本資料のうち，枠囲みの内容は，
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所　工事計画審査資料	
資 料 番 号	補足－340-7　改 9
提出年月日	平成 30 年 9 月 28 日

東海第二発電所

耐震性に関する説明書に係る補足説明資料

水平２方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について

平成３０年９月

日本原子力発電株式会社

目次

1. 検討の目的 ･･ 1
2. 水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価に用いる地震動 ･･････････････････････ 2
2.1 東海第二発電所の基準地震動 ･･ 2
2.2 水平２方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動 ･･････････････････････････ 6
3. 各施設における水平２方向及び鉛直方向地震力の影響評価 ･･････････････････････････････ 7
3.1 建物・構築物 ･･ 7
3.1.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計手法の考え方 ･･････････････････ 7
3.1.2 水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法 ･･････････････････････････ 9
3.1.3 水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価部位の抽出 ･･････････････････ 13
3.1.4 水平２方向及び鉛直方向地震力の影響評価部位の抽出結果 ･･････････････････････ 29
3.1.5 水平２方向及び鉛直方向地震力の影響評価方針 ･･････････････････････････････ 31
3.1.6 主排気筒 ･･ 33
3.1.7 原子炉建屋基礎盤の検討 ･･ 38
3.1.8 使用済燃料プールの検討 ･･ 55
3.2 機器・配管系 ･･ X
3.3 屋外重要土木構造物 ･･ X
3.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備 ･･････････････････････････････ X

別紙１ 評価部位の抽出に関する説明資料
別紙２ ３次元ＦＥＭモデルを用いた精査
別紙３ ３次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析
別紙４ 機器・配管系に関する説明資料

参考資料 方向性を考慮していない水平方向地震動における模擬地震波の作成方針

1.　検討の目的

平成 25 年に制定された「実用発電用原子炉及びその付属施設の技術基準に関する規則（平成 25 年 6 月 28 日原子力規制委員会規則第 6 号)」(以下「技術基準」という。）は，従前の耐震設計審査指針から充実が図られている。

そのうち，新たに要求された水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せについて，耐震設計に係る工認審査ガイドにおいて，以下の内容が示されている。

耐震設計に係る工認審査ガイド（抜粋）

3.5.2　水平方向及び鉛直方向地震力の組合せ（4.4.2 及び 5.5.2 も同様） 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せを適切に行っていることを確認する。 (1)　動的な地震力の組合せ 水平 2 方向及び鉛直方向の地震力による応力の組合せを簡易的に行う際には，各方向の入力地震動の位相特性や建物・構築物の構造，応答特性に留意し，非安全側の評価にならない組合せ方法を適用していること。 なお，各方向の入力地震動の位相特性や建物・構築物の二次元応答特性により応答の同時性を考慮する必要がある場合は，各方向の各時刻歴での応答を逐次重ね合わせる等の方法により，応答の同時性を考慮していること。

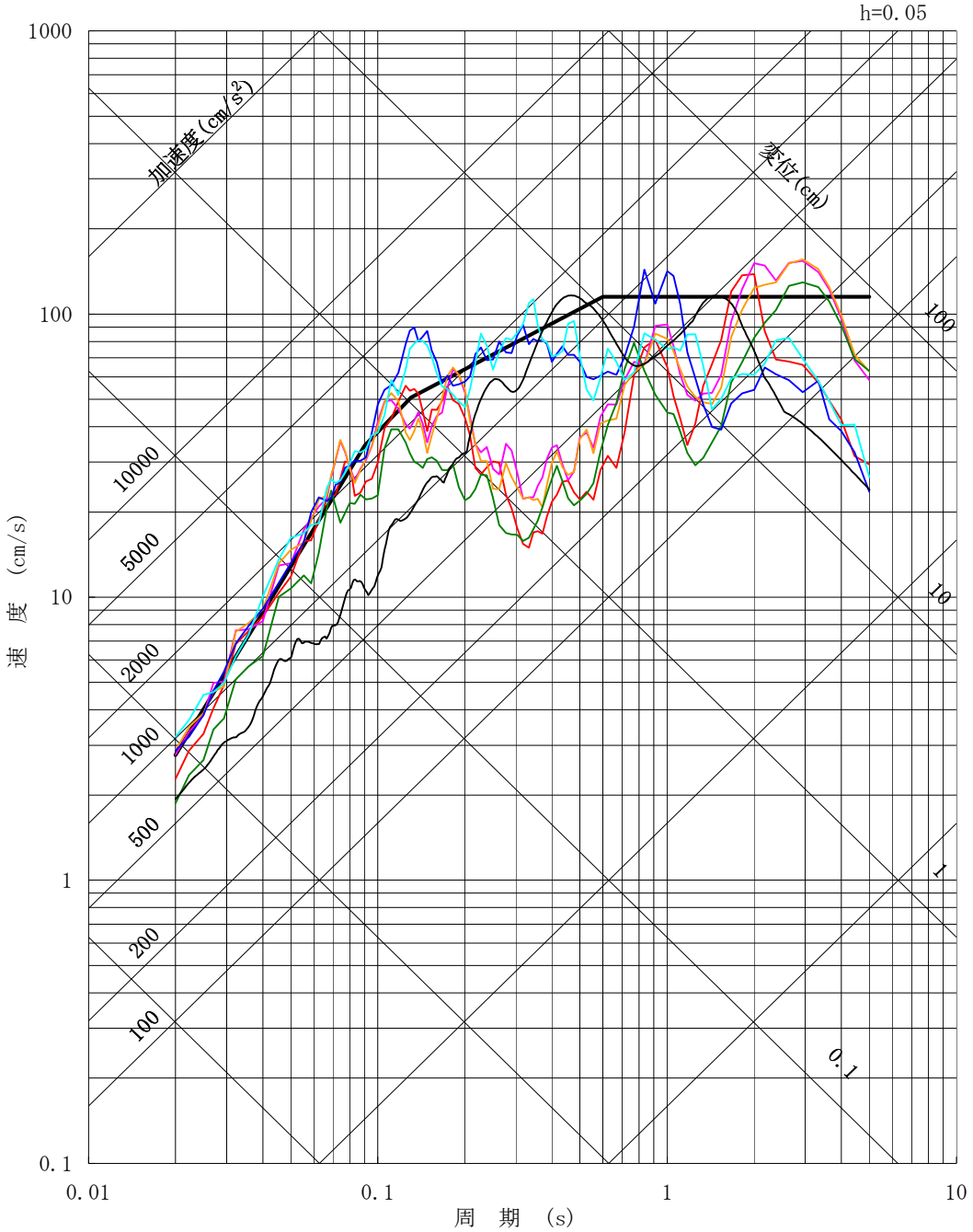
上記審査ガイドを踏まえ，従来の設計手法における水平 1 方向及び鉛直方向地震力を組み合わせた耐震計算に対して，施設の構造特性から水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の可能性があるものを抽出し，施設が有する耐震性に及ぼす影響を評価する。

2.　水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価に用いる地震動

2.1　東海第二発電所の基準地震動

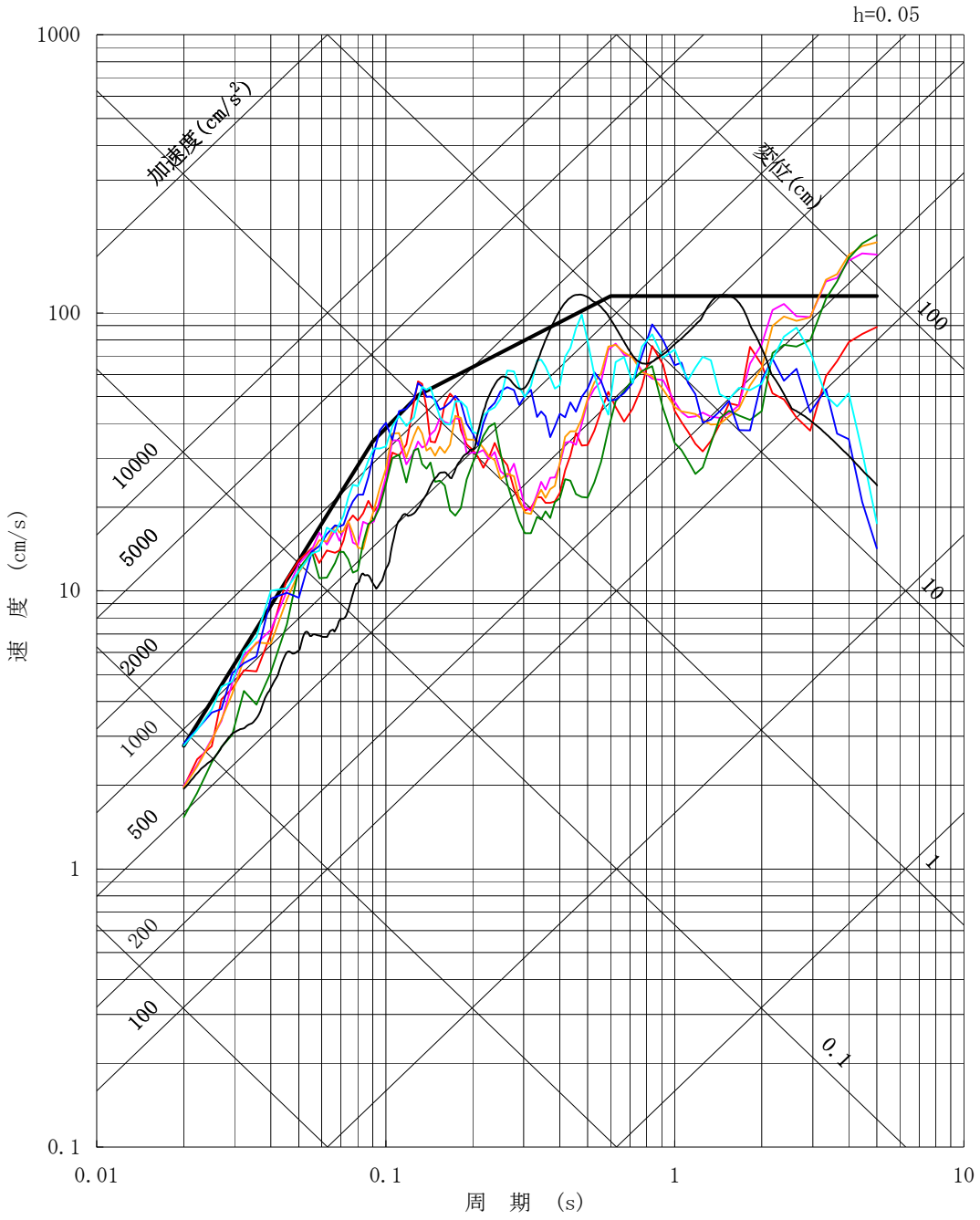
東海第二発電所の基準地震動Ｓ$_s$は，「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」を評価して，これらの評価結果に基づき策定している。「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」としては，応答スペクトルに基づく地震動評価及び断層モデルを用いた手法による地震動評価を実施し，その結果を踏まえ，応答スペクトルに基づく地震動として基準地震動Ｓ$_s$－Ｄ１，断層モデルを用いた地震動としてＳ$_s$－１１～Ｓ$_s$－１４，Ｓ$_s$－２１，Ｓ$_s$－２２を策定している。また，「震源を特定せず策定する地震動」として基準地震動Ｓ$_s$－３１を策定している。

基準地震動Ｓ$_s$のスペクトルを図 2-1 に示す。



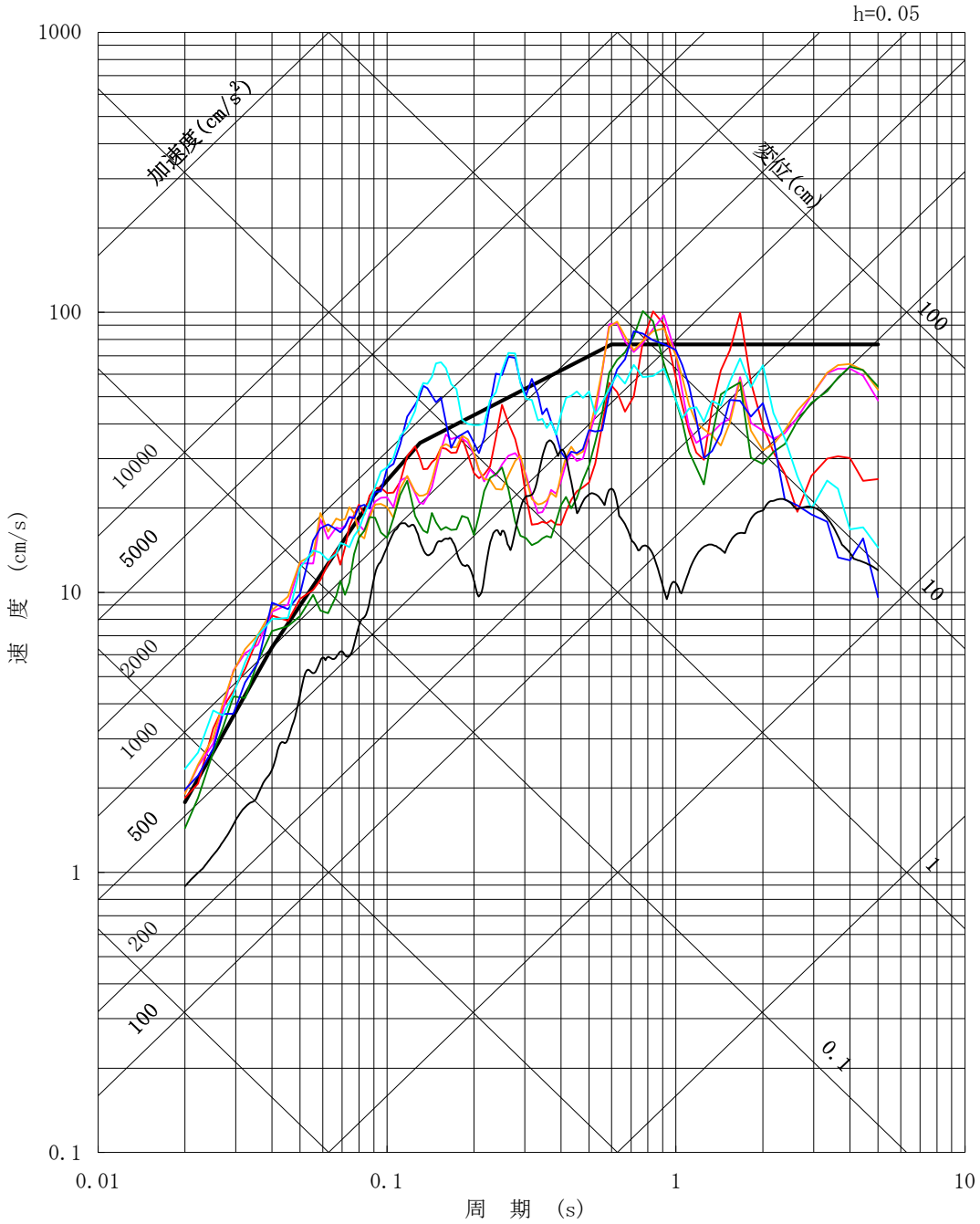
- Ｓｓ－Ｄ１
- Ｓｓ－１１　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ，破壊開始点 1）
- Ｓｓ－１２　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ，破壊開始点 2）
- Ｓｓ－１３　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ，破壊開始点 3）
- Ｓｓ－１４　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（断層傾斜角の不確かさ，破壊開始点 2）
- Ｓｓ－２１　2011 年東北地方太平洋沖型地震（短周期レベルの不確かさ）
- Ｓｓ－２２　2011 年東北地方太平洋沖型地震（ＳＭＧＡ位置と短周期レベルの不確かさの重畳）
- Ｓｓ－３１　2004 年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動

図 2-1（1／3）　基準地震動Ｓｓの応答スペクトル（NS 方向）



Ｓｓ－Ｄ１
Ｓｓ－１１　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ，破壊開始点 1）
Ｓｓ－１２　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ，破壊開始点 2）
Ｓｓ－１３　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ，破壊開始点 3）
Ｓｓ－１４　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（断層傾斜角の不確かさ，破壊開始点 2）
Ｓｓ－２１　2011 年東北地方太平洋沖型地震（短周期レベルの不確かさ）
Ｓｓ－２２　2011 年東北地方太平洋沖型地震（ＳＭＧＡ位置と短周期レベルの不確かさの重畳）
Ｓｓ－３１　2004 年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動

図 2-1（2／3）　基準地震動Ｓ$_s$の応答スペクトル（EW 方向）



Ｓｓ－Ｄ１
Ｓｓ－１１　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ，破壊開始点 1）
Ｓｓ－１２　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ，破壊開始点 2）
Ｓｓ－１３　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（短周期レベルの不確かさ，破壊開始点 3）
Ｓｓ－１４　Ｆ１断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震（断層傾斜角の不確かさ，破壊開始点 2）
Ｓｓ－２１　2011 年東北地方太平洋沖型地震（短周期レベルの不確かさ）
Ｓｓ－２２　2011 年東北地方太平洋沖型地震（ＳＭＧＡ位置と短周期レベルの不確かさの重畳）
Ｓｓ－３１　2004 年北海道留萌支庁南部地震の検討結果に保守性を考慮した地震動

図 2-1（3／3）　基準地震動Ｓｓの応答スペクトル（UD 方向）

2.2　水平２方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動

水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価に用いる基準地震動は，複数の基準地震動Ｓ$_s$における地震動の特性及び包絡関係と施設の特性による影響も考慮した上で選定し，本影響評価に用いる。

3.　各施設における水平２方向及び鉛直方向地震力の影響評価

3.1　建物・構築物

3.1.1　水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計手法の考え方

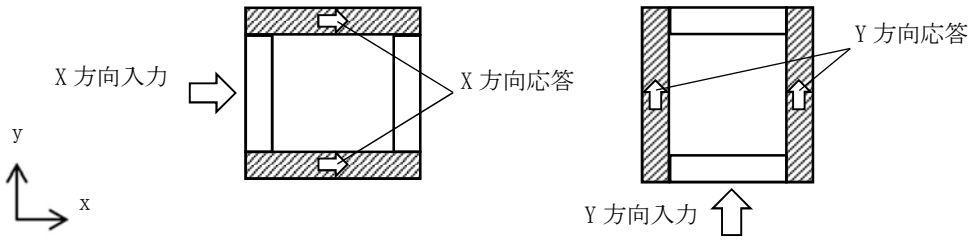
従来の設計手法では，建物・構築物の地震応答解析において，水平方向及び鉛直方向の地震動を質点系モデルに方向ごとに入力し，解析を行っている。また，原子炉施設における建物・構築物は，全体形状及び平面レイアウトから，地震力を主に耐震壁で負担する構造であり，剛性の高い設計としている。

水平方向の地震力に対しては，せん断力について評価することを基本とし，建物・構築物に生じるせん断力に対して，地震時の力の流れが明解となるように，直交する２方向に釣合いよく配置された鉄筋コンクリート造耐震壁を主な耐震要素として構造計画を行う。地震応答解析は，水平２方向の耐震壁に対して，それぞれ剛性を評価し，各水平方向に対して解析を実施している。従って，建物・構築物に対し，水平２方向の入力がある場合，各方向から作用するせん断力を負担する部位が異なるため，水平２方向の入力がある場合の評価は，水平１方向にのみ入力がある場合と同等な評価となる。

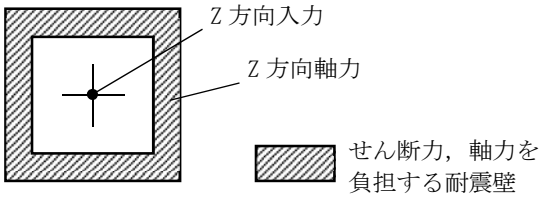
鉛直方向の地震力に対しては，軸力について評価することを基本としている。建物・構築物に作用する軸力は,鉄筋コンクリート造耐震壁を主な耐震要素として構造計画を行う。

入力方向ごとの耐震要素について，図 3-1-1 及び図 3-1-2 に示す。

また，添付書類「Ｖ-2-2　耐震設計上重要な設備を設置する施設の耐震性についての計算書」，Ｖ-2-3～Ｖ-2-10 の申請設備の耐震計算書及び添付書類「Ｖ-2-11　波及的影響を及ぼすおそれのある施設の耐震性についての計算書」のうち建物・構築物の応力解析による評価は，上記の考え方を踏まえた地震応答解析により算出された応答を，水平１方向及び鉛直方向に組み合わせて行っている。

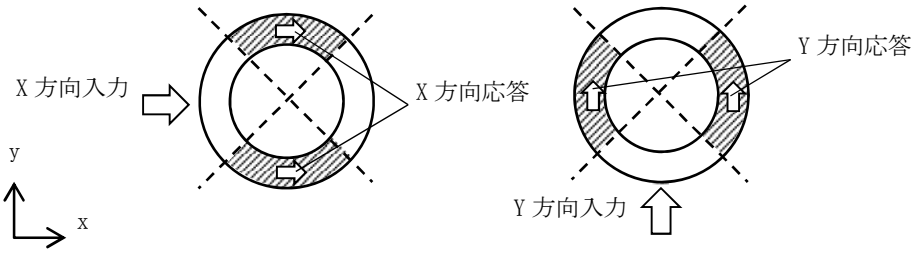


(a) 水平方向

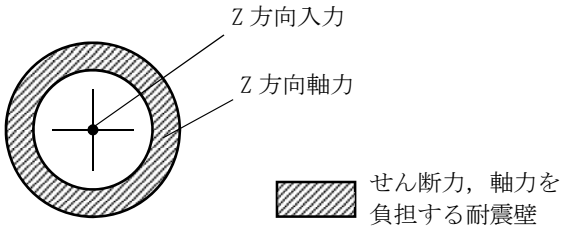


(b) 鉛直方向

図 3-1-1　入力方向ごとの耐震要素（矩形）



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 3-1-2　入力方向ごとの耐震要素（円筒形）

3.1.2　水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法

建物・構築物において，従来設計手法に対して水平2方向及び鉛直方向地震力を考慮した場合に影響を受ける可能性がある部位の評価を行う。

評価対象は，耐震重要施設及びその間接支持構造物，常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設並びにこれらの施設への波及的影響防止のために耐震評価を実施する部位とする。

対象とする部位について，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響が想定される応答特性から，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を受ける可能性のある部位を抽出する。

応答特性から抽出された水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を受ける可能性のある部位は，既往の評価結果の荷重又は応力の算出結果等を水平2方向及び鉛直方向に組み合わせ，各部位に発生する荷重や応力を算出し，各部位が有する耐震性への影響を確認する。

各部位が有する耐震性への影響があると確認された場合は，詳細な手法を用いた検討等，新たに設計上の対応策を講じる。

影響評価のフローを図3-1-3に示す。

(1)　耐震評価上の構成部位の整理

建物・構築物の耐震評価上の構成部位を整理し，各建屋において，該当する耐震評価上の構成部位を網羅的に確認する。

(2)　応答特性の整理

建物・構築物における耐震評価上の構成部位について，水平2方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される応答特性を整理する。応答特性は，荷重の組合せによる影響が想定されるもの及び3次元的な建屋挙動から影響が想定されるものに分けて整理する。

なお，隣接する上位クラス建物・構築物への波及的影響防止のための建物・構築物の評価は，上位クラスの建物・構築物との相対変位による衝突可否判断が基本となる。そのため，せん断及び曲げ変形評価を行うこととなり，耐震壁を主たる評価対象部位としている。また，波及的影響評価において杭及びケーソンについては損傷を想定した評価をしている。そのため，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに対しても，耐震評価への影響が想定される部位として抽出対象に該当しない。

(3)　荷重の組合せによる応答特性が想定される部位の抽出

整理した耐震評価上の構成部位について，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響が想定される応答特性のうち，荷重の組合せによる応答特性により，耐震性への影響が想定される部位を抽出する。

(4)　3次元的な応答特性が想定される部位の抽出

荷重の組合せによる応答特性が想定される部位として抽出されなかった部位について，

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対し，3 次元的な応答特性により，耐震性への影響が想定される部位を抽出する。

(5)　3 次元ＦＥＭモデルによる精査

3 次元的な応答特性が想定される部位として抽出された部位について，3 次元ＦＥＭモデルを用いた精査を実施し，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにより，耐震性への影響が想定される部位を抽出する。

また，3 次元的な応答特性が想定される部位として抽出されなかった部位についても，局所応答の観点から，3 次元ＦＥＭモデルによる精査を実施し，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにより，耐震性への影響が想定される部位を抽出する。

局所応答に対する 3 次元ＦＥＭモデルによる精査を行う建物・構築物は，その重要性，規模，構造特性及び機器評価確認への適用性を考慮し，原子炉建屋について，地震応答解析を行う。

原子炉建屋の 3 次元ＦＥＭモデルの概要図を図 3-1-4 に示す。

(6)　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価

水平 2 方向及び鉛直方向同時入力による評価を行わない部位における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価においては，水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる局部評価の荷重又は応力の算出結果を用い，水平 2 方向及び鉛直方向地震力を組合せる方法として，米国 REGULATORY GUIDE 1.92（注）の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考として，組合せ係数法（1.0：0.4：0.4）に基づいて地震力を設定する。

評価対象として抽出した耐震評価上の構成部位について，構造部材の発生応力を適切に組み合わせることで，各部位の設計上の許容値に対する評価を実施し，各部位の耐震性への影響を評価する。

注　：REGULATORY GUIDE (RG) 1.92 “COMBINING MODAL RESPONSES AND SPATIAL COMPONENTS IN SEISMIC RESPONSE ANALYSIS”

(7)　機器・配管系への影響検討

（3）及び（5）にて，施設が有する耐震性への影響が想定され，評価対象として抽出された部位が，耐震重要施設，常設耐震重要重大事故防止設備又は常設重大事故緩和設備が設置される重大事故等対処施設の機器・配管系の間接支持機能を有する場合には，機器・配管系に対し，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響を確認する。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響が確認された場合，機器・配管系の影響評価に反映する。

なお，（5）の精査にて，建物・構築物の影響の観点から抽出されなかった部位であっても，3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析結果から，機器・配管系への影響の可能性が想定される部位について検討対象として抽出する。

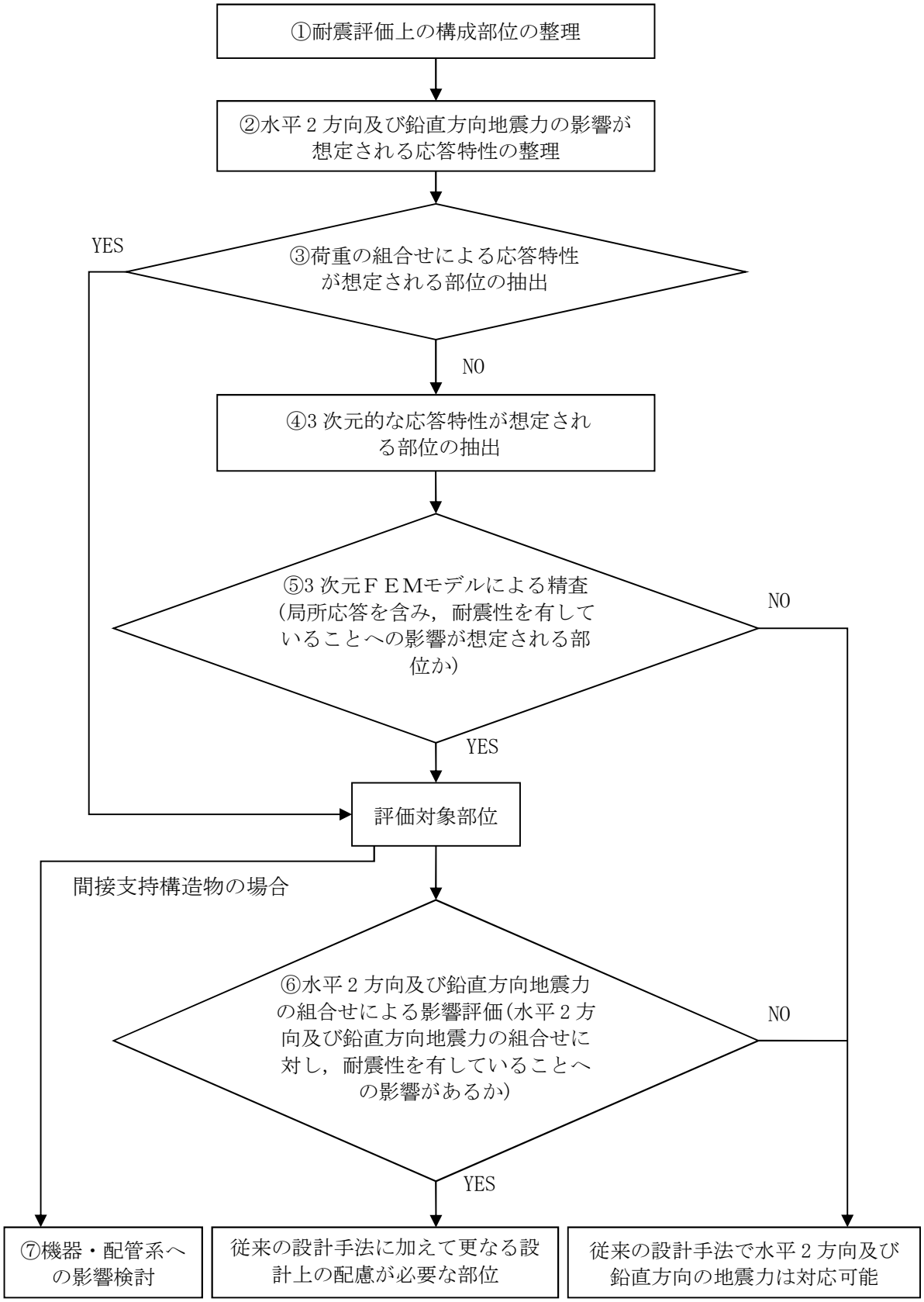


図 3-1-3　水平２方向及び鉛直方向地震力による影響評価のフロー

図 3-1-4　原子炉建屋の 3 次元モデルの概要図

3.1.3　水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価部位の抽出

対象とする部位について，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響が想定される応答特性から，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を受ける可能性のある部位を抽出する。影響評価部位の抽出の詳細については別紙1に示す。

(1)　耐震評価上の構成部位の整理

建物・構築物の耐震評価上の構成部位を整理し，各建屋において，該当する耐震評価上の構成部位を網羅的に確認した。確認した結果を表3-1-1に示す。

表 3-1-1　建物・構築物における耐震評価上の構成部材の整理

耐震性評価部位		原子炉建屋	主排気筒	非常用ガス処理系配管支持架構	使用済燃料乾式貯蔵建屋	格納容器圧力逃がし装置格納槽	緊急時対策所建屋	タービン建屋	サービス建屋
		RC 造及びＳ造	Ｓ造	Ｓ造	RC 造及びＳ造	RC 造	RC 造	RC 造及びＳ造	RC 造及びＳ造
柱	一般部	○	－	－	○	－	○	○	○
	隅部	○	○	○	○	－	○	○	○
	地下部	○	－	－	－	－	－	○	－
	筒身	－	○	－	－	－	－	－	－
梁	一般部	○	○	○	○	－	○	○	○
	地下部	○	－	－	－	－	－	○	－
	鉄骨ﾄﾗｽ	○	－	－	○	－	－	○	－
壁	一般部	○	－	－	○	○	○	○	○
	地下部	○	－	－	－	○	－	○	－
	鉄骨ﾌﾞﾚｰｽ	－	○	○	－	－	－	－	○
床屋根	一般部	○	－	－	○	○	○	○	○
基礎	基礎スラブ	○	－	○	○	○	○	○	－
	ケーソン	－	－	－	－	－	－	○	－
	基礎梁	－	○	－	－	－	－	－	○
	杭	－	○	○	○	－	○	○	○

凡例　○：対象の構造部材有り，－：対象の部材なし

(2)　応答特性の整理

建物・構築物における耐震評価上の構成部位について，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される応答特性を整理した。応答特性は，荷重の組合せによる影響が想定されるもの及び 3 次元的な建屋挙動から影響が想定されるものに分けて整理した。整理した結果を表 3-1-2 及び表 3-1-3 に示す。また，応答特性を踏まえ，耐震評価上の構成部位に対する水平 2 方向入力の考え方を表 3-1-4 に示す。

表 3-1-2　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される応答特性
（荷重の組合せによる応答特性）

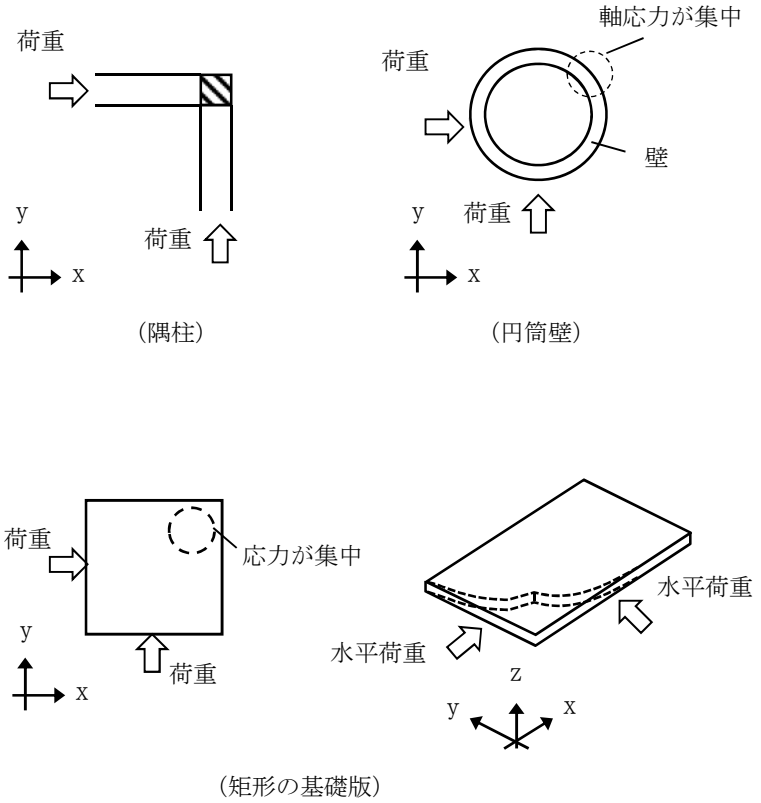
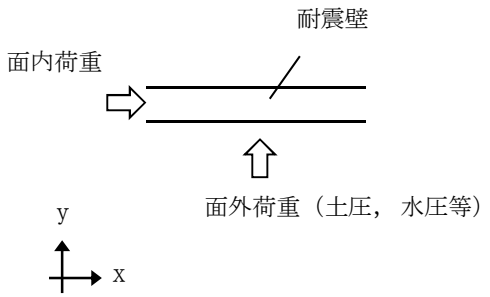
<table>
<tr><th colspan="2">荷重の組合せによる応答特性</th><th>影響想定部位</th></tr>
<tr><td>①－1</td><td>直交する水平 2 方向の荷重が，応力として集中</td><td>応力の集中する隅柱等
（例）
 
</td></tr>
<tr><td>①－2</td><td>面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用</td><td>土圧を負担する地下耐震壁等
水圧を負担するプール壁等
（例）
 
</td></tr>
</table>

表 3-1-3　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される応答特性
（3 次元的な応答特性）

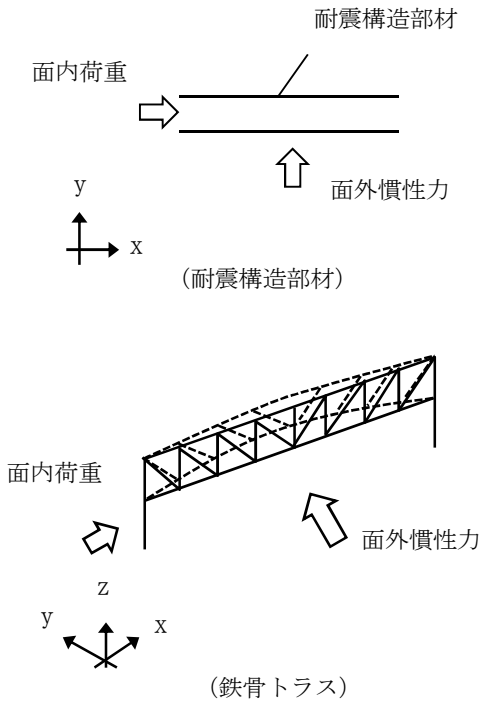
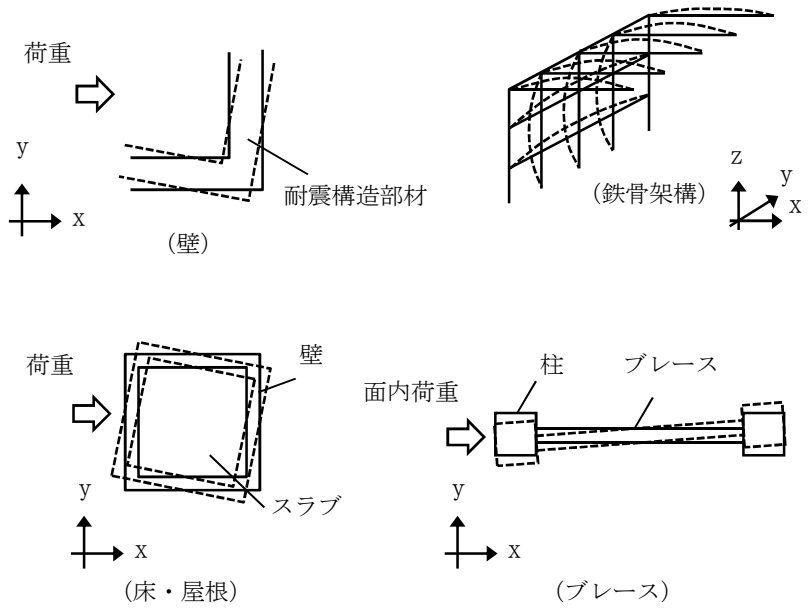
3 次元的な応答特性		影響想定部位
②－1	面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい	大スパン又は吹き抜け部に設置された部位 （例） 
②－2	加振方向以外の方向に励起される振動	塔状構造物などを含む，ねじれ挙動が想定される建物・構築物 （例） 

表 3-1-4（1／3）　耐震評価上の構成部位に対する水平 2 方向入力による影響の考え方

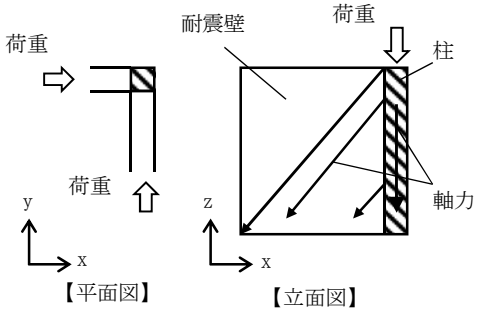
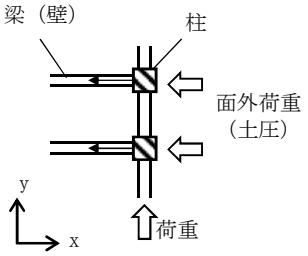
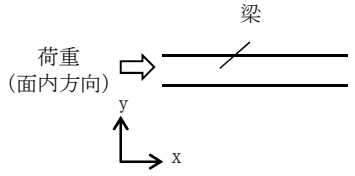
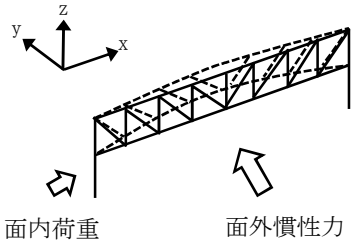
耐震評価上の構成部材		水平 2 方向入力の影響
柱	一般部	耐震壁付構造の場合，水平入力による影響は小さい。
	隅部（端部を含む）	独立した隅柱は，直交する地震荷重が同時に作用する。ただし，耐震壁付きの隅柱は，軸力が耐震壁に分散されることで影響は小さい。 
	地下部	地下外周柱は面内方向の荷重を負担しつつ面外方向（土圧）の荷重が作用する。ただし，外周部耐震壁付のため，水平入力による影響は小さい。また，土圧が作用する方向にある梁及び壁が応力を負担することで，水平面外入力による影響は小さい。 
梁	一般部	大スパンや吹抜け部では面内方向の荷重に加え，面外慣性力が作用する。ただし，1 方向のみ地震荷重を負担することが基本であり，また，床及び壁の拘束により面外地震荷重負担による影響は小さい。 
	地下部	地下外周梁は面内方向の荷重を負担しつつ面外方向（土圧）の荷重が作用する。ただし，1 方向のみ地震荷重を負担することが基本であり，また，床及び壁の拘束により面外地震荷重負担による影響は小さい。
	鉄骨トラス	大スパンや吹抜け部では面内方向の荷重に加え，面外慣性力が作用する。ただし，1 方向のみ地震荷重を負担することが基本であり，また，床による拘束があるため，面外地震荷重負担による影響は小さい。 

表 3-1-4（2／3）　耐震評価上の構成部位に対する水平 2 方向入力による影響の考え方

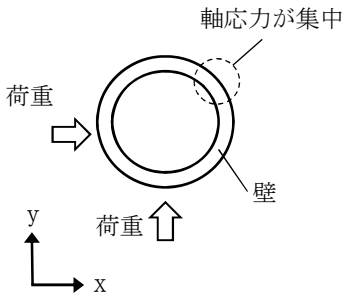
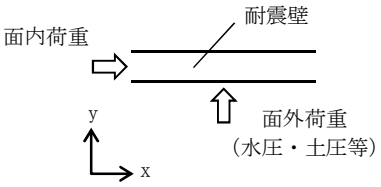
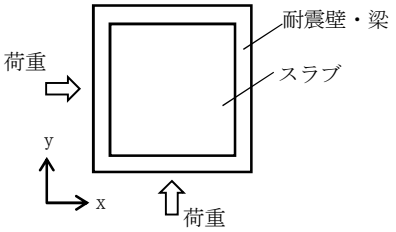
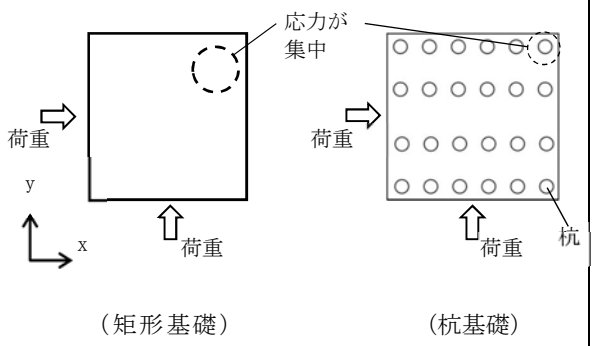
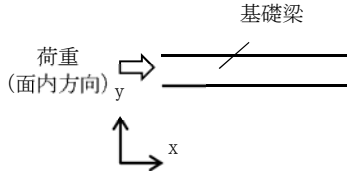
耐震評価上の構成部材		水平 2 方向入力の影響
壁	一般部	1 方向のみ地震荷重を負担することが基本である。 円筒壁は直交する水平 2 方向の地震力により，集中応力が作用する。  （円筒壁）
	地下部 プール壁	地下部分の耐震壁は，直交する方向からの地震時面外土圧荷重も受ける。同様にプール部の壁については水圧を面外方向から受ける。 
	鉄骨 ブレース	1 方向のみ地震荷重を負担することが基本であり，ねじれによる荷重増分は軽微と考えられ影響は小さい。
床 屋根	一般部	スラブは四辺が壁及び梁で拘束されており，水平方向に変形しにくい構造となっており，水平地震力の影響は小さい。 

表 3-1-4（3／3）　耐震評価上の構成部位に対する水平 2 方向入力による影響の考え方

耐震評価上の構成部材		水平 2 方入力の影響
基礎	基礎スラブ ・ ケーソン ・ 杭	直交する水平 2 方向の地震力により，集中応力が作用する。 
	基礎梁	面内方向の荷重に加え，面外慣性力が作用する。また，面外地震荷重負担による影響は小さい。 

(3)　荷重の組合せによる応答特性が想定される部位の抽出

表 3-1-1 に示す耐震評価上の構成部位のうち，表 3-1-2 に示す荷重の組合せによる応答特性により，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響が想定される部位を抽出した。抽出した結果を表 3-1-5 に示す。

応答特性①－1「直交する水平 2 方向の荷重が，応力として集中する部位」として，主排気筒及び非常用ガス処理系配管支持架構の隅柱，原子炉建屋，非常用ガス処理系配管支持架構，使用済燃料乾式貯蔵建屋，格納容器圧力逃がし装置格納槽及び緊急時対策所建屋の基礎スラブ並びに主排気筒，非常用ガス処理系配管支持架構，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の杭を抽出した。

また，応答特性①－2「面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用する部位」として，原子炉建屋の地下外壁及びプール側壁，格納容器圧力逃がし装置格納槽及びタービン建屋の地下外壁を抽出した。

a.　柱

柱は，①－1「直交する水平 2 方向の荷重が，応力として集中」する部位としては，隅部（端部柱を含む）が考えられ，中柱の一般部は，応力が集中することはなく該当しない。また，主排気筒の筒身については，鉄塔の中央で支持されており，応力が集中することはなく該当しない。

主排気筒，非常用ガス処理系配管支持架構の隅柱は①－1 に該当するものとして抽出した。サービス建屋の隅柱については，サービス建屋が隣接する上位クラス建物・構築物への波及的影響防止のための評価対象建屋であり，隣接する原子炉建屋への衝突方向には耐震壁追設補強により，隅柱に軸応力が集中しても波及的影響評価に影響がないため，抽出しない。

①－2「面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用」の部位としては，土圧が作用する地下外周柱が考えられるが，原子炉建屋及びタービン建屋の地下外周柱は，耐震壁に囲まれており，耐震壁が面内の荷重を負担し，地下外周柱は面内の荷重を負担しないため，該当しない。また，対象の建物・構築物の地下外周柱はすべて梁等に接続しており，土圧はそのまま梁等に伝達されるため，該当しない。

b.　梁

梁の一般部，地下部及び鉄骨トラス部については，地震力の負担について方向性を持っており，①－1「直交する水平 2 方向の荷重が，応力として集中」の部位に該当しない。

①－2「面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用」の部位としては，土圧が作用する地下外周部が考えられるが，原子炉建屋及びタービン建屋の地下外周梁は直交する床及び壁が存在し，これらによる面外方向の拘束があるため，該当しない。

c.　壁

矩形の壁は，地震力の負担について方向性を持っており，①－1「直交する水平 2 方向の荷重が，応力として集中」の部位は存在しない。独立した円筒壁は応力の集中が考えられる。ただし，原子炉建屋の一次格納容器を囲む円筒遮蔽壁のように，建屋の中央付近に位置し，その外側にあるボックス型の壁とスラブで一体化されている場合は，①－

1「直交する水平２方向の荷重が，応力として集中」の部位に該当しない。

①－2「面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用」の部位としては，土圧や水圧が作用するプール部や地下部が考えられ,原子炉建屋の地下外壁及びプール側壁,格納容器圧力逃がし装置格納槽及びタービン建屋の地下外壁を，①－2 に該当するものとして抽出した。

d.　床及び屋根

床及び屋根については，地震力の負担について方向性を持っており，①－1「直交する水平２方向の荷重が，応力として集中」及び①－2「面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用」の部位に該当しない。

e.　基礎

①－1「直交する水平２方向の荷重が，応力として集中」の部位としては，基礎スラブ及び杭が考えられる。

原子炉建屋，非常用ガス処理系配管支持架構，使用済燃料乾式貯蔵建屋，格納容器圧力逃がし装置格納槽及び緊急時対策所建屋の基礎スラブ並びに主排気筒，非常用ガス処理系配管支持架構，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の杭は隅部への応力集中が考えられるため，①－1 に該当するものとして抽出した。

①－2「面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用」の部位としては，基礎主排気筒の基礎梁が考えられるが，主排気筒の基礎梁は地震時の面外荷重が、直近の直交部材にて受ける構造としているため該当しない。

表 3-1-5　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認が必要な部位の抽出（荷重の組合せによる応答特性によるスクリーニング）

耐震性評価部位		原子炉建屋	主排気筒	非常用ガス処理系配管支持架構	使用済燃料乾式貯蔵建屋	格納容器圧力逃がし装置格納槽	緊急時対策所建屋	タービン建屋	サービス建屋
		RC 造及び S 造	S 造	S 造	RC 造及び S 造	RC 造	RC 造	RC 造及び S 造	RC 造及び S 造
柱	一般部	該当なし	－	－	該当なし	－	該当なし	該当なし	該当なし
	隅部	該当なし	①－1 要	①－１要	該当なし	－	該当なし	該当なし	不要 (*1)
	地下部	該当なし	－	－	－	－	－	該当なし	－
	筒身	－	該当なし	－	－	－	－	－	－
梁	一般部	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	－	該当なし	該当なし	該当なし
	地下部	該当なし	－	－	－	－	－	該当なし	－
	鉄骨ﾄﾗｽ	該当なし	－	－	該当なし	－	－	該当なし	－
壁	一般部	①－2 要（ﾌﾟｰﾙ側壁）	－	－	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし
	地下部	①－2 要	－	－	－	①－2 要	－	①－2 要	－
	鉄骨ﾌﾞﾚｰｽ	－	該当なし	該当なし	－	－	－	－	不要 (*2)
床屋根	一般部	該当なし	－	－	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし
基礎	基礎スラブ	①－1 要	－	①－１要	①－1 要	①－1 要	①－1 要	不要 (*2)	－
	ケーソン	－	－	－	－	－	－	不要 (*2)	－
	基礎梁	－	該当なし	－	－	－	－	－	不要 (*2)
	杭	－	①－1 要	①－１要	①－1 要	－	①－1 要	不要 (*2)	不要 (*2)

凡例　要：評価必要，不要：評価不要，①－1：応答特性「直交する水平 2 方向の荷重が応力として集中」，①－2：応答特性「面内荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用」

注記　*1:上位クラス建物・構築物への波及的影響防止のための評価対象建屋であり，隣接する原子炉建屋への衝突方向には耐震壁追設補強により，隅柱に軸応力が集中しても波及的影響評価に影響がないため，不要とする。

*2:　上位クラス建物・構築物への波及的影響防止のための評価対象建屋は，衝突可否判断が基本となるため，せん断及び曲げ変形評価を行うこととなり，耐震壁を主たる評価対象部位としている。また，波及的影響評価において杭及びケーソンについては損傷を想定した評価をしている。そのため，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対しても，耐震評価への影響が想定される部位として抽出対象に該当しない。

(4)　3 次元的な応答特性が想定される部位の抽出

表 3-1-1 に示す耐震評価上の構成部位のうち，荷重の組合せによる応答特性が想定される部位として抽出されなかった部位について，表 3-1-3 に示す 3 次元的な応答特性により，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響が想定される部位を抽出した。抽出した結果を表 3-1-6 に示す。

応答特性②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい可能性がある部位」として，原子炉建屋の燃料取替フロアの壁を抽出した。

また，応答特性②－2「加振方向以外の方向に励起される振動が発生する可能性がある部位」として，非常用ガス処理系配管支持架構の梁一般部（水平材）及び鉄骨ブレース（斜材）を抽出した。

a.　柱

主排気筒及び非常用ガス処理系配管支持架構の隅柱は(3)で抽出されているため，その他の柱について②－1「面外方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」部位，②－2「加振方向以外の方向に励起される振動」の発生する部位への該当を検討する。

原子炉建屋，主排気筒，使用済燃料乾式貯蔵建屋，緊急時対策所建屋，タービン建屋，サービス建屋の柱は各部とも，両方向に対して断面算定を実施しており，面外慣性力の影響も考慮済であるため，②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」の部位には該当しない。また，対象の建物・構築物は，鉄筋コンクリート造耐震壁又は鉄骨ブレースを主な耐震要素として扱っており，地震力のほとんどを耐震壁又は鉄骨ブレースが負担する。ねじれ振動の影響が想定される部位についても，ねじれを加味した構造計画を行っており，②－2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位にも該当しない。

主排気筒は地震力のほとんどを鉄塔が負担しており，筒身は②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」の部位には該当しない。また，釣り合いよく鉄塔に支持される構造計画を行っており，②－2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位にも該当しない。

b.　梁

原子炉建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋，緊急時対策所建屋，タービン建屋，サービス建屋の梁一般部及び地下部は，剛性の高い床や耐震壁が付帯するため，面外方向の変形を抑制することから，②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」及び②－2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位には該当しない。

鉄骨トラス部は，１方向トラスの場合には，面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きいと考えられるが，各建屋の鉄骨トラスは直交方向にもトラスや繋ぎ梁が存在し，面外慣性力を負担するため，②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」の部位に該当しない。また，非常用ガス処理系配管支持架構については対称構造でないためにねじれ挙動が想定されることから，②－2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位に該当する。

c.　壁

(3)で抽出されている以外の各建屋の壁について，②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」及び②－2「加振方向以外の方向に励起される振動」の発生する部位の検討を行う。

原子炉建屋の上部階の壁は複数スパンにまたがって直交方向に壁及び大梁がなく，面内方向荷重に加え，面外慣性力の影響が大きいと考えられることから，②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」の部位に該当する。

非常用ガス処理系配管支持架構については対称構造でないためにねじれ挙動が想定されるため，②－2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位に該当する。

d.　床及び屋根

各建屋の床及び屋根については，釣合いよく壁が配置されているため，②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」及び②－2「加振方向以外の方向に励起される振動」の部位に該当しない。

e.　基礎

基礎スラブ及び杭は，(3)の荷重の組合せによる応答特性を踏まえたスクリーニングで既に抽出されている。

②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」の部位としては，主排気筒の基礎梁が考えられるが，主排気筒の基礎梁は短スパンであり影響は少ないと考えられるため，該当しない。

表 3-1-6　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認が必要な部位の抽出
(3 次元的な応答特性を踏まえたスクリーニング)

耐震性評価部位		原子炉建屋	主排気筒	非常用ガス処理系配管支持架構	使用済燃料乾式貯蔵建屋	格納容器圧力逃がし装置格納槽	緊急時対策所建屋	タービン建屋	サービス建屋
		RC 造及び S 造	S 造	S 造	RC 造及び S 造	RC 造	RC 造	RC 造及び S 造	RC 造及び S 造
柱	一般部	不要	－	－	不要	－	不要	不要	不要
	隅部	不要	要	要	不要	－	不要	不要	不要
	地下部	不要	－	－	－	－	－	不要	－
	筒身	－	不要	－	－	－	－	－	－
梁	一般部	不要	不要	②－2	不要	－	不要	不要	不要
	地下部	不要	－	－	－	－	－	不要	－
	鉄骨ﾄﾗｽ	不要	－	－	不要	－	－	不要	－
壁	一般部	要（ﾌﾟｰﾙ側壁） ②－1（燃料取替フロア壁）	－	－	不要	不要	不要	不要（*）	不要
	地下部	要	－	－	－	要	－	要	－
	鉄骨ﾌﾞﾚｰｽ	－	不要	②－2	－	－	－	－	不要
床 屋根	一般部	不要	－	－	不要	不要	不要	不要	不要
基礎	基礎スラブ	要	－	要	要	要	要	不要	－
	ケーソン	－	－	－	－	－	－	不要	－
	基礎梁	－	不要	－	－	－	－	－	不要
	杭	－	要	要	要	－	要	不要	不要

凡例　要：荷重の組合せによる応答特性でのスクリーニングで抽出済み，不要：評価不要，②－1：応答特性「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」，②－2：応答特性「加振方向以外の方向に励起される振動」

注記　＊：上部階の壁は複数スパンにまたがって直交方向に壁及び大梁がなく，面内方向荷重に加え，面外慣性力の影響が大きいと考えられるが下部に上位クラス施設がないため不要とする。

(5)　3 次元ＦＥＭモデルによる精査

3 次元的な応答特性が想定される部位として抽出した部位について，3 次元ＦＥＭモデルにより精査を行う。

応答特性②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい部位」については，施設の重要性，建屋規模及び構造特性を考慮し，下部に上位クラス施設がある原子炉建屋の燃料取替フロアの壁を代表として 3 次元ＦＥＭモデルによる精査を行う。

応答特性②－2「加振方向以外の方向に励起される振動の影響が大きい部位」については，ねじれ応答の影響が懸念されるとともに，重要施設である非常用ガス処理系配管支持架構の梁一般部（水平材）及び鉄骨ブレース（斜材）を代表として 3 次元ＦＥＭモデルによる精査を行う。

また，原子炉建屋の耐震評価部位全般に対し，局所的な応答について，3 次元ＦＥＭモデルによる精査を行う。精査は，地震応答解析により水平 2 方向及び鉛直方向入力時の影響を評価することで行う。局所的な応答と併せて捩れ挙動についても確認を行う。

3 次元ＦＥＭモデルを用いた精査について表 3-1-6 に示す。

表 3-1-6　3 次元モデルを用いた精査

耐震評価部位		対象 建物・構築物	3 次元的な応答特性	3 次元モデルを用いた精査方法	3 次元モデルを用いた精査結果
梁	一般部	非常用ガス処理系配管支持架構	②－2 (加振方向以外の方向に励起される振動が発生)	水平 2 方向及び鉛直方向入力時の応答の水平 1 方向入力時の応答に対する増分が小さいことを確認する。	・水平 2 方向及び鉛直方向地震力による左記の対象に有する耐震性への影響は想定されないため抽出しない。
壁	一般部	原子炉建屋 (燃料取替フロア)	②－1 (面内方向の荷重に加え面外慣性力の影響が大きい)	同上	・同上
	鉄骨 ブレース	非常用ガス処理系配管支持架構	②－2 (加振方向以外の方向に励起される振動が発生)	同上	・同上
耐震評価 部位全般		原子炉建屋	局所的な応答	同上	・同上

注　：下線部は代表として評価する建物・構築物を示す。

3.1.4　水平2方向及び鉛直方向地震力の影響評価部位の抽出結果

(1)　建物・構築物における影響評価部位の抽出結果

建物・構築物において，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響が想定されるとして抽出した部位を表3-1-7に示す。

応答特性①－1「直交する水平2方向の荷重が，応力として集中する部位」のうち，重要施設である非常用ガス処理系排気筒を支持する，主排気筒鉄塔部の主柱材を代表として，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価を行う。また，建屋規模が大きく，重要な設備を多く内包している等の留意すべき特徴を有している原子炉建屋の基礎スラブを代表として，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価を行う。

応答特性①－2「面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用する部位」として，施設の重要性，建屋規模及び構造特性を考慮し，上部に床などの拘束がなく，面外荷重（水圧）が作用する原子炉建屋使用済燃料プールの壁を代表して，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価を行う。

(2)　機器・配管系への影響が考えられる部位の抽出結果

建物・構築物において，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価対象として抽出した耐震評価上の構成部位について，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響の観点から，機器・配管系への影響の可能性がある部位について検討した。

主排気筒の主柱材については，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せにより応力が集中する部位であり，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響がないため，機器・配管系への影響の可能性はない。

原子炉建屋の基礎については，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せにより応力が集中する部位であり，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響がないため，機器・配管系への影響の可能性はない。

原子炉建屋（使用済燃料貯蔵プール）の壁については，面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用する部位であり，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる応答値への影響がないため，機器・配管系への影響の可能性はない。

表 3-1-7　水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価部位の抽出結果

応答特性	耐震評価部位		対象建物・構築物	代表評価部位
①－1	柱	隅部	・主排気筒 ・非常用ガス処理系配管支持架構	重要設備である非常用ガス処理系排気筒を支持する，主排気筒鉄塔部の主柱材を代表として評価する。
	基礎	基礎スラブ ・ 杭	・原子炉建屋 ・主排気筒 ・非常用ガス処理系配管支持架構 ・使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・格納容器圧力逃がし装置格納層 ・緊急時対策所建屋	建物規模が比較的大きく，重要な設備を多く内包している等の留意すべき特徴を有している原子炉建屋の基礎を代表として評価する。
①－2	壁	水圧 作用部 地下部	・原子炉建屋（使用済燃料プール） ・原子炉建屋（壁地下部） ・格納容器圧力逃がし装置格納槽（壁地下部） ・タービン建屋（壁地下部）	施設の重要性，建屋規模及び構造特性を考慮し，上部に床などの拘束がなく，面外荷重（水圧）が作用する使用済燃料プールの壁を評価する。

凡例　①－1：応答特性「直交する水平 2 方向の荷重が，応力として集中」
　　①－2：応答特性「面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用」
注　：下線部は代表として評価する建物・構築物を示す。

3.1.5　水平２方向及び鉛直方向地震力の影響評価方針

水平２方向及び鉛直方向地震力の組合わせによる影響評価部位として抽出された部位について，基準地震動Ｓ$_s$を用い，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合わせの影響を評価した。評価は従来設計手法による各部位の解析モデル及び鉛直方向地震力の組合せによる評価結果を用いた。評価に用いる地震動を表 3-1-8 に示す。

また，影響評価は，水平２方向及び鉛直方向を同時に入力する時刻歴応答解析による評価，または，基準地震動Ｓ$_s$の各方向地震力成分により，個別に計算した最大応答地を用い，水平 2 方向及び鉛直方向地震力を組み合わせる方法として，米国 REGULATORY GUIDE 1.92（注）の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考に，組合せ係数法（1.0：0.4：0.4）に基づいた評価により実施した。

表 3-1-8　評価に用いる地震動

耐震評価部位		対象建物・構築物	評価に用いる地震動	評価に用いる理由
柱	隅部	主排気筒	基準地震動 S_s－Ｄ１ S_s－１１～S_s－１４ S_s－２１，S_s－２２ S_s－３１	添付書類「Ｖ-2-2-15-1　主排気筒の耐震性についての計算書」の評価結果を用いるため，S_s－Ｄ１，S_s－１１～S_s－１４，S_s－２１，S_s－２２及びS_s－３１による動的地震力を各レベルで包絡した地震力とする。
基礎	矩形	原子炉建屋	基準地震動 S_s－Ｄ１ S_s－１１～S_s－１４ S_s－２１，S_s－２２ S_s－３１	添付書類「Ｖ-2-9-3-4　原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書」の評価結果を用いるため，S_s－Ｄ１，S_s－１１～S_s－１４，S_s－２１，S_s－２２及びS_s－３１による動的地震力を各レベルで包絡した地震力とする。
壁	水圧作用部	原子炉建屋（使用済燃料プール）	基準地震動 S_s－Ｄ１ S_s－１１～S_s－１４ S_s－２１，S_s－２２ S_s－３１	添付書類「Ｖ-2-4-2-1　使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の評価結果を用いるため，S_s－Ｄ１，S_s－１１～S_s－１４，S_s－２１，S_s－２２及びS_s－３１による動的地震力を各レベルで包絡した地震力とする。

3.1.6　主排気筒

3.1.6.1　検討の概要

隅柱は，直交する水平2方向の荷重が応力として集中する部位である。検討は応力集中の影響が大きいと想定される主排気筒の主柱材について，3 次元ＦＥＭモデルを用いて，地震動を水平2方向及び鉛直方向から入力した場合の検討を実施する。

主排気筒は，原子炉建屋の東側に位置し，中央の内径 4.5 m，高さ 140 m の筒身にかかる水平力を周囲の根開き 28 m，高さ 130 m の鋼管トラスの 4 脚支持鉄塔で分担する鉄骨骨組構造であり，筒身と鉄塔は 7 箇所で接続され，筒身と鉄塔の脚部はアンカーボルトで締結されている。主排気筒の構造概要図を図 3.1.6-1 に示す。

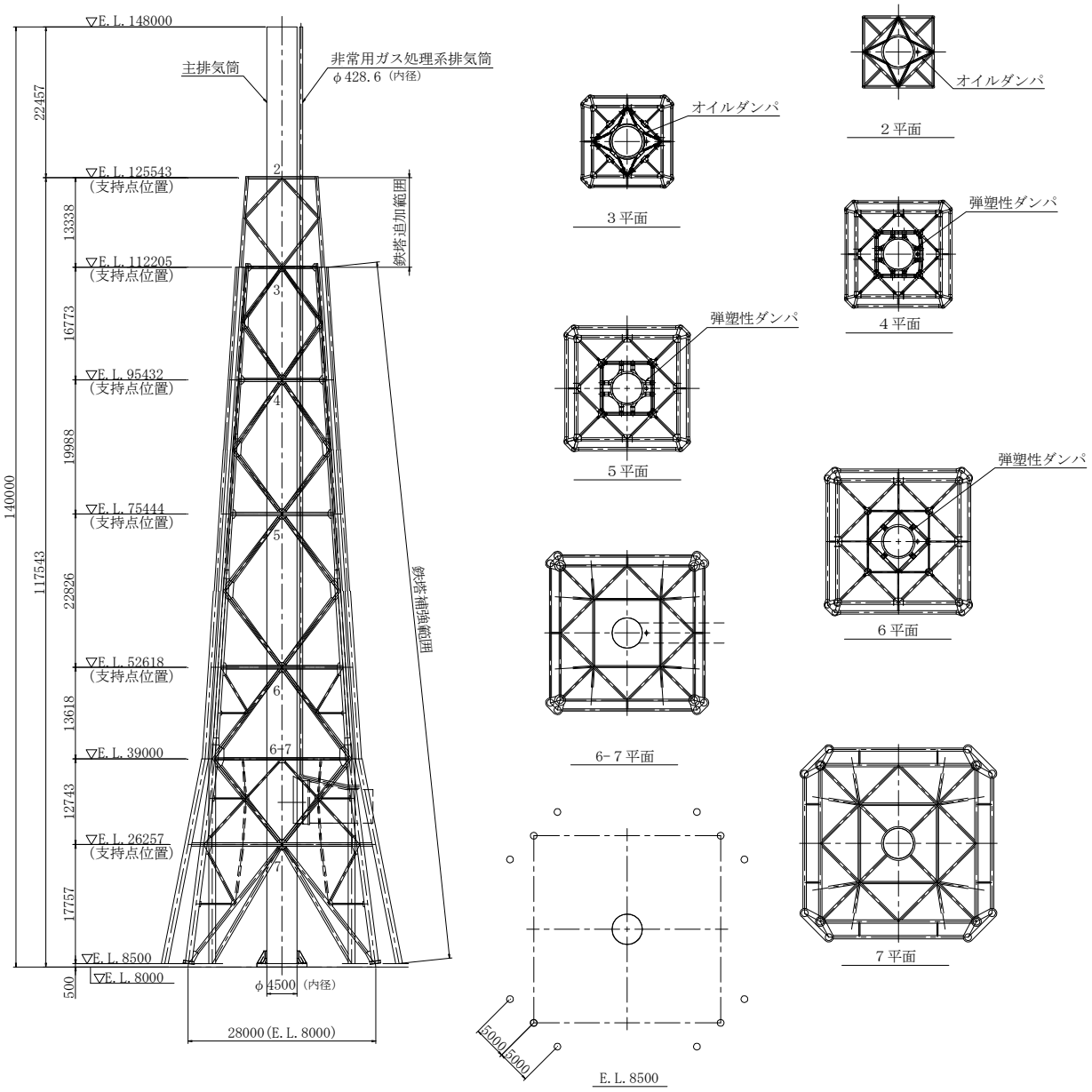


図 3.1.6-1　主排気筒の構造概要図（単位：mm）

3.1.6.2　検討方針

主排気筒の鉄塔のうち，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価として，直交する水平2方向の荷重が応力として集中する部位である主柱材を対象に評価を行う。

評価に当たっては，基準地震動S_sによる地震力（以下「S_s地震時」という。）に対して，3次元ＦＥＭモデルによる弾性応力解析を行い，各主柱材に対する水平2方向及び鉛直方向入力時と水平1方向及び鉛直方向入力時の軸力及び曲げによる応力度比の比率を求め，これらの比率を考慮した各主柱材の応力度比が，1.0を超えないことを確認する。

解析モデルの詳細及び許容値については，添付書類「Ｖ-2-2-15-1　主排気筒の耐震性についての計算書」に示すものと同一である。

3.1.6.3　荷重及び荷重の組合せ

荷重の組合せは，添付書類「Ｖ-2-1-9　機能維持の基本方針」に基づき，設定する。荷重の組合せを表3.1.6-1に示す。

荷重の詳細は，添付書類「Ｖ-2-2-15-1　主排気筒の耐震性についての計算書」に示す固定荷重（G），地震荷重（K）及び風荷重（W）と同一である。

表3.1.6-1　荷重の組合せ

外力の状態	水平荷重の入力方向	荷重の組合せ
S_s地震時	0°	G＋K＋W
S_s地震時	45°	G＋K＋W

G　：固定荷重
K　：地震荷重
W　：風荷重

3.1.6.4　使用材料の許容応力度

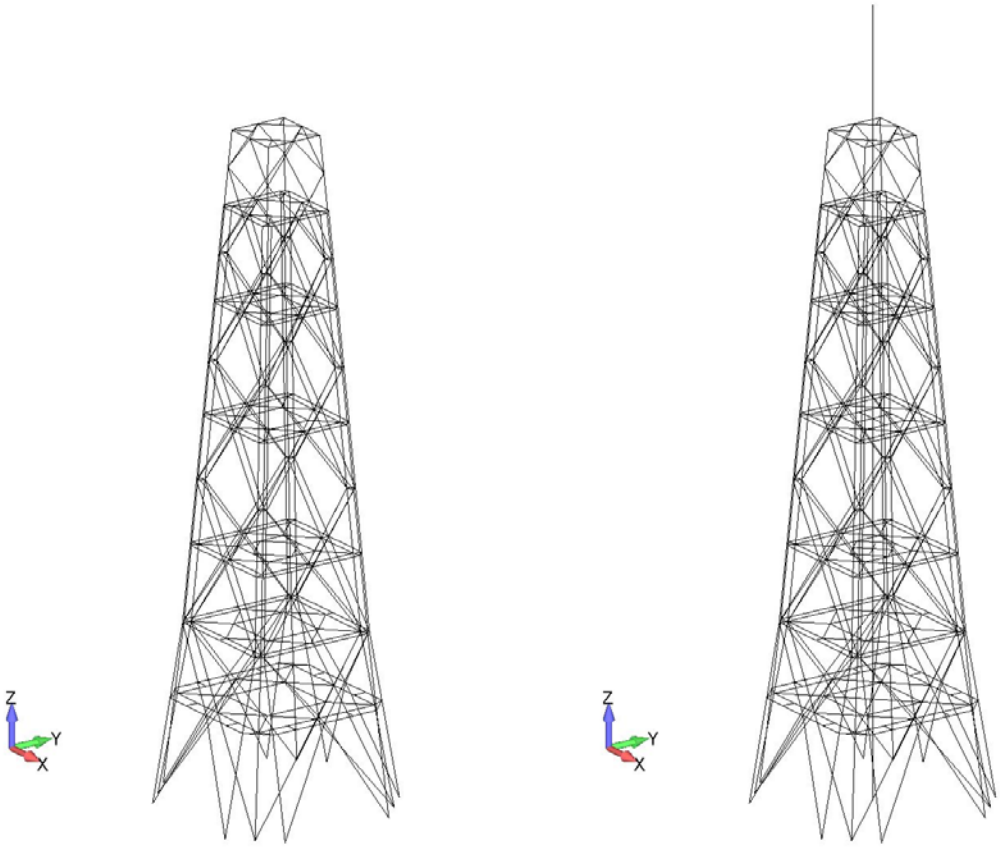
主柱材の許容応力度及び終局強度は，添付書類「Ｖ-2-2-15-1　主排気筒の耐震性についての計算書」の「3.3　許容限界」にて示すものと同一である。

3.1.6.5　地震応答解析

(1)　解析モデル

鉄塔の応力解析モデル図を図3.1.6－2に，部材リストを表3.1.6-2に示す。

解析モデルの詳細は，添付書類「Ｖ-2-2-15-1　主排気筒の耐震性についての計算書」の「3.4.1　応力評価方法」に示す内容と同一である。



(a)　地震荷重による応力評価用モデル　　(b)　風荷重による応力評価用モデル

図 3.1.6-2　鉄塔の応力解析モデル

表 3.1.6-2　部材リスト

部位	EL. (m)	使用部材	材質
主柱材	112.205	Φ406.4×6.4	STK400
	95.432	Φ406.4×12.7	STK400
	75.444	Φ558.8×12.7	STK400
	52.618	Φ812.8×12.7	STK400
	26.257	Φ1016.0×12.7	STK400

(2)　解析諸元

使用材料（主柱材）の物性値を表 3.1.6-3 に示す。

表 3.1.6-3　材料物性値

使用材料	ヤング係数	ポアソン比
主柱材（STK400）	205000 N/mm^2	0.3

(3)　評価方法

3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析を行い，地震荷重及び風荷重を組み合わせて，各主柱材に対する水平 2 方向及び鉛直方向入力時各主柱材の最大検定比が，1.0 を超えないことを確認する。

a.　荷重の組合せケース

荷重の組合せケースを表 3.1.6-4 に示す。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を確認するため，水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せについても検討を行い，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる結果と比較し，その影響を評価する。

表 3.1.6-4　荷重の組合せケース

ケース No.	荷重の組合せ
1	$G+1.0K_{H0°}+0.4K_{H0°}+0.4K_V+W_{0°}$
2	$G+0.4K_{H0°}+1.0K_{H0°}+0.4K_V+W_{0°}$
3	$G+0.4K_{H0°}+0.4K_{H0°}+1.0K_V+W_{0°}$
4	$G+1.0K_{H45°}+0.4K_{H45°}+0.4K_V+W_{45°}$
5	$G+0.4K_{H45°}+1.0K_{H45°}+0.4K_V+W_{45°}$
6	$G+0.4K_{H45°}+0.4K_{H45°}+1.0K_V+W_{45°}$

G　：固定荷重

$K_{H0°}$　：0°方向の水平方向地震荷重

$K_{H45°}$　：45°方向の水平方向地震荷重

K_V　：鉛直方向地震荷重

$W_{0°}$　：0°方向の風荷重

$W_{45°}$　：45°方向の風荷重

b.　荷重の入力方法

添付書類「Ｖ-2-2-15-1　主排気筒の耐震性についての計算書」の「3.4.1　応力評価方法」に倣い，地震荷重については，基準地震動S_sの地震応答解析により得られた地震荷重を，地震荷重による応力評価用モデルに入力し，風荷重については，

建築基準法施行令第 87 条に規定される算出法に基づいた風荷重を，風荷重による応力評価用モデルに入力する。

(4) 評価結果

水平 2 方向及び鉛直方向入力時並びに水平 1 方向及び鉛直方向入力時の主柱材の最大応力度比を表 3.1.6-5 に示す。

評価の結果,水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる最大応力度比と比較し，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる最大応力度比は増加傾向であるものの，これらの最大応力度比の比率を考慮しても検定比が 1.0 を超えていないことを確認した。

以上より，水平 2 方向及び鉛直方向地震力に対し，主排気筒が有する耐震性への影響がないことを確認した。

表 3.1.6-5　主柱材の最大応力度比

（水平 2 方向と鉛直方向の組合せ及び水平 1 方向と鉛直方向の組合せ）

EL. (m)	使用部材	材質	判定結果		比率 ②/①
			① 水平1方向及び鉛直方向入力時	② 水平2方向及び鉛直方向入力時	
112.205	Φ406.4× 6.4	STK400	0.48 ≦ 1.00	0.52 ≦ 1.00	1.09
95.432	Φ406.4×12.7	STK400	0.53 ≦ 1.00	0.65 ≦ 1.00	1.23
75.444	Φ558.8×12.7	STK400	0.73 ≦ 1.00	0.87 ≦ 1.00	1.20
52.618	Φ812.8×12.7	STK400	0.71 ≦ 1.00	0.73 ≦ 1.00	1.03
26.257	Φ1016.0×12.7	STK400	0.55 ≦ 1.00	0.57 ≦ 1.00	1.04

3.1.6.6　検討のまとめ

隅柱は直交する水平 2 方向の荷重が，応力として集中する部位である。

応力集中の影響が大きいと考えられる主排気筒の鉄塔の各主柱材について，3 次元ＦＥＭモデルを用いて，基準地震動S_sに対して水平 2 方向及び鉛直方向から入力した場合の検討を行った。

検討の結果，最大応力度比は増加傾向であるものの，これらの最大応力度比の比率を考慮しても検定比が 1.0 を超えないことを確認した。

以上のことから，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対し，鉄骨骨組構造の隅柱が有する耐震性への影響がないことを確認した。

3.1.7　原子炉建屋基礎盤の検討

3.1.7.1　検討の概要

矩形の基礎は，直交する水平2方向の荷重が隅部に応力集中する可能性があることから，S_s地震時を対象として，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を検討する。

原子炉建屋基礎盤は，原子炉格納容器の底部に該当する部分（以下「原子炉格納容器底部コンクリートマット」という。）並びに，二次格納施設にあたる原子炉建屋原子炉棟のうち，原子炉格納容器底部コンクリートマット以外の基礎（以下「原子炉棟基礎」という。）及び原子炉建屋付属棟の基礎（以下「付属棟基礎」という。）で構成される。

原子炉建屋基礎盤の底面における平面規模は，南北方向 68.5 m，東西方向 68.25 m，厚さ 5.0 m の矩形である。原子炉建屋基礎盤の概略平面図及び概略断面図を図 3.1.7-1 及び図 3.1.7-2 に示す。

図 3.1.7-1 の概略平面図（EL.－4.0 m）

図 3.1.7-2　原子炉建屋基礎盤の概略断面図（A－A 断面　EW 方向）

3.1.7.2　検討方針

水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価として，直交する水平2方向の荷重が応力として集中する部位である原子炉棟基礎及び付属棟基礎について，評価を行う。

評価に当たっては，S_s地震時に対して，3次元ＦＥＭモデルの応力解析結果を用いた断面の評価について，許容値を超えないことを確認する。

解析モデルの詳細及び許容値については，添付書類「Ｖ-2-9-3-4　原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書」に示すものと同一である。

3.1.7.3　荷重及び荷重の組合せ

荷重の組合せは，添付書類「Ｖ-2-1-9　機能維持の基本方針」に基づき設定する。荷重の組合せを表3.1.7-1に示す。

荷重の詳細は，添付書類「Ｖ-2-9-3-4　原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書」の「4.2.1　荷重」に示す死荷重（D），活荷重（L），運転時圧力（P_1），逃がし安全弁作動時荷重（H_1），常時土圧荷重（E_0），地震時土圧荷重（E_s）及び地震荷重（K_s）と同一である

表3.1.7-1　荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S_s地震時	$D+L+E_0+P_1+H_1+K_s+E_s$

D　　：死荷重
L　　：活荷重（地震時の積雪荷重$S_{地震時}$を含む）
E_0　　：常時土圧荷重
E_s　　：地震時増分土圧荷重
K_s　　：S_s地震荷重
P_1　　：運転時圧力*
H_1　　：逃がし安全弁作動時荷重*

注　＊：原子炉格納容器底部コンクリートマットに作用

3.1.7.4　使用材料の許容限界

コンクリート及び鉄筋の許容応力度は，添付書類「Ｖ-2-9-3-4　原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書」の「4.4　解析モデル及び諸元」に示す内容と同一である。

3.1.7.5　応力解析

(1)　解析モデル

解析モデル図を図 3.1.7-3 に示す。

解析モデルの詳細は，添付書類「V-2-9-3-4　原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書」の「4.4　解析モデル及び諸元」に示す内容と同一である。

図 3.1.7-3　解析モデル

(2)　荷重ケース

Ｓ$_s$地震時の応力は，添付書類「Ｖ-2-9-3-4　原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書」の「4.5.1　応力解析方法」に示す，次の荷重ケースによる応力を組み合わせて求める。

DL　　：死荷重＋活荷重

E_0　　：常時土圧荷重

E_{sNS}*1　：NS 方向　Ｓ$_s$地震時増分土圧

E_{sEW}*1　：EW 方向　Ｓ$_s$地震時増分土圧

K_{sSN}*1　：S→N 方向　Ｓ$_s$地震荷重

K_{sWE}*1　：W→E 方向　Ｓ$_s$地震荷重

K_{sDU}*1　：鉛直方向　Ｓ$_s$地震荷重

P_1*2　　：運転時圧力

H_1*2　　：逃がし安全弁作動時荷重

注記　＊1：計算上の座標軸を基本として，EW 方向は W→E 方向加力，NS 方向は S→N 方向加力，鉛直方向は上向き加力を記載している。

＊2：原子炉格納容器底部コンクリートマットに作用する。

(3)　荷重の組合せケース

荷重の組合せケースは，Ｓ$_s$地震時の単独荷重を，米国 REGULATORY GUIDE 1.92 の「2. Combining Effects Casused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考に，組合せ係数法（1.0：0.4：0.4）に基づいて評価する。なお，水平 2 方向と鉛直方向の組合せにおいては，水平 1 方向と鉛直方向の組合せの結果を考慮して鉛直方向地震力に 0.4 を乗じるケースに対して実施する。

荷重の組合せケースを表 3.1.7-2 に示す。

表 3.1.7-2（1／2）　荷重の組合せケース

（a）　水平 2 方向及び鉛直方向の組合せ

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S_s 地震時	2-1	$DL+E_0+P_1+H_1+1.0K_{sNS}+0.4K_{sEW}+0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}+0.4E_{sEW}$
	2-2	$DL+E_0+P_1+H_1+0.4K_{sNS}+1.0K_{sEW}+0.4K_{sDU}+0.4E_{sNS}+1.0E_{sEW}$
	2-3	$DL+E_0+P_1+H_1-0.4K_{sNS}+1.0K_{sEW}+0.4K_{sDU}+0.4E_{sNS}+1.0E_{sEW}$
	2-4	$DL+E_0+P_1+H_1-1.0K_{sNS}+0.4K_{sEW}+0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}+0.4E_{sEW}$
	2-5	$DL+E_0+P_1+H_1-1.0K_{sNS}-0.4K_{sEW}+0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}+0.4E_{sEW}$
	2-6	$DL+E_0+P_1+H_1-0.4K_{sNS}-1.0K_{sEW}+0.4K_{sDU}+0.4E_{sNS}+1.0E_{sEW}$
	2-7	$DL+E_0+P_1+H_1+0.4K_{sNS}-1.0K_{sEW}+0.4K_{sDU}+0.4E_{sNS}+1.0E_{sEW}$
	2-8	$DL+E_0+P_1+H_1+1.0K_{sNS}-0.4K_{sEW}+0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}+0.4E_{sEW}$
	2-9	$DL+E_0+P_1+H_1+1.0K_{sNS}+0.4K_{sEW}-0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}+0.4E_{sEW}$
	2-10	$DL+E_0+P_1+H_1+0.4K_{sNS}+1.0K_{sEW}-0.4K_{sDU}+0.4E_{sNS}+1.0E_{sEW}$
	2-11	$DL+E_0+P_1+H_1-0.4K_{sNS}+1.0K_{sEW}-0.4K_{sDU}+0.4E_{sNS}+1.0E_{sEW}$
	2-12	$DL+E_0+P_1+H_1-1.0K_{sNS}+0.4K_{sEW}-0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}+0.4E_{sEW}$
	2-13	$DL+E_0+P_1+H_1-1.0K_{sNS}-0.4K_{sEW}-0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}+0.4E_{sEW}$
	2-14	$DL+E_0+P_1+H_1-0.4K_{sNS}-1.0K_{sEW}-0.4K_{sDU}+0.4E_{sNS}+1.0E_{sEW}$
	2-15	$DL+E_0+P_1+H_1+0.4K_{sNS}-1.0K_{sEW}-0.4K_{sDU}+0.4E_{sNS}+1.0E_{sEW}$
	2-16	$DL+E_0+P_1+H_1+1.0K_{sNS}-0.4K_{sEW}-0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}+0.4E_{sEW}$

表 3.1.7-2（2／2）　荷重の組合せケース

（b）　水平 1 方向及び鉛直方向の組合せ

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
Ｓ$_s$地震時	1-1	$DL+E_0+P_1+H_1+1.0K_{sSN}+0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}$
	1-2	$DL+E_0+P_1+H_1+1.0K_{sWE}+0.4K_{sDU}+1.0E_{sEW}$
	1-3	$DL+E_0+P_1+H_1-1.0K_{sSN}+0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}$
	1-4	$DL+E_0+P_1+H_1-1.0K_{sWE}+0.4K_{sDU}+1.0E_{sEW}$
	1-5	$DL+E_0+P_1+H_1+1.0K_{sSN}-0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}$
	1-6	$DL+E_0+P_1+H_1+1.0K_{sWE}-0.4K_{sDU}+1.0E_{sEW}$
	1-7	$DL+E_0+P_1+H_1-1.0K_{sSN}-0.4K_{sDU}+1.0E_{sNS}$
	1-8	$DL+E_0+P_1+H_1-1.0K_{sWE}-0.4K_{sDU}+1.0E_{sEW}$
	1-9	$DL+E_0+P_1+H_1+0.4K_{sSN}+1.0K_{sDU}+0.4E_{sNS}$
	1-10	$DL+E_0+P_1+H_1+0.4K_{sWE}+1.0K_{sDU}+0.4E_{sEW}$
	1-11	$DL+E_0+P_1+H_1-0.4K_{sSN}+1.0K_{sDU}+0.4E_{sNS}$
	1-12	$DL+E_0+P_1+H_1-0.4K_{sWE}+1.0K_{sDU}+0.4E_{sEW}$
	1-13	$DL+E_0+P_1+H_1+0.4K_{sSN}-1.0K_{sDU}+0.4E_{sNS}$
	1-14	$DL+E_0+P_1+H_1+0.4K_{sWE}-1.0K_{sDU}+0.4E_{sEW}$
	1-15	$DL+E_0+P_1+H_1-0.4K_{sSN}-1.0K_{sDU}+0.4E_{sNS}$
	1-16	$DL+E_0+P_1+H_1-0.4K_{sWE}-1.0K_{sDU}+0.4E_{sEW}$

3.1.7.6　評価方法

基礎の断面の評価は，添付書類「Ｖ-2-9-3-4　原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書」の「4.5.2　断面の評価方法」に示す方法と同一である。

3.1.7.7　評価結果

断面の評価結果を以下に示す。また，原子炉建屋基礎盤の配筋領域図及び配筋一覧を図 3.1.7-4 及び表 3.1.7-3 に示す。

断面の評価結果を記載する要素は，軸力，曲げモーメント及び面外せん断力に対する評価において，発生値に対する許容値の割合が最小となる要素とする。

選定した要素の位置を図 3.1.7-5 に，評価結果を表 3.1.7-4 に示す。

S_s地震時における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにおいて，水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する評価結果と水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する評価結果を比較すると，水平 2 方向の地震力の影響により解析結果の値は増加傾向にあり，一部最大となる要素が変わるものもあるが，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる軸力，曲げモーメント及び面外せん断力に対する評価における発生値は各許容値を超えないことを確認した。

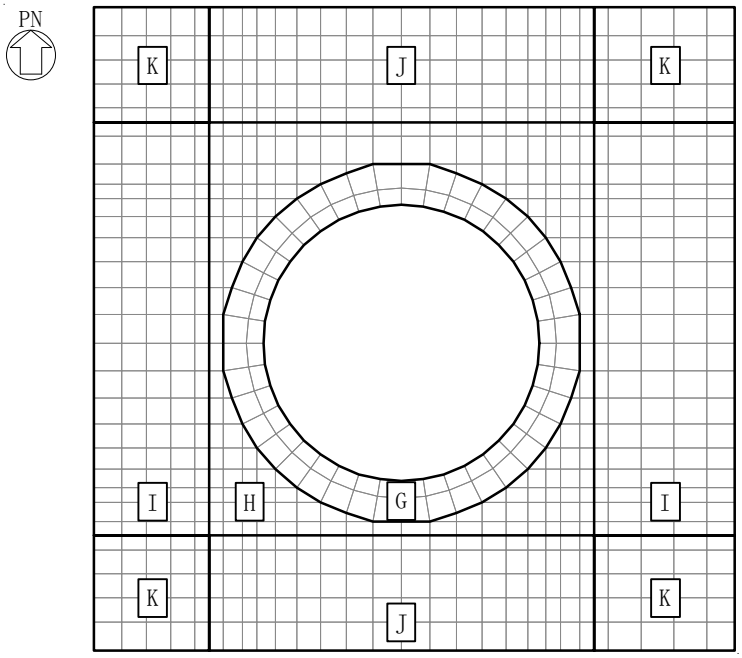


図 3.1.7-4　配筋領域図

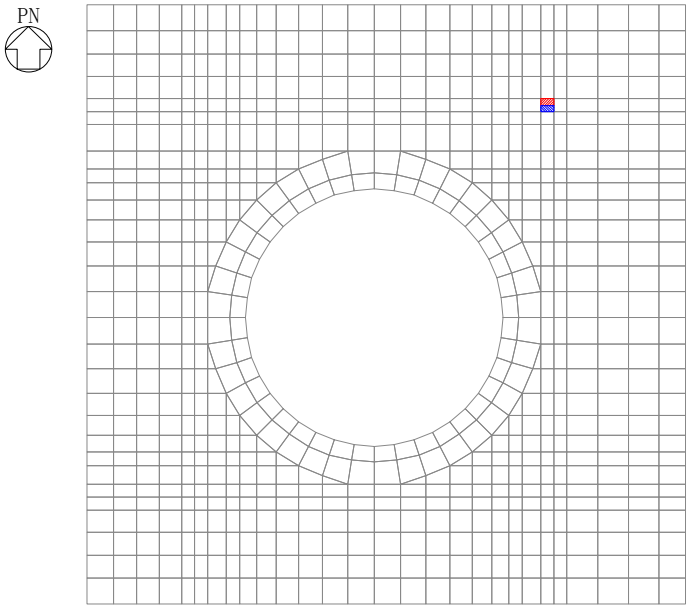
表 3.1.7-3　配筋一覧

(a)　格子配筋

領域	方向	上端筋	下端筋
H	EW	3-D38@200	3-D38@200
	NS	3-D38@200	3-D38@200
I	EW	D38@200＋2-D38@400	D38@200＋2-D38@400
	NS	3-D38@200	3-D38@200
J	EW	3-D38@200	3-D38@200
	NS	D38@200＋2-D38@400	D38@200＋2-D38@400
K	EW	D38@200＋2-D38@400	D38@200＋2-D38@400
	NS	D38@200＋2-D38@400	D38@200＋2-D38@400

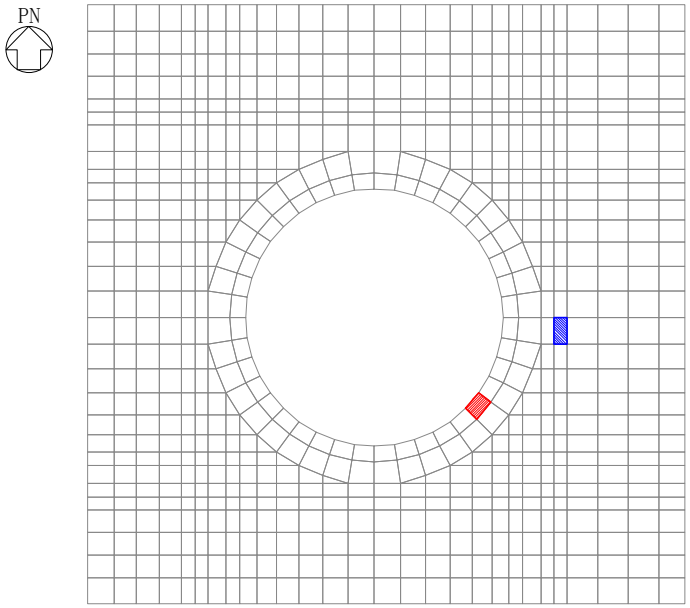
(b)　r － θ 方向配筋

領域	方向	上端筋	下端筋
G	半径	68-D38/45°　(4 段)	68-D38/45°　(4 段)
	円周	4-D38@200	4-D38@200



は，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる断面算定部位を示す。
は，水平1方向及び鉛直方向地震力の組合せによる断面算定部位を示す。

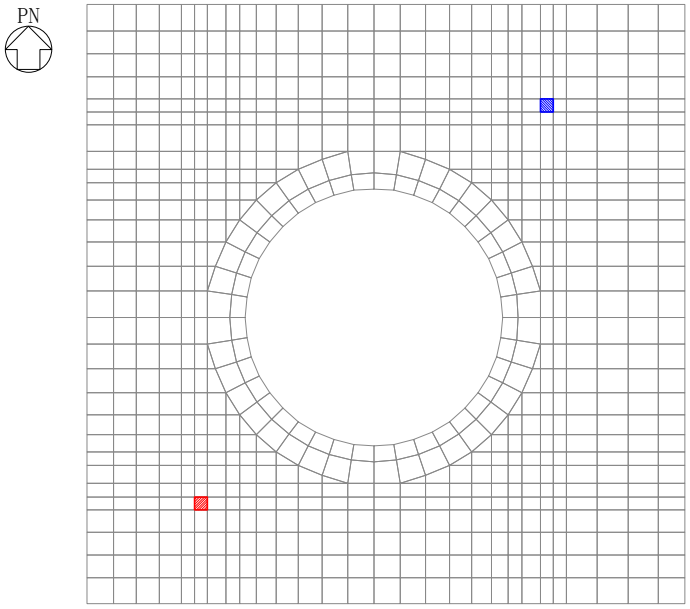
(a)　軸力＋曲げモーメント（NS 方向または円周方向）



は，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる断面算定部位を示す。
は，水平1方向及び鉛直方向地震力の組合せによる断面算定部位を示す。

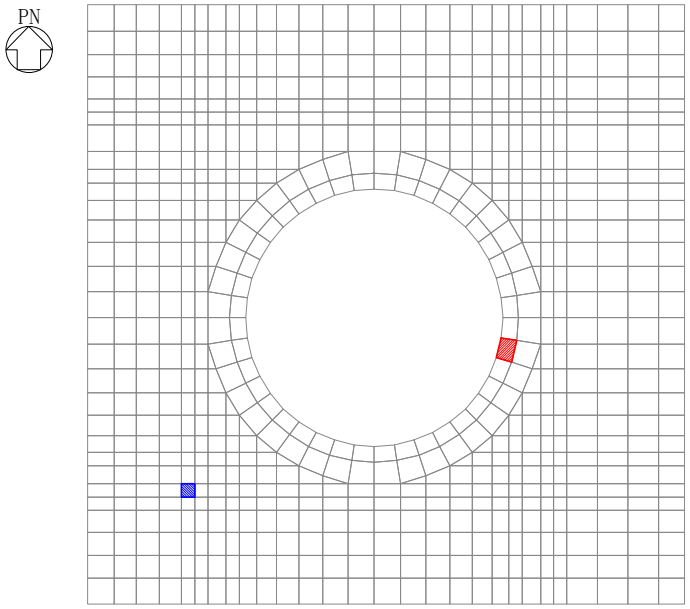
(b)　軸力＋曲げモーメント（EW 方向または半径方向）

図 3.1.7-5（1／2）　解析結果を記載する要素の位置



は，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる断面算定部位を示す。
は，水平1方向及び鉛直方向地震力の組合せによる断面算定部位を示す。

(c)　面外せん断力（NS 方向または円周方向）



は，水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる断面算定部位を示す。
は，水平1方向及び鉛直方向地震力の組合せによる断面算定部位を示す。

(d)　面外せん断力（EW 方向または半径方向）

図 3.1.7-5（2／2）　解析結果を記載する要素の位置

表 3.1.7-4　原子炉棟基礎及び付属棟基礎の評価結果（S_s地震時）

(a)　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せ

評価項目		方向	要素番号	組合せケース	発生値	許容値
軸力 ＋ 曲げモーメント	曲げモーメント （×10^3 kN･m/m）	NS	851	2-12	10.7	11.8
		半径	276	2-3	43.6	49.8
面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	NS	438	2-6	1.45*	2.12
		半径	279	2-3	1.96*	2.12

注記　＊：応力の再配分等を考慮して，応力の平均化を行った結果

(b)　水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せ

評価項目		方向	要素番号	組合せケース	発生値	許容値
軸力 ＋ 曲げモーメント	曲げモーメント （×10^3 kN･m/m）	NS	851	1-7	10.9	12.2
		EW	626	1-6	23.2	32.4
面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	NS	851	1-1	1.60	2.19
		EW	465	1-4	1.90	2.19

3.1.7.8　原子炉建屋における改造工事に伴う重量増加を反映した検討

3.1.7.7 項の評価結果に対して，設備の補強や追加等の改造工事に伴い重量が増加することの影響についての検討を行う。

(1)　検討方針

「3.1.7.2　検討方針」に示す検討方針と同様である。ただし，設備の補強や追加等の改造工事に伴う重量増加を考慮した割増係数を 3.1.7.7 項の評価結果に乗じて構造健全性の検討を行う。

(2)　検討結果

原子炉建屋基礎盤については，1 次遮蔽壁（以下「シェル壁（S／W)」という。)，原子炉建屋原子炉棟（以下「原子炉棟」という。）の外壁（以下「内部ボックス壁（I／W)」という。）及び原子炉建屋付属棟（以下,「付属棟」という。）の外壁（以下「外部ボックス壁（O／W)」という。）からの基礎への地震時せん断力，軸力を地震荷重として考慮することから，原子炉建屋基礎盤上層（要素番号(10)，EL.－4.0 m～EL.2.0 m）の最大応答せん断力及び軸力の応答比率の最大値を割増係数として設定し，応力評価結果の発生値に乗じて各許容値を超えないことを確認する。

原子炉建屋基礎盤上層（要素番号（10)）の最大応答せん断力及び軸力の各方向の応答比率と割増係数を表 3.1.7-5 に示す。

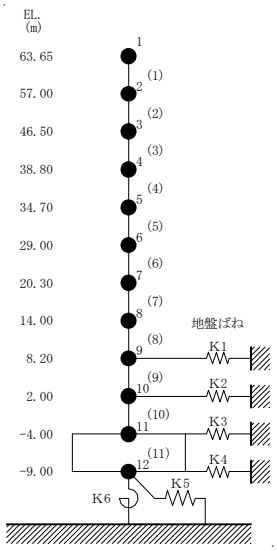
原子炉建屋基礎盤の断面評価結果を表 3.1.7-6 に示す。重量増加を考慮した割増係数を乗じた結果においても，各許容値を超えないことを確認した。

表 3.1.7-5　重量増加を考慮した割増係数：原子炉建屋基礎盤

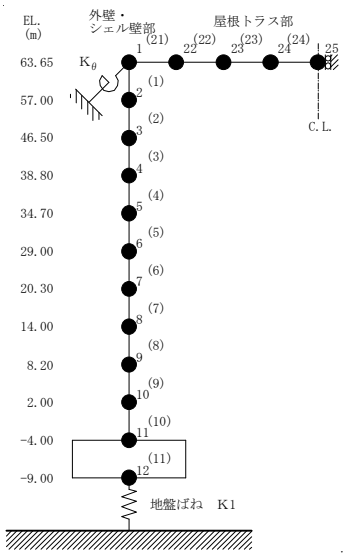
	NS 方向	EW 方向	UD 方向
要素番号（10）	1.02*1	1.02*1	1.02*1
割増係数	1.02*2		

注記　＊1：添付書類「V2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」別紙 1 に示す原子炉建屋基礎盤上層（要素番号(10)）の最大応答せん断力及び軸力の応答比率

＊2：各方向の応答比率の最大値



NS，EW 方向



UD 方向

表 3.1.7-6　重量増加を考慮した評価結果（S_s地震時）

(a) 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せ

評価項目		方向	要素番号	発生値①	割増係数②	①×②	許容値
軸力＋曲げモーメント	曲げモーメント（×10^3 kN･m/m）	NS	851	10.7	1.02	11.0	11.8
		半径	276	43.6	1.02	44.5	49.8
面外せん断力	面外せん断応力度（N/mm^2）	NS	438	1.45*	1.02	1.48	2.12
		半径	279	1.96*	1.02	2.00	2.12

注記　＊：応力の再配分等を考慮して，応力の平均化を行った結果

3.1.7.9　検討のまとめ

矩形の基礎は，直交する水平２方向の荷重が隅部に応力集中する可能性があることから，原子炉建屋基礎盤（原子炉棟基礎及び付属棟基礎）について，水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せに対して，3 次元ＦＥＭモデルを用いた弾性応力解析を実施した。

検討の結果，水平１方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する評価結果と水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する評価結果を比較すると，水平２方向の地震力の影響により解析結果の値は増加傾向にあり，一部最大となる要素位置が変わるものもあるが，水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せによる軸力，曲げモーメント及び面外せん断力に対する評価における発生値は各許容値を超えないことを確認した。

また，原子炉建屋における改造工事に伴う重量増加を反映した地震応答解析に基づき影響について検討を行い，重量増加を考慮した場合においても安全上問題とならないことを確認した。

以上のことから，水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せに対し，原子炉建屋基礎盤（原子炉棟基礎及び付属棟基礎）が有する耐震性への影響はないことを確認した。

3.1.8　使用済燃料プールの検討

3.1.8.1　検討の概要

使用済燃料プールの耐震壁は面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の水圧等の荷重が作用する部位であり，水平2方向の地震力を受ける。

使用済み燃料プールは，原子炉建屋の原子炉棟の燃料取替床（EL.46.50 m）付近に位置する鉄筋コンクリート構造物で，使用済燃料，制御棒及び使用済燃料輸送容器が収容される。使用済燃料プール内には，収容される機器の遮蔽及び冷却のため常時水が張られている。使用済燃料プール内面はステンレス鋼でライニングされており，漏水を防ぐと共に，保守，点検についても考慮されている。

使用済燃料プールはほぼ長方形で,その大きさは,内面寸法で12.192 m×10.363 m,壁厚2.154 m，底面スラブ厚1.599 mである。

使用済燃料プールを含む原子炉建屋の概略平面図及び概略断面図を図3.1.8-1及び図3.1.8-2に，使用済燃料プール周りの概略平面図及び概略断面図を図3.1.8-3及び図3.1.8-4に示す。

図 3.1.8-1 の概略平面図（EL.46.5 m）

図 3.1.8-2　使用済燃料プールを含む原子炉建屋の概略断面図（A－A 断面）

図 3.1.8-3 の概略平面図（EL.38.80 m）

図 3.1.8-4　使用済燃料プール周りの概略断面図（A－A 断面）

3.1.8.2　検討方針

水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価として，面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用する使用済燃料プールの壁について，評価を行う。

評価に当たっては，S_s地震時に対して，3次元ＦＥＭモデルの応力解析結果を用いた断面の評価について，許容値を超えないことを確認する。

解析モデルの詳細及び許容値については，添付書類「Ｖ-2-4-2-1　使用済燃料プールの耐震性についての計算書」に示すものと同一である。

3.1.8.3　荷重及び荷重の組合せ

荷重の組合せは，添付書類「Ｖ-2-1-9　機能維持の基本方針」に基づき設定する。荷重の組合せを表3.1.8-1に示す。

荷重の詳細は，添付書類「Ｖ-2-4-2-1　使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.2.1　荷重」に示す固定荷重（G），積載荷重（P），静水圧荷重（H_S），長期ラック荷重（R_0）動水圧荷重（Hs）及び地震荷重（S_s）と同一である。

表3-1　荷重の組合せケース（S_s地震時）

外力の状態	荷重の組合せ
S_s地震時	$G+P+H_s+R_0+Hs+S_s$

G　：固定荷重
P　：積載荷重
H_s　：静水圧荷重
R_0　：長期ラック荷重
Hs　：動水圧荷重
S_s　：S_s地震荷重

3.1.8.4　使用材料の許容限界

コンクリート及び鉄筋の許容応力度は，添付書類「Ｖ-2-4-2-1　使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.4　解析モデル及び諸元」に示す内容と同一である。

3.1.8.5　応力解析

(1)　解析モデル

解析モデル図を図3.1.8-5に示す。

解析モデルの詳細は，添付書類「Ｖ-2-4-2-1　使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.4　解析モデル及び諸元」に示す内容と同一である。

節点数：1028
要素数：1038

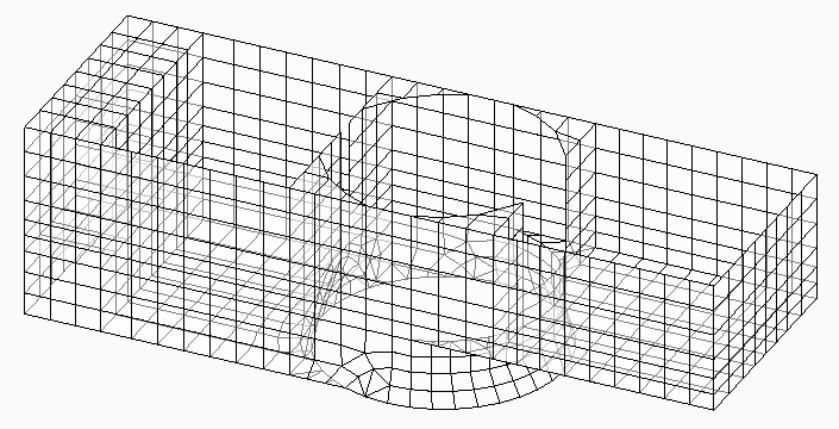


図 3.1.8-5　解析モデル概要図

(2)　荷重ケース

Ｓ$_d$地震時，Ｓ$_d$地震時＋温度及びＳ$_s$地震時の応力は，単独荷重による解析で求まる応力を組合せて求める。

単独荷重の記号を以下に示す。

GP	：固定荷重及び積載荷重		
H_s	：静水圧荷重		
R_0	：長期ラック荷重		
Ss_{WE}*	：Ｓ$_s$地震荷重	W→E 方向	GP 及び R_0 による慣性力
Ss_{SN}*	：Ｓ$_s$地震荷重	S→N 方向	GP 及び R_0 による慣性力
Ss_{DU}*	：Ｓ$_s$地震荷重	鉛直方向	GP 及び R_0 による慣性力
Hs_{WE}*	：Ｓ$_s$地震荷重	W→E 方向	水平地震力による動水圧荷重
Hs_{SN}*	：Ｓ$_s$地震荷重	S→N 方向	水平地震力による動水圧荷重
Hs_{DU}*	：Ｓ$_s$地震荷重	鉛直方向	鉛直地震力による動水圧荷重

注記　＊：加力方向により絶対値の差異はないため，計算上の座標軸を基本として，EW 方向は W→E 方向加力，NS 方向は S→N 方向加力，鉛直方向は上向き加力を記載している。

(3)　荷重の組合せケース

荷重の組合せケースは，Ｓ$_s$地震時の単独荷重を，米国 REGULATORY GUIDE 1.92 の「2. Combining Effects Casused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考に，組合せ係数法（1.0：0.4：0.4）に基づいて評価する。なお，水平２方向と鉛直方向の組み合わせにおいては，水平１方向と鉛直方向の組合せの結果を考慮して鉛直方向地震力に 0.4 を乗じるケースに対して実施する。

荷重の組合せケースを表 3.1.8-2 に示す。

表 3.1.8-2（1／2）　荷重の組合せケース

（a）水平２方向及び鉛直方向の組合せ

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せケース
Ｓ$_s$地震時	4 - 1	$GP+H_s+R_0+1.0Ss_{NS}+0.4Ss_{EW}+0.4Ss_{DU}+1.0Hs_{NS}+0.4Hs_{EW}+0.4Hs_{DU}$
	4 - 2	$GP+H_s+R_0+0.4Ss_{NS}+1.0Ss_{EW}+0.4Ss_{DU}+0.4Hs_{NS}+1.0Hs_{EW}+0.4Hs_{DU}$
	4 - 3	$GP+H_s+R_0-0.4Ss_{NS}+1.0Ss_{EW}+0.4Ss_{DU}-0.4Hs_{NS}+1.0Hs_{EW}+0.4Hs_{DU}$
	4 - 4	$GP+H_s+R_0-1.0Ss_{NS}+0.4Ss_{EW}+0.4Ss_{DU}-1.0Hs_{NS}+0.4Hs_{EW}+0.4Hs_{DU}$
	4 - 5	$GP+H_s+R_0-1.0Ss_{NS}-0.4Ss_{EW}+0.4Ss_{DU}-1.0Hs_{NS}-0.4Hs_{EW}+0.4Hs_{DU}$
	4 - 6	$GP+H_s+R_0-0.4Ss_{NS}-1.0Ss_{EW}+0.4Ss_{DU}-0.4Hs_{NS}-1.0Hs_{EW}+0.4Hs_{DU}$
	4 - 7	$GP+H_s+R_0+0.4Ss_{NS}-1.0Ss_{EW}+0.4Ss_{DU}+0.4Hs_{NS}-1.0Hs_{EW}+0.4Hs_{DU}$
	4 - 8	$GP+H_s+R_0+1.0Ss_{NS}-0.4Ss_{EW}+0.4Ss_{DU}+1.0Hs_{NS}-0.4Hs_{EW}+0.4Hs_{DU}$
	4 - 9	$GP+H_s+R_0+1.0Ss_{NS}+0.4Ss_{EW}-0.4Ss_{DU}+1.0Hs_{NS}+0.4Hs_{EW}-0.4Hs_{DU}$
	4 - 10	$GP+H_s+R_0+0.4Ss_{NS}+1.0Ss_{EW}-0.4Ss_{DU}+0.4Hs_{NS}+1.0Hs_{EW}-0.4Hs_{DU}$
	4 - 11	$GP+H_s+R_0-0.4Ss_{NS}+1.0Ss_{EW}-0.4Ss_{DU}-0.4Hs_{NS}+1.0Hs_{EW}-0.4Hs_{DU}$
	4 - 12	$GP+H_s+R_0-1.0Ss_{NS}+0.4Ss_{EW}-0.4Ss_{DU}-1.0Hs_{NS}+0.4Hs_{EW}-0.4Hs_{DU}$
	4 - 13	$GP+H_s+R_0-1.0Ss_{NS}-0.4Ss_{EW}-0.4Ss_{DU}-1.0Hs_{NS}-0.4Hs_{EW}-0.4Hs_{DU}$
	4 - 14	$GP+H_s+R_0-0.4Ss_{NS}-1.0Ss_{EW}-0.4Ss_{DU}-0.4Hs_{NS}-1.0Hs_{EW}-0.4Hs_{DU}$
	4 - 15	$GP+H_s+R_0+0.4Ss_{NS}-1.0Ss_{EW}-0.4Ss_{DU}+0.4Hs_{NS}-1.0Hs_{EW}-0.4Hs_{DU}$
	4 - 16	$GP+H_s+R_0+1.0Ss_{NS}-0.4Ss_{EW}-0.4Ss_{DU}+1.0Hs_{NS}-0.4Hs_{EW}-0.4Hs_{DU}$

表 3.1.8-2（2／2）　荷重の組合せケース

（b）水平 1 方向及び鉛直方向の組合せ

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せケース
S_s地震時	3 - 1	$GP+H_s+R_0+1.0Ss_{WE}+1.0Hs_{WE}+0.4Ss_{DU}+0.4Hs_{DU}$
	3 - 2	$GP+H_s+R_0-1.0Ss_{WE}-1.0Hs_{WE}+0.4Ss_{DU}+0.4Hs_{DU}$
	3 - 3	$GP+H_s+R_0+1.0Ss_{SN}+1.0Hs_{SN}+0.4Ss_{DU}+0.4Hs_{DU}$
	3 - 4	$GP+H_s+R_0-1.0Ss_{SN}-1.0Hs_{SN}+0.4Ss_{DU}+0.4Hs_{DU}$
	3 - 5	$GP+H_s+R_0+1.0Ss_{WE}+1.0Hs_{WE}-0.4Ss_{DU}-0.4Hs_{DU}$
	3 - 6	$GP+H_s+R_0-1.0Ss_{WE}-1.0Hs_{WE}-0.4Ss_{DU}-0.4Hs_{DU}$
	3 - 7	$GP+H_s+R_0+1.0Ss_{SN}+1.0Hs_{SN}-0.4Ss_{DU}-0.4Hs_{DU}$
	3 - 8	$GP+H_s+R_0-1.0Ss_{SN}-1.0Hs_{SN}-0.4Ss_{DU}-0.4Hs_{DU}$
	3 - 9	$GP+H_s+R_0+0.4Ss_{WE}+0.4Hs_{WE}+1.0Ss_{DU}+1.0Hs_{DU}$
	3 - 10	$GP+H_s+R_0-0.4Ss_{WE}-0.4Hs_{WE}+1.0Ss_{DU}+1.0Hs_{DU}$
	3 - 11	$GP+H_s+R_0+0.4Ss_{SN}+0.4Hs_{SN}+1.0Ss_{DU}+1.0Hs_{DU}$
	3 - 12	$GP+H_s+R_0-0.4Ss_{SN}-0.4Hs_{SN}+1.0Ss_{DU}+1.0Hs_{DU}$
	3 - 13	$GP+H_s+R_0+0.4Ss_{WE}+0.4Hs_{WE}-1.0Ss_{DU}-1.0Hs_{DU}$
	3 - 14	$GP+H_s+R_0-0.4Ss_{WE}-0.4Hs_{WE}-1.0Ss_{DU}-1.0Hs_{DU}$
	3 - 15	$GP+H_s+R_0+0.4Ss_{SN}+0.4Hs_{SN}-1.0Ss_{DU}-1.0Hs_{DU}$
	3 - 16	$GP+H_s+R_0-0.4Ss_{SN}-0.4Hs_{SN}-1.0Ss_{DU}-1.0Hs_{DU}$

3.1.8.6　評価方法

使用済燃料プールの壁の評価は，添付書類「Ｖ-2-4-2-1　使用済燃料プールの耐震性についての計算書」の「3.5.2　断面の評価方法」に示す方法と同一である。

3.1.8.7　評価結果

断面の評価結果を以下に示す。また，使用済燃料プールの壁の配筋一覧を表 3.1.8-3 に示す。

断面の評価結果を記載する要素は，軸力，曲げモーメント及び面外せん断力に対する評価において，発生値に対する許容値の割合が最小となる要素とする。

選定した要素の位置を図 3.1.8-6 及び図 3.1.8-7 に，評価結果を表 3.1.8-4 に示す。

S_s地震時における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにおいて，水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する評価結果と水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する評価結果を比較すると，水平 2 方向の地震力の影響により解析結果の値は増加傾向にあり，一部最大となる要素が変わるものもあるが，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる軸力，曲げモーメント及び面外せん断力に対する評価における発生値は各許容値を超えないことを確認した。

表 3.1.8-3　配筋一覧

部位	レベル EL.（m）	壁厚 （cm）	配筋	
			縦筋	横筋
北側壁	34.689～ 39.191	200	D35@200　2 段　内 D29@200　2 段　外	D29@200　2 段　内外共
	39.191～ 46.5	200	D29@200　2 段　内外共	D29@200　2 段　内外共
東側壁	34.689～ 39.191	215.4	D35@200　2 段　内 D29@200　2 段　外	D29@200　2 段　内外共
	39.191～ 46.5	215.4	D29@200　2 段　内外共	D29@200　2 段　内外共
南側壁	34.689～ 46.5	157.6	D38@200　2 段　内外共	D38@200　2 段　内外共
西側壁	34.689～ 39.191	215.4	D35@200　2 段　内 D29@200　2 段　外	D29@200　2 段　内外共
	39.191～ 41.547	215.4	D29@200　2 段　内外共	D29@200　2 段　内外共
	41.547～ 43.198	137.2	D29@200　2 段　内外共	D29@200　2 段　内外共
	43.198～ 46.5	137.2	D29@200　2 段　内外共	D29@150　2 段　内外共

(a) 北側壁

(b) 東側壁

図 3.1.8-6（1／2）　解析結果を記載する要素の位置（水平 2 方向）

(c) 南側壁

(d) 西側壁

図 3.1.8-6 (2／2)　解析結果を記載する要素の位置（水平 2 方向）

(a) 北側壁

(b) 東側壁

図 3.1.8-7（1／2）　解析結果を記載する要素の位置（水平 1 方向）

(c) 南側壁

(d) 西側壁

図 3.1.8-7 (2／2)　解析結果を記載する要素の位置（水平 1 方向）

表 3.1.8-4（1／2）　使用済燃料プールの壁の評価結果（Ｓ$_s$地震時）

（a）水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せ

		評価項目	要素位置	組合せケース	解析結果	許容値	備考
軸力＋曲げモーメント＋面内せん断力	北側壁	コンクリート（×10^{-3}）	2219	4 - 9	0.135	3.00	圧縮側
		鉄筋（×10^{-3}）	2272	4 - 15	1.78	5.00	引張側
	東側壁	コンクリート（×10^{-3}）	1590	4 - 4	0.148	3.00	圧縮側
		鉄筋（×10^{-3}）	1590	4 - 16	1.93	5.00	引張側
	南側壁	コンクリート（×10^{-3}）	3055	4 - 16	0.337	3.00	圧縮側
		鉄筋（×10^{-3}）	3037	4 - 14	1.60	5.00	引張側
	西側壁	コンクリート（×10^{-3}）	1090	4 - 1	0.159	3.00	圧縮側
		鉄筋（×10^{-3}）	1046	4 - 9	1.69	5.00	引張側
軸力	北側壁	圧縮応力度（N/mm^2）	2272	4 - 3	0.716	14.7	
	東側壁	圧縮応力度（N/mm^2）	1581	4 - 12	1.36	14.7	
	南側壁	圧縮応力度（N/mm^2）	3043	4 - 10	3.22	14.7	
	西側壁	圧縮応力度（N/mm^2）	1090	4 - 9	1.55	14.7	
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度（N/mm^2）	2209	4 - 10	0.483	1.61	
	東側壁	面内せん断応力度（N/mm^2）	1590	4 - 16	1.15	1.47	
	南側壁	面内せん断応力度（N/mm^2）	3037	4 - 14	2.11	3.81	
	西側壁	面内せん断応力度（N/mm^2）	1087	4 - 13	1.13	1.86	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度（N/mm^2）	2228	4 - 9	0.621	1.31	
	東側壁	面外せん断応力度（N/mm^2）	1536	4 - 15	0.439	1.37	
	南側壁	面外せん断応力度（N/mm^2）	7801	4 - 11	1.11	2.05	
	西側壁	面外せん断応力度（N/mm^2）	1033	4 - 10	0.470	1.32	

表 3.1.8-4（2／2）　使用済燃料プールの壁の評価結果（S_s地震時）

(b) 水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せ

		評価項目	要素位置	組合せケース	解析結果	許容値	備考
軸力 ＋ 曲げモーメント ＋ 面内せん断力	北側壁	コンクリート （×10^{-3}）	2219	3 - 16	0.142	3.00	圧縮側
		鉄筋 （×10^{-3}）	2272	3 - 5	1.77	5.00	引張側
	東側壁	コンクリート （×10^{-3}）	1535	3 - 5	0.135	3.00	圧縮側
		鉄筋 （×10^{-3}）	1590	3 - 7	1.78	5.00	引張側
	南側壁	コンクリート （×10^{-3}）	3055	3 - 15	0.393	3.00	圧縮側
		鉄筋 （×10^{-3}）	3037	3 - 5	1.46	5.00	引張側
	西側壁	コンクリート （×10^{-3}）	1035	3 - 6	0.145	3.00	圧縮側
		鉄筋 （×10^{-3}）	1046	3 - 8	1.58	5.00	引張側
軸力	北側壁	圧縮応力度 （N/mm^2）	2272	3 - 2	0.701	14.7	
	東側壁	圧縮応力度 （N/mm^2）	1581	3 - 8	1.36	14.7	
	南側壁	圧縮応力度 （N/mm^2）	3055	3 - 15	3.15	14.7	
	西側壁	圧縮応力度 （N/mm^2）	1090	3 - 8	1.54	14.7	
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度 （N/mm^2）	2268	3 - 13	0.648	1.97	
	東側壁	面内せん断応力度 （N/mm^2）	1590	3 - 7	1.06	1.50	
	南側壁	面内せん断応力度 （N/mm^2）	3037	3 - 5	2.08	3.93	
	西側壁	面内せん断応力度 （N/mm^2）	1087	3 - 7	1.10	1.90	
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度 （N/mm^2）	2228	3 - 16	0.666	1.28	
	東側壁	面外せん断応力度 （N/mm^2）	1546	3 - 13	0.424	1.27	
	南側壁	面外せん断応力度 （N/mm^2）	7803	3 - 15	0.895	1.60	
	西側壁	面外せん断応力度 （N/mm^2）	1033	3 - 6	0.457	1.32	

3.1.8.8　原子炉建屋における改造工事に伴う重量増加を反映した検討

3.1.8.7 項の評価結果に対して，設備の補強や追加等の改造工事に伴い重量が増加することの影響についての検討を行う。

(1)　検討方針

「3.1.8.2　検討方針」に示す検討方針と同様である。ただし，設備の補強や追加等の改造工事に伴う重量増加を考慮した割増係数を 3.1.8.7 項の評価結果に乗じて構造健全性の検討を行う。

(2)　検討結果

使用済燃料プールは，主たる水平地震時荷重として，せん断力分配解析による内部ボックス壁（I／W）の EL.46.5 m～EL.34.7 m 位置（要素番号（3），(4)）でのせん断力を考慮し，鉛直震度として EL.46.5 m～EL.34.7 m 位置（質点番号 3，4，5）の鉛直方向最大応答加速度より算出した値を考慮することから，NS 方向及び EW 方向は要素番号（3），(4）の最大応答せん断力の応答比率の最大値を，UD 方向は質点番号 3，4，5 の最大応答加速度の応答比率の最大値を応答比率とし，各方向の応答比率の最大値を割増係数として設定し，応力評価結果の発生値に乗じて各許容値を超えないことを確認する。

要素番号（3），(4）の最大応答せん断力の応答比率及び質点番号 3，4，5 の最大応答加速度の応答比率，並びに割増係数をを表 3.1.8-5 に示す。

表 3.1.8-6 に評価結果を示す。重量増加を考慮した割増係数を乗じた結果においても，各許容値を超えないことを確認した。

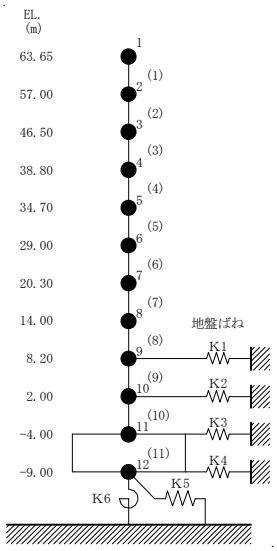
表 3.1.8-5　重量増加を考慮した割増係数：使用済燃料プール

	NS 方向	EW 方向	UD 方向
要素番号（3），（4）の最大値	1.03*1	1.04*1	－
質点番号 3，4，5 の最大値	－	－	1.00*2
割増係数	1.04*3		

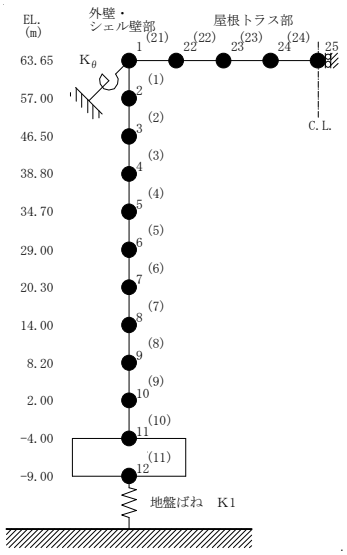
注記　＊1：添付書類「Ⅴ2-2-1　原子炉建屋の地震応答計算書」別紙 1 に示す要素番号（3），（4）の最大応答せん断力の応答比率の最大値

＊2：添付書類「Ⅴ2-2-1　原子炉建屋の地震応答計算書」別紙 1 に示す質点番号 3，4，5 の最大応答加速度の応答比率の最大値

＊3：各方向の応答比率の最大値



NS，EW 方向



UD 方向

表 3.1.8-6　重量増加を考慮した評価結果（S_s地震時）

(a) 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せ

		評価項目	要素位置	解析結果①	割増係数②	①×②	許容値
軸力＋曲げモーメント＋面内せん断力※	北側壁	コンクリート（×10^{-3}）	2219	0.135	1.04	0.141	3.00
		鉄筋（×10^{-3}）	2272	1.78	1.04	1.86	5.00
	東側壁	コンクリート（×10^{-3}）	1590	0.148	1.04	0.154	3.00
		鉄筋（×10^{-3}）	1590	1.93	1.04	2.01	5.00
	南側壁	コンクリート（×10^{-3}）	3055	0.337	1.04	0.351	3.00
		鉄筋（×10^{-3}）	3037	1.60	1.04	1.67	5.00
	西側壁	コンクリート（×10^{-3}）	1090	0.159	1.04	0.166	3.00
		鉄筋（×10^{-3}）	1046	1.69	1.04	1.76	5.00
軸力	北側壁	圧縮応力度（N/mm^2）	2272	0.716	1.04	0.745	14.7
	東側壁	圧縮応力度（N/mm^2）	1581	1.36	1.04	1.42	14.7
	南側壁	圧縮応力度（N/mm^2）	3043	3.22	1.04	3.35	14.7
	西側壁	圧縮応力度（N/mm^2）	1090	1.55	1.04	1.61	14.7
面内せん断力	北側壁	面内せん断応力度（N/mm^2）	2209	0.483	1.04	0.502	1.61
	東側壁	面内せん断応力度（N/mm^2）	1590	1.15	1.04	1.20	1.47
	南側壁	面内せん断応力度（N/mm^2）	3037	2.11	1.04	2.20	3.81
	西側壁	面内せん断応力度（N/mm^2）	1087	1.13	1.04	1.18	1.86
面外せん断力	北側壁	面外せん断応力度（N/mm^2）	2228	0.621	1.04	0.646	1.31
	東側壁	面外せん断応力度（N/mm^2）	1536	0.439	1.04	0.457	1.37
	南側壁	面外せん断応力度（N/mm^2）	7801	1.11	1.04	1.16	2.05
	西側壁	面外せん断応力度（N/mm^2）	1033	0.470	1.04	0.489	1.32

3.1.8.9　検討のまとめ

使用済燃料プールの壁は，面内方向の荷重を負担しつつ，面外方向の水圧等の荷重が作用する部位であるため，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対して，3 次元ＦＥＭモデルを用いた弾性応力解析を実施した。

検討の結果，水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する評価結果と水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する評価結果を比較すると，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにより，許容値に対する解析結果の割合は，水平 2 方向の地震力の影響により割合が最大となる要素位置が変わり，解析結果の値は増加傾向であるものの，S_s地震時における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対して，軸力，曲げモーメント及び面外せん断力に対する鉄筋及びコンクリートのひずみ，軸力による圧縮応力度，面内せん断力並びに面外せん断力が，各許容値を超えないことを確認した。

また，原子炉建屋における改造工事に伴う重量増加を反映した地震応答解析に基づき影響について検討を行い，重量増加を考慮した場合においても安全上問題とならないことを確認した。

以上のことから，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対し，使用済燃料プールの壁が有する耐震性への影響はないことを確認した。

別紙１　評価部位の抽出に関する説明資料

目次

1.　構成部位の整理及び水平2方向及び鉛直地震力による影響確認が必要な部位の抽出に関する整理表 ..... 別紙 1-1
2.　対象建屋の図面 ..... 別紙 1-5
2.1　原子炉建屋 ..... 別紙 1-6
2.2　主排気筒 ..... 別紙 1-17
2.3　非常用ガス処理系配管支持架構 ..... 別紙 1-19
2.4　使用済燃料乾式貯蔵建屋 ..... 別紙 1-22
2.5　格納容器圧力逃がし装置格納槽 ..... 別紙 1-24
2.6　緊急時対策所建屋 ..... 別紙 1-26
2.7　タービン建屋 ..... 別紙 1-30
2.8　サービス建屋 ..... 別紙 1-36
3.　代表部位の選定プロセス ..... 別紙 1-44

1. 構成部位の整理及び水平 2 方向及び鉛直地震力による影響確認が必要な部位の抽出に関する整理表

抽出に関する整理表を表 1-1～表 1-3 に示す。

表 1-1　建物・構築物における耐震評価上の構成部材の整理

耐震性評価部位		原子炉建屋	主排気筒	非常用ガス処理系配管支持架構	使用済燃料乾式貯蔵建屋	格納容器圧力逃がし装置格納槽	緊急時対策所建屋	タービン建屋	サービス建屋
		RC 造及びＳ造	Ｓ造	Ｓ造	RC 造及びＳ造	RC 造	RC 造	RC 造及びＳ造	RC 造及びＳ造
柱	一般部	○	－	－	○	－	○	○	○
	隅部	○	○	○	○	－	○	○	○
	地下部	○	－	－	－	－	－	○	－
	筒身	－	○	－	－	－	－	－	－
梁	一般部	○	○	○	○	－	○	○	○
	地下部	○	－	－	－	－	－	○	－
	鉄骨ﾄﾗｽ	○	－	－	○	－	－	○	－
壁	一般部	○	－	－	○	○	○	○	○
	地下部	○	－	－	－	○	－	○	－
	鉄骨ﾌﾞﾚｰｽ	－	○	○	－	－	－	－	○
床屋根	一般部	○	－	－	○	○	○	○	○
基礎	基礎スラブ	○	－	○	○	○	○	○	－
	ケーソン	－	－	－	－	－	－	○	－
	基礎梁	－	○	－	－	－	－	－	○
	杭	－	○	○	○	－	○	○	○

凡例　○：対象の構造部材有り，―：対象の部材なし

表 1-2　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認が必要な部位の抽出（荷重の組合せによる応答特性によるスクリーニング）

耐震性評価部位		原子炉建屋	主排気筒	非常用ガス処理系配管支持架構	使用済燃料乾式貯蔵建屋	格納容器圧力逃がし装置格納槽	緊急時対策所建屋	タービン建屋	サービス建屋
		RC 造及び S 造	S 造	S 造	RC 造及び S 造	RC 造	RC 造	RC 造及び S 造	RC 造及び S 造
柱	一般部	該当なし	－	－	該当なし	－	該当なし	該当なし	該当なし
	隅部	該当なし	①－1 要	①－1 要	該当なし	－	該当なし	該当なし	不要 (*1)
	地下部	該当なし	－	－	－	－	－	該当なし	－
	筒身	－	該当なし	－	－	－	－	－	－
梁	一般部	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	－	該当なし	該当なし	該当なし
	地下部	該当なし	－	－	－	－	－	該当なし	－
	鉄骨ﾄﾗｽ	該当なし	－	－	該当なし	－	－	該当なし	－
壁	一般部	①－2 要（ﾌﾟｰﾙ側壁）	－	－	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし
	地下部	①－2 要	－	－	－	①－2 要	－	①－2 要	－
	鉄骨ﾌﾞﾚｰｽ	－	該当なし	該当なし	－	－	－	－	不要 (*2)
床屋根	一般部	該当なし	－	－	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし	該当なし
基礎	基礎スラブ	①－1 要	－	①－1 要	①－1 要	①－1 要	①－1 要	不要 (*2)	－
	ケーソン	－	－	－	－	－	－	不要 (*2)	－
	基礎梁	－	該当なし	－	－	－	－	－	不要 (*2)
	杭	－	①－1 要	①－1 要	①－1 要	－	①－1 要	不要 (*2)	不要 (*2)

凡例　要：評価必要，不要：評価不要，①－1：応答特性「直交する水平 2 方向の荷重が応力として集中」，①－2：応答特性「面内荷重を負担しつつ，面外方向の荷重が作用」

注記　＊1:上位クラス建物・構築物への波及的影響防止のための評価対象建屋であり，隣接する原子炉建屋への衝突方向には耐震壁追設補強により，隅柱に軸応力が集中しても波及的影響評価に影響がないため，不要とする。

＊2: 上位クラス建物・構築物への波及的影響防止のための評価対象建屋は，衝突可否判断が基本となるため，せん断及び曲げ変形評価を行うこととなり，耐震壁を主たる評価対象部位としている。また，波及的影響評価において杭及びケーソンについては損傷を想定した評価をしている。そのため，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対しても，耐震評価への影響が想定される部位として抽出対象に該当しない。

表 1-3　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認が必要な部位の抽出
(3 次元的な応答特性を踏まえたスクリーニング)

耐震性評価部位		原子炉建屋	主排気筒	非常用ガス処理系配管支持架構	使用済燃料乾式貯蔵建屋	格納容器圧力逃がし装置格納槽	緊急時対策所建屋	タービン建屋	サービス建屋
		RC 造及び S 造	S 造	S 造	RC 造及び S 造	RC 造	RC 造	RC 造及び S 造	RC 造及び S 造
柱	一般部	不要	－	－	不要	－	不要	不要	不要
	隅部	不要	要	要	不要	－	不要	不要	不要
	地下部	不要	－	－	－	－	－	不要	－
	筒身	－	不要	－	－	－	－	－	－
梁	一般部	不要	不要	②－2	不要	－	不要	不要	不要
	地下部	不要	－	－	－	－	－	不要	－
	鉄骨ﾄﾗｽ	不要	－	－	不要	－	－	不要	－
壁	一般部	要（ﾌﾟｰﾙ側壁） ②－1（燃料取替フロア壁）	－	－	不要	不要	不要	不要（*）	不要
	地下部	要	－	－	－	要	－	要	－
	鉄骨ﾌﾞﾚｰｽ	－	不要	②－2	－	－	－	－	不要
床屋根	一般部	不要	－	－	不要	不要	不要	不要	不要
基礎	基礎スラブ	要	－	要	要	要	要	不要	－
	ケーソン	－	－	－	－	－	－	不要	－
	基礎梁	－	不要	－	－	－	－	－	不要
	杭	－	要	要	要	－	要	不要	不要

凡例　要：荷重の組合せによる応答特性でのスクリーニングで抽出済み，不要：評価不要，②－1：応答特性「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」，②－2：応答特性「加振方向以外の方向に励起される振動」

注記　＊：上部階の壁は複数スパンにまたがって直交方向に壁及び大梁がなく，面内方向荷重に加え，面外慣性力の影響が大きいと考えられるが下部に上位クラス施設がないため不要とする。

2.　対象建屋の図面

「水平 2 方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する影響評価結果」において，「建物・構築物における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価部位の抽出」のプロセスに用いた対象建屋の図面を図 2-1～図 2-45 に記載する。

なお，上記にて評価部位として抽出されなかった部位の考え方を表 2-1 に示す。

2.1　原子炉建屋

原子炉建屋の図面を図 2-1～図 2-11 に記載する。

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

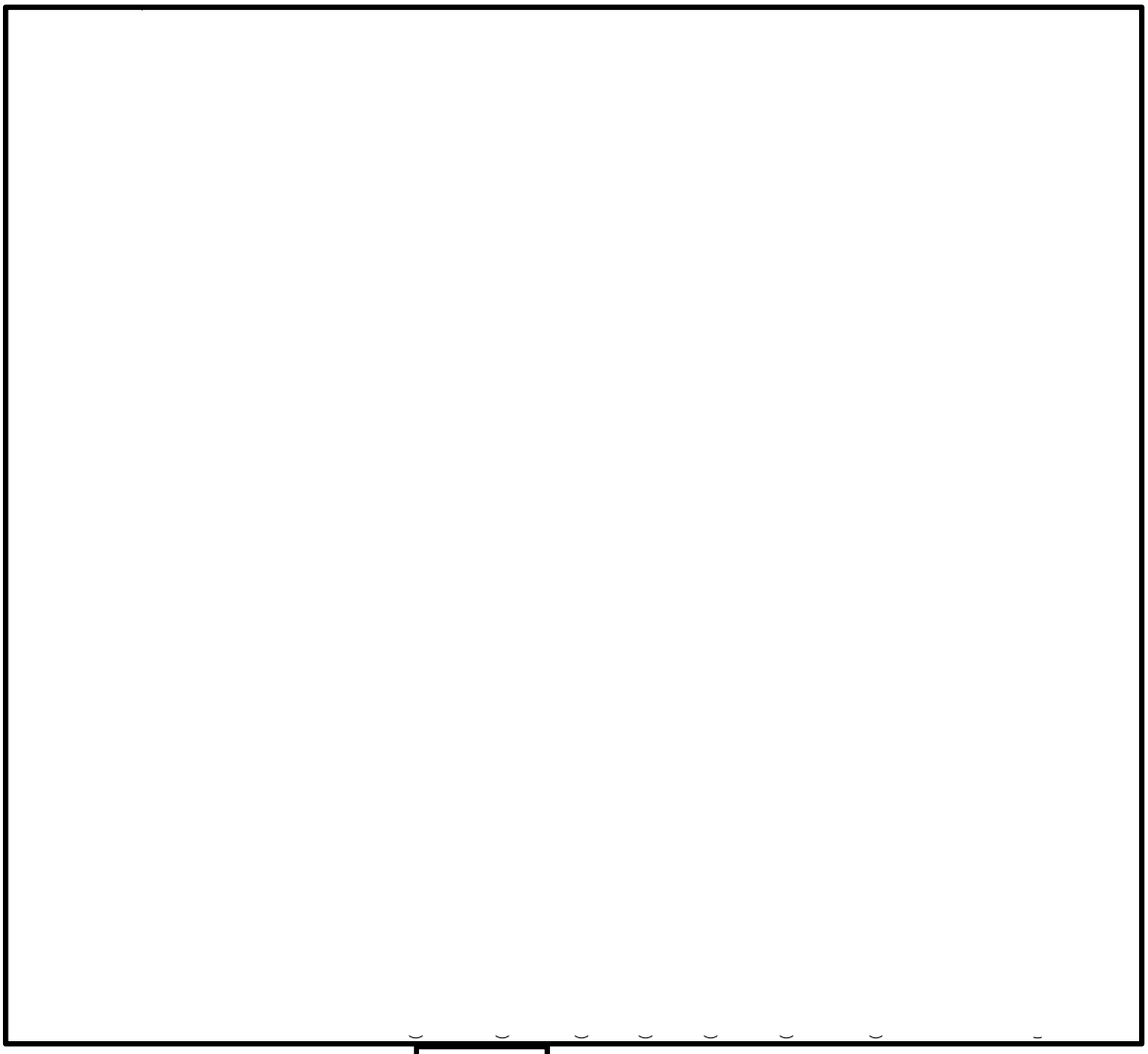


図 2-1 [redacted] の概略平面図（EL. －4.00 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

図 2-2 の概略平面図（EL. －2.00 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

図 2-3 [redacted] の概略平面図（EL. 8.20 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

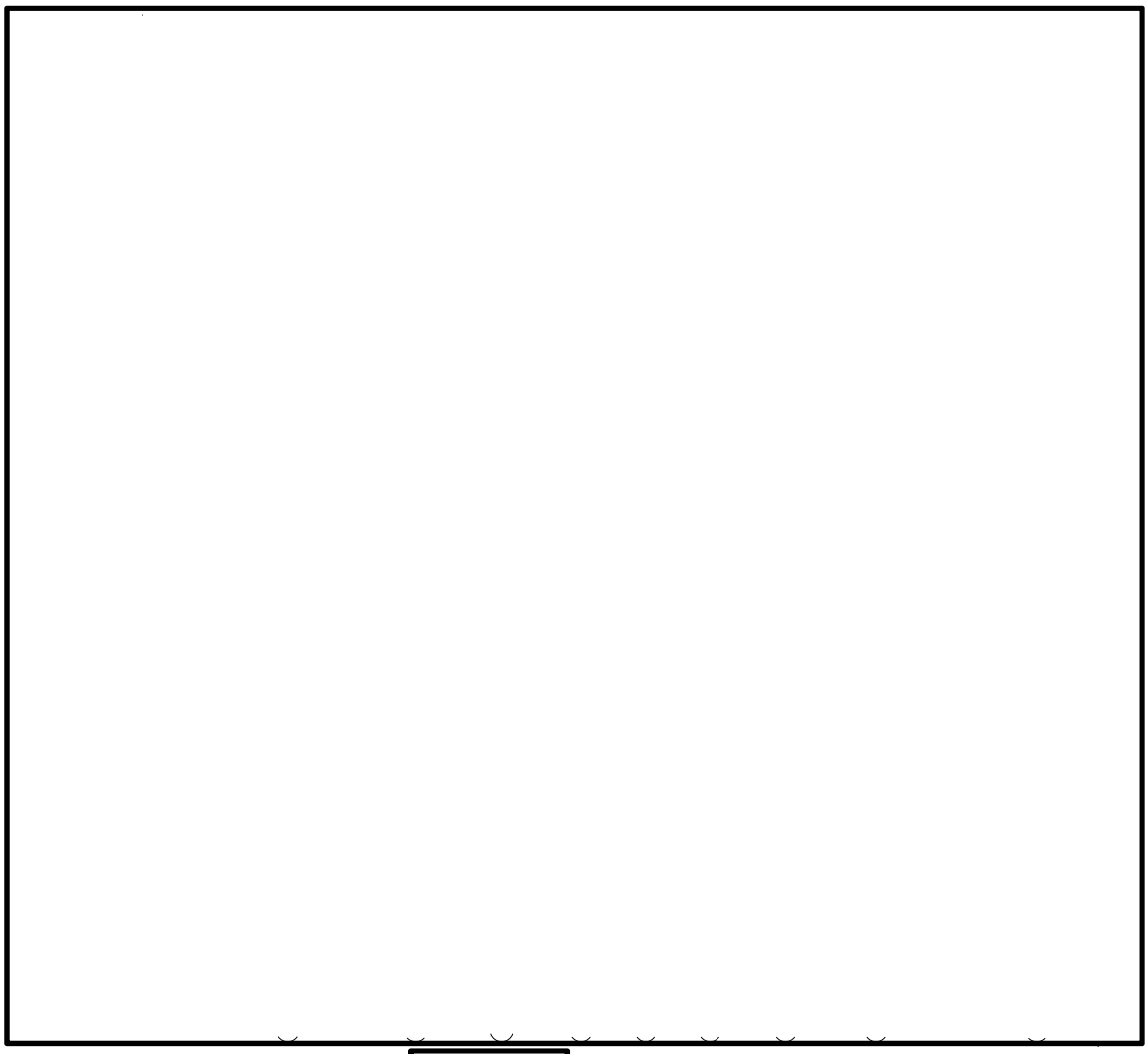


図 2-4 [redacted]の概略平面図（EL. 14.00 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

図 2-5 [redacted]の概略平面図（EL. 20. 30 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

図 2-6 [redacted]の概略平面図（EL. 29.00 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

図 2-7 [redacted]の概略平面図（EL. 38. 80 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

図 2-8 [redacted]の概略平面図（EL. 46.50 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

図 2-9 [redacted]の概略平面図（EL. 57.00 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

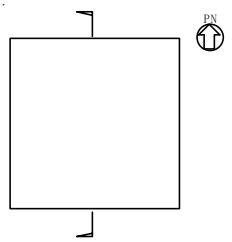


図 2-10　原子炉建屋の概略断面図（NS 方向）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

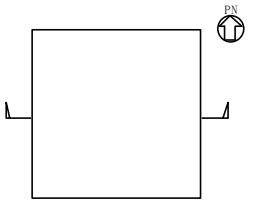


図 2-11　原子炉建屋の概略断面図（EW 方向）

2.2　主排気筒

主排気筒の図面を図 2-12～図 2-13 に記載する。

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

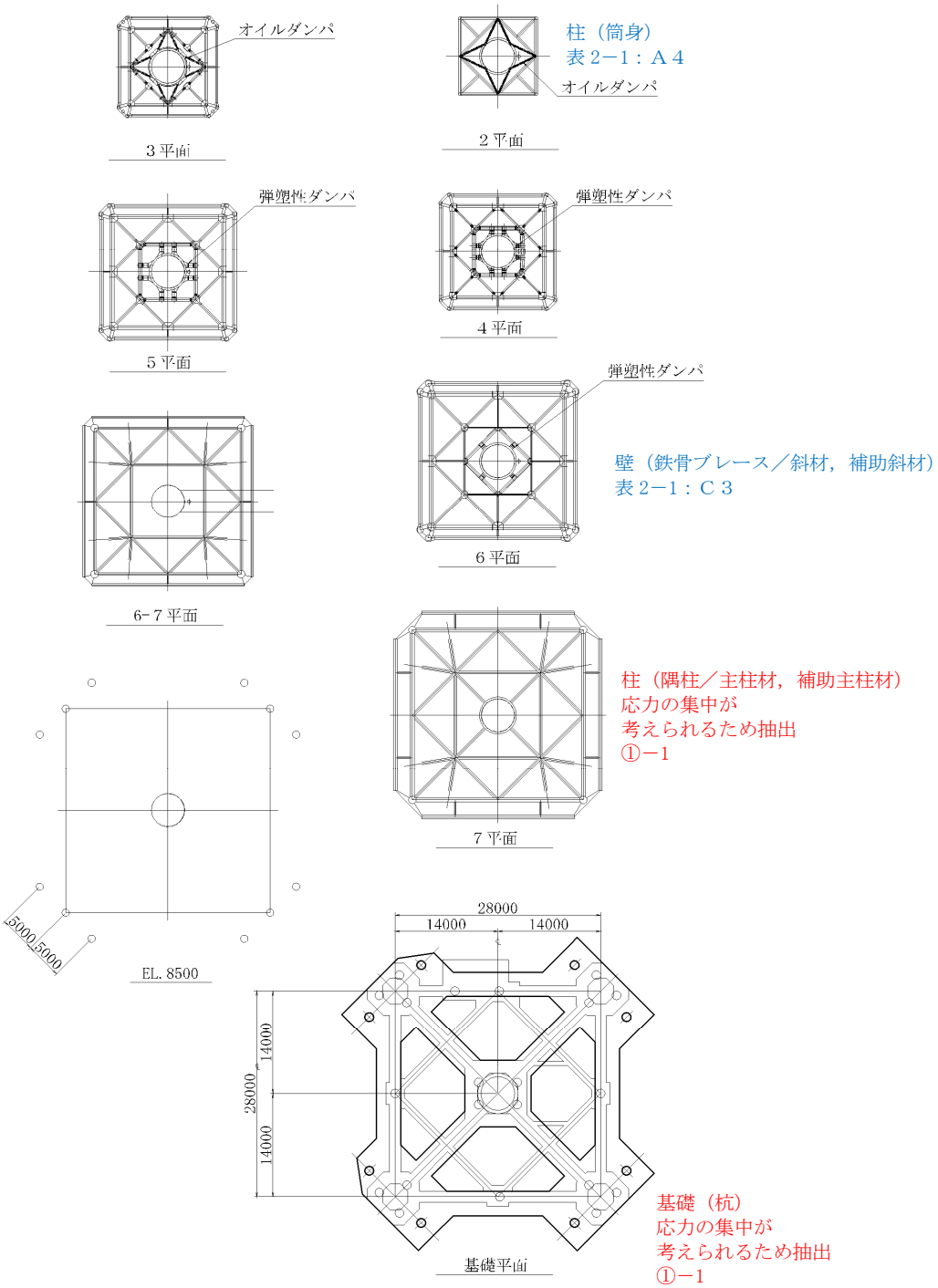


図 2-12　主排気筒の概略平面図

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：３次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

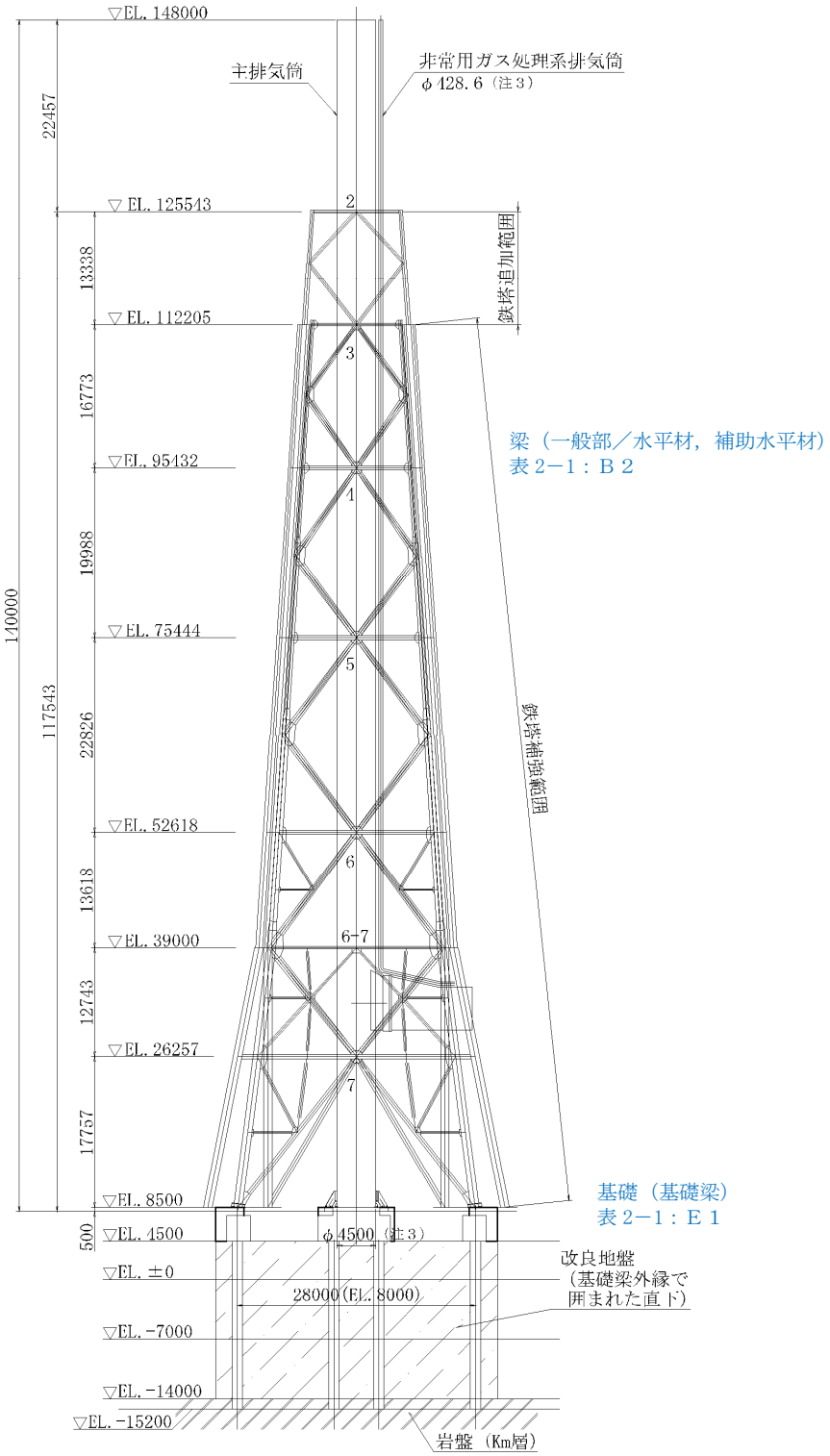


図 2-13　主排気筒の概略側面図

2.3　非常用ガス処理系配管支持架構

非常用ガス処理系配管支持架構の図面を図 2-14～図 2-19 に記載する。

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

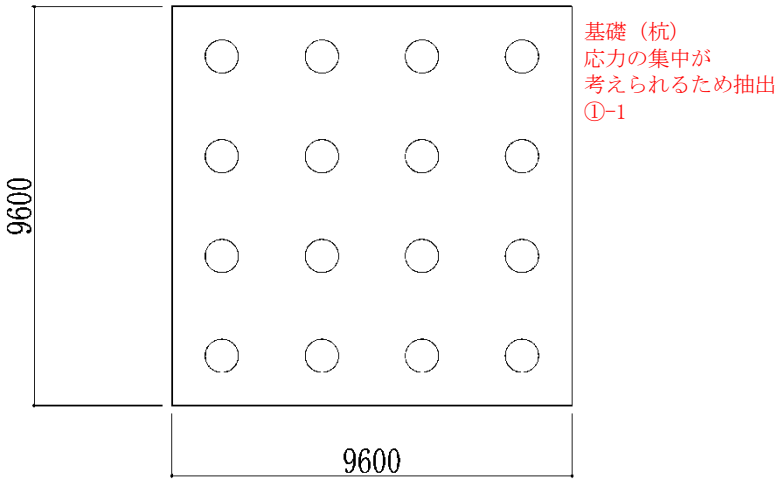


図 2-14　非常用ガス処理系配管支持架構の杭伏図（EL. 5.2 m）

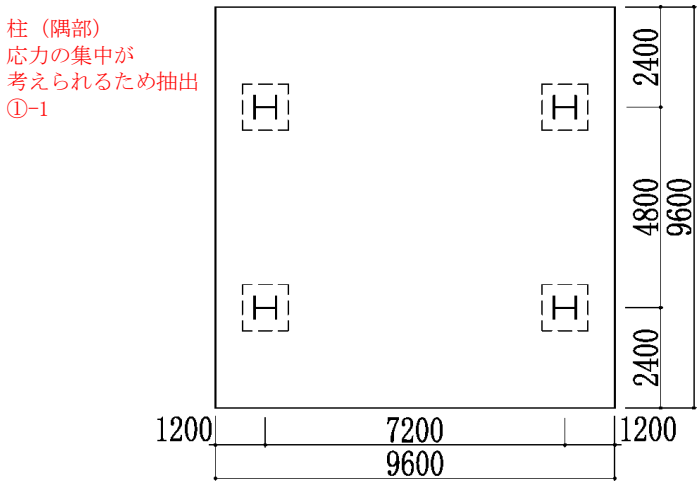


図 2-15　非常用ガス処理系配管支持架構の概略平面図（EL. 7.7 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：３次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

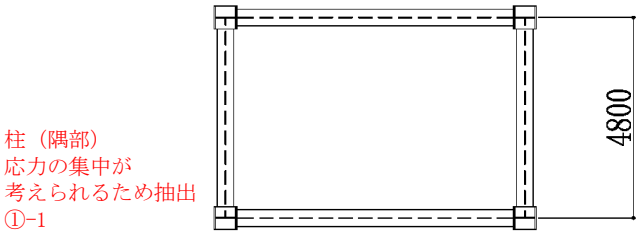


図 2-16　非常用ガス処理系配管支持架構の概略平面図（EL. 14.2 m）

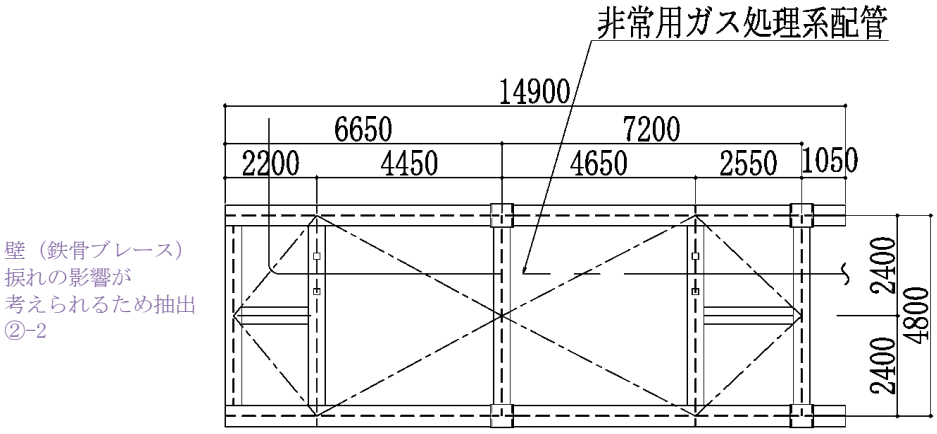


図 2-17　非常用ガス処理系配管支持架構の概略平面図（EL. 20.8 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：３次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

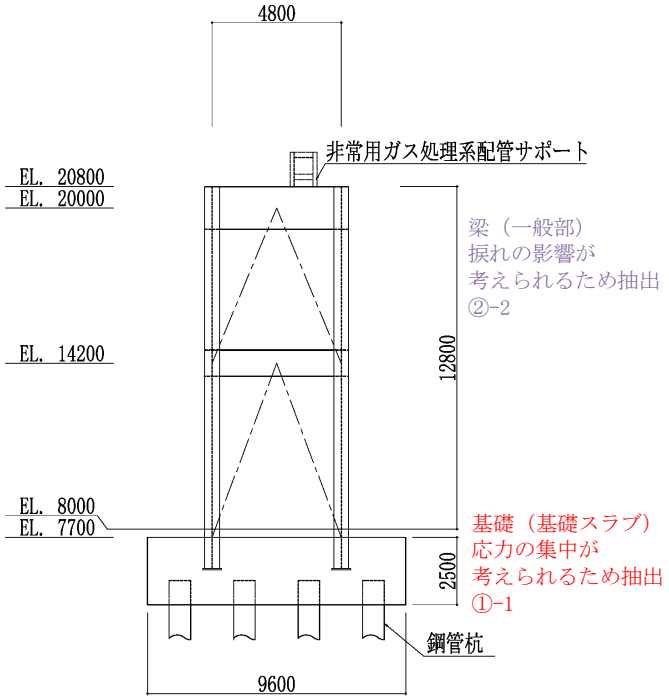


図 2-18　非常用ガス処理系配管支持架構の概略軸組図（NS 方向）

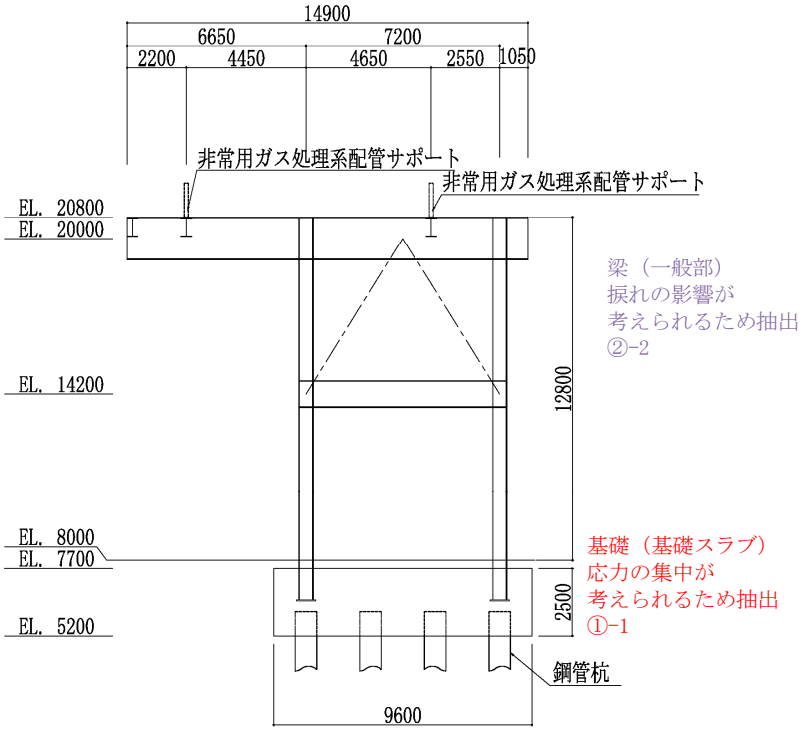
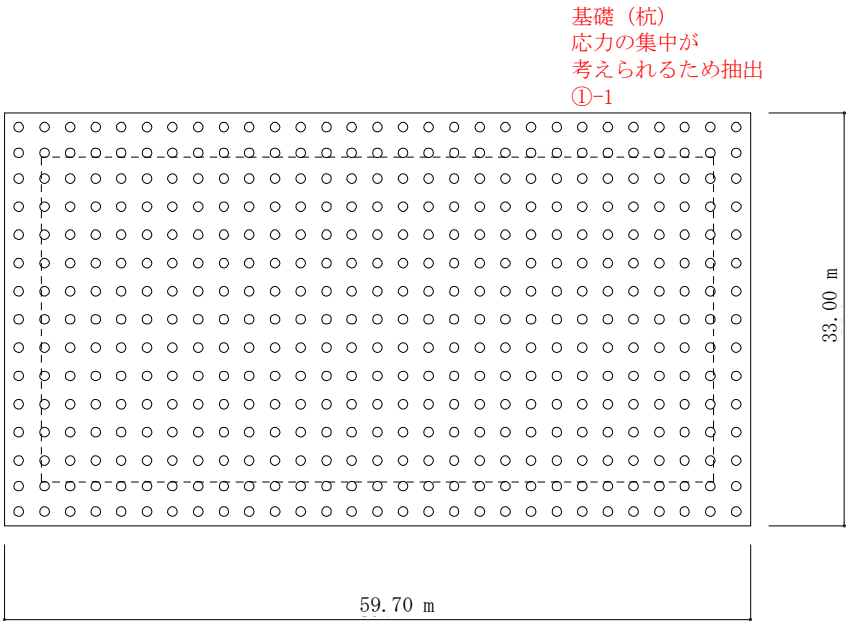


図 2-19　非常用ガス処理系配管支持架構の概略軸組図（EW 方向）

2.4　使用済燃料乾式貯蔵建屋

使用済燃料乾式貯蔵建屋の図面を図 2-20～図 2-23 に記載する。

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：３次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由



凡例　○：杭
：建屋外壁位置

図 2-20　使用済燃料乾式貯蔵建屋の杭伏図（EL.　5.8 m）

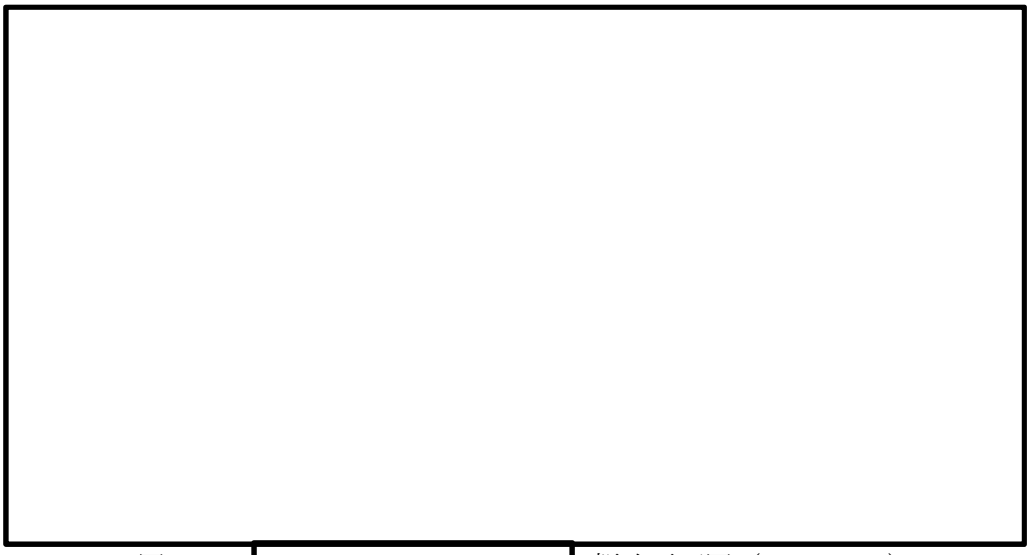


図 2-21　　の概略平面図（EL.　8.3 m）

図 2-22　使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図（NS 方向，A－A 断面）

図 2-23　使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図（EW 方向，B－B 断面）

2.5　格納容器圧力逃がし装置格納槽

格納容器圧力逃がし装置格納槽の図面を図 2-24～図 2-26 に記載する。

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

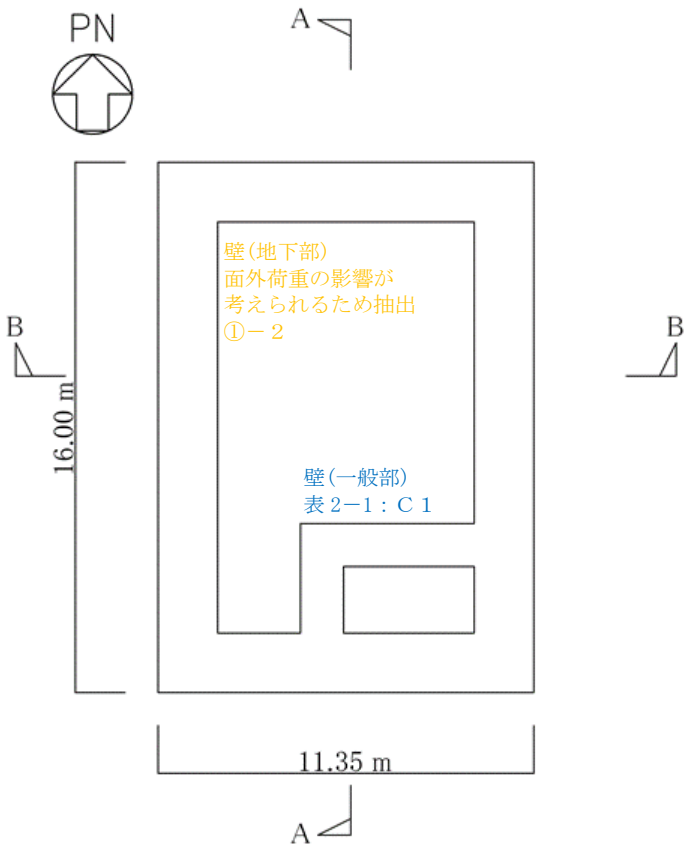


図 2-24　格納容器圧力逃がし装置格納槽の概略平面図（EL.－12.8 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：３次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

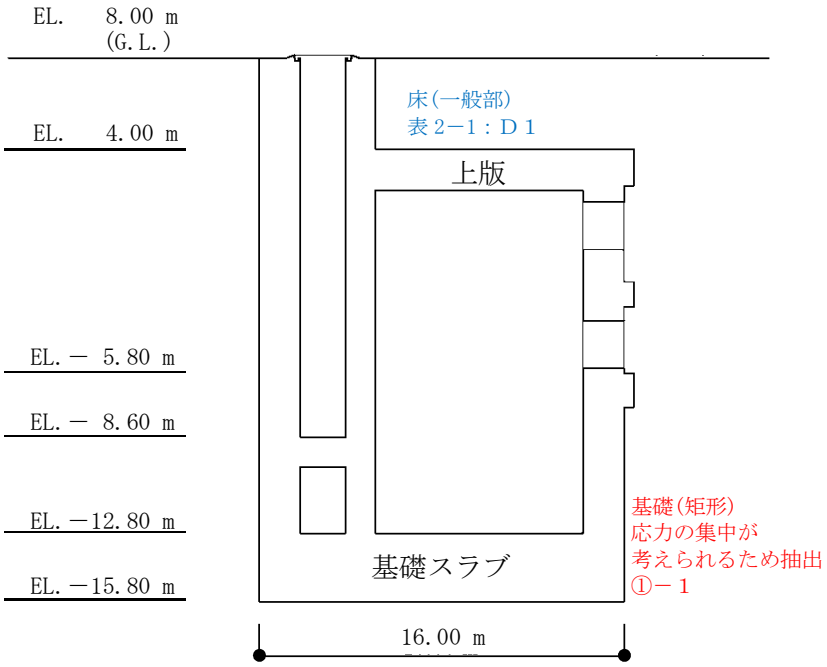


図 2-25　格納容器圧力逃がし装置格納槽の概略断面図（NS 方向，A－A 断面）

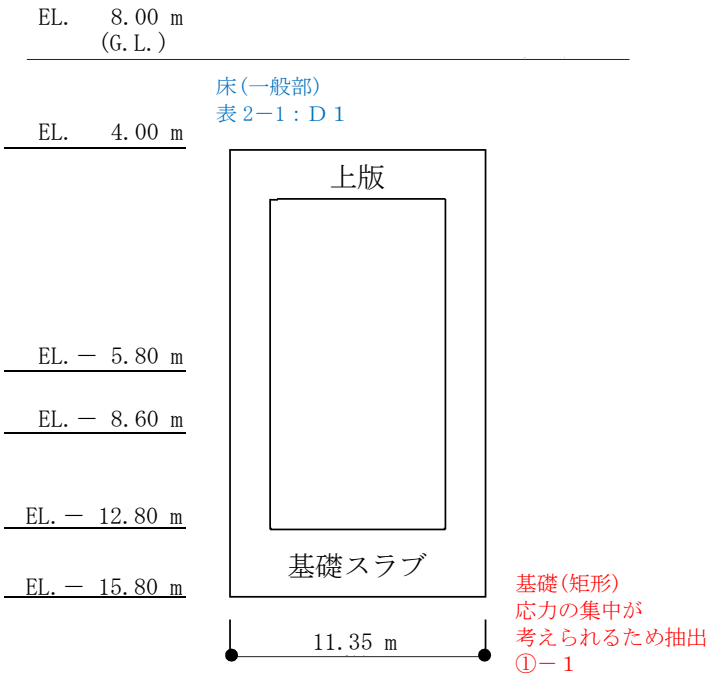


図 2-26　格納容器圧力逃がし装置格納槽の概略断面図（EW 方向，B－B 断面）

2.6　緊急時対策所建屋

緊急時対策所建屋の図面を図 2-27～図 2-33 に記載する。

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：３次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

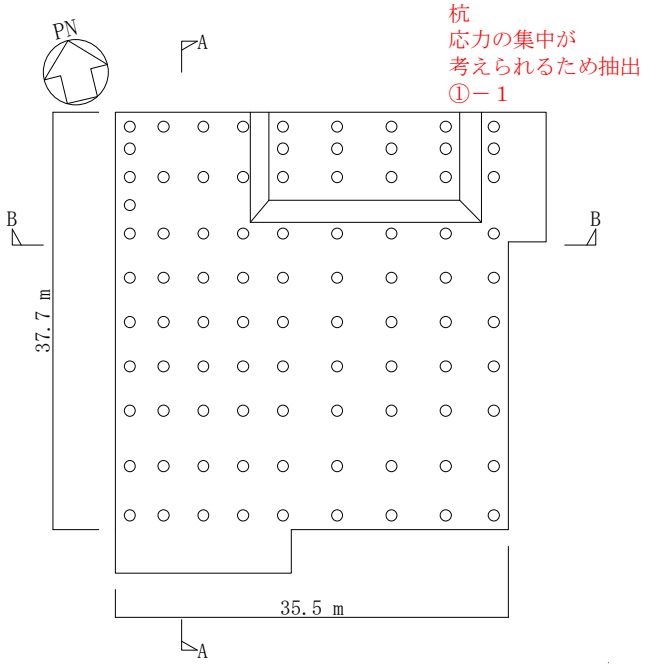


図 2-27　緊急時対策所建屋の概略平面図（EL. 20.8 m）

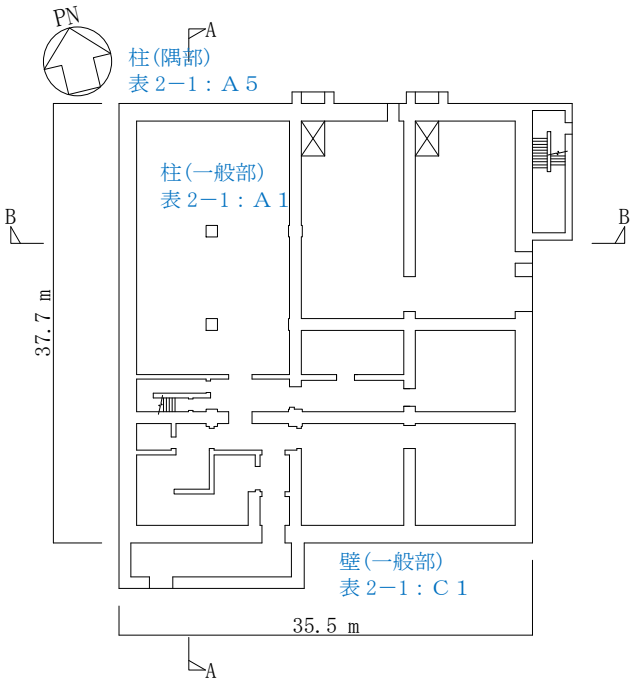


図 2-28　緊急時対策所建屋の概略平面図（EL. 23.3 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：3 次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

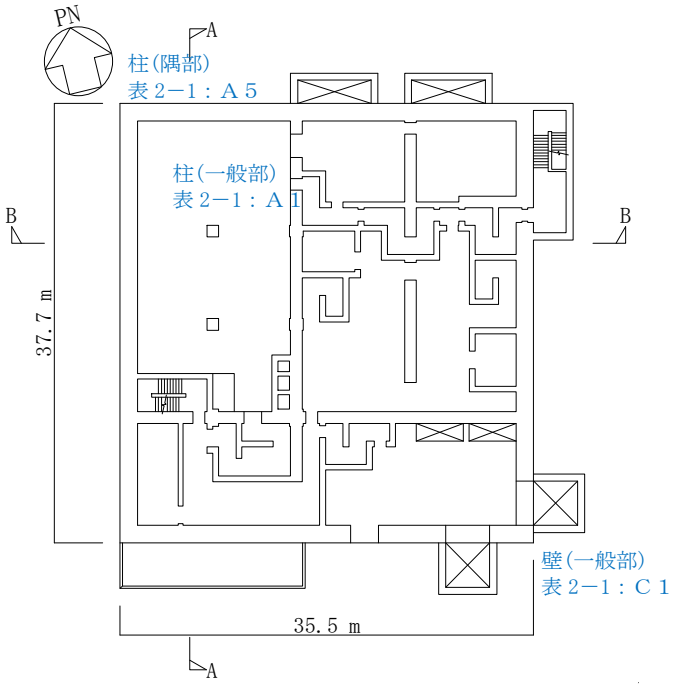


図 2-29　緊急時対策所建屋の概略平面図（EL. 30.3 m）

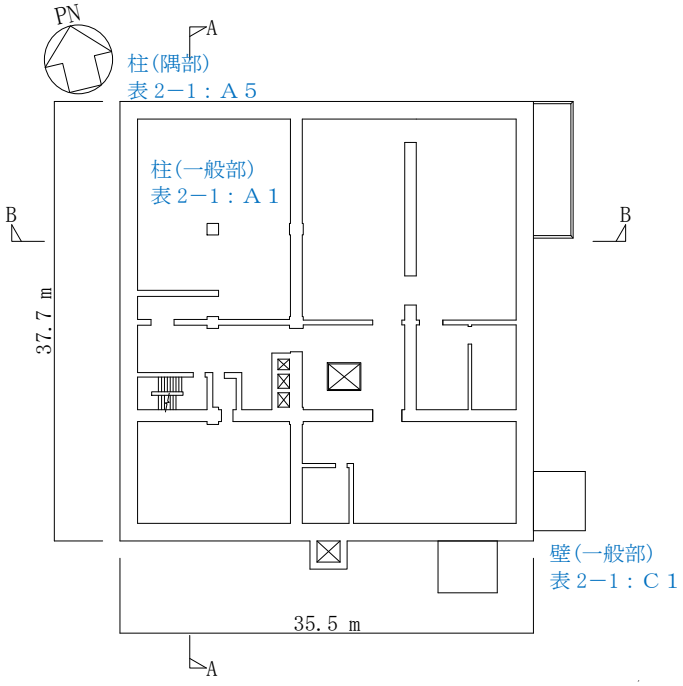


図 2-30　緊急時対策所建屋の概略平面図（EL. 37.0 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：３次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

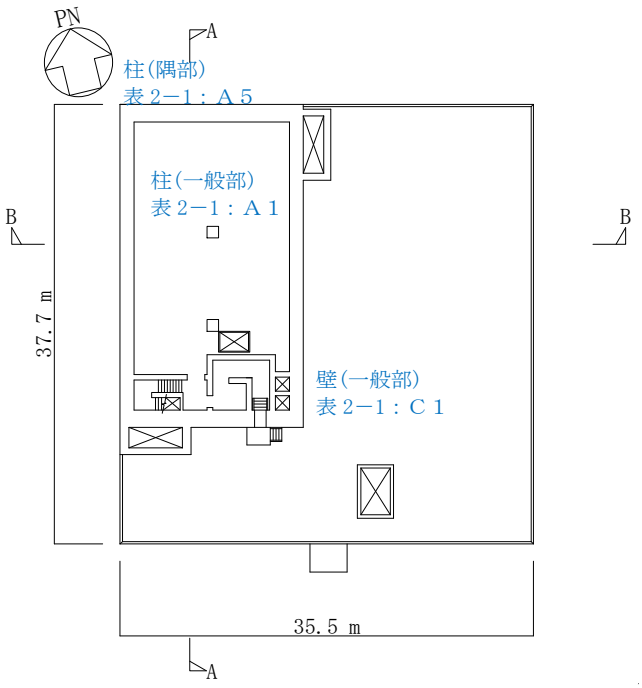


図 2-31　緊急時対策所建屋の概略平面図（EL. 43.5 m）

赤字：①－１で抽出された部位
橙字：①－２で抽出された部位
緑字：②－１で抽出された部位
紫字：②－２で抽出された部位
茶字：３次元ＦＥＭモデルによる精査
青字：抽出されなかった部位及びその理由

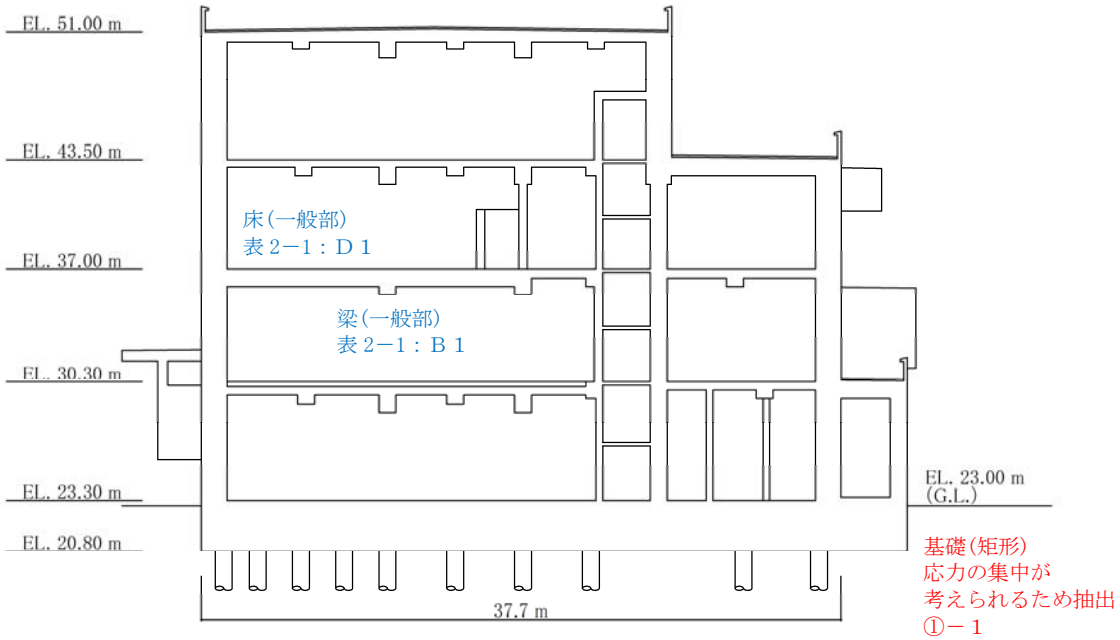


図 2-32　緊急時対策所建屋の概略断面図(NS 方向，A－A 断面)

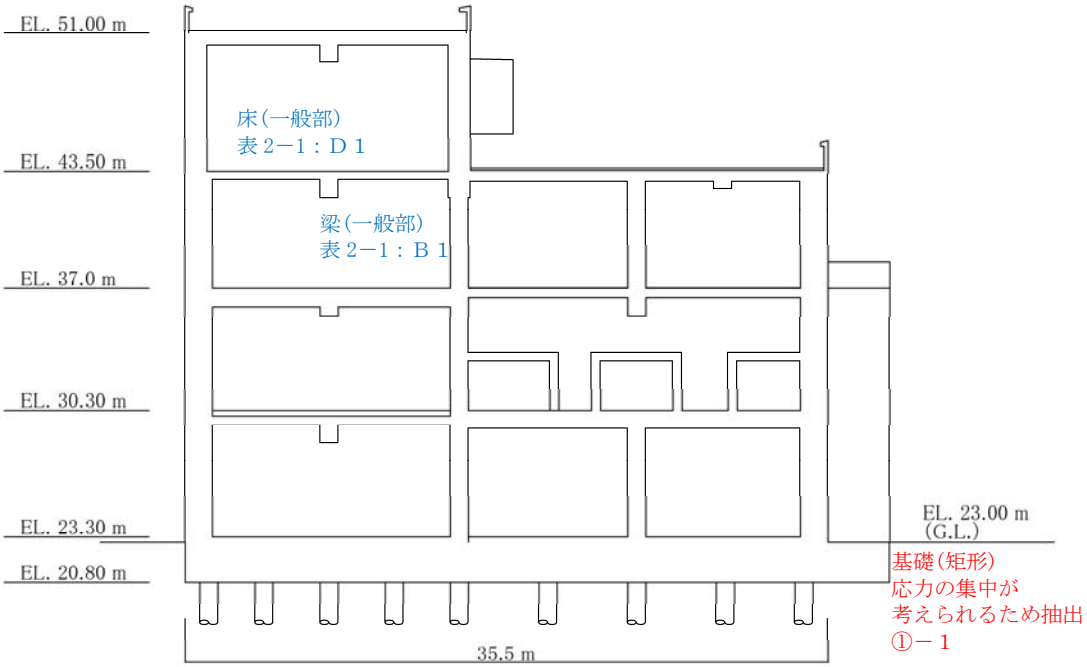


図 2-33　緊急時対策所建屋の概略断面図(EW 方向，B－B 断面)

2.7　タービン建屋

タービン建屋の図面を図 2-34～図 2-39 に記載する。

図 2-34　[redacted]概略平面図（EL. －4.00 m）

図 2-35 の概略平面図（EL. 8.20 m）

図 2-36 の概略平面図（EL. 18.00 m）

図 2-37 [redacted]の概略平面図（EL.28.00 m）

図 2-38　タービン建屋の概略断面図（NS 方向）

図 2-39　タービン建屋の概略断面図（EW 方向）

2.8　サービス建屋

サービス建屋の図面を図 2-40～図 2-45 に記載する。

図 2-40 [redacted]の概略平面図（EL.8.20 m）

図 2-41 の概略平面図（EL. 11.20 m）

図 2-42 の概略平面図（EL. 14.00 m）

図 2-43 の概略平面図（EL. 18.00 m）

図 2-44 の概略平面図（EL.22.00 m）

図 2-45　サービス建屋の概略断面図（EW 方向）

。・

表 2-1　評価部位から除外する基本的な考え方（1/2）

記号	部位		①－1 応力集中	①－2 面外荷重	②－1 面外慣性力	②－2 捩じれ	除外する部位
A 1	柱	一般部 （RC 部）	・中柱は応力が集中することなく該当しない。	・面外荷重が作用する地下部ではない。	・壁付き柱は地震力のほとんどを耐震壁が負担しており，該当しない。 ・独立柱自身の慣性力により影響が生じるような階高を有する柱はないため，該当しない。	・釣り合いよく耐震壁が配置された構造計画を行っており，該当しない。	原子炉建屋 使用済燃料乾式貯蔵建屋 緊急時対策所建屋 タービン建屋 サ**ービス建屋**
A 2		一般部 （S 部） ブレース構造	・中柱は応力が集中することなく該当しない。	・面外荷重が作用する地下部ではない。	・地震力のほとんどをブレースが負担しており，該当しない	・釣り合いよく耐震壁が配置された構造計画を行っており，該当しない。	サービス建屋
A 3		一般部 （S 部） ラーメン構造	・中柱は応力が集中することなく該当しない。	・面外荷重が作用する地下部ではない。	・柱自身の慣性力により影響が生じるような階高を有する柱はないため，該当しない。	・整形な建屋で捩れによる影響のおそれがない構造計画を行っており，該当しない。	サービス建屋
A 4		筒身	・筒身は鉄塔の中央で支持されており，応力が集中することなく該当しない。	・面外荷重が作用する地下部ではない。	・地震力のほとんどを鉄塔が負担しており，該当しない。	・釣り合いよく鉄塔に支持される構造計画を行っており，該当しない。	主排気筒
A 5		隅部	・耐震壁付きの柱は，応力集中が懸念される軸力が耐震壁に分散されることで影響が小さいと考えられるため，該当しない。	・面外荷重が作用する地下部ではない。	・地震力のほとんどを耐震壁が負担しており，該当しない。	・釣り合いよく耐震壁が配置された構造計画を行っており，該当しない。	原子炉建屋 使用済燃料乾式貯蔵建屋 緊急時対策所建屋 タービン建屋 サービス建屋
A 6		地下部 （一般部，隅部）	・中柱は応力が集中することなく該当しない。 ・耐震壁付きの隅柱は，応力集中が懸念される軸力が耐震壁に分散されることで影響が小さいと考えられるため，該当しない。	・地下外周部が考えられるが，外周部柱はすべて梁等に接続しており，土圧はそのまま梁等に伝達されるため，該当しない。	・地震力のほとんどを耐震壁が負担しており，該当しない。	・釣り合いよく耐震壁が配置された構造計画を行っており，該当しない。	原子炉建屋 タービン建屋
B 1	梁	一般部 （ＲＣ部）	・地震力の負担について方向性を持っており，該当しない。	・面外荷重が作用する地下部ではない。	・剛性の高い床や耐震壁が付帯するため，面外方向の変形を抑制することから該当しない。	・剛性の大きい床が付帯しているため該当部位は存在しない。	原子炉建屋 使用済燃料乾式貯蔵建屋 緊急時対策所建屋 タービン建屋 サービス建屋
B 2		一般部 （Ｓ部：水平材，補助水平材）	・地震力の負担について方向性を持っており，該当しない。	・面外荷重が作用する地下部ではない。	・軽量なトラス部材で構成されており，該当しない。	・釣り合いよく水平材，補助水平材が配置された構造計画を行っており，該当しない。	主排気筒
B 3		地下部	・地震力の負担について方向性を持っており，該当しない。	・地下外周部が考えられるが，吹抜けがないことから，外周部梁は全て剛性が高いスラブに接続しており，土圧はそのままスラブに伝達されるため，該当しない。	・剛性の高い床や耐震壁が付帯するため，面内方向の変形を抑制することから該当しない。	・剛性の大きい床が付帯しているため該当部位は存在しない。	原子炉建屋 タービン建屋
B 4		鉄骨トラス	・地震力の負担について方向性を持っており，該当しない。	・面外荷重が作用する地下部ではない。	・上弦材を屋根床に，下弦材は振れ止めにより拘束されており，面外方向への変形を抑制しているため，該当しない。	・剛性の大きい床が付帯しているため該当部位は存在しない。	原子炉建屋 使用済燃料乾式貯蔵建屋 タービン建屋

表 2-1　評価部位から除外する基本的な考え方（2／2）

記号	部位		①－1 応力集中	①－2 面外荷重	②－1 面外慣性力	②－2 捩じれ	除外する部位
C１	壁	一般部 （矩形）	・地震力の負担について方向性を持っており該当しない。	・面外荷重が作用する地下部ではない。	・水平及び鉛直方向に大スパンの壁がないため，該当しない。	・釣り合いよく耐震壁が配置された構造計画を行っており，該当しない。＊	原子炉建屋 使用済燃料乾式貯蔵建屋 緊急時対策所建屋 格納容器圧力逃がし装置格納槽 タービン建屋 サービス建屋
C２	壁	一般部 （円筒）	・建屋の中心付近に位置し，その外側にあるボックス型の壁とスラブで一体化されている壁は，応力集中が懸念される軸力がスラブ等に分散されることで影響が小さいと考えられるため，該当しない。	・地震による面外荷重が作用する地下部ではない。	・水平及び鉛直方向に大スパンの壁がないため，該当しない。	・釣り合いよく耐震壁が配置された構造計画を行っており，該当しない。	原子炉建屋
C３	壁	鉄骨ブレース	・地震力の負担について方向性を持っており，該当しない。	・面外荷重が作用する地下部ではない。	・軽量なトラス部材で構成されており，該当しない。	・釣り合いよく斜材，補助斜材が配置された構造計画を行っており，該当しない。	主排気筒 サービス建屋
D１		一般部	・地震力の負担について方向性を持っており，該当しない。	・積載荷重等従来から面外荷重を考慮しており，今回の抽出プロセスで該当しない。	・大スパンの床及び屋根がないため，該当しない。	・釣り合いよく耐震壁が配置された構造計画を行っており，該当しない。	原子炉建屋 使用済燃料乾式貯蔵建屋 緊急時対策所建屋 タービン建屋 格納容器圧力逃がし装置格納槽 サービス建屋
E１	基礎	基礎梁	・地震力の負担について方向性を持っており，該当しない。	・地震時の面外荷重は、直近の直交部材にて受ける構造としているため該当しない。	・基礎梁は短スパンであり影響は少ないと考えられるため，該当しない。	・概ね対称構造であり，釣り合いよく基礎梁が配置された構造計画を行っており，該当しない。	主排気筒

注記　＊：原子炉建屋は局所評価と併せて捩れ挙動の影響について確認する。

3.　代表部位の選定プロセス

(a)　柱－隅部

応力集中が考えられる隅柱を有する鉄骨部の規模等を表 3-1 に示す。

重要設備である非常用ガス処理系排気筒を支持する，主排気筒鉄塔部の主柱材を代表として評価する。

表 3-1　隅柱を有する鉄骨部の規模等

項目	部位	対象*	平面形状 (m)		スパン (m)
①－１	柱	<u>主排気筒</u>	28.0	28.0	28.0
		非常用ガス処理系配管支持架構	7.2	4.8	7.2

注記　＊：下線部は代表を示す。

(b)　基礎

応力集中が考えられる矩形基礎の規模を表 3-2 に示す。

建物規模が比較的大きく，重要な設備を多く内包している等の留意すべき特徴を有している原子炉建屋の基礎を代表として評価する。

表 3-2　建屋の規模等

項目	部位	対象*	平面形状 (m)	
①－１	基礎	<u>原子炉建屋</u>	68.5	68.25
		主排気筒	33.1	33.1
		非常用ガス処理系配管支持架構	9.6	9.6
		使用済燃料乾式貯蔵建屋	59.70	33.00
		格納容器圧力逃がし装置格納槽	16.00	11.35
		緊急時対策所建屋	37.70	35.50

注記　＊：下線部は代表を示す。

(c)　壁（面外荷重）

面外荷重の影響が考えられる部位について，面外荷重が作用する壁の高さ及び床等の拘束有無を表 3-3 に示す。

施設の重要性，建屋規模及び構造特性を考慮し，上部に床などの拘束がなく，面外荷重（水圧）が作用する使用済燃料プールの壁を評価する。

表 3-3　壁の規模等

項目	部位	対象*	高さ (m)	床等の 拘束有無
①－２	壁	原子炉建屋（使用済燃料プール）	11.811	無
		原子炉建屋（壁地下部）	12.2	有
		格納容器圧力逃がし装置格納槽（格納槽部）	15.0	有
		タービン建屋（壁地下部）	12.2	有

注記　＊：下線部は代表を示す。

別紙２　３次元ＦＥＭモデルを用いた精査

目次

1. 3次元ＦＥＭモデルを用いた精査の概要······ 別紙 2-1
2. 非常用ガス処理系配管支持架構のねじれによる影響検討······ 別紙 2-3
2.1 構造概要······ 別紙 2-3
2.2 検討方針······ 別紙 2-5
2.3 解析モデル······ 別紙 2-7
2.4 地震応答解析······ 別紙 2-8
2.5 地震応答解析結果······ 別紙 2-9
2.5.1 補正比率の算出······ 別紙 2-9
2.5.2 地震応答解析結果······ 別紙 2-9
2.6 評価結果······ 別紙 2-11
3. 原子炉建屋の壁の面外慣性力による影響検討······ 別紙 2-14
3.1 検討の概要······ 別紙 2-14
3.2 検討方針······ 別紙 2-18
3.3 解析モデル······ 別紙 2-20
3.4 地震応答解析の概要······ 別紙 2-22
3.5 地震応答解析結果······ 別紙 2-28
3.6 面外慣性力に対する壁の断面算定······ 別紙 2-34
3.6.1 解析モデル及び荷重条件······ 別紙 2-34
3.6.2 応答補正比率の算出······ 別紙 2-36
3.6.3 断面の評価部位の選定······ 別紙 2-37
3.6.4 断面算定方法······ 別紙 2-39
3.6.5 断面算定結果······ 別紙 2-40
3.7 検討のまとめ······ 別紙 2-42
4. 局所応答による影響検討······ 別紙 2-43
5. 3次元ＦＥＭモデルを用いた精査のまとめ······ 別紙 2-44

補　原子炉建屋の壁の面外慣性力による影響検討についての補足説明

1.　3 次元ＦＥＭモデルを用いた精査の概要

3 次元的な応答特性が想定される部位として，添付書類「Ｖ-2-12　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」において，応答特性②－1「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい可能性がある部位」，応答特性②－2「加振方向以外の方向に励起される振動の影響が大きい可能性がある部位」，3 次元的な応答特性に伴う影響が考えられる部位をそれぞれ抽出し，3 次元ＦＥＭモデルによる精査を行うこととした。

本資料では，精査の概要及び精査の結果を以降に示す。

3 次元ＦＥＭモデルによる精査に用いる地震動を表 1-1 に示す。

表 1-1　評価に用いる地震動

対象			評価に用いる地震動	評価に用いる理由
耐震評価部位		建物・構築物		
梁	一般部	非常用ガス処理系配管支持架構	基準地震動 S_s－D１*1	全周期帯の応答が大きく，架構への影響も大きい基準地震動 S_s－D１を用いる。
壁	一般部	原子炉建屋（燃料取替フロア）	基準地震動 S_s－D１*2	全周期帯の応答が大きく，建屋への影響も大きい基準地震動 S_s－D１を用いる。
	鉄骨ブレース	非常用ガス処理系配管支持架構	基準地震動 S_s－D１*1	全周期帯の応答が大きく，架構への影響も大きい基準地震動 S_s－D１を用いる。
耐震評価部位全般		原子炉建屋	基準地震動 S_s－D１*2	全周期帯の応答が大きく，建屋への影響も大きい基準地震動 S_s－D１を用いる。

注記　＊1：水平方向の地震動のうち片方は，同時性を考慮し，模擬地震波を用いる。なお，模擬地震波は，S_s－D１の設計用応答スペクトルに適合するが，S_s－D１とは位相特性が異なる模擬地震波である。

＊2：3 次元ＦＥＭモデルによる応答補正比率の算出は，線形解析のため S_d－D１を用いる。水平方向の地震動のうち片方は，同時性を考慮し，模擬地震波を用いる。なお，模擬地震波は，S_d－D１の設計用応答スペクトルに適合するが，S_d－D１とは位相特性が異なる模擬地震波である。

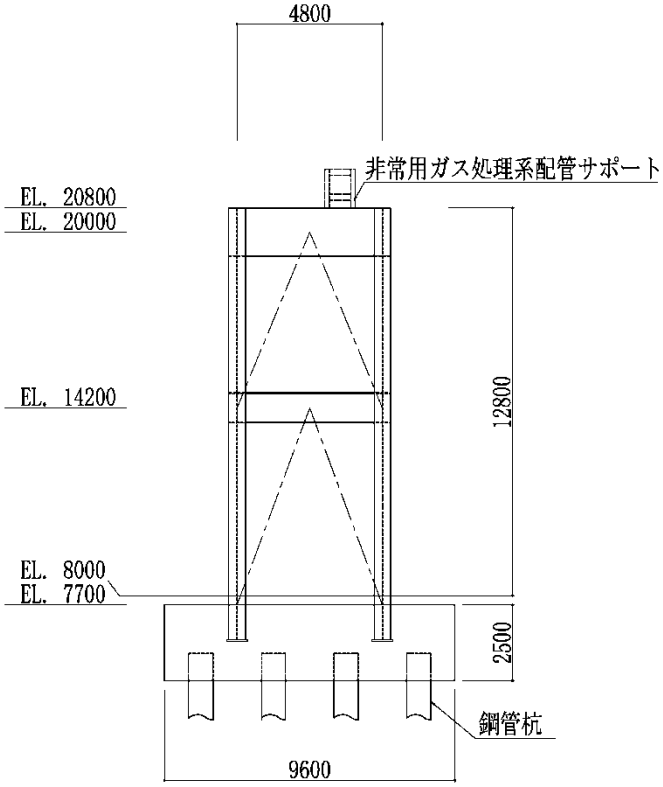
2.　非常用ガス処理系配管支持架構のねじれによる影響検討

2.1　構造概要

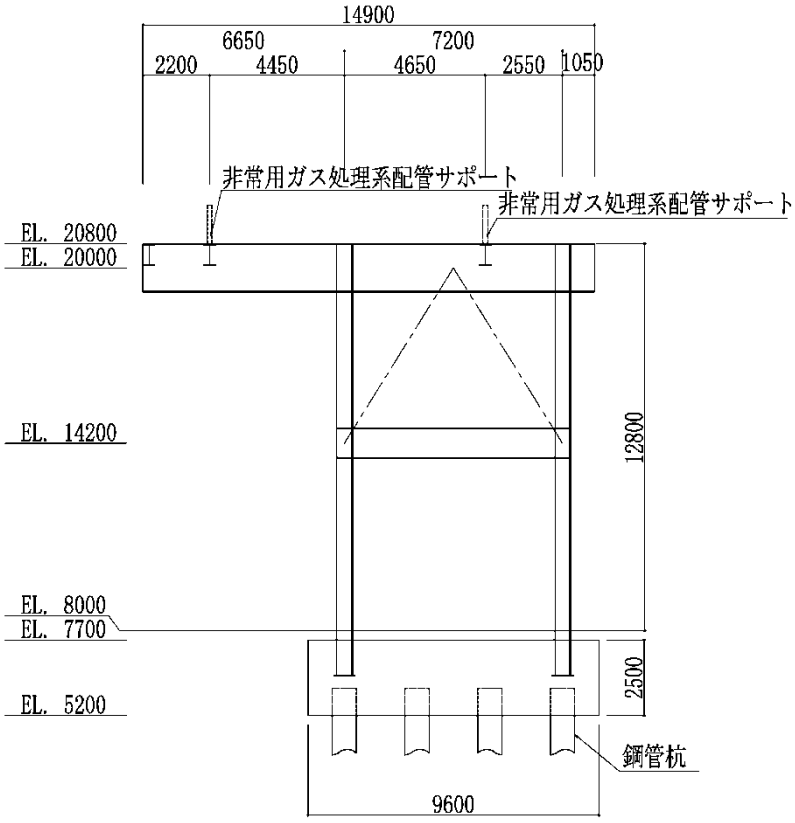
非常用ガス処理系配管支持架構は，片持ち梁のスパンが東側より西側の方が長く，上部の重心が 4 本の柱の中心から西側にずれている。このため，ねじれ応答が発生する可能性があることから，地震動を水平 2 方向及び鉛直方向に入力した場合の影響検討を実施する。

非常用ガス処理系配管支持架構は，非常用ガス処理系配管を原子炉建屋から主排気筒へ導くための架構であり，平面が南北方向 4.8 m，東西方向 14.9 m，地上高さ 12.8 m の鉄骨造の架構である。

非常用ガス処理系配管支持架構の軸組図を図 2-1 に示す。



(a) NS 方向



(b) EW 方向

図 2-1　非常用ガス処理系配管支持架構軸組図（単位：mm）

2.2　検討方針

非常用ガス処理系配管支持架構について，基準地震動Ｓ$_s$に対する水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対し，3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析を実施し，架構全体系のねじれの影響を把握し，その影響を考慮しても耐震性に問題のないことを確認する。具体的には，水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せにより評価した基準地震動Ｓ$_s$に対する評価結果に対して応答の補正を行い，応答補正した結果，各部材に発生する応力が評価基準値内に収まっていることを確認する。

なお，非常用ガス処理系配管支持架構については，水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる評価において，3 次元ＦＥＭモデルを使用していることから，架構全体のねじれの影響についてはすでに考慮されている。しかし，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにおける 3 方向同時入力の影響については，評価に与える影響を確認できていないことから，本検討では，この観点に着目し，検討を行うこととする。

具体的には，梁及びブレースの応答に影響がある節点において，基準地震動Ｓ$_s$に対する最大応答加速度をもとに，3 次元的な応答補正比率 ζ を算出し，1 方向入力の応答補正を行い，耐震性評価への影響検討を行う。応答補正の方法としては，梁及びブレースの断面評価値（発生応力／許容値）に応答補正比率 ζ を乗じて，断面評価値が 1.0 以下であることを確認する。図 2-2 に検討フローを示す。

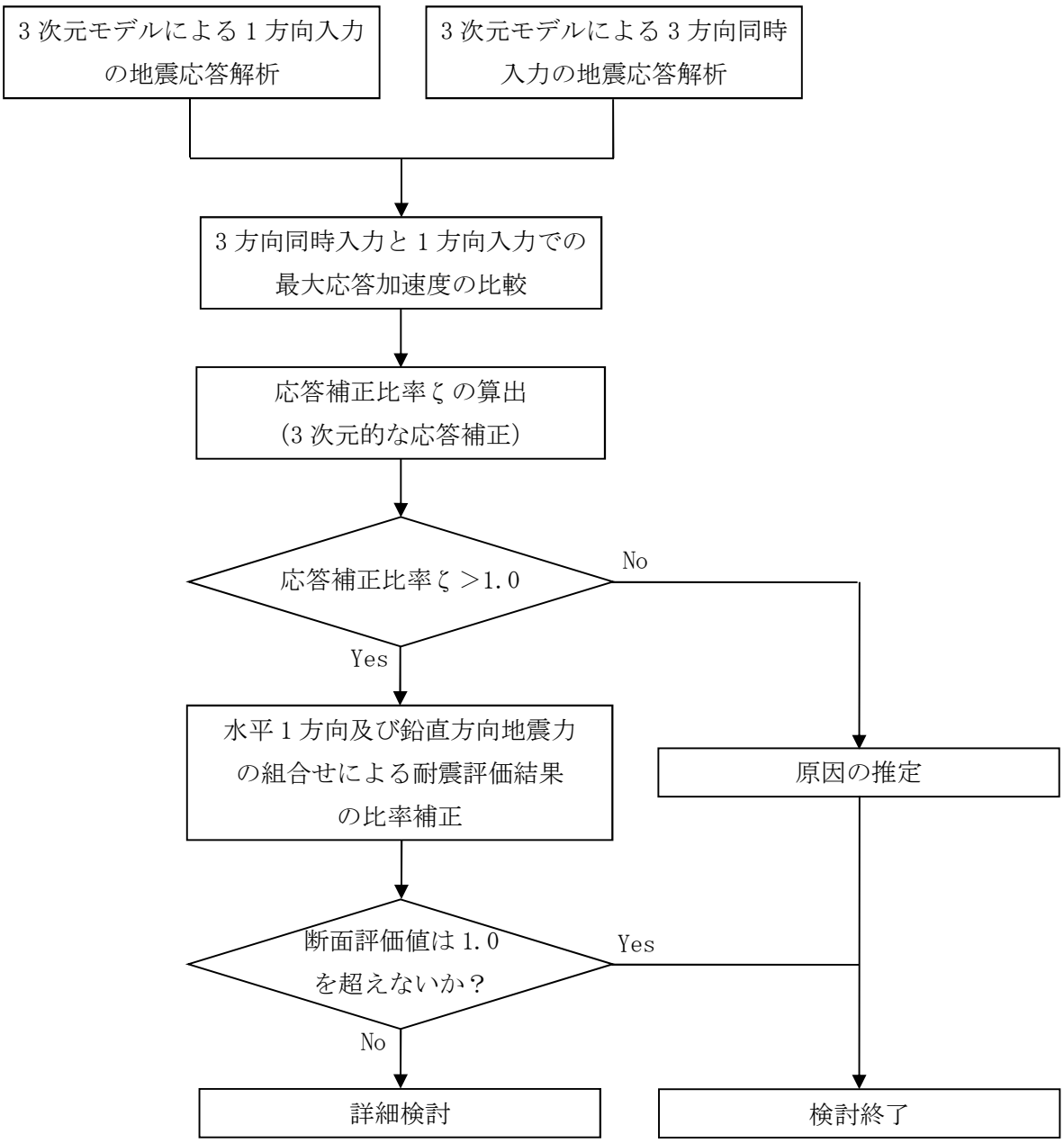

3 次元モデルによる 1 方向入力の地震応答解析
3 次元モデルによる 3 方向同時入力の地震応答解析
3 方向同時入力と 1 方向入力での最大応答加速度の比較
応答補正比率ζの算出（3 次元的な応答補正）
応答補正比率ζ＞1.0
No
Yes
水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる耐震評価結果の比率補正
原因の推定
断面評価値は 1.0 を超えないか？
Yes
No
詳細検討
検討終了

図 2-2　検討フロー図

2.3　解析モデル

非常用ガス処理系配管支持架構については，水平１方向及び鉛直方向地震力の組合せによる評価において，3 次元ＦＥＭモデルを使用していることから，本検討に用いる解析モデルについても同様の解析モデルを用いることとする。非常用ガス処理系配管支持架構の解析モデル図を図 2-3 に示す。

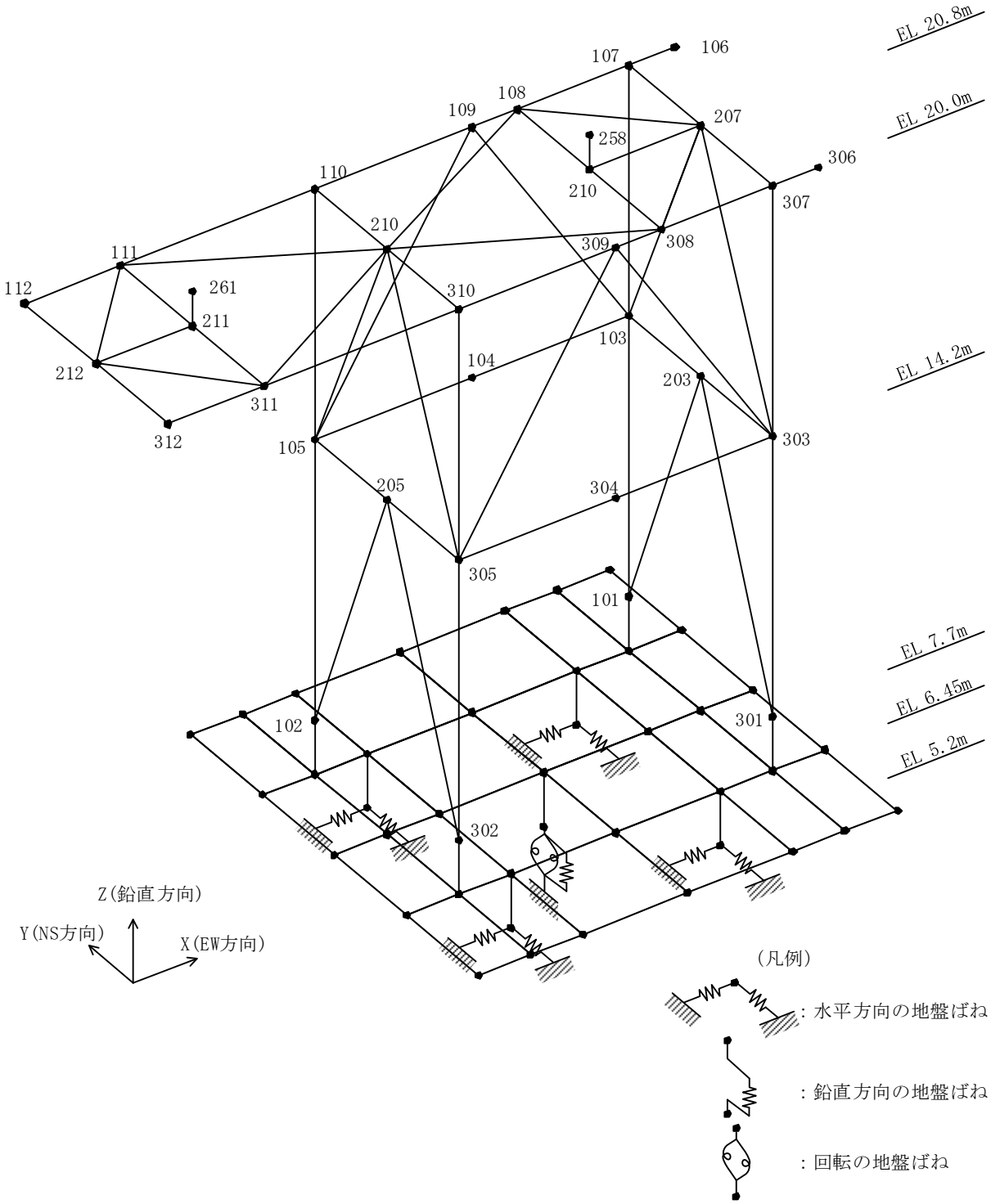


図 2-3　非常用ガス処理系配管支持架構の解析モデル図及び評価節点

2.4　地震応答解析

「2.3　解析モデル」に記載する 3 次元ＦＥＭモデルを用いて，基準地震動Ｓ$_s$のうち，「別紙 2　表 1-1　評価に用いる地震動」で整理したとおり，Ｓ$_s$－Ｄ1 に対する地震応答解析を実施する。

3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析は，NS 方向，EW 方向及び鉛直方向の各々に対して行う。また，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認のための応答補正比率 ζ を算出するため，NS 方向，EW 方向及び鉛直方向の 3 方向同時入力による応答評価も併せて実施する。

3 次元ＦＥＭモデルの応答評価に用いる節点の位置（番号）を図 2-3 に示す。

2.5　地震応答解析結果

2.5.1　補正比率の算出

3 次元モデルによる 3 次元的な応答性状を踏まえた定量的な耐震評価を行うため，1 方向入力の応答を補正する応答補正比率ζを算出する。

1 方向入力及び 3 方向同時入力の最大応答加速度を比較し，応答補正比率αを算出する。

また，非常用ガス処理系配管支持架構については，水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる評価において，3 次元モデルを用いて評価しており，ねじれ振動が考慮されていることから，ねじれ振動の補正係数 β を 1.0 とする。

応答補正比率ζは以下のように算出する。

①応答補正比率αは評価点ごとに定める。

②応答補正比率αは保守的な評価を実施するため，1.0 以上とする。

③応答補正比率ζは，層ごとの各評価点のαの最大値を用いて定め，局所的な応答を踏まえたものとなるよう設定する。

応答補正比率ζの算出式を以下に示す。

評価用の応答補正比率　$\zeta = \mathrm{Max}(\alpha) \times \beta$　…… (1)

（Ｍａｘ（α）：層ごとの各評価点のαの最大値）

ここで，

3 方向同時入力の応答補正比率　$\alpha = \dfrac{\text{3方向同時入力による最大応答加速度}}{\text{1方向入力による最大応答加速度}}$　… (2)

（但し，ζを算出する場合は，$\alpha \geqq 1.0$）

ねじれ振動の応答補正比率　$\beta = 1.0$　…… (3)

2.5.2　地震応答解析結果

地震応答解析で応答値が大きいS_s－D1 に対し，地盤物性の諸元のばらつきを基本ケースとした場合の応答補正比率ζの算定を行う。算定結果を表 2-1 に示す。S_s－D1 の応答補正比率 ζ は，1.00～1.05 の範囲にある。

表 2-1　応答補正比率α及びζの算定（Ｓ$_s$－Ｄ1：基本ケース）

レベル	節点番号	NS 方向			EW 方向			ζ
		最大加速度応答（cm/s^2）		α（②/①）	最大加速度応答（cm/s^2）		α（②/①）	
		①	②		①	②		
		1 方向入力	3 方向同時入力		1 方向入力	3 方向同時入力		
EL. 20.8 m	258	1046	1042	1.00	1602	1575	0.98	1.04
	261	1333	1385	1.04	1611	1621	1.01	
EL. 20.0 m	106	1326	1288	0.97	1557	1597	1.03	1.05
	107	1229	1201	0.98	1557	1597	1.03	
	108	1029	1025	1.00	1556	1596	1.03	
	109	958	964	1.01	1555	1595	1.03	
	110	861	842	0.98	1559	1602	1.03	
	111	1323	1375	1.04	1561	1609	1.03	
	112	1652	1731	1.05	1561	1609	1.03	
	207	1227	1200	0.98	1586	1567	0.99	
	208	1030	1027	1.00	1588	1570	0.99	
	210	860	841	0.98	1582	1562	0.99	
	211	1324	1375	1.04	1592	1574	0.99	
	212	1651	1731	1.05	1590	1572	0.99	
	306	1326	1292	0.97	1599	1622	1.01	
	307	1229	1202	0.98	1599	1622	1.01	
	308	1029	1025	1.00	1598	1621	1.01	
	309	958	964	1.01	1597	1620	1.01	
	310	861	842	0.98	1601	1624	1.01	
	311	1323	1374	1.04	1604	1626	1.01	
	312	1652	1732	1.05	1605	1626	1.01	
EL. 14.2 m	103	855	840	0.98	1376	1418	1.03	1.03
	104	717	721	1.00	1377	1418	1.03	
	105	597	592	0.99	1377	1417	1.03	
	203	848	833	0.98	1423	1384	0.97	
	205	592	588	0.99	1428	1386	0.97	
	303	855	839	0.98	1415	1437	1.02	
	304	717	724	1.01	1415	1437	1.02	
	305	597	592	0.99	1415	1437	1.02	
EL. 7.7 m	101	490	490	1.00	491	491	1.00	1.00
	102	491	491	1.00	491	491	1.00	
	301	490	490	1.00	491	491	1.00	
	302	491	491	1.00	491	491	1.00	

2.6　評価結果

各層の応答補正比率ζを，添付書類「Ｖ-2-2-17　非常用ガス処理系配管支持架構の耐震性についての計算書」で求めた断面評価値（許容値に対する発生応力の比）に乗じて，補正後の断面評価値を算出した。なお，評価結果は，梁及びブレースの全部材において，断面評価値が最大になる部材を代表部位として記載することとし，梁及びブレースの断面の評価部位を図2-4 及び図 2-5 に示す。

Ｓ$_s$－Ｄ1 より算定した各層の応答補正比率 ζ を用いて補正した断面評価値を表 2-2 に示す。評価の結果，断面評価値が 1.0 を超えないことを確認した。

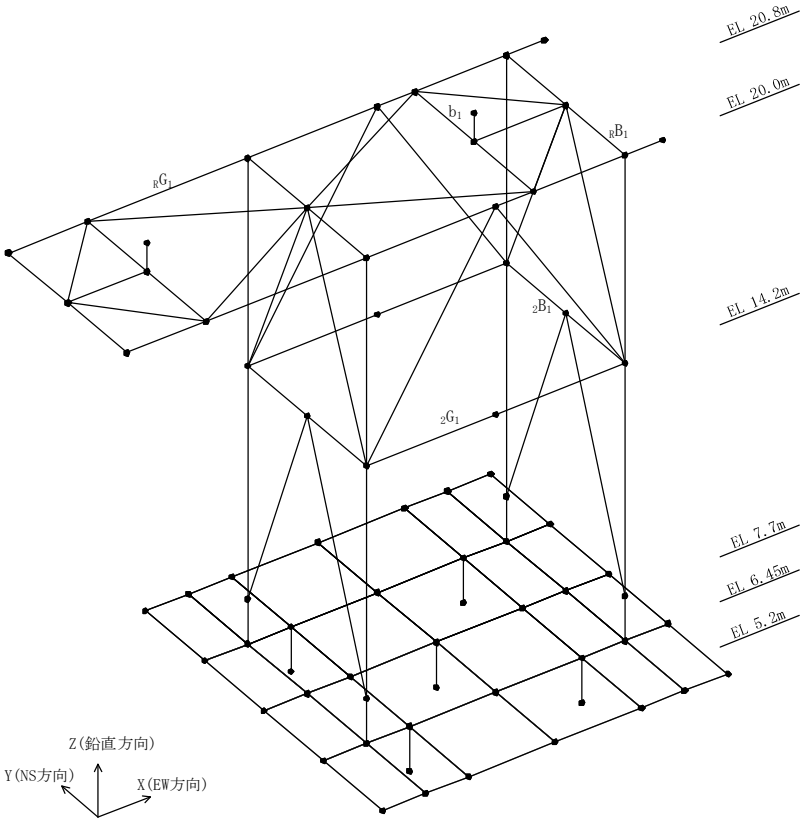


図 2-4　梁の断面の代表部位

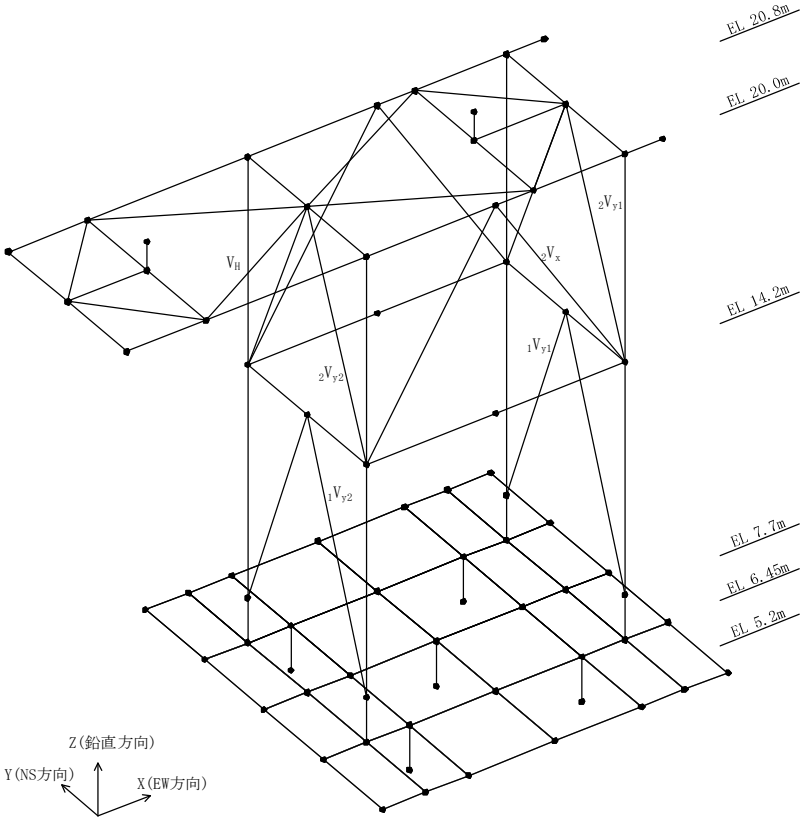


図 2-5　ブレースの断面の代表部位

表 2-2　3 次元的な応答特性を踏まえた断面評価：S_s－D1

(a) 梁

部材符号	断面評価値		応答補正比率 ζ	応答補正後 (断面評価値×ζ)	
	フランジ	ウェブ		フランジ	ウェブ
${}_{R}G_{1}$	0.191	0.045	1.05	0.201	0.048
${}_{R}B_{1}$	0.034	0.010	1.05	0.036	0.011
${}_{2}G_{1}$	0.329	0.083	1.03	0.339	0.086
${}_{2}B_{1}$	0.125	0.039	1.03	0.129	0.041
b_{1}	0.109	0.059	1.05	0.115	0.062

(b) ブレース

部材符号	断面評価値	応答補正比率 ζ	応答補正後 (断面評価値×ζ)
${}_{2}V_{x}$	0.222	1.05	0.234
${}_{2}V_{y1}$	0.204	1.05	0.215
${}_{1}V_{y1}$	0.358	1.03	0.369
${}_{2}V_{y2}$	0.200	1.05	0.210
${}_{1}V_{y2}$	0.298	1.03	0.307
V_{H}	0.076	1.05	0.080

2.7　まとめ

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認として，加振方向以外の方向に励起される振動が影響する可能性のある非常用ガス処理系配管支持架構について，評価を行った。

評価の結果，3 次元的な応答性状である応答補正を考慮しても，非常用ガス処理系配管支持架構の断面評価値は 1.0 を超えないことを確認した。よって，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにより，非常用ガス処理系配管支持架構が有する耐震性への影響はない。

以上のことから，ねじれ応答が発生する可能性がある非常用ガス処理系配管支持架構については，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる評価を行う部位として抽出しない。

3.　原子炉建屋の壁の面外慣性力による影響検討

3.1　検討の概要

水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の評価として，面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響の可能性がある原子炉建屋の壁の検討を実施する。

検討は，複数スパン及び層にまたがって直交方向に壁及び床のない連続した壁について，地震動を水平2方向及び鉛直方向に入力した場合の検討を実施する。

原子炉建屋は，主体構造が鉄筋コンクリート造で鉄骨造陸屋根をもつ地下2階，地上6階の建物である。中央部には，平面が南北方向 45.5 m，東西方向 42.5 m の原子炉建屋原子炉棟（以下「原子炉棟」という。）があり，その周囲には原子炉建屋付属棟（以下「付属棟」という。）を配置している。

原子炉棟と付属棟は，同一基礎版上に配置した一体構造であり，原子炉建屋の平面は，下部で南北方向 68.5 m，東西方向 68.25 m のほぼ正方形となっている。基礎底面からの高さは 73.08 m であり，地上高さは 56.08 m である。また，原子炉建屋は隣接する他の建屋と構造的に分離されている。

原子炉建屋の基礎は，厚さ 5.0 m のべた基礎で，支持地盤である砂質泥岩上に人工岩盤を介して設置されている。

原子炉棟の中央部には原子炉圧力容器を収容している原子炉格納容器があり，その周囲の一時遮蔽壁（以下「シェル壁（S／W)」という。）は上部が円錐台形，下部は円筒形で基礎版から立ち上がっている。シェル壁（S／W）の壁厚は上部で 1.9 m，下部で 1.8 m である。

原子炉棟の外壁（以下「内部ボックス壁（I／W)」という。）は基礎版から屋根面まで連続しており，壁厚は地下部分で 1.5 m，地上部分では 1.5 m～0.3 m である。また，付属棟の外壁（以下「外部ボックス壁（O／W)」という。）の壁厚は地下部分で 1.5 m，地上部分では 1.5 m～0.9 m である。建屋は全体として非常に剛性が高く，建屋に加わる地震時の水平力はすべてこれらの耐震壁で負担する。

なお，燃料取替床（EL.46.5 m）には使用済燃料貯蔵プールが設置されている。

原子炉建屋の概略平面図及び概略断面図を図 3-1 及び図 3-2 に示す。

図 3-1（1／2）　　概略平面図（EL. 46.5 m）

図 3-1（2／2）　　の概略平面図（EL. －4.0 m）

図 3-2（1／2）　原子炉建屋の概略断面図（A－A 断面　EW 方向）

図 3-2（2／2）　原子炉建屋の概略断面図（B－B 断面　NS 方向）

3.2　検討方針

原子炉建屋について，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対し，3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析を実施する。

複数スパン及び層にまたがって直交方向に壁及び床のない連続した原子炉建屋の壁について，弾性設計用地震動S_dに対する地震応答解析により得られた最大応答加速度の分布から，面外慣性力の影響を確認する。また，水平 1 方向の入力に対する最大応答加速度と 3 方向同時入力による最大応答加速度を比較し，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を確認する。

3 次元ＦＥＭモデルによる最大応答加速度の分布から面外慣性力の影響を把握した上で，原子炉建屋の壁を部分的に抽出し，保守的な静的解析モデルに置き換える。面外慣性力による面外応力に対して断面算定を行い，面外慣性力の影響を評価する。

図 3-3 に検討フローを示す

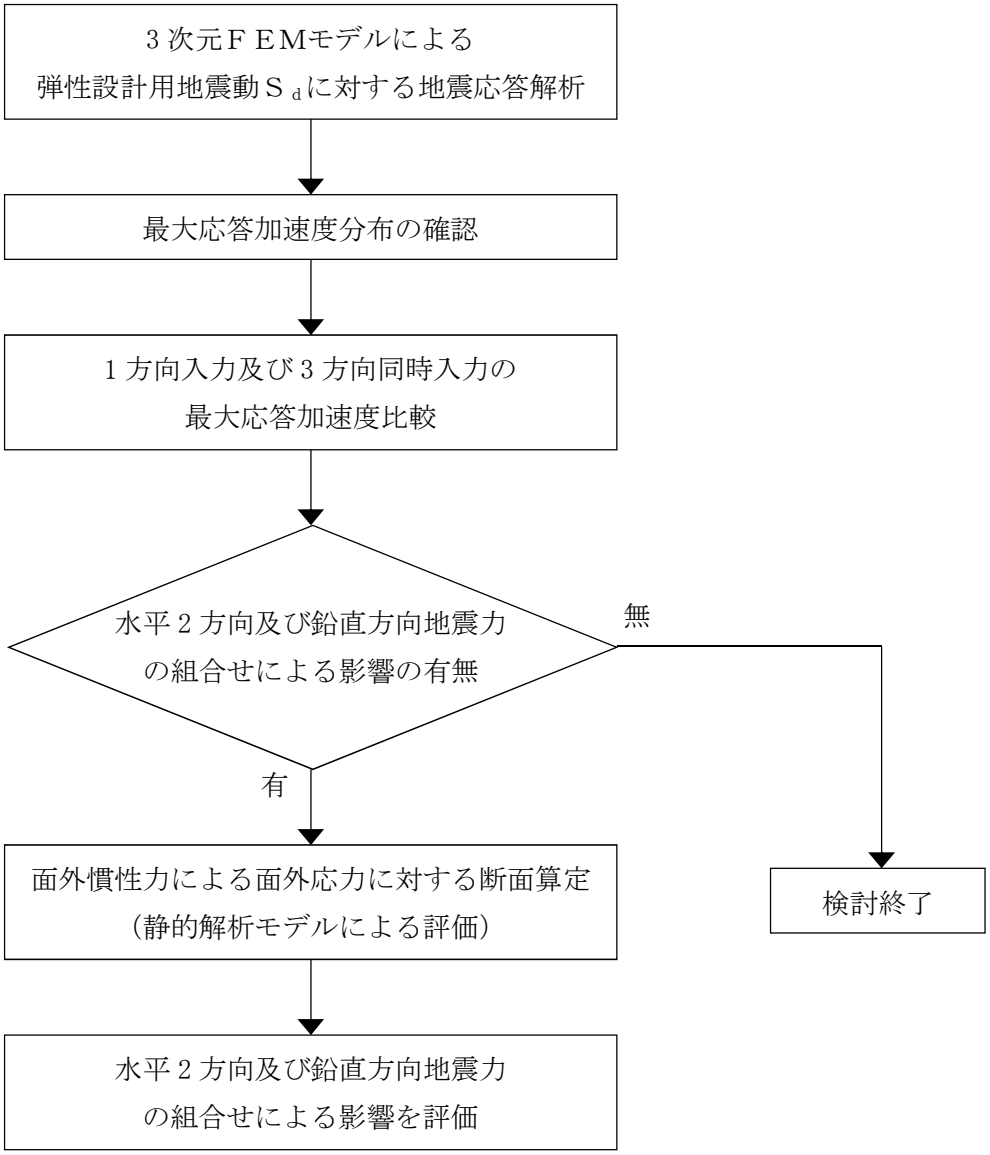

3 次元ＦＥＭモデルによる
弾性設計用地震動Ｓ d に対する地震応答解析
最大応答加速度分布の確認
1 方向入力及び 3 方向同時入力の
最大応答加速度比較
水平 2 方向及び鉛直方向地震力
の組合せによる影響の有無
無
有
面外慣性力による面外応力に対する断面算定
（静的解析モデルによる評価）
検討終了
水平 2 方向及び鉛直方向地震力
の組合せによる影響を評価

図 3-3　検討フロー

3.3　解析モデル

原子炉建屋の3次元ＦＥＭモデルを構築する。解析モデルを図3-4に示す。

モデル化の範囲は，原子炉棟，付属棟及び基礎とする。

耐震壁，補助壁及び床スラブはシェル要素（約 7500 要素），柱及び梁はバー要素（約 1500 要素），屋根面の鉄骨ブレースはロッド要素（約50要素），基礎はソリッド要素（約2800要素）とする。要素の大きさは，各床スラブレベルと対応する位置に節点を設け，高さ方向及び水平方向に 2 m～3 m 程度とする。（解析モデルの詳細は，別紙 3「3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析」に示す。）

検討に用いる解析モデルのケースを表3-1，使用材料の物性値を表3-2に示す。

検討に用いる解析モデルのケースは，質点系モデルと，表3-1に示す諸条件を対応させた建屋模擬モデルとする。

地震応答解析には，解析コード「ＭＳＣ　ＮＡＳＴＲＡＮ ver.2016.1」を用いる。

表3-1　解析モデルの検討ケース

モデルケース	床のモデル化	地盤のモデル化	コンクリート 剛性の設定
建屋模擬モデル	床柔	相互作用考慮	設計基準強度

表3-2　使用材料の物性値

部位	ヤング係数 (N/mm^2)	減衰定数 (%)
鉄筋コンクリート部	2.21×10^4	5
鉄骨部	2.05×10^5	2

(a) 建屋全景

(b) EW 断面図

(c) NS 断面図

図 3-4　解析モデル

3.4　地震応答解析の概要

3 次元ＦＥＭモデル（建屋模擬モデル）を用いて，弾性設計用地震動Ｓ$_d$に対する地震応答解析を実施する。地震応答解析は線形解析とし，周波数応答解析を用いる。

応答評価位置は，原子炉建屋の EL.46.5 m～EL.63.65 m とする。応答評価部位を図 3-5，応答評価対象位置及び節点番号図を図 3-6 に示す。

地震動の組合せを表 3-3 に示す。

入力地震動については，線形解析であることから，水平 2 方向の地震力による影響評価は，弾性設計用地震動Ｓ$_d$を水平 2 方向に組合せた地震力を算定し実施する。具体的には，弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１を水平 2 方向及び鉛直方向に入力した検討を実施する。

したがって，本検討において北面及び南面の応答評価を行う際には，NS 方向に対しては弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の水平成分を，EW 方向に対しては模擬地震波(基準地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の水平成分の設計用応答スペクトルに適合するよう，位相を変えたもの)をそれぞれ同時入力する。東面及び西面の応答評価を行う際には，その反対で，EW 方向に対しては弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の水平成分を，NS 方向に対しては模擬地震波をそれぞれ同時入力する。また，鉛直方向の地震動は，弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の鉛直成分を水平 2 方向と同時入力する。

図 3-5（1／2）　応答評価部位

(b) 3 次元ＦＥＭモデル

図 3-5（2／2）　応答評価部位

(a) 北面

(b) 南面

図 3-6（1／2）　応答評価対象位置及び節点番号図

(c) 東面

(d) 西面

図 3-6 (2／2)　応答評価対象位置及び節点番号図

表 3-3　地震動の組合せ

(a) 北面及び南面の応答評価時

地震動の入力方法	NS 方向	EW 方向	鉛直方向
水平 1 方向入力	S_d－D１	－	－
3 方向同時入力	S_d－D１	模擬地震波*	S_d－D１

注記　＊：弾性設計用地震動S_d－D１の設計用応答スペクトルに適合するが，S_d－D１とは位相特性が異なる地震波。

(b) 東面及び西面の応答評価時

地震動の入力方法	NS 方向	EW 方向	鉛直方向
水平 1 方向入力	－	S_d－D１	－
3 方向同時入力	模擬地震波*	S_d－D１	S_d－D１

注記　＊：弾性設計用地震動S_d－D１の設計用応答スペクトルに適合するが，S_d－D１とは位相特性が異なる地震波。

3.5　地震応答解析結果

3 次元ＦＥＭモデルを用いて，弾性設計用地震動Ｓ$_d$に対する地震応答解析を実施した。

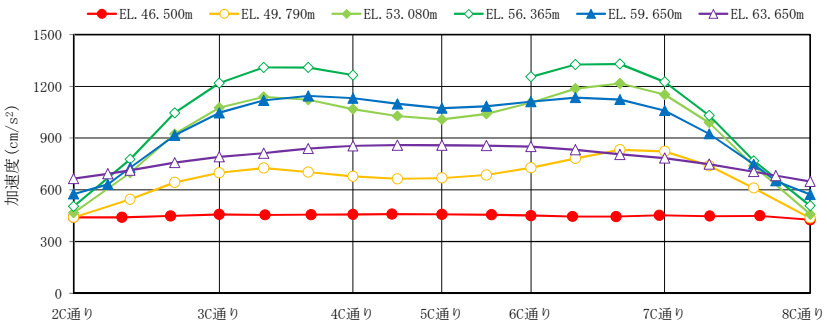
原子炉建屋の壁について，3 方向同時入力における壁面外方向の最大応答加速度分布を図 3-7 及び図 3-8 に示す。

3 方向同時入力における壁面外方向最大応答加速度は，平面的に中央部で面外にはらむような加速度分布となっており，高さ方向では EL.56.365 m が最大となるような加速度分布となっている。

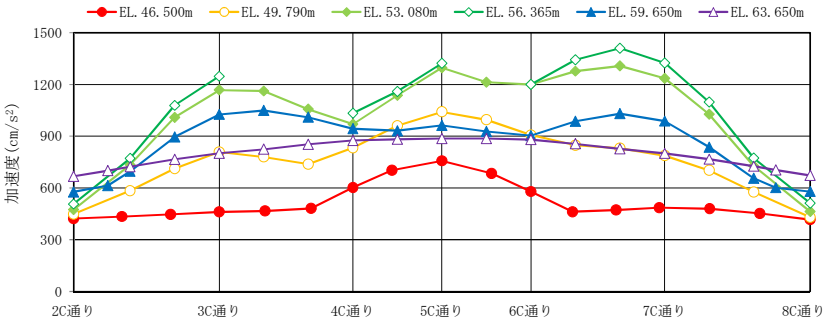
水平 1 方向入力における最大応答加速度の分布図を図 3-9 及び図 3-10 に示す。また，水平 1 方向入力及び 3 方向同時入力の最大応答加速度の比較を図 3-11 に示す。

水平 1 方向についても，3 方向同時入力と同様に，平面的に中央部で面外にはらむような加速度分布となっており，高さ方向では EL.56.365 m が最大となるような加速度分布となっている。

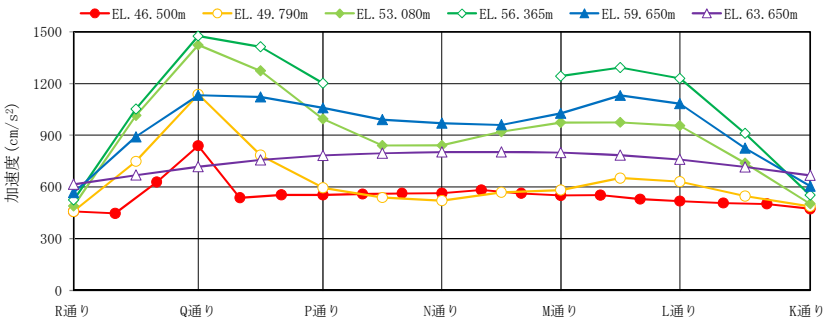
また，3 方向同時入力は，水平 1 方向入力と比べ概ね同等の最大加速度を示し，多少の大小はあるものの概ね同様の最大応答加速度分布を示している。この結果は壁面外方向の地震動が主な影響を与えており，水平直交方向及び鉛直方向地震動は面外応答に与える影響が小さい事を示している。3 方向同時入力の最大応答加速度は水平 1 方向入力に対して，0.92～1.19 倍程度である。



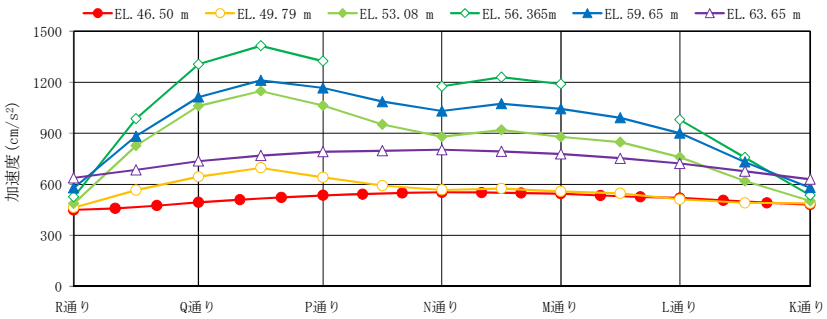
(a) 北面



(b) 南面

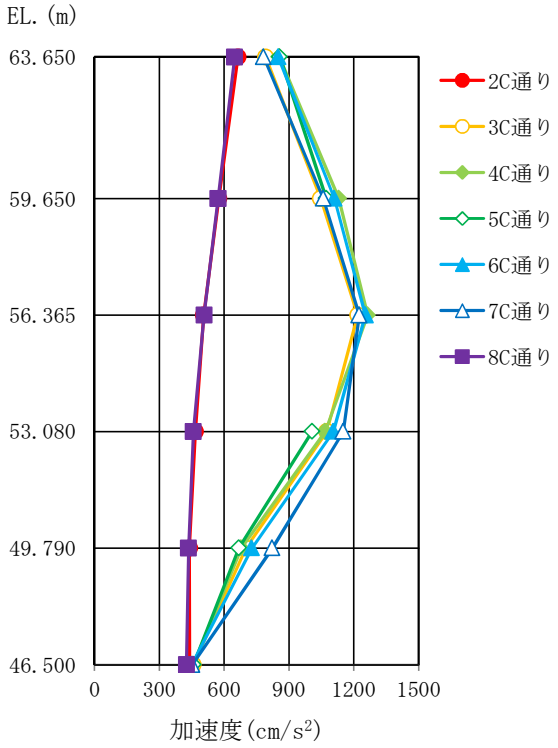


(c) 東面

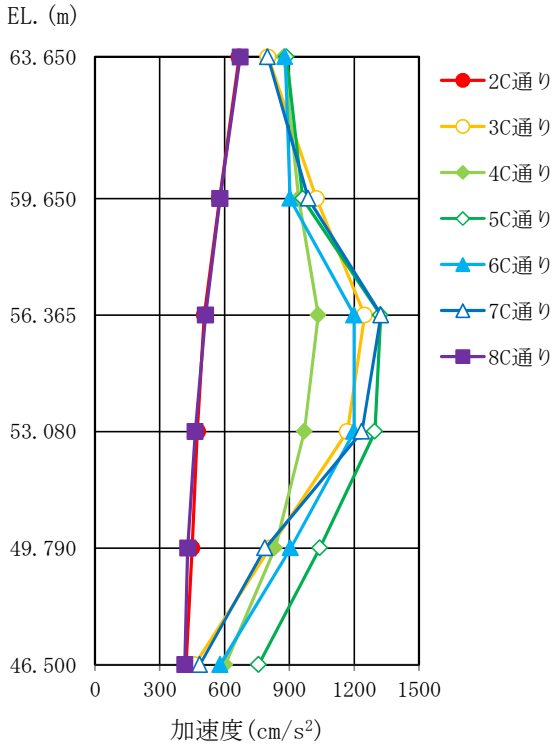


(d) 西面

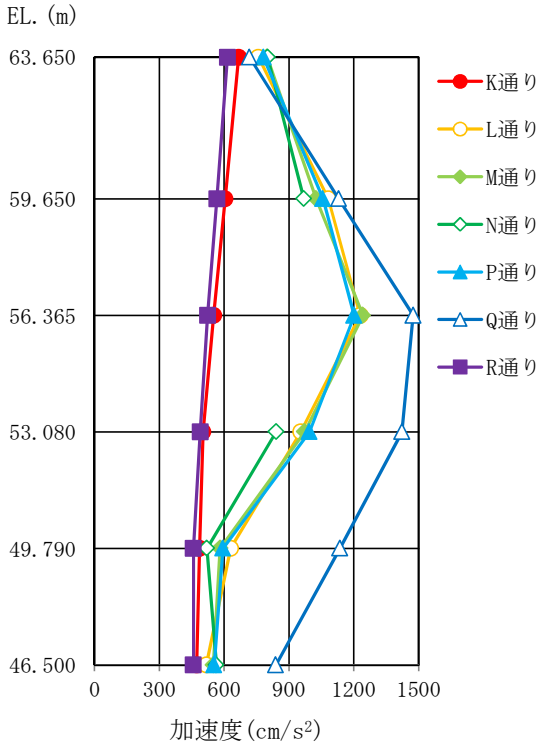
図 3-7　3 方向同時入力における壁面外方向の最大応答加速度分布（平面分布）



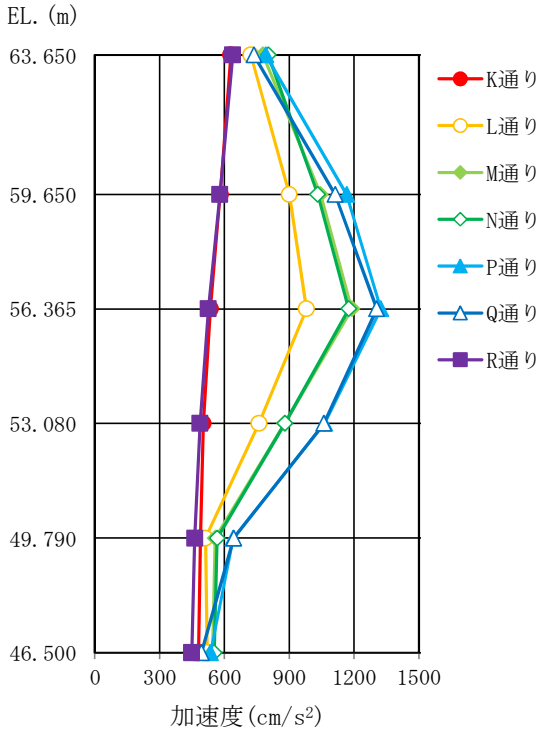
(a) 北面



(b) 南面

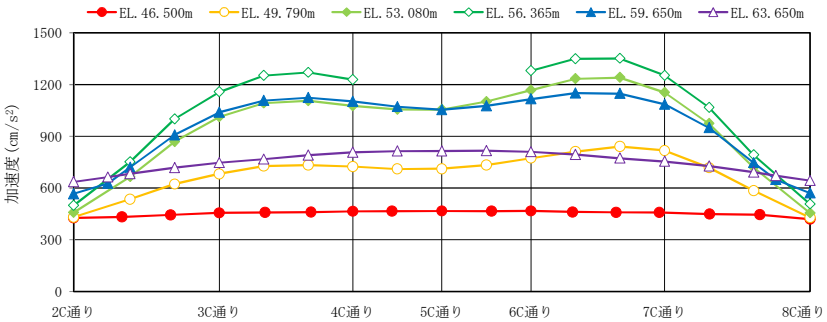


(c) 東面

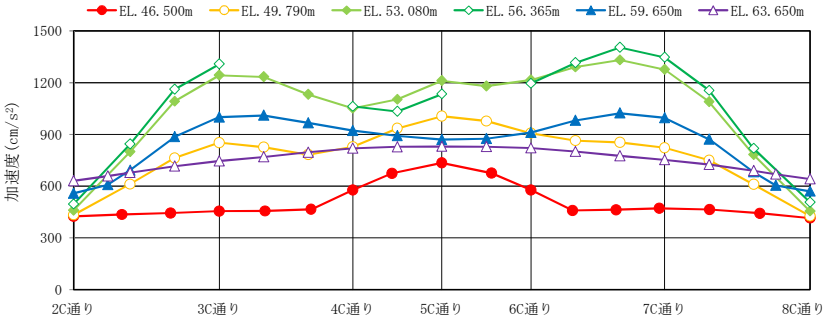


(d) 西面

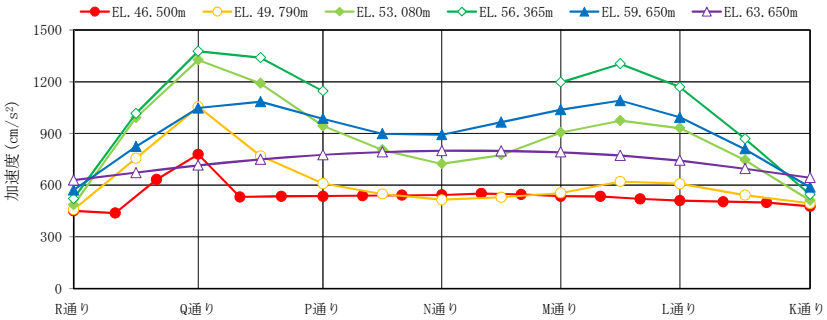
図 3-8　3 方向同時入力における壁面外方向の最大応答加速度分布（断面分布）



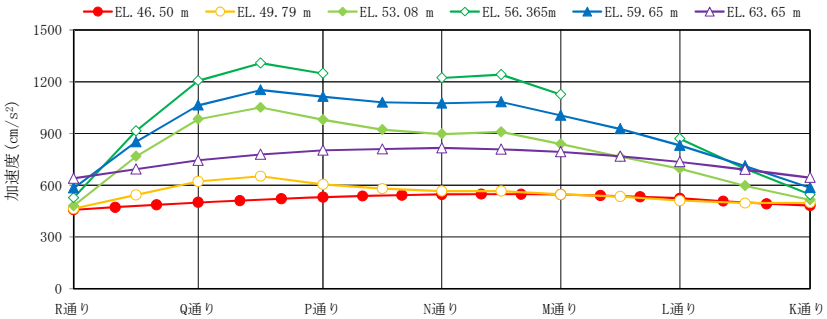
(a) 北面



(b) 南面

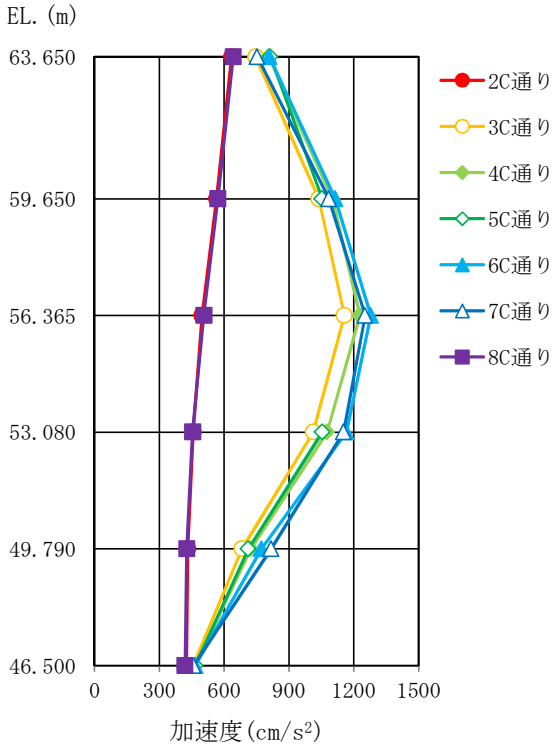


(c) 東面

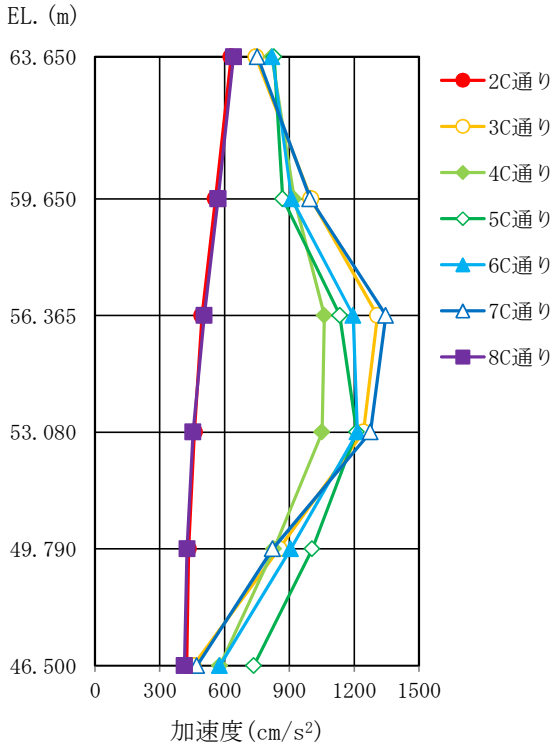


(d) 西面

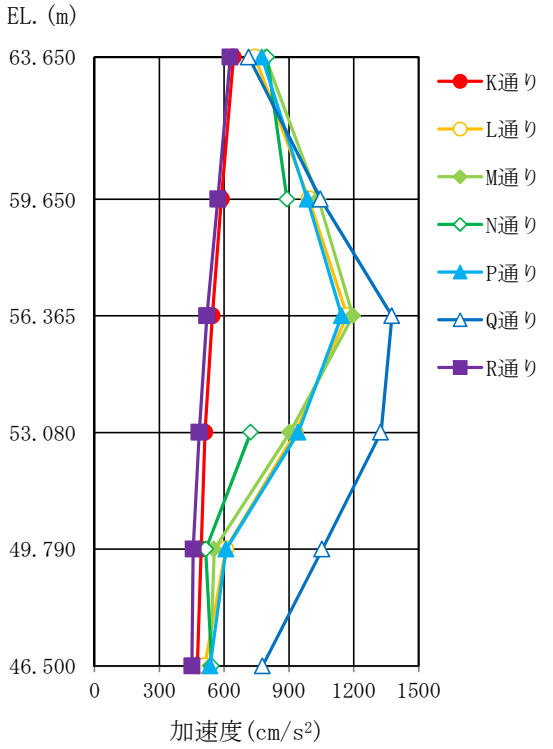
図 3-9　水平 1 方向入力における壁面外方向の最大応答加速度分布（平面分布）



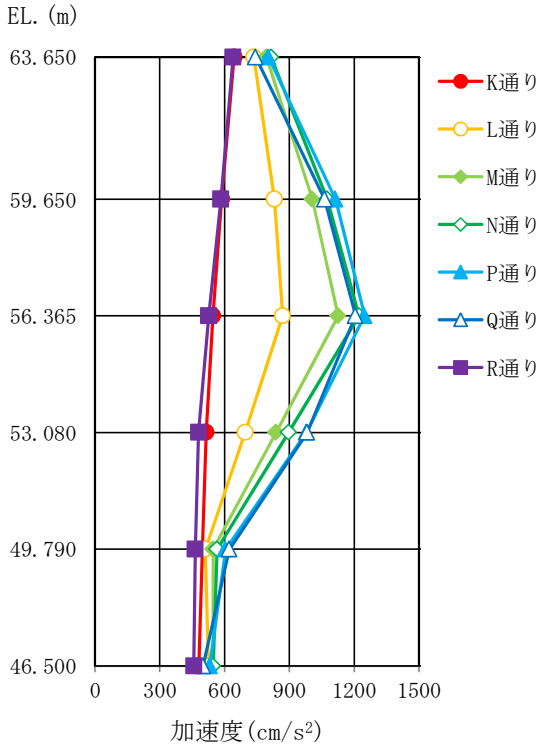
(a) 北面



(b) 南面

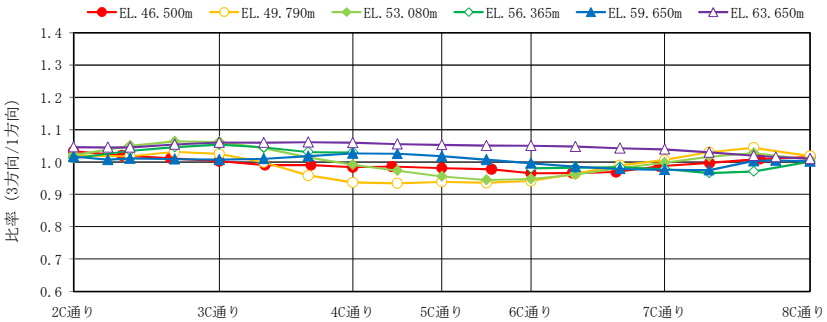


(c) 東面

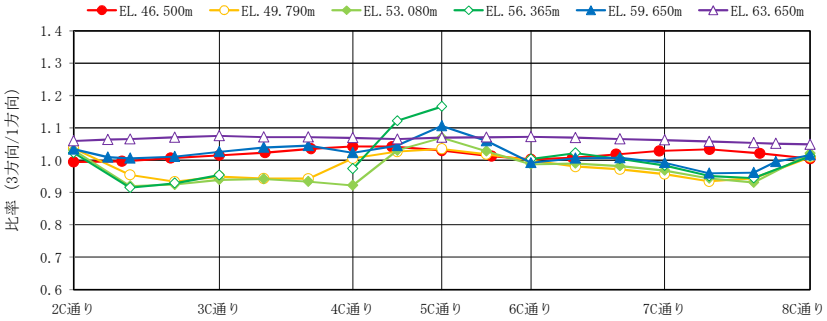


(d) 西面

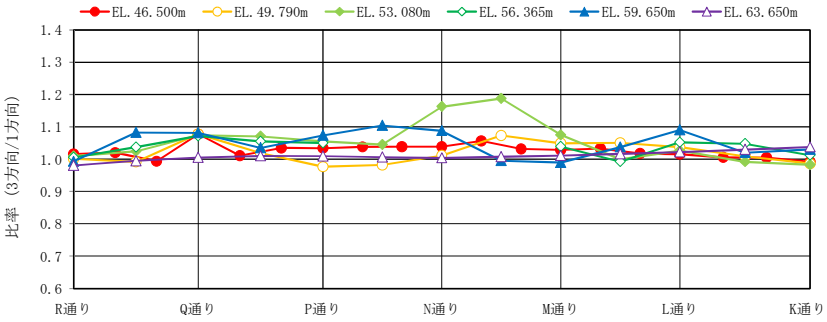
図 3-10　水平 1 方向入力における壁面外方向の最大応答加速度分布（断面分布）



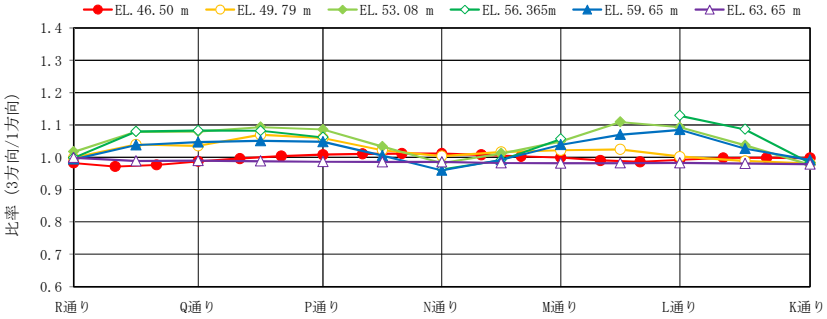
（a）北面



（b）南面



（c）東面



（d）西面

図 3-11　3 方向同時入力と水平 1 方向入力の壁面方向の最大応答加速度比較
（水平 1 方向入力に対する 3 方向同時入力の最大応答加速度の比率）

3.6　面外慣性力に対する壁の断面算定

複数スパン及び層にまたがって直交方向に壁及び床のない連続した壁について，面外慣性力の影響として，原子炉建屋の壁を部分的に抽出し，面外慣性力に対する検討を行う。検討は，静的解析モデルに置き換えて，面外慣性力による面外応力に対して断面算定を行い，面外慣性力の影響を評価する。

評価結果を記載する部位は，面外慣性力によって生じる曲げモーメント及び面外せん断力が最大となる部位とする。

3.6.1　解析モデル及び荷重条件

解析モデルを図 3-12 に示す。解析モデルは静的解析モデルとし，スパン端部の柱を境界条件として，単位幅の両端固定梁に置き換える。荷重としては，弾性設計用地震動Ｓ$_d$（以下「Ｓ$_d$地震時」という。）及び基準地震動Ｓ$_s$（以下「Ｓ$_s$地震時」という。）による面外慣性力を等分布荷重として考慮する。Ｓ$_d$地震時は，Ｓ$_d$－Ｄ１による面外方向の最大応答加速度（絶対加速度）を用いて静的震度に換算し保守的に評価する。なお，静的震度を算定する際には，地震波による影響及び地盤のばらつきによる影響を考慮するため質点系モデルによる地震応答解析における最大応答加速度より算出した応答補正比率を乗じる。Ｓ$_s$地震時は，Ｓ$_d$地震時の面外慣性力を，質点系モデルによる地震応答解析における最大応答加速度比で係数倍して定める。面外慣性力の算出方法は以下の通りである。

$$w_d = \frac{a_{max}}{g} W$$

$$w_s = \alpha \cdot w_d$$

ここで，w_d　：　Ｓ$_d$地震時の面外慣性力（kN/m）

w_s　：　Ｓ$_s$地震時の面外慣性力（kN/m）

a_{max}　：　Ｓ$_d$地震時の 3 方向同時入力における最大応答加速度（kN/m）

g　：　重力加速度（cm/s^2）

W　：　壁自重（$= \gamma \cdot t$）（kN/m）

γ　：　単位体積重量（＝24 kN/m^3）

t　：　壁厚（＝0.3 m）

α　：　入力地震動の最大加速度比（870／435＝2.0）

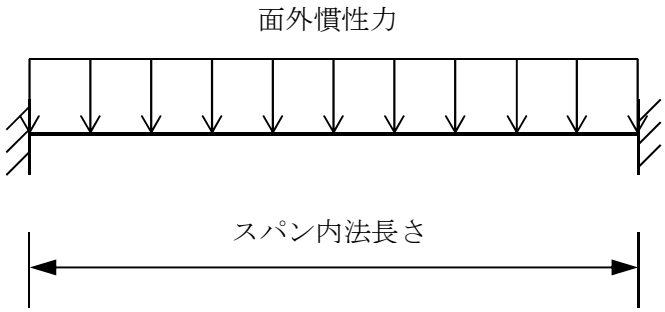


図 3-12　静的解析モデル

3.6.2　応答補正比率の算出

応答補正比率は，添付資料「Ｖ-2-2-1　原子炉建屋の地震応答計算書」における質点系モデルを用いた地震応答解析のうち，EL.46.5 m～EL.63.65 m の質点（質点番号(1)～(3)）の最大応答加速度により算出する。地震波による影響は基本ケースでのＳ$_{d}$－Ｄ１による最大応答加速度に対する，その他の弾性設計用地震動Ｓ$_{d}$による最大応答加速度の比，地盤のばらつきによる影響は基本ケースに対するばらつきケースの比により算出する。

算出した応答補正比率を表 3-4 に示す。

表 3-4　応答補正比率

	NS 方向	EW 方向	備　考
① 地震波による影響	1.12	1.11	Ｓ$_{d}$－３１／Ｓ$_{d}$－Ｄ１
② ばらつきによる影響	1.06	1.06	地盤＋σ／基本ケース Ｓ$_{d}$－３１
①×② 応答補正比率	1.19	1.18	NS 方向は北面及び南面， EW 方向は東面及び西面に考慮する。
Ｓ$_{s}$地震時／Ｓ$_{d}$地震時	1.75	1.86	Ｓ$_{s}$－３１／Ｓ$_{d}$－３１ NS 方向は北面及び南面， EW 方向は東面及び西面に考慮する。

3.6.3　断面の評価部位の選定

応答補正比率を考慮し算出したＳ$_d$地震時の面外慣性力によって生じる面外応力の一覧を表 3-5 に示す。

表 3-5 より面外慣性力によって生じる面外応力は南面（R 通り）の 7C-8C 通り間の壁で最大となる。

表 3-5　発生面外応力

位置		スパン (mm)	震度	面外慣性力 (kN/m)	発生値	
					曲げﾓｰﾒﾝﾄ (kN･m)	面外せん断力 (kN)
北面	2C-3C	6750	1.48	10.6	40.4	35.9
	3C-4C	5600	1.59	11.4	29.9	32.0
	4C-5C	4250	1.53	11.0	16.6	23.5
	5C-6C	4250	1.52	11.0	16.5	23.3
	6C-7C	5300	1.61	11.6	27.2	30.8
	7C-8C	7050	1.49	10.7	44.3	37.7
南面	2C-3C	6750	1.51	10.9	41.4	36.8
	3C-4C	5600	1.51	10.9	28.5	30.5
	4C-5C	4250	1.60	11.5	17.4	24.5
	5C-6C	4250	1.60	11.5	17.4	24.5
	6C-7C	5300	1.71	12.3	28.8	32.6
	7C-8C	7300	1.61	11.6	51.4	42.2
東面	K-L	6200	1.48	10.7	34.1	33.0
	L-M	5850	1.56	11.2	31.9	32.8
	M-N	5850	1.50	10.8	30.7	31.5
	N-P	5850	1.45	10.4	29.7	30.5
	P-Q	6200	1.78	12.8	41.0	39.6
	Q-R	5850	1.78	12.8	36.5	37.4
西面	K-L	6200	1.18	8.49	27.2	26.3
	L-M	5850	1.43	10.3	29.4	30.2
	M-N	5850	1.48	10.7	30.4	31.2
	N-P	5850	1.59	11.5	32.7	33.6
	P-Q	6200	1.70	12.3	39.3	38.0
	Q-R	5850	1.57	11.3	32.3	33.1

注　：は最大値を示す。

3.6.4　断面算定方法

「ＲＣ－Ｎ規準」に基づき，曲げモーメント及びせん断力が，短期許容応力度に基づく許容値を超えないことを確認する。

曲げモーメントについては，評価対象部位に生じる曲げモーメント M が次式で算出する短期許容曲げモーメント M_A を超えないことを確認する。

$$M_A = a_t \cdot f_t \cdot j$$

ここで，

M_A	：短期許容曲げモーメント（N･mm）
a_t	：引張鉄筋断面積（mm^2）
f_t	：引張鉄筋の短期許容引張応力度（N/mm^2）
j	：断面の応力中心間距離で，断面の有効せいの 7/8 倍の値（mm）

面外せん断力については，面外せん断力 Q が次式で算出する許容面外せん断力 Q_A を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \alpha \cdot f_s$$

ここで，

Q_A	：許容面外せん断力（N）
b	：断面の幅（mm）
j	：断面の応力中心間距離で，断面の有効せいの 7/8 倍の値（mm）
α	：許容せん断力の割り増し係数（1.0）
f_s	：コンクリートの短期許容せん断応力度

3.6.5　断面算定結果

断面算定結果を表 3-6 に示す。

Ｓ$_d$地震時において，曲げモーメントに対する検定値が 0.540，せん断力に対する検定値が 0.207 となり，短期許容応力度を超えないことを確認した。

Ｓ$_s$地震時において，曲げモーメントに対する検定値が 0.945，せん断力に対する検定値が 0.363 となり，短期許容応力度を超えないことを確認した。

面外慣性力として，最大応答加速度の絶対値を用いていることや応答補正比率を乗じていること，解析モデルとして保守的なモデルを用いていることなど，保守的な検討をしていることも勘案すれば，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにより，原子炉建屋の壁が有する耐震性への影響はない。

表 3-6　断面算定結果

検討ケース	S_d地震時	S_s地震時
厚さ t（mm）×幅 b（mm）	300×1000	
有効せい　d（mm）	220	
配　筋	D19@200 （1433 mm^2）	
鉄筋の許容引張応力度　f_t（N/mm^2）	345	
ｺﾝｸﾘｰﾄの許容せん断応力度 f_s（N/mm^2）	1.06	
発生曲げモーメント　M（kN･m）	51.4	89.9
許容値　M_A（kN･m）	95.2	95.2
検定値　M/M_A	0.540	0.945
発生せん断力　Q（kN）	42.2	73.9
許容値　Q_A（kN）	204	204
検定値　Q/Q_A	0.207	0.363
判　定	可	可

3.7　検討のまとめ

水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認として，複数スパン及び層にまたがって直交方向に壁及び床のない連続した壁に対し，面外慣性力の影響について検討を行った。

３ 次元ＦＥＭモデルを用いて，弾性設計用地震動Ｓ$_d$に対する地震応答解析を実施し，壁の面外方向の最大応答加速度分布を確認した結果，面外にはらむような加速度分布となっており，面外慣性力が発生していることを確認したが，水平１方向入力による最大応答加速度分布に対し，水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せによる最大応答加速度分布は概ね同傾向であることを確認した。この結果は壁の面外応答に与える影響は，面外方向の地震動が支配的であり，水平直交方向及び鉛直方向地震動は面外応答に与える影響が小さい事を示している。

面外慣性力が発生していることから，原子炉建屋の壁を部分的に抽出し，保守的な静的モデルに置き換えて，面外慣性力による面外応力に対して断面算定を行った。その結果，Ｓ$_d$地震時及びＳ$_s$地震時における応力が，短期許容応力を超えないことを確認した。面外慣性力として，最大応答加速度の絶対値を用いていることや応答補正比率を乗じていること，解析モデルとして保守的なモデルを用いていることも踏まえると，面外慣性力により原子炉建屋の壁が有する耐震性への影響はない。

以上のことから，複数スパン及び層にまたがって直交方向に壁及び床のない連続した壁については，水平２方向及び鉛直方向地震力の組合せによる評価を行う部位として抽出しない。

4.　局所応答による影響検討

応答特性②－1 及び②－2 により抽出されなかった耐震評価部位全般に対して，局所的な応答について，弾性設計用地震動Ｓ$_{d}$－Ｄ１及び模擬地震波を用いて，3 次元ＦＥＭモデルによる精査を行った。

精査に当たっては，3 次元ＦＥＭモデルで構築した原子炉建屋の地震応答解析モデルを用いて，水平 2 方向及び鉛直方向入力時の最大応答加速度を算出し評価することで行った。精査の内容は，別紙 3「3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析」に示す。

3 次元ＦＥＭモデルを用いた精査の結果，原子炉建屋が有する耐震性への影響が小さいことから，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価が必要な部位は抽出されなかった。

したがって，水平 2 方向及び鉛直方向地震力を適切に算定するにあたっては，質点系モデルの地震応答解析結果を用いることで，簡易的かつ保守的に評価を行うことが可能であることを確認した。

5.　3 次元ＦＥＭモデルを用いた精査のまとめ

3 次元的な応答特性が想定される部位について，3 次元ＦＥＭモデルにより精査を行った。

応答特性②－１「面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい」部位として，原子炉建屋の壁（燃料取替フロア）について，精査を行った。

応答特性②－２「加振方向遺骸の方向に励起される振動の影響が大きい」部位として，ねじれ応答の影響が懸念される非常用ガス処理系配管支持架構の梁及び壁（鉄骨ブレース）について，精査を行った。

3 次元ＦＥＭモデルを用いた精査の結果，いずれの評価対象部位においても，有している耐震性への影響が小さいと判断できることから，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響が必要な部位は抽出されなかった。

更に，建屋評価部位全般に対し，局所的な応答について，原子炉建屋を対象として，3 次元モデルより，水平 2 方向及び鉛直方向入力時の最大応答加速度を算出し検討することで精査を行った。精査の結果，有している耐震性への影響が小さいと判断できることから，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響評価が必要な部位は抽出されなかった。

以上のことから，3 次元的な応答特性が想定される部位として抽出された部位については，有する耐震性への影響が小さいと判断できることから，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる評価を行う部位として抽出しない。

補　原子炉建屋の壁の面外慣性力による影響検討についての補足

1.　概要

本資料では，別紙 2「3.　原子炉建屋の壁の面外慣性力による影響検討」で行った原子炉建屋の壁の面外慣性力に対する検討で記載した評価位置の壁に生じる鉛直方向の加速度を示すものである。

2.　鉛直方向加速度分布

3 次元ＦＥＭモデルを用いた，弾性設計用地震動S_dに対する地震応答解析による鉛直方向入力における鉛直方向の最大応答加速度分布を図 2－1 に示す。

図 2－1 に示すように，鉛直方向加速度は壁の面内方向であり，面内での局所的な増幅はなく，別紙 2「3.　原子炉建屋の壁の面外慣性力による影響検討」において，面外慣性力に対する影響検討において，局所的な鉛直方向の増幅を考慮しない。

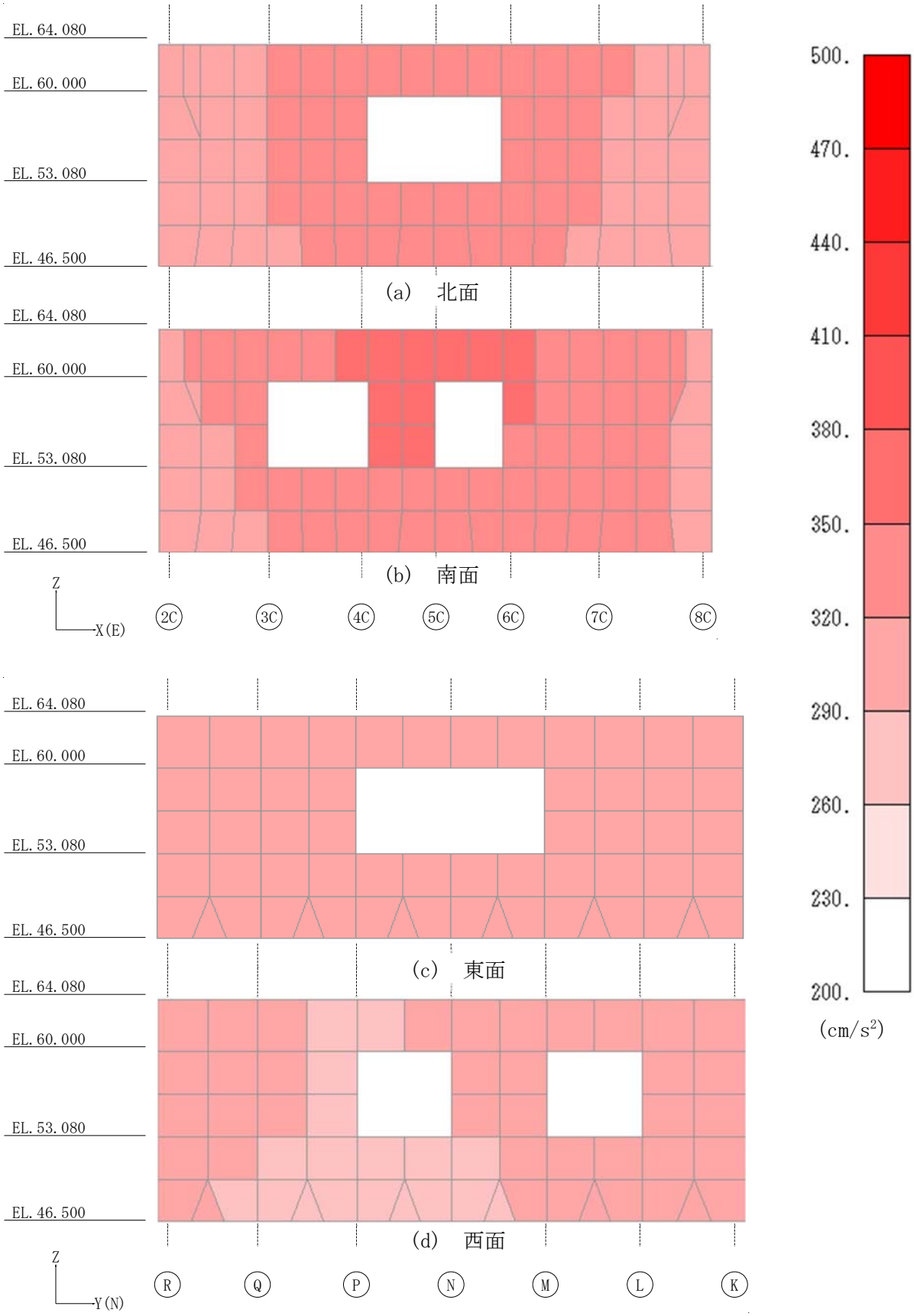


図 2－1　鉛直方向入力における鉛直方向の最大応答加速度分布

別紙３　３次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析

目次

1. 検討概要 ..... 別紙 3-1
1.1 構造概要 ..... 別紙 3-1
1.2 3次元ＦＥＭモデルによる耐震性評価の方針 ..... 別紙 3-5
2. 3次元ＦＥＭモデルの構築 ..... 別紙 3-7
2.1 原子炉建屋の3次元ＦＥＭモデル ..... 別紙 3-7
2.1.1 モデル化の基本方針 ..... 別紙 3-7
2.1.2 荷重 ..... 別紙 3-15
2.1.3 建屋－地盤の相互作用 ..... 別紙 3-15
2.2 固有値解析 ..... 別紙 3-18
2.3 観測記録を用いた検討 ..... 別紙 3-21
2.3.1 観測記録を用いた検討の概要 ..... 別紙 3-21
2.3.2 観測記録による解析結果 ..... 別紙 3-28
2.3.3 観測記録と解析結果の比較及び考察 ..... 別紙 3-28
2.3.4 結論 ..... 別紙 3-29
3. 3次元ＦＥＭモデルによる評価 ..... 別紙 3-36
3.1 地震応答解析の概要 ..... 別紙 3-36
3.2 建屋応答性状の把握 ..... 別紙 3-41
3.3 建屋耐震評価への影響検討 ..... 別紙 3-62
3.4 床応答への影響検討 ..... 別紙 3-95
3.5 地震観測記録を踏まえた耐震評価への影響検討 ..... 別紙 3-100
3.5.1 検討概要 ..... 別紙 3-100
3.5.2 評価方針 ..... 別紙 3-100
3.5.3 評価結果 ..... 別紙 3-105
3.5.4 入力地震動の代表性について ..... 別紙 3-108
4. まとめ ..... 別紙 3-110

補1 観測記録とシミュレーション解析の床応答スペクトル（h=1%）の比較
補2 実剛性を用いたシミュレーション解析結果
補3 3次元ＦＥＭモデルによるシミュレーション解析結果
補4 検討に用いる地震動の代表性について
補5 3次元ＦＥＭモデルによるＳｄ-Ｄ１の地震応答解析結果
補6 3次元ＦＥＭモデルによる応答結果の整理
補7 機器設置位置付近における応答

1.　検討概要

建屋の３次元的応答性状の把握及び質点系モデルによる地震応答解析の妥当性の確認の観点から，原子炉建屋について３次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析を行い，建屋の局所的な応答を検討する。また，３ 次元ＦＥＭモデルによる挙動が，建屋及び機器・配管系の有する耐震性に及ぼす影響を検討する。

1.1　構造概要

原子炉建屋は，主体構造が鉄筋コンクリート造で鉄骨造陸屋根をもつ地下２階，地上６階の建物である。中央部には，平面が南北方向 45.5 m，東西方向 42.5 m の原子炉建屋原子炉棟（以下「原子炉棟」という。）があり，その周囲には原子炉建屋付属棟（以下「付属棟」という。）を配置している。

原子炉棟と付属棟は，同一基礎版上に配置した一体構造であり，原子炉建屋の平面は，下部で南北方向 68.5 m，東西方向 68.25 m のほぼ正方形となっている。基礎底面からの高さは 73.08 m であり，地上高さは 56.08 m である。また，原子炉建屋は隣接する他の建屋と構造的に分離されている。

原子炉建屋の基礎は，厚さ 5.0 m のべた基礎で，支持地盤である砂質泥岩上に人工岩盤を介して設置されている。

原子炉棟の中央部には原子炉圧力容器を収容している原子炉格納容器があり，その周囲の壁（以下「シェル壁（S／W)」という。）は上部が円錐台形，下部は円筒形で基礎版から立ち上がっている。シェル壁（S／W）の壁厚は上部で 1.9 m，下部で 1.8 m である。

原子炉棟の外壁（以下「内部ボックス壁（I／W)」という。）は基礎版から屋根面まで連続しており，壁厚は地下部分で 1.5 m，地上部分では 1.5 m～0.3 m である。また，付属棟の外壁（以下「外部ボックス壁（O／W)」という。）の壁厚は地下部分で 1.5 m，地上部分では 1.5 m～0.9 m である。建屋は全体として非常に剛性が高く，建屋に加わる地震時の水平力はすべてこれらの耐震壁で負担する。

なお，燃料取替床（EL.46.5 m）には使用済燃料プールが設置されている。

原子炉建屋の概略平面図及び概略断面図を図 1-1 及び図 1-2 に示す。

図 1-1（1／2）　　の概略平面図（EL. 46.5 m）

図 1-1（2／2）　　の概略平面図（EL. －4.0 m）

図 1-2（1／2）　原子炉建屋の概略断面図（A－A 断面　EW 方向）

図 1-2（2／2）　原子炉建屋の概略断面図（B－B 断面　NS 方向）

1.2　3次元ＦＥＭモデルによる耐震性評価の方針

原子炉建屋について3次元ＦＥＭモデルを構築し，固有値解析や観測記録を用いた解析結果から，同モデルの妥当性を確認する。その上で，3 次元的な応答特性を把握する。また，弾性設計用地震動Ｓ$_d$による地震応答解析を行い，建屋の平均的な応答や局所的な応答を把握する。更に，3次元的な応答特性から建屋及び機器・配管系の耐震評価への影響を確認する。

解析モデルのケースを表1-1に示す。解析モデルのケースは，床の柔性，地盤のモデル化を変動要因とする以下の3ケースとした。

表1-1　解析モデルのケース

モデルケース	床のモデル化	地盤のモデル化	コンクリート 剛性の設定
建屋模擬モデル	床柔	相互作用考慮	設計基準強度
比較用モデル	床柔	底面鉛直方向固定	設計基準強度
質点系対応モデル	床剛	相互作用考慮	設計基準強度

建屋模擬モデルは，床の柔性を考慮し，地盤のモデル化に相互作用を考慮することで，建屋の実状を模擬したモデルとしている。

比較用モデルは建屋模擬モデルにおける地盤のモデル化「相互作用考慮」を「底面鉛直方向固定」に変更している。

質点系対応モデルは建屋模擬モデルにおける「床柔」を「床剛」に変更することにより。「床剛，相互作用考慮」の組合せとなり，質点系モデルに対応したモデルとなっている。

これら3ケースについて，固有値解析及び地震応答解析を実施し，その結果を比較することにより，全体的な3次元的応答特性，ロッキング振動の影響，ねじれの影響及び床の剛性の影響について検討を実施する。

3次元ＦＥＭモデルによる耐震性評価フローを図1-3に示す。

解析には解析コード「ＭＳＣ　ＮＡＳＴＲＡＮ ver.2016.1」を用いる。

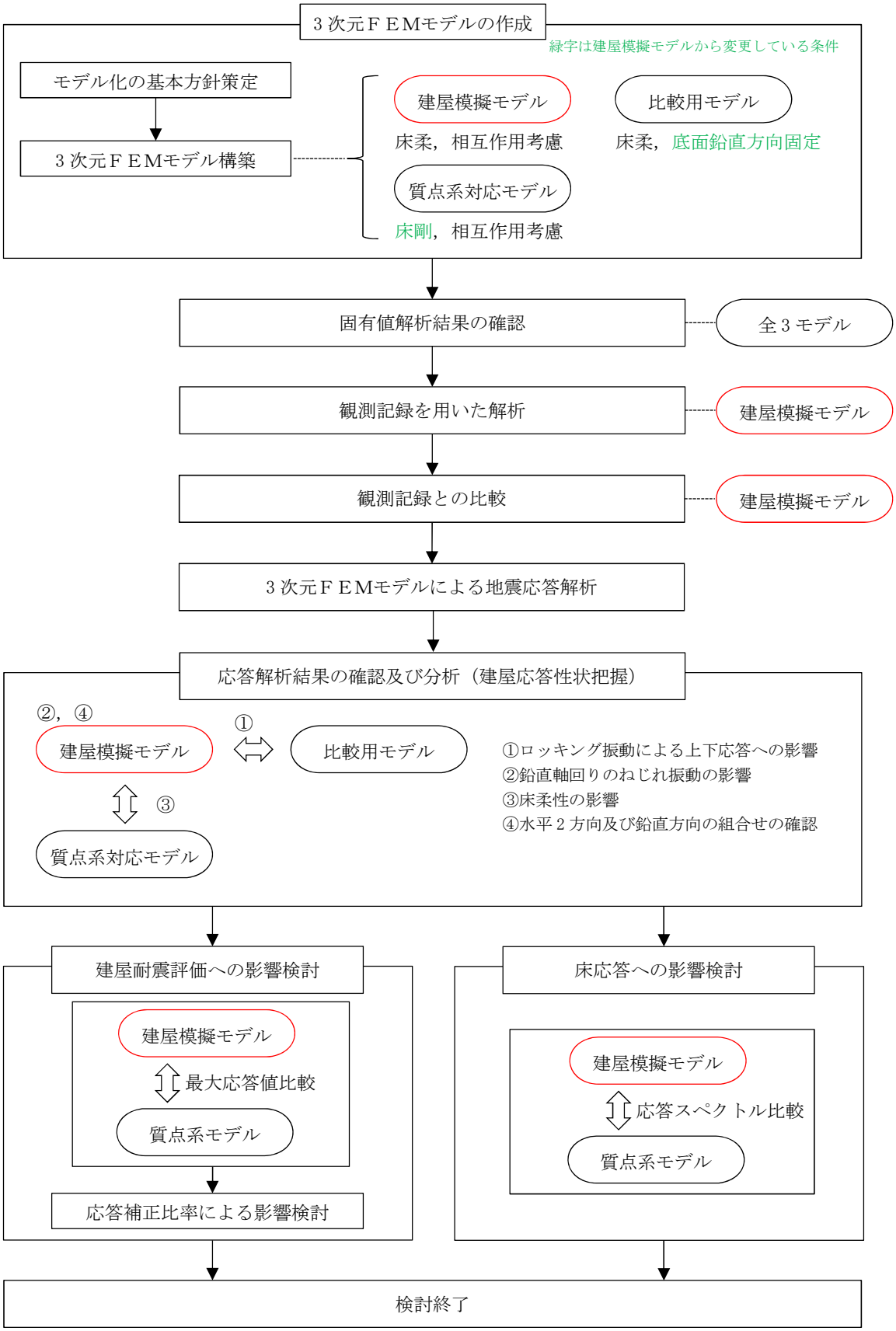


図 1-3　3 次元ＦＥＭモデルによる耐震性評価フロー

2.　3次元ＦＥＭモデルの構築

2.1　原子炉建屋の3次元ＦＥＭモデル

2.1.1　モデル化の基本方針

原子炉建屋の3次元ＦＥＭモデルを構築する。解析モデルを図2-1に示す。また，各階のモデル図を図2-2に示す。

モデル化の範囲は，原子炉棟，付属棟及び基礎とする。

耐震壁，補助壁及び床スラブはシェル要素(約 7500 要素)，柱及び梁はバー要素(約 1500 要素)，屋根面の鉄骨ブレースはロッド要素（約 50 要素)，基礎はソリッド要素(約 2800 要素)とする。

要素の大きさは，各床スラブレベルと対応する位置に節点を設け，高さ方向及び水平方向に2 m～3 m程度とする。

部材の接合部における剛域及びモデル化位置のオフセットの設定は行わない。また，バー要素は柱・梁の壁・床と重複する部分の断面も含めた断面性能としてモデル化している。

使用材料及び地盤の物性値をそれぞれ表 2-1 及び表 2-2 に，地盤のひずみ依存性を図2-3～図2-6に示す。コンクリート強度は，設計基準強度を用いるものとする。

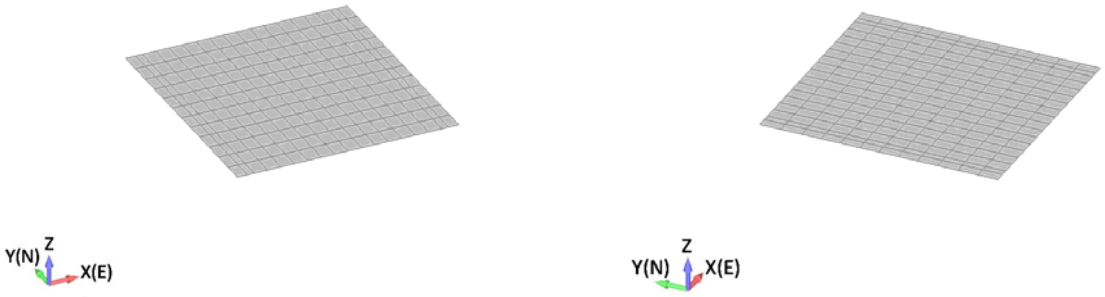
(a) 建屋全景

図2-1（1／2）　解析モデル

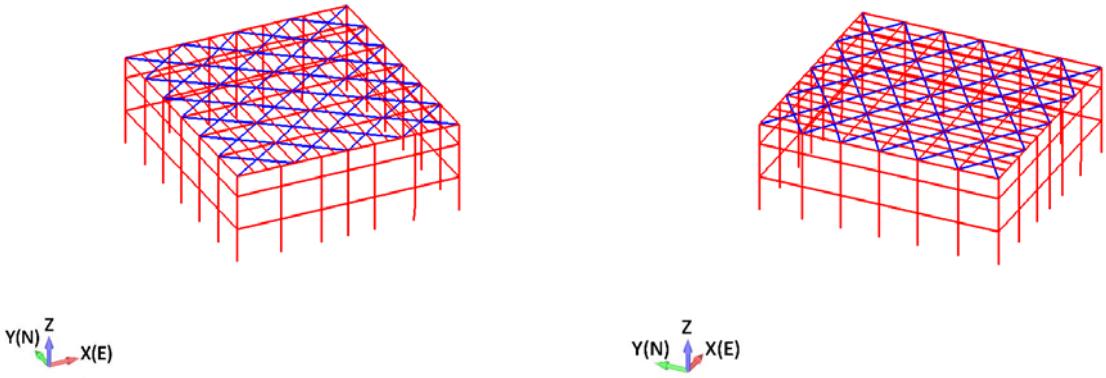
(b) EW 断面図

(c) NS 断面図

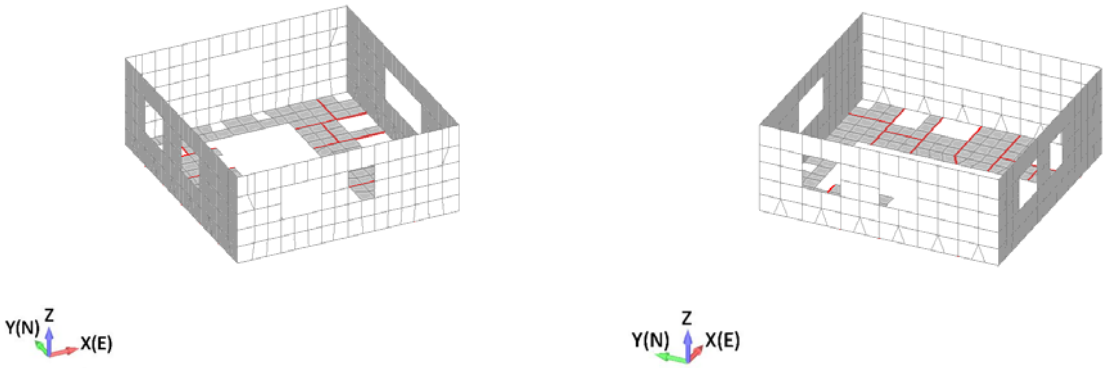
図 2-1 (2／2)　解析モデル



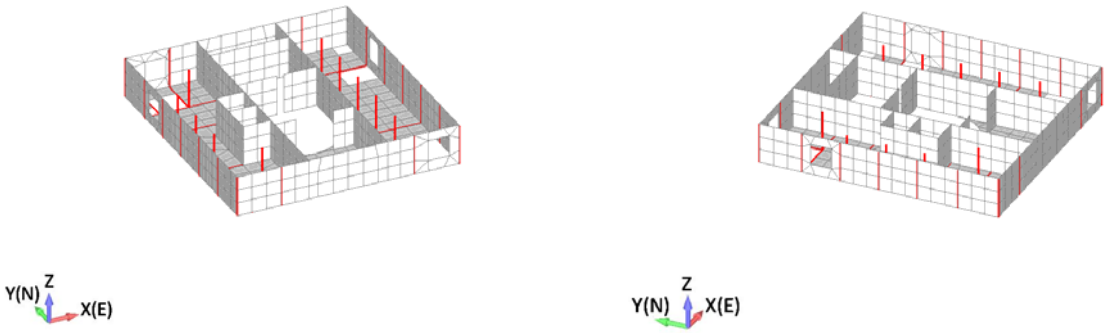
(a) EL. 63.65 m（屋根スラブ）



(b) EL. 46.5 m～EL. 63.65 m（柱，梁及び屋根トラス）

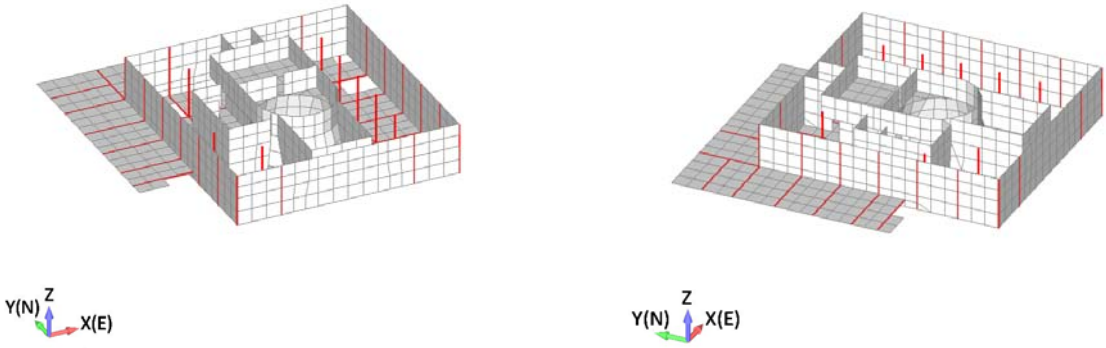


(c) EL. 46.5 m～EL. 63.65 m

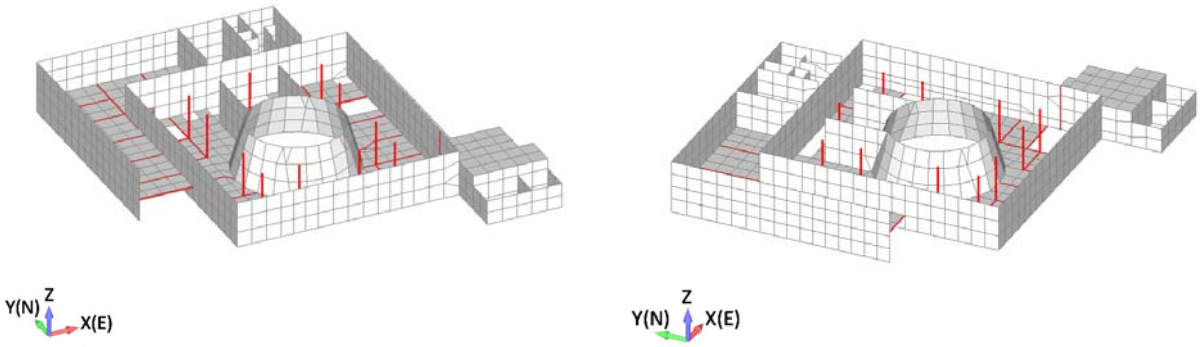


(d) EL. 38.8 m～EL. 46.5 m

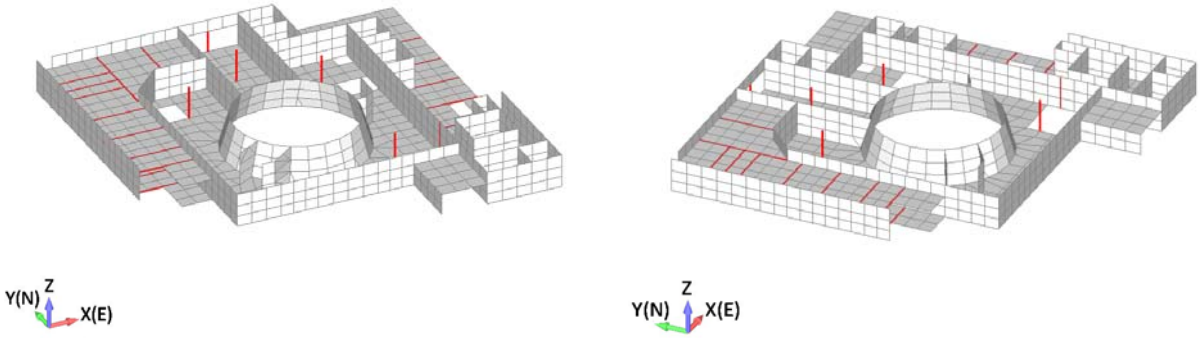
図 2-2（1／3）　各部材のモデル図



(e) EL.29.0 m～EL.38.8 m

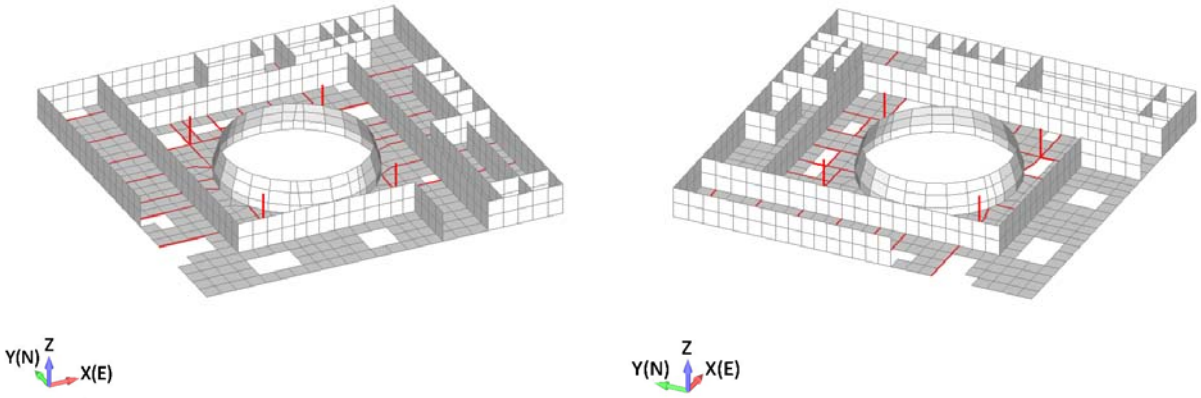


(f) EL.20.3 m～EL.29.0 m

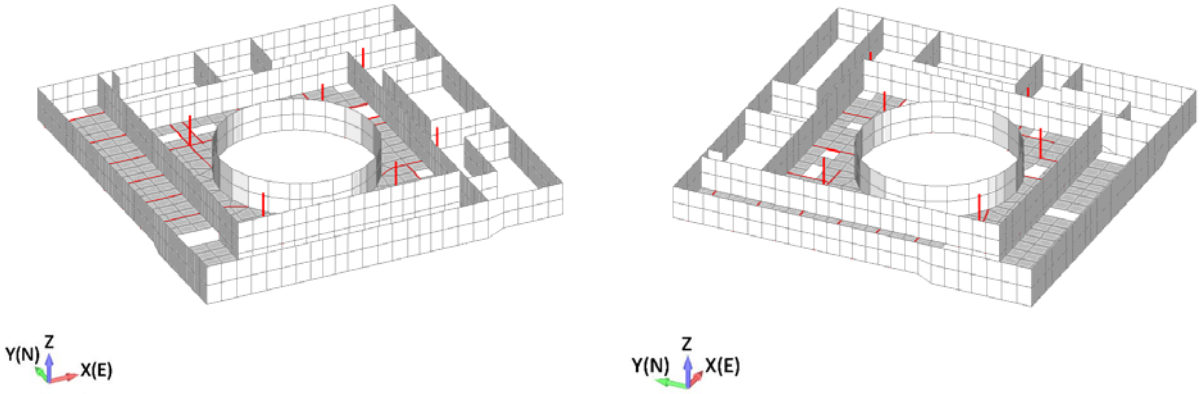


(g) EL.14.0 m～EL.20.3 m

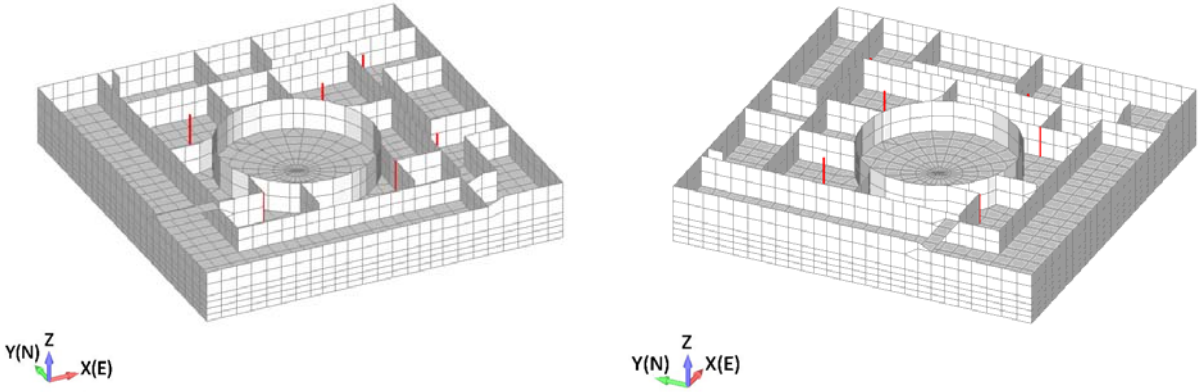
図 2-2 (2／3)　各部材のモデル図



(h) EL.8.2 m～EL.14.0 m



(i) EL.2.0 m～EL.8.2 m



(j) EL.－9.0 m～EL.2.0 m

図 2-2（3／3）　各部材のモデル化

表 2-1　使用材料の物性値

部位	ヤング係数 (N/mm^2)	減衰定数 (%)
鉄筋コンクリート部	2.21×10^4	5
鉄骨部	2.05×10^5	2

表 2-2　地盤の物性値

(a) 地盤物性

標高 EL. m	地層 区分	層厚 m	密度 ρ t/m^3	S波速度 Vs m/s	ﾎﾟｱｿﾝ比 ν
8.0	du*	5.0	1.82	210	0.385
3.0	Ag2*	1.0	1.89	240	0.286
2.0	Ag2	4.7	2.01	240	0.491
-2.7	D2g-3	11.7	2.15	500	0.462
-14.4	Km	5.6	1.72	446	0.461
-20.0		20.0	1.72	456	0.460
-40.0		20.0	1.73	472	0.458
-60.0		30.0	1.73	491	0.455
-90.0		30.0	1.73	514	0.452
-120.0		30.0	1.73	537	0.449
-150.0		40.0	1.74	564	0.445
-190.0		40.0	1.74	595	0.441
-230.0		40.0	1.75	626	0.437
-270.0		50.0	1.75	660	0.433
-320.0		50.0	1.76	699	0.427
-370.0	解放基盤	—	1.76	718	0.425

注記　＊：地下水位より浅いことを示す。

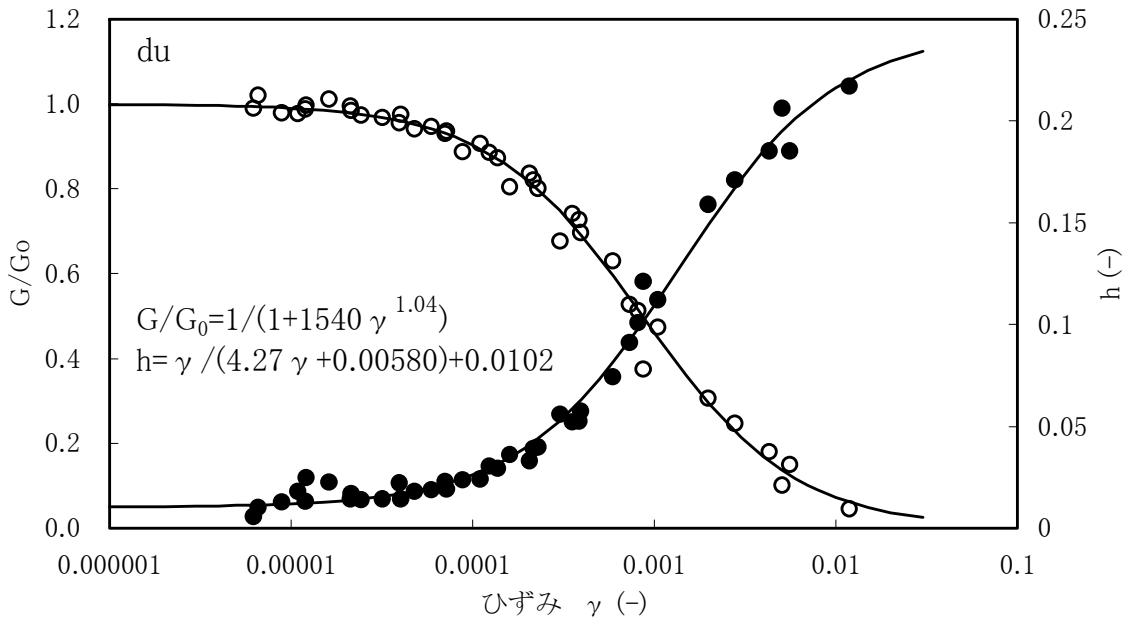


図 2-3　動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性（du 層）

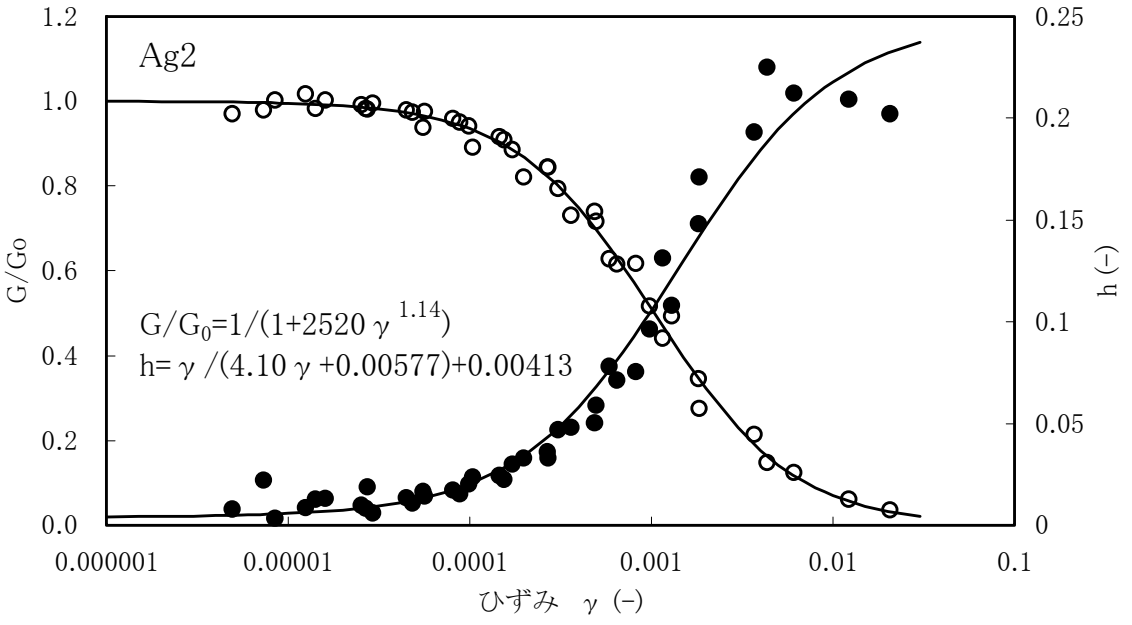


図 2-4　動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性（Ag2 層）

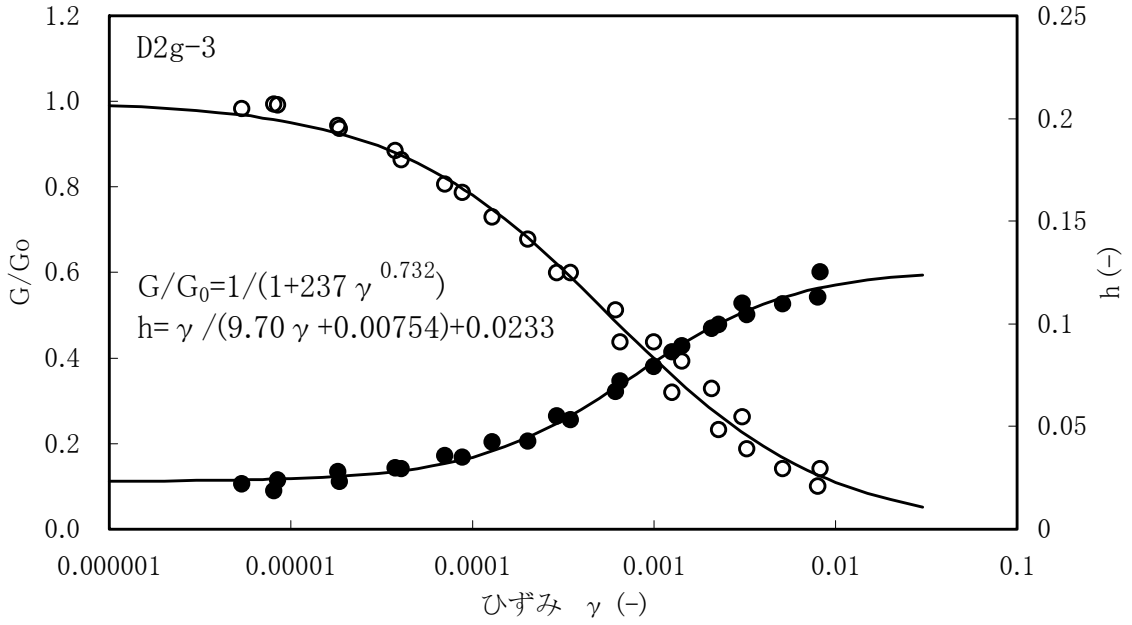


図 2-5　動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性（D2g-3 層）

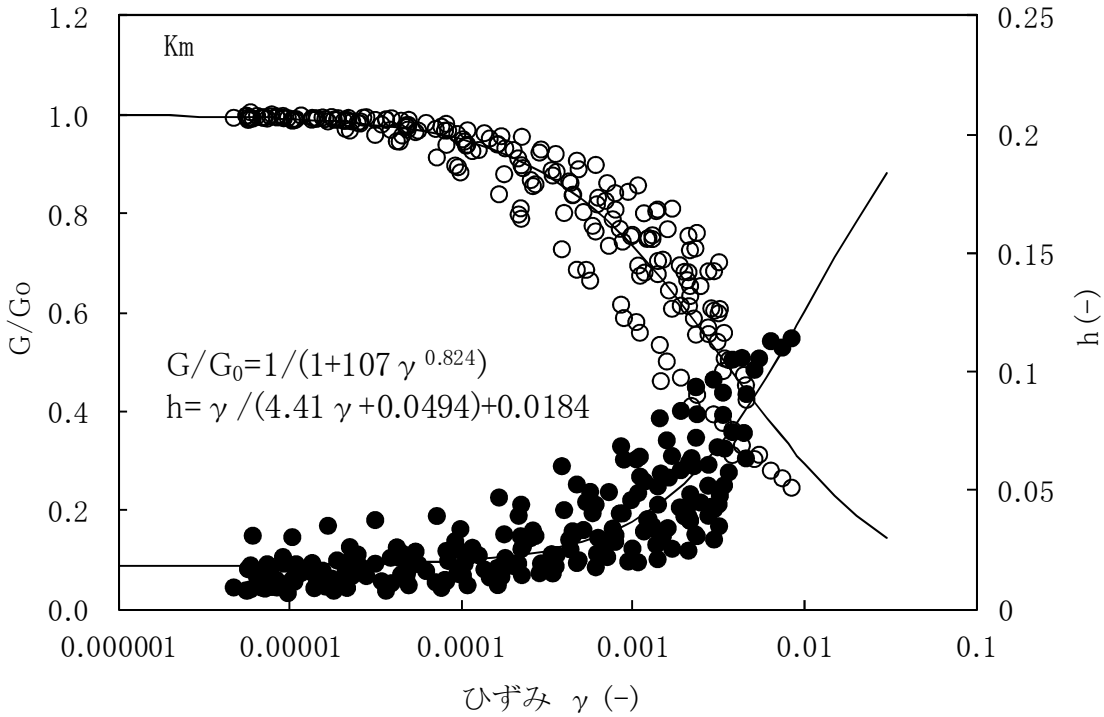


図 2-6　動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性（Km 層）

2.1.2　荷重

固定荷重，積載荷重，積雪荷重及び機器・配管荷重を考慮する。各部について，質点系モデルの質量と整合するよう質量を調整する。

このうち，炉内構造物については，質点系モデルで質量として考慮しており，建屋の 3 次元ＦＥＭモデルについても質量として考慮する。

2.1.3　建屋－地盤の相互作用

建屋－地盤の相互作用は，添付書類「Ｖ-2-2-1　原子炉建屋の地震応答計算書」における質点系モデルのＳ$_{d}$-Ｄ１での基礎底面地盤ばね及び側面地盤ばねと整合するよう，地盤をばね要素でモデル化することで考慮する。

基礎底面地盤ばねについては，質点系モデルで考慮したスウェイ，ロッキング及び鉛直ばねの値を元に，3 次元ＦＥＭモデルの基礎底面の各節点位置に要素面積に応じて離散化する。ただし，鉛直ばねのうち，水平方向加振用は，基礎底面ロッキングばねを元に NS 方向と EW 方向の平均値として設定する。

基礎側面の地盤ばねについては，質点系モデルで考慮している側面水平ばねの値を元に，各質点レベルに対応する各節点位置に要素面積に応じて離散化する。

なお，用いるばね値は，質点系モデルにおけるＳ$_{d}$－Ｄ１に対する値とする。

各地盤ばね諸元については表 2-3～表 2-5 に，底面地盤ばねと側面地盤ばね設置図について図 2-7 に示す。

表 2-3　底面地盤ばね定数と減衰係数（水平方向）

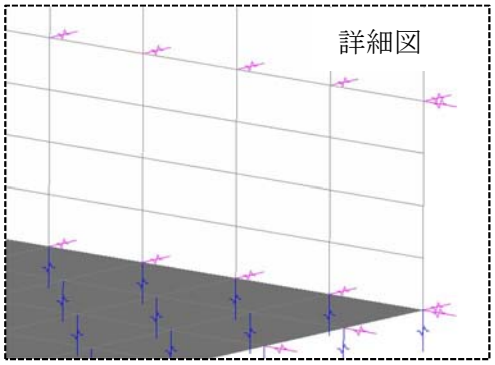
地盤ばね	NS 方向		EW 方向	
	ばね定数	減衰係数	ばね定数	減衰係数
水平底面ばね	6.95×10^{7} kN/m	3.58×10^{6} kN・s/m	6.95×10^{7} kN/m	3.59×10^{6} kN・s/m

表 2-4　底面地盤ばね定数と減衰係数（上下方向）

地盤ばね		UD 方向	
		ばね定数	減衰係数
上下底面ばね	水平方向加振時	2.56×10^{8} kN/m	4.20×10^{6} kN・s/m
	鉛直方向加振時	1.16×10^{8} kN/m	8.50×10^{6} kN・s/m

表 2-5　側面地盤ばね定数と減衰係数（水平方向）

地盤ばね	EL. (m)	NS 方向		EW 方向	
		ばね定数	減衰係数	ばね定数	減衰係数
水平側面ばね	8.0	6.67×10^{5} kN/m	3.01×10^{5} kN・s/m	6.67×10^{5} kN/m	3.03×10^{5} kN・s/m
	2.0	1.76×10^{6} kN/m	6.71×10^{5} kN・s/m	1.76×10^{6} kN/m	6.67×10^{5} kN・s/m
	−4.0	8.58×10^{6} kN/m	9.76×10^{5} kN・s/m	8.58×10^{6} kN/m	9.76×10^{5} kN・s/m
	−9.0	2.18×10^{7} kN/m	9.56×10^{5} kN・s/m	2.18×10^{7} kN/m	9.56×10^{5} kN・s/m



青　　：底面地盤ばね

ピンク　　：側面地盤ばね

注１　：底面地盤ばねは３方向軸ばねとする。

注２　：側面地盤ばねは法線方向軸ばねとする。

図 2-7　地盤ばねの設置図

2.2　固有値解析

建屋模擬モデル（床柔，相互作用考慮），比較用モデル（床柔，底面鉛直方向固定），質点系対応モデル（床剛，相互作用考慮）の 3 つの解析モデルケースについて，固有値解析を実施した。

各モデルの建屋－地盤連成の 1 次モードにおける固有振動数を表 2-6 に示す。モード図を表 2-7 に示す。なお，質点系モデルの固有値解析結果は，S_d－D１に対する結果とする。

建屋模擬モデルと比較用モデルとでは，モデル設定において，鉛直方向の建屋－地盤相互作用の考慮の有無に差異がある。両モデルの固有値解析結果を比較すると，建屋－地盤相互作用を考慮した建屋模擬モデルの方が，比較用モデルよりも固有振動数が小さくなる傾向である。

建屋模擬モデルと質点系対応モデルとでは，モデル設定において，床を柔とするか剛とするかに差異がある。両モデルの固有値解析結果を比較すると，床を剛とした質点系対応モデルの方が建屋模擬モデルよりも固有振動数が大きくなる傾向である。

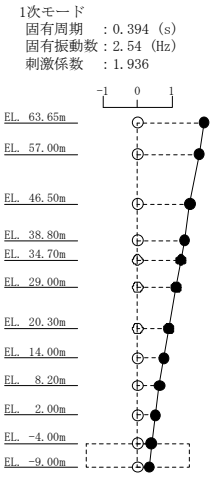
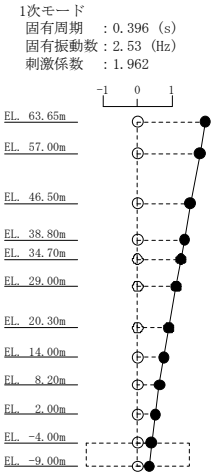
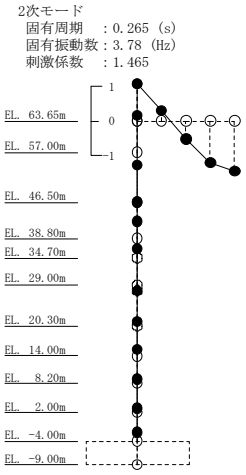
質点系対応モデルと質点系モデルとでは，補助壁のモデル化に差異がある。質点系対応モデルでは，補助壁をモデル化しているが，質点系モデルではモデル化していない。両モデルの固有値解析結果を比較すると，補助壁をモデル化した質点系対応モデルで剛性が質点系モデルより大きくなり，固有振動数も大きくなる傾向が見られる。

上記のモデル設定の差と固有値解析結果で得られた固有振動数の関係については，工学的に類推される結果と対応しており，各モデルの設定は妥当なものと考えられる。

表 2-6　固有値解析結果

方向	振動数（Hz）			
	建屋模擬 モデル	比較用 モデル	質点系対応 モデル	質点系 モデル
NS	2.45	3.08	2.63	2.54
EW	2.38	2.95	2.60	2.53
UD	3.72	9.04	3.81	3.78

表 2-7　質点系モデル及び３次元ＦＥＭモデルのモード比較

方向	質点系	建屋模擬モデル
NS	 2.54 Hz	2.45 Hz
EW	 2.53 Hz	2.38 Hz
UD	 3.78 Hz	3.72 Hz

2.3　観測記録を用いた検討

2.3.1　観測記録を用いた検討の概要

2011 年東北地方太平洋沖地震に対して，3 次元ＦＥＭモデルを用いて解析を実施する。解析には前述の建屋模擬モデルを用いる。観測記録を用いた検討に用いる使用材料の物性値及び地盤ばねの物性値を表 2-8～表 2-11 に示す。

解析に用いる地震の諸元を図 2-9 に，地震計位置を図 2-10 に示す。また，観測記録を元に作成された，解放基盤表面レベル（EL.－370 m）で定義される解放基盤波を図 2-11 に，解放基盤波を用いて算出した地盤の最大加速度分布と観測記録の比較を図 2-12 に示す。

観測記録を用いた解析は，はじめに，3 次元ＦＥＭモデルに地盤ばねを介してホワイトノイズを入力し，周波数応答解析により，基礎底面レベル（EL. －9.0 m）に対する各節点の伝達関数を算定する。次に，一次元波動論に基づき，解放基盤波を用いて算出した基礎底面レベルでの地盤の応答波と周波数応答解析より得られた伝達関数を用いて各節点での応答を評価する。また，3 方向同時入力による応答は，水平 2 方向及び鉛直方向の 1 方向入力による地震応答解析で算出された各成分の応答を，時刻歴で足し合わせることにより算出する。応答の算出方法の概要を図 2-8 に示す。

検討は，地震計を設置している EL.46.5 m，EL.29.0 m，EL.14.0 m 及び EL.－4.0 m の位置での応答解析結果と観測記録とを比較することにより行う。なお，観測記録を用いた解析は，鉄筋コンクリート部の減衰定数を 5%，鉄骨部の減衰定数を 2%として行う。

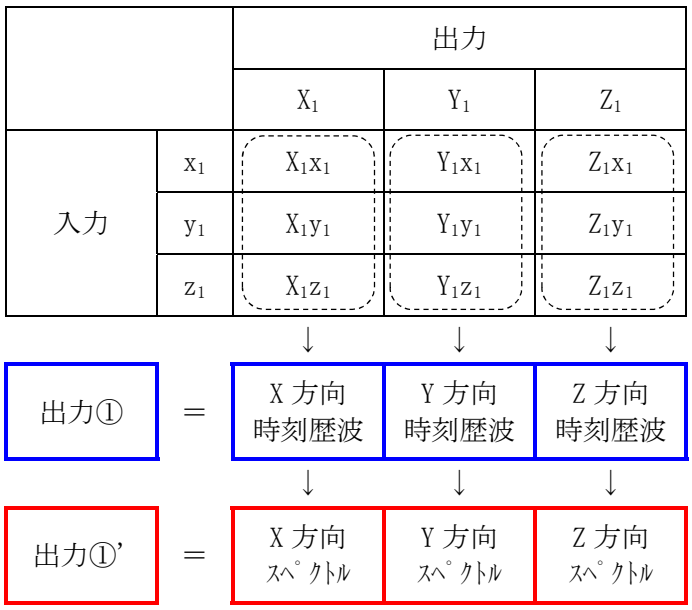


図 2-8　3 方向同時入力による応答の算出方法

表 2-8　使用材料の物性値

部位	ヤング係数 (N/mm^2)	減衰定数 (%)
鉄筋コンクリート部	2.21×10^4	5
鉄骨部	2.05×10^5	2

表 2-9　底面地盤ばね定数と減衰係数（水平方向）

地盤ばね	NS 方向		EW 方向	
	ばね定数	減衰係数	ばね定数	減衰係数
水平底面ばね	6.95×10^7 kN/m	3.58×10^6 kN･s/m	6.95×10^7 kN/m	3.59×10^6 kN･s/m

表 2-10　底面地盤ばね定数と減衰係数（鉛直方向）

地盤ばね		UD 方向	
		ばね定数	減衰係数
上下底面ばね	水平方向加振時	2.55×10^8 kN/m	4.18×10^6 kN･s/m
	鉛直方向加振時	1.16×10^8 kN/m	8.49×10^6 kN･s/m

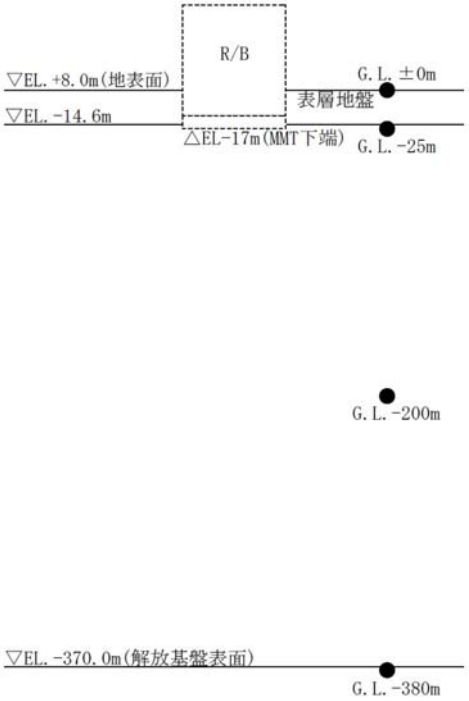
表 2-11　側面地盤ばね定数と減衰係数（水平方向）

地盤ばね	EL. (m)	NS 方向		EW 方向	
		ばね定数	減衰係数	ばね定数	減衰係数
水平側面ばね	8.0	6.28×10^5 kN/m	2.74×10^5 kN･s/m	6.28×10^5 kN/m	2.74×10^5 kN･s/m
	2.0	1.59×10^6 kN/m	5.98×10^5 kN･s/m	1.59×10^6 kN/m	6.03×10^5 kN･s/m
	−4.0	8.27×10^6 kN/m	9.58×10^5 kN･s/m	8.27×10^6 kN/m	9.56×10^5 kN･s/m
	−9.0	2.14×10^7 kN/m	9.49×10^5 kN･s/m	2.14×10^7 kN/m	9.48×10^5 kN･s/m

地震名	2011 年東北地方太平洋沖地震
発生日時	2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃*
マグニチュード	9.0*
震源深さ	24 km*
震央距離	270
震源距離	271

注記　＊：気象庁発表値

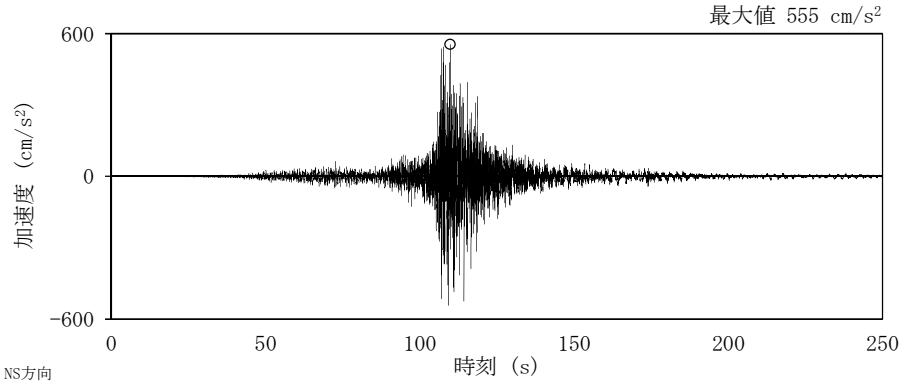
図 2-9　東北地方太平洋沖地震の震央位置



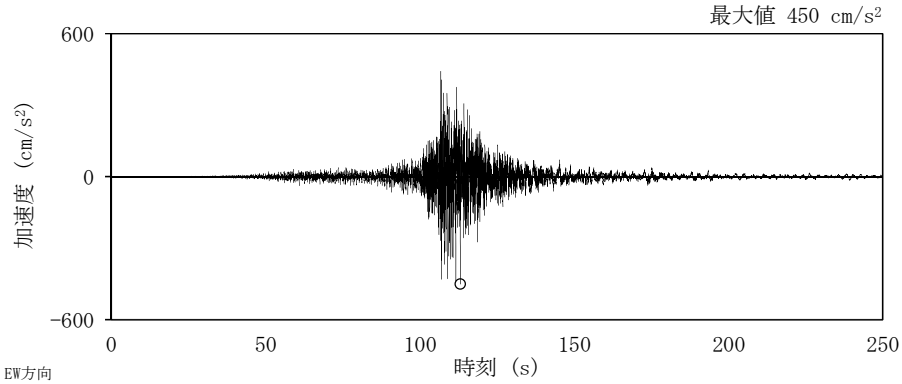
(a) 地盤観測点

(b) 建屋観測点

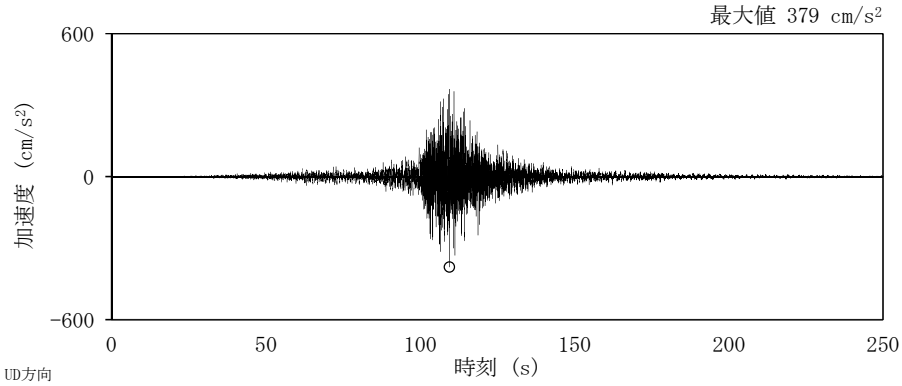
図 2-10　地震計位置



(a) 加速度波形　NS 方向

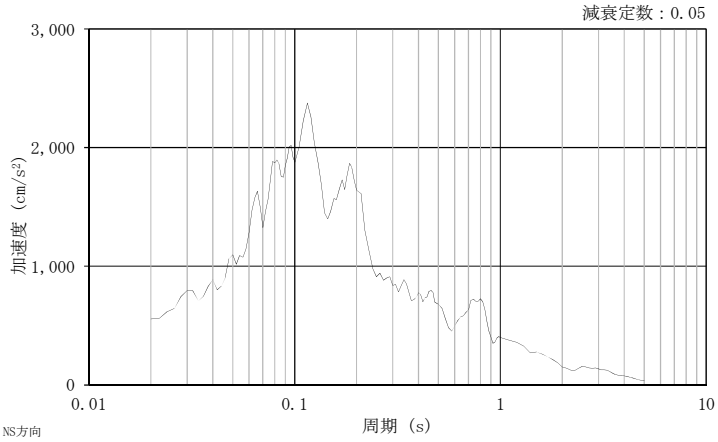


(b) 加速度波形　EW 方向

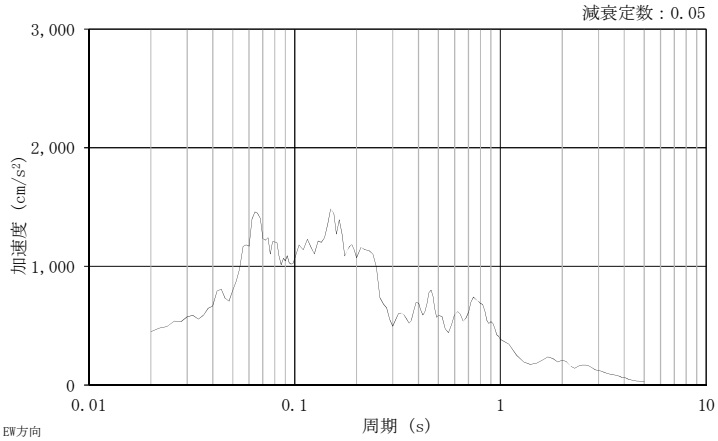


(c) 加速度波形　UD 方向

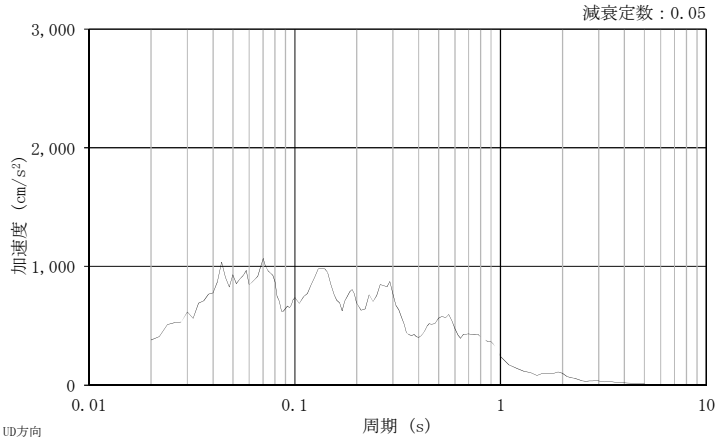
図 2-11 (1／2)　解放基盤表面レベル (EL.－370 m) での解放基盤波



(d) 加速度応答スペクトル　NS 方向

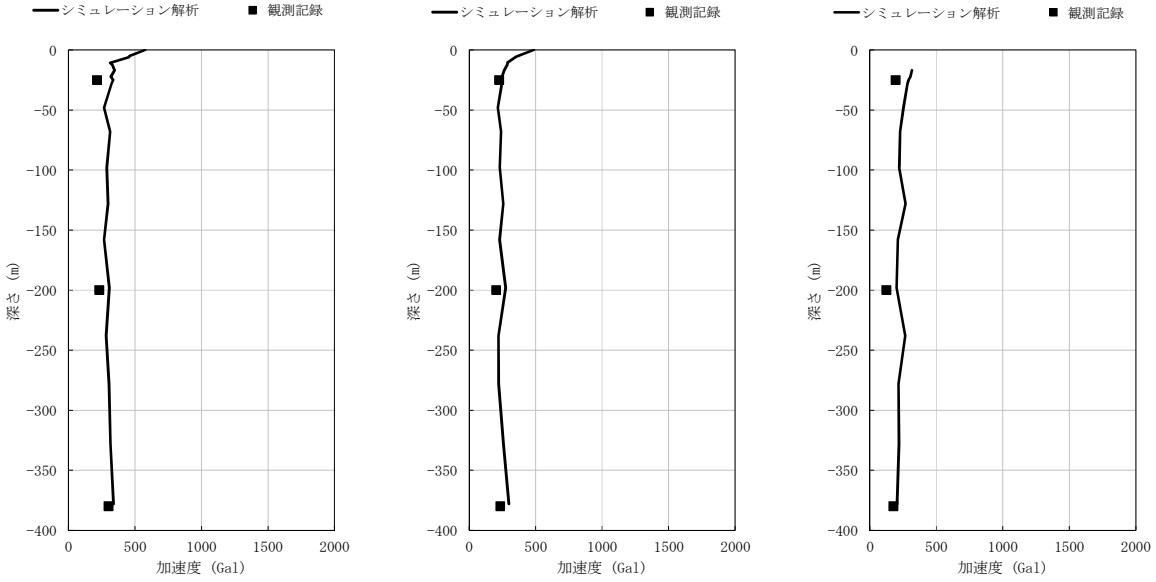


(e) 加速度応答スペクトル　EW 方向



(f) 加速度応答スペクトル　UD 方向

図 2-11 (2／2)　解放基盤表面レベル (EL.-370 m) での解放基盤波



(a) NS 方向　　(b) EW 方向　　(c) UD 方向*

注記　＊：UD 方向の G.L.－17 m（EL.－9 m）の観測記録は E＋F，シミュレーション解析は 2E を示す。

図 2-12　地中の最大応答加速度分布

2.3.2　観測記録による解析結果

2011 年東北地方太平洋沖地震の解放基盤波を用いて 3 次元ＦＥＭモデル（建屋模擬モデル）による解析を実施する。

EL.46.5 m，EL.29.0 m，EL.14.0 m 及び EL.－4.0 m の地震計位置での観測記録及び解析結果の加速度応答スペクトルの比較を表 2-12 に示す。なお，観測記録と比較するための解析結果は 3 方向同時入力による結果とし，地震計位置近傍の節点のものを用いる。また，添付書類「Ｖ-2-2-1　原子炉建屋の地震応答計算書」で用いた質点系モデルによるシミュレーション解析結果も併せて示す。

2.3.3　観測記録と解析結果の比較及び考察

観測記録，質点系モデルによるシミュレーション解析結果，3 次元ＦＥＭモデルによる解析結果を比較すると，NS 方向については，やや 3 次元ＦＥＭモデルによる解析結果が他に比べ大きめとなる傾向にあるが，質点系モデルによるシミュレーション解析結果及び 3 次元ＦＥＭモデルによる解析結果は観測記録のスペクトル形状と概ね対応している。

EW 方向について，3 次元ＦＥＭモデルによる解析結果は 0.4 秒～0.5 秒付近におけるピークを大きく評価しているが，その他の周期帯においては比較的よく整合している。EL.46.5 m では，0.1 秒付近より短周期側の周期帯において，質点系モデルによるシミュレーション解析結果に比べ観測記録が大きくなっている。3 次元ＦＥＭモデルの解析結果については，若干小さめではあるものの応答スペクトルの傾向は再現できている。

鉛直方向について，全体的に 3 次元ＦＥＭモデルによる解析結果が大きくなる傾向にはあるが，両モデルでの解析結果は観測記録のスペクトル形状と概ね対応している。

EW 方向において，解析結果と観測記録とで差異が生じる要因としては，以下が考えられる。

①　0.4～0.5 秒付近の周期帯において大きなピークが生じる要因

・0.4～0.5 秒付近の周期帯は，建屋－地盤連成系における 1 次固有周期付近の周期帯である。原子炉建屋の地震応答解析モデルは，補足説明資料「地震応答解析における既工認との比較」の別紙「原子炉建屋の地震応答解析モデルについて」で示すように，①人工岩盤を解析モデルに反映していないことにより，短周期成分を中心にやや大きくなっていること，②側面の地盤回転ばねを無視していることの影響は軽微であることを確認しており，③その他の要因としては，ばらつきをもつ不均質な地盤を平均的な成層モデルに仮定していることが差異の生じる要因と考えられる。

②　0.1 秒付近より短周期側の周期帯で観測記録が大きくなる要因

・3 次元ＦＥＭモデルにおける水平及び鉛直の各方向の入力による EL.46.5 m での EW 方向成分の床応答スペクトルを表 2-13 に示す。NS 方向入力による EW 方向成分の応答はいずれの位置でも比較的小さく，位置による差はほとんどない。また，EW 方向入力による EW 方向成分の応答についても，位置によって大きな差はなく，

質点系モデルによる結果ともよく整合している。しかし，UD 方向入力による EW 方向成分の応答は，応答評価点①及び②では比較的小さいが，応答評価点③～⑤においては 0.1 秒付近で大きな応答が生じている。各方向の入力による EW 方向成分の応答を時刻歴で足し合わせた 3 方向入力による応答は，応答評価点①及び②では，EW 方向入力及び質点系モデルによるシミュレーション解析結果と大きな差は生じていないが，応答評価点③～⑤では，短周期側で増幅しており，観測記録に近いスペクトル形状を示している。

・観測記録において短周期側で応答の増幅が生じている EL.46.5 m の下階の EL.38.8 m における 3 次元ＦＥＭモデル及び質点系モデルによるシミュレーション解析の床応答スペクトルを表 2-14 に示す。EL.38.8 m では，位置によるスペクトル形状の差はほとんどなく，1 方向入力と 3 方向入力による結果も差はわずかであり，EL.46.5m で見られるような局所的な応答は生じていない。

・以上より，観測記録で見られる短周期側の増幅は，鉛直方向の入力により生じる EW 方向の応答によるものであり，EL.46.5 m において生じているものであると考えられる。質点系モデルによるシミュレーション解析結果においては他方向からの入力による応答を評価することができないため，観測記録と差異が生じたと考えられる。

・原子炉建屋 3 次元ＦＥＭモデルのモード図（EW 方向断面図）を図 2-13 に示す。地震計位置及び西面中央付近において，鉛直方向入力による EW 方向応答の励起が生じる 0.1 秒付近に，東西のオペフロ面が外側にはらみ出すようなモード（10.06 Hz）があり，EW 方向の応答が大きくなる要因の一つと考えられる

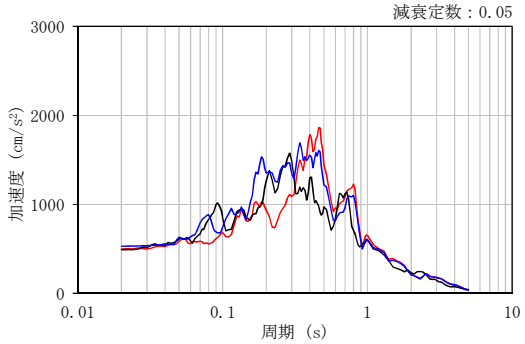
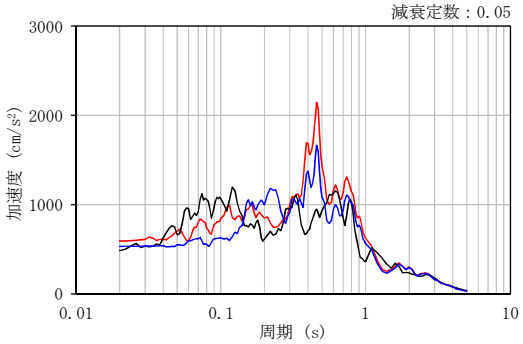
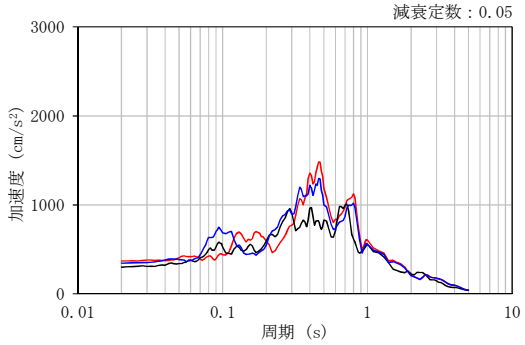
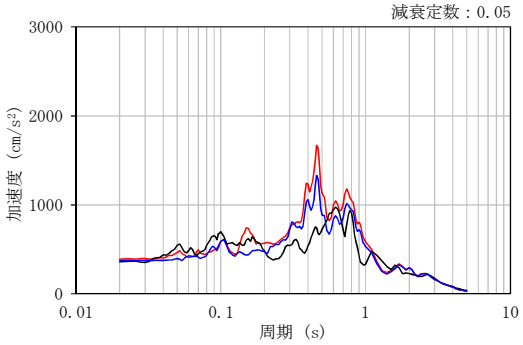
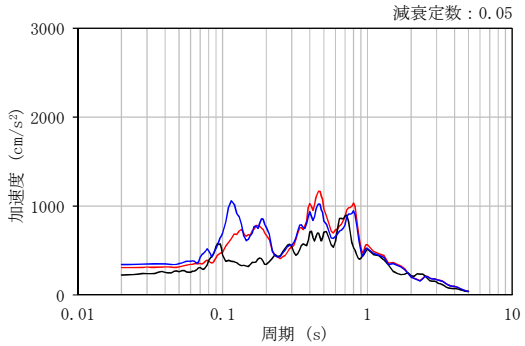
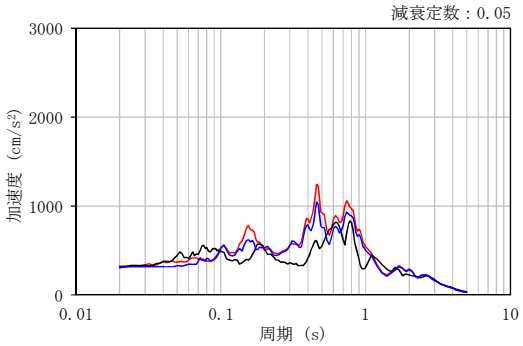
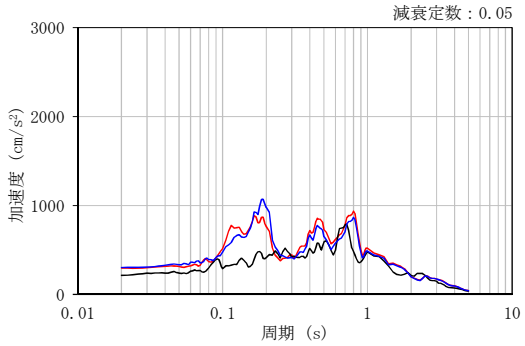
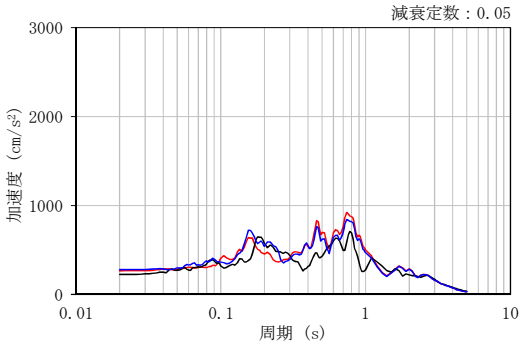
2.3.4　結論

以上から，建屋模擬モデルによる解析結果は，一部の周期帯に差異が認められるものの，観測記録と概ね対応しており，スペクトル形状を再現できている。

よって，以降の原子炉建屋の 3 次元応答性状の影響検討については，建屋模擬モデルを用いることとする。

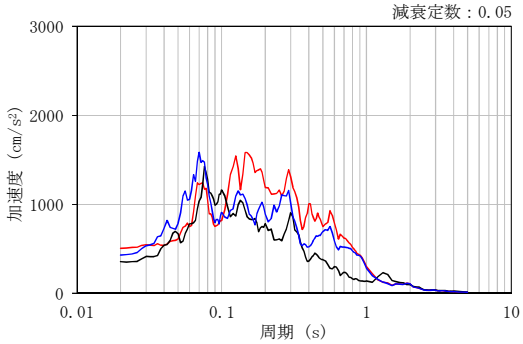
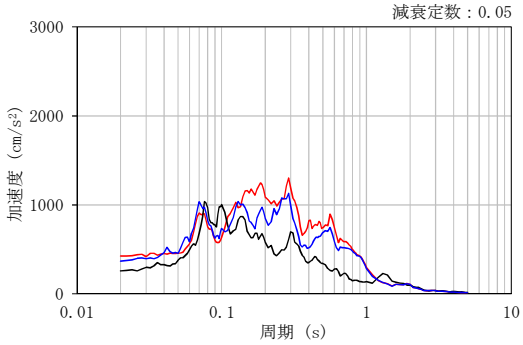
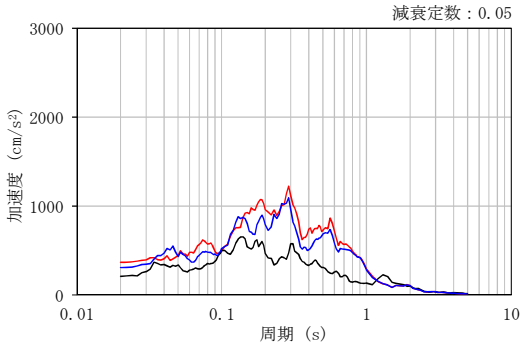
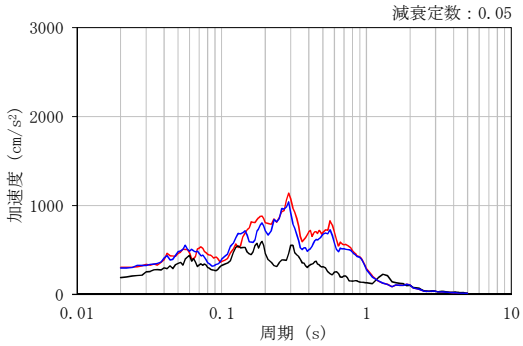
また，観測記録と質点系モデルの結果の比較で確認した局所的な応答と考えられる応答の影響については，以降で検討する。

表 2-12（1／2）　観測記録と解析結果の比較（h＝5%）

EL. (m)	NS 方向	EW 方向
46.5		
29.0		
14.0		
−4.0		

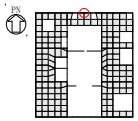
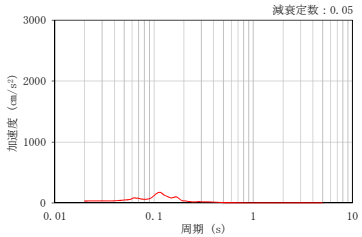
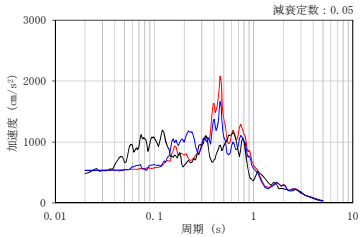
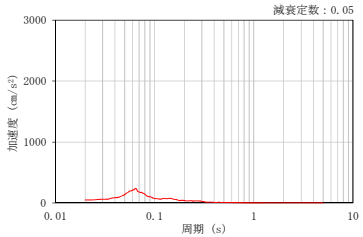
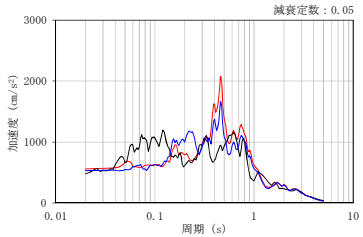
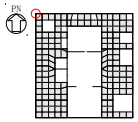
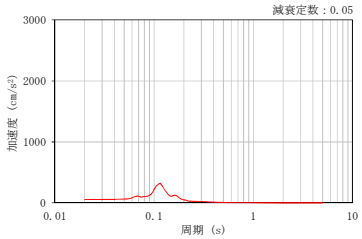
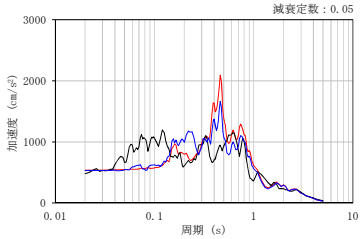
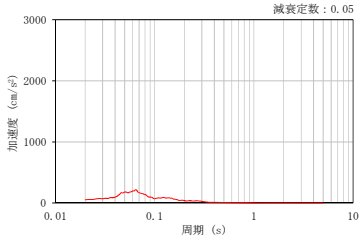
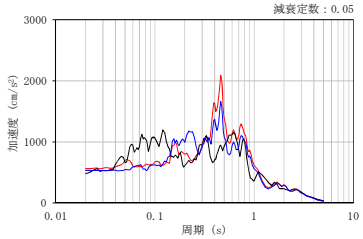
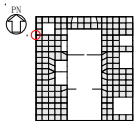
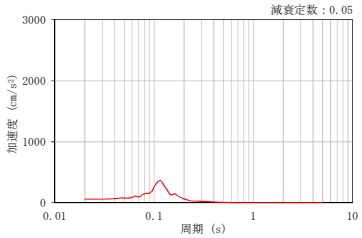
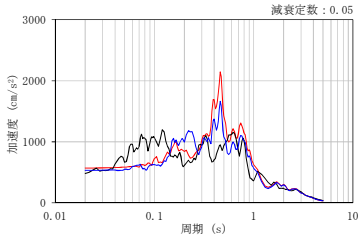
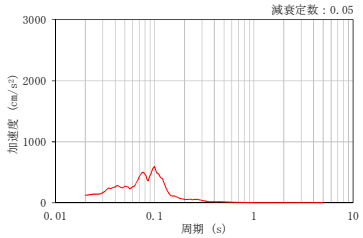
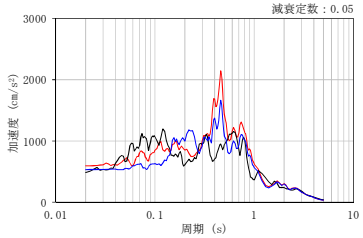
観測記録　3 次元ＦＥＭ　質点系

表 2-12（2／2）　観測記録と解析結果の比較（h＝5%）

EL. (m)	UD 方向
46.5	
29.0	
14.0	
−4.0	

観測記録　　3 次元ＦＥＭ　　質点系

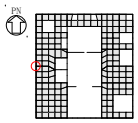
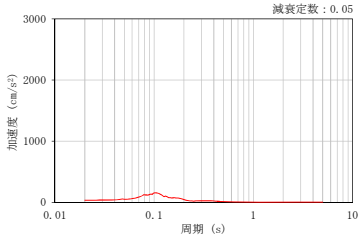
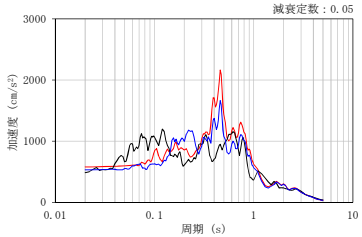
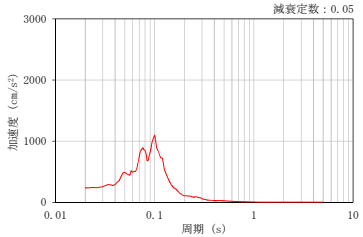
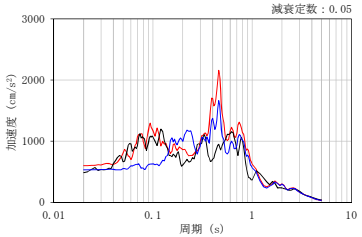
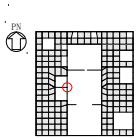
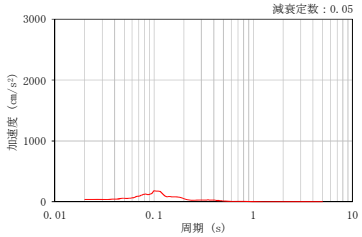
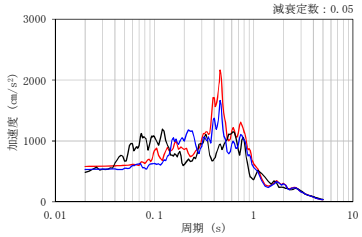
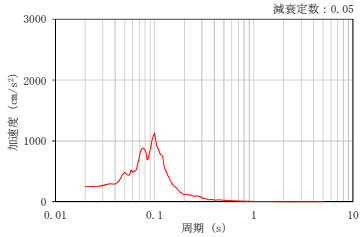
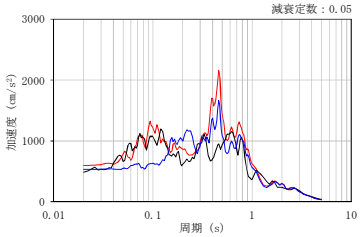
表 2-13（1／2）　EW 方向の床応答スペクトル [redacted] h＝5%）

応答評価点	NS 方向入力	EW 方向入力	鉛直方向入力	3 方向入力
①  I／W 北面中央				
②  I／W 西面北側				
③  加速度計位置				

減衰定数：0.05
加速度（cm/s²）
周期（s）

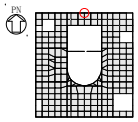
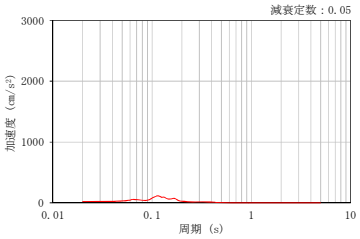
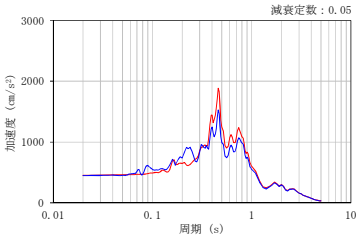
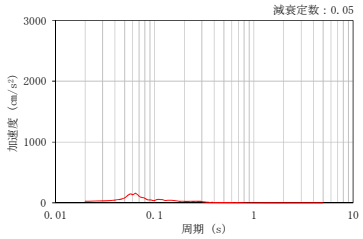
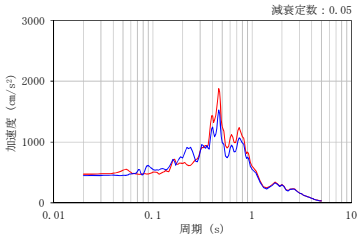
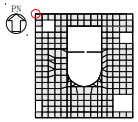
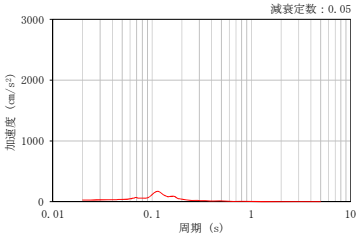
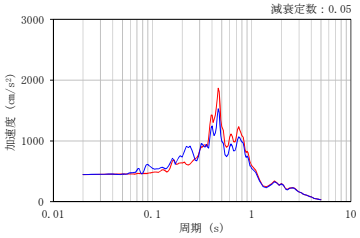
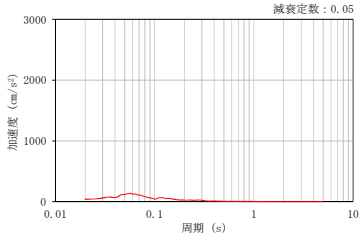
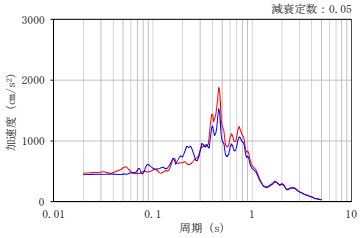
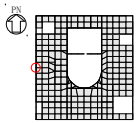
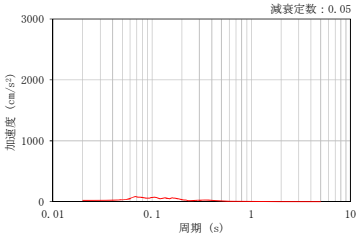
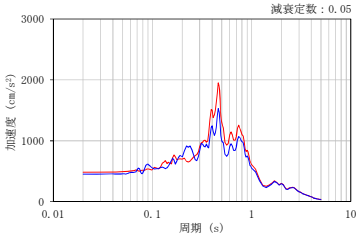
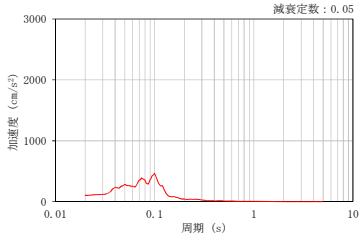
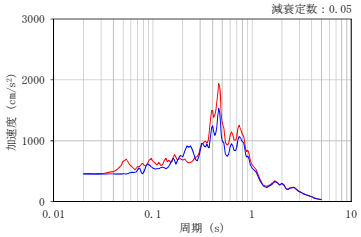
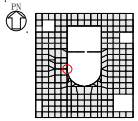
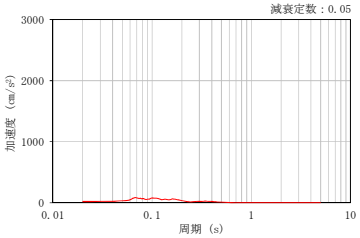
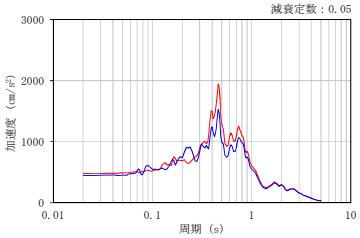
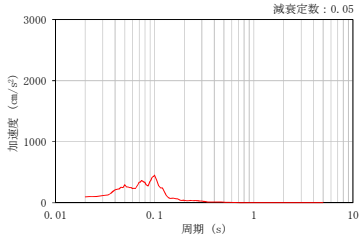
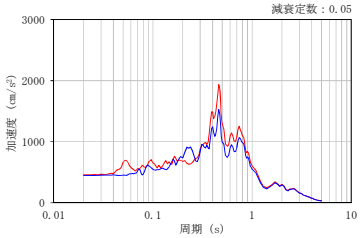
——— 観測記録　——— 3 次元ＦＥＭ　——— 質点系

表 2-13（2／2）　EW 方向の床応答スペクトル [redacted] h＝5%）

応答評価点	NS 方向入力	EW 方向入力	鉛直方向入力	3 方向入力
④  I/W 西面中央				
⑤  ｳｪﾙ西側中央				

観測記録　3 次元ＦＥＭ　質点系

表 2-14　EW 方向の床応答スペクトル（[redacted] h＝5%）

応答評価点	NS 方向入力	EW 方向入力	鉛直方向入力	3 方向入力
⑥  I／W 北面中央				
⑦  I／W 西面北側				
⑧  I／W 西面中央				
⑨  ｳｪﾙ西側中央				

3 次元ＦＥＭ　　質点系

図 2-13　原子炉建屋 3 次元ＦＥＭモデルのモード図（EW 方向断面図）

3.　3次元ＦＥＭモデルによる評価

3.1　地震応答解析の概要

原子炉建屋の3次元的な応答性状を把握し，それらが建屋耐震評価及び床応答へ及ぼす影響を検討するため，建屋模擬モデル（床柔，相互作用考慮），比較用モデル（床柔，底面鉛直方向固定）及び質点系対応モデル（床剛，相互作用考慮）の3つの3次元ＦＥＭモデルを用いて，弾性設計用地震動$Ｓ_d$に対する地震応答解析を実施する。

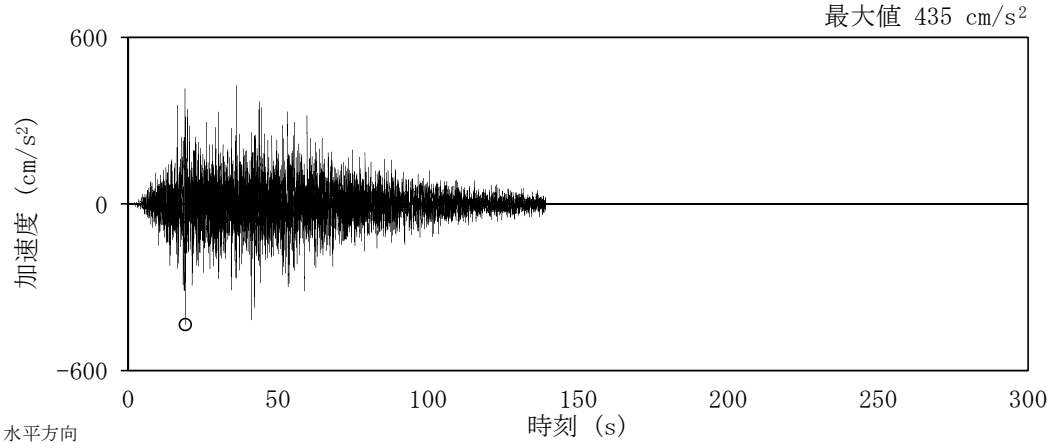
3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析は弾性応答解析としていることから，地震動は一次元波動論に基づき，解放基盤表面レベル（EL.－370 m）で定義される弾性設計用地震動$Ｓ_d$－Ｄ１に対する建屋基礎底面及び側面地盤ばねレベルでの地盤の応答を，地盤ばねを介して入力し，3次元的応答性上の把握を行う。

入力地震動$Ｓ_d$－Ｄ１を図3-1に示す。

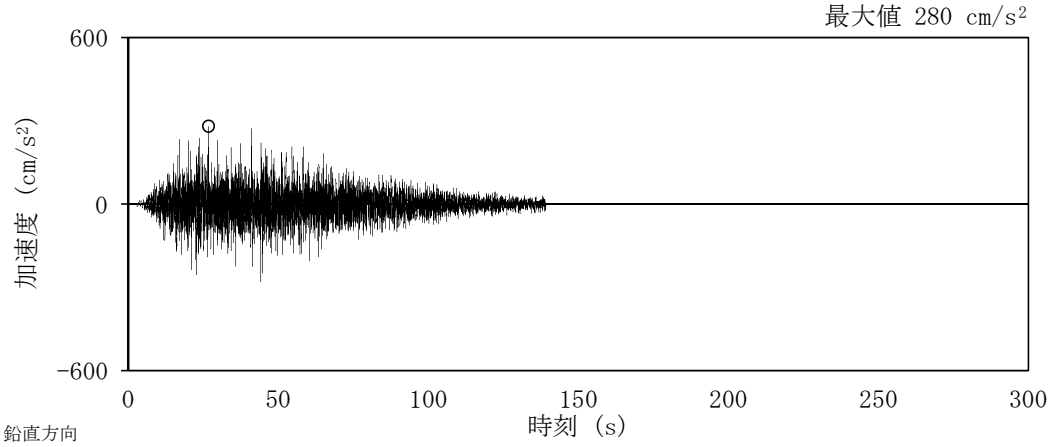
3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析は，NS 方向，EW 方向及び鉛直方向の各々に対して行う。また，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認として，NS 方向，EW 方向及び鉛直方向の3方向同時入力による応答評価も併せて実施する。

3 次元ＦＥＭモデルの応答評価位置を図 3-2，3 次元ＦＥＭモデルの評価点に対応する質点系モデルの質点を図3-3に示す。

3 次元ＦＥＭモデルの応答評価位置は，地震計設置階に対応する床における耐震壁位置（O／W，I／W及びS／W）の点のうち，対称性及び建屋形状を考慮した代表点を抽出した。



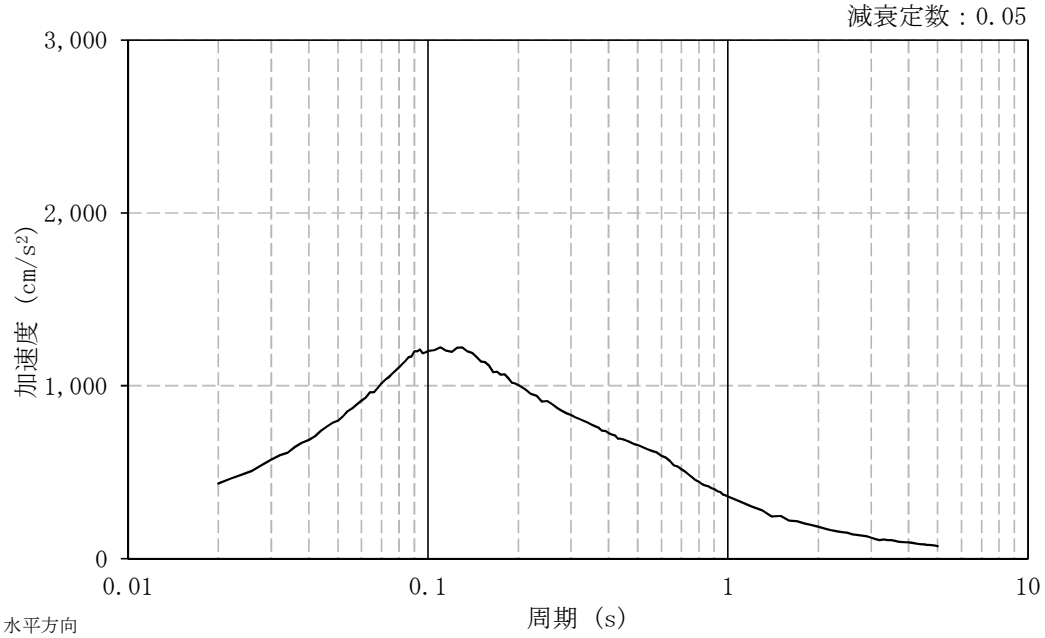
水平方向



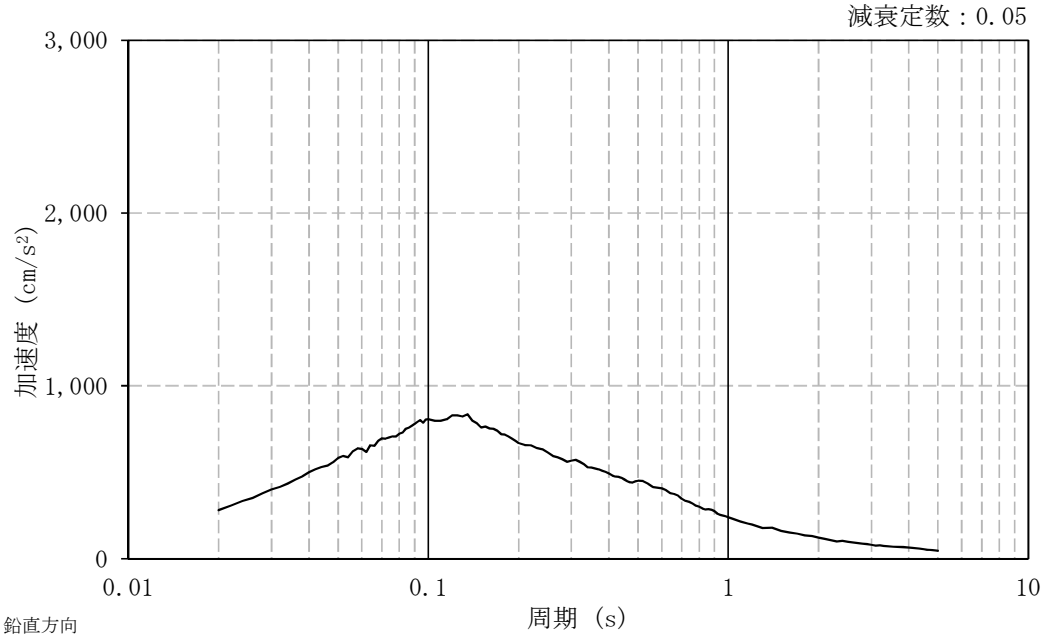
鉛直方向

(a) 加速度波形

図 3-1（1／2）　入力地震動（S_d－D１）



水平方向



鉛直方向

(b) 加速度応答スペクトル

図 3-1（2／2）　入力地震動（S_d－D１）

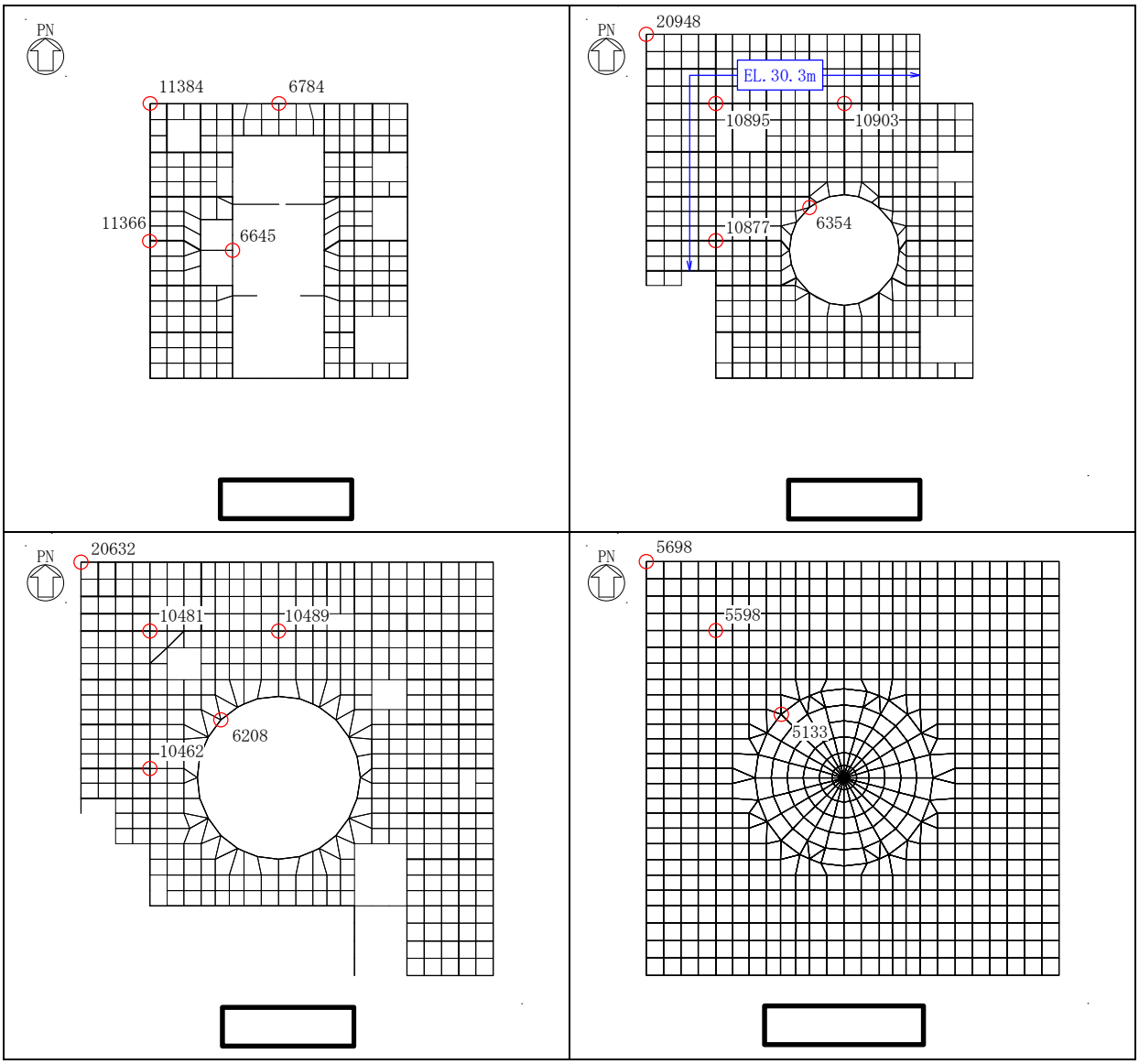

PN
11384
6784
11366
6645
PN
20948
EL. 30. 3m
10895
10903
10877
6354
PN
20632
10481
10489
6208
10462
PN
5698
5598
5133

図 3-2　応答評価位置

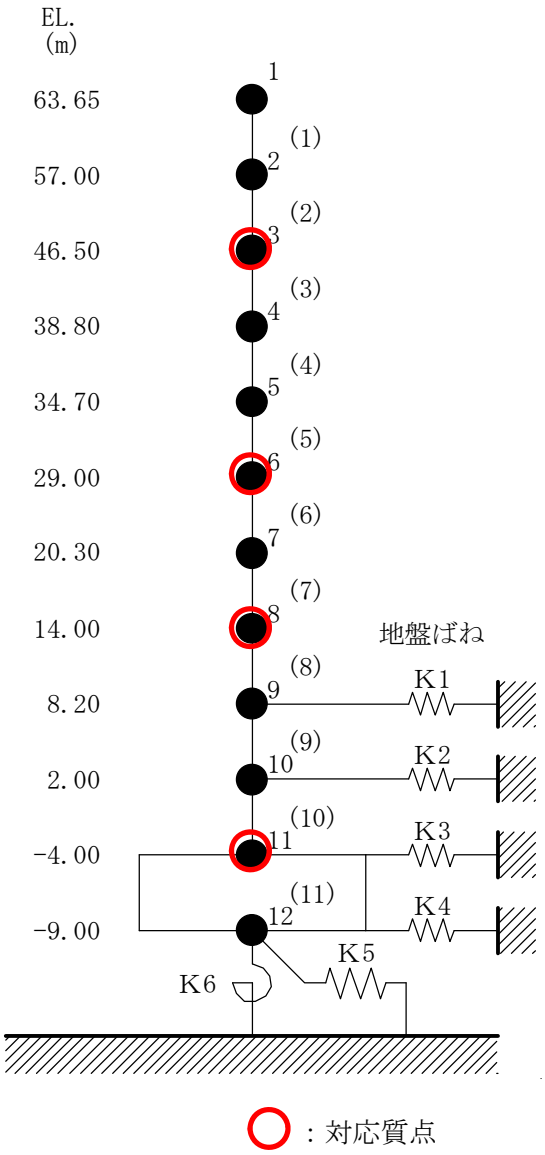


図 3-3　3 次元ＦＥＭモデルの評価点に対応する質点系モデルの質点（水平方向）

3.2　建屋応答性状の把握

建屋模擬モデル（床柔，相互作用考慮），比較用モデル（床柔，底面鉛直方向固定）及び質点系対応モデル（床剛，相互作用考慮）の 3 つの 3 次元ＦＥＭモデルを用いて，図 1-3 の評価フローに基づき，建屋応答特性の把握を行う。

具体的には，以下の(1)～(4)の応答特性について，分析・考察する。

(1)基礎のロッキング振動による鉛直方向応答への影響：建屋模擬モデル－比較用モデル間で比較。

(2)鉛直軸回りのねじれ振動の影響：建屋模擬モデルの加振方向及び直交方向の応答で比較。

(3)床柔性の影響：建屋模擬モデル－質点系対応モデル間で比較。

(4)水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響：建屋模擬モデルの水平 1 方向入力と 3 方向同時入力で比較。

(1)　基礎のロッキング振動による鉛直方向応答への影響

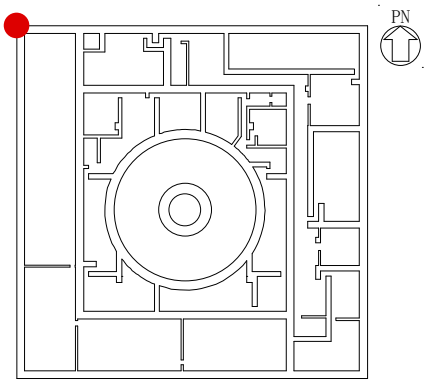
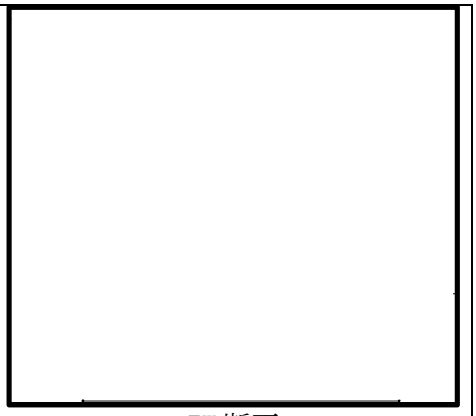
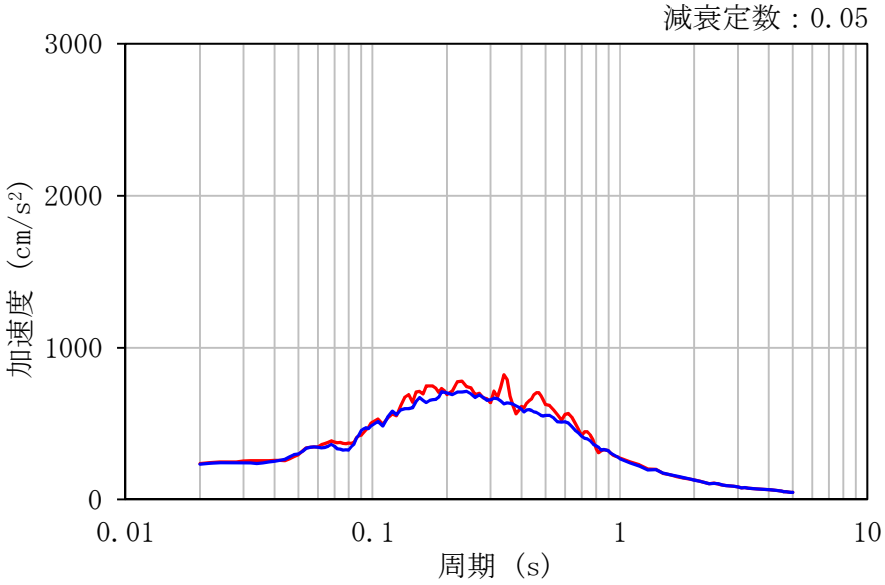
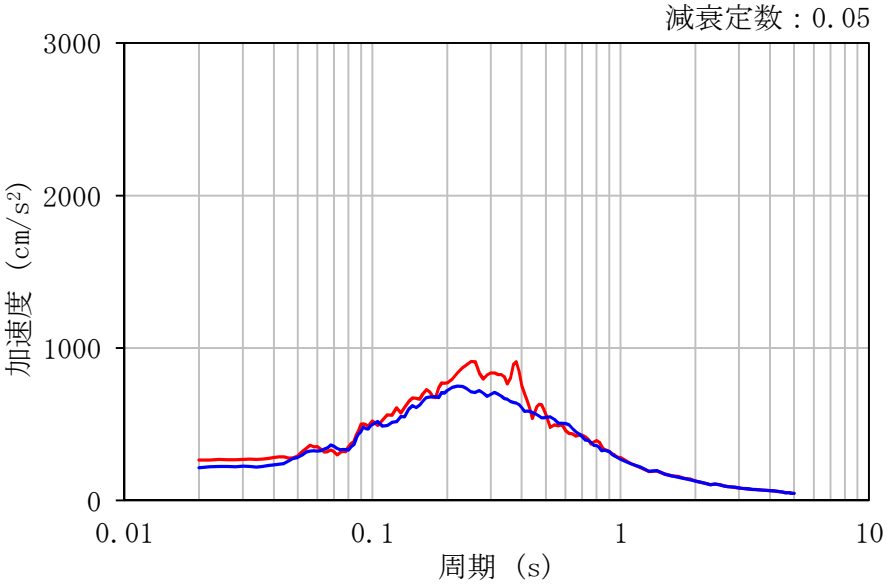
基礎のロッキング振動による鉛直方向応答への影響は，相互作用を考慮している建屋模擬モデル（床柔，相互作用考慮）及び相互作用を考慮していない比較用モデル（床柔，底面鉛直方向固定）の水平方向の入力による鉛直方向応答を比較することで検討する。なお，鉛直方向応答は，水平加振時の鉛直方向応答＋鉛直加振時の鉛直方向応答により求めるが，水平方向の入力による鉛直方向応答を比較するため，鉛直加振時の鉛直方向応答はいずれのモデルも建屋模擬モデルによる結果を用いる。

応答比較に用いる評価点は，ロッキング振動の影響が出やすいと考えられる建屋端部の評価点 No.5698（EL.－4.0 m），No.20632（EL.14.0 m）及び No.20948（EL.29.0 m）を抽出した。

検討結果を表 3-1 に示す。

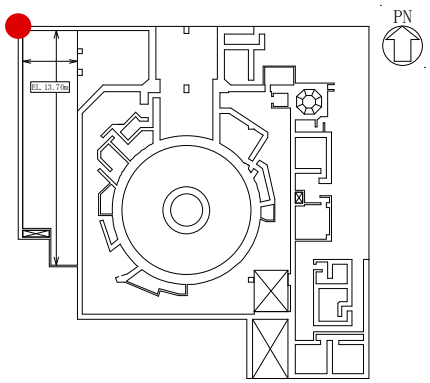
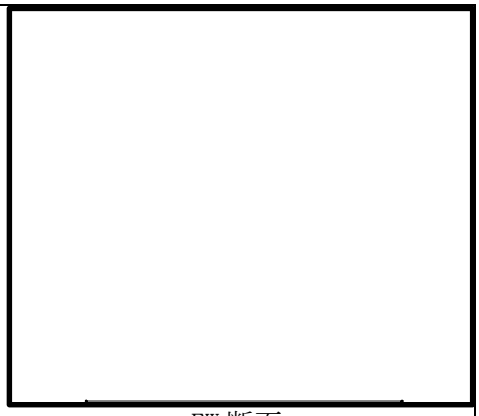
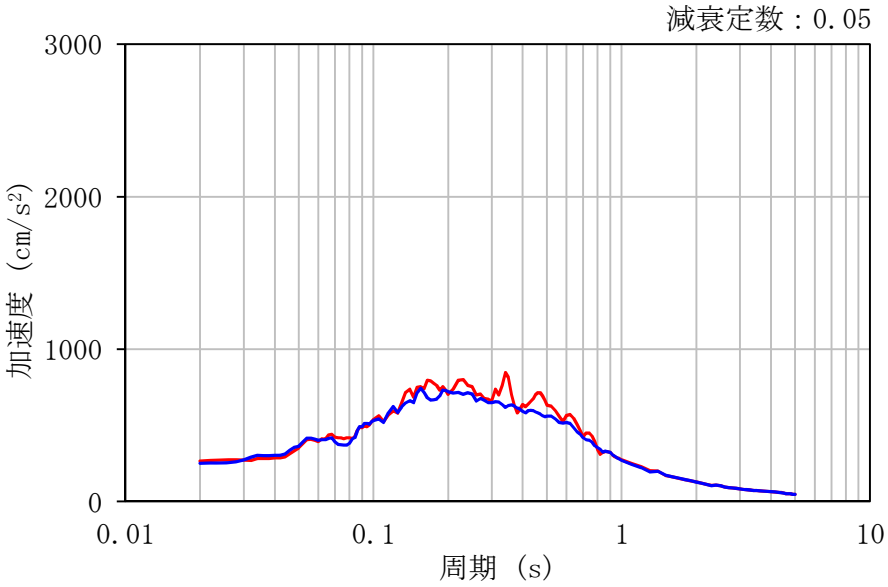
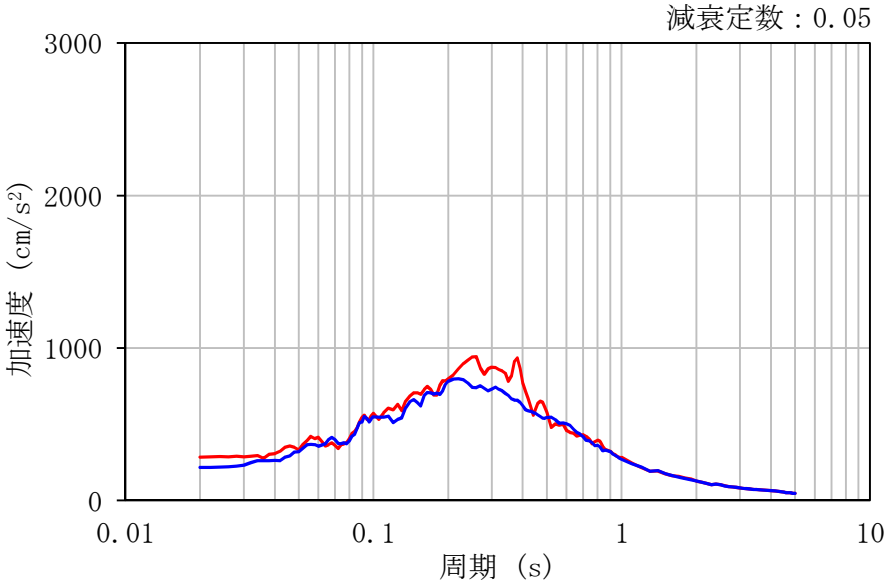
表 3-1 より，全ての評価点において，建屋模擬モデル及び比較用モデルの応答を比較すると，モデル間の差分は小さく，基礎のロッキング振動による影響は小さい。また，建屋模擬モデルの応答がやや大きいことから，建屋模擬モデルを検討対象モデルとすることは保守的である。

表 3-1（1／3）　建屋模擬モデル及び比較用モデルの鉛直方向応答

EL.□m 評価点 No. 5698 O／W 脚部		 EW 断面
NS＋鉛直方向 加振時 鉛直応答		
EW＋鉛直方向 加振時 鉛直応答		

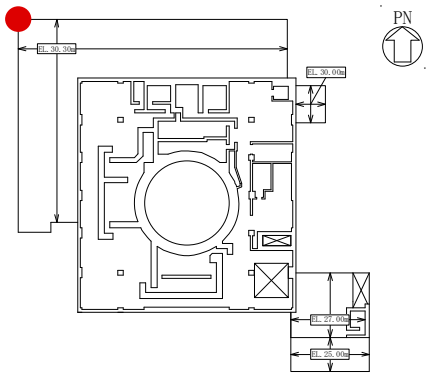
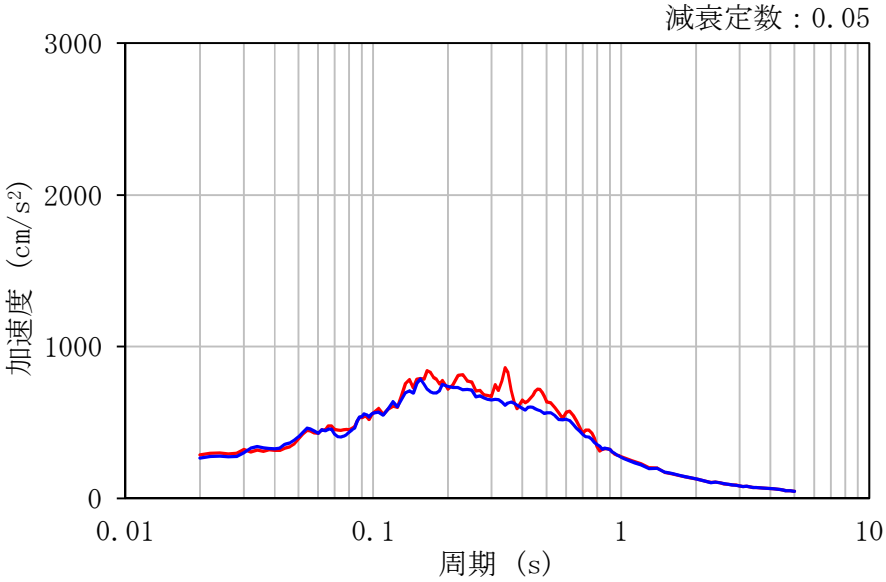
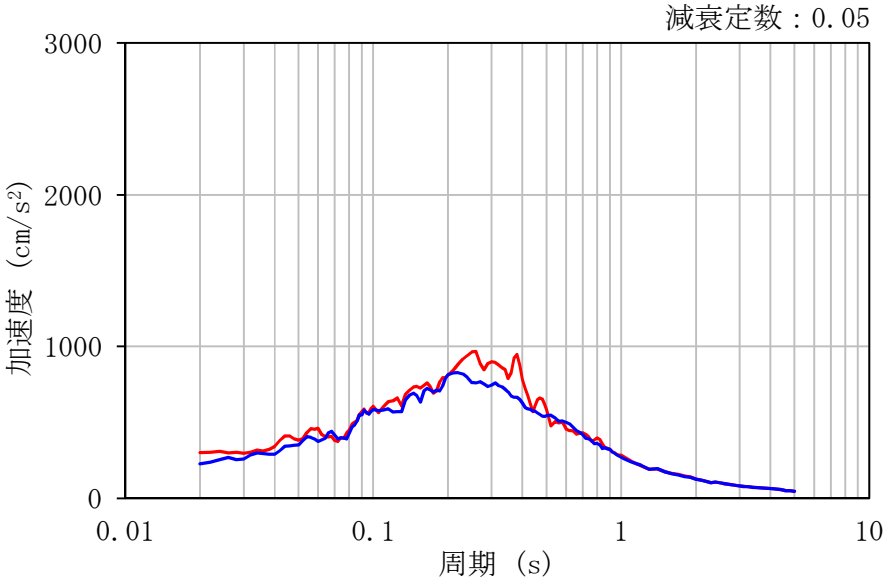
建屋模擬モデル　比較用モデル

表 3-1（2／3）　建屋模擬モデル及び比較用モデルの鉛直方向応答

EL m 評価点 No. 20632 O／W 脚部		 EW 断面
NS＋鉛直方向 加振時 鉛直応答		
EW＋鉛直方向 加振時 鉛直応答		

建屋模擬モデル　比較用モデル

表 3-1（3／3）　建屋模擬モデル及び比較用モデルの鉛直方向応答

EL. □ m 評価点 No. 20948 O／W 脚部		 EW 断面
NS＋鉛直方向 加振時 鉛直応答		
EW＋鉛直方向 加振時 鉛直応答		

建屋模擬モデル　比較用モデル

(2)　鉛直軸回りのねじれの影響

鉛直軸回りのねじれの影響は，建屋模擬モデル（床柔，相互作用考慮）の地震応答解析により確認する。

応答評価点は，平面形状よりねじれの影響が出やすいと考えられる No.20632（EL.14.0 m）及び No.20948（EL.29.0 m）について抽出し，加振方向と加振直交方向の応答を比較する。

水平加振時の応答比較を表 3-2 に示す。

表 3-2 より，選定した評価点において，加振直交方向の応答は発生しているものの加振方向の応答と比較して十分に小さくなっている。したがって，水平 1 方向入力を考慮する場合，加振方向の応答に対して設計を行えば，耐震安全性上問題にはならないと考えられるが，水平 2 方向の入力を考えた場合，ねじれ応答の影響による応答が増幅する可能性がある。

以上より，水平 2 方向の入力によるねじれ応答の影響は「(4)　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響」において確認する。

表 3-2（1／2）　建屋模擬モデルの水平加振時の応答比較

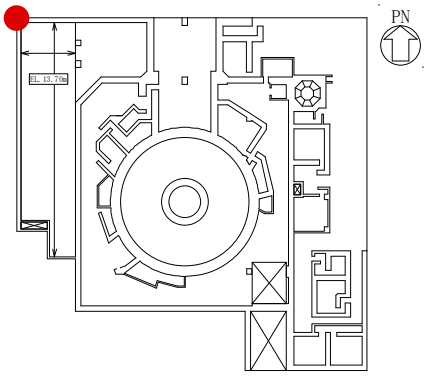
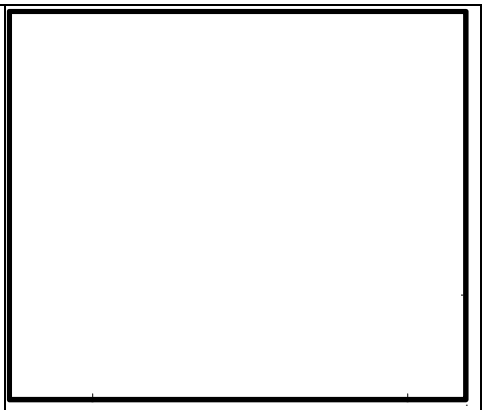
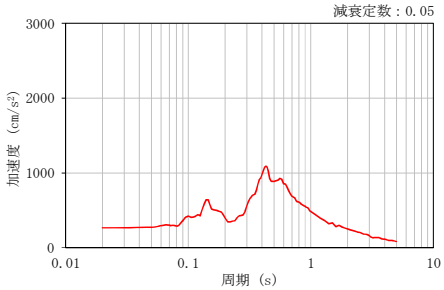
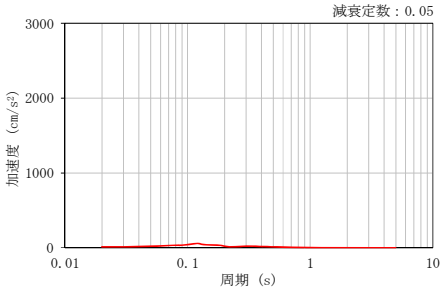
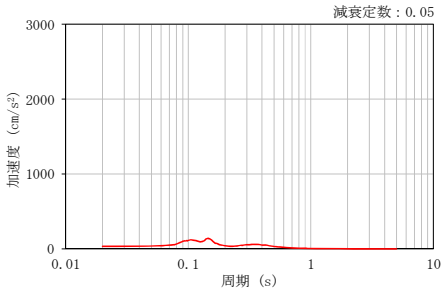
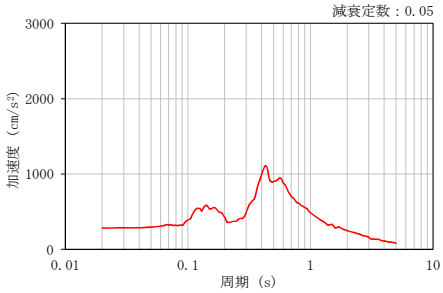
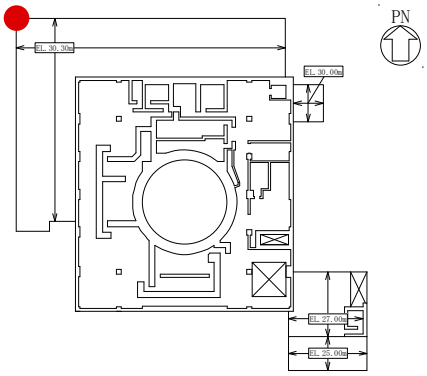
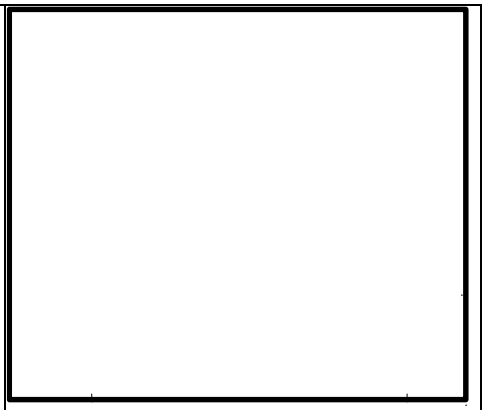
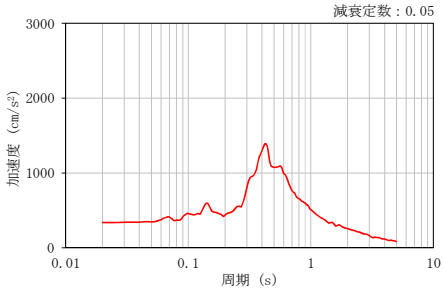
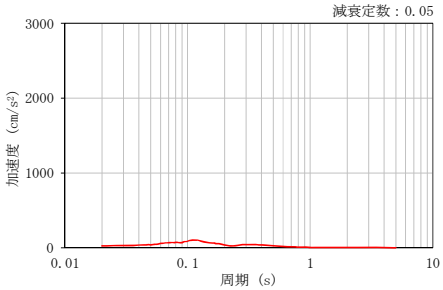
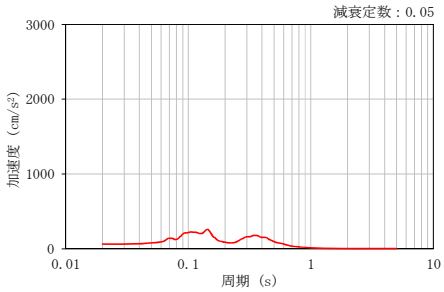
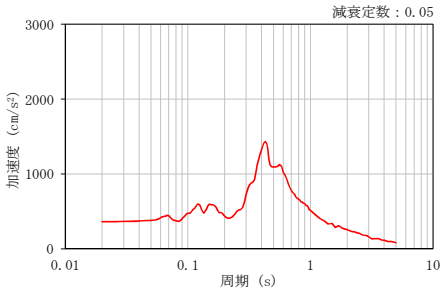
EL. m 評価点 No. 20632 O／W 脚部		 EW 断面
方向	NS 方向応答	EW 方向応答
NS 方向 加振時		
EW 方向 加振時		

表 3-2（2／2）　建屋模擬モデルの水平加振時の応答比較

EL.[redacted] m 評価点 No. 20948 O／W 脚部	 	 EW 断面
方向	NS 方向応答	EW 方向応答
NS 方向 加振時	 	
EW 方向 加振時	 	

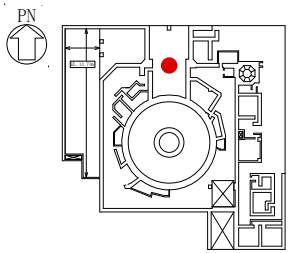
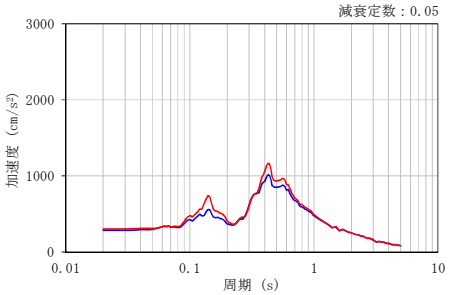
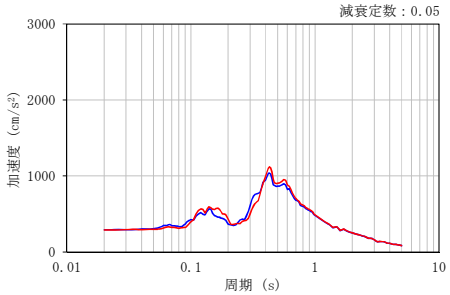
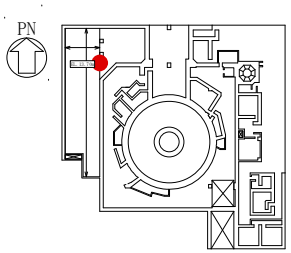
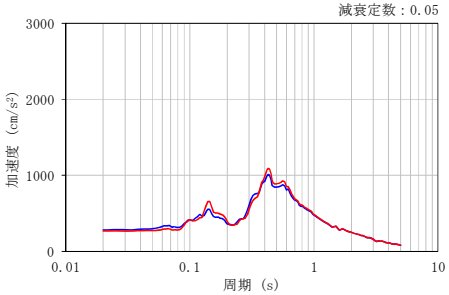
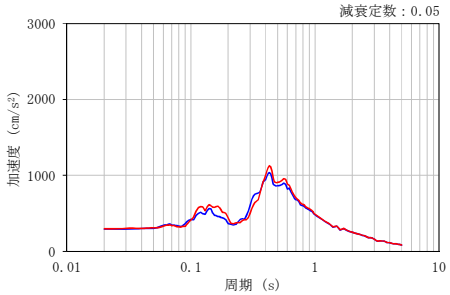
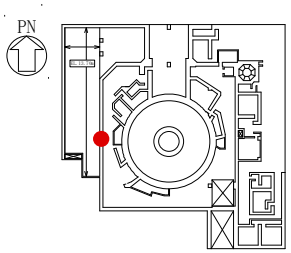
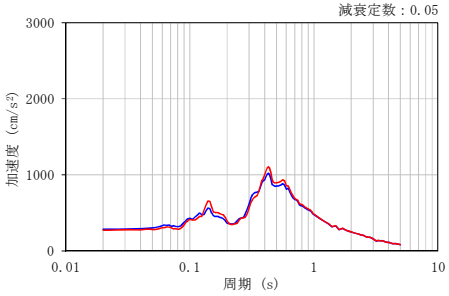
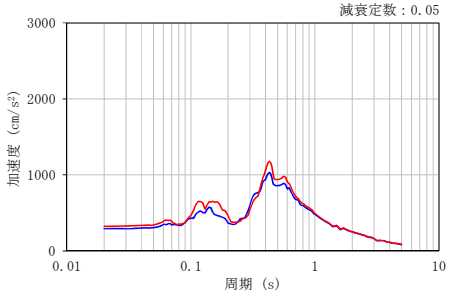
(3)　床柔性の影響

床柔性の影響は，床の柔性を考慮した建屋模擬モデル（床柔，相互作用考慮）と床を剛とした比較用モデル（床剛，相互作用考慮）を比較することにより確認する。応答を比較する評価点は，平面的に広い EL.14.0 m の評価点 No.10462，No.10481 の建屋端部及び中心部とする。

建屋模擬モデル及び質点系対応モデルの比較結果を表 3-3 に示す。

表 3-3 より，建屋模擬モデル及び質点系対応モデルを比較すると，概ね同等もしくは質点系対応モデルにおいてピーク値がやや低減されることから，建屋模擬モデルを検討対象とすることは保守的である。

表 3-3　建屋模擬モデルと質点系対応モデルの応答比較

評価点	NS 方向加振時 NS 応答	EW 応答方向加振時 EW 応答
 EL. [redacted] m　No. 10489		
 EL. [redacted] m　No. 10481		
 EL. [redacted] m　No. 10462		

建屋模擬モデル　　質点系対応モデル

(4)　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響

a．地震動の入力方法

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認として，建屋模擬モデルに弾性設計用地震動Ｓ$_d$を水平 2 方向及び鉛直方向に同時に入力（3 方向同時入力）した場合について検討する。

地震動の組合せを表 3-4 に示す。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組み合わせによる影響検討は，弾性設計用地震動Ｓ$_d$を水平 2 方向及び鉛直方向に組合せた地震力に対して実施する。具体的には，弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１を水平 2 方向及び鉛直方向に入力した検討を実施する。

ただし，全く同じ地震動が同時に水平 2 方向に入力されることは現実的ではないことから，弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１については，水平 2 方向の地震動のうち NS 方向には弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の水平方向成分を入力し，直交する EW 方向は弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の設計用応答スペクトルに適合するが，Ｓ$_d$－Ｄ１の水平方向成分とは位相特性の異なる模擬地震波を入力する。また，鉛直方向の地震動は，弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の鉛直方向成分を入力する。

したがって，本検討においては，NS 方向に対しては弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の水平成分を，EW 方向に対しては模擬地震波(基準地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の水平成分の設計用応答スペクトルに適合するよう，位相を変えたもの)をそれぞれ入力する。また，鉛直方向の地震動は，弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の鉛直方向成分を入力する。3 方向同時入力による応答は，水平 2 方向及び鉛直方向の 1 方向入力による地震応答解析で算出された各成分の応答を，時刻歴で足し合わせることにより算出する。応答算出の考え方を図 3-4 に示す。

表 3-1　地震動の組合せ

地震動の入力方法		NS 方向	EW 方向	鉛直方向
1 方向入力	NS 方向	S_d－D１	－	－
	EW 方向	－	模擬地震波*	－
3 方向同時入力		S_d－D１	模擬地震波*	S_d－D１

注記　＊：弾性設計用地震動S_d－D１の設計用応答スペクトルに適合するが，S_d－D１とは位相特性が異なる地震波。

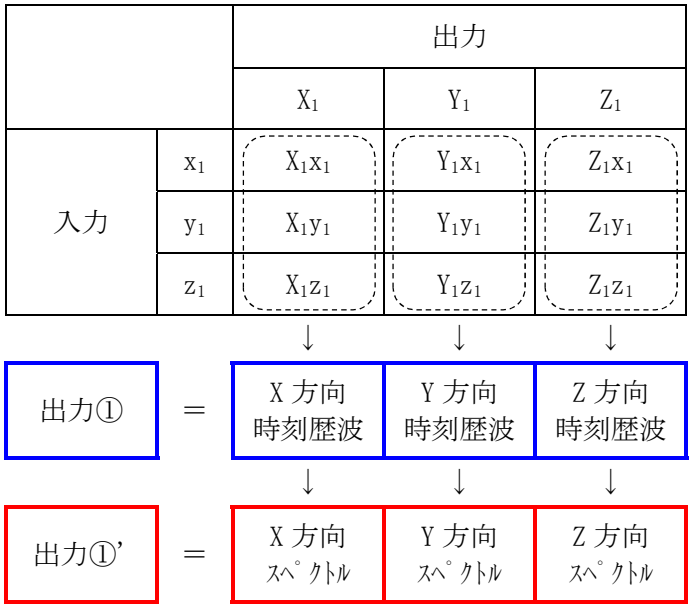


図 3-1　3 次元ＦＥＭモデルによる応答算出の考え方

b．水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認は，表 3-4 の地震動を対象に，NS 方向に入力した場合及び EW 方向に入力した場合の応答と，3 方向同時入力した場合の応答とを比較することにより実施する。

応答を比較する評価点は，地震計設置階である EL.－4.0 m，EL.14.0 m，EL.29.0 m 及び EL.46.5 m の床における耐震壁位置（O／W，I／W 及び S／W）の点のうち，対称性及び建屋形状を考慮した代表点を抽出した。

比較した結果を表 3-5 に示す。

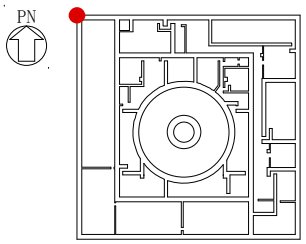
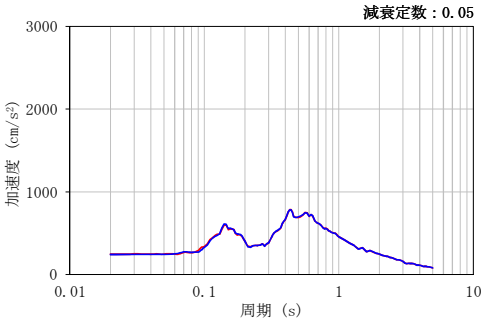
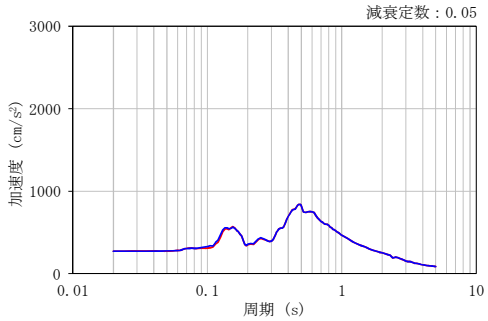
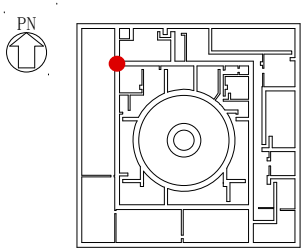
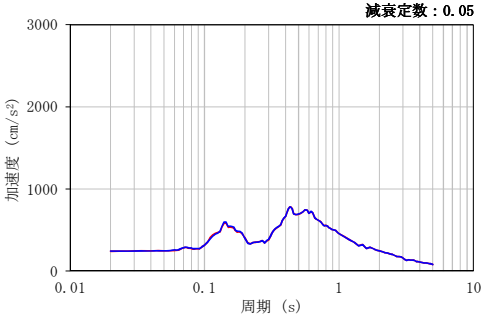
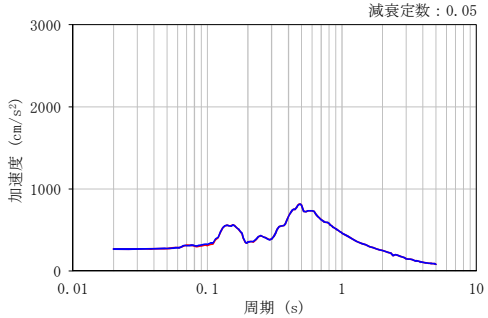
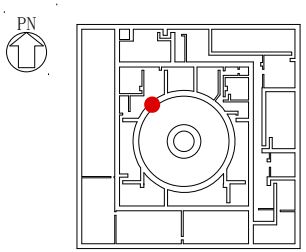
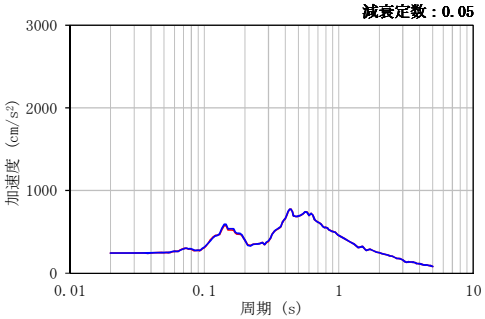
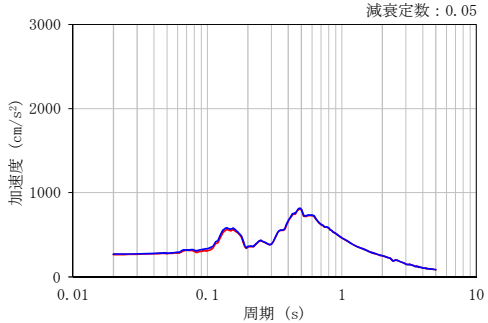
表 3-5 より，EL.46.5 m の評価点 No.6645 及び 11366 を除く評価点においては，3 方向同時入力時の方が若干応答が大きくなる点もあるものの，1 方向入力時及び 3 方向入力時の応答の差は小さく，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響はほとんどないことを確認した。

EL.46.5 m の評価点 No.6645 及び 11366 では，NS 方向については 1 方向入力時及び 3 方向入力時の応答は概ね一致しているが，EW 方向では「2.3　観測記録を用いた検討」で見られた 0.1 秒付近の周期帯における応答増幅が生じている。また，表 3-6 に示す直下階である EL.38.8 m やその他の床レベルでは，EL.46.5 m で見られるような増幅はほとんど生じていない。したがって，EW 方向における 0.1 秒付近の応答増幅は，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる EL.46.5 m における局所的な応答であると考えられる。EL.46.5 m における影響検討は「別紙 4 機器・配管系に関する説明資料」で行う。

「(2)　鉛直軸回りのねじれの影響」では，水平 2 方向の入力を考えた場合に，ねじれの影響によって相互に応答増幅する可能性が示唆されたが，ねじれ振動の影響による応答増幅は見られなかった。

原子炉建屋の質点系モデルを用いた耐震検討では，ねじれ振動を考慮せず，水平 1 方向入力時の入力方向の応答に対する検討を行っているが，本検討により，ねじれを考慮しないことは妥当と考えられる。

表 3-5（1／7）　3 次元ＦＥＭモデルの 3 方向同時入力及び 1 方向入力の応答比較

評価点	NS 応答	EW 応答
 EL. m　No. 5698		
 EL. m　No. 5598		
 EL. m　No. 5133		

3 方向　　1 方向

表 3-5（2／7）　3 次元ＦＥＭモデルの 3 方向同時入力及び 1 方向入力の応答比較

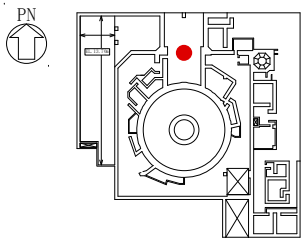
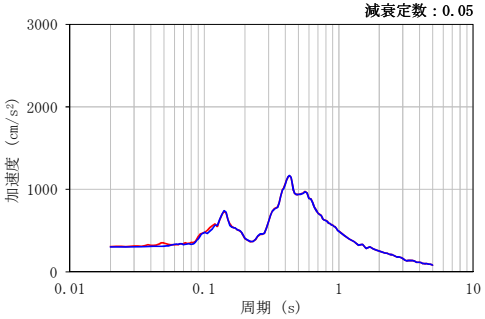
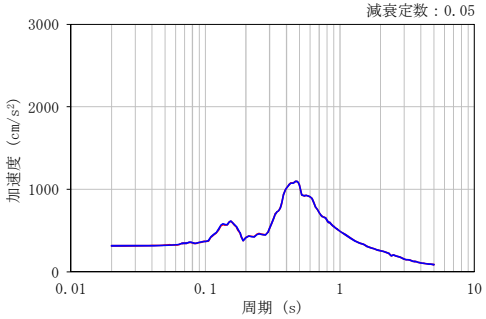
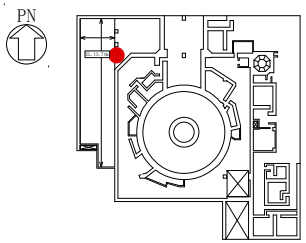
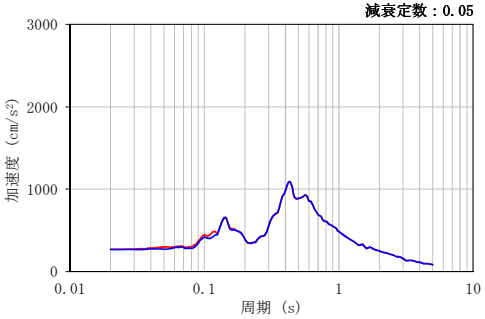
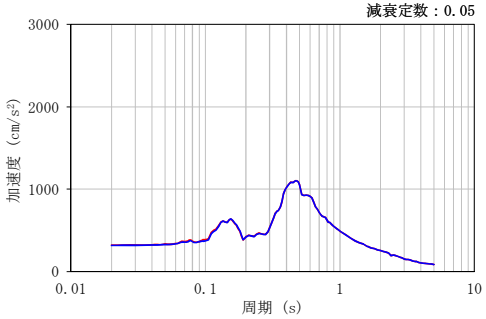
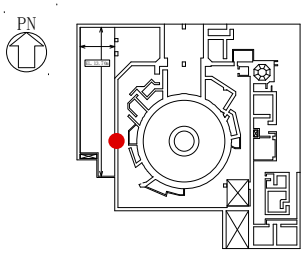
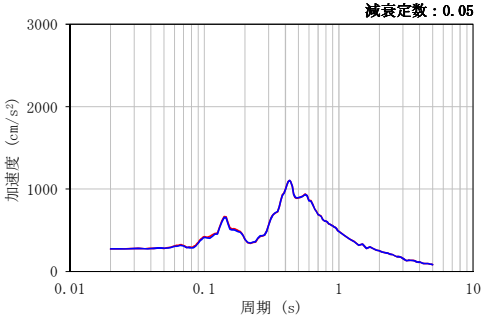
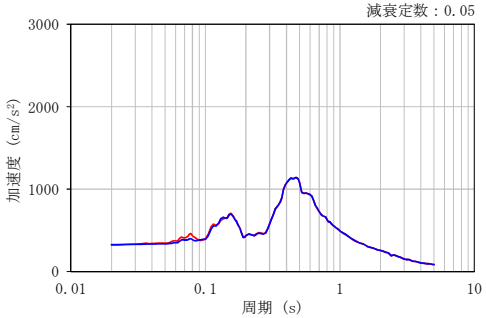
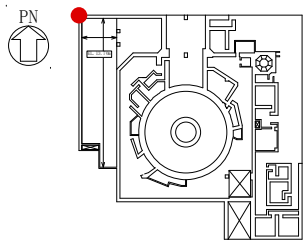
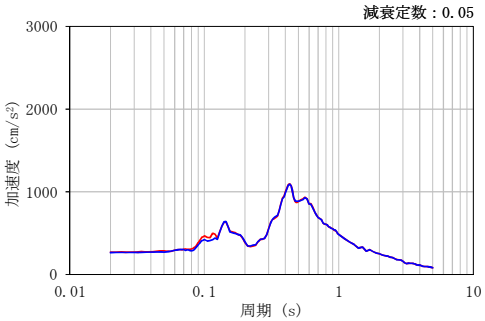
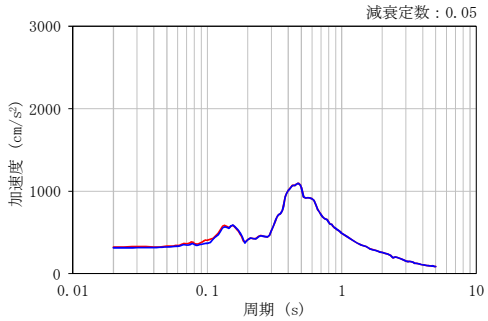
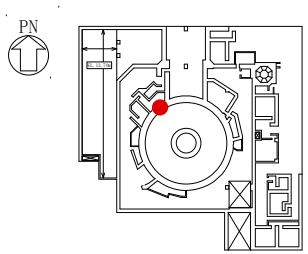
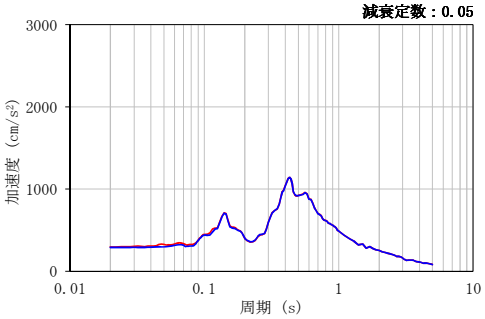
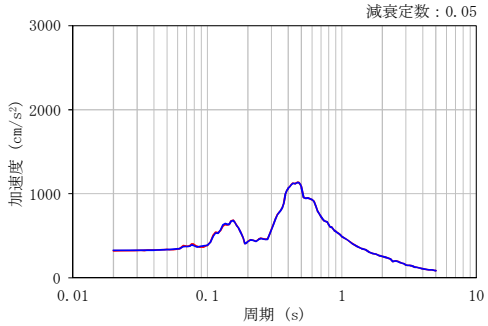
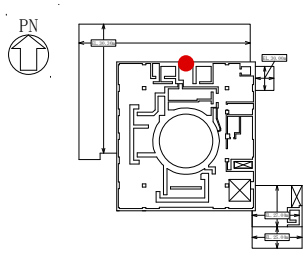
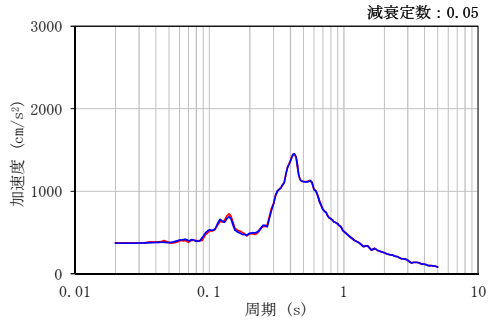
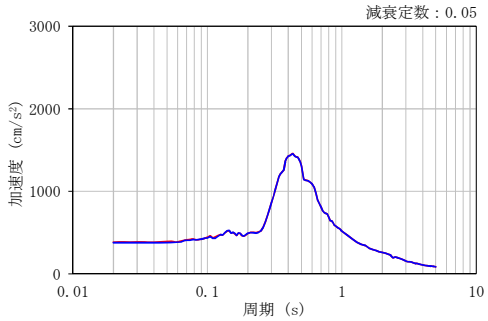
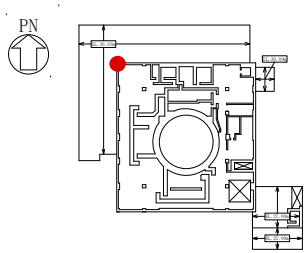
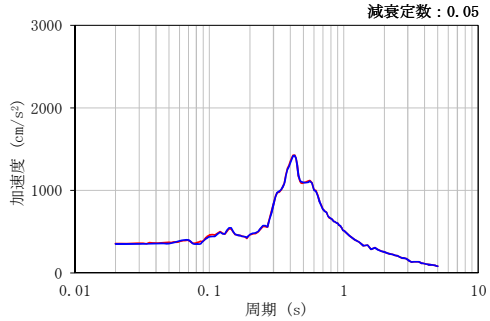
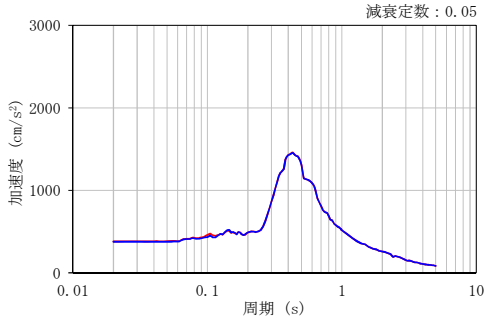
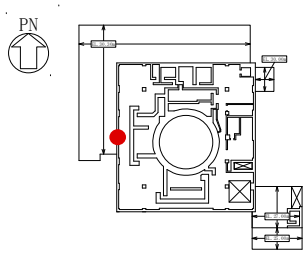
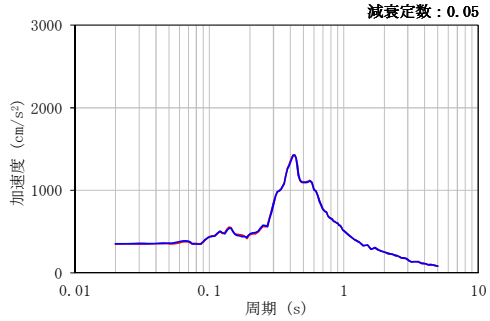
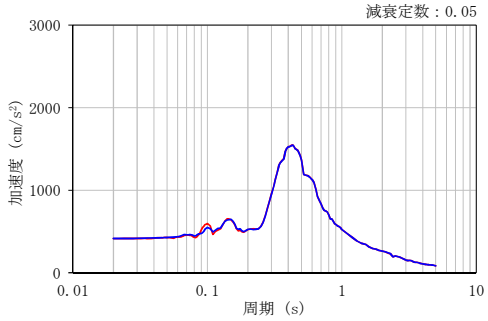
評価点	NS 応答	EW 応答
 EL [redacted] m　No. 10489		
 EL [redacted] m　No. 10481		
 EL. [redacted] m　No. 10462		

表 3-5（3／7）　3 次元ＦＥＭモデルの 3 方向同時入力及び 1 方向入力の応答比較

評価点	NS 応答	EW 応答
 EL.[redacted]m　No. 20632		
 EL.[redacted]m　No. 6208		

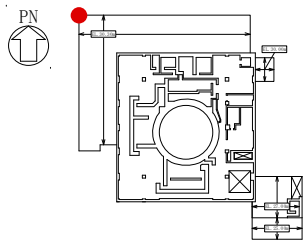
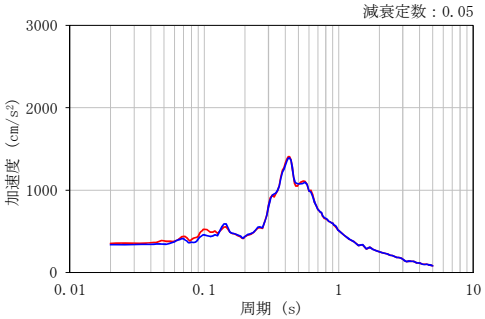
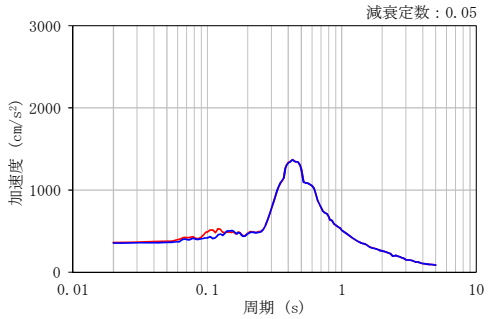
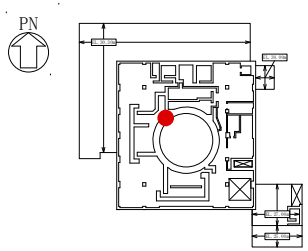
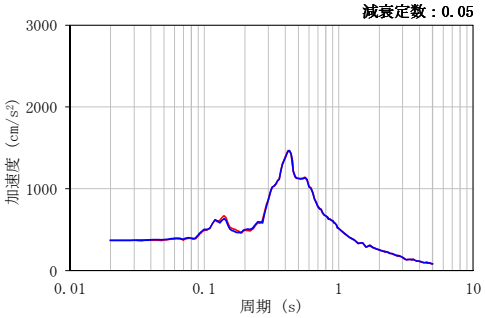
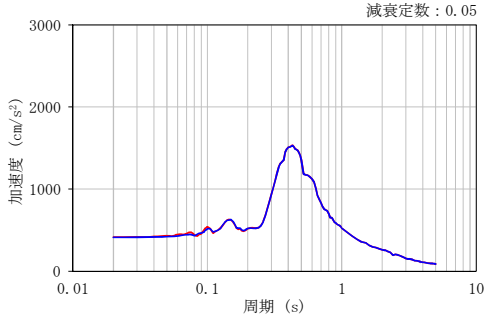
3 方向　　1 方向

表 3-5（4／7）　3 次元ＦＥＭモデルの 3 方向同時入力及び 1 方向入力の応答比較

評価点	NS 応答	EW 応答
 EL. [redacted] m　No. 10903		
 EL. [redacted] m　No. 10895		
 EL [redacted] m　No. 10877		

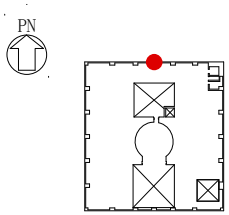
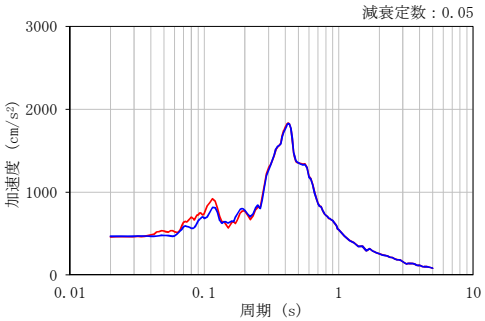
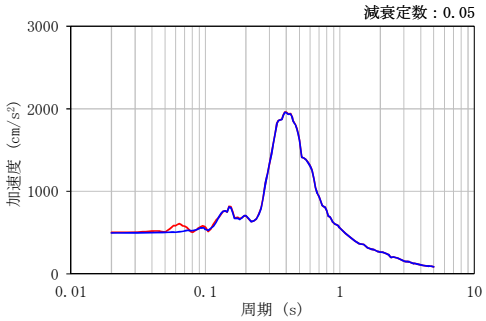
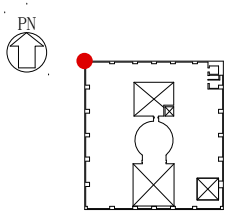
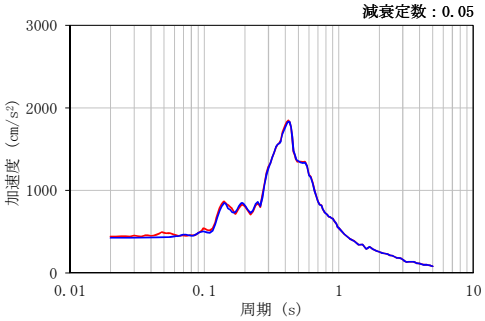
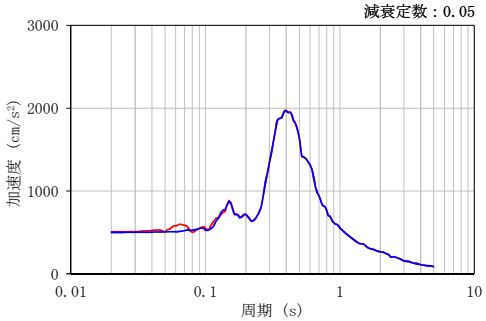
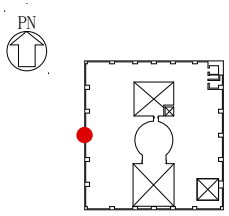
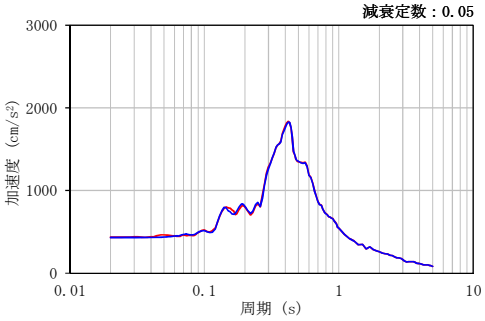
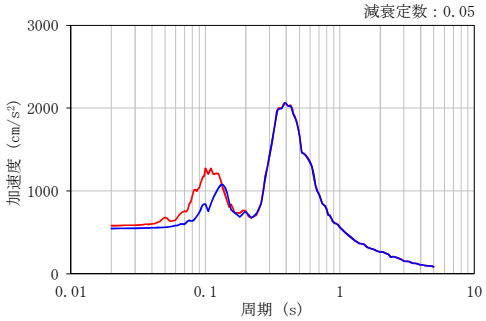
3 方向　　1 方向

表 3-5（5／7）　3 次元ＦＥＭモデルの 3 方向同時入力及び 1 方向入力の応答比較

評価点	NS 応答	EW 応答
 EL [redacted] m　No. 20948		
 EL [redacted] m　No. 6354		

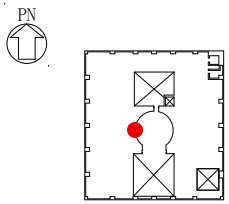
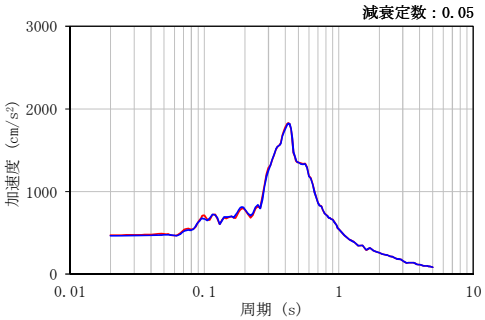
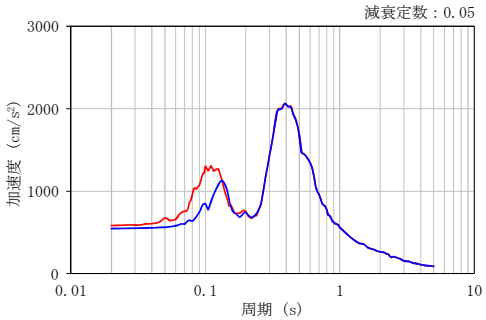
3 方向　　1 方向

表 3-5（6／7）　3 次元ＦＥＭモデルの 3 方向同時入力及び 1 方向入力の応答比較

評価点	NS 応答	EW 応答
 EL [redacted] m　No.　6784		
 EL [redacted] m　No. 11384		
 EL [redacted] m　No. 11366		

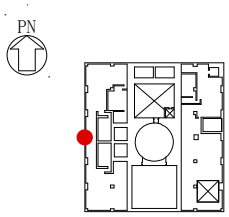
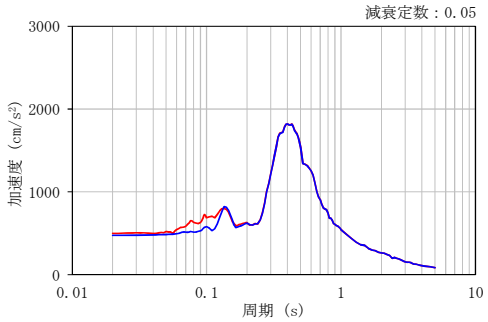
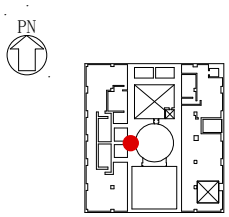
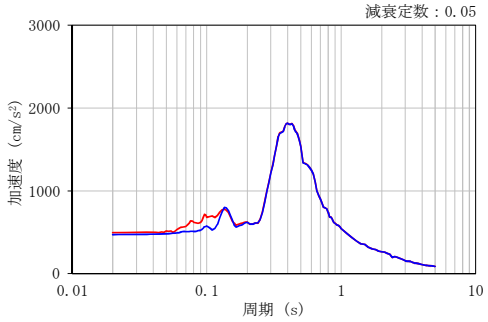
3 方向　　1 方向

表 3-5（7／7）　3 次元ＦＥＭモデルの 3 方向同時入力及び 1 方向入力の応答比較

評価点	NS 応答	EW 応答
 EL. [redacted] m　No. 6645		

3 方向　　1 方向

表 3-6　EL. 38.8 m における EW 方向の応答

評価点	EW 応答
 EL. [redacted] m　No. 11182	
 EL. [redacted] m　No.　6431	

3 方向　　1 方向

(5)　まとめ

建屋模擬モデル，比較用モデル及び質点系対応モデルを用いて地震応答解析を実施し，応答性状について分析・考察を行った。

基礎のロッキング振動による鉛直方向への影響について，建屋模擬モデルと比較用モデルでの応答比較をした結果，ロッキング振動の影響はほとんど見られないこと，及び建屋模擬モデルにより保守的な評価が可能であることを確認した。

床柔性の影響について，建屋模擬モデルと比較用モデルでの応答比較をした結果，建屋模擬モデルにより保守的な評価が可能であることを確認した。

鉛直軸回りのねじれ振動の影響及び水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響について，建屋模擬モデルを用いて検討した結果，3方向同時入力と1方向入力時での応答の差異がほとんどないことから，1方向入力時の応答に対し，これらの影響がほとんどないことを確認した。ただし，EL.46.5 m の EW 方向においては，水平2方向及び鉛直方向の組合せによる影響と考えられる局所的な応答が生じるため，「別紙 4　機器・配管系に関する説明資料」で影響検討を行う。

以上の3次元的な応答特性に関する分析・考察を踏まえて，次節以降では建屋模擬モデルを用いて，局所的な応答による建屋耐震評価及び床応答への影響を検討する。

3.3　建屋耐震評価への影響検討

(1)　検討方針

建屋耐震評価への影響検討として，3 次元ＦＥＭモデルの応答及び質点系モデルの応答を比較する。

検討において，両モデルともに弾性設計用地震動Ｓ$_d$に対する地震応答解析を実施し，以下の 2 項目について検討を行う。

①建屋模擬モデル（3 次元ＦＥＭモデル）及び質点系モデルの最大応答値（最大応答加速度）の比較検討

②3 次元的な応答特性（応答補正率）を考慮した建屋影響検討

なお，質点系モデルは添付書類「Ｖ-2-2-1　原子炉建屋の地震応答計算書」に記載の原子炉建屋の地震応答解析モデルと同じである。

(2)　建屋模擬モデル（3 次元ＦＥＭモデル）及び質点系モデルの最大応答値（最大応答加速度）の比較検討

建屋模擬モデル及び質点系モデルの最大応答加速度の比較を行い，3 次元的な影響について確認する。

評価にあたっては，質点系モデルの全質点での応答を評価対象とし，質点系モデルの各質点に対応する 3 次元ＦＥＭモデルの節点としては，図 3-5 に示す節点とした。

比較検討結果を図 3-6 に示す。

両モデル間で，最大応答加速度は概ね対応しているが，建屋模擬モデルは 3 次元的な応答性状が考慮されているため，完全には一致しない。

したがって，以降の「3 次元的な応答特性（応答補正率）を考慮した建屋影響検討」により，建屋への影響検討を実施する。

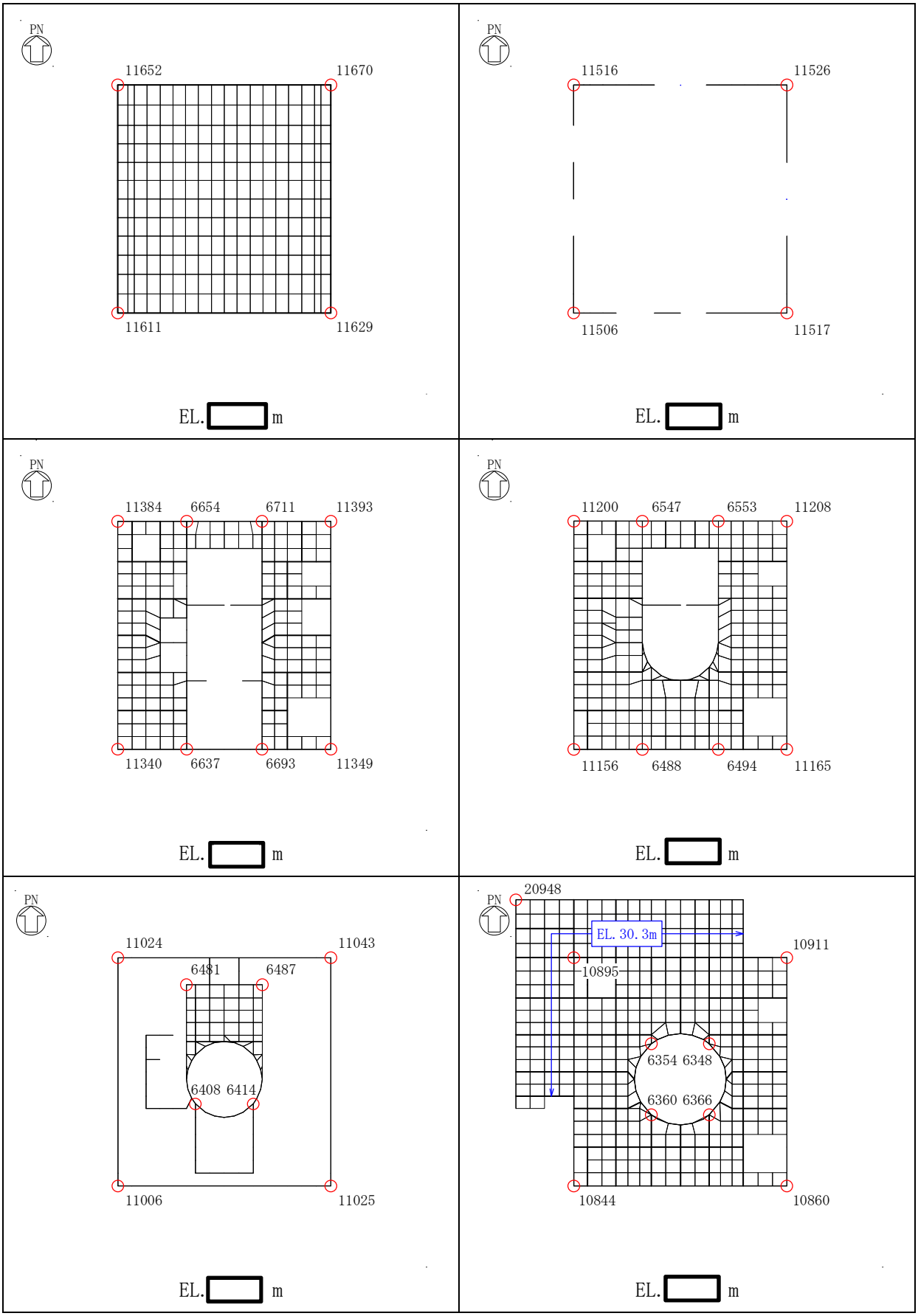


図 3-5（1／2）　応答評価位置

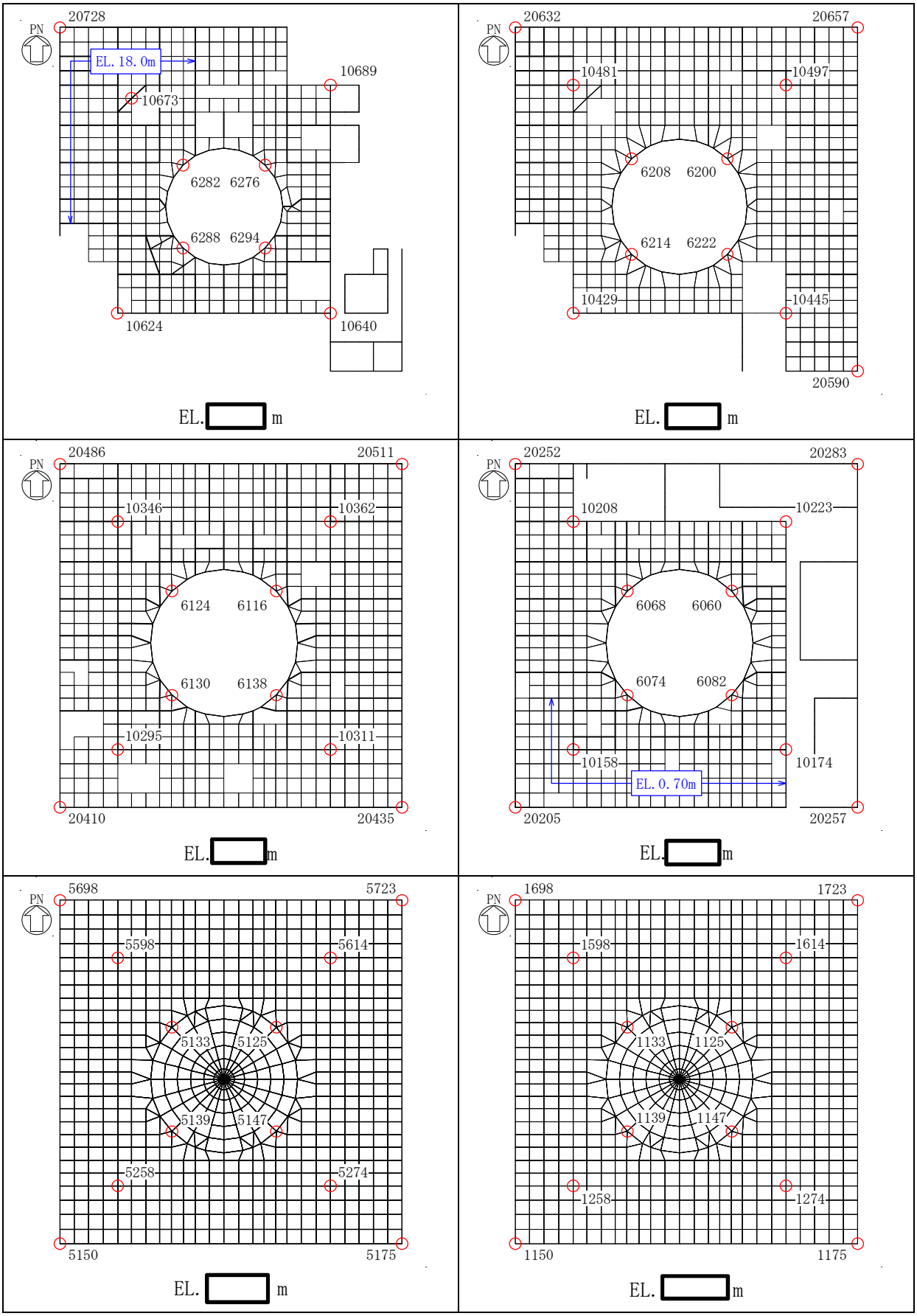
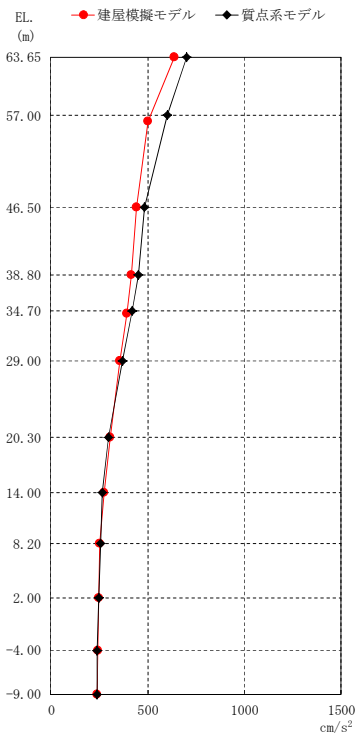


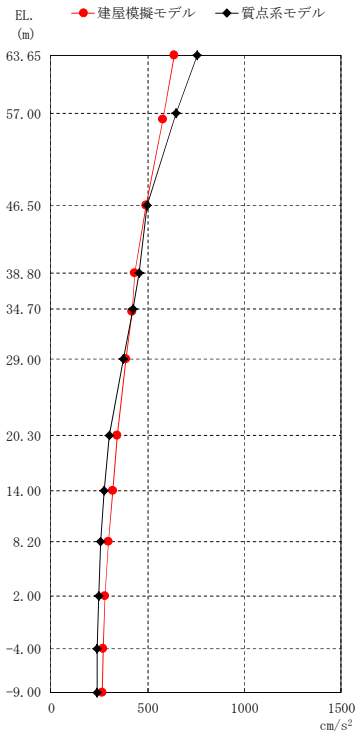
図 3-5（2／2）　応答評価位置



(単位：cm/s²)

質点系モデル	建屋模擬モデル
699	637
603	501
483	441
450	415
420	394
370	358
300	309
267	277
255	254
248	247
239	242
239	241

(a) NS 方向



(単位：cm/s²)

質点系モデル	建屋模擬モデル
754	636
649	577
499	495
457	436
425	422
373	387
301	345
274	321
258	297
249	280
239	270
239	267

(b) EW 方向

図 3-6　最大応答加速度の比較

(3)　3 次元的な応答特性（応答補正率）を考慮した建屋影響検討

(2)の結果を踏まえて，質点系モデルに対して，3 次元ＦＥＭモデルを用いて 3 次元的な応答補正を考慮し，建屋耐震評価への影響検討を実施する。

評価に当たっては，質点系モデルにおいて，基準地震動S_sに対する層レベルでの評価を行う部位を対象とし，3 次元ＦＥＭモデルにおける当該部での代表的な節点を複数節点選定する。

図 3-7 に検討フローを示す。

選定した 3 次元ＦＥＭモデルでの評価点において，弾性設計用地震動S_dに対する最大応答加速度をもとに，3 次元的な応答補正比率ζを算出し，質点系モデルの基準地震動S_sに対する応答補正を行い，耐震評価への影響検討を行う。

具体的には，質点系モデルの基準地震動S_sに対する最大応答せん断力 Q に応答補正比率ζを乗じて，3 次元的な応答特性を踏まえたせん断力を算定する。得られたせん断力を質点系モデルの各層のせん断スケルトンカーブ上にプロットし，せん断ひずみが評価基準値（2.0×10^{-3}）を超えないことを確認する。ここで，第 1 折点を超える場合は，エネルギー定則によりせん断ひずみを評価する。エネルギー定則によるせん断ひずみの評価方法を図 3-8 に示す。せん断ひずみを確認した結果，せん断ひずみが評価基準値を超えるものは詳細検討を実施する。

評価において用いた 3 次元ＦＥＭモデルにおける応答評価位置を図 3-5 に，質点系モデルでの評価部位を図 3-9 に示す。

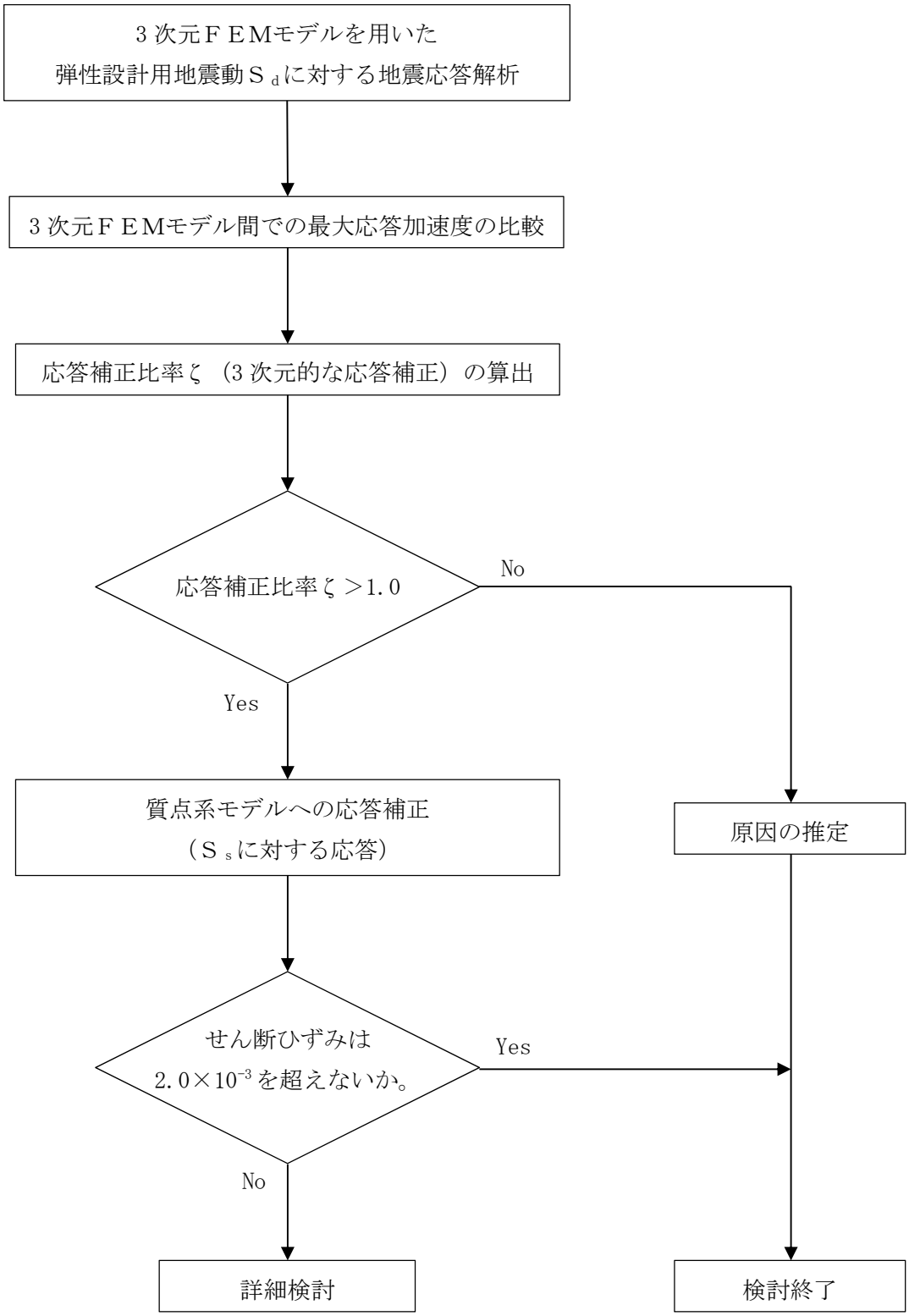

3次元ＦＥＭモデルを用いた
弾性設計用地震動Ｓ$_d$に対する地震応答解析
3次元ＦＥＭモデル間での最大応答加速度の比較
応答補正比率ζ（3次元的な応答補正）の算出
応答補正比率ζ＞1.0
No
Yes
質点系モデルへの応答補正
（Ｓ$_s$に対する応答）
原因の推定
せん断ひずみは
2.0×10^{-3}を超えないか。
Yes
No
詳細検討
検討終了

図 3-7　検討フロー

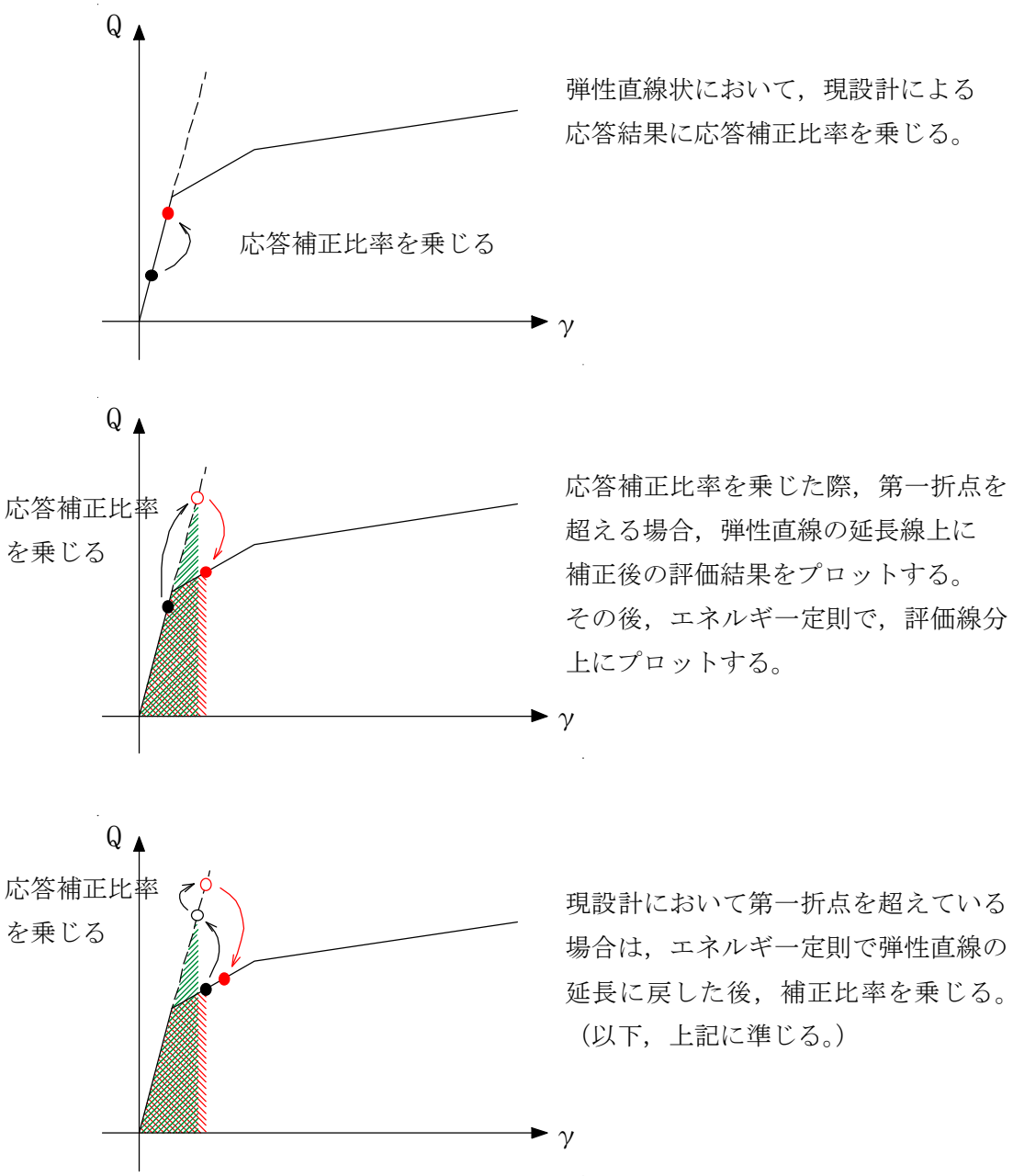


図 3-8　エネルギー定則によるせん断ひずみの評価方法

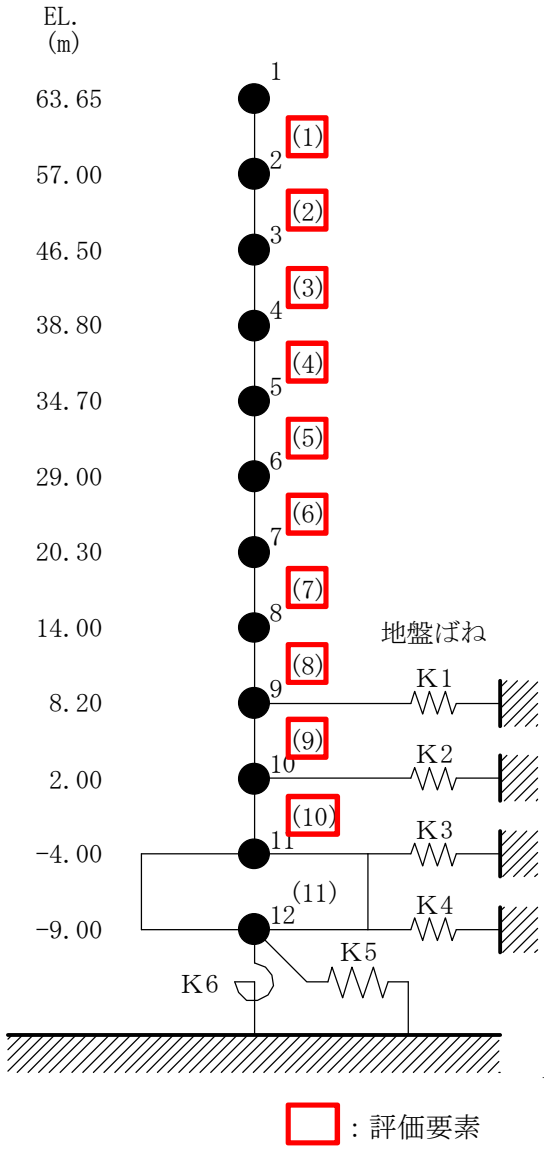


図 3-9　質点系モデルの評価部位

a．応答補正比率の算出

3 次元ＦＥＭモデルによる 3 次元的な応答性状を踏まえた定量的な耐震評価を行うため，質点系モデルの応答を補正する応答補正比率ζを算出する。

原子炉建屋については，質点系モデルにおいて，3 次元的な応答性状を考慮した 3 方向同時入力の解析ができないことから，建屋模擬モデルにおいて，1 方向入力及び 3 方向同時入力の最大応答加速度を比較し，応答補正比率αを算出する。

また，質点系モデルにおいて，ねじれ振動を考慮していないことから，建屋模擬モデル及び質点系モデルと諸条件を整合させた質点系対応モデルの最大応答加速度を比較し，応答補正比率βを算出する。

得られたα及びβを乗じて，建屋評価用の応答補正比率ζを以下のように算出する。

①応答補正比率α及びβはそれぞれ評価点ごとに定める。
②応答補正比率α及びβは保守的な評価を実施するため，それぞれ 1.0 以上とする
③応答補正比率ζは，層ごとの各評価点のα×βの最大値を用いる。

応答補正比率ζの算出式を以下に示す。

建屋評価用の応答補正比率ζ＝Max(α×β)　…(1)式

（Max（α×β）：層ごとの各評価点のα×βの最大値）

ここで，

$$3\text{ 方向同時入力の応答補正比率}\alpha = \frac{3\text{ 方向同時入力による最大応答加速度}}{1\text{ 方向入力による最大応答加速度}} \cdots(2)\text{式}$$

（ただし，ζを算出する場合は，α≥1.0）

$$\text{ねじれ振動の応答補正比率}\beta = \frac{\text{建屋模擬モデルの最大応答加速度}}{\text{質点系対応モデルの最大応答加速度}} \cdots(3)\text{式}$$

（ただし，ζを算出する場合は，β≥1.0）

応答補正比率α，β，ζの算定結果を表 3-7～表 3-12 に示す。応答補正比率ζは 1.02～1.32 の範囲にある。

表 3-7（1／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率αの算定（NS 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力	
63.65	1	11652	635	664	1.05
		11611	630	668	1.06
		11629	641	672	1.05
		11670	642	649	1.01
57.00	2	11516	498	504	1.01
		11506	495	506	1.02
		11517	506	512	1.01
		11526	507	507	1.00
46.50	3	11384	426	441	1.03
		11340	424	422	0.995
		11349	414	416	1.00
		11393	419	426	1.02
		6654	460	456	0.991
		6637	465	482	1.04
		6693	459	462	1.01
		6711	461	445	0.966
38.80	4	11200	399	412	1.03
		11156	399	394	0.987
		11165	389	386	0.994
		11209	394	389	0.988
		6547	432	432	0.999
		6488	434	430	0.991
		6494	439	436	0.995
		6553	431	430	0.997
34.70	5	11024	377	387	1.03
		11006	379	374	0.987
		11025	368	362	0.983
		11043	375	367	0.979
		6481	414	415	1.00
		6408	412	406	0.987
		6414	412	402	0.977
		6487	415	406	0.979

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるαを示す。

表 3-7（2／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率αの算定（NS 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s²)		α (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力	
29	6	20948	337	354	1.05
		10895	350	356	1.02
		10844	352	346	0.981
		10860	339	329	0.970
		10911	348	341	0.981
		6351	368	368	0.999
		6357	371	366	0.986
		6363	387	375	0.969
		6345	373	368	0.986
20.3	7	20728	282	286	1.01
		10673	306	310	1.01
		10624	306	304	0.992
		10640	299	289	0.967
		10689	308	304	0.988
		6279	326	332	1.02
		6285	314	314	1.00
		6291	320	316	0.986
		6273	319	318	0.999
14	8	20632	266	270	1.02
		20590	268	272	1.01
		20657	264	267	1.01
		10481	268	271	1.01
		10429	276	272	0.986
		10445	272	266	0.975
		10497	281	276	0.983
		6204	301	307	1.02
		6211	280	282	1.01
		6218	285	279	0.979
		6197	285	287	1.01

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるαを示す。

表 3-7（3／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率αの算定（NS 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力	
8.2	9	20486	251	250	0.999
		20410	245	253	1.03
		20435	253	254	1.01
		20511	251	249	0.991
		10346	253	252	0.996
		10295	252	255	1.01
		10311	254	256	1.01
		10362	256	259	1.01
		6120	263	269	1.02
		6127	255	255	0.997
		6134	257	261	1.01
		6113	256	258	1.01
2	10	20252	246	248	1.01
		20205	243	245	1.01
		20257	247	243	0.986
		20283	245	244	0.996
		10208	247	248	1.01
		10158	247	246	0.999
		10174	248	244	0.984
		10223	248	249	1.00
		6064	247	250	1.02
		6071	248	247	0.996
		6078	248	247	0.996
		6057	249	248	0.996

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるαを示す。

表 3-8（1／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率αの算定（EW 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力	
63.65	1	11652	635	671	1.06
		11611	640	652	1.02
		11629	637	682	1.07
		11670	633	648	1.02
57.00	2	11516	576	597	1.04
		11506	578	589	1.02
		11517	580	606	1.04
		11526	576	593	1.03
46.50	3	11384	497	507	1.02
		11340	496	504	1.02
		11349	501	514	1.03
		11393	494	506	1.03
		6654	495	505	1.02
		6637	490	493	1.00
		6693	492	499	1.01
		6711	494	503	1.02
38.80	4	11200	436	433	0.991
		11156	434	452	1.04
		11165	428	426	0.995
		11209	440	449	1.02
		6547	439	437	0.994
		6488	434	445	1.02
		6494	432	438	1.01
		6553	440	441	1.00
34.70	5	11024	409	410	1.00
		11006	411	421	1.02
		11025	403	399	0.991
		11043	413	418	1.01
		6481	439	453	1.03
		6408	433	435	1.00
		6414	427	424	0.992
		6487	440	456	1.04

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるαを示す。

表 3-8（2／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率αの算定（EW 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力	
29	6	20948	356	362	1.02
		10895	376	381	1.01
		10844	383	387	1.01
		10860	377	364	0.968
		10911	380	386	1.02
		6351	406	413	1.02
		6357	413	410	0.993
		6363	397	389	0.980
		6345	397	397	1.00
20.3	7	20728	324	332	1.03
		10673	345	345	0.997
		10624	340	337	0.990
		10640	349	345	0.989
		10689	339	344	1.01
		6279	352	350	0.993
		6285	357	349	0.979
		6291	348	335	0.964
		6273	350	346	0.988
14	8	20632	314	323	1.03
		20590	319	333	1.04
		20657	308	319	1.04
		10481	318	321	1.01
		10429	313	309	0.987
		10445	334	335	1.00
		10497	317	317	1.00
		6204	325	323	0.995
		6211	329	326	0.992
		6218	320	318	0.994
		6197	331	327	0.988

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるαを示す。

表 3-8（3／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率αの算定（EW 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力	
8.2	9	20486	298	306	1.03
		20410	284	282	0.992
		20435	297	307	1.03
		20511	294	296	1.01
		10346	300	302	1.01
		10295	292	296	1.01
		10311	292	297	1.01
		10362	298	300	1.00
		6120	302	301	0.997
		6127	305	309	1.01
		6134	298	301	1.01
		6113	306	304	0.994
2	10	20252	283	288	1.02
		20205	275	273	0.993
		20257	281	285	1.02
		20283	281	283	1.01
		10208	279	281	1.01
		10158	280	282	1.01
		10174	281	281	1.00
		10223	282	287	1.02
		6064	281	283	1.01
		6071	278	280	1.01
		6078	282	285	1.01
		6057	280	282	1.01

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるαを示す。

表 3-9（1／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率βの算定（NS 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		β (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 質点系対応	② 建屋模擬	
63.65	1	11652	513	635	1.24
		11611	513	630	1.23
		11629	517	641	1.24
		11670	517	642	1.24
57.00	2	11516	450	498	1.11
		11506	450	495	1.10
		11517	453	506	1.12
		11526	453	507	1.12
46.50	3	11384	369	426	1.16
		11340	369	424	1.15
		11349	368	414	1.13
		11393	368	419	1.14
		6654	369	460	1.25
		6637	369	465	1.26
		6693	368	459	1.24
		6711	368	461	1.25
38.80	4	11200	343	399	1.16
		11156	343	399	1.16
		11165	341	389	1.14
		11209	341	394	1.16
		6547	342	432	1.26
		6488	342	434	1.27
		6494	341	439	1.28
		6553	341	431	1.26
34.70	5	11024	334	377	1.13
		11006	334	379	1.14
		11025	328	368	1.12
		11043	328	375	1.14
		6481	332	414	1.25
		6408	332	412	1.24
		6414	330	412	1.25
		6487	330	415	1.26

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるβを示す。

表 3-9（2／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率βの算定（NS 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		β (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 質点系対応	② 建屋模擬	
29	6	20948	326	337	1.03
		10895	322	350	1.09
		10844	322	352	1.09
		10860	318	339	1.07
		10911	318	348	1.10
		6351	320	368	1.15
		6357	321	371	1.16
		6363	320	387	1.21
		6345	319	373	1.17
20.3	7	20728	299	282	0.943
		10673	303	306	1.01
		10624	303	306	1.01
		10640	300	299	0.998
		10689	300	308	1.03
		6279	301	326	1.08
		6285	302	314	1.04
		6291	301	320	1.06
		6273	301	319	1.06
14	8	20632	286	266	0.929
		20590	281	268	0.954
		20657	281	264	0.938
		10481	282	268	0.949
		10429	285	276	0.967
		10445	282	272	0.964
		10497	282	281	0.993
		6204	284	301	1.06
		6211	285	280	0.983
		6218	284	285	1.00
		6197	283	285	1.01

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるβを示す。

表 3-9（3／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率βの算定（NS 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		β (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 質点系対応	② 建屋模擬	
8.2	9	20486	263	251	0.952
		20410	263	245	0.932
		20435	262	253	0.964
		20511	262	251	0.958
		10346	263	253	0.963
		10295	263	252	0.959
		10311	263	254	0.967
		10362	263	256	0.974
		6120	263	263	0.999
		6127	263	255	0.971
		6134	263	257	0.978
		6113	263	256	0.976
2	10	20252	242	246	1.01
		20205	242	243	1.00
		20257	243	247	1.01
		20283	243	245	1.01
		10208	243	247	1.02
		10158	243	247	1.02
		10174	244	248	1.02
		10223	244	248	1.02
		6064	243	247	1.01
		6071	243	248	1.02
		6078	243	248	1.02
		6057	244	249	1.02

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるαを示す。

表 3-10（1／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率βの算定（EW 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		β (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 質点系対応	② 建屋模擬	
63.65	1	11652	576	635	1.10
		11611	575	640	1.11
		11629	575	637	1.11
		11670	576	633	1.10
57.00	2	11516	511	576	1.13
		11506	509	578	1.14
		11517	509	580	1.14
		11526	511	576	1.13
46.50	3	11384	425	497	1.17
		11340	416	496	1.19
		11349	416	501	1.20
		11393	425	494	1.16
		6654	425	495	1.16
		6637	416	490	1.18
		6693	416	492	1.18
		6711	425	494	1.16
38.80	4	11200	389	436	1.12
		11156	384	434	1.13
		11165	384	428	1.11
		11209	389	440	1.13
		6547	389	439	1.13
		6488	384	434	1.13
		6494	384	432	1.13
		6553	389	440	1.13
34.70	5	11024	373	409	1.10
		11006	367	411	1.12
		11025	367	403	1.10
		11043	373	413	1.11
		6481	372	439	1.18
		6408	369	433	1.17
		6414	369	427	1.16
		6487	372	440	1.18

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるβを示す。

表 3-10（2／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率βの算定（EW 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		β (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 質点系対応	② 建屋模擬	
29	6	20948	349	356	1.02
		10895	347	376	1.01
		10844	348	383	1.01
		10860	348	377	0.968
		10911	347	380	1.02
		6351	347	406	1.02
		6357	347	413	0.993
		6363	347	397	0.980
		6345	347	397	1.00
20.3	7	20728	324	324	1.03
		10673	325	345	0.997
		10624	324	340	0.990
		10640	324	349	0.989
		10689	325	339	1.01
		6279	325	352	0.993
		6285	324	357	0.979
		6291	324	348	0.964
		6273	324	350	0.988
14	8	20632	310	314	1.03
		20590	312	319	1.04
		20657	310	308	1.04
		10481	310	318	1.01
		10429	312	313	0.987
		10445	312	334	1.00
		10497	311	317	1.00
		6204	311	325	0.995
		6211	311	329	0.992
		6218	312	320	0.994
		6197	311	331	0.988

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるβを示す。

表 3-10（3／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率βの算定（EW 方向）

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		β (②/①)
EL. (m)	質点番号	ＦＥＭ節点	① 質点系対応	② 建屋模擬	
8.2	9	20486	300	298	0.992
		20410	299	284	0.950
		20435	299	297	0.993
		20511	300	294	0.980
		10346	300	300	0.999
		10295	300	292	0.975
		10311	300	292	0.976
		10362	300	298	0.995
		6120	300	302	1.01
		6127	300	305	1.02
		6134	300	298	0.995
		6113	300	306	1.02
2	10	20252	288	283	0.983
		20205	287	275	0.958
		20257	288	281	0.977
		20283	287	281	0.977
		10208	288	279	0.971
		10158	288	280	0.973
		10174	288	281	0.976
		10223	288	282	0.980
		6064	288	281	0.976
		6071	288	278	0.965
		6078	288	282	0.980
		6057	288	280	0.973

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるβを示す。

表 3-11（1／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率ζの算定（NS 方向）

評価点			α	β	α×β	応答補正比率ζ
EL.(m)	質点番号	ＦＥＭ節点				
63.65	1	11652	1.05	1.24	1.31	1.31
		11611	1.06	1.23	1.31	
		11629	1.05	1.24	1.31	
		11670	1.01	1.24	1.26	
57.00	2	11516	1.01	1.11	1.13	1.14
		11506	1.02	1.10	1.13	
		11517	1.01	1.12	1.14	
		11526	1.00	1.12	1.12	
46.50	3	11384	1.03	1.16	1.20	1.32
		11340	1.00	1.15	1.15	
		11349	1.00	1.13	1.13	
		11393	1.02	1.14	1.17	
		6654	1.00	1.25	1.25	
		6637	1.04	1.26	1.32	
		6693	1.01	1.24	1.26	
		6711	1.00	1.25	1.25	
38.80	4	11200	1.03	1.16	1.20	1.28
		11156	1.00	1.16	1.16	
		11165	1.00	1.14	1.14	
		11209	1.00	1.16	1.16	
		6547	1.00	1.26	1.26	
		6488	1.00	1.27	1.27	
		6494	1.00	1.28	1.28	
		6553	1.00	1.26	1.26	
34.70	5	11024	1.03	1.13	1.17	1.26
		11006	1.00	1.14	1.14	
		11025	1.00	1.12	1.12	
		11043	1.00	1.14	1.14	
		6481	1.00	1.25	1.25	
		6408	1.00	1.24	1.24	
		6414	1.00	1.25	1.25	
		6487	1.00	1.26	1.26	

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるζ（＝α×β）を示す。

表 3-11（2／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率ζの算定（NS 方向）

評価点			α	β	α×β	応答補正比率ζ
EL.(m)	質点番号	ＦＥＭ節点				
29	6	20948	1.05	1.03	1.09	1.21
		10895	1.02	1.09	1.12	
		10844	1.00	1.09	1.09	
		10860	1.00	1.07	1.07	
		10911	1.00	1.10	1.10	
		6351	1.00	1.15	1.15	
		6357	1.00	1.16	1.16	
		6363	1.00	1.21	1.21	
		6345	1.00	1.17	1.17	
20.3	7	20728	1.01	1.00	1.01	1.11
		10673	1.01	1.01	1.03	
		10624	1.00	1.01	1.01	
		10640	1.00	1.00	1.00	
		10689	1.00	1.03	1.03	
		6279	1.02	1.08	1.11	
		6285	1.00	1.04	1.04	
		6291	1.00	1.06	1.06	
		6273	1.00	1.06	1.06	
14	8	20632	1.02	1.00	1.02	1.09
		20590	1.01	1.00	1.01	
		20657	1.01	1.00	1.01	
		10481	1.01	1.00	1.01	
		10429	1.00	1.00	1.00	
		10445	1.00	1.00	1.00	
		10497	1.00	1.00	1.00	
		6204	1.02	1.06	1.09	
		6211	1.01	1.00	1.01	
		6218	1.00	1.00	1.00	
		6197	1.01	1.01	1.03	

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるζ（＝α×β）を示す。

表 3-11（3／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率ζの算定（NS 方向）

評価点			α	β	α×β	応答補正比率ζ
EL.(m)	質点番号	ＦＥＭ節点				
8.2	9	20486	1.00	1.00	1.00	1.03
		20410	1.03	1.00	1.03	
		20435	1.01	1.00	1.01	
		20511	1.00	1.00	1.00	
		10346	1.00	1.00	1.00	
		10295	1.01	1.00	1.01	
		10311	1.01	1.00	1.01	
		10362	1.01	1.00	1.01	
		6120	1.02	1.00	1.02	
		6127	1.00	1.00	1.00	
		6134	1.01	1.00	1.01	
		6113	1.01	1.00	1.01	
2	10	20252	1.01	1.01	1.03	1.04
		20205	1.01	1.00	1.01	
		20257	1.00	1.01	1.01	
		20283	1.00	1.01	1.01	
		10208	1.01	1.02	1.04	
		10158	1.00	1.02	1.02	
		10174	1.00	1.02	1.02	
		10223	1.00	1.02	1.02	
		6064	1.02	1.01	1.04	
		6071	1.00	1.02	1.02	
		6078	1.00	1.02	1.02	
		6057	1.00	1.02	1.02	

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるζ（＝α×β）を示す。

表 3-12（1／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率ζの算定（EW 方向）

評価点			α	β	α×β	応答補正比率ζ
EL.(m)	質点番号	ＦＥＭ節点				
63.65	1	11652	1.06	1.10	1.17	1.19
		11611	1.02	1.11	1.14	
		11629	1.07	1.11	1.19	
		11670	1.02	1.10	1.13	
57.00	2	11516	1.04	1.13	1.18	1.19
		11506	1.02	1.14	1.17	
		11517	1.04	1.14	1.19	
		11526	1.03	1.13	1.17	
46.50	3	11384	1.02	1.17	1.20	1.24
		11340	1.02	1.19	1.22	
		11349	1.03	1.20	1.24	
		11393	1.03	1.16	1.20	
		6654	1.02	1.16	1.19	
		6637	1.00	1.18	1.18	
		6693	1.01	1.18	1.20	
		6711	1.02	1.16	1.19	
38.80	4	11200	1.00	1.12	1.12	1.18
		11156	1.04	1.13	1.18	
		11165	1.00	1.11	1.11	
		11209	1.02	1.13	1.16	
		6547	1.00	1.13	1.13	
		6488	1.02	1.13	1.16	
		6494	1.01	1.13	1.15	
		6553	1.00	1.13	1.13	
34.70	5	11024	1.00	1.10	1.10	1.23
		11006	1.02	1.12	1.15	
		11025	1.00	1.10	1.10	
		11043	1.01	1.11	1.13	
		6481	1.03	1.18	1.22	
		6408	1.00	1.17	1.17	
		6414	1.00	1.16	1.16	
		6487	1.04	1.18	1.23	

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるζ（＝α×β）を示す。

表 3-12（2／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率ζの算定（EW 方向）

評価点			α	β	α×β	応答補正比率ζ
EL.(m)	質点番号	ＦＥＭ節点				
29	6	20948	1.02	1.02	1.05	1.20
		10895	1.01	1.08	1.10	
		10844	1.01	1.10	1.12	
		10860	1.00	1.08	1.08	
		10911	1.02	1.10	1.13	
		6351	1.02	1.17	1.20	
		6357	1.00	1.19	1.19	
		6363	1.00	1.14	1.14	
		6345	1.00	1.14	1.14	
20.3	7	20728	1.03	1.00	1.03	1.10
		10673	1.00	1.06	1.06	
		10624	1.00	1.05	1.05	
		10640	1.00	1.08	1.08	
		10689	1.01	1.05	1.07	
		6279	1.00	1.09	1.09	
		6285	1.00	1.10	1.10	
		6291	1.00	1.07	1.07	
		6273	1.00	1.08	1.08	
14	8	20632	1.03	1.01	1.05	1.07
		20590	1.04	1.02	1.07	
		20657	1.04	1.00	1.04	
		10481	1.01	1.03	1.05	
		10429	1.00	1.00	1.00	
		10445	1.00	1.07	1.07	
		10497	1.00	1.02	1.02	
		6204	1.00	1.04	1.04	
		6211	1.00	1.06	1.06	
		6218	1.00	1.03	1.03	
		6197	1.00	1.06	1.06	

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるζ（＝α×β）を示す。

表 3-12（3／3）　建屋耐震評価用の応答補正比率ζの算定（EW 方向）

評価点			α	β	α×β	応答補正比率ζ
EL.(m)	質点番号	ＦＥＭ節点				
8.2	9	20486	1.03	1.00	1.03	1.04
		20410	1.00	1.00	1.00	
		20435	1.03	1.00	1.03	
		20511	1.01	1.00	1.01	
		10346	1.01	1.00	1.01	
		10295	1.01	1.00	1.01	
		10311	1.01	1.00	1.01	
		10362	1.00	1.00	1.00	
		6120	1.00	1.01	1.01	
		6127	1.01	1.02	1.04	
		6134	1.01	1.00	1.01	
		6113	1.00	1.02	1.02	
2	10	20252	1.02	1.00	1.02	1.02
		20205	1.00	1.00	1.00	
		20257	1.02	1.00	1.02	
		20283	1.01	1.00	1.01	
		10208	1.01	1.00	1.01	
		10158	1.01	1.00	1.01	
		10174	1.00	1.00	1.00	
		10223	1.02	1.00	1.02	
		6064	1.01	1.00	1.01	
		6071	1.01	1.00	1.01	
		6078	1.01	1.00	1.01	
		6057	1.01	1.00	1.01	

注　：網掛け部分は質点番号に対応したＦＥＭ節点のうち最大となるζ（＝α×β）を示す。

b．評価結果

各層の応答比率を乗じた最大応答せん断力及び最大せん断ひずみを表 3-13 に示す。補正後の応答をプロットしたせん断スケルトンカーブを図 3-10 及び図 3-11 に示す。

質点系モデルの最大応答せん断力 Q に応答補正比率ζを乗じて，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響及び 3 次元的な応答特性を踏まえたせん断ひずみを評価した結果，NS 方向及び EW 方向ともに全ての層において，評価基準値（2.0×10^{-3}）を超えないことを確認した。

以上のことから，原子炉建屋については，3 次元的な応答特性による応答補正を考慮しても，建屋が有する耐震性への影響はないことを確認した。

表 3-13　3 次元的な応答特性を踏まえたせん断力及びせん断ひずみ

(a) NS 方向

要素番号	質点系モデルの最大応答値（S_s）			応答補正比率ζ	応答補正後（最大応答値×ζ）	
	Q（$\times 10^5$ kN）	γ（$\times 10^{-3}$）	地震動		Q（$\times 10^5$ kN）	γ（$\times 10^{-3}$）
1	0.212	0.084	S_s－２１	1.31	0.278	0.110
2	0.396	0.158	S_s－２１	1.14	0.452	0.180
3	0.989	0.051	S_s－３１	1.32	1.31	0.067
4	1.83	0.169	S_s－３１	1.28	1.95	0.227
5	2.50	0.452	S_s－３１	1.26	2.67	0.637
6	3.54	0.259	S_s－３１	1.21	3.80	0.333
7	4.63	0.367	S_s－３１	1.11	4.85	0.424
8	5.96	0.164	S_s－３１	1.09	6.50	0.179
9	6.77	0.158	S_s－３１	1.03	6.97	0.163
10	7.57	0.177	S_s－３１	1.04	7.87	0.184

(b)　EW 方向

要素番号	質点系モデルの最大応答値（S_s）			応答補正比率ζ	応答補正後（最大応答値×ζ）	
	Q（$\times 10^5$ kN）	γ（$\times 10^{-3}$）	地震動		Q（$\times 10^5$ kN）	γ（$\times 10^{-3}$）
1	0.214	0.091	S_s－２２	1.19	0.255	0.108
2	0.398	0.169	S_s－２２	1.19	0.442	0.202
3	0.989	0.070	S_s－３１	1.24	1.23	0.086
4	1.79	0.138	S_s－３１	1.18	2.10	0.162
5	2.53	0.298	S_s－３１	1.23	2.79	0.396
6	3.56	0.259	S_s－３１	1.20	3.84	0.332
7	4.63	0.468	S_s－３１	1.10	4.83	0.535
8	6.07	0.235	S_s－３１	1.07	6.19	0.255
9	6.83	0.163	S_s－３１	1.04	7.10	0.170
10	7.71	0.184	S_s－３１	1.02	7.86	0.188

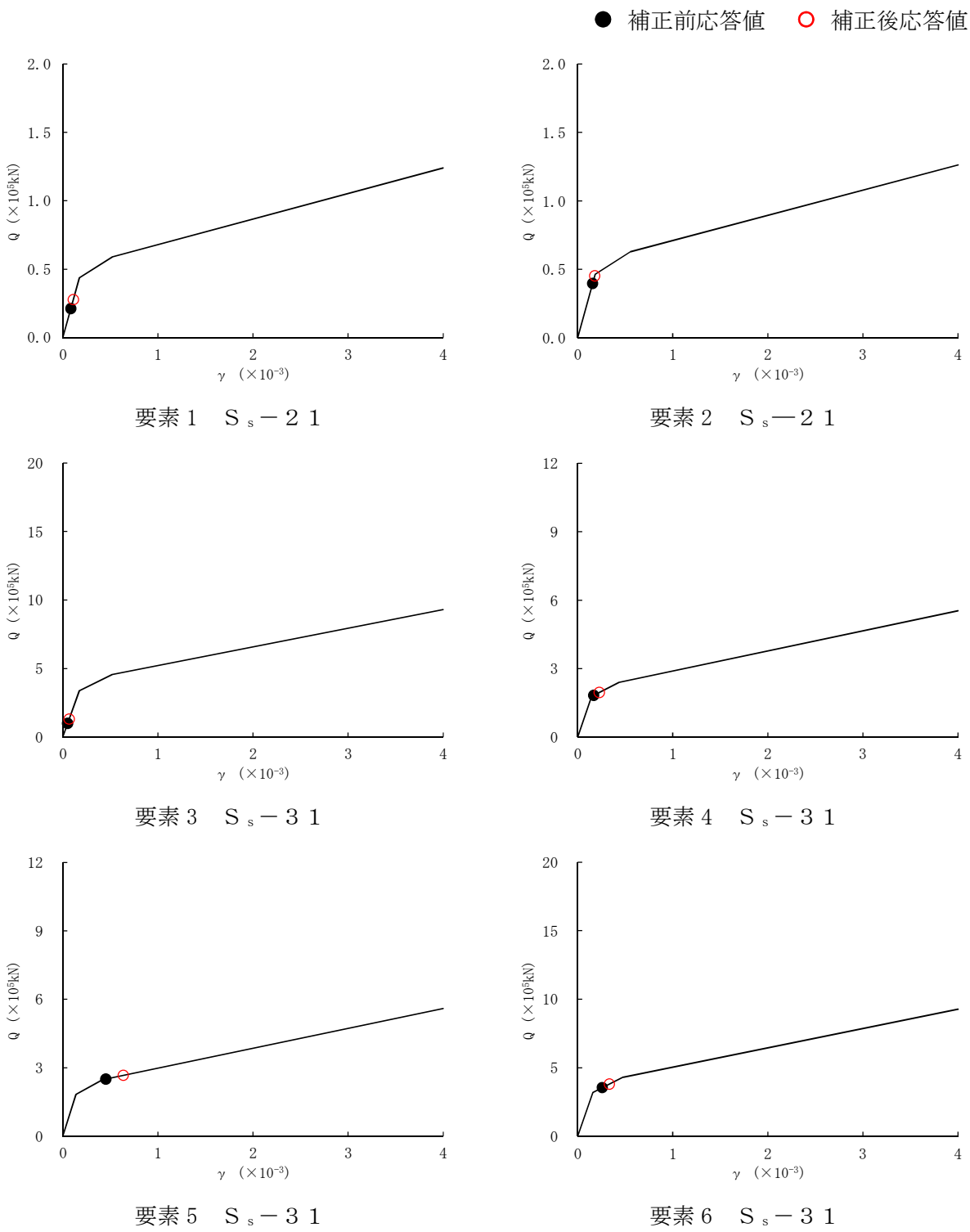


図 3-10（1／2）　せん断スケルトンカーブ上の最大応答値（NS 方向）

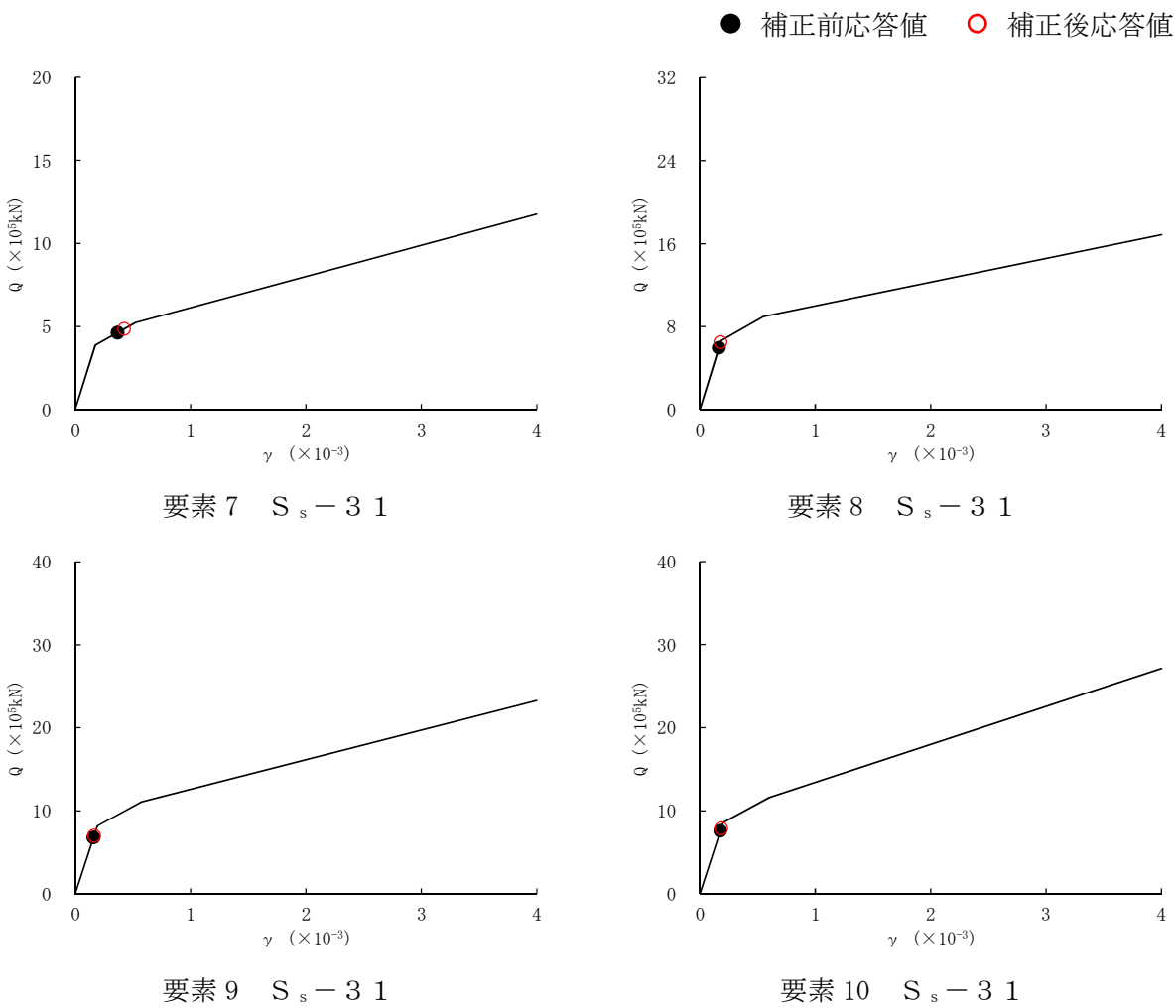


図 3-10（2／2）　せん断スケルトンカーブ上の最大応答値（NS 方向）

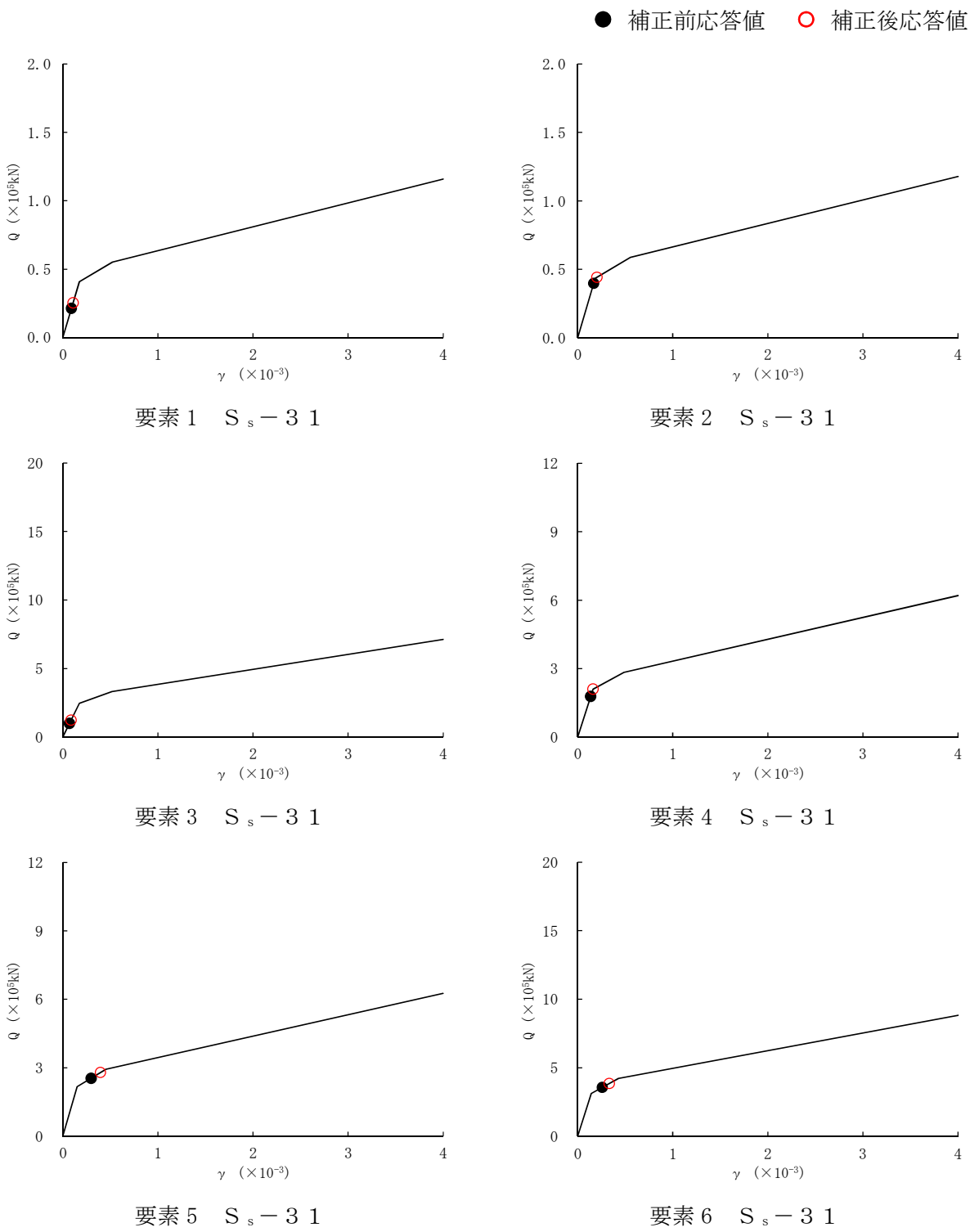


図 3-11（1／2）　せん断スケルトンカーブ上の最大応答値（EW 方向）

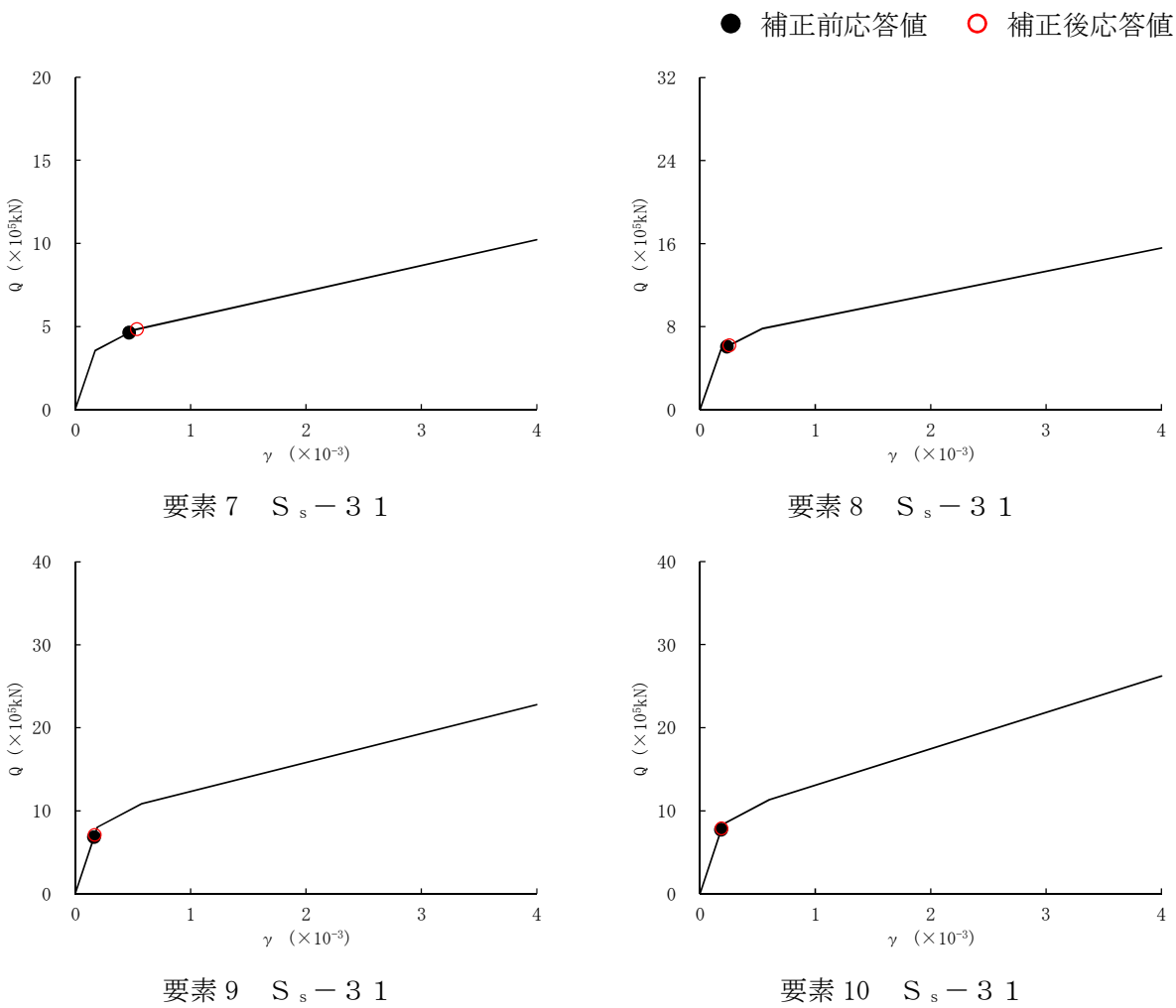


図 3-11（2／2）　せん断スケルトンカーブ上の最大応答値（EW 方向）

3.4　床応答への影響検討

3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析結果から，3 次元的挙動が床応答に及ぼす影響について検討する。

評価部位は，図 3-2 における各レベルの I／W 位置の北西部とする。

評価にあたっては，3 次元ＦＥＭモデルにおける 1 方向入力及び 3 方向同時入力時の床応答の比較，並びに質点系モデル及び 3 次元ＦＥＭモデルの床応答を比較し，3 次元的な応答特性の影響を確認する。

ここで，1 方向入力及び 3 方向同時入力時の床応答の比較については，「3.2(4)　水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響」にて検討しており，各レベルにおいて 3 方向同時入力による影響はほとんどないことを確認している。

質点系モデル及び 3 次元ＦＥＭモデルの床応答の比較について，地震動の入力は質点系モデルで 1 方向入力していることから，3 次元ＦＥＭモデルにおいても 1 方向入力で比較する。

表 3-14 に比較結果を示す。

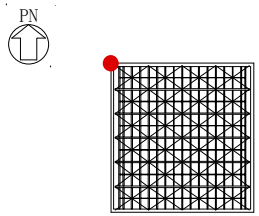
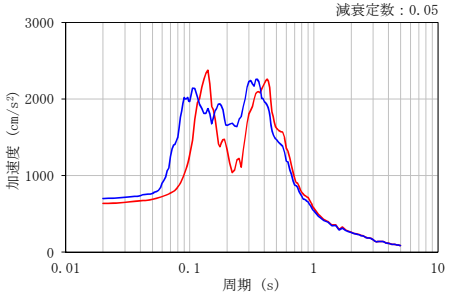
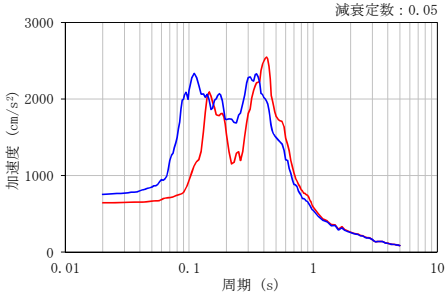
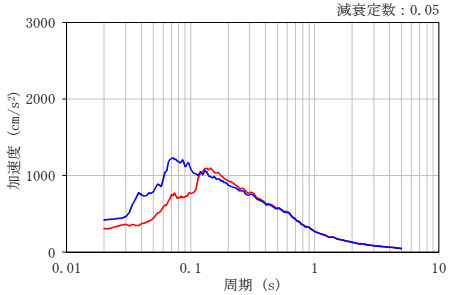
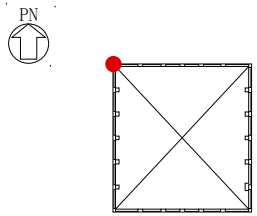
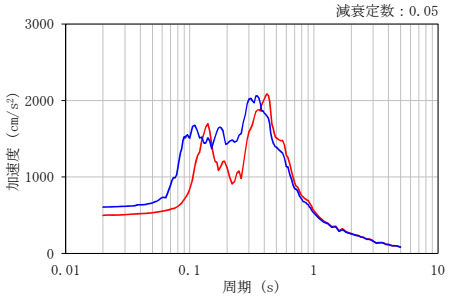
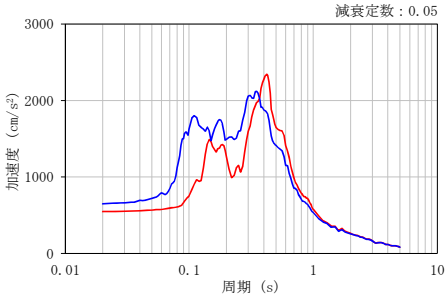
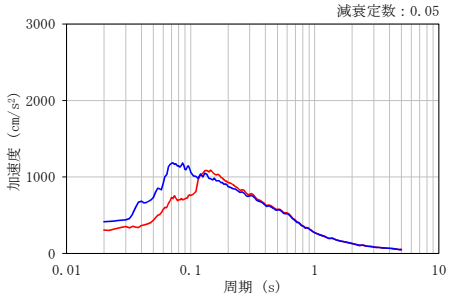
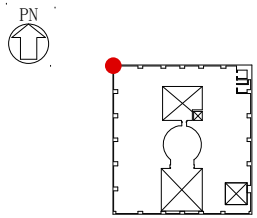
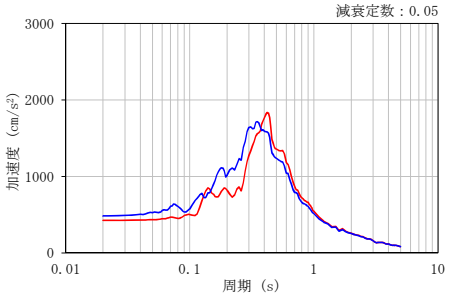
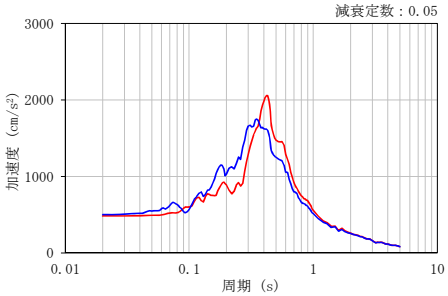
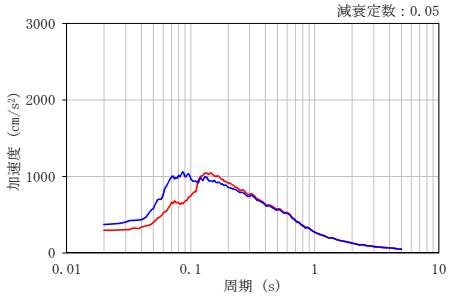
質点系モデルの応答と建屋模擬モデルの応答は概ね同等であることが確認できた。

以上のことから，3 次元的な応答特性を踏まえても，原子炉建屋における質点系モデルの応答は，妥当な応答となることが確認できた。

この結果は，I／W 位置の北西部での比較であり，また 3 次元ＦＥＭモデルにおいても 1 方向入力を行っていることから，「補 5　S_d－Ｄ１に対する 3 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析」にて各階の評価点を増し，内部ボックス壁，外部ボックス壁及びシェル壁の壁隅部及び中間部も対象とし 3 方向同時入力時の応答性状の把握の観点から加速度応答スペクトルを示し，建屋応答性状の分析を行う。

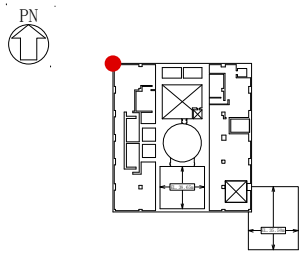
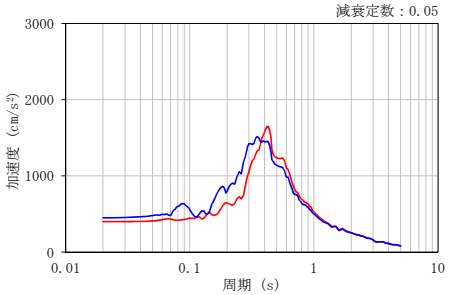
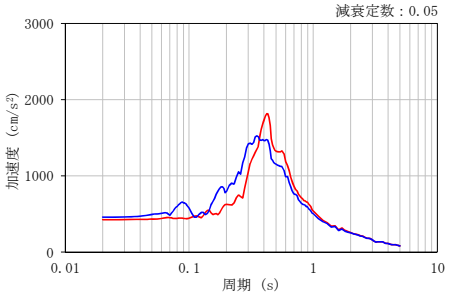
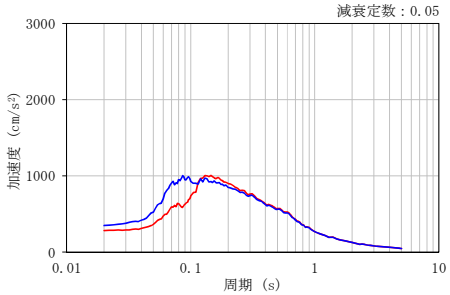
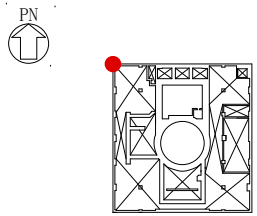
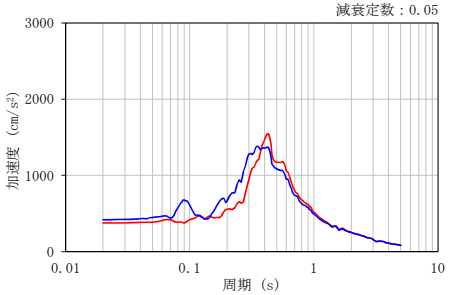
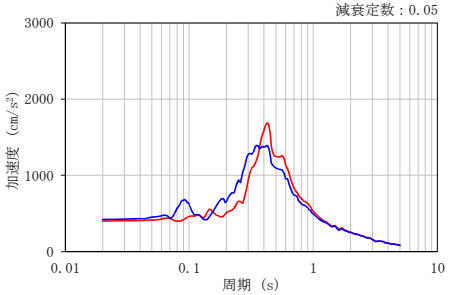
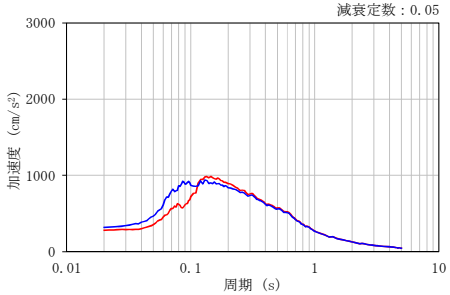
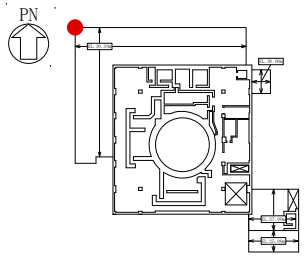
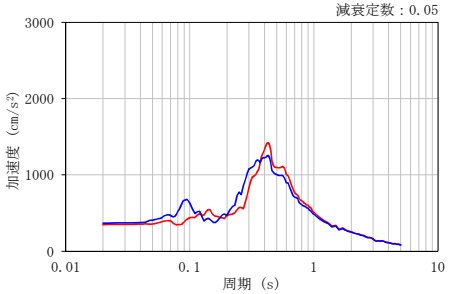
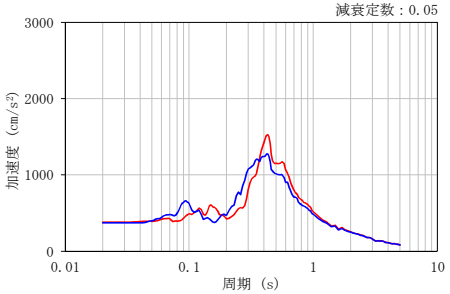
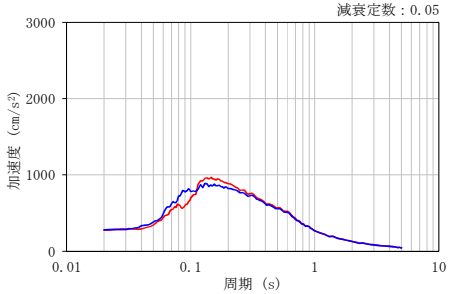
なお，「3.2　建屋応答性状の把握」で確認したように，EL.46.5 m の EW 方向については，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響で局所的な応答が生じるため，「別紙 4 機器・配管系に関する説明資料」において，その影響について検討を行う。

表 3-14（1／4）　３次元ＦＥＭモデル（建屋模擬モデル）及び質点系モデルの応答比較

評価点	NS 応答	EW 応答	UD 応答
 EL [redacted] m No. 11652			
 EL [redacted] m No. 11516			
 EL [redacted] m No. 11384			

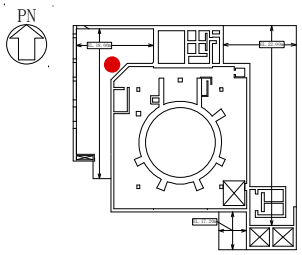
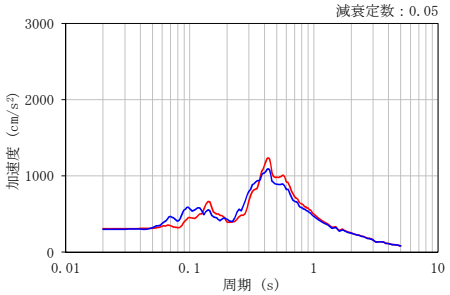
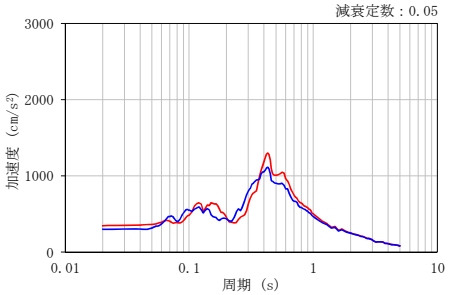
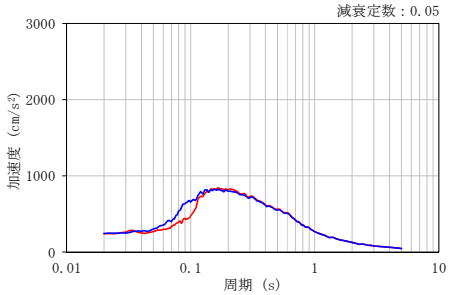
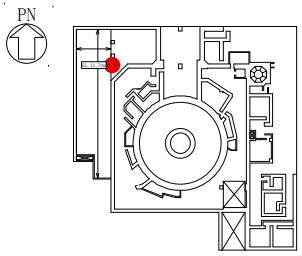
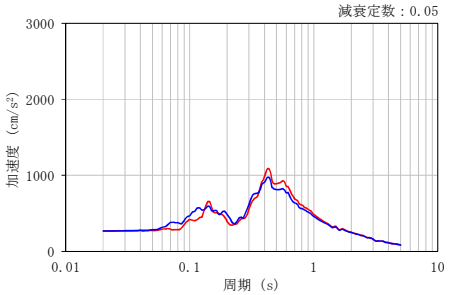
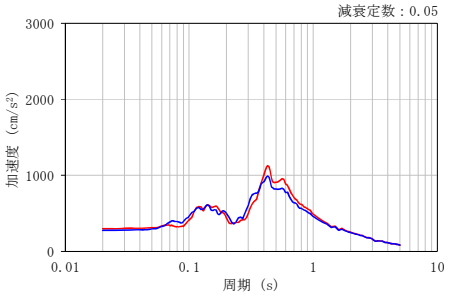
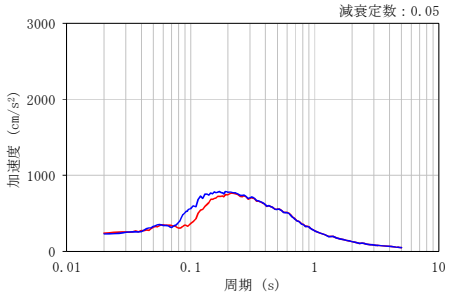
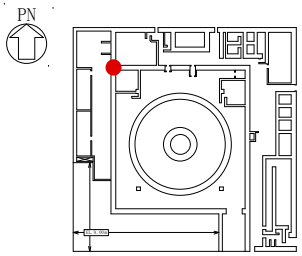
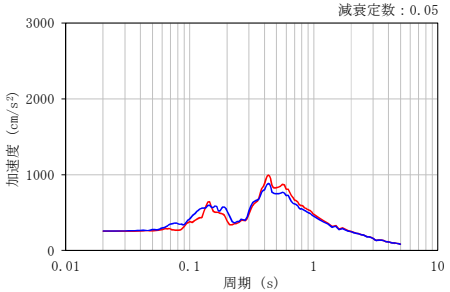
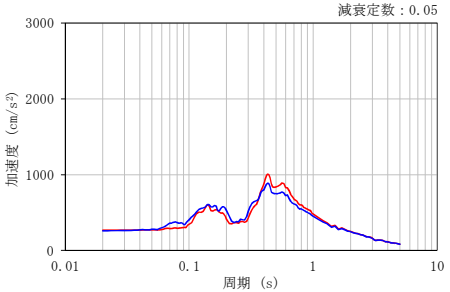
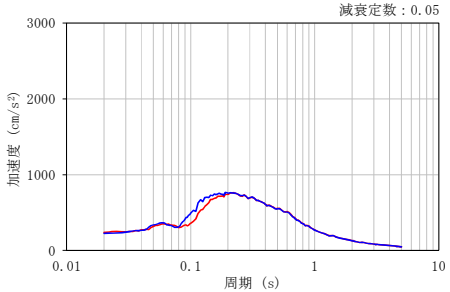
建屋模擬モデル　質点系モデル

表 3-14（2／4）　3 次元ＦＥＭモデル（建屋模擬モデル）及び質点系モデルの応答比較

評価点	NS 応答	EW 応答	UD 応答
 EL [redacted] m No. 11200			
 EL [redacted] m No. 11024			
 EL [redacted] m No. 10895			

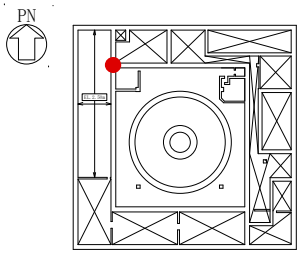
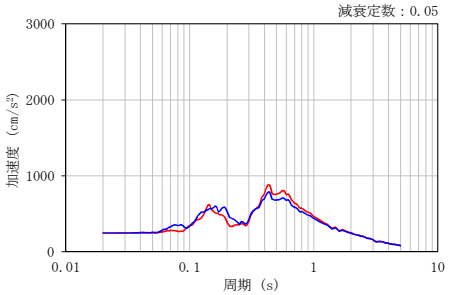
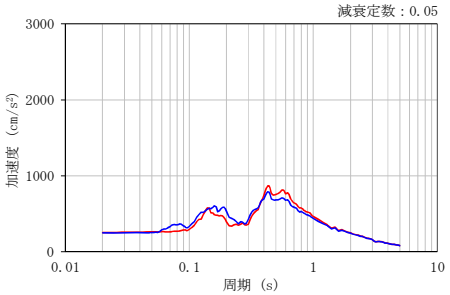
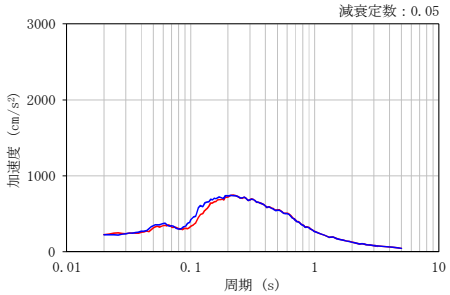
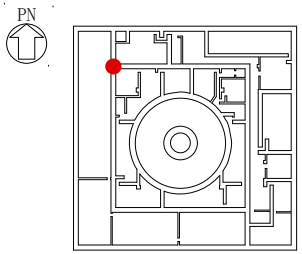
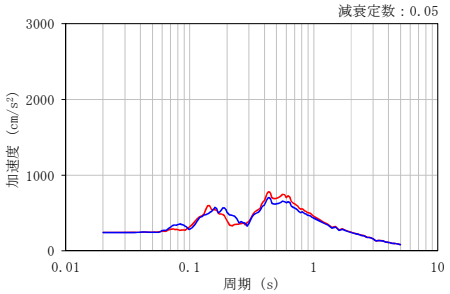
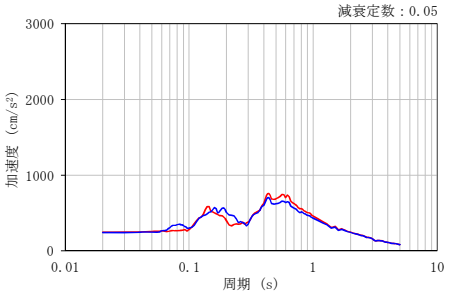
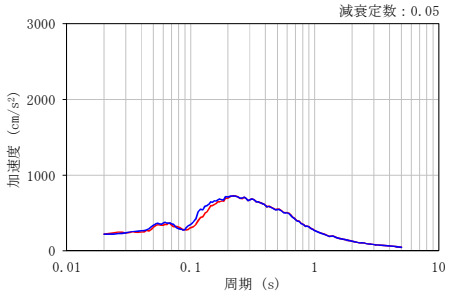
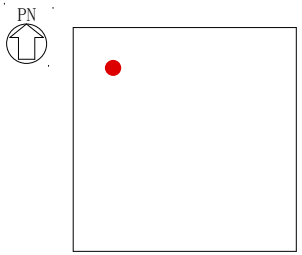
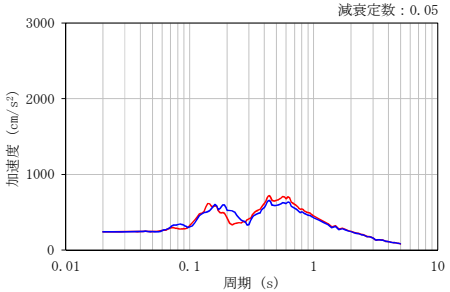
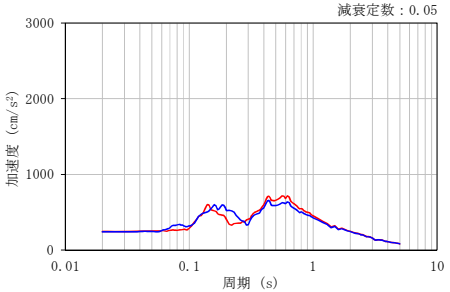
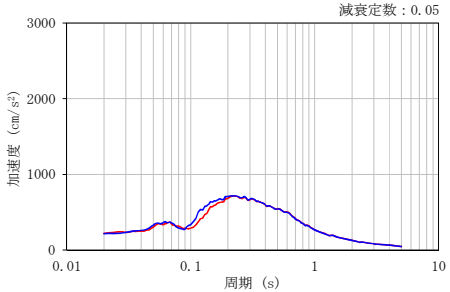
建屋模擬モデル　質点系モデル

表 3-14（3／4）　3 次元ＦＥＭモデル（建屋模擬モデル）及び質点系モデルの応答比較

評価点	NS 応答	EW 応答	UD 応答
 EL. [redacted] m No. 10673			
 EL. [redacted] m No. 10481			
 EL. [redacted] m No. 10346			

建屋模擬モデル　質点系モデル

表 3-14（4／4）　3 次元ＦＥＭモデル（建屋模擬モデル）及び質点系モデルの応答比較

評価点	NS 応答	EW 応答	UD 応答
 EL. [redacted] m No. 10208			
 EL. [redacted] m No. 5598			
 EL. [redacted] m No. 1598			

建屋模擬モデル　質点系モデル

3.5　地震観測記録を踏まえた耐震評価への影響検討

3.5.1　検討概要

東北地方太平洋沖地震の地震観測記録では，オペフロにおける EW 方向の床応答加速度スペクトルの 10 Hz 付近が増幅することが確認されている。なお，建屋全体の３次元ＦＥＭモデル（以下「建屋全体モデル」という）を用いた建屋応答の分析より，鉛直地震力により EW 方向の 10 Hz 付近の応答が増幅することを確認している。

一方，使用済燃料プールは，水平方向と鉛直方向の地震力の組合せに対し，組合せ係数法を用いた応力解析を実施し耐震健全性を確認している。

本検討では，オペフロにある使用済燃料プールに対して，鉛直地震力による EW 方向の応答増幅に対する影響検討を実施する。

3.5.2　評価方針

(1)　評価対象部位及び応力成分

建屋全体モデルによる固有値解析により，EW 方向の応答が励起される振動モードは，ウェル壁がプールゲート部を境に東西に開閉するモードである。

ウェル壁の上部が東西方向に変形する挙動（開閉モード）により，ウェル壁には壁面内の曲げモーメントが作用し，ウェル壁下部に曲げに伴う局所応力が生じる。この局所応力は，ウェル壁のプールゲートに面した側面では曲げに伴う鉛直方向の引張力，プールゲート底部には水平方向の引張力が作用する。

本検討では，使用済燃料プールのうち鉛直地震力による EW 方向の応答増幅が与える影響の最も大きな部位としてウェル壁下部を抽出し，建屋全体モデルを用いた地震応答解析結果から，鉛直地震力によりウェル壁脚部に生じる鉛直方向引張力と水平方向引張力に与える影響について確認する。評価対象とする部位を図 3-12 に，評価する応力成分を図 3-13 に示す。

図 3-12　建屋全体モデルの評価対象要素（EW 方向断面図）

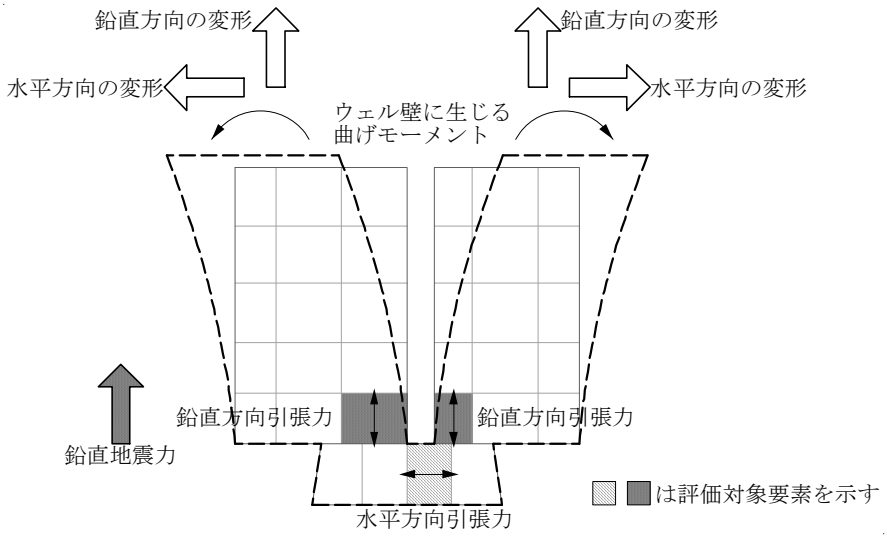


図 3-13　建屋全体モデルの評価対象部位及び応力成分

(2)　評価方法

評価は，使用済燃料プールの耐震評価に用いた応力解析モデル（以下「耐震評価モデル」という）により算出した応力に，建屋全体モデルにより求めた鉛直地震力により励起された軸方向引張力の増幅を考慮しても，発生応力が許容限界以下となることを確認する。

a.　応答増幅の確認

建屋全体モデルによる地震応答解析を行い，ウェル壁に発生する EW 方向単独入力時の応力と鉛直方向単独入力時の応力を比較し応答増幅率を算出する。なお，検討に用いる入力地震動は，対象とする短周期成分を含む地震動とし，S_d－D１とする。応答増幅率を算出する評価対象要素を図 3-14 に示す。

建屋全体モデルによる応答増幅率は以下により算出する。

$$\text{応答増幅率} = \frac{(\text{EW 方向単独入力時の発生応力} + \text{開閉モードによる応力増分})}{\text{EW 方向単独入力時の発生応力}}$$

また，鉛直方向単独入力時の応力増分の算出方法を以下に示す。また，算出方法の概要をに示す。

1)　プールゲート部側面下端

1a：各時刻における評価対象要素を含む同一高さの 3 要素の平均鉛直軸方向力を算出する。

1b：各時刻における評価対象要素の鉛直軸方向力から，「1a」の平均鉛直軸方向力を減ずる。

1c：「1b」の時刻歴最大値を，ウェル壁面内曲げモーメントによる鉛直軸方向力増分（3 次元挙動による鉛直軸方向引張力）とする。

2)　プールゲート部底部

2a：質点系モデルによるオペフロ（EL.46.5 m）の鉛直方向応答加速度時刻歴より，各時刻の鉛直震度を算出する。

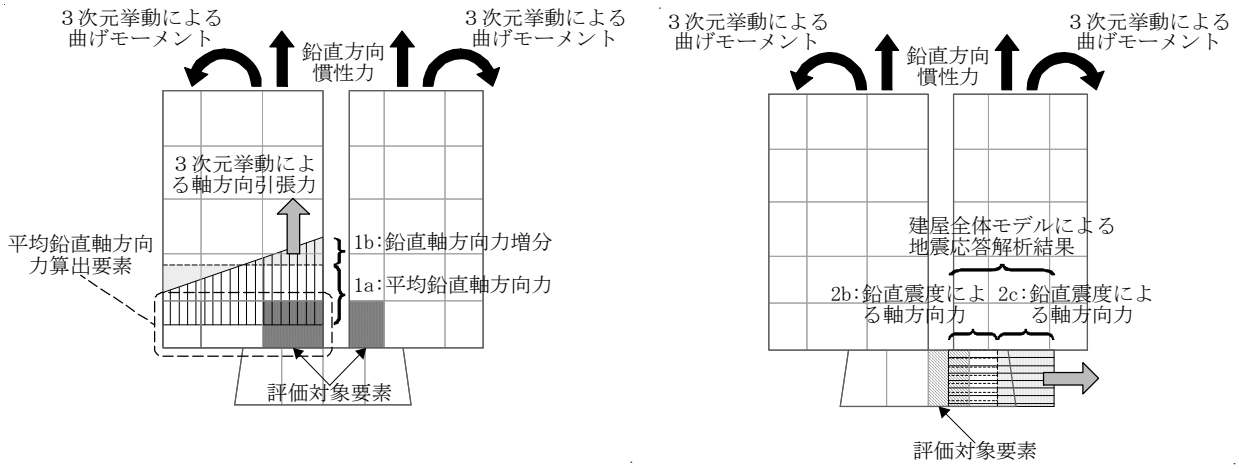
2b：自重による静的応力解析結果に「2a」で求めた鉛直震度を乗じて鉛直方向の慣性力による水平軸方向力を算出する。

2c：各時刻の評価対象要素の水平軸方向力から，「2b」の水平軸方向力を減じる。

2d：「2c」の時刻歴最大値を，ウェル壁面内曲げモーメントによる水平軸方向力増分（3 次元挙動による水平軸方向引張力）とする。

注　：数値は要素番号を示す。

図 3-14　建屋全体モデルの評価対象要素



(a) 鉛直軸方向力増分
（プールゲート部側面下端）

(b) 水平軸方向力増分
（プールゲート部底部）

図 3-15　開閉モードによる軸方向力増分の概念図

b.　応答増幅を考慮した応力検討

使用済燃料プールの耐震評価結果である検定比に，鉛直加振時の応答増幅率による割増しを考慮する。このとき，軸方向引張力の増分は，引張側の鉄筋が負担することとする。検定比に応答増幅率を乗じる評価対象要素を図 3-16 に示す。

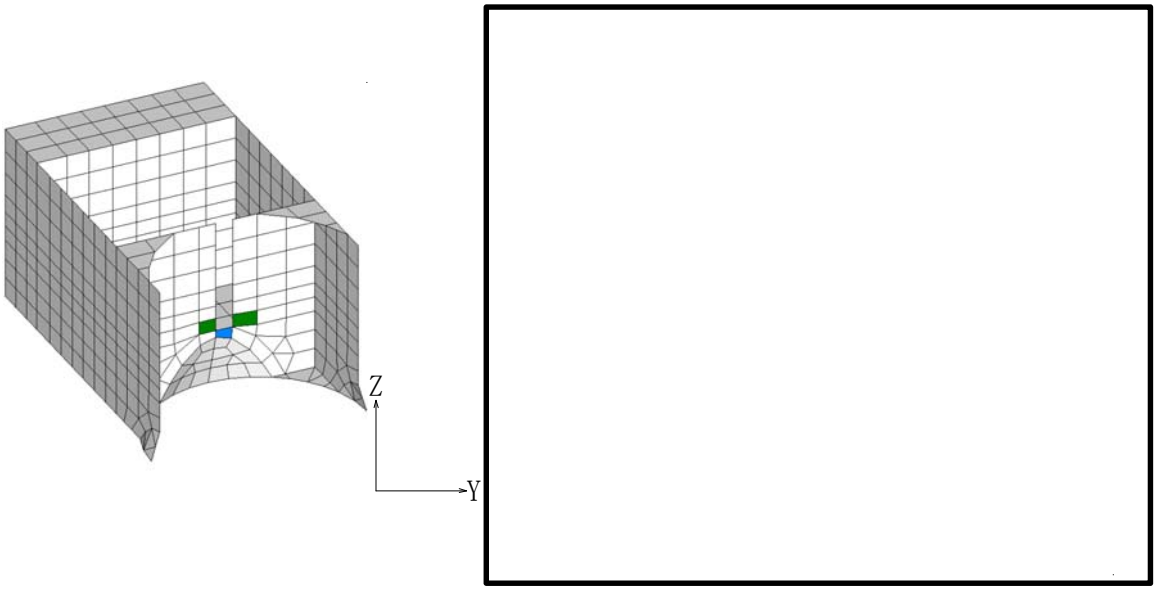


図 3-16　耐震評価モデルの評価対象要素

3.5.3　評価結果

(1)　応答増幅の確認

建屋全体モデルを用いて鉛直地震力（S_d－Ｄ１）に対してウェル壁の開閉モードにより，プールゲート部に生じる応答増幅率を算定した。図 3-17 に軸方向力増分を，表 3-15 に応答増幅率の算定結果を示す。なお，図 3-17 に示すように，評価対象要素は水平もしくは鉛直軸方向力増分が最大となる要素を含んでいる。

(a) 鉛直軸方向力増分

(b) 水平軸方向力増分

図 3-17　開閉モードによる軸方向力増分（S_d－Ｄ１）

表 3-15　応答増幅率の評価結果

要素番号	応力	UD 方向入力による応力増分	EW 方向入力による応力	応答増幅率 (1.0 EW＋0.4 UD)／(1.0 EW)
6141	鉛直軸方向引張力	294	1240	1.095
6142	鉛直軸方向引張力	411	1640	1.101
5378	水平軸方向引張力	253	275	1.368

(2)　応答増幅を考慮した応力検討

耐震評価モデルを用いて実施した使用済燃料プールの応力解析において，Ｓ$_s$地震時の水平 2 方向及び鉛直方向入力時の鉄筋ひずみの許容値に対する検定比を図 3-18 に，評価対象要素の検定比に応答増幅率を乗じた結果を表 3-16 に示す。表 3-16 に示すように，鉛直地震力時にウェル壁が開閉するモードによる局部的な応力を考慮しても，許容限界以下となる事を確認した。なお，図 3-18 に示すように，評価対象要素は水平もしくは鉛直軸方向の検定比が最大となる要素を含んでいる。

(a) 鉛直方向鉄筋

(b) 水平方向鉄筋

図 3-18　水平 2 方向及び鉛直方向入力時の鉄筋の検定比

表 3-16　ウェル壁の影響検討結果（S_s地震　水平 2 方向及び鉛直方向入力時）

要素番号	項目	応答増幅率	応力解析時 検定比	応答増幅を考慮した検定比
3031	引張鉄筋検定比	1.095	0.264	0.290
3043	引張鉄筋検定比	1.101	0.209	0.231
3037	引張鉄筋検定比	1.368	0.321	0.440

3.5.4　入力地震動の代表性について

本検討では，ウェル壁の開閉モードによるプールゲート部に生じる応答増幅率の算定にはＳ$_d$－Ｄ１を用いた。質点系モデルのオペフロ位置における鉛直方向の加速度応答スペクトルの比較を図 3-19 に示す。なお，図 3-19 は，Ｓ$_d$－Ｄ１に対する加速度応答スペクトル比を示している。図に示すようにウェル壁の開閉モード付近を含む周期 0.05 秒～周期 0.12 秒の範囲でＳ$_d$－Ｄ１を上回り，最大となる地震動はＳ$_d$－１１，Ｓ$_d$-１３，Ｓ$_d$－２１，Ｓ$_d$－２２の 4 波である。

ここでは，上記 4 波に対してＳ$_d$－Ｄ１と同様に応力増分を算出し，Ｓ$_d$－Ｄ１による応力増分と比較する。

建屋全体モデルを用いたＳ$_d$－１１，Ｓ$_d$-１３，Ｓ$_d$－２１，Ｓ$_d$－２２による地震応答解析から求めた応力増分の包絡値を図 3-20 に示す。また，Ｓ$_d$－Ｄ１による応力増分との比較を図 3-21 に示す。Ｓ$_d$－Ｄ１による応力増分と比較すると，プールゲート部底部周辺の応力増分比は鉛直方向 1.05 倍，水平方向 1.16 倍となっている。表 3-16 に示すように評価対象要素の割増後の検定比は最大で 0.440 であり，1.05～1.16 倍しても検定比は 1.0 を超過しないことを確認した。

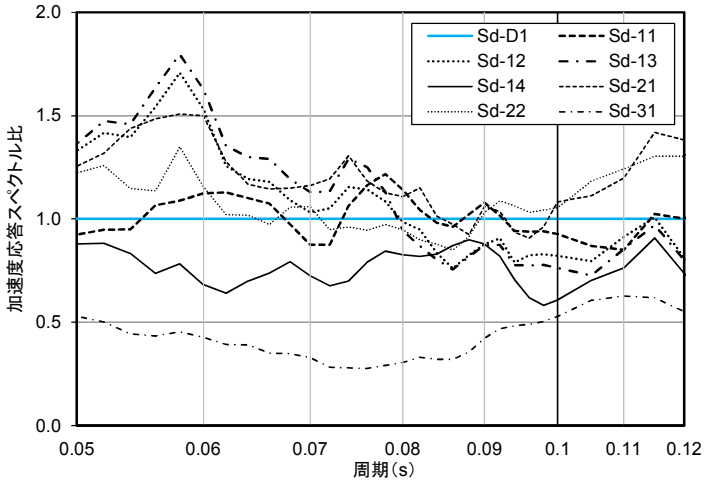
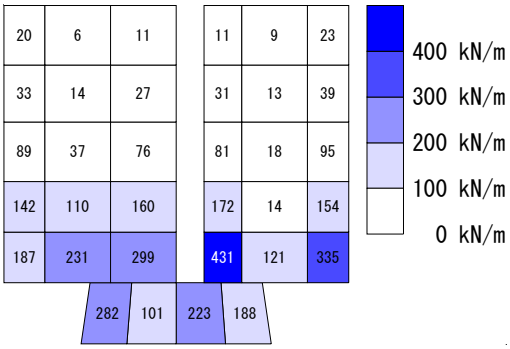
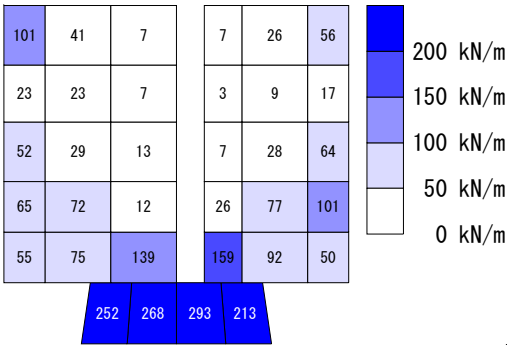


図 3-19　オペフロにおける加速度応答スペクトルの比較

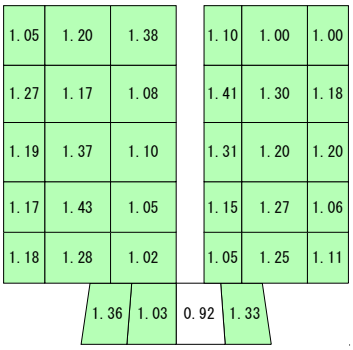


(a) 鉛直軸方向力増分

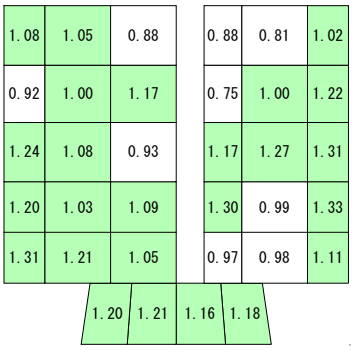


(b) 水平軸方向力増分

図 3-20　応力増分の包絡値（S_d－１１，S_d-１３，S_d－２１，S_d－２２）



(a) 鉛直方向



(b) 水平方向

図 3-21　S_d－Ｄ１による応力増分に対する増分比

4.　まとめ

原子炉建屋について，建屋の３次元応答特性の影響確認及び建屋の質点系モデルによる応答性状の検証の観点から，３ 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析を行い建屋の局所的な応答を検討した。また，３ 次元ＦＥＭモデルによる挙動が，建屋及び機器・配管系の有する耐震性に及ぼす影響を検討した。

建屋については，３ 次元ＦＥＭモデルにより得られた３次元的な応答特性を質点系モデルに考慮して応答補正した結果，建屋が有する耐震性への影響はないことを確認した。

また，東北地方太平洋沖地震の地震観測記録に確認された，オペフロにおける EW 方向の床応答加速度スペクトルの 10 Hz 付近の増幅に対し，３次元ＦＥＭモデルを用いた検討を行い耐震評価上問題ないことを確認した。

機器・配管系については，３ 次元ＦＥＭモデルにより得られた局所的な応答（床応答）と質点系モデルより得られた応答を比較した結果，機器・配管系が有する耐震性に及ぼす影響がないことを確認した。

以上のことから，原子炉建屋の質点系モデルは，３ 次元的な応答特性による局所的な応答を考慮できないものの，３ 次元ＦＥＭモデルとの応答比較等の検証を踏まえて，保守的な解析モデルとなっている。

ただし，この結果は，I／W 位置の北西部での比較であり，また ３ 次元ＦＥＭモデルにおいても １ 方向入力を行っていることから，「補 5　Ｓｄ－Ｄ１に対する ３ 次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析」にて各階の評価点を増し，内部ボックス壁，外部ボックス壁及びシェル壁の壁隅部及び中間部も対象とし３方向同時入力時の応答性状の把握の観点から加速度応答スペクトルを示し，建屋応答性状の分析を行う。

補１　観測記録とシミュレーション解析の床応答スペクトル（h＝1%）の比較

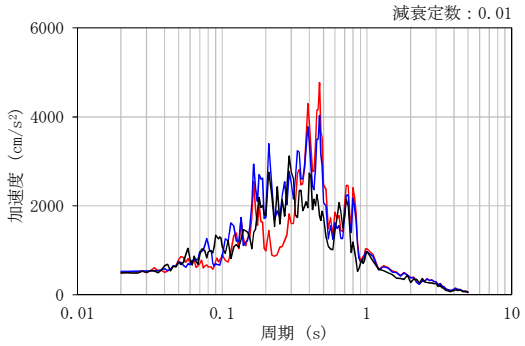
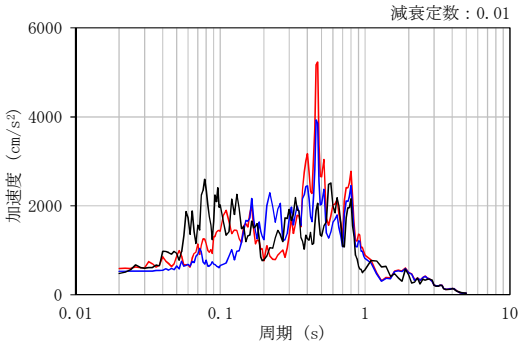
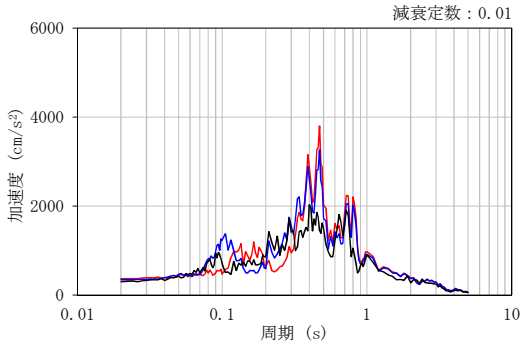
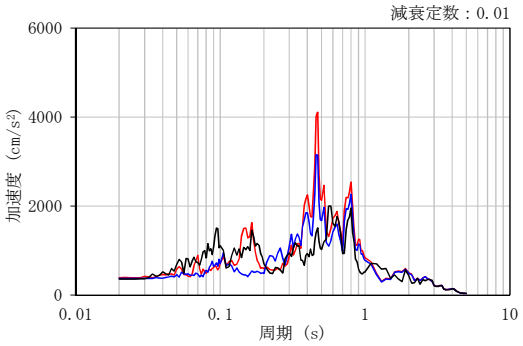
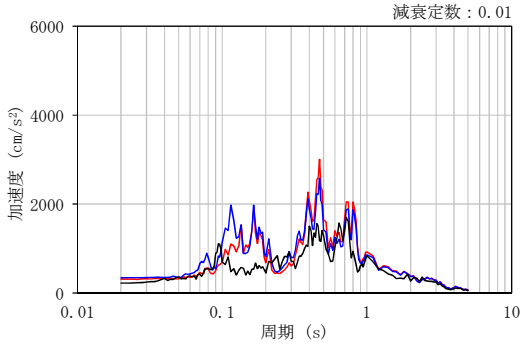
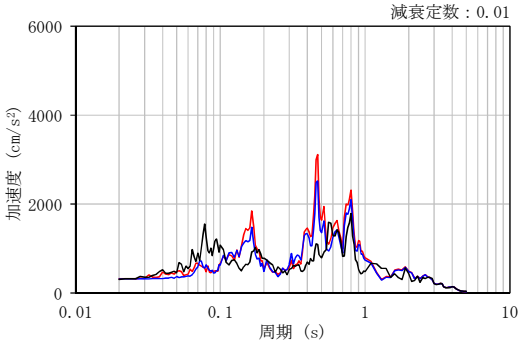
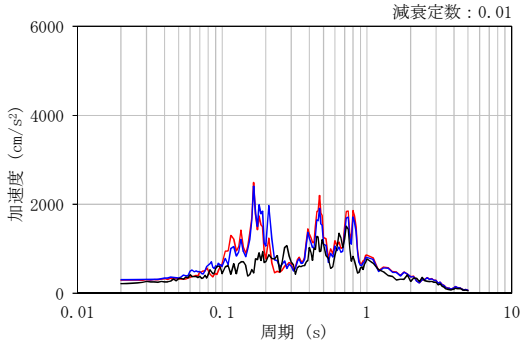
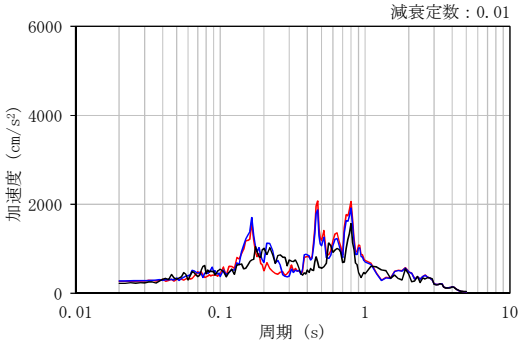
1.　はじめに

本資料は，「別紙 3　2.3　観測記録を用いた検討」において示した，観測記録とシミュレーション解析結果の比較について減衰定数を 0.1 とした場合の床応答スペクトルを記載するものである。

2.　床応答スペクトル

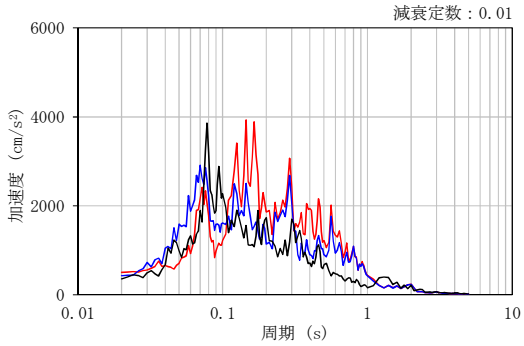
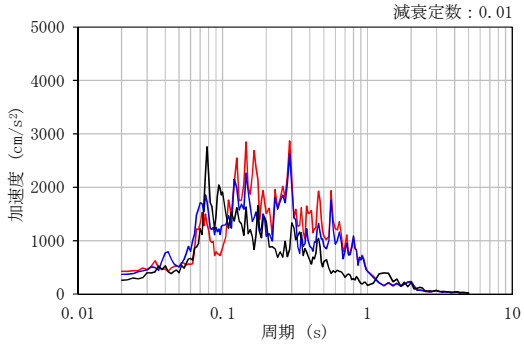
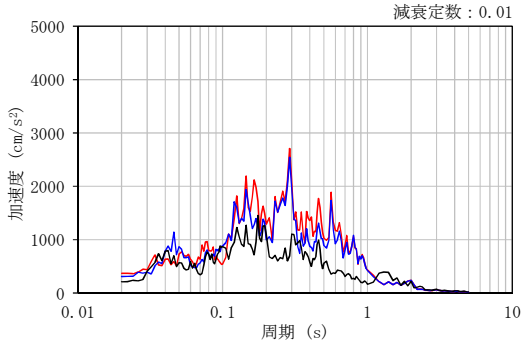
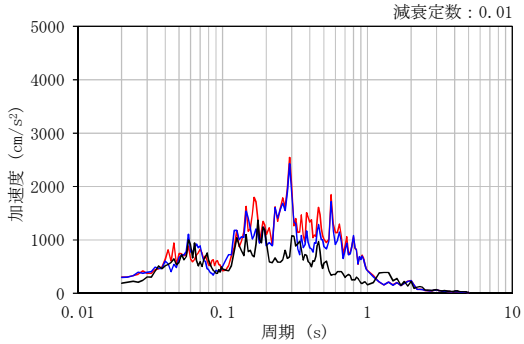
EL.46.5 m，EL.29.0 m，EL.14.0 m 及び EL.-4.0 m の地震計位置での観測記録及び解析結果の加速度応答スペクトルの比較を表 2－1 に示す。なお，観測記録と比較するための解析結果は 3 方向同時入力による結果とし，地震計位置近傍の節点のものを用いる。また，添付書類「Ⅴ-2-2-1　原子炉建屋の地震応答計算書」に用いた質点系モデルにおける解析結果も参考として併せて示す。

表２－１（1／2）　観測記録と解析結果の比較（h＝1%）

EL. (m)	NS 方向	EW 方向
46.5		
29.0		
14.0		
-4.0		

観測記録　3 次元ＦＥＭ　質点系

表２－１（2／2）　観測記録と解析結果の比較（h＝1%）

EL. (m)	UD 方向
46.5	
29.0	
14.0	
-4.0	

観測記録　　3 次元ＦＥＭ　　質点系

補２　実剛性を用いたシミュレーション解析結果

1.　検討概要

３次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析において，建屋の実状を模擬したモデルとして用いている建屋模擬モデルではコンクリートの剛性として設計基準強度に基づく剛性を考慮しており，「別紙３　2.3　観測記録を用いた検討」で示したように，一部の周期帯に差異が認められるものの，観測記録と概ね対応しており，スペクトル形状を再現できている。

ここでは，コンクリートの剛性として「補足-400-3 地震応答解析における材料物性のばらつきに関する検討」に示す実測データによる実強度に基づく剛性を設定した場合の応答に与える影響について検討する。

2.　解析モデル

解析モデルは，「別紙３　2.3　観測記録を用いた検討」において用いた建屋模擬モデル及び建屋模擬モデルのコンクリート剛性を実剛性とした実剛性モデルとする。なお，コンクリート剛性以外の条件については，同一とする。解析モデルのケースを表 2-1 に示す。また，コンクリートの剛性を表 2-2 に示す。

表 2-1　解析モデルのケース

モデルケース	床のモデル化	地盤のモデル化	コンクリート剛性の設定
建屋模擬モデル	床柔	相互作用考慮	設計基準強度
実剛性モデル	床柔	相互作用考慮	実強度

表 2-2　コンクリートの剛性

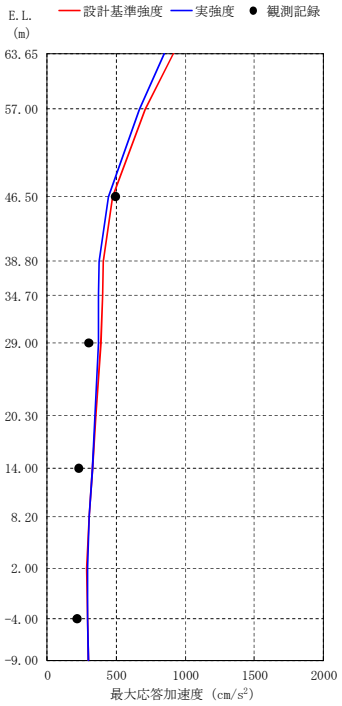
	コンクリート強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (N/mm^2)
設計基準強度	22.1	2.21×10^4
実強度	42.1	2.73×10^4

3.　検討結果

3 方向同時入力による最大応答加速度分布を図 3-1 に，加速度計を設置している EL.46.5 m，EL.29.0 m，EL.14.0 m 及び EL.－4.0 m の位置での床応答スペクトルの比較を表 3-1 に示す。

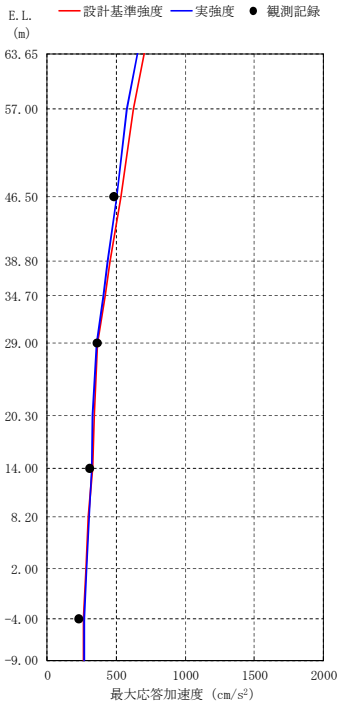
建屋模擬モデル（設計基準強度）と実剛性モデルとを比較すると，最大応答加速度は概ね同等もしくは実剛性モデルの方がわずかに下回る傾向にある。また，床応答スペクトルについても，実剛性モデルを建屋模擬モデルが概ね包絡する結果となっている。

また，建屋剛性の変動は地盤物性の変動と比較し地震応答解析への感度が小さく，建屋の実剛性を考慮しても水平加速度への影響は 7%程度，鉛直加速度への影響は 9%程度である。



設計基準強度	実強度	観測記録
912	846	
707	665	
475	444	492
405	375	
403	372	
385	370	301
351	346	
328	326	225
304	301	
287	289	
291	291	214
300	300	

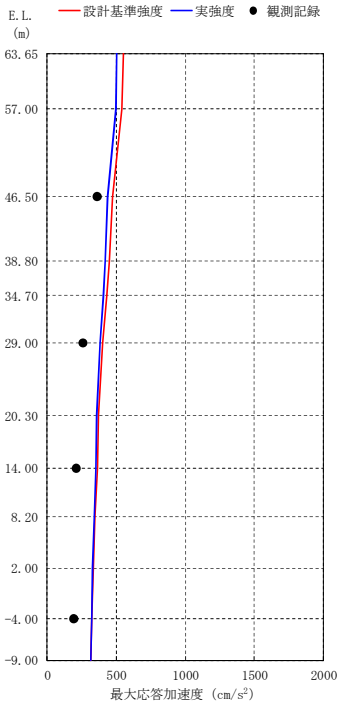
(a) NS 方向



設計基準強度	実強度	観測記録
705	657	
627	578	
534	504	481
454	439	
417	407	
362	360	361
341	328	
325	324	306
296	304	
279	286	
264	269	225
263	265	

(b) EW 方向

図 3-1（1／2）　最大応答加速度分布の比較

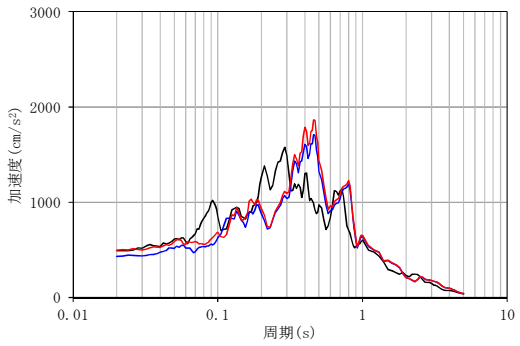
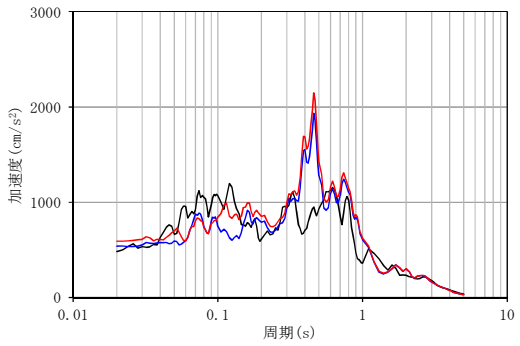
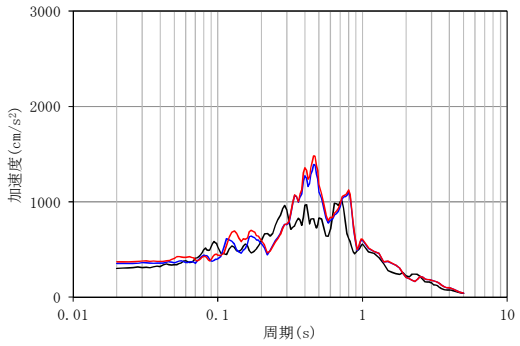
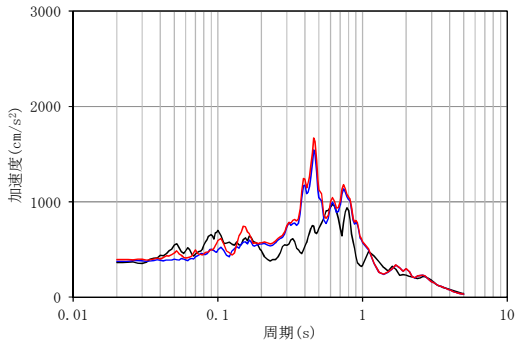
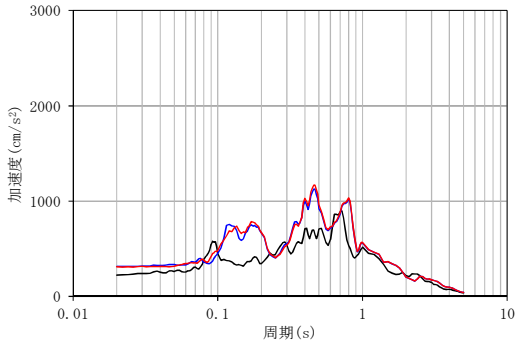
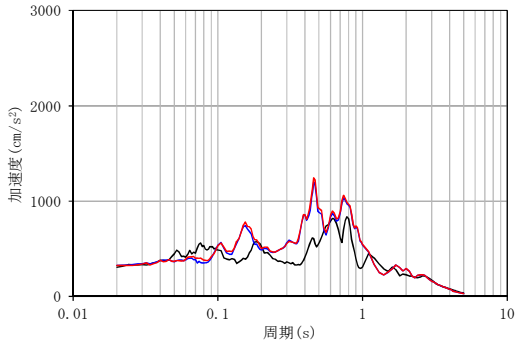
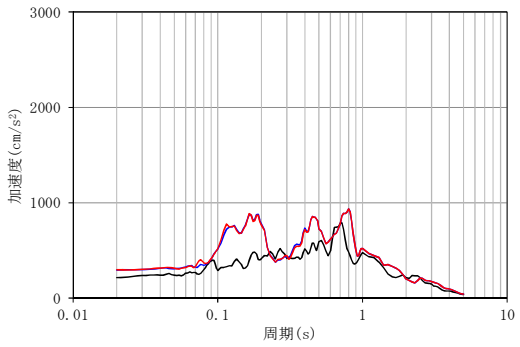
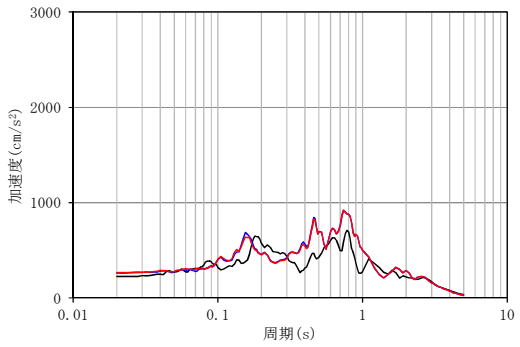


設計基準強度	実強度	観測記録
553	505	
539	495	
471	438	358
451	420	
428	407	
401	382	259
372	358	
363	355	212
345	340	
331	331	
319	323	189
313	318	

（c）UD 方向

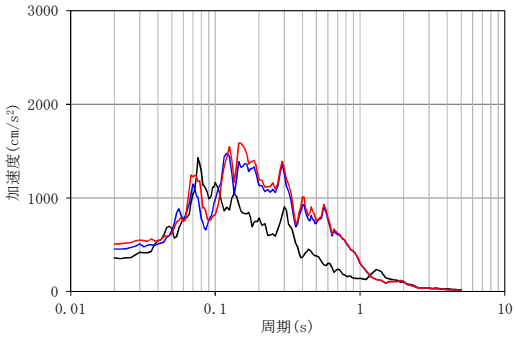
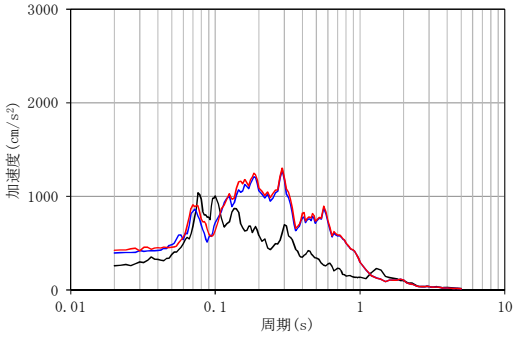
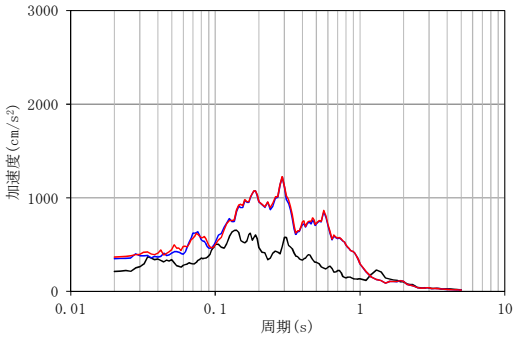
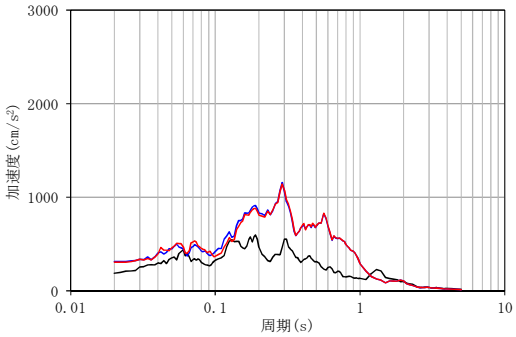
図 3-1（2／2）　最大応答加速度分布の比較

表 3-1（1／2）　床応答スペクトルの比較

EL. (m)	NS 方向	EW 方向
46.5		
29.0		
14.0		
-4.0		

観測記録　設計基準強度　実強度

表 3-1（2／2）　床応答スペクトルの比較

EL. (m)	UD 方向
46.5	
29.0	
14.0	
-4.0	

観測記録　設計基準強度　実強度

補３　３次元 FEM モデルによるシミュレーション解析結果

1.　検討概要

「別紙 3　2.3　観測記録を用いた検討」では，観測点における観測記録と３次元 FEM モデルを用いたシミュレーション解析による床応答スペクトルの比較を示し，一部の周期帯に差異が認められるものの，スペクトル形状を再現できていることを確認した。

ここでは，3 次元ＦＥＭモデルの観測点以外の節点における加速度応答スペクトルを示し，建屋応答性状について分析を行う。また比較として質点系モデルによるシミュレーション解析も併記する。

2.　検討条件

質点系モデルによるシミュレーション解析と比較を行う節点を図 2－1 に示す。比較は NS 方向，EW 方向，UD 方向の方向別に行う。各階の節点を外部ボックス壁（以下「O/W」という。），内部ボック壁（以下「I/W」という。），及びシェル壁（以下「S/W」という。）に分類し，水平方向の，O/W と I/W については，出力方向に対して平行な両端部の壁と中央に分けて示す。

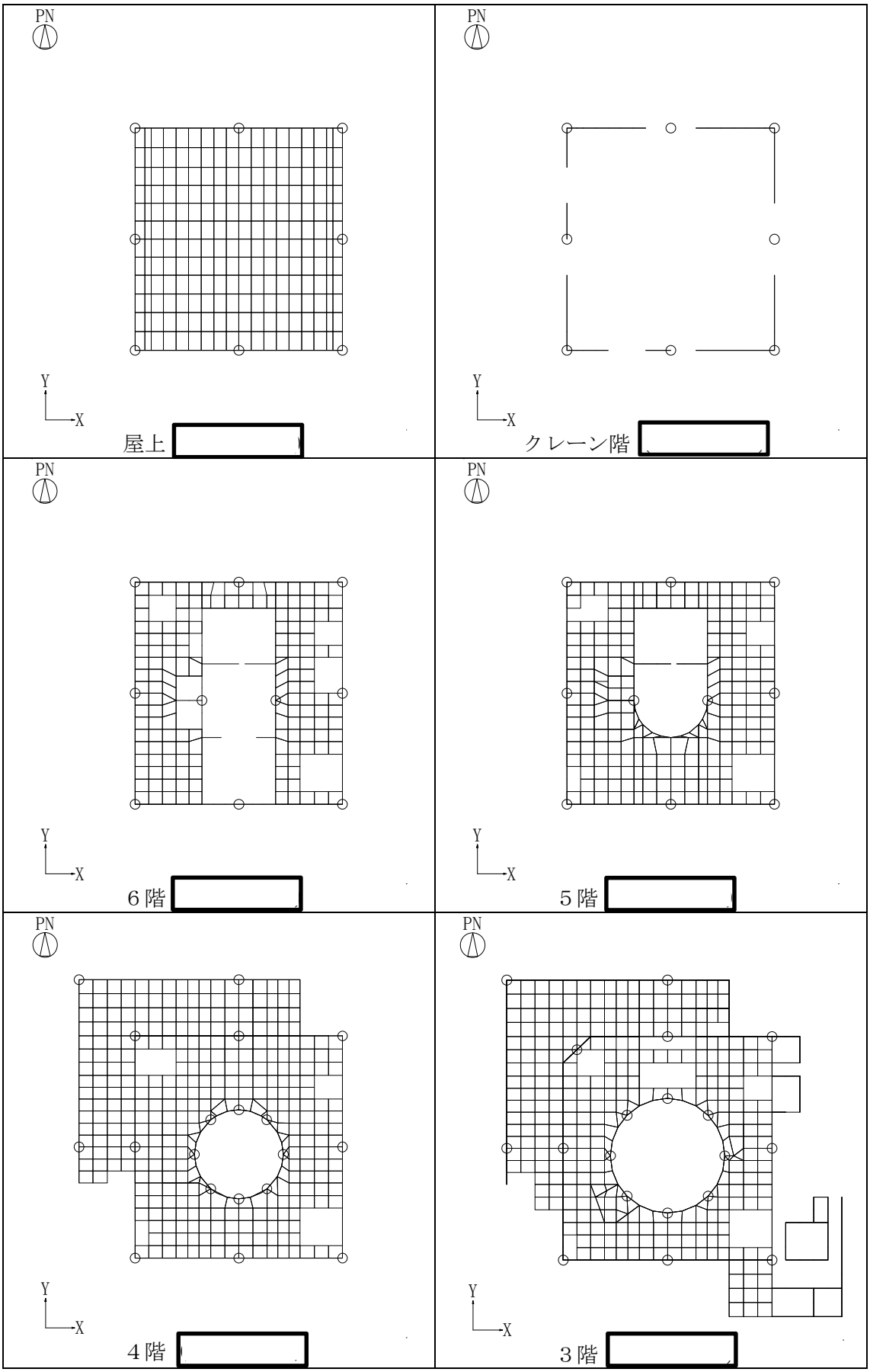


図２－１（1／2）　応答スペクトル評価点

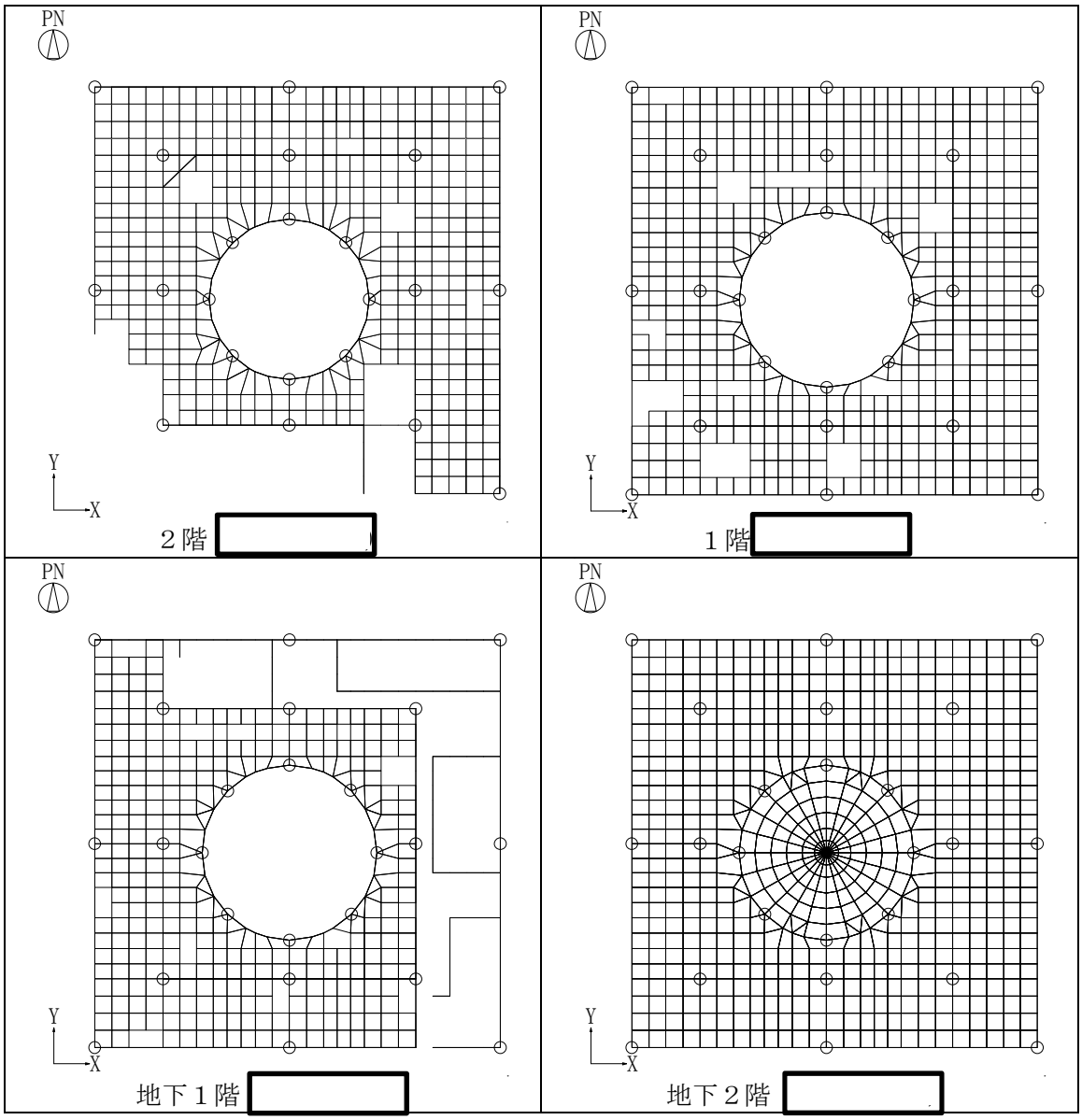


図２－１（2／2）　応答スペクトル評価点

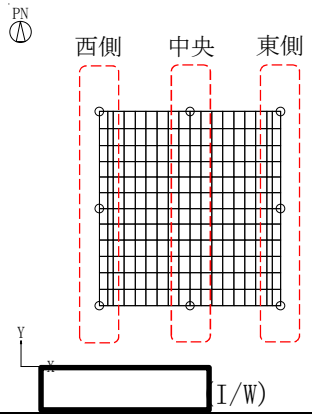
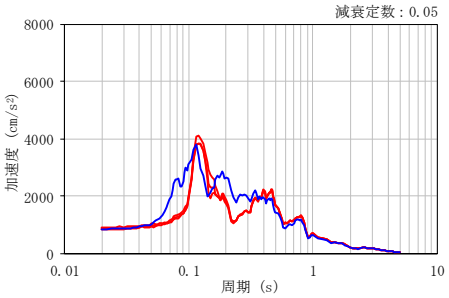
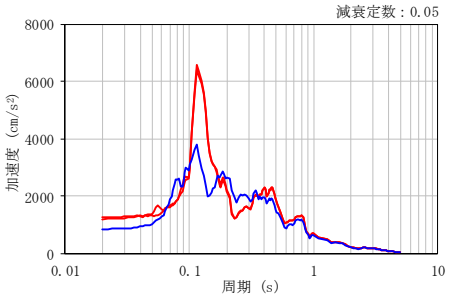
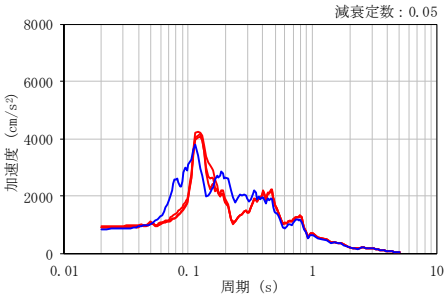
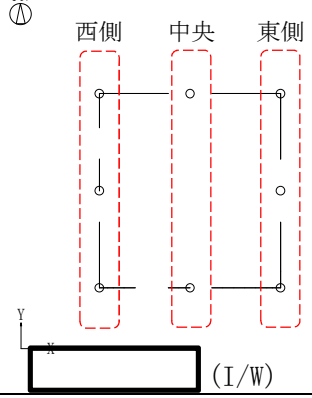
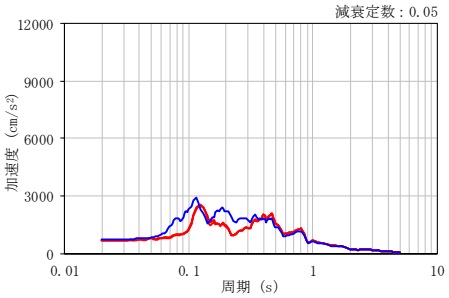
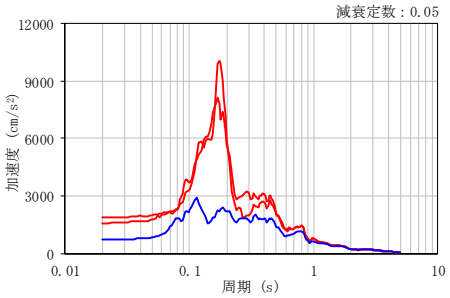
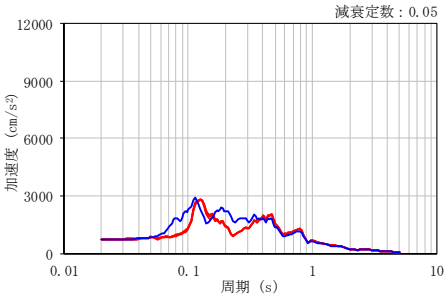
3.　検討結果

屋上（EL.63.65 m）から地下２階（EL.-4.00 m）までの各階における，3 方向同時入力の加速度応答スペクトルを表 3－1～表 3－7 に示す。また比較として質点系モデルによるシミュレーション解析も併記する。

NS 方向，EW 方向ともに，耐震壁が I/W のみとなる６階(オペフロ／EL.46.50 m）以上では，壁中央の節点では，面外方向の加速度応答が大きくなる。特にクレーン階（EL.57.00 m）はスラブと接続していないため屋上（EL.63.65 m）よりも面外方向の加速度応答が大きい。しかし，６階より下の階では面外方向の加速度応答も含め，３次元ＦＥＭの出力位置による結果に大きな違いはなく，各階で概ね一致した応答スペクトルとなっている。

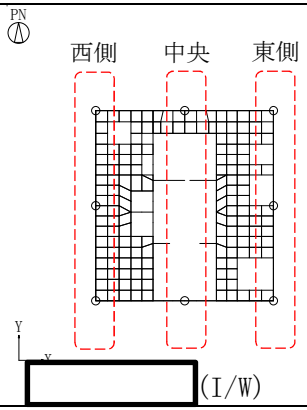
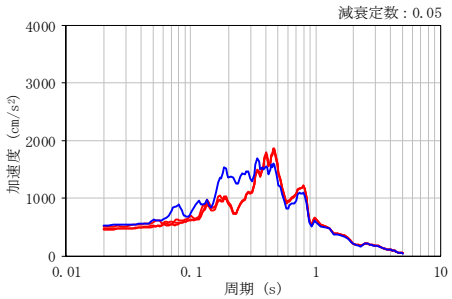
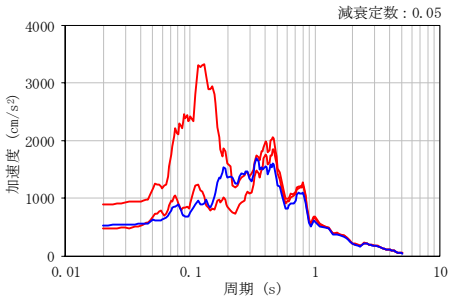
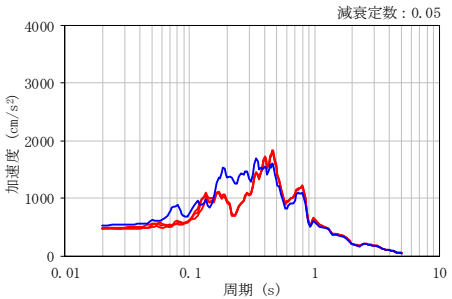
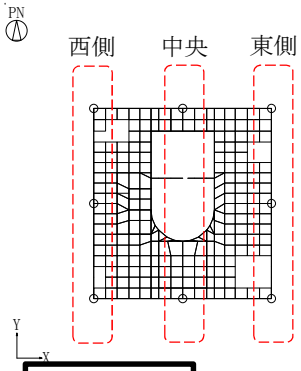
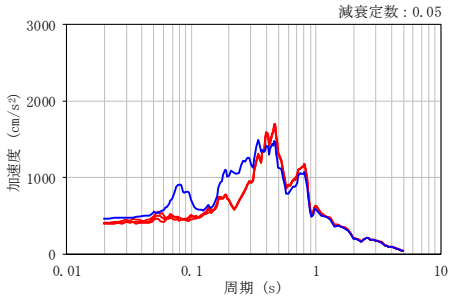
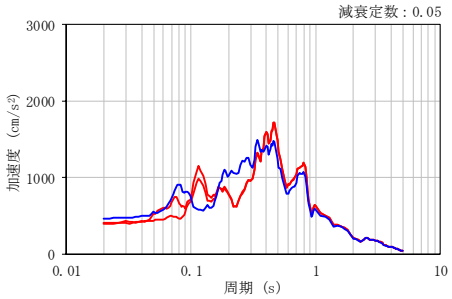
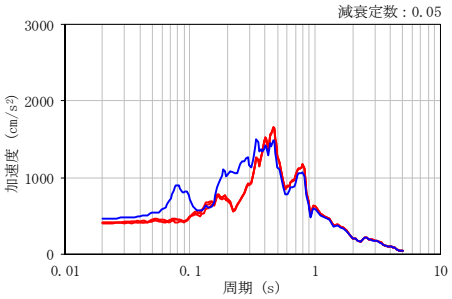
３次元ＦＥＭ応答の質点系モデル応答との比較においても面内方向の加速度応答に大きな違いはなく，中央の節点の面外方向の加速度応答についても重要施設のある６階より下の階では質点系モデル応答と整合が取れている。

表 3－1（1／5）　NS 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
屋上  [redacted] I/W)	 	 	
クレーン階  [redacted] (I/W)	 	 	

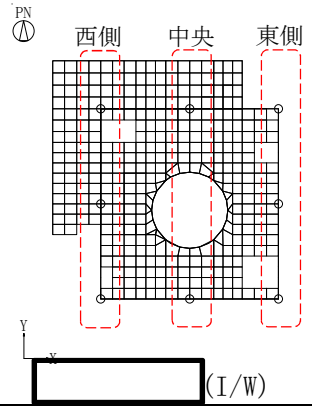
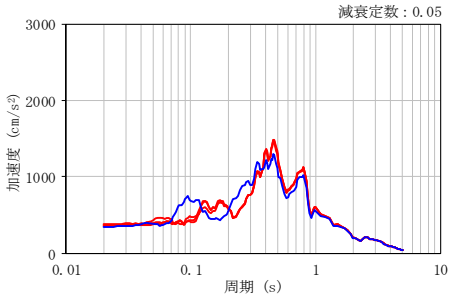
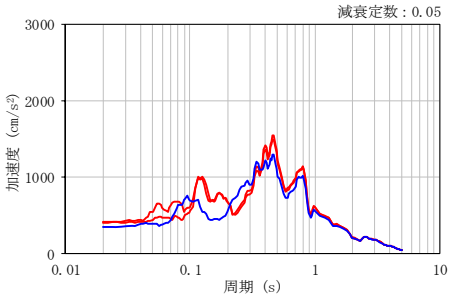
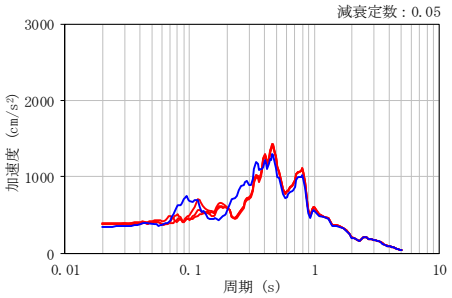
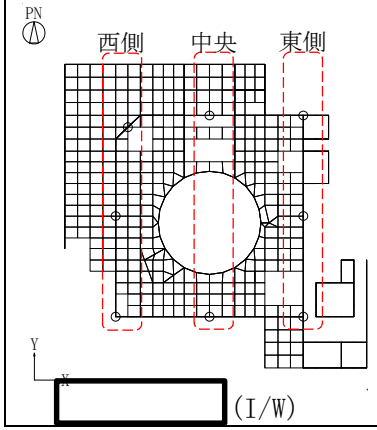
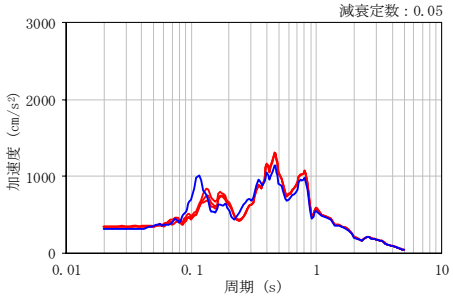
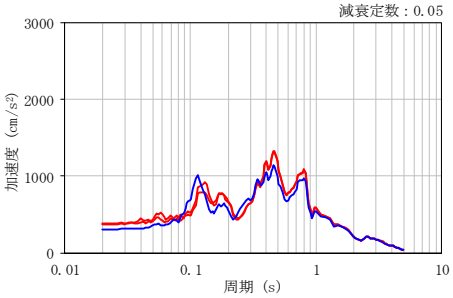
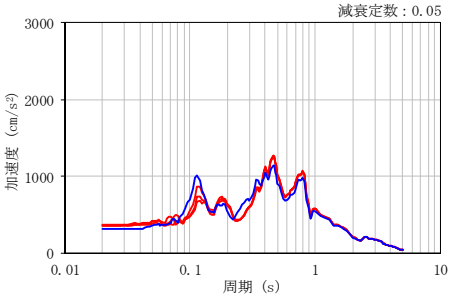
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－1（2／5）　NS 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
 [redacted] (I/W)			
５階  [redacted] (I/W)			

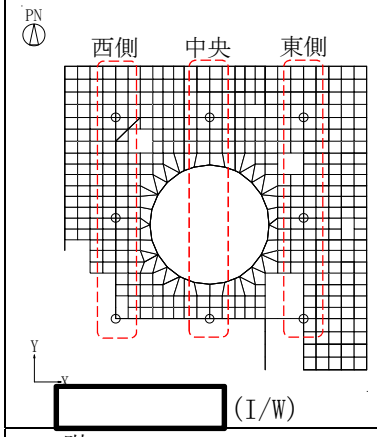
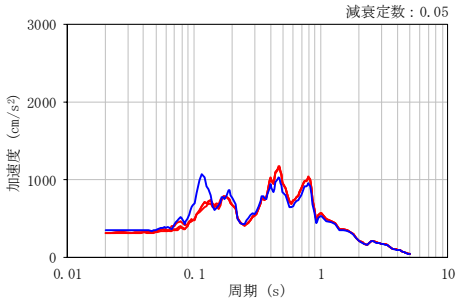
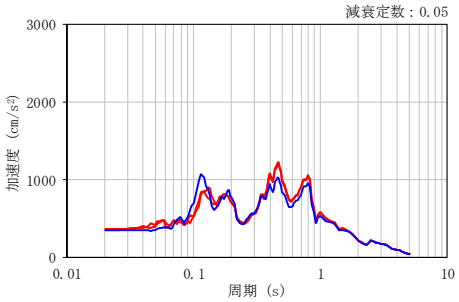
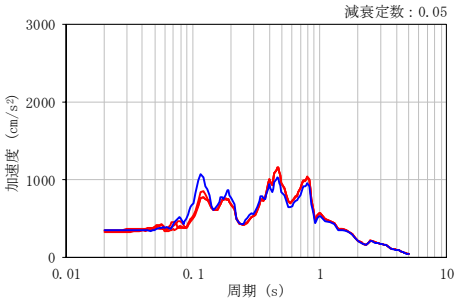
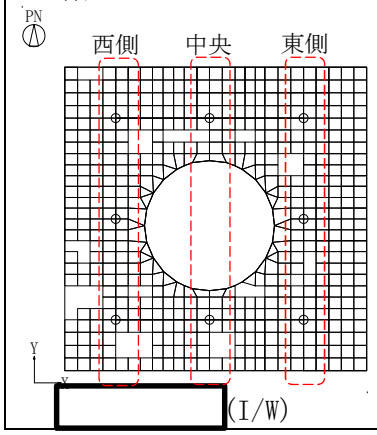
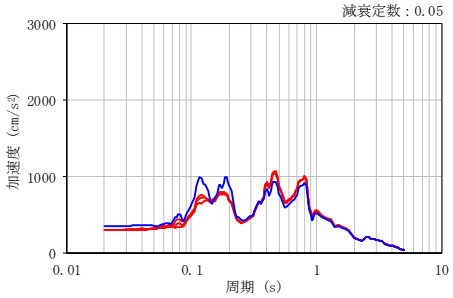
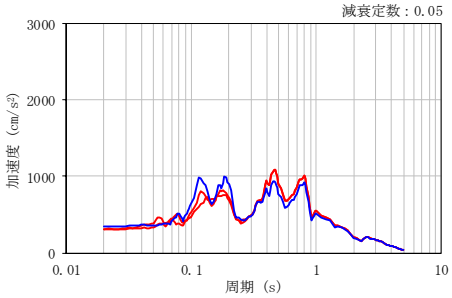
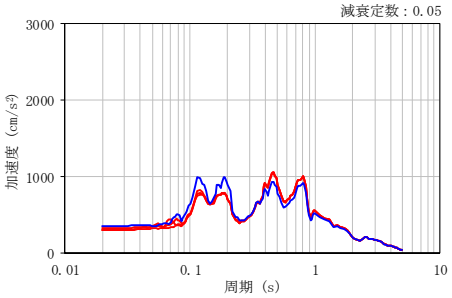
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－1（3／5）　NS 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
4 階  	 	 	
3 階  	 	 	

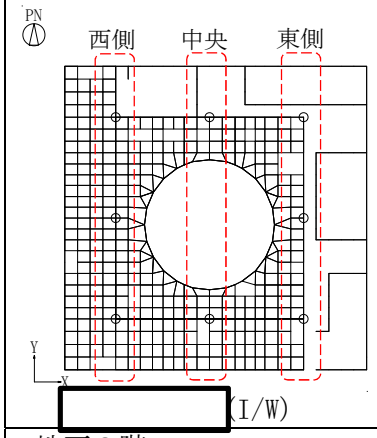
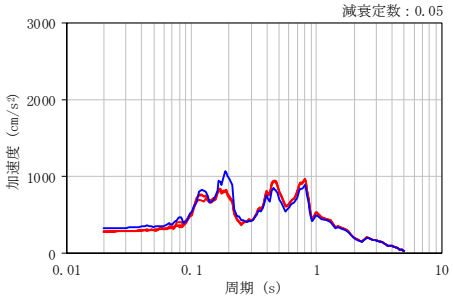
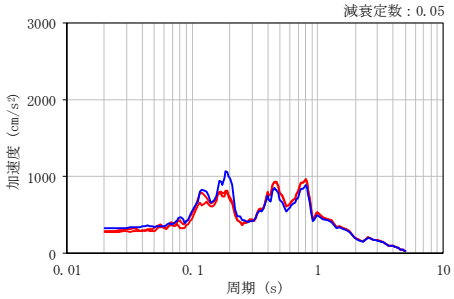
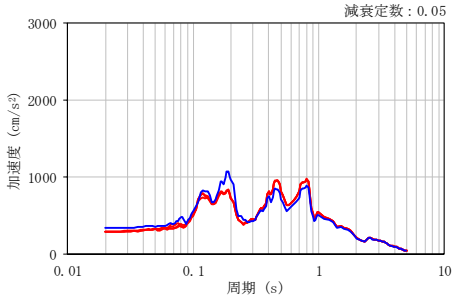
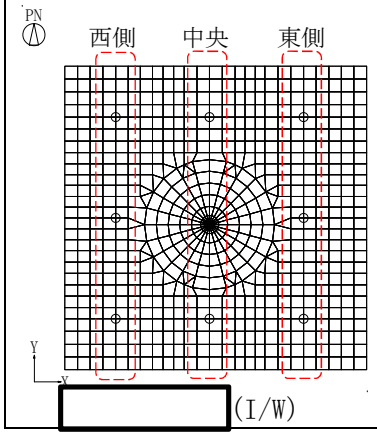
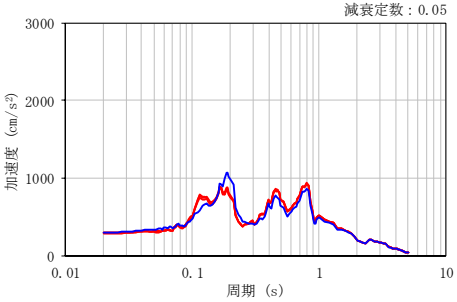
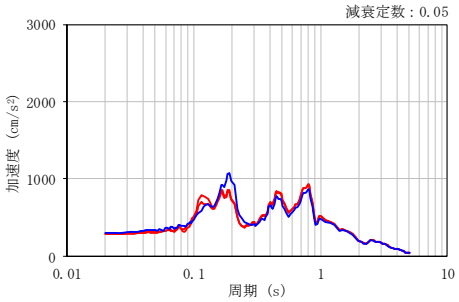
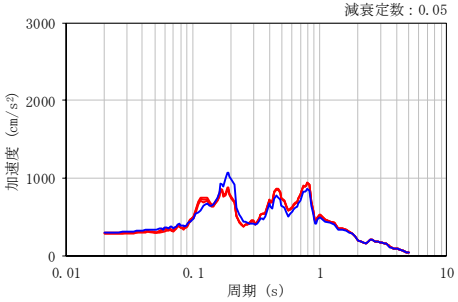
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－1（4／5）　NS 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
２階 			
１階 			

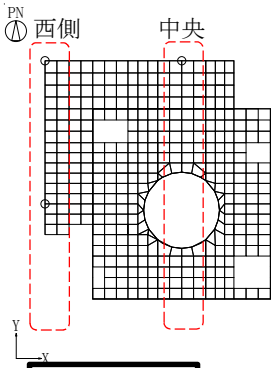
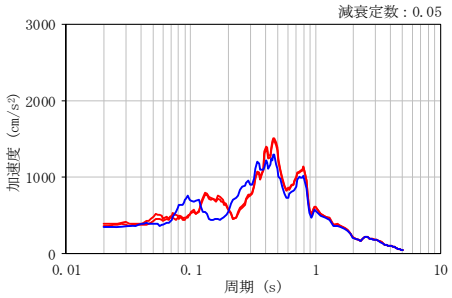
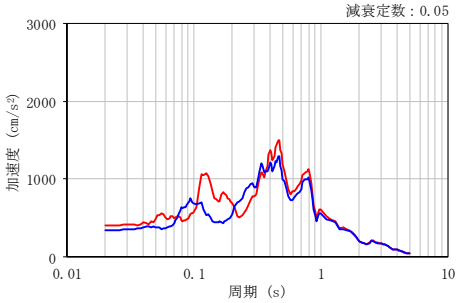
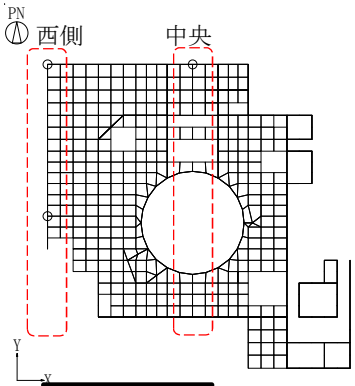
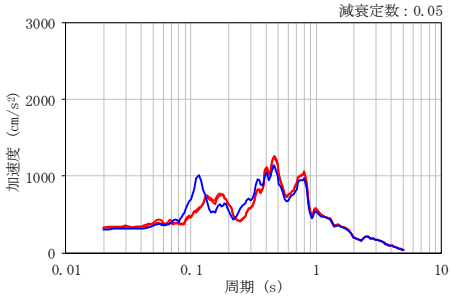
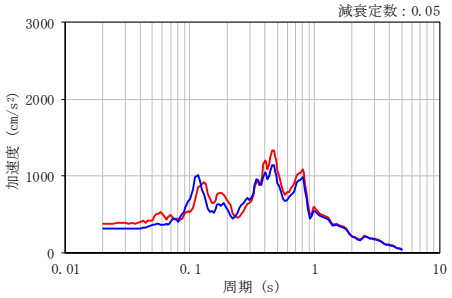
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－1（5／5）　NS 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
地下１階  	 	 	
地下２階  	 	 	

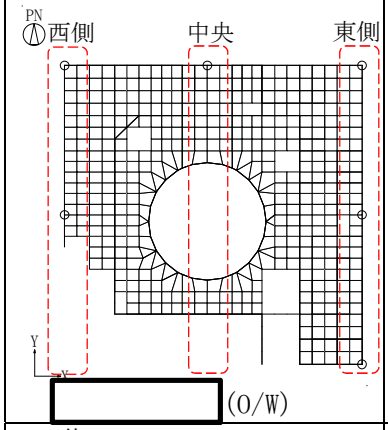
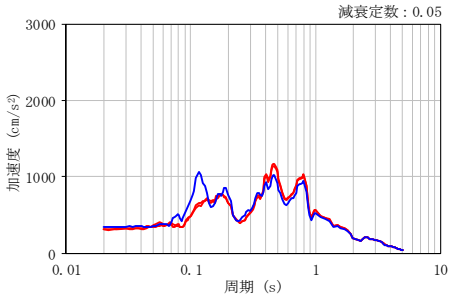
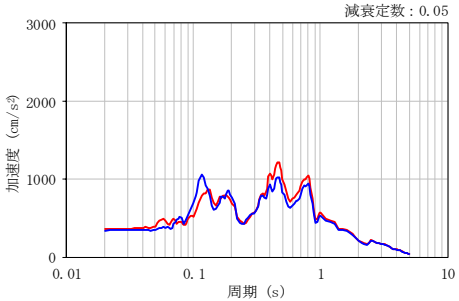
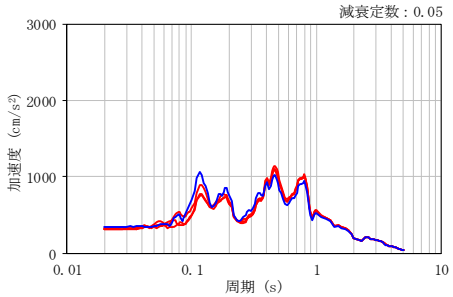
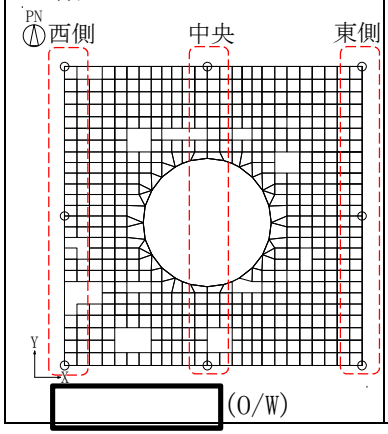
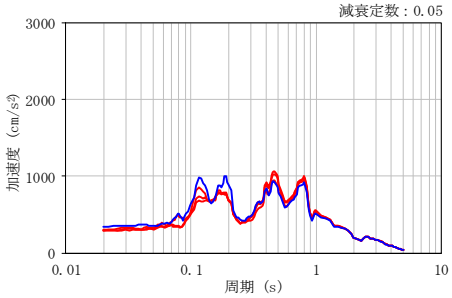
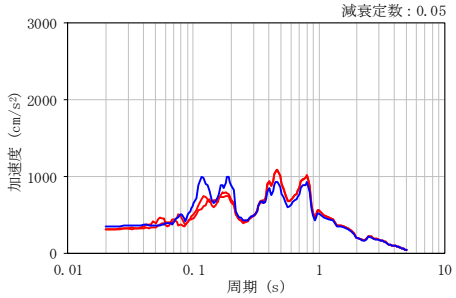
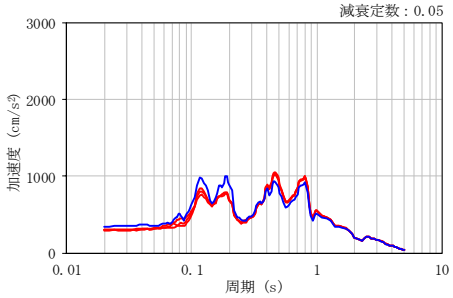
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－2（1／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
４階  [redacted](O/W)	 	 	
３階  [redacted](O/W)	 	 	

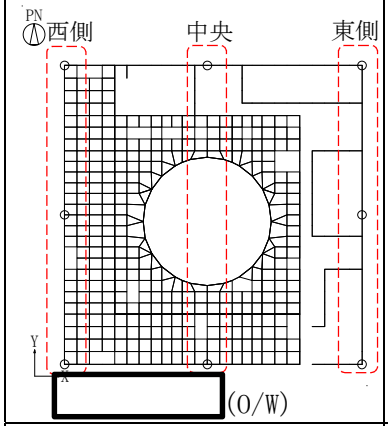
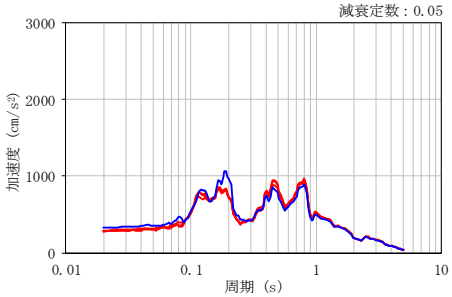
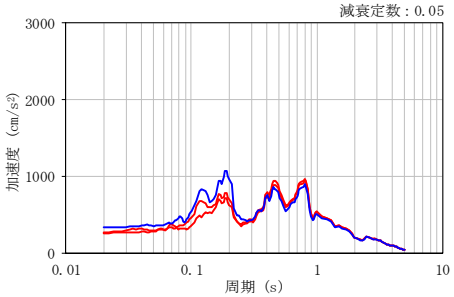
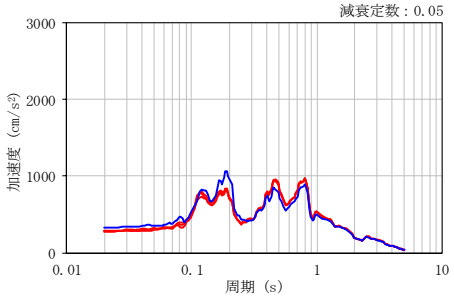
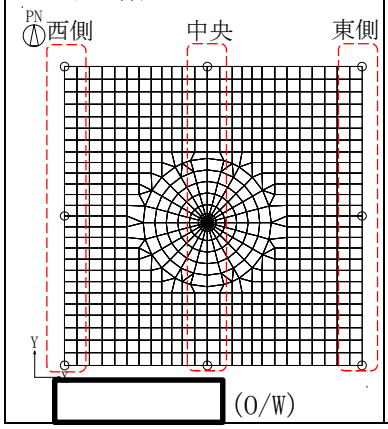
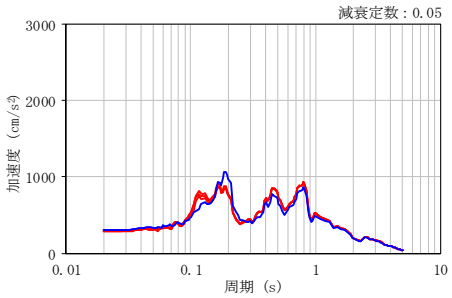
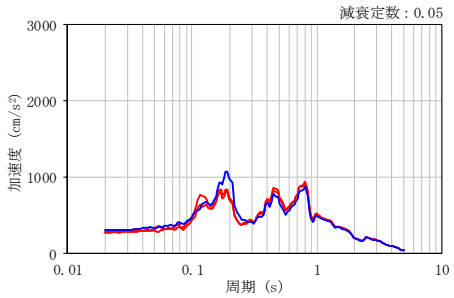
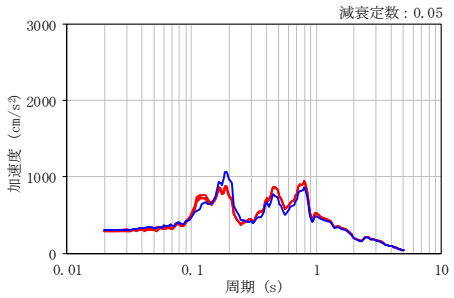
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－2（2／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
2 階  	 	 	
1 階  	 	 	

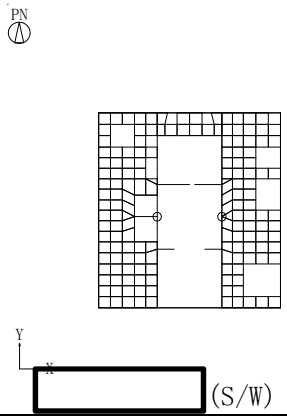
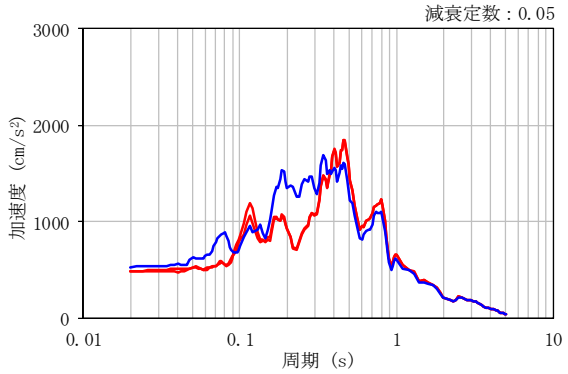
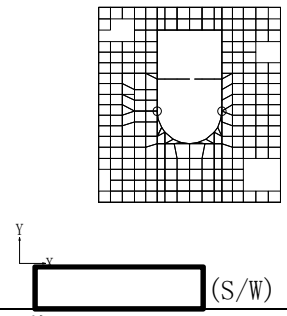
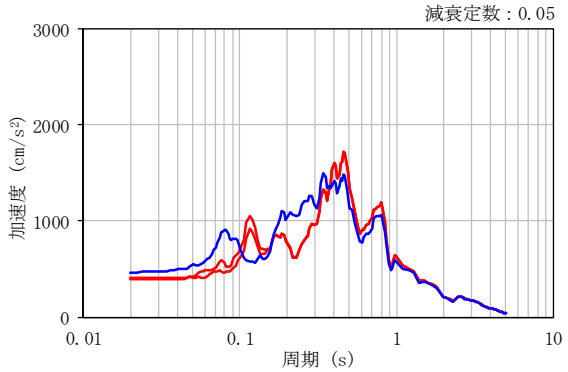
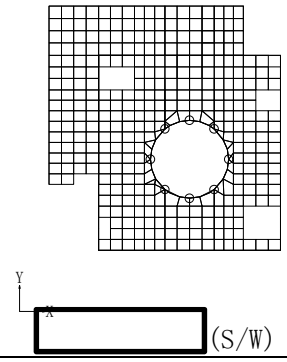
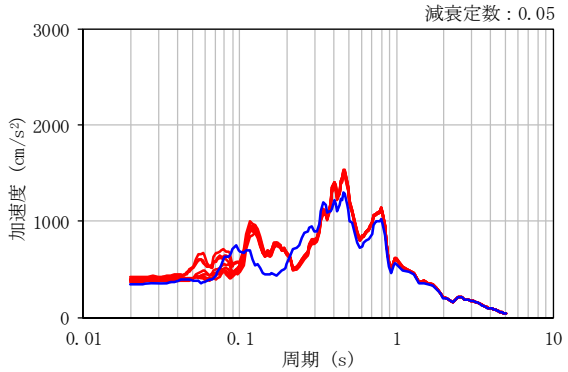
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－2（3／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
地下 1 階  	 	 	
地下 2 階  	 	 	

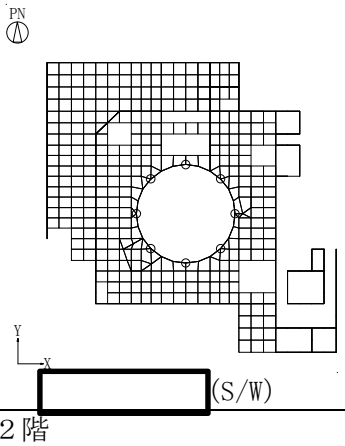
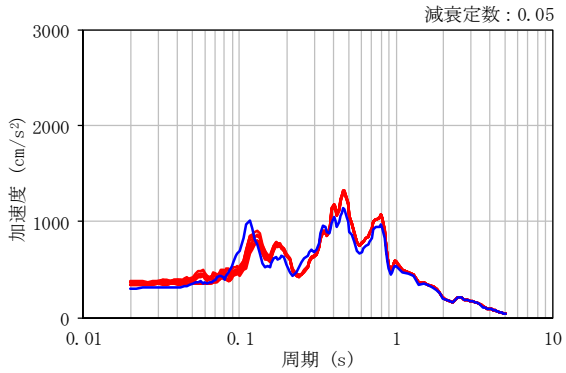
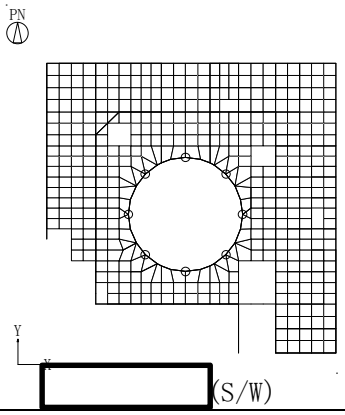
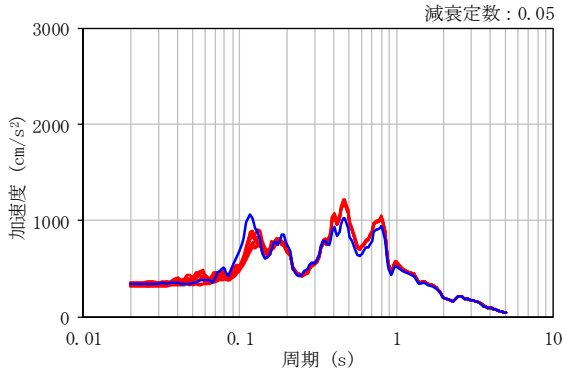
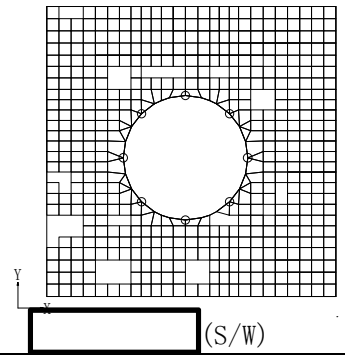
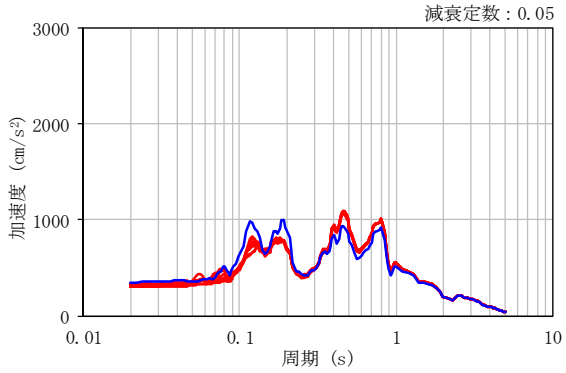
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－3（1／3）NS 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
6 階  	
5 階  	
4 階  	

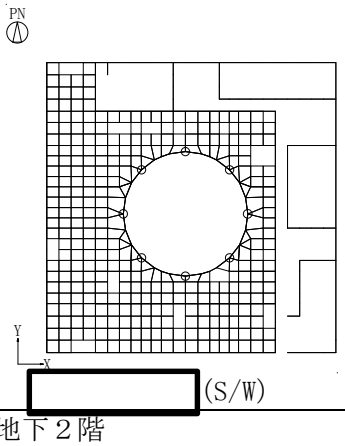
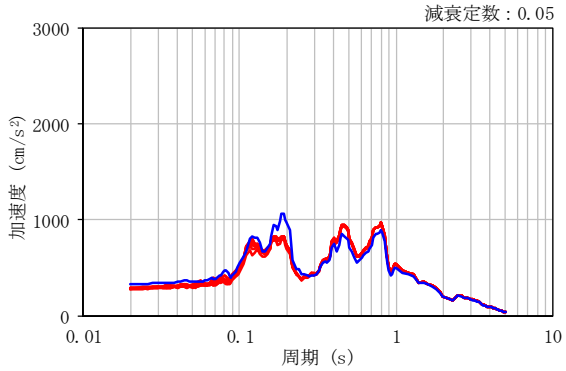
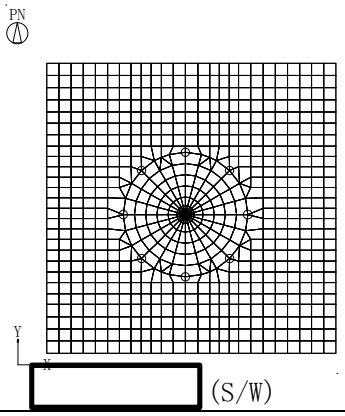
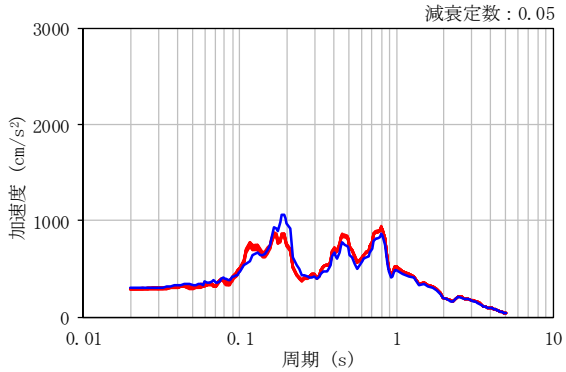
3 次元 FEM，　質点系

表 3－3（2／3）　NS 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
3 階  (S/W)	
2 階  (S/W)	
1 階  (S/W)	

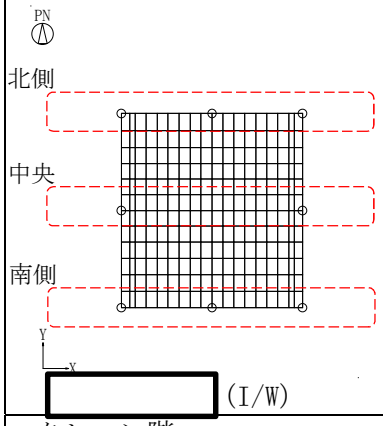
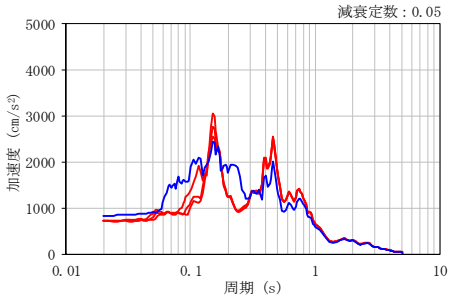
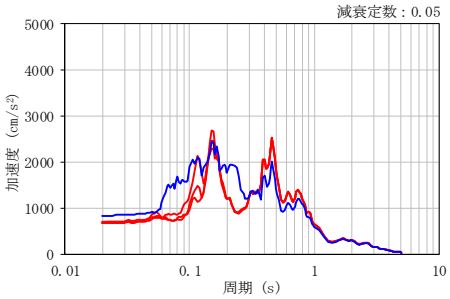
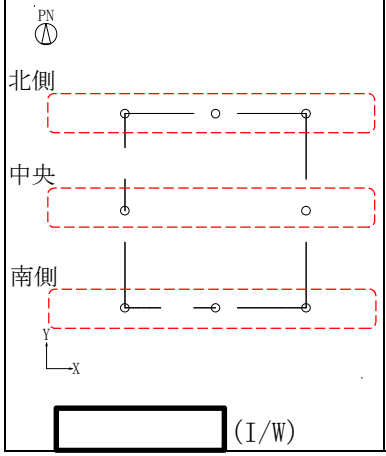
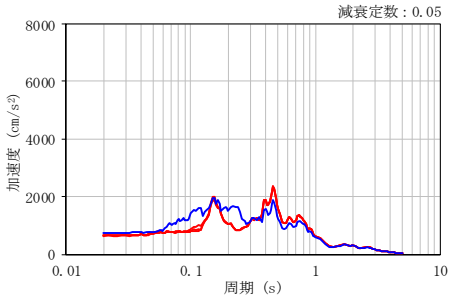
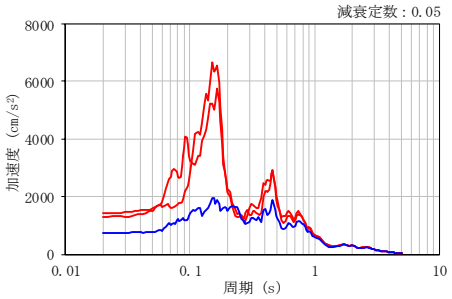
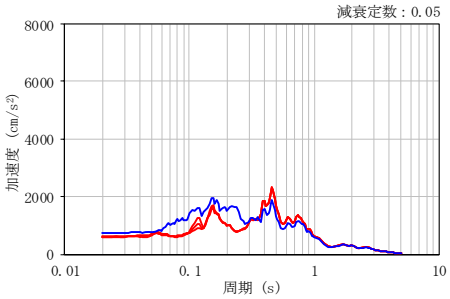
3 次元 FEM，　質点系

表 3－3（3／3）　NS 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
地下１階  [redacted](S/W)	
地下２階  [redacted](S/W)	

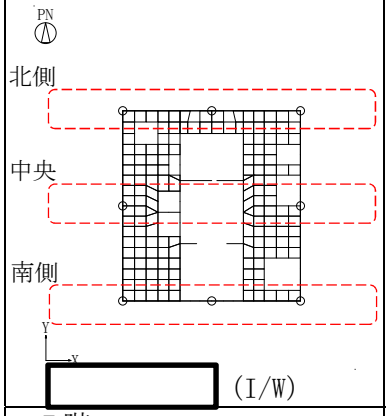
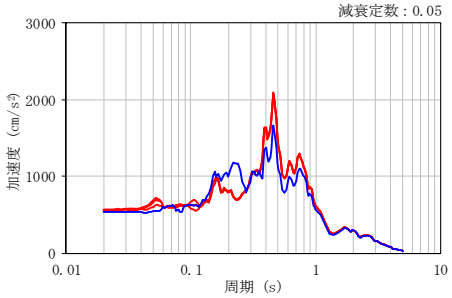
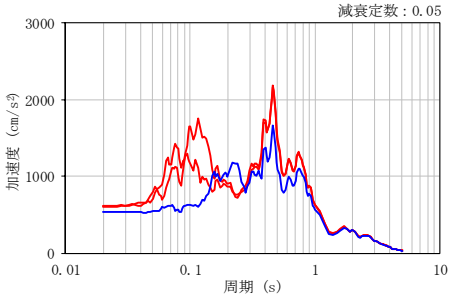
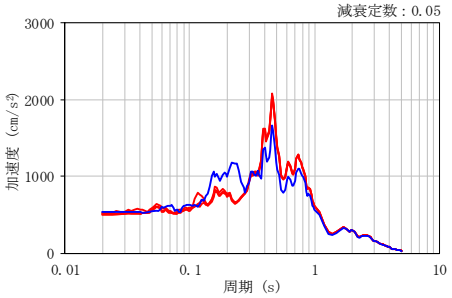
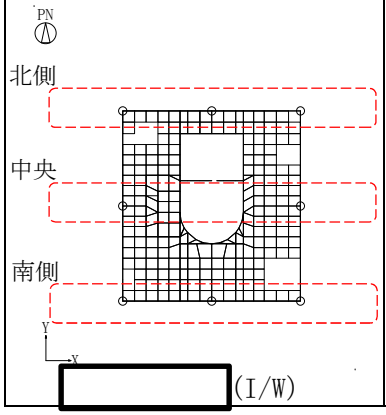
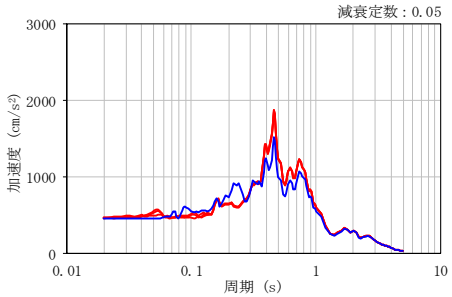
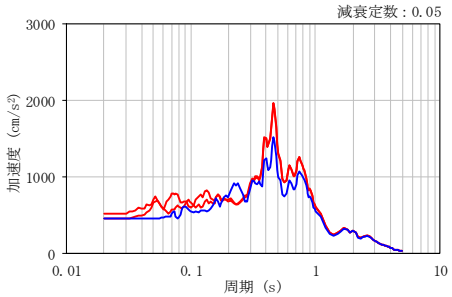
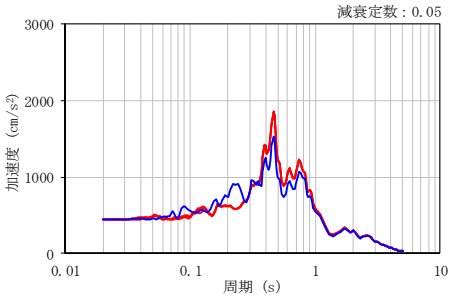
3 次元 FEM,　質点系

表３－４（1／5）　EW 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
屋上  	 	 	
クレーン階  	 	 	

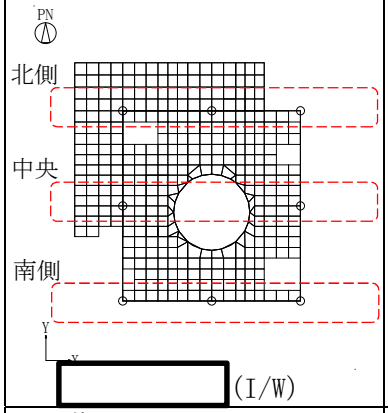
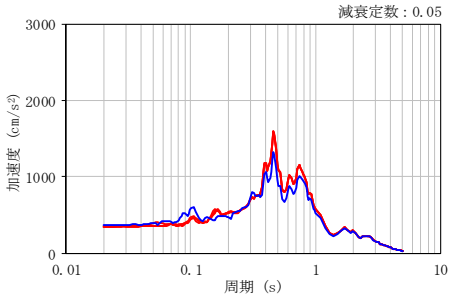
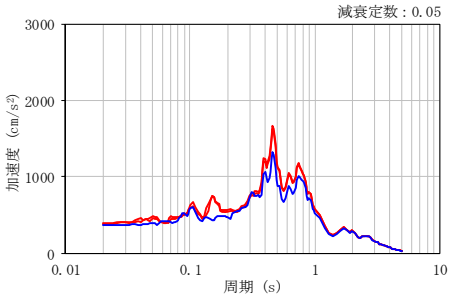
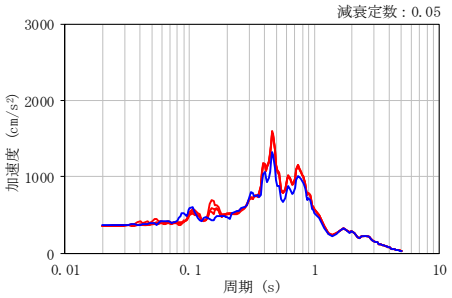
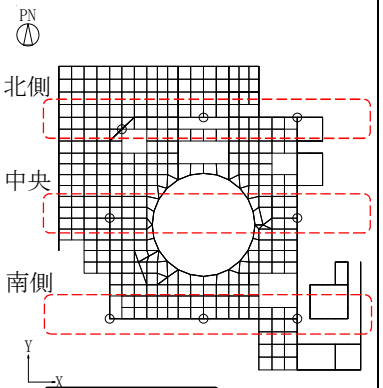
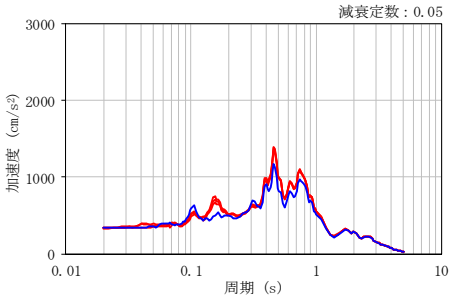
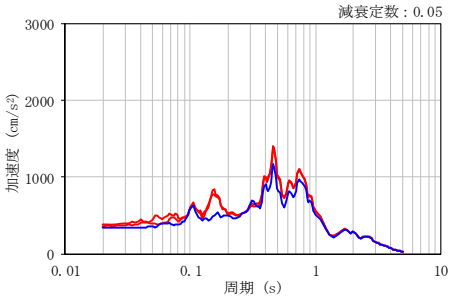
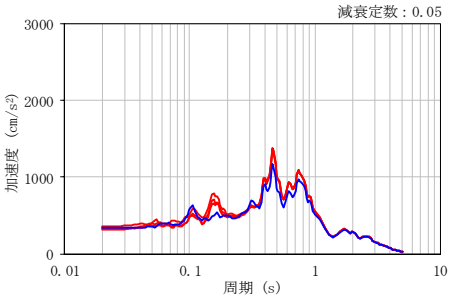
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表３－４（2／5）　EW 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
６階  	 	 	
５階  	 	 	

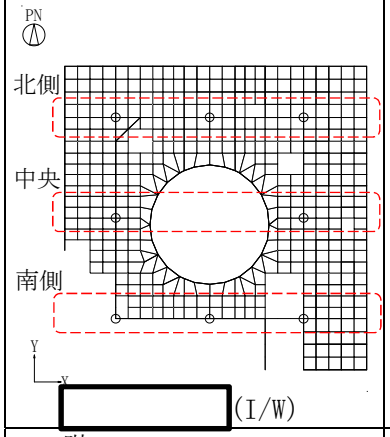
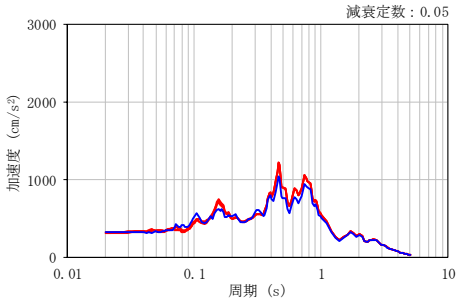
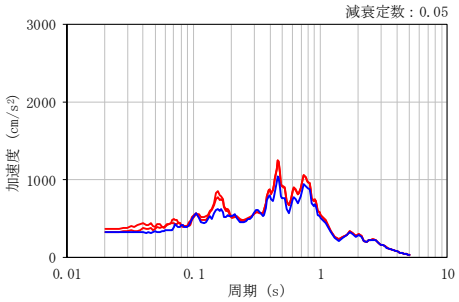
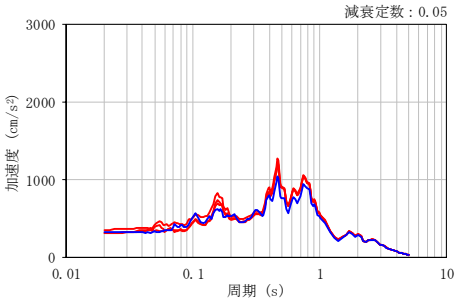
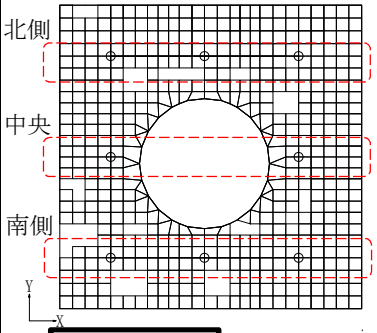
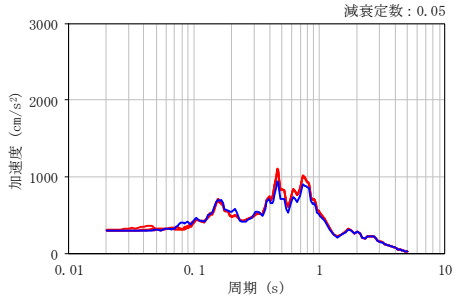
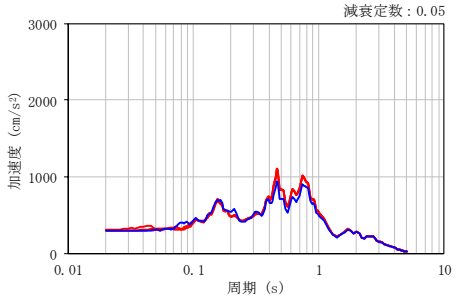
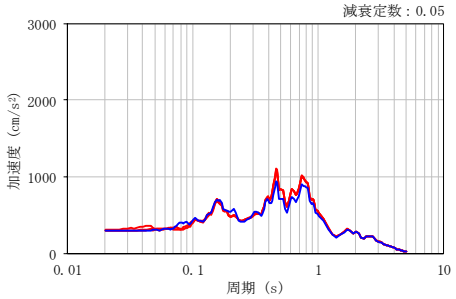
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表３－４（3／5）　EW 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
４階  [redacted] (I/W)			
３階  [redacted] (I/W)			

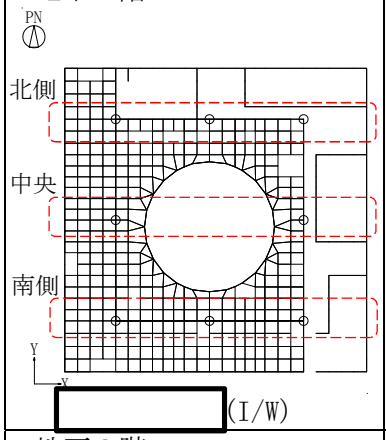
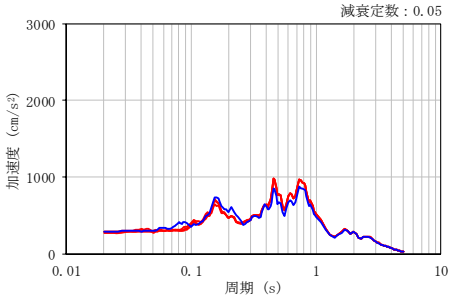
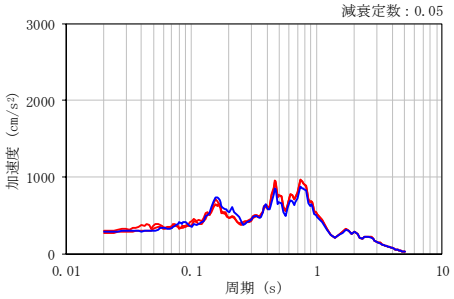
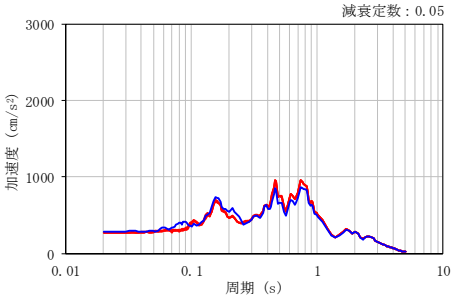
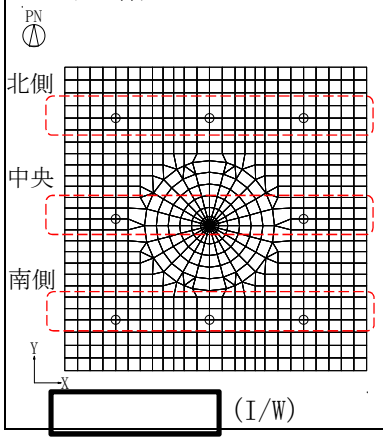
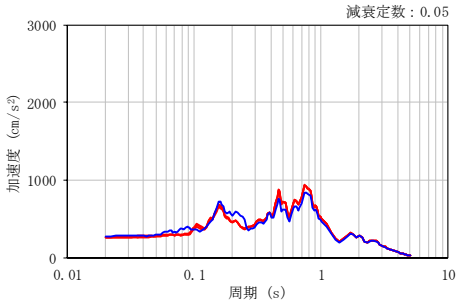
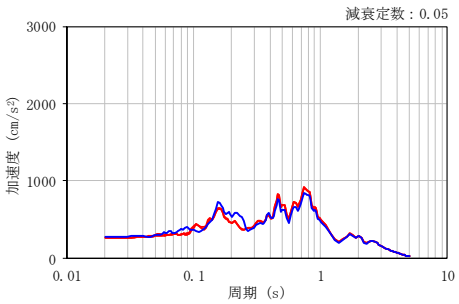
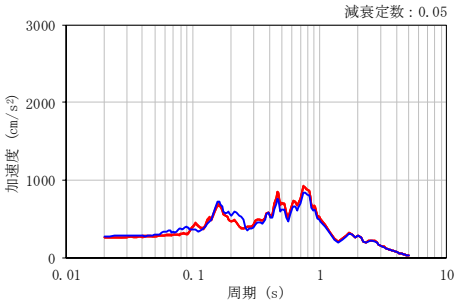
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表３－４（4／5）　EW 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
２階  [redacted](I/W)	 	 	
１階  [redacted](I/W)	 	 	

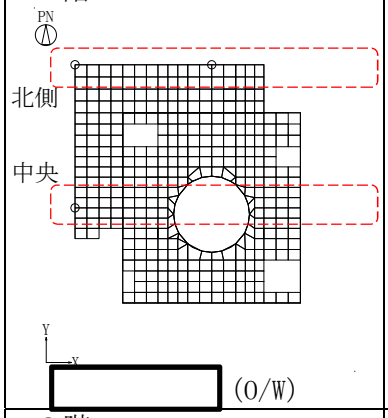
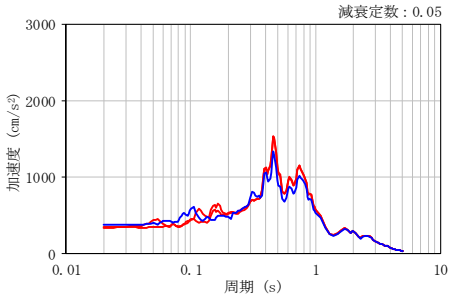
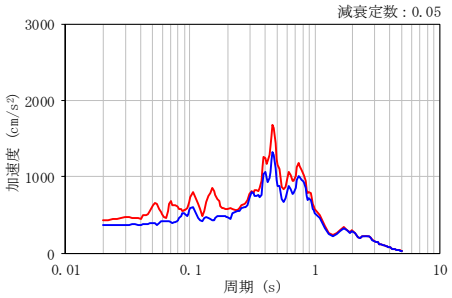
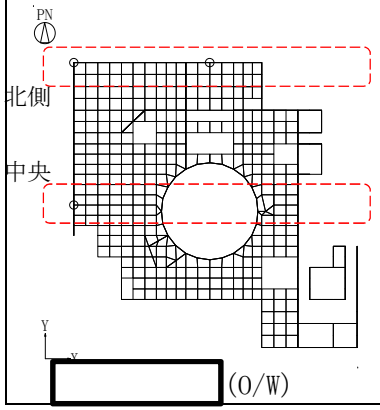
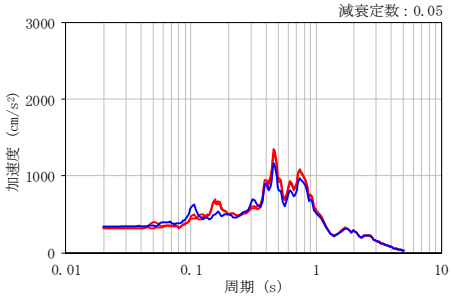
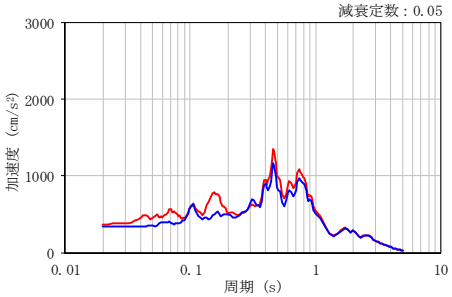
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表３－４（5／5）　EW 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
地下１階  	 	 	
地下２階  	 	 	

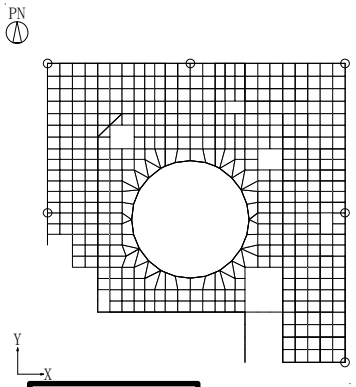
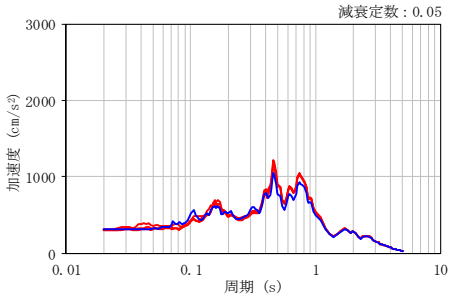
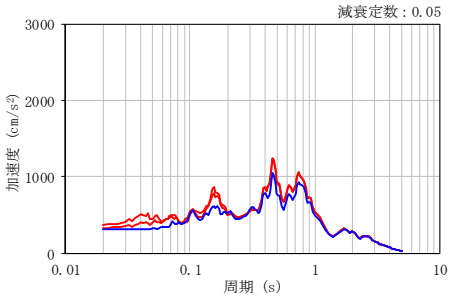
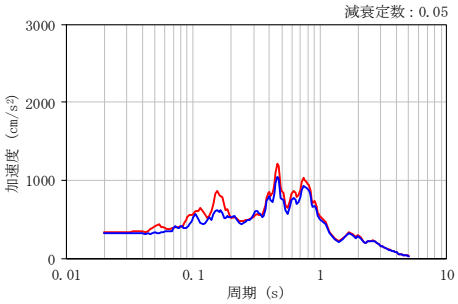
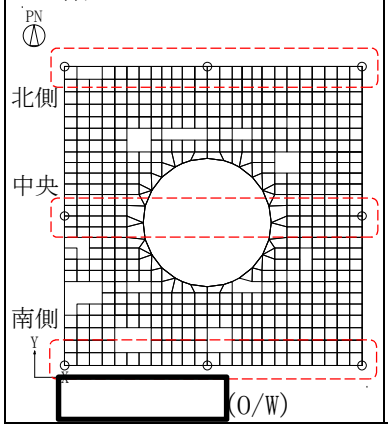
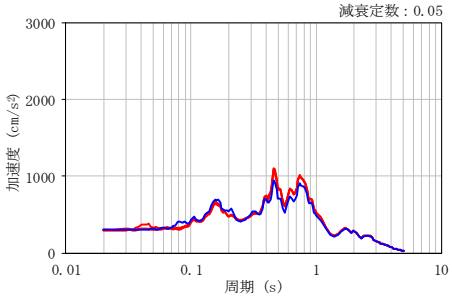
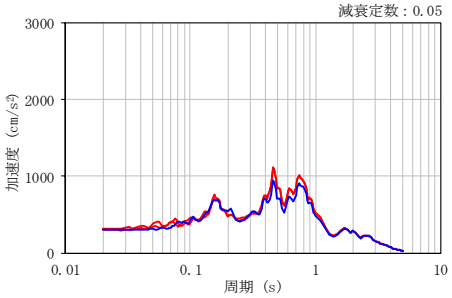
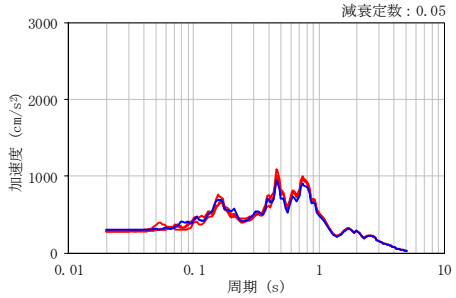
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表３－５（1／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
４階  	 	 	
３階  	 	 	

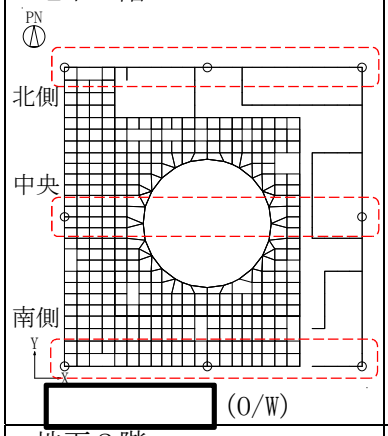
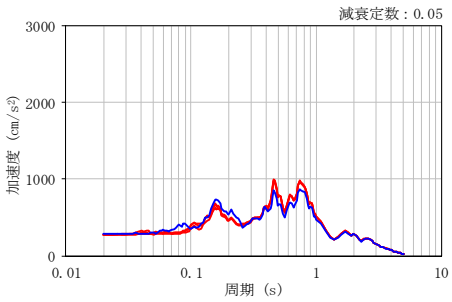
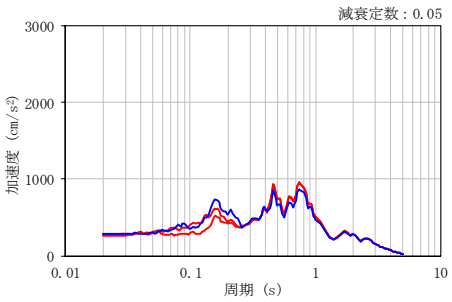
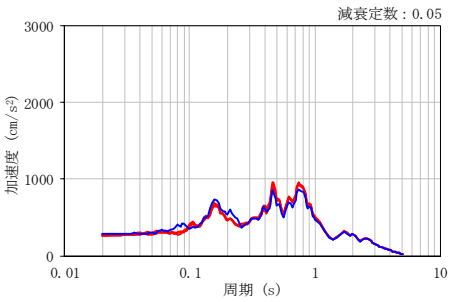
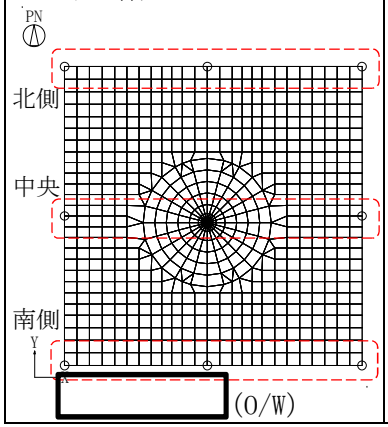
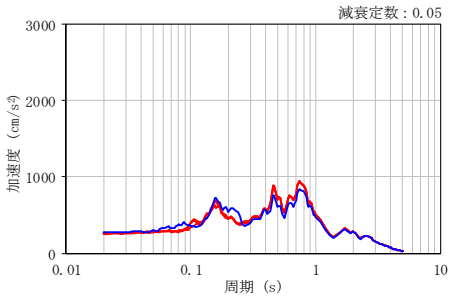
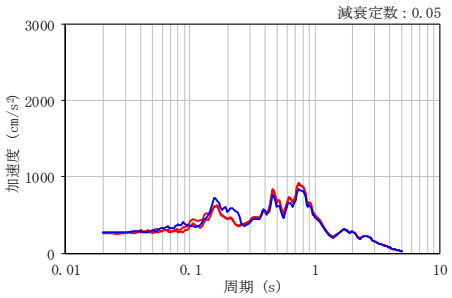
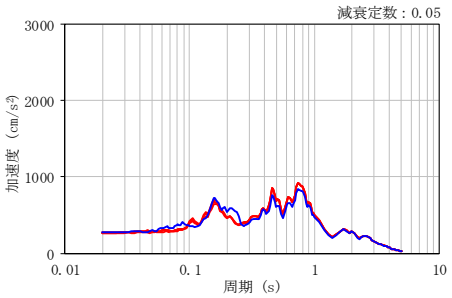
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－5（2／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
２階  [redacted]（O/W）			
１階  [redacted]（O/W）			

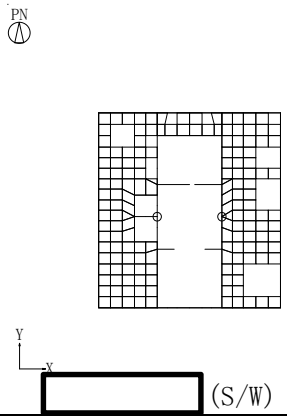
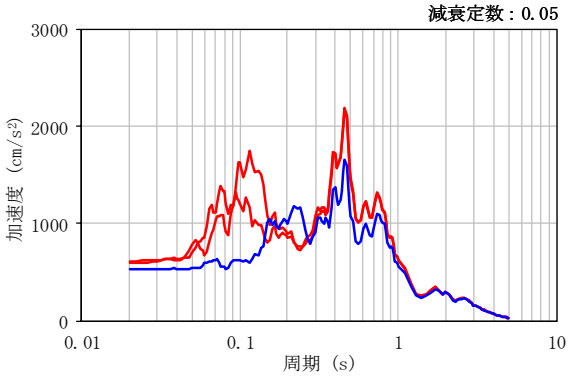
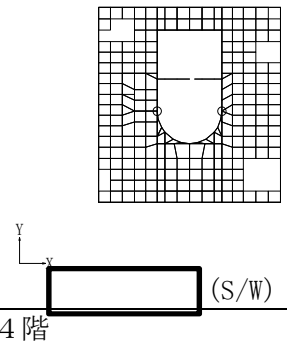
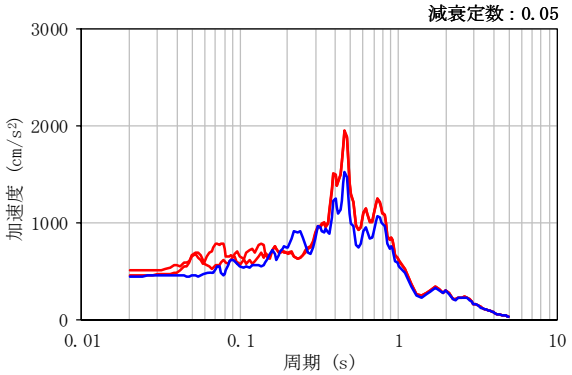
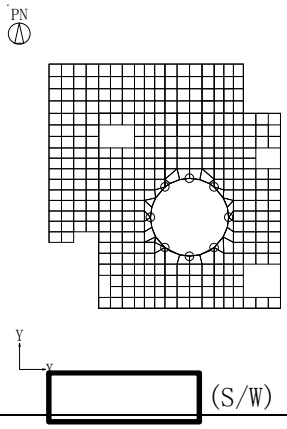
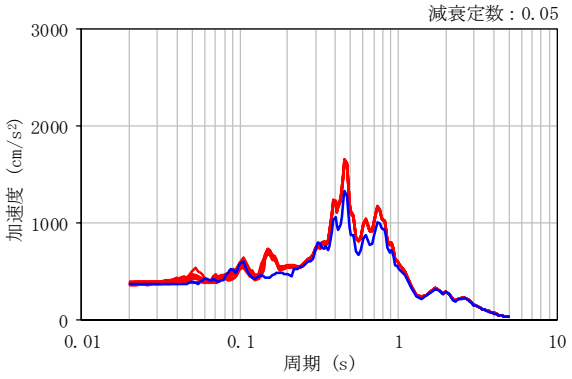
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－5（3／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
地下１階  	 	 	
地下２階  	 	 	

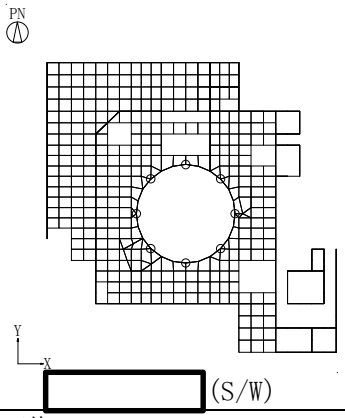
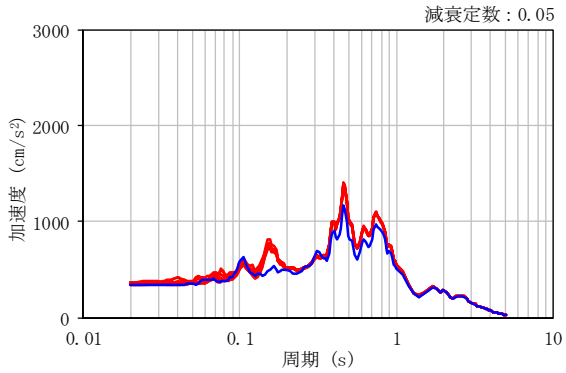
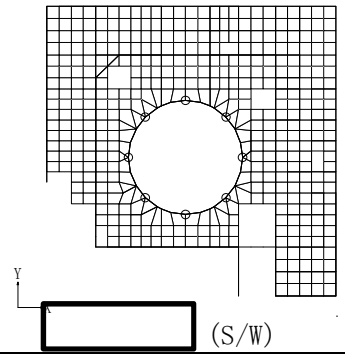
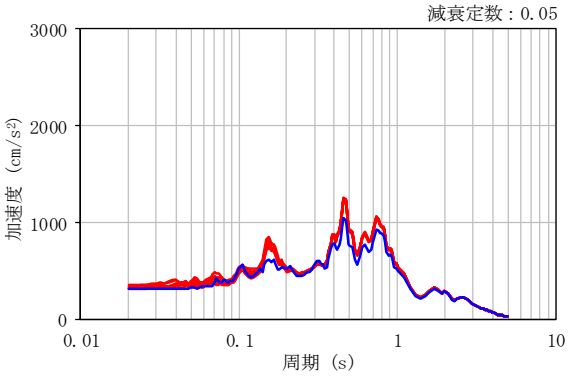
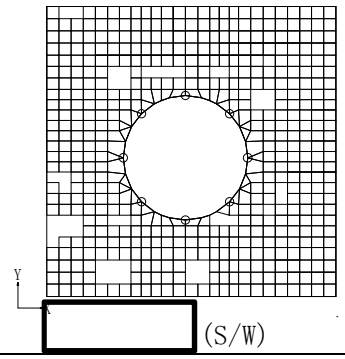
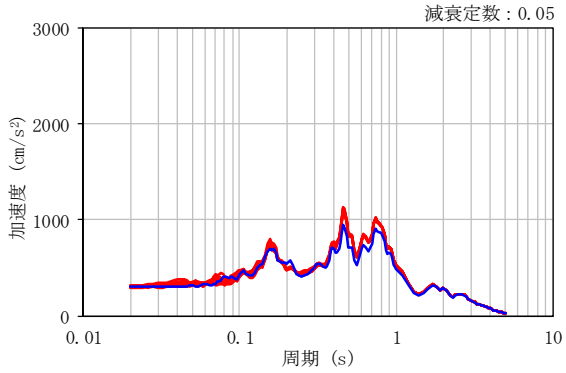
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－6（1／3）　EW 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
6 階  	
5 階  	
4 階  	

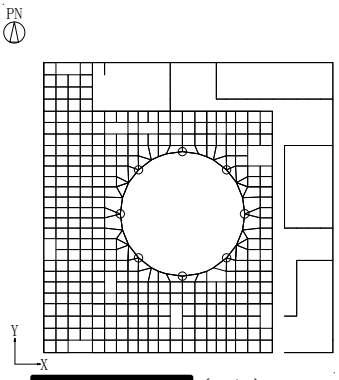
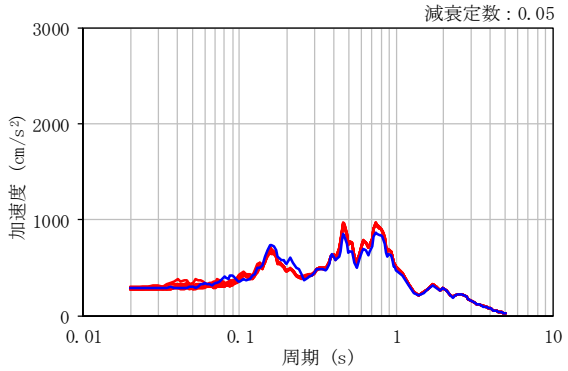
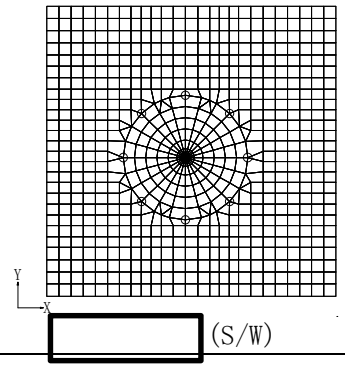
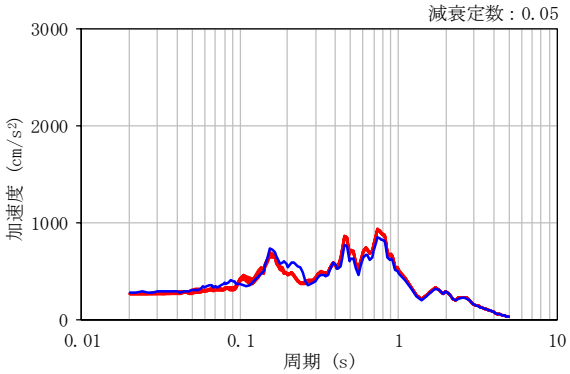
3 次元 FEM，　質点系

表 3－6（2／3）　EW 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
3 階  	
2 階  	
1 階  	

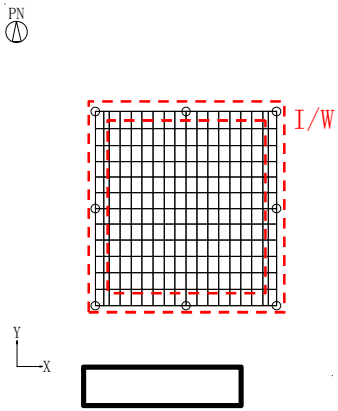
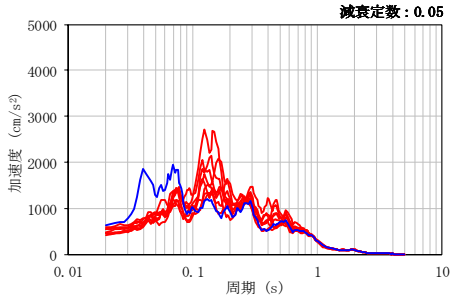
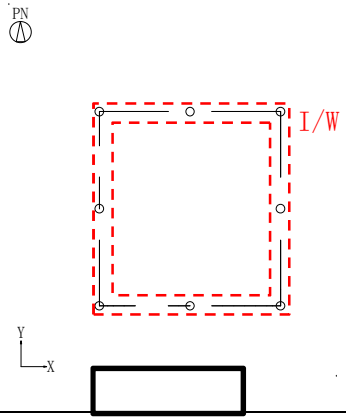
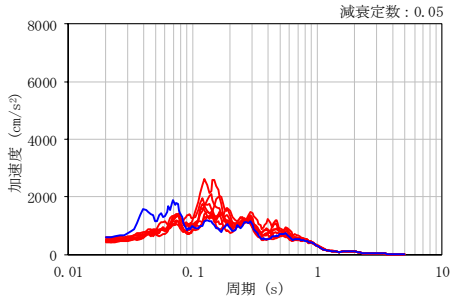
3 次元 FEM，　質点系

表３－６（3／3）　EW 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
地下１階  (S/W)	
地下２階  (S/W)	

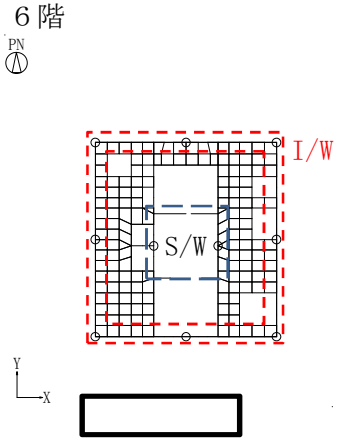
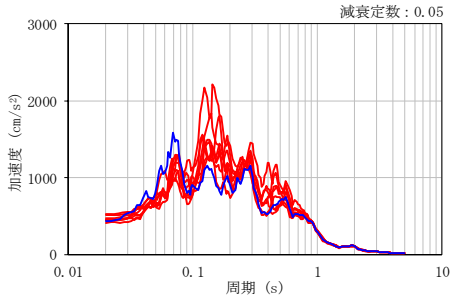
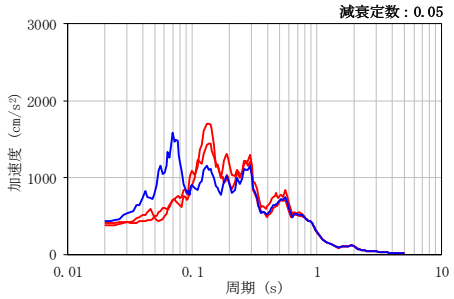
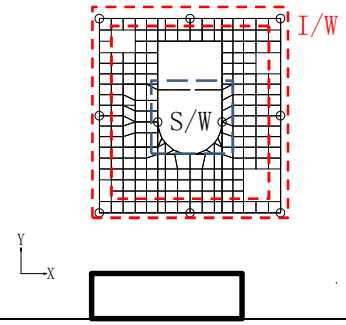
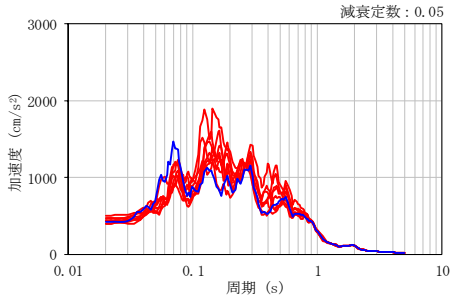
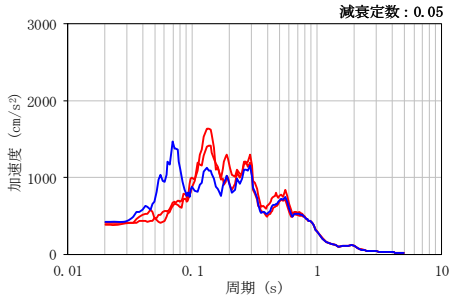
３次元 FEM,　質点系

表 3－7（1／5）　UD 方向の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	O/W	I/W	S/W
屋上  		 	
クレーン階  		 	

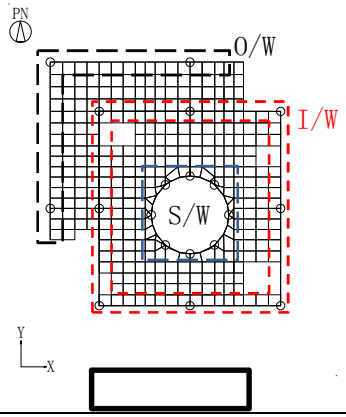
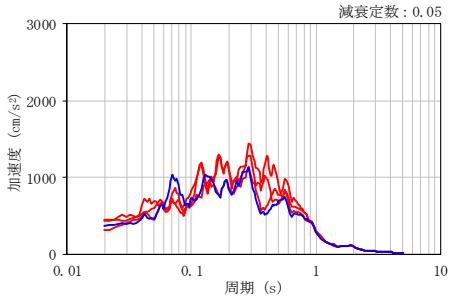
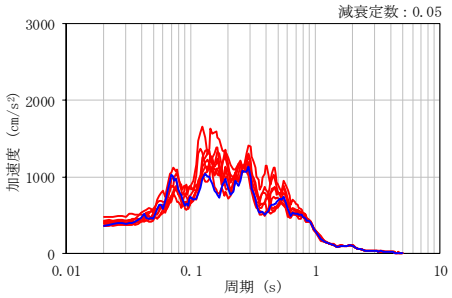
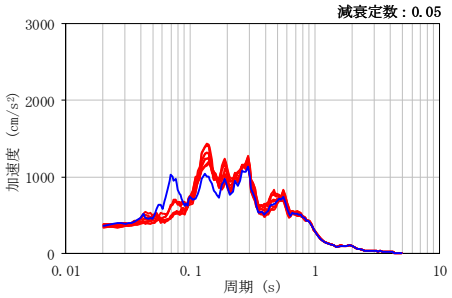
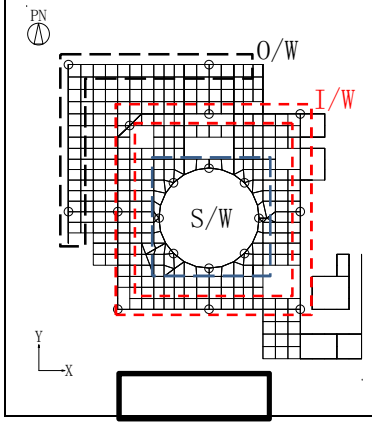
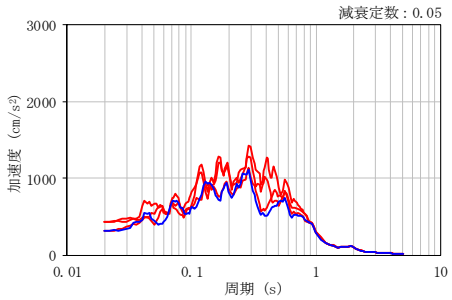
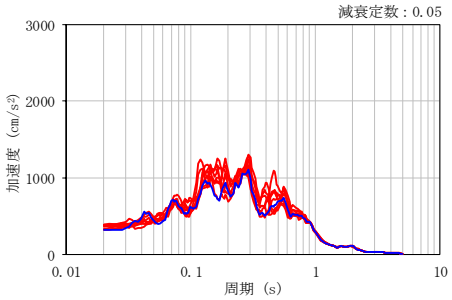
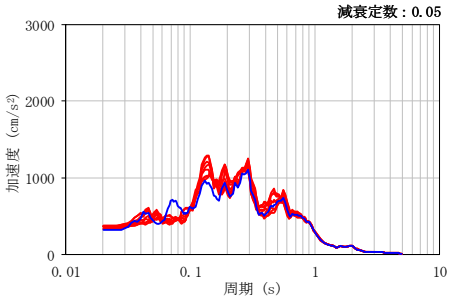
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－7（2／5）　UD 方向の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	O/W	I/W	S/W
6 階 			
5 階 			

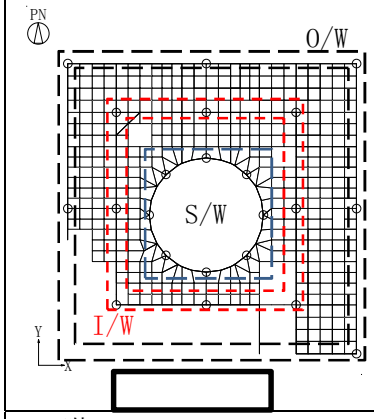
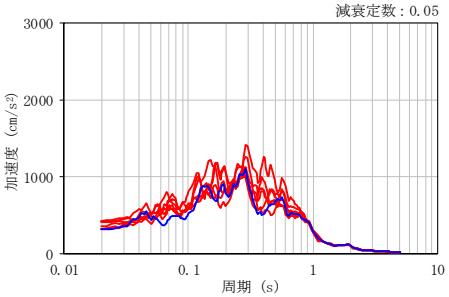
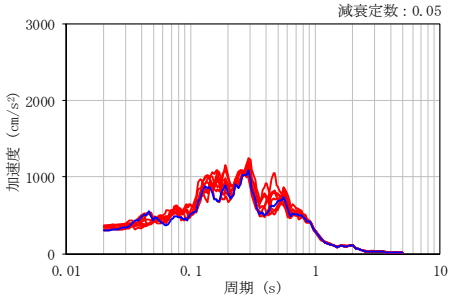
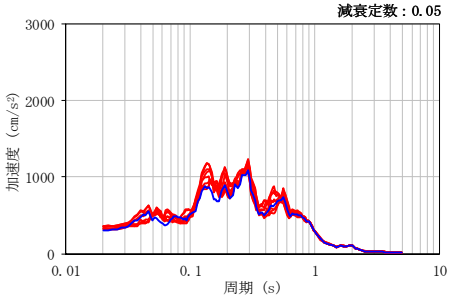
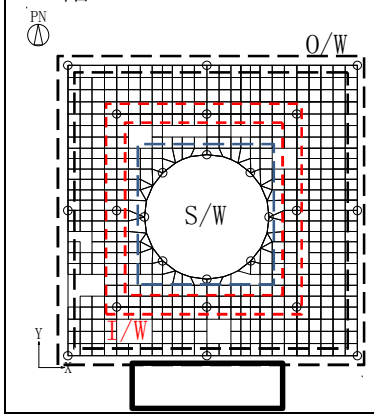
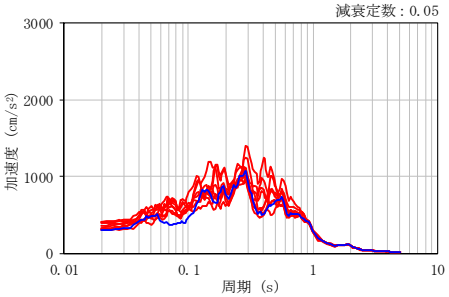
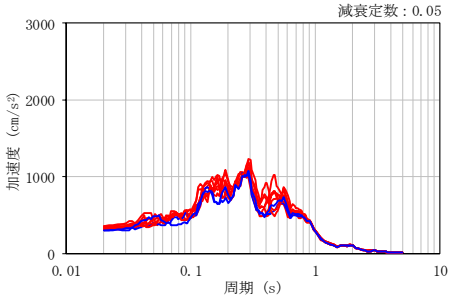
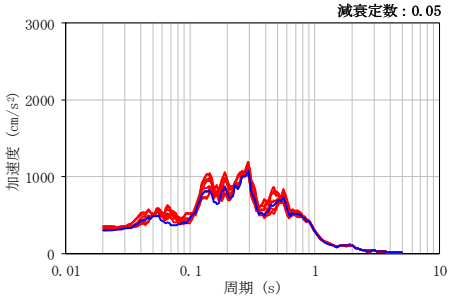
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－7（3／5）　UD 方向の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	O/W	I/W	S/W
4 階 			
3 階 			

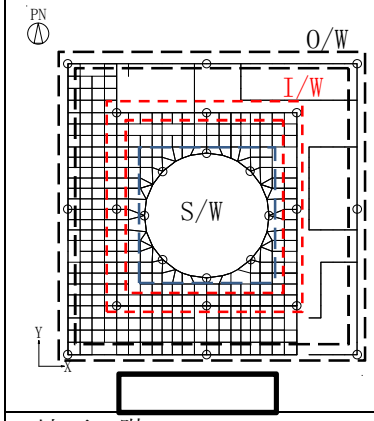
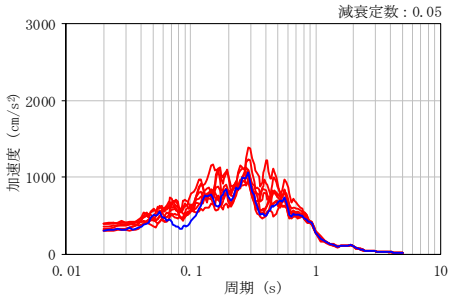
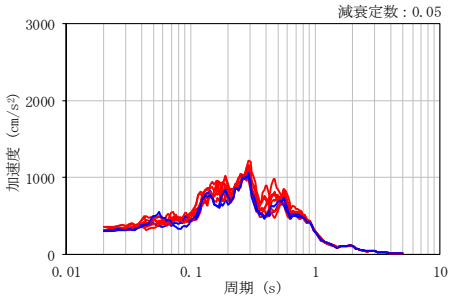
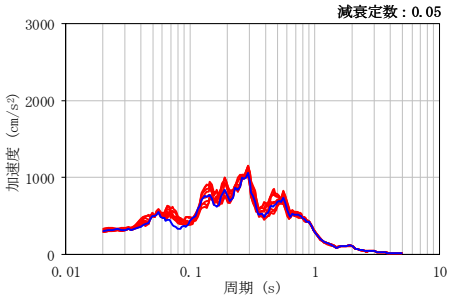
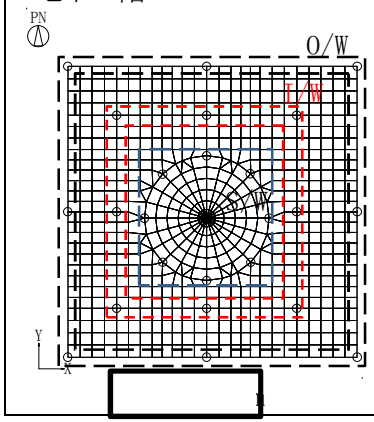
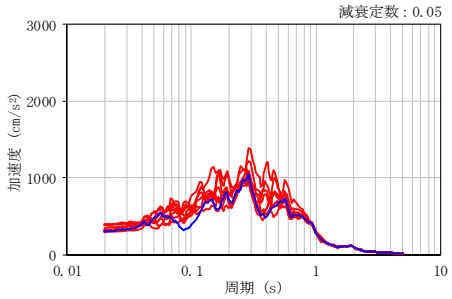
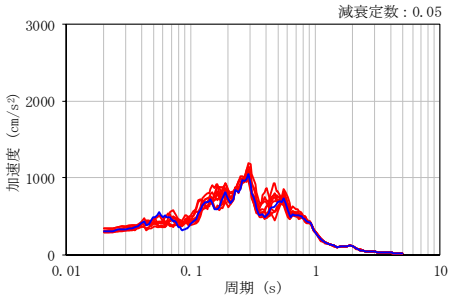
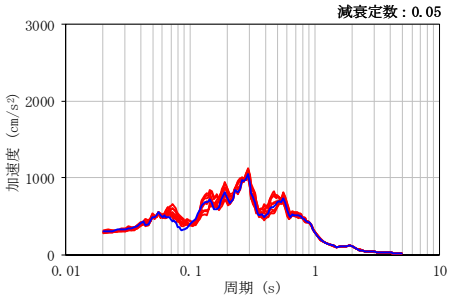
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－7（4／5）　UD 方向の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	O/W	I/W	S/W
２階 			
１階 			

3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－7（5／5）　UD 方向の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	O/W	I/W	S/W
地下１階 			
地下２階 			

3 次元ＦＥＭ，　質点系

補４　検討に用いる地震動の代表性について

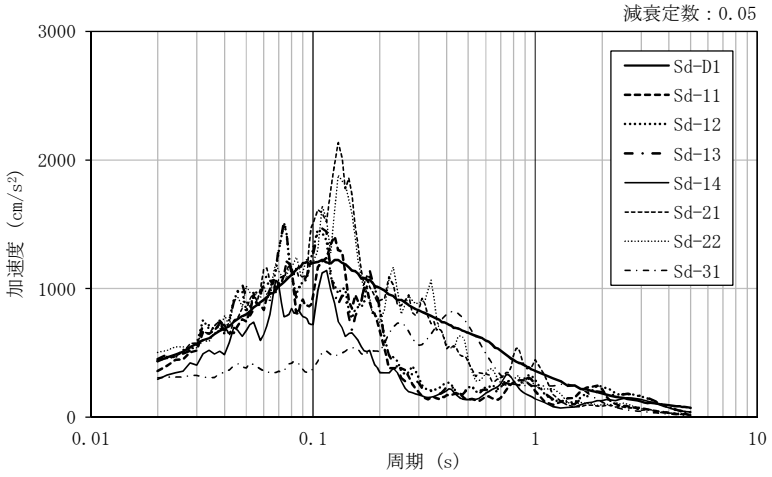
1.　検討概要

３次元ＦＥＭモデルを用いた地震応答解析は，弾性設計用地震動Ｓ$_{d}$のうち，広帯域の周期成分を含むＳ$_{d}$－Ｄ１を用いて実施している。ここでは，解放基盤表面における弾性設計用地震動と基礎下端レベルにおける入力地震動の加速度応答スペクトルを比較し，弾性設計用地震動Ｓ$_{d}$－Ｄ１の代表性について確認する。

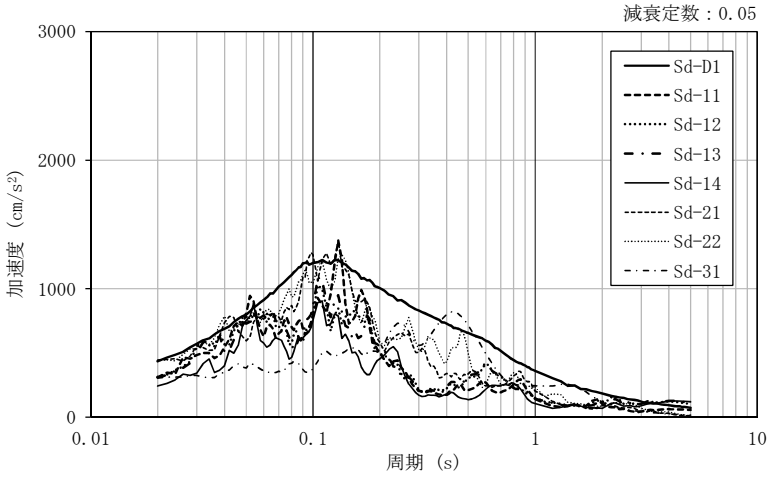
2.　検討結果

解放基盤表面における弾性設計用地震動と基礎下端レベルにおける入力地震動の加速度応答スペクトルを図 2－1 及び図 2－2 にそれぞれ示す。また，水平 2 方向の加速度応答スペクトルの二乗和平方根による応答スペクトルを図 2－3 に示す。なお，S_d－Ｄ１については，直交方向の地震動には３次元ＦＥＭモデルを用いた地震応答解析の EW 方向の入力に用いた位相の異なる模擬地震波（弾性設計用地震動S_d－Ｄ１の設計用応答スペクトルに適合するが，S_d－Ｄ１とは位相特性が異なる地震波。）を用いた。

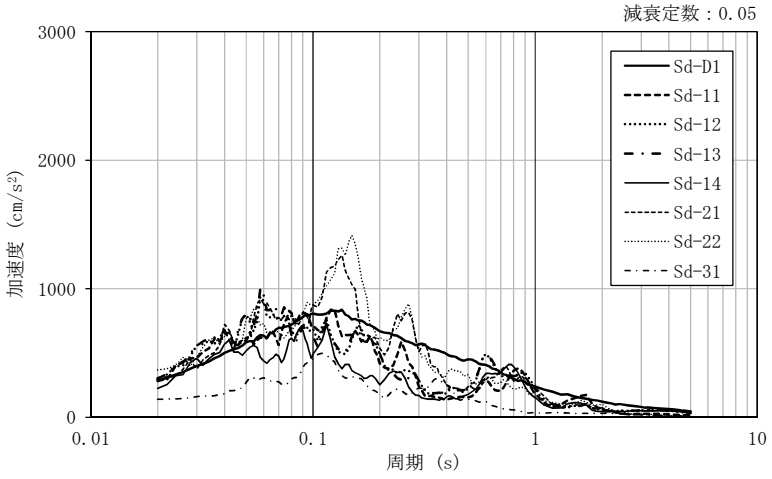
質点系モデルによる地盤－建屋連成系の 1 次及び 2 次の固有周期はそれぞれ 0.4 秒，0.2 秒であり，図 2－3 に示すように建屋の主要な周期帯域において，S_d－Ｄ１の加速度応答スペクトルは，他を包絡しており，S_d－Ｄ１を用いた検討により建屋の主要な応答性状を代表できることを確認した。



（a）NS 方向

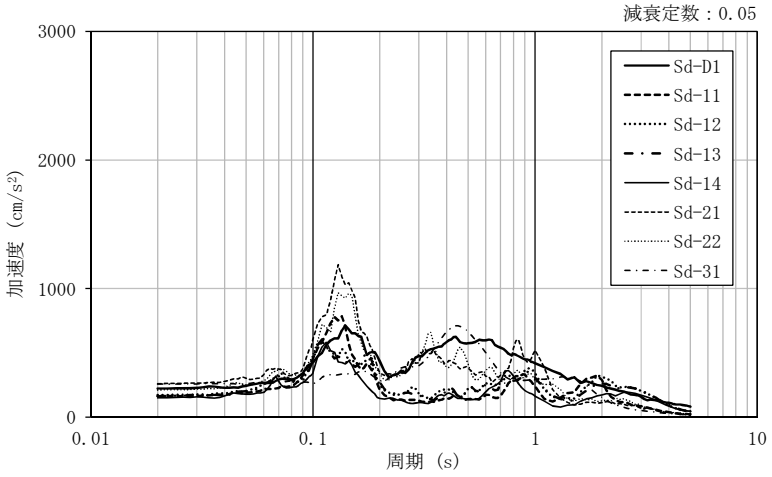


（b）EW 方向

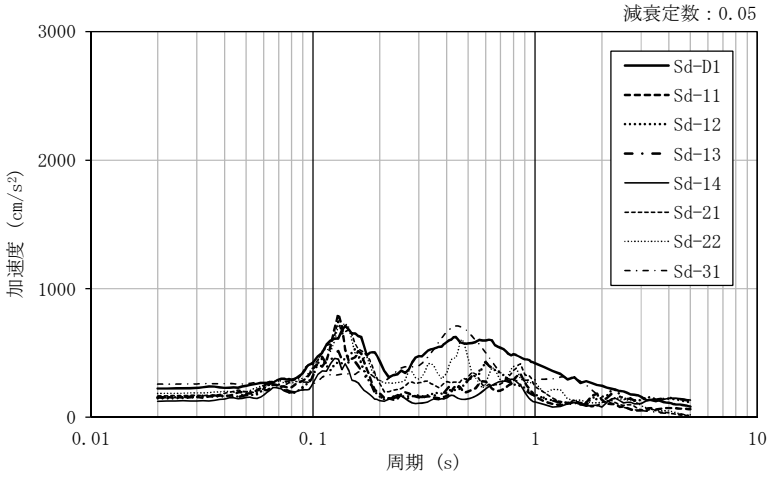


（c）UD 方向

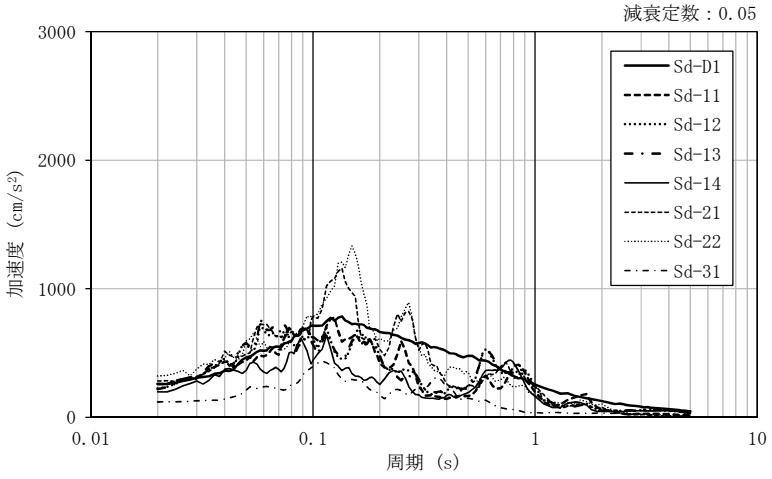
図 2－1　弾性設計用地震動の加速度応答スペクトル（解放基盤波）



（a）NS 方向

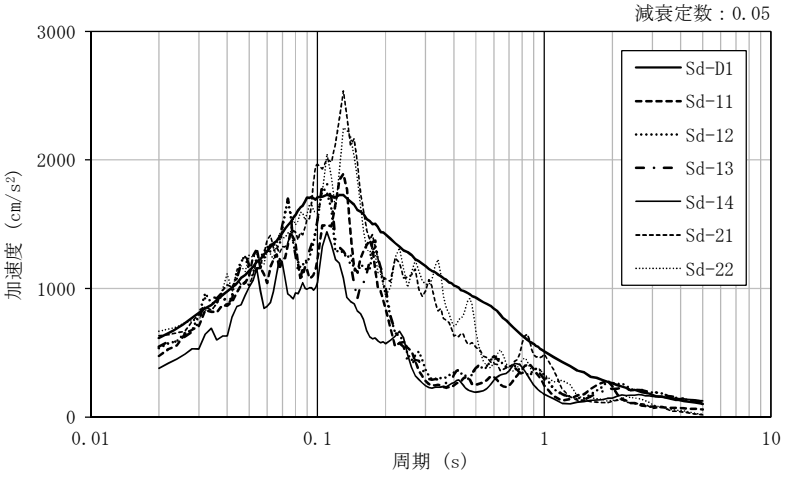


（b）EW 方向

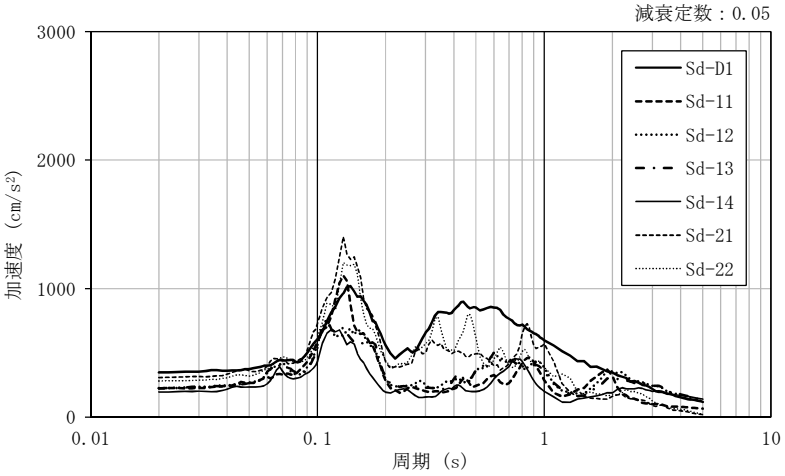


（c）UD 方向

図 2－2　入力地震動の加速度応答スペクトル（EL.－9.0 m）



(a) 解放基盤波



(b) 入力動（基礎下端）

図 2－3　水平 2 方向の二乗和平方根の加速度応答スペクトル

補５　Ｓ$_{d}$－Ｄ１に対する３次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析

1.　検討概要

「別紙 3　3.2　建屋応答性状の把握」では，建屋模擬モデル，比較用モデル及び質点系対応モデルを用いて分析を行い，建屋模擬モデルを用いた検討より，3 方向同時入力と 1 方向入力時での応答の差異がほとんどないことを確認した。

ここでは，Ｓ$_{d}$－Ｄ１に対する 3 次元ＦＥＭモデルによる 3 方向同時入力時の応答性状の把握の観点から，各階の内部ボックス壁，外部ボックス壁，シェル壁における加速度応答スペクトルを示し，建屋応答性状について分析を行う。また比較として質点系モデルによる加速度応答スペクトルも併記する。

2.　検討条件

質点系モデルによる解析結果と比較を行う節点を図 2－1 に示す。比較は NS 方向，EW 方向，UD 方向の方向別に行う。各階の節点を外部ボックス壁（以下「O/W」という。），内部ボック壁（以下「I/W」という。），及びシェル壁（以下「S/W」という。）に分類し，水平方向の，O/W と I/W については，出力方向に対して平行な両端部の壁と中央に分けて示す。

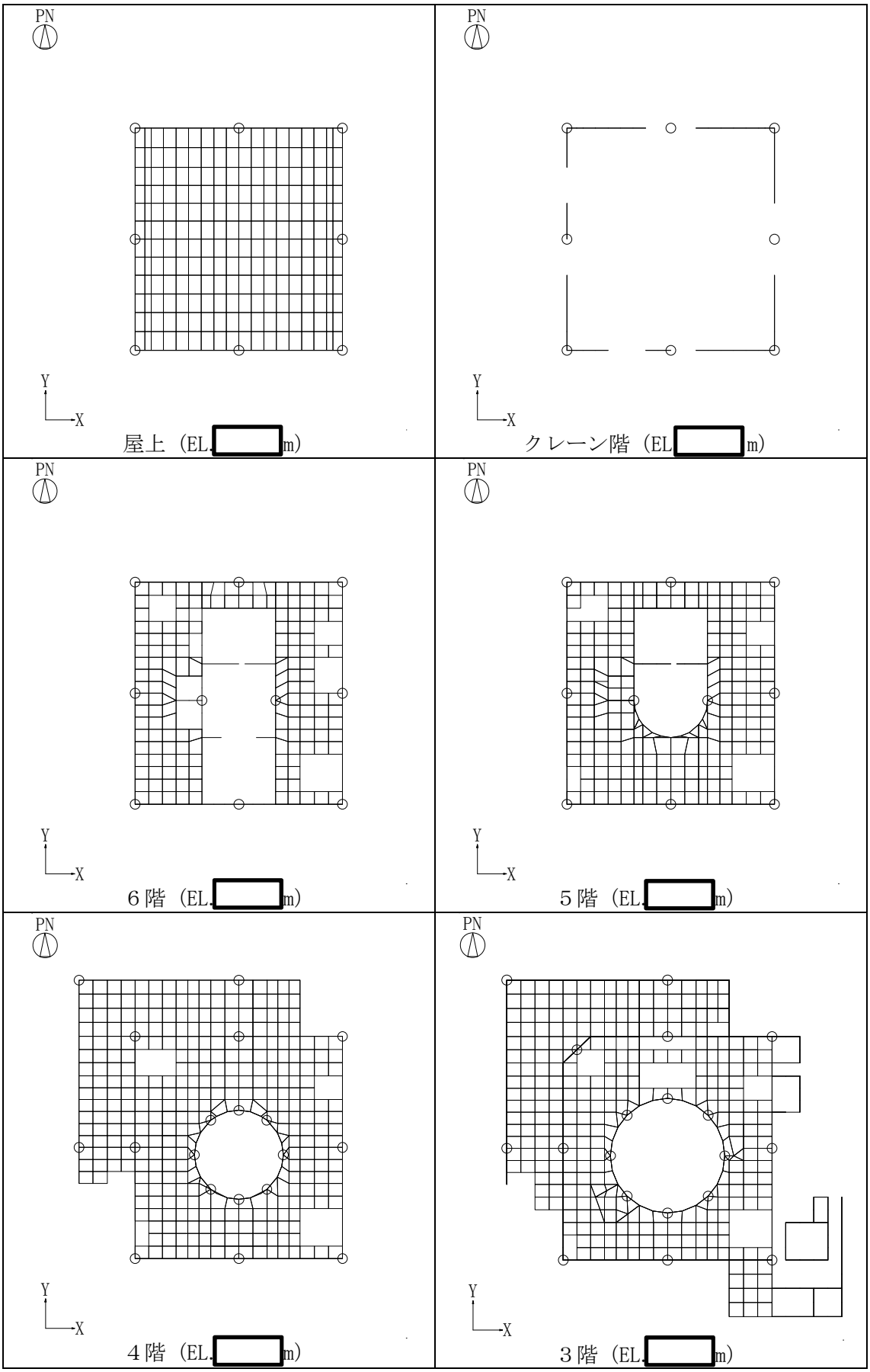


図２－１（1／2）　応答スペクトル評価点

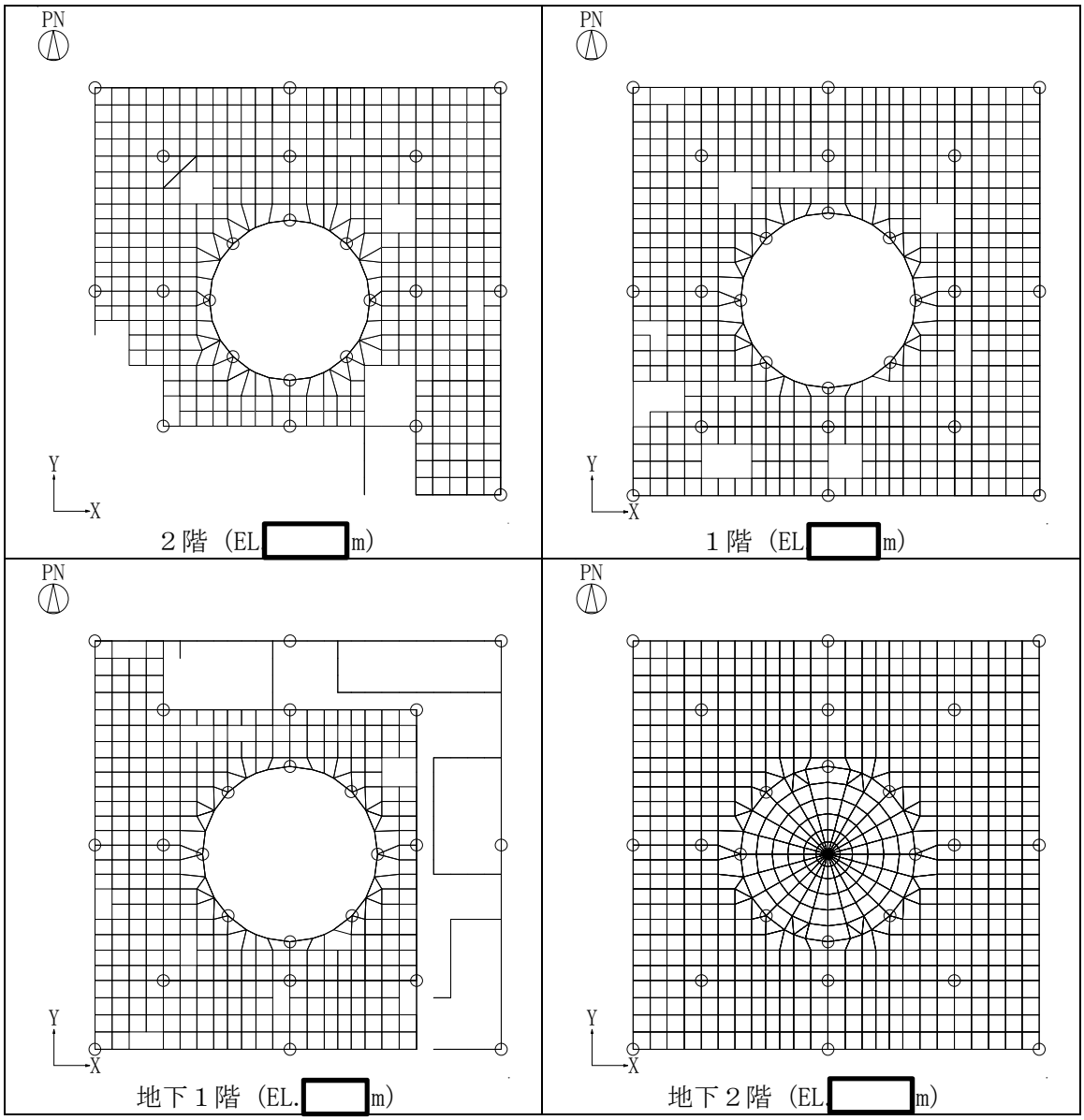


図２－１（2／2）　応答スペクトル評価点

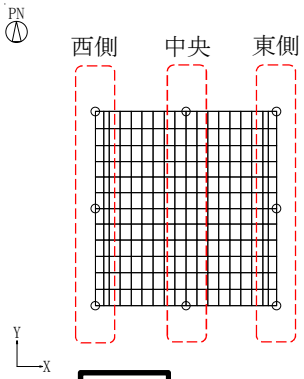
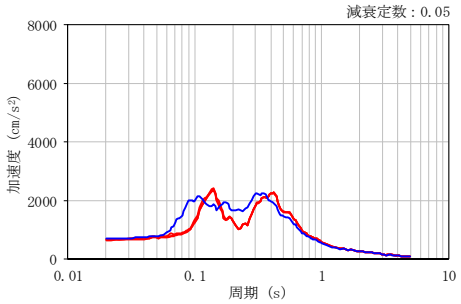
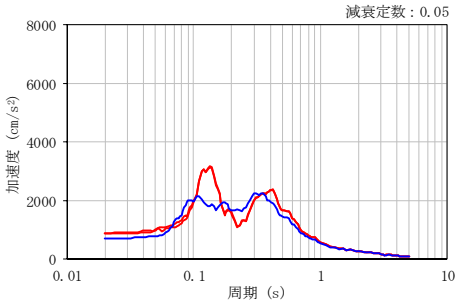
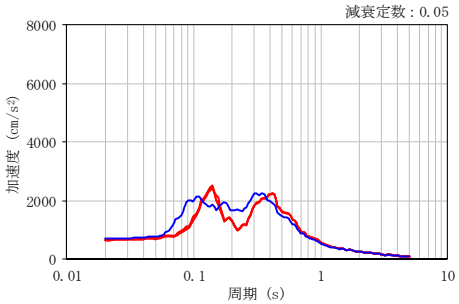
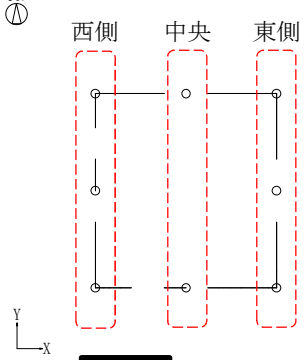
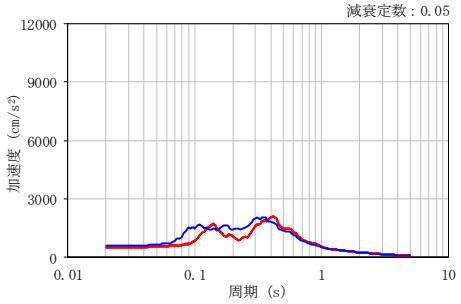
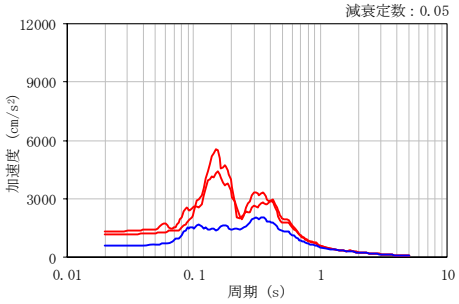
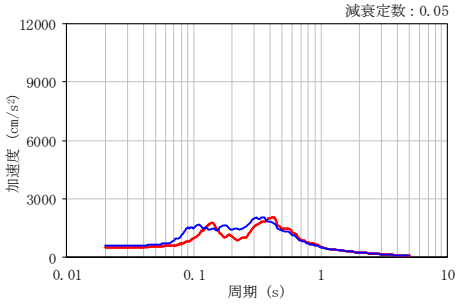
3.　検討結果

屋上（EL.63.65 m）から地下２階（EL.-4.00 m）までの各階における，3 方向同時入力の加速度応答スペクトルを表 3－1～表 3－7 に示す。また比較として質点系モデルによる加速度応答スペクトルも併記する。

NS 方向，EW 方向ともに，耐震壁が I/W のみとなる６階(オペフロ／EL.46.50 m）以上では，壁中央の節点では，面外方向の加速度応答が大きくなる。特にクレーン階（EL.57.00 m）はスラブと接続していないため屋上（EL.63.65 m）よりも面外方向の加速度応答が大きい。しかし，６階より下の階では面外方向の加速度応答も含め，3 次元ＦＥＭの出力位置による結果に大きな違いはなく，各階で概ね一致した応答スペクトルとなっている。

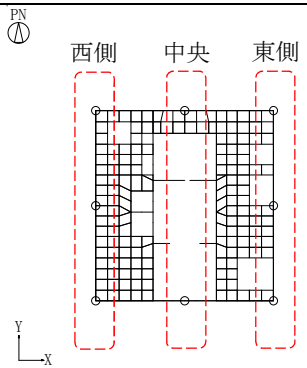
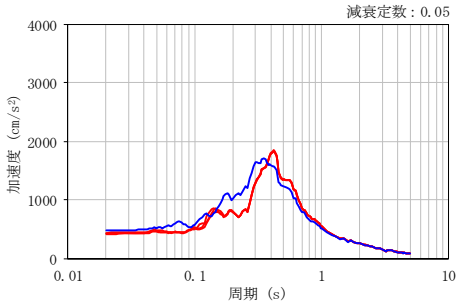
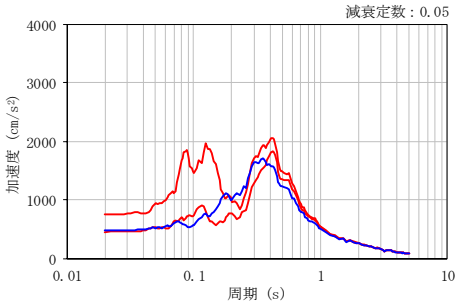
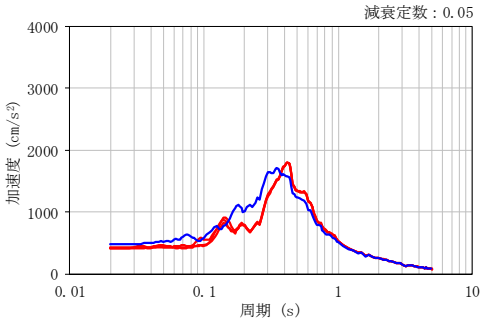
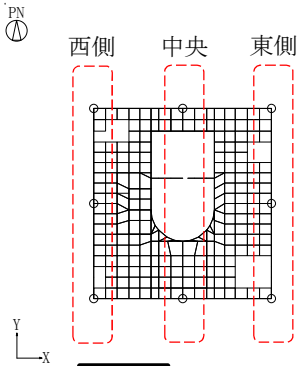
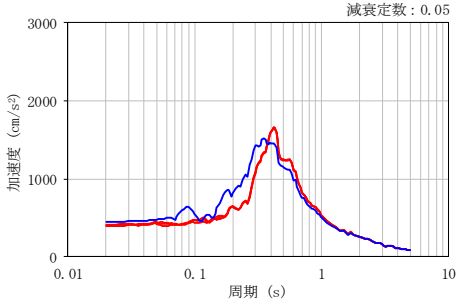
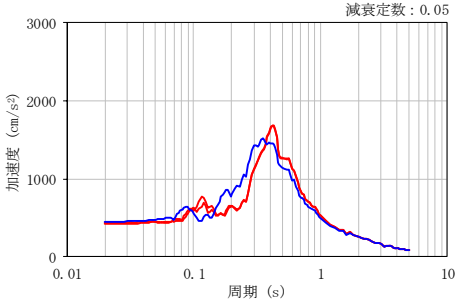
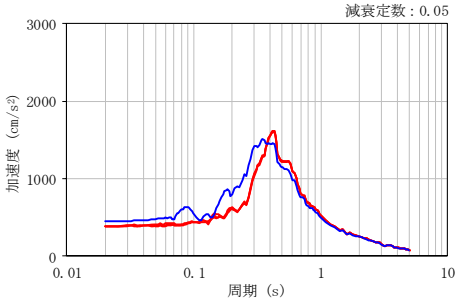
３次元ＦＥＭ応答の質点系モデル応答との比較においても面内方向の加速度応答に大きな違いはなく，中央の節点の面外方向の加速度応答についても重要施設のある６階より下の階では質点系モデル応答と整合が取れている。

表 3－1（1／5）　NS 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
屋上  EL [redacted] m（I/W）	 	 	
クレーン階  EL [redacted] m（I/W）	 	 	

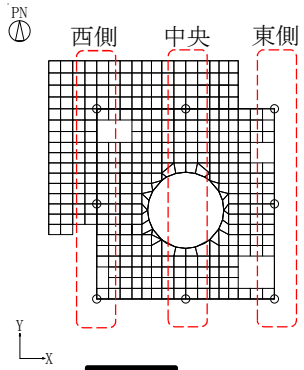
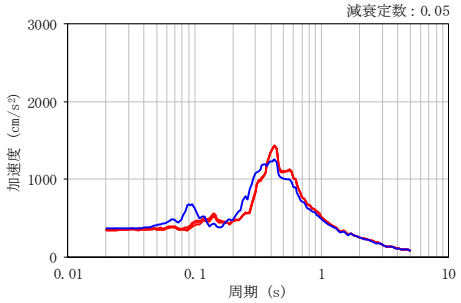
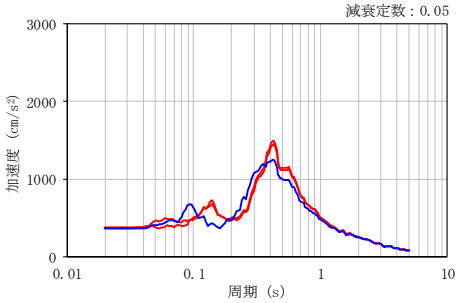
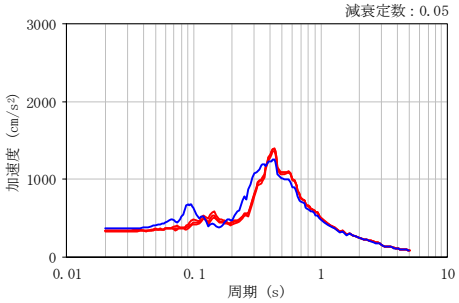
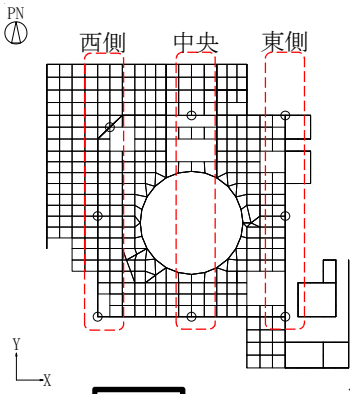
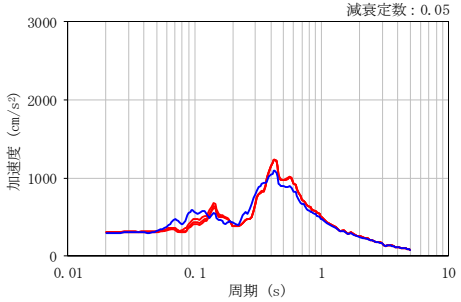
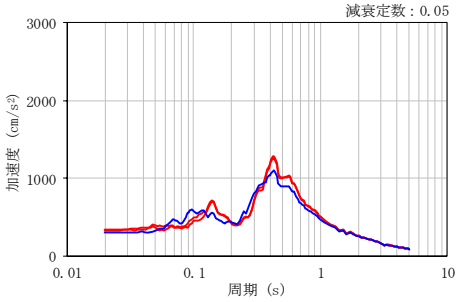
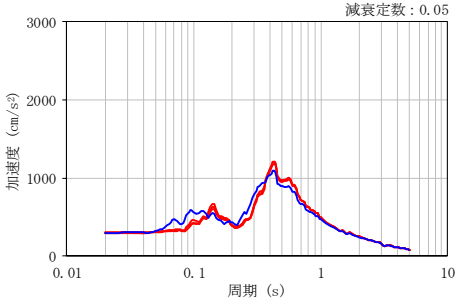
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－1（2／5）　NS 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
 EL [redacted] m（I/W）			
５階  EL [redacted] m（I/W）			

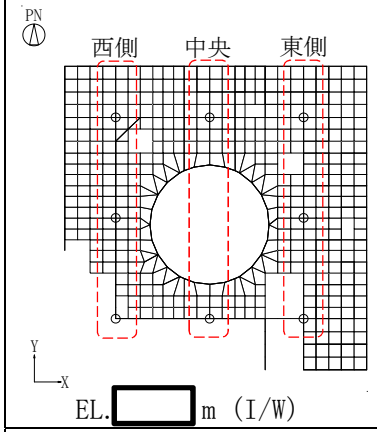
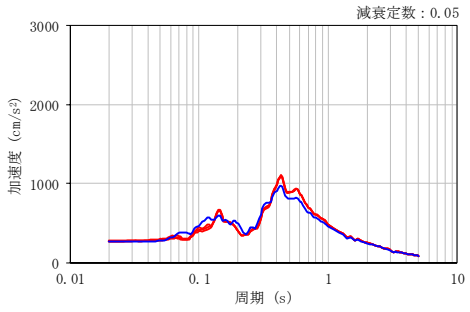
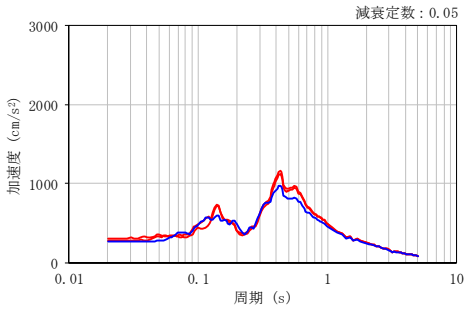
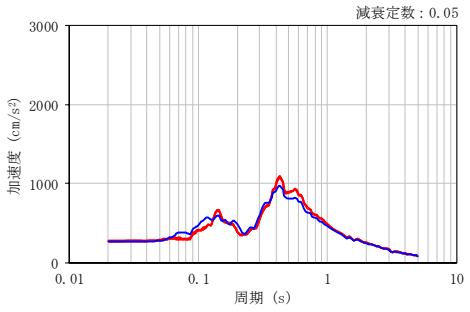
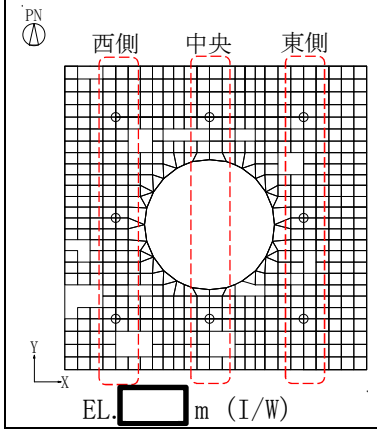
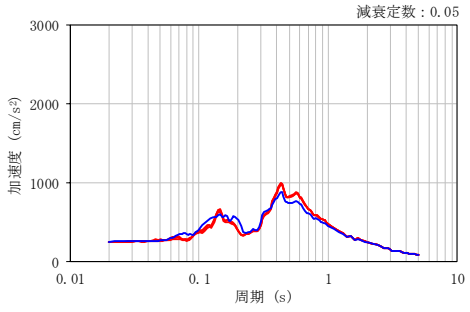
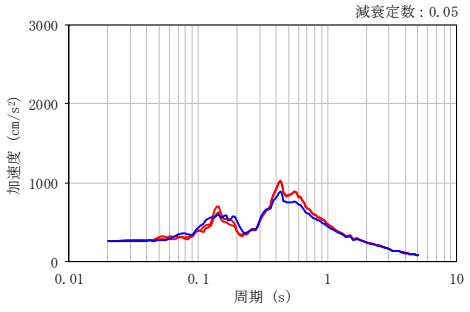
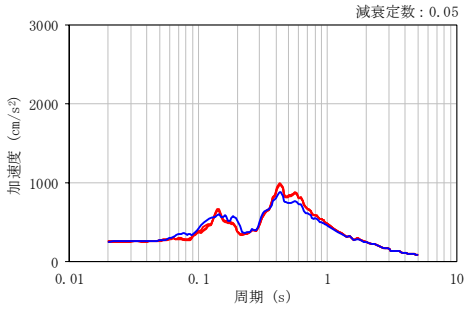
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－1（3／5）　NS 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
４階  EL. [redacted] m（I/W）	 	 	
３階  EL. [redacted] m（I/W）	 	 	

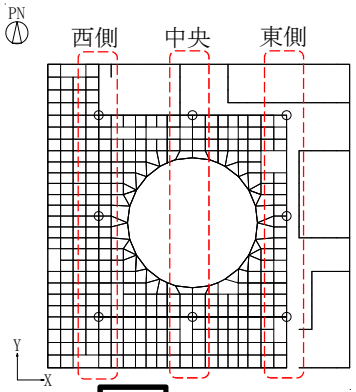
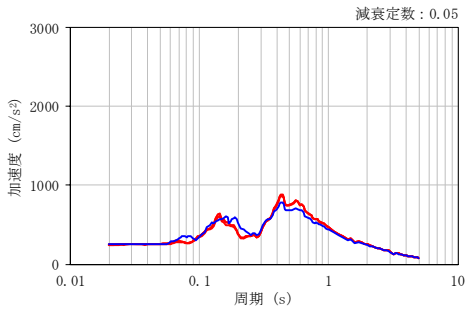
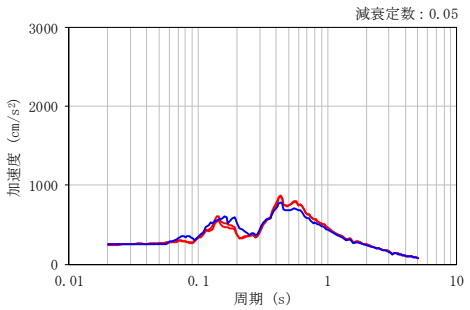
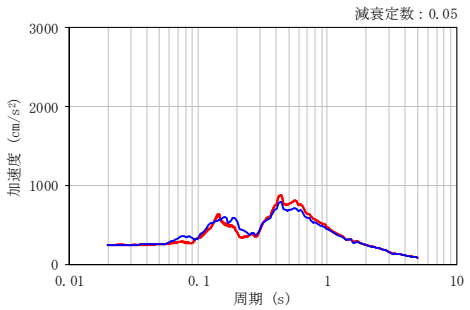
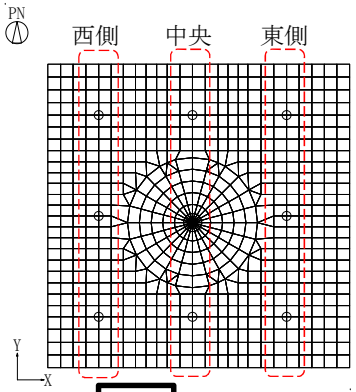
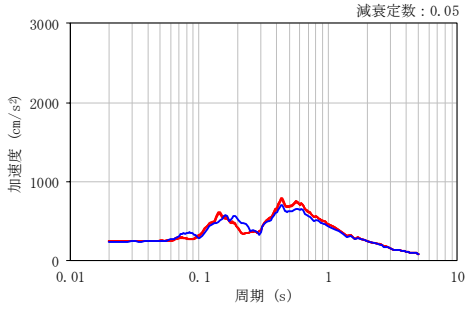
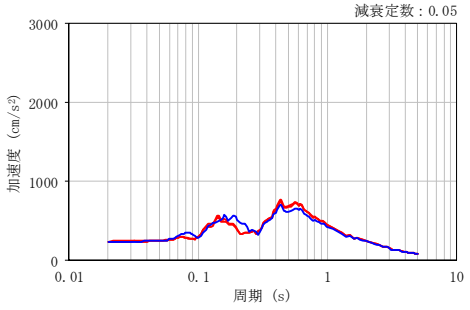
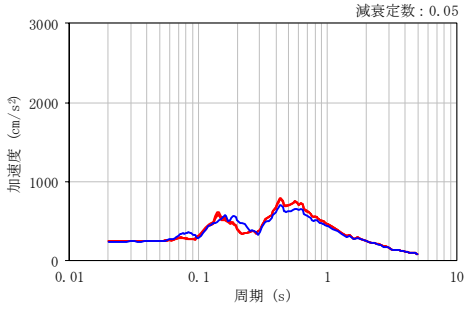
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－1（4／5）　NS 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
２階  EL.[redacted] m（I/W）	 	 	
１階  EL.[redacted] m（I/W）	 	 	

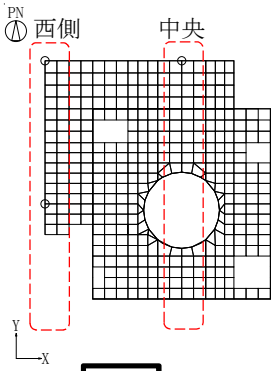
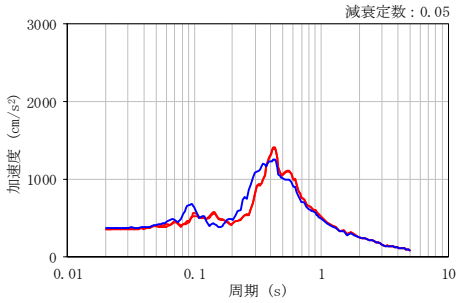
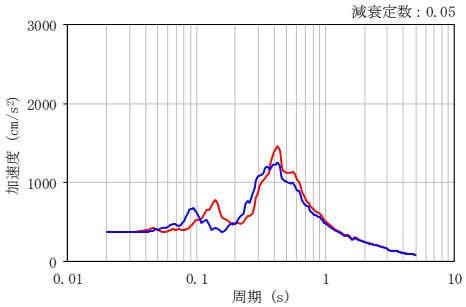
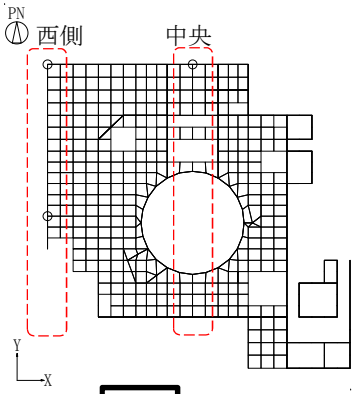
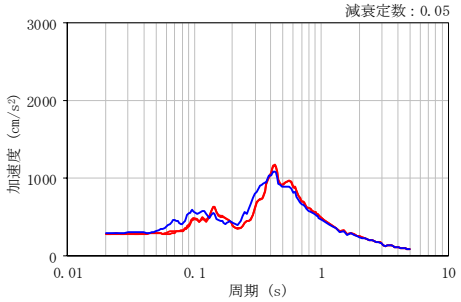
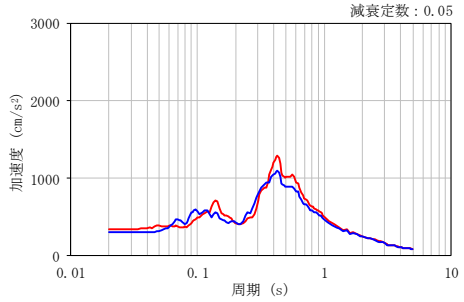
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－1（5／5）　NS 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
地下１階  EL.[redacted] m（I/W）	 	 	
地下２階  EL.[redacted] m（I/W）	 	 	

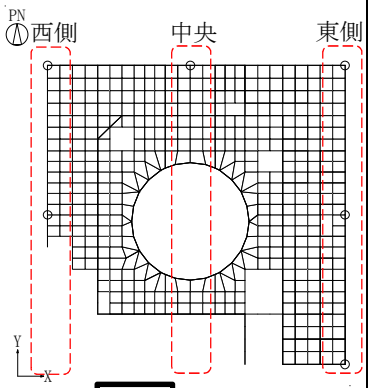
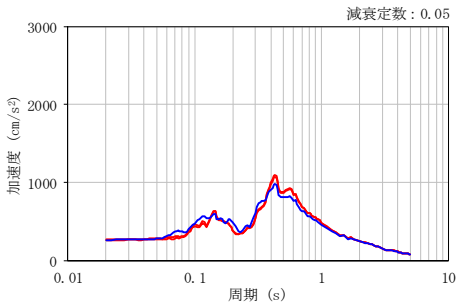
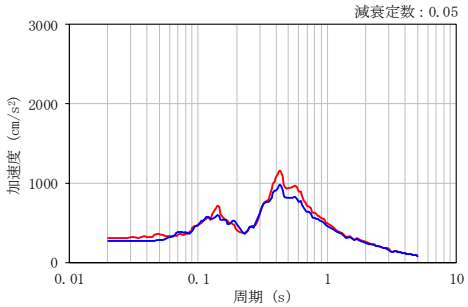
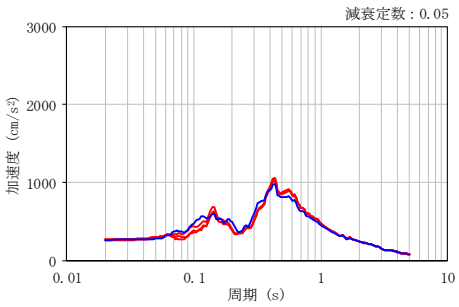
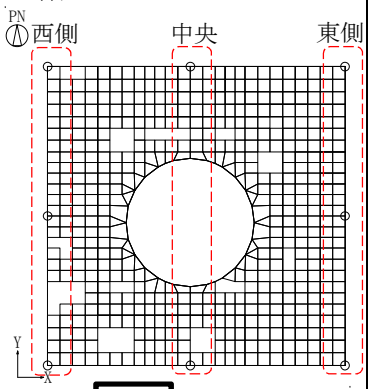
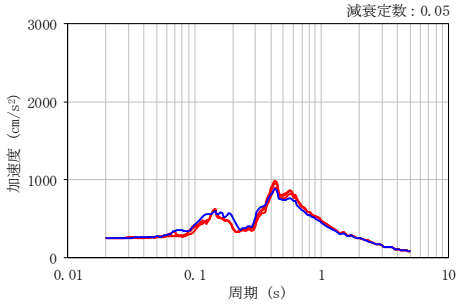
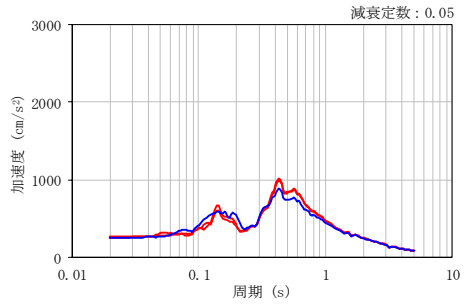
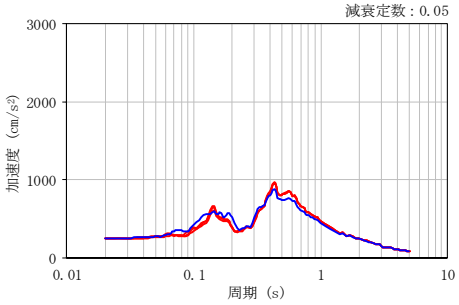
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－2（1／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
４階  EL.[redacted] m（O/W）	 	 	
３階  EL.[redacted] m（O/W）	 	 	

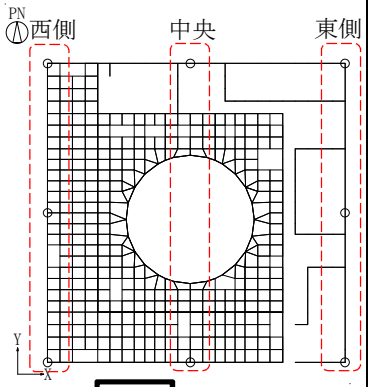
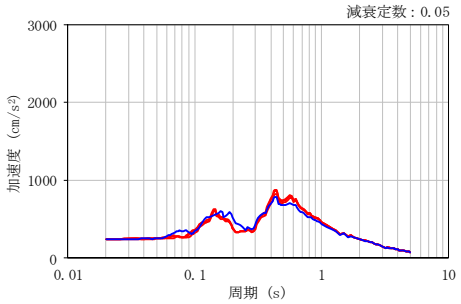
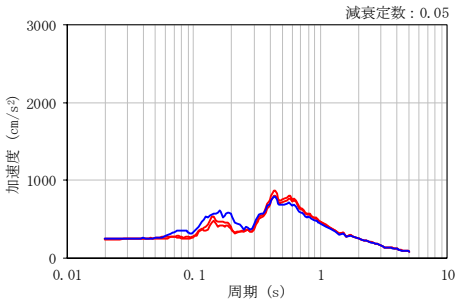
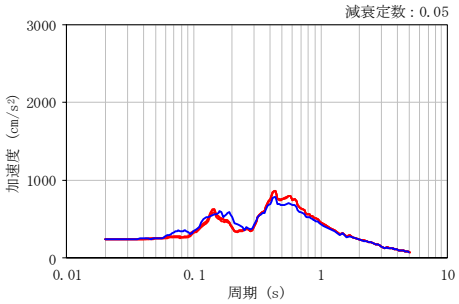
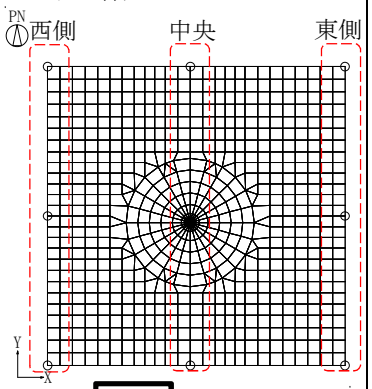
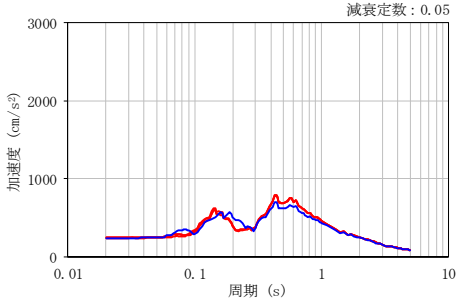
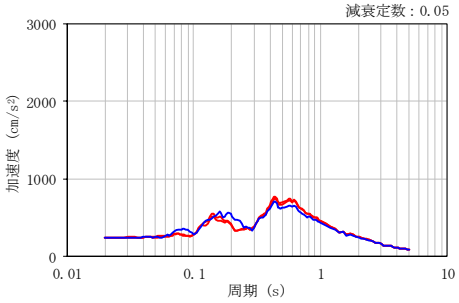
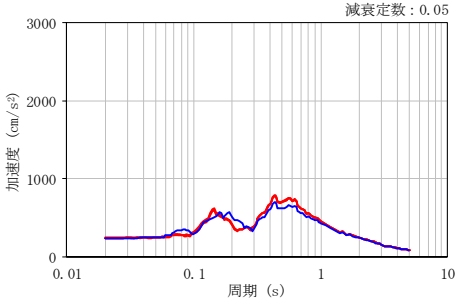
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－2（2／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
２階  EL [redacted] m（O/W）	 	 	
１階  EL [redacted] m（O/W）	 	 	

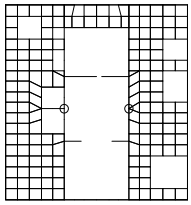
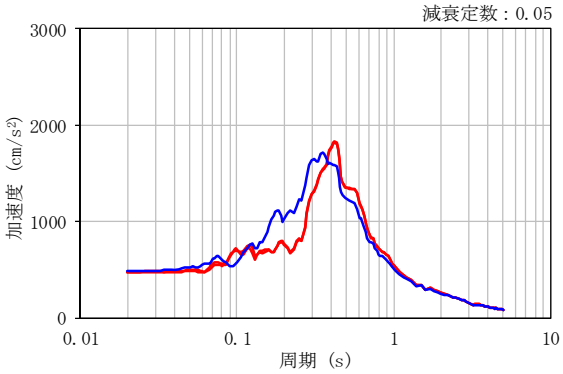
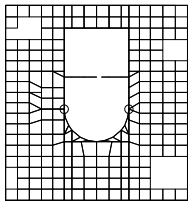
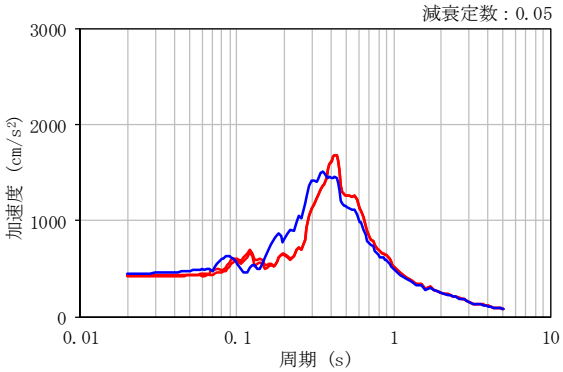
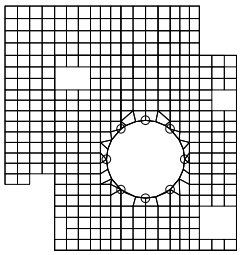
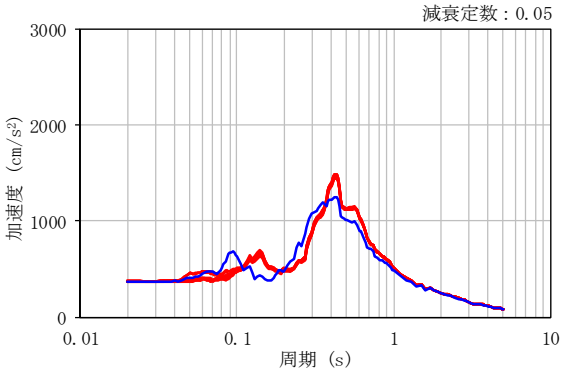
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－2（3／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	西側	中央	東側
地下 1 階  EL [redacted] m（O/W）	 	 	
地下 2 階  EL. [redacted] m（O/W）	 	 	

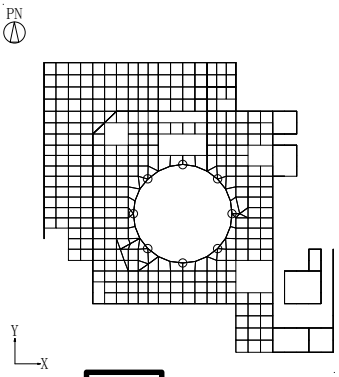
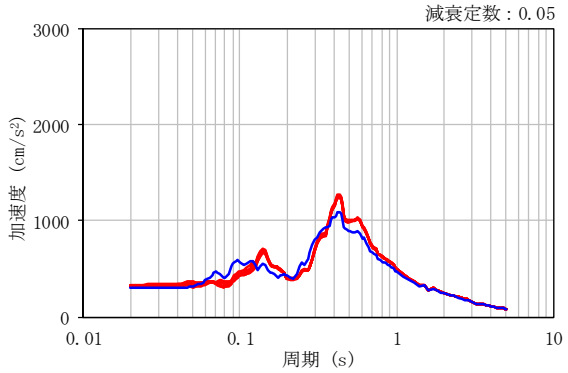
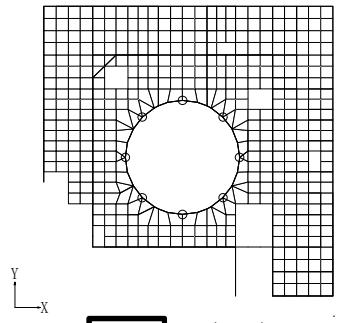
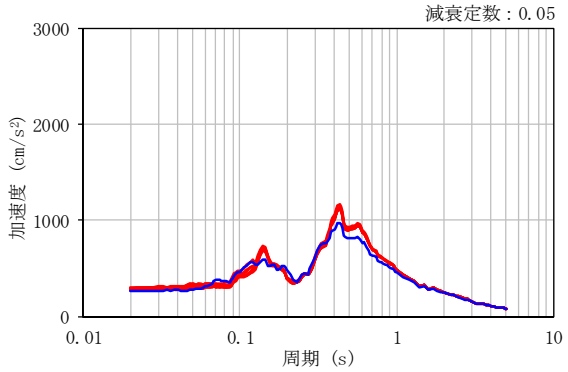
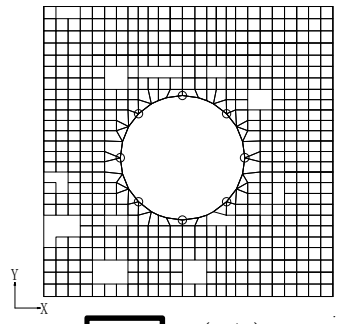
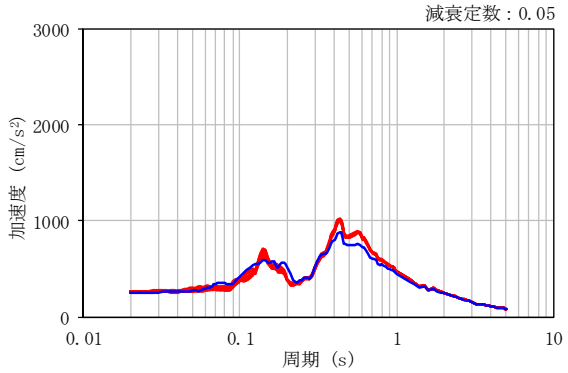
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－3（1／3）NS 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
6 階 PN  Y X EL. [redacted] m（S/W）	
5 階 PN  Y X EL. [redacted] m（S/W）	
4 階 PN  Y X EL. [redacted] m（S/W）	

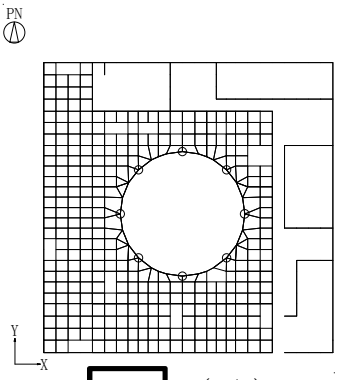
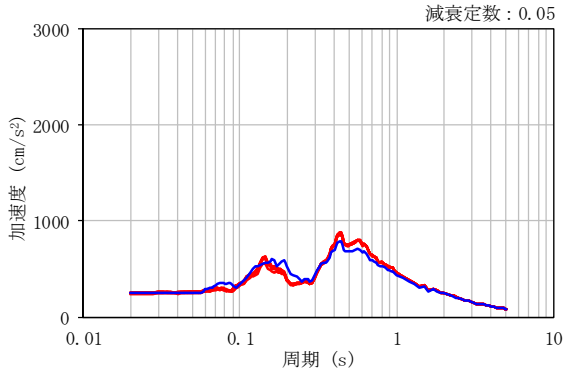
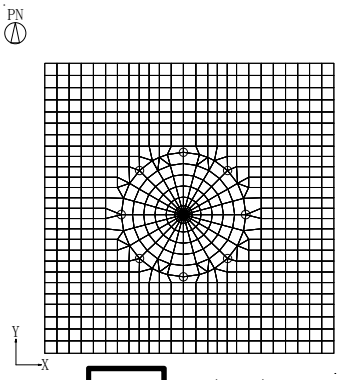
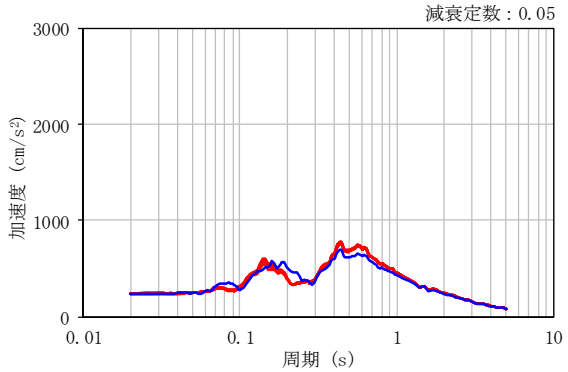
3 次元 FEM，　質点系

表 3－3（2／3）　NS 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
3 階  EL. [redacted] m（S/W）	
2 階  EL. [redacted] m（S/W）	
1 階  EL [redacted] m（S/W）	

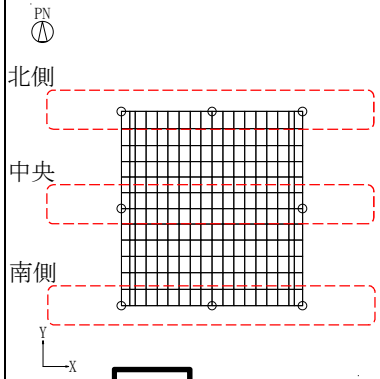
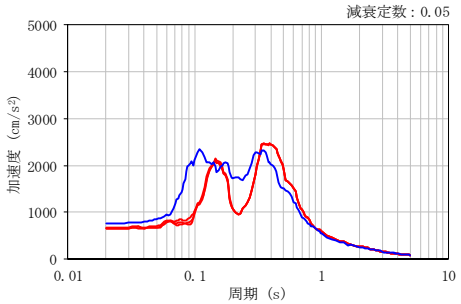
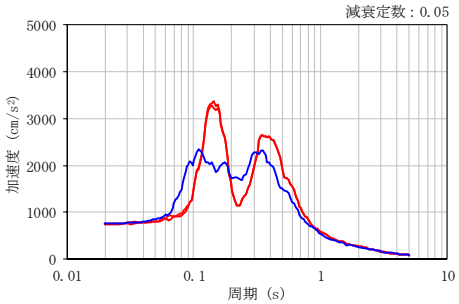
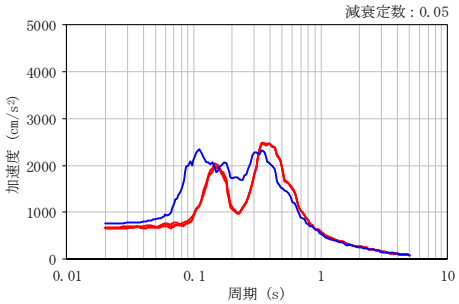
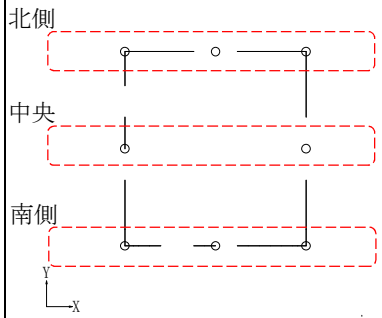
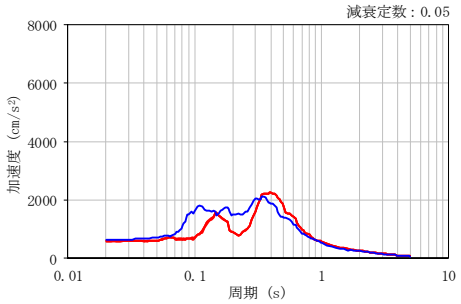
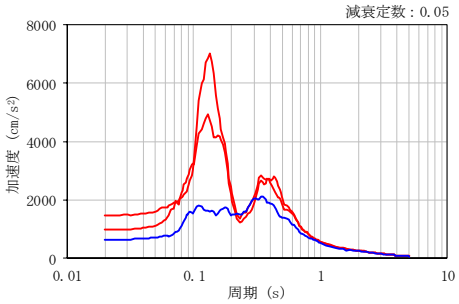
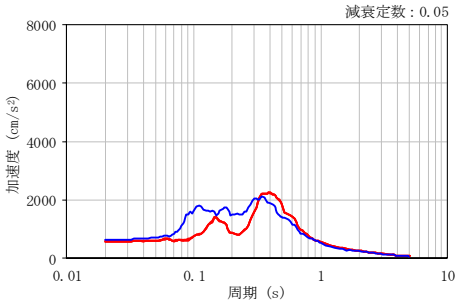
3 次元 FEM，　質点系

表 3－3（3／3）　NS 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
地下１階  EL.[redacted]m（S/W）	
地下２階  EL.[redacted]m（S/W）	

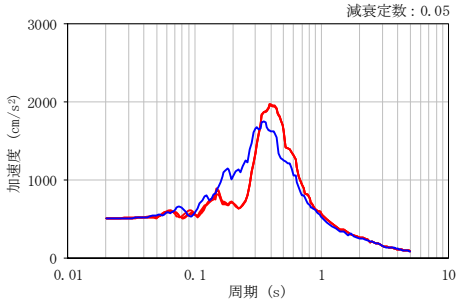
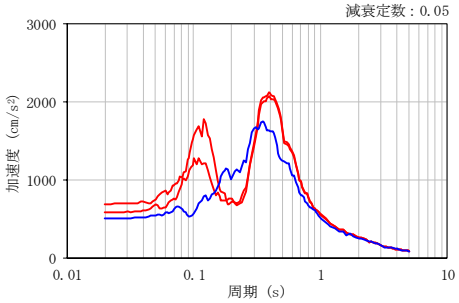
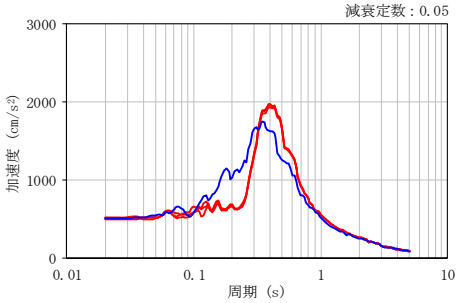
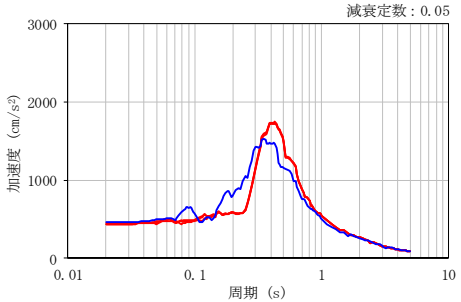
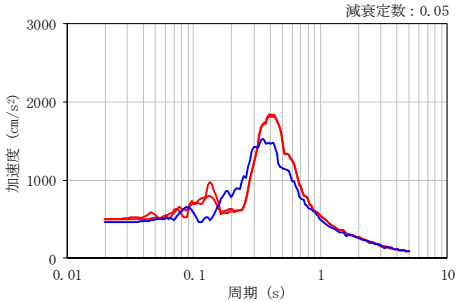
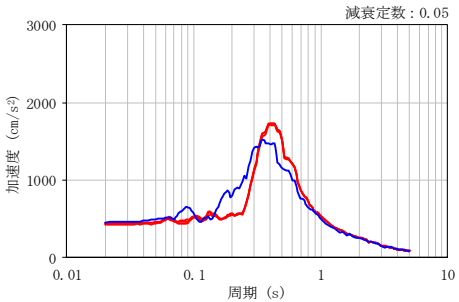
3 次元 FEM，　質点系

表 3－4（1／5）　EW 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
屋上  EL.[redacted] m（I/W）	 	 	
クレーン階  EL[redacted] m（I/W）	 	 	

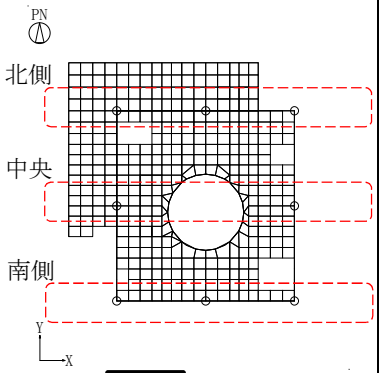
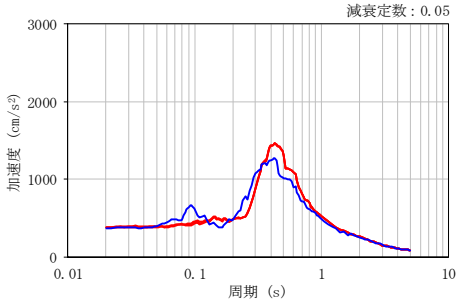
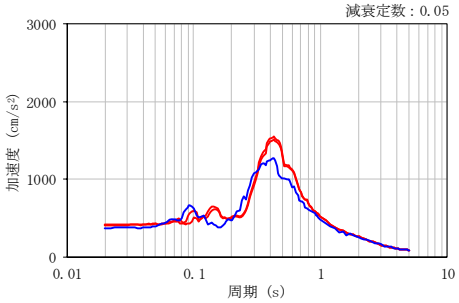
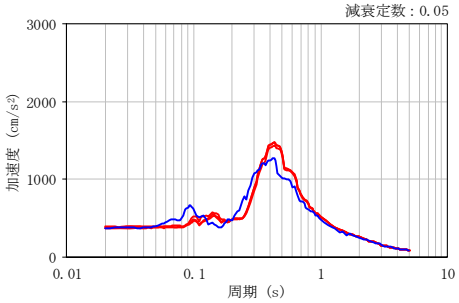
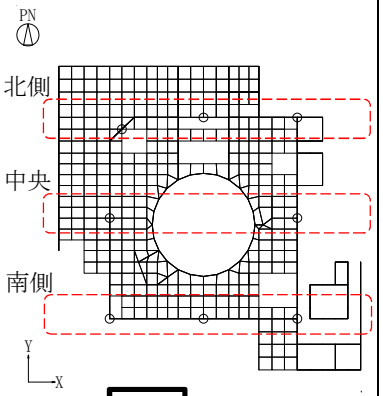
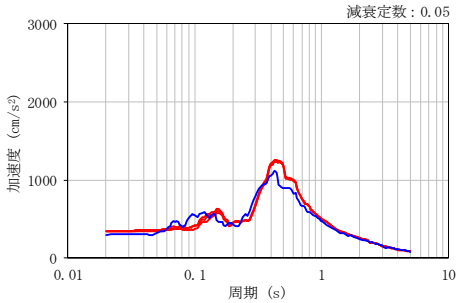
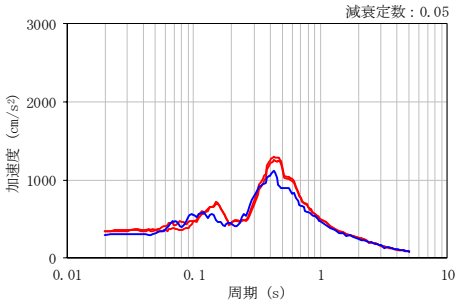
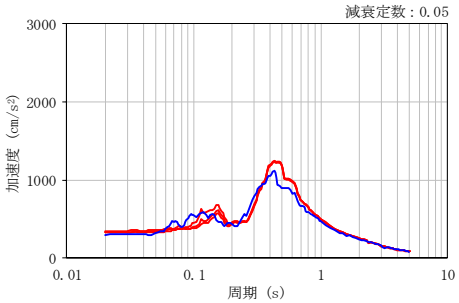
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表３－４（2／5）　EW 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
６階 PN 北側 中央 南側 Y X EL. [redacted] m（I/W）			
５階 PN 北側 中央 南側 Y X EL. [redacted] m（I/W）			

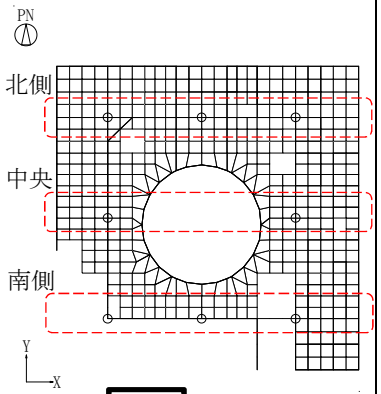
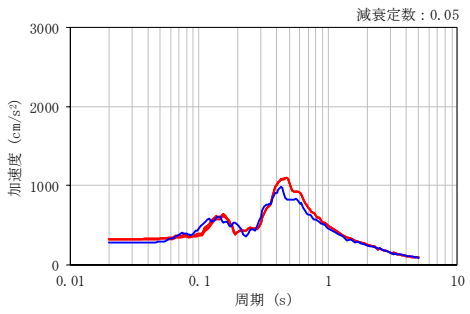
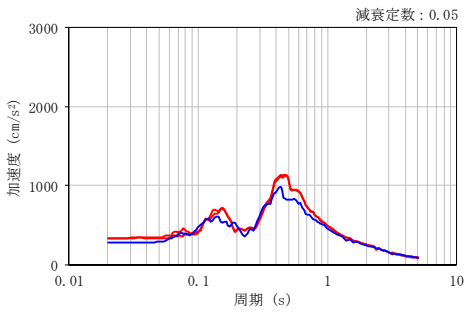
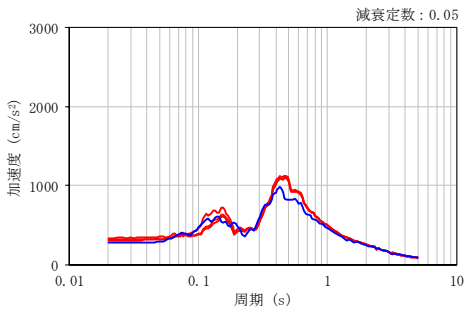
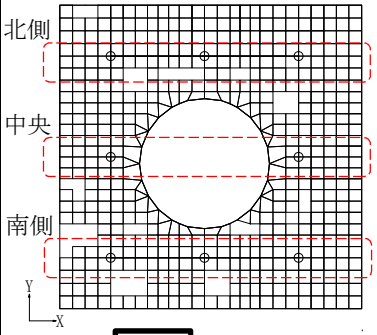
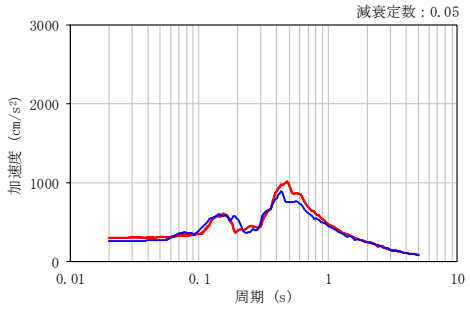
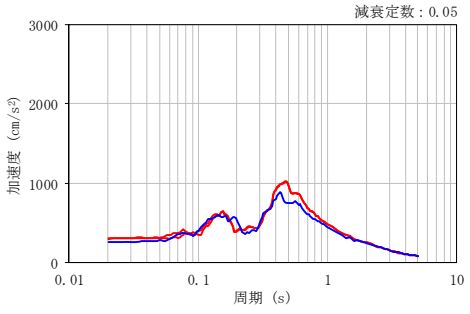
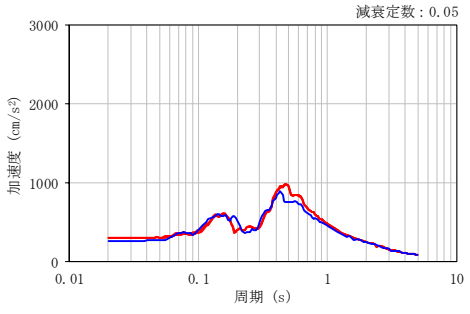
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表３－４（3／5）　EW 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
４階  EL.[redacted] m（I/W）	 	 	
３階  EL.[redacted] m（I/W）	 	 	

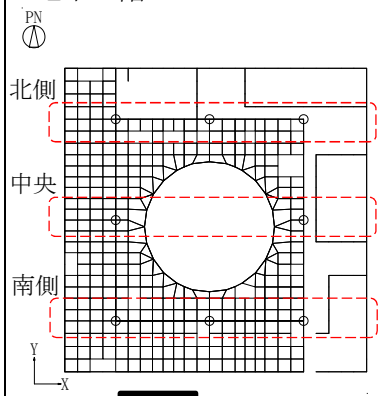
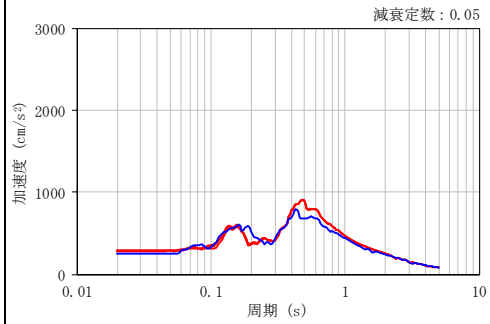
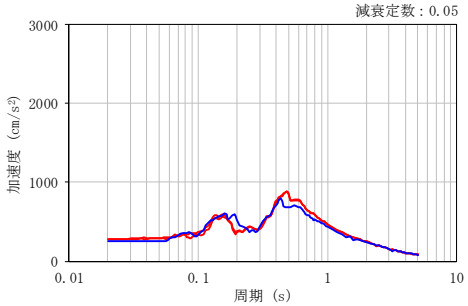
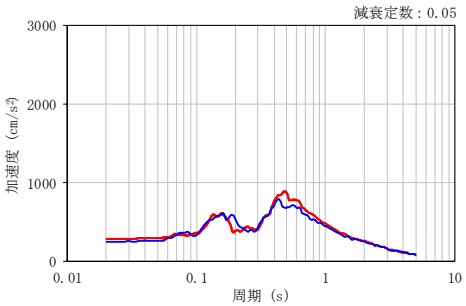
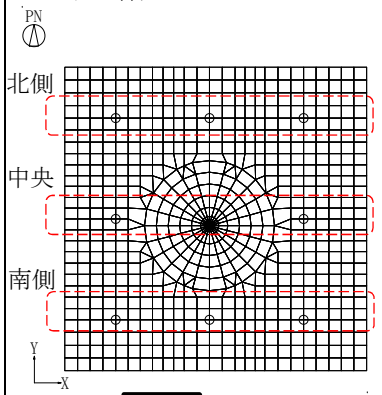
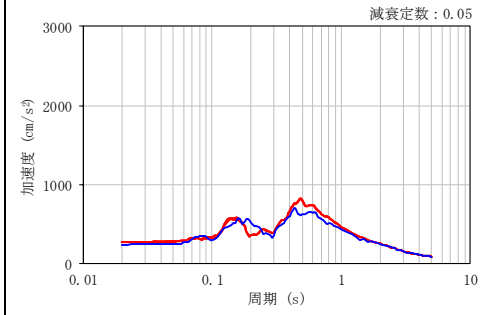
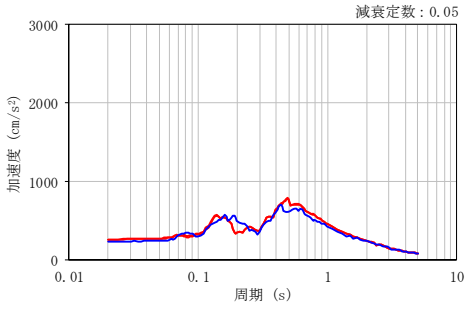
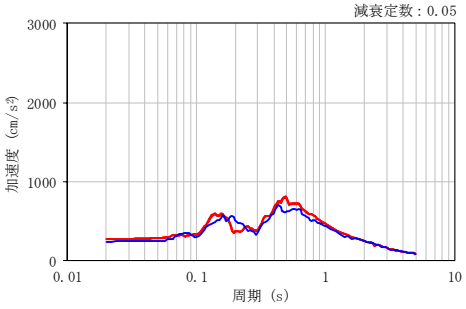
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表３－４（4／5）　EW 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
２階  EL.[redacted] m（I/W）	 	 	
１階  EL.[redacted] m（I/W）	 	 	

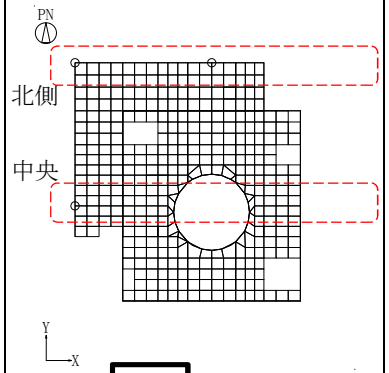
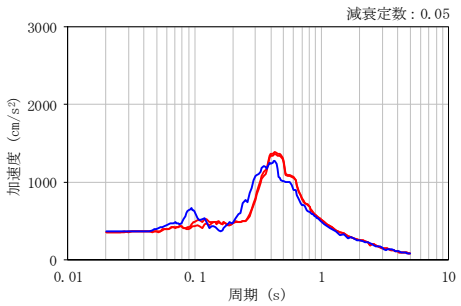
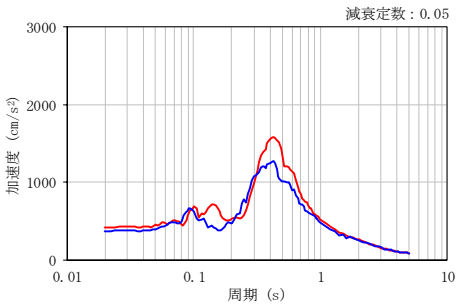
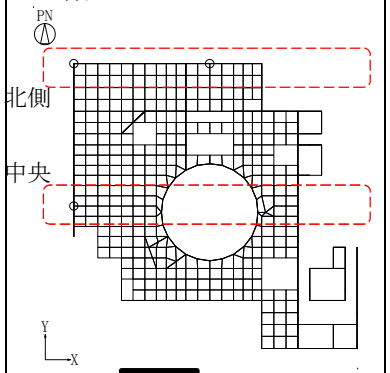
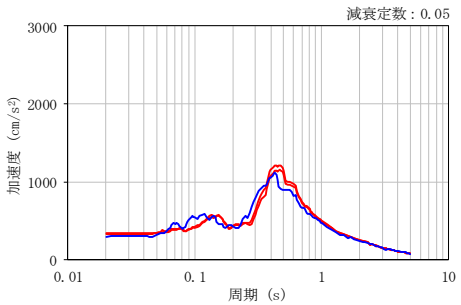
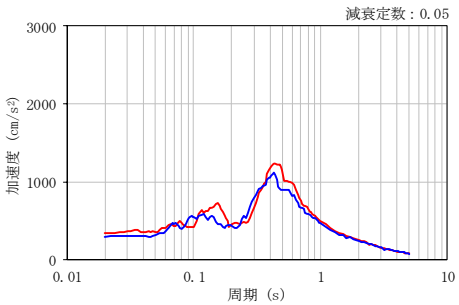
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表３－４（5／5）　EW 方向（I/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
地下１階  EL.[redacted]m（I/W）	 	 	
地下２階  EL.-[redacted]m（I/W）	 	 	

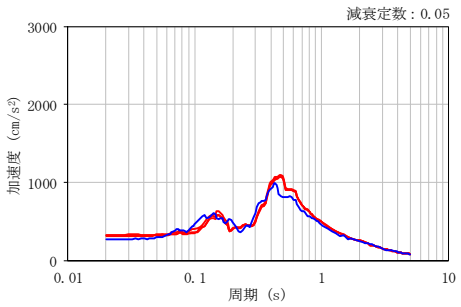
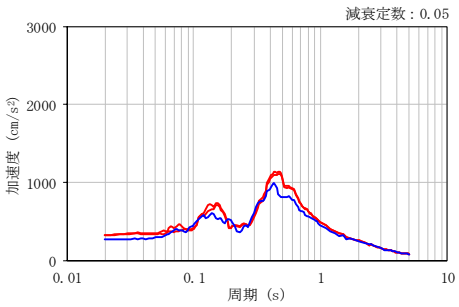
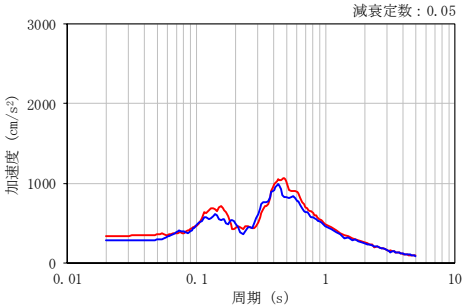
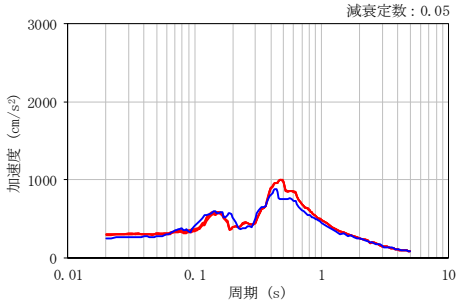
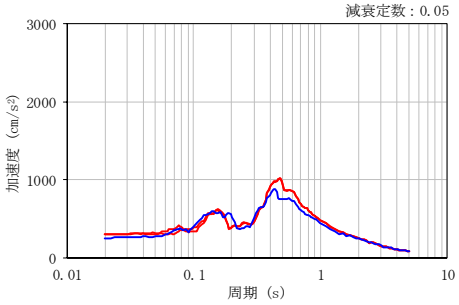
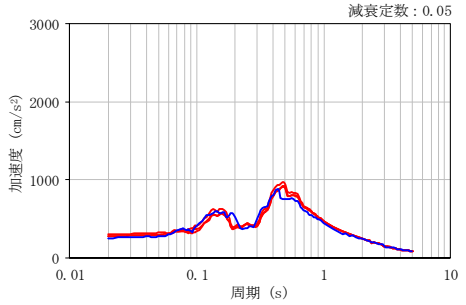
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－5（1／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
４階  EL.[redacted] m（O/W）	 	 	
３階  EL.[redacted] m（O/W）	 	 	

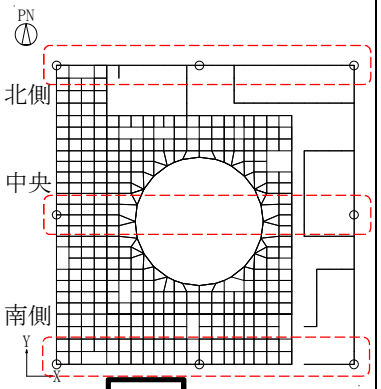
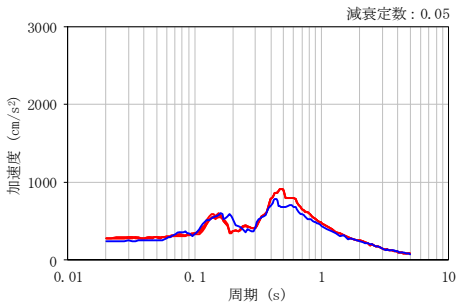
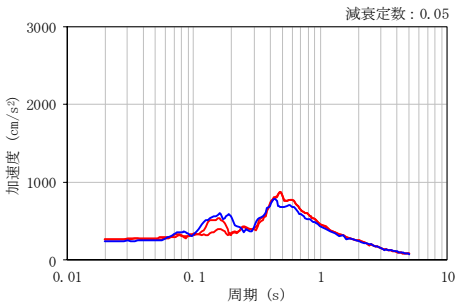
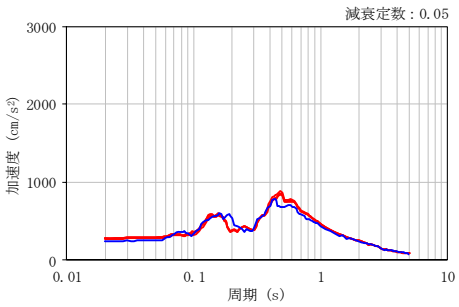
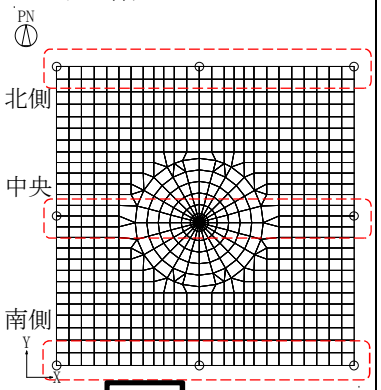
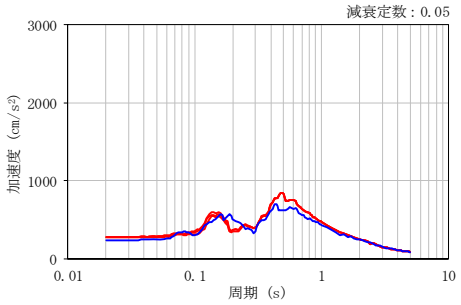
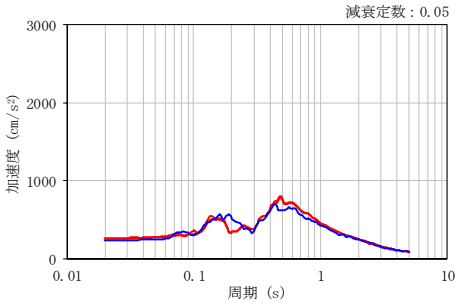
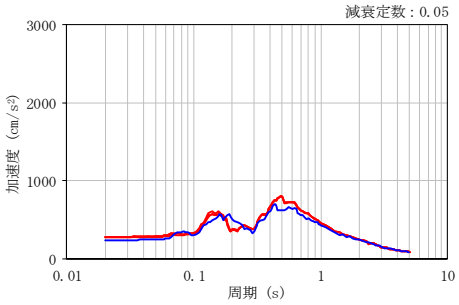
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－5（2／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
２階 PN Y X EL.[redacted]m（O/W）			
１階 PN 北側 中央 南側 Y X EL[redacted]m（O/W）			

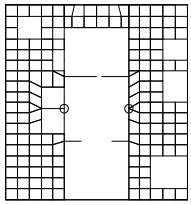
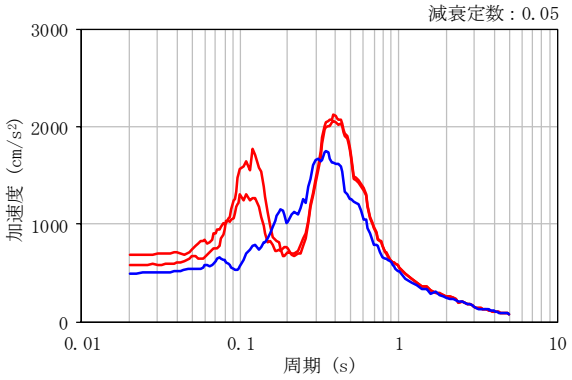
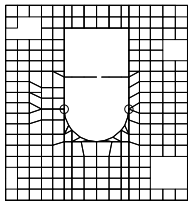
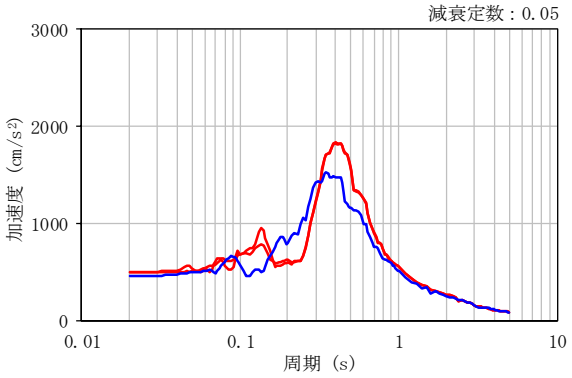
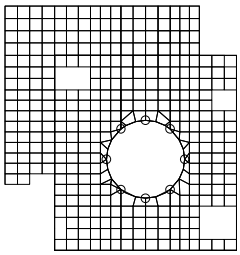
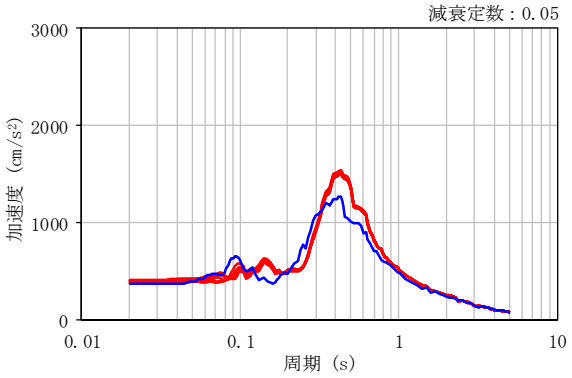
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－5（3／3）　NS 方向（O/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	北側	中央	南側
地下１階  EL.[redacted]m（O/W）	 	 	
地下２階  EL.[redacted]m（O/W）	 	 	

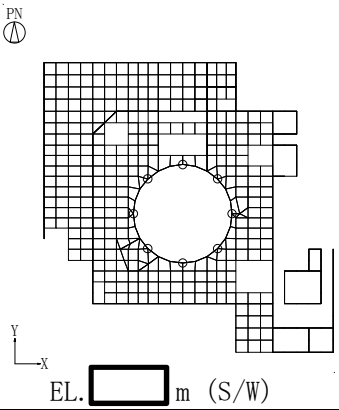
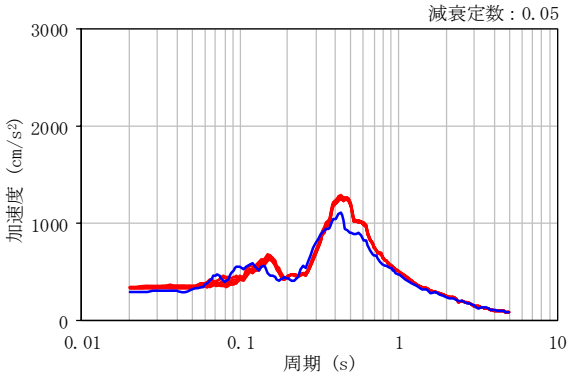
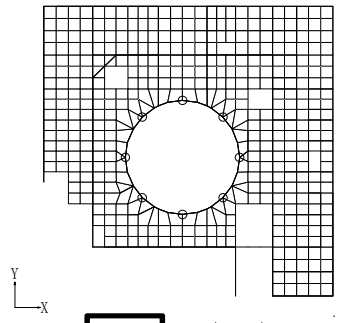
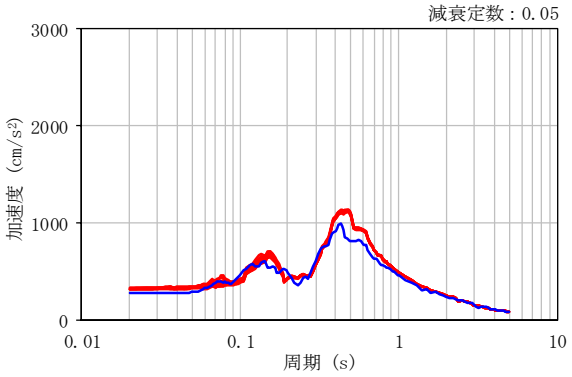
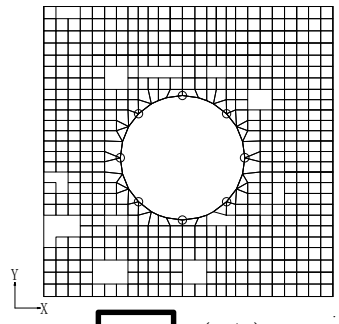
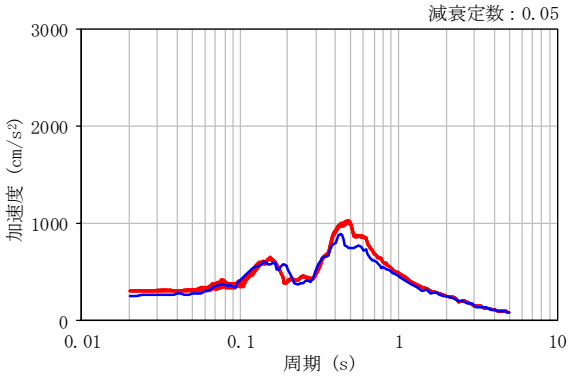
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－6（1／3）　EW 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
6 階 PN  Y X EL. [redacted] m（S/W）	
5 階 PN  Y X EL. [redacted] m（S/W）	
4 階 PN  Y X EL. [redacted] m（S/W）	

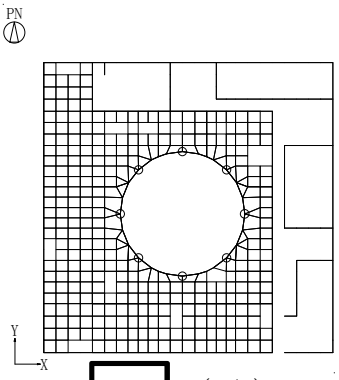
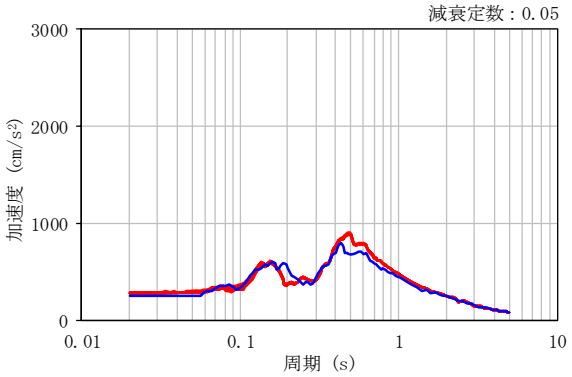
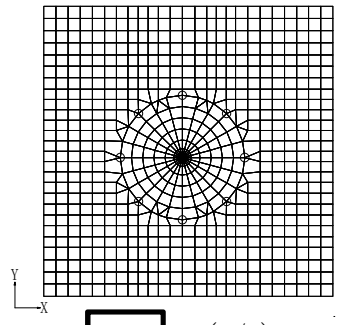
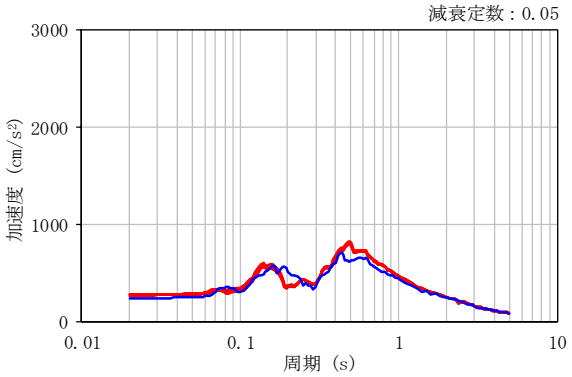
3 次元 FEM，　質点系

表 3－6（2／3）　EW 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
3 階  EL. [redacted] m（S/W）	
2 階  EL. [redacted] m（S/W）	
1 階  EL. [redacted] m（S/W）	

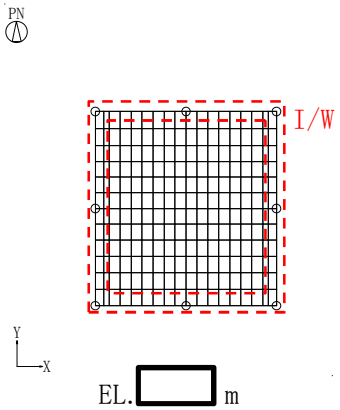
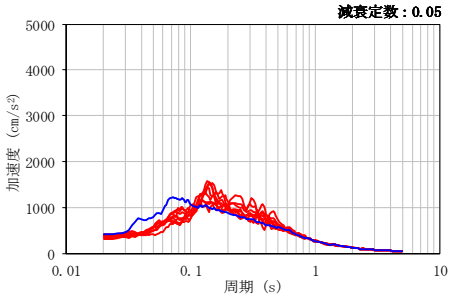
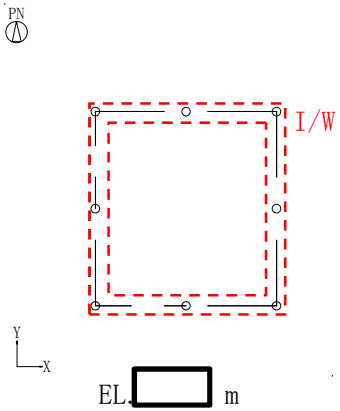
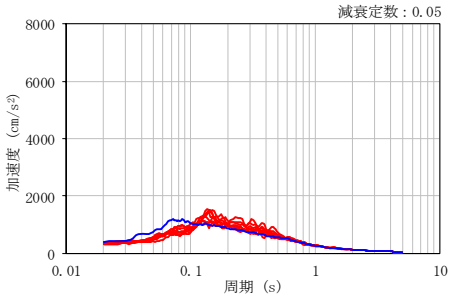
3 次元 FEM，　質点系

表 3－6（3／3）　EW 方向（S/W）の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	床応答スペクトル
地下１階  EL.[redacted]m（S/W）	
地下２階  EL.[redacted]m（S/W）	

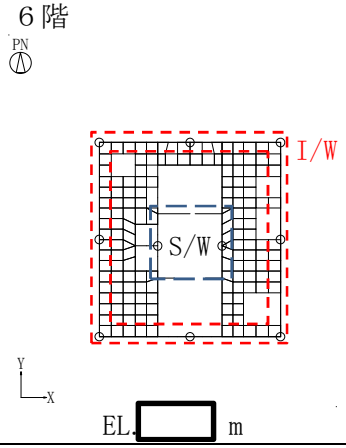
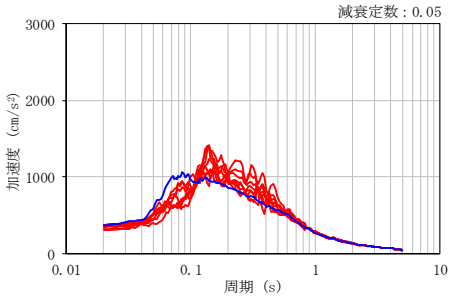
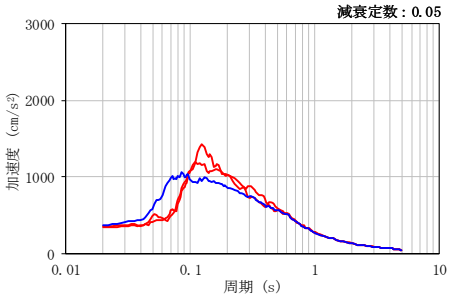
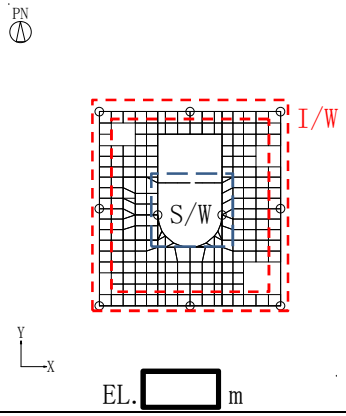
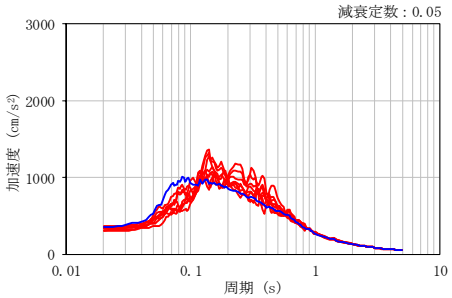
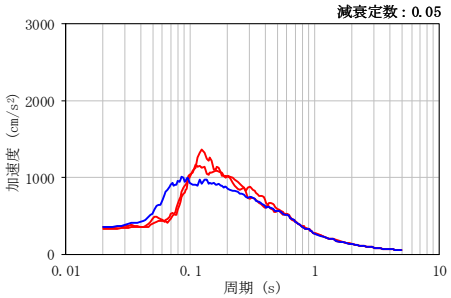
3 次元 FEM,　質点系

表 3－7（1／5）　UD 方向の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	O/W	I/W	S/W
屋上 			
クレーン階 			

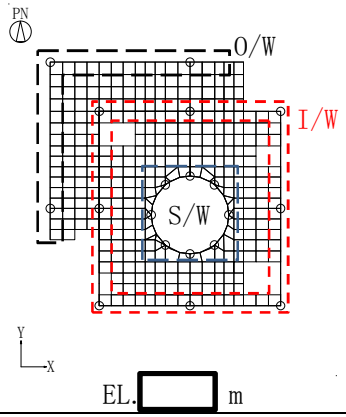
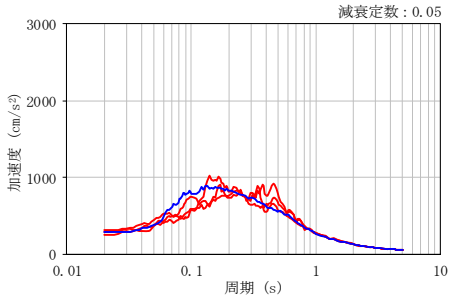
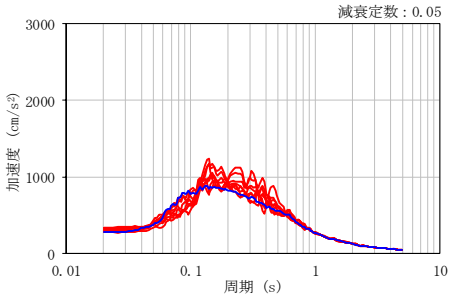
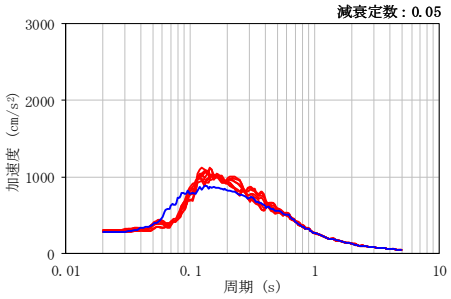
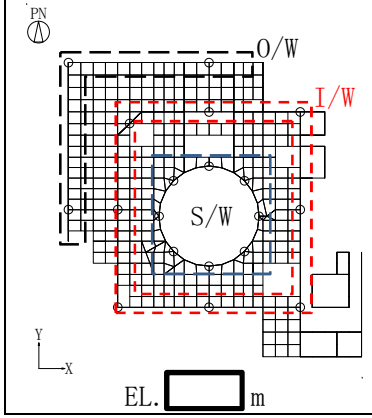
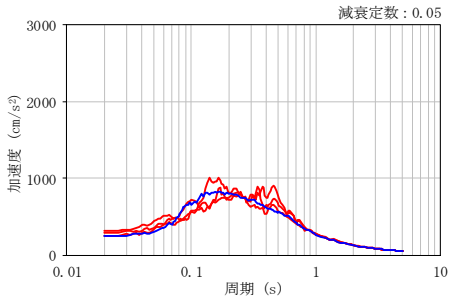
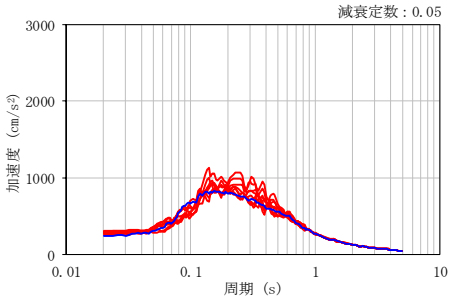
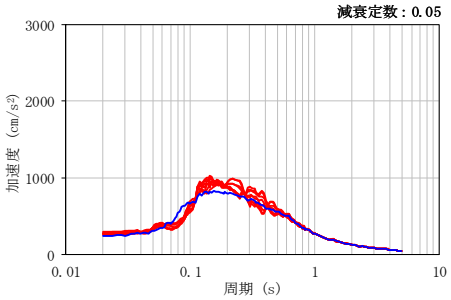
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－7（2／5）　UD 方向の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	O/W	I/W	S/W
6 階  		 	
5 階  		 	

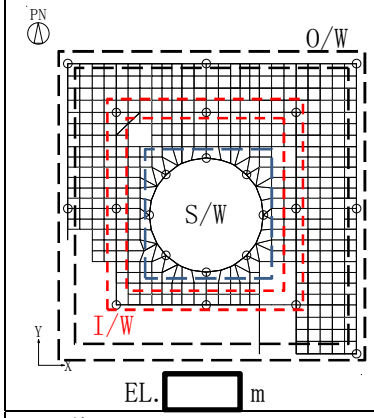
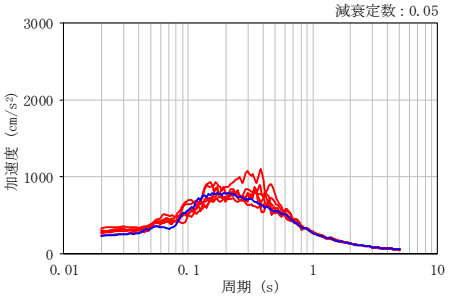
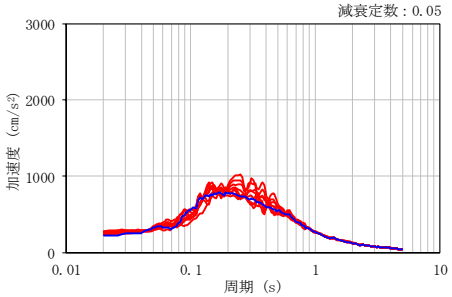
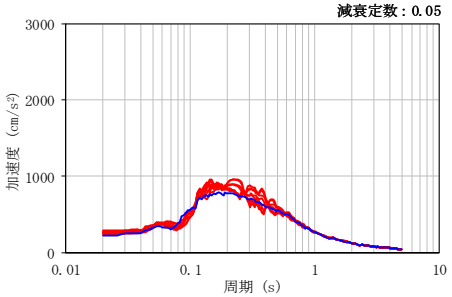
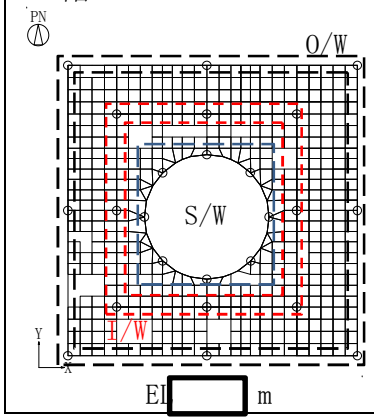
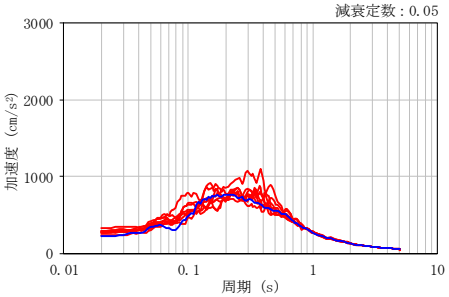
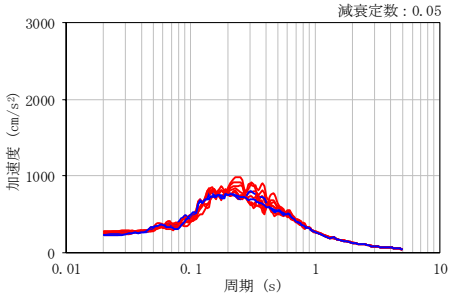
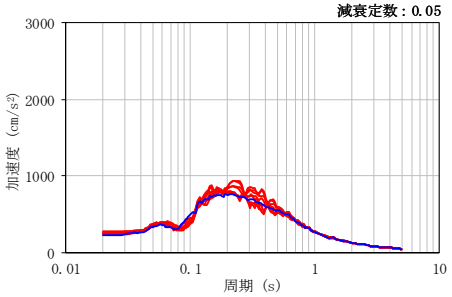
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－7（3／5）　UD 方向の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	O/W	I/W	S/W
４階 			
３階 			

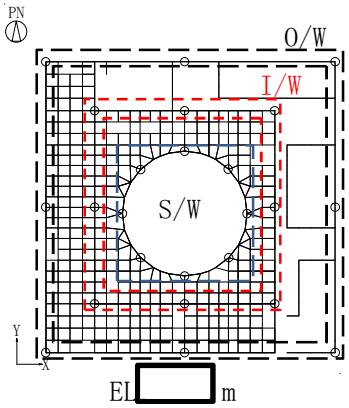
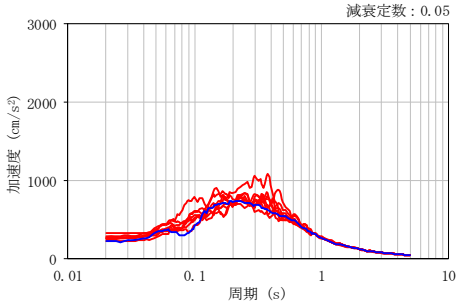
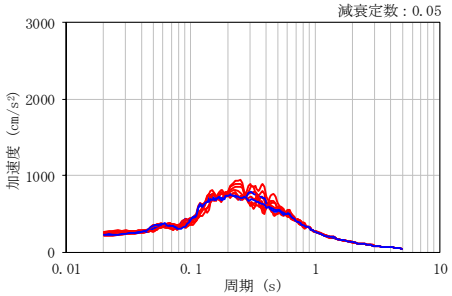
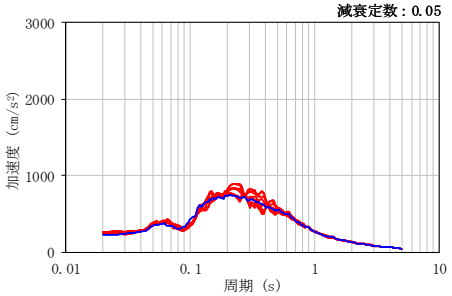
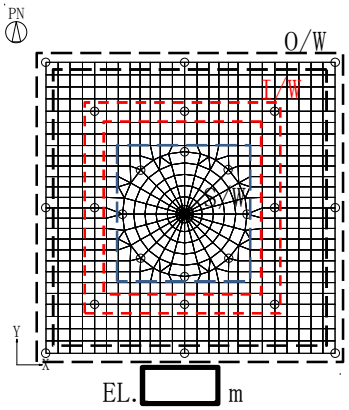
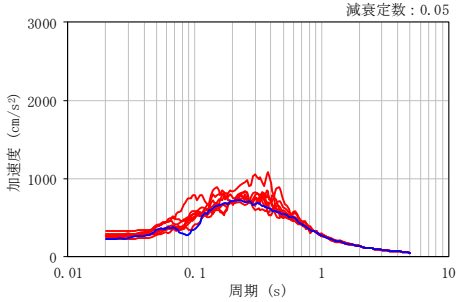
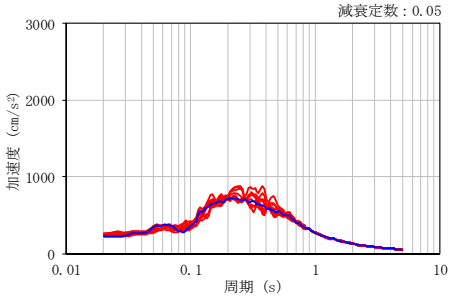
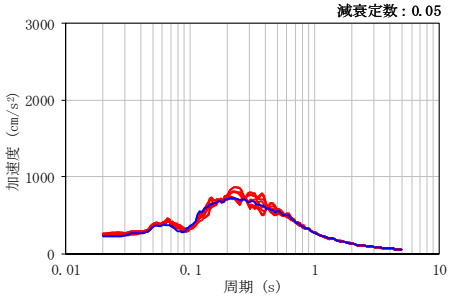
3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－7（4／5）　UD 方向の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	O/W	I/W	S/W
２階 			
１階 			

3 次元ＦＥＭ，　質点系

表 3－7（5／5）　UD 方向の床応答スペクトル（h=5%）

応答評価点	O/W	I/W	S/W
地下１階  	 	 	
地下２階  	 	 	

3 次元ＦＥＭ，　質点系

補６　３次元ＦＥＭモデルによる応答結果の整理

1.　検討概要

質点系モデルによる地震応答解析の妥当性の確認及び建屋・機器の耐震性評価における建屋３次元応答の影響の把握の観点から，各部の加速度や発生応力について整理する。

整理して示す応答結果を以下に示す。

①　基礎上端の格納容器内における鉛直方向の応答加速度
②　基礎盤上の耐震壁のせん断力及び曲げモーメント
③　燃料取替床及び付属棟電気室屋根の面内せん断力
④　使用済燃料プールのせん断力

検討に用いる解析モデルは，別紙 3「３次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析」で示した建屋模擬モデルとし，弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１を水平 2 方向及び鉛直方向に入力した検討を実施する。

検討に用いる解析モデルのケースを表 1－1，地震動の組合せを表 1－2 に示す。

表 1－1　解析モデルの検討ケース

モデルケース	床のモデル化	地盤のモデル化	コンクリート剛性の設定
建屋模擬モデル	床柔	相互作用考慮	設計基準強度

表 1－2　地震動の組合せ

地震動の入力方向	NS 方向	EW 方向	鉛直方向
3 方向同時入力	Ｓ$_d$－Ｄ１	模擬地震波*	Ｓ$_d$－Ｄ１
1 方向入力	Ｓ$_d$－Ｄ１	－	－
	－	Ｓ$_d$－Ｄ１	－

＊：弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の設計用応答スペクトルに適合するが，Ｓ$_d$－Ｄ１とは位相特性が異なる地震波。

2.　基礎上端の格納容器内における鉛直方向の応答加速度

2.1　検討方針

基礎盤上の炉内構造物脚部における加速度応答スペクトルについて確認するとともに，質点系モデルによる加速度応答スペクトルと比較を行う。

質点系モデルと比較する３次元ＦＥＭモデルの加速度応答は，基礎上端（EL.－4.0 m）における格納容器内における鉛直方向の応答とし，比較として耐震壁（O／W，I／W 及び S／W）直下における鉛直方向の応答も示す。地震動の入力方向は表 1－2 に示す「3 方向同時入力」とする。

応答評価点は，耐震壁（O／W，I／W 及び S／W）直下の節点及び格納容器内の節点とし，それぞれ東・西・南・北・北東・南東・北西・南西の 8 点ずつとする。応答評価点を図 2－1 に示す。

図 2－1　応答評価点

2.2　検討結果

各応答評価点での鉛直方向の床応答スペクトルを図 2－2 に示す。

S／W 位置における鉛直方向の応答は質点系モデルによる応答と概ね一致しているが，基礎盤中心からの距離が長くなる I／W 及び O／W 位置ではスペクトルの概形は一致しているもののロッキングに伴う鉛直方向応答によるばらつきが若干見られる。また，格納容器内の節点においては，質点系モデルと比べて短周期側の応答が増幅している。

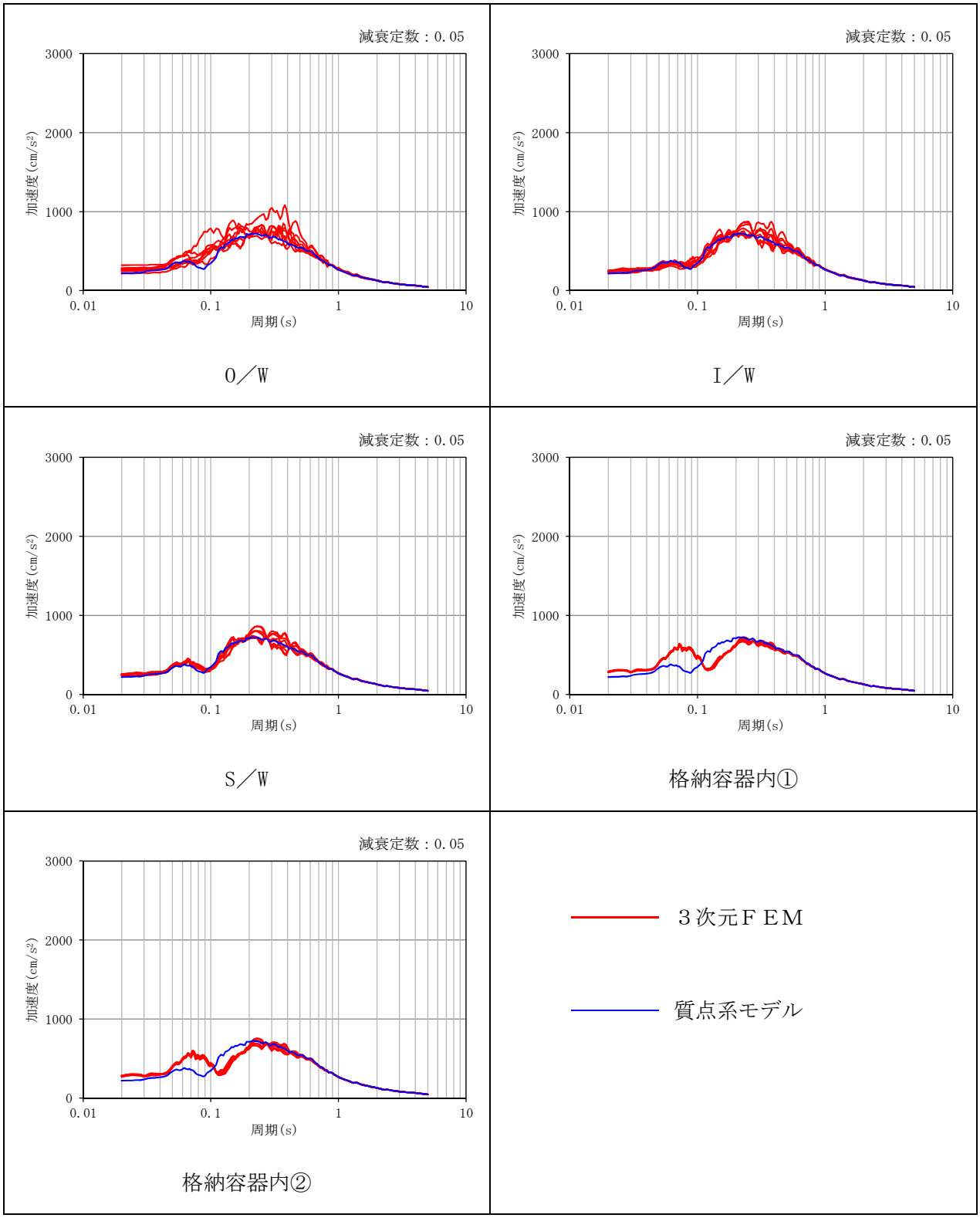


図２－２　床応答スペクトルの比較（鉛直方向）

3.　基礎盤上の耐震壁のせん断力及び曲げモーメント

3.1　検討方針

建屋 3 次元応答の影響の把握の観点から，3 次元ＦＥＭモデルを用いて水平２方向及び鉛直方向入力時と水平１方向入力時の基礎盤直上の耐震壁要素に生じる地震力の比較を行う。また，これら地震力と耐震安全性検討に用いた地震力の比較を行い，耐震安全性検討に用いた地震力の検証を行う。

３次元ＦＥＭモデルによる地震力の算定は，3 次元ＦＥＭモデルに水平 1 方向入力した応答結果及び水平 2 方向及び鉛直方向に同時入力した応答結果を用いることとし，地震動の入力方向は表 3－1 に示すように，NS 方向のせん断力及び曲げモーメントの比較を行う場合には，NS 方向にＳ$_d$－Ｄ１を，EW 方向に模擬地震波を入力し，EW 方向方向のせん断力及び曲げモーメントの比較を行う場合には，その逆の組合せとする。なお，鉛直方向にはＳ$_d$－Ｄ１の鉛直方向成分を入力する。

表 3－1　地震動の組合せ

応答の方向	地震動の入力方向	NS 方向	EW 方向	鉛直方向
NS 方向	3 方向同時入力	Ｓ$_d$－Ｄ１	模擬地震波*	Ｓ$_d$－Ｄ１
	1 方向入力	Ｓ$_d$－Ｄ１	－	－
EW 方向	3 方向同時入力	模擬地震波*	Ｓ$_d$－Ｄ１	Ｓ$_d$－Ｄ１
	1 方向入力	－	Ｓ$_d$－Ｄ１	－

＊：弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の設計用応答スペクトルに適合するが，Ｓ$_d$－Ｄ１とは位相特性が異なる地震波。

3.2　検討結果

３次元ＦＥＭモデルの応答結果より求めた各壁の負担する地震力を表 3－2 に示す。表 3－2 には比較として基礎盤の耐震評価時に各耐震壁から作用させた Sd 地震荷重を示す。また，せん断力，曲げモーメント共に，各壁の負担する地震力の合計値が最大となる時刻での３次元ＦＥＭ値を示す。

I/W，O/W のせん断力は，加振平行方向の耐震壁に生じる面内せん断力と加振直交方向の耐震壁に生じる面外せん断力を加算する。なお，加振直交方向の壁に生じる面外せん断力については NS 方向加振時には東西の耐震壁，EW 方向加振時には南北の耐震壁に等分して加算し，各耐震壁の負担するせん断力を算出した。

S/W のせん断力は，面内せん断力及び面外せん断力の加振平行方向成分を合計した。

曲げモーメントは，各要素に生じる軸力に各耐震壁の図心位置からの距離を乗じて算出した。

表 3-2 に示すように，水平 2 方向及び鉛直方向入力時と水平 1 方向入力時の基礎盤直上の耐震壁要素に生じる地震力は，概ね一致しており，建屋３次元応答の基礎盤の耐震安全性評価に与える影響が小さいことを確認した。

また，3 次元ＦＥＭモデルの応答結果より求めた地震力は，基礎盤の耐震評価時に用いた地震力に比べ小さいことを確認した。これは，3 次元ＦＥＭモデルでは，耐震壁以外の壁もモデル化しているため，耐震壁の負担する地震力が減ったことが要因の一つとして挙げられる。

以上より，基礎盤の耐震安全性検討に用いた地震力に，建屋 3 次元応答の影響は無視できるとともに，地震力の設定は保守的評価となっていることを確認した。

表 3－2　地震力の比較

(a) NS 方向

部　位	せん断力（kN）			曲げモーメント（×10^3 kN･m）		
	地震*荷重	３次元ＦＥＭ		地震*荷重	３次元ＦＥＭ	
		１方向	３方向		１方向	３方向
O／W（東側）	111500	40870	41420	2164	2198	2264
O／W（西側）	109500	44000	45790	2589	1845	1777
I／W（東側）	70200	63600	61600	3578	1425	1491
I／W（西側）	69650	63380	61840	3613	1856	1923
S／W	79280	43940	43500	2732	1247	1241

注記　＊：地震荷重は，基礎盤の耐震評価時に各耐震壁から作用させたＳ$_d$地震荷重を示す。

(b) EW 方向

部　位	せん断力（kN）			曲げモーメント（×10^3 kN･m）		
	地震*荷重	３次元ＦＥＭ		地震*荷重	３次元ＦＥＭ	
		１方向	３方向		１方向	３方向
O／W（北側）	120300	53210	54800	3259	2222	2273
O／W（南側）	115700	46260	48180	1441	1748	1700
I／W（北側）	70180	58670	58130	3560	1961	1999
I／W（南側）	66900	57960	56230	3742	1972	2094
S／W	81520	44530	44110	2953	1612	1603

注記　＊：地震荷重は，基礎盤の耐震評価時に各耐震壁から作用させたＳ$_d$地震荷重を示す。

4.　燃料取替床及び付属棟電気室屋根の面内せん断力

4.1　検討方針

建屋３次元応答の影響の把握の観点から，床柔性やねじれ振動が，床に生じる面内せん断力に与える影響について検討する。検討は，床柔性の影響の確認として，「補 3　３次元 FEM モデルによるシミュレーション解析結果」に示す面外方向の加速度の大きくなる燃料取替床（EL.46.5m），ねじれ振動による影響の確認として，北西角部のみに付属棟が配置される電気室屋根（EL.30.3m）におけるスラブの面内せん断力について確認する。

検討に用いる解析モデルは，別紙 3「３次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析」で示した建屋模擬モデルとし，弾性設計用地震動Ｓ$_{d}$－Ｄ１を水平 2 方向及び鉛直方向に入力した検討を実施する。地震動の入力方向は表 1－2 に示す「3 方向同時入力」とする。

面内せん断力の検討に用いる要素を図 4－2 に示す。

図 4－1　応答評価位置

4.2　検討結果

EL.46.5m 及び EL.30.3m における床の面内せん断応力度の最大値を図 4－2 に示す。

最大面内せん断応力度は，EL.46.5m で 0.979 N/mm^2，EL.30.3m で 0.849 N/mm^2 であり，コンクリートの短期許容せん断応力度 1.06 N/mm^2 以下となることを確認した。

また，Ｓ$_s$地震時に対する評価として，Ｓ$_d$－Ｄ１による地震応答解析によって生じる面内せん断応力度を 2 倍した値について検討を行う。2 倍した場合の面内せん断力の最大値は，EL.46.5m で 1.96 N/mm^2，EL.30.3m で 1.70 N/mm^2 であり，コンクリートの短期許容せん断応力度を超えるため，以下の式によって算出したスラブの許容せん断応力度 τ_Aを超えないことを確認する。スラブの配筋を表 4－1 に示す。

$$\tau_A = p_s \cdot {}_sf_t$$

ここで，p_s　：各方向の鉄筋比

${}_sf_t$　：鉄筋の短期許容引張応力度（345 N/mm^2）

Ｓｓ地震時に対する評価結果を表 4－2 に示す。許容面内せん断応力度に対する発生面内せん断応力の比は EL.46.5m で 0.422，EL.30.3m で 0.688 となり，スラブの許容せん断応力度以下となることを確認した。

以上より，床柔性やねじれ振動が，床に生じる面内せん断力に与える影響について検討し，耐震安全性評価結果に影響を与えないことを確認した。

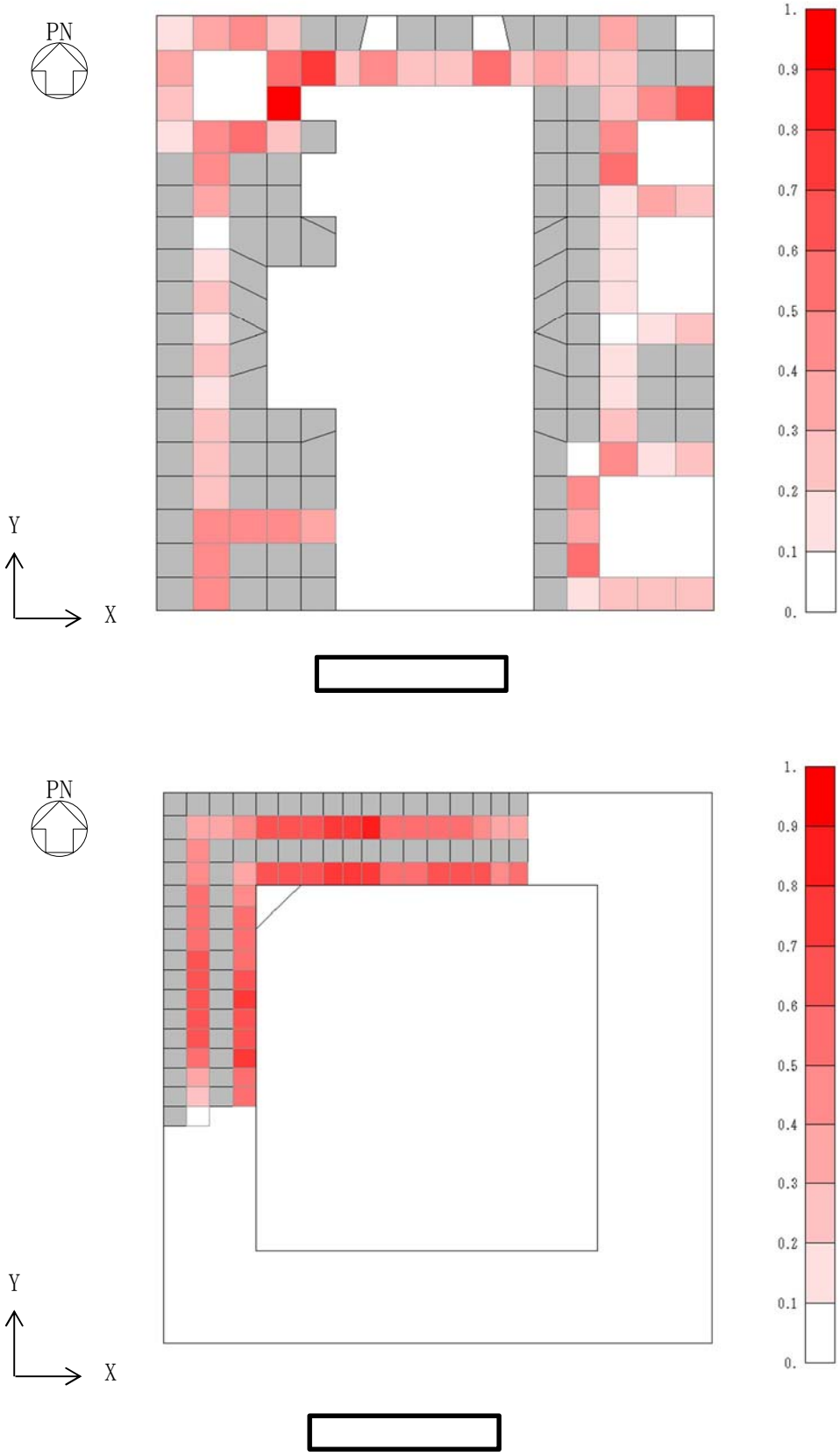


図 4－2　最大面内せん断応力度分布

表 4－1　配筋

標高 EL. (m)	スラブ厚 (mm)	方向	上端筋	下端筋
46.5m	500	NS	D25@150	D25@150
		EW	D25@150	D25@150
30.3m	400	NS	D19@200	D19@200
		EW	D19@200	D19@200

表 4－2　評価結果

標高 EL.	46.5m		30.3m	
方向	NS	EW	NS	EW
発生面内せん断応力度	1.96	1.96	1.70	1.70
鉄筋比	0.0135	0.0135	0.00716	0.00716
鉄筋許容引張応力度	345	345	345	345
許容面内せん断応力度	4.65	4.65	2.47	2.47
検定比	0.422	0.422	0.688	0.688
判定	可	可	可	可

5.　使用済燃料プールのせん断力

5.1　検討方針

建屋３次元応答の影響の把握の観点から，３次元ＦＥＭモデルを用いて水平２方向及び鉛直方向入力時と水平１方向入力時の使用済燃料プールの西側プール壁及び東側プール壁に生じる地震力の比較を行う。また，これら地震力と耐震安全性検討に用いた地震力の比較を行い，耐震安全性検討に用いた地震力の検証を行う。

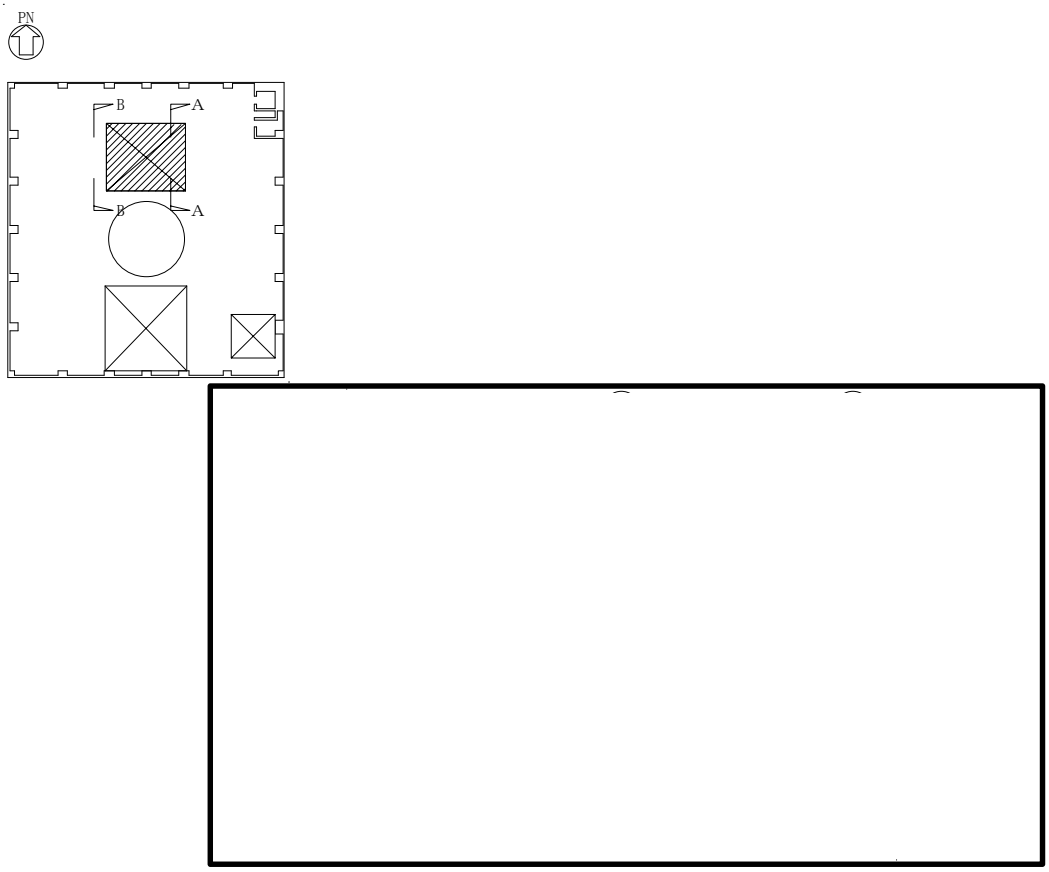
３次元ＦＥＭモデルによる地震力の算定は，３次元ＦＥＭモデルに水平１方向入力した応答結果及び水平２方向及び鉛直方向に同時入力した応答結果を用いることとし，地震動の入力方向は表 5－1 に示すように，NS 方向にＳ$_d$－Ｄ１を，EW 方向に模擬地震波を入力する。なお，鉛直方向にはＳ$_d$－Ｄ１の鉛直方向成分を入力する。

検討に用いる解析モデルは，別紙 3「３次元ＦＥＭモデルによる地震応答解析」で示した建屋模擬モデルとし，面内せん断力の検討に用いる要素を図 5－1 に示す。

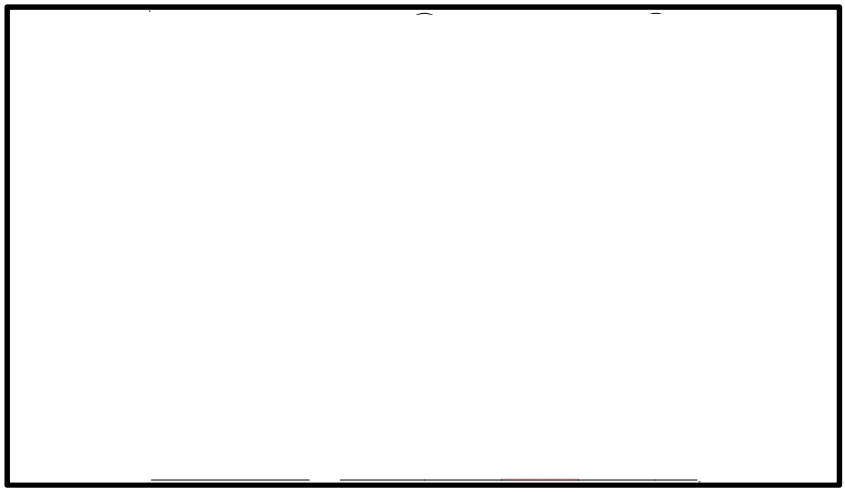
表 5－1　地震動の組合せ

応答の方向	地震動の入力方向	NS 方向	EW 方向	鉛直方向
NS 方向	3 方向同時入力	Ｓ$_d$－Ｄ１	模擬地震波*	Ｓ$_d$－Ｄ１
	1 方向入力	Ｓ$_d$－Ｄ１	－	－

＊：弾性設計用地震動Ｓ$_d$－Ｄ１の設計用応答スペクトルに適合するが，Ｓ$_d$－Ｄ１とは位相特性が異なる地震波。



(a) 東側プール壁（A－A 矢視）



(b) 西側プール壁（B－B 矢視）

図 5－1　応答評価位置

5.2　検討結果

３次元ＦＥＭモデルの応答結果より求めた西側プール壁及び東側プール壁の負担する地震力を表 5－2 に示す。表 5－2 には比較として使用済燃料プールの耐震評価時に作用させた Sd 地震荷重を示す。このとき，各プール壁の負担する地震力の合計値が最大となる時刻での３次元ＦＥＭ値を示す。

せん断力は，各プール壁に生じる面内せん断力の合計値とする。

表 5－2 に示すように，水平２方向及び鉛直方向入力時と水平１方向入力時の使用済み燃料プールの壁要素に生じる地震力は，概ね一致しており，建屋３次元応答の基礎盤の耐震安全性評価に与える影響が小さいことを確認した。

また，３次元ＦＥＭモデルの応答結果より求めた地震力は，使用済燃料プールの耐震評価時に用いた地震力に比べ小いことを確認した。これは，３次元ＦＥＭモデルでは，３次元ＦＥＭモデルでは，使用済燃料プールに取り付く床もモデル化しているため，プール壁の負担する地震力が減ったことが要因の一つとして挙げられる。

以上より，使用済燃料プールの耐震安全性検討に用いた地震力に，建屋３次元応答の影響は無視できるとともに，地震力の設定は保守的評価となっていることを確認した。

表 5－2　地震力の比較

部　位	せん断力（kN）		
	地震*荷重	３次元 FEM	
		１方向	３方向
使用済燃料プール	14100	10100	9910

注記　＊：地震荷重は，使用済燃料プールの耐震評価時にプール壁端部から作用させたＳ$_d$地震荷重を示す。

補 7　機器設置位置付近における応答

1.　概要

原子炉建屋 6 階における面外方向の応答が大きくなる傾向が確認されたことから，本資料では，機器等の設置位置付近の節点における応答性状を把握する目的で，以下の節点に対する床応答スペクトルを示す。

応答評価位置は，機器等が設置されている壁及び床とし，燃料取替床上部の壁（EL.46.5m～63.65m），燃料取替床（EL.46.5m）の使用済み燃料プール周辺及びプールの床版（EL.38.8m）とする。応答評価位置を図 1-1 に示す。

壁について，それぞれの面外方向の 1 方向入力による面外方向の加速度応答スペクトルを図 1-2 に示す。また，プール周辺及びプールの床版について，水平 2 方向及び鉛直方向のそれぞれ 1 方向入力による加速度応答スペクトルを図 1-3～図 1-6 に示す。

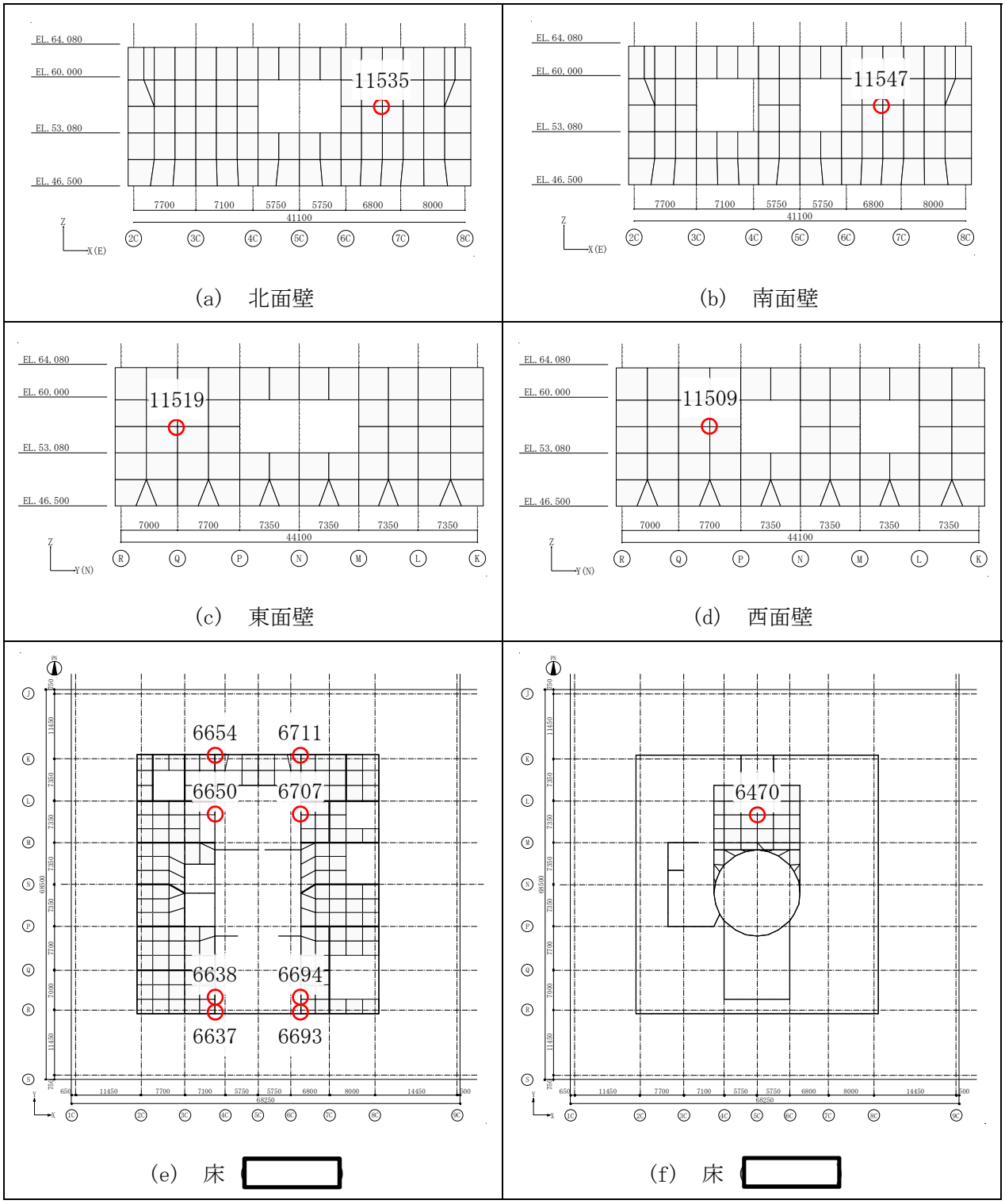
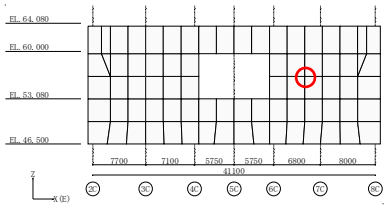
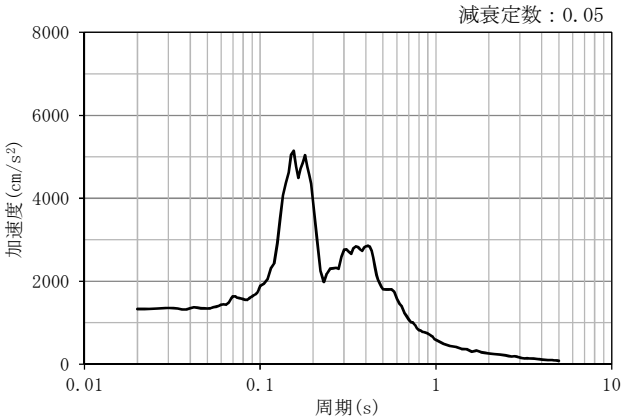

EL. 64. 080
EL. 60. 000
EL. 53. 080
EL. 46. 500
11535
7700 7100 5750 5750 6800 8000
41100
2C 3C 4C 5C 6C 7C 8C
(a) 北面壁
11547
(b) 南面壁
11519
7000 7700 7350 7350 7350 7350
44100
R Q P N M L K
(c) 東面壁
11509
(d) 西面壁
6654 6711
6650 6707
6638 6694
6637 6693
(e) 床
6470
(f) 床

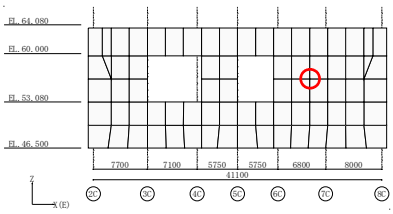
図 1-1　応答評価位置



節点番号：11535
NS 方向応答

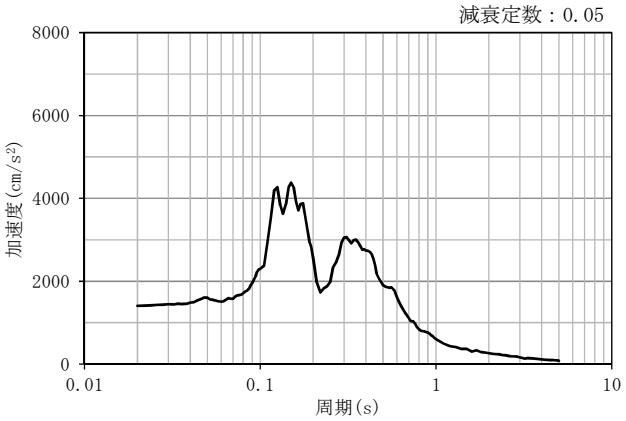
(a)　北面

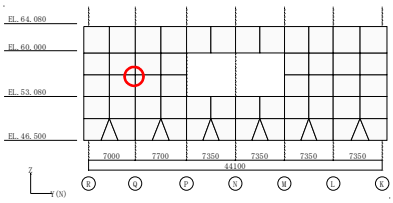




節点番号：11547
NS 方向応答

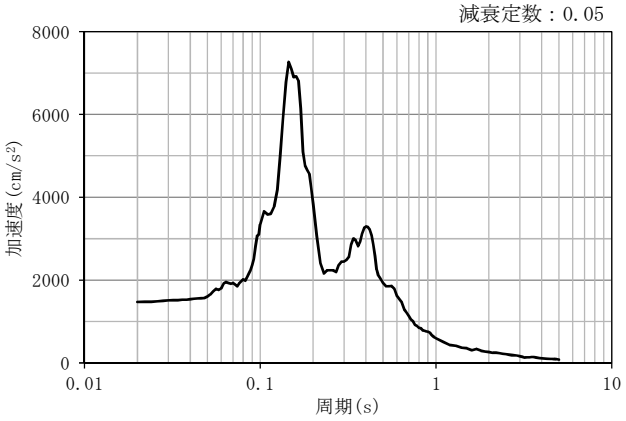
(b)　南面

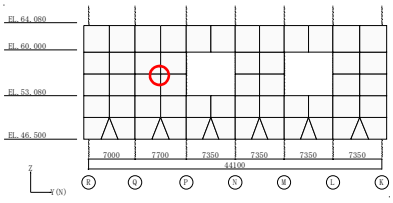




節点番号：11519
EW 方向応答

(c)　東面





節点番号：11509
EW 方向応答

(d)　西面

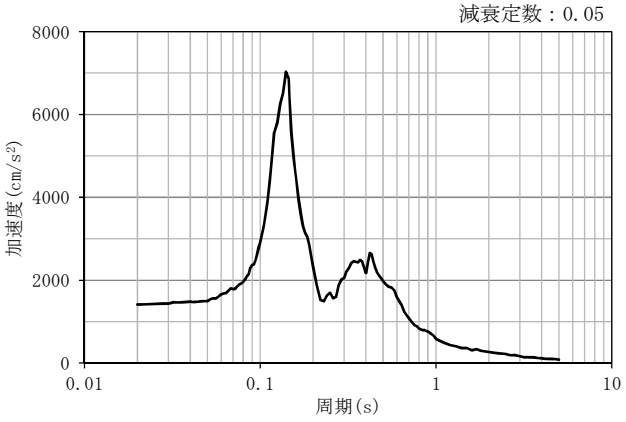
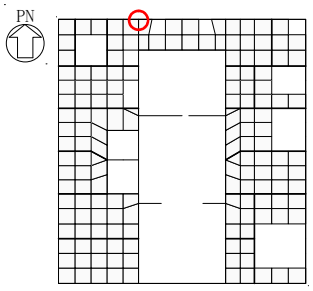
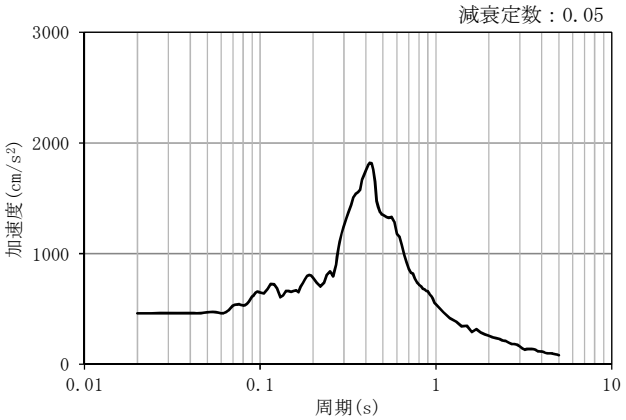
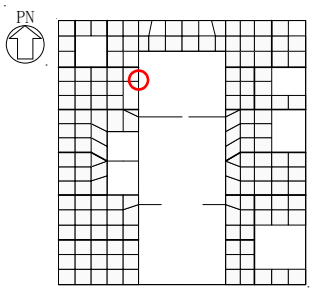


図 1-2　加速度応答スペクトル（壁）

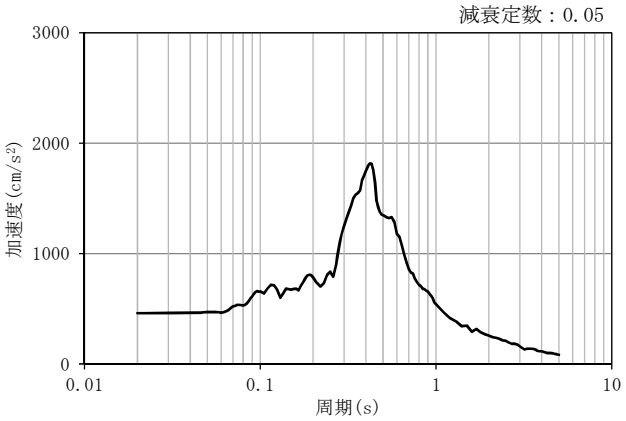


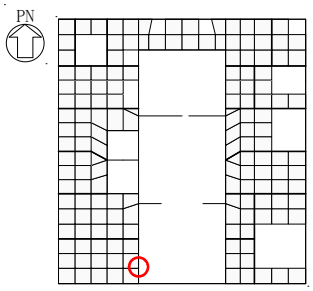
節点番号：6654



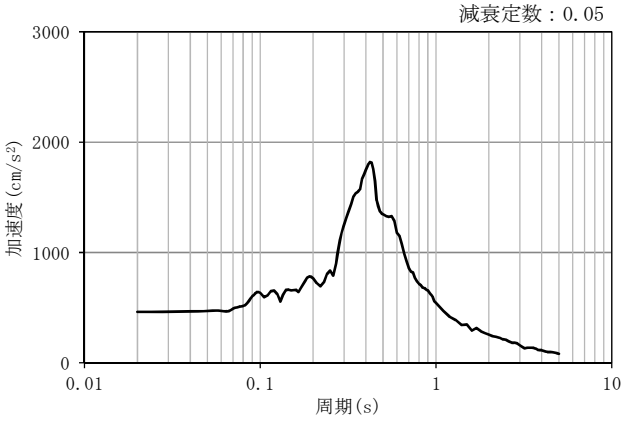


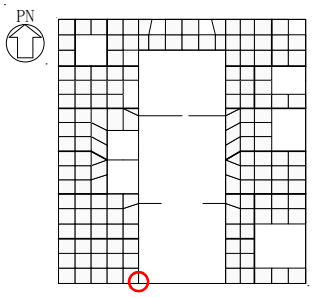
節点番号：6650





節点番号：6638





節点番号：6637

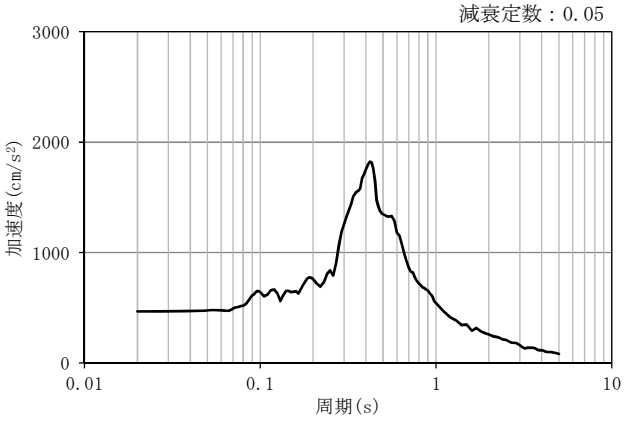
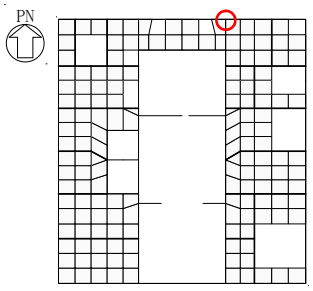
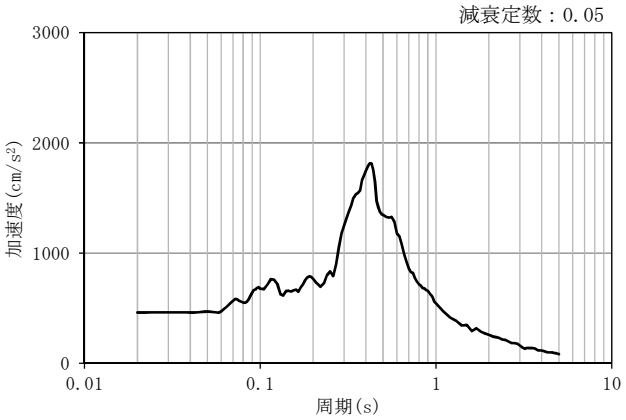
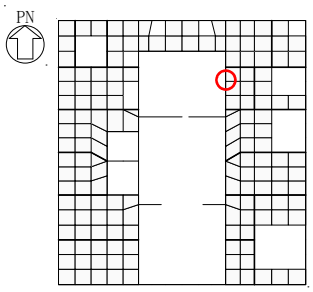


図 1-3（1／2）　加速度応答スペクトル（プール周辺，NS 方向応答）

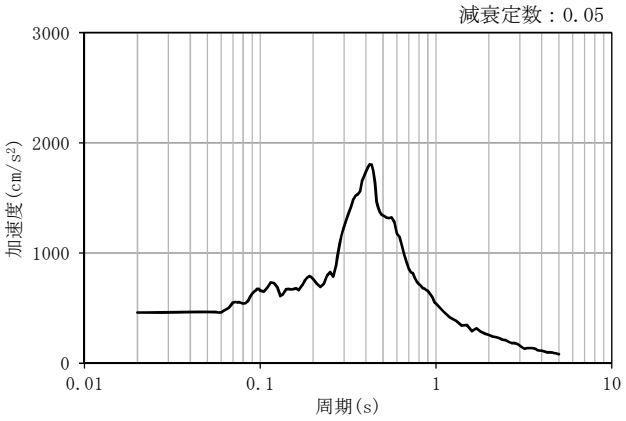


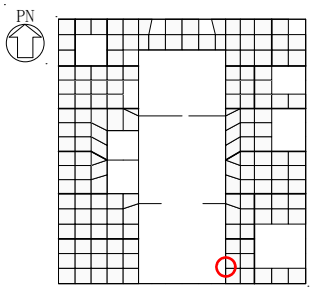
節点番号：6711



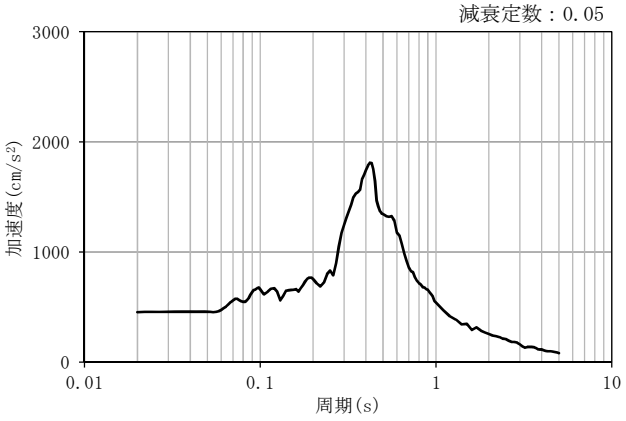


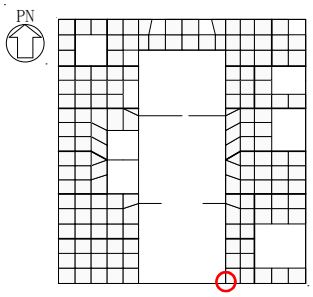
節点番号：6707





節点番号：6694





節点番号：6693

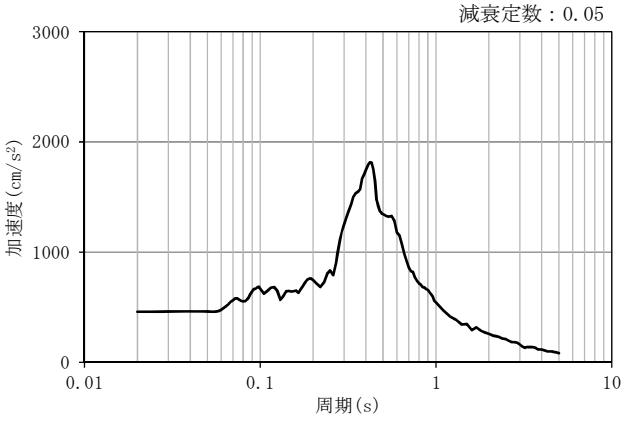
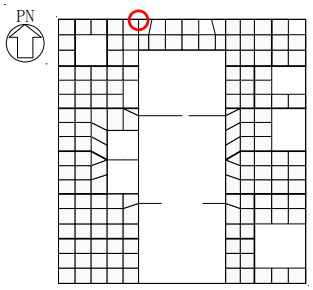
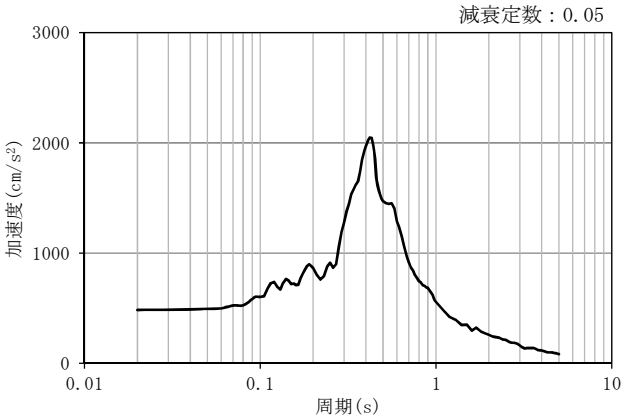
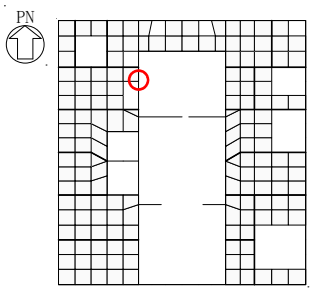


図 1-3（2／2）　加速度応答スペクトル（プール周辺，NS 方向応答）

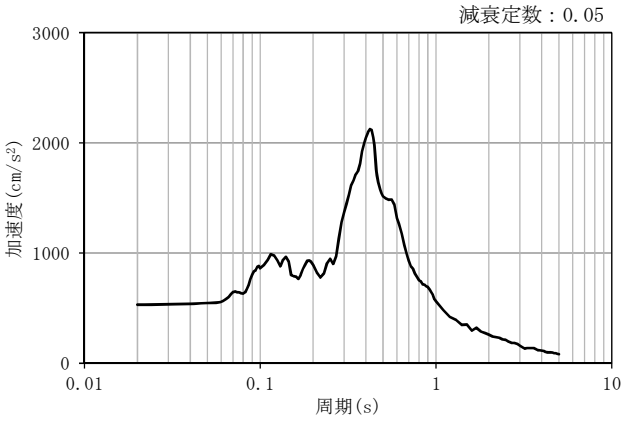


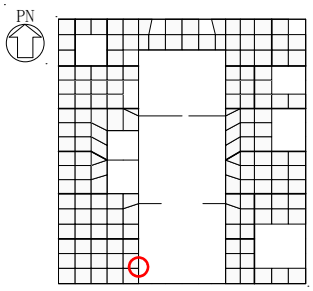
節点番号：6654



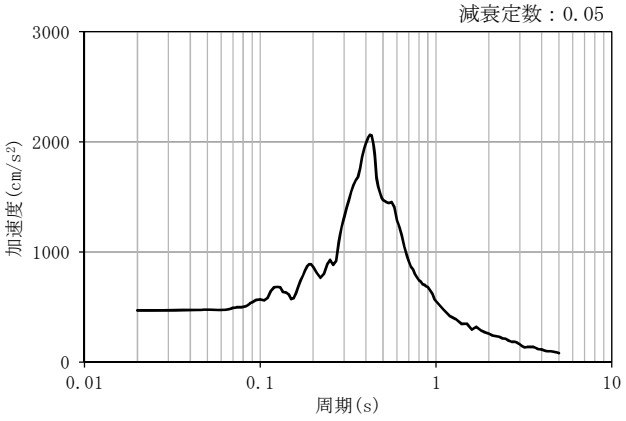


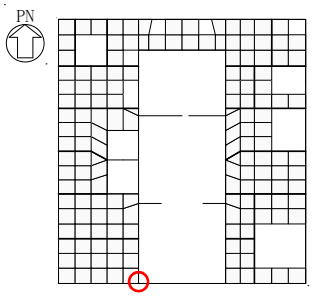
節点番号：6650





節点番号：6638





節点番号：6637

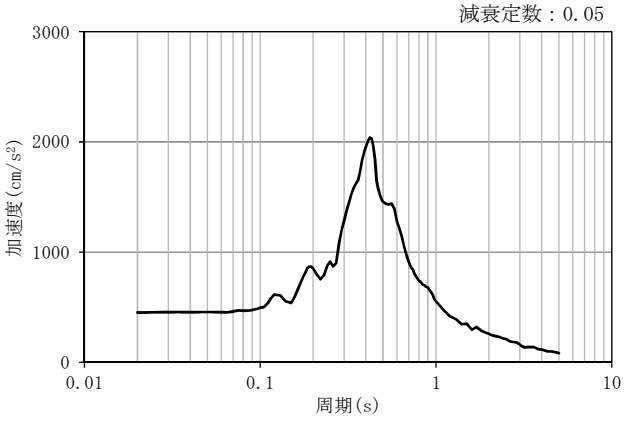
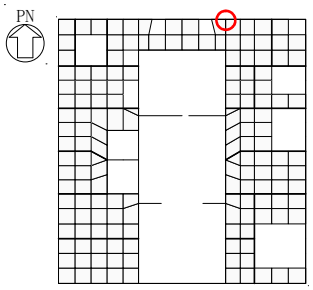
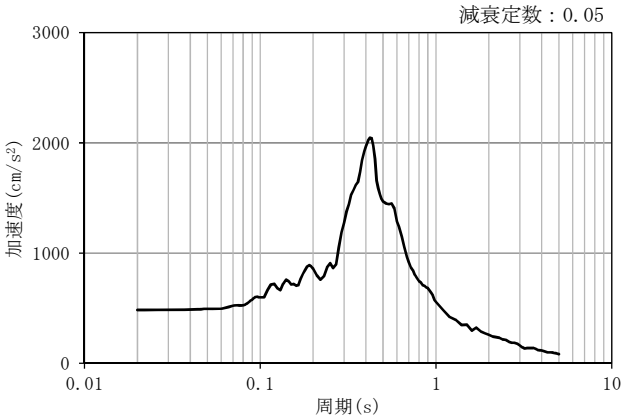
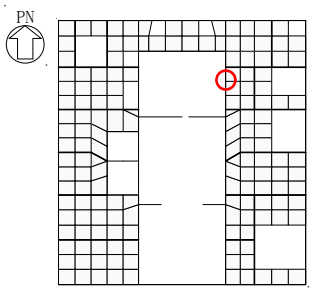


図 1-4（1／2）　加速度応答スペクトル（プール周辺，EW 方向応答）

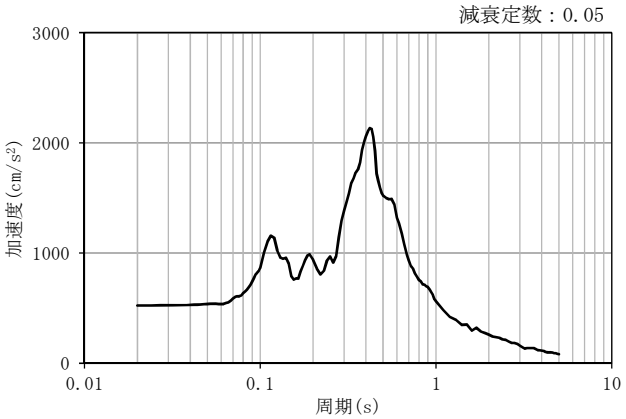


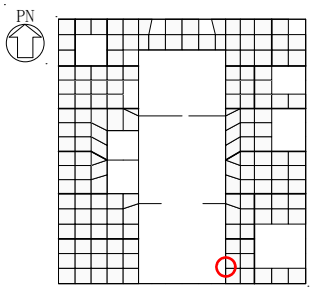
節点番号：6711



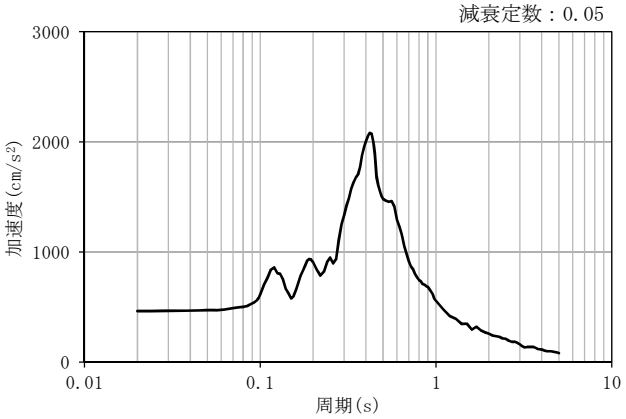


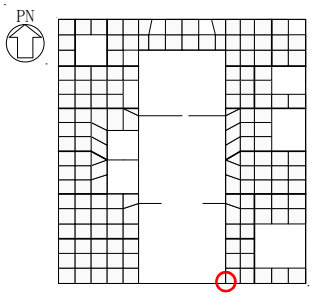
節点番号：6707





節点番号：6694





節点番号：6693

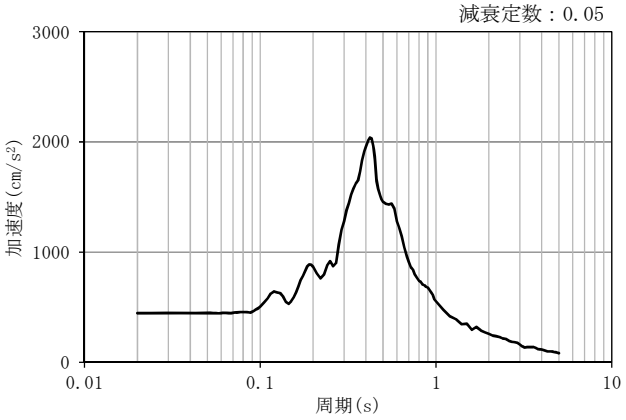
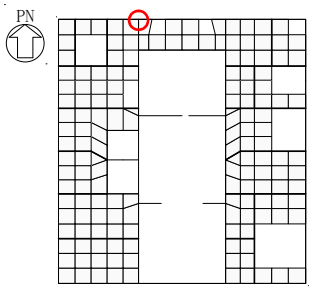
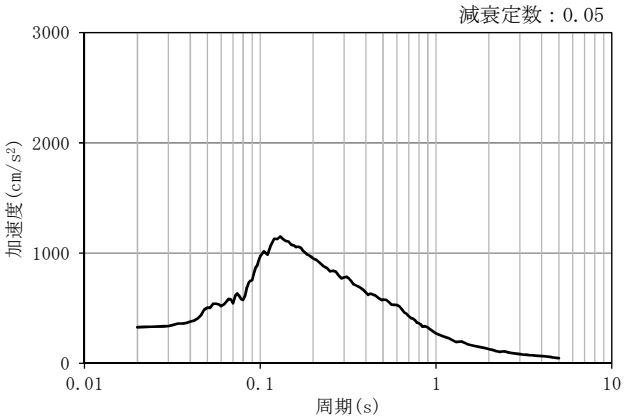
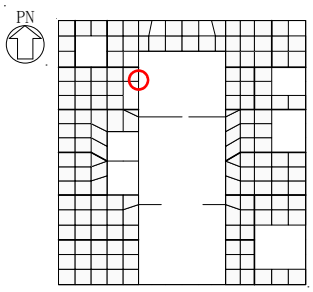


図 1-4（2／2）　加速度応答スペクトル（プール周辺，EW 方向応答）

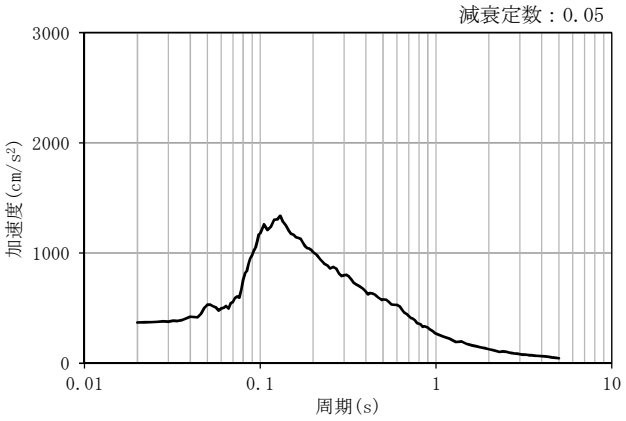


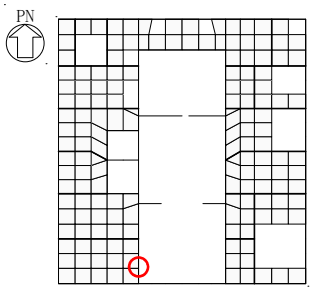
節点番号：6654



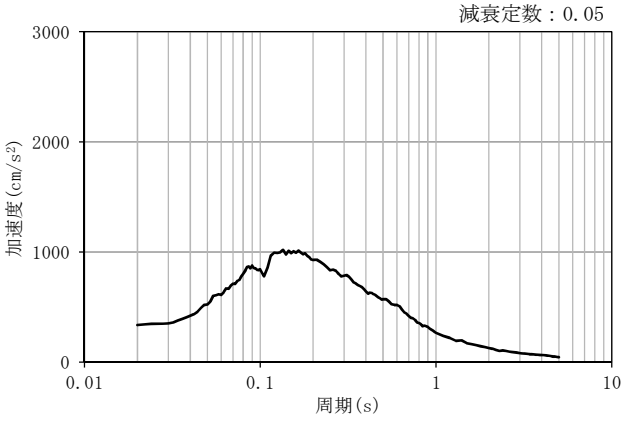


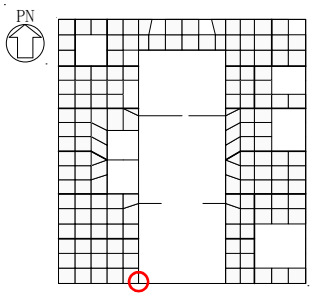
節点番号：6650





節点番号：6638





節点番号：6637

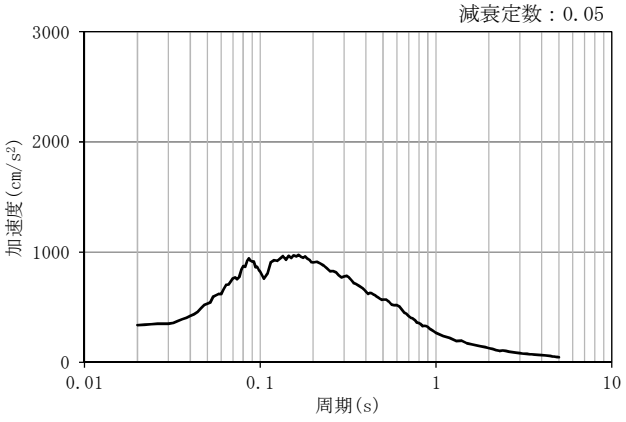
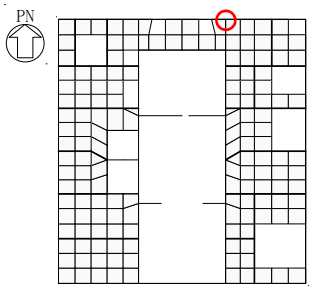
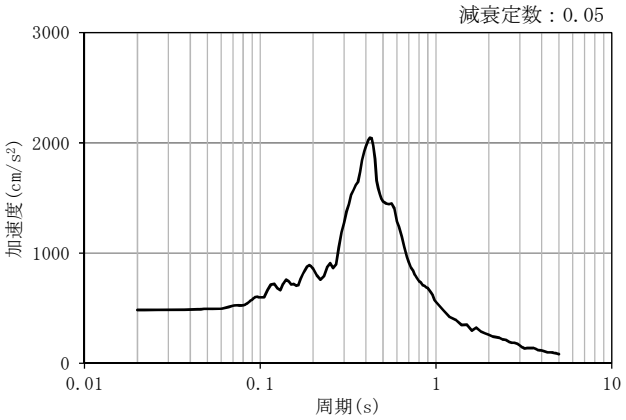
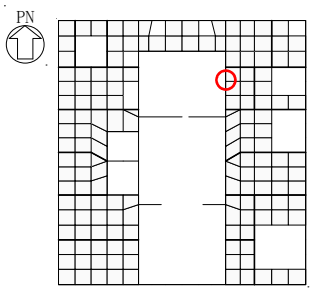


図 1-5（1／2）　加速度応答スペクトル（プール周辺，UD 方向応答）

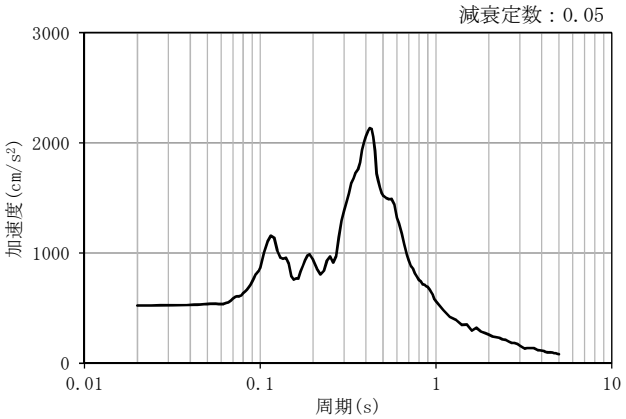


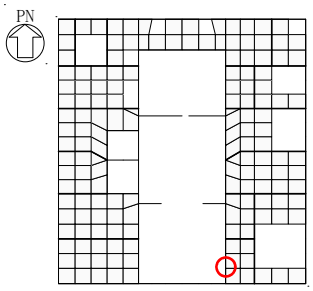
節点番号：6711



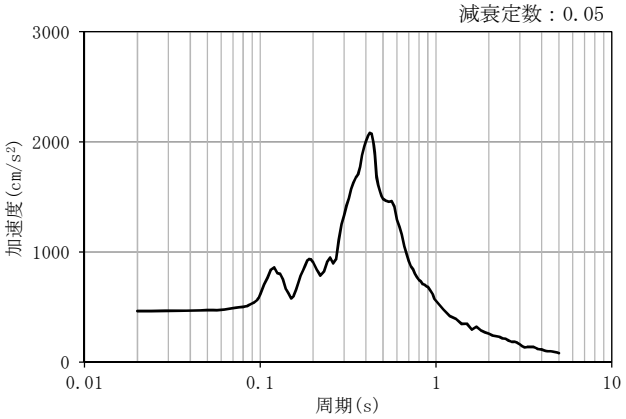


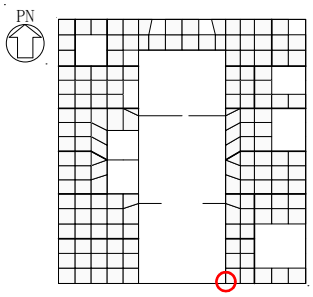
節点番号：6707





節点番号：6694





節点番号：6693

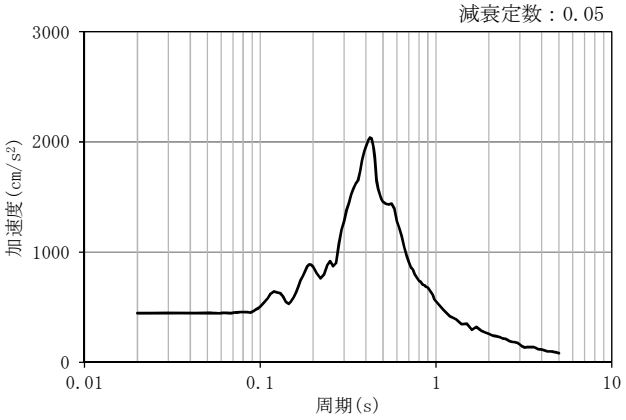
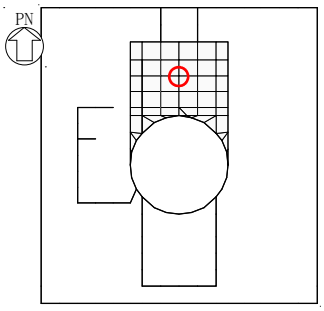
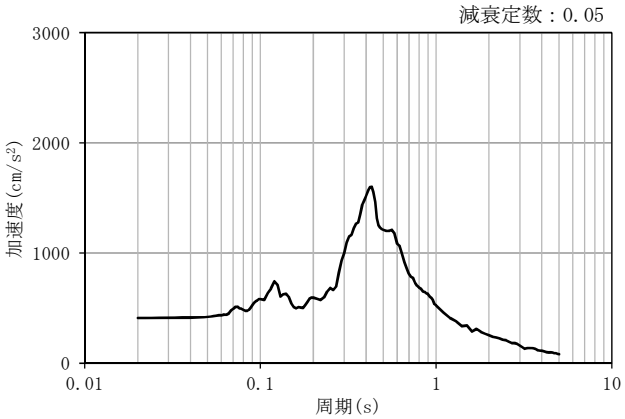


図 1-5（2／2）　加速度応答スペクトル（プール周辺，UD 方向応答）

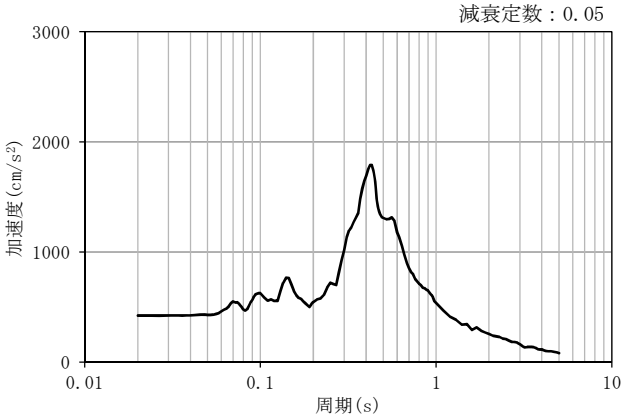


節点番号：6470

NS 方向応答



EW 方向応答



UD 方向応答

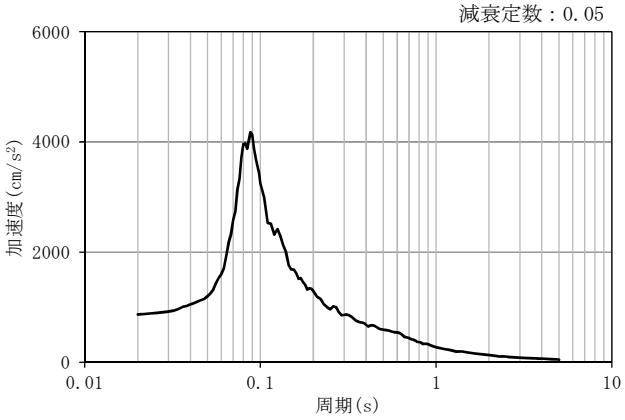


図 1-6　加速度応答スペクトル（プール床版）

参考資料

S_s－D１の直交方向の模擬地震波について

1.　検討概要

水平２方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討を行う際に３次元ＦＥＭによる地震応答解析には弾性設計用地震動S_d－Ｄ１を代表波として用いている。この際，水平１方向にはS_d－Ｄ１を用いるが，その直交方向にはS_d－Ｄ１とは位相特性の異なる模擬地震波を用いている。

震源を特定せず策定する地震動として策定された基準地震動S_s－３１も水平方向には方向性を考慮していないが，S_d－Ｄ１を３次元ＦＥＭによる地震応答解析の代表波として選定している。

ここでは，S_d－Ｄ１の直交方向の模擬地震波について示すとともに，S_d－３１ではなくS_d－Ｄ１を代表波として選定した妥当性を示す。

2.　位相特性の異なる模擬地震波

弾性設計用地震動S_dは基準地震動S_sに係数 0.5 を乗じて設定しており，ここではS_s－Ｄ１及びS_s－３１と新たに作成されたそれぞれの直交波について示す。

2.1　S_s－Ｄ１の直交波について

S_s－Ｄ１と位相特性の異なる模擬地震波は，S_s－Ｄ１とは異なる乱数の位相を持つ正弦波の重ね合わせによって，S_s－Ｄ１と同じコントロールポイント及び振幅包絡線の経時変化にて作成する。応答スペクトルのコントロールポイントを表１に，振幅包絡線の経時変化を表２に示す。

S_s－Ｄ１及びS_s－Ｄ１と位相特性の異なる模擬地震波の応答スペクトルをそれぞれ図１及び図２に，加速度時刻歴波形を図３及び図４に示す。また，それぞれの地震波を２方向入力した場合のオービットを図５に示す。S_s－Ｄ１と位相特性の異なる模擬地震波のＳＩ比は 1.0 以上であり，応答スペクトル比は 0.85 以上である。応答スペクトル比を図６に示す。

図１及び図２に示す様に，S_s－Ｄ１と新たに作成したS_s－Ｄ１と位相特性の異なる模擬地震波はほぼ同じ応答スペクトル及び時刻歴波形をしている。また図３に示すとおり，オービットは偏りがない。

2.2　S_s－３１の直交波について

S_s－３１については，2004 年北海道留萌支庁南部地震の観測記録より策定された地震動である。水平方向の地震動は，ＥＷ方向の観測記録から推定される基盤相当位置の地震動に基づき敷地地盤の物性等を踏まえて作成されている。そのためS_s－３１の直交方向の地震波については，ＮＳ方向の観測記録から推定される基盤相当位置の地震動に基づき敷地地盤の物性等を踏まえて作成する。

S_s－３１及びS_s－３１の直交波の加速度時刻歴波形をそれぞれ図７及び図８に示す。また，それぞれの地震波を２方向入力した場合のオービットを図９に示す。

図８に示すように，ＮＳ方向の観測記録を用いて作成された地震波はＳ$_s$－３１と比較して小さく，図９に示す様に応答の軌道もＥＷ方向に偏っている。

3.　検討結果

Ｓ$_s$－Ｄ１の直交方向の模擬地震波について示した。

またＳ$_s$－３１とその直交波のオービットには偏りがあり，Ｓ$_s$－Ｄ１とその直交波のオービットは偏りがないことを確認した。以上より，Ｓ$_d$－Ｄ１を水平２方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討を行う地震動として選定することの妥当性を確認した。

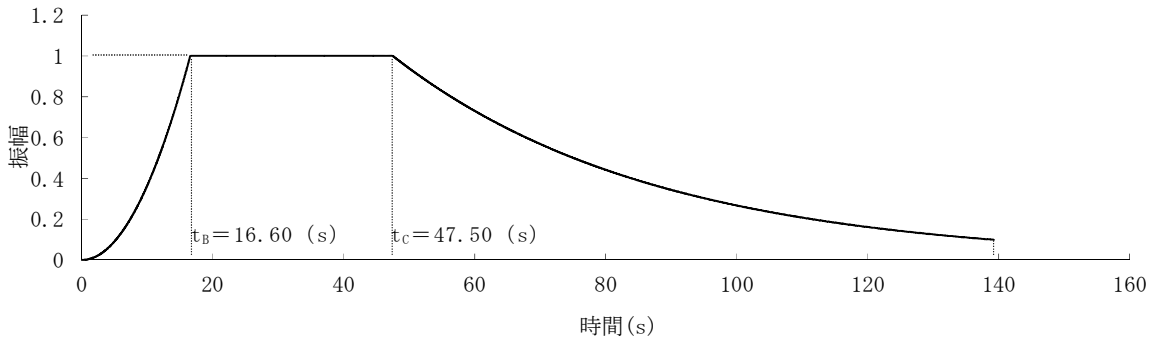
表１　応答スペクトルのコントロールポイント

応答スペクトル		コントロールポイント				
		T_A	T_B	T_C	T_D	T_E
S_S-D1_H	周期（s）	0.02	0.09	0.13	0.60	5.00
	速度（cm/s）	2.77	34.38	50.69	115.00	115.00

注　：T_A～T_Eは周期（s）

表２　振幅包絡線の経時的変化

種別	継続時間（s）	振幅包絡線の経時的変化（s）		
		t_B	t_C	t_D
S_S-D1_H	139.28	16.60	47.50	139.28
S_S-D1_V	139.28	16.60	47.50	139.28



M＝8.3，Xeq＝135.8km として評価

$$t_B = 10^{0.5M-2.93}$$

$$t_C - t_B = 10^{0.3M-1.0}$$

$$t_D - t_C = 10^{0.17M+0.54\log Xeq-0.6}$$

$$E(t) = \begin{cases} (t/t_B)^2 & 0 \le t \le t_B \\ 1 & t_B \le t \le t_C \\ \exp[(\ln 0.1)(t-t_C)/(t_D-t_C)] & t_C \le t \le t_D \end{cases}$$

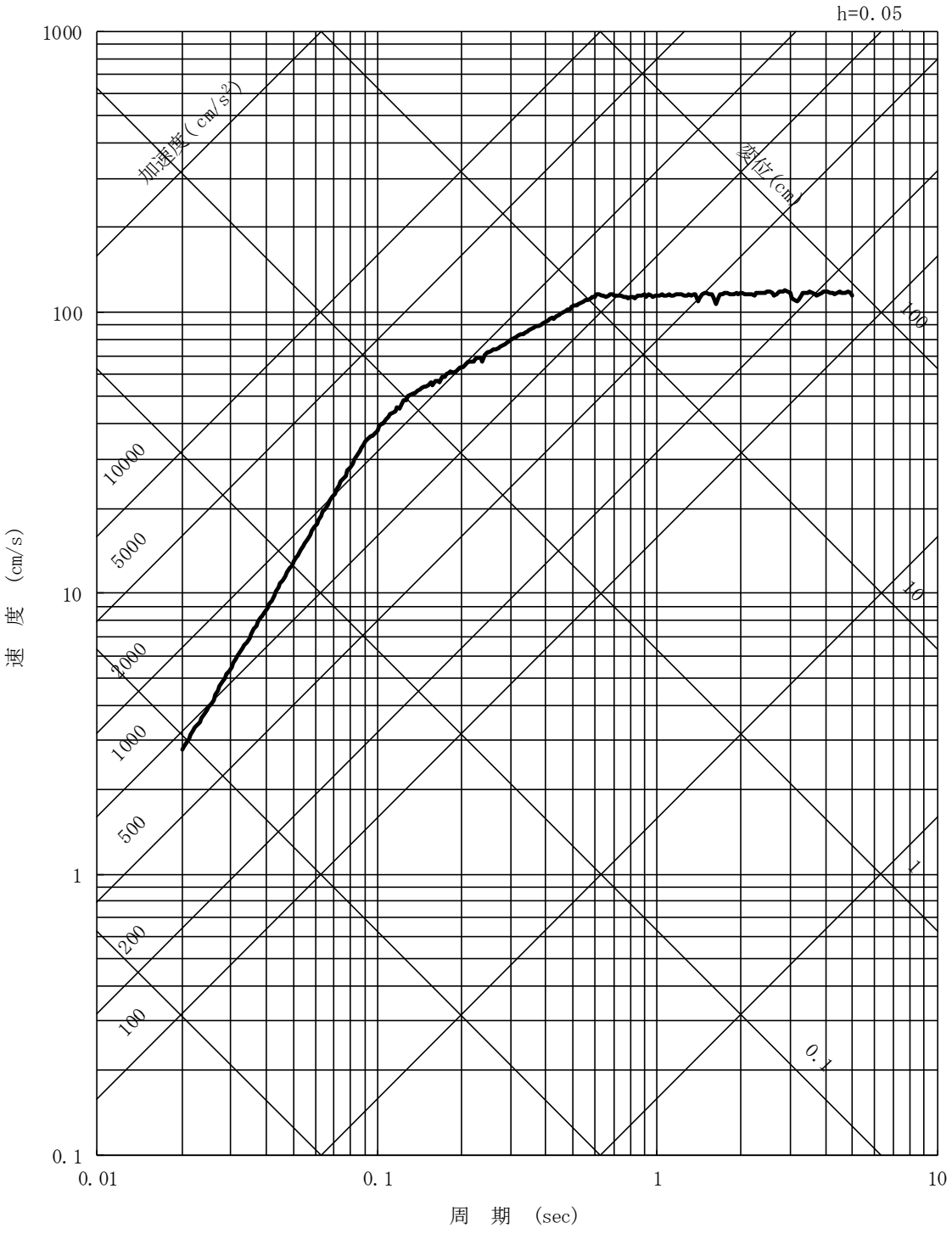


図１　Ｓ$_s$－Ｄ１の応答スペクトル

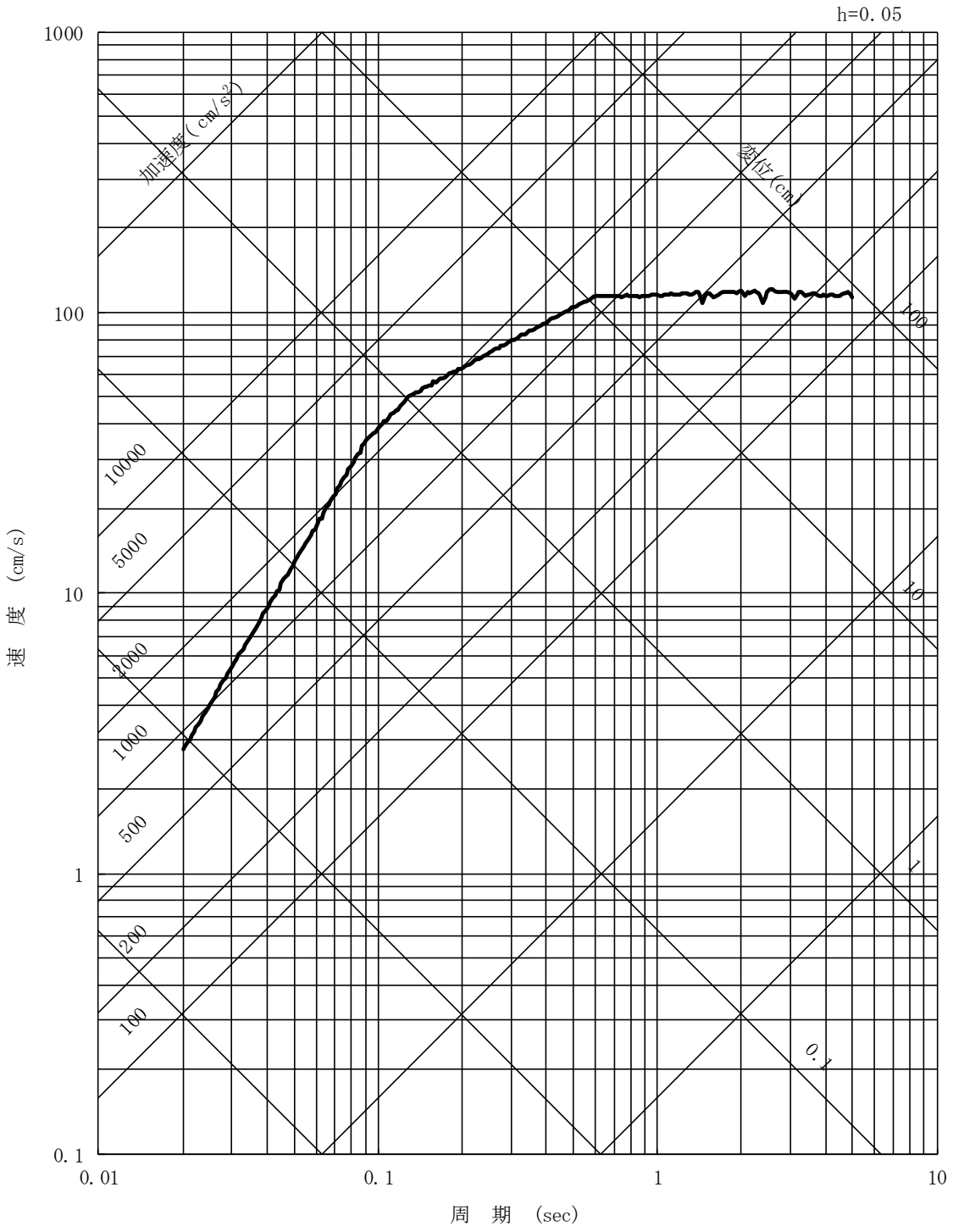


図２　Ｓ$_s$－Ｄ１と位相特性の異なる模擬地震波の応答スペクトル

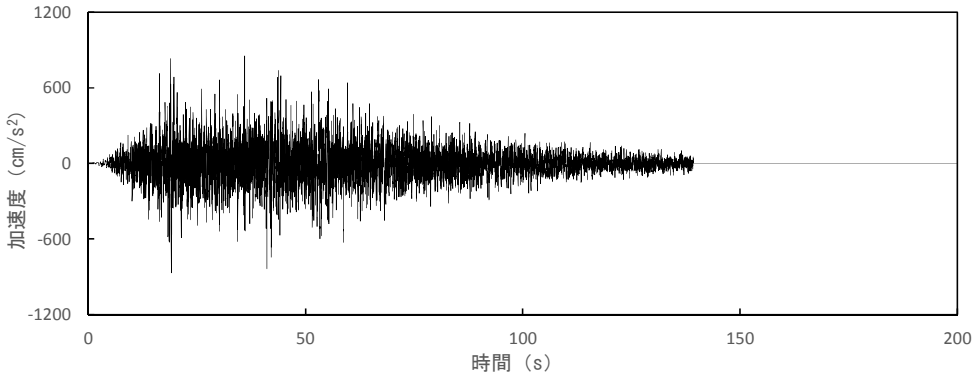


図３　Ｓ$_s$－Ｄ１の加速度時刻歴波形

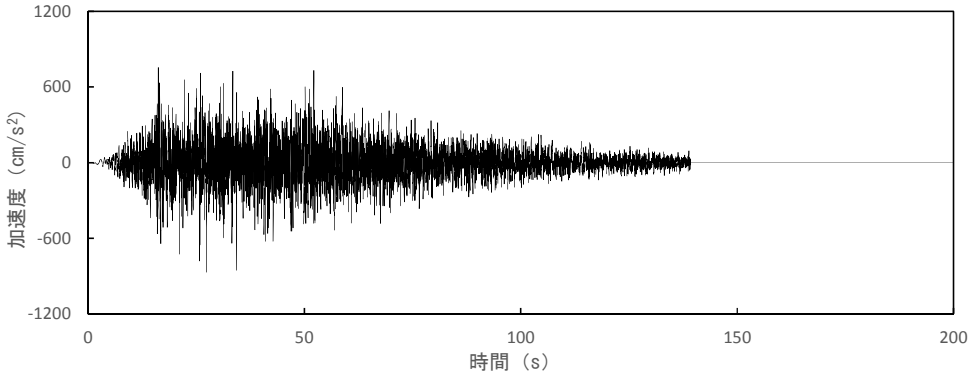


図４　Ｓ$_s$－Ｄ１と位相特性の異なる模擬地震波の加速度時刻歴波形

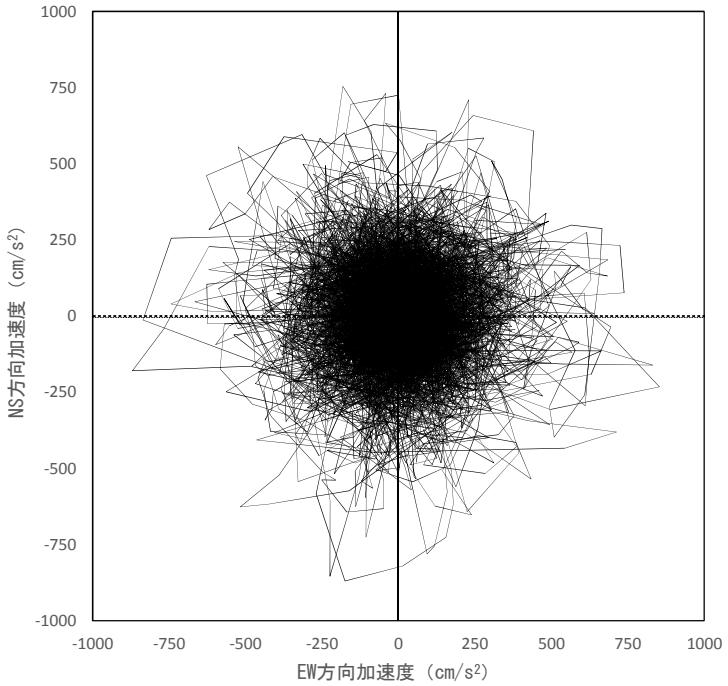


図５　Ｓ$_s$－Ｄ１のオービット
（位相が異なる地震波を２方向入力した場合）

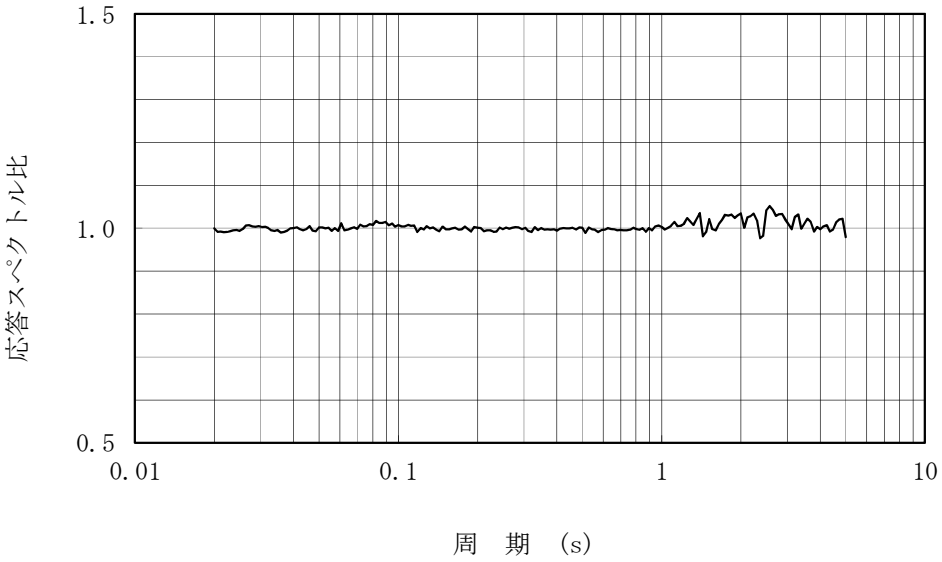


図６　Ｓ$_s$－Ｄ１と位相特性の異なる模擬地震波の応答スペクトル比

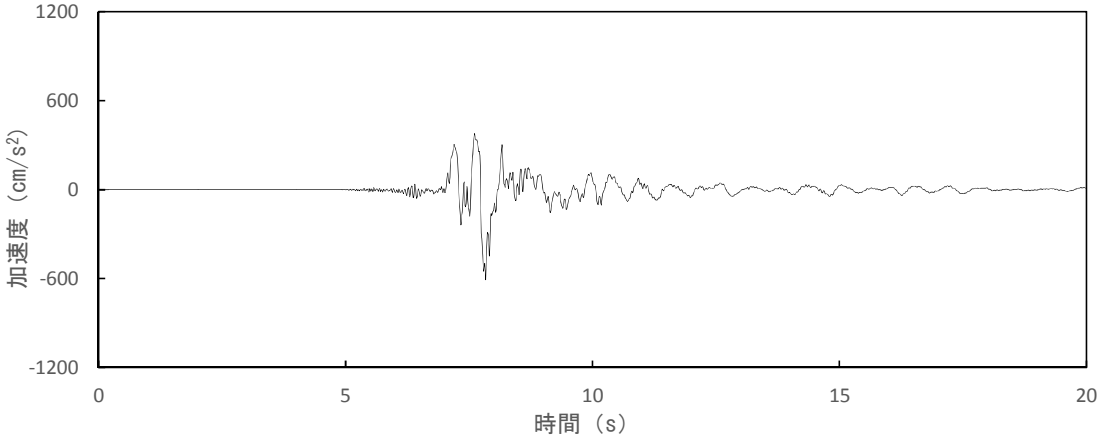


図７　Ｓ$_s$－３１の加速度時刻歴波形

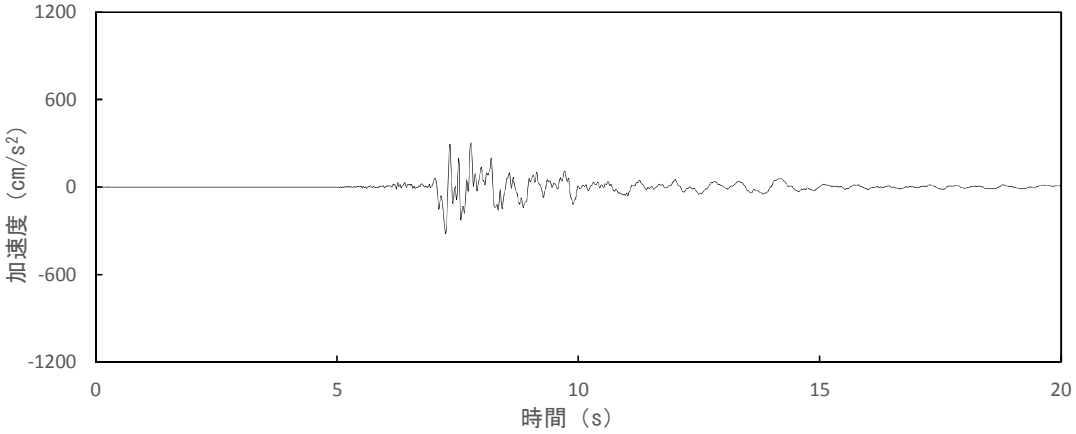


図８　Ｓ$_s$－３１の直交波の加速度時刻歴波形

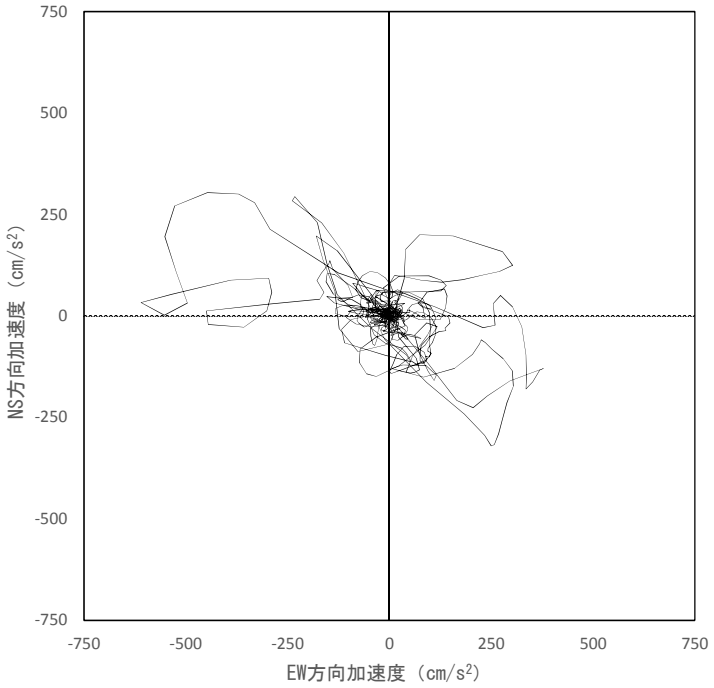


図９　Ｓ$_{s}$－３１のオービット
（それぞれの地震波を２方向入力した場合）