

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6
提出年月日	平成30年8月30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8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
3.2 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

黒線：本日も説明

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。

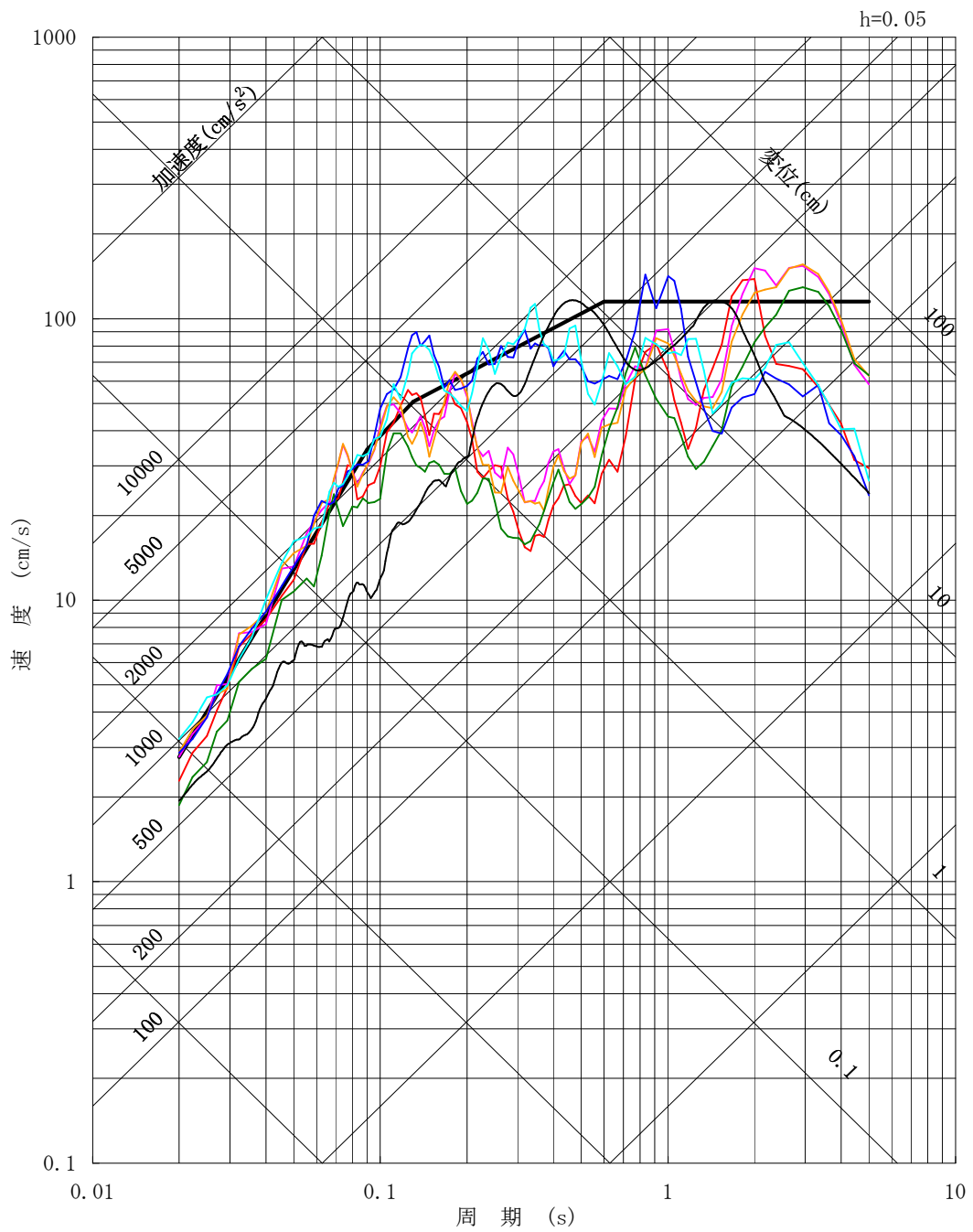
上記審査ガイドを踏まえ、従来の設計手法における水平 1 方向及び鉛直方向地震力を組み合わせた耐震計算に対して、施設の構造特性から水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の可能性のあるものを抽出し、施設が有する耐震性に及ぼす影響を評価する。

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

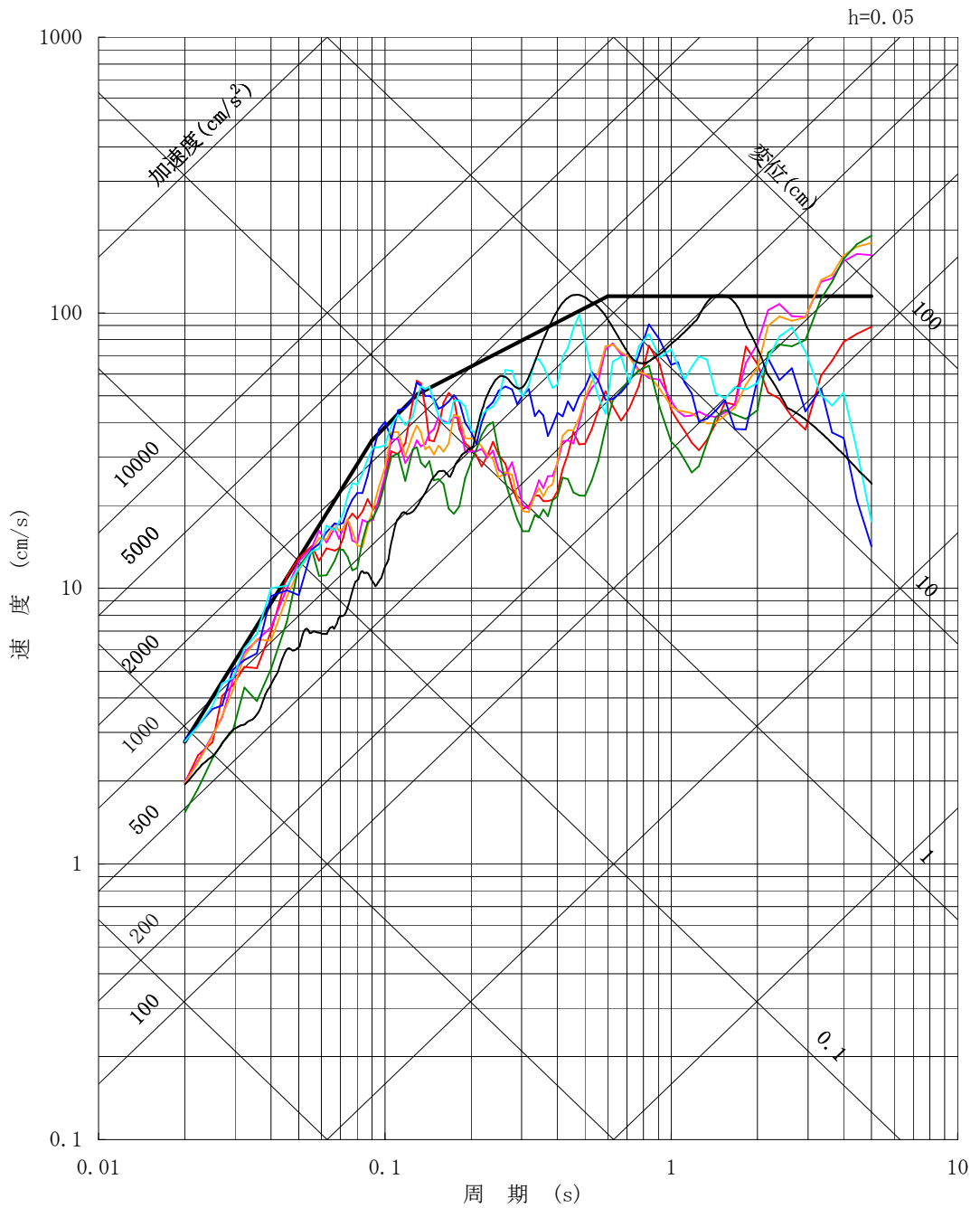
東海第二発電所の基準地震動 S_s は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」を評価して、これらの評価結果に基づき策定している。「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」としては、応答スペクトルに基づく地震動評価及び断層モデルを用いた手法による地震動評価を実施し、その結果を踏まえ、応答スペクトルに基づく地震動として基準地震動 S_s-D1 、断層モデルを用いた地震動として $S_s-11 \sim S_s-14$ 、 S_s-21 、 S_s-22 を策定している。また、「震源を特定せず策定する地震動」として基準地震動 S_s-31 を策定している。

基準地震動 S_s のスペクトルを図 2-1 に示す。



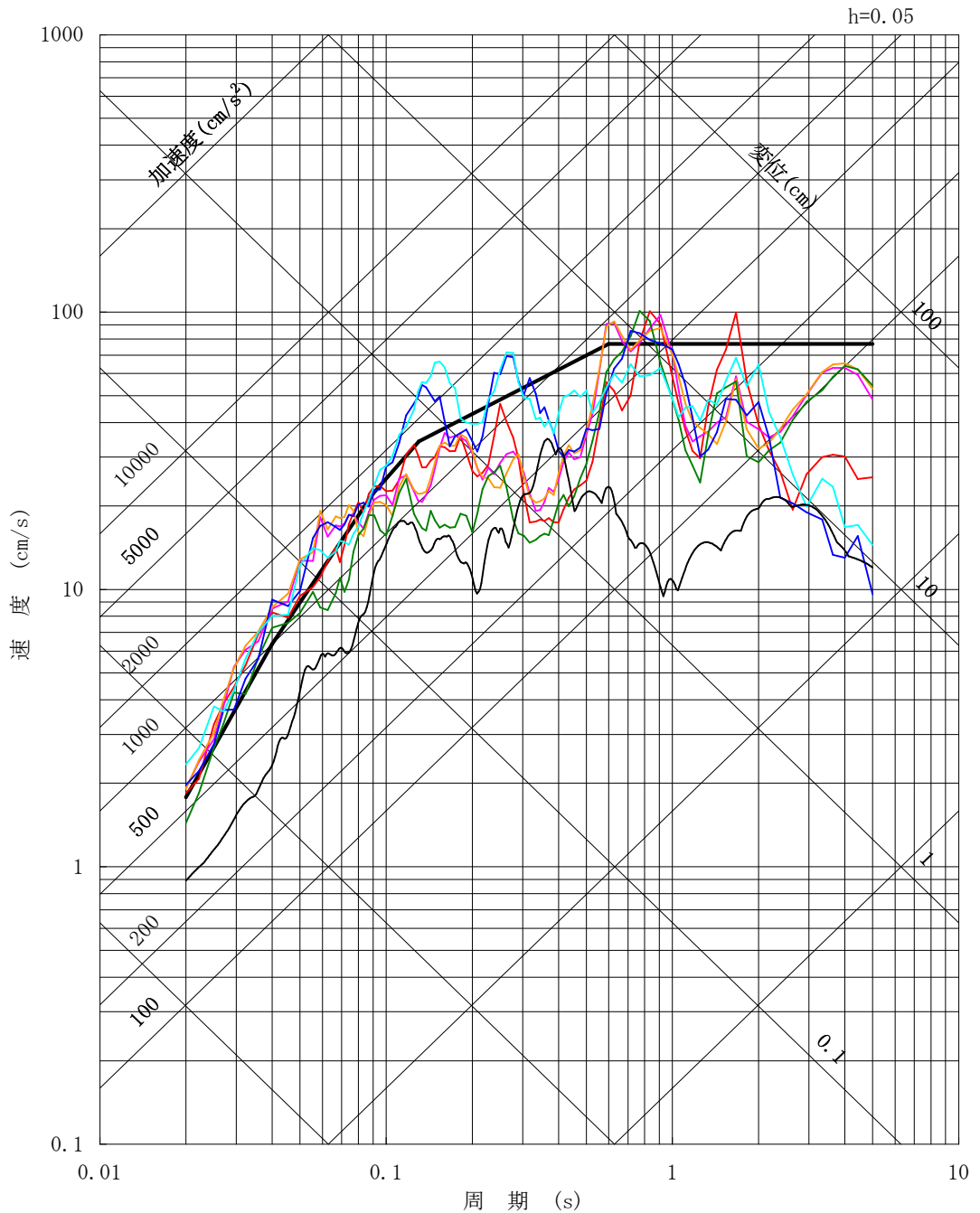
- S_s-D1
- S_s-11 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点1)
- S_s-12 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-13 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (短周期レベルの不確かさ, 破壊開始点3)
- S_s-14 F1断層～北方陸域の断層～塩ノ平地震断層による地震 (断層傾斜角の不確かさ, 破壊開始点2)
- S_s-21 2011年東北地方太平洋沖型地震 (短周期レベルの不確かさ)
- S_s-22 2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMGA位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- S_s-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 S_s の応答スペクトル (NS 方向)



- S_s-D1
- S_s-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)
- S_s-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)
- S_s-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)
- S_s-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)
- S_s-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)
- S_s-22 2011年東北地方太平洋沖型地震 (SMG A位置と短周期レベルの不確かさの重畳)
- S_s-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)



- S_s-D1
- S_s-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）
- S_s-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）
- S_s-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）
- S_s-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）
- S_s-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）
- S_s-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）
- S_s-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 S_s 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

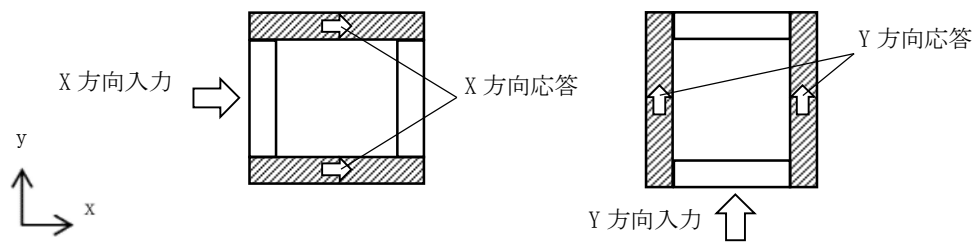
従来の設計手法では、建物・構築物の地震応答解析において、水平方向及び鉛直方向の地震動を質点系モデルに方向ごとに入力し、解析を行っている。また、原子炉施設における建物・構築物は、全体形状及び平面レイアウトから、地震力を主に耐震壁で負担する構造であり、剛性の高い設計としている。

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。

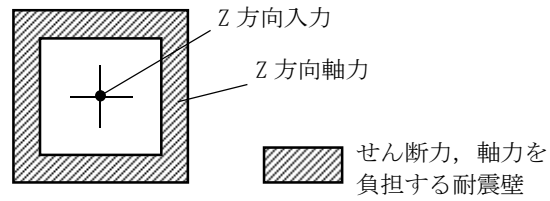
鉛直方向の地震力に対しては、軸力について評価することを基本としている。建物・構築物に作用する軸力は、鉄筋コンクリート造耐震壁を主な耐震要素として構造計画を行う。

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、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 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。

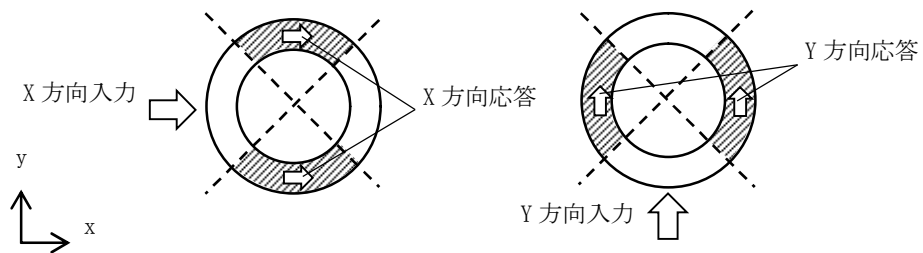


(a) 水平方向

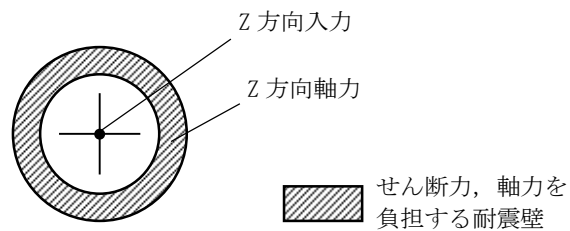


(b) 鉛直方向

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、その他の構成部位については抽出対象に該当しない。**杭及びケーソンについても上部構造の大変形による衝突が杭及びケーソンの大規模降伏による転倒に先行すると考えられるため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 F E M 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 F E M 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 F E M 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 F E M 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 F E M 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 F E M 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。

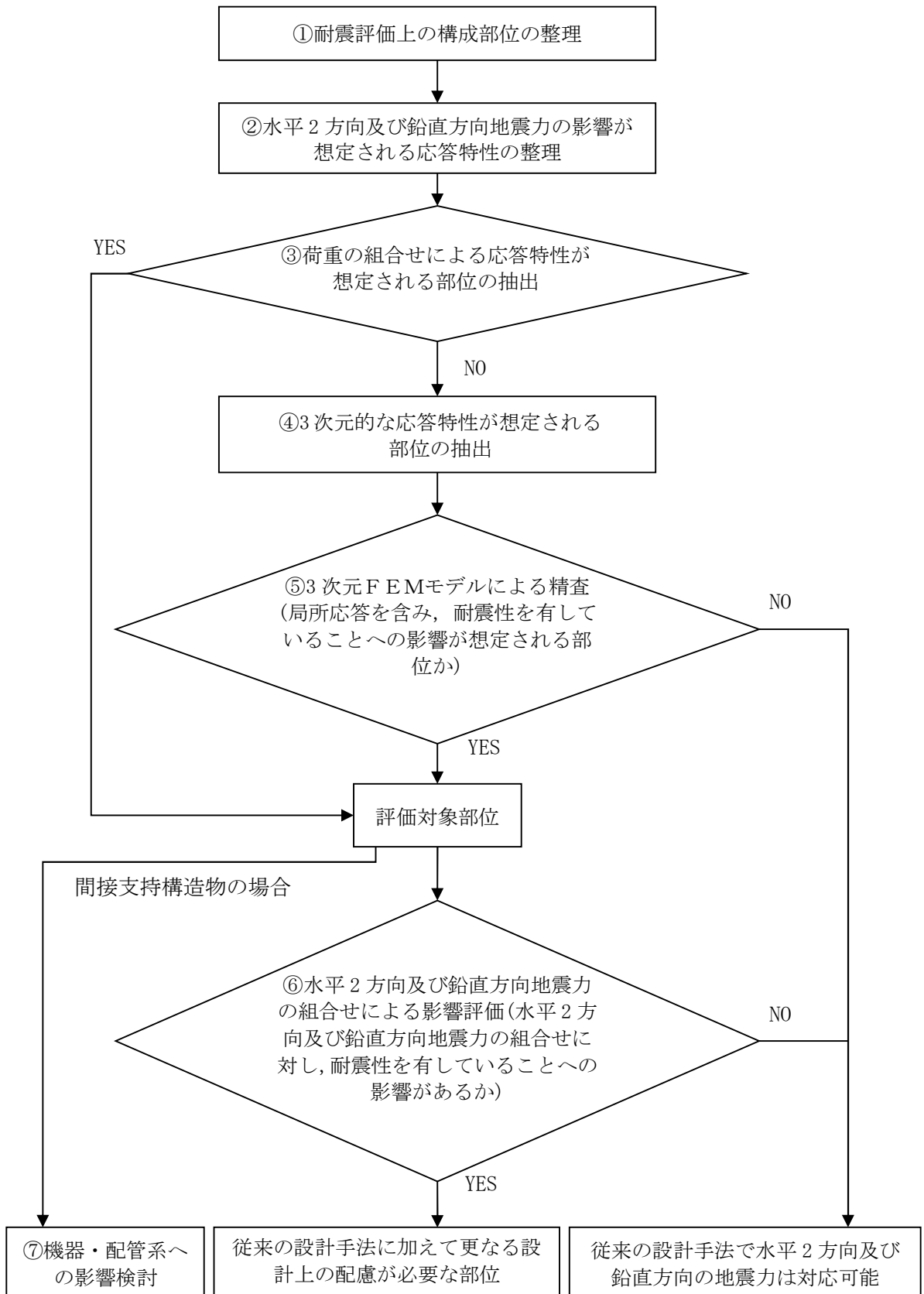


図 3-1-3 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価のフロー

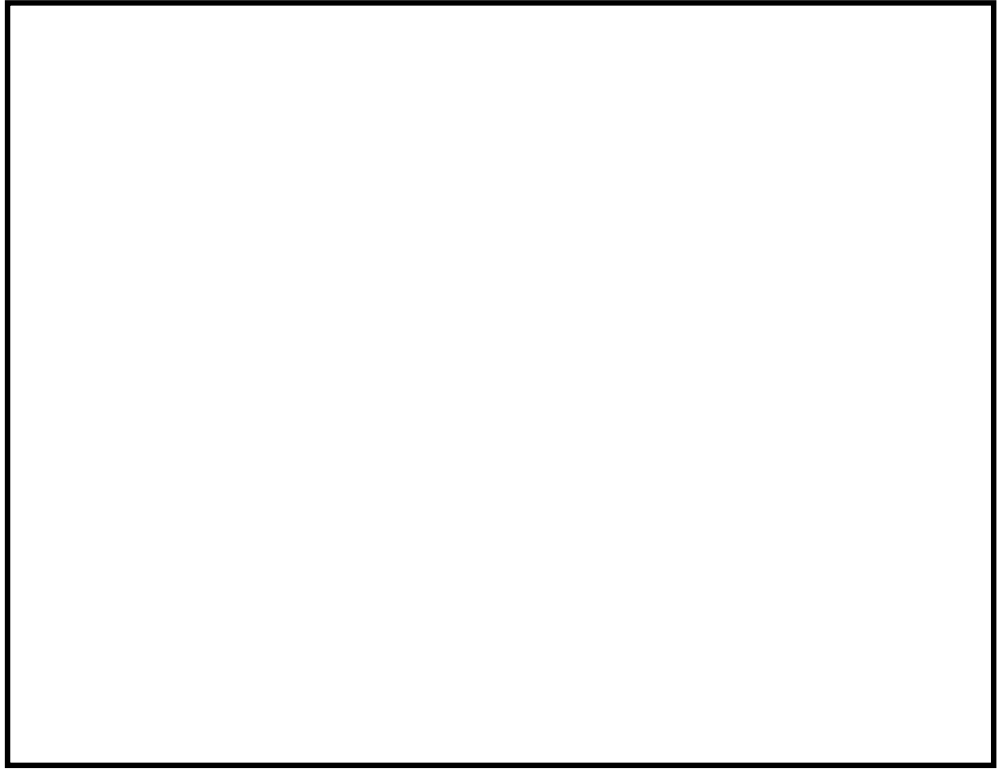


図 3-1-4 原子炉建屋の 3 次元モデルの概要図

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	○	—	—	—	○	—	○	—
	鉄骨ブレース	—	○	○	—	—	—	—	○
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方向入力のかえ方を表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)

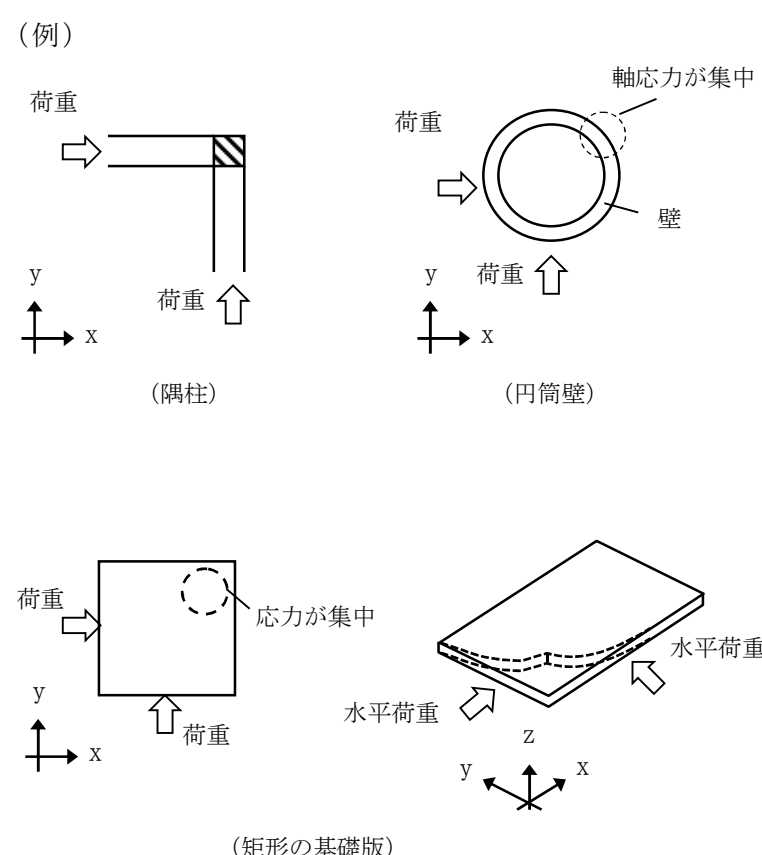
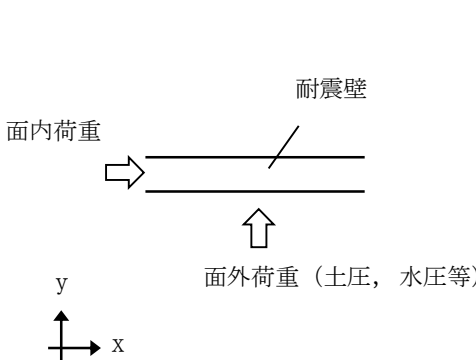
荷重の組合せによる 応答特性		影響想定部位
①-1	直交する水平 2 方向の荷重が, 応力として集中	<p>応力の集中する隅柱等</p> <p>(例)</p>  <p>荷重 → (隅柱)</p> <p>荷重 → (円筒壁)</p> <p>軸応力が集中</p> <p>壁</p> <p>荷重 ↑</p> <p>応力が集中</p> <p>水平荷重</p> <p>水平荷重</p> <p>(矩形の基礎版)</p>
①-2	面内方向の荷重を負担しつつ, 面外方向の荷重が作用	<p>土圧を負担する地下耐震壁等 水圧を負担するプール壁等</p> <p>(例)</p>  <p>耐震壁</p> <p>面内荷重 →</p> <p>↑</p> <p>面外荷重 (土圧, 水圧等)</p>

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
<p>②-1</p> <p>面内方向の荷重に加え，面外慣性力の影響が大きい</p>	<p>大スパン又は吹き抜け部に設置された部位 (例)</p>
<p>②-2</p> <p>加振方向以外の方に励起される振動</p>	<p>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)</p>

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

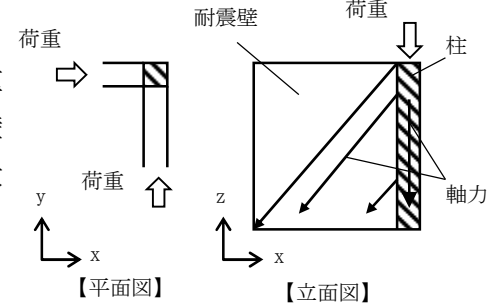
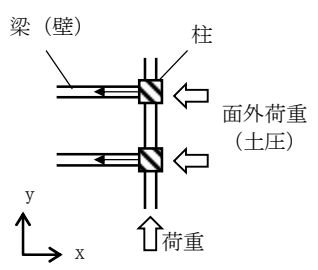
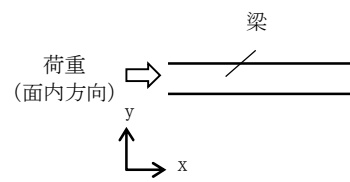
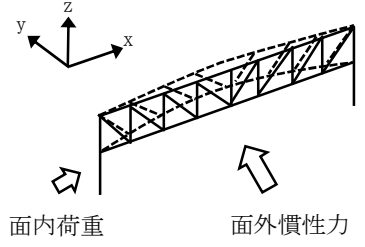
耐震評価上の構成部材		水平 2 方向入力の影響
柱	一般部	耐震壁付構造の場合、水平入力による影響は小さい。
	隅部 (端部を含む)	<p>独立した隅柱は、直交する地震荷重が同時に作用する。ただし、耐震壁付きの隅柱は、軸力が耐震壁に分散されることで影響は小さい。</p>  <p>【平面図】 【立面図】</p>
	地下部	<p>地下外周柱は面内方向の荷重を負担しつつ面外方向（土圧）の荷重が作用する。ただし、外周部耐震壁付のため、水平入力による影響は小さい。また、土圧が作用する方向にある梁及び壁が応力を負担することで、水平面外入力による影響は小さい。</p> 
梁	一般部	<p>大スパンや吹抜け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。</p> 
	地下部	<p>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。</p>
	鉄骨トラス	<p>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。</p> 

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	<p>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。</p> <p>(円筒壁)</p>
	地下部 プール壁	<p>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。</p> <p>面外荷重 (水圧・土圧等)</p>
	鉄骨 ブレース	<p>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。</p>
床 屋根	一般部	<p>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。</p> <p>耐震壁・梁 スラブ</p>

表 3-1-4 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 (3/3)

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。	<p>(矩形基礎) (杭基礎)</p>
	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。	<p>基礎梁</p>

(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 ^(*)
	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 (プール側壁)	—	—	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	—
	鉄骨ブレース	—	該当なし	該当なし	—	—	—	—	不要 ^(*)
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 ^(*)	—
	ケーソン	—	—	—	—	—	—	不要 ^(*)	—
	基礎梁	—	該当なし	—	—	—	—	—	不要 ^(*)
	杭	—	①-1 要	①-1 要	①-1 要	—	①-1 要	不要 ^(*)	不要 ^(*)

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するため不要とする。杭及びケーソンについても上部構造の大変形による衝突が杭及びケーソンの大規模降伏による転倒に先行すると考えられるため不要とする。

(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3-1-5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 3-1-5 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
(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 (プール側壁) 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	—
	鉄骨ブレース	—	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。

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	<u>非常用ガス処理系</u> <u>配管支持架構</u>	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	<u>原子炉建屋</u> <u>(燃料取替フロア)</u>	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	<u>非常用ガス処理系</u> <u>配管支持架構</u>	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		<u>原子炉建屋</u>	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、主排気筒鉄塔部の支柱材を代表として、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のある部位について検討した。

主排気筒の支柱材については、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	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>主排気筒</u> ・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、主排気筒鉄塔部の支柱材を代表として評価する。
	基礎	基礎スラブ ・ 杭	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>原子炉建屋</u> ・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	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>原子炉建屋（使用済燃料プール）</u> ・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み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み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。

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。

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支柱材について、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4.5m、高さ140mの筒身にかかる水平力を周囲の根開き28m、高さ130mの鋼管トラスの4脚支持鉄塔で分担する鉄骨組構造であり、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。

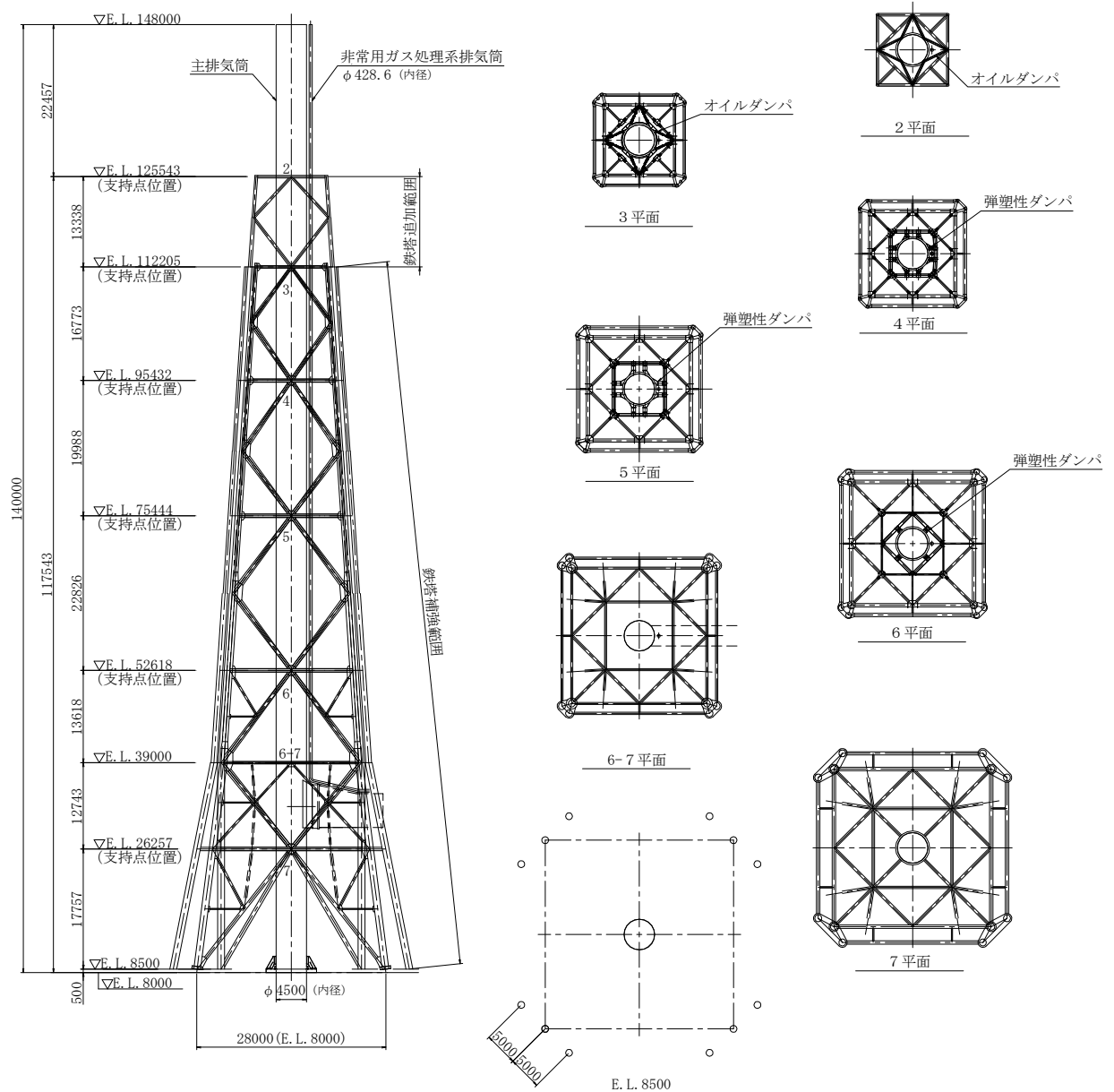


図 3.1.6-1 主排気筒の構造概要図 (単位 : mm)

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支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、各支柱材に対する水平 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支柱材の応力度比が、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」に示すものと同様である。

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

支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」にて示すものと同様である。

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」に示す内容と同様である。

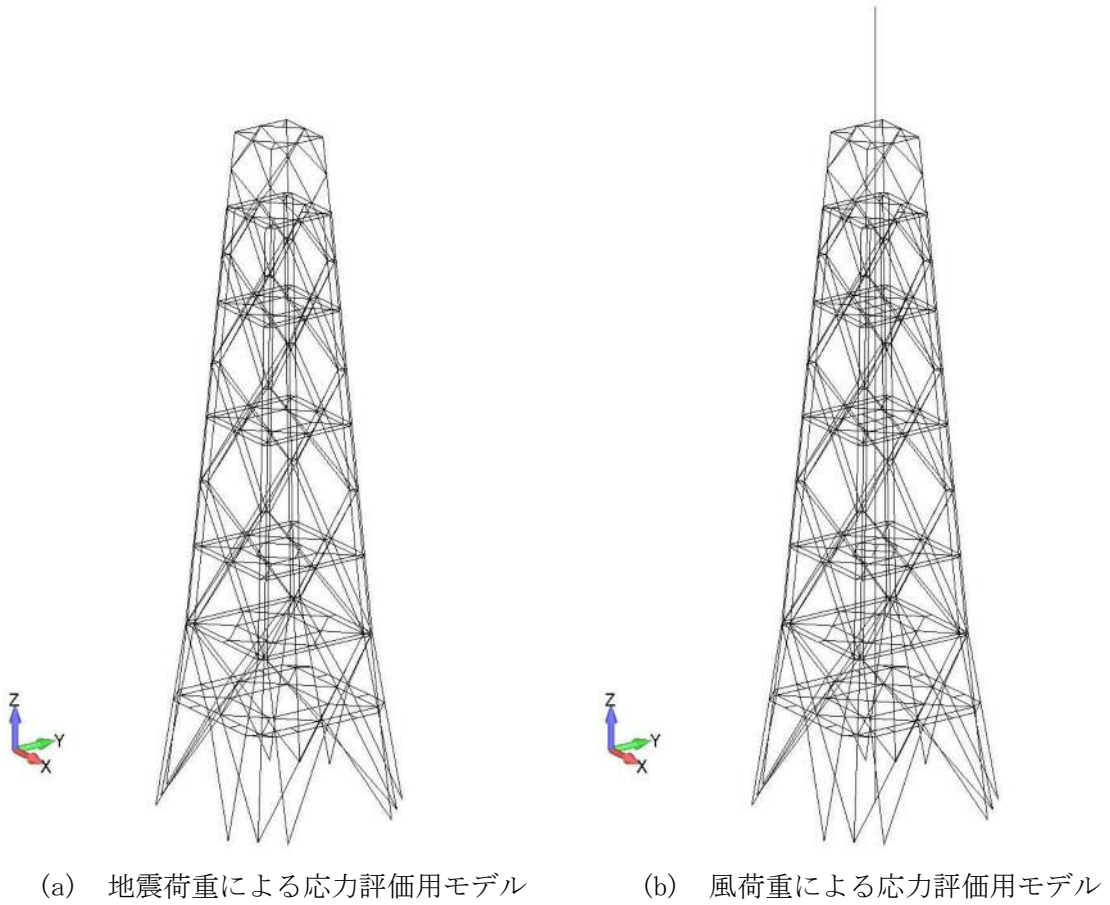


図 3.1.6-2 鉄塔の応力解析モデル

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	$\Phi 406.4 \times 6.4$	STK400
	95.432	$\Phi 406.4 \times 12.7$	STK400
	75.444	$\Phi 558.8 \times 12.7$	STK400
	52.618	$\Phi 812.8 \times 12.7$	STK400
	26.257	$\Phi 1016.0 \times 12.7$	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合せて、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	$G + 1.0K_{H0^\circ} + 0.4K_{H0^\circ} + 0.4K_V + W_{0^\circ}$
2	$G + 0.4K_{H0^\circ} + 1.0K_{H0^\circ} + 0.4K_V + W_{0^\circ}$
3	$G + 0.4K_{H0^\circ} + 0.4K_{H0^\circ} + 1.0K_V + W_{0^\circ}$
4	$G + 1.0K_{H45^\circ} + 0.4K_{H45^\circ} + 0.4K_V + W_{45^\circ}$
5	$G + 0.4K_{H45^\circ} + 1.0K_{H45^\circ} + 0.4K_V + W_{45^\circ}$
6	$G + 0.4K_{H45^\circ} + 0.4K_{H45^\circ} + 1.0K_V + W_{45^\circ}$

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 S₀ 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68.5m、東西方向68.25m、厚さ5.0m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 原子炉建屋基礎盤の概略平面図 (EL. -4.0m)

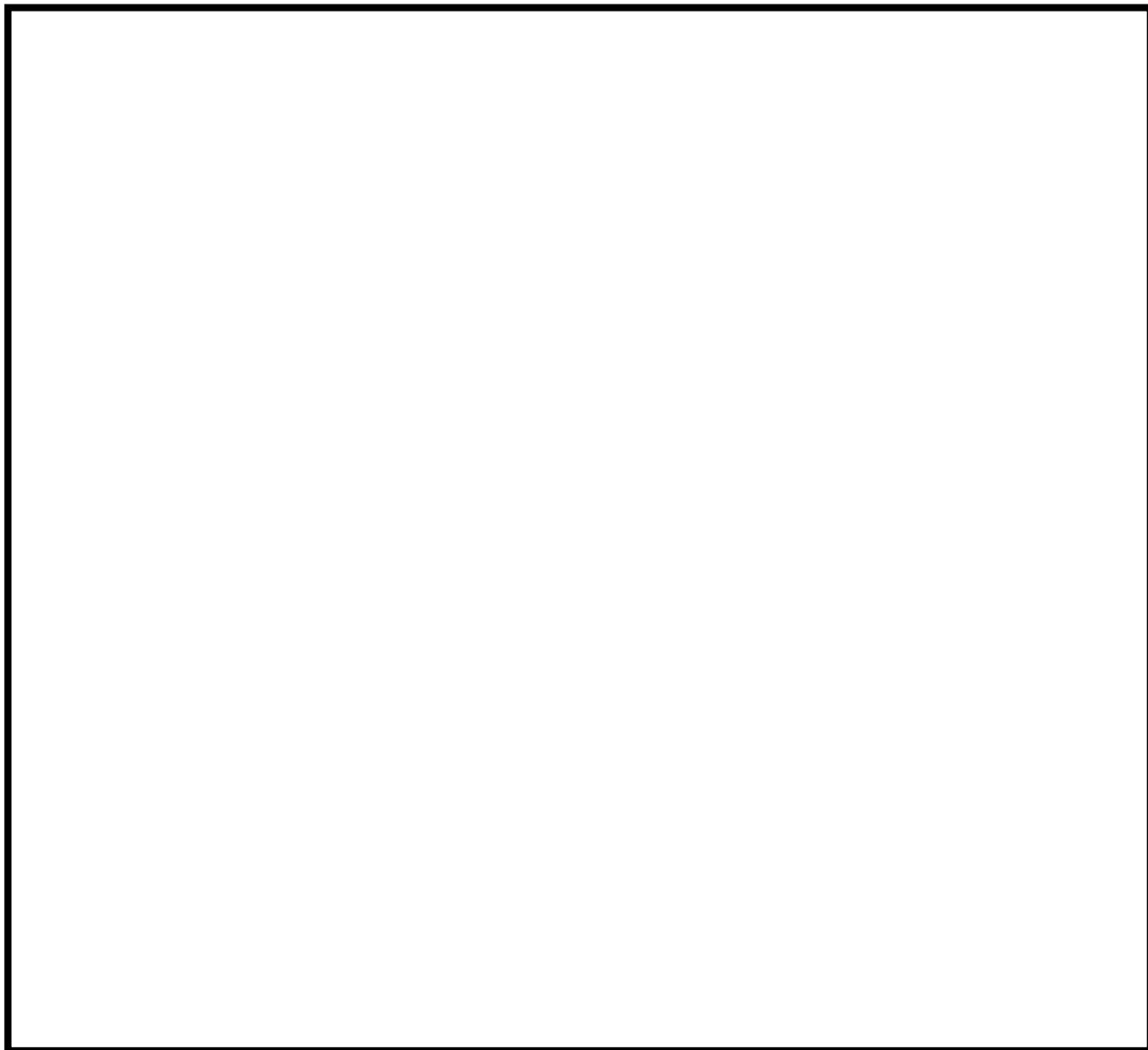


図 3.1.7-2 原子炉建屋基礎盤の概略断面図 (A-A 断面 EW 方向)

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、資料V-2-9-1-13「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、資料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、資料V-2-9-1-13「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*

※：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、資料V-2-9-1-13「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、資料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。

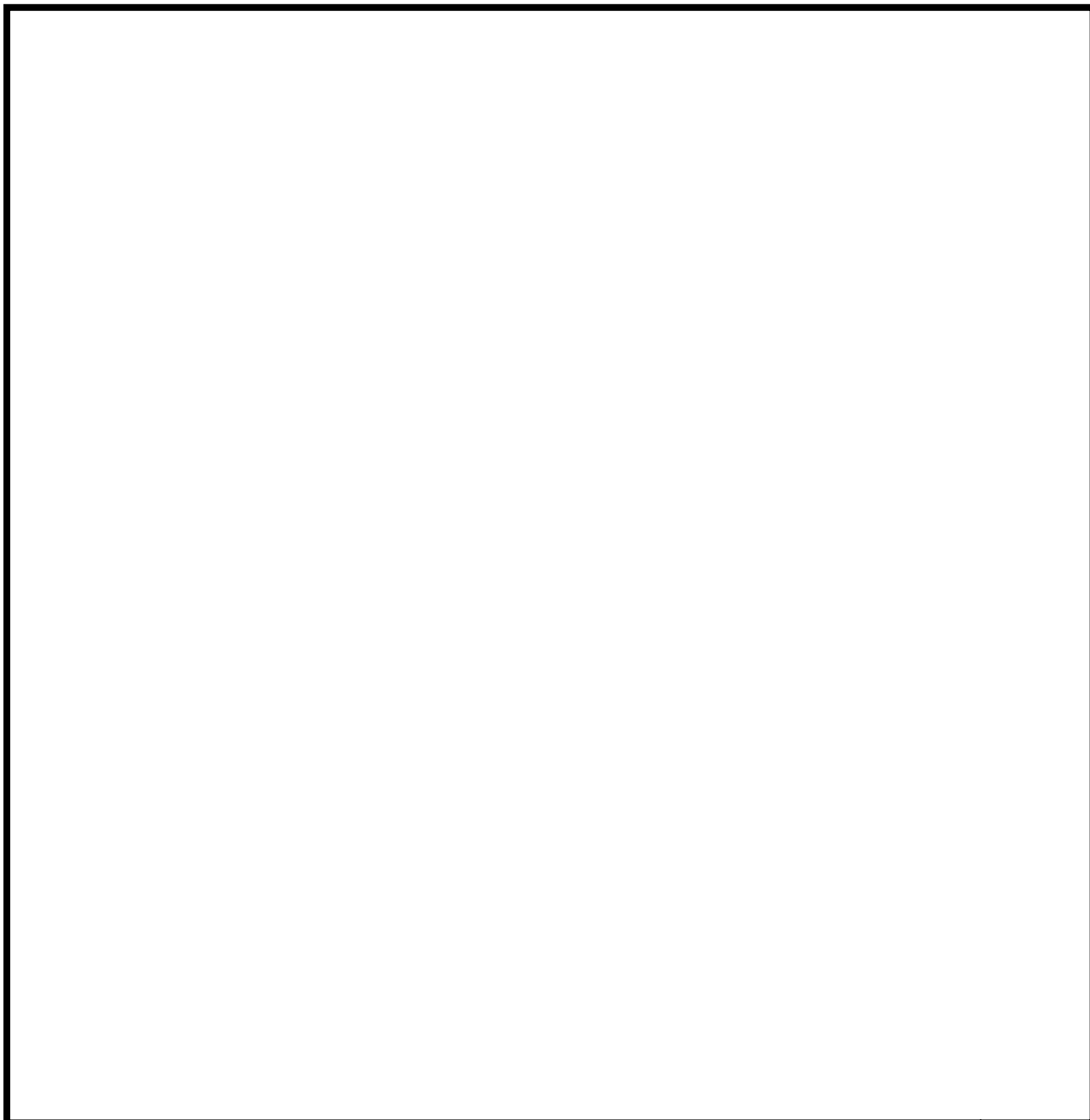


図 3.1.7-3 解析モデル

(2) 荷重ケース

S_s 地震時の応力は、資料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

※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3.1.7-2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、資料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。

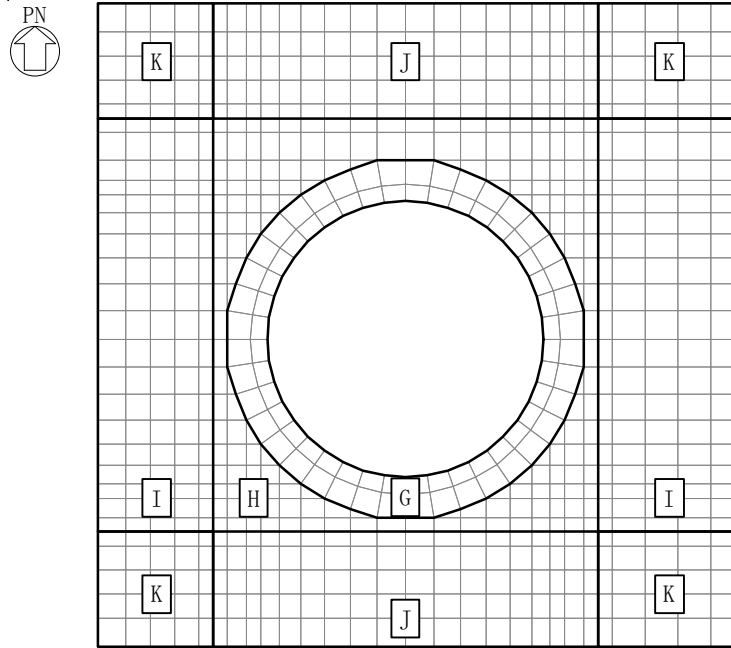


図 3.1.7-4 配筋領域図

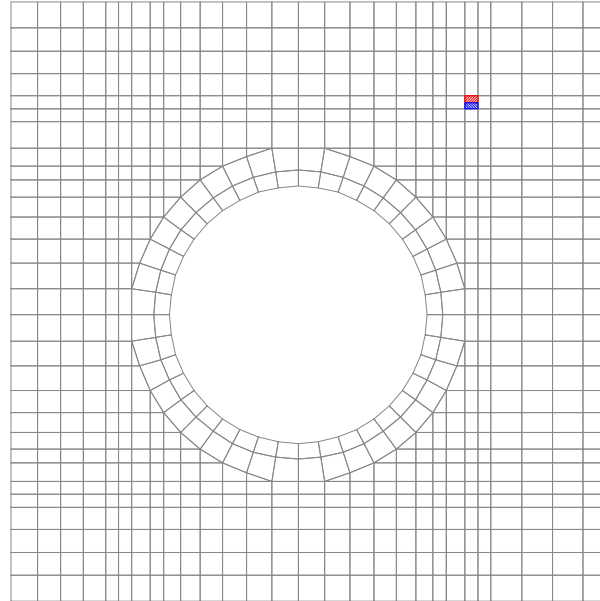
表 3.1.7-3 配筋一覧

(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

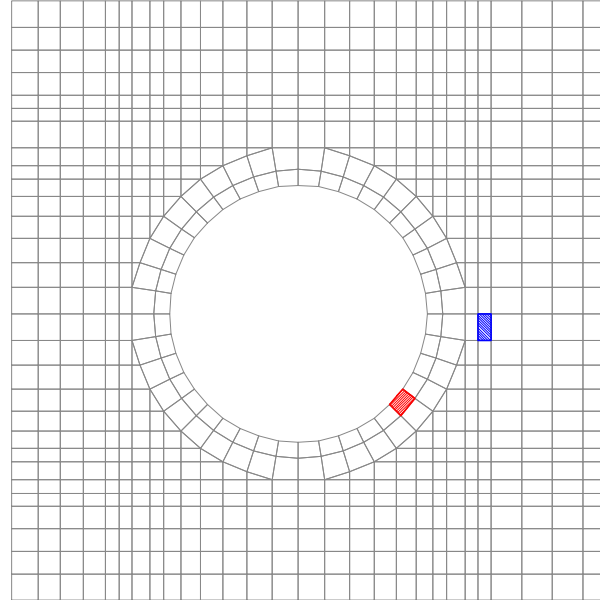
(b) $r - \theta$ 方向配筋

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。

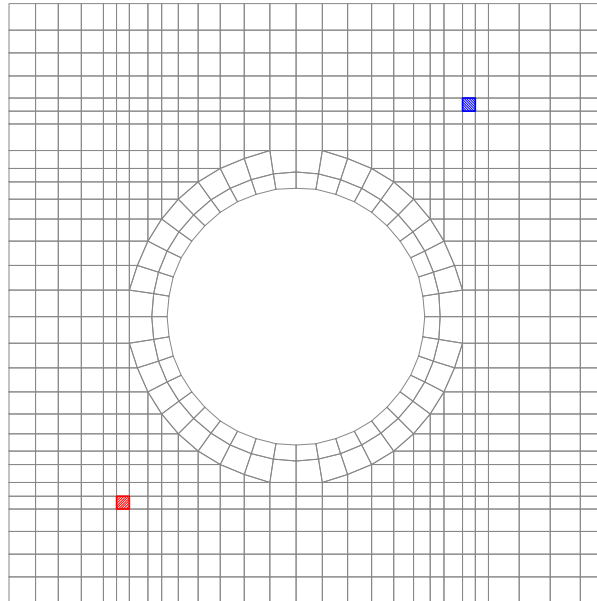
(a) 軸力+曲げモーメント (NS 方向または円周方向)



■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。

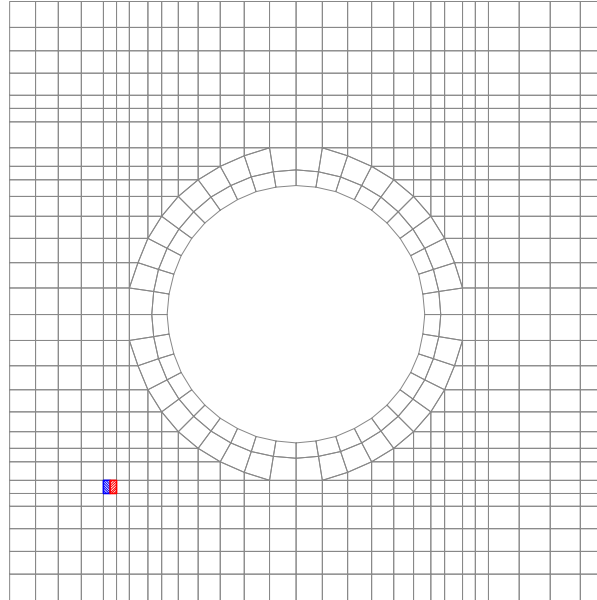
(b) 軸力+曲げモーメント (EW 方向または半径方向)

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 ($\times 10^3$ kN \cdot m/m)	NS	851	2-12	10.7	11.8
		半径	276	2-3	43.9	49.8
面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm ²)	NS	438	2-6	1.42 [*]	2.12
		EW	465	2-6	1.71 [*]	2.12

注 : 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 ($\times 10^3$ kN \cdot 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 原子炉建屋改造工事に伴う評価結果の影響検討

3.1.7.7項の評価結果に対して、補強等の原子炉建屋改造工事に伴う重量の増加分を考慮した応答増幅の影響について検討を行う。

(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、補強等の原子炉建屋改造工事に伴う重量の増加分を考慮した応答倍率(補強反映モデル/今回工認モデル)を S_s 地震荷重(K_s)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。)及び原子炉建屋附属棟(以下、「附属棟」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反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~EL. 2.0m)の応答倍率を用いる。

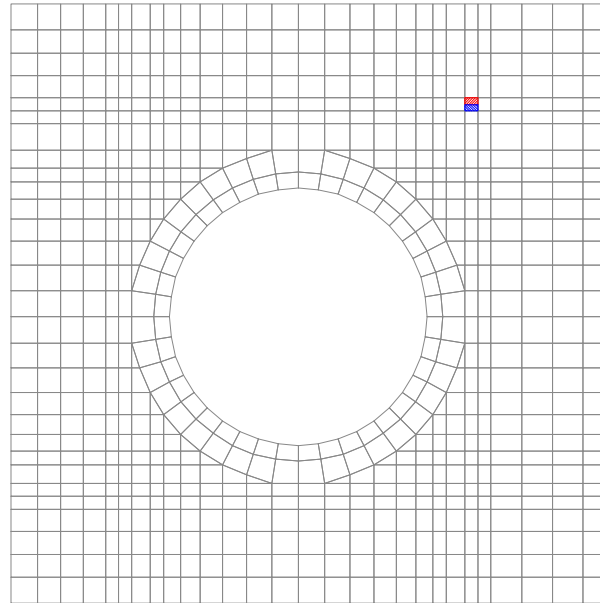
補強等に伴う重量の増加分を考慮したせん断力(UD方向の倍率は軸力)の応答倍率を表3.1.7-5に示す。

原子炉建屋基礎盤の断面評価検定値一覧を表3.1.7-6に、選定した要素の位置を図3.1.7-6に示す。

以上より、補強等の原子炉建屋改造工事に伴う重量の増加分を考慮した評価結果への影響を考慮した場合においても構造健全性に影響はないことを確認した。

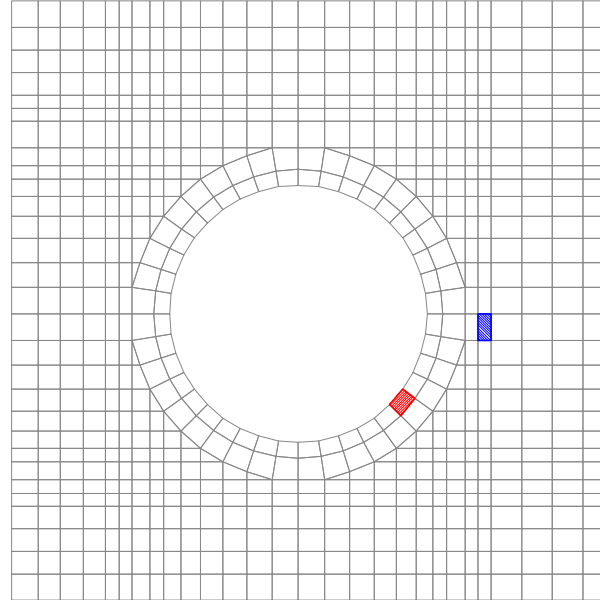
表 3.1.7-5 応答倍率：原子炉建屋基礎盤

	NS 方向	EW 方向	UD 方向
要素番号 (10)	1.02	1.02	1.01



■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。

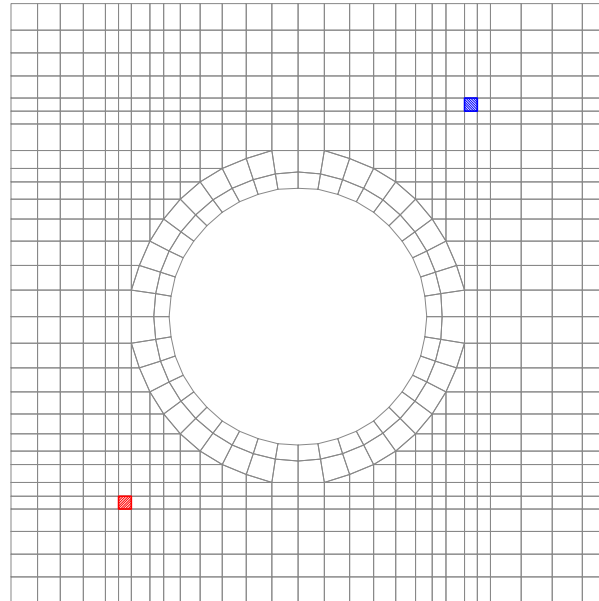
(a) 軸力+曲げモーメント (NS 方向または円周方向)



■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。

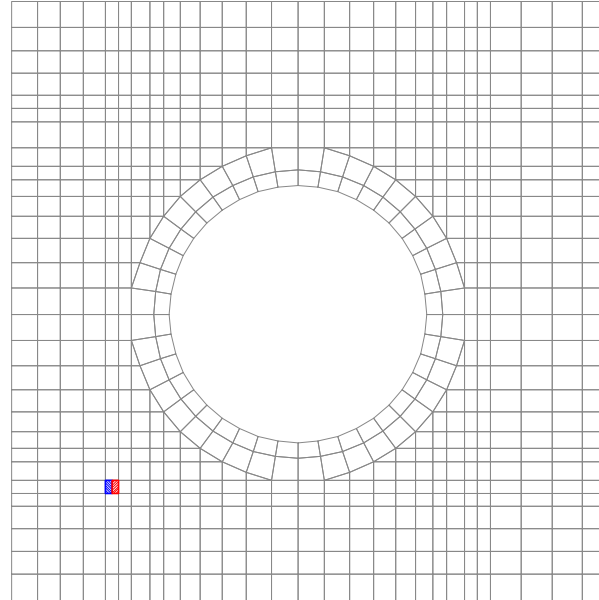
(b) 軸力+曲げモーメント (EW 方向または半径方向)

図 3.1.7-6 (1/2) 解析結果を記載する要素の位置 (図は暫定版)



■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 3.1.7-6 (2/2) 解析結果を記載する要素の位置 (図は暫定版)

表 3.1.7-6 補強等の原子炉建屋改造工事に伴う重量の増加分を考慮した評価
 (発生値は応答倍率 1.02 による暫定値)

評価項目		方向	要素 番号	発生値	許容値
軸力 + 曲げモーメント	曲げモーメント ($\times 10^3$ kN・m/m)	NS	851	10.9	11.8
		半径	276	44.8	49.8
面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm ²)	NS	438	1.45*	2.12
		EW	465	1.74*	2.12

注 : 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 F E M 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、補強等の原子炉建屋改造工事に伴う重量の増加分を考慮した応答増幅の影響を考慮した場合においても構造健全性に影響は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。

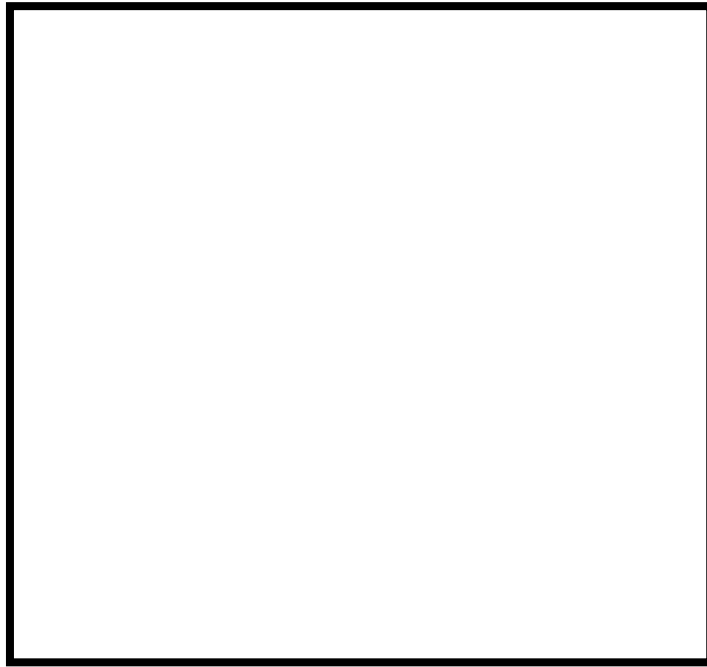


図 3.1.8-1 使用済燃料プールを含む原子炉建屋の概略平面図 (EL. 46.5 m)

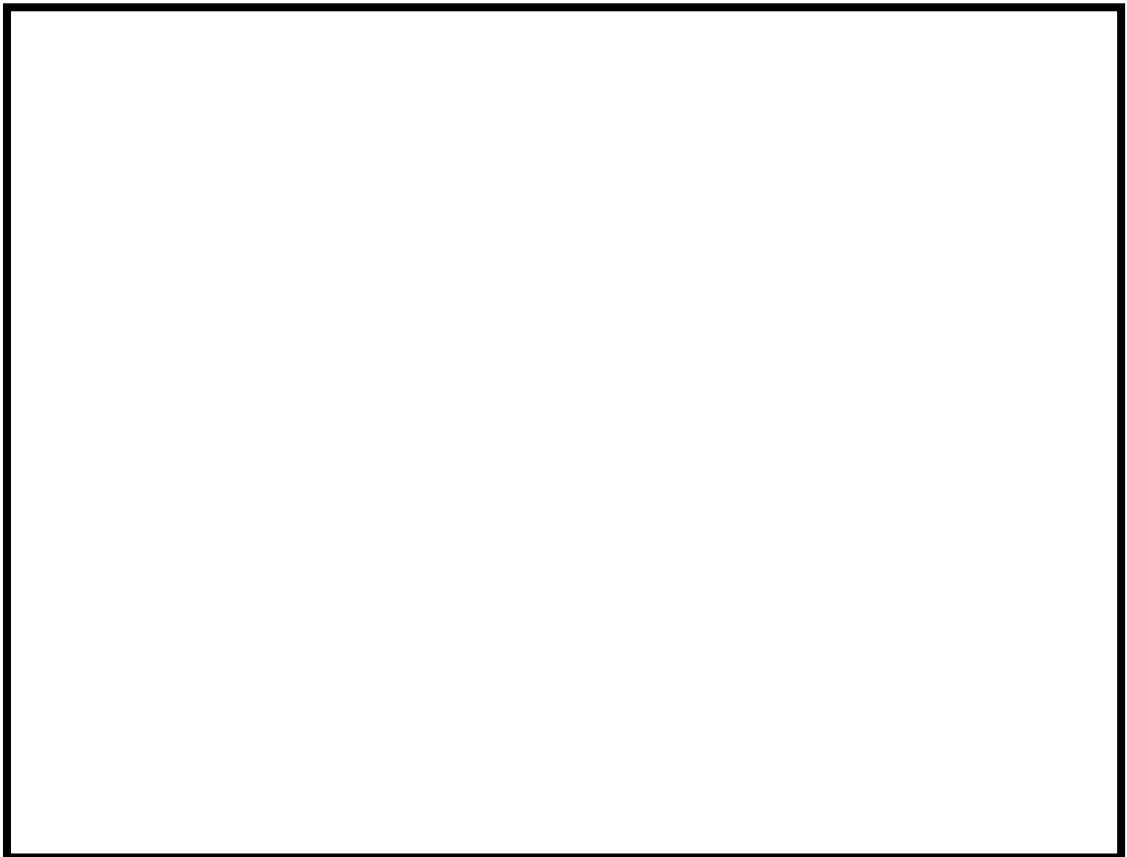


図 3.1.8-2 使用済燃料プールを含む原子炉建屋の概略断面図 (A-A 断面)

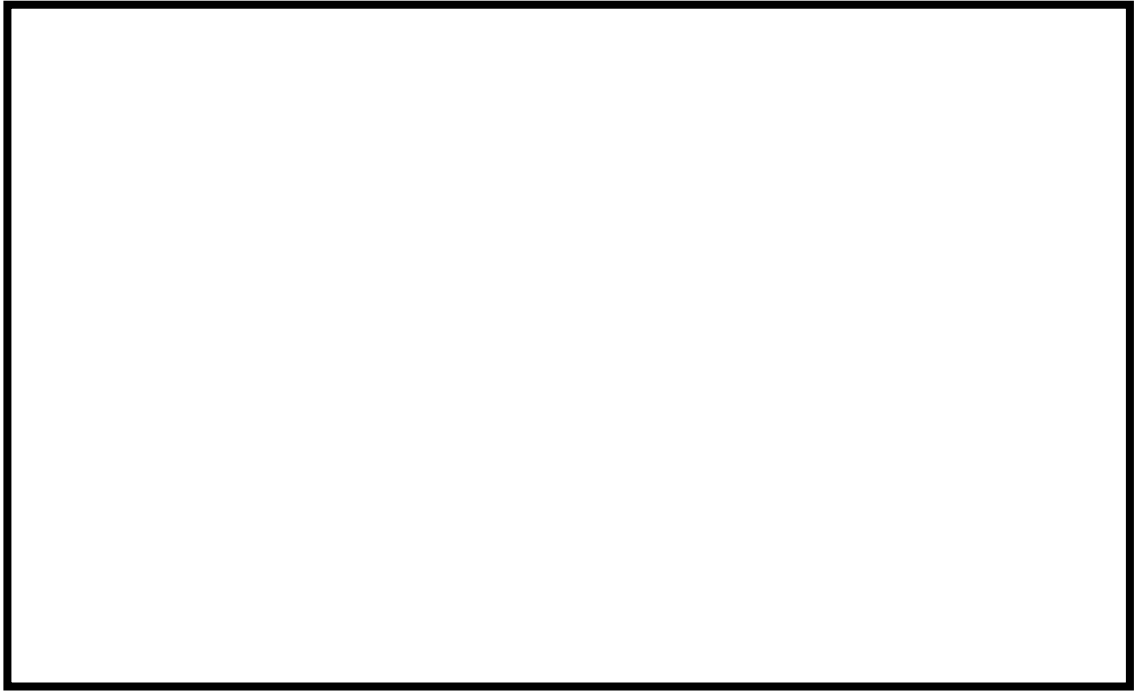


図 3.1.8-3 使用済燃料プール周りの概略平面図 (EL. 38.80 m)



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、資料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、資料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、資料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(H_s)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	$G+P+H_s+R_0+H_s+S_s$

- 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
- H_s : 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、資料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、資料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

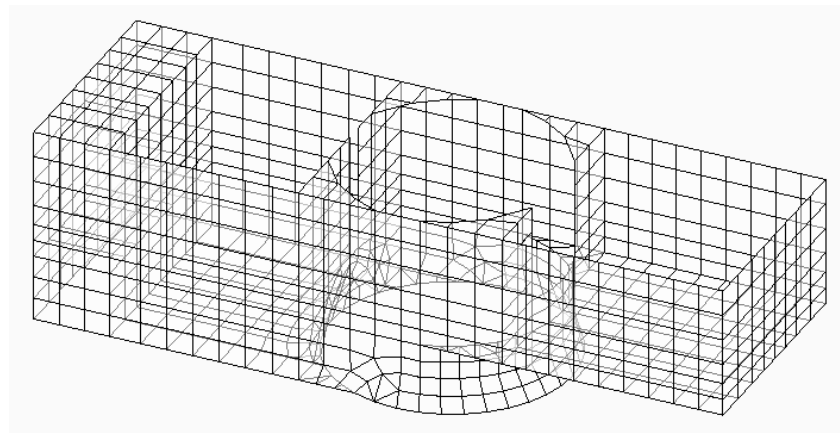


図 3.1.8-5 解析モデル概要図

(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め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
S_{SWE}^{**}	:	S_s 地震荷重 W→E 方向 GP による慣性力
S_{SSN}^{**}	:	S_s 地震荷重 S→N 方向 GP による慣性力
S_{SDU}^{**}	:	S_s 地震荷重 鉛直方向 GP による慣性力
H_{SWE}^{**}	:	S_s 地震荷重 W→E 方向 水平地震力による動水圧荷重
H_{SSN}^{**}	:	S_s 地震荷重 S→N 方向 水平地震力による動水圧荷重
H_{SDU}^{**}	:	S_s 地震荷重 鉛直方向 鉛直地震力による動水圧荷重

※：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	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SNS} + 0.4S_{SEW} + 0.4S_{SDU} + 1.0H_{SNS} + 0.4H_{SEW} + 0.4H_{SDU}$
	4 - 2	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SNS} + 1.0S_{SEW} + 0.4S_{SDU} + 0.4H_{SNS} + 1.0H_{SEW} + 0.4H_{SDU}$
	4 - 3	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SNS} + 1.0S_{SEW} + 0.4S_{SDU} - 0.4H_{SNS} + 1.0H_{SEW} + 0.4H_{SDU}$
	4 - 4	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SNS} + 0.4S_{SEW} + 0.4S_{SDU} - 1.0H_{SNS} + 0.4H_{SEW} + 0.4H_{SDU}$
	4 - 5	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SNS} - 0.4S_{SEW} + 0.4S_{SDU} - 1.0H_{SNS} - 0.4H_{SEW} + 0.4H_{SDU}$
	4 - 6	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SNS} - 1.0S_{SEW} + 0.4S_{SDU} - 0.4H_{SNS} - 1.0H_{SEW} + 0.4H_{SDU}$
	4 - 7	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SNS} - 1.0S_{SEW} + 0.4S_{SDU} + 0.4H_{SNS} - 1.0H_{SEW} + 0.4H_{SDU}$
	4 - 8	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SNS} - 0.4S_{SEW} + 0.4S_{SDU} + 1.0H_{SNS} - 0.4H_{SEW} + 0.4H_{SDU}$
	4 - 9	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SNS} + 0.4S_{SEW} - 0.4S_{SDU} + 1.0H_{SNS} + 0.4H_{SEW} - 0.4H_{SDU}$
	4 - 10	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SNS} + 1.0S_{SEW} - 0.4S_{SDU} + 0.4H_{SNS} + 1.0H_{SEW} - 0.4H_{SDU}$
	4 - 11	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SNS} + 1.0S_{SEW} - 0.4S_{SDU} - 0.4H_{SNS} + 1.0H_{SEW} - 0.4H_{SDU}$
	4 - 12	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SNS} + 0.4S_{SEW} - 0.4S_{SDU} - 1.0H_{SNS} + 0.4H_{SEW} - 0.4H_{SDU}$
	4 - 13	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{SNS} - 0.4S_{SEW} - 0.4S_{SDU} - 1.0H_{SNS} - 0.4H_{SEW} - 0.4H_{SDU}$
	4 - 14	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{SNS} - 1.0S_{SEW} - 0.4S_{SDU} - 0.4H_{SNS} - 1.0H_{SEW} - 0.4H_{SDU}$
	4 - 15	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{SNS} - 1.0S_{SEW} - 0.4S_{SDU} + 0.4H_{SNS} - 1.0H_{SEW} - 0.4H_{SDU}$
	4 - 16	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{SNS} - 0.4S_{SEW} - 0.4S_{SDU} + 1.0H_{SNS} - 0.4H_{SEW} - 0.4H_{SDU}$

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	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{sWE} + 1.0H_{sWE} + 0.4S_{sDU} + 0.4H_{sDU}$
	3 - 2	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{sWE} - 1.0H_{sWE} + 0.4S_{sDU} + 0.4H_{sDU}$
	3 - 3	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{sSN} + 1.0H_{sSN} + 0.4S_{sDU} + 0.4H_{sDU}$
	3 - 4	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{sSN} - 1.0H_{sSN} + 0.4S_{sDU} + 0.4H_{sDU}$
	3 - 5	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{sWE} + 1.0H_{sWE} - 0.4S_{sDU} - 0.4H_{sDU}$
	3 - 6	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{sWE} - 1.0H_{sWE} - 0.4S_{sDU} - 0.4H_{sDU}$
	3 - 7	$GP + H_s + R_0 + 1.0S_{sSN} + 1.0H_{sSN} - 0.4S_{sDU} - 0.4H_{sDU}$
	3 - 8	$GP + H_s + R_0 - 1.0S_{sSN} - 1.0H_{sSN} - 0.4S_{sDU} - 0.4H_{sDU}$
	3 - 9	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{sWE} + 0.4H_{sWE} + 1.0S_{sDU} + 1.0H_{sDU}$
	3 - 10	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{sWE} - 0.4H_{sWE} + 1.0S_{sDU} + 1.0H_{sDU}$
	3 - 11	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{sSN} + 0.4H_{sSN} + 1.0S_{sDU} + 1.0H_{sDU}$
	3 - 12	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{sSN} - 0.4H_{sSN} + 1.0S_{sDU} + 1.0H_{sDU}$
	3 - 13	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{sWE} + 0.4H_{sWE} - 1.0S_{sDU} - 1.0H_{sDU}$
	3 - 14	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{sWE} - 0.4H_{sWE} - 1.0S_{sDU} - 1.0H_{sDU}$
	3 - 15	$GP + H_s + R_0 + 0.4S_{sSN} + 0.4H_{sSN} - 1.0S_{sDU} - 1.0H_{sDU}$
	3 - 16	$GP + H_s + R_0 - 0.4S_{sSN} - 0.4H_{sSN} - 1.0S_{sDU} - 1.0H_{sDU}$

3.1.8.6 評価方法

使用済燃料プールの壁の評価は、資料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。

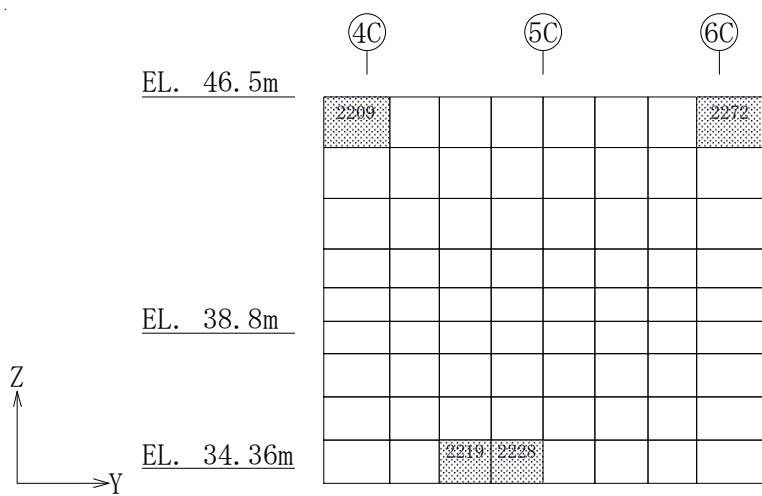
断面の評価結果を記載する要素は、軸力、曲げモーメント及び面外せん断力に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素とする。

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。

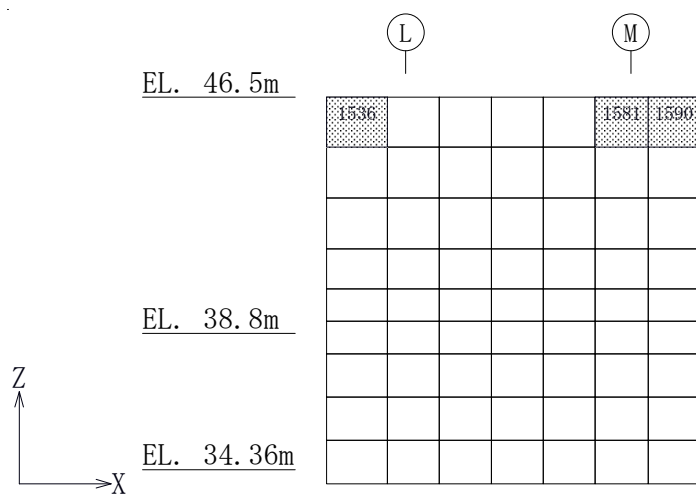
S_s地震時における水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せにおいて、水平1方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する評価結果と水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する評価結果を比較すると、水平2方向の地震力の影響により解析結果の値は増加傾向にあり、一部最大となる要素が変わるものもあるが、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる軸力、曲げモーメント及び面外せん断力に対する評価における発生値は各許容値を超えないことを確認した。

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～ +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

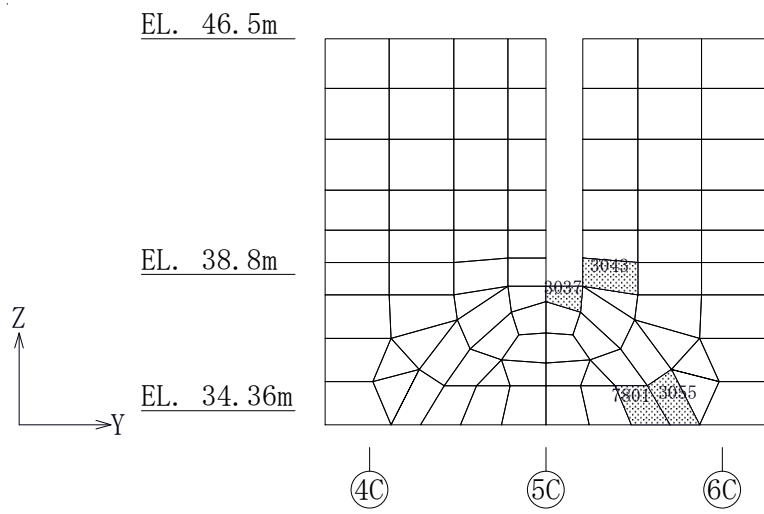


(a) 北側壁

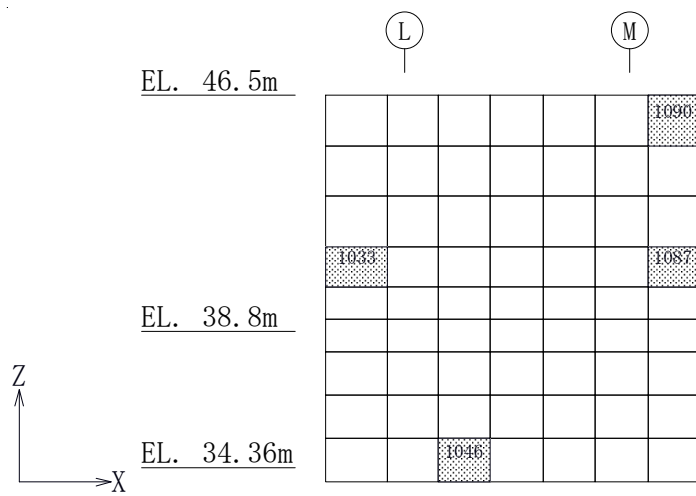


(b) 東側壁

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)

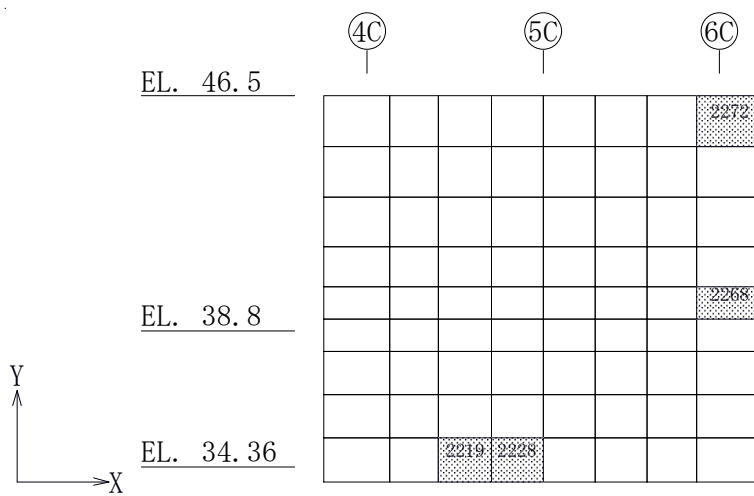


(c) 南側壁

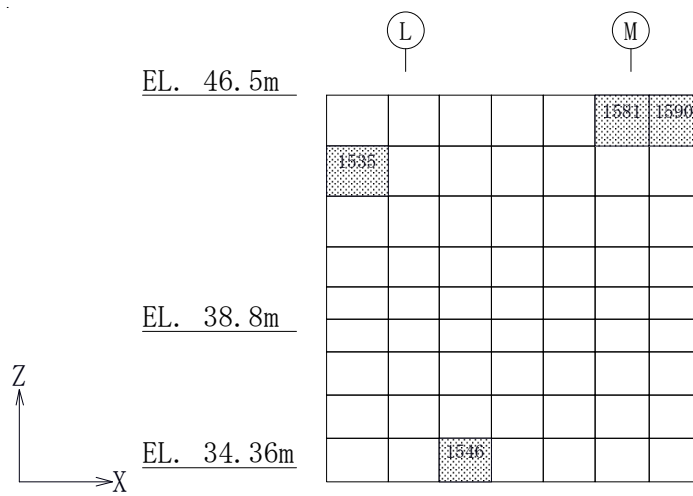


(d) 西側壁

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)

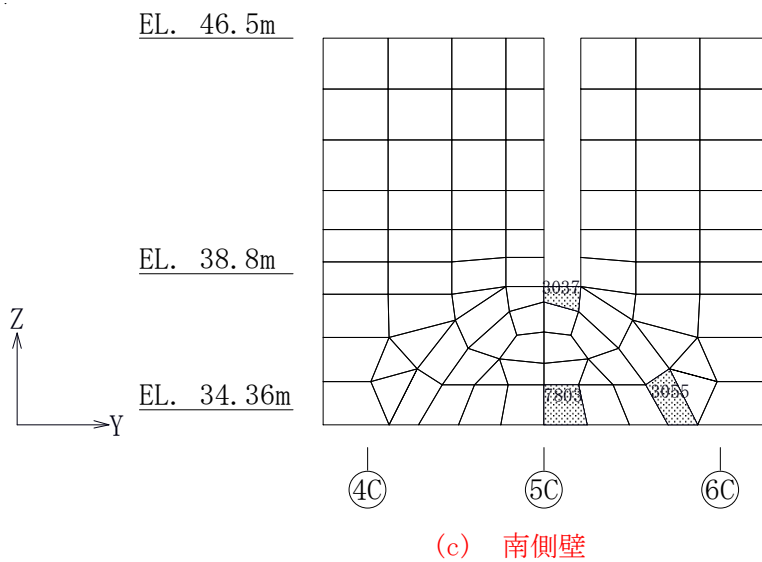


(a) 北側壁

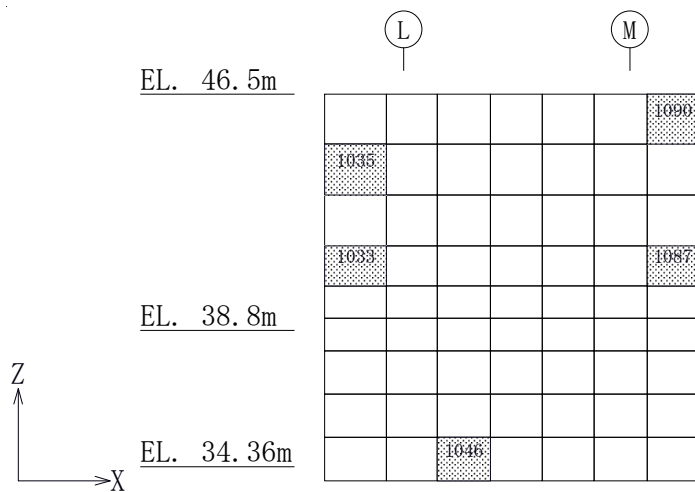


(b) 東側壁

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 3.1.7-4 (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 ($\times 10^{-3}$)	2219	4 - 9	0.135	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	2272	4 - 15	1.78	5.00	引張側
	東側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	1590	4 - 4	0.148	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	1590	4 - 16	1.93	5.00	引張側
	南側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	3055	4 - 16	0.337	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	3037	4 - 14	1.60	5.00	引張側
	西側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	1090	4 - 1	0.159	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	1046	4 - 9	1.69	5.00	引張側
軸力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	2272	4 - 3	0.716	14.7	
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1581	4 - 12	1.36	14.7	
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	3043	4 - 10	3.22	14.7	
	西側壁	面内せん断応力度 (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 3.1.7-4 (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 ($\times 10^{-3}$)	2219	3 - 16	0.142	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	2272	3 - 5	1.77	5.00	引張側
	東側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	1535	3 - 5	0.135	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	1590	3 - 7	1.78	5.00	引張側
	南側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	3055	3 - 15	0.393	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	3037	3 - 5	1.46	5.00	引張側
	西側壁	コンクリート ($\times 10^{-3}$)	1035	3 - 6	0.145	3.00	圧縮側
		鉄筋 ($\times 10^{-3}$)	1046	3 - 8	1.58	5.00	引張側
軸力	北側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	2272	3 - 2	0.701	14.7	
	東側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	1581	3 - 8	1.36	14.7	
	南側壁	面内せん断応力度 (N/mm ²)	3055	3 - 15	3.15	14.7	
	西側壁	面内せん断応力度 (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 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、S₀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。

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。

参考

参表 1 (1/2) 補強等の原子炉建屋改造工事に伴う重量の増加分を考慮した応答倍率

(a) NS 方向 最大応答せん断力

EL. (m)	要素 番号	最大応答せん断力 ($\times 10^4$ kN)		応答倍率 (補強反映モデル/ 今回工認モデル)
		今回工認モデル	補強反映モデル	
63.65 ~ 57.00	(1)	1.66	1.64	0.99
57.00 ~ 46.50	(2)	3.13	3.32	1.06
46.50 ~ 38.80	(3)	8.21	8.45	1.03
38.80 ~ 34.70	(4)	15.2	15.6	1.03
34.70 ~ 29.00	(5)	20.9	21.4	1.02
29.00 ~ 20.30	(6)	27.5	28.2	1.03
20.30 ~ 14.00	(7)	35.3	36.0	1.02
14.00 ~ 8.20	(8)	45.4	46.1	1.02
8.20 ~ 2.00	(9)	54.2	55.2	1.02
2.00 ~ -4.00	(10)	65.3	66.3	1.02

(b) EW 方向 最大応答せん断力

EL. (m)	要素 番号	最大応答せん断力 ($\times 10^4$ kN)		応答倍率 (補強反映モデル/ 今回工認モデル)
		今回工認モデル	補強反映モデル	
63.65 ~ 57.00	(1)	1.72	1.73	1.01
57.00 ~ 46.50	(2)	3.26	3.45	1.06
46.50 ~ 38.80	(3)	8.30	8.55	1.03
38.80 ~ 34.70	(4)	15.6	15.9	1.02
34.70 ~ 29.00	(5)	21.5	21.8	1.01
29.00 ~ 20.30	(6)	28.7	29.0	1.01
20.30 ~ 14.00	(7)	36.6	37.3	1.02
14.00 ~ 8.20	(8)	46.1	47.0	1.02
8.20 ~ 2.00	(9)	54.4	55.4	1.02
2.00 ~ -4.00	(10)	65.4	66.4	1.02

参表 1 (2/2) 補強等の原子炉建屋改造工事に伴う重量の増加分を考慮した応答倍率
(c) UD 方向 最大応答軸力

EL. (m)	要素 番号	最大応答軸力 ($\times 10^4$ kN)		応答倍率 (補強反映モデル/ 今回工認モデル)
		工認モデル	改造考慮	
63.65 ~ 57.00	(1)	1.39	1.40	1.01
57.00 ~ 46.50	(2)	2.49	2.62	1.05
46.50 ~ 38.80	(3)	6.82	6.93	1.02
38.80 ~ 34.70	(4)	12.8	12.9	1.01
34.70 ~ 29.00	(5)	17.7	17.9	1.01
29.00 ~ 20.30	(6)	24.2	24.5	1.01
20.30 ~ 14.00	(7)	31.7	32.1	1.01
14.00 ~ 8.20	(8)	41.5	42.0	1.01
8.20 ~ 2.00	(9)	49.4	50.0	1.01
2.00 ~ -4.00	(10)	57.6	58.3	1.01

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
2.2 固有値解析.....	別紙 3-15
2.3 観測記録を用いた検討.....	別紙 3-18
2.4 地震観測記録を踏まえた耐震評価への影響検討.....	別紙 3-32
3. 3次元FEMモデルによる評価.....	別紙 3-42
3.1 地震応答解析の概要.....	別紙 3-42
3.2 建屋応答性状の把握.....	別紙 3-47
3.3 建屋耐震評価への影響検討.....	別紙 3-68
3.4 床応答への影響検討.....	別紙 3-101

1. 検討概要

建屋の3次元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45.5m、東西方向42.5m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68.5m、東西方向68.25mのほぼ正方形となっている。基礎底面からの高さは73.08mであり、地上高さは56.08m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5.0m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1.9m、下部で1.8m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1.5m、地上部分では1.5m～0.3m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1.5m、地上部分では1.5m～0.9m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.46.5m)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1-1及び図1-2に示す。

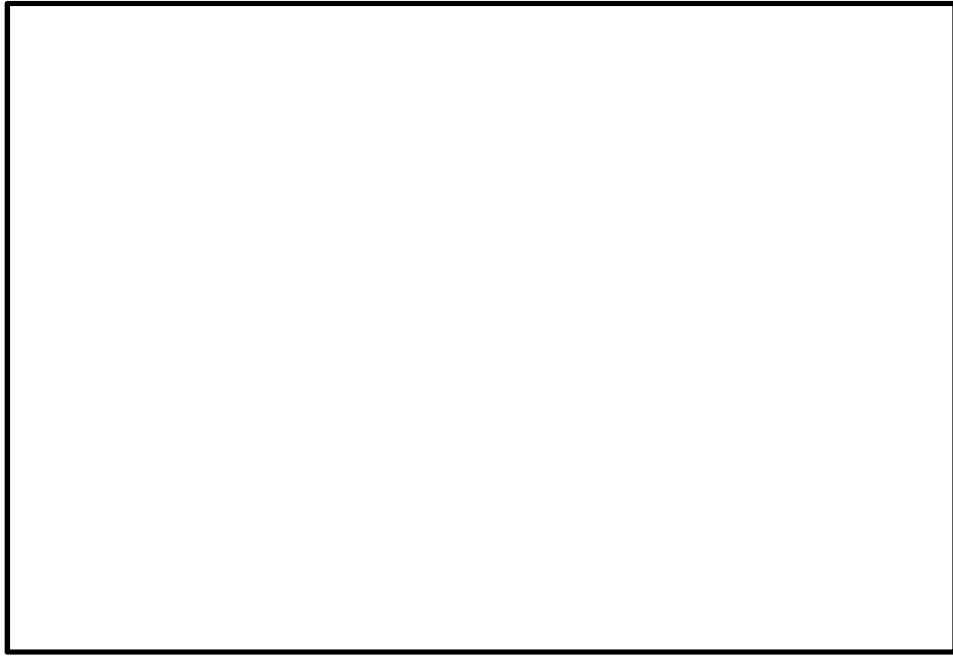


図 1-1 (1/2) 原子炉建屋の概略平面図 (EL. 46.5 m)

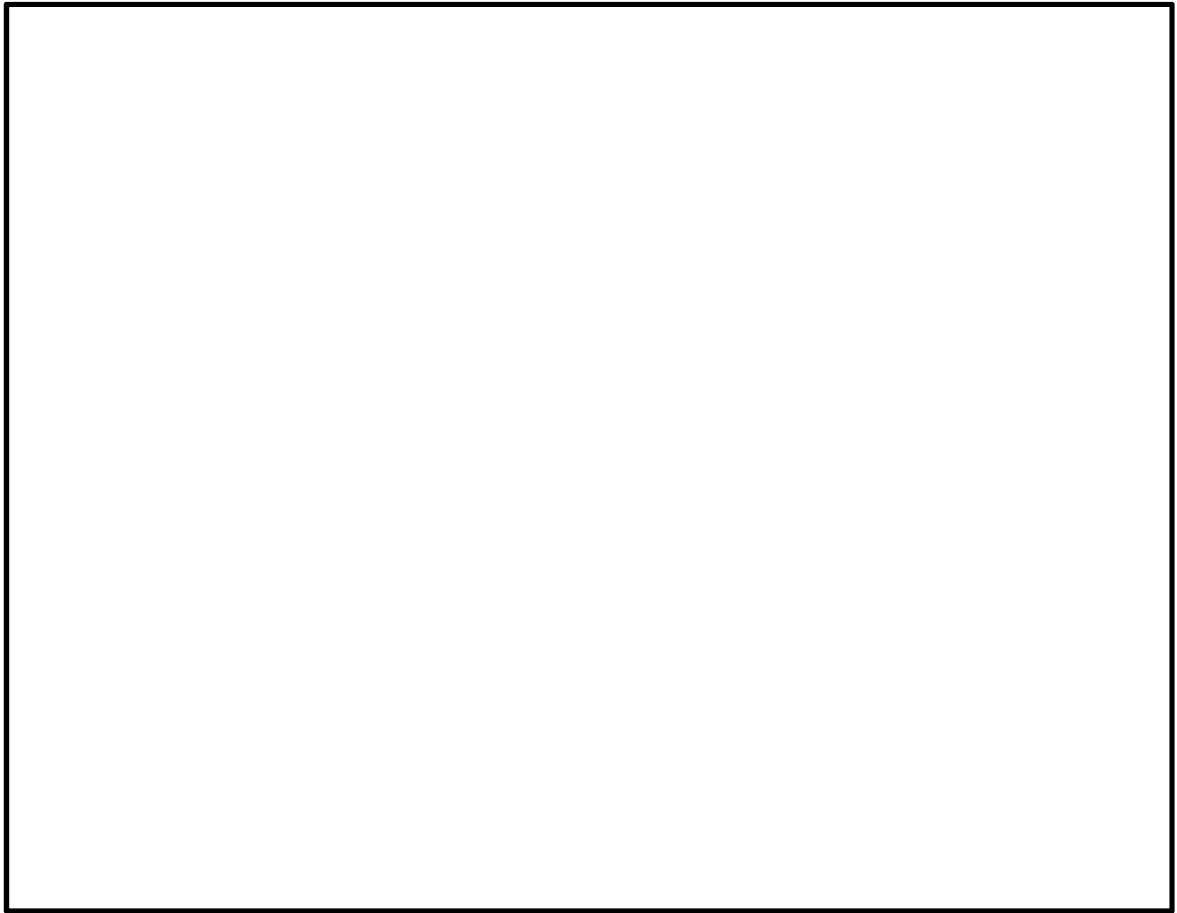


図 1-1 (2/2) 原子炉建屋の概略平面図 (EL. -4.0 m)

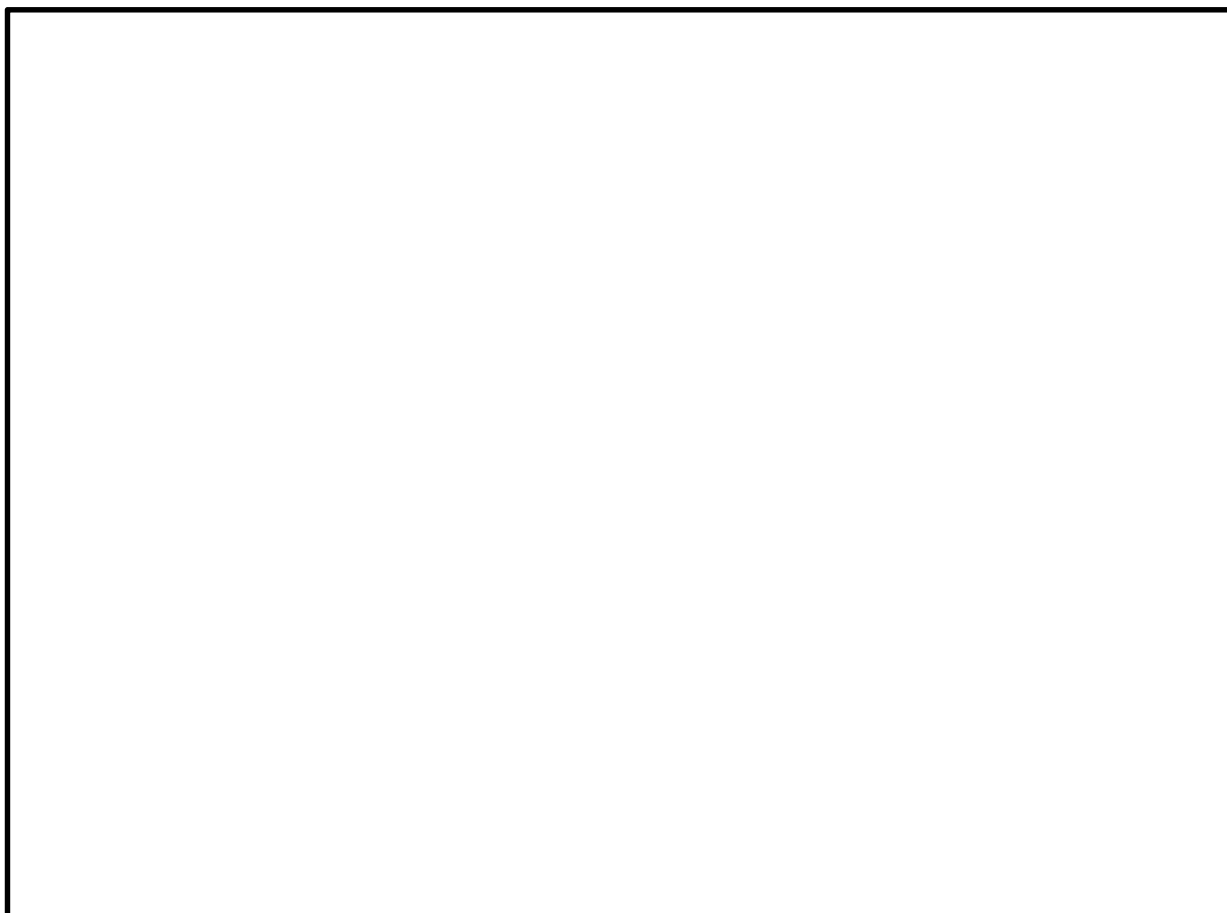


図 1-2 (1/2) 原子炉建屋の概略断面図 (A-A 断面)

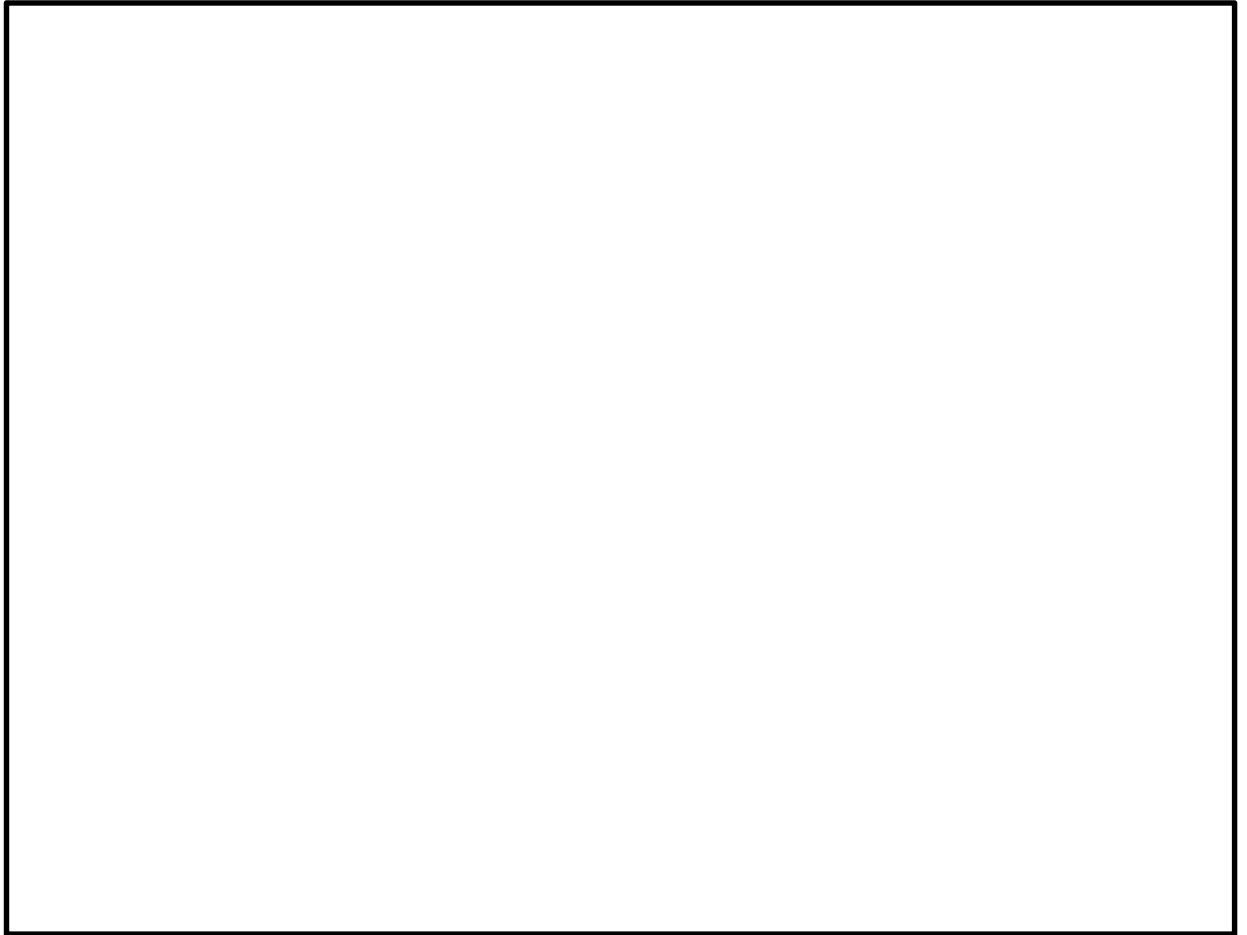


図 1-2 (2/2) 原子炉建屋の概略断面図 (B-B 断面)

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次元的な応答特性、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。

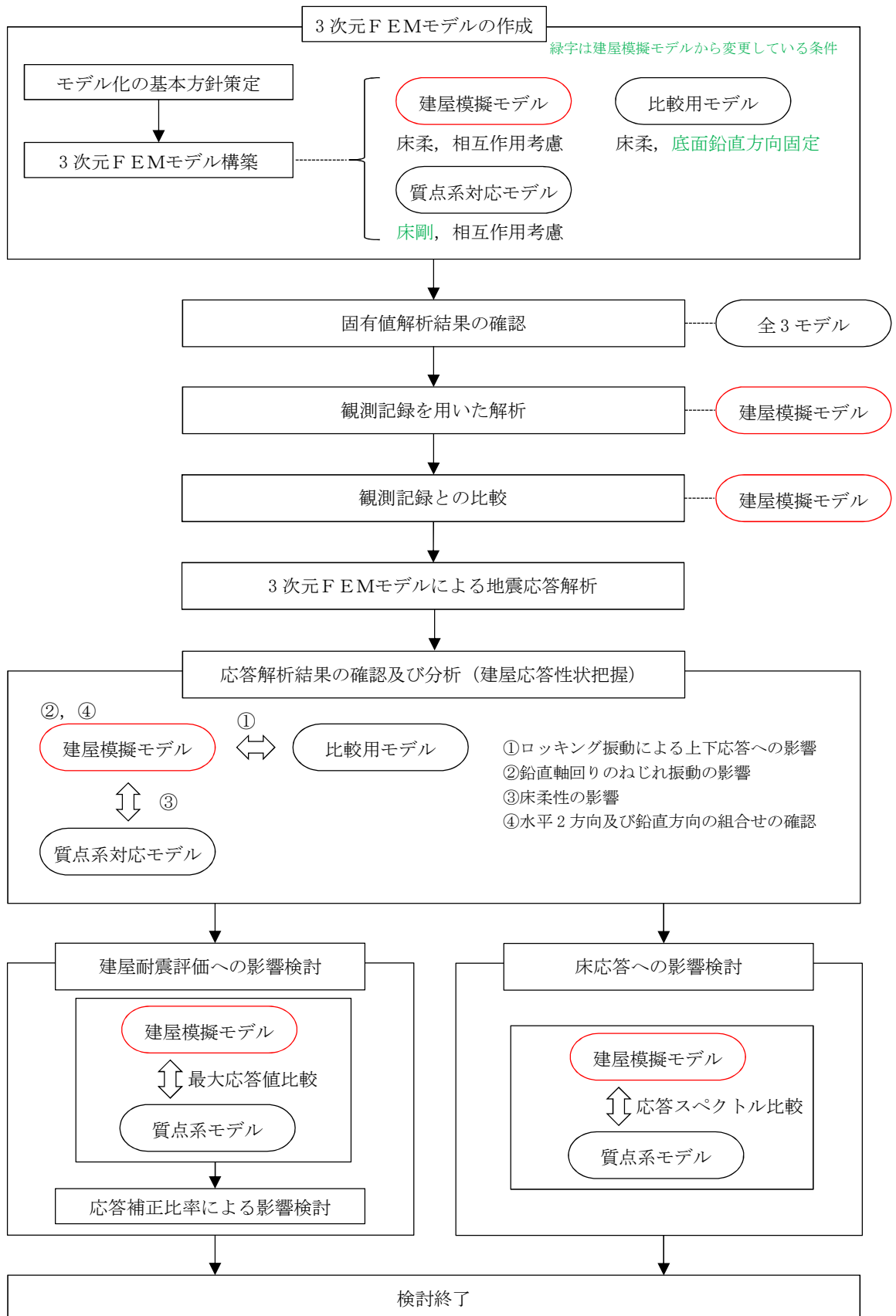


図 1-3 3次元FEMモデルによる耐震性評価フロー

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

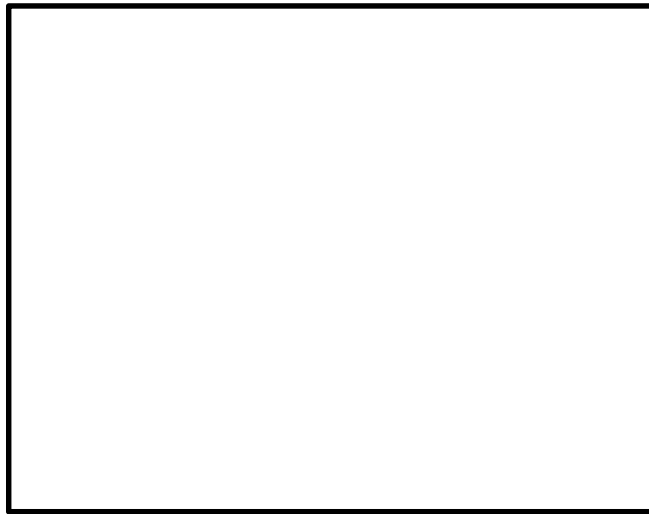
原子炉建屋の3次元FEMモデルを構築する。解析モデルを図2-1に示す。

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2~3m程度とする。

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2-2~図2-5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



(b) EW 断面図



(c) NS 断面図

図 2-1 解析モデル

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	ポアソン比 ν
8.0	du*	5.0	1.82	210	0.385
3.0	Ag2*	1.0	1.89	240	0.286
2.0		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

*：地下水位より浅いことを示す。

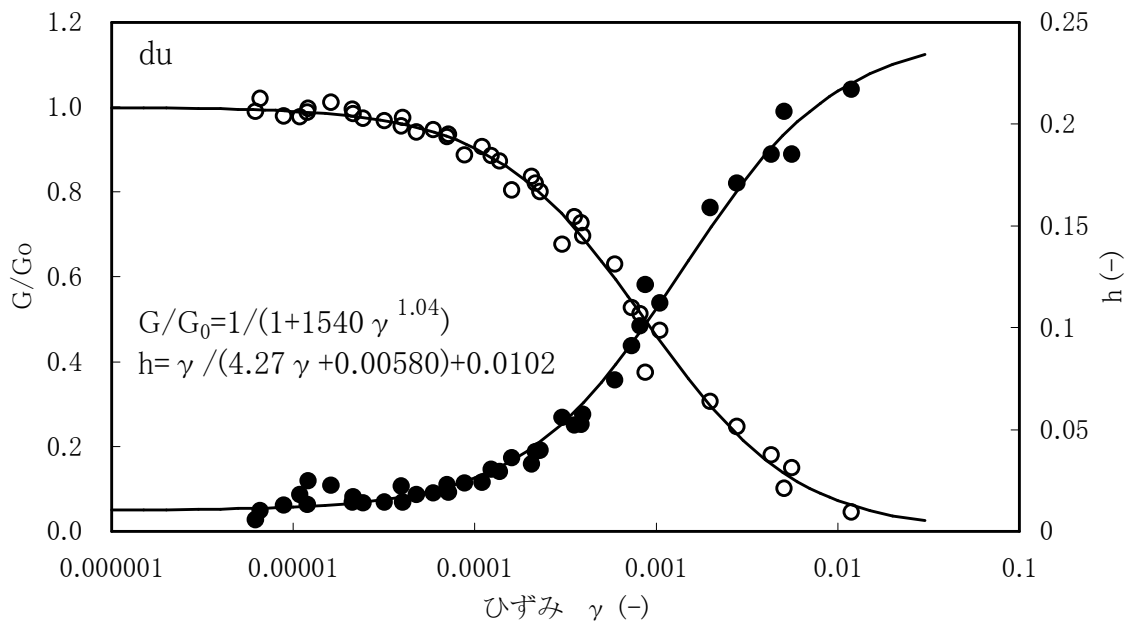


図 2-2 動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性 (du 層)

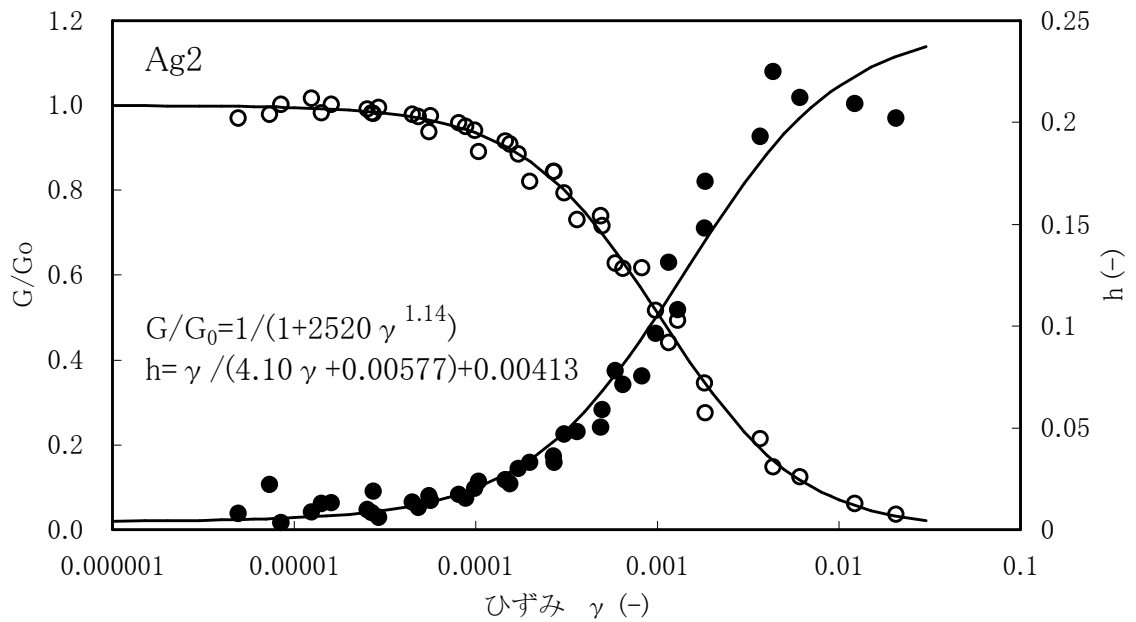


図 2-3 動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性 (Ag2 層)

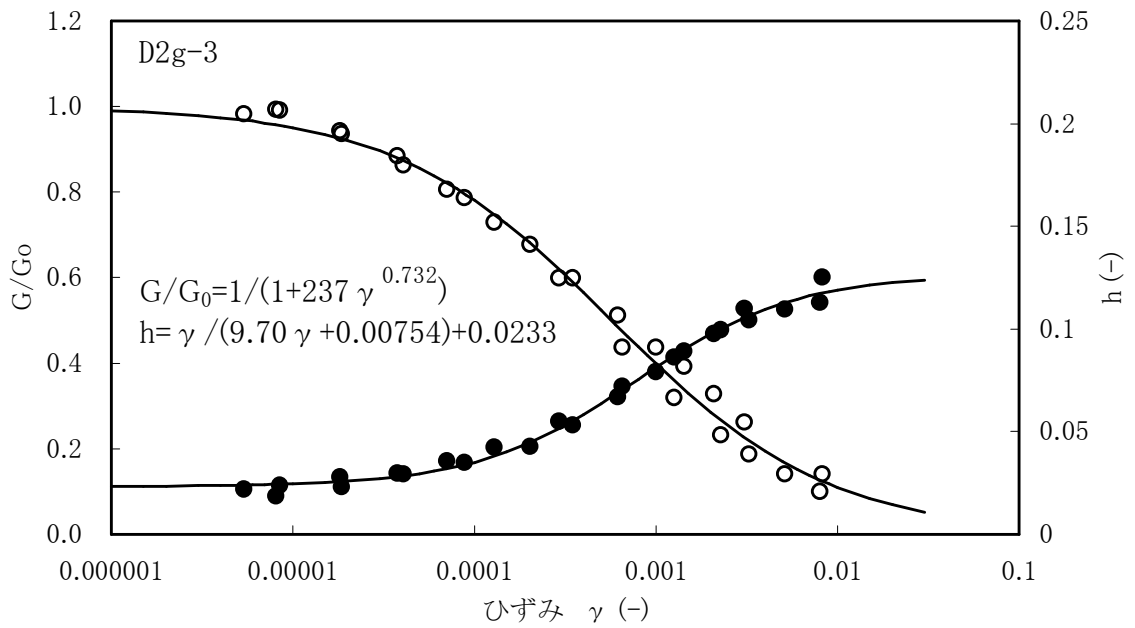


図 2-4 動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性 (D2g-3 層)

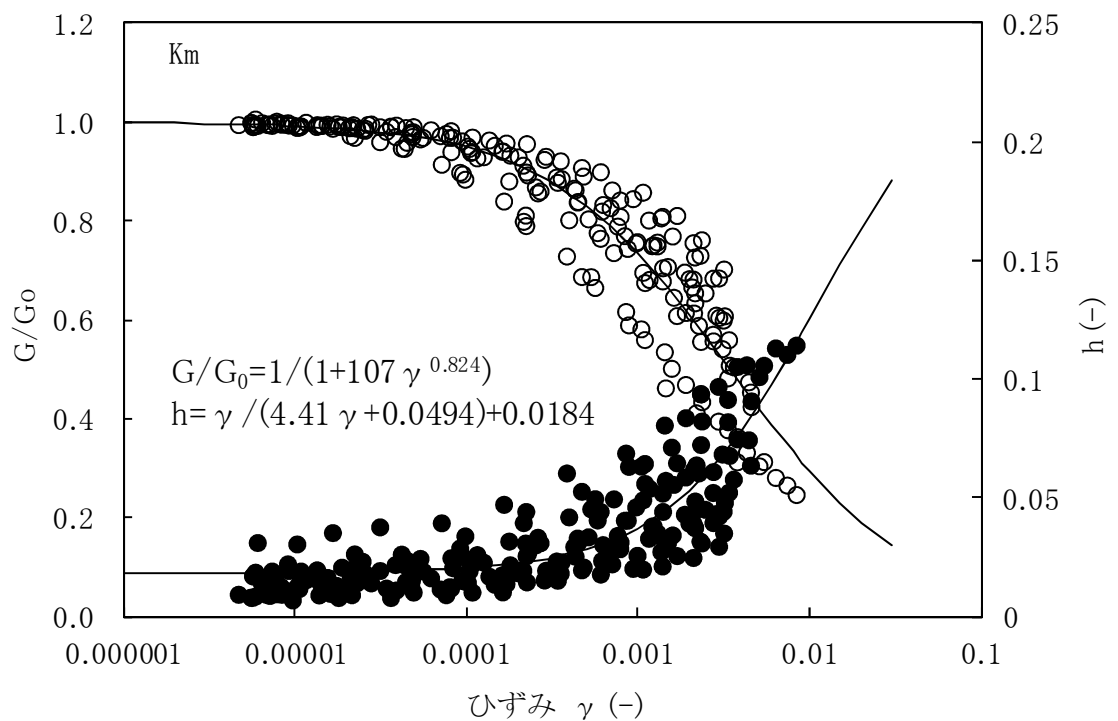


図 2-5 動せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性 (Km 層)

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 2-6 に示す。

表 2-3 底面地盤ばね定数と減衰係数（水平方向）

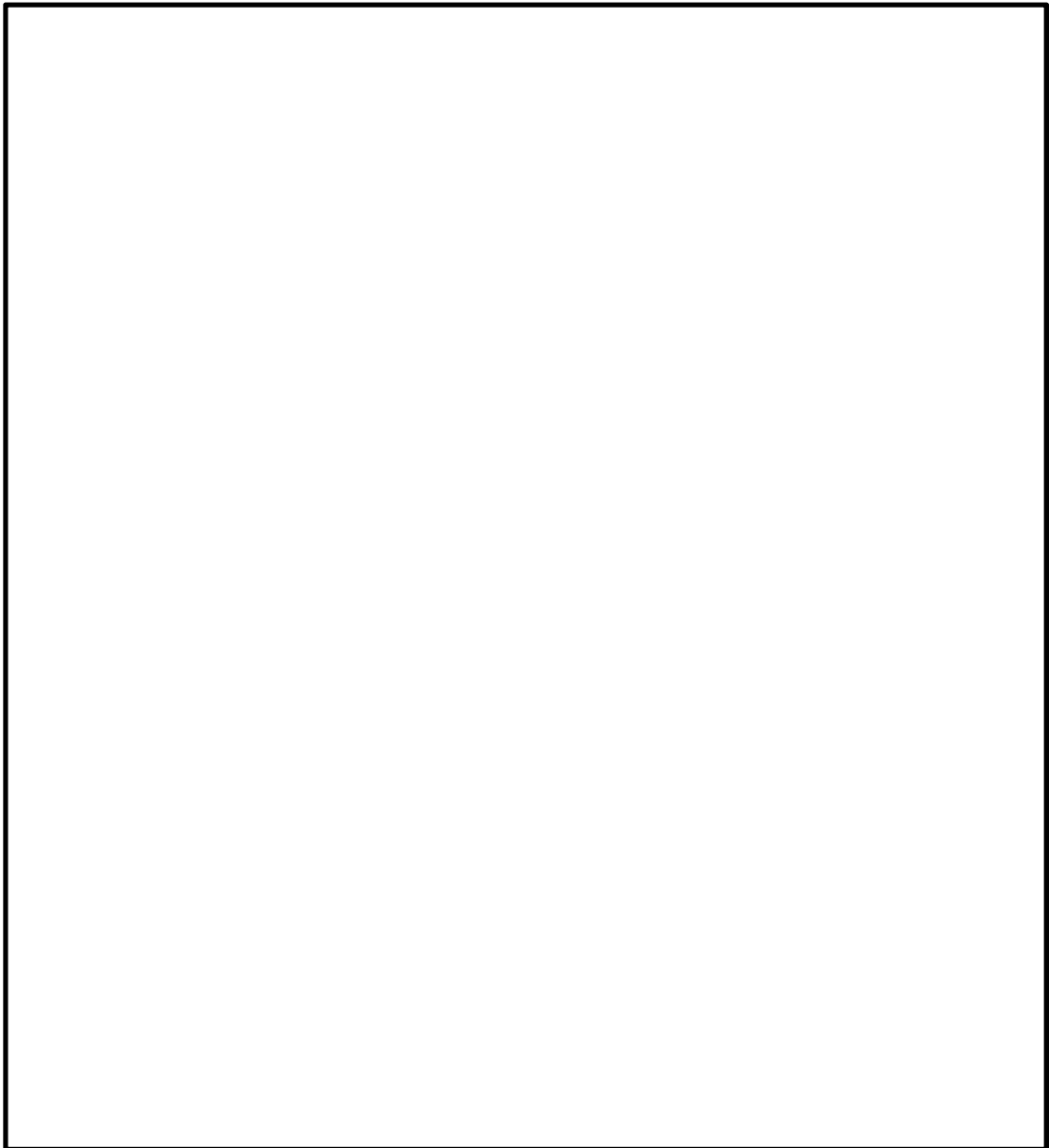
地盤ばね	NS 方向		EW 方向	
	ばね定数	減衰係数	ばね定数	減衰係数
水平底面ばね	6.95×10^7 kN/m	3.58×10^6 kN・s/m	6.95×10^7 kN/m	3.59×10^6 kN・s/m

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
※底面地盤ばねは3方向軸ばねとする。
※側面地盤ばねは法線方向軸ばねとする。

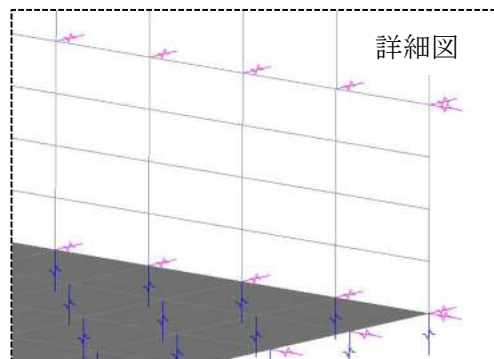


図 2-6 地盤ばねの設置図

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_a-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。

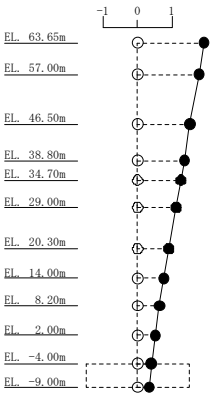

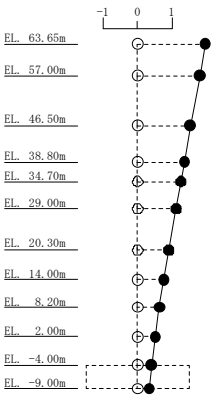
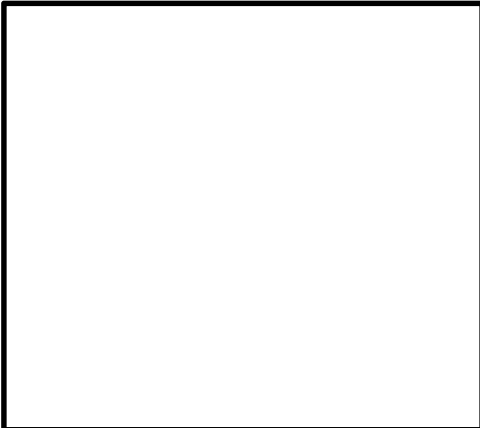
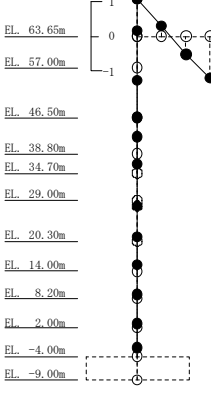
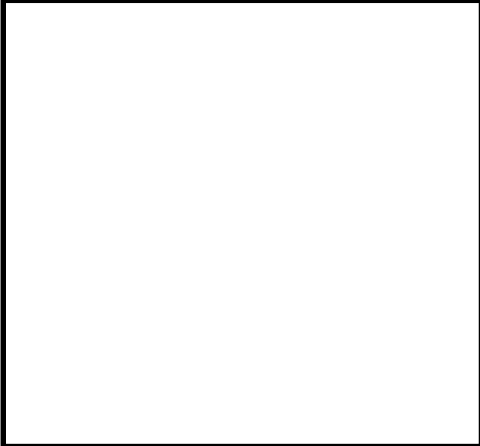
質点系対応モデルと質点系モデルとでは，補助壁のモデル化に差異がある。質点系対応モデルでは，補助壁をモデル化しているが，質点系モデルではモデル化していない。両モデルの固有値解析結果を比較すると，補助壁をモデル化した質点系対応モデルで剛性が質点系モデルより大きくなり，固有振動数も大きくなる傾向が見られる。

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	<p>1次モード 固有周期 : 0.394 (s) 固有振動数 : 2.54 (Hz) 刺激係数 : 1.936</p>  <p>2.54 Hz</p>	 <p>2.45 Hz</p>
EW	<p>1次モード 固有周期 : 0.396 (s) 固有振動数 : 2.53 (Hz) 刺激係数 : 1.962</p>  <p>2.53 Hz</p>	 <p>2.38 Hz</p>
UD	<p>2次モード 固有周期 : 0.265 (s) 固有振動数 : 3.78 (Hz) 刺激係数 : 1.465</p>  <p>3.78 Hz</p>	 <p>3.72 Hz</p>

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2-8に、地震計位置を図2-9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2-10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. -9.0m)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により算出する。応答の算出方法の概要を図2-7に示す。

検討は、地震計を設置しているEL. 46.5m, EL. 29.0m, EL. 14.0m及びEL. -4.0m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。

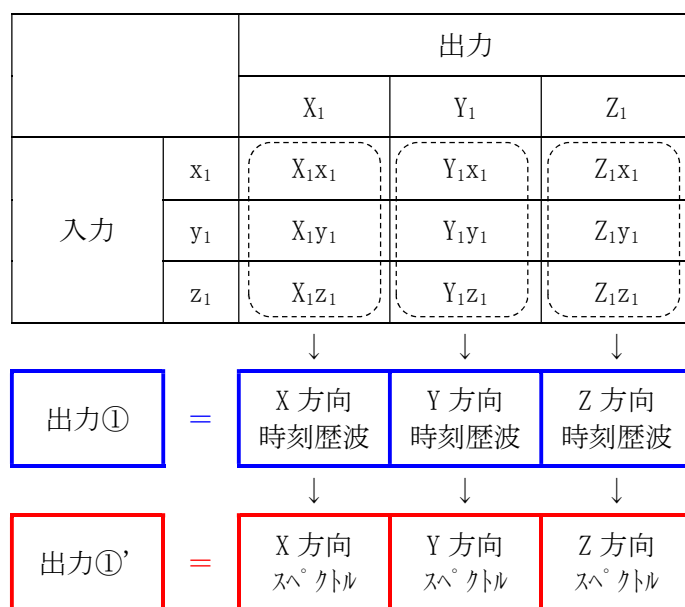


図 2-7 3方向同時入力による応答の算出方法

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 ^(注)
マグニチュード	9.0 ^(注)
震源深さ	24km ^(注)
震央距離	270
震源距離	271

(注) 気象庁発表値



図 2-8 東北地方太平洋沖地震の震央位置

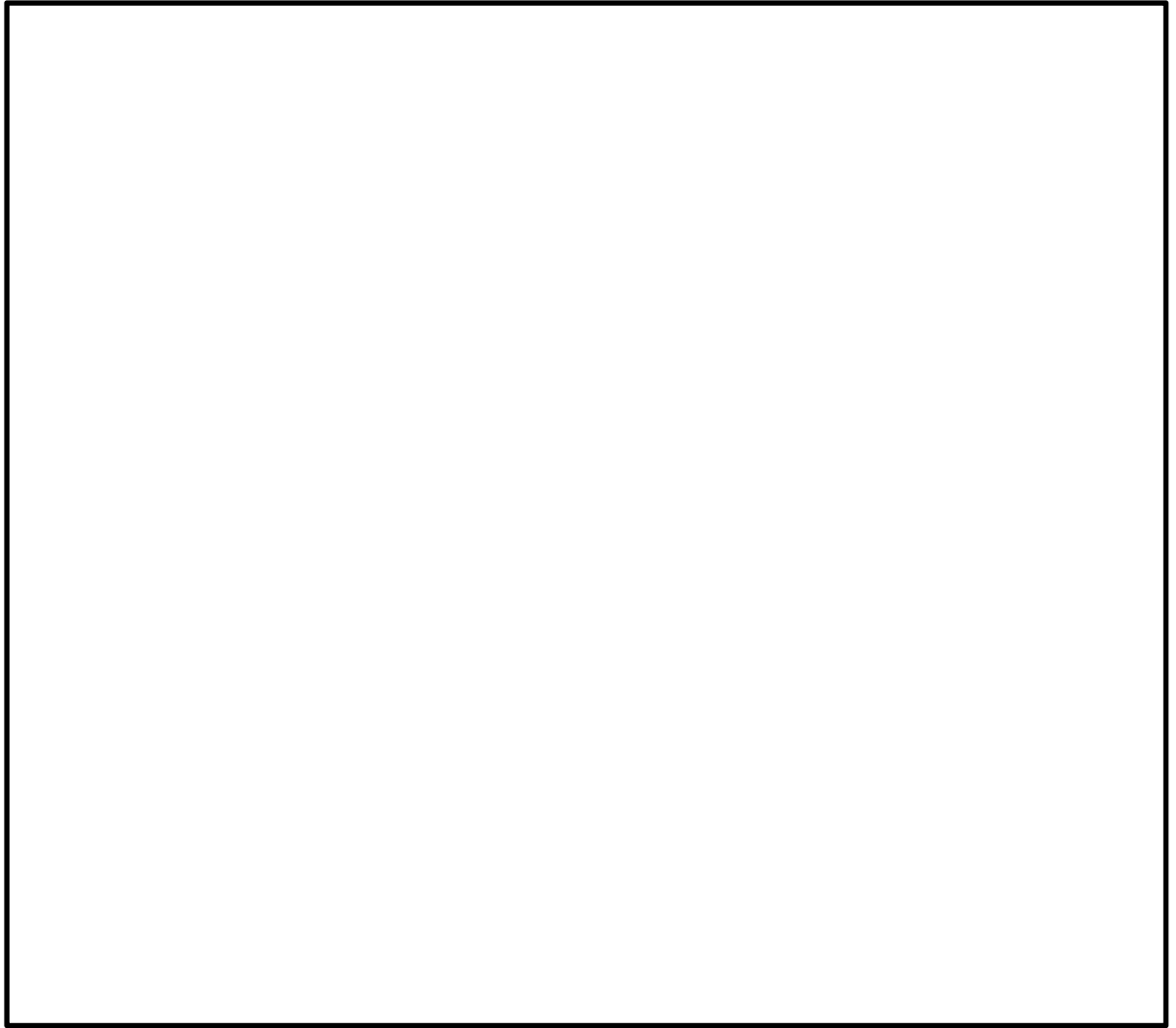
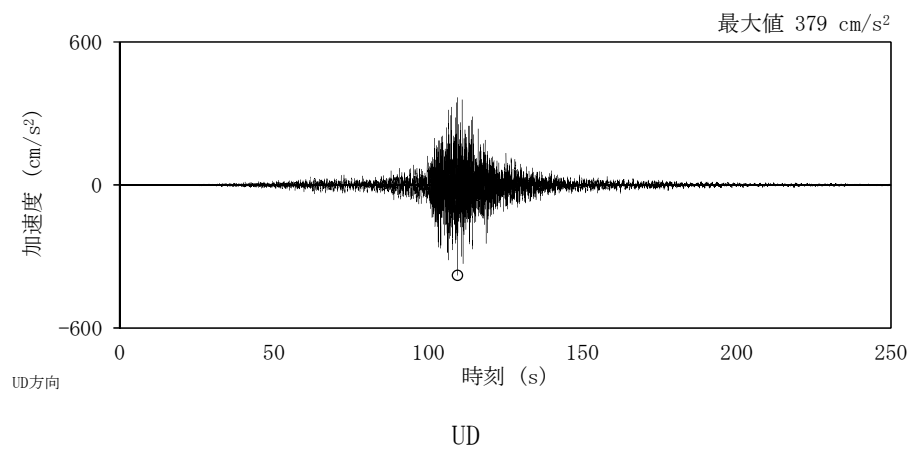
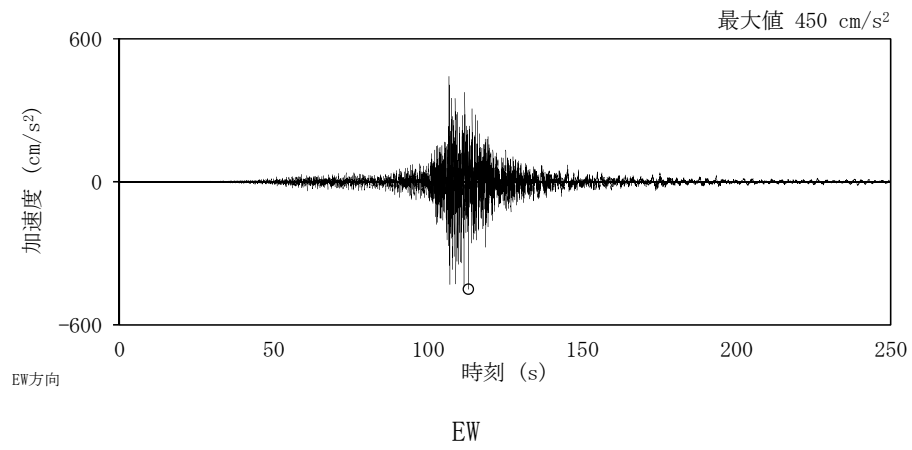
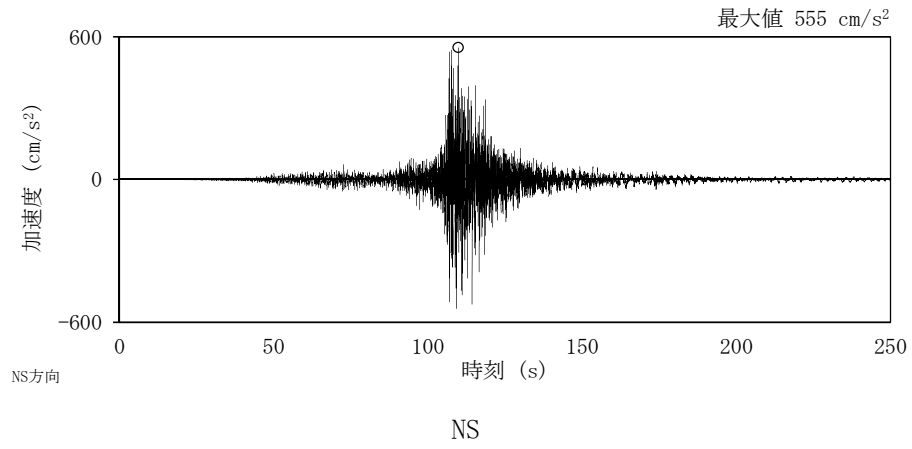
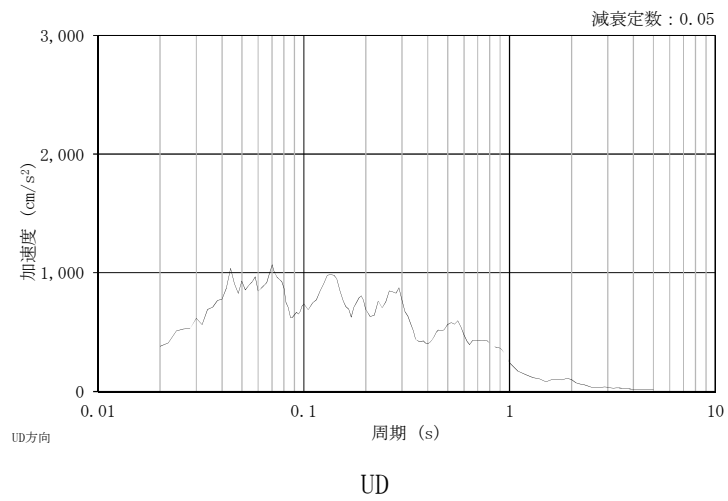
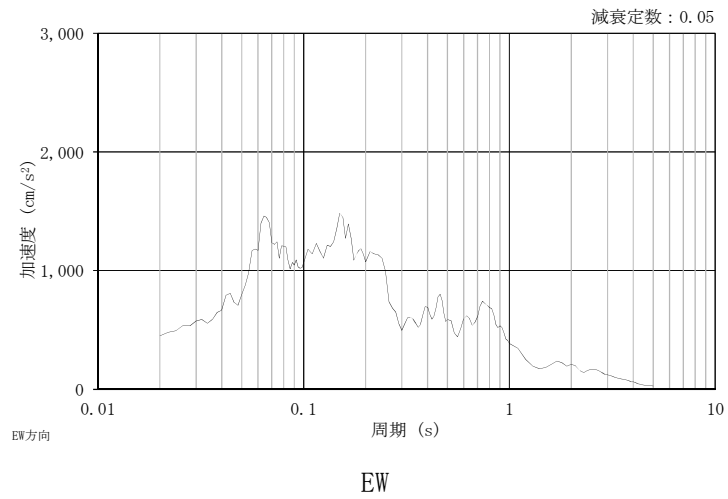
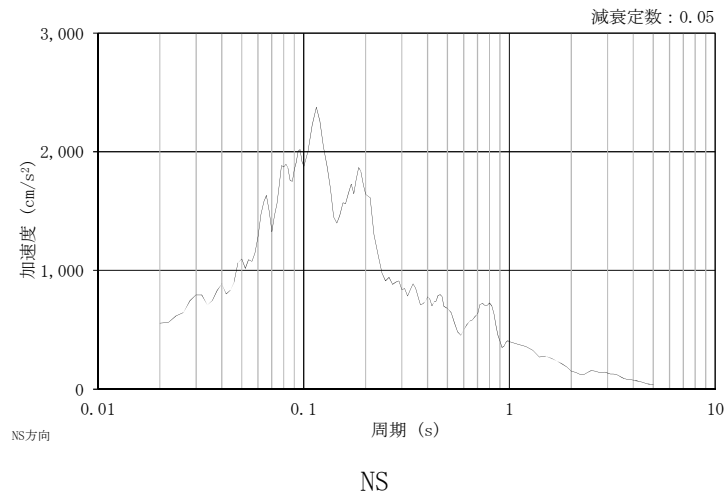


図 2-9 地震計位置



(a) 加速度波形

図 2-10 (1/2) 解放基盤表面レベル (EL. -370 m) での解放基盤波



(b) 加速度応答スペクトル

図 2-10 (2/2) 解放基盤表面レベル (EL. -370 m) での解放基盤波

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. 46.5m, EL. 29.0m, EL. 14.0m 及び EL. -4.0m 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. 46.5m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。

①0.4～0.5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。

②0.1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. 46.5m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 2-11 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（10.06Hz）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

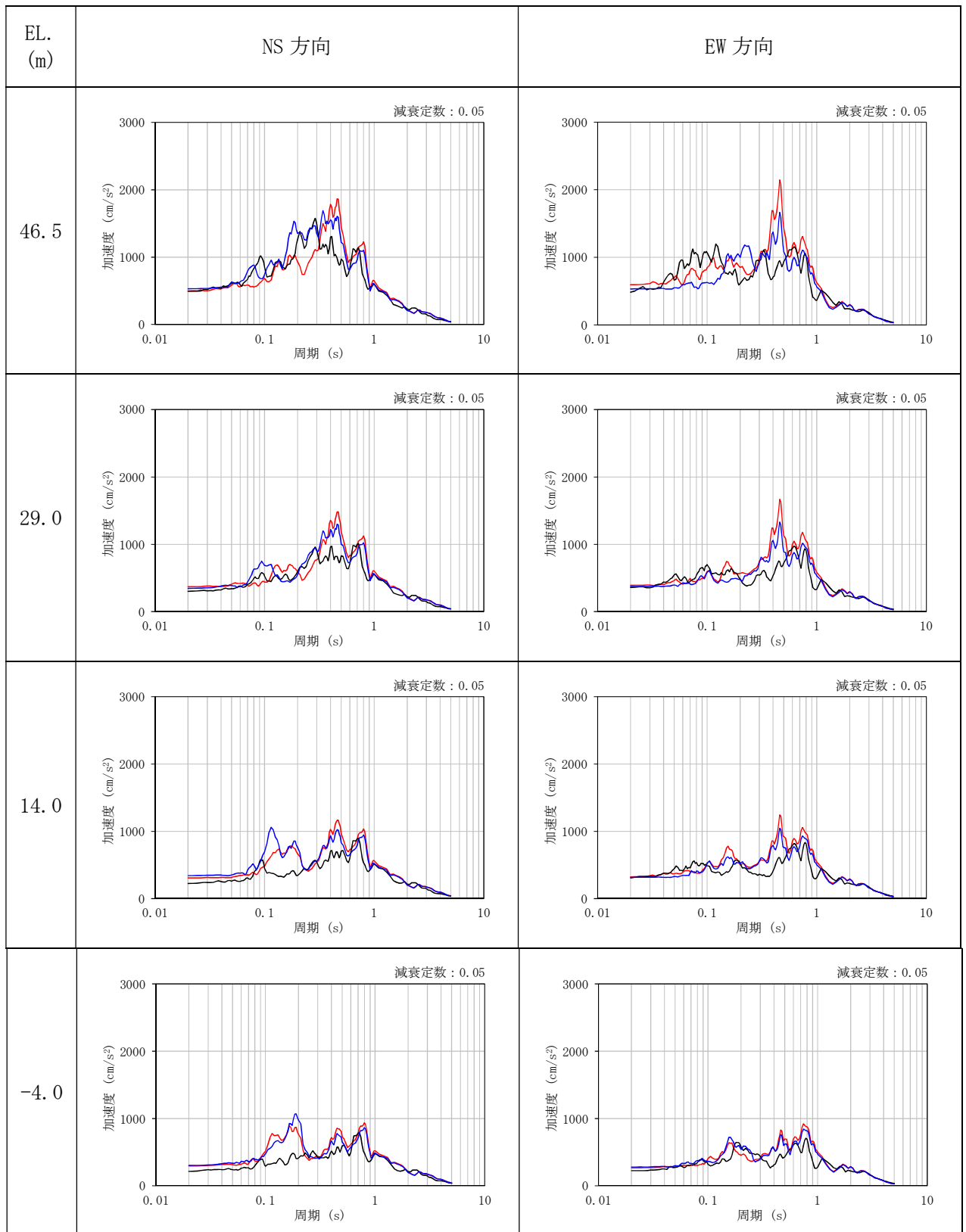
2.3.4 結論

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。

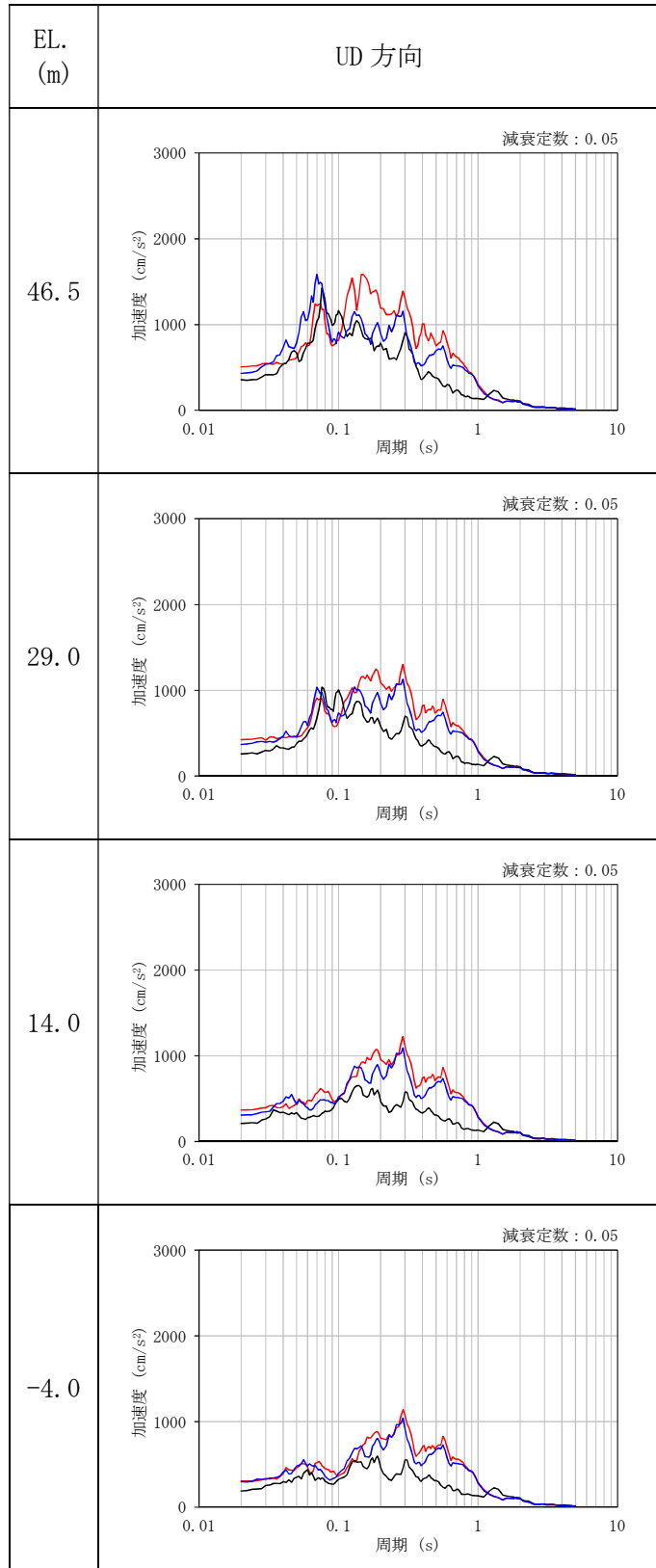
また、観測記録と質点系モデルの結果の比較で確認した局所的な応答と考えられる応答の影響については、以降で検討する。

表 2-12 (1/2) 観測記録と解析結果の比較 (h=5%)



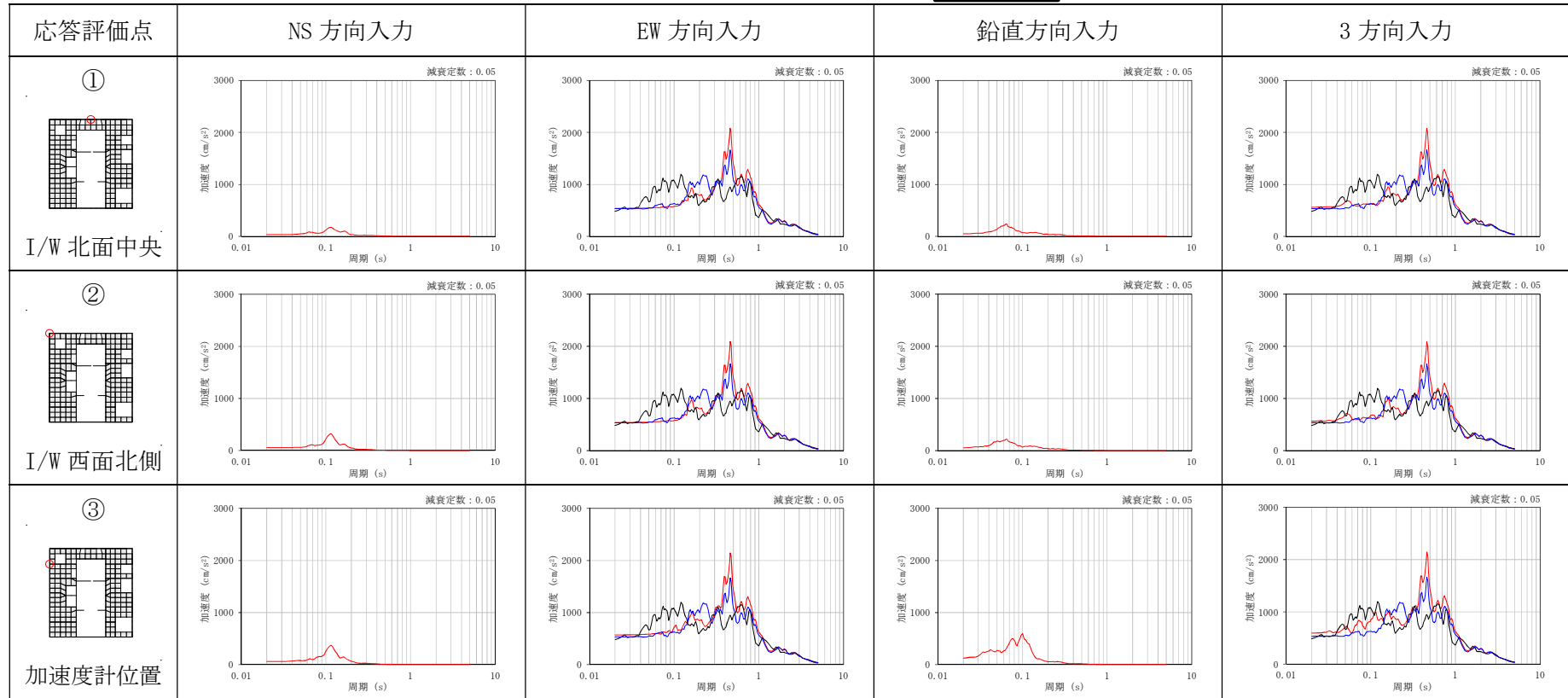
— 観測記録 — 3次元FEM — 質点系

表 2-12 (2/2) 観測記録と解析結果の比較 (h=5%)



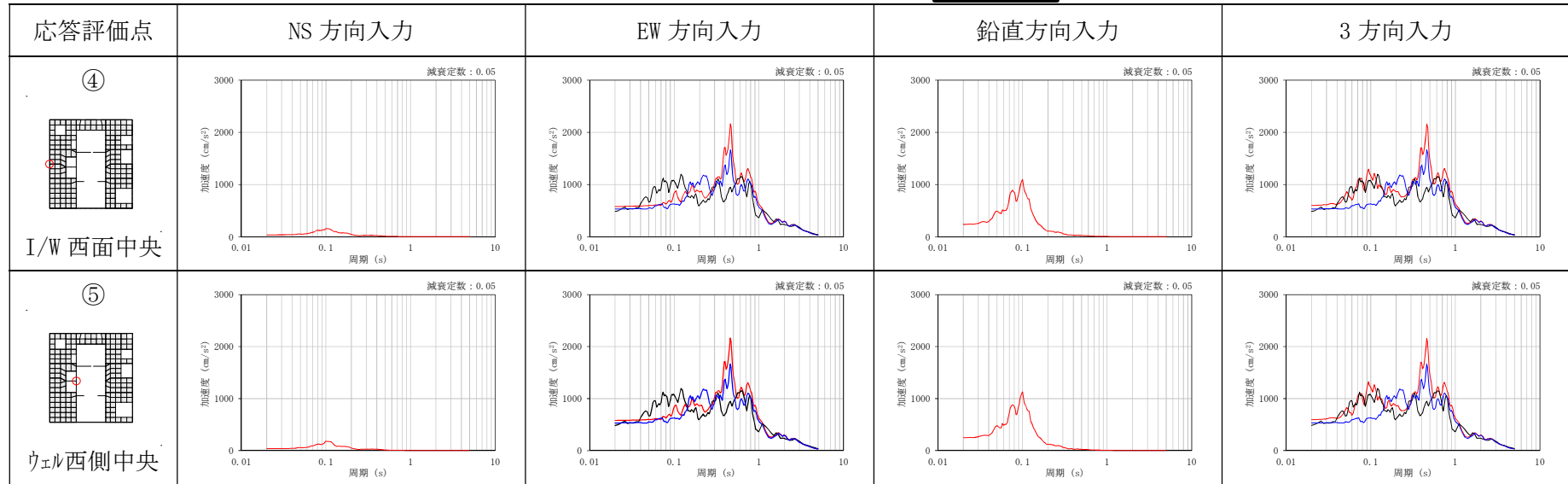
— 観測記録 — 3次元FEM — 質点系

表 2-13 (1/2) EW 方向の床応答スペクトル h=5%



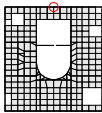
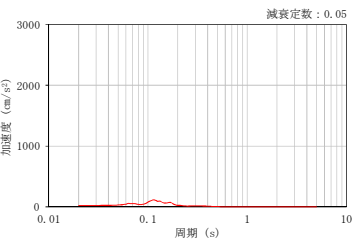
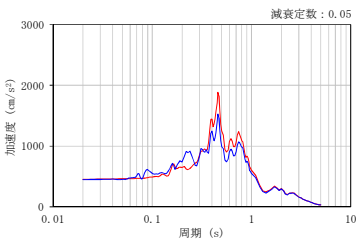
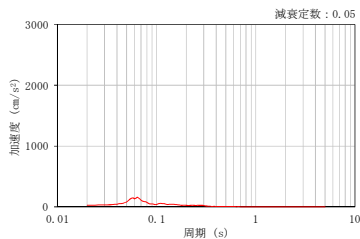
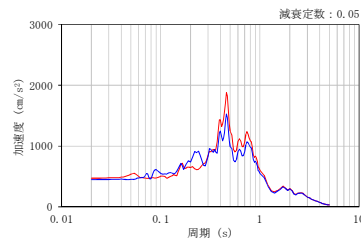
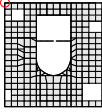
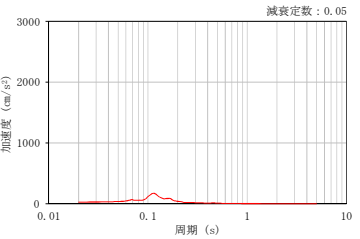
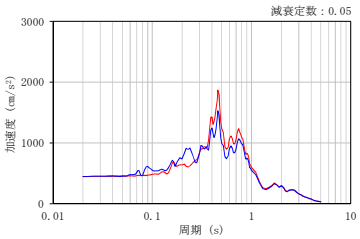
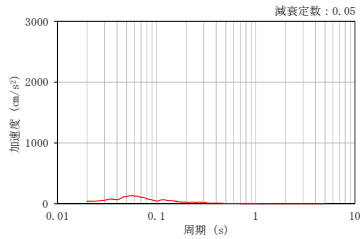
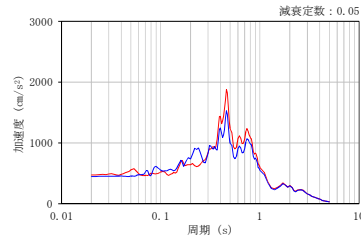
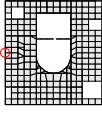
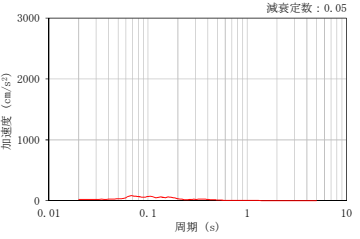
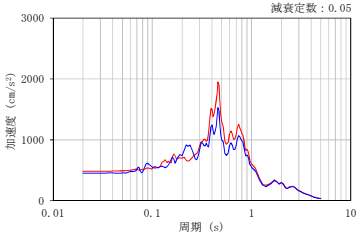
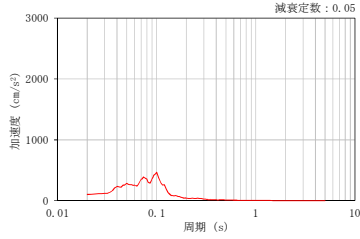
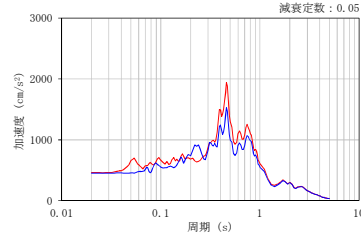
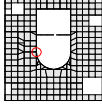
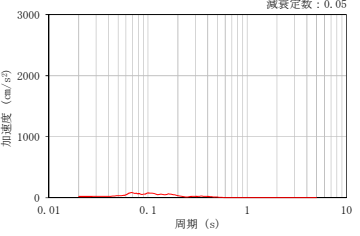
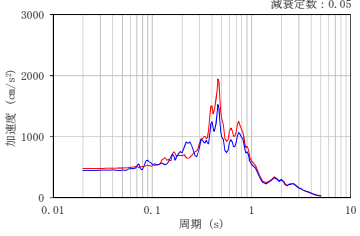
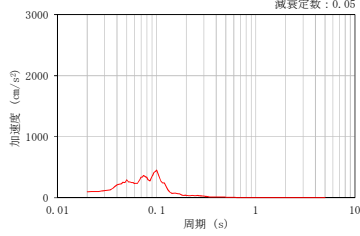
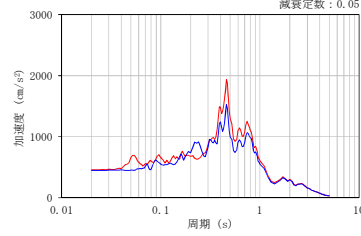
—— 観測記録
 —— 3次元FEM
 —— 質点系

表 2-13 (2/2) EW 方向の床応答スペクトル h=5%



— 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 (減衰定数: 0.05) 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

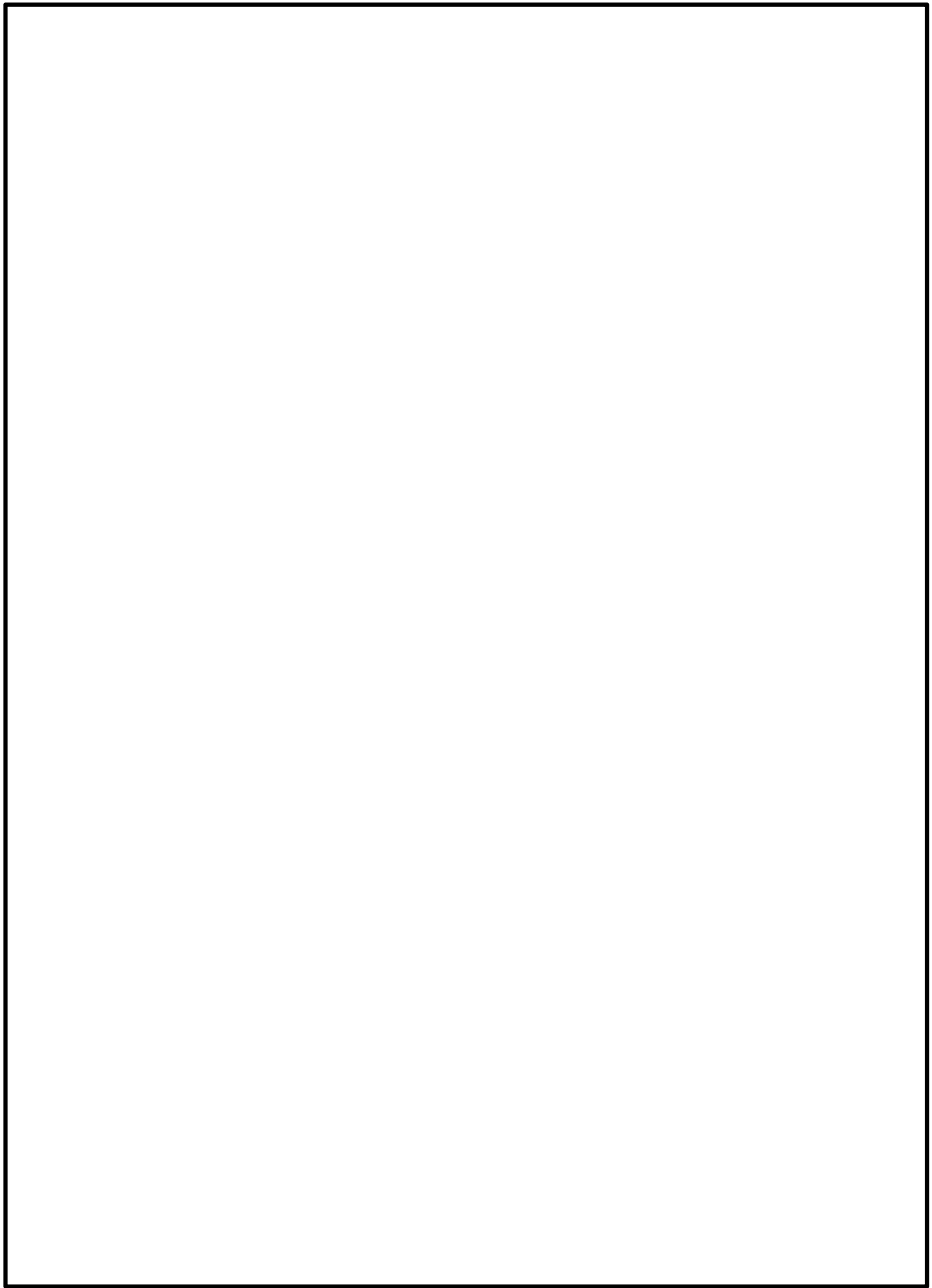


図 2-11 原子炉建屋 3 次元 FEM モデルのモード図 (EW 方向断面図)

2.4 地震観測記録を踏まえた耐震評価への影響検討

2.4.1 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 10Hz 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 10Hz 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。

2.4.2 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 2-12 に、評価する応力成分を図 2-13 に示す。

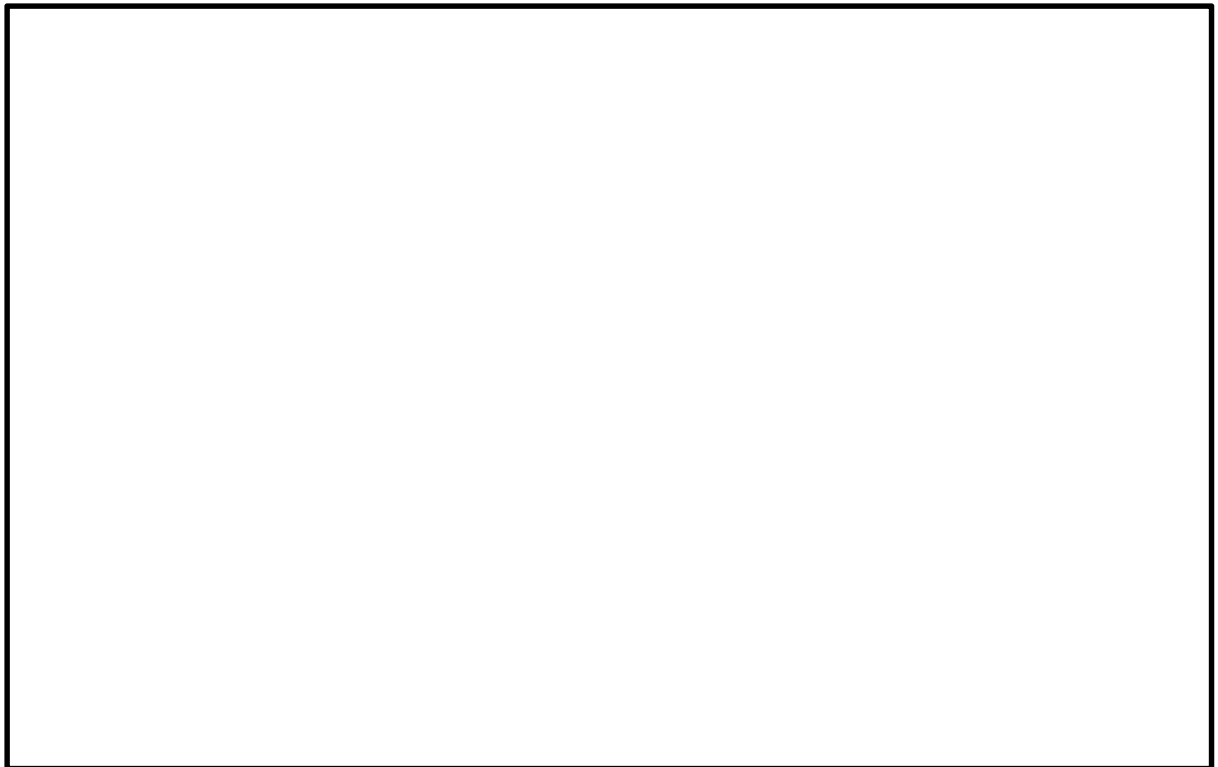


図 2-12 建屋全体モデルの評価対象要素 (EW 方向断面図)

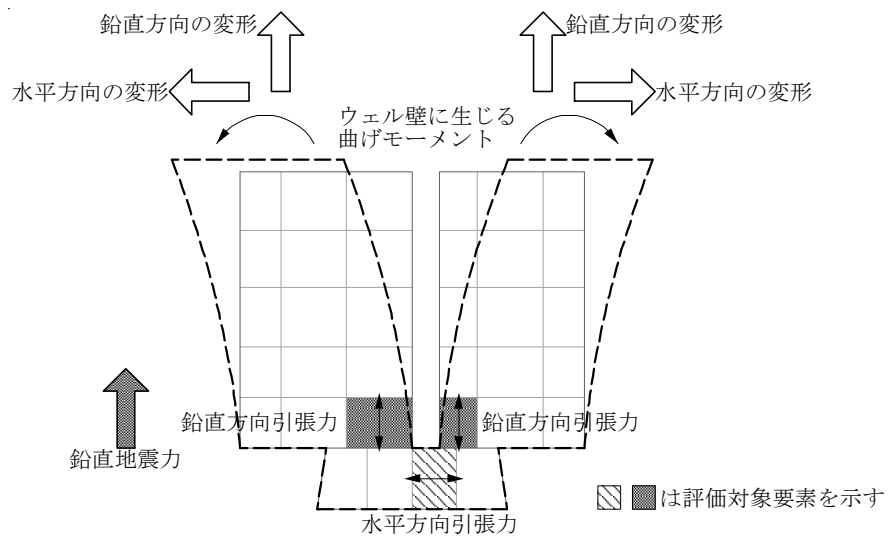


図 2-13 建屋全体モデルの評価対象部位及び応力成分

(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 2-14 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。

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

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。

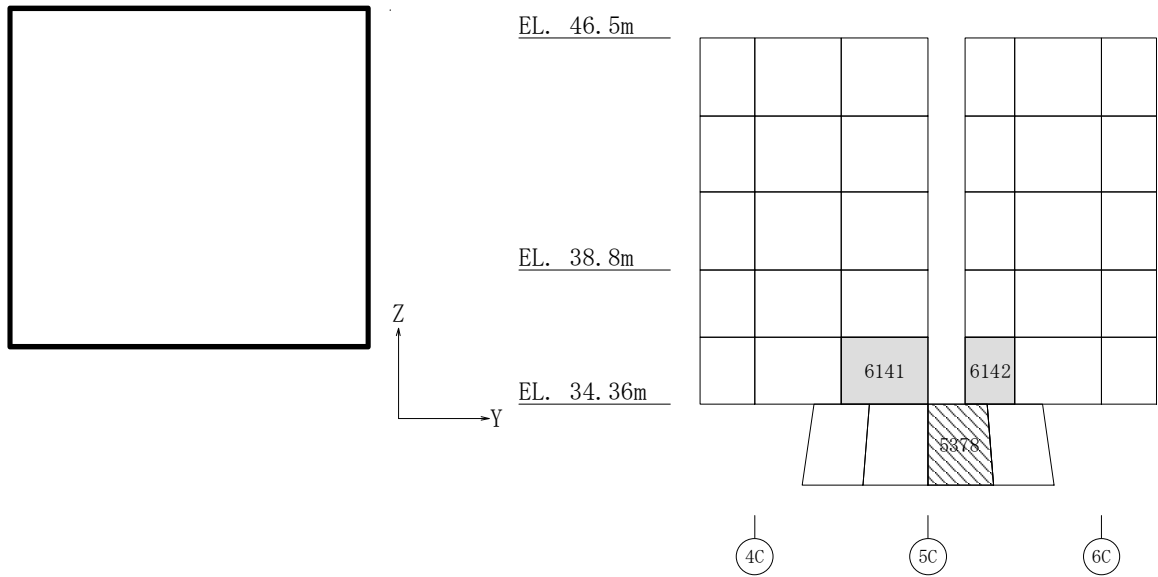
2) プールゲート部底部

2a：質点系モデルによるオペフロ (EL. 46.5m) 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。

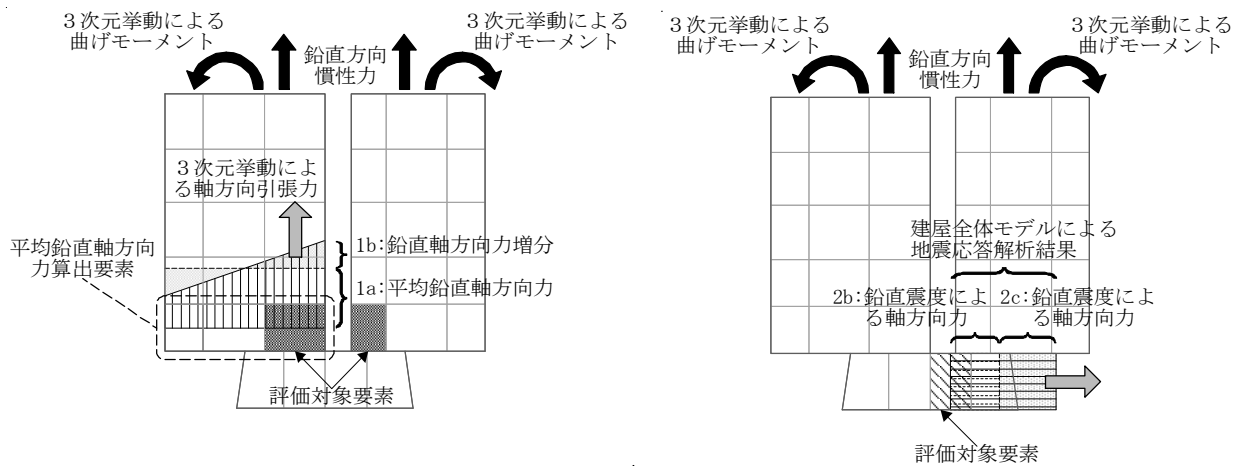
2c：各時刻の評価対象要素の水平軸方向力から、「2b」の水平軸方向力を減じる。

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 2-14 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 2-15 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 2-16 に示す。

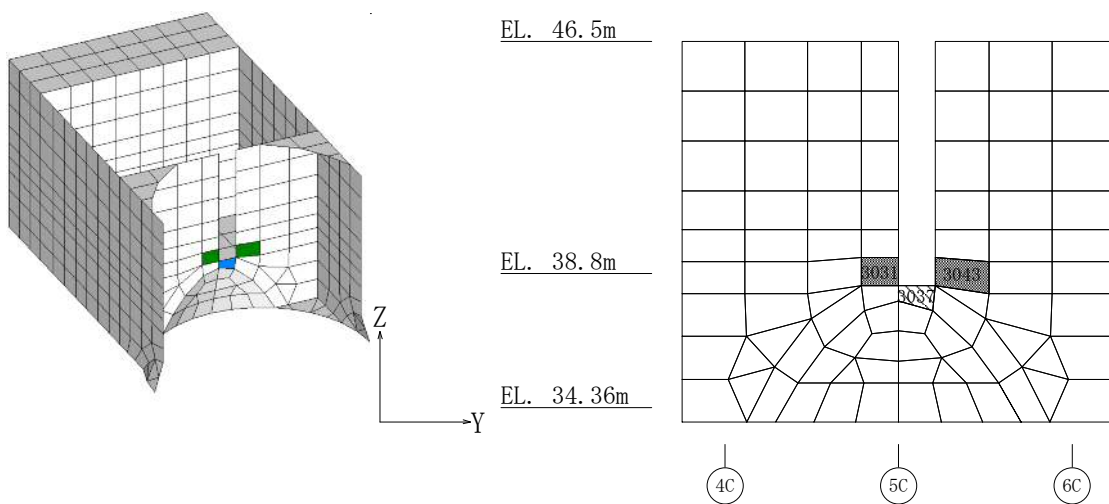
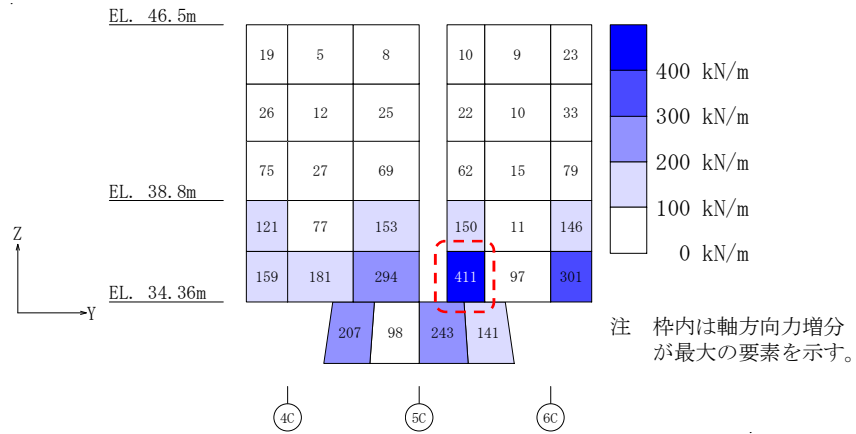


図 2-16 耐震評価モデルの評価対象要素

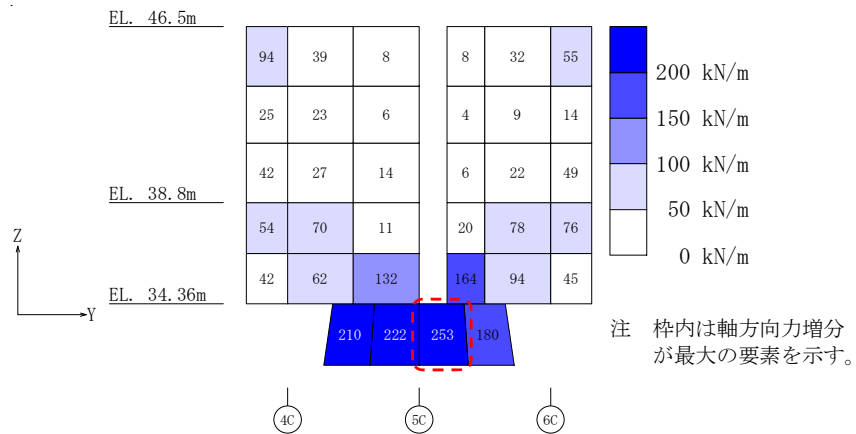
2.4.3 評価結果

(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_a-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2-17に軸方向力増分を、表2-15に応答増幅率の算定結果を示す。なお、図2-17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

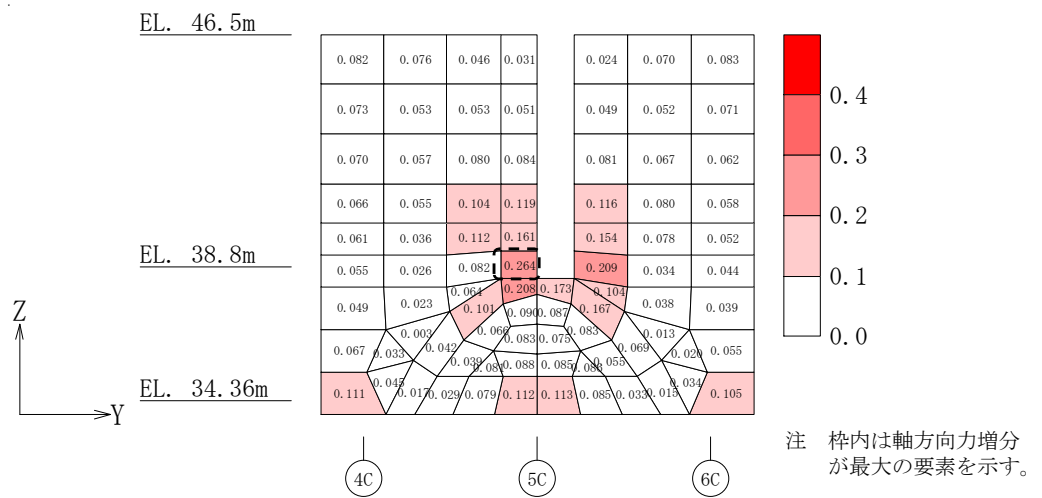
図2-17 開閉モードによる軸方向力増分（ S_a-D1 ）

表2-15 応答増幅率の評価結果

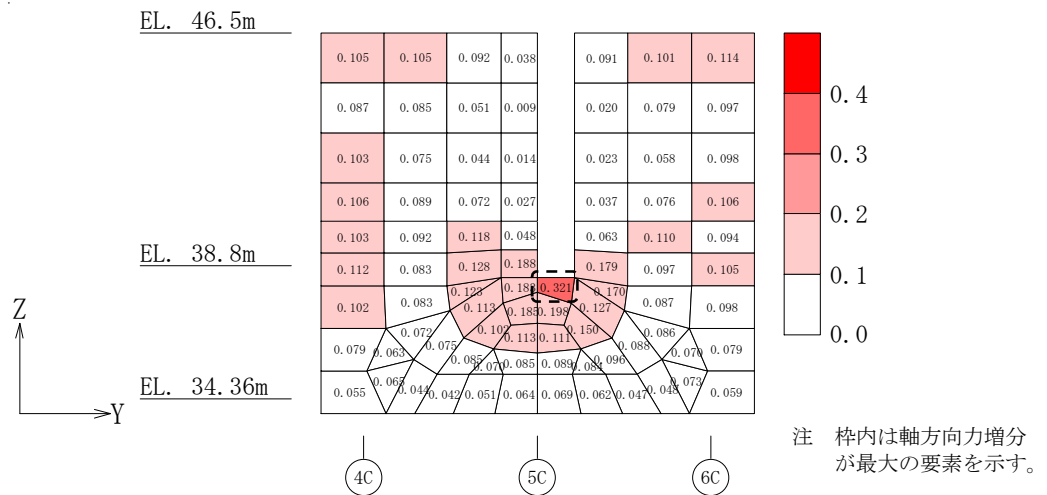
要素番号	応力	UD 方向入力 による応力増分	EW 方向入力 による応力	応答増幅率 (1.0EW+0.4UD) /(1.0EW)
6141	鉛直軸方向引張力	294	1240	1.095
6142	鉛直軸方向引張力	411	1640	1.101
5378	水平軸方向引張力	253	275	1.368

(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2-18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2-16に示す。表2-16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所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2-18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2-18 水平2方向及び鉛直方向入力時の鉄筋の検定比

表 2-16 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

2.4.4 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 2-19 に示す。なお、図 2-19 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 2-20 に示す。また、 S_d-D1 による応力増分との比較を図 2-21 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 2-16 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。

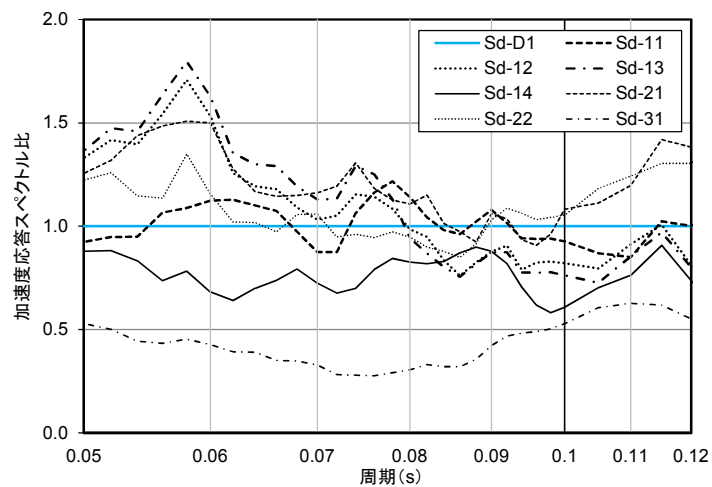
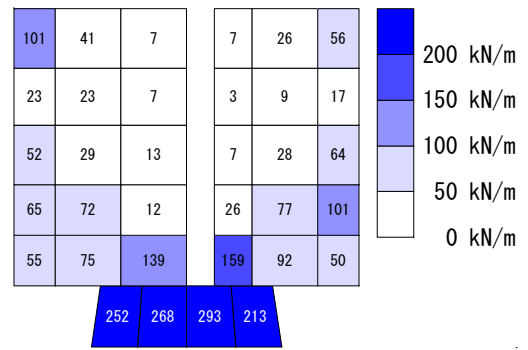
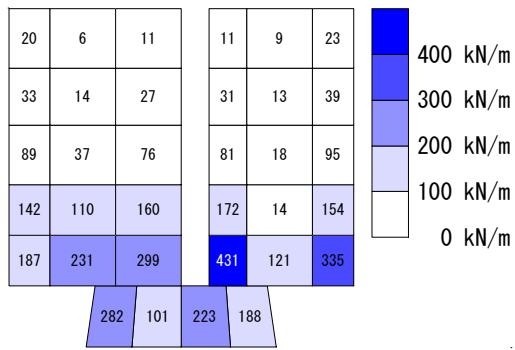


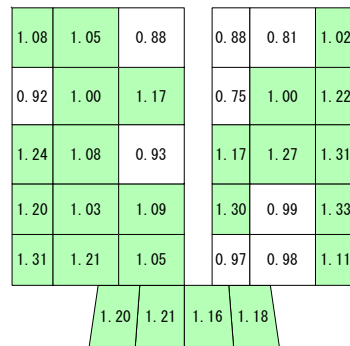
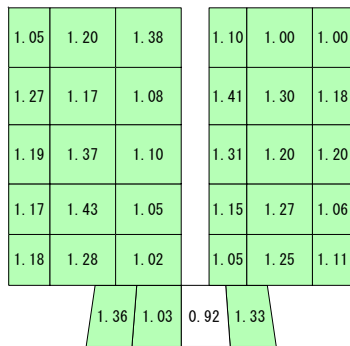
図 2-19 オペフロにおける加速度応答スペクトルの比較



(a) 鉛直軸方向力増分

(b) 水平軸方向力増分

図 2-20 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 2-21 S_d-D1 による応力増分に対する増分比

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。

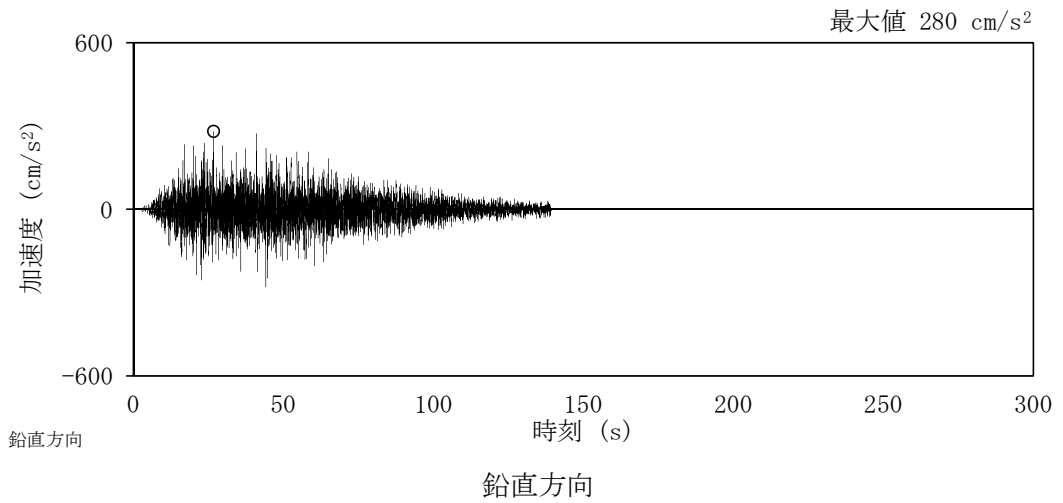
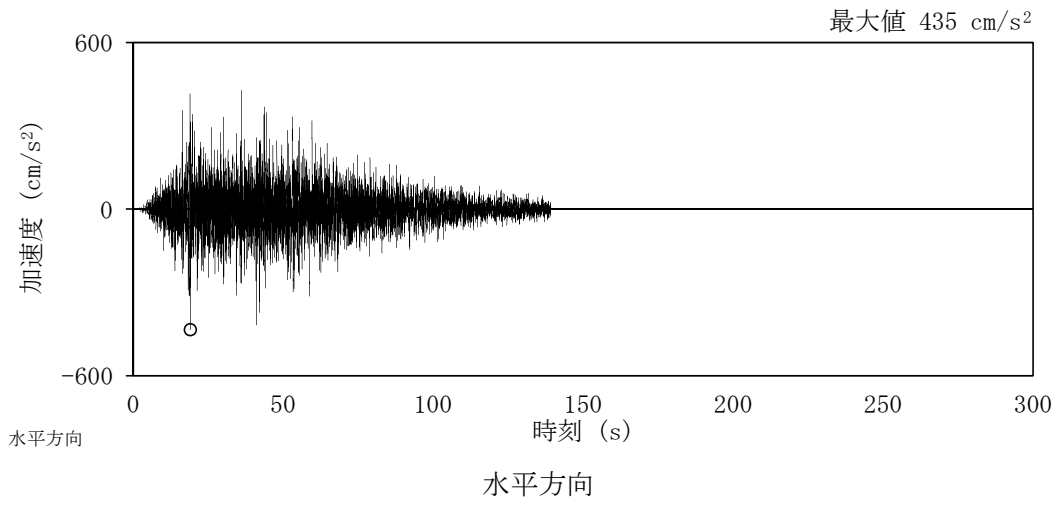
3次元FEMモデルによる地震応答解析は弾性応答解析としていることから、地震動は一次元波動論に基づき、解放基盤表面レベル（EL.-370 m）で定義される弾性設計用地震動 S_d-D1 に対する建屋基礎底面及び側面地盤ばねレベルでの地盤の応答を、地盤ばねを介して入力し、3次元的な応答性上の把握を行う。

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。



(a) 加速度波形

図 3-1 (1/2) 入力地震動 (S_d-D1)

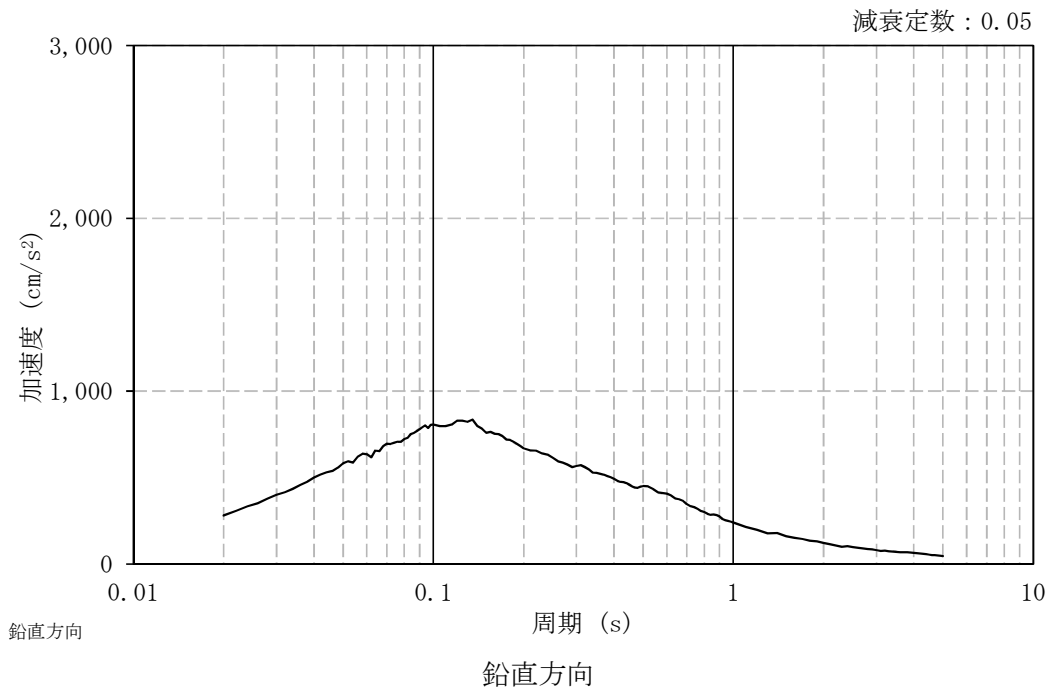
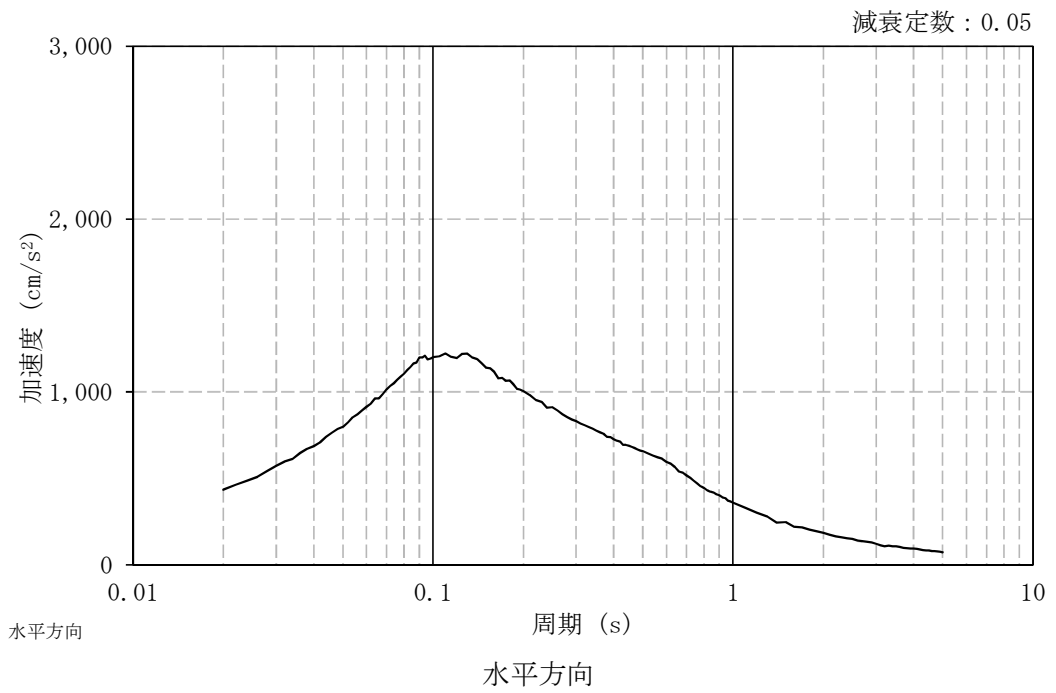


図 3-1 (2/2) 入力地震動 (S_d-D1)

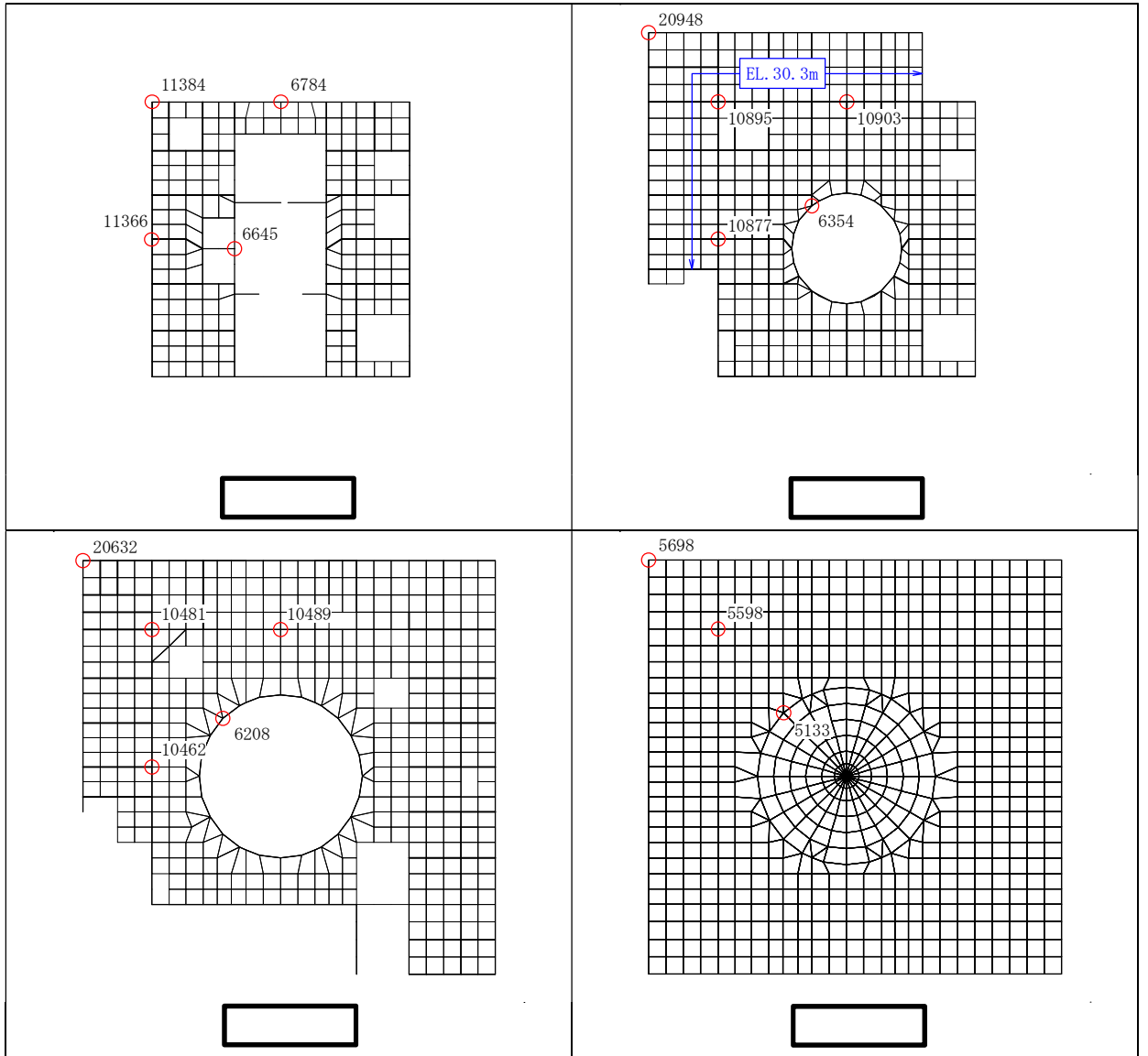


図 3-2 応答評価位置

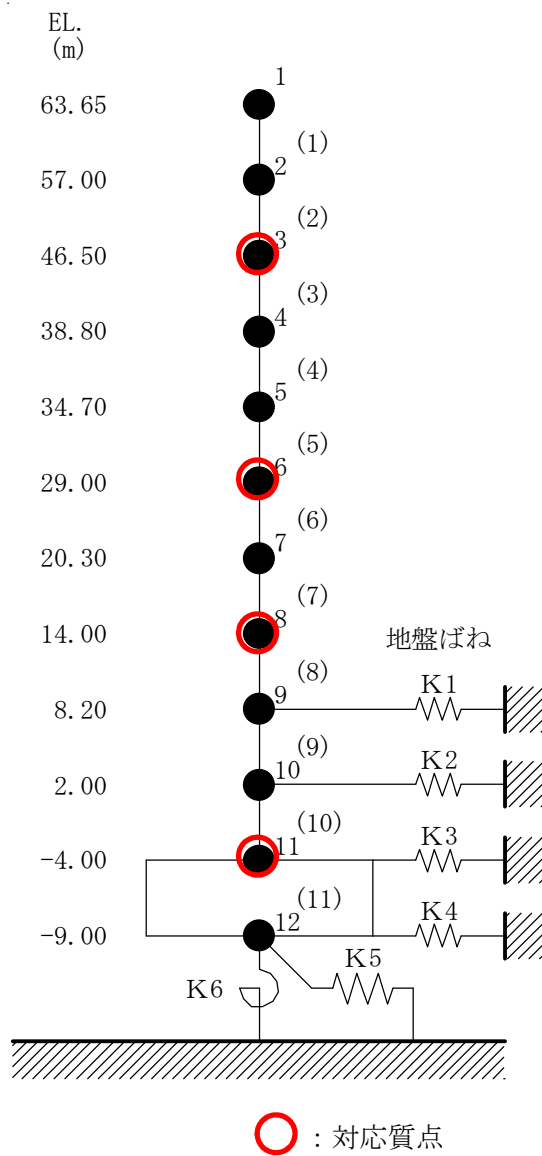


図 3-3 3次元FEMモデルの評価点に対応する質点系モデルの質点（水平方向）

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：建屋模擬モデルー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：建屋模擬モデルー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

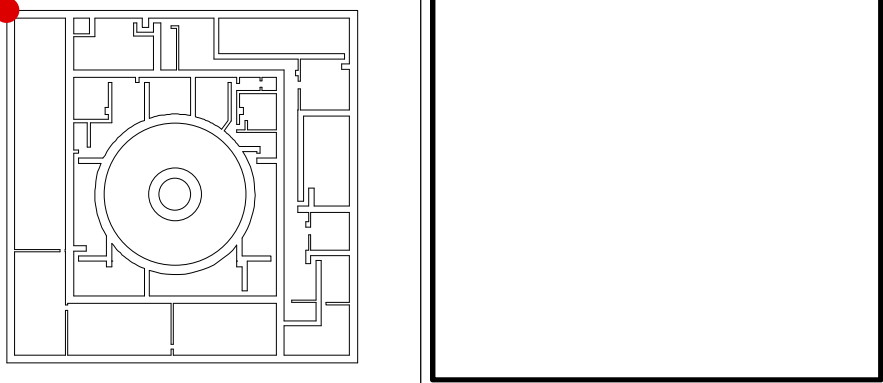
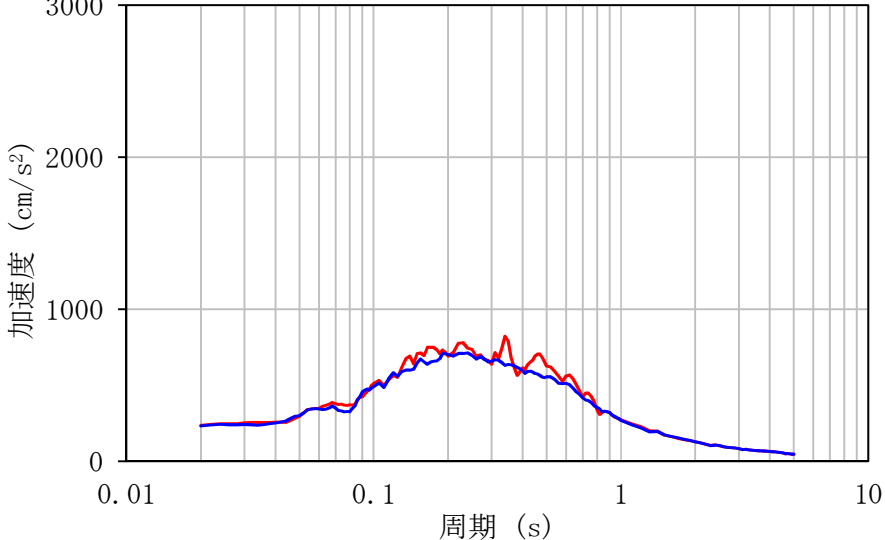
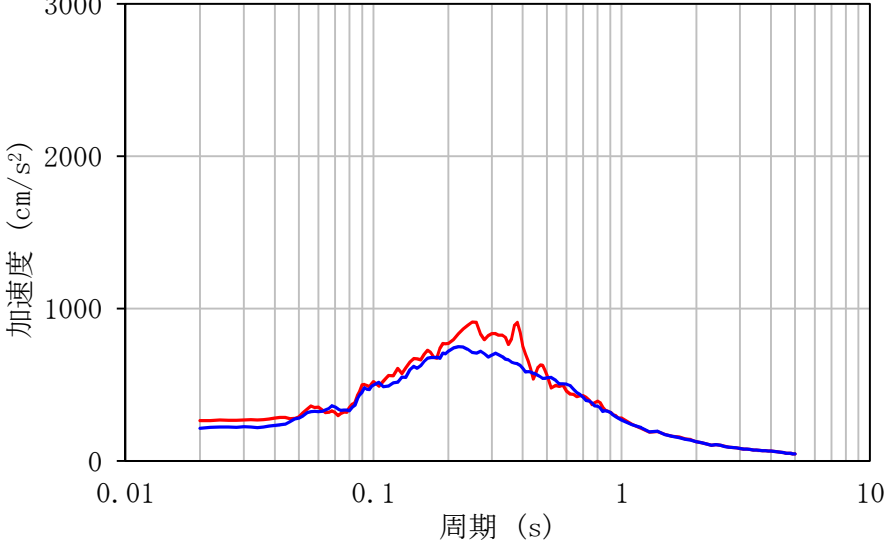
基礎のロッキング振動による鉛直方向応答への影響は，相互作用を考慮している建屋模擬モデル（床柔，相互作用考慮）及び相互作用を考慮していない比較用モデル（床柔，底面鉛直方向固定）の水平方向の入力による鉛直方向応答を比較することで検討する。なお，鉛直方向応答は，水平加振時の鉛直方向応答+鉛直加振時の鉛直方向応答により求めるが，水平方向の入力による鉛直方向応答を比較するため，鉛直加振時の鉛直方向応答はいずれのモデルも建屋模擬モデルによる結果を用いる。

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。

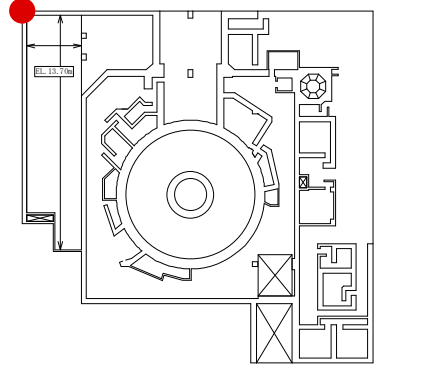
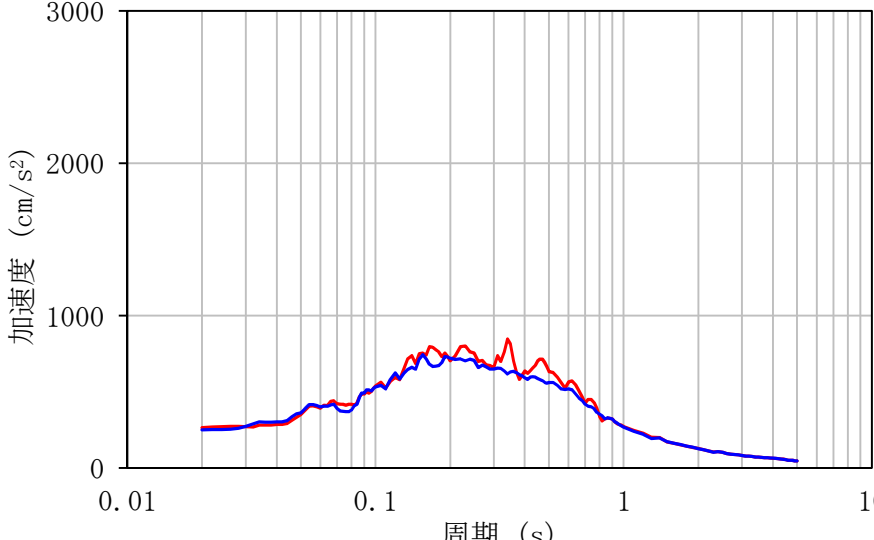
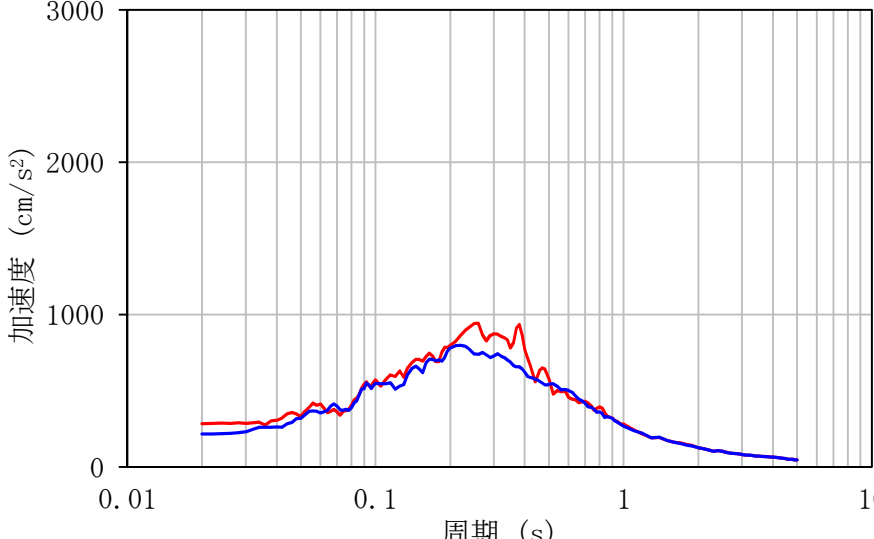
表3-1より，全ての評価点において，建屋模擬モデル及び比較用モデルの応答を比較すると，モデル間の差分は小さく，基礎のロッキング振動による影響は小さい。また，建屋模擬モデルの応答がやや大きいことから，建屋模擬モデルを検討対象モデルとすることは保守的である。

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

<p>評価点 No. 5698 O/W 脚部</p>	
<p>NS+鉛直方向 加振時 鉛直応答</p>	<p style="text-align: right;">減衰定数 : 0.05</p> 
<p>EW+鉛直方向 加振時 鉛直応答</p>	<p style="text-align: right;">減衰定数 : 0.05</p> 

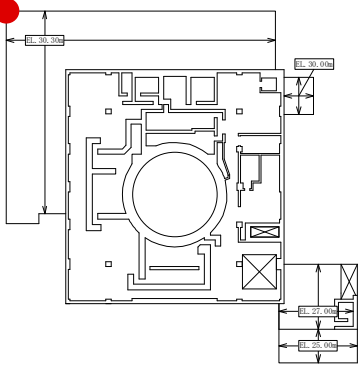

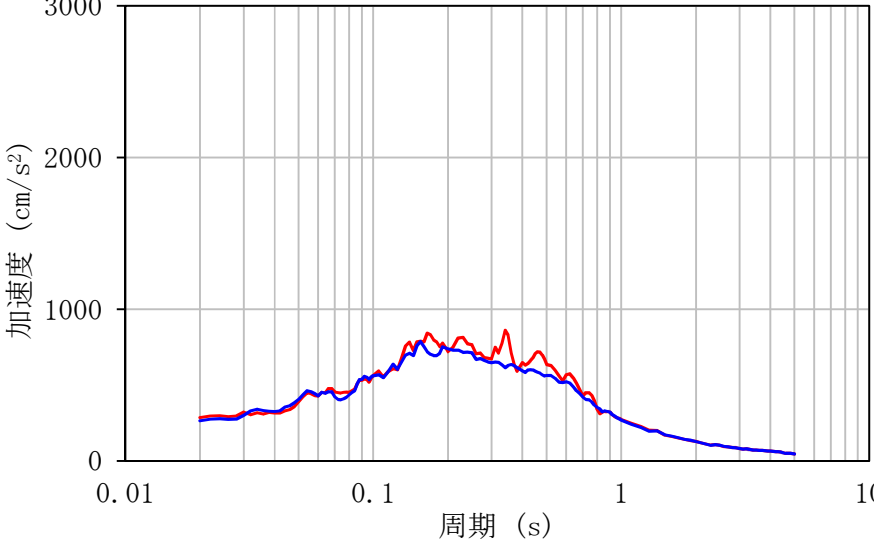
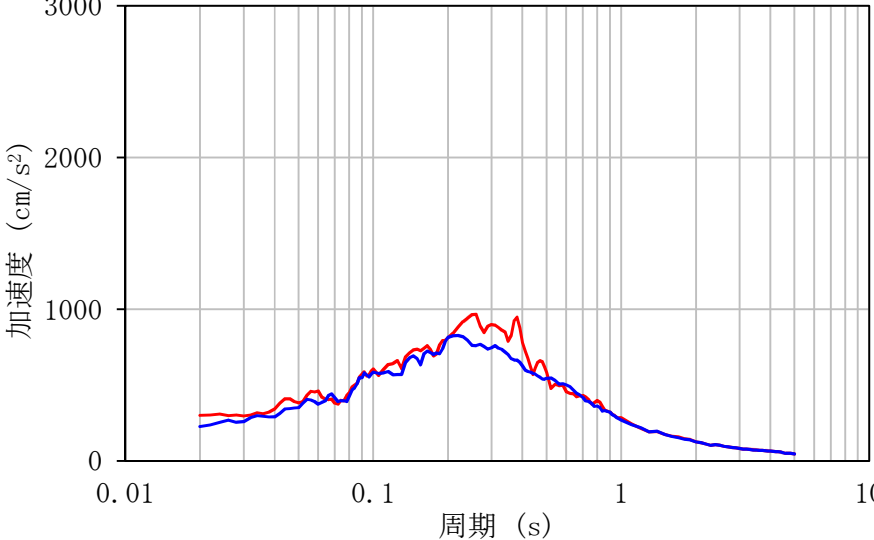
— 建屋模擬モデル — 比較用モデル

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

<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 30px; margin-bottom: 5px;"></div> <p>評価点 No. 20632 O/W 脚部</p>	
<p>NS+鉛直方向 加振時 鉛直応答</p>	<p style="text-align: right;">減衰定数 : 0.05</p> 
<p>EW+鉛直方向 加振時 鉛直応答</p>	<p style="text-align: right;">減衰定数 : 0.05</p> 

— 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

<p>評価点 No. 20948 O/W 脚部</p>		
<p>NS+鉛直方向 加振時 鉛直応答</p>	<p style="text-align: right;">減衰定数 : 0.05</p> 	
<p>EW+鉛直方向 加振時 鉛直応答</p>	<p style="text-align: right;">減衰定数 : 0.05</p> 	

— 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

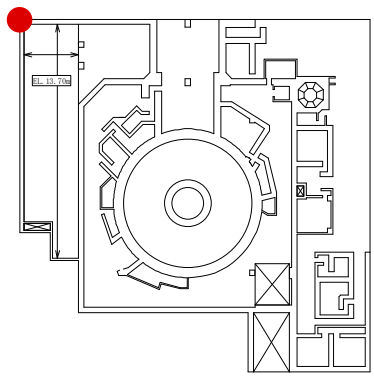
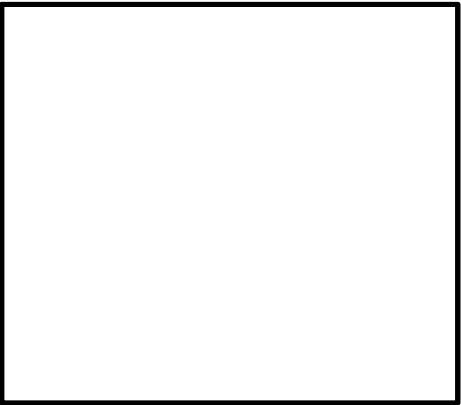
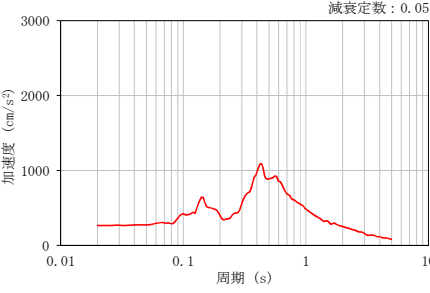
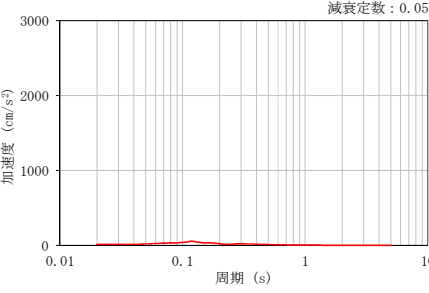
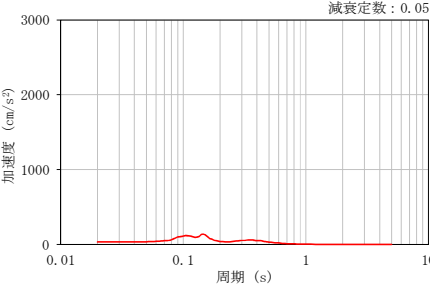
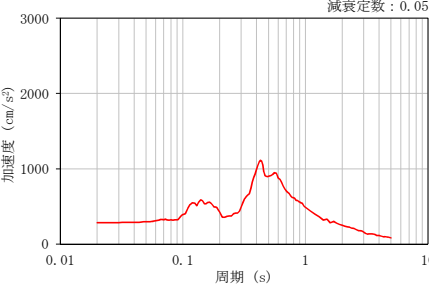
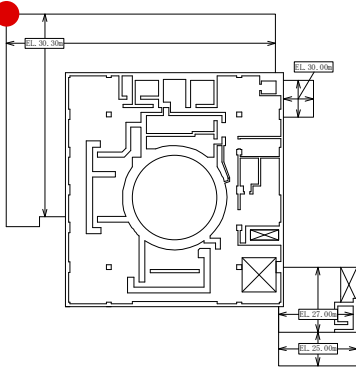

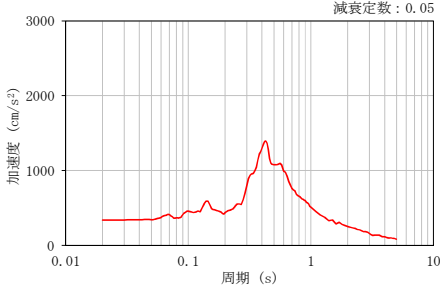
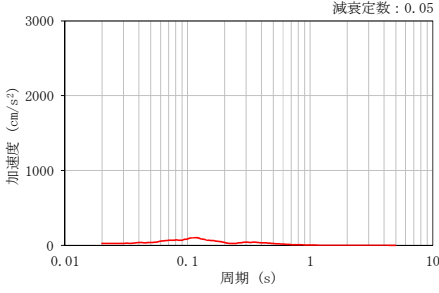
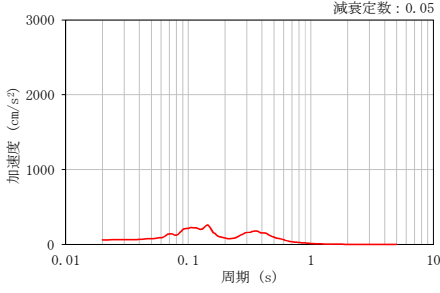
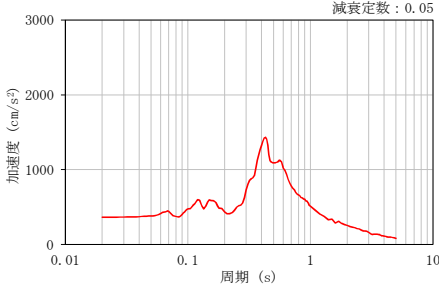
<p>評価点 No. 20632 O/W 脚部</p>		
<p>方向</p>	<p>NS 方向応答</p>	<p>EW 方向応答</p>
<p>NS 方向 加振時</p>		
<p>EW 方向 加振時</p>		

表 3-2 (2/2) 建屋模擬モデルの水平加振時の応答比較

<p>評価点 No. 20948 O/W 脚部</p>		
<p>方向</p>	<p>NS 方向応答</p>	<p>EW 方向応答</p>
<p>NS 方向 加振時</p>		
<p>EW 方向 加振時</p>		

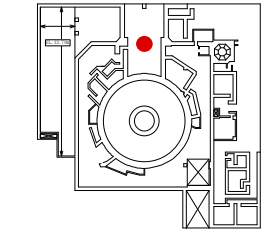
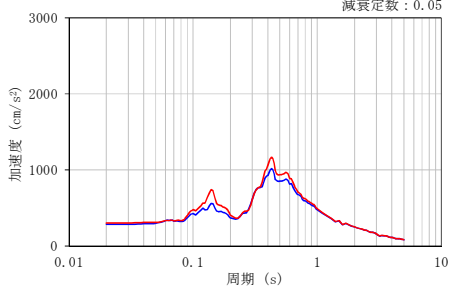
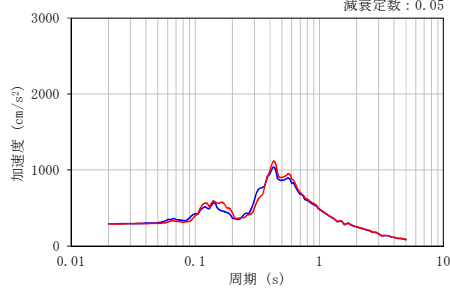
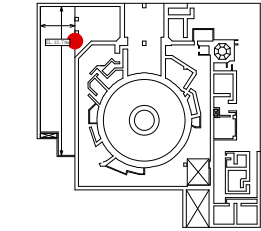
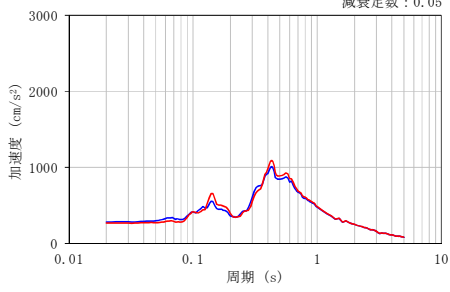
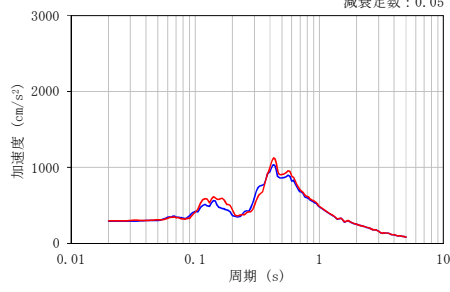
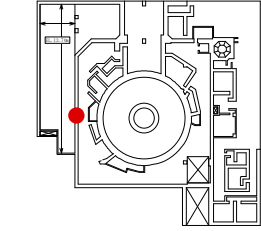
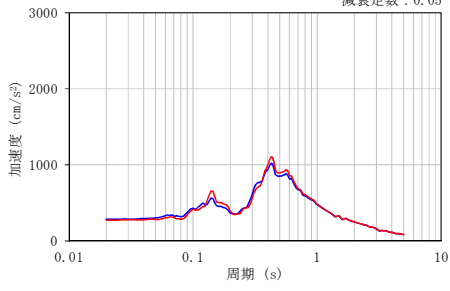
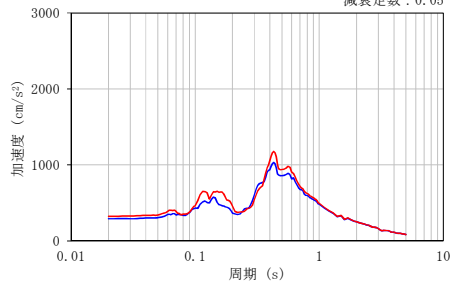
(3) 床柔性の影響

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
 <p data-bbox="353 624 636 671">No. 10489</p>	 <p data-bbox="1144 379 1249 395">減衰定数 : 0.05</p>	 <p data-bbox="1722 379 1827 395">減衰定数 : 0.05</p>
 <p data-bbox="353 954 636 1002">No. 10481</p>	 <p data-bbox="1144 710 1249 726">減衰定数 : 0.05</p>	 <p data-bbox="1722 710 1827 726">減衰定数 : 0.05</p>
 <p data-bbox="353 1284 636 1332">No. 10462</p>	 <p data-bbox="1144 1040 1249 1056">減衰定数 : 0.05</p>	 <p data-bbox="1722 1040 1827 1056">減衰定数 : 0.05</p>

— 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動に対して実施する。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により算出する。応答算出の考え方を図 3-4 に示す。

表 3-4 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 -D 1	—	—
	EW 方向	—	模擬地震波 ^(注)	—
3 方向同時入力		S _d -D 1	模擬地震波 ^(注)	S _d -D 1

(注) 弾性設計用地震動 S_d-D 1 の設計用応答スペクトルに適合するが、S_d-D 1 とは位相特性が異なる地震波。

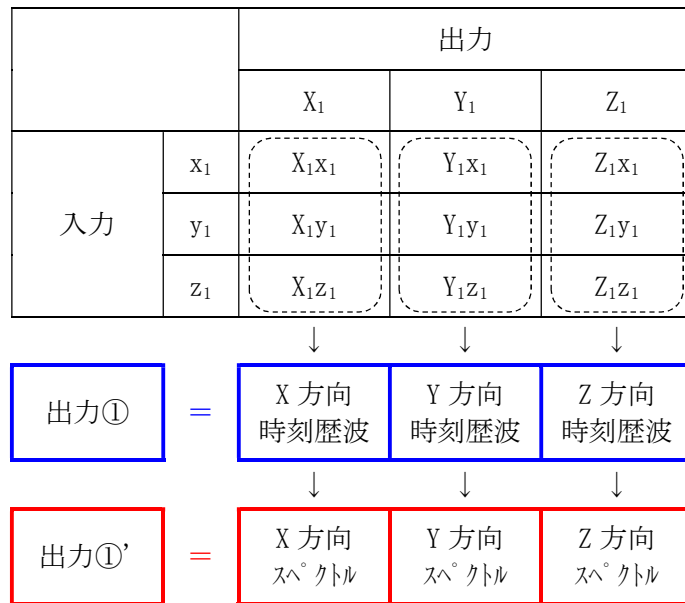


図 3-4 3次元 FEMモデルによる応答算出の考え方

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。

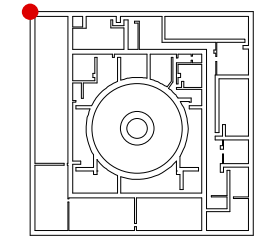
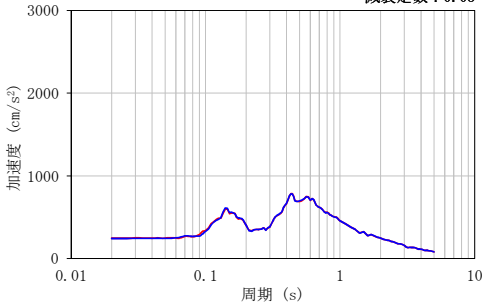
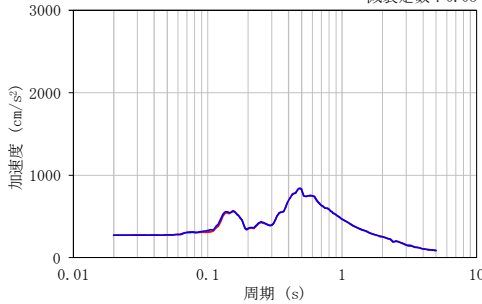
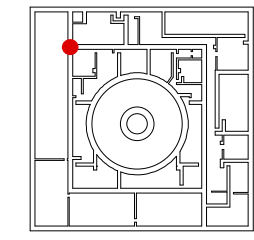
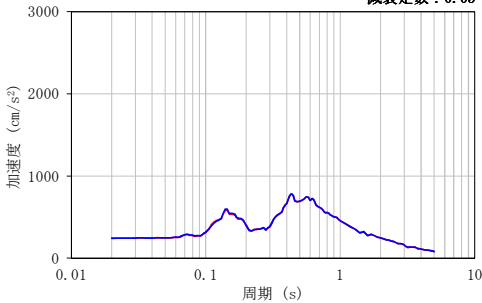
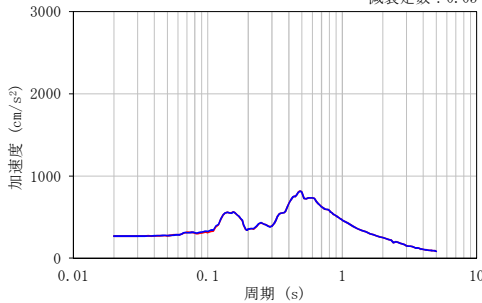
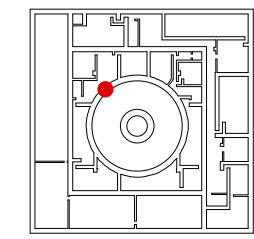
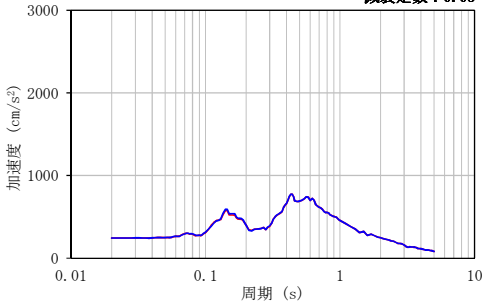
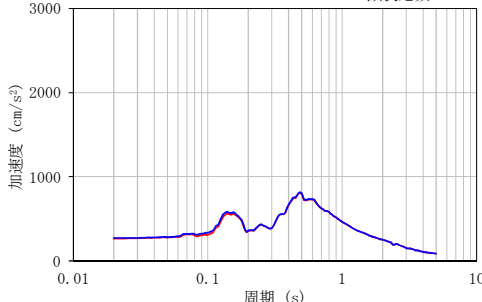
表 3-5 より、EL. 46.5 m の評価点 No. 6645 及び 11366 を除く評価点においては、3 方向同時入力時の方が若干応答が大きくなる点もあるものの、1 方向入力時及び 3 方向入力時の応答の差は小さく、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響はほとんどないことを確認した。

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
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> No. 5698	<p style="text-align: center;">減衰定数 : 0.05</p> 	<p style="text-align: center;">減衰定数 : 0.05</p> 
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> No. 5598	<p style="text-align: center;">減衰定数 : 0.05</p> 	<p style="text-align: center;">減衰定数 : 0.05</p> 
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> No. 5133	<p style="text-align: center;">減衰定数 : 0.05</p> 	<p style="text-align: center;">減衰定数 : 0.05</p> 

— 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

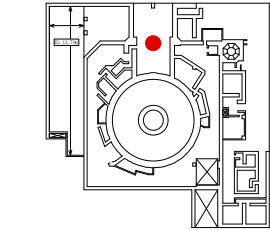
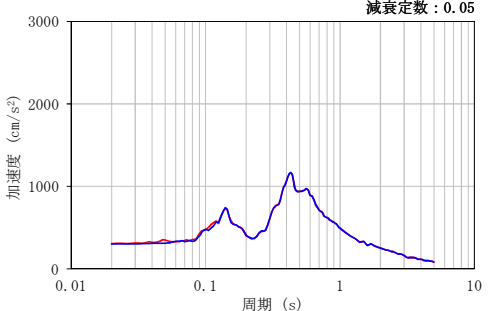
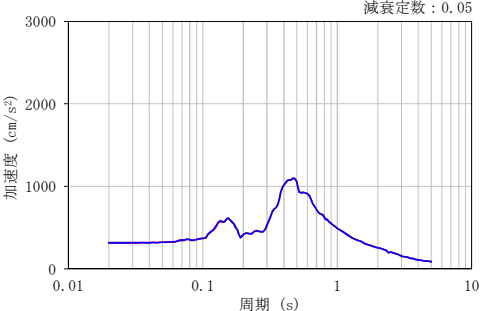
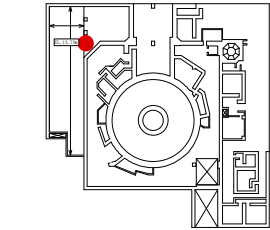
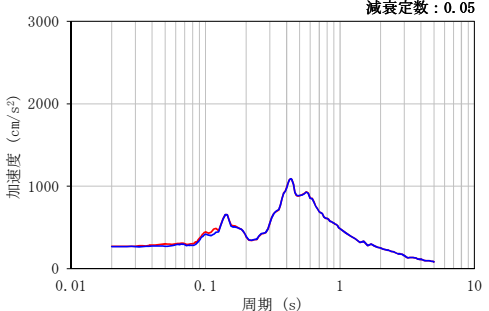
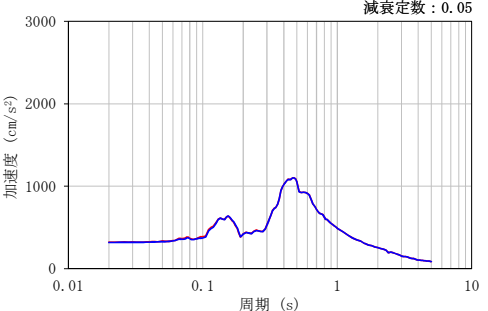
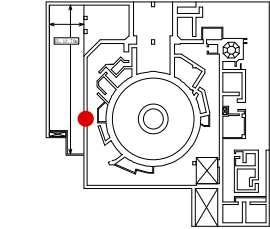
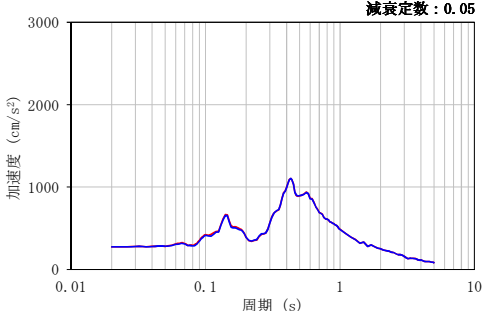
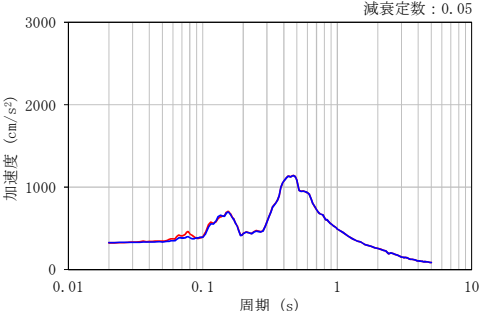
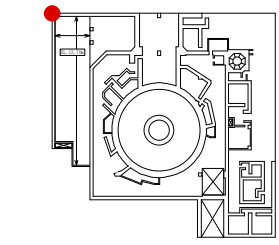
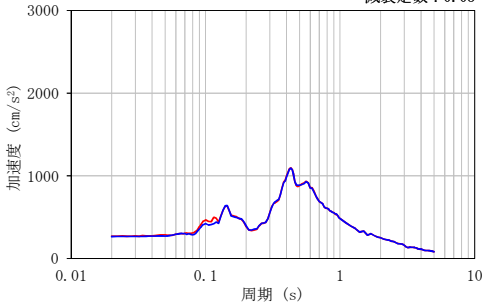
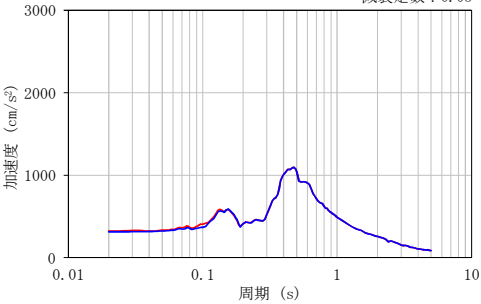
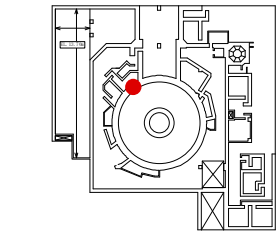
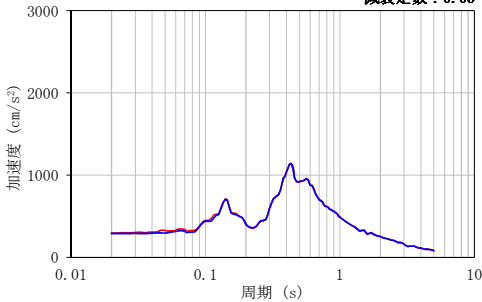
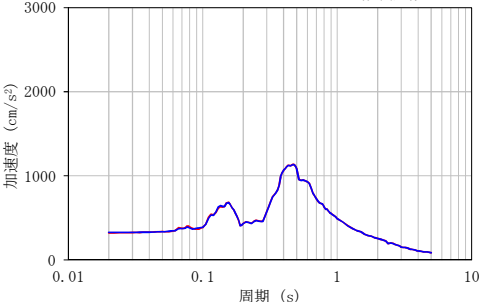
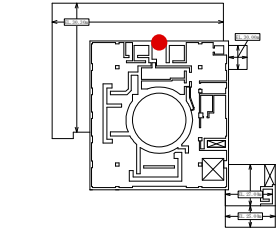
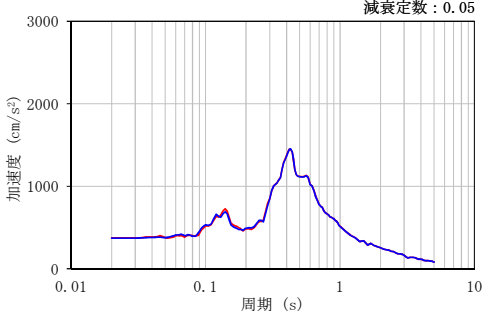
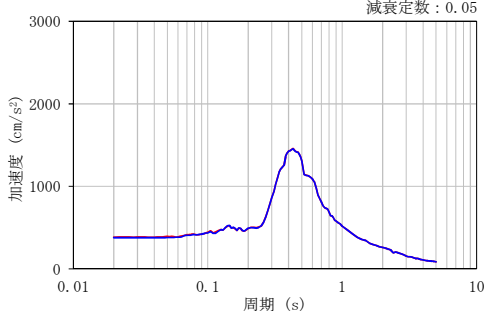
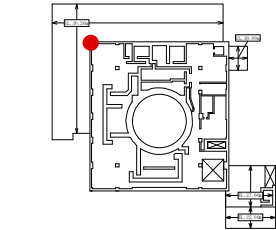
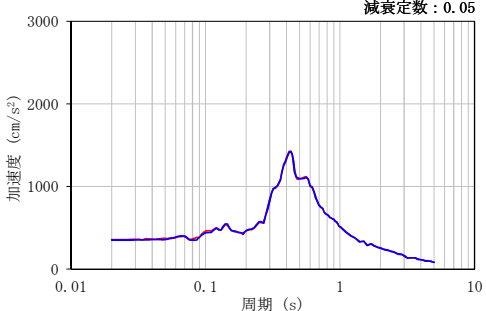
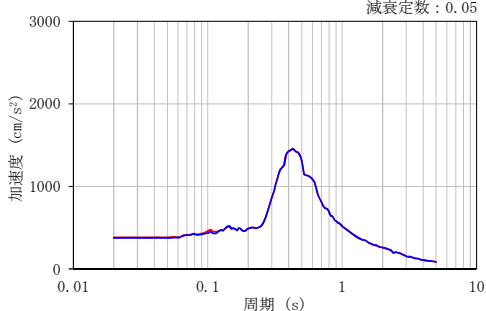
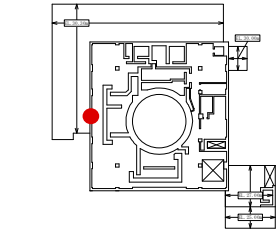
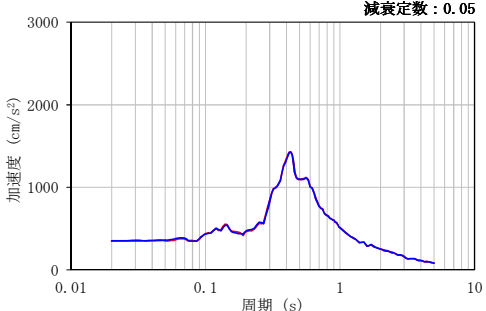
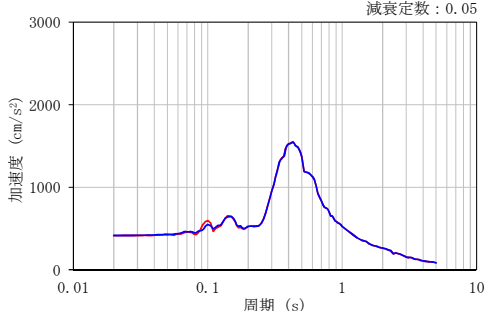
評価点	NS 応答	EW 応答
 <p data-bbox="344 628 636 671">No. 10489</p>	 <p data-bbox="1151 368 1267 389">減衰定数 : 0.05</p>	 <p data-bbox="1733 368 1850 389">減衰定数 : 0.05</p>
 <p data-bbox="344 963 636 1007">No. 10481</p>	 <p data-bbox="1151 703 1267 724">減衰定数 : 0.05</p>	 <p data-bbox="1733 703 1850 724">減衰定数 : 0.05</p>
 <p data-bbox="344 1299 636 1342">No. 10462</p>	 <p data-bbox="1151 1038 1267 1059">減衰定数 : 0.05</p>	 <p data-bbox="1733 1038 1850 1059">減衰定数 : 0.05</p>

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
 <p data-bbox="338 624 504 671">[Redacted]</p> <p data-bbox="517 639 638 671">No. 20632</p>	<p data-bbox="1151 363 1272 387">減衰定数 : 0.05</p> 	<p data-bbox="1733 363 1854 387">減衰定数 : 0.05</p> 
 <p data-bbox="338 963 504 1011">[Redacted]</p> <p data-bbox="517 979 638 1011">No. 6208</p>	<p data-bbox="1151 699 1272 722">減衰定数 : 0.05</p> 	<p data-bbox="1733 699 1854 722">減衰定数 : 0.05</p> 

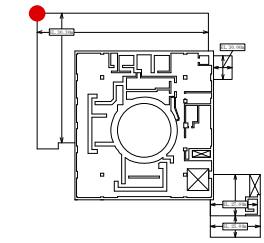
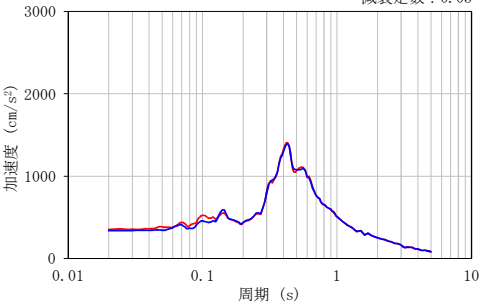
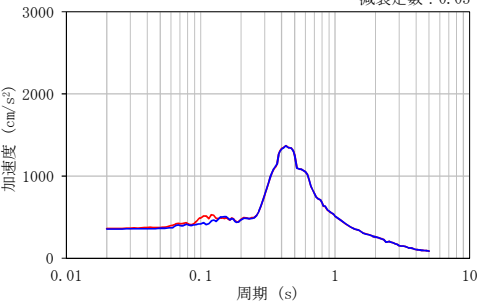
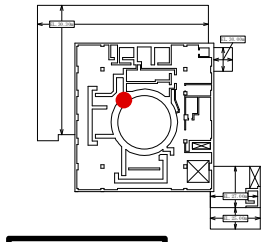
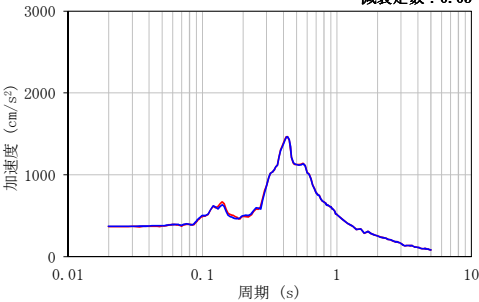
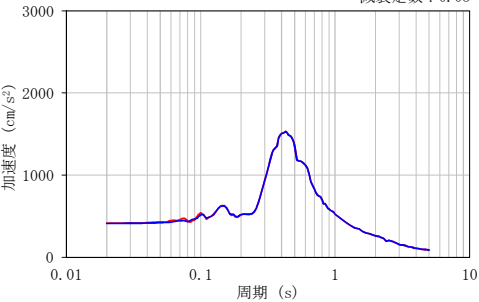
— 3方向 — 1方向

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
 <p data-bbox="338 624 636 671">No. 10903</p>	 <p data-bbox="1151 368 1267 384">減衰定数 : 0.05</p>	 <p data-bbox="1729 368 1845 384">減衰定数 : 0.05</p>
 <p data-bbox="338 959 636 1007">No. 10895</p>	 <p data-bbox="1151 703 1267 719">減衰定数 : 0.05</p>	 <p data-bbox="1729 703 1845 719">減衰定数 : 0.05</p>
 <p data-bbox="338 1294 636 1342">No. 10877</p>	 <p data-bbox="1151 1038 1267 1054">減衰定数 : 0.05</p>	 <p data-bbox="1729 1038 1845 1054">減衰定数 : 0.05</p>

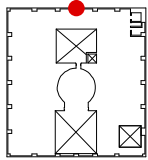
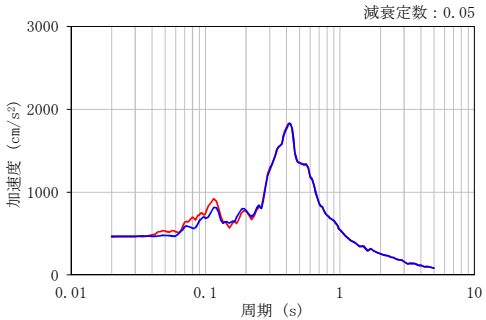
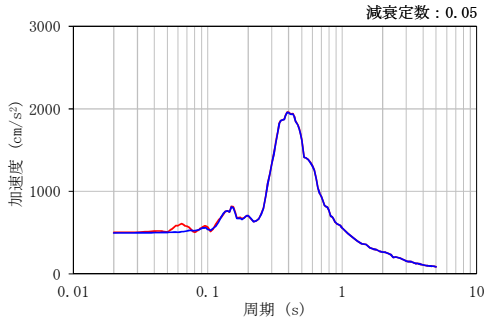
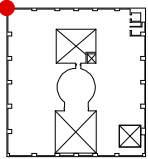
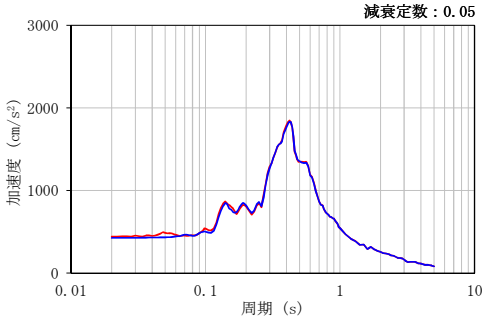
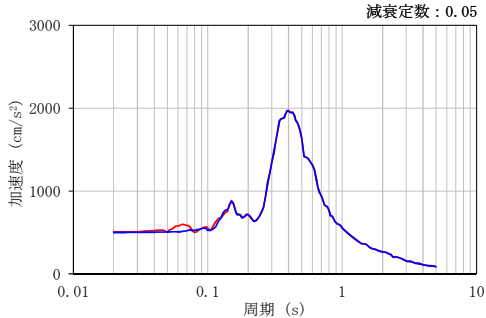
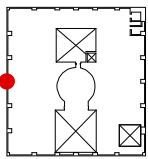
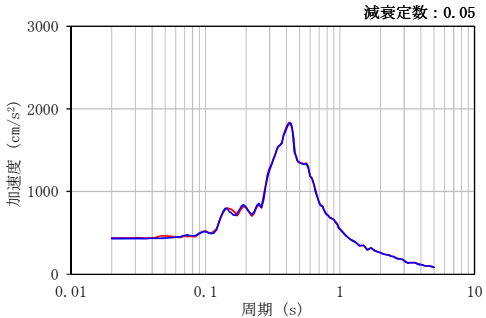
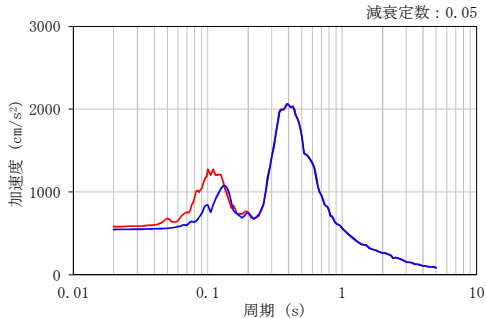
— 3方向 — 1方向

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
 <p data-bbox="353 624 638 671">No. 20948</p>	<p data-bbox="1153 368 1265 391">減衰定数 : 0.05</p> 	<p data-bbox="1736 368 1848 391">減衰定数 : 0.05</p> 
 <p data-bbox="353 967 638 1015">No. 6354</p>	<p data-bbox="1153 703 1265 726">減衰定数 : 0.05</p> 	<p data-bbox="1736 703 1848 726">減衰定数 : 0.05</p> 

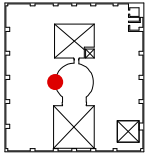
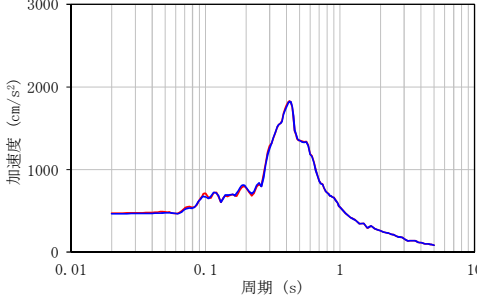
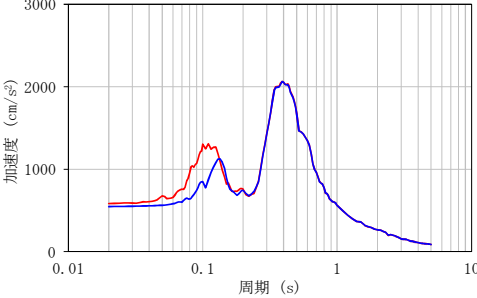
— 3方向 — 1方向

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
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> No. 6784		
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> No. 11384		
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> No. 11366		

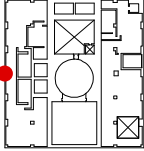
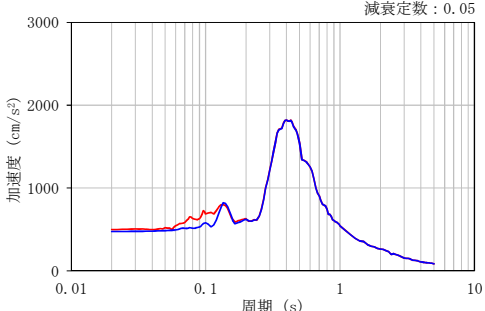
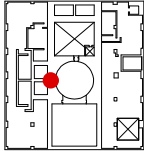
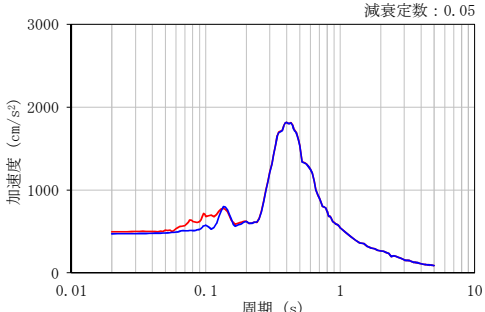
— 3方向 — 1方向

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
 <p data-bbox="358 624 629 671">No. 6645</p>	<p data-bbox="1151 363 1267 384">減衰定数 : 0.05</p> 	<p data-bbox="1733 363 1850 384">減衰定数 : 0.05</p> 

— 3方向 — 1方向

表 3-6 [] における EW 方向の応答

評価点	EW 応答
 <p data-bbox="416 607 703 651">[] No. 11182</p>	
 <p data-bbox="416 938 695 983">[] No. 6431</p>	

— 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。

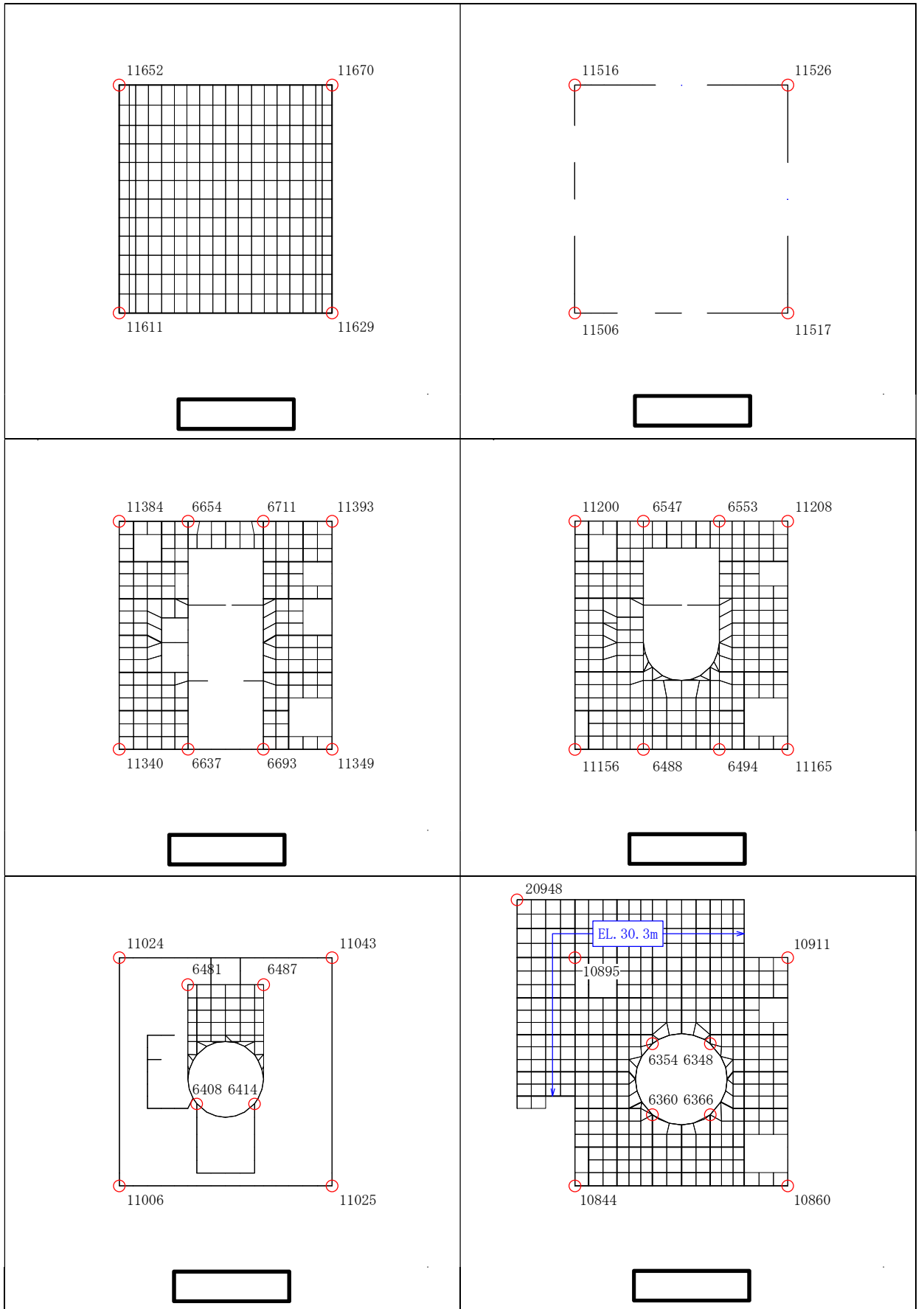


図 3-5 (1/2) 応答評価位置

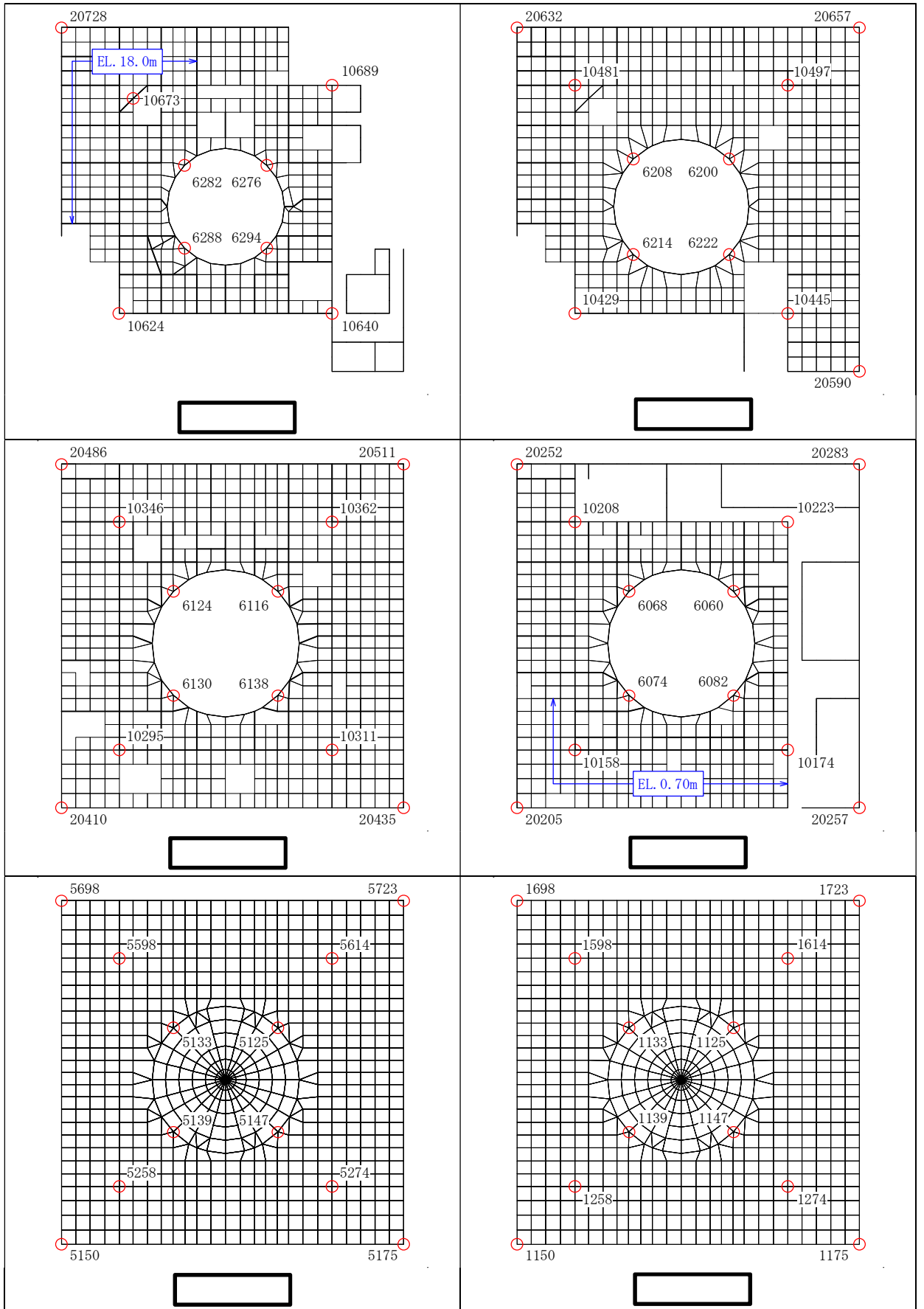
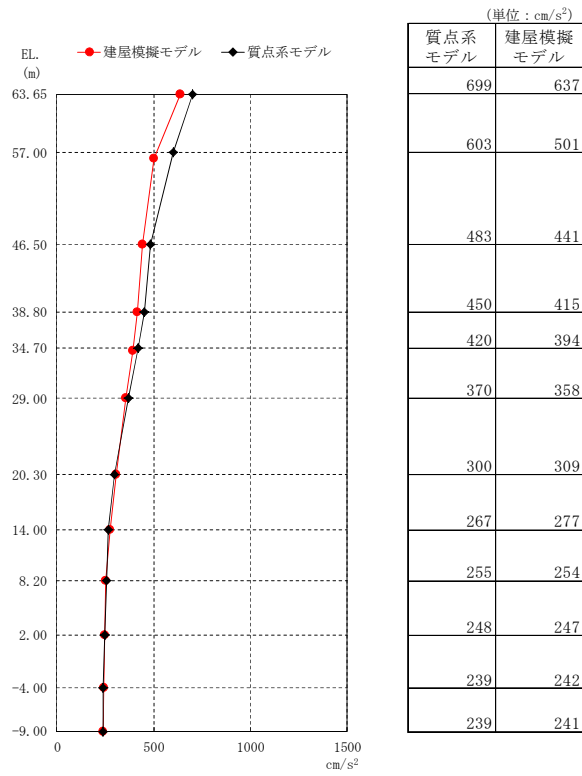
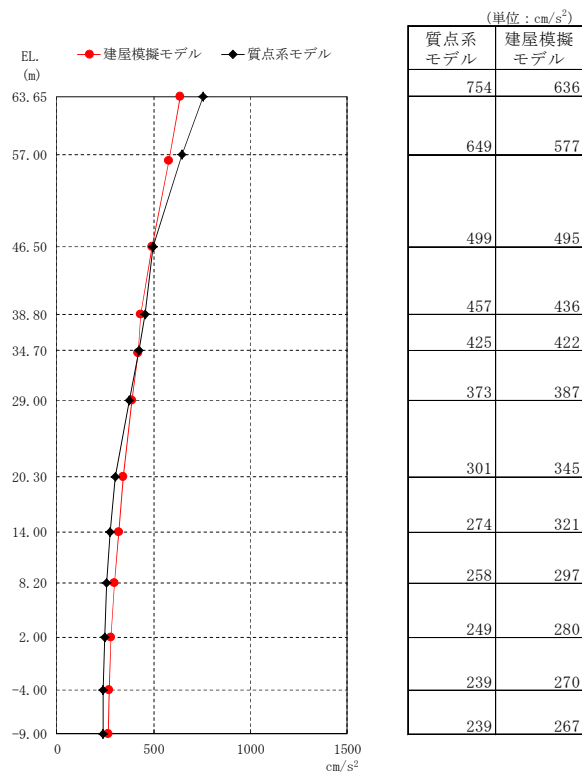


図 3-5 (2/2) 応答評価位置



(a) NS 方向



(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、エネルギー一定則によりせん断ひずみを評価する。エネルギー一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。

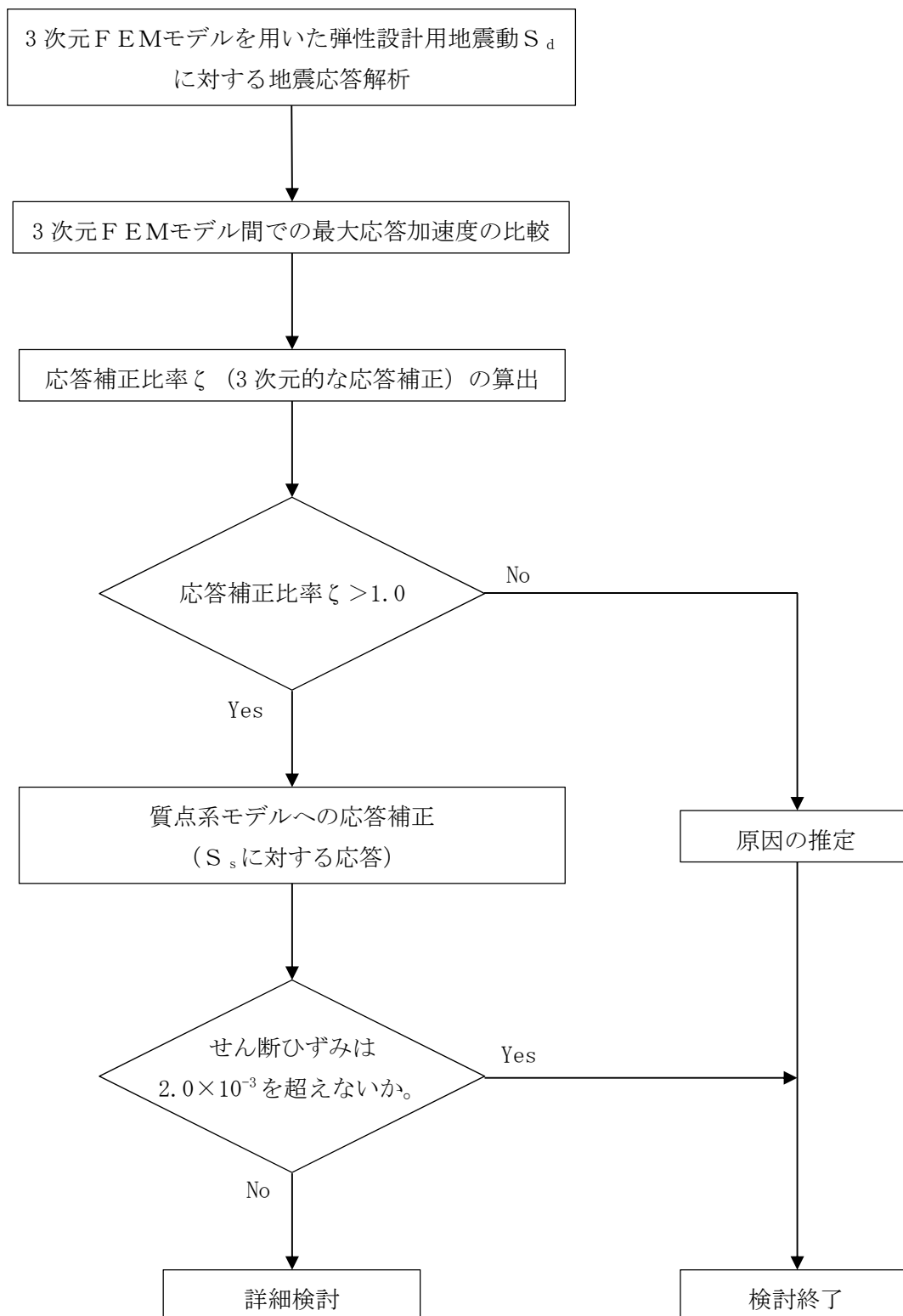
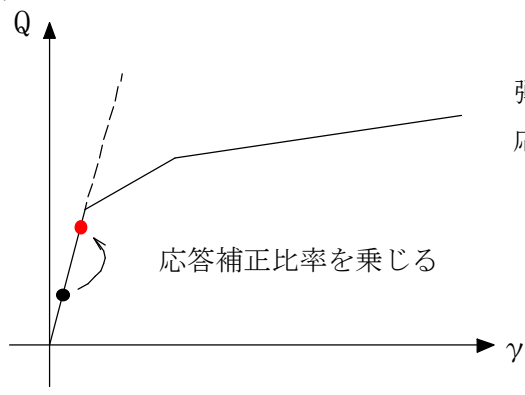
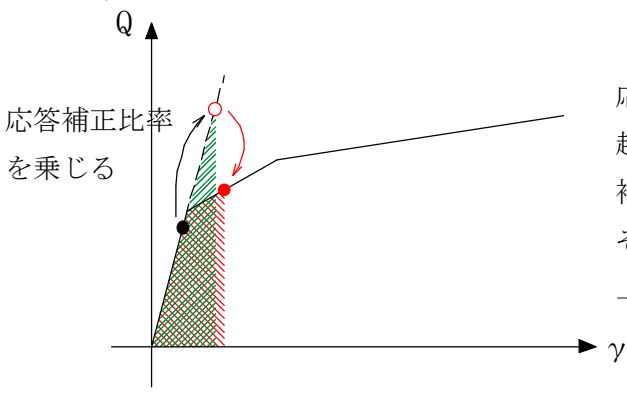


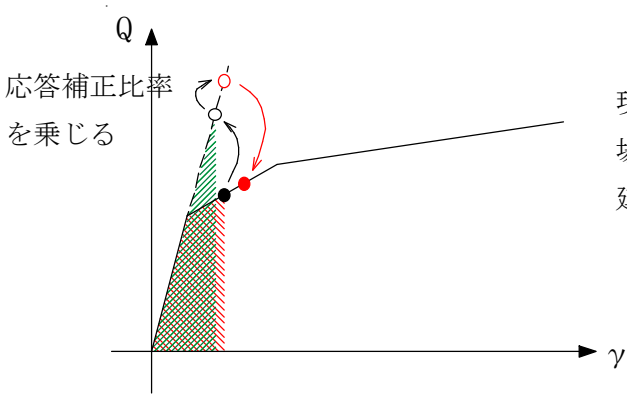
図 3-7 検討フロー



弾性直線状において，現設計による
応答結果に応答補正比率を乗じる。



応答補正比率を乗じた際，第一折点を
超える場合，弾性直線の延長線上に
補正後の評価結果をプロットする。
その後，エネルギー一定則で，評価線分
上にプロットする。



現設計において第一折点を越えている
場合は，エネルギー一定則で弾性直線の
延長に戻した後，補正比率を乗じる。
(以下，上記に準じる。)

図 3-8 エネルギー一定則によるせん断ひずみの評価方法

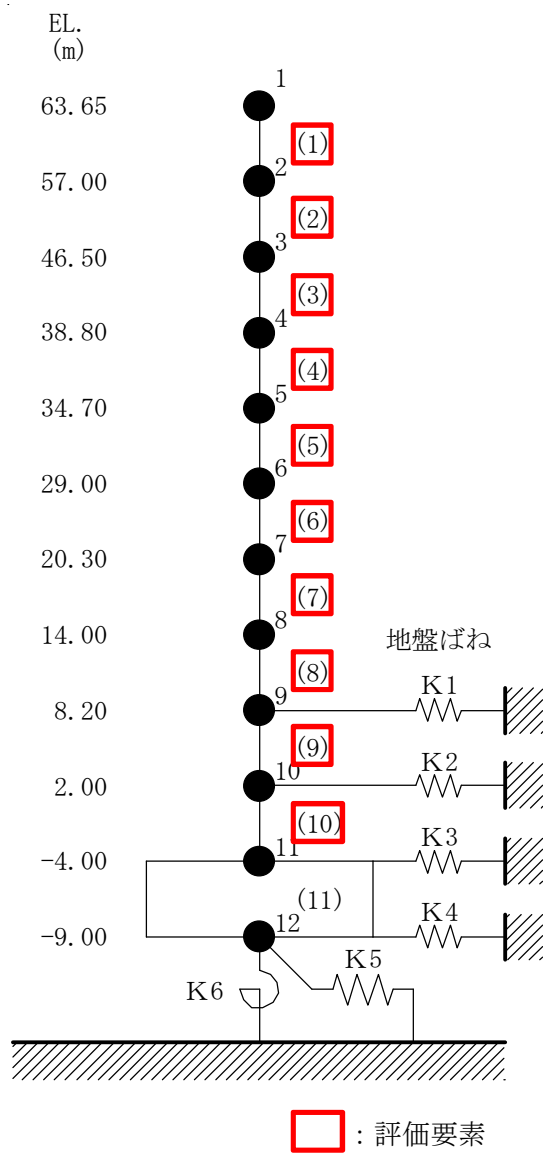


図 3-9 質点系モデルの評価部位

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 $\alpha \times \beta$ 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 $\zeta = \text{Max}(\alpha \times \beta)$ …(1)式

($\text{Max}(\alpha \times \beta)$: 層ごとの各評価点の $\alpha \times \beta$ の最大値)

ここで、

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

(ただし、 ζ を算出する場合は、 $\alpha \geq 1.0$)

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

(ただし、 ζ を算出する場合は、 $\beta \geq 1.0$)

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	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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/s^2)		α (②/①)
EL. (m)	質点 番号	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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	F E M 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
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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 節点のうち最大となる β 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	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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	F E M 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

※網掛け部：質点番号に対応した F E M 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	$\alpha \times \beta$	応答補正 比率 ζ
EL. (m)	質点 番号	F E M 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	

※網掛け部：質点番号に対応したF E M節点のうち最大となる ζ ($= \alpha \times \beta$) 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	$\alpha \times \beta$	応答補正 比率 ζ
EL. (m)	質点 番号	F E M 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	

※網掛け部：質点番号に対応したFEM節点のうち最大となると ($= \alpha \times \beta$) 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	$\alpha \times \beta$	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	

※網掛け部：質点番号に対応したFEM節点のうち最大となる ζ ($= \alpha \times \beta$) 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	$\alpha \times \beta$	応答補正 比率 ζ
EL. (m)	質点 番号	F E M 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	
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	

※網掛け部：質点番号に対応したF E M節点のうち最大となる ζ ($= \alpha \times \beta$) 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	$\alpha \times \beta$	応答補正 比率 ζ
EL. (m)	質点 番号	F E M 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	

※網掛け部：質点番号に対応したFEM節点のうち最大となると ($= \alpha \times \beta$) 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	$\alpha \times \beta$	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	

※網掛け部：質点番号に対応したFEM節点のうち最大となる ζ ($= \alpha \times \beta$) 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

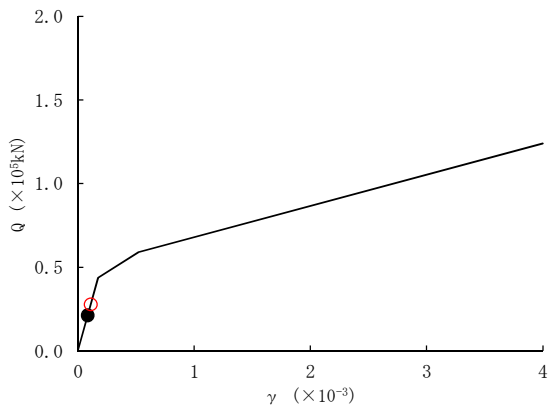
(a) NS 方向

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

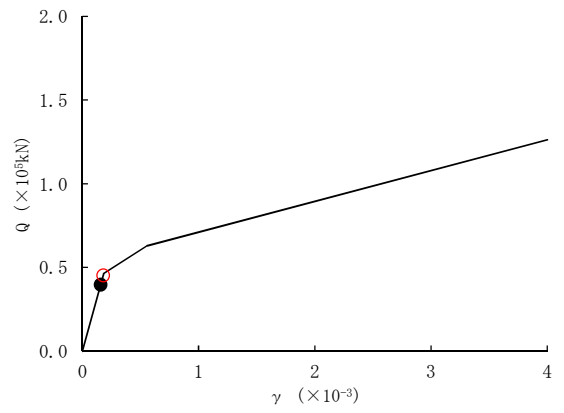
(b) EW 方向

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

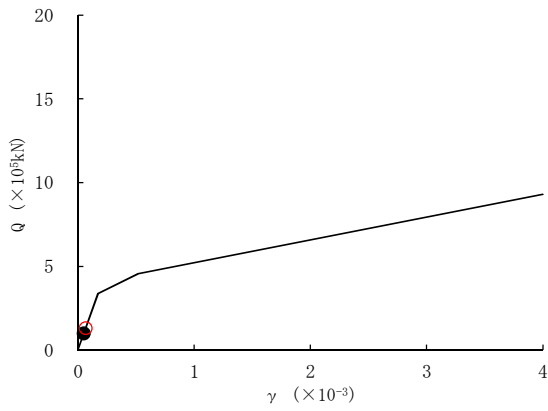
● 補正前応答値 ○ 補正後応答値



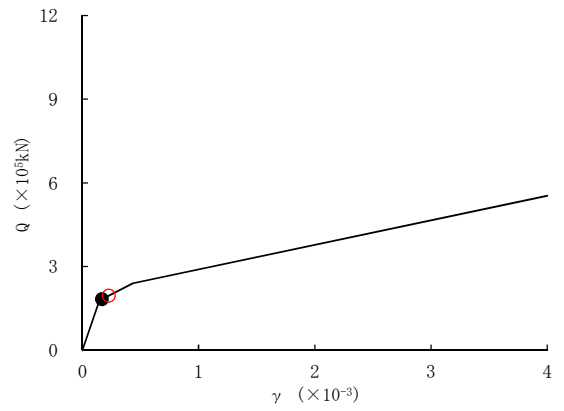
要素 1 Ss-21



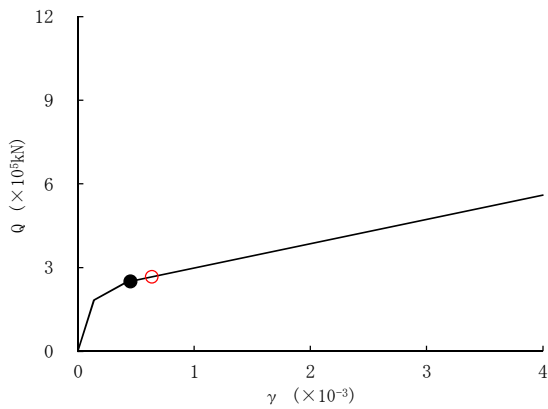
要素 2 Ss-21



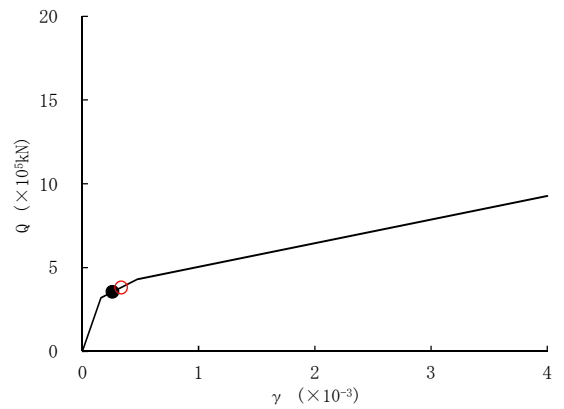
要素 3 Ss-31



要素 4 Ss-31



要素 5 Ss-31



要素 6 Ss-31

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)

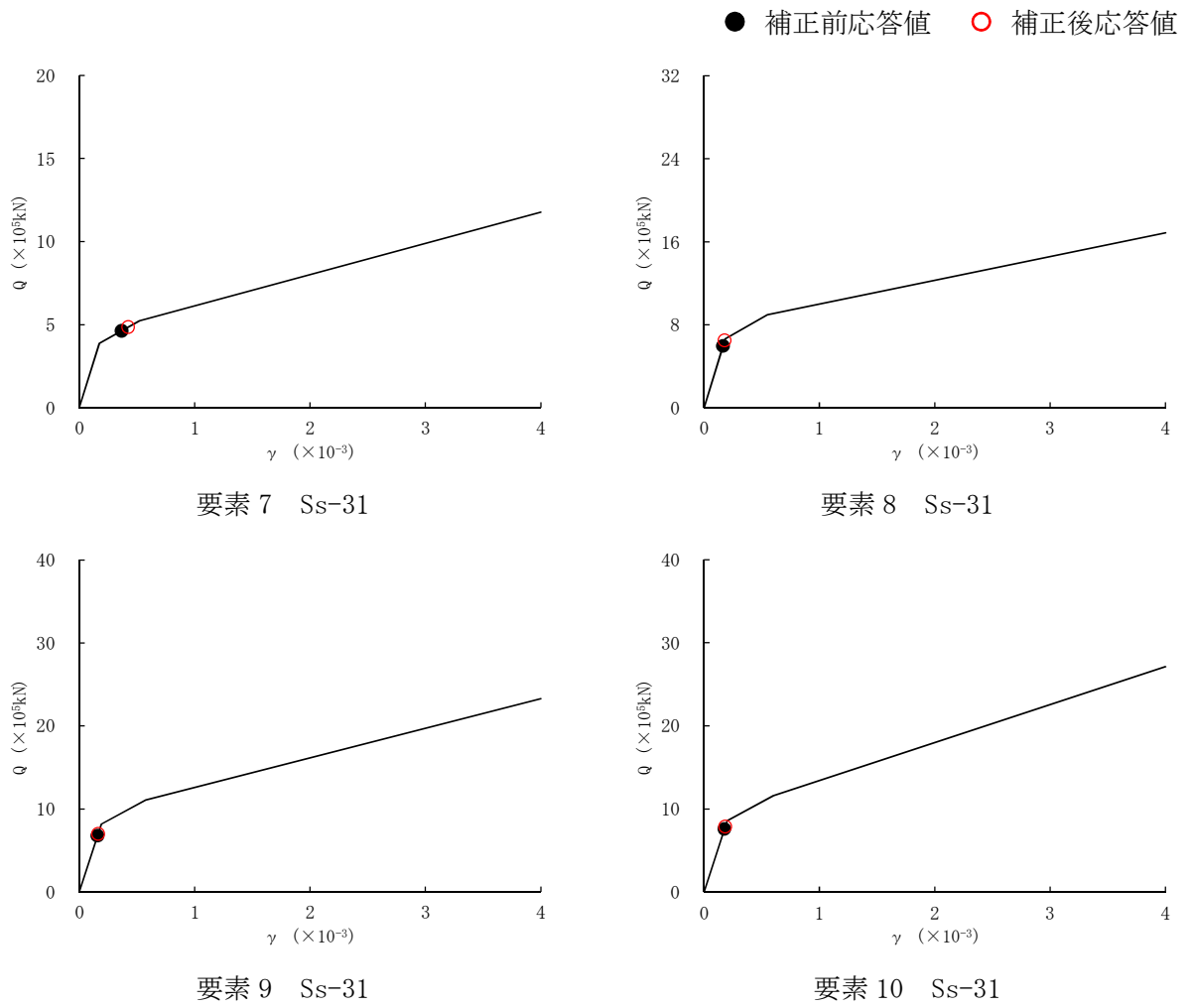


図 3-10 (2/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (NS 方向)

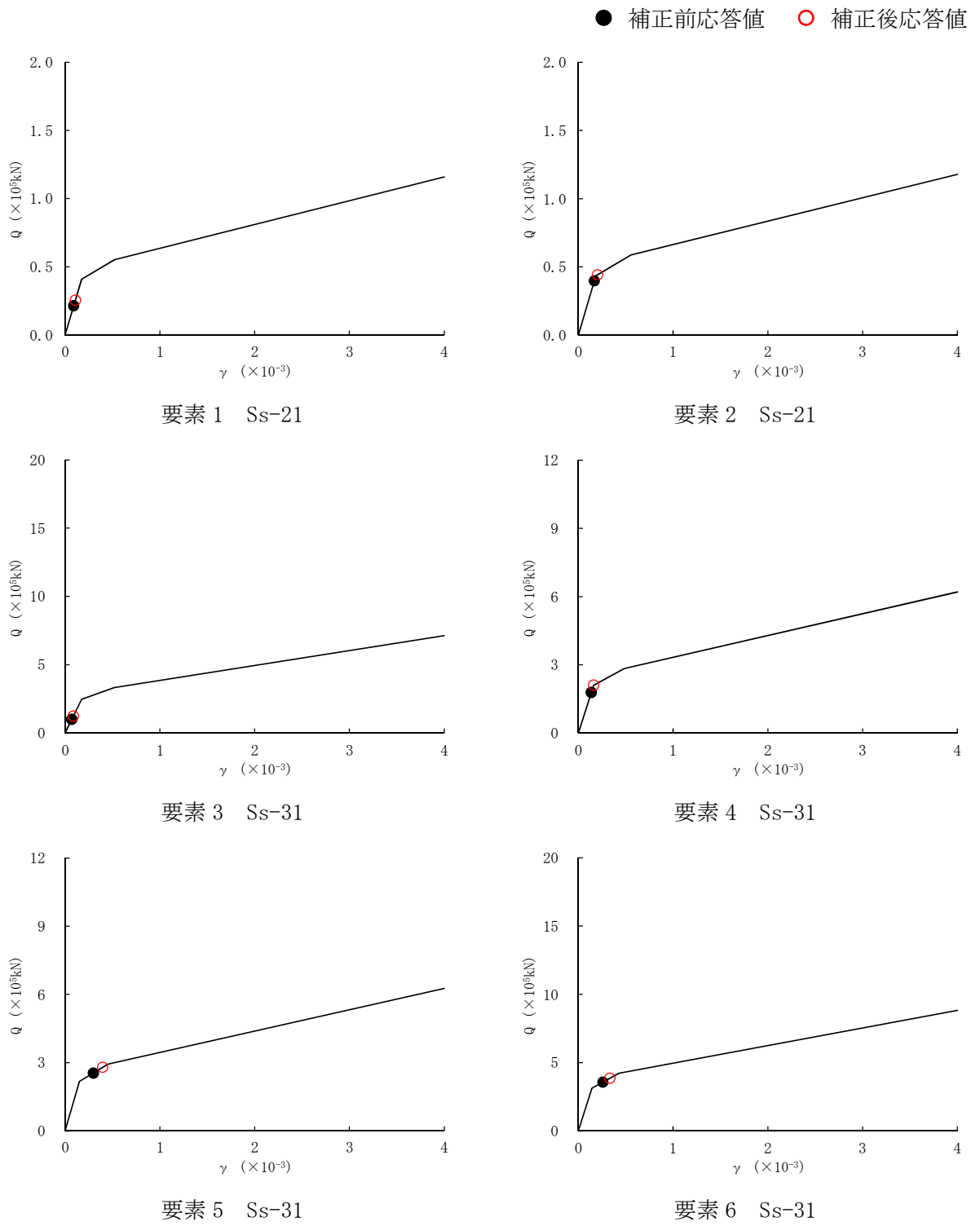


図 3-11 (1/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (EW 方向)

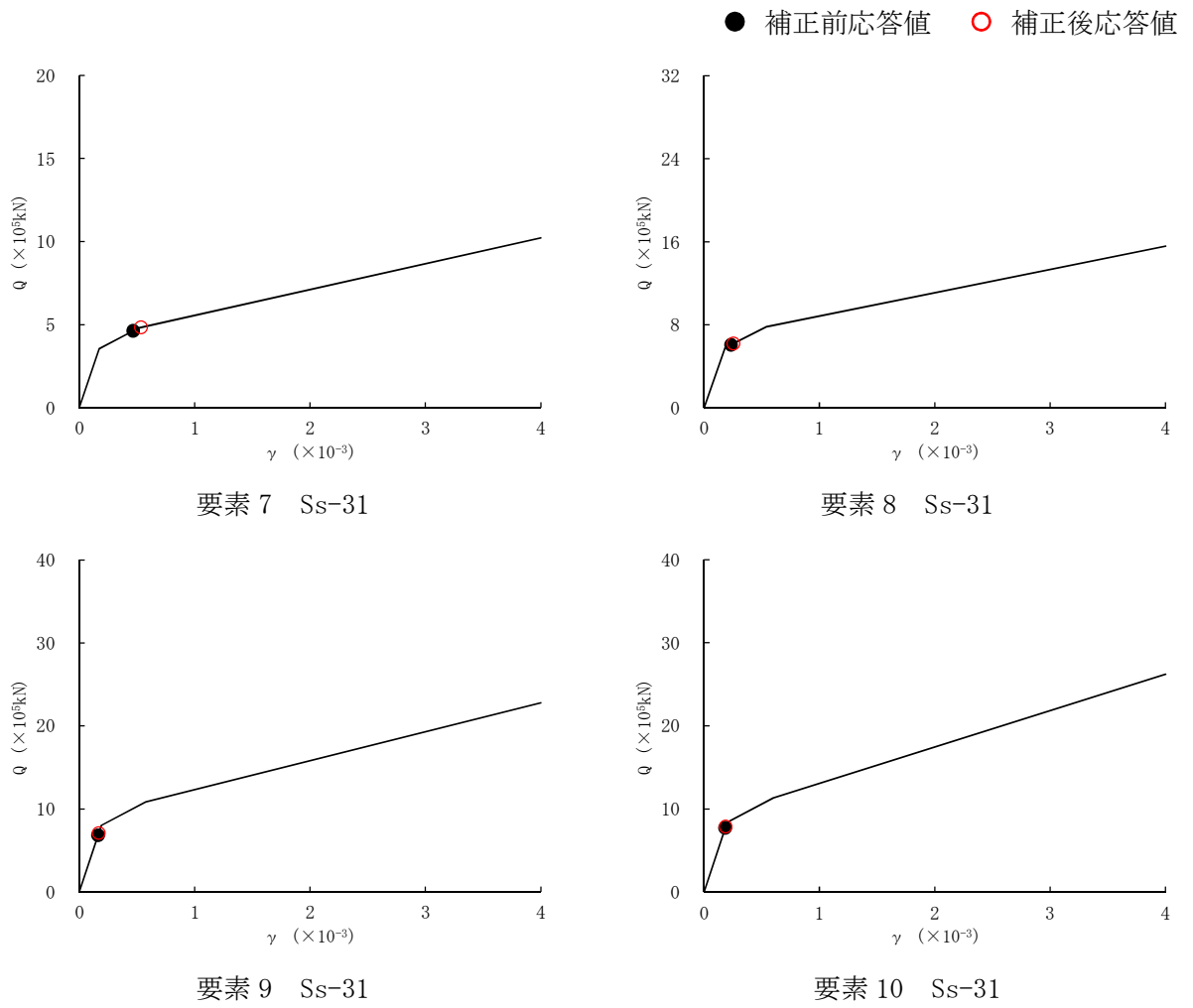


図 3-11 (2/2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (EW 方向)

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方向入力と比較する。

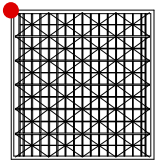
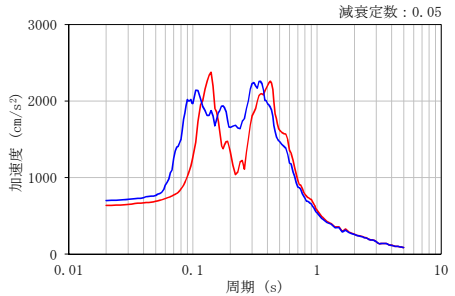
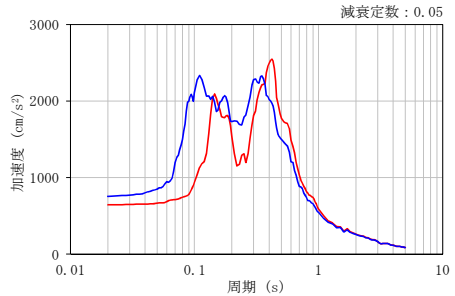
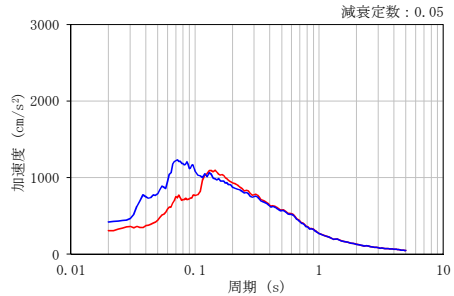
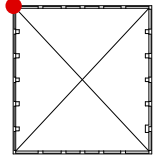
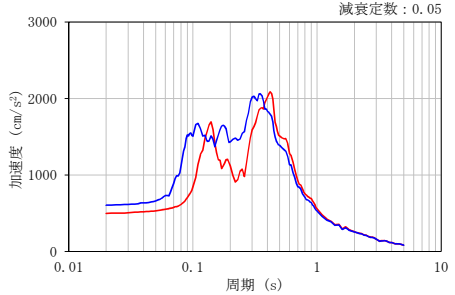
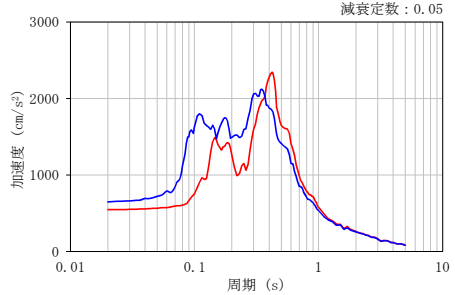
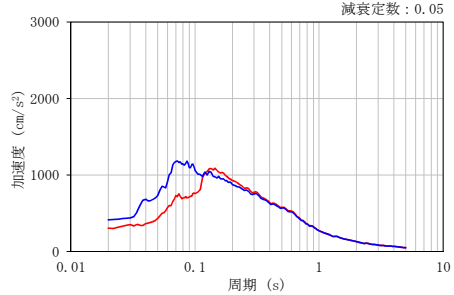
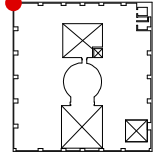
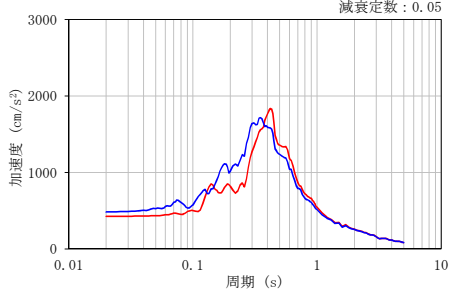
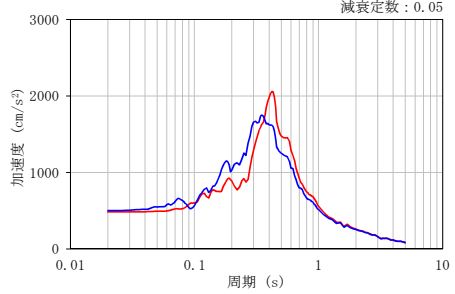
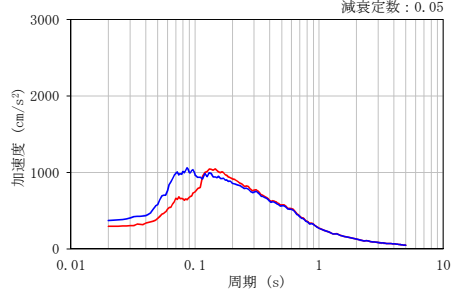
表3-14に比較結果を示す。

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。

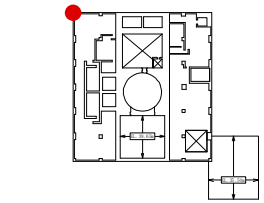
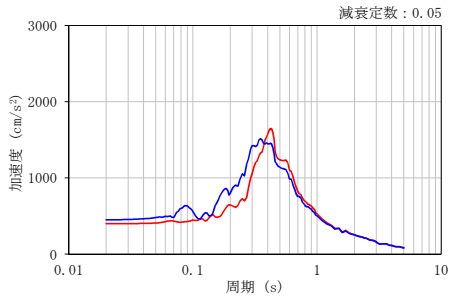
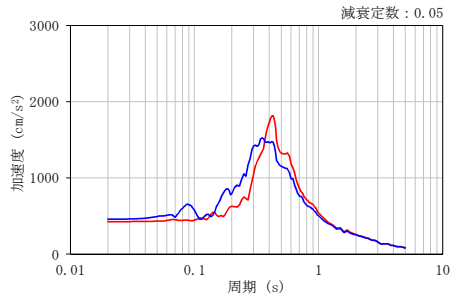
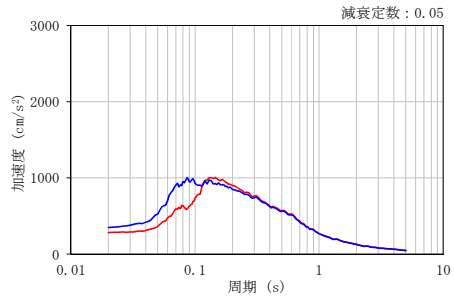
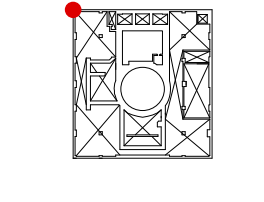
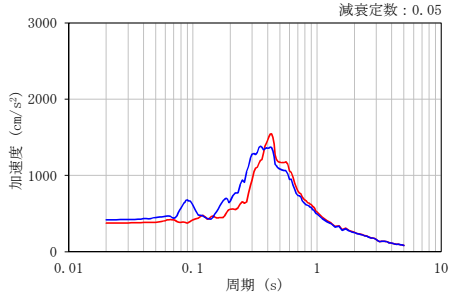
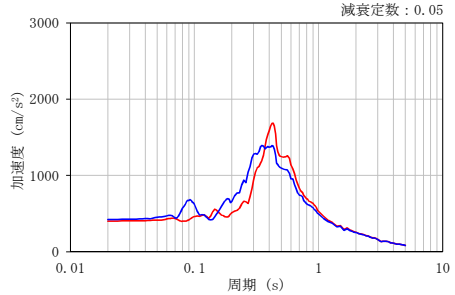
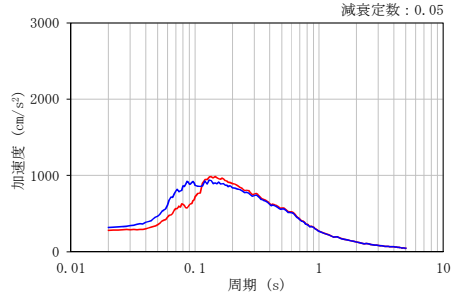
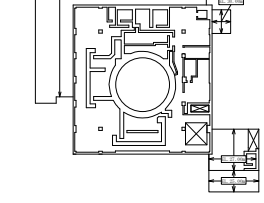
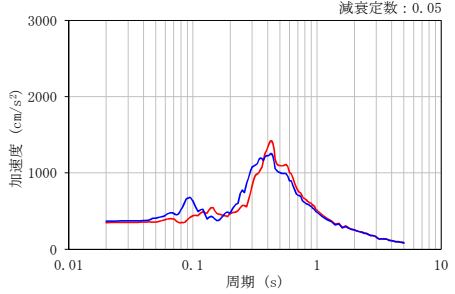
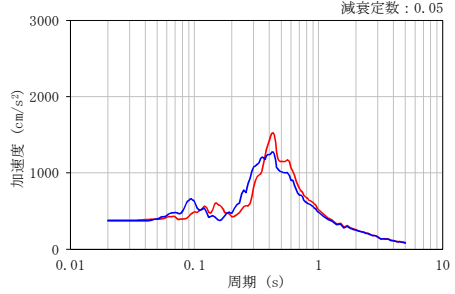
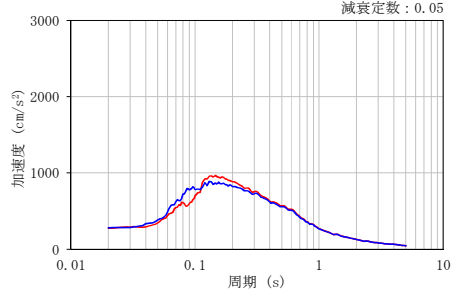
なお、「3.2 建屋応答性状の把握」で確認したように、EL.46.5mのEW方向については、水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響で局所的な応答が生じるため、「別紙4 機器・配管系に関する説明資料」において、その影響について検討を行う。

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
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 20px; vertical-align: middle;"></div> No. 11652			
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 20px; vertical-align: middle;"></div> No. 11516			
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 20px; vertical-align: middle;"></div> No. 11384			

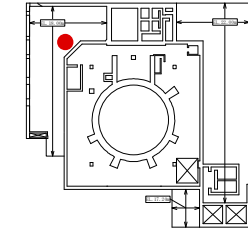
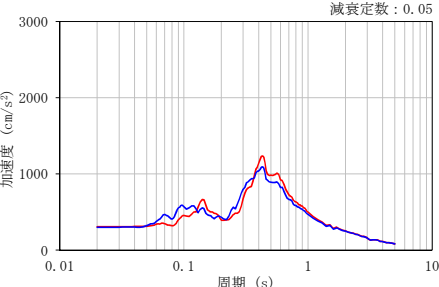
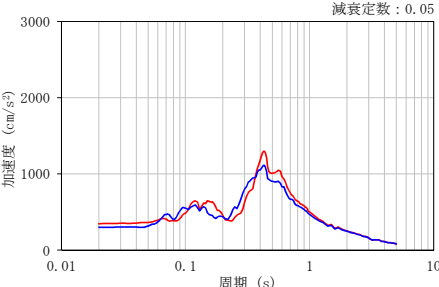
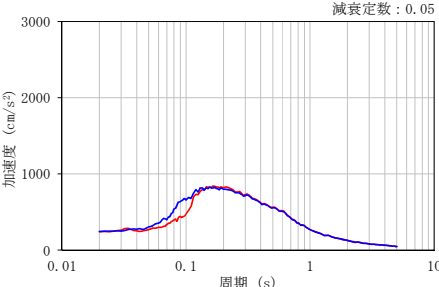
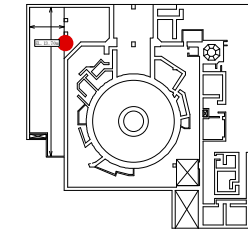
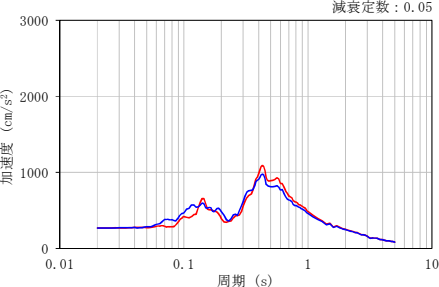
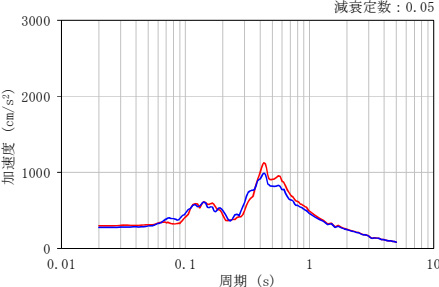
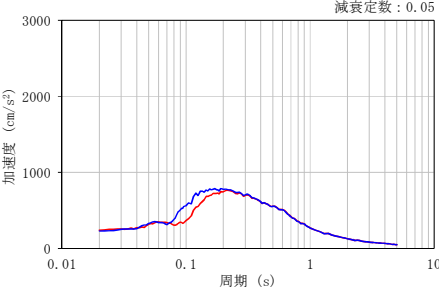
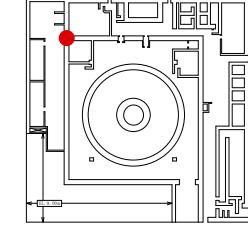
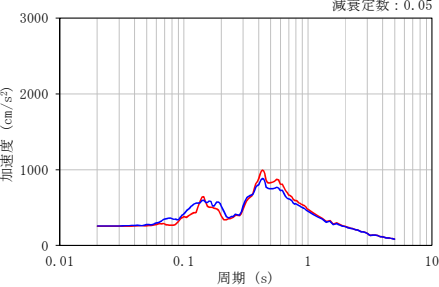
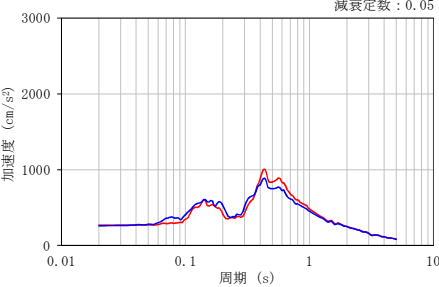
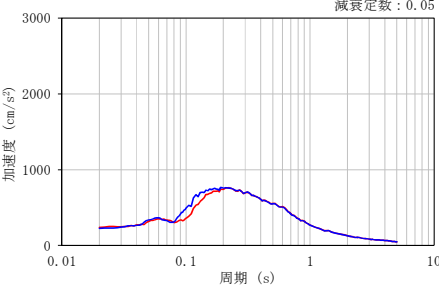
— 建屋模擬モデル — 質点系モデル

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
 No. 11200			
 No. 11024			
 No. 10895			

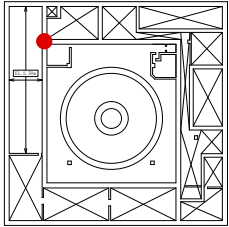
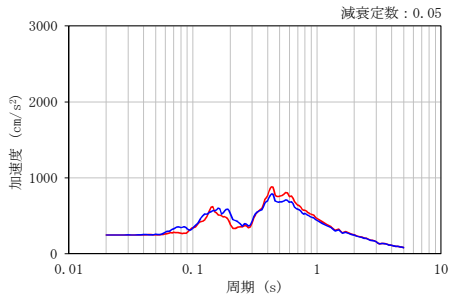
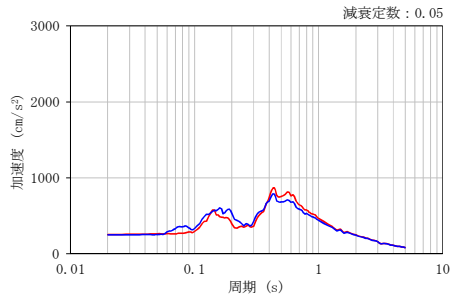
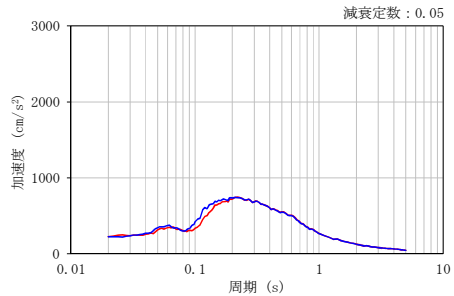
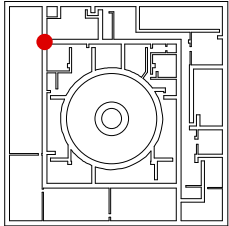
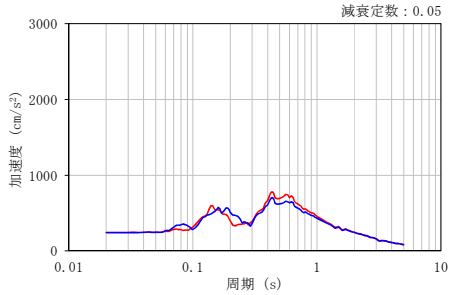
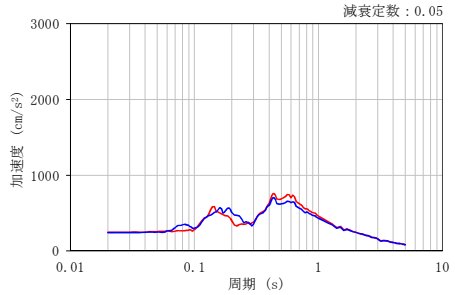
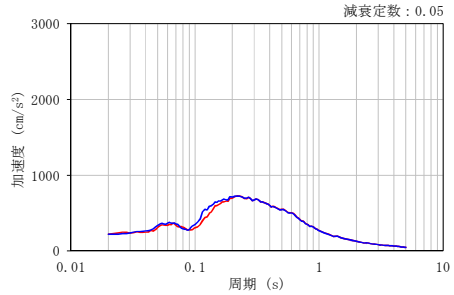
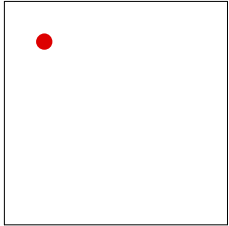
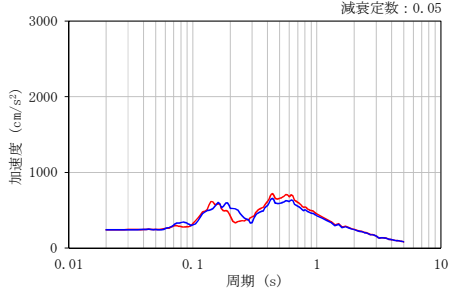
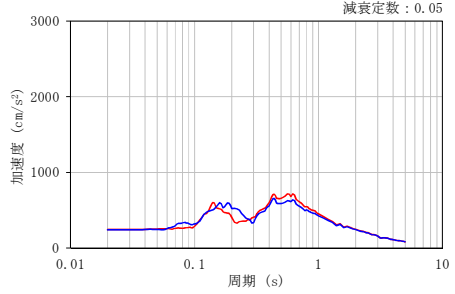
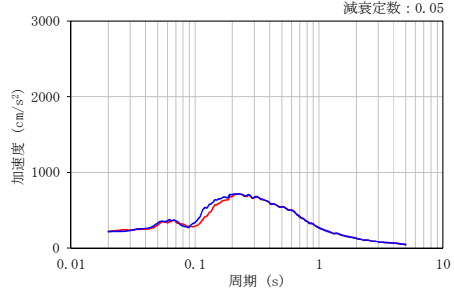
— 建屋模擬モデル — 質点系モデル

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
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 20px; vertical-align: middle;"></div> No. 10673			
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 20px; vertical-align: middle;"></div> No. 10481			
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 60px; height: 20px; vertical-align: middle;"></div> 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
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> No. 10208			
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> No. 5598			
 <div style="border: 1px solid black; display: inline-block; width: 50px; height: 15px; vertical-align: middle;"></div> No. 1598			

— 建屋模擬モデル — 質点系モデル

別紙3の補足説明資料

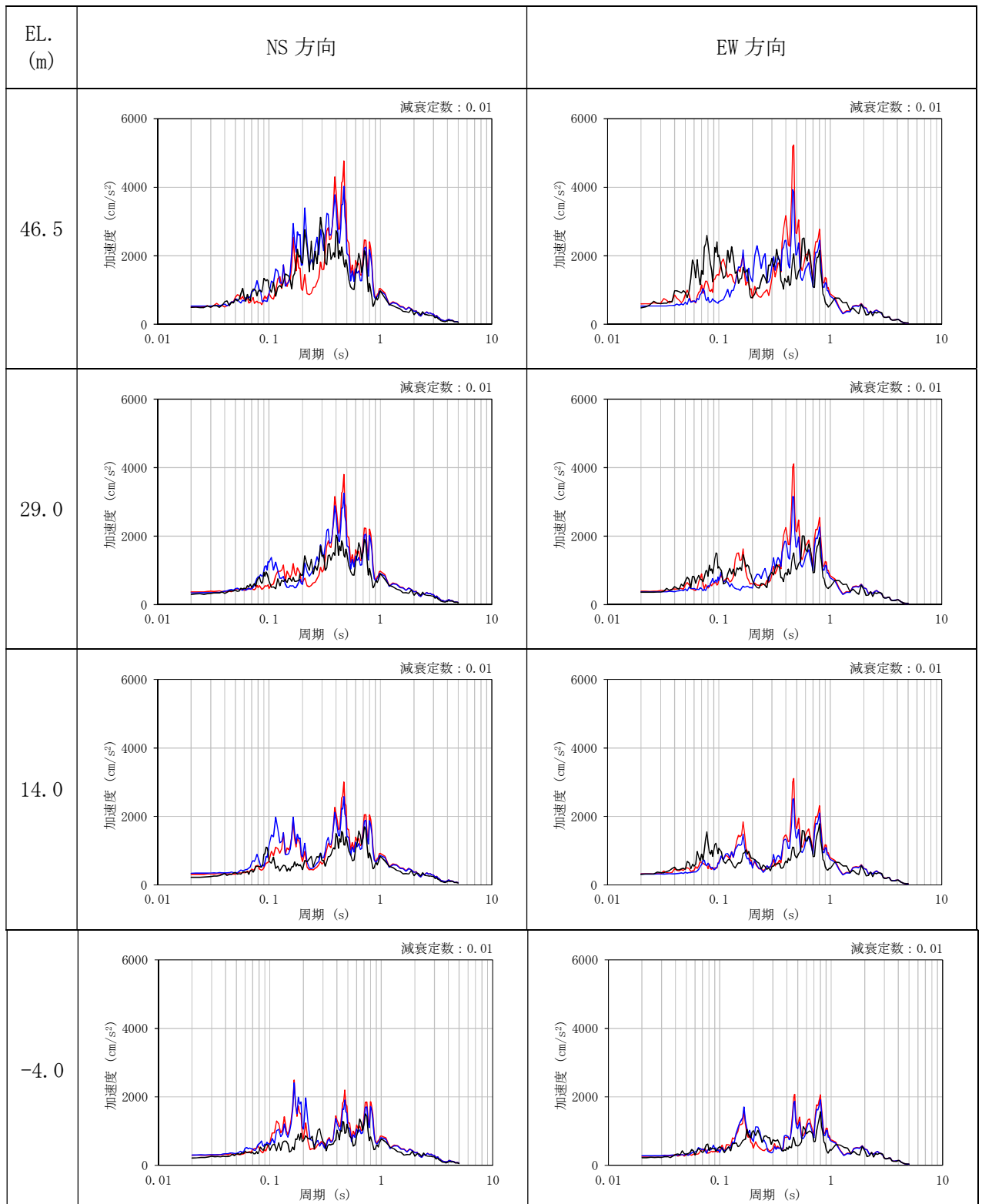
1. はじめに

本資料は、「別紙3 3次元FEMモデルによる地震応答解析」の「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

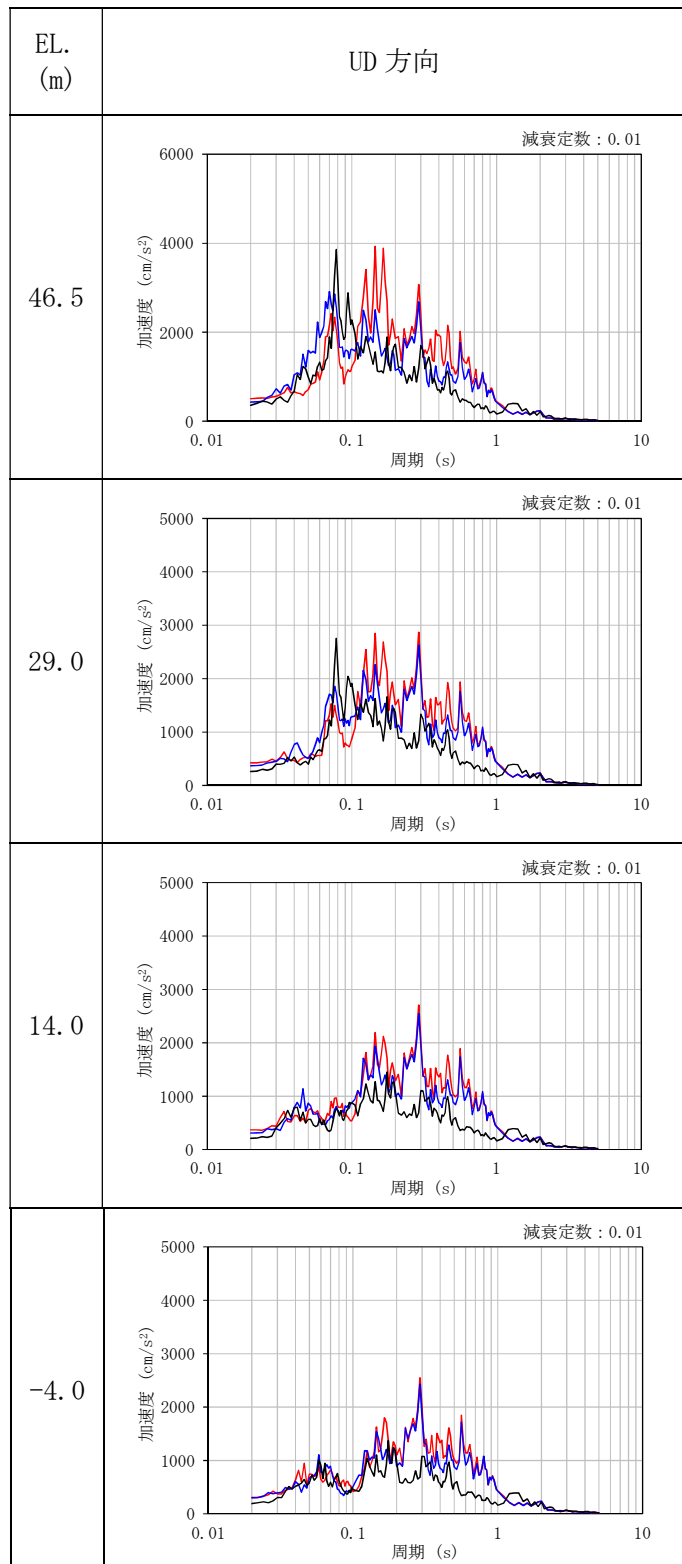
EL. 46.5 m, EL. 29.0 m, EL. 14.0 m 及び EL. -4.0 m の地震計位置での観測記録及び解析結果の加速度応答スペクトルの比較を表 2-1 に示す。なお、観測記録と比較するための解析結果は3方向同時入力による結果とし、地震計位置近傍の節点のものを用いる。また、添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」に用いた質点系モデルにおける解析結果も参考として併せて示す。

表 2-1 (1/2) 観測記録と解析結果の比較 (h=1%)



—— 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%)



— 観測記録 — 3次元FEM — 質点系