

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-400 改0

工事計画に係る補足説明資料

補足-400【建物・構築物の地震応答解析についての補足説明資料】

平成30年10月

日本原子力発電株式会社

添付書類に係る補足説明資料

「建物・構築物の地震応答解析」に係る添付書類の記載内容を補足するための説明資料を以下に示す。

工認添付資料	補足説明資料
V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書 V-2-2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震 応答計算書	補足-400-1 地震応答解析における既工認と今回工認 の解析モデル及び手法の比較
V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書 V-2-2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震 応答計算書 V-2-2-10 緊急時対策所建屋の地震応答計 算書 V-2-2-18 格納容器圧力逃がし装置格納槽 の地震応答計算書	補足-400-2 地震応答解析モデルに用いる鉄筋コンク リート部の減衰定数に関する検討
V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書 V-2-2-2 原子炉建屋の耐震性についての 計算書 V-2-2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震 応答計算書 V-2-2-5 使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震 性についての計算書 V-2-2-10 緊急時対策所建屋の地震応答計 算書 V-2-2-11 緊急時対策所建屋の耐震性につ いての計算書 V-2-2-14 主排気筒の地震応答計算書	補足-400-3 地震応答解析における材料物性のばらつ きに関する検討

工認添付資料	補足説明資料
<p>V-2-2-15-1 主排気筒の耐震性についての計算書</p> <p>V-2-2-15-2 主排気筒の基礎の耐震性についての計算書</p> <p>V-2-2-16 非常用ガス処理系配管支持架構の地震応答計算書</p> <p>V-2-2-17 非常用ガス処理系配管支持架構の耐震性についての計算書</p> <p>V-2-2-18 格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答計算書</p> <p>V-2-2-19 格納容器圧力逃がし装置格納槽の耐震性についての計算書</p> <p>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</p> <p>V-2-8-4-2 中央制御室遮蔽の耐震性についての計算書</p> <p>V-2-9-2-2 原子炉格納容器底部コンクリートマットの耐震性についての計算書</p> <p>V-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟の耐震性についての計算書</p> <p>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</p> <p>V-2-11-2-13 タービン建屋の耐震性についての計算書</p>	<p>補足-400-3 地震応答解析における材料物性のばらつきに関する検討</p>

工認添付資料	補足説明資料
V-2-11-2-14 サービス建屋の耐震性についての計算書 V-2-11-2-15 使用済燃料乾式貯蔵建屋上屋の耐震性についての計算書	補足-400-3 地震応答解析における材料物性のばらつきに関する検討
V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書	補足-400-4 隣接建屋の影響に関する検討
V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書 V-2-2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書 V-2-2-10 緊急時対策所建屋の地震応答計算書 V-2-2-18 格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答計算書	補足-400-5 地震応答解析における耐震壁のせん断スケルトンカーブの設定
V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書 V-2-2-2 原子炉建屋の耐震性についての計算書 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	補足-400-6 地震応答解析における原子炉建屋の重大事故等時の高温による影響
V-2-2-2 原子炉建屋の耐震性についての計算書 V-2-2-10 緊急時対策所建屋の地震応答計算書	補足-400-7 地震応答解析における保有水平耐力に関する補足説明

工認添付資料	補足説明資料
<p>V-2-8-4-2 中央制御室遮蔽の耐震性についての計算書</p> <p>V-2-9-2-2 原子炉格納容器底部コンクリートマットの耐震性についての計算書</p> <p>V-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟の耐震性についての計算書</p> <p>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</p>	<p>原子炉建屋の既工認時の設計用地震力と 補足-400-8 今回工認における静的地震力及び弾性設計用地震動 S_d による地震力の比較</p>

補足-400-1 【地震応答解析における既工認と今回工認の
解析モデル及び手法の比較】

目次

1. 概要	1
2. 地震応答解析モデル及び手法の比較	2

別紙 1-1 原子炉建屋の地盤接地状況と埋込み S R モデルの適用性について

別紙 1-2 原子炉建屋の地震応答解析モデルの変更について

別紙 1-3 原子炉建屋の地震応答解析モデルについて

別紙 1-4 原子炉建屋の地震時の基礎浮上りの評価法について

別紙 2-1 使用済燃料乾式貯蔵建屋で用いる有効入力動の適用性について

別紙 2-2 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの変更について

別紙 2-3 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルについて

1. 概要

本資料は、原子炉建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の既工認時及び今回工認時の地震応答解析モデル及び手法の比較を示すものである。

また、本資料は、以下の資料の補足説明をするものである。

- ・添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「V-2-2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書」

2. 地震応答解析モデル及び手法の比較

建屋の地震応答解析モデル及び手法の比較を表 2-1 及び表 2-2 に示す。鉛直モデルの諸元の設定方法を表 2-3 に示す。また、今回工認時の地震応答解析モデルを図 2-1 及び図 2-2 に示す。

比較に用いる既工認時の地震応答解析モデル及び手法は、建設工認のものである。

表 2-1 地震応答解析モデル及び手法の比較（原子炉建屋）

項目	内容	既工認時*1*2	今回工認	備考
入力地震動の算定法	水平	設計用地震波を人工岩盤下端に直接入力	基準地震動を用いて、一次元波動論により算定	(1)
	鉛直	—	基準地震動を用いて、一次元波動論により算定	(1)
解析コード		—	DAC3N V97	—
建屋のモデル化	モデル	質点系モデル	同左	(2)
	材料物性	検討時の規準に基づき設定 ・コンクリートのヤング係数, ポアソン比 $E=2.06 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (SI 換算) $\nu=0.167$	適用規準の見直しによる再設定 ・コンクリートのヤング係数, ポアソン比 $E=2.21 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ $\nu=0.2$ 鉛直モデル用: ・鋼材のヤング係数, ポアソン比 $E=2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ $\nu=0.3$	(3)
	剛性評価	耐震壁を考慮	同左	(2)
	減衰定数	RC : 5%	・水平方向 : RC : 5% ・鉛直方向 : RC : 5%, 鋼材 : 2%	—
地盤のモデル化	底面ばね	水平及び回転ばねを考慮 (Timoshenko, Barkan, 田治見等の式による値から設定)	・水平方向 : 水平及び回転ばねを考慮 ・鉛直方向 : 鉛直ばねを考慮	(4)
	側面ばね*3	考慮せず	・水平方向 : 水平ばねを考慮 ・鉛直方向 : 考慮せず	
非線形特性	耐震壁	考慮せず	・水平方向 : 考慮 ・鉛直方向 : 考慮せず	(4)
	底面ばね	考慮せず	・水平方向 : 接地率 75% を下回る場合, 基礎浮上りによる幾何学的非線形性考慮 ・鉛直方向 : 考慮せず	

注記 *1 : 建設工認時は、水平方向のみ地震応答解析を実施し、鉛直方向は静的地震力を考慮

*2 : 東海第二発電所「既工事計画認可申請書第 1 回 資料Ⅲ-1-4「原子炉建屋の地震応答計算書」(47 公第 12076 号 昭和 48 年 4 月 9 日認可)」

*3 : 地盤接地状況を踏まえ側面ばねを考慮。地盤接地状況及びその適用性について別紙 1-1 に示す。

具体的な反映事項（表の備考欄に対応）

- (1) 解放基盤で定義される基準地震動を用いて、一次元波動論により算定した。水平方向では基礎下端及び側面地盤位置での応答波を、鉛直方向では基礎下端位置での応答波を入力した。
- (2) 人工岩盤はモデル化範囲から除外、下屋部に積雪荷重の考慮、せん断断面積でクレーン階の壁付柱の突出部の断面積無視に変更等。変更の内容について別紙 1-2 に示す。
- (3) 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」((社) 日本建築学会, 1999) 及び「鋼構造設計規準」((社) 日本建築学会, 2005) に基づく。
- (4) 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」((社) 日本電気協会) に基づく。

表 2-2 地震応答解析モデル及び手法の比較（使用済燃料乾式貯蔵建屋）

項目	内容	既工認時*1*2	今回工認	備考
入力地震動の算定法	水平	基準地震動を用いて、一次元波動論により算定	三次元薄層要素法による杭の拘束効果を考慮した有効入力動	(1)
	鉛直	—	三次元薄層要素法による杭の拘束効果を考慮した有効入力動	(1)
解析コード		NORA	NORA2D Ver. 01.03.00	—
建屋のモデル化	モデル	質点系モデル	同左	(2)
	材料物性	検討時の規準に基づき設定 ・コンクリートのヤング係数, ポアソン比 $E=2.26 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (SI 換算) $\nu=0.167$	適用規準の見直しによる再設定 ・コンクリートのヤング係数, ポアソン比 $E=2.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ $\nu=0.2$ 鉛直モデル用: ・鋼材のヤング係数, ポアソン比 $E=2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ $\nu=0.3$	(3)
	剛性評価	耐震壁を考慮	同左	(2)
	減衰定数	RC : 5%	・水平方向 : RC : 5% ・鉛直方向 : RC : 5%, 鋼材 : 2%	—
地盤のモデル化	底面ばね	水平及び回転ばねを考慮 (三次元薄層要素法により算定)	・水平方向 : 水平及び回転ばねを考慮 ・鉛直方向 : 鉛直ばねを考慮 (水平, 回転及び鉛直ばねとも三次元薄層要素法により算定)	(4)
非線形特性	耐震壁	考慮せず	・水平方向 : 考慮 ・鉛直方向 : 考慮せず	(4)
	底面ばね	考慮せず	・水平方向 : 考慮せず ・鉛直方向 : 考慮せず	—

注記 *1 : 建設工認時は、水平方向のみ地震応答解析を実施し、鉛直方向は静的地震力を考慮

*2 : 東海第二発電所『既工事計画認可申請書（平成 11 年 6 月 24 日付け発管発第 64 号） 資料 IV-2-3_使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書』（平成 11・06・25 資 第 1 号 平成 11 年 9 月 2 日認可）

具体的な反映事項（表の備考欄に対応）

- (1) 既工認時は、解放基盤で定義される基準地震動を用いて、一次元波動論により算定した。今回工認は一次元波動論により算定した入力地震動に、三次元薄層要素法により杭の拘束効果を考慮した有効入力動として設定する。入力位置は、既工認と同じく基礎下端位置とする。有効入力動の適用性について別紙 2-1 に示す。
- (2) 変更の内容について別紙 2-2 に示す。
- (3) 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（（社）日本建築学会、1999）及び「鋼構造設計規準」（（社）日本建築学会、2005）に基づく。
- (4) 「原子力発電所耐震設計技術指針」EAG 4601-1991 追補版」（（社）日本電気協会）に基づく。

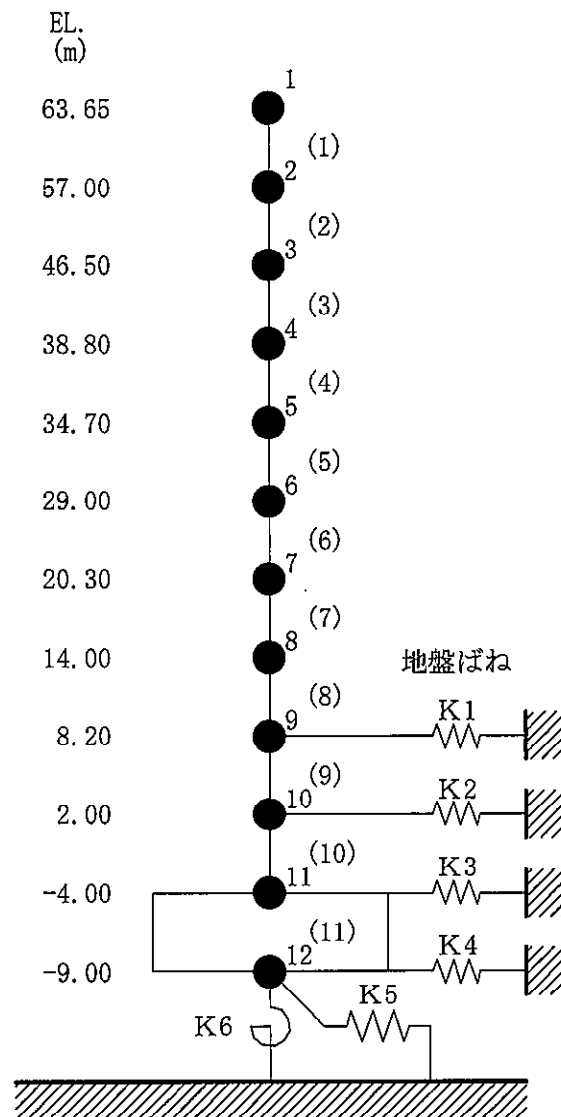
表 2-3 鉛直モデルの諸元の設定方法

(a) 原子炉建屋

部位	質量	剛性	備考
耐震壁・柱	鉛直モデルに対応する水平モデルの質点の質量	水平方向モデルにおいて剛性を考慮している耐震壁の全軸断面積及び鉛直剛性として考慮できる柱の軸断面積の和より軸剛性を算出	—
屋根トラス	質点の支配面積より算出	曲げ変形とせん断変形を生じる質点系の曲げせん断梁モデルとして剛性を算出	—

(b) 使用済燃料乾式貯蔵建屋

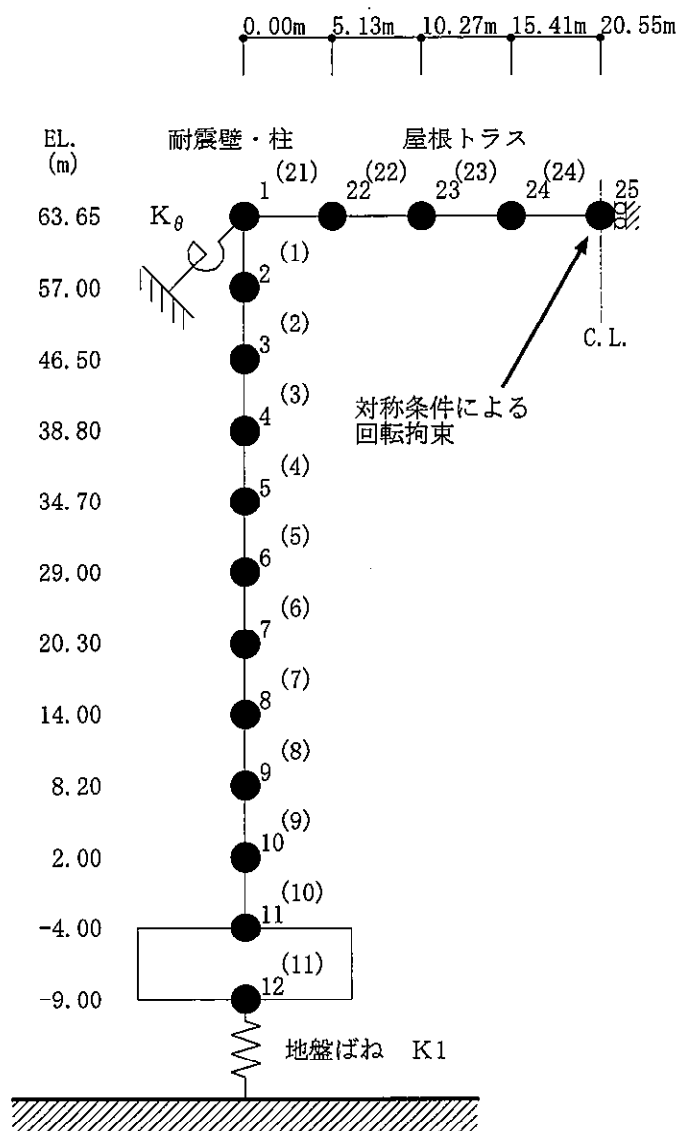
部位	質量	剛性	備考
耐震壁・柱	鉛直モデルに対応する水平モデルの質点の質量を算出	水平方向モデルにおいて剛性を考慮している耐震壁の全軸断面積及び鉛直剛性として考慮できる柱の軸断面積の和より軸剛性を算出	貯蔵エリアの標準スパン（支配幅 7 m）に対して算出
屋根トラス	質点の支配面積より算出	曲げ変形とせん断変形を生じる質点系の曲げせん断梁モデルとして剛性を算出	



注 1 : 数字は質点番号を示す。

注 2 : () 内は部材番号を示す。

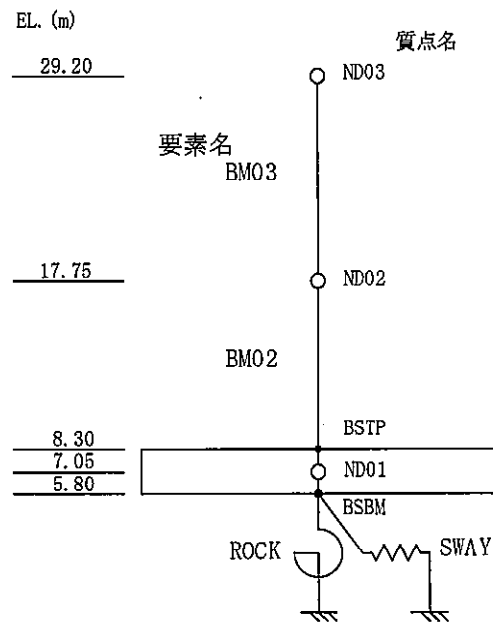
図 2-1 (1/2) 地震応答解析モデル (水平方向))



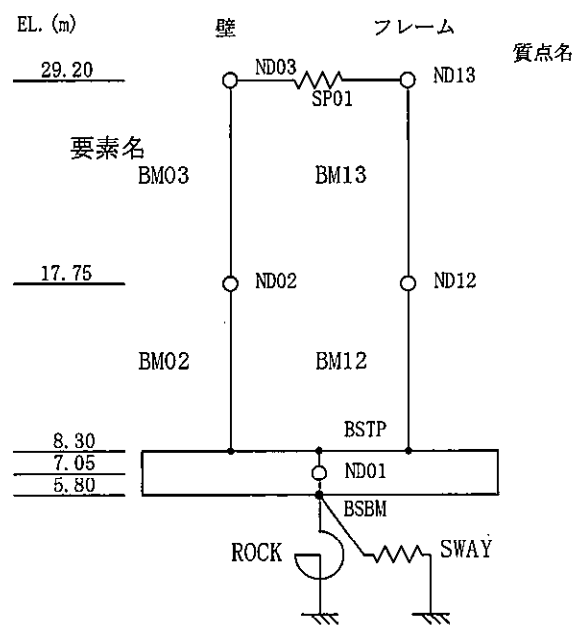
注 1 : 数字は質点番号を示す。

注 2 : () 内は部材番号を示す。

図 2-1 (2/2) 地震応答解析モデル (鉛直方向))



(a) NS 方向



(b) EW 方向

図 2-2 (1/2) 地震応答解析モデル ((水平方向))

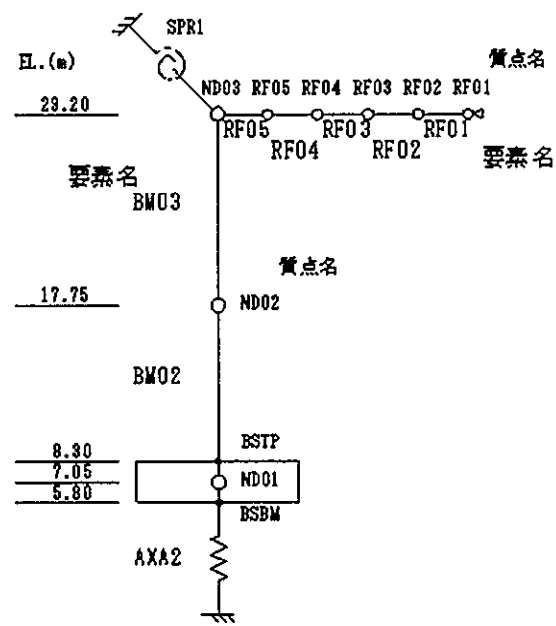


図 2-2 (2/2) 地震応答解析モデル (鉛直方向))

別紙 1-1 原子炉建屋の地盤接地状況と
埋込みSRモデルの適用性について

目次

1. 原子炉建屋の地盤接地状況と埋込みS Rモデルの適用性について	別紙 1-1-1
1.1 原子炉建屋の地盤接地状況	別紙 1-1-1
1.2 建屋埋込み効果の適用条件・評価手法に関する規格・基準類等の記載	別紙 1-1-1
1.3 埋込みS Rモデルの適用性について	別紙 1-1-1

1. 原子炉建屋の地盤接地状況と埋込みSRモデルの適用性について

原子炉建屋の地震応答解析では、水平方向の地震応答解析モデルに側面地盤ばねを考慮している。建屋埋込み効果の適用条件・評価手法に関する規格・基準類等の記載を確認し、原子炉建屋の埋込み効果を考慮することの妥当性を確認する。

1.1 原子炉建屋の地盤接地状況

原子炉建屋の周辺建屋の概要及び埋込み状況を図 1-1 に示す。網掛けで示す範囲が、周辺地盤と接している範囲である。西面、東面及び南面の3面の大部分が周辺地盤と接しており、その占める割合が面積で75 %以上となっている。

1.2 建屋埋込み効果の適用条件・評価手法に関する規格・基準類等の記載

「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)」(以下「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」という)において引用されている「建屋埋込み効果の評価法の標準化に関する調査報告書¹⁾」(以下「標準化報告書」という)によると、埋込み効果を見込むためには、建屋は少なくとも3面が埋め込まれていることが必要であるとされている。

また、「原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 -2008 ((社) 日本電気協会)²⁾」(以下「J E A C 4 6 0 1 -2008」という)では、NOVAKの側面ばねを用いた埋込みSRモデルを適用できる条件として、「埋め込み基礎の接触状況が構造物の応答に与える影響について³⁾」等の文献の結果等をもとに、建物・構築物の地下部分の大部分(3面または面積で75 %以上)が周辺地盤と接している場合には、全面埋込みと同様な埋込み効果が期待できるものとしている。

1.3 埋込みSRモデルの適用性について

原子炉建屋の地盤接地状況は面積で75 %以上となっており、建屋埋込み効果の適用条件・評価手法に関する規格・基準類等の記載に基づき、原子炉建屋の埋込み効果を考慮することの妥当性を確認した。

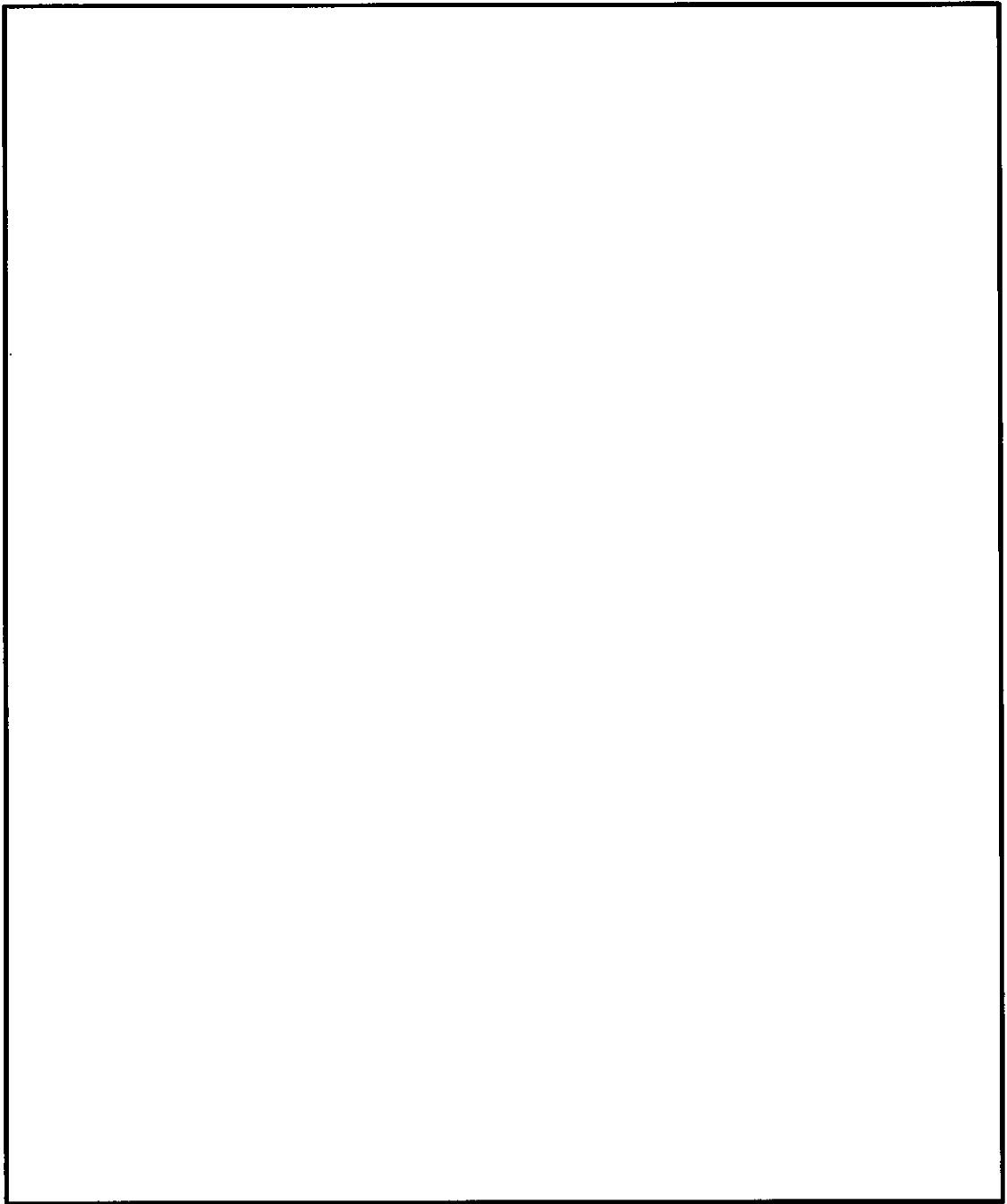


図 1-1 (1/2) 原子炉建屋の周辺建屋の概要及び埋込み状況

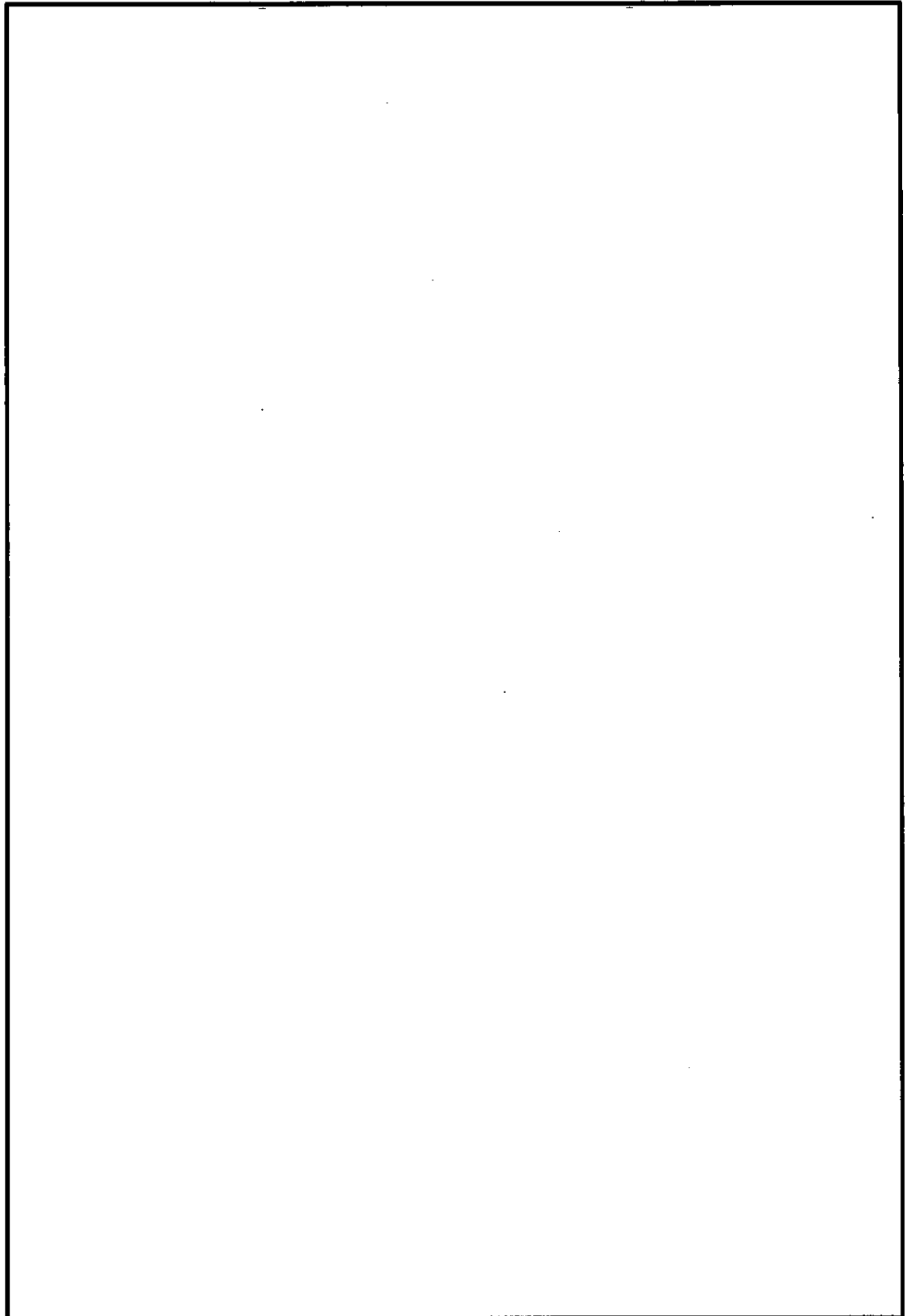


図 1-1 (2/2) 原子炉建屋の周辺建屋の概要及び埋込み状況

【参考文献】

- 1) 建屋埋込み効果の評価法の標準化に関する調査報告書（(社) 日本電気協会 電気技術基準調査委員会，昭和 62 年 6 月）
- 2) 原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 -2008（(社) 日本電気協会）
- 3) 吉田一博，萩原哲也：埋め込み基礎の接触状況が構造物の応答に与える影響について，第 11 回日本工学シンポジウム，2002，pp1287-1292

別紙 1-2 原子炉建屋の地震応答解析モデルの変更について

目次

1. 概要	別紙 1-2-1
2. 原子炉建屋の地震応答解析モデルの変更について	別紙 1-2-2
2.1 人工岩盤の考慮方法の変更	別紙 1-2-2
2.2 クレーン階における変更	別紙 1-2-3
2.3 積雪荷重による変更	別紙 1-2-4
2.4 4 階の壁剛性の変更	別紙 1-2-5
3. 固有値解析結果の比較	別紙 1-2-8

1. 概要

原子炉建屋の水平方向の地震応答解析モデル（以下「R/B 今回工認モデル」という。）は、基本的に建設工認時の地震応答解析モデル（以下「R/B 建設工認モデル」という。）に基づいて設定しているが、解析モデルの精緻化等を目的とし、R/B 建設工認モデルから変更を行っている。本資料では、変更の概要を示す。

図 1-1 に地震応答解析モデルの変更箇所の概要を示す。

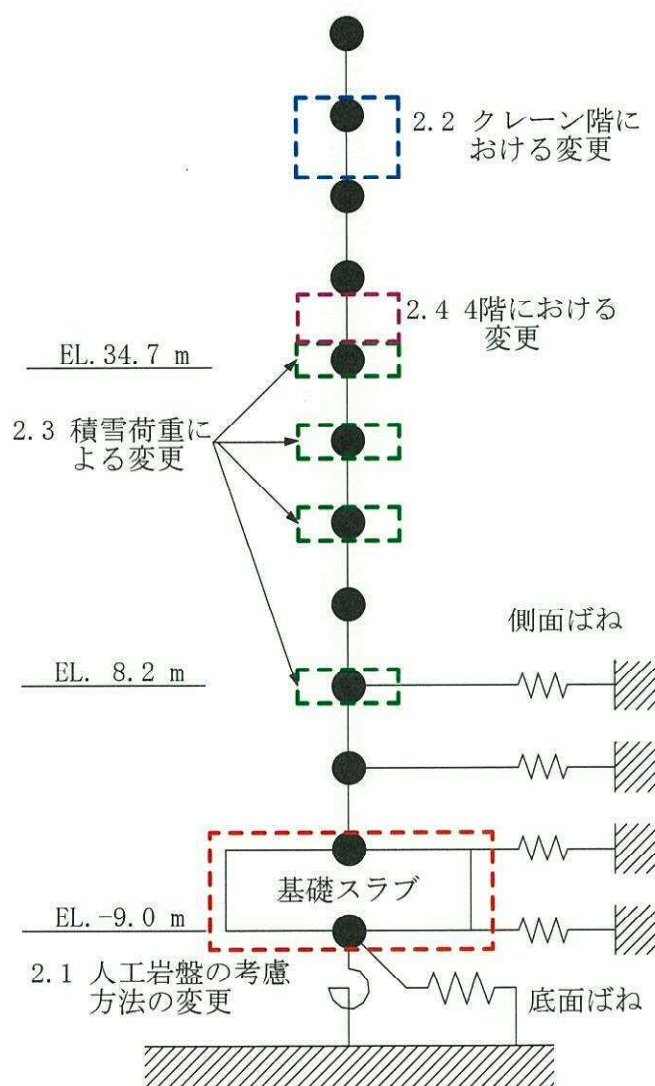


図 1-1 地震応答解析モデルの変更箇所の概要

2. 原子炉建屋の地震応答解析モデルの変更について

2.1 人工岩盤の考慮方法の変更

R/B 建設工認モデルにおいては、人工岩盤（EL. -9.0 m～EL. -17.0 m）を地震応答解析モデルに含めてモデル化していた。R/B 今回工認モデルにおいては、人工岩盤については、東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析で保守的な結果（別紙 1-3 参照）となったことから、支持地盤として考慮するものとし、地震応答解析モデルは EL. -9.0 m の基礎スラブ下端位置までをモデル化する。図 2-1 に地震応答解析モデルの比較を示す。

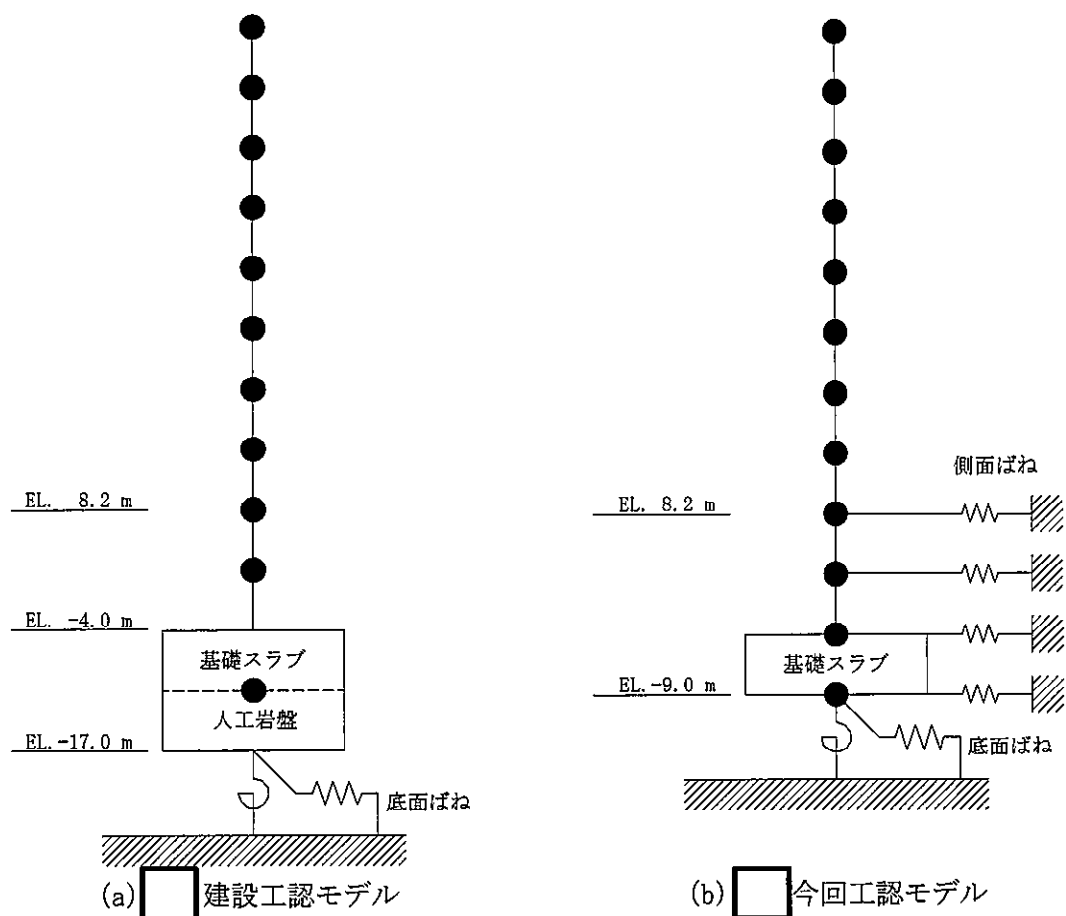


図 2-1 地震応答解析モデルの比較

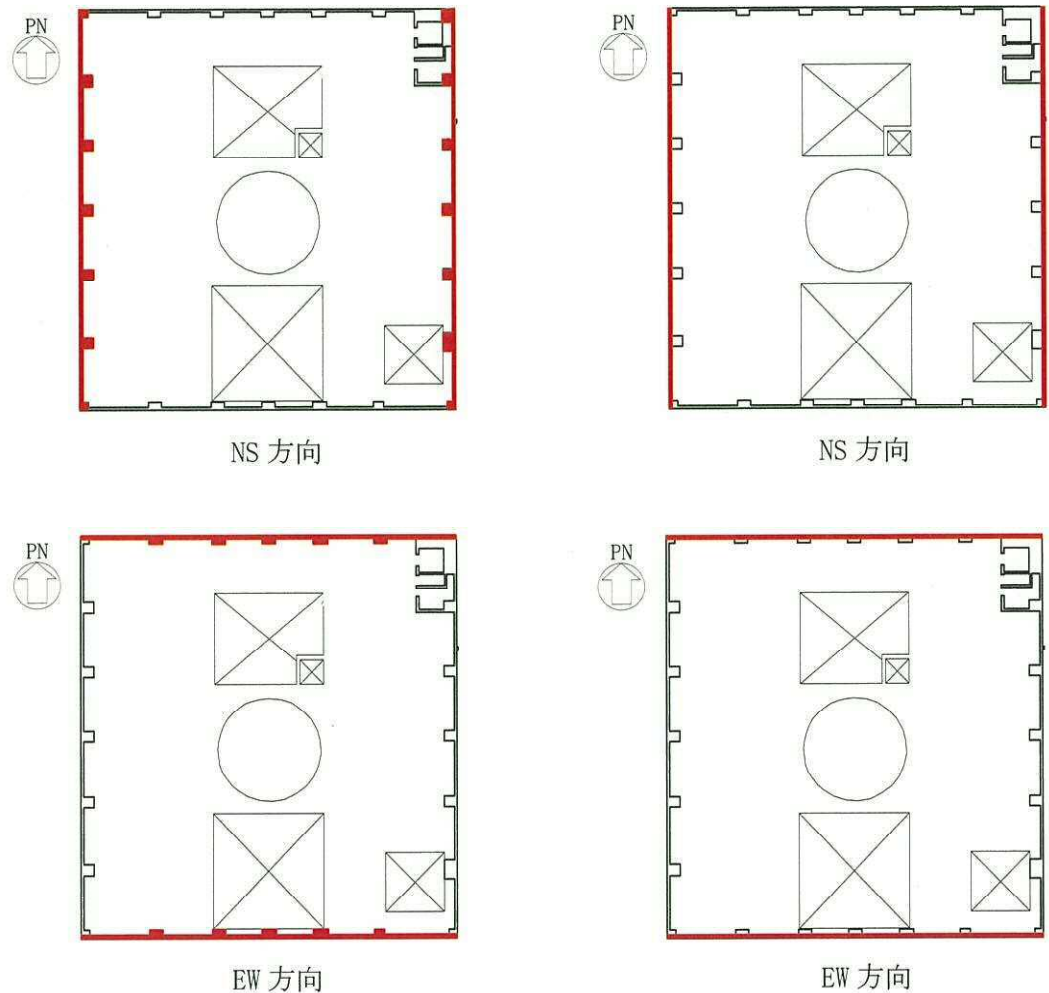
2.2 クレーン階における変更

(1) 重量の変更


R/B 建設工認モデルにはクレーン重量が考慮されていなかったが、R/B 今回工認モデルでは、クレーンの重量を考慮することとし、EL. 57.0 m の質点重量及び回転慣性重量を変更した。

(2) セン断断面積の変更

R/B 建設工認モデルにおいては、オペフロ上部 (EL. 46.50 m～EL. 57.00 m) のセン断断面積として、耐震壁と壁付柱の突出部の断面積を考慮して、セン断断面積を算定していた。R/B 今回工認モデルにおいては、耐震壁のみでセン断断面積を算定する。図 2-2 にセン断断面積を評価する耐震壁を示したオペフロ階 (EL. 46.50 m～EL. 57.00 m) の平面図を示す。



注記 * : 赤線は、セン断断面積を評価する耐震壁を示す。

(a)  建設工認モデル

(b)  今回工認モデル

図 2-2  の平面図

2.3 積雪荷重による変更

R/B 今回工認モデルにおいては、多雪地域ではないが、原子炉建屋の地震応答解析に積雪荷重を考慮することとする。

R/B 今回工認モデルに積雪荷重を新たに加える原子炉建屋付属棟の部位を図 2-3 に示す。

原子炉建屋原子炉棟（以下「原子炉棟」という。）については、平成 22 年に屋根トラスの裕度向上工事として重量低減措置を実施している。原子炉棟の積雪荷重を考慮した屋根荷重に、裕度向上工事による低減重量を差し引くと、原子炉棟の屋根荷重は 586 kgf/m^2 となる。建設工認時の設計図書では原子炉棟の屋根荷重を 600 kgf/m^2 として質点重量を算定しており、積雪荷重を考慮した現状の屋根荷重とほぼ同等であることを踏まえて、R/B 建設工認モデルの値からの変更は行わない。

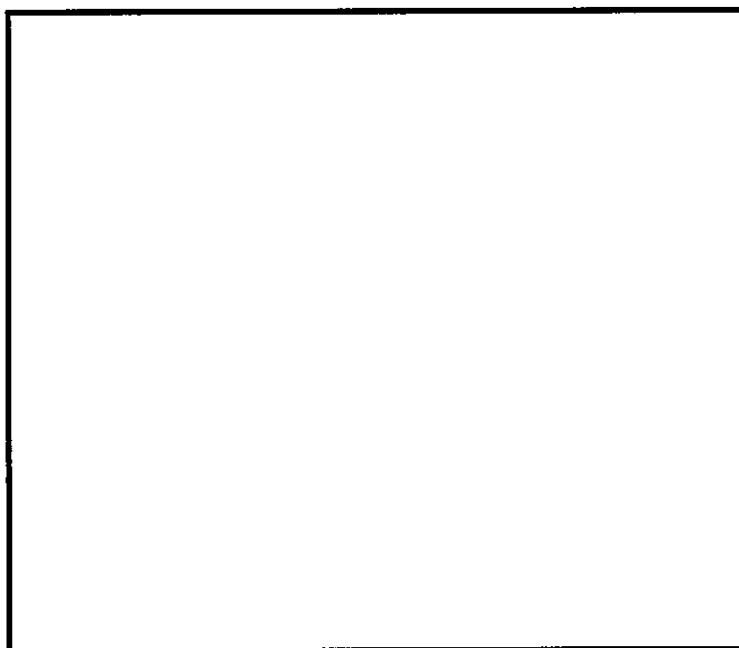


図 2-3 R/B 今回工認モデルに積雪荷重を新たに加える の部位

2.4 4階の壁剛性の変更

R/B 建設工認モデルにおいて示されている EL. 38.8 m～EL. 34.7 m のせん断断面積及び断面 2 次モーメントには、使用済燃料プールの壁を考慮している。使用済燃料プールの壁は、シェル壁と内部ボックス壁に接続されシェル壁と一体として挙動すると考えられるため、剛性評価に考慮していた。EL. 34.7 m は使用済燃料プールの底版の上端レベルに相当するが、当該レベルは図 2-4 に示すように使用済燃料プールの床以外に床が無い構造となっている。これより、R/B 今回工認モデルでは、上下階の床に接続されている壁を考慮することとし EL. 34.7 m から EL. 38.8 m の壁を剛性評価から除いた解析モデルを用いることとした。

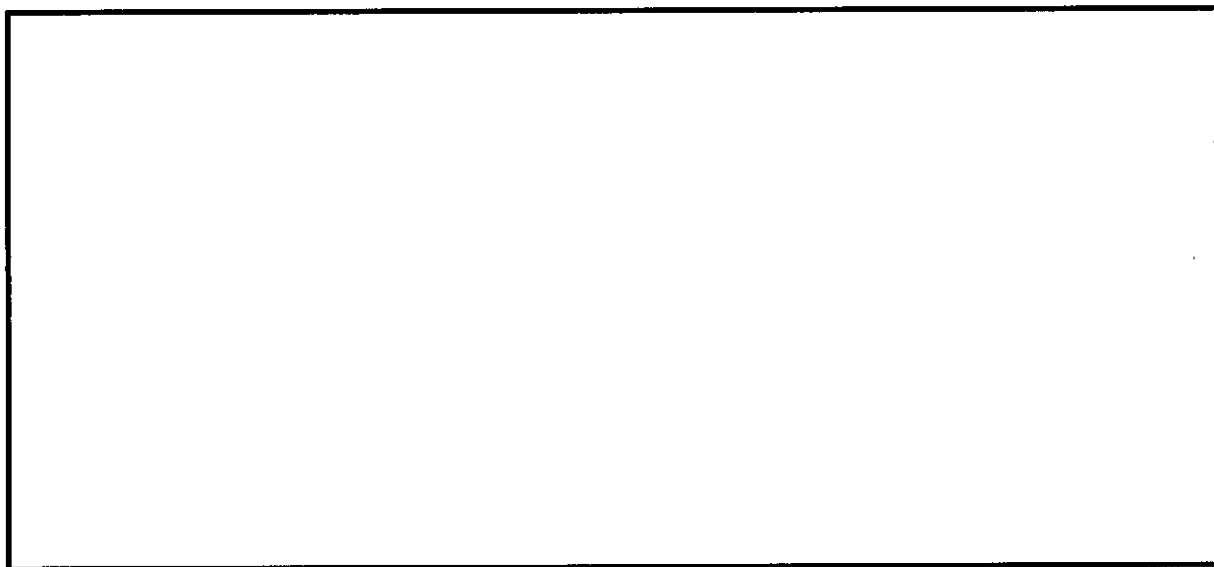


図 2-4 4階の使用済燃料プール床周辺の構造概要

上記の変更を考慮した R/B 今回工認モデル諸元を表 2-1 に示す。

表 2-1 建設工認モデルと今回工認モデル諸元の比較 (1/2)

建設工認モデル諸元								今回工認モデル諸元				
高さ m EL.	質点 番号	質点質量 ^{※1} t・s ² /m	回転慣性 ^{※1} ×10 ³ t・s ² ・m		質点重量 ^{※2} kN W	回転慣性重量 ^{※2} ×10 ⁵ kN・m ²		高さ m EL.	質点 番号	質点重量 kN W	回転慣性重量 ×10 ⁵ kN・m ²	
			I _{gNS}	I _{gEW}		I _{gNS}	I _{gEW}				I _{gNS}	I _{gEW}
63.65	1	165	37.1	32.8	15,870	35.7	31.5	63.65	1	15,870	35.7	31.5
57.00	2	140	47.4	42.9	13,460	45.6	41.3	57.00	2	16,160	51.2	44.7
46.50	3	700	125.1	108.9	67,320	120.3	104.7	46.50	3	67,320	120.3	104.7
38.80	4	1,010	168.0	103.8	97,130	161.6	99.8	38.80	4	97,130	161.6	99.8
34.70	5	865	117.5	71.4	83,190	113.0	68.7	34.70	5	83,270	113.0	68.7
29.00	6	1,270	362.7	260.5	122,140	348.8	250.5	29.00	6	122,370	348.8	250.5
20.30	7	1,680	508.2	565.6	161,570	488.7	543.9	20.30	7	161,820	488.7	543.9
14.00	8	2,440	749.5	810.6	234,650	720.8	779.6	14.00	8	234,650	720.8	779.6
8.20	9	2,070	928.6	922.1	199,070	893.0	886.8	8.20	9	199,260	893.0	886.8
2.00	10	2,295	865.6	863.8	220,710	832.4	830.7	2.00	10	220,710	832.4	830.7
	11	16,200	6,374.2	6,398.8	1,557,960	6,130.1	6,153.8	-4.00	11	439,290	1,724.6	1,712.1
総重量		28,835						-9.00	12	275,090	1,081.4	1,073.5
								総重量		1,932,940		

※1：建設工認図書記載値

※2：建設工認図書記載値を重力加速度9.80665m/s²を用いてSI単位系に単位換算

	建設工認モデルからの変更箇所	「2.1 人工岩盤の考慮方法の変更」
	建設工認モデルからの変更箇所	「2.2 クレーン階における変更」
	建設工認モデルからの変更箇所	「2.3 積雪荷重による変更」

表 2-1 建設工認モデルと今回工認モデル諸元の比較 (2/2)

建設工認モデル諸元						今回工認モデル諸元					
高さ m EL.	要素 番号	せん断断面積 m ²		断面2次モーメント × 10 ³ m ⁴		高さ m EL.	要素 番号	せん断断面積 m ²		断面2次モーメント × 10 ³ m ⁴	
		A _{sNS}	A _{sEW}	I _{NS}	I _{EW}			A _{sNS}	A _{sEW}	I _{NS}	I _{EW}
63.65						63.65					
	(1)	27.3	25.5	20.4	18.4		(1)	27.3	25.5	20.4	18.4
57.00						57.00					
	(2)	32.0	30.0	20.4	18.4		(2)	27.3	25.5	20.4	18.4
46.50						46.50					
	(3)	212	154	64.4	34.7		(3)	212	154	64.4	34.7
38.80						38.80					
	(4)	266	238	52.7	40.5		(4)	133	141	45.0	37.3
34.70						34.70					
	(5)	143	156	45.4	38.7		(5)	143	156	45.4	38.7
29.00						29.00					
	(6)	218	237	77.6	72.9		(6)	218	237	77.6	72.9
20.30						20.30					
	(7)	242	224	86.3	77.6		(7)	242	224	86.3	77.6
14.00						14.00					
	(8)	394	345	178.5	147.4		(8)	394	345	178.5	147.4
8.20						8.20					
	(9)	464	454	218.4	208.5		(9)	464	454	218.4	208.5
2.00						2.00					
	(10)	464	454	218.8	208.9		(10)	464	454	218.8	208.9
						-4.00					
							(11)	4,675	4,675	1,828.1	1,814.8
						-9.00					

		建設工認モデルからの変更箇所	「2.1 人工岩盤の考慮方法の変更」
		建設工認モデルからの変更箇所	「2.2 クレーン階における変更」
		建設工認モデルからの変更箇所	「2.4 4階の壁剛性の変更」

3. 固有値解析結果の比較

R/B 建設工認モデル及び R/B 今回工認モデルの固有値解析結果の比較を示す。

固有値解析結果（固有周期及び固有振動数）の比較を表 3-1 に，刺激関数図を図 3-1 及び図 3-2 に示す。NS 方向，EW 方向ともに R/B 建設工認モデルの固有値と R/B 今回工認モデルの固有値は概ね一致している。

表 3-1 固有値解析結果の比較

(a) NS 方向

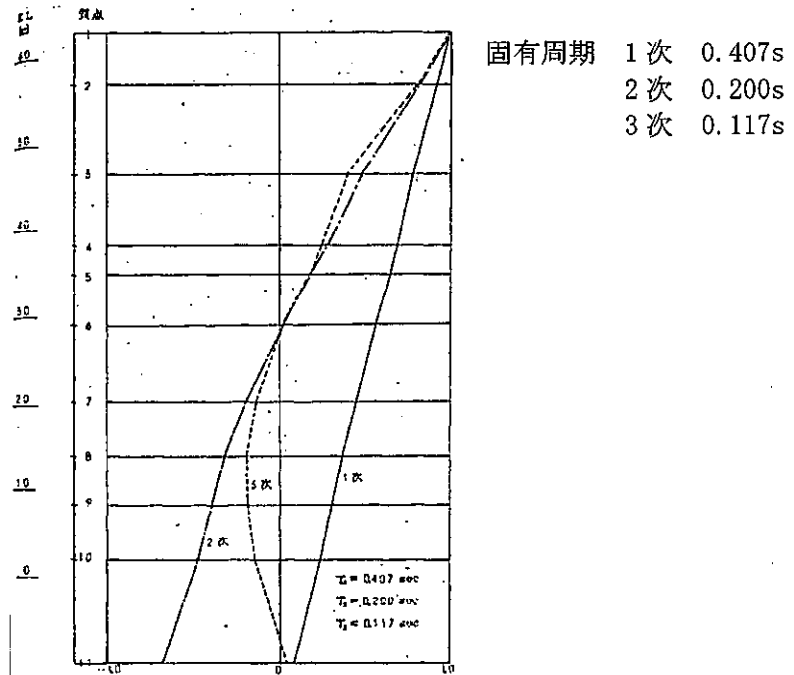
次数	R/B 建設工認モデル*		R/B 今回工認モデル (S _s -D1)	
	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)
1	0.407	2.46	0.409	2.44
2	0.200	5.00	0.202	4.96
3	0.117	8.55	0.104	9.60

注記 * : 東海第二発電所『既工事計画認可申請書第1回 添付書類Ⅲ-1-4 原子炉建屋の地震応答計算書』(47 公第 12076 号 昭和 48 年 4 月 9 日認可)』

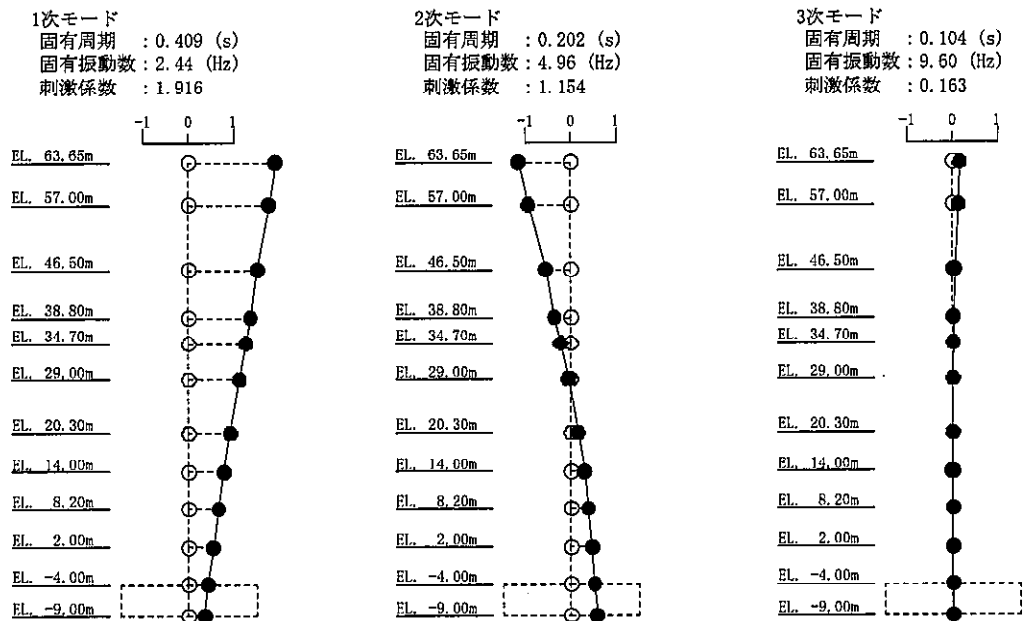
(b) EW 方向

次数	R/B 建設工認モデル*		R/B 今回工認モデル (S _s -D1)	
	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)
1	0.410	2.44	0.411	2.43
2	0.201	4.98	0.202	4.96
3	0.120	8.33	0.107	9.32

注記 * : 東海第二発電所『既工事計画認可申請書第1回 添付書類「Ⅲ-1-4 原子炉建屋の地震応答計算書」(47 公第 12076 号 昭和 48 年 4 月 9 日認可)』

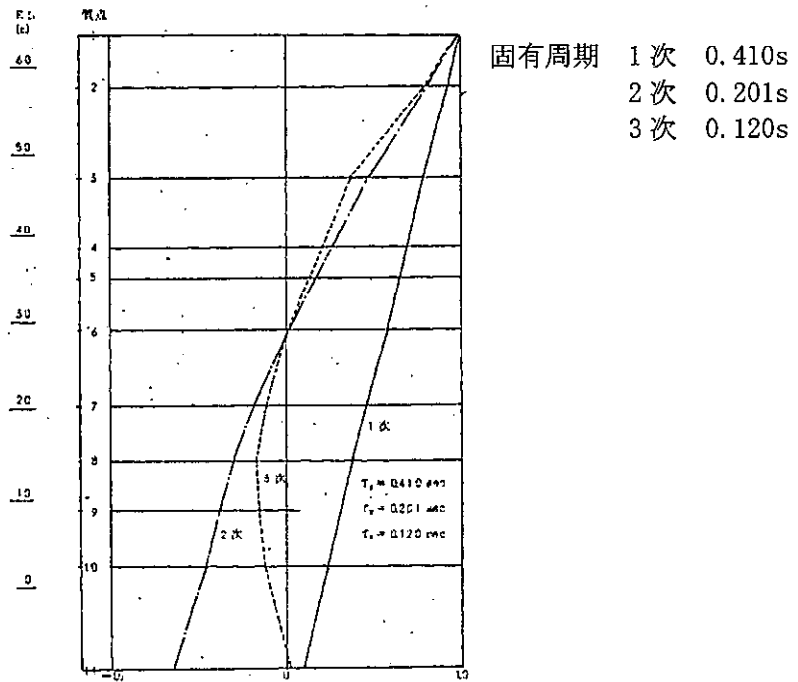


(a) R/B 建設工認モデル (1次～3次モード)

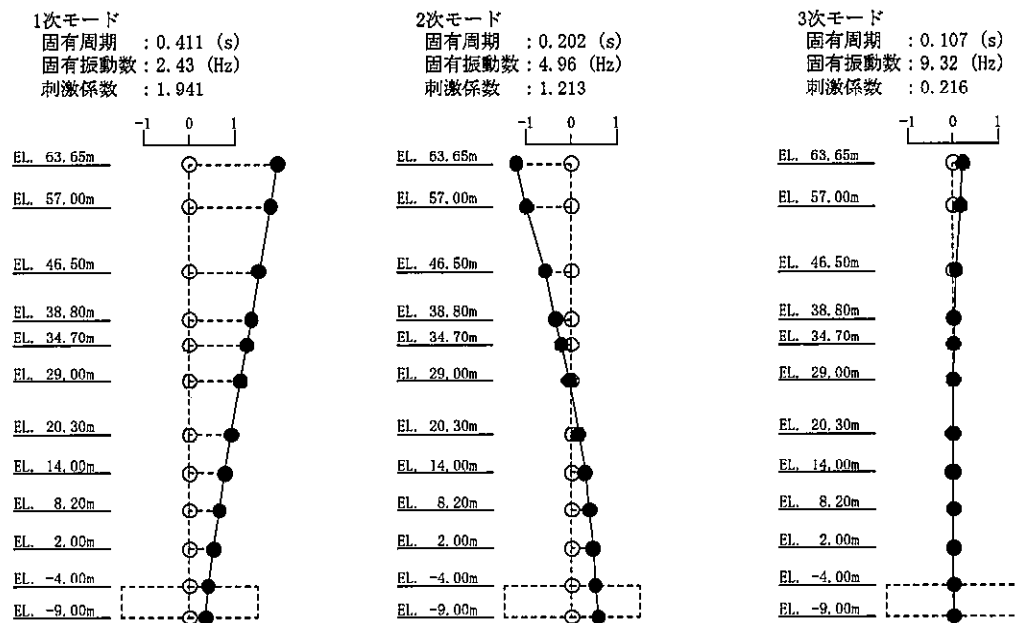


(b) R/B 今回工認モデル (S_s-D1)

図 3-1 刺激関数図 (NS 方向)



(a) R/B 建設工認モデル (1次～3次モード)



(b) R/B 今回工認モデル (S_s-D1)

図 3-2 刺激関数図 (EW 方向)

別紙 1-3 原子炉建屋の地震応答解析モデルについて

目次

1. 概要	別紙 1-3-1
2. 原子炉建屋の概要	別紙 1-3-2
2.1 建屋概要	別紙 1-3-2
2.2 設置地盤の状況	別紙 1-3-6
3. 地震応答解析モデルに係る影響検討	別紙 1-3-8
3.1 概要	別紙 1-3-8
3.2 原子炉建屋内の地震計設置位置	別紙 1-3-9
3.3 建屋－地盤動的相互作用の評価法について	別紙 1-3-10
3.4 人工岩盤のモデル化について	別紙 1-3-23
3.5 側面回転ばねの扱いについて	別紙 1-3-35
4. シミュレーション解析結果を踏まえた施設影響	別紙 1-3-47
4.1 原子炉建屋への影響	別紙 1-3-47
4.2 原子炉建屋に設置された機器・配管系	別紙 1-3-48
5. まとめ	別紙 1-3-115

補足 シミュレーション解析に用いる入力地震動の算定について

1. 概要

原子炉建屋の地震応答解析モデル（以下「R/B 今回工認モデル」という。）は、2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震（以下「東北地方太平洋沖地震」という。）のシミュレーション解析結果を踏まえて設定している。

本資料は、東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析として実施した基礎底面の人工岩盤のモデル化方法及び側面地盤ばねの扱いについての影響検討結果を説明するものである。

2. 原子炉建屋の概要

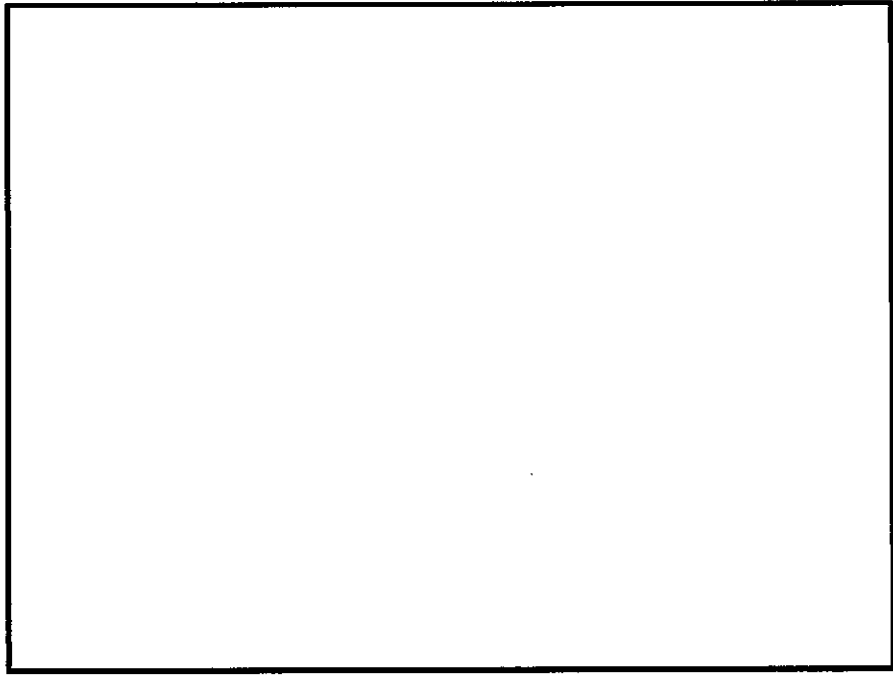
2.1 建屋概要

原子炉建屋は、地下2階、地上6階の鉄筋コンクリート造の建物である。

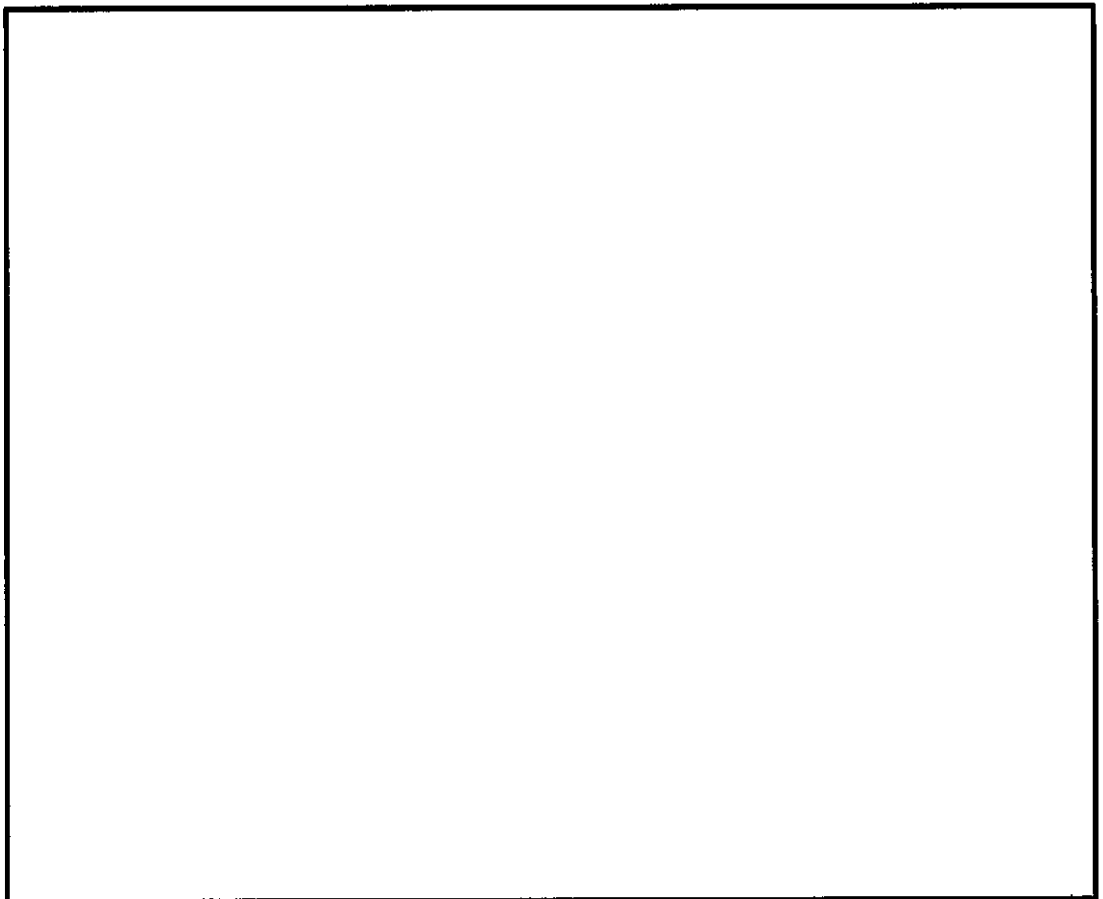
建物の中央部には原子炉格納容器を収納する原子炉棟があり、その周囲に付属棟を配置している。原子炉建屋の概要を図2-1及び図2-2に、使用材料を表2-1に示す。

原子炉棟と付属棟とは同一基礎スラブ上に設置した一体構造であり、原子炉建屋の平面は、地下部分は約67 m×約67 m、地上部分は一部を除き約41 m×約44 mの矩形をしている。基礎底面からの高さは約73 mであり、地上高さは約56 mである。

原子炉建屋の基礎は、平面が約67 m×約67 m、厚さ5 mのべた基礎で、人工岩盤を介して、砂質泥岩である久米層に岩着している。

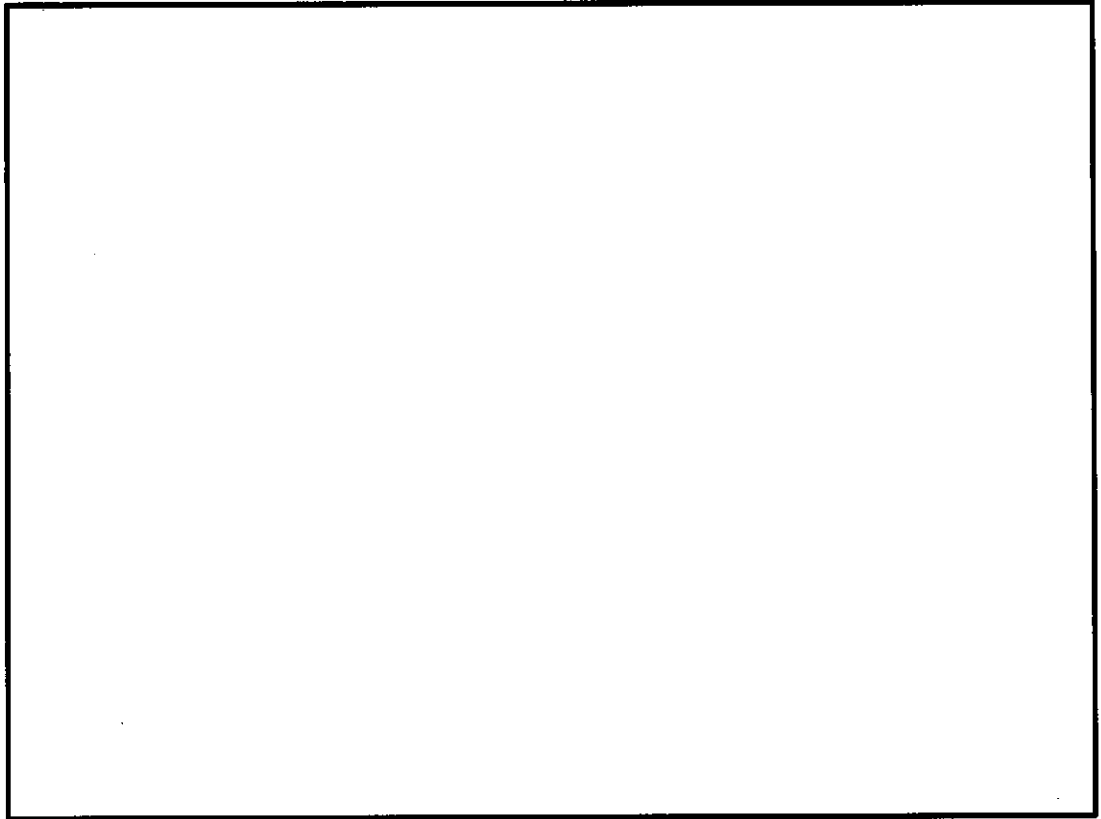


(EL. 46.5 m)

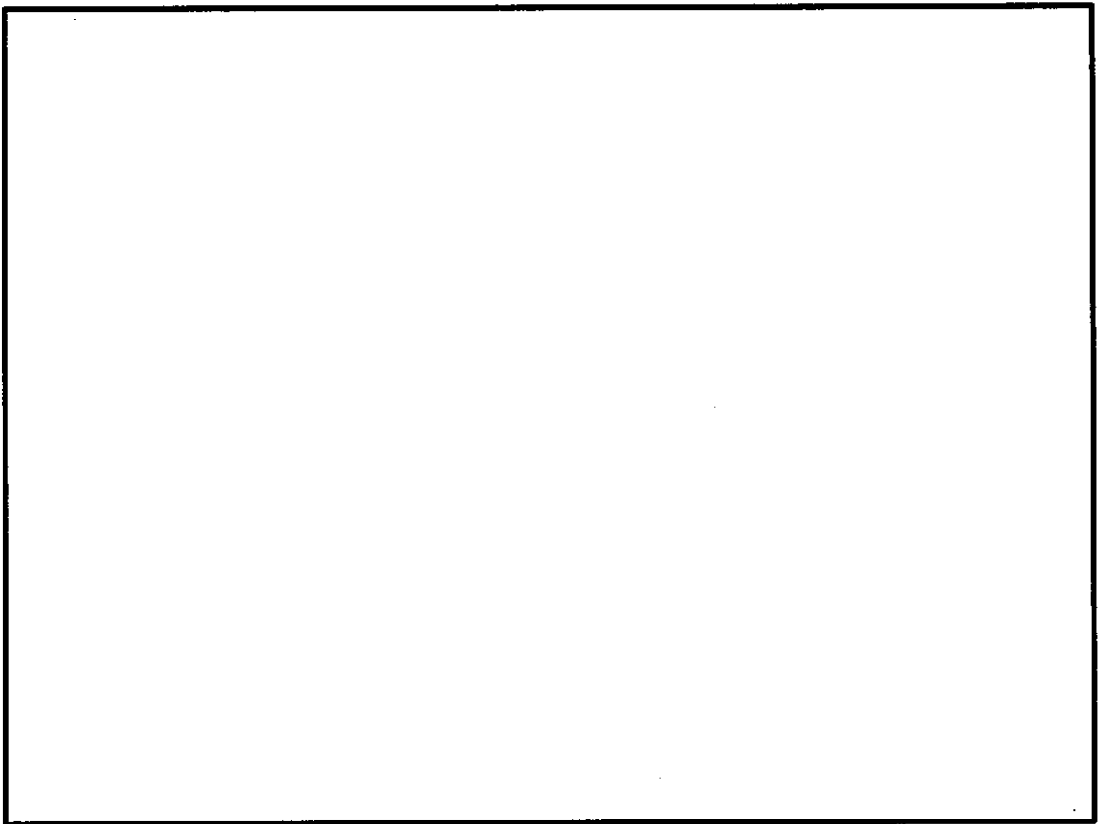


(EL. -4.0 m)

図 2-1 の概要（平面図）



(A-A 断面)



(B-B 断面)

図 2-2 原子炉建屋の概要（断面図）

表 2-1 原子炉建屋の使用材料*1

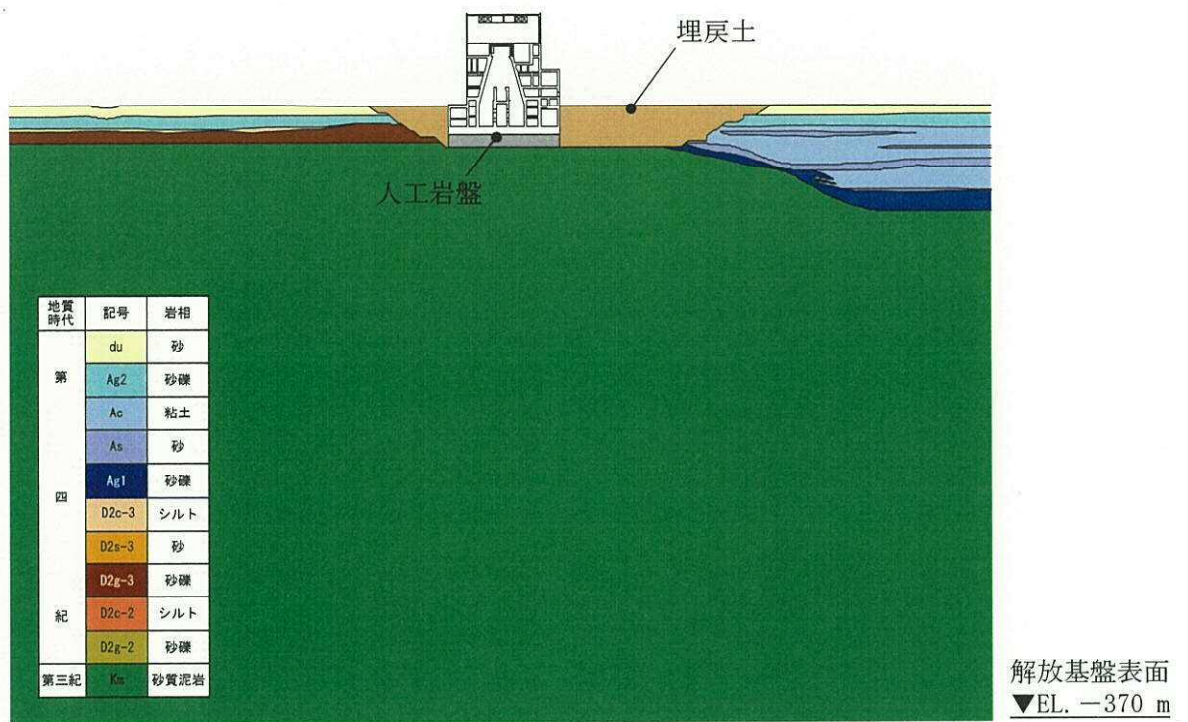
部位	設計基準強度		単位体積 重量	ポアソン比	ヤング係数	せん断 弾性係数
	Fc (kgf/cm ²)	Fc*2 (N/mm ²)	γ (kN/m ³)	ν	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)
建屋	225	22.1	24.0	0.2	2.21×10^4	9.21×10^3
人工岩盤	140	13.7	23.0	0.2	1.88×10^4	7.83×10^3
鋼材	—	—	77.1	0.3	2.05×10^5	7.9×10^4

注 *1：使用材料については、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説—許容応力度設計法—（1999）」、「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（2005）」及び「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（2005）」に準拠した。

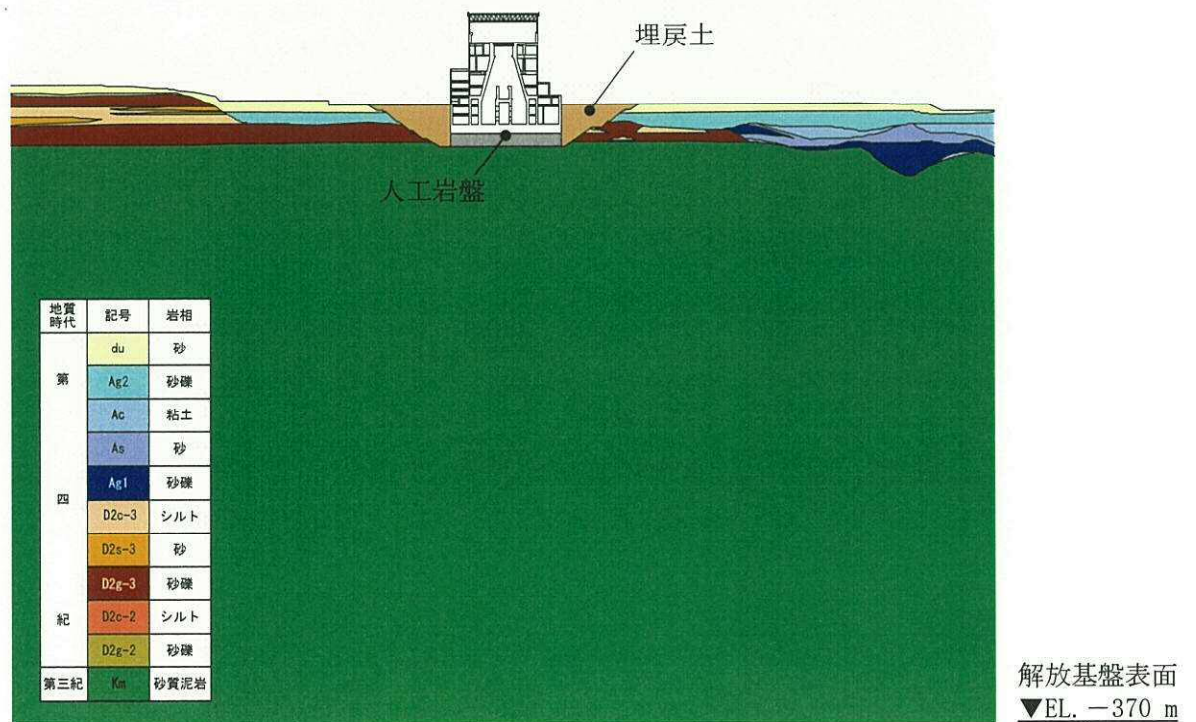
*2：Fc は 9.80665 m/s^2 を用いて換算した。

2.2 設置地盤の状況

原子炉建屋はコンクリート造の人工岩盤を介して、砂質泥岩である久米層に岩着している。
原子炉建屋の設置状況及び埋込み状況を図 2-3 の原子炉建屋設置地盤断面図に示す。



(NS 方向)



(EW 方向)

図 2-3 原子炉建屋設置地盤断面図

3. 地震応答解析モデルに係る影響検討

3.1 概要

東海第二発電所原子炉建屋の基礎はコンクリート造の人工岩盤を介して支持地盤である久米層に設置している。また、原子炉建屋の基礎下端は EL. -9 m であり、地表面 (EL. 8 m) から 17 m 地中に埋め込まれている。

建設当時の工認（以下「建設工認」という。）では、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（(社) 日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1 -1987」という。）制定前であったため、解放基盤表面という概念が無く、地盤応答解析を介さずに人工岩盤下端に設計波を直接入力していた。そのため人工岩盤を建屋モデル側にモデル化し、建屋と側面地盤の相互作用は考慮していなかった。

R/B 今回工認モデルを検討するにあたり、「J E A G 4 6 0 1 -1987」及び原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版（(社) 日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」という。）には、基礎底面の人工岩盤のモデル化方法及び側面回転地盤ばねの扱いについて明確に表記されていないため、東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いたシミュレーション解析を行い、人工岩盤のモデル化の影響と建屋と側面地盤との相互作用の影響評価を行った。

3.2 原子炉建屋内の地震計設置位置

原子炉建屋には、地震時の基本的な振動性状を把握する目的で偶数階に各階 1 台の地震計を設置している。また、基礎（地下 2 階）には更に 4 台の地震計を設置している。

原子炉建屋の地震計設置位置を図 3-1 に示す。

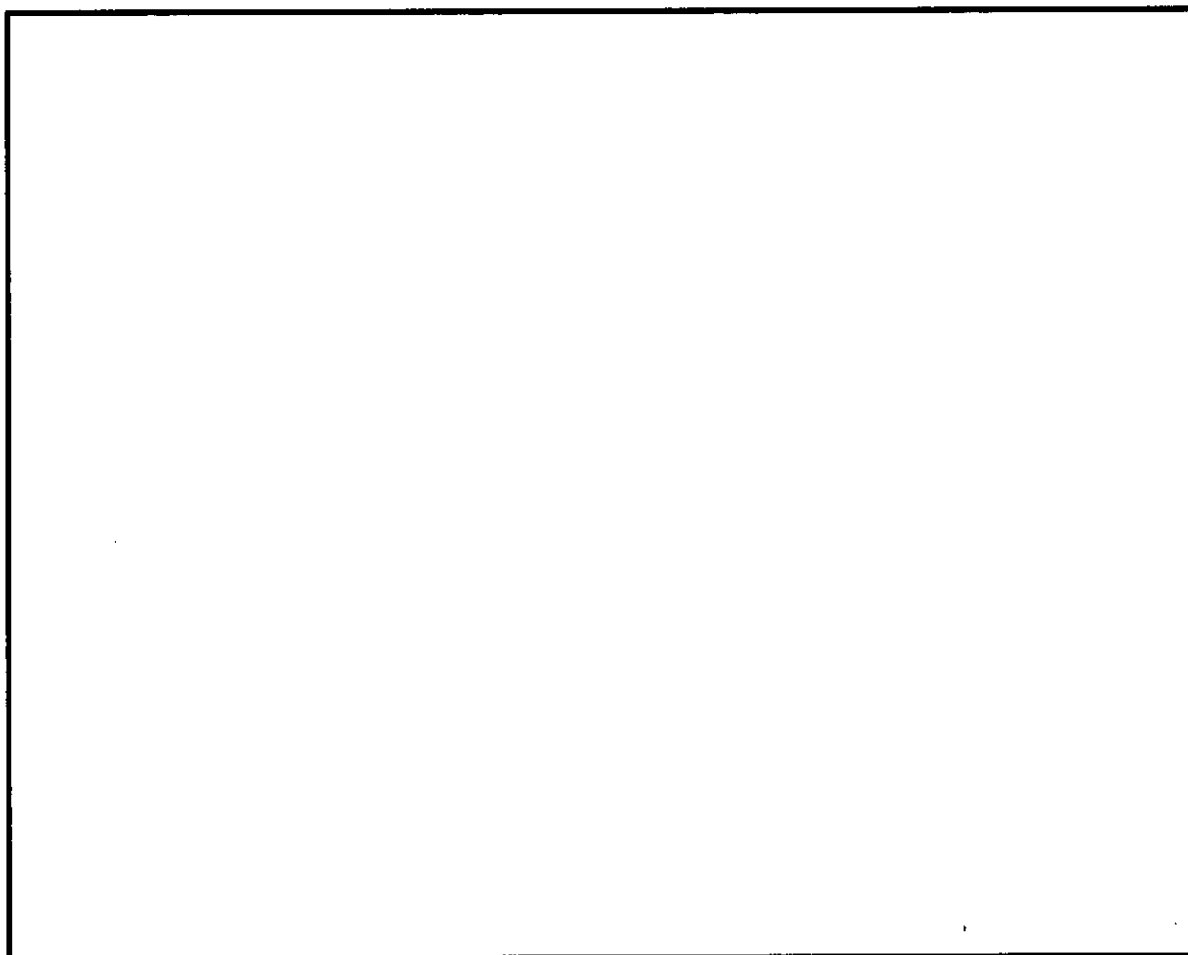


図 3-1 原子炉建屋の地震計設置位置

3.3 建屋－地盤動的相互作用の評価法について

建設工認では、埋込み効果を見放した、スウェイ・ロッキングモデル（以下「SRモデル」という。）として、建屋と地盤の相互作用を考慮している。

本資料では、はじめに、SRモデルと側面地盤による回転拘束を含む埋込み効果を考慮した埋込みSRモデルを用いて東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析を行い、建屋の振動性状を比較した。解析に用いたSRモデルによる地震応答解析の概要を図3-2に、埋込みSRモデルによる地震応答解析の概要を図3-3に示す。

東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果として、両者の最大応答加速度分布の比較を図3-4及び図3-5に、床応答スペクトルの比較を図3-6及び図3-7に示す。これらの解析結果より埋込みSRモデルを用いた方が、SRモデルを用いた場合に比べ、観測記録との整合が改善しており、より実状に近い建屋の振動性状を評価できているものと考えられる。

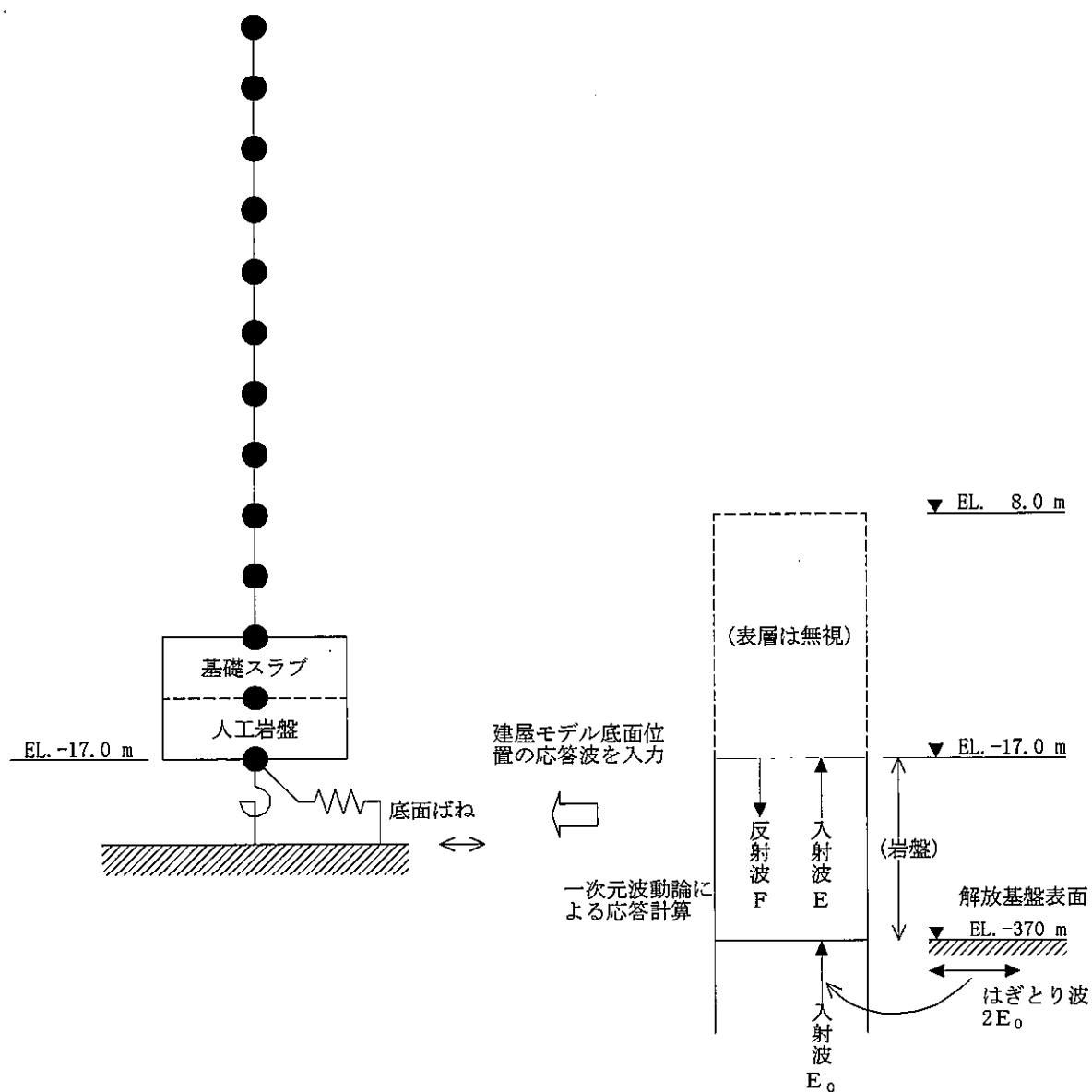


図 3-2 SRモデルによる地震応答解析の概要

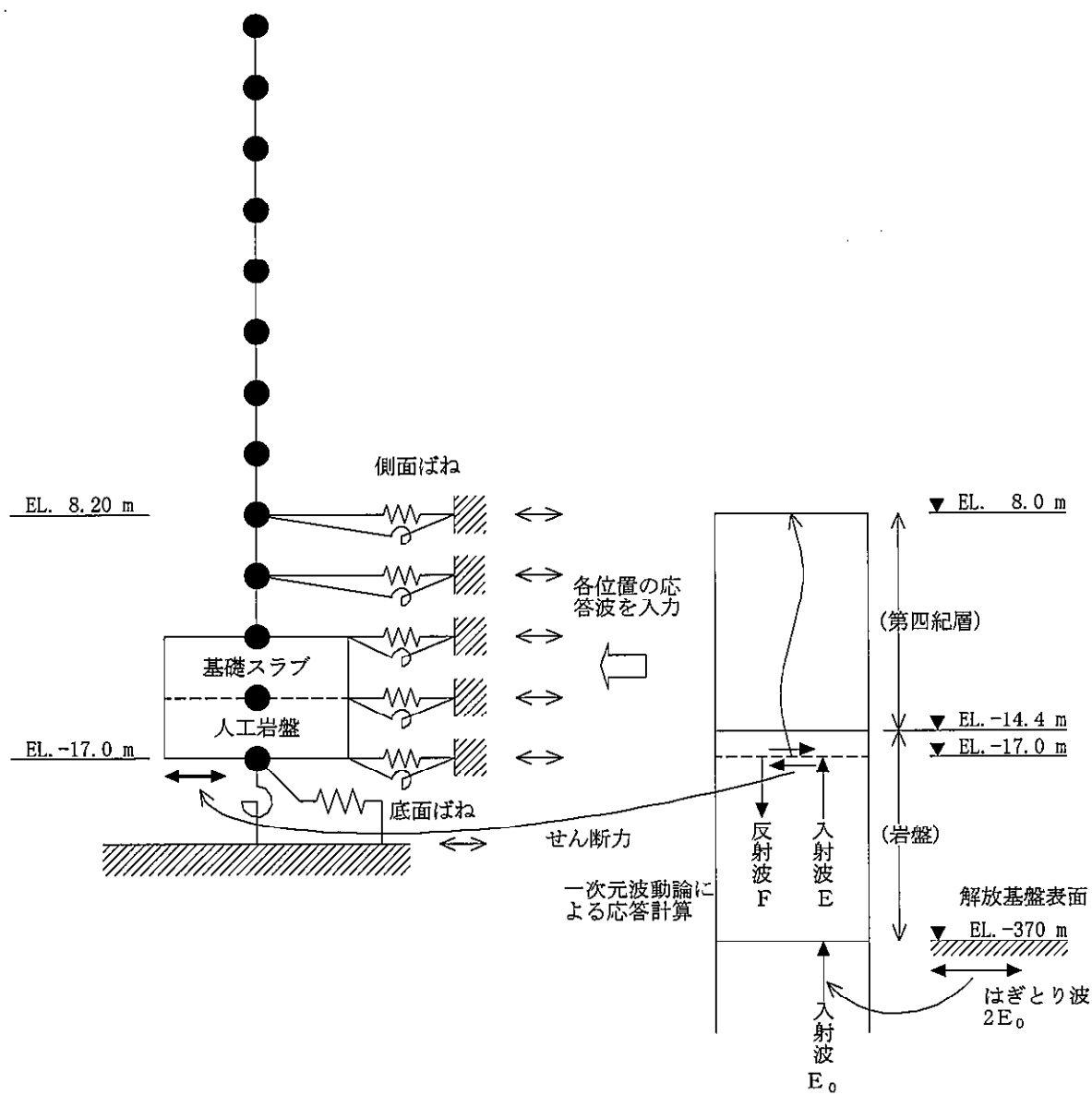


図 3-3 埋込みSRモデルによる地震応答解析の概要

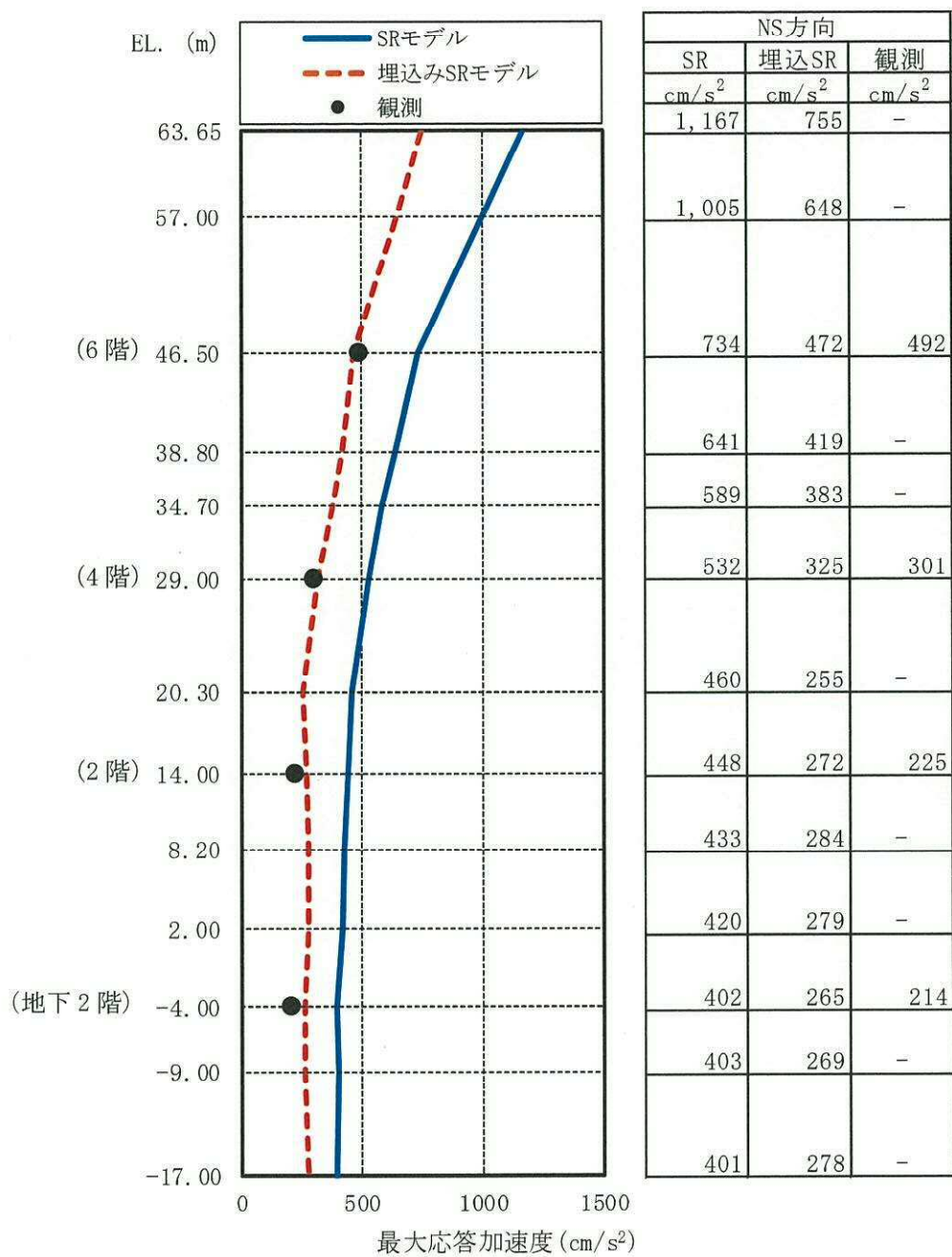


図 3-4 最大応答加速度分布の比較 (NS 方向)

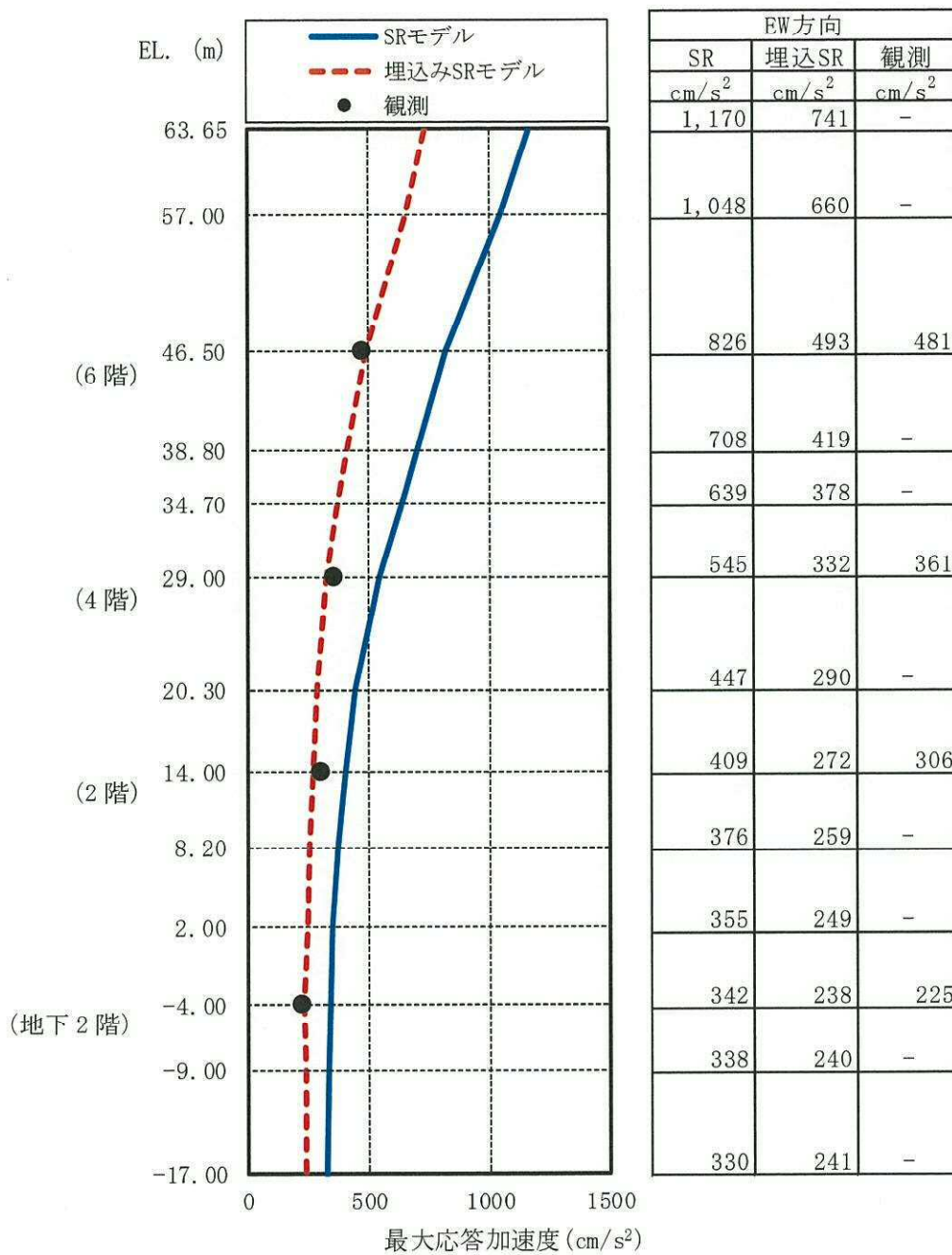
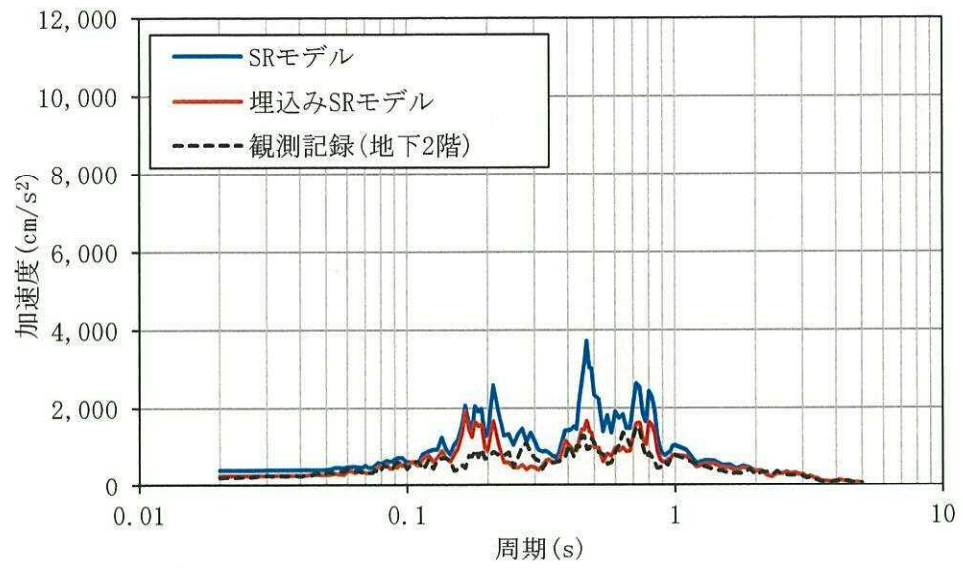
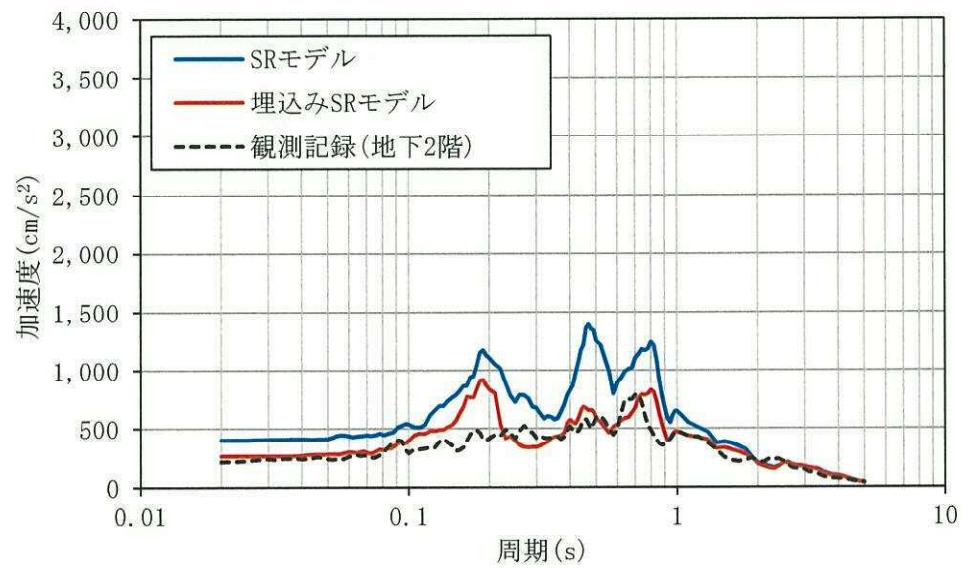


図 3-5 最大応答加速度分布の比較 (EW 方向)



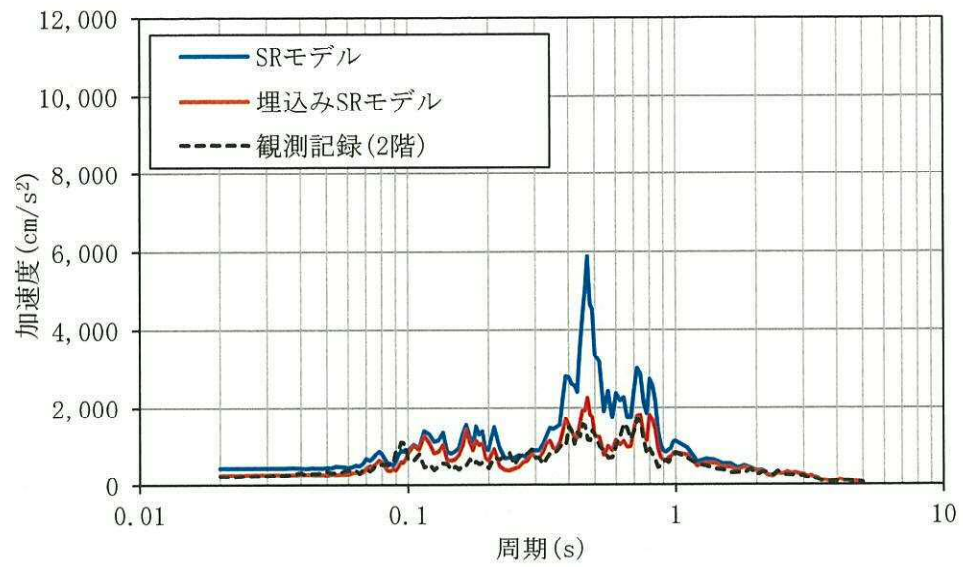
$h=1\%$



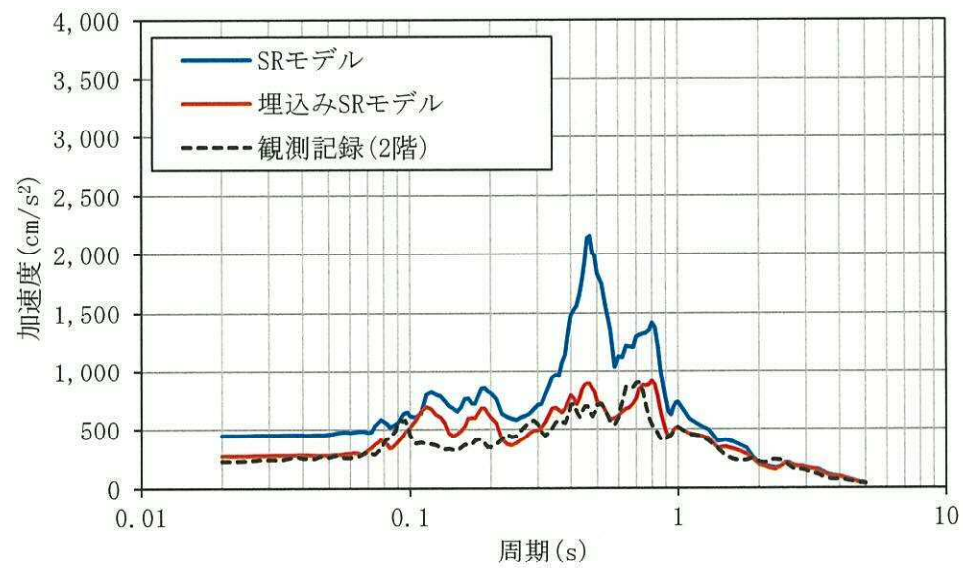
$h=5\%$

地下 2 階

図 3-6 (1/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)



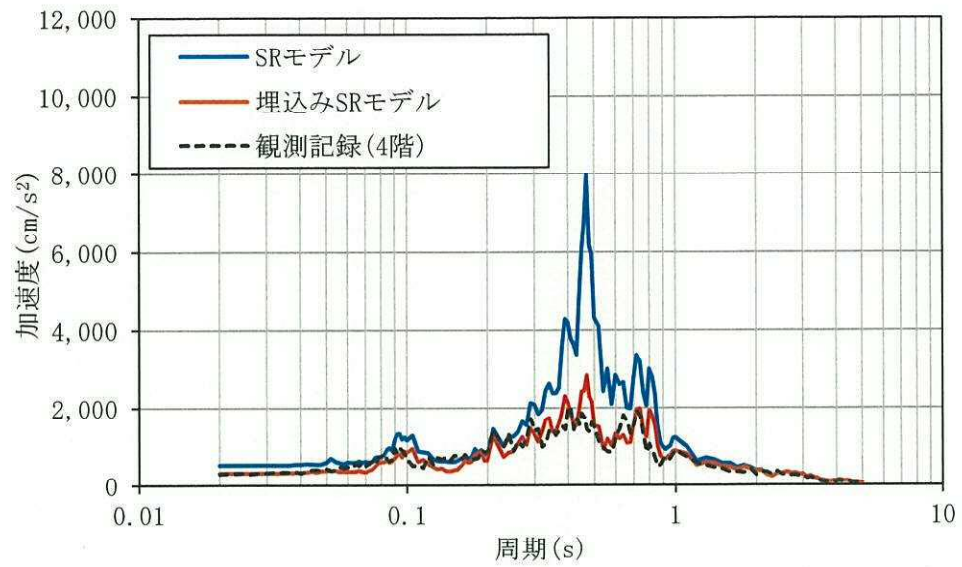
$h=1\%$



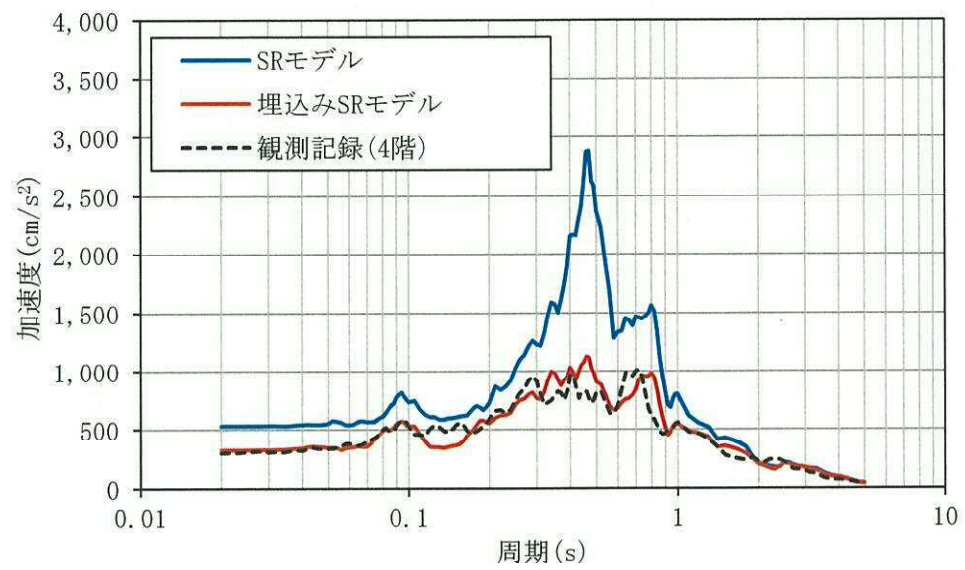
$h=5\%$

2 階

図 3-6 (2/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)



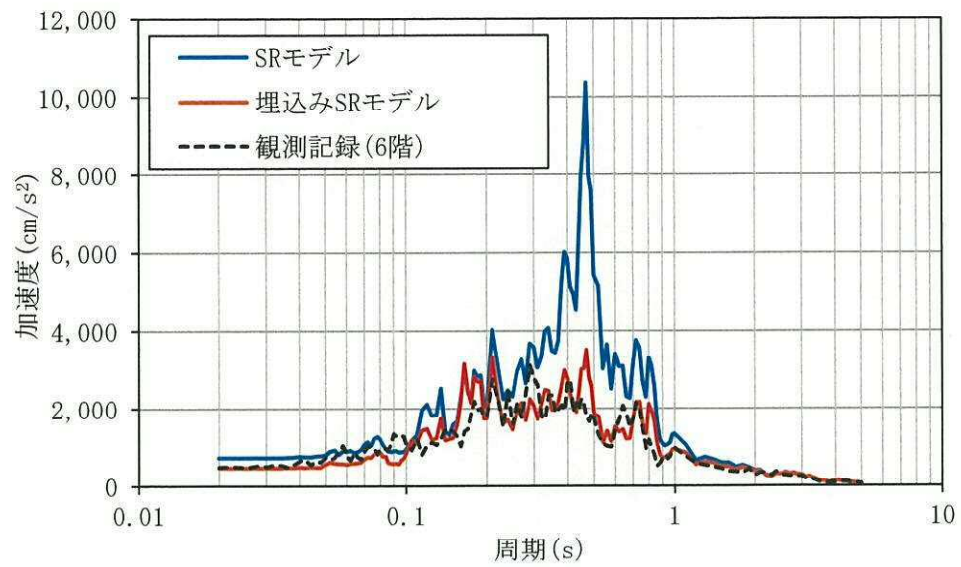
$h=1\%$



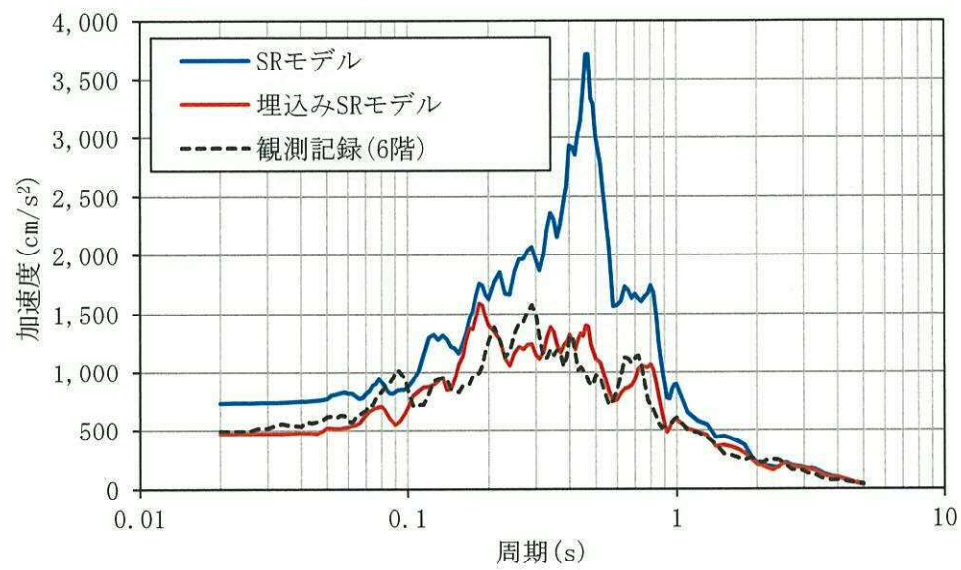
$h=5\%$

4 階

図 3-6 (3/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)



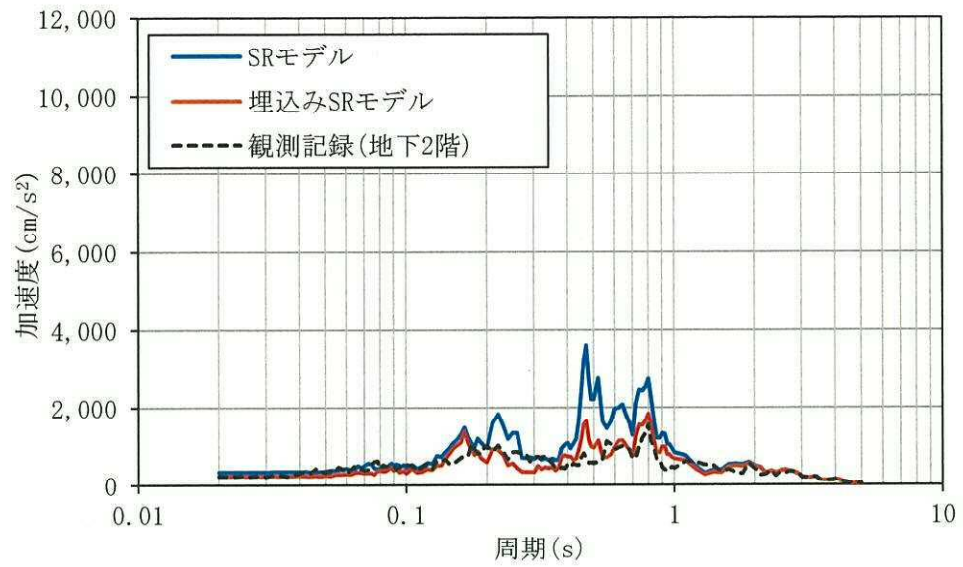
$h=1\%$



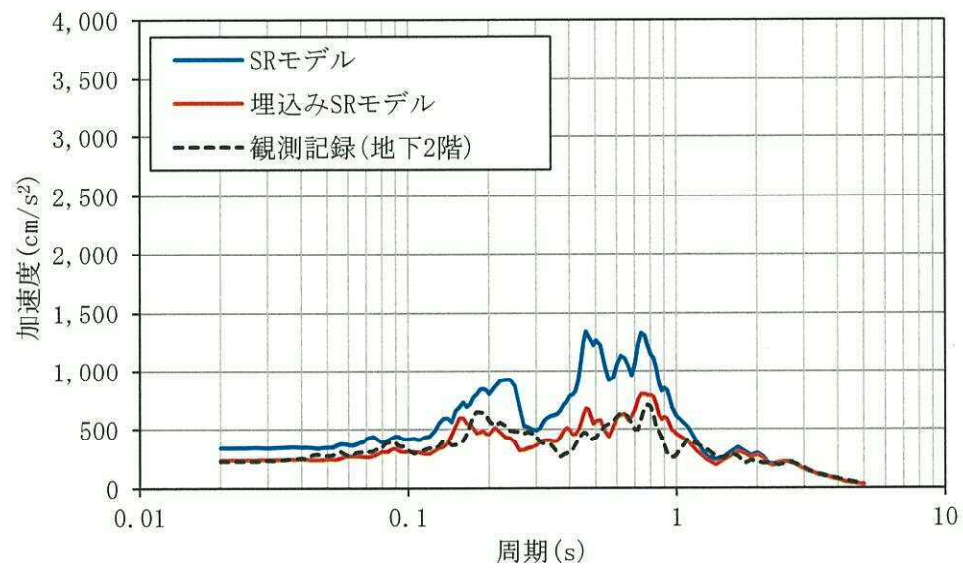
$h=5\%$

6 階

図 3-6 (4/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)



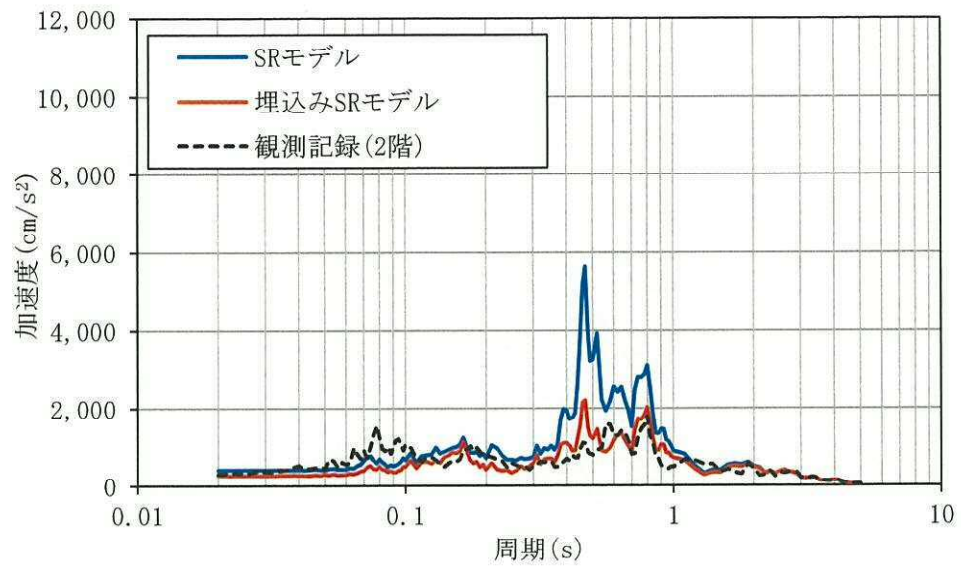
$h=1\%$



$h=5\%$

地下2階

図 3-7 (1/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)



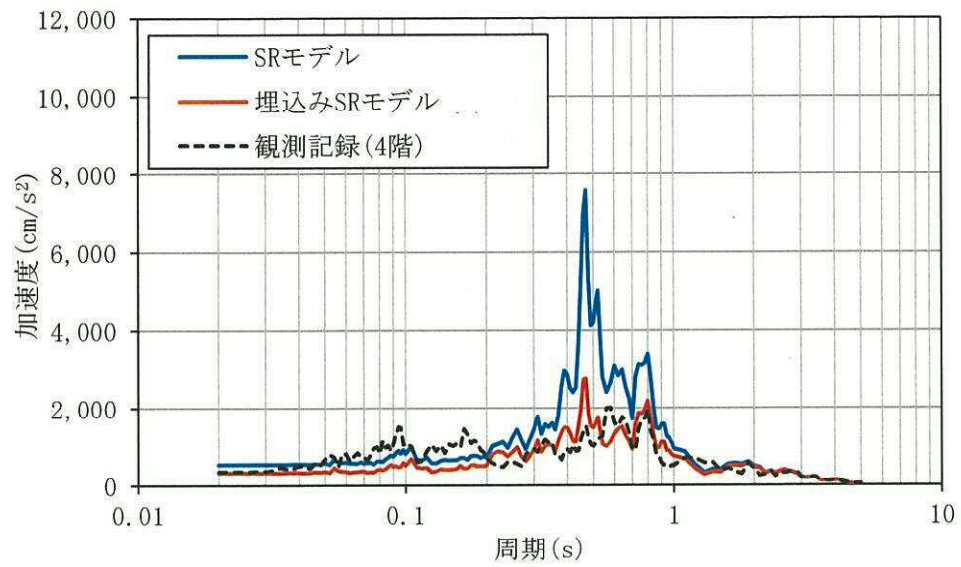
$h=1\%$



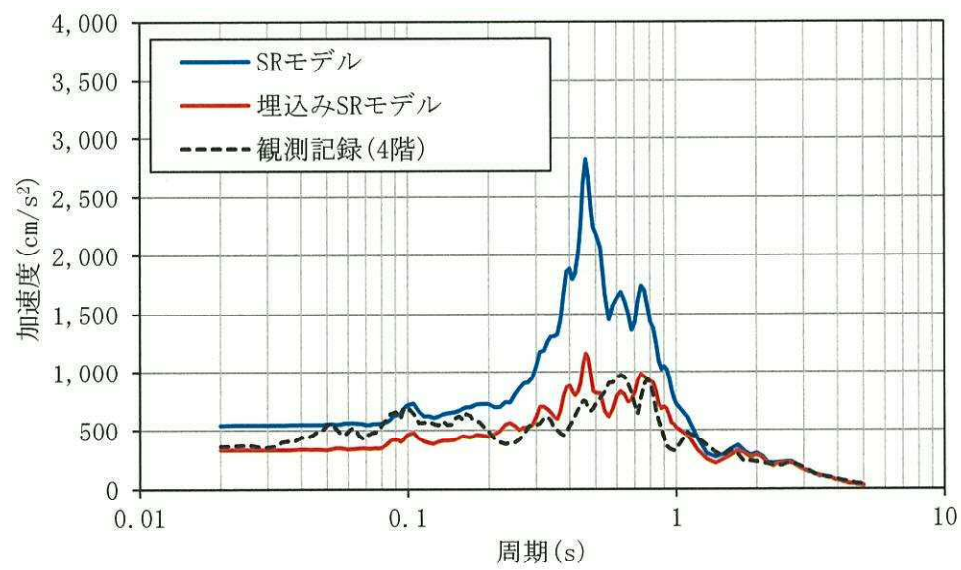
$h=5\%$

2 階

図 3-7 (2/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)



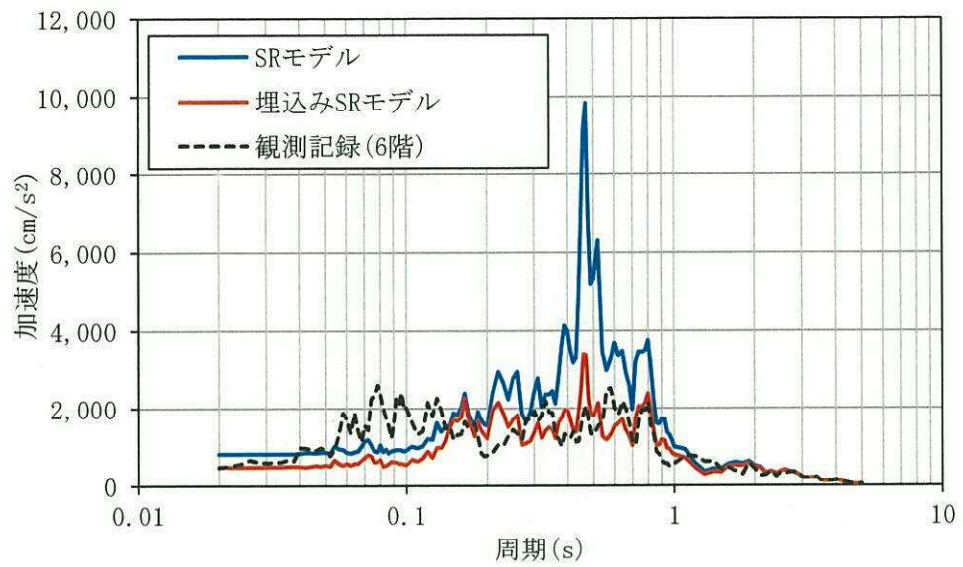
$h=1\%$



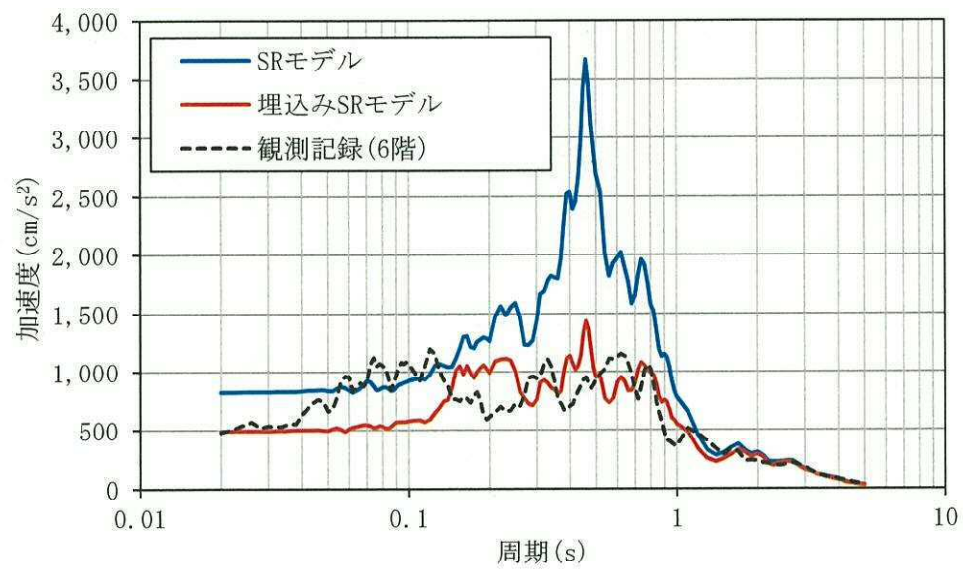
$h=5\%$

4 階

図 3-7 (3/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)



$h=1\%$



$h=5\%$

6 階

図 3-7 (4/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)

3.4 人工岩盤のモデル化について

建設工認では、人工岩盤を建屋モデル側にモデル化し、地震応答解析を行っていたが、ここでは、人工岩盤を地盤モデル側に岩盤としてモデル化した場合の建屋応答への影響について検討した。

人工岩盤を岩盤としてモデル化した場合の地震応答解析の概要を図 3-8 に示す。ここで、基礎底面の地盤ばね及び入力動の算定に用いる地盤モデルは、基礎底面レベルである EL. -9.0 m まで砂質泥岩である久米層の物性と同等として設定した。また、比較検討には、前章にも用いた実状に近い建屋の振動性状を評価できている埋込み S R モデルを用いた。

東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果として最大応答加速度分布の比較を図 3-9 及び図 3-10 に、床応答スペクトルの比較を図 3-11 及び図 3-12 に示す。人工岩盤を地盤モデル側に岩盤としてモデル化した場合は、建屋モデル側にモデル化した場合の応答に比べ、概ね同程度であるか一部の周期帯では若干大きくなることが確認できた。そのため R/B 今回工認モデルでは、保守的に人工岩盤を地盤モデル側に岩盤としてモデル化する方針とした。

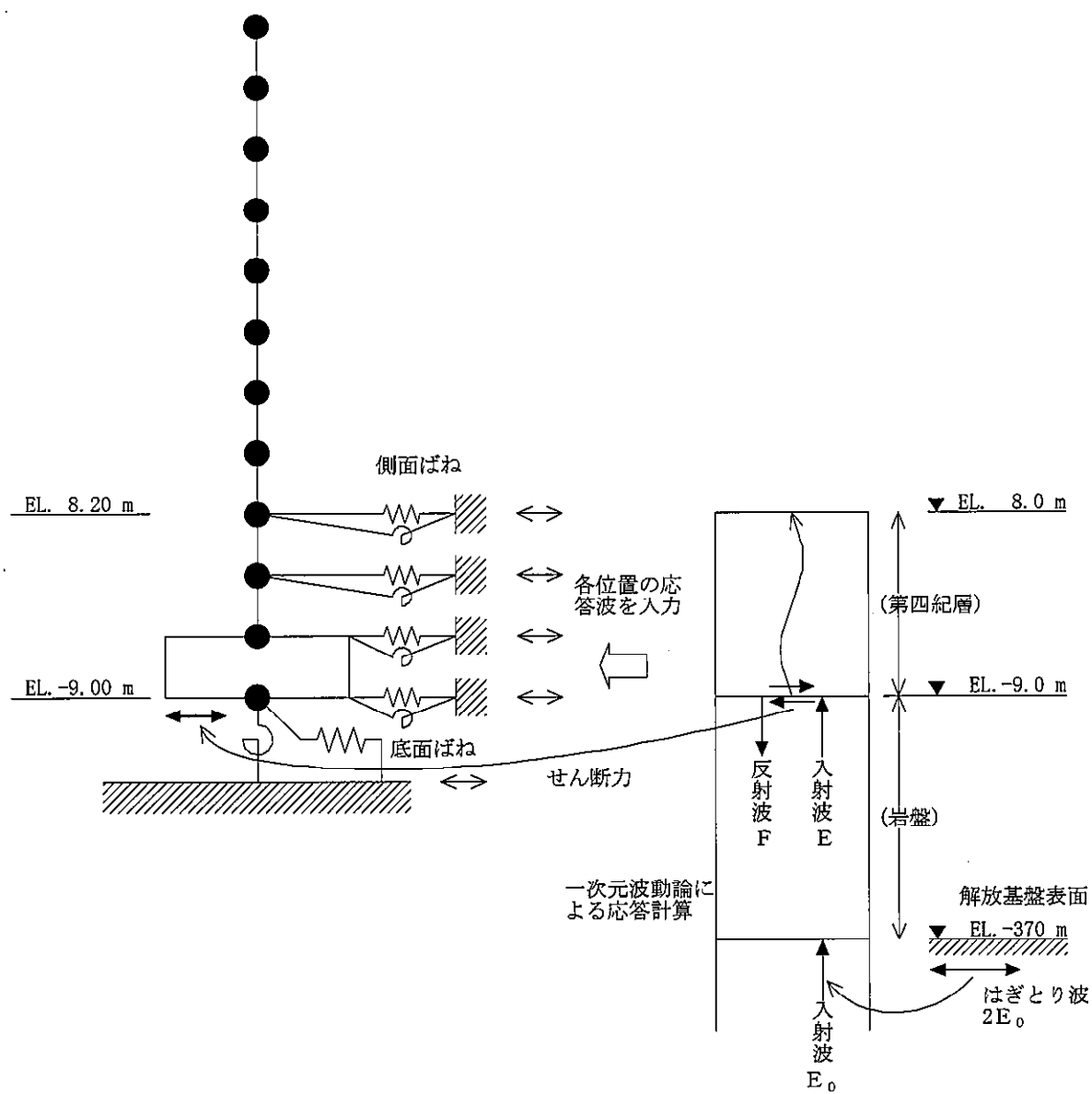


図 3-8 人工岩盤を岩盤としてモデル化した場合の地震応答解析の概要

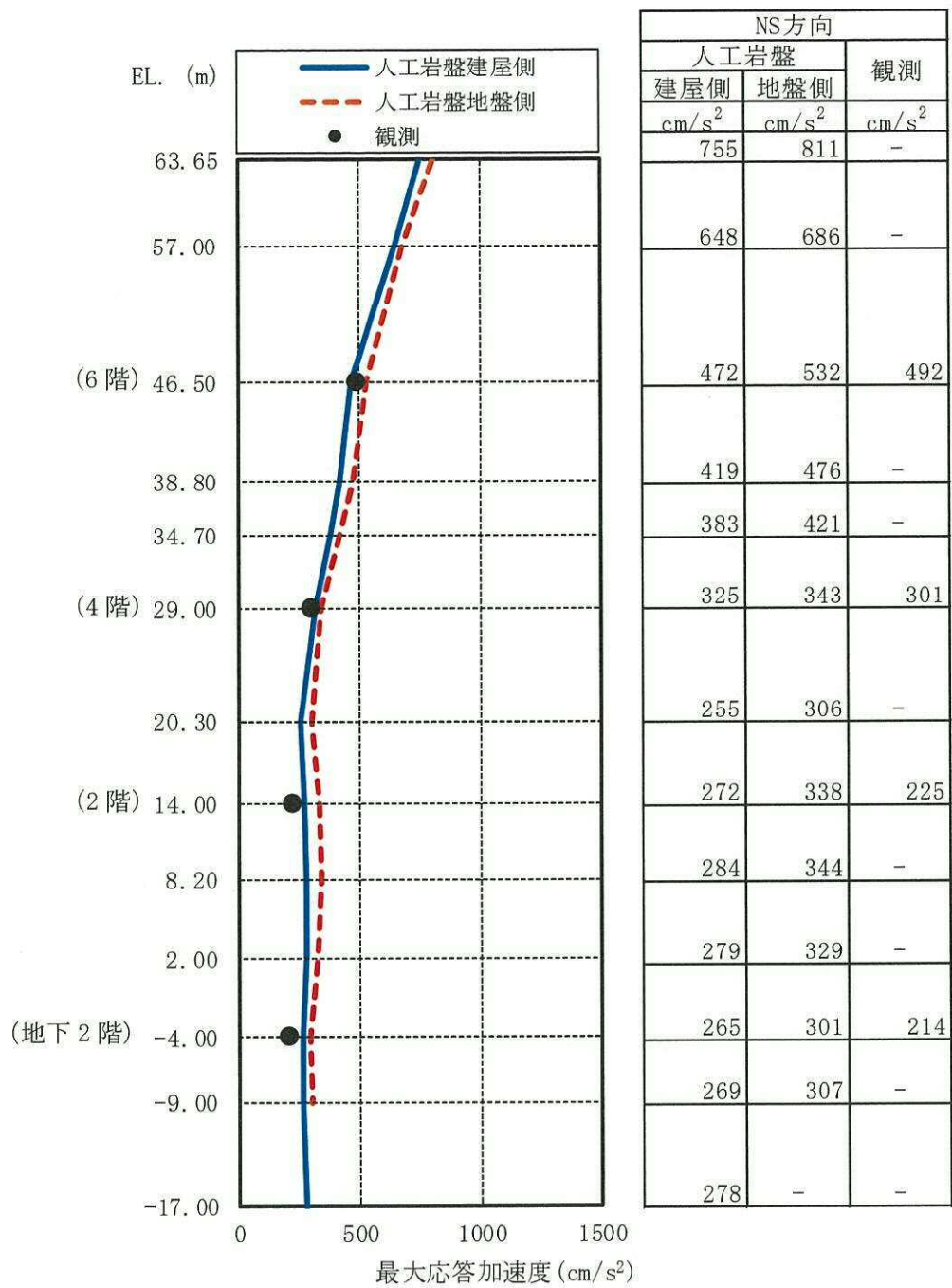


図 3-9 最大応答加速度分布の比較 (NS 方向)

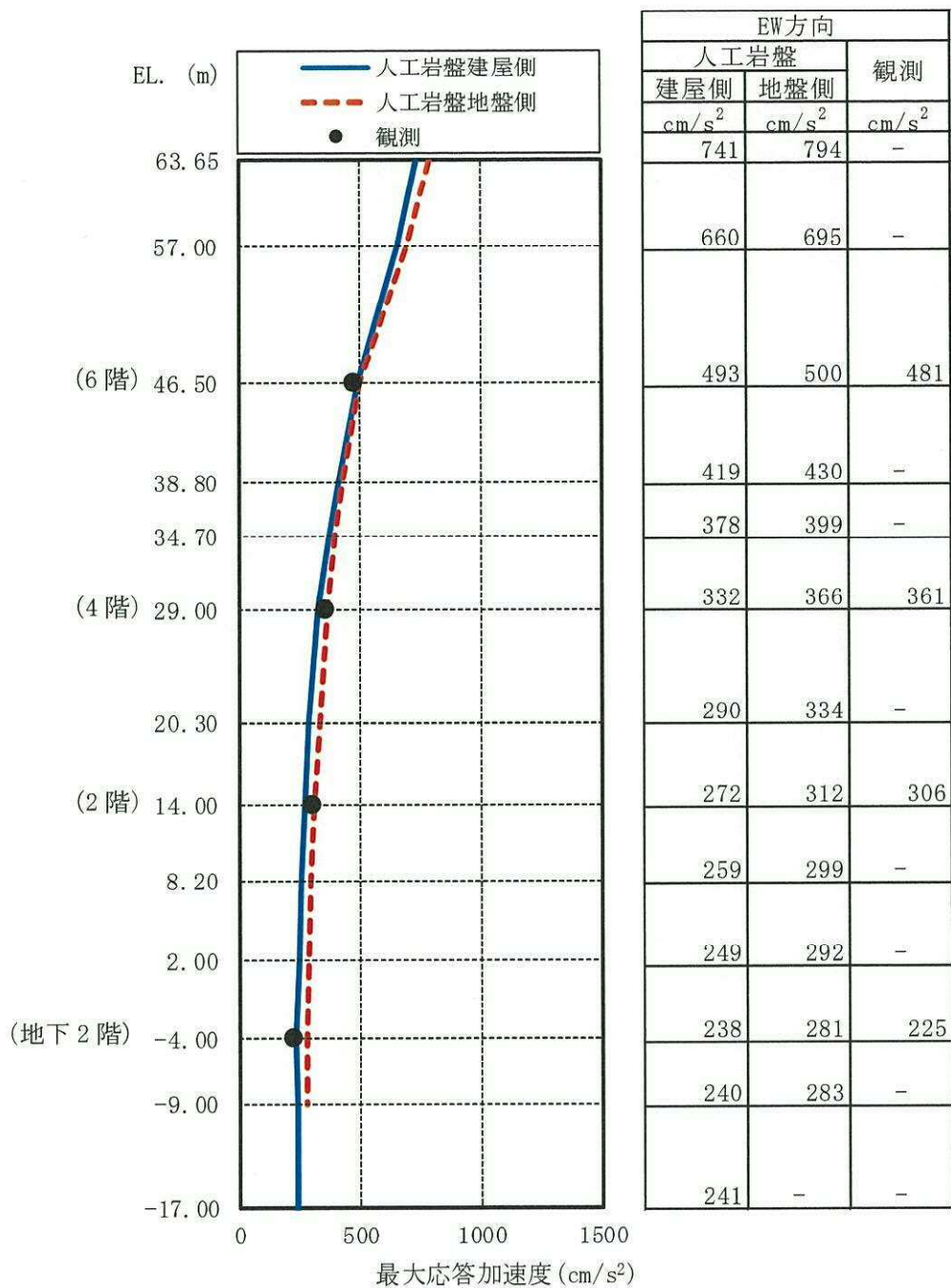
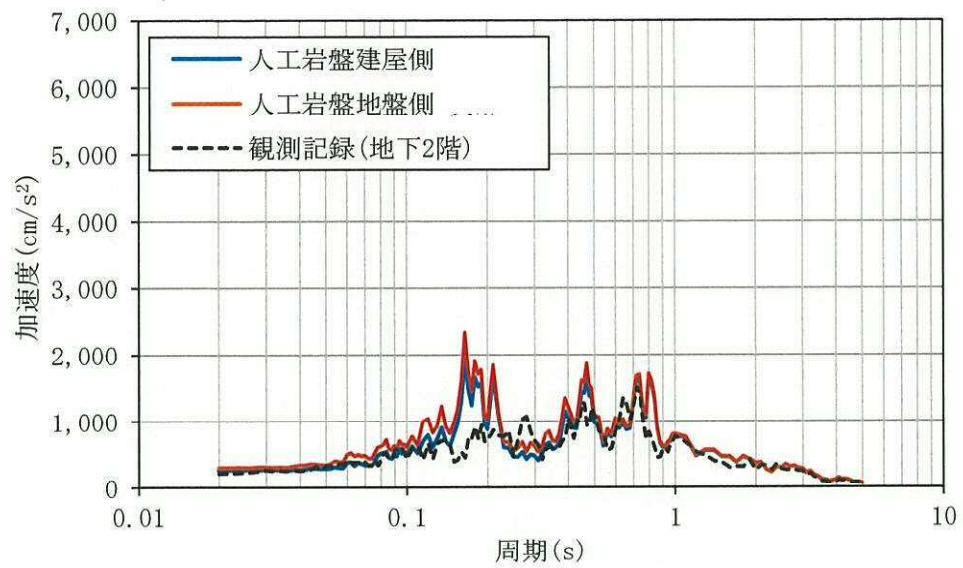
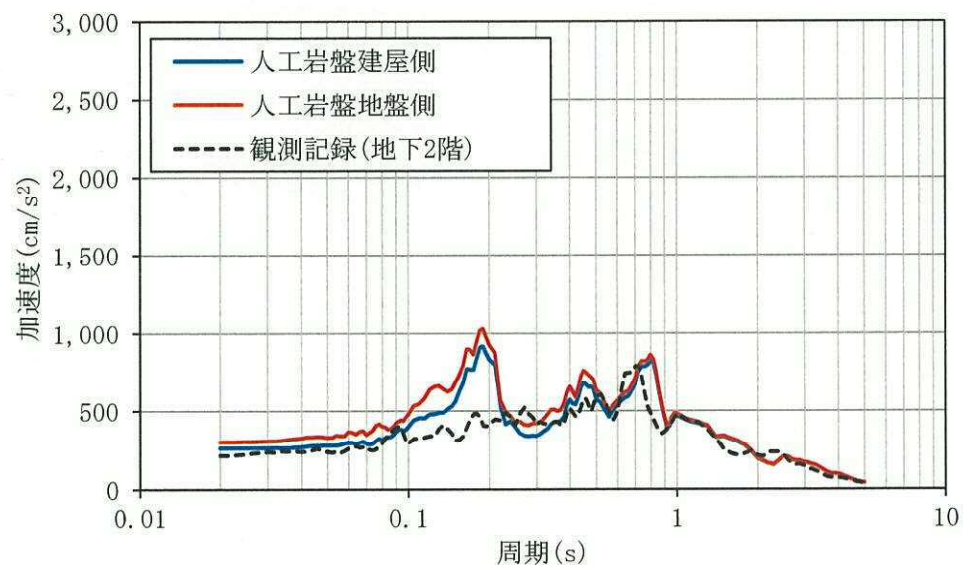


図 3-10 最大応答加速度分布の比較 (EW 方向)



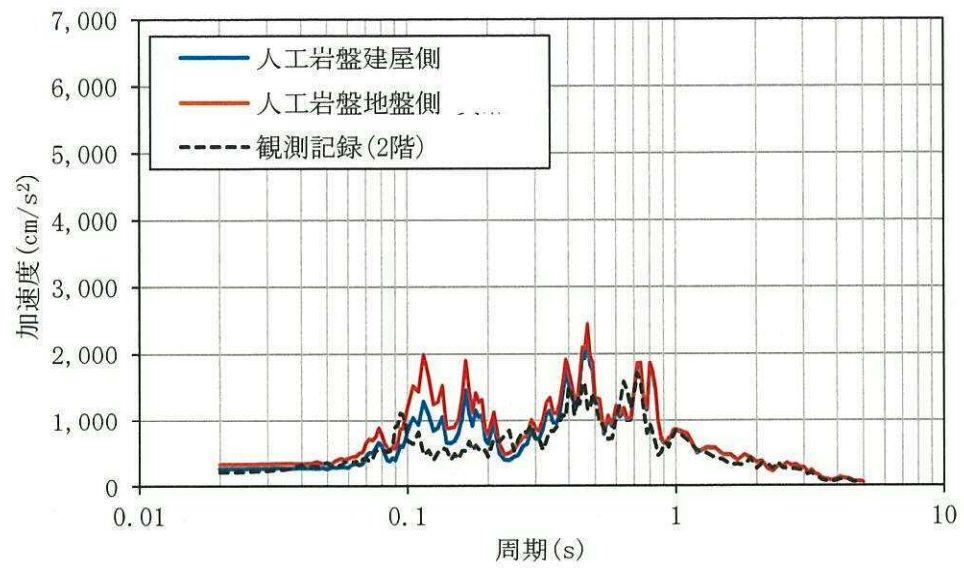
$h=1\%$



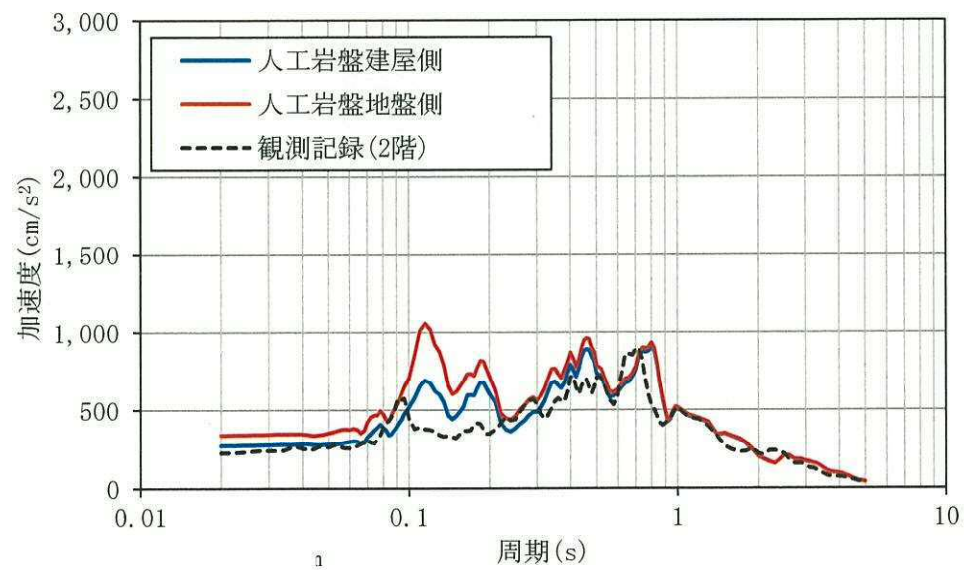
$h=5\%$

地下2階

図 3-11 (1/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)



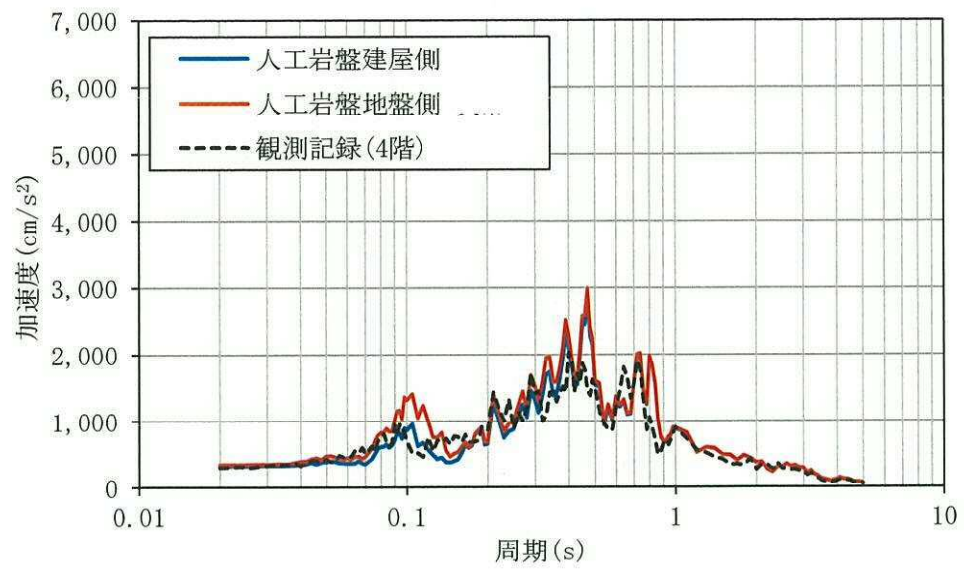
$h=1\%$



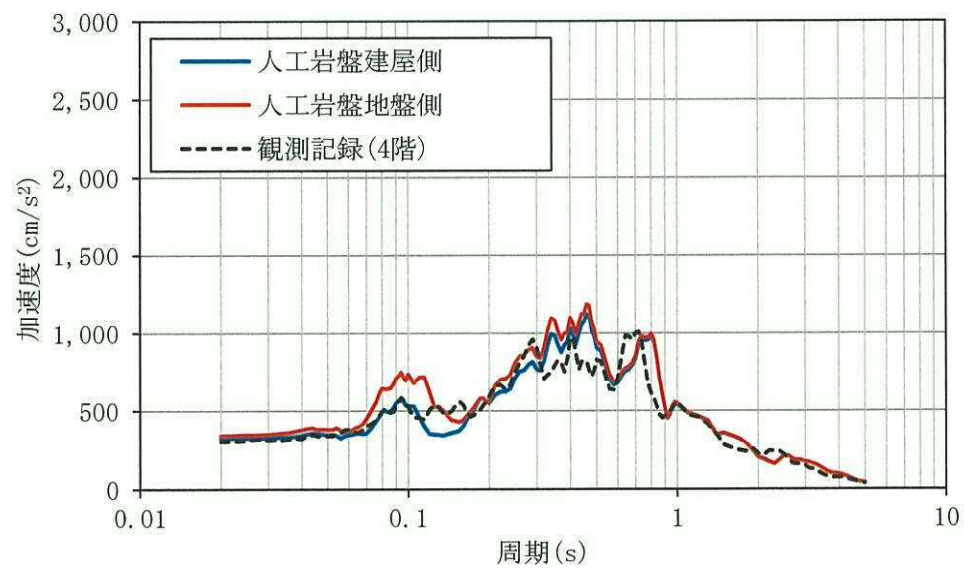
$h=5\%$

2 階

図 3-11 (2/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)



$h=1\%$



$h=5\%$

4 階

図 3-11 (3/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)

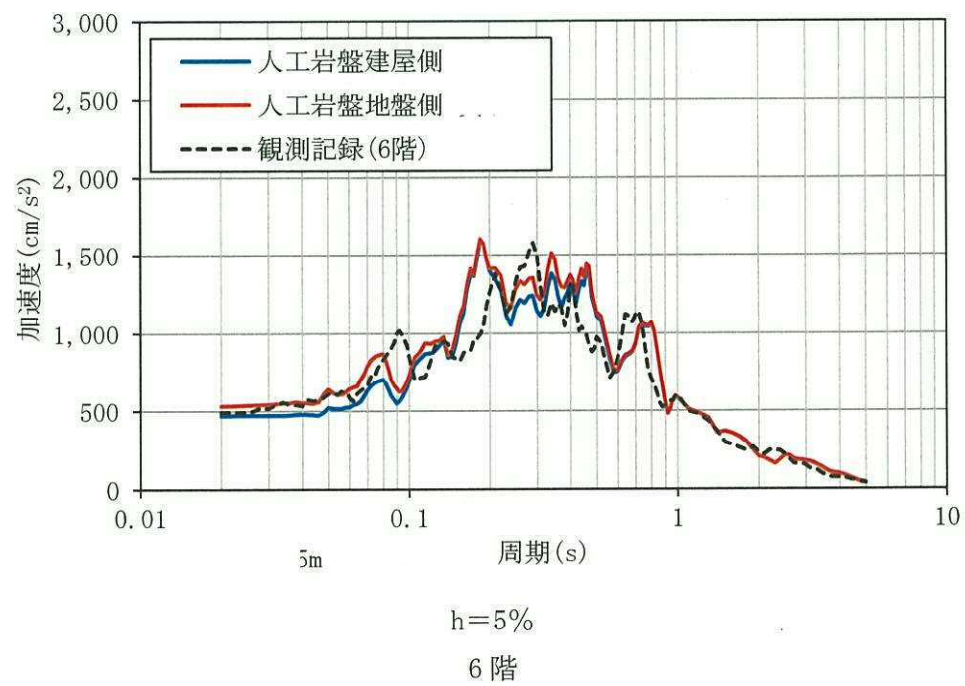
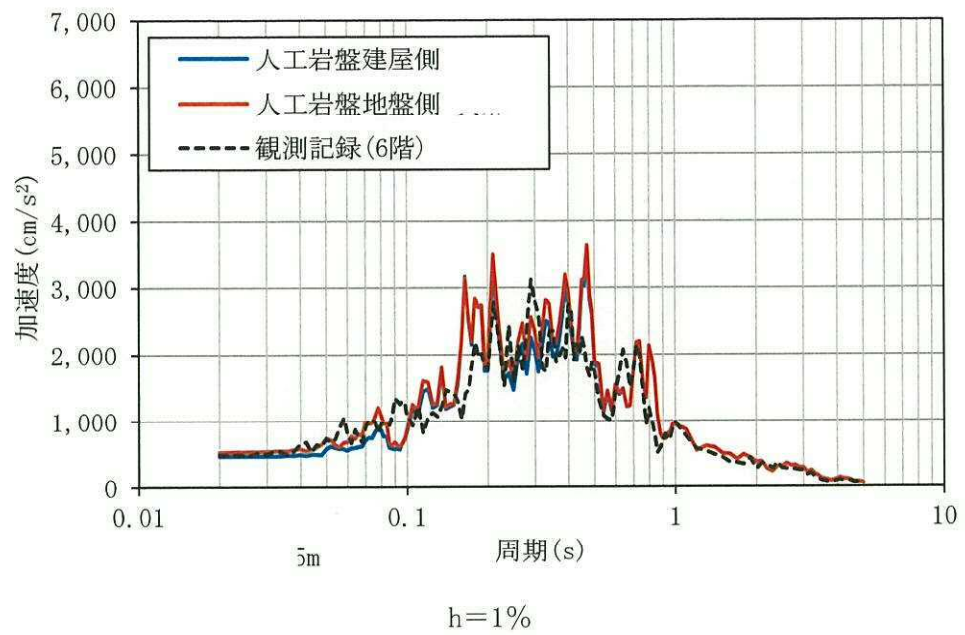


図 3-11 (4/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)

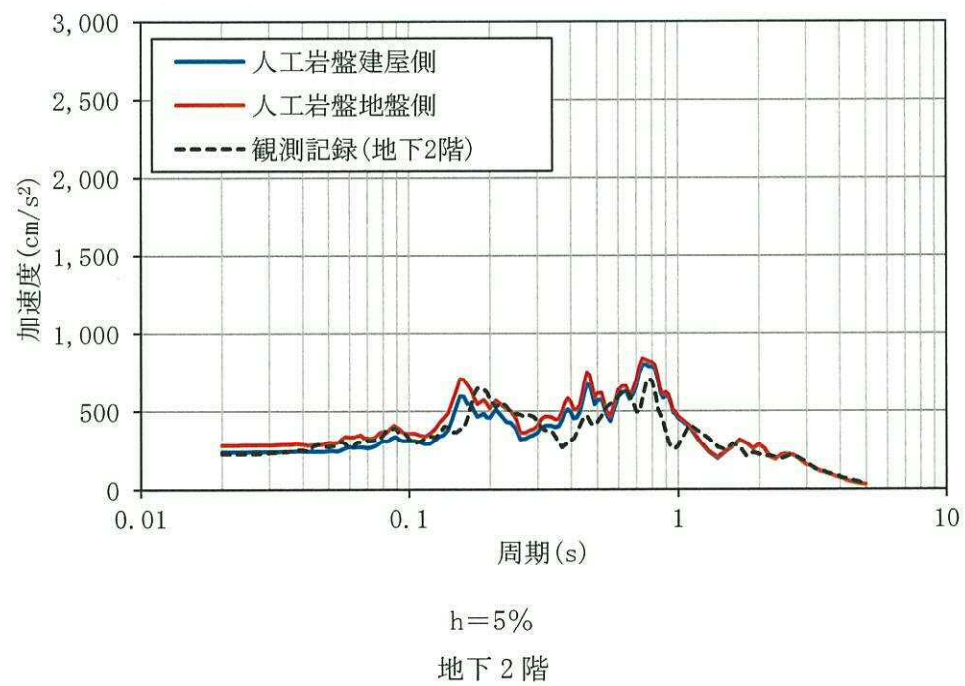
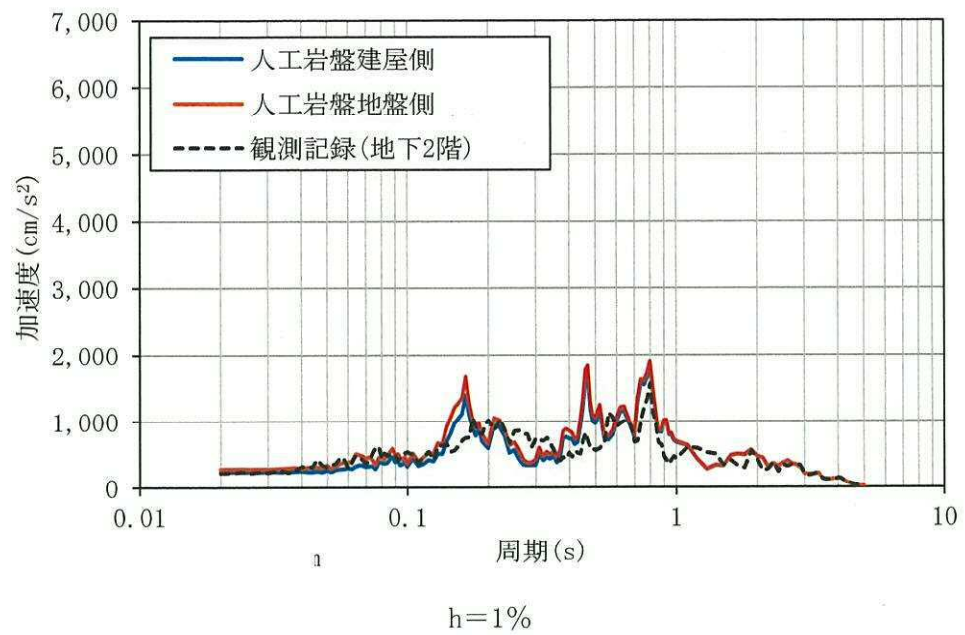
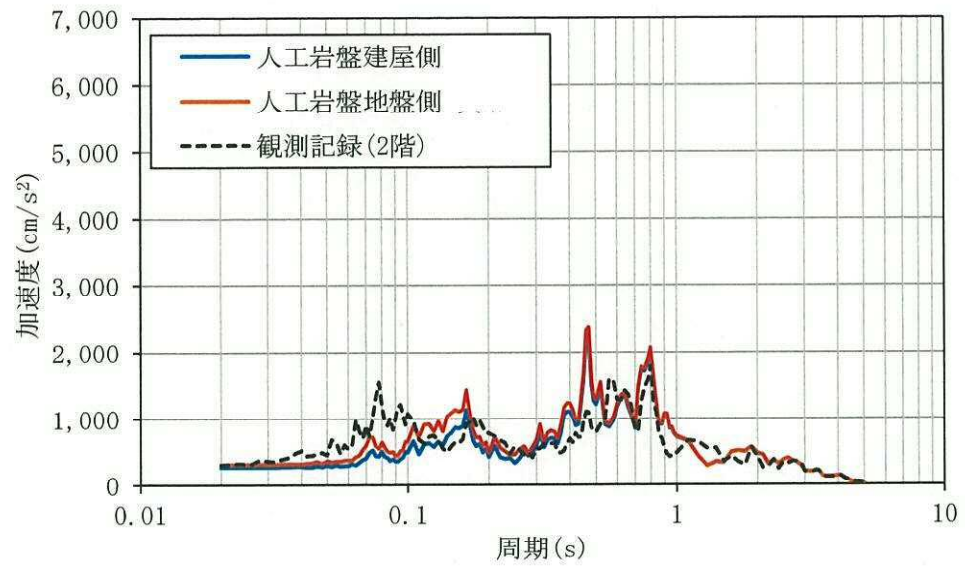
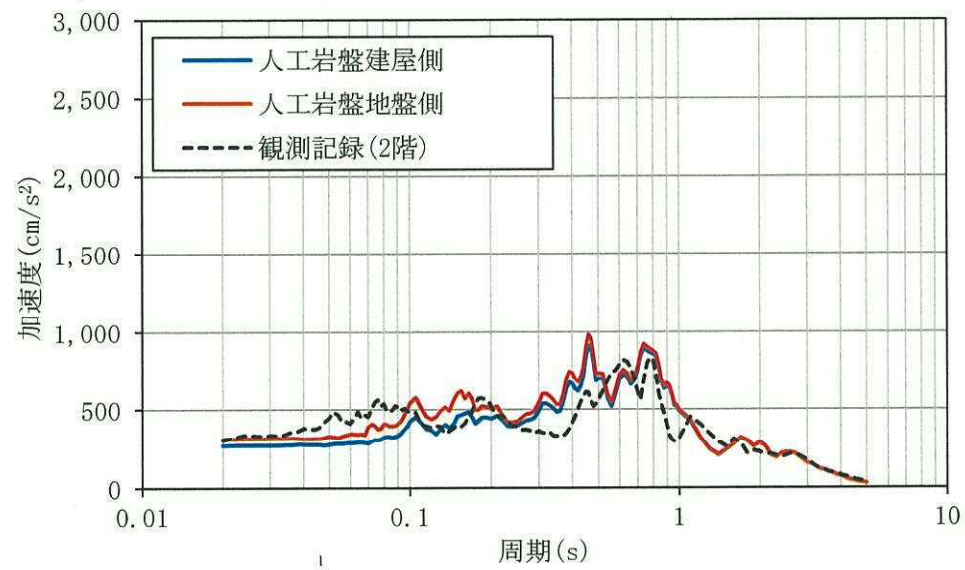


図 3-12 (1/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)



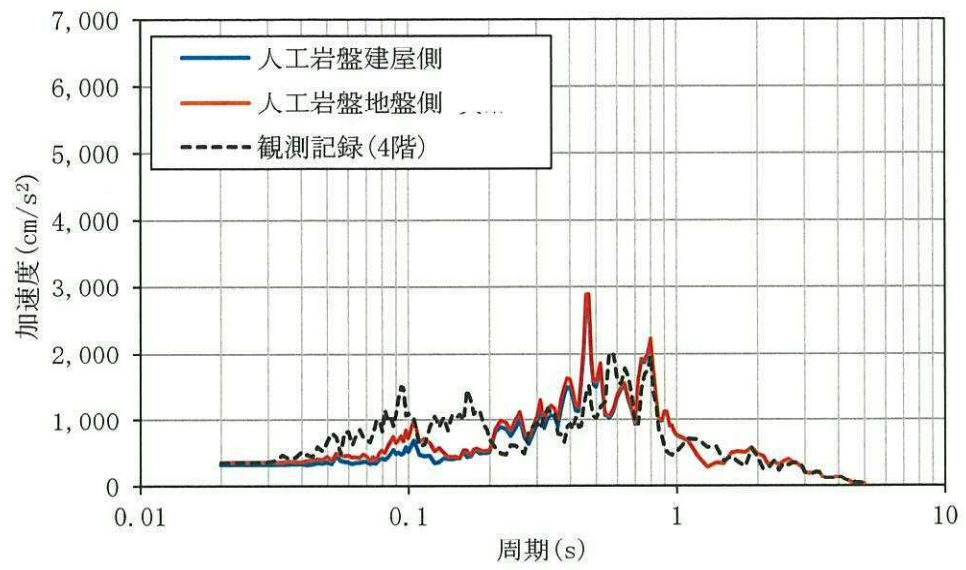
$h=1\%$



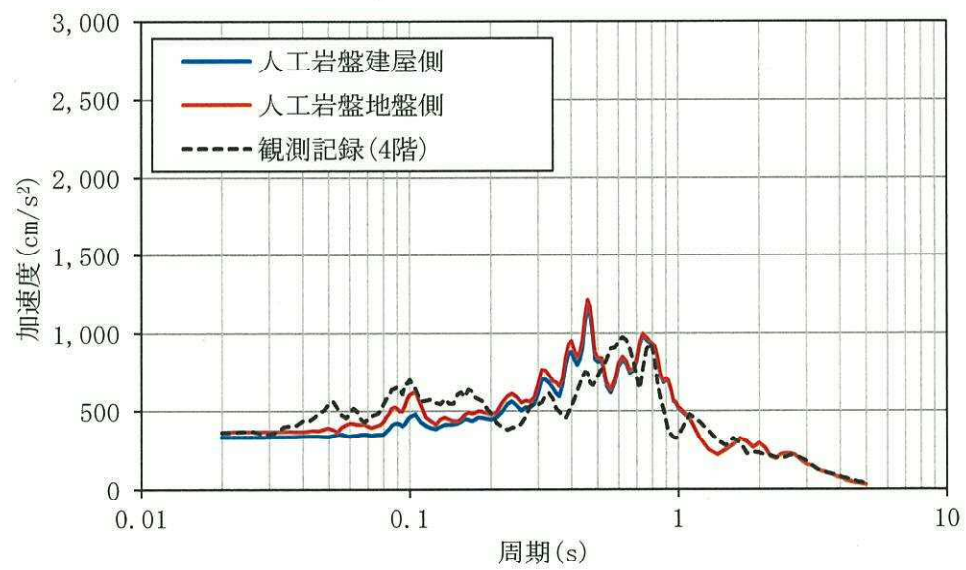
$h=5\%$

2 階

図 3-12 (2/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)



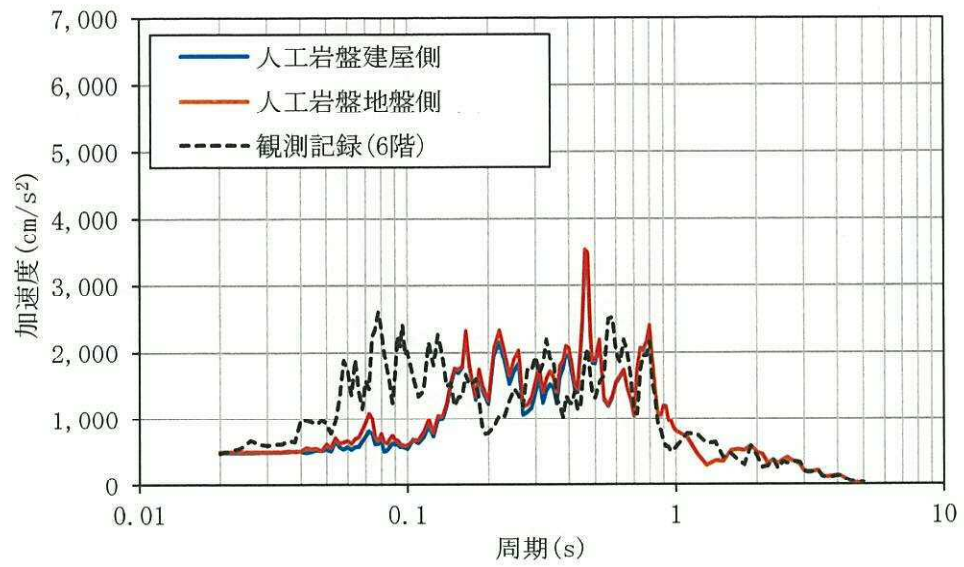
$h=1\%$



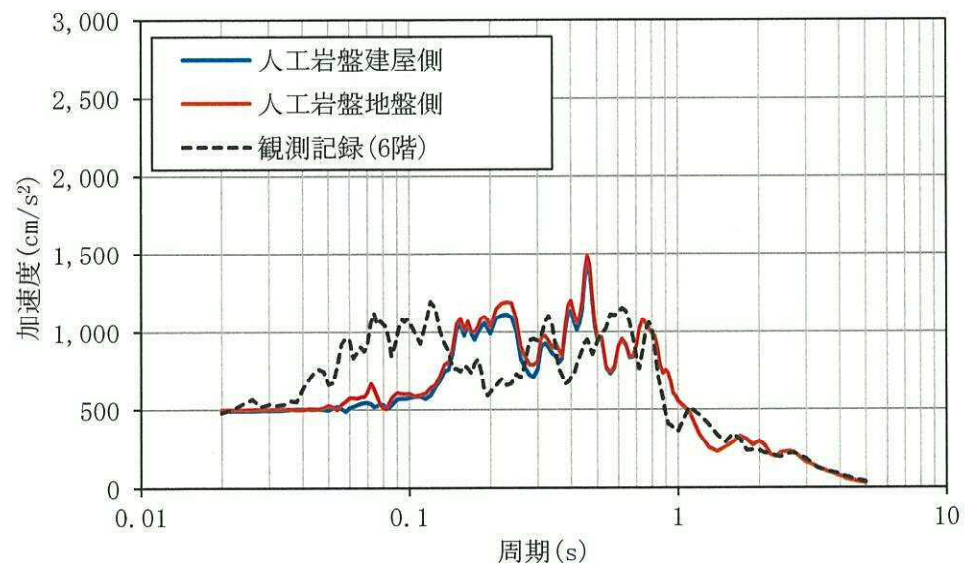
$h=5\%$

4 階

図 3-12 (3/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)



$h=1\%$



$h=5\%$

6 階

図 3-12 (4/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)

3.5 側面回転ばねの扱いについて

建屋側面地盤の埋込み効果を考慮するにあたり、側面地盤を水平ばね及び回転ばねとして評価してきた。ここでは、側面回転ばねを考慮しない場合の建屋応答への影響について検討した。

側面回転ばねを考慮しない場合の地震応答解析の概要を図 3-13 に示す。

東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果として最大応答加速度分布の比較を図 3-14 及び図 3-15 に、床応答スペクトルの比較を図 3-16 及び図 3-17 に示す。側面回転ばねを考慮しない場合の解析結果は、側面回転ばねを考慮する場合の応答に比べ、概ね同程度であるか一部の周期帯では若干大きくなることが確認できた。

「3.3 建屋－地盤動的相互作用の評価法について」において示したように、埋込み効果として、側面地盤の水平ばね及び回転ばねを考慮した場合に、より実状に近い建屋の振動性状を評価できているものと考えられるが、R/B 今回工認モデルにおいては、保守的に側面回転ばねを採用しない方針とした。

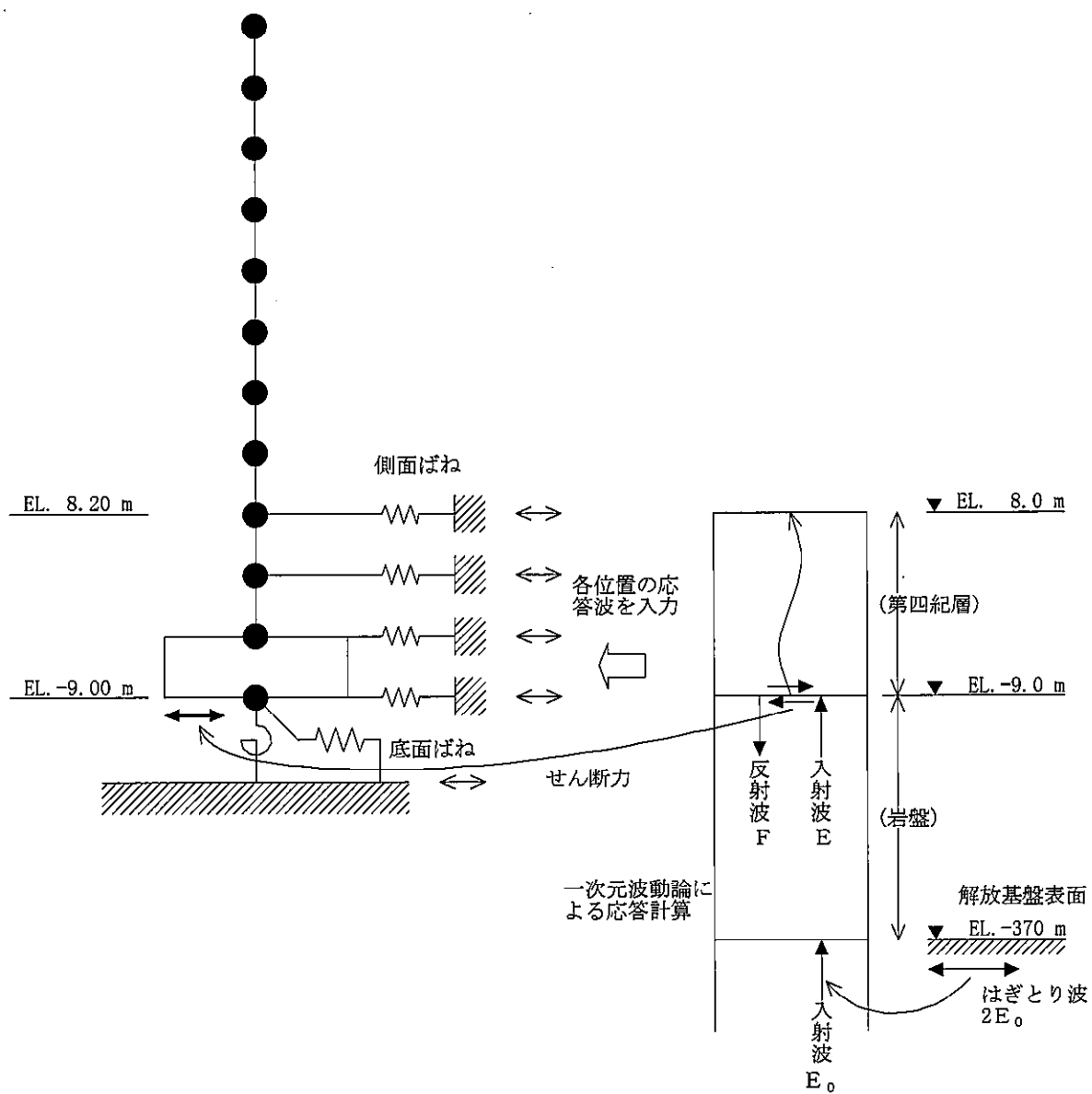


図 3-13 側面回転ばねを考慮しない場合の地震応答解析の概要

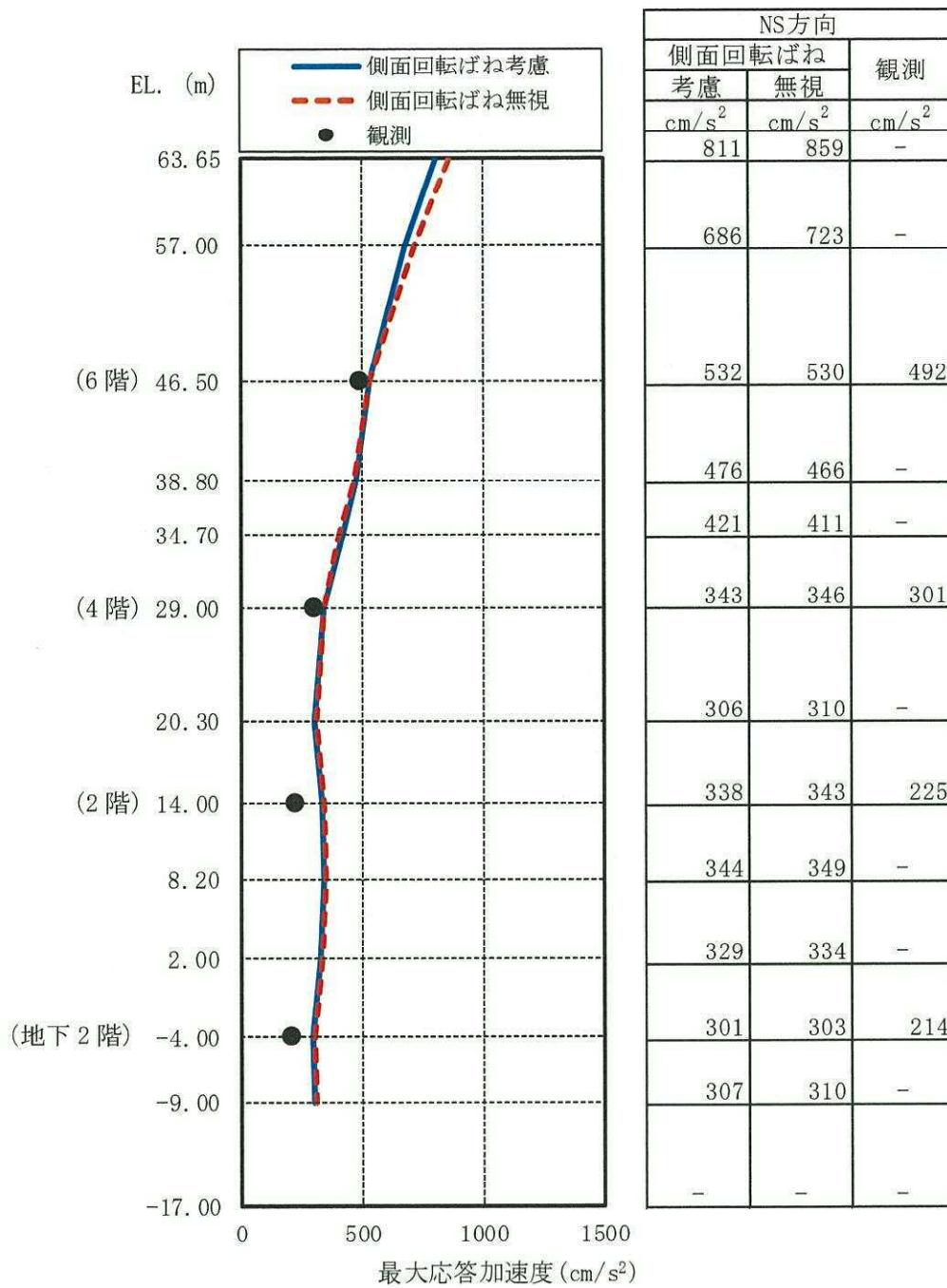


図 3-14 最大応答加速度分布の比較 (NS 方向)

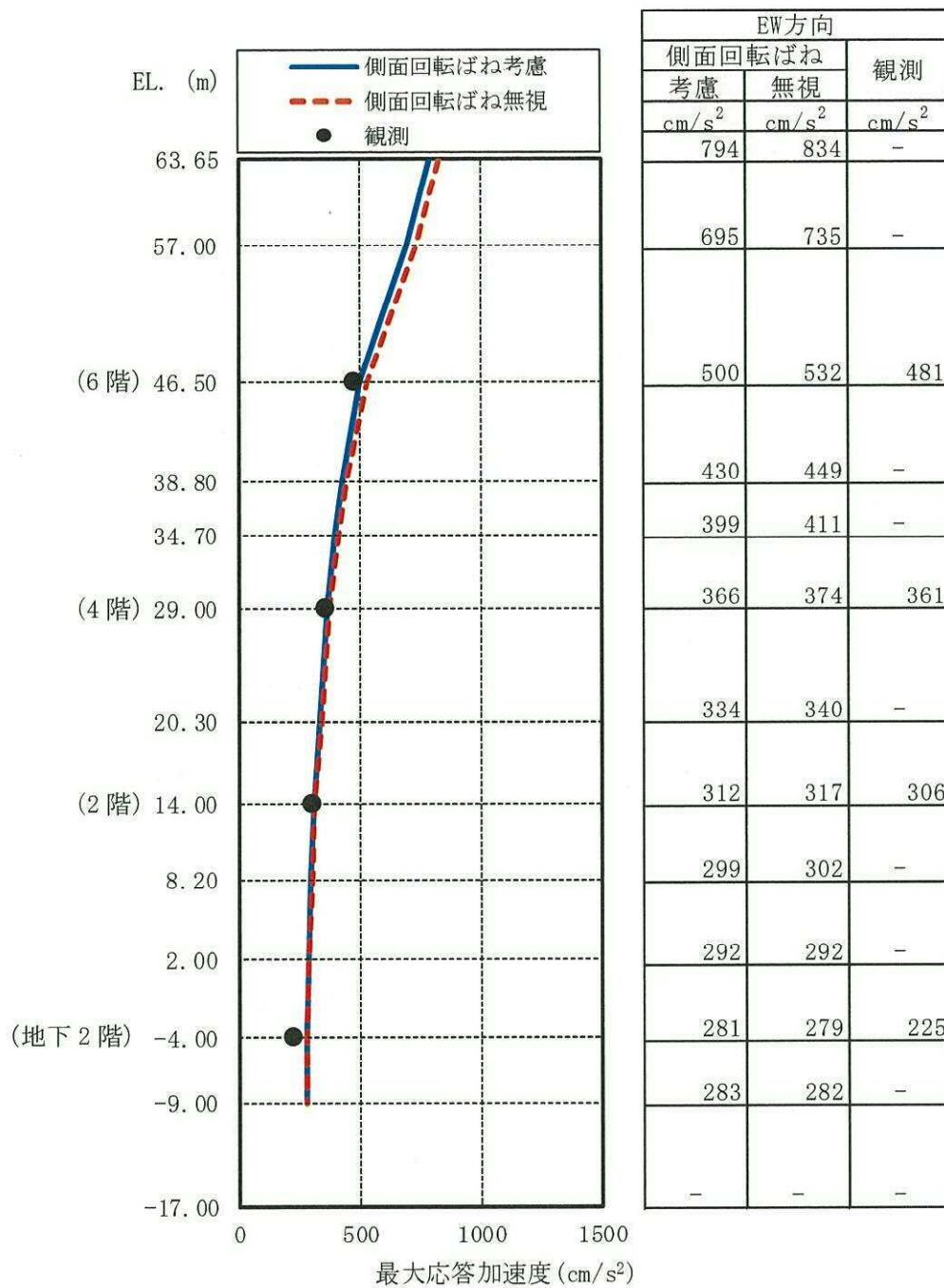
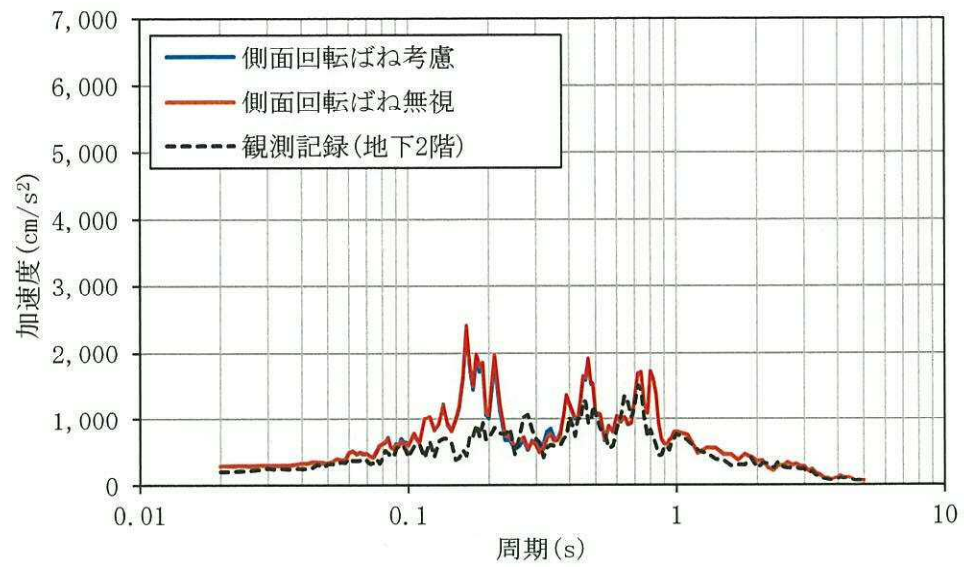
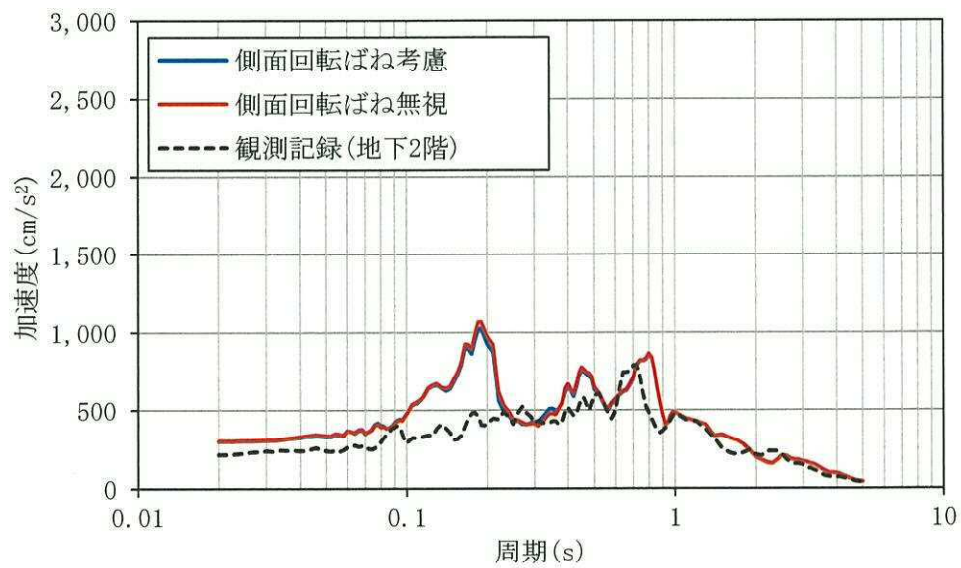


図 3-15 最大応答加速度分布の比較 (EW 方向)



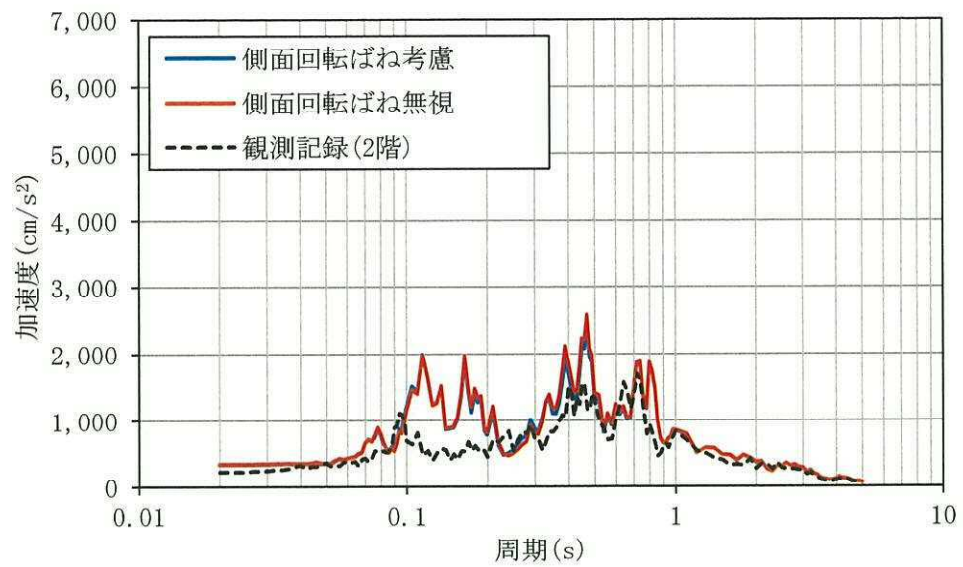
$h=1\%$



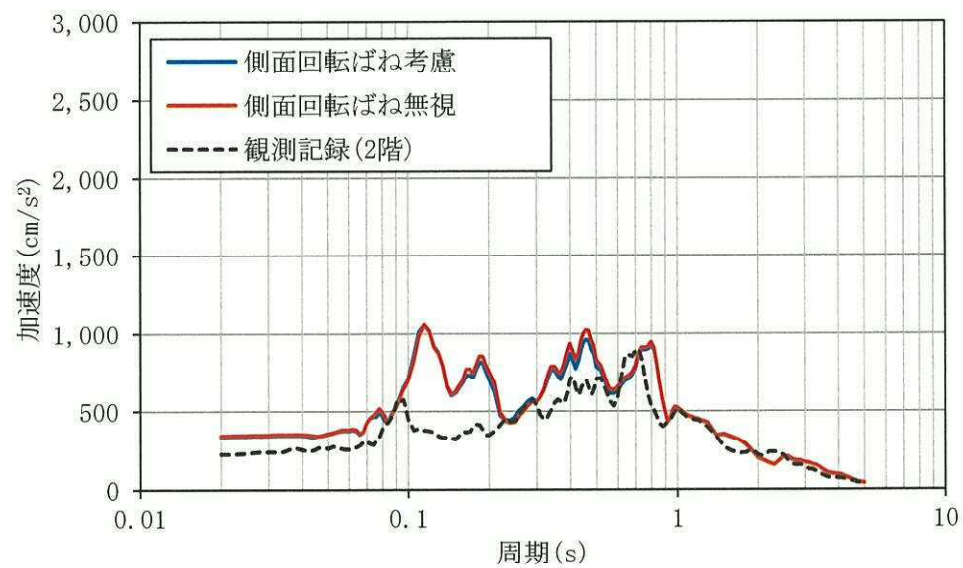
$h=5\%$

地下 2 階

図 3-16 (1/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)



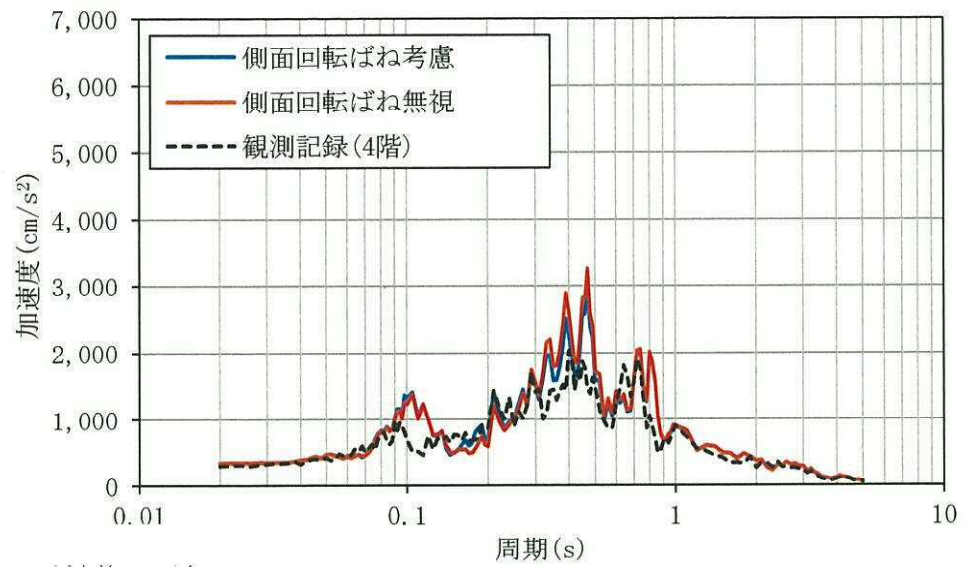
$h=1\%$



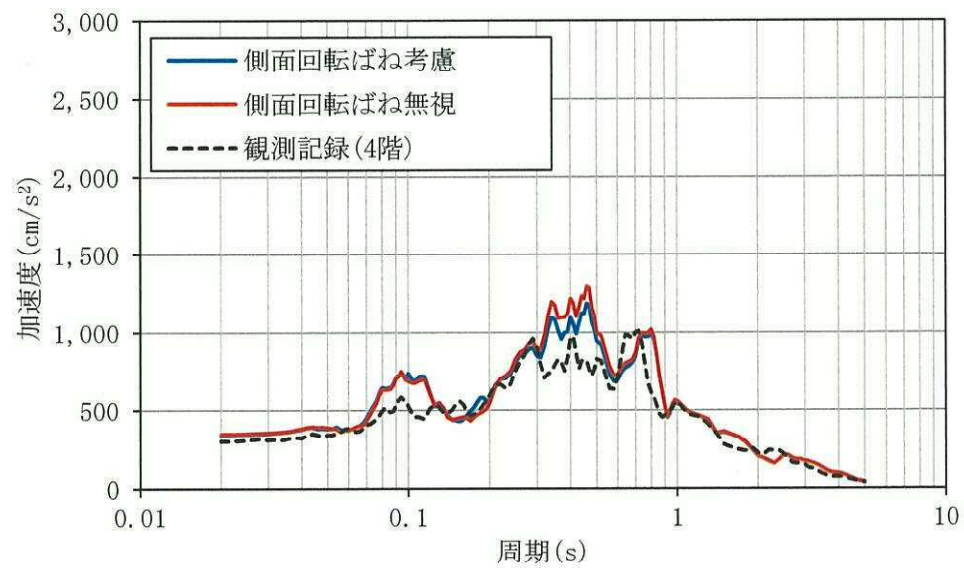
$h=5\%$

2 階

図 3-16 (2/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)



$h=1\%$



$h=5\%$

4 階

図 3-16 (3/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)

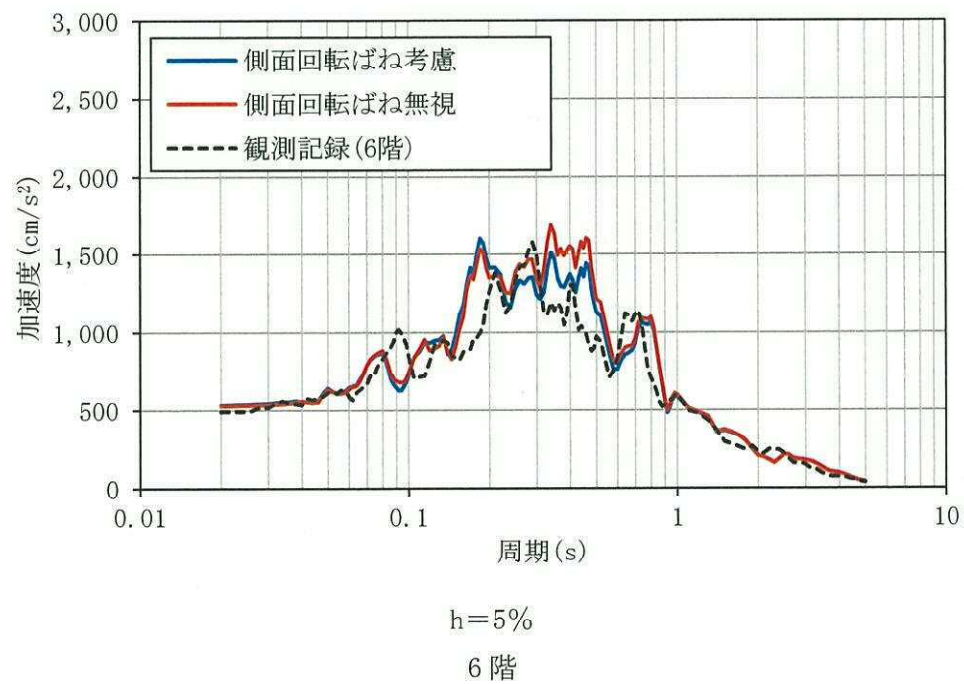
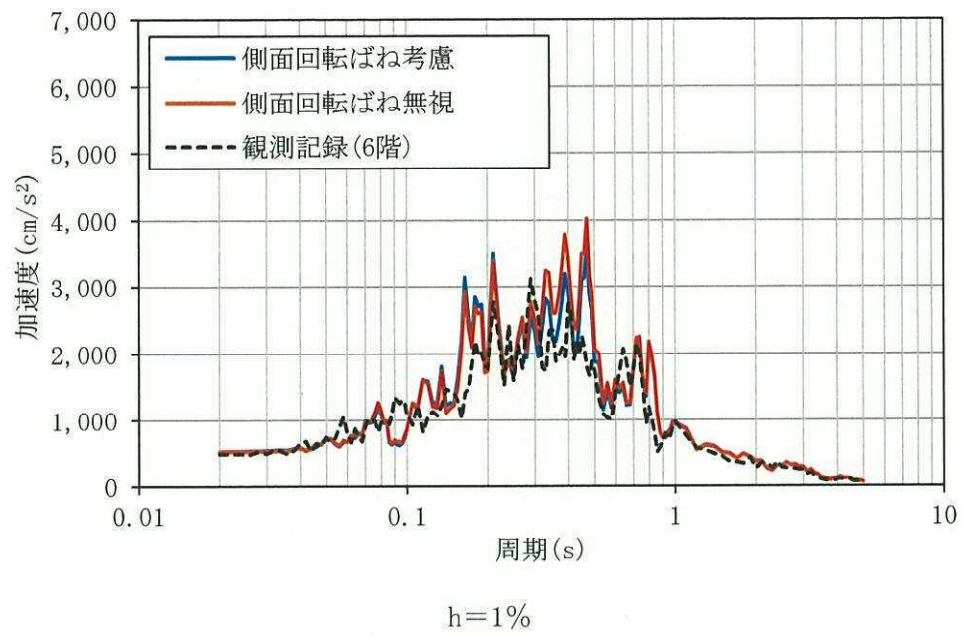
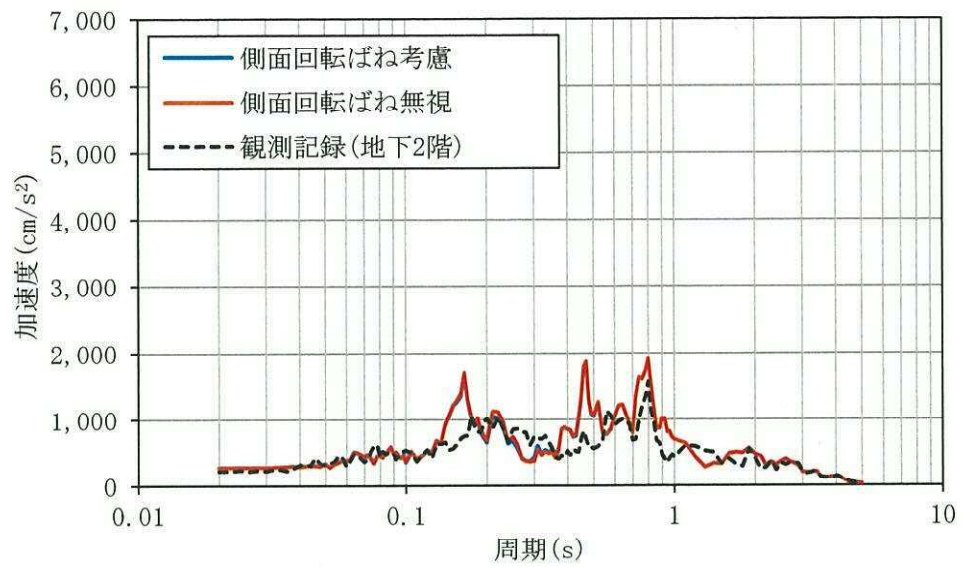
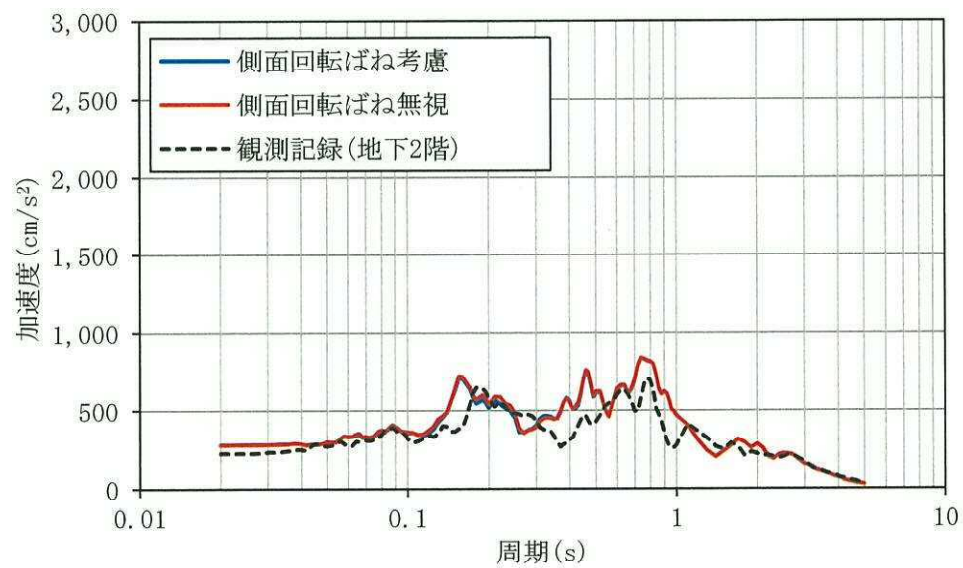


図 3-16 (4/4) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向)



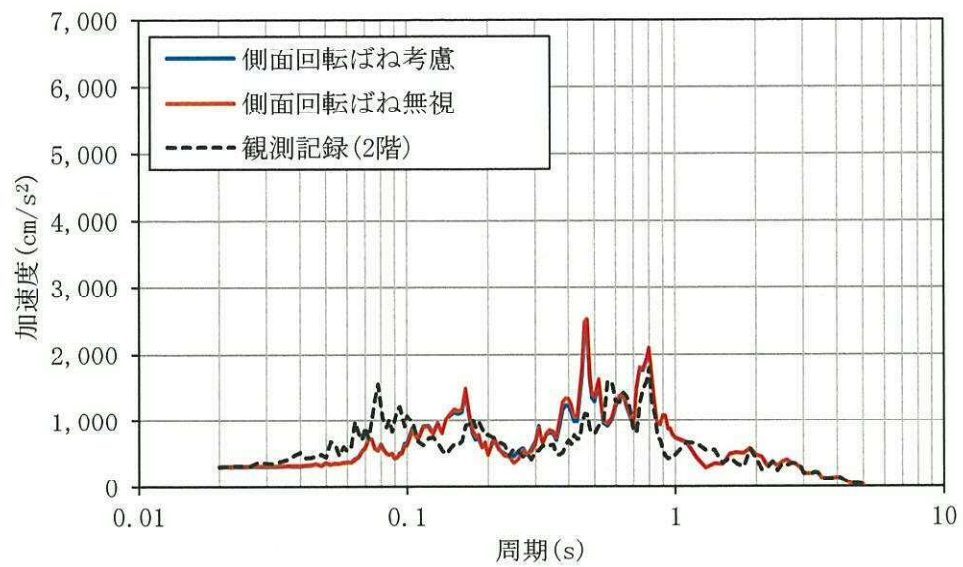
$h=1\%$



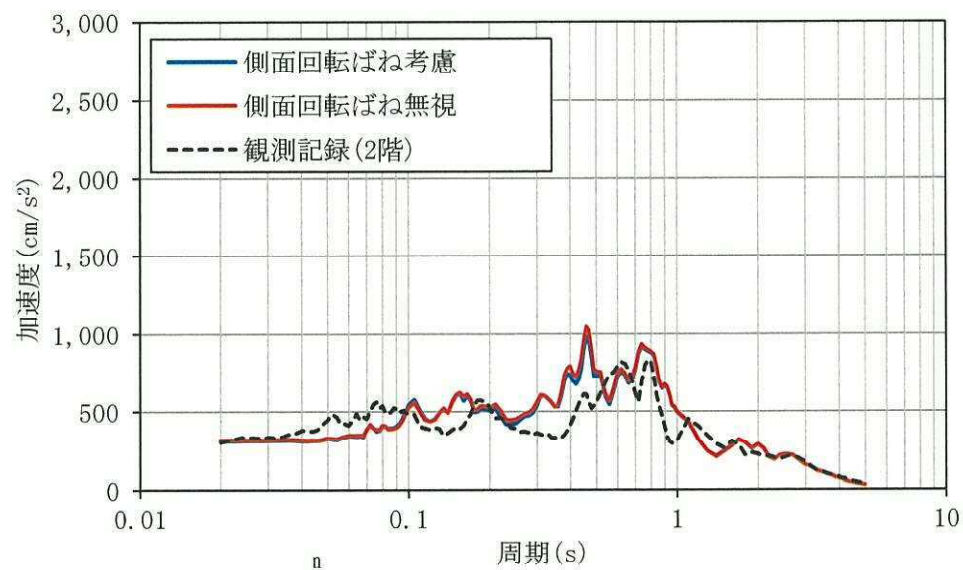
$h=5\%$

地下 2 階

図 3-17 (1/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)



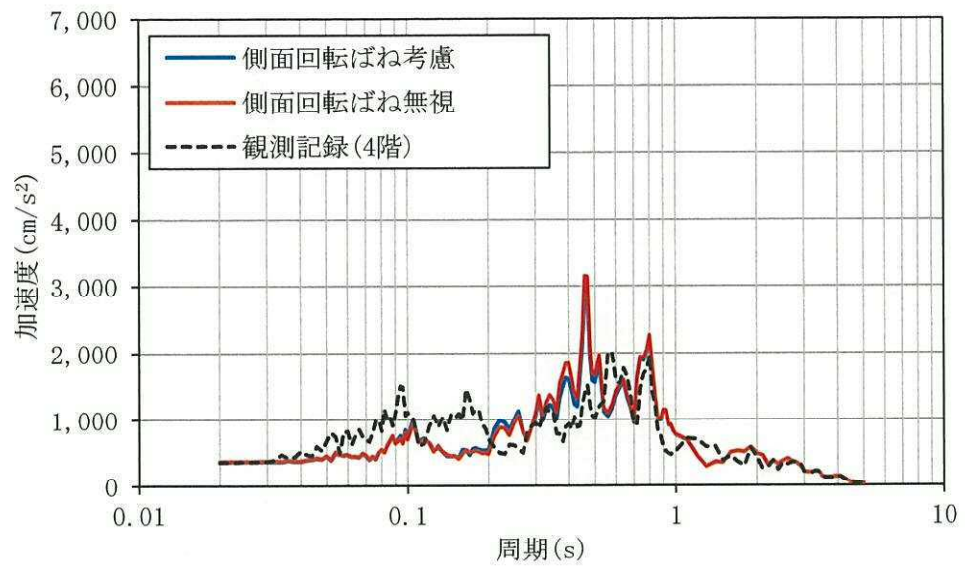
$h=1\%$



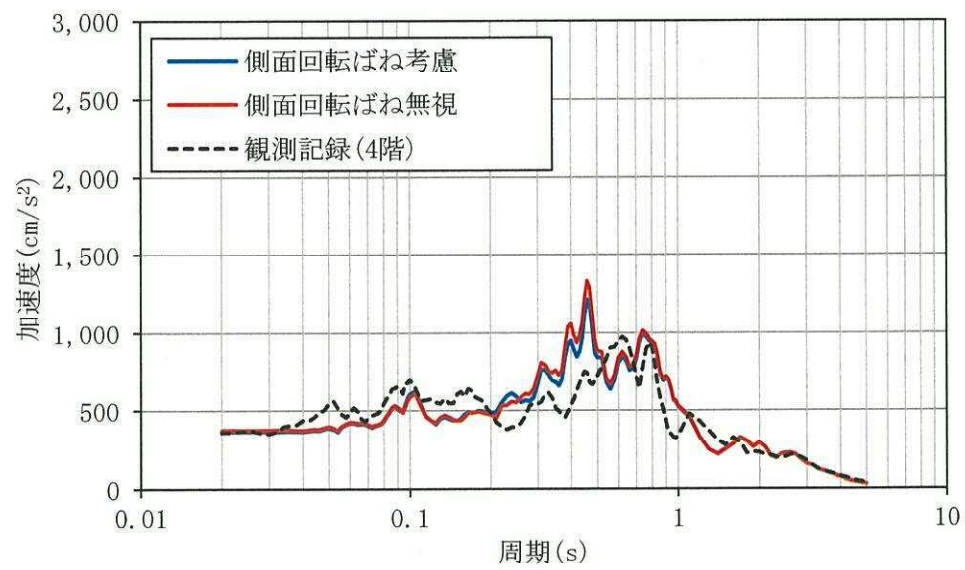
$h=5\%$

2 階

図 3-17 (2/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)



$h=1\%$



$h=5\%$

4 階

図 3-17 (3/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)

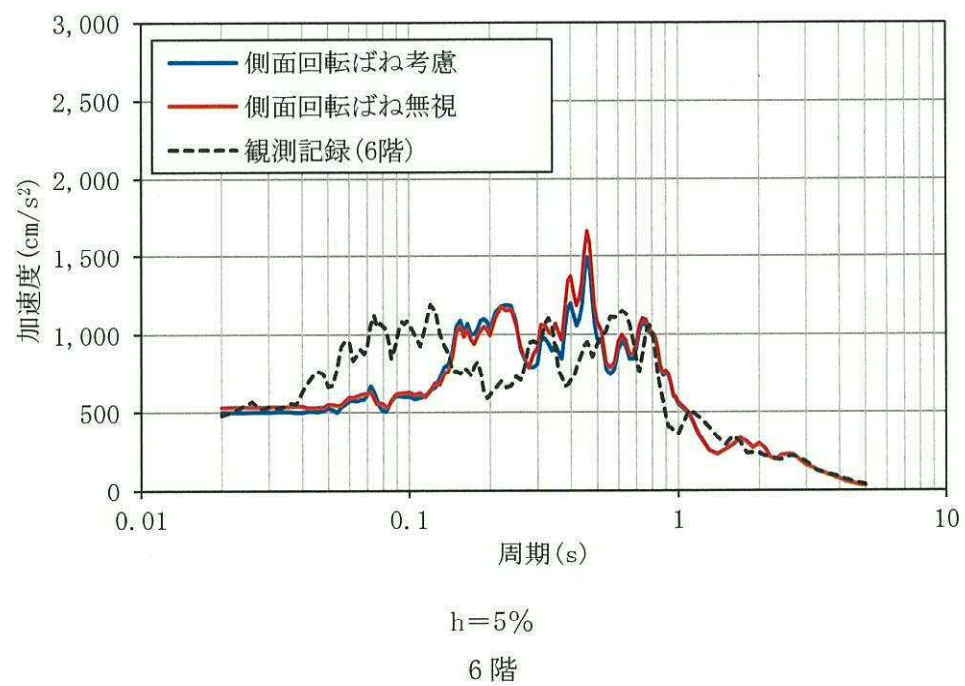
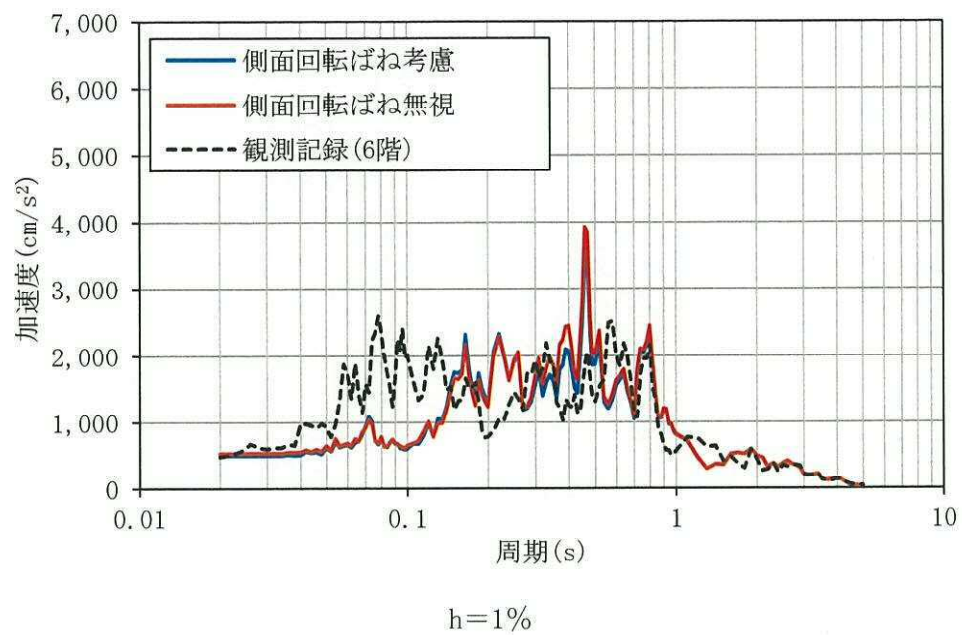


図 3-17 (4/4) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向)

4. シミュレーション解析結果を踏まえた施設影響

「3. 項 地震応答解析モデルに係る影響検討」において、観測記録と観測記録を適用した原子炉建屋の今回工認モデルを用いたシミュレーション解析結果の床応答スペクトルの比較において、観測記録の加速度がシミュレーション解析の加速度を上回る結果が確認された。このため、観測記録がシミュレーション解析結果を上回ることによる施設への影響について確認する。

施設の影響確認は、観測記録が今回工認モデルを用いたシミュレーション解析結果の応答を上回ったことを踏まえて、観測記録と観測記録を適用した今回工認モデルを用いたシミュレーション解析結果の応答とを比較することにより行う。なお、地盤ばねは観測記録に基づき設定した値を適用する。

なお、観測記録とシミュレーション解析の差異の考察については、「補足 340-7 水平 2 方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する検討について 別紙 3 3 次元 F E Mモデルによる地震応答解析 2.3 観測記録を用いた検討」で示す。

4.1 原子炉建屋への影響

図 4-1 に観測記録の最大応答加速度とシミュレーション解析との最大応答加速度との比較を示す。原子炉建屋の地震計設置位置での観測記録と原子炉建屋質点系モデルを用いたシミュレーション解析の応答とを比較した結果、最大応答加速度分布は各方向において、観測記録がシミュレーション解析を上回らないことが確認できたため、原子炉建屋の耐震評価に影響はない。

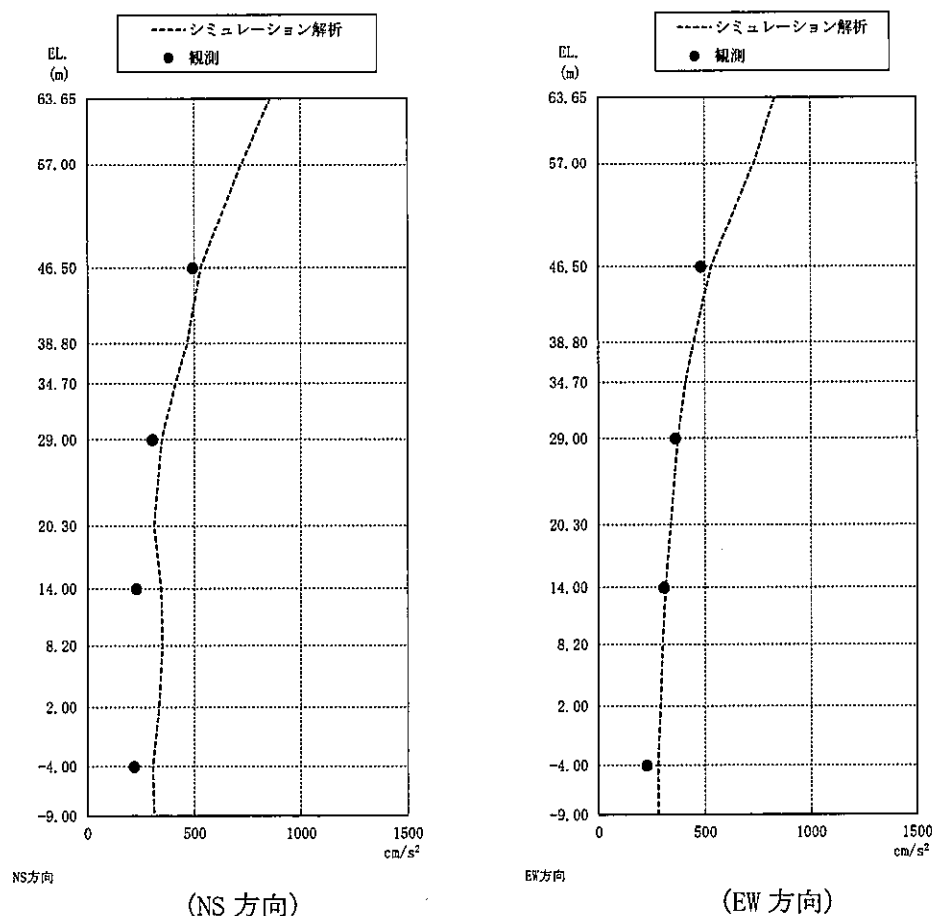


図 4-1 最大応答加速度の分布の比較

4.2 原子炉建屋に設置された機器・配管系

(1) 床応答スペクトルの傾向確認

原子炉建屋の各床面のシミュレーション解析結果の床応答スペクトルと観測記録の床応答スペクトルとの比較を図 4-2～図 4-4 に示す。また、最大応答加速度と固有周期 0.05 秒位置での加速度比較を表 4-1 に示す。機器・配管系評価においては、NS 方向及び EW 方向を包絡させた設計用床応答曲線を適用し、耐震評価を実施することから、NS 方向と EW 方向を包絡させた床応答スペクトルにて比較している。

また、原子炉建屋の設計用床応答曲線及び評価用震度は、設備評価用として加速度を 1.5 倍した値を基本として耐震計算を実施していることから、シミュレーション解析結果については、加速度値（震度）を 1.5 倍したものとする。

原子炉建屋の各床面のシミュレーション解析結果の床応答スペクトルと観測記録の床応答スペクトルの比較結果を以下に記す。

① 減衰定数 5%

- ・シミュレーション解析結果の床応答スペクトルは観測記録の床応答スペクトルを包絡している。

② 減衰定数 2%

- ・EL. 46.5 m の床応答スペクトルの比較では、0.05 秒から 0.1 秒において観測記録の床応答スペクトルがシミュレーション解析結果の床応答スペクトルを超えている周期が確認できる。
- ・EL. 46.5 m の床応答スペクトル以外の階高の床応答スペクトルにおいては、シミュレーション解析結果が観測記録を概ね包絡していることが確認できる。

③ 減衰定数 1%

- ・EL. 46.5 m の床応答スペクトルの比較では、0.05 秒から 0.1 秒において観測記録の床応答スペクトルがシミュレーション解析結果の床応答スペクトルを超えている周期が確認できる。
- ・EL. 29.0 m 及び EL. 14.0 m の床応答スペクトルの比較では、一部の周期帯で観測記録の床応答スペクトルがシミュレーション解析結果の床応答スペクトルを超えている周期が確認できる。
- ・EL. -4.0 m の床応答スペクトルにおいては、シミュレーション解析結果が観測記録を包絡していることが確認できる。

④ 最大応答加速度

- ・全標高に対してシミュレーション解析結果の最大応答加速度は、観測記録の最大応答加速度を超えていることが確認できる。

以上のとおり床応答スペクトル及び最大応答加速度の比較した傾向を示したが、機器・配管系の耐震設計の特徴を踏まえて、設備の影響評価を実施する。

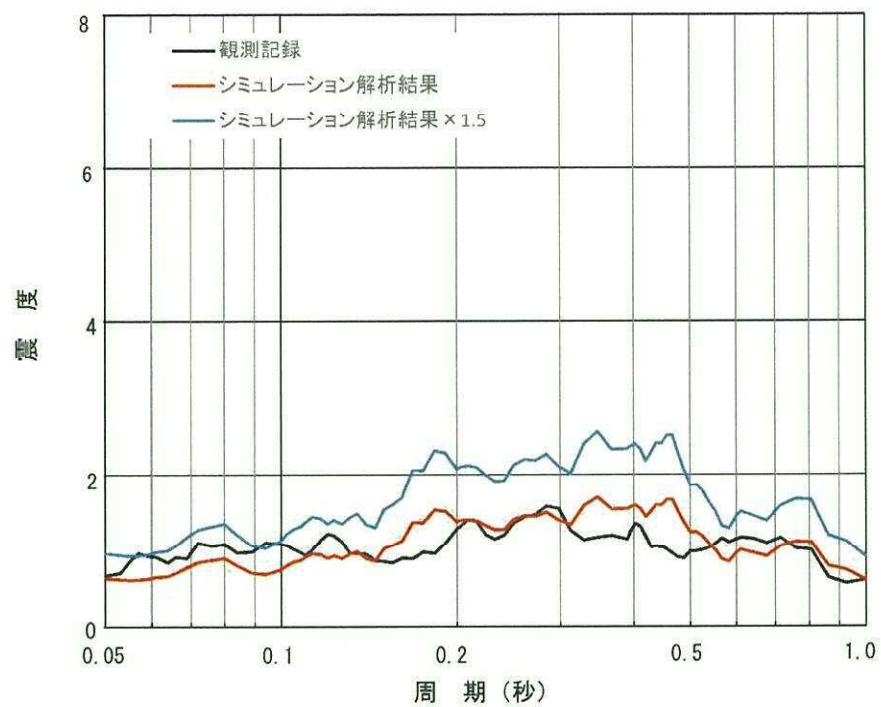


図 4-2 (1/4) EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較 (減衰 5%)

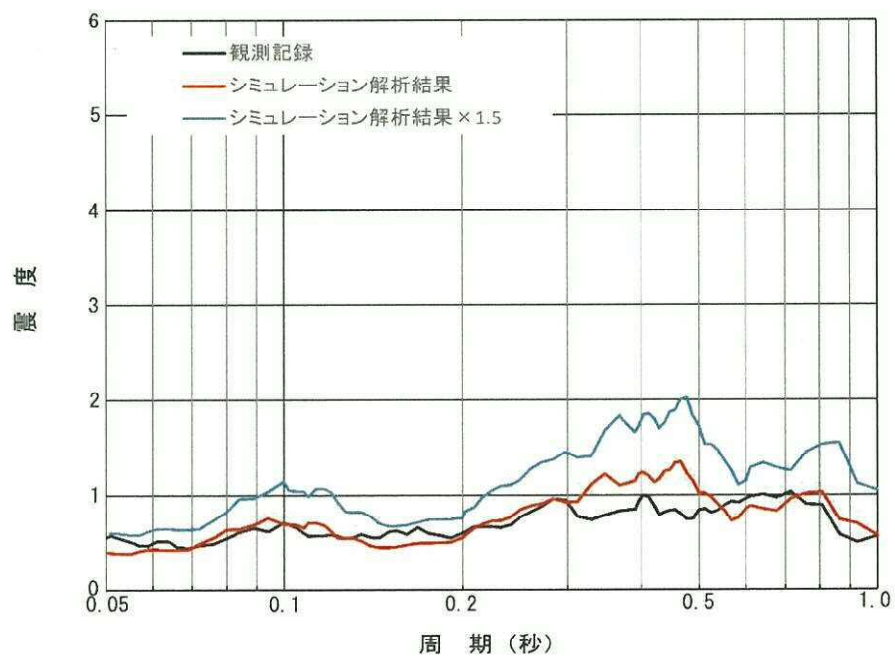


図 4-2 (2/4) EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 5%)

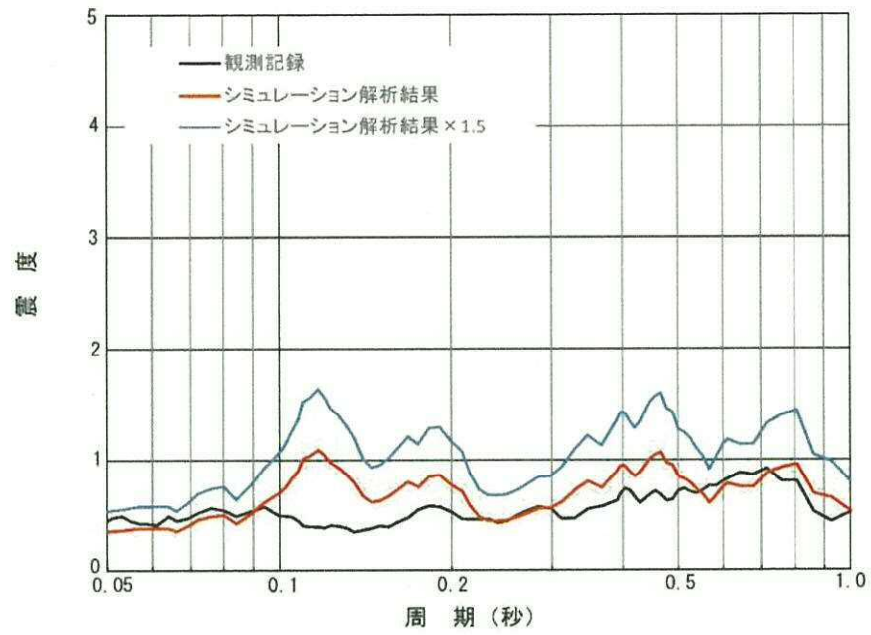


図 4-2 (3/4) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 5%)

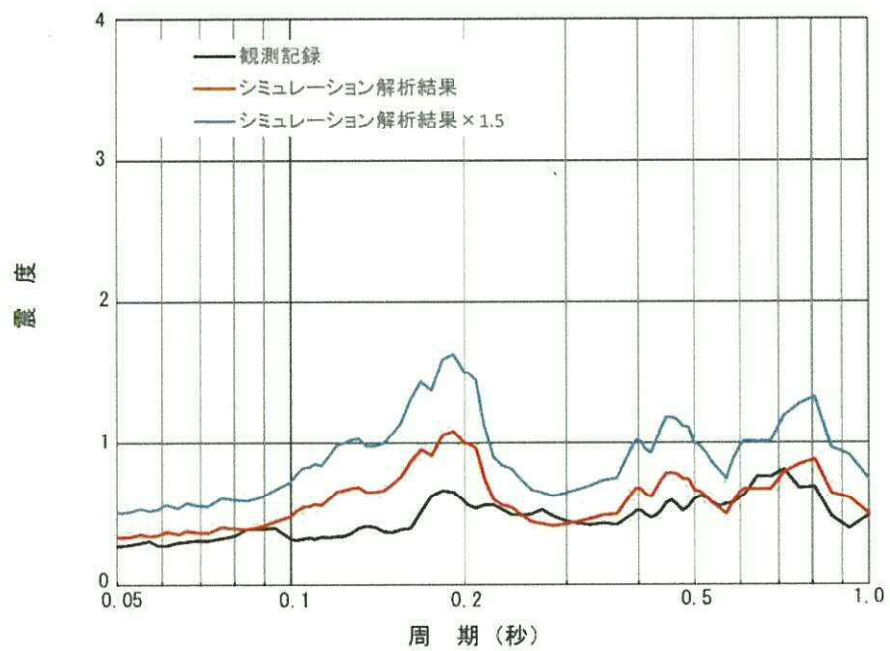


図 4-2 (4/4) EL. -4.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 5%)

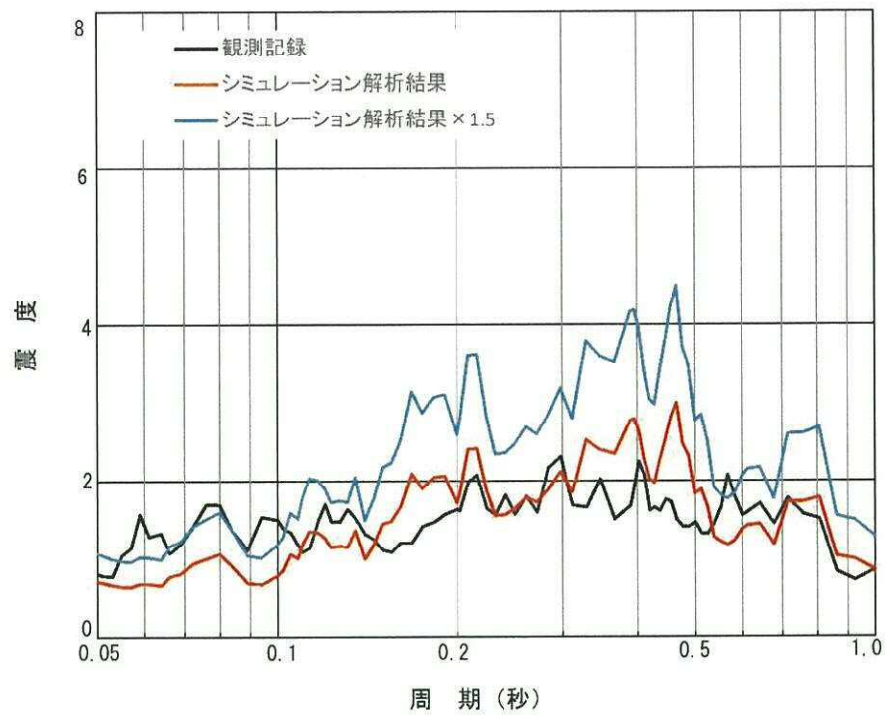


図 4-3 (1/4) EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較 (減衰 2%)

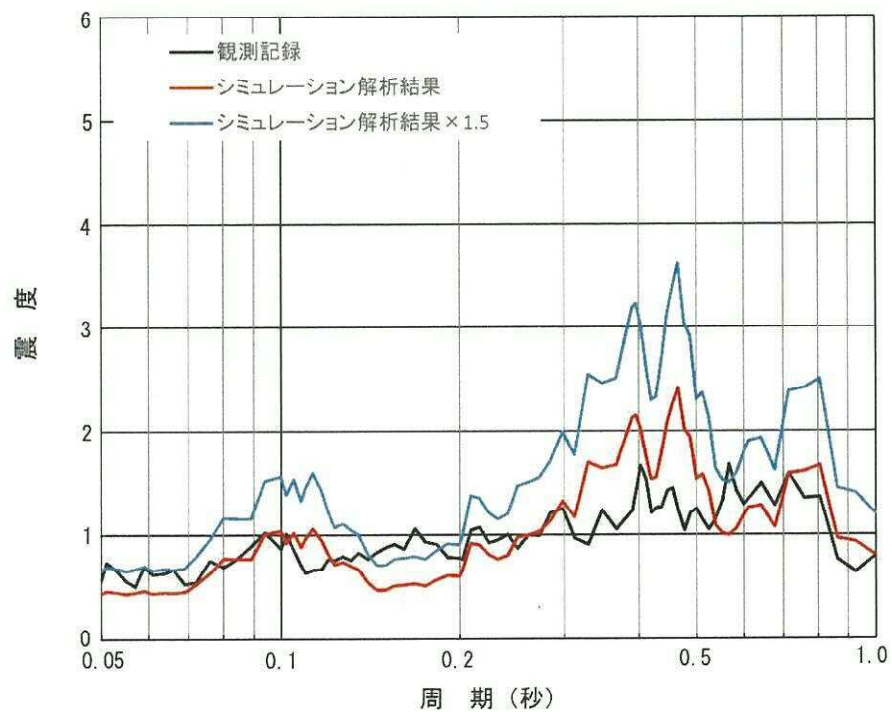


図 4-3 (2/4) EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 2%)

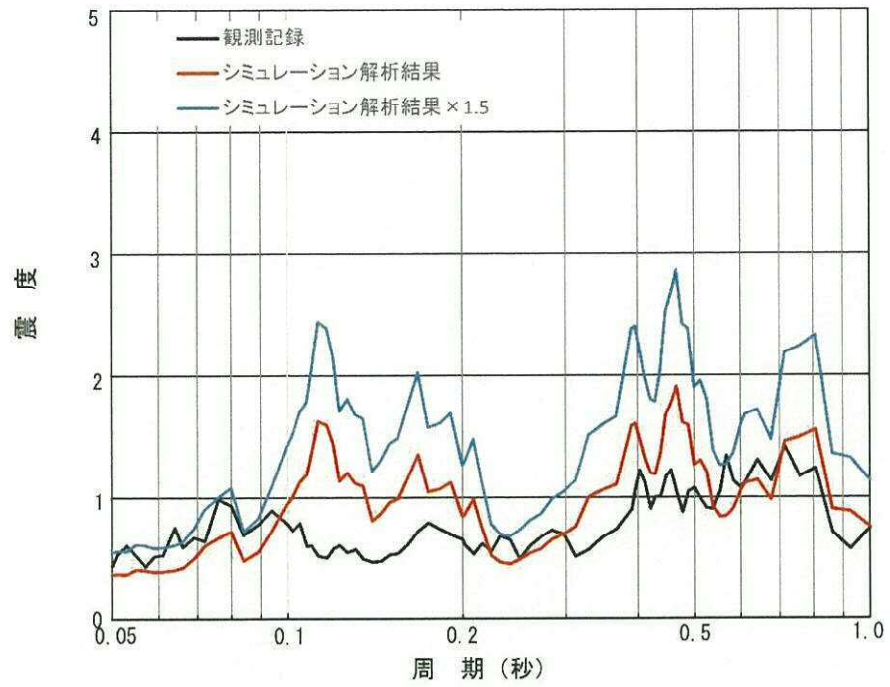


図 4-3 (3/4) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 2%)

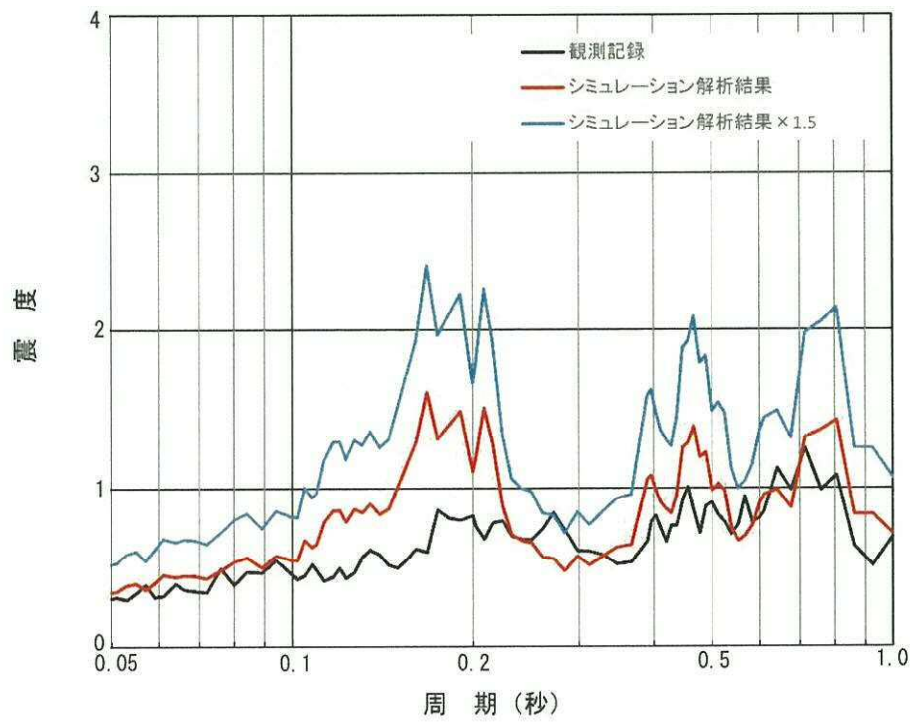


図 4-3 (4/4) EL. -4.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 2%)

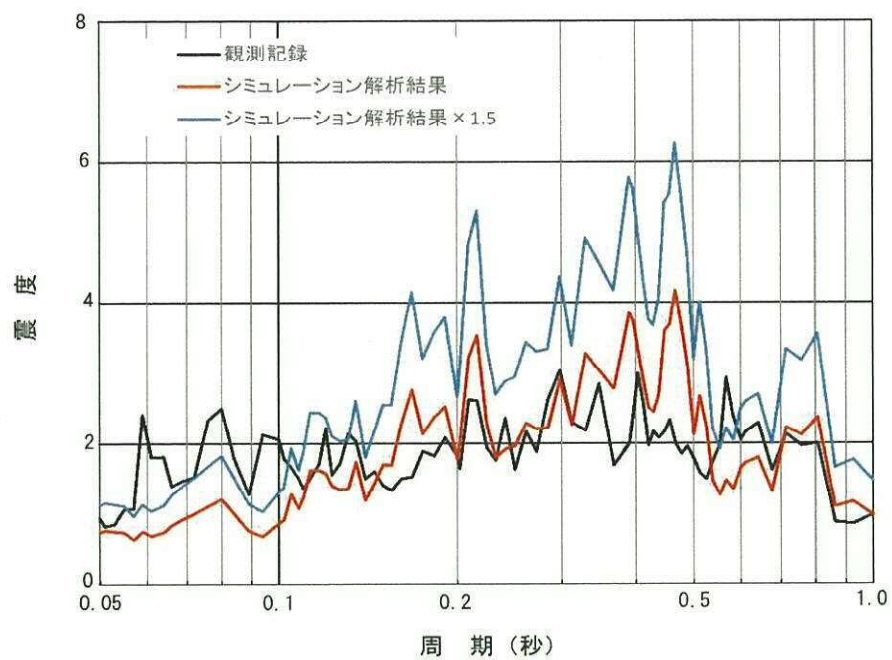


図 4-4 (1/4) EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較 (減衰 1%)

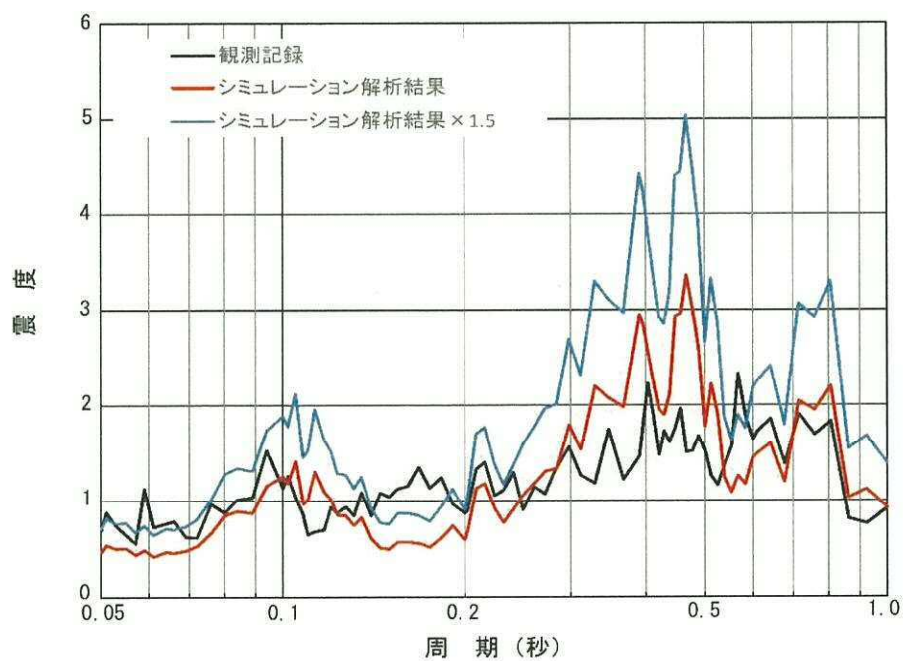


図 4-4 (2/4) EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 1%)

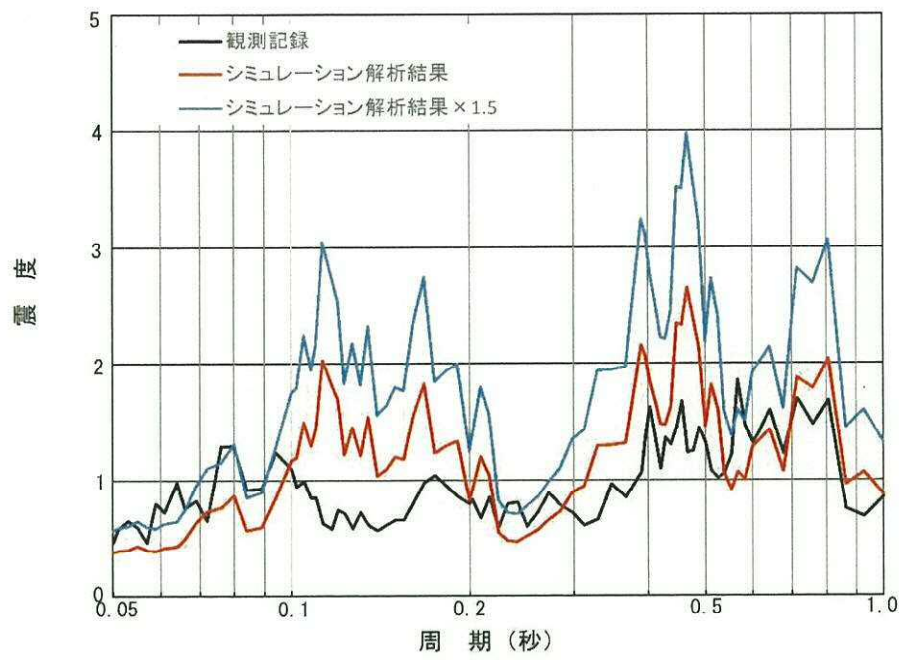


図 4-4 (3/4) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 1%)

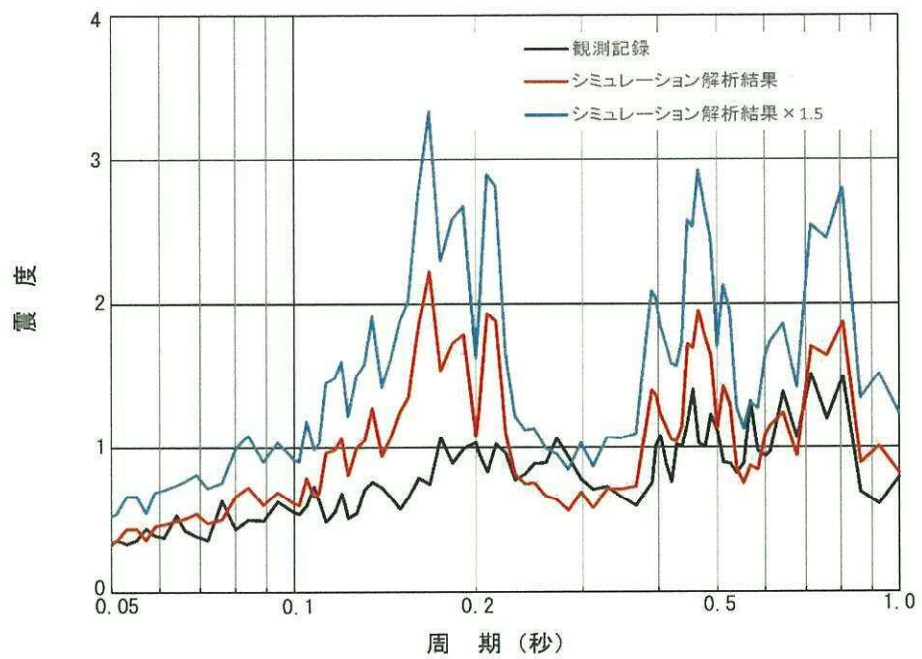


図 4-4 (4/4) EL. -4.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 1%)

表 4-1 最大応答加速度と固有周期 0.05 秒位置での加速度比較

標高 (m)	最大応答加速度 (cm/s^2)			固有周期 0.05 秒位置* の加速度 (cm/s^2)				
	シミュレーション 解析			観測記録		シミュレーション 解析		観測記録
	NS	EW	Max(NS, EW) $\times 1.5$	NS	EW	$\times 1.0$	$\times 1.5$	
46.5	530	532	798	492	481	700	1050	797
29.0	346	374	561	301	361	430	644	556
14.0	343	317	515	225	306	359	538	431
-4.0	303	279	455	214	225	339	509	301

注記 * : 床応答スペクトルは減衰 2%を適用し, NS 方向と EW 方向を包絡させた値として記載。

(2) 観測記録による影響評価

観測記録とシミュレーション解析結果との差異に対して設備の影響評価を実施する。

観測記録とシミュレーション解析結果を比較すると、剛な設備に適用する最大応答加速度は、シミュレーション解析結果が観測記録を上回っていることから、床応答スペクトルを適用する柔な設備を対象とする。

評価対象とする床応答スペクトルとしては、鉛直方向は観測記録がシミュレーション解析結果を上回るのが、本影響評価においては、以下理由から観測記録の影響が比較的広範囲に現れている水平方向に着目して評価する。

- ・鉛直方向の観測記録とシミュレーション解析結果との比較において、観測記録が上回る箇所として、EL. 46.5 m 及び EL. 29.0 m の周期約 0.08 秒～0.1 秒の間の周期帯に限定されること。
- ・機器の鉛直方向の固有周期は基本的に剛であり、当該周期帯に固有周期はないこと。
- ・配管系は観測記録がシミュレーション解析結果を上回る周期帯に固有周期が存在する可能性があるが、当該標高に設置されている配管系は、後述するとおり 2 倍以上の耐震裕度があること、また、シミュレーション解析結果に対して観測記録が上回っている範囲として鉛直方向よりも水平方向のほうが顕著であること。

図 4-5 に観測記録による影響評価フローを示すとともに、以下に評価対象設備、影響評価方法、影響評価結果を示す。

a. 評価対象設備

地震計の設置されている標高が EL. -4.0 m, EL. 14.0 m, EL. 29.0 m 及び EL. 46.5 m に限定され、観測系としてすべての標高を網羅できていないことに鑑み、観測記録とシミュレーション解析結果に差異が認められた EL. 14.0 m 以上の標高に設置される耐震重要設備並びに常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備、上位クラスの設備に波及的影響を及ぼす設備を対象とする。

b. 影響評価方法

設備の固有周期を確認し、観測記録とシミュレーション解析の応答比率（以下「FRS 比率」という。）*を踏まえた割り増しを考慮しても、設備の有する耐震裕度に収まることを確認する。FRS 比率が設備の耐震裕度を上回る場合は、個別に詳細検討を行い、観測記録の影響を考慮しても発生応力が許容応力に収まることを確認する。適用する固有周期については、応答に対して振動特性上支配的な 1 次固有周期を用いる。なお、配管系については、複数の振動モードを有することから 1 次固有周期よりも剛領域における FRS 比率を用いた影響確認も行う。

地震計が設置されていない標高に設置された設備の影響評価においては、地震計が設置された上下階の FRS 比率のうち、大きなほうの比率を用いて検討を行う。但し、EL. 46.5 m の観測記録とシミュレーション解析結果との差異については、東西のオペフロ面が外側にはらみ出すようなモードによる影響が要因となっており、その影響は EL. 46.5 m のオペ

口面に限定されることから、他の標高に設置された設備への影響評価には用いないこととする。

注記 *：耐震計算において、設計用床応答曲線（周期軸方向に拡張 10%考慮）を 1.5 倍した設備評価用床応答曲線を適用している設備については、シミュレーション解析結果を 1.5 倍した床応答スペクトルにより応答比率を求める。また、設計用床応答曲線（周期軸方向に拡張 10%考慮）及びばらつきケースを包絡した設備評価用床応答曲線を適用している設備については、シミュレーション解析結果（ $\times 1.0$ ）により応答比率を求める。

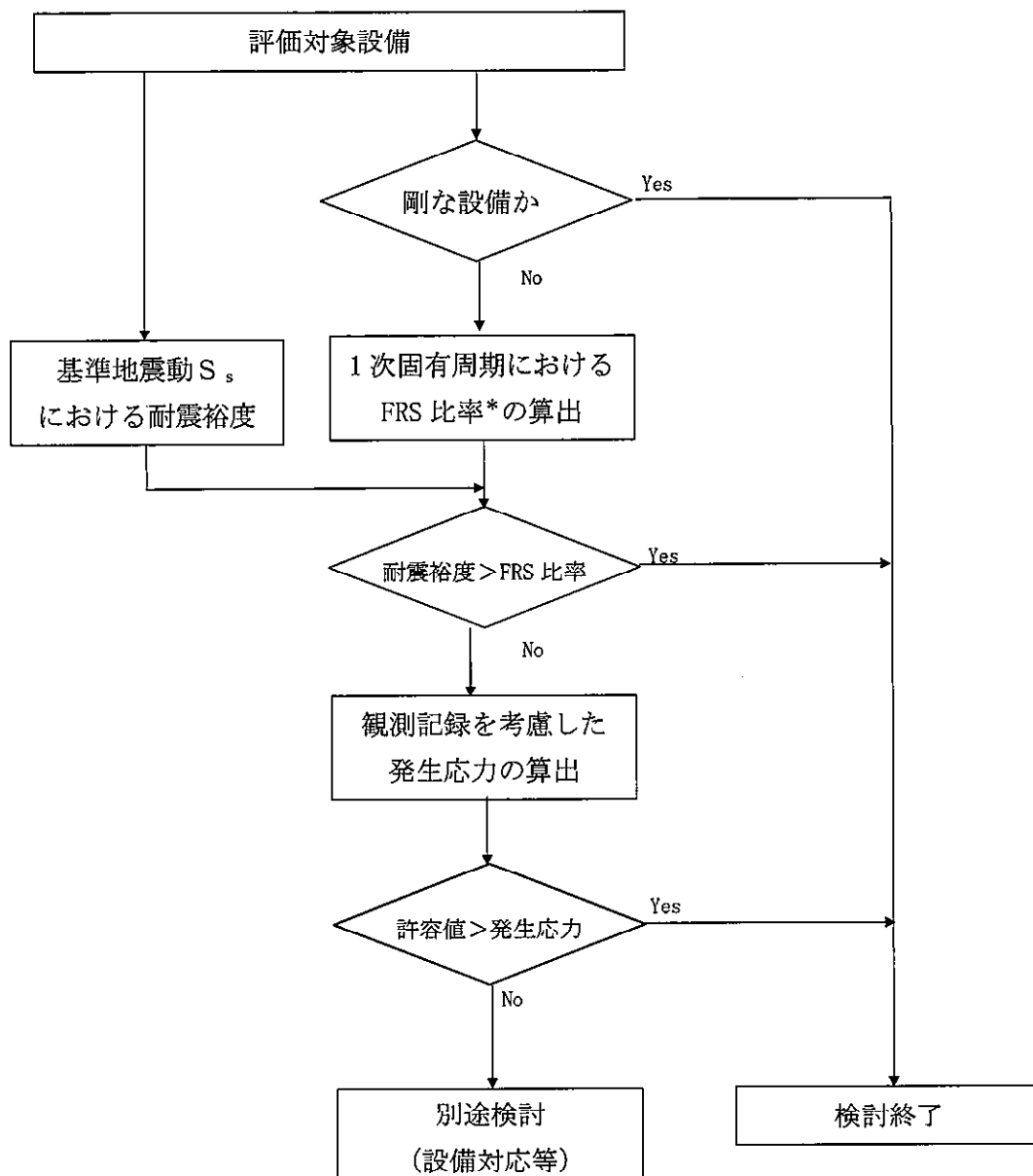
c. 影響評価結果

各設備の影響評価結果について次頁以降に示す。

観測記録とシミュレーション解析結果の応答比である「FRS 比率」に対して、燃料取替機及び窒素ガス代替注入系配管以外の設備は、設備の耐震裕度が FRS 比率を上回っていることを確認した。また、燃料取替機及び窒素ガス代替注入系配管については、詳細検討を行い観測記録の影響を考慮しても発生応力が許容応力に収まることを確認した。

なお、地震計が設置されていない EL. 38.8 m 及び EL. 34.7 m に設置された設備について EL. 46.5 m の FRS 比率を適用した場合の影響評価を実施し、仮に EL. 46.5 m の FRS 比率を適用したとしても耐震性に影響を与えないことを確認した。

また、配管系の影響検討として、1 次固有周期よりも剛領域の FRS 比率を用いた場合においても耐震性に影響を与えないことを確認した。




注記 * : 観測記録の加速度÷シミュレーション解析結果の加速度

図 4-5 観測記録による影響評価フロー

① 設置床レベル 46.5 m の機器・配管系（減衰 0.5%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 46.5 m であり，減衰定数 0.5% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，格納容器圧力逃がし装置配管が有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果，基準地震動 S_0 の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-2 設置床レベル 46.5 m の機器・配管系（減衰 0.5%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
①	格納容器圧力 逃がし装置配管	配管 本体		せん断	92	363	3.94	1.38	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

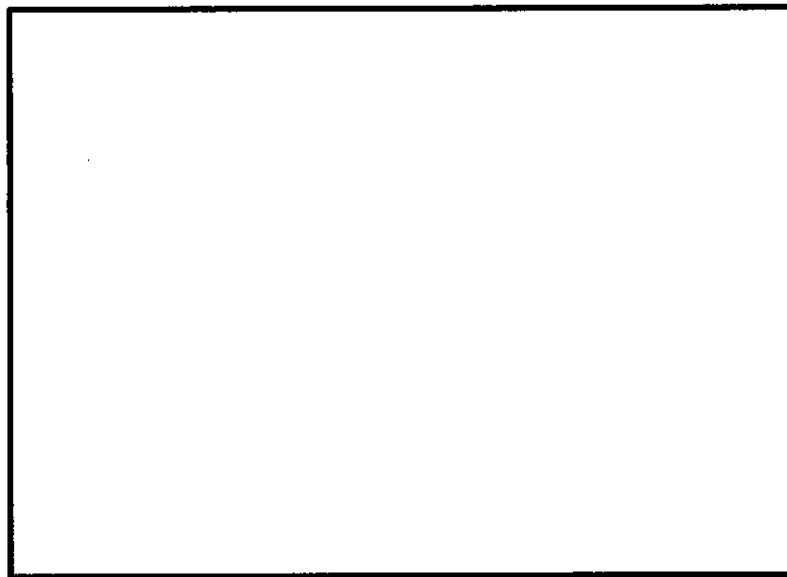



図 4-6  EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 0.5%）

② 設置床レベル 46.5 m の機器・配管系（減衰 1.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 46.5 m であり，減衰定数 1.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，使用済燃料プール温度計（S A）が有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-3 設置床レベル 46.5 m の機器・配管系（減衰 1.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
②		基礎 本体		せん断	13	94	7.23	—	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

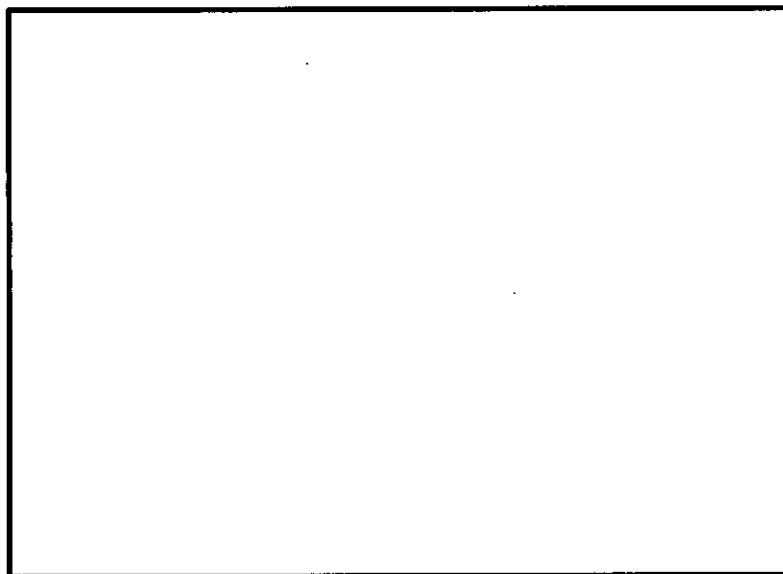
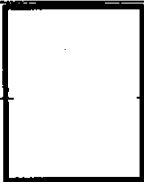


図 4-7 EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 1.0%）

③ 設置床レベル 46.5 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 46.5 m であり、減衰定数 2.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として、燃料取替機（S A）、燃料取替機（D B）及び非常ガス再循環系配管が有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果、非常ガス再循環系配管については、基準地震動 S₀ の耐震裕度は FRS 比率以上であるため、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。燃料取替機については、FRS 比率が耐震裕度を上回る結果となったため、詳細検討を行い耐震裕度が確保可能であることを確認した。

表 4-4 設置床レベル 46.5 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS ^{*1} 比率	影響 評価
①	燃料取替機	脱線防止ラグ （取付ボルト）		せん断	135	146	1.08	1.69	○ ^{*2}
②	非常ガス再循環 系配管（FRVS-6）	配管本体		1 次	25	343	13.72	1.13	○

注記 *1：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

*2：FRS 比率が耐震裕度を上回る結果となったため、詳細検討を行い耐震裕度が確保可能であることを確認した。

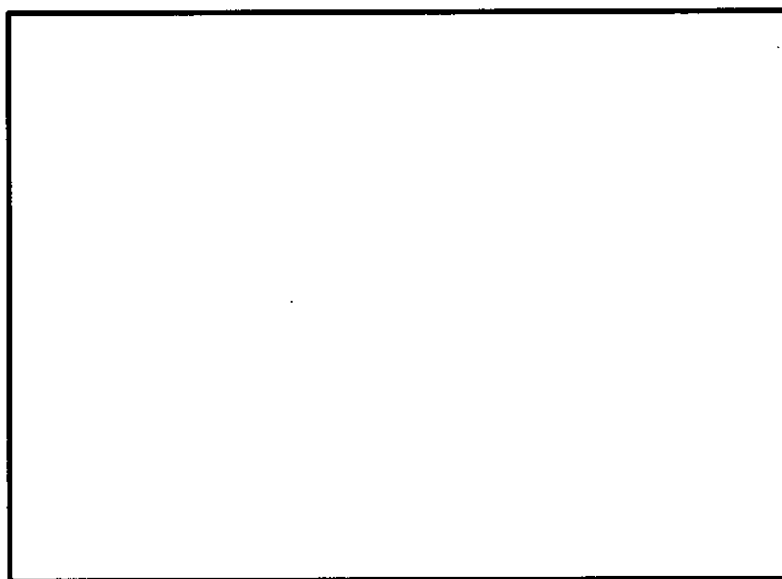



図 4-8  EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 2.0%）

【燃料取替機の詳細検討】

詳細検討は、耐震評価にて上述の FRS 比率 1.69 未満の耐震裕度の部材について行う。表 5 に示すとおり FRS 比率 1.69 未満の部材として、燃料取替機構造物フレーム、トロリ脱線防止ラグ、横行レールについて詳細検討を行う。

表 4-5 燃料取替機の耐震評価結果（設計基準対処設備）

部 材			応 力 分 類	基準地震動 S _s による評価結果		
				応力値	許容応力	耐震裕度
燃料取替機構造物フレーム			曲 げ	216	275	1.27
			せん断	3	158	52.66
			組 合 せ	217	275	1.26
ブリッジ	脱線防止 ラグ	ラグ本体	曲 げ	101	253	2.50
			せん断	31	146	4.70
			組 合 せ	114	253	2.21
		取付 ボルト	せん断	64	146	2.28
トロリ	脱線防止 ラグ	ラグ本体	曲 げ	154	253	1.64
			せん断	59	146	2.47
			組 合 せ	184	253	1.37
		取付 ボルト	せん断	135	146	1.08
走行レール			曲 げ	240	756	3.15
			せん断	26	436	16.76
			組 合 せ	244	756	3.09
横行レール			曲 げ	428	483	1.12
			せん断	17	278	16.35
			組 合 せ	428	483	1.12

a. 燃料取替機構造物フレームの詳細検討

詳細検討は、地震応答解析結果から算定される荷重のうち水平方向地震の影響を受ける荷重に FRS 比率の 1.69 倍をした荷重から、応力値を算出することにより行う。観測記録による影響検討に用いた荷重の算定結果を表 4-6 及び表 4-7 に示す。表 4-8 に燃料取替機構造物フレームの詳細検討を示すが燃料取替機構造物フレームの地震時による応答は、鉛直方向地震の荷重が支配的であり、水平方向地震による荷重増加の影響は小さく応力値の増加も僅かとなり、許容応力に収まる結果となった。

表 4-6 応力値算定に用いる荷重条件

	S _s による 荷重	観測記録による 影響検討	備 考
F _x : 軸力 (N)			代表として算定過程 を表 4-7 に示す。
F _y : y 方向せん断力 (N)			
F _z : z 方向せん断力 (N)			
M _x : ねじれモーメント (N・mm)			
M _y : y 軸曲げモーメント (N・mm)			
M _z : z 軸曲げモーメント (N・mm)			

表 4-7 観測記録による影響検討の算定過程 (F_x : 軸力の例示)

	荷重条件		S _s による 荷重	観測記録による 影響検討
F _x : 軸力 (N)	自 重 (①)			
	鉛直方向地震 (②)			
	水平方向 地震	ブリッジ (③)		
		トロリ* (④)		
	合 計 (①+④+√ (② ² +③ ²))			

注記 * : トロリはレール上を滑ることにより摩擦係数分の荷重に制限される。

表 4-8 燃料取替機構造物フレームの詳細検討結果

部 材	応 力 分 類	基準地震動 S _s による評価結果			観測記録による 影響検討		
		応力値	許容 応力	耐震 裕度	応力値	許容 応力	耐震 裕度
燃料取替機 構造物フレーム	曲 げ	216	275	1.27	224	275	1.22
	せ ん 断	3	158	52.66	3	158	52.66
	組 合 せ	217	275	1.26	224	275	1.22

b. トロリ脱線防止ラグ及び横行レールの詳細検討

燃料取替機の応力値算出に用いる荷重は、床応答スペクトルを適用した動的解析に加えて、最大応答加速度（1.2ZPA）を適用した静的解析により算出している。ブリッジ脱線防止ラグ及び横行レールの応力値算出は、動的解析による算出荷重と静的解析による算出荷重との何れか大きい方を用いている。

動的解析による算出荷重と静的解析による算出荷重との比較を、観測記録による影響を考慮した結果を含めて表 4-9 に示す。シミュレーション解析と観測記録との比較から最大応答加速度（1.2ZPA）は、シミュレーション解析結果が保守的な結果となっていることから静的解析の荷重に変更はない。動的解析による観測記録影響を考慮した荷重は、基準地震動 S_s の評価に用いた荷重から増加することになる。

上述のとおり動的解析については、観測記録による影響により荷重が増加することになるが、静的解析による荷重に包絡されることから、基準地震動 S_s の評価結果に変更がないことを確認した。

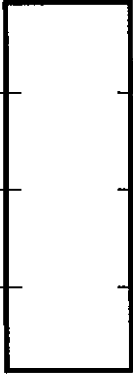
表 4-9 動的解析と静的解析との荷重比較

荷重の 方向	荷重 (N)		
	静的解析 (1.2ZPA を適用)	動的解析 (床応答スペクトルを適用)	
	S_s による応答	S_s による 応答	観測記録影響 を考慮
水平方向			

④ 設置床レベル 38.8 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 38.8 m であり，減衰定数 2.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，非常用ガス処理系配管，低圧代替注水系配管及び格納容器下部注水系配管が有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果，基準地震動 S_0 の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-10 設置床レベル 38.8 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
㉑	非常用ガス処理系配管（AC-SGTS）	配管 本体		1 次	101	335	3.31	1.19	○
㉒	低圧代替注水系配管（ALPI-003R3F）	配管 本体		1 次	97	366	3.77	—	○
㉓	低圧代替注水系配管（ALPI-001DG）	配管 本体		1 次	116	366	3.15	—	○
㉔	格納容器下部注水系配管（FP-R-1）	配管 本体		1 次	183	366	2.00	—	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

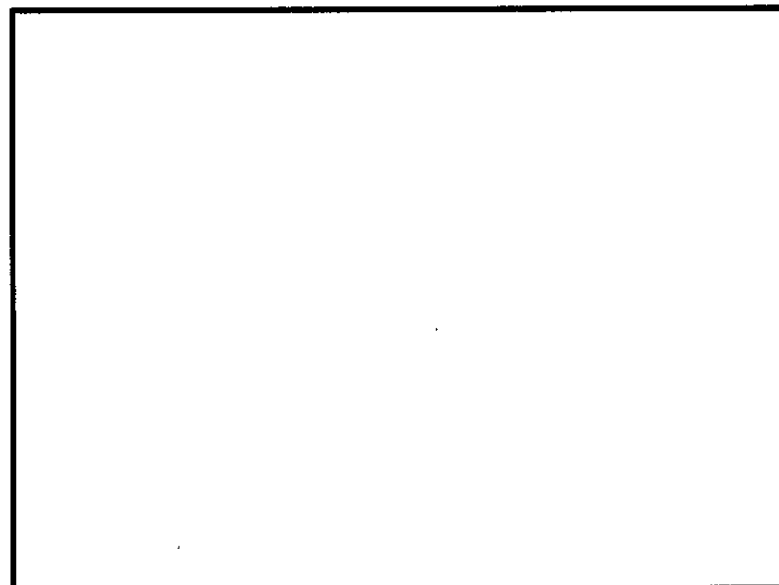



図 4-9  EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 2.0%）

⑤ 設置床レベル 38.8 m の機器・配管系（減衰 3.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 38.8 m であり、減衰定数 3.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として、格納容器圧力逃がし装置配管が有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果、基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-11 設置床レベル 38.8 m の機器・配管系（減衰 3.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
④	格納容器圧力逃 がし装置配管 （PV-002R5F）	配管 本体		1 次	78	363	4.65	1.12	○
⑤	格納容器圧力逃 がし装置配管 （PV-008YD）	配管 本体		1 次	96	363	3.78	—	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

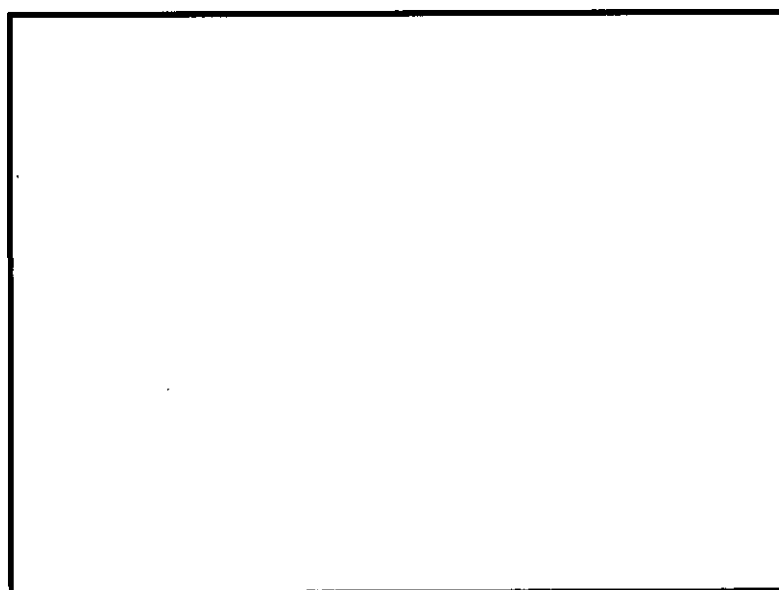



図 4-10 EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 3.0%）

⑥ 設置床レベル 34.7 m の機器・配管系（減衰 0.5%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 34.7 m であり，減衰定数 0.5% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，代替燃料プール冷却系配管が有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-12 設置床レベル 34.7 m の機器・配管系（減衰 0.5%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
⑥	代替燃料プール冷却系配管 （AFPC-3）	配管 本体		1 次	77	365	4.74	—	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

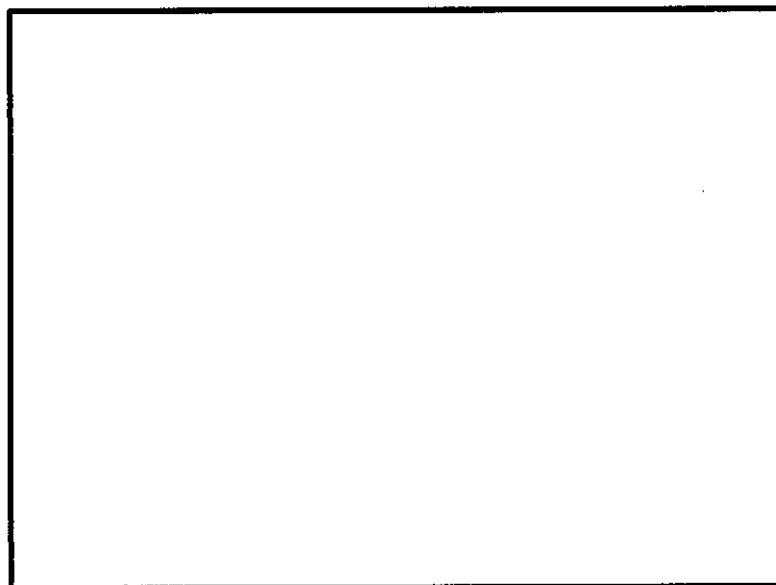



図 4-11  EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 0.5%）

⑦ 設置床レベル 34.7 m の機器・配管系（減衰 1.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 34.7 m であり、減衰定数 1.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として、使用済燃料貯蔵ラック（70 体）及び制御棒貯蔵ラック（S クラスへの波及的影響）が有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果、基準地震動 S₀ の耐震裕度は FRS 比率以上であるため、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-13 設置床レベル 34.7 m の機器・配管系（減衰 1.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
①	使用済燃料貯蔵ラック（70 体）	取付 ボルト		1 次	146	153	1.04	1.03	○
②	制御棒貯蔵ラック	基礎 ボルト		1 次	158	171	1.08	1.08	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

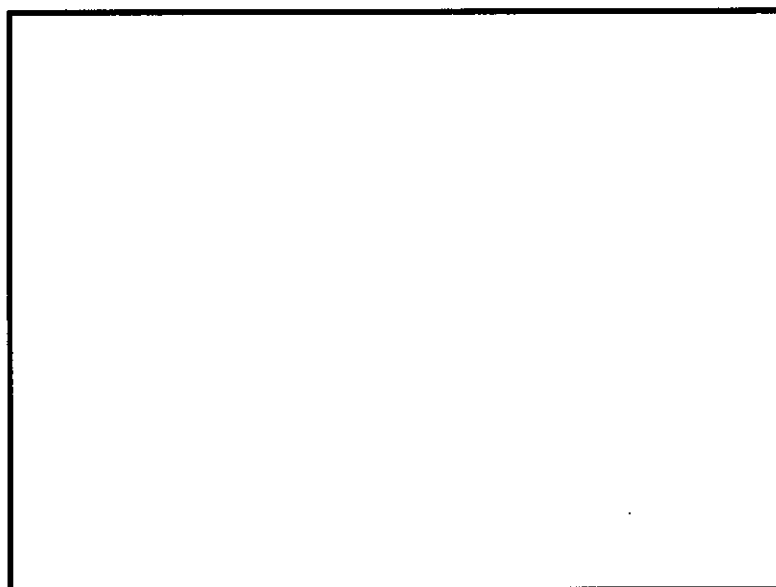


図 4-12 EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 1.0%）

⑧ 設置床レベル 29.0 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 29.0 m であり，減衰定数 2.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，原子炉隔離時冷却系配管が有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-14 設置床レベル 29.0 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
⑧	原子炉隔離時冷却系配管 （RCIC-19, 20, 29）	配管 本体		1 次	146	363	2.48	—	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

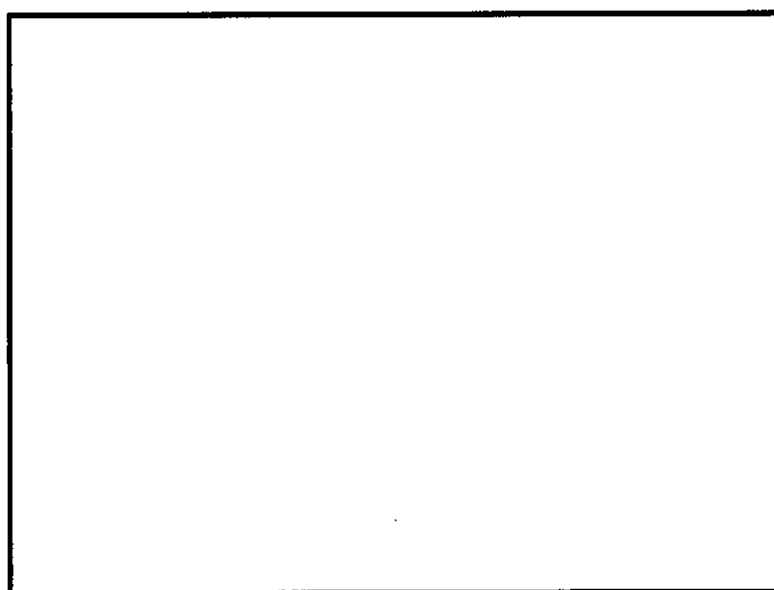



図 4-13  EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 2.0%）

⑨ 設置床レベル 29.0 m の機器・配管系（減衰 3.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 29.0 m であり，減衰定数 3.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，原子炉隔離時冷却系配管が有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-15 設置床レベル 29.0 m の機器・配管系（減衰 3.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
⑨	原子炉隔離時冷却系配管（RCIC-7）	配管 本体		1 次	62	380	6.12	—	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

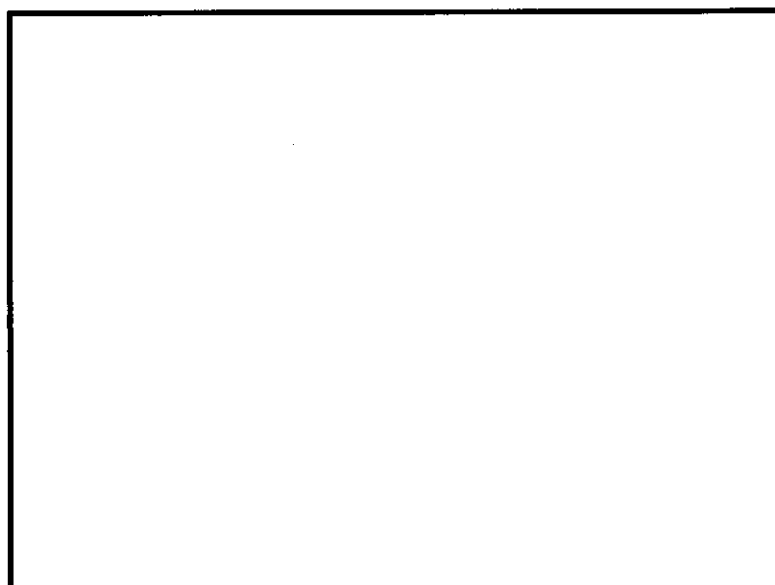
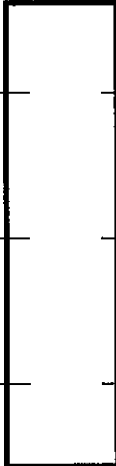


図 4-14 EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 3.0%）

⑩ 設置床レベル 20.3 m の機器・配管系（減衰 0.5%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 20.3 m であり，減衰定数 0.5% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，窒素ガス代替注入系配管，中央制御室待避室空気ポンベユニット配管，第二弁操作室空気ポンベユニット配管及び非常用逃がし安全弁駆動系配管が有る。当該設備に対して，シミュレーション解析結果を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S₀ の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-16 設置床レベル 20.3 m に設置された機器・配管系（減衰 0.5%）への影響評価結果

	設備名称	評価項目	一次固有周期（秒）	応力分類	発生応力（MPa）	許容応力（MPa）	裕度	FRS* ¹ 比率	影響評価
㊸	窒素ガス代替注入系配管（ANI-7）	配管本体		1 次	244	367	1.50	1.59 —	○* ²
㊹	中央制御室待避室空気ポンベユニット配管（MCRS-1）	配管本体		1 次	244	468	1.91	— —	○
㊺	第二弁操作室空気ポンベユニット配管（PCVVVCC-1）	配管本体		1 次	213	468	2.19	— —	○
㊻	非常用逃がし安全弁駆動系配管（ESD-1）	配管本体		1 次	207	431	2.08	1.67 —	○

注記 *1：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。また，上段に 29.0 m の比率，下段に 14.0 m の比率を記載する。

*2：FRS 比率が耐震裕度を上回る結果となったため，詳細検討を行い耐震裕度が確保可能であることを確認した。

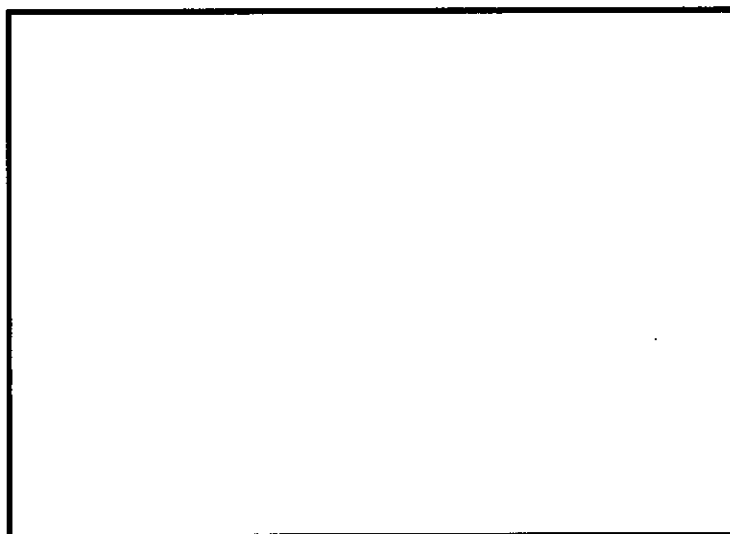



図 4-15 (1/2)  EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 0.5%）

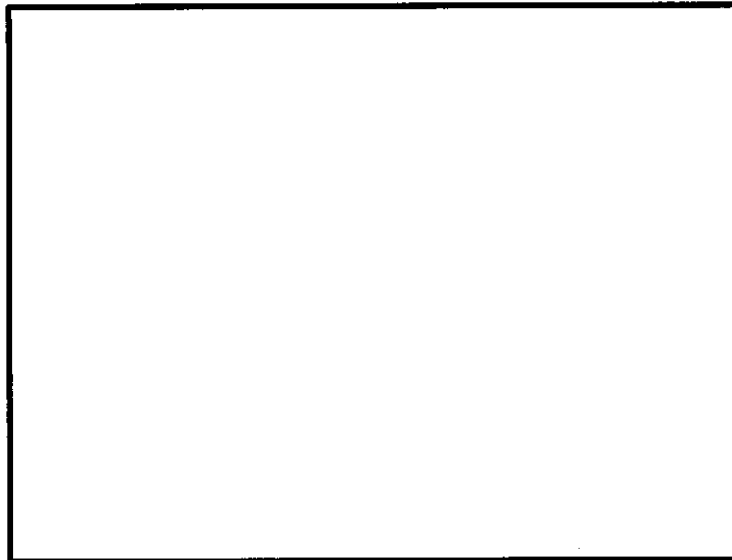


図 4-15 (2/2) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 0.5%)

【窒素ガス代替注入系配管 (ANI-7) の詳細検討】

詳細検討は、配管系の発生応力を地震による応力、地震時以外の応力に分け、更に地震時応力を水平方向地震による応力と鉛直方向地震による応力に分類し、水平方向地震による応力に FRS 比率を考慮することにより行う。FRS 比率を考慮した詳細検討結果を表 4-17 に示す。表 4-17 に示すとおり発生応力は、許容値を満足することを確認した。

表 4-17 FRS 比率を考慮した詳細検討結果

	1 次応力 (MPa)					許容値 (MPa)
	地震以外 の応力	地震による応力			合計応力	
		水平方向	鉛直方向	合計 (SRSS)		
現状評価	16.6	89.7	208.7	227.2	244	367
詳細検討	16.6	142.7 (89.7×1.59)	208.7	252.9	270	367

⑪ 設置床レベル 20.3 m の機器・配管系（減衰 1.5%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 20.3 m であり、減衰定数 1.5% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として、代替循環冷却系配管が有る。当該設備に対して、シミュレーション解析結果を踏まえた影響評価を実施した結果、基準地震動 S₀ の耐震裕度は FRS 比率以上であるため、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-18 設置床レベル 20.3 m に設置された機器・配管系（減衰 1.5%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
①	代替循環冷却系 配管（ARC-2）	配管 本体		1 次	186	365	1.96	— —	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。また、上段に 29.0 m の比率、下段に 14.0 m の比率を記載する。

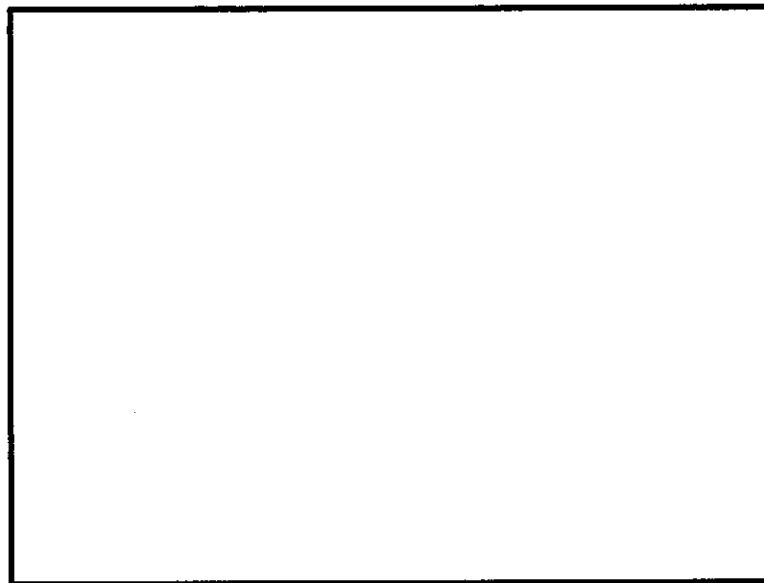


図 4-16 (1/2) EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 1.5%）

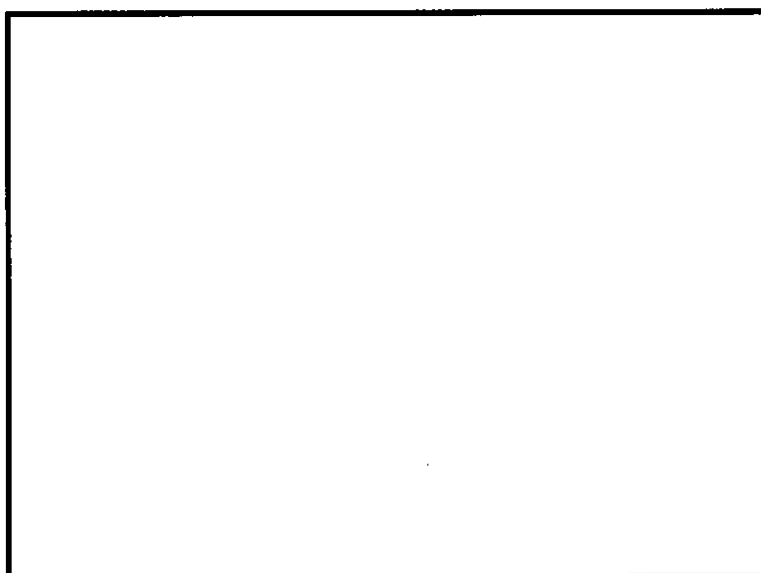


図 4-16 (2/2) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 1.5%)

⑫ 設置床レベル 20.3 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 20.3 m であり、減衰定数 2.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として、不活性ガス系配管、可燃性ガス濃度制御系配管、残留熱除去系配管、給水系配管が有る。当該設備に対して、シミュレーション解析結果を踏まえた影響評価を実施した結果、基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-19 設置床レベル 20.3 m に設置された機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
㉑	不活性ガス系配管 （AC-1, 2, 3, 8）	配管 本体	0.15	1 次	171	335	1.95	— —	○
㉒	可燃性ガス濃度制御系 配管（FC-1）	配管 本体		1 次	65	363	5.58	— —	○
㉓	可燃性ガス濃度制御系 配管（FC-2）	配管 本体		1 次	133	363	2.72	1.07 —	○
㉔	可燃性ガス濃度制御系 配管（FC-3, 4）	配管 本体		1 次	55	363	6.60	— —	○
㉕	可燃性ガス濃度制御系 配管（FC-7, 8）	配管 本体		1 次	61	363	5.95	— —	○
㉖	残留熱除去系配管 （RHR-34, 37, 38, 39, 50）	配管 本体		1 次	166	380	2.28	— —	○
㉗	給水系配管 （FDW-13, 14）	配管 本体		1 次	81	229	2.82	— —	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。また、上段に 29.0 m の比率、下段に 14.0 m の比率を記載する。

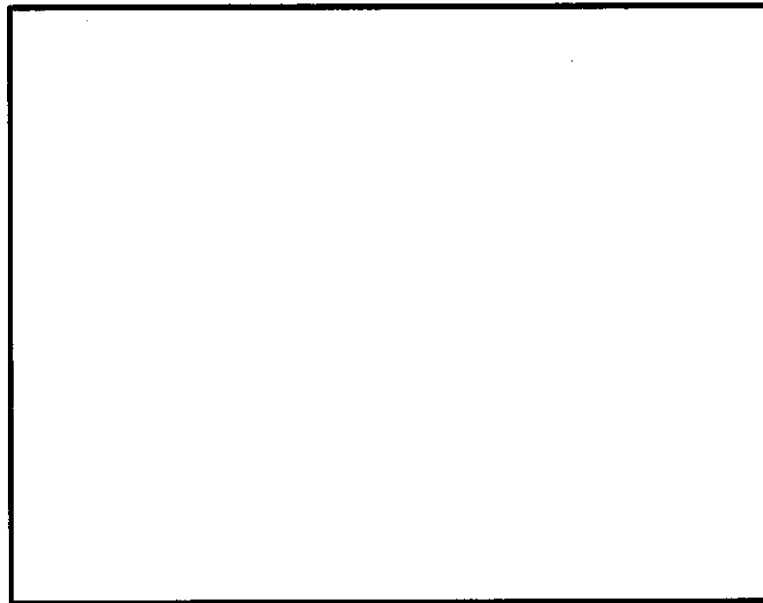


図 4-17 (1/2) EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 2.0%)

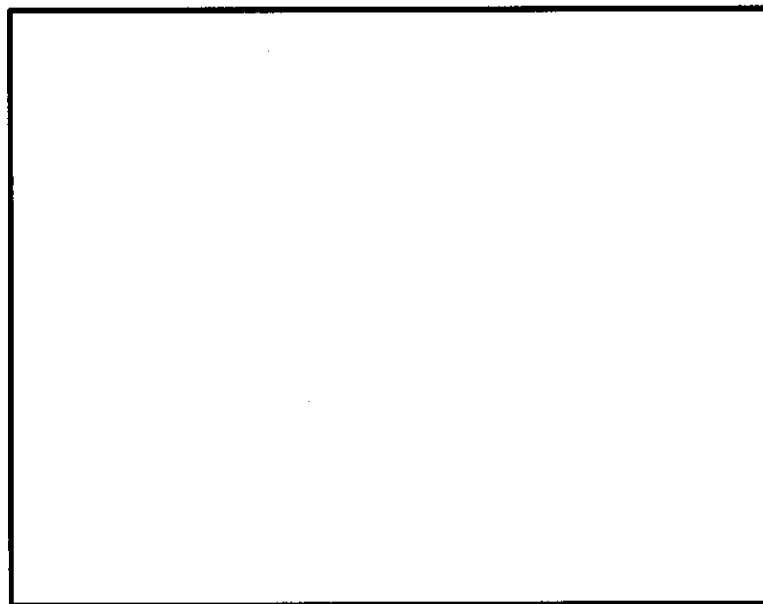
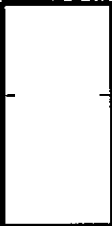


図 4-17 (2/2) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 2.0%)

⑬ 設置床レベル 20.3 m の機器・配管系（減衰 3.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 20.3 m であり，減衰定数 3.0%を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，原子炉冷却材浄化系配管，主蒸気隔離弁漏えい抑制系配管が有る。当該設備に対して，シミュレーション解析結果を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S₀ の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-20 20.3 m に設置された機器・配管系（減衰 3.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
①	原子炉冷却材浄化系配管（CU-R-7）	配管 本体		1 次	108	260	2.40	— —	○
②	主蒸気隔離弁漏えい抑制系配管（MSIV-23, 25, 27, 29）	配管 本体		1 次	114	363	3.18	— —	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。また，上段に 29.0 m の比率，下段に 14.0 m の比率を記載する。

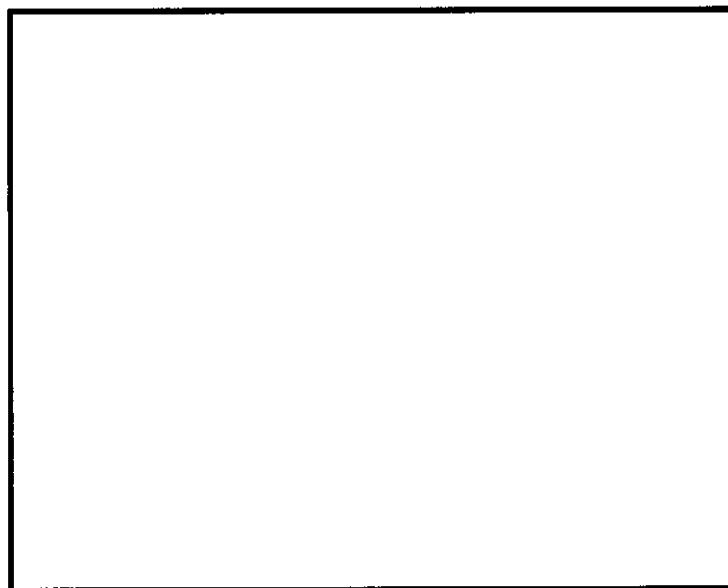



図 4-18（1/2）  EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 3.0%）

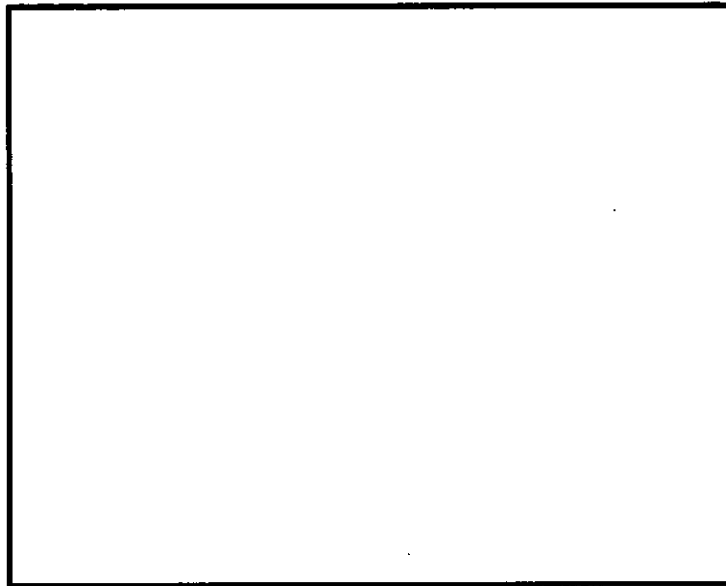


図 4-18 (2/2) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 3.0%)

⑭ 設置床レベル 14.0 m の機器・配管系（減衰 0.5%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 14.0 m であり，減衰定数 0.5% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として不活性ガス系配管が有る。当該設備に対して，シミュレーション解析結果を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-21 設置床レベル 14.0 m に設置された機器・配管系（減衰 0.5%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
①	不活性ガス系配管 （AC-6, 7）	配管 本体		1 次	59	335	5.67	1.12	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

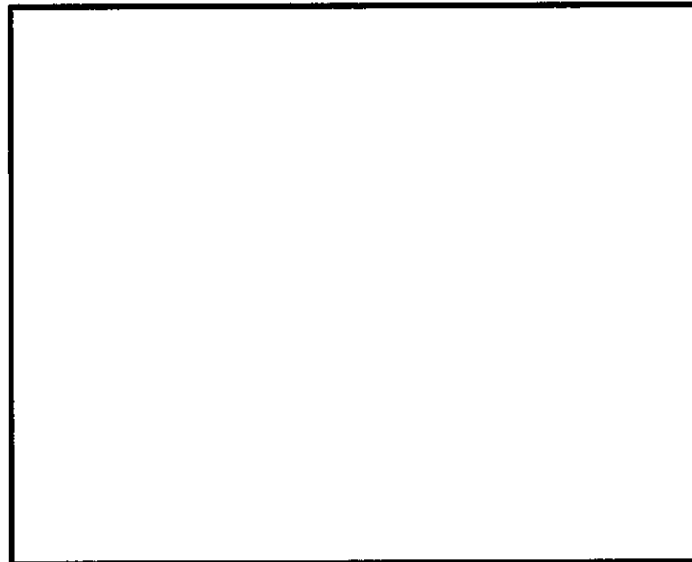


図 4-19 EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 0.5%）

⑮ 設置床レベル 14.0 m の機器・配管系（減衰 1.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 14.0 m であり，減衰定数 1.0%を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，残留熱除去系配管が有る。当該設備に対して，シミュレーション解析結果を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S₀ の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-22 設置床レベル 14.0 m に設置された機器・配管系（減衰 1.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
①	残留熱除去系配管 （RHR-66）	配管 本体		1 次	109	363	3.33	1.04	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

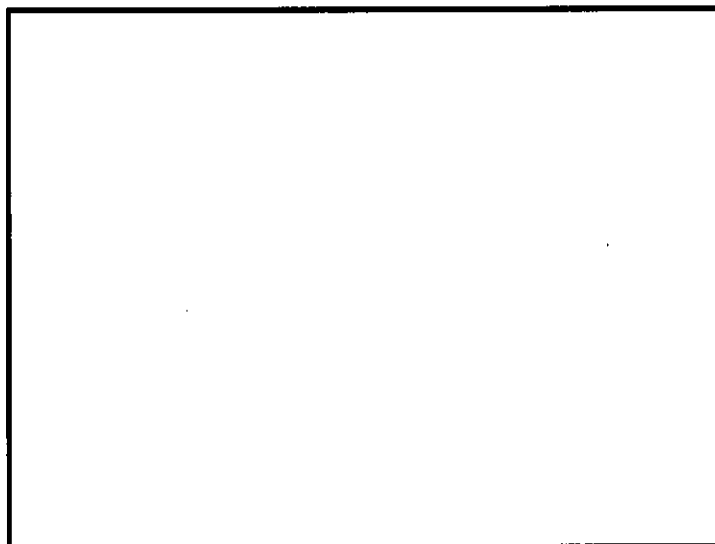


図 4-20 EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 1.0%）

⑩ 設置床レベル EL. 14.0 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 14.0 m であり、減衰定数 2.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として、高圧炉心スプレイ系配管、低圧炉心スプレイ系配管、残留熱除去系配管がある。当該設備に対して、シミュレーション解析結果を踏まえた影響評価を実施した結果、基準地震動 S_0 の耐震裕度は FRS 比率以上であるため、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-23 設置床レベル 14.0 m に設置された機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価部位	一次固有周期 (秒)	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度	FRS* 比率	影響評価
④	高圧炉心スプレイ系配管 (HPCS-4, 5)	配管本体		1 次	194	364	1.87	—	○
⑤	低圧炉心スプレイ系配管 (LPCS-2, 3)	配管本体		1 次	150	396	2.64	—	○
⑥	残留熱除去系配管 (RHR-48)	配管本体		1 次	143	396	2.76	—	○
⑦	残留熱除去系配管 (RHR-70)	配管本体		1 次	217	260	1.19	—	○

注記 * : 観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

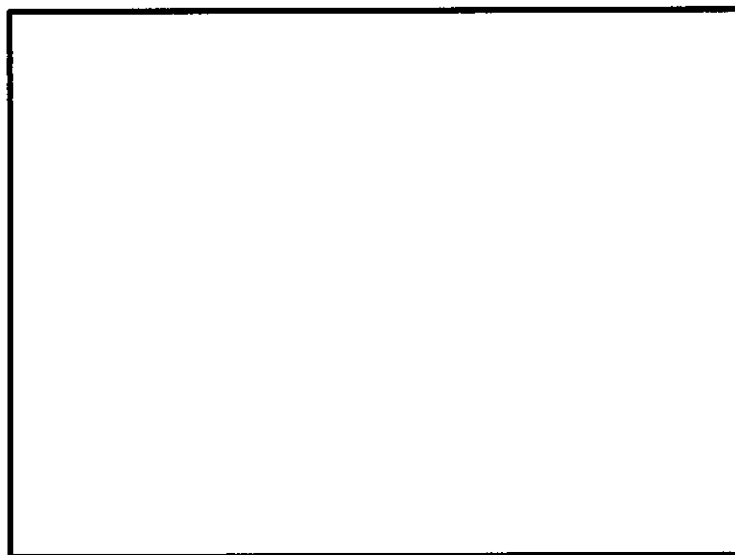


図 4-21 EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 2.0%）

⑰ 設置床レベル EL. 14.0 m の機器・配管系（減衰 3.0%）への影響検討結果

設置床レベルが EL. 14.0 m であり、減衰定数 3.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として、残留熱除去系配管が有る。当該設備に対して、シミュレーション解析結果を踏まえた影響評価を実施した結果、基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-24 設置床レベル 14.0 m に設置された機器・配管系（減衰 3.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
㊦	残留熱除去系配管 （RHR-5, 21）	配管 本体		1 次	156	335	2.14	—	○
㊧	残留熱除去系配管 （RHR-8, 30, 99, 100）	配管 本体		1 次	181	380	2.09	—	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

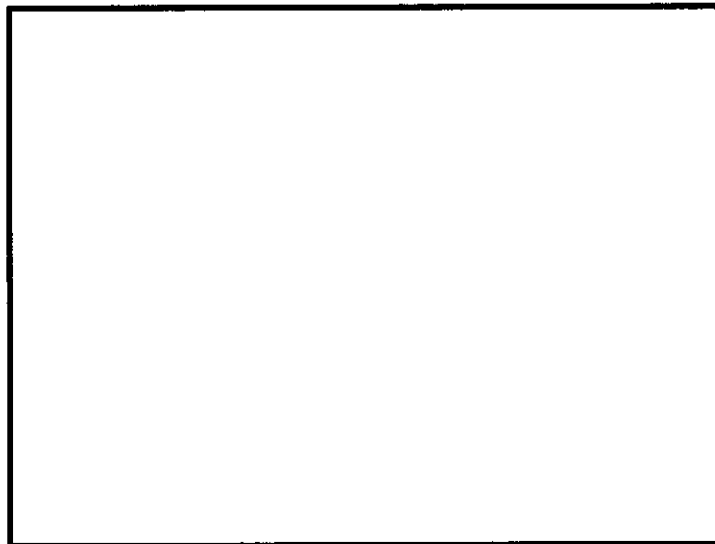


図 4-22 EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 3.0%）

【参考】 EL. 38.8 m 及び EL. 34.7 m に設置されている設備の EL. 46.5 m の FRS 比率を用いた影響検討

地震計が設置されていない標高に設置された設備の設備影響評価においては、評価影響対象設備の設置された上下階の FRS 比率を確認しているが、EL. 38.8 m 及び EL. 34.7 m に設置されている設備の評価に当たっては、東西のオペフロ面が外側にはらみ出すという特異な影響が生じていることから EL. 46.5 m の FRS 比率を適用していない。

ここでは、EL. 38.8 m 及び EL. 34.7 m に設置された設備について、仮に EL. 46.5 m の FRS 比率を適用した場合の影響について示す。

- ① 設置床レベル EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m の機器・配管系（減衰 0.5%）において EL. 46.5 m の FRS 比率を適用した場合の影響検討結果

設置床レベルが EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m であり、減衰定数 0.5% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として、代替燃料プール冷却系配管が有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果、基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-25 設置床レベル EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m の機器・配管系（減衰 0.5%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
④	代替燃料プール冷却系（AFPC-3）	配管 本体		1 次	77	365	4.74	2.42	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

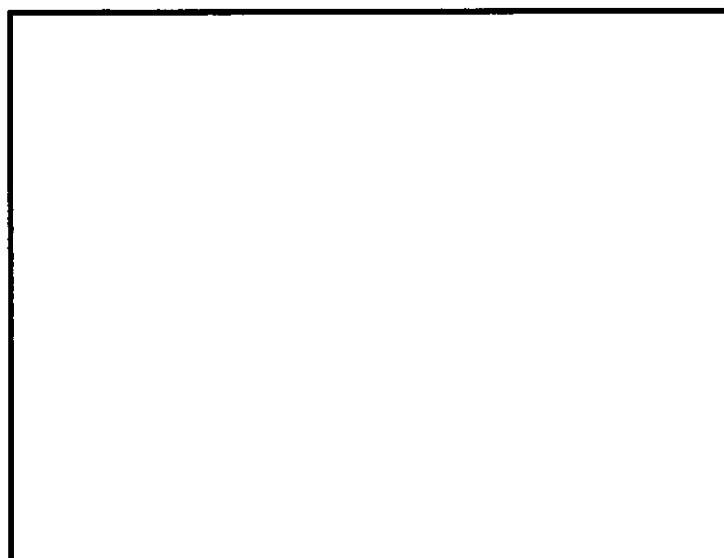



図 4-23  EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 0.5%）

- ② 設置床レベル EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m の機器・配管系（減衰 1.0%）において EL. 46.5 m の FRS 比率を適用した場合の影響検討結果

設置床レベルが EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m であり，減衰定数 1.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，使用済燃料貯蔵ラック及び制御棒貯蔵ラックが有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-26 設置床レベル EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m の機器・配管系（減衰 1.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価部位	一次固有周期 (秒)	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	耐震裕度	FRS ^{*1} 比率	影響評価
④	使用済燃料貯蔵ラック (70 体)	取付ボルト		1 次	146	153	1.04	2.09	○ ^{*2}
⑤	制御棒貯蔵ラック	基礎ボルト		1 次	158	171	1.08	—	○

注記 *1：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

*2：FRS 比率が耐震裕度を上回る結果となったため，詳細検討を行い耐震裕度が確保可能であることを確認した。

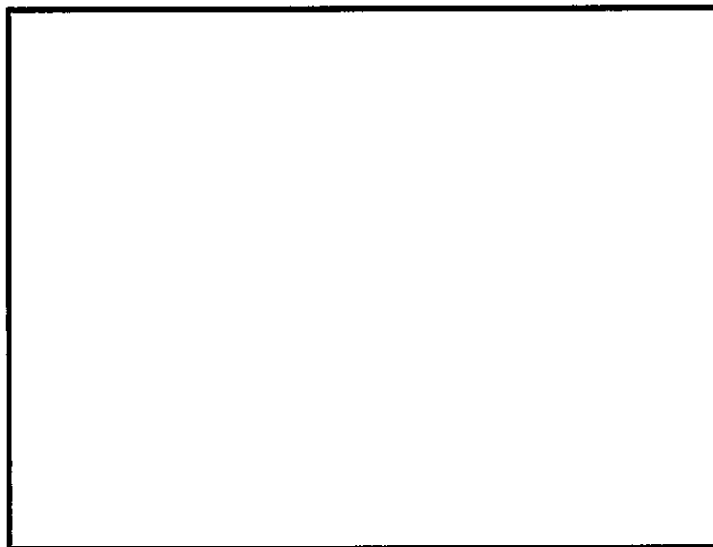


図 4-24 EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 1.0%）

【使用済燃料貯蔵ラックの詳細検討】

使用済燃料貯蔵ラックは、矩形形状であり NS 方向及び EW 方向により 1 次固有周期が異なることを踏まえて、NS 方向、EW 方向ごとの固有周期を踏まえて算定した使用済燃料貯蔵ラックの耐震裕度と、NS 方向及び EW 方向の各方向における床応答スペクトルを用いて求めた FRS 比率とを比較することにより影響を確認した。

NS 方向は、一次固有周期位置においてシミュレーション解析結果の震度が観測記録の震度を上回っており、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。また、EW 方向は、一次固有周期位置における観測記録とシミュレーション解析結果との FRS 比率が 1.44 であったが、EW 方向の耐震裕度 2.28 に収まっていることから、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-27 使用済燃料貯蔵ラックの影響評価結果

	設備名称	評価部位	方向	一次固有周期(秒)	応力分類	発生応力(MPa)	許容応力(MPa)	耐震裕度	FRS*比率	影響評価
㊦	使用済燃料貯蔵ラック (70 体)	取付ボルト	NS 方向		1 次	146	153	1.04	—	○
㊧			EW 方向		1 次	67	153	2.28	1.44	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

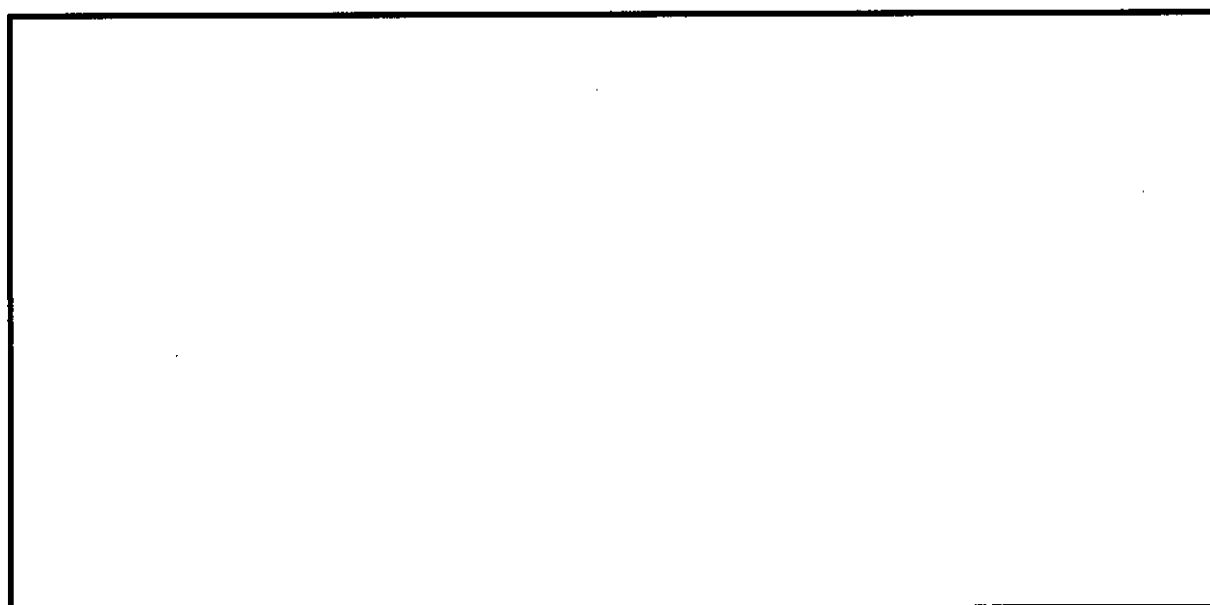


図 4-25 EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較 (減衰 1.0%)

- ③ 設置床レベル EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m の機器・配管系（減衰 2.0%）において EL. 46.5 m の FRS 比率を適用した場合の影響検討結果

設置床レベルが EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m であり，減衰定数 2.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，使用済燃料貯蔵ラック及び制御棒貯蔵ラックが有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-28 設置床レベル EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
③	非常用ガス処理系配管（AC-SGTS）	配管 本体		1 次	101	335	3.31	—	○
④	低圧代替注水系配管（ALPI-003R3F）	配管 本体		1 次	97	366	3.77	1.07	○
⑤	低圧代替注水系配管（ALPI-001DG）	配管 本体		1 次	116	366	3.15	—	○
⑥	格納容器下部注水系配管（FP-R-1）	配管 本体		1 次	183	366	2.00	1.26	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

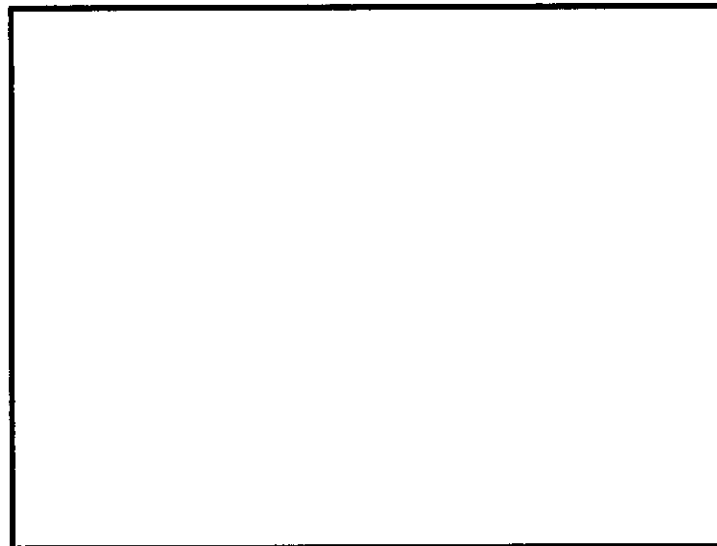


図 4-26 EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 2.0%）

- ④ 設置床レベル EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m の機器・配管系（減衰 3.0%）において EL. 46.5 m の FRS 比率を適用した場合の影響検討結果

設置床レベルが EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m であり，減衰定数 3.0% を適用して耐震評価を実施する機器・配管系として，使用済燃料貯蔵ラック及び制御棒貯蔵ラックが有る。当該設備に対して影響評価結果を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-29 設置床レベル EL. 38.8 m 又は EL. 34.7 m の機器・配管系（減衰 3.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
④	格納容器圧力逃がし 装置配管 （PV-002R5F）	配管 本体		1 次	78	363	4.65	—	○
⑤	格納容器圧力逃がし 装置配管 （PV-008YD）	配管 本体		1 次	96	363	3.78	—	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。

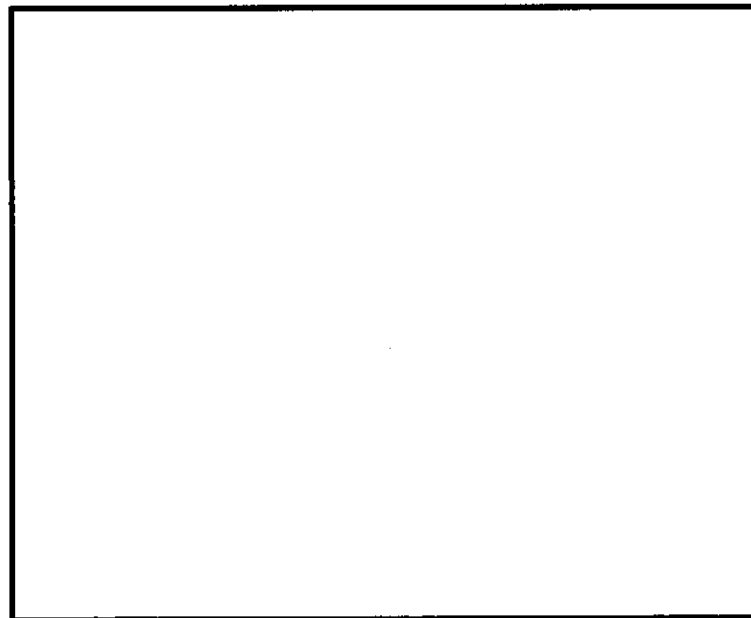


図 4-27 EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 3.0%）


【参考 2】配管系における追加検討

配管系に対して、高次モードの影響を確認するため、1 次固有周期よりも剛側の領域において、最大となる FRS 比率と耐震裕度とを比較することにより影響を確認した。

① 設置床レベル 46.5 m に設置された配管系（減衰 0.5%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 46.5 m であり、減衰定数 0.5% を適用して耐震評価を実施する配管系として、格納容器圧力逃がし装置配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果、基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-30 設置床レベル 46.5 m の機器・配管系（減衰 0.5%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
②	格納容器圧力逃 がし装置配管	配管 本体		1 次	92	363	3.94	2.78	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

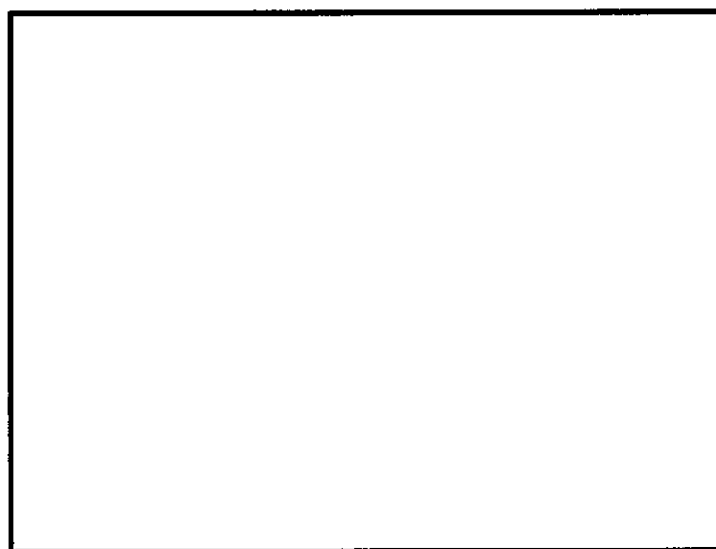




図 4-28  EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 0.5%）

② 設置床レベル 46.5 m に設置された配管系（減衰 2.0%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 46.5 m であり，減衰定数 2.0% を適用して耐震評価を実施する配管系として，非常ガス再循環系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-31 設置床レベル 46.5 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
②	非常ガス再循環 系配管 （FRVS-6）	配管本体		1 次	25	343	13.72	1.53	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

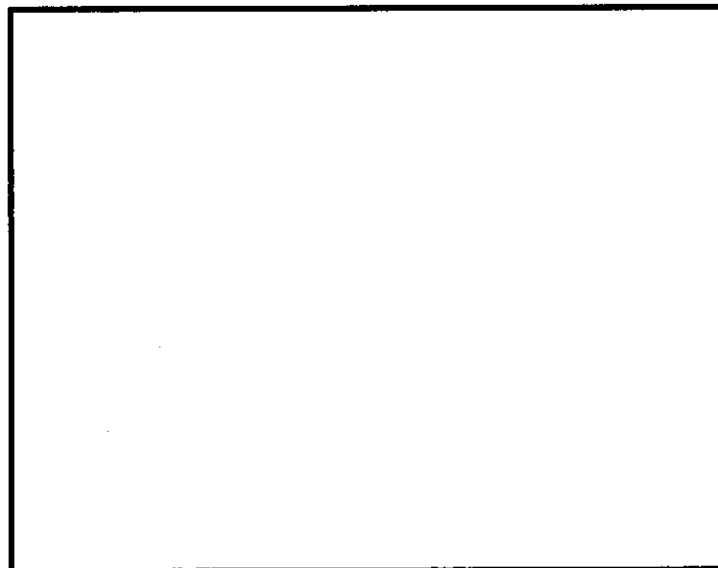



図 4-29  EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 2.0%）

③ 設置床レベル 38.8 m に設置された配管系（減衰 2.0%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 38.8 m であり，減衰定数 2.0% を適用して耐震評価を実施する配管系として，非常用ガス処理系配管，低圧代替注水系配管及び格納容器下部注水系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-32 設置床レベル 38.8 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
㊸	非常用ガス処理系配管（AC-SGTS）	配管 本体		1 次	101	335	3.31	1.53 1.24	○
㊹	低圧代替注水系配管（ALPI-003R3F）	配管 本体		1 次	97	366	3.77	1.53 1.07	○
㊺	低圧代替注水系配管（ALPI-001DG）	配管 本体		1 次	116	366	3.15	1.53 1.07	○
㊻	格納容器下部注水系配管（FP-R-1）	配管 本体		1 次	183	366	2.00	1.53 1.07	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。また，上段に 46.5 m の比率，下段に 29.0 m の比率を記載する。

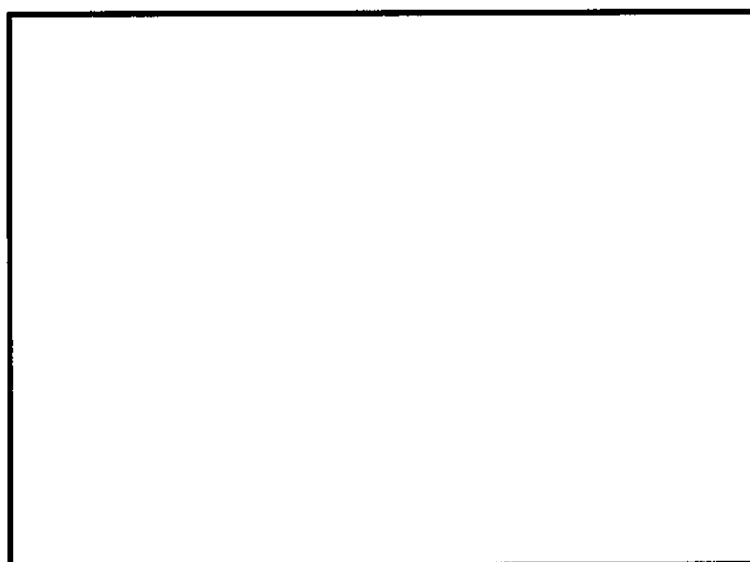


図 4-30 (1/2) EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 2.0%）

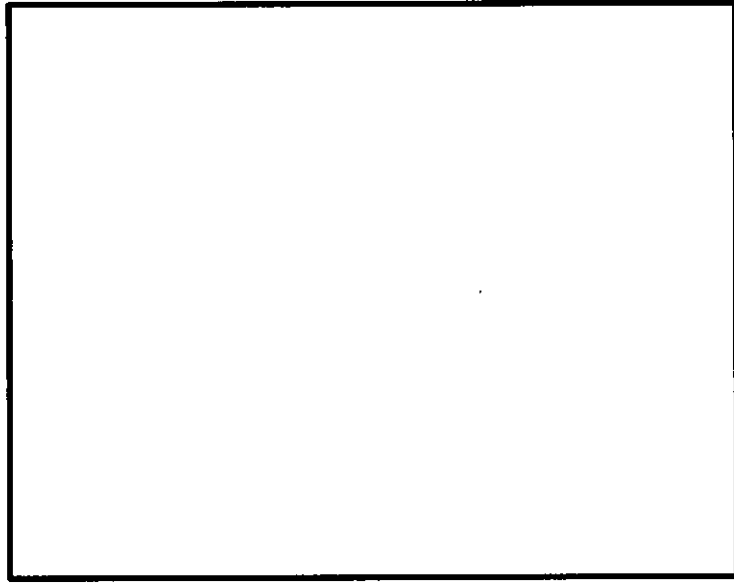


図 4-30 (2/2) EL. 29. 0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 2.0%)

④ 設置床レベル 38.8 m に設置された配管系（減衰 3.0%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 38.8 m であり，減衰定数 3.0%を適用して耐震評価を実施する配管系として，格納容器圧力逃がし装置配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-33 設置床レベル 38.8 m の機器・配管系（減衰 3.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
④	格納容器圧力逃 がし装置配管 （PV-002R5F）	配管 本体		1 次	78	363	4.65	1.34 1.12	○
⑤	格納容器圧力逃 がし装置配管 （PV-008YD）	配管 本体		1 次	96	363	3.78	1.34 1.12	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。また，上段に 46.5 m の比率，下段に 29.0 m の比率を記載する。

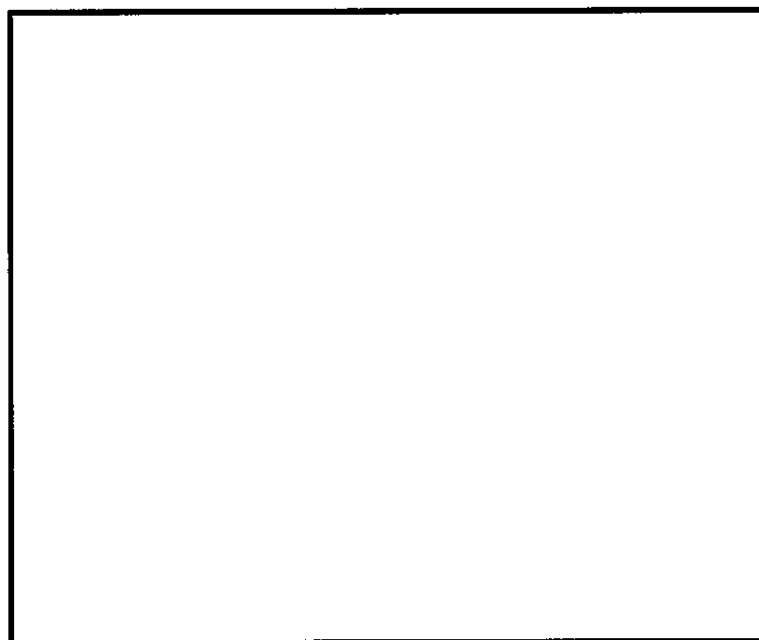


図 4-31 (1/2) EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 3.0%）

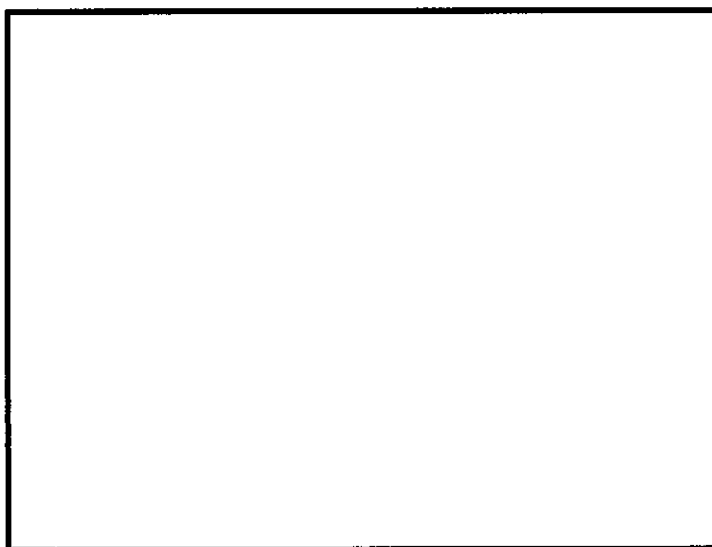



図 4-31 (2/2) EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 3.0%)

⑤ 設置床レベル 34.7 m に設置された配管系（減衰 0.5%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 34.7 m であり，減衰定数 0.5%を適用して耐震評価を実施する配管系として，代替燃料プール冷却系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-34 設置床レベル 34.7 m の機器・配管系（減衰 0.5%）への影響評価結果

	設備名称	評価部位	一次固有周期 (秒)	応力分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	耐震裕度	FRS* 比率	影響評価
④	代替燃料プール冷却系配管 (AFPC-3)	配管本体		1 次	77	365	4.74	2.78 2.15	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。また，上段に 46.5 m の比率，下段に 29.0 m の比率を記載する。

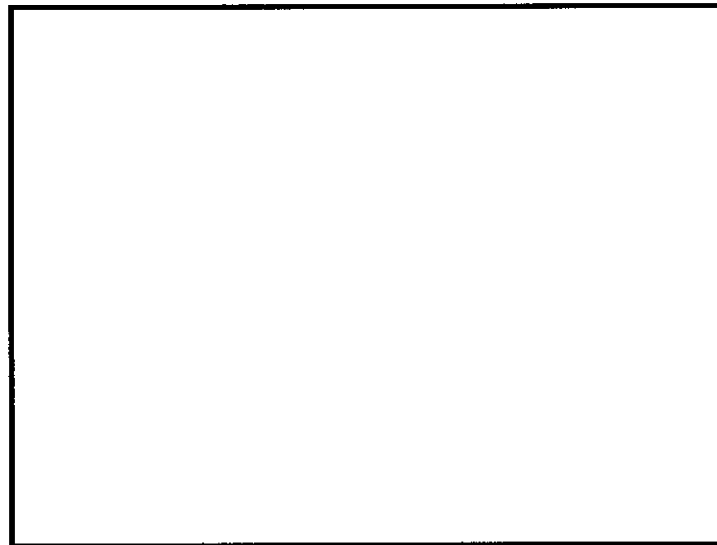



図 4-32 (1/2)  EL. 46.5 m 床応答スペクトル比較（減衰 0.5%）

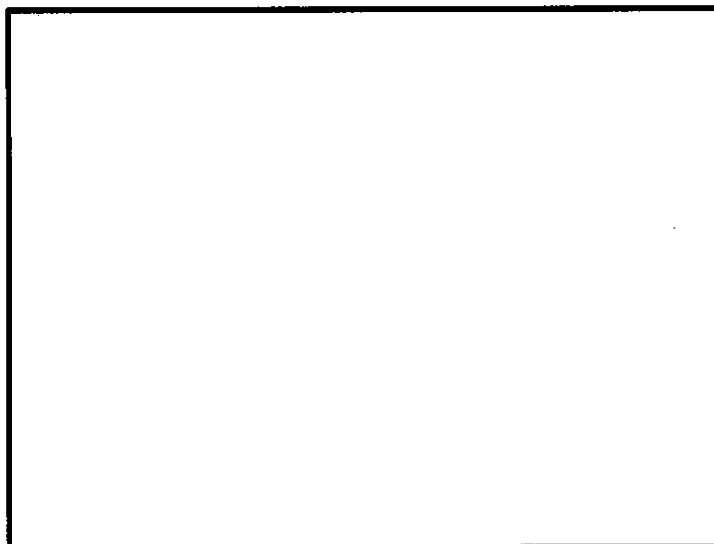


図 4-32 (2/2) EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 0.5%)

⑥ 設置床レベル 29.0 m に設置された配管系（減衰 2.0%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 29.0 m であり，減衰定数 2.0% を適用して耐震評価を実施する配管系として，原子炉隔離時冷却系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_0 の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-35 設置床レベル 29.0 m の機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
①	<div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 40px; margin-bottom: 5px;"></div> 29)	配管 本体	<div style="border: 1px solid black; width: 50px; height: 20px; margin-bottom: 5px;"></div>	1 次	146	363	2.48	1.07	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

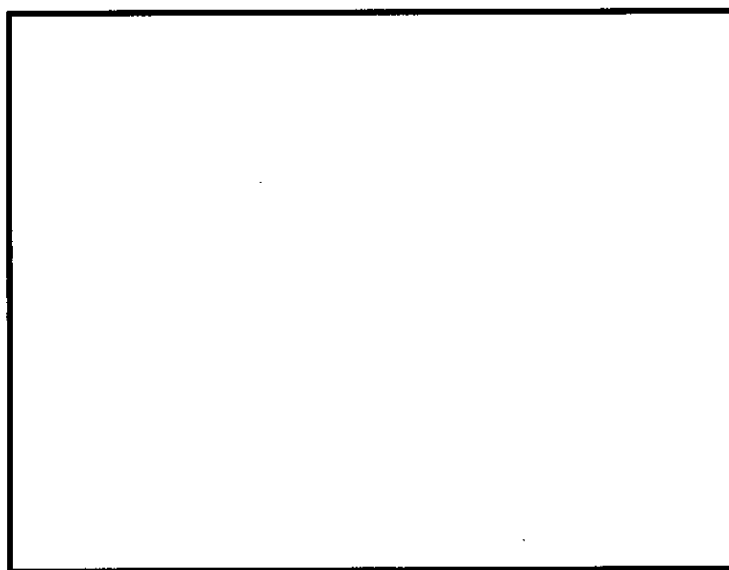


図 4-33 EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 2.0%）

⑦ 設置床レベル 29.0 m に設置された配管系（減衰 3.0%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 29.0 m であり，減衰定数 3.0% を適用して耐震評価を実施する配管系として，原子炉隔離時冷却系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-36 設置床レベル 29.0 m の機器・配管系（減衰 3.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	耐震 裕度	FRS* 比率	影響 評価
⑦		配管 本体		1 次	62	380	6.12	1.05	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果を上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

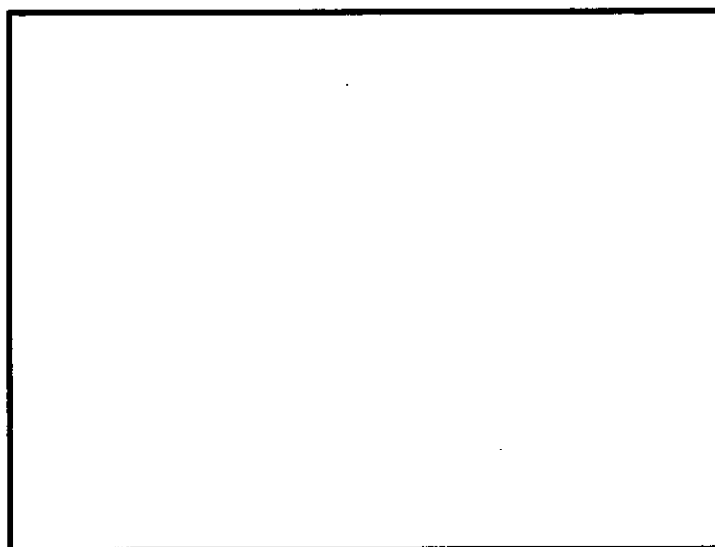


図 4-34 EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 3.0%）

⑧ 設置床レベル 20.3 m に設置された配管系（減衰 0.5%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 20.3 m であり，減衰定数 0.5% を適用して耐震評価を実施する配管系として，窒素ガス代替注入系配管，中央制御室待避室空気ポンベユニット配管，第二弁操作室空気ポンベユニット配管及び非常用逃がし安全弁駆動系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-37 設置床レベル 20.3 m に設置された機器・配管系（減衰 0.5%）への影響評価結果

	設備名称	評価項目	一次固有周期（秒）	応力分類	発生応力（MPa）	許容応力（MPa）	裕度	FRS* ¹ 比率	影響評価
㊸	窒素ガス代替注入系配管（ANI-7）	配管本体		1 次	244	367	1.50	2.15 1.76	○* ²
㊹		配管本体		1 次	244	468	1.91	2.15 1.76	○* ²
㊺	第二弁操作室空気ポンベユニット配管（PCVVCC-1）	配管本体		1 次	213	468	2.19	2.15 1.76	○
㊻	非常用逃がし安全弁駆動系配管（ESD-1）	配管本体		1 次	207	431	2.08	2.15 1.76	○* ²

注記 *1：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。また，上段に 29.0 m の比率，下段に 14.0 m の比率を記載する。

*2：FRS 比率が耐震裕度を上回る結果となったため，詳細検討を行い耐震裕度が確保可能であることを確認した。

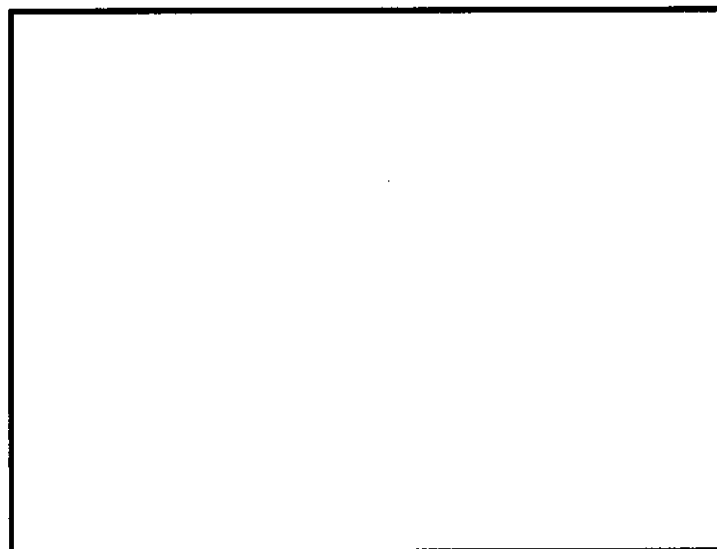



図 4-35 (1/2)  EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 0.5%）

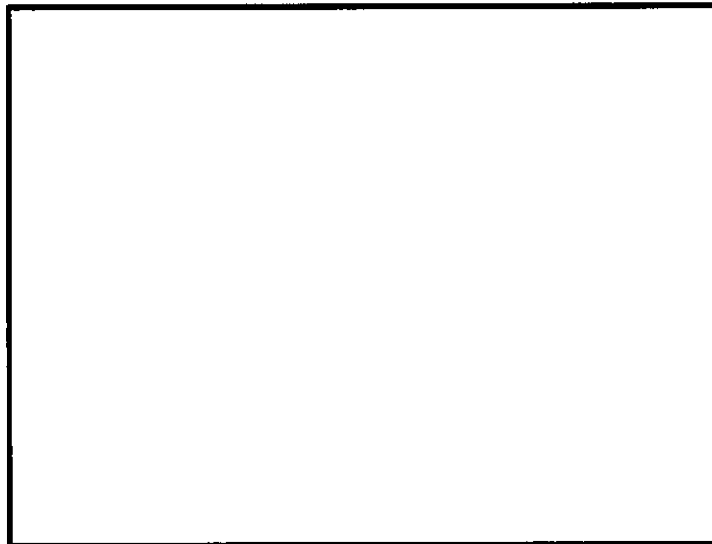


図 4-35 (2/2) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 0.5%)

【窒素ガス代替注入系配管 (ANI-7) の詳細検討】

詳細検討は、配管系の発生応力を地震による応力、地震時以外の応力に分け、更に地震時応力を水平方向地震による応力と鉛直方向地震による応力に分類し、水平方向地震による応力に FRS 比率を考慮することにより行う。FRS 比率を考慮した詳細検討結果を表 4-38 に示す。表 4-38 に示すとおり発生応力は、許容値を満足することを確認した。

表 4-38 FRS 比率を考慮した詳細検討結果

	1 次応力 (MPa)					許容値 (MPa)
	地震以外 の応力	地震による応力			合計応力	
		水平方向	鉛直方向	合計 (SRSS)		
現状評価	16.6	89.7	208.7	227.2	244	367
詳細検討	16.6	192.9 (89.7×2.15)	208.7	284.2	301	367

【中央制御室待避室空気ポンプユニット配管（MCRS-1）】

詳細検討は、配管系の発生応力を地震による応力、地震時以外の応力に分け、更に地震時応力を水平方向地震による応力と鉛直方向地震による応力に分類し、水平方向地震による応力に FRS 比率を考慮することにより行う。FRS 比率を考慮した詳細検討結果を表 4-39 に示す。表 4-39 に示すとおり発生応力は、許容値を満足することを確認した。

表 4-39 FRS 比率を考慮した詳細検討結果

	1 次応力 (MPa)					許容値 (MPa)
	地震以外 の応力	地震による応力			合計応力	
		水平方向	鉛直方向	合計 (SRSS)		
現状評価	48.4	193.9	17.7	194.8	244	468
詳細検討	48.4	416.9 (193.9×2.15)	17.7	417.3	466	468

【非常用逃がし安全弁駆動系配管（ESD-1）】

詳細検討は、配管系の発生応力を地震による応力、地震時以外の応力に分け、更に地震時応力を水平方向地震による応力と鉛直方向地震による応力に分類し、水平方向地震による応力に FRS 比率を考慮することにより行う。FRS 比率を考慮した詳細検討結果を表 4-40 に示す。表 4-40 に示すとおり発生応力は、許容値を満足することを確認した。

表 4-40 FRS 比率を考慮した詳細検討結果

	1 次応力 (MPa)					許容値 (MPa)
	地震以外 の応力	地震による応力			合計応力	
		水平方向	鉛直方向	合計 (絶対和)		
現状評価	87.3	48.9	70.6	119.5	207	431
詳細検討	87.3	105.2 (48.9×2.15)	70.6	175.8	264	431

⑨ 設置床レベル 20.3 m に設置された配管系（減衰 1.5%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 20.3 m であり，減衰定数 1.5% を適用して耐震評価を実施する配管系として，代替循環冷却系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-41 設置床レベル 20.3 m に設置された機器・配管系（減衰 1.5%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* ¹ 比率	影響 評価
⑧	代替循環冷却系 配管（ARC-2）	配管 本体		1 次	186	365	1.96	1.47 1.38	○

注記 *1：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。また，上段に 29.0 m の比率，下段に 14.0 m の比率を記載する。

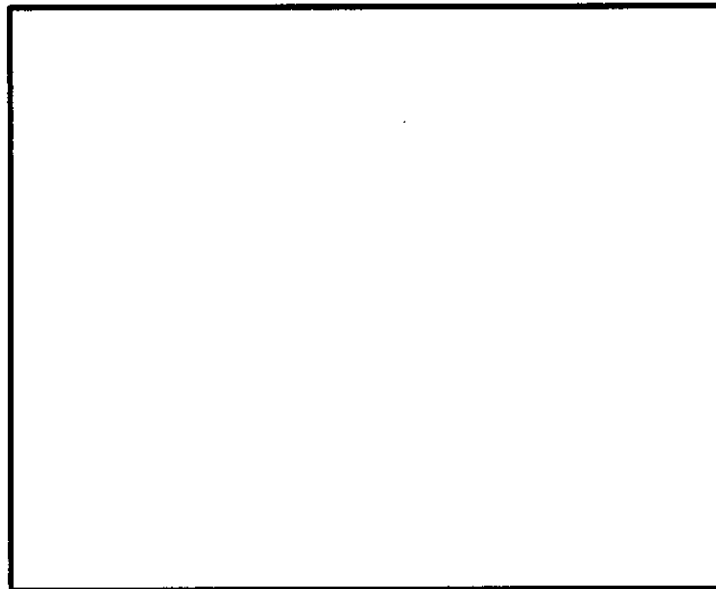


図 4-36 (1/2) EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 1.5%）

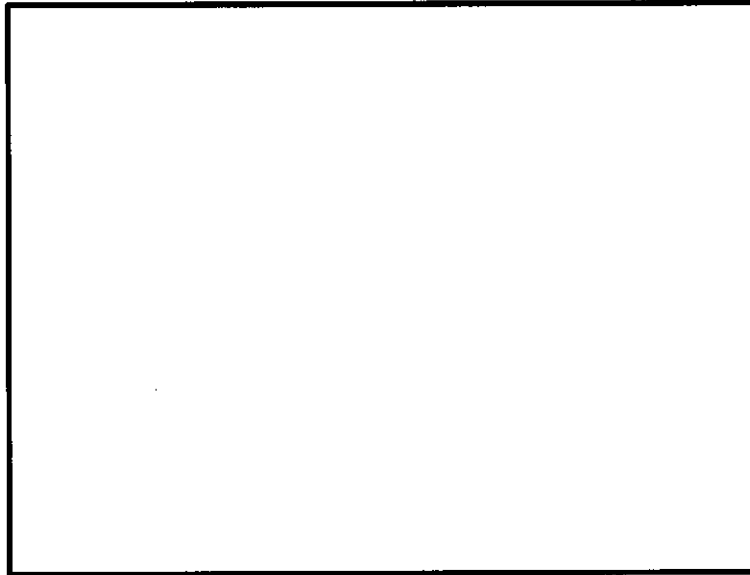


図 4-36 (2/2) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 1.5%)

⑩ 設置床レベル 20.3 m に設置された配管系（減衰 2.0%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 20.3 m であり，減衰定数 2.0%を適用して耐震評価を実施する配管系として，不活性ガス系配管，可燃性ガス濃度制御系配管，残留熱除去系配管，給水系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-42 設置床レベル 20.3 m に設置された機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
㉑	不 活 性 ガ ス 系 配 管 （AC-1, 2, 3, 8）	配管 本体		1 次	171	335	1.95	1.07 1.24	○
㉒	可燃性ガス濃度制御系 配管（FC-1）	配管 本体		1 次	65	363	5.58	1.07 1.24	○
㉓	可燃性ガス濃度制御系 配管（FC-2）	配管 本体		1 次	133	363	2.72	1.07 —	○
㉔	可燃性ガス濃度制御系 配管（FC-3, 4）	配管 本体		1 次	55	363	6.60	1.07 1.24	○
㉕	可燃性ガス濃度制御系 配管（FC-7, 8）	配管 本体		1 次	61	363	5.95	1.07 1.24	○
㉖	残留熱除去系配管 （RHR-34, 37, 38, 39, 50）	配管 本体		1 次	166	380	2.28	1.07 1.24	○
㉗	給水系配管 （FDW-13, 14）	配管 本体		1 次	81	229	2.82	1.07 1.24	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「—」と記載する。また，上段に 29.0 m の比率，下段に 14.0 m の比率を記載する。

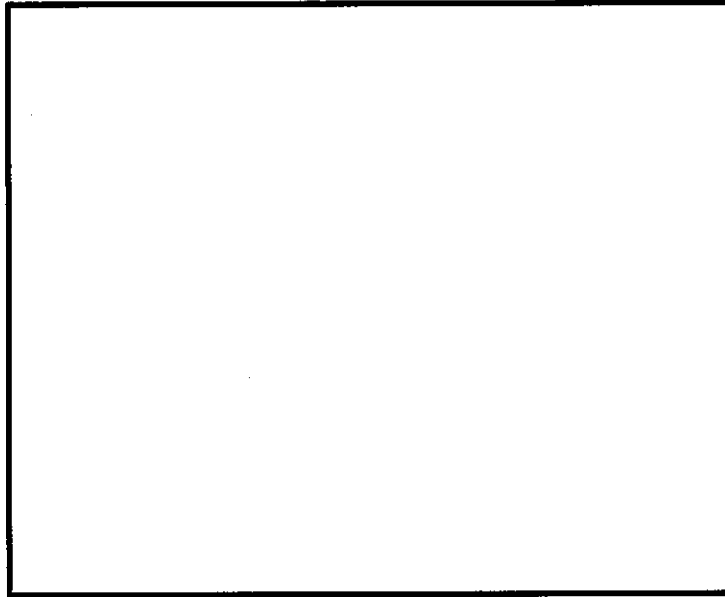


図 4-37 (1/2) EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 2.0%)

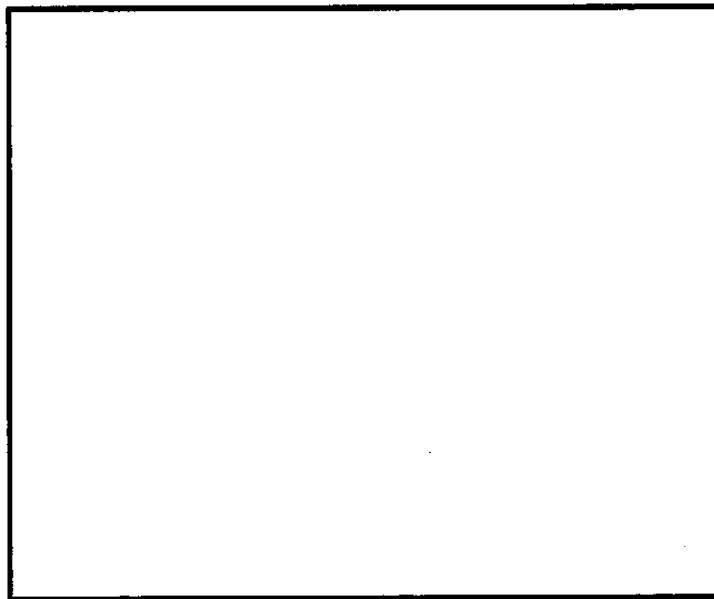


図 4-37 (2/2) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 2.0%)

⑪ 設置床レベル 20.3 m に設置された配管系（減衰 3.0%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 20.3 m であり、減衰定数 3.0% を適用して耐震評価を実施する配管系として、原子炉冷却材浄化系配管、主蒸気隔離弁漏えい抑制系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果、基準地震動 S_o の耐震裕度は FRS 比率以上であるため、観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-43 20.3 m に設置された機器・配管系（減衰 3.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
④	原子炉冷却材浄化系配管（CU-R-7）	配管 本体		1 次	108	260	2.40	1.05 1.06	○
⑤	主蒸気隔離弁漏えい抑制系配管（MSIV-23, 25, 27, 29）	配管 本体		1 次	114	363	3.18	1.05 1.06	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は、その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。また、上段に 29.0 m の比率、下段に 14.0 m の比率を記載する。

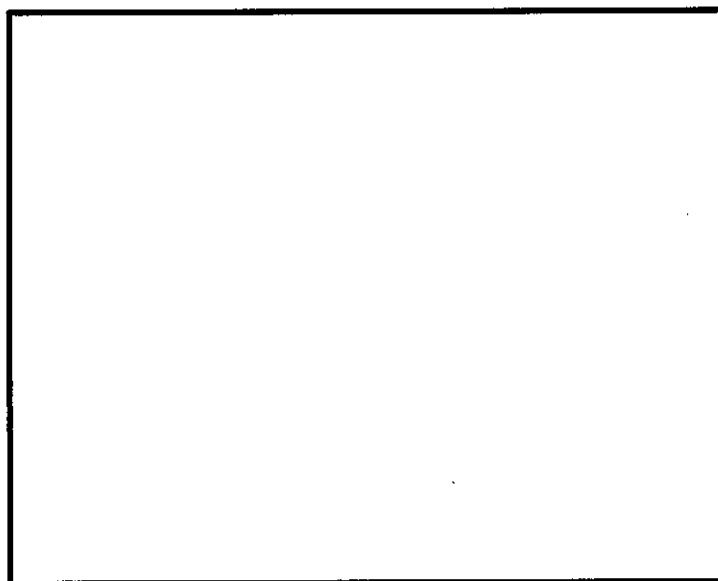


図 4-38 (1/2) EL. 29.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 3.0%）

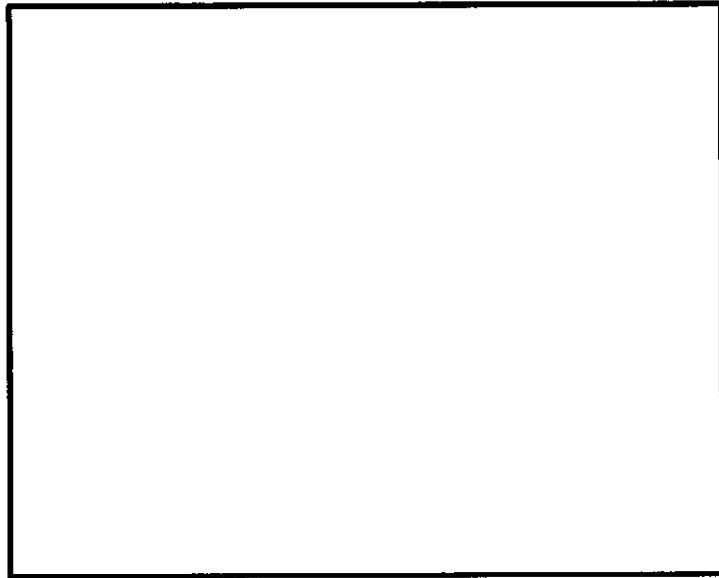


図 4-38 (2/2) EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 3.0%)

⑫ 設置床レベル 14.0 m に設置された配管系 (減衰 0.5%) に対する追加検討

設置床レベルが EL. 14.0 m であり, 減衰定数 0.5% を適用して耐震評価を実施する配管系として, 不活性ガス系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果, 基準地震動 S_0 の耐震裕度は FRS 比率以上であるため, 観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-44 設置床レベル 14.0 m に設置された機器・配管系 (減衰 0.5%) への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期 (秒)	応力 分類	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
⑧	不活性ガス系配管 (AC-6, 7)	配管 本体		1 次	59	335	5.67	1.76	○

注記 * : 観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は, その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「一」と記載する。

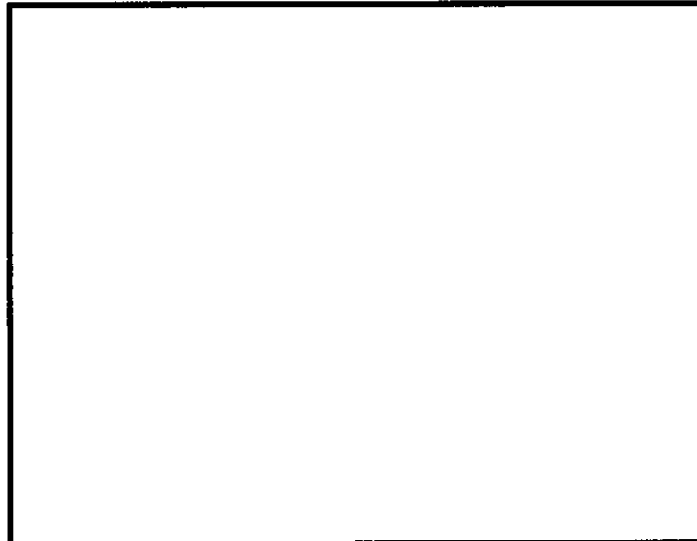


図 4-39 EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較 (減衰 0.5%)

⑬ 設置床レベル 14.0 m に設置された配管系（減衰 1.0%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 14.0 m であり，減衰定数 1.0%を適用して耐震評価を実施する配管系として，残留熱除去系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-45 設置床レベル 14.0 m に設置された機器・配管系（減衰 1.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
④	残留熱除去系配管 （RHR66）	配管 本体		1 次	109	363	3.33	1.52	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

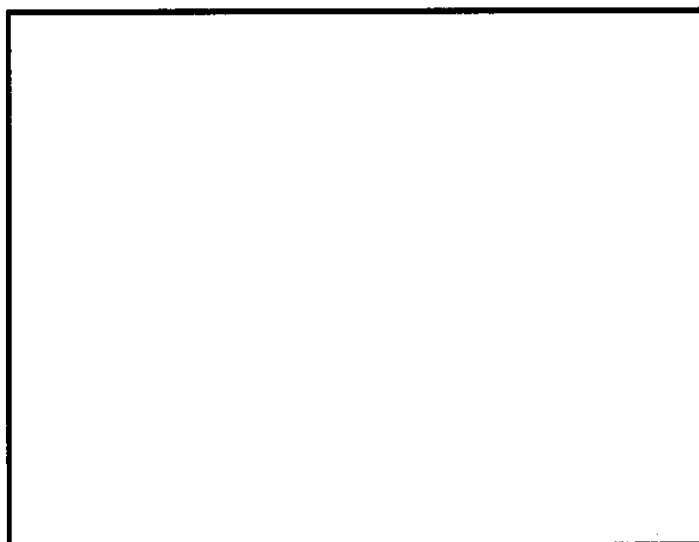


図 4-40 〇〇〇〇 EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 1.0%）

⑭ 設置床レベル 14.0 m に設置された配管系（減衰 2.0%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 14.0 m であり，減衰定数 2.0% を適用して耐震評価を実施する配管系として，高圧炉心スプレイ系配管，低圧炉心スプレイ系配管，残留熱除去系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_s の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-46 設置床レベル 14.0 m に設置された機器・配管系（減衰 2.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
㊸	高圧炉心スプレイ系 配管（HPCS-， 5）	配管 本体		1 次	194	364	1.87	1.24	○
㊹	低圧炉心スプレイ系 配管（LPCS-2， 3）	配管 本体		1 次	150	396	2.64	1.24	○
㊺	残留熱除去系配管 （RHR-48）	配管 本体		1 次	143	396	2.76	1.24	○
㊻	残留熱除去系配管 （RHR-70）	配管 本体		1 次	217	260	1.19	1.24	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

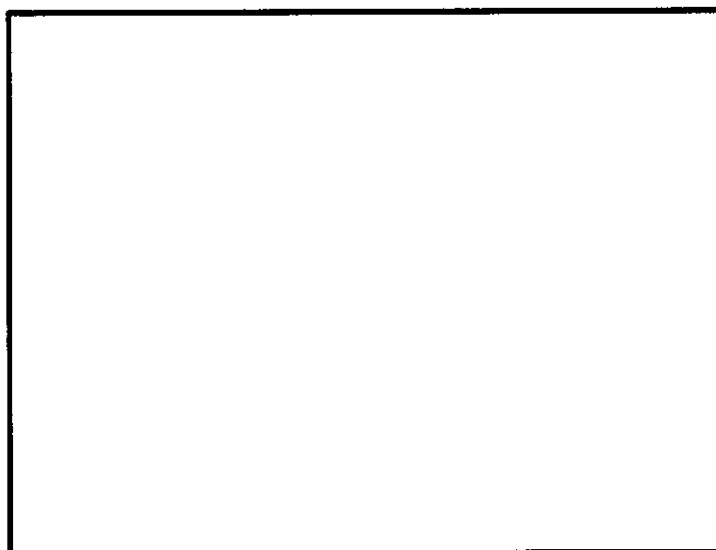


図 4-41 EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 2.0%）

⑮ 設置床レベル 14.0 m に設置された配管系（減衰 3.0%）に対する追加検討

設置床レベルが EL. 14.0 m であり，減衰定数 3.0% を適用して耐震評価を実施する配管系として，残留熱除去系配管が有る。当該設備に対して 1 次固有周期よりも剛領域での FRS 比率を踏まえた影響評価を実施した結果，基準地震動 S_0 の耐震裕度は FRS 比率以上であるため，観測記録とシミュレーション解析結果の差異に対する影響がないことを確認した。

表 4-47 設置床レベル 14.0 m に設置された機器・配管系（減衰 3.0%）への影響評価結果

	設備名称	評価 部位	一次固有 周期（秒）	応力 分類	発生応力 （MPa）	許容応力 （MPa）	裕 度	FRS* 比率	影響 評価
⑤	残留熱除去系配管 （RHR-5, 21）	配管 本体		1 次	156	335	2.14	1.06	○
⑥	残留熱除去系配管 （RHR-8, 30, 99, 100）	配管 本体		1 次	181	380	2.09	1.06	○

注記 *：観測記録がシミュレーション解析結果上回っている場合は，その比率を記載する。またシミュレーション解析が観測記録を上回っていれば「－」と記載する。

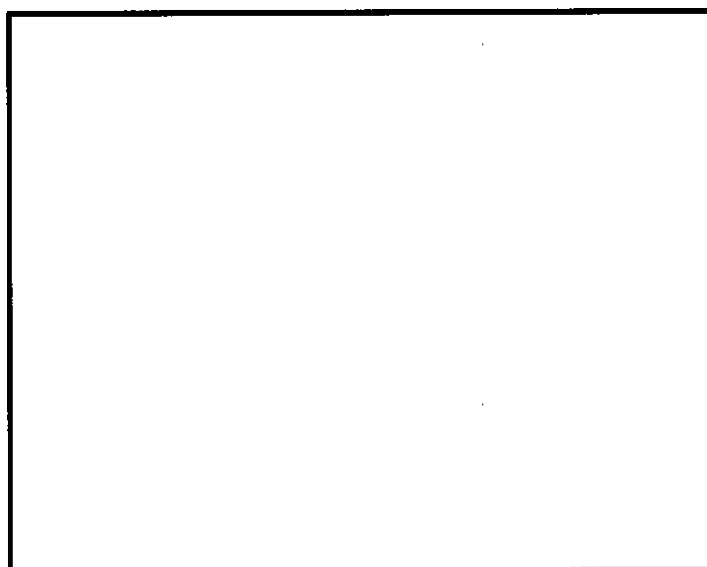


図 4-42 EL. 14.0 m 床応答スペクトル比較（減衰 3.0%）

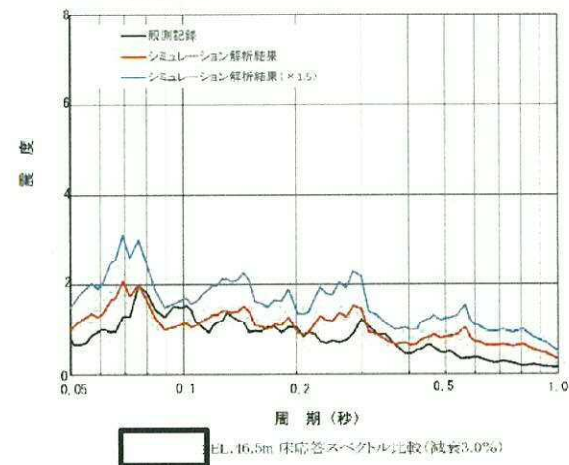
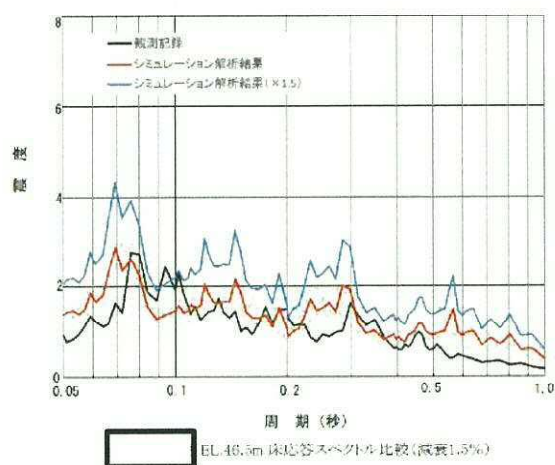
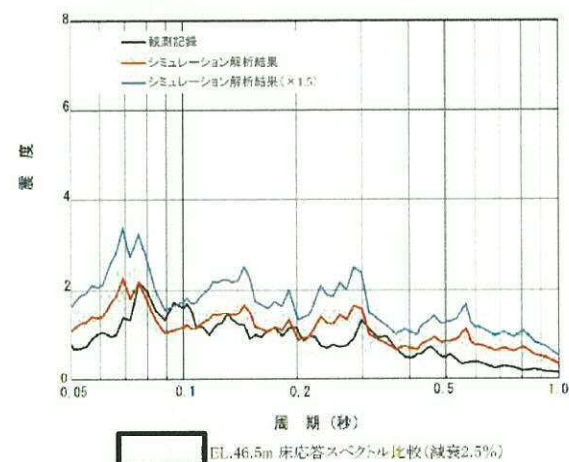
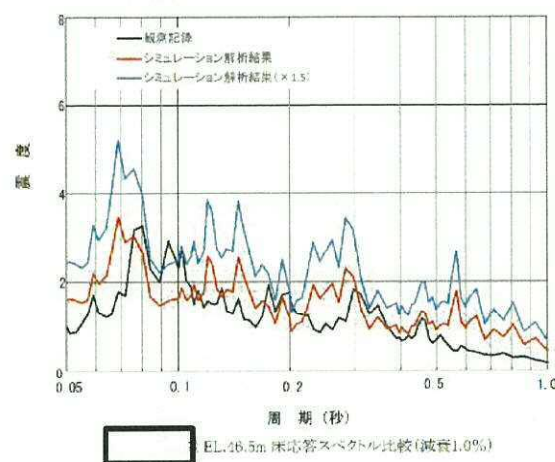
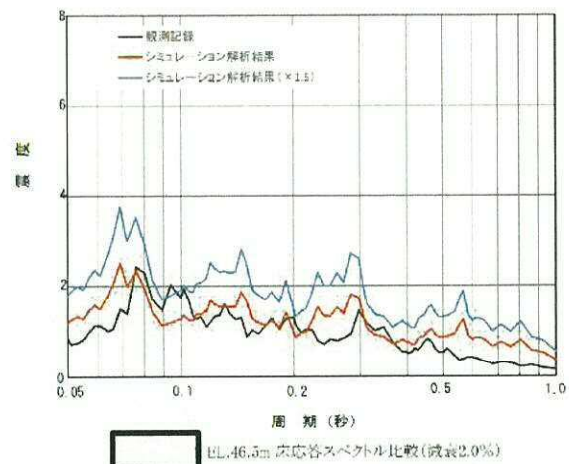
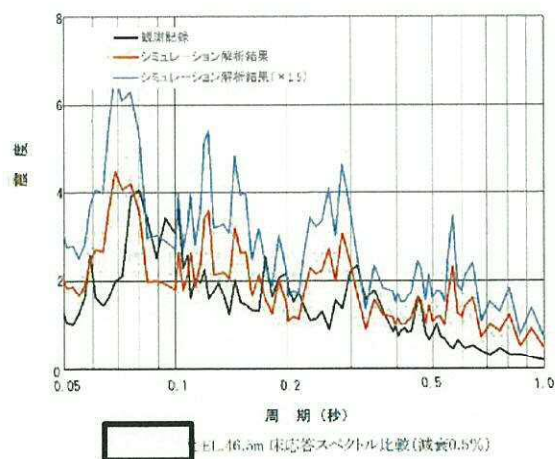


図 4-43 (1) 鉛直方向の観測記録とシミュレーション解析結果の比較

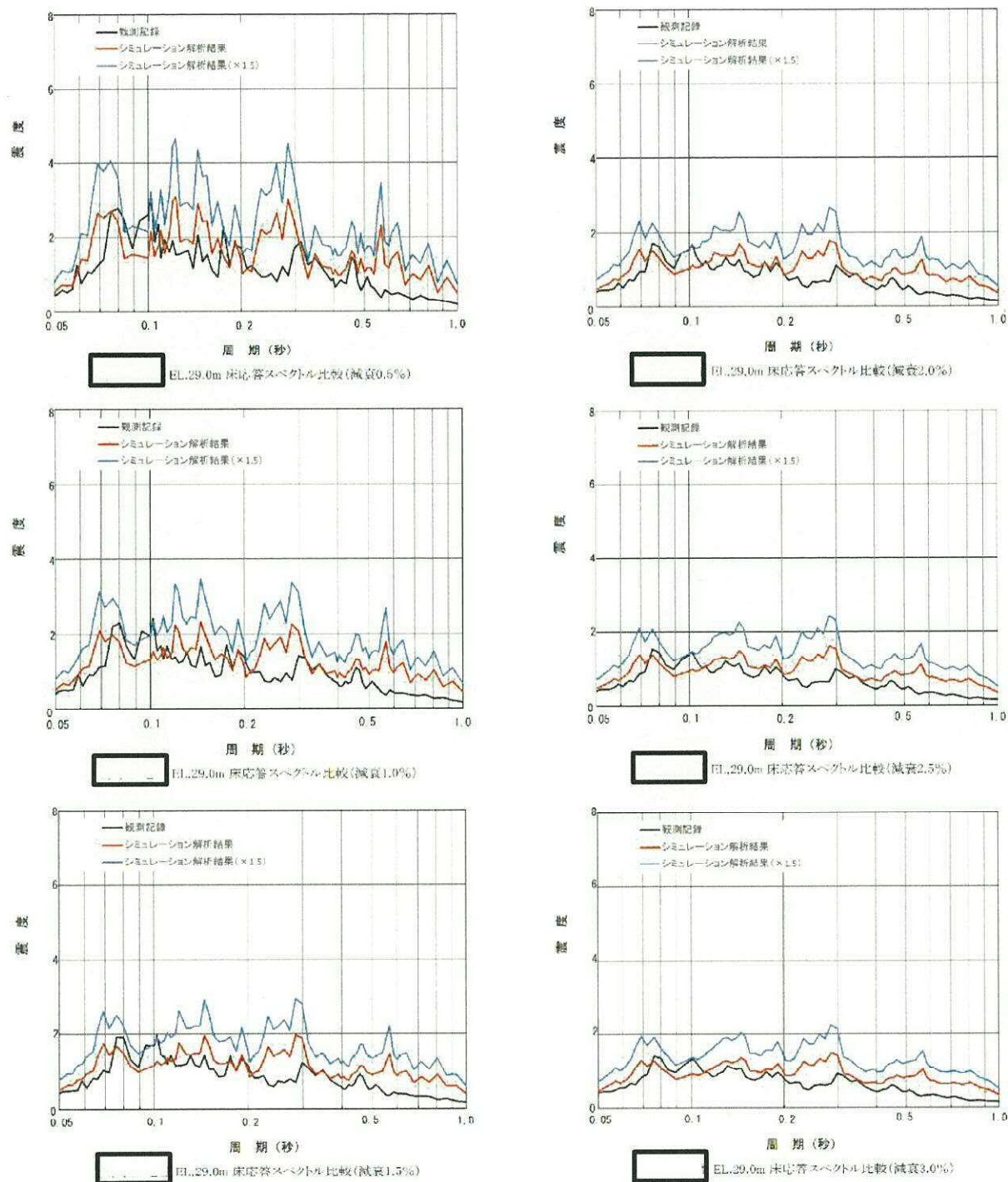
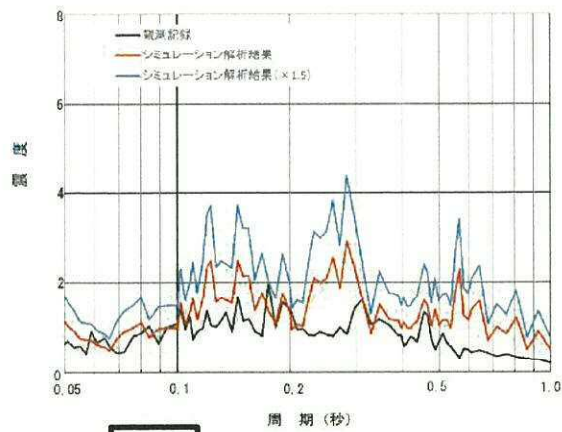
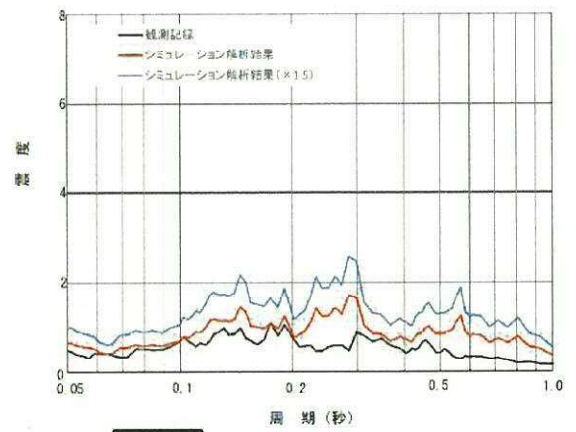


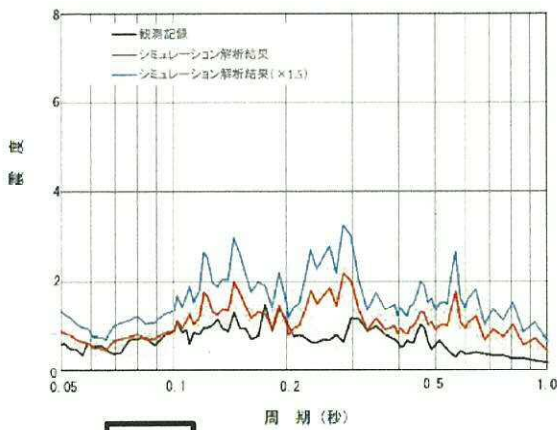
図 4-43 (2) 鉛直方向の観測記録とシミュレーション解析結果の比較



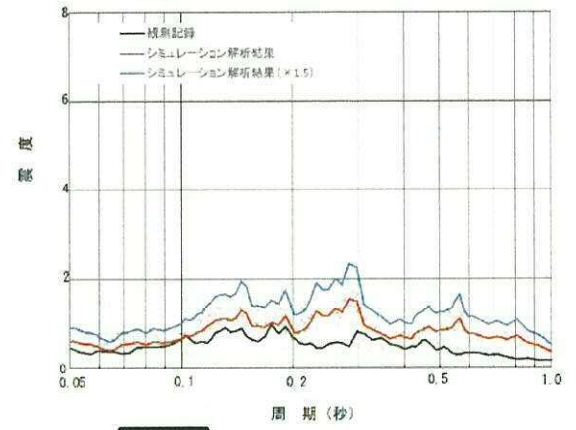
FL14.0m 床応答スペクトル比較(減衰0.5%)



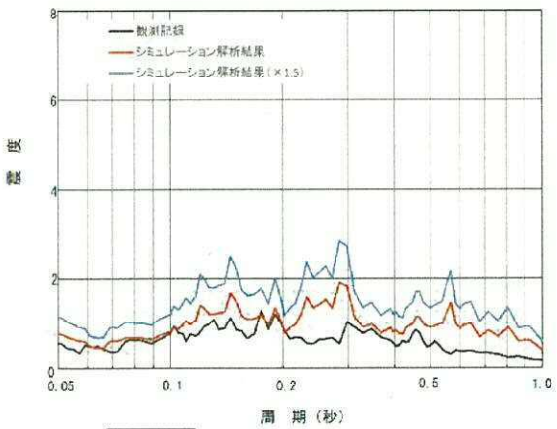
FL14.0m 床応答スペクトル比較(減衰2.0%)



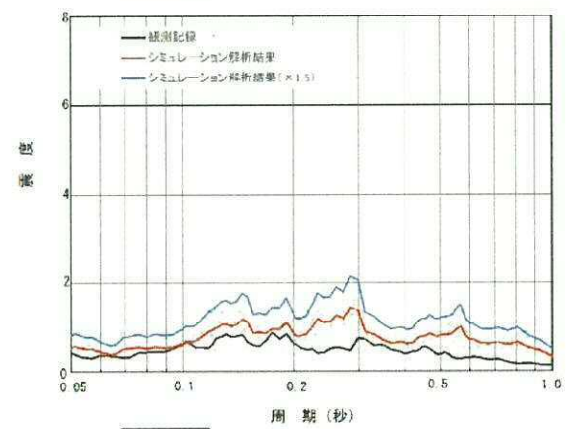
FL14.0m 床応答スペクトル比較(減衰1.0%)



FL14.0m 床応答スペクトル比較(減衰2.5%)



FL14.0m 床応答スペクトル比較(減衰1.5%)



FL11.0m 床応答スペクトル比較(減衰3.0%)

図 4-43 (3) 鉛直方向の観測記録とシミュレーション解析結果の比較

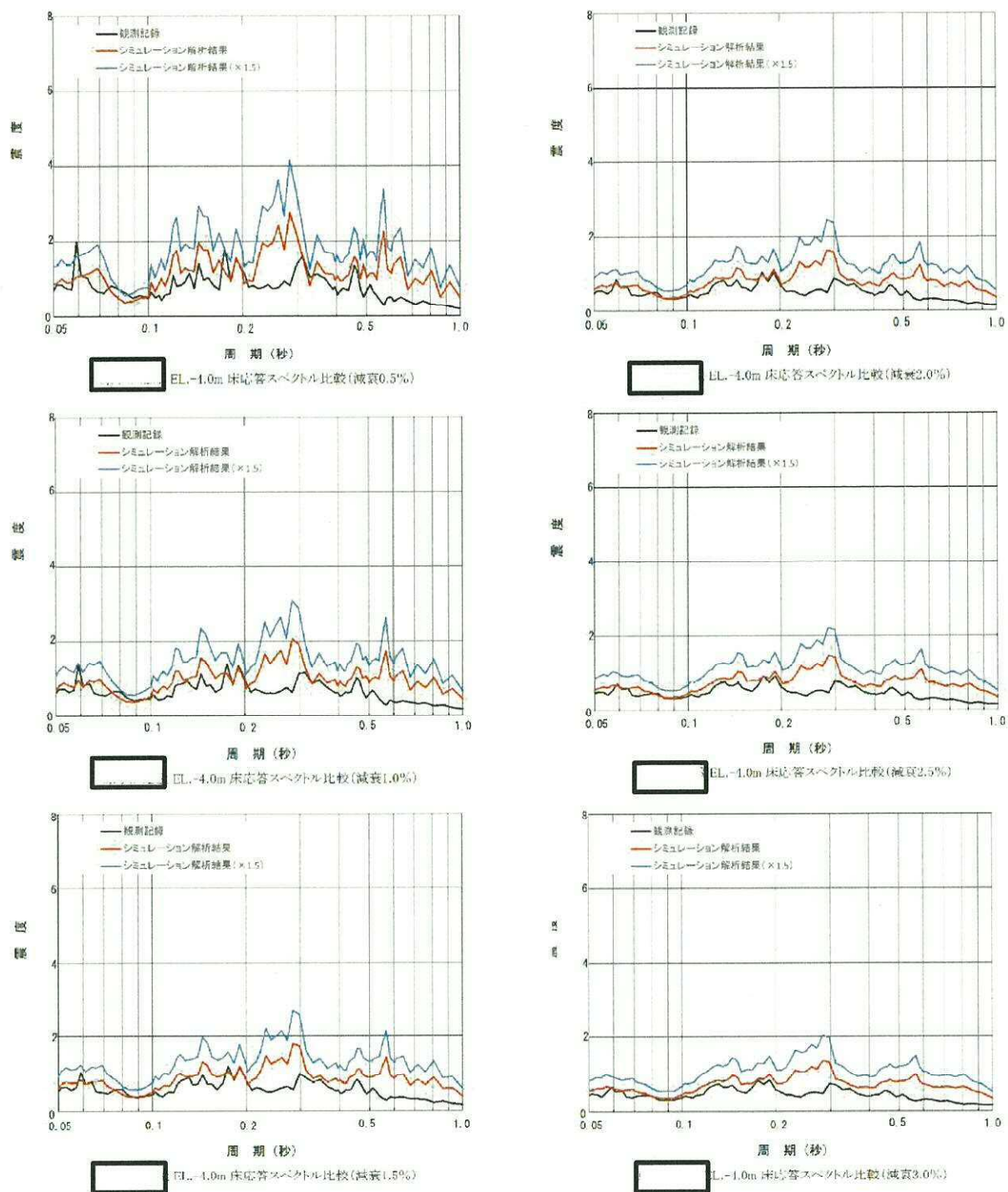


図 4-43 (4) 鉛直方向の観測記録とシミュレーション解析結果の比較

5. まとめ

原子炉建屋の地震応答解析モデルについて、東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果の比較から、人工岩盤のモデル化及び側面回転ばねの影響について検討した。

建設工認では埋込みを考慮しないS Rモデルとしていたが、側面地盤の埋込み効果を考慮した埋込みS Rモデルとした場合、より実状に近い建屋の振動性状を評価できることを確認した。また、人工岩盤は岩盤として地盤モデル側にモデル化し、側面回転ばねを考慮しないモデルとする方が、応答を保守側に評価することを確認した。

なお、建設工認の地震応答解析モデルは、埋込みを考慮しないモデルで、底面地盤ばね減衰定数 5%一定としている。東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果より、埋込みを考慮しない場合、埋込みを考慮したモデルに比べて建屋応答を保守的に評価することを確認しており、建設工認モデルが埋込み考慮の今回工認モデルに比べて保守的な応答となるモデル化となっていたことを確認した。

以上の結果から、R/B 今回工認モデルは、人工岩盤を地盤モデル側に岩盤としてモデル化し、側面回転ばねを考慮しない埋込みS Rモデルとすることとした。

別紙 1-3 の補足説明資料

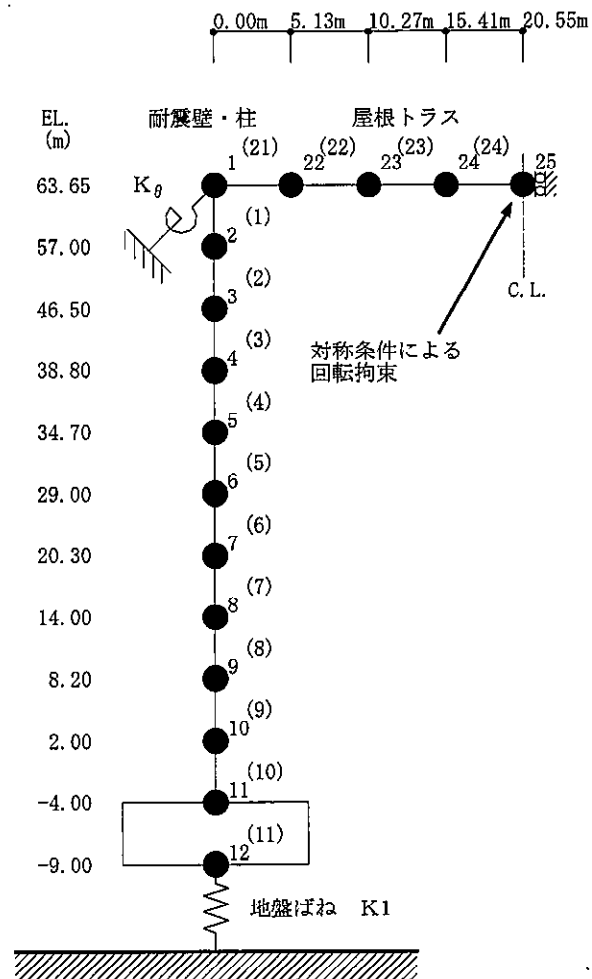
1. 概要

本資料は、「別紙 1-3 原子炉建屋の地震応答解析モデルについて」で示した原子炉建屋の地震応答解析における東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析について、鉛直方向モデルによる結果を示すものである。

2. 解析モデル

鉛直方向の解析モデルを図 2-1 に示す。

鉛直方向の解析モデルは、水平方向と同様に人工岩盤を地盤モデル側に岩盤としてモデル化する。なお、側面地盤ばねについては考慮しない。



注 1 : 数字は質点番号を示す。

注 2 : () 内は要素番号を示す。

図 2-1 解析モデル（鉛直方向）

3. 解析結果

東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果として最大応答加速度分布の比較を図 3-1 に、床応答スペクトルの比較を図 3-2 に示す。

最大応答加速度は、解析結果が観測記録を上回っており、床応答スペクトルについてもほぼ全ての周期帯で解析結果が観測記録を上回る傾向となっている。

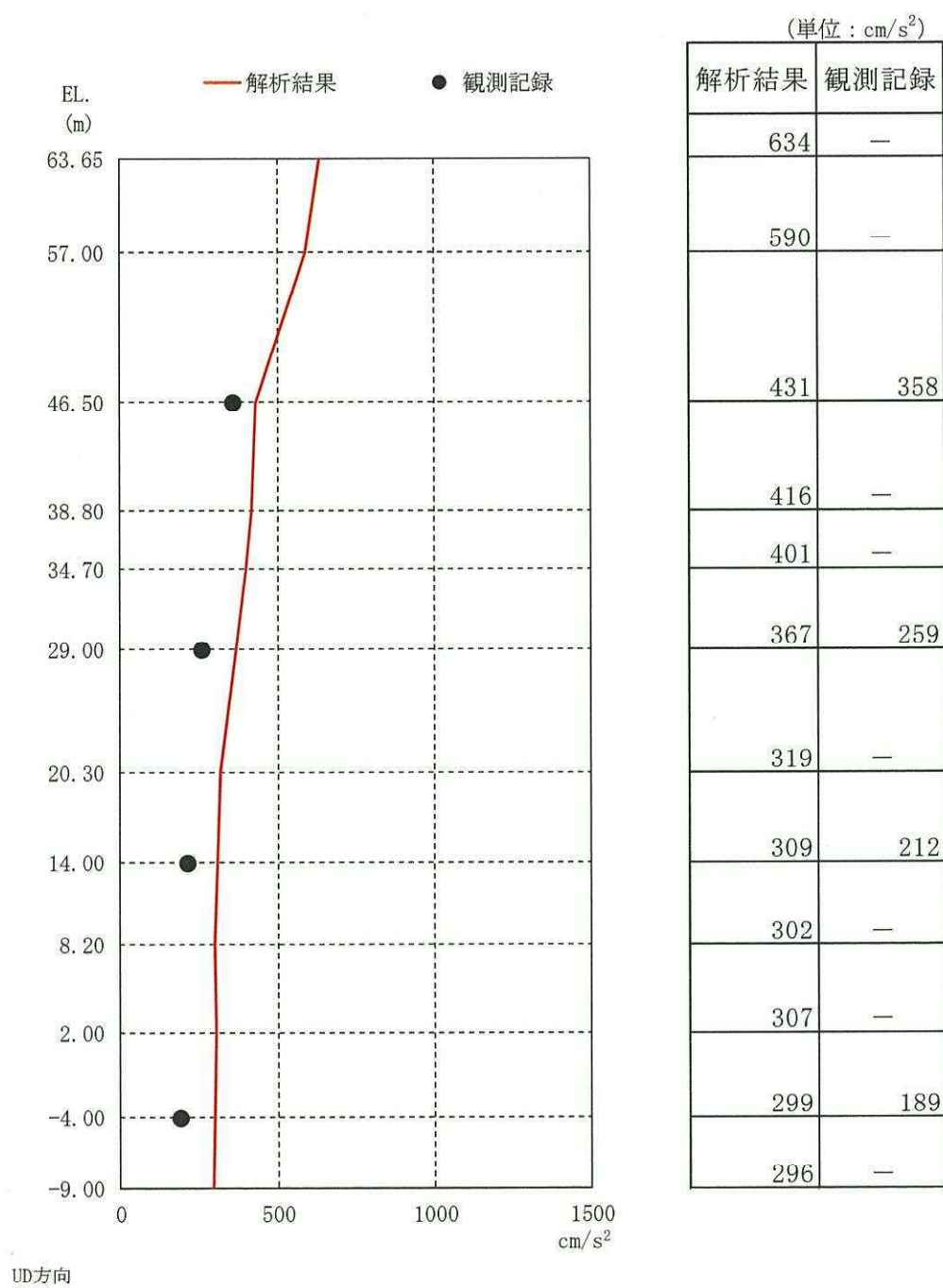


図 3-1 最大応答加速度分布の比較 (鉛直方向)

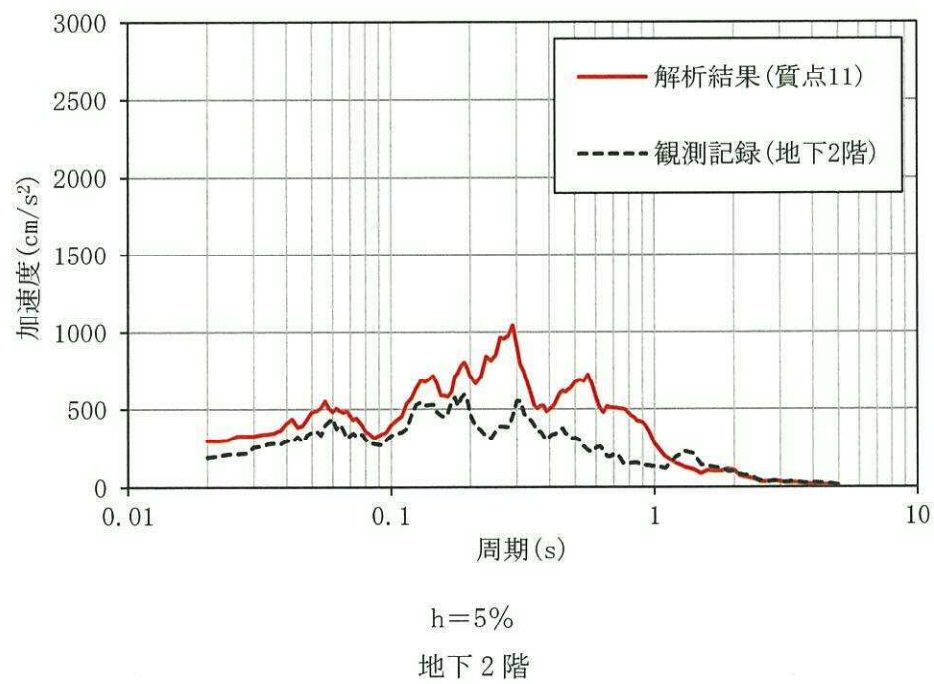
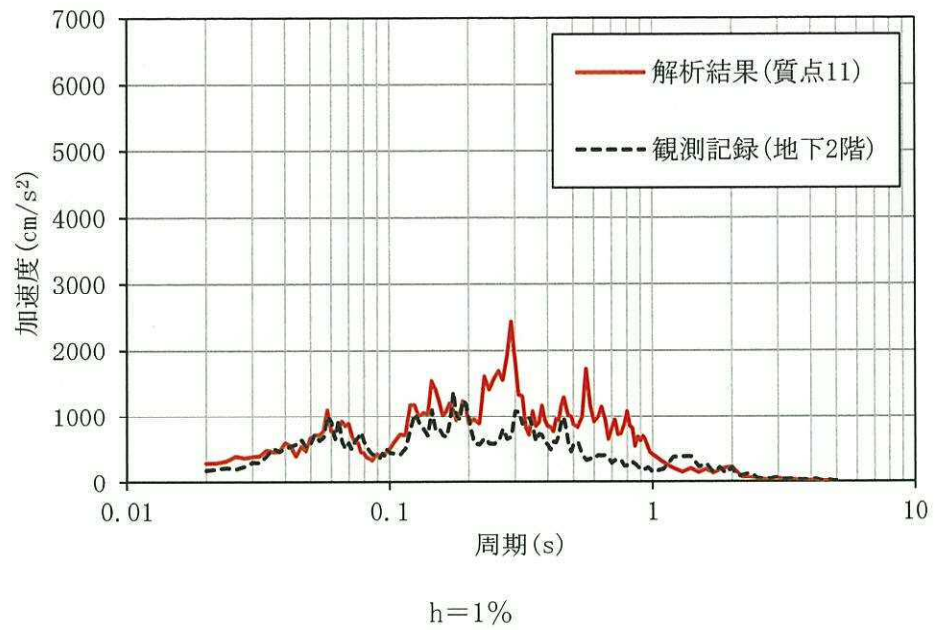


図 3-2 (1/4) 床応答スペクトルの比較 (鉛直方向)

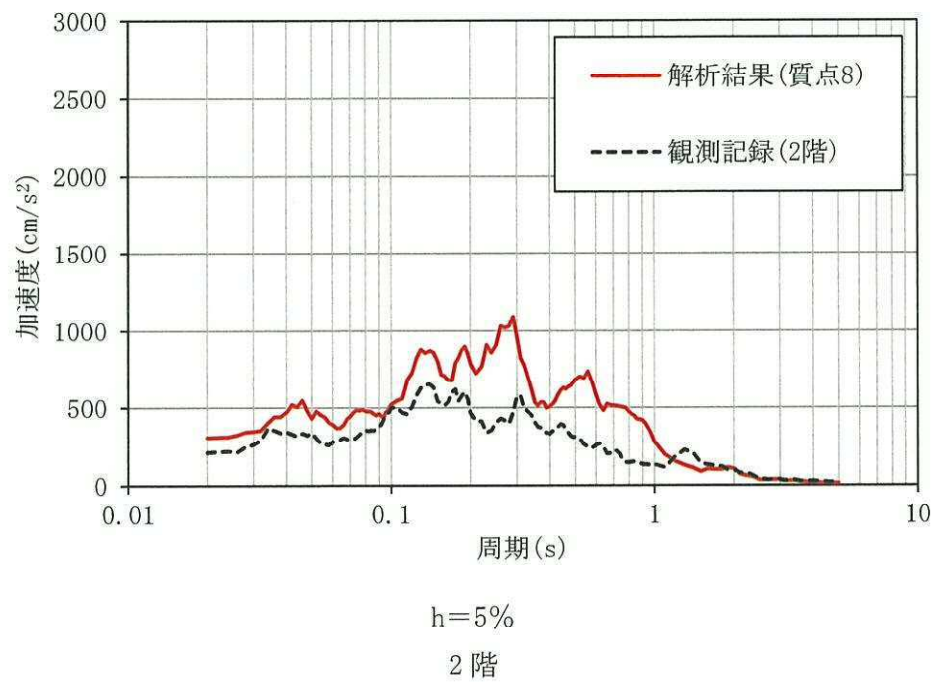
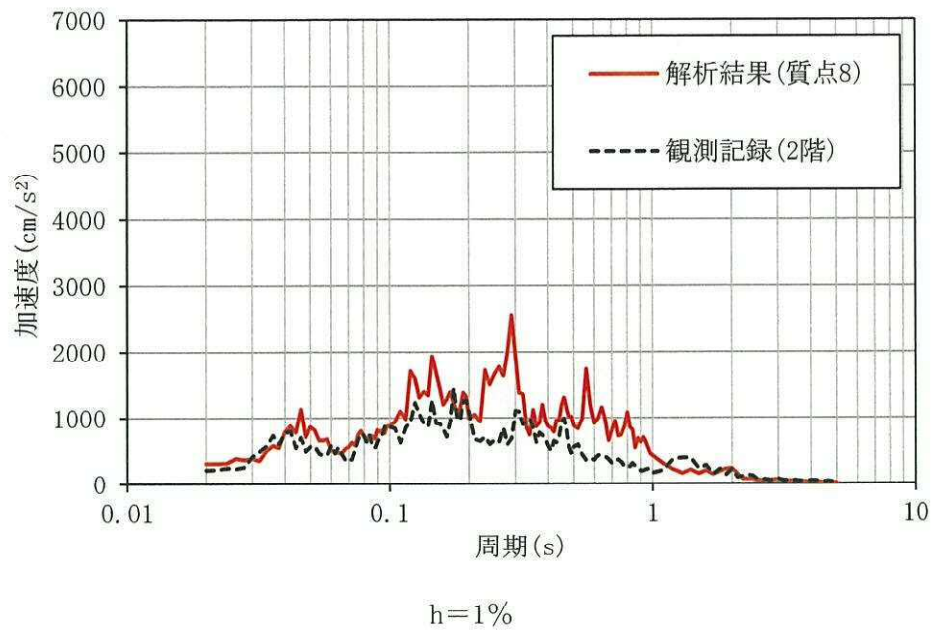


図 3-2 (2/4) 床応答スペクトルの比較 (鉛直方向)

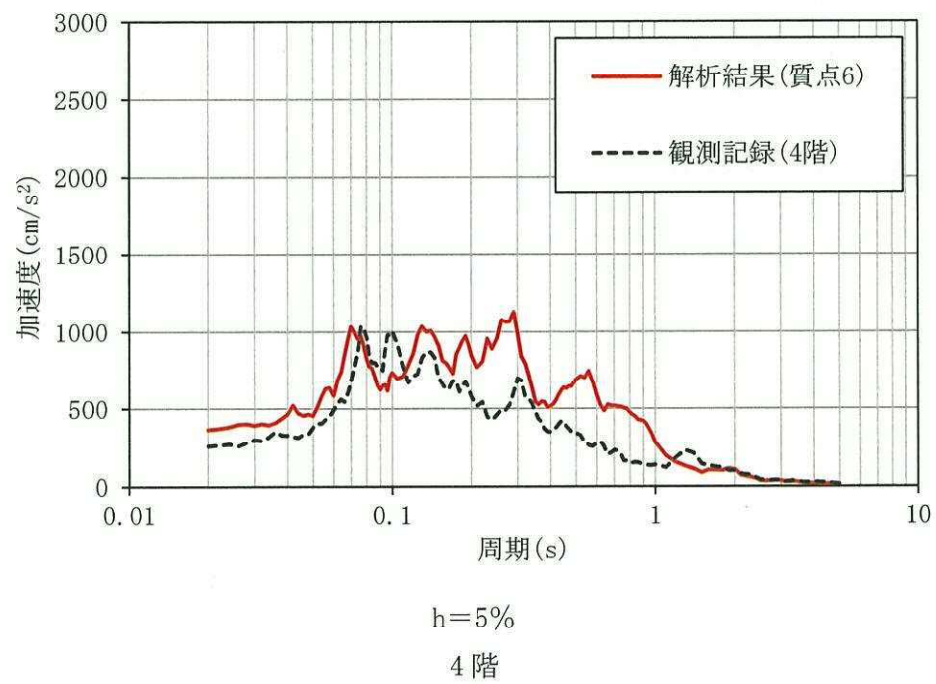
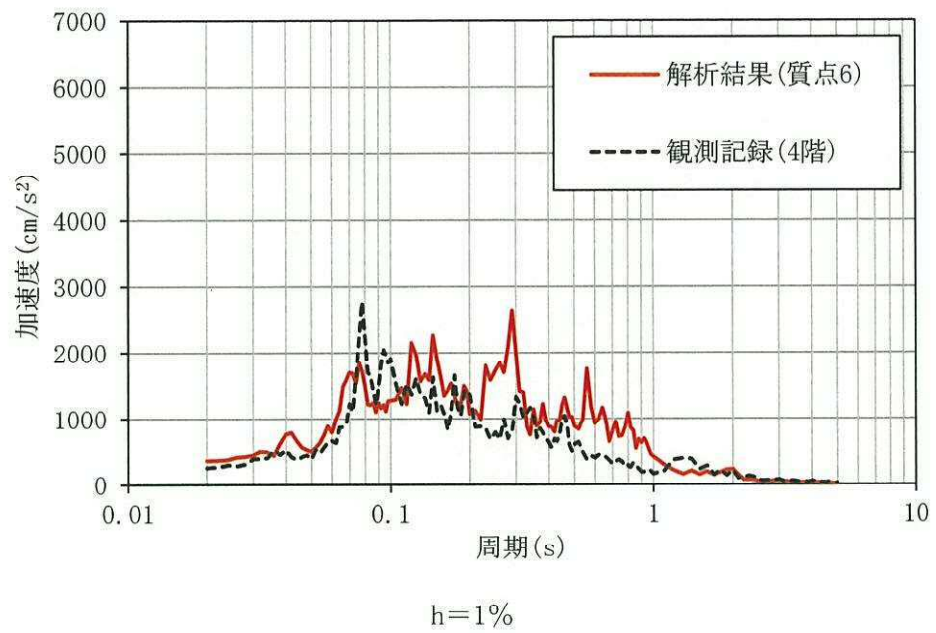
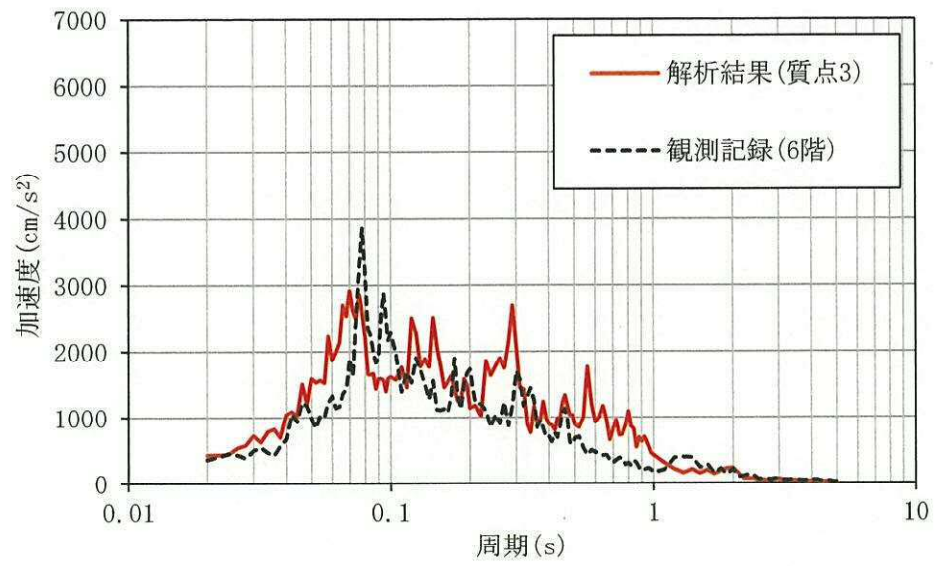
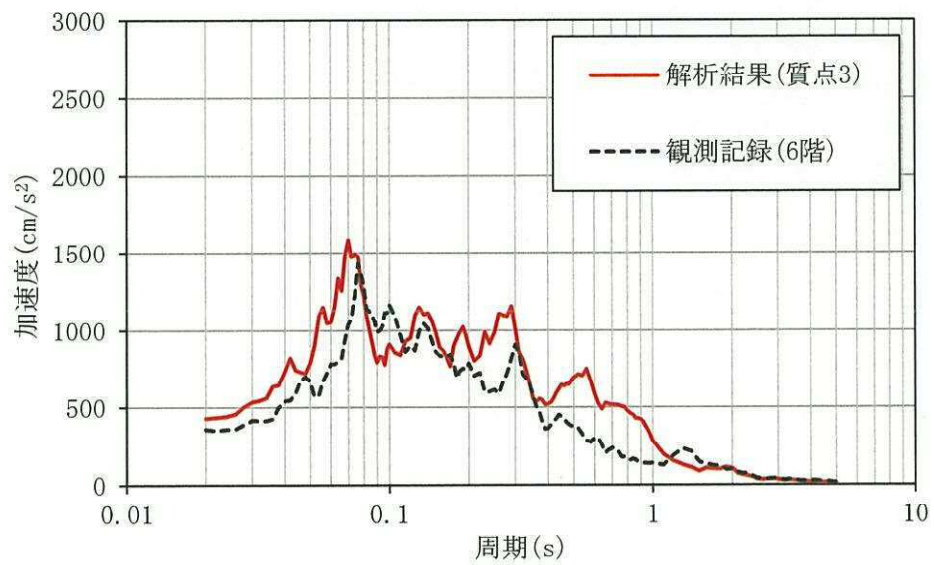


図 3-2 (3/4) 床応答スペクトルの比較 (鉛直方向)



$h=1\%$



$h=5\%$

6 階

図 3-2 (4/4) 床応答スペクトルの比較 (鉛直方向)

補足 シミュレーション解析に用いる入力地震動の算定について

1. 概要

今回工認では、地震応答解析における原子炉建屋への入力地震動は一次元波動論に基づき、解放基盤表面レベルで定義される基準地震動 S_0 及び弾性設計用地震動 S_d 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として評価している。地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図を図 1-1 及び図 1-2 に示す。

ここでは、建屋のシミュレーション解析に用いる入力地震動の算定結果について示す。

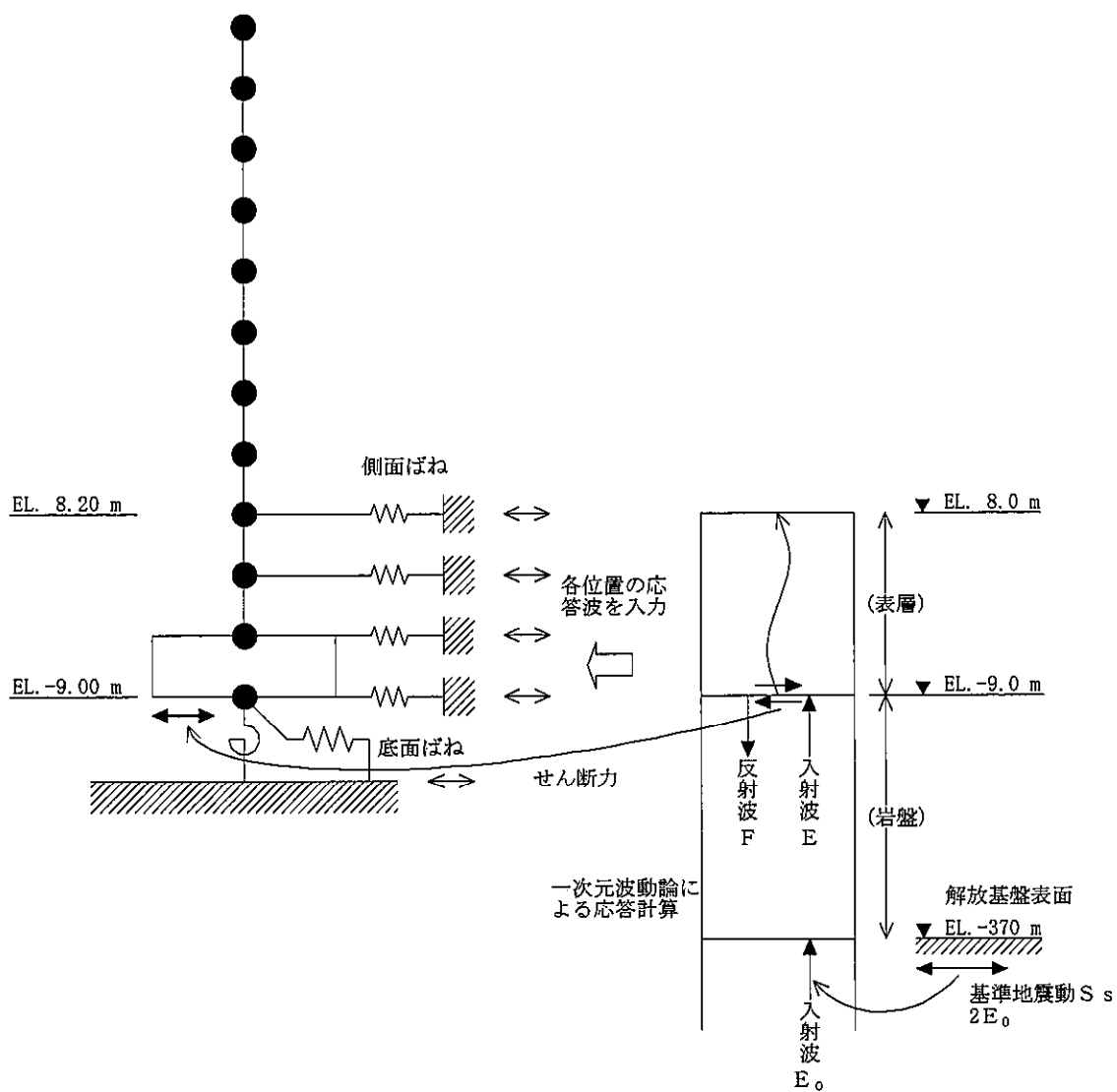


図 1-1 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図（水平方向）

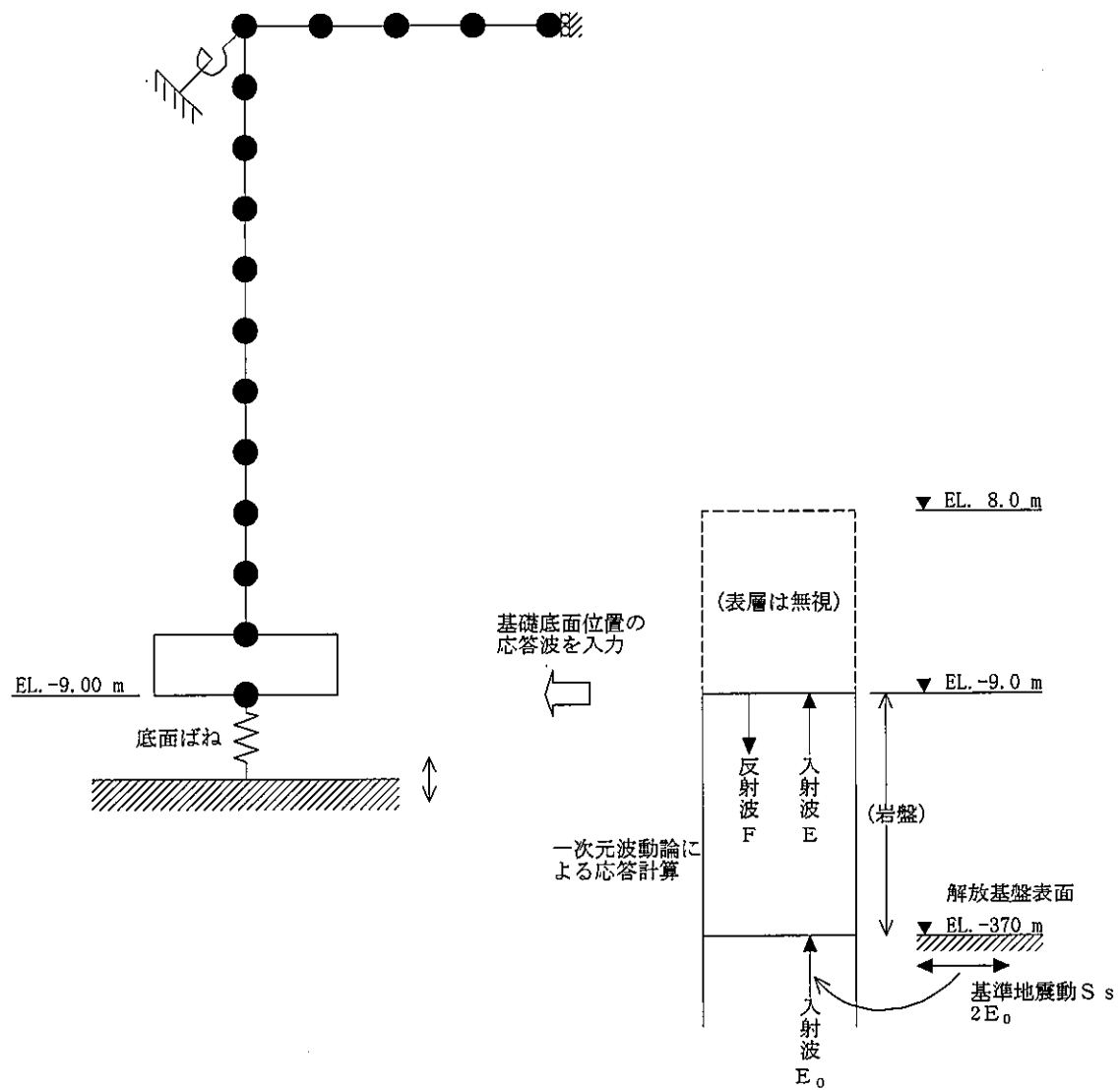


図 1-2 地震応答解析モデルに入力する地震動の概念図（鉛直方向）

2. 検討内容

2.1 検討方針

2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を基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用い、今回工認と同様に一次元波動論により地盤応答解析を行う。解析の地中の最大応答加速度分布を観測記録と比較することにより入力動評価の妥当性を確認する。2011年東北地方太平洋沖地震の諸元及び震央位置を図 2-1 に示す。

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

注記 * : 気象庁発表値

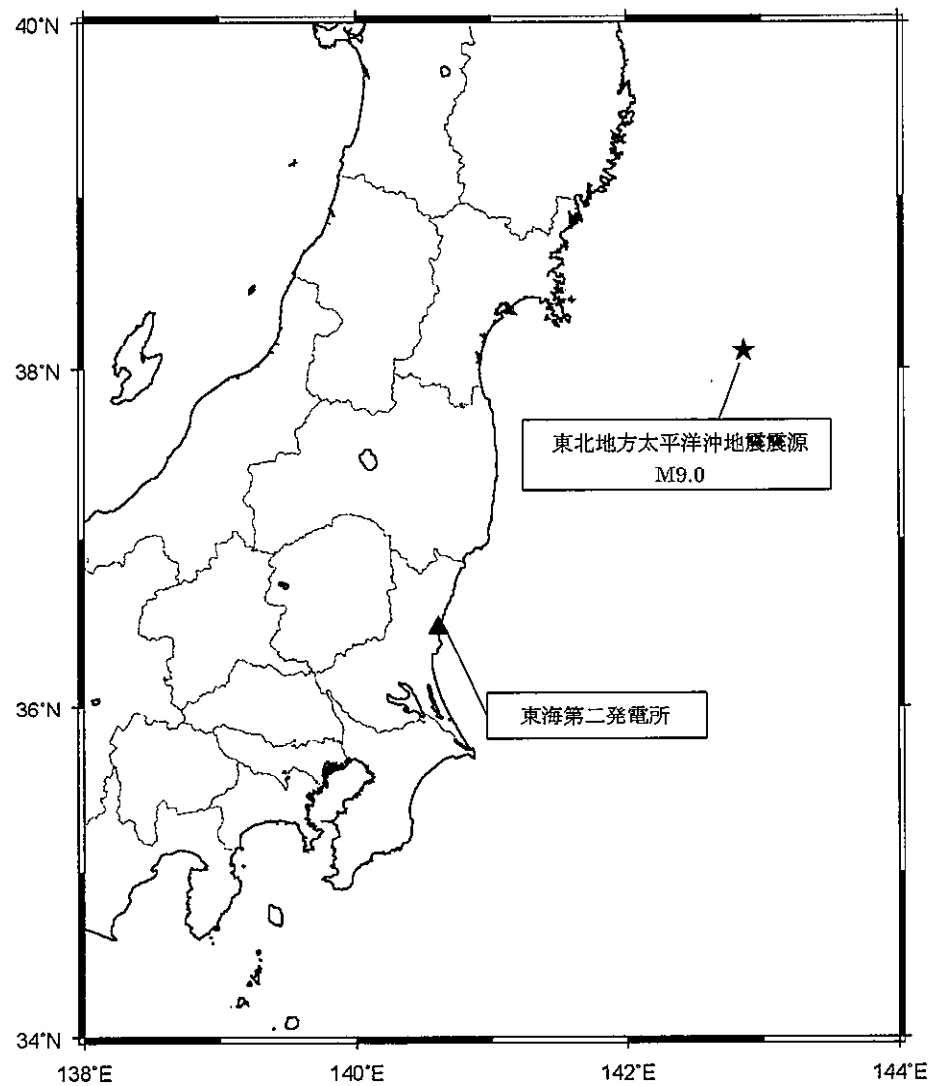


図 2-1 2011 年東北地方太平洋沖地震の諸元及び震央位置

2.2 地盤地震計設置位置

図 2-2 に地盤地震計設置位置を構内配置図に示す。また、地盤地震計設置深さを図 2-3 に示す。

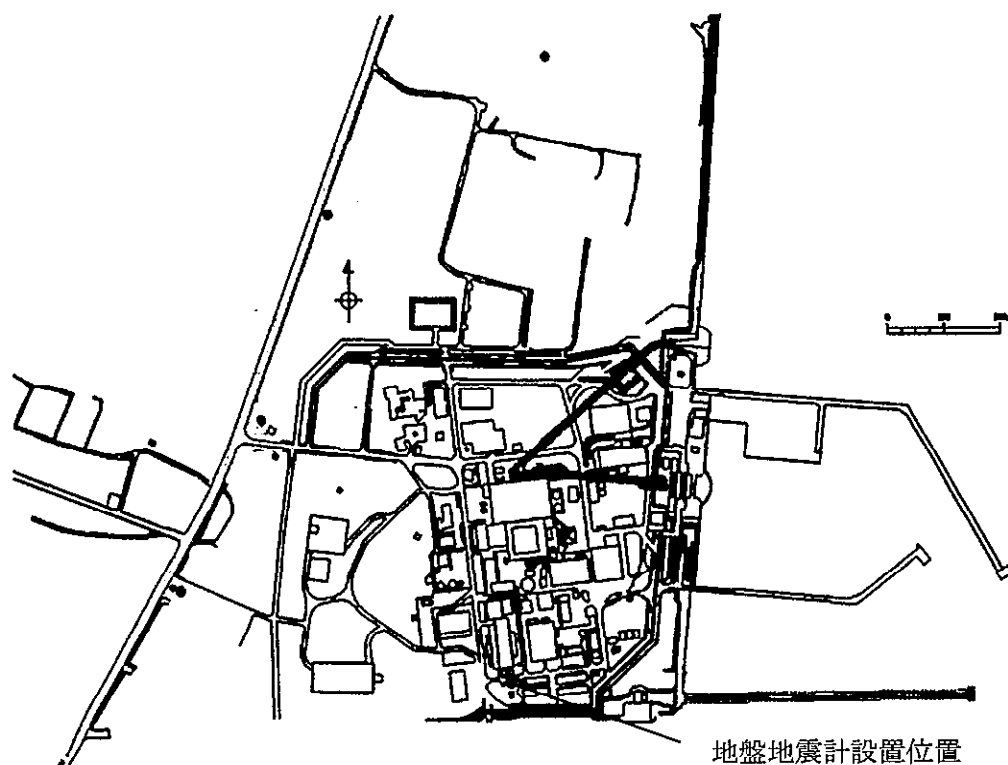


図 2-2 地盤地震計設置位置（構内配置）

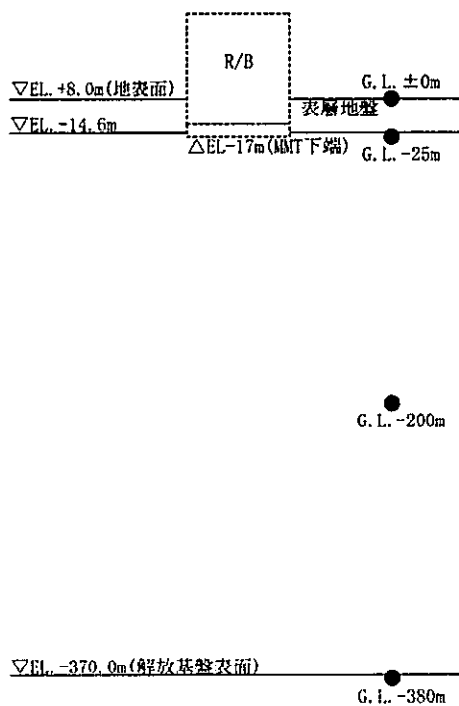
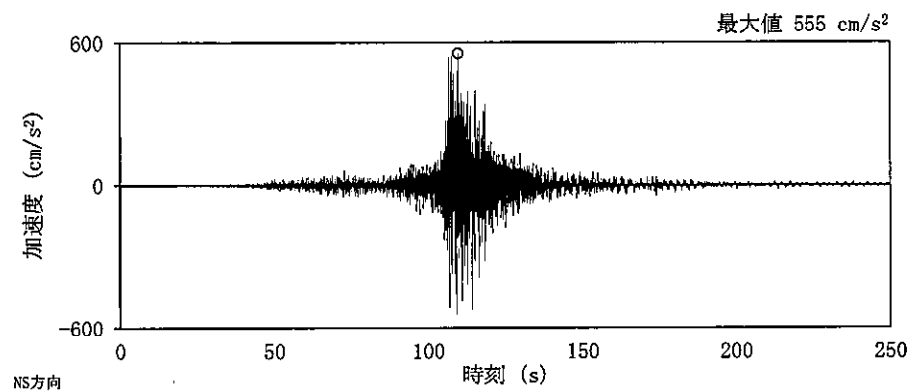


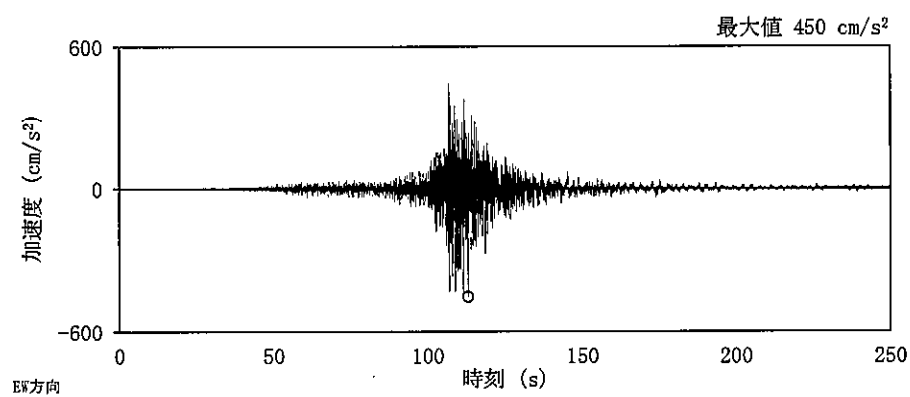
図 2-3 地盤地震計設置深さ（標高）

2.3 解放基盤波

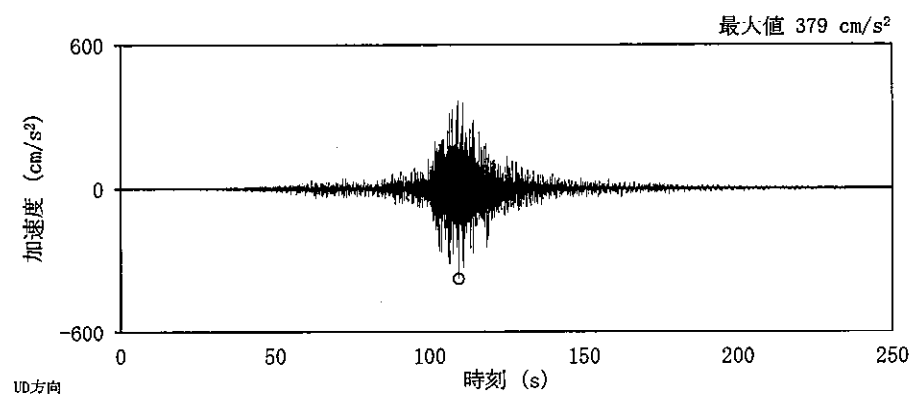
2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を基に作成された解放基盤表面レベル(EL. -370 m)で定義される解放基盤波を図 2-4 に示す。



(a) 加速度波形 NS 方向

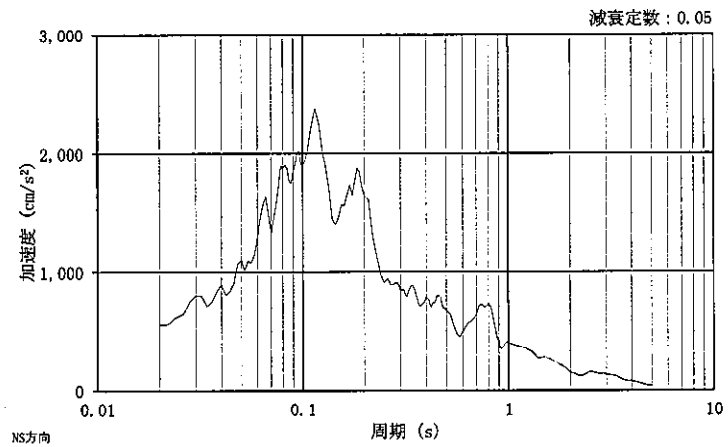


(b) 加速度波形 EW 方向

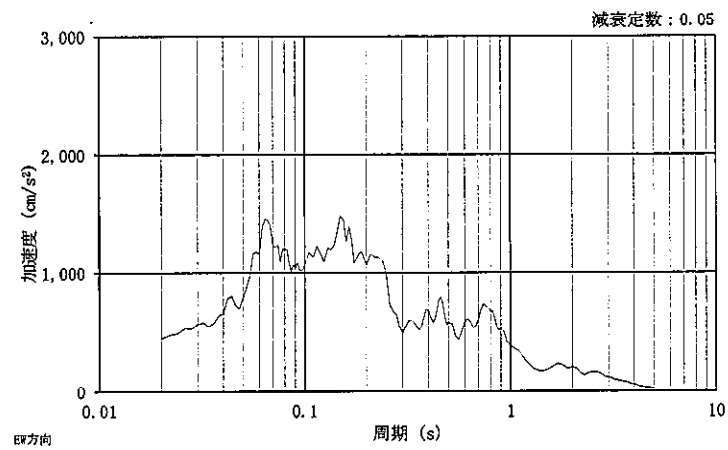


(c) 加速度波形 UD 方向

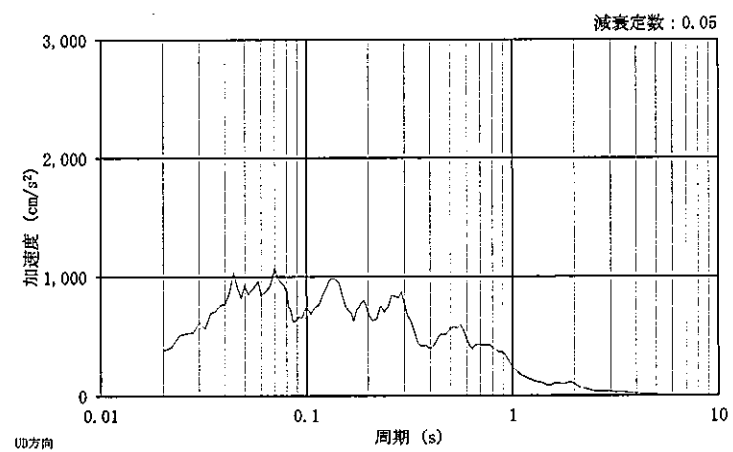
図 2-4 (1/2) 解放基盤表面レベル (EL. -370 m) における解放基盤波



(d) 加速度応答スペクトル NS 方向



(e) 加速度応答スペクトル EW 方向



(f) 加速度応答スペクトル UD 方向

図 2-4 (2/2) 解放基盤表面レベル (EL. -370 m) における解放基盤波

2.4 地盤物性

地盤応答解析に用いる初期地盤の物性値を表 2-1 に、歪依存特性を図 2-5～図 2-8 に示す。

表 2-1 初期地盤物性

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	Ag2	4.7	2.01	240	0.491
-2.7	D2g-3	11.7	2.15	500	0.462
-14.4	Km	5.6	1.72	446	0.461
-20.0		20.0	1.72	456	0.460
-40.0		20.0	1.73	472	0.458
-60.0		30.0	1.73	491	0.455
-90.0		30.0	1.73	514	0.452
-120.0		30.0	1.73	537	0.449
-150.0		40.0	1.74	564	0.445
-190.0		40.0	1.74	595	0.441
-230.0		40.0	1.75	626	0.437
-270.0		50.0	1.75	660	0.433
-320.0		50.0	1.76	699	0.427
-370.0	解放基盤	—	1.76	718	0.425

注記 *：地下水位より浅いことを示す。

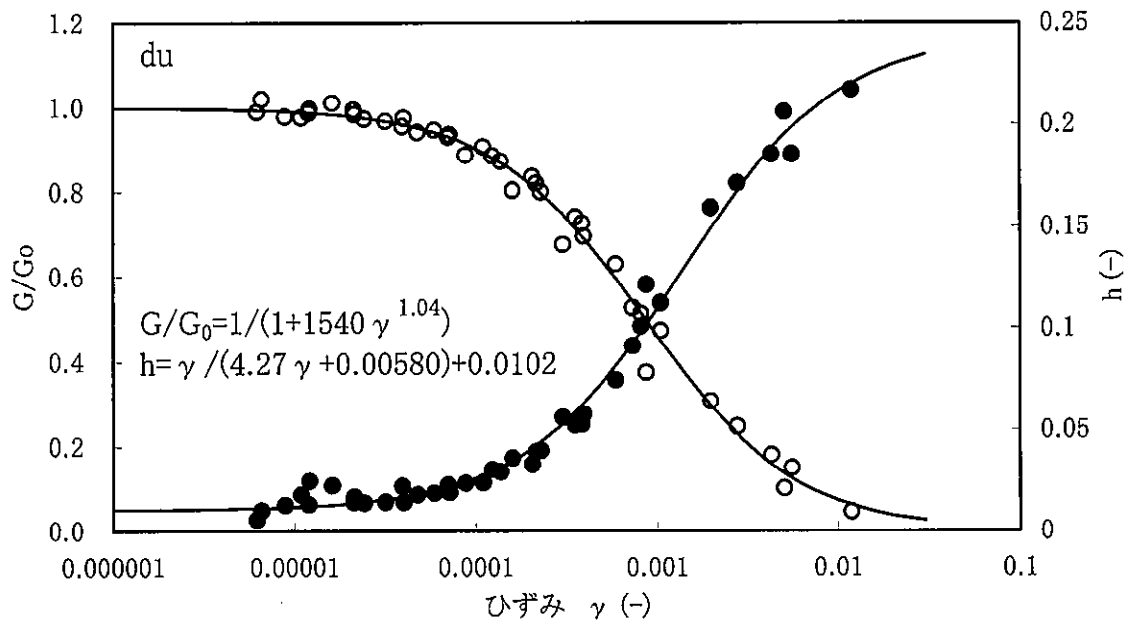


図 2-5 動せん断弾性係数及び減衰のひずみ依存性 (du 層)

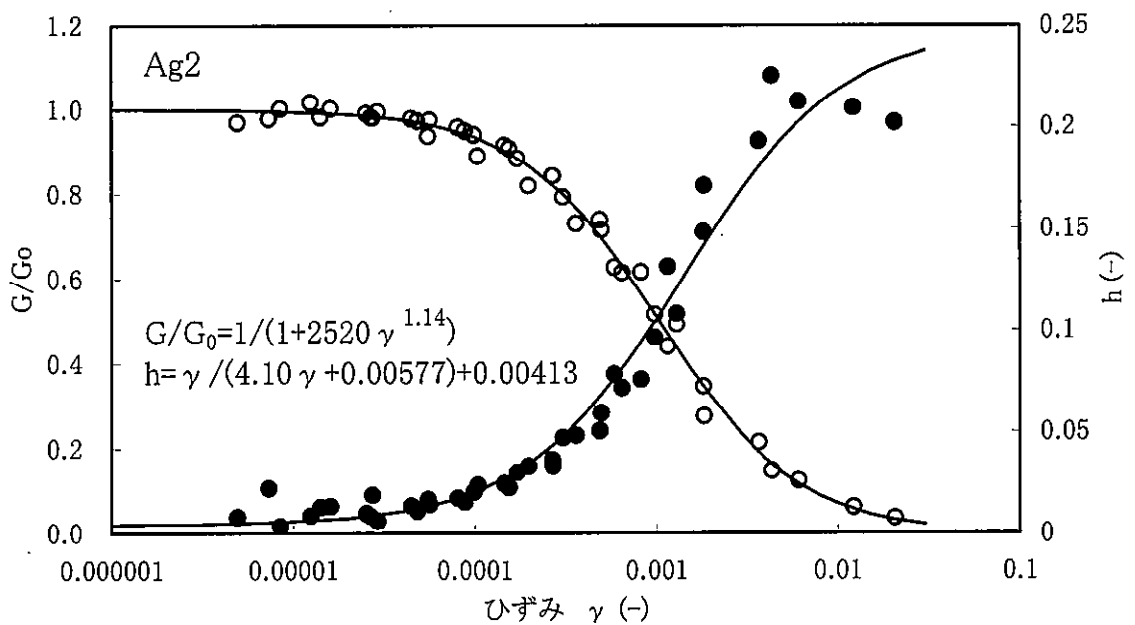


図 2-6 動せん断弾性係数及び減衰のひずみ依存性 (Ag2 層)

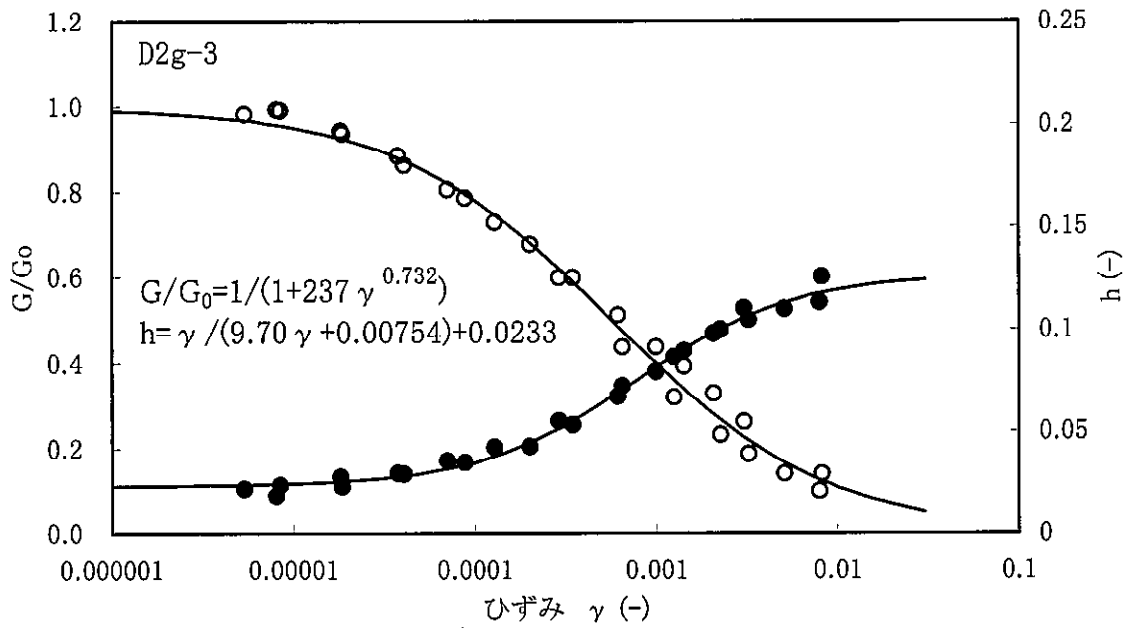


図 2-7 動せん断弾性係数及び減衰のひずみ依存性 (D2g-3 層)

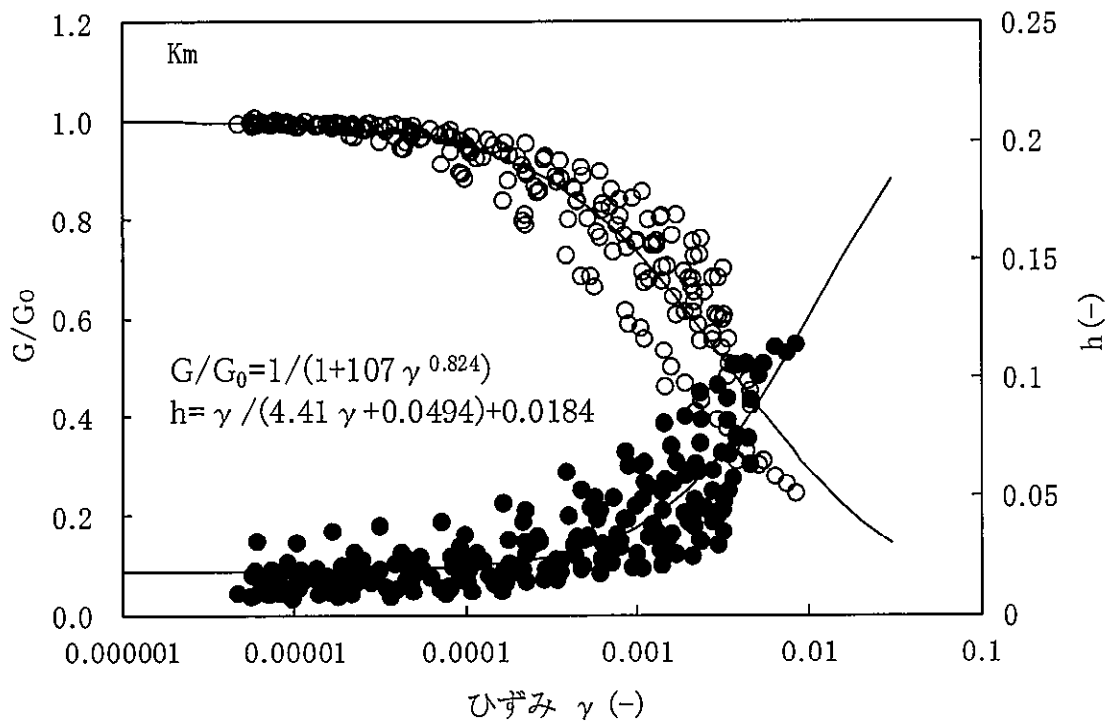
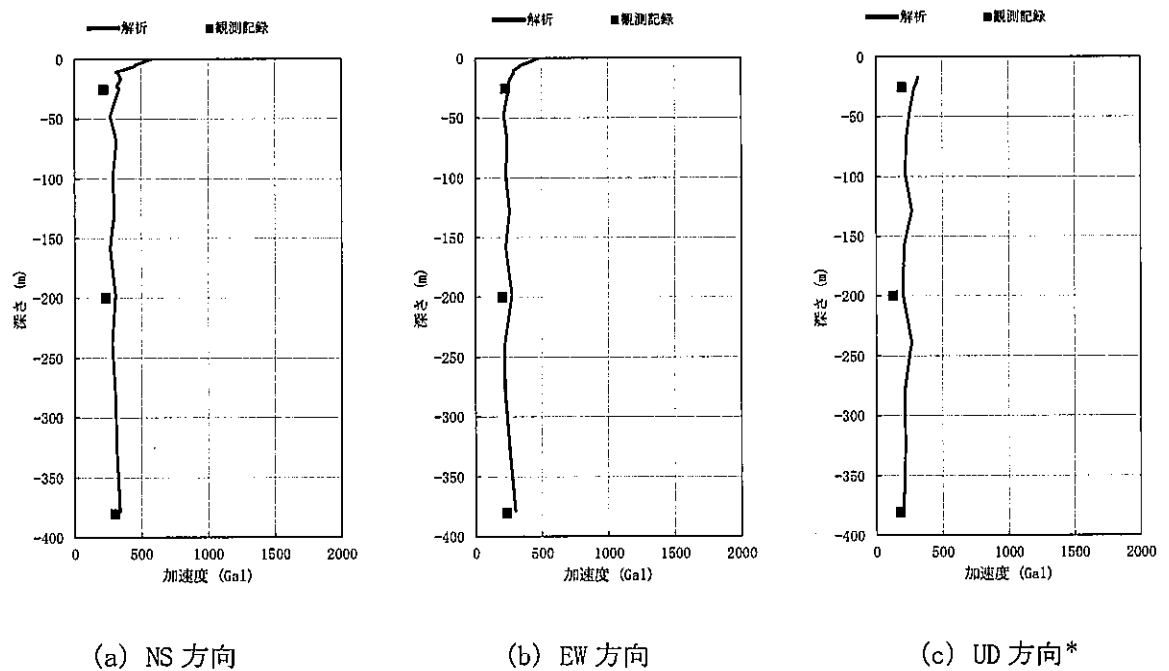


図 2-8 動せん断弾性係数及び減衰のひずみ依存性 (Km 層)

3. 検討結果

2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録による地中応答を今回工認と同様の方法により解析を行った。

地中の最大応答加速度分布を観測記録と比較し図 3-1 に示す。最大応答加速度分布は観測記録とほぼ対応している。同じ手法を用いて算定している基準地震動 S_e 及び弾性設計用地震動 S_d に対する入力地震動についても妥当な評価と判断できる。



注記 * : UD 方向の G.L. -17 m (EL. -9 m) の観測記録は E+F, 解析は 2E を示す。

図 3-1 地中の最大応答加速度分布

別紙 1-4 原子炉建屋の地震時の基礎浮上りの評価法について

目次

1. 概要・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 別紙 1-4-1
2. 基礎浮上りの評価手順について・・・・・・・・・・ 別紙 1-4-1
3. 原子炉建屋の基礎浮上りの評価法について・・・・・・・・ 別紙 1-4-2

1. 概要

原子炉建屋の耐震設計において、建屋・地盤系の地震応答解析を行い地震力を求める際、基礎の浮き上がりを考慮した解析が必要となる場合がある。ここでは、J E A G 4 6 0 1－1991 追補版に示される耐震設計において基礎浮上りが予想される場合の地震応答解析に関する浮上り評価法について示す。

2. 基礎浮上りの評価手順について

接地率（ η ）は、地震応答解析結果の最大転倒モーメント（ M_{max} ）を用いて次式により算定する。

$$\eta = 3 \left(\frac{1}{2} - \frac{M_{max}}{W \cdot L} \right)$$

ここで、

η	: 接地率
M_{max}	: 最大転倒モーメント
W	: 建屋総重量
L	: 建屋基礎幅

接地率が 75% 以上の場合は、基礎浮上りの幾何学的非線形を線形とした地震応答解析を、接地率が 65% 以上の場合は基礎浮上りによる幾何学的非線形性を考慮した地盤ばねを採用した非線形地震応答解析を行えば、地震応答解析結果を設計用地震力の算定に用いてさしつかえがなく、接地率が 65% 未満の場合は別途検討が必要である。図 2-1 に基礎浮上りの評価手順フローを示す。

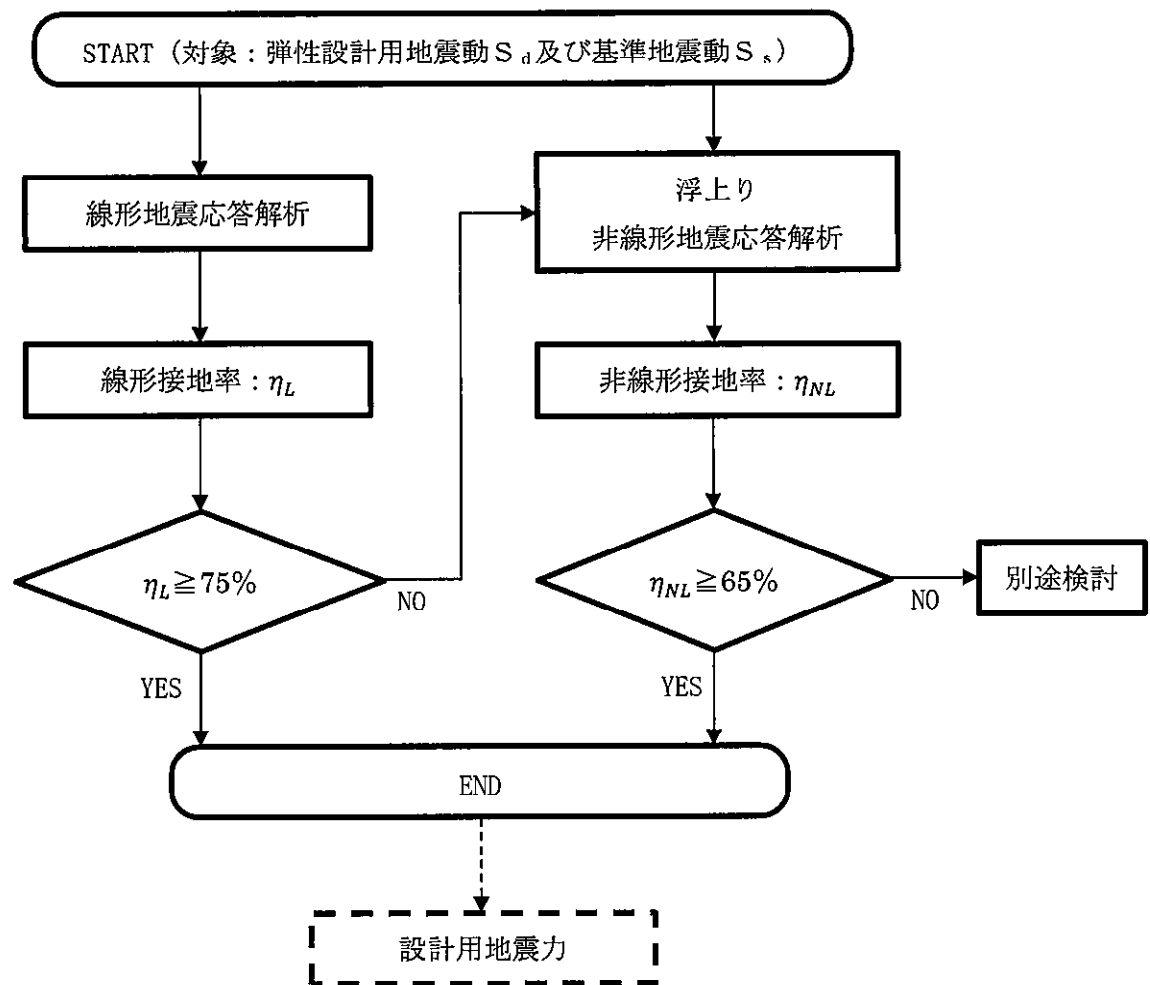


図 2-1 基礎浮上りの評価手順フロー

3. 原子炉建屋の基礎浮上りの評価法について

原子炉建屋の最小接地率は 95.8 % であり 75 % 以上であるため、基礎浮上りの幾何学的非線形を線形とした地震応答解析を行っている。

別紙 2-1 使用済燃料乾式貯蔵建屋で用いる有効入力動の適用性について

目次

1. 既工認と今回工認における地盤ばね及び入力地震動算出方法の比較 別紙 2-1-1
2. 三次元薄層要素法による杭の拘束効果を考慮した有効入力動の算出方法 別紙 2-1-2
3. 三次元薄層要素法の妥当性確認 別紙 2-1-3
4. 杭の拘束効果を考慮した有効入力動の適用性の検討 別紙 2-1-5
5. 基準地震動 S_e に対する有効入力動と自由地盤地震動の比較 別紙 2-1-9

参考資料 規格・基準等での有効入力動に関する記載

1. 既工認と今回工認における地盤ばね及び入力地震動算出方法の比較

既工認では、杭を考慮した地盤ばね算出に三次元薄層要素法を用いていたが、建屋地震応答解析モデルへの入力動には一次元波動論により算出した基礎スラブ底面レベルにおける露頭波を用いていた。三次元薄層要素法とは、水平方向には弾性波動論、深さ方向には有限要素法で定式化した解析手法である。

今回工認では、入力地震動評価にも同手法により杭の拘束効果を考慮した基礎スラブ底面レベルにおける有効入力動を用いることにより、地盤ばねの設定との整合を図り、より実状に近い評価とする。表 1-1 に既工認と今回工認における地盤ばね及び入力地震動算出方法の比較を示す。

表 1-1 既工認と今回工認における地盤ばね及び入力地震動算出方法の比較

	建屋モデル	①地盤ばね	②入力地震動
既工認		<p>三次元薄層要素法により杭を考慮した地盤ばねを算出</p> <p>杭の存在を考慮している範囲</p>	<p>一次元波動論により入力地震動を算出</p> <p>自由地盤地震動 基準地震動</p>
今回工認		<p>三次元薄層要素法により杭を考慮した地盤ばねを算出</p>	<p>三次元薄層要素法により杭の拘束効果を考慮した入力地震動を算出</p> <p>有効入力動 基準地震動</p>

2. 三次元薄層要素法による杭の拘束効果を考慮した有効入力動の算出方法

一次元波動論から算出される自由地盤地震動に三次元薄層要素法により算出した伝達関数比率を乗じて杭の拘束効果を考慮した有効入力動を算出する。算出方法を図 2-1 に示す。

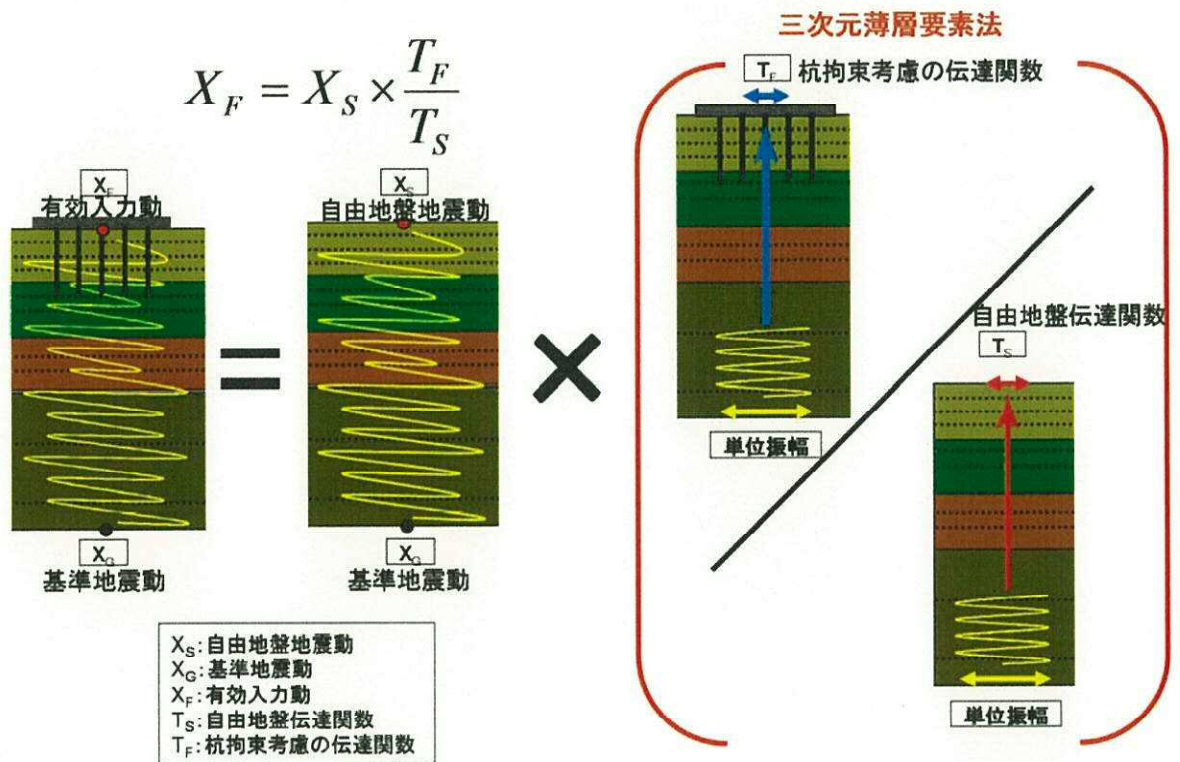


図 2-1 三次元薄層要素法による有効入力動の算出方法

3. 三次元薄層要素法の妥当性確認

三次元薄層要素法による有効入力動の妥当性を規格基準等の記載より確認した。規格基準等には、杭基礎の拘束効果を考慮した有効入力動を設定すること及びその評価に三次元薄層要素法が用いられることが示されている。確認した規格基準等の抜粋を「【補足資料】規格基準等での有効入力動に関する記載」に示す。

また、三次元薄層要素法の妥当性を確認するため、三次元薄層要素法及び一次元波動論より算定した自由地盤の伝達関数を比較した。地盤物性は、 S_s - D 1 Hによる等価物性を代表として用いた。図3-1に比較対象概要図、図3-2に一次元波動論及び三次元薄層要素法による自由地盤の伝達関数を比較して示す。両者同様な結果が得られていることから三次元薄層要素法の妥当性を確認した。

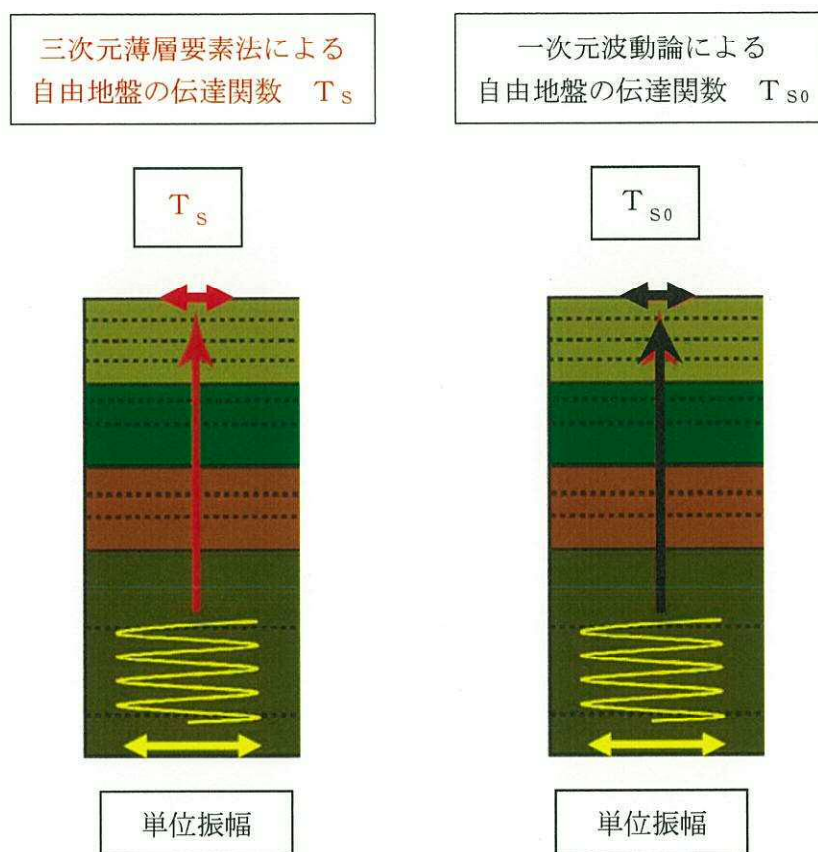


図 3-1 比較対象概要図

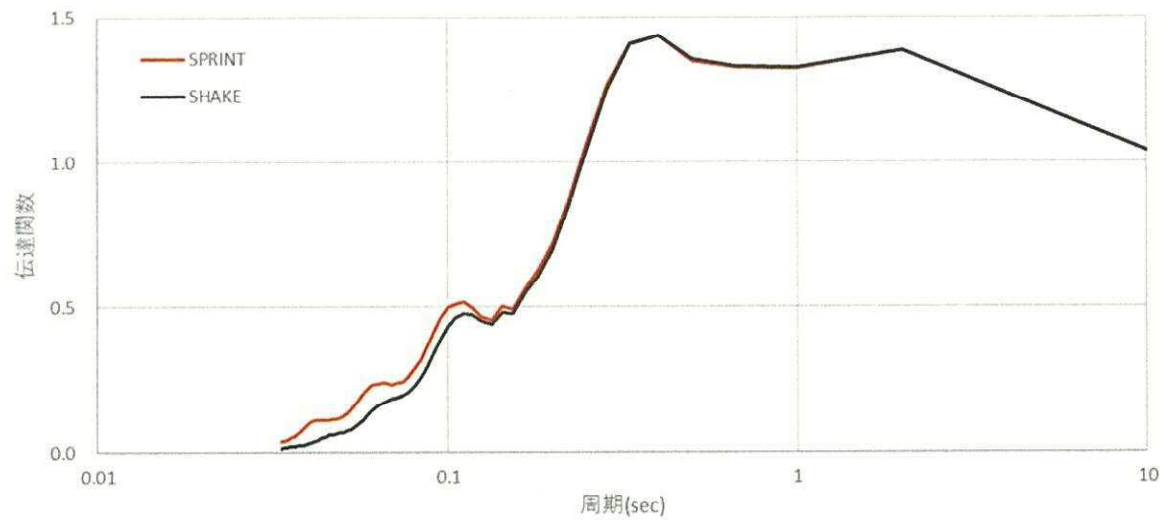


図 3-2 一次元波動論及び三次元薄層要素法による自由地盤の伝達関数の比較

4. 杭の拘束効果を考慮した有効入力動の適用性の検討

使用済燃料乾式貯蔵建屋への杭の拘束効果を考慮した有効入力動の適用性を確認するため、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いたシミュレーション解析を行った。地震観測記録と有効入力動を用いた解析結果の基礎上の床応答スペクトルの比較を図4-1に示す。

有効入力動を用いた解析結果は、建屋の1次固有周期、2次固有周期及び使用済燃料乾式貯蔵容器（以下、貯蔵容器という。）で観測記録と概ね同等以上となっており、使用済燃料乾式貯蔵建屋への杭の拘束効果を考慮した有効入力動の適用性を確認した。

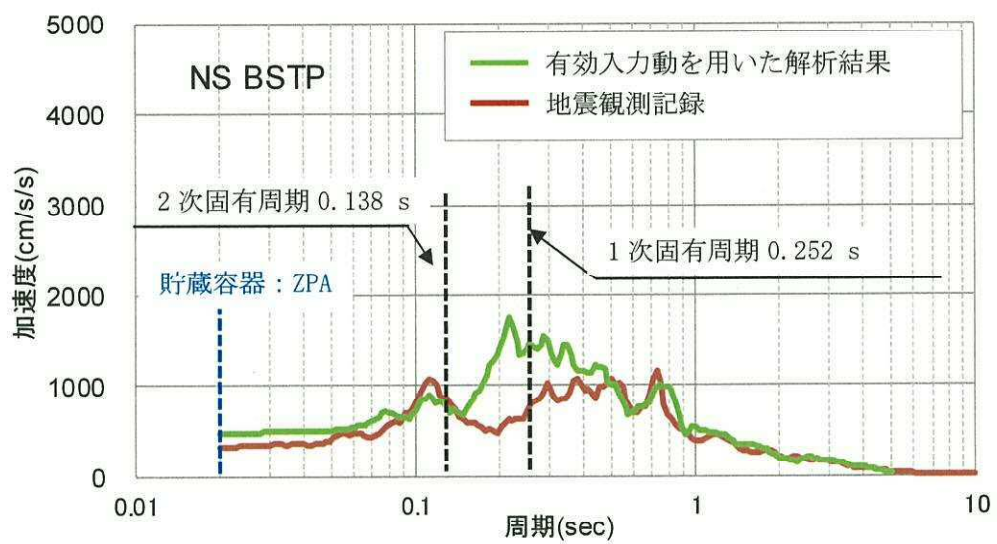
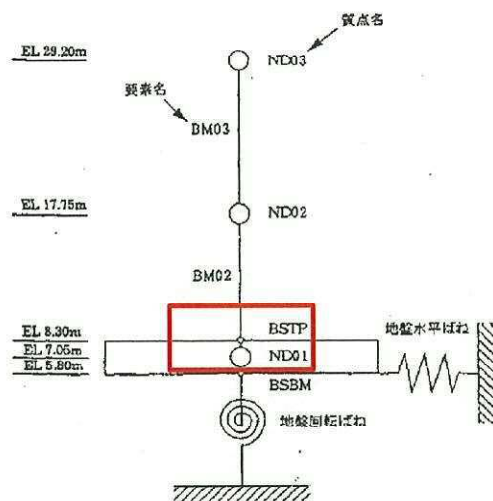


図 4-1 (1/3) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向, $h=5\%$)

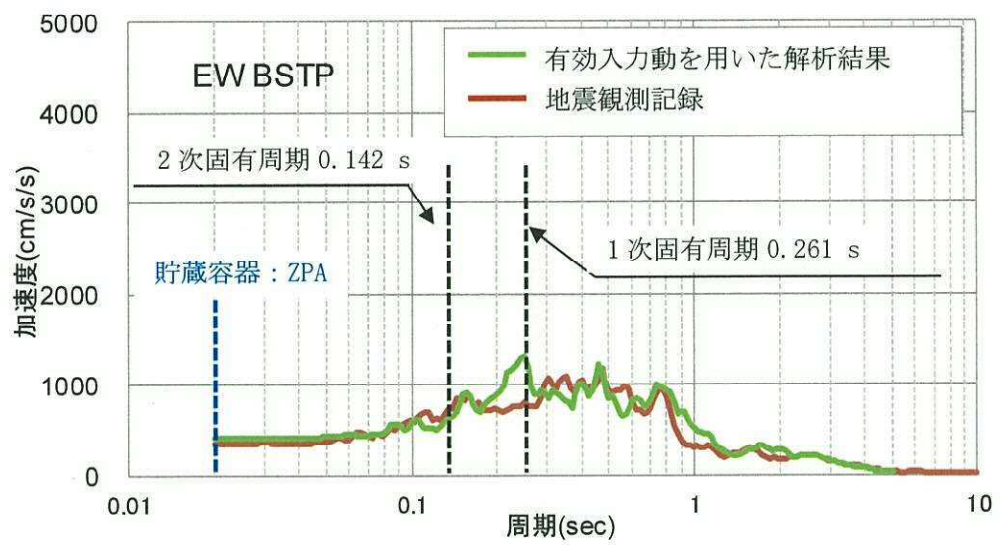
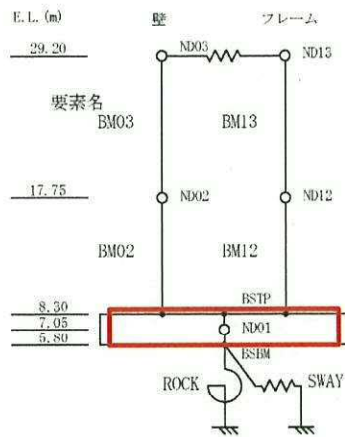


図4-1 (2/3) 床応答スペクトルの比較 (EW方向, $h=5\%$)

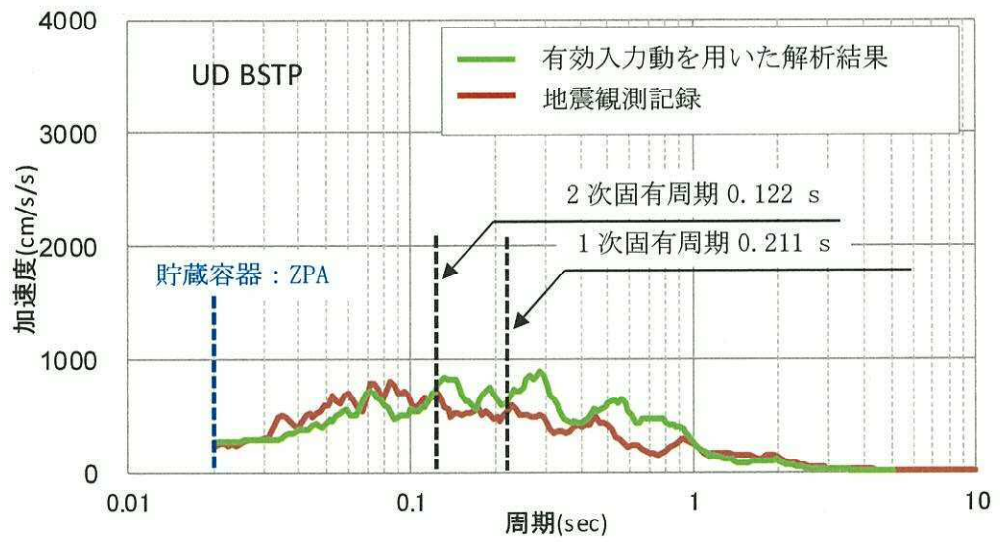
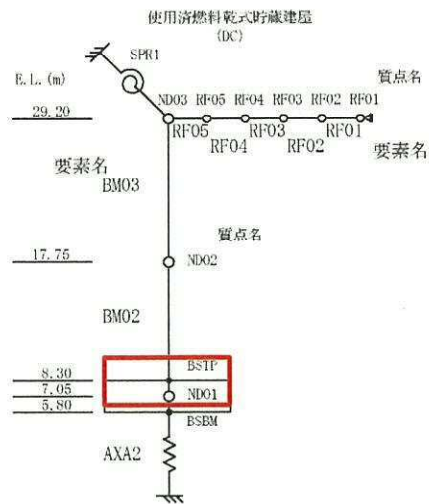


図 4-1 (3/3) 床応答スペクトルの比較 (UD 方向, $h=5\%$)

5. 基準地震動 S_s に対する有効入力動と自由地盤地震動の比較

基準地震動 S_s に対する杭の拘束効果を考慮した有効入力動を既工認手法による自由地盤地震動と比較を行った。比較は代表として基準地震動 S_s -D 1 に対して行った。

図5-1に一次元波動論により算定した自由地盤地震動 X_s の加速度応答スペクトルを示す。三次元薄層要素法により算定した自由地盤の伝達関数 T_s 及び杭拘束考慮の伝達関数 T_F を図5-2及び図5-3にそれぞれ示す。また、 T_s に対する T_F の比を図5-4に示す。最終的に算定された、NS方向及びEW方向の有効入力動の加速度応答スペクトルを自由地盤地震動の加速度応答スペクトルと比較して図5-5に示す。

杭の拘束効果を考慮した有効入力動は自由地盤地震動よりやや小さいことを確認した。

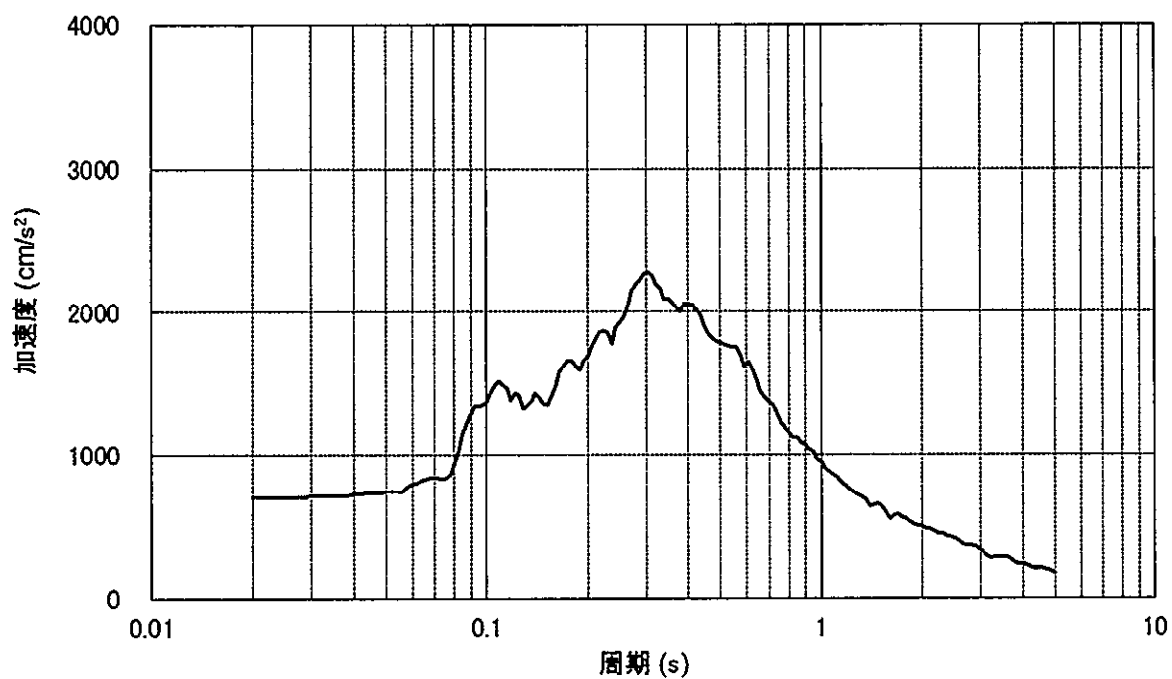


図 5-1 自由地盤地震動 (X_s) の加速度応答スペクトル ($S_s-D 1$, $h=5\%$)

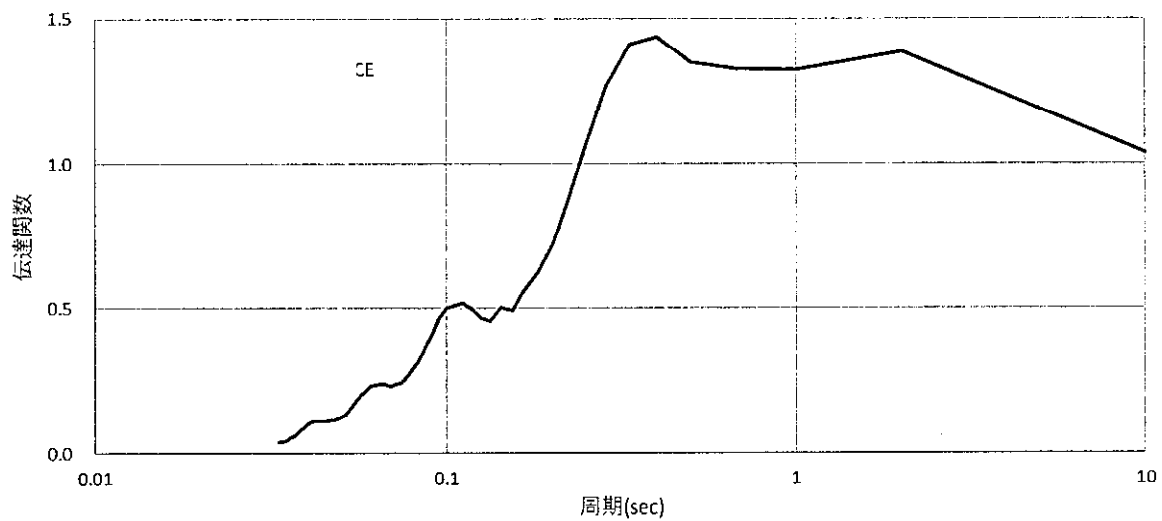
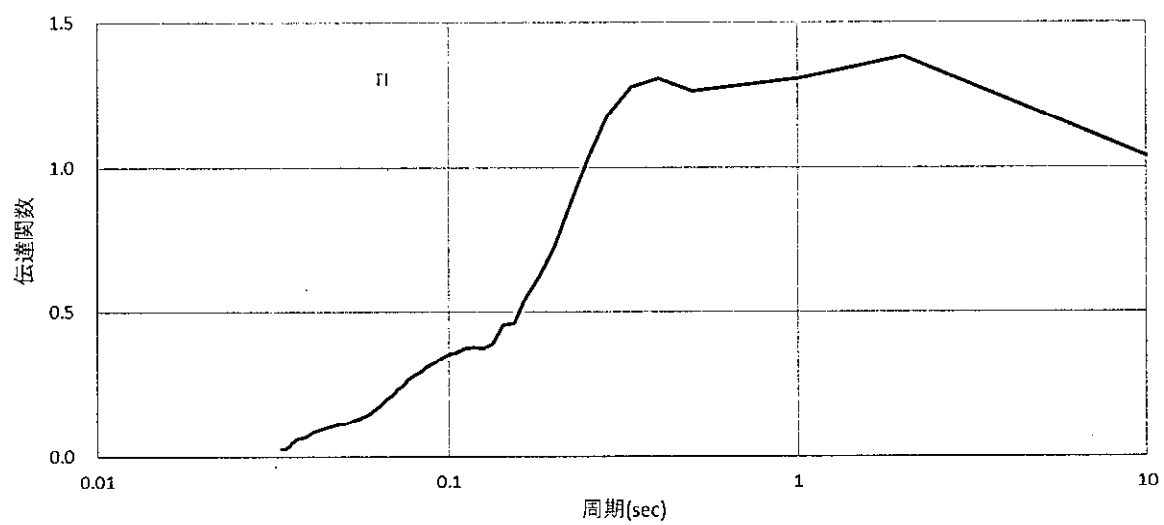
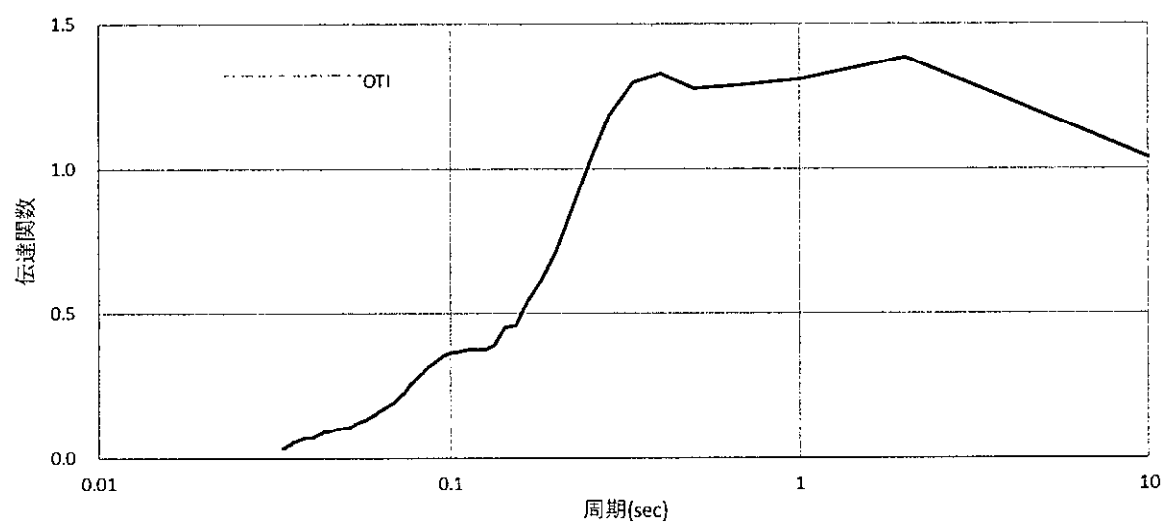


図 5-2 自由地盤伝達関数 (T_s)



(a) NS方向



(b) EW方向

図 5-3 杭拘束考慮の伝達関数 (T_F)

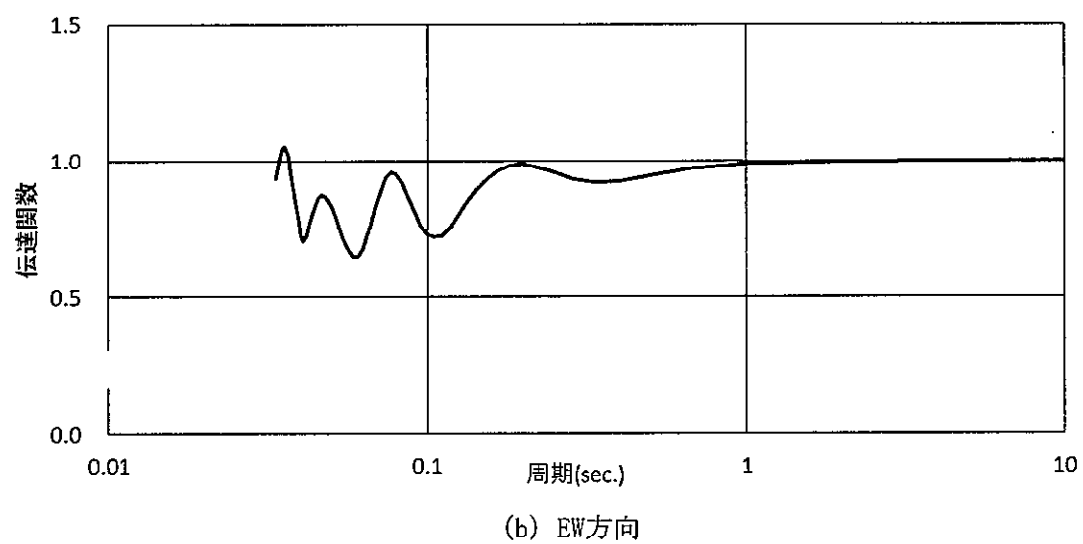
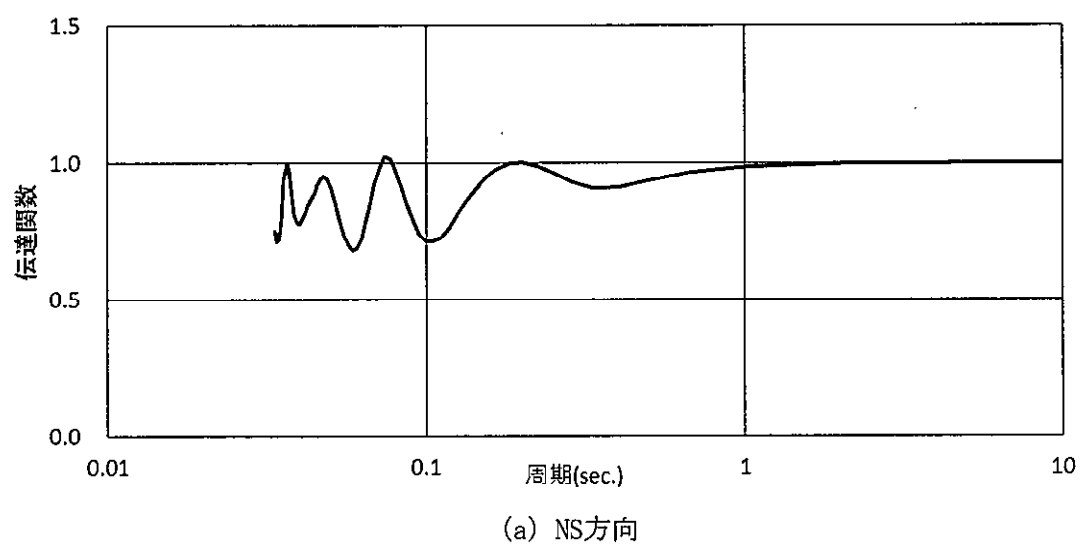
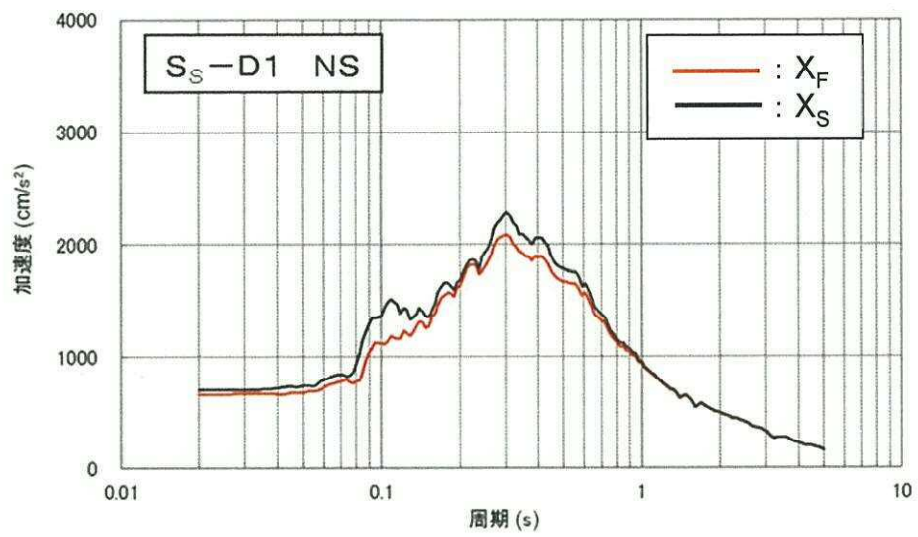
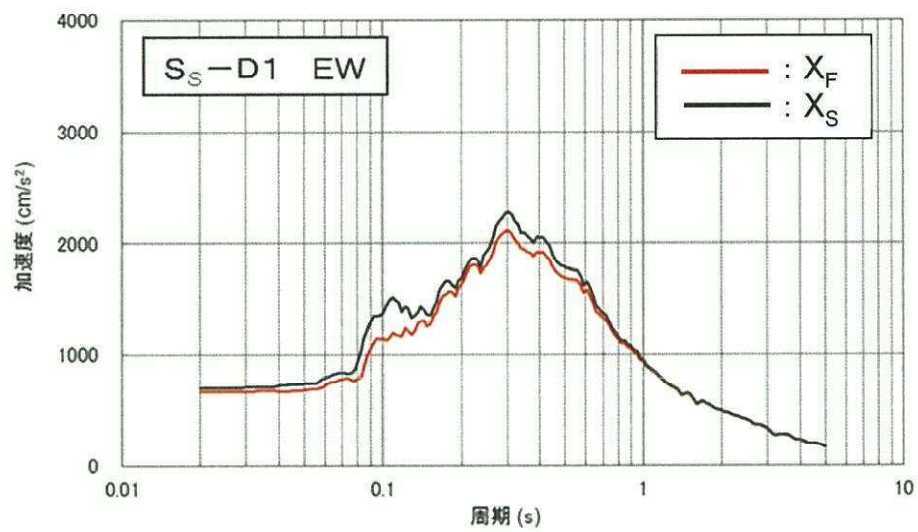


図 5-4 T_s に対する T_F の比



(a) NS 方向



(b) EW 方向

図 5-5 加速度応答スペクトルの比較 (h=5%)

【参考資料】規格基準等での有効入力動に関する記載

- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 1 6－2003 ((社) 日本電気協会, 2003)
- ・原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 1 6－2009 ((社) 日本電気協会, 2010)
- ・入門・建物と地盤との動的相互作用 ((社) 日本建築学会, 1996)
- ・建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計 ((社) 日本建築学会, 2006)

b) FEM モデル

FEM モデルは、一般に地盤及び杭基礎を二次元にモデル化し、杭基礎全体モデルとして応答解析を行う。FEM モデルでは、地盤を平面ひずみ要素、杭を梁要素、建屋を質点系あるいは平面ひずみ要素にモデル化する。また、地盤を軸対称要素、群杭をリング杭要素にモデル化した軸対称 FEM モデル^(7.3.2-6)による応答解析も可能である。地盤モデルの側面と底面の境界には、波動エネルギーの逸散を考慮するため、エネルギー伝達境界あるいは粘性境界などを設けて地盤の半無限性を考慮する。FEM モデルでは、群杭と地盤を直接モデル化することが可能であり、群杭効果や埋込み効果を考慮できる。また、液状化対策などの目的で実施する地盤改良の効果を直接取り込むことができる。

杭体や地盤の非線形性は、それぞれの要素に非線形特性を組み込んだモデルによる時刻歴応答解析により考慮する。

なお、二次元 FEM モデルや軸対称 FEM モデルによる解析では、三次元的に配置されている群杭を適切に二次元又は軸対称にモデル化する必要がある。

c) SR モデル

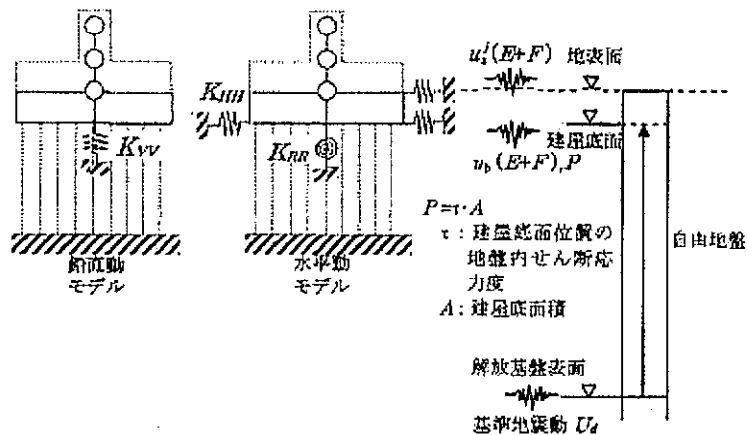
SR モデルでは、建屋を質点系にモデル化し、基礎底面位置に群杭と地盤との動的相互作用を考慮して評価した群杭ばね（水平ばねと回転ばね）を取り付けてモデル化する。基礎底面の群杭ばねは、地盤の成層性と半無限性を考慮した三次元薄層法による加振解などを用いて、群杭効果を考慮して評価することができる。また、杭本数が多本数となる場合には、2 本杭の柔性を重ね合わせる方法^{(7.3.2-9), (7.3.2-10)}や群杭係数を用いる方法などの近似解法^{(7.3.2-11), (7.3.2-12), (7.3.2-13)}により求めることができる。貯蔵建屋に埋込みが有る場合の側面地盤ばねは、質点系モデルと同様に Novak の方法などにより評価する。群杭ばねは、基礎スラブを剛体として評価した場合、水平ばね、回転ばね、水平・回転連成ばねの 3 成分が算定されるが、水平・回転連成ばねの影響は小さいため、通常考慮しなくてもよい。

群杭ばねは、複素数として振動数に依存した形で求められるが、時刻歴応答解析に用いる場合は「原子力発電所耐震設計技術指針 追補版 (JEAG 4601)」(日本電気協会)による近似法と同様に、地盤ばねの剛性に相当する実数部は振動数 $\omega = 0$ における値、すなわち、振動数に依存しない一定値として取扱うこととする。減衰に相当する虚数部は、建屋連成系の 1 次振動数 ω_1 における減衰定数 μ_1 を通る ω の 1 次式とする。

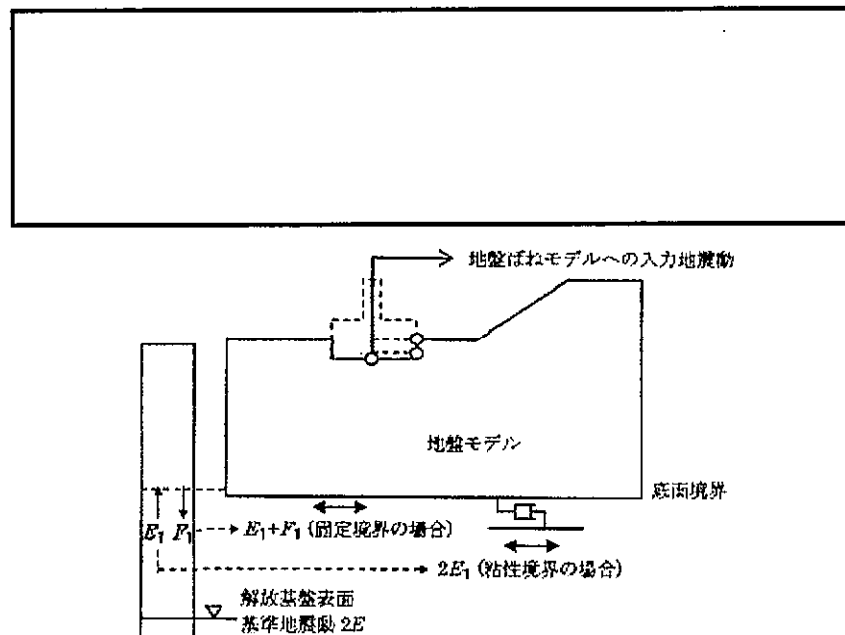
なお、SR モデルによって地震応答解析を行う場合には、杭体の応力と変形は

る。このとき、補正水平力 P は建屋底面位置における地盤のせん断応力度と建屋底面積との積として求める。

杭応答は、応答変位法により評価する。杭に作用する変動軸力は地震応答解析から得られる建屋の最大応答転倒モーメントを適切な方法により杭位置に配分して求める。杭の最大・最小軸力は、変動軸力に長期荷重による軸力及び鉛直方向の地震応答解析による軸力を組み合わせて評価する。



附図2.6-5 地盤ばねモデルへの入力地震動（一次元波動論による場合）



附図2.6-6 地盤ばねモデルへの入力地震動（分散系モデルによる場合）

3.3.3 基礎入力動

基礎入力動は基礎の剛性が地盤震動を拘束する効果を考慮した建物-基礎系への入力地震動であり，解析的には図3.13に示すごとく入力地震動を受けたときの無質量・剛体基礎の応答として求めることができる。鉛直入射S波 $E_0 \exp(i\omega t)$ に対するR1基礎の基礎入力動を図3.14に示す。縦軸は基礎入力動の水平成分 Δ^* および回転成分 ϕ^* に基礎の半幅 b を掛けた基礎端での上下変位 $\phi^* b$ を地表面の応答振幅 U_s で基準化した値である。R1基礎は地中架程度の埋め込みを有する直接基礎であるが，埋め込みのない地表面基礎では水平の基礎入力動は振幅比 Δ^*/U_s が1で回転成分 ϕ^* はゼロとなる。すなわち，基礎入力動は地表面の応答そのものになる。基礎が若干埋め込まれたことにより，上記の地表面基礎での基礎入力動の特性とは異なり，特に回転成分は振動数が高くなるにつれて大きくなる。水平成分の基礎入力動の振幅比は均質地盤G1においては振動数とともに減少するが，成層地盤G2とG3においては地盤の固有振動数の影響を受けて波打ち，固有振動数付近では谷になる。これは地盤の固有振動数で共振する地盤の応答を基礎が拘束していることに起因する。

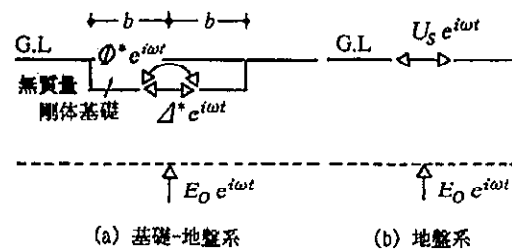


図3.13 基礎入力動

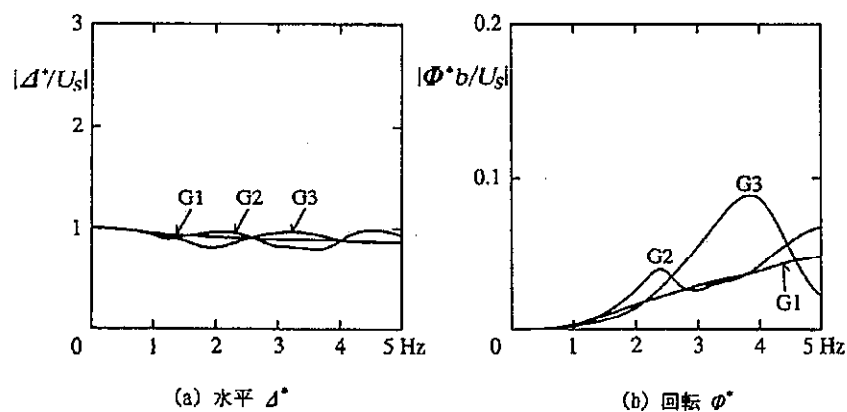


図3.14 基礎入力動：R1基礎

6.3.4 プログラムの流れ

図 6.3.6 に、直接境界要素法による動的相互作用解析プログラムの流れを示し、前 3 項の数式および留意点の参照箇所を位置付けた。まず、問題の定義において地盤物性、基礎形状、ならびに擾乱の種類が定義される。次に、境界要素法の要素積分とマトリックス解の評価が行われ、目的とする動的相互作用基本物理量が求められる。

境界要素積分の評価においては、対象振動数範囲に相応しい要素分割、使用するグリーン関数の選択と評価、ならびに境界要素特異積分および非特異積分の手法の選択が行われる。評価された影響関数（境界積分結果）にマトリックス演算を行う際には、外部問題において発生する内部固有値の取り扱いに注意が必要となる。

6.4 薄層要素法

薄層要素法または薄層法とは、弾性地盤における正弦的な被動伝播を求めるのに際し、地盤を水平な薄層に分割して水平方向には均質な連続体とするが、深さ方向には分割面で離散的に扱う方法に対して名付けられたものである¹⁷⁾。当初、この方法は有限要素法の普及とも関係して、地盤を規則領域と不規則領域とに分けたとき、規則領域の無限の広がり代わるエネルギー伝達境界の設定に応用されてきた¹⁷⁸⁾⁻¹⁸¹⁾⁻¹⁸²⁾。その後、同じ薄層モデルを用いて、任意節面上に正弦的な点加振を与えたときの波動伝播の解が解析的に導きだされた^{181),182),183)}。その結果、これを成層地盤のグリーン関数として用いることにより、サブストラクチャー法に基づいた三次元の動的相互作用解析が著しく簡易化されることになった。

一般に、弾性地盤における波動伝播の解は波数に関する無限積分で表され、その数値計算は極めて煩雑となる。しかしながら、薄層法ではこの無限積分が解析的に求められ、解がいわゆる Closed form で与えられる。したがって、計算効率の点で極めて有利となるため、

本節では、この薄層法について、その基礎方程式と導出される解の最終表現を示し、解の精度を検討して薄層モデル設定の際の注意点を述べる。また、薄層法の適用例として、ここでは群杭の動的相互作用問題をとりあげ、若干の数値解析例を紹介する。

6.4.1 薄層モデルにおける加振解

まず、図 6.4.1 のような半無限成層地盤に対し、薄層モデルを以下のように設定する。

- 1) 地盤の深さ方向にモデル化領域を定め、その成層状況および解析精度を考慮して多数の水平な薄層に分割する。ここに、各薄層は均質とし、層内では深さ方向の変位分布を直線に仮定する。
- 2) 各薄層節面に対し、その節面番号を地表面より順次 1, 2, ..., N と付す。この番号は節面下の層要素についても共用する。
- 3) 地盤の半無限性を考慮するため、最下層（第 N 層）をダッシュポットまたは半無限要素でモデル化する [図 6.4.2 参照]。

(2) 薄層領域の精度

10層モデルを用いて、最下層がダッシュボットの場合と半無限境界の場合について薄層領域による解の精度を検討する。ただし、前述の薄層分割による精度を考え、ここでは $r/H \geq 3$ および $n \geq 5$ をほぼ満足するようにモデルを設定してある。 $r/L=1/2$, 1 の場合について、 $\omega L/V_s$ を変数として求めた変位関数の比較を図 6.4.7 に示す。ここでも同様に、せん断波の1波長： λ とモデル深さ： L の関係の考えると、

$$m = \frac{\lambda}{L} \rightarrow \frac{\omega L}{V_s} = \frac{2\pi}{m} \quad (6.4.21)$$

一般の離散化手法では、対象振動数に対してモデル深さを $m=1$ 程度に選ぶ。そこで、ここでも式 (6.4.21) から $0 < \omega L/V_s \leq 6.0$ の範囲を対象とし、図の横軸には上記の $m=\lambda/L$ も示した。

まず、 r/L に着目してモデルの設定深さを考えると、図からはダッシュボットモデルの場合に $r/L \leq 1/2$ 、半無限境界モデルでは $r/L \leq 1$ となるように薄層領域を設けるのが望ましいといえる。さらにこのとき、ダッシュボットモデルおよび半無限境界モデルとも、水平加振に対しては $m \leq 4$ ($\omega L/V_s \geq 1.5$)、上下加振に対しては少なくとも $m \leq 2$ ($\omega L/V_s \geq 3.0$) となるように設定することもある。結局、ここでも加振点—受振点間距離： r とせん断波の1波長： λ の両者に対するバランスが問題となる。

(3) 薄層モデルの設定方法

以上の精度検討をまとめると、薄層モデルを設定する際の指標として、薄層分割については表 6.4.1 が、薄層領域については表 6.4.2 が提唱できよう。もちろん、現実の地盤は層序が複雑なこともあって、このように単純には設定できない場合もある。しかしながら、同表は薄層モデル設定の際のめやすになろう。

表 6.4.1 薄層分割 (分割層厚) の設定指標

r/H		$\lambda/H (\omega H/V_s)$	
少なくとも	できれば	少なくとも	できれば
>3	≥ 4	$>5 (\leq 1.25)$	$\geq 6 (\leq 1.0)$

表 6.4.2 薄層領域 (モデル深さ) の設定指標

r/L		$\lambda/L (\omega L/V_s)$	
ダッシュボット	半無限境界	水平加振	上下加振
$\leq 1/2$	≤ 1	$\leq 4 (\geq 1.5)$	$\leq 2 (\geq 3.0)$

6.4.4 薄層モデルによる群杭の動的相互作用解析

計算効率や成層地盤への適用性などにより、薄層モデルは埋込み基礎や杭基礎の三次元動的相互作用解析に広く用いられている。ここでは、最近注目されている群杭の動的相互作用解析について数値計算例を紹介する。

いま、図 6.4.8 (a) のような構造物—杭—地盤系を考え、サブストラクチャー法を適用して同

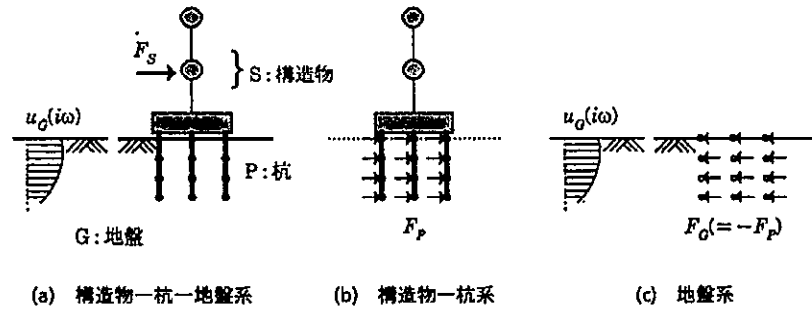


図 6.4.8 サブストラクチャー法による構造物—杭系と地盤系の分離

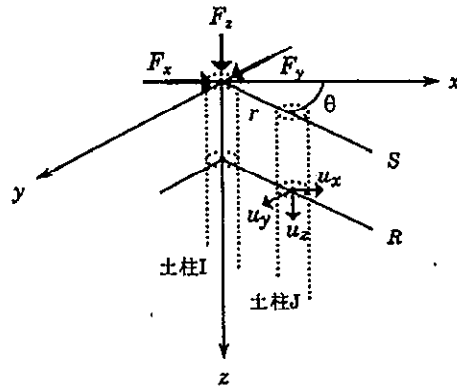


図 6.4.9 地盤系における加振力と変位の関係

図 (b), (c) のように構造物—杭系と地盤系に分離する。分離にあたっては、容積法を採用するのがこの場合には便利である。まず、同図 (c) の地盤系に着目して薄層モデルを設定し、杭と地盤とが連続する節点を薄層節面上に設ける。このように空間的に分布された節点群に対し、先の薄層解を適用して変位と加振力の関係式を求める。このとき、図 6.4.9 を参照して、杭と置き換わるすべての土柱に対し $I \neq J$ の場合には式 (6.4.8) を、 $I = J$ の場合には式 (6.4.11) または式 (6.4.13) を適用すると、変位と加振力の関係は次式で表す。

$$\begin{Bmatrix} \{u_x\} \\ \{u_y\} \\ \{u_z\} \end{Bmatrix} = [A(i\omega)] \begin{Bmatrix} \{F_x\} \\ \{F_y\} \\ \{F_z\} \end{Bmatrix} \quad (6.4.22)$$

または、これを簡単に $\{u\} = [A]\{F\}$ と表す。この関係式が求められていれば、以後はサブストラクチャー法に従い定式化すればよい。すなわち、図 6.4.8 を参照して相互作用力 F_p , F_g の釣り合い条件と変位の連続条件を考慮すると、最終的な運動方程式は以下のように導かれる。

$$\left(\begin{bmatrix} [K_{ss}] & [K_{sp}] \\ [K_{ps}] & [K_{pp}] - [K_p^0] + [A]^{-1} \end{bmatrix} - \omega^2 \begin{bmatrix} [M_s] & \\ & [M_p] - [M_p^0] \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} \{u_s\} \\ \{u_p\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{F_s\} \\ \{F^*\} \end{Bmatrix} \quad (6.4.23)$$

ここに,

$$\{F^*\} = [A]^{-1} \{u_0\}$$

ただし, $[K_{SS}]$, $[K_{PP}]$, ... および $[M_S]$, $[M_P]$, ... は, それぞれ構造物: S と杭: P の離散化表示による剛性マトリックスと質量マトリックスを意味する. とくに, $[K_{PP}]$ と $[M_P]$ は杭と同体積の土柱の剛性マトリックスと質量マトリックスを表す. また, $\{F_S\}$ は構造物に外部から作用する加振力ベクトルで, $\{F^*\}$ は地震時に杭に作用するドライビングフォースベクトルである.

数値例¹⁰⁾として, 杭径: B に対する杭中心間隔: S の比が $S/B=2.5$ の場合について, 杭本数: N をパラメーターに求めた群杭の水平インピーダンスを図 6.4.10 に示す. 同図には参考のため単

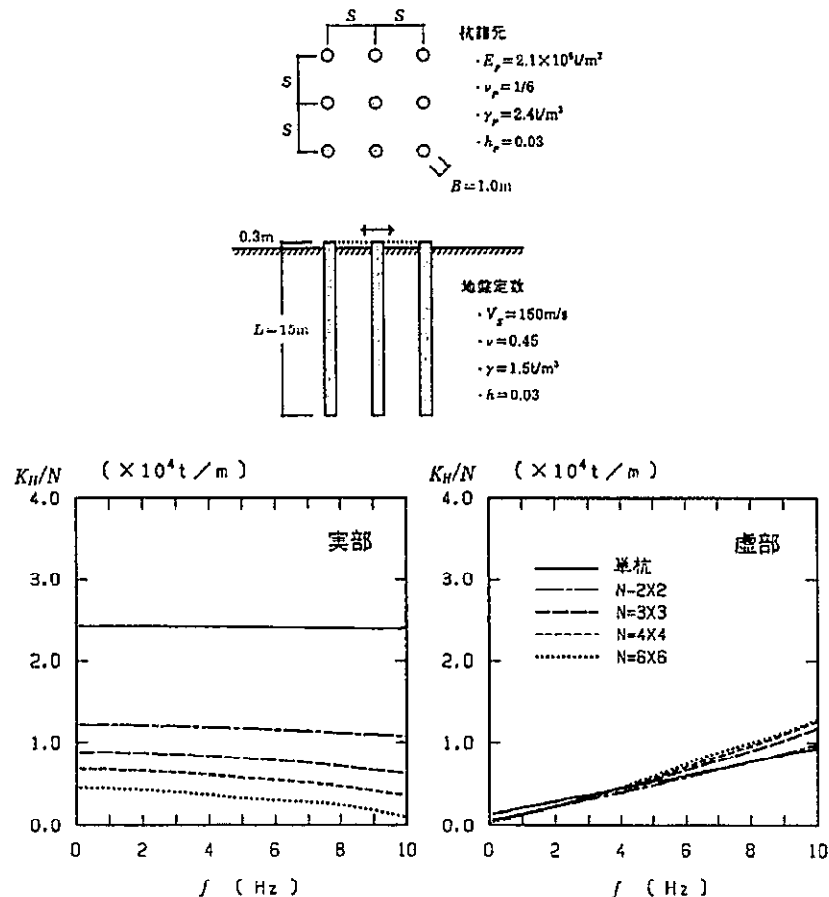


図 6.4.10 群杭の水平インピーダンス (杭間隔比: $S/B=2.5$)

1.2.3 慣性の相互作用と入力相互作用

相互作用を理解するには、図1.2.4に示すように、建物と地盤とを分離して考えると分かりやすい。この考え方は、後に、動的サブストラクチャー法として解説されているが、ここでは導入部としてその概要を示しておく。

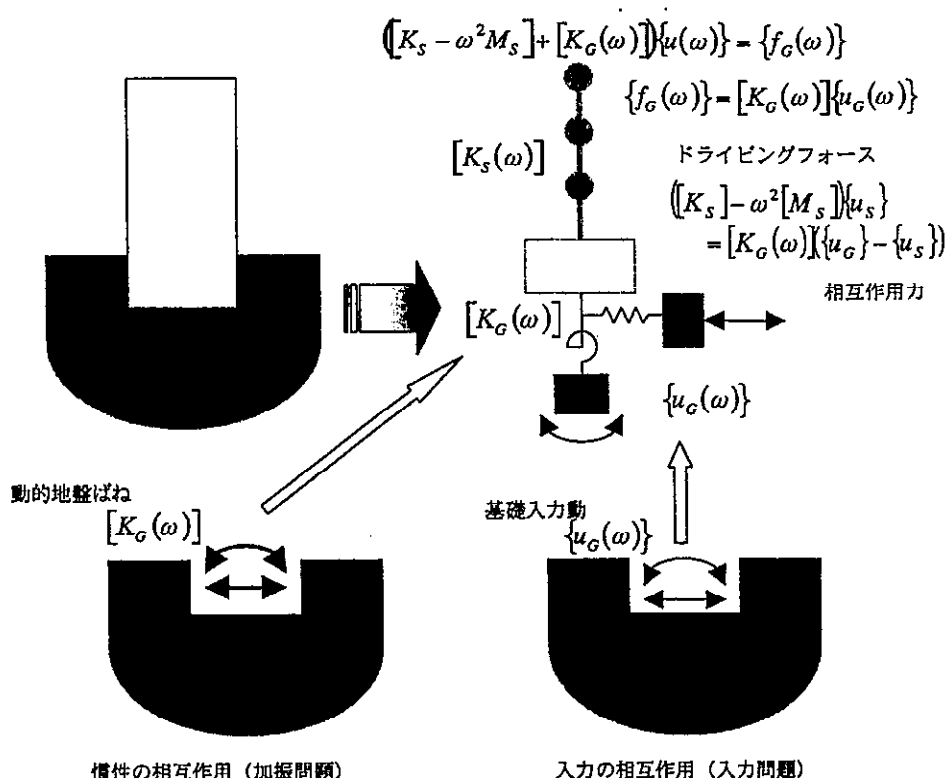


図 1.2.4 建物と地盤とを分離した解析

まず、建物が存在しない状態（建物部を切り欠いた地盤）を想定する。このときの建物と地盤との境界部での力－変位関係を、「動的地盤ばね」と呼んでいる（相互作用ばね、インピーダンスなどとも呼ぶ）。また、地震動が入射したときの建物－地盤境界部での動きを、「基礎入力動」と呼んでいる。基礎入力動は、地盤ばねを介して建物に作用する入力地震動に相当する。動的地盤ばねと基礎入力動を求める問題を、それぞれ、「加振問題」、「入力問題」と呼び、それぞれの相互作用効果を「慣性の相互作用」、「入力の相互作用」と呼ぶ。上に示した地盤ばねや地下逸散減衰は慣性の相互作用効果の一つ、入力損失は入力の相互作用効果の一つである。

動的地盤ばねと基礎入力動の積は「ドライビングフォース」と呼ばれる。ドライビングフォースは、地震動が入射したことによって生じた建物－地盤境界部の変位を、元に戻すために必要となる力である。この力が、作用・反作用の関係で上部構造に作用することになる。

したがって、上部構造物の運動方程式には、剛性行列に動的地盤ばねが加わり、外力ベクトルにドライビングフォースが与えられることになる。動的地盤ばねは、建物の存在の有無による変位差（基礎の応答変位と基礎入力動との相対変位）に比例した抵抗力を生み出す。これが建物と地盤との間でやりとりされる「相互作用力」である。

6.4 基礎入力動の評価

6.4.1 杭基礎の基礎入力動の特徴

杭基礎建物の入力動は、直接基礎のように表層地盤の地表面応答波がそのまま上部構造に入力されるのではなく、地盤内に存在する群杭が表層地盤の挙動を拘束するため、自由地盤の応答波とは異なる。図 6.4.1 は薄層法を用いて求めた杭基礎の基礎入力動を、自由地表面の応答に対する比（応答倍率）として示している。地盤モデルは 3 章の図 3.3.3 に示した地盤-2 の地盤モデル（支持層 GL-25m）であり、液状化層がない場合と考慮した場合である。杭径は 1200mm と 1500mm、杭間距離は 6m とし、杭本数は $2 \times 2 = 4$ 本と $6 \times 6 = 36$ 本としている。

地盤の 1 次固有振動数に相当する 1Hz 以下の低振動数では、基礎入力動の振幅は自由地表面を下回り、いわゆる「入力損失効果」が見られる。その低減効果は、群杭が表層地盤の挙動を拘束する効果に応じて杭本数が多く、杭径が大きくなるほど大きくなる。また液状化層を考慮した地盤では入力損失効果が顕著に見られるが、杭本数が多い杭基礎では 2Hz 付近の高振動数域で自由地盤に比べ大きくなる場合がある。これは、液状化層をもつ自由地盤では地盤の非線形化による減衰効果により増幅が抑えられるのに対し、杭基礎では杭の支持層地盤から直接杭体を伝わり上部構造に入力する地震動成分があるためである。このような杭基礎への基礎入力動の性状は、群杭効果と同様に杭径、杭長、杭間距離、地盤剛性によって異なる。杭基礎と上部構造をモデル化した一体型モデルを用いた応答解析ではこのような基礎入力動の影響は自動的に考慮されるが、分離型モデルでは別途基礎入力動を評価して SR モデルに入力する必要がある。

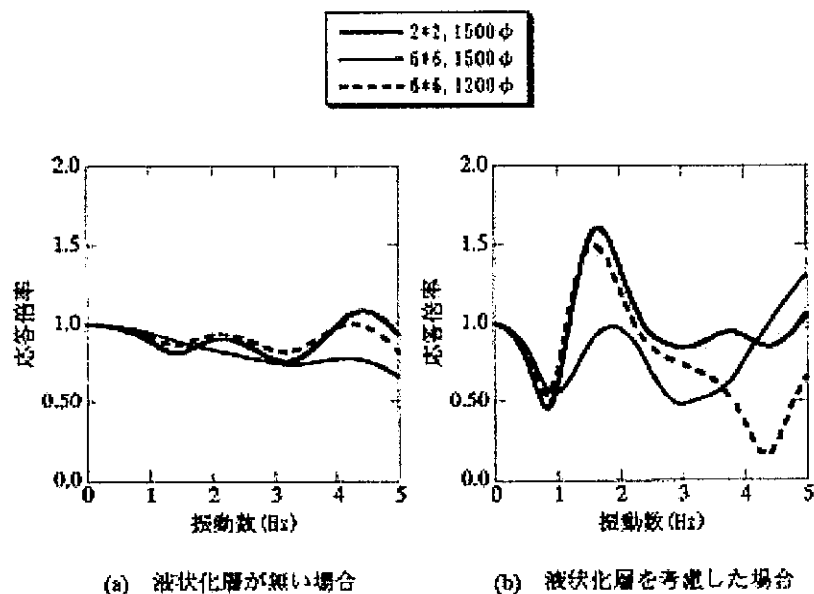


図 6.4.1 自由地表面の応答に対する杭基礎の基礎入力動の比

別紙 2-2 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの変更について

目次

1. 概要	別紙 2-2-1
2. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの変更について	別紙 2-2-2
3. 既工認モデルとの比較	別紙 2-2-15
4. FEMモデルの固有値解析結果との比較	別紙 2-2-20
5. 質点系モデルとFEMモデルによるスペクトル比較	別紙 2-2-22

1. 概要

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデル（以下「DC 今回工認モデル」という。）は、基本的に建設工認時の地震応答解析モデル（以下「DC 既工認モデル」という。）に基づき設定しているが、解析モデルの精緻化を目的とし、DC 既工認モデルから変更を行っている。本資料では、使用済燃料乾式貯蔵建屋のモデルについて変更の概要及び影響確認結果を示すことで、DC 今回工認モデルの妥当性を確認する。

2. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの変更について

地震応答解析モデルは、以下の方針に基づいて、DC 既工認モデルから変更する。

NS 方向の耐震壁には、金属キャスク冷却のために上階及び下階に大開口が設けられている。NS 方向の DC 既工認モデルでは、剛床仮定に基づいて弾性剛性を設定し 1 本棒多質点系モデルを構築した。このモデルによる S_2 地震の建屋応答は弾性範囲に収まっていた。DC 今回工認モデルでは、弾性剛性が S_2 地震時の非線形挙動に大きな影響を及ぼすため、大開口の影響をより適切に反映できる 3 次元全体 FEM モデルによる等価弾性剛性を採用することに変更する。3 次元全体 FEM モデルは既工認の応力解析で用いた全体モデルとする。図 2-1 に 3 次元全体 FEM モデルによる等価剛性の設定フローを示す。壁脚部 (EL. 8.3 m) を固定とした FEM モデルを用いて、NS 方向載荷時の各階床レベルでのせん断変形及び屋根レベルでの曲げ変形を算定する。

まず各階床レベルの鉛直自由度を拘束 (水平ローラー) したせん断変形解析を実施し、得られたせん断変形に適合する各層の等価せん断剛性を算定する。続いて、鉛直自由度の拘束条件を解除した曲げせん断変形解析を実施し、屋根レベルの全体変形 (曲げ+せん断変形) を算定する。屋根レベルの曲げ変形は、全体変形からせん断変形を差し引くことにより求める。等価曲げ剛性 I_e は、FEM モデルによる曲げ変形と既工認モデルの曲げ剛性をベースとする曲げ変形が等しくなるように設定する。そのため、既工認モデルの上層と下層の曲げ剛性の比率を変えないという条件で、両者の曲げ変形が等しくなるように係数を決定し、各層の曲げモーメントにその係数を乗じた値を等価曲げ剛性とする。

耐震壁のせん断スケルトンカーブの各折点せん断力は、竣工図に基づき、J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づき算定した。図 2-2 に各耐震壁の配筋図 (EL. 8.3 m ~ EL. 17.75 m) を示す。図 2-3 にせん断スケルトンカーブ算定で考慮した耐震壁を黒塗りで示す。図中には、「鉄筋コンクリート構造設計基準・同解説」により設定した耐震壁の協力幅をカッコつき数字で示す。設定したせん断スケルトンカーブを図 2-4 に示す。

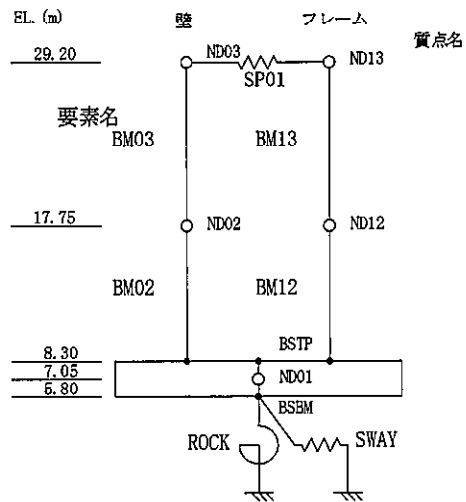
図 2-5 にガラリ周辺部について FEM モデルの拡大図を示す。下層階のガラリ高さに対する柱幅の比は $4.12 \text{ m} / 1.2 \text{ m} = 3.4$ 、上層階のガラリ高さに対する柱幅の比は $3.0 / 1.2 = 2.5$ となっている。

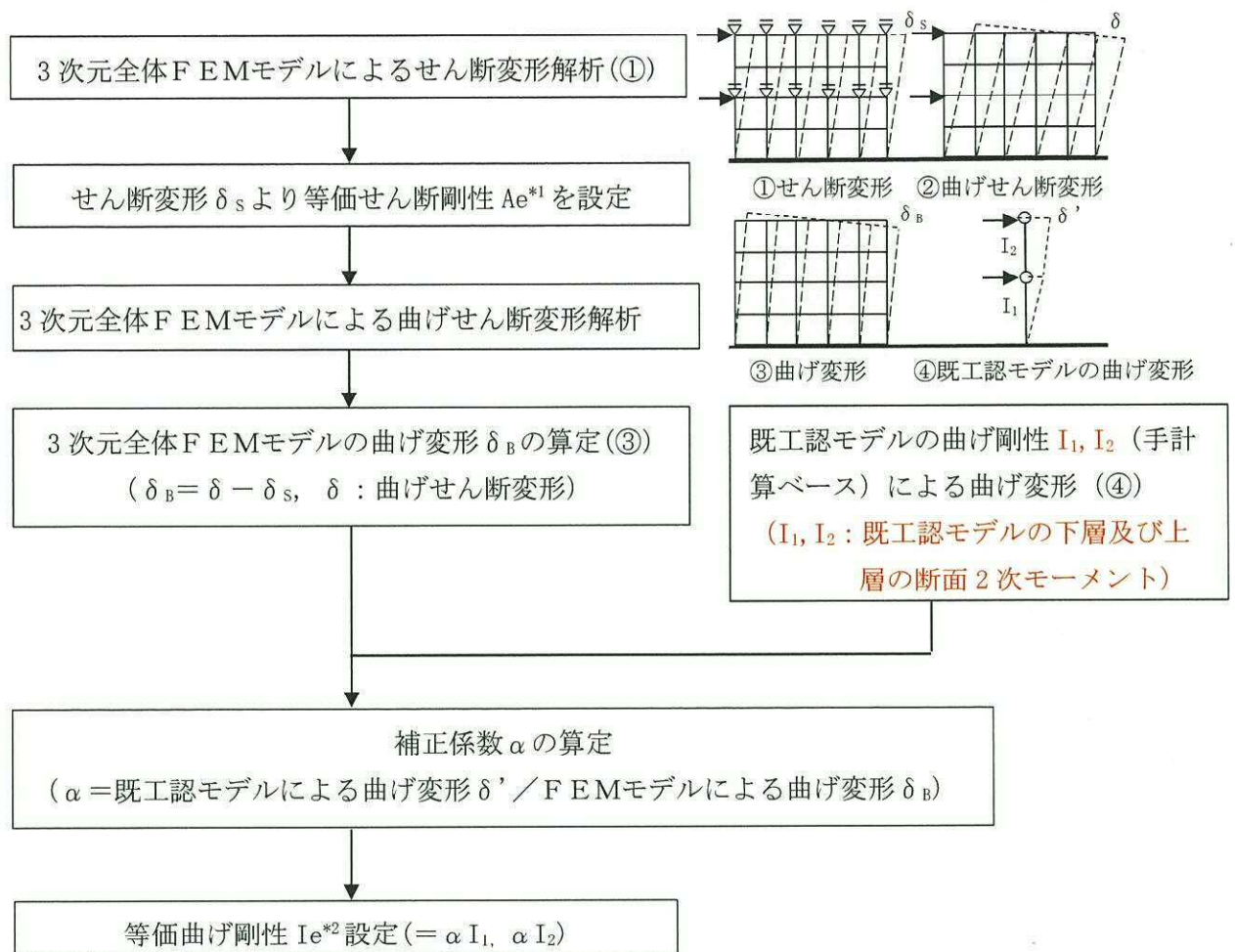
一方、EW 方向の DC 既工認モデルは、NS 方向に細長い形状をしている使用済燃料乾式貯蔵建屋の EW 方向振動に対して、妻側耐震壁と中央のフレームを集約して 1 本棒多質点系モデルを構築した。DC 今回工認モデルでは、S₀地震時の非線形挙動を精度良く表現する必要があるために、妻側耐震壁が主要な耐震要素であることを考慮し、妻側耐震壁と耐震壁間のフレームに分離してそれぞれ 1 本棒でモデル化し、屋根スラブを模擬したせん断ばねで連結した 2 本棒多質点系モデルに変更する。図 2-6 に DC 今回工認モデル（EW 方向）を、図 2-7 に壁とフレームのモデル化範囲を、図 2-8 に屋根スラブのせん断ばね置換の概要を示す。EW 方向モデルは、竣工図に基づき壁部及びフレームの剛性を評価した。壁部のせん断剛性及び曲げ剛性は黒塗りした 2 枚の妻側耐震壁のせん断剛性及び曲げ剛性の和で評価した。壁部のせん断剛性は地震方向に平行な要素のみで評価する。壁部の曲げ剛性の算定には協力幅を考慮する。フレームの弾性剛性は妻側耐震壁の弾性剛性と比較して小さいので、門型構面としての評価ではなく、柱の個々のせん断剛性及び曲げ剛性の和で評価した。図 2-9 に解析モデルの概念図を示す。

耐震壁のせん断スケルトンカーブは J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づき算定した。フレームの層間変形角の一覧を表 2-1 に示す。フレームの層間変形角の最大値は $1/1070$ であり、「技術基準解説書」の層間変形角の制限値 $1/120$ を十分に下回っている。従って、フレームは復元力特性を設定せず線形とした。図 2-10 にせん断スケルトンカーブ算定で考慮した耐震壁を黒塗りで示す。図中には、カッコつき数字で耐震壁の協力幅も示す。設定したせん断スケルトンカーブを図 2-11 に示す。

表 2-1 フレームの層間変形角の一覧

要素 番号	フレームの層間変形角							
	S_s-D1	S_s-11	S_s-12	S_s-13	S_s-14	S_s-21	S_s-22	S_s-31
BM13	1/1690	1/4380	1/3810	1/3420	1/3440	1/2290	1/2200	1/1270
BM12	1/1380	1/2430	1/3060	1/2810	1/2460	1/1910	1/1370	1/1070





注記 *1: 等価せん断断面積 Ae の算定方法

$$Ae = \frac{P \cdot H}{G \cdot \delta_s}$$

ここに, P : 水平荷重

H : 層高さ

G : コンクリートのせん断断面係数

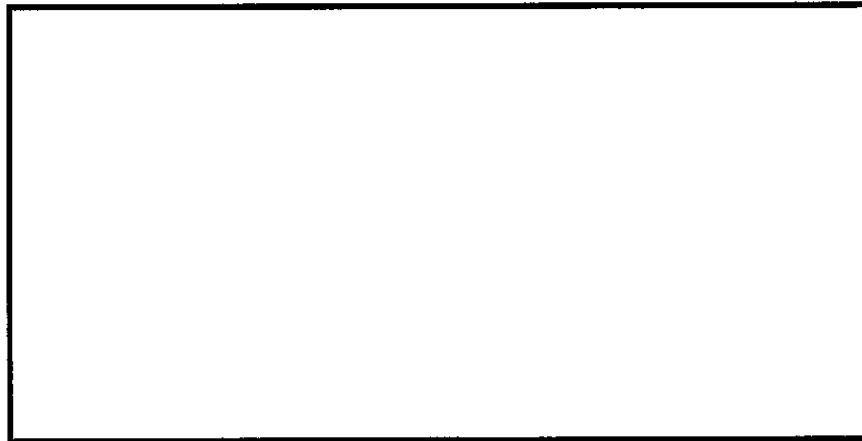
δ_s : せん断変形

*2: 等価曲げ剛性 Ie の算定方法

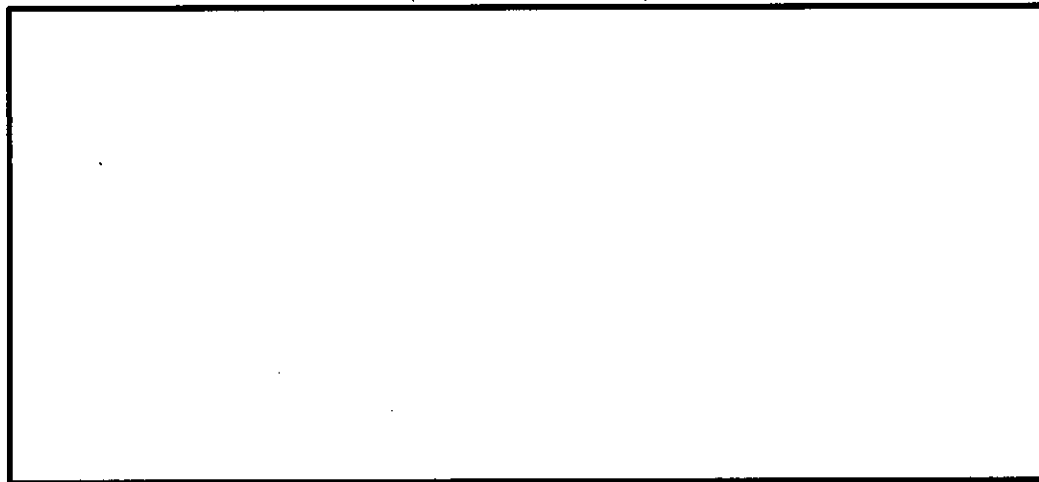
FEMモデルによる曲げ変形 δ_B と既工認モデルの曲げモーメントを上層, 下層とも一律に α 倍したときの曲げ変形が等しくなるように α を決定する。曲げモーメントを α 倍すると曲げ変形は $1/\alpha$ となるので, 次式が成り立つ。

$$\delta_B = \delta' / \alpha \Rightarrow \alpha = \delta' / \delta_B$$

図 2-1 3次元全体FEMモデルによる等価剛性 ($Ae \cdot Ie$) の設定フロー (NS 方向)



中間床伏図 (1)
(EL. 10. 8M~EL. 17. 75M)

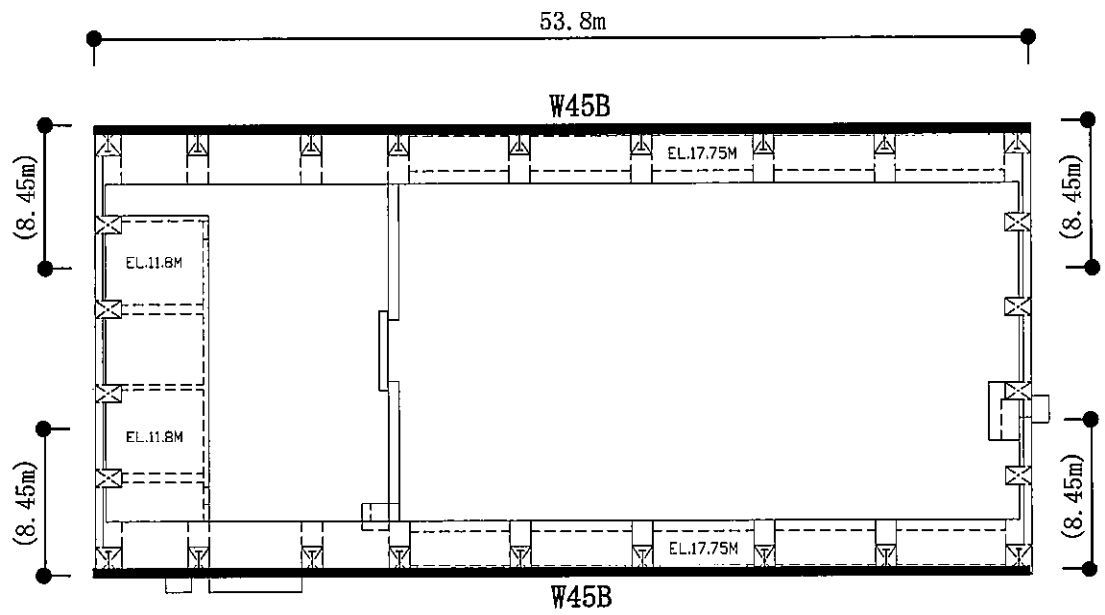


1 階 伏 図
(EL. 8. 3M)

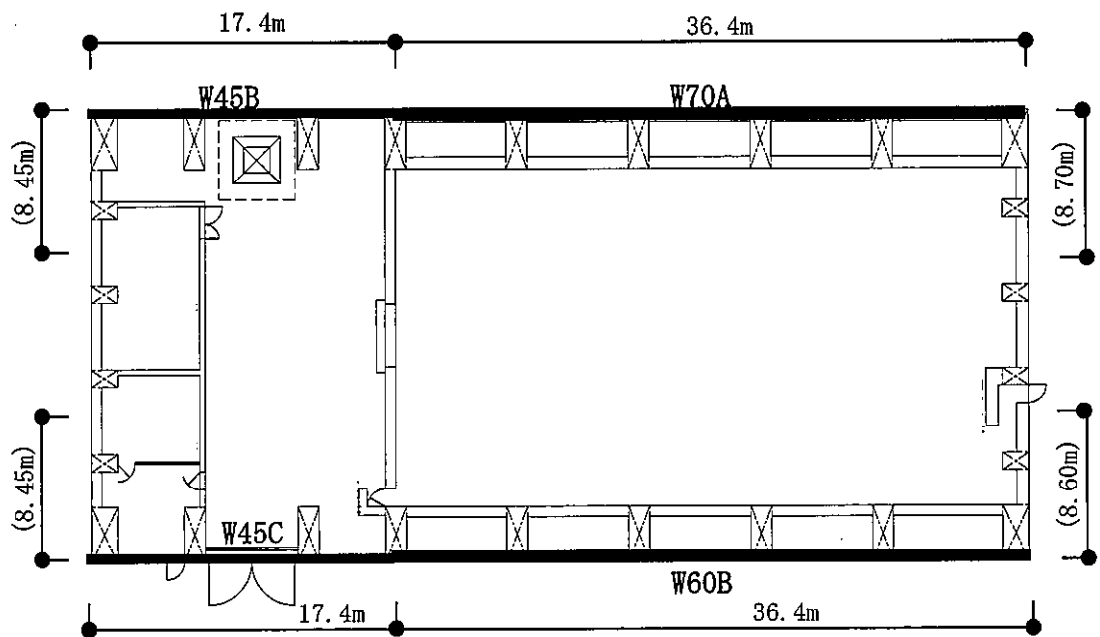
記号	縦筋	横筋
W45A	内 : D22@250 外 : D22@250	内 : D22@250 外 : D22@250
W45B	内 : D25@250 外 : D25@250	内 : D25@250 外 : D25@250
W45C	内 : D25@250 外 : D25@250	内 : D29@250 外 : D29@250
W60B	内 : D29@250 外 : D29@250	内 : D29@250 外 : D29@250
W70A	内 : D29@250 外 : D29@250	内 : D29@250 外 : D29@250

注 : 記号に含まれる数値は壁厚 (cm) を表す。(例 : W45A なら 45 cm)

図 2-2 の耐震壁の配筋図 (EL. 8. 3 m~EL. 17. 75 m)



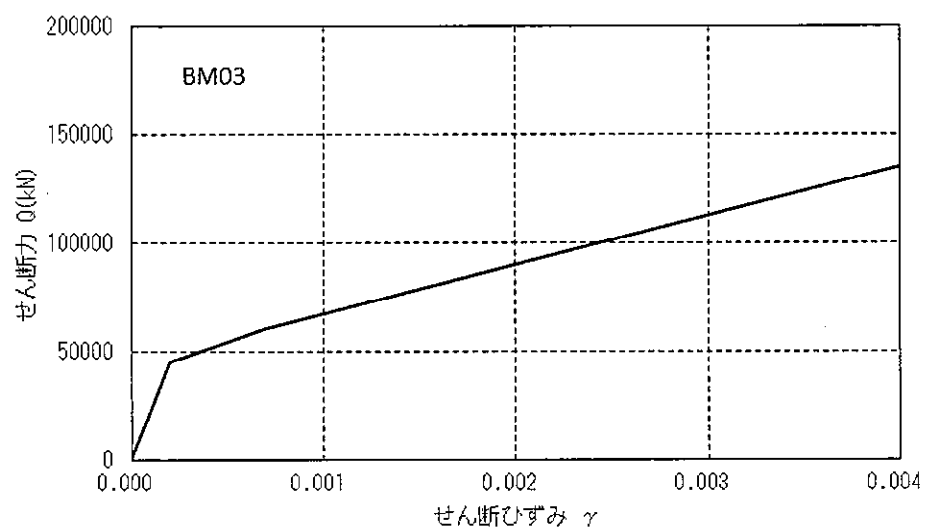
(a) BM03



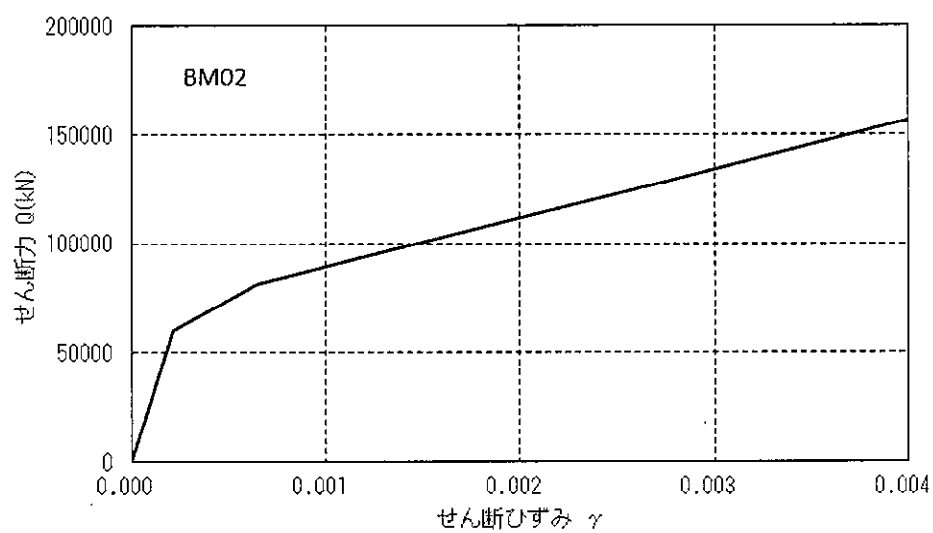
(b) BM02

注 : カッコつき数字は耐震壁の協力幅を示す。

図 2-3 せん断スケルトンカーブ算定で考慮した耐震壁 (N S 方向)

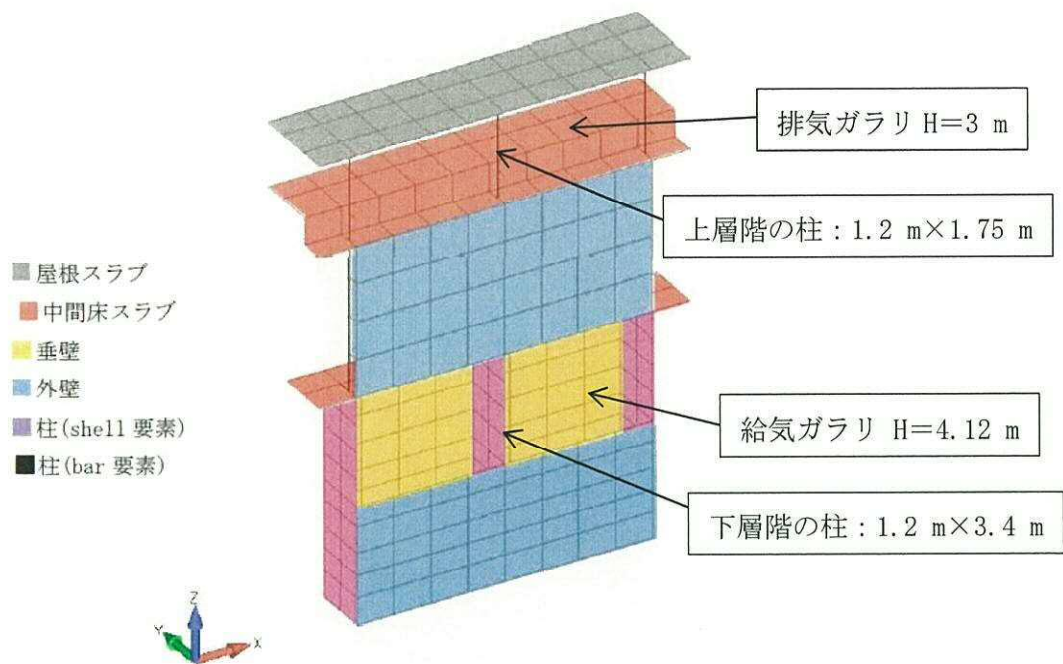


(a) BM03

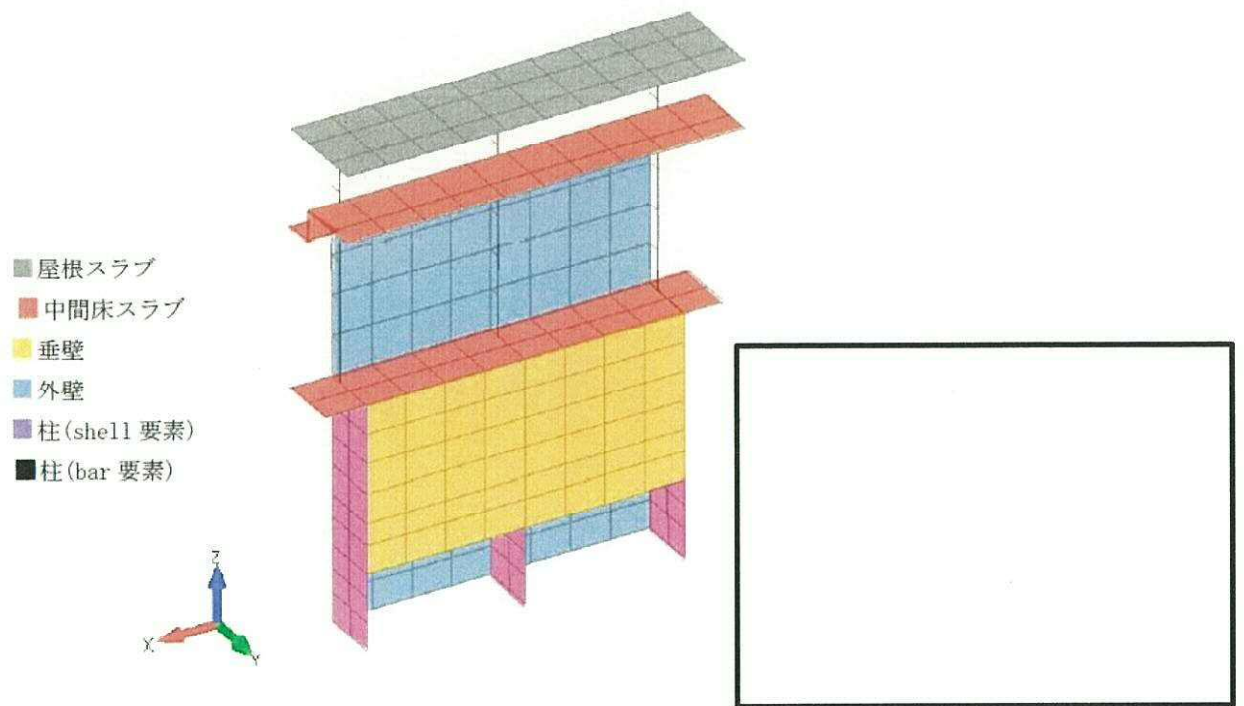


(b) BM02

図 2-4 せん断スケルトンカーブ (NS 方向)



(a) 建屋外側



(b) 建屋内側

図 2-5 FEMモデルの拡大図 (NS方向)

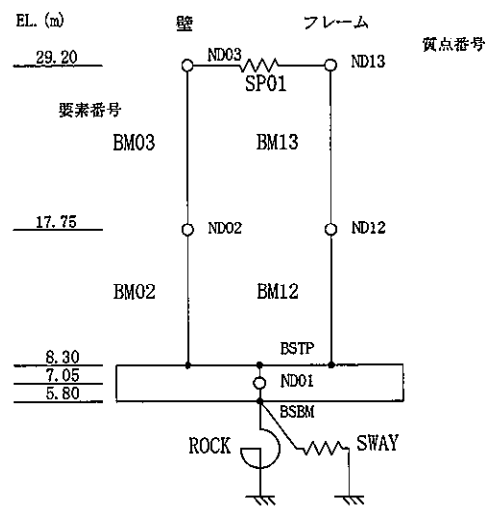


図 2-6 DC 今回工認モデル (EW 方向)

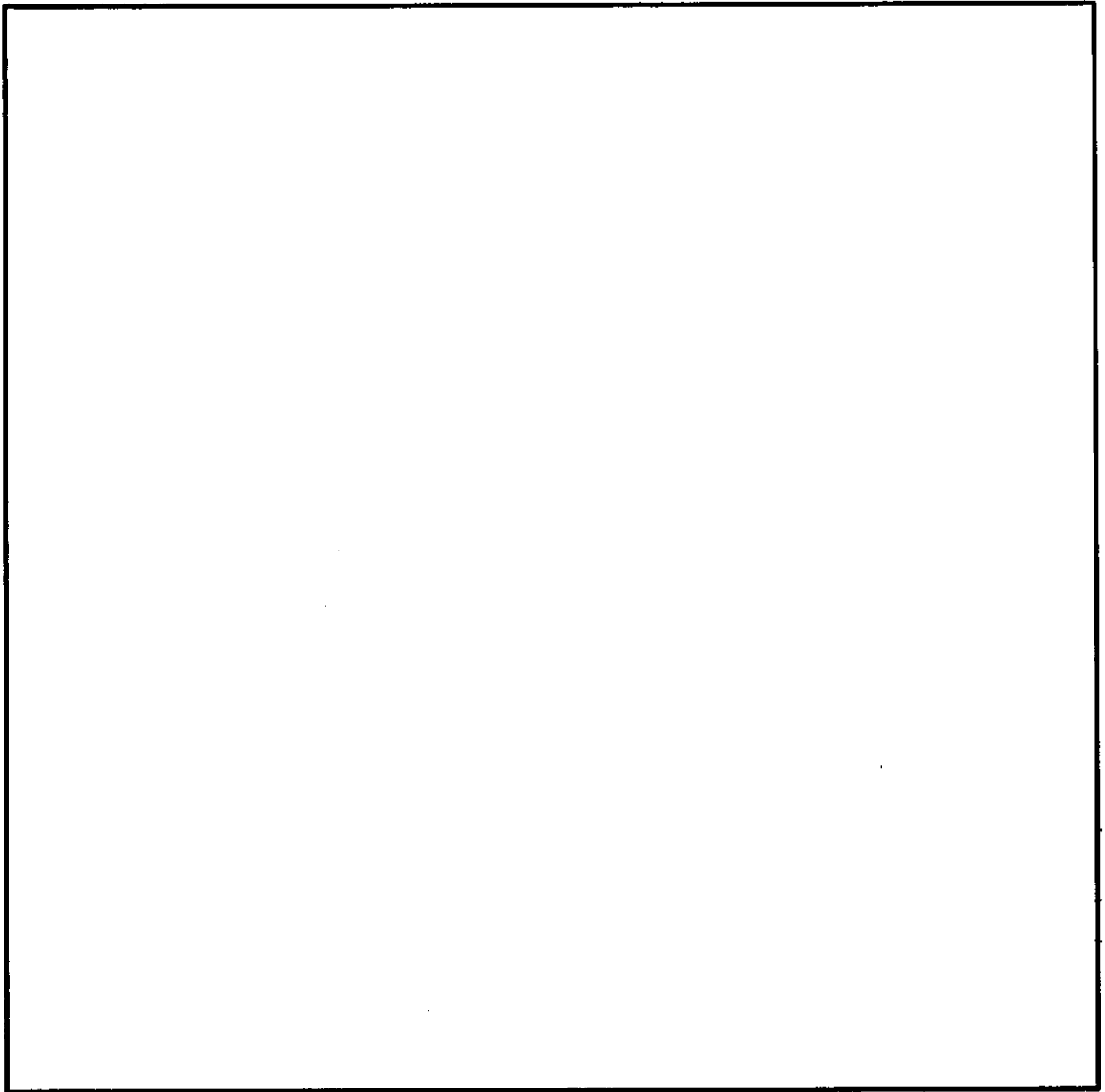
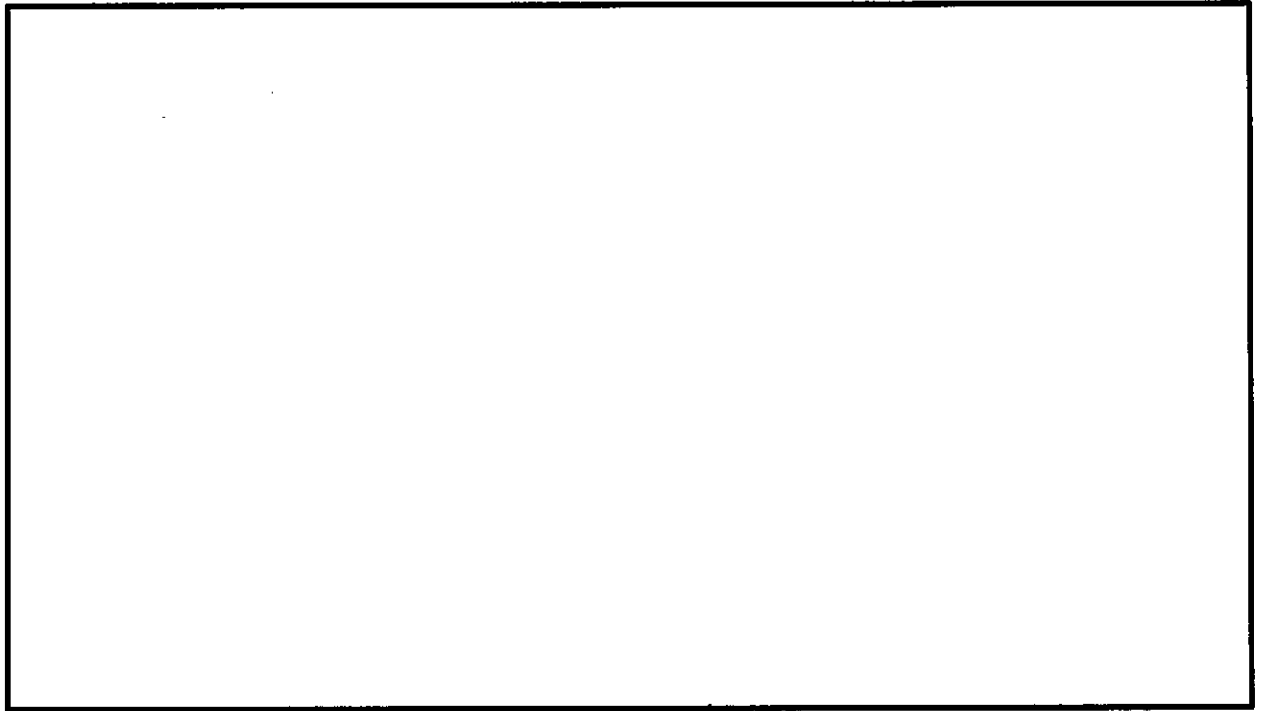


図 2-7 壁とフレームのモデル化範囲 (BW 方向)

柱断面寸法が $B \times D$ の場合のフレームの弾性剛性

注 1 : せん断剛性 $A_s : (B \cdot D) \times \text{柱本数}$

注 2 : 曲げ剛性 $I : (B \cdot D^3) / 12 \times \text{柱本数}$



屋根スラブのせん断断面積 $A = 45 \text{ (cm)} \times 2600 \text{ (cm)}$
 $= 117000 \text{ (cm}^2\text{)}$

壁質点とフレーム質点の距離 $L = 5230/2 \text{ (cm)}$
 $= 2615 \text{ (cm)}$

せん断弾性係 $G = 95.6 \text{ (tf/cm}^2\text{)}$

屋根スラブのせん断ばね定数 $K = 2 \text{ GA/L}$
 $= 8550 \text{ (tf/cm)}$

図 2-8 屋根スラブのせん断ばね置換の概要

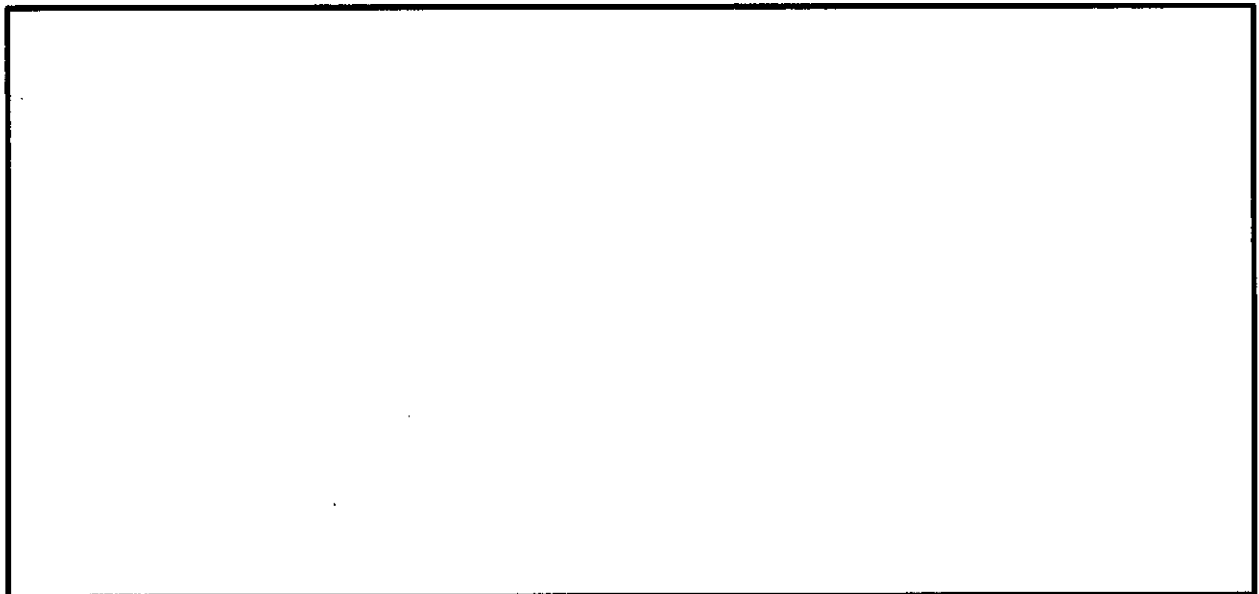
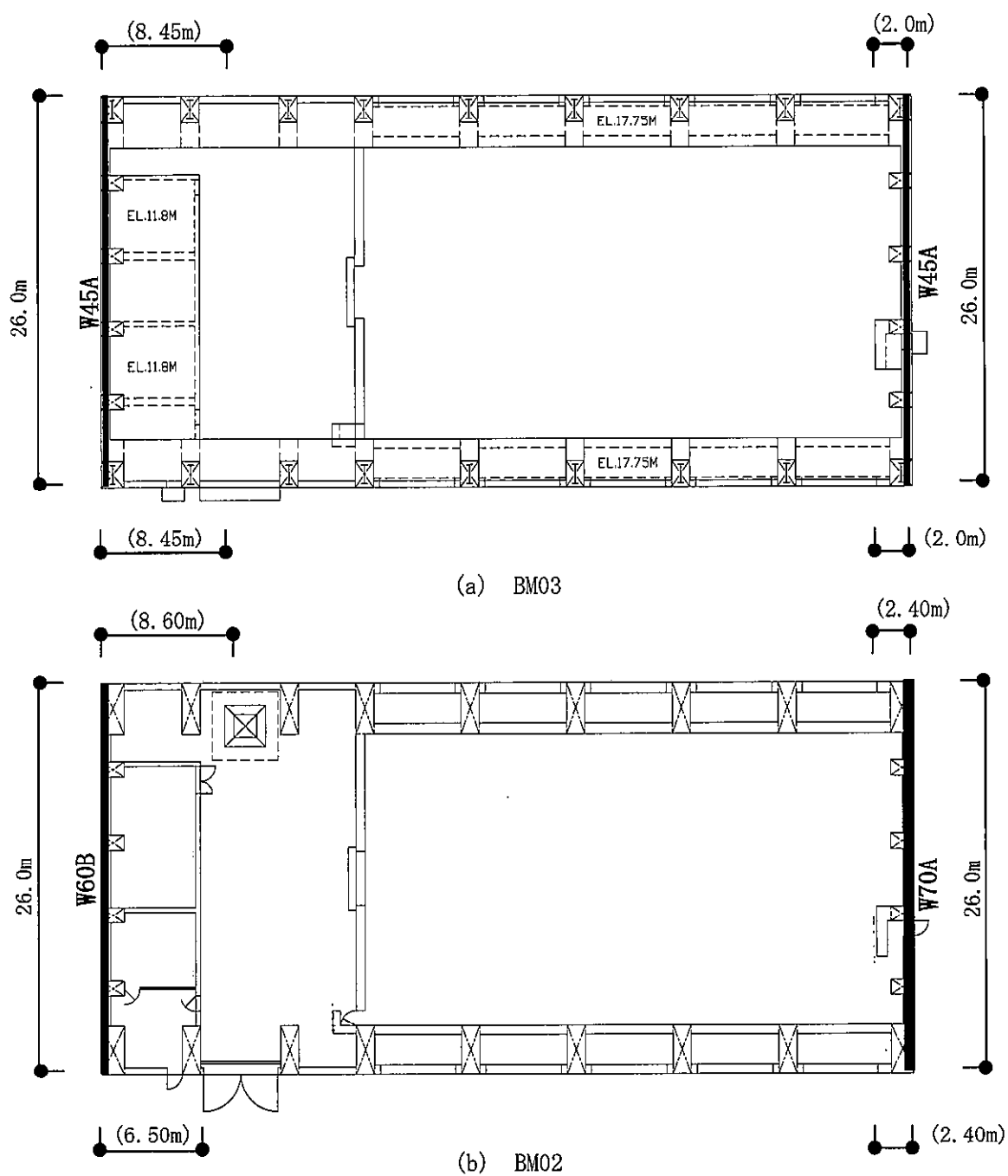
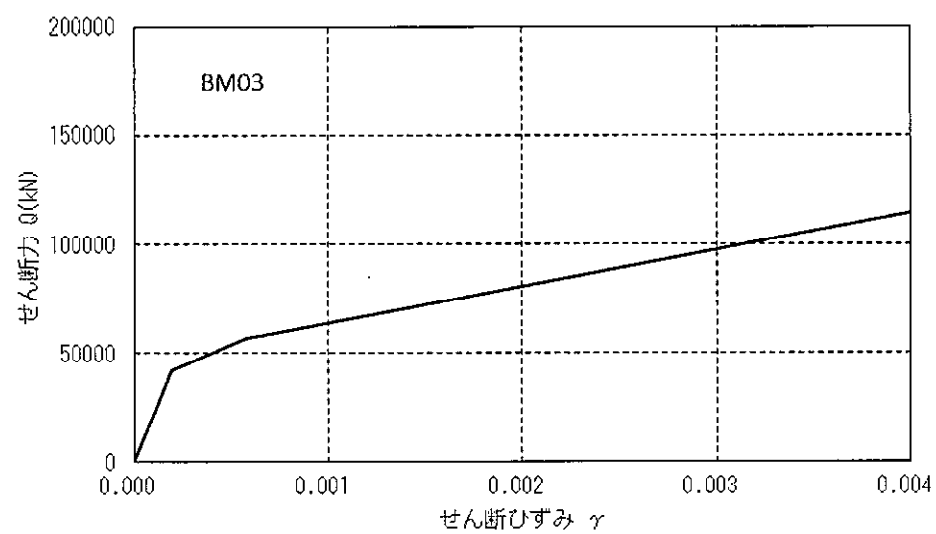


図 2-9 解析モデルの概念図 (EW 方向)

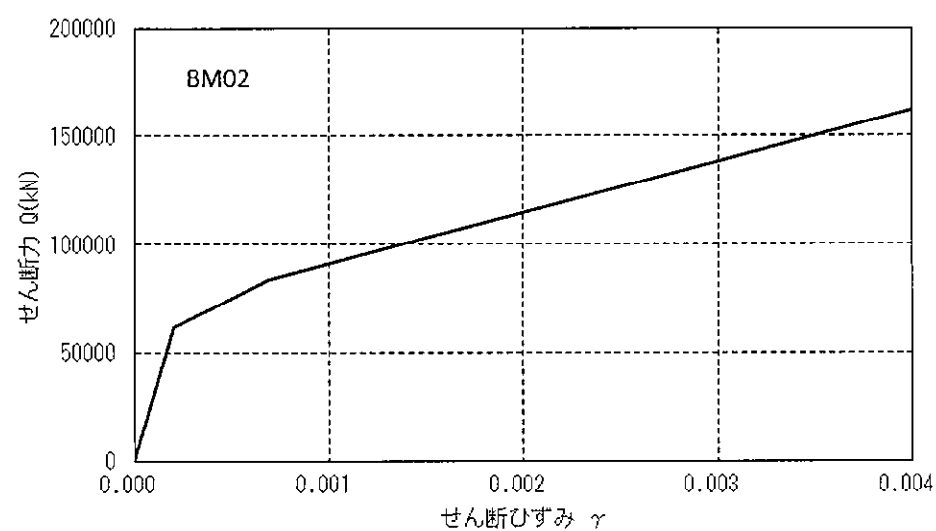


注 : カッコつき数字は耐震壁の協力幅を示す。

図 2-10 せん断スケルトンカーブ算定で考慮した耐震壁 (EW方向)



(a) BM03



(b) BM02

図 2-11 せん断スケルトンカーブ (EW 方向, 壁部)

3. 既工認モデルとの比較

DC 既工認モデル（NS 方向）及び諸元を図 3-1 及び表 3-1 に，DC 今回工認モデル（NS 方向）及び諸元を図 3-2 及び表 3-2 に示す。DC 既工認モデル（EW 方向）及び諸元を図 3-3 及び表 3-3 に，DC 今回工認モデル（EW 方向）及び諸元を図 3-4 及び表 3-4 に示す。今回工認モデルでは，積雪荷重を考慮したために頂部質点の質点重量及び回転慣性重量が増加した。

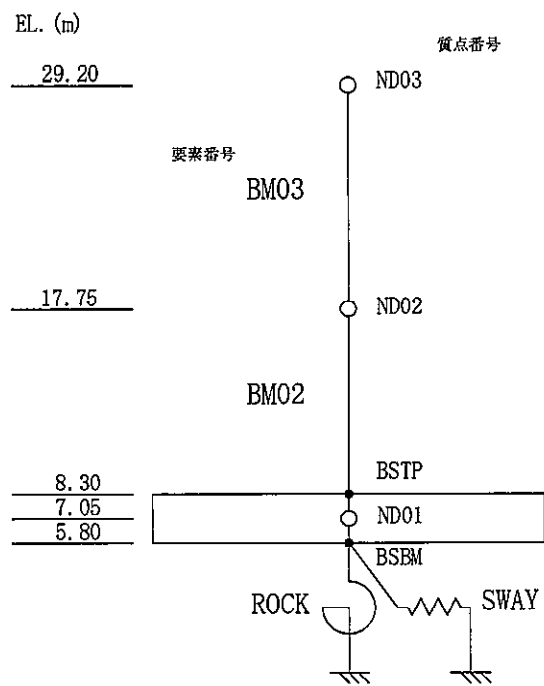


図 3-1 DC 既工認モデル (NS 方向)

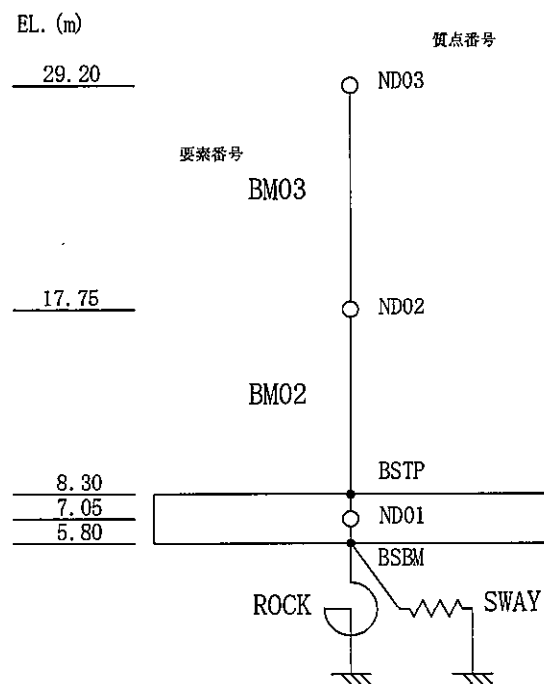


図 3-2 DC 今回工認モデル (NS 方向)

表 3-1 DC 既工認モデルの諸元 (NS 方向)

標高 EL. (m)	質点 番号	質点重量 (kN)	回転慣性重量 ($\times 10^4$ kN \cdot m ²)	要素 番号	せん断断面積 (m ²)	断面 2 次 モーメント (m ⁴)
29.20	ND03	40400	974	BM03	29.90	22803
17.75	ND02	40890	1651			
7.05	ND01	163180	4861	BM02	28.43	30420

表 3-2 DC 今回工認モデルの諸元 (NS 方向)

標高 EL. (m)	質点 番号	質点重量 (kN)	回転慣性重量 ($\times 10^4$ kN \cdot m ²)	要素 番号	せん断断面積 (m ²)	断面 2 次 モーメント (m ⁴)
29.20	ND03	40700	981	BM03	24.17	5997
17.75	ND02	40890	1651			
7.05	ND01	163180	4861	BM02	30.09	8000

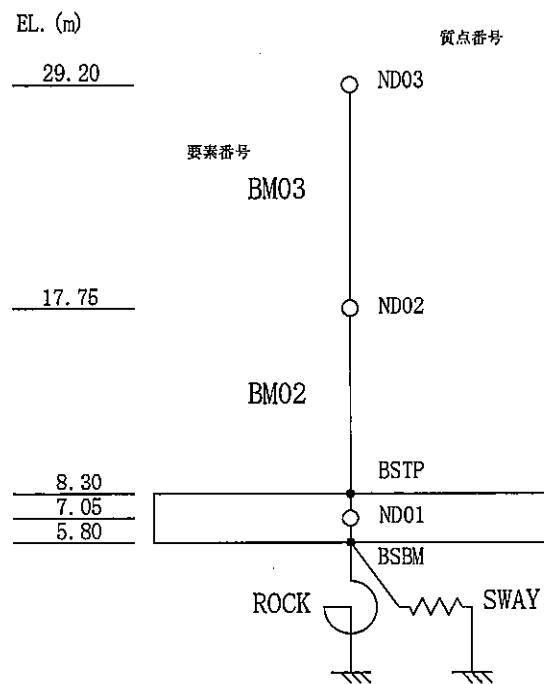


図 3-3 DC 既工認モデル (EW 方向)

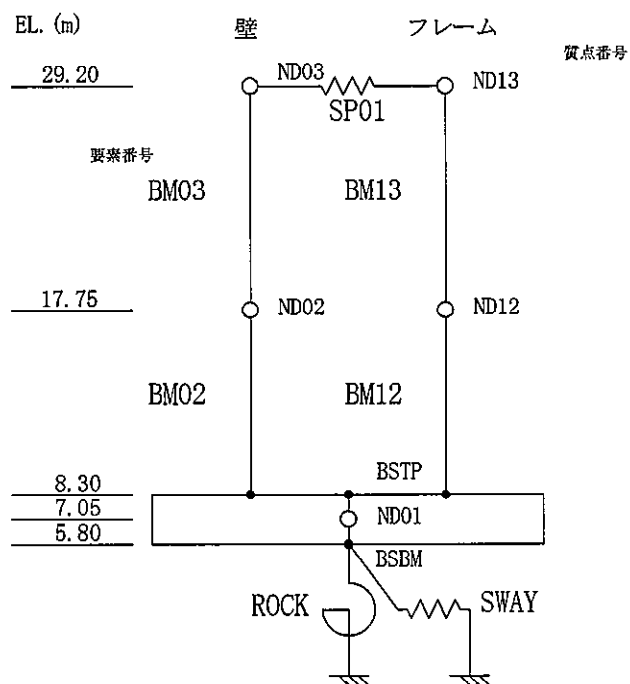


図 3-4 DC 今回工認モデル (EW 方向)

表 3-3 DC 既工認モデルの諸元 (EW 方向)

標高 EL. (m)	質点 番号	質点重量 (kN)	回転慣性重量 ($\times 10^4$ kN \cdot m 2)	要素 番号	せん断断面積 (m 2)	断面 2 次 モーメント (m 4)
29.20	ND03	40400	101	BM03	10.93	4281
17.75	ND02	40890	117			
7.05	ND01	163180	1497	BM02	41.43	5426

表 3-4 DC 今回工認モデルの諸元 (EW 方向)

標高 EL. (m)	質点 番号		質点重量 (kN)			回転慣性重量 ($\times 10^4$ kN \cdot m 2)		要素 番号		せん断断面積 (m 2)		断面 2 次 モーメント (m 4)	
	壁	フレーム	壁	フレーム	合計	壁	フレーム	壁	フレーム	壁	フレーム	壁	フレーム
29.20	ND03	13	12330	28370	40700	70	—	BM03	13	23.40	29.40	3495	7.503
17.75	ND02	12	13570	27320	40890	77	—						
7.05	01		163180			1497		BM02	12	33.63	55.44	4429	50.45

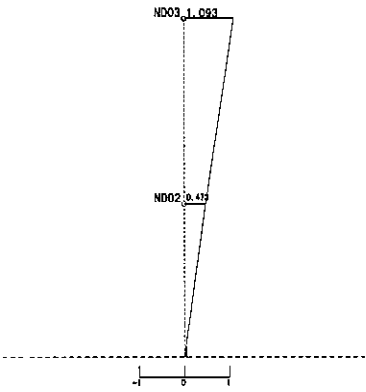
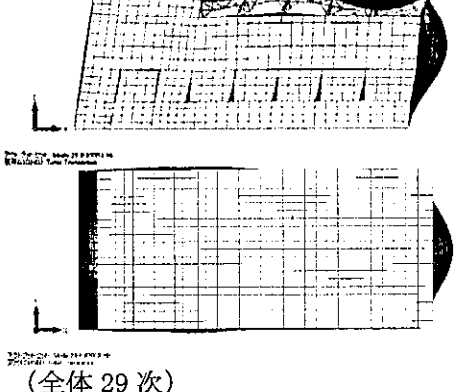
注 : 屋根スラブせん断ばね : SP01=8.38 $\times 10^6$ kN/m

4. FEMモデルの固有値解析結果との比較

比較対象とした3次元FEMモデルは今回工認の基礎スラブや屋根トラスの応力解析に用いたモデルである。既工認モデルからの変更点を以下に示す。既工認モデルを図4-1に、今回工認モデルを図4-2に示す。今回工認モデルは、地震時変形挙動をより適切に反映させるため、上部構造のメッシュサイズを既工認モデルに対して水平及び上下方向を約1/2に細分化した。

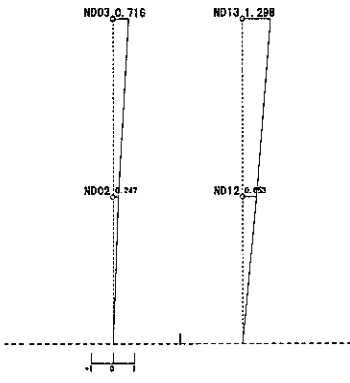
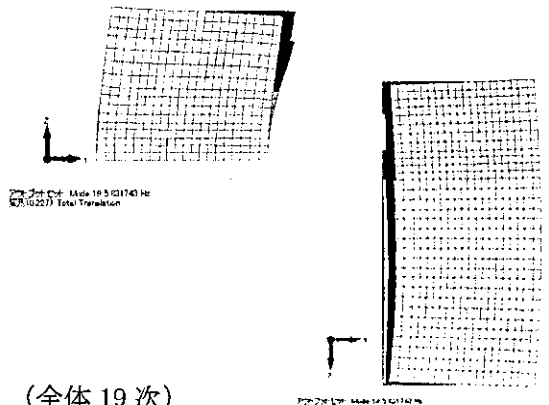
NS方向の固有値の比較を表4-1に、EW方向の比較を表4-2に示す。NS方向、EW方向ともに質点系モデルの固有値がFEMモデルの固有値と概ね一致していることから、DC今回工認モデルの妥当性を確認した。

表 4-1 質点系モデルとFEMモデルの固有値の比較（NS方向、壁脚部固定条件）

モード次数	質点系モデル	今回工認FEMモデル
1次	6.91 Hz, 0.145 s	6.87 Hz, 0.146 s
固有モード図		

注：FEMモデルは基準床レベルの水平変位を一定に拘束（MPC）している。

表 4-2 質点系モデルとFEMモデルの固有値の比較（EW方向、壁脚部固定条件）

モード次数	質点系モデル	今回工認FEMモデル
1次	5.82 Hz, 0.172 s	5.83 Hz, 0.172 s
固有モード図		

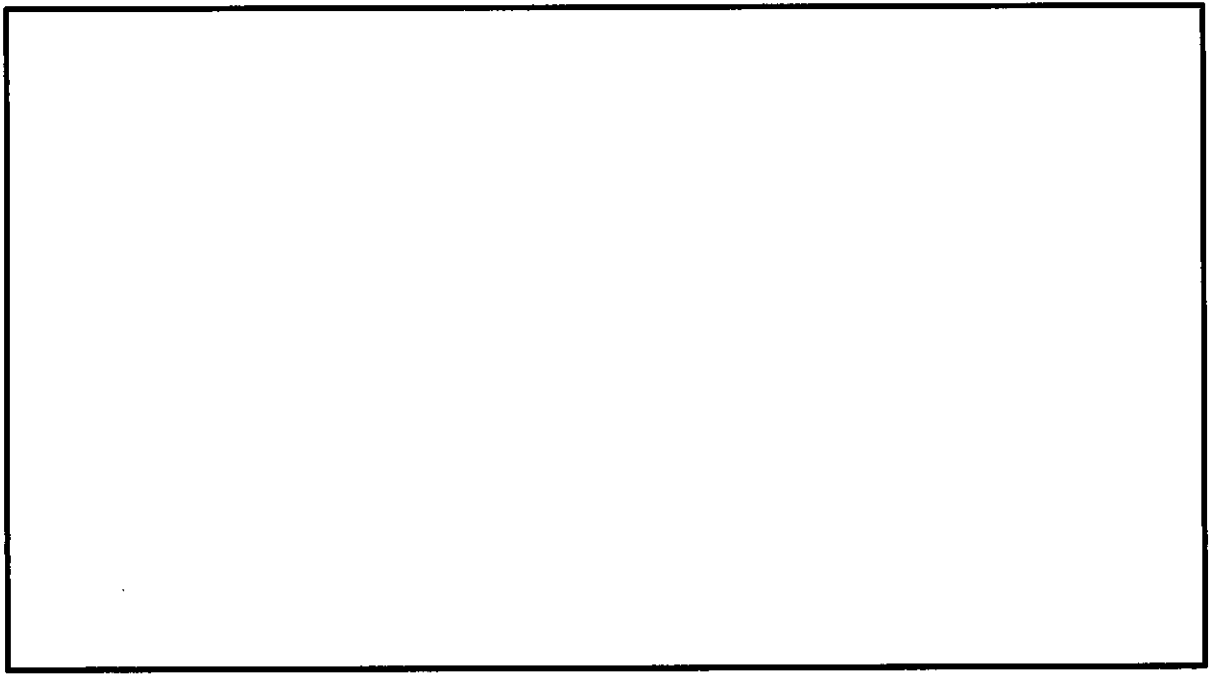


図 4-1 既工認 F E Mモデル

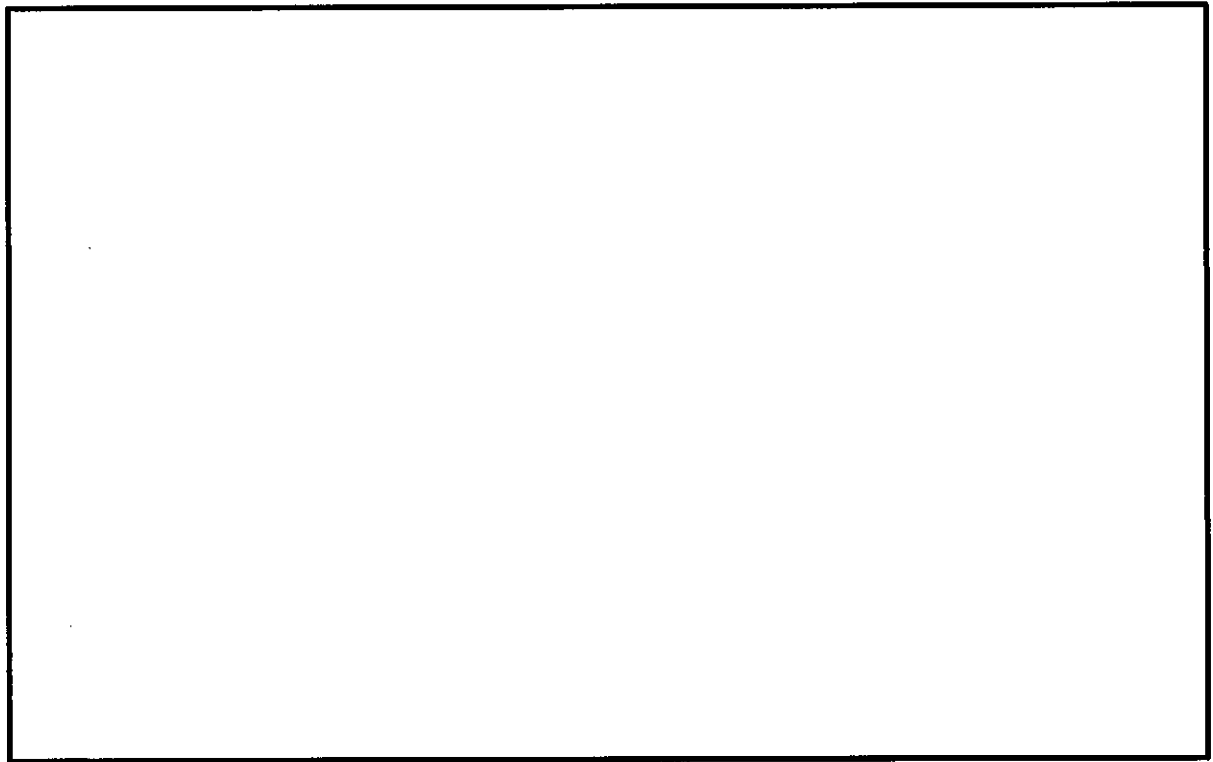


図 4-2 今回工認 F E Mモデル

5. 質点系モデルとFEMモデルによるスペクトル比較

質点系モデルの妥当性を確認するために、今回工認FEMモデルを用いて東北地方太平洋沖地震の観測記録のシミュレーション解析及びS_d-D1に対する地震応答解析を行った。以下に検討の概要と結果を示す。

(1) 観測記録のシミュレーション

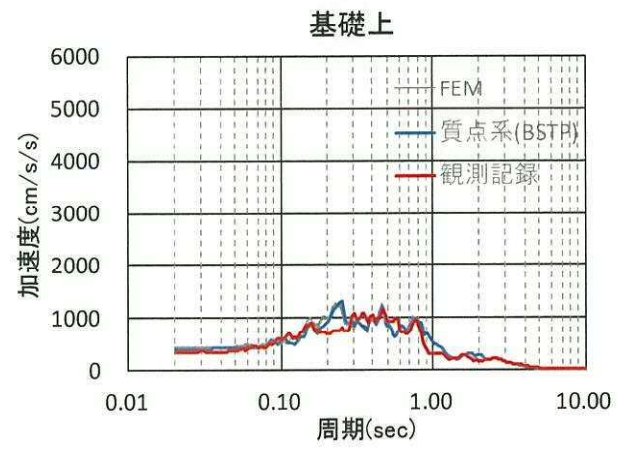
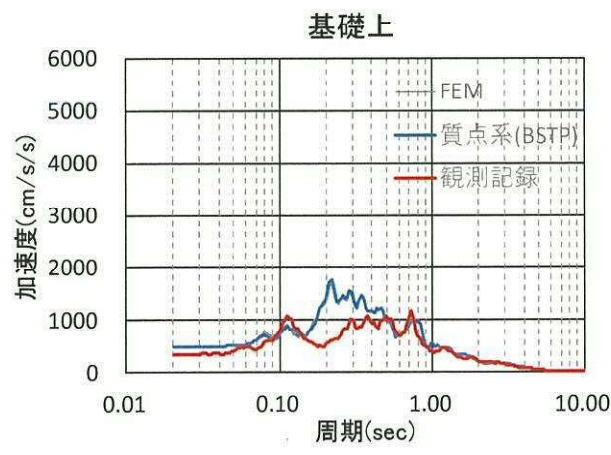
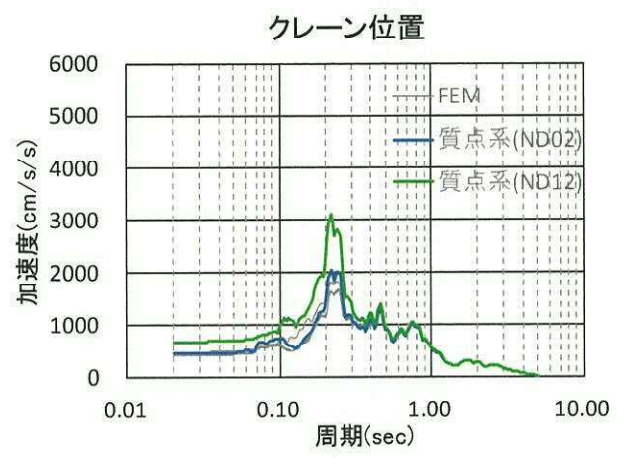
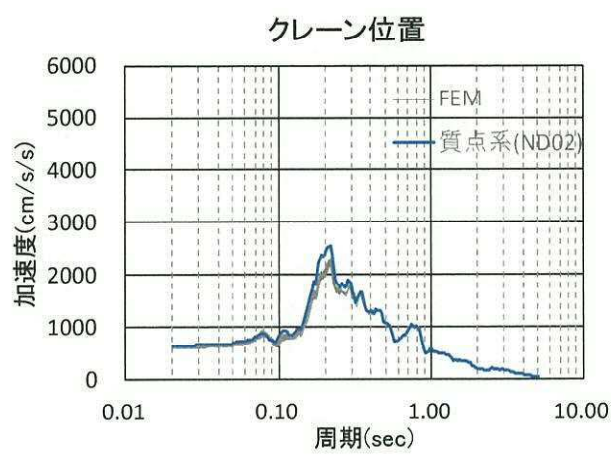
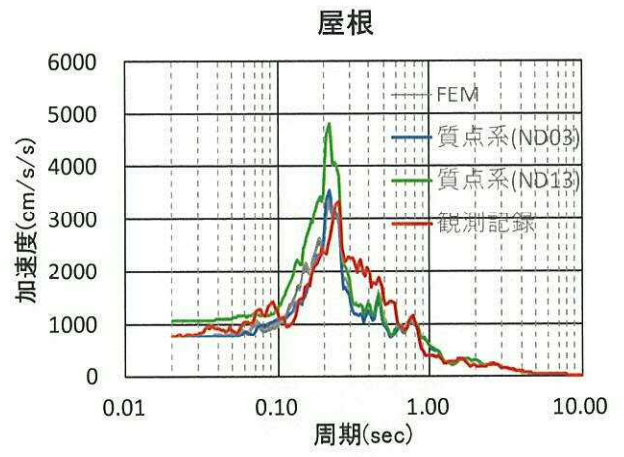
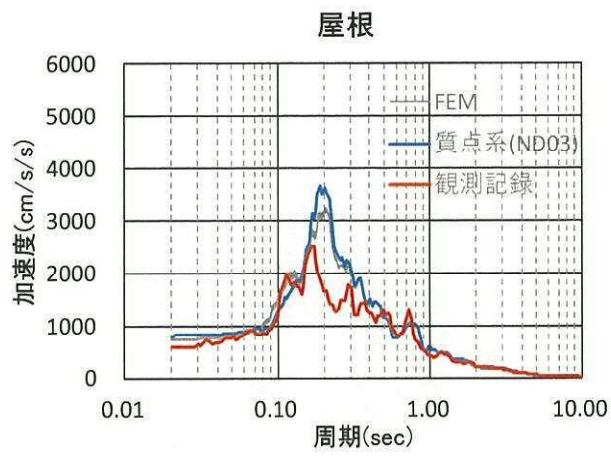
図 5-1 に床応答スペクトルの比較を示す。水平方向については、DC 今回工認モデルがFEMモデルとほぼ同等か安全側の応答となっている。上下方向については、屋根レベルの屋根トラスの応答は2方向の影響のためFEMの応答がDC 今回工認モデルを上回っているが、クレーンレベルや基礎上端では良く整合している。

(2) 質点系モデルとFEMモデルによるS_d-D1に対する床応答スペクトルの比較

図 5-2 に床応答スペクトルの比較を示す。水平方向については、DC 今回工認モデルがFEMモデルとほぼ同等の応答となっている。上下方向については、屋根レベルの屋根トラス中央の応答は2方向の影響のためFEMの応答がDC 今回工認モデルを上回っているが、クレーンレベルや基礎上端では良く整合している。

(3) まとめ

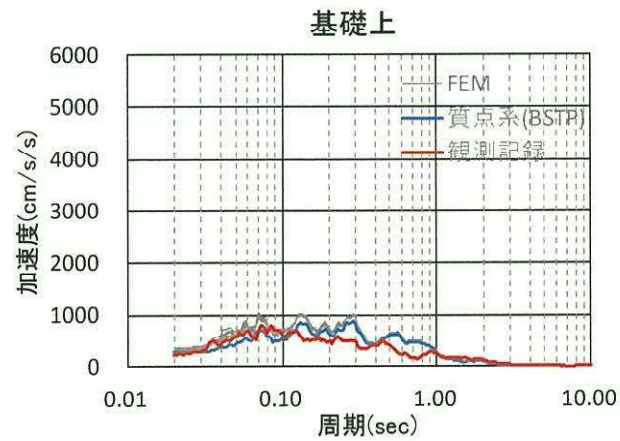
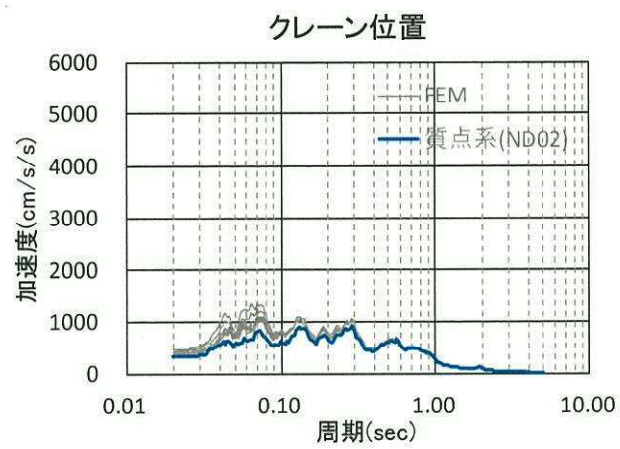
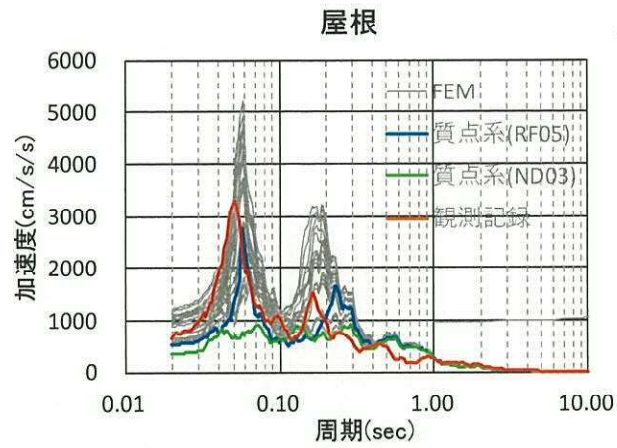
水平方向については、質点系モデル（今回工認モデル）とFEMモデルとほぼ同等の応答となっている。上下方向については、FEMモデルの屋根トラス中央の以外の応答はよく整合している。以上より質点系モデルの妥当性が確認できた。なお、屋根トラスの検討にはFEMモデルを用いており問題はない。



(a) NS 方向

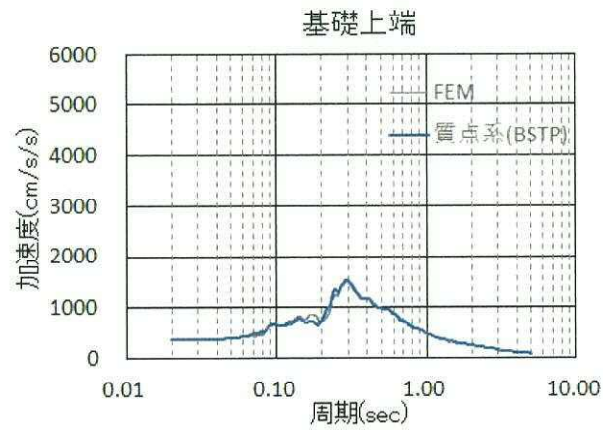
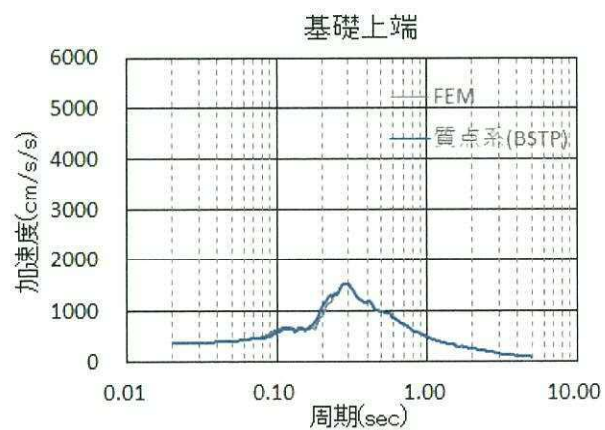
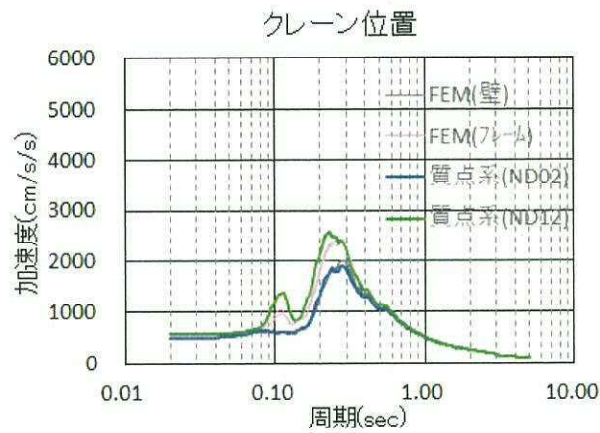
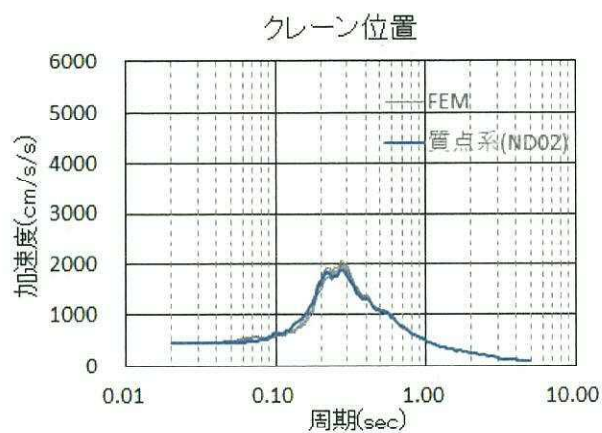
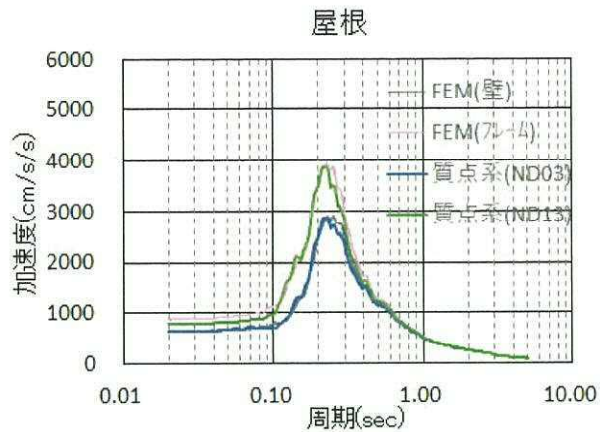
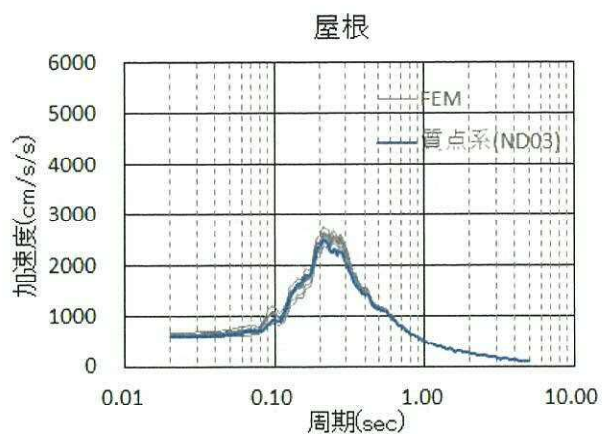
(b) EW 方向

図 5-1 (1/2) 床応答スペクトルの比較 (h=5%)
シミュレーション



(c) 上下方向

図 5-1 (2/2) 床応答スペクトルの比較 ($h=5\%$)
シミュレーション

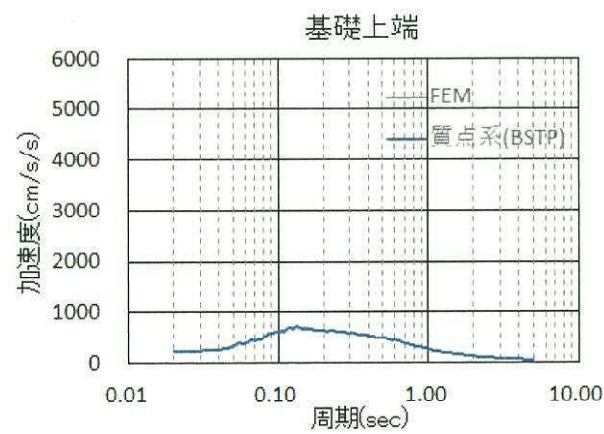
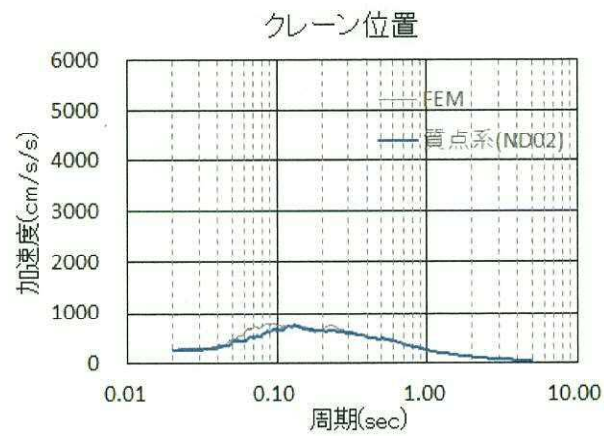
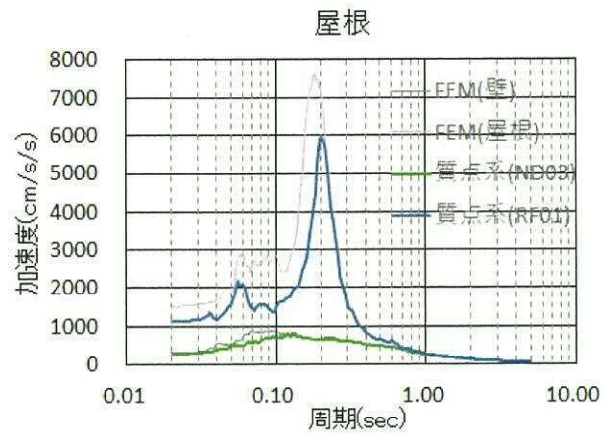


(a) NS 方向

(b) EW 方向

図 5-2 (1/2) 床応答スペクトルの比較 (h=5%)

S_d -D 1 応答



(c) 上下方向

図 5-2 (2/2) 床応答スペクトルの比較 (h=5%)
S_d-D 1 応答

別紙 2-3 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルについて

目次

1. 概要.....	別紙 2-3-1
2. 使用済燃料乾式貯蔵建屋モデルの妥当性検討.....	別紙 2-3-2
2.1 地震計設置位置.....	別紙 2-3-2
2.2 シミュレーション解析結果.....	別紙 2-3-4
2.3 施設の耐震評価への影響検討.....	別紙 2-3-13
2.4 工認に用いる地震応答解析モデルの妥当性について.....	別紙 2-3-17

1. 概要

DC 今回工認モデルの妥当性確認として、2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震（以下「東北地方太平洋沖地震」という。）時の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施した。解析に用いる地震の諸元を図 1-1 に示す。

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

注記 *：気象庁発表値

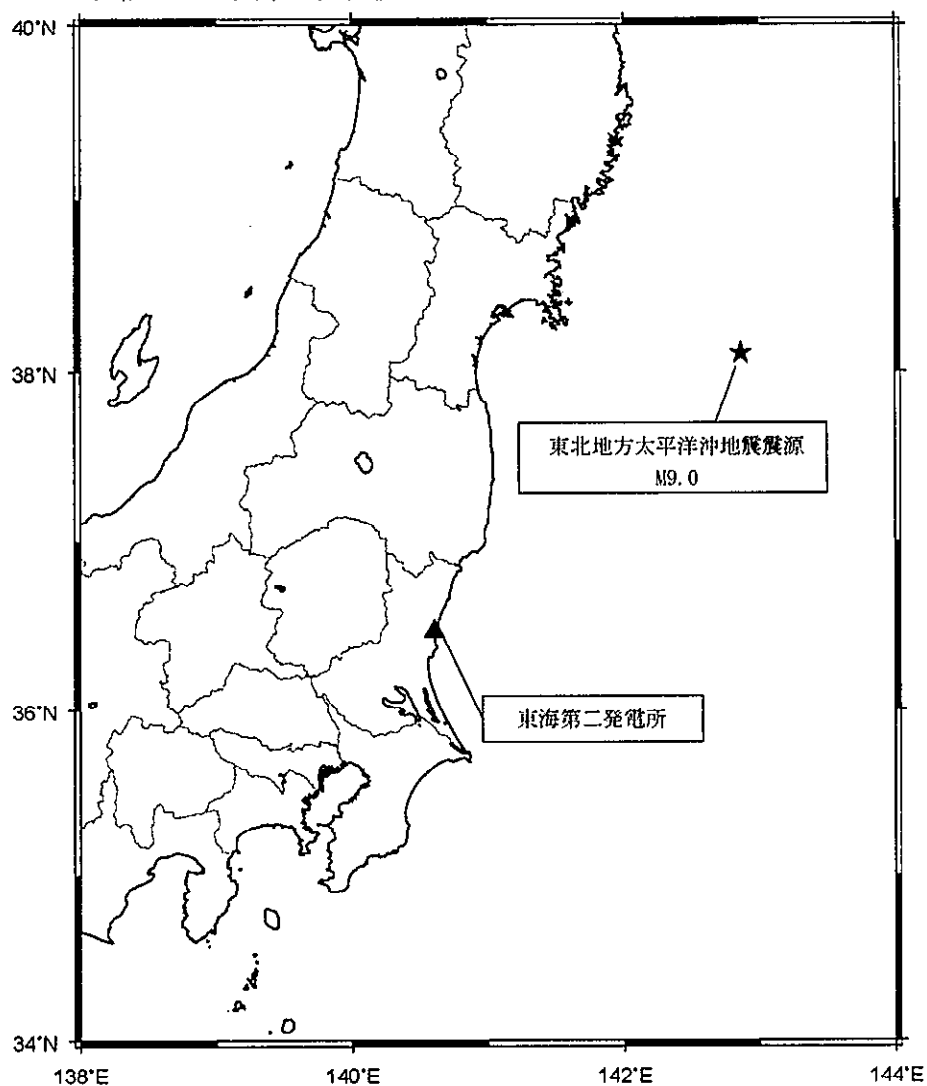
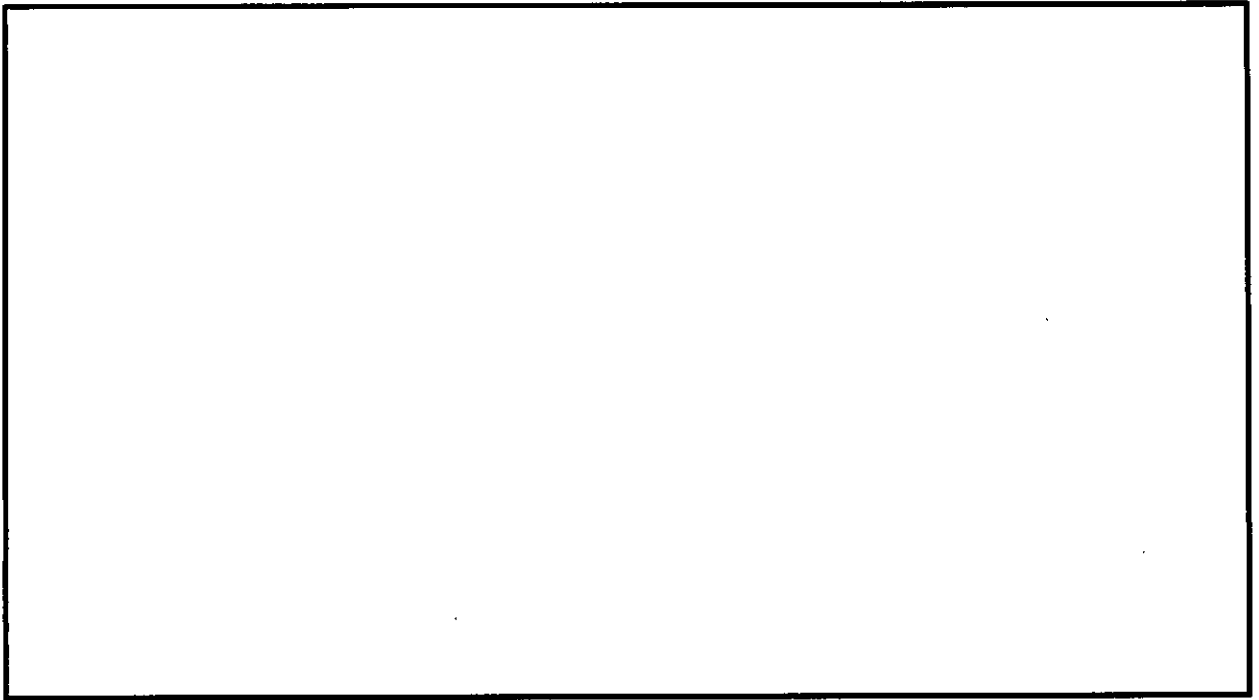


図 1-1 東北地方太平洋沖地震の震央位置

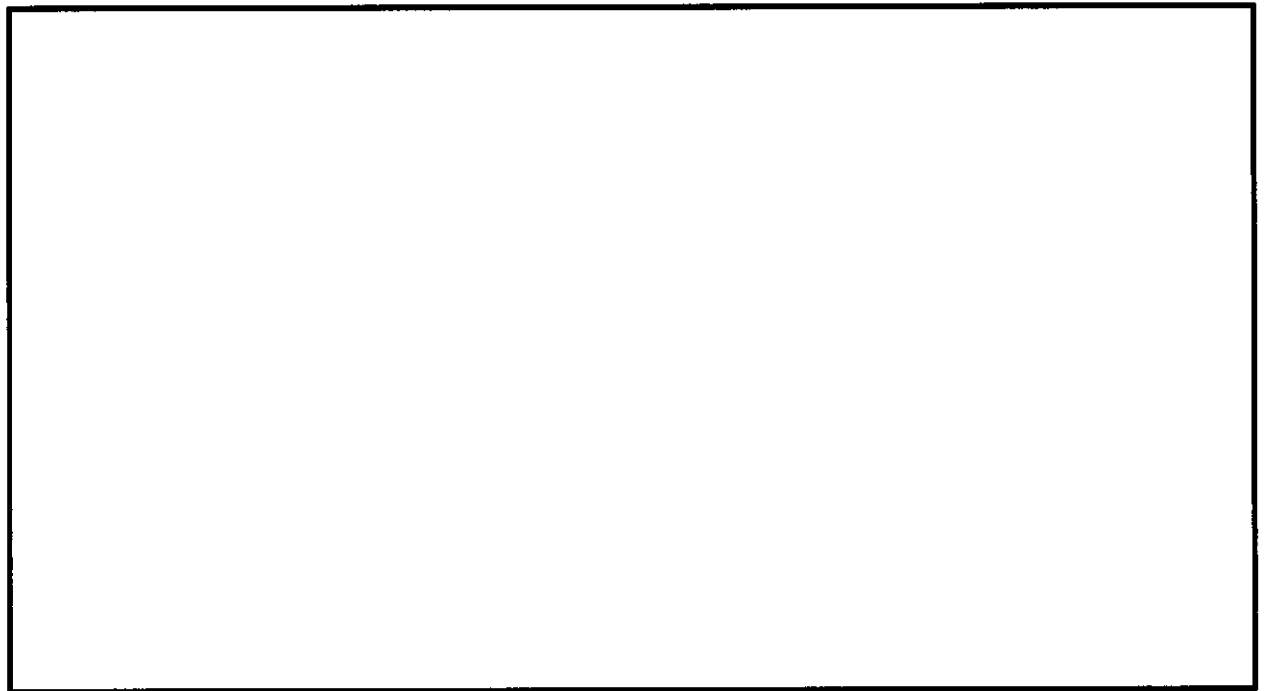
2. 使用済燃料乾式貯蔵建屋モデルの妥当性検討地震計設置位置

使用済燃料乾式貯蔵建屋には、地震時の基本的な振動性状を把握する目的で基礎上端と屋根トラス上部に各 1 台の地震計を設置している。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震計設置位置を図 2-1 に示す。



(a) 断面図



(b) 1 階 (EL. 8.3 m) 平面図

図 2-1 の地震計設置位置

2.2 シミュレーション解析結果

観測記録を用いたシミュレーション解析は、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデル（以下「DC 今回工認モデル」という。）を用いた。既工認での地震応答解析の概要図を図 2-2 に、今回工認での評価の概要図を図 2-3 に、東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果として、最大応答加速度分布の比較を図 2-4 に床応答スペクトルの比較を図 2-5 に示す。各解析結果の比較図には建設工認時の地震応答解析モデル（以下「DC 既工認モデル」という。）による結果及びシミュレーション解析に用いた入力地震動も参考として示す。

観測記録、DC 今回工認モデルによる解析結果、DC 既工認モデルによる解析結果を比較すると、各方向において、DC 今回工認モデルと DC 既工認モデルの解析結果は観測記録と概ね良い対応を示している。

ほぼすべての周期帯において解析結果と観測記録は概ね同等もしくは解析結果が観測記録を上回る結果となっており、DC 今回工認モデルを耐震評価用の解析モデルとして適用することは妥当である。

0.1 秒付近は観測記録の方が上回るがその差は比較的小さい。また、0.2 秒から 0.3 秒付近ではシミュレーション解析の方が大きめの評価を与えている。その差異が生じる要因としては、以下が考えられる。

①0.1 秒付近及び 0.2 秒から 0.3 秒付近の差異が生じる要因

- ・基礎スラブ上端位置での応答であり、上部構造物の影響は小さい。また、上部構造物の質点重量は全体の 1/3 程度である。上記の確認のためシミュレーション解析の建屋入力地震動を比較したところ、基礎スラブ上端応答と同様の傾向にあった。そのため、差異の要因として、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考えられる。

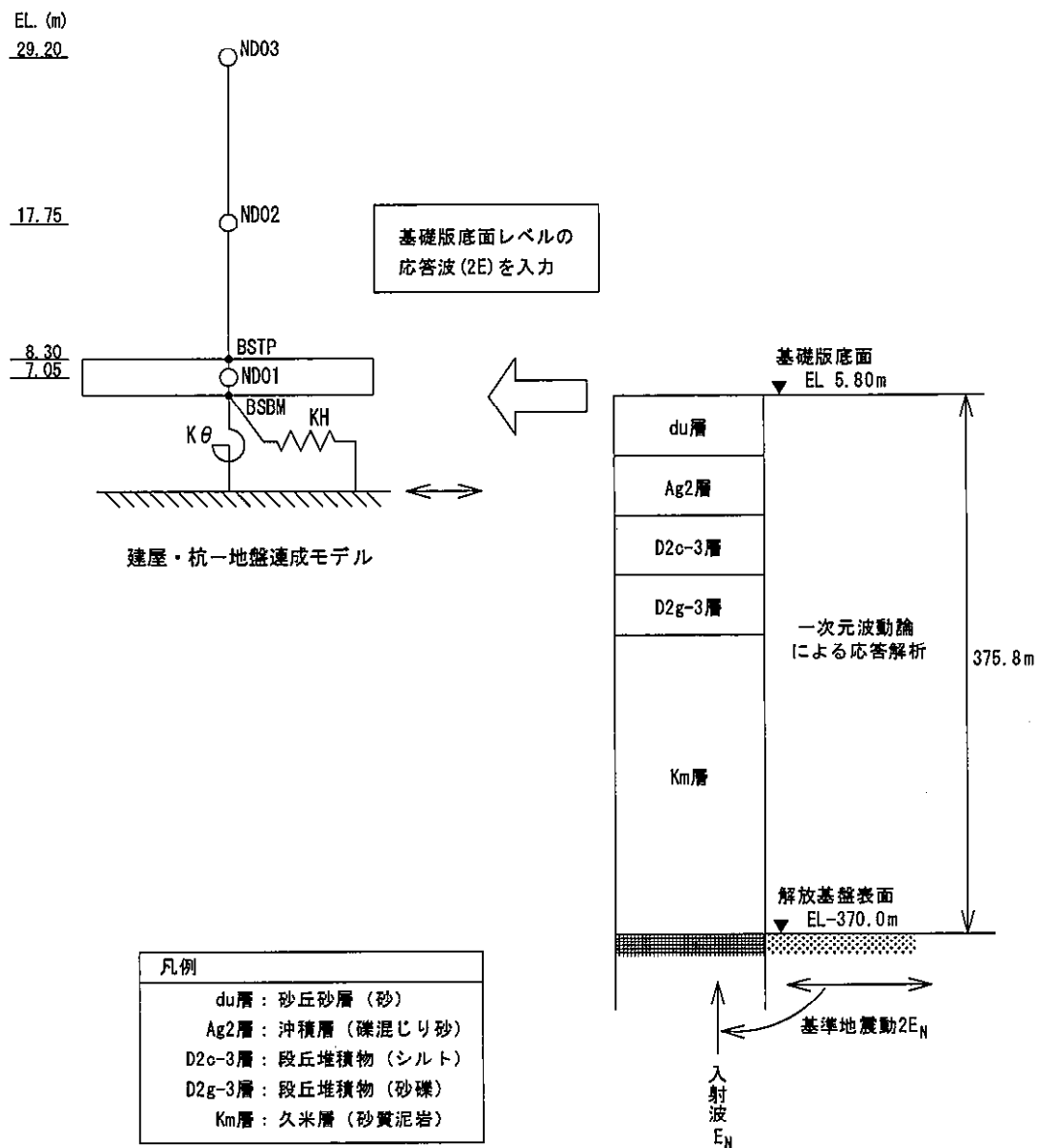
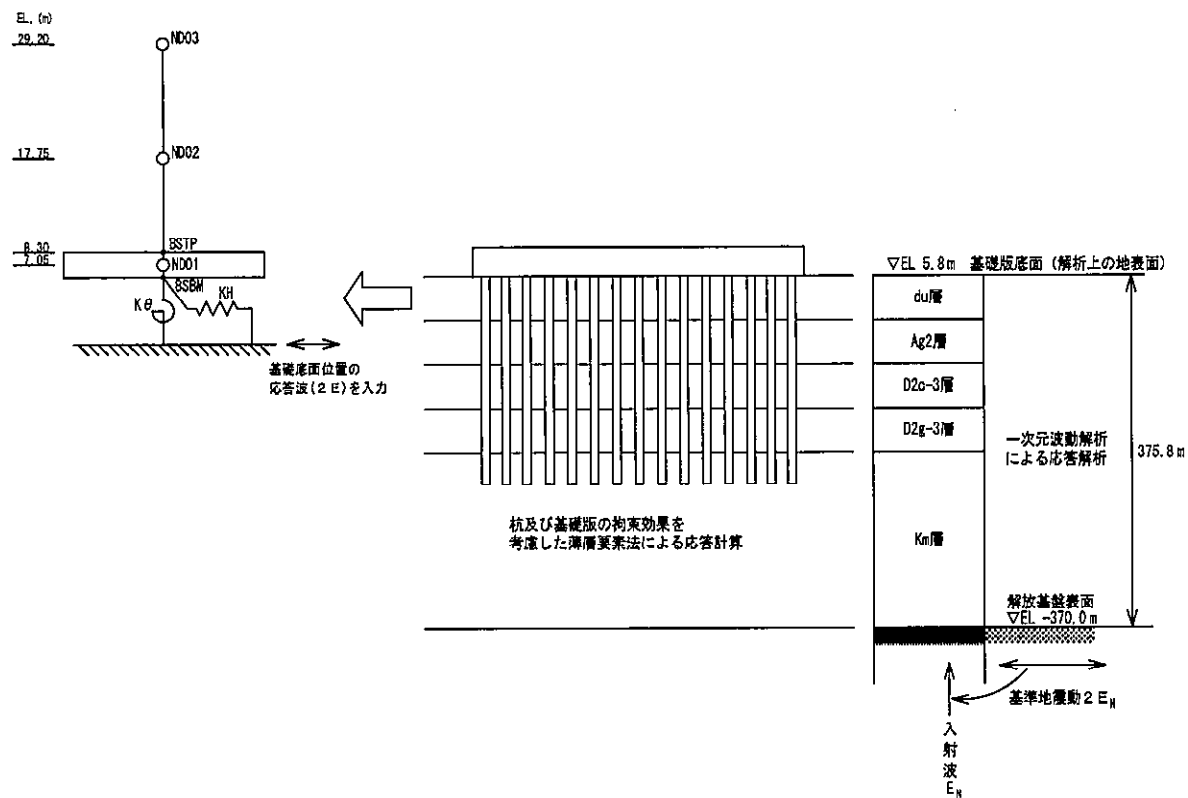
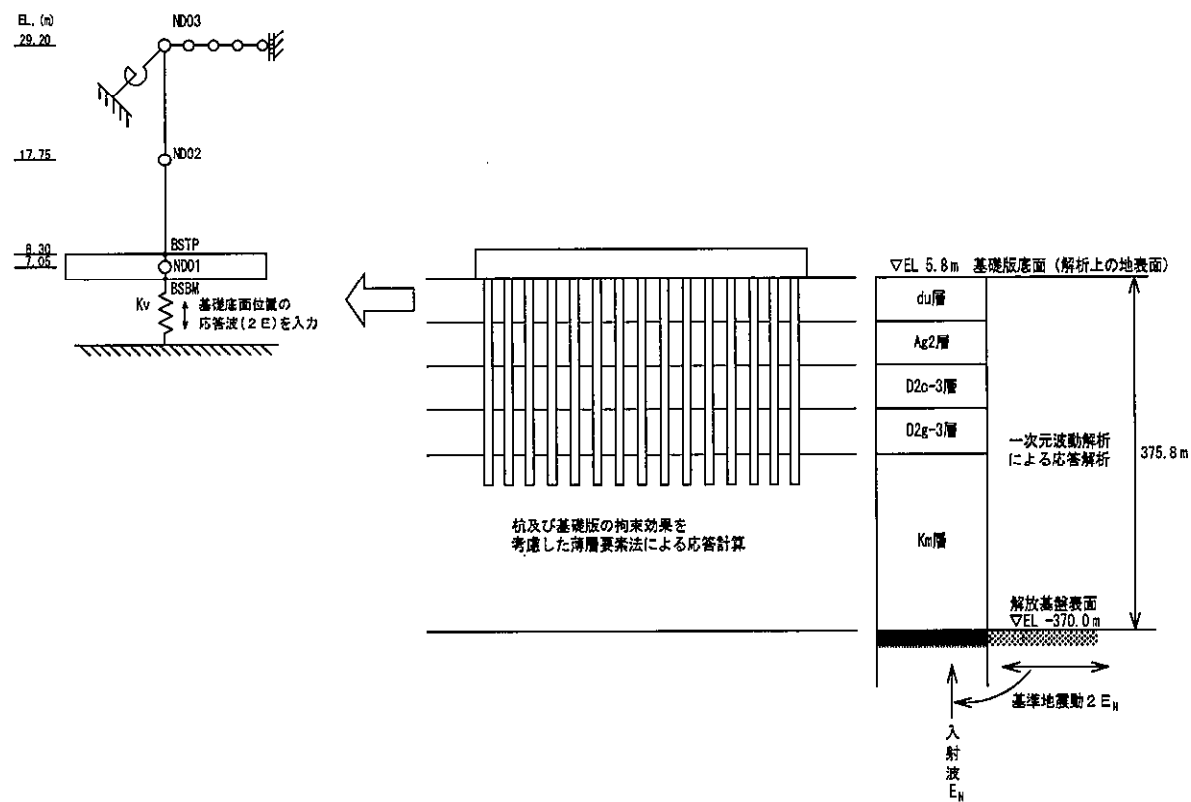


図 2-2 地震応答解析の概要図（既工認）



(水平方向)



(鉛直方向)

図 2-3 地震応答解析の概要図 (今回工認での評価)

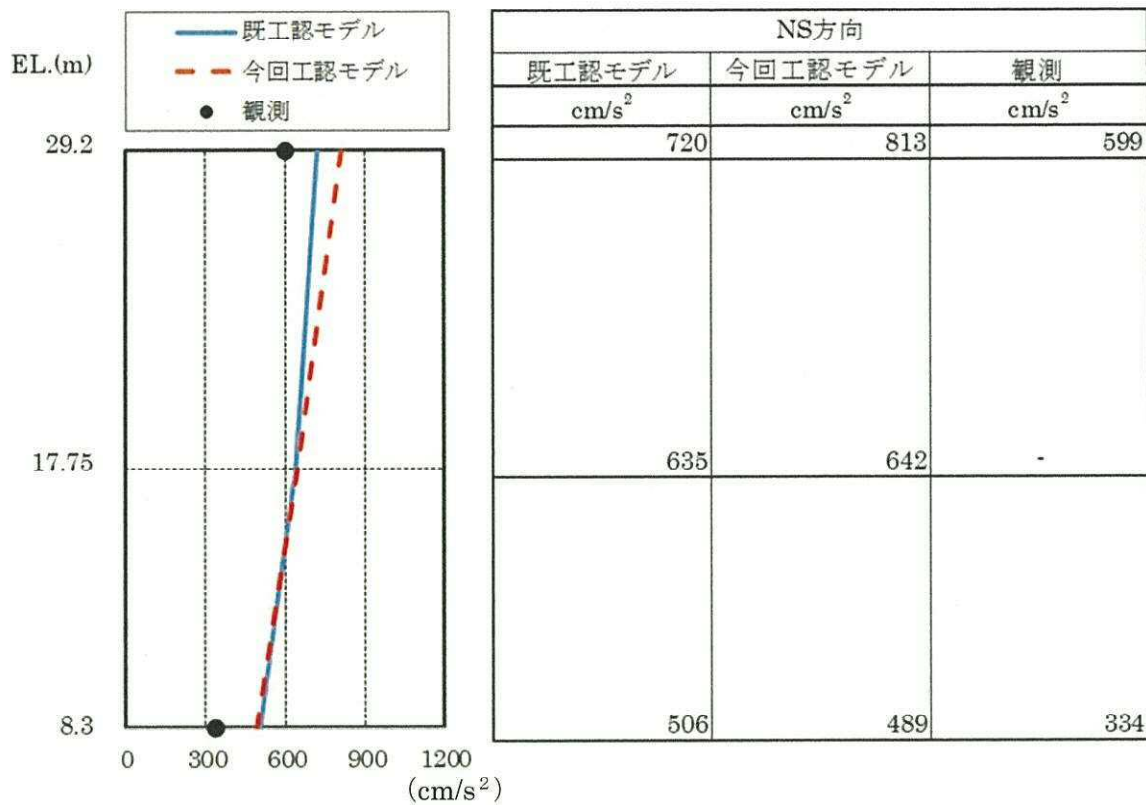
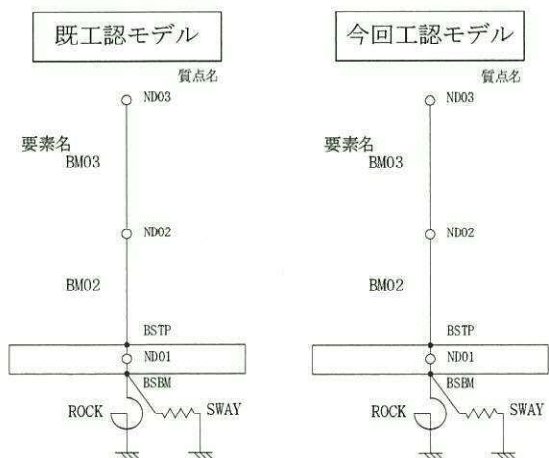


図 2-4 (1/3) 最大応答加速度分布の比較 (NS 方向)



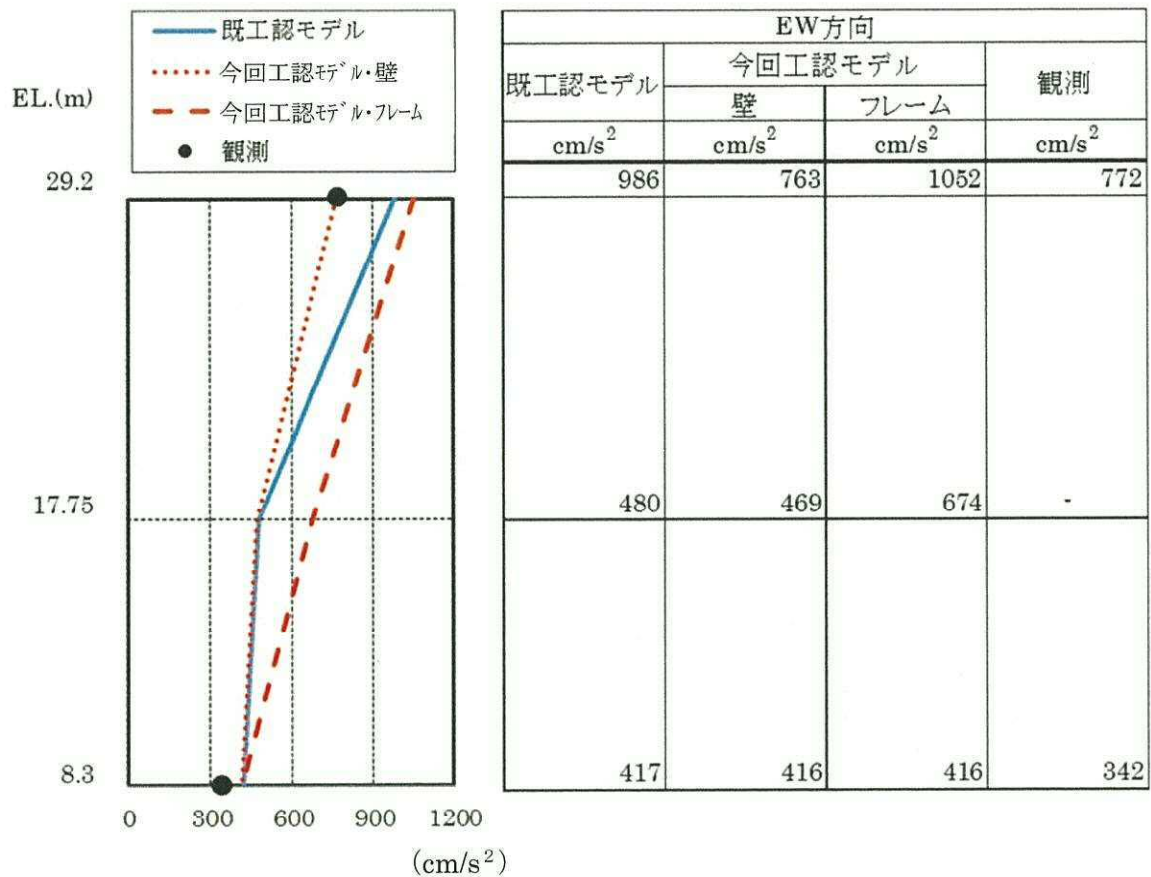
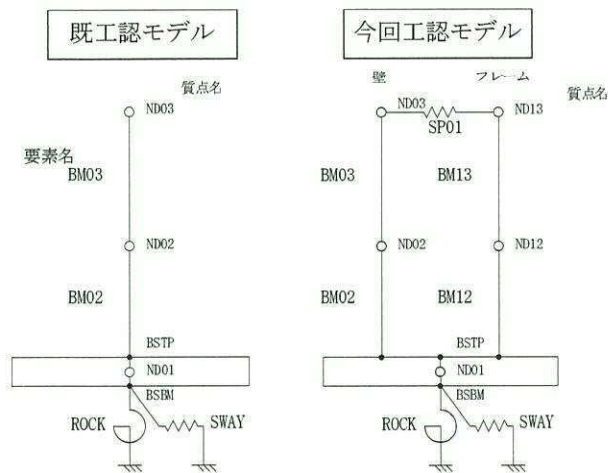


図2-4 (2/3) 最大応答加速度分布の比較 (EW方向)



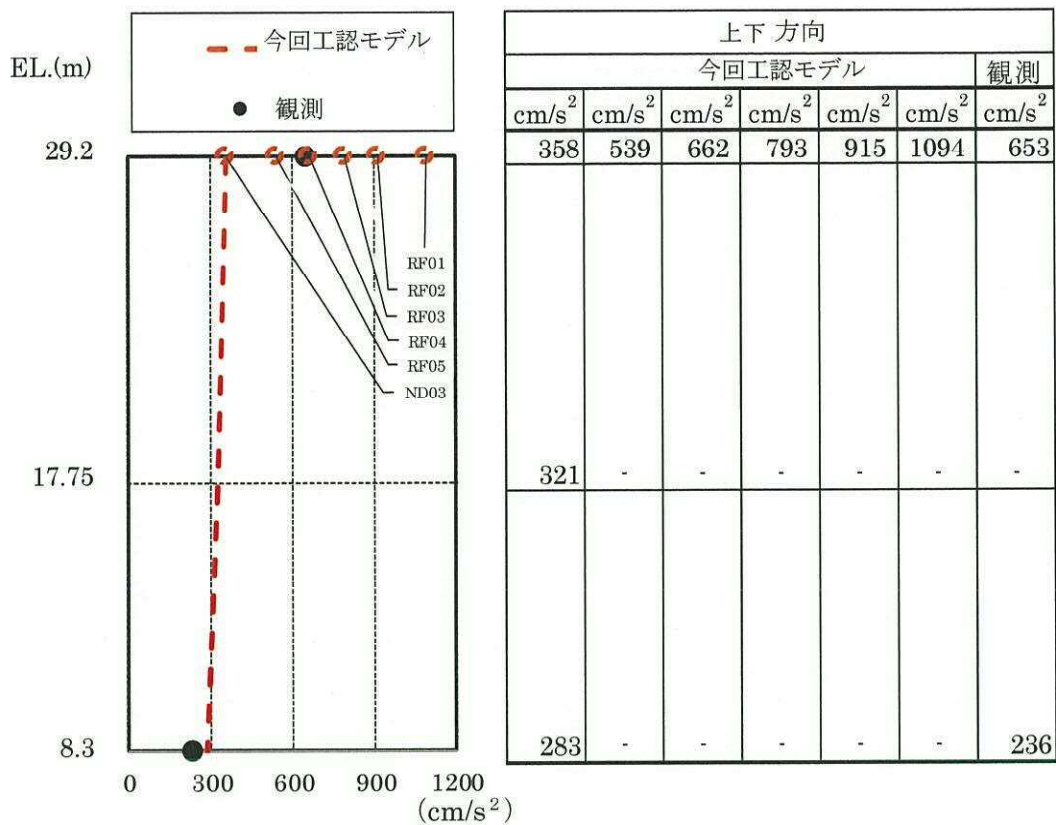
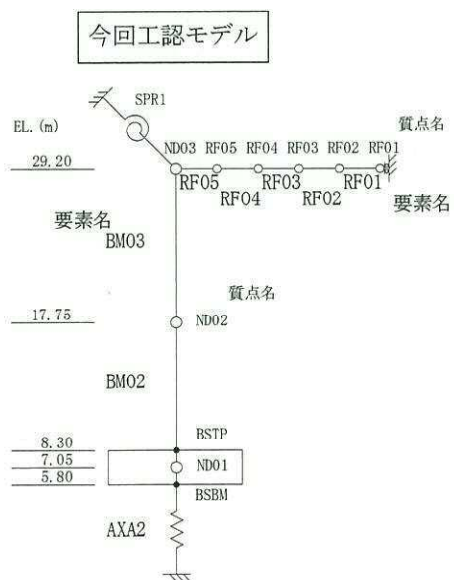


図2-4 (3/3) 最大応答加速度分布の比較 (鉛直方向)



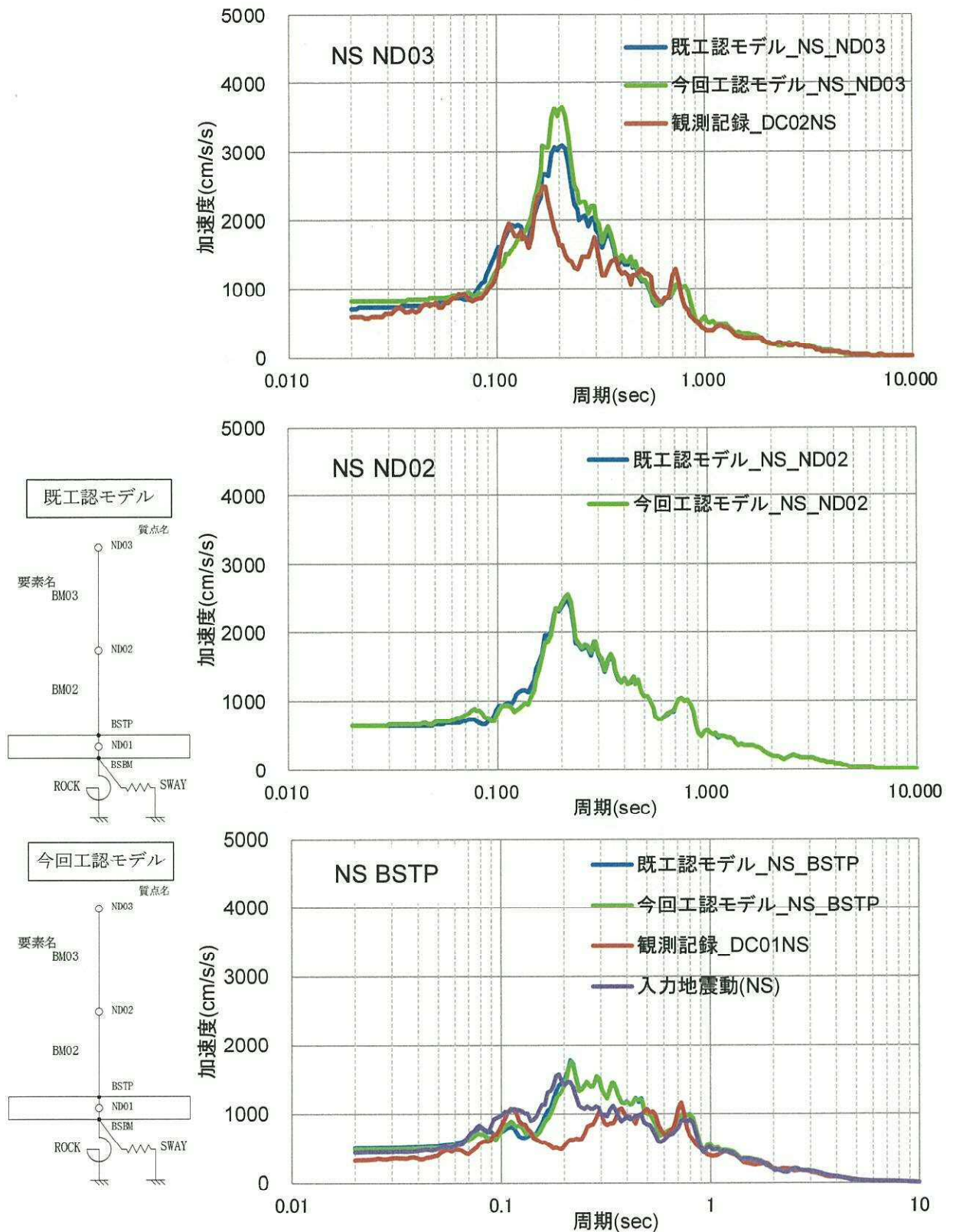


図 2-5 (1/3) 床応答スペクトルの比較 (NS 方向, $h=5\%$)

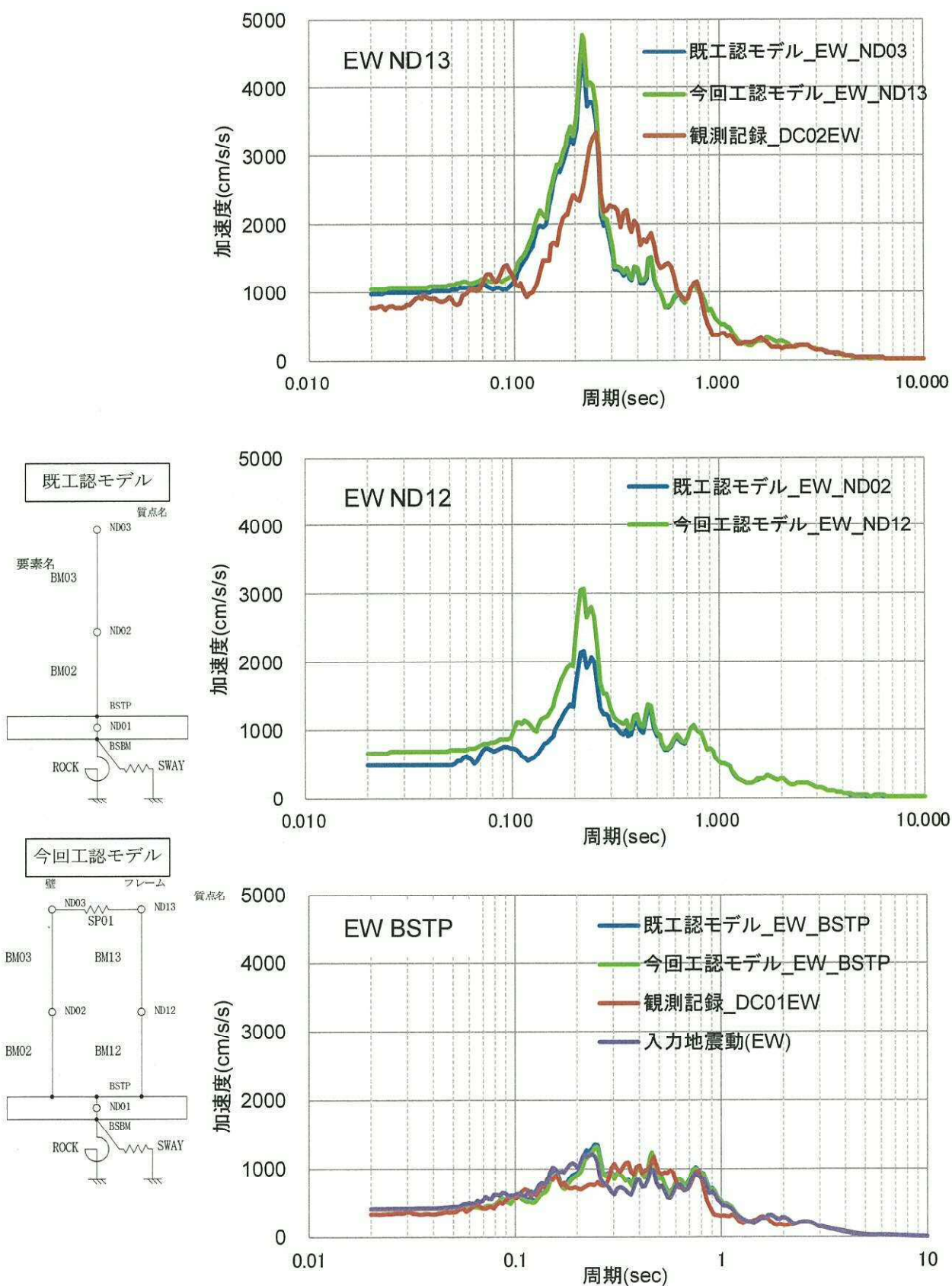


図 2-5 (2/3) 床応答スペクトルの比較 (EW 方向, $h=5\%$)

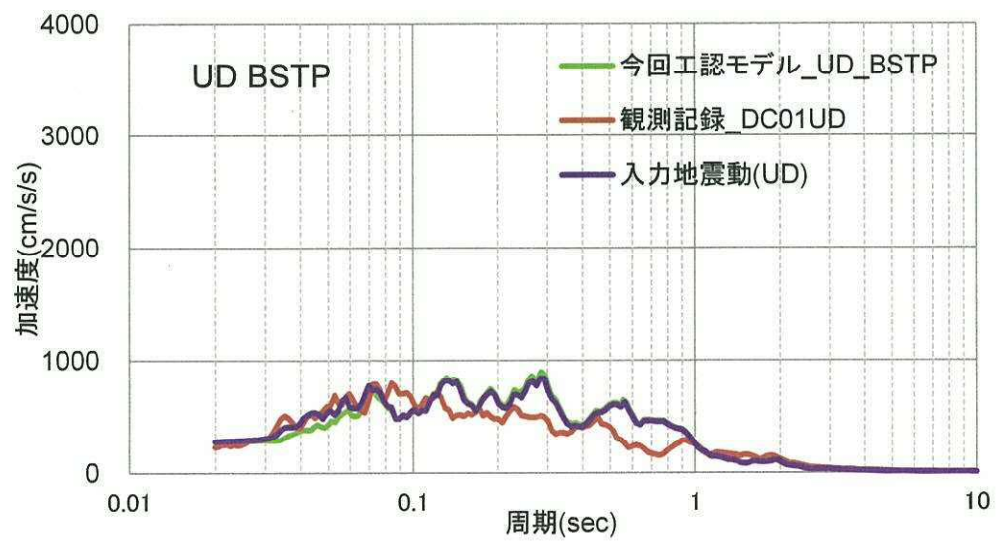
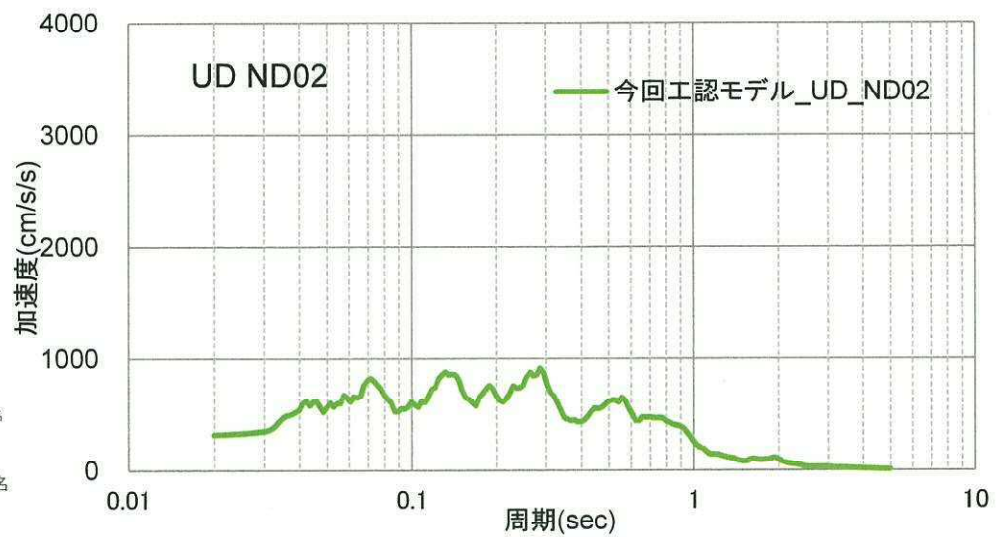
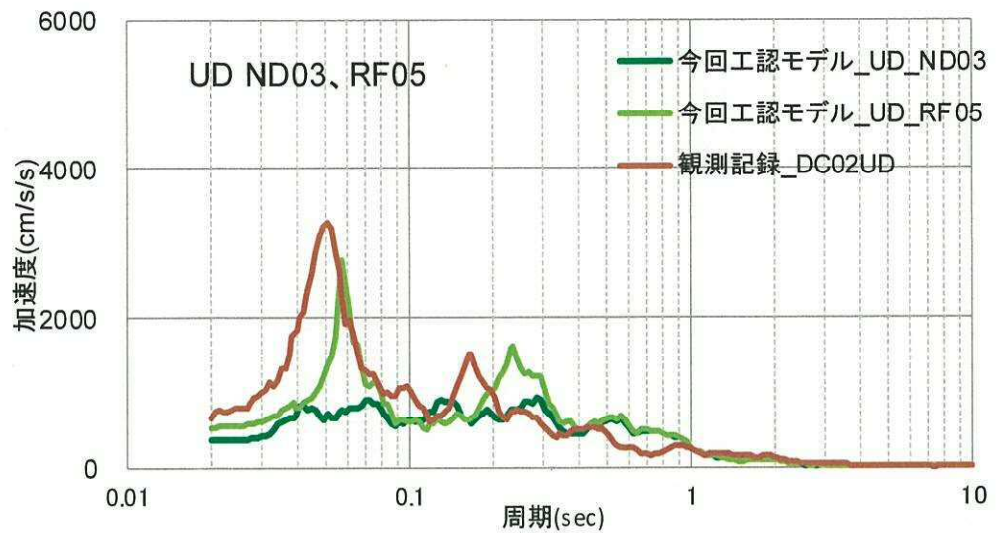
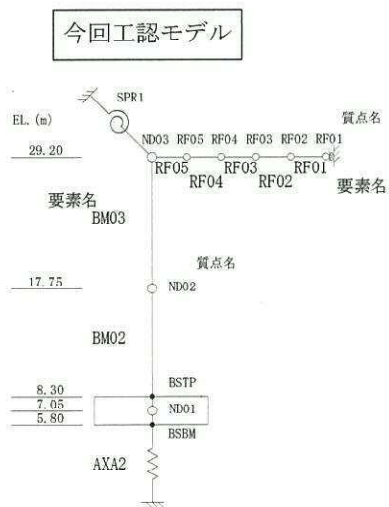


図 2-5 (3/3) 床応答スペクトルの比較 (上下方向, $h=5\%$)

2.3 施設の耐震評価への影響検討

2.3.1 建屋への影響

使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震計設置位置での観測記録と今回工認モデルを用いたシミュレーション解析の応答とを比較した結果、最大応答加速度分布は観測記録がシミュレーション解析を上回らないことが確認できたため、DC 建屋の耐震評価に影響はない(図 2-4)。

2.3.2 機器・配管系への影響

(1) 影響検討対象設備

使用済燃料乾式貯蔵建屋に設置された機器・配管系として、使用済燃料乾式貯蔵容器(以下「ドライキャスク」という。)及び使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーン(以下「DC 建屋クレーン」という。)がある。影響検討対象設備を表 3-1 に示す。

表 3-1 [] に設置の影響検討対象設備

影響検討対象設備	設置階高
[]	EL. 8.3 m
[]	EL. 17.75 m

(2) 影響評価結果

a. ドライキャスク

ドライキャスクの耐震評価に用いる EL. 8.3 m の最大応答加速度 (ZPA) について、シミュレーション解析の結果と観測記録とを比較した結果を表 3-2 に示す。表 3-2 に示すとおり観測記録の応答加速度はシミュレーション解析の加速度を上回らないことが確認できたため、使用済燃料乾式貯蔵容器 (DC) の耐震評価に影響はない。

表 3-2 [] EL. 8.3 m の応答加速度比較

	方向	応答加速度 (cm/s ²)	
		シミュレーション 解析結果	観測記録
[] EL. 8.3 m	水平	489	342
	鉛直	283	236

b. DC 建屋クレーン

DC 建屋クレーンは、EL. 17.75 m のクレーンガーダ上に設置されている。地震観測計は EL. 8.3 m 及び EL. 29.2 m に設置されており、シミュレーション解析結果との比較も当該階で実施していることから、EL. 8.3 m 及び EL. 29.2 m による床応答スペクトルの比較により影響を確認する。

図 2-6 に観測記録の床応答スペクトルとシミュレーション解析結果の床応答スペクトルとの比較に DC 建屋クレーンの 1 次固有周期を記載して示す。また DC 建屋クレーンの 1 次固有周期を表 3-3 に示す。

シミュレーション解析結果の応答加速度値のほうが観測記録の応答加速度値を概ね大きな値となっていることを確認した。鉛直方向の固有周期 0.128 秒で観測記録のほうが大きな応答加速度値となっているが、耐震評価で支配的な解析条件となる吊荷有りの 1 次固有周期 0.292 秒及び 0.239 秒ではシミュレーション解析のほうが応答加速度値は大きいことから問題ない。

表 3-3 DC 建屋クレーンの 1 次固有周期

ガーダ位置	吊荷	1 次固有周期 (秒)		
		NS 方向	EW 方向	鉛直方向
中央	有	0.190	0.174	0.292
	無	0.191	0.175	0.128
端部	有	0.141	0.177	0.239
	無	0.141	0.178	0.103

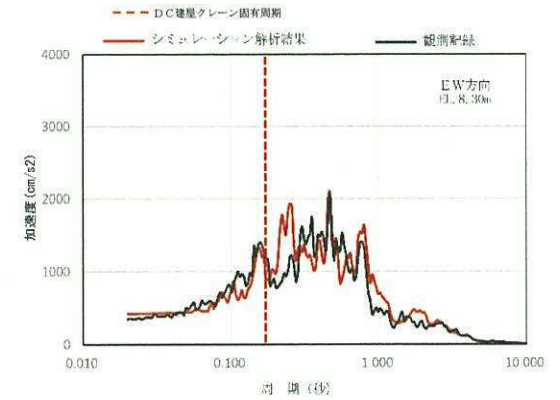
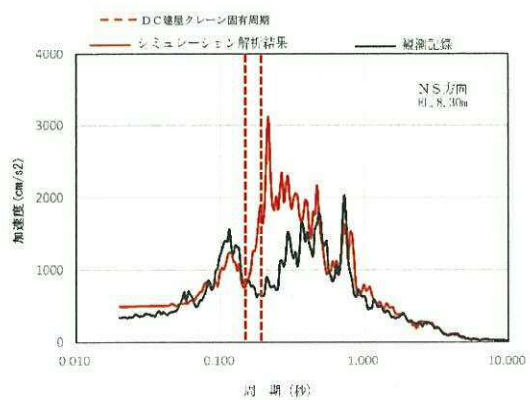
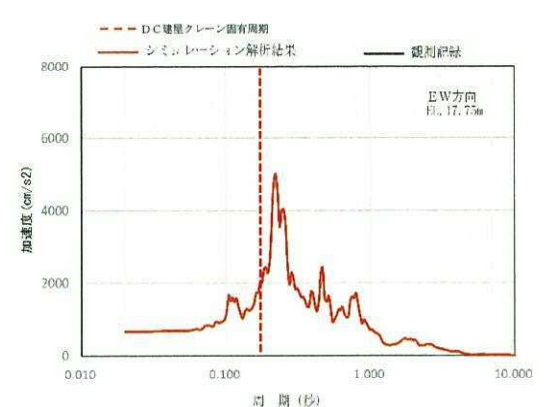
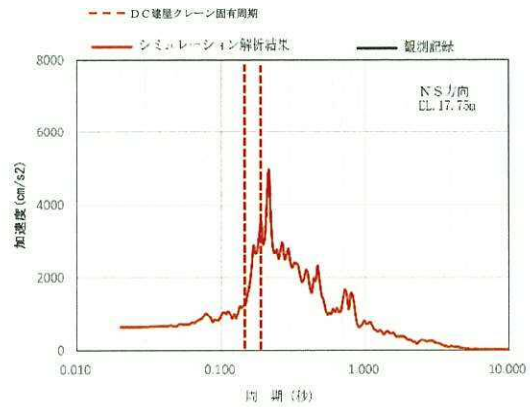
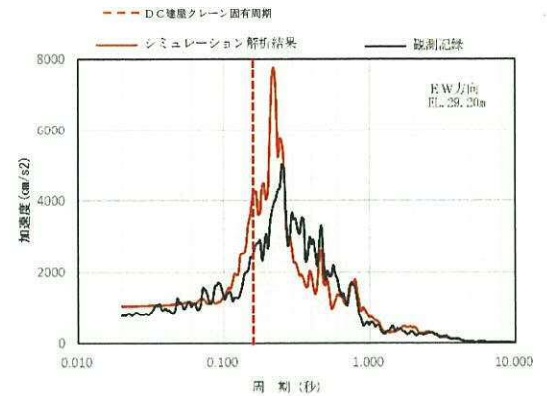
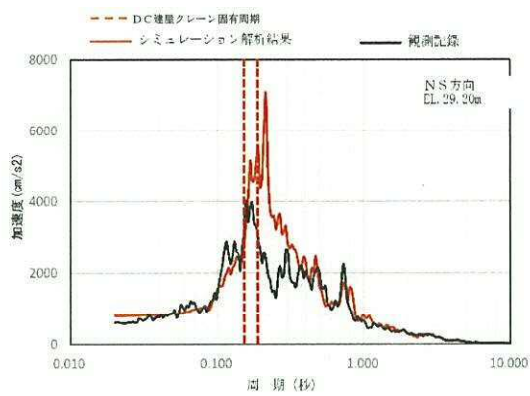


図 2-6 (1/2) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の床応答スペクトル比較図 (減衰 2%)

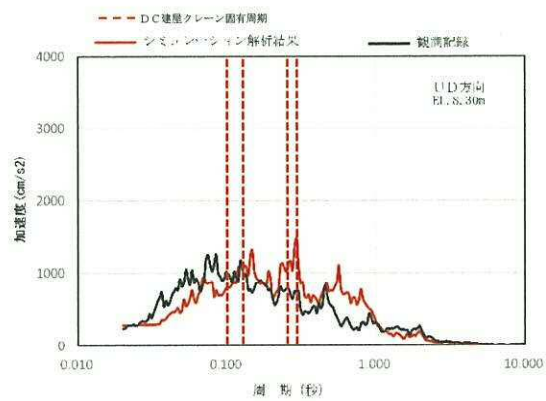
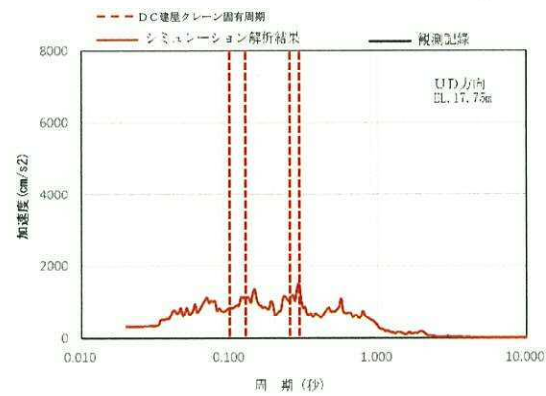
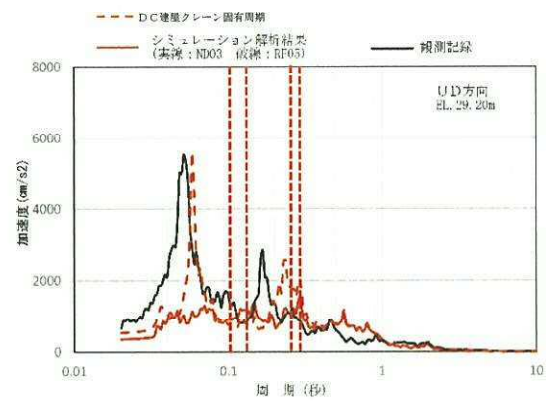


図 2-6 (2/2) 使用済燃料乾式貯蔵建屋の床応答スペクトル比較図 (減衰 2%)

2.4 工認に用いる地震応答解析モデルの妥当性について

使用済燃料乾式貯蔵建屋が細長い形状をしていること等を考慮し、地震応答解析モデルを既工認から変更した。東北地方太平洋沖地震のシミュレーション解析結果より、貯蔵容器への入力となるEL. 8.3 mの基礎上端での応答及び建屋有周期近傍での建屋応答を概ね安全側に評価出来ていることを確認した。

以上の結果を踏まえ、使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算及び耐震計算書に用いる応答解析モデルには、DC 今回工認モデルを用いることとした。

補足-400-2【地震応答解析モデルに用いる
鉄筋コンクリート部の減衰定数に関する検討】

目次

1. 概要	1
1.1 検討概要	1
1.2 検討方針	2
2. 地震応答解析モデルに用いる減衰特性	3
2.1 地震応答解析モデルにおける減衰特性の取扱い	3
2.2 建物・構築物の減衰定数の設定	4
2.3 地盤への逸散減衰の設定	5
2.4 減衰マトリクスの設定	7
2.5 履歴減衰（復元力特性）の設定	9
3. 減衰定数に関する既往の知見の整理	10
3.1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験	10
3.2 実建造物の振動試験	12
3.3 実建造物の地震観測	15
4. 減衰定数の検討	38
4.1 地盤への逸散減衰の検討	38
4.2 地震観測記録を用いたシミュレーション解析	41
5. 建屋の最大応答せん断ひずみ	53
5.1 基準地震動 S_s 応答レベル	53
5.2 弾性設計用地震動 S_d 応答レベル	53
6. 地震応答解析モデルにおける減衰定数の設定についての考察	54
6.1 実現象における減衰	55
6.2 地震応答解析モデルにおける減衰	57
6.3 地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察	58
6.4 まとめ	61

別紙 1 原子炉建屋の基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する最大応答せん断ひずみ

別紙 2 各建物・構築物の図面集

別紙 3 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震観測記録のシミュレーション解析

1. 概要

1.1 検討概要

本資料は、添付書類「V-2-1-6 地震応答解析の基本方針」において設定している、東海第二発電所の建物・構築物の地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート造部（以下「RC 造部」という）の減衰定数の設定の妥当性について説明するものである。

地震応答解析に用いる RC 造部の減衰定数について、既往の知見に加え、施設の地震観測記録による検討を行ったうえで、入力地震動及び建物・構築物の構造と形状を踏まえた考察を加えて、妥当性を確認する。

また、本資料は、以下の添付資料の補足説明をするものである。

- ・添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「V-2-2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「V-2-2-10 緊急時対策所建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「V-2-2-18 格納容器圧力逃がし装置格納槽の地震応答計算書」

1.2 検討方針

一般に建物・構築物の減衰作用としては、材料減衰（内部摩擦減衰、外部摩擦減衰及びすべり摩擦減衰）、履歴減衰及び地盤への逸散減衰が考えられる。「日本電気協会 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）－1987」及び「J E A G 4 6 0 1－1991 追補版」では、建物・構築物の地震応答解析における減衰特性を建物・構築物の材料減衰、履歴減衰（復元力特性）及び地盤への逸散減衰の組合せとしてモデル化することが提案されており、東海第二発電所の建物・構築物の地震応答解析においても、これに従いモデル化している。

また、「J E A G 4 6 0 1－1987」には、建物・構築物の RC 造部に対して 5 % が慣用的に使用されている値として示されている。東海第二発電所の工事計画認可申請書の建物・構築物の地震応答解析においても、RC 造部の減衰定数を 5 % としている。

本資料では、既往の知見に加え、東海第二発電所の原子炉建屋による検討から、入力地震動及び建物・構築物の構造と形状に応じ、建物・構築物の RC 造部の減衰定数に 5 % を用いることについての妥当性を考察する。

検討フローを図 1-1 に示す。

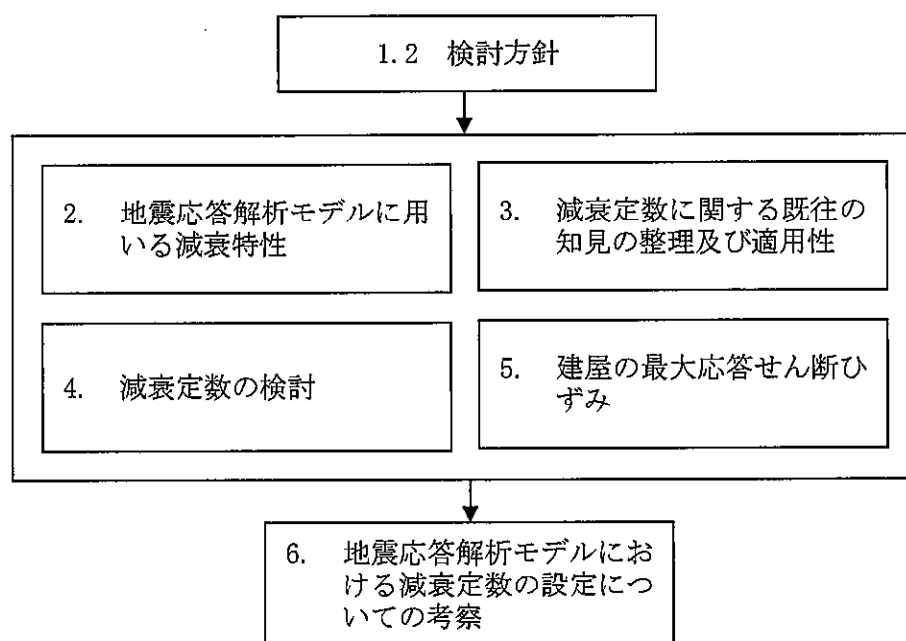


図 1-1 減衰定数の設定根拠の検討フロー

2. 地震応答解析モデルに用いる減衰特性

2.1 地震応答解析モデルにおける減衰特性の取扱い

東海第二発電所の地震応答解析モデルにおける減衰特性は、「J E A G 4 6 0 1 -1987」及び「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づき、建物・構築物の材料減衰，履歴減衰（復元力特性）及び地盤への逸散減衰の組合せとしてモデル化している。この中で，材料減衰が減衰定数に対応する。

地震応答解析モデルに用いる減衰特性の設定フローを図 2-1 に示す。

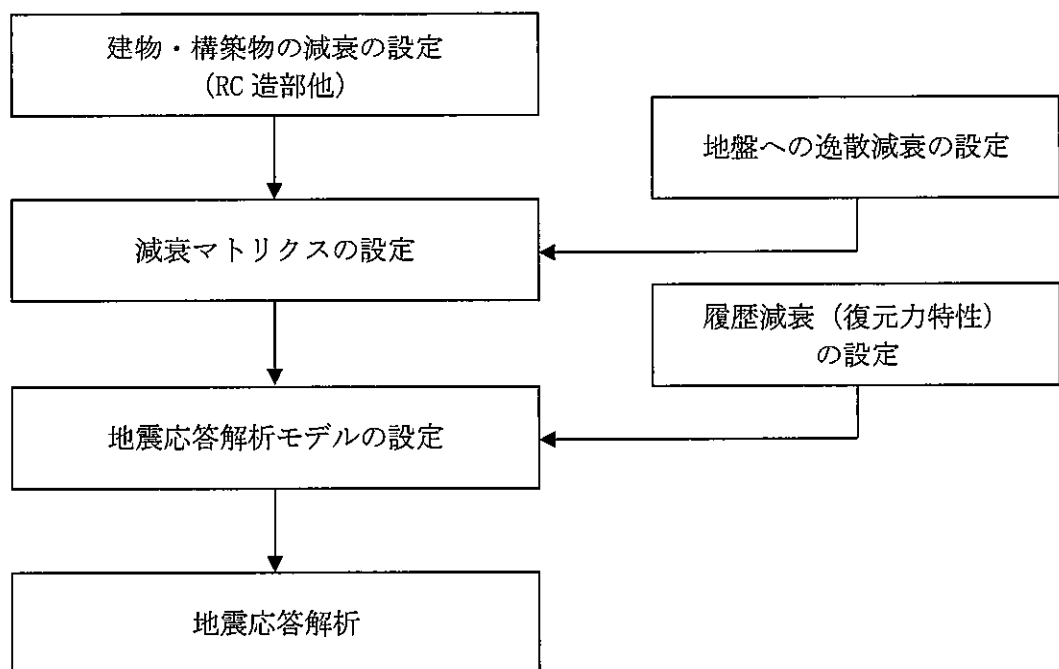


図 2-1 地震応答解析モデルに用いる減衰特性の設定フロー

2.2 建物・構築物の減衰定数の設定

東海第二発電所の建物・構築物の地震応答解析モデルにおいて、減衰定数は「J E A G 4 6 0 1 -1987」に基づき RC 造部を 5 %としている。

東海第二発電所の建物・構築物の減衰定数の設定状況を表 2-1 に示す。

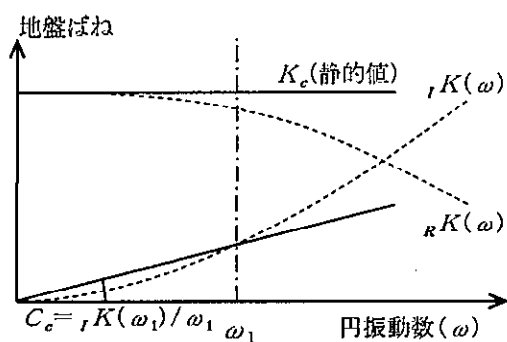
表 2-1 東海第二発電所 建物・構築物の減衰定数の設定状況

建物・構築物	構造種別	減衰定数
原子炉建屋 (R/B)	RC 造	5 %
	鉄骨造	2 %
使用済燃料乾式貯蔵建屋	RC 造	5 %
	鉄骨造	2 %
緊急時対策所建屋	RC 造	5 %
格納容器圧力逃がし装置格納槽	RC 造	5 %

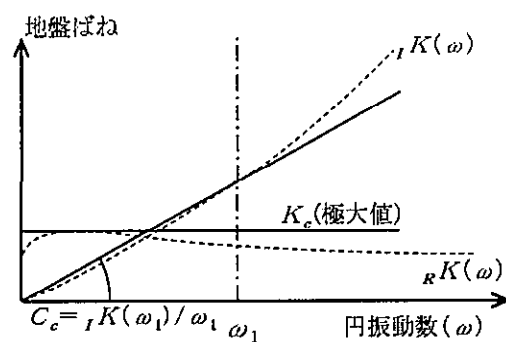
2.3 地盤への逸散減衰の設定

東海第二発電所の建物・構築物は、「J E A G 4 6 0 1 -1987」及び「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づき、建屋－地盤連成系としてモデル化し、地盤連成の効果は地盤ばねとしてモデル化している。地盤ばねについては、地盤条件、基礎形状等を基に剛性及び減衰係数を評価している。減衰係数は、振動系全体のうち地盤の影響が卓越する最初の固有振動数 (ω) に対応する虚部の値と原点とを結ぶ直線の傾き (C_d) により算定している。地盤ばねの剛性及び減衰係数の算定の概念図を図 2-2 に示す。

基礎底面地盤の回転ばねについては、接地率が 75 %を下回る場合、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づき基礎浮き上がりによる幾何学的非線形性を考慮する。基礎浮き上がりによる回転ばねの剛性の非線形特性を図 2-3 に示す。基礎浮き上がりによる回転ばねの減衰係数の低下率は、地震応答解析の各時刻における回転ばねの剛性の低下率と同じとしている。杭基礎を有する建物・構築物については、杭が引き抜けない事を確認する場合には、基礎底面地盤ばねは基礎浮き上がりによる幾何学的非線形性を考慮せずに線形ばねとする。



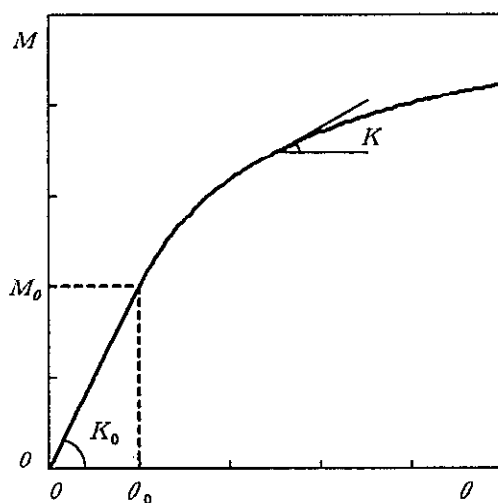
(a) 底面ばね



K_c : 地盤ばねの剛性
 C_c : 地盤ばねの減衰係数
 ω : 地盤の影響が卓越する最初の固有振動数

(b) 側面ばね（埋め込みを考慮する場合）

図 2-2 地盤ばねの剛性及び減衰係数の算定の概念図

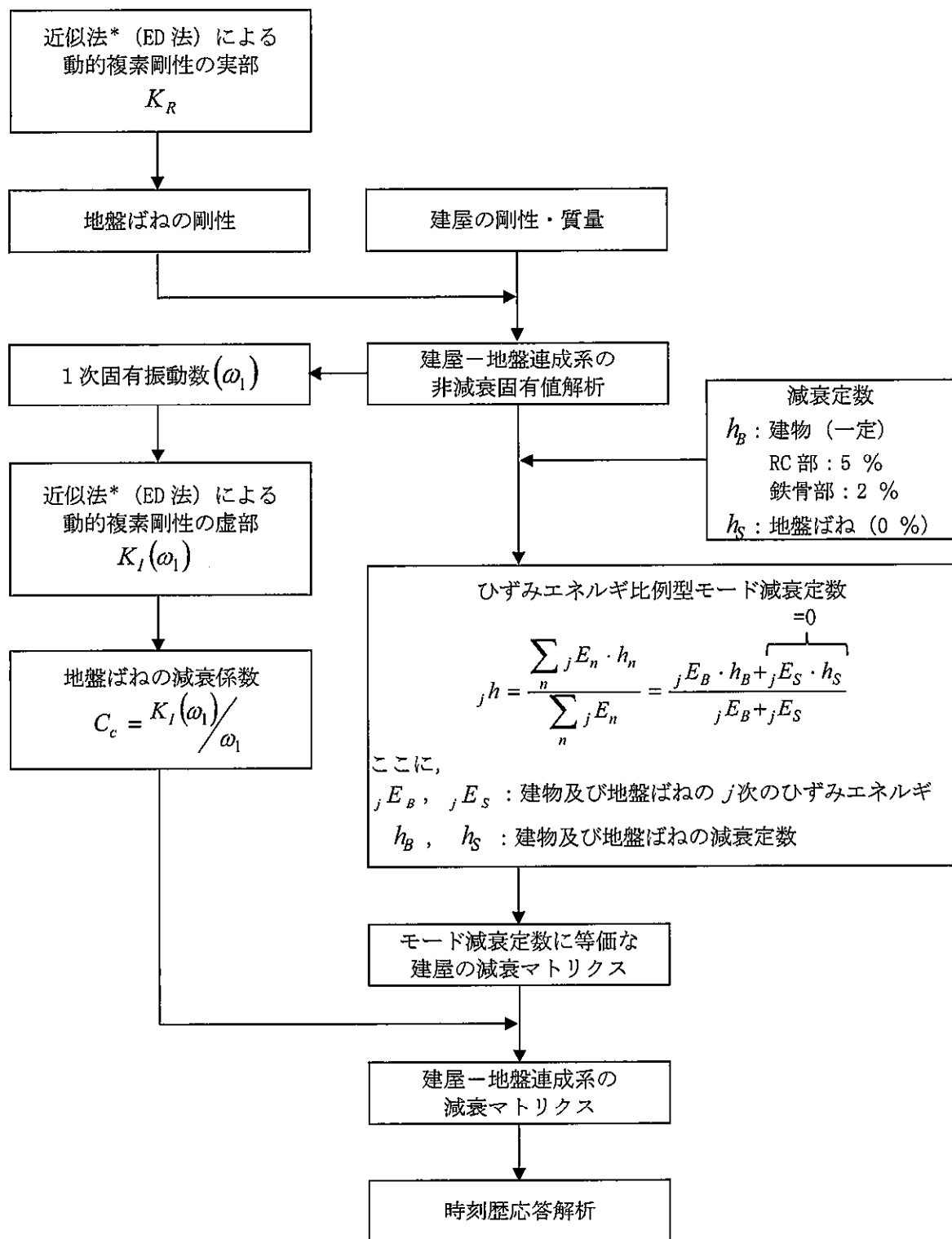


M : 転倒モーメント
 M_0 : 浮上り限界転倒モーメント
 θ : 回転角
 θ_0 : 浮上り限界回転角
 K_0 : 回転ばねの初期剛性
 K : 回転角 θ の時の回転ばねの剛性

図 2-3 基礎浮き上がりによる地盤の回転ばねの剛性の非線形特性

2.4 減衰マトリクスの設定

東海第二発電所の建屋－地盤連成系の減衰マトリクスは、図 2-4 に示すように、建物・構築物の減衰定数に基づいてひずみエネルギー比例型モード減衰定数を算定した後、近似法により算定した地盤ばねの減衰定数と組み合わせて算定する。



注記 * : 近似法は, 「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」に基づく。

図 2-4 建屋―地盤連成系の減衰マトリクスの算定フロー

2.5 履歴減衰（復元力特性）の設定

東海第二発電所の建物・構築物の地震応答解析に用いた RC 造部の復元力特性（履歴減衰）を表 2-2 示す。RC 造部の復元力特性は「J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版」に基づき、 $\tau - \gamma$ 関係においては最大点指向型モデルを、 $M - \phi$ 関係においてはディグレイディングモデルを用いている。 $\tau - \gamma$ 関係では安定ループにおける履歴吸収エネルギーによる減衰効果を期待していない設定となっている。

表 2-2 RC 造部の復元力特性

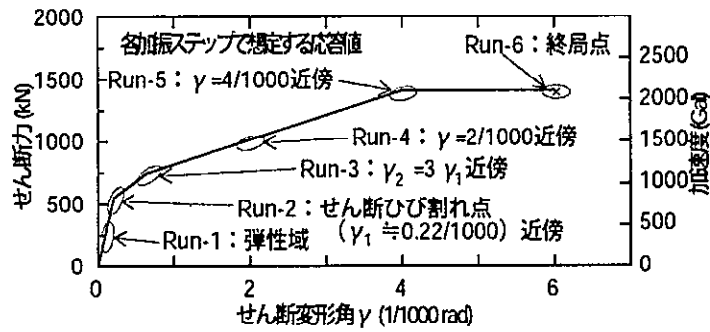
	$\tau - \gamma$ 関係 (せん断応力度－せん断ひずみ関係)	$M - \phi$ 関係 (曲げモーメント－曲率関係)
スケルトンカーブ	トリリニア	トリリニア
履歴特性	<ul style="list-style-type: none"> ・ 最大点指向型履歴ループ ・ 安定ループは面積を持たず、履歴吸収エネルギーがない 	<p>(第 2 剛性域内)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 最大点指向型履歴ループ ・ 安定ループは面積を持たず、履歴吸収エネルギーがない <p>(第 3 剛性域内)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ ディグレイディングトリリニア型 ・ 安定ループは面積があり、履歴吸収エネルギーがある
モデル図	<p><最大点指向型モデル></p>	<p><ディグレイディングモデル></p>

3. 減衰定数に関する既往の知見の整理

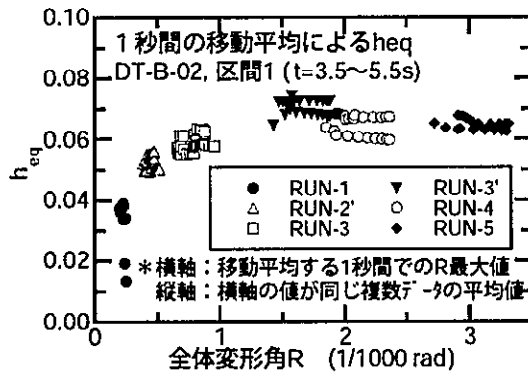
本章では応答レベルに応じた減衰定数を検討する観点から既往の知見や観測記録の整理を行う。整理にあたっては地盤への逸散減衰や履歴減衰を含むものかどうかにも着目する。

3.1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験

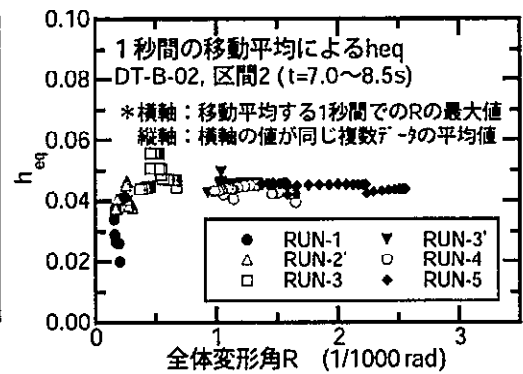
(財)原子力発電技術機構^{3, 1)}において「原子炉建屋の多入力試験分科会」の審議の下、ボックス型 RC 耐震壁が多方向から同時に地震力を受ける際の動的挙動の調査を目的として、三次元振動台を用いた加振試験（以下「RC 耐震壁試験」という。）を実施している。図 3-1 に RC 耐震壁試験の試験結果を示す。試験の結果によると等価粘性減衰定数 (heq) は、表 3-1 に示すように、履歴減衰を含む場合の弾性域で 1 %～4 %程度、第 1 折点付近で 5 %程度、第 2 折点付近で 6 %～7 %程度となっている。この値は、履歴減衰をあまり含まない場合の等価粘性減衰定数よりも、第 1 折点付近でも 1 %程度大きい値となっている。さらに、第 2 折点以降では 2 %程度大きくなっており、応答レベルが大きくなり非線形化するにつれ、履歴減衰は大きくなる傾向がある。また、等価粘性減衰定数には、第 1 折点付近までは応答レベルに応じて大きくなる傾向（振幅依存性）がみられる。



(a) 応答レベルと復元力特性の対応



(b) 履歴減衰を含む場合



(c) 履歴減衰をあまり含まない場合

図 3-1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験結果より算定された減衰定数^{3, 1)}

表 3-1 RC 耐震壁試験による等価粘性減衰の評価表

応答レベル	弾性域	第 1 折点 付近	第 2 折点 付近	許容限界 $\gamma = 2/1000$	終局点付近 $\gamma = 4/1000$
履歴減衰 を含む場合	1 %～4 % 程度	5 %程度	6 %～7 % 程度	6 %～7 % 程度	6 %～7 % 程度
履歴減衰 をあまり 含まない場合	2 %～4 % 程度	4 %程度	4 %～5 % 程度	4 %～5 % 程度	4 %～5 % 程度

3.2 実構造物の振動試験

「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書(日本建築学会構造委員会(2001))^{3. 2)}によると、原子炉建屋(BWR)での起振機による振動試験結果において弾性域(微小振幅レベル)での減衰定数は、5 %～54 %程度となっており、原子炉建屋(PWR)では、PCCVで2 %～3 %程度、RC造部で2 %～7 %程度となっている。ここで、東海第二発電所原子炉建屋の振動試験結果も含まれており、減衰定数は20 %となっている。この減衰定数の値は1次のピークにハーフパワー法*を適用して算出したものである^{3. 3)}。

原子炉建屋(PWR)と比較し、東海第二発電所の減衰が大きくなっているのは、軟質岩盤に立地しており、地盤への逸散減衰を多く含んでいるためと考えられる。地盤逸散減衰が大きいことについては、後述の「4.1 地盤への逸散減衰の検討」にて分析した「表 4-2 建屋及び地盤の減衰定数並びにひずみエネルギーの比率(原子炉建屋)」と整合している。

特に、原子炉建屋(BWR)の地盤条件 $V_s=500 \text{ m/s} \sim 700 \text{ m/s}$ 程度のサイトでは、地盤への逸散減衰を多く含み減衰定数が大きな値(19 %～54 %)になっている(図 3-2 参照)。原子炉施設の振動試験と解析評価比較一覧を表 3-2 に示す。

注記 * : ハーフパワー法 : 任意の固有振動数 f_n における応答の $1/\sqrt{2}$ となる振動数範囲 Δf により減衰比を求める方法

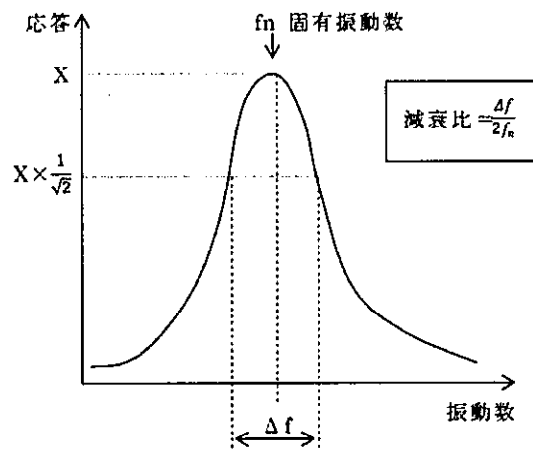


表 3-2 原子炉施設の振動試験と解析評価比較一覧*

(a) BWR

項目	文献B(V)-1	文献B(V)-2~4	文献B(V)-5	文献B(V)-6	文献B(V)-7、8	文献B(V)-9	文献B(V)-10	文献B(V)-11	文献B(V)-12~14
サイト	女川1	福島1-1	福島2-1	東海2	柏崎6	浜岡2(1)	浜岡3	浜岡4	島根1
建屋 [炉型]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]	原子炉建屋 [BWR Mark-II]	原子炉建屋 [BWR Mark-II]	原子炉建屋 [ABWR]	原子炉建屋 [BWR Mark-II]	原子炉建屋 [BWR Mark-II改]	原子炉建屋 [BWR Mark-II改]	原子炉建屋 [BWR Mark-I]
起振機 [加振力]	電中研大型起振機 [20t x 2]	大型起振機 [3t]	-	電中研大型起振機 [150t x 2]	大型起振機 [20t x 2]	電中研大型起振機 [150t x 2]	大型起振機 [10t x 2]	大型起振機 [10t x 2]	起振機 [3t]
測定箇所	・屋根 ・クレーン階 ・オペフロ ・基礎 等	・鉄骨屋根 ・建屋各階床 ・基礎 ・機器 等	・鉄骨屋根 ・建屋各階床 ・基礎	・建屋各階床	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部)	・建屋各階床 (端部・中央部) ・機器 等
地盤条件	$V_s=1620\text{m/s}$	$E=45\text{GPa}$	$V_s=550\text{m/s}$	$V_s=470\text{m/s}$	$(V_s=500\text{m/s})$	$(V_s=700\text{m/s})$	$V_s=700\text{m/s}$	$V_s=700\text{m/s}$	$V_s=1800\text{m/s}$
固有振動数 (1次)	試験 5.55Hz 解析 5.55Hz	0.25s 0.25s	3Hz 約3Hz	2.7Hz 2.4Hz	3.5Hz 3.9Hz	4.8Hz	3.8Hz	4.1Hz	0.19s 0.19s
減衰定数	試験 1次: 5.1% 解析 FEM建屋: 5% 質点系: 7.5%	-	1次: 33% 建屋: 3% 地盤: 5%	1次: 20% 1次: 15%	1次: 54% 建屋: 3% 地盤: 波動論	1次: 19~20%	1次: 41% 建屋: 5% 地盤: 格子型	1次: 36% 建屋: 5% 地盤: 格子型	- 建屋: (0.0064s) 地盤: (0.012s)
建屋材料定数 (ヤング率)	設計 325t/cm ² 解析 325t/cm ²	210t/cm ² 520t/cm ²	210t/cm ² 360t/cm ²	210t/cm ² 235t/cm ²	270t/cm ² 432t/cm ²	210t/cm ²	210t/cm ² 420t/cm ²	260t/cm ² 440t/cm ²	210t/cm ² 520t/cm ²
解析モデル	設計 SRモデル 解析 SRモデル ・FEMモデル ・SRモデル	SRモデル SRモデル	SRモデル SRモデル (地盤: FEM/BEM M27ソフト)	SRモデル 埋込みSRモデル	埋込みSRモデル	-	格子型モデル 格子型モデル	格子型モデル 格子型モデル	SRモデル SRモデル
評価方法 評価項目	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線	試験結果 ・共振曲線 ・位相曲線	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・位相曲線 ・振動モード	試験・解析比較 ・共振曲線 ・振動モード
備考						本文献は試験結果のみを示している			解析の減衰は内部粘性減衰で評価。

(b) PWR

項目	文献P(V)-1~3	文献P(V)-4~6	文献P(V)-7、8	文献P(V)-9、10、13	文献P(V)-11	文献P(V)-12	文献P(V)-13	
サイト	敦賀2	玄海3	大飯3	川内1	泊1	伊方2	もんじゅ	
建屋 [炉型]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋 [4-loop]	原子炉建屋 [3-loop]	原子炉建屋 [2-loop]	原子炉建屋 [2-loop]	原子炉建屋 [FBR]	
起振機 [加振力]	大型起振機 [150t x 2] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [10t] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [10t x 2] 小型起振機 [3t]	大型起振機 [50t], [10t]	大型起振機 [50t], [10t]	大型起振機 [50t], [10t]	大型起振機 [10t x 2]	
測定箇所	・1/C ・PCV (4-N) 振動測定も含む ・REB ・E/B	・1/C ・PCV (4-N) 振動測定も含む ・REB	・1/C ・PCV (4-N) 振動測定も含む ・REB	・0/S (4-N) 振動測定も含む ・1/C	・0/S (4-N) 振動測定も含む ・1/C ・C/V	・0/S (4-N) 振動測定も含む ・1/C ・C/V	・0/S (4-N) 振動測定も含む ・1/C ・C/V	
地盤条件	$V_s=1600\text{m/s}$	$V_s=1350\text{m/s}$	$V_s=2230\text{m/s}$	$V_s=1500\text{m/s}$	$V_s=1400\text{m/s}$	$V_s=2300\text{m/s}$	$V_s=1900\text{m/s}$	
固有振動数 (1次)	試験 PCCV: 4.85 Hz 1/C: 7.57 Hz E/B: 3.15 Hz 解析 PCCV: 4.92 Hz 1/C: 7.66 Hz	PCCV: 4.97 Hz (NS) 1/C: 9.62 Hz (NS) 9.71 Hz (EW) 解析 PCCV: 4.92 Hz 1/C: 7.66 Hz	PCCV: 5.01 Hz (NS) 4.97 Hz (EW) 1/C: 9.78 Hz (NS) 10.62 Hz (EW) 解析 PCCV: 5.5 (NS) 1/C: 9.4 (NS) 10.5 (EW)	0/S: 4.7 Hz 1/C: 9.4 Hz (X) 10.6 Hz (Y) 0/S: 4.1 Hz 1/C: 9.6 Hz (X) 10.2 Hz (Y)	0/S: 5.4 Hz (X) 5.6 Hz (Y) 1/C: 11.9 Hz (X) 12.9 Hz (Y) 0/S: 5.1 Hz (X) 5.9 Hz (Y) 1/C: 11.9 Hz (X) 13.8 Hz (Y)	0/S: 6.9~7.1 Hz 1/C: 13.7~13.9 Hz (X) 11.3~11.8 Hz (Y) C/V: 8.1 Hz 0/S: 6.8 Hz 1/C: 13.1 Hz (X) 11.8 Hz (Y) A/B: 5.9 Hz (NS) 6.5 Hz (EW)	1/C: 9.0 Hz (NS) 9.1 Hz (EW) A/B: 5.4 Hz (NS) 5.5 Hz (EW) 1/C: 8.1 Hz (NS) 8.0 Hz (EW) A/B: 5.9 Hz (NS) 6.5 Hz (EW)	
減衰定数	試験 PCCV: 2.2% 1/C: 3.4% E/B: 2.2% (NS) 解析 PCCV: 2.0% 1/C: 4.0%	PCCV: 2.0% (NS) 1/C: 3.0% (NS) 3.0% (EW) 解析 PCCV: 2.0% 1/C: 3.0%	PCCV: 1.7% (NS) 1.0% (EW) 1/C: 13.0% (NS) 2.0% (EW) 試験値と同じ値を採用	0/S: 3.0% 1/C: 2.0% (X) 2.0% (Y)	0/S: 7.0% (X) 5.8% (Y) 1/C: 4.6% (X) 2.0% (Y)	0/S: 3.3% 1/C: 12.8% (X) 3.1% (Y)	1/C: 5.2% (NS) 5.4% (EW) A/B: 7.7% (NS) 9.1% (EW)	
建屋材料定数 (ヤング率)	設計 1/C: 230 t/cm ² PCCV: 304 t/cm ² 解析 1/C: 270 t/cm ² PCCV: 400 t/cm ²	1/C: 230 t/cm ² PCCV: 304 t/cm ² 1/C: 380 t/cm ² PCCV: 380 t/cm ²	1/C: 257 t/cm ² PCCV: 315 t/cm ² 1/C: 370 t/cm ² PCCV: 430 t/cm ²	RC: 223 t/cm ² RC: 380 t/cm ²	RC: 230 t/cm ² RC: 340 t/cm ²	RC: 210 t/cm ² RC: 390 t/cm ²	RC: 230 t/cm ² RC: 310 t/cm ²	
解析モデル	設計 S-R モデル 解析 ・全付建屋: 3次元 質点系 S-R ・PCCV: 3DFEM	S-R モデル ・1/C 部分を有限要素 系 S-R とした質点 系 S-R (水平) ・3DFEM (上下)	S-R モデル 1/C 部分を有限要素 系 S-R とした質点系 S-R	S-R モデル 上部構造曲げせん断 質点系 S-R	S-R モデル 上部構造曲げせん断 質点系 S-R	S-R モデル 上部構造曲げせん断 質点系 S-R	S-R モデル 上部構造曲げせん断 質点系 S-R	
評価方法 評価項目	一質点系固有振動分析 により各モードの固有 振動数、減衰定数を評価 ・共振曲線 ・モード図	一質点系固有振動分析 により各モードの固有 振動数、減衰定数を評価 ・共振曲線 ・モード図	一質点系固有振動分析 により各モードの固有 振動数、減衰定数を評価 ・共振曲線 ・モード図 ・伝達関数	ハーフパワー法 ・固有振動数 ・振動形 ・共振曲線	多自由度固有振動分析 のモード同定法 ・固有振動数 ・モード図 ・共振曲線	ハーフパワー法 ・固有振動数 ・振動形 ・共振曲線	一質点系固有振動分析 により各モードの固有 振動数、減衰定数を評価 ・共振曲線 ・モード図	
備考								

注記 * : 「原子炉施設の実機試験・観測と評価」に関する調査報告書 (日本建築学会構造委員会 (2001)) 3. 2) に加筆)

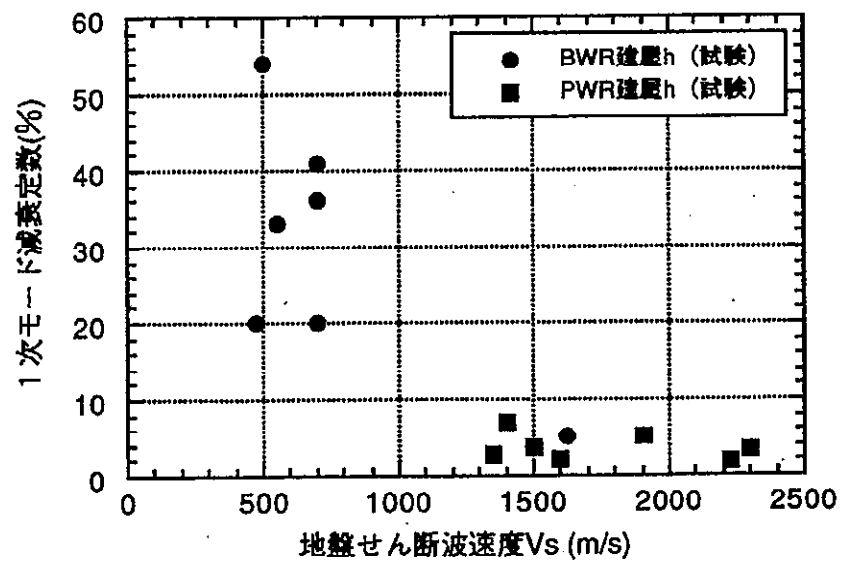


図 3-2 地盤剛性 (V_s) と試験結果の減衰定数の関係^{3. 2)}

3.3 実構造物の地震観測

3.3.1 原子炉建屋（BWR）での地震観測（RC 造部）

(1) 女川 2 号機及び 3 号機での地震観測

東北電力（株）女川 2 号機及び 3 号機原子炉建屋シミュレーション解析結果^{3. 3)}を表 3-3 に示す。基礎上端と上部構造の観測記録を用いているため、解析結果に対する地盤への逸散減衰の影響は小さいと考えられるものの、建屋が地盤に埋め込まれていることによる減衰への影響が考えられる。地震による累積的影響が小さいと考えられる、東北地方太平洋沖地震(2011 年 3 月 11 日)以前の地震観測記録の分析結果によると、減衰定数 h は 1 % ～ 8 % 程度となっている。

減衰定数と加速度レベルの関係を図 3-3 に示す。基礎版上加速度が 500 cm/s^2 程度までは、加速度レベルに応じて大きくなる傾向がある。

表 3-3 東北電力（株）女川 2 号機及び 3 号機原子炉建屋シミュレーション解析結果

(a) 女川 2 号機原子炉建屋 固有振動数と減衰定数の傾向

地震名	NS方向			EW方向		
	基礎版上加速度 2RB-6(cm/s ²)	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※	基礎版上加速度 2RB-6(cm/s ²)	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※
1994.10.04 22:22 北海道東方沖 マグニチュード8.2 震央距離758km	15	6.74 1.31	1.40 -	15	6.50 3.73	1.32 -
2003.05.26 18:24 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離48km	112	5.55 7.77	1.15 -	168	5.29 4.01	1.08 -
2005.08.16 11:46 宮城県沖 マグニチュード7.2 震央距離73km	230	5.44 6.30	1.13 -	206	5.24 4.63	1.07 -
2011.03.11 14:46 東北地方太平洋沖 マグニチュード9.0 震央距離123km	501	4.42 6.88	0.92 -	461	4.43 5.87	0.90 -
2011.04.07 23:32 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離43km	358	4.31 8.08	0.89 -	367	4.36 7.19	0.89 -

(b) 女川 3 号機原子炉建屋 固有振動数と減衰定数の傾向

地震名	NS方向			EW方向		
	基礎版上加速度 3RB-1(cm/s ²)	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※	基礎版上加速度 3RB-1(cm/s ²)	振動数(Hz) 減衰定数(%)	比率※
2001.12.02 22:02 岩手県内陸南部 マグニチュード6.4 震央距離112km	33	6.23 4.29	1.25 -	35	5.75 5.25	1.17 -
2003.05.26 18:24 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離48km	129	5.78 3.95	1.16 -	189	5.31 4.51	1.08 -
2005.08.16 11:46 宮城県沖 マグニチュード7.2 震央距離73km	222	5.55 3.78	1.11 -	188	5.20 5.57	1.06 -
2011.03.11 14:46 東北地方太平洋沖 マグニチュード9.0 震央距離123km	545	4.72 6.03	0.94 -	458	4.58 7.00	0.93 -
2011.04.07 23:32 宮城県沖 マグニチュード7.1 震央距離43km	373	4.57 5.27	0.91 -	398	4.48 7.66	0.91 -

(「東北電力（株）女川 2 号機及び 3 号機原子炉建屋シミュレーション解析について

(コメント回答) [建築物・構造 6-3-2 (2012)]^{3, 4)} に加筆)

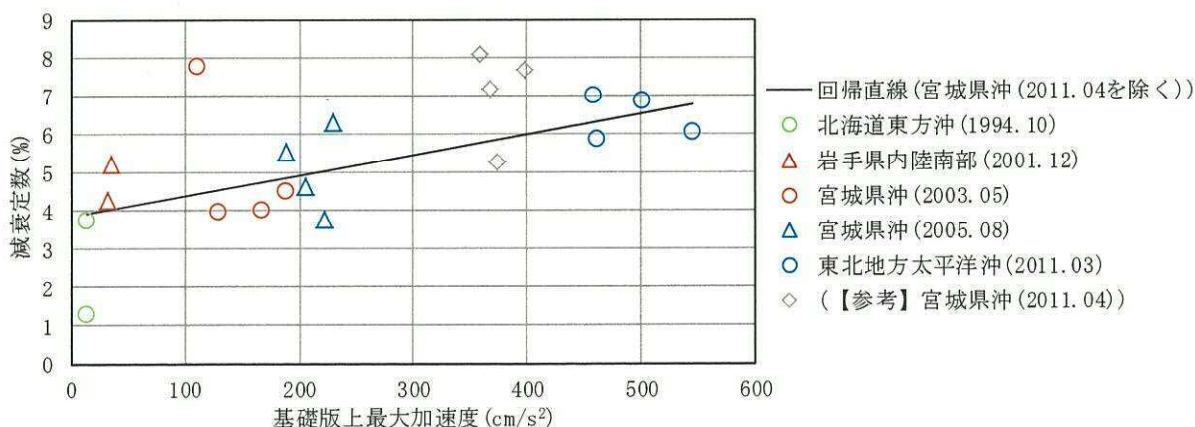


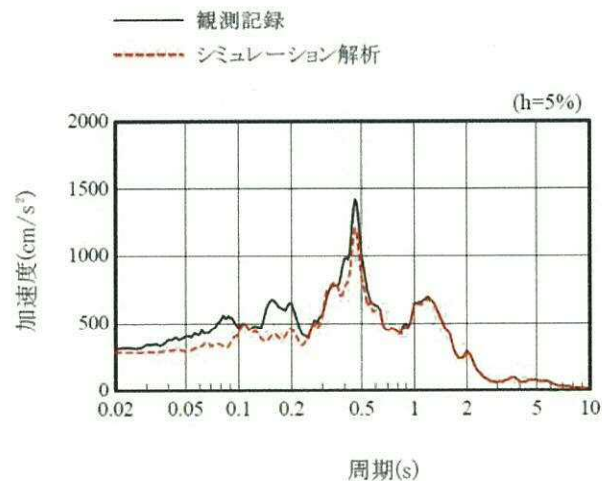
図 3-3 減衰定数と入力加速度レベルの関係

(2) 福島第二・2号機での地震観測

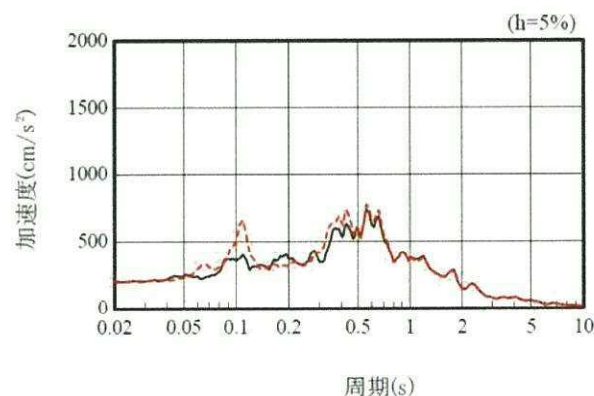
東京電力（株）福島第二・2号機原子炉建屋の東北地方太平洋沖地震を対象としたシミュレーション解析^{3, 5)}では、設計モデルを基本として実情を踏まえた建屋及び地盤条件を考慮した埋込みSRモデルにより、基礎版上の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施している。この際、建屋RC造部の材料減衰は5%とし、解析モデルへは歪みエネルギー比例型減衰として与えている。

シミュレーション解析結果の地上2階の加速度応答スペクトルは、観測記録の傾向を概ね捉えている（図3-4参照）。なお、シミュレーション解析結果の各階の最大せん断ひずみは、最大でも 0.1×10^{-3} 程度となったとしている。

減衰定数5%を設定した地震観測シミュレーション解析により、観測記録を概ね再現できることが確認された。



(a) 南北方向



(b) 東西方向

図3-4 地上2階の加速度応答スペクトルの比較^{3, 5)}

(3) 東通1号機での地震観測

東北電力（株）東通原子力発電所1号機原子炉建屋の2008年7月24日に発生した岩手県沿岸北部の地震を対象としたシミュレーション解析^{3, 6)}では、地盤との相互作用を考慮した多軸多質点系のシミュレーション解析モデルにより、基礎スラブ上端質点の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施している。この際、建屋RC造部の材料減衰は5%としている。

シミュレーション解析結果の1階、3階及び屋根の加速度応答スペクトルは、観測記録を概ね再現している（図3-5参照）。減衰定数5%を設定した地震観測シミュレーション解析により、観測記録を概ね再現できることが確認された。

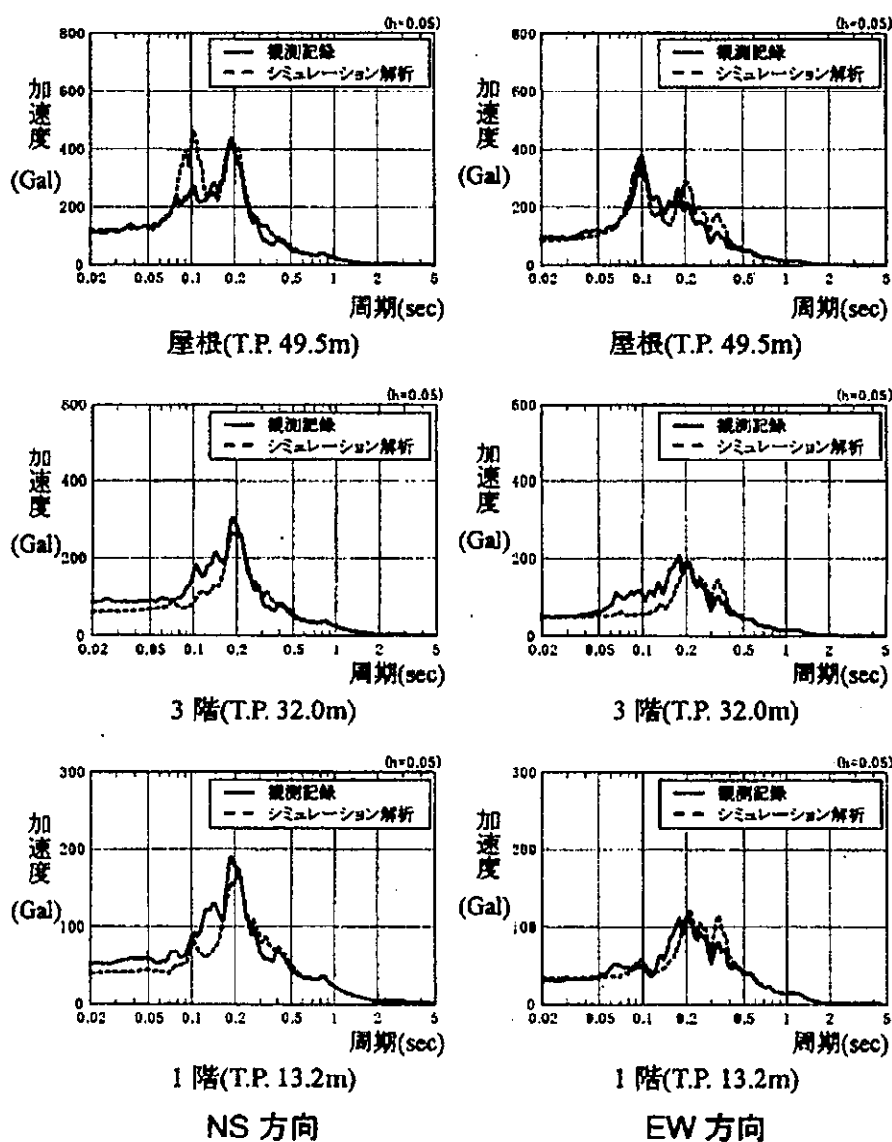


図3-5 加速度応答スペクトルの比較^{3, 6)}

(4) 柏崎刈羽 5 号機及び 7 号機の地震観測

東京電力（株）柏崎刈羽原子力発電所 5 号機及び 7 号機原子炉建屋の新潟県中越沖地震を対象としたシミュレーション解析^{3, 7)}では、設計時のモデルに実情を踏まえた建屋及び地盤条件を考慮した埋込み SR モデルにより、基礎版上の観測記録を用いたシミュレーション解析を実施している。この際、建屋 RC 造部の材料減衰は 5 %とし、解析モデルへは歪みエネルギー比例型減衰として与えている。

シミュレーション解析結果の 5 号機地上 2 階及び 7 号機地上 3 階の加速度応答スペクトルは、観測記録を比較的良好に再現できることが示されたとしている（図 3-6 参照）。なお、シミュレーション解析結果の各階の最大せん断ひずみは、最大でも 5 号機 0.2×10^{-3} 程度、7 号機で 0.12×10^{-3} 程度となったとしている。

減衰定数 5 %を設定した地震観測シミュレーション解析により、観測記録を概ね再現できることが確認された。

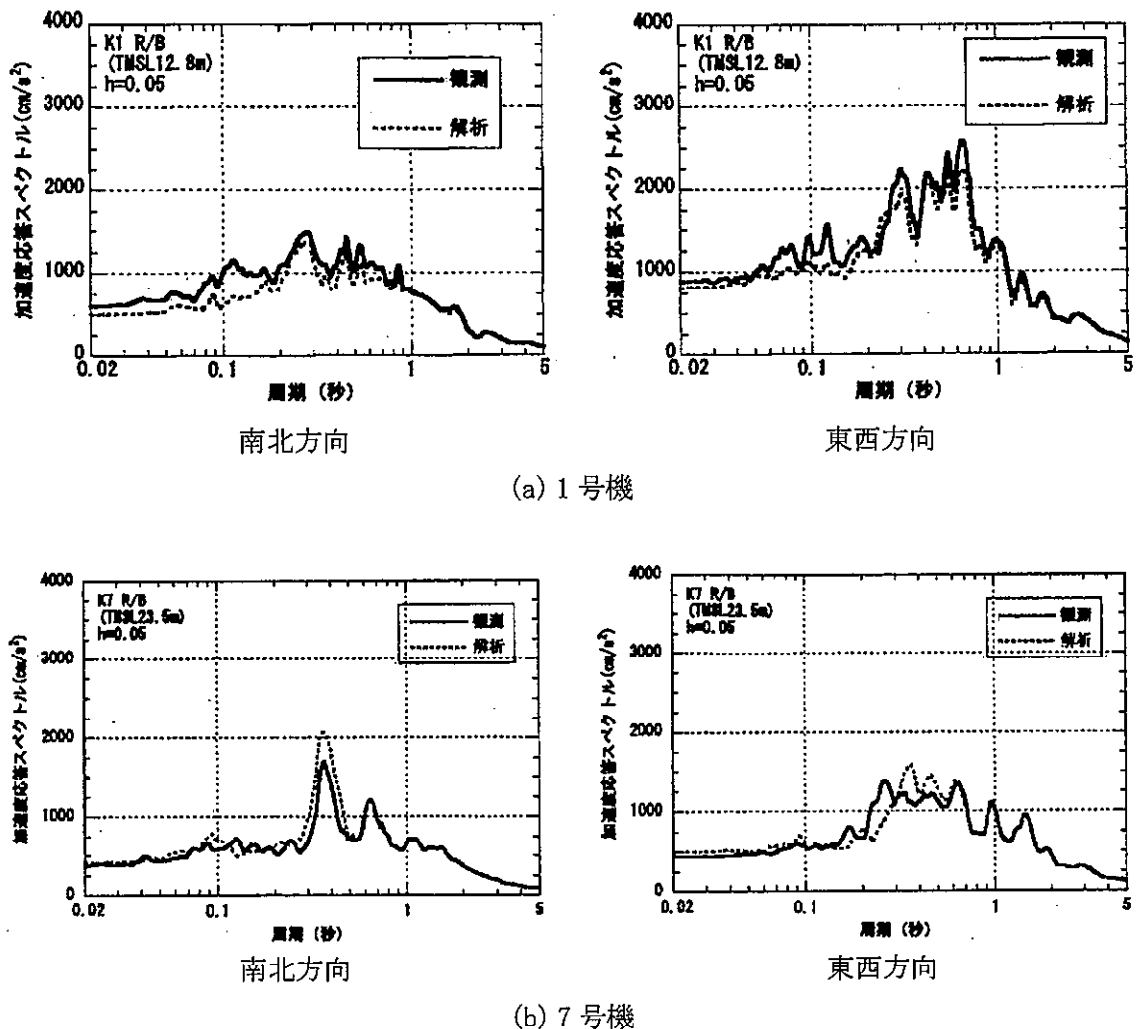


図 3-6 加速度応答スペクトルの比較^{3, 7)}

(5) 浜岡 3 号機の地震観測

中部電力（株）浜岡原子力発電所 3 号機原子炉建屋の上下動シミュレーション解析^{3. 8)}では、静岡県南部地震（1988 年 6 月 1 日）を対象として、建屋を多質点系モデルで評価したシミュレーション解析モデルにより、基礎版上端における上下動観測波を入力とした解析を実施している。この際、建屋 RC 造部の材料減衰は 5 %としている。

シミュレーション解析結果の屋根端部及び中央部の加速度応答スペクトルは、観測記録にみられる卓越振動数及び増幅特性を概ね捉えている（図 3-7 参照）。減衰定数 5 %を設定した上下動地震観測シミュレーション解析により、観測記録と比較的良好な対応を示すことが確認された。

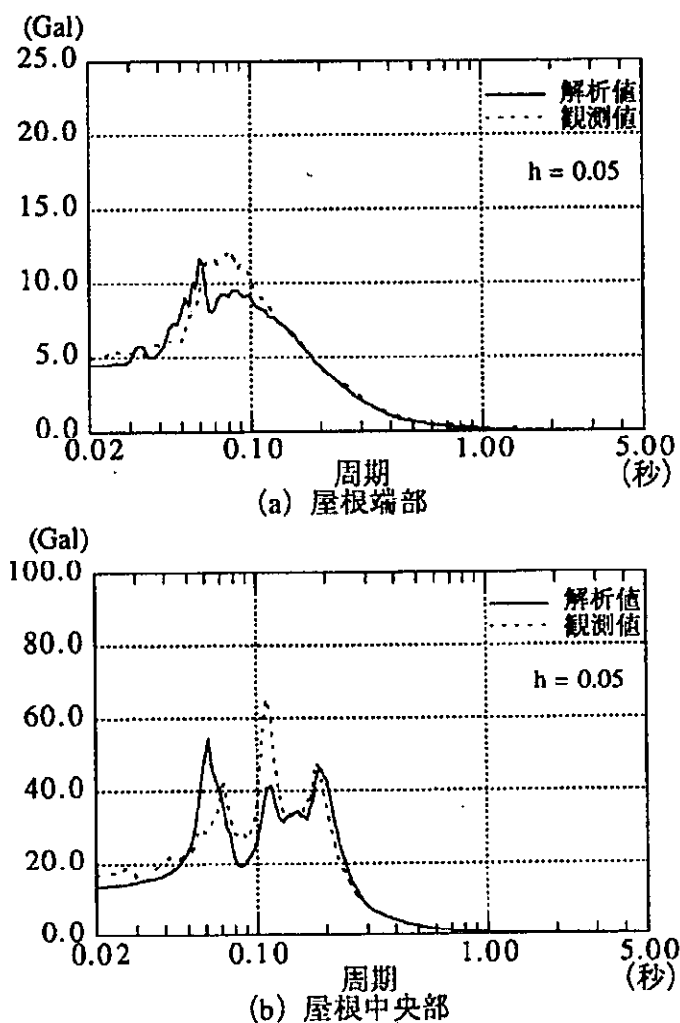


図 3-7 加速度応答スペクトルの比較^{3. 8)}

(6) 浜岡 4 号機の地震観測

中部電力（株）浜岡原子力発電所 4 号機原子炉建屋と周辺地盤を含めた建屋－地盤連成計のシミュレーション解析^{3, 9)}では、建屋を質点系、地盤を多質点系並列地盤モデルで評価したシミュレーション解析モデルにより、自由地盤の GL-20 m の 3 地震の観測波を入力とした解析を実施している。この際、建屋 RC 造部の材料減衰は 5 %としている。

シミュレーション解析結果の屋根階中央部、4 階及び 1 階の加速度応答スペクトルは、観測記録を概ね良い対応を示している（図 3-8 参照）。

減衰定数 5 %を設定した地震観測シミュレーション解析により、観測記録を概ねよく対応できることが確認された。

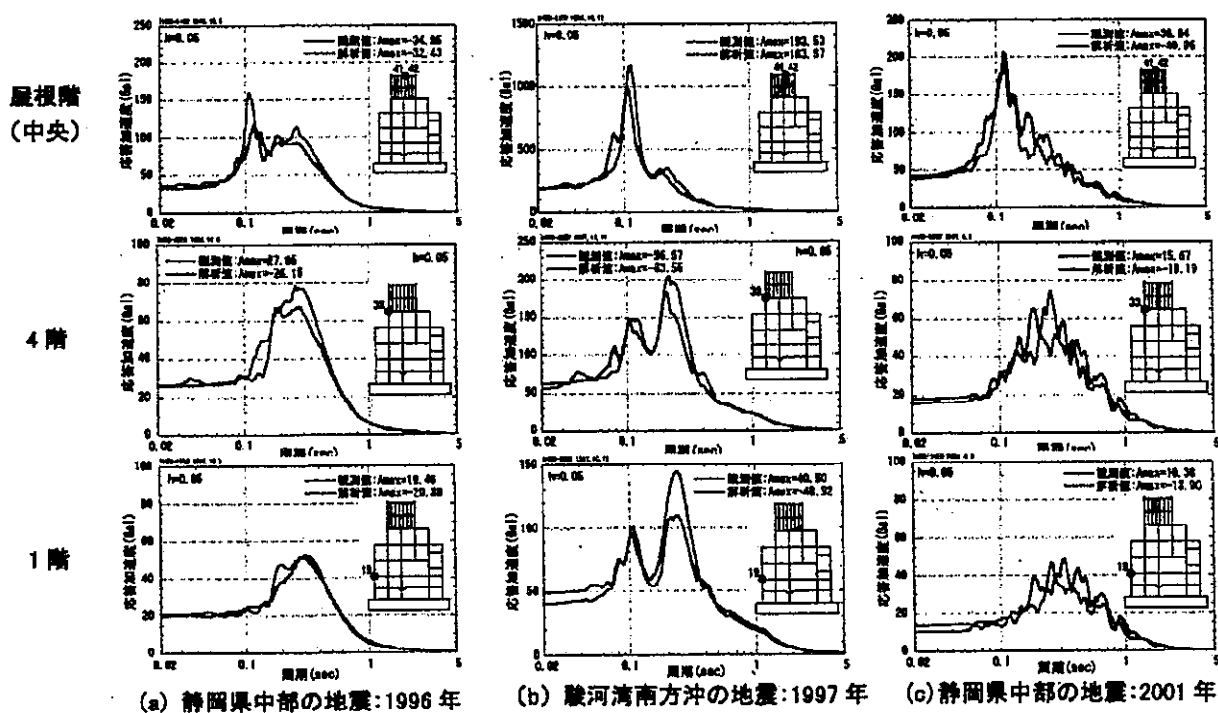


図 3-8 加速度応答スペクトルの比較^{3, 9)}

3.3.2 原子炉建屋（PWR）での地震観測（新規制基準施行前）

原子炉建屋（PWR）における地震観測記録の分析結果を表 3-4 に整理する。整理にあたっては、地盤への逸散減衰の影響が小さいと考えられる上部構造物と基礎上端の記録に基づく文献を選定している。得られた観測記録レベルでの減衰定数は 1 %～4 % 程度となっている。

また、九州電力（株）では 1997 年鹿児島県北西部地震の本震及び余震等の観測記録を用いて、川内原子力発電所 1 号機（以下「川内 1 号機」という。）の外部遮蔽建屋における基礎上端最大加速度と減衰定数の関係性を評価している。評価結果を図 3-9 に示す。加速度レベルが大きくなるにつれ、減衰定数は大きくなる傾向が見られるとしている。

表 3-4 原子炉建屋（PWR）での地震観測記録の分析結果

	基礎上端最大加速度 (推定される応答レベル)	減衰定数	備考
伊方 1 号機 ^{3.10)}	約 25 cm/s ² (弾性域)	内部コンクリート：3 % 外周コンクリート壁：3.5 %	1979 年 7 月 13 日 周防灘の地震
泊 1 号機 ^{3.11)}	約 40 cm/s ² (弾性域)	外部遮蔽建屋， 内部コンクリート， 周辺補機棟の平均：4.1 %	1993 年 7 月 12 日 北海道南西沖地震
川内 1 号機 ^{3.12)}	1 cm/s ² ～68 cm/s ² 程度 (弾性域)	外部遮蔽建屋：1 %～4 %程度	1997 年 3 月 26 日， 5 月 13 日 鹿児島県北西部地震 (余震を含む 24 地震)

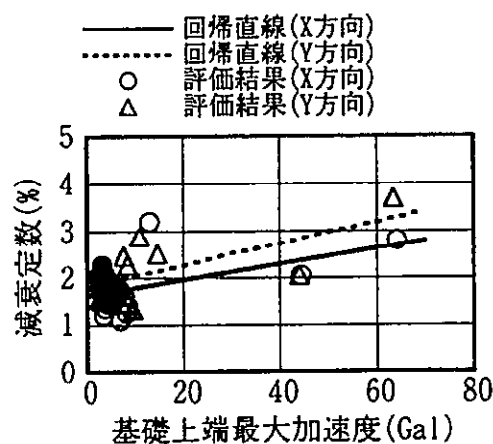


図 3-9 川内 1 号機 外部遮蔽建屋の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係^{3.6)}

3.3.3 原子炉建屋（PWR）での地震観測（新規制基準施行後）

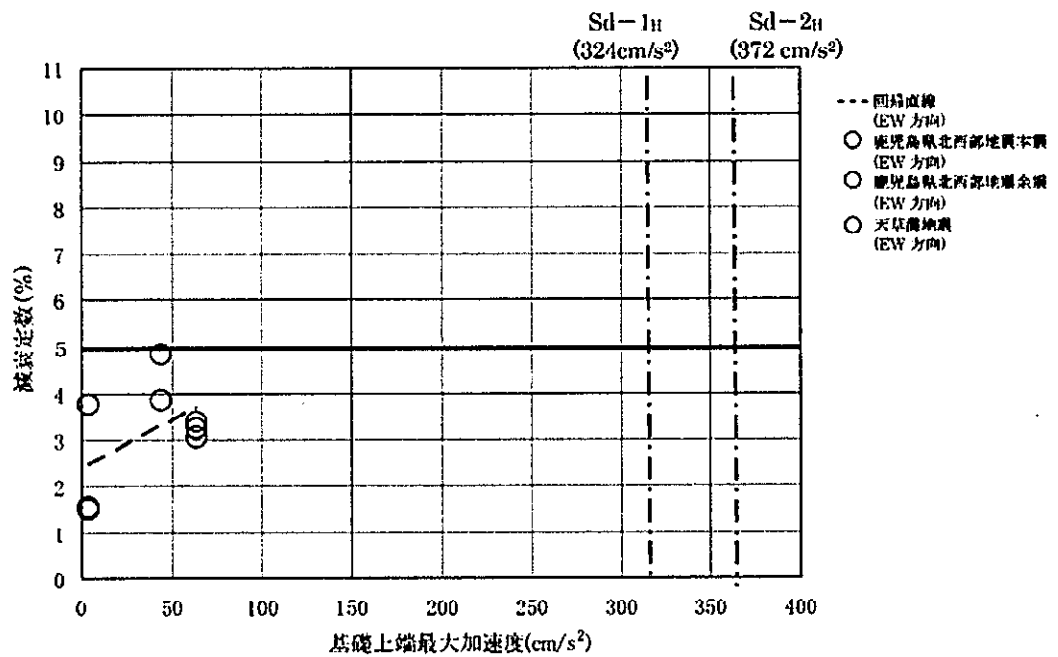
(1) 川内 1 号機での地震観測（RC 造部）

九州電力（株）は川内 1 号機の減衰定数に関する検討^{3. 13)}において、複数の地震観測記録を用いた詳細な検討を行い、川内 1 号機の外部遮蔽建屋、内部コンクリート及び原子炉補助建屋における減衰定数 h について、構造及び形状による考察並びに基準地震動 S_a 及び弾性設計用地震動 S_d 応答レベルでの減衰定数 h の考察を実施している。

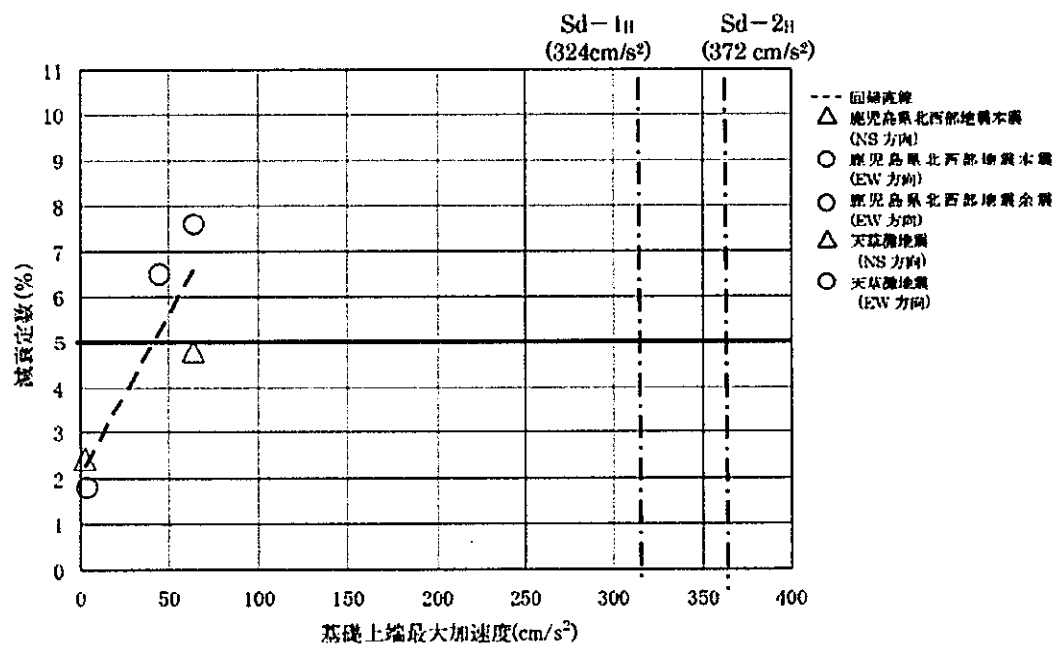
① システム同定による減衰定数 h の評価

九州電力（株）は鹿児島県北西部地震の本震、同地震の余震及び天草灘地震の地震観測記録を用いて、システム同定により減衰定数 h を評価した結果、水平方向は外部遮蔽建屋で 2% ～5 % 程度、内部コンクリートで 2 %～8 % 程度、原子炉補助建屋で 2 %～10 % 程度、鉛直方向は各建屋で 2 %～5 % 程度であるとしている。減衰定数 h と基礎上端最大加速度を比較した結果を図 3-10 に示す。

これらの結果を踏まえ九州電力（株）は、川内 1 号機について、システム同定により評価した減衰定数は入力地点の加速度レベルに応じて大きくなる傾向を示しており、検討に用いた地震観測記録の入力地点の加速度よりも大きいレベルでは、更に大きな減衰が推定できるとしている。



(a) 外部遮蔽建屋（水平方向）



(b) 内部コンクリート（水平方向）

図 3-10 (1/2) 川内 1 号機の基礎先端最大加速度と減衰定数の関係^{3. 13)}

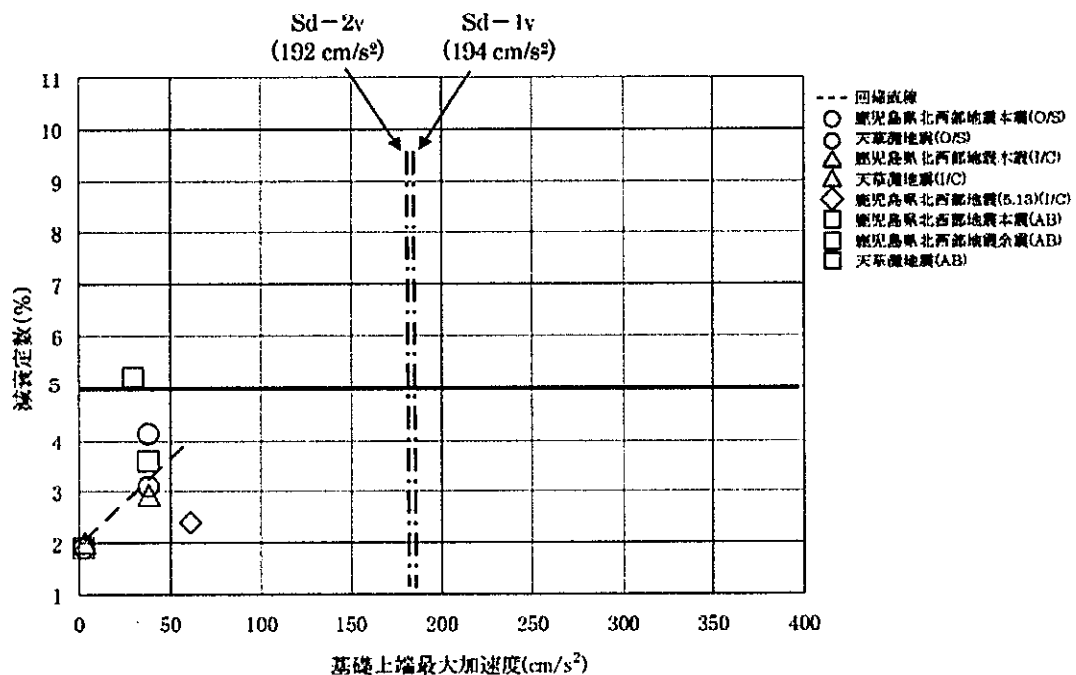
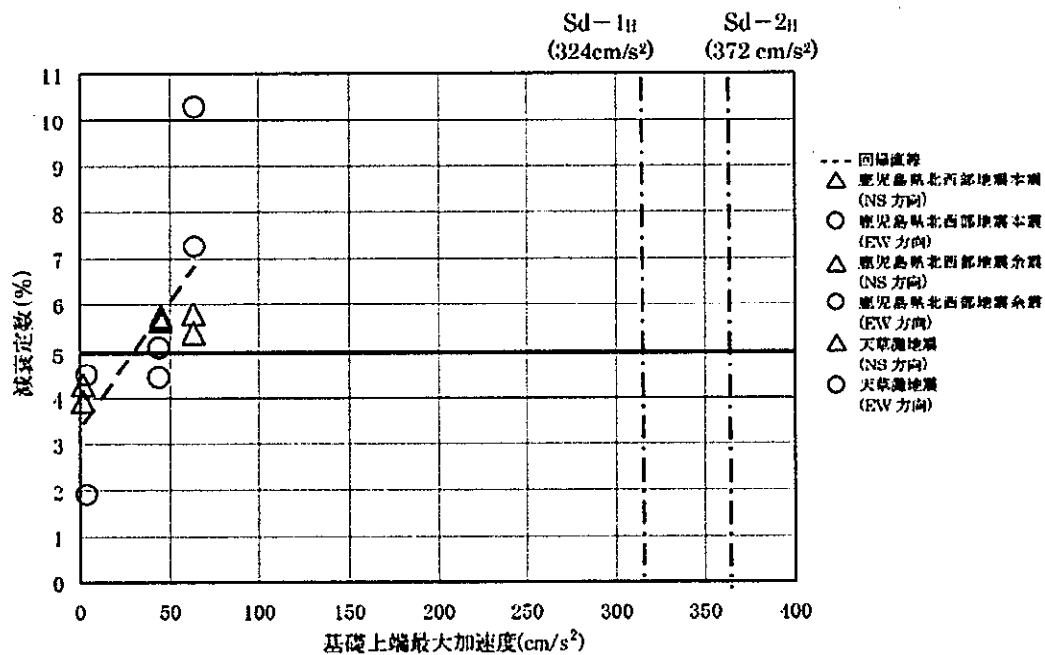


図 3-10 (2/2) 川内 1 号機の基礎上端最大加速度と減衰定数の関係^{3. 13)}

② 構造及び形状による考察

九州電力（株）は RC 造の建物・構築物の減衰定数 h について、構造及び形状により、以下のように考察している。

RC 耐震壁試験と比較して減衰効果が期待できる要因に着目し、単純な構造体と、多数の耐震壁及び構造床から構成された 3 次元的な広がりを持つ複雑な構造体に分類して考察を行う。

単純な構造体は、外部遮蔽建屋が該当し、トップドーム部を除き高さ方向に構造床がなく、耐震壁に取り付く梁及び耐震壁がないような構造体で、直交する接合部が少ないことが特徴と言える。

複雑な構造体は、直交部材との接合部を複数有する構造体とし、内部コンクリート及び原子炉補助建屋が該当する。内部コンクリートは、構造床を有し、耐震壁は 3 次元的に複雑な形状となっている。また、原子炉補助建屋は、複数の層にそれぞれ構造床があり、耐震壁も多数の区画を形成している。

これら複雑な構造体は、水平方向及び鉛直方向の地震力に対し、耐震壁及び構造床に加え、接合部を介した挙動及び加力方向と直交する構造部材の挙動から、減衰効果が得られると考えられる。これらは、内部コンクリート及び原子炉補助建屋の水平方向については、システム同定による減衰定数の評価結果において、単純な RC 耐震壁と比較して、減衰効果が特に大きい傾向が得られていること、また、鉛直方向については、地震応答解析モデルによる検討結果において、鉛直方向の観測記録で減衰効果が解析結果以上に得られていることから推察できる。

③ 基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する応答レベルでの減衰定数の考察

九州電力（株）は川内 1 号機の基準地震動 S_s による耐震壁の最大せん断ひずみは、スケルトンカーブにおいて概ね第 1 折点付近であり、弾性設計用地震動 S_d による耐震壁の最大せん断ひずみは、スケルトンカーブにおいて概ね第 1 折点付近以下であるとしている。

既往の実験・観測結果に加え、川内 1 号機におけるシステム同定による減衰定数 h の評価結果からも、減衰定数 h には振幅依存性が確認されることから、基準地震動 S_s レベル（水平方向 540 gal 以上、鉛直方向 320 gal 以上）及び弾性設計用地震動 S_d レベル（水平方向 320 gal 以上、鉛直方向 190 gal 以上）では、観測記録レベル（1 gal～60 gal 程度）で得られた減衰定数 h よりも大きいと考えられ、基準地震動 S_s レベル及び弾性設計用地震動 S_d レベルの解析に用いる減衰定数 h は水平方向及び鉛直方向とも 5 % 程度以上と考えられるとしている。

ここで、複雑な構造体である内部コンクリート及び原子炉補助建屋については観測記録地震動レベル（1 gal～60 gal 程度）で 5 % を超える減衰定数 h が得られているが、単純な構造体である外部遮蔽建屋は最大で約 5 % と、構造の複雑さによる減衰効果の違いが見られることから、九州電力（株）は単純な構造体である外部遮蔽建屋については、観測記録より得られた減衰定数 h に加え、振幅依存性を踏まえると弾性設計用地震動 S

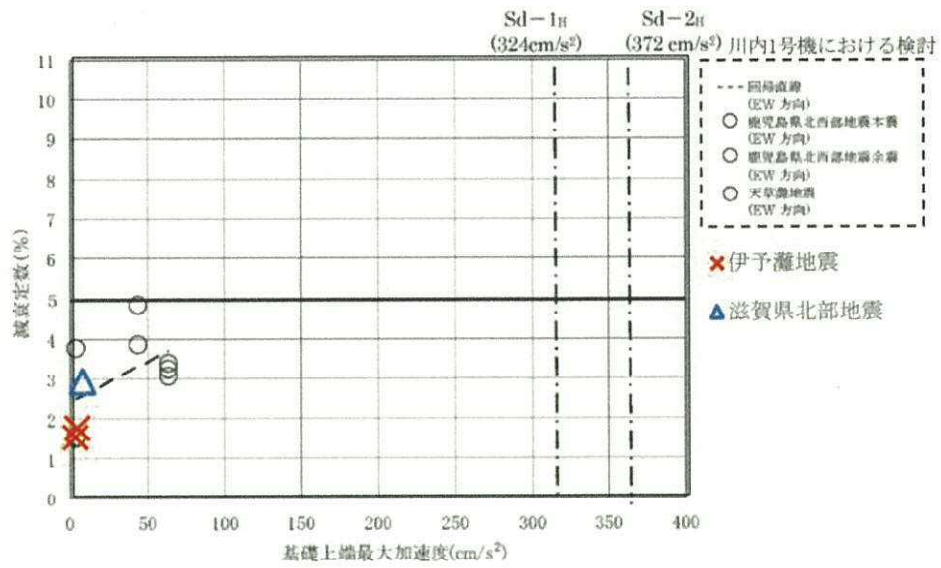
Ⅱレベルにおいても 5 %程度以上とできるものと考えられるが、構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくいことから、弾性設計用地震動 $S_{Ⅱ}$ を用いた評価では減衰定数を 3 %とした場合についても考慮するとしている。

(2) 高浜 3 号機の地震観測 (RC 造部)

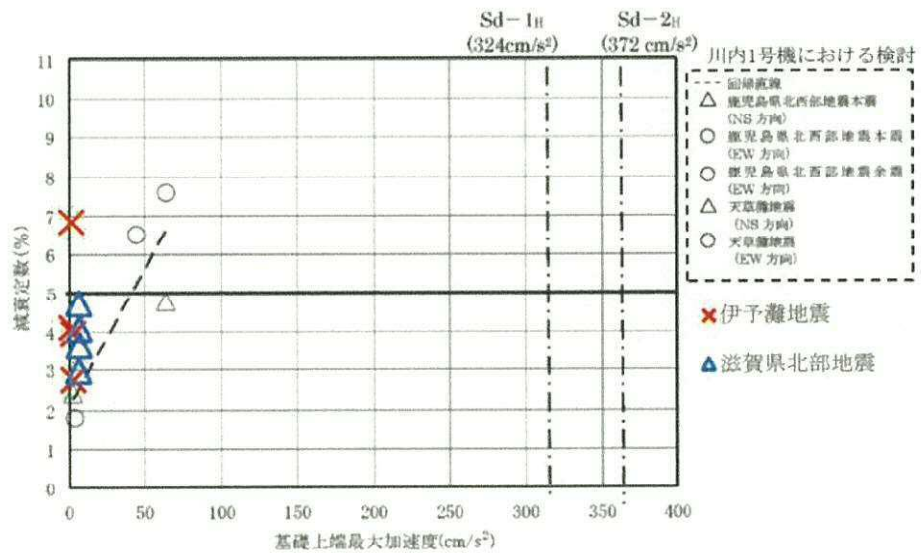
関西電力(株)は高浜発電所 3 号機(以下「高浜 3 号機」という)における減衰定数に関する検討^{3, 14)}では、地震観測記録を用いて建屋の減衰定数 h の考察を実施している。

システム同定により減衰定数 h を評価した結果、水平方向は外部遮蔽建屋で 1.6 %～2.9 %程度、内部コンクリートで 2.8 %～6.8 %程度、外周建屋で 2.2 %～5.2 %程度、鉛直方向は各建屋で 1.4 %～7.3 %程度であるとしている。高浜 3 号機のシステム同定結果を図 3-11 に示す。

また、高浜 3 号機と川内 1 号機は、建物・構築物の配置やその構造的特徴には共通点が見られることから、川内 1 号機の観測記録及びそれに基づく検討内容の結果を高浜 3 号機に適用できるとしている。

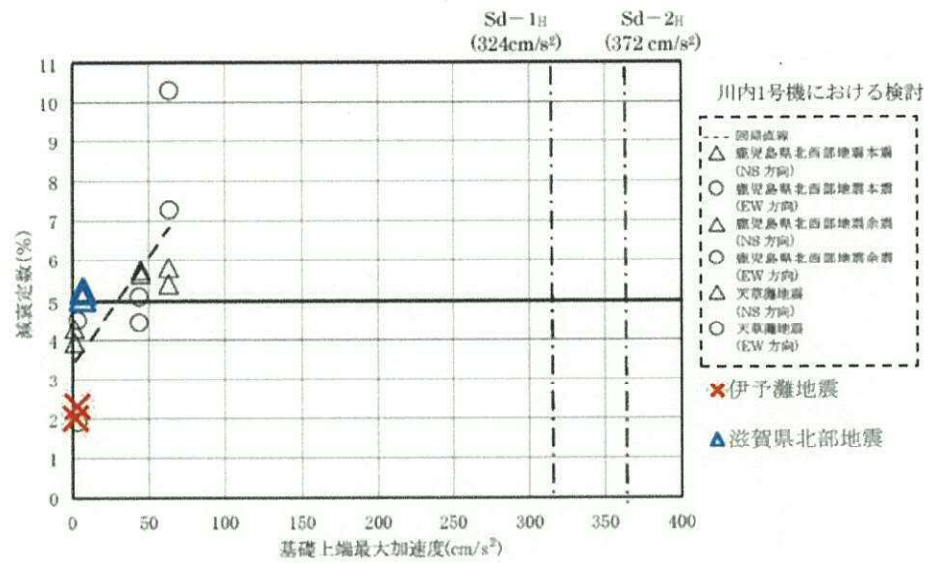


(1) 外部しゃへい建屋 (水平方向)

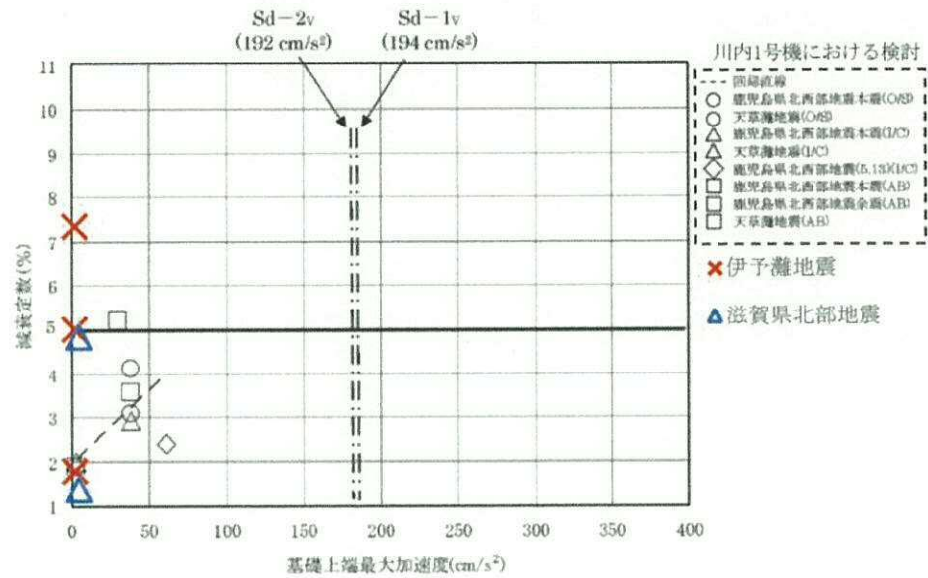


(2) 内部コンクリート (水平方向)

図 3-11 (1/2) 川内 1 号機における鹿児島県北西部地震の本震及び余震等を含むシステム同定結果と高浜 3 号機の伊予灘地震によるシステム同定結果^{3. 14)}



(3) 外周建屋（川内：原子炉補助建屋）（水平方向）



(4) 外部しゃへい建屋、内部コンクリート、外周建屋（川内：原子炉補助建屋）（鉛直方向）

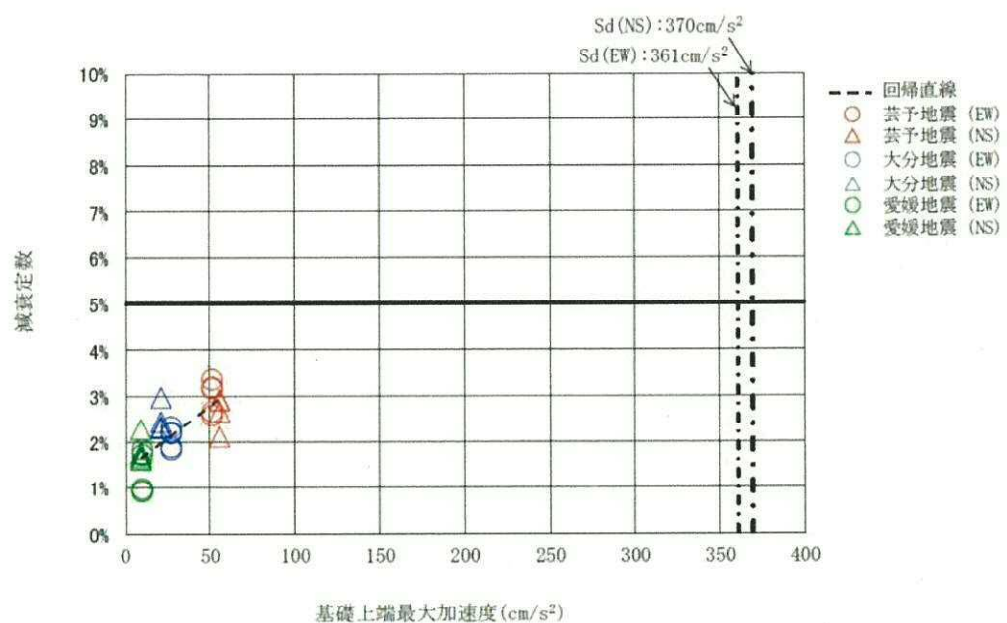
図 3-11 (2/2) 川内 1 号機における鹿児島県北西部地震の本震及び余震等を含むシステム同定結果と高浜 3 号機の伊予灘地震によるシステム同定結果^{3, 14)}

(3) 伊方3号機の地震観測（RC造部）

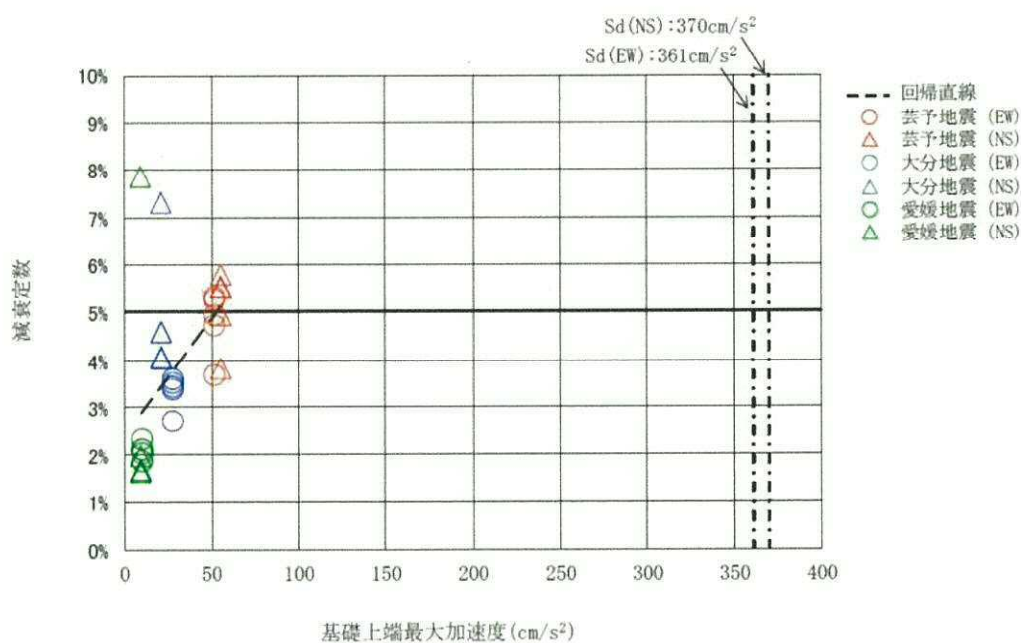
四国電力（株）は伊方発電所3号機（以下「伊方3号機」という）における減衰定数に関する検討^{3. 15)}では、地震観測記録を用いて建屋の減衰定数 h の考察を実施している。

システム同定により減衰定数 h を評価した結果、水平方向は外周コンクリート壁で3 %程度、内部コンクリートで5 %程度であるとしている。鉛直方向は、外周コンクリート壁、内部コンクリートともに5 %程度であるとしている。伊方3号機のシステム同定結果を図3-12に示す。

また、伊方3号機と川内1号機は、類似の構造をもつ建物・構築物であり、川内1号機の観測記録及びそれに基づく検討内容を伊方3号機に適用できるとしている。

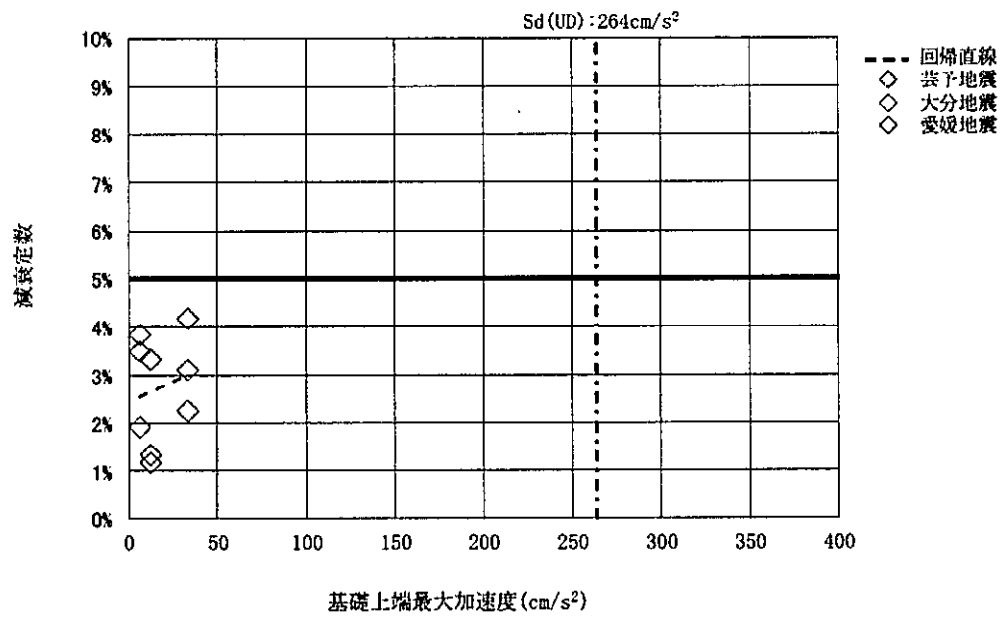


(a) 外周コンクリート壁 (水平方向)



(b) 内部コンクリート (水平方向)

図 3-12 (1/2) 伊方 3 号機の芸予地震等によるシステム同定結果^{3. 15)}



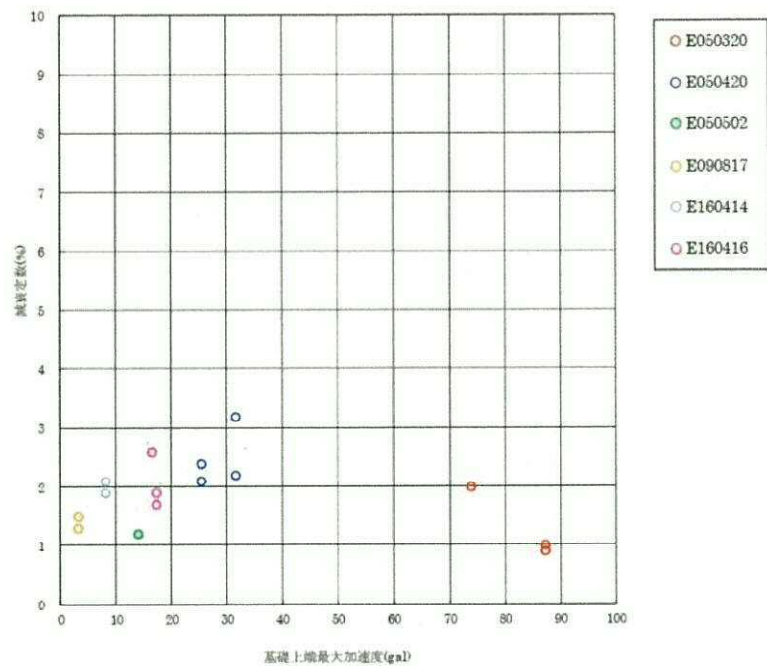
(c) 外周コンクリート壁 (鉛直方向)

図 3-12 (2/2) 伊方 3 号機の芸予地震等によるシステム同定結果^{3. 15)}

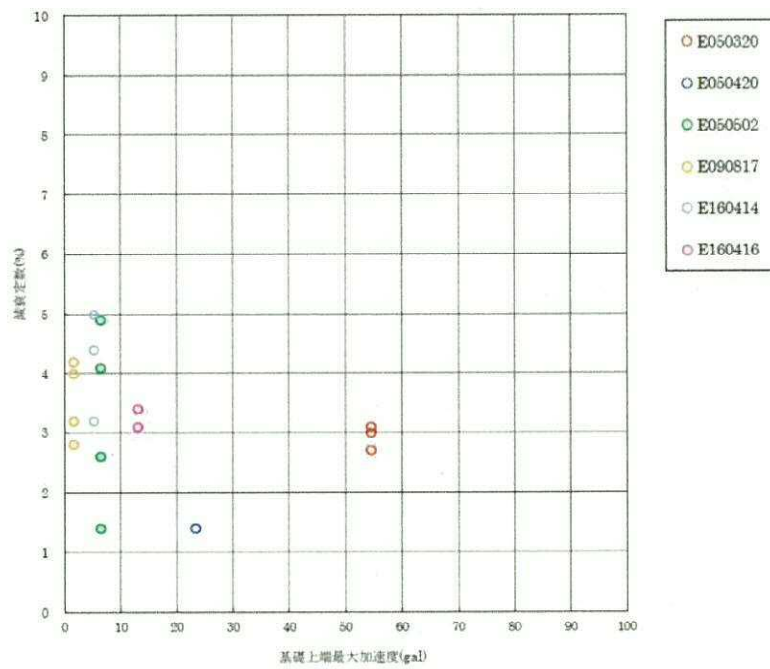
(4) 玄海 3 号機の地震観測 (PCCV)

① 玄海 3 号機における地震観測記録を用いた減衰定数の検討

玄海発電所 3 号機（以下「玄海 3 号機」という）における減衰定数に関する検討^{3. 16)}では、地震観測記録を用いたシステム同定を実施し、PCCV では減衰定数が低振幅の観測記録レベルでも、水平方向では 2 %程度以上であり最大では 3 %を超える減衰定数が得られ、鉛直方向では 2 %程度以上の結果であり最大では 5 %程度の減衰定数が得られたとしている。玄海 3 号機のシステム同定結果を図 3-13 に示す。



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 3-13 玄海 3 号機の観測記録によるシステム同定結果^{3, 16)}

② 3次元FEMモデルを用いた動的線形解析による検討

玄海3号機では、減衰定数が地震応答解析モデルに与える影響を確認する観点から、3次元FEMモデルを用いた動的線形解析による検討を実施している。この検討では、PCCVの減衰定数を3%、RC造部の減衰定数を5%とした解析ケース（以下「基本ケース」という）及びPCCVの減衰定数を2%、RC造部の減衰定数を3%とした解析ケース（以下「減衰定数の不確かさ考慮ケース」という）による地震応答解析を行い、観測記録との比較検討を行っている。

上記によると、3次元FEMモデルによる解析結果は、概ね観測記録と同等または保守的な評価となっており、保守的な解析結果が得られる場合においても、基本ケースの方が観測記録と比較的よく整合するとしている。

③ 基準地震動 S_s 及び弾性設計用地震動 S_d に対する応答レベル

九州電力（株）によると、玄海3号機のPCCVの基準地震動 S_s による耐震壁の最大応答せん断ひずみは、スケルトンカーブの第1折点を超える程度となり、弾性設計用地震動 S_d による耐震壁の最大応答せん断ひずみは、スケルトンカーブの第1折点未満であるとしている。

④ 減衰定数の考察

玄海3号機における基準地震動 S_s に対するPCCVの応答レベルは、スケルトンカーブの第1折点を超える程度であり、第1折点付近の減衰定数について考察している。玄海3号機の観測記録を用いたシステム同定結果は、水平方向で2%～3%程度、鉛直方向で2%～5%程度であり、第1折点付近の減衰定数としては、このシステム同定結果に既往の実験結果による減衰定数の振幅依存性を考慮できるとしている。また、3次元FEMモデルの動的線形解析により観測記録レベルにおいて、減衰定数3%の妥当性を確認しており、第1折点付近におけるPCCVの減衰定数は3%程度以上となることが推定されたとしている。

また、弾性設計用地震動 S_d レベルでのPCCVの減衰定数については、観測記録の地震動レベルと S_d 地震動レベルとの振幅レベルの違いによる減衰定数の振幅依存性を踏まえると、基準地震動 S_s と同様にPCCVで3%を基本とするとしている。これは、3次元FEMモデルを用いた動的線形解析による検討において、観測記録レベルの床応答スペクトルは、PCCVの減衰定数を3%とした基本ケース及びPCCVの減衰定数を2%とした減衰定数のばらつき考慮ケースともに、観測記録と同等または保守的な結果を示すこと、基本ケースの方が観測記録と整合する傾向があることから、3%が妥当な設定であるとしている。

なお、単純な構造体のPCCVについては、構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくく低振幅である観測記録レベルにおいても水平方向、鉛直方向ともに2%程度以上の減衰定数が得られていることを踏まえ、弾性設計用地震動 S_d に対する評価において、減衰定数の設定に起因するばらつきとして2%を考慮するとしている。

(5) 大飯 3 号機の地震観測

大飯発電所 3 号機（以下「大飯 3 号機」という）における減衰定数に関する検討^{3. 17)}

では、2 つの地震観測記録を用いたシステム同定を実施し、RC 造部及び PCCV の減衰定数を評価している。RC 造部では水平方向 7.1 %～9.7 %程度の減衰定数が得られ、鉛直方向では、6.1 %～8.2 %程度の減衰定数が得られたとしている。PCCV では、水平方向で 1.7 %～2.4 %程度、鉛直方向 1.6 %～4.2 %程度の減衰定数が得られたとしている。

また、大飯 3 号機、高浜 3 号機及び伊方 3 号機は、原子炉格納施設の構造的特徴の類似性が確認され、高浜 3 号機及び伊方 3 号機における減衰定数に関する既往の知見を大飯 3 号機の RC 造部の減衰定数の検討に適用することは可能であるとしている。さらに、大飯 3 号機と玄海 3 号機については、原子炉格納施設及び PCCV の構造的特徴の類似性が確認され、玄海 3 号機における PCCV の減衰定数に関する既往の知見を大飯 3 号機の PCCV の減衰定数の検討に適用することは可能であるとしている。

4. 減衰定数の検討

4.1 地盤への逸散減衰の検討

「2.4 減衰マトリクスの設定」に示したひずみエネルギー比例型モード減衰定数を用いて、建屋全体の減衰量に対する地盤への逸散減衰の影響を検討する。

東海第二発電所原子炉建屋のひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定結果を表 4-1 に示す。また、算定に用いた建屋及び地盤の減衰定数並びにひずみエネルギーの比率を表 4-2 に示す。

水平方向では、NS 方向及び EW 方向ともに 1 次、2 次が地盤－建屋連成モード、3 次が建屋単独モードになっている。水平方向のモード減衰定数は、刺激係数の大きな 1 次では、NS 方向は 21.2 % の内 20.1 % が、EW 方向は 20.9 % の内 19.8 % が、2 次でも NS 方向は 39.9 % の内 39.0 % が、EW 方向は 39.8 % の内 38.9 % が地盤減衰の影響であり全体に占める割合が大きい。建屋単独モードである 3 次では NS 方向は 14.4 % の内 10.6 % が、EW 方向は 13.9 % の内 10.1 % が、地盤減衰の影響であり 1 次、2 次と比較して小さいが刺激関数も小さいため建屋への地震応答に与える影響は小さい。

また、鉛直方向では、1 次、3 次が屋根トラスのモード、2 次が地盤－建屋連成のモードになっている。モード減衰定数は地盤－建屋連成のモードである 2 次では 55.1 % の内 54.9 % が地盤減衰の影響であり全体に占める割合が大きい。屋根トラスの振動モードである 1 次及び 3 次では地盤減衰の影響が比較的小さく鉄骨部材の減衰の影響が主である。

これより、東海第二発電所原子炉建屋の地震応答解析モデルにおいては、地盤への逸散減衰の影響が建物・構築物の減衰よりもかなり大きいといえる。

表 4-1 ひずみエネルギー比例型モーダル減衰定数の算定結果：(原子炉建屋)

(a) NS 方向, S_s-D1

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数 (%)	刺激係数	備考
1	2.44	21.2	1.916	地盤-建屋連成一次
2	4.96	39.9	-1.154	
3	9.60	14.4	0.163	

(b) EW 方向, S_s-D1

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数 (%)	刺激係数	備考
1	2.43	20.9	1.941	地盤-建屋連成一次
2	4.96	39.8	-1.213	
3	9.32	13.9	0.216	

(c) UD 方向, S_s-D1

次数	固有振動数 (Hz)	モード減衰定数 (%)	刺激係数	備考
1	2.50	2.7	2.516	屋根トラス一次
2	3.65	55.1	-1.596	地盤-建屋連成一次
3	10.79	2.1	0.129	

表 4-2 建屋及び地盤の減衰定数並びにひずみエネルギーの比率 ()

方向	部材				1次			2次			3次		
					① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②
NS 方向	建屋				5.0%	22.1%	1.1%	5.0%	18.4%	0.9%	5.0%	75.9%	3.8%
	地盤 ばね	側面	並進	EL. 8.20	86.8%	0.7%	0.6%	93.2%	0.2%	0.1%	96.4%	0.0%	0.0%
				EL. 2.00	82.8%	1.0%	0.9%	91.1%	0.5%	0.5%	95.3%	0.0%	0.0%
				EL. -4.00	63.2%	3.5%	2.2%	79.3%	3.4%	2.7%	88.6%	0.0%	0.0%
				EL. -9.00	31.4%	7.3%	2.3%	51.7%	12.2%	6.3%	69.9%	0.2%	0.2%
		底面	並進	EL. -9.00	36.0%	24.4%	8.8%	56.8%	40.7%	23.1%	73.8%	0.8%	0.6%
			回転	EL. -9.00	13.0%	40.9%	5.3%	25.1%	24.7%	6.18%	42.4%	23.1%	9.8%
	合計(モード減衰定数)						21.2%			39.9%			14.4%
EW 方向	建屋				5.0%	22.9%	1.1%	5.0%	19.0%	0.9%	5.0%	76.7%	3.8%
	地盤 ばね	側面	並進	EL. 8.20	86.7%	0.7%	0.6%	93.2%	0.2%	0.1%	96.3%	0.0%	0.0%
				EL. 2.00	82.7%	1.0%	0.9%	91.1%	0.5%	0.5%	95.2%	0.0%	0.0%
				EL. -4.00	63.0%	3.5%	2.2%	79.3%	3.5%	2.8%	88.3%	0.0%	0.0%
				EL. -9.00	31.2%	7.2%	2.2%	51.7%	12.3%	6.3%	69.2%	0.3%	0.2%
		底面	並進	EL. -9.00	35.8%	24.1%	8.6%	56.8%	41.0%	23.2%	73.2%	1.0%	0.7%
			回転	EL. -9.00	12.9%	40.7%	5.2%	25.0%	23.7%	5.9%	41.5%	22.0%	9.1%
	合計(モード減衰定数)						20.9%			39.8%			13.9%
UD 方向	建屋(RC)				5.0%	13.6%	0.7%	5.0%	4.6%	0.2%	5.0%	2.0%	0.1%
	建屋(鉄骨)				2.0%	85.8%	1.7%	2.0%	0.6%	0.0%	2.0%	98.0%	2.0%
	地盤 ばね	EL. -9.00	底面	並進	46.7%	0.6%	0.3%	58.0%	94.7%	54.9%	82.5%	0.0%	0.0%
	合計(モード減衰定数)						2.7%			55.1%			2.1%

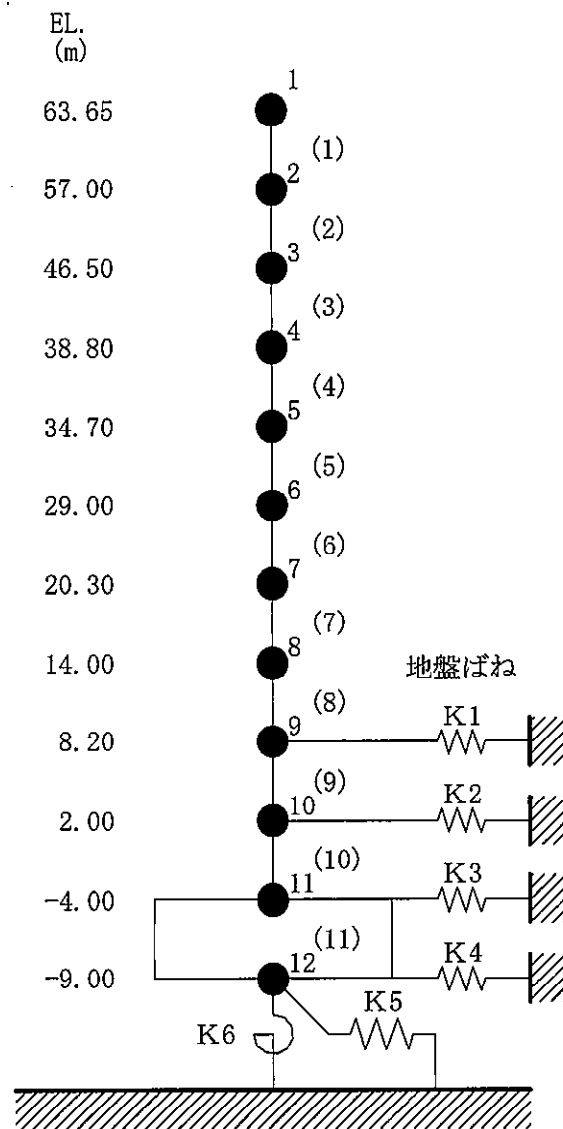
4.2 地震観測記録を用いたシミュレーション解析

東海第二発電所原子炉建屋を対象に 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震（以下「東北地方太平洋沖地震」という。）時の観測記録を用いたシミュレーション解析を行った。解析モデルは添付書類「V-2-2-1 原子炉建屋の地震応答解析」に示すモデルを用いる。

解析モデルを図 4-1(1)に、解析に用いた使用材料の物性値を表 4-3 に示す。減衰定数は「3.3.1 原子炉建屋（BWR）での地震観測（RC 造部）」で示されている減衰定数と入力加速度レベルの関係の結果を踏まえて RC 造部を 3 %と 5 %の 2 種類の場合について検討する。

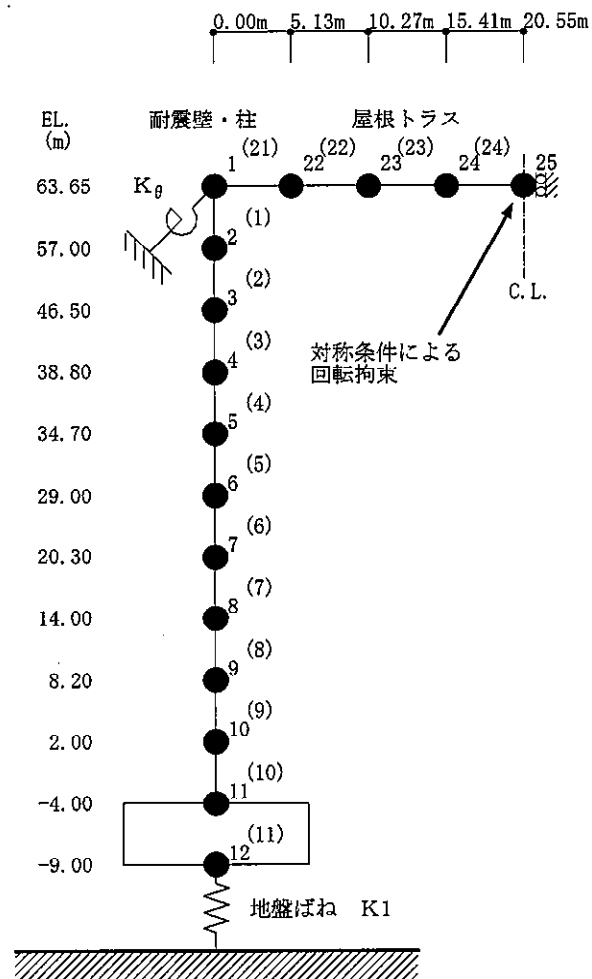
シミュレーション結果として、最大応答加速度分布を図 4-2 に、加速度応答スペクトルを図 4-3～図 4-5 に解析結果と観測記録を比較して示す。

最大応答加速度分布では、RC 造部の減衰 3 %と 5 %の両者ともに観測記録に対して保守的な値となったが、減衰 5 %の結果の方が観測記録により整合する結果となっている。また、加速度応答スペクトルにおいても、RC 造部の減衰 3 %と 5 %のケース共に、観測記録との整合性はほぼ同等であるが、減衰 5 %の結果の方が観測記録により整合する傾向にある。



注 1 : 数字は質点番号を示す。
 注 2 : () 内は要素番号を示す。

図 4-1 (1) 解析モデル (水平方向)



注 1 : 数字は質点番号を示す。

注 2 : () 内は要素番号を示す。

図 4-1 (2) 解析モデル (鉛直方向)

表 4-3 使用材料の物性値

使用材料	ヤング係数 (N/mm ²)	せん断 弾性係数 (N/mm ²)	減衰定数 (%)
鉄筋コンクリート コンクリート : Fc=22.1 (N/mm ²) (Fc=225 (kgf/cm ²))	2.21×10 ⁴	9.21×10 ³	3, 5

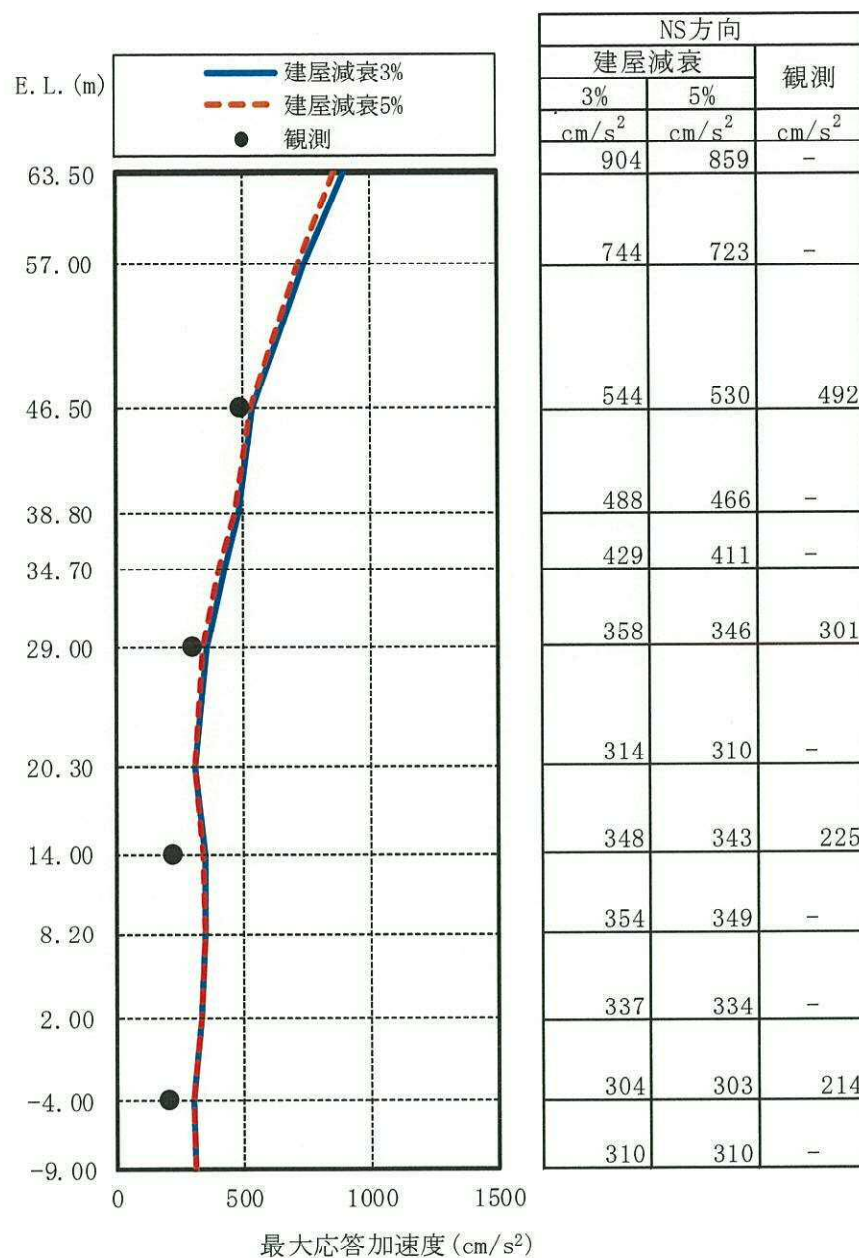


図 4-2 (1/3) 最大応答加速度分布の比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震

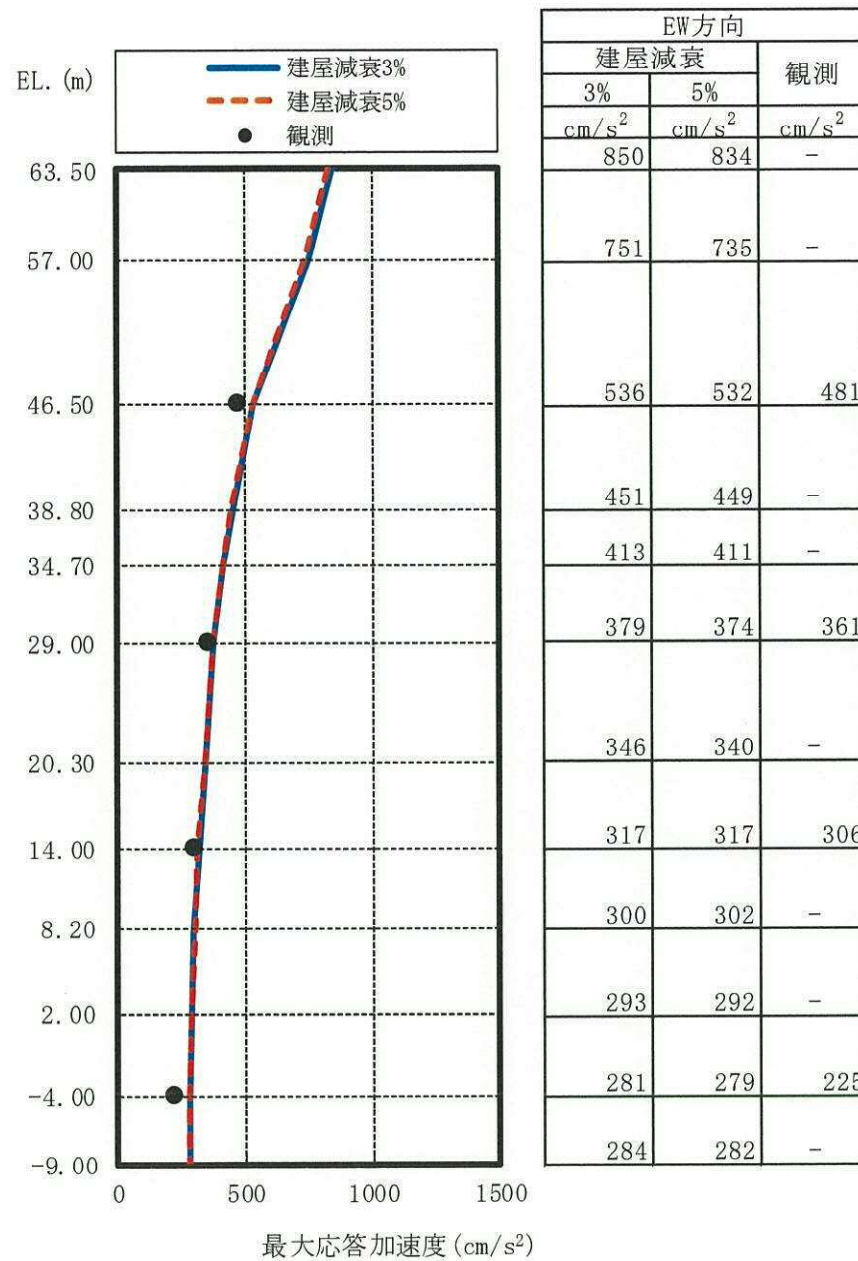


図 4-2 (2/3) 最大応答加速度分布の比較 (EW 方向) : 東北地方太平洋沖地震

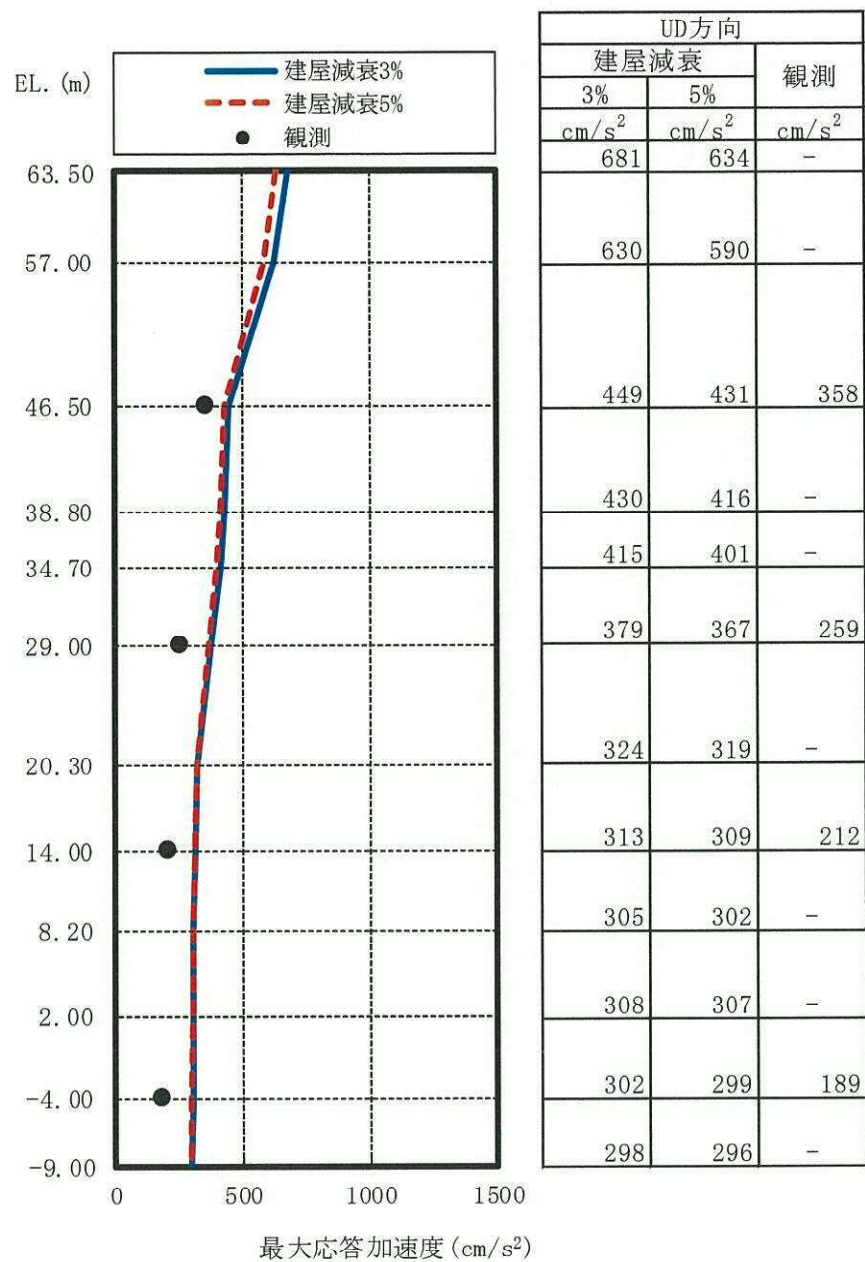
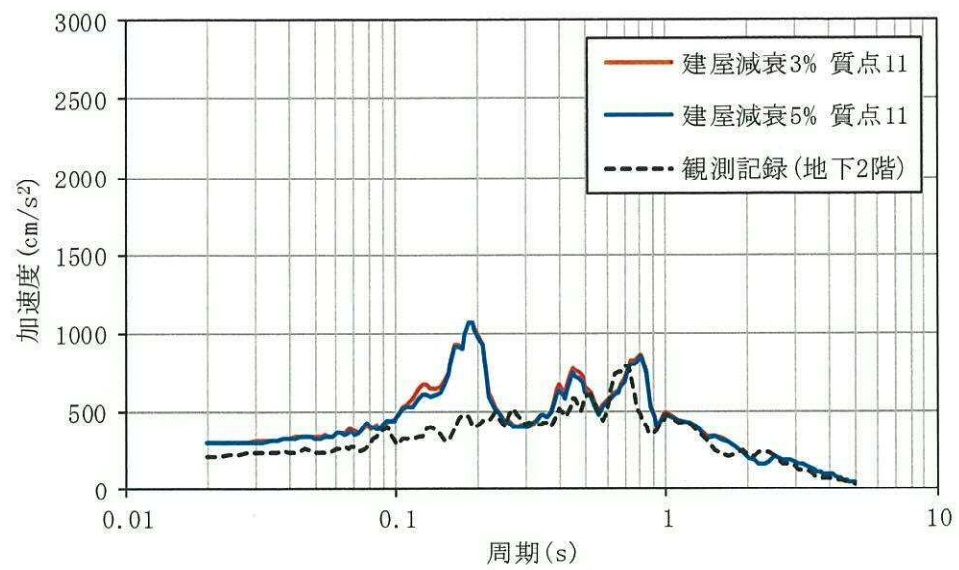
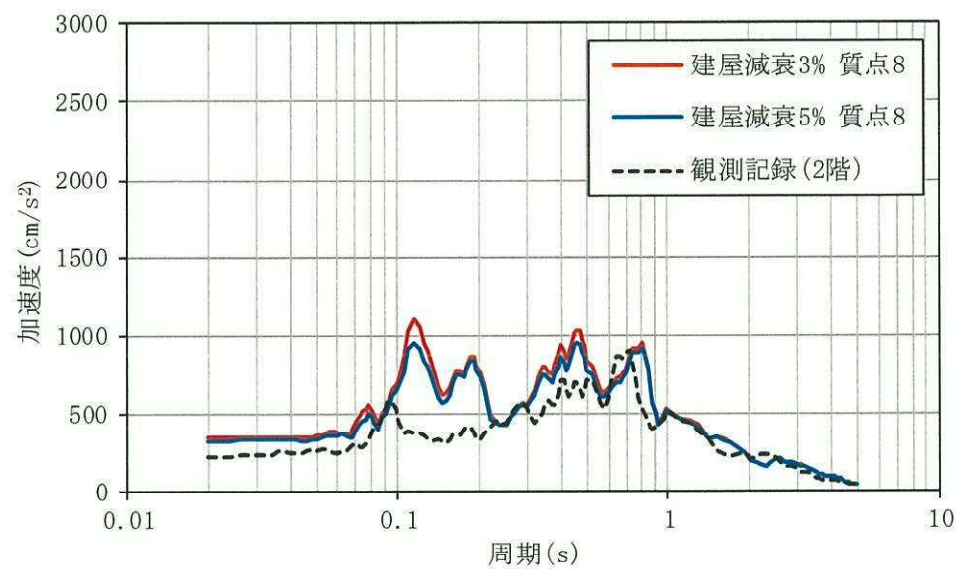


図 4-2 (3/3) 最大応答加速度分布の比較 (鉛直方向) : 東北地方太平洋沖地震

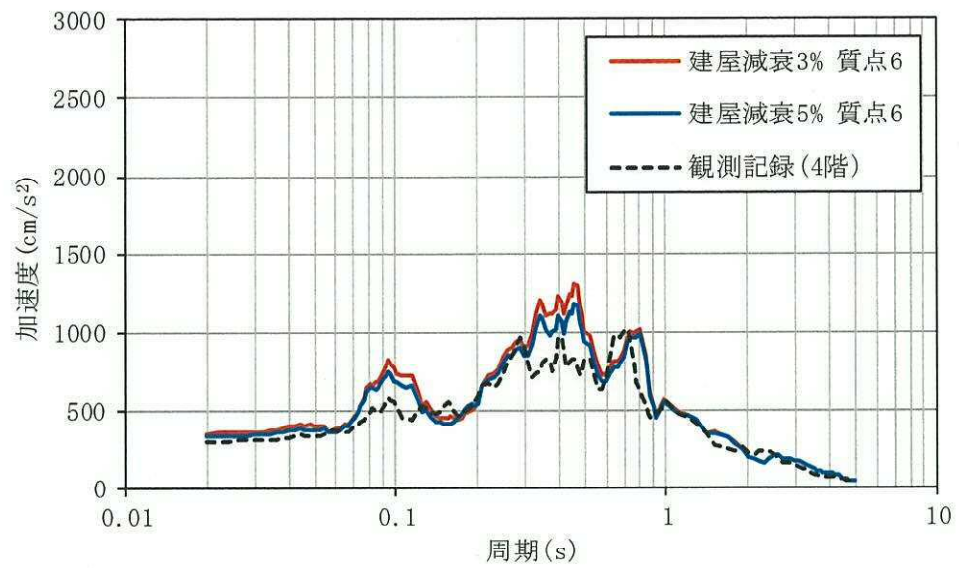


(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, $h=5\%$)

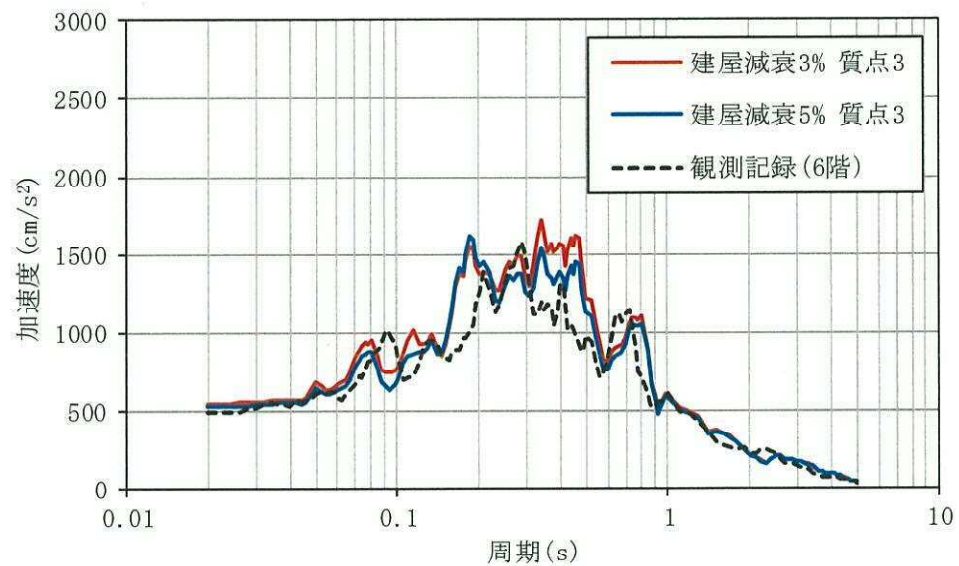


(b) 2階 (EL. 14.00 m, $h=5\%$)

図 4-3 (1/2) 加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震

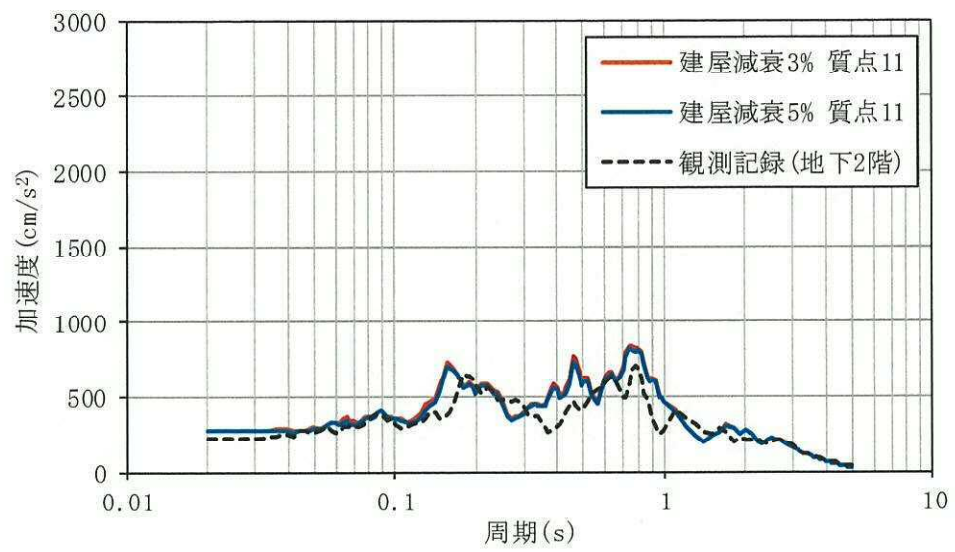


(c) 4 階 (EL. 29.00 m, $h=5\%$)

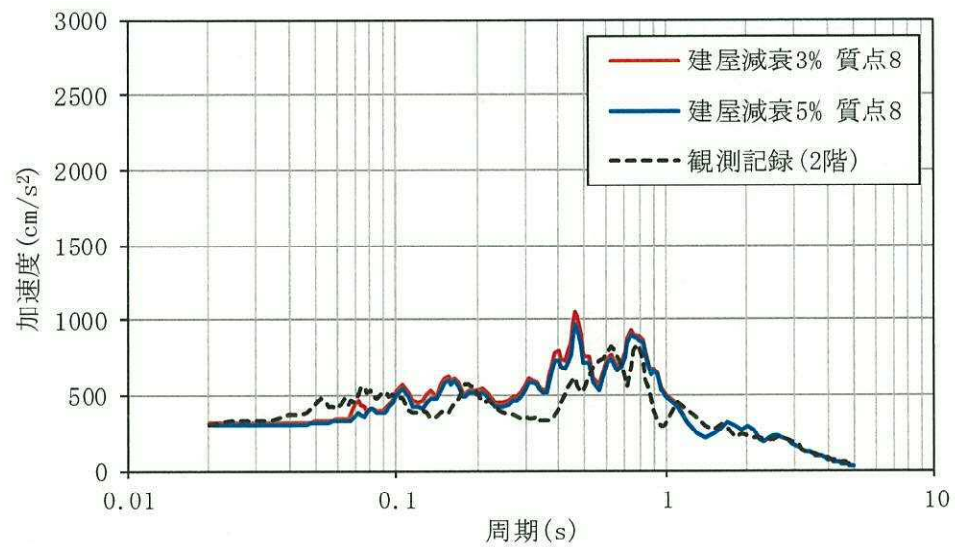


(d) 6 階 (EL. 46.50 m, $h=5\%$)

図 4-3 (2/2) 加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) : 東北地方太平洋沖地震

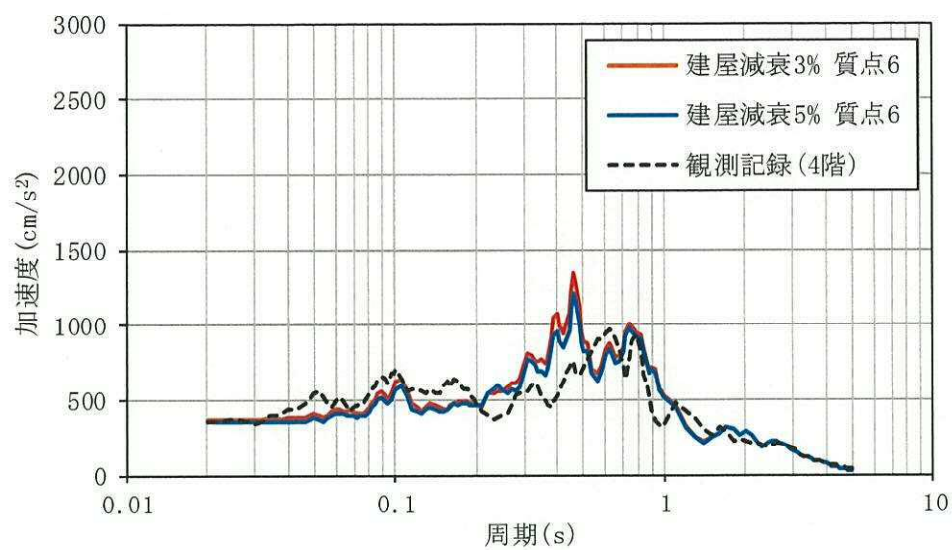


(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, h=5%)

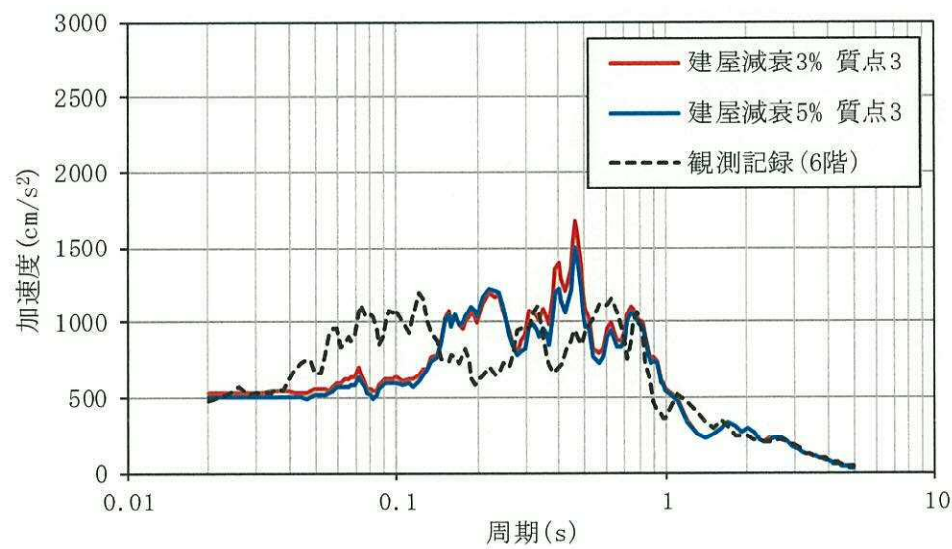


(b) 2階 (EL. 14.00 m, h=5 %)

図 4-4 (1/2) 加速度応答スペクトルの比較 (EW 方向) : 東北地方太平洋沖地震

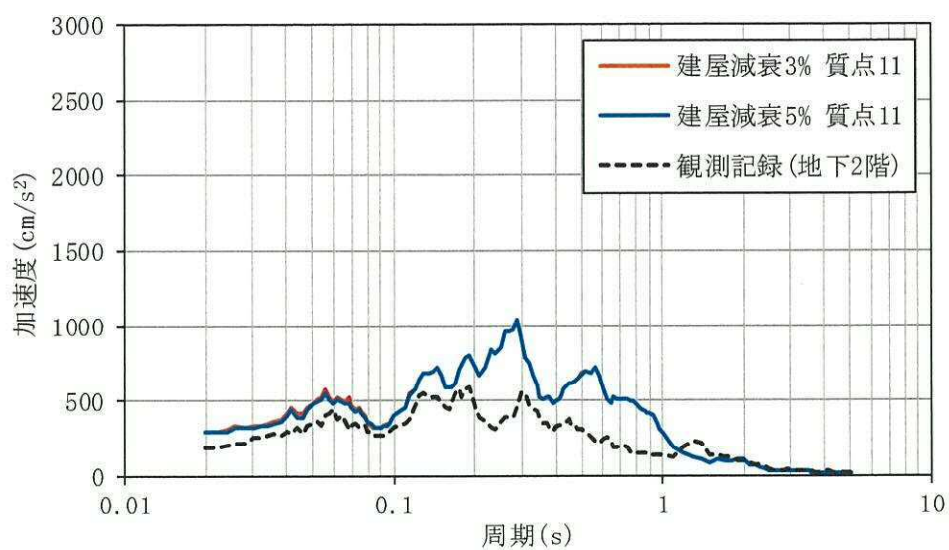


(c) 4 階 (EL. 29.00 m, h=5 %)

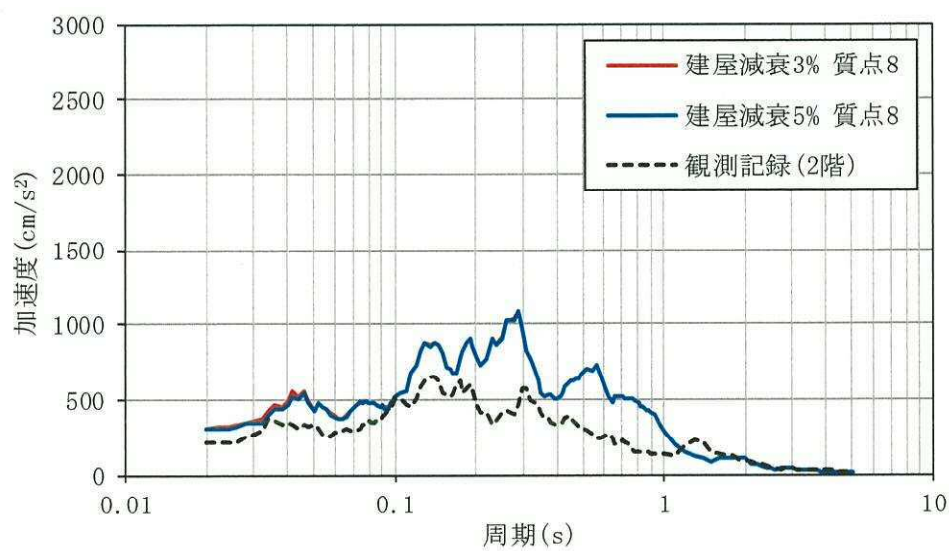


(d) 6 階 (EL. 46.50 m, h=5 %)

図 4-4 (2/2) 加速度応答スペクトルの比較 (EW 方向) : 東北地方太平洋沖地震

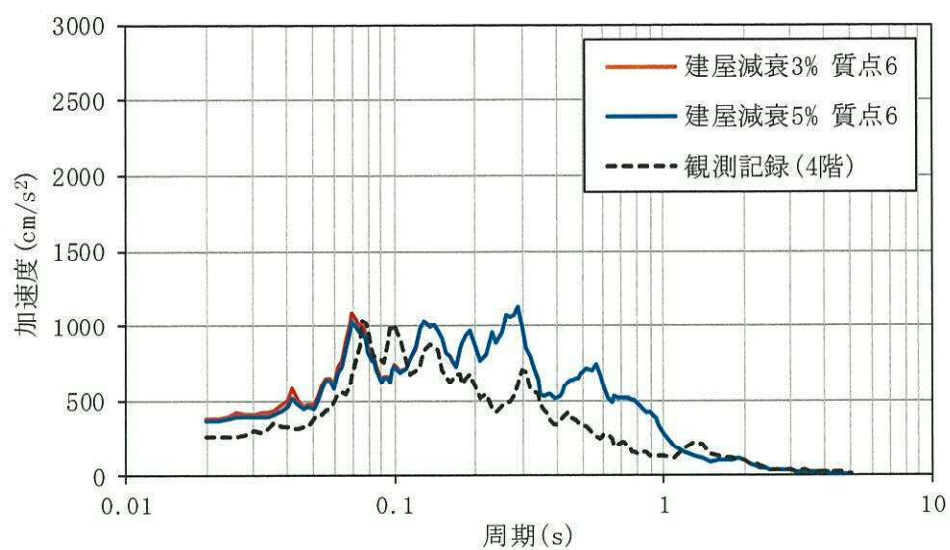


(a) 地下2階 (EL. -4.00 m, $h=5\%$)

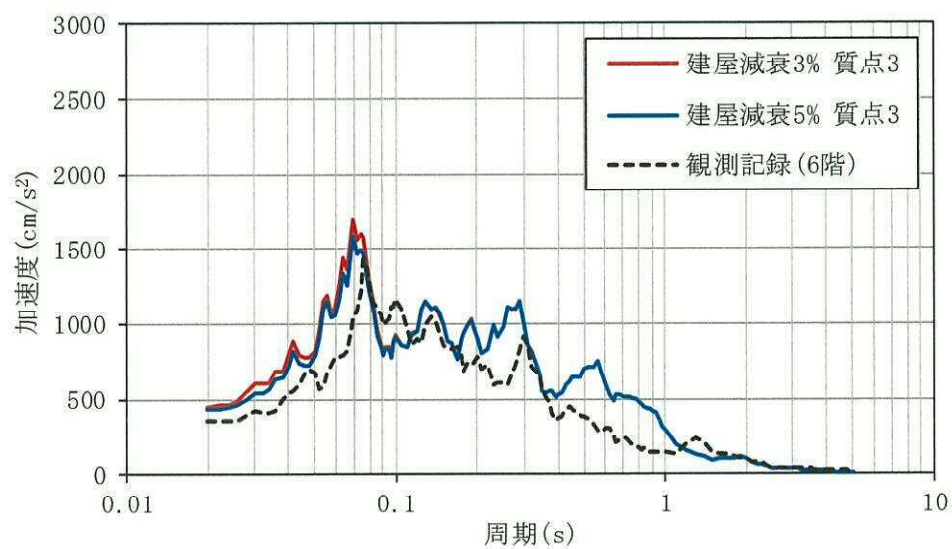


(b) 2階 (EL. 14.00 m, $h=5\%$)

図 4-5 (1/2) 加速度応答スペクトルの比較 (鉛直方向) : 東北地方太平洋沖地震



(c) 4 階 (EL. 29.00 m, $h=5\%$)



(d) 6 階 (EL. 46.50 m, $h=5\%$)

図 4-5 (2/2) 加速度応答スペクトルの比較 (鉛直方向) : 東北地方太平洋沖地震

5. 建屋の最大応答せん断ひずみ

5.1 基準地震動 S_b 応答レベル

東海第二発電所原子炉建屋の基準地震動 S_b による耐震壁の最大応答せん断ひずみを別紙 1 に示す。耐震壁の最大応答せん断ひずみは、基準地震動 S_b の応答レベルで、スケルトンカーブの第 1 折点付近から第 2 折点を若干越える程度となっている。

5.2 弾性設計用地震動 S_d 応答レベル

東海第二発電所原子炉建屋の弾性設計用地震動 S_d による耐震壁の最大応答せん断ひずみを別紙 1 に示す。耐震壁の最大応答せん断ひずみは、弾性設計用地震動 S_d の応答レベルで、スケルトンカーブの第 1 折点以下となっている。

6. 地震応答解析モデルにおける減衰定数の設定についての考察

2章～5章で述べた内容について整理を行い、東海第二発電所の質点系モデルによる地震応答解析において、建物・構築物のRC造部の減衰定数に5%を用いることの妥当性を検討する。

考察のフローを図6-1に示す。

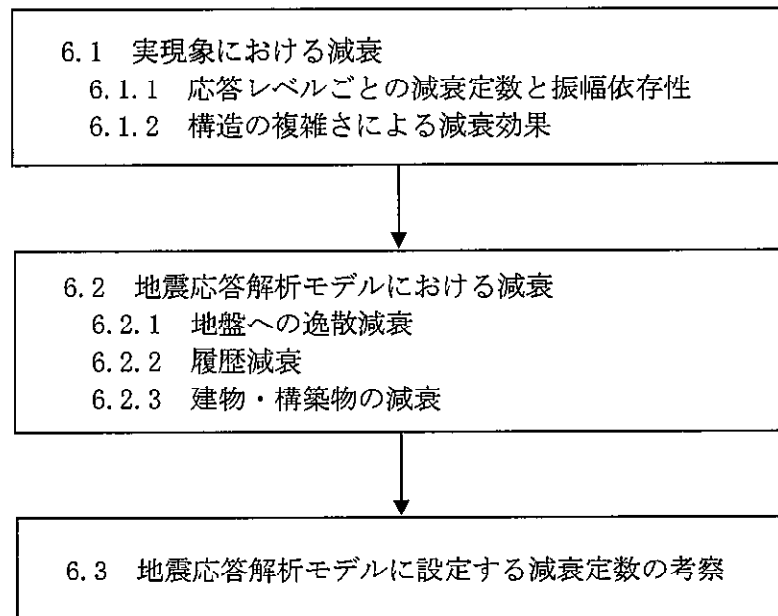


図 6-1 RC 造部の減衰定数に 5 %を用いることの妥当性についての考察のフロー

6.1 実現象における減衰

6.1.1 応答レベルごとの減衰定数と振幅依存性

3.1 節～3.3 節に示した既往の実験結果・観測結果を表 6-1 に整理する。

「3.1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験」の結果に着目すると、RC 造部の減衰定数は応答レベルが第 1 折点付近までで 1 %～5 %程度、それを越えた付近で 6 %～7 %である。また、原子力発電所における観測記録による減衰定数は応答レベルが弾性域で 1 %～10 %程度である。

また、「3.1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験」結果より、弾性域において応答レベルと減衰の間に振幅依存性がみられ、また、3.3.2 節及び 3.3.3 節の実機の地震観測記録を用いた検討結果においても基礎版上最大加速度と減衰の間に振幅依存性がみられる。

実機の地震観測記録を用いたシステム同定結果によれば、BWR の RC 造部で水平方向 1 %～8 %程度、PWR の RC 造部（外部遮蔽建屋、原子炉補助建屋、外周建屋等）では水平方向 1 %～10 %程度、鉛直方向 1 %～8 %程度である。なお、鉛直方向の減衰定数については、PWR の PCCV に比べて、RC 造部は大きな値が得られており、水平方向と同程度の値となっている。

表 6-1 既往の実験結果・観測結果の整理

応答レベル		線形	非線形			備考
		弾性域	第 1 折点 付近	第 2 折点 付近	許容限界	
RC 耐震壁実験		1 %～4 % 程度	5 %程度	6 %～7 % 程度	6 %～7 % 程度	履歴減衰を含む
		2 %～4 % 程度	4 %程度	4 %～5 % 程度	4 %～5 % 程度	履歴減衰を あまり含まない
実建造物の 振動試験	BWR	5 %～54 % 程度	—	—	—	地盤への逸散減衰 を含む
	PWR	2 %～7 % 程度	—	—	—	地盤への逸散減衰 を含む
実機の 地震観測 記録	BWR 水平	1 %～8 %程度		—	—	履歴減衰等を含む
	PWR 水平	1 %～10 % 程度	—	—	—	地盤への逸散減衰 をあまり含まない
	PWR 鉛直	1 %～8 % 程度	—	—	—	地盤への逸散減衰 をあまり含まない

6.1.2 構造の複雑さによる減衰効果

「3.1 RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験」結果のうち、履歴減衰を含む RC 耐震壁の加振試験結果に着目すると、RC 部の減衰定数は弾性域で 1 %～4 %程度、それを超えた付近で 5 %～7 %程度である。一方で、原子力発電所の振動試験及び地震観測記録に基づく減衰定数は、弾性域の非常に小さい応答レベルでも 1 %～10 %程度の減衰が得られている。これは、RC 耐震壁実験が、ボックス型 RC 耐震壁を用いた試験であるのに対し、原子力発電所は加力方向と直交する構造床や構造壁との接合部を複数有する複雑な構造であり、これらの部材の挙動及び接合部を介した挙動から、減衰効果が得られたものと考えられる。

また、3.3.2 節においても、PWR 型の原子力発電所の構造壁や構造床の少ない単純な構造物である外部遮蔽建屋や PCCV は、複雑な構造である内部コンクリート等に比べて減衰定数が小さい傾向がある。このことから、構造の複雑さによる減衰効果が存在すると考えられる。

6.2 地震応答解析モデルにおける減衰

「1.2 検討方針」に示したとおり、一般に建物・構築物の減衰作用には、材料減衰（内部摩擦減衰、外部摩擦減衰及びすべり摩擦減衰）、復元力特性による履歴減衰及び地盤への逸散減衰が考えられるが、「J E A G 4 6 0 1 - 1987」及び「J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版」に基づく建屋の地震応答解析モデルである質点系モデルでは、これらの減衰作用を整理し、材料減衰、履歴減衰及び地盤への逸散減衰の組合せとして設定している。ここで、材料減衰は減衰定数として設定している。

6.2.1 地盤への逸散減衰

「4.1 地盤への逸散減衰の検討」に示した東海第二発電所原子炉建屋のひずみエネルギー比例型モード減衰定数の算定結果より、各次固有周期におけるモード減衰定数が、その主たるモードを成す建屋に設定した減衰定数に対して非常に大きく、地盤部分のひずみエネルギーの比率が大きくなっていることから、東海第二発電所原子炉建屋においては、地盤への逸散減衰の影響が建物・構築物の減衰よりも非常に大きい。

6.2.2 履歴減衰

「2.5 復元力特性（履歴減衰）の設定」に示したとおり、J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づく履歴減衰の設定による。この設定では、 $\tau - \gamma$ 関係の履歴特性の安定ループにおいて履歴吸収エネルギーによる減衰効果を期待していない。

一方で、3.1 節に示した RC 耐震壁試験において、履歴減衰を含む場合の等価粘性減衰定数は、履歴減衰をあまり含まない場合よりも、第 1 折点付近で 1 % 程度、さらに第 2 折点以降で 2 % 程度大きくなるという結果が得られている。

以上より、J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づく履歴減衰は、保守的に設定されているといえる。

6.2.3 建物・構築物の減衰

「1.2 検討方針」に示したとおり、一般に建物・構築物の減衰作用には、材料減衰（内部摩擦減衰、外部摩擦減衰及びすべり摩擦減衰）、履歴減衰及び地盤への逸散減衰が考えられるが、J E A G 4 6 0 1 - 1987 及び J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づく地震応答解析では、これらの減衰を整理し、建物・構築物の減衰、地盤への逸散減衰及び復元力特性（履歴減衰）の組合せとして減衰特性をモデル化している。このことから、J E A G 4 6 0 1 - 1987 に記載されている地震応答解析モデルに設定する建物・構築物の減衰定数は材料減衰として与えられていると考えられる。また、「6.2.2 履歴減衰」に示したとおり、J E A G 4 6 0 1 - 1991 追補版に基づく履歴減衰が保守的に設定されていることを踏まえると、J E A G のモデル化では、材料減衰に応答レベルに応じて実際の履歴減衰の一部も含まれているものと考えられる。

6.3 地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察

地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察にあたっての整理を表 6-2 に示す。

表 6-2 地震応答解析モデルに設定する減衰定数の考察にあたっての整理

	応答レベル	線形	非線形		
		第 1 折点 未満	第 1 折点 付近	第 2 折点 付近	許容 限界 付近
実 現 象	東海第二発電所における地震動	弾性設計用 地震動 S_d	基準地震動 S_a		
	RC 耐震実験 (履歴減衰を含む)	1 %～4 %程度 ↓ 構造の複雑さによる 減衰の増加 2 %程度以上	5 %程度	6 %～7 % 程度	6 %～7 % 程度
	東海第二発電所	5 %程度以上 ↑	7 %程度 以上	8 %程度 以上	8 % 程度 以上
解 析	質点系モデル (東海第二発電所)	5 %程度 以上 3 %, 5 %で東北地方 太平洋沖地震の観測記録 をシミュレーション (水平・鉛直)			

東海第二発電所については、東北地方太平洋沖地震の観測記録の建屋減衰を3%、5%とした水平方向及び鉛直方向のシミュレーションを行っており、その結果は3%、5%ともに観測記録に対して保守的な値となった。

ここで、東海第二発電所における東北地方太平洋沖地震の観測記録は弾性設計用地震動 S_d 相当の地震レベルである。RC耐震壁試験結果よりも2%程度大きな減衰定数となっているが、RC耐震壁試験は耐震壁そのものを用いた単純な構造体に対する減衰を評価しているのに対し、建物・構築物は多数の耐震壁から構成された3次元的な広がりをもつ複雑な構造体であるためと考えられる。鉛直方向についても、複数の壁と床により構成される複雑な構造をもつ部位については、構造の複雑さによる減衰効果があると考えられる。東海第二発電所の原子炉建屋は平面図・断面図（別紙2）から判断し、多数の構造床や構造壁で構成されており、複雑な構造体に分類できる。

以上より実現象においては、RC耐震壁試験から得られた5%程度の減衰定数に対し、構造の複雑さによる減衰の増加により2%程度以上減衰は増加し、第1折点付近では7%程度以上、第2折点付近では8%程度以上の減衰定数となることが推定される。ここで、J E A G 4 6 0 1-1987及びJ E A G 4 6 0 1-1991 追補版に基づく応答解析モデルは、「2. 地震応答解析モデルに用いた減衰特性」及び「4.1 地盤への逸散減衰の検討」に示したとおり、減衰を建物・構築物の減衰、履歴減衰及び地盤への逸散減衰の3つの組合せにより減衰特性をモデル化しているが、履歴減衰は保守的に設定されている。また、東海第二発電所においては、地盤への逸散減衰が非常に大きく、3つの組合せの減衰特性のうち、応答に与える支配的な要因となっている。

以上より、J E A G 4 6 0 1-1987及びJ E A G 4 6 0 1-1991 追補版に基づき設定した東海第二発電所の建物・構築物における地震応答解析モデルでは、実現象における建物・構築物の減衰として第1折点付近では7%程度以上、第1折点未満でも5%程度以上であることから、設計に用いる建物・構築物の減衰として5%を設定することは妥当であると考えられる。

入力地震動並びに構造及び形状による整理を踏まえた減衰定数の整理を表6-3に示す。

表 6-3 入力地震動並びに構造及び形状による整理を踏まえた減衰定数の整理

建物・構築物			原子炉建屋	使用済燃料 乾式貯蔵建屋	緊急時対策所 建屋	格納容器圧力 逃がし装置 格納槽
構造及び形状			複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体	複雑な構造体
入力地震動	S_s	水平	5 %	5 %	5 %	5 %
		鉛直	5 %	5 %	5 %	5 %
	S_d	水平	5 %	5 %	—	—
		鉛直	5 %	5 %	—	—

6.4 まとめ

6.1 節～6.3 節を踏まえ、東海第二発電所の建物・構築物の基準地震動 S_a レベル及び弾性設計用地震動 S_d レベルの地震応答解析に用いる鉄筋コンクリート部の減衰定数は、水平及び鉛直とも 5 %程度以上と考えられる。