

## 2.5 地震応答解析結果

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

原子炉建屋の壁について、3方向同時入力における壁面外方向の最大応答加速度分布を図 2-7～図 2-10 に示す。

3方向同時入力における壁面外方向最大応答加速度は、平面的に中央部で面外にはらむような加速度分布となっている。高さ方向については、東西面壁では T.M.S.L. 41.9m が、南北面壁では T.M.S.L. 49.7m が最大となる。

水平 1 方向入力における最大応答加速度の分布図を図 2-11～図 2-14 に示す。また、水平 1 方向入力及び 3 方向同時入力の最大応答加速度の比較を図 2-15 及び図 2-16 に示す。

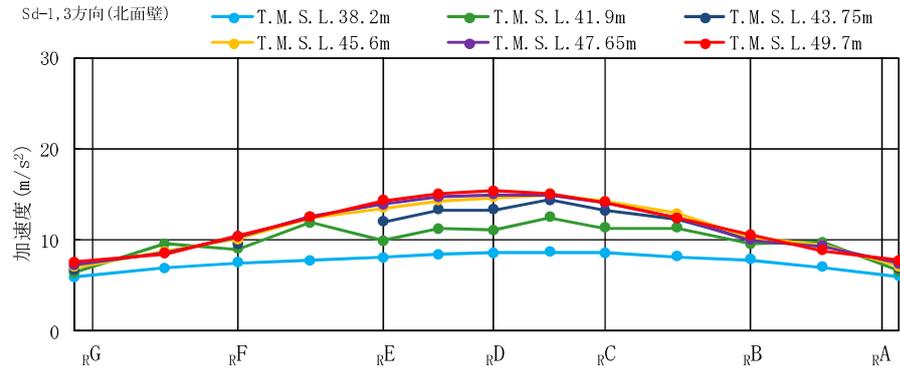
水平 1 方向についても、3方向同時入力と同様に、平面的に中央部で面外にはらむような加速度分布となっており、高さ方向については、東西面壁では T.M.S.L. 41.9m が、南北面壁では T.M.S.L. 49.7m が最大となる。

ただし、3方向同時入力は、水平 1 方向入力とおおむね同等の最大加速度を示し、多少の大小はあるもののおおむね同様の最大応答加速度分布を示している。この結果は壁面外方向の地震動が主な影響を与えており、水平直交方向及び鉛直方向地震動は面外応答に与える影響が小さいことを示している。3方向同時入力の最大応答加速度は水平 1 方向入力に対して、0.86～1.23 程度である。

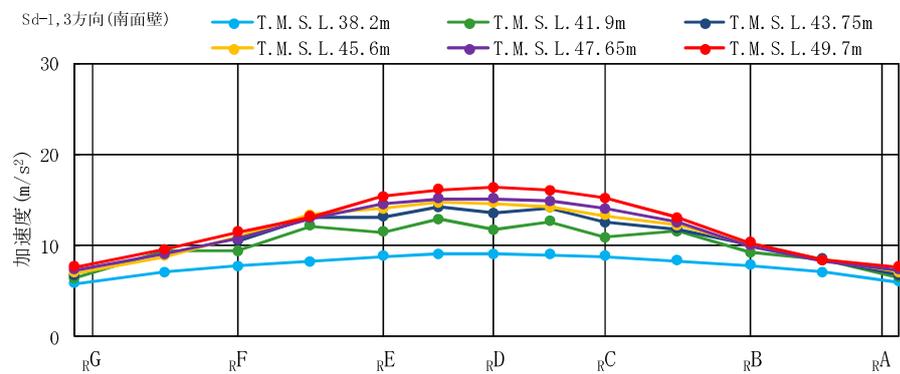
また、3方向同時入力及び水平 1 方向入力ともに、壁の面外方向の加速度は、南北面壁に対して顕著に影響が出ている。これは、屋根スラブの剛性を保守的に非考慮としていることに加え、東西面壁に対し、南北面壁の方がより長いスパンにまたがって直交方向に壁及び床のない連続した壁であることが起因していると考えられる。東西面壁の通り芯間距離（ $R_2$  通り～ $R_6$  通り）は 37.0m、南北面壁の通り芯間距離（ $R_A$  通り～ $R_G$  通り）は 59.6m であり、南北面壁は 1.6 倍以上長くなっている。また、各壁の面外方向の応答増幅は、図 2-17 に示す 3次元 FEM モデルの固有値解析結果（2次モード）からも確認できる。いずれの壁も固有周期 0.19s 付近において面外方向にはらむようなモードとなっている。

以上のことから、南北面壁を代表部位として、面外慣性力による面外応力に対する断面算定を行い、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を評価する。

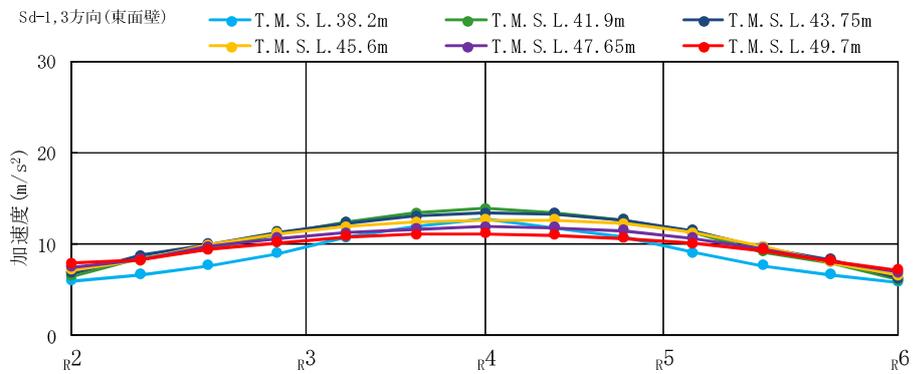
なお、面外方向加速度の機器・配管系への影響については、「別紙 4 機器・配管系に関する説明資料」において検討を行う。



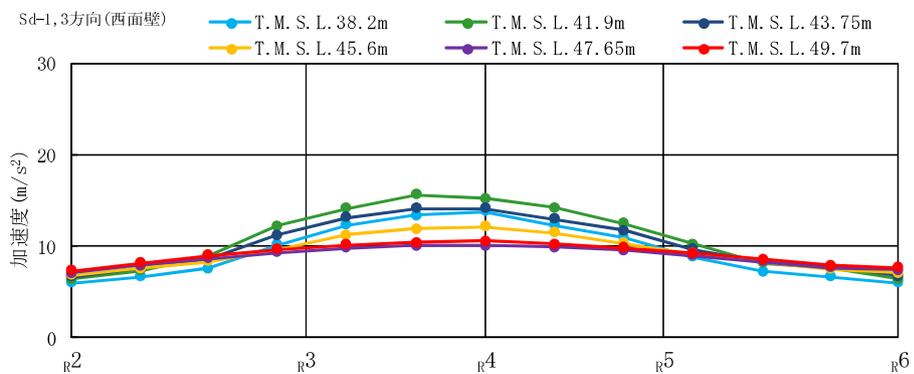
(a) 北面壁



(b) 南面壁



(c) 東面壁



(d) 西面壁

図 2-7 3 方向同時入力における壁面外方向の最大応答加速度分布 (Sd-1, 平面分布)

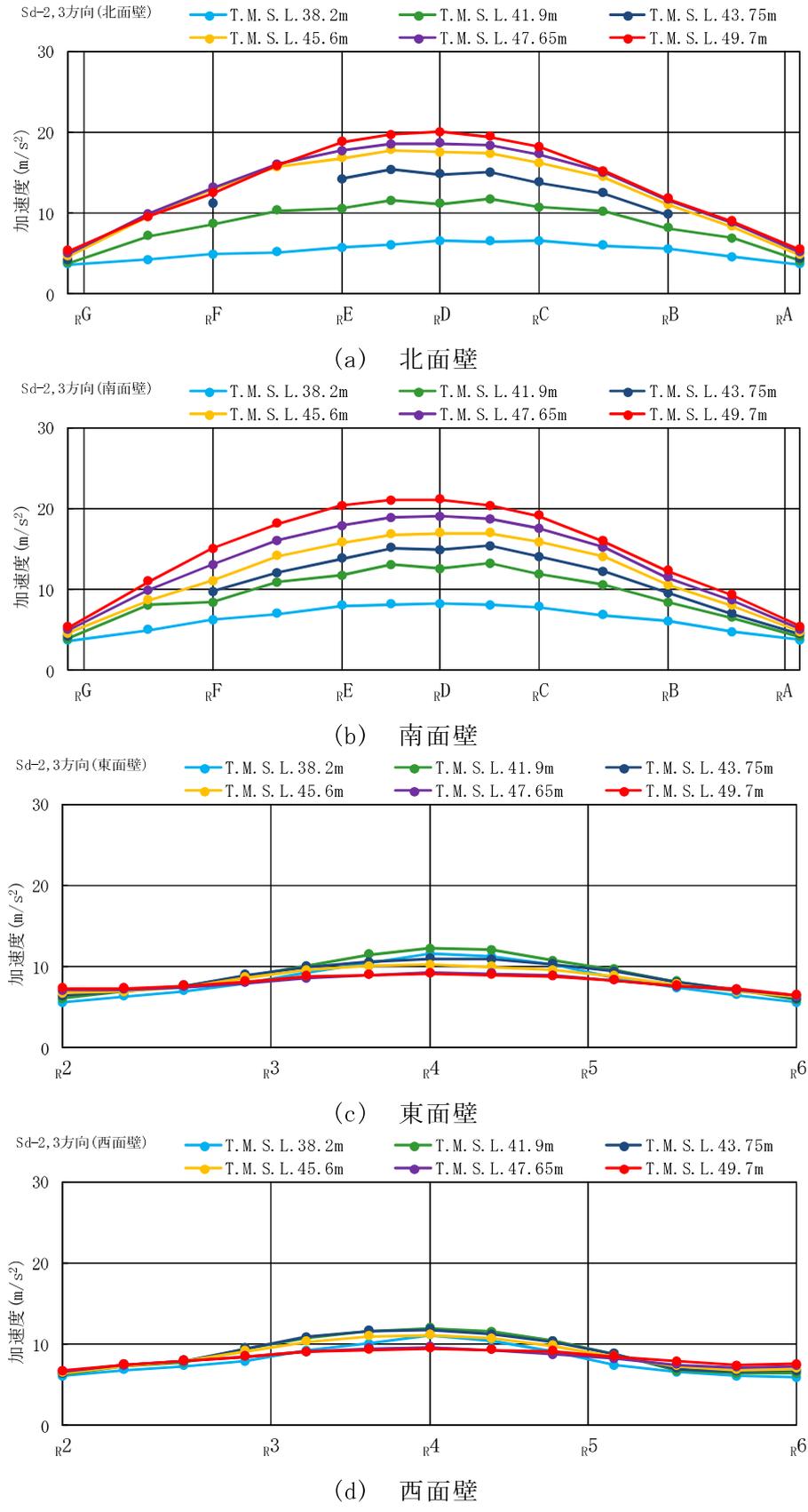
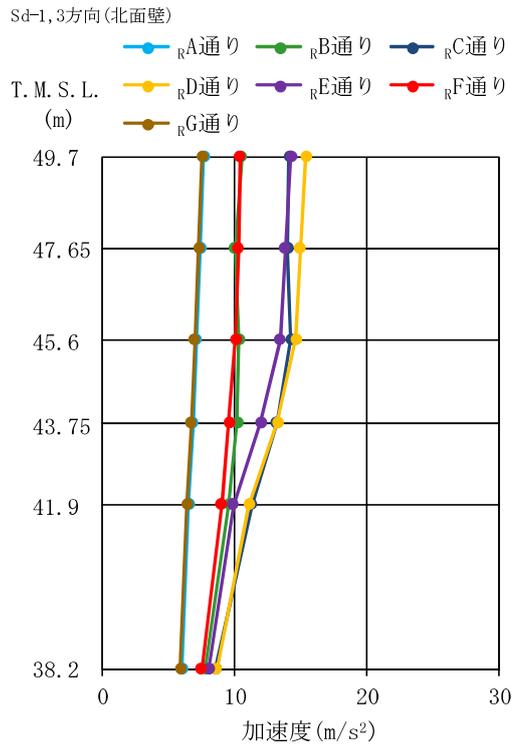
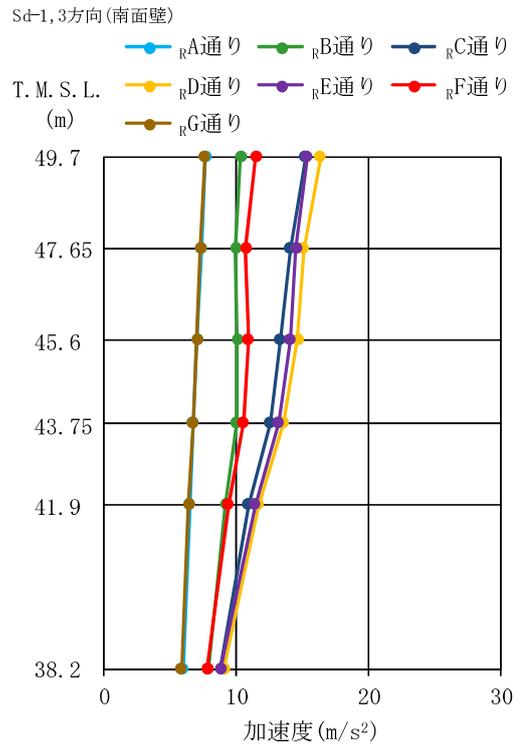


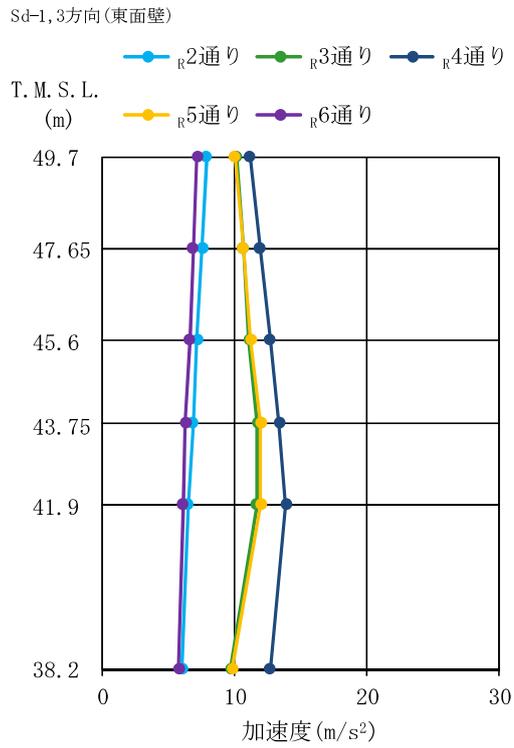
図 2-8 3 方向同時入力における壁面外方向の最大応答加速度分布 (Sd-2, 平面分布)



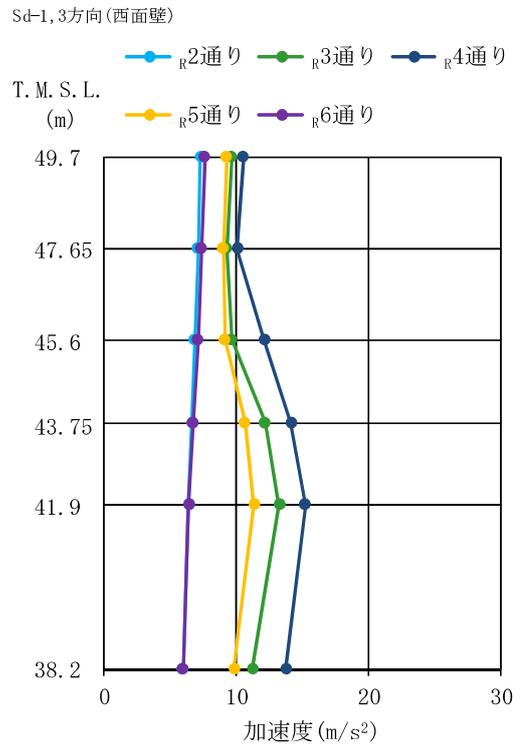
(a) 北面壁



(b) 南面壁

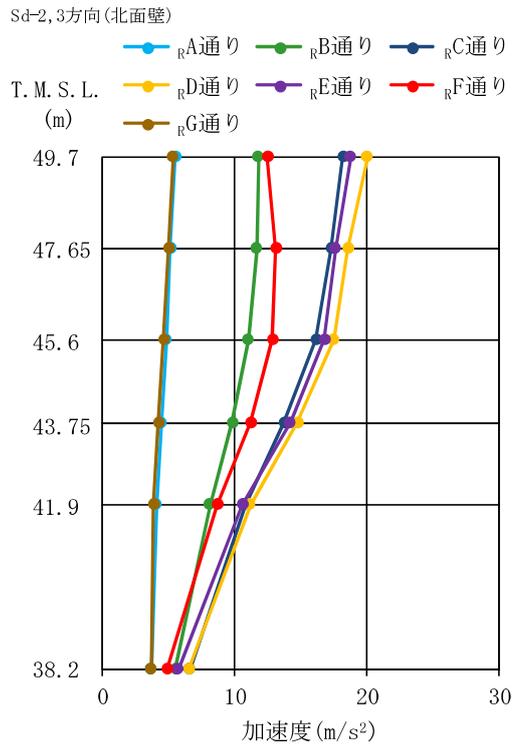


(c) 東面壁

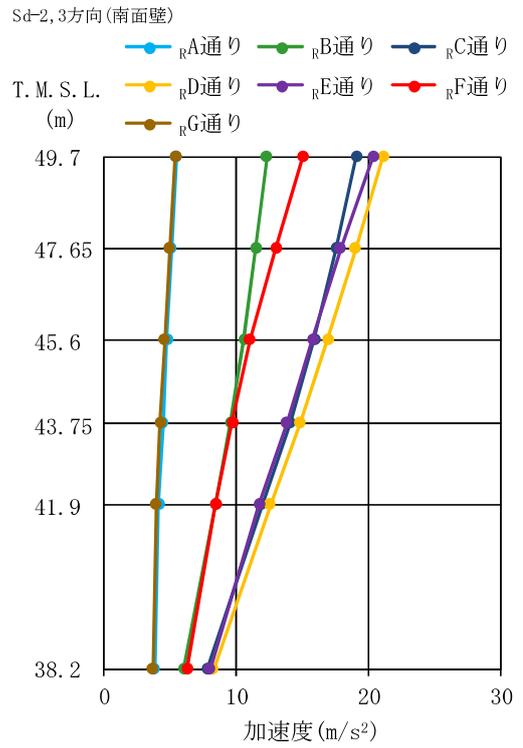


(d) 西面壁

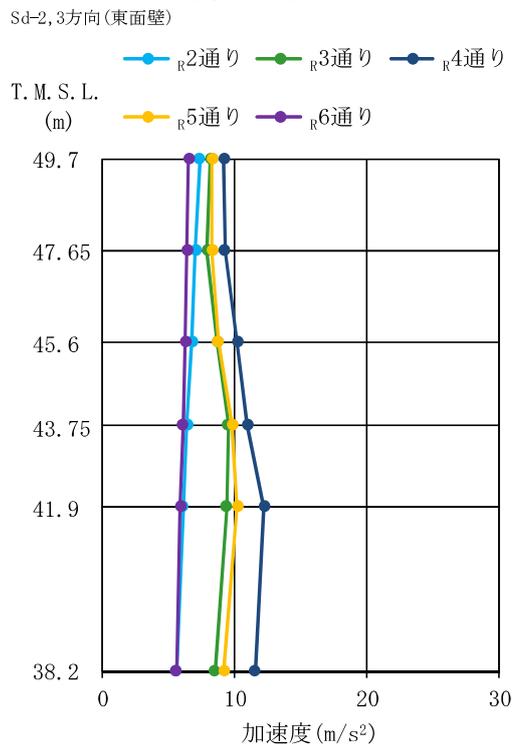
図 2-9 3 方向同時入力における壁面外方向の最大応答加速度分布 (Sd-1, 断面分布)



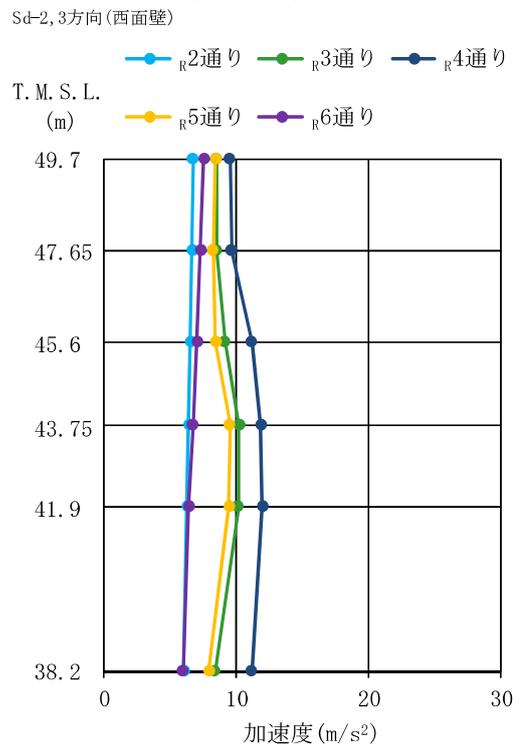
(a) 北面壁



(b) 南面壁

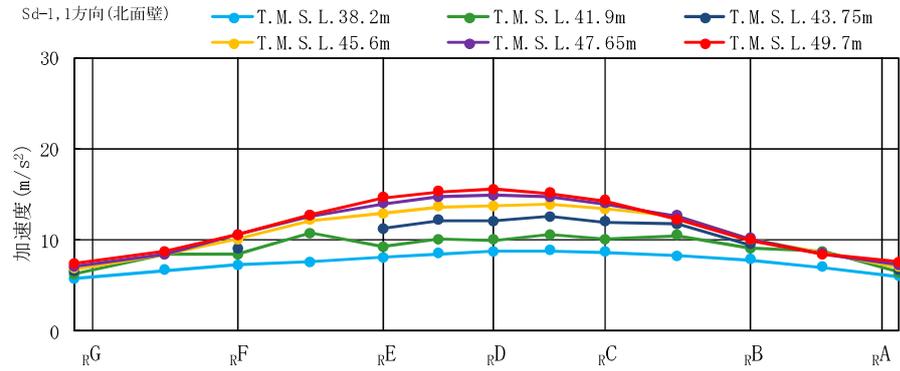


(c) 東面壁

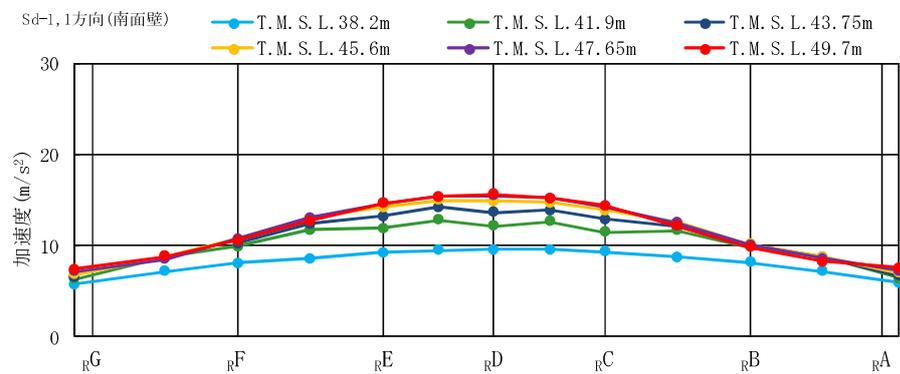


(d) 西面壁

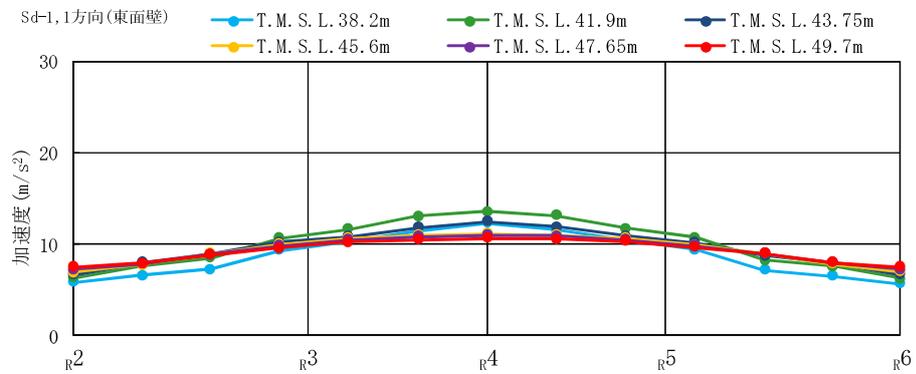
図 2-10 3 方向同時入力における壁面外方向の最大応答加速度分布 (Sd-2, 断面分布)



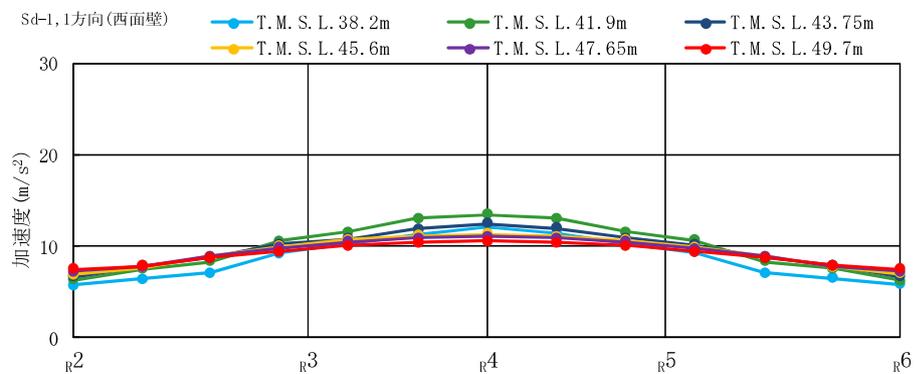
(a) 北面壁



(b) 南面壁



(c) 東面壁



(d) 西面壁

図 2-11 水平 1 方向入力における最大応答加速度の分布図 (Sd-1, 平面分布)

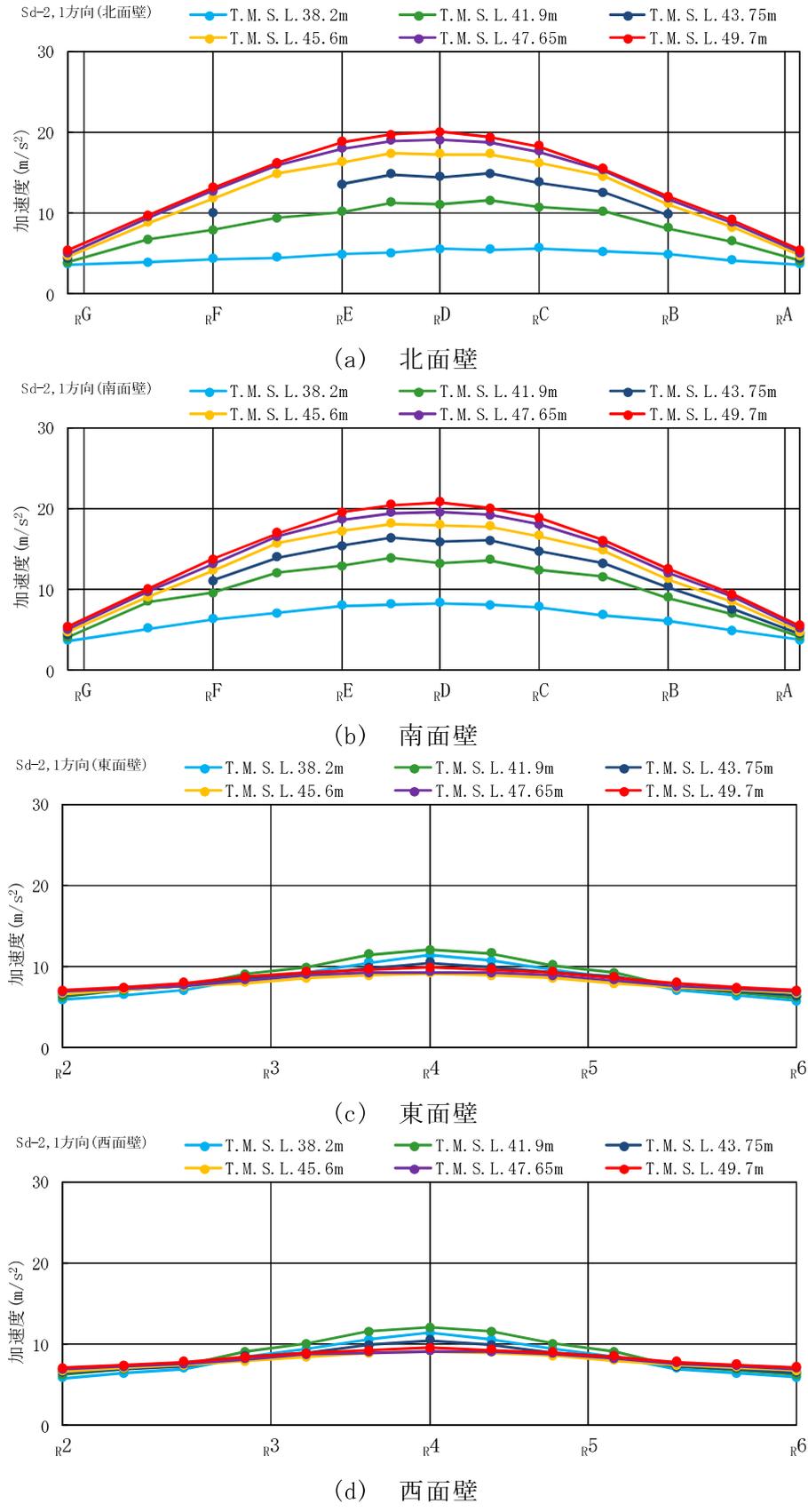
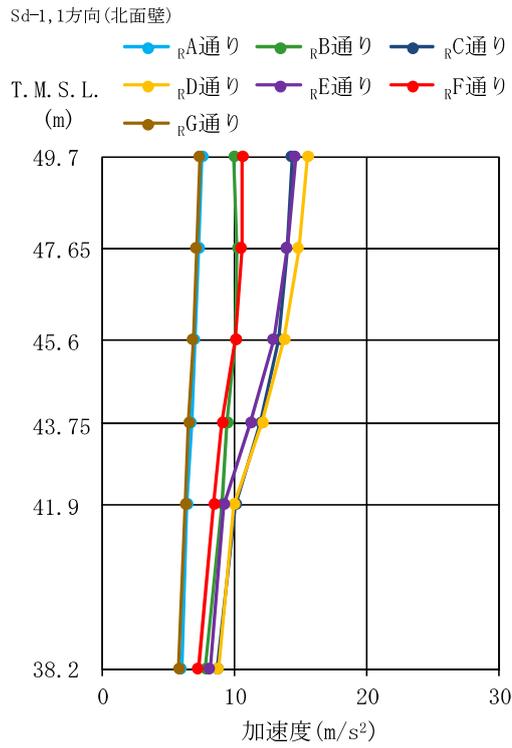
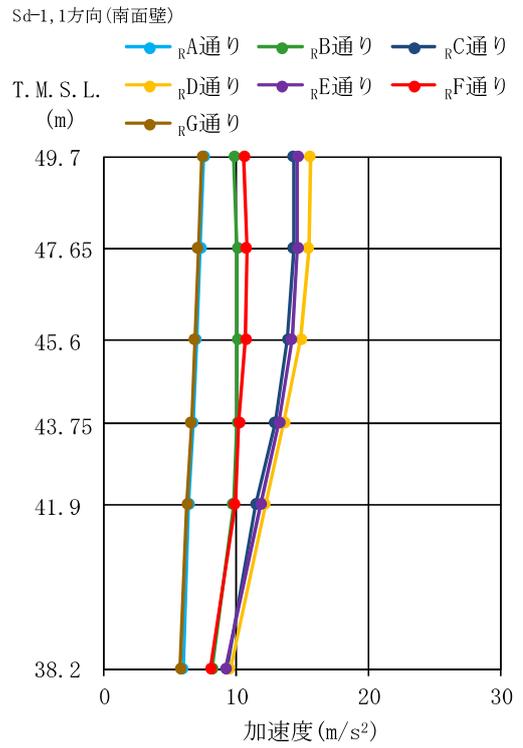


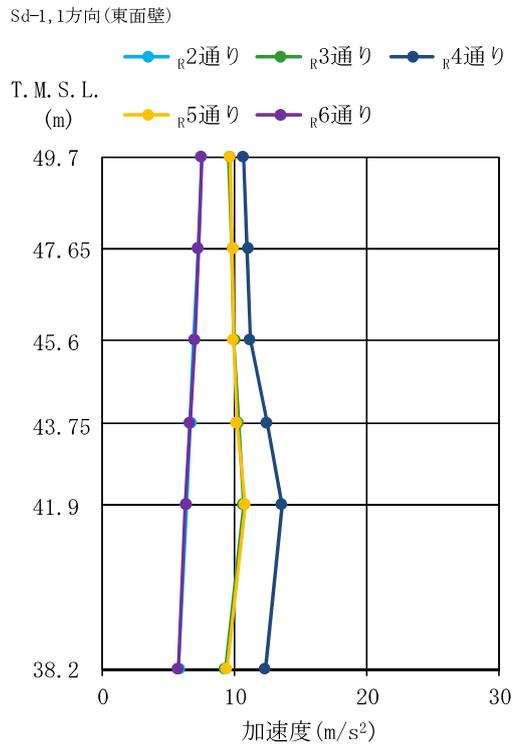
図 2-12 水平 1 方向入力における最大応答加速度の分布図 (Sd-2, 平面分布)



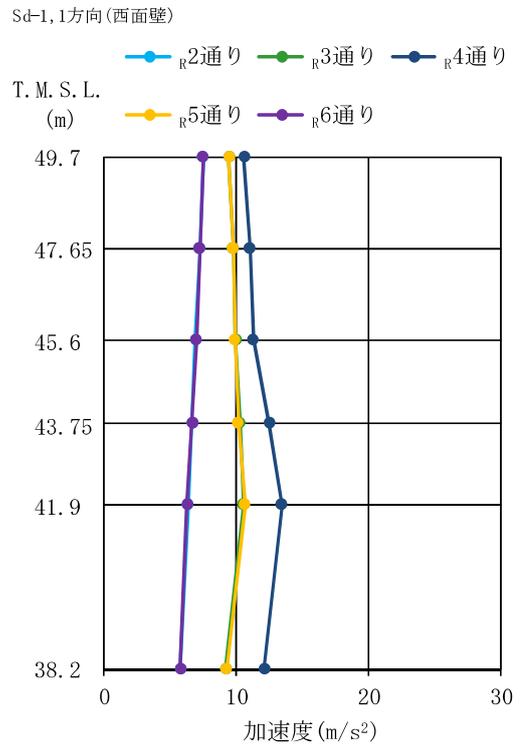
(a) 北面壁



(b) 南面壁

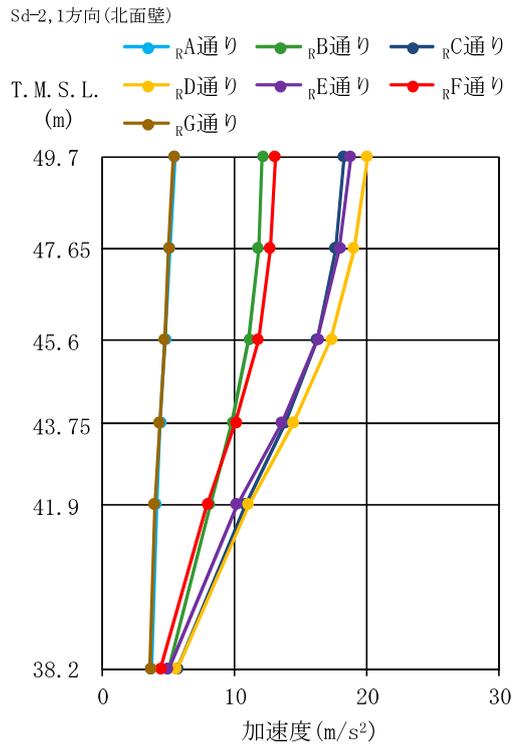


(c) 東面壁

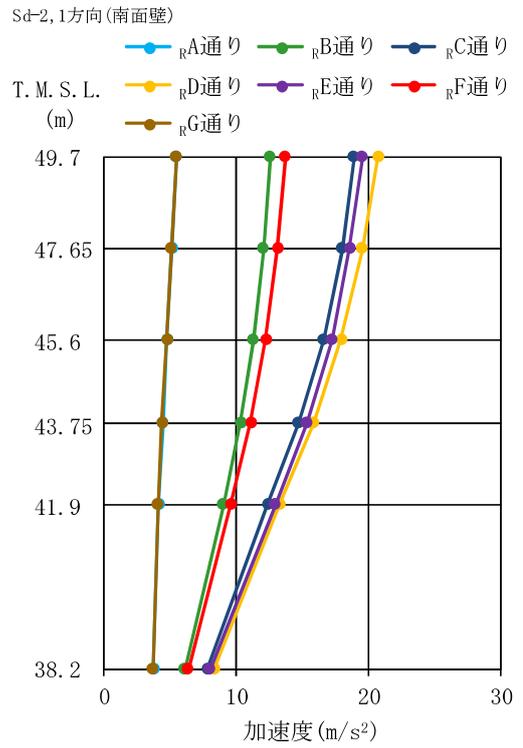


(d) 西面壁

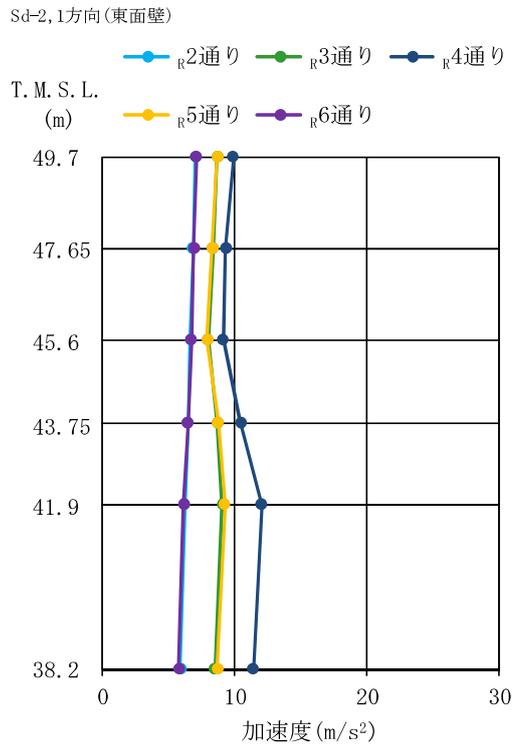
図 2-13 水平 1 方向入力における最大応答加速度の分布図 (Sd-1, 断面分布)



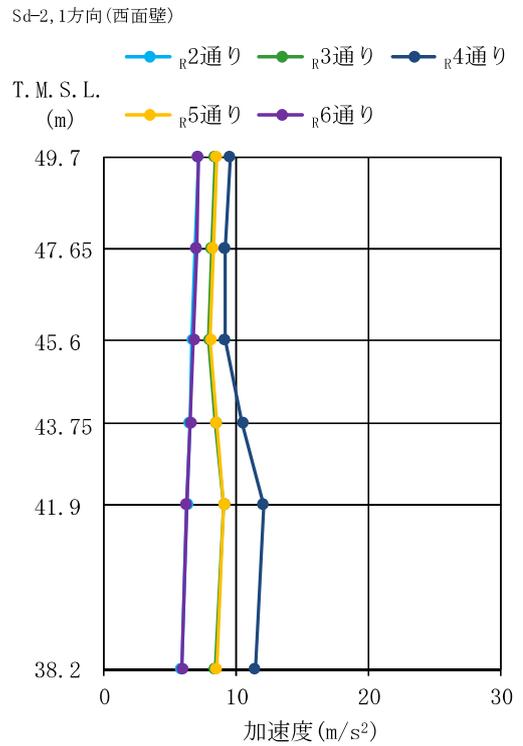
(a) 北面壁



(b) 南面壁

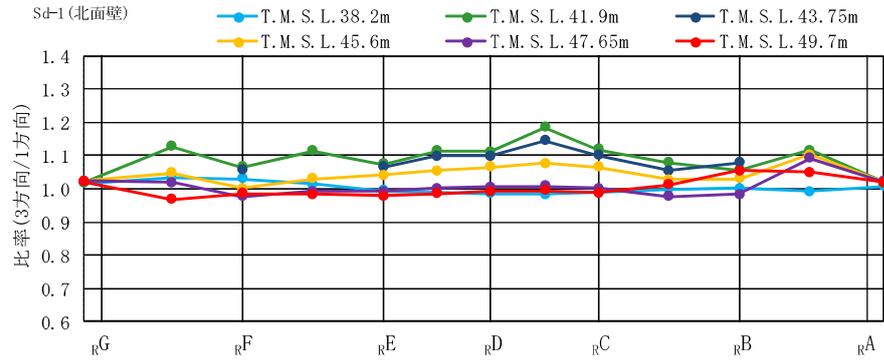


(c) 東面壁

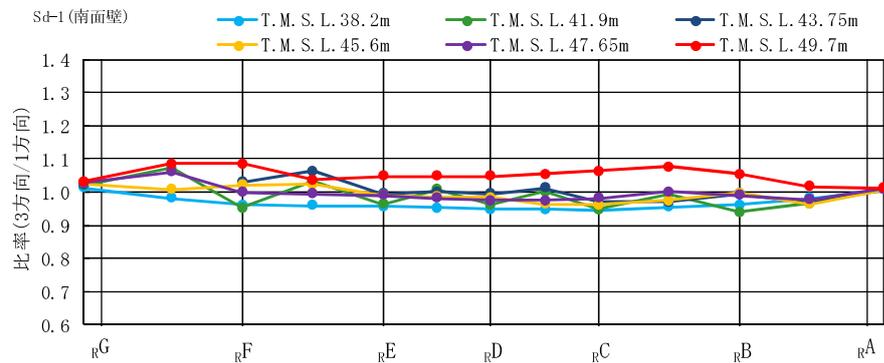


(d) 西面壁

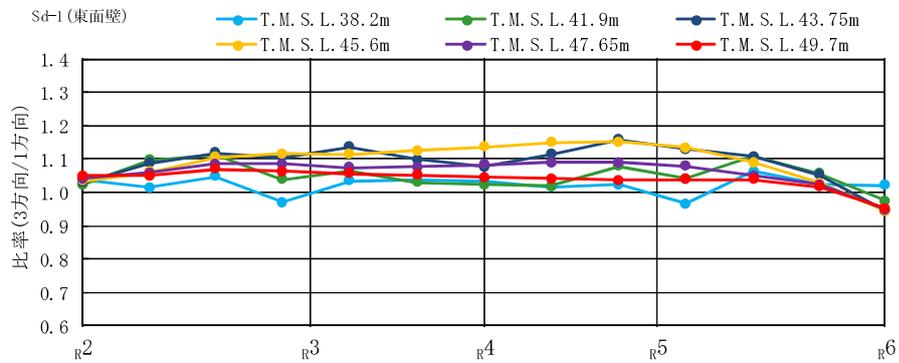
図 2-14 水平 1 方向入力における最大応答加速度の分布図 (Sd-2, 断面分布)



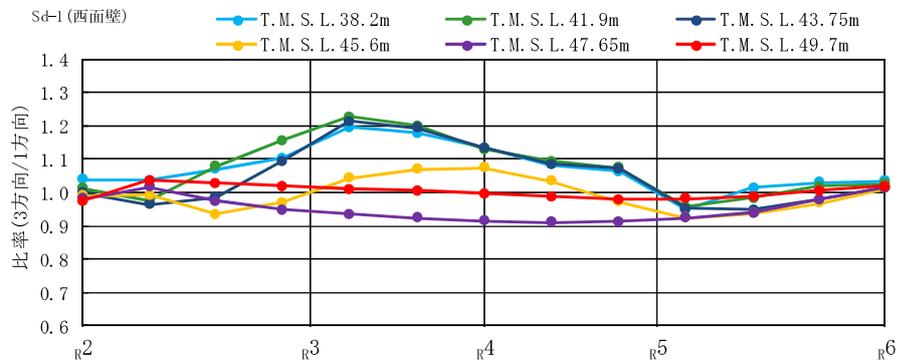
(a) 北面壁



(b) 南面壁

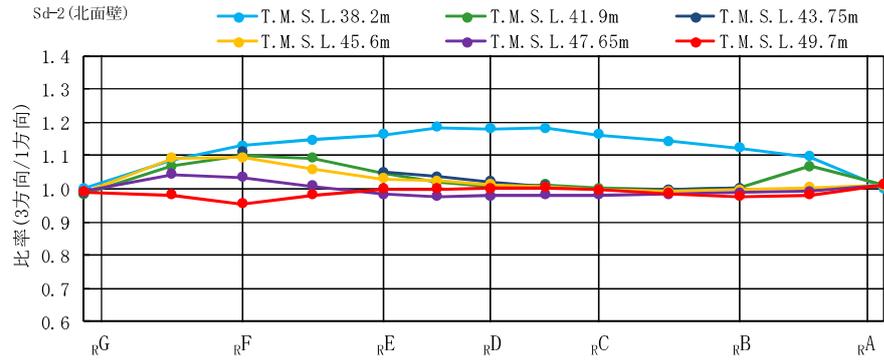


(c) 東面壁

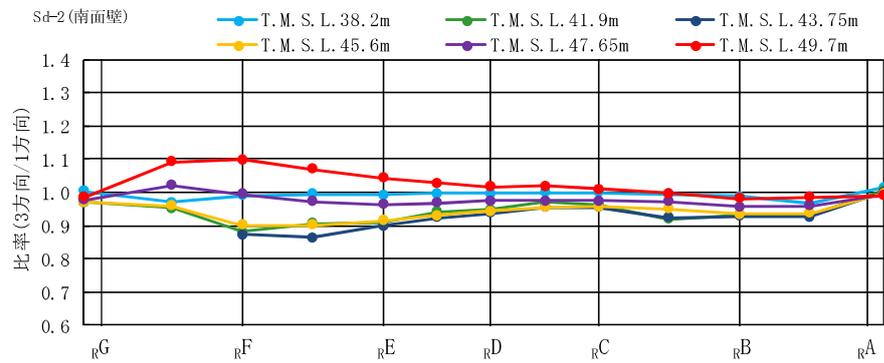


(d) 西面壁

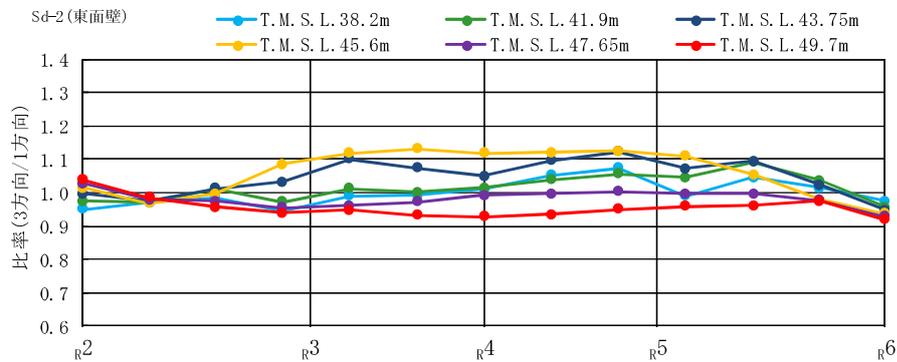
図 2-15 水平 1 方向入力及び 3 方向同時入力の最大応答加速度の比較 (Sd-1)  
(水平 1 方向入力に対する 3 方向同時入力の最大応答加速度の比率)



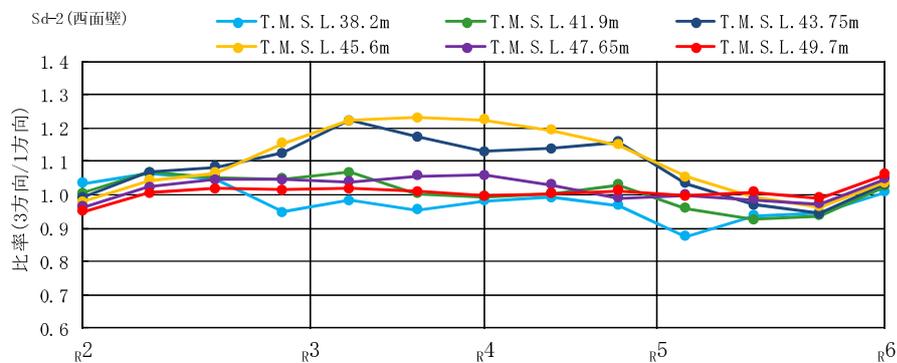
(a) 北面壁



(b) 南面壁

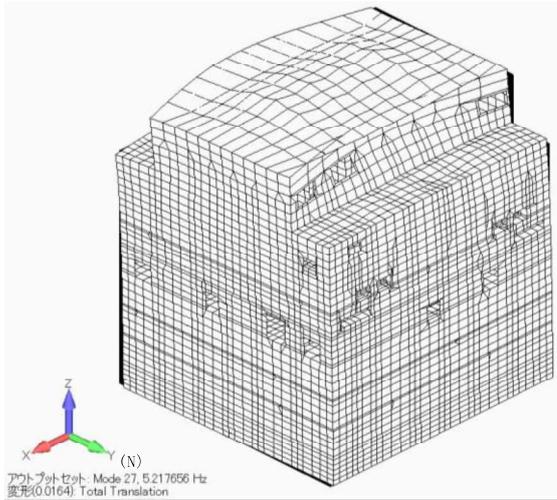


(c) 東面壁

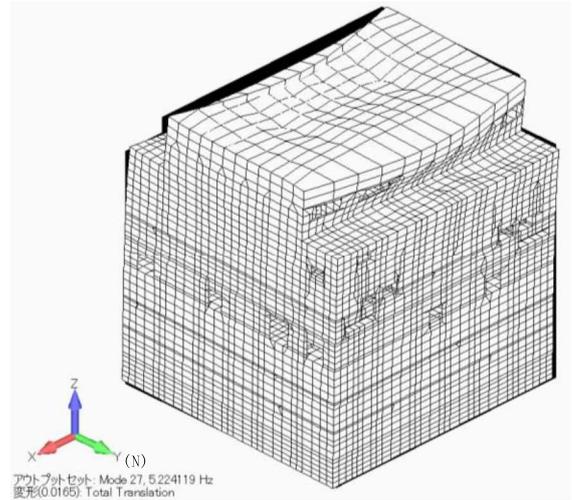


(d) 西面壁

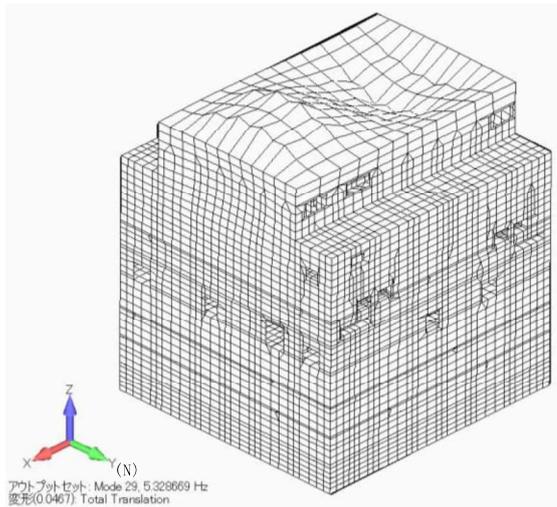
図 2-16 水平 1 方向入力及び 3 方向同時入力の最大応答加速度の比較 (Sd-2)  
(水平 1 方向入力に対する 3 方向同時入力の最大応答加速度の比率)



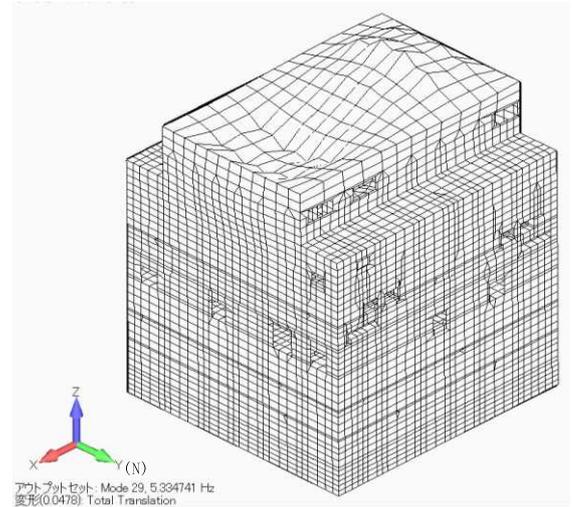
5.22Hz (0.19s)  
(a) Sd-1 NS 方向



5.22Hz (0.19s)  
(b) Sd-2 NS 方向



5.33Hz (0.19s)  
(c) Sd-1 EW 方向



5.33Hz (0.19s)  
(d) Sd-2 EW 方向

図 2-17 3次元 FEM モデル (建屋模擬モデル) の固有値解析結果 (2次モード)

## 2.6 面外慣性力に対する壁の断面算定

複数スパン及び層にまたがって直交方向に壁及び床の無い連続した壁について、面外慣性力の影響として、原子炉建屋の壁を部分的に抽出し、面外慣性力に対する検討を行う。検討は、「2.5 地震応答解析結果」より、壁の面外方向への加速度の影響が顕著に出ている南北面の壁を対象として、静的応力解析モデルに置き換えて、面外慣性力による面外応力に対して断面算定を行い、面外慣性力の影響を評価する。

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

### 2.6.1 解析モデル及び荷重条件

解析モデルを図 2-18 に示す。

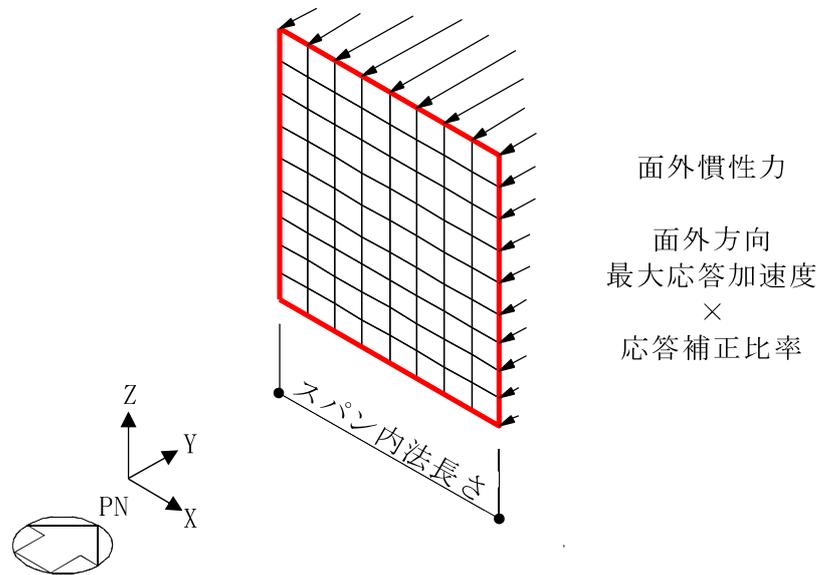
解析モデルは静的応力解析モデルとし、スパン端部の柱及びはりを境界条件として、四辺固定版に置き換える。

荷重としては、基準地震動  $S_s$ （以下「 $S_s$  地震時」という。）による面外方向慣性力を考慮する。 $S_s$  地震時は、弾性設計用地震動  $S_d$ （以下「 $S_d$  地震時」）による応答加速度に対し補正を行い、質点系モデルによる地震応答解析における最大応答加速度比で係数倍して定めるものとし、 $S_{s-1}$  及び  $S_{s-2}$  の包絡値とする。

$S_d$  地震時による応答加速度の補正は、 $S_{d-1}$  及び  $S_{d-2}$  による面外方向の最大応答加速度（絶対加速度）に対し、材料物性による不確かさを考慮するための応答補正比率を乗じることで保守的に評価したものである。また、応答補正比率は、質点系モデルによる地震応答解析における最大応答加速度より算出する。

面外慣性力の算出方法は以下の通りである。

$$\begin{aligned} & S_s \text{ 地震時の面外方向加速度（面外慣性力）} \\ & = \text{建屋模擬モデル（3次元FEM）の } S_d \text{ 地震時面外方向最大応答加速度} \\ & \quad \times \text{応答補正比率} \dots\dots\dots (2.1) \end{aligned}$$



注：□は固定端とする部分を示す。

図 2-18 解析モデル

## 2.6.2 応答補正比率の算出

材料物性の不確かさによる応答補正比率は、基本ケースの質点系モデルの最大応答加速度に対する材料物性の不確かさを考慮した質点系モデルの最大応答加速度の比により算出する。

S<sub>s</sub>地震時に用いる質点系モデルによる最大応答加速度比は、S<sub>d</sub>地震時の基本ケースとS<sub>s</sub>地震時の基本ケースの比により算出する。

なお、用いる最大応答加速度は、T.M.S.L. 49.7m及びT.M.S.L. 38.2mの質点（質点番号1及び質点番号2）の最大応答加速度とする。

算出した応答補正比率を表2-4に示す。

表2-4 応答補正比率

(a) 材料物性の不確かさによる応答補正比率

地震波	Sd-1		Sd-2		備考
	T.M.S.L. (m)	49.7	38.2	49.7	
①基本ケース 最大加速度応答 (m/s <sup>2</sup> )	9.66	6.64	5.30	3.89	—
②材料物性の不確かさ 最大加速度応答 (m/s <sup>2</sup> )	10.1	7.32	5.73	4.28	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ Sd-1 (T.M.S.L. 38.2m 及び 49.7m) と Sd-2 (T.M.S.L. 49.7m) は、建屋剛性・地盤剛性 (+σ) 考慮モデルの応答</li> <li>・ Sd-2 (T.M.S.L. 38.2m) は、建屋剛性・地盤剛性 (-σ) 考慮モデルの応答</li> </ul>
②/① 最大加速度応答比	1.05	1.11	1.09	1.11	—
採用応答補正比率	1.11		1.11		<ul style="list-style-type: none"> <li>・ ②材料物性の不確かさが全て同一ケースでないため、保守的に最大の応答補正比率を設定</li> </ul>

(b) 質点系モデルのS<sub>d</sub>地震時に対するS<sub>s</sub>地震時の最大加速度応答比

地震波	Ss-1		Ss-2		備考
	T.M.S.L. (m)	49.7	38.2	49.7	
③S <sub>d</sub> 地震時 最大加速度応答 (m/s <sup>2</sup> )	9.66	6.64	5.30	3.89	・ 基本ケース
④S <sub>s</sub> 地震時 最大加速度応答 (m/s <sup>2</sup> )	18.0	12.3	10.9	8.61	・ 基本ケース
④/③ 最大加速度応答比	1.87	1.86	2.06	2.22	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 同一ケースの倍率のためメッシュ分割に合わせ線形補間を行う</li> </ul>

### 2.6.3 断面の評価部位の選定

単位幅あたりの最大応力を表 2-5 に示す。また、最大値を下線で示す。

面外慣性力により，南面壁の  $R_B$ - $R_C$  間の壁で最大となる。

断面の評価部位の選定に関する応力コンター図を表 2-6 に示す。

表 2-5 単位幅あたりの最大応力 ( $S_{s-1}$  及び  $S_{s-2}$  包絡)

位置		単位幅あたりの最大応力	
		曲げモーメントM (kN・m/m)	面外せん断力Q (kN/m)
北面壁	$R_A - R_B$	38.8	49.7
	$R_B - R_C$	51.3	72.3
	$R_C - R_D$	35.9	62.9
	$R_D - R_E$	36.3	63.8
	$R_E - R_F$	50.3	58.1
	$R_F - R_G$	43.2	59.2
南面壁	$R_A - R_B$	32.4	45.6
	$R_B - R_C$	<u>52.4</u>	<u>72.8</u>
	$R_C - R_D$	36.8	62.8
	$R_D - R_E$	36.5	62.5
	$R_E - R_F$	52.0	72.3
	$R_F - R_G$	44.7	58.6

表 2-6 断面の評価部位の選定に関する応力コンター図（南面壁 R<sub>B</sub>-R<sub>C</sub> 間）

	コンター図
M <sub>x</sub>	<p>注：□は，最大応力（39.9kN・m/m）を示す</p>
M <sub>y</sub>	<p>注：□は，最大応力（52.4kN・m/m）を示す</p>
Q <sub>x</sub>	<p>注：□は，最大応力（58.3kN/m）を示す</p>
Q <sub>y</sub>	<p>注：□は，最大応力（72.8kN/m）を示す</p>

#### 2.6.4 断面算定方法

「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」に基づき，基準地震動  $S_s$  により生じる曲げモーメント及びせん断力が，許容限界を超えないことを確認する。許容限界については，「技術基準解説書」に基づき  $F$  値に 1.1 倍の割増しを考慮した弾性限強度とする。

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

$$M_A = a_t f_t j \quad \dots\dots\dots (2. 2)$$

ここで，

- $M_A$  : 断面の単位幅あたりの許容曲げモーメント (N・mm/m)
- $a_t$  : 断面の単位幅あたりの引張鉄筋の断面積 (mm<sup>2</sup>/m)
- $f_t$  : 引張鉄筋の許容引張応力度で基準強度  $F$  値の 1.1 倍 (N/mm<sup>2</sup>)
- $j$  : 断面の応力中心距離で，断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

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

$$Q_A = b j \alpha f_s \quad \dots\dots\dots (2. 3)$$

ここで，

- $Q_A$  : 断面の単位幅あたりの許容面外せん断力 (N/m)
- $b$  : 単位幅あたりの断面の幅 (mm/m)
- $j$  : 断面の応力中心距離で有効せいの 7/8 倍の値 (mm)
- $\alpha$  : 許容せん断力の割増係数 (1.0)
- $f_s$  : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

#### 2.6.5 断面算定結果

断面算定結果を表 2-7 に示す。

S s 地震時において、曲げモーメントに対する検定値が 0.747、面外せん断力に対する検定値が 0.324 となり、許容限界を超えないことを確認した。

面外慣性力として、応答補正比率を考慮したうえで最大応答加速度の絶対値を用いていることや解析モデルとして保守的なモデルを用いていることなど、保守的な検討をしていることより、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せにより、原子炉建屋の壁が有する耐震性への影響はないと判断できる。

表 2-7 断面算定結果

検討ケース	S s地震時
厚さ t (mm) × 幅 b (mm)	<input type="text" value=""/> × 1000
有効せい d (mm)	213
配筋 (鉄筋断面積)	D16@200 ( $a_t = 995\text{mm}^2/\text{m}$ )
鉄筋の許容引張応力度 $f_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	379
コンクリートの許容せん断応力度 $f_s$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.21
発生曲げモーメント M (kN・m/m)	52.4
許容値 $M_A$ (kN・m/m)	70.2
検定値 M / $M_A$	0.747
発生せん断力 Q (kN/m)	72.8
許容値 $Q_A$ (kN/m)	225
検定値 Q / $Q_A$	0.324
判定	可

## 2.7 検討のまとめ

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

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

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

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

### 3. 局所応答による影響検討

応答特性②-1 及び②-2 により抽出されなかった耐震評価部位全般に対して、局所的な応答について、弾性設計用地震動 Sd-1 及び Sd-2 を用いて、3次元 FEM モデルによる精査を行った。

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

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

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

#### 4. 3次元 FEM モデルを用いた精査のまとめ

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

応答特性②-1「面内方向の荷重に加え、面外慣性力の影響が大きい」可能性がある部位として、原子炉建屋の壁（燃料取替床レベル）について、精査を行った。

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

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

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

別紙 2-1 3次元的な応答特性を考慮した燃料取替床ブローアウト  
パネルの評価について

## 目 次

1. 概要 .....	別紙 2-1-1
2. オペフロ BOP の S d 閉機能維持の評価 .....	別紙 2-1-4
2.1 検討方針 .....	別紙 2-1-4
2.2 3次元 FEM モデルの応答を用いた面外方向地震荷重の算定 .....	別紙 2-1-6
2.3 S d 閉機能維持の評価 .....	別紙 2-1-8

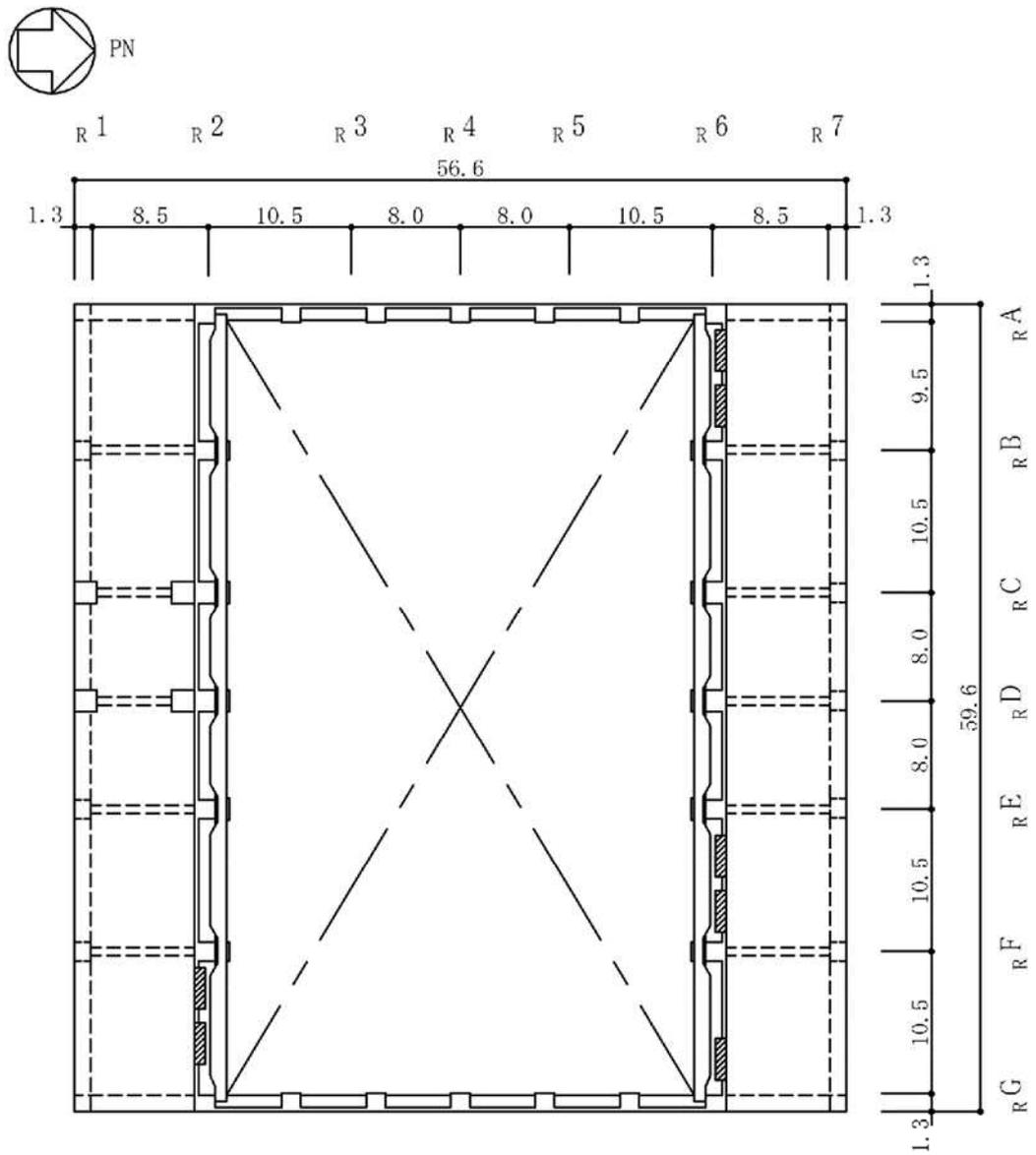
## 1. 概要

別紙 2「3次元 FEM モデルを用いた精査」では、応答特性②-1「面内方向の荷重に加え、面外慣性力の影響が大きい」という特性より、3次元的な応答特性が想定される部位として抽出した原子炉建屋（燃料取替床レベル）の壁について、3次元 FEM モデルによる精査を行った。詳細には、原子炉建屋の壁の面外慣性力による影響検討として、南北面壁を代表部位とし、面外慣性力による面外応力に対する断面算定を行い、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を評価した。評価の結果、面外慣性力により原子炉建屋の壁が有する耐震性への影響は無いことを確認した。

ここで、代表部位として選定した南北面壁には、燃料取替床ブローアウトパネル（以下「オペフロ BOP」という。）を設置している。

VI-2-9-3-1-1「燃料取替床ブローアウトパネルの耐震性についての計算書」における評価のうち、面外慣性力の影響を受けると考えられる『弾性設計用地震動  $S_d$  による地震力に相当する荷重でオペフロ BOP が開放しないこと』（以下「 $S_d$  閉機能維持」という。）について、3次元 FEM モデルによる応答を用いた評価を行う。

オペフロ BOP の設置位置図を図 1-1 に、構造計画を表 1-1 に、固有周期を表 1-2 に示す。



 : オペフロ BOP

注：東京湾平均海面を以下「T. M. S. L.」という。

図 1-1 オペフロ BOP の設置位置図 (単位 : m)

(T. M. S. L. 38.2m)

表 1-1 オペフロ BOP 構造計画

計画の概要	
支持構造	主体構造
オペフロ BOP は、十分な強度を有する構造とし、枠部により原子炉建屋原子炉区域の壁に据え付ける。	<ul style="list-style-type: none"> <li>・パネル本体部</li> <li>・枠部</li> </ul> オペフロ BOP は、パネル本体部、パネルを原子炉建屋外壁内に設置する枠部より構成される設備である。
材料	SS400
作動方式	止板式 (16 個/パネル)
止板仕様	材質 SHY685
概略構造図 (単位 : m)	

表 1-2 オペフロ BOP の固有周期

方向	固有振動数 (Hz)	固有周期 (s)
NS 方向	□	□

注：固有周期は、VI-2-9-3-1-1「燃料取替床ブローアウトパネルの耐震性についての計算書」に基づきモックアップ試験体の振動試験による。

## 2. オペフロ BOP の S d 閉機能維持の評価

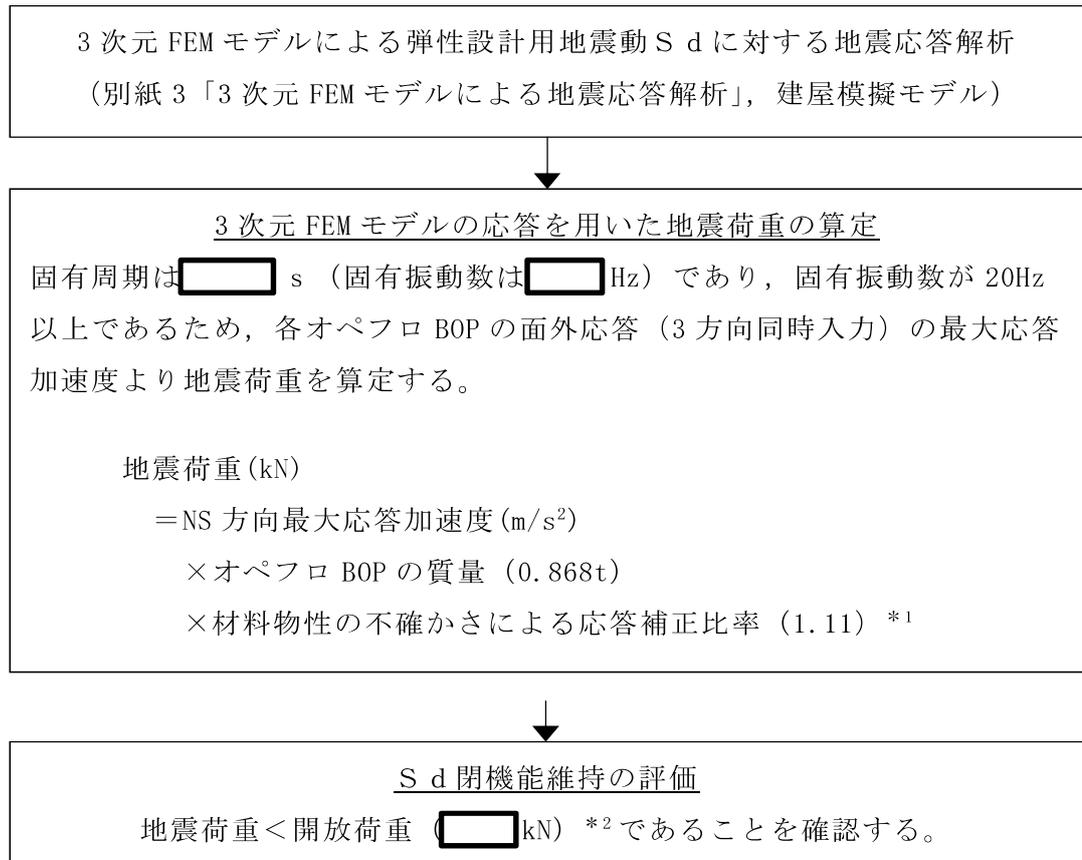
### 2.1 検討方針

S d 閉機能維持の評価では、3次元 FEM モデルの応答を用いた面外方向地震荷重が許容値である開放荷重を下回ることを確認する。

3次元 FEM モデルによる S d 閉機能維持の評価フローを図 2-1 に示す。

別紙 3「3次元 FEM モデルによる地震応答解析」における建屋模擬モデル（3次元 FEM）を対象とした弾性設計用地震動 S d に対する地震応答解析結果を用い、オペフロ BOP に対する材料物性の不確かさを考慮した面外方向地震荷重を算定する。

具体的には、オペフロ BOP における 3次元 FEM モデルによる面外応答に対し、材料物性の不確かさによる応答補正比率を乗じ、面外応答を算定する。ここで、面外応答には、保守的な評価のため 3次元 FEM の応答として 3方向同時入力時の面外応答を用いるものとする。オペフロ BOP の面外方向（NS 方向）の固有周期は  s（固有振動数は  Hz）であり、固有振動数が 20Hz 以上であるため、得られた面外応答の最大応答加速度より面外方向地震荷重を算定し、許容値である開放荷重を下回ることを確認する。ここで、開放荷重は保守的な評価のため、VI-2-9-3-1-1「燃料取替床ブローアウトパネルの耐震性についての計算書」に示す実機大モックアップ試験で得られた最小値を用いる。



注：下線部は、本資料にて扱う内容を示す。

注記\*1：別紙 2「3次元 FEM モデルを用いた精査」における最大の応答補正比率を用いる。

\*2：VI-2-9-3-1-1「燃料取替床ブローアウトパネルの耐震性についての計算書」に示す実機大モックアップ試験で得られた最小値を用いる。

図 2-1 3次元 FEM モデルによる S d 閉機能維持の評価フロー

## 2.2 3次元 FEM モデルの応答を用いた面外方向地震荷重の算定

オペフロ BOP は、T. M. S. L. 45.19m 及び T. M. S. L. 42.35m において、原子炉建屋原子炉区域（二次格納施設）の壁に枠部と止板により据付けられていることから、3次元 FEM モデルにおけるオペフロ BOP 相当の開口のうち、上部 3 節点、下部 4 または 5 節点の面外応答（3 方向同時入力）について、支配幅を考慮した重み付け平均によりオペフロ BOP 一枚当たりの面外応答を算出する。なお、面外方向地震荷重は Sd-1 及び Sd-2 の包絡荷重とする。面外応答の算出方法の概要を図 2-2 に示す。

材料物性の不確かさによる応答補正比率は、基本ケースの質点系モデルの最大応答加速度に対する材料物性の不確かさを考慮した質点系モデルの最大応答加速度の比により算出するものとし、別紙 2「3次元 FEM モデルを用いた精査」における最大の応答補正比率(1.11)を用いるものとする。

オペフロ BOP に対する面外方向地震荷重の算定方法は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \text{面外方向地震荷重 (kN)} &= \text{NS 方向最大応答加速度 (m/s}^2\text{)} \\ &\quad \times \text{オペフロ BOP の質量 (0.868t)} \\ &\quad \times \text{材料物性の不確かさによる応答補正比率 (1.11)} \\ &\quad \dots (2.1) \end{aligned}$$

面外方向地震荷重の算定結果を表 2-1 に示す。

面外方向地震荷重は、北面壁  $rE-rF$  間において最大となる。別紙 2「3次元 FEM モデルを用いた精査」では、平面的に中央部がはらむような加速度分布であり、同一傾向であることを確認した。

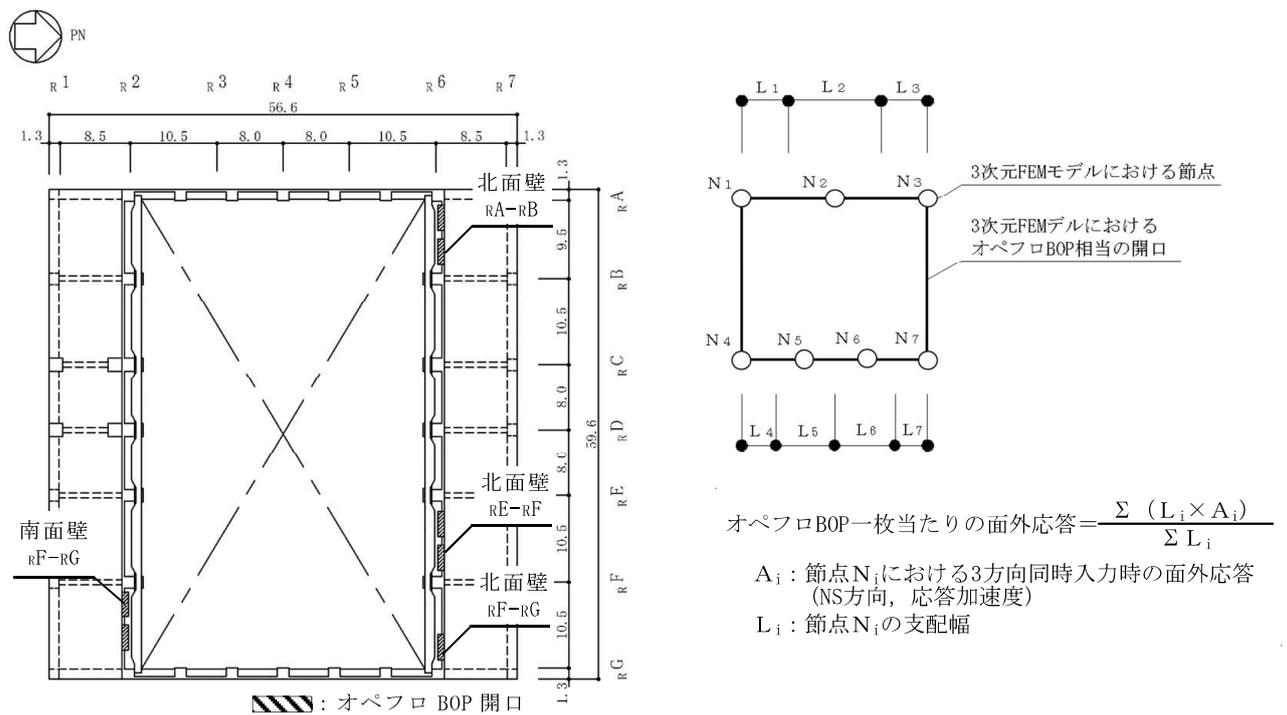


図 2-2 面外応答の算出方法の概要

表 2-1 材料物性の不確かさを考慮した面外方向地震荷重

オペフロ BOP		最大応答 加速度 (m/s <sup>2</sup> )	オペフロ BOP 質量 (t)	材料物性の 不確かさ による 応答補正比率	面外方向 地震荷重 (kN)	評価用 地震荷重 (kN)
北面壁	R <sub>A</sub> - R <sub>B</sub>	8.8	0.868	1.11	8.5	13.0
	R <sub>E</sub> - R <sub>F</sub>	13.4			<u>13.0</u>	
	R <sub>F</sub> - R <sub>G</sub>	9.0			8.7	
南面壁	R <sub>F</sub> - R <sub>G</sub>	9.5			9.2	

注：下線部は、評価用地震荷重に用いた面外方向地震荷重を示す。

### 2.3 S d 閉機能維持の評価

オペフロ BOP の評価用地震荷重と開放荷重を比較した評価結果を表 2-2 に示す。

3次元的な応答特性を考慮した評価用地震荷重は開放荷重を下回り、オペフロ BOP は、弾性設計用地震動 S d による地震力に対して、開放しないことを確認した。

なお、解析モデルとして屋根スラブの剛性を考慮していないこと、評価用地震荷重の算定には 3 方向同時入力時の応答を用いていること、許容値である開放荷重は最小値を用いていることなど、保守的な検討をしていることから、オペフロ BOP における S d 閉機能維持への影響はないと判断できる。

表 2-2 評価結果

評価用 地震荷重 (kN)	開放荷重* (kN)	検定値 (評価用地震荷重／開放荷重)	判定
13.0	<input type="text"/>	<input type="text"/>	○

注記\*：VI-2-9-3-1-1 「燃料取替床ブローアウトパネルの耐震性についての計算書」  
に示す実機大モックアップ試験で得られた最小値

### 別紙 3 3次元 FEM モデルによる地震応答解析

## 目 次

1. 検討概要	別紙 3-1
1.1 構造概要	別紙 3-1
1.2 3次元 FEM モデルによる耐震性評価の方針	別紙 3-13
2. 3次元 FEM モデルの構築	別紙 3-15
2.1 原子炉建屋の3次元 FEM モデル	別紙 3-15
2.1.1 モデル化の基本方針	別紙 3-15
2.1.2 荷重	別紙 3-22
2.1.3 建屋-地盤の相互作用	別紙 3-22
2.2 固有値解析	別紙 3-27
2.3 観測記録を用いた検討	別紙 3-33
2.3.1 観測記録を用いた検討の概要	別紙 3-33
2.3.2 観測記録による解析結果	別紙 3-39
2.3.3 観測記録と解析結果の比較及び考察	別紙 3-39
2.3.4 結論	別紙 3-39
3. 3次元 FEM モデルによる評価	別紙 3-41
3.1 地震応答解析の概要	別紙 3-41
3.2 建屋応答性状の把握	別紙 3-48
3.2.1 基礎のロッキング振動による鉛直方向応答への影響	別紙 3-48
3.2.2 鉛直軸回りのねじれ振動の影響	別紙 3-51
3.2.3 床柔性の影響	別紙 3-56
3.2.4 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響	別紙 3-61
3.2.5 まとめ	別紙 3-80
3.3 建屋耐震性評価への影響検討	別紙 3-81
3.3.1 検討方針	別紙 3-81
3.3.2 建屋模擬モデル及び質点系モデルの最大応答値の比較検討	別紙 3-81
3.3.3 3次元的な応答特性（応答補正率）を考慮した建屋影響検討	別紙 3-86
3.4 床応答への影響検討	別紙 3-113
4. まとめ	別紙 3-122

別紙 3-1 観測記録を用いたシミュレーション解析

別紙 3-2 3次元 FEM モデルによる応答結果の整理

## 1. 検討概要

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

### 1.1 構造概要

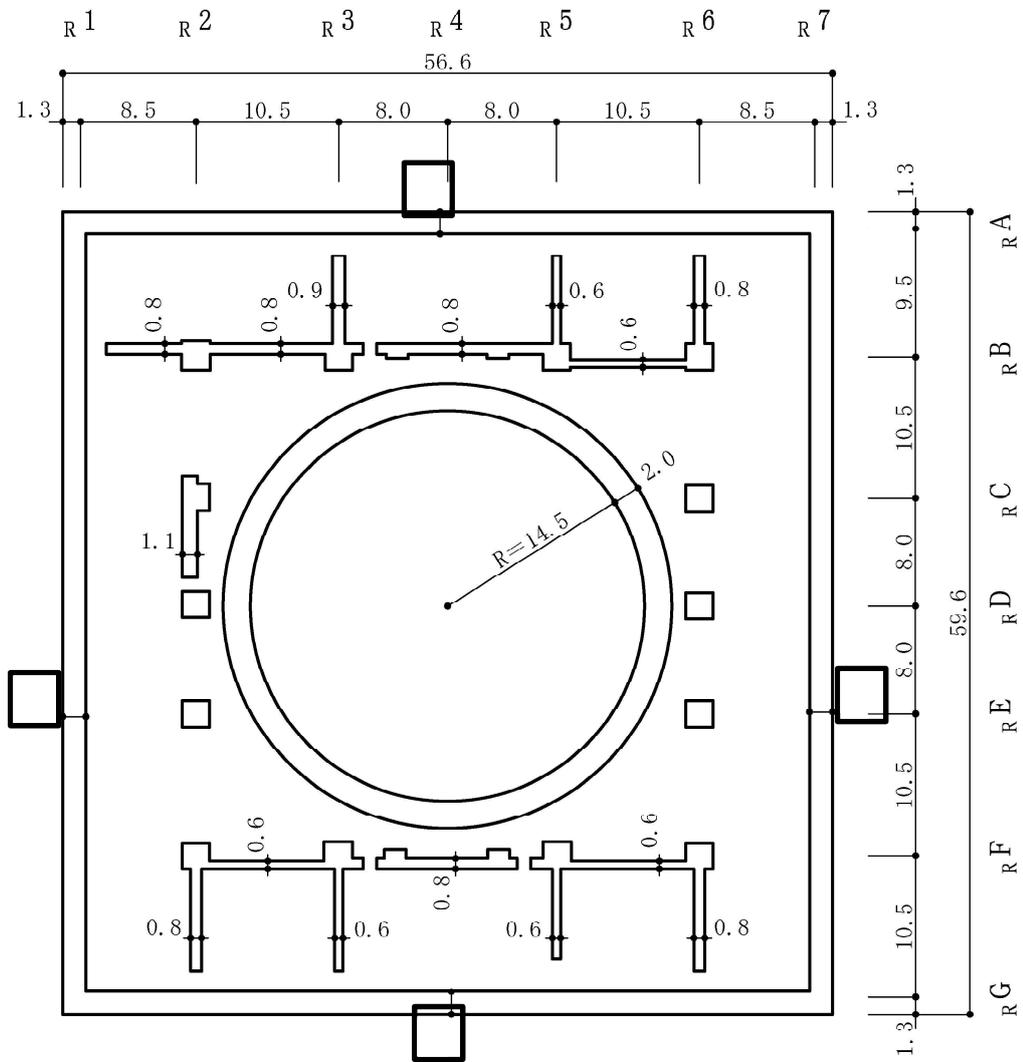
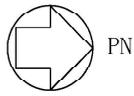
原子炉建屋は、地上 4 階、地下 3 階建ての鉄筋コンクリート造を主体とした建物で、屋根部分が鉄骨造（トラス構造）となっている。原子炉建屋の概略平面図及び概略断面図を図 1-1 及び図 1-2 に示す。

原子炉建屋の平面は、下部では 56.6m（NS方向）×59.6m（EW方向）、最上階は 39.0m（NS方向）×59.6m（EW方向）である。基礎スラブ底面からの高さは 63.4m であり、地上高さは 37.7m である。なお、原子炉建屋の屋根部分には主排気筒が設置されている。また、原子炉建屋は隣接する他の建屋と構造的に分離している。

原子炉建屋の基礎は厚さ 5.5m のべた基礎で、支持地盤である泥岩上に直接設置している。

原子炉建屋の中央部には原子炉圧力容器を収容している鉄筋コンクリート製原子炉格納容器（以下「RCCV」という。）がある。RCCV は円筒形で基礎スラブ上から立ち上がり、床スラブによって原子炉建屋と一体構造になっている。この RCCV の高さは底部上端からトップスラブ部下端まで 29.5m、内径は 29.0m であり、壁厚は 2.0m である。

原子炉建屋の主な耐震壁は、RCCV と外壁である。主要な耐震壁は建屋の中心に対してほぼ対称に配置しており、開口部も少なく、建屋は全体として非常に剛性の高い構造となっている。



注：東京湾平均海面を，以下「T.M.S.L.」という。

図 1-1 原子炉建屋の概略平面図 (B3F, T.M.S.L. -8.2m) (1/9) (単位 : m)

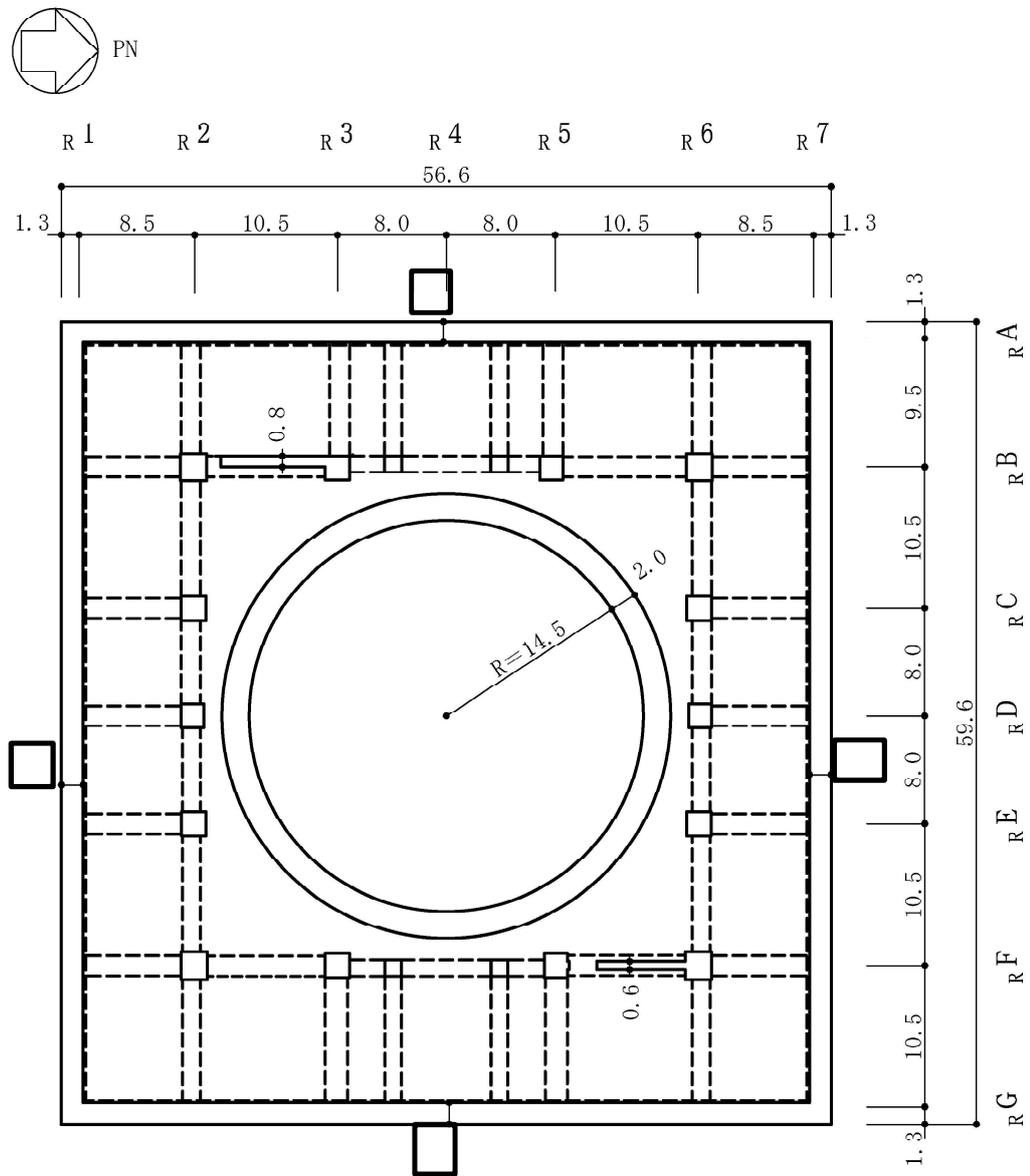


図 1-1 原子炉建屋の概略平面図 (B2F, T. M. S. L. -1.7m) (2/9) (単位 : m)

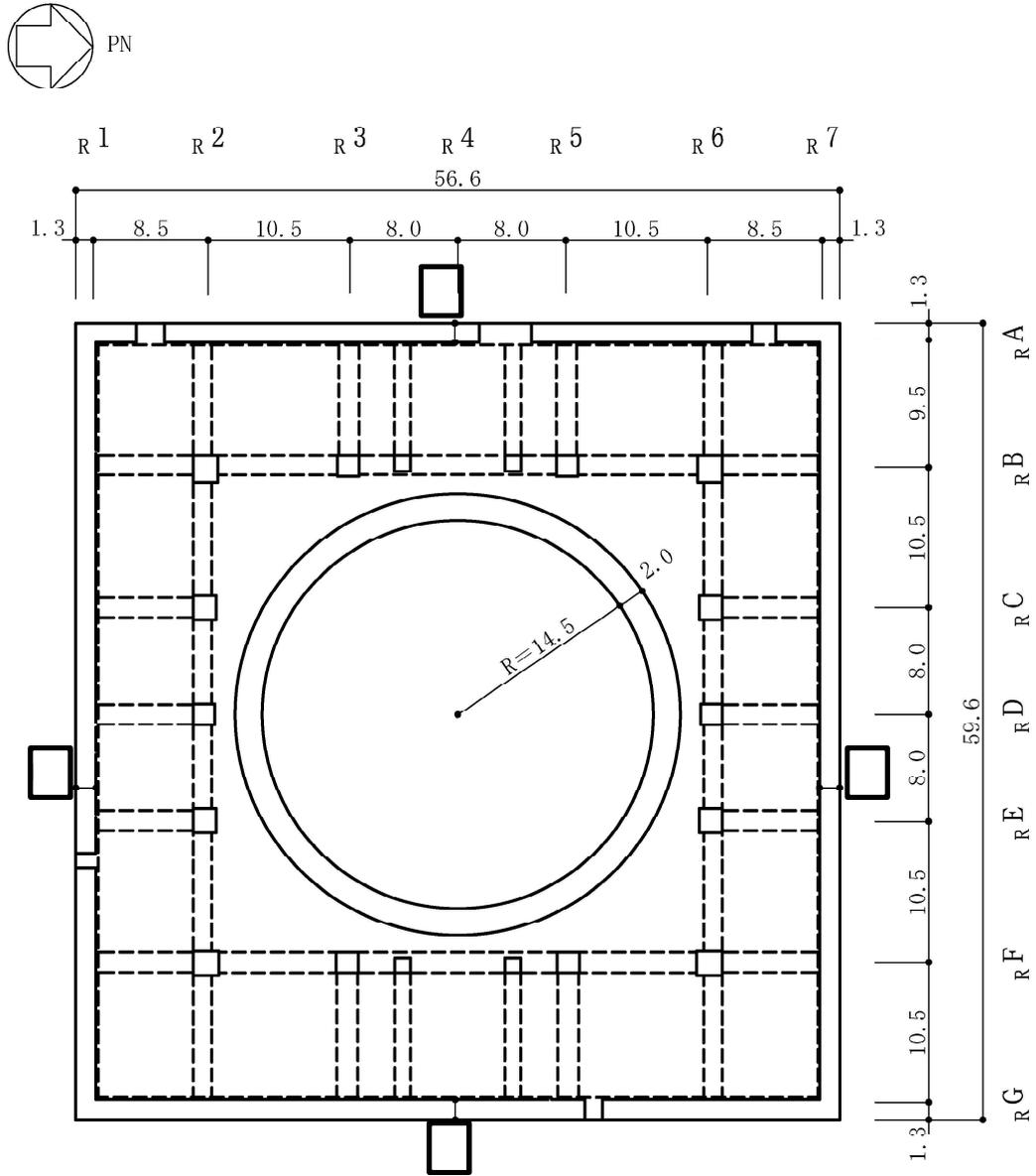


図 1-1 原子炉建屋の概略平面図 (B1F, T.M.S.L. 4.8m) (3/9) (単位 : m)

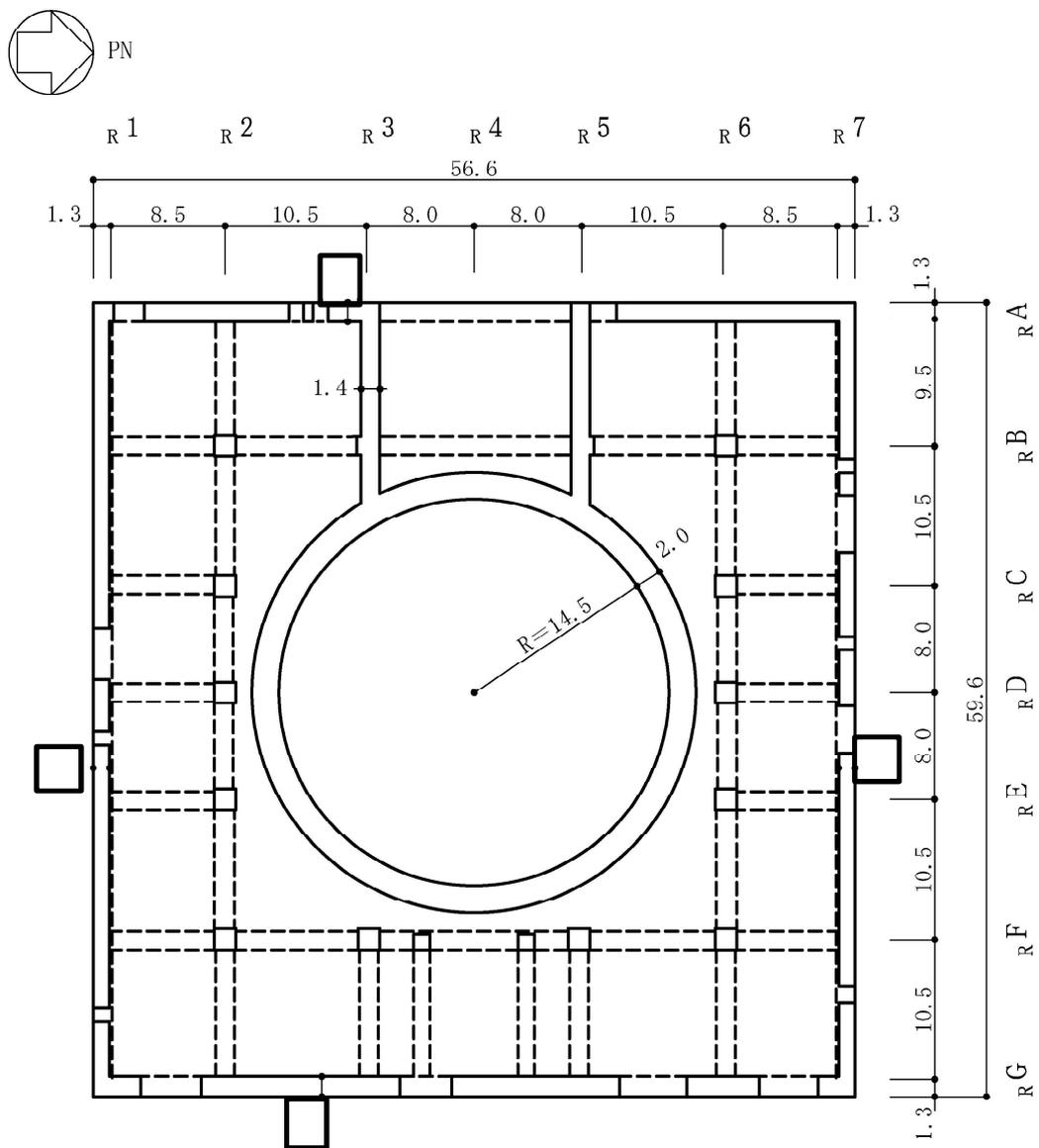


図 1-1 原子炉建屋の概略平面図 (1F, T.M.S.L. 12.3m) (4/9) (単位 : m)

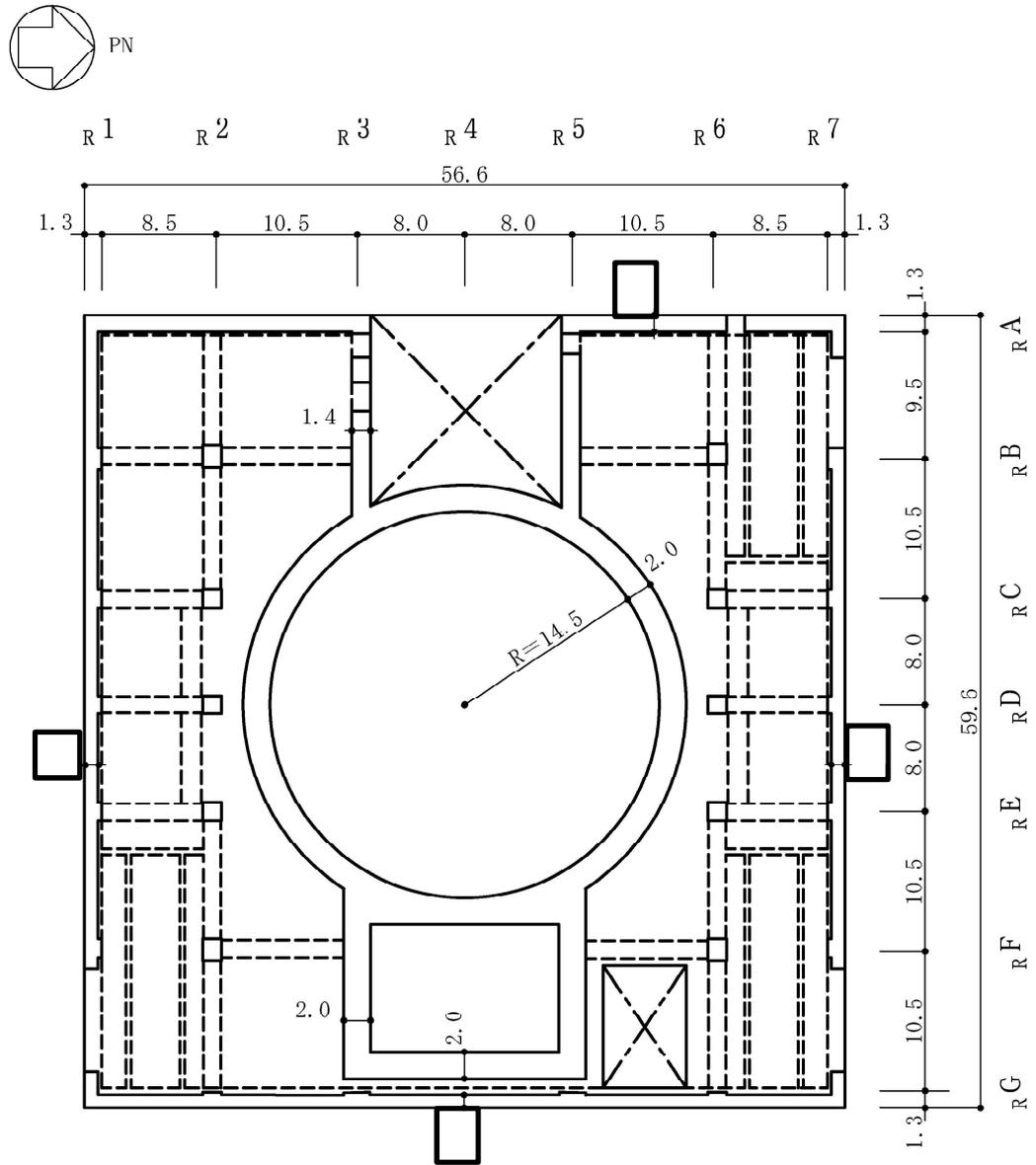


図 1-1 原子炉建屋の概略平面図 (2F, T.M.S.L. 18.1m) (5/9) (単位 : m)

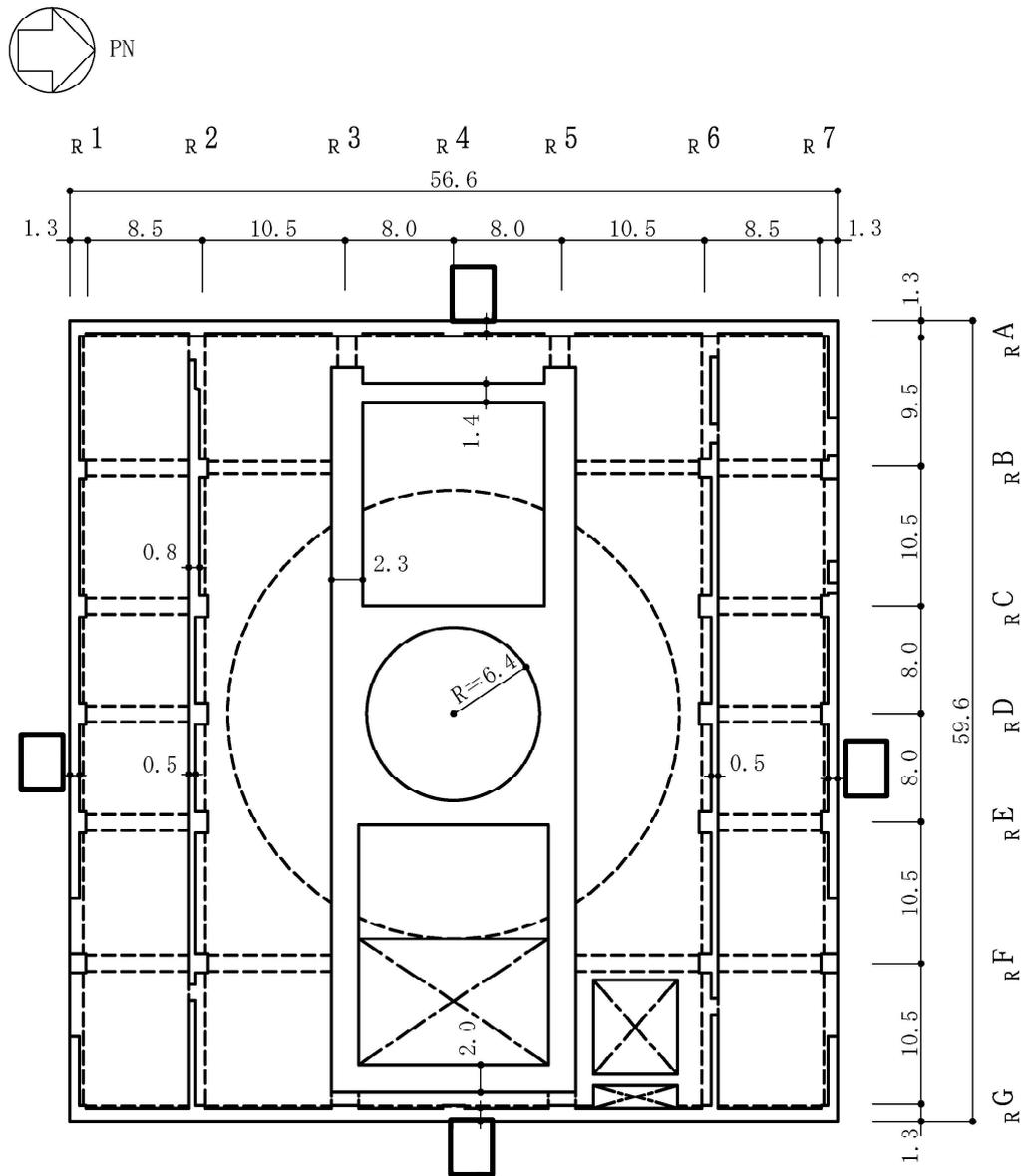


図 1-1 原子炉建屋の概略平面図 (3F, T.M.S.L. 23.5m) (6/9) (単位 : m)

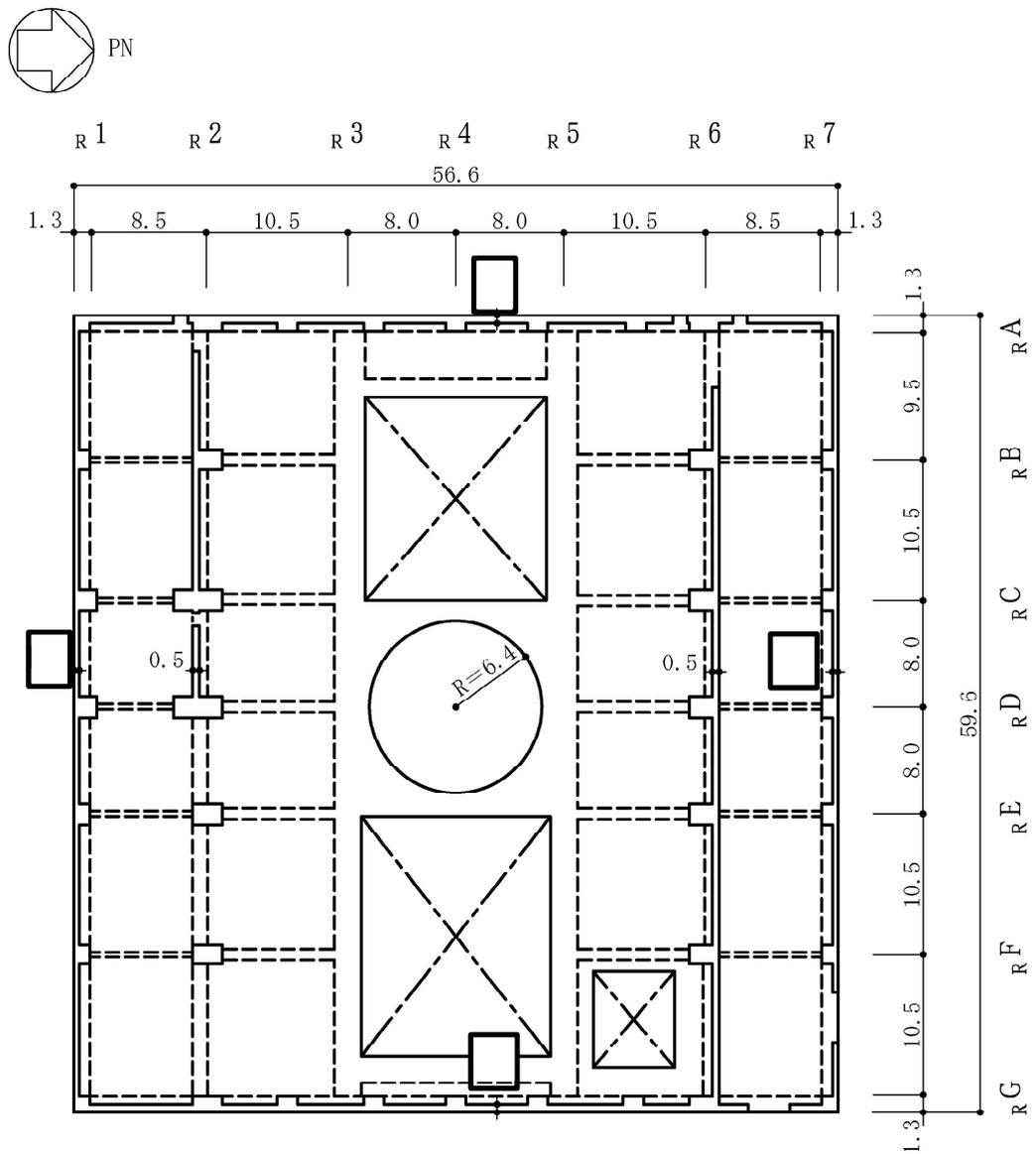


図 1-1 原子炉建屋の概略平面図 (4F, T.M.S.L. 31.7m) (7/9) (単位 : m)

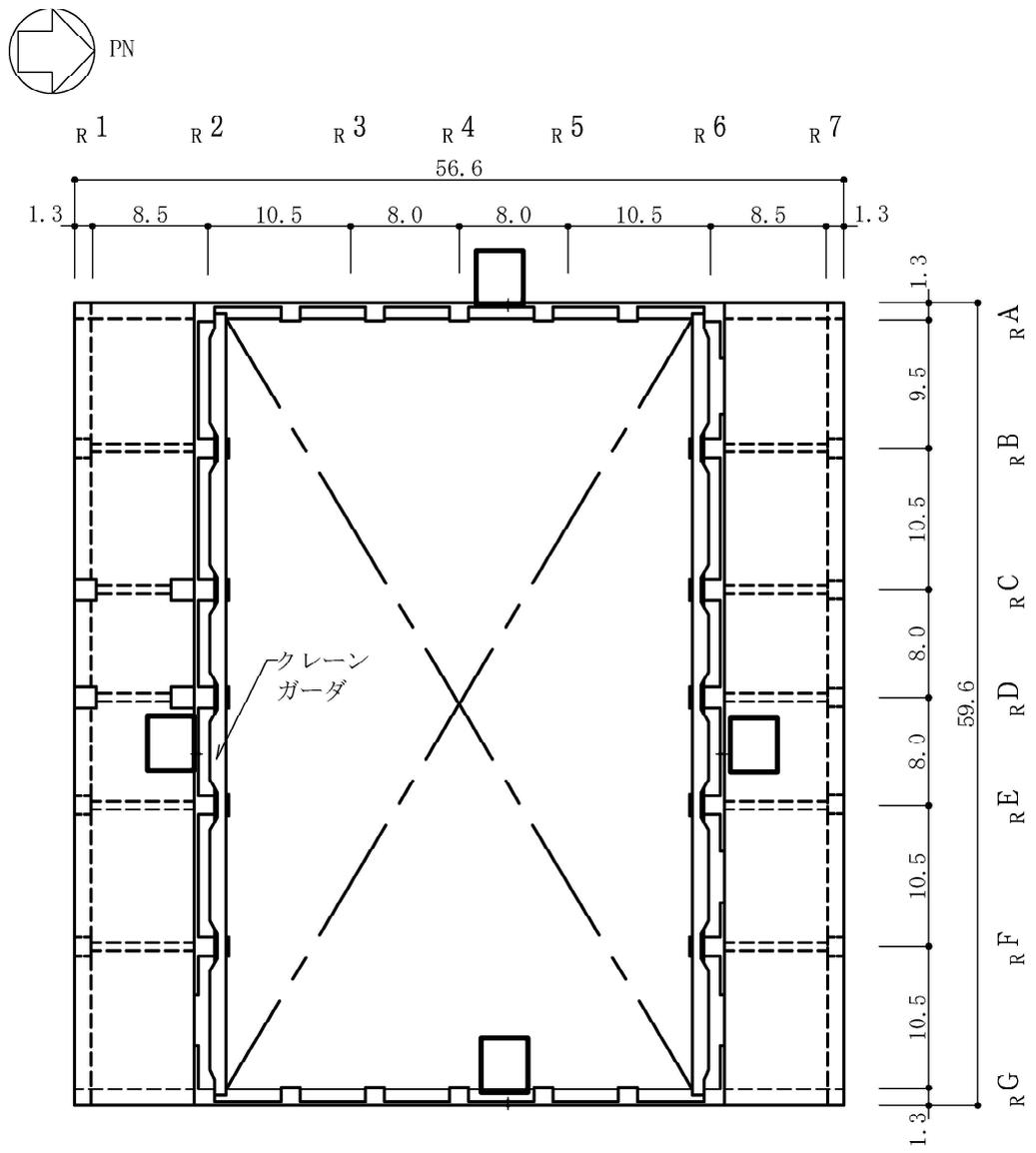


図 1-1 原子炉建屋の概略平面図 (CRF, T. M. S. L. 38.2m) (8/9) (単位 : m)

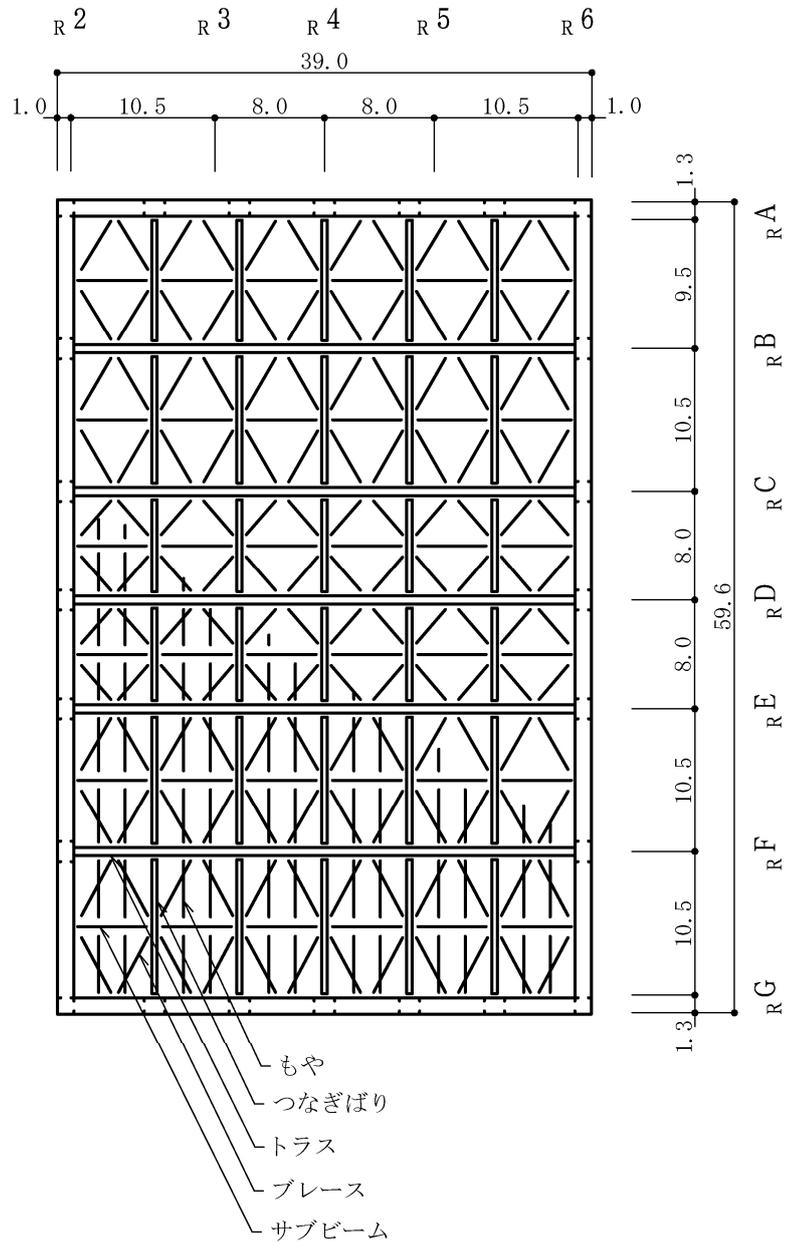
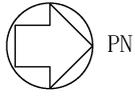
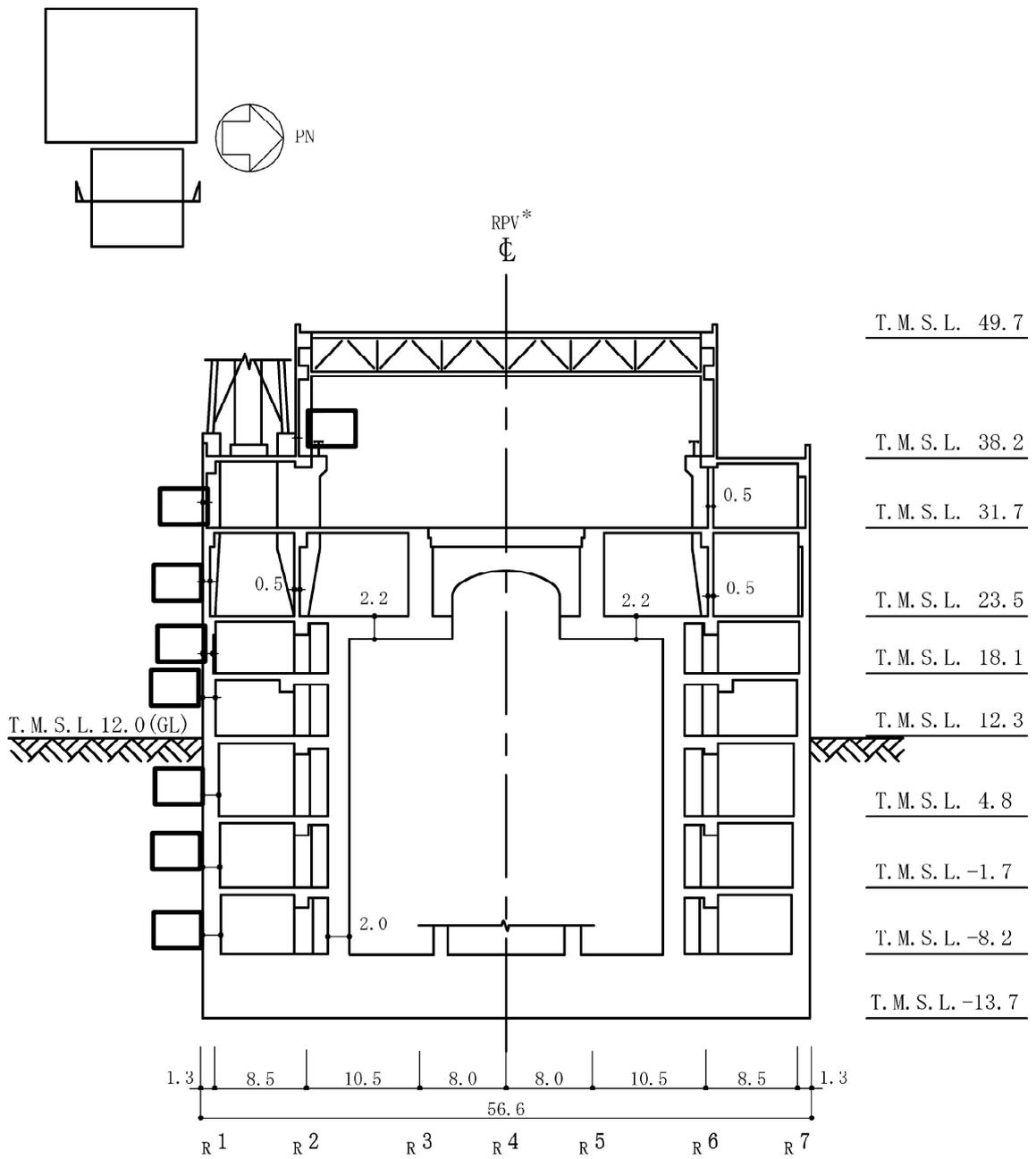


図 1-1 原子炉建屋の概略平面図 (RF, T.M.S.L. 49.7m) (9/9) (単位 : m)



注記\*：原子炉圧力容器を，以下「RPV」という。

図 1-2 原子炉建屋の概略断面図 (NS 方向) (1/2) (単位 : m)

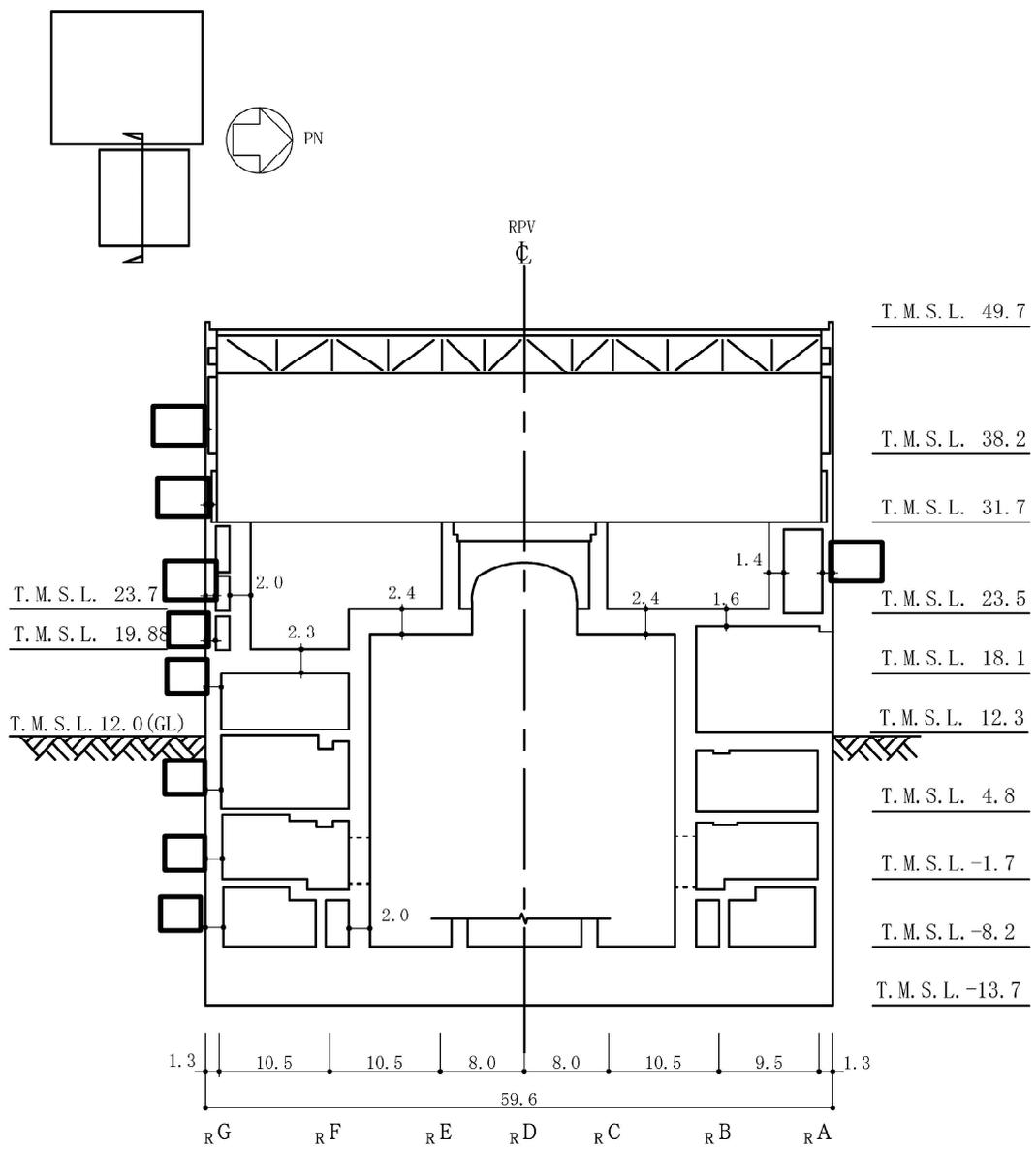


図 1-2 原子炉建屋の概略断面図 (EW 方向) (2/2) (単位 : m)

## 1.2 3次元 FEM モデルによる耐震性評価の方針

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

解析モデル（3 次元 FEM）のケースを表 1-1 に示す。解析モデル（3 次元 FEM）のケースは，床の柔性を変動要因とする以下の 2 ケースとした。

表 1-1 解析モデル（3 次元 FEM）のケース

モデルケース	床のモデル化*	地盤のモデル化	コンクリート剛性の設定
建屋模擬モデル (3 次元 FEM)	床柔	相互作用考慮	実強度
質点系対応モデル (3 次元 FEM)	床剛	相互作用考慮	実強度

注記\*：床のモデル化は基礎スラブを含むものとし，「床剛」の設定ではせん断剛性，曲げ剛性及び軸剛性のいずれについても剛とする。

建屋模擬モデル（3 次元 FEM）は，床の柔性を考慮し，地盤のモデル化に相互作用を考慮することで，建屋の実状を模擬したモデルとしている。

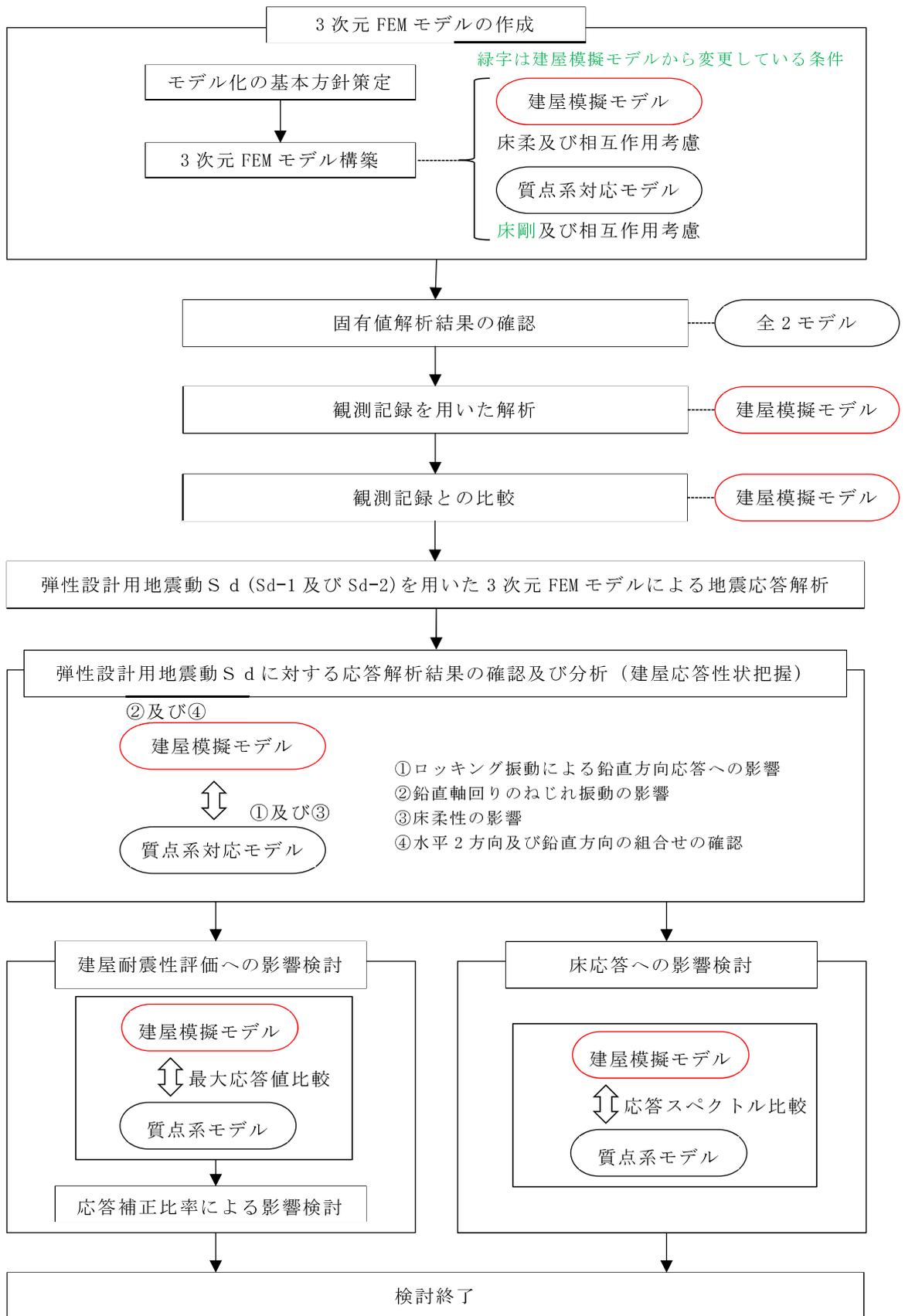
質点系対応モデル（3 次元 FEM）は，建屋模擬モデル（3 次元 FEM）における「床柔」を「床剛」に変更することにより，「床剛及び相互作用考慮」の組合せとなり，質点系モデルに対応したモデルとなっている。

これら 2 ケースについて，固有値解析及び地震応答解析を実施し，その結果を比較することにより，全体的な 3 次元的な応答特性，ロッキング振動の影響，ねじれ振動の影響及び床の剛性の影響について検討を実施する。

3 次元 FEM モデルによる耐震性評価フローを図 1-3 に示す。

3 次元 FEM モデルによる地震応答解析は，1 方向入力により行う。また，水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響検討として 3 方向同時入力による応答評価も併せて実施する。なお，3 方向同時入力による各方向の応答は，1 方向入力における各成分の応答を時刻歴で足し合わせるにより算出しており，詳細は「3.2.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響」にて示す。

なお，評価には解析コード「MSC NASTRAN」を用いる。



○ : 検討対象モデル

図 1-3 3次元 FEM モデルによる耐震性評価フロー

## 2. 3次元 FEM モデルの構築

### 2.1 原子炉建屋の 3次元 FEM モデル

#### 2.1.1 モデル化の基本方針

原子炉建屋の 3次元 FEM モデルを構築する。

モデル図を図 2-1 に、各階のモデル図を図 2-2 に示す。

モデル化の範囲は、原子炉建屋、RCCV、使用済燃料貯蔵プール、蒸気乾燥器・気水分離器ピット、ダイヤフラムフロア、原子炉本体基礎及び基礎とする。

3次元 FEM モデルで設定する各部材の要素タイプは、以下のとおりである。

床スラブ・壁はシェル要素（約 21000 要素）とし、補助壁については VI-2-2-1 「原子炉建屋の地震応答計算書」における質点系モデルで考慮している壁をモデル化する。基礎スラブは、ソリッド要素（約 5600 要素）とする。柱、はり及び屋根トラスのうち主トラス及びつなぎばりの上下弦材、サブビームについてはビーム要素（約 3700 要素）とし、壁内に収まる柱及びはりについては、モデル化しないものとする。屋根トラスのうち主トラス及びつなぎばりの斜材・束材及び水平ブレースはトラス要素（約 400 要素）とする。

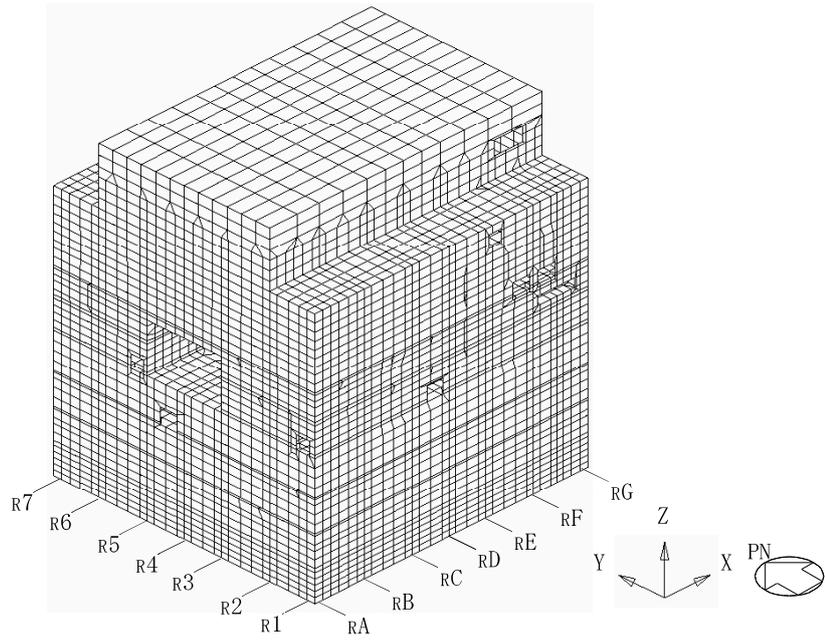
また、壁・床の開口部については、主要な開口部のみモデル化する。

要素の大きさは、各スラブレベルと対応する位置に節点を設け、水平方向には通り芯間を 2 分割以上、鉛直方向にはフロア間を 2 分割以上とする。

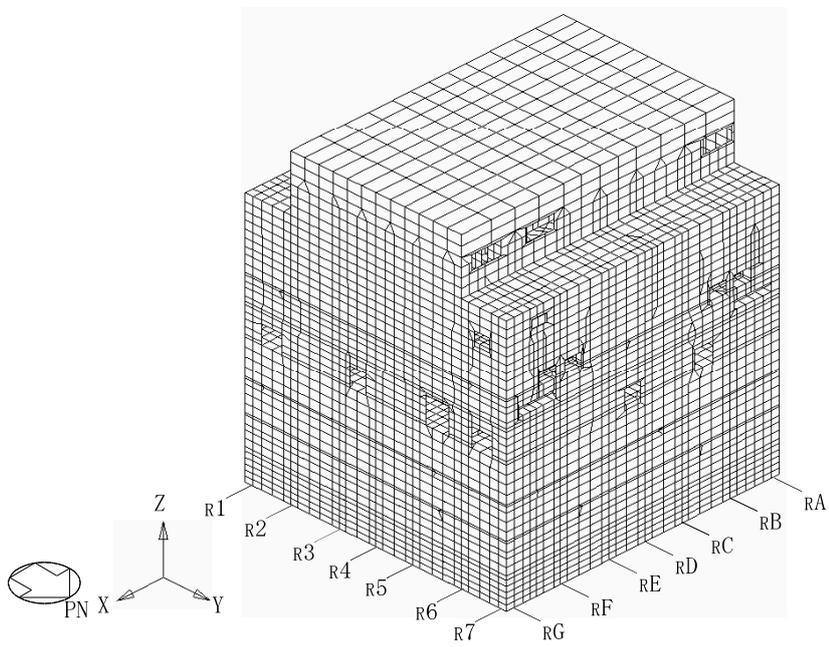
部材の接合部における剛域の設定は行わない。また、ビーム要素は柱・はりの壁・床と重複する部分の断面も含めて断面性能としてモデル化している。

使用材料の物性値を表 2-1 に示す。

コンクリートの実強度、ヤング係数及び地盤物性については、VI-2-2-1 「原子炉建屋の地震応答計算書」における原子炉建屋の設定値と同一である。なお、屋根スラブについては剛性を見込まないものとする。

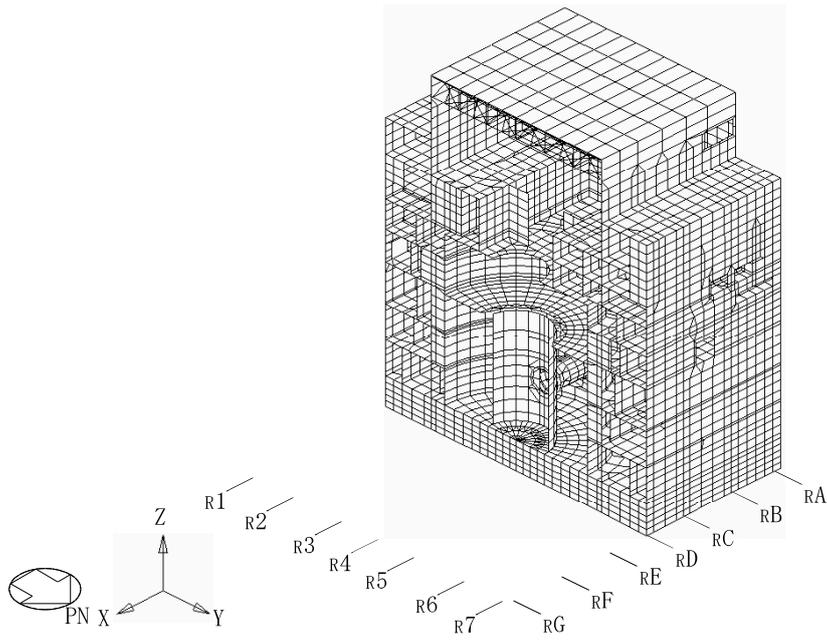


(a) 建屋全景（南西面）

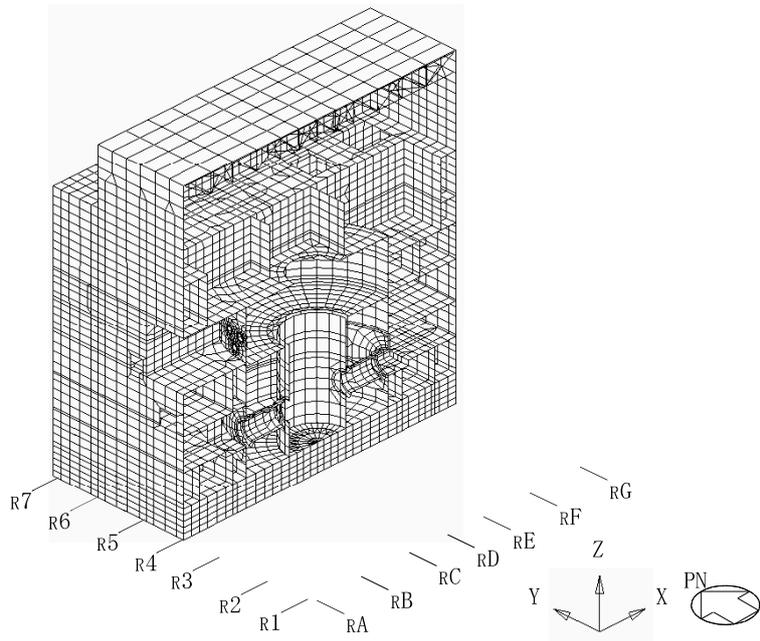


(b) 建屋全景（北東面）

図 2-1 モデル図 (1/2)

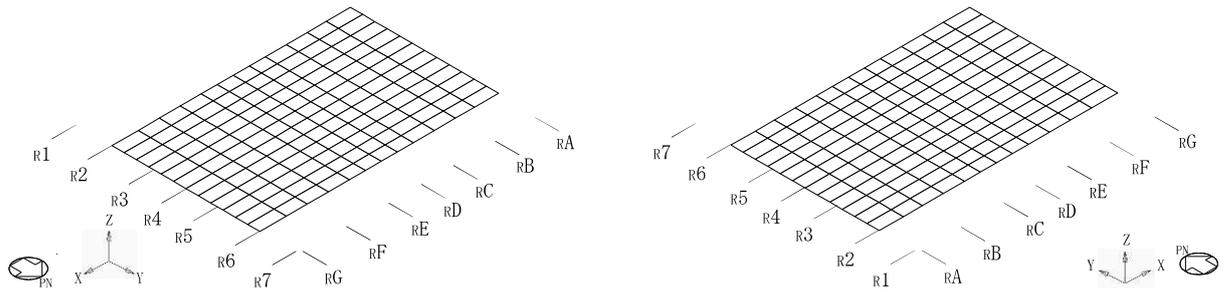


(c) NS 断面図

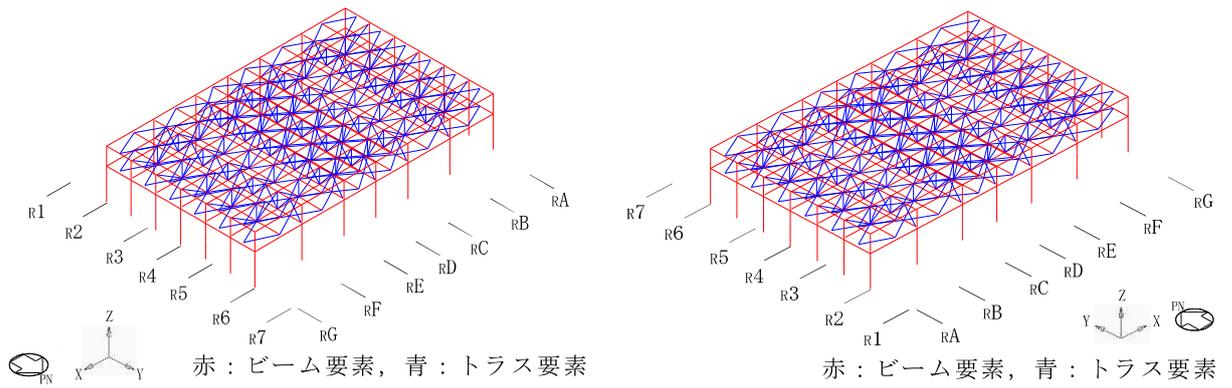


(d) EW 断面図

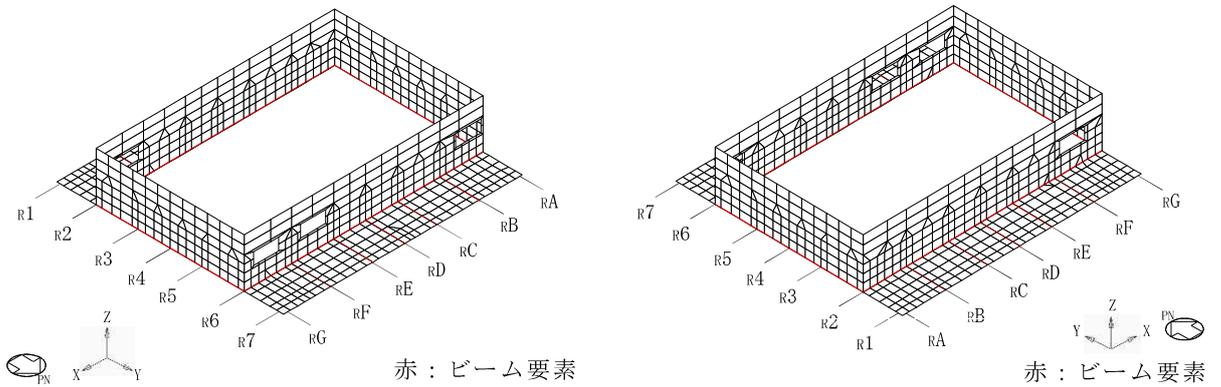
図 2-1 モデル図 (2/2)



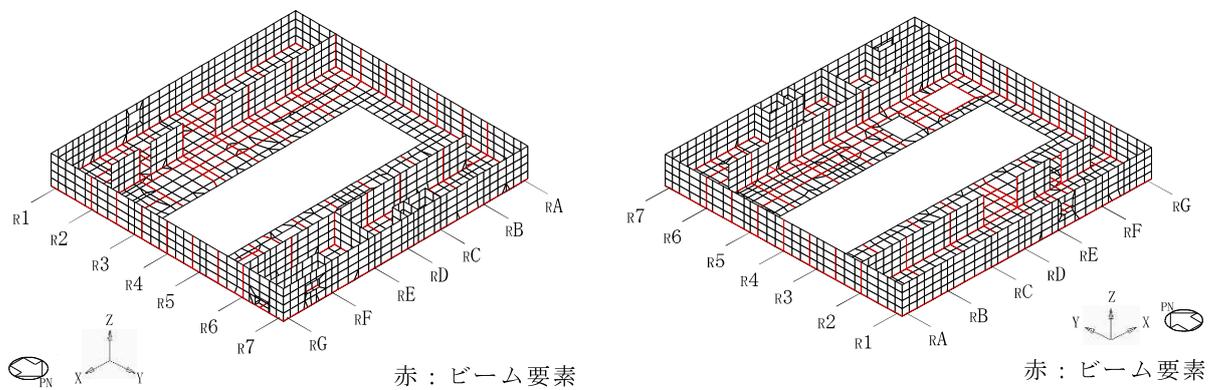
(a) T. M. S. L. 49.7m (屋根スラブ)



(b) T. M. S. L. 38.2m～T. M. S. L. 49.7m (柱，はり及び屋根トラス)

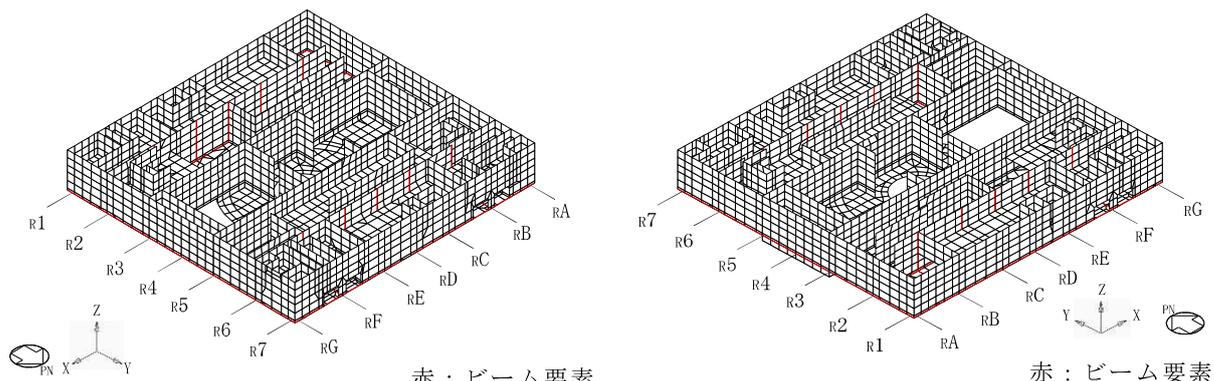


(c) T. M. S. L. 38.2m～T. M. S. L. 49.7m



(d) T. M. S. L. 31.7m～T. M. S. L. 38.2m

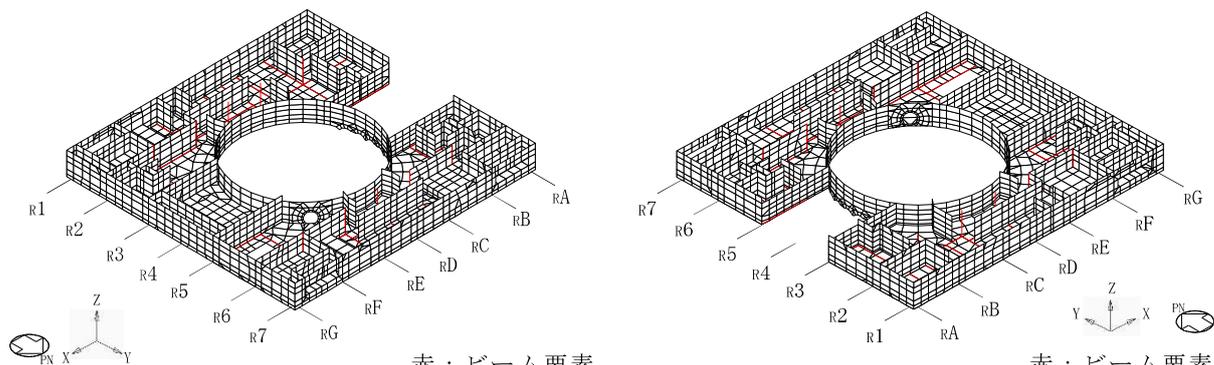
図 2-2 各階のモデル図 (1/3)



赤：ビーム要素

赤：ビーム要素

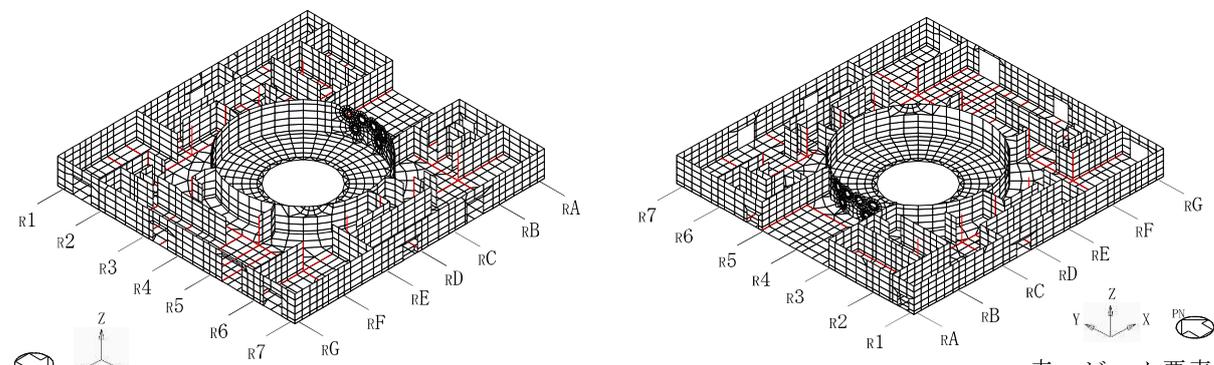
(e) T. M. S. L. 23.5m ~ T. M. S. L. 31.7m



赤：ビーム要素

赤：ビーム要素

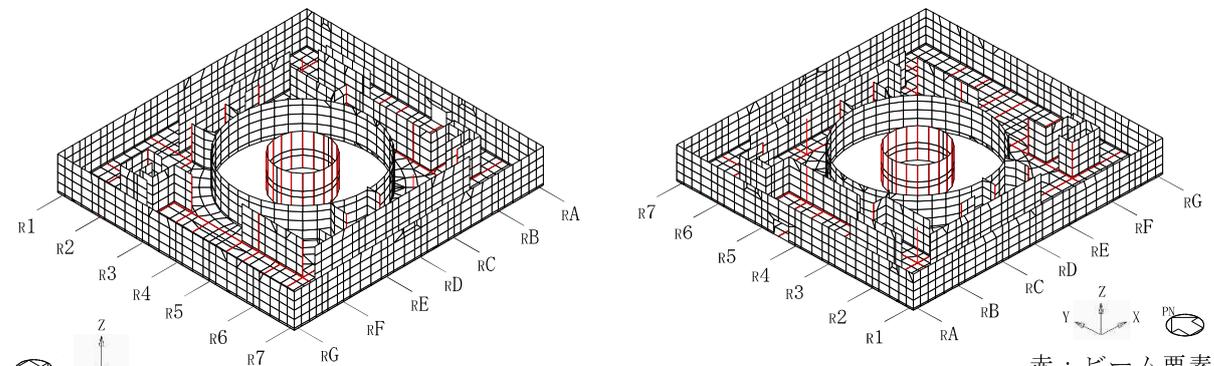
(f) T. M. S. L. 18.1m ~ T. M. S. L. 23.5m



赤：ビーム要素

赤：ビーム要素

(g) T. M. S. L. 12.3m ~ T. M. S. L. 18.1m



赤：ビーム要素

赤：ビーム要素

(h) T. M. S. L. 4.8m ~ T. M. S. L. 12.3m

図 2-2 各階のモデル図 (2/3)

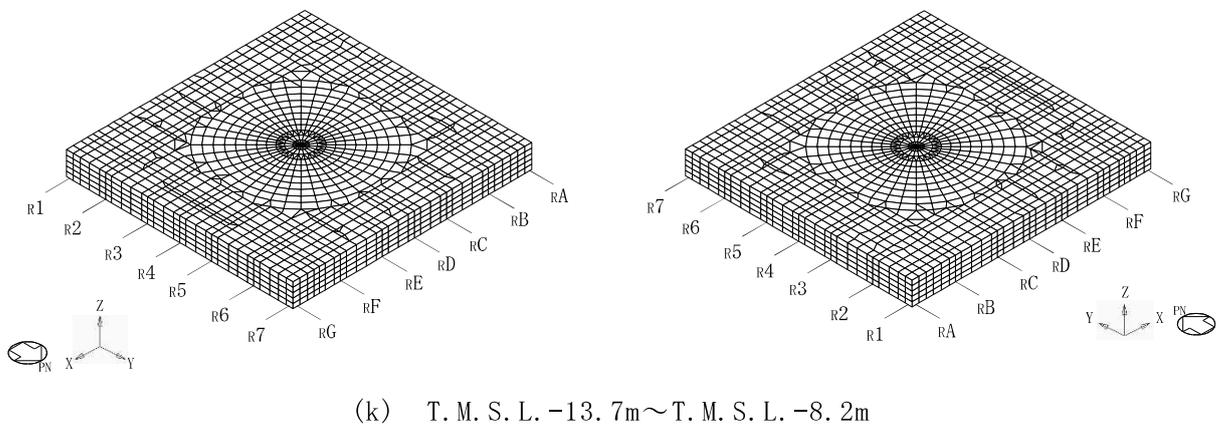
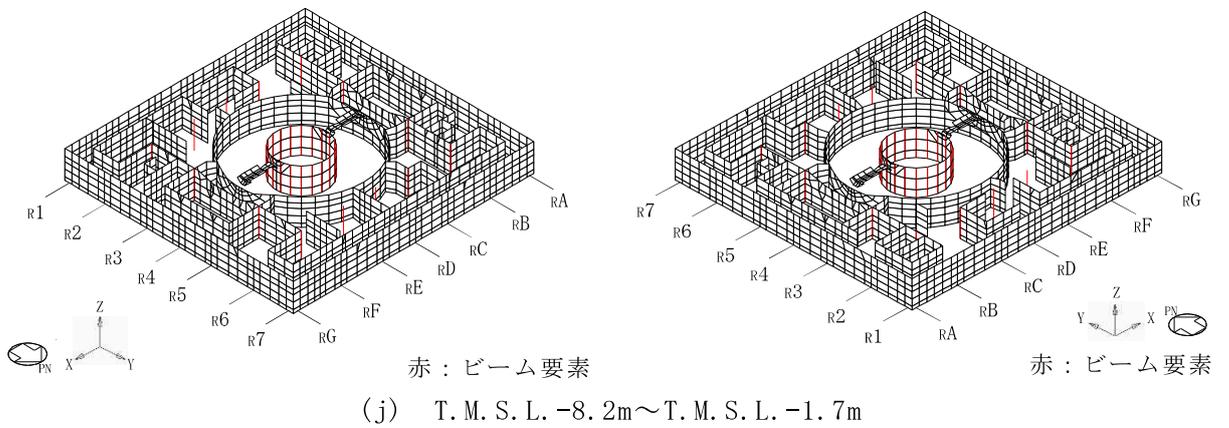
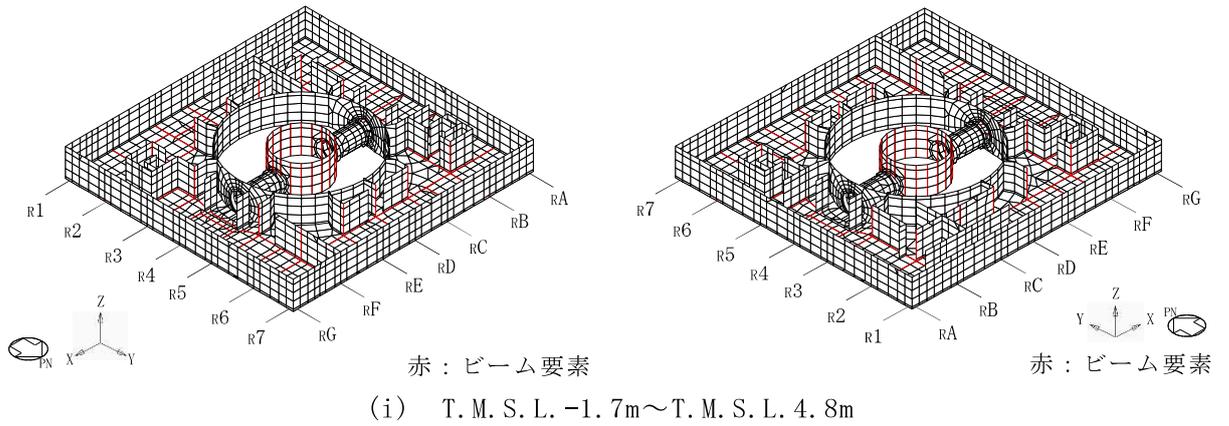


図 2-2 各階のモデル図 (3/3)

表 2-1 使用材料の物性値

部位	使用材料	ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 G (N/mm <sup>2</sup> )	減衰定数 h (%)
建屋部	コンクリート*： $\sigma_c = 43.1 \text{ N/mm}^2$ ( $\sigma_c = 440 \text{ kgf/cm}^2$ ) 鉄筋：SD35 (SD345 相当)	$2.88 \times 10^4$	$1.20 \times 10^4$	5
基礎スラブ	コンクリート*： $\sigma_c = 39.2 \text{ N/mm}^2$ ( $\sigma_c = 400 \text{ kgf/cm}^2$ ) 鉄筋：SD35 (SD345 相当)	$2.79 \times 10^4$	$1.16 \times 10^4$	5
屋根トラス部	鉄骨：SS41 (SS400 相当)	$2.05 \times 10^5$	$0.79 \times 10^5$	2
	鉄骨：SM50A (SM490A 相当)	$2.05 \times 10^5$	$0.79 \times 10^5$	2

注記\*：実強度に基づくコンクリート強度を示す。

### 2.1.2 荷重

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

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

### 2.1.3 建屋－地盤の相互作用

建屋－地盤の相互作用は，VI-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」における質点系モデルの Sd-1 及び Sd-2 での基礎底面地盤ばね及び側面地盤ばねと整合するよう，地盤をばね要素でそれぞれモデル化することで考慮する。

基礎底面地盤ばねについては，質点系モデルで考慮したスウェイ，ロッキング及び鉛直ばねの値を基に，3次元 FEM モデルの基礎底面の各節点位置に要素面積に応じて離散化する。ただし，鉛直ばねのうち，水平方向加振用は，基礎底面回転ばねを基に設定する。詳細な離散化方法を以下に示す。

地盤ばね成分が底面・並進及び底面・鉛直の場合は，各方向の地盤ばね定数を基礎底面積で除した地盤反力係数に対し，各節点の支配面積を乗じ，各節点に離散化する。また，地盤ばね成分が底面・回転の場合（水平方向加振時のみ考慮），各方向の地盤ばね定数を基礎底面の断面二次モーメントで除した鉛直次元の地盤反力係数に対し，各節点の支配面積を乗じ，各節点に離散化する。

側面の地盤ばねについては，質点系モデルで考慮している側面水平ばねの値を基に，各質点レベルに対応する各節点位置に要素面積に応じて離散化する。なお，鉛直方向加振時では質点系モデルと同様に側面ばねを考慮しないものとする。詳細な離散化方法を以下に示す。

地盤ばね成分が側面・並進（水平方向加振時のみ考慮）の場合，各節点における支配高さは全周にわたり同一とし，各方向の地盤ばね定数を全周長さ（支配長さの総和）で除した地盤反力係数に対し，各節点の支配長さを乗じ，各節点に離散化する。また，地盤ばね成分が側面・回転の場合（水平方向加振時のみ考慮），各方向の地盤ばね定数を壁側面の断面二次モーメントで除した地盤反力係数に対し，各節点の支配長さを乗じることで，各節点に離散化する。

なお，減衰係数は地盤ばね定数と同様に分配するものとする。

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

表 2-2 地盤ばね定数と減衰係数（底面・並進）

地震動	NS 方向		EW 方向	
	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
Sd-1	$7.70 \times 10^7$	$2.92 \times 10^6$	$7.66 \times 10^7$	$2.89 \times 10^6$
Sd-2	$7.76 \times 10^7$	$2.93 \times 10^6$	$7.72 \times 10^7$	$2.90 \times 10^6$

表 2-3 地盤ばね定数と減衰係数

(a) 底面・回転

地震動		回転方向	
		ばね定数 (kN・m/rad)	減衰係数 (kN・m・s/rad)
Sd-1	NS 方向加振時	$7.50 \times 10^{10}$	$6.22 \times 10^8$
	EW 方向加振時	$8.08 \times 10^{10}$	$7.25 \times 10^8$
Sd-2	NS 方向加振時	$7.56 \times 10^{10}$	$6.23 \times 10^8$
	EW 方向加振時	$8.14 \times 10^{10}$	$7.30 \times 10^8$

注：底面回転ばねについては、鉛直ばねに置換してモデル化する。

(b) 底面・鉛直

地震動		鉛直方向	
		ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
Sd-1	鉛直方向加振時	$1.27 \times 10^8$	$6.70 \times 10^6$
Sd-2	鉛直方向加振時	$1.28 \times 10^8$	$6.73 \times 10^6$

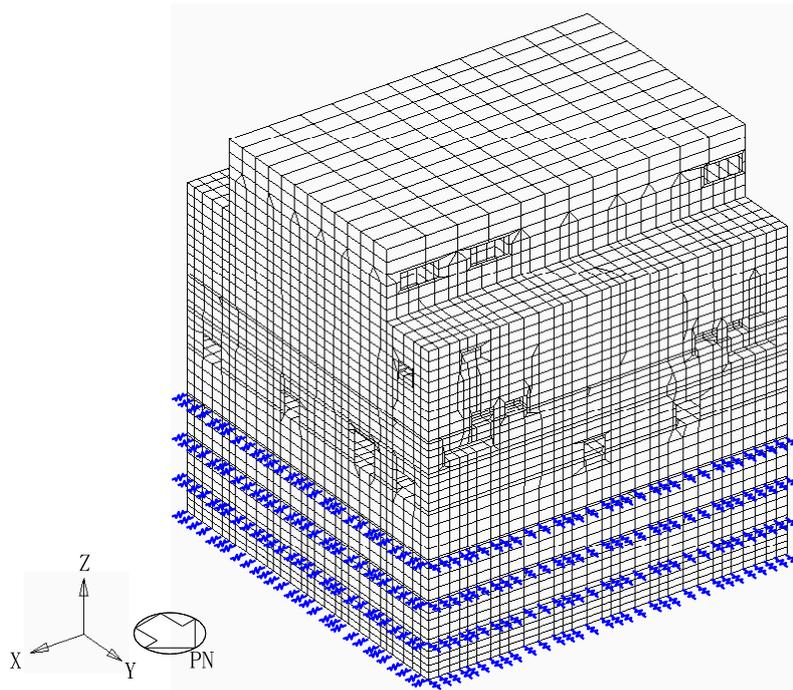
表 2-4 地盤ばね定数と減衰係数（側面・並進）

地震動	T. M. S. L. (m)	NS 方向		EW 方向	
		ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
Sd-1	4.8	$1.34 \times 10^6$	$4.69 \times 10^5$	$1.34 \times 10^6$	$4.70 \times 10^5$
	-1.7	$3.55 \times 10^6$	$1.24 \times 10^6$	$3.55 \times 10^6$	$1.25 \times 10^6$
	-8.2	$9.11 \times 10^6$	$1.79 \times 10^6$	$9.11 \times 10^6$	$1.79 \times 10^6$
	-13.7	$4.78 \times 10^6$	$8.86 \times 10^5$	$4.78 \times 10^6$	$8.85 \times 10^5$
Sd-2	4.8	$1.29 \times 10^6$	$4.61 \times 10^5$	$1.29 \times 10^6$	$4.62 \times 10^5$
	-1.7	$3.42 \times 10^6$	$1.22 \times 10^6$	$3.42 \times 10^6$	$1.23 \times 10^6$
	-8.2	$9.08 \times 10^6$	$1.79 \times 10^6$	$9.08 \times 10^6$	$1.79 \times 10^6$
	-13.7	$4.78 \times 10^6$	$8.86 \times 10^5$	$4.78 \times 10^6$	$8.85 \times 10^5$

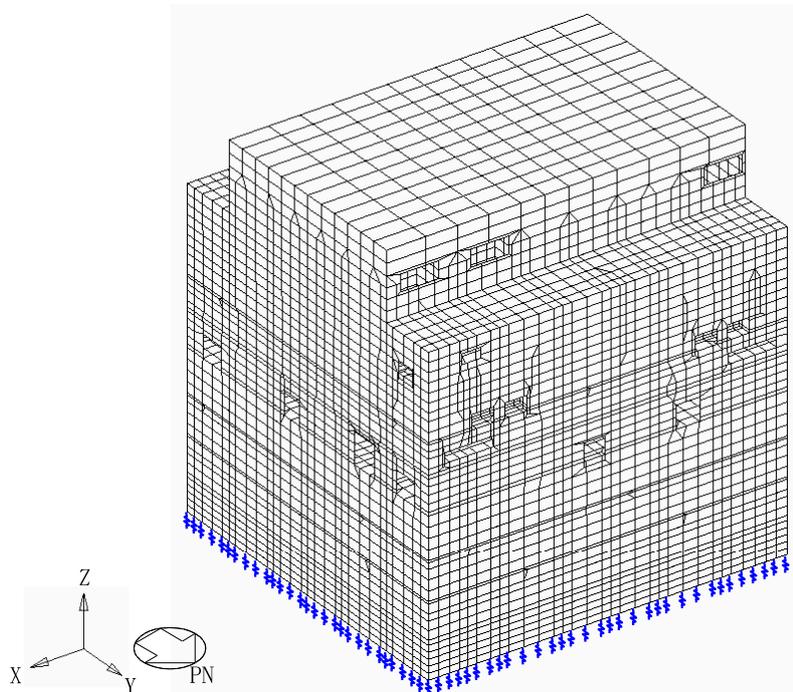
表 2-5 地盤ばね定数と減衰係数 (側面・回転)

地震動	T. M. S. L. (m)	NS 方向		EW 方向	
		ばね定数 (kN・m/rad)	減衰係数 (kN・m・s/rad)	ばね定数 (kN・m/rad)	減衰係数 (kN・m・s/rad)
Sd-1	4.8	$1.04 \times 10^9$	$1.16 \times 10^8$	$1.04 \times 10^9$	$1.17 \times 10^8$
	-1.7	$2.76 \times 10^9$	$3.08 \times 10^8$	$2.76 \times 10^9$	$3.09 \times 10^8$
	-8.2	$7.17 \times 10^9$	$4.12 \times 10^8$	$7.17 \times 10^9$	$4.14 \times 10^8$
	-13.7	$3.74 \times 10^9$	$2.01 \times 10^8$	$3.74 \times 10^9$	$2.03 \times 10^8$
Sd-2	4.8	$1.00 \times 10^9$	$1.14 \times 10^8$	$1.00 \times 10^9$	$1.15 \times 10^8$
	-1.7	$2.66 \times 10^9$	$3.04 \times 10^8$	$2.66 \times 10^9$	$3.05 \times 10^8$
	-8.2	$7.16 \times 10^9$	$4.11 \times 10^8$	$7.16 \times 10^9$	$4.14 \times 10^8$
	-13.7	$3.74 \times 10^9$	$2.01 \times 10^8$	$3.74 \times 10^9$	$2.03 \times 10^8$

注：側面回転ばねについては、鉛直ばねに置換してモデル化する。



青線：離散化した地盤ばね（NS・EW で異なるばね値，底面及び側面に対して考慮）  
 (a) 水平方向解析時



青線：離散化した地盤ばね（底面のみに考慮）  
 (b) 鉛直方向解析時

図 2-3 地盤ばねの設置図

## 2.2 固有値解析

建屋模擬モデル（3次元 FEM，床柔及び相互作用考慮）及び質点系対応モデル（3次元 FEM，床剛及び相互作用考慮）の2つの解析モデルケースについて、Sd-1 及び Sd-2 に対する固有値解析を実施した。

各モデルの建屋—地盤連成の1次モードにおける固有振動数を表 2-6 に示す。また、各モデルのモード図を表 2-7 に示す。

固有値解析の結果について、質点系モデルと3次元 FEM モデルである建屋模擬モデル及び質点系対応モデルは、いずれの方向についてもおおむね整合している。

3次元 FEM モデルの建屋模擬モデルと質点系対応モデルとでは、モデル設定において、床を柔とするか剛とするかに差異がある。両モデルの固有値解析結果を比較すると、床を剛とした質点系対応モデルの方が建屋模擬モデルよりも固有振動数が大きくなる傾向である。

床剛とした3次元 FEM モデルである質点系対応モデルと質点系モデルとでは、同程度の振動数において質点系モデルの固有モードに類似したモードが質点系対応モデルのモードに見られることから良く対応している。

床柔とした3次元 FEM モデルである建屋模擬モデルと質点系モデルとでは、水平方向の固有振動数は整合的であり、鉛直方向の固有振動数は質点系モデルの方が大きくなる。鉛直方向における違いは、建屋模擬モデルにおいて屋根スラブの剛性を保守的に考慮していないことによる影響と考えられる。

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

表 2-6 固有値解析結果

(a) Sd-1

方向	振動数 (Hz)		
	3次元 FEM		質点系モデル
	建屋模擬モデル	質点系対応モデル	
NS	2.30	2.40	2.34
EW	2.39	2.46	2.39
鉛直	3.81	3.89	3.96

(b) Sd-2

方向	振動数 (Hz)		
	3次元 FEM		質点系モデル
	建屋模擬モデル	質点系対応モデル	
NS	2.30	2.40	2.34
EW	2.39	2.46	2.40
鉛直	3.82	3.90	3.97

表 2-7 質点系モデル及び 3 次元 FEM モデルのモード比較 (1/4)

(a) Sd-1 水平方向

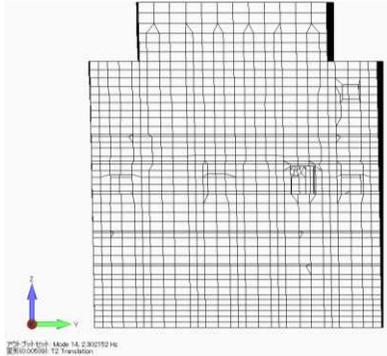
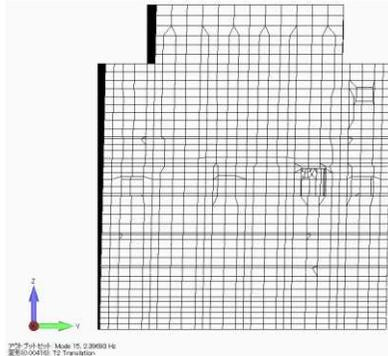
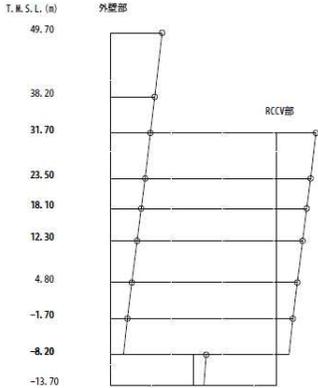
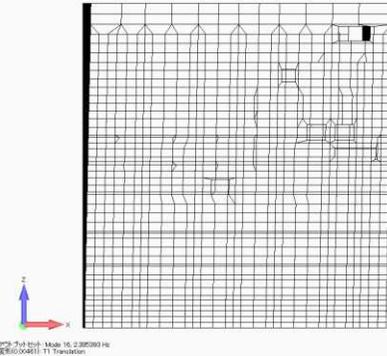
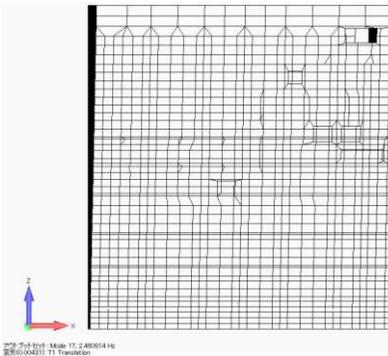
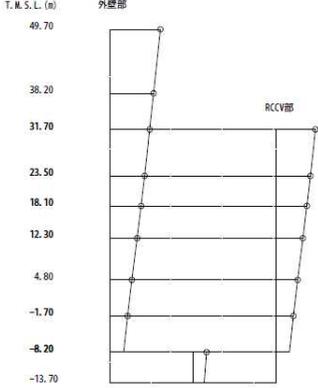
方向	3次元 FEM		質点系モデル
	建屋模擬モデル	質点系対応モデル	
NS	 <p>2.30 Hz</p>	 <p>2.40 Hz</p>	 <p>2.34 Hz</p>
EW	 <p>2.39 Hz</p>	 <p>2.46 Hz</p>	 <p>2.39 Hz</p>

表 2-7 質点系モデル及び 3 次元 FEM モデルのモード比較 (2/4)

(b) Sd-1 鉛直方向

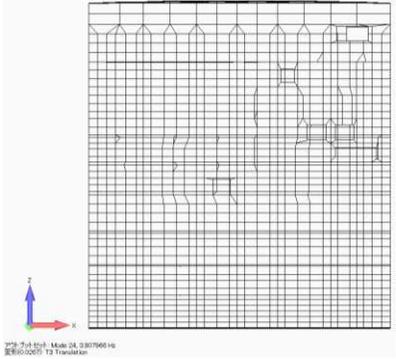
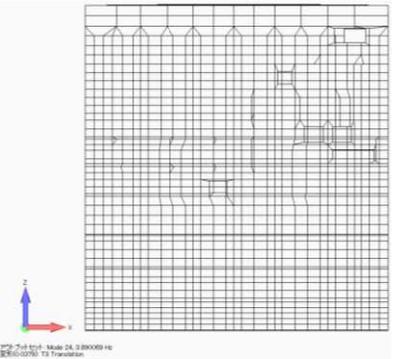
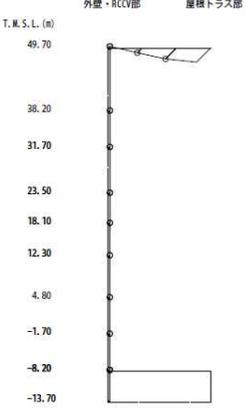
方向	3次元 FEM		質点系モデル
	建屋模擬モデル	質点系対応モデル	
鉛直	 <p>3.81 Hz</p>	 <p>3.89 Hz</p>	 <p>3.96 Hz</p>

表 2-7 質点系モデル及び 3 次元 FEM モデルのモード比較 (3/4)

(c) Sd-2 水平方向

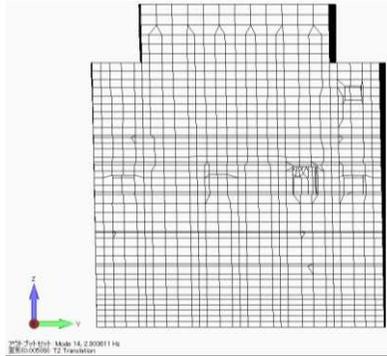
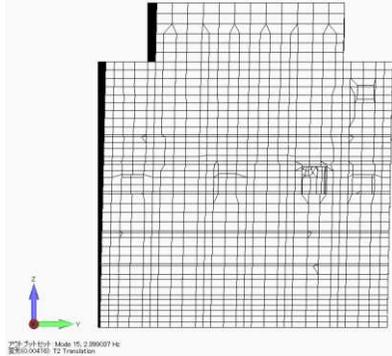
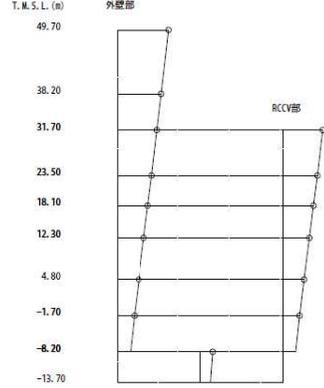
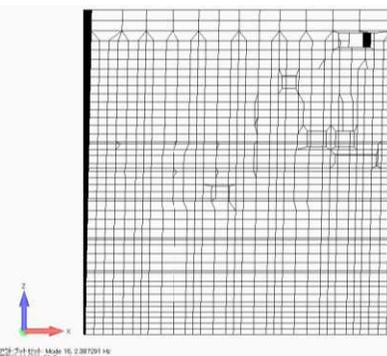
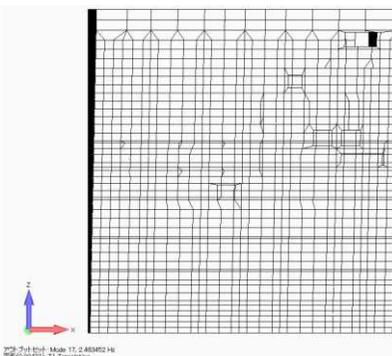
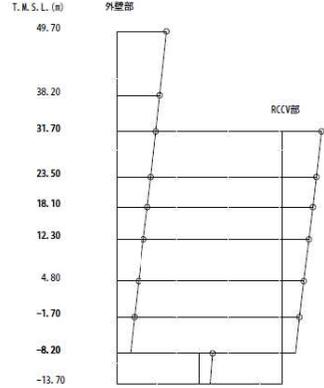
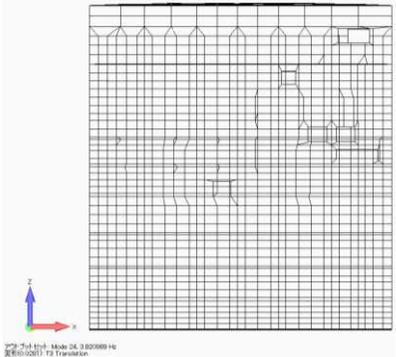
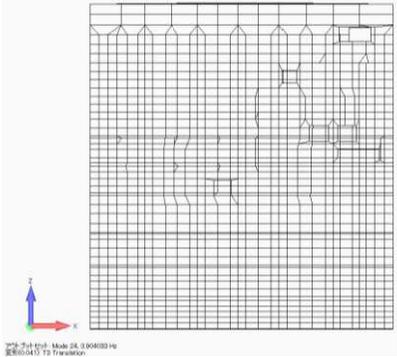
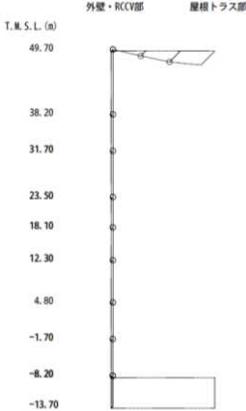
方向	3次元 FEM		質点系モデル
	建屋模擬モデル	質点系対応モデル	
NS	 <p>2.30 Hz</p>	 <p>2.40 Hz</p>	 <p>2.34 Hz</p>
EW	 <p>2.39 Hz</p>	 <p>2.46 Hz</p>	 <p>2.40 Hz</p>

表 2-7 質点系モデル及び 3 次元 FEM モデルのモード比較 (4/4)

(d) Sd-2 鉛直方向

方向	3次元 FEM		質点系モデル
	建屋模擬モデル	質点系対応モデル	
鉛直	 <p>3.82 Hz</p>	 <p>3.90 Hz</p>	 <p>3.97 Hz</p>

## 2.3 観測記録を用いた検討

### 2.3.1 観測記録を用いた検討の概要

2007年新潟県中越沖地震に対して、3次元FEMモデルを用いたシミュレーション解析を実施する。解析は、建屋模擬モデル（3次元FEM）に対して中越沖地震発生時の実状を考慮する。

シミュレーション解析における地震応答解析の概略図を図2-4に示す。

シミュレーション解析は、地震時に観測した基礎スラブ上における水平方向及び鉛直方向の地震観測記録を用いた周波数応答解析により行う。

基礎スラブ上における観測記録を地盤の伝達関数を用いて解放基盤表面に下ろし、基礎スラブ上の応答が観測記録と整合するまで一次元波動論による等価線形地震応答解析を繰り返し、シミュレーション解析用の収束地盤物性を作成する。作成した収束地盤物性に基づく建屋基礎底面レベル及び側面地盤ばねレベルの地盤応答を、地盤ばねを介して入力し、建屋の伝達関数を求める。

以上の手順で求めた基礎スラブ上からの建屋各部の伝達関数と原子炉建屋の基礎スラブ上での観測地震波を用いて建屋各部位の応答を算定する。

本検討においては、地震計を設置している T. M. S. L. 23.5m の位置での応答解析結果と観測記録とを比較し、傾向を確認する。

観測記録を用いた検討では、表2-8～表2-12に示す使用材料の物性値及び地盤ばねの物性値を用いる。

解析に用いる地震の諸元を図2-5に、地震計位置を図2-6に示す。また、原子炉建屋の基礎上で得られた観測記録を図2-7に示す。

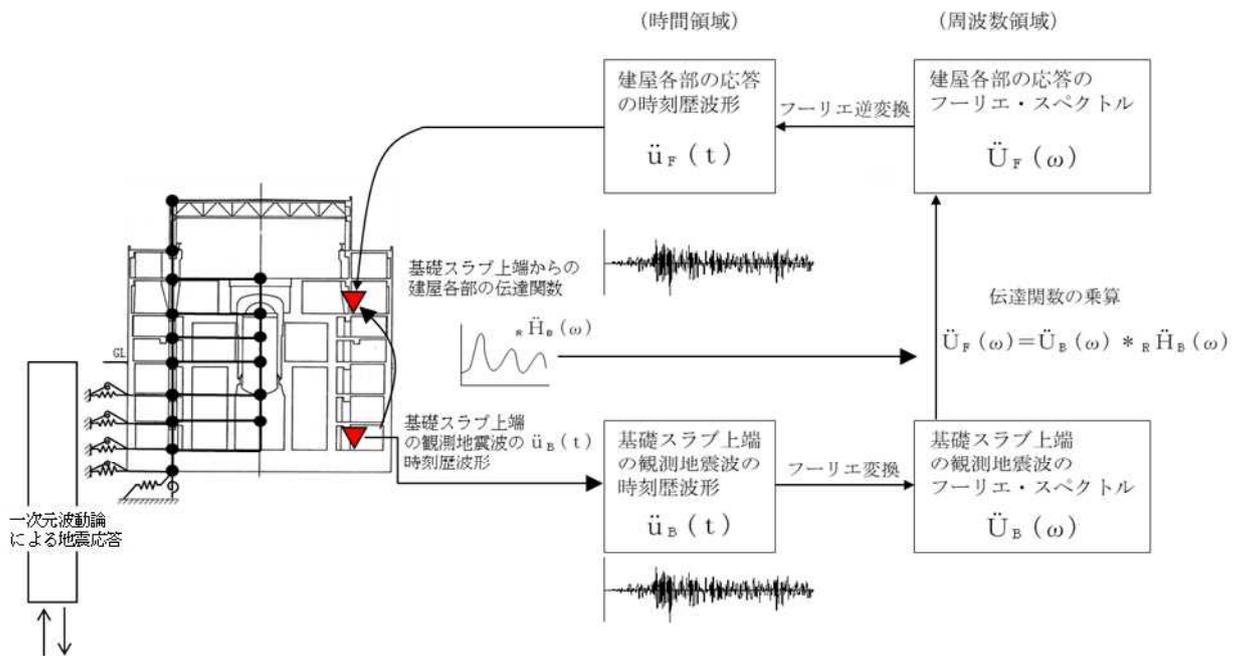


図 2-4 シミュレーション解析における地震応答解析の概略図

表 2-8 使用材料の物性値

部位	使用材料	ヤング係数 E (N/mm <sup>2</sup> )	せん断弾性係数 G (N/mm <sup>2</sup> )	減衰定数 h (%)
建屋部	コンクリート* : $\sigma_c = 43.1 \text{ N/mm}^2$ ( $\sigma_c = 440 \text{ kgf/cm}^2$ ) 鉄筋 : SD35 (SD345 相当)	$2.88 \times 10^4$	$1.20 \times 10^4$	5
基礎スラブ	コンクリート* : $\sigma_c = 39.2 \text{ N/mm}^2$ ( $\sigma_c = 400 \text{ kgf/cm}^2$ ) 鉄筋 : SD35 (SD345 相当)	$2.79 \times 10^4$	$1.16 \times 10^4$	5
屋根トラス部	鉄骨 : SS41 (SS400 相当)	$2.05 \times 10^5$	$0.79 \times 10^5$	2
	鉄骨 : SM50A (SM490A 相当)	$2.05 \times 10^5$	$0.79 \times 10^5$	2

注記\* : 実強度に基づくコンクリート強度を示す。

表 2-9 地盤ばね定数と減衰係数（底面・並進）

NS 方向		EW 方向	
ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
$7.48 \times 10^7$	$2.87 \times 10^6$	$7.44 \times 10^7$	$2.84 \times 10^6$

表 2-10 地盤ばね定数と減衰係数

(a) 底面・回転

	回転方向	
	ばね定数 (kN・m/rad)	減衰係数 (kN・m・s/rad)
NS 方向加振時	$7.32 \times 10^{10}$	$6.15 \times 10^8$
EW 方向加振時	$7.88 \times 10^{10}$	$7.21 \times 10^8$

注：底面回転ばねについては，鉛直ばねに置換してモデル化する。

(b) 底面・鉛直

	鉛直方向	
	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
鉛直方向加振時	$1.24 \times 10^8$	$6.61 \times 10^6$

表 2-11 地盤ばね定数と減衰係数（側面・並進）

T. M. S. L. (m)	NS 方向		EW 方向	
	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
4.8	$1.29 \times 10^6$	$4.60 \times 10^5$	$1.29 \times 10^6$	$4.62 \times 10^5$
-1.7	$3.42 \times 10^6$	$1.22 \times 10^6$	$3.42 \times 10^6$	$1.22 \times 10^6$
-8.2	$8.70 \times 10^6$	$1.75 \times 10^6$	$8.70 \times 10^6$	$1.75 \times 10^6$
-13.7	$4.56 \times 10^6$	$8.65 \times 10^5$	$4.56 \times 10^6$	$8.64 \times 10^5$

表 2-12 地盤ばね定数と減衰係数（側面・回転）

T. M. S. L. (m)	NS 方向		EW 方向	
	ばね定数 (kN・m/rad)	減衰係数 (kN・m・s/rad)	ばね定数 (kN・m/rad)	減衰係数 (kN・m・s/rad)
4.8	$1.00 \times 10^9$	$1.14 \times 10^8$	$1.00 \times 10^9$	$1.15 \times 10^8$
-1.7	$2.65 \times 10^9$	$3.03 \times 10^8$	$2.65 \times 10^9$	$3.04 \times 10^8$
-8.2	$6.85 \times 10^9$	$4.04 \times 10^8$	$6.85 \times 10^9$	$4.07 \times 10^8$
-13.7	$3.57 \times 10^9$	$1.97 \times 10^8$	$3.57 \times 10^9$	$1.99 \times 10^8$

注：側面回転ばねについては，鉛直ばねに置換してモデル化する。

地震名	新潟県中越沖地震
発生日時	2007年7月16日 10時13分頃*
マグニチュード	6.8*
震源深さ	17km*
震央距離	16km
震源距離	約23km

注記\*：気象庁発表を示す。

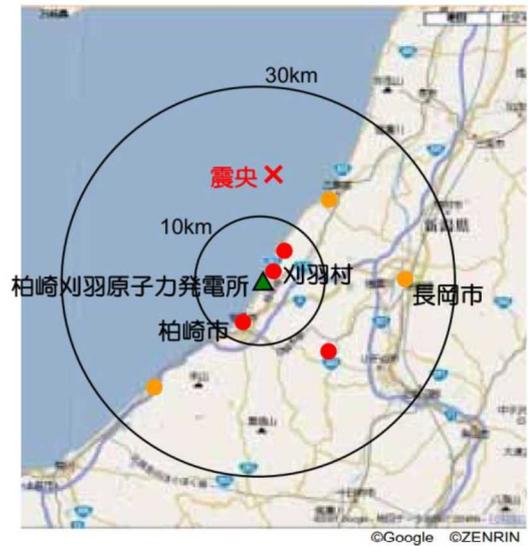


図 2-5 新潟県中越沖地震の震央位置

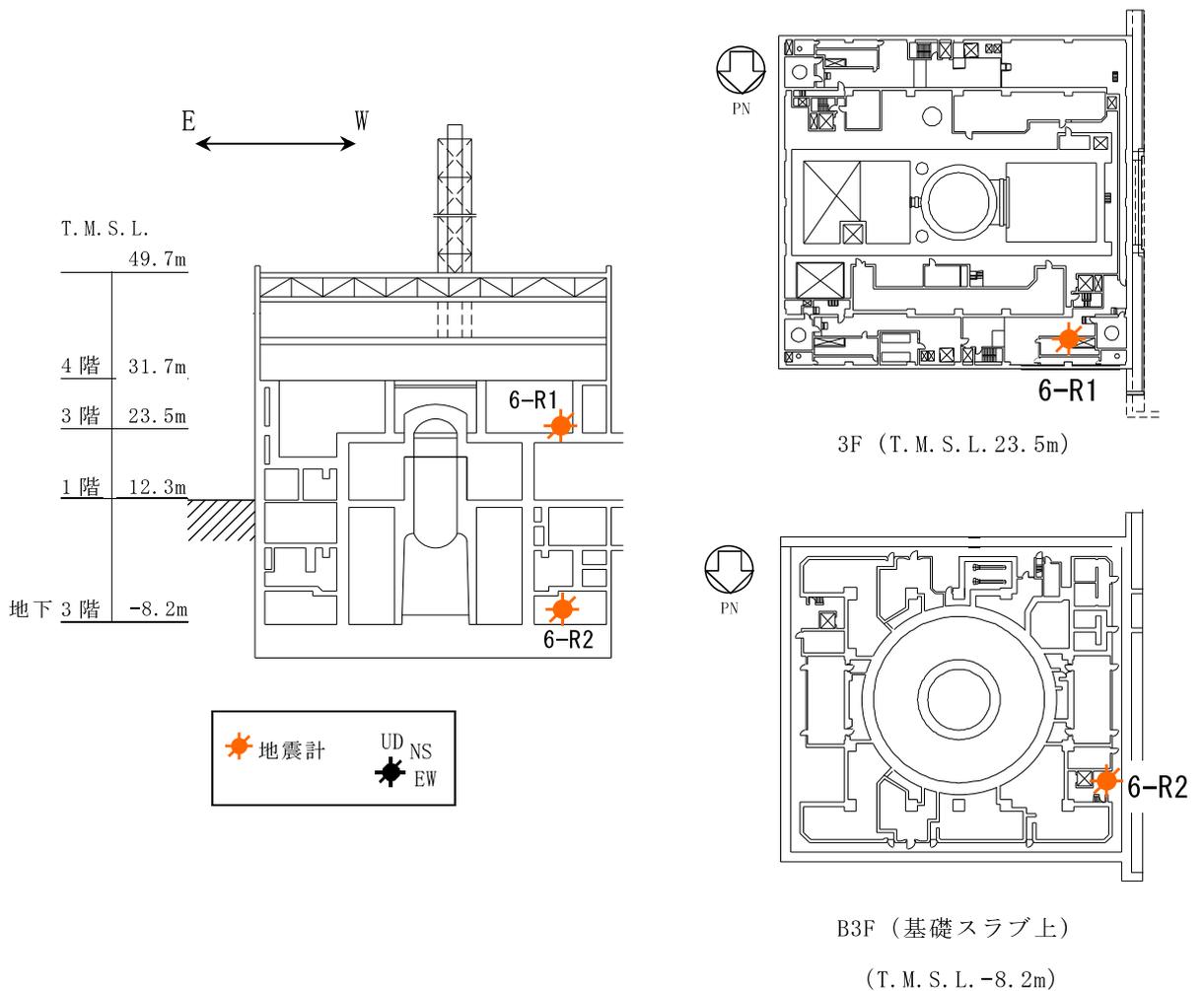
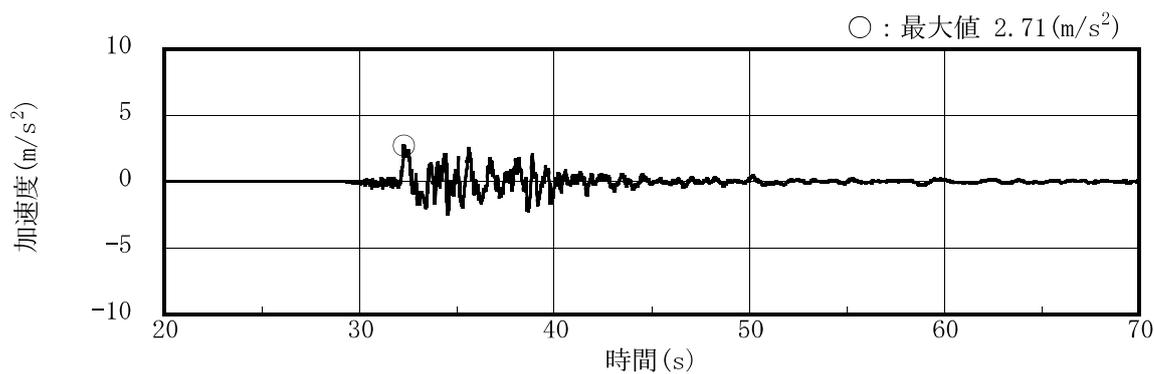
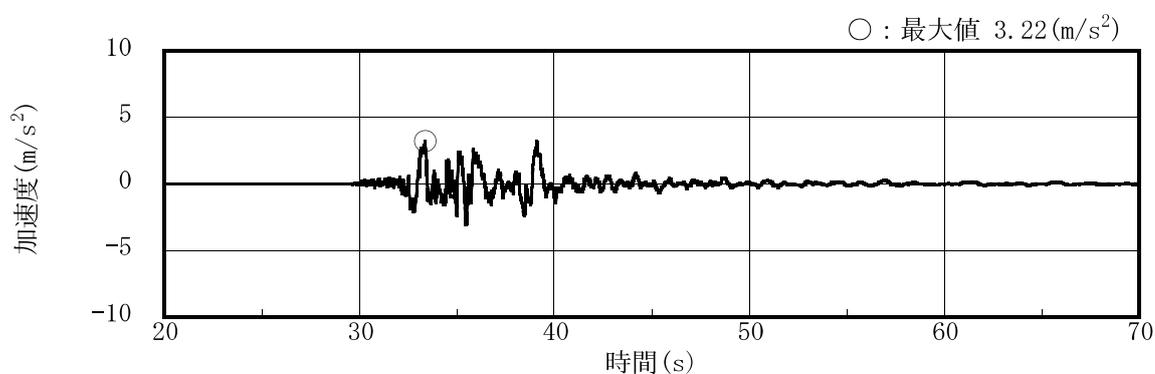


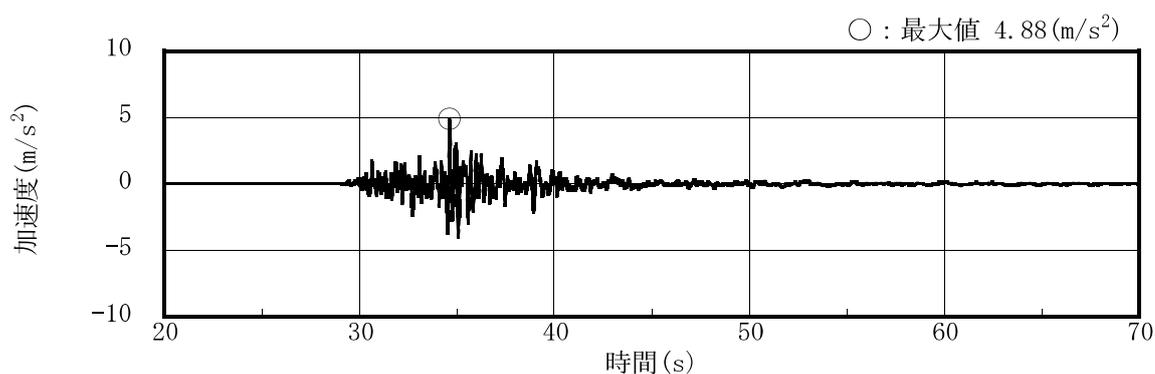
図 2-6 地震計位置



NS 方向



EW 方向



鉛直方向

図 2-7 原子炉建屋の基礎上 (T.M.S.L. -8.2m) の観測記録  
(2007 年新潟県中越沖地震)

### 2.3.2 観測記録による解析結果

2007年新潟県中越沖地震の観測記録を用いて3次元FEMモデルによる解析を実施する。

T.M.S.L.23.5mの地震計位置での観測記録及び解析結果の加速度応答スペクトルの比較を図2-8に示す。なお、観測記録と比較するための解析結果は、3方向同時入力による結果とし、地震計位置近傍の節点のものを用いる。

### 2.3.3 観測記録と解析結果の比較及び考察

観測記録と3次元FEMモデルによる解析結果を比較すると、やや3次元FEMモデルの解析結果が観測記録よりも大きくなる傾向にあるが、観測記録のスペクトル形状とおおむね対応している。

### 2.3.4 結論

以上から、3次元FEMモデルによる解析結果は、一部の周期帯に差異が認められるものの、観測記録とおおむね対応しており、スペクトル形状を再現できている。

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

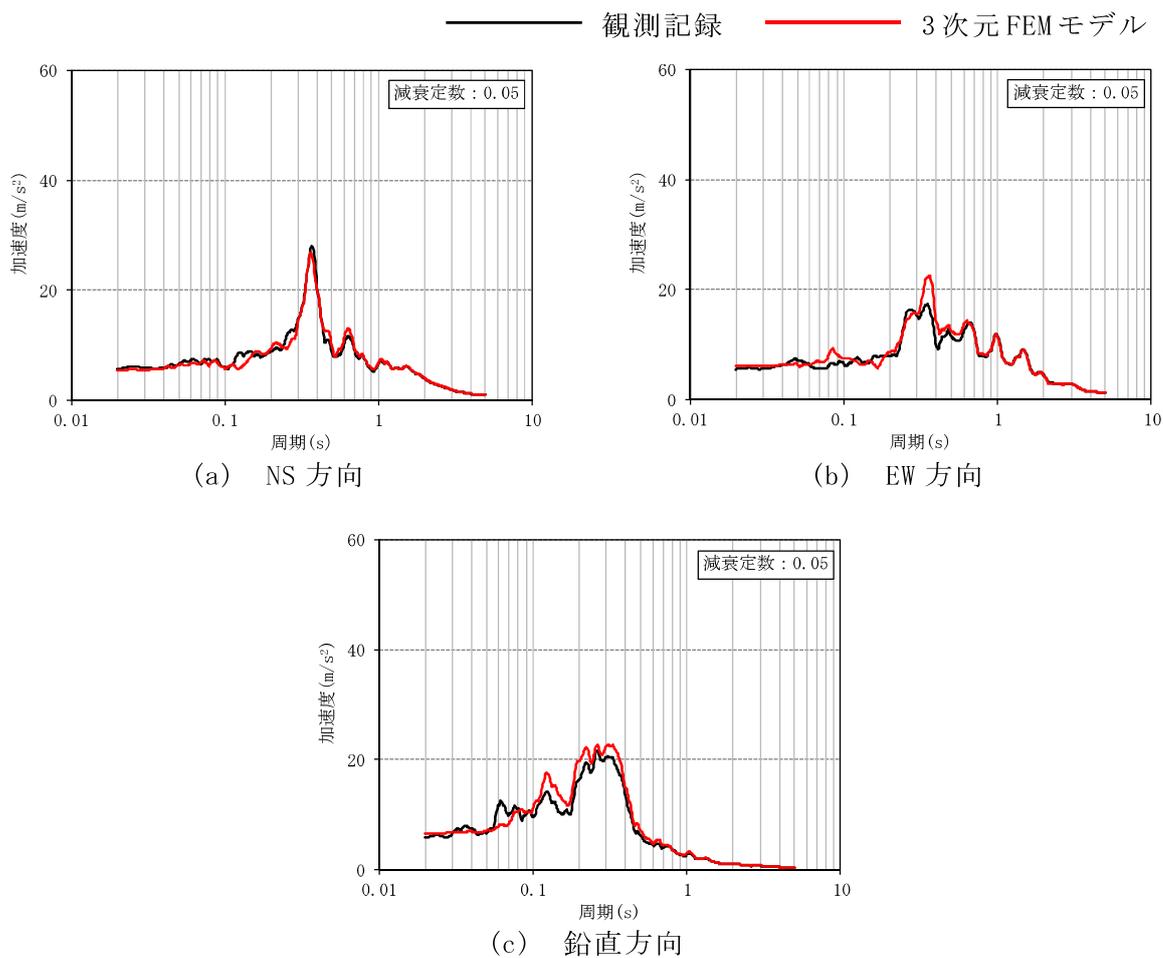


図 2-8 観測記録 (T. M. S. L. 23.5m 観測点: 6-R1) と解析結果の比較

### 3. 3次元 FEM モデルによる評価

#### 3.1 地震応答解析の概要

原子炉建屋の 3 次元的な応答性状を把握し、それらが建屋耐震性評価及び床応答へ及ぼす影響を検討するため、建屋模擬モデル（床柔及び相互作用考慮）及び質点系対応モデル（床剛及び相互作用考慮）の 2 つの 3 次元 FEM モデルを用いて、弾性設計用地震動 S d に対する地震応答解析を実施する。

3 次元 FEM モデルによる地震応答解析は弾性応答解析としていることから、地震動は弾性設計用地震動 S d とし、全周期帯の応答が大きく、耐震評価への影響も大きい Sd-1 及び断層モデルを用いた手法による地震動として NS 方向、EW 方向及び鉛直方向の方向性を持つ Sd-2 を用いる。（VI-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」参照）

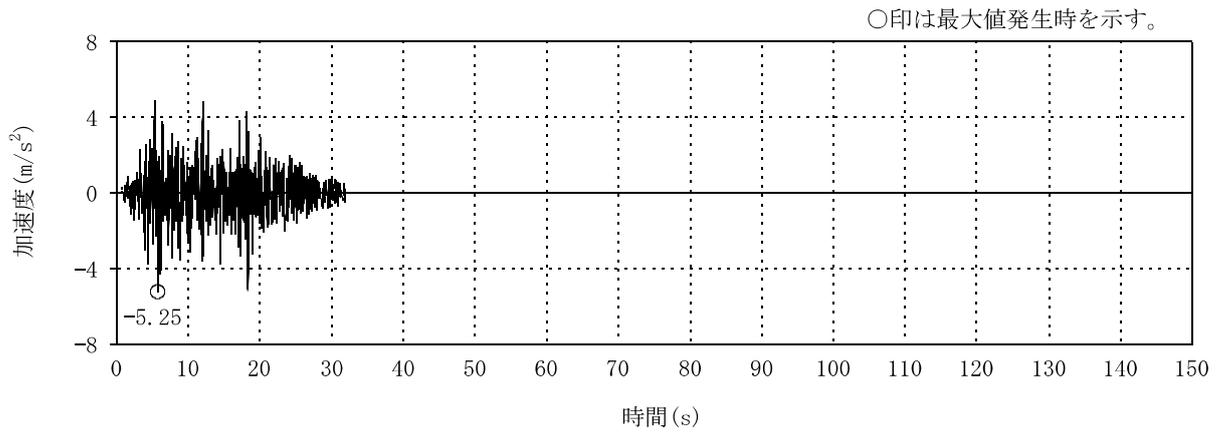
弾性設計用地震動 S d に対する建屋基礎底面及び側面地盤ばねレベルでの地盤の応答を、地盤ばねを介して入力し、3 次元的な応答性状の把握を行う。

入力地震動 Sd-1 及び Sd-2 を図 3-1 に示す。

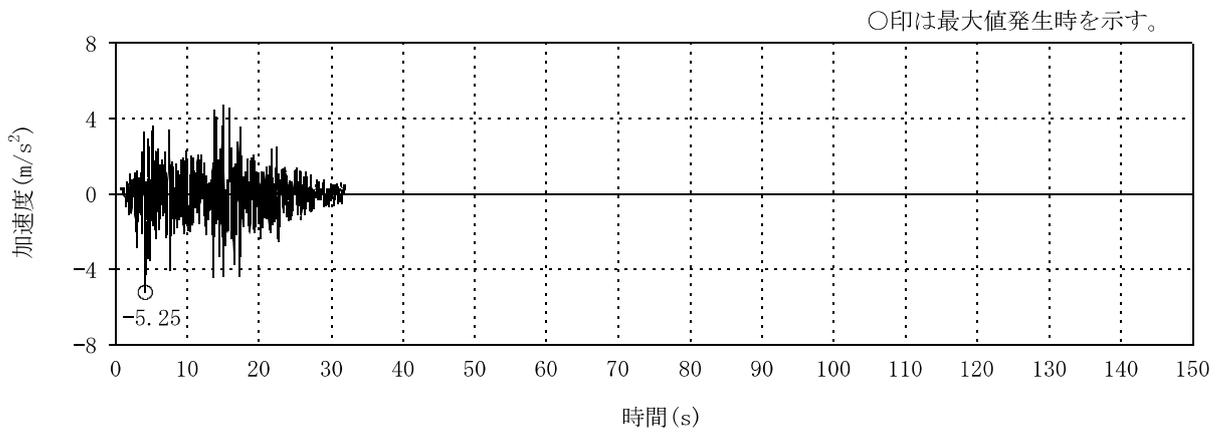
3 次元 FEM モデルによる地震応答解析は、NS 方向、EW 方向及び鉛直方向の各々に対して行う。また、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認として、NS 方向、EW 方向及び鉛直方向の 3 方向同時入力による応答評価も併せて実施する。

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

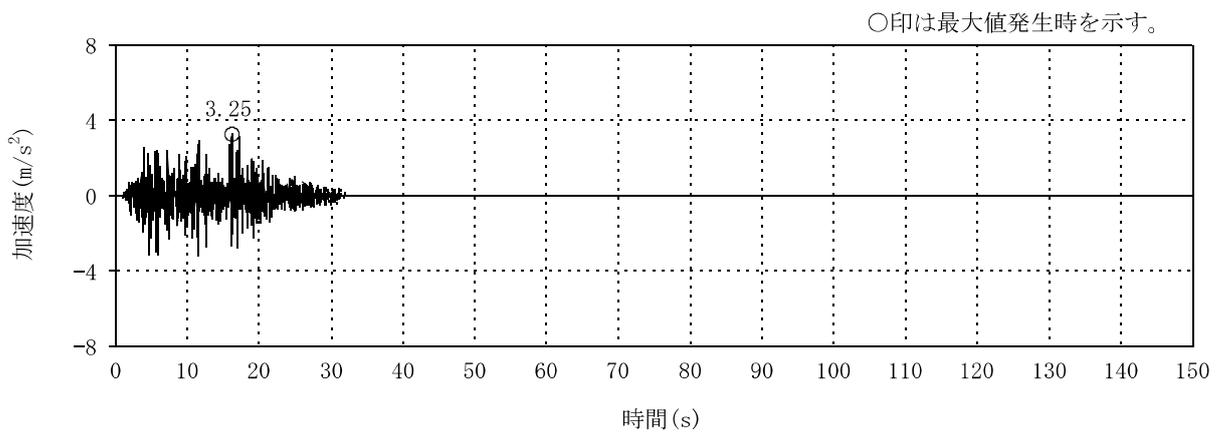
3 次元 FEM モデルの応答評価位置について、地震計設置階である B3F、3F（T.M.S.L. -8.2m 及び T.M.S.L. 23.5m）に加え、1F（T.M.S.L. 12.3m）及び 4F（燃料取替床、T.M.S.L. 31.7m）に対応する床において、対称性及び建屋形状を考慮し、RCCV 部は円筒壁近傍の 7 点、外壁部は 12 点を抽出した。



(a) NS 方向 (Sd-1H)



(b) EW 方向 (Sd-1p\*)

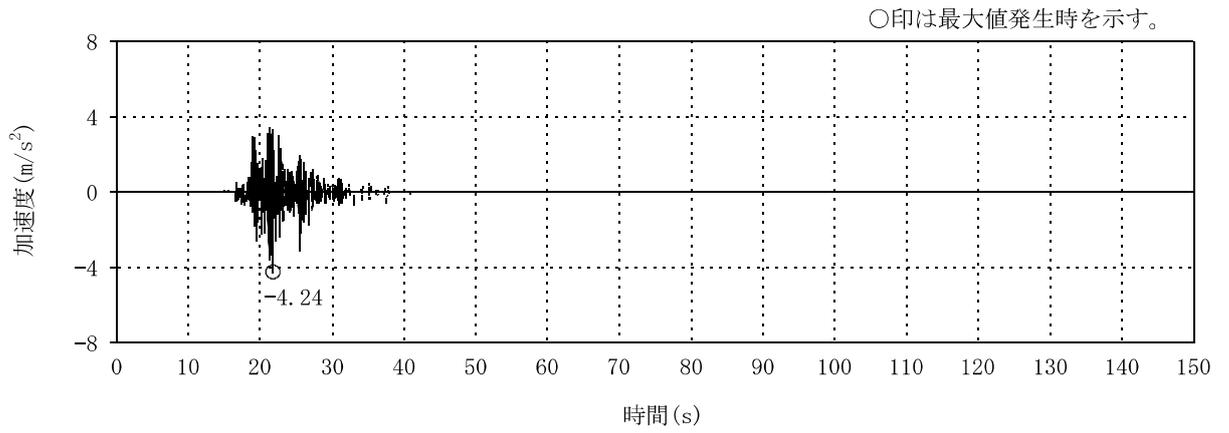


(c) 鉛直方向 (Sd-1V)

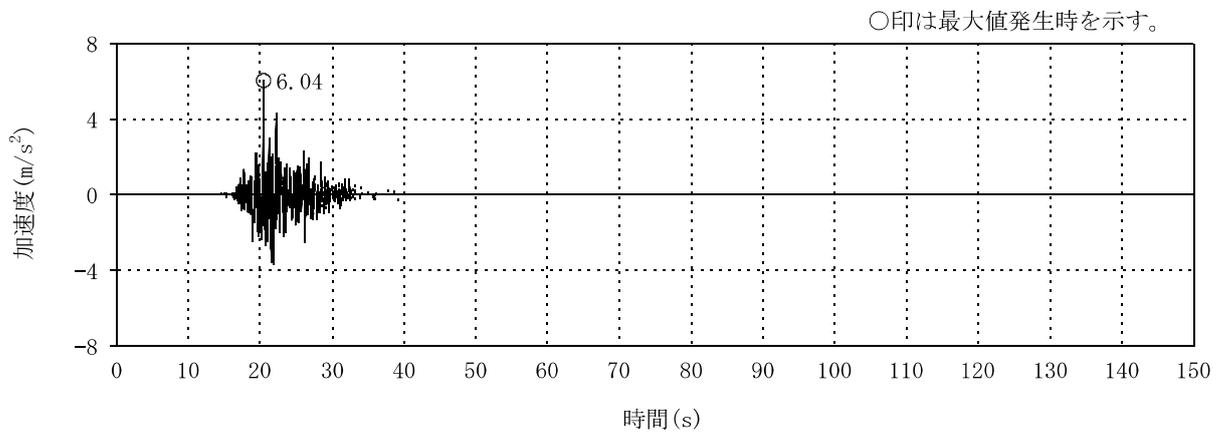
(1) 加速度波形 (Sd-1)

注記\* : 弾性設計用地震動 Sd-1 の水平成分 Sd-1H の設計用応答スペクトルに適合するが、Sd-1H とは位相特性が異なる模擬地震波。

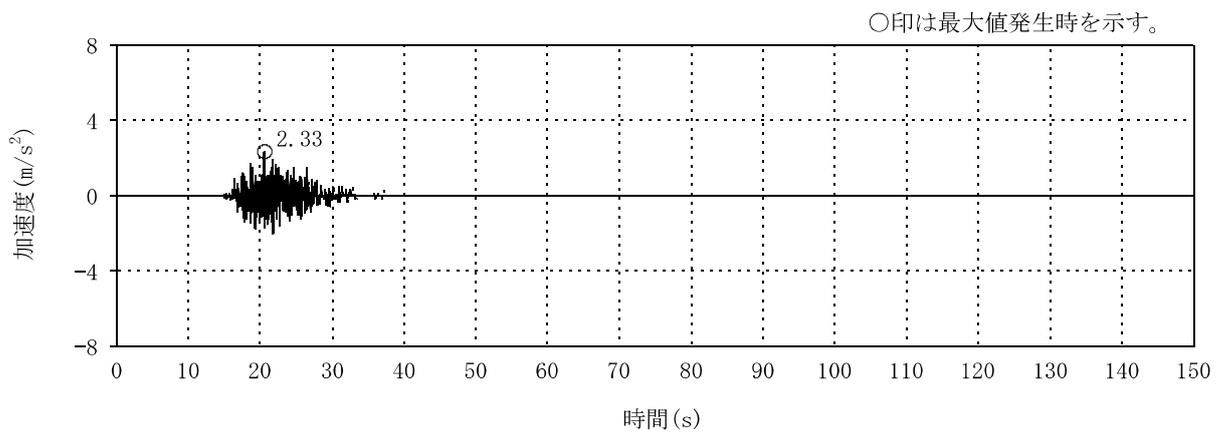
図 3-1 入力地震動 (1/3)



(a) NS 方向 (Sd-2NS)



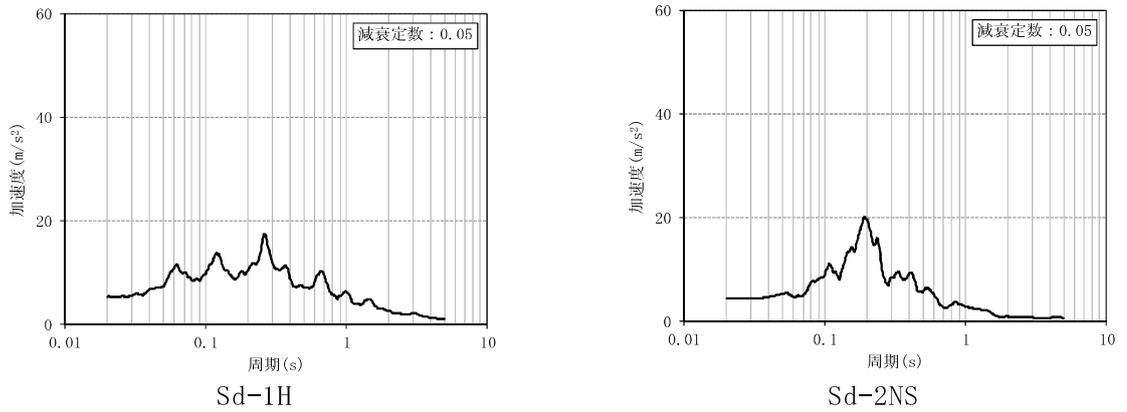
(b) EW 方向 (Sd-2EW)



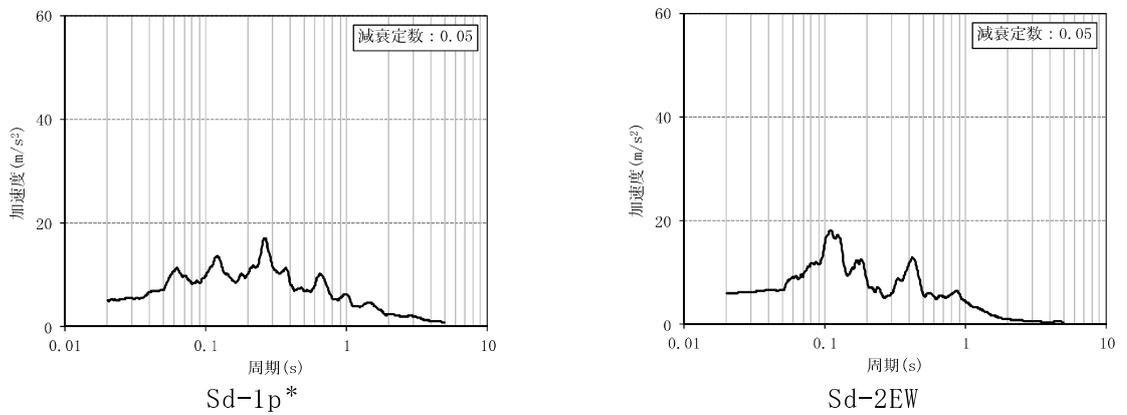
(c) 鉛直方向 (Sd-2UD)

(2) 加速度波形 (Sd-2)

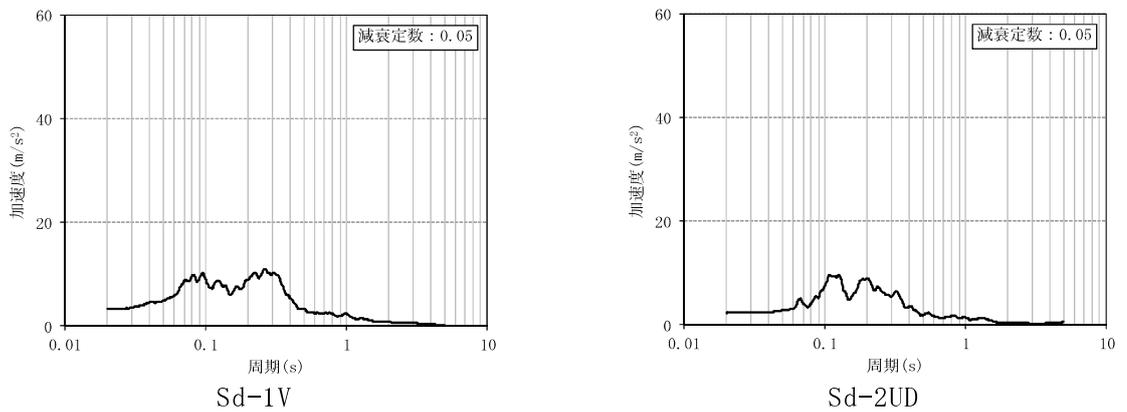
図 3-1 入力地震動 (2/3)



(a) NS 方向



(b) EW 方向

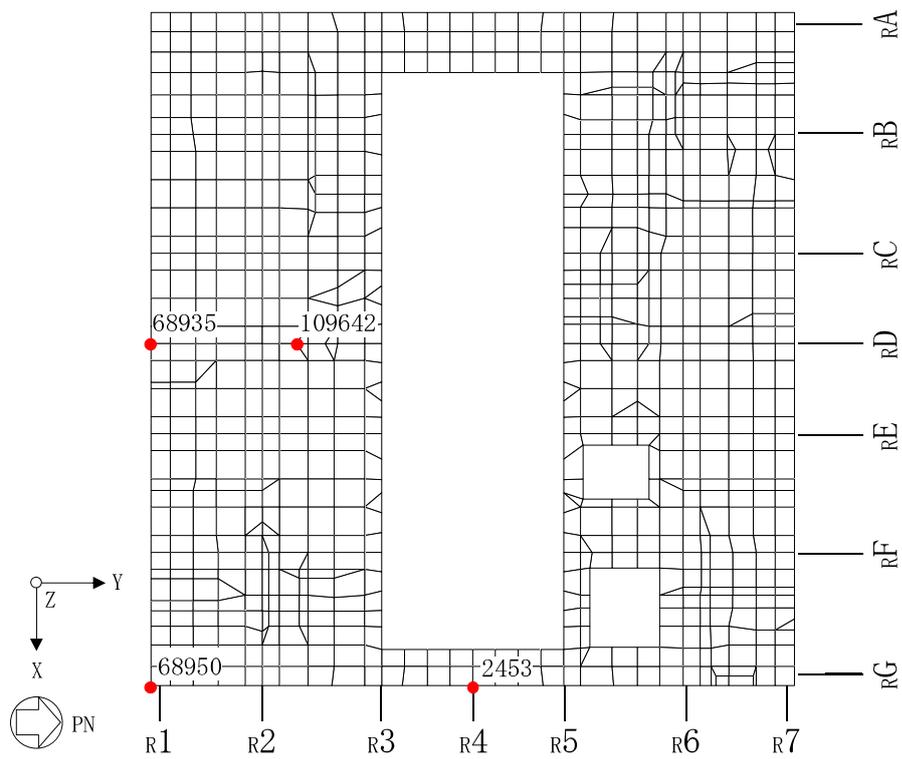


(c) 鉛直方向

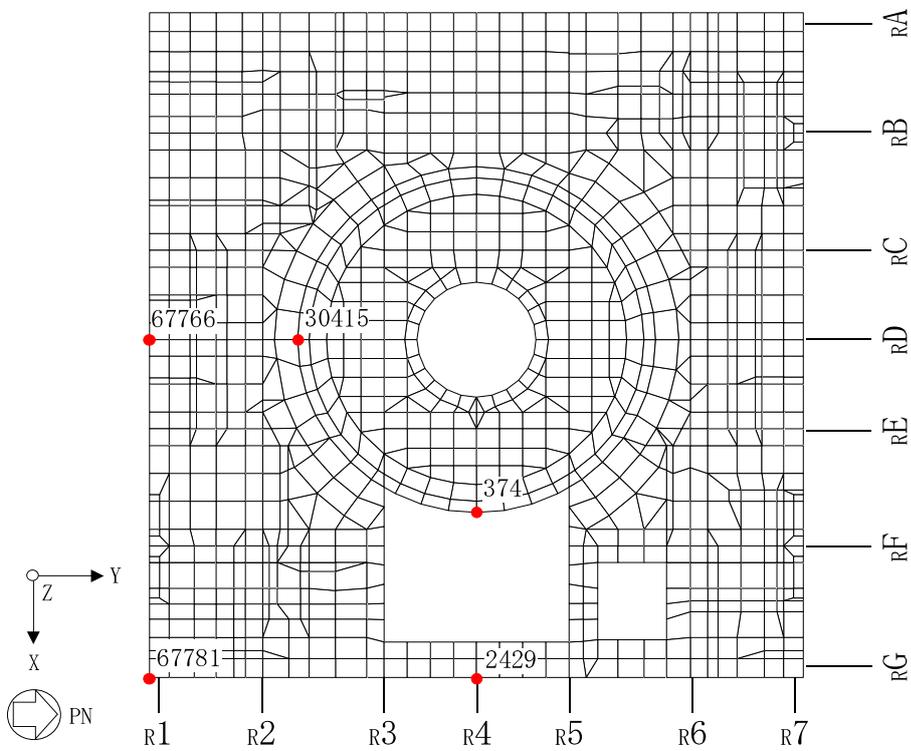
### (3) 加速度応答スペクトル

注記\*：弾性設計用地震動 Sd-1 の水平成分 Sd-1H の設計用応答スペクトルに適合するが、Sd-1H とは位相特性が異なる模擬地震波。

図 3-1 入力地震動 (3/3)

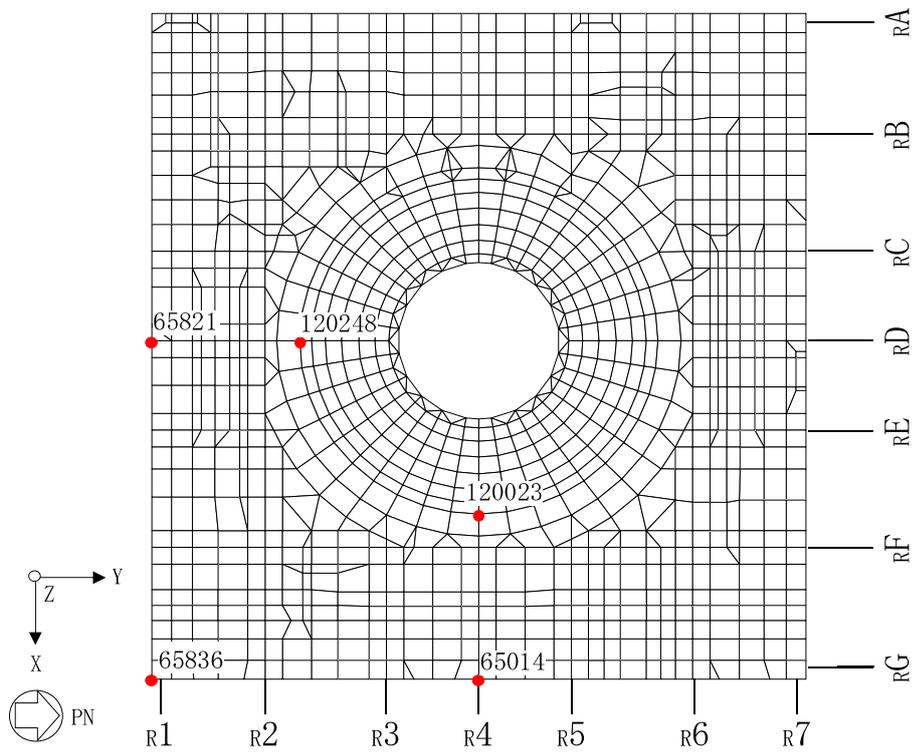


(a) 4F (T. M. S. L. 31.7m)

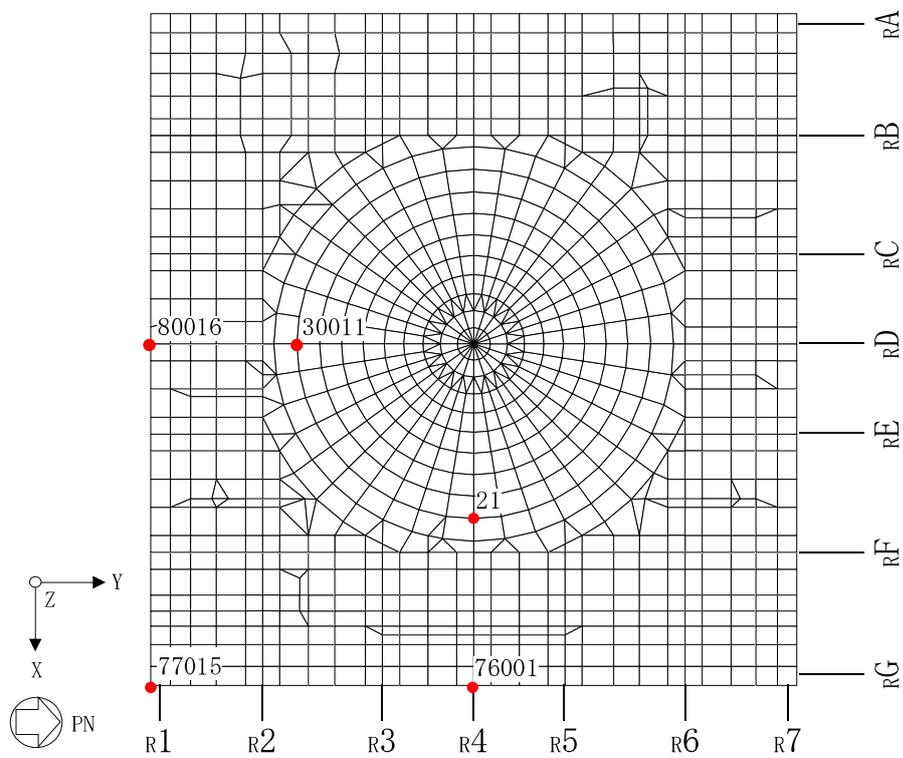


(b) 3F (T. M. S. L. 23.5m)

図 3-2 応答評価位置 (1/2)

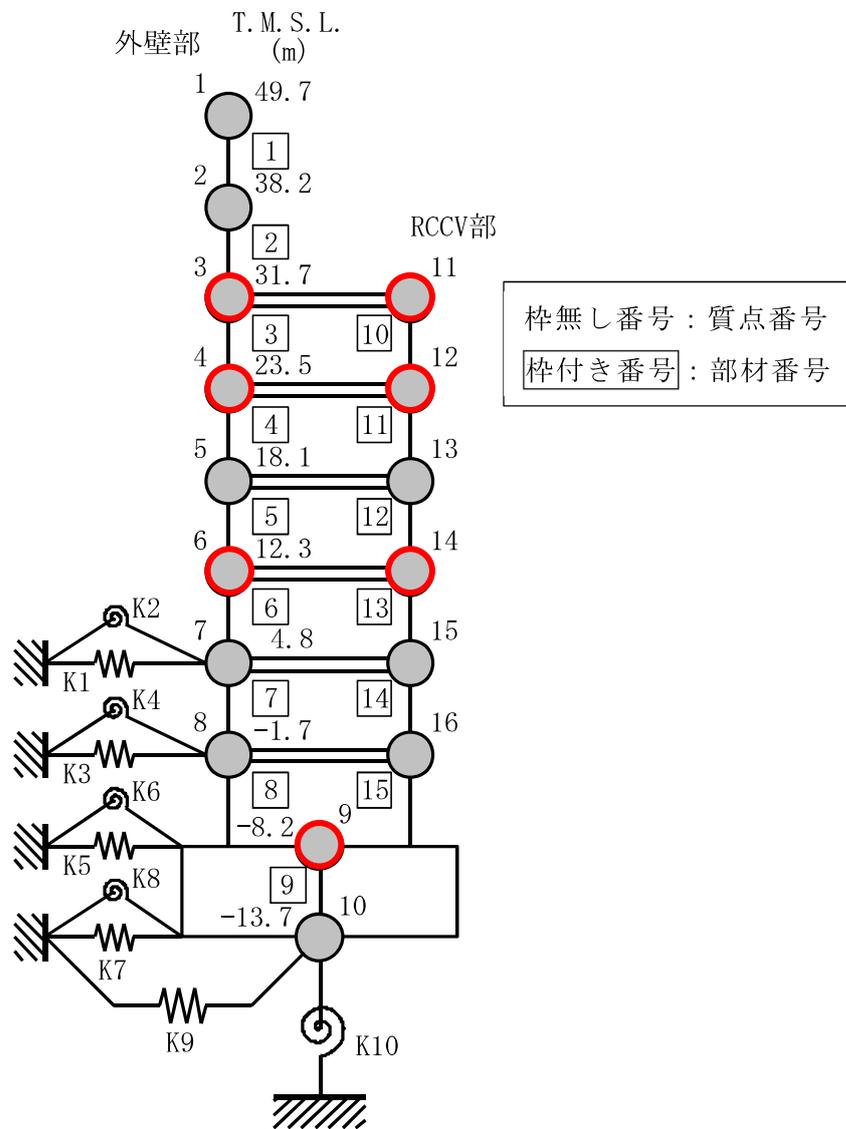


(c) 1F (T. M. S. L. 12. 3m)



(d) B3F (T. M. S. L. -8. 2m)

図 3-2 応答評価位置 (2/2)



注：○は応答評価レベル（対応質点）を示す。

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

### 3.2 建屋応答性状の把握

建屋模擬モデル（床柔及び相互作用考慮）及び質点系対応モデル（床剛及び相互作用考慮）の2つの3次元FEMモデルを用いて、図1-3の評価フローに基づき、建屋応答特性の把握を行う。

具体的には、以下の4点の応答特性について、3次元FEMモデルを用いた分析・考察を行う。

- ・ 基礎のロッキング振動による鉛直方向応答への影響：建屋模擬モデル－質点系対応モデル間で比較。
- ・ 鉛直軸回りのねじれ振動の影響：建屋模擬モデルの加振方向及び直交方向の応答で比較。
- ・ 床柔性の影響：建屋模擬モデル－質点系対応モデル間で比較。
- ・ 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響：建屋模擬モデルの水平1方向入力と3方向同時入力で比較。

#### 3.2.1 基礎のロッキング振動による鉛直方向応答への影響

基礎のロッキング振動による鉛直方向応答への影響は、建屋模擬モデル（3次元FEM，床柔及び相互作用考慮）及び質点系対応モデル（3次元FEM，床剛及び相互作用考慮）の水平方向入力による鉛直方向応答を比較することで検討する。なお、鉛直方向応答は、水平加振時の鉛直方向応答＋鉛直加振時の鉛直方向応答により求めるが、水平方向の入力による鉛直方向応答を比較するため、鉛直加振時の鉛直方向応答はいずれのモデルも建屋模擬モデルによる結果を用いる。

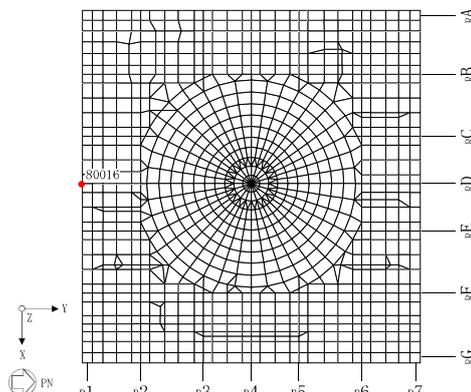
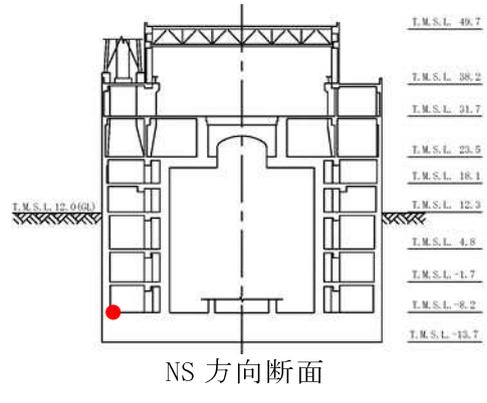
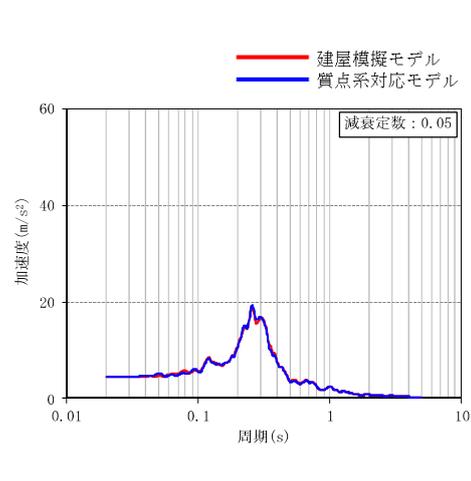
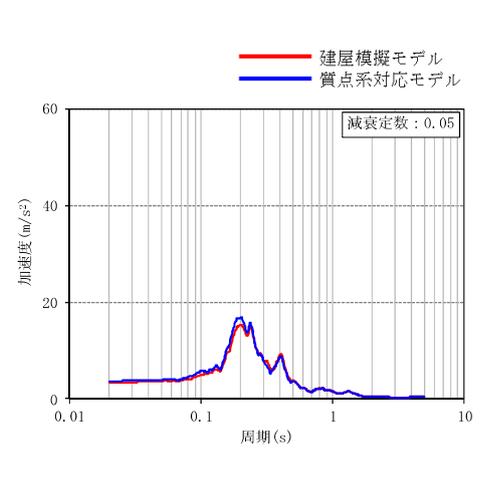
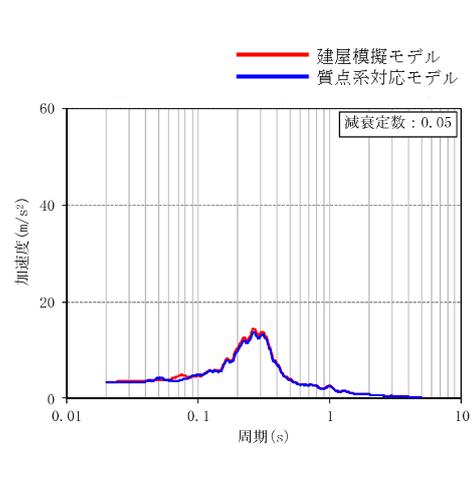
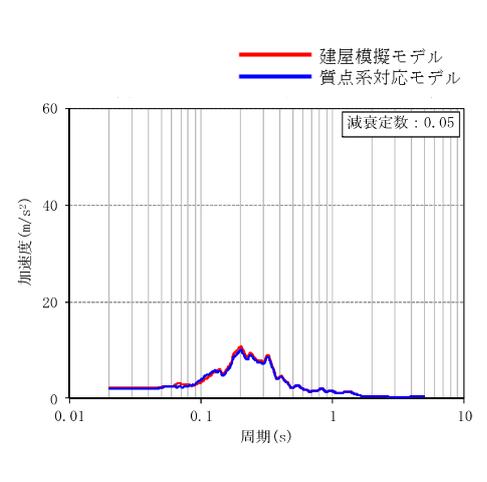
基礎のロッキング振動を確認するための応答の評価点は、ロッキング振動の影響が出やすいと考えられる建屋端部の評価点 No. 80016 及び No. 76001（T. M. S. L. - 8.2m）を抽出した。

評価点 No. 80016 は、NS 方向加振によりロッキング振動の影響が現れ、EW 方向加振時はロッキングの振動の影響がない部位である。また、評価点 No. 76001 は、EW 方向加振によりロッキング振動の影響が現れ、NS 方向加振時はロッキングの振動の影響がない部位である。このため、NS 方向加振時及び EW 方向加振時を比較することにより基礎のロッキング振動の影響について検討する。

検討結果を表3-1に示す。

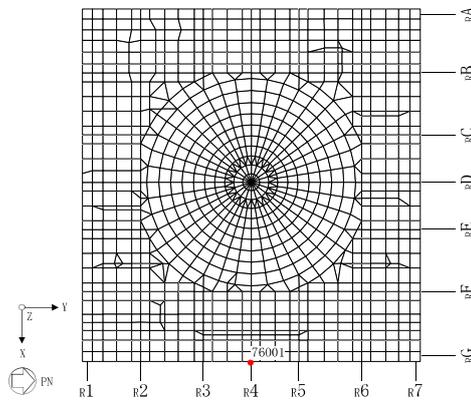
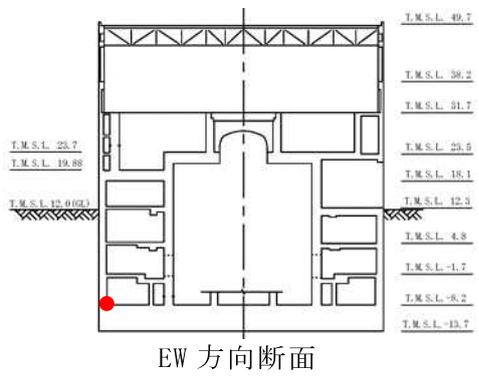
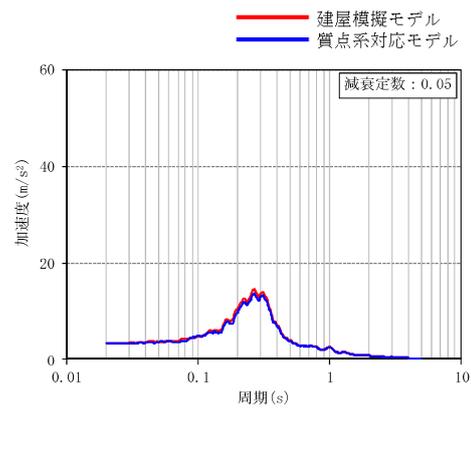
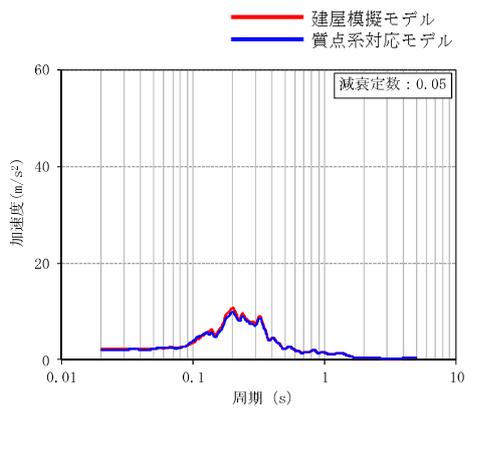
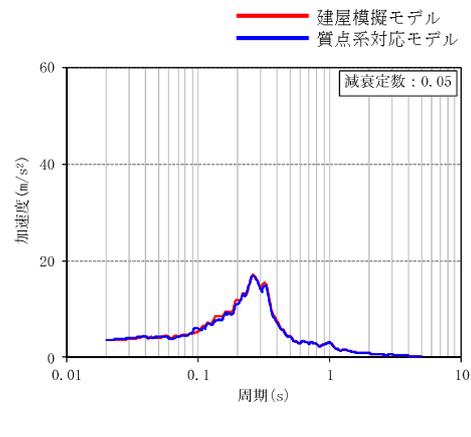
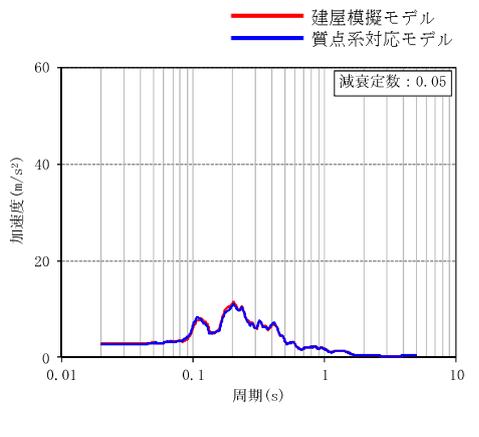
表3-1より、全ての評価点において、NS方向加振時及びEW方向加振時の応答にほとんど差は見られない。したがって、ロッキング振動の影響はほとんどないことを確認した。また基礎柔性を考慮した建屋模擬モデル及び基礎を剛床とした質点系対応モデルの応答の差は小さく、基礎柔性によるロッキング振動の影響はほとんどないことを確認した。

表 3-1 建屋模擬モデル及び質点系対応モデルの鉛直方向応答 (1/2)

<p>T. M. S. L. -8.2m 評価点 No. 80016</p>		 <p>NS 方向断面</p>
<p>地震動</p>	<p>Sd-1</p>	<p>Sd-2</p>
<p>NS + 鉛直方向 加振時 鉛直応答</p>		
<p>EW + 鉛直方向 加振時 鉛直応答</p>		

注：建屋模擬モデル及び質点系対応モデルは 3 次元 FEM モデルである。

表 3-1 建屋模擬モデル及び質点系対応モデルの鉛直方向応答 (2/2)

<p>T. M. S. L. -8.2m</p> <p>評価点 No. 76001</p>		 <p>EW 方向断面</p>
<p>地震動</p>	<p>Sd-1</p>	<p>Sd-2</p>
<p>NS + 鉛直方向 加振時 鉛直応答</p>		
<p>EW + 鉛直方向 加振時 鉛直応答</p>		

注：建屋模擬モデル及び質点系対応モデルは 3 次元 FEM モデルである。

### 3.2.2 鉛直軸回りのねじれ振動の影響

鉛直軸回りのねじれ振動の影響は、建屋模擬モデル（3次元 FEM，床柔及び相互作用考慮）の地震応答解析により確認する。

原子炉建屋は、整形な平面形状であるため、ねじれ振動の影響は受けにくいと考えられるが、その中でも隅部がねじれ振動の影響が出やすいと考えられるため、応答評価点は、No. 67781（T.M.S.L. 23.5m）及び No. 68950（T.M.S.L. 31.7m）を抽出し、加振方向と加振直交方向の応答を比較する。

水平加振時の応答比較を表 3-2 に示す。

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

以上より、水平 2 方向の入力によるねじれ振動の影響は「3.2.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響」において確認する。

表 3-2 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の水平加振時の応答比較 (1/4)

(a) T. M. S. L. 23.5m Sd-1

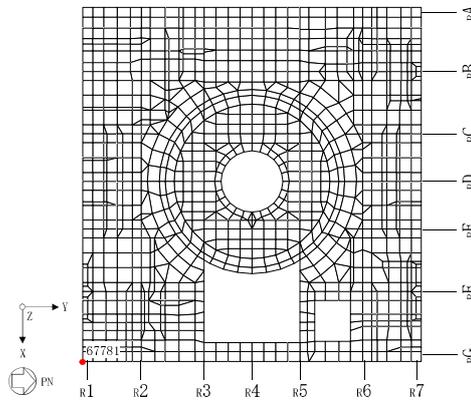
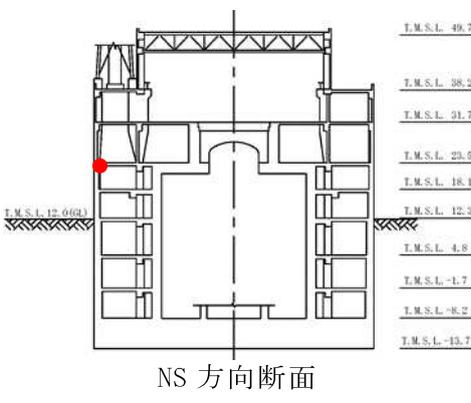
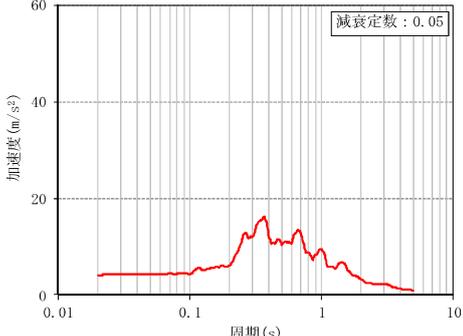
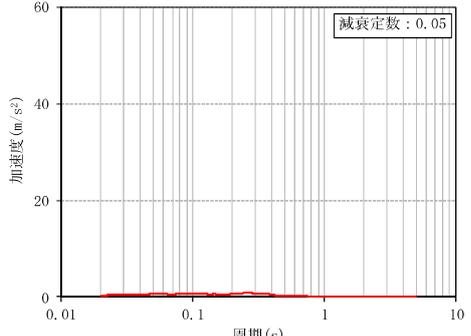
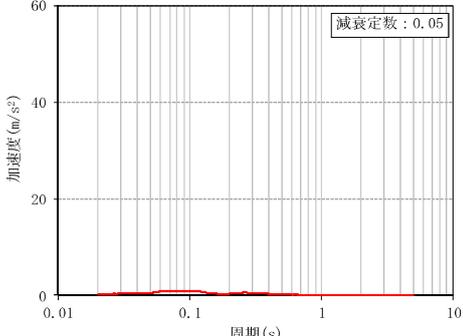
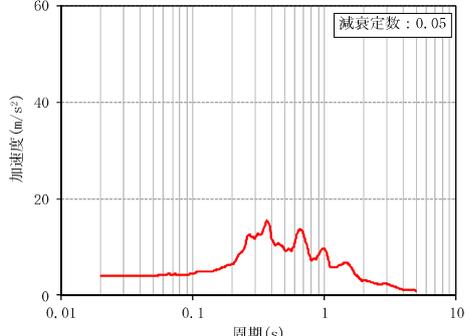
<p>T. M. S. L. 23.5m</p> <p>評価点 No. 67781</p>		 <p>NS 方向断面</p>
<p>方向</p>	<p>NS 方向応答</p>	<p>EW 方向応答</p>
<p>Sd-1 NS 方向 加振時</p>		
<p>Sd-1 EW 方向 加振時</p>		

表 3-2 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の水平加振時の応答比較 (2/4)

(b) T. M. S. L. 23.5m Sd-2

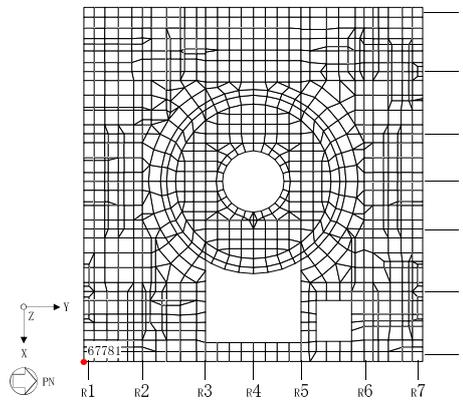
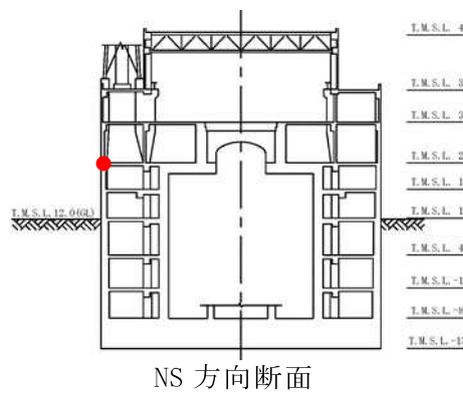
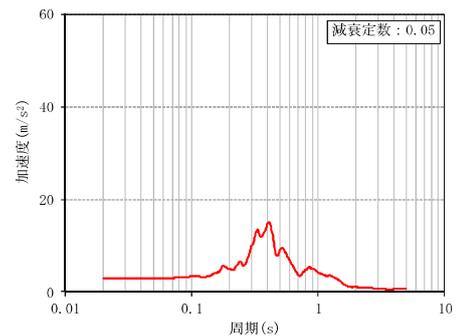
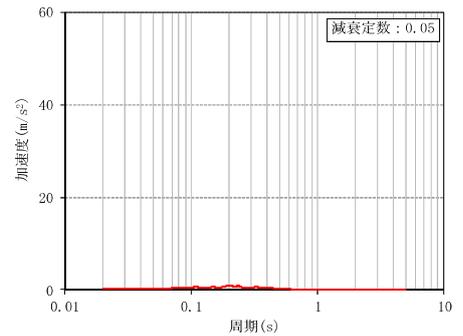
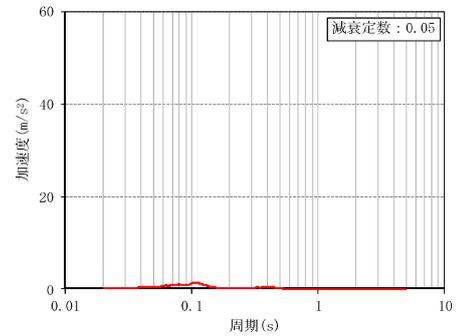
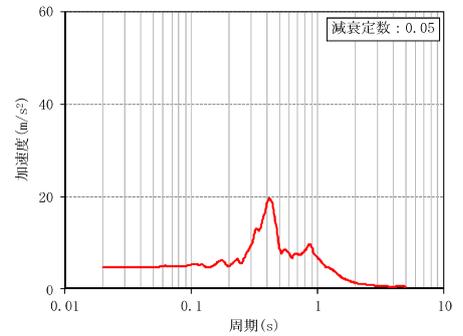
<p>T. M. S. L. 23.5m</p> <p>評価点 No. 67781</p>		 <p>NS 方向断面</p>
<p>方向</p>	<p>NS 方向応答</p>	<p>EW 方向応答</p>
<p>Sd-2 NS 方向 加振時</p>		
<p>Sd-2 EW 方向 加振時</p>		

表 3-2 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の水平加振時の応答比較 (3/4)

(c) T. M. S. L. 31.7m Sd-1

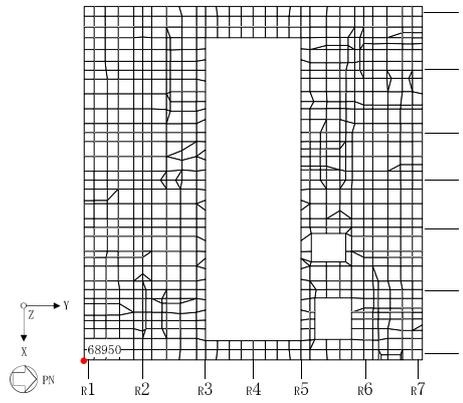
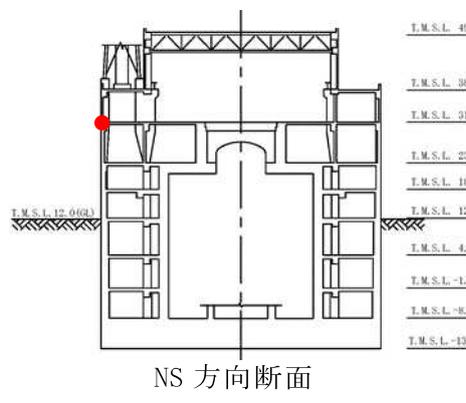
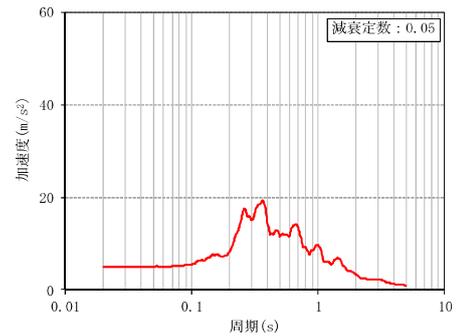
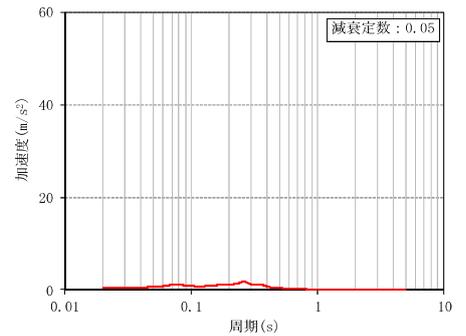
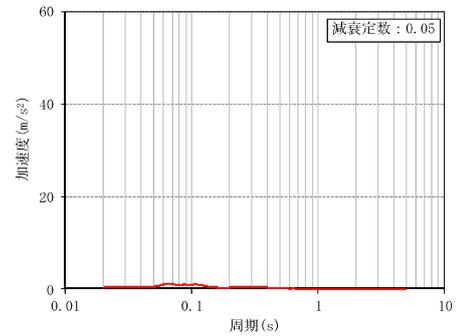
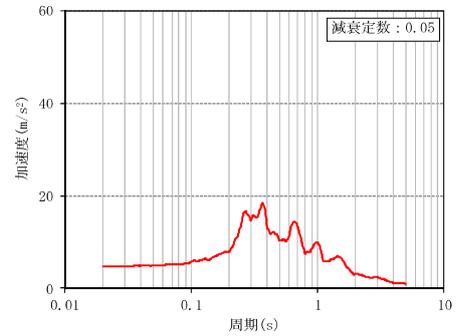
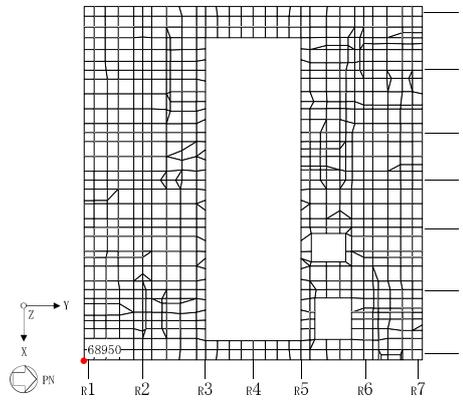
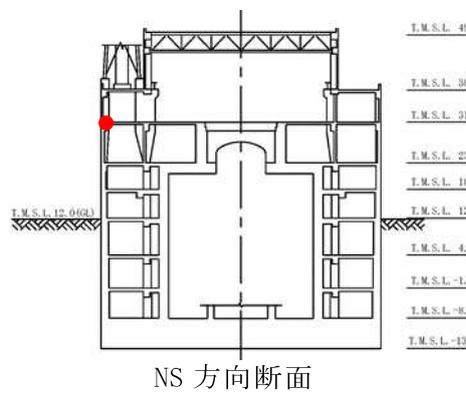
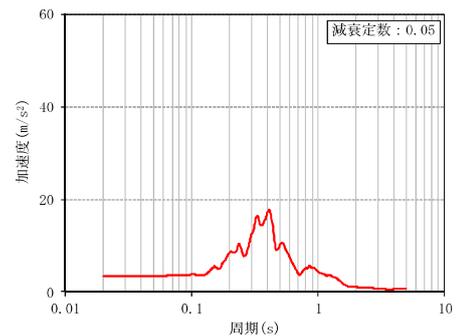
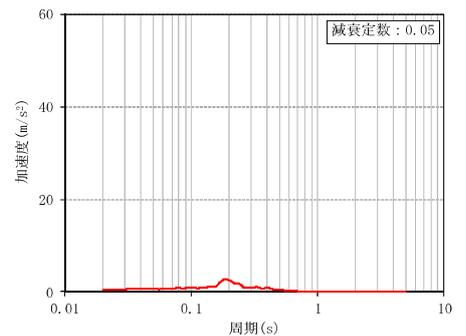
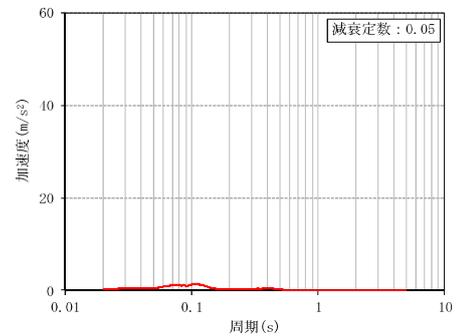
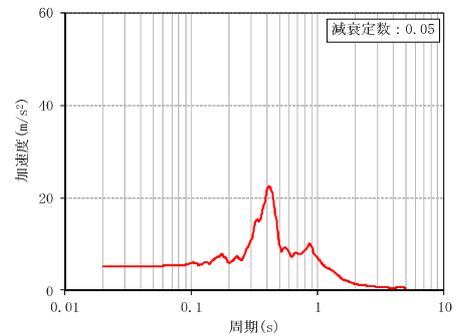
<p>T. M. S. L. 31.7m</p> <p>評価点 No. 68950</p>		 <p>NS 方向断面</p>
<p>方向</p>	<p>NS 方向応答</p>	<p>EW 方向応答</p>
<p>Sd-1 NS 方向 加振時</p>		
<p>Sd-1 EW 方向 加振時</p>		

表 3-2 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の水平加振時の応答比較 (4/4)

(d) T. M. S. L. 31.7m Sd-2

<p>T. M. S. L. 31.7m</p> <p>評価点 No. 68950</p>		 <p>NS 方向断面</p>
<p>方向</p>	<p>NS 方向応答</p>	<p>EW 方向応答</p>
<p>Sd-2 NS 方向 加振時</p>		
<p>Sd-2 EW 方向 加振時</p>		

### 3.2.3 床柔性の影響

床柔性の影響は、床の柔性を考慮した建屋模擬モデル（3次元 FEM，床柔及び相互作用考慮）と床を剛とした質点系対応モデル（3次元 FEM，床剛及び相互作用考慮）を比較することにより確認する。応答を比較する評価点は、地上部－地下部の境界における外壁部及び RCCV 部相当位置として 1 階（T.M.S.L. 12.3m）の評価点 No. 65836，No. 65821 及び No. 65014 並びに No. 120023 及び No. 120248 とする。

建屋模擬モデル及び質点系対応モデルの比較結果を表 3-3 に示す。

表 3-3 より、建屋模擬モデル及び質点系対応モデルを比較すると、応答の差は小さく、床柔性の影響はほとんどないことを確認した。

なお、NS 方向加振時 NS 応答での周期 0.2s 付近における建屋模擬モデル及び質点系対応モデルによる応答の差については、「別紙 3-2 3次元 FEM モデルによる応答結果の整理」に示す。

表 3-3 建屋模擬モデル (3次元 FEM) と質点系対応モデル (3次元 FEM) の応答比較 (1/4)

(a) Sd-1 外壁部

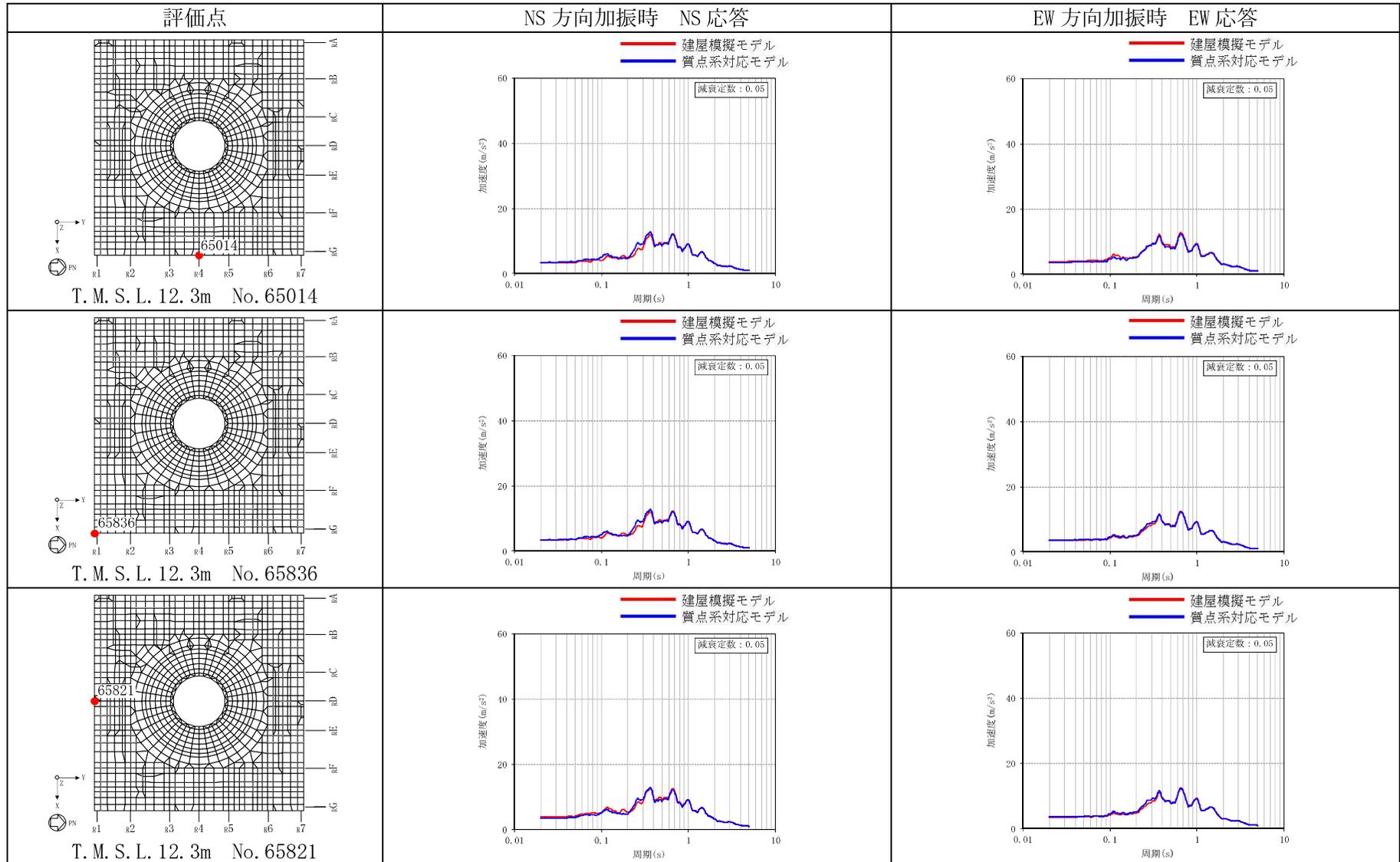


表 3-3 建屋模擬モデル (3次元 FEM) と質点系対応モデル (3次元 FEM) の応答比較 (2/4)

(b) Sd-1 RCCV 部

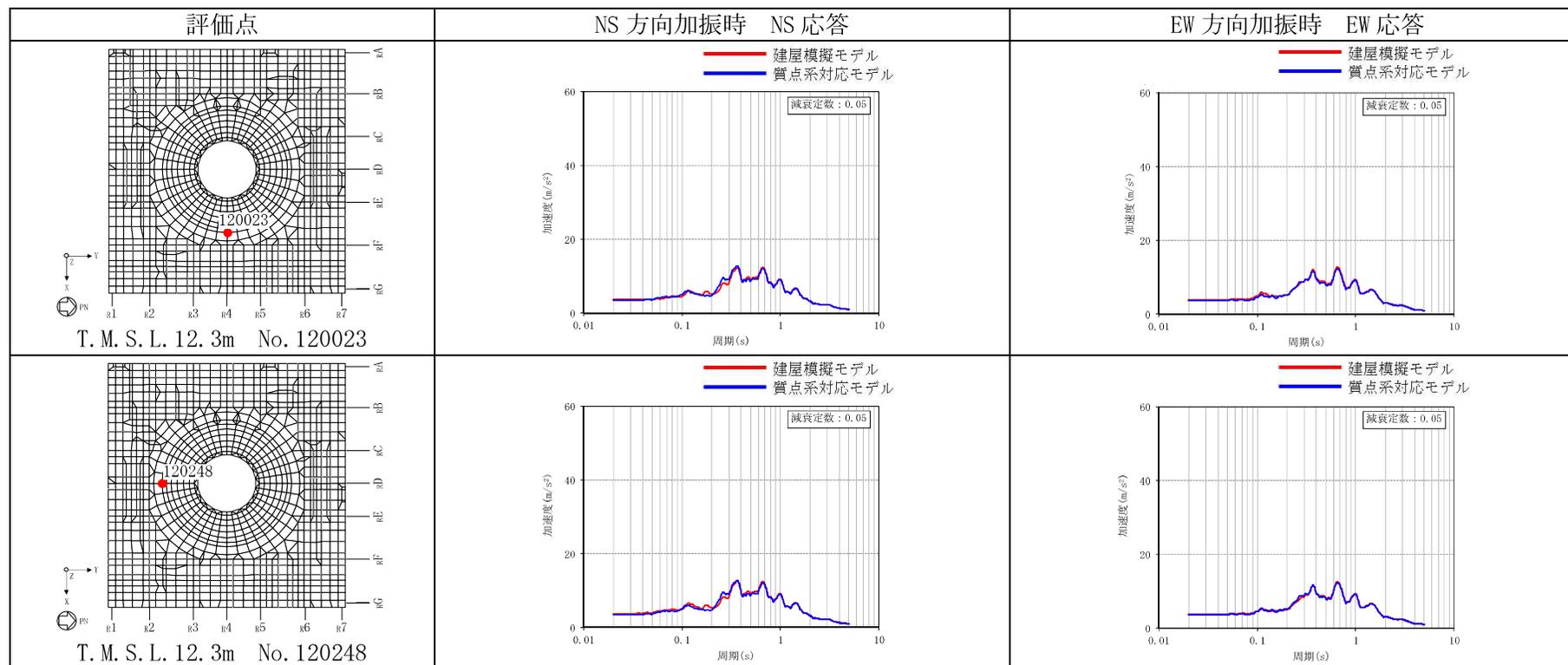


表 3-3 建屋模擬モデル (3次元 FEM) と質点系対応モデル (3次元 FEM) の応答比較 (3/4)

(c) Sd-2 外壁部

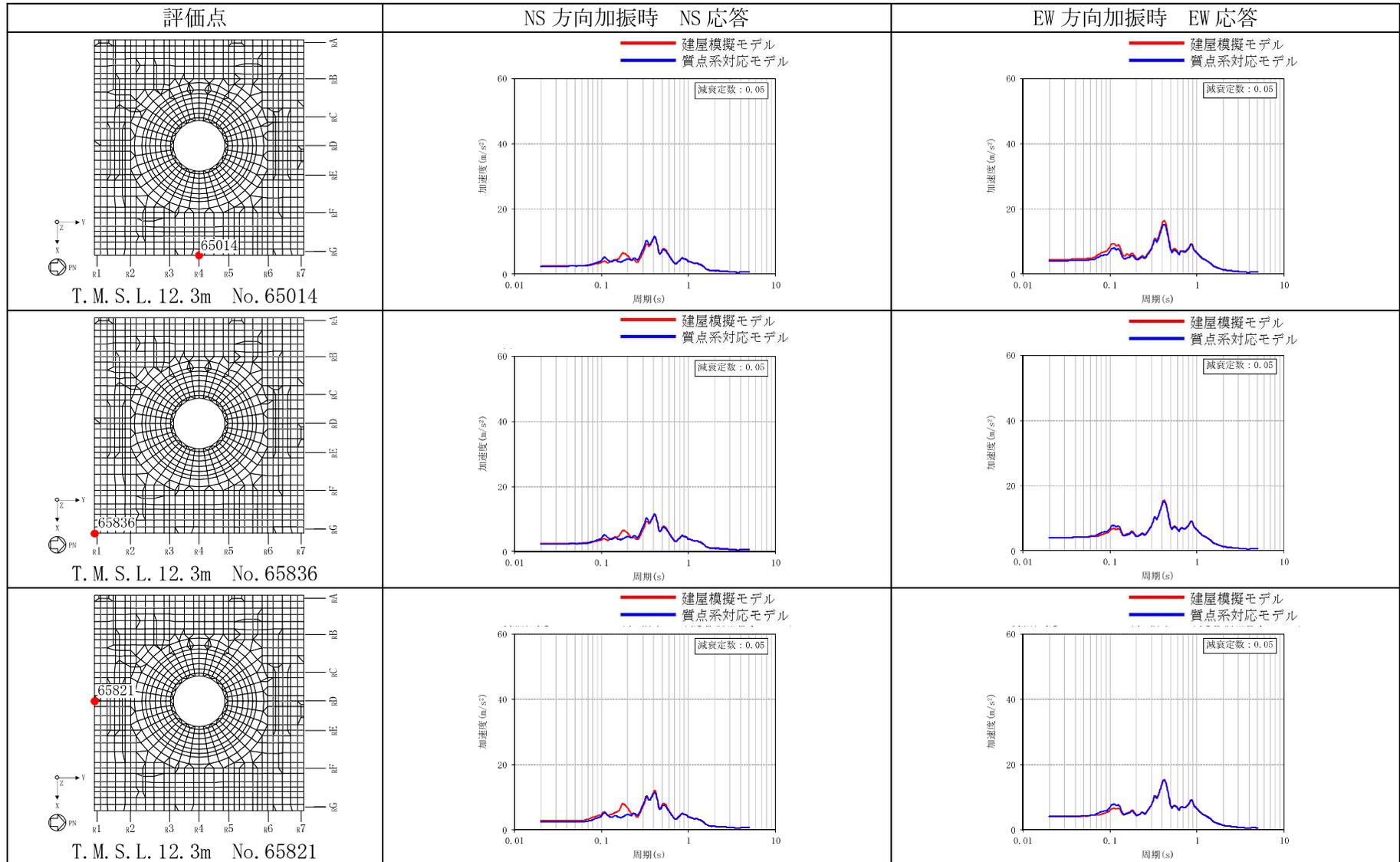
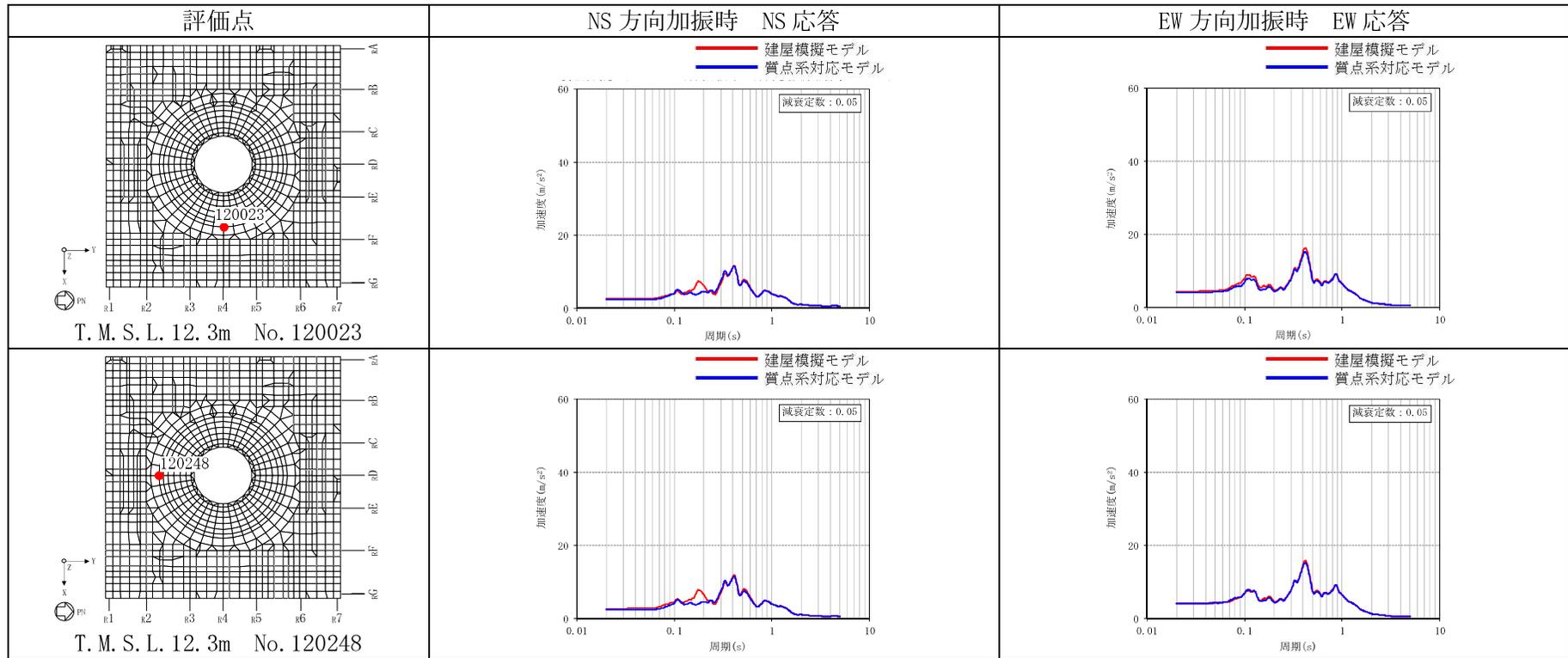


表 3-3 建屋模擬モデル (3次元 FEM) と質点系対応モデル (3次元 FEM) の応答比較 (4/4)

(d) Sd-2 RCCV 部



### 3.2.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響

#### (1) 地震動の入力方法

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

地震動の組合せを表 3-4 に示す。

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響検討は、弾性設計用地震動  $S_d$  を水平 2 方向及び鉛直方向に組み合わせた地震力に対して実施する。具体的には、弾性設計用地震動  $S_{d-1}$  及び  $S_{d-2}$  を水平 2 方向及び鉛直方向に入力した検討を実施する。

ただし、全く同じ地震動が同時に水平 2 方向に入力されることは現実的ではないことから、弾性設計用地震動  $S_{d-1}$  については、水平 2 方向の地震動のうち NS 方向には弾性設計用地震動  $S_{d-1}$  の水平方向成分を入力し、直交する EW 方向は弾性設計用地震動  $S_{d-1}$  の水平成分の設計用応答スペクトルに適合するが、弾性設計用地震動  $S_{d-1}$  の水平成分とは位相特性が異なる模擬地震波を入力する。また、鉛直方向の地震動は、弾性設計用地震動  $S_{d-1}$  の鉛直方向成分を入力する。

したがって、 $S_{d-1}$  に対する本検討においては、NS 方向に対しては弾性設計用地震動  $S_{d-1}$  の水平成分（ $S_{d-1H}$ ）を、EW 方向に対しては模擬地震波  $S_{d-1p}$ （ $S_{d-1H}$  の設計用応答スペクトルに適合するが、 $S_{d-1H}$  とは位相特性が異なる模擬地震波）をそれぞれ同時入力する。また、鉛直方向の地震動は、弾性設計用地震動  $S_{d-1}$  の鉛直方向成分（ $S_{d-1V}$ ）を水平 2 方向と同時に入力する。

3 方向同時入力による各方向の応答は、水平 2 方向及び鉛直方向の地震動を入力して算出された各成分の応答を、時刻歴で足し合わせることにより算出する。

応答算出の考え方を図 3-4 に示す。

表 3-4 地震動の組合せ

(a) Sd-1

地震動の入力方法		NS 方向	EW 方向	鉛直方向
1 方向入力	NS 方向	Sd-1H	—	—
	EW 方向	—	Sd-1p*	—
3 方向同時入力		Sd-1H	Sd-1p*	Sd-1V

注記\* : Sd-1H の設計用応答スペクトルに適合するが, Sd-1H とは位相特性が異なる模擬地震波。

(b) Sd-2

地震動の入力方法		NS 方向	EW 方向	鉛直方向
1 方向入力	NS 方向	Sd-2NS	—	—
	EW 方向	—	Sd-2EW	—
3 方向同時入力		Sd-2NS	Sd-2EW	Sd-2UD

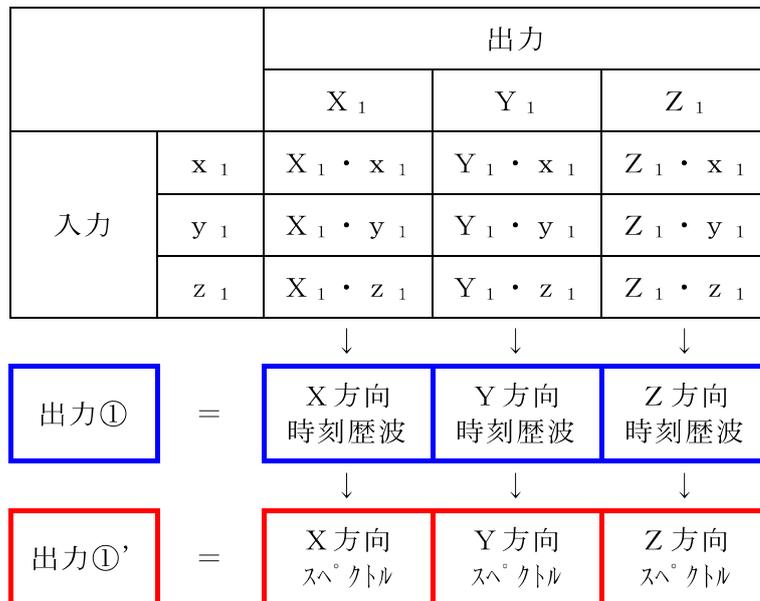


図 3-4 3次元 FEM モデルによる応答算出の考え方

(2) 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認

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

応答は図 3-2 に示す評価点について比較するものとし、比較した結果を表 3-5 及び表 3-6 に示す。

表 3-5 及び表 3-6 より、いずれの地震動、いずれの評価点においても、1 方向入力時及び 3 方向同時入力時の応答の差は小さく、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響はほとんどないことを確認した。

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

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

表 3-5 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の3方向同時入力及び1方向入力の応答比較 (Sd-1) (1/8)

(a) T. M. S. L. -8.2m 外壁部

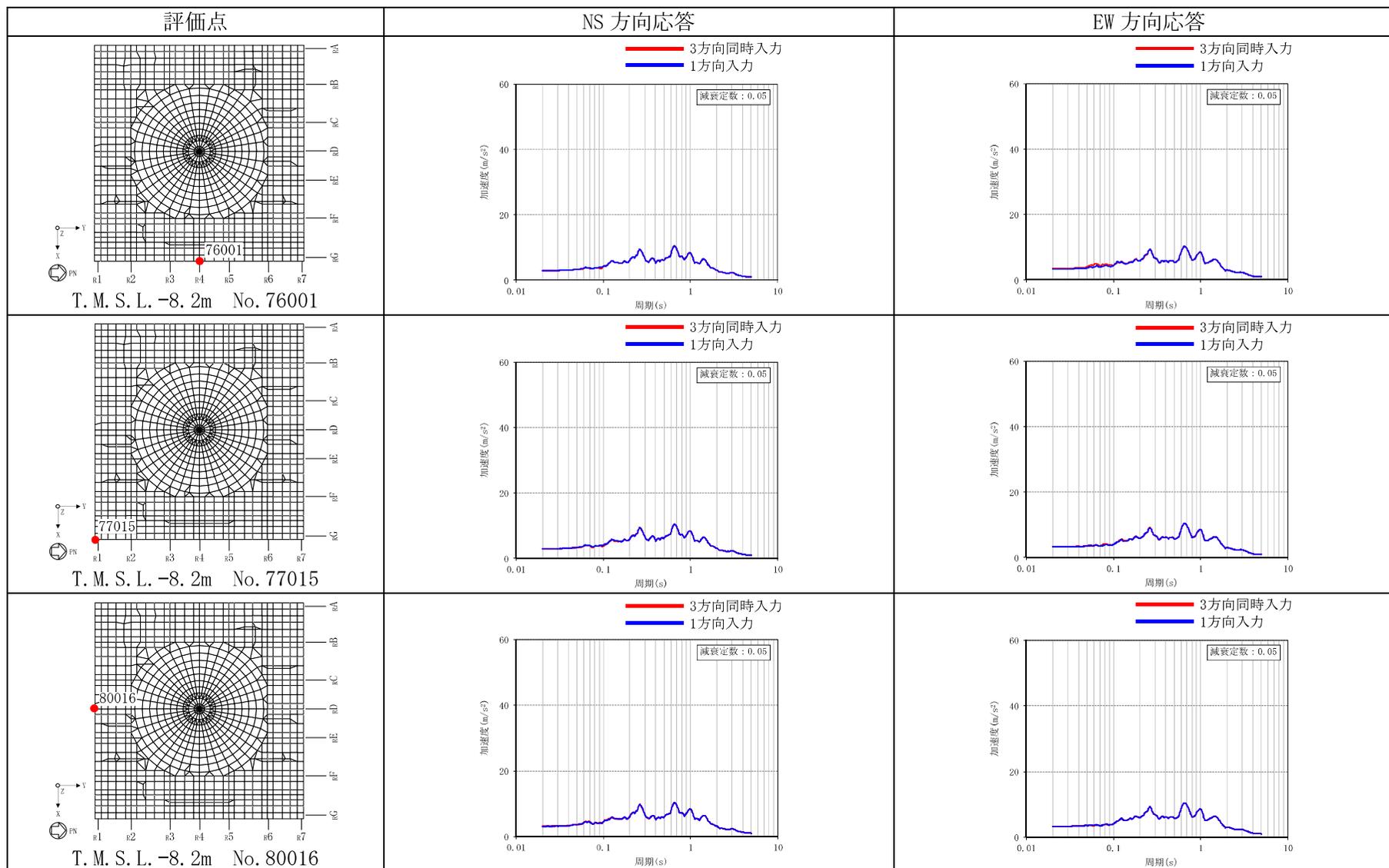


表 3-5 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (Sd-1) (2/8)

(b) T. M. S. L. -8.2m RCCV 部

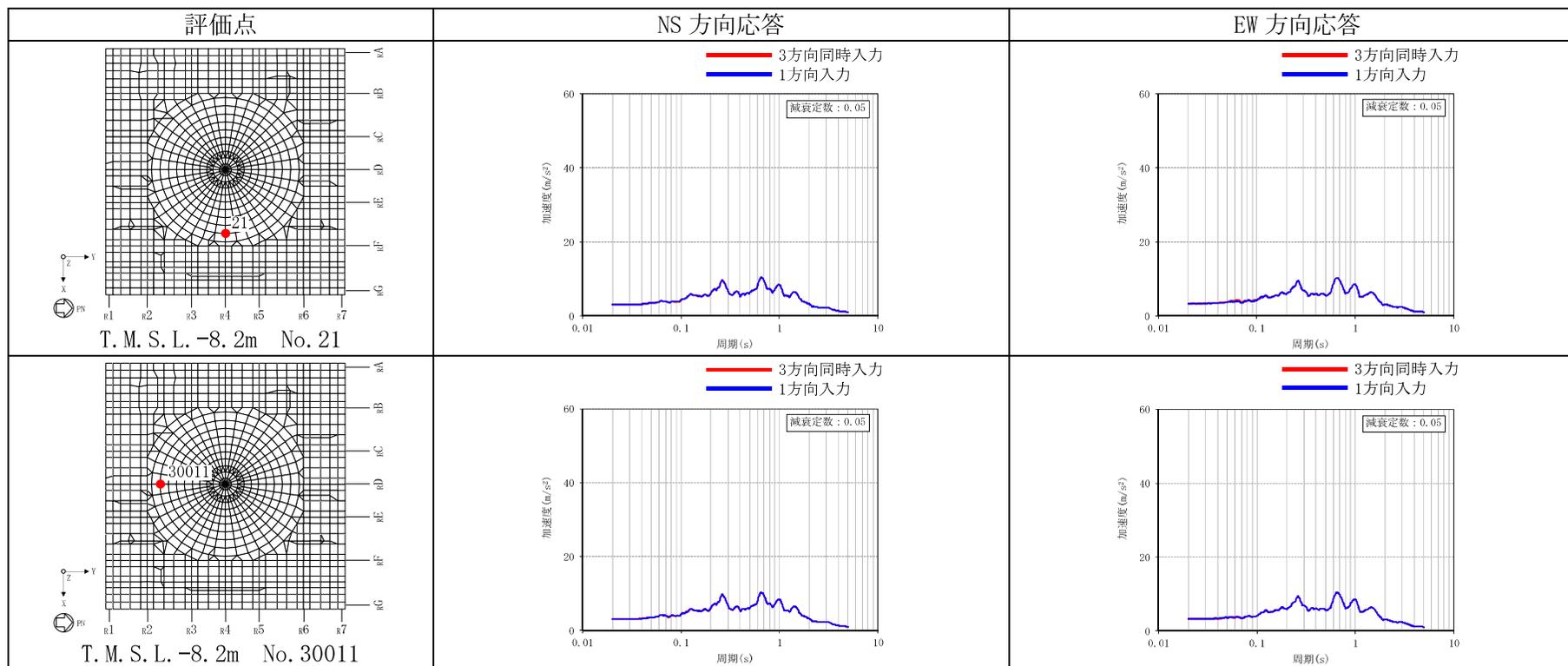


表 3-5 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (Sd-1) (3/8)

(c) T. M. S. L. 12. 3m 外壁部

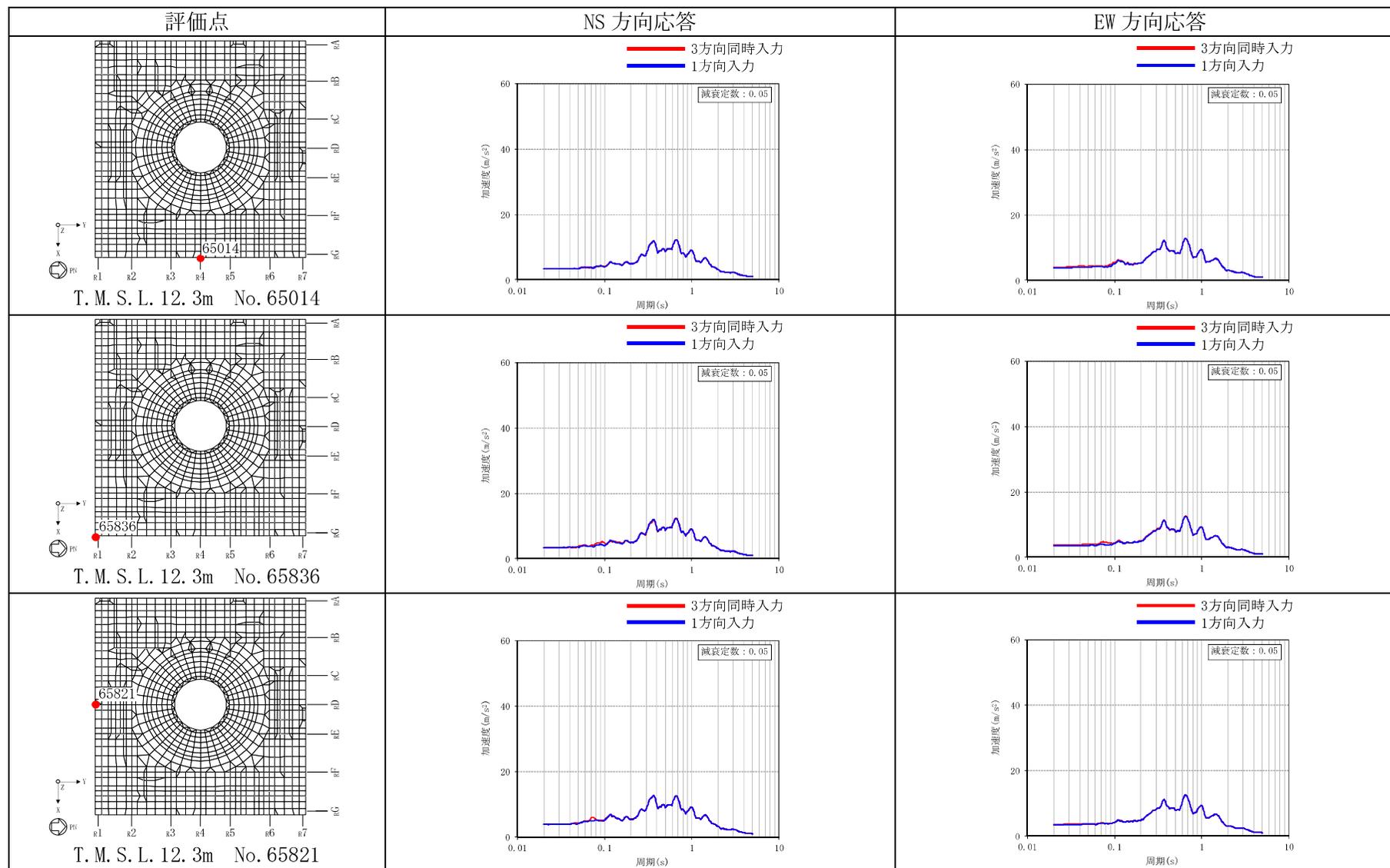


表 3-5 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (Sd-1) (4/8)

(d) T. M. S. L. 12. 3m RCCV 部

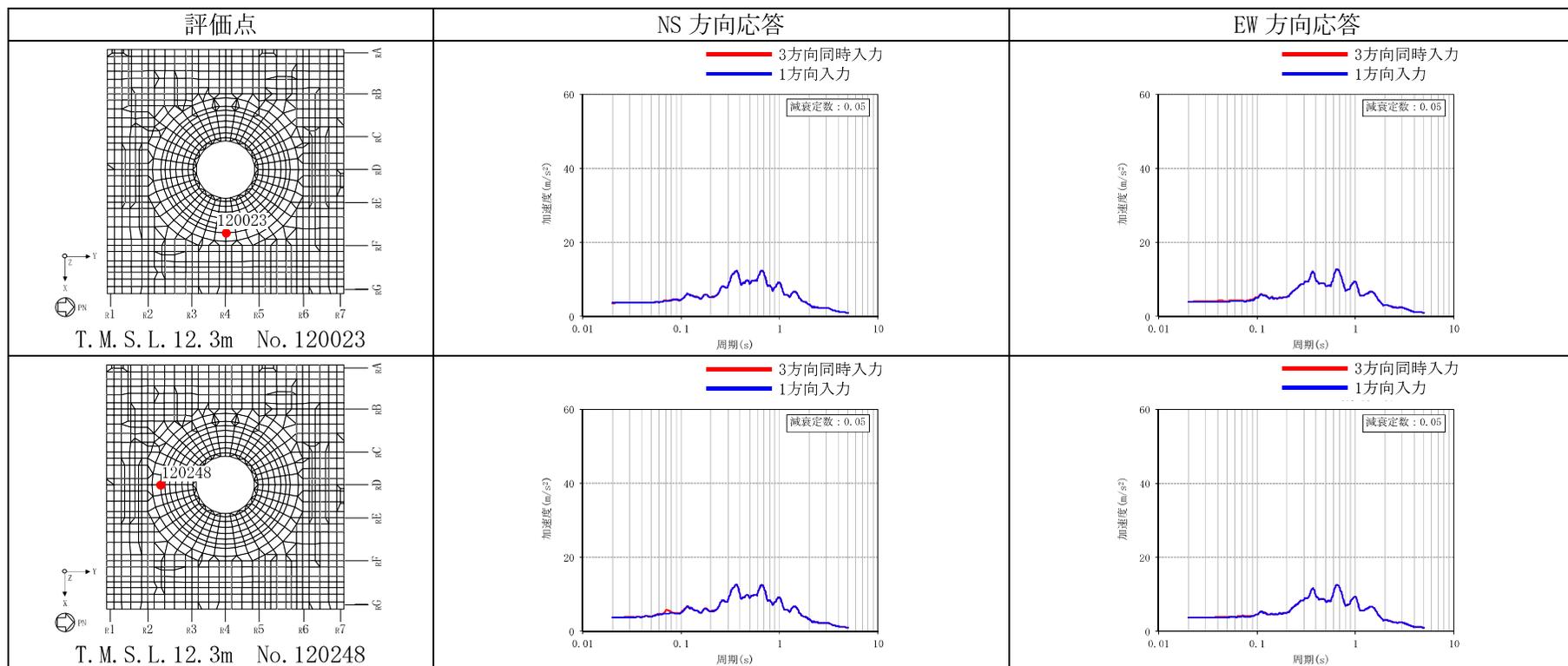


表 3-5 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (Sd-1) (5/8)

(e) T. M. S. L. 23. 5m 外壁部

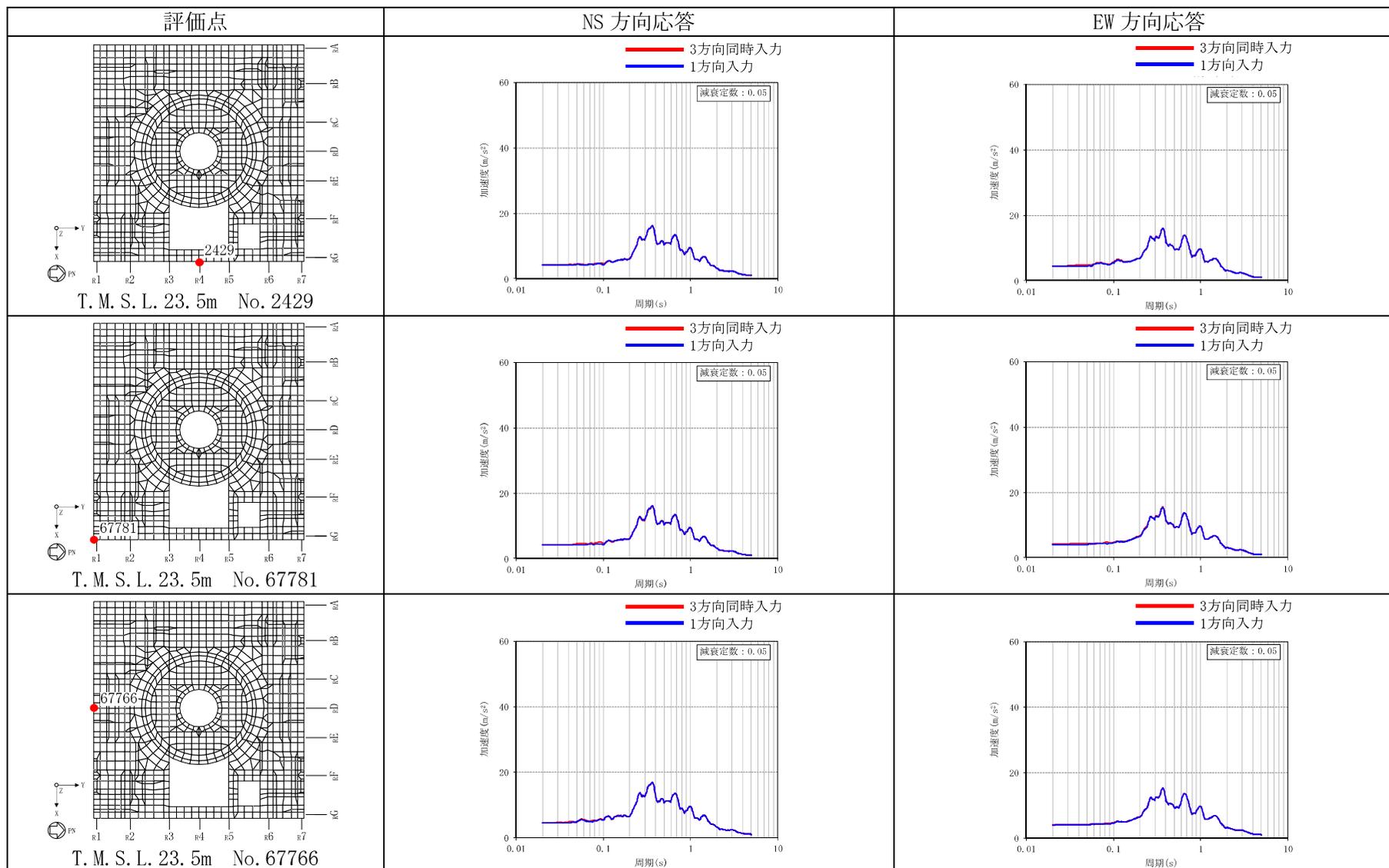


表 3-5 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の3方向同時入力及び1方向入力の応答比較 (Sd-1) (6/8)

(f) T. M. S. L. 23.5m RCCV 部

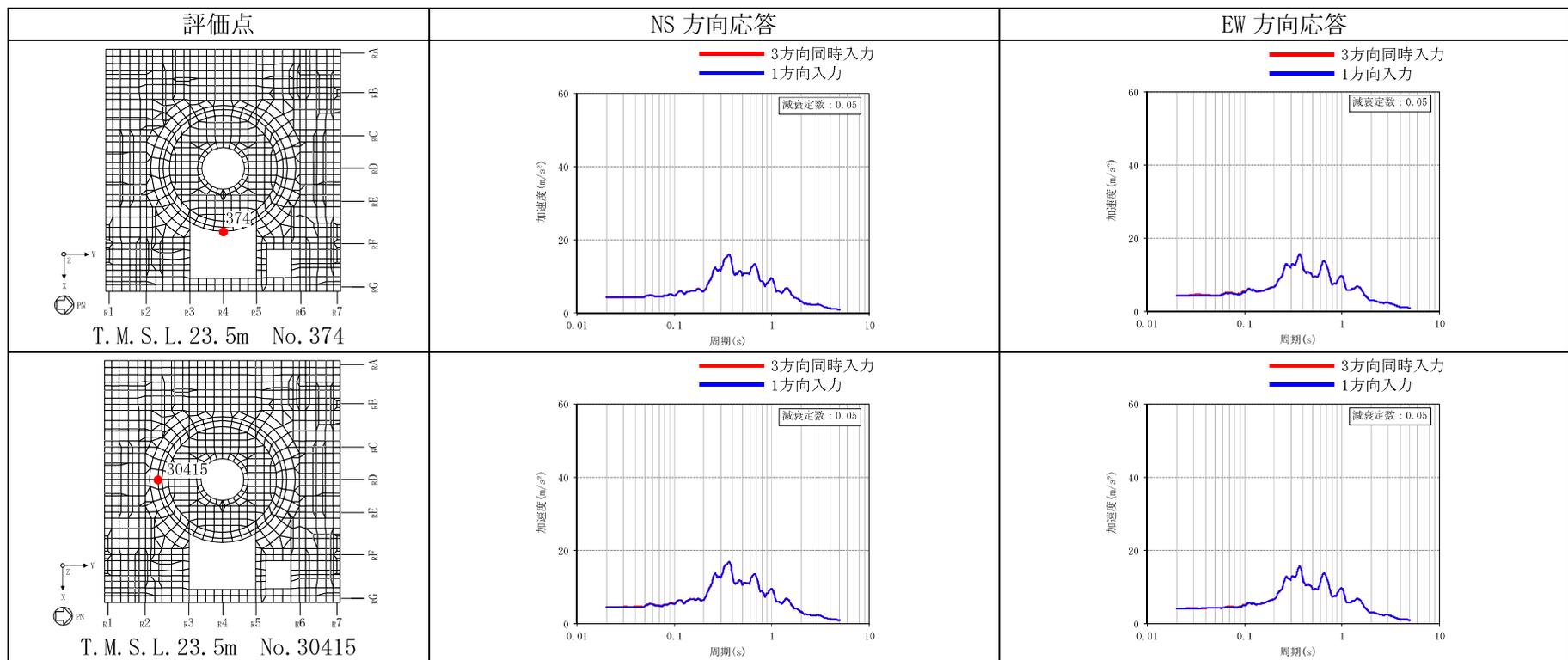


表 3-5 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (Sd-1) (7/8)

(g) T.M.S.L. 31.7m 外壁部

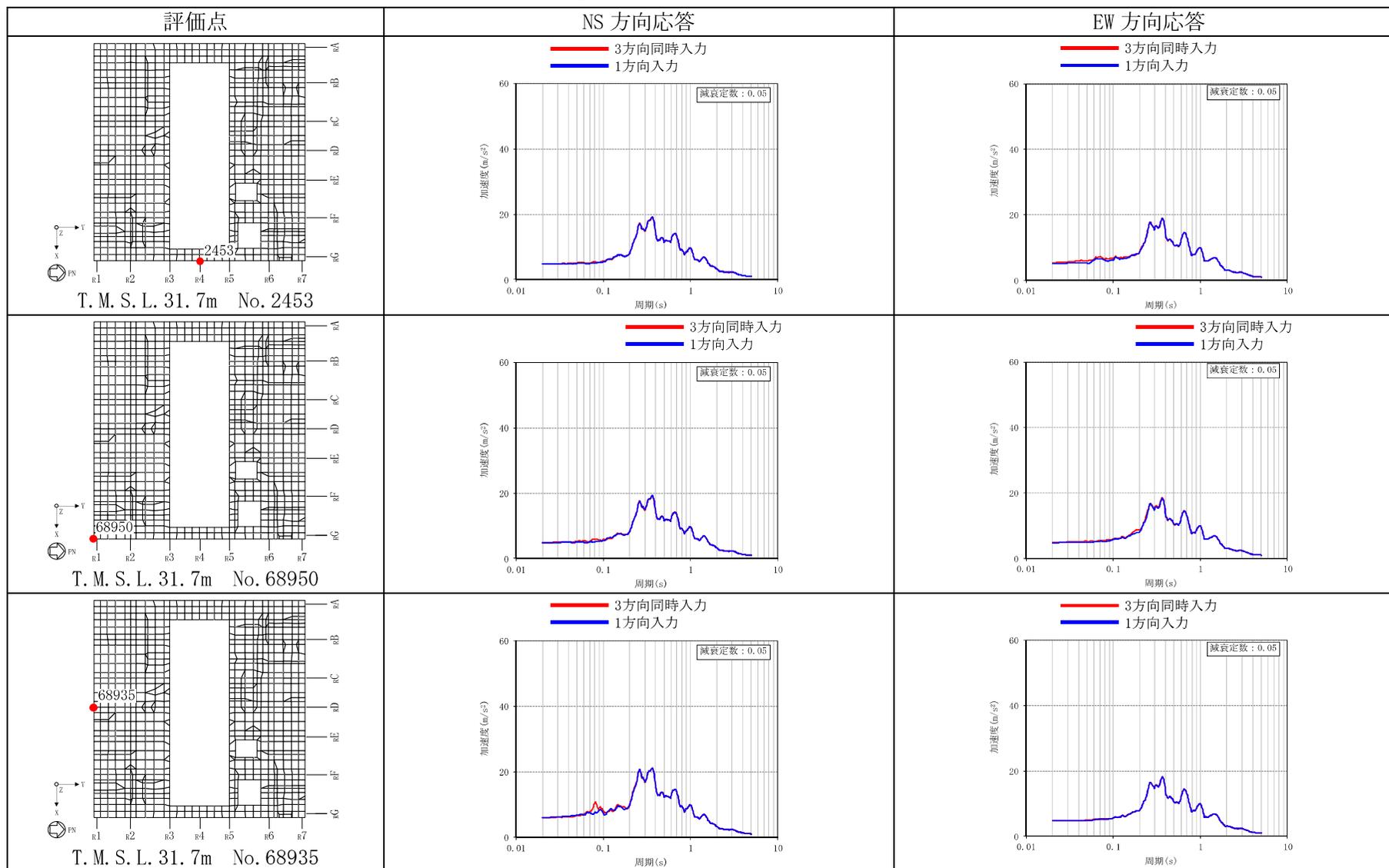


表 3-5 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (Sd-1) (8/8)

(h) T. M. S. L. 31.7m RCCV 部

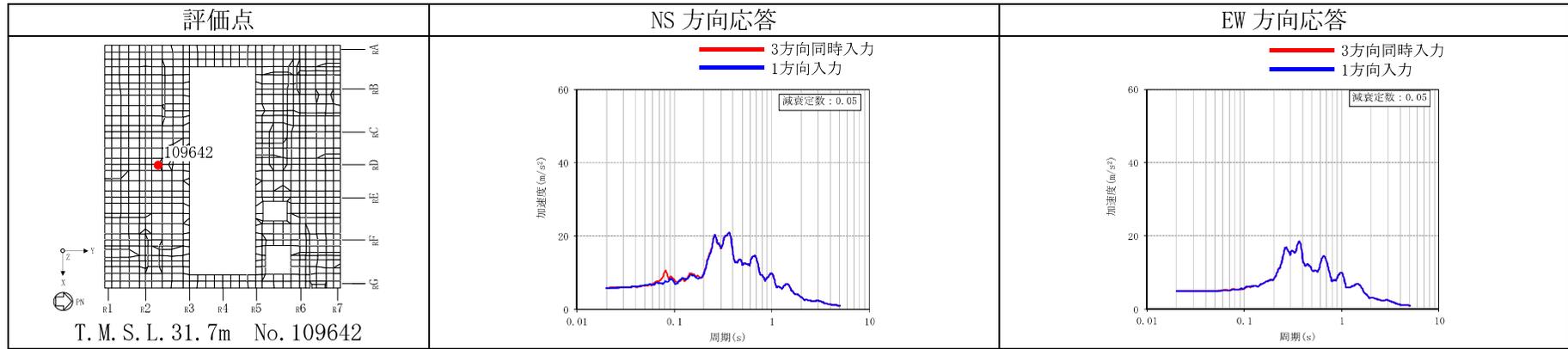


表 3-6 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の3方向同時入力及び1方向入力の応答比較 (Sd-2) (1/8)

(a) T. M. S. L. -8.2m 外壁部

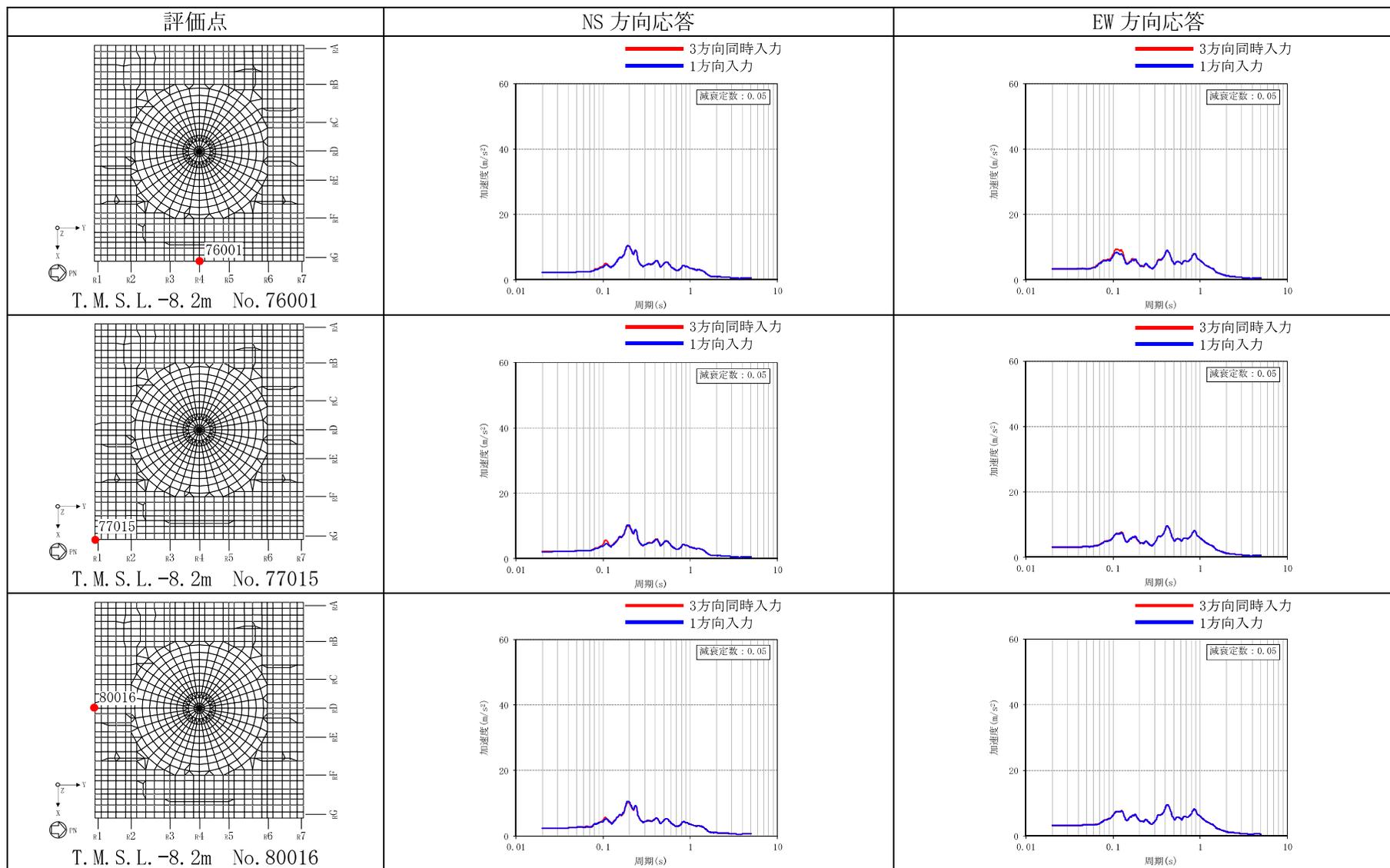


表 3-6 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の3方向同時入力及び1方向入力の応答比較 (Sd-2) (2/8)

(b) T. M. S. L. -8.2m RCCV 部

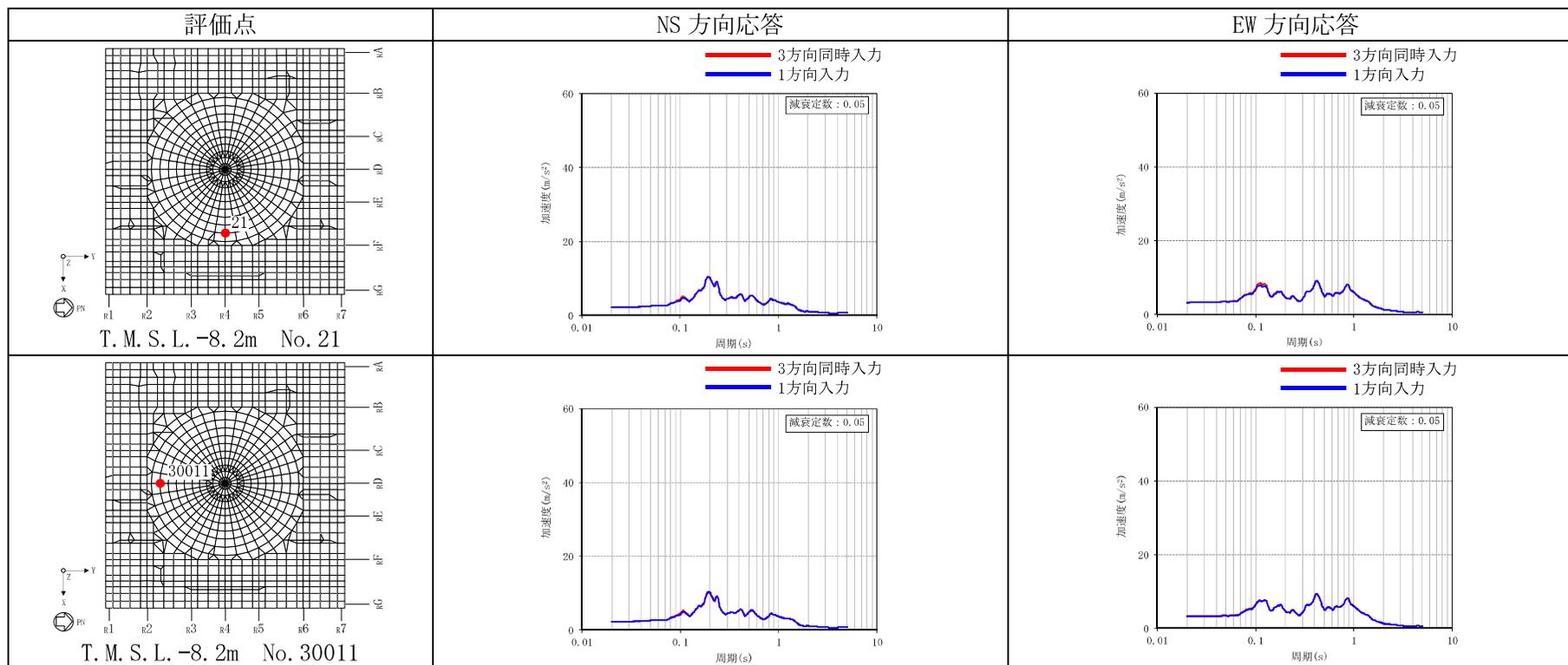


表 3-6 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の3方向同時入力及び1方向入力の応答比較 (Sd-2) (3/8)

(c) T. M. S. L. 12. 3m 外壁部

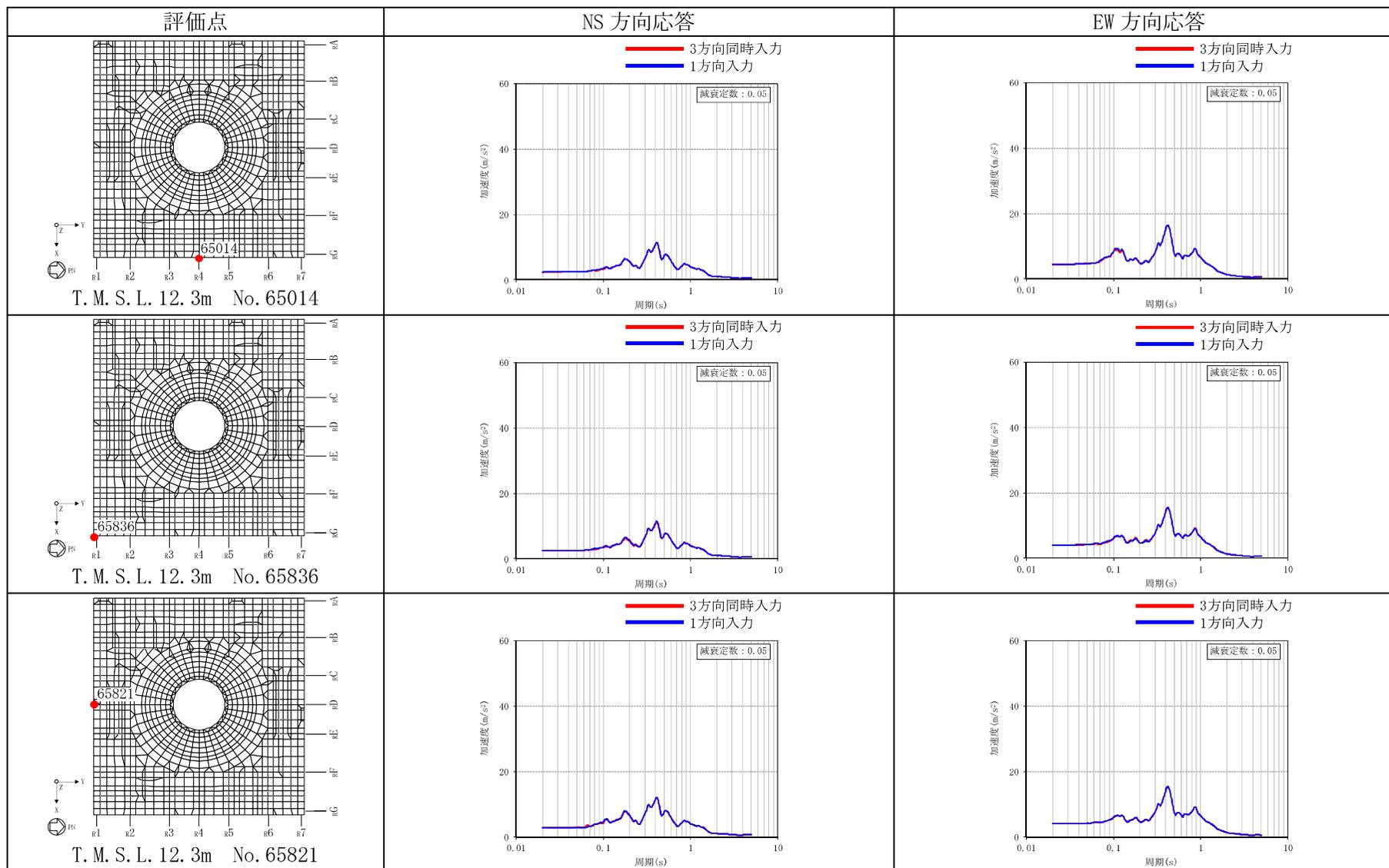


表 3-6 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の3方向同時入力及び1方向入力の応答比較 (Sd-2) (4/8)

(d) T. M. S. L. 12. 3m RCCV 部

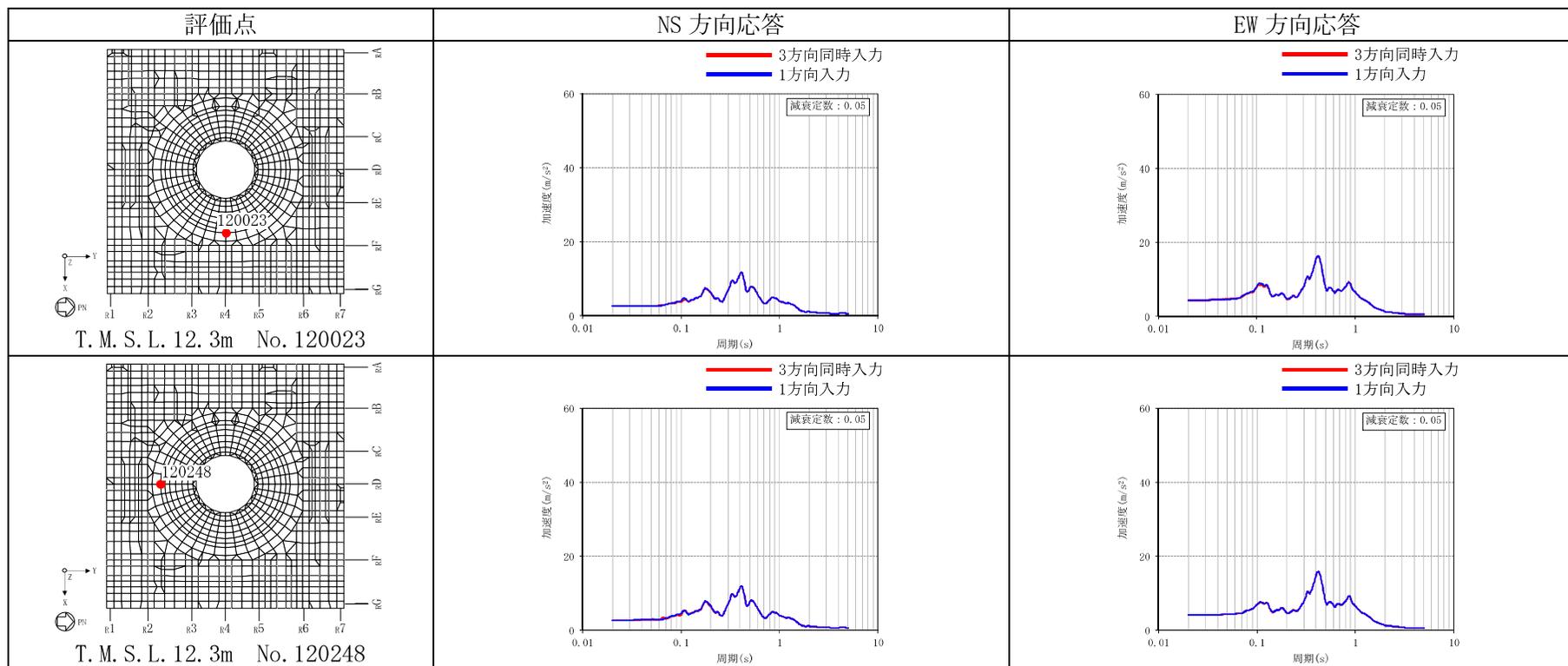


表 3-6 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の3方向同時入力及び1方向入力の応答比較 (Sd-2) (5/8)

(e) T. M. S. L. 23.5m 外壁部

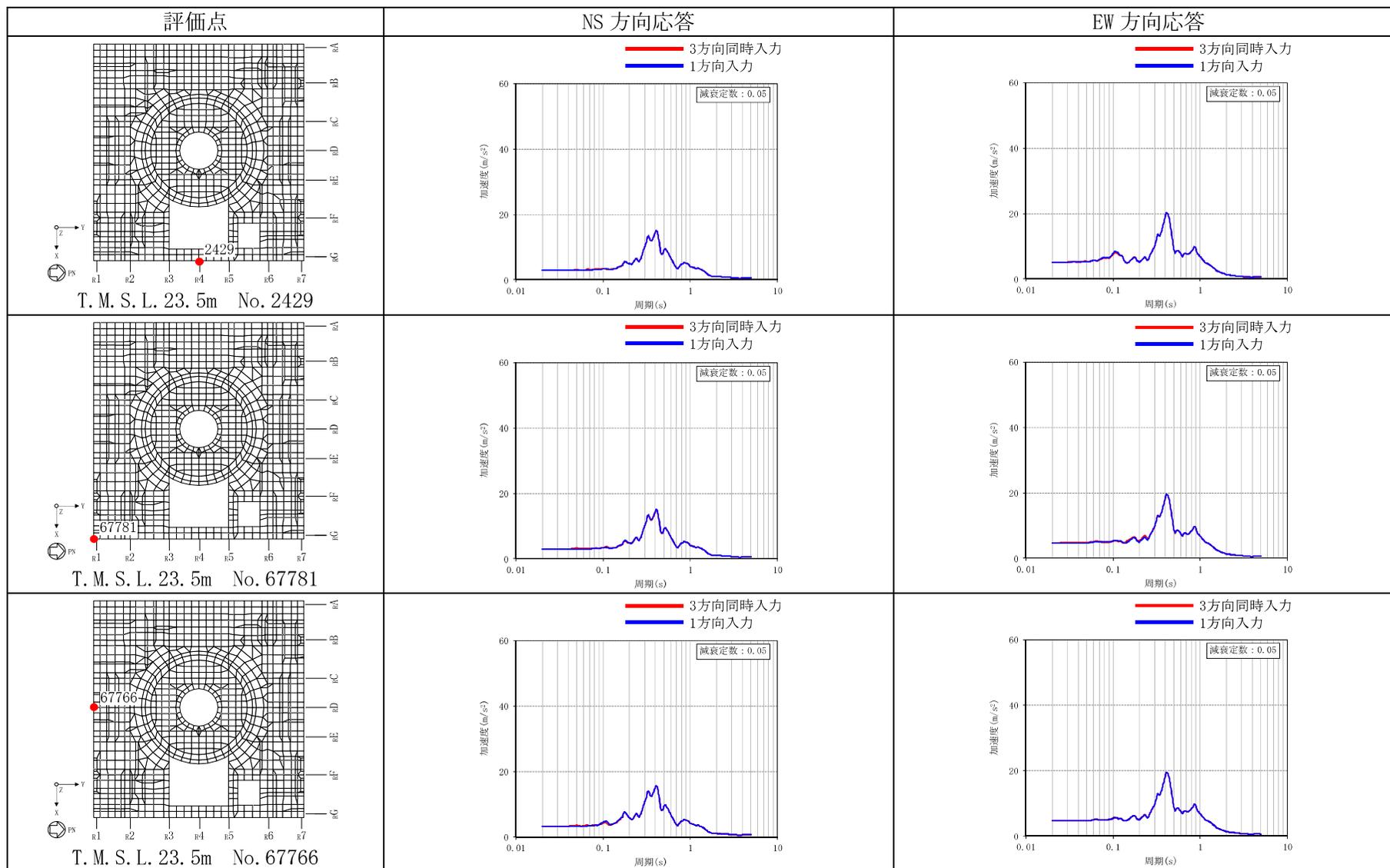


表 3-6 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (Sd-2) (6/8)

(f) T. M. S. L. 23.5m RCCV 部

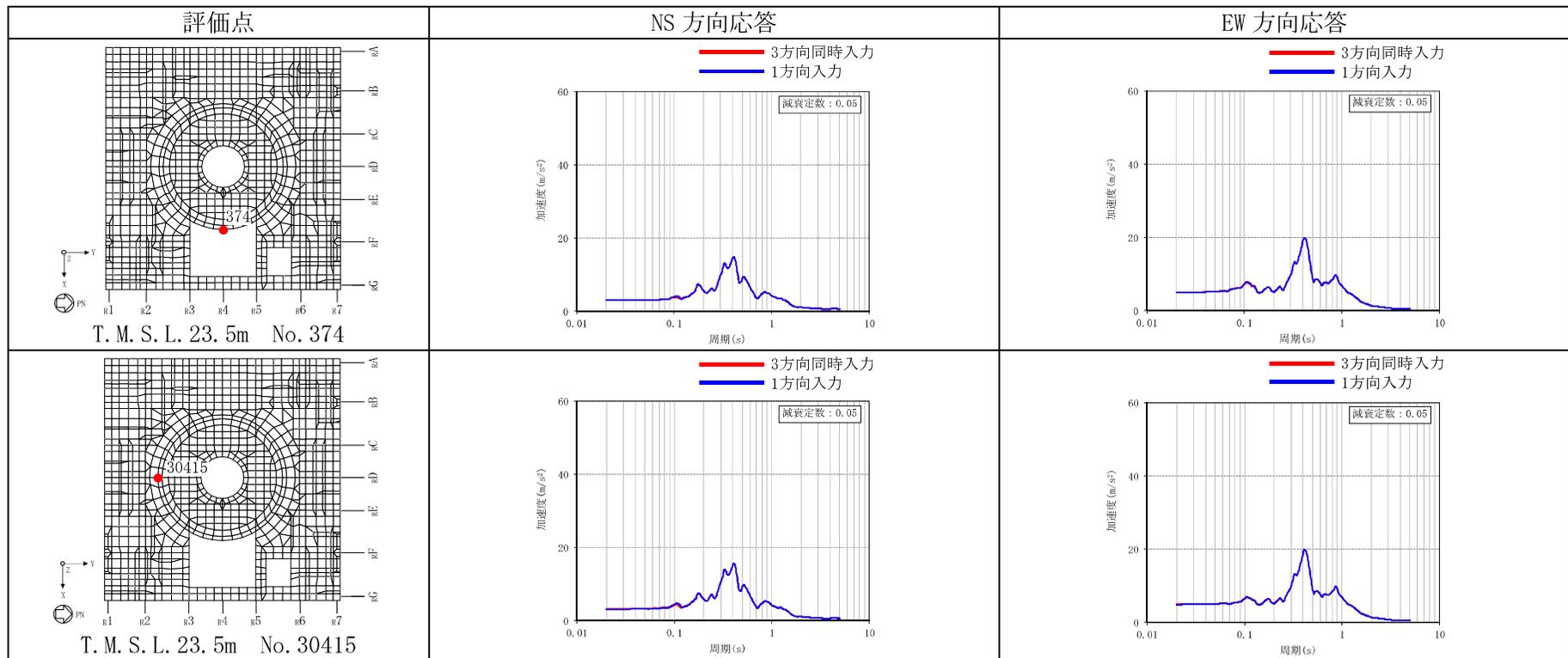


表 3-6 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (Sd-2) (7/8)

(g) T.M.S.L. 31.7m 外壁部

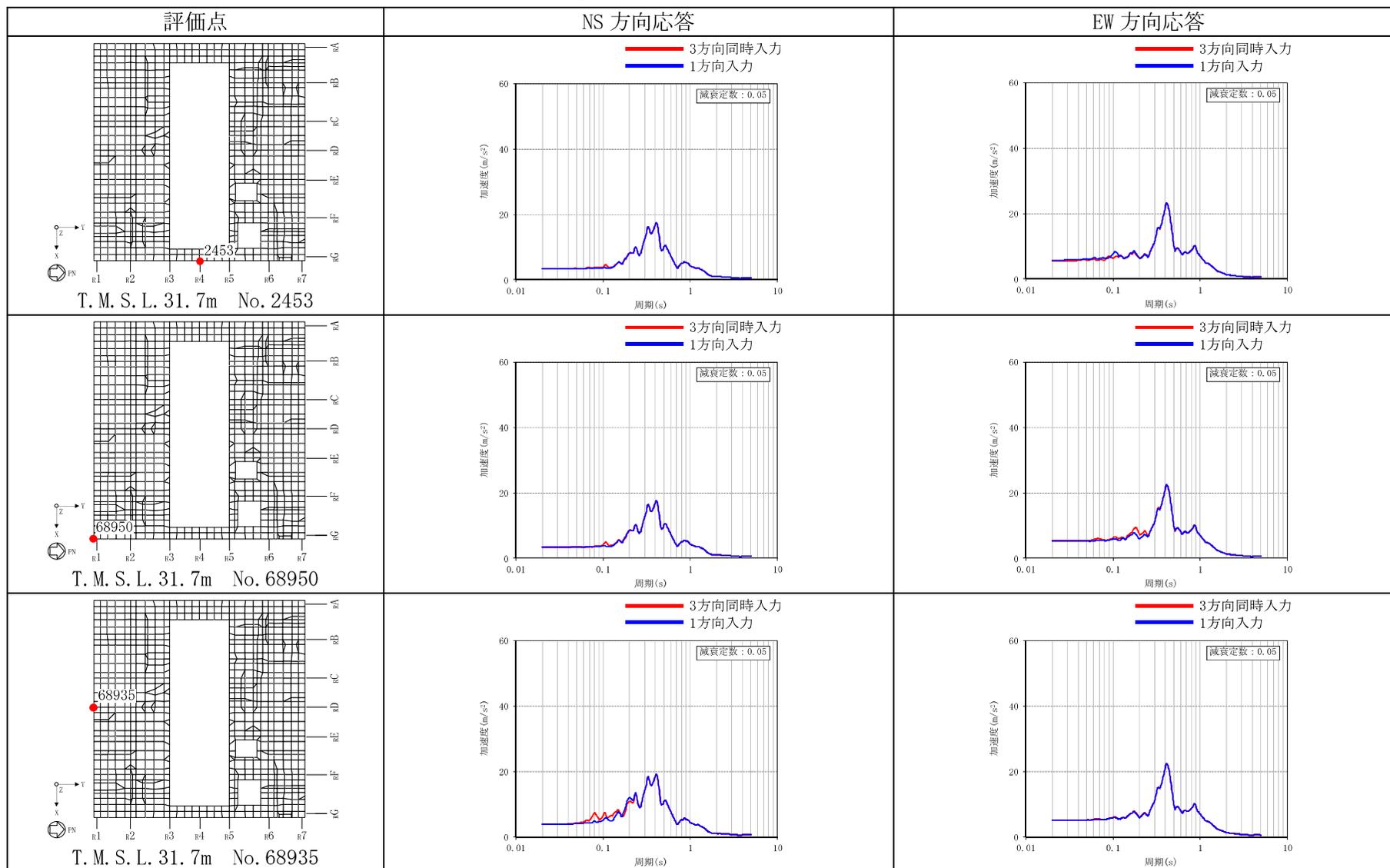
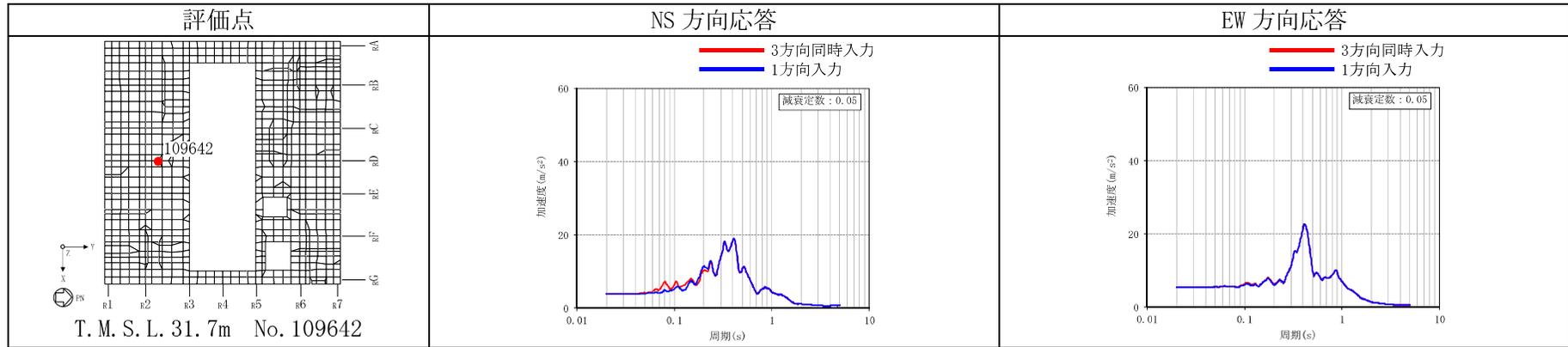


表 3-6 建屋模擬モデル (3次元 FEM) の 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (Sd-2) (8/8)

(h) T. M. S. L. 31.7m RCCV 部



### 3.2.5 まとめ

建屋模擬モデル（3次元 FEM）及び質点系対応モデル（3次元 FEM）を用いて地震応答解析を実施し、応答性状について分析・考察を行った。

基礎のロッキング振動による鉛直方向への影響について、ロッキング振動の影響はほとんどないことを確認した。

床柔性の影響について、建屋模擬モデルと質点系対応モデルでの応答比較をした結果、応答の差は小さく、床柔性の影響がほとんどないことを確認した。

鉛直軸回りのねじれ振動の影響並びに水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響について、建屋模擬モデルを用いて検討した結果、3 方向同時入力と 1 方向入力時での応答の差異がほとんどないことから、1 方向入力時の応答に対し、これらの影響がほとんどないことを確認した。

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

### 3.3 建屋耐震性評価への影響検討

#### 3.3.1 検討方針

建屋耐震性評価への影響検討として、建屋模擬モデル（3次元 FEM）の応答及び質点系モデルの応答を比較する。両モデルともに弾性設計用地震動  $S_d$  に対する地震応答解析を実施し、以下の2項目について検討を行う。

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

②3次元的な応答特性（応答補正率）を考慮した建屋影響検討

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

#### 3.3.2 建屋模擬モデル及び質点系モデルの最大応答値の比較検討

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

評価に当たっては、質点系モデルの全質点での応答を評価対象とし、質点系モデルの各質点に対応する建屋模擬モデル（3次元 FEM）の節点としては、図 3-5 に示す節点とした。

比較した結果を図 3-6 に示す。なお、図 3-6 における建屋模擬モデルの最大応答加速度は、図 3-5 に示す節点における最大応答加速度をレベルごとに平均した値である。なお、各節点の最大応答値については「別紙 3-2 3次元 FEM モデルによる応答結果の整理」に示す。

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

したがって、以降の「3.3.3 3次元的な応答特性（応答補正率）を考慮した建屋影響検討」により、建屋への影響検討を実施する。

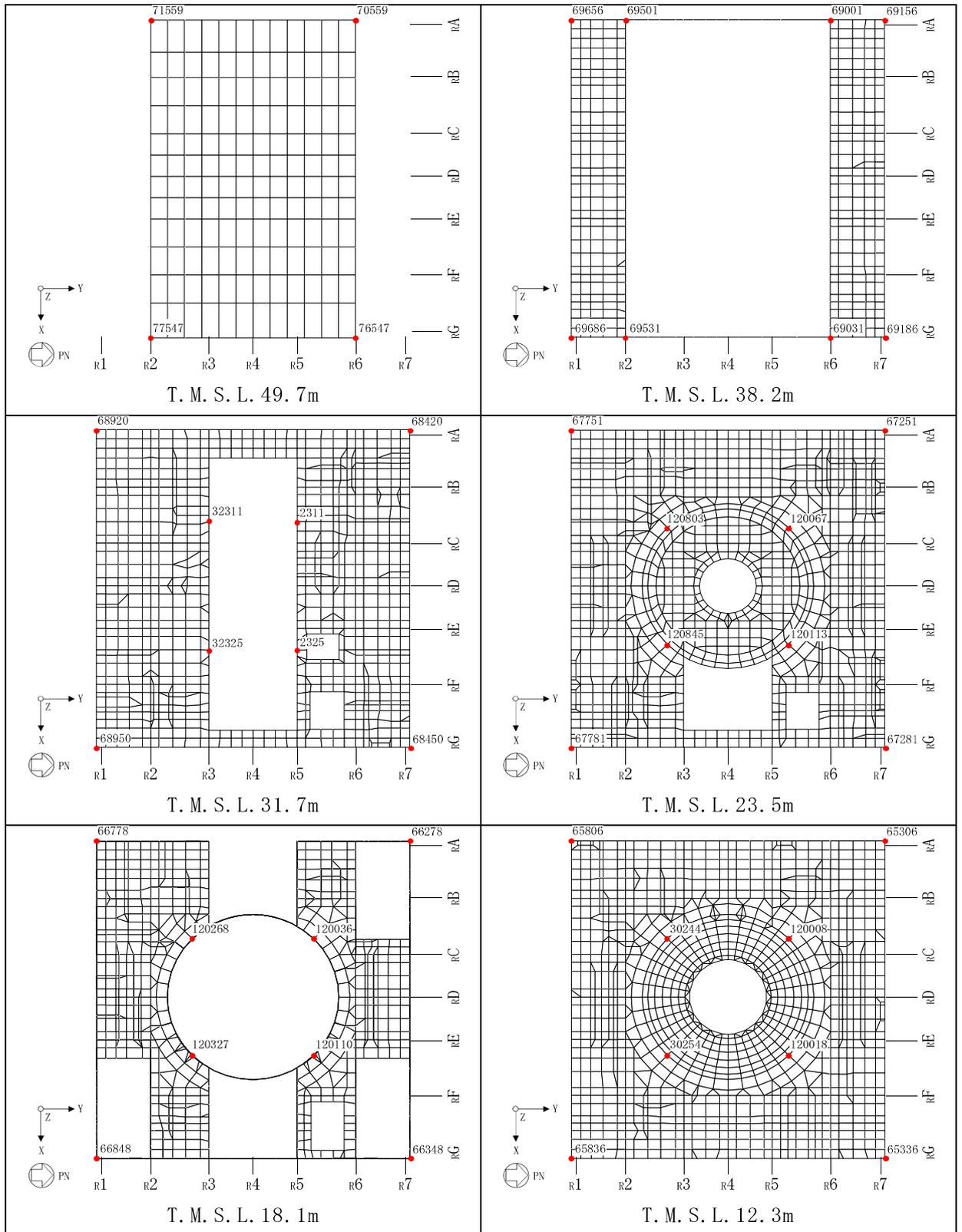


図 3-5 応答評価位置 (1/2)

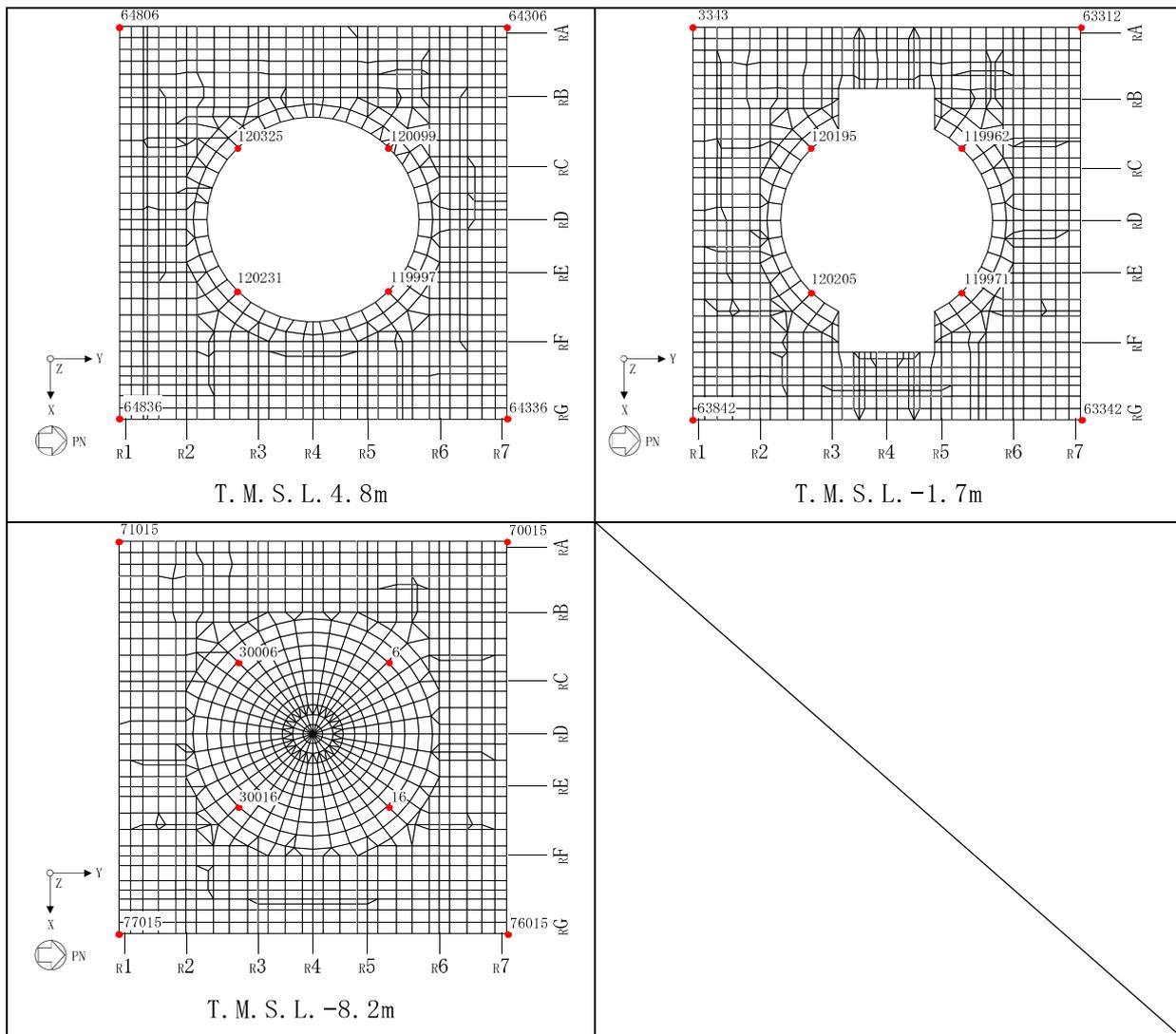
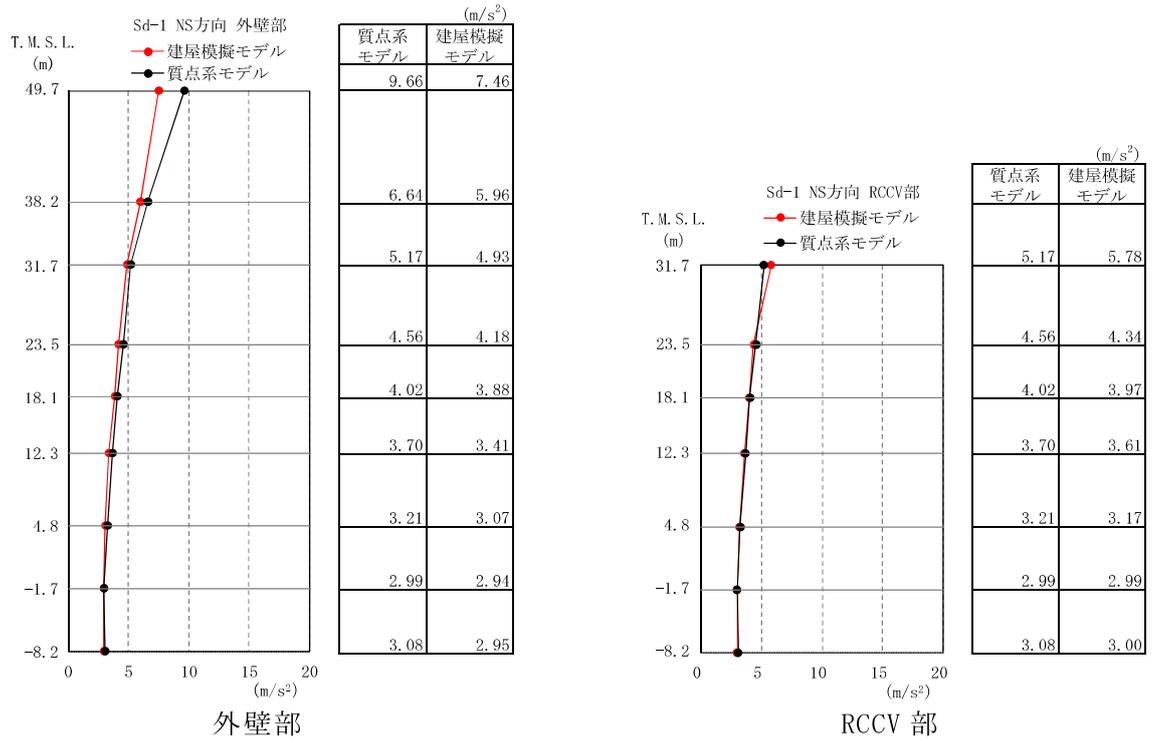
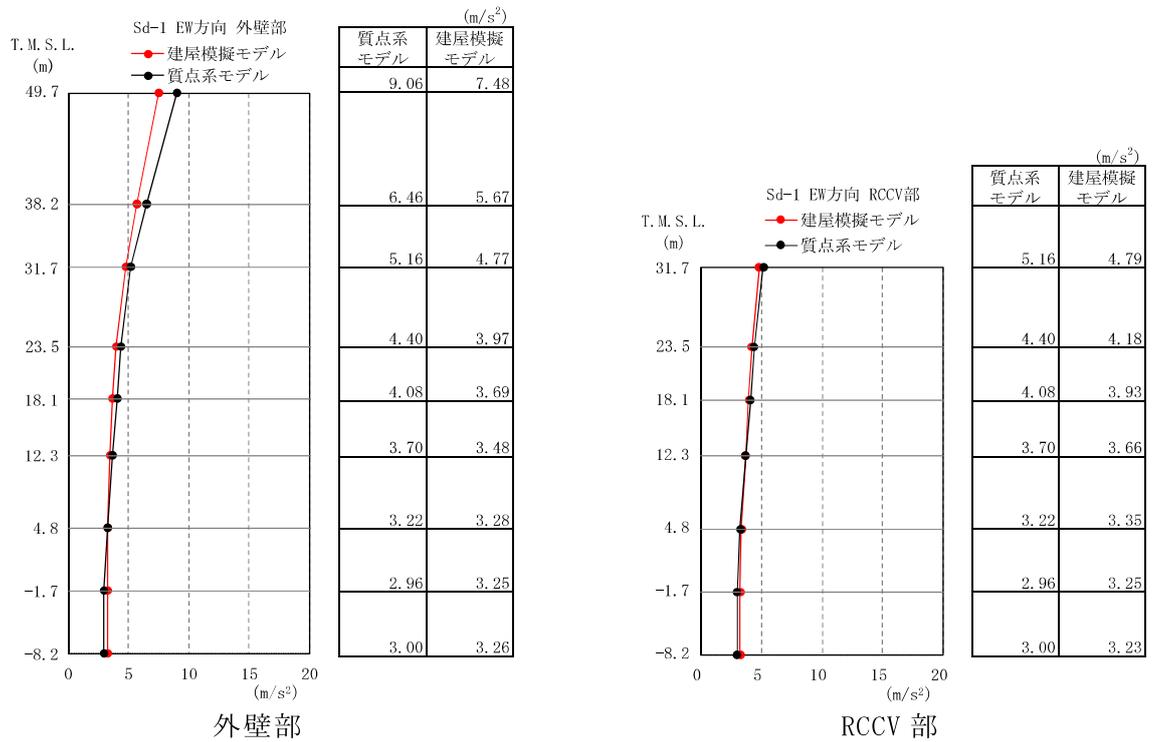


図 3-5 応答評価位置 (2/2)



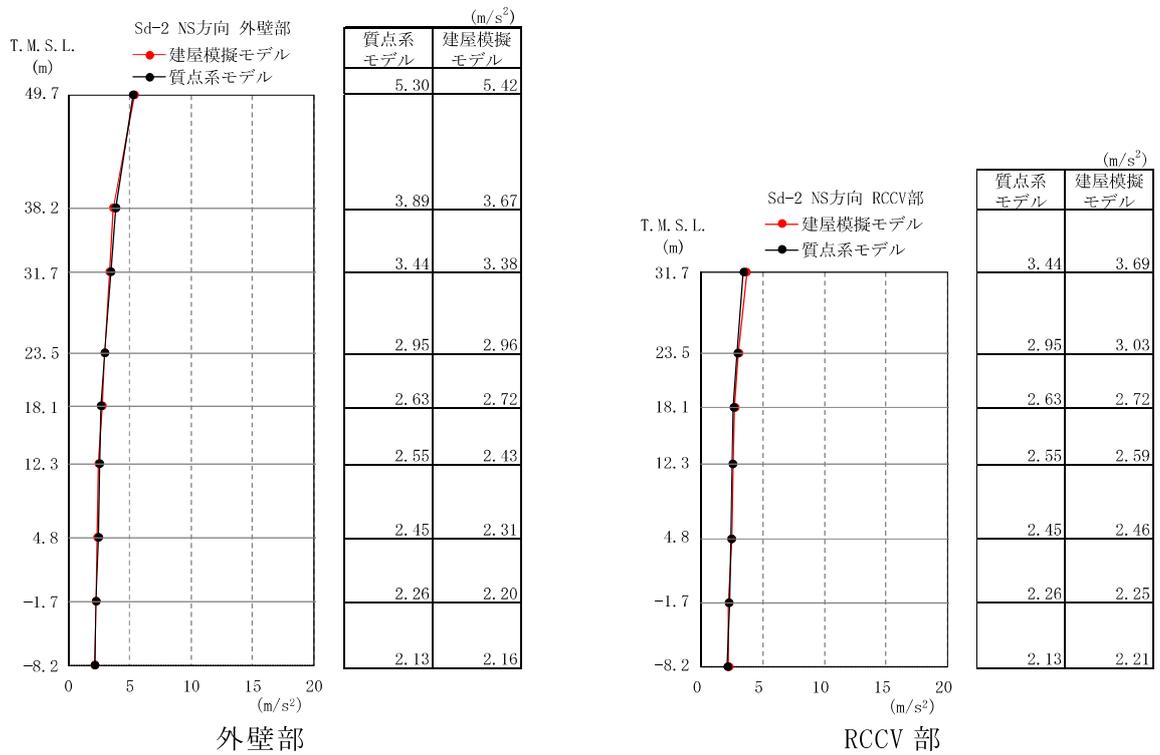
(a) Sd-1 NS方向加振時 NS方向応答



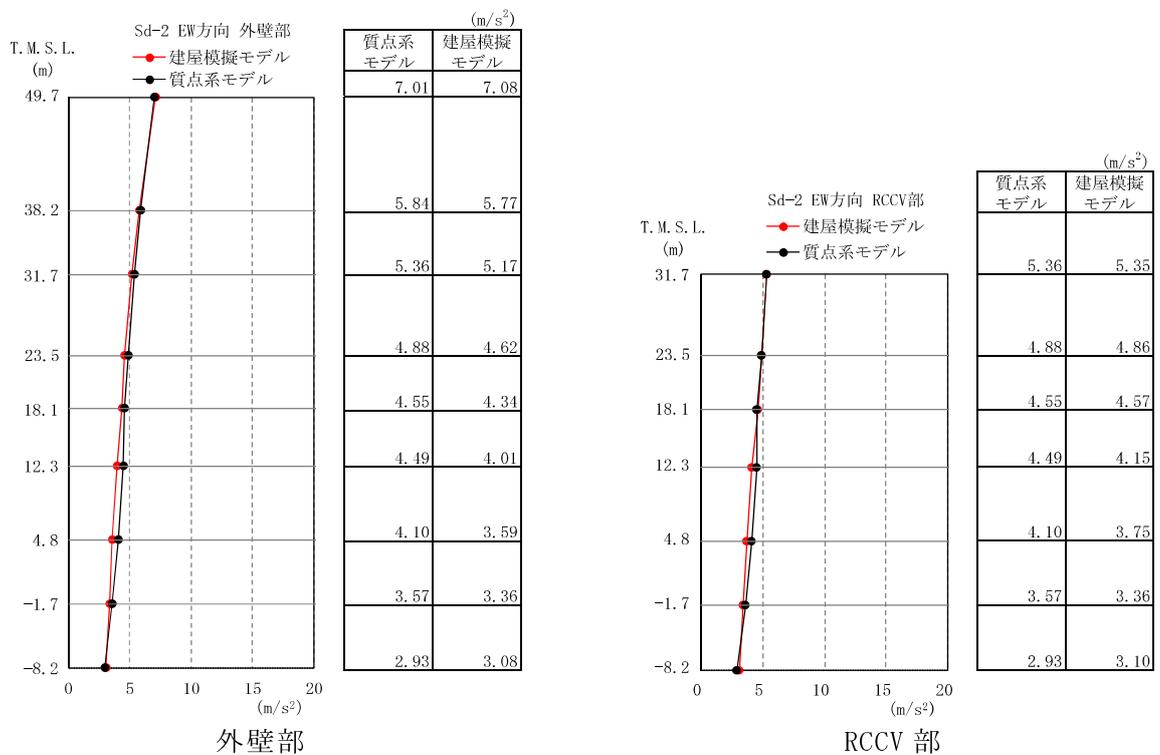
(b) Sd-1 EW方向加振時 EW方向応答

注：建屋模擬モデルは3次元FEMモデルである。

図3-6 最大応答加速度の比較 (1/2)



(a) Sd-2 NS方向加振時 NS方向応答



(b) Sd-2 EW方向加振時 EW方向応答

注：建屋模擬モデルは3次元FEMモデルである。

図3-6 最大応答加速度の比較 (2/2)

### 3.3.3 3次元的な応答特性（応答補正率）を考慮した建屋影響検討

「3.3.2 建屋模擬モデル及び質点系モデルの最大応答値の比較検討」の結果を踏まえて、質点系モデルに対して、3次元FEMモデルを用いた3次元的な応答補正を考慮し、建屋耐震性評価への影響検討を実施する。

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

図3-7に検討フローを示す。

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

なお、VI-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」では、基準地震動  $S_s$  による質点系モデルを用いた地震応答解析を行い、耐震壁のせん断ひずみを検討している。ここでは耐震壁のせん断ひずみについてのみ検討を行う。

具体的には、質点系モデルの基準地震動  $S_s$  に対する最大応答のうち、せん断応力度  $\tau$  に応答補正比率  $\zeta$  を乗じて、3次元的な応答特性を踏まえたせん断応力度を算定する。得られたせん断応力度を質点系モデルの各層のせん断スケルトン曲線上にプロットし、せん断ひずみが評価基準値 ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) を超えないことを確認する。ここで、第1折点を超える場合は、エネルギー一定則によりせん断ひずみを評価する。エネルギー一定則によるせん断ひずみの評価方法を図3-8に示す。せん断ひずみを確認した結果、せん断ひずみが評価基準値を超えるものは詳細検討を実施する。

評価において選定した3次元FEMモデルにおける代表節点を図3-5に、質点系モデルでの評価部位を図3-9に示す。

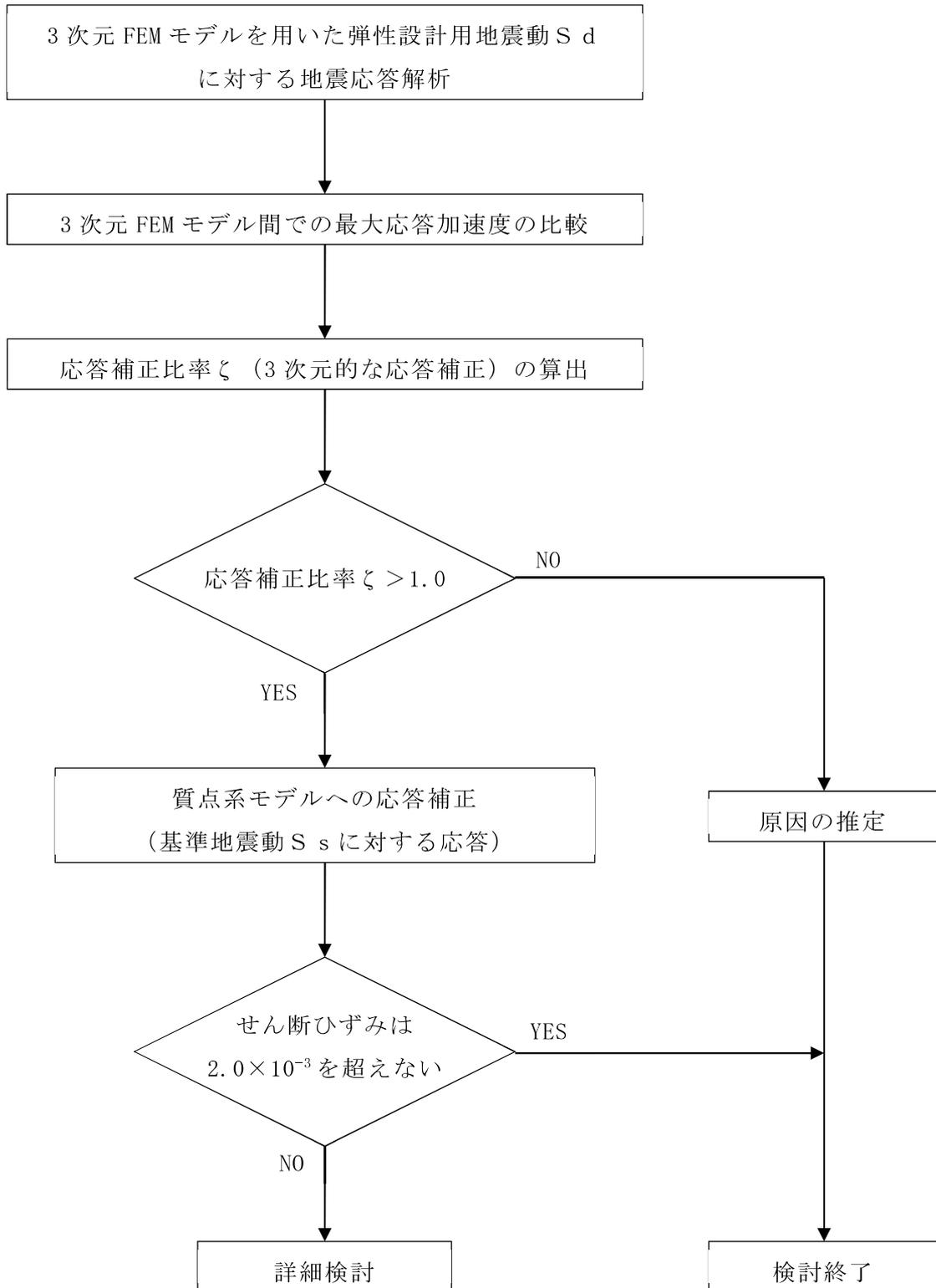


図 3-7 検討フロー

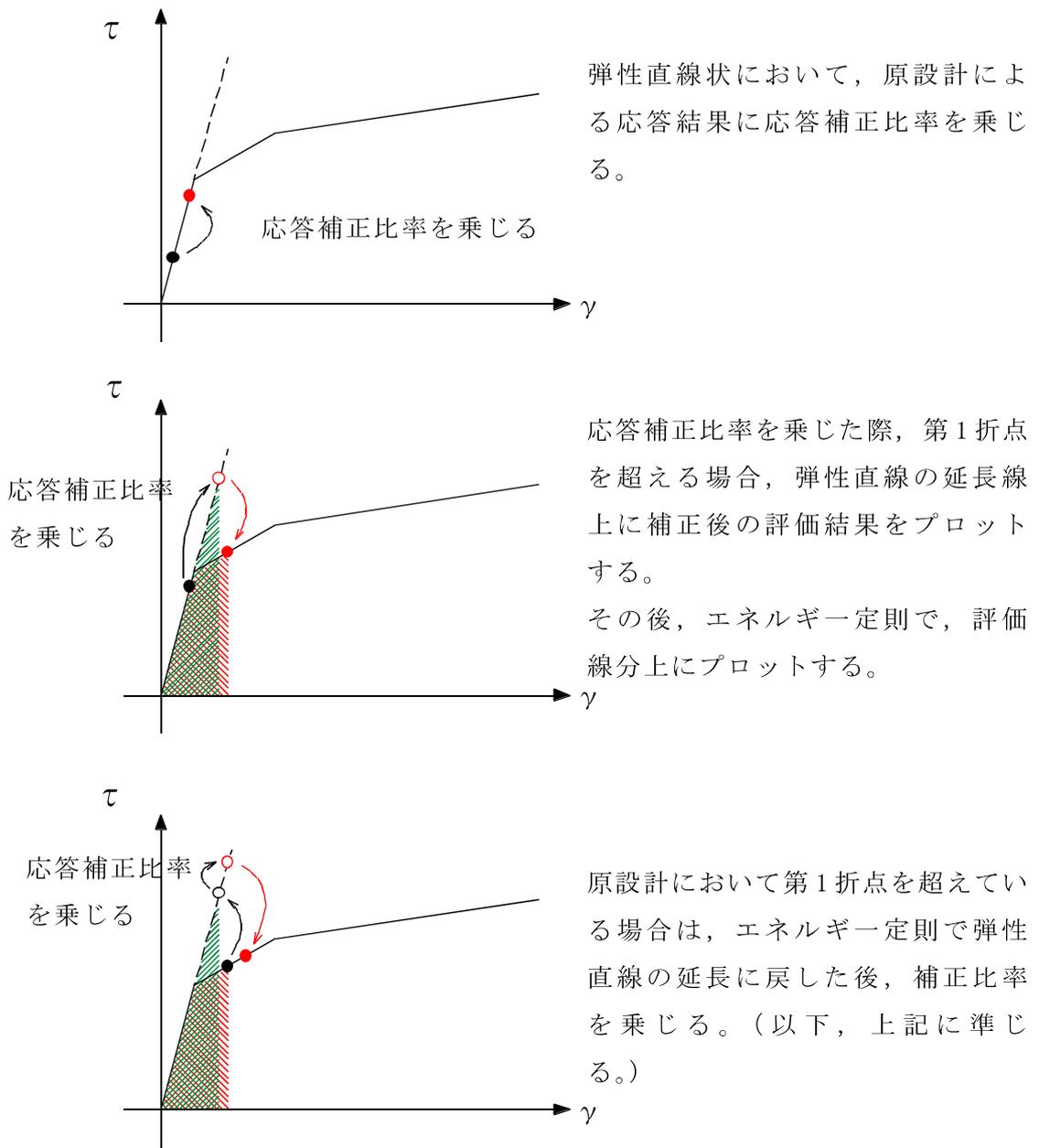


図 3-8 エネルギー一定則によるせん断ひずみの評価方法

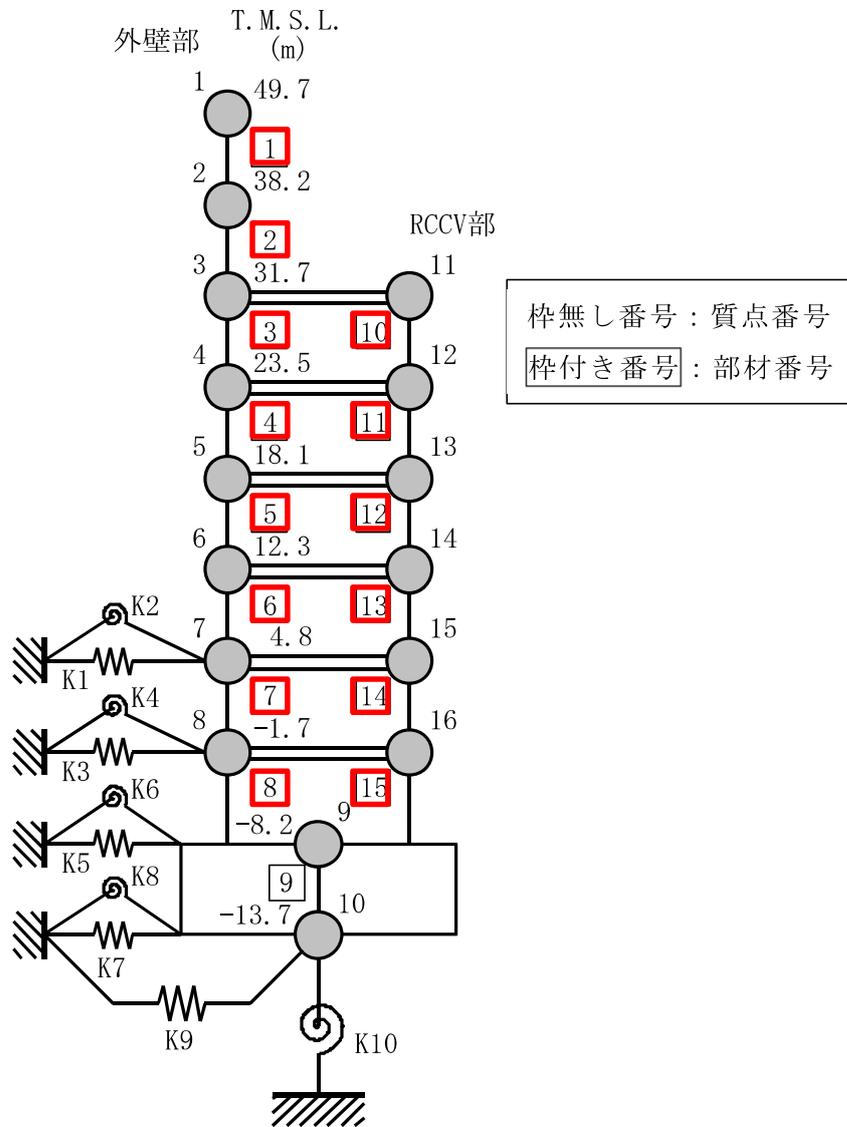


図 3-9 質点系モデルの評価部位

(1) 応答補正比率の算出

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

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

また、質点系モデルにおいて、ねじれ振動を考慮していないことから、建屋模擬モデル(3次元FEM)及び質点系モデルと諸条件を整合させた質点系対応モデル(3次元FEM)の最大応答加速度を比較し、応答補正比率 $\beta$ を算出する。

得られた $\alpha$ 及び $\beta$ を乗じて、建屋評価用の応答補正比率 $\zeta$ を以下のように算出する。

- ① 応答補正比率 $\alpha$ 及び $\beta$ はそれぞれ評価点ごとに定める。
  - ② 応答補正比率 $\alpha$ 及び $\beta$ は保守的な評価を実施するため、それぞれ1.0以上とする。
  - ③ 応答補正比率 $\zeta$ は、層ごとの各評価点の $\alpha \cdot \beta$ の最大値を用いて定め、局所的な応答を踏まえたものとなるよう設定する。
- 応答補正比率 $\zeta$ の算出式を以下に示す。

$$\text{建屋評価用の応答補正比率 } \zeta = \text{Max}(\alpha \cdot \beta) \dots\dots\dots (3. 1)$$

(Max( $\alpha \cdot \beta$ ): 層ごとの各評価点の $\alpha \cdot \beta$ の最大値)

ここで、

3方向同時入力の応答補正比率 $\alpha$

$$= \frac{\text{3方向同時入力による最大応答加速度}}{\text{1方向入力による最大応答加速度}} \dots\dots\dots (3. 2)$$

(ただし、 $\zeta$ を算出する場合は、 $\alpha \geq 1.0$ )

ねじれ振動の応答補正比率 $\beta$

$$= \frac{\text{建屋模擬モデル(3次元FEM)の最大応答加速度}}{\text{質点系対応モデル(3次元FEM)の最大応答加速度}} \dots\dots (3. 3)$$

(ただし、 $\zeta$ を算出する場合は、 $\beta \geq 1.0$ )

応答補正比率 $\alpha$ 、 $\beta$ 及び $\zeta$ の算定結果を表3-7~表3-12に示す。応答補正比率 $\zeta$ は1.03~1.30の範囲にある。

表 3-7 建屋耐震性評価用の応答補正比率  $\alpha$  の算定 (NS 方向) (1/2)

評価点			Sd-1 NS方向			Sd-2 NS方向			採用 $\alpha$	
			最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\alpha_{Sd-1}$ ②/①	最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\alpha_{Sd-2}$ ④/③		
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点	① 1方向入力	② 3方向入力		③ 1方向入力	④ 3方向入力			
外 壁 部	49.7	1	71559	7.55	7.64	1.02	5.46	5.41	0.99	1.02
			70559	7.55	7.69	1.02	5.42	5.48	1.02	1.02
			77547	7.38	7.61	1.04	5.43	5.35	0.986	1.04
			76547	7.37	7.52	1.03	5.37	5.31	0.989	1.03
	38.2	2	69656	6.15	6.16	1.01	3.72	3.83	1.03	1.03
			69501	5.92	5.97	1.01	3.71	3.76	1.02	1.02
			69001	5.94	5.99	1.01	3.68	3.69	1.01	1.01
			69156	6.20	6.23	1.01	3.71	3.78	1.02	1.02
			69686	5.99	6.02	1.01	3.63	3.65	1.01	1.01
			69531	5.77	5.84	1.02	3.64	3.65	1.01	1.02
			69031	5.77	5.86	1.02	3.63	3.63	1.00	1.02
			69186	5.94	6.05	1.02	3.63	3.76	1.04	1.04
	31.7	3	68920	4.96	4.95	1.00	3.42	3.45	1.01	1.01
			68420	5.00	5.10	1.02	3.40	3.32	0.977	1.02
			68950	4.84	4.89	1.02	3.36	3.38	1.01	1.02
			68450	4.90	4.96	1.02	3.34	3.33	1.00	1.02
	23.5	4	67751	4.19	4.15	0.991	2.98	3.00	1.01	1.01
			67251	4.19	4.28	1.03	2.97	2.89	0.974	1.03
			67781	4.15	4.20	1.02	2.93	2.95	1.01	1.02
			67281	4.19	4.21	1.01	2.94	2.95	1.01	1.01
	18.1	5	66778	3.77	3.83	1.02	2.67	2.70	1.02	1.02
			66278	3.91	3.95	1.02	2.75	2.68	0.975	1.02
			66848	3.91	3.91	1.00	2.73	2.76	1.02	1.02
			66348	3.93	3.97	1.02	2.75	2.76	1.01	1.02
	12.3	6	65806	3.38	3.53	1.05	2.41	2.40	1.00	1.05
			65306	3.42	3.35	0.980	2.44	2.44	1.00	1.00
			65836	3.43	3.32	0.968	2.44	2.42	0.992	1.00
			65336	3.40	3.43	1.01	2.43	2.39	0.984	1.01
	4.8	7	64806	3.06	3.12	1.02	2.30	2.38	1.04	1.04
			64306	3.06	3.20	1.05	2.32	2.33	1.01	1.05
			64836	3.08	3.03	0.984	2.32	2.33	1.01	1.01
			64336	3.07	3.14	1.03	2.31	2.33	1.01	1.03
-1.7	8	3343	2.95	2.94	1.00	2.20	2.25	1.03	1.03	
		63312	2.96	3.02	1.03	2.21	2.23	1.01	1.03	
		63842	2.93	2.94	1.01	2.21	2.31	1.05	1.05	
		63342	2.93	3.11	1.07	2.20	2.21	1.01	1.07	

注 1 : 最大応答加速度 (①~④) は、いずれも建屋模擬モデル (3次元 FEM) の応答である。

注 2 : 採用  $\alpha$  は、 $\alpha_{Sd-1}$  及び  $\alpha_{Sd-2}$  の大きい方を採用し、いずれも 1 未満の場合は保守的に 1 を採用する。

表 3-7 建屋耐震性評価用の応答補正比率  $\alpha$  の算定 (NS 方向) (2/2)

評価点			Sd-1 NS方向			Sd-2 NS方向			採用 $\alpha$	
			最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\alpha_{Sd-1}$ ②/①	最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\alpha_{Sd-2}$ ④/③		
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点	① 1方向入力	② 3方向入力		③ 1方向入力	④ 3方向入力			
R C C V 部	31.7	11	32311	5.66	5.67	1.01	3.75	3.79	1.02	1.02
			2311	5.90	6.02	1.03	3.64	3.71	1.02	1.03
			32325	5.49	5.52	1.01	3.73	3.69	0.990	1.01
			2325	6.05	6.07	1.01	3.63	3.86	1.07	1.07
	23.5	12	120803	4.28	4.33	1.02	3.00	3.05	1.02	1.02
			120067	4.37	4.36	1.00	3.06	3.06	1.00	1.00
			120845	4.30	4.31	1.01	3.00	3.02	1.01	1.01
			120113	4.41	4.38	0.994	3.06	3.13	1.03	1.03
	18.1	13	120268	3.94	4.01	1.02	2.73	2.76	1.02	1.02
			120036	3.97	3.92	0.99	2.73	2.75	1.01	1.01
			120327	3.99	4.00	1.01	2.72	2.72	1.00	1.01
			120110	4.00	3.97	0.993	2.72	2.79	1.03	1.03
	12.3	14	30244	3.56	3.60	1.02	2.58	2.58	1.00	1.02
			120008	3.61	3.60	1.00	2.59	2.62	1.02	1.02
			30254	3.61	3.58	0.992	2.59	2.59	1.00	1.00
			120018	3.64	3.64	1.00	2.60	2.63	1.02	1.02
	4.8	15	120325	3.14	3.17	1.01	2.45	2.51	1.03	1.03
			120099	3.14	3.12	0.994	2.45	2.48	1.02	1.02
			120231	3.20	3.18	0.994	2.47	2.46	1.00	1.00
			119997	3.20	3.34	1.05	2.47	2.52	1.03	1.05
-1.7	16	120195	3.00	2.99	1.00	2.25	2.29	1.02	1.02	
		119962	3.00	3.02	1.01	2.25	2.28	1.02	1.02	
		120205	2.99	2.96	0.990	2.24	2.29	1.03	1.03	
		119971	2.98	3.09	1.04	2.25	2.28	1.02	1.04	

注 1 : 最大応答加速度 (①~④) は、いずれも建屋模擬モデル (3次元 FEM) の応答である。

注 2 : 採用  $\alpha$  は、 $\alpha_{Sd-1}$  及び  $\alpha_{Sd-2}$  の大きい方を採用し、いずれも 1 未満の場合は保守的に 1 を採用する。

表 3-8 建屋耐震性評価用の応答補正比率  $\alpha$  の算定 (EW 方向) (1/2)

評価点			Sd-1 EW方向			Sd-2 EW方向			採用 $\alpha$	
			最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\alpha_{Sd-1}$ ②/①	最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\alpha_{Sd-2}$ ④/③		
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点	① 1方向入力	② 3方向入力		③ 1方向入力	④ 3方向入力			
外 壁 部	49.7	1	71559	7.49	7.30	0.975	7.08	6.73	0.951	1.00
			70559	7.48	7.62	1.02	7.11	7.54	1.07	1.07
			77547	7.47	7.85	1.06	7.04	7.32	1.04	1.06
			76547	7.49	7.13	0.952	7.09	6.51	0.919	1.00
	38.2	2	69656	5.62	5.69	1.02	5.73	5.13	0.896	1.02
			69501	5.73	5.95	1.04	5.84	6.04	1.04	1.04
			69001	5.78	5.97	1.04	5.87	5.92	1.01	1.04
			69156	5.59	5.93	1.07	5.72	5.86	1.03	1.07
			69686	5.63	6.25	1.12	5.71	6.29	1.11	1.12
			69531	5.78	6.01	1.04	5.86	5.57	0.951	1.04
			69031	5.66	5.78	1.03	5.75	5.60	0.974	1.03
			69186	5.58	5.55	1.00	5.72	5.47	0.957	1.00
	31.7	3	68920	4.74	4.78	1.01	5.13	4.95	0.965	1.01
			68420	4.80	5.08	1.06	5.19	5.12	0.987	1.06
			68950	4.77	5.09	1.07	5.16	5.37	1.05	1.07
			68450	4.79	4.93	1.03	5.18	5.17	1.00	1.03
	23.5	4	67751	3.94	3.98	1.02	4.60	4.52	0.983	1.02
			67251	3.99	4.22	1.06	4.63	4.65	1.01	1.06
			67781	3.97	4.17	1.06	4.64	4.71	1.02	1.06
			67281	3.98	4.13	1.04	4.62	4.65	1.01	1.04
	18.1	5	66778	3.66	3.60	0.984	4.29	4.29	1.00	1.00
			66278	3.70	3.79	1.03	4.35	4.42	1.02	1.03
			66848	3.71	3.86	1.05	4.36	4.44	1.02	1.05
			66348	3.70	3.72	1.01	4.35	4.34	1.00	1.01
	12.3	6	65806	3.46	3.43	0.992	4.00	4.00	1.00	1.00
			65306	3.48	3.37	0.969	4.01	4.05	1.01	1.01
			65836	3.50	3.70	1.06	4.02	4.00	0.996	1.06
			65336	3.48	3.54	1.02	4.01	3.96	0.988	1.02
4.8	7	64806	3.27	3.25	0.994	3.59	3.63	1.02	1.02	
		64306	3.28	3.23	0.985	3.59	3.65	1.02	1.02	
		64836	3.29	3.38	1.03	3.59	3.60	1.01	1.03	
		64336	3.28	3.34	1.02	3.59	3.53	0.984	1.02	
-1.7	8	3343	3.25	3.24	1.00	3.37	3.39	1.01	1.01	
		63312	3.25	3.29	1.02	3.34	3.37	1.01	1.02	
		63842	3.25	3.28	1.01	3.37	3.38	1.01	1.01	
		63342	3.25	3.26	1.01	3.34	3.36	1.01	1.01	

注 1 : 最大応答加速度 (①~④) は、いずれも建屋模擬モデル (3次元 FEM) の応答である。

注 2 : 採用  $\alpha$  は、 $\alpha_{Sd-1}$  及び  $\alpha_{Sd-2}$  の大きい方を採用し、いずれも 1 未満の場合は保守的に 1 を採用する。

表 3-8 建屋耐震性評価用の応答補正比率  $\alpha$  の算定 (EW 方向) (2/2)

評価点			Sd-1 EW方向			Sd-2 EW方向			採用 $\alpha$	
			最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\alpha_{Sd-1}$ ②/①	最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\alpha_{Sd-2}$ ④/③		
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点	① 1方向入力	② 3方向入力		③ 1方向入力	④ 3方向入力			
R C C V 部	31.7	11	32311	4.79	5.10	1.07	5.36	5.51	1.03	1.07
			2311	4.79	5.14	1.08	5.35	5.52	1.04	1.08
			32325	4.78	4.86	1.02	5.33	5.25	0.985	1.02
			2325	4.81	5.20	1.09	5.35	5.21	0.974	1.09
	23.5	12	120803	4.13	4.14	1.01	4.81	4.81	1.00	1.01
			120067	4.19	4.17	1.00	4.88	4.91	1.01	1.01
			120845	4.16	4.15	1.00	4.84	4.90	1.02	1.02
			120113	4.22	4.20	0.996	4.91	4.92	1.01	1.01
	18.1	13	120268	3.91	3.87	0.990	4.55	4.51	0.992	1.00
			120036	3.91	3.90	1.00	4.55	4.53	1.00	1.00
			120327	3.94	3.95	1.01	4.58	4.61	1.01	1.01
			120110	3.96	3.94	0.995	4.60	4.62	1.01	1.01
	12.3	14	30244	3.65	3.67	1.01	4.13	4.09	0.991	1.01
			120008	3.67	3.64	0.992	4.17	4.15	1.00	1.00
			30254	3.66	3.78	1.04	4.13	4.13	1.00	1.04
			120018	3.67	3.69	1.01	4.17	4.20	1.01	1.01
	4.8	15	120325	3.35	3.34	1.00	3.74	3.75	1.01	1.01
			120099	3.35	3.25	0.971	3.75	3.75	1.00	1.00
			120231	3.35	3.40	1.02	3.73	3.74	1.01	1.02
			119997	3.36	3.34	1.00	3.79	3.80	1.01	1.01
-1.7	16	120195	3.24	3.23	1.00	3.38	3.42	1.02	1.02	
		119962	3.25	3.27	1.01	3.35	3.38	1.01	1.01	
		120205	3.24	3.25	1.01	3.37	3.37	1.00	1.01	
		119971	3.25	3.26	1.01	3.36	3.40	1.02	1.02	

注 1 : 最大応答加速度 (①~④) は、いずれも建屋模擬モデル (3次元 FEM) の応答である。

注 2 : 採用  $\alpha$  は、 $\alpha_{Sd-1}$  及び  $\alpha_{Sd-2}$  の大きい方を採用し、いずれも 1 未満の場合は保守的に 1 を採用する。

表 3-9 建屋耐震性評価用の応答補正比率  $\beta$  の算定 (NS 方向) (1/2)

評価点			Sd-1 NS方向加振時 NS方向応答			Sd-2 NS方向加振時 NS方向応答			採用 $\beta$	
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点	最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\beta_{Sd-1}$ ②/①	最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\beta_{Sd-2}$ ④/③		
			① 質点系対応 モデル	② 建屋模擬 モデル		③ 質点系対応 モデル	④ 建屋模擬 モデル			
外 壁 部	49.7	1	71559	9.46	7.55	0.799	5.23	5.41	1.04	1.04
			70559	9.46	7.55	0.799	5.23	5.48	1.05	1.05
			77547	9.42	7.38	0.784	5.18	5.35	1.04	1.04
			76547	9.42	7.37	0.783	5.18	5.31	1.03	1.03
	38.2	2	69656	6.56	6.15	0.938	3.80	3.83	1.01	1.01
			69501	6.54	5.92	0.906	3.80	3.76	0.990	1.00
			69001	6.54	5.94	0.909	3.76	3.69	0.982	1.00
			69156	6.56	6.20	0.946	3.77	3.78	1.01	1.01
			69686	6.56	5.99	0.914	3.75	3.65	0.974	1.00
			69531	6.54	5.77	0.883	3.75	3.65	0.974	1.00
			69031	6.48	5.77	0.891	3.71	3.63	0.979	1.00
			69186	6.50	5.94	0.914	3.71	3.76	1.02	1.02
	31.7	3	68920	5.05	4.96	0.983	3.21	3.45	1.08	1.08
			68420	5.04	5.00	0.993	3.21	3.32	1.04	1.04
			68950	5.01	4.84	0.967	3.20	3.38	1.06	1.06
			68450	5.00	4.90	0.980	3.19	3.33	1.05	1.05
	23.5	4	67751	4.20	4.19	0.998	2.76	3.00	1.09	1.09
			67251	4.21	4.19	1.00	2.76	2.89	1.05	1.05
			67781	4.20	4.15	0.989	2.75	2.95	1.08	1.08
			67281	4.20	4.19	1.00	2.75	2.95	1.08	1.08
	18.1	5	66778	3.79	3.77	1.00	2.48	2.70	1.09	1.09
			66278	3.90	3.91	1.01	2.56	2.68	1.05	1.05
			66848	3.93	3.91	1.00	2.57	2.76	1.08	1.08
			66348	3.94	3.93	1.00	2.58	2.76	1.07	1.07
	12.3	6	65806	3.43	3.38	0.986	2.31	2.40	1.04	1.04
			65306	3.44	3.42	0.995	2.31	2.44	1.06	1.06
			65836	3.45	3.43	0.995	2.33	2.42	1.04	1.04
			65336	3.45	3.40	0.986	2.32	2.39	1.04	1.04
4.8	7	64806	3.08	3.06	0.994	2.30	2.38	1.04	1.04	
		64306	3.08	3.06	0.994	2.30	2.33	1.02	1.02	
		64836	3.08	3.08	1.00	2.30	2.33	1.02	1.02	
		64336	3.08	3.07	1.00	2.30	2.33	1.02	1.02	
-1.7	8	3343	2.84	2.95	1.04	2.17	2.25	1.04	1.04	
		63312	2.84	2.96	1.05	2.17	2.23	1.03	1.05	
		63842	2.84	2.93	1.04	2.18	2.31	1.06	1.06	
		63342	2.84	2.93	1.04	2.18	2.21	1.02	1.04	

注 1 : 質点系対応モデル及び建屋模擬モデルは、いずれも 3 次元 FEM モデルである。

注 2 : 採用  $\beta$  は、 $\beta_{Sd-1}$  及び  $\beta_{Sd-2}$  の大きい方を採用し、いずれも 1 未満の場合は保守的に 1 を採用する。

表 3-9 建屋耐震性評価用の応答補正比率  $\beta$  の算定 (NS 方向) (2/2)

評価点			Sd-1 NS方向加振時 NS方向応答			Sd-2 NS方向加振時 NS方向応答			採用 $\beta$	
			最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\beta_{Sd-1}$ ②/①	最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\beta_{Sd-2}$ ④/③		
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点	① 質点系対応 モデル	② 建屋模擬 モデル		③ 質点系対応 モデル	④ 建屋模擬 モデル			
R C C V 部	31.7	11	32311	5.15	5.66	1.10	3.22	3.79	1.18	1.18
			2311	5.16	5.90	1.15	3.22	3.71	1.16	1.16
			32325	5.14	5.49	1.07	3.22	3.69	1.15	1.15
			2325	5.17	6.05	1.18	3.21	3.86	1.21	1.21
	23.5	12	120803	4.15	4.28	1.04	2.72	3.05	1.13	1.13
			120067	4.22	4.37	1.04	2.76	3.06	1.11	1.11
			120845	4.15	4.30	1.04	2.72	3.02	1.12	1.12
			120113	4.21	4.41	1.05	2.76	3.13	1.14	1.14
	18.1	13	120268	3.81	3.94	1.04	2.49	2.76	1.11	1.11
			120036	3.84	3.97	1.04	2.50	2.75	1.10	1.10
			120327	3.84	3.99	1.04	2.50	2.72	1.09	1.09
			120110	3.84	4.00	1.05	2.50	2.79	1.12	1.12
	12.3	14	30244	3.44	3.56	1.04	2.33	2.58	1.11	1.11
			120008	3.46	3.61	1.05	2.33	2.62	1.13	1.13
			30254	3.45	3.61	1.05	2.34	2.59	1.11	1.11
			120018	3.46	3.64	1.06	2.33	2.63	1.13	1.13
	4.8	15	120325	3.09	3.14	1.02	2.32	2.51	1.09	1.09
			120099	3.09	3.14	1.02	2.32	2.48	1.07	1.07
			120231	3.10	3.20	1.04	2.32	2.46	1.07	1.07
			119997	3.10	3.20	1.04	2.32	2.52	1.09	1.09
-1.7	16	120195	2.86	3.00	1.05	2.19	2.29	1.05	1.05	
		119962	2.85	3.00	1.06	2.19	2.28	1.05	1.06	
		120205	2.86	2.99	1.05	2.19	2.29	1.05	1.05	
		119971	2.86	2.98	1.05	2.19	2.28	1.05	1.05	

注 1 : 質点系対応モデル及び建屋模擬モデルは、いずれも 3 次元 FEM モデルである。

注 2 : 採用  $\beta$  は、 $\beta_{Sd-1}$  及び  $\beta_{Sd-2}$  の大きい方を採用し、いずれも 1 未満の場合は保守的に 1 を採用する。

表 3-10 建屋耐震性評価用の応答補正比率  $\beta$  の算定 (EW 方向) (1/2)

評価点			Sd-1 EW方向加振時 EW方向応答			Sd-2 EW方向加振時 EW方向応答			採用 $\beta$	
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点	最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\beta_{Sd-1}$ ②/①	最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\beta_{Sd-2}$ ④/③		
			① 質点系対応 モデル	② 建屋模擬 モデル		③ 質点系対応 モデル	④ 建屋模擬 モデル			
外 壁 部	49.7	1	71559	7.20	7.49	1.05	6.55	6.73	1.03	1.05
			70559	7.25	7.48	1.04	6.59	7.54	1.15	1.15
			77547	7.19	7.47	1.04	6.56	7.32	1.12	1.12
			76547	7.26	7.49	1.04	6.60	6.51	0.987	1.04
	38.2	2	69656	5.48	5.62	1.03	5.49	5.13	0.935	1.03
			69501	5.49	5.73	1.05	5.48	6.04	1.11	1.11
			69001	5.48	5.78	1.06	5.50	5.92	1.08	1.08
			69156	5.48	5.59	1.03	5.51	5.86	1.07	1.07
			69686	5.47	5.63	1.03	5.48	6.29	1.15	1.15
			69531	5.51	5.78	1.05	5.49	5.57	1.02	1.05
			69031	5.48	5.66	1.04	5.51	5.60	1.02	1.04
			69186	5.48	5.58	1.02	5.51	5.47	0.993	1.02
	31.7	3	68920	4.94	4.74	0.960	5.11	4.95	0.969	1.00
			68420	4.96	4.80	0.968	5.15	5.12	1.00	1.00
			68950	4.94	4.77	0.966	5.12	5.37	1.05	1.05
			68450	4.96	4.79	0.966	5.15	5.17	1.01	1.01
	23.5	4	67751	4.22	3.94	0.934	4.68	4.52	0.966	1.00
			67251	4.24	3.99	0.942	4.69	4.65	0.992	1.00
			67781	4.22	3.97	0.941	4.68	4.71	1.01	1.01
			67281	4.24	3.98	0.939	4.69	4.65	0.992	1.00
	18.1	5	66778	3.74	3.66	0.979	4.35	4.29	0.987	1.00
			66278	3.81	3.70	0.972	4.41	4.42	1.01	1.01
			66848	3.79	3.71	0.979	4.40	4.44	1.01	1.01
			66348	3.81	3.70	0.972	4.41	4.34	0.985	1.00
	12.3	6	65806	3.56	3.46	0.972	4.03	4.00	0.993	1.00
			65306	3.57	3.48	0.975	4.03	4.05	1.01	1.01
			65836	3.56	3.50	0.984	4.03	4.00	0.993	1.00
			65336	3.56	3.48	0.978	4.03	3.96	0.983	1.00
4.8	7	64806	3.33	3.27	0.982	3.72	3.63	0.976	1.00	
		64306	3.34	3.28	0.983	3.74	3.65	0.976	1.00	
		64836	3.34	3.29	0.986	3.73	3.60	0.966	1.00	
		64336	3.34	3.28	0.983	3.74	3.53	0.944	1.00	
-1.7	8	3343	3.18	3.25	1.03	3.46	3.39	0.980	1.03	
		63312	3.18	3.25	1.03	3.42	3.37	0.986	1.03	
		63842	3.18	3.25	1.03	3.44	3.38	0.983	1.03	
		63342	3.18	3.25	1.03	3.42	3.36	0.983	1.03	

注 1 : 質点系対応モデル及び建屋模擬モデルは、いずれも 3 次元 FEM モデルである。

注 2 : 採用  $\beta$  は、 $\beta_{Sd-1}$  及び  $\beta_{Sd-2}$  の大きい方を採用し、いずれも 1 未満の場合は保守的に 1 を採用する。

表 3-10 建屋耐震性評価用の応答補正比率  $\beta$  の算定 (EW 方向) (2/2)

評価点			Sd-1 EW方向加振時 EW方向応答			Sd-2 EW方向加振時 EW方向応答			採用 $\beta$	
			最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\beta_{Sd-1}$ ②/①	最大応答加速度 ( $m/s^2$ )		$\beta_{Sd-2}$ ④/③		
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点	① 質点系対応 モデル	② 建屋模擬 モデル		③ 質点系対応 モデル	④ 建屋模擬 モデル			
R C C V 部	31.7	11	32311	4.95	4.79	0.968	5.12	5.51	1.08	1.08
			2311	4.95	4.79	0.968	5.13	5.52	1.08	1.08
			32325	4.94	4.78	0.968	5.11	5.25	1.03	1.03
			2325	4.95	4.81	0.972	5.12	5.21	1.02	1.02
	23.5	12	120803	4.16	4.13	0.993	4.65	4.81	1.04	1.04
			120067	4.25	4.19	0.986	4.70	4.91	1.05	1.05
			120845	4.16	4.16	1.00	4.65	4.90	1.06	1.06
			120113	4.25	4.22	0.993	4.70	4.92	1.05	1.05
	18.1	13	120268	3.76	3.91	1.04	4.37	4.51	1.04	1.04
			120036	3.77	3.91	1.04	4.38	4.53	1.04	1.04
			120327	3.78	3.94	1.05	4.40	4.61	1.05	1.05
			120110	3.80	3.96	1.05	4.42	4.62	1.05	1.05
	12.3	14	30244	3.57	3.65	1.03	4.03	4.09	1.02	1.03
			120008	3.58	3.67	1.03	4.05	4.15	1.03	1.03
			30254	3.57	3.66	1.03	4.03	4.13	1.03	1.03
			120018	3.58	3.67	1.03	4.05	4.20	1.04	1.04
	4.8	15	120325	3.35	3.35	1.00	3.74	3.75	1.01	1.01
			120099	3.35	3.35	1.00	3.75	3.75	1.00	1.00
			120231	3.35	3.35	1.00	3.74	3.74	1.00	1.00
			119997	3.35	3.36	1.01	3.75	3.80	1.02	1.02
-1.7	16	120195	3.19	3.24	1.02	3.46	3.42	0.989	1.02	
		119962	3.19	3.25	1.02	3.43	3.38	0.986	1.02	
		120205	3.19	3.24	1.02	3.45	3.37	0.977	1.02	
		119971	3.19	3.25	1.02	3.43	3.40	0.992	1.02	

注 1 : 質点系対応モデル及び建屋模擬モデルは、いずれも 3次元 FEM モデルである。

注 2 : 採用  $\beta$  は、 $\beta_{Sd-1}$  及び  $\beta_{Sd-2}$  の大きい方を採用し、いずれも 1 未満の場合は保守的に 1 を採用する。

表 3-11 建屋耐震性評価用の応答補正比率 $\zeta$ の算定 (NS 方向) (1/2)

評価点			$\alpha$	$\beta$	$\alpha \cdot \beta$	NS方向 応答補正比率 $\zeta$	
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点					
外 壁 部	49.7	1	71559	1.02	1.04	1.07	1.09
			70559	1.02	1.05	1.08	
			77547	1.04	1.04	1.09	
			76547	1.03	1.03	1.07	
	38.2	2	69656	1.03	1.01	1.05	1.07
			69501	1.02	1.00	1.02	
			69001	1.01	1.00	1.01	
			69156	1.02	1.01	1.04	
			69686	1.01	1.00	1.01	
			69531	1.02	1.00	1.02	
			69031	1.02	1.00	1.02	
	31.7	3	68920	1.01	1.08	1.10	1.10
			68420	1.02	1.04	1.07	
			68950	1.02	1.06	1.09	
			68450	1.02	1.05	1.08	
	23.5	4	67751	1.01	1.09	1.11	1.11
			67251	1.03	1.05	1.09	
			67781	1.02	1.08	1.11	
			67281	1.01	1.08	1.10	
	18.1	5	66778	1.02	1.09	1.12	1.12
			66278	1.02	1.05	1.08	
			66848	1.02	1.08	1.11	
			66348	1.02	1.07	1.10	
	12.3	6	65806	1.05	1.04	1.10	1.10
			65306	1.00	1.06	1.06	
			65836	1.00	1.04	1.04	
			65336	1.01	1.04	1.06	
	4.8	7	64806	1.04	1.04	1.09	1.09
64306			1.05	1.02	1.08		
64836			1.01	1.02	1.04		
64336			1.03	1.02	1.06		
-1.7	8	3343	1.03	1.04	1.08	1.12	
		63312	1.03	1.05	1.09		
		63842	1.05	1.06	1.12		
		63342	1.07	1.04	1.12		

表 3-11 建屋耐震性評価用の応答補正比率 $\zeta$ の算定 (NS 方向) (2/2)

評価点			$\alpha$	$\beta$	$\alpha \cdot \beta$	NS方向 応答補正比率 $\zeta$
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点				
R C C V 部	31.7	11	32311	1.02	1.18	1.30
			2311	1.03	1.16	
			32325	1.01	1.15	
			2325	1.07	1.21	
	23.5	12	120803	1.02	1.13	1.18
			120067	1.00	1.11	
			120845	1.01	1.12	
			120113	1.03	1.14	
	18.1	13	120268	1.02	1.11	1.16
			120036	1.01	1.10	
			120327	1.01	1.09	
			120110	1.03	1.12	
	12.3	14	30244	1.02	1.11	1.16
			120008	1.02	1.13	
			30254	1.00	1.11	
			120018	1.02	1.13	
	4.8	15	120325	1.03	1.09	1.15
			120099	1.02	1.07	
			120231	1.00	1.07	
			119997	1.05	1.09	
-1.7	16	120195	1.02	1.05	1.10	
		119962	1.02	1.06		
		120205	1.03	1.05		
		119971	1.04	1.05		

表 3-12 建屋耐震性評価用の応答補正比率 $\zeta$ の算定 (EW 方向) (1/2)

評価点			$\alpha$	$\beta$	$\alpha \cdot \beta$	EW方向 応答補正比率 $\zeta$	
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点					
外 壁 部	49.7	1	71559	1.00	1.05	1.05	1.24
			70559	1.07	1.15	1.24	
			77547	1.06	1.12	1.19	
			76547	1.00	1.04	1.04	
	38.2	2	69656	1.02	1.03	1.06	1.29
			69501	1.04	1.11	1.16	
			69001	1.04	1.08	1.13	
			69156	1.07	1.07	1.15	
			69686	1.12	1.15	1.29	
			69531	1.04	1.05	1.10	
			69031	1.03	1.04	1.08	
			69186	1.00	1.02	1.02	
	31.7	3	68920	1.01	1.00	1.01	1.13
			68420	1.06	1.00	1.06	
			68950	1.07	1.05	1.13	
			68450	1.03	1.01	1.05	
	23.5	4	67751	1.02	1.00	1.02	1.08
			67251	1.06	1.00	1.06	
			67781	1.06	1.01	1.08	
			67281	1.04	1.00	1.04	
	18.1	5	66778	1.00	1.00	1.00	1.07
			66278	1.03	1.01	1.05	
			66848	1.05	1.01	1.07	
			66348	1.01	1.00	1.01	
	12.3	6	65806	1.00	1.00	1.00	1.06
			65306	1.01	1.01	1.03	
			65836	1.06	1.00	1.06	
			65336	1.02	1.00	1.02	
4.8	7	64806	1.02	1.00	1.02	1.03	
		64306	1.02	1.00	1.02		
		64836	1.03	1.00	1.03		
		64336	1.02	1.00	1.02		
-1.7	8	3343	1.01	1.03	1.05	1.06	
		63312	1.02	1.03	1.06		
		63842	1.01	1.03	1.05		
		63342	1.01	1.03	1.05		

表 3-12 建屋耐震性評価用の応答補正比率 $\zeta$ の算定 (EW 方向) (2/2)

評価点			$\alpha$	$\beta$	$\alpha \cdot \beta$	EW方向 応答補正比率 $\zeta$	
T. M. S. L. (m)	質点 番号	FEM 節点					
R C C V 部	31.7	11	32311	1.07	1.08	1.16	1.17
			2311	1.08	1.08	1.17	
			32325	1.02	1.03	1.06	
			2325	1.09	1.02	1.12	
	23.5	12	120803	1.01	1.04	1.06	1.09
			120067	1.01	1.05	1.07	
			120845	1.02	1.06	1.09	
			120113	1.01	1.05	1.07	
	18.1	13	120268	1.00	1.04	1.04	1.07
			120036	1.00	1.04	1.04	
			120327	1.01	1.05	1.07	
			120110	1.01	1.05	1.07	
	12.3	14	30244	1.01	1.03	1.05	1.08
			120008	1.00	1.03	1.03	
			30254	1.04	1.03	1.08	
			120018	1.01	1.04	1.06	
	4.8	15	120325	1.01	1.01	1.03	1.04
			120099	1.00	1.00	1.00	
			120231	1.02	1.00	1.02	
			119997	1.01	1.02	1.04	
-1.7	16	120195	1.02	1.02	1.05	1.05	
		119962	1.01	1.02	1.04		
		120205	1.01	1.02	1.04		
		119971	1.02	1.02	1.05		

(2) 評価結果

各層の応答補正比率を乗じた最大せん断応力度及び最大せん断ひずみを表 3-13 に示す。

補正後の応答をプロットしたせん断スケルトン曲線を図 3-10 及び図 3-11 に示す。

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

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

表 3-13 3次元的な応答特性を踏まえたせん断応力度及びせん断ひずみ

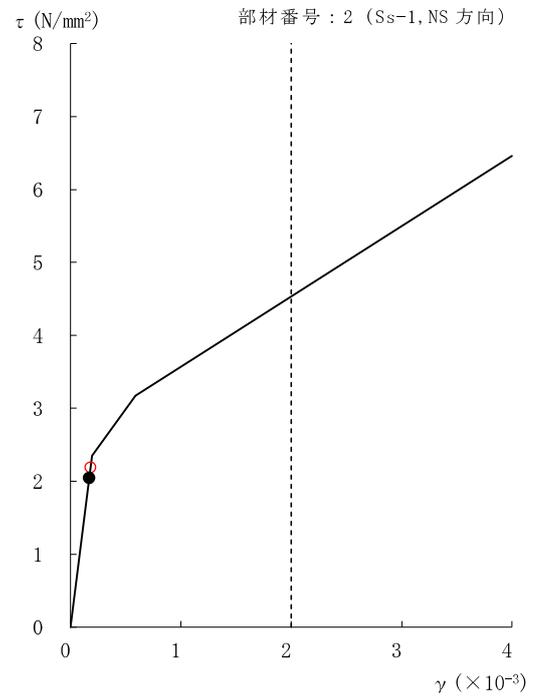
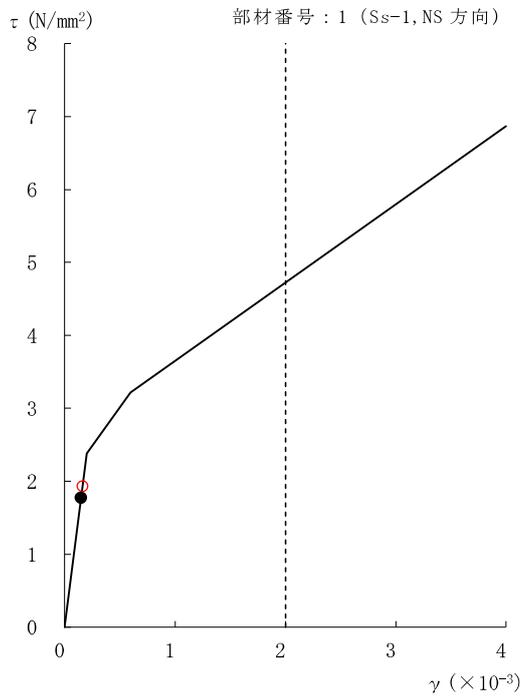
(a) NS 方向

部材 番号	質点系モデルの最大応答値 (基準地震動 $S_s$ , NS方向)			NS方向 応答補正比率 $\zeta$	応答補正後 (最大応答値・ $\zeta$ )		
	$\tau$ ( $N/mm^2$ )	$\gamma$ ( $\times 10^{-3}$ )	地震動		$\tau$ ( $N/mm^2$ )	$\gamma$ ( $\times 10^{-3}$ )	
外 壁 部	1	1.77	0.148	$S_s-1$	1.09	1.93	0.161
	2	2.05	0.170	$S_s-1$	1.07	2.19	0.182
	3	1.96	0.163	$S_s-1$	1.10	2.15	0.179
	4	2.73	0.349	$S_s-1$	1.11	2.83	0.402
	5	2.67	0.342	$S_s-1$	1.12	2.76	0.398
	6	2.90	0.391	$S_s-1$	1.10	3.01	0.445
	7	3.16	0.476	$S_s-8$	1.09	3.28	0.537
	8	2.70	0.243	$S_s-8$	1.12	2.75	0.276
R C C V 部	10	0.299	0.0249	$S_s-1$	1.30	0.388	0.0323
	11	1.81	0.151	$S_s-1$	1.18	2.14	0.178
	12	1.66	0.139	$S_s-1$	1.16	1.93	0.161
	13	2.45	0.204	$S_s-1$	1.16	2.64	0.238
	14	2.93	0.354	$S_s-1$	1.15	3.08	0.426
	15	2.37	0.197	$S_s-8$	1.10	2.59	0.217

(b) EW 方向

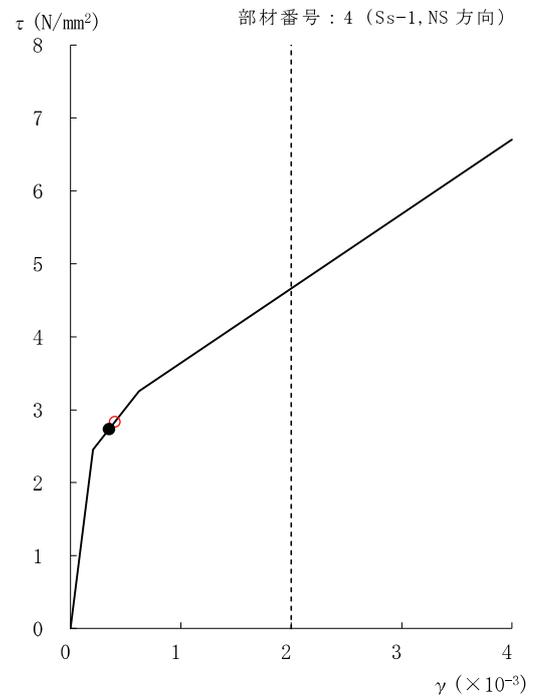
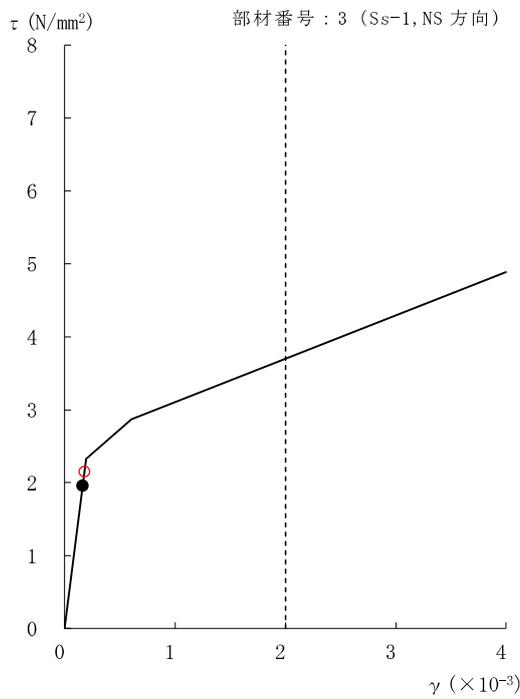
部材 番号	質点系モデルの最大応答値 (基準地震動 $S_s$ , EW方向)			EW方向 応答補正比率 $\zeta$	応答補正後 (最大応答値・ $\zeta$ )		
	$\tau$ ( $N/mm^2$ )	$\gamma$ ( $\times 10^{-3}$ )	地震動		$\tau$ ( $N/mm^2$ )	$\gamma$ ( $\times 10^{-3}$ )	
外 壁 部	1	1.22	0.102	$S_s-1$	1.24	1.52	0.126
	2	1.34	0.112	$S_s-1$	1.29	1.73	0.144
	3	1.72	0.144	$S_s-1$	1.13	1.95	0.162
	4	2.43	0.214	$S_s-2$	1.08	2.46	0.233
	5	2.59	0.303	$S_s-2$	1.07	2.64	0.331
	6	2.98	0.469	$S_s-2$	1.06	3.05	0.509
	7	2.91	0.398	$S_s-2$	1.03	2.94	0.414
	8	2.74	0.326	$S_s-2$	1.06	2.78	0.351
R C C V 部	10	0.395	0.0329	$S_s-2$	1.17	0.462	0.0385
	11	1.10	0.0920	$S_s-2$	1.09	1.20	0.100
	12	1.84	0.154	$S_s-2$	1.07	1.97	0.164
	13	2.78	0.310	$S_s-2$	1.08	2.84	0.341
	14	2.57	0.260	$S_s-2$	1.04	2.58	0.272
	15	2.72	0.268	$S_s-2$	1.05	2.75	0.283

● 補正前応答値      ○ 補正後応答値



部材番号 1 Ss-1

部材番号 2 Ss-1

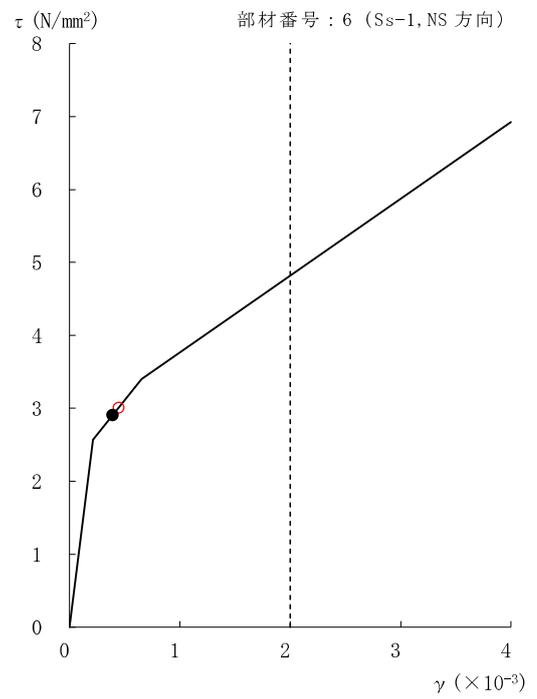
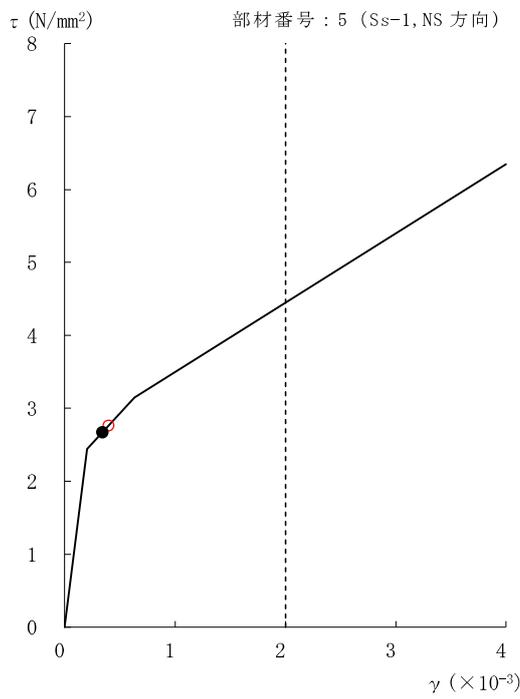


部材番号 3 Ss-1

部材番号 4 Ss-1

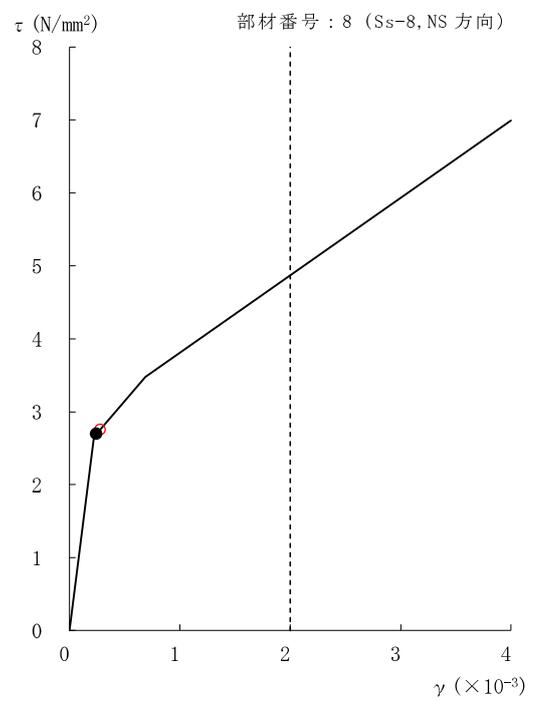
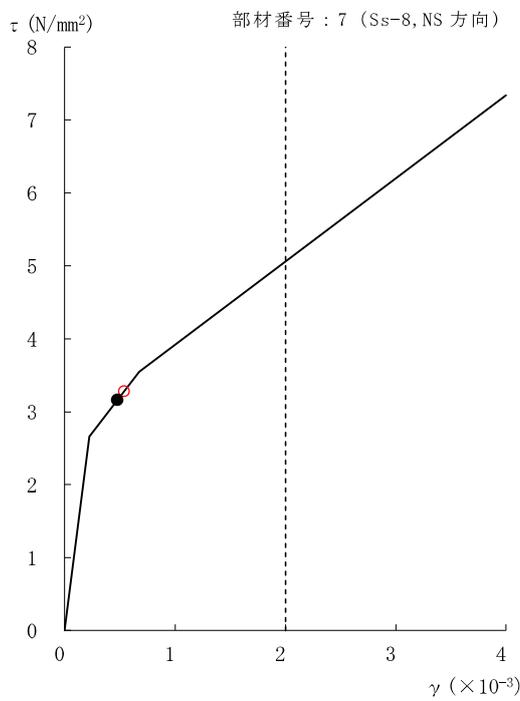
図 3-10 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向) (1/4)

● 補正前応答値      ○ 補正後応答値



部材番号 5 Ss-1

部材番号 6 Ss-1

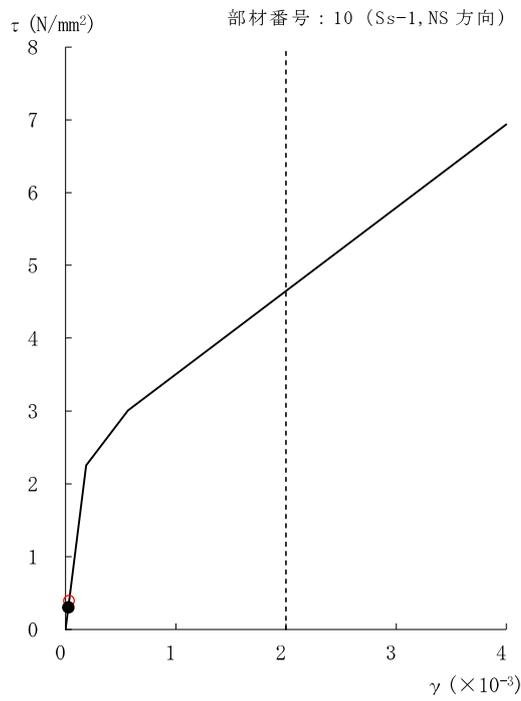


部材番号 7 Ss-8

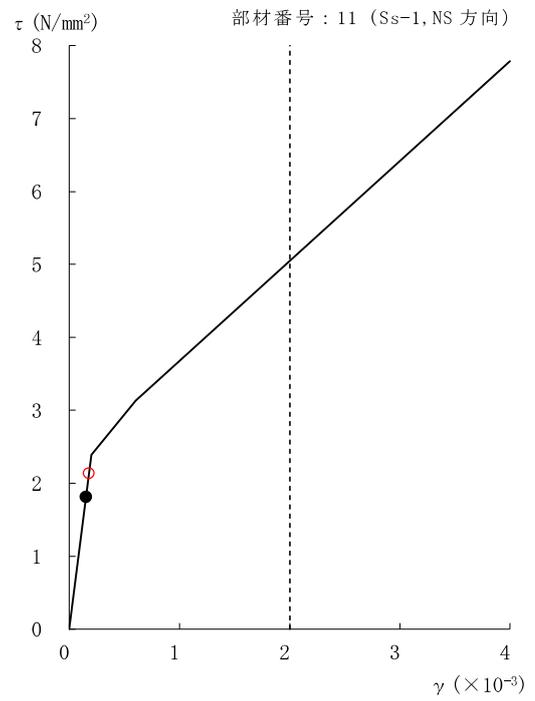
部材番号 8 Ss-8

図 3-10 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向) (2/4)

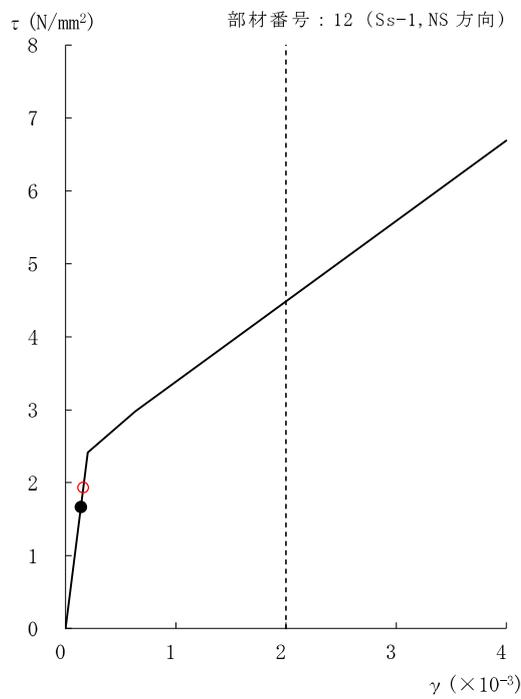
● 補正前応答値      ○ 補正後応答値



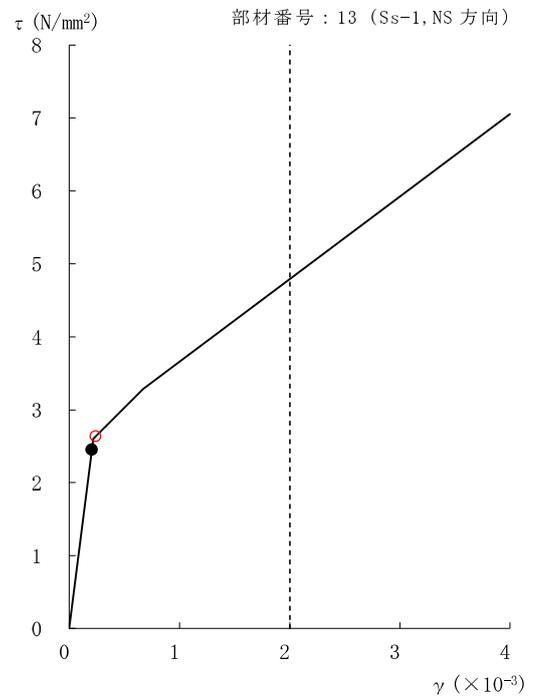
部材番号 10 Ss-1



部材番号 11 Ss-1



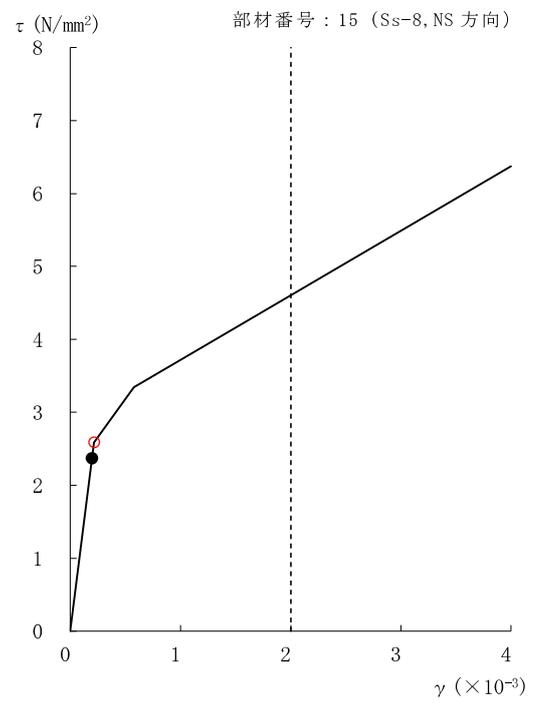
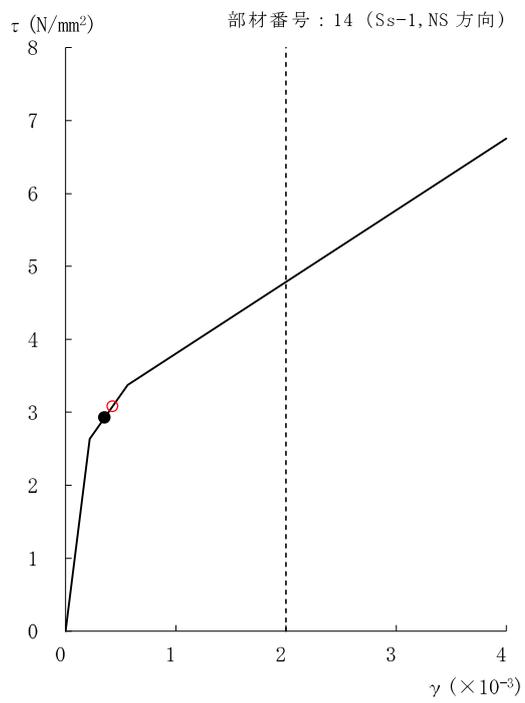
部材番号 12 Ss-1



部材番号 13 Ss-1

図 3-10 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向) (3/4)

● 補正前応答値      ○ 補正後応答値

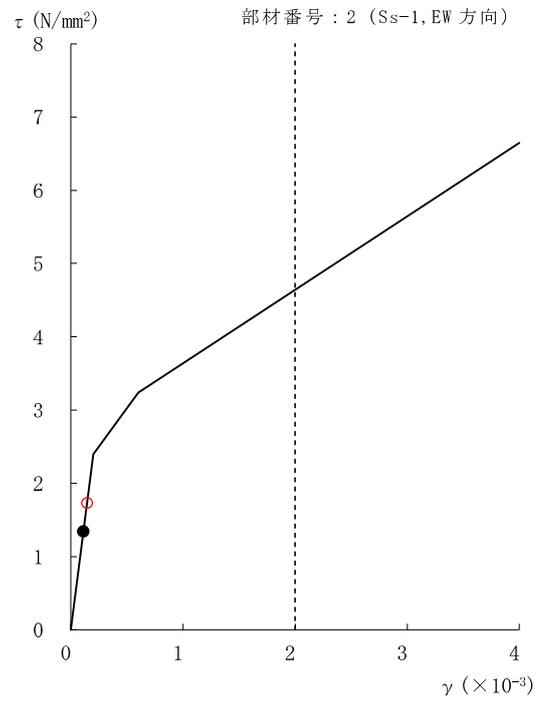
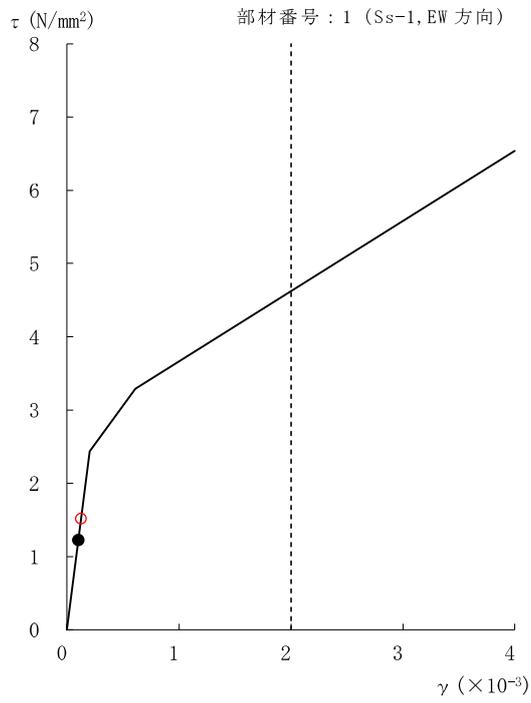


部材番号 14 Ss-1

部材番号 15 Ss-8

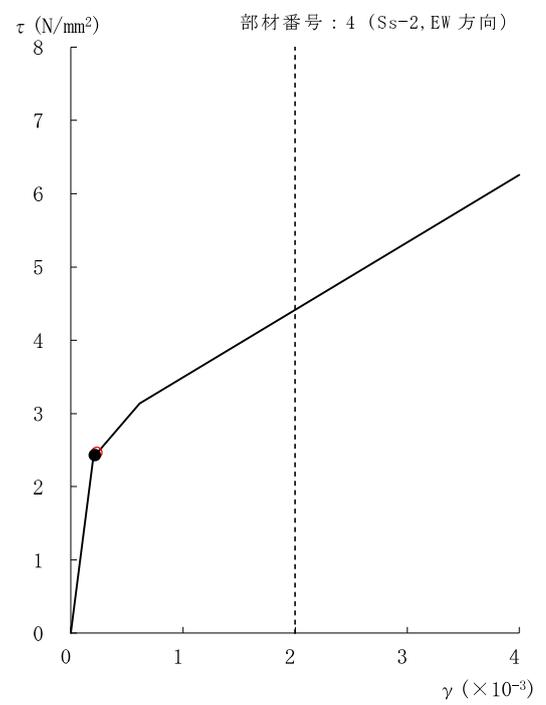
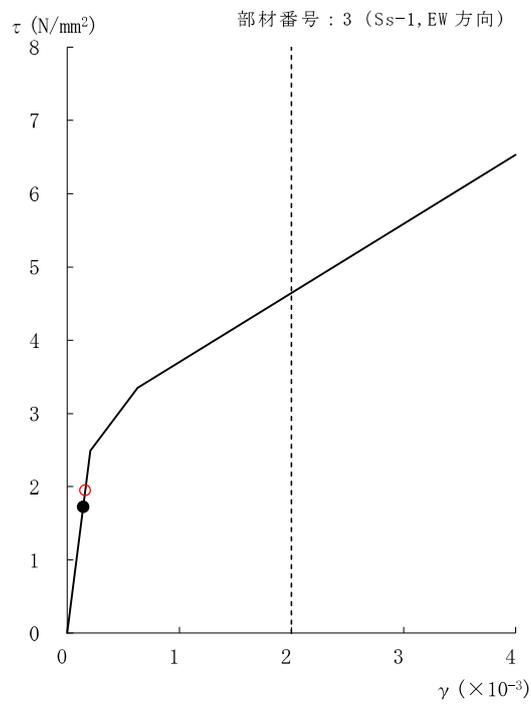
図 3-10 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (NS 方向) (4/4)

● 補正前応答値      ○ 補正後応答値



部材番号 1 Ss-1

部材番号 2 Ss-1

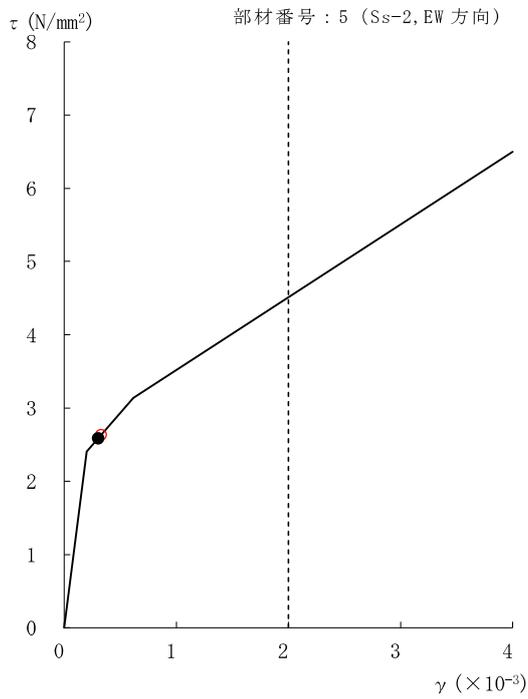


部材番号 3 Ss-1

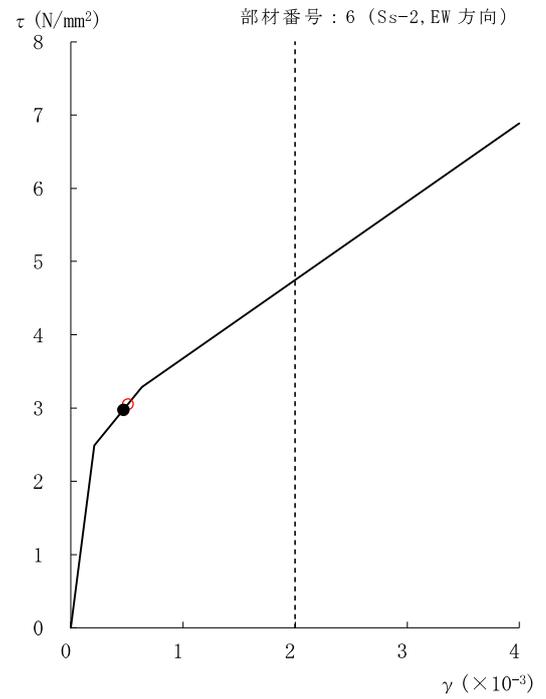
部材番号 4 Ss-2

図 3-11 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向) (1/4)

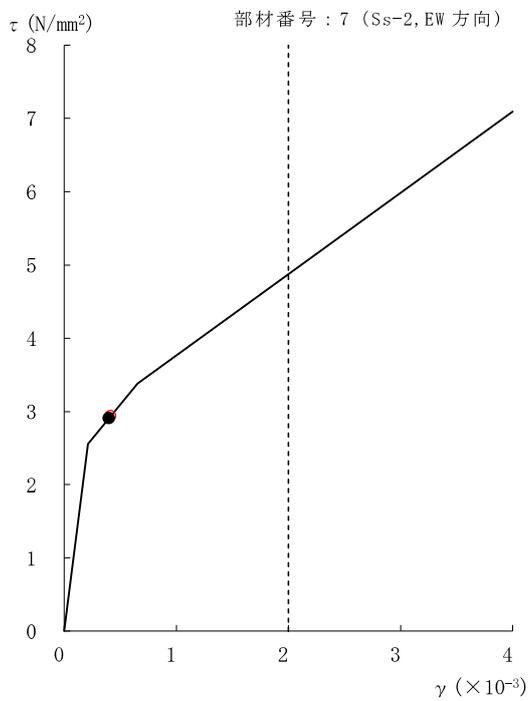
● 補正前応答値      ○ 補正後応答値



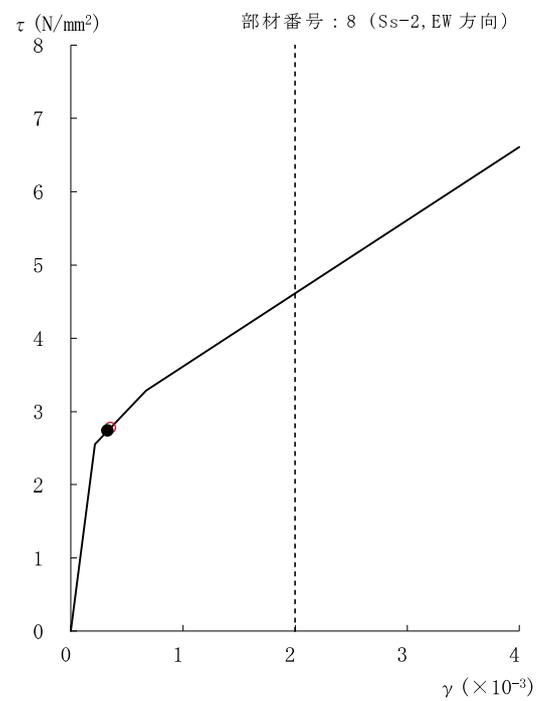
部材番号 5 Ss-2



部材番号 6 Ss-2



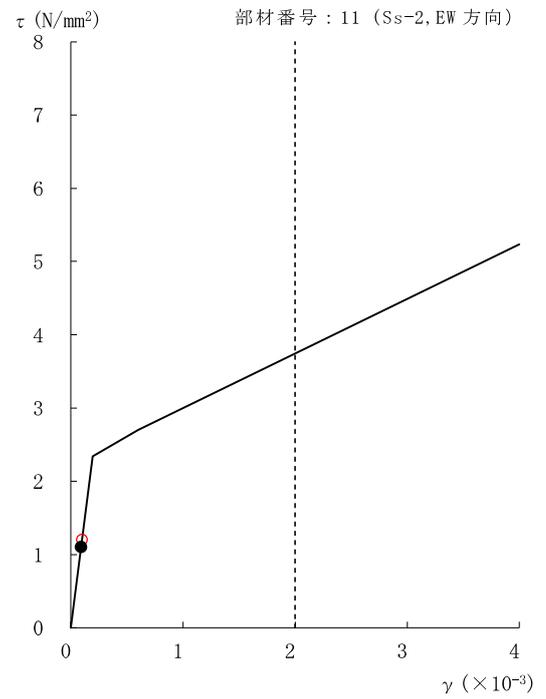
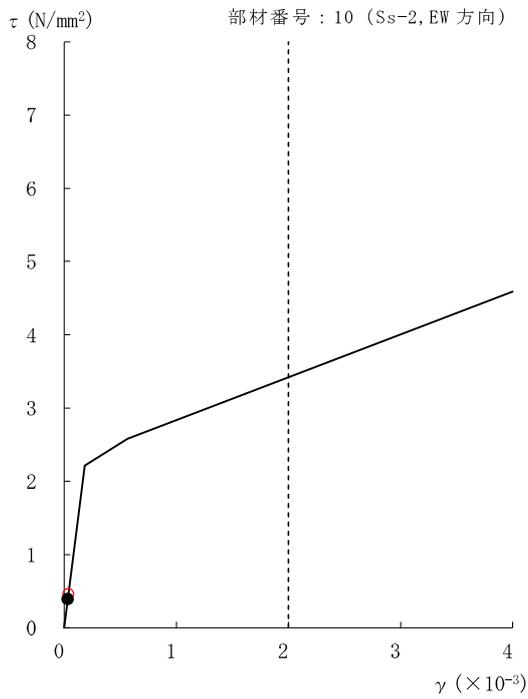
部材番号 7 Ss-2



部材番号 8 Ss-2

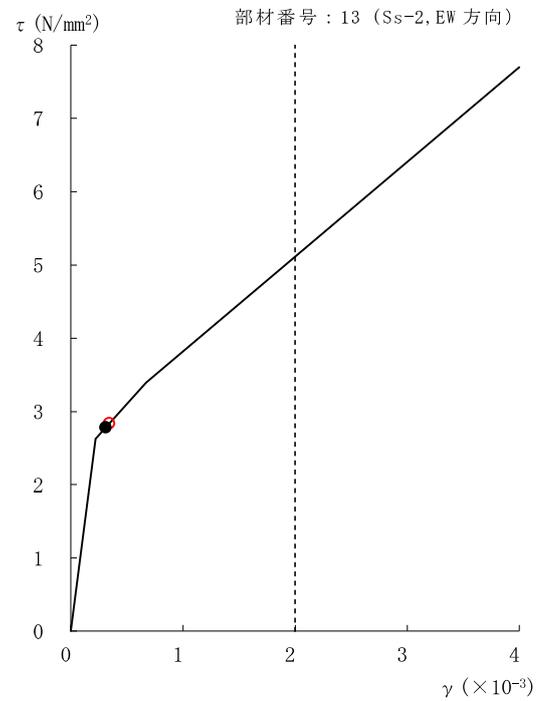
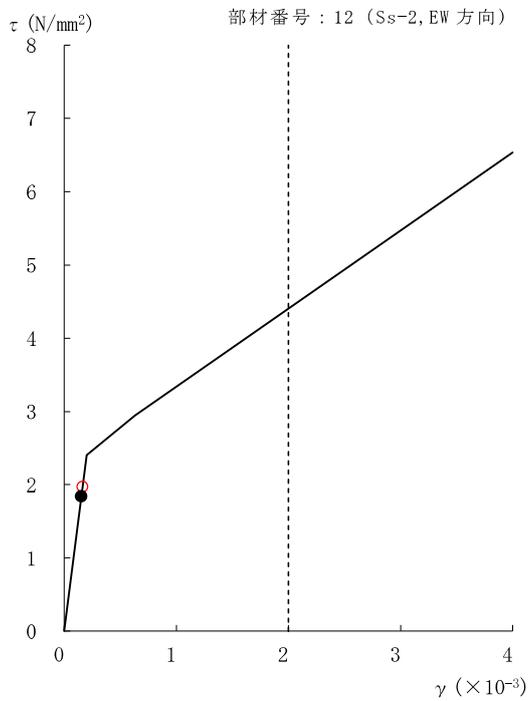
図 3-11 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向) (2/4)

● 補正前応答値      ○ 補正後応答値



部材番号 10 Ss-2

部材番号 11 Ss-2

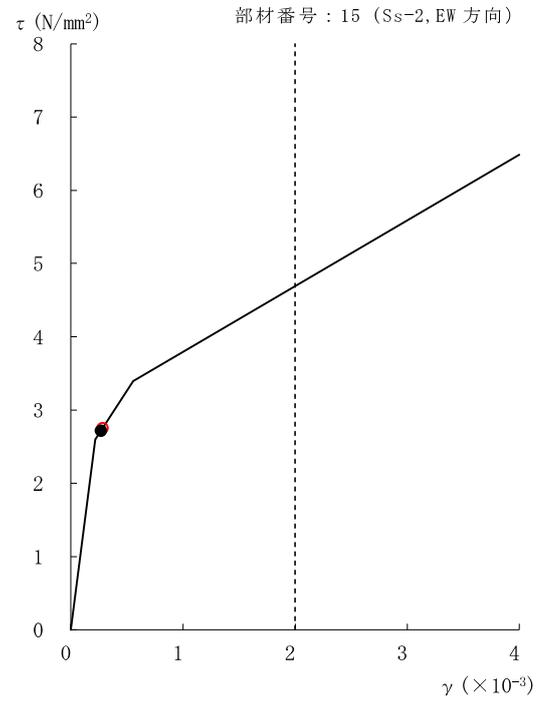
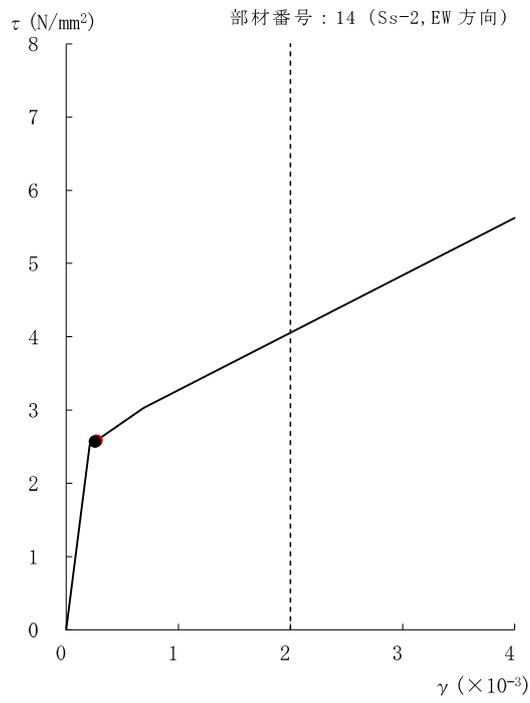


部材番号 12 Ss-2

部材番号 13 Ss-2

図 3-11 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向) (3/4)

● 補正前応答値      ○ 補正後応答値



部材番号 14 Ss-2

部材番号 15 Ss-2

図 3-11 せん断スケルトン曲線上の最大応答値 (EW 方向) (4/4)

### 3.4 床応答への影響検討

3次元 FEM モデルによる地震応答解析結果から、3次元的な応答性状が床応答に及ぼす影響について検討する。

評価部位は、図 3-5 における T.M.S.L. -8.2m~31.7m における南東の外壁部（R1 通り及び RG 通り）とする。

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

ここで、1 方向入力及び 3 方向同時入力時の床応答の比較については、「3.2.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響」にて検討しており、各レベルにおいて 3 方向同時入力による影響はほとんどないことを確認している。

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

表 3-14 及び表 3-15 に比較結果を示す。

建屋上部における NS 方向の 0.2s 付近の応答において、3次元 FEM モデルの応答が質点系モデルより大きくなる傾向を示したが、その他の周期帯においては、おおむね同等であることが確認できた。

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

なお、NS 方向の 0.2s 付近における、局所的な応答の機器・配管系への影響については、「別紙 4 機器・配管系に関する説明資料」において検討を行う。

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

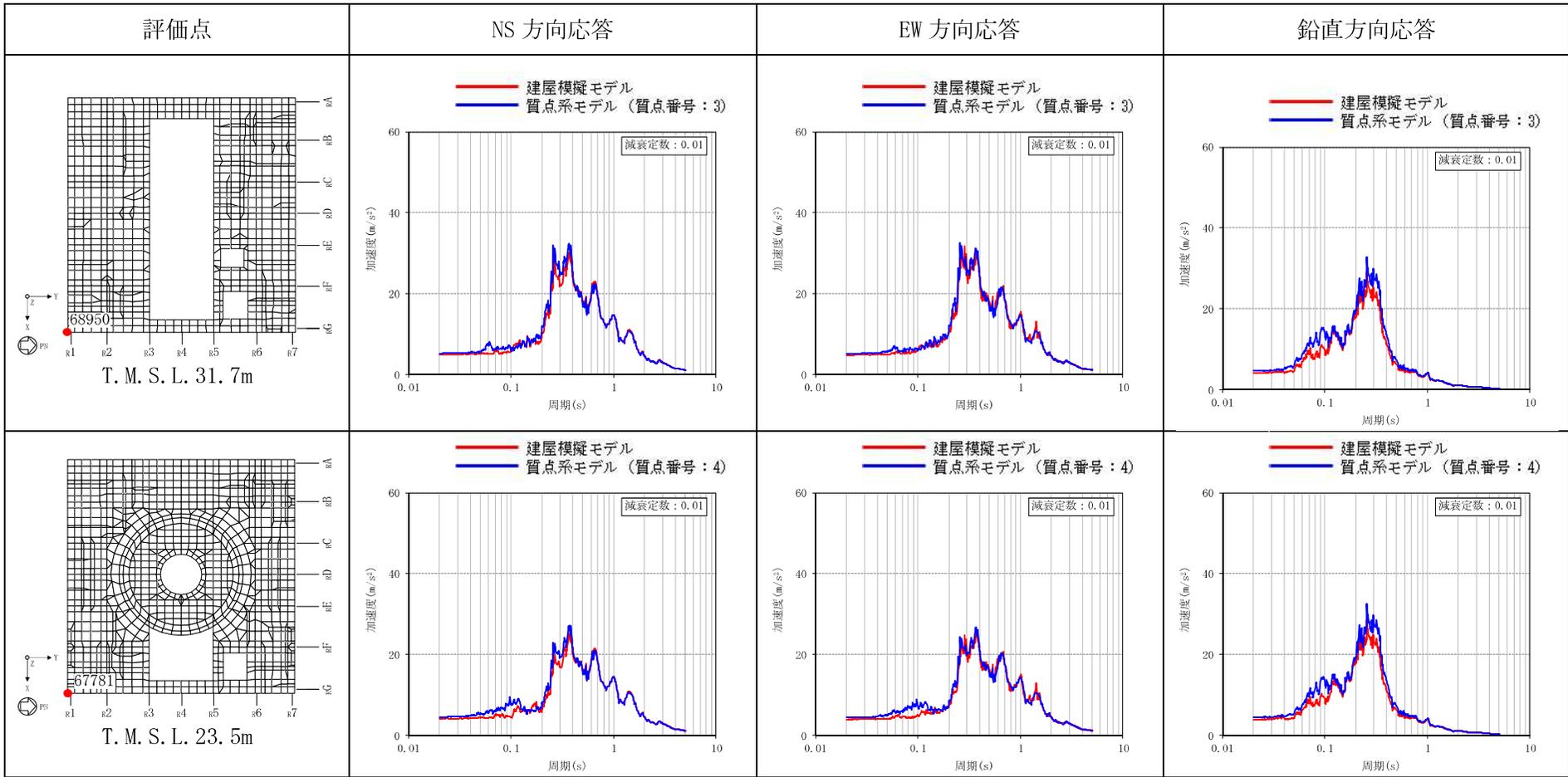


表 3-14 3次元 FEM モデル（建屋模擬モデル）及び質点系モデルの応答比較（Sd-1）（2/4）

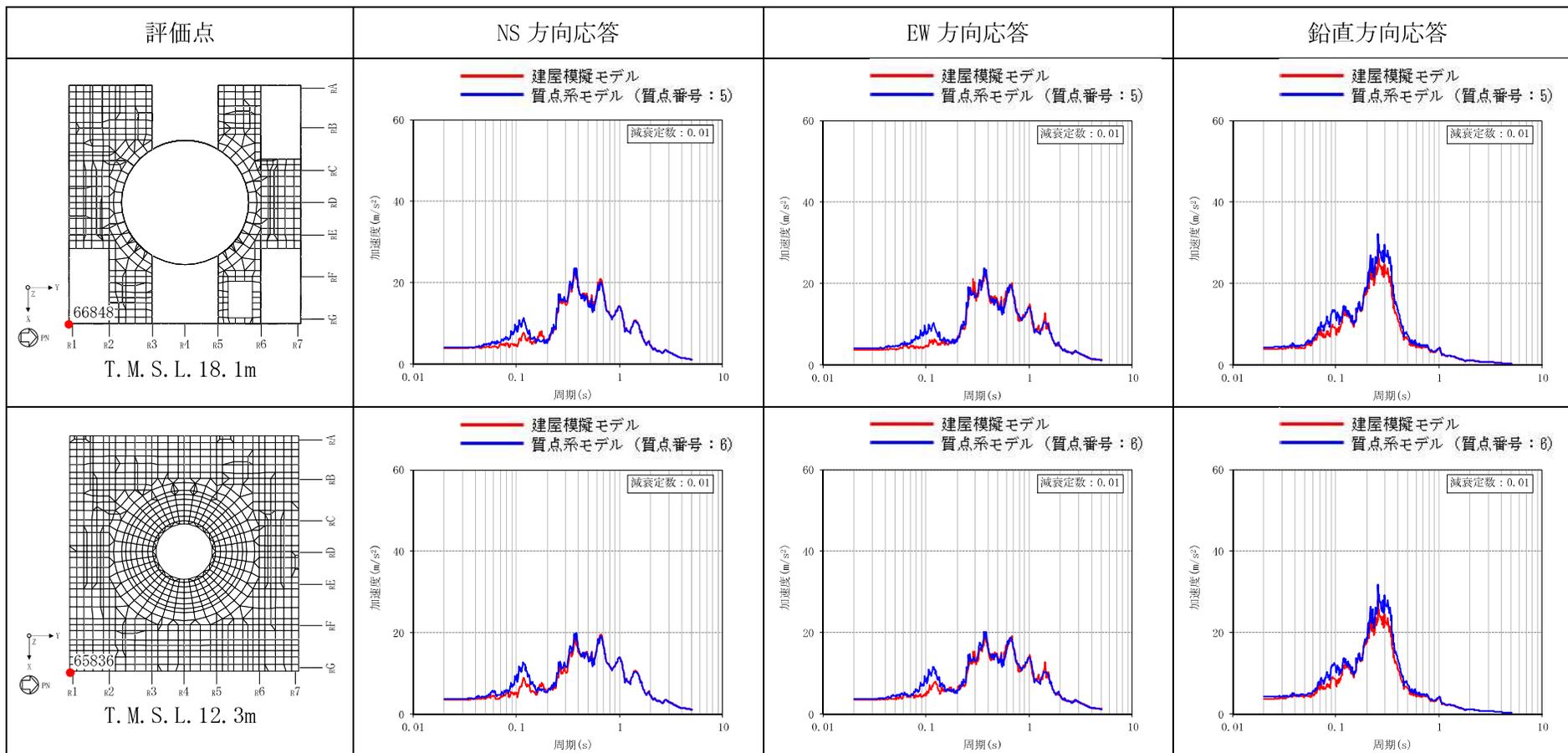


表 3-14 3次元 FEM モデル (建屋模擬モデル) 及び質点系モデルの応答比較 (Sd-1) (3/4)

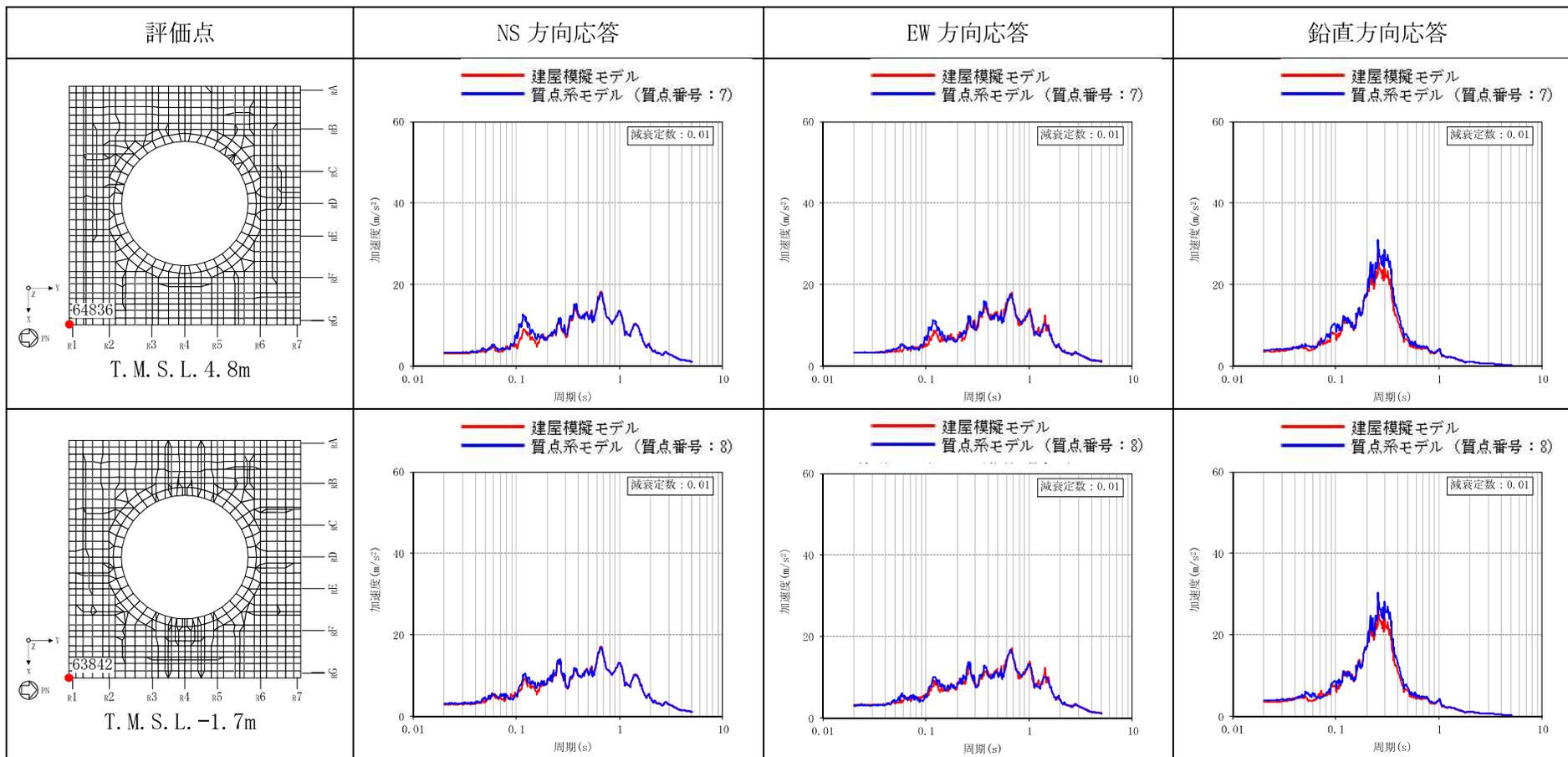


表 3-14 3次元 FEM モデル（建屋模擬モデル）及び質点系モデルの応答比較（Sd-1）（4/4）

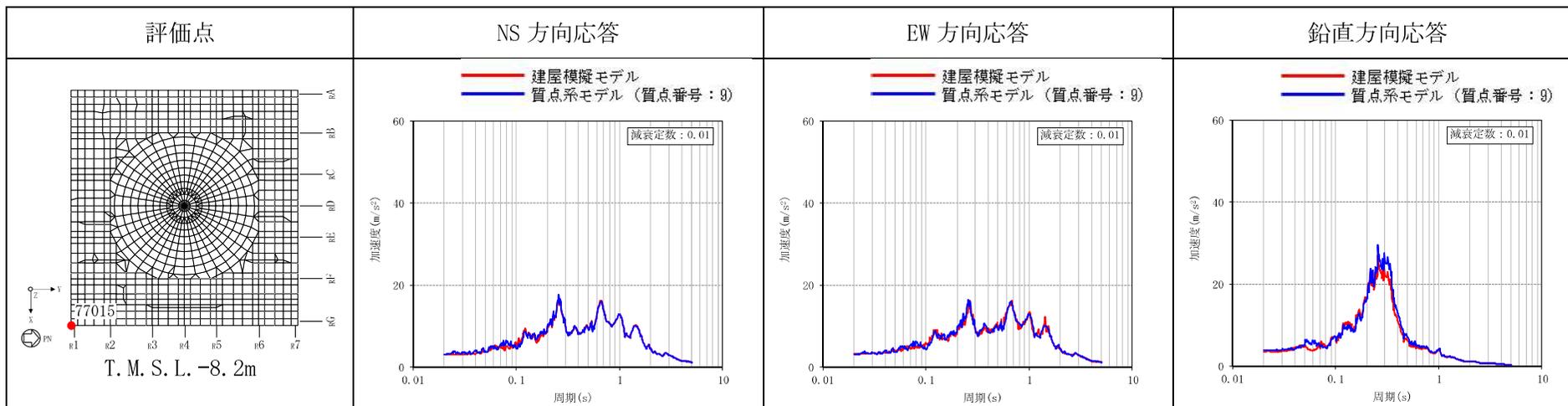


表 3-15 3次元 FEM モデル（建屋模擬モデル）及び質点系モデルの応答比較（Sd-2）（1/4）

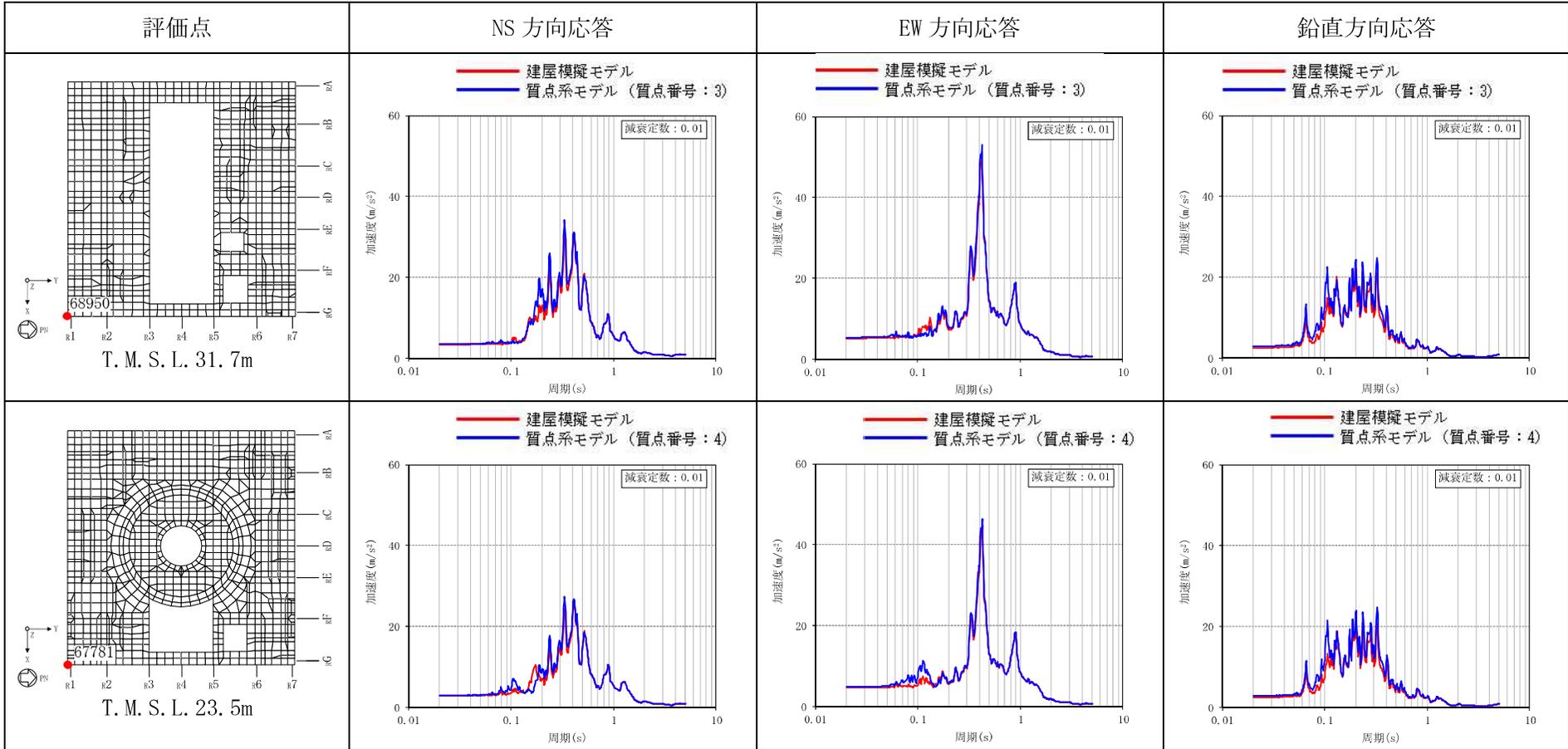


表 3-15 3次元 FEM モデル（建屋模擬モデル）及び質点系モデルの応答比較（Sd-2）（2/4）

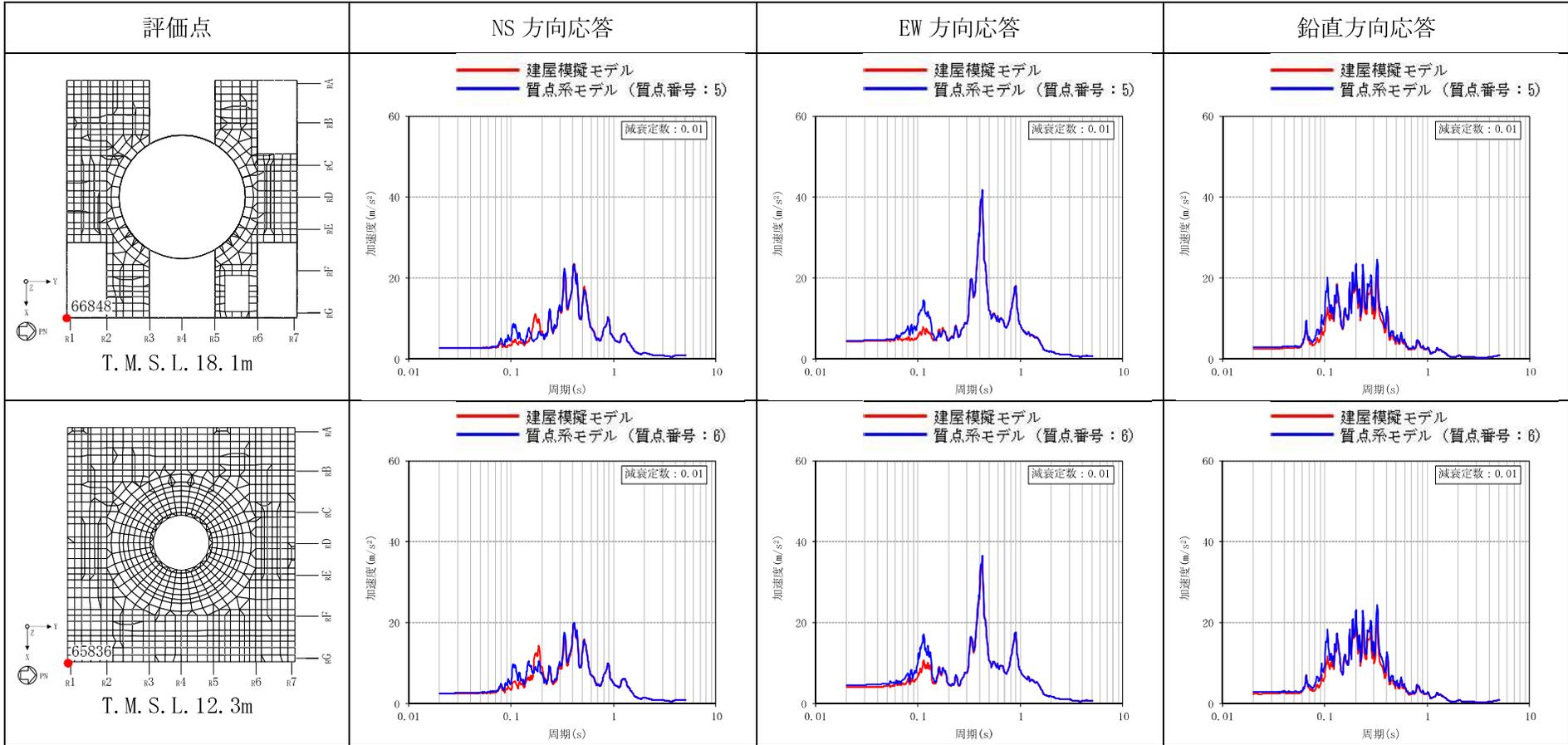


表 3-15 3次元 FEM モデル (建屋模擬モデル) 及び質点系モデルの応答比較 (Sd-2) (3/4)

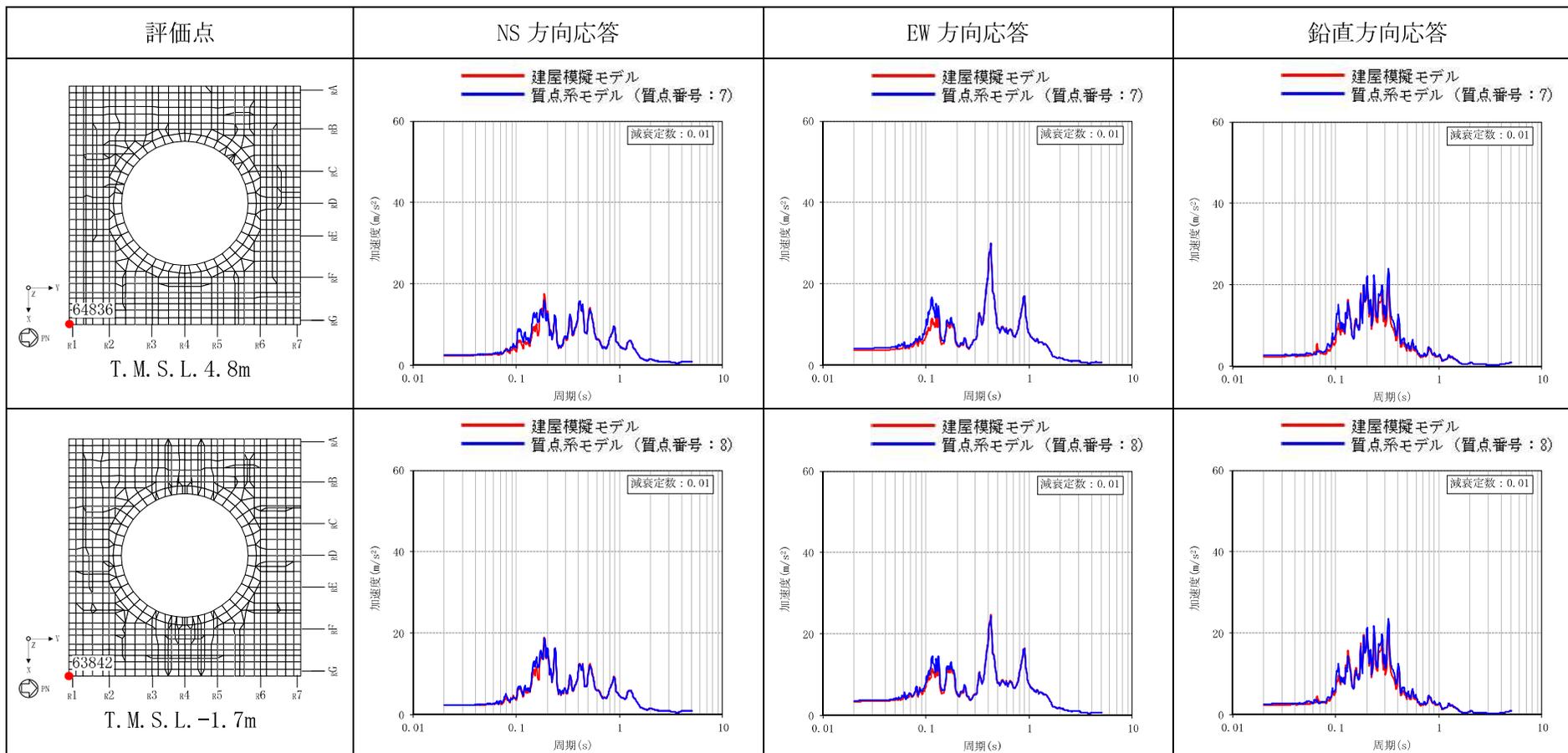
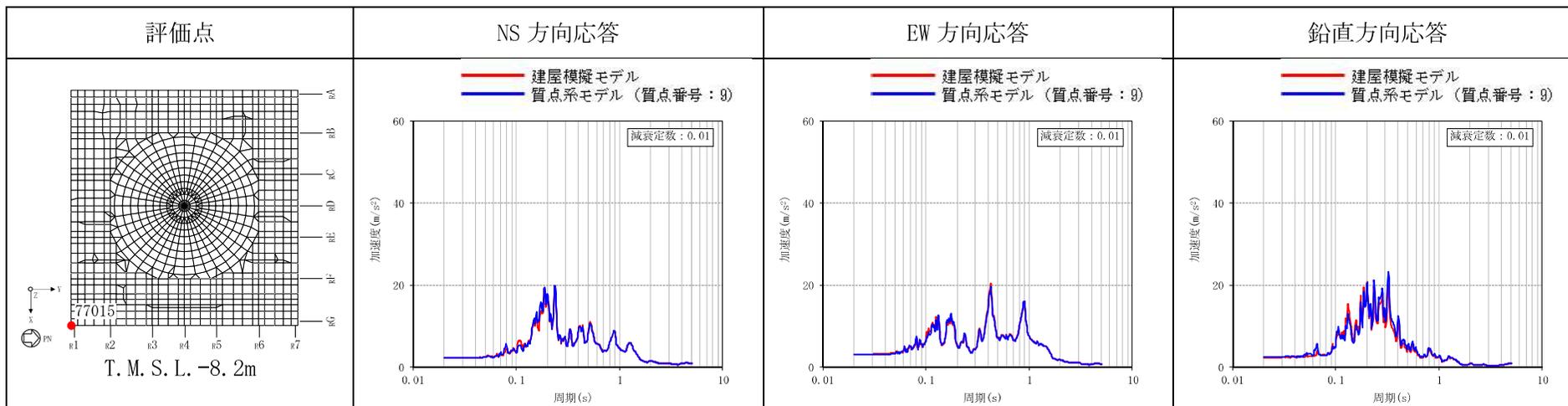


表 3-15 3次元 FEM モデル（建屋模擬モデル）及び質点系モデルの応答比較（Sd-2）（4/4）



#### 4. まとめ

原子炉建屋について、建屋の 3 次元的な応答性状を確認し、質点系モデルの応答性状を検証するため、3 次元 FEM モデルによる地震応答解析を行い、建屋の局所的な応答について検討を行った。また、3 次元 FEM モデルによる挙動が、建屋及び機器・配管系の有する耐震性に及ぼす影響について検討を行った。

建屋については、3 次元 FEM モデルにより得られた 3 次元的な応答性状を質点系モデルに考慮して応答補正を行った結果、建屋が有する耐震性への影響は無いことを確認した。

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

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

## 別紙 3-1 観測記録を用いたシミュレーション解析

目 次

1. 検討概要 ..... 別紙 3-1-1

## 1. 検討概要

「別紙 3 3次元 FEM モデルによる地震応答解析」において、原子炉建屋について、2007年新潟県中越沖地震（以下「中越沖地震」という。）に対する、3次元 FEM モデルを用いたシミュレーション解析を実施し、観測記録を再現できていることを確認した。

本資料では、中越沖地震以外の観測記録のうち最も大きい観測記録である 2004 年新潟県中越地震の最大余震に対して 3次元 FEM モデルを用いたシミュレーション解析を実施し、観測記録が再現できているか確認する。

確認結果については、令和 2 年 10 月 14 日付け原規規発第 2010147 号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所第 7 号機の設計及び工事の計画の説明資料「水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する検討について（KK7 補足-024 資料 4）」のうち「別紙 3-1 6 号機原子炉建屋の観測記録を用いたシミュレーション解析」による。

## 別紙 3-2 3次元 FEM モデルによる応答結果の整理

## 目 次

1. 3次元 FEM モデルによる応答結果の整理の概要	別紙 3-2-1
2. 3次元 FEM モデルによる応答結果の整理	別紙 3-2-2
2.1 建屋模擬モデルと質点系対応モデルの応答の整理	別紙 3-2-2
2.2 建屋全体応答の整理	別紙 3-2-5
2.3 水平方向加振時の屋根スラブにおける鉛直方向の最大応答加速度	別紙 3-2-12

## 1. 3次元 FEM モデルによる応答結果の整理の概要

「別紙 3 3次元 FEM モデルによる地震応答解析」（以下「別紙 3」という。）では、原子炉建屋について、建屋の 3 次元的な応答性状を確認し、質点系モデルによる地震応答解析の妥当性を検証するため、3次元 FEM モデルによる地震応答解析を行い、建屋の局所的な応答について検討を行った。また、3次元 FEM モデルによる挙動が、建屋及び機器・配管系の有する耐震性に及ぼす影響について検討を行った。

本資料では、別紙 3 に示した応答結果のうち、表 1-1 に示す応答結果について詳細を示す。

表 1-1 応答結果の整理の概要

	別紙 3 に示した応答結果*	本資料における整理方法
1	「3.2.3 床柔性の影響」	「2.1 建屋模擬モデルと質点系対応モデルの応答の整理」において、建屋模擬モデル（3次元 FEM）と質点系対応モデル（3次元 FEM）との応答の違いについて詳細を示す。
2	「3.3.2 建屋模擬モデル及び質点系モデルの最大応答値の比較検討」	「2.2 建屋全体応答の整理」において、建屋模擬モデル（3次元 FEM）における代表節点の最大応答加速度を示す。
3	—	「2.3 水平加振時の屋根スラブにおける鉛直方向の最大応答加速度」において、応答整理を行う際の参考として、建屋模擬モデル（3次元 FEM）と質点系対応モデル（3次元 FEM）を対象に、屋根スラブにおける代表節点の水平加振時の鉛直方向の最大応答加速度を示す。

注記\*：別紙 3 における耐震性評価には用いない応答を「—」で示す。

## 2. 3次元 FEM モデルによる応答結果の整理

### 2.1 建屋模擬モデルと質点系対応モデルの応答の整理

別紙 3 における「3.2.3 床柔性の影響」では、以下の 2 つのモデルによる応答を比べることで床柔性の影響を確認している。

- ・床の柔性を考慮した建屋模擬モデル（3次元 FEM，床柔及び相互作用考慮）
- ・床を剛とした質点系対応モデル（3次元 FEM，床剛及び相互作用考慮）

表 2-1 に示す Sd-2 による NS 方向加振時 NS 方向応答では、周期 0.2s 付近において、建屋模擬モデル（3次元 FEM）と質点系対応モデル（3次元 FEM）による応答にわずかながら差がみられる。

両モデルの NS 方向固有値解析結果に基づき、2次モードにおける振動モードの比較を表 2-2 に示す。

建屋模擬モデル（3次元 FEM）は屋根スラブの剛性を非考慮としており、周期 0.2s 付近のモードである 2次モードにおいて屋根スラブ中央部の変形が NS 方向に大きくはらみ出すような分布となっている。一方で、質点系対応モデル（3次元 FEM）では屋根スラブの剛性を床スラブと同様に剛という条件としており、屋根スラブは NS 方向に一体となって挙動する分布となっている。

また、表 2-1 に示す周期 0.2s 付近における応答の差は中央部（No. 65821）において最も大きくなっており、屋根スラブの変形が建屋下部における全体挙動に影響を与えたことが推察される。

これらより、表 2-1 に示す周期 0.2s 付近における応答の差は、屋根スラブの剛性の設定条件の相違によるものと考えられる。

表 2-1 建屋模擬モデル（3次元FEM）と質点系対応モデル（3次元FEM）の応答比較

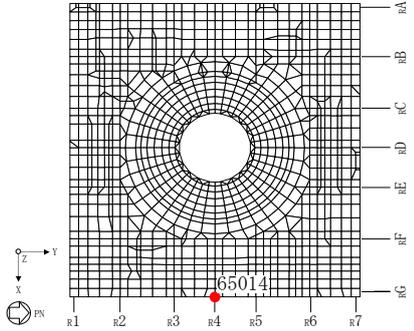
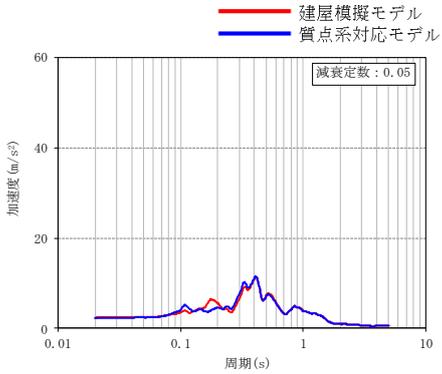
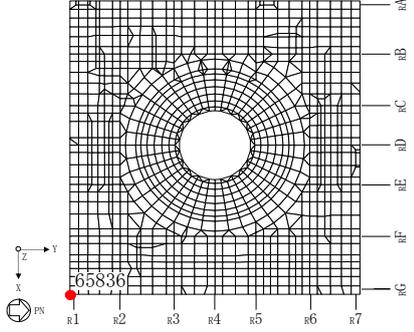
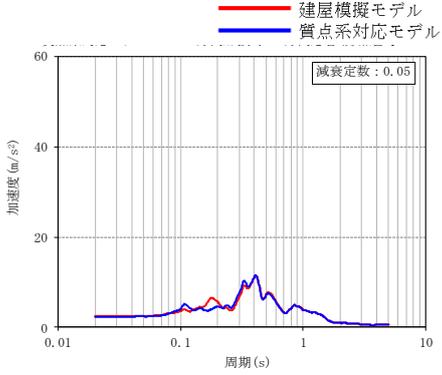
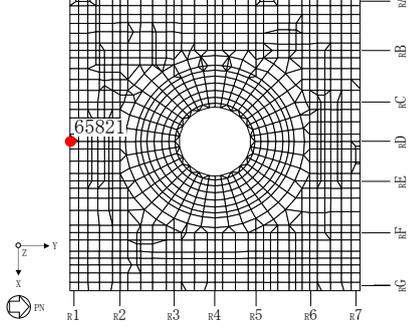
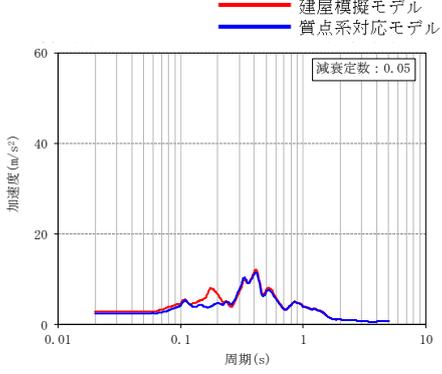
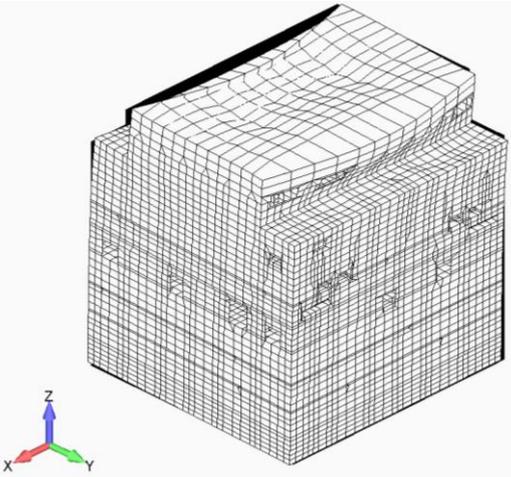
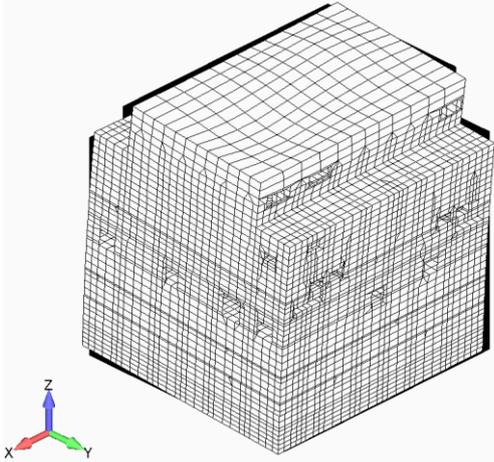
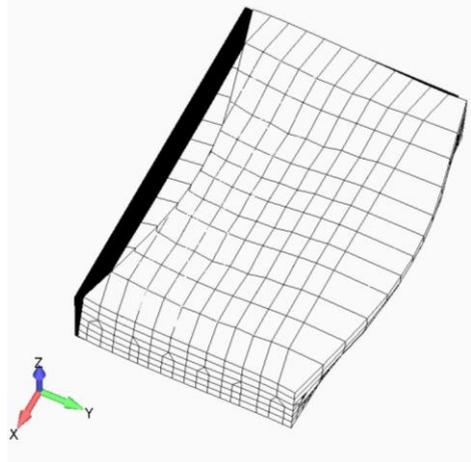
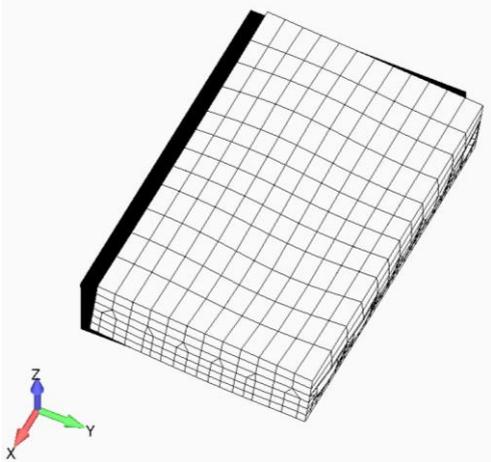
評価点（外壁部）	Sd-2 NS 方向加振時 NS 応答
 <p>T. M. S. L. 12. 3m No. 65014</p>	
 <p>T. M. S. L. 12. 3m No. 65836</p>	
 <p>T. M. S. L. 12. 3m No. 65821</p>	

表 2-2 振動モードの比較 (NS 方向 2 次モード)

3次元 FEM	建屋模擬モデル 屋根スラブ剛性 非考慮	質点系対応モデル 屋根スラブ剛性 考慮*
振動数 (周期)	5.22Hz (0.19s)	5.58Hz (0.18s)
建屋 全景		
屋根 スラブ		

注記\* : 床スラブと同様に剛としている。

## 2.2 建屋全体応答の整理

別紙 3 における「3.3.2 建屋模擬モデル及び質点系モデルの最大応答値の比較検討」では、建屋耐震性評価への影響検討として、建屋模擬モデル（3次元 FEM）及び質点系モデルの最大応答値（最大応答加速度）の比較を行っている。なお、当該比較の際には、建屋模擬モデル（3次元 FEM）の図 2-1 に示す節点の最大応答加速度をレベルごとに平均した値を用いている。ただし、別紙 3 における「3.3.3 3次元的な応答特性（応答補正率）を考慮した建屋影響検討」での応答補正比率算定の際は、各節点の最大応答加速度を用いて評価している。

ここでは、建屋模擬モデル（3次元 FEM）の図 2-1 に示す節点における応答の平均化が妥当であることを、以下の 2つと比較することで確認する。

- ・ 図 2-1 に示す節点の最大応答加速度のレベルごとの最大値
- ・ 図 2-1 に示す節点の最大応答加速度のレベルごとの最小値

建屋模擬モデル（3次元 FEM）の各節点の最大応答加速度の比較を図 2-2 及び図 2-3 に示す。

いずれのレベルについても建屋模擬モデル（3次元 FEM）の各節点の最大応答加速度のばらつきは小さい。その中でも最もばらつきがあるのは T.M.S.L. 38.2m であるが、「別紙 2 3次元 FEM モデルを用いた精査」において壁の面外方向の最大応答加速度分布（図 2-4 及び図 2-5 参照）を示すとともに、ばらつきは壁の面外慣性力による影響であること、面外慣性力による原子炉建屋の壁が有する耐震性への影響は無いことを確認している。

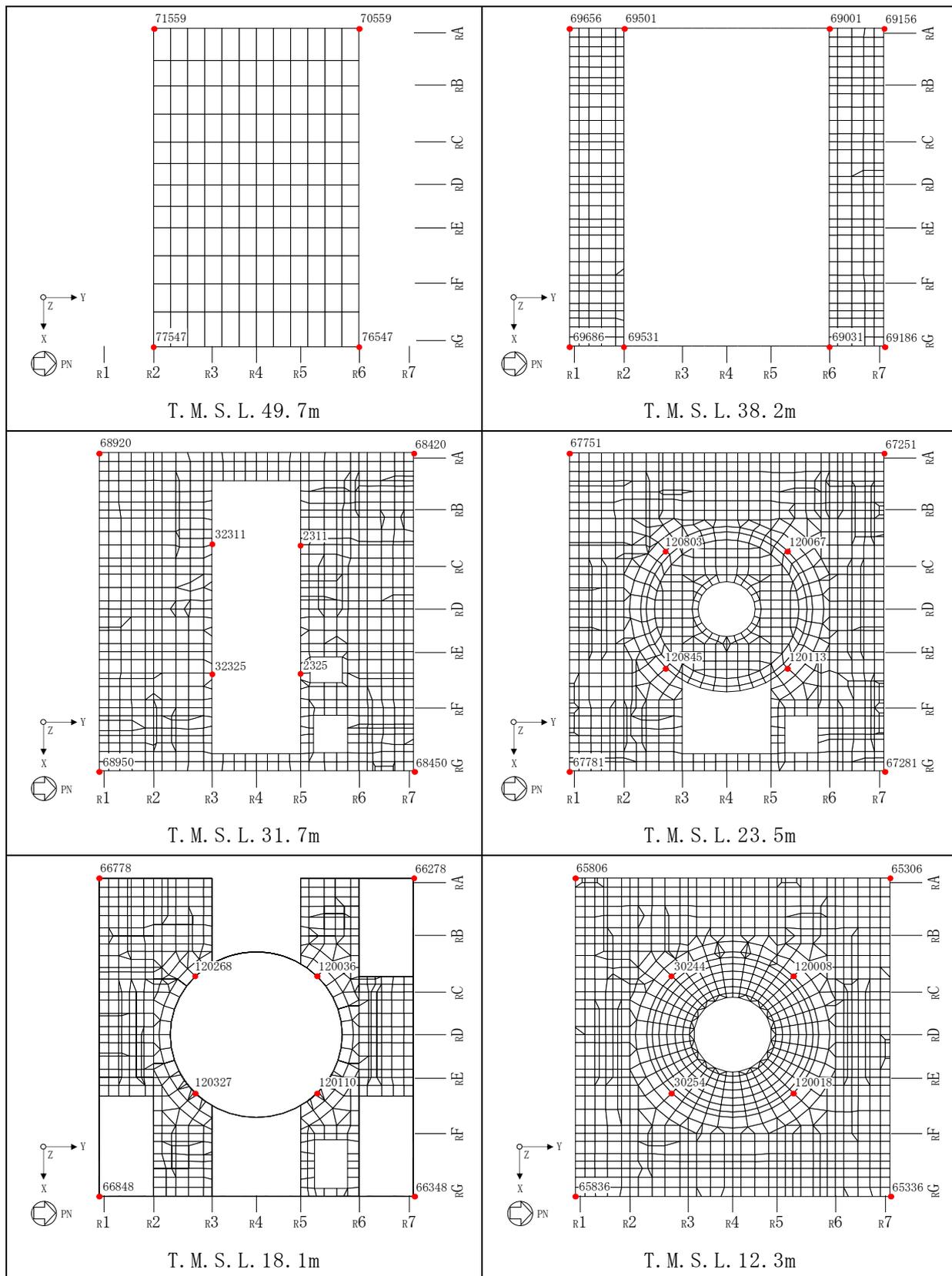


图 2-1 応答評価位置 (1/2)

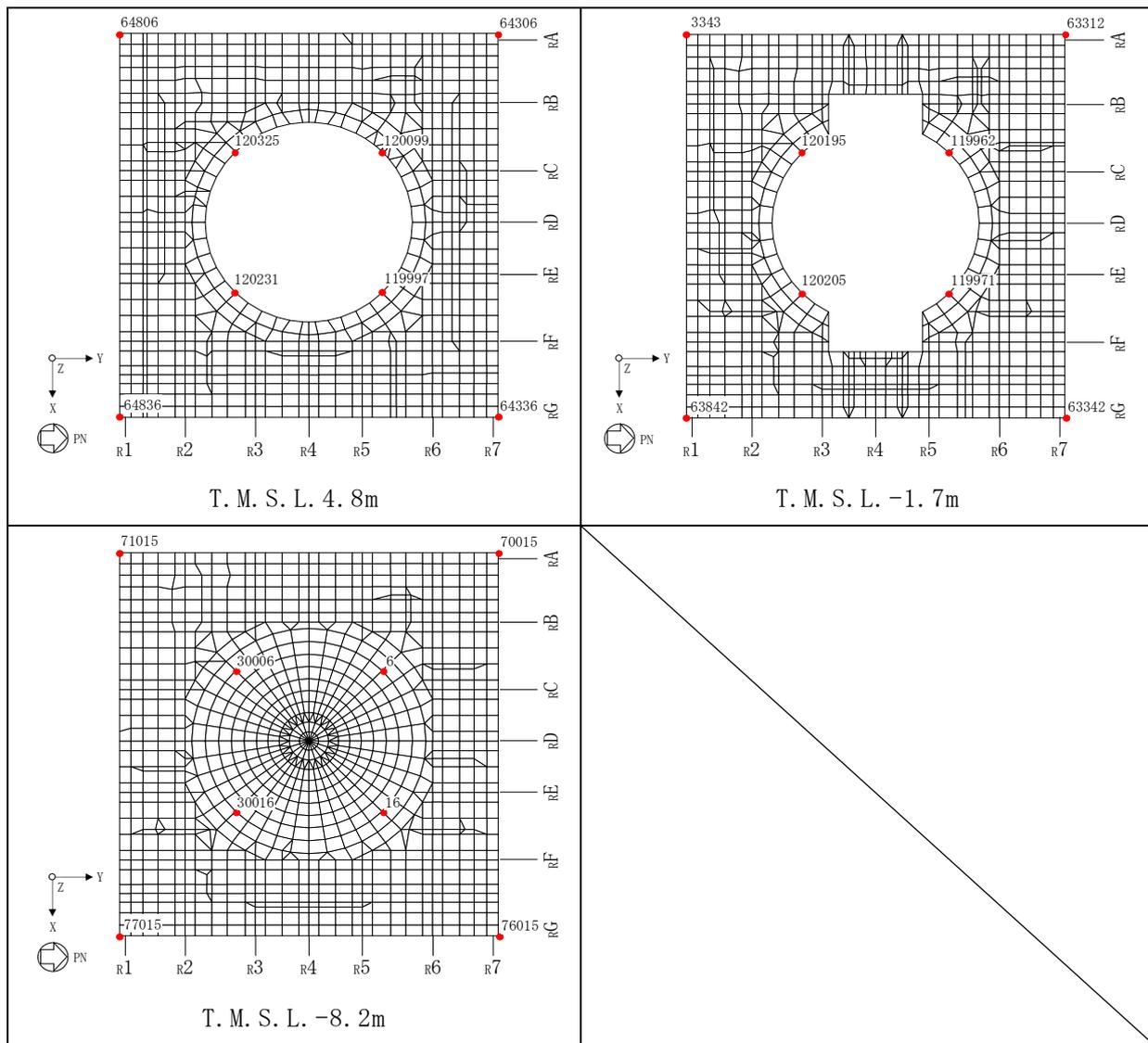
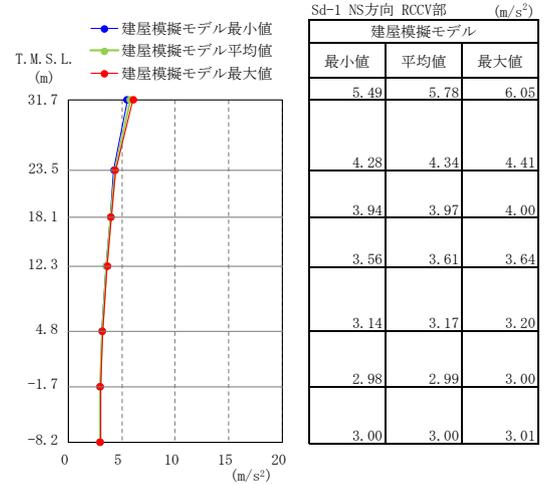
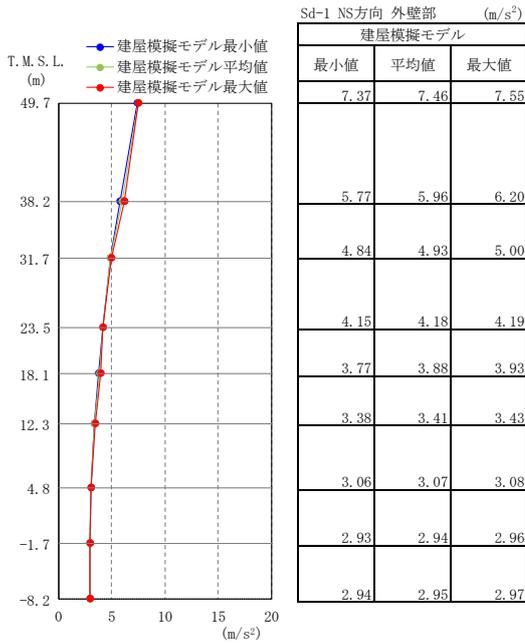
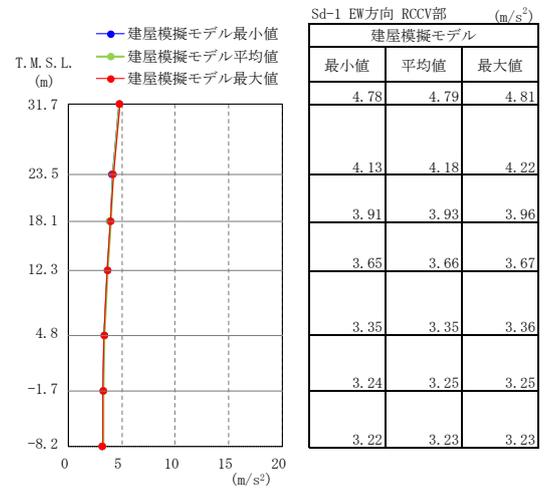
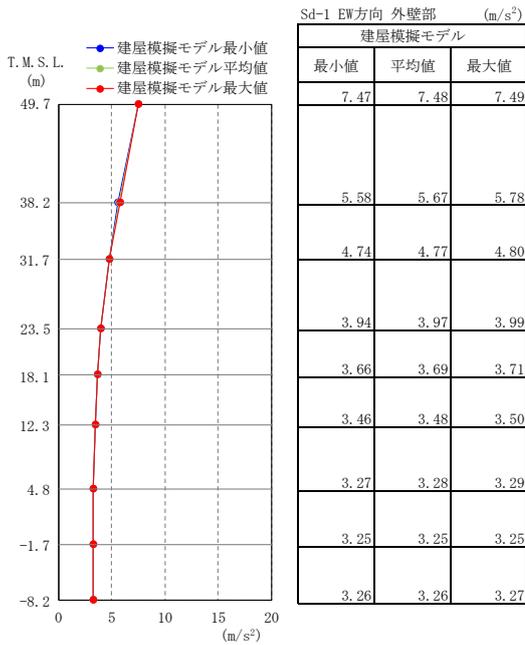


図 2-1 応答評価位置 (2/2)



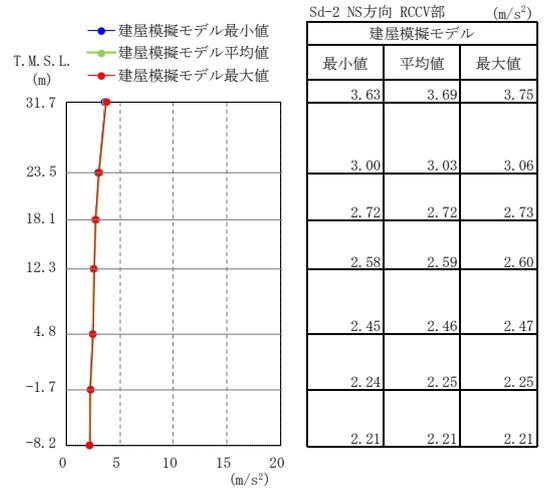
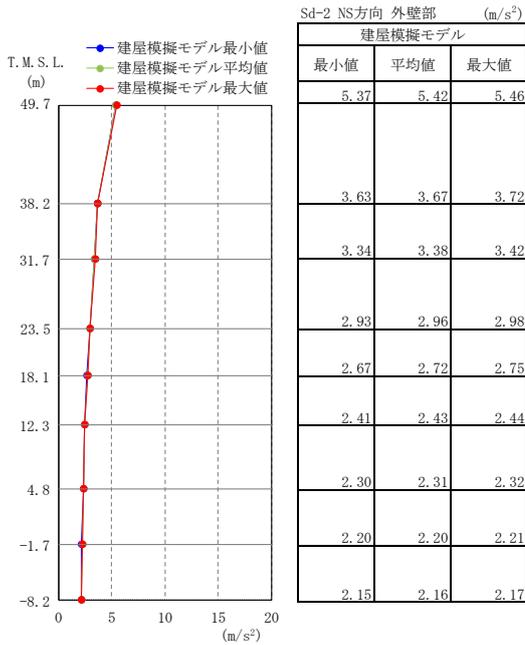
(a) 外壁部 (b) RCCV部  
(1) Sd-1 NS方向加振時 NS方向応答



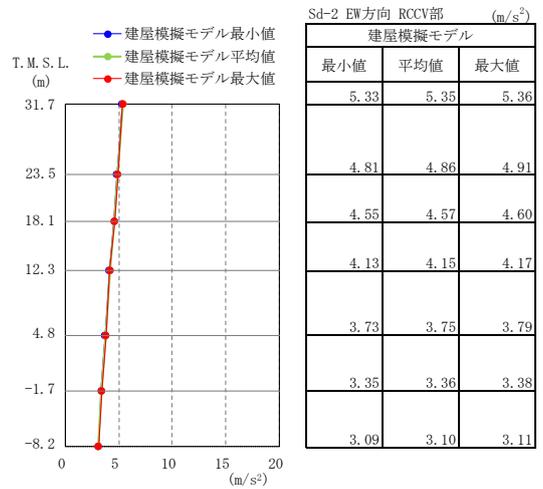
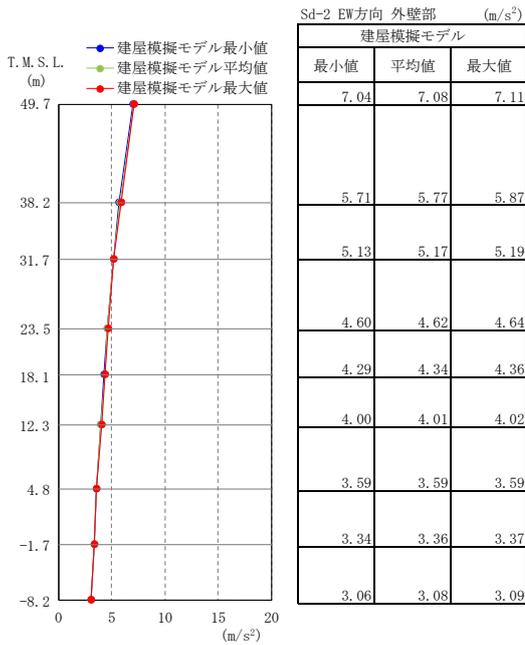
(a) 外壁部 (b) RCCV部  
(2) Sd-1 EW方向加振時 EW方向応答

注：建屋模擬モデルは3次元FEMモデルである。

図2-2 最大応答加速度の比較 (Sd-1)



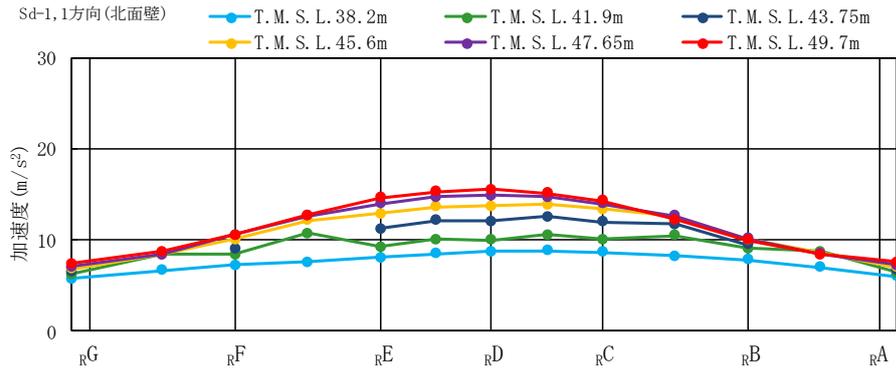
(a) 外壁部 (b) RCCV部  
(1) Sd-2 NS方向加振時 NS方向応答



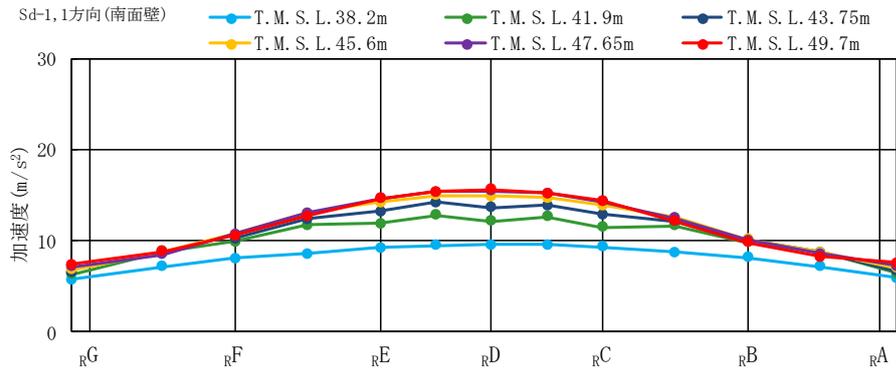
(a) 外壁部 (b) RCCV部  
(2) Sd-2 EW方向加振時 EW方向応答

注：建屋模擬モデルは3次元FEMモデルである。

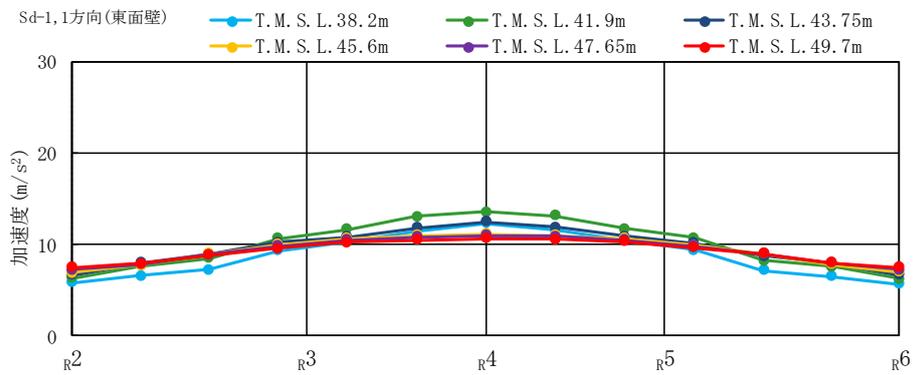
図2-3 最大応答加速度の比較 (Sd-2)



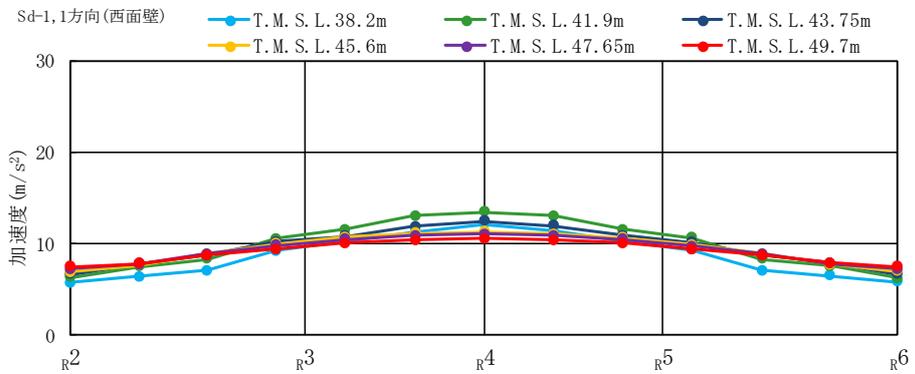
(a) 北面壁



(b) 南面壁

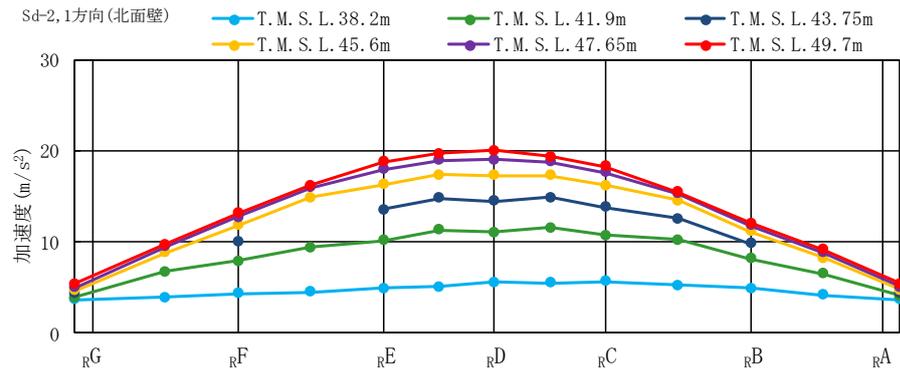


(c) 東面壁

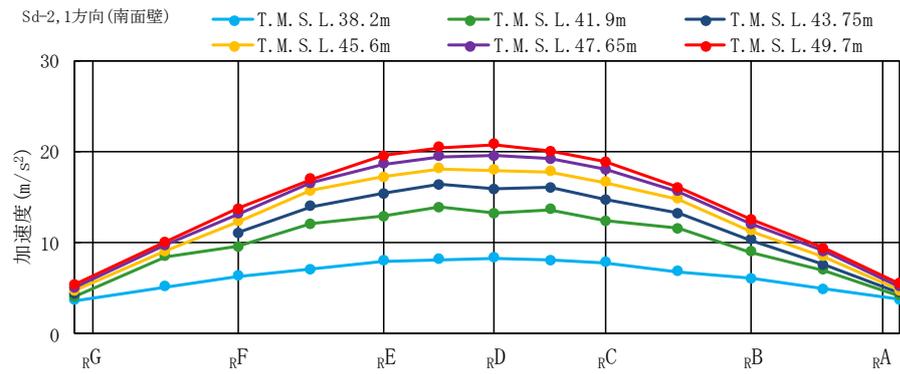


(d) 西面壁

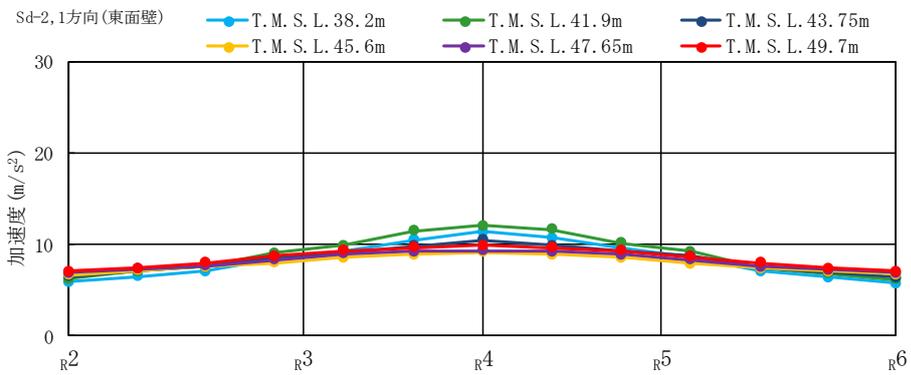
図 2-4 水平 1 方向入力における最大応答加速度の分布図 (Sd-1, 平面分布)



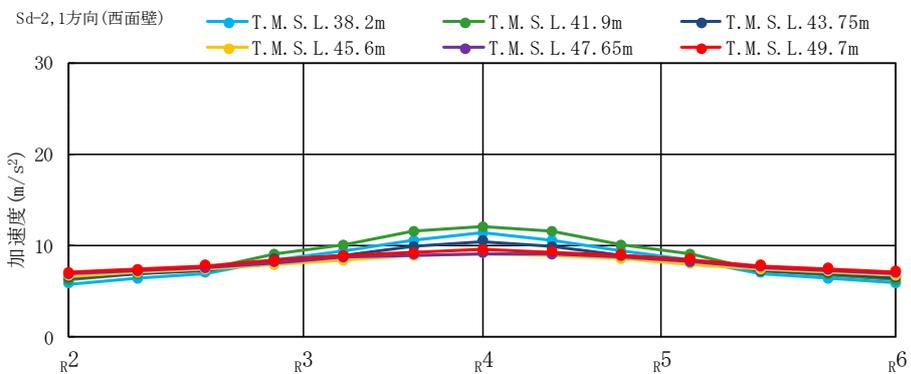
(a) 北面壁



(b) 南面壁



(c) 東面壁



(d) 西面壁

図 2-5 水平 1 方向入力における最大応答加速度の分布図 (Sd-2, 平面分布)

### 2.3 水平方向加振時の屋根スラブにおける鉛直方向の最大応答加速度

ここでは、応答整理を行う際の参考として、以下の 2 つのモデルを対象に、屋根スラブの代表節点における水平方向加振時の鉛直方向の最大応答加速度を示す。

- ・床の柔性を考慮した建屋模擬モデル（3次元 FEM，床柔及び相互作用考慮）
- ・床を剛とした質点系対応モデル（3次元 FEM，床剛及び相互作用考慮）

なお、建屋模擬モデルは屋根スラブの剛性を非考慮としており、質点系対応モデルでは屋根スラブの剛性を床スラブと同様に剛としている。

最大応答加速度を示す屋根スラブの代表節点を図 2-6 及び図 2-7 に示す。

代表節点は加振方向ごとに設定するものとし、NS 方向加振時は、各通り（トラス）で分布を確認するため、つなぎばり及び外壁との交点を選定する。EW 方向加振時は、各つなぎばりで分布を確認するため、トラス、サブビーム及び外壁との交点を選定する。

水平方向加振時の鉛直方向の最大応答加速度を図 2-8 及び図 2-9 に示す。

水平方向加振時の鉛直方向応答は、いずれのモデルについても加振方向の応答に比べ小さい。また、NS 加振時の鉛直方向応答について、建屋模擬モデルは NS 軸に対し鉛直方向 1 次に類似した分布、質点系対応モデルは NS 軸に対し鉛直方向 2 次に類似した分布となっており、建屋模擬モデルは質点系対応モデルに比べ応答が増大している。一方で、EW 方向加振時ではいずれのモデルも EW 軸に対し鉛直方向 2 次モードに類似した分布であり、同程度の応答となっている。

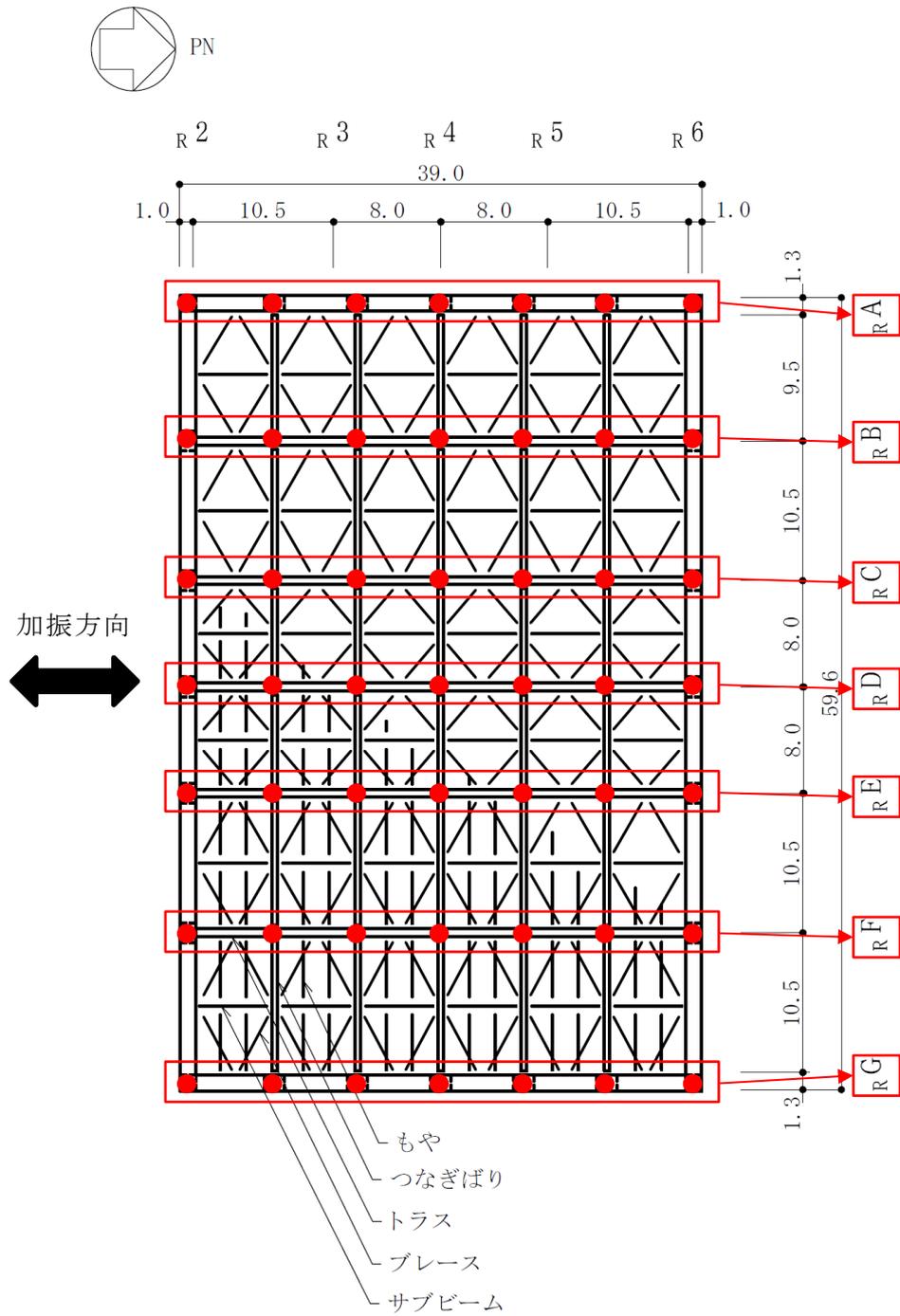


図 2-6 NS 方向加振時における屋根スラブの代表節点

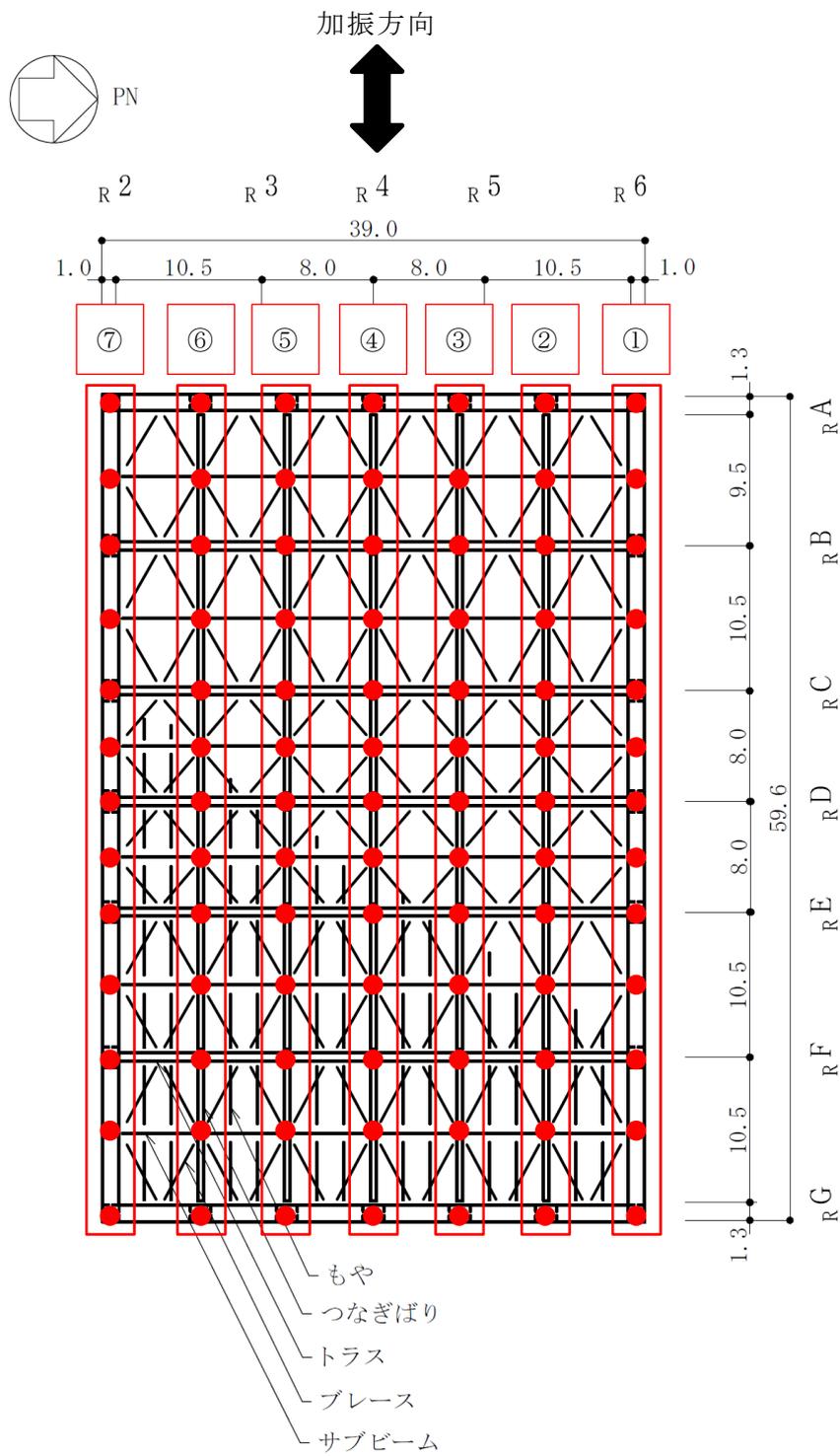
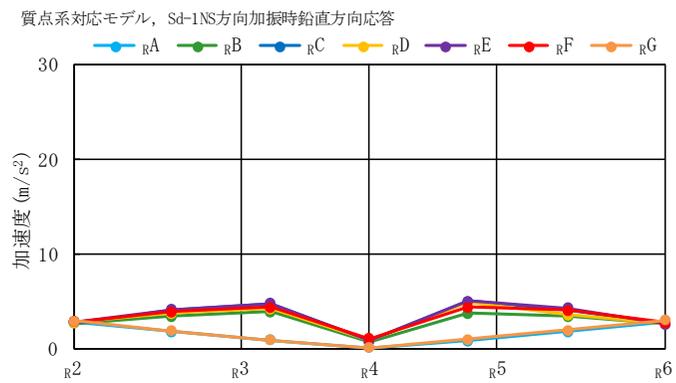
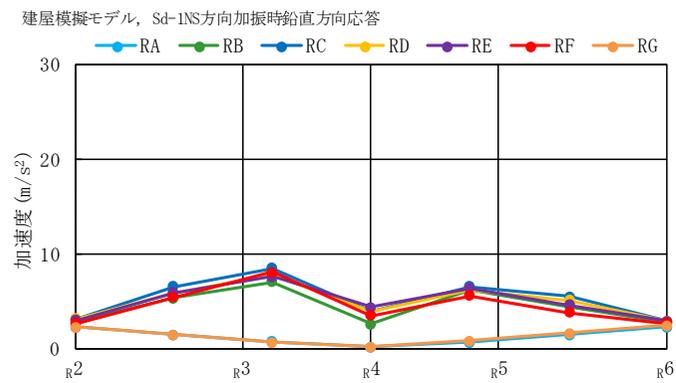


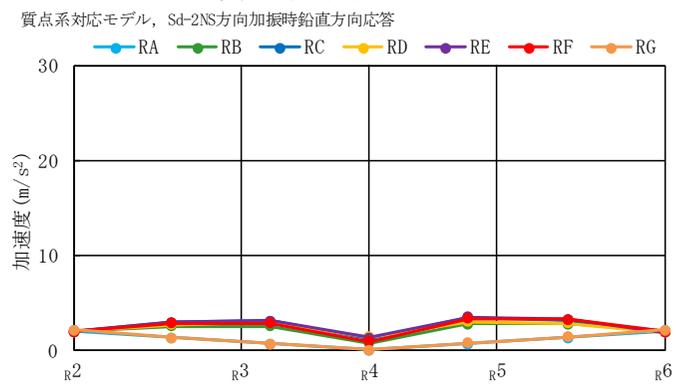
図 2-7 EW 方向加振時における屋根スラブの代表節点



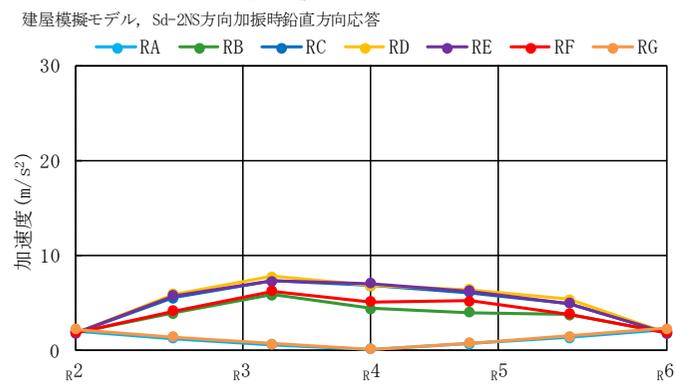
(a) 質点系対応モデル Sd-1



(b) 建屋模擬モデル Sd-1

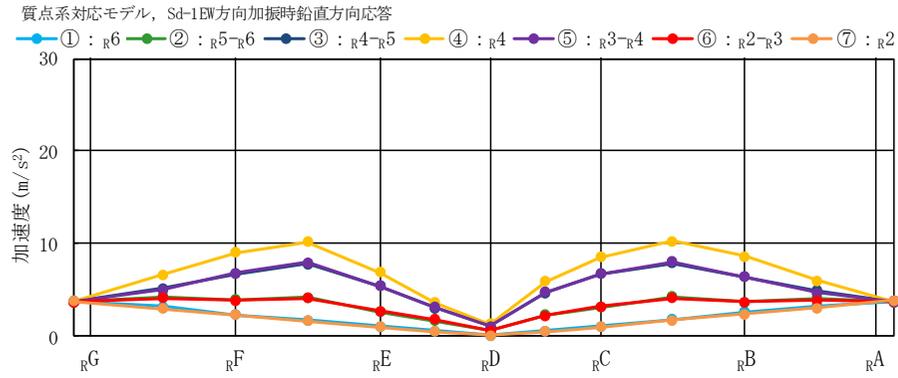


(c) 質点系対応モデル Sd-2

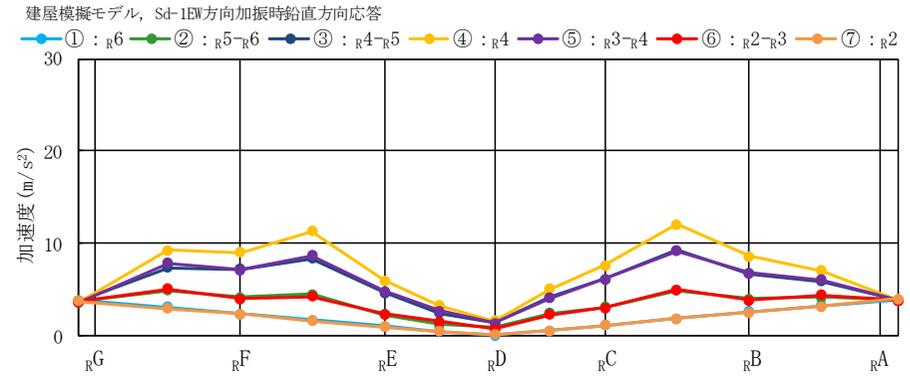


(d) 建屋模擬モデル Sd-2

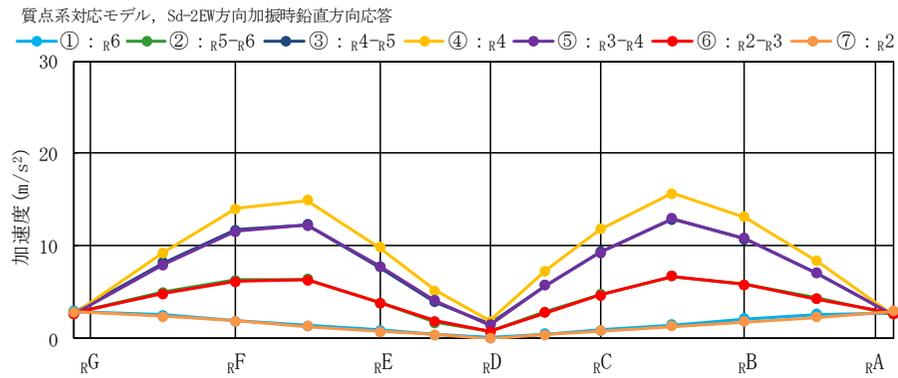
図 2-8 NS 方向加振時における鉛直方向の最大応答加速度の分布図



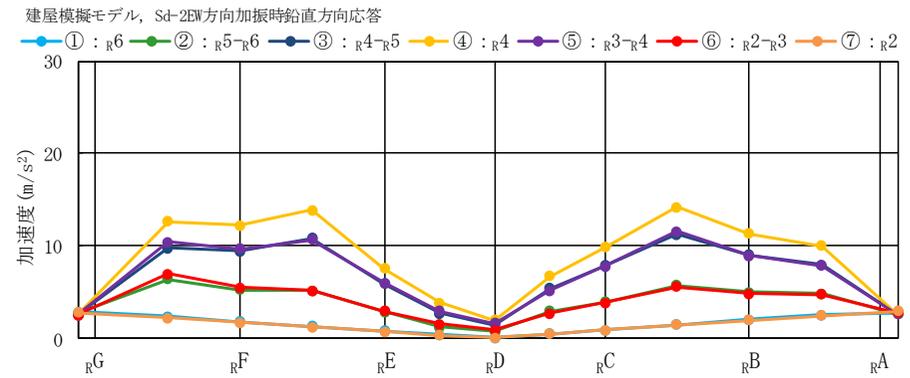
(a) 質点系対応モデル Sd-1



(b) 建屋模擬モデル Sd-1



(c) 質点系対応モデル Sd-2



(d) 建屋模擬モデル Sd-2

図 2-9 EW 方向加振時における鉛直方向の最大応答加速度の分布図

別紙5 方向性を考慮しない水平地震動における  
模擬地震波の作成方針

目 次

1. はじめに ..... 別紙5-1

## 1. はじめに

水平2方向及び鉛直方向地震力の同時入力による影響検討を行う際に、主排気筒及び軽油タンク基礎の地震応答解析では基準地震動 $S_s-1$ 、原子炉建屋の建屋3次元FEMによる地震応答解析では基準地震動 $S_s-1$ に係数0.5を乗じて設定した弾性設計用地震動 $S_d-1$ 、第一ガスタービン発電機用燃料タンク基礎の地震応答解析では基準地震動 $S_s-3$ を代表波として用いている。この際、水平1方向には $S_s-1H$ と $S_s-3H$ を用いるが、その直交方向には $S_s-1H$ と $S_s-3H$ とは位相の異なる模擬地震波を用いている。本資料では、 $S_s-1H$ と $S_s-3H$ とは位相の異なる模擬地震波の作成方針について示す。

作成方針については、令和2年10月14日付け原規規発第2010147号にて認可された柏崎刈羽原子力発電所第7号機的设计及び工事の計画の説明資料「水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する検討について（KK7 補足-024 資料4）」のうち「別紙5 方向性を考慮しない水平地震動における模擬地震波の作成方針」による。