

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点や防護上の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-5_改13
提出年月日	2021年12月1日

補足-600-5 水平2方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する
検討について

目 次

1. 検討の目的	1
2. 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動	1
2.1 女川原子力発電所の基準地震動	1
2.2 水平 2 方向及び鉛直方向地震力による影響評価に用いる地震動	4
3. 各施設における水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対する検討結果	4
3.1 建物・構築物	4
3.1.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計手法の考え方	4
3.1.2 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法	7
3.1.3 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価部位の抽出	12
3.1.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価部位の抽出結果	33
3.1.5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方針	35
3.1.6 排気筒の検討	36
3.1.7 使用済燃料プールの壁の検討	47
3.1.8 原子炉建屋の基礎版の検討	65
3.2 機器・配管系	81
3.2.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計手法の考え方	81
3.2.2 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方針	82
3.2.3 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せ影響評価方法	83
3.2.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価設備の抽出	87
3.2.5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価設備の抽出結果	89
3.2.6 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価	90
3.2.7 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価結果	91
3.2.8 まとめ	91
3.3 屋外重要土木構造物	107
3.3.1 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計手法の考え方	107
3.3.2 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方針	110
3.3.3 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法	111
3.3.4 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出	114
3.3.5 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出結果	140
3.3.6 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価結果	151
3.3.7 機器・配管系への影響	204
3.3.8 まとめ	205

3.4 津波防護施設, 浸水防止設備及び津波監視設備	206
3.4.1 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物	206
3.4.2 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せによる従来設計手法の考え方	219
3.4.3 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方針	220
3.4.4 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価方法	221
3.4.5 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出	224
3.4.6 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価対象構造物の抽出結果	236
3.4.7 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せの評価結果	241
3.4.8 機器・配管系への影響	300

別紙1 建物・構築物における評価部位の抽出に関する説明資料

別紙2 原子炉建屋3次元FEMモデルを用いた精査

別紙3 原子炉建屋3次元FEMモデルによる地震応答解析

別紙4 機器・配管系に関する影響検討

別紙5 方向性を考慮しない水平地震動における位相の異なる模擬地震波の作成

別紙6 原子炉建屋基礎版の応力解析における応力平均化の考え方

: 本日の説明範囲

3.2.7 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価結果

別紙 4.2 において水平 2 方向での発生値の増分の影響が無視できないと整理した設備について、3.2.6 項の影響評価条件において算出した発生値に対して設備の耐震性への影響を確認する。評価した内容を設備ごとに示し、その影響評価結果については重大事故等の状態も考慮した結果について別紙 4.3 に示す。

3.2.8 まとめ

機器・配管系において、水平 2 方向の地震力の影響を受ける可能性がある設備について、従来設計手法における保守性も考慮した上で抽出し、従来の水平 1 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる設計に対して影響を評価した。その結果、工認耐震計算書の発生値を超えて耐震性への影響が懸念される設備については、水平 2 方向及び鉛直方向地震力を想定した発生値が許容値を満足し、設備が有する耐震性に影響のないことを確認した。

本影響評価は、水平 2 方向及び鉛直方向地震力により設備が有する耐震性への影響を確認することを目的としている。そのため、工認耐震計算書の発生値をそのまま用いて水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せを評価しており、以下に示す保守側となる要因を含んでいる。

- ・工認耐震計算書の発生値（水平 1 方向及び鉛直方向地震力による応力成分と圧力等の地震以外の応力成分の組合せ）に対して、係数（ $\sqrt{2}$ ）を乗じて水平 2 方向及び鉛直方向地震力を想定した発生値として算出しているため、係数を乗じる必要のない鉛直方向地震力による応力成分と圧力等の地震以外の応力成分についても係数を乗じている。
- ・工認耐震計算書において水平各方向を包絡した床応答曲線を各方向に入力している設備は各方向の大きい方の地震力が水平 2 方向に働くことを想定した発生値として算出している。

以上のことから、水平 2 方向及び鉛直方向地震力については、機器・配管系が有する耐震性に影響がないことを確認した。

また、建物・構築物、屋外重要土木構造物、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備の検討により、機器・配管系への影響の可能性のある部位は抽出されなかった。

なお、3次元 FEM モデルを用いた精査（別紙 2）を踏まえて面外**応答**による影響検討対象として、原子炉建屋（燃料取替床レベル）の壁及び床に設置される機器・配管系の設備を抽出し、影響を検討した結果、面外**応答**による影響を考慮しても機器・配管系の耐震評価に影響がないことを確認した。また、3次元 FEM モデルによる地震応答解析（別紙 3）において、3次元 FEM モデルの応答スペクトルが質点系モデルの応答スペクトルを上回る箇所があることを踏まえて機器・配管系への影響を検討した結果、機器・配管系の耐震評価に影響がないことを確認した（別紙 4）。

別紙 2 原子炉建屋 3次元 FEM モデルを用いた精査

目 次

1. 3次元 FEM モデルを用いた精査の概要	別紙 2- 1
2. 原子炉建屋の壁の面外慣性力による影響検討.....	別紙 2- 3
2.1 検討の概要.....	別紙 2- 3
2.2 検討方針.....	別紙 2-12
2.3 解析モデル.....	別紙 2-14
2.4 地震応答解析の概要.....	別紙 2-18
2.5 地震応答解析結果.....	別紙 2-25
2.6 面外慣性力に対する壁の断面の評価.....	別紙 2-34
2.7 面外慣性力及び面内せん断力を組み合わせた場合の壁の断面の評価....	別紙 2-45
2.8 検討のまとめ.....	別紙 2-57
3. 局所応答による影響検討.....	別紙 2-58
4. 3次元 FEM モデルを用いた精査のまとめ	別紙 2-59
5. 引用文献.....	別紙 2-60

1. 3次元 FEM モデルを用いた精査の概要

添付書類「VI-2-12 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」において、応答特性②-1「面内方向の荷重に加え、面外慣性力の影響が大きい」、応答特性②-2「加振方向以外の方向に励起される振動」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の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う。

面外応答の影響については質点系モデルでは評価できない応答のため、補足説明資料「補足-600-43 地震応答に影響を及ぼす不確かさ要因の整理」に基づき、3次元 FEM モデルによる詳細評価を実施し、耐震性への影響を確認するとともに、評価結果を添付書類「VI-2-12-1 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」に反映することとした。

本資料では、精査の概要及び精査の結果を示す。

3次元 FEM モデルによる精査に用いる地震動を表 1-1 に示す。

表 1-1 評価に用いる地震動

対象		建物・構築物	評価に用いる地震動	評価に用いる理由
耐震評価部位				
壁	一般部 (燃料取替床レベル)	原子炉建屋	基準地震動 S _s -D ₂ *	全周期帯の応答が大きく、 建屋への影響が大きい

注記* : 3次元 FEM モデルによる応答補正比率の算出は、線形解析のため弾性設計用地震動 S_d-D₂ を用いる。水平方向の地震動は一方向に弾性設計用地震動 S_d-D₂ を入力するが、もう一方向の入力地震動は、弾性設計用地震動 S_d-D₂ と応答スペクトルが同じで位相が異なる地震動とする。

2. 原子炉建屋の壁の面外慣性力による影響検討

2.1 検討の概要

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の評価として、面内方向の荷重に加え面外慣性力の影響の可能性のある原子炉建屋の燃料取替床レベルの壁について、地震動を水平 2 方向及び鉛直方向に入力した場合の検討を実施する。

原子炉建屋は、地下 3 階、地上 3 階建で、基礎底面からの高さは 64.6m であり、平面は下部で 77.0m(NS 方向)×84.0m(EW 方向)^{*1}のほぼ正方形である。建屋の構造は鉄筋コンクリート造(一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造)である。

原子炉建屋の中央部には、平面が 66.0m×53.0m^{*1}(最下階)で地下 3 階、地上 3 階建の原子炉建屋原子炉棟(以下「原子炉棟」という。)があり、その周囲には地下 3 階、地上 2 階建の原子炉建屋付属棟(以下「付属棟」という。)が配置され、これらは同一基礎版上に設置された一体構造である。また、原子炉建屋は隣接する他の建屋と構造的に分離している。

原子炉建屋の基礎は、厚さ 6.0m のべた基礎で、支持地盤である砂岩及び頁岩上に設置されている。

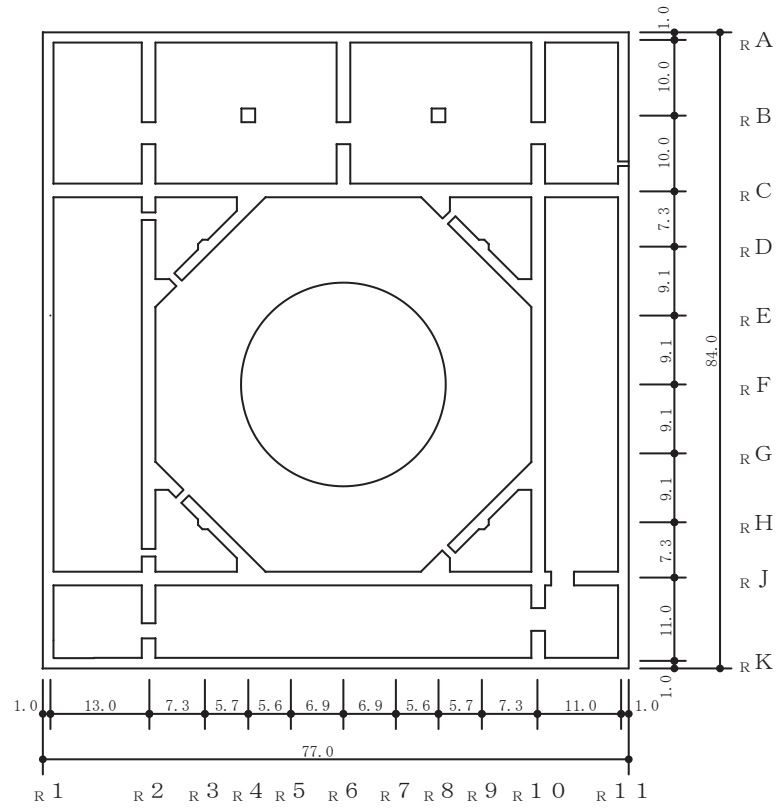
原子炉建屋の主たる耐震要素は、原子炉格納容器のまわりを囲んでいる 1 次しゃへい壁(以下「シェル壁：SW」という。)、原子炉棟の外壁(以下「内部ボックス壁：IW」という。)及び付属棟の外壁(以下「外部ボックス壁：OW」という。)である。

なお、燃料取替床(O.P.^{*2}33.2m)には使用済燃料プールが設置されている。

原子炉建屋の概略平面図及び概略断面図を図 2-1 及び図 2-2 に示す。

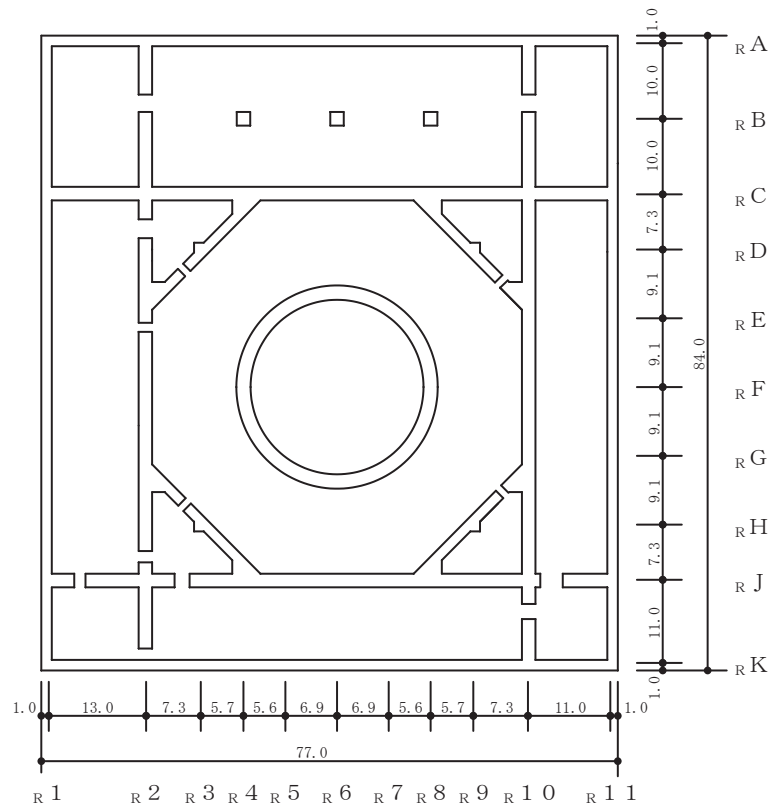
注記*1 : 建屋寸法は壁外面押えとする。

*2 : O.P. は女川原子力発電所工事用基準面であり、東京湾平均海面(T.P.)-0.74m である。



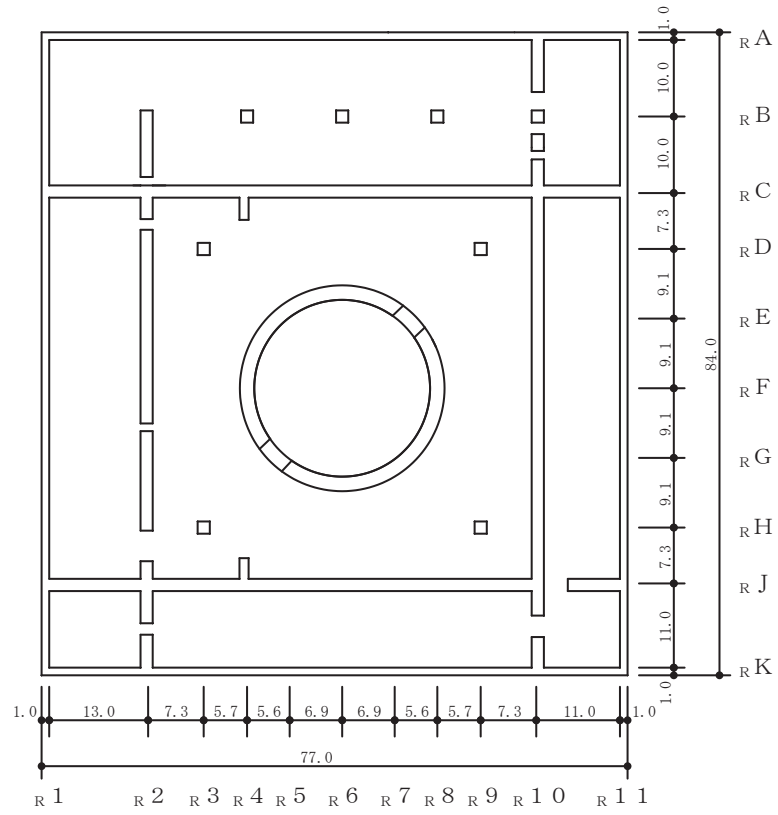
(単位 : m)

図 2-1(1) 原子炉建屋の概略平面図 (0.P. -8.1m)



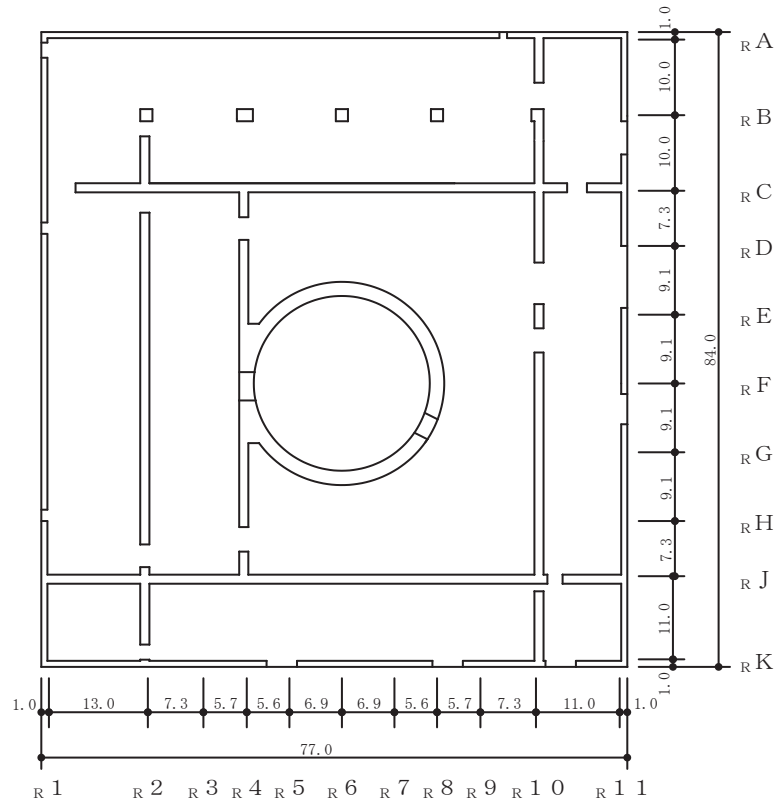
(単位：m)

図 2-1(2) 原子炉建屋の概略平面図 (0. P. -0.8m)



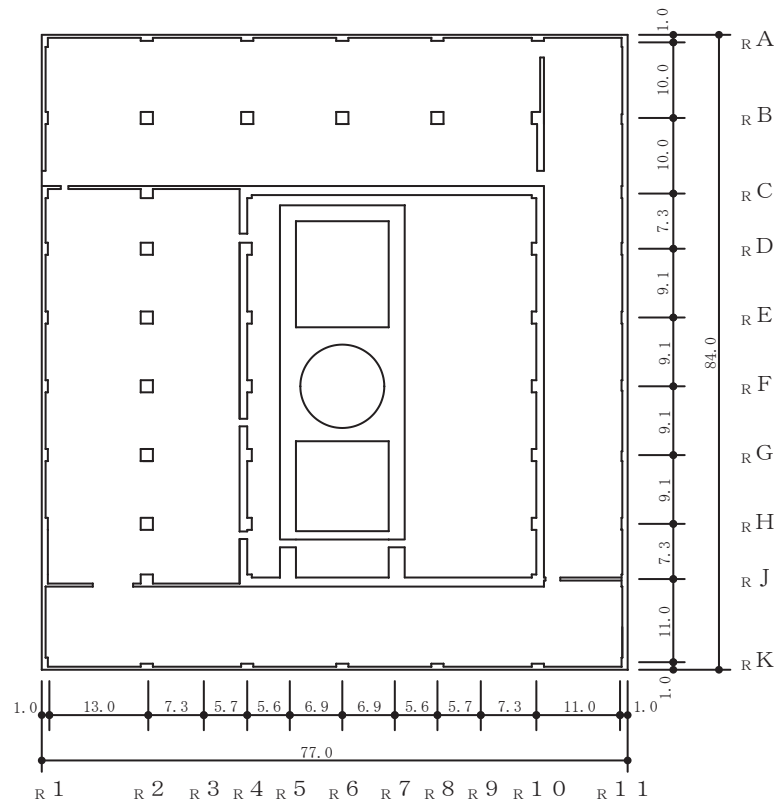
(単位：m)

図 2-1(3) 原子炉建屋の概略平面図 (0. P. 6. 0m)



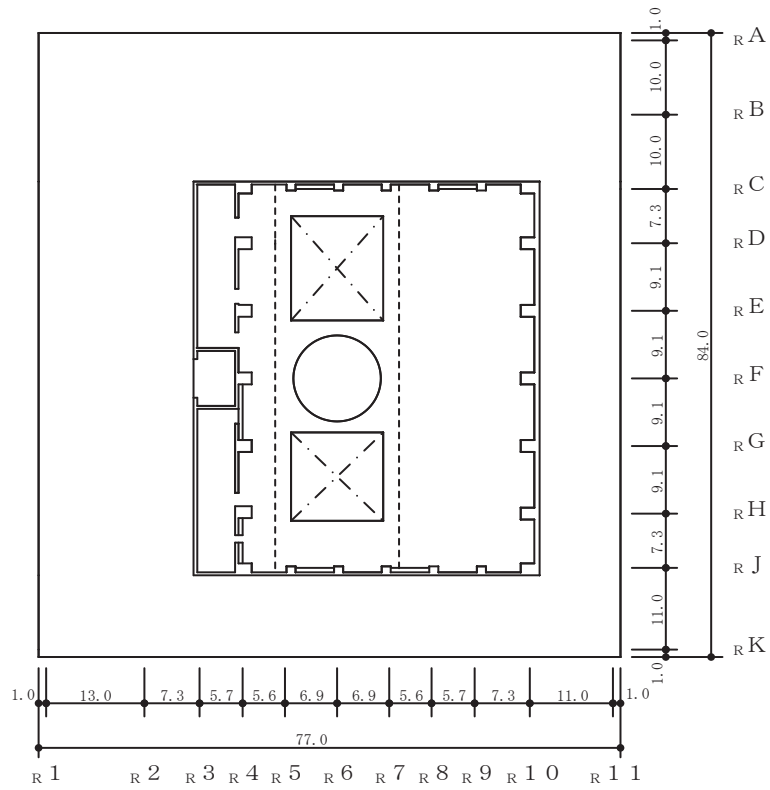
(単位：m)

図 2-1(4) 原子炉建屋の概略平面図 (0.P. 15.0m)



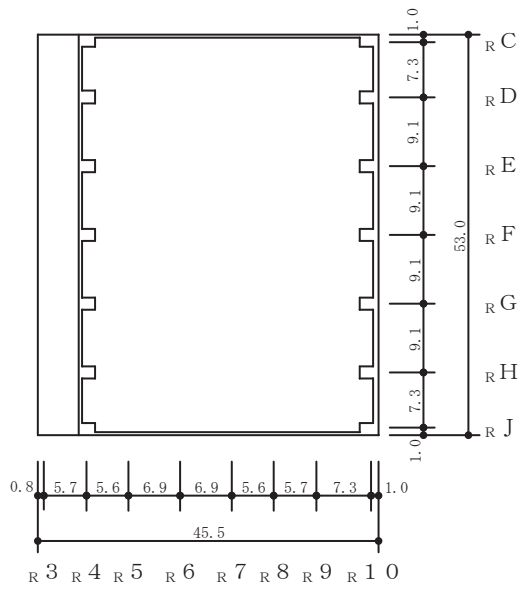
(単位：m)

図 2-1(5) 原子炉建屋の概略平面図 (0.P. 22.5m)



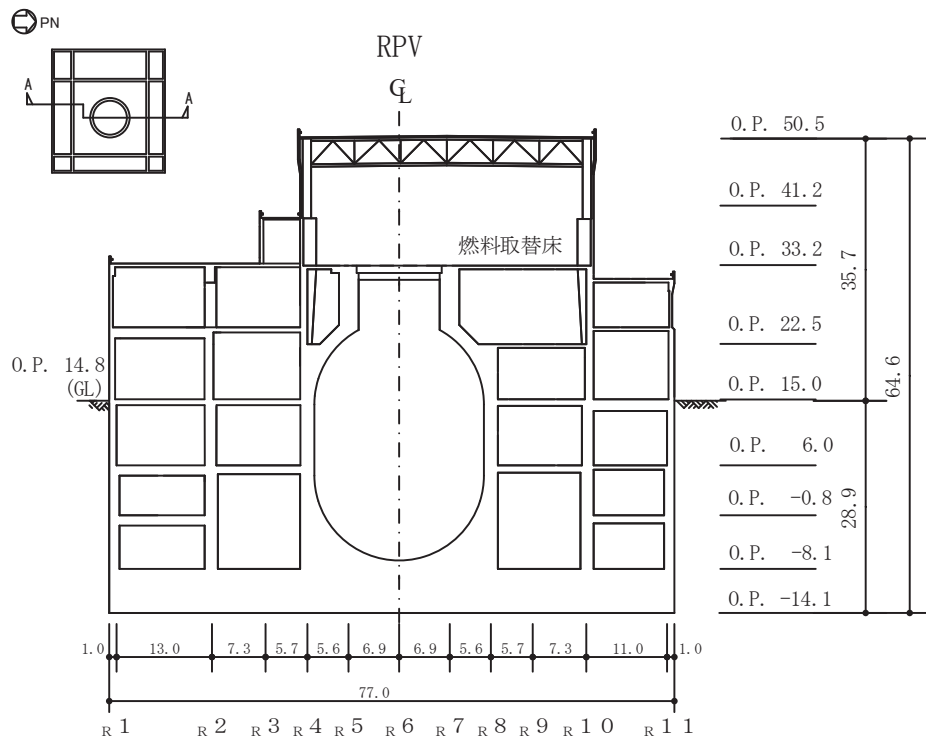
(単位：m)

図 2-1(6) 原子炉建屋の概略平面図 (0. P. 33. 2m)



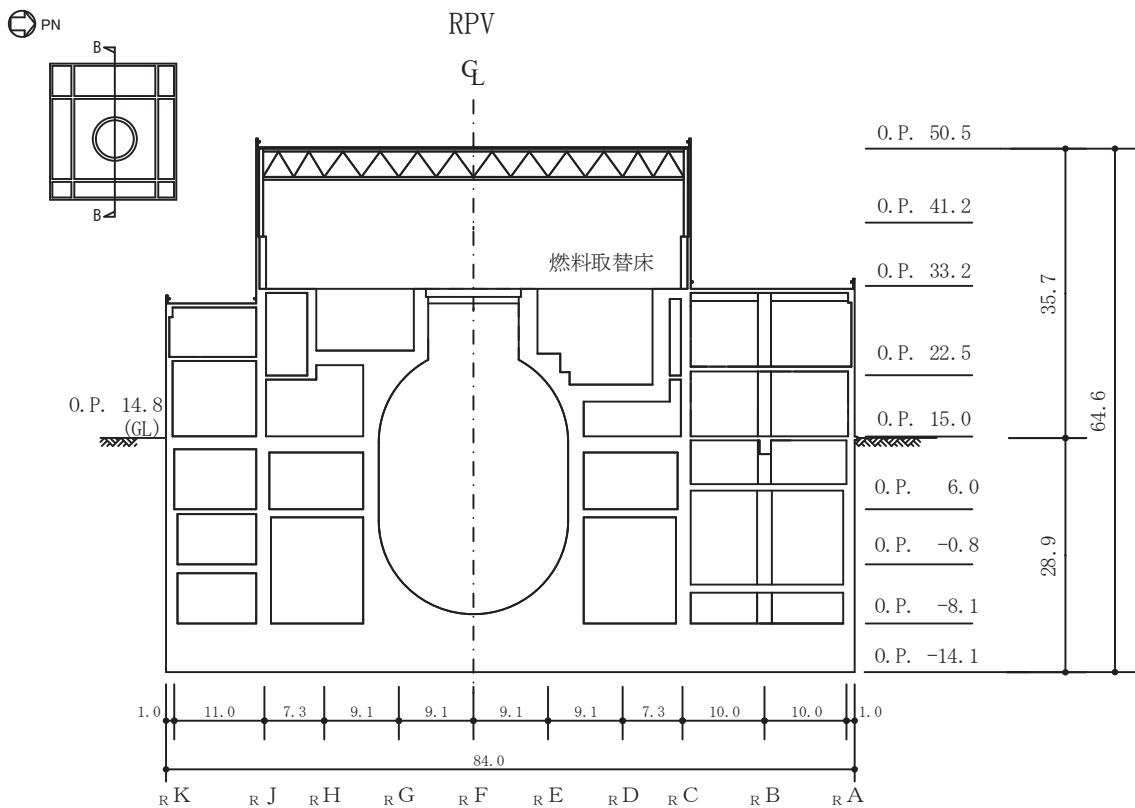
(単位：m)

図 2-1(7) 原子炉建屋の概略平面図 (0. P. 41. 2m)



(単位 : m)

図 2-2(1) 原子炉建屋の概略断面図 (A-A 断面 NS 方向)



(単位 : m)

図 2-2(2) 原子炉建屋の概略断面図 (B-B 断面 EW 方向)

2.2 検討方針

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

原子炉建屋の燃料取替床レベルの壁について、弾性設計用地震動 S_d に対する地震応答解析により得られた最大応答加速度の分布から、面外慣性力の影響を確認する。また、水平 1 方向の入力に対する最大応答加速度と 3 方向同時入力による最大応答加速度を比較し、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を確認する。

3 次元 FEM モデルによる最大応答加速度の分布から面外慣性力の影響を把握したうえで、原子炉建屋の壁を部分的に抽出し、保守的な静的応力解析モデルに置き換える。面外慣性力による面外応力に対して断面の評価を行い、面外慣性力の影響を確認する。

許容限界については、面外曲げモーメントにより生ずる壁主筋の発生応力が、「建設省告示第 2464 号」に基づき F 値に 1.1 倍の割増しを考慮した弾性限強度を超えないこととする。また、面外せん断応力については、「日本建築学会 2005 年 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に基づく短期許容面外せん断力を超えないこととする。

面外慣性力の影響に対する弾性設計用地震動 $S_d - D_2$ による評価については、地震動の最大加速度比が基準地震動 S_s に対して 0.58 倍であるため、地盤や建屋の非線形性による影響を考慮しても、弾性設計用地震動 S_d 地震時（以下「 S_d 地震時」という。）の質点系モデルの応答加速度が基準地震動 S_s 時（以下「 S_s 地震時」という。）の応答加速度の 0.7 倍程度であり、許容限界が S_s 時の 1/1.1 倍であることから、基準地震動 S_s により生じる各部材の断面の応力が弾性限強度を超えないことを確認することで、本資料においては弾性設計用地震動 S_d による評価は行わないこととする。

検討フローを図 2-3 に示す。

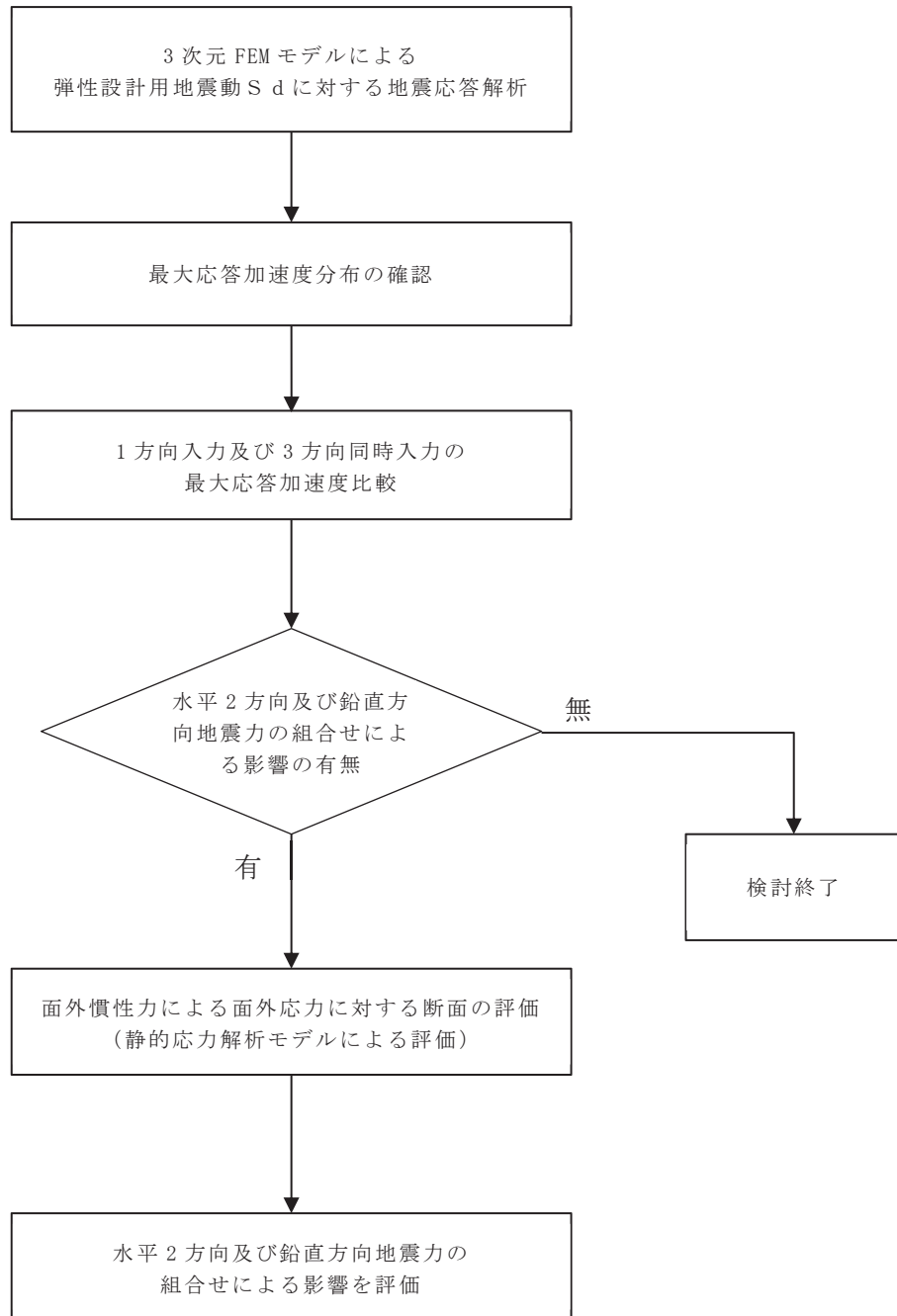


図 2-3 3次元 FEM を用いた精査の評価フロー

2.3 解析モデル

原子炉建屋の 3 次元 FEM モデル図を図 2-4 に示す。

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 44200 要素）とする。基礎版は、ソリッド要素（約 13900 要素）とする。柱，はり，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 3000 要素）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，水平ブレースはトラス要素（約 500 要素）とする。

また，壁・床の開口部については，主要な部分のみモデル化する。

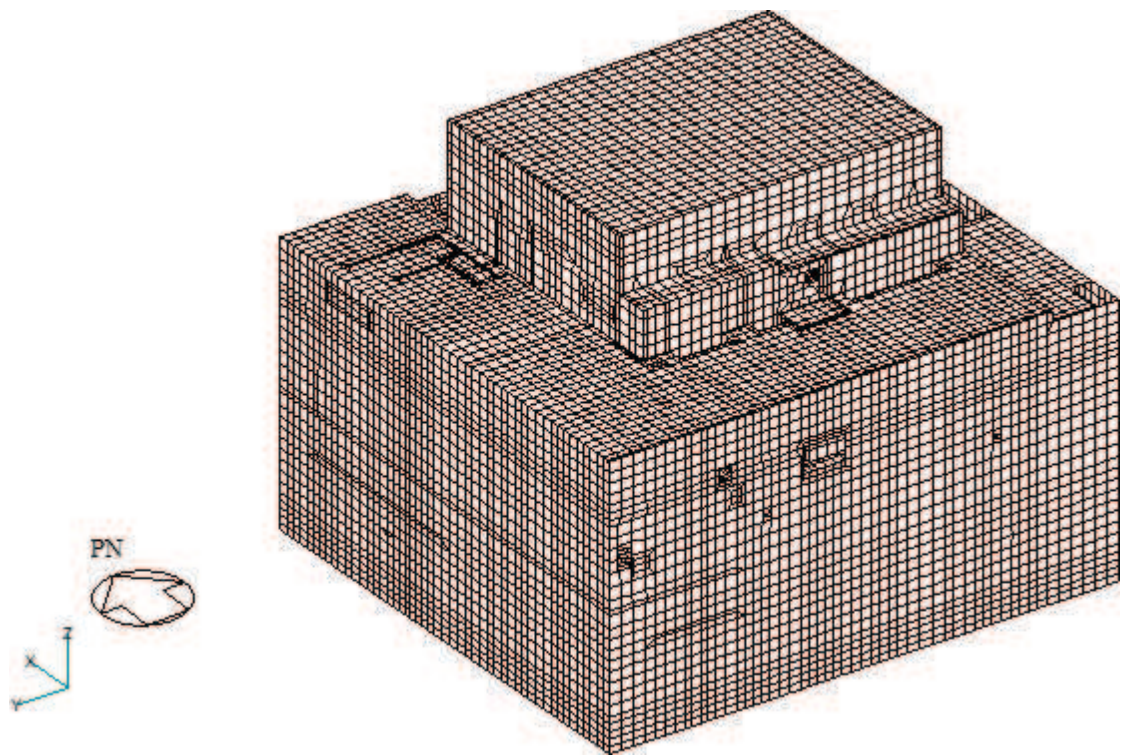
要素の大きさは，各スラブの上面レベルと対応する位置に節点を設け，鉛直方向にはフロア間を 3 分割以上，水平方向は 3 分割以上とする。（解析モデルの詳細は，「別紙 3 原子炉建屋 3 次元 FEM モデルによる地震応答解析」に示す。）

検討に用いる解析モデルの諸条件を表 2-1 に，使用材料の物性値を表 2-2 に示す。

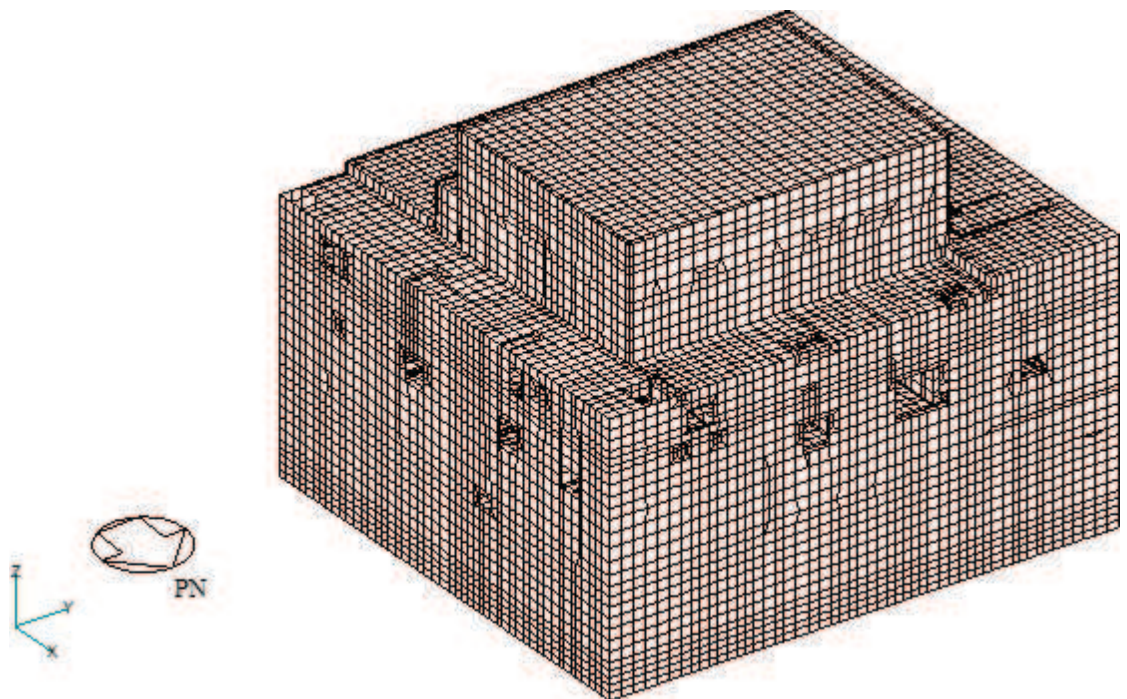
検討に用いる解析モデルは，質点系モデルと表 2-1 に示す諸条件を対応させた 3 次元 FEM モデルとする。

なお，質点系モデルと同様に平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等の地震やコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ等に伴う初期剛性の低下を反映する。耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数を表 2-3 に示す。

地震応答解析には，解析コード「NASTRAN」を用いる。

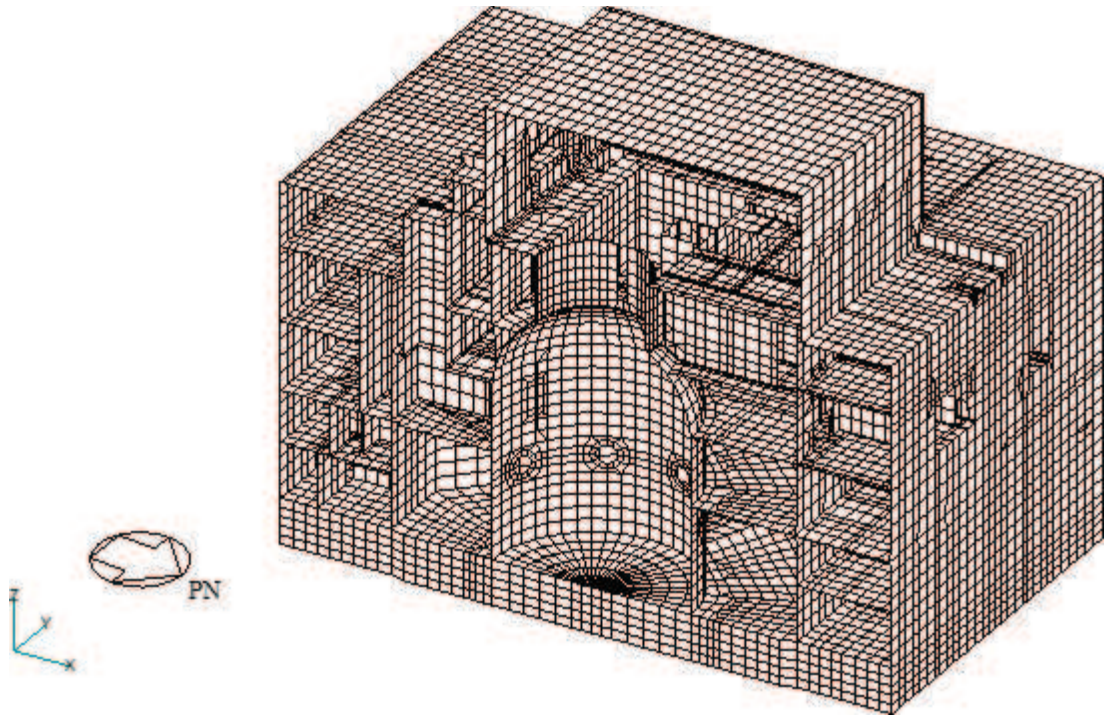


(a) 建屋全景（南西面）

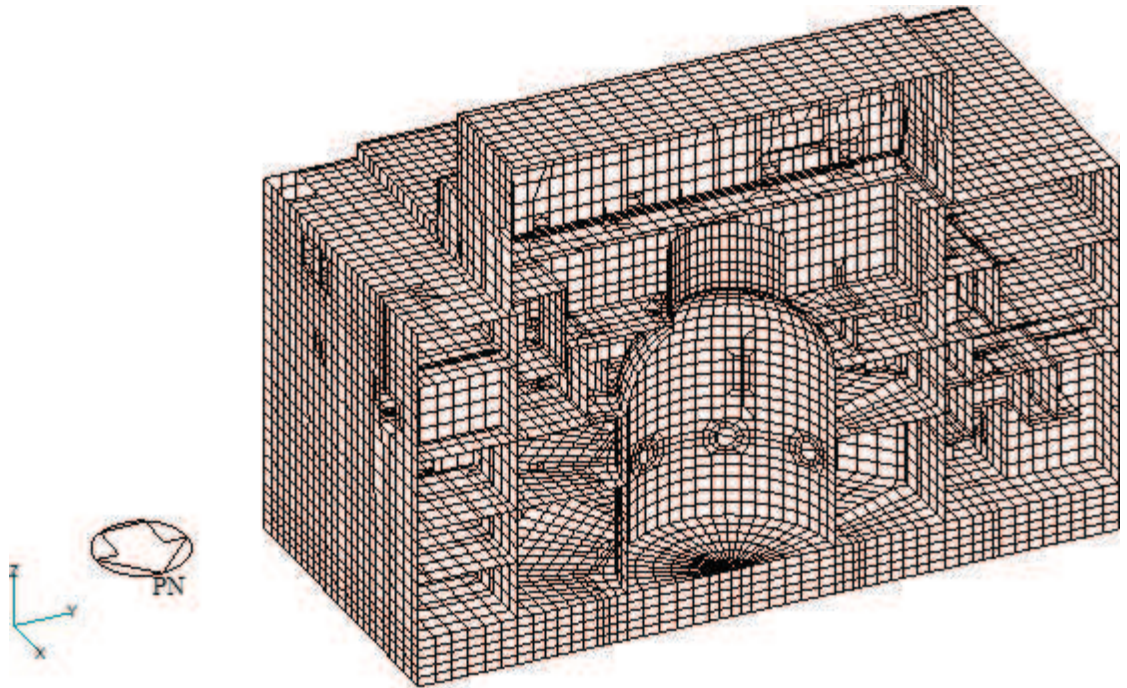


(b) 建屋全景（北東面）

図 2-4 モデル図 (1/2)



(c) NS 断面図



(d) EW 断面図

図 2-4 モデル図 (2/2)

表 2-1 解析モデルの諸条件

モデル	床のモデル化	地盤のモデル化	コンクリート剛性の設定
3次元 FEM モデル	柔性を考慮する	相互作用考慮	2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いたシミュレーション解析により補正

表 2-2 使用材料の物性値

部位	使用材料	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	減衰定数 h (%)
建屋部 燃料取替床上部 既設部	鉄筋コンクリート コンクリート： F _c = 32.4 (N/mm ²) (F _c = 330 (kgf/cm ²)) 鉄筋：SD35 (SD345 相当)	2.65 × 10 ⁴	1.14 × 10 ⁴	5
建屋部 燃料取替床上部 追設部	鉄筋コンクリート コンクリート： F _c = 33 (N/mm ²) 鉄筋：SD345	2.52 × 10 ⁴	1.05 × 10 ⁴	5
建屋部 燃料取替床下部 既設部	鉄筋コンクリート コンクリート： F _c = 32.4 (N/mm ²) (F _c = 330 (kgf/cm ²)) 鉄筋：SD35 (SD345 相当)	2.65 × 10 ⁴	1.14 × 10 ⁴	5
屋根トラス	鉄骨：SS41 (SS400 相当) SM41A (SM400A 相当)	2.05 × 10 ⁵	7.90 × 10 ⁴	2
追設ブレース	鉄骨：SN400B SN490B BCR295	2.05 × 10 ⁵	7.90 × 10 ⁴	2

表 2-3 耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数

方向	地上 3 階及びクレーン階 (O. P. 33. 2m より上部)	地下 3 階～地上 2 階 (O. P. 33. 2m より下部)
NS	0. 30	0. 75
EW	0. 50	0. 80

注：追設耐震壁については補正を行わない。

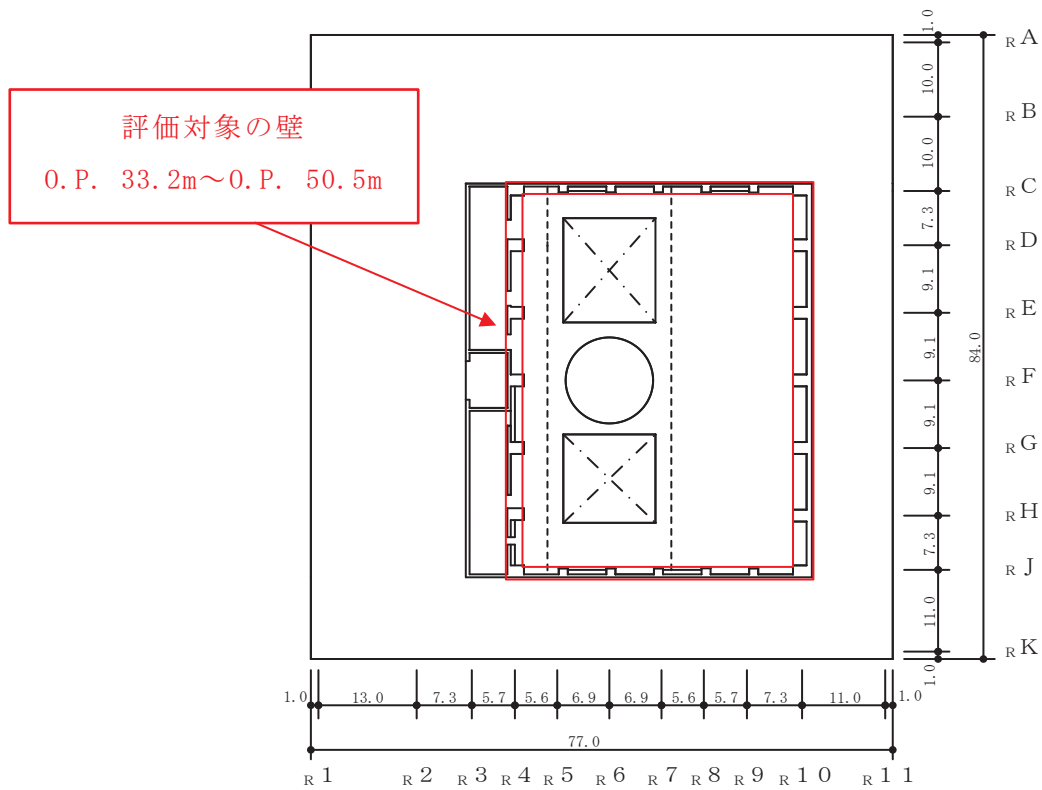
2.4 地震応答解析の概要

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。地震応答解析は線形解析とし、周波数応答解析を用いる。

床応答評価位置は、原子炉建屋の O. P. 33. 2m～O. P. 55. 0m とする。応答評価部位を図 2-5 に、応答評価対象位置及び節点番号図を図 2-6 に示す。

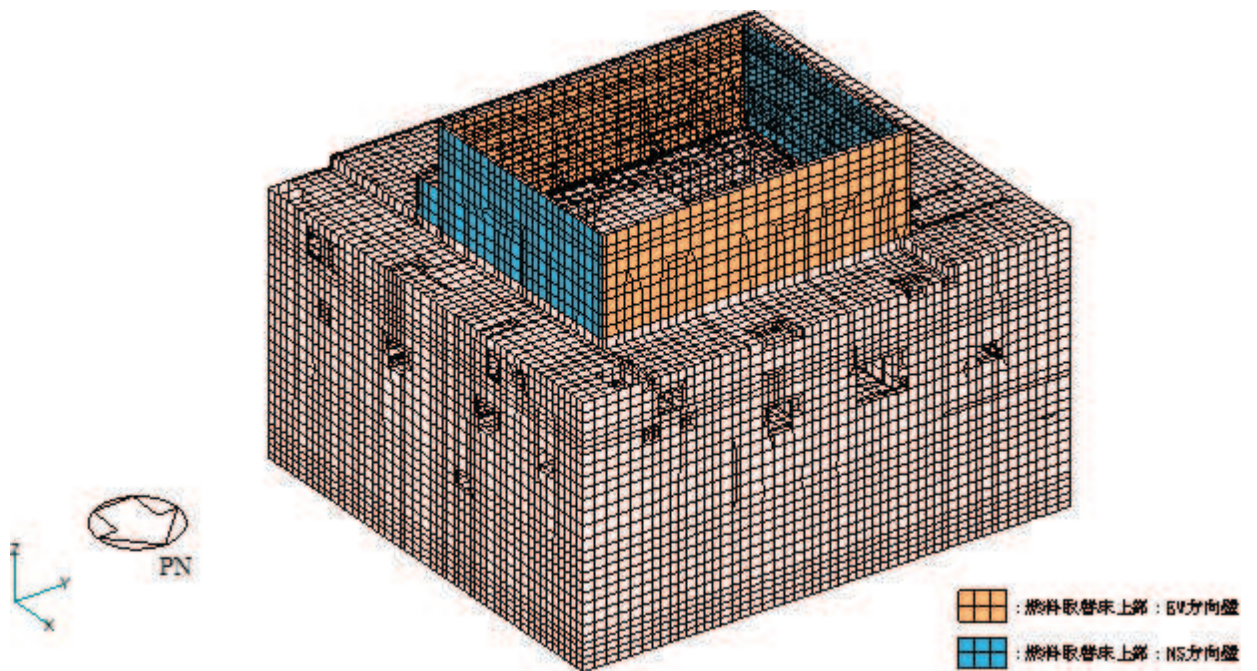
3次元 FEM モデルは線形解析モデルであることから、入力する地震動は弾性設計用地震動 S_d とし、水平 2 方向の地震力による影響評価は、弾性設計用地震動 S_d を水平 2 方向に組み合わせた地震力を算定し実施する。具体的には、NS 方向（北面壁及び南面壁の面外方向）における 1 方向入力と 3 方向同時入力の比較を行う場合は、NS 方向に弾性設計用地震動 $S_d - D 2$ の水平方向地震波（以下「 $S_d - D 2 H$ 」という。）を、EW 方向に弾性設計用地震動 $S_d - D 2$ の位相違い波*（以下「 $S_d - D 2 p$ 」という。）を、UD 方向に弾性設計用地震動 $S_d - D 2$ の鉛直方向地震波（以下「 $S_d - D 2 V$ 」という。）を入力する。EW 方向（東面壁及び西面壁の面外方向）における 1 方向入力と 3 方向同時入力の比較を行う場合は、EW 方向に $S_d - D 2 H$ を、NS 方向に $S_d - D 2 p$ を、UD 方向に $S_d - D 2 V$ を入力する。地震動の組合せを表 2-4 に示す。

注記*： $S_d - D 2 H$ の設計用応答スペクトルに適合するが、 $S_d - D 2 H$ とは位相特性が異なる地震波である。



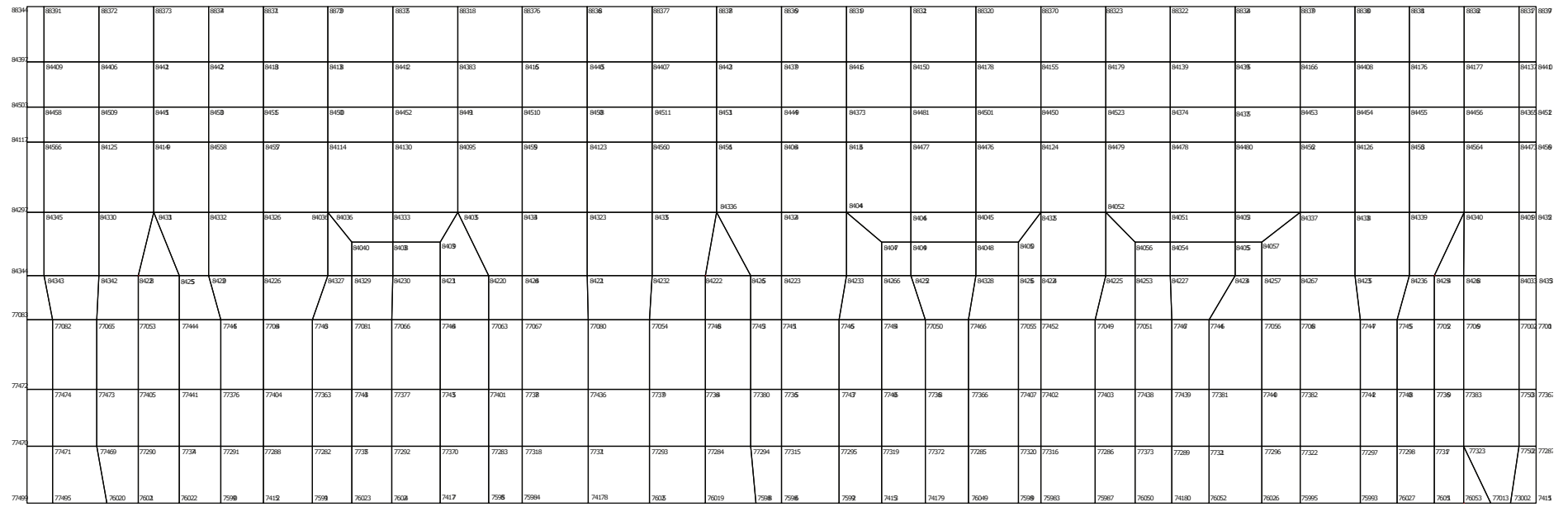
(単位 : m)

(a) 概略平面図



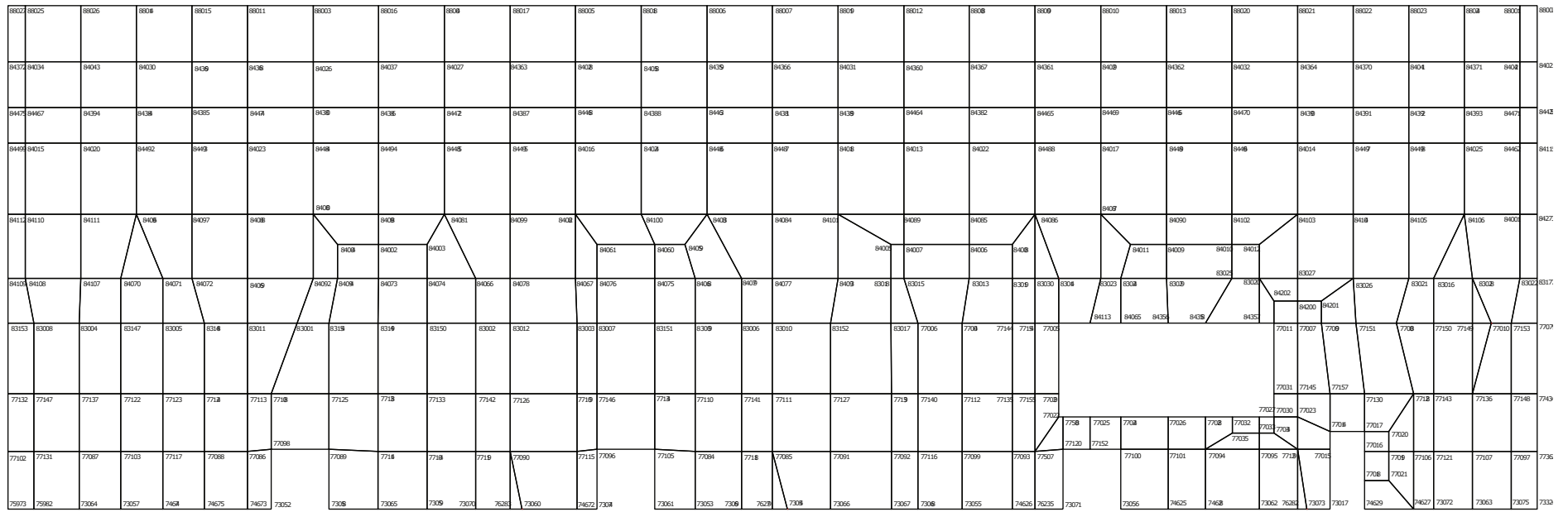
(b) 3次元 FEM モデル

図 2-5 応答評価部位



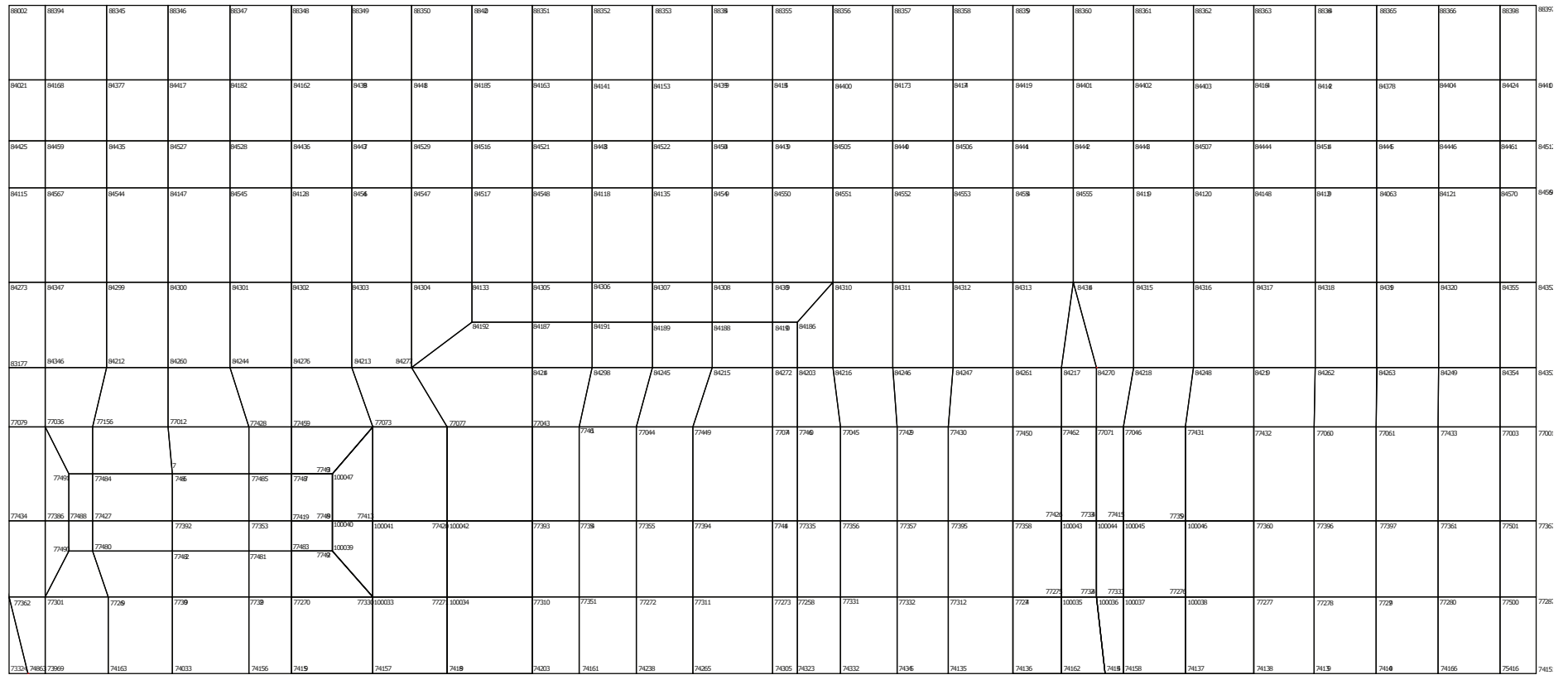
(a) 北面壁 (R10 通り)

図 2-6(1) 応答評価対象位置及び節点番号図(1/4)



(b) 南面壁 (R4 通り)

図 2-6(2) 応答評価対象位置及び節点番号図(2/4)



(d) 西面壁 (RC 通り)

図 2-6(4) 応答評価対象位置及び節点番号図(4/4)

表 2-4 入力地震動の組合せ

(a) 北面壁及び南面壁の応答評価時

地震動の入力方法	NS 方向	EW 方向	UD 方向
水平 1 方向入力	S d - D 2 H	—	—
3 方向同時入力	S d - D 2 H	S d - D 2 p	S d - D 2 V

(b) 東面壁及び西面壁の応答評価時

地震動の入力方法	NS 方向	EW 方向	UD 方向
水平 1 方向入力	—	S d - D 2 H	—
3 方向同時入力	S d - D 2 p	S d - D 2 H	S d - D 2 V

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 - D 2 に対する地震応答解析を実施した。

原子炉建屋の燃料取替床レベルの壁について、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 及び図 2-8 に示す。3方向同時入力における壁面外方向最大応答加速度は、柱部分の加速度が小さく、柱間のスパン毎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いる。高さ方向については、O.P. 45.9m が概ね最大となっている。

水平 1 方向入力における最大応答加速度の分布図を図 2-9 及び図 2-10 に示す。水平 1 方向についても、3方向同時入力と同様に、柱部分の加速度が小さく、柱間のスパン毎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、O.P. 45.9m が概ね最大となっている。

3方向同時入力と水平 1 方向入力の最大応答加速度を並べて比較した図を図 2-11 ~ 図 2-14 に示す。端部の最大応答加速度は水平 1 方向入力がやや小さくなる傾向が見られるが、3方向同時入力と水平 1 方向入力は概ね同等の最大加速度を示している。この結果は、燃料取替床レベルの壁の面外応答については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。

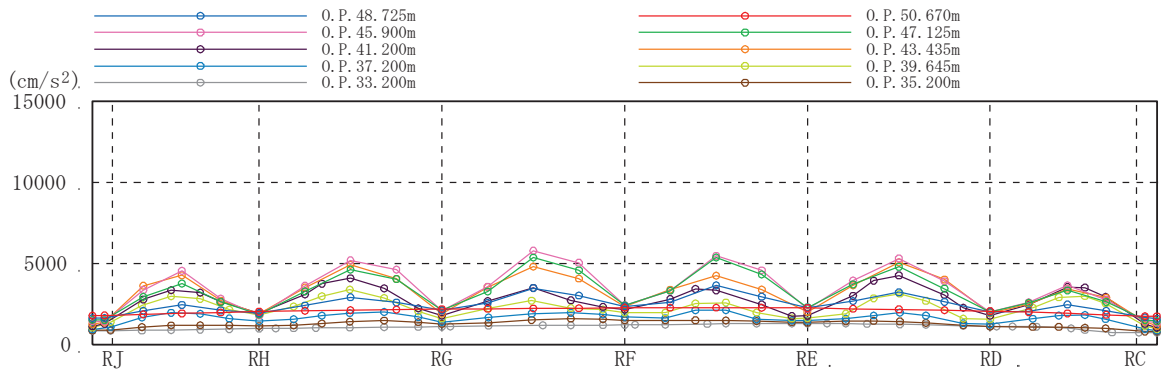
なお、最大応答加速度分布を詳細に見ると、図 2-14 に示した西面壁の最大加速度分布で 3方向同時入力と水平 1 方向入力のいずれも R10 側の最大加速度が大きくなる傾向が認められる。この原因として、建屋のねじれ応答が影響している可能性が考えられるが、燃料取替床より上部の地震応答性状については、「補足-620-1 別紙 19-1 耐震補強による地震応答特性への影響について」において、地震応答解析モデルによる検討と地震観測記録の分析から詳細な検討を実施しており、建屋にはねじれ応答が生じるが、その影響は小さいことを確認している。西面壁の面外応答についても、3方向同時入力と水平 1 方向入力の最大応答加速度が同様の分布となっていることから、ねじれ応答による面外振動の影響の可能性がある場合でも、水平直交方向及び鉛直方向地震動が面外応答に与える影響が小さいことを示している。

また、3方向同時入力及び水平 1 方向入力ともに、南北面の壁が、東西面の壁に比べて柱部分の最大加速度と柱間の最大加速度の差が大きくなる傾向が認められる。これは、東西面壁に対し、南北面壁の方が柱間のスパンが長いことに起因していると考えられる。東西面壁の柱間距離は 6.3m、南北面壁の柱間距離は 9.1m であり、南北面壁の柱間距離は東西面壁の 1.4 倍程度である。各壁の面外方向の応答増幅は、図 2-15 に示す 3次元 FEM モデルの固有値解析結果からも確認できる。全体 14 次 (7.26Hz) は東西面の壁が全体として弓なりに変形するモード、全体 36 次は南北面の壁が全体として弓なりに変形するモードである。全体 112 次は南北面の壁が柱間のスパン毎に

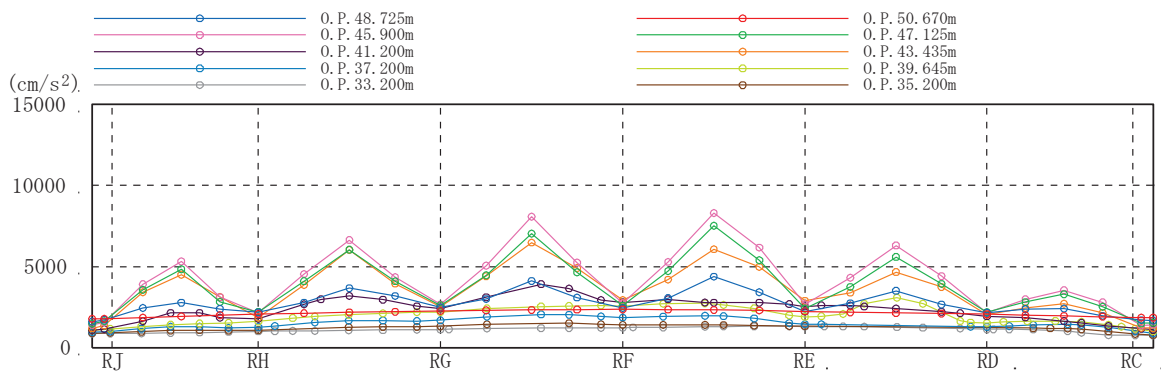
弓なりに変形するモードである。弾性設計用地震動 $S_d - D_2$ による面外方向の最大応答加速度分布はこのようなモードの影響を含む分布形状になっていると考えられる。

以上のことより、面外慣性力による面外応力に対する断面評価の対象部位については、3次元 FEM モデルの応答を確認して南北面壁を代表部位として選定し、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響を評価する。

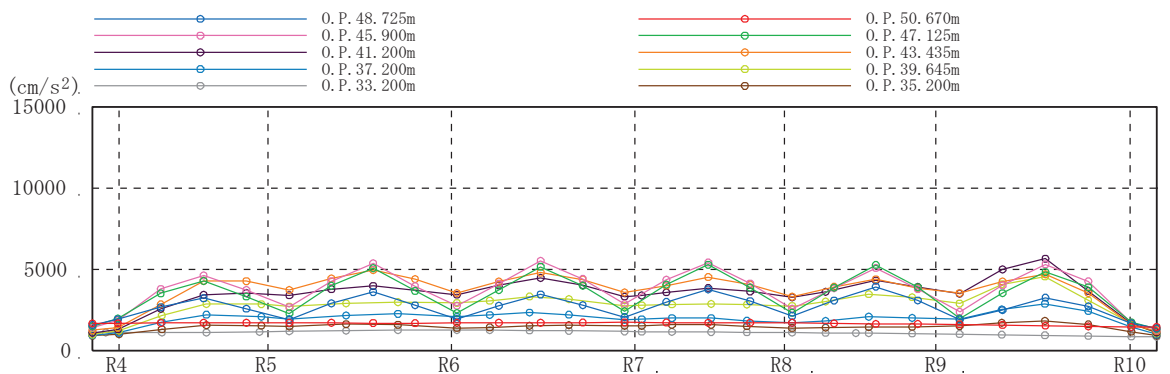
なお、面外方向加速度の機器・配管系への影響については、「別紙 4 機器・配管系に関する影響検討」において検討を行う。



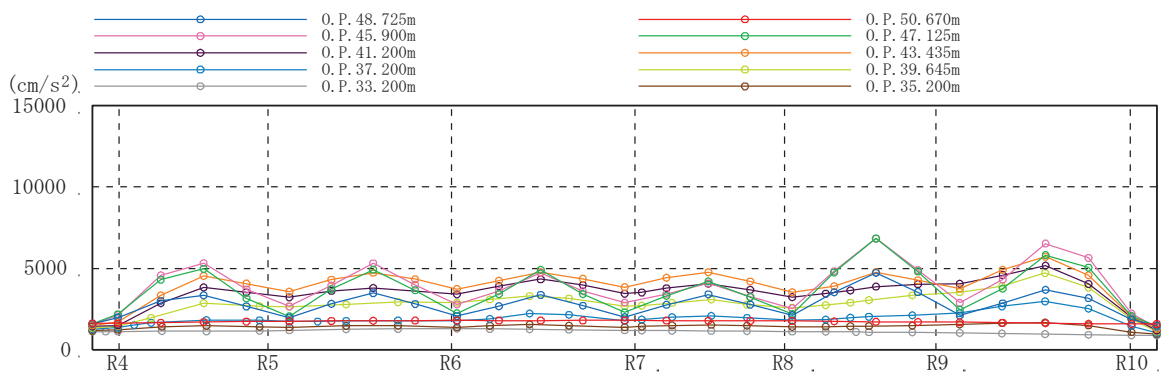
(a) 北面壁



(b) 南面壁

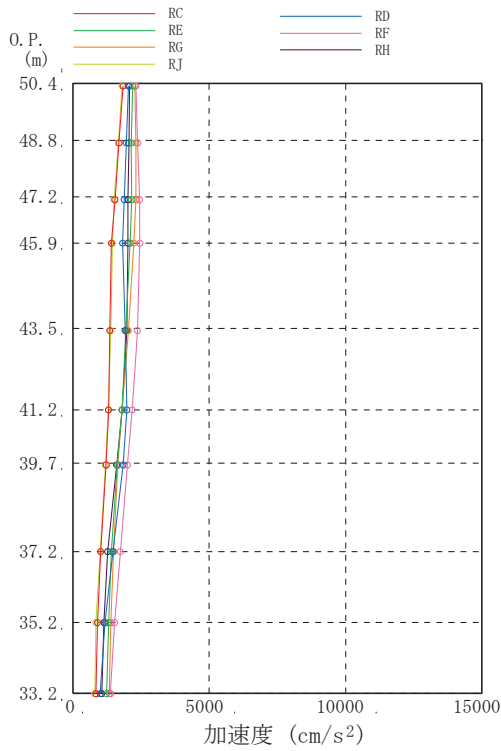


(c) 東面壁

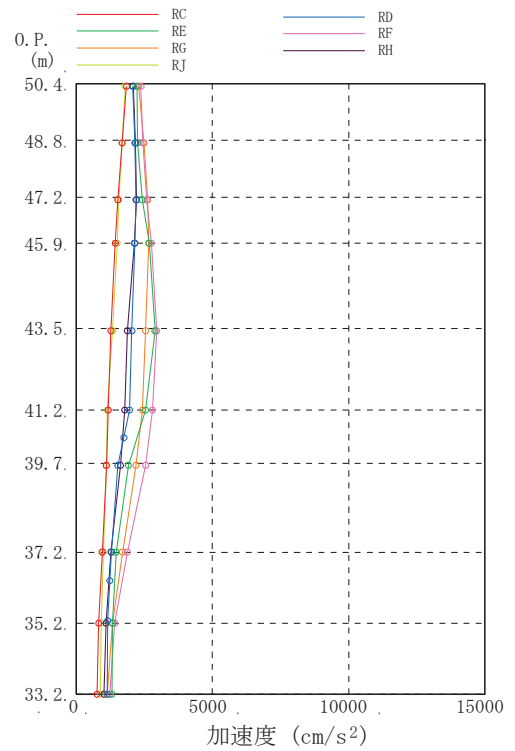


(d) 西面壁

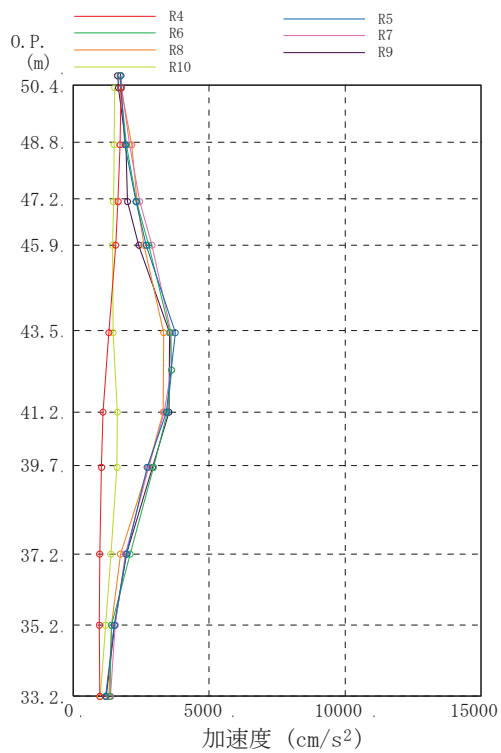
図 2-7 3 方向同時入力における壁面外方向の最大応答加速度分布



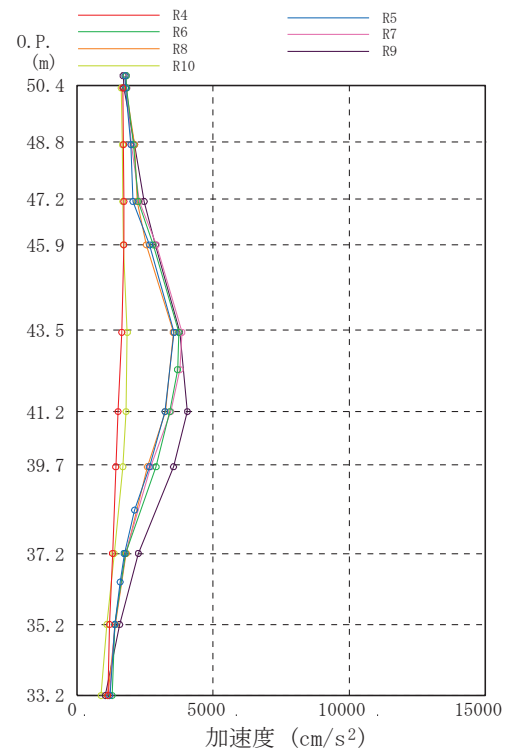
(a) 北面壁



(b) 南面壁



(c) 東面壁



(d) 西面壁

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

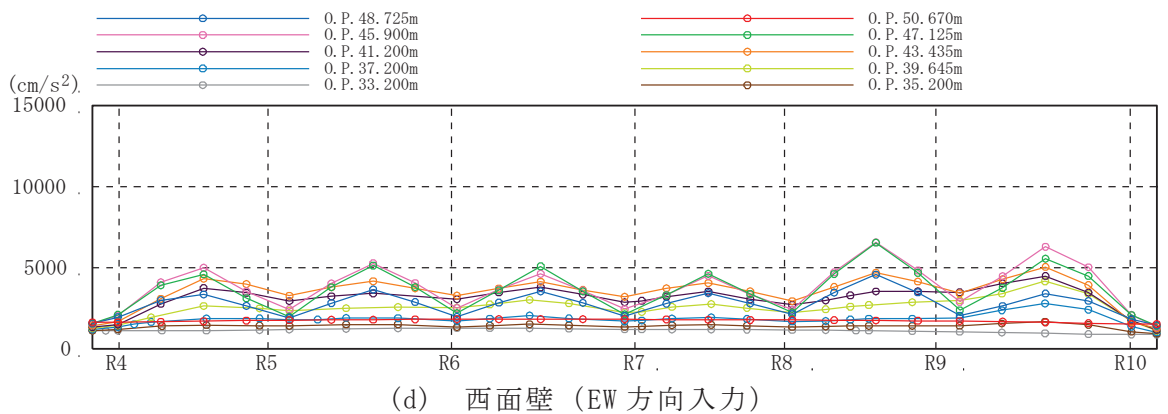
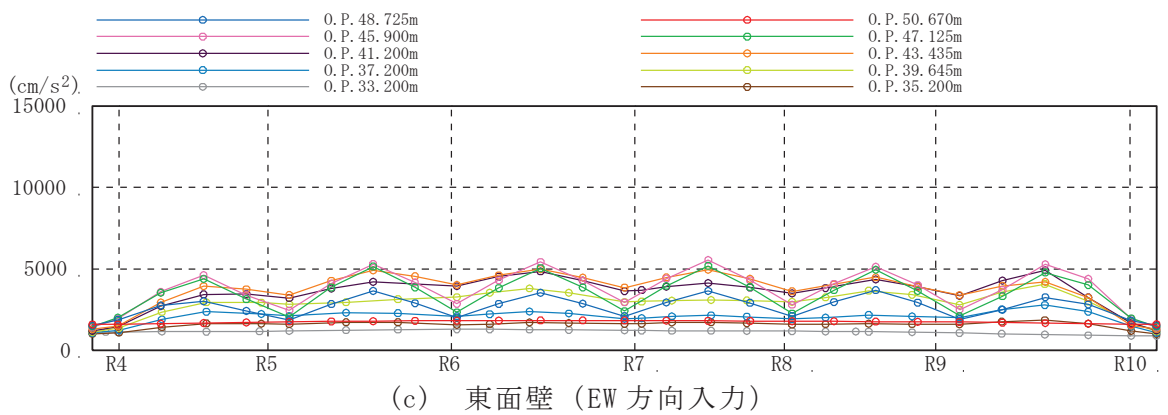
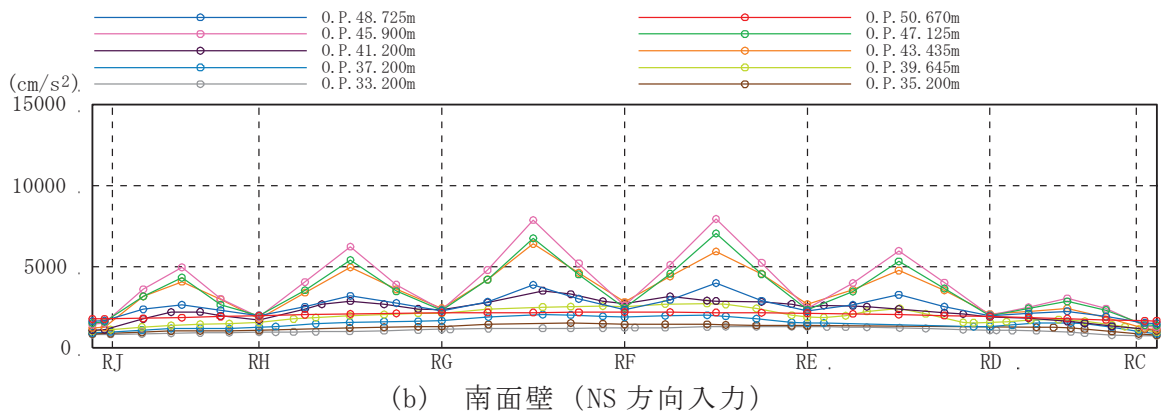
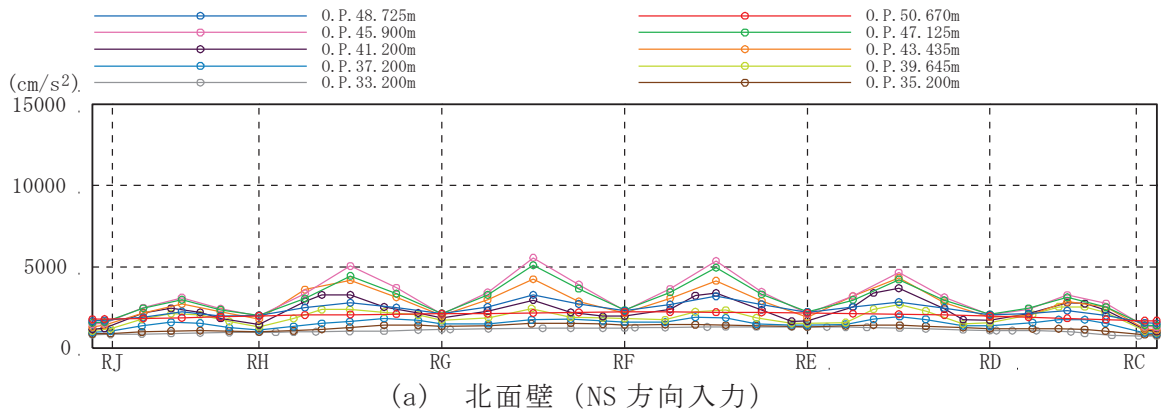
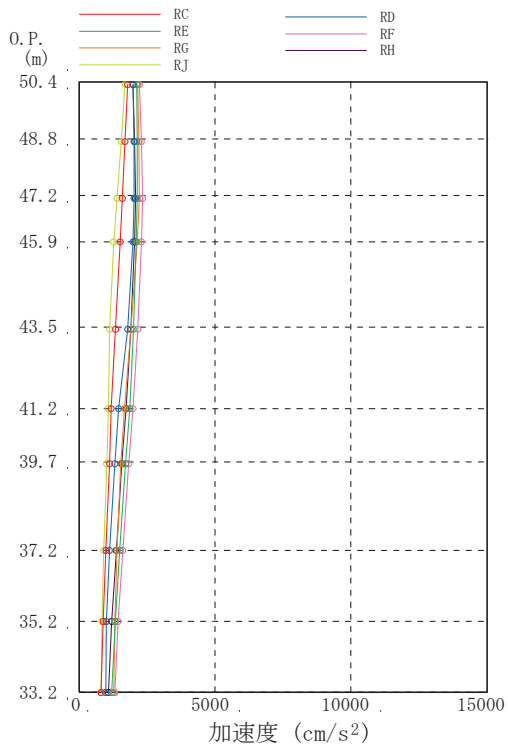
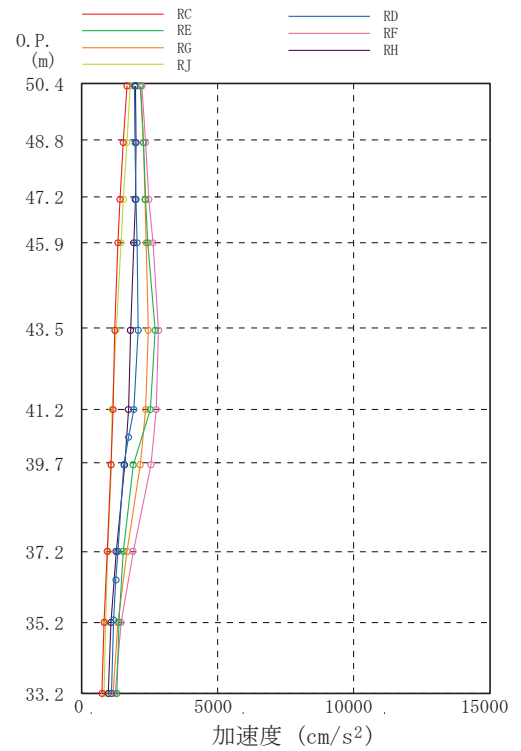


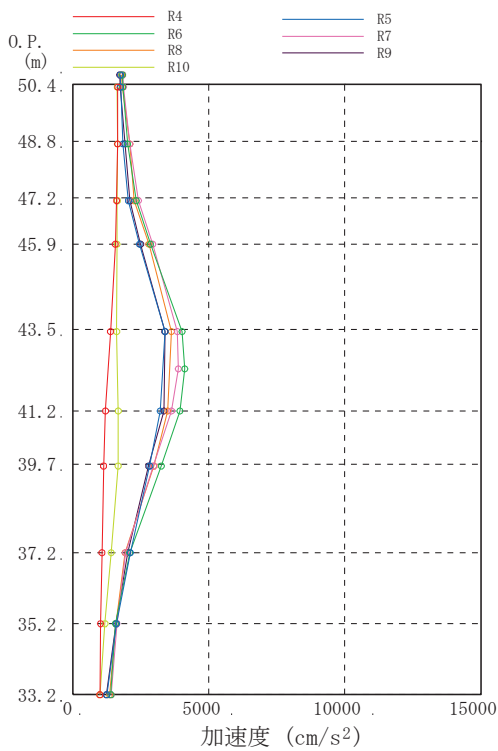
図 2-9 水平 1 方向入力における壁面外方向の最大応答加速度分布



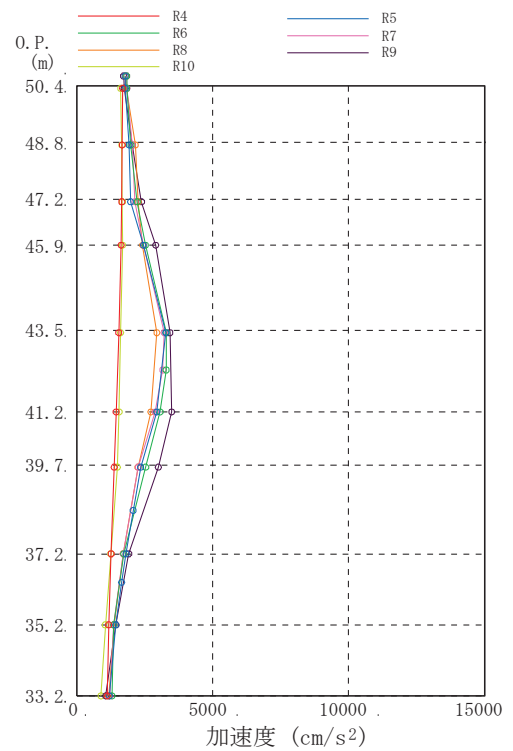
(a) 北面壁 (NS 方向入力)



(b) 南面壁 (NS 方向入力)

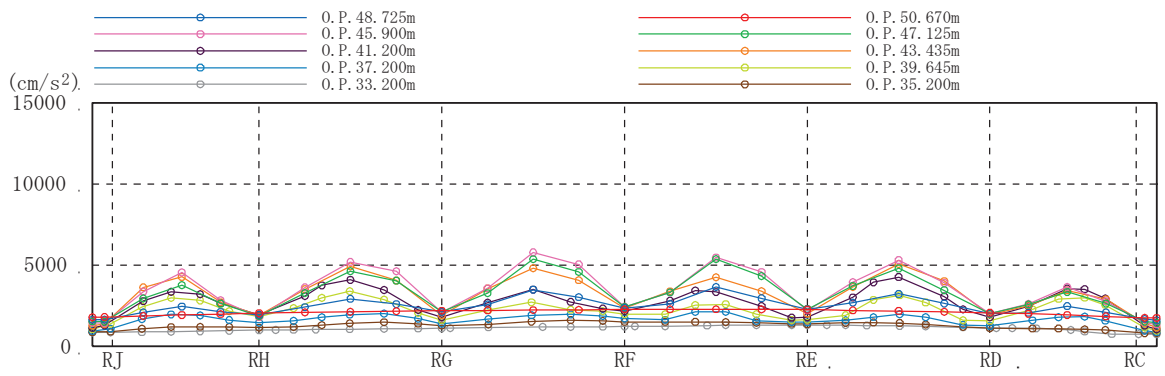


(c) 東面壁 (EW 方向入力)

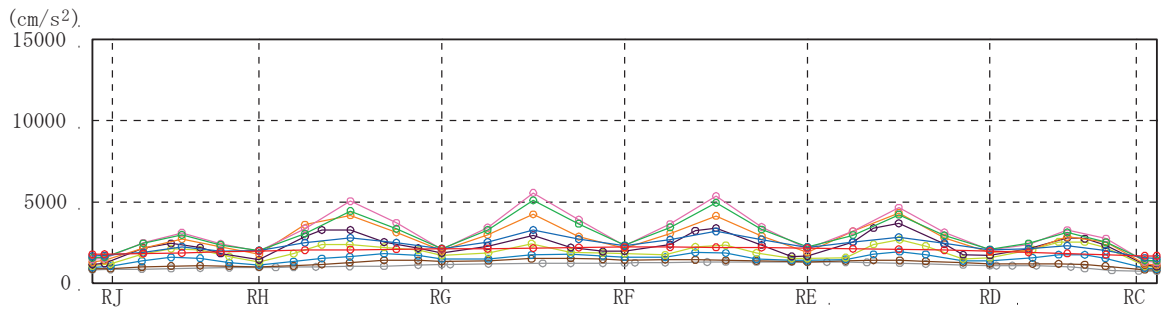


(d) 西面壁 (EW 方向入力)

図 2-10 水平 1 方向入力における壁面外方向の最大応答加速度分布

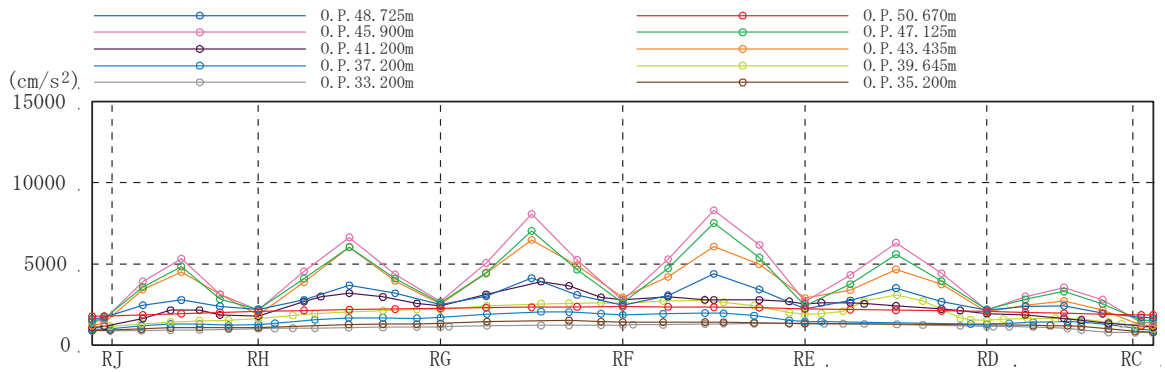


(a) 3方向入力

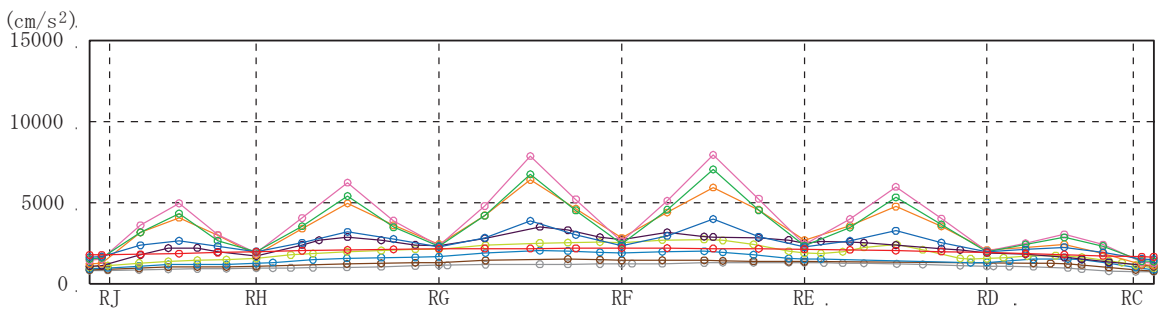


(b) 1方向入力 (NS方向入力)

図 2-11 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 (北面壁)

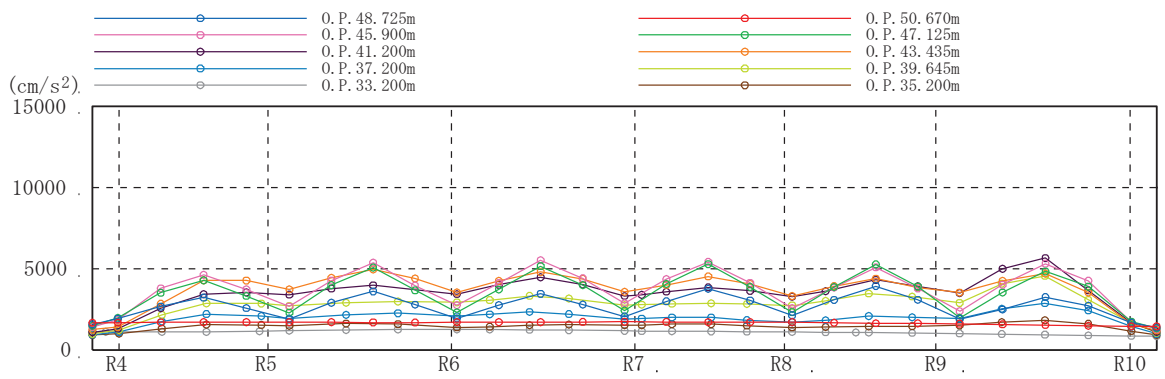


(a) 3方向入力

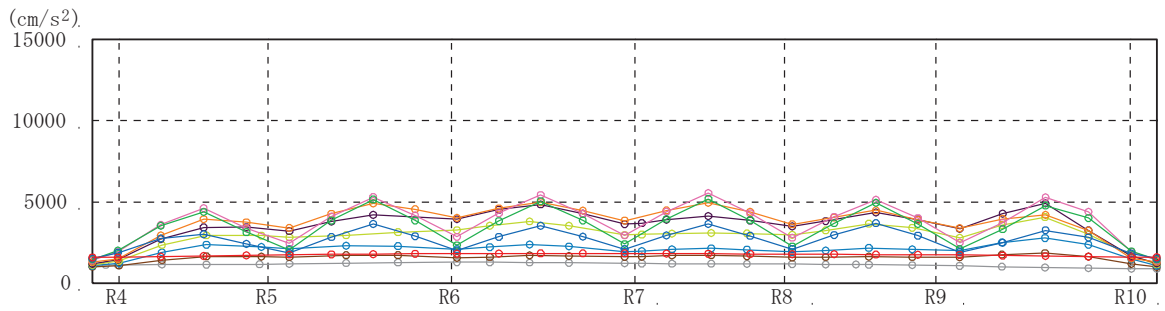


(b) 1方向入力 (NS方向入力)

図 2-12 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 (南面壁)

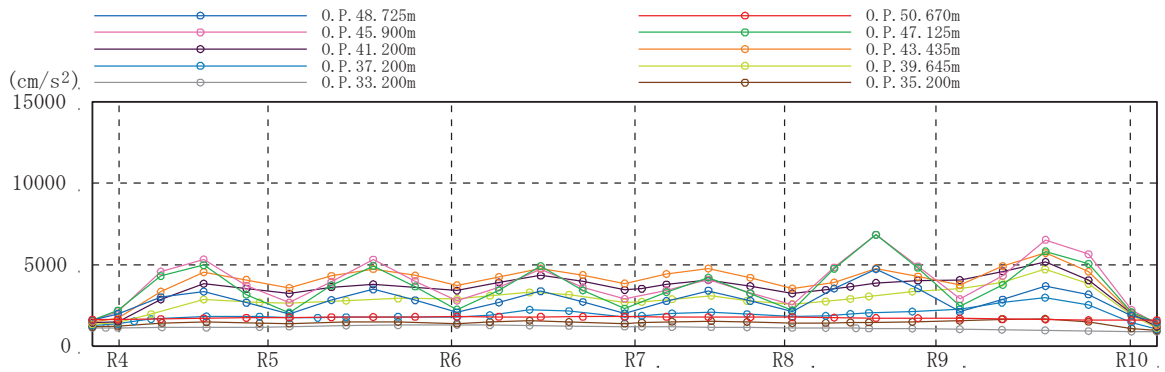


(a) 3方向入力

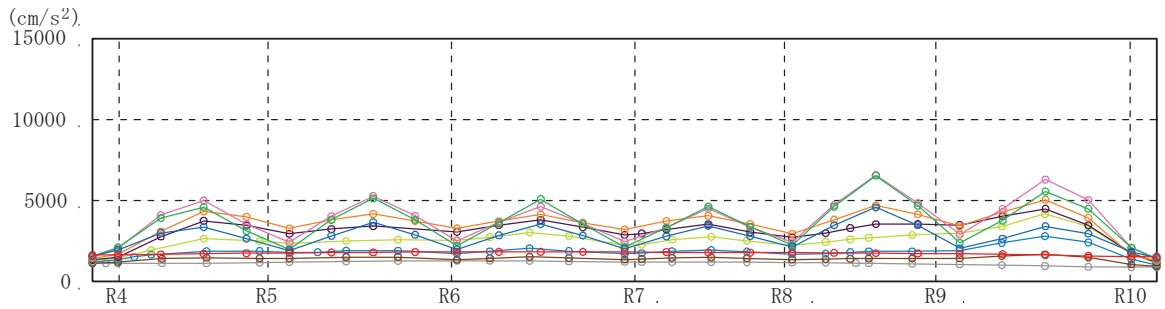


(b) 1方向入力 (EW方向入力)

図 2-13 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 (東面壁)

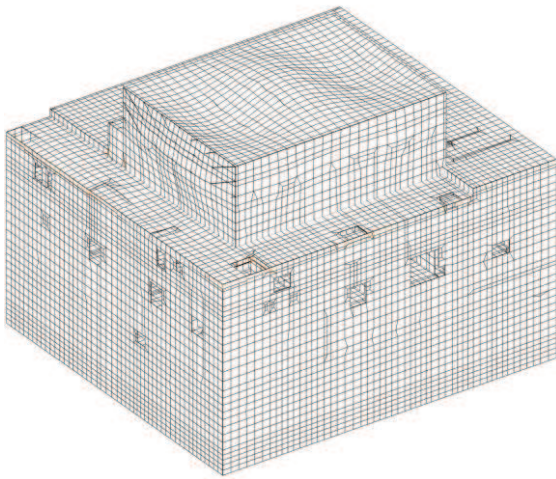


(a) 3方向入力

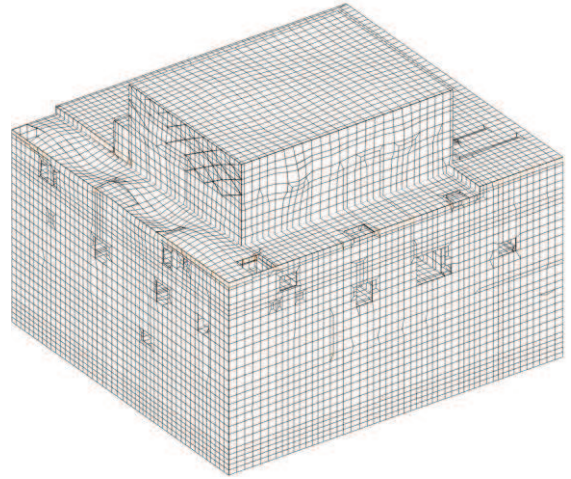


(b) 1方向入力 (EW方向入力)

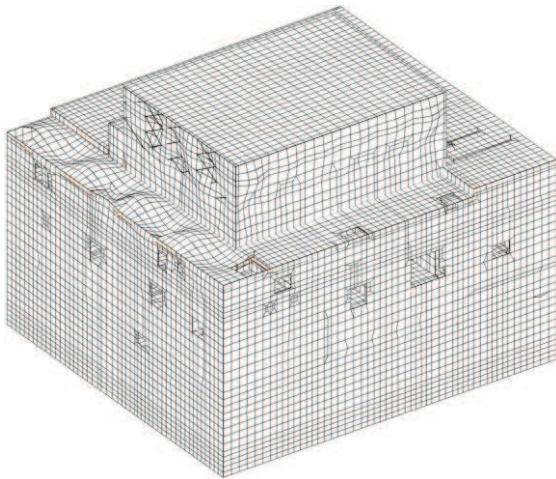
図 2-14 水平 1 方向入力及び 3 方向同時入力の最大応答加速度の比較 (西面壁)



全体 14 次 (7.26Hz)



全体 36 次 (8.89Hz)



全体 112 次 (11.94Hz)

図 2-15 3次元 FEM モデルの固有値解析結果

2.6 面外慣性力に対する壁の断面の評価

面外慣性力の影響として、原子炉建屋の燃料取替床レベルの壁について、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する断面の評価を行い、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鉄筋応力度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 2-16 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または屋根スラブを境界条件として、四辺固定版に置き換える。耐震壁は面外方向の曲げモーメントにより引張側表面にひび割れを生じ、ひび割れの進展に応じて周辺部に応力が再配分されることとなる。本検討では、コンクリートの非線形特性を考慮した積層シェル要素を用い、引張側コンクリートのひび割れに伴う応力分散を考慮する。コンクリートの材料構成則を図 2-18 に示す。

鉄筋についてもモデル化し、面外方向の曲げモーメントにより鉄筋に生じる引張応力度が許容限界として設定した弾性限強度を超えないことを確認することで、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ことを確認する。

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 地震時の応答加速度は、弾性設計用地震動 S_d （以下「 S_d 地震時」という。）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、係数の算出は基準地震動 $S_s - D_2$ による応答を用いる。

S_d 地震時による応答加速度の補正は、弾性設計用地震動 $S_d - D_2$ 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。

検討対象である南北面の壁について、算出した S s 地震時の面外慣性力コンタ
ー図を図 2-17 に示す。

S s 地震時の面外方向加速度（面外慣性力）

= 3 次元 FEM モデルの S d 地震時面外方向最大応答加速度 × 応答補正比率

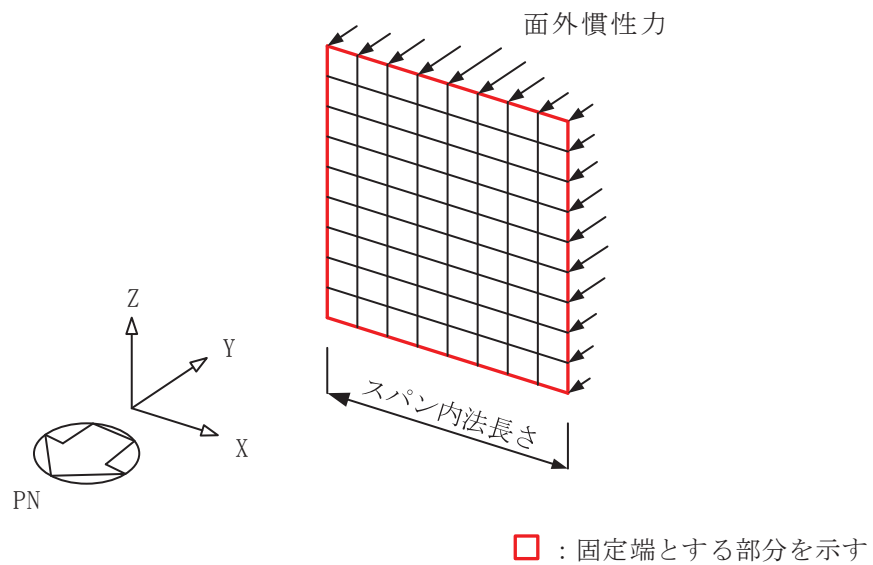
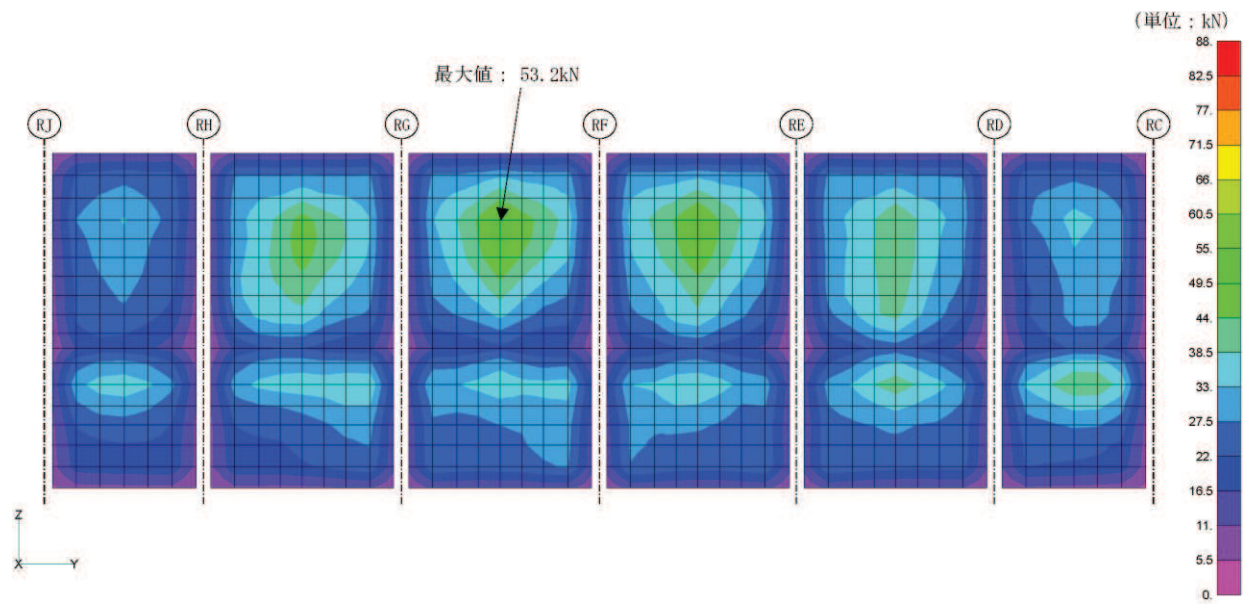
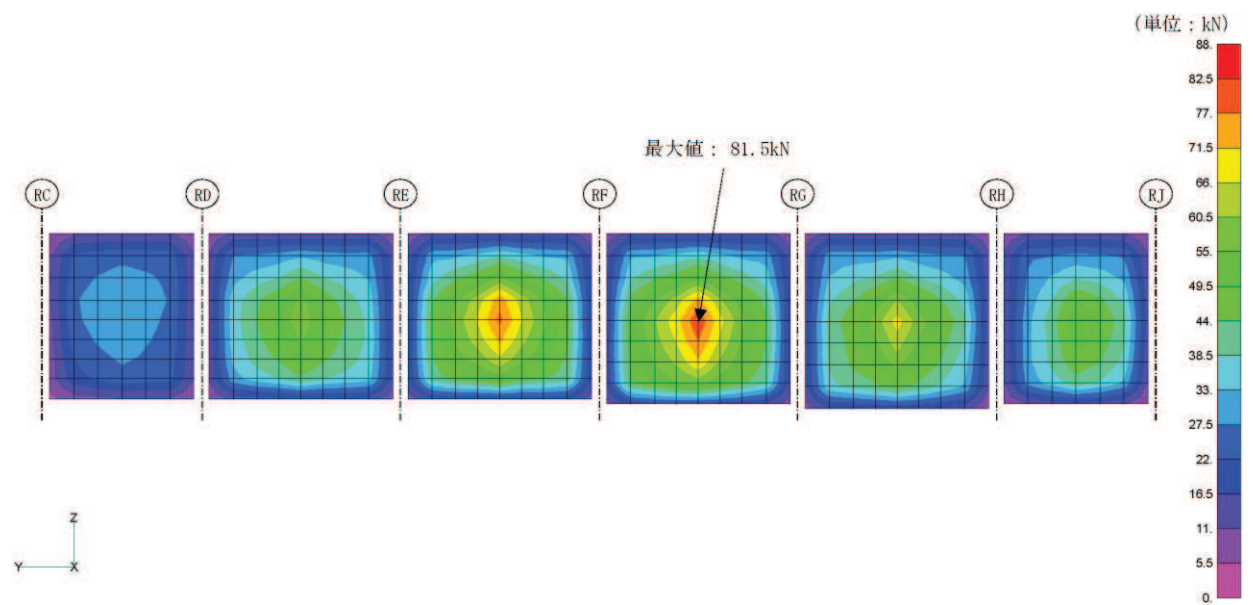


図 2-16 解析モデル

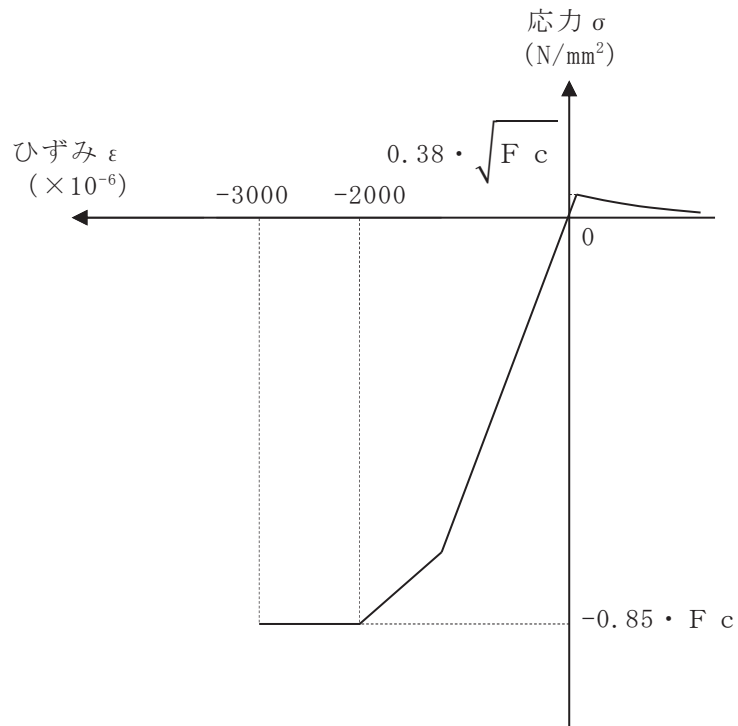


(a) 北面壁



(b) 南面壁

図 2-17 S s 地震時の面外慣性力コンター図



F_c : コンクリートの設計基準強度

項目	設定
圧縮強度	$-0.85 \cdot F_c$ (「CCV規格*1」)
終局圧縮ひずみ	-3000×10^{-6} (「CCV規格」)
圧縮側のコンクリート構成則	CEB-FIP Model code に基づき設定 (引用文献(1)参照)
ひび割れ発生後の引張軟化曲線	出雲ほか(1987)による式 ($c = 0.4$) (引用文献(2)参照)
引張強度	$\sigma_t = 0.38 \cdot \sqrt{F_c}$ (「RC規準*2」)

注：引張方向の符号を正とする。

注記*1： JSME S NE 1-2003 発電用原子力設備規格 コンクリート製
原子炉格納容器規格

*2： 日本建築学会 1999年 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 ー許
容応力度設計法ー

コンクリートの応力-ひずみ関係

図 2-18 材料構成則

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 s 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 d 地震時の基本ケースと S s 地震時の基本ケースの比により算出する。

なお、北面及び南面の外壁の面外振動を評価するため、用いる最大応答加速度は、NS 方向モデルの O. P. 50.5m の質点（質点番号 6，質点番号 18）及び O. P. 33.2m の質点（質点番号 8，質点番号 13，質点番号 20）の最大応答加速度とする。

算出した応答補正比率を表 2-5 に示す。

表 2-5 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	S d - D 2		備考
	50.5	33.2	
O. P. (m)	50.5	33.2	
①基本ケース 最大加速度応答 (cm/s ²)	2981	1228	
②材料物性の不確かさ 最大応答加速度 (cm/s ²)	3052	1279	地盤剛性 + σ 考慮モデルの応答
②/① 最大加速度応答比	1.02	1.04	同一ケースの倍率のためメッシュ分割に合わせて線形補間を行う

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

地震波	S d - D 2		備考
	50.5	33.2	
O. P. (m)	50.5	33.2	
③ S d 地震時 最大加速度応答 (cm/s ²)	2981	1228	基本ケース
④ S s 地震時 最大応答加速度 (cm/s ²)	4619	1988	基本ケース
④/③ 最大加速度応答比	1.55	1.62	同一ケースの倍率のためメッシュ分割に合わせて線形補間を行う

2.6.3 断面の評価部位の選定

代表部位とした北面壁及び南面壁における鉄筋応力度及び単位幅あたりの面外せん断力を表 2-6 に示す。断面の評価部位は鉄筋応力度及び面外せん断力が最大となる位置を選定する。なお、北面壁は O. P. 39.645m よりも下部の壁厚が 400mm、上部の壁厚が 250mm であることから、それぞれ選定する。

選定した断面の評価部位の応力コンター図を表 2-7 及び表 2-8 に示す。

表 2-6 鉄筋応力度及び単位幅あたりの面外せん断力 (S s - D 2)

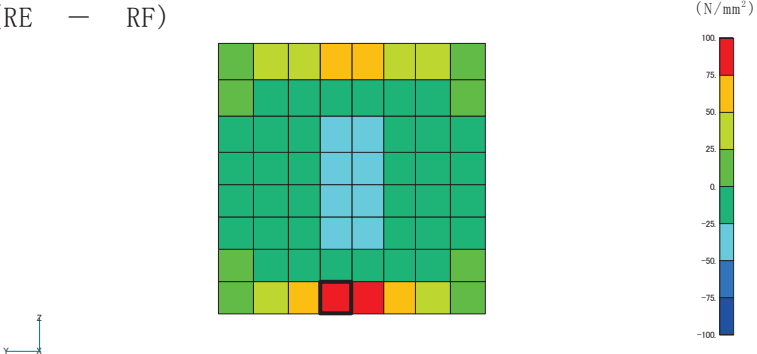
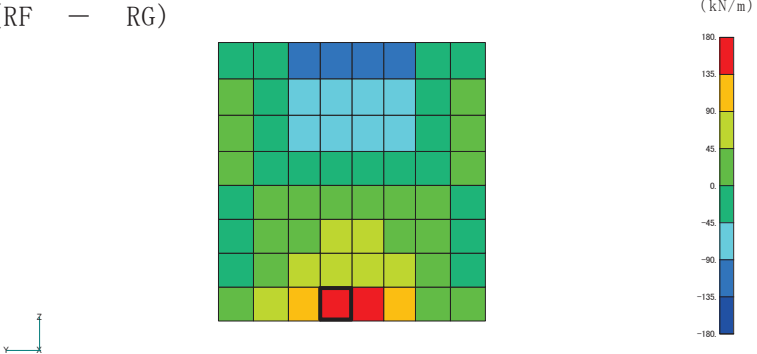
位置			鉄筋応力度 (N/mm ²)		面外せん断力 (kN/m)	
			σ_{tx}	σ_{ty}	Q _x	Q _y
北面壁	壁厚 250mm	RC - RD	22.7	8.79	73.5	49.4
		RD - RE	79.3	48.3	119	95.7
		RE - RF	84.4	55.8	126	107
		RF - RG	84.1	57.1	128	109
		RG - RH	83.2	51.7	124	99.4
		RH - RJ	20.1	8.31	68.8	47.7
	壁厚 400mm	RC - RD	17.4	4.27	124	38.3
		RD - RE	62.3	15.2	191	73.2
		RE - RF	60.0	15.5	189	73.1
		RF - RG	56.8	14.6	183	74.1
		RG - RH	61.0	15.7	194	67.8
		RH - RJ	14.1	3.78	107	35.1
南面壁	壁厚 250mm	RC - RD	12.6	8.49	62.2	52.5
		RD - RE	50.7	58.2	116	130
		RE - RF	70.3	81.4	150	169
		RF - RG	74.8	80.0	155	170
		RG - RH	59.3	57.4	124	131
		RH - RJ	25.2	16.9	92.0	79.0

注：ハッチングは、北面壁（壁厚 250mm）、北面壁（壁厚 400mm）及び南面壁における各通りの応答値のうち最大値を表示。

表 2-7 断面の評価部位の選定に関する応力コンター図（北面壁）

壁厚	応力	コンター図	
250mm	鉄筋応力度 σ_{tX}	(RE - RF)	<p>壁厚 250mm 壁厚 400mm</p> <p>□ : 最大応力度 84.4N/mm²</p>
	面外せん断力 Q_x	(RF - RG)	<p>壁厚 250mm 壁厚 400mm</p> <p>□ : 最大応力 128kN/m</p>
400mm	鉄筋応力度 σ_{tX}	(RD - RE)	<p>壁厚 250mm 壁厚 400mm</p> <p>□ : 最大応力度 62.3N/mm²</p>
	面外せん断力 Q_x	(RG - RH)	<p>壁厚 250mm 壁厚 400mm</p> <p>□ : 最大応力 194kN/m</p>

表 2-8 断面の評価部位の選定に関する応力コンター図（南面壁）

壁厚	応力	コンター図
250mm	鉄筋応力度 $\sigma_t y$	<p>(RE - RF)</p>  <p>□ : 最大応力度 81.4N/mm²</p>
	面外せん断力 Q_y	<p>(RF - RG)</p>  <p>□ : 最大応力 170kN/m</p>

2.6.4 断面の評価方法

基準地震動 S_s による面外慣性力により耐震壁に生じる面外方向の曲げモーメントに対し、応力解析モデルにモデル化した鉄筋の引張応力度及び圧縮応力度が許容限界を超えないことを確認する。許容限界としては、「建設省告示第 2464 号」に基づき鉄筋の F 値に 1.1 倍の割増しを考慮した弾性限強度とする。

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

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

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

α : 割増し係数 (1.0)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)

2.6.5 断面の評価結果

断面の評価結果を表 2-9 に示す。

S s 地震時において、面外方向の曲げモーメントにより発生する壁主筋の応力度に対する検定値が 0.23、面外せん断力に対する検定値が 0.95 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ため、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。

ただし、面外方向に大きな加速度が生じていることを踏まえ、「2.7 面外慣性力及び面内せん断力を組み合わせた場合の壁の断面の評価」において、面外慣性力及び面内せん断力を組み合わせた場合の評価を行う。

表 2-9 断面の評価結果

検討ケース		S s 地震時		
検討位置		北面壁 (R10 通り)		南面壁 (R4 通り)
厚さ t (mm) × 幅 b (mm)		250×1000	400×1000	250×1000
有効せい d (mm)		170	315.5	170
配筋	縦筋 (鉄筋断面積)	D22@200 (1935mm ² /m)	D25@200 (2535mm ² /m)	D22@200 (1935mm ² /m)
	横筋 (鉄筋断面積)	D19@200 (1435mm ² /m)	D22@200 (1935mm ² /m)	D19@200 (1435mm ² /m)
曲げモーメント	方向	X 方向	X 方向	Y 方向
	鉄筋応力度 σ_t (N/mm ²)	84.4	62.3	81.4
	許容限界 (N/mm ²)	379.5	379.5	379.5
	検定値	0.23	0.17	0.22
面外せん断力	方向	X 方向	X 方向	Y 方向
	発生せん断力 Q (kN/m)	128	194	170
	許容限界 (kN/m)	180	334	180
	検定値	0.72	0.59	0.95
判定		可	可	可

2.7 面外慣性力及び面内せん断力を組み合わせた場合の壁の断面の評価

「2.5 地震応答解析結果」に示すとおり、原子炉建屋の燃料取替床レベルの南北面の壁には面外方向に大きな加速度が生じていることから、当該壁を静的応力解析モデルに置き換えて、面外慣性力及び面内せん断力を組み合わせた場合の断面の評価を行う。

原子炉建屋燃料取替床レベルの壁については「VI-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟(二次格納施設)の耐震性についての計算書(以下「二次格納施設の耐震性についての計算書」という。)」において、二次格納施設バウンダリの機能設計上の性能目標である構造強度を有することの確認として、S_d地震時に生じる応力に対し「日本建築学会2005年 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」に基づく短期許容応力度を超えないことを確認している。そこで、原子炉建屋燃料取替床レベルの壁に対する面外慣性力及び面内せん断力を組み合わせた場合の断面評価にあたっては、S_d地震時の応答に材料物性の不確かさを考慮した地震力を用いる。

評価結果を記載する部位は、面外慣性力及び面内せん断力によって生じる鉄筋応力度及び面外せん断力が最大となる部位とする。

なお、S_s地震時の耐震壁の評価については「二次格納施設の耐震性についての計算書」において、面内に生じるせん断ひずみが許容限界である 2.0×10^{-3} を超えないことを確認しているが、「2.6 面外慣性力に対する壁の断面の評価」においては、S_s地震時の面外慣性力に対し、原子炉建屋燃料取替床レベルの壁の断面評価の結果、鉄筋に生じる応力度が弾性範囲内であることを確認していることから、面内に生じるせん断ひずみの評価に対する影響は小さいと考えられる。

2.7.1 解析モデル及び荷重条件

解析モデルを図2-19に示す。

解析モデルについては「2.6 面外慣性力に対する壁の断面の評価」と同様に、耐震壁は面外方向の曲げモーメントにより引張側表面にひび割れを生じ、ひび割れの進展に応じて周辺部に応力が再配分されることから、コンクリートの非線形特性を考慮した積層シェル要素を用い、引張側コンクリートのひび割れに伴う応力分散を考慮する。コンクリートの材料構成則は図2-18に示すとおりである。

境界条件については、モデルの上端に水平方向せん断力を与えるため、下端を固定端とし、その他の三辺は面内水平方向のみ自由とする。

評価に当たっては、面内方向のせん断力及び面外方向の曲げモーメントにより鉄筋に生じる引張応力度が許容限界として設定した弾性限強度を超えないことを確認することで、面外慣性力及び面内せん断力を組み合わせた場合でも原子炉建屋の壁に対する二次格納施設バウンダリとして要求される機能への影響がないことを確認する。

荷重としては、S d 地震時による面外方向慣性力及び面内方向せん断力を考慮する。

S d 地震時による応答加速度及び応答せん断力の補正は、弾性設計用地震動 S d - D 2 による面外方向及び面内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。

面外慣性力及び面内せん断力の算出方法は以下の通りである。

検討対象である南北面の壁について、算出した S d 地震時の面外慣性力コンタ一図を図 2-20 に、S d 地震時の面内せん断力荷重図を図 2-21 に示す。

S d 地震時の面外方向加速度（面外慣性力）

$$= 3 \text{次元 FEM モデルの S d 地震時面外方向最大応答加速度} \times \text{応答補正比率}$$

S d 地震時の面内せん断力

$$= 3 \text{次元 FEM モデルの S d 地震時面内方向最大応答せん断力} \times \text{応答補正比率}$$

面外慣性力と面内せん断力の組合せは、「原子力発電所耐震設計技術規程（J E A C 4 6 0 1 - 2008）」を参考に、組合せ係数法（組合せ係数は 1.0 と 0.4）を用いるものとする。

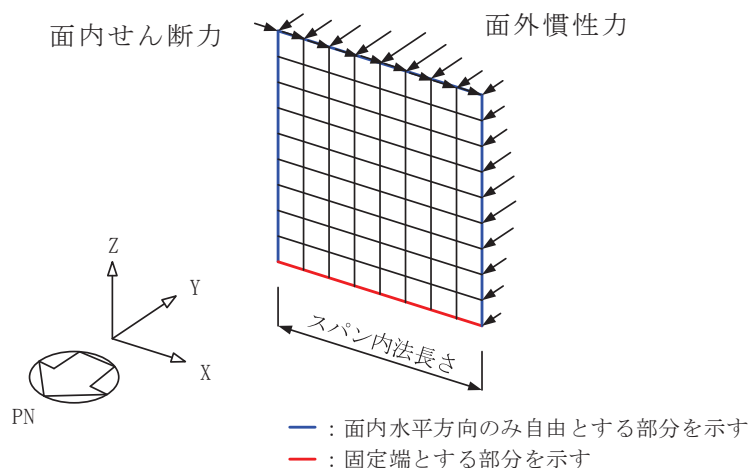
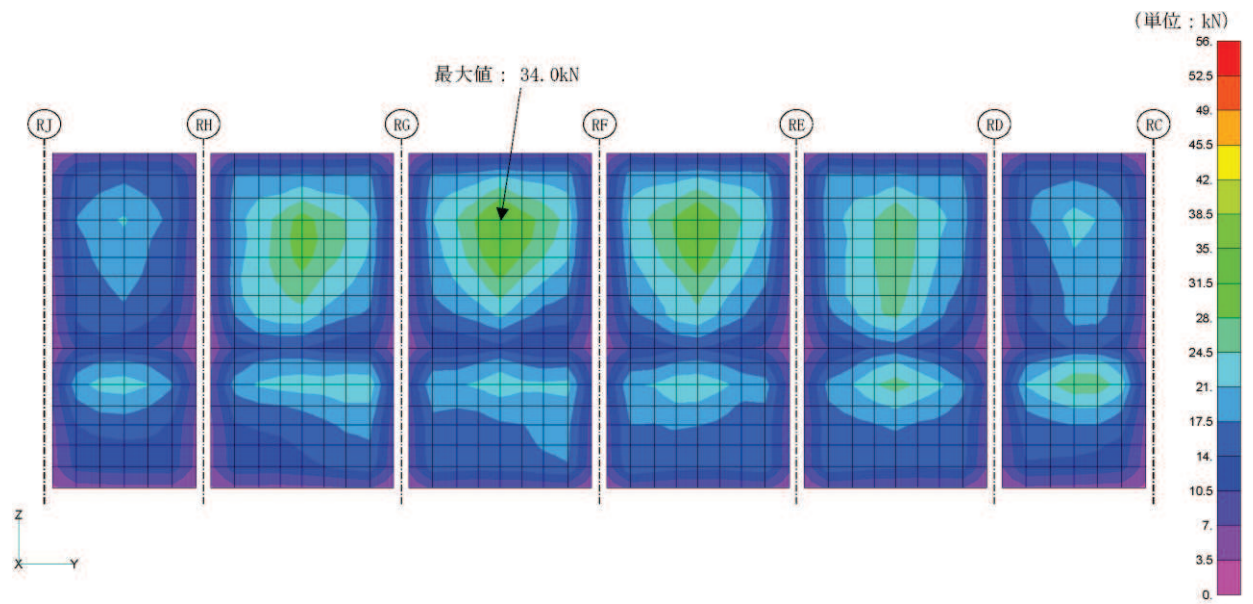
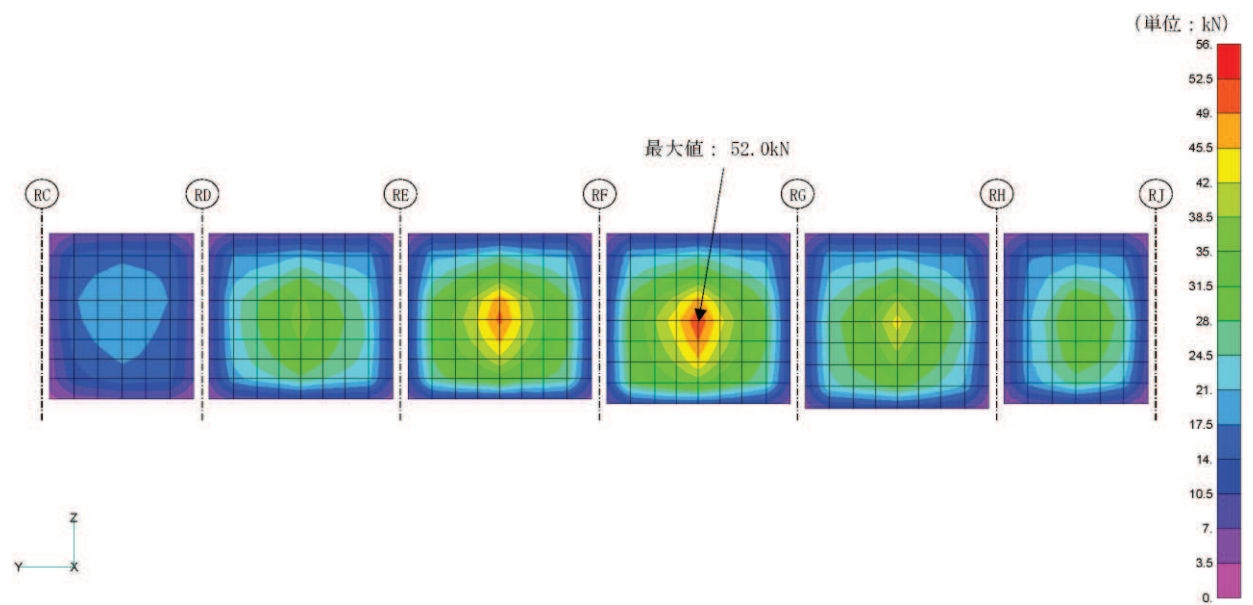


図 2-19 解析モデル

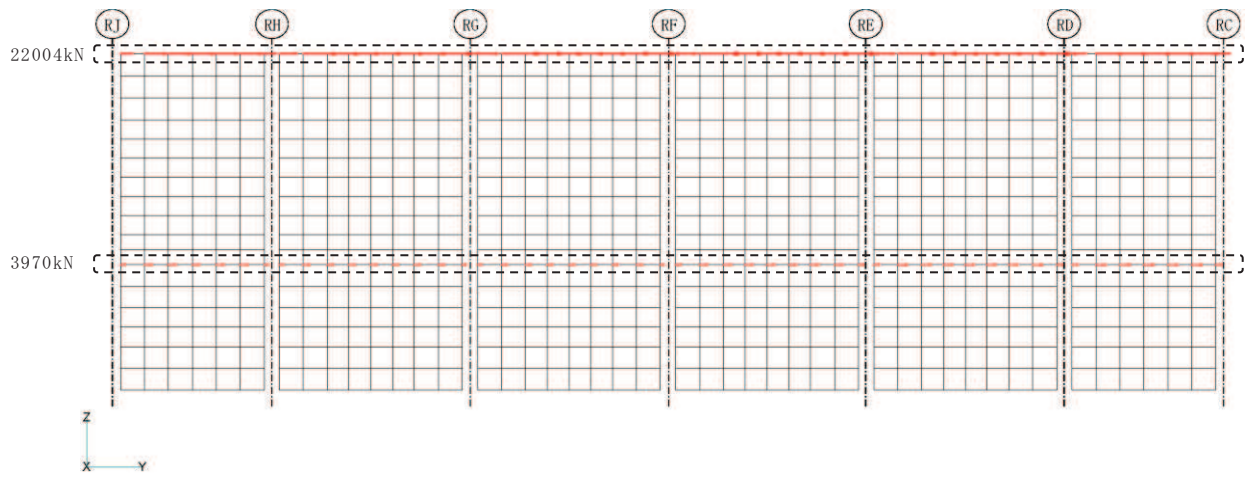


(a) 北面壁

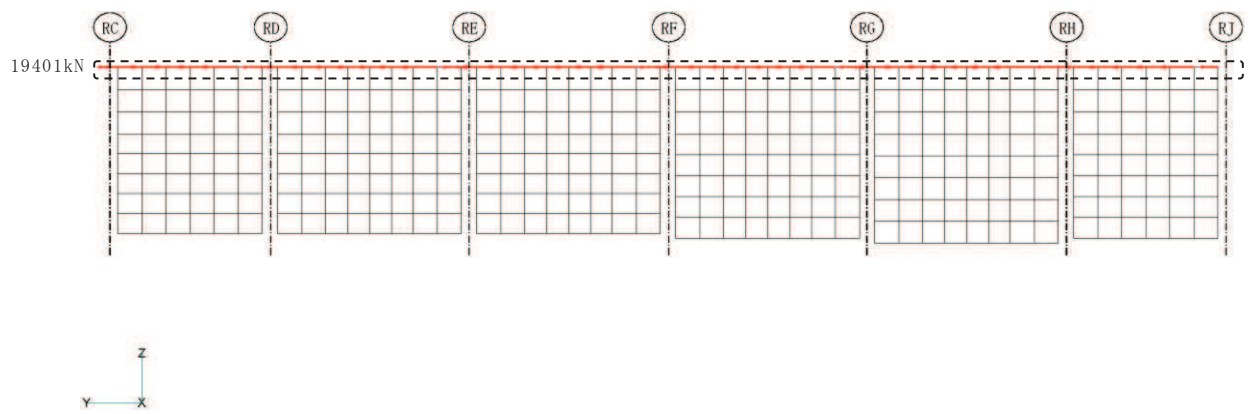


(b) 南面壁

図 2-20 S d 地震時の面外慣性力コンター図



(a) 北面壁



(b) 南面壁

図 2-21 S d 地震時の面内せん断力荷重図

2.7.2 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。

面外慣性力に乗じる応答補正比率は、北面及び南面の外壁の面外振動を評価するため、用いる最大応答加速度は、NS方向モデルのO.P. 50.5mの質点（質点番号6, 質点番号18）及びO.P. 33.2mの質点（質点番号8, 質点番号13, 質点番号20）の最大応答加速度とする。

面内せん断力に乗じる応答補正比率は、北面及び南面の外壁の面内応答を評価するため、用いる最大応答加速度は、EW方向モデルのO.P. 50.5mの質点（質点番号10, 質点番号20）, O.P. 41.2mの質点（質点番号11, 質点番号21）及びO.P. 33.2mの質点（質点番号12, 質点番号22）の最大応答加速度とする。

算出した応答補正比率を表2-10に示す。

表 2-10 応答補正比率

(a) 面外慣性力に乗じる材料物性の不確かさによる応答補正比率

地震波	S d - D 2		備考
	50.5	33.2	
0. P. (m)	50.5	33.2	
①基本ケース 最大加速度応答 (cm/s ²)	2981	1228	
②材料物性の不確かさ 最大応答加速度 (cm/s ²)	3052	1279	地盤剛性 + σ 考慮モデルの応答
②/① 最大加速度応答比	1.02	1.04	同一ケースの倍率のためメッシュ分割に合わせて線形補間を行う

(b) 面内せん断力に乗じる材料物性の不確かさによる応答補正比率

地震波	S d - D 2						備考
	北面 (R10 通り)			南面 (R4 通り)			
対象部位	北面 (R10 通り)			南面 (R4 通り)			
0. P. (m)	50.5	41.2	33.2	50.5	41.2	33.2	
①基本ケース 最大加速度応答 (cm/s ²)	2350	1949	1207	2482	1517	1208	
②材料物性の不確かさ 最大応答加速度 (cm/s ²)	2350	1967	1232	2530	1555	1237	地盤剛性 + σ 考慮モデルの応答
②/① 最大加速度応答比	1.00	1.01	1.02	1.02	1.03	1.02	
採用応答補正比率	1.02			1.03			保守的に最大の応答補正比率を設定

2.7.3 断面の評価部位の選定

代表部位とした北面壁及び南面壁における鉄筋応力度及び単位幅あたりの面外せん断力を表 2-11 に示す。断面の評価部位は鉄筋応力度及び面外せん断力が最大となる位置を選定する。なお、北面壁は O. P. 39.645m よりも下部の壁厚が 400mm、上部の壁厚が 250mm であることから、それぞれ選定する。

選定した断面の評価部位の応力コンター図を表 2-12 及び表 2-13 に示す。

表 2-11 鉄筋応力度及び単位幅あたりの面外せん断力 (S d - D 2)

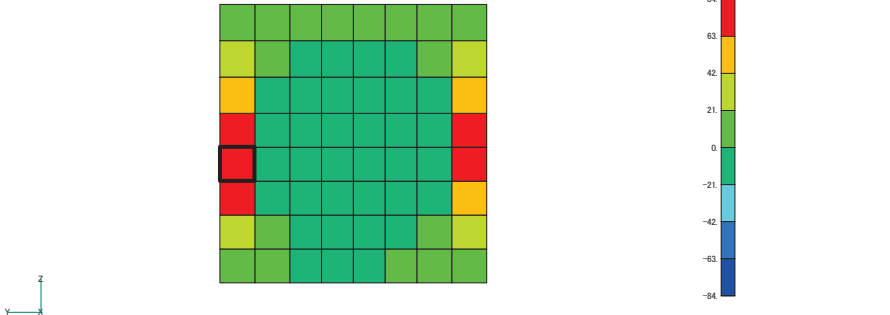
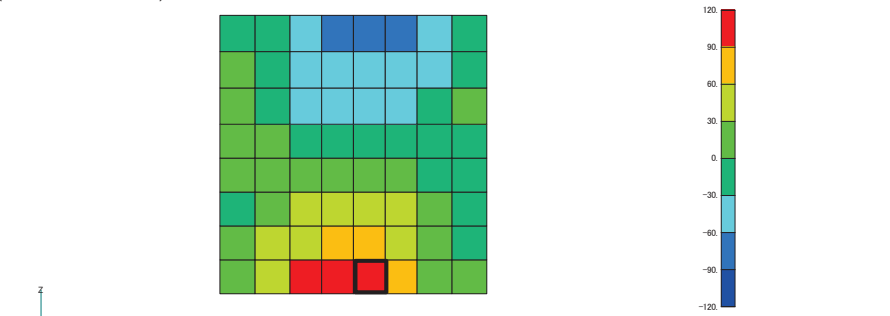
位置			鉄筋応力度 (N/mm ²)		面外せん断力 (kN/m)	
			σ_{tx}	σ_{ty}	Q _x	Q _y
北面壁	壁厚 250mm	RC - RD	11.3	4.96	46.9	30.8
		RD - RE	100	40.1	70.2	67.0
		RE - RF	112	48.9	74.1	75.8
		RF - RG	111	49.2	76.6	76.2
		RG - RH	104	42.7	73.5	69.0
		RH - RJ	9.66	4.67	44.6	29.6
	壁厚 400mm	RC - RD	9.32	2.61	77.2	24.0
		RD - RE	54.7	13.4	143	43.7
		RE - RF	53.7	14.2	144	43.3
		RF - RG	49.5	13.2	142	44.2
		RG - RH	52.4	13.3	146	40.5
		RH - RJ	8.00	2.32	65.9	22.0
南面壁	壁厚 250mm	RC - RD	6.82	5.01	41.1	33.0
		RD - RE	40.0	34.3	68.2	82.6
		RE - RF	75.0	56.8	86.0	110
		RF - RG	82.2	57.3	87.4	111
		RG - RH	55.5	37.3	72.9	84.6
		RH - RJ	13.6	8.15	58.3	49.3

注：ハッチングは、北面壁（壁厚 250mm）、北面壁（壁厚 400mm）及び南面壁における各通りの応答値のうち最大値を表示。

表 2-12 断面の評価部位の選定に関する応力コンター図（北面壁）

壁厚	応力	コンター図	
250mm	鉄筋応力度 $\sigma_t X$	(RE - RF)	<p>□ : 最大応力度 112N/mm²</p>
	面外せん断力 Q_x	(RF - RG)	<p>□ : 最大応力 76.6kN/m</p>
400mm	鉄筋応力度 $\sigma_t X$	(RD - RE)	<p>□ : 最大応力度 54.7N/mm²</p>
	面外せん断力 Q_x	(RG - RH)	<p>□ : 最大応力 146kN/m</p>

表 2-13 断面の評価部位の選定に関する応力コンター図（南面壁）

壁厚	応力	コンター図
250mm	鉄筋応力度 σ_{tX}	<p>(RF - RG)</p>  <p>□ : 最大応力度 82.2N/mm²</p>
	面外せん断力 Q_y	<p>(RF - RG)</p>  <p>□ : 最大応力 111kN/m</p>

2.7.4 断面の評価方法

弾性設計用地震動 S_d による面外慣性力及び面内せん断力により耐震壁に生じる鉄筋の引張応力度及び圧縮応力度が許容限界を超えないことを確認する。許容限界としては、「建設省告示第 2464 号」に基づき鉄筋の F 値に 1.1 倍の割増しを考慮した弾性限強度とする。

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

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

ここで、

Q_A : 許容面外せん断力 (N)

b : 断面の幅 (mm)

j : 断面の応力中心距離で、断面の有効せいの 7/8 倍の値 (mm)

α : 割増し係数 (1.0)

f_s : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm²)

2.7.5 断面の評価結果

断面の評価結果を表 2-14 に示す。

S d 地震時において、壁主筋に発生する応力度に対する検定値が 0.30、面外せん断力に対する検定値が 0.62 となり、許容限界を超えないことを確認したことから、面外慣性力及び面内せん断力を組み合わせた場合においても、原子炉建屋の壁に対する二次格納施設バウンダリとして要求される機能への影響はないと判断できる。

表 2-14 断面の評価結果

検討ケース		S d 地震時		
検討位置		北面壁 (R10 通り)		南面壁 (R4 通り)
厚さ t (mm) × 幅 b (mm)		250×1000	400×1000	250×1000
有効せい d (mm)		170	315.5	170
配筋	縦筋 (鉄筋断面積)	D22@200 (1935mm ² /m)	D25@200 (2535mm ² /m)	D22@200 (1935mm ² /m)
	横筋 (鉄筋断面積)	D19@200 (1435mm ² /m)	D22@200 (1935mm ² /m)	D19@200 (1435mm ² /m)
面内せん断力及び 曲げモーメント	方向	X 方向	X 方向	X 方向
	鉄筋応力度 σ_t (N/mm ²)	112	54.7	82.2
	許容限界 (N/mm ²)	379.5	379.5	379.5
	検定値	0.30	0.15	0.22
面外せん断力	方向	X 方向	X 方向	Y 方向
	発生せん断力 Q (kN/m)	76.6	146	111
	許容限界 (kN/m)	180	334	180
	検定値	0.43	0.44	0.62
判定		可	可	可

2.8 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、原子炉建屋の燃料取替床レベルの壁に対し、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。

一方で、原子炉建屋の燃料取替床レベルの壁に対する面外慣性力が発生していることから、加速度の大きい原子炉建屋南北面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する断面の評価を行った。その結果、 S_s 地震時における壁主筋の応力及び壁の面外せん断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。

さらに、同様のモデルを用いて、面外慣性力及び面内せん断力を組み合わせた場合の原子炉建屋の燃料取替床レベルの壁に対する断面の評価を行い、 S_d 地震時においても壁主筋の応力及び壁の面外せん断応力が許容限界を超えないことを確認したことから、原子炉建屋の壁に対する二次格納施設バウンダリとして要求される機能への影響はないと判断できる。

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した原子炉建屋の燃料取替床レベルの壁については、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

添付書類「VI-2-12 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」において応答特性②-1 及び②-2 により抽出されなかった原子炉建屋の耐震評価部位全般に対し、局所的な応答による影響の有無について、弾性設計用地震動 S d - D 2 を用いて 3 次元 FEM モデルを用いた精査を行った。

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 原子炉建屋 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

添付書類「VI-2-12 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」において、応答特性②-1「面内方向の荷重に加え、面外慣性力の影響が大きい」可能性がある部位として、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の燃料取替床レベルの壁について、3次元 FEM モデルを用いた精査を行った。3次元 FEM モデルを用いた精査の結果、原子炉建屋の燃料取替床レベルの壁において、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の考慮が必要な部位は抽出されなかった。

さらに、応答特性②-1 及び②-2 により抽出されなかった原子炉建屋の建屋評価部位全般に対し、原子炉建屋を対象とした 3次元 FEM モデルにより、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、局所的な応答について精査を行った。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。

5. 引用文献

- (1) Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE) ,
1993
- (2) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫 : 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル,
コンクリート工学, Vol.25, No.9, 1987.9

別紙 3 原子炉建屋 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- 2
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- 10
2. 3次元 FEM モデルの構築.....	別紙 3- 12
2.1 原子炉建屋の3次元 FEM モデル.....	別紙 3- 12
2.1.1 モデル化の基本方針.....	別紙 3- 12
2.1.2 荷重.....	別紙 3- 19
2.1.3 建屋－地盤の相互作用.....	別紙 3- 19
2.2 固有値解析.....	別紙 3- 21
2.3 観測記録を用いた検討.....	別紙 3- 23
3. 3次元 FEM モデルによる評価.....	別紙 3- 24
3.1 地震応答解析の概要.....	別紙 3- 24
3.2 建屋応答性状の把握.....	別紙 3- 28
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- 28
3.2.2 鉛直軸回りのねじれ振動の影響.....	別紙 3- 31
3.2.3 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- 34
3.2.4 まとめ.....	別紙 3- 52
3.3 建屋耐震性評価への影響検討.....	別紙 3- 53
3.3.1 検討方針.....	別紙 3- 53
3.3.2 3次元 FEM 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- 53
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- 62
3.4 床応答への影響検討.....	別紙 3- 93
4. まとめ.....	別紙 3-143

1. 検討概要

添付書類「VI-2-12 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」において応答特性②-1 及び②-2 により抽出されなかった原子炉建屋の耐震評価部位全般に対し、質点系モデルでは評価できない建屋の 3 次元的応答性状の把握、及び建屋の 3 次元的応答に対する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、補足説明資料「補足-600-43 地震応答に影響を及ぼす不確かさ要因の整理」に基づき、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、地下 3 階、地上 3 階建てで、基礎底面からの高さは 64.6m であり、平面は下部で 77.0m (NS 方向) × 84.0m (EW 方向) *¹ のほぼ正方形である。建屋の構造は鉄筋コンクリート造（一部鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造）である。

原子炉建屋の中央部には、平面が 66.0m × 53.0m *¹ (最下階) で地下 3 階、地上 3 階建ての原子炉建屋原子炉棟（以下「原子炉棟」という。）があり、その周囲には地下 3 階、地上 2 階建ての原子炉建屋付属棟（以下「付属棟」という。）が配置され、これらは同一基礎版上に設置された一体構造である。また、原子炉建屋は隣接する他の建屋と構造的に分離している。

原子炉建屋の基礎は、厚さ 6.0m のべた基礎で、支持地盤である砂岩及び頁岩上に設置されている。

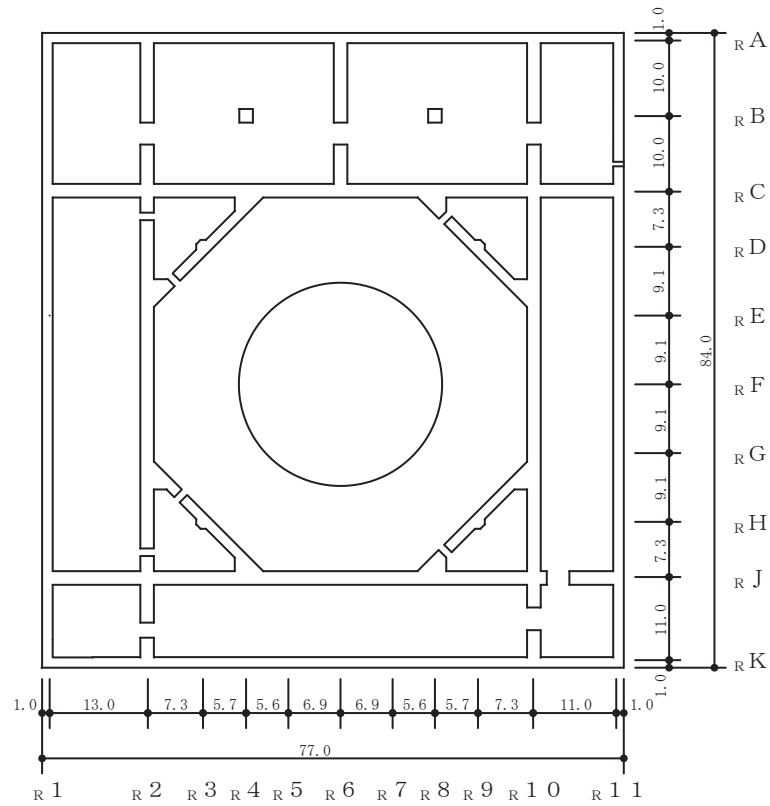
原子炉建屋の主たる耐震要素は、原子炉格納容器のまわりを囲んでいる 1 次しゃへい壁（以下「シェル壁：SW」という。）、原子炉棟の外壁（以下「内部ボックス壁：IW」という。）及び付属棟の外壁（以下「外部ボックス壁：OW」という。）である。

なお、燃料取替床 (O.P. *²33.2m) には使用済燃料プールが設置されている。

原子炉建屋の概略平面図及び概略断面図を図 1-1 及び図 1-2 に示す。

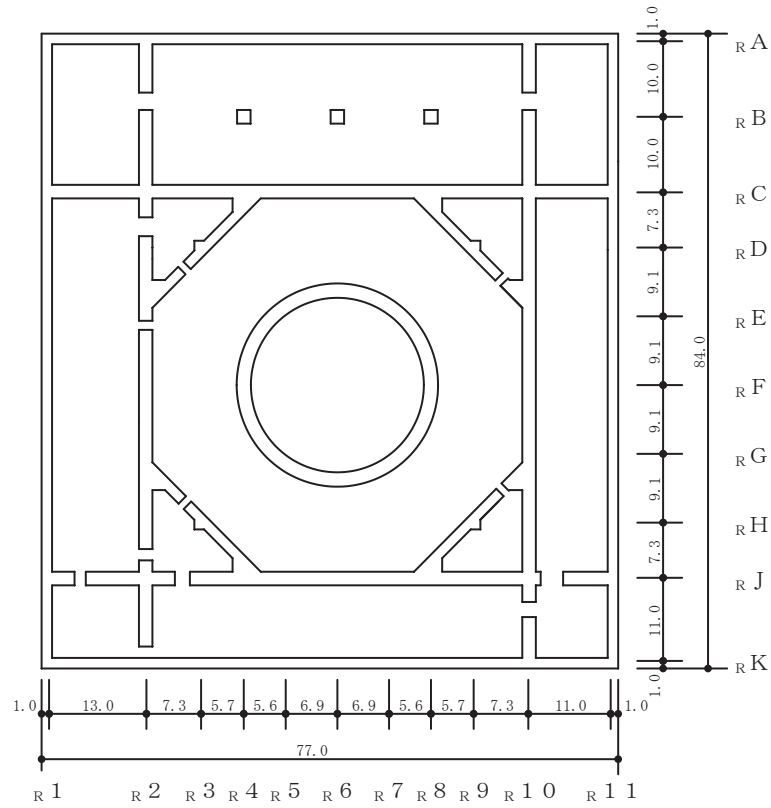
注記 *1 : 建屋寸法は壁外面押えとする。

*2 : O.P. は女川原子力発電所工事用基準面であり、東京湾平均海面 (T.P.) -0.74m である。



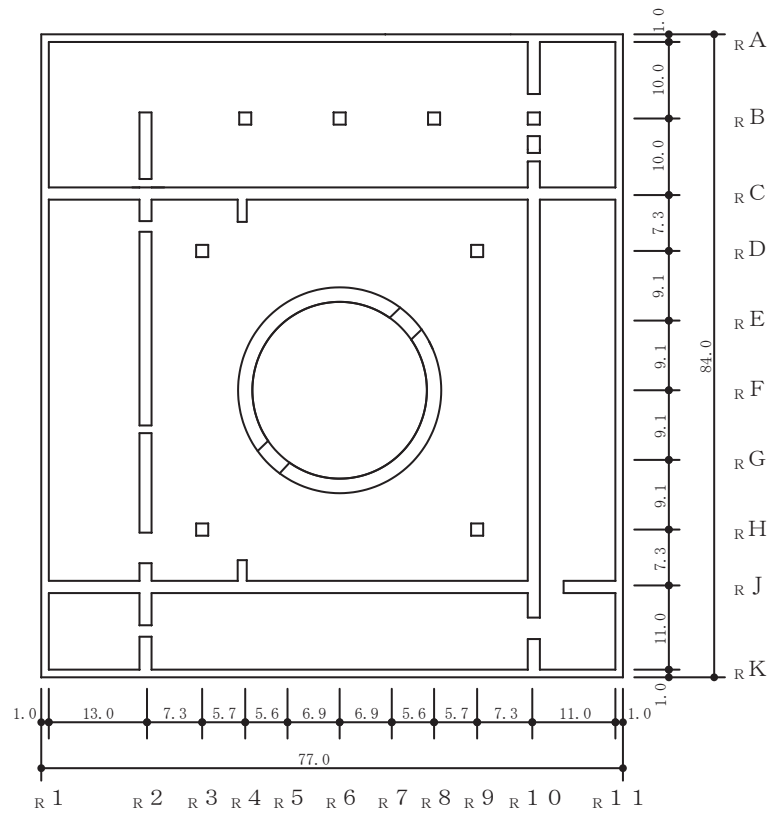
(単位：m)

図 1-1(1) 原子炉建屋の概略平面図 (0.P. -8.1m)



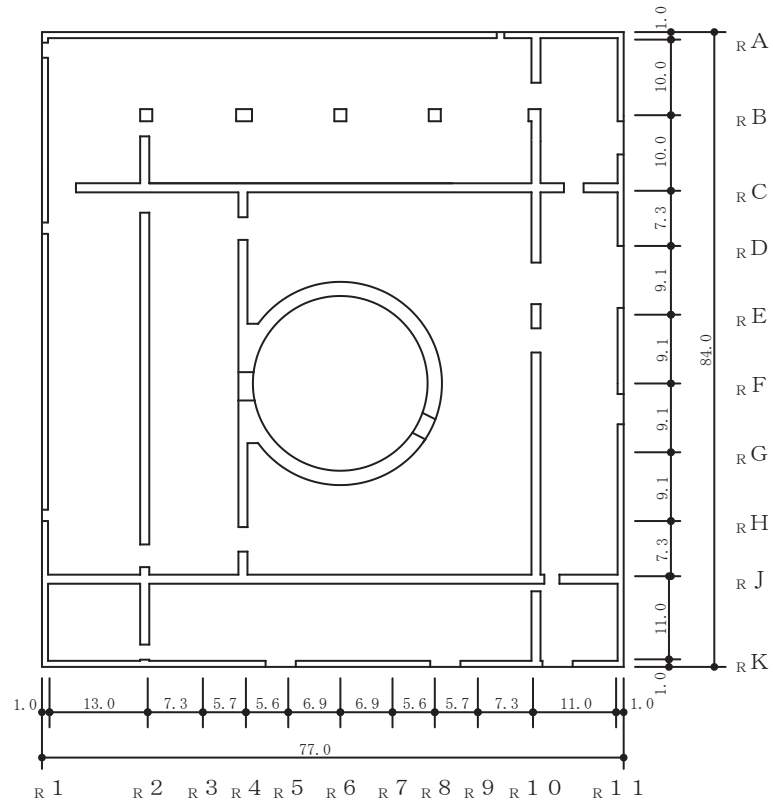
(単位：m)

図 1-1(2) 原子炉建屋の概略平面図 (0. P. -0.8m)



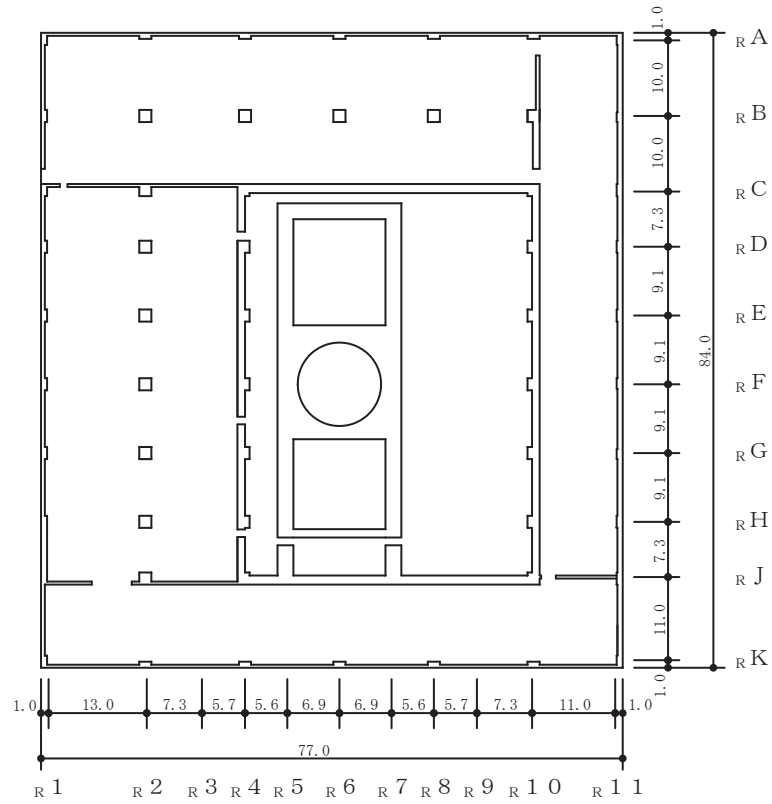
(単位：m)

図 1-1(3) 原子炉建屋の概略平面図 (0. P. 6. 0m)



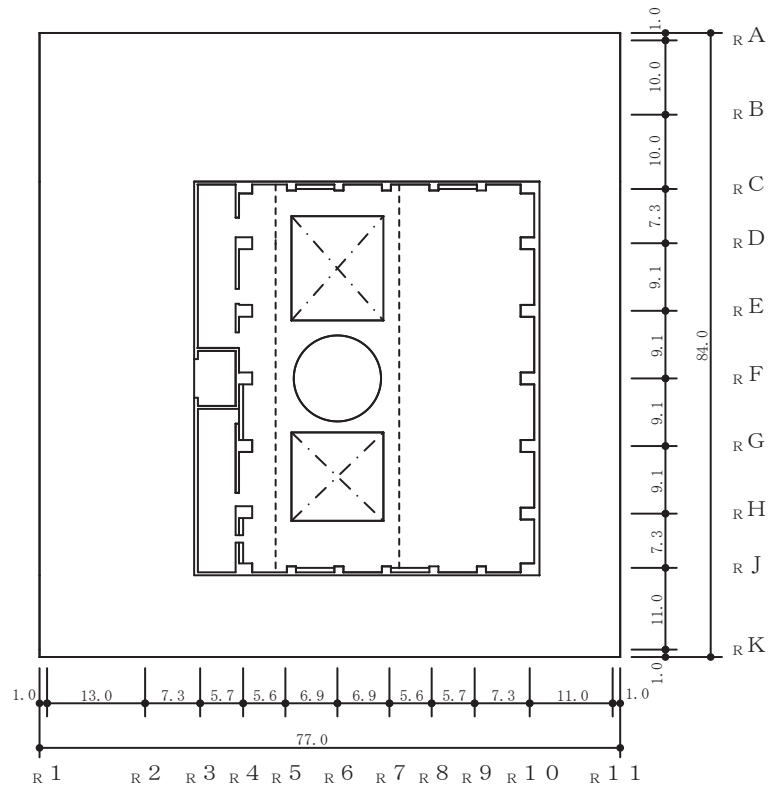
(単位：m)

図 1-1(4) 原子炉建屋の概略平面図 (0.P. 15.0m)



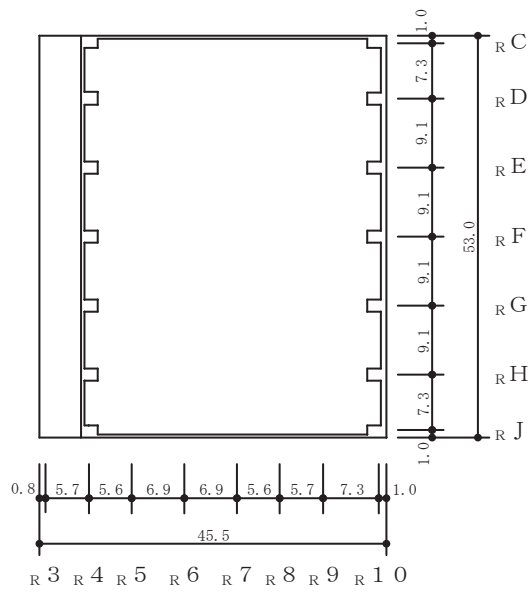
(単位：m)

図 1-1(5) 原子炉建屋の概略平面図 (0.P. 22.5m)



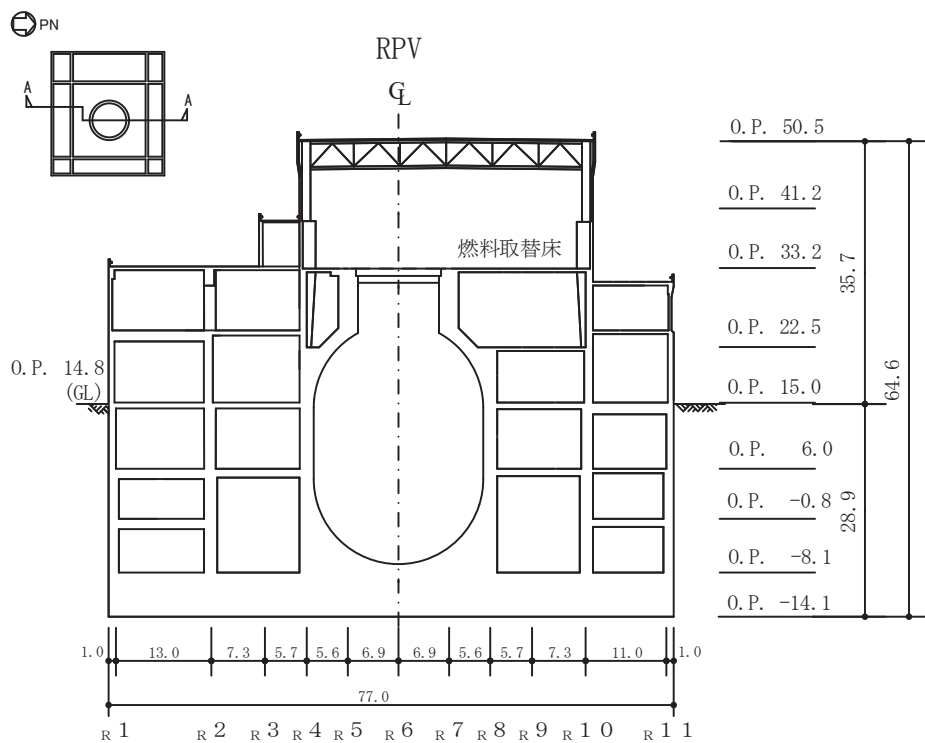
(単位：m)

図 1-1(6) 原子炉建屋の概略平面図 (0. P. 33. 2m)



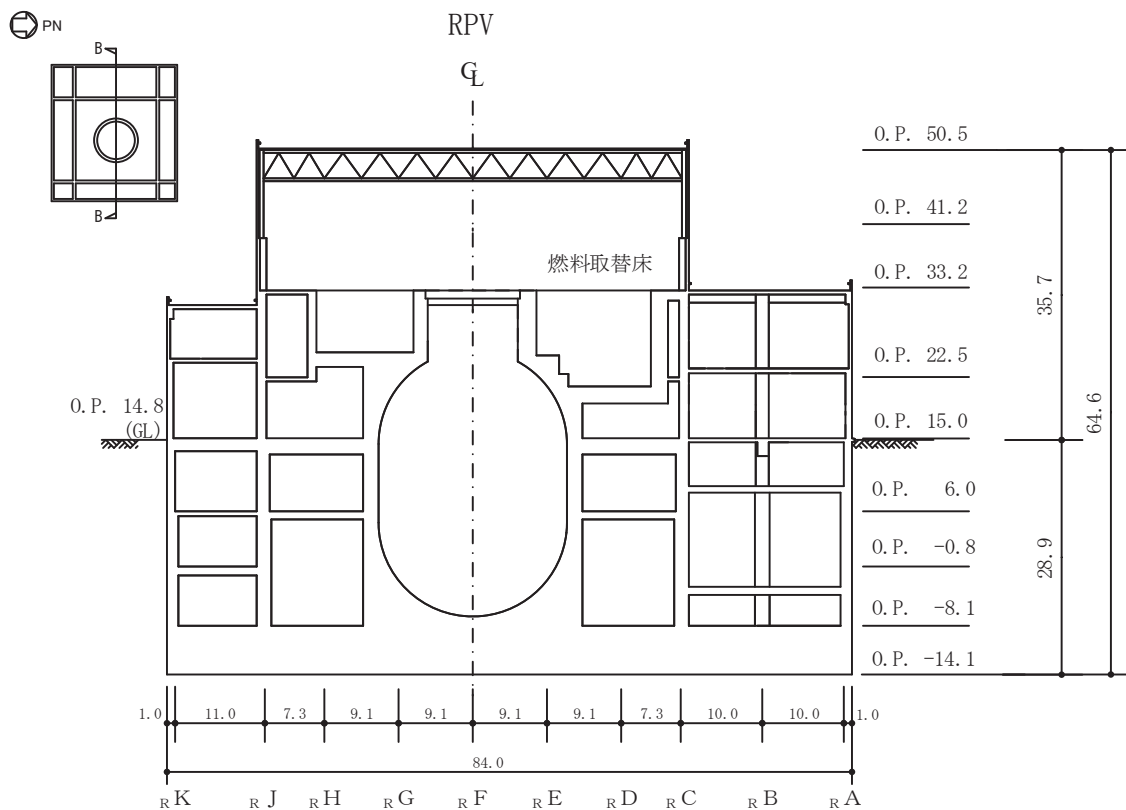
(単位 : m)

図 1-1(7) 原子炉建屋の概略平面図 (0. P. 41. 2m)



(単位 : m)

図 1-2(1) 原子炉建屋の概略断面図 (A-A 断面 NS 方向)



(単位 : m)

図 1-2(2) 原子炉建屋の概略断面図 (B-B 断面 EW 方向)

1.2 3次元 FEM モデルによる耐震性評価の方針

原子炉建屋について 3次元 FEM モデルを構築し、固有値解析や観測記録を用いた解析結果から、同モデルの妥当性を確認する。そのうえで、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 - D 2 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。

3次元 FEM モデルのモデル化条件を表 1-1 に示す。質点系モデルでは床の柔性を考慮しているが、3次元 FEM モデルも床の柔性を考慮したモデルとなっている。

表 1-1 3次元 FEM モデルのモデル化条件

モデル	床のモデル化	地盤のモデル化	コンクリート剛性の設定*
3次元 FEM モデル	柔性を考慮	相互作用考慮 (底面地盤のみ)	2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の観測記録を用いたシミュレーション解析により補正

3次元 FEM モデルは、床の柔性を考慮し、地盤のモデル化に底面地盤の相互作用を考慮し、壁部分に質点系モデルのシミュレーション解析で評価した等価剛性を適用することで、建屋の実情を模擬したモデルとしている。なお、本資料で検討する 3次元 FEM モデルは、補足説明資料「補足-620-1 別紙 5 3次元 FEM 等価線形モデルによるシミュレーション解析（原子炉建屋）」に示した 3.11 地震シミュレーション解析に用いた 3次元 FEM モデルに対して、3.11 地震後に実施した燃料取替床上部壁の耐震補強部材の追加を反映したモデルとしている。

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「3.2.3 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。

また、解析には解析コード「MSC NASTRAN」を用いる。

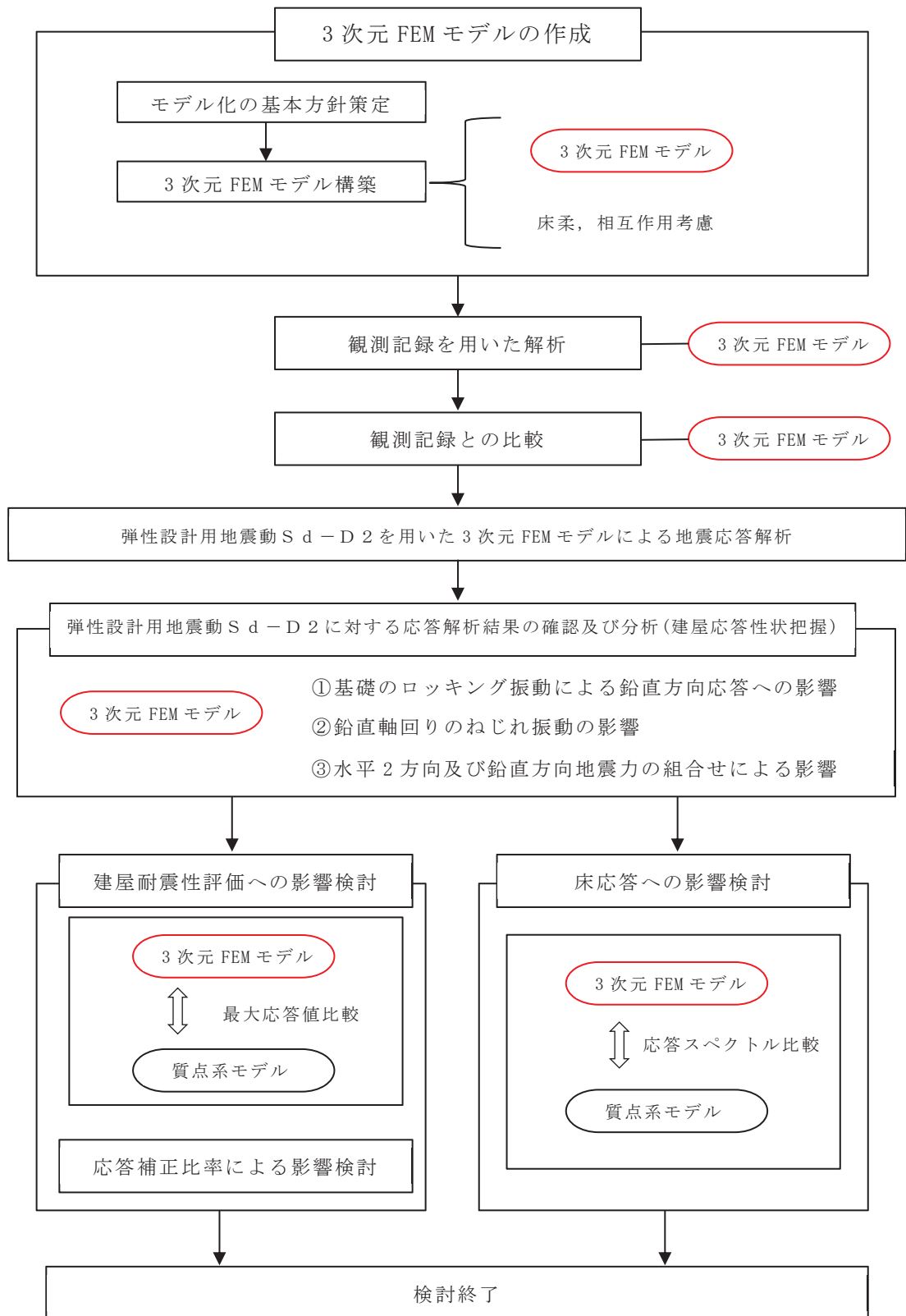


図 1-3 3次元 FEM モデルによる耐震性評価フロー

2. 3次元 FEM モデルの構築

2.1 原子炉建屋の 3次元 FEM モデル

2.1.1 モデル化の基本方針

原子炉建屋の 3次元 FEM モデルを図 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、使用済み燃料プール、蒸気乾燥器・気水分離器ピット及び基礎とする。

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 44200 要素）とし、耐震壁以外の主要な壁もモデル化する。基礎版は、ソリッド要素（約 13900 要素）とする。柱、はり、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 3000 要素）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、水平ブレースはトラス要素（約 500 要素）とする。

また、壁・床の開口部については、主要な部分のみモデル化する。

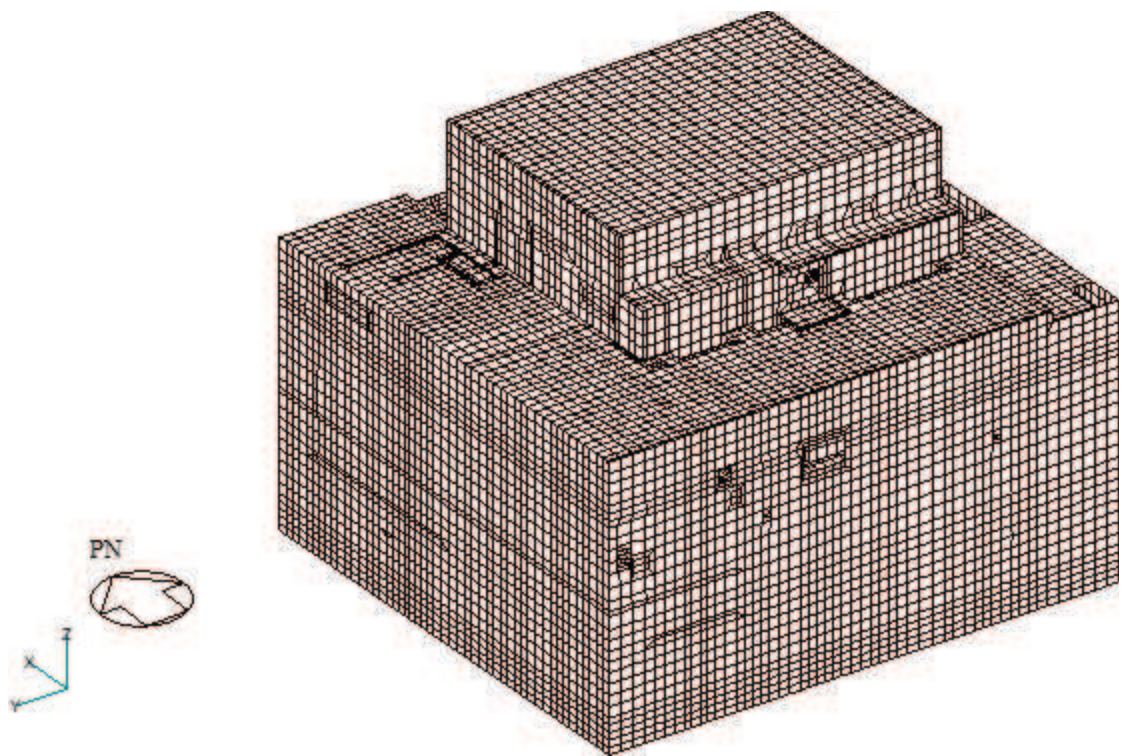
要素の大きさは、各スラブの上面レベルと対応する位置に節点を設け、鉛直方向にはフロア間を 3 分割以上、水平方向は通り芯間を 3 分割以上を目安とする。

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。

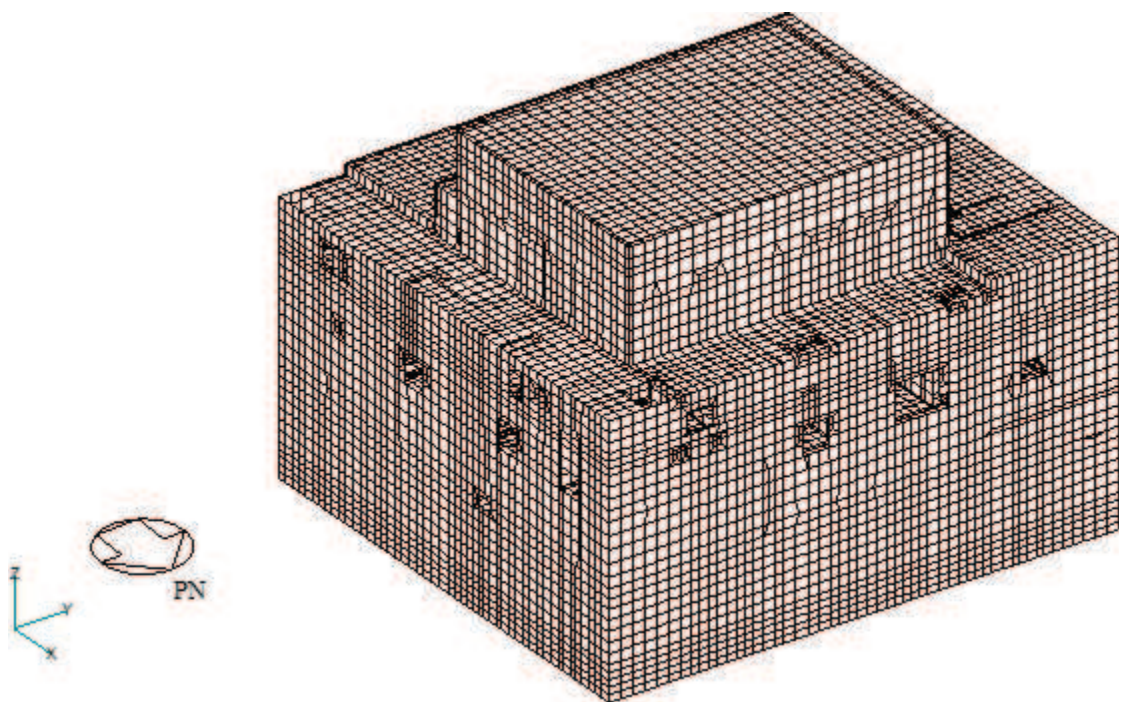
使用材料の物性値を表 2-1 に示す。

コンクリートの強度及びヤング係数並びに地盤物性については、添付書類「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、質点系モデルと同様に平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等の地震やコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ等に伴う初期剛性の低下を反映する。耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数を表 2-2 に示す。

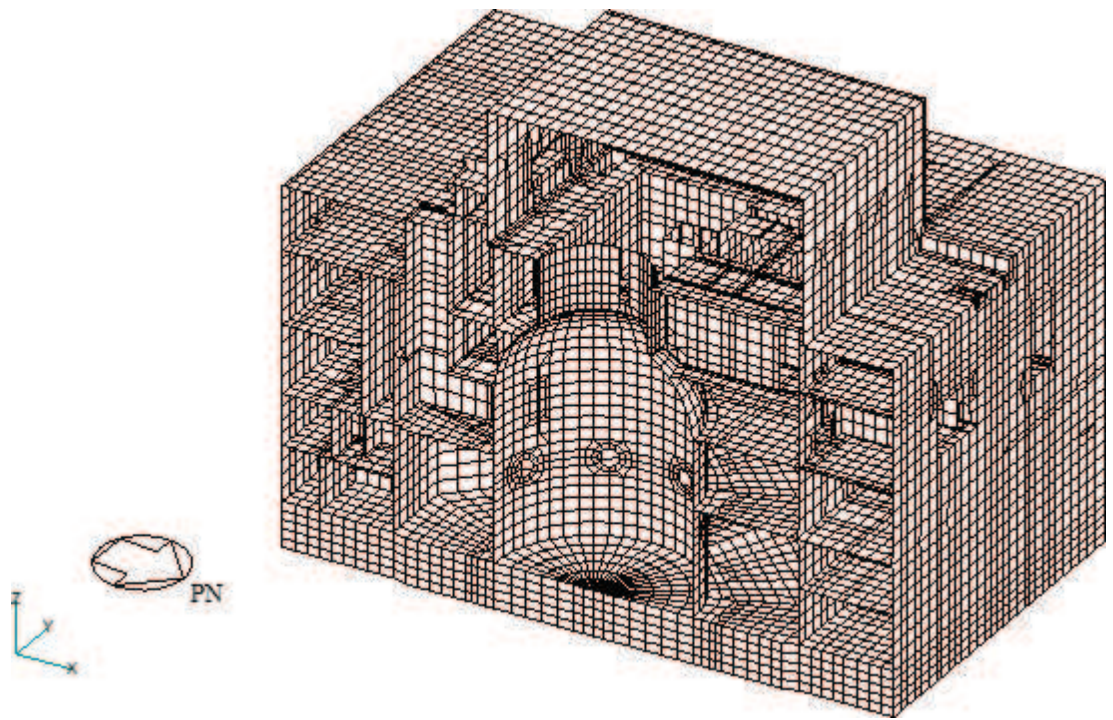


(a) 建屋全景（南西面）

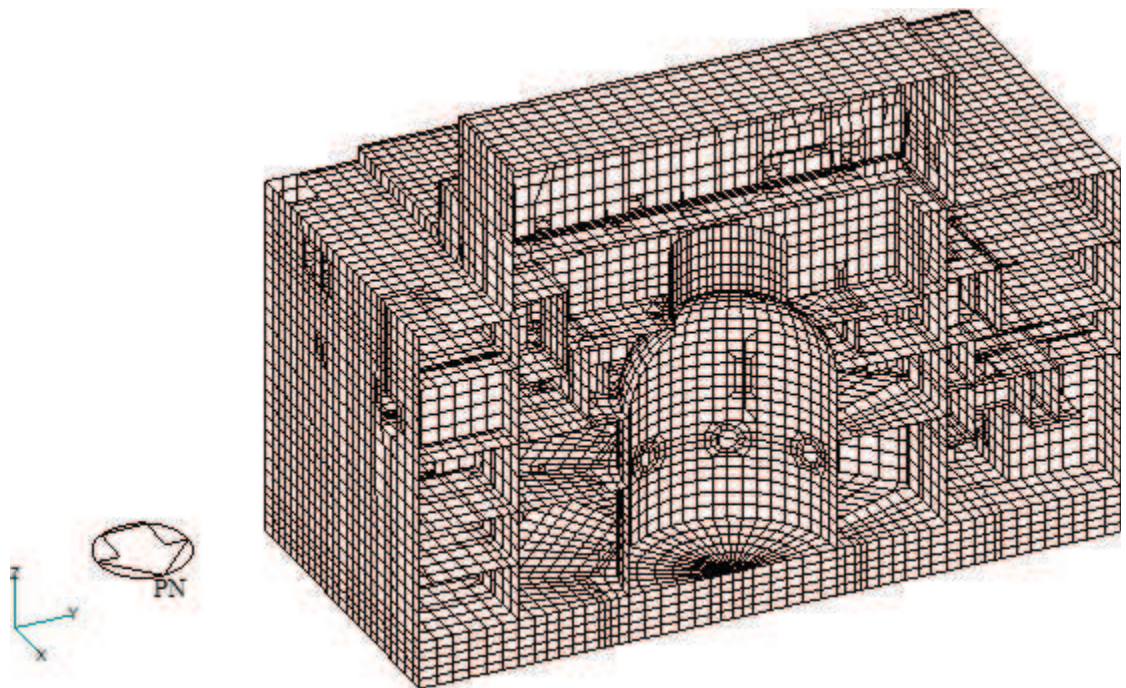


(b) 建屋全景（北東面）

図 2-1(1) 3次元 FEM モデル図 (1/2)

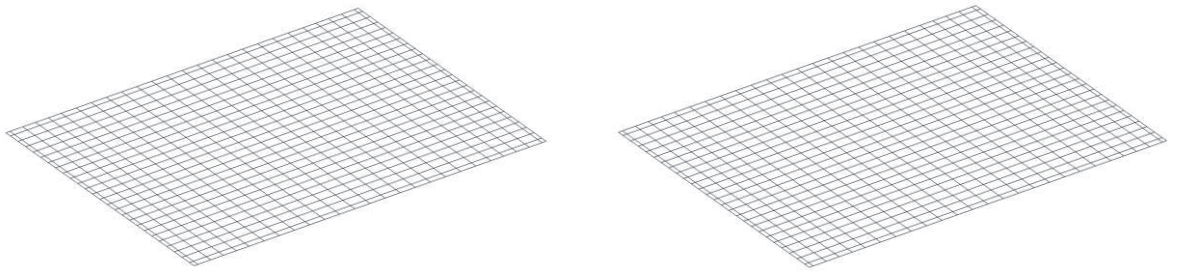


(c) NS 断面図

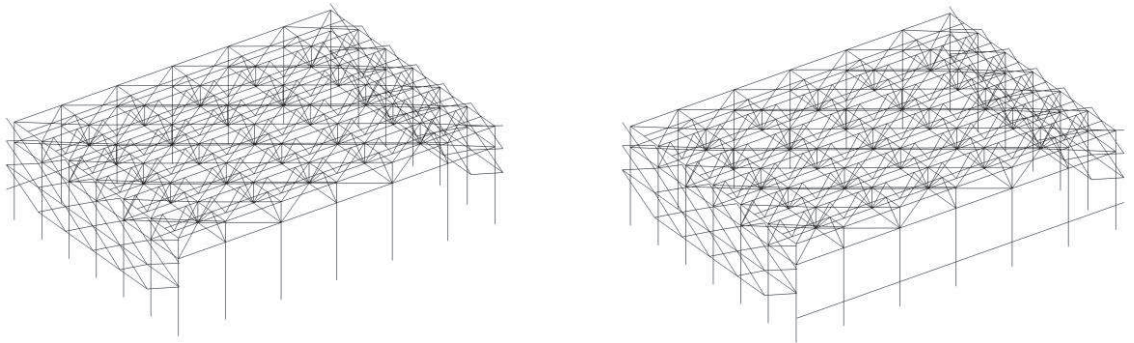


(d) EW 断面図

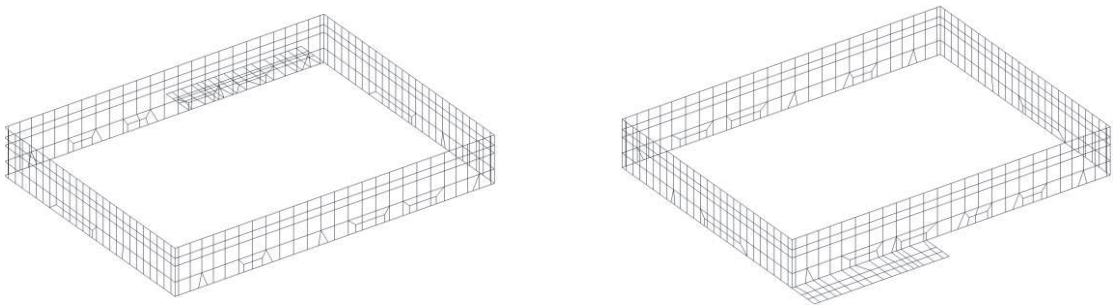
図 2-1(2) 3次元 FEM モデル図 (2/2)



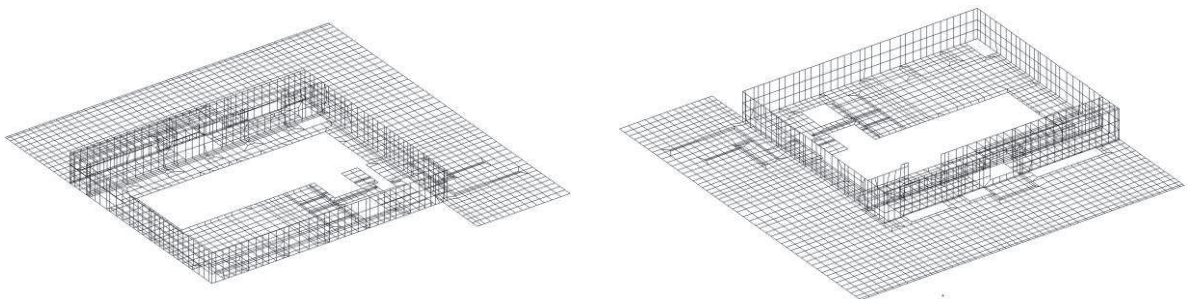
(a) O. P. 50.5m (屋根スラブ)



(b) O. P. 33.2m~O. P. 50.5m (柱, はり及び屋根トラス)

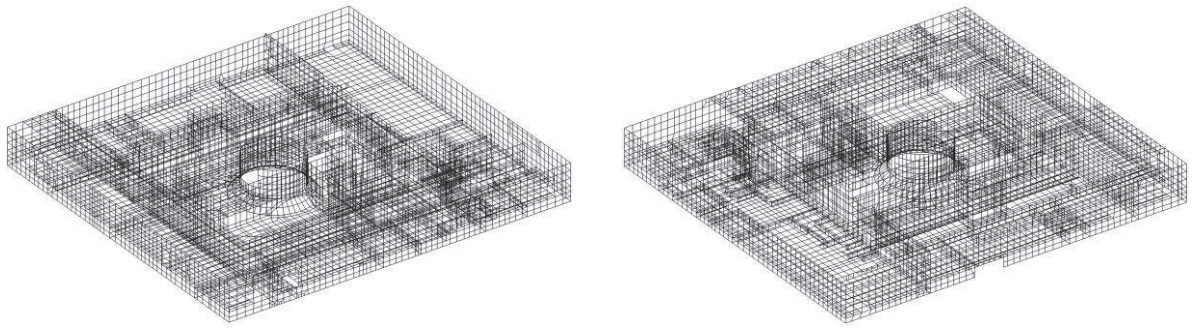


(c) O. P. 41.2m~O. P. 50.5m

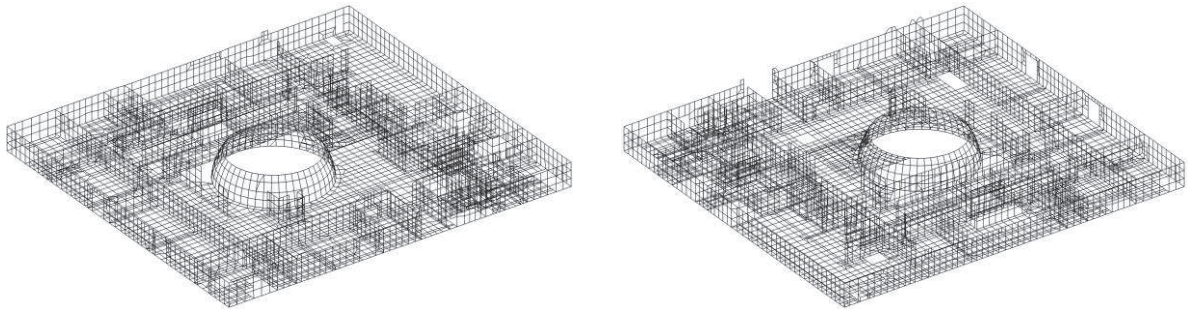


(d) O. P. 33.2m~O. P. 41.2m

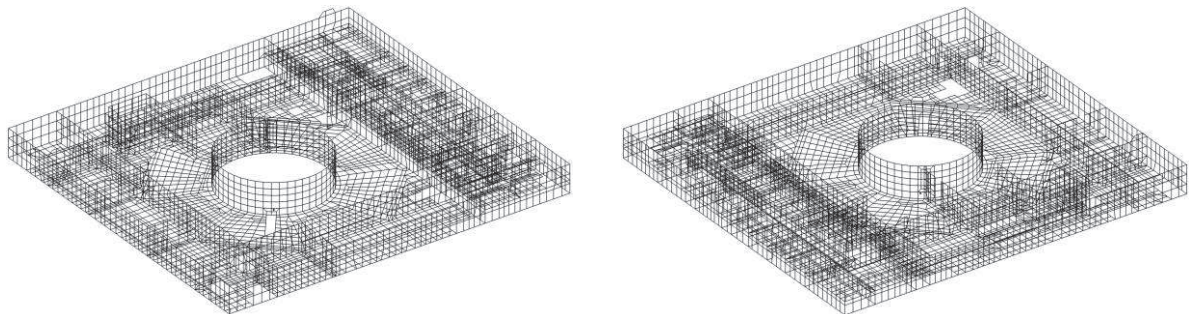
図 2-2(1) 各階の 3 次元 FEM モデル図 (1/3)



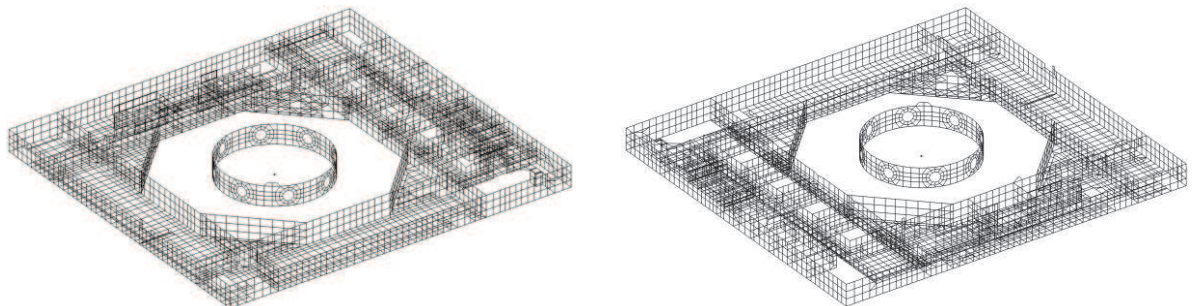
(e) O. P. 22.5m ~ O. P. 33.2m



(f) O. P. 15.0m ~ O. P. 22.5m

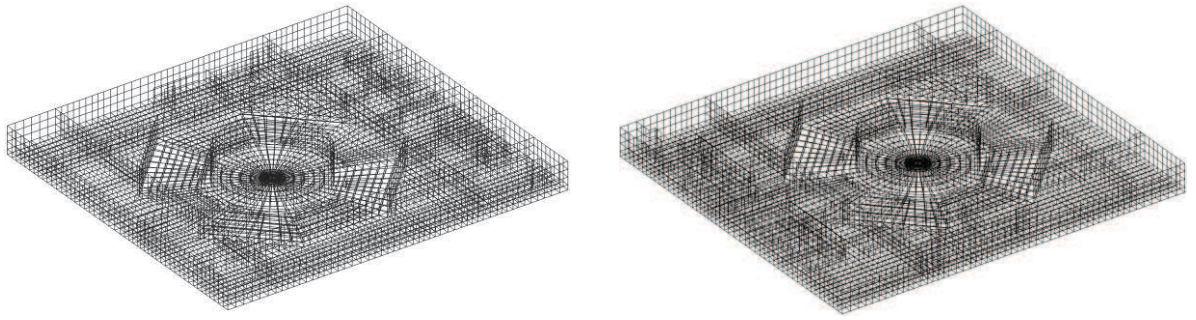


(g) O. P. 6.0m ~ O. P. 15.0m



(h) O. P. -0.8m ~ O. P. 6.0m

図 2-2(2) 各階の 3 次元 FEM モデル図 (2/3)



(i) O. P. -8.1m~O. P. -0.8m

図 2-2(3) 各階の 3 次元 FEM 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 ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	減衰定数 h (%)
建屋部 燃料取替床上部 既設部	鉄筋コンクリート コンクリート： F c = 32.4 (N/mm ²) (F c = 330 (kgf/cm ²)) 鉄筋：SD35 (SD345 相当)	2.65 × 10 ⁴	1.14 × 10 ⁴	5
建屋部 燃料取替床上部 追設部	鉄筋コンクリート コンクリート： F c = 33 (N/mm ²) 鉄筋：SD345	2.52 × 10 ⁴	1.05 × 10 ⁴	5
建屋部 燃料取替床下部 既設部	鉄筋コンクリート コンクリート： F c = 32.4 (N/mm ²) (F c = 330 (kgf/cm ²)) 鉄筋：SD35 (SD345 相当)	2.65 × 10 ⁴	1.14 × 10 ⁴	5
屋根トラス	鉄骨：SS41 (SS400 相当) SM41A (SM400A 相当)	2.05 × 10 ⁵	7.90 × 10 ⁴	2
追設ブレース	鉄骨：SN400B SN490B BCR295	2.05 × 10 ⁵	7.90 × 10 ⁴	2

表 2-2 耐震壁の初期剛性の設計値に対する補正係数

方向	地上 3 階及びクレーン階 (O. P. 33.2m より上部)	地下 3 階～地上 2 階 (O. P. 33.2m より下部)
NS	0.30	0.75
EW	0.50	0.80

注：追設耐震壁については補正を行わない。

2.1.2 荷重

固定荷重，積載荷重及び機器・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に重量を調整する。このうち，炉内構造物については，質点系モデルでは重量として考慮しており，建屋の3次元FEMモデルにお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，添付書類「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基礎底面地盤ばねと整合するよう，地盤をばね要素でモデル化することで考慮する。

基礎底面地盤ばねについては，質点系モデルで考慮したスウェイ，ロッキング及び鉛直ばねの値を基に，3次元FEMモデルの基礎底面の各節点位置に，節点の支配面積に応じて離散化した値で割り当てる。水平方向加振時のロッキングばねは，鉛直ばねとして設定する。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た値のばねを各節点に離散化したばねとして設定する。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）は，水平2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た値のばねを各節点に離散化したばねとして設定する。一般に，水平2方向の回転ばねに等価な鉛直ばねの値は異なる値となるが，2方向同時入力解析を行うため，2方向の等価な鉛直ばねの平均値を設定値とする。

減衰係数は地盤ばね定数と同様の方法で各節点に離散化した減衰要素としてモデル化する。各地盤ばね諸元を表2-3に示す。

表 2-3 地盤ばね定数と減衰係数

(a) 底面・並進

方向	ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
NS	1.742×10^9	2.351×10^7
EW	1.727×10^9	2.309×10^7

(b) 底面・回転

方向	ばね定数 (kN・m/rad.)	減衰係数 (kN・m・s/rad.)
NS	2.994×10^{12}	5.100×10^9
EW	3.386×10^{12}	6.732×10^9

(c) 底面・鉛直

ばね定数 (kN/m)	減衰係数 (kN・s/m)
2.350×10^9	4.605×10^7

2.2 固有値解析

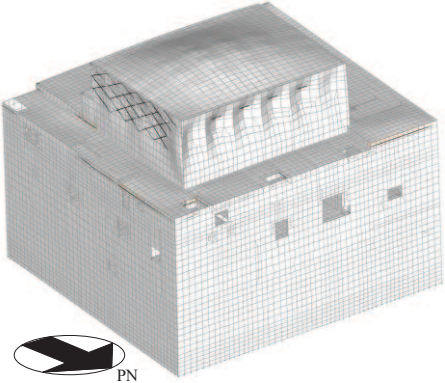
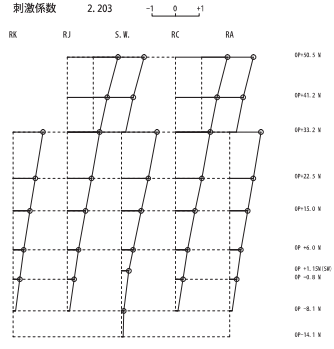
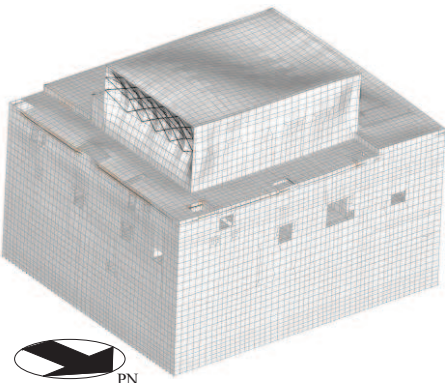
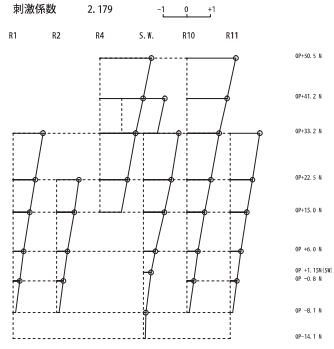
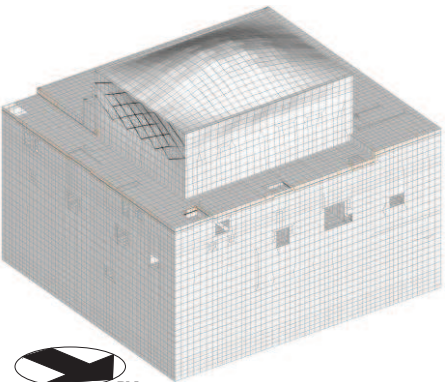
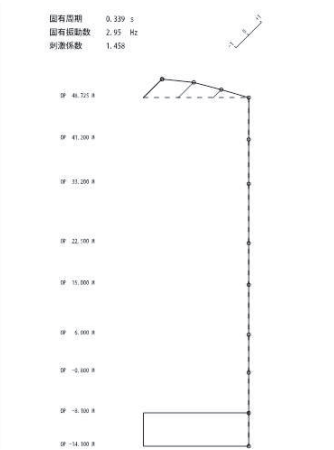
3次元 FEM モデルについて、固有値解析を実施した。固有値解析結果を表 2-4 に、質点系モデル及び 3次元 FEM モデルの固有モード比較を表 2-5 に示す。

固有値解析の結果について、質点系モデルと 3次元 FEM モデルは、いずれの方向についても概ね整合している。

表 2-4 固有値解析結果

方向	振動数 (Hz)	
	3次元 FEM モデル	質点系モデル
NS	4.10	4.21
EW	4.28	4.36
UD	3.74	2.95

表 2-5 質点系モデル及び 3 次元 FEM モデルの固有モード比較

方向	3 次元 FEM	質点系モデル
NS		<p>固有周期 0.237 s 固有振動数 4.21 Hz 刺激係数 2.203</p>  <p>RK RJ S.W. RC RA</p> <p> 0F+0.5 V 0F+1.2 V 0F+3.2 V 0F+2.5 V 0F+5.0 V 0F+4.0 V 0F+1.100/0E 0F-0.8 V 0F-8.1 V 0F-14.1 V </p>
	4.10 Hz	4.21 Hz
EW		<p>固有周期 0.230 s 固有振動数 4.36 Hz 刺激係数 2.179</p>  <p>R1 R2 R4 S.W. R10 R11</p> <p> 0F+0.5 V 0F+1.2 V 0F+3.2 V 0F+2.5 V 0F+5.0 V 0F+4.0 V 0F+1.100/0E 0F-0.8 V 0F-8.1 V 0F-14.1 V </p>
	4.28 Hz	4.36 Hz
UD		<p>固有周期 0.339 s 固有振動数 2.95 Hz 刺激係数 1.438</p>  <p> 0F 41.738 V 0F 41.100 V 0F 31.200 V 0F 22.100 V 0F 11.100 V 0F 6.100 V 0F -5.100 V 0F -14.100 V </p>
	3.74 Hz	2.95 Hz

2.3 観測記録を用いた検討

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震（以下「3.11 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結果については、補足説明資料「補足-620-1 別紙 5 3 次元 FEM 等価線形モデルによるシミュレーション解析（原子炉建屋）」に詳細を記載している。

3 次元 FEM モデルによる解析結果は、建屋内の各部に配置された地震計による地震観測記録との比較で、応答スペクトルの形状をよく再現できていることを確認しており、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。

なお、上記のシミュレーション解析に用いたモデルに対し、以降の原子炉建屋の 3 次元応答性状の影響検討に用いる 3 次元 FEM モデルは、添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」に示す質点系モデルとの整合性の観点から、以下の項目について変更している。

- ①せん断耐力の向上を目的とした耐震補強工事において追設した部材として、内部ボックス壁と同じ構面において 3 階（O.P. 33.2m～O.P. 41.2m）には耐震壁を、クレーン階（O.P. 41.2m～O.P. 50.5m）には鉄骨ブレースを地震応答解析モデルに反映している。
- ②コンクリートの減衰定数は 7%から 5%としている。

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、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、建屋への影響も大きい弾性設計用地震動 $S_d - D2$ を用いる。(添付書類「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 $S_d - D2$ に対する建屋基礎底面の地盤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。図 3-1 に 3次元 FEM モデルによる地震応答解析の概念を示す。

水平2方向及び鉛直方向に同時に地震動を入力する場合は、水平方向に弾性設計用地震動 $S_d - D2$ の水平方向地震波(以下「 $S_d - D2 H$ 」という。)及び弾性設計用地震動 $S_d - D2$ の位相違い波* (以下「 $S_d - D2 p$ 」という。)を、UD方向に弾性設計用地震動 $S_d - D2$ の鉛直方向地震波(以下「 $S_d - D2 V$ 」という。)を入力する。弾性設計用地震動 $S_d - D2 H$ 、 $S_d - D2 p$ 及び $S_d - D2 V$ の模擬地震波の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを図 3-2 及び図 3-3 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。

注記* : $S_d - D2 H$ の設計用応答スペクトルに適合するが、 $S_d - D2 H$ とは位相特性が異なる地震波である。

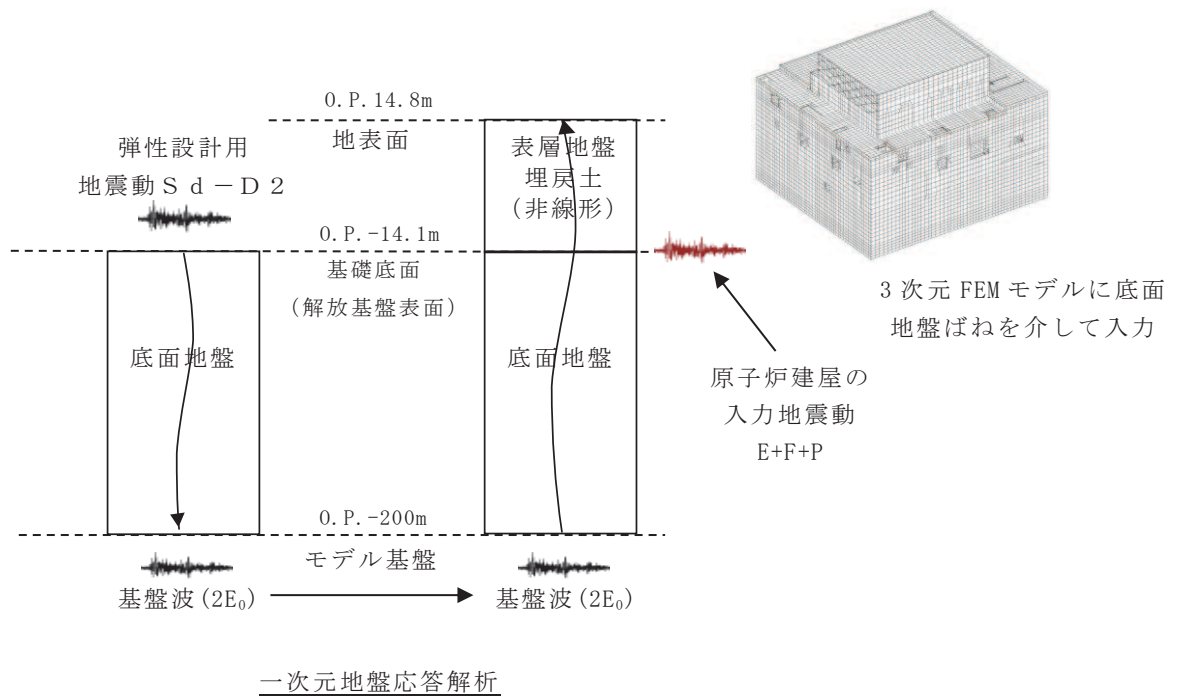
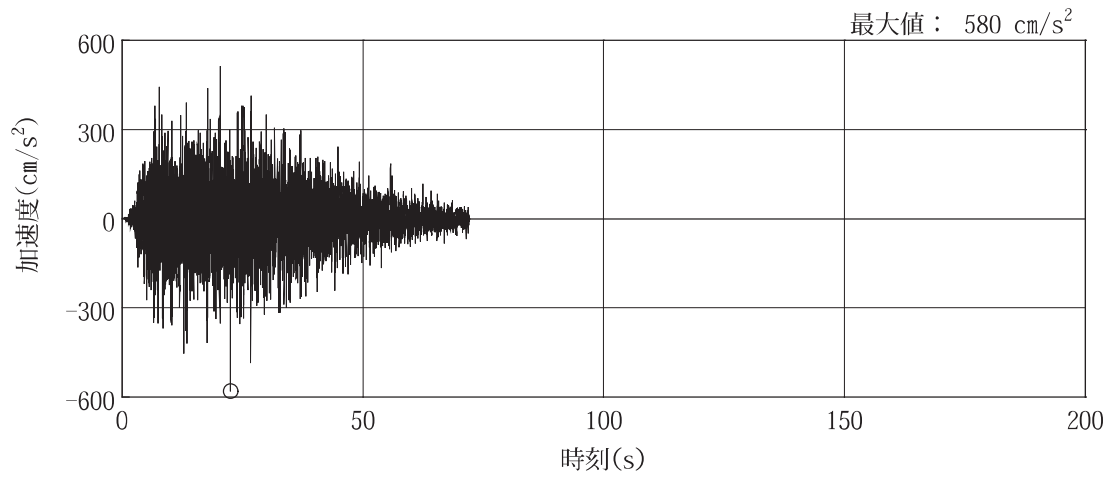
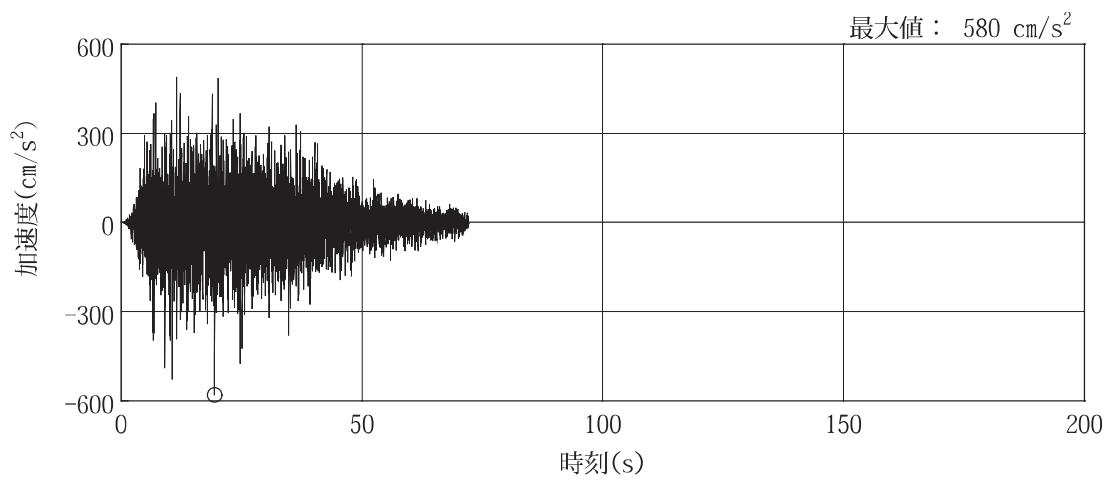


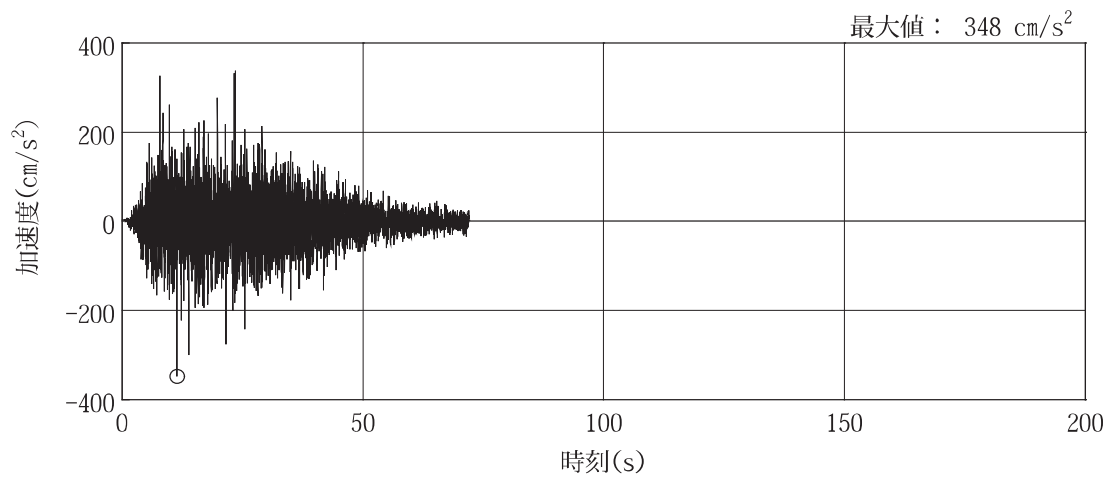
図 3-1 3次元 FEM モデルによる地震応答解析の概念



(a) S d - D 2 H

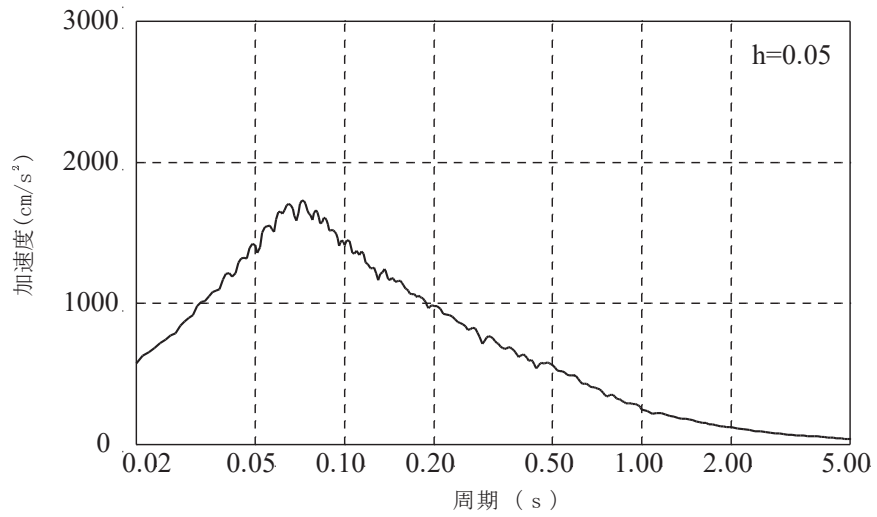


(b) S d - D 2 p

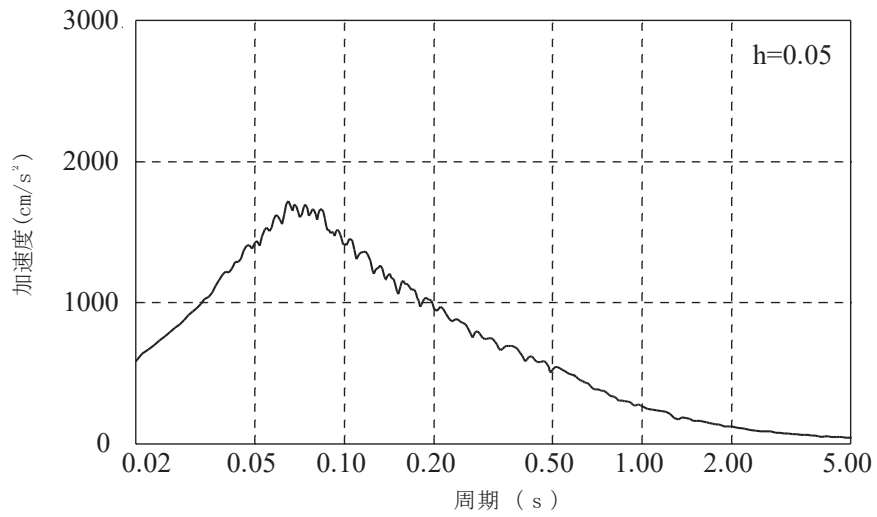


(c) S d - D 2 V

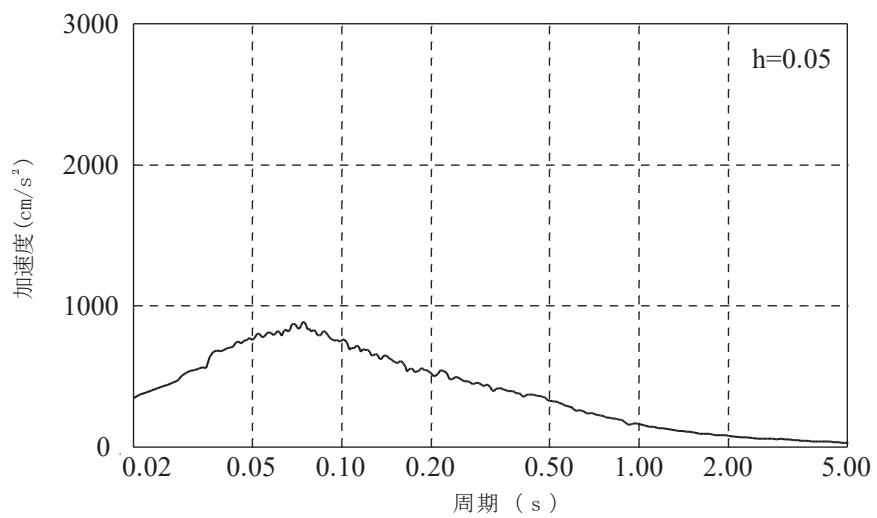
図 3-2 検討に用いる地震波の加速度時刻歴波形



(a) S d - D 2 H



(b) S d - D 2 p



(c) S d - D 2 V

図 3-3 検討に用いる地震波の加速度応答スペクトル

3.2 建屋応答性状の把握

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 3 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
3次元 FEM モデルの水平入力時の基礎版端部の鉛直応答で比較する
- ・鉛直軸回りのねじれ振動の影響
3次元 FEM モデルの加振方向及び直交方向の応答で比較する
- ・水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響
3次元 FEM モデルの水平 1 方向入力と 3 方向同時入力と比較する

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、3次元 FEM モデルの鉛直入力時の鉛直方向応答と、水平方向と鉛直方向の同時入力による鉛直方向応答を比較することで検討する。

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表れやすいと考えられる建屋端部の評価点 No. 120 及び No. 11 (O.P. -8.1m) を抽出した。

評価点 No. 120 は、NS 方向加振によりロッキングの影響が表れ、EW 方向加振時はロッキング振動の影響がほとんど表れない部位である。また、評価点 No. 11 は、EW 方向加振によりロッキングの影響が表れ、NS 方向加振時はロッキング振動の影響がほとんど表れない部位である。このため、これら 2 点について、NS 方向加振時と EW 方向加振時の鉛直応答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、いずれの評価点においても NS 方向加振時及び EW 方向加振時の応答にほとんど差が見られない。従って、ロッキング振動の影響はほとんどないことを確認した。

表 3-1(1) 基礎版端部評価点の鉛直成分の応答スペクトルの比較 (S d - D 2) (1/2)

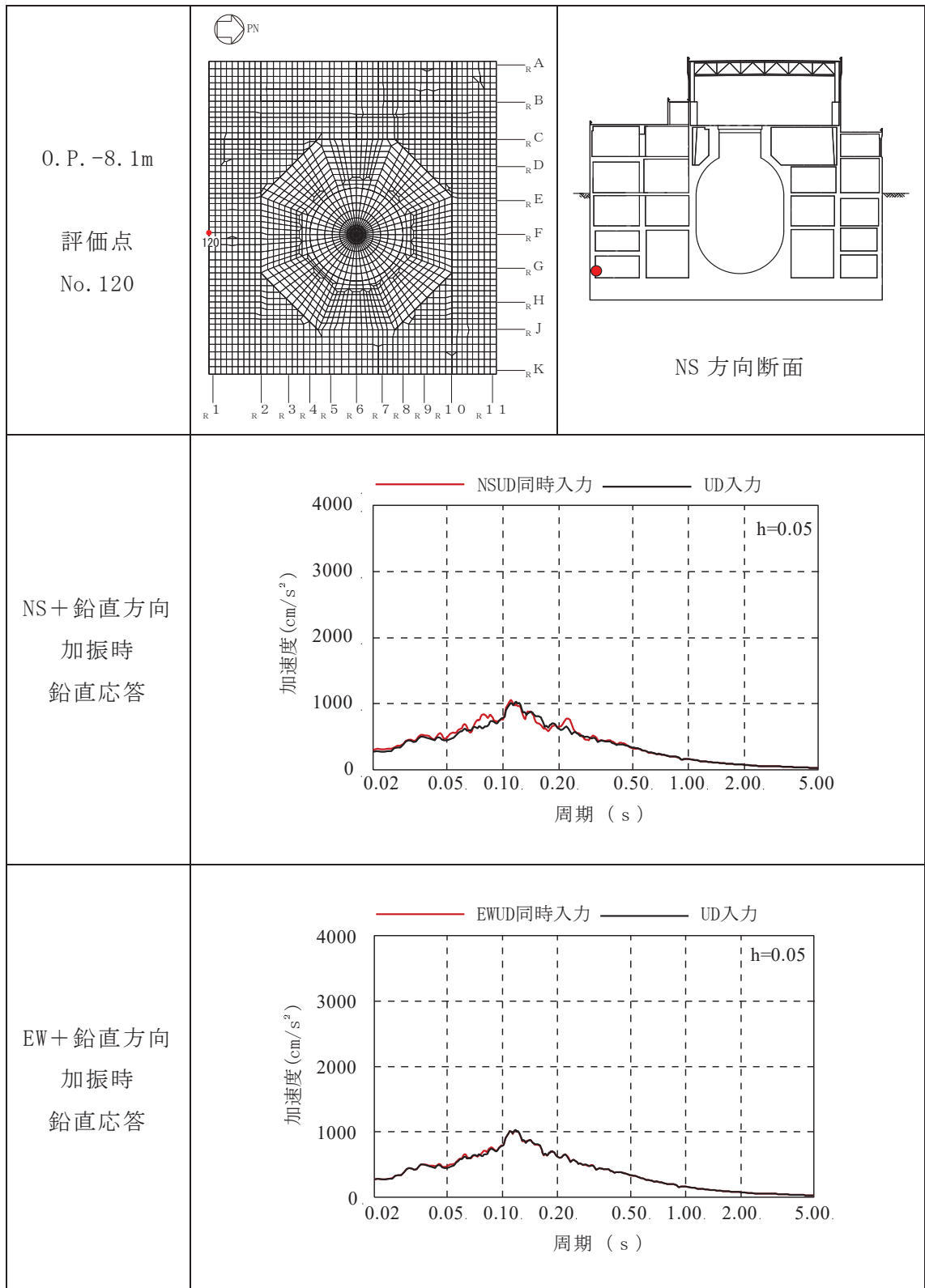
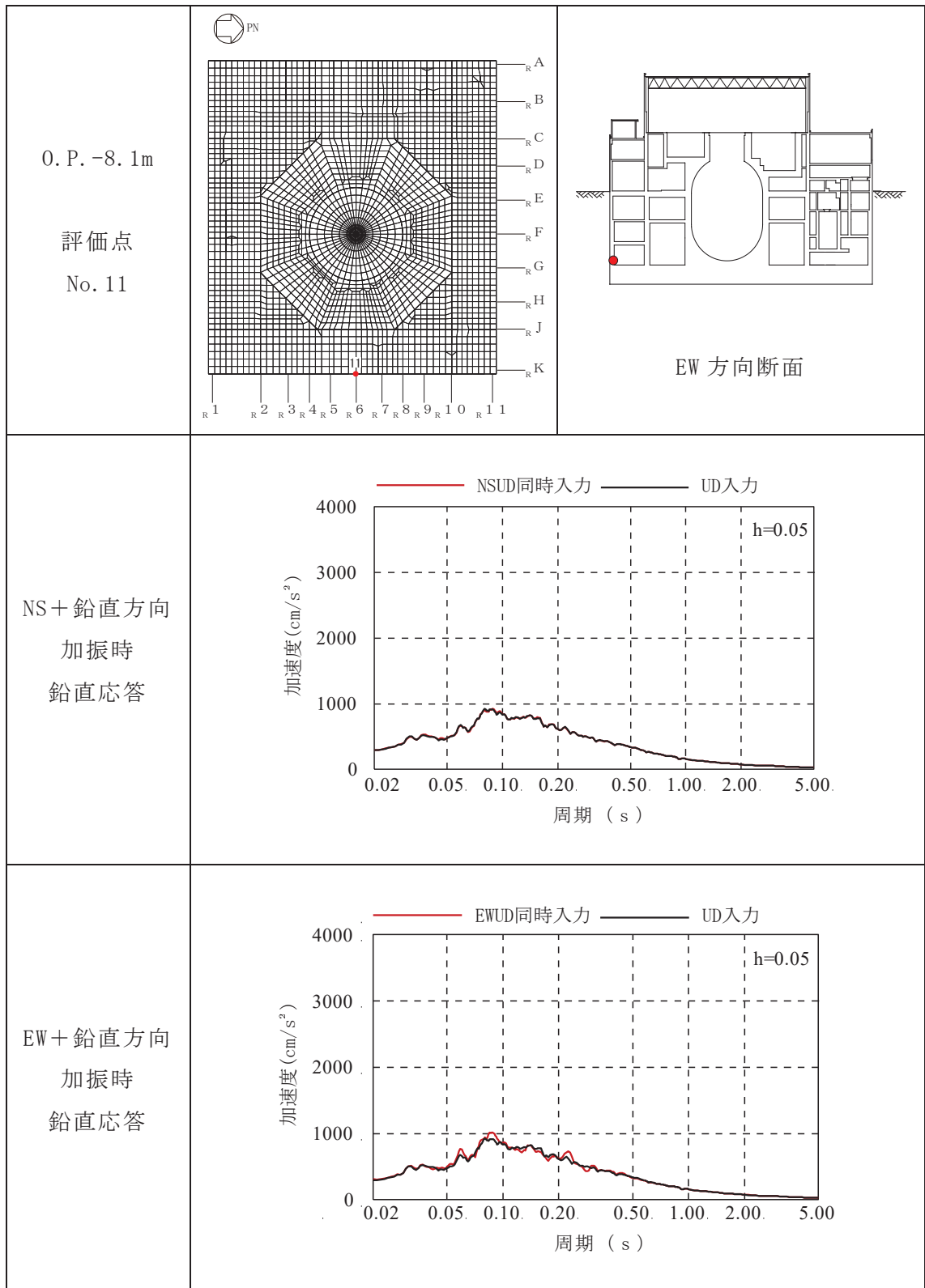


表 3-1(2) 基礎版端部評価点の鉛直成分の応答スペクトルの比較 (S d - D 2) (2/2)



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を 3次元 FEM モデル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. 63439 及び No. 38903 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。水平 2 方向の入力を考慮する場合については、水平 2 方向の入力地震動の位相の組合せによって、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、「3.2.3 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(1) 3次元 FEM モデルの水平加振時の応答比較(1/2)

O.P. 15.0m S d - D 2

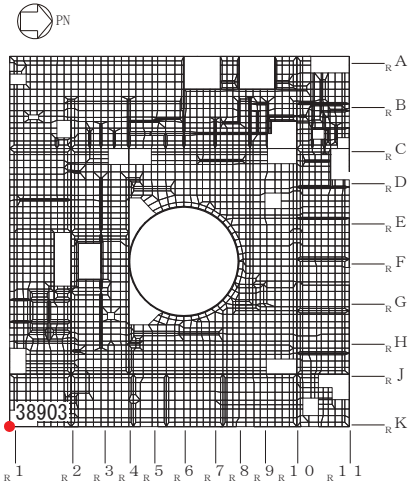
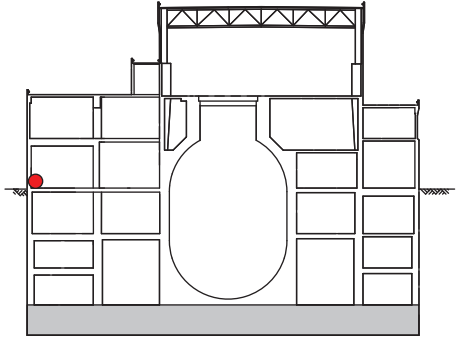
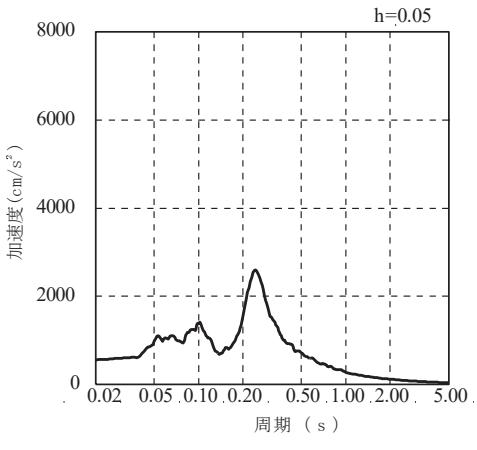
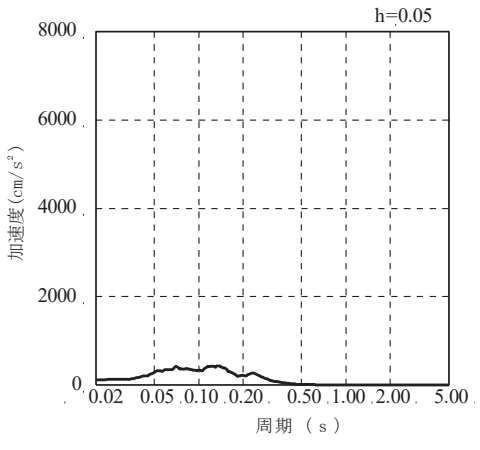
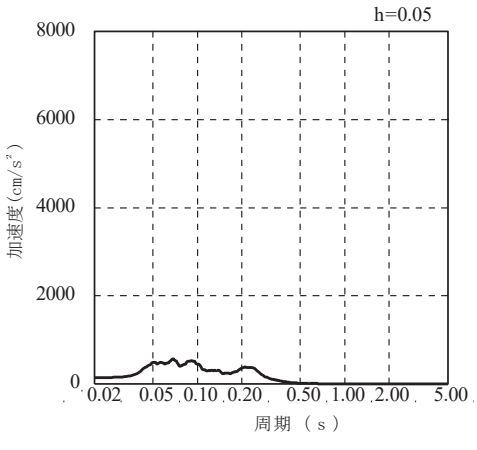
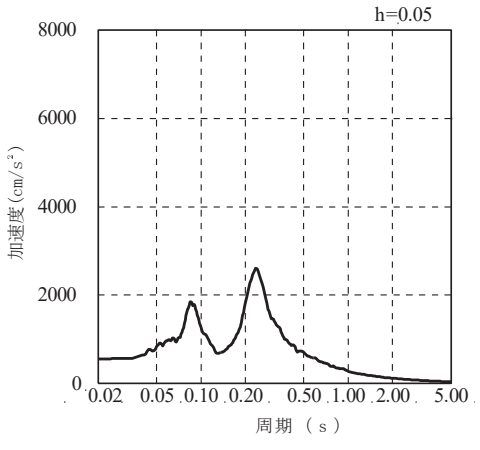
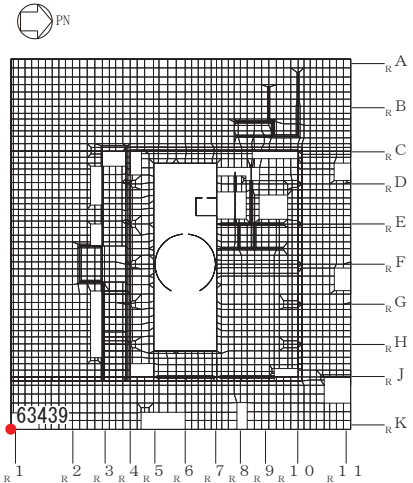
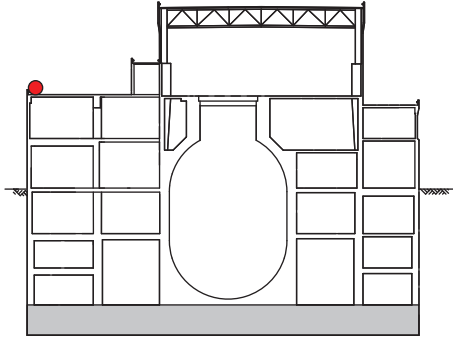
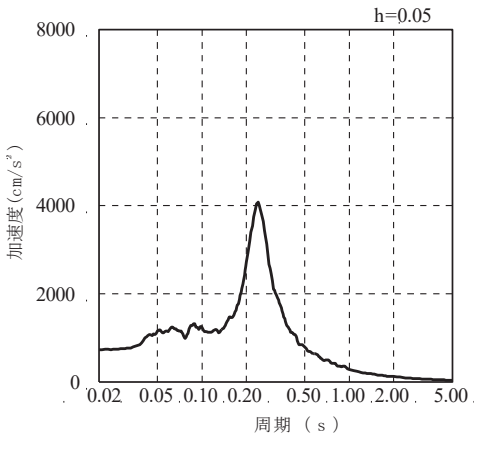
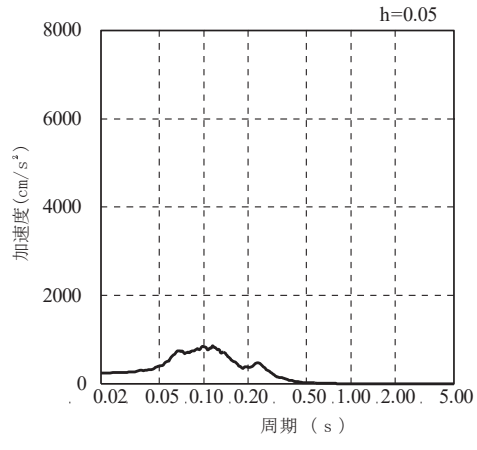
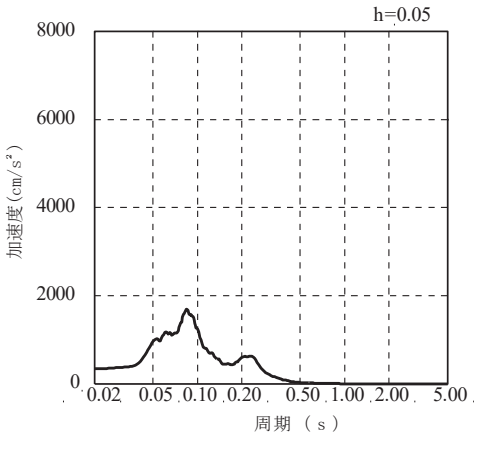
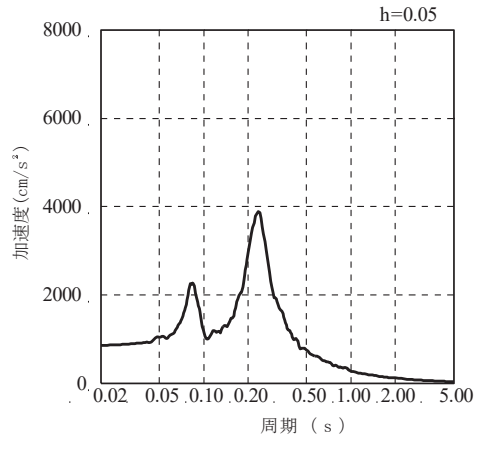
<p>O.P. 15.0m</p> <p>評価点 No. 38903</p>		
<p>方向</p>	<p>NS 方向応答</p>	<p>EW 方向応答</p>
<p>NS 方向 加振時</p>		
<p>EW 方向 加振時</p>		

表 3-2(2) 3次元 FEM モデルの水平加振時の応答比較 (2/2)

0. P. 33.2m S d - D 2

<p>0. P. 33.2m</p> <p>評価点 No. 63439</p>		
<p>方向</p>	<p>NS 方向応答</p>	<p>EW 方向応答</p>
<p>NS 方向 加振時</p>		
<p>EW 方向 加振時</p>		

3.2.3 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、3 次元 FEM モデルに弾性設計用地震動 S d を水平 2 方向及び鉛直方向に同時に入力（3 方向同時入力）した場合について検討する。

地震動の組合せを表 3-3 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 S d - 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 - D 2 について、水平 2 方向同時入力を行う場合は以下のように入力地震動を設定する。NS 方向の応答性状の比較を行う場合は、主方向である NS 方向に S d - D 2 H を入力し、直交方向の EW 方向には S d - D 2 p を入力する。EW 方向の応答性状の比較を行う場合は、主方向である EW 方向に S d - D 2 H の波形を入力し、直交方向の NS 方向には S d - D 2 p を入力する。

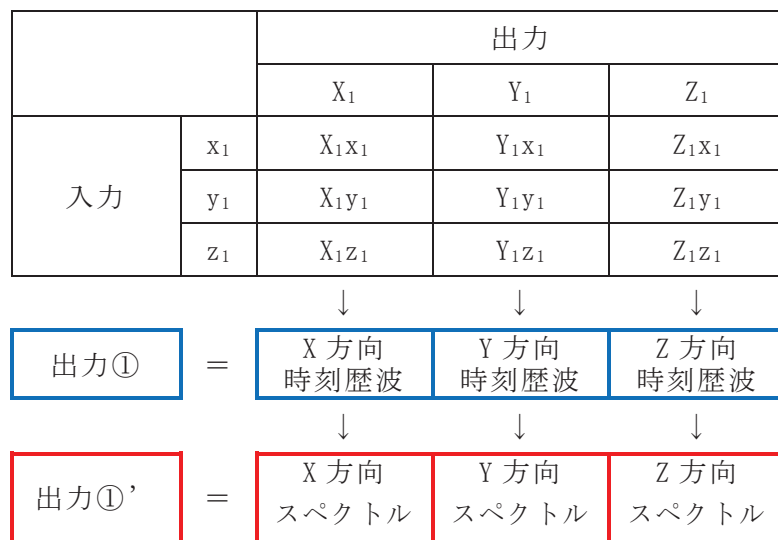
3 方向同時入力による各方向の応答は、水平 2 方向及び鉛直方向の地震動を入力して算出された各成分の応答を、時刻歴で足し合わせるにより算出する。

応答算出の考え方を図 3-4 に示す。

表 3-3 地震動の組合せ (S d - D 2)

地震動の入力方向		NS 方向	EW 方向	UD 方向
1 方向入力	NS 方向 評価時	S d - D 2 H	—	—
	EW 方向 評価時	—	S d - D 2 H	—
3 方向 同時入力	NS 方向 評価時	S d - D 2 H	S d - D 2 p	S d - D 2 V
	EW 方向 評価時	S d - D 2 p	S d - D 2 H	S d - D 2 V

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

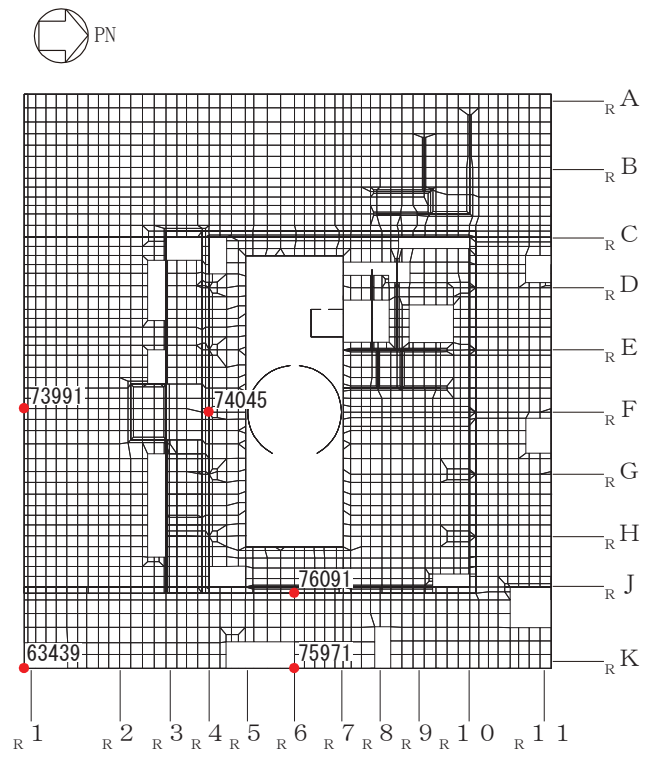
水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の確認は、表 3-3 の地震動を対象に、NS 方向に入力した場合及び EW 方向に入力した場合の応答と、3 方向同時入力した場合の応答とを比較することにより実施する。

応答は図 3-5 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 に示す。

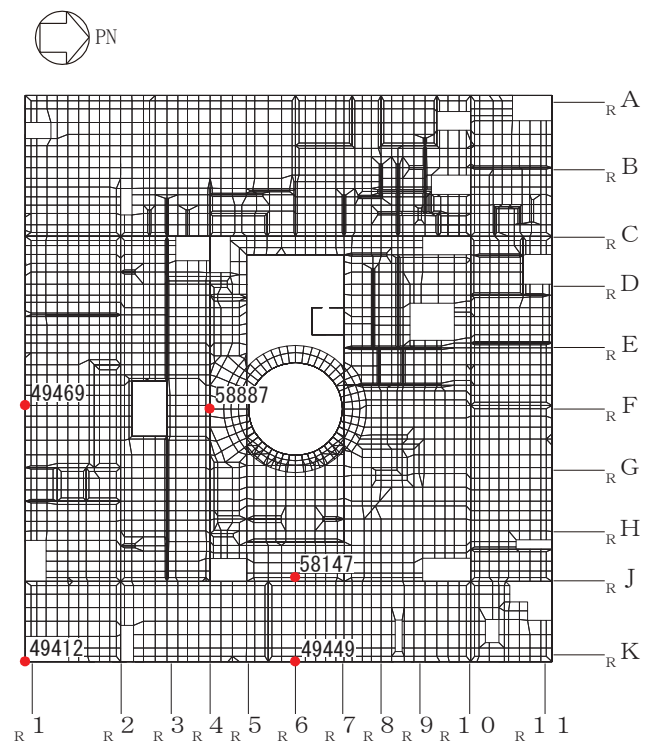
表 3-5 より、いずれの評価点においても、1 方向入力時及び 3 方向同時入力時の応答の差は小さく、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響はほとんどないことを確認した。

「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、本検討結果により、ねじれを考慮しないことは妥当と考える。

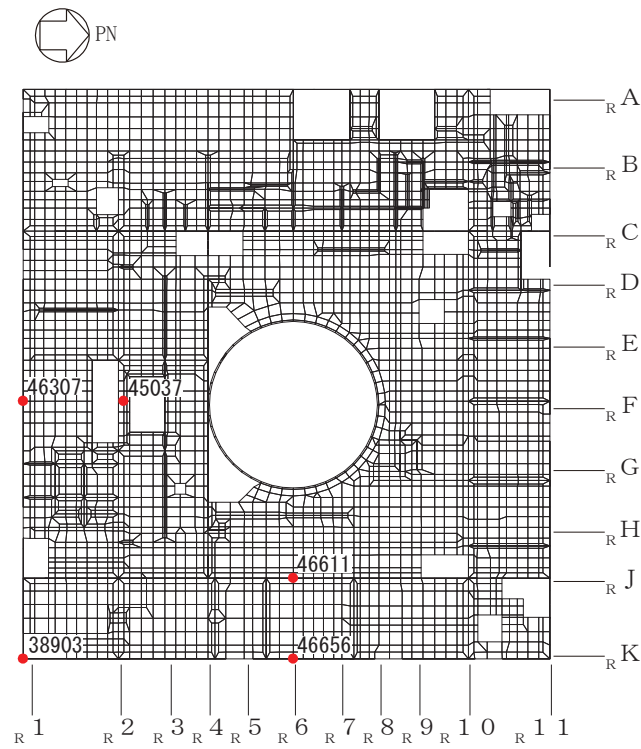


(a) 3F (O. P. 33.2m)

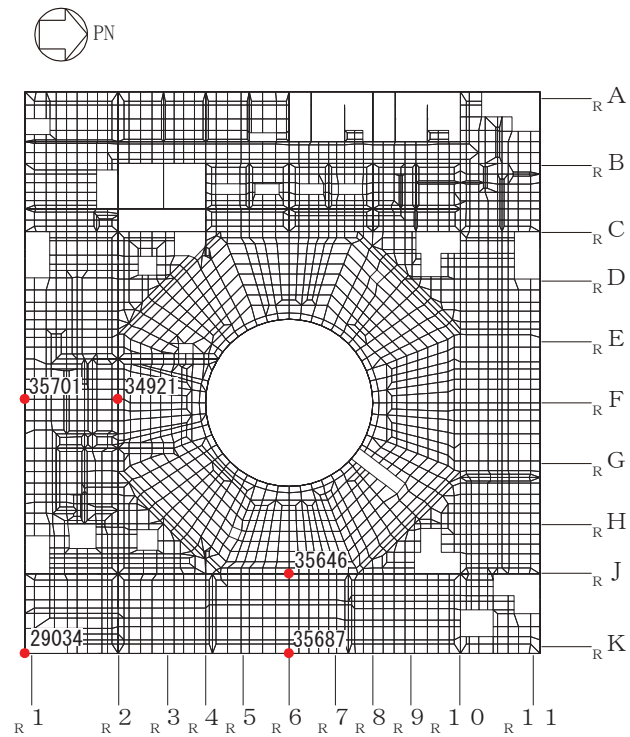


(b) 2F (O. P. 22.5m)

図 3-5(1) 応答評価位置(1/3)

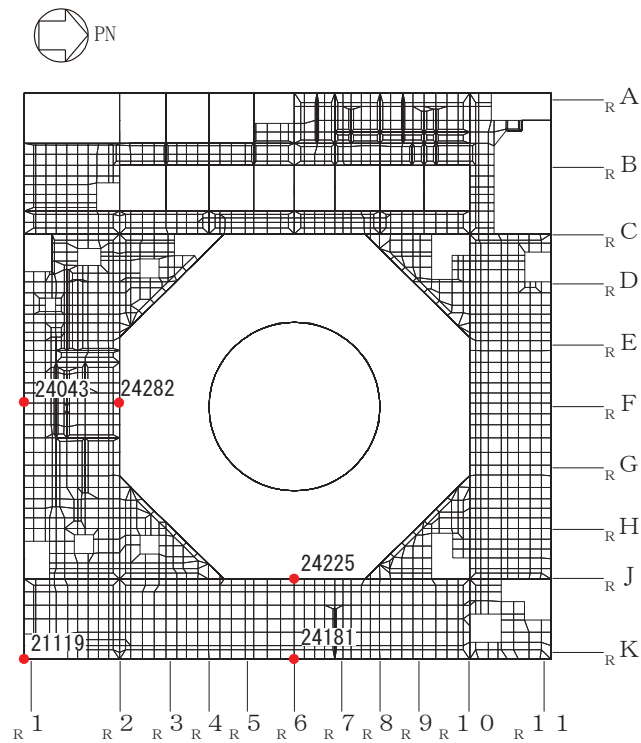


(c) 1F (O.P. 15.0m)

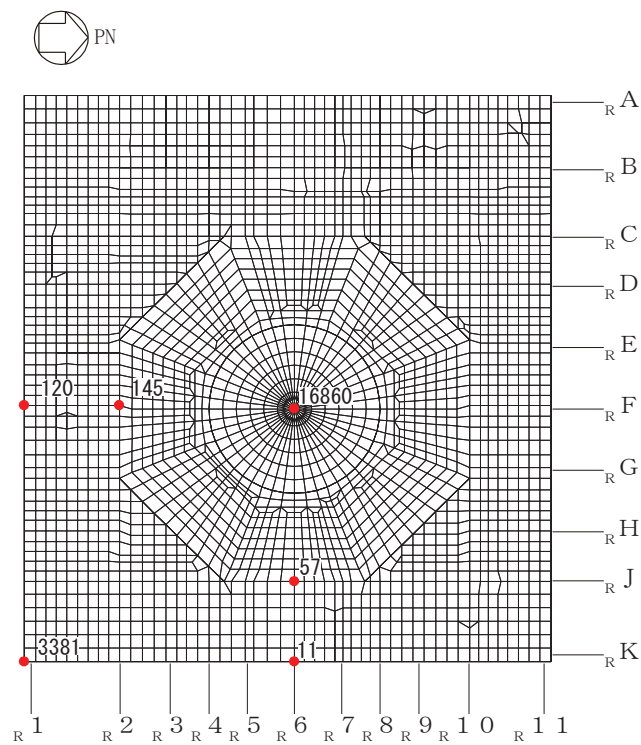


(d) B1F (O.P. 6.0m)

図 3-5(2) 応答評価位置(2/3)



(e) B2F (O. P. -0.8m)



(f) B3F (O. P. -8.1m)

図 3-5(3) 応答評価位置(3/3)

表 3-5(1) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (1/12)

(a) 0. P. 33. 2m 外壁部

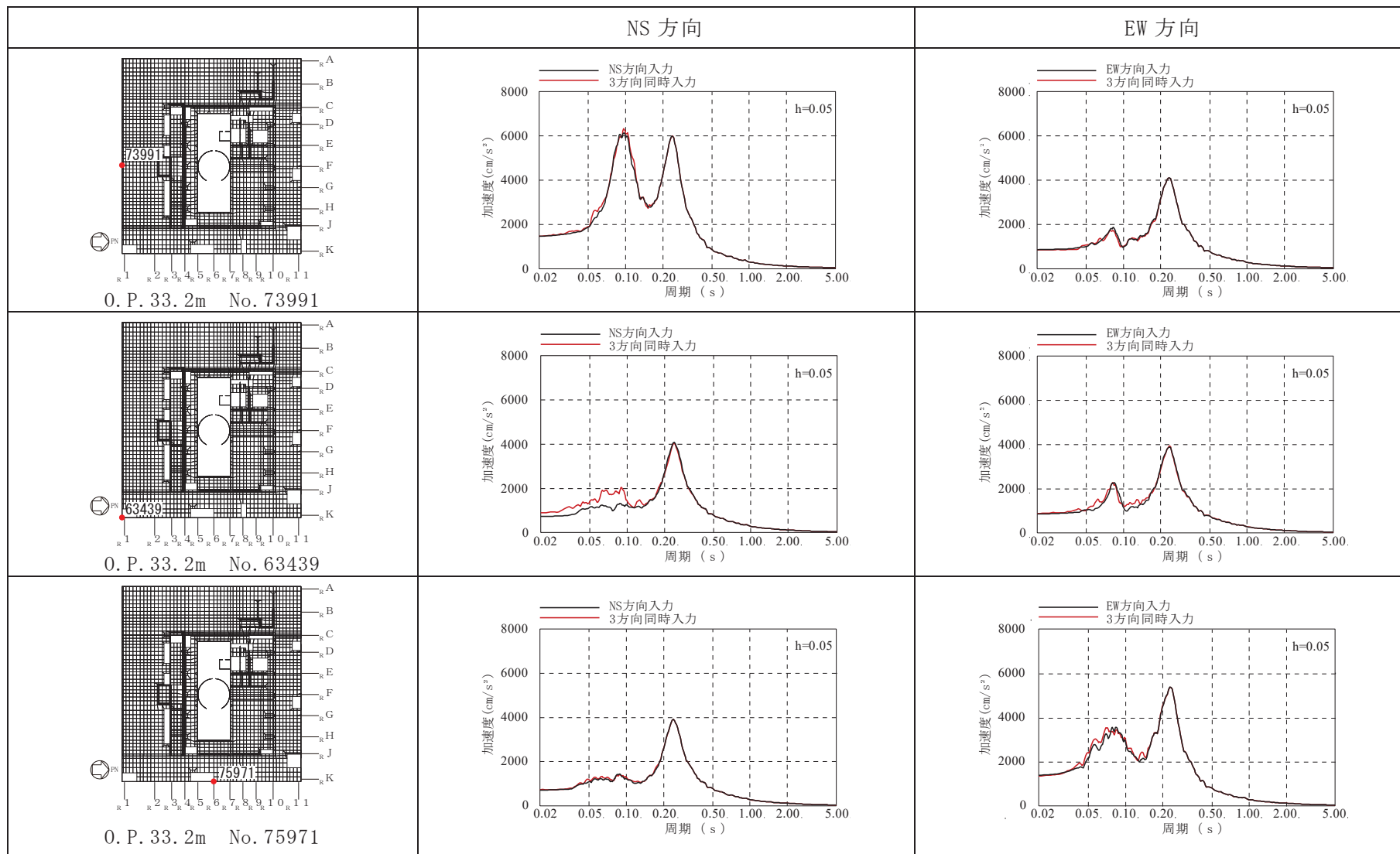


表 3-5(2) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (2/12)

(b) O. P. 33. 2m

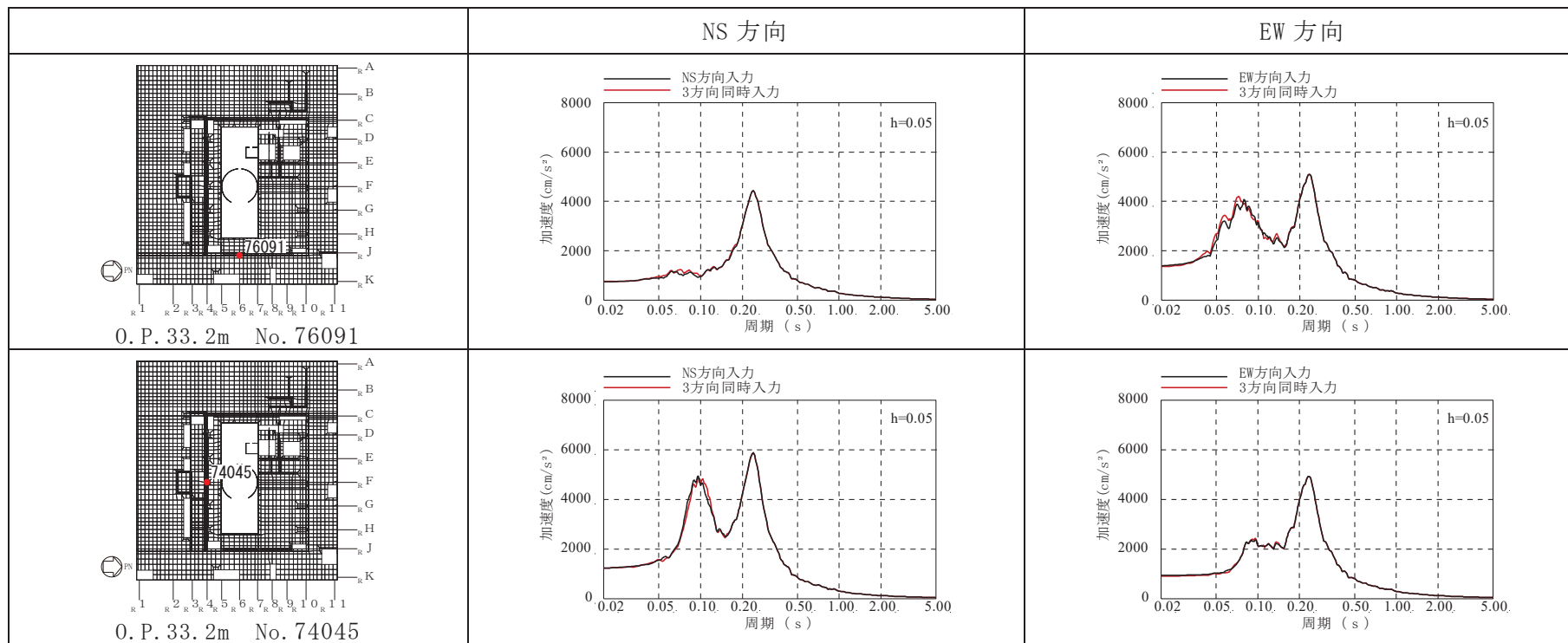


表 3-5(3) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (3/12)

(c) O.P. 22.5 外壁部

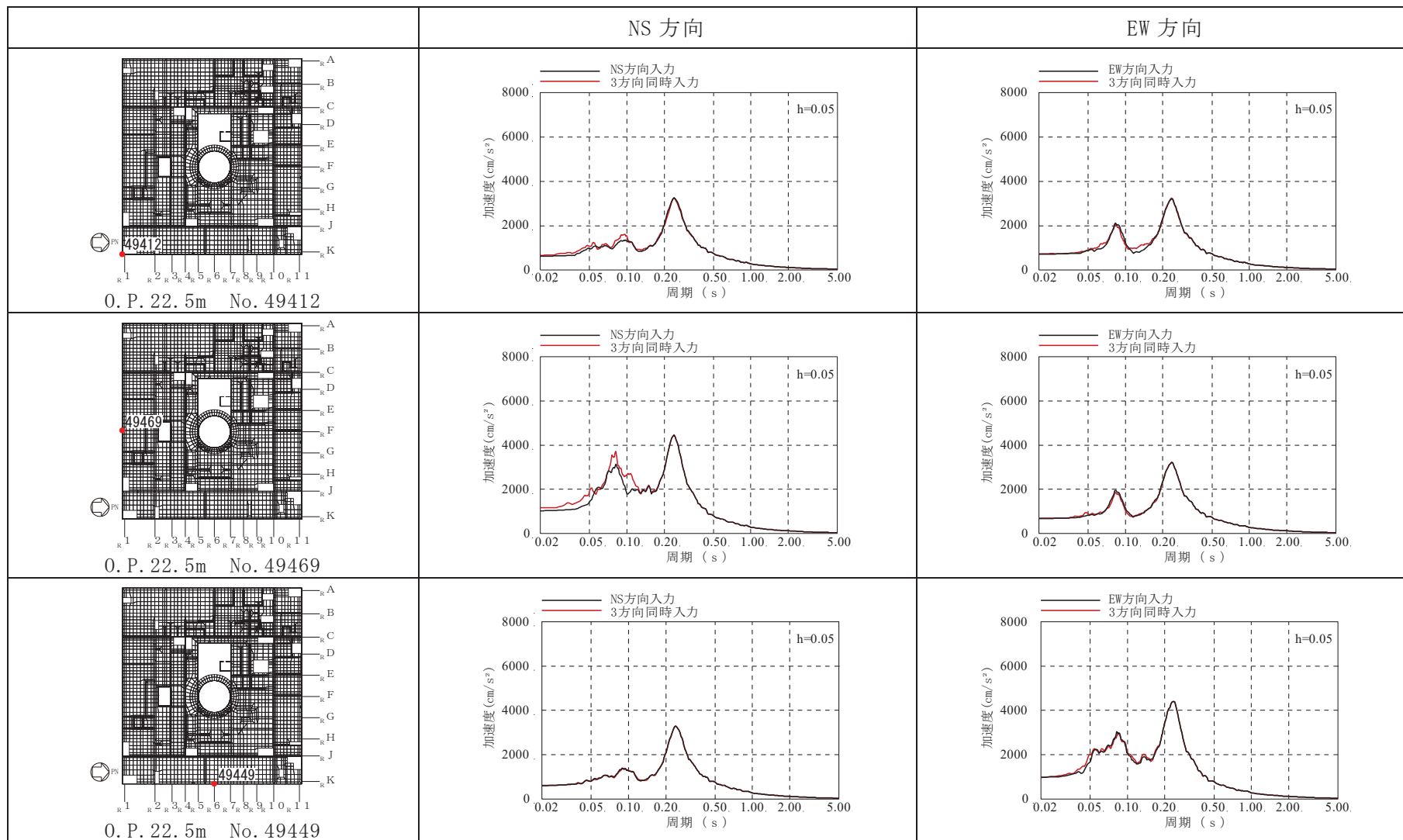


表 3-5(4) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (4/12)

(d) O.P. 22.5m

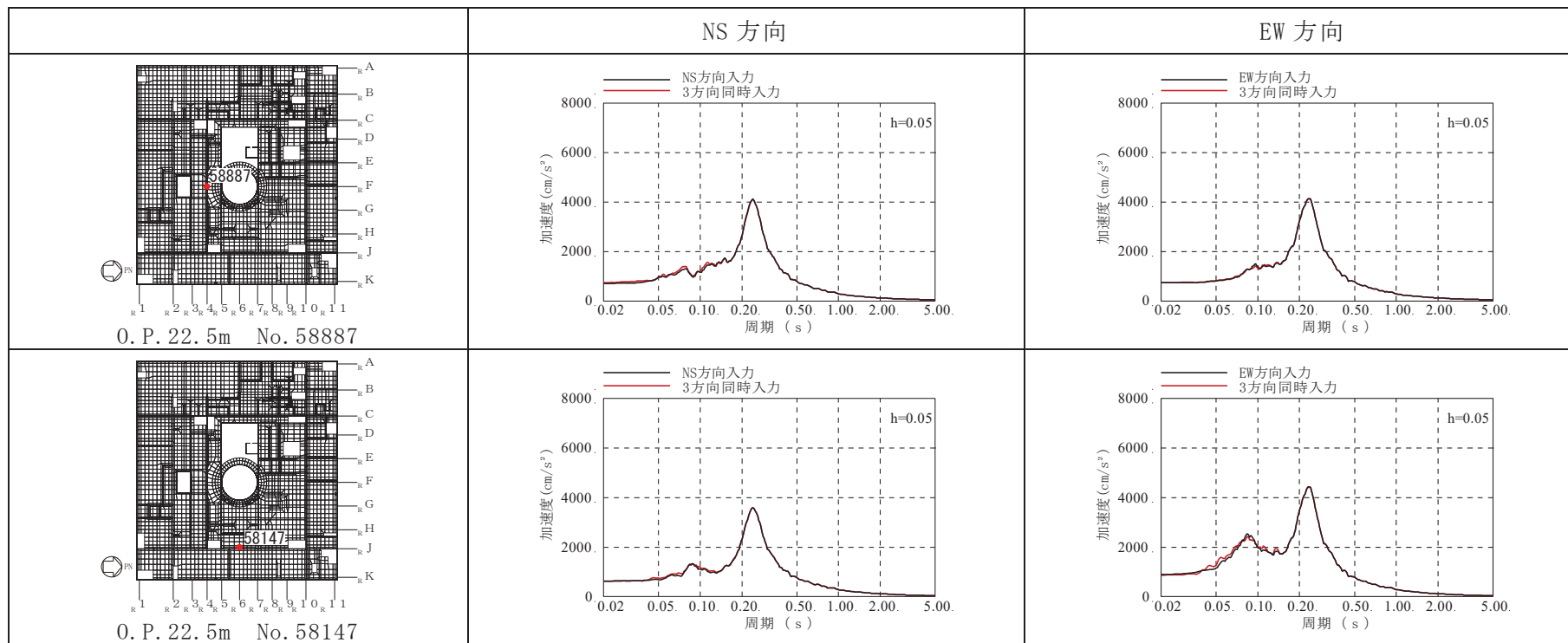


表 3-5(5) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (5/12)

(e) 0. P. 15. 0m 外壁部

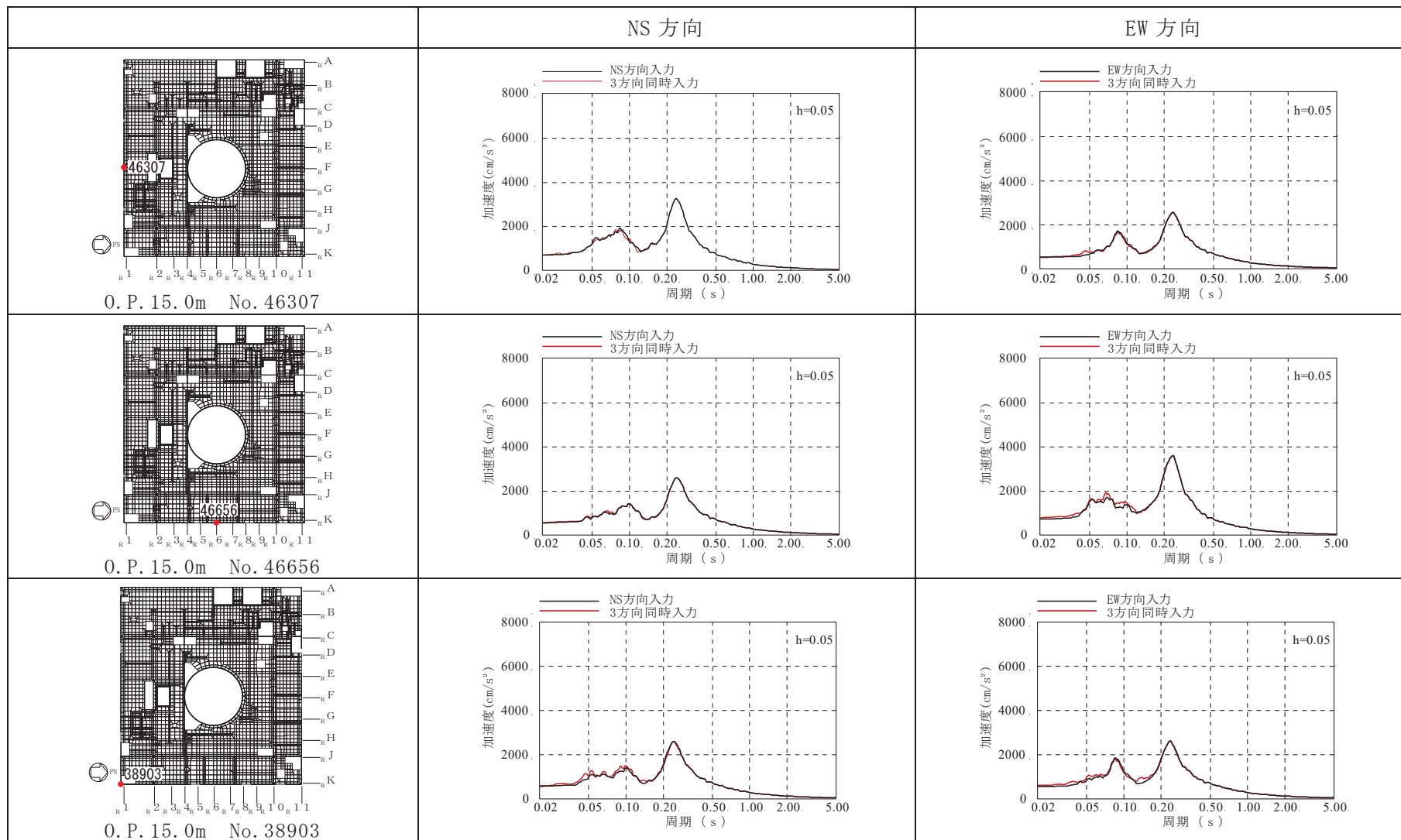


表 3-5(6) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (6/12)

(f) O. P. 15.0m

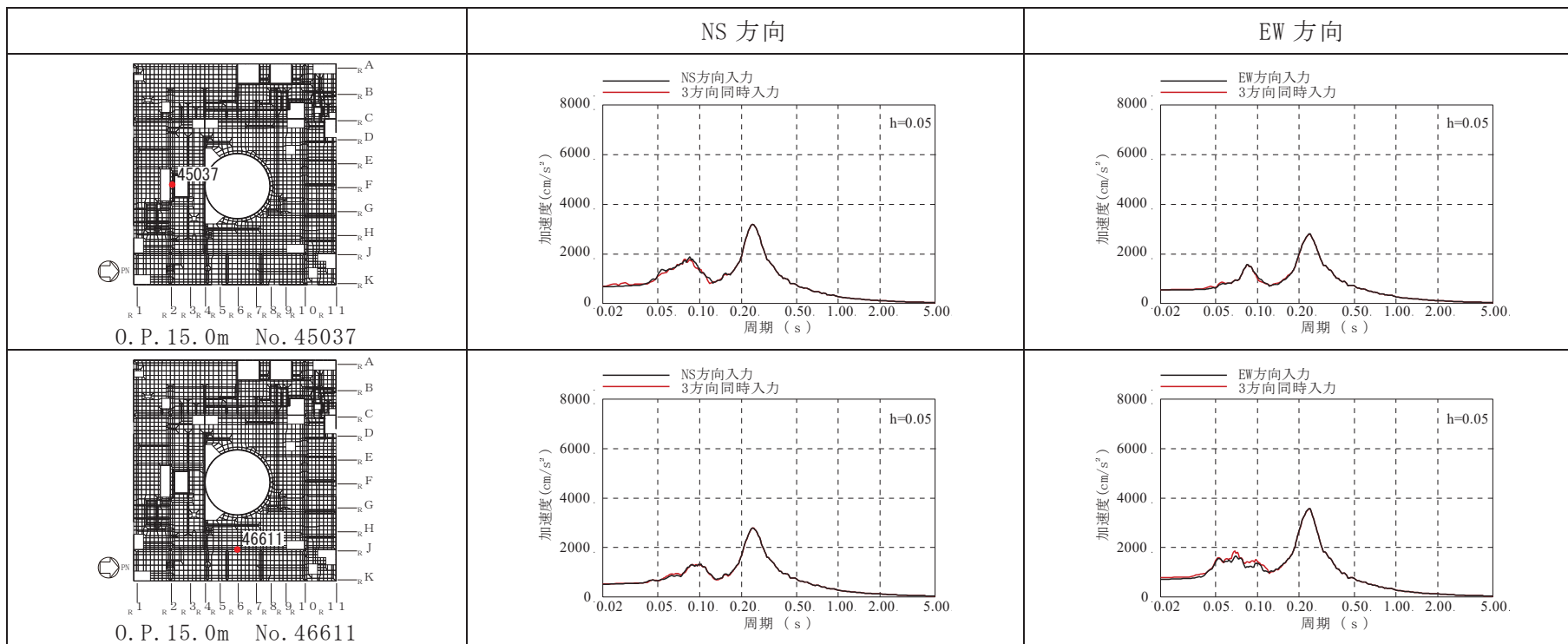


表 3-5(7) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (7/12)

(g) O.P. 6.0m 外壁部

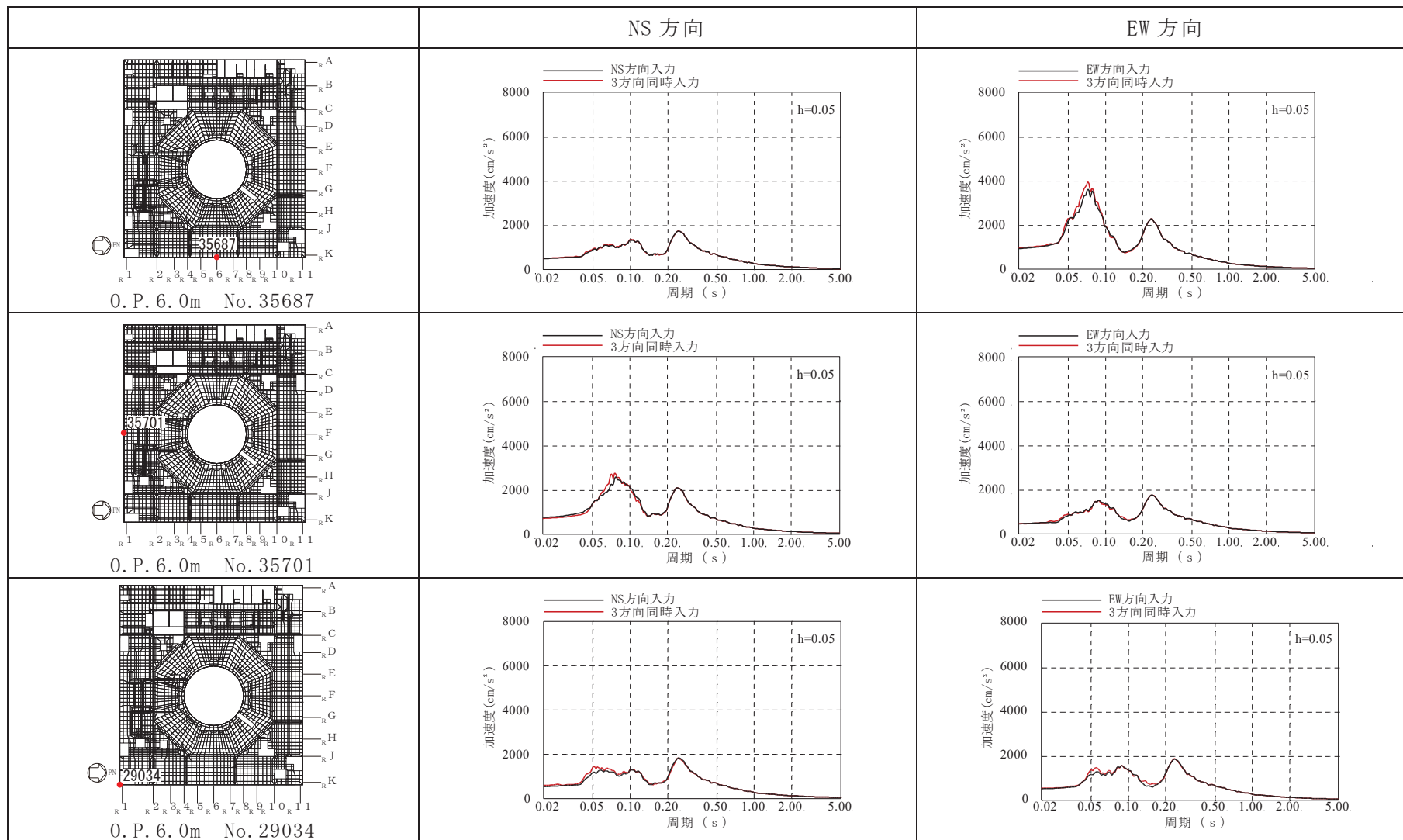


表 3-5(8) 3次元 FEM モデルの 3 方向同時入力及び 1 方向入力の応答比較 (S d - D 2) (8/12)

(h) O. P. 6. 0m

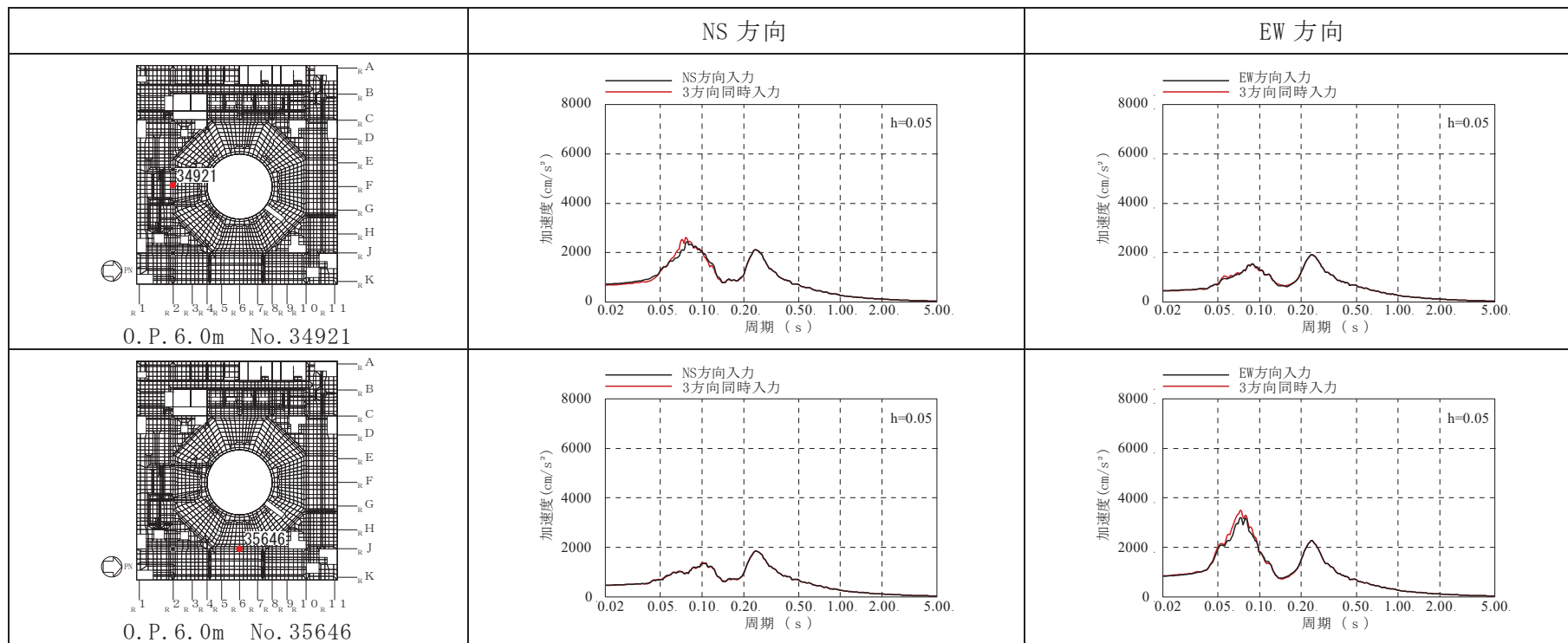


表 3-5(9) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (9/12)

(i) 0. P. -0.8m 外壁部

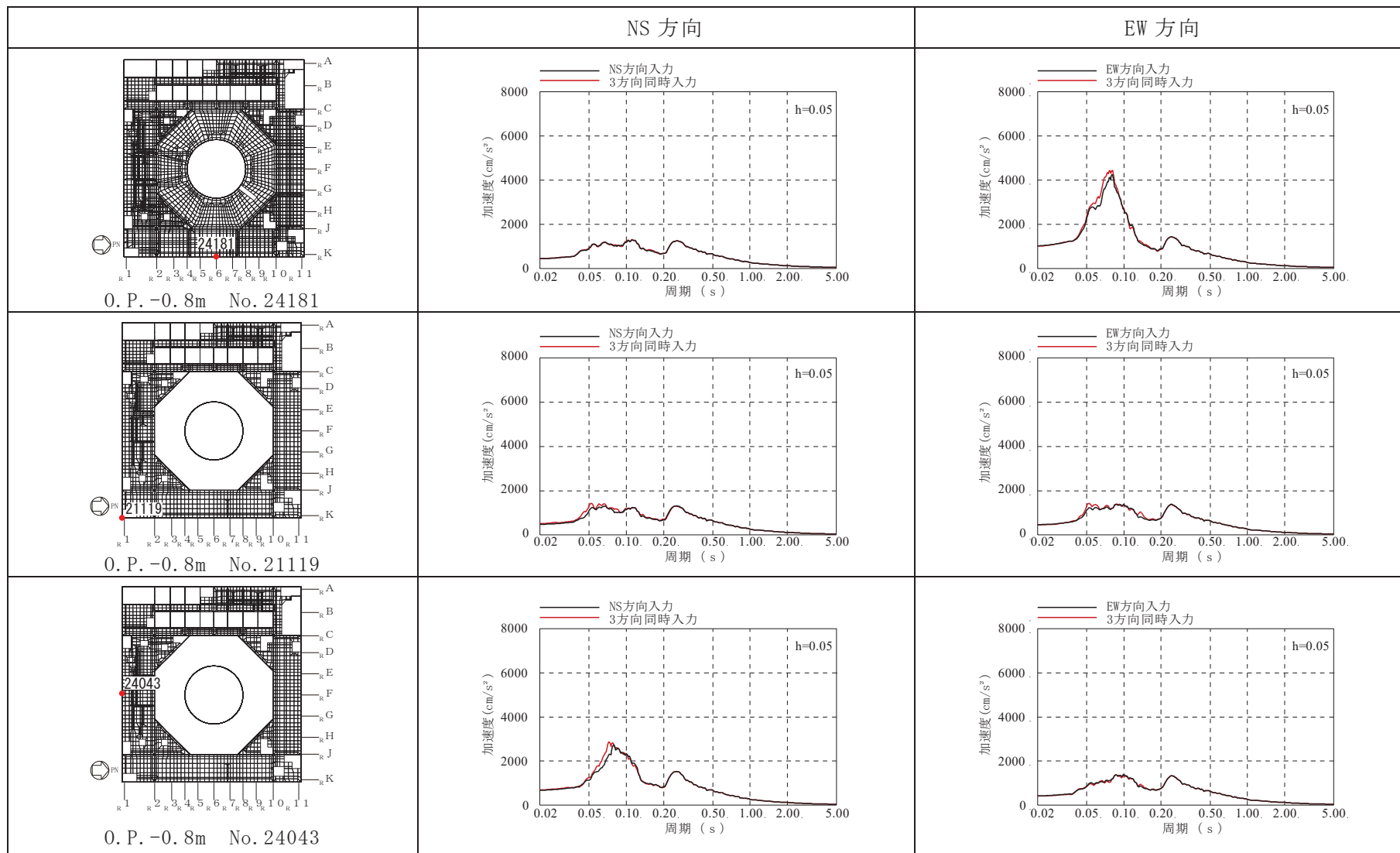


表 3-5(10) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (10/12)

(j) O. P. -0.8m

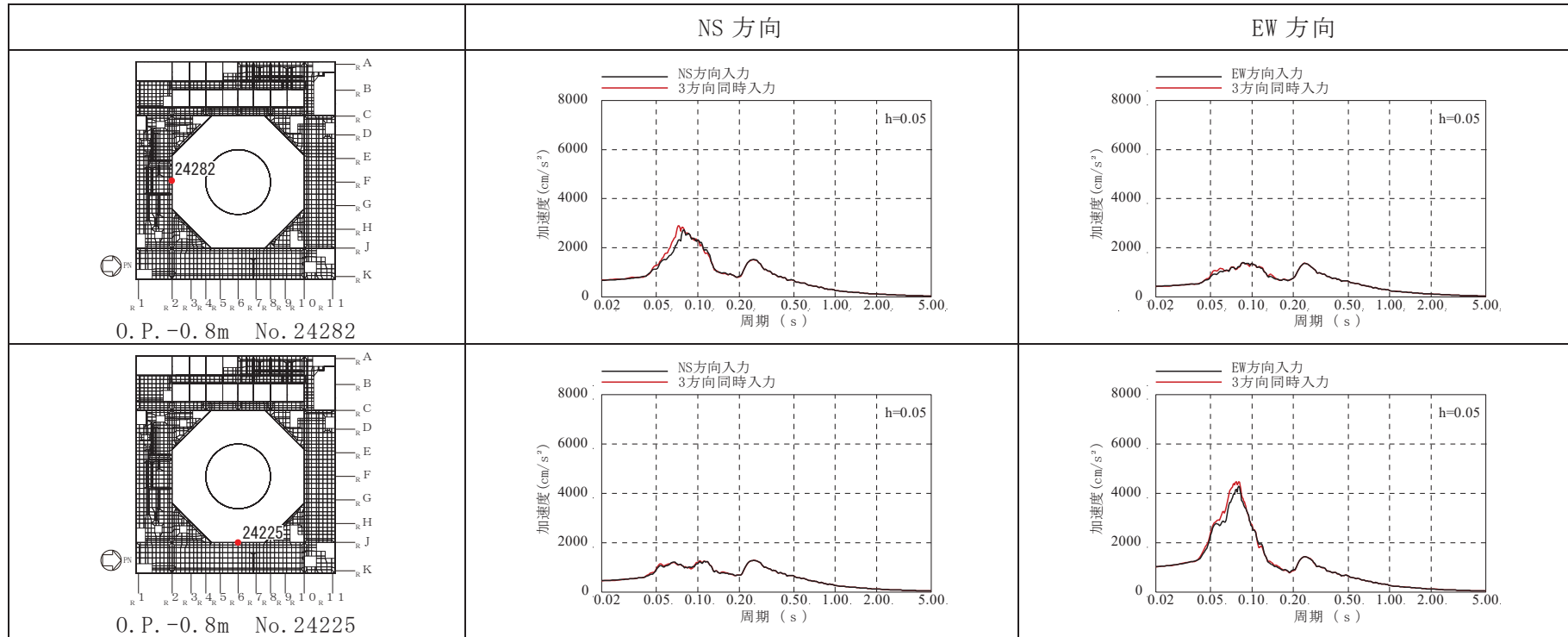


表 3-5(11) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (11/12)

(k) 0.P. -8.1m 外壁部

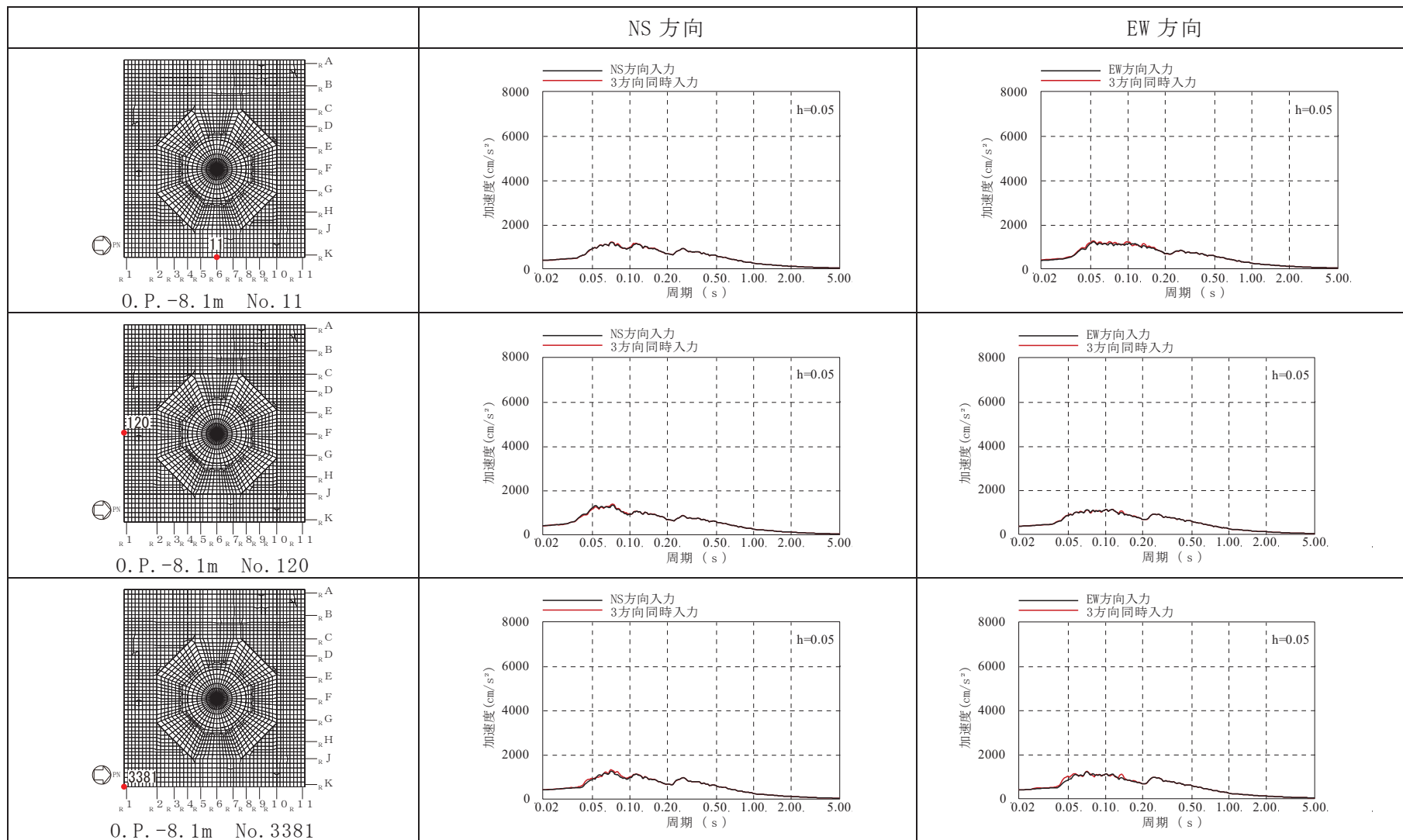
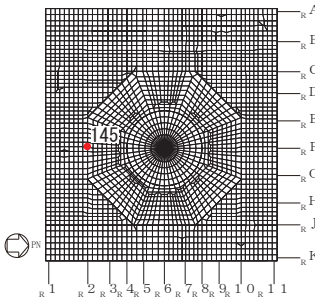
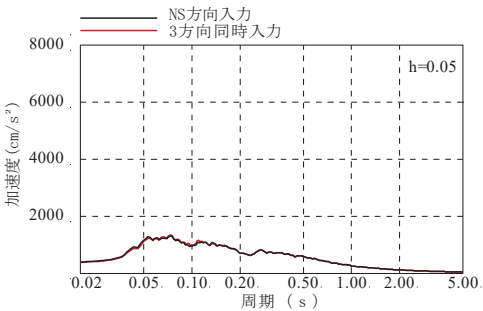
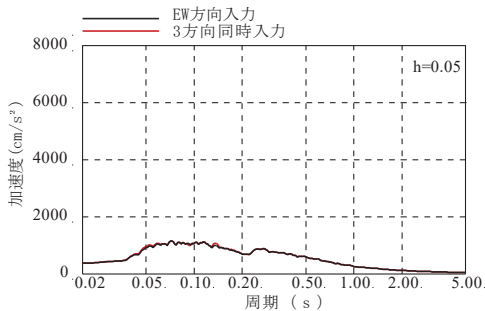
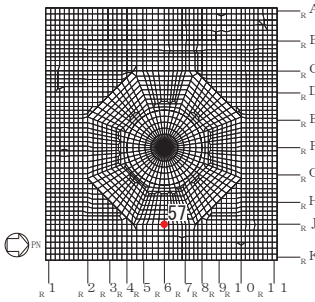
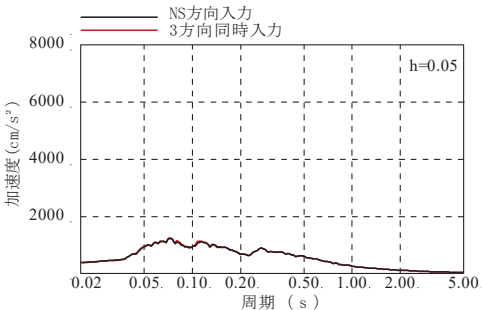
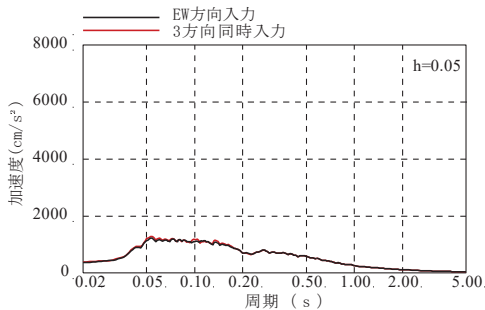
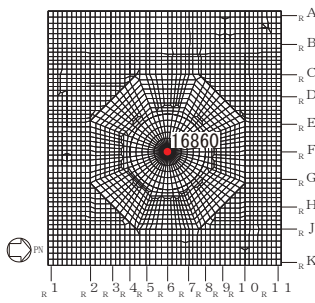
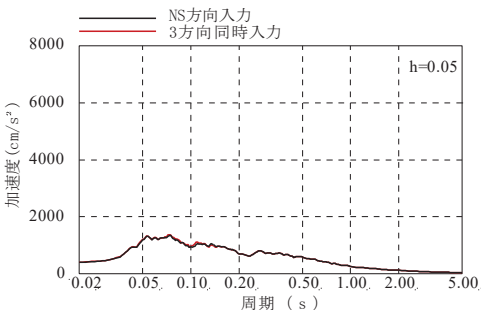
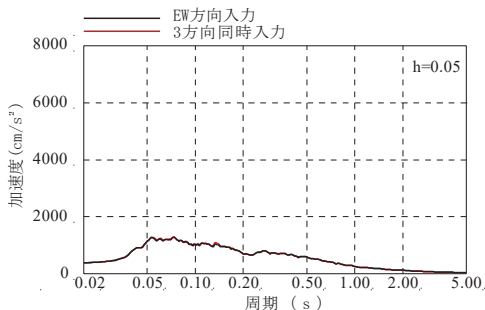


表 3-5(12) 3次元 FEM モデルの 3方向同時入力及び 1方向入力の応答比較 (S d - D 2) (12/12)

(1) O.P. -8.1m

	NS 方向	EW 方向
 <p>O.P. -8.1m No. 145</p>		
 <p>O.P. -8.1m No. 57</p>		
 <p>O.P. -8.1m No. 16860</p>		

3.2.4 まとめ

3次元 FEM モデルを用いて地震応答解析を実施し、応答性状について分析・考察を行った。

基礎のロッキング振動による鉛直方向への影響について、ロッキング振動の影響は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、3次元 FEM 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、3次元 FEM モデルの応答及び質点系モデルの応答を比較する。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つの項目について検討を行う。

①3次元 FEM モデル及び質点系モデルの最大応答値（最大応答加速度）の比較検討

②3次元的な応答特性（応答補正率）を考慮した建屋影響検討

なお、質点系モデルは添付書類「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 3次元 FEM モデル及び質点系モデルの最大応答値の比較検討

3次元 FEM モデル及び質点系モデルの最大応答値（最大応答加速度）の比較を行い、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3次元 FEM モデルの節点としては、図 3-6 に示す節点とした。

比較した結果を図 3-7 及び図 3-8 に示す。なお、図 3-7 及び図 3-8 における3次元 FEM モデルの最大応答加速度は、図 3-6 に示す節点における最大応答加速度をレベルごと通りごとに平均した値である。

両モデル間で、建屋下層部の最大応答加速度はおおむね対応しているが、建屋上部ほど質点系モデルの応答が大きくなる傾向が見られる。

したがって、質点系モデルによる応答評価は保守性を有していると考えられるが、「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。

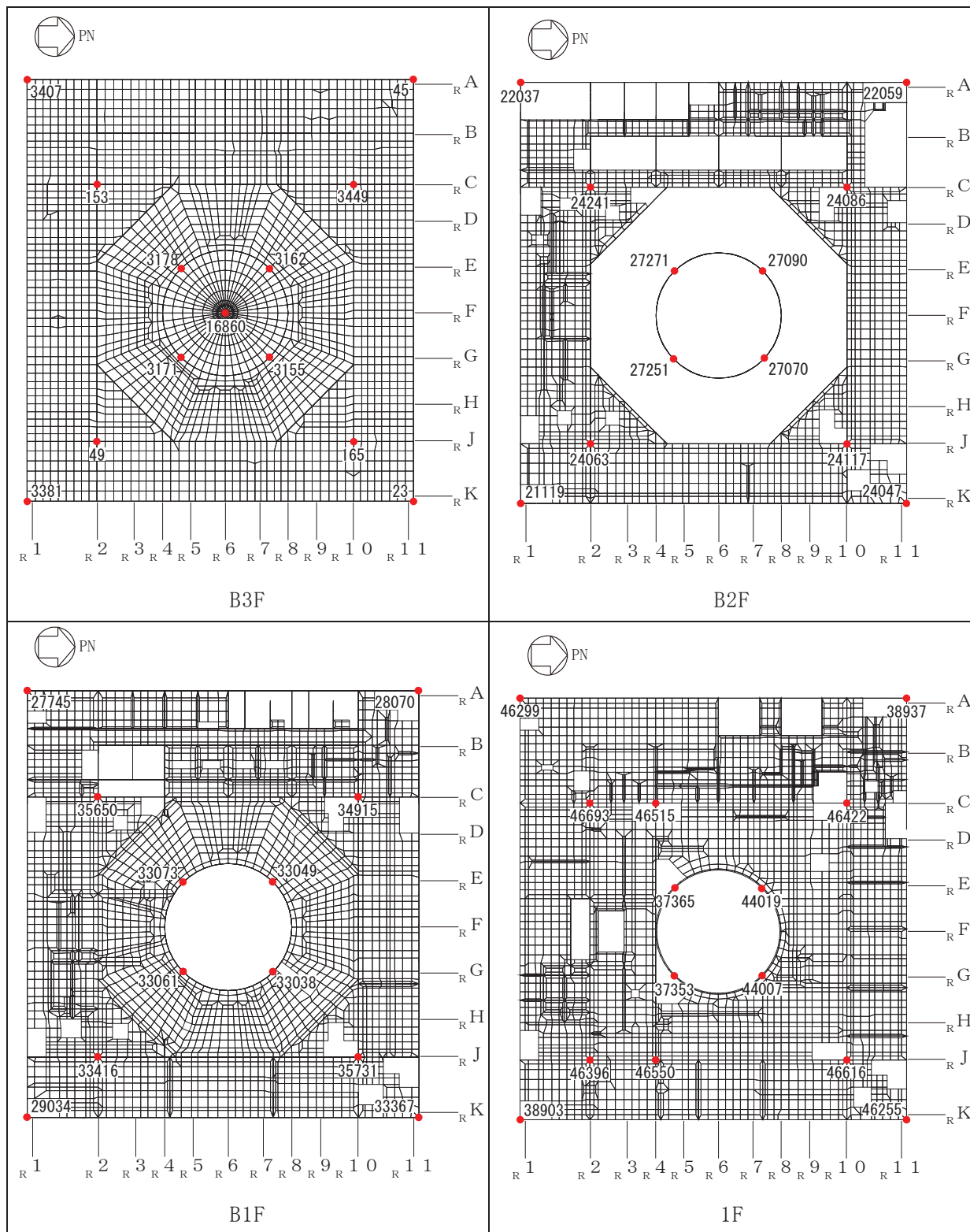


図 3-6(1) 応答評価位置(1/2)

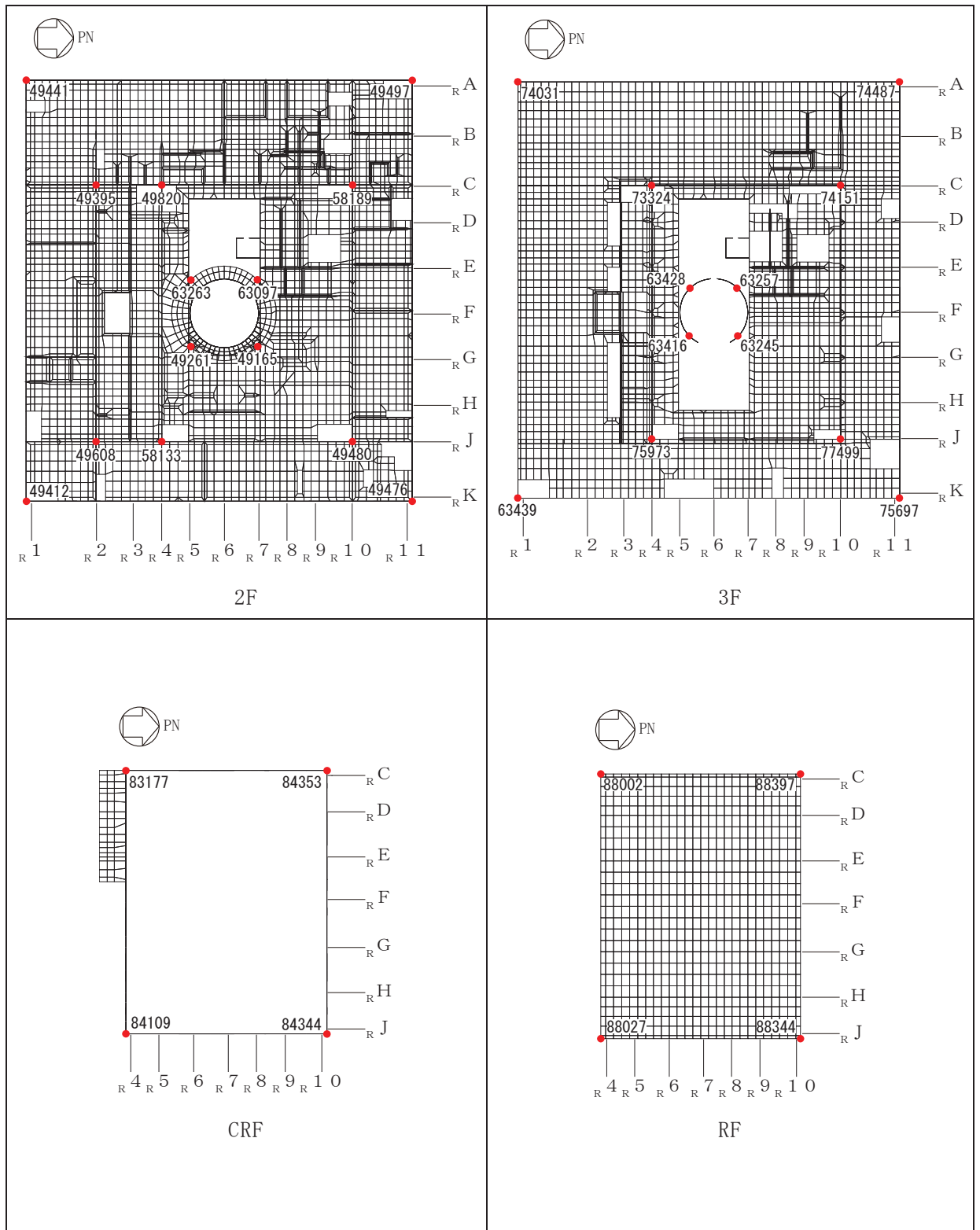
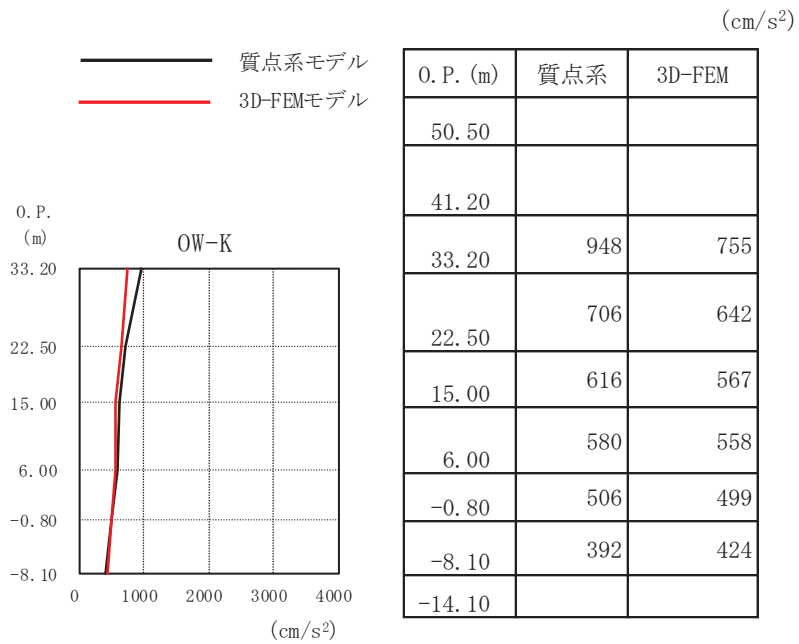
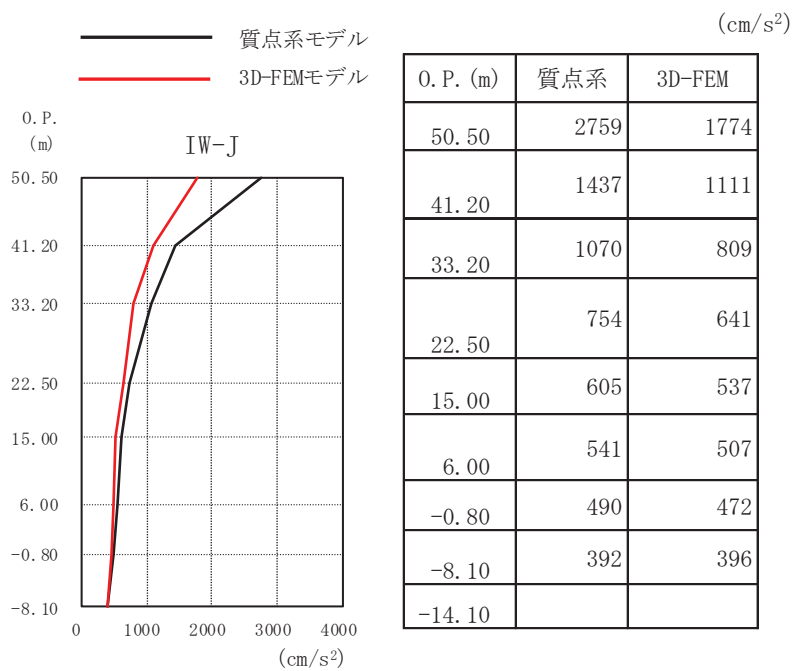


図 3-6(2) 応答評価位置(2/2)

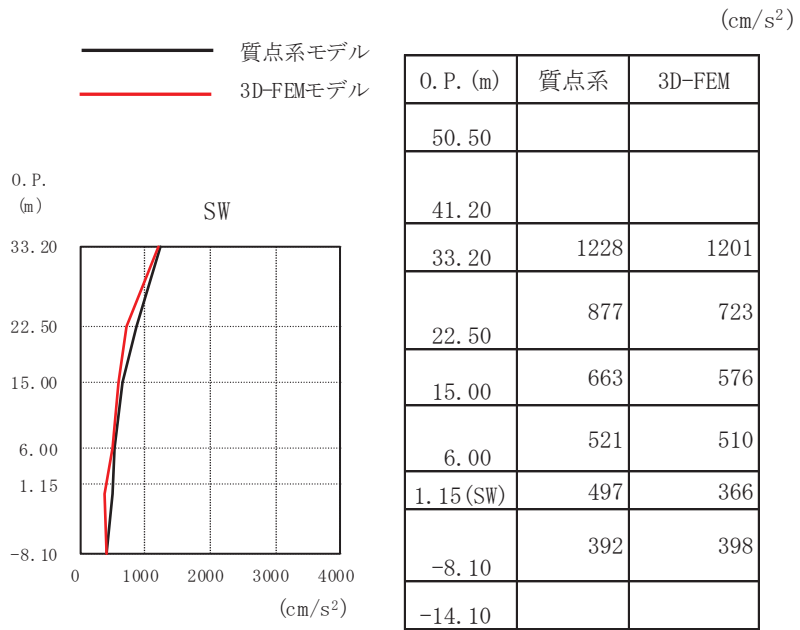


OW-K

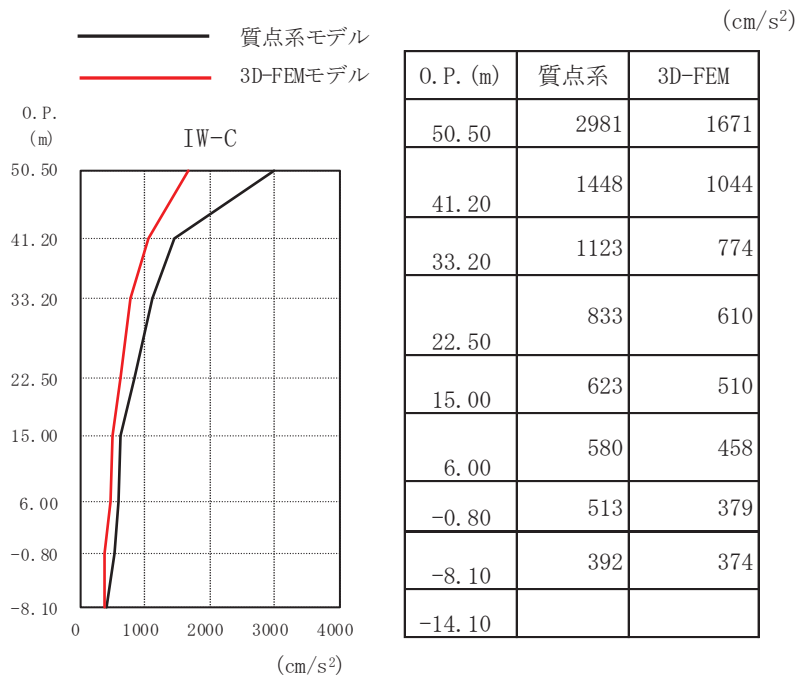


IW-J

図 3-7(1) 最大加速度の比較 NS 方向 (1/3)

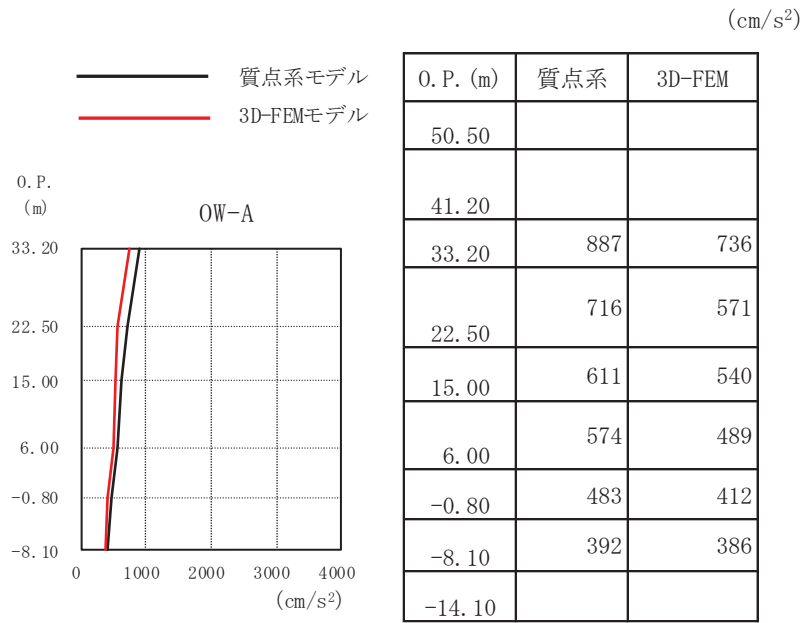


SW



IW-C

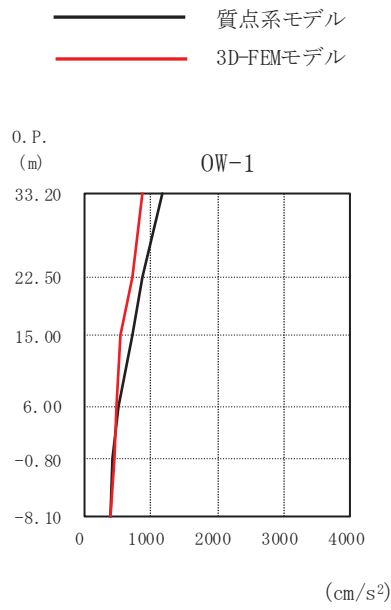
図 3-7(2) 最大加速度の比較 NS 方向(2/3)



OW-A

図 3-7(3) 最大加速度の比較 NS 方向 (3/3)

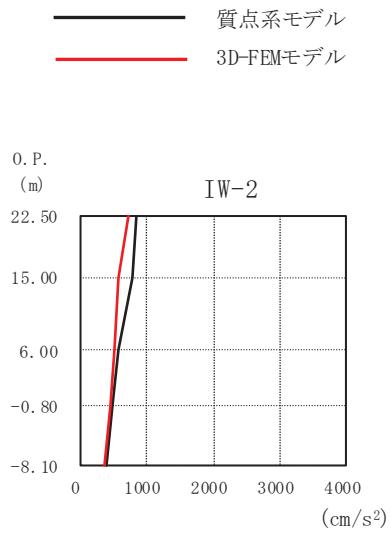
(cm/s²)



O.P. (m)	質点系	3D-FEM
50.50		
41.20		
33.20	1179	862
22.50	868	710
15.00	738	546
6.00	526	497
-0.80	423	443
-8.10	382	399
-14.10		

OW-1

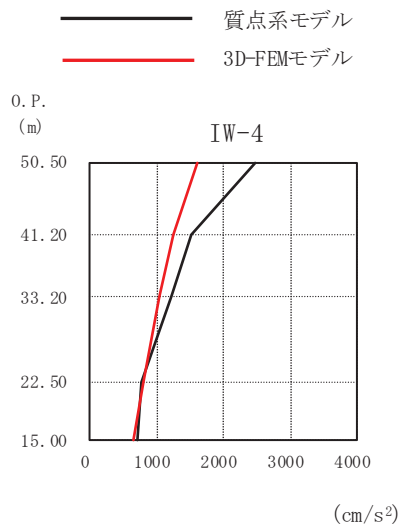
(cm/s²)



O.P. (m)	質点系	3D-FEM
50.50		
41.20		
33.20		
22.50	855	707
15.00	779	567
6.00	565	502
-0.80	471	455
-8.10	382	376
-14.10		

IW-2

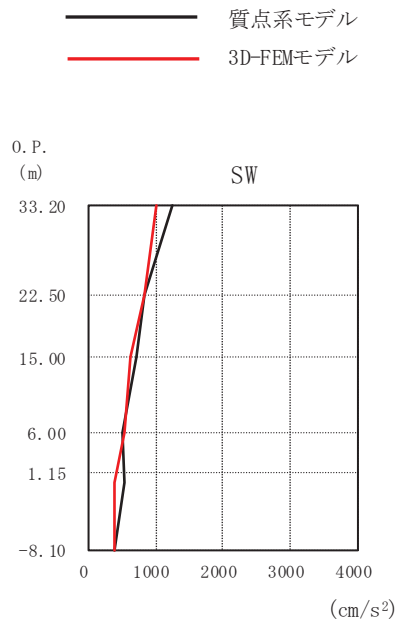
図 3-8(1) 最大加速度の比較 EW 方向 (1/3)



(cm/s²)

O.P. (m)	質点系	3D-FEM
50.50	2482	1607
41.20	1517	1262
33.20	1208	1051
22.50	784	807
15.00	698	655
6.00		
-0.80		
-8.10		
-14.10		

IW-4

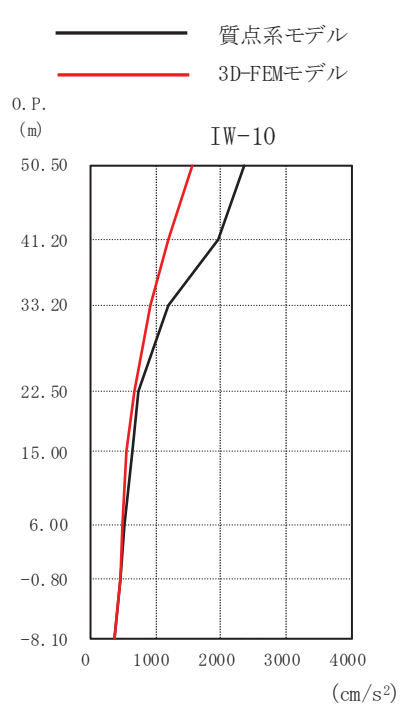


(cm/s²)

O.P. (m)	質点系	3D-FEM
50.50		
41.20		
33.20	1251	1022
22.50	830	838
15.00	719	622
6.00	499	542
1.15 (SW)	546	373
-8.10	382	381
-14.10		

SW

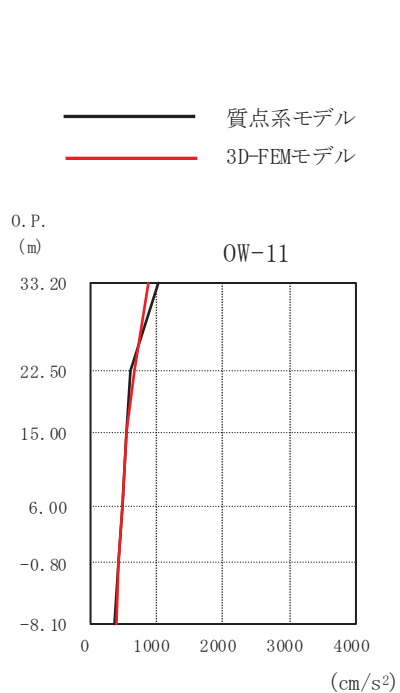
図 3-8(2) 最大加速度の比較 EW 方向 (2/3)



(cm/s²)

O. P. (m)	質点系	3D-FEM
50.50	2350	1565
41.20	1949	1199
33.20	1207	914
22.50	738	674
15.00	646	565
6.00	526	500
-0.80	452	445
-8.10	382	372
-14.10		

IW-10



(cm/s²)

O. P. (m)	質点系	3D-FEM
50.50		
41.20		
33.20	1028	872
22.50	628	669
15.00	563	553
6.00	497	483
-0.80	431	438
-8.10	382	396
-14.10		

OW-11

図 3-8(3) 最大加速度の比較 EW 方向 (3/3)

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 3次元 FEM 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 3-9 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 ξ 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、添付書類「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 τ に応答補正率 ξ 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各軸のせん断スケルトンカーブ上にプロットし、せん断ひずみが評価基準値 (2.0×10^{-3}) を超えないことを確認する。ここで、第1折点を超える場合は、エネルギー一定則によりせん断ひずみを評価する。エネルギー一定則によるせん断ひずみの評価方法を図 3-10 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は図 3-6 に示した節点である。質点系モデルでの評価部位を図 3-11 に示す。

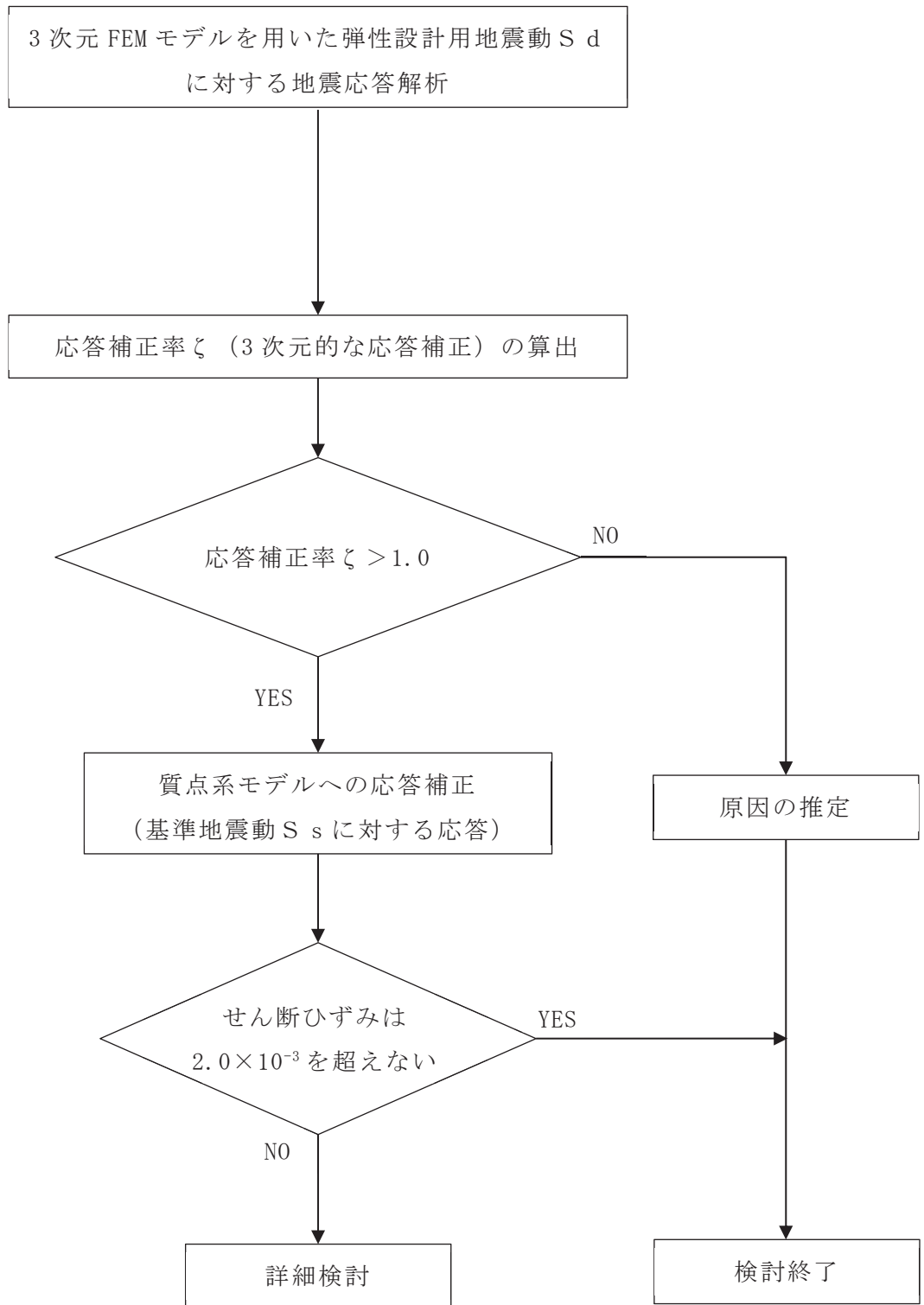
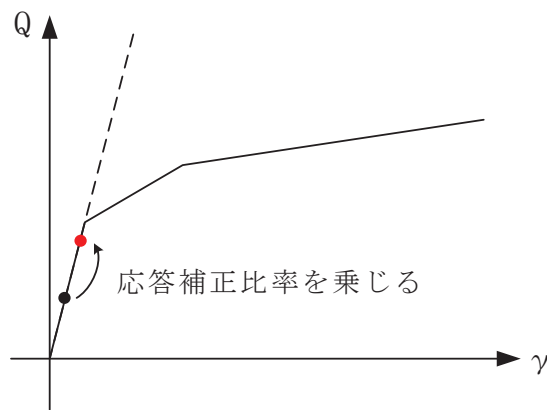
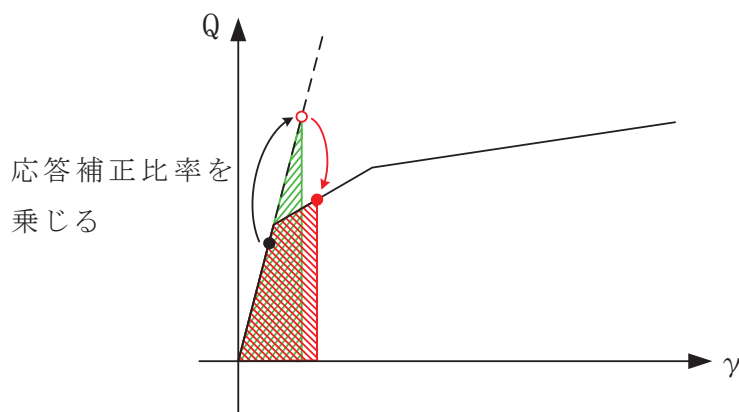


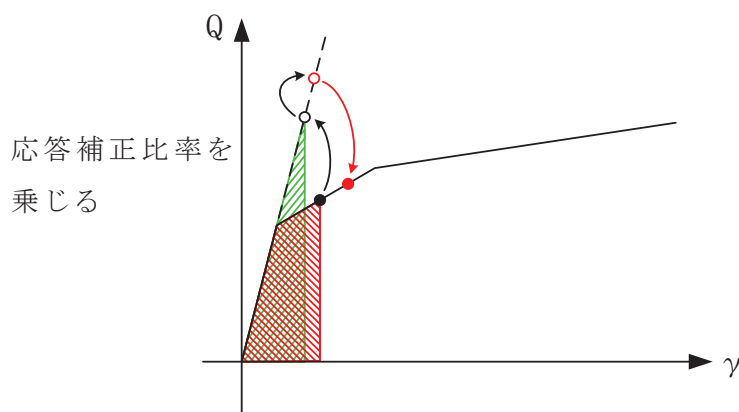
図 3-9 検討フロー



弾性直線上において，原設計による応答結果に応答補正比率を乗じる。



応答補正比率を乗じた際，第1折点を超える場合，弾性直線の延長線上に補正後の評価結果をプロットする。その後，エネルギー一定則で，評価線上にプロットする。



原設計において第1折点を超えている場合は，エネルギー一定則で弾性直線の延長に戻した後，補正比率を乗じる。（以下，上記に準じる）

図 3-10 エネルギー一定則によるせん断ひずみの評価方法

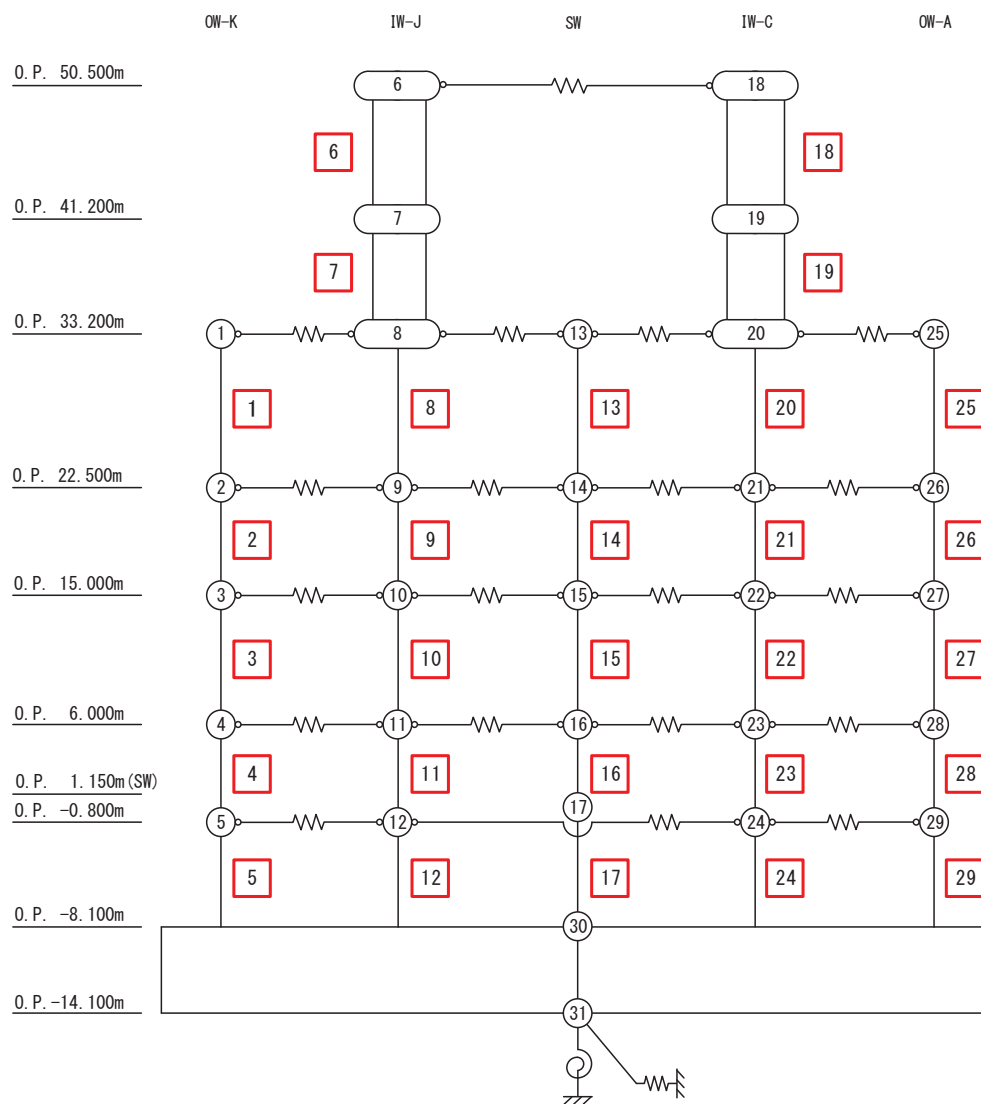


図 3-11(1) 質点系モデルの評価部位 (NS 方向) (1/2)

OW-1

IW-2

IW-4

SW

IW-10

OW-11

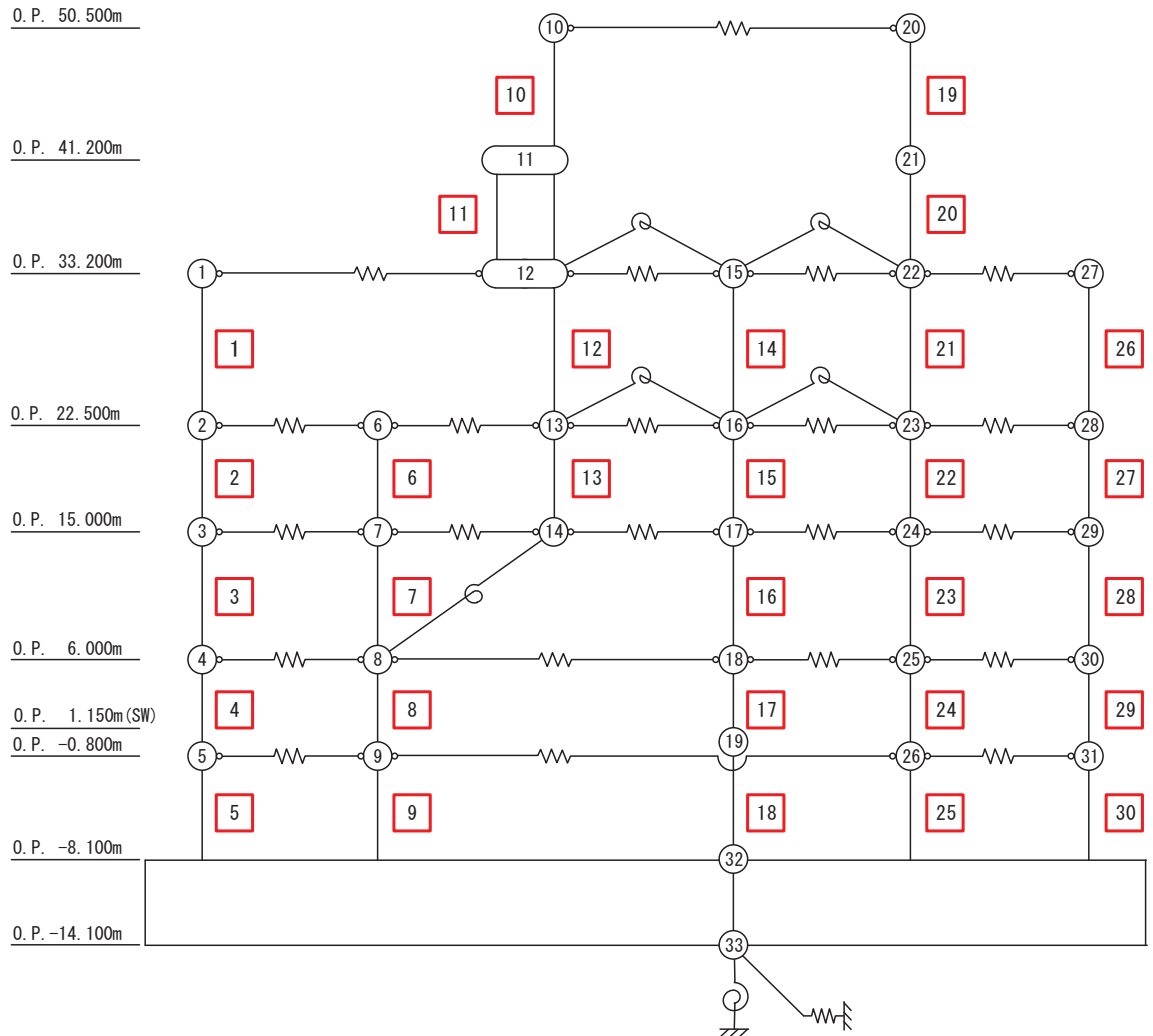


図 3-11(2) 質点系モデルの評価部位 (EW 方向) (2/2)

(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 ζ を算出する。

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

得られた α を用いて、建屋評価用の応答補正比率 ζ を以下のように算出する。

- ① 応答補正比率 α は評価点ごとに定める。
- ② 応答補正比率 α は保守的な評価を実施するため、1.0 以上とする。

応答補正比率 ζ の算出式を以下に示す。

$$\text{建屋評価用の応答補正比率 } \zeta = \text{Max}(\alpha, 1.0)$$

ここで、

3 方向同時入力の応答補正比率 α

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

(ただし、 ζ を算出する場合は、 $\alpha \geq 1.0$)

応答補正比率 α 、 ζ の算定結果を表 3-6 及び表 3-7 に示す。応答補正比率 ζ は 1.0~1.47 の範囲にある。

表 3-6(1) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (NS 方向) (1/5)
(OW-K)

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α ②/①	NS方向 応答補正比率 ζ
O.P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
33.2	1	63439	741	897	1.22	1.47
		75697	769	1125	1.47	
22.5	2	49412	622	671	1.08	1.22
		49476	661	806	1.22	
15.0	3	38903	559	593	1.07	1.07
		46255	575	556	0.97	
6.0	4	29034	539	585	1.09	1.09
		33367	577	527	0.92	
-0.8	5	21119	477	514	1.08	1.08
		24047	521	480	0.93	

表 3-6(2) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (NS 方向) (2/5)
(IW-J)

評価点			最大応答加速度 (cm/s ²)		α ②/①	NS方向 応答補正比率 ζ
O. P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
50.5	6	88027	1777	1779	1.01	1.03
		88344	1770	1812	1.03	
41.2	7	84109	1082	1066	0.99	1.01
		84344	1141	1151	1.01	
33.2	8	75973	821	871	1.07	1.08
		77499	797	855	1.08	
22.5	9	49608	649	625	0.97	1.05
		58133	630	597	0.95	
		49480	644	674	1.05	
15.0	10	46396	536	562	1.05	1.05
		46550	524	543	1.04	
		46616	550	538	0.98	
6.0	11	33416	499	518	1.04	1.04
		35731	514	475	0.93	
-0.8	12	24063	467	476	1.03	1.03
		24117	477	453	0.95	

表 3-6(3) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (NS 方向) (3/5)
(SW)

評価点			最大応答加速度 (cm/s ²)		α ②/①	NS方向 応答補正比率 ζ
O.P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
33.2	13	63428	1230	1224	1.00	1.07
		63257	1230	1307	1.07	
		63416	1151	1145	1.00	
		63245	1193	1273	1.07	
22.5	14	63263	687	704	1.03	1.15
		63097	769	787	1.03	
		49261	717	734	1.03	
		49165	718	824	1.15	
15.0	15	37365	566	622	1.10	1.17
		44019	591	603	1.03	
		37353	553	646	1.17	
		44007	597	580	0.98	
6.0	16	33073	511	479	0.94	1.03
		33049	541	542	1.01	
		33061	499	513	1.03	
		33038	490	483	0.99	
1.15	17	27271	366	367	1.01	1.14
		27090	387	404	1.05	
		27251	355	382	1.08	
		27070	356	403	1.14	

表 3-6(4) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (NS 方向) (4/5)
(IW-C)

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α ②/①	NS方向 応答補正比率 ζ
O. P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
50.5	18	88002	1664	1856	1.12	1.12
		88397	1678	1762	1.06	
41.2	19	83177	1075	1098	1.03	1.05
		84353	1013	1061	1.05	
33.2	20	73324	752	762	1.02	1.02
		74151	797	789	0.99	
22.5	21	49395	622	636	1.03	1.05
		49820	587	602	1.03	
		58189	621	650	1.05	
15.0	22	46693	527	564	1.08	1.08
		46515	490	516	1.06	
		46422	512	534	1.05	
6.0	23	35650	480	514	1.08	1.08
		34915	436	430	0.99	
-0.8	24	24241	392	425	1.09	1.09
		24086	365	377	1.04	

表 3-6(5) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (NS 方向) (5/5)
(0W-A)

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α ②/①	NS方向 応答補正比率 ζ
O.P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
33.2	25	74031	695	804	1.16	1.24
		74487	776	959	1.24	
22.5	26	49441	601	588	0.98	1.29
		49497	542	696	1.29	
15.0	27	46299	589	573	0.98	1.02
		38937	492	499	1.02	
6.0	28	27745	504	487	0.97	1.04
		28070	474	490	1.04	
-0.8	29	22037	414	411	1.00	1.02
		22059	410	418	1.02	

表 3-7(1) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (EW 方向) (1/6)
(0W-1)

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α ②/①	NS方向 応答補正比率 ζ
O.P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
33.2	1	74031	859	840	0.98	1.02
		63439	865	881	1.02	
22.5	2	49441	708	661	0.94	1.03
		49412	712	730	1.03	
15.0	3	46299	535	534	1.00	1.10
		38903	557	611	1.10	
6.0	4	27745	485	489	1.01	1.05
		29034	510	535	1.05	
-0.8	5	22037	419	418	1.00	1.00
		21119	466	454	0.98	

表 3-7(2) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (EW 方向) (2/6)
(IW-2)

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α ②/①	EW方向 応答補正比率 ζ
O.P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
22.5	6	49395	700	700	1.00	1.02
		49608	714	724	1.02	
15.0	7	46693	547	556	1.02	1.09
		46396	587	634	1.09	
6.0	8	35650	495	509	1.03	1.03
		33416	509	508	1.00	
-0.8	9	24241	436	448	1.03	1.03
		24063	474	465	0.99	

表 3-7(3) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (EW 方向) (3/6)
(IW-4)

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α ②/①	NS方向 応答補正比率 ζ
O.P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
50.5	10	88002	1629	1616	1.00	1.08
		88027	1585	1704	1.08	
41.2	11	83177	1337	1438	1.08	1.08
		84109	1187	1117	0.95	
33.2	12	73324	1124	1129	1.01	1.01
		75973	977	962	0.99	
22.5	13	49820	810	823	1.02	1.02
		58133	804	817	1.02	
15.0	14	46515	624	643	1.03	1.13
		46550	686	772	1.13	

表 3-7(4) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (EW 方向) (4/6)
(SW)

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α ②/①	EW方向 応答補正比率 ζ
O.P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
33.2	15	63428	932	899	0.97	1.00
		63257	1088	1052	0.97	
		63416	927	888	0.96	
		63245	1142	1105	0.97	
22.5	16	63263	833	842	1.02	1.05
		63097	882	925	1.05	
		49261	795	773	0.98	
		49165	842	853	1.02	
15.0	17	37365	598	575	0.97	1.11
		44019	641	656	1.03	
		37353	595	658	1.11	
		44007	656	674	1.03	
6.0	18	33073	507	492	0.97	1.07
		33049	544	580	1.07	
		33061	526	519	0.99	
		33038	590	610	1.04	
1.15	19	27271	380	396	1.05	1.16
		27090	369	426	1.16	
		27251	369	390	1.06	
		27070	375	391	1.05	

表 3-7(5) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (EW 方向) (5/6)
(IW-10)

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α ②/①	NS方向 応答補正比率 ζ
O. P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
50.5	20	88397	1541	1582	1.03	1.03
		88344	1589	1470	0.93	
41.2	21	84353	1179	1188	1.01	1.01
		84344	1219	1143	0.94	
33.2	22	74151	884	883	1.00	1.00
		77499	944	910	0.97	
22.5	23	58189	673	686	1.02	1.02
		49480	676	658	0.98	
15.0	24	46422	559	553	0.99	1.00
		46616	572	566	0.99	
6.0	25	34915	515	541	1.06	1.06
		35731	485	509	1.05	
-0.8	26	24086	446	461	1.04	1.04
		24117	444	453	1.02	

表 3-7(6) 建屋耐震性評価用の応答補正比率の算定 (EW 方向) (6/6)
(OW-11)

評価点			最大応答加速度 (cm/s^2)		α ②/①	EW方向 応答補正比率 ζ
O. P. (m)	質点番号	FEM節点	① 1 方向入力	② 3 方向入力		
33.2	27	74487	913	1044	1.15	1.15
		75697	832	774	0.94	
22.5	28	49497	675	749	1.11	1.11
		49476	664	612	0.93	
15.0	29	38937	539	588	1.10	1.10
		46255	566	563	1.00	
6.0	30	28070	452	467	1.04	1.04
		33367	515	510	1.00	
-0.8	31	22059	411	410	1.00	1.00
		24047	466	445	0.96	

(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 3-8 に示す。

補正後の応答をプロットしたせん断スケルトンカーブを図 3-10 及び図 3-11 に示す。質点系モデルの最大応答せん断応力度に応答補正比率 α 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 方向ともにすべての層において、評価基準値 (2.0×10^{-3}) を超えないことを確認した。

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

表 3-8(1) 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(1/2)

(a) NS方向

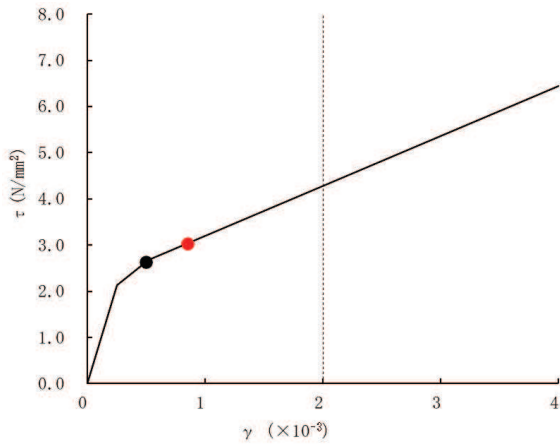
部材番号		質点系モデルの最大応答値 (基準地震動 S_s , NS方向)			NS方向 応答補正比率 ζ	応答補正後 (最大応答値 $\times\zeta$)	
		τ (N/mm ²)	γ ($\times 10^{-3}$)	地震動		τ (N/mm ²)	γ ($\times 10^{-3}$)
OW-K	1	2.63	0.50	$S_s - D 1$	1.47	3.04	0.85
	2	2.83	0.58	$S_s - D 1$	1.22	3.02	0.76
	3	2.83	0.52	$S_s - N 1$	1.07	2.93	0.57
	4	2.70	0.43	$S_s - N 1$	1.09	2.80	0.48
	5	3.19	0.60	$S_s - N 1$	1.08	3.30	0.66
IW-J	6	3.09	0.91	$S_s - D 2$	1.03	3.12	0.93
	7	3.23	1.06	$S_s - F 3$	1.01	3.23	1.06
	8	2.74	0.51	$S_s - D 2$	1.08	2.84	0.56
	9	2.99	0.60	$S_s - D 2$	1.05	3.03	0.64
	10	3.06	0.59	$S_s - N 1$	1.05	3.12	0.63
	11	2.90	0.51	$S_s - N 1$	1.04	2.95	0.54
	12	3.21	0.62	$S_s - N 1$	1.03	3.25	0.64
SW	13	1.28	0.15	$S_s - D 2$	1.07	1.37	0.16
	14	2.48	0.30	$S_s - D 2$	1.15	2.58	0.35
	15	2.77	0.34	$S_s - N 1$	1.17	2.90	0.40
	16	3.73	0.75	$S_s - N 1$	1.03	3.77	0.78
	17	2.89	0.34	$S_s - N 1$	1.14	3.01	0.39
IW-C	18	3.25	1.05	$S_s - F 3$	1.12	3.37	1.16
	19	3.08	0.92	$S_s - D 2$	1.05	3.13	0.96
	20	2.93	0.61	$S_s - D 2$	1.02	2.95	0.63
	21	3.25	0.74	$S_s - D 1$	1.05	3.30	0.79
	22	3.10	0.58	$S_s - N 1$	1.08	3.21	0.64
	23	2.91	0.50	$S_s - N 1$	1.08	3.02	0.55
	24	3.47	0.80	$S_s - N 1$	1.09	3.57	0.90
OW-A	25	2.76	0.55	$S_s - D 2$	1.24	2.97	0.74
	26	2.96	0.62	$S_s - D 1$	1.29	3.23	0.89
	27	3.05	0.59	$S_s - N 1$	1.02	3.08	0.61
	28	2.83	0.48	$S_s - N 1$	1.04	2.88	0.50
	29	3.33	0.74	$S_s - N 1$	1.02	3.35	0.76

表 3-8(2) 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(2/2)

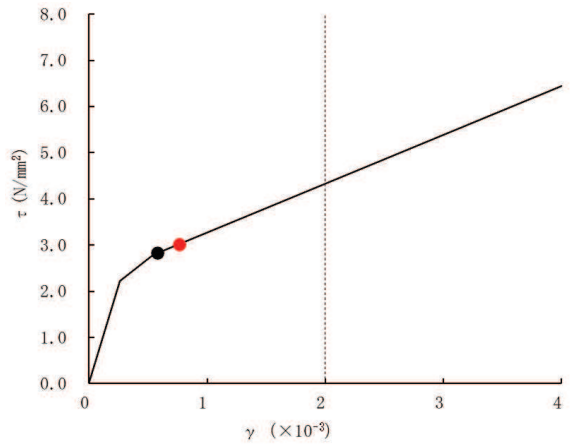
(b) EW方向

部材番号		質点系モデルの最大応答値 (基準地震動 S_s , NS方向)			EW方向 応答補正比率 ζ	応答補正後 (最大応答値 $\times \zeta$)	
		τ (N/mm ²)	τ ($\times 10^{-3}$)	地震動		τ (N/mm ²)	τ ($\times 10^{-3}$)
OW-1	1	2.77	0.56	$S_s - D 2$	1.02	2.79	0.58
	2	2.85	0.52	$S_s - D 1$	1.03	2.89	0.54
	3	2.97	0.56	$S_s - D 1$	1.10	3.08	0.64
	4	2.65	0.39	$S_s - N 1$	1.11	2.76	0.44
	5	3.01	0.52	$S_s - N 1$	1.00	3.01	0.52
IW-2	6	2.53	0.41	$S_s - D 1$	1.02	2.55	0.42
	7	3.21	0.64	$S_s - D 1$	1.09	3.29	0.72
	8	2.74	0.41	$S_s - N 1$	1.03	2.77	0.43
	9	3.14	0.56	$S_s - N 1$	1.03	3.18	0.58
IW-4	10	2.51	0.45	$S_s - F 3$	1.08	2.53	0.46
	11	2.93	0.77	$S_s - D 2$	1.00	2.93	0.77
	12	2.53	0.38	$S_s - D 2$	1.01	2.56	0.39
	13	2.93	0.47	$S_s - D 1$	1.02	2.97	0.49
SW	14	1.73	0.19	$S_s - D 2$	1.00	1.73	0.19
	15	2.62	0.37	$S_s - D 1$	1.05	2.66	0.39
	16	3.17	0.54	$S_s - D 1$	1.11	3.32	0.62
	17	3.61	0.68	$S_s - N 1$	1.07	3.72	0.74
	18	2.82	0.31	$S_s - N 1$	1.16	2.96	0.36
IW-10	19	2.82	0.68	$S_s - D 2$	1.03	2.85	0.71
	20	2.84	0.70	$S_s - D 2$	1.01	2.84	0.71
	21	2.72	0.49	$S_s - D 2$	1.00	2.72	0.49
	22	3.16	0.71	$S_s - D 1$	1.02	3.18	0.73
	23	3.02	0.56	$S_s - D 1$	1.00	3.02	0.56
	24	2.70	0.41	$S_s - N 1$	1.06	2.76	0.44
	25	3.16	0.59	$S_s - N 1$	1.04	3.23	0.62
OW-11	26	2.69	0.54	$S_s - D 2$	1.15	2.82	0.66
	27	2.97	0.70	$S_s - D 1$	1.11	3.09	0.81
	28	2.77	0.49	$S_s - D 1$	1.10	2.90	0.56
	29	2.69	0.41	$S_s - N 1$	1.04	2.73	0.43
	30	3.06	0.54	$S_s - N 1$	1.00	3.06	0.54

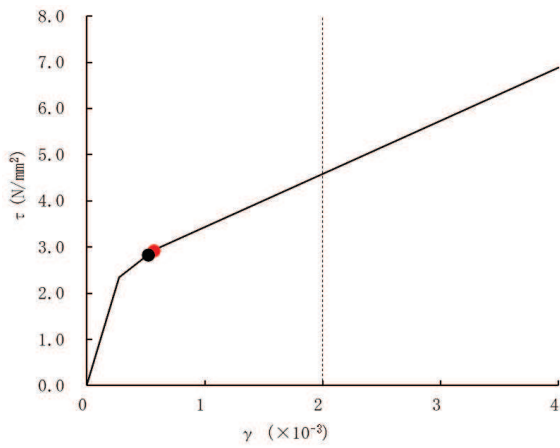
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



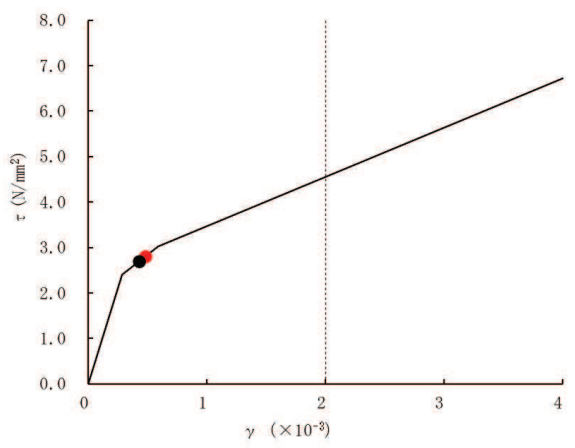
要素番号(1)



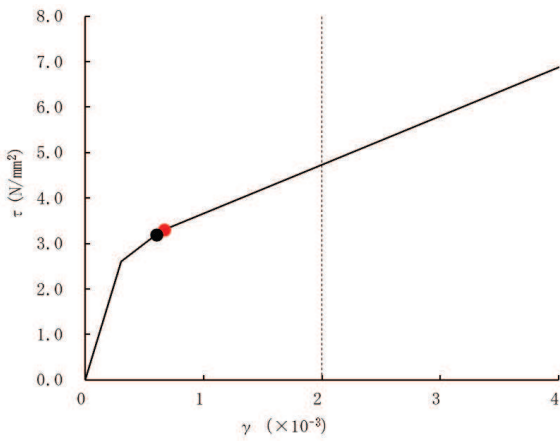
要素番号(2)



要素番号(3)



要素番号(4)



要素番号(5)

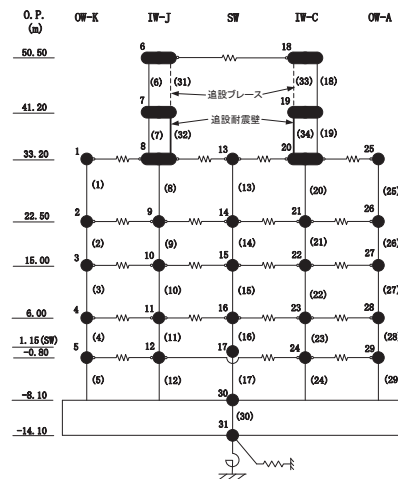
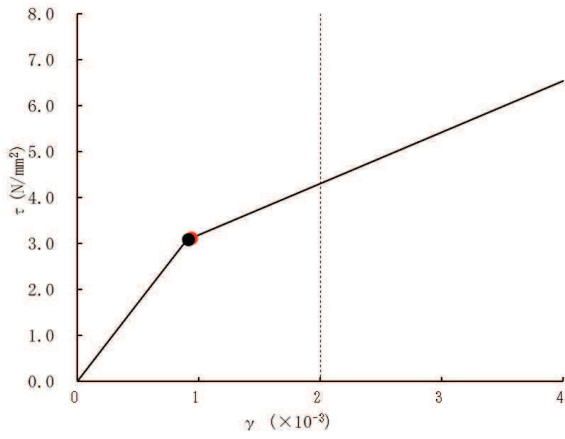
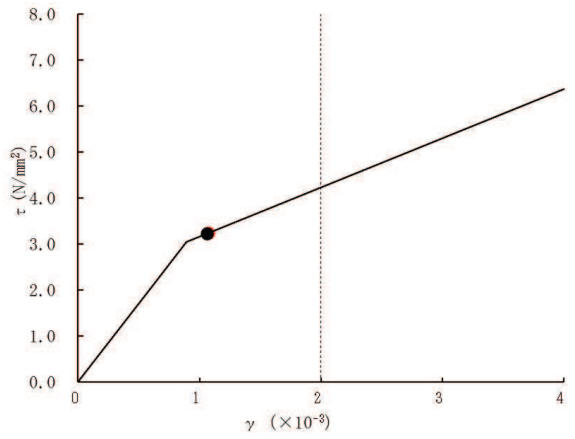


図 3-12(1) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (NS 方向) (1/6)

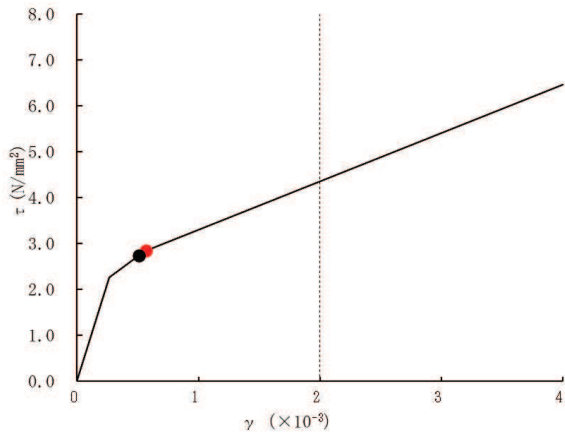
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



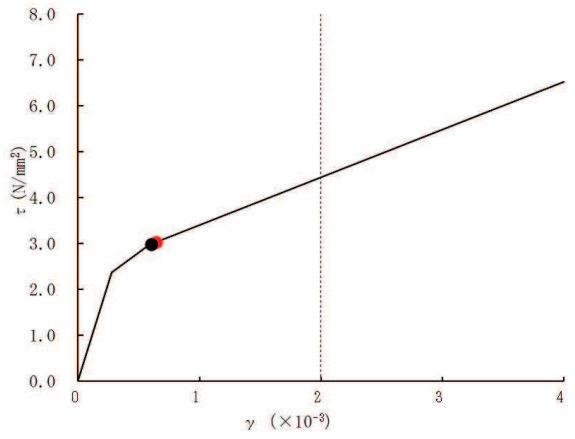
要素番号(6)



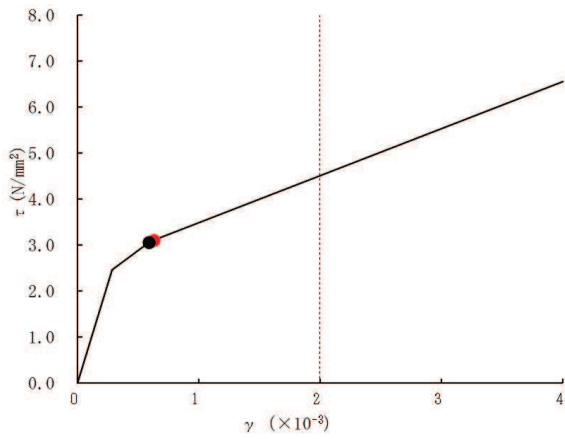
要素番号(7)



要素番号(8)



要素番号(9)



要素番号(10)

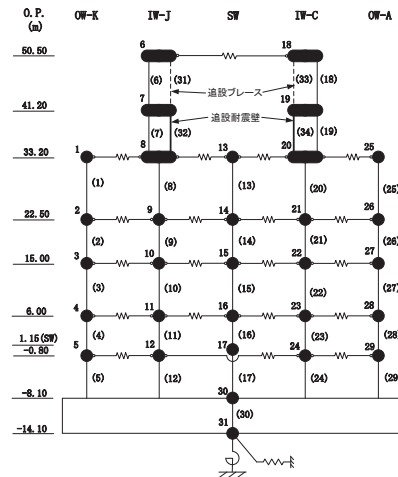
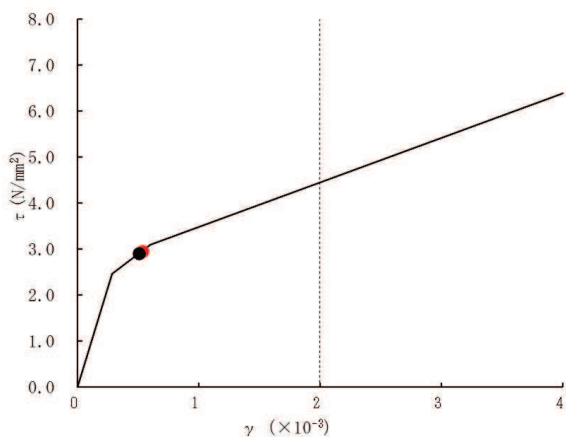
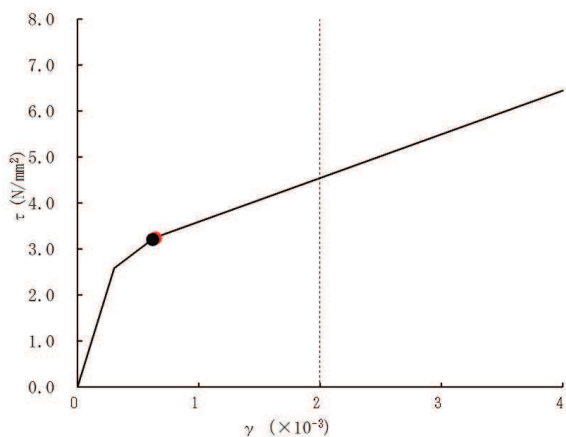


図 3-12(2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (NS 方向) (2/6)

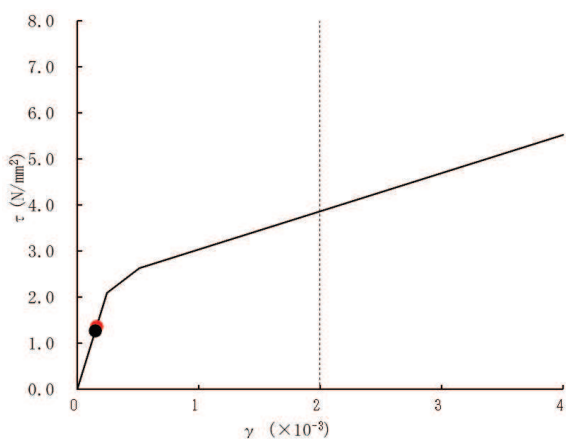
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



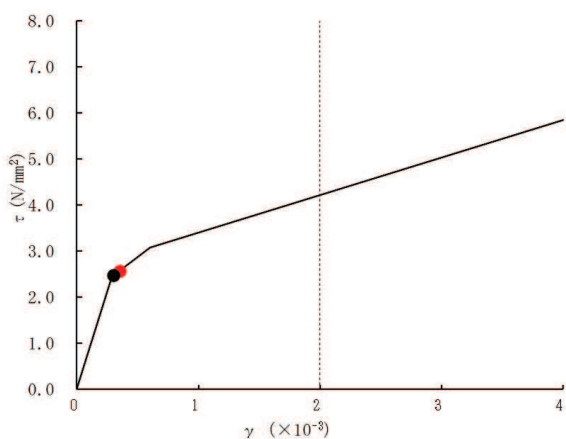
要素番号(11)



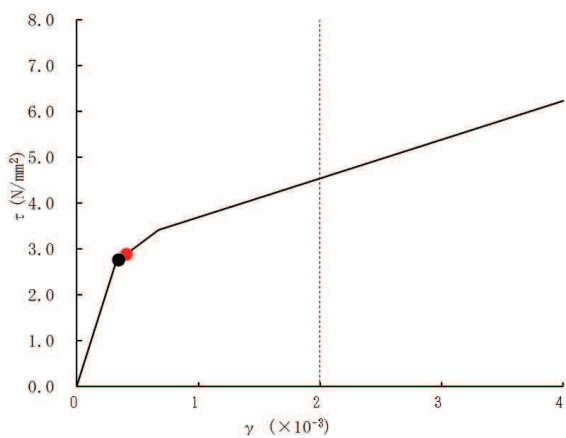
要素番号(12)



要素番号(13)



要素番号(14)



要素番号(15)

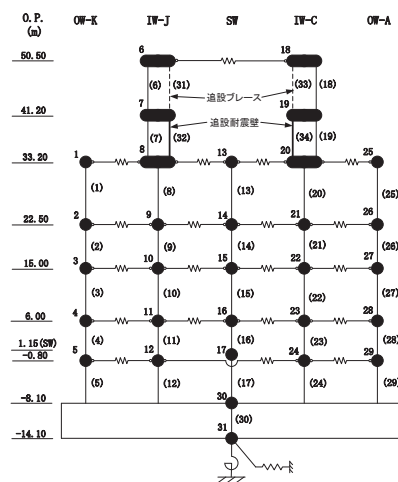
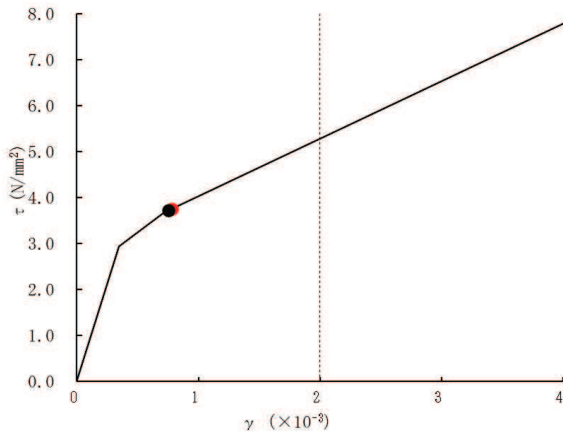
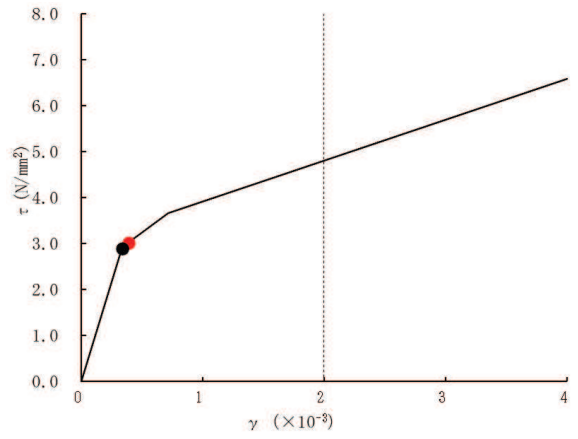


図 3-12(3) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (NS 方向) (3/6)

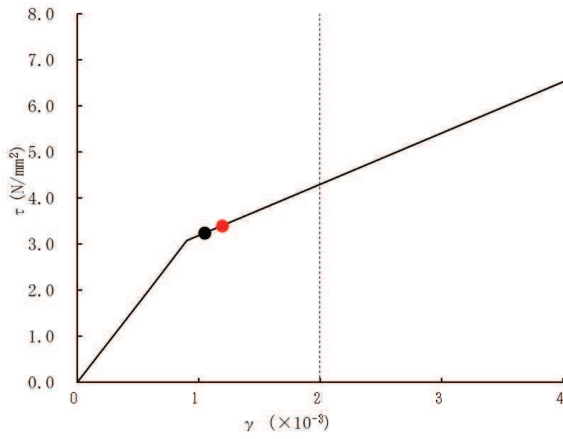
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



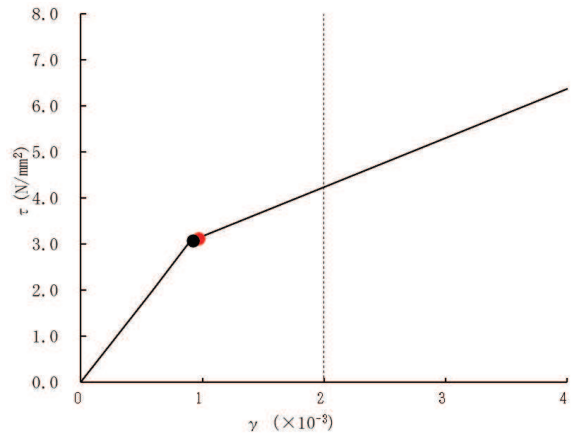
要素番号 (16)



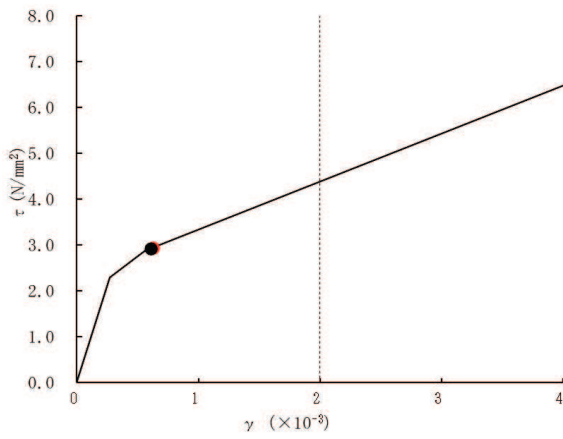
要素番号 (17)



要素番号 (18)



要素番号 (19)



要素番号 (20)

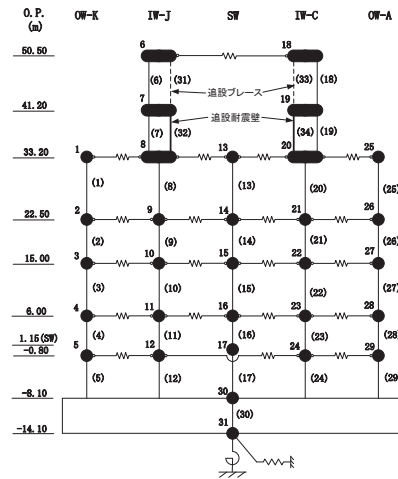
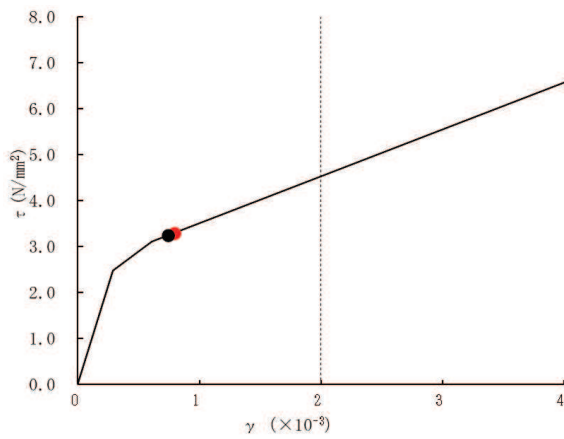
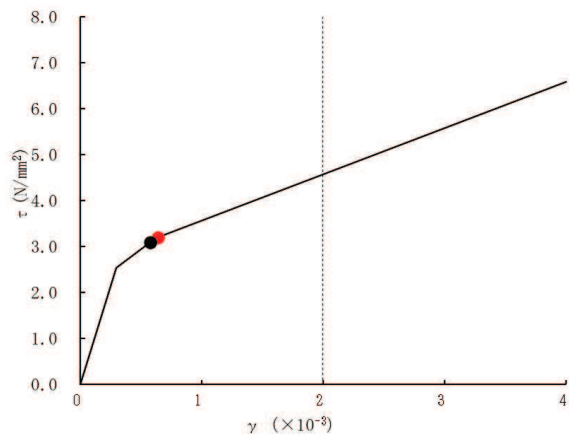


図 3-12(4) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (NS 方向) (4/6)

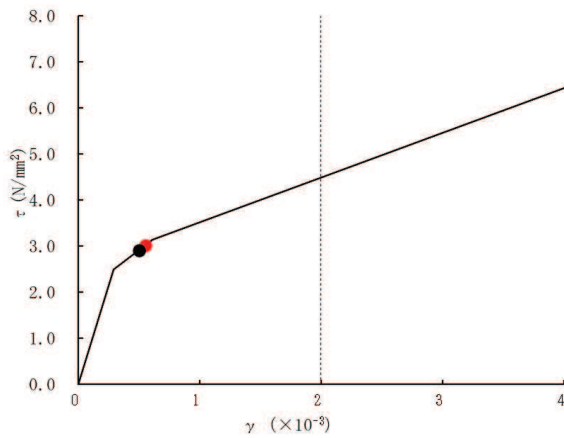
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



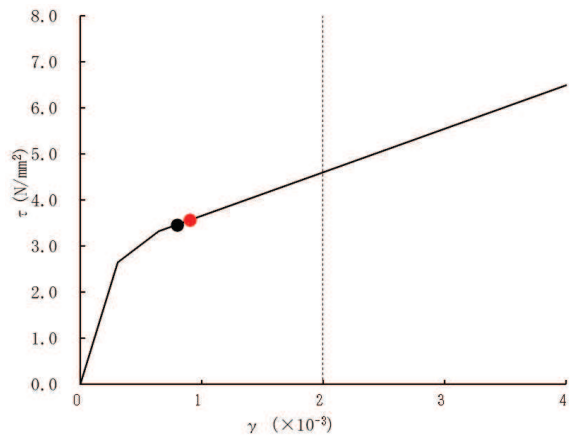
要素番号 (21)



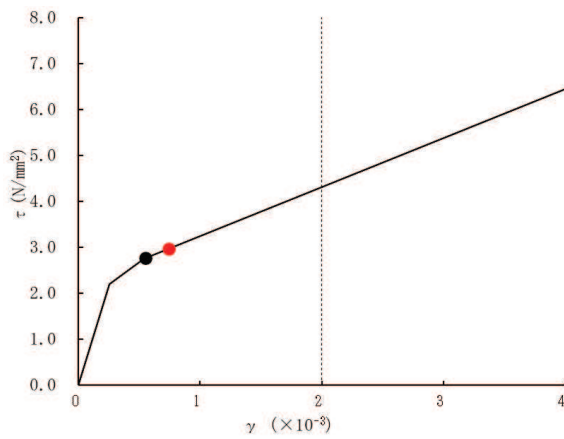
要素番号 (22)



要素番号 (23)



要素番号 (24)



要素番号 (25)

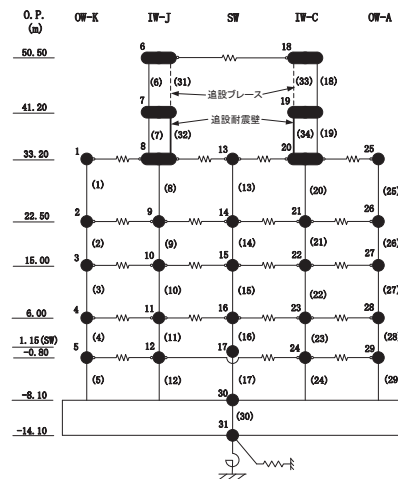
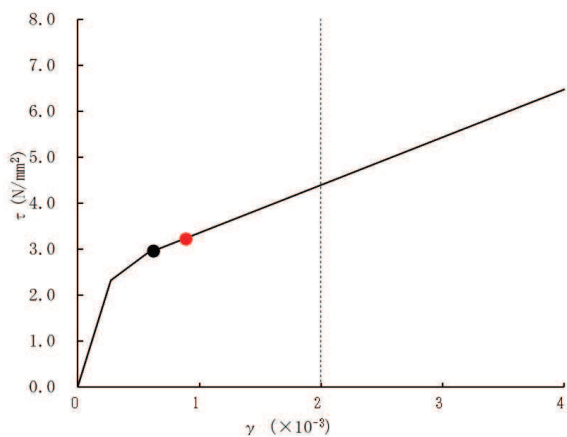
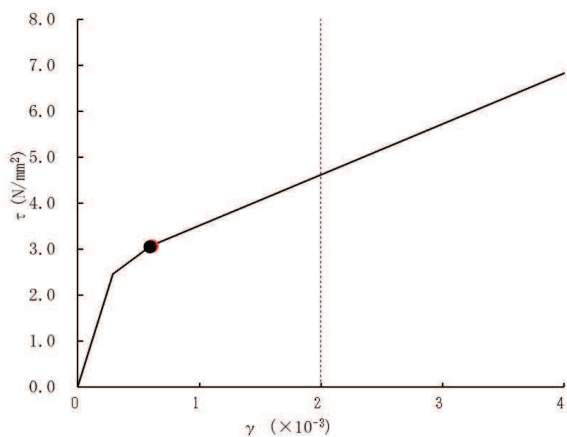


図 3-12(5) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (NS 方向) (5/6)

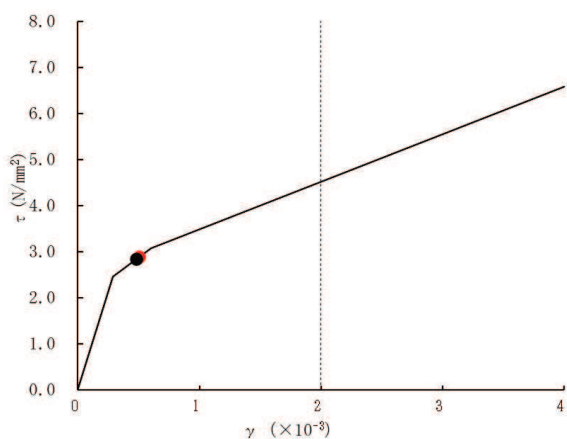
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



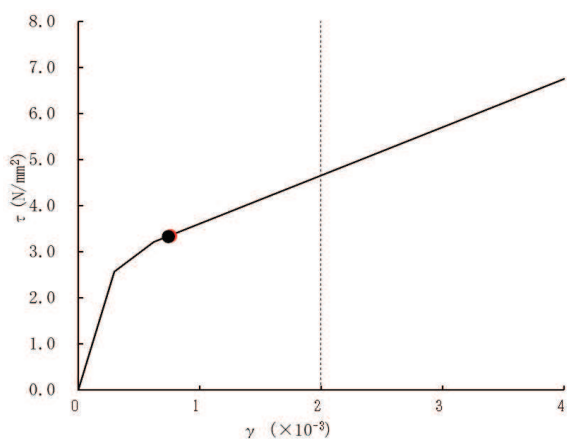
要素番号 (26)



要素番号 (27)



要素番号 (28)



要素番号 (29)

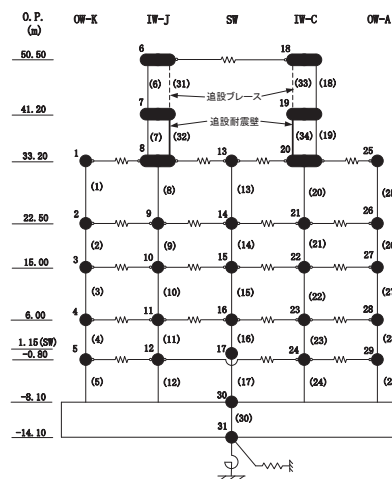
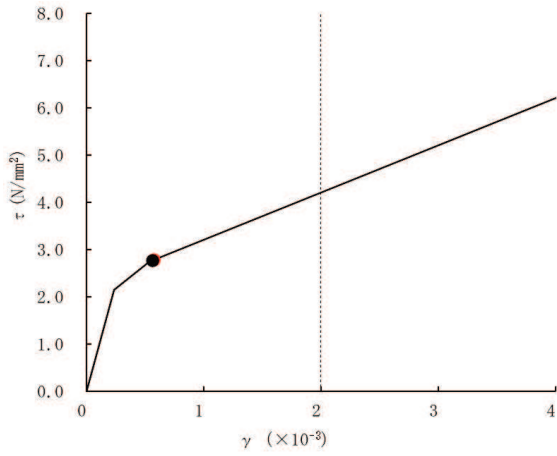
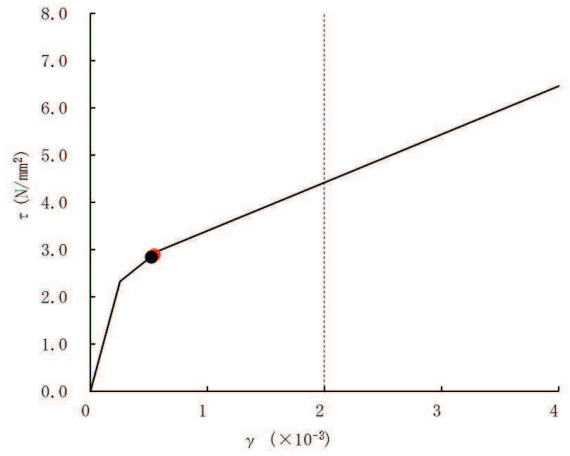


図 3-12(6) セン断スケルトンカーブ上の最大応答値 (NS 方向) (6/6)

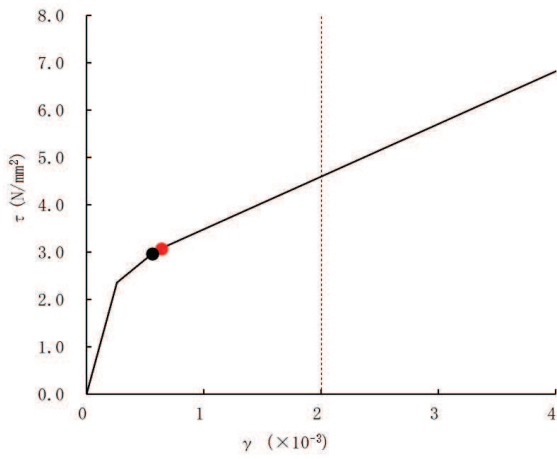
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



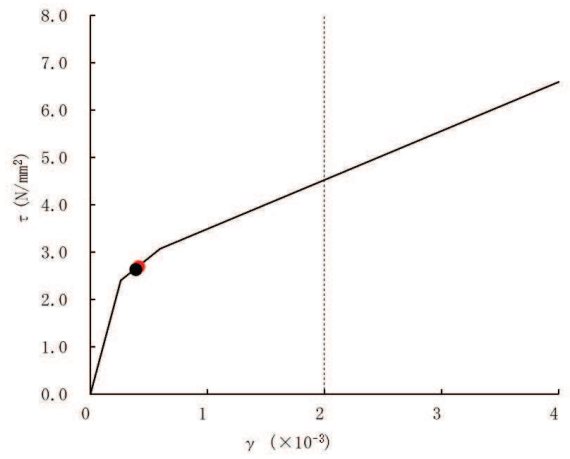
要素番号(1)



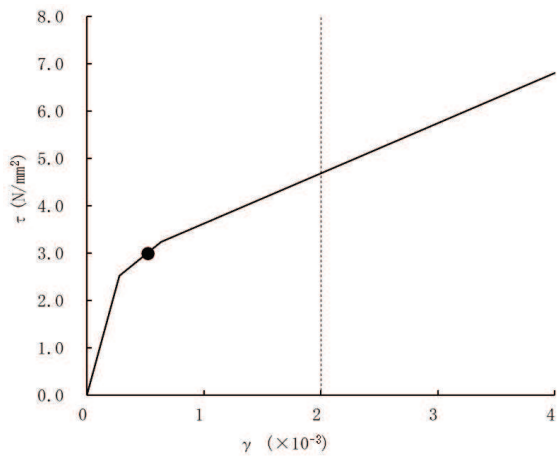
要素番号(2)



要素番号(3)



要素番号(4)



要素番号(5)

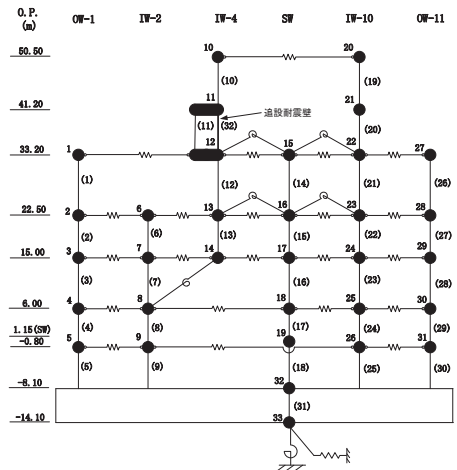
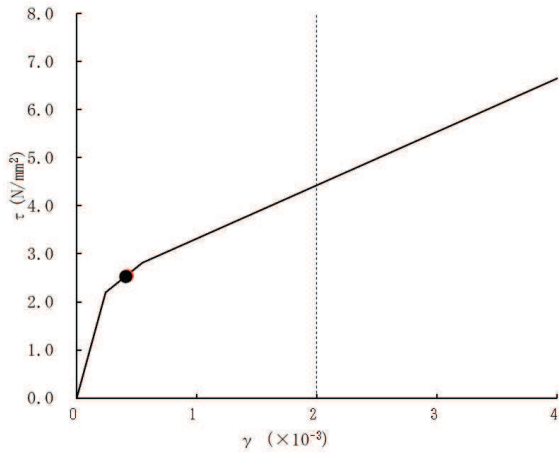
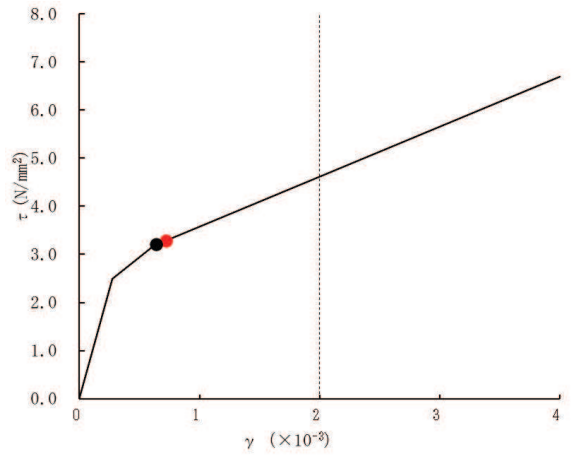


図 3-13(1) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (EW 方向) (1/6)

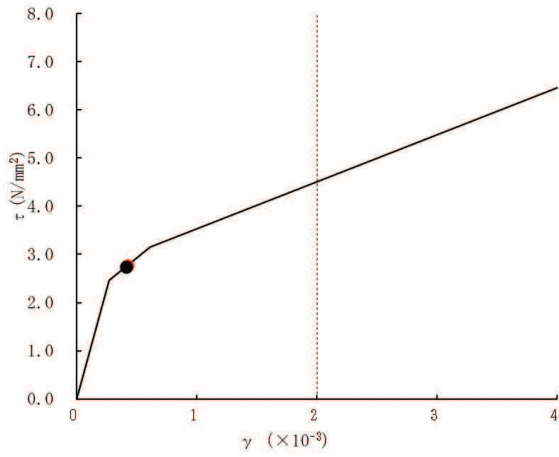
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



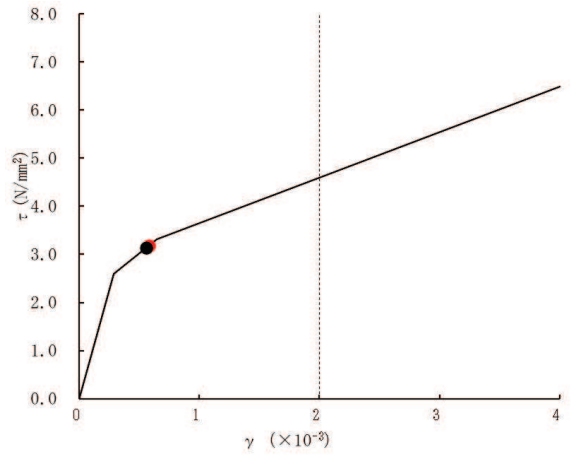
要素番号(6)



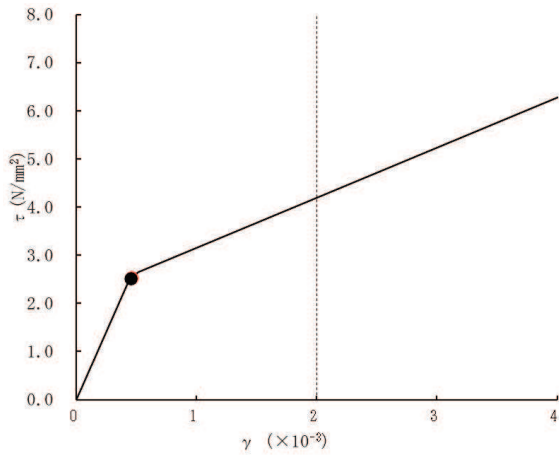
要素番号(7)



要素番号(8)



要素番号(9)



要素番号(10)

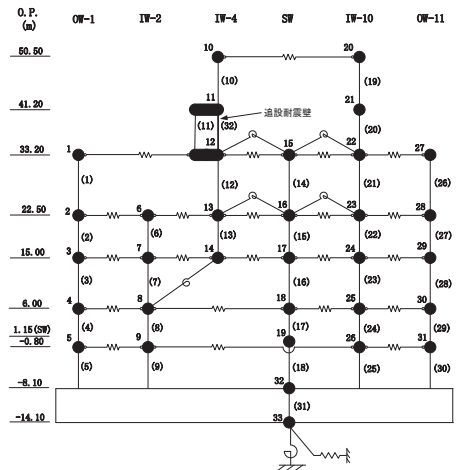
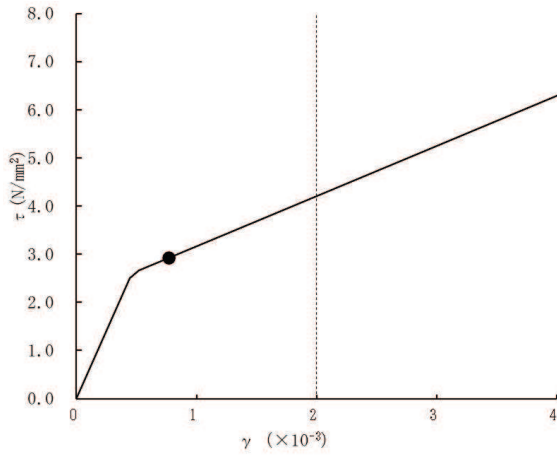
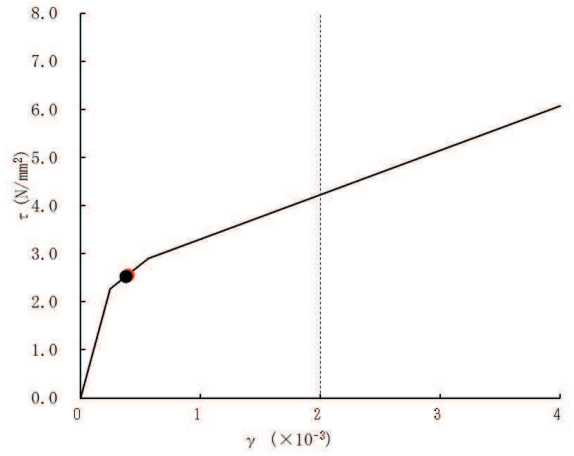


図 3-13(2) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (EW 方向) (2/6)

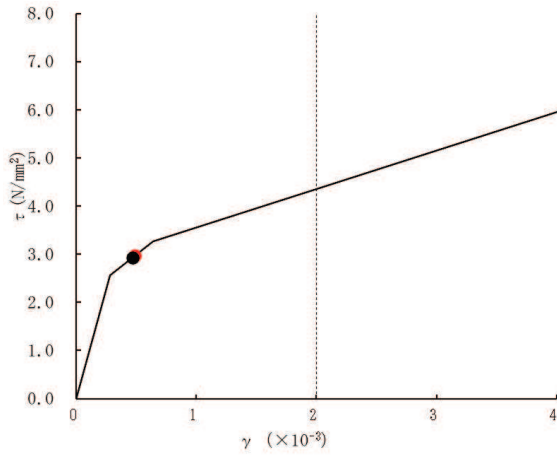
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



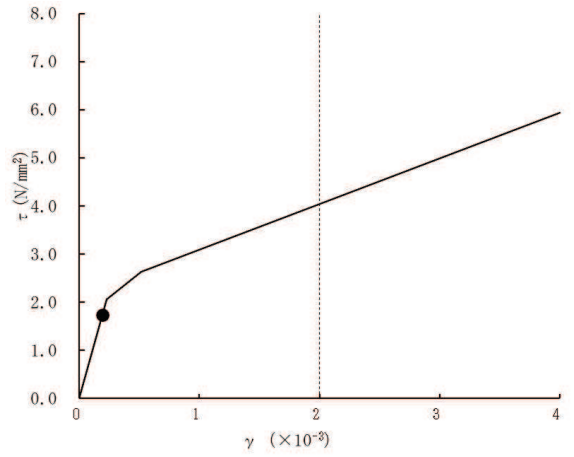
要素番号(11)



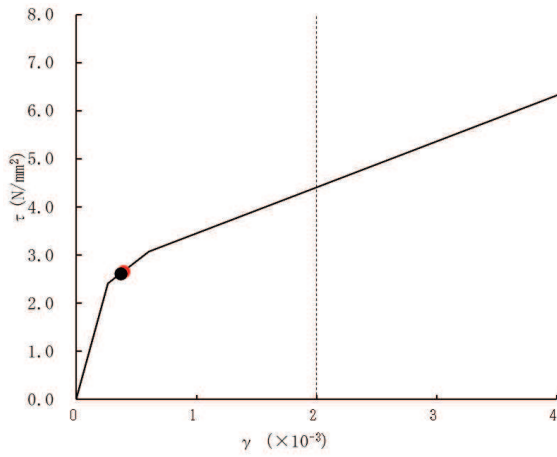
要素番号(12)



要素番号(13)



要素番号(14)



要素番号(15)

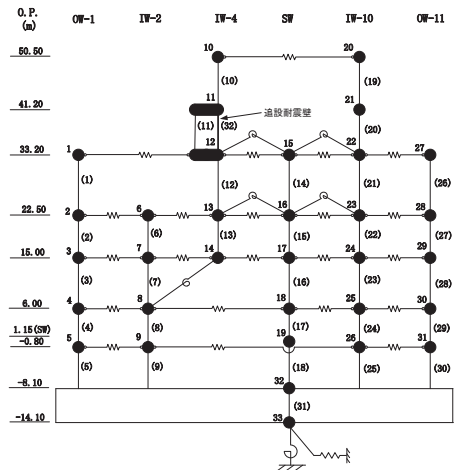
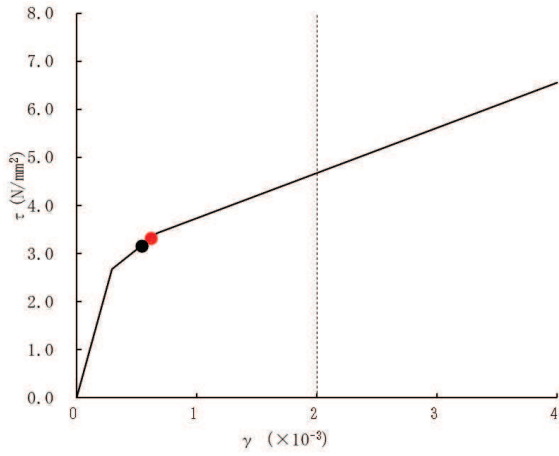
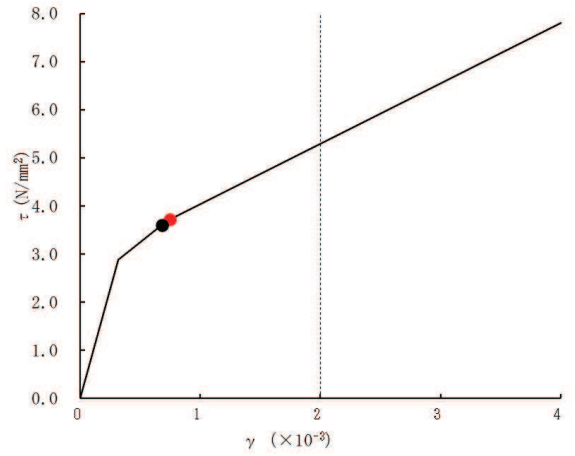


図 3-13(3) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (EW 方向) (3/6)

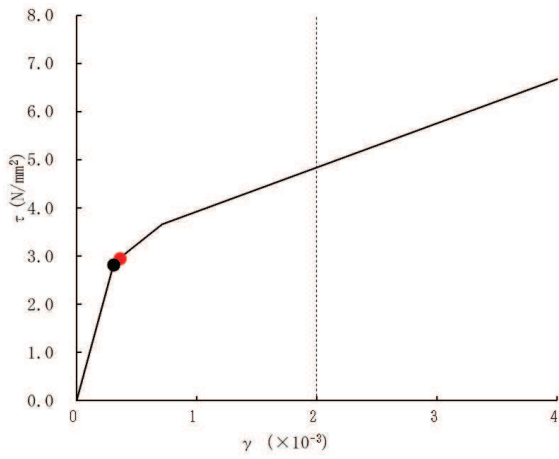
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



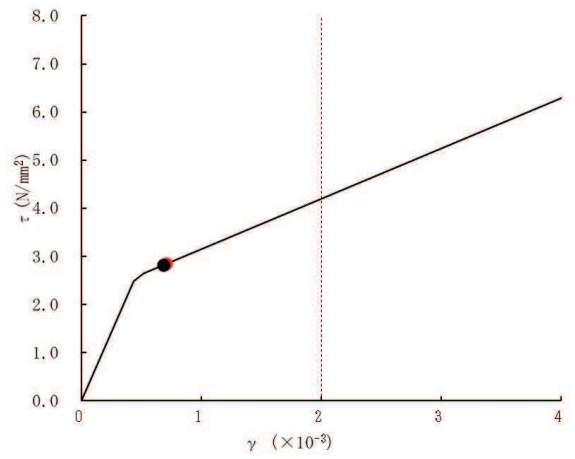
要素番号 (16)



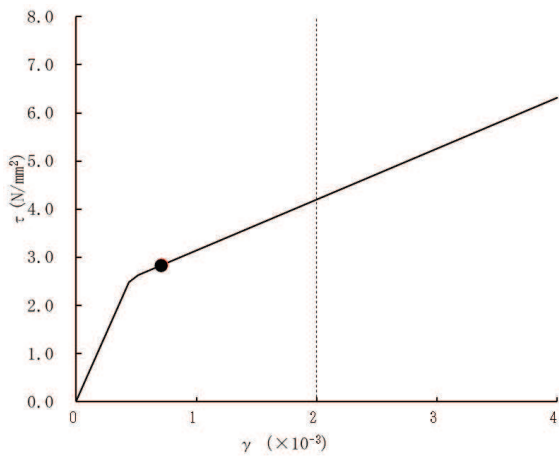
要素番号 (17)



要素番号 (18)



要素番号 (19)



要素番号 (20)

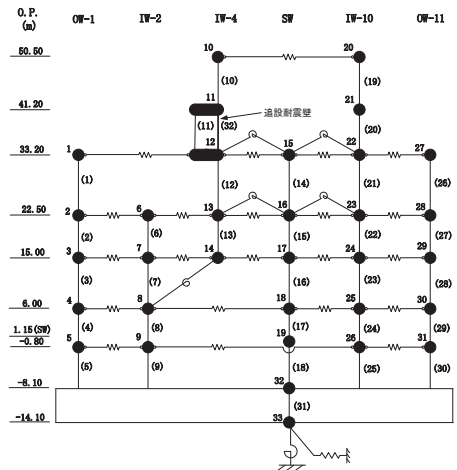
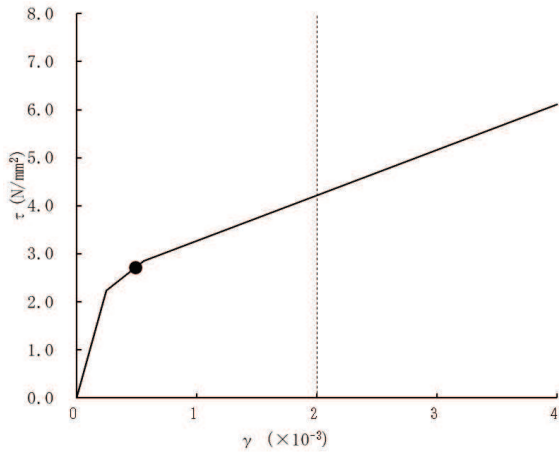
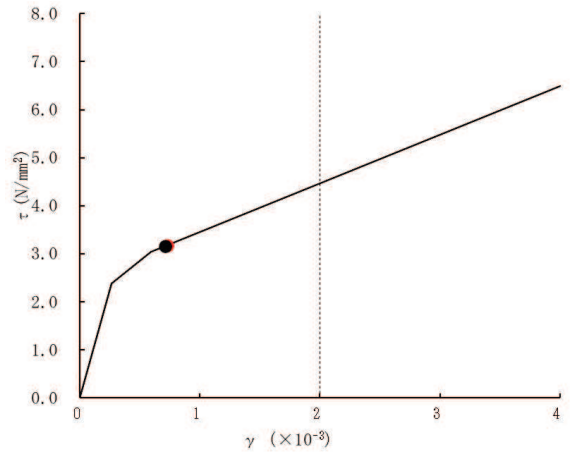


図 3-13(4) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (EW 方向) (4/6)

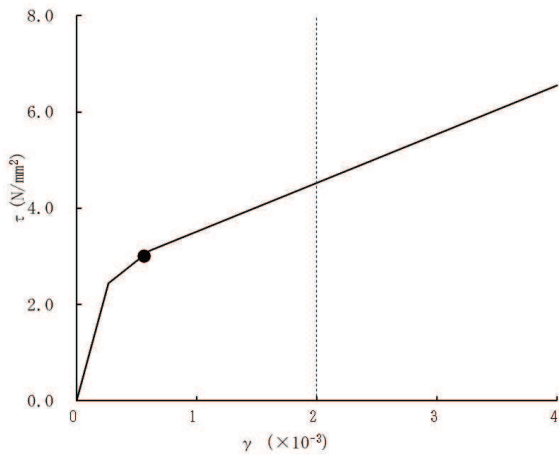
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



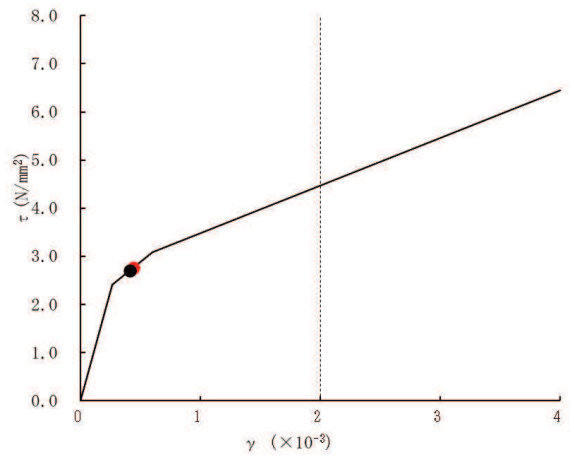
要素番号 (21)



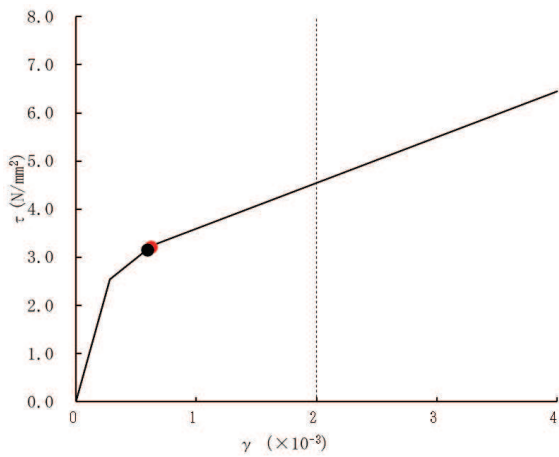
要素番号 (22)



要素番号 (23)



要素番号 (24)



要素番号 (25)

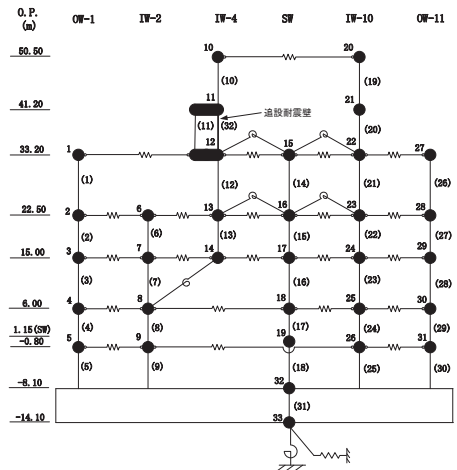
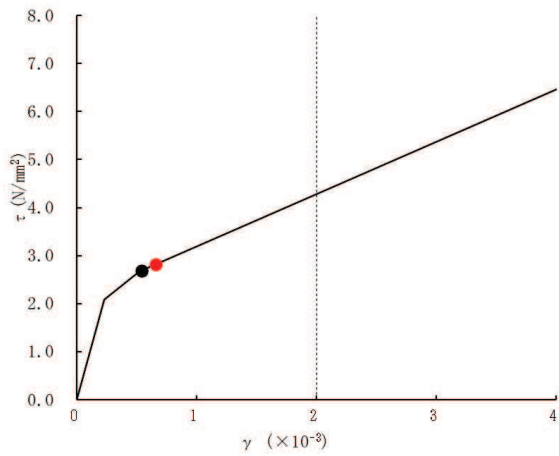
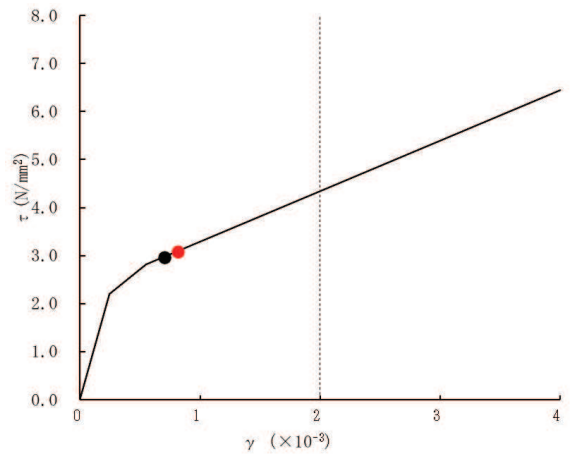


図 3-13(5) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (EW 方向) (5/6)

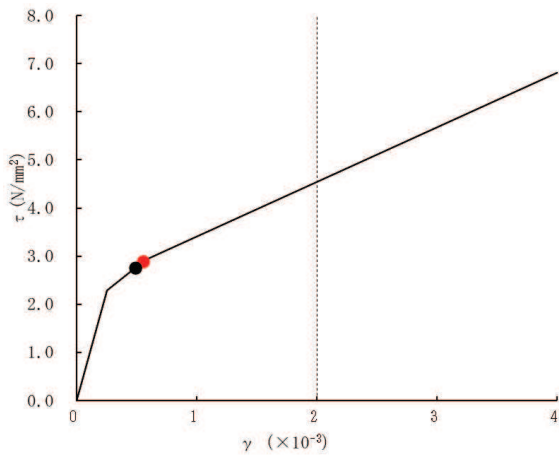
● 補正前応答値 ● 補正後応答値



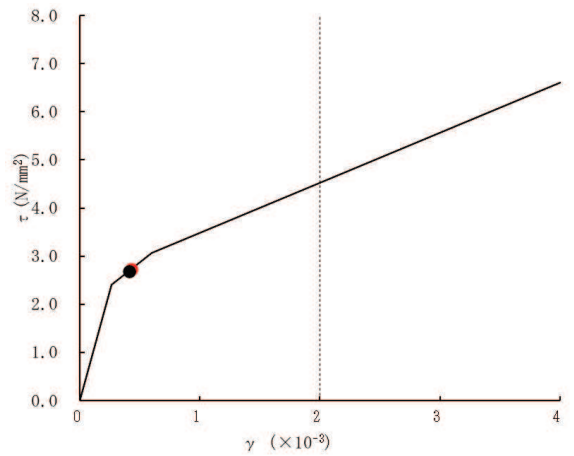
要素番号 (26)



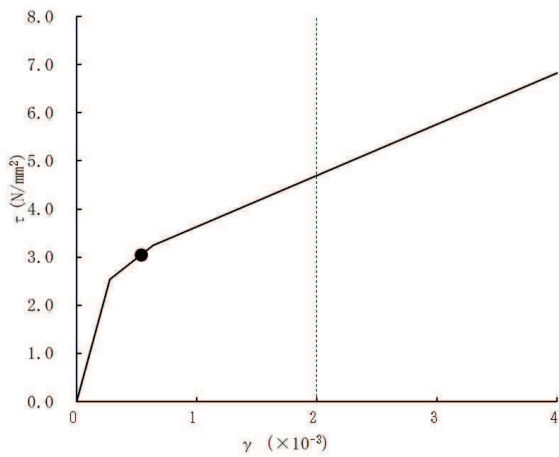
要素番号 (27)



要素番号 (28)



要素番号 (29)



要素番号 (30)

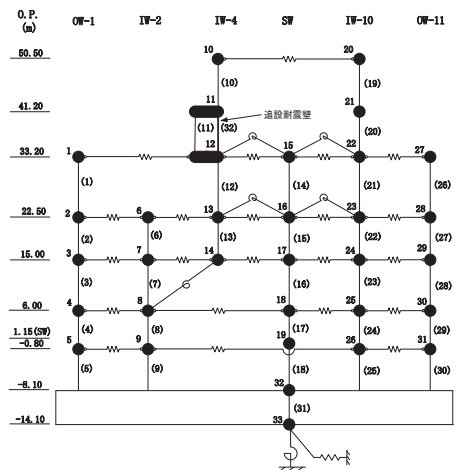


図 3-13(6) せん断スケルトンカーブ上の最大応答値 (EW 方向) (6/6)

3.4 床応答への影響検討

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

評価部位は、図3-5におけるO.P. -8.1m~50.5mにおける各耐震壁上の節点とする。なお、原子炉建屋の地震応答解析モデルは床の柔性を考慮した多軸の質点系モデルを採用していることを踏まえ、3次元 FEM モデルと質点系モデルの床応答の比較に当たっては、それぞれの軸における耐震壁に対応する節点及び質点を選定した。さらに、建屋全体の応答性状を比較できるように、質点系モデルの各質点に対応する代表節点の応答波形を時刻歴で平均した波形の応答スペクトルを比較した。3次元 FEM モデルにおいて選定した代表節点の位置と、応答波形を平均化した節点の範囲を図3-14に示す。

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

ここで、3次元 FEM モデルにおける1方向入力及び3方向同時入力時の床応答の比較については、「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3-9に比較結果を示す。表3-9に示す比較結果のうち、水平方向について、3次元 FEM モデルの応答は、周期0.18秒より長周期側では質点系モデルの応答とピーク周期と振幅がほぼ対応している。周期0.18秒より短周期側では、質点系モデルの応答スペクトルが3次元 FEM モデルの応答スペクトルより大きくなる傾向が見られる。一方、3次元 FEM モデルの応答スペクトルが質点系モデルの応答スペクトルを上回る箇所が一部の周期にあるものの、3次元 FEM モデルのみに顕著なピークが表れる箇所は認められず、質点系モデルの応答を用いた評価が保守的であることが確認できた。鉛直方向については概ねすべての周期帯で、質点系モデルの応答スペクトルが3次元 FEM モデルの応答スペクトルを上回った。

また、質点系モデルの床応答スペクトルに見られる短周期の顕著なピークは、本検討で用いた弾性設計用地震動S_d-D₂が、全周期帯に大きな応答を発生させる模擬地震波であり、O.P. -8.1mにおける加速度応答スペクトルには、入力地震動の持つ明瞭なピークがないため、床柔とした質点系モデルの高次モードに対応する応答により生じたと考えられる。各床レベルの設計用床応答スペクトルは、この高次モードに対応

した顕著なピークを持つ各質点の応答（NS 方向と EW 方向）を包絡して作成されることから、保守的な設定となる。

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。

また、3 次元 FEM モデルの応答スペクトルが質点系モデルの応答スペクトルを上回る箇所があることを踏まえ、「別紙 4 機器・配管系に関する影響検討」において機器・配管系への影響について検討を行う。

なお、表 3-9(3)、表 3-9(7)、表 3-9(13)、表 3-9(17)、表 3-9(21)に示す O.P. 33. 2m より上部の応答については、面内方向の荷重に加え面外慣性力の影響が想定されることから、「別紙 2 原子炉建屋 3 次元 FEM モデルを用いた精査」において、面外方向加速度による面外方向の慣性力に対して、原子炉建屋の燃料取替床レベルの壁の耐震性に影響がないことを確認しており、機器・配管系に対する面外方向加速度への影響については、「別紙 4 機器・配管系に関する影響検討」において影響を検討している。また、O.P. 50. 5m に位置する屋根トラスについては、水平方向の地震動に加え、鉛直方向の地震動の影響を受けやすいと考えられることから、添付書類「VI-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟（二次格納施設）の耐震性についての計算書」において、3 次元 FEM モデルを用いた時刻歴応答解析により、基準地震動 S_s により生じる各部材の断面の応力が弾性限強度を超えないことを確認している。

表 3-10 に各代表節点の平均化を行う前の応答スペクトルと、平均化した応答スペクトルとの比較結果を示す。表 3-10 に示す各節点の平均化前後の応答スペクトルの比較を見ると、表 3-10(1)の O.P. 33. 2m 等の応答スペクトルのように、水平方向の各節点の平均化前の短周期側の応答については、建屋端部にある階段室等の開口による影響と考えられるばらつきが見られるものの、各節点の平均化前の応答スペクトルについては周期全体に渡って比較的ばらつきが小さく、建屋全体の応答性状を示していることを確認したことから、平均化した 3 次元 FEM モデルの応答スペクトルを質点系の応答スペクトルと比較することは妥当と判断した。

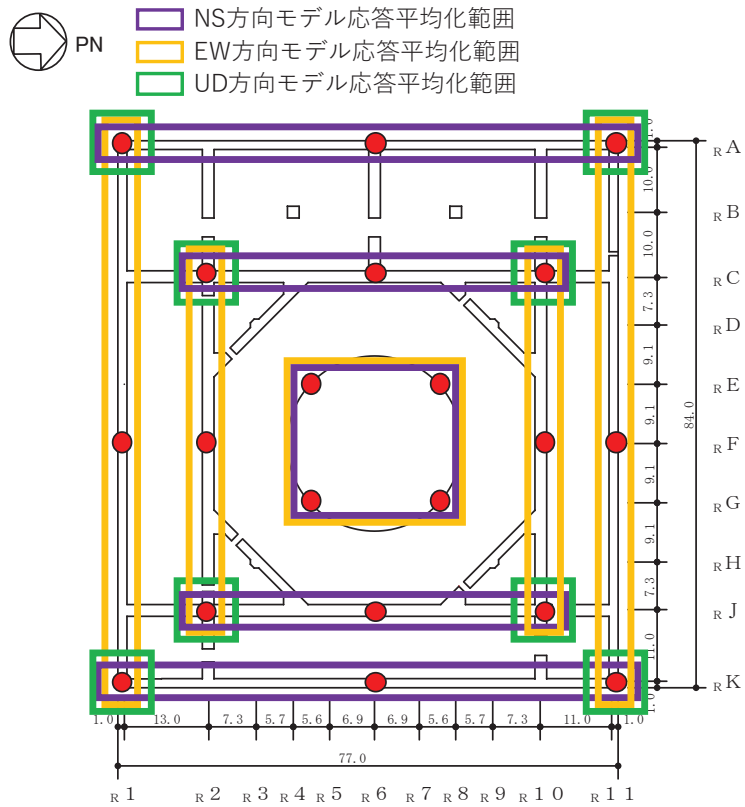


図 3-14(1) 代表節点の位置と応答平均化範囲 (0. P. -8. 1m)
(0. P. -0. 8m~22. 5m も同様)

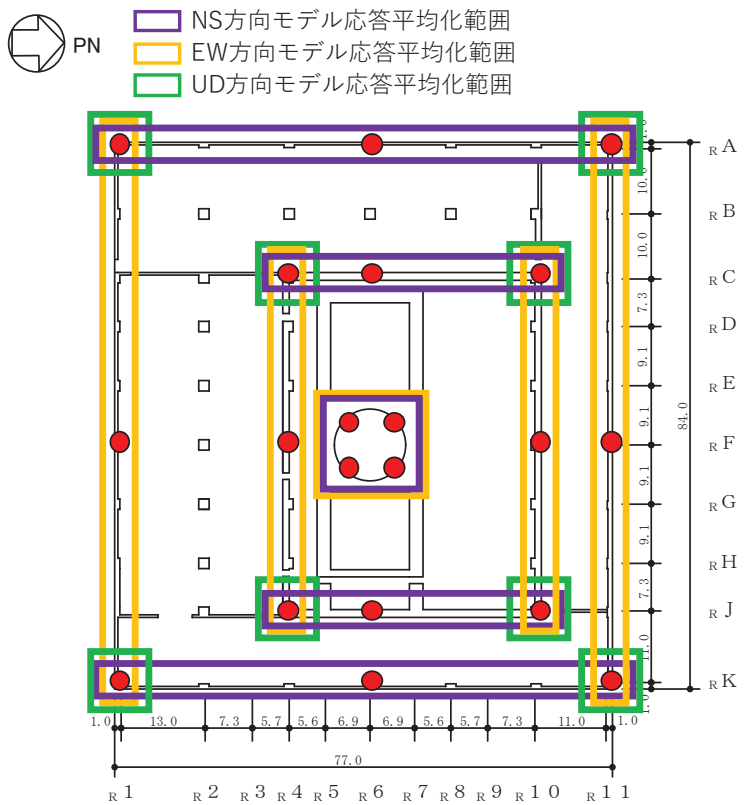


図 3-14(2) 代表節点の位置と応答平均化範囲 (0. P. 33. 2m)



- NS方向モデル応答平均化範囲
- EW方向モデル応答平均化範囲
- UD方向モデル応答平均化範囲

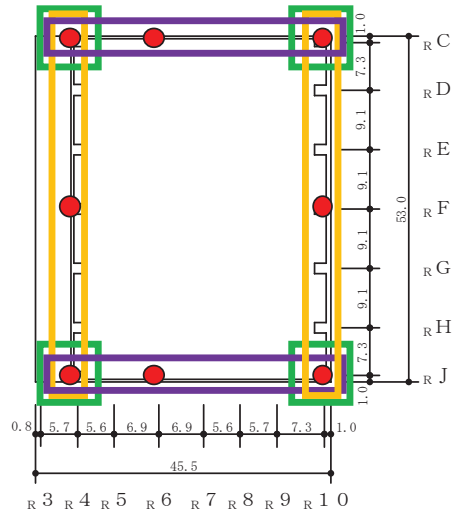


図 3-14(3) 代表節点の位置と応答平均化範囲 (O.P. 41.2m)
(O.P. 50.5m も同様)

表 3-9(1) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (1/22)

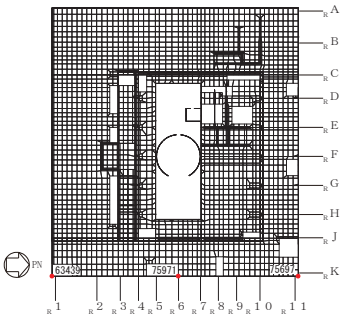
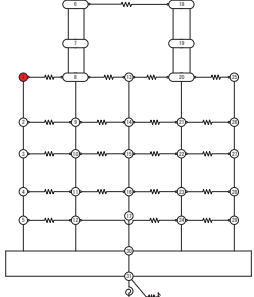
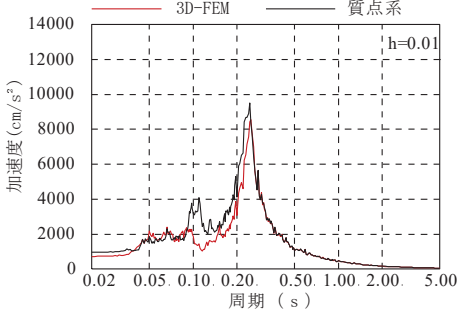
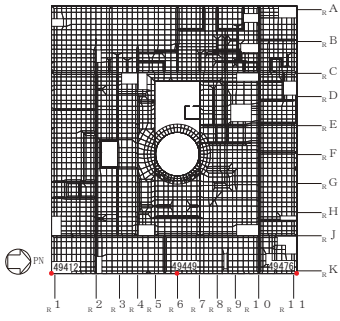
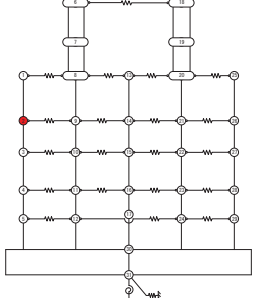
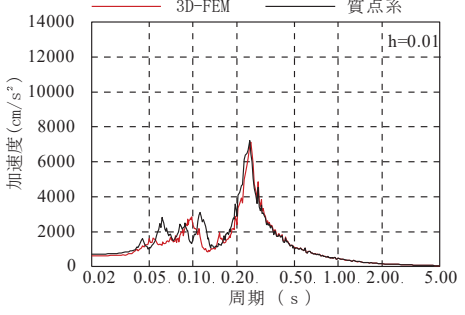
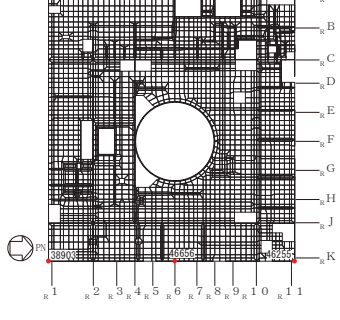
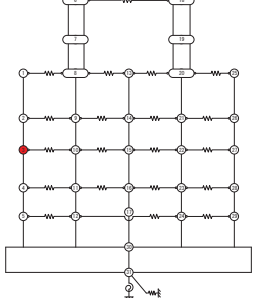
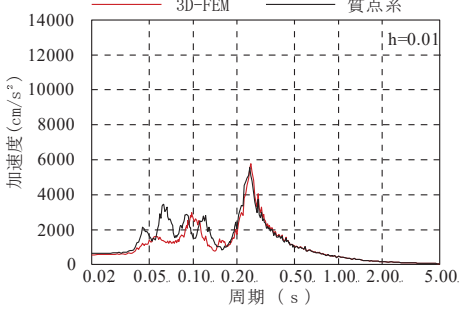
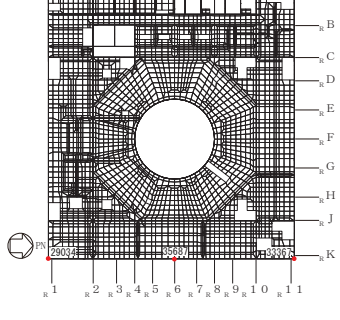
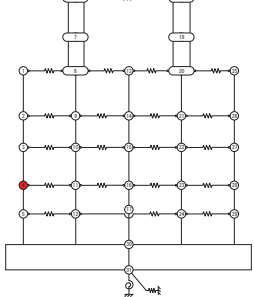
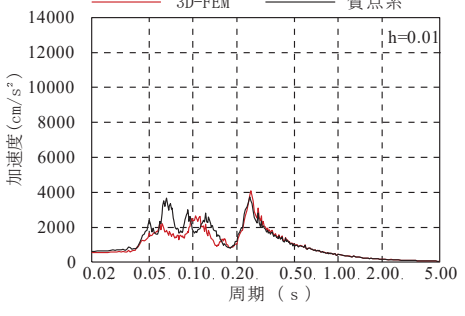
3次元 FEM モデル	質点系モデル	NS 方向応答 (0W-K)
 <p style="text-align: center;">O. P. 33.2m</p>	 <p style="text-align: center;">質点 1</p>	
 <p style="text-align: center;">O. P. 22.5m</p>	 <p style="text-align: center;">質点 2</p>	
 <p style="text-align: center;">O. P. 15.0m</p>	 <p style="text-align: center;">質点 3</p>	
 <p style="text-align: center;">O. P. 6.0m</p>	 <p style="text-align: center;">質点 4</p>	

表 3-9(2) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d-D 2) (2/22)

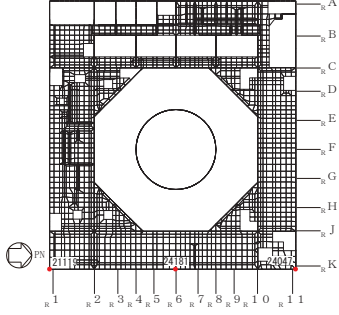
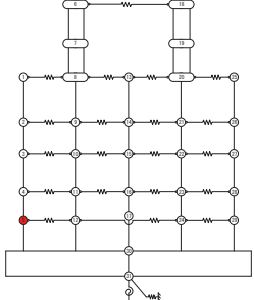
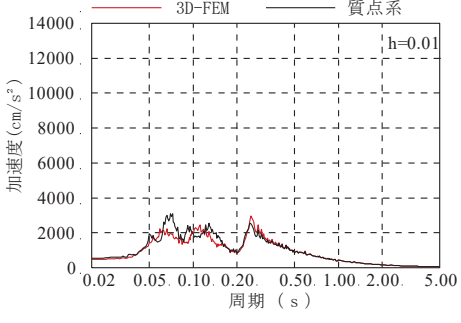
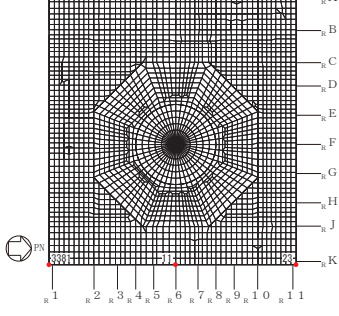
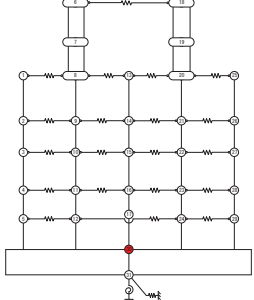
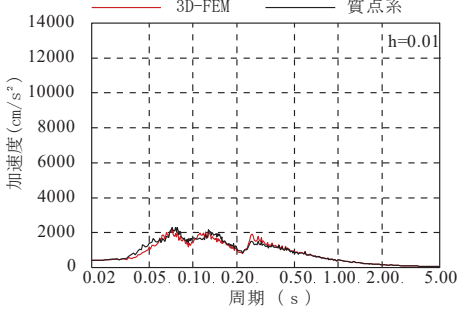
3次元 FEM モデル	質点系モデル	NS 方向応答 (OW-K)
 <p>O. P. -0.8m</p>	 <p>質点 5</p>	
 <p>O. P. -8.1m</p>	 <p>質点 30</p>	

表 3-9(3) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (3/22)

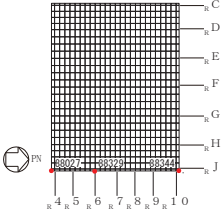
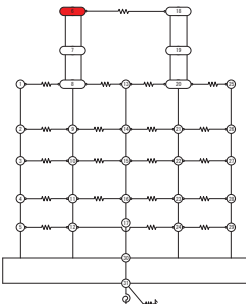
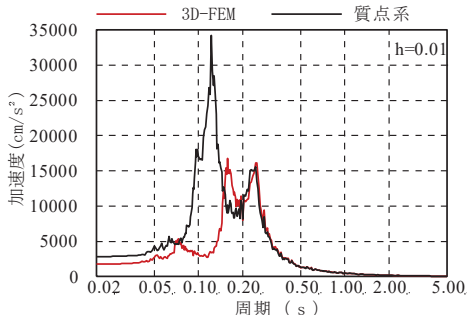
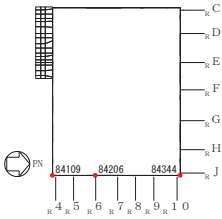
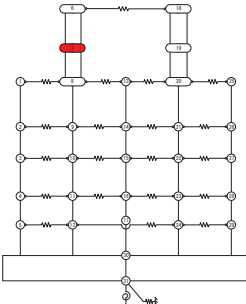
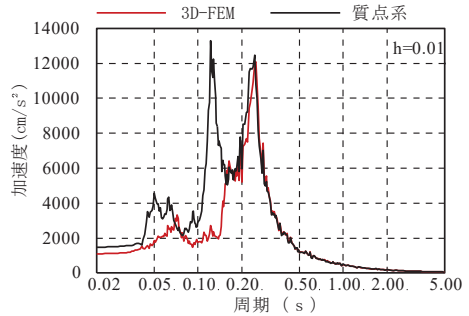
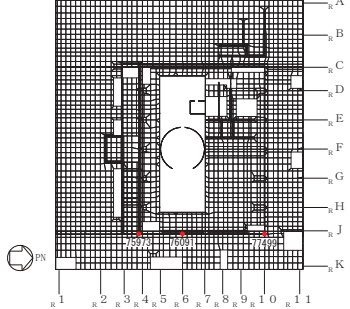
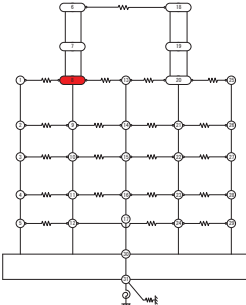
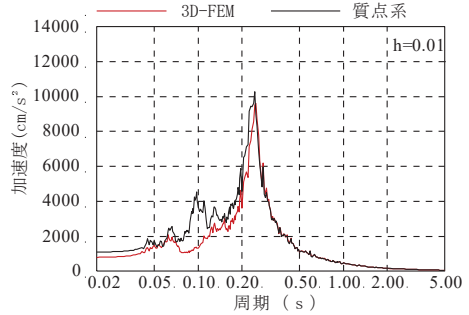
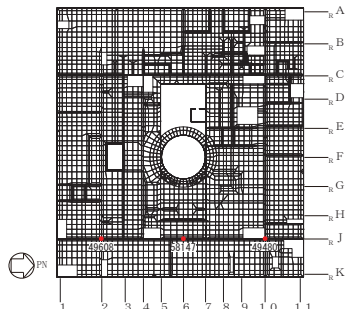
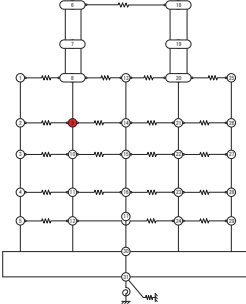
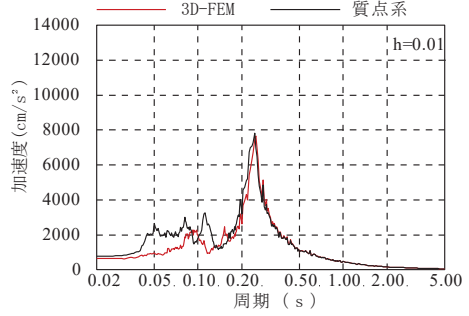
3次元 FEM モデル	質点系モデル	NS 方向応答 (IW-J)
 <p>O. P. 50. 5m</p>	 <p>質点 6</p>	
 <p>O. P. 41. 2m</p>	 <p>質点 7</p>	
 <p>O. P. 33. 2m</p>	 <p>質点 8</p>	
 <p>O. P. 22. 5m</p>	 <p>質点 9</p>	

表 3-9(4) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (4/22)

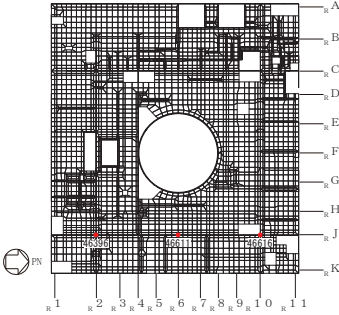
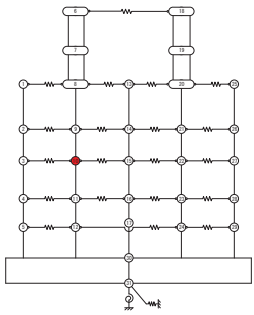
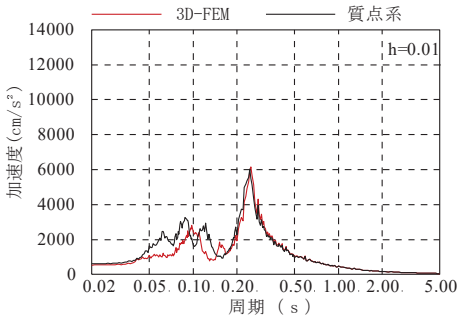
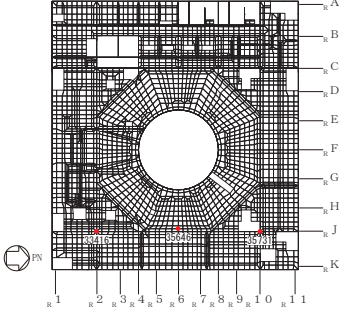
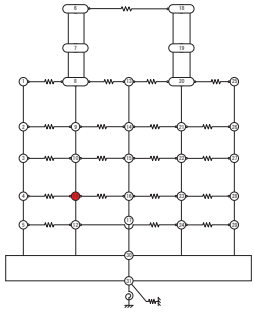
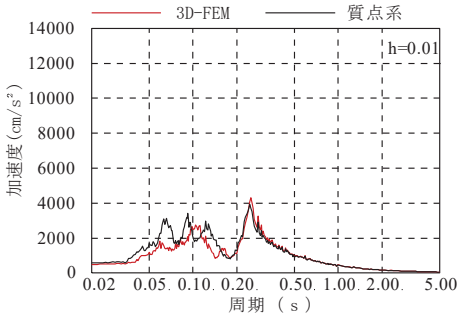
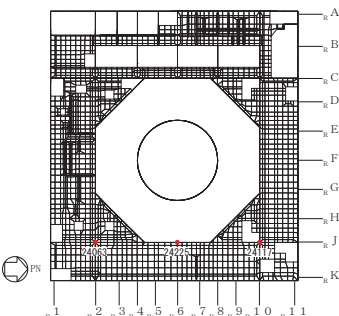
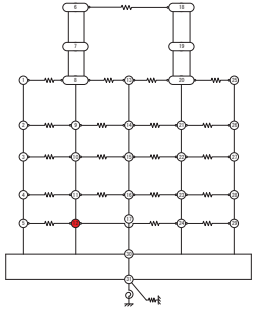
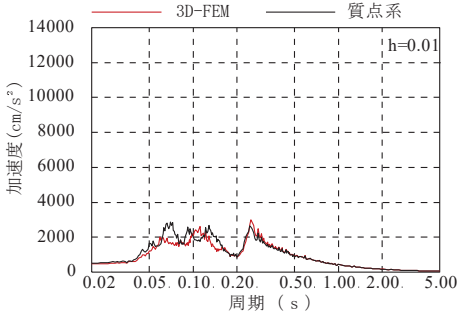
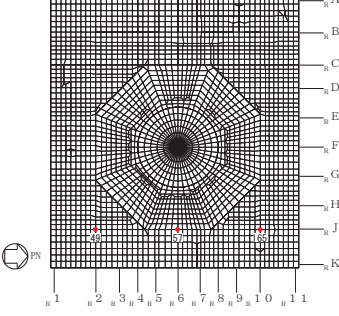
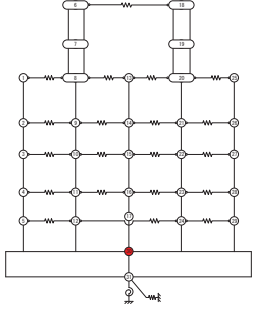
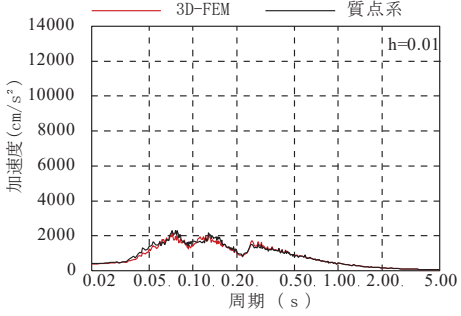
3次元 FEM モデル	質点系モデル	NS 方向応答 (IW-J)
 <p>O. P. 15.0m</p>	 <p>質点 10</p>	
 <p>O. P. 6.0m</p>	 <p>質点 11</p>	
 <p>O. P. -0.8m</p>	 <p>質点 12</p>	
 <p>O. P. -8.1m</p>	 <p>質点 30</p>	

表 3-9(5) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (5/22)

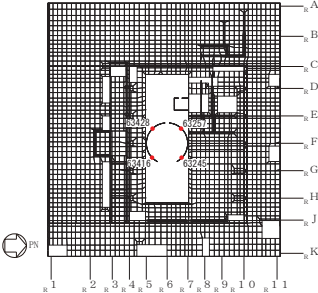
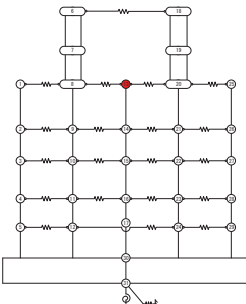
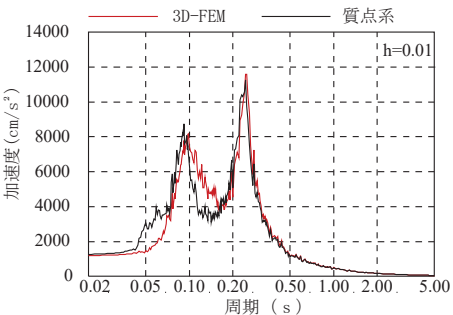
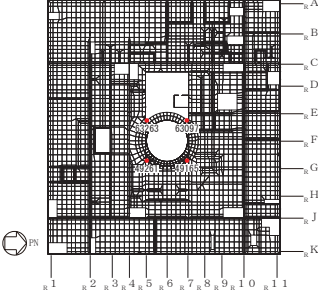
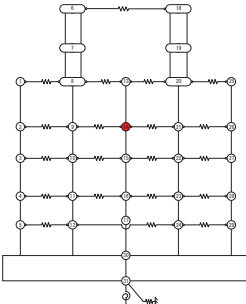
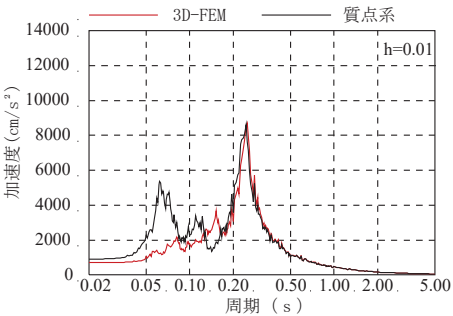
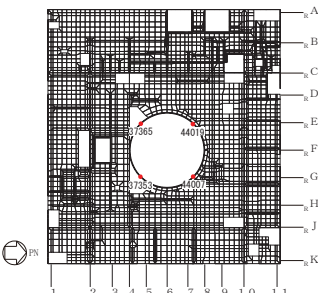
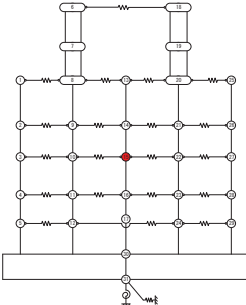
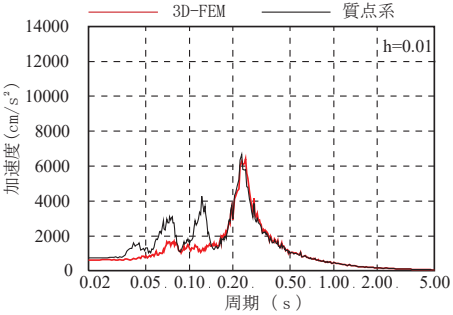
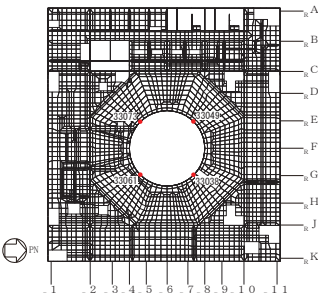
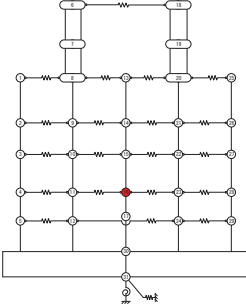
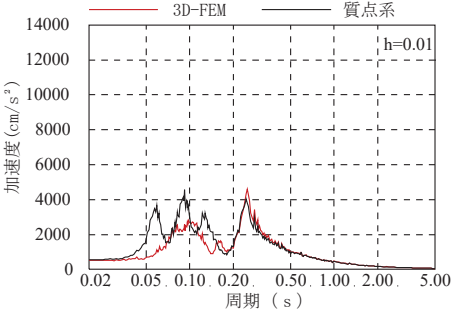
3次元 FEM モデル	質点系モデル	NS 方向応答 (SW)
 <p>O. P. 33. 2m</p>	 <p>質点 13</p>	
 <p>O. P. 22. 5m</p>	 <p>質点 14</p>	
 <p>O. P. 15. 0m</p>	 <p>質点 15</p>	
 <p>O. P. 6. 0m</p>	 <p>質点 16</p>	

表 3-9(6) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (6/22)

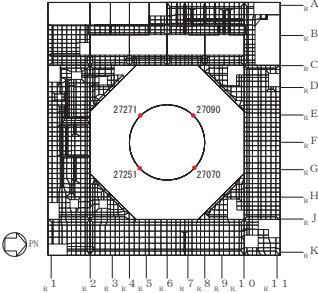
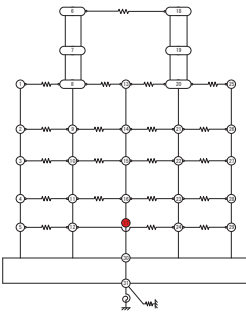
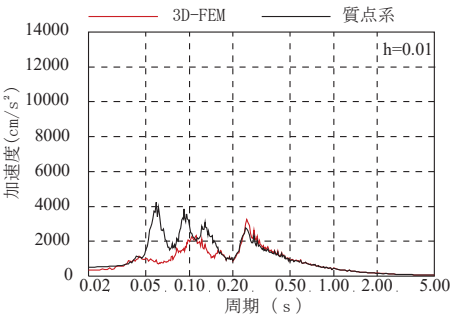
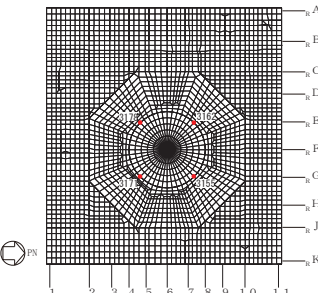
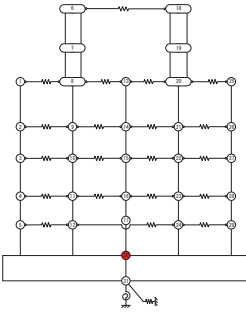
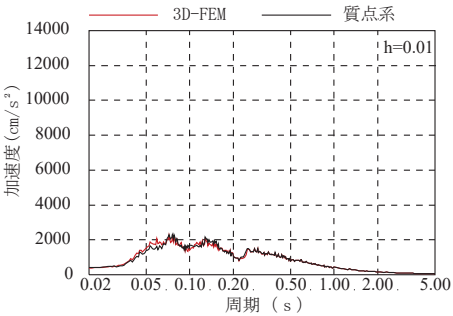
3次元 FEM モデル	質点系モデル	NS 方向応答 (SW)
 <p>O. P. 1. 15m</p>	 <p>質点 17</p>	
 <p>O. P. -8. 1m</p>	 <p>質点 30</p>	

表 3-9(7) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (7/22)

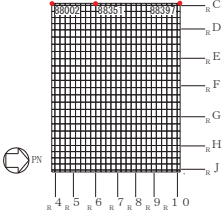
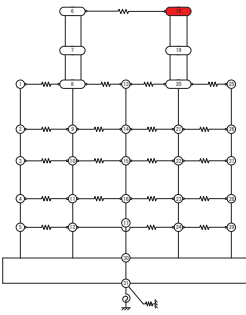
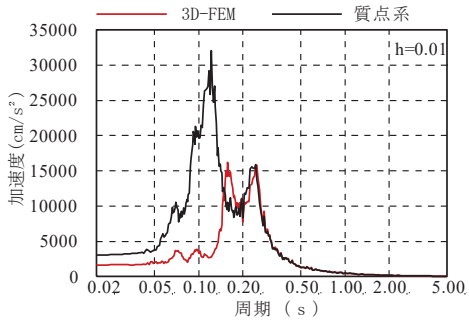
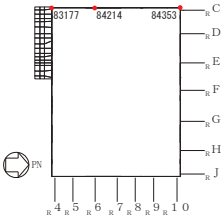
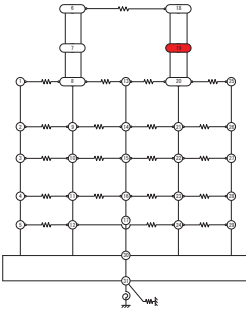
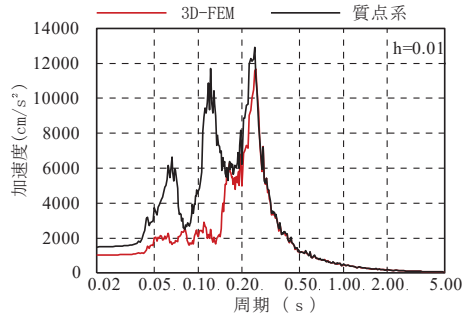
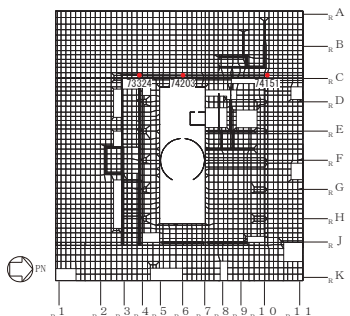
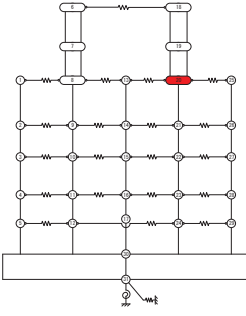
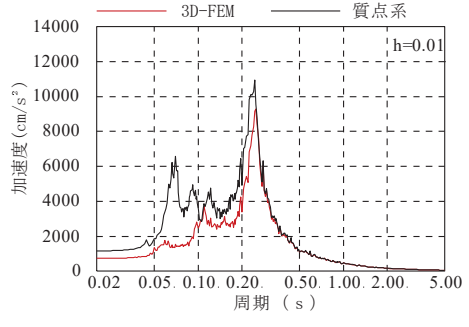
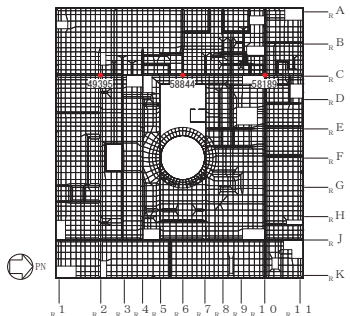
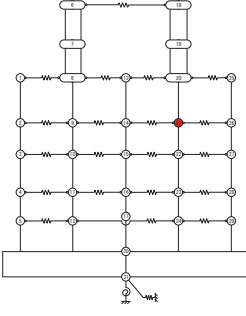
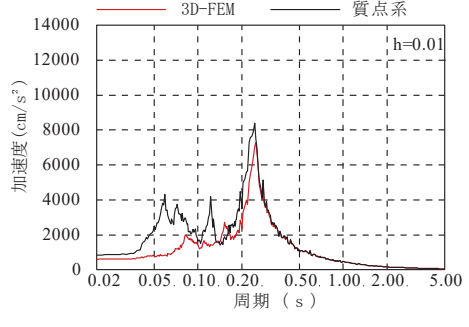
3次元 FEM モデル	質点系モデル	NS 方向応答 (IW-C)
 <p>O. P. 50. 5m</p>	 <p>質点 18</p>	
 <p>O. P. 41. 2m</p>	 <p>質点 19</p>	
 <p>O. P. 33. 2m</p>	 <p>質点 20</p>	
 <p>O. P. 22. 5m</p>	 <p>質点 21</p>	

表 3-9(8) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (8/22)

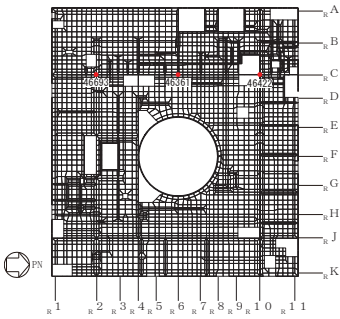
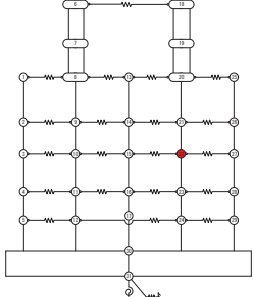
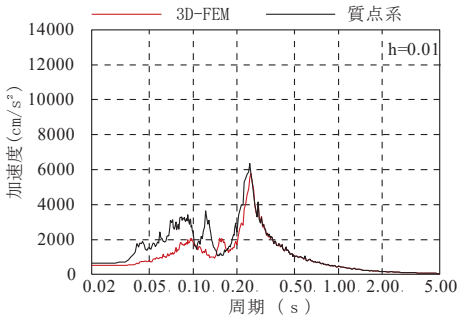
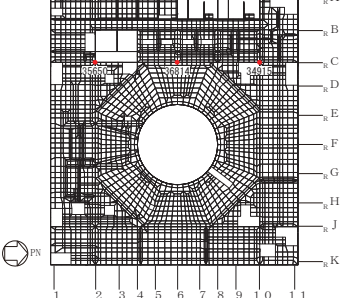
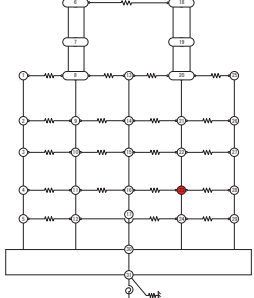
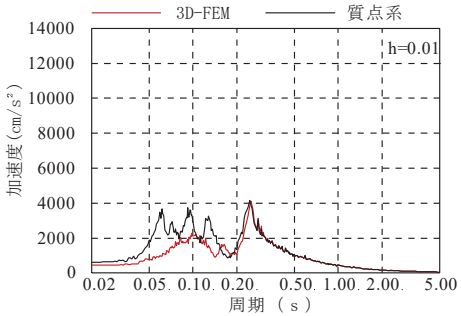
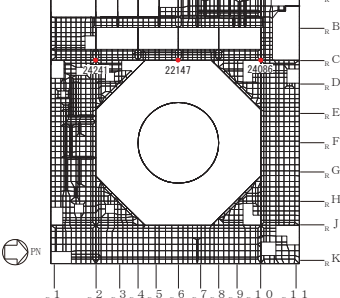
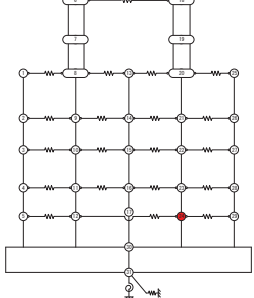
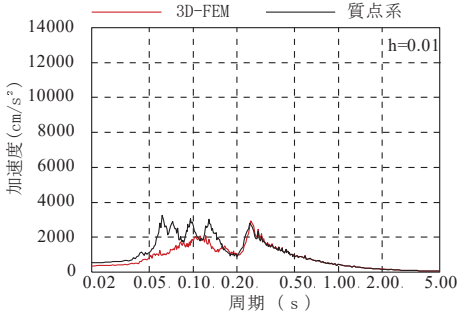
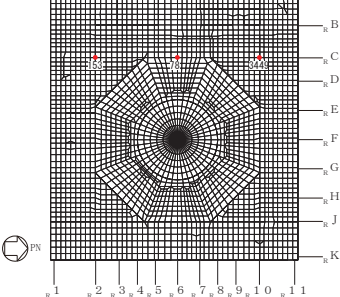
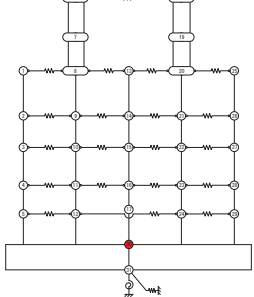
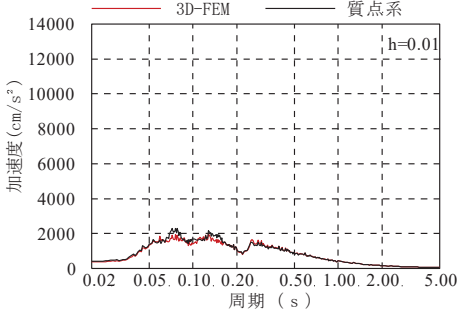
3次元 FEM モデル	質点系モデル	NS 方向応答 (IW-C)
 <p>O. P. 15.0m</p>	 <p>質点 22</p>	
 <p>O. P. 6.0m</p>	 <p>質点 23</p>	
 <p>O. P. -0.8m</p>	 <p>質点 24</p>	
 <p>O. P. -8.1m</p>	 <p>質点 30</p>	

表 3-9(9) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d-D 2) (9/22)

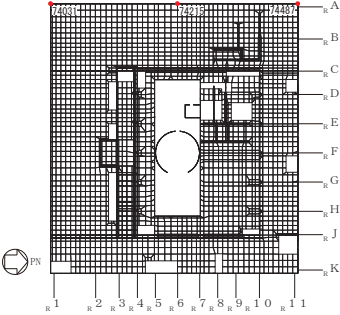
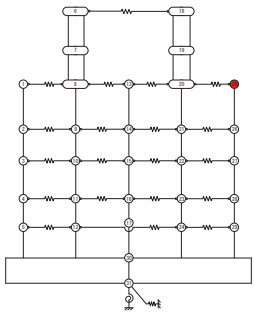
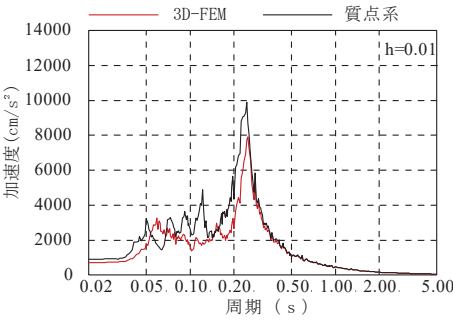
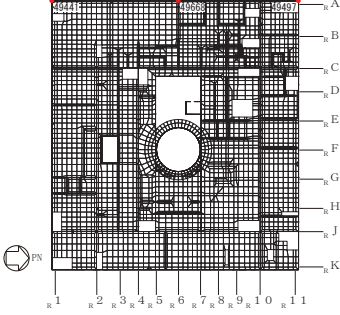
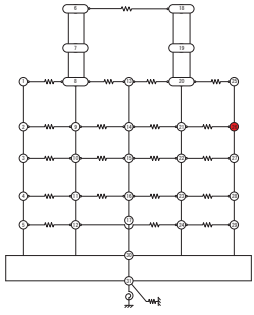
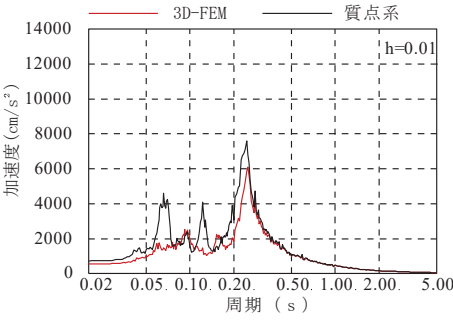
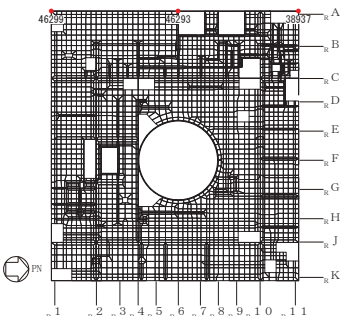
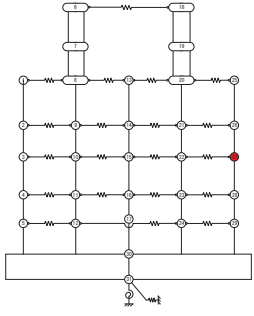
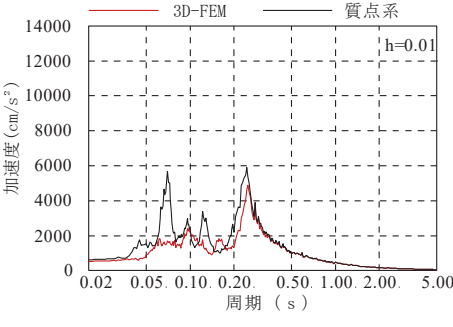
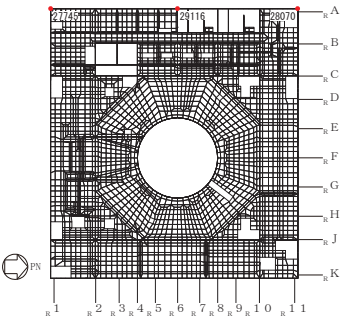
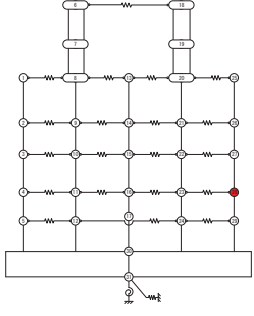
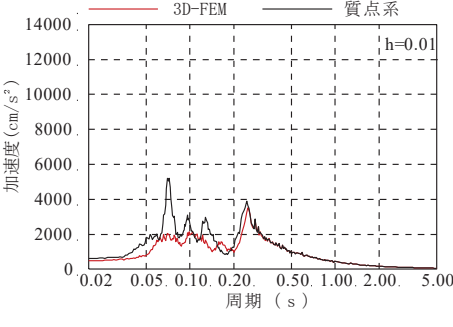
3次元 FEM モデル	質点系モデル	NS 方向応答 (0W-A)
 <p>O. P. 33. 2m</p>	 <p>質点 25</p>	
 <p>O. P. 22. 5m</p>	 <p>質点 26</p>	
 <p>O. P. 15. 0m</p>	 <p>質点 27</p>	
 <p>O. P. 6. 0m</p>	 <p>質点 28</p>	

表 3-9(10) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d-D 2) (10/22)

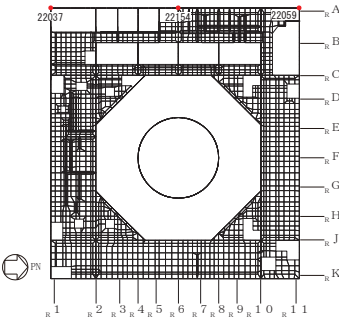
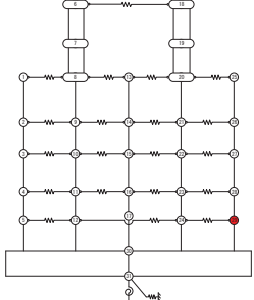
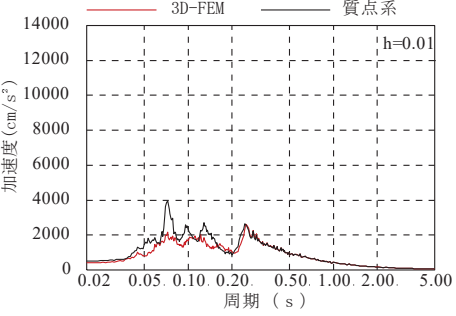
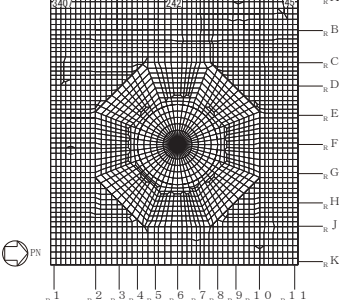
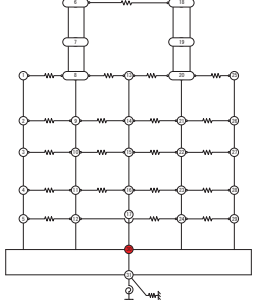
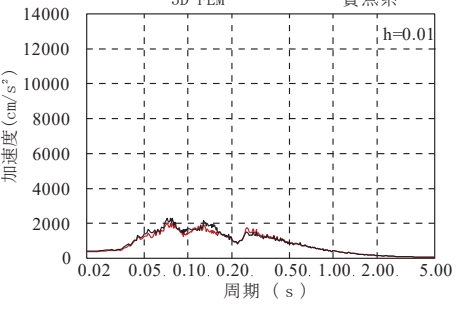
3次元 FEM モデル	質点系モデル	NS 方向応答 (OW-A)
 <p>O. P. -0.8m</p>	 <p>質点 29</p>	
 <p>O. P. -8.1m</p>	 <p>質点 30</p>	

表 3-9(11) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (11/22)

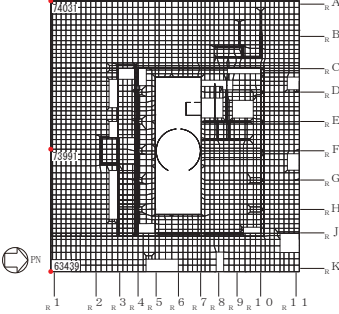
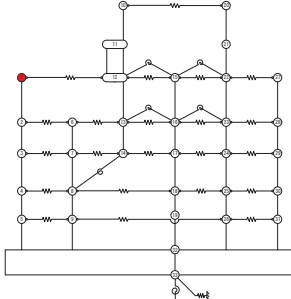
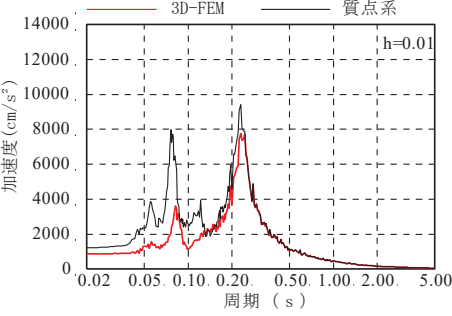
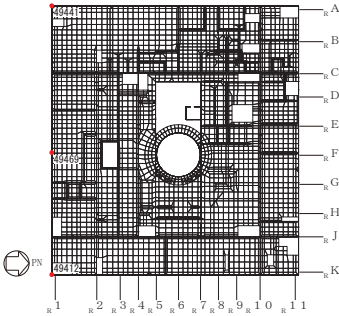
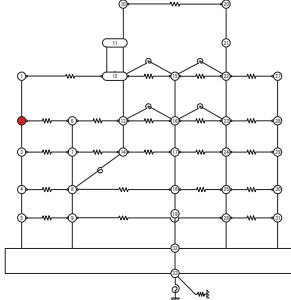
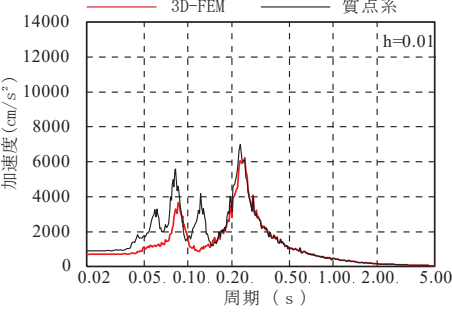
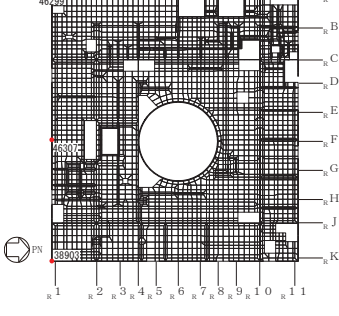
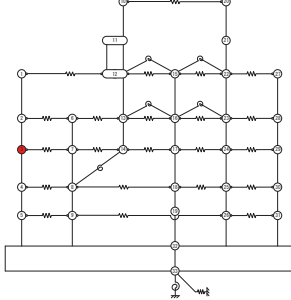
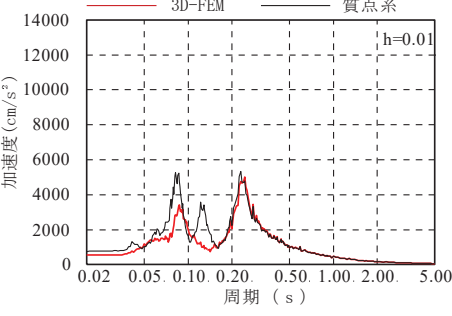
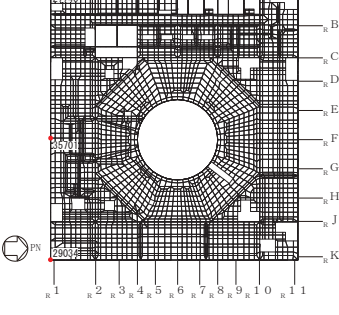
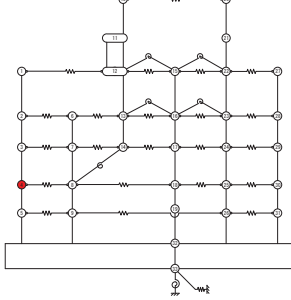
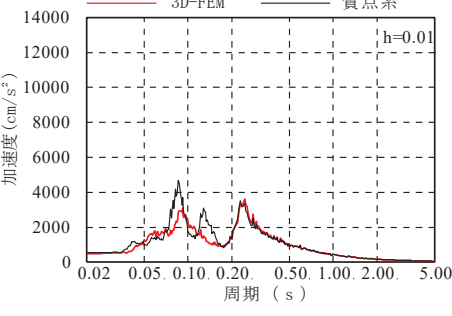
3次元 FEM モデル	質点系モデル	EW 方向応答 (0W-1)
 <p>O. P. 33.2m</p>	 <p>質点 1</p>	
 <p>O. P. 22.5m</p>	 <p>質点 2</p>	
 <p>O. P. 15.0m</p>	 <p>質点 3</p>	
 <p>O. P. 6.0m</p>	 <p>質点 4</p>	

表 3-9(12) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (12/22)

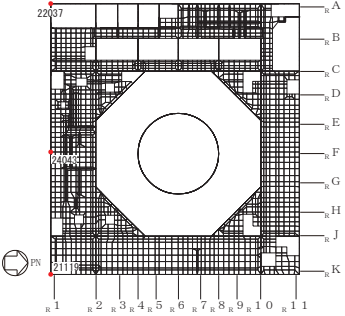
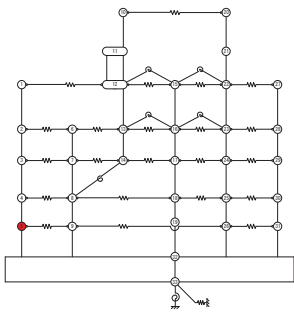
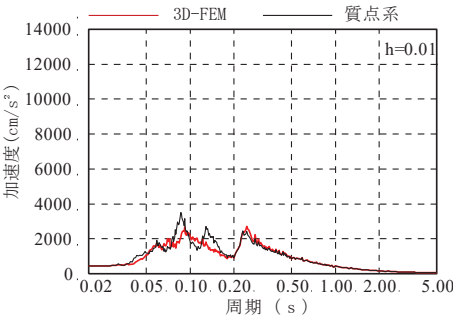
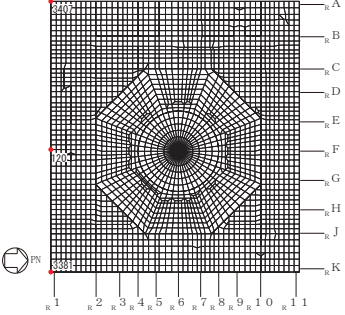
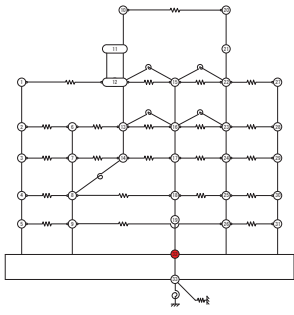
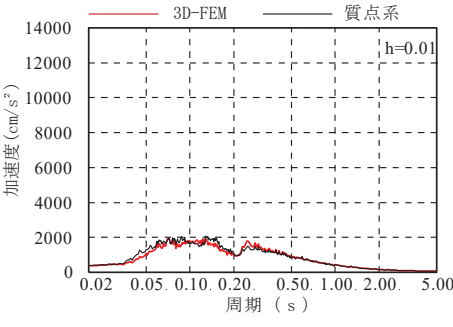
3次元 FEM モデル	質点系モデル	EW 方向応答 (0W-1)
 <p>O. P. -0.8m</p>	 <p>質点 5</p>	
 <p>O. P. -8.1m</p>	 <p>質点 32</p>	

表 3-9(13) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d-D 2) (13/22)

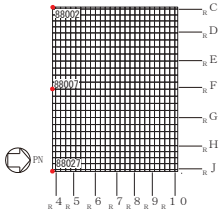
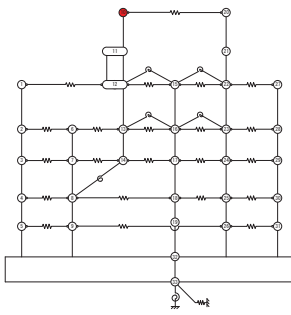
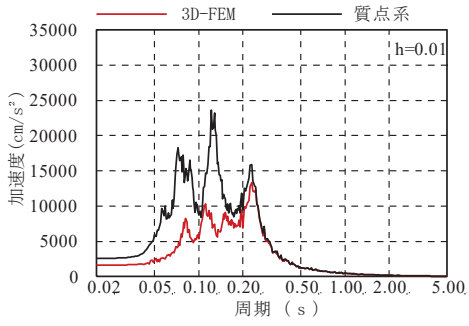
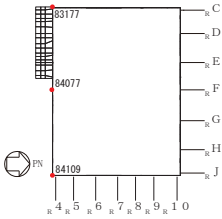
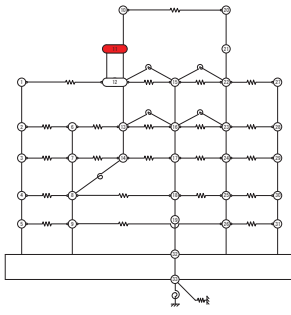
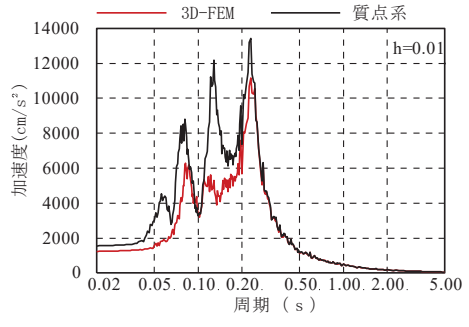
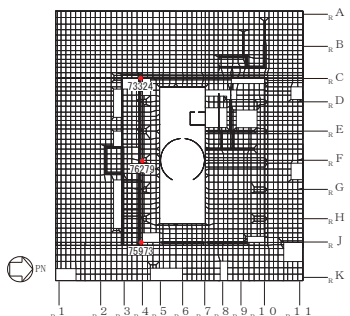
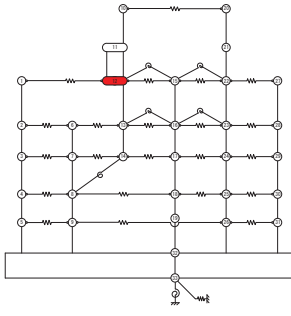
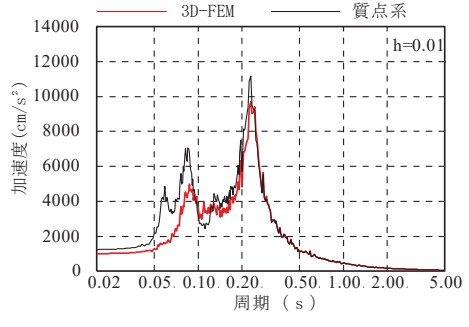
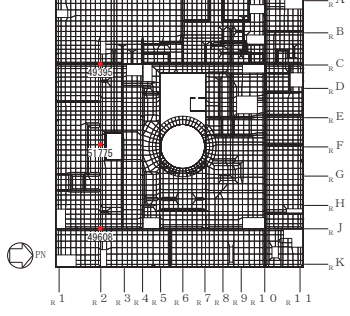
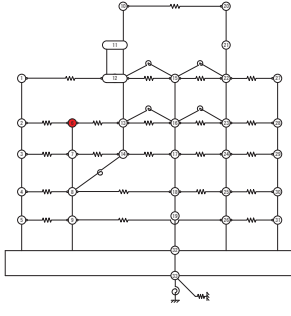
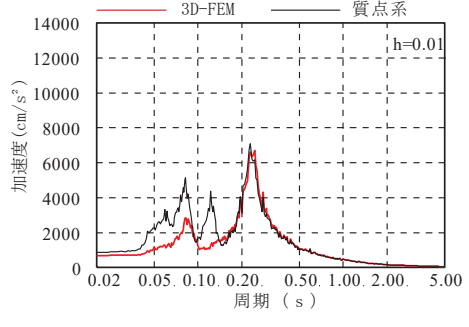
3次元 FEM モデル	質点系モデル	EW 方向応答 (IW-2, IW-4)
 <p>O. P. 50. 5m</p>	 <p>質点 10</p>	
 <p>O. P. 41. 2m</p>	 <p>質点 11</p>	
 <p>O. P. 33. 2m</p>	 <p>質点 12</p>	
 <p>O. P. 22. 5m</p>	 <p>質点 6</p>	

表 3-9(14) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (14/22)

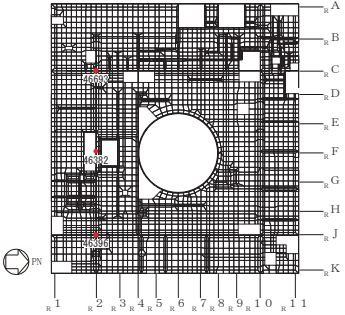
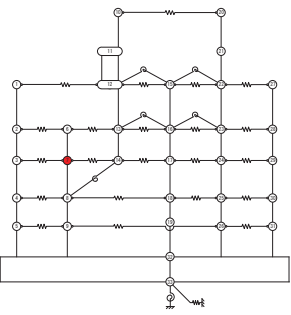
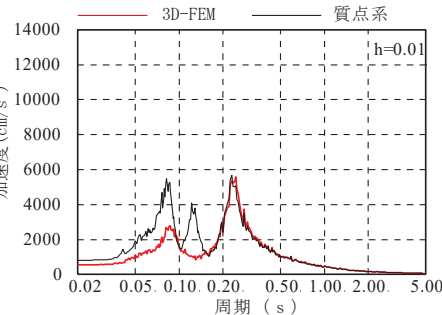
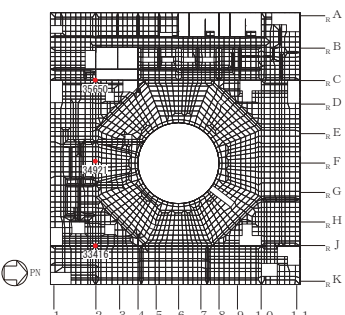
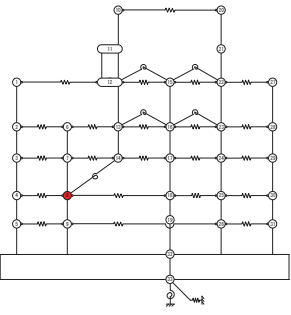
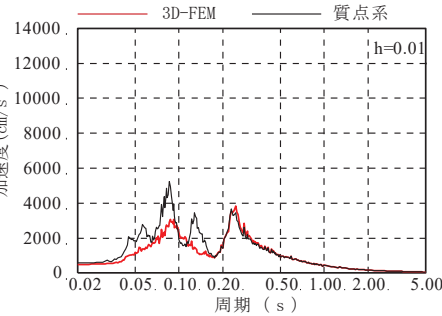
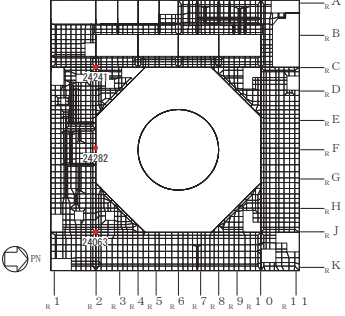
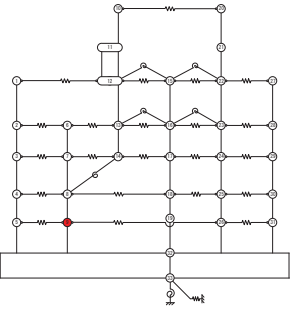
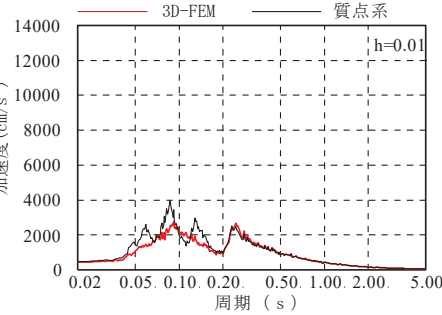
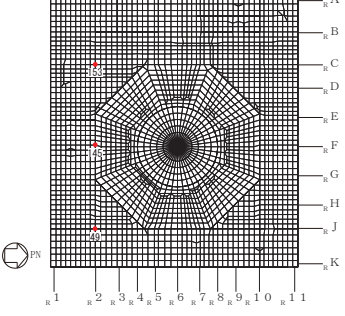
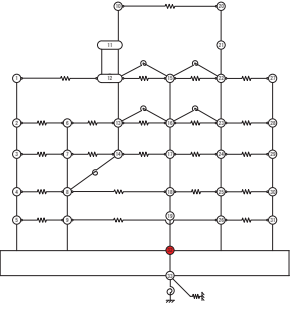
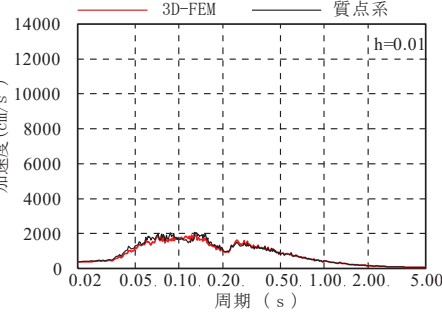
3次元 FEM モデル	質点系モデル	EW 方向応答 (IW-2)
 <p>O. P. 15.0m</p>	 <p>質点 7</p>	
 <p>O. P. 6.0m</p>	 <p>質点 8</p>	
 <p>O. P. -0.8m</p>	 <p>質点 9</p>	
 <p>O. P. -8.1m</p>	 <p>質点 32</p>	

表 3-9(15) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (15/22)

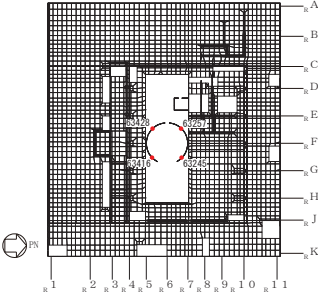
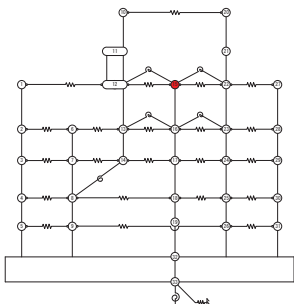
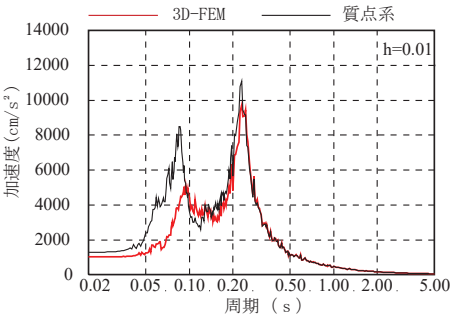
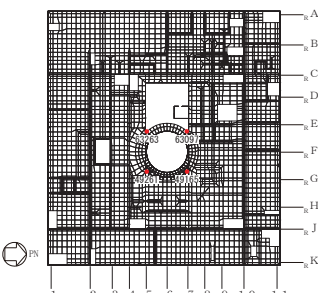
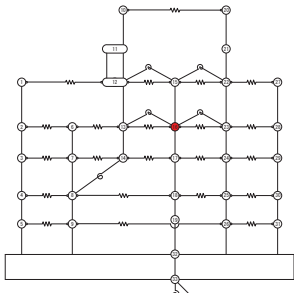
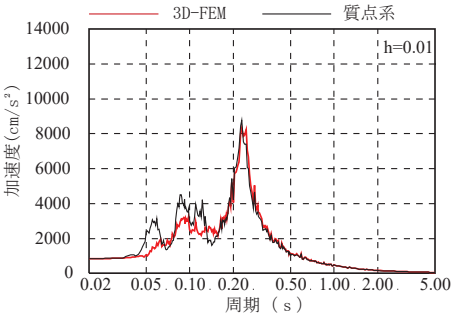
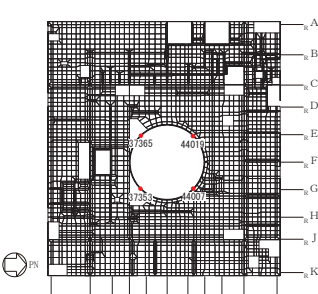
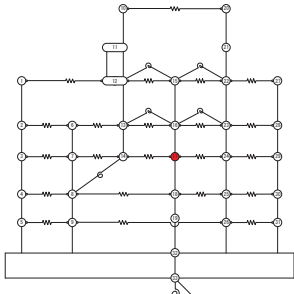
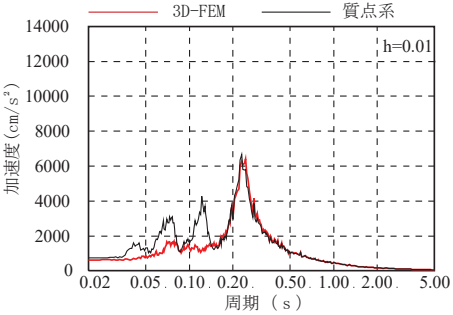
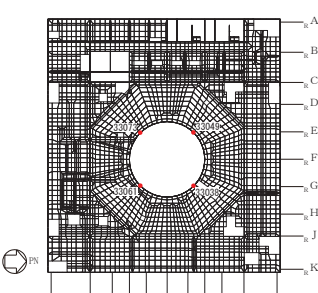
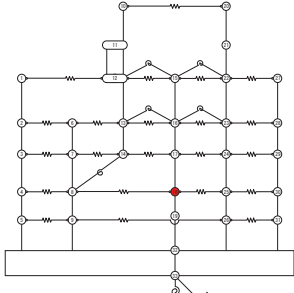
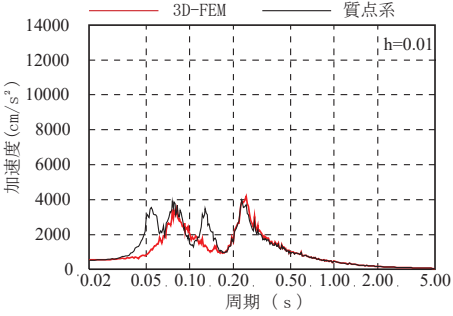
3次元 FEM モデル	質点系モデル	EW 方向応答 (SW)
 <p>O. P. 33.2m</p>	 <p>質点 15</p>	
 <p>O. P. 22.5m</p>	 <p>質点 16</p>	
 <p>O. P. 15.0m</p>	 <p>質点 17</p>	
 <p>O. P. 6.0m</p>	 <p>質点 18</p>	

表 3-9(16) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (16/22)

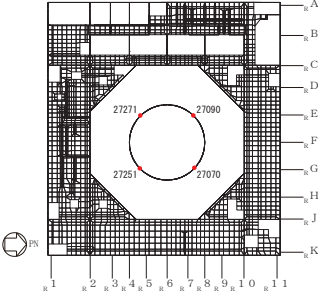
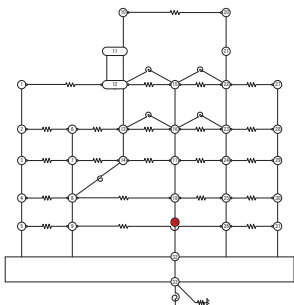
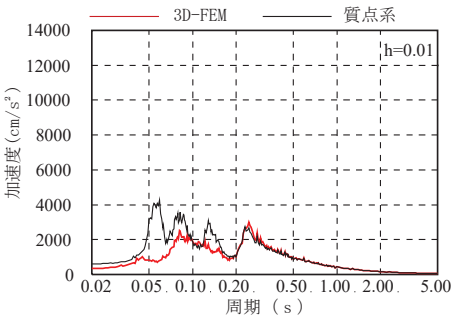
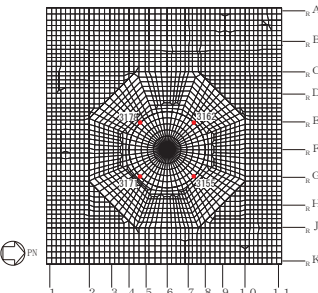
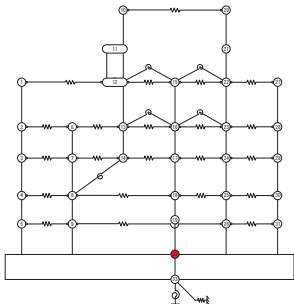
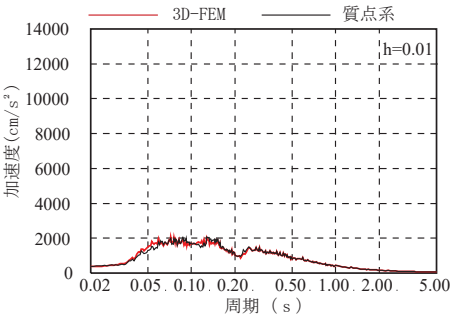
3次元 FEM モデル	質点系モデル	EW 方向応答 (SW)
 <p>O. P. 1. 15m</p>	 <p>質点 19</p>	
 <p>O. P. -8. 1m</p>	 <p>質点 32</p>	

表 3-9(17) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (17/22)

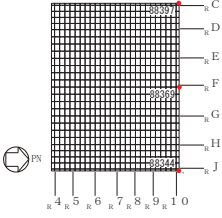
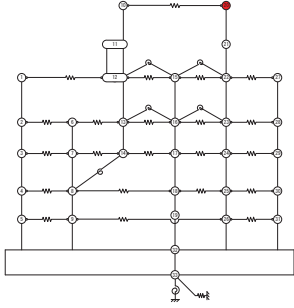
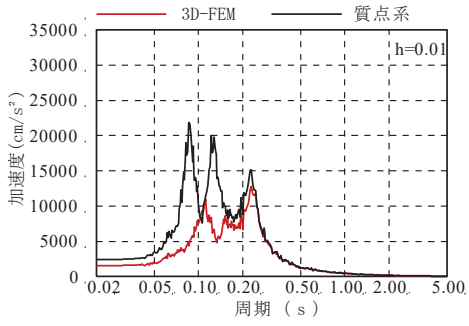
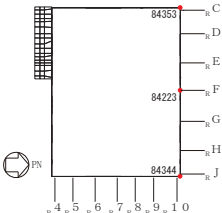
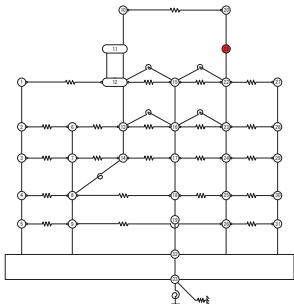
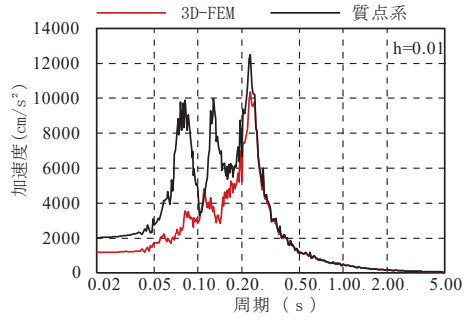
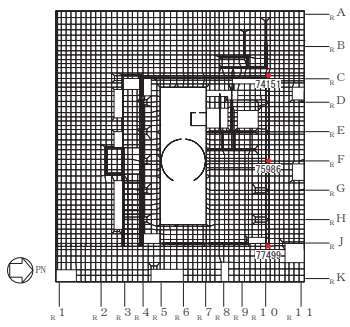
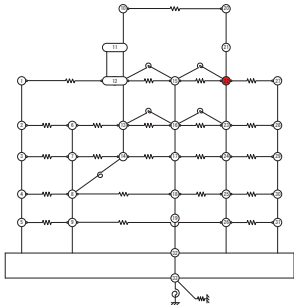
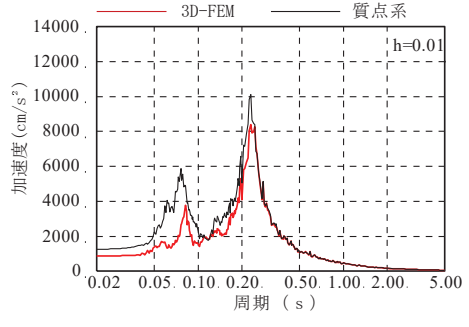
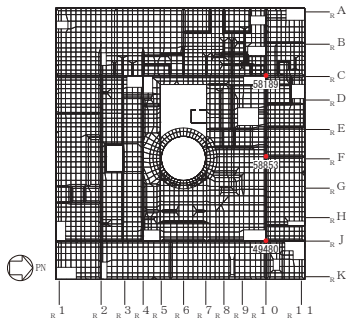
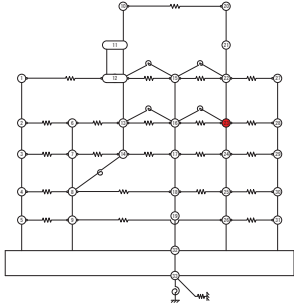
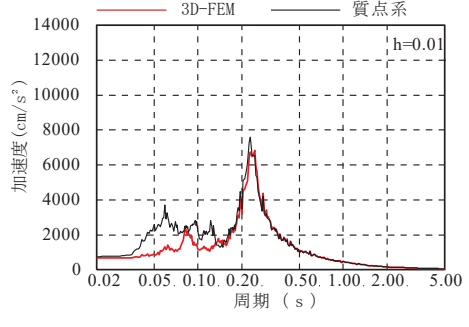
3次元 FEM モデル	質点系モデル	EW 方向応答 (IW-10)
 <p>O. P. 50. 5m</p>	 <p>質点 20</p>	
 <p>O. P. 41. 2m</p>	 <p>質点 21</p>	
 <p>O. P. 33. 2m</p>	 <p>質点 22</p>	
 <p>O. P. 22. 5m</p>	 <p>質点 23</p>	

表 3-9(18) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (18/22)

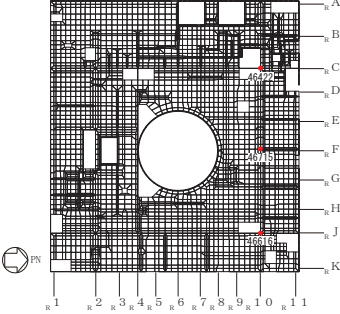
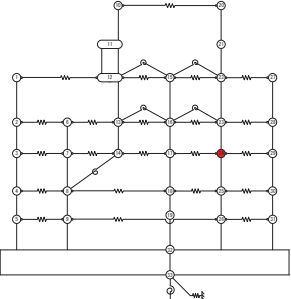
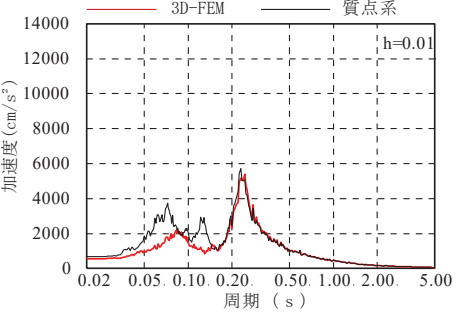
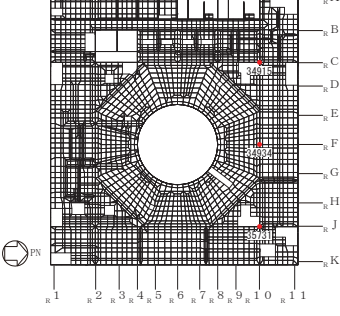
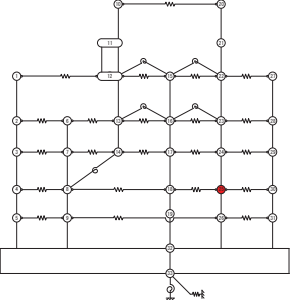
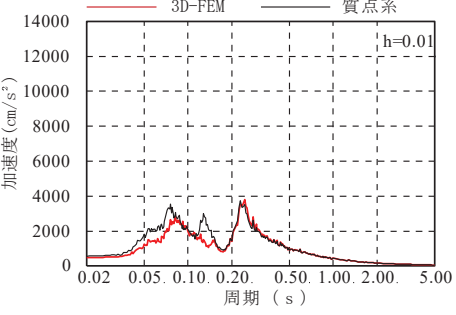
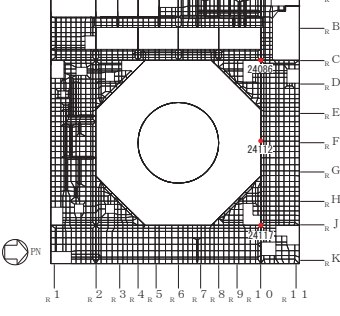
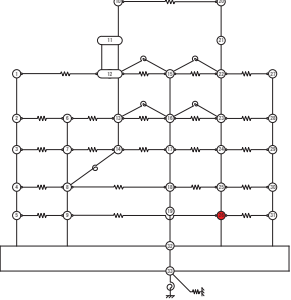
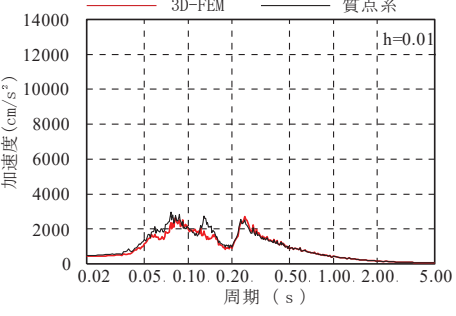
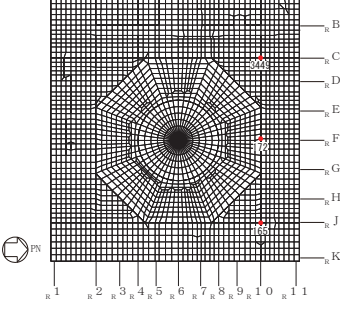
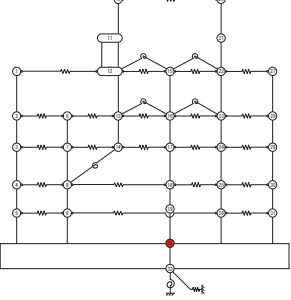
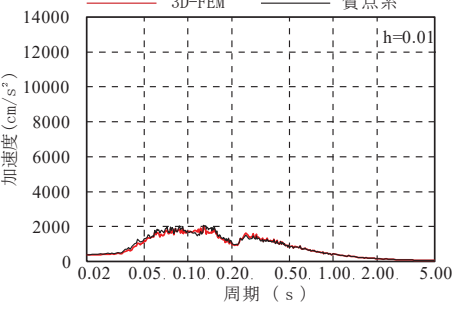
3次元 FEM モデル	質点系モデル	EW 方向応答 (IW-10)
 <p>O. P. 15.0m</p>	 <p>質点 24</p>	
 <p>O. P. 6.0m</p>	 <p>質点 25</p>	
 <p>O. P. -0.8m</p>	 <p>質点 26</p>	
 <p>O. P. -8.1m</p>	 <p>質点 32</p>	

表 3-9(19) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (19/22)

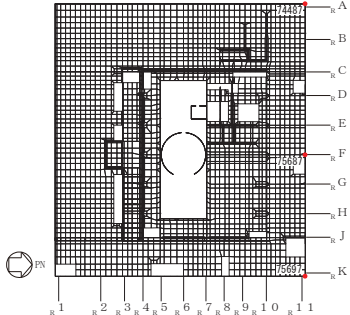
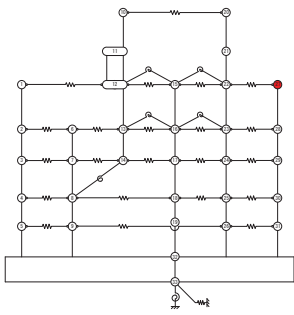
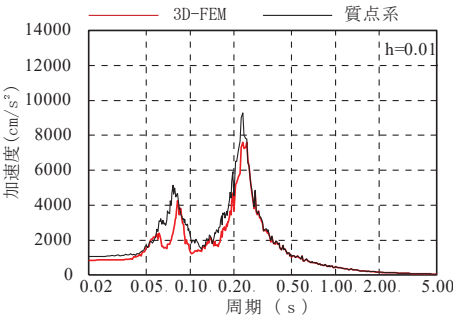
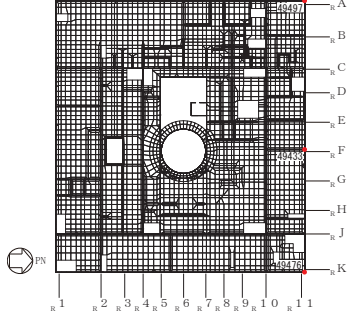
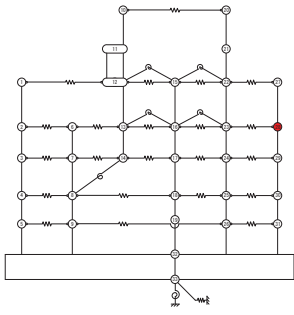
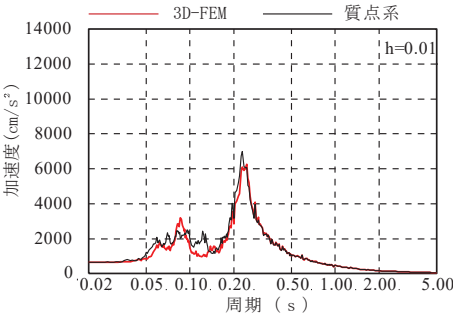
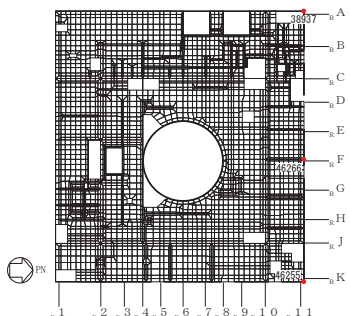
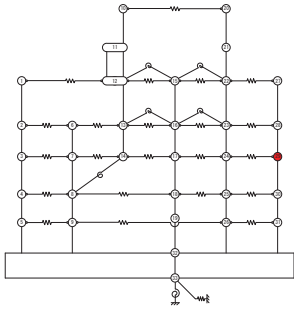
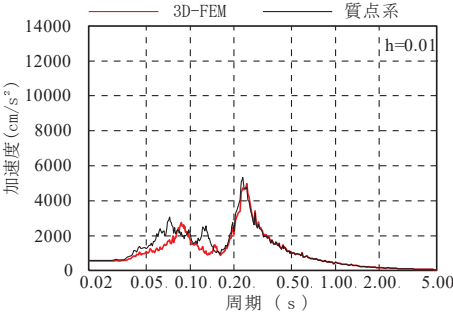
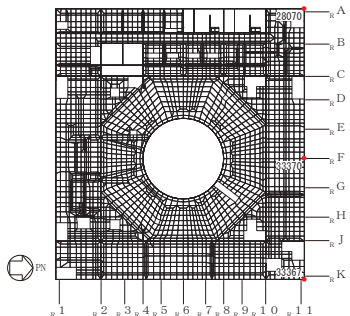
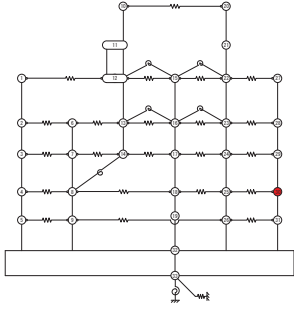
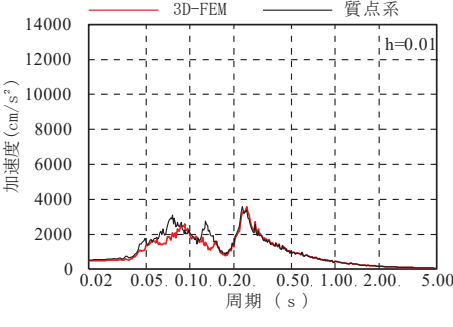
3次元 FEM モデル	質点系モデル	EW 方向応答 (0W-11)
 <p>O. P. 33.2m</p>	 <p>質点 27</p>	
 <p>O. P. 22.5m</p>	 <p>質点 28</p>	
 <p>O. P. 15.0m</p>	 <p>質点 29</p>	
 <p>O. P. 6.0m</p>	 <p>質点 30</p>	

表 3-9(20) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (20/22)

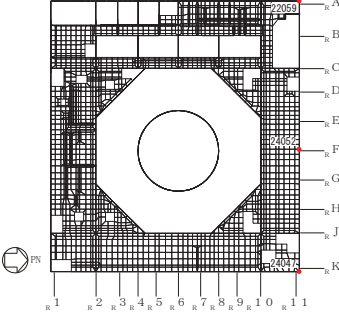
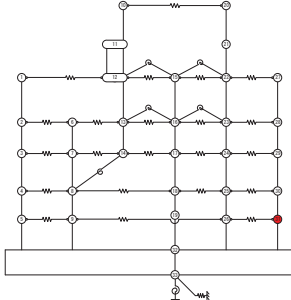
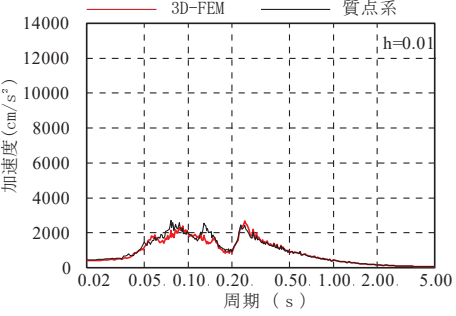
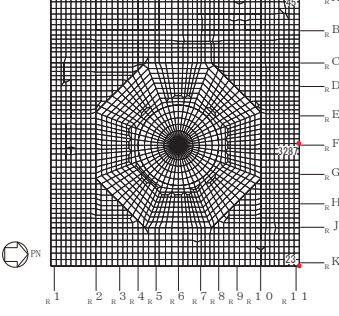
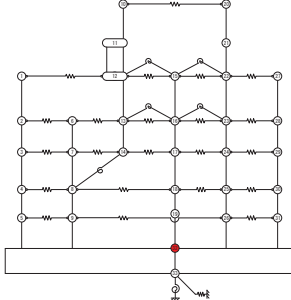
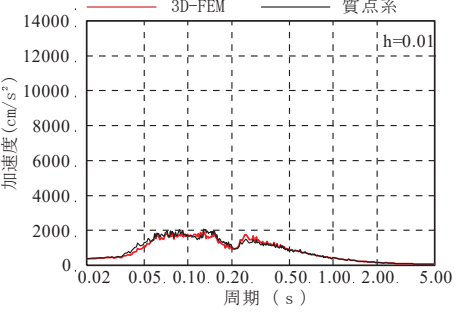
3次元 FEM モデル	質点系モデル	EW 方向応答 (0W-11)
 <p>O. P. -0.8m</p>	 <p>質点 31</p>	
 <p>O. P. -8.1m</p>	 <p>質点 32</p>	

表 3-9(21) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (21/22)

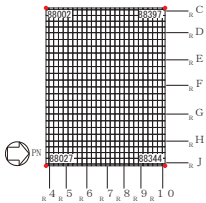
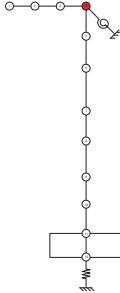
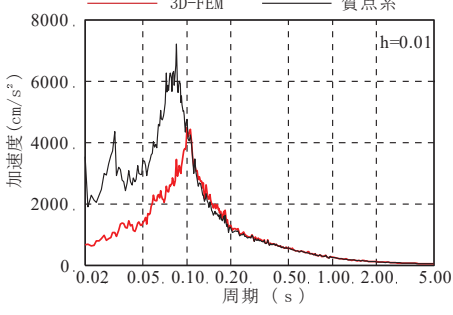
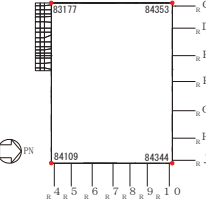
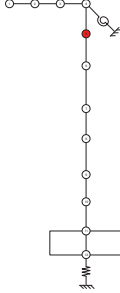
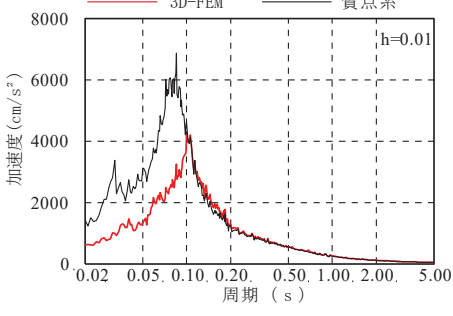
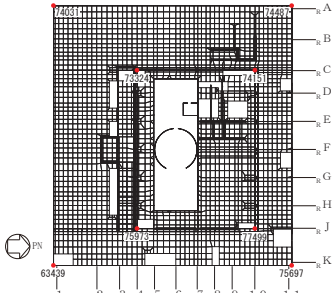
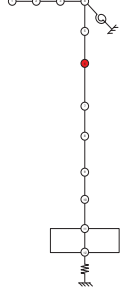
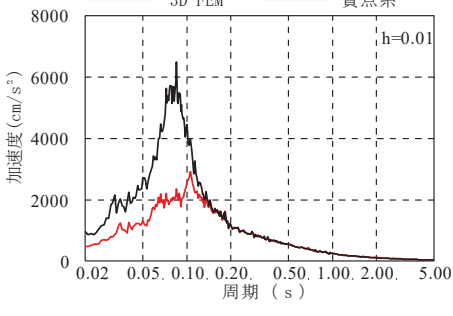
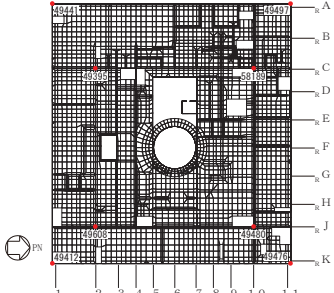
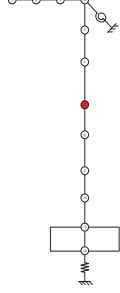
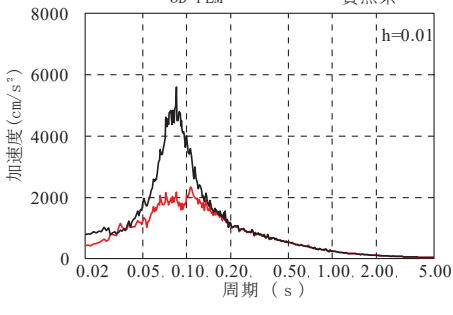
3次元 FEM モデル	質点系モデル	UD 方向応答
 <p>O. P. 50.5m</p>	 <p>質点 4</p>	
 <p>O. P. 41.2m</p>	 <p>質点 5</p>	
 <p>O. P. 33.2m</p>	 <p>質点 6</p>	
 <p>O. P. 22.5m</p>	 <p>質点 7</p>	

表 3-9(22) 3次元 FEM モデルと質点系モデルの応答比較 (S d - D 2) (22/22)

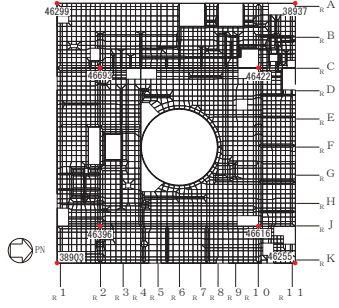
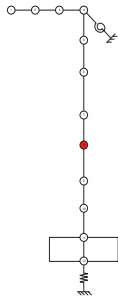
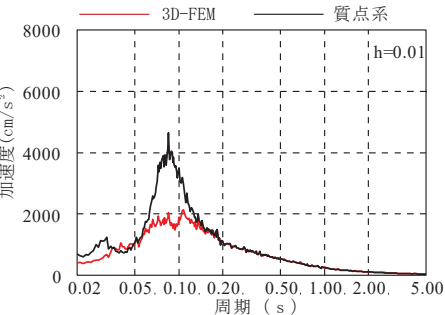
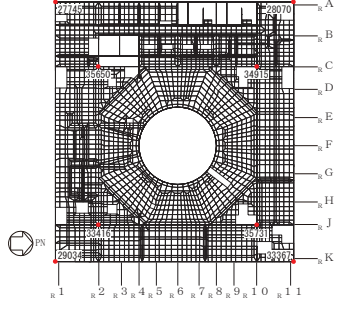
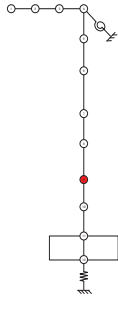
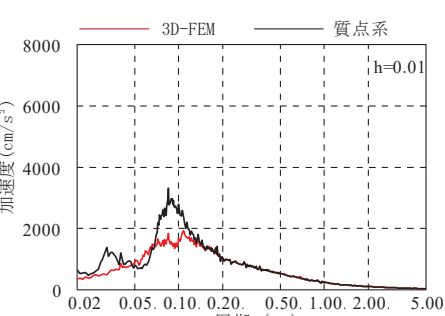
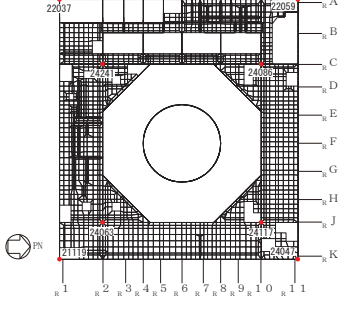
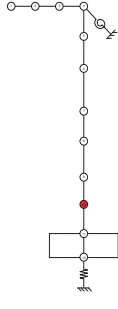
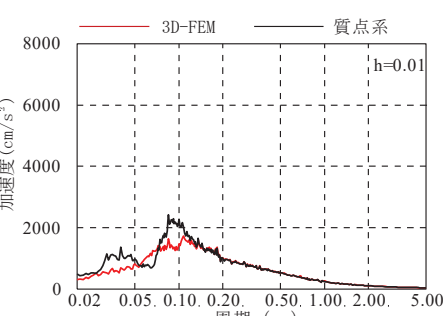
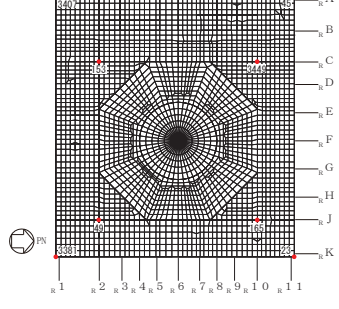
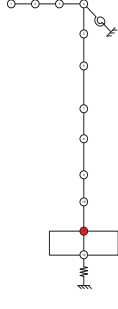
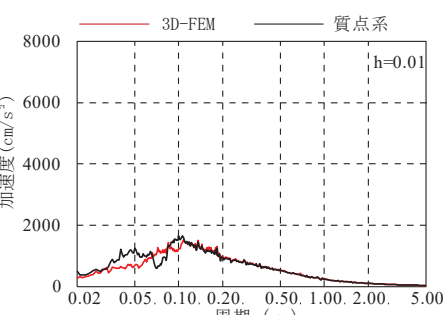
3次元 FEM モデル	質点系モデル	UD 方向応答
 <p>O.P. 15.0m</p>	 <p>質点 8</p>	
 <p>O.P. 6.0m</p>	 <p>質点 9</p>	
 <p>O.P. -0.8m</p>	 <p>質点 10</p>	
 <p>O.P. -8.1m</p>	 <p>質点 11</p>	

表 3-10(1) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (1/24)

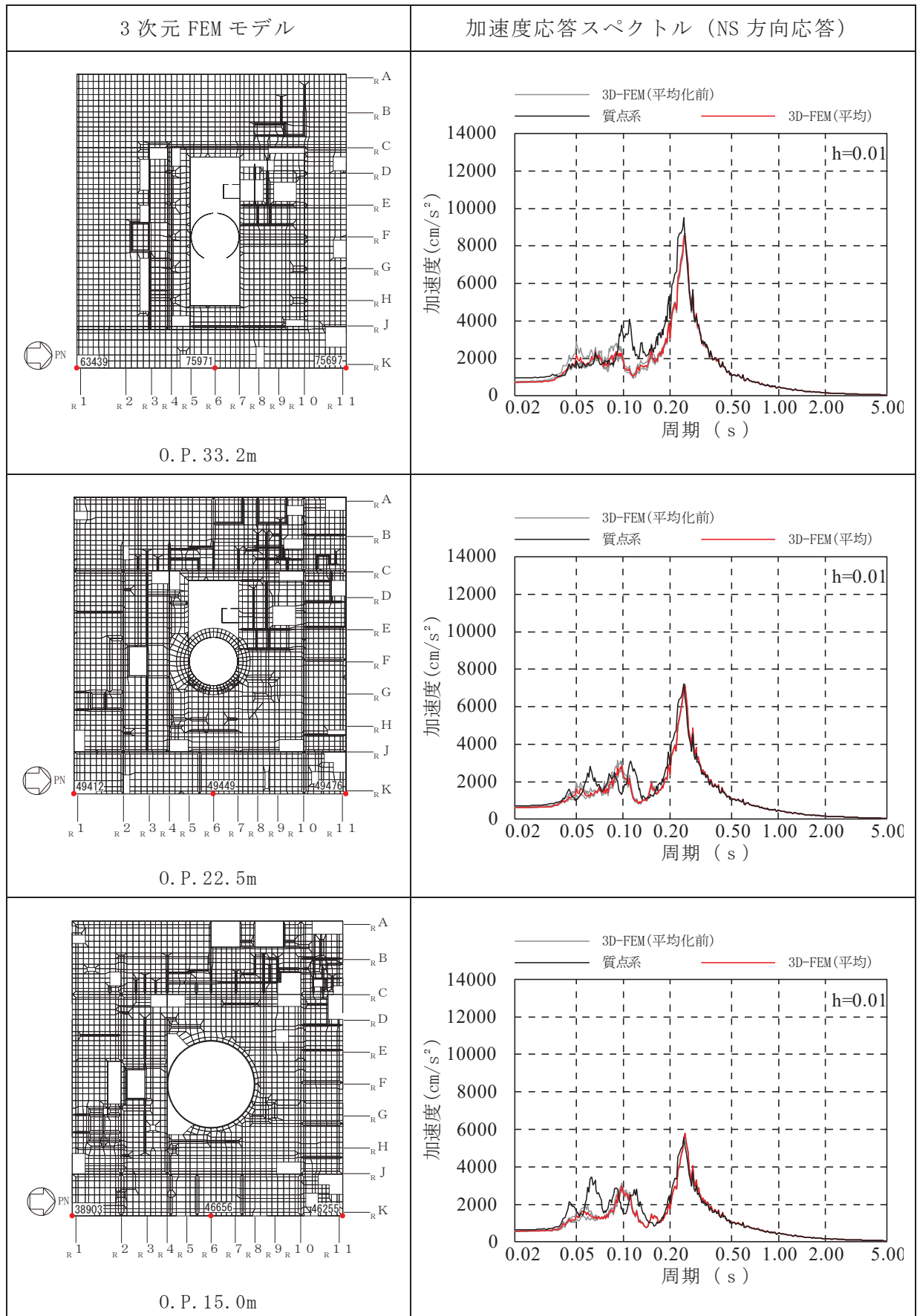


表 3-10(2) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (2/24)

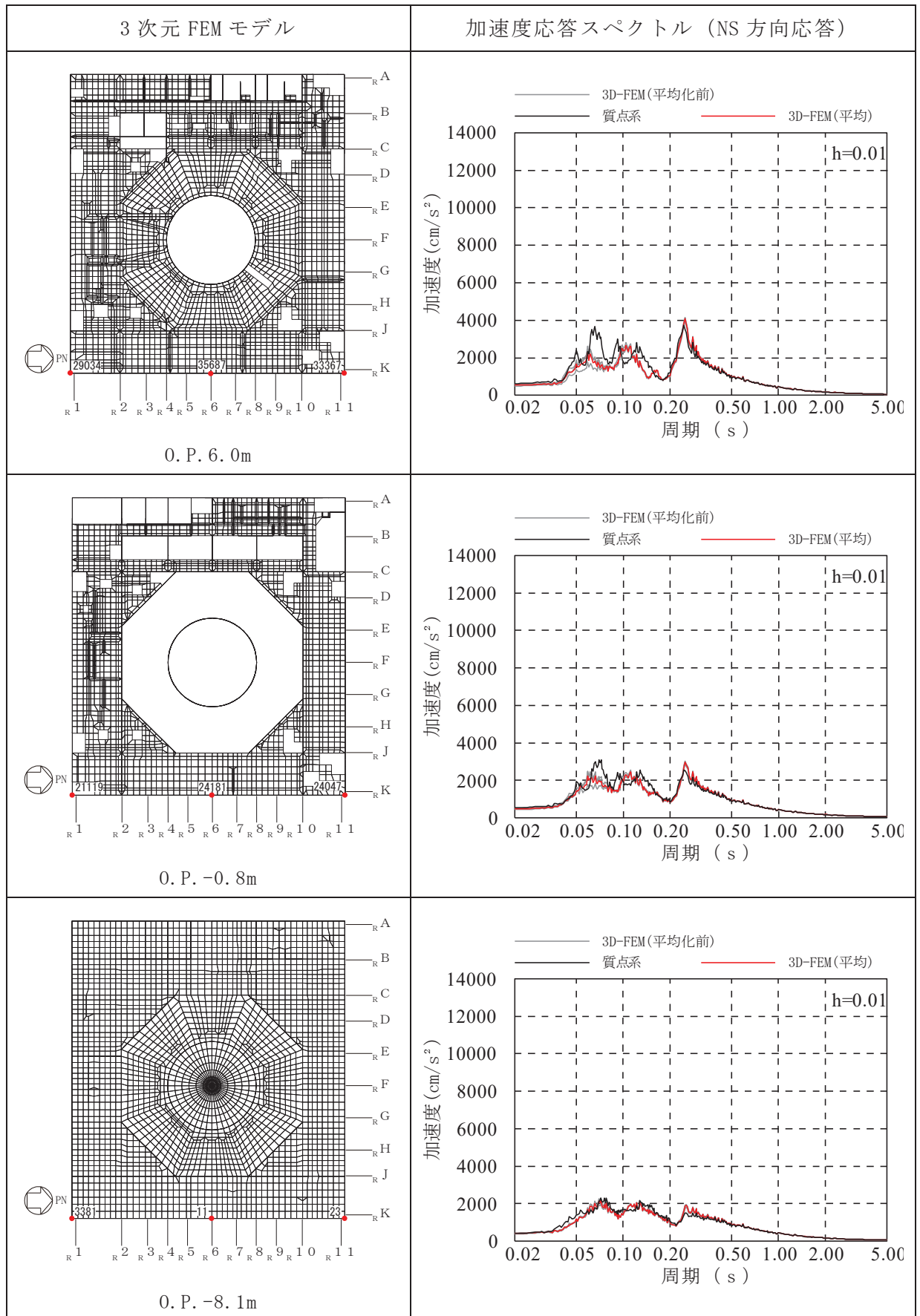


表 3-10(3) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較(3/24)

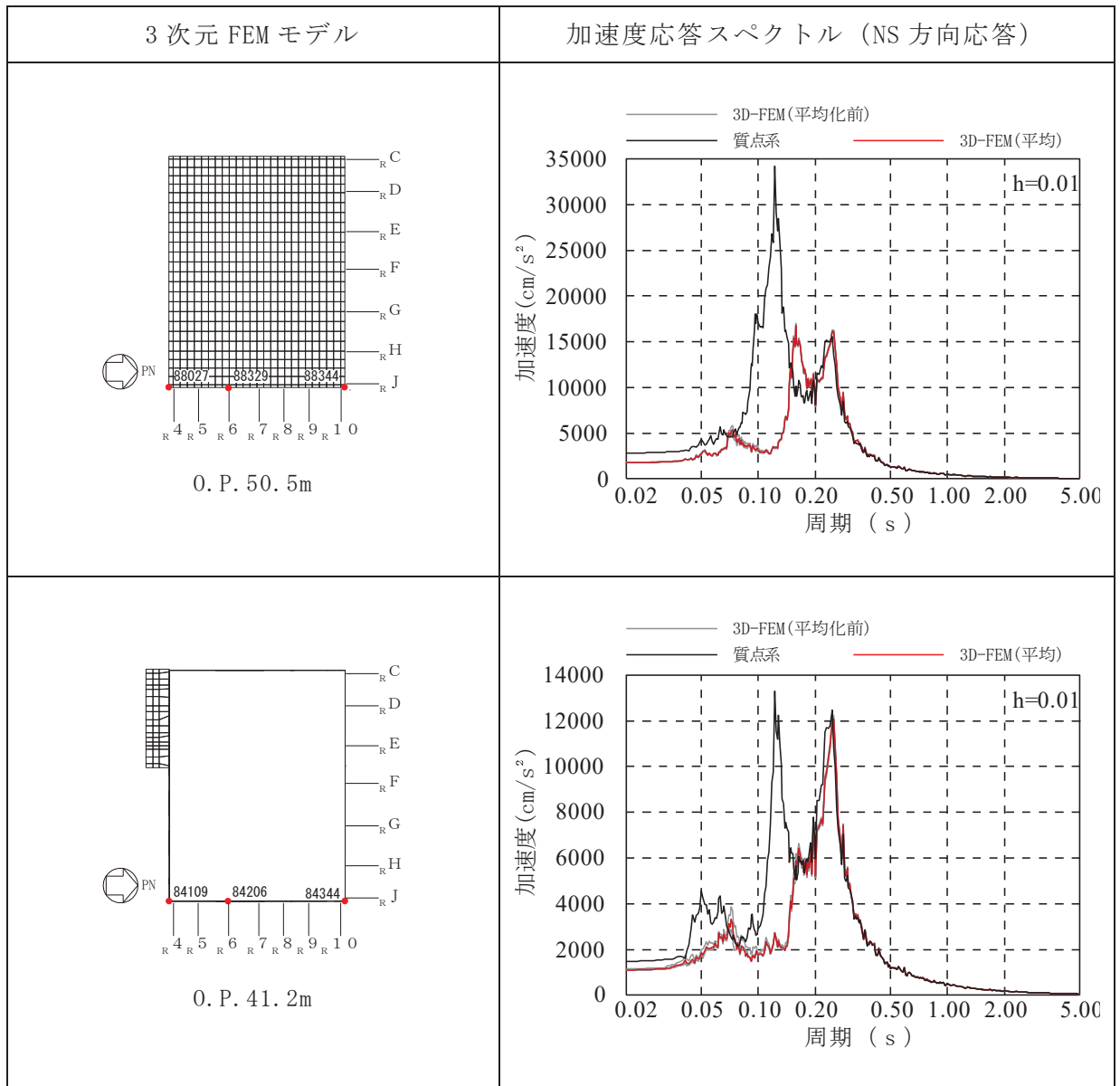


表 3-10(4) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較(4/24)

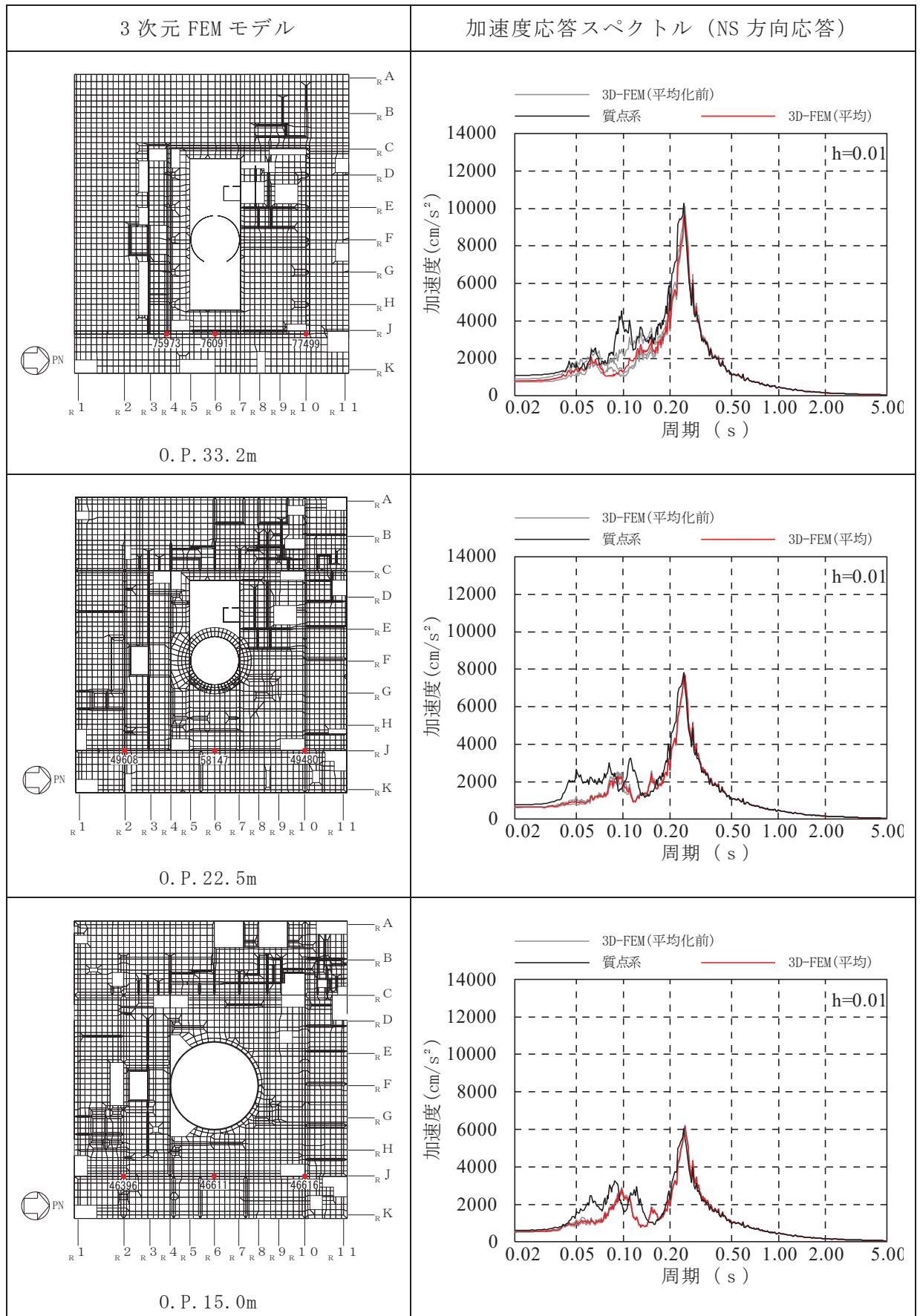


表 3-10(5) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (5/24)

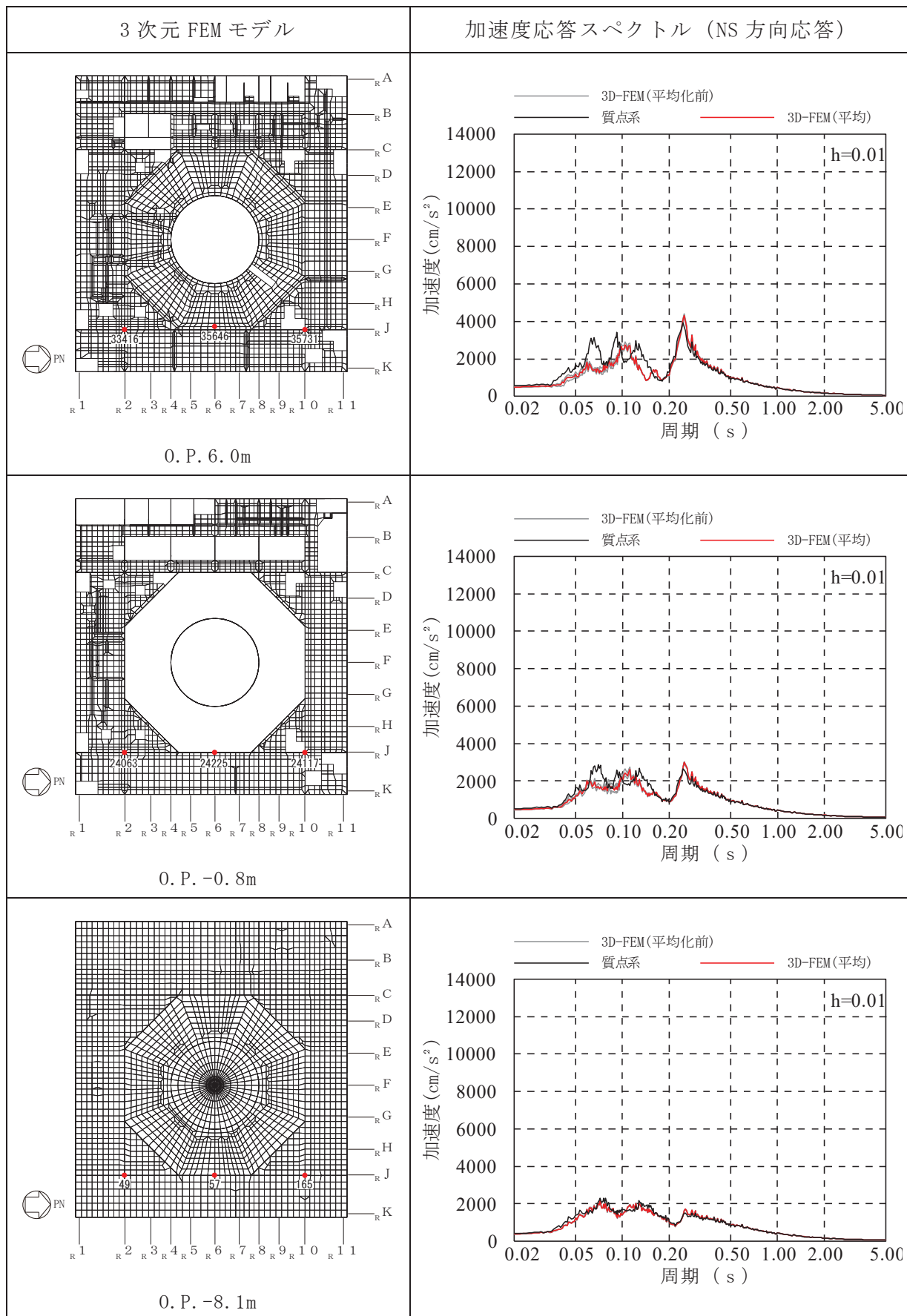


表 3-10(6) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (6/24)

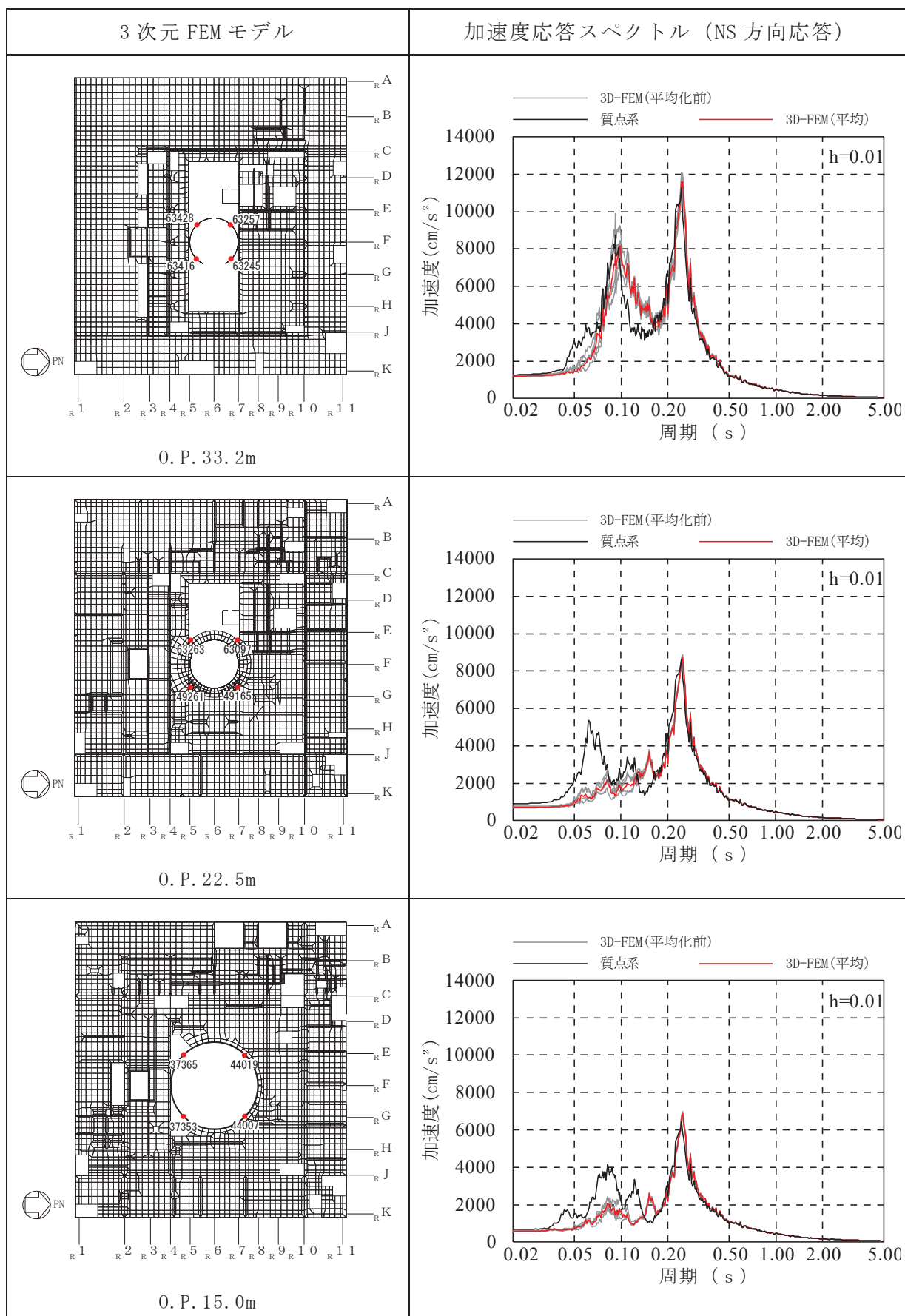


表 3-10(7) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (7/24)

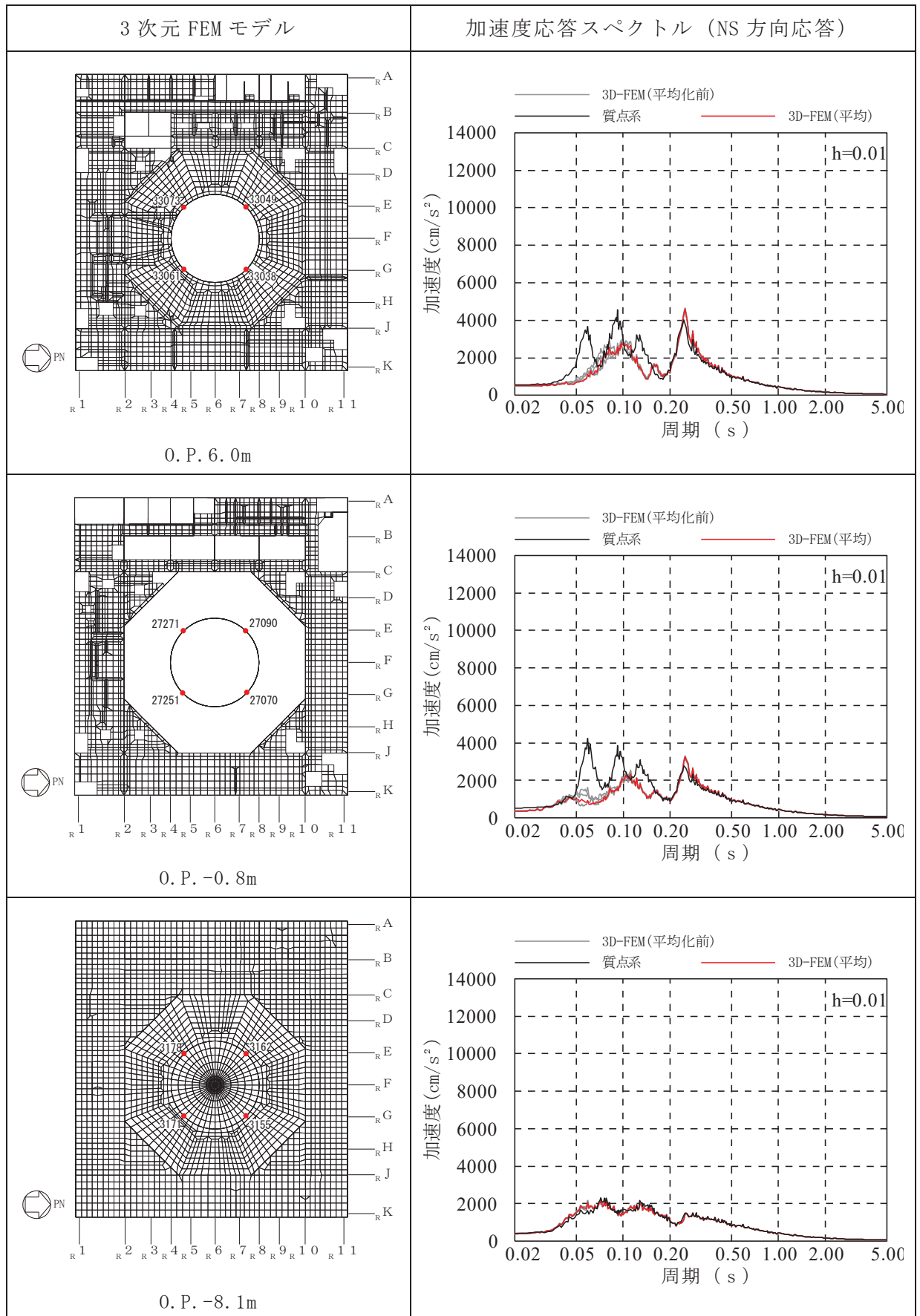


表 3-10(8) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較(8/24)

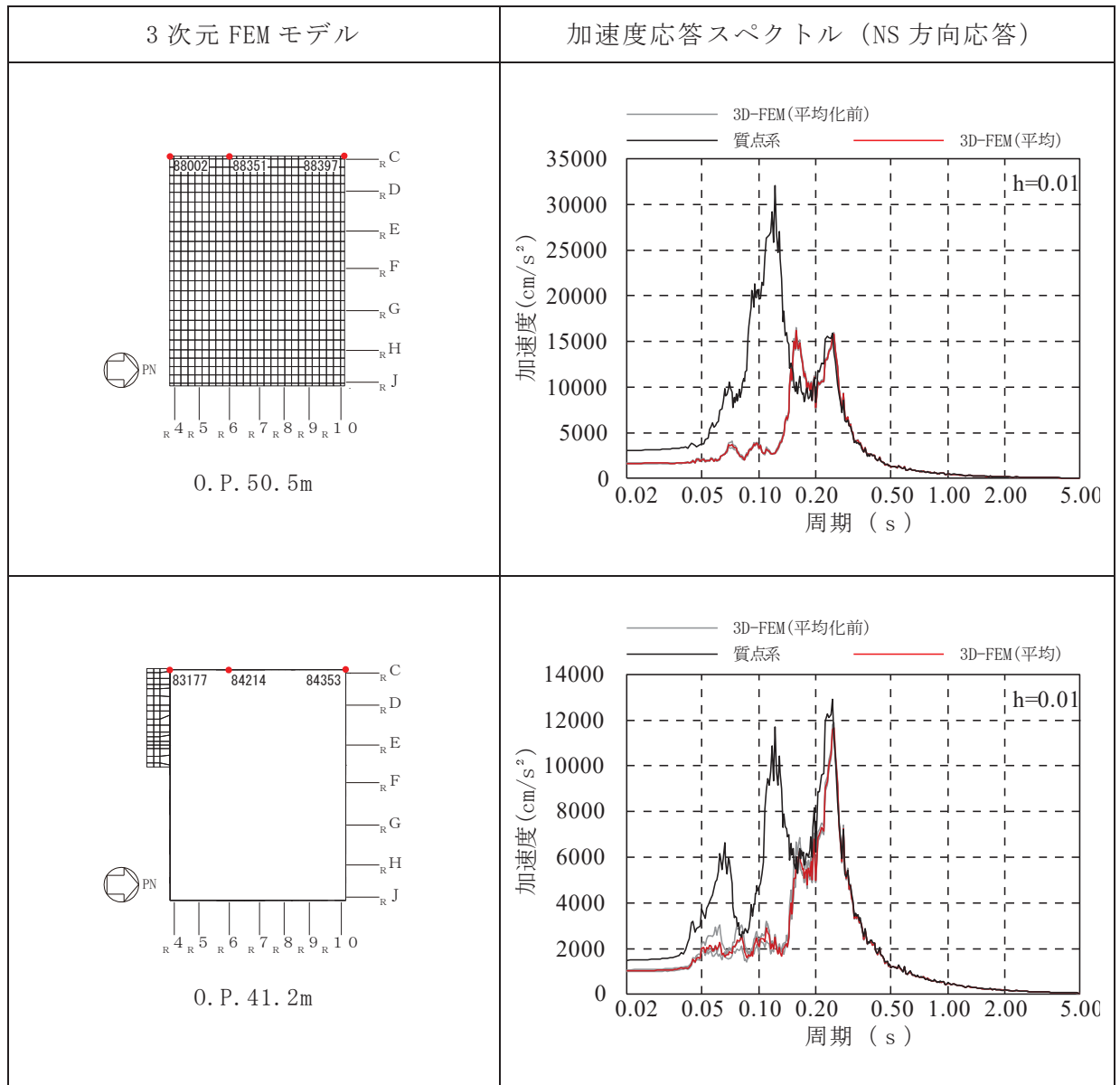


表 3-10(9) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (9/24)

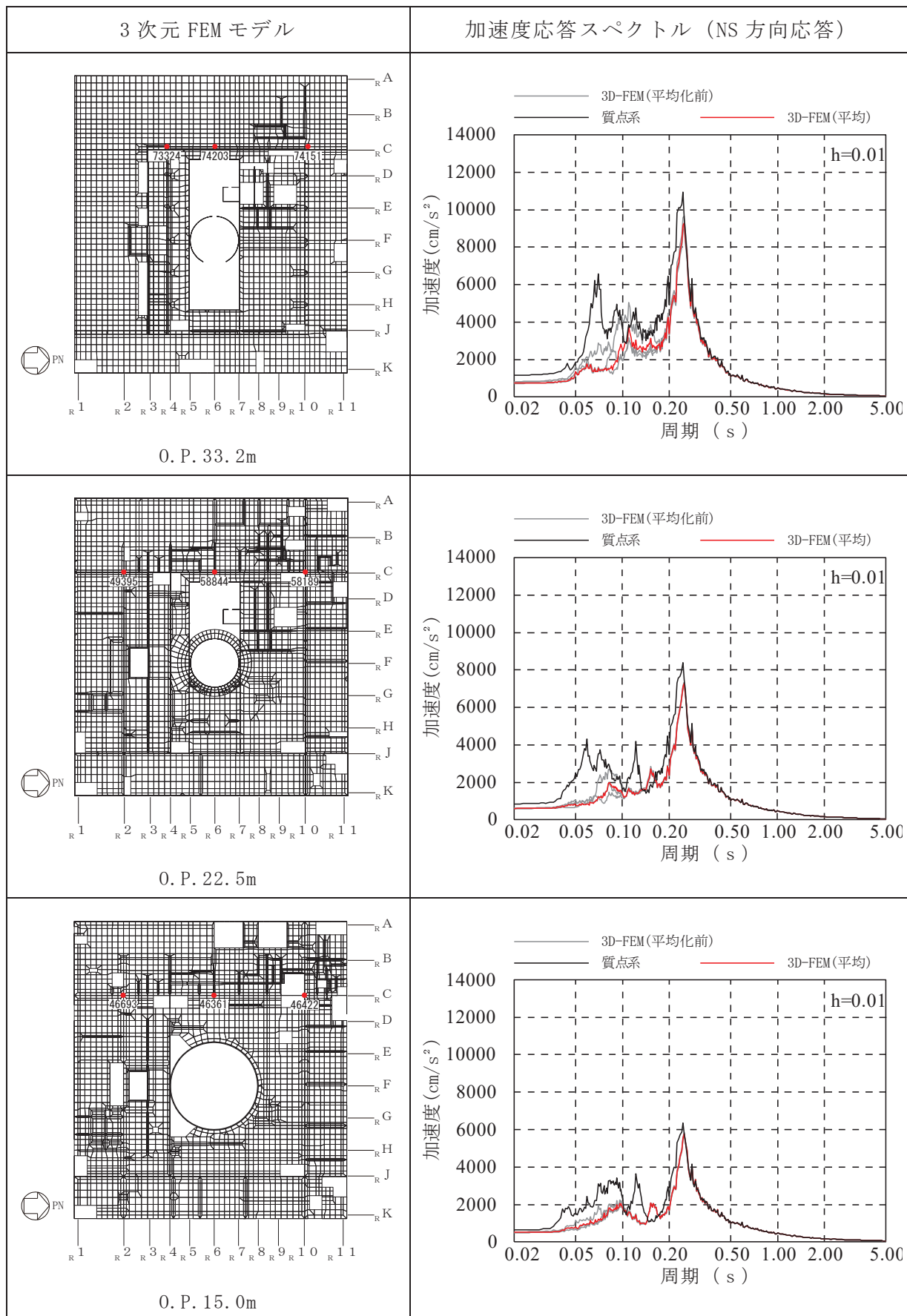


表 3-10(10) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較(10/24)

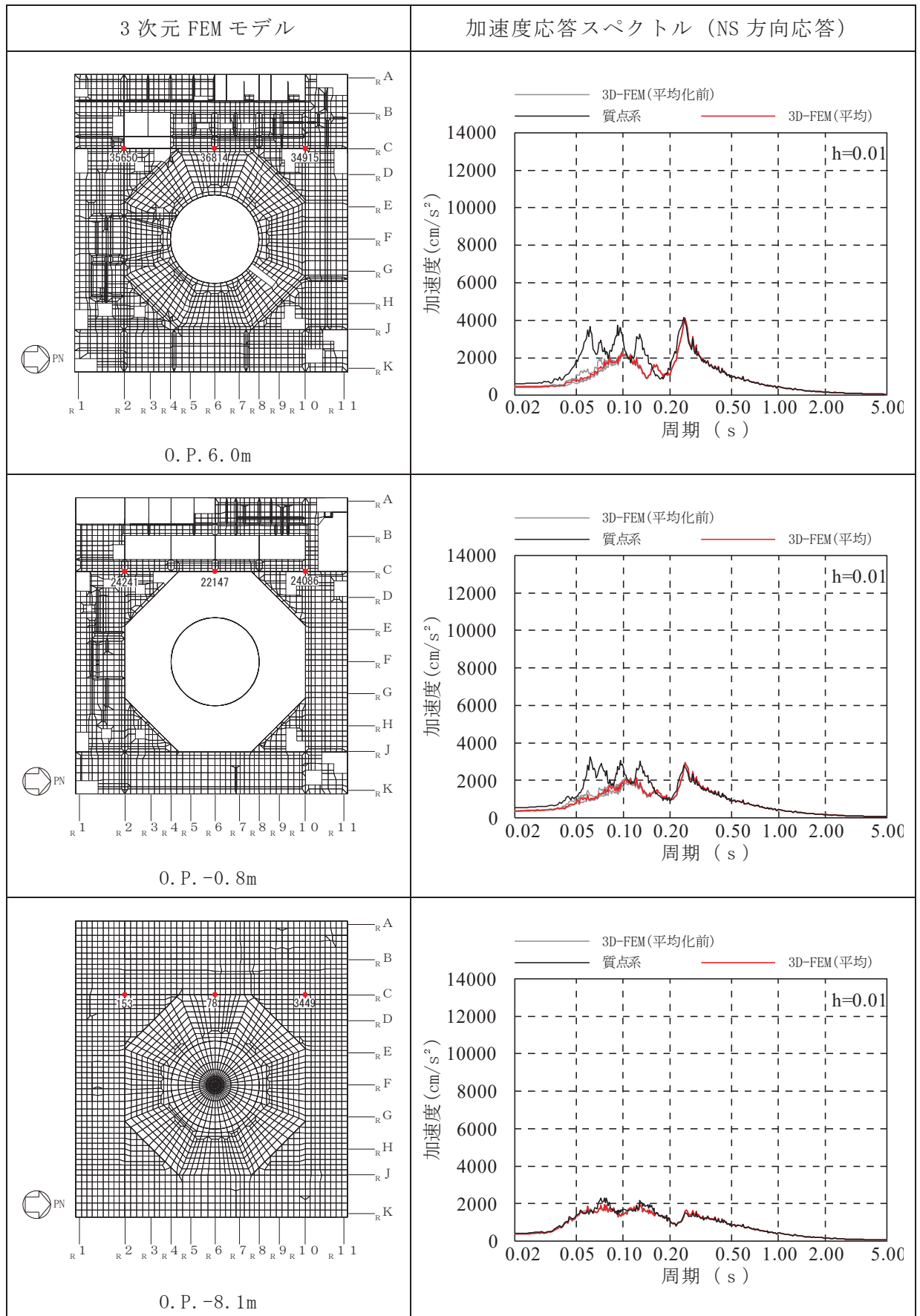


表 3-10(11) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (11/24)

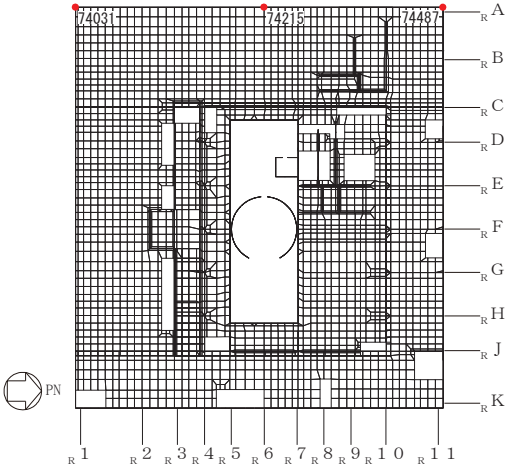
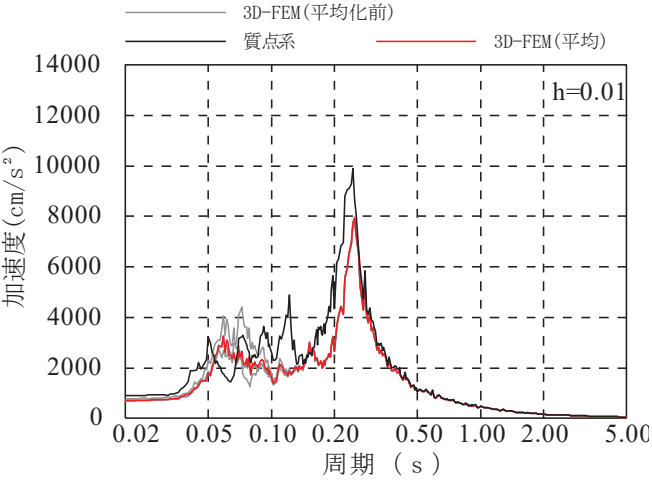
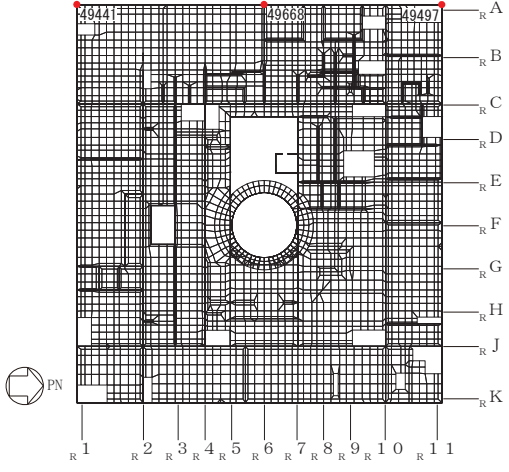
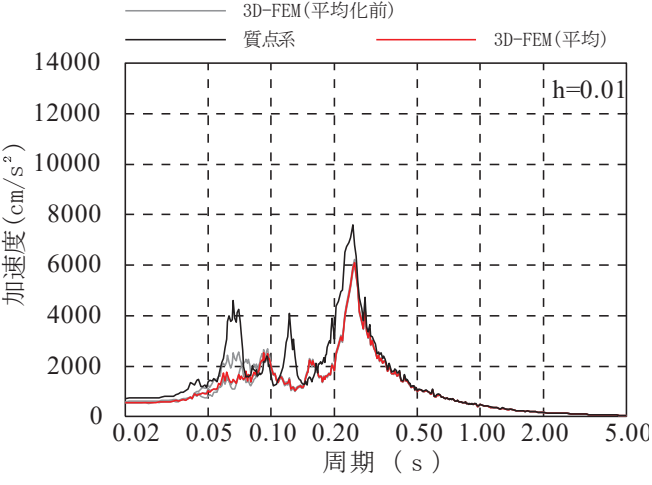
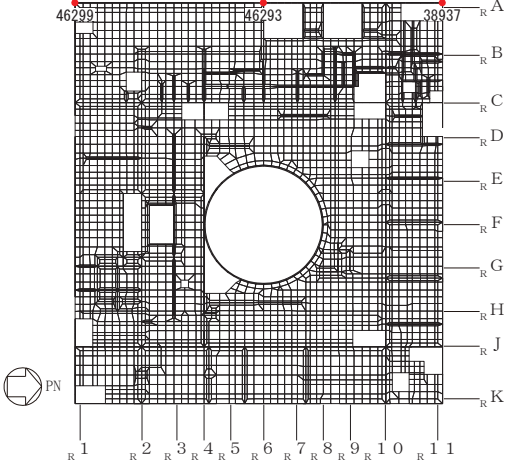
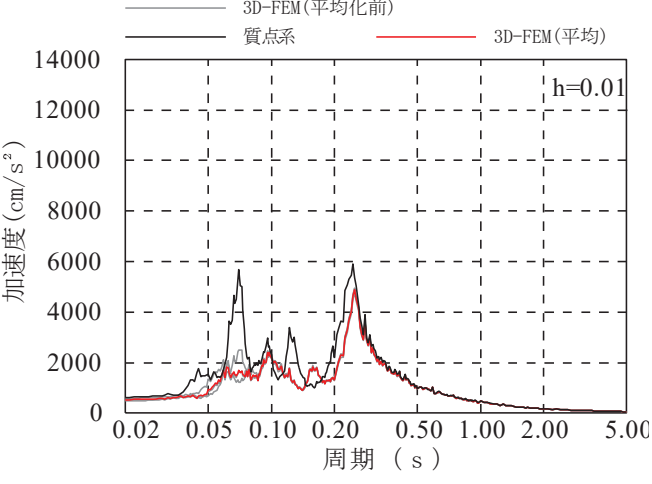
3次元 FEM モデル	加速度応答スペクトル (NS 方向応答)
 <p style="text-align: center;">O. P. 33.2m</p>	
 <p style="text-align: center;">O. P. 22.5m</p>	
 <p style="text-align: center;">O. P. 15.0m</p>	

表 3-10(12) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (12/24)

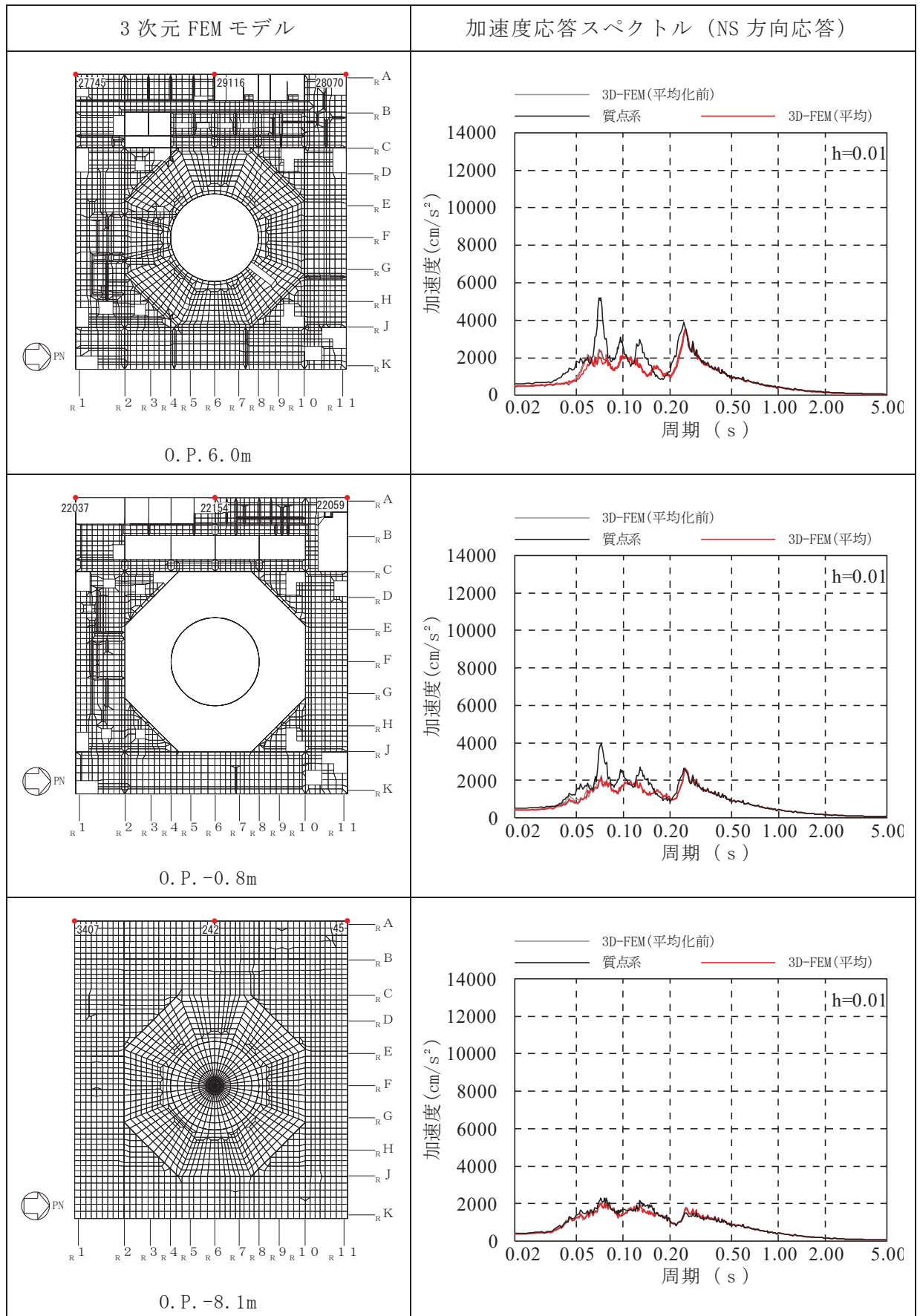


表 3-10(13) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (13/24)

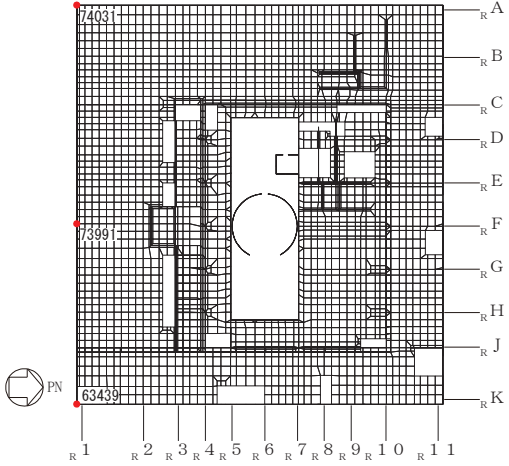
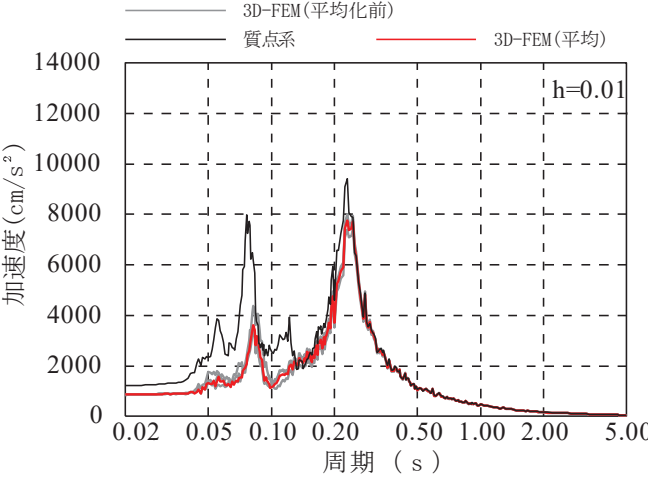
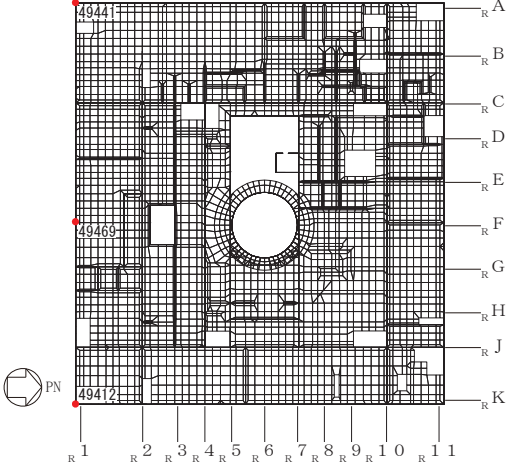
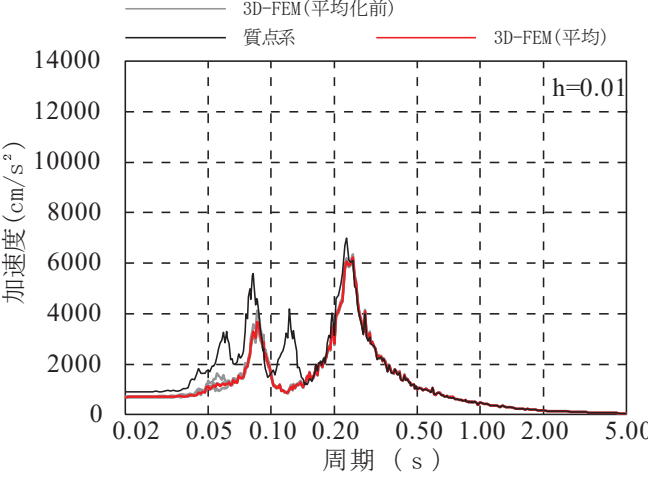
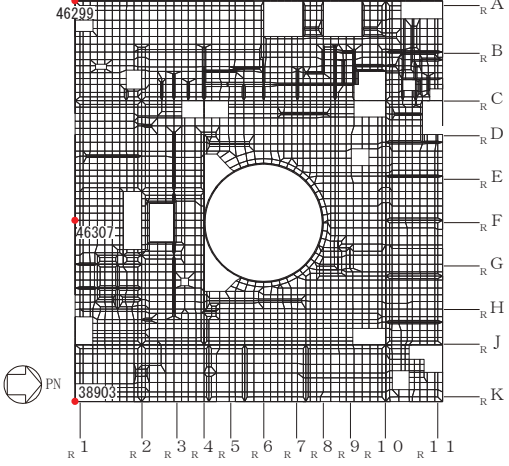
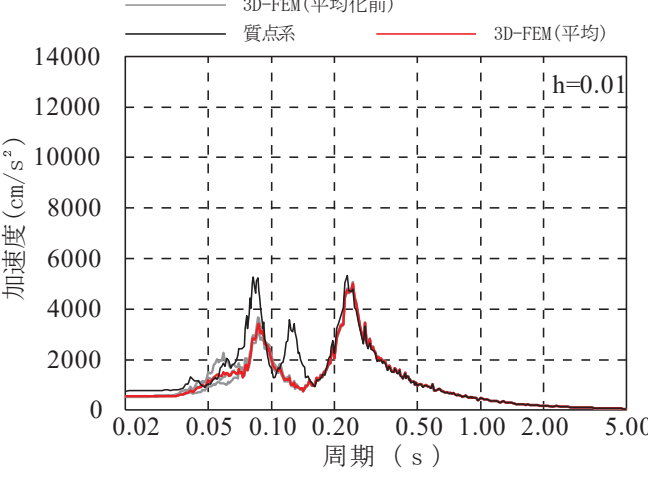
3次元 FEM モデル	加速度応答スペクトル (EW 方向応答)
 <p>O. P. 33.2m</p>	
 <p>O. P. 22.5m</p>	
 <p>O. P. 15.0m</p>	

表 3-10(14) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (14/24)

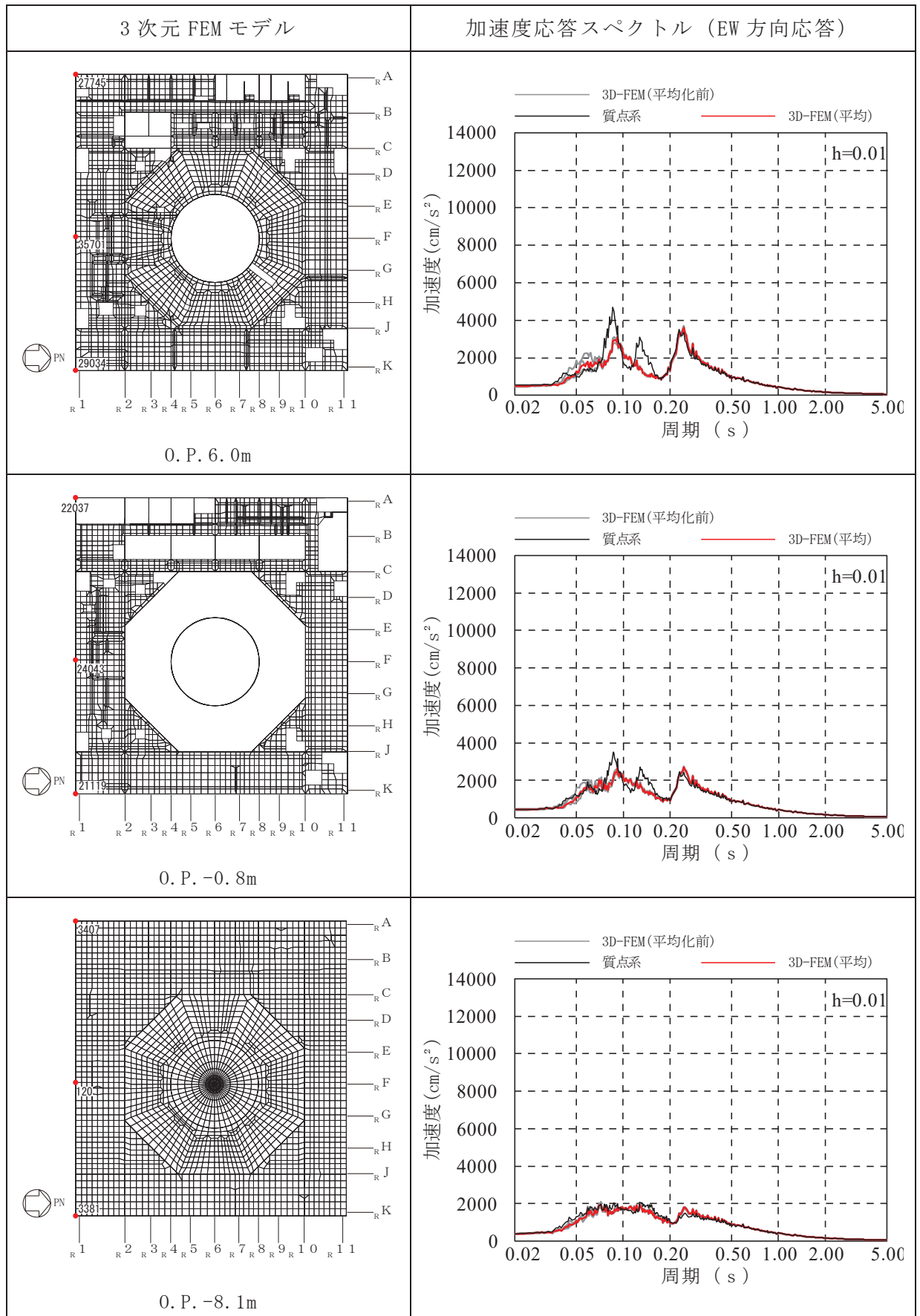


表 3-10(15) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (15/24)

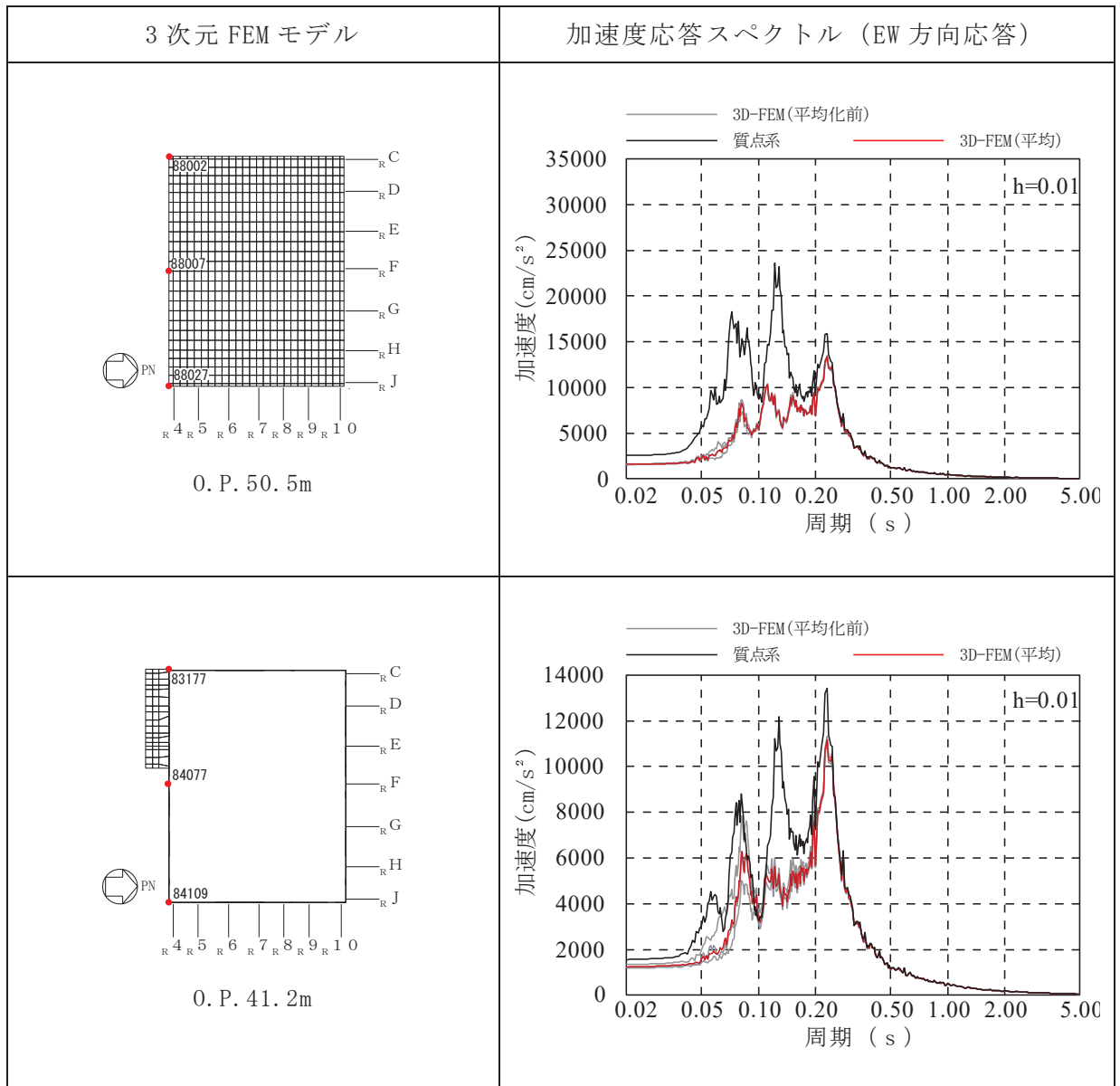


表 3-10(16) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (16/24)

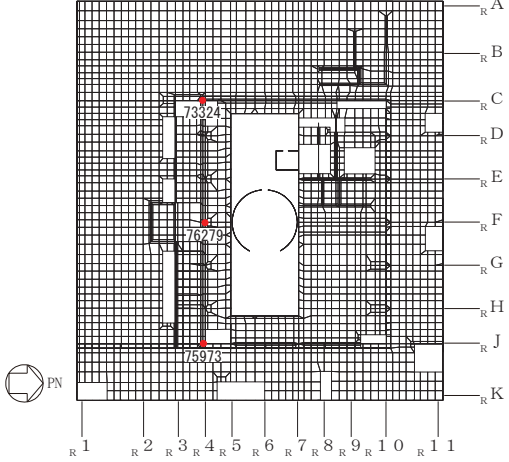
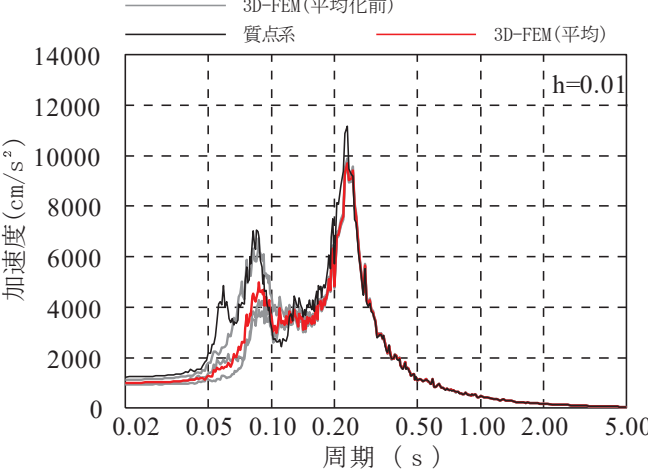
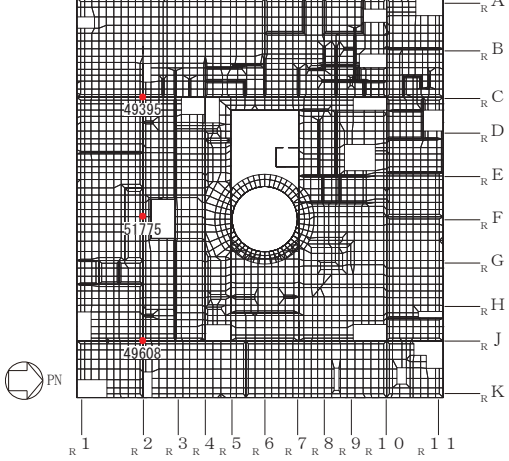
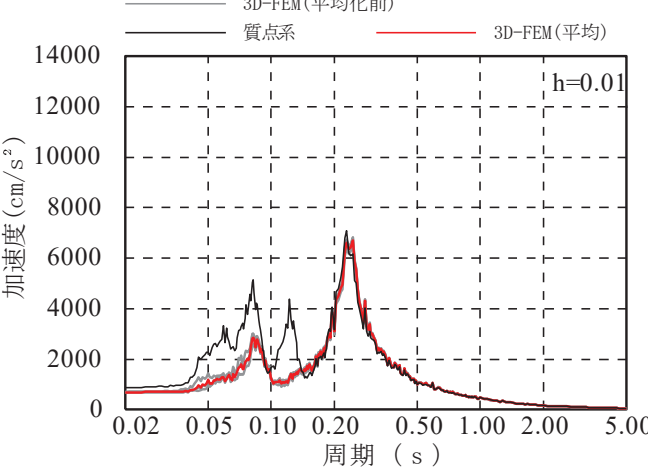
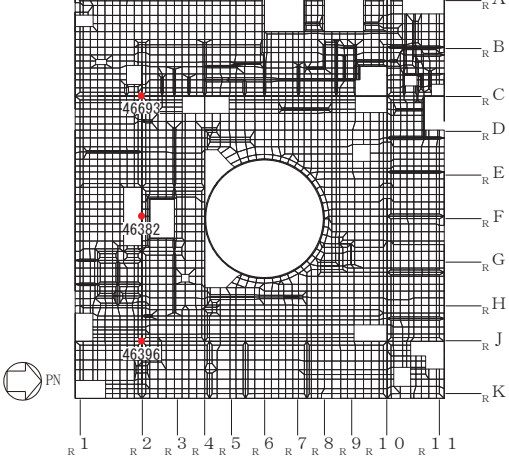
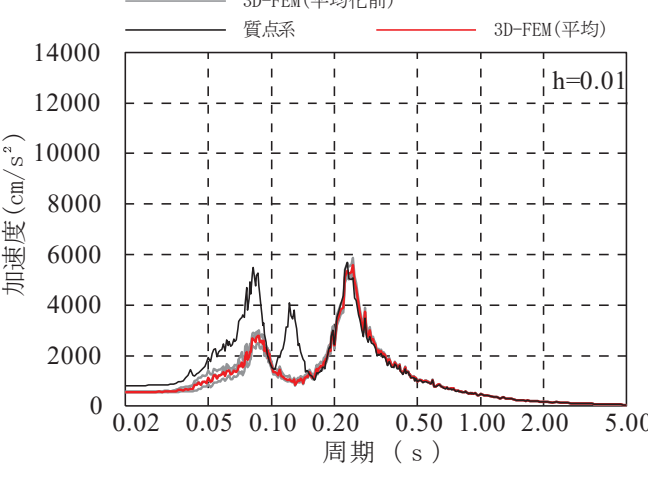
3次元 FEM モデル	加速度応答スペクトル (EW 方向応答)
 <p>O. P. 33. 2m</p>	
 <p>O. P. 22. 5m</p>	
 <p>O. P. 15. 0m</p>	

表 3-10(17) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (17/24)

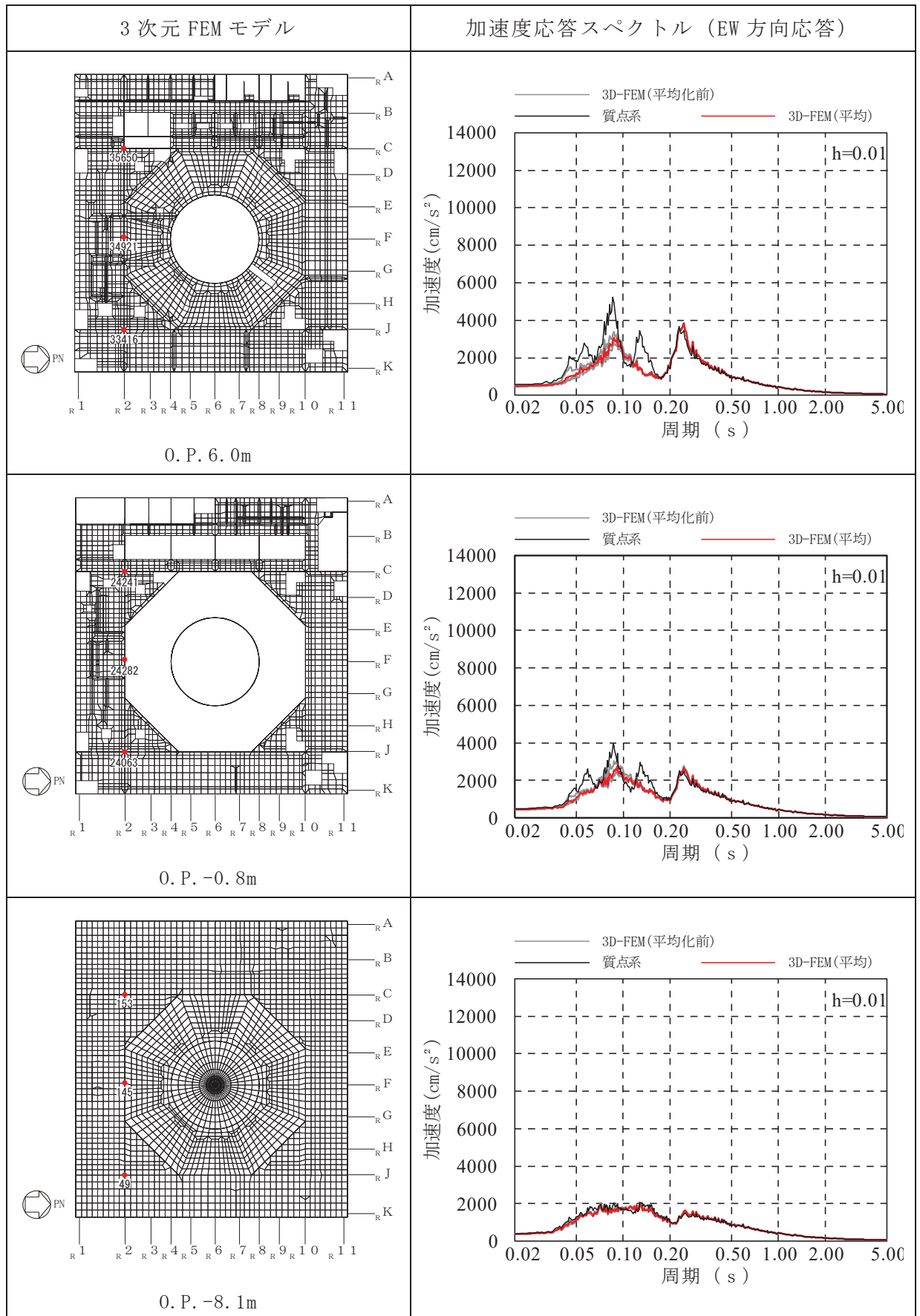


表 3-10(18) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (18/24)

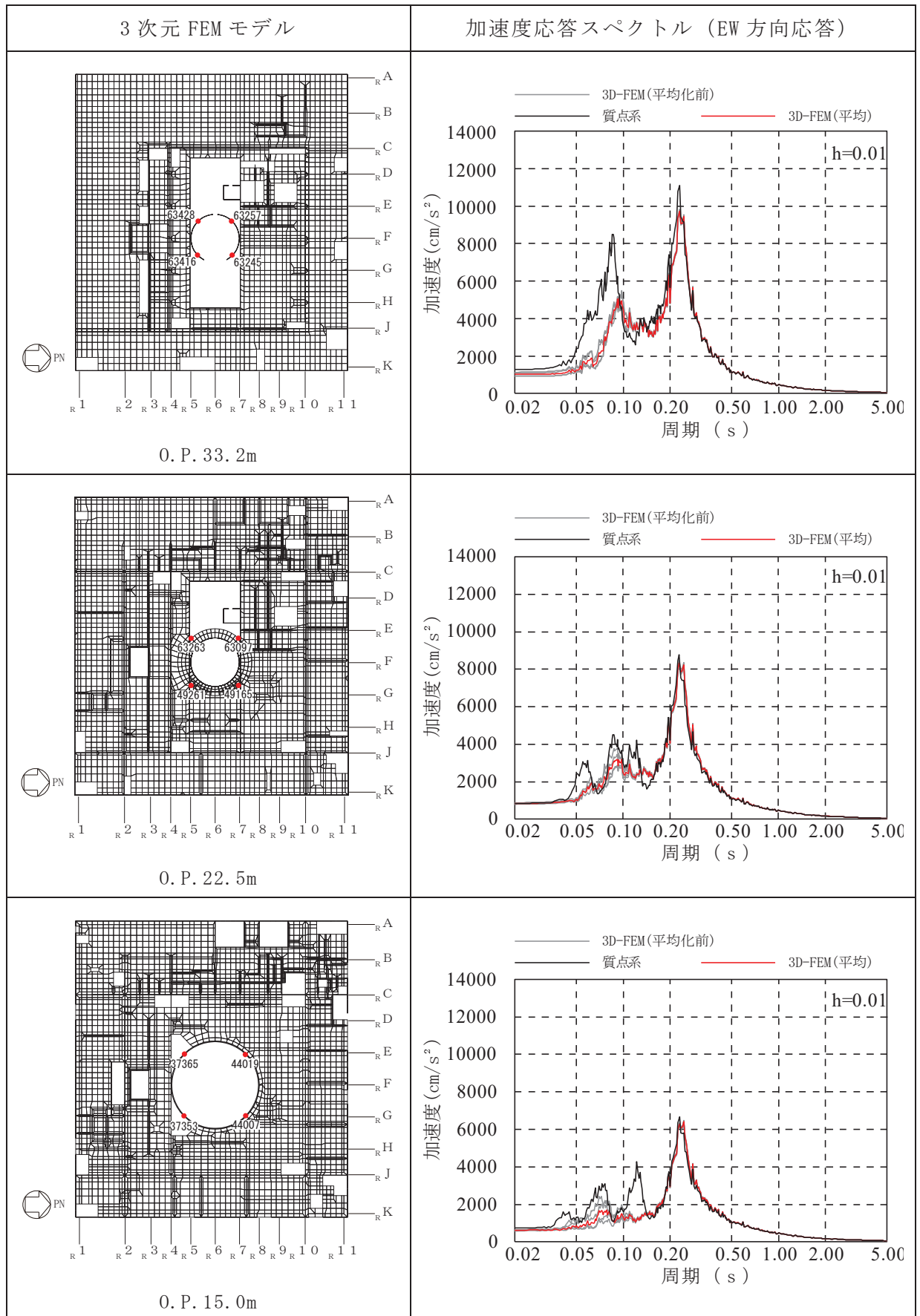


表 3-10(19) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (19/24)

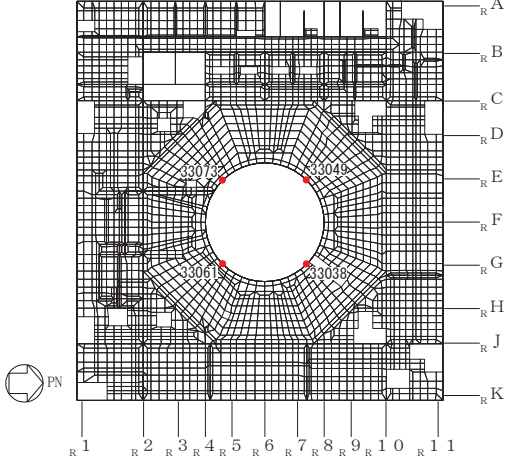
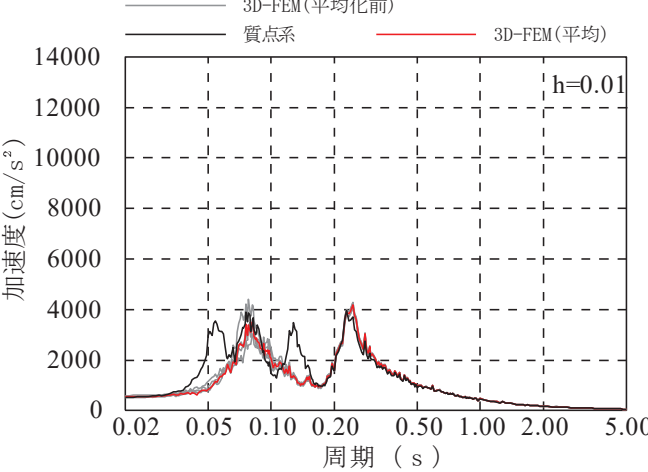
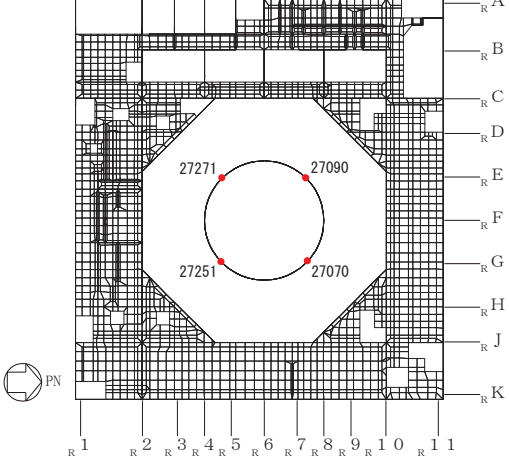
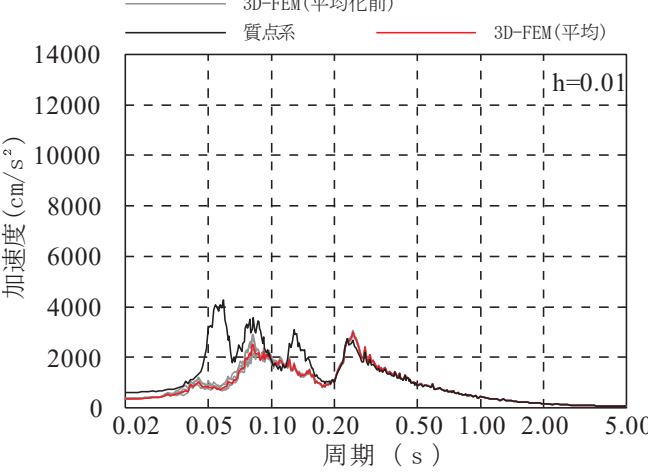
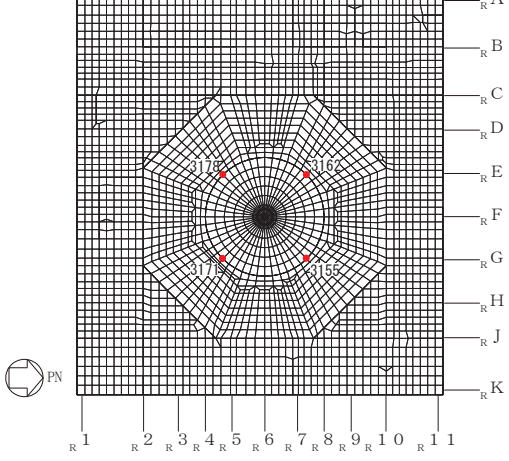
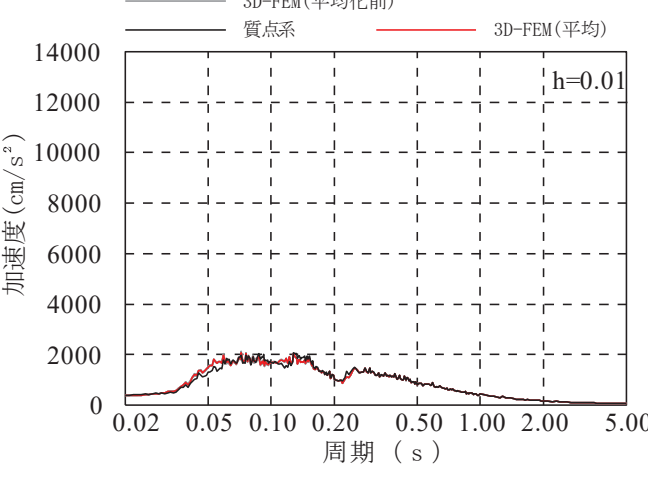
3次元 FEM モデル	加速度応答スペクトル (EW 方向応答)
 <p style="text-align: center;">O. P. 6. 0m</p>	
 <p style="text-align: center;">O. P. -0. 8m</p>	
 <p style="text-align: center;">O. P. -8. 1m</p>	

表 3-10(20) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (20/24)

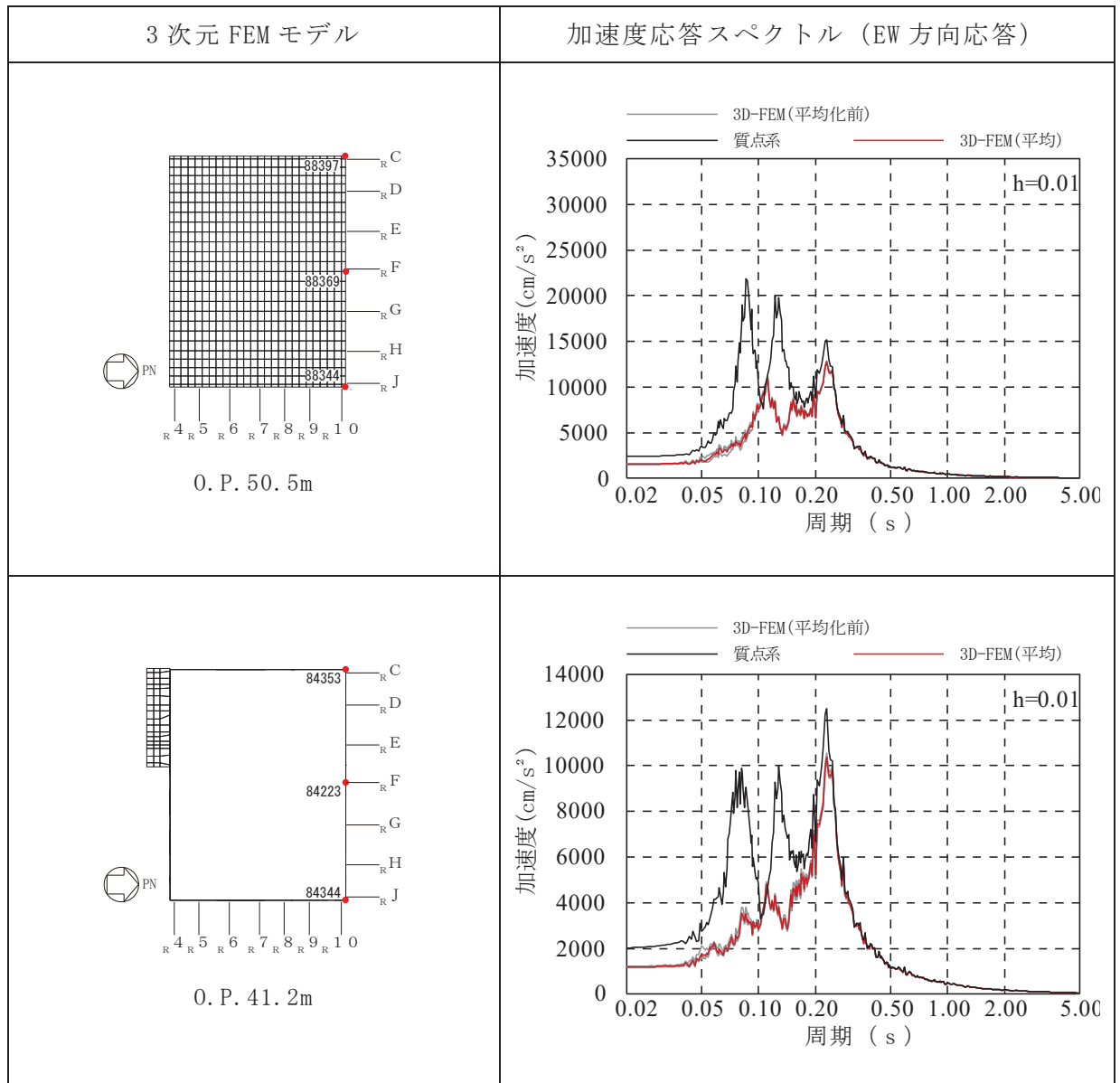


表 3-10(21) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (21/24)

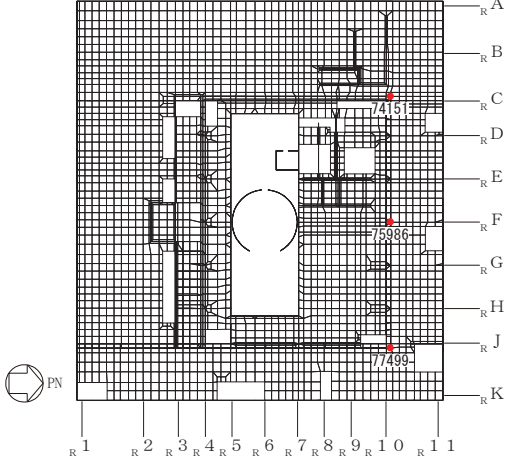
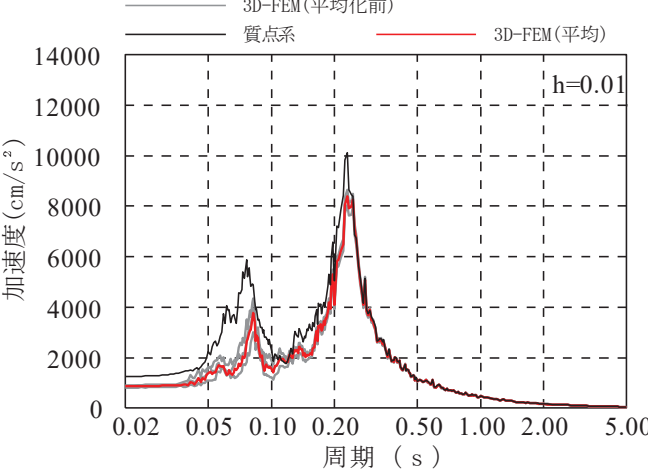
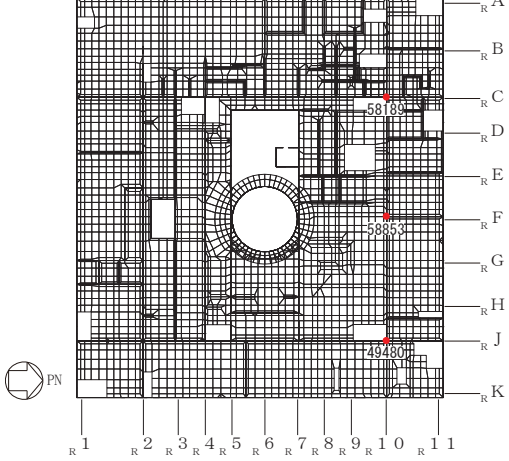
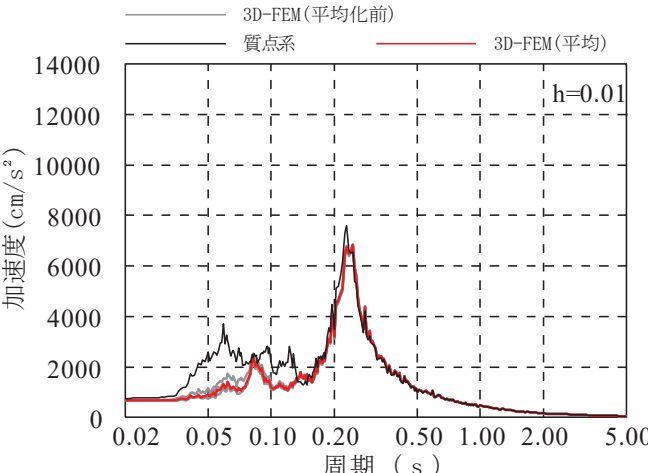
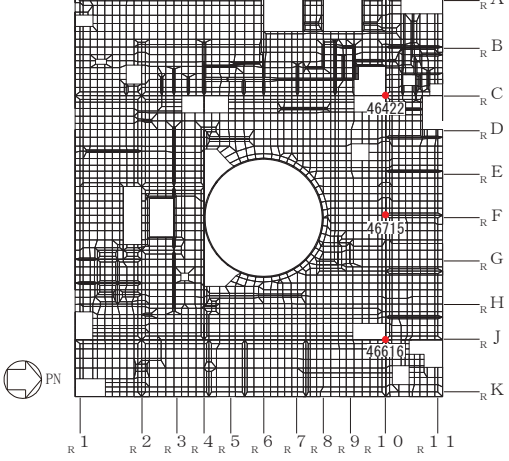
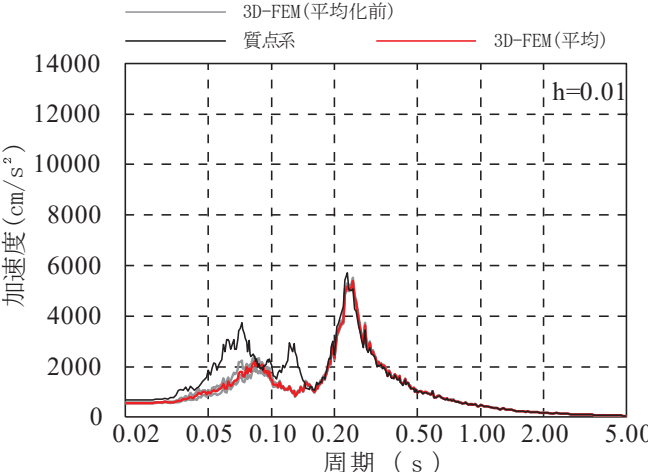
3次元 FEM モデル	加速度応答スペクトル (EW 方向応答)
 <p>O. P. 33.2m</p>	
 <p>O. P. 22.5m</p>	
 <p>O. P. 15.0m</p>	

表 3-10(22) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (22/24)

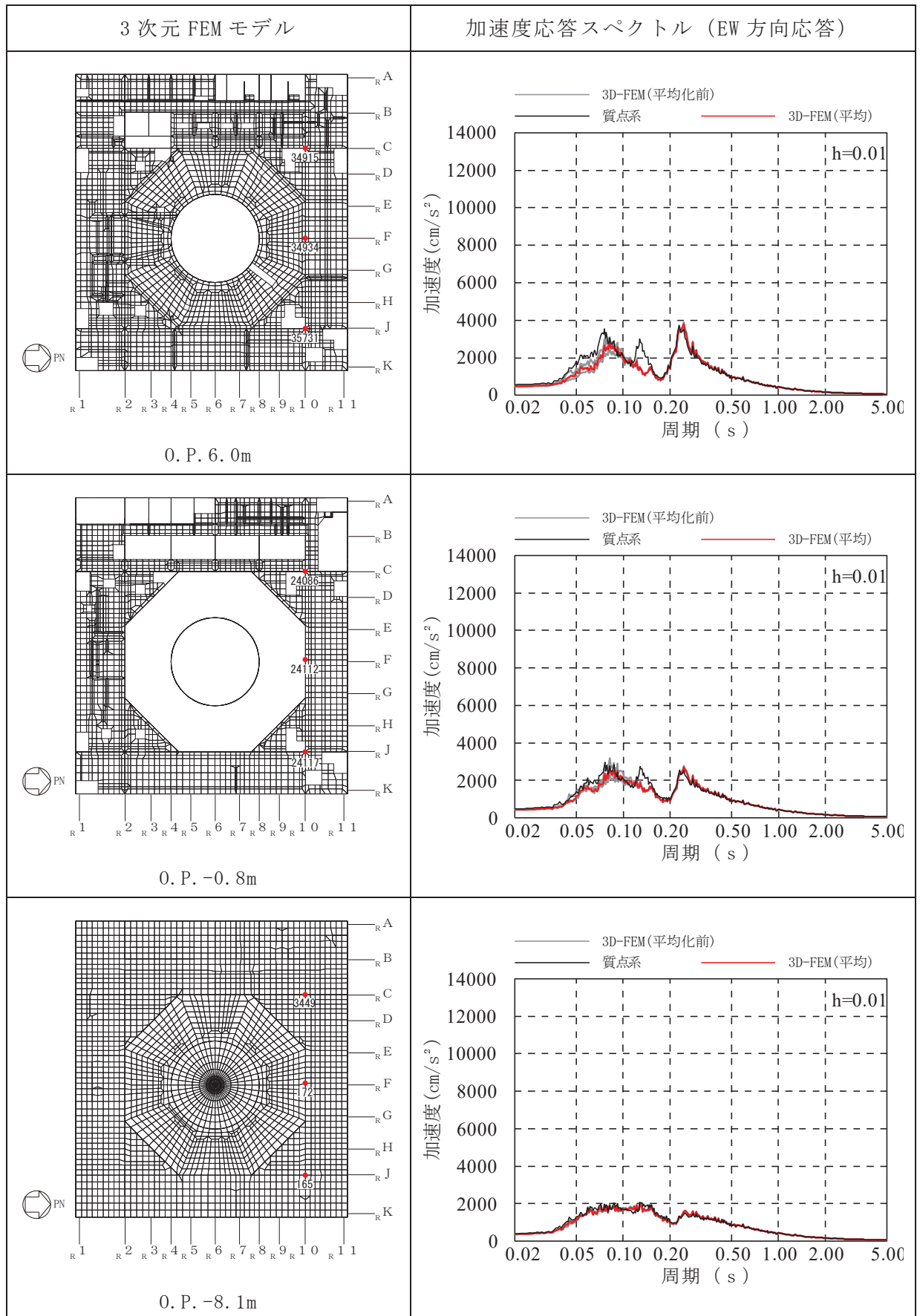


表 3-10(23) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (23/24)

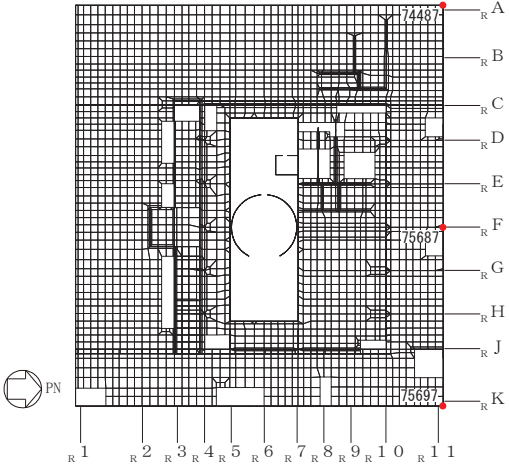
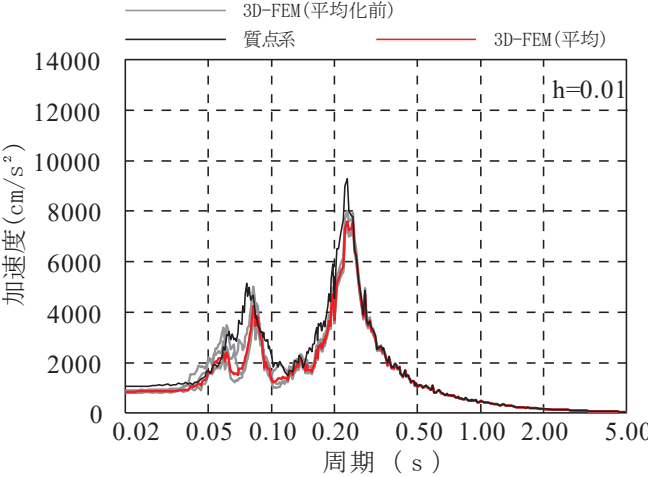
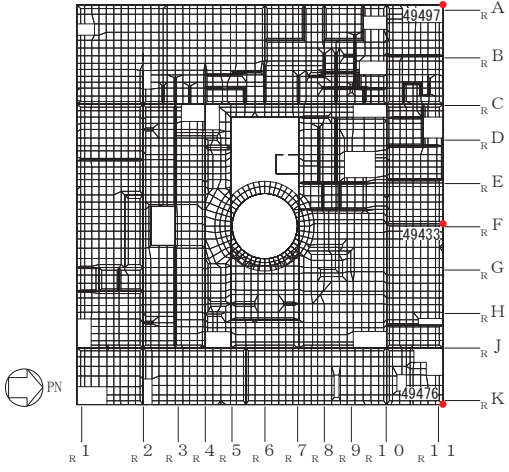
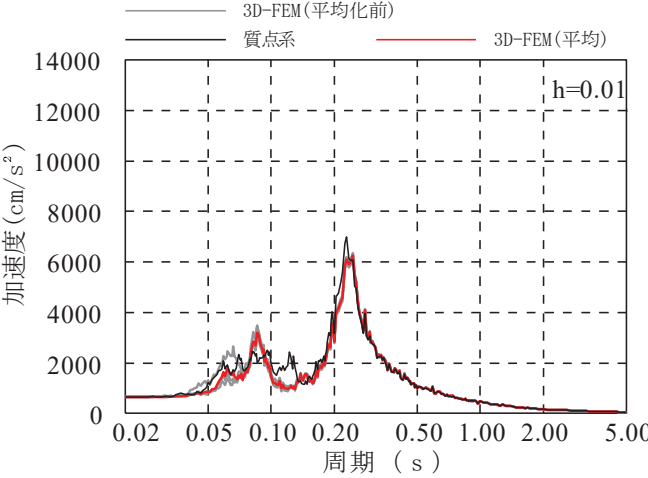
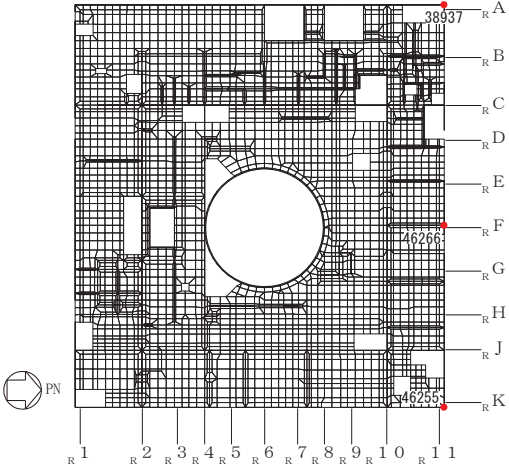
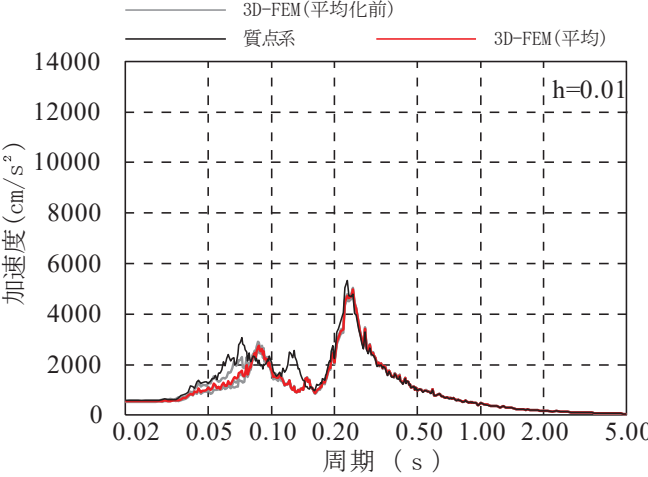
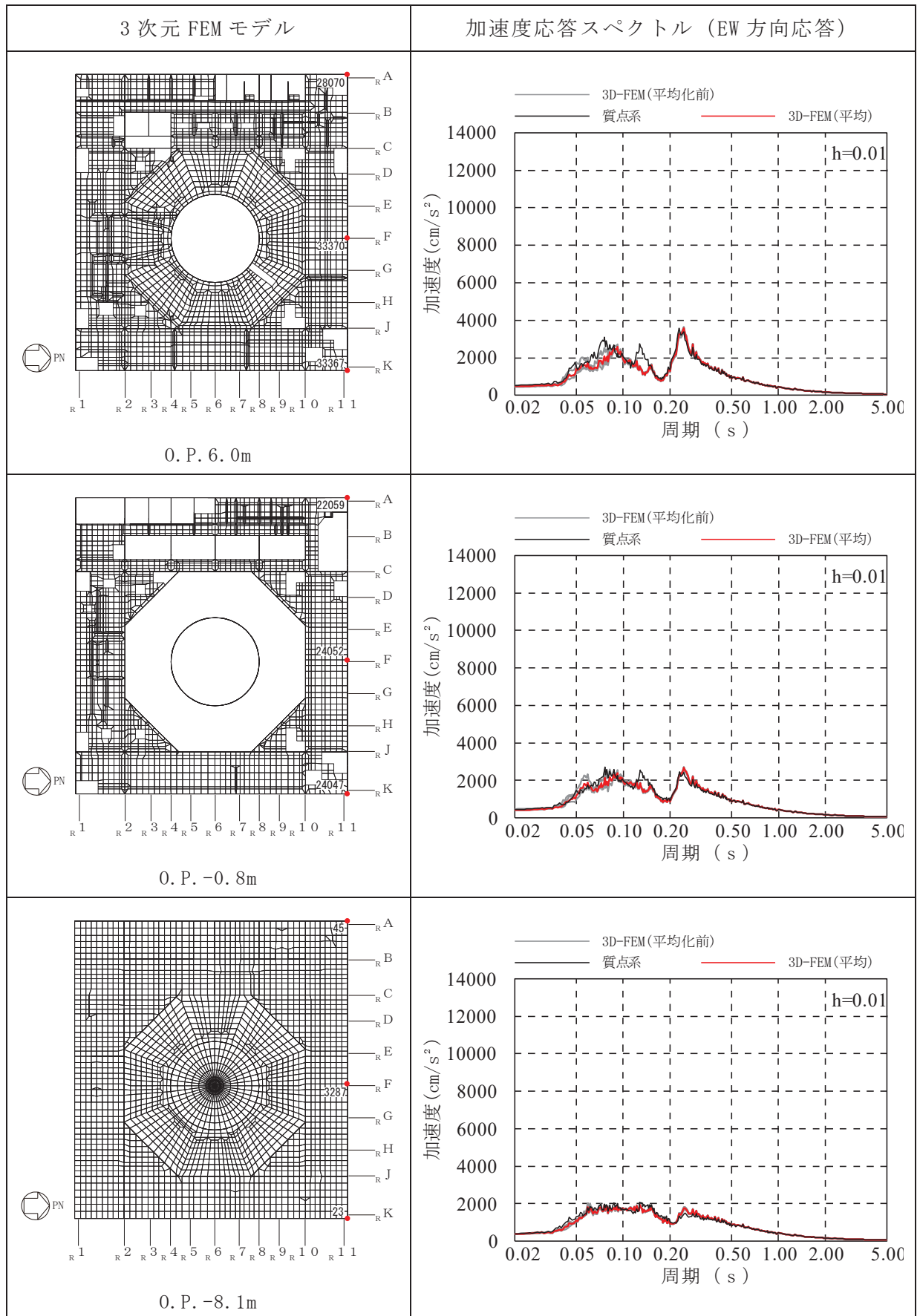
3次元 FEM モデル	加速度応答スペクトル (EW 方向応答)
 <p style="text-align: center;">O. P. 33.2m</p>	
 <p style="text-align: center;">O. P. 22.5m</p>	
 <p style="text-align: center;">O. P. 15.0m</p>	

表 3-10(24) 3次元 FEM モデルの加速度応答スペクトルの平均化前後の比較 (24/24)



4. まとめ

「別紙 2 原子炉建屋 3 次元 FEM モデルを用いた精査」においては、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の壁（燃料取替床レベル）について、3 次元 FEM モデルにより精査を行い、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる影響の考慮が必要な部位は抽出されなかったことを確認した。


本資料では、建屋評価部位全般に対し、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、局所的な応答についての精査を行った。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 4 機器・配管系に関する影響検討

目 次

別紙 4.1	機器・配管系の耐震評価における 水平 2 方向入力の影響有無整理結果……	別紙 4.1-1
別紙 4.2	水平 2 方向の地震による代表設備の増分影響結果 ……	別紙 4.2-1
別紙 4.3	水平 2 方向の地震による発生値と許容値の比較結果 ……	別紙 4.3-1
別紙 4.4	個別設備に関する補足説明 ……	別紙 4.4-1
別紙 4.5	水平 2 方向及び鉛直方向地震力の影響評価における代表性・	別紙 4.5-1
別紙 4.6	水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せ方法の検討 ……	別紙 4.6-1
別紙 4.7	原子炉建屋 3 次元 FEM モデルの面外 応答 に係る 機器・配管系への影響検討……	別紙 4.7-1
別紙 4.8	原子炉建屋 3 次元 FEM モデルの応答解析結果に係る 機器・配管系への影響検討……	別紙 4.8-1

 : 本日の説明範囲

原子炉建屋 3次元 FEM モデルの面外 応答に係る機器・配管系への影響検討

1. はじめに

「別紙 2 3次元 FEM モデルを用いた精査」の「2.5 地震応答解析結果」より、壁の中央部で面外にはらむような最大応答加速度分布となっており、3次元 FEM モデルの面外応答が質点系モデルの応答を上回る箇所がある。そのため、補足説明資料「補足 600-43 地震応答に影響を及ぼす不確かさ要因の整理」に基づき、面外 応答の機器・配管系への影響検討を実施する。なお、影響検討は、本文の「3.2 機器・配管系」の水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価結果を基に実施する。

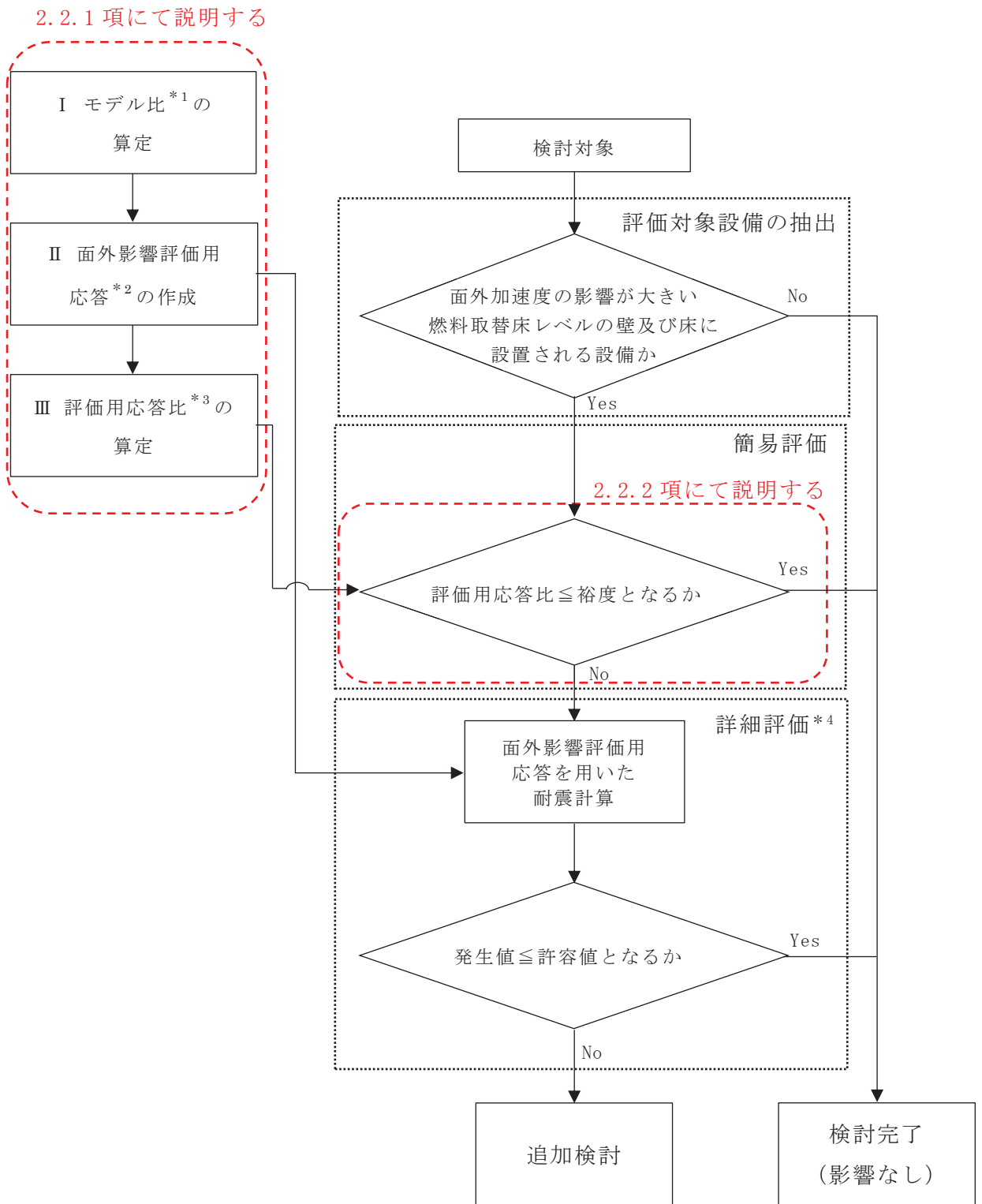
2. 検討方針

「2.1 検討対象」について、評価用応答比（詳細は 2.3.1 項にて説明）と各検討対象の裕度（許容値／発生値）を用いた簡易評価及び 3次元影響評価用応答（詳細は 2.3.1 項にて説明）を用いた詳細評価を行う。影響検討フローを図 1 に示す。

2.1 検討対象

原子炉建屋に設置され、最大応答加速度、床応答曲線及び時刻歴応答加速度を用いて評価する以下の機器・配管系を影響検討の対象とする。なお、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て、面外 応答の影響は大きいことから、原子炉建屋 3 階（以下「燃料取替床」という。）に設置される設備を代表とする。また、燃料取替床の床についても燃料取替床の壁と同様であることから、機器・配管系に対する面外 応答の影響を併せて検討する。影響検討対象の機器・配管系について表 1 に示す。

- ・設計基準対象施設のうち、耐震重要度分類の S クラスに属する機器・配管系
- ・重大事故等対処施設のうち、常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備、常設重大事故防止設備（設計基準拡張）（当該設備が属する耐震重要度分類が S クラスのもの）及び常設重大事故緩和設備（設計基準拡張）に属する機器・配管系
- ・波及的影響防止のために耐震評価を実施する機器・配管系



- 注記*1：モデル比 = $S_d - D2$ に対する 3次元 FEM モデルの応答 / $S_d - D2$ に対する質点系モデルの応答
 *2：面外影響評価用応答 = 質点系モデル基本ケース*5の S_s (S_s7 波*6) に対する応答 × モデル比
 *3：評価用応答比 = 面外影響評価用応答 / 基準地震動 S_s (S_s7 波) の設計用床応答曲線
 *4：当該設備の耐震計算書で適用している評価手法と同等の手法による評価 (解析モデルの精緻化含む)
 *5：添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」に示す基本ケース
 *6： S_s7 波は、基準地震動 $S_s - D1, D2, D3, F1, F2, F3$ 及び $S_s - N1$

図1 原子炉建屋 3次元 FEM モデルの面外応答に係る機器・配管系への影響検討フロー

表 1 影響検討対象設備 (1/2)

No	設備名称
1	使用済燃料貯蔵ラック
2	制御棒・破損燃料貯蔵ラック
3	使用済燃料プール水位／温度（ガイドパルス式）
4	使用済燃料プール水位／温度（ヒートサーモ式）
5	使用済燃料プール監視カメラ
6	原子炉補機冷却水サージタンク
7	原子炉建屋内水素濃度
8	燃料取替エリア放射線モニタ
9	使用済燃料プール上部空間放射線モニタ（低線量）
10	使用済燃料プール上部空間放射線モニタ（高線量）
11	原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置
12	静的触媒式水素再結合装置（その 1）
13	静的触媒式水素再結合装置（その 2）
14	静的触媒式水素再結合装置動作監視装置
15	燃料プール冷却浄化系配管（FPC-002, 003）
16	燃料プール代替注水系配管（FPC-020）
17	燃料プールのスプレイ系配管（FPC-019）
18	原子炉補機冷却水系配管（KRCW-105, 205）
19	非常用ガス処理系配管（SGTS-001）
20	原子炉格納容器フィルタベント系配管（FCVS-004）
21	堰
22	津波監視カメラ

表 1 影響検討対象設備 (2/2)

No	設備名称
23	原子炉建屋クレーン
24	燃料交換機
25	制御棒貯蔵ラック
26	燃料チャンネル着脱機

注：燃料取替床に設置される大物搬入口ハッチカバーについては、補足説明資料「補足-370-4 原子炉格納施設の水素濃度低減性能に関する説明書に係る補足説明資料」の「補足 5 原子炉建屋地上 3 階大物搬入口ハッチカバーについて」において、原子炉建屋 3 次元 FEM モデルの面外 **応答**に係る影響検討を行う。

2.2 検討内容

2.2.1 面外応答の影響を評価するための応答の作成

3次元 FEM モデルでは、弾性設計用地震動 S_d に対する地震応答解析を行っていることから、質点系モデルの基準地震動 S_s に対する応答を補正し、面外応答による影響を評価できる応答を作成する。

- I 弾性設計用地震動 S_d に対する 3次元 FEM モデルの応答／弾性設計用地震動 S_d に対する質点系モデルの応答の比（以下「モデル比（ S_d ）」という。）を、全周期において算定する。モデル比は、各影響検討設備の設計用減衰定数に対する応答の比で作成する。減衰定数 2% のモデル比の例を図 2 に示す。モデル比は、固有周期 0.150s を例とすると (b/a) となる。なお、建屋 3次元 FEM モデルの応答による機器・配管系の耐震評価結果へ与える影響を検討するものであるため、モデル比が 1.0 を下回る場合でも、そのモデル比を乗ずる。
- II 質点系モデル基本ケースの基準地震動 S_s に対する固有周期毎の応答に、モデル比を乗算した応答（以下「面外影響評価用応答（ S_s ）」という。）を算定する。面外影響評価用応答の例を図 3 に示す。面外影響評価用応答は、固有周期 0.150s を例とすると、0.150s の質点系モデル基本ケースの基準地震動 S_s に対する応答に 0.150s のモデル比を乗算した値となる。
- III 面外影響評価用応答（ S_s ）／基準地震動 S_s の設計用床応答曲線の比（以下「評価用応答比（ S_s ）」という。）を算定する。評価用応答比の算定例を図 4 に示す。評価用応答比は、仮に固有周期が 0.150s の機器・配管系とすると、設計用床応答曲線（以下「設計用床応答曲線（ S_s ）」という。）による耐震計算を実施している場合 (d/c) となる。なお、配管反力等を用いて評価している機器・配管系は、反力等を算定している配管の評価用応答比を考慮して評価する。

ここで、弾性設計用地震動 S_d に対する 3次元 FEM モデルの応答は、機器・配管系の設置箇所に対応する節点の応答を用いる。図 5～11 に影響検討に用いた節点を示す。

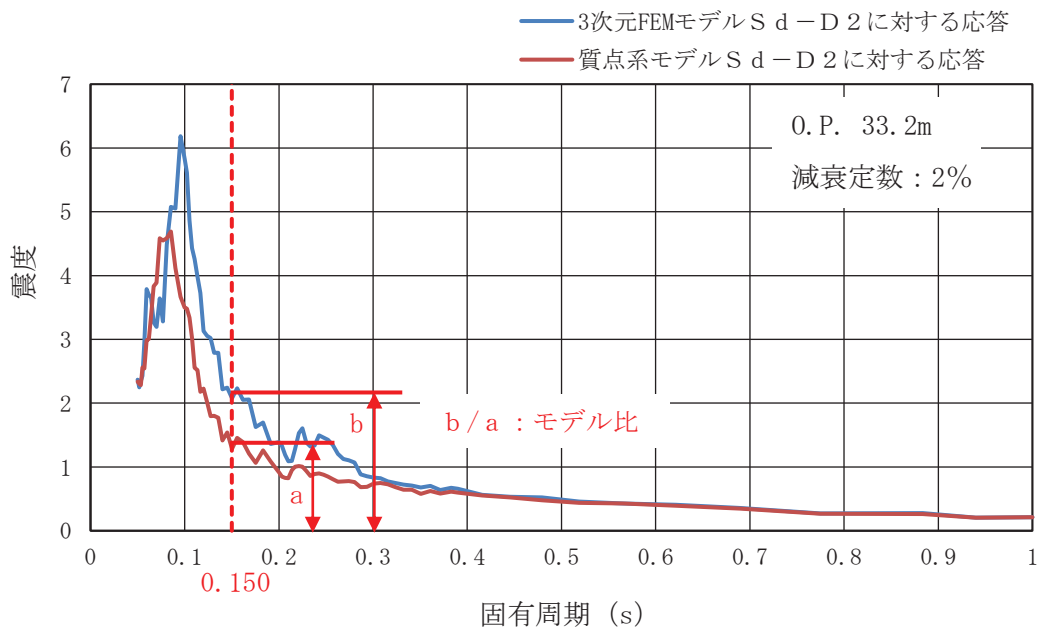


図2 モデル比 (S_d) の算定例 (2.2.1 項 I)

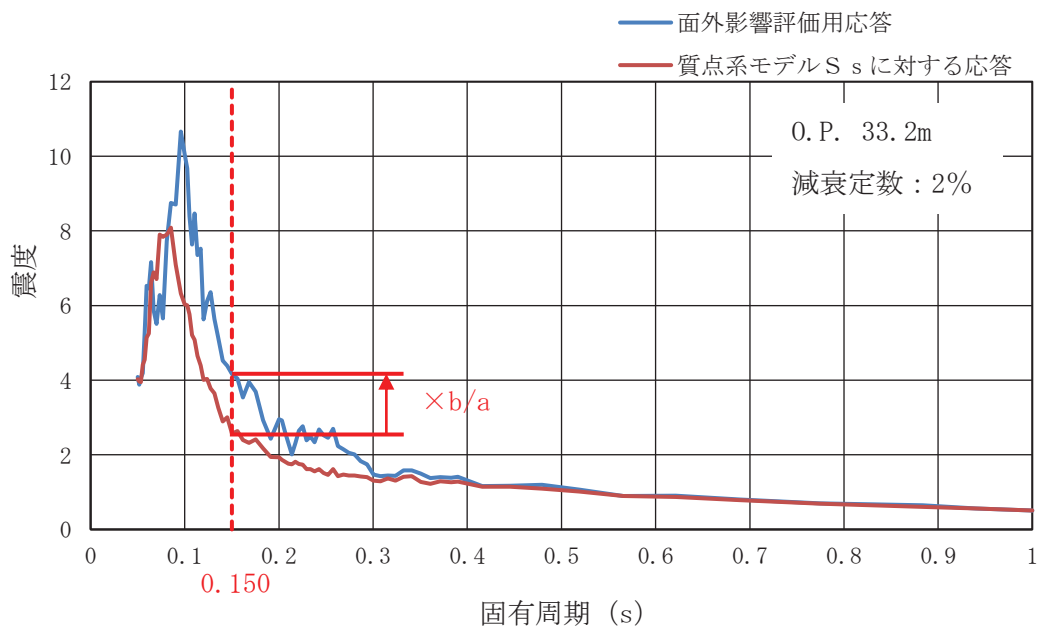
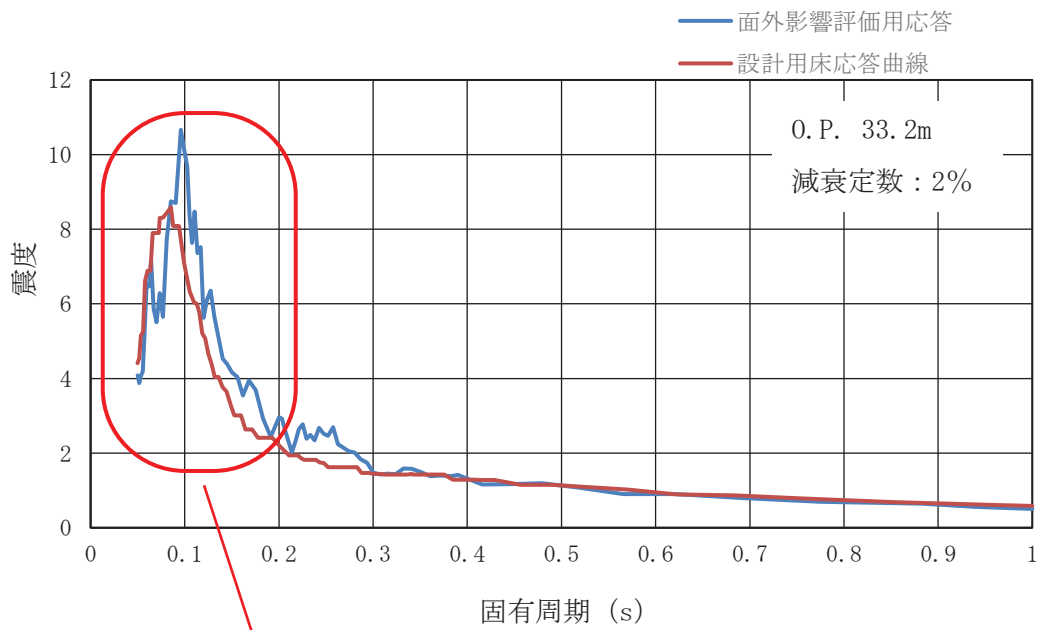
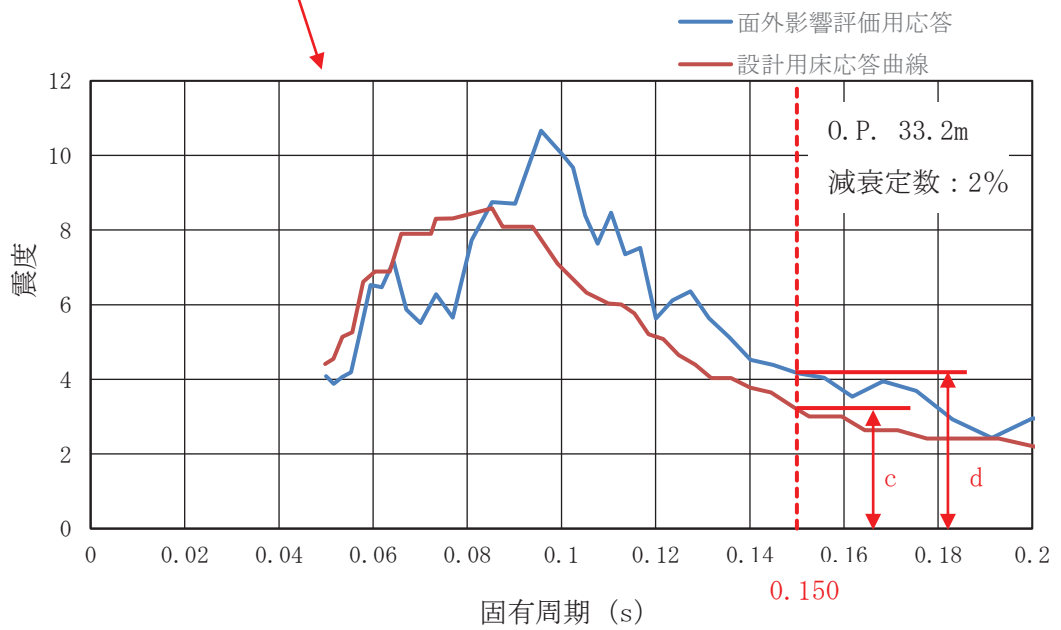


図3 面外影響評価用応答 (S_s) の算定例 (2.2.1 項 II)



(全体図 (固有周期 0~1.0 s))



(拡大図 (固有周期 0~0.2 s))

図4 評価用応答比 (S_s) の算定例 (2.2.1 項Ⅲ)

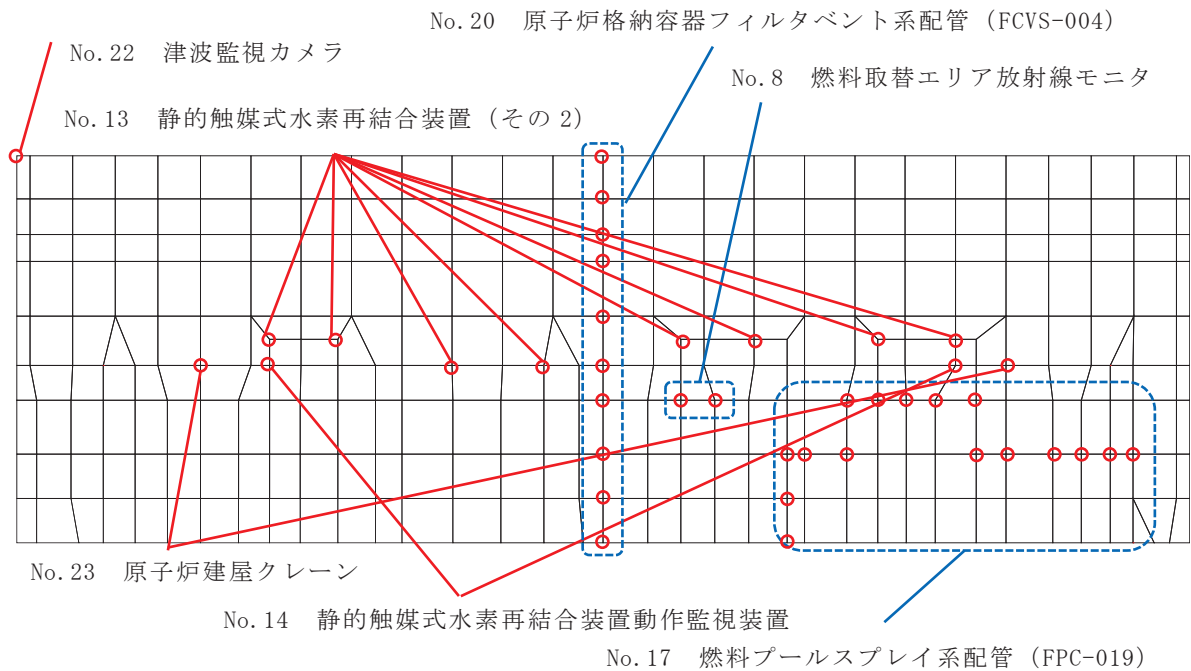


図 5 燃料取替床北面壁 (R10)

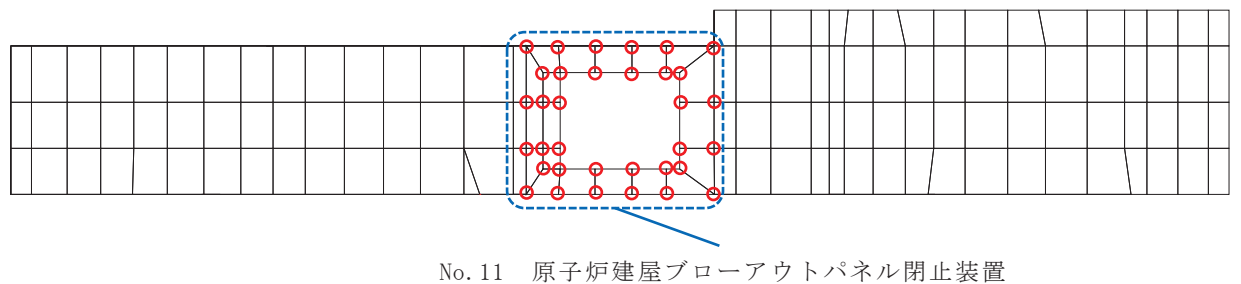


図 6 燃料取替床南面壁 (R3)

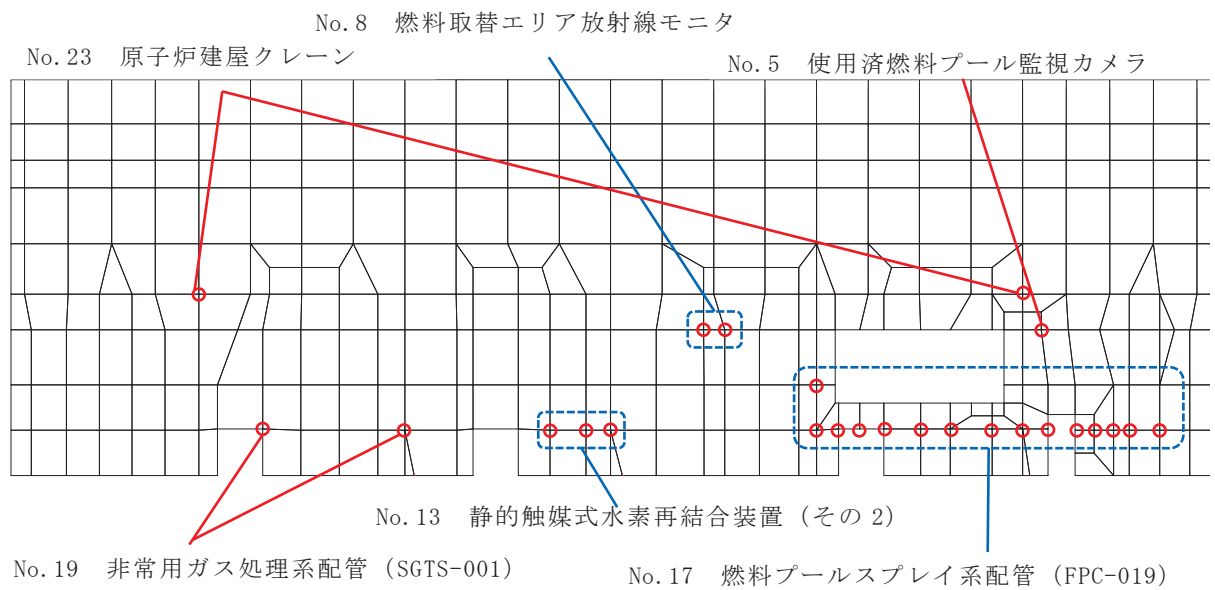
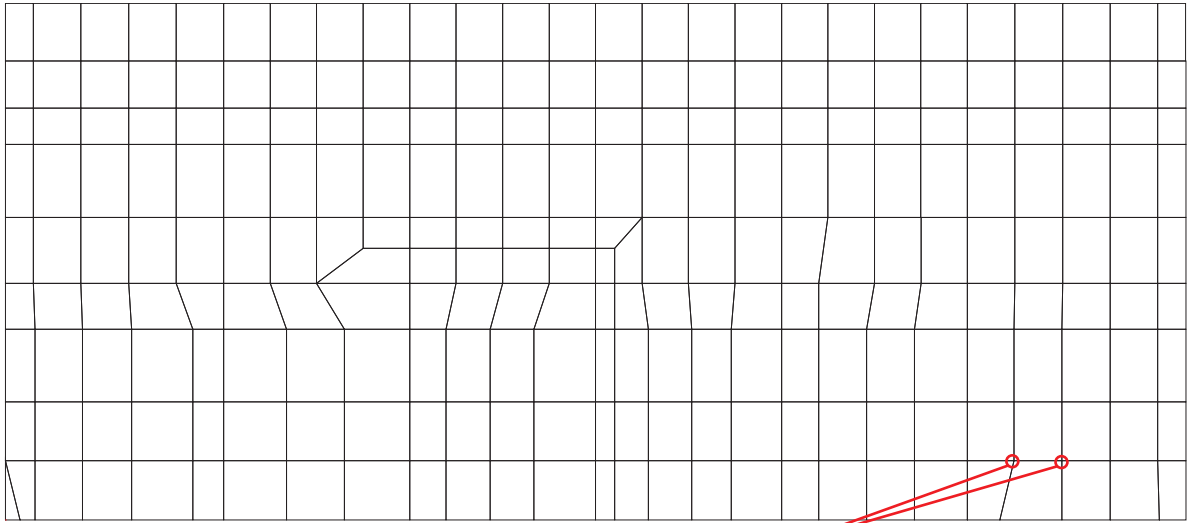
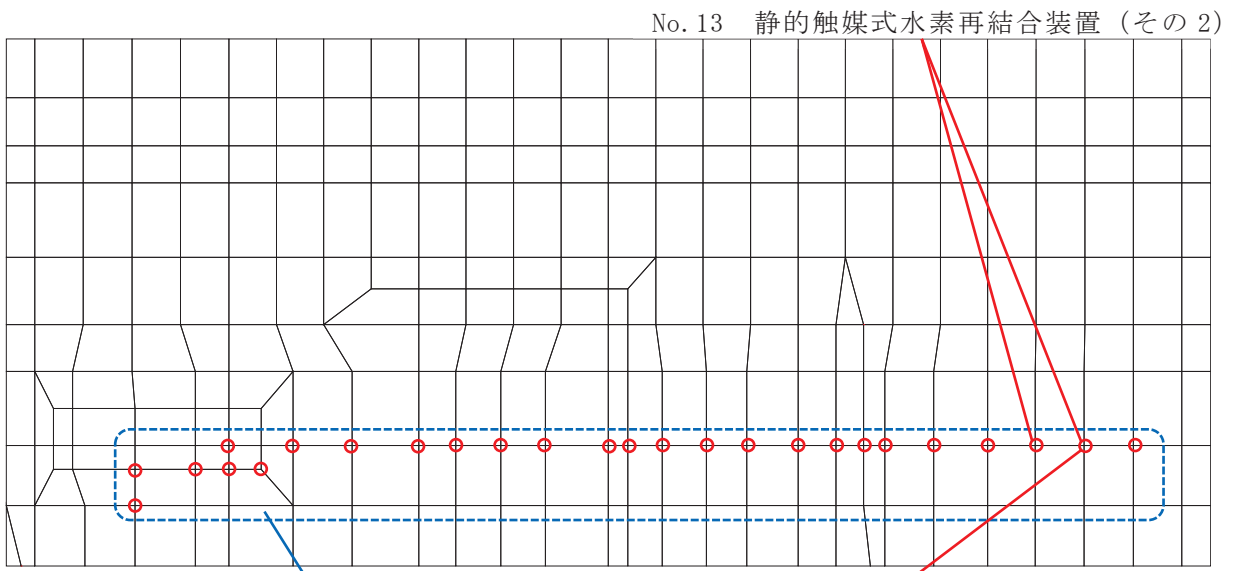


図 7 燃料取替床南面壁 (R4)



No. 13 静的触媒式水素再結合装置 (その 2)

図 8 燃料取替床東面壁 (RJ)



No. 13 静的触媒式水素再結合装置 (その 2)

No. 17 燃料プールのプレイ系配管 (FPC-019)

No. 14 静的触媒式水素再結合装置動作監視装置

図 9 燃料取替床西面壁 (RC)

No. 7 原子炉建屋内水素濃度

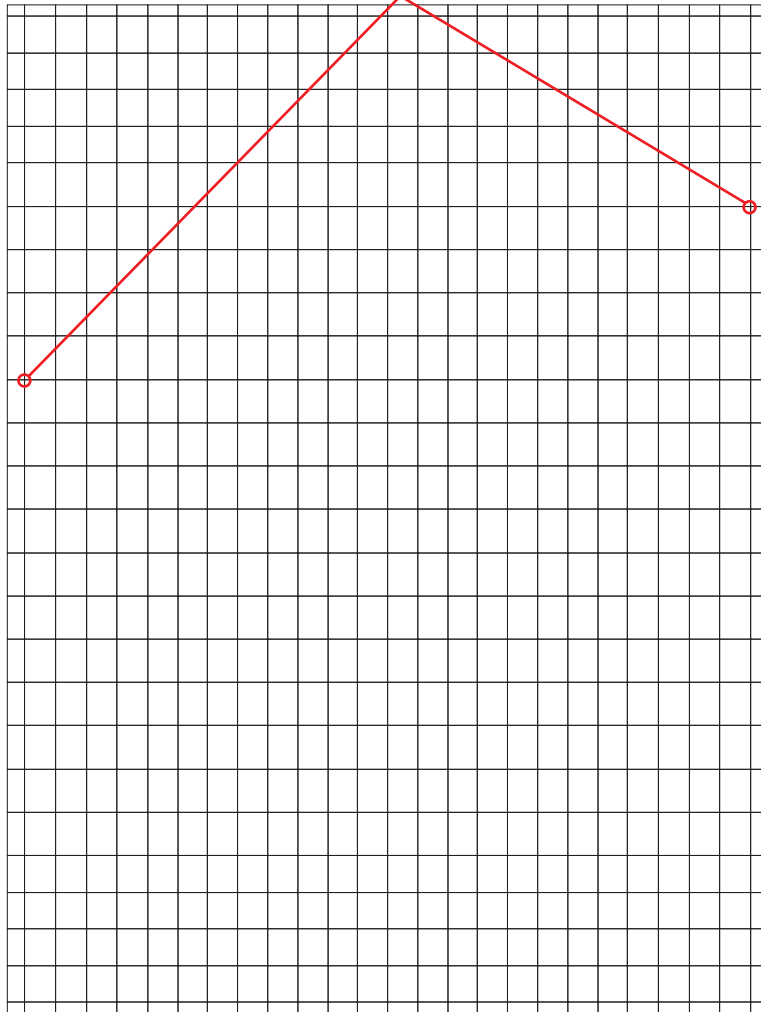


図 10 燃料取替床天井

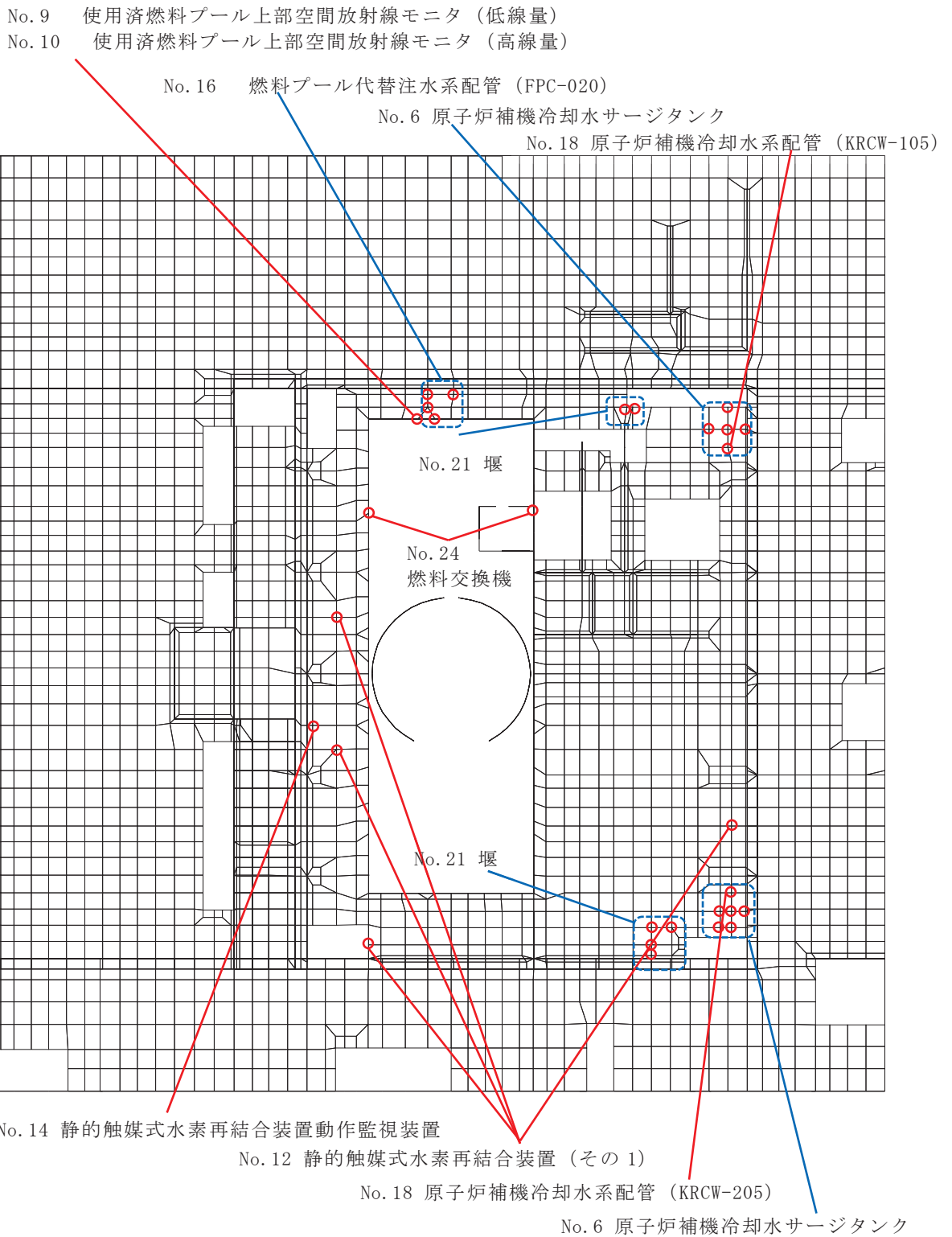


図 11 燃料取替床

No. 15 燃料プール冷却浄化系配管 (FPC-002)

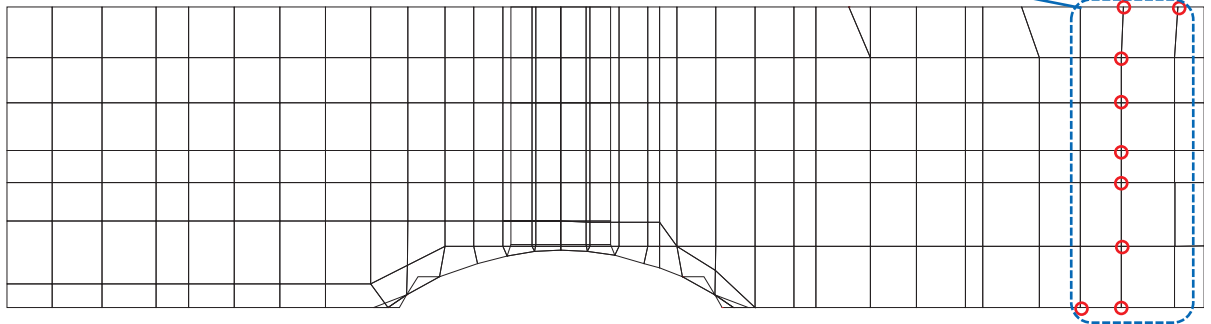
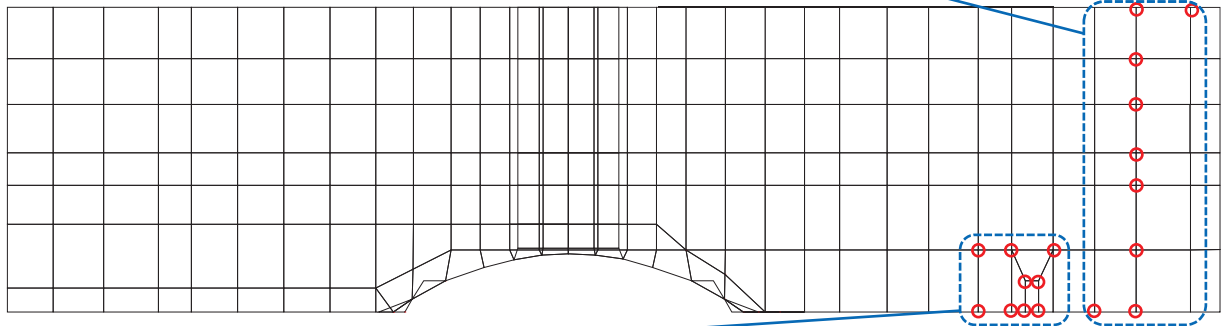


図 11 使用済燃料プール北面壁

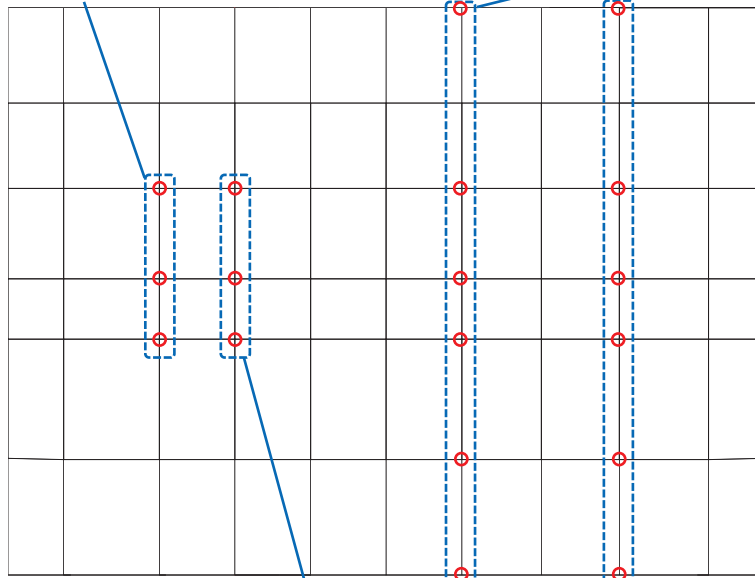
No. 15 燃料プール冷却浄化系配管 (FPC-003)



No. 2 制御棒・破損燃料貯蔵ラック

図 12 使用済燃料プール南面壁

No. 4 使用済燃料プール水位／温度 (ヒートサーモ式) No. 26 チャンネル着脱機



No. 3 使用済燃料プール水位／温度 (ガイドパルス式)

図 13 使用済燃料プール西面壁

No. 2 制御棒・破損燃料貯蔵ラック

No. 1 使用済燃料貯蔵ラック

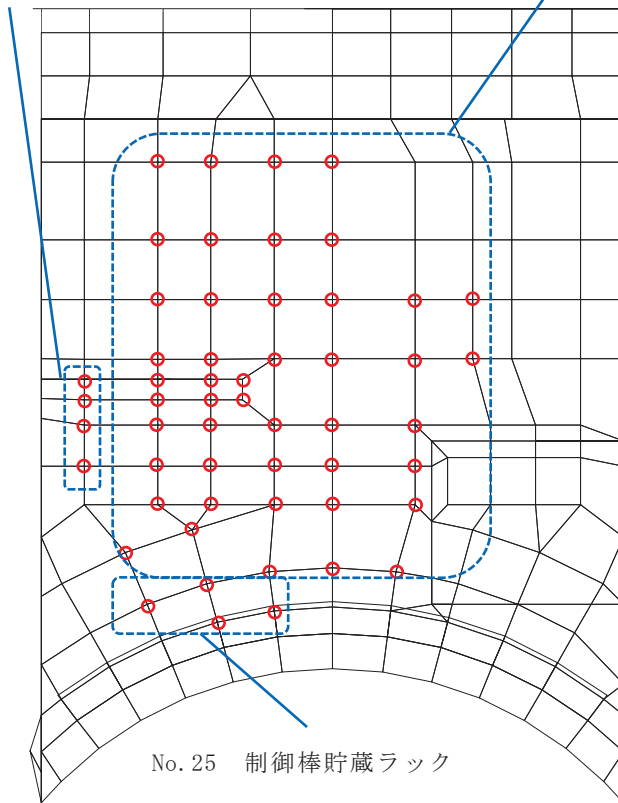


図 14 使用済燃料プール床

2.2.2 面外 **応答** による影響の評価

評価用応答比が耐震計算の裕度を上回る機器・配管系を抽出する。なお、柔な設備については、評価用応答比は 0.05s を超える全ての固有周期を考慮する。具体的な考慮方法を図 15 及び図 16 に示す。

抽出された機器・配管系に対して詳細検討を実施する。

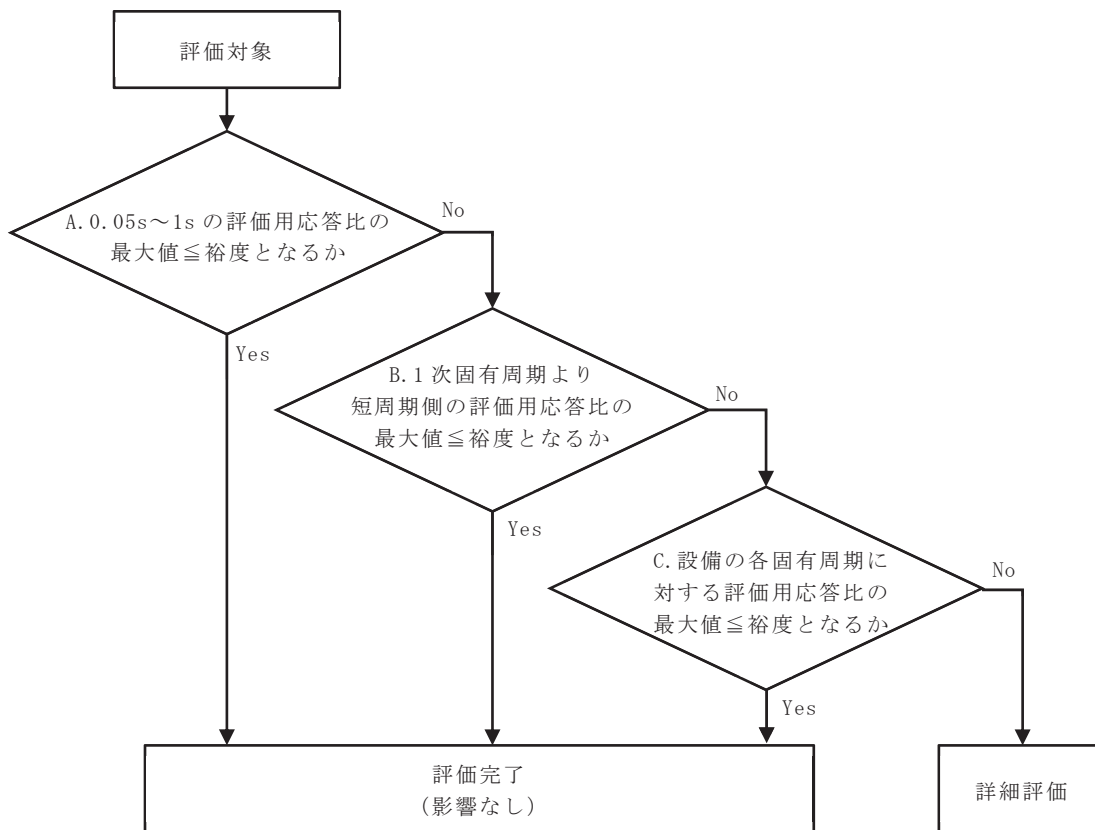
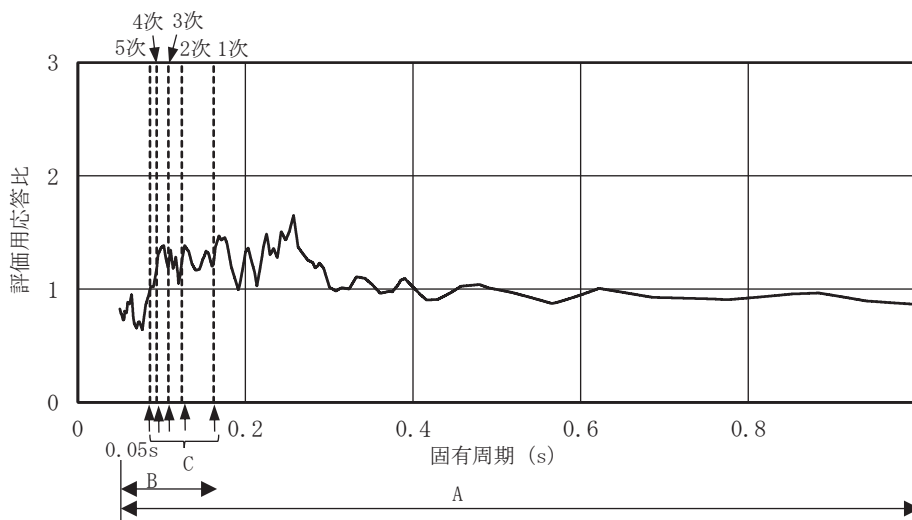


図 15 機器・配管系の固有周期における評価用応答比の考慮方法



注：A, B, C は図 15 のフローと対応

図 16 評価用応答比 (S s) の算定例

3. 評価結果

3.1 簡易評価結果

簡易評価の結果を表 2 に示す。その結果、詳細評価が必要となった機器・配管系について表 3 に示す。また、設計用床応答曲線を用いた評価をしている各影響検討設備の面外影響評価用応答（ S_s ）と設計用床応答曲線（ S_s ）の比較を図 17～22 に示す。

表 2 簡易評価結果（基準地震動 S_s ）（1/2）

No	設備名称	評価部位	応力分類等	最小裕度*	評価用応答比	検討結果
1	使用済燃料貯蔵ラック	補強板 d (170 体ラック)	組合せ	1.06	1.32	×
2	制御棒・破損燃料貯蔵ラック	ラック部材	組合せ	1.31	1.08	○
3	使用済燃料プール水位／温度（ガイドパルス式）	検出器保護管	組合せ	—	0.61	○
4	使用済燃料プール水位／温度（ヒートサーモ式）	ワーキングテーブルラグ	組合せ	—	0.84	○
5	使用済燃料プール監視カメラ	—	電氣的機能維持	—	0.84	○
6	原子炉補機冷却水サージタンク	基礎ボルト	引張り	2.12	1.65	○
7	原子炉建屋内水素濃度	—	電氣的機能維持		1.21	○
8	燃料取替エリア放射線モニタ	—	電氣的機能維持		1.36	○
9	使用済燃料プール上部空間放射線モニタ（低線量）	—	電氣的機能維持		1.04	○
10	使用済燃料プール上部空間放射線モニタ（高線量）	—	電氣的機能維持		1.04	○
11	原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置	—	動的機能		1.64	×
12	静的触媒式水素再結合装置（その 1）	静的触媒式水素再結合装置本体	組合せ	1.41	1.41	○
13	静的触媒式水素再結合装置（その 2）	静的触媒式水素再結合装置本体	組合せ	1.21	2.35	×
14	静的触媒式水素再結合装置動作監視装置	—	電氣的機能維持		1.34	○

注記*：評価用応答比が 1 以下の場合、耐震性に影響を与えないため「—」と記載する。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 2 簡易評価結果（基準地震動 S s）（2/2）

No	設備名称	評価部位	応力分類等	最小裕度*	評価用応答比	検討結果
15	燃料プール冷却浄化系配管 (FPC-002, 003)	配管本体	疲労評価	—	0.68	○
16	燃料プール代替注水系配管 (FPC-020)	配管本体	一次+二次応力	—	0.96	○
17	燃料プールのプレイ系配管 (FPC-019)	配管本体	一次+二次応力	2.36	1.63	○
18	原子炉補機冷却水系配管 (KRCW-105, 205)	配管本体	一次+二次応力	1.04	1.57	×
19	非常用ガス処理系配管 (SGTS-001)	配管本体	一次+二次応力	—	0.35	○
20	原子炉格納容器フィルタベント系配管 (FCVS-004)	配管本体	疲労評価	—	0.78	○
21	堰	アンカーボルト	引張	10.87	1.44	○
22	津波監視カメラ	津波監視カメラ	電氣的機能維持	—	0.62	○
23	原子炉建屋クレーン	脱線防止ラグ	圧縮	1.18	1.11	○
24	燃料交換機	燃料交換機構造物フレーム	組合せ		1.32	×
25	制御棒貯蔵ラック	基礎ボルト	引張り	—	0.84	○
26	燃料チャンネル着脱機	バックプレート	せん断	1.15	1.03	○

注記*：評価用応答比が1以下の場合、耐震性に影響を与えないため「—」と記載する。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。



図 17 No. 4 使用済燃料プール水位／温度（ガイドパルス式）の
面外影響評価用応答（S s）と設計用床応答曲線（S s）



図 18 No. 15 燃料プール冷却浄化系配管（FPC-002, 003）の
面外影響評価用応答（S s）と設計用床応答曲線（S s）

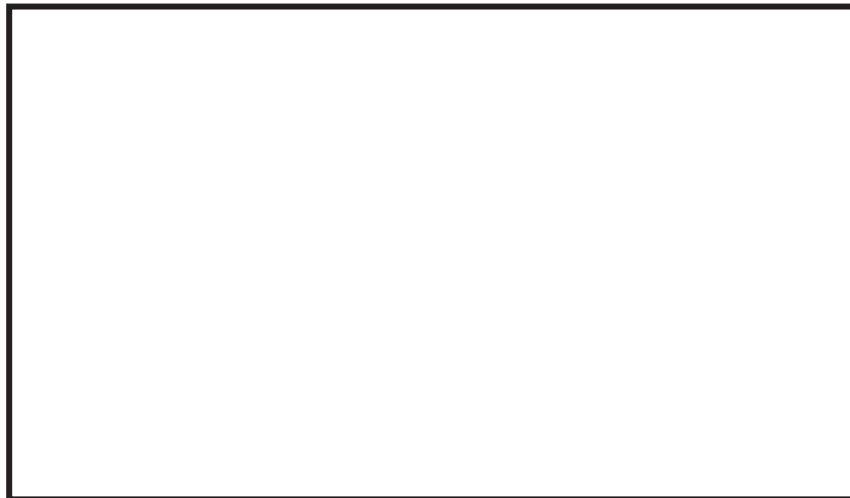


図 19 No. 18 原子炉補機冷却水系配管（KRCW-105, 205）の
面外影響評価用応答（S s）と設計用床応答曲線（S s）



図 20 No. 19 非常用ガス処理系配管 (SGTS-001) の
面外影響評価用応答 (S s) と設計用床応答曲線 (S s)



図 21 No. 20 原子炉格納容器フィルタベント系配管 (FCVS-004) の
面外影響評価用応答 (S s) と設計用床応答曲線 (S s)

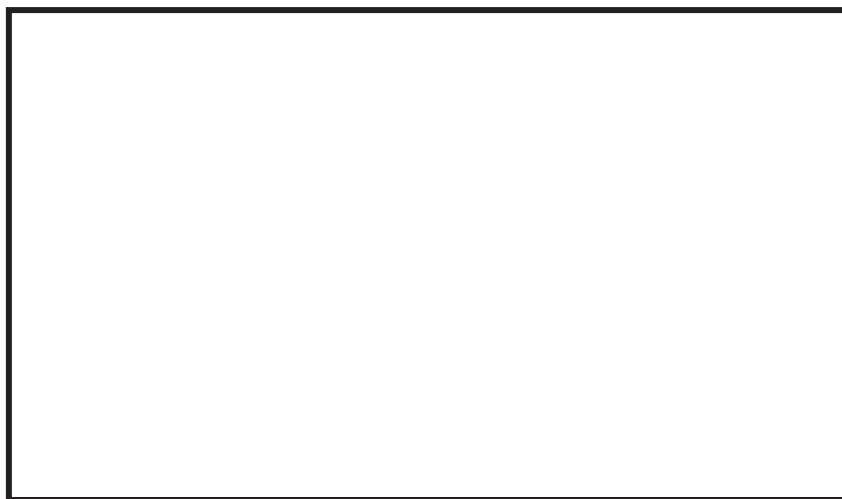


図 22 No. 24 燃料交換機の
面外影響評価用応答 (S s) と設計用床応答曲線 (S s)

表 3 詳細評価が必要となった設備

No	設備名称	減衰定数 (%) *2	固有周期 (s) *2,3	評価 項目	評価用 応答比	耐震 裕度 *4
1	使用済燃料貯蔵ラック	—	—	構造 強度	1.32	1.06
11	原子炉建屋ブローアウト パネル閉止装置	—	—	機能 維持	1.64	
13	静的触媒式水素再結合 装置 (その 2)	—	—	構造 強度	2.35	1.21
19	原子炉補機冷却水系配管 (KRCW-105, 205) *1			構造 強度	1.57	1.04
22	燃料交換機	2.0		構造 強度	1.32	

注記*1：裕度が小さい KRCW-205 を代表で記載

*2：面外方向に対して剛な設備は「—」として記載（使用済燃料貯蔵ラックの面外方向の固有周期は 0.05s 以下で剛であり，面内方向の固有周期は s（110 体ラック）， s（170 体ラック）で柔である。原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置は，面外方向及び面内方向ともに 0.05s 以下で剛である。静的触媒式水素再結合装置（その 2）は，面外方向及び面内方向ともに 0.05s 以下で剛である。）

*3：1 次固有周期を代表して記載

*4：耐震裕度は各設備の耐震計算書の全評価結果のうち，最小値を記載

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3.2 詳細評価結果

(1) 詳細評価条件

詳細評価が必要となった機器・配管系の評価の耐震条件は、表4に示すとおり、剛な設備は最大応答加速度、柔な設備は床応答曲線（拡幅なし）を用いた。また、面外方向入力による影響の検討であることから、面外方向のみ評価用応答比にモデル比を考慮し、面内方向は評価用応答比を考慮せず評価する。地震条件にはS s 7波*¹の基本ケース*²を用いた。なお、面外方向入力による影響の検討であることから、簡便のため、面内方向は工認耐震計算書と同一の設計条件を用いて評価する場合がある。

詳細評価に用いた面外評価用応答を図23、24及び表5に示す。

なお、耐震条件以外の圧力、温度等の条件は、耐震計算書と同一の条件である。

注記*1：S s 7波は、基準地震動S s - D 1，D 2，D 3，F 1，F 2，F 3及びS s - N 1。

*2：添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」に記載の材料物性の不確かさを考慮する解析ケースのうち、ケース1（基本ケース）を示す。

(2) 詳細評価結果

評価結果を表6に示す。詳細評価対象設備の発生値が許容値以下となることを確認した。

表4 詳細評価に用いた地震力

方向	設備の剛性	耐震条件	評価用応答比
面外	剛	最大応答加速度	モデル比
	柔	床応答曲線（拡幅なし）	モデル比
面内	剛	最大応答加速度	—
	柔	床応答曲線（拡幅なし）	—

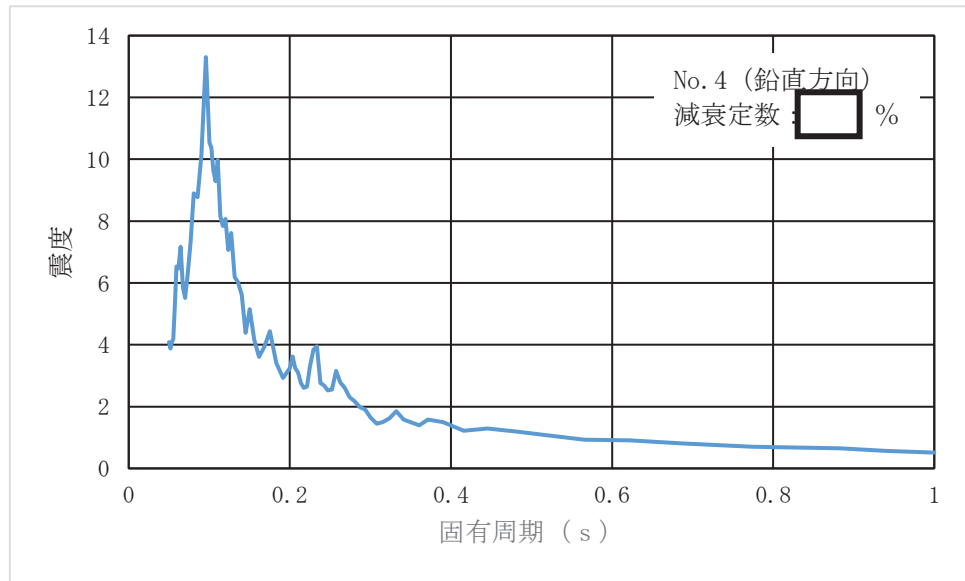


図 23 No. 19 原子炉補機冷却水系配管 (KRCW-105, 205) の面外影響評価用応答 (S s)

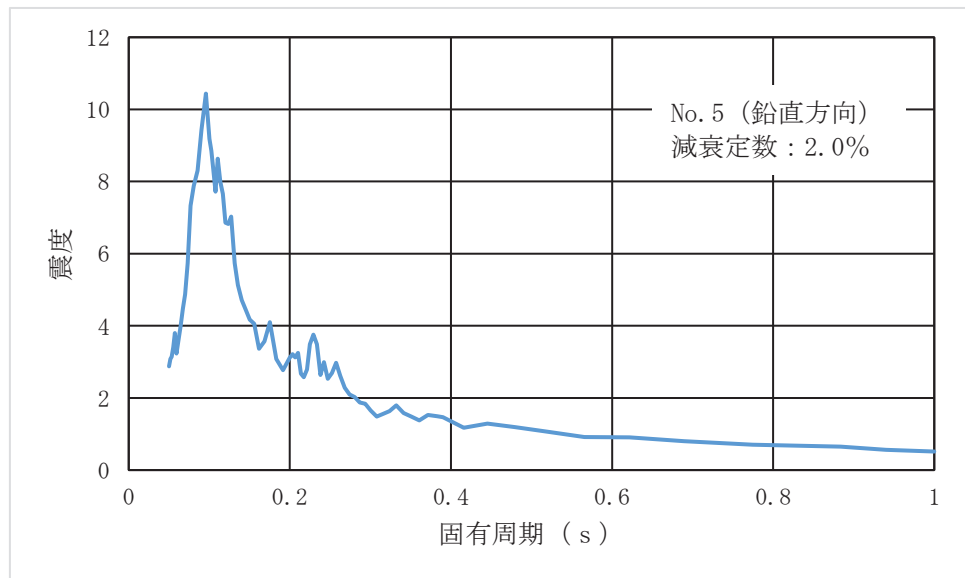


図 24 No. 22 燃料交換機の面外影響評価用応答 (S s)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 5 面外影響評価用最大応答加速度

No	設備名称	面外方向	最大応答加速度 (G)
1	使用済燃料貯蔵ラック	UD方向	2.06
11	原子炉建屋ブローアウトパネル 閉止装置* ¹	NS方向	
13	静的触媒式水素再結合装置 (その2)* ²	NS方向	7.94
19	原子炉補機冷却水系配管 (KRCW-105, 205)* ³	UD方向	2.82
22	燃料交換機	UD方向	2.70

注記*1：別紙 4.7.1 にて詳細を示す

*2：別紙 4.7.2 にて詳細を示す

*3：裕度が小さい KRCW-205 を代表で記載

表 6 詳細評価結果

No	設備名称	評価部位	応力 分類等	発生値	許容値		
1	使用済燃料貯蔵ラック	補強板 d	組合せ	193MPa	205MPa		
11	原子炉建屋ブローアウト パネル閉止装置* ¹	扉駆動用電動機	機能維持 評価				
		門駆動用電動機					
13	静的触媒式水素再結合装 置(その2)* ²	静的触媒式水素 再結合装置本体	組合せ				
19	原子炉補機冷却水系配管 (KRCW-105, 205)* ³	配管本体	一次+ 二次応力				
22	燃料交換機	燃料交換機 構造物フレーム	組合せ	243MPa			

注記*1：別紙 4.7.1 にて詳細を示す

*2：別紙 4.7.2 にて詳細を示す

*3：裕度が小さい KRCW-205 を代表で記載

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) 耐震計算書との比較

表7に面外応答の影響を踏まえた詳細評価による発生値と耐震計算書に記載の発生値との比較結果を示す。表7のとおり、詳細評価の結果が耐震計算結果を上回る設備は2設備であることを確認した。よって、補足説明資料「補足 600-43 地震応答に影響を及ぼす不確かさ要因の整理」に基づき、これら2設備の評価結果を添付書類「VI-2-12-1 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」に反映することとした。

表7 詳細評価による発生値と耐震計算書に記載の発生値との比較結果（基準地震動 S s）

No	設備名称	評価部位	応力分類等	詳細評価による発生値	耐震計算書に記載の発生値	比較結果*
1	使用済燃料貯蔵ラック	補強板 d	組合せ	193MPa	193MPa	—
11	原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置	扉駆動用電動機	機能維持評価		2.62G	○
		門駆動用電動機				
13	静的触媒式水素再結合装置（その2）	静的触媒式水素再結合装置本体	組合せ			
19	原子炉補機冷却水系配管（KRCW-105, 205）	配管本体	一次＋二次応力	338MPa	440MPa	—
22	燃料交換機	燃料交換機構造物フレーム	組合せ	243MPa	320MPa	—

注記＊：詳細評価による発生値が耐震計算書に記載の発生値を上回る場合「○」を記載

4. まとめ

「別紙2 3次元 FEM モデルを用いた精査」の「2.5 地震応答解析結果」より、壁の中央部で面外にはらむような最大応答加速度分布となっていることから、面外**応答**の機器・配管系への影響検討を実施した。その結果、面外**応答**による影響を考慮しても、機器・配管系の耐震**性**に影響がないことを確認した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置の機能維持評価

1. はじめに

原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置（以下「BOP 閉止装置」という。）の機能維持評価について、簡易評価による耐震性が確認できなかったことから、詳細検討を実施した。詳細検討で用いた面外評価用最大応答加速度と機能確認済加速度について示す。

2. 動的機能維持評価対象設備

BOP 閉止装置における動的機能維持評価対象は、扉駆動用電動機及び門駆動用電動機である。

3. 面外評価用最大応答加速度による機能維持評価

3.1 BOP 閉止装置の機能確認済加速度による評価

評価結果を表 1 に示す。BOP 閉止装置の面外評価用最大応答加速度は、機能確認済加速度を超えており、耐震性が確認できなかった。表 1 に示す機能確認済加速度は、実機規模の試験体を用いた加振試験によって、重大事故等時における BOP 閉止装置の機能維持を確認したものであり、面外応答を考慮した加速度はこれを超過していたものである。

表 1 加振試験による機能確認済加速度を用いた評価結果

対象	面外評価用 最大応答加速度 (G)	機能確認済加速度* (G)
BOP 閉止装置		

注記* : 添付書類「VI-2-9-4-4-1-5 原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置の耐震性について」から引用

実機規模の試験体を用いた加振試験より得られている機能確認済加速度を用いた評価で耐震性を確認できなかったことから、BOP 閉止装置の要求機能を踏まえた評価を実施する。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3.2 BOP 閉止装置の機能要求を踏まえた評価*1

BOP 閉止装置の要求機能が、基準地震動 S s 後においても、作動性及び扉閉止後の原子炉建屋原子炉棟を負圧に維持できる気密性を保持できることを踏まえて、それぞれの要求機能に対して以下のとおり機能維持を確認する。

BOP 閉止装置の要求機能のうち、基準地震動 S s 後における作動性については、装置を駆動するために必要な扉駆動用電動機及び門駆動用電動機の機能維持並びに内梁や門ピン等の構造健全性を確認する必要がある。

次に、BOP 閉止装置の要求機能のうち、基準地震動 S s 後における扉閉止後の原子炉建屋原子炉棟を負圧に維持できる気密性の保持については、内梁や門ピン等の構造健全性を確認する必要がある。

以上より、BOP 閉止装置の要求機能を保持するためには、内梁や門ピン等の構造健全性及び電動機の機能維持を確認する必要があるため、その確認結果を以下に示す。

(1) 内梁や門ピン等の構造健全性

BOP 閉止装置の構造強度評価*2 における評価結果は表 2 のとおり、最小裕度は であり、面外 **応答** による評価用応答比 1.64 に対して十分余裕があることから問題ないことを確認した。

表 2 BOP 閉止装置の構造強度評価結果

評価部位	応力分類	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度
門ピン	引張	51		

(2) 電動機の機能維持

BOP 閉止装置の扉駆動用電動機及び門駆動用電動機は、それぞれに加振試験を実施している。扉駆動用電動機及び門駆動用電動機に加振試験結果を表 3 に示す。扉駆動用電動機及び門駆動用電動機の面外評価用最大応答加速度は機能確認済加速度以下であり、耐震性に問題がないことを確認した。

注記*1：評価の詳細については、補足説明資料「補足-200-16 ブローアウトパネル関連設備の設計方針」参照

*2：添付書類「VI-2-9-4-4-1-5 原子炉建屋ブローアウトパネル閉止装置の耐震性について」に記載

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

表 3 扉駆動用電動機及び門駆動用電動機の加振試験結果

対象	面外評価用 最大応答加速度 (G)	機能確認済加速度* (G)
扉駆動用電動機		
門駆動用電動機		

注記* : 補足説明資料「補足-200-16 ブローアウトパネル関連設備の設計方針」から引用

4. まとめ

面外**応答**による影響を考慮しても、BOP 閉止装置の機能維持評価において、耐震性に影響がないことを確認した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

静的触媒式水素再結合装置（その2）の応力評価

1. はじめに

静的触媒式水素再結合装置（その2）（以下「静的触媒式水素再結合装置」という。）の応力評価について、簡易評価による耐震性が確認できなかったことから、詳細検討を実施した。詳細検討で用いた面外評価用最大応答加速度と機能確認済加速度について示す。

2. 応力評価対象部位

静的触媒式水素再結合装置の応力評価対象部位は、面外方向の応答倍率>裕度となる静的触媒式水素再結合装置本体である。

3. 面外評価用最大応答加速度による応力評価

3.1 静的触媒式水素再結合装置の面外方向の応答倍率による評価

評価条件を表1、評価結果を表2に示す。静的触媒式水素再結合装置本体の面外評価用最大応答加速度による算出応力は許容応力を超過しており、耐震性が確認できなかったことから、「3.2 静的触媒式水素再結合装置本体の解析モデル精緻化による評価」を実施する。

表1 面外評価用最大応答加速度を用いた評価条件

対象	NS方向（面外方向） 震度* ¹	EW方向（面内方向） 震度* ²	UD方向（面内方向） 震度* ²
静的触媒式水素 再結合装置本体	7.94	3.10	1.86

注記*1：面外方向は基準地震動 S_s （基本ケース）に対して面外方向の応答倍率（2.35倍）を乗じた震度

*2：面内方向は基準地震動 S_s （基本ケース）の震度

表2 面外評価用最大応答加速度を用いた評価結果

対象	応力分類	算出応力* ¹ (MPa)	許容応力* ² (MPa)
静的触媒式水素再結合装置本体	組合せ		

注記*1: 面内方向は基準地震動S_s (基本ケース)の震度, 面外方向は基準地震動S_s (基本ケース)に対して面外方向の応答倍率を乗じた震度による算出応力

*2: 添付書類「VI-2-9-4-4-3-1 静的触媒式水素再結合装置の耐震性についての計算書」から引用

3.2 静的触媒式水素再結合装置本体の解析モデル精緻化による評価

添付書類「VI-2-9-4-4-3-1 静的触媒式水素再結合装置の耐震性についての計算書」(以下「工認計算書」という。)で使用した解析モデルから, より実機の構造状態に合うよう精緻化した解析モデルによる応力評価を実施した。3.2.1項に精緻化した解析モデルを示す。

静的触媒式水素再結合装置本体の解析モデル精緻化による評価結果を表3に示す。静的触媒式水素再結合装置本体の面外評価用最大応答加速度による算出応力は許容応力以下であり, 耐震性が確認できた。

表3 静的触媒式水素再結合装置本体の解析モデル精緻化による評価結果

対象	応力分類	算出応力* ¹ (MPa)	許容応力* ² (MPa)
静的触媒式水素再結合装置本体	組合せ		

注記*1: 面内方向は基準地震動S_s (基本ケース)の震度, 面外方向は基準地震動S_s (基本ケース)に対して面外方向の応答倍率を乗じた震度による算出応力

*2: 添付書類「VI-2-9-4-4-3-1 静的触媒式水素再結合装置の耐震性についての計算書」から引用

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

3.2.1 解析モデルの精緻化

図1に工認計算書で使用した解析モデルを示す。

3.1項の評価で裕度が1未満となった箇所は、静的触媒式水素再結合装置本体の背面部の①ハウジングである。



図1 工認計算書の解析モデル

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

図 2 に①ハウジングの外形図を示す。

①ハウジングは、②ブラケットと③カートリッジガイドに挟まれるようにリベットで接合された構造となっている。工認耐震計算書では①ハウジング（板厚 ）と②ブラケットをモデル化しており、③カートリッジガイドは質量のみをモデルに考慮している。

今回の検討において、建屋の面外方向の応答が増加したことにより、①ハウジングに対しても図 2 に示すとおり面外方向への入力加速度が大きくなったことから、過大な応力が発生し許容応力を上回る結果となった。

そこで、実構造を踏まえた解析モデルの精緻化を実施するため、図 2 に示す③カートリッジガイド（①ハウジングと接合する上部の板状の範囲）について解析モデルへ反映を行った。



図 2 ①ハウジングの外形図

精緻化した解析モデルを図 3 に示す。

工認計算書では、上記のとおり①ハウジングのみの板厚 をモデル化していたが、精緻化した解析モデルでは、①ハウジングの濃色部について、①ハウジングの板厚 と③カートリッジガイド上部が接合する部位（板厚 ）の板厚を考慮して板厚 としてモデル化した。

今回の検討対象である面外方向は、①ハウジングと③カートリッジガイドを接合するリベットの軸方向となるため、2枚の板を押し付ける方向に荷重が加わる。リベット接合位置ではワッシャーとリベットによって、①ハウジングと③カートリッジガイドはリジットに固定されているため、2枚の板厚を考慮できる。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

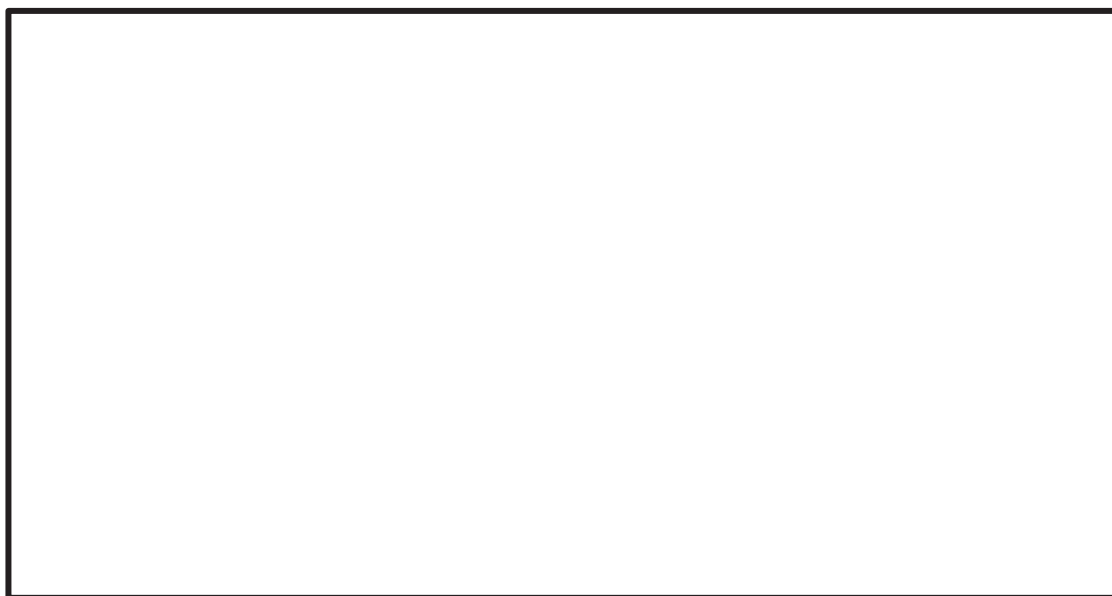


図 3 精緻化した解析モデル

4. まとめ

面外応答による影響を考慮しても、静的触媒式水素再結合装置本体の応力評価において、耐震性に影響がないことを確認した。

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

原子炉建屋 3次元 FEM モデルの応答解析結果に係る機器・配管系への影響検討

1. はじめに

「別紙 3 3次元 FEM モデルによる地震応答解析」の「3.4 床応答への影響検討」より、3次元 FEM モデルの応答が質点系モデルの応答を上回る箇所があることから、補足説明資料「補足 600-43 地震応答に影響を及ぼす不確かさ要因の整理」に基づき、機器・配管系への影響検討を実施する。

2. 検討方針

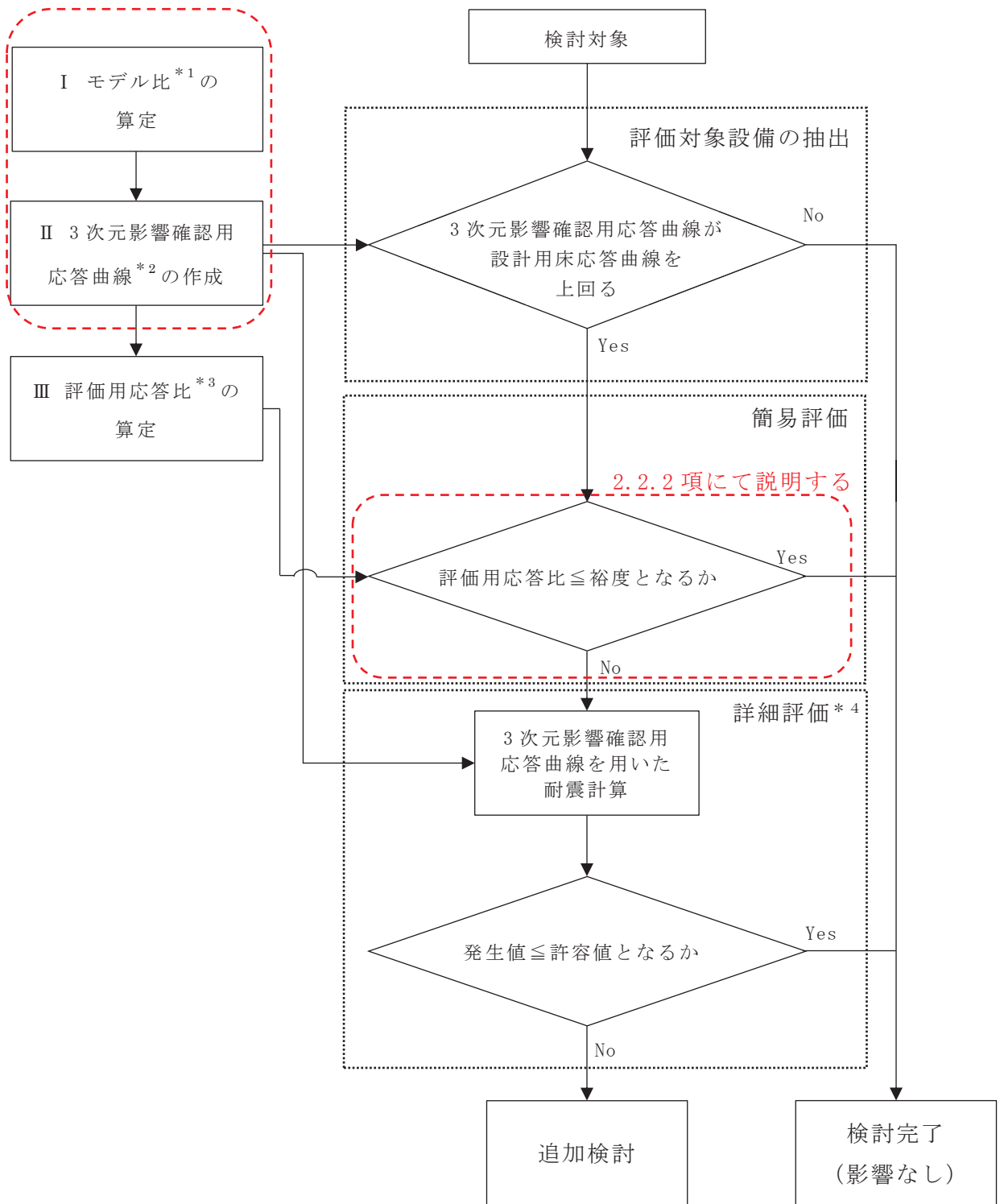
3次元 FEM モデルの応答スペクトルから、3次元影響確認用応答曲線を作成し、設計用床応答曲線との比較を行う。比較対象箇所は、「別紙 3 3次元 FEM モデルによる地震応答解析」の「3.4 床応答への影響検討」と同様とする。「2.1 検討対象」について、評価用応答比と各検討対象の裕度（許容値／発生値）を用いた簡易評価及び3次元影響確認用応答曲線を用いた詳細評価を行う。影響検討フローを図 1 に示す。なお、応答の作成及び評価は、「別紙 4.7 原子炉建屋 3次元 FEM モデルの面外応答に係る機器・配管系への影響検討」と同様の方法である。

2.1 検討対象

原子炉建屋に設置される以下の機器・配管系を影響検討の対象とする。

- ・設計基準対象施設のうち、耐震重要度分類の S クラスに属する機器・配管系
- ・重大事故等対処施設のうち、常設耐震重要重大事故防止設備、常設重大事故緩和設備、常設重大事故防止設備（設計基準拡張）（当該設備が属する耐震重要度分類が S クラスのもの）及び常設重大事故緩和設備（設計基準拡張）に属する機器・配管系
- ・波及的影響防止のために耐震評価を実施する機器・配管系

2.2.1 項にて説明する



- 注記*1: モデル比 = $S_d - D2$ に対する 3次元 FEM モデルの応答 / $S_d - D2$ に対する質点系モデルの応答
 *2: 面外影響評価用応答 = 質点系モデル基本ケース*5の S_s (S_s 7波*6) に対する応答 × モデル比
 *3: 評価用応答比 = 面外影響評価用応答 / 基準地震動 S_s (S_s 7波) の設計用床応答曲線
 *4: 当該設備の耐震計算書で適用している評価手法と同等の手法による評価 (解析モデルの精緻化含む)
 *5: 添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」に示す基本ケース
 *6: S_s 7波は、基準地震動 $S_s - D1, D2, D3, F1, F2, F3$ 及び $S_s - N1$

図1 原子炉建屋 3次元 FEM モデルの応答解析結果に係る機器・配管系への影響検討フロー

2.2 検討内容

2.2.1 3次元影響を確認するための応答の作成

3次元 FEM モデルでは、弾性設計用地震動 S_d に対する地震応答解析を行っていることから、質点系モデルの基準地震動 S_s に対する応答を補正し、3次元影響を確認できる応答を作成する。

I 弾性設計用地震動 S_d に対する 3次元 FEM モデルの応答／弾性設計用地震動 S_d に対する質点系モデルの応答の比（以下「モデル比 (S_d)」という。）を、全周期において算定する。モデル比は、「別紙 3 原子炉建屋 3次元 FEM モデルによる地震応答解析」の表 3-9 に記載の減衰定数 1%における応答の比を用いて作成する。モデル比の例を図 2 に示す。なお、3次元 FEM モデルの応答による機器・配管系の耐震評価結果へ与える影響を検討するものであるため、モデル比が 1.0 を下回る場合でも、そのモデル比を乗ずる。

II 質点系モデル基本ケースの基準地震動 S_s に対する固有周期毎の応答に、モデル比を乗算した応答曲線（以下「3次元影響確認用応答曲線 (S_s)」という。）を算定する。3次元影響確認用応答曲線算定の例を図 3 に示す。3次元影響確認用応答曲線は、固有周期 0.102s を例とすると、0.102s の質点系モデル基本ケースの基準地震動 S_s に対する応答に 0.102s のモデル比を乗算した値となる。

III 3次元影響確認用応答曲線 (S_s)／基準地震動 S_s の設計用床応答曲線の比（以下「評価用応答比 (S_s)」という。）を算定する。評価用応答比の算定例を図 4 に示す。評価用応答比は、仮に固有周期が 0.102s の機器・配管系とすると、設計用床応答曲線（以下「設計用床応答曲線 (S_s)」という。）による耐震計算を実施している場合 (d/c) となる。なお、配管反力等を用いて評価している機器・配管系は、反力等を算定している配管の評価用応答比を考慮して評価する。

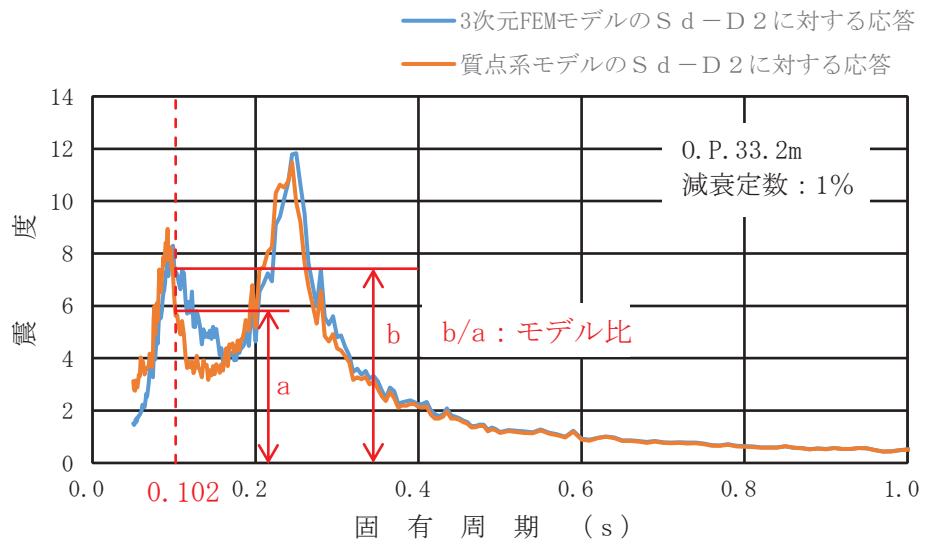


図2 モデル比 (S_d) の算定例 (2.2.1 項 I)

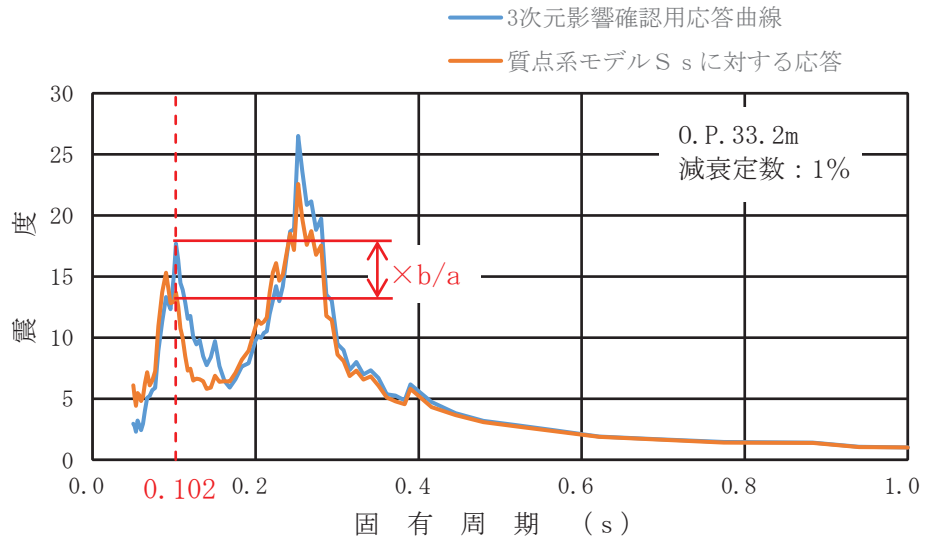
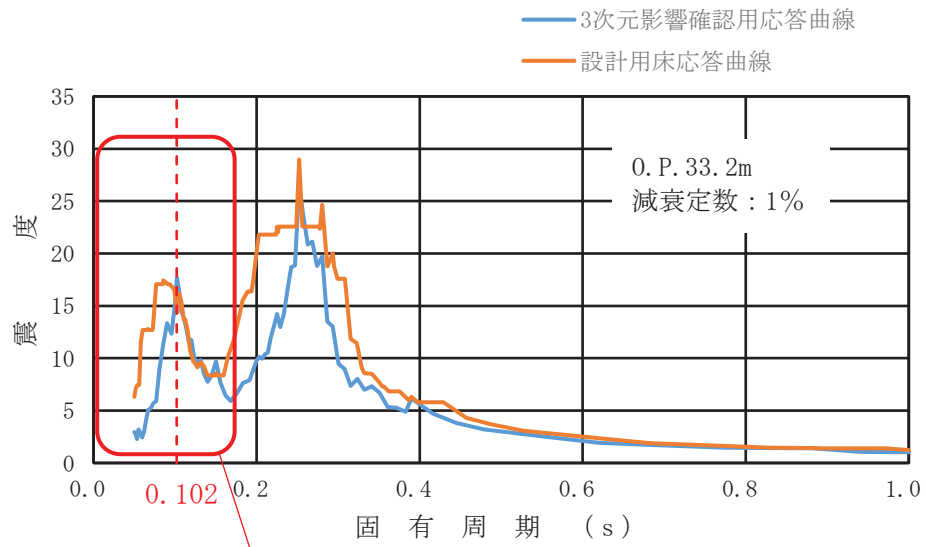
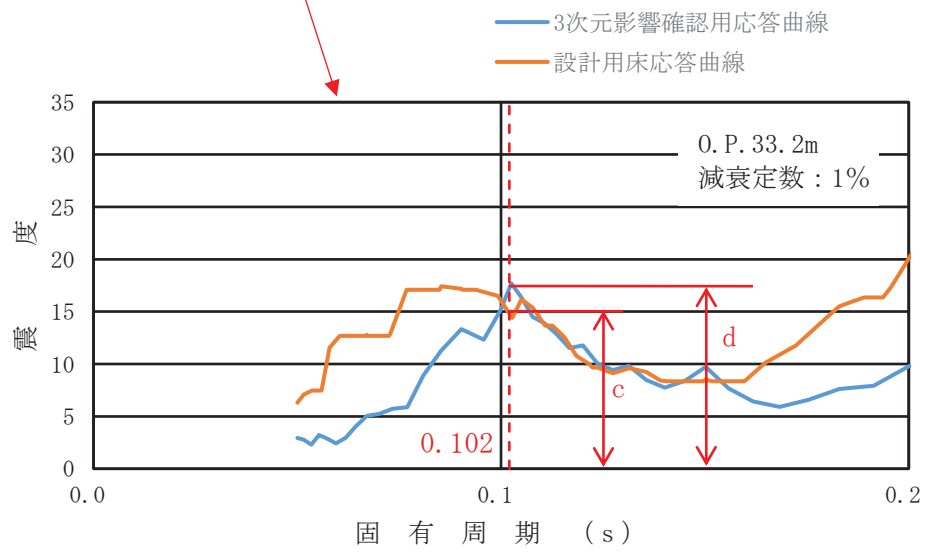


図3 3次元影響確認用応答曲線 (S_s) の算定例 (2.2.1 項 II)



(全体図 (固有周期 0~1.0 s))



(拡大図 (固有周期 0~0.2 s))

図 4 評価用応答比 (S_s) の算定例 (2.2.1 項Ⅲ)

2.2.2 3次元 FEM モデルによる影響の評価

評価用応答比が耐震計算の裕度を上回る機器・配管系を抽出する。なお、柔な設備については、評価用応答比は 0.05s を超える全ての固有周期を考慮する。具体的な考慮方法を図 5 及び図 6 に示す。

抽出された機器・配管系に対して詳細検討を実施する。

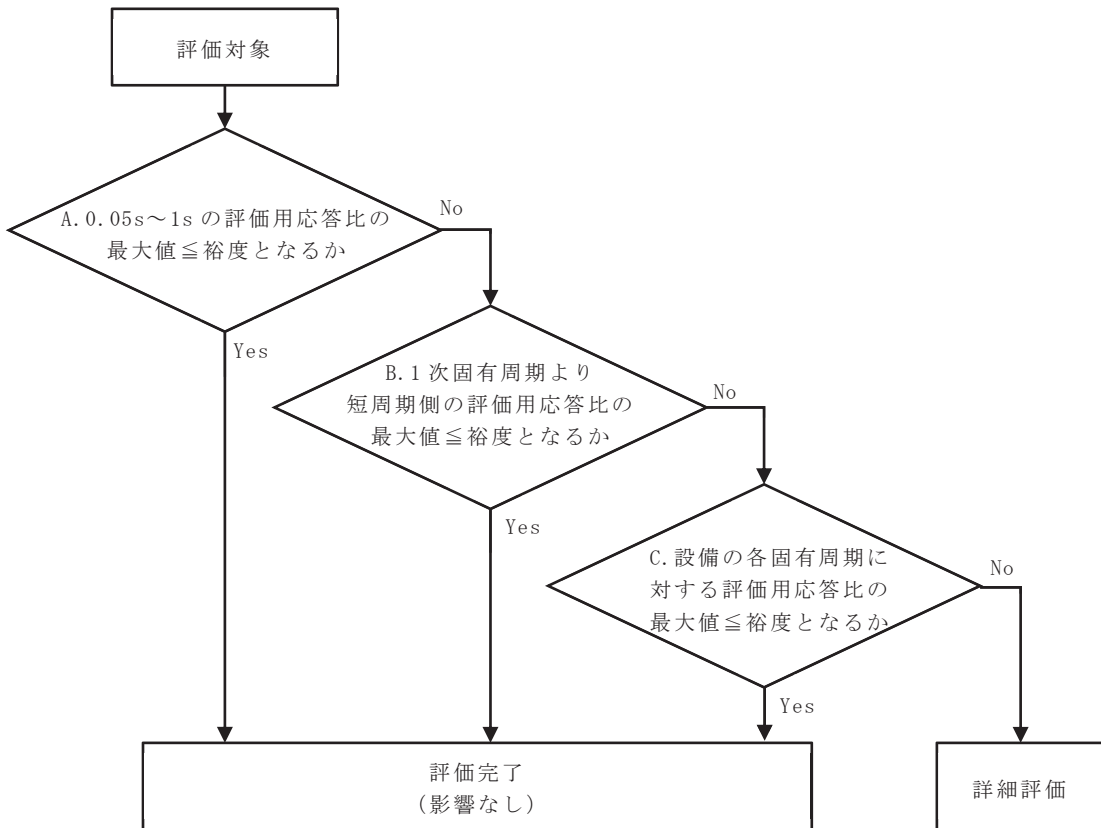
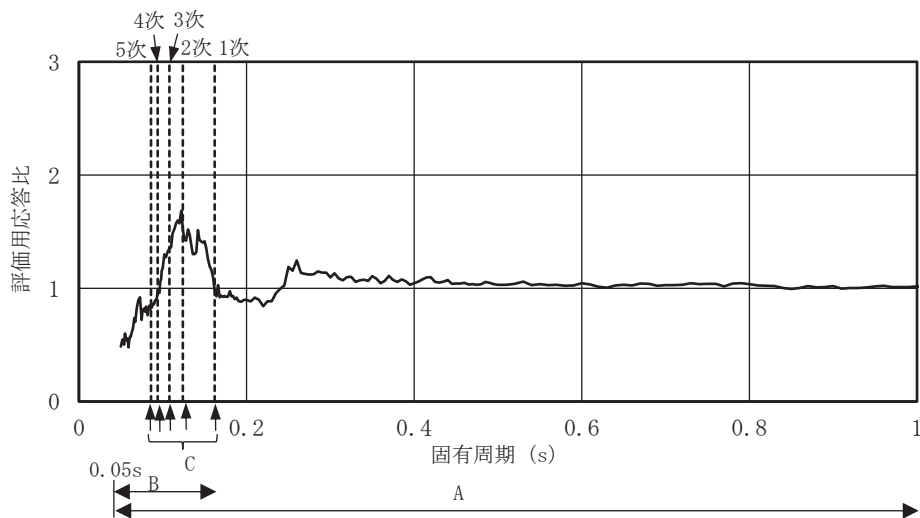


図 5 機器・配管系の固有周期における評価用応答比の考慮方法



注：A, B, C は図 5 のフローと対応

図 6 評価用応答比 (S s) の算定例

3. 評価用応答比

最大応答加速度の評価用応答比を表 1, 3次元影響確認用応答曲線 (S_s) と設計用床応答曲線 (S_s) の床応答曲線を図 5 (水平方向) 及び図 6 (鉛直方向) に示す。

表 1 最大応答加速度の評価用応答比 (1/2) (水平方向)

標高 O.P. (m)	評価用応答比
50.5	0.60
41.2	0.65
33.2	0.97
22.5	0.96
15.0	0.85
6.0	0.97
1.15	0.69
-0.8	0.98
-8.1	1.09

表 1 最大応答加速度の評価用応答比 (2/2) (鉛直方向)

標高 O.P. (m)	評価用応答比
48.75	0.86
41.2	0.87
33.2	0.86
22.5	0.69
15.0	0.78
6.0	0.92
-0.8	0.98
-8.1	0.95

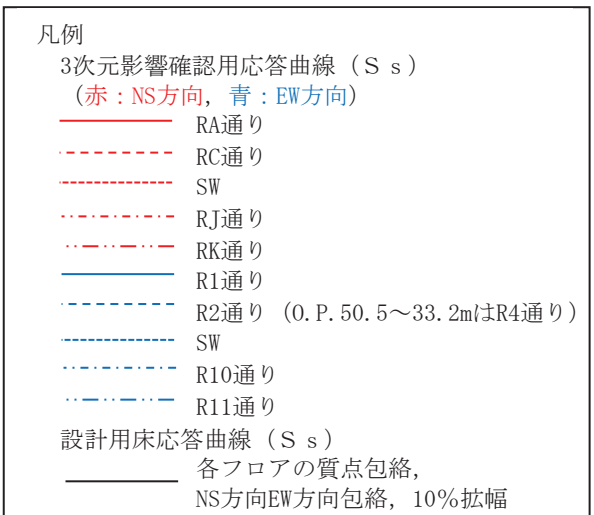
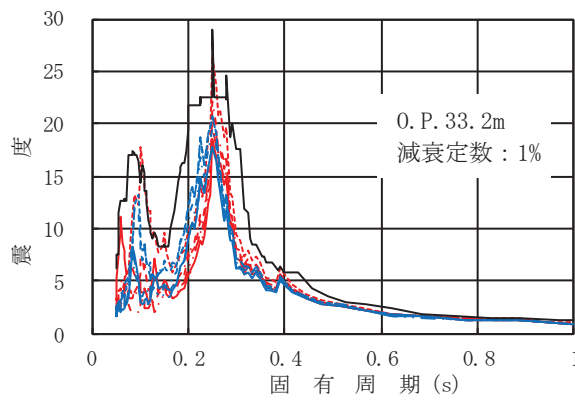
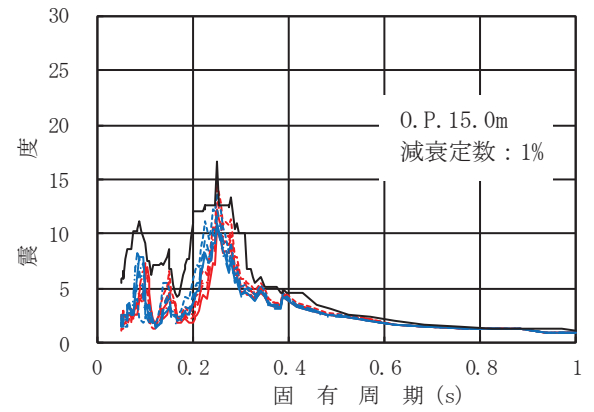
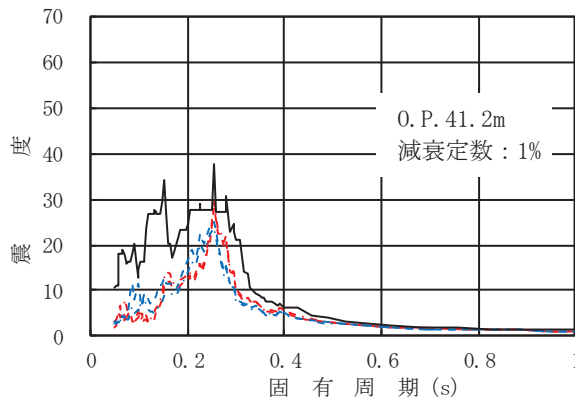
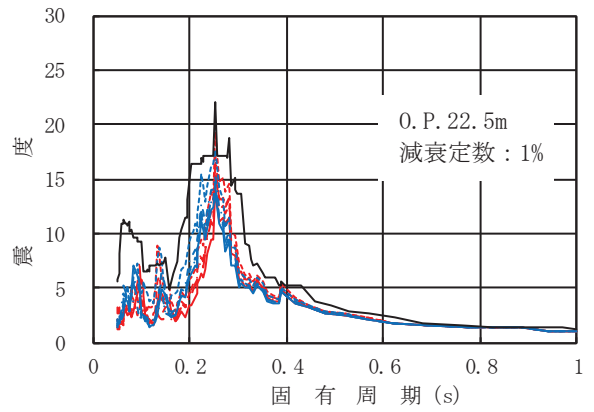
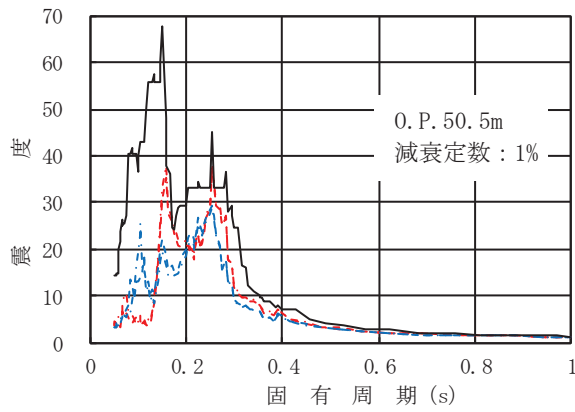


図5 3次元影響確認用応答曲線 (S s) と設計用床応答曲線 (S s) の比較 (水平方向) (1/2)

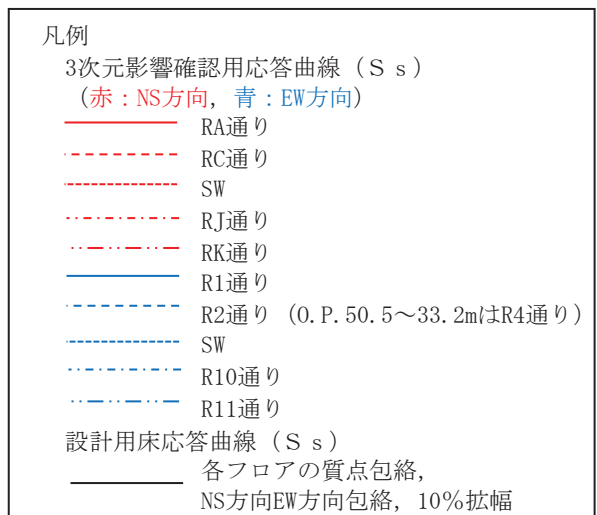
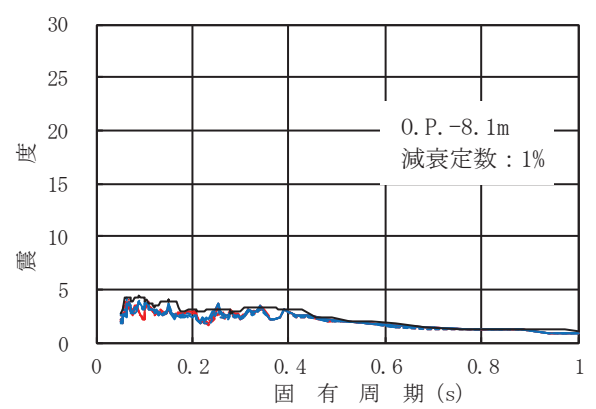
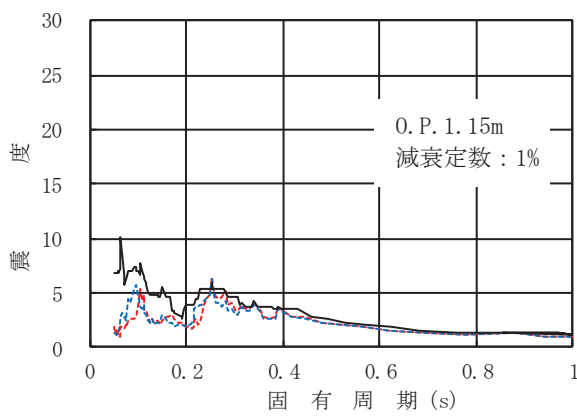
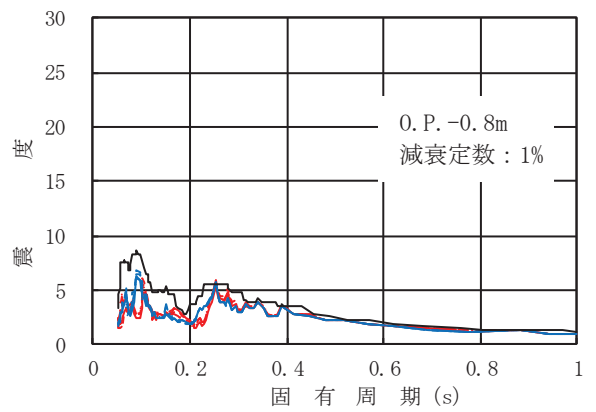
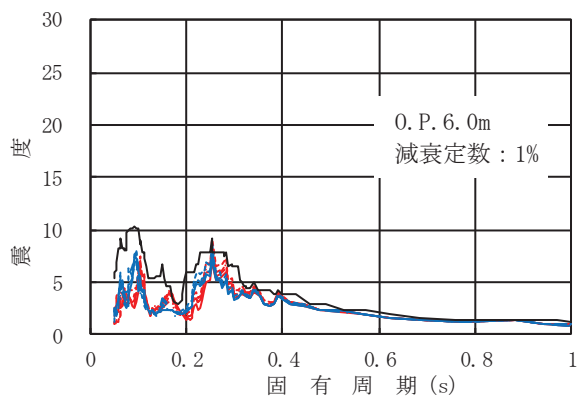


図5 3次元影響確認用応答曲線 (S s) と設計用床応答曲線 (S s) の比較 (水平方向) (2/2)

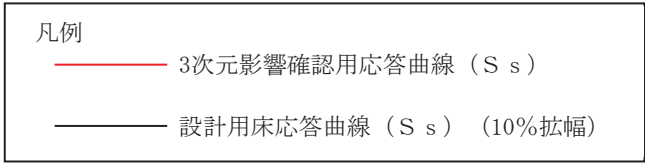
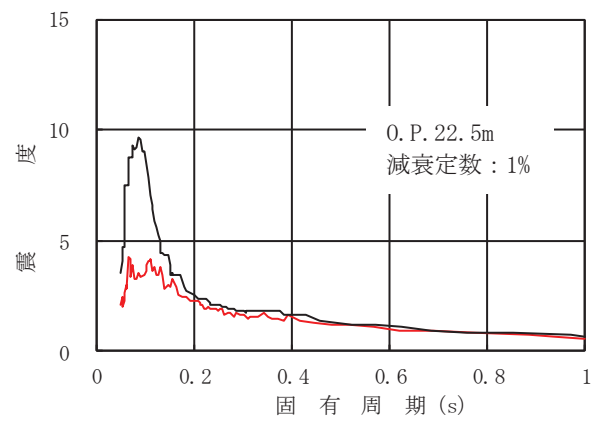
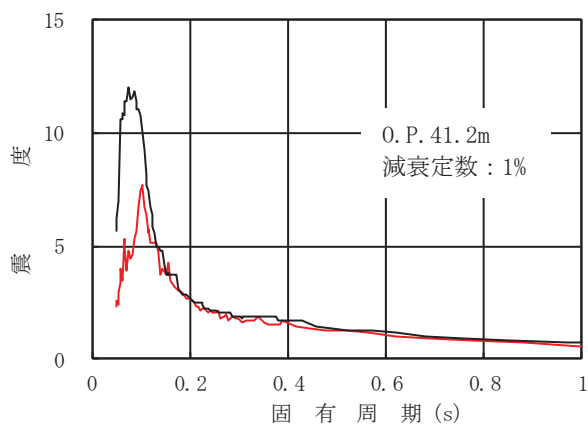
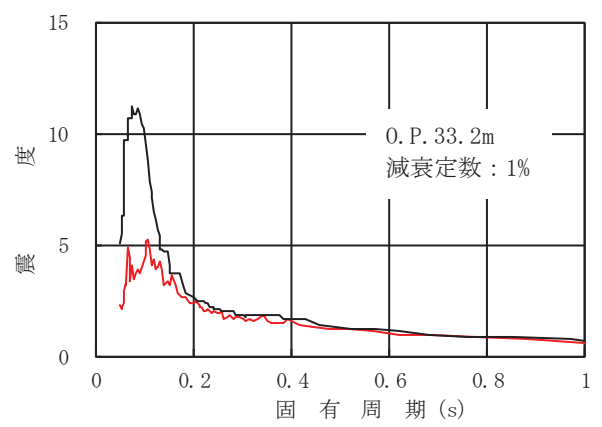
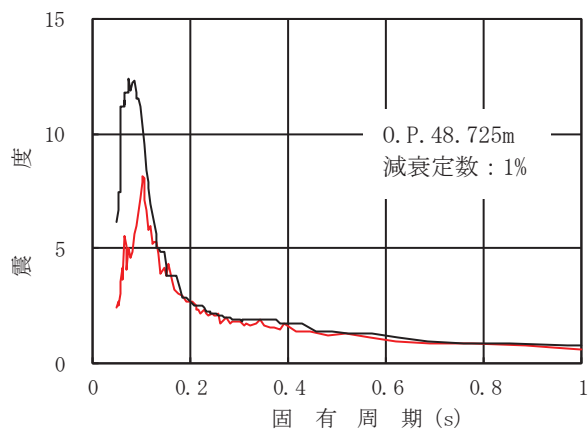


図6 3次元影響確認用応答曲線 (S s) と設計用床応答曲線 (S s) の比較 (鉛直方向) (1/2)

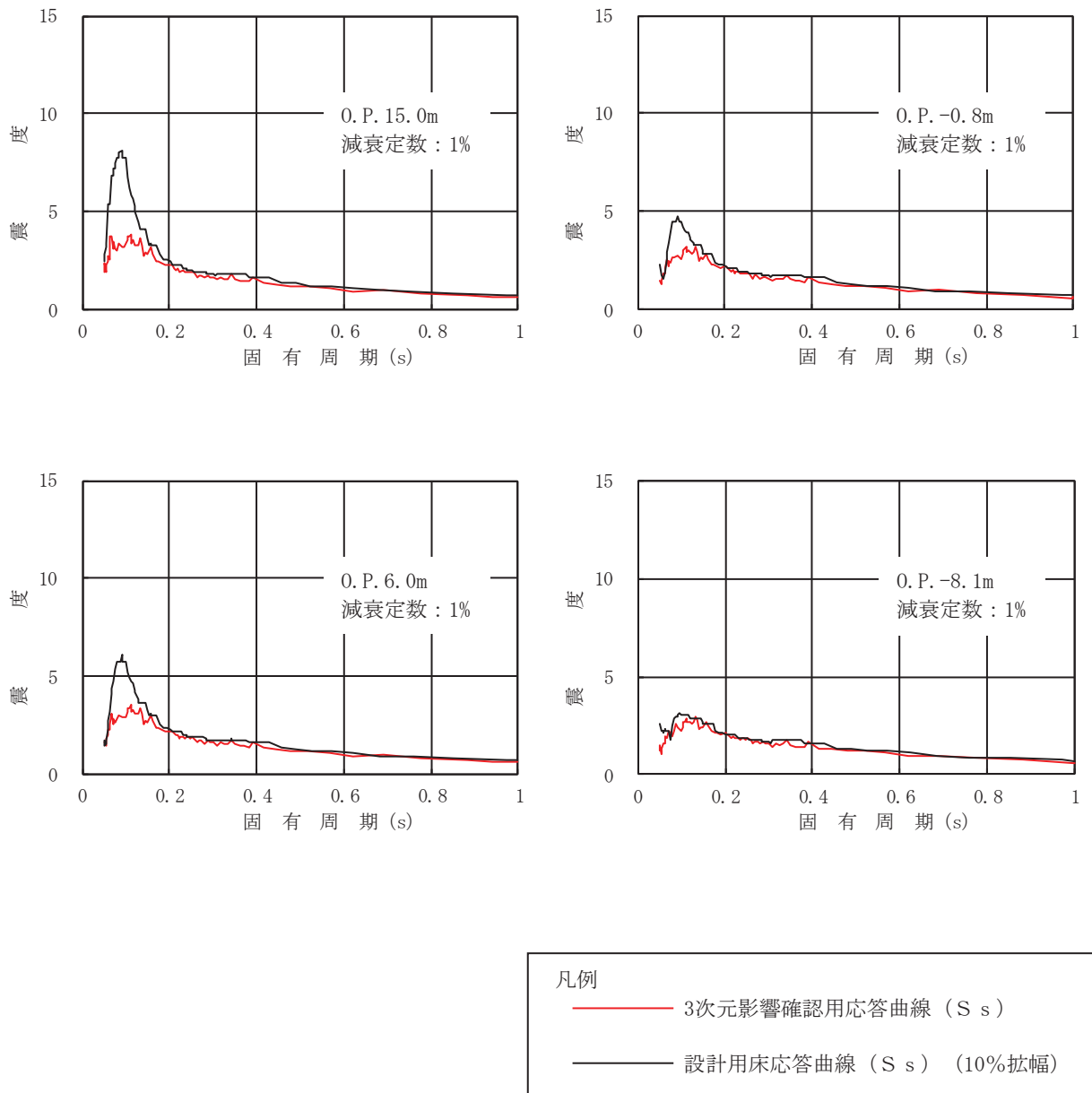


図6 3次元影響確認用応答曲線 (S s) と設計用床応答曲線 (S s) の比較 (鉛直方向) (2/2)

4. 評価結果

(1) 簡易評価結果

簡易評価の結果，一部の設備（2設備）を除き，評価用応答比が設備の裕度以下となることを確認した。表2に評価用応答比が設備の裕度を上回った2設備の簡易評価結果を示す。

表2 評価用応答比が設備の裕度を上回った2設備の簡易評価結果（基準地震動S_s）

設備名称	評価部位	応力分類	最小裕度	評価用応答比	検討結果
原子炉補機冷却水系配管（RCW-013）	配管本体	一次＋二次 応力	1.02	1.15	×
低圧炉心スプレイ系配管（LPCS-002）	配管本体	一次＋二次 応力	1.08	1.12	×

(2) 詳細評価結果

簡易評価において評価用応答比が設備の裕度を上回った2設備に対して詳細評価を行った結果，発生値が許容値以下であることを確認した。図7に詳細評価に用いた3次元影響確認用応答曲線（S_s）と設計用床応答曲線（S_s）を示す。表3に評価用応答比が設備の裕度を上回った2設備の詳細評価結果を示す。

表3 評価用応答比が設備の裕度を上回った2設備の詳細評価結果（基準地震動S_s）

設備名称	評価部位	応力分類	発生値 (MPa)	許容値 (MPa)
原子炉補機冷却水系配管（RCW-013）	配管本体	一次＋二次 応力	304	466
低圧炉心スプレイ系配管（LPCS-002）	配管本体	一次＋二次 応力	265	378



(水平方向)



(鉛直方向)

図 7 詳細評価に用いた 3次元影響確認用応答曲線 (S_s) と設計用床応答曲線 (S_s)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(3) 耐震計算書との比較

表 4 に 3 次元 FEM モデルの応答の影響を踏まえた詳細評価による発生値と耐震計算書に記載の発生値の比較結果を示す。表 4 のとおり、詳細評価対象設備の詳細評価による発生値が耐震計算書に記載の発生値以下であることを確認した。

表4 詳細評価における発生値と耐震計算書における発生値（基準地震動 S_s）

設備名称	評価部位	応力分類	詳細評価による発生値 (MPa)	耐震計算書に記載の発生値 (MPa)	比較結果*
原子炉補機冷却水系配管 (RCW-013)	配管本体	一次+二次応力	304	456	—
低圧炉心スプレイ系配管 (LPCS-002)	配管本体	一次+二次応力	265	347	—

注記*：詳細評価による発生値が耐震計算書に記載の発生値を上回る場合「○」を記載

5. まとめ

「別紙 3 3次元 FEM モデルによる地震応答解析」の「3.4 床応答への影響検討」より、3次元 FEM モデルの応答が質点系モデルの応答を上回る箇所があることを踏まえて機器・配管系への影響検討を実施した。その結果、3次元 FEM モデルによる影響を考慮しても、機器・配管系の耐震性に影響がないことを確認した。