

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

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-400-1 改9
提出年月日	平成30年10月2日

建物・構築物の地震応答解析についての補足説明資料

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

平成30年10月

日本原子力発電株式会社

目次

1. 概要.....	1
2. 地震応答解析モデル及び手法の比較.....	2

別紙 1-1 原子炉建屋の地盤接地状況と埋込みSRモデルの適用性について

別紙 1-2 原子炉建屋の地震応答解析モデルの変更について

別紙 1-3 原子炉建屋の地震応答解析モデルについて

補足 シミュレーション解析に用いる入力地震動の算定について

別紙 2-1 使用済燃料乾式貯蔵建屋で用いる有効入力動の適用性について

別紙 2-2 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの変更について

別紙 2-3 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルについて

下線 今回提出資料

別紙 2-2 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの変更について

目次

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

1. 概要

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

2. 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデルの変更について

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

NS 方向の耐震壁には、金属キャスク冷却のために上階及び下階に大開口が設けられている。NS 方向の DC 既工認モデルでは、剛床仮定に基づいて弾性剛性を設定し 1 本棒多質点系モデルを構築した。このモデルによる S₂地震の建屋応答は弾性範囲に収まっていた。DC 今回工認モデルでは、弾性剛性が S₃地震時の非線形挙動に大きな影響を及ぼすため、大開口の影響をより適切に反映できる 3 次元全体 FEM モデルによる等価弾性剛性を採用することに変更する。3 次元全体 FEM モデルは既工認の応力解析で用いた全体モデルとする。図 2-1 に 3 次元全体 FEM モデルによる等価剛性の設定フローを示す。壁脚部 (EL. 8.3 m) を固定とした FEM モデルを用いて、NS 方向載荷時の各階床レベルでのせん断変形及び屋根レベルでの曲げ変形を算定する。

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

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

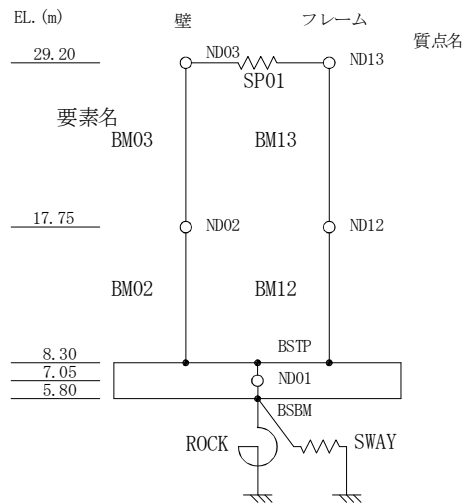
図 2-5 にガラリ周辺部について FEM モデルの拡大図を示す。下層階のガラリ高さに対する柱幅の比は 4.12m/1.2m=3.4、上層階のガラリ高さに対する柱幅の比は 3.0/1.2=2.5 となっている。

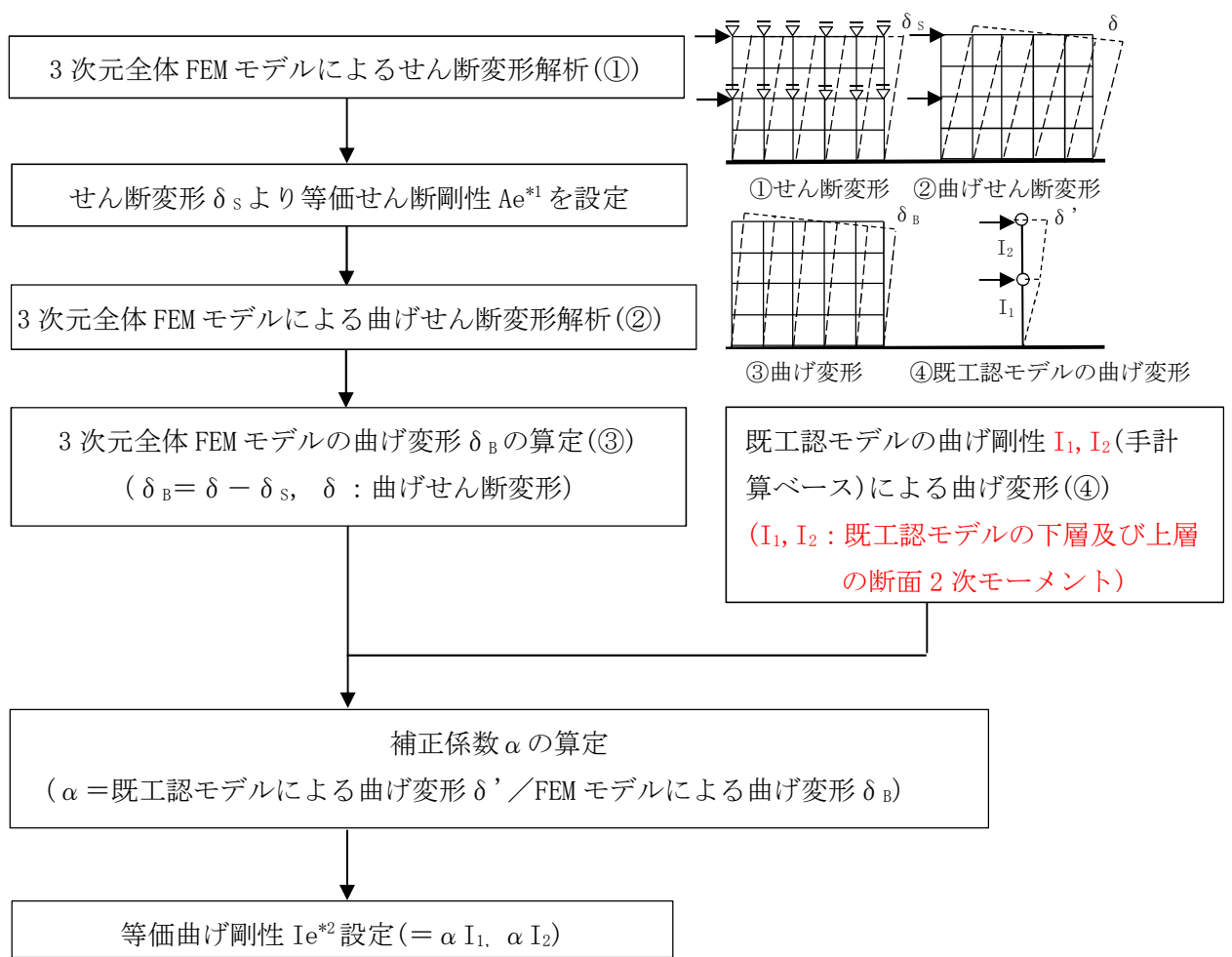
一方、EW 方向の DC 既工認モデルは、NS 方向に細長い形状をしている使用済燃料乾式貯蔵建屋の EW 方向振動に対して、妻側耐震壁と中央のフレームを集約して 1 本棒多質点系モデルを構築した。DC 今回工認モデルでは、S_s地震時の非線形挙動を精度良く表現する必要があるために、妻側耐震壁が主要な耐震要素であることを考慮し、妻側耐震壁と耐震壁間のフレームに分離してそれぞれ 1 本棒でモデル化し、屋根スラブを模擬したせん断ばねで連結した 2 本棒多質点系モデルに変更する。図 2-6 に DC 今回工認モデル (EW 方向) を、図 2-7 に壁とフレームのモデル化範囲を、図 2-8 に屋根スラ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

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

表 2-1 フレームの層間変形角の一覧

要素 番号	フレームの層間変形角							
	S _s -D 1	S _s -1 1	S _s -1 2	S _s -1 3	S _s -1 4	S _s -2 1	S _s -2 2	S _s -3 1
BM13	1/1690	1/4380	1/3810	1/3420	1/3440	1/2290	1/2200	1/1270
BM12	1/1380	1/2430	1/3060	1/2810	1/2460	1/1910	1/1370	1/1070





*1 : 等価せん断断面積 Ae の算定方法

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

ここに, P : 水平荷重

H : 層高さ

G : コンクリートのせん断断面係数

δ_s : せん断変形

*2 : 等価曲げ剛性 Ie の算定方法

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

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

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



中間床伏図 (1)
(EL. 10. 8M~EL. 17. 75M)

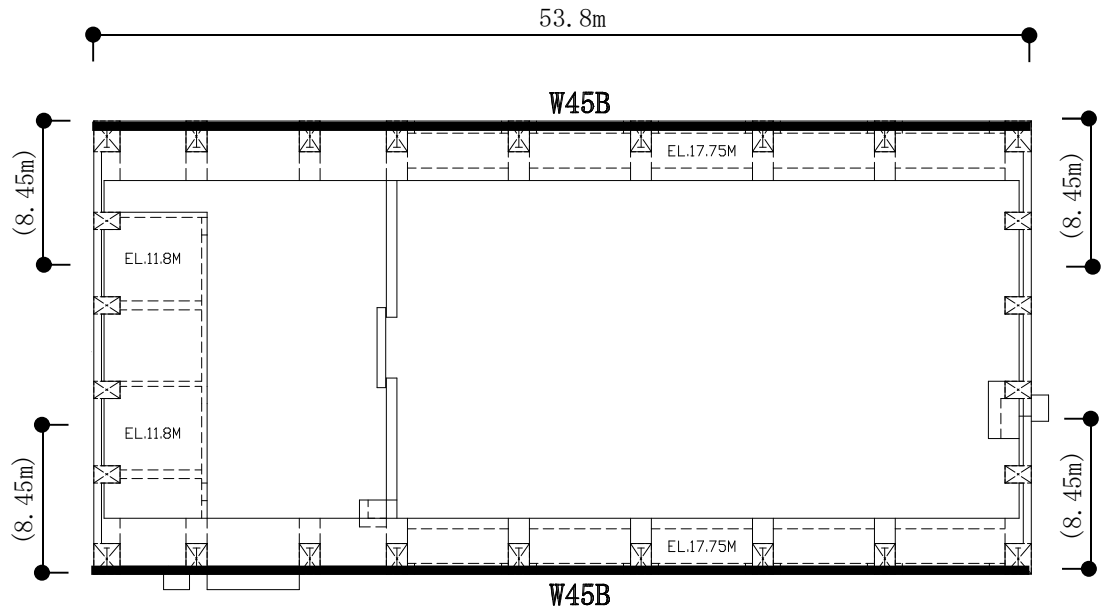


1 階 伏 図
(EL. 8. 3M)

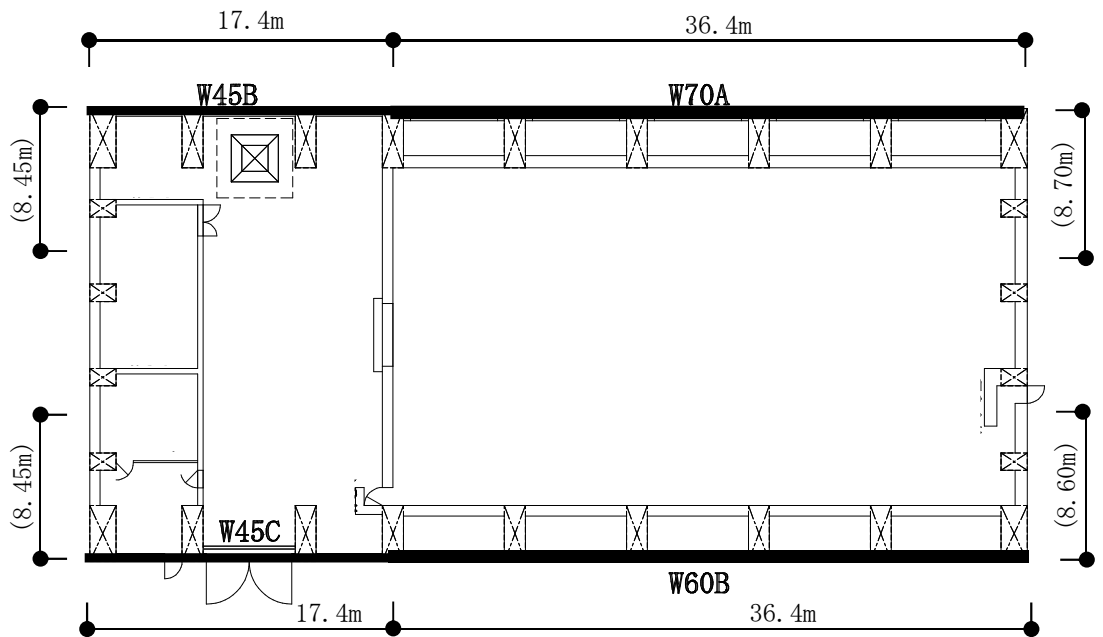
記号	縦筋	横筋
W45A	内：D22@250 外：D22@250	内：D22@250 外：D22@250
W45B	内：D25@250 外：D25@250	内：D25@250 外：D25@250
W45C	内：D25@250 外：D25@250	内：D29@250 外：D29@250
W60B	内：D29@250 外：D29@250	内：D29@250 外：D29@250
W70A	内：D29@250 外：D29@250	内：D29@250 外：D29@250

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

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



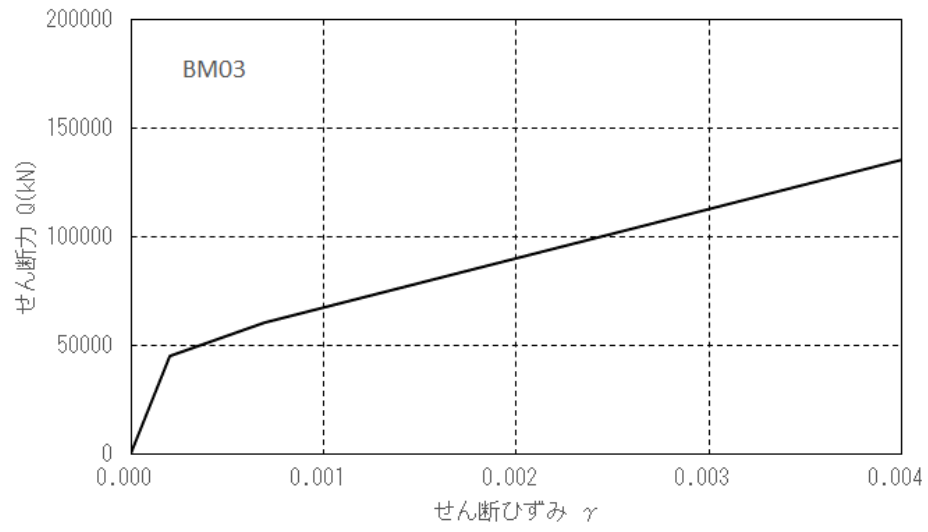
(a) BM03



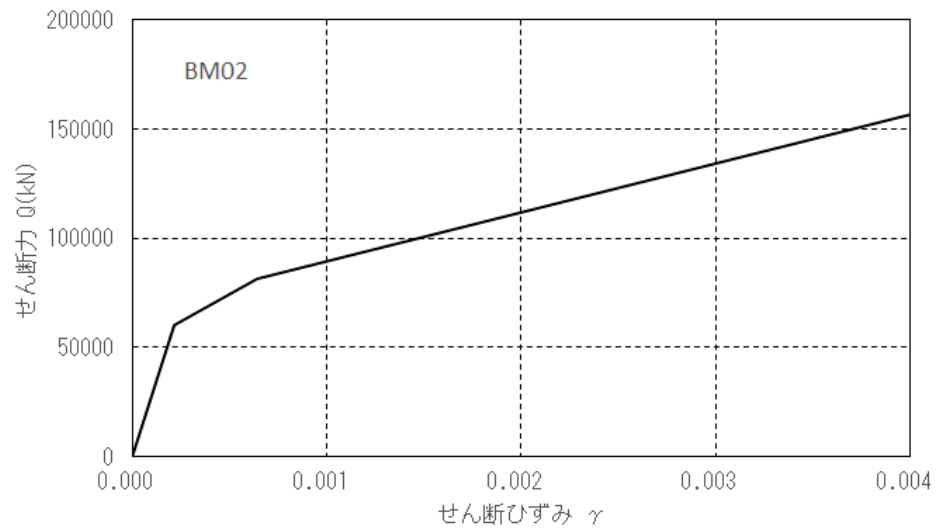
(b) BM02

注記：カッコつき数字は耐震壁の協力幅を示す。

図 2-3 セン断スケルトンカーブ算定で考慮した耐震壁（NS方向）

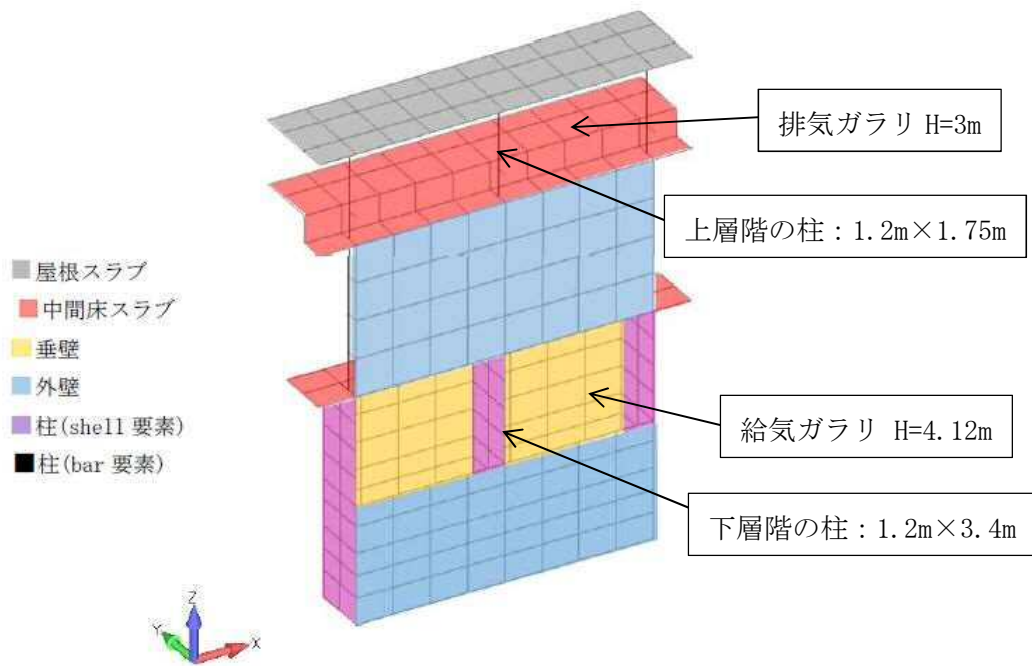


(a) BM03

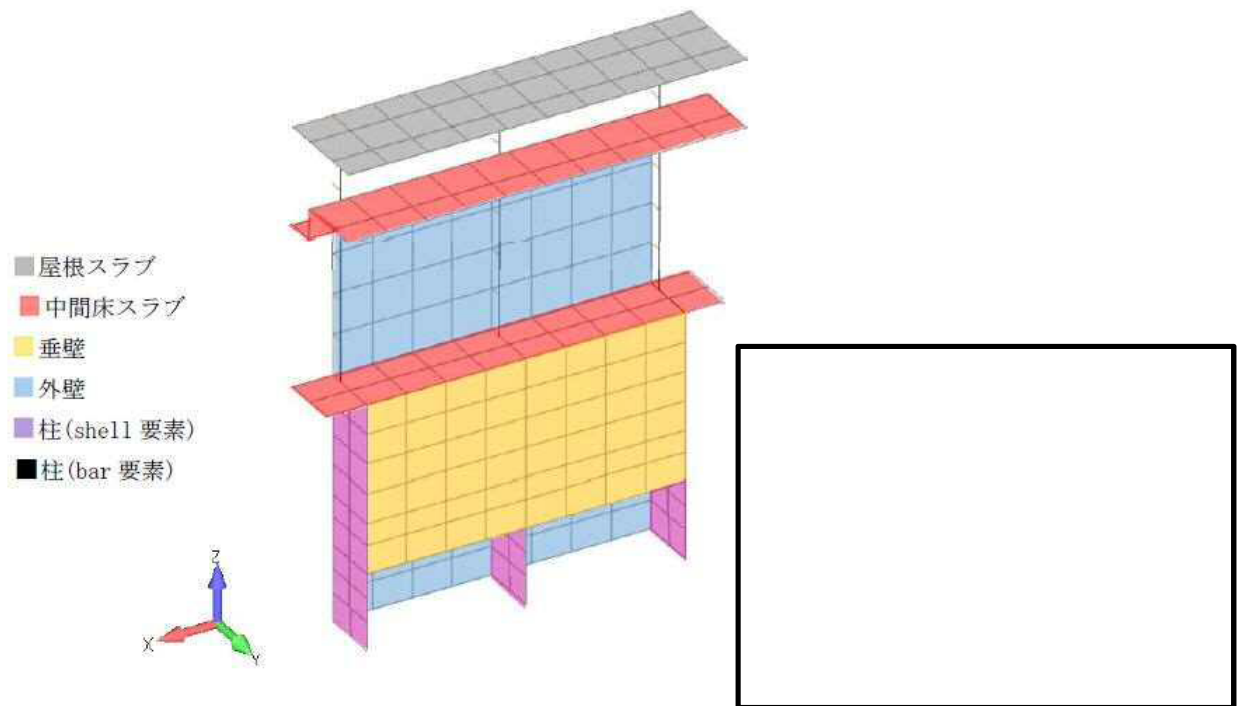


(b) BM02

図 2-4 せん断スケルトンカーブ (NS 方向)



(a) 建屋外側



(b) 建屋内側

図 2-5 FEMモデルの拡大図 (NS方向)

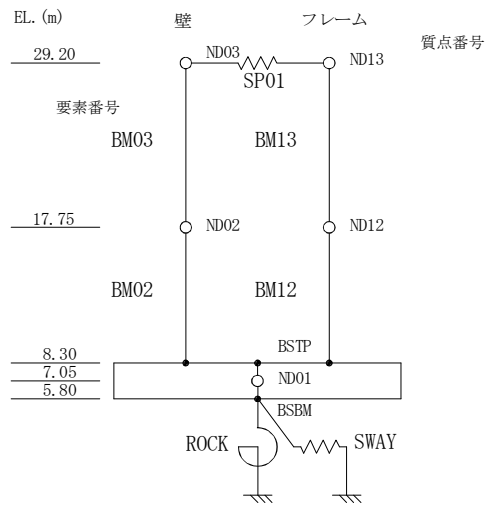


図 2-6 DC 今回工認モデル (EW 方向)

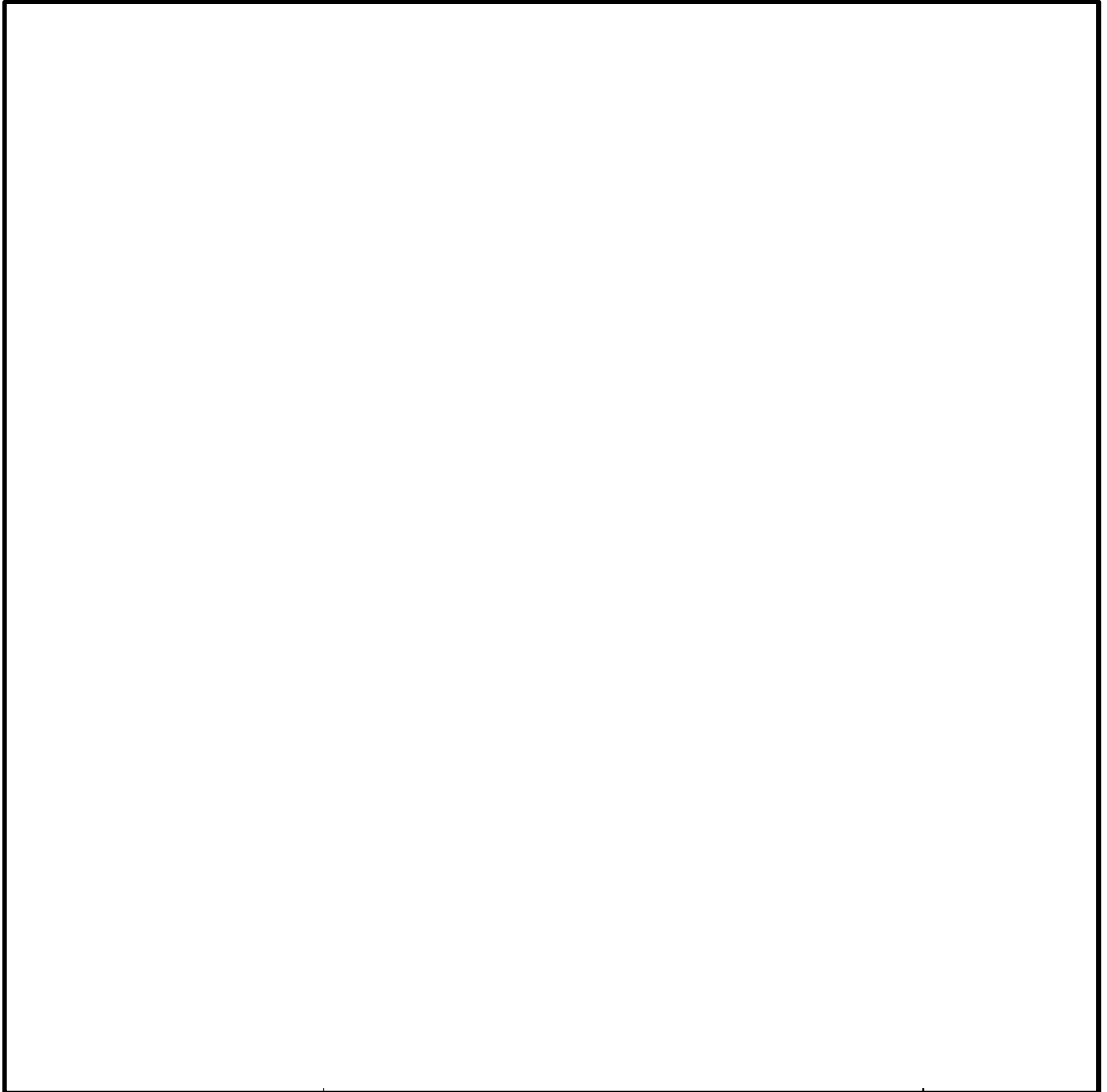
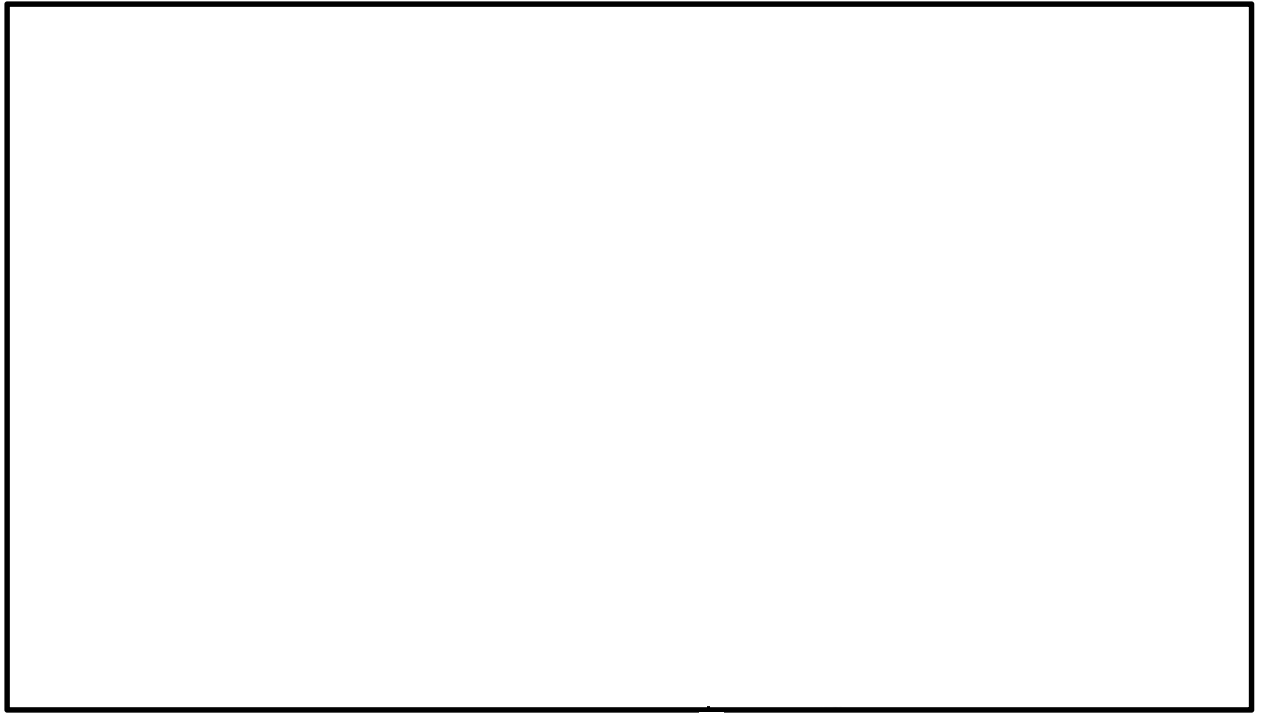


図 2-7 壁とフレームのモデル化範囲 (EW 方向)

柱断面寸法が $B \times D$ の場合のフレームの弾性剛性

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

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



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

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

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

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

図 2-8 屋根スラブのせん断ばね置換の概要

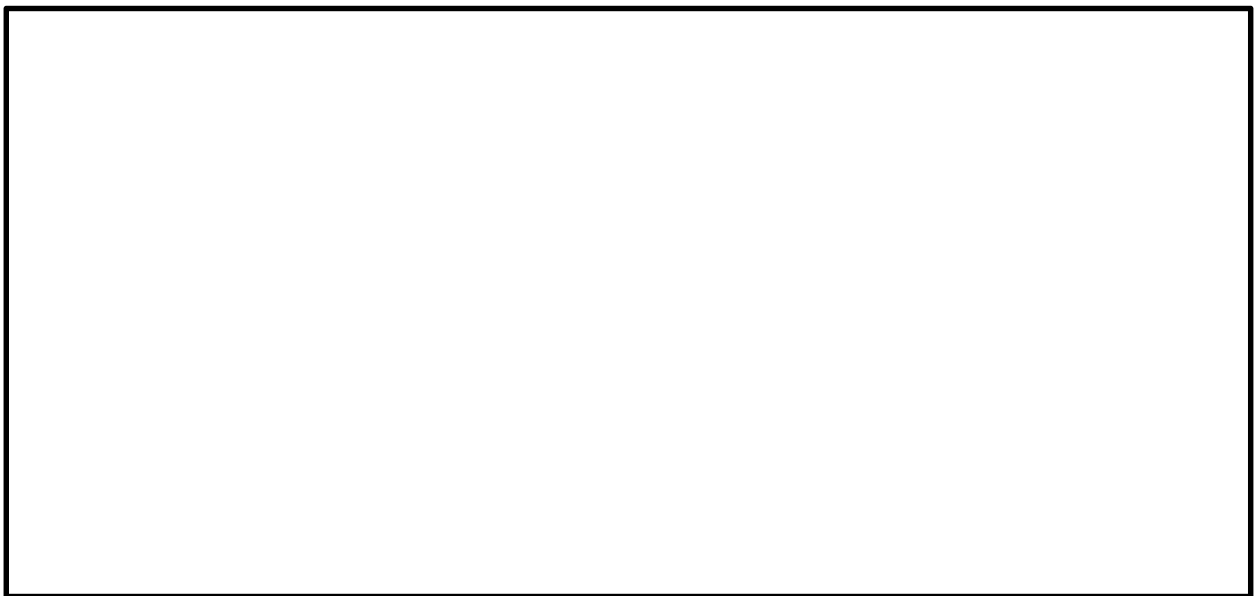
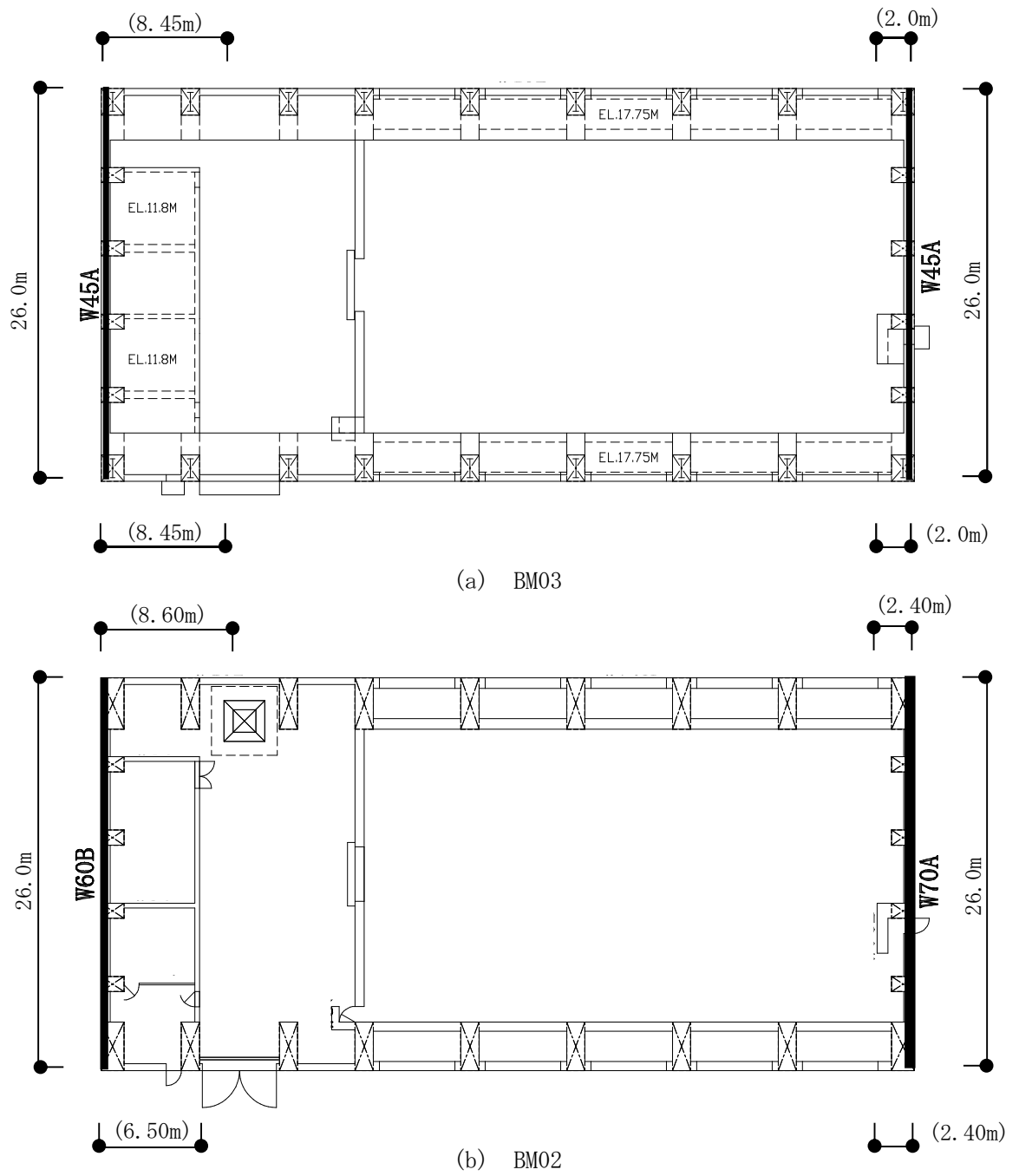
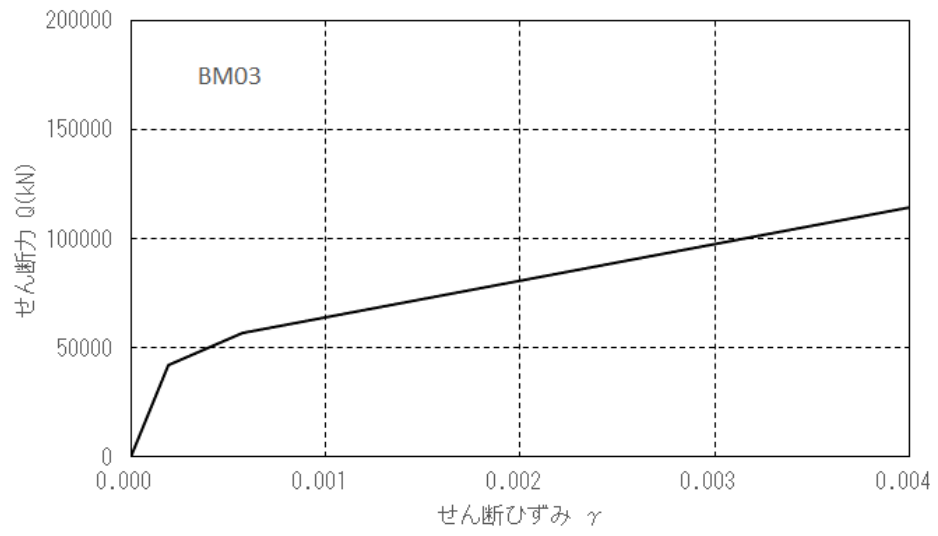


図 2-9 解析モデルの概念図 (EW 方向)

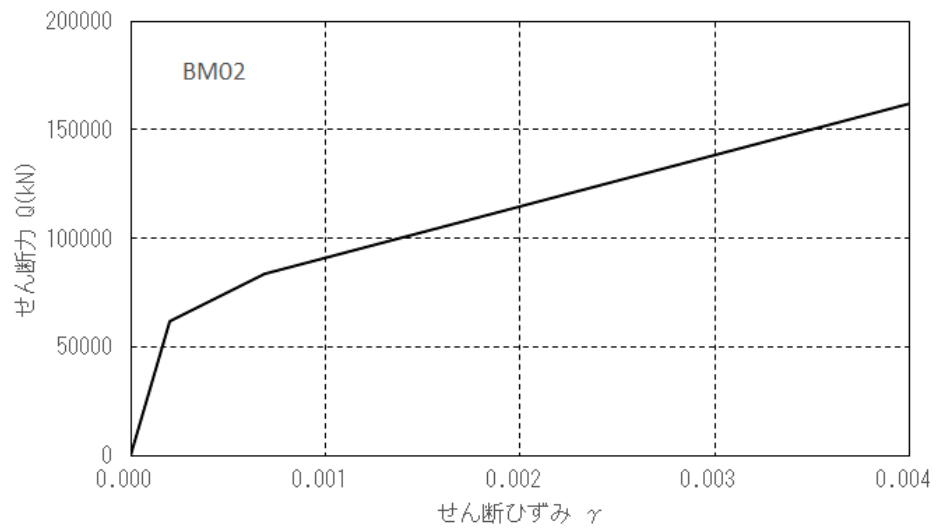


注記：カッコつき数字は耐震壁の協力幅を示す。

図 2-10 せん断スケルトンカーブ算定で考慮した耐震壁（EW方向）



(a) BM03



(b) BM02

図 2-11 せん断スケルトンカーブ (EW 方向, 壁部)

3. 既工認モデルとの比較

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

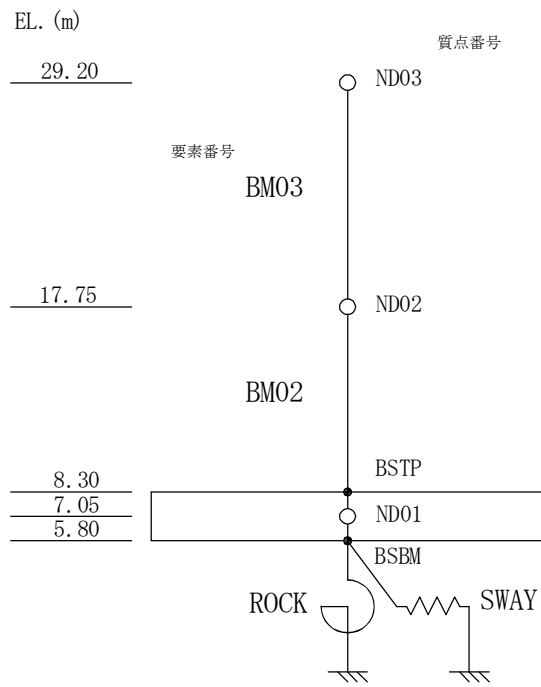


図 3-1 DC 既工認モデル (NS 方向)

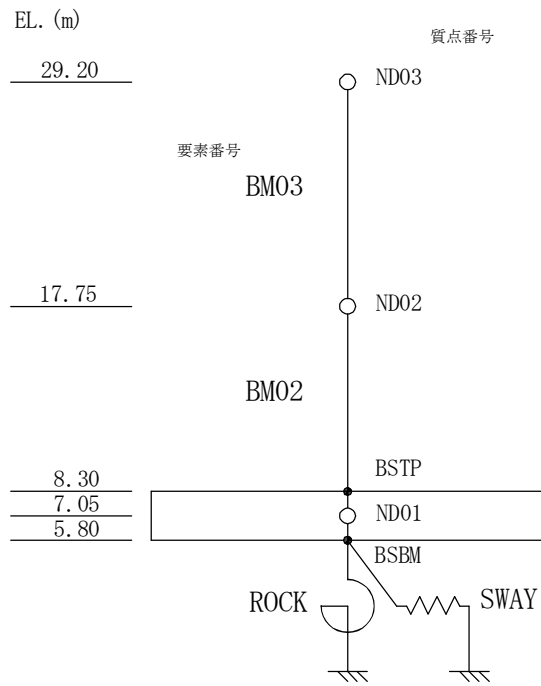


図 3-2 DC 今回工認モデル (NS 方向)

表 3-1 DC 既工認モデルの諸元 (NS 方向)

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

表 3-2 DC 今回工認モデルの諸元 (NS 方向)

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

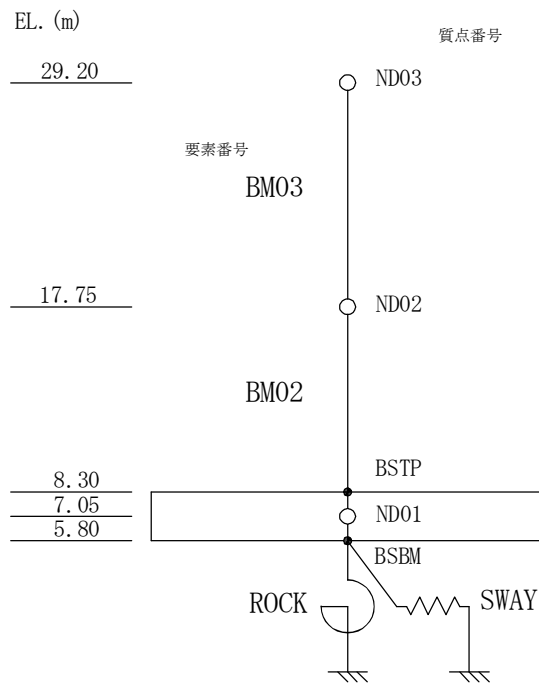


図 3-3 DC 既工認モデル (EW 方向)

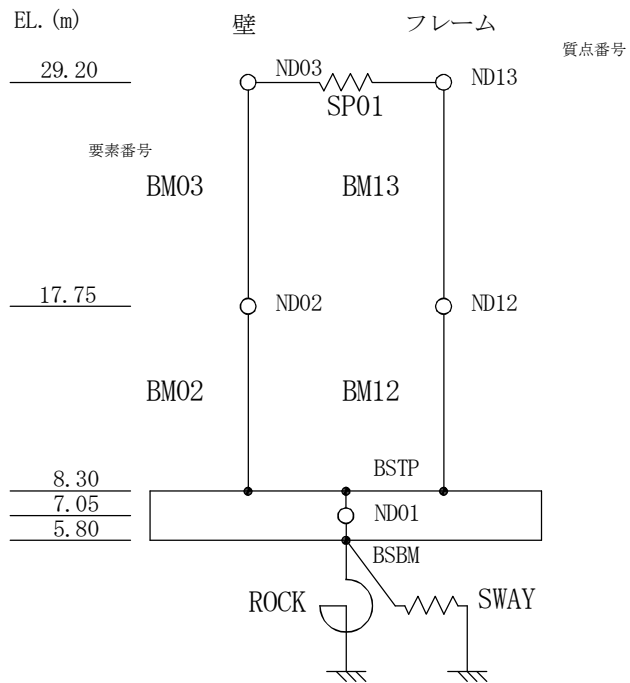


図 3-4 DC 今回工認モデル (EW 方向)

表 3-3 DC 既工認モデルの諸元 (EW 方向)

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

表 3-4 DC 今回工認モデルの諸元 (EW 方向)

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

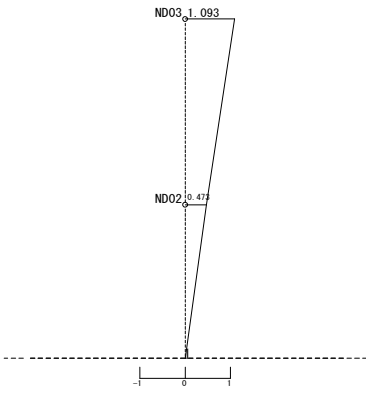
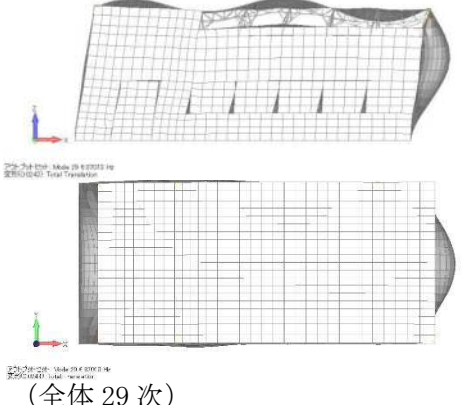
注 : 屋根スラブせん断ばね : SP01=8.38 $\times 10^6$ kN/m

4. FEMモデルの固有値解析結果との比較

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

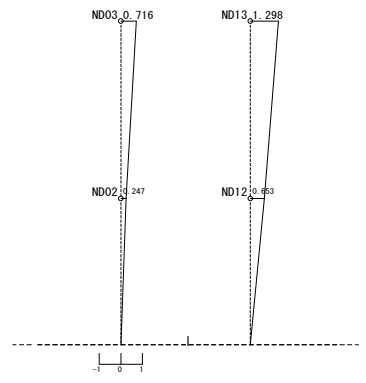
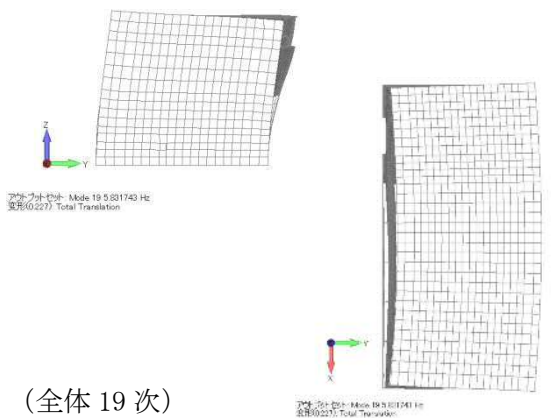
NS方向の固有値の比較を表4-1に、EW方向の比較を表4-2に示す。NS方向、EW方向ともに質点系モデルの固有値がFEMモデルの固有値と概ね一致していることから、DC今回工認モデルの妥当性を確認した。

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

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

注：FEMモデルは基準床レベルの水平変位を一定に拘束（MPC）している。

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

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

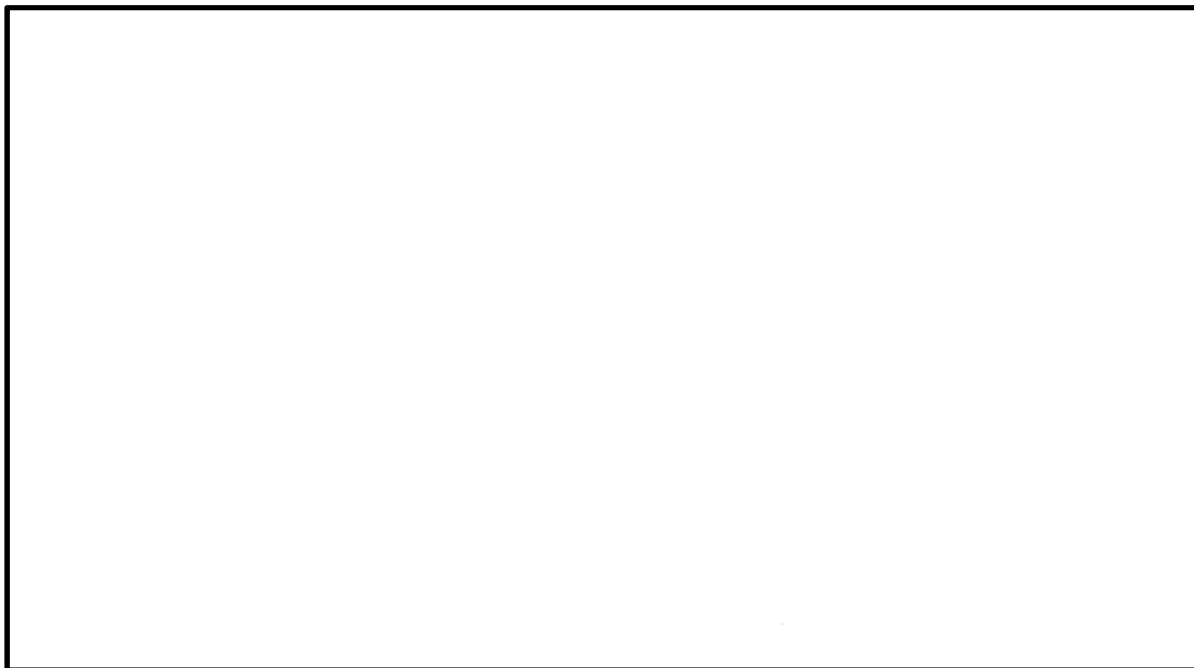


図 4-1 既工認FEMモデル



図 4-2 今回工認FEMモデル

5. 質点系モデルと FEM モデルによるスペクトル比較

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

(1) 観測記録のシミュレーション

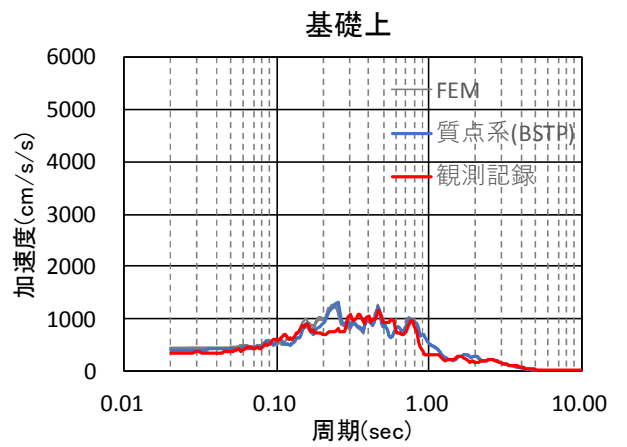
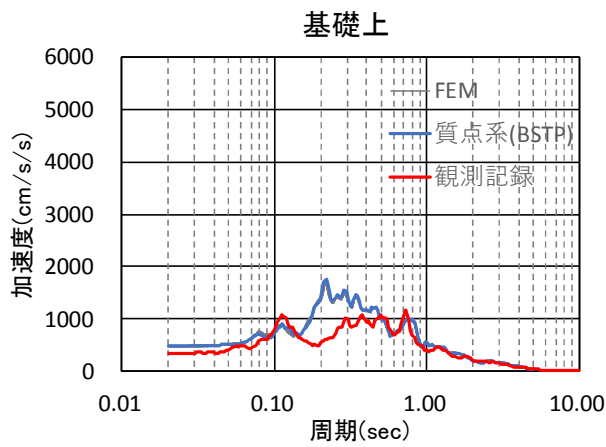
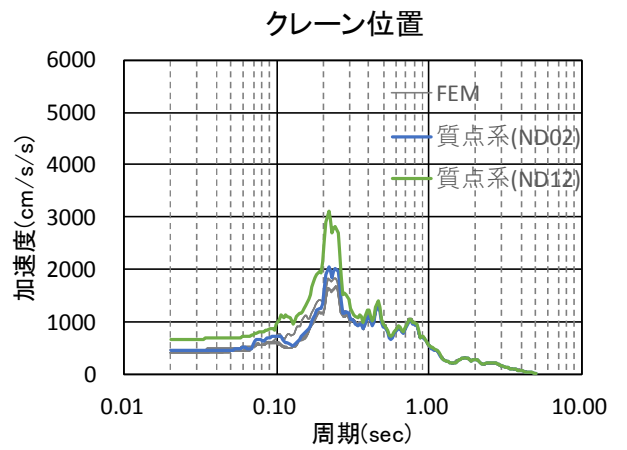
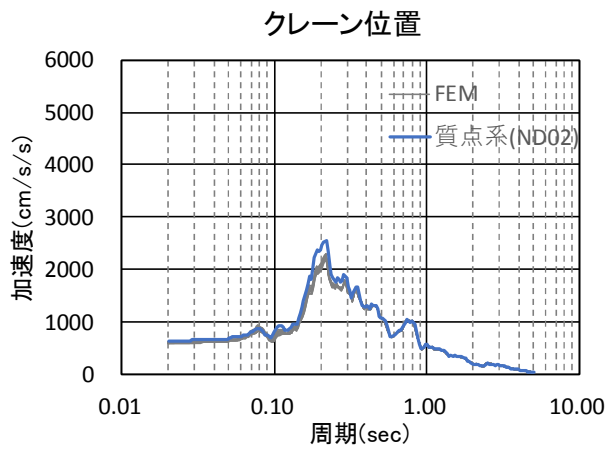
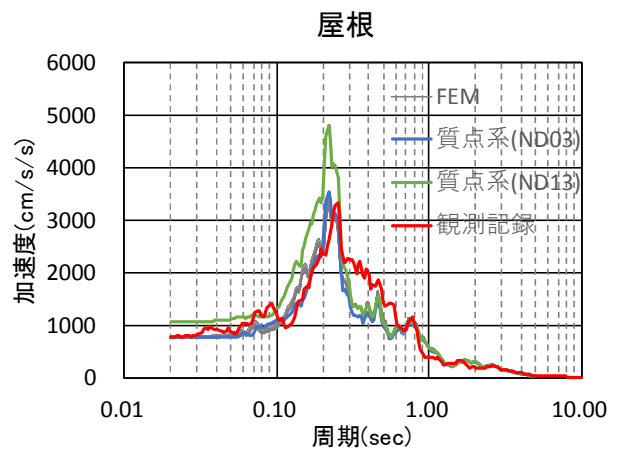
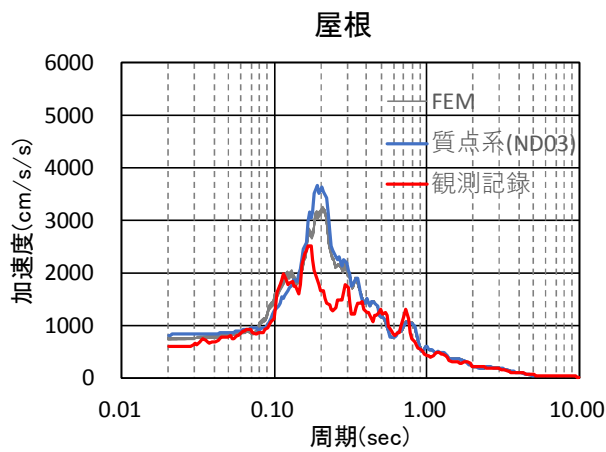
図 5-1 に床応答スペクトルの比較を示す。水平方向については、DC 今回工認モデルが FEM モデルとほぼ同等か安全側の応答となっている。上下方向については、屋根レベルの屋根トラスの応答は 2 方向の影響のため FEM の応答が DC 今回工認モデルを上回っているが、クレーンレベルや基礎上端では良く整合している。

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

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

(3) まとめ

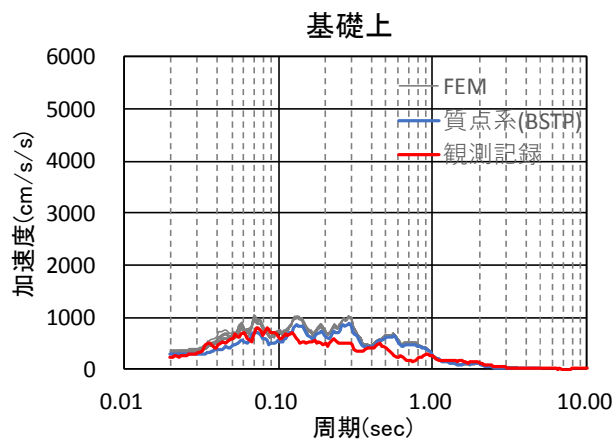
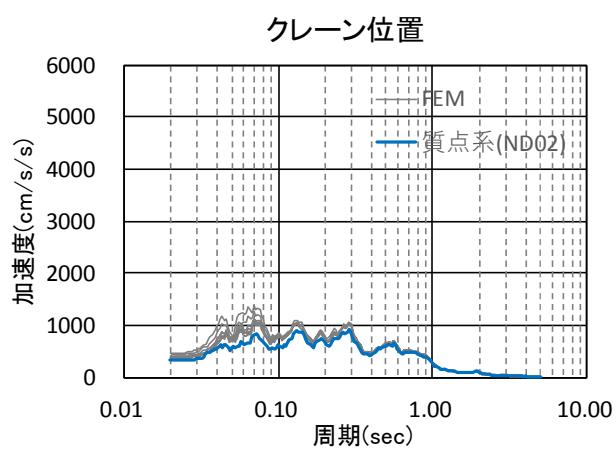
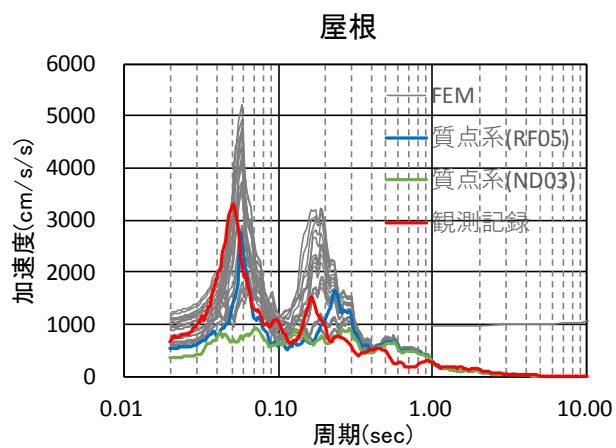
水平方向については、質点系モデル（今回工認モデル）と FEM モデルとほぼ同等の応答となっている。上下方向については、FEM モデルの屋根トラス中央の以外の応答はよく整合している。以上より質点系モデルの妥当性が確認できた。なお、屋根トラスの検討には FEM モデルを用いており問題はない。



(a) NS 方向

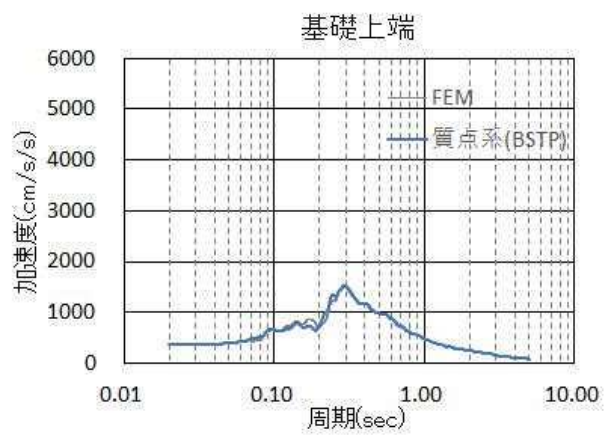
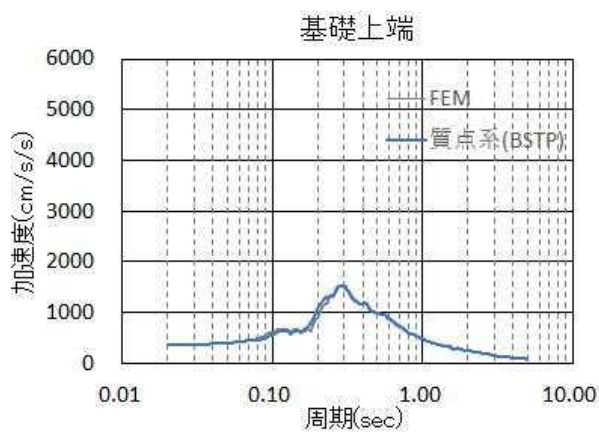
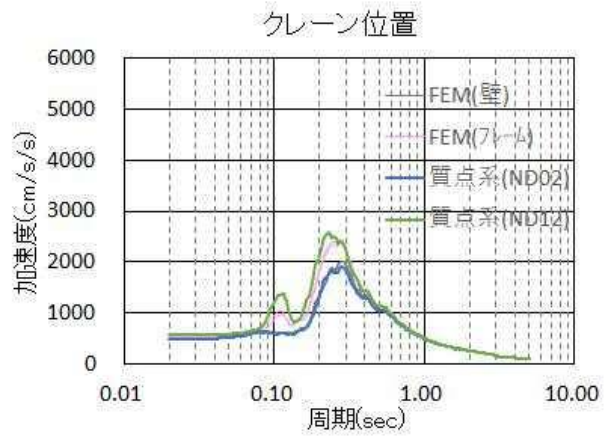
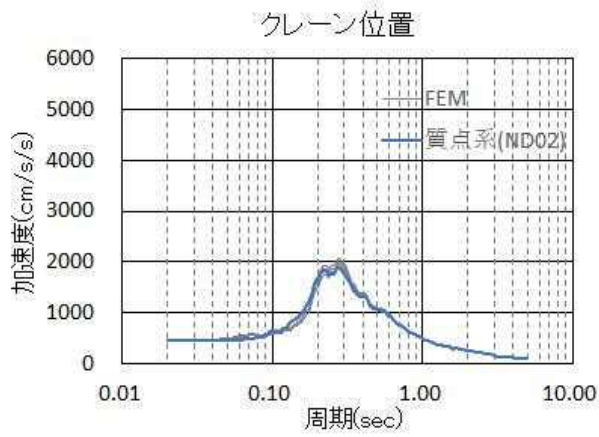
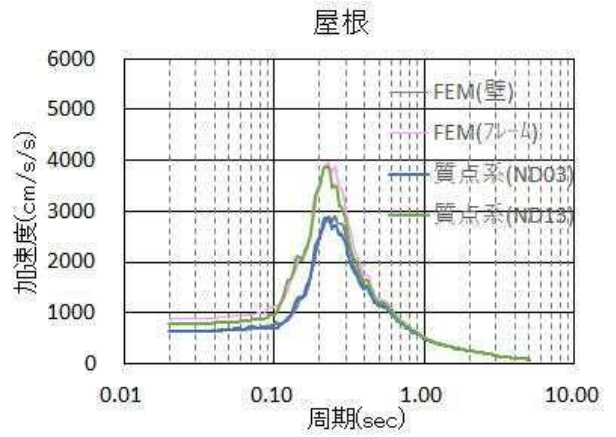
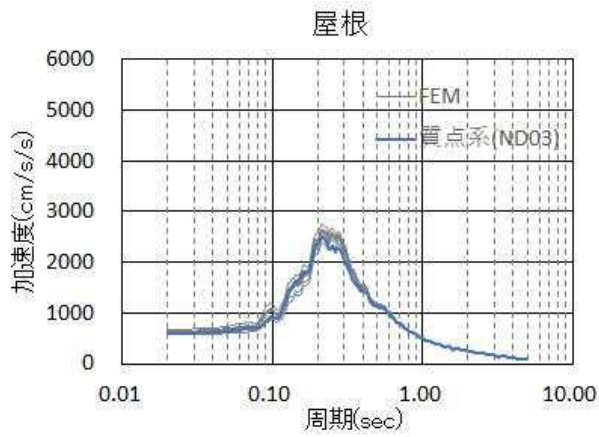
(b) EW 方向

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



(c) 上下方向

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

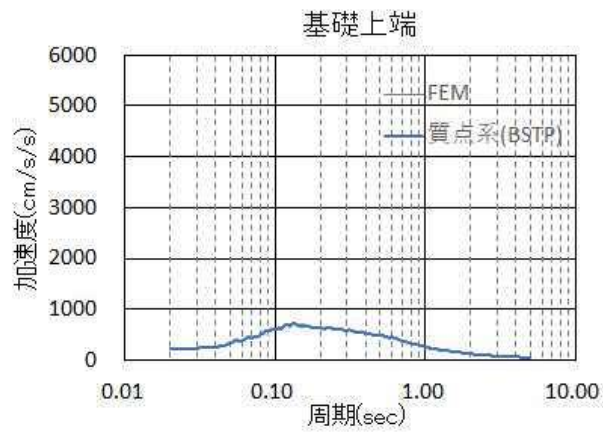
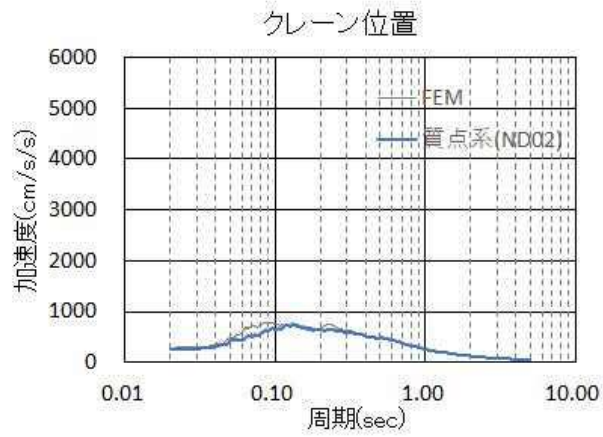
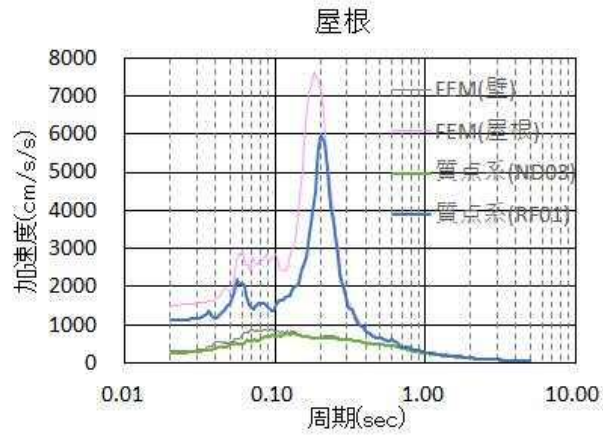


(a) NS 方向

(b) EW 方向

図 5-2 (1/2) 床応答スペクトルの比較 (h=5%)

$S_a - D1$ 応答



(c) 上下方向

図 5-2 (2/2) 床応答スペクトルの比較 (h=5%)

$S_a - D1$ 応答