

福島第一原子力発電所 3号機

安全上重要な建物・構築物及び
機器・配管系の耐震安全性評価

平成22年 7月16日

東京電力株式会社



東京電力

目次

■基本方針

I. 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

- 1 建物概要
- 2 基準地震動 S_s の概要
- 3 入力地震動の算定
- 4 地震応答解析モデルの設定
- 5 地震応答解析結果
- 6 耐震安全性評価結果
- 7 補足説明

II. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

- 1 評価概要
- 2 減衰定数
- 3 応答倍率法の考え方
- 4 各設備の評価プロセス
- 5 福島第一5号機と3号機における評価結果の比較

III. 参考資料

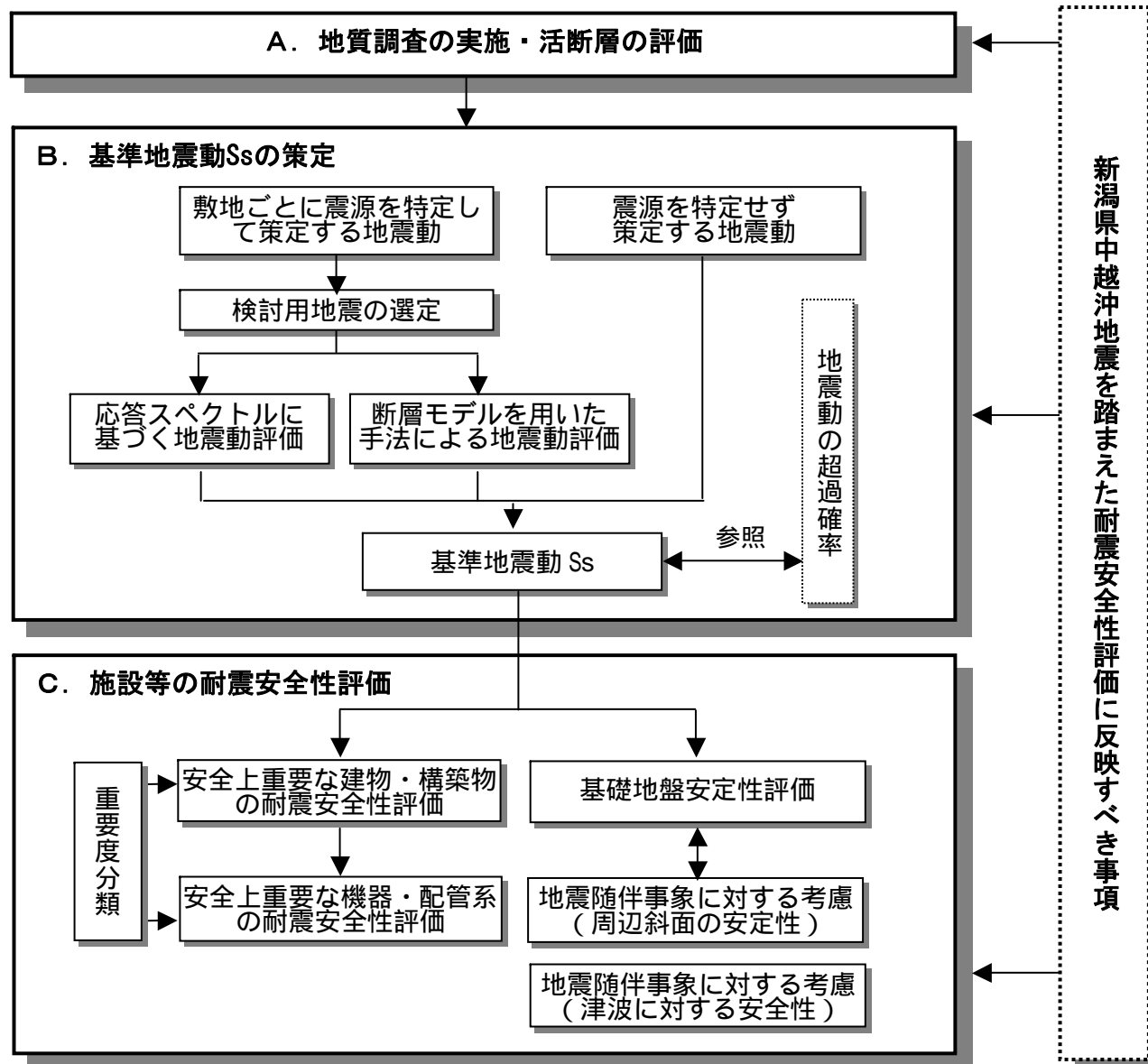
■基本方針

- 基準地震動Ssに対し、耐震安全上重要な施設の安全機能保持の観点から耐震安全性評価を行う
- 中間報告における評価対象施設は、新耐震指針によるSクラスの施設のうち、原子炉を「止める」、「冷やす」、放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する主要な施設

評価対象

施設等の内訳	評価対象
建物・構築物	原子炉建屋
機器・配管系	炉心支持構造物，制御棒（挿入性），残留熱除去系ポンプ，残留熱除去系配管，原子炉圧力容器，主蒸気系配管，原子炉格納容器

新耐震指針に照らした耐震安全性評価の流れ



I . 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

1 建物概要

評価対象建屋

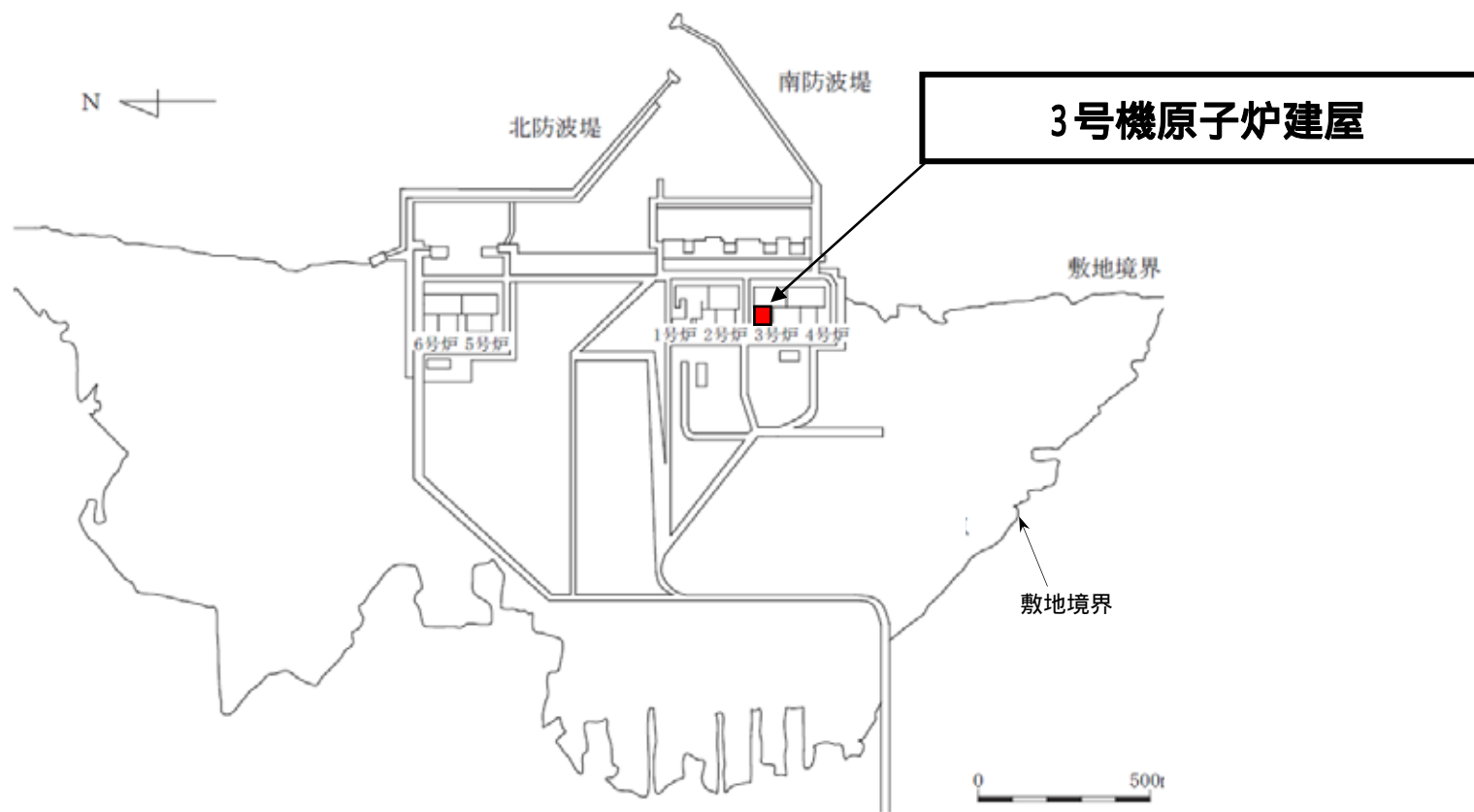


図1-1 福島第一原子力発電所 配置図

3号機原子炉建屋の概要

- 構造：鉄筋コンクリート造
 (一部鉄骨造 (トラス構造))
- 階数：地上5階，地下1階
- 基礎：厚さ4.0mのべた基礎で，新第三紀層の泥岩盤上に設置
- 平面形状：47.0m (NS方向) × 47.0m (EW方向) (1, 2階)
 47.0m (NS方向) × 35.2m (EW方向) (3, 4, 5階)
 47.0m (NS方向) × 57.4m (EW方向) (地下階)
- 高さ：基礎版底面から61.78m (地上高さ45.72m)

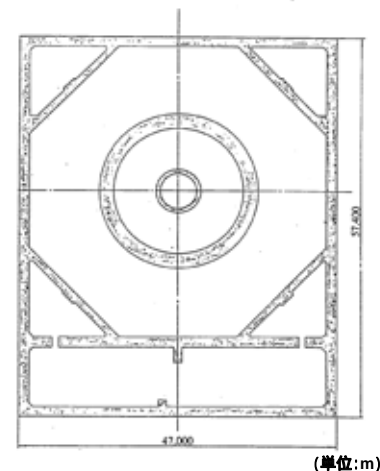


図1-2 平面図

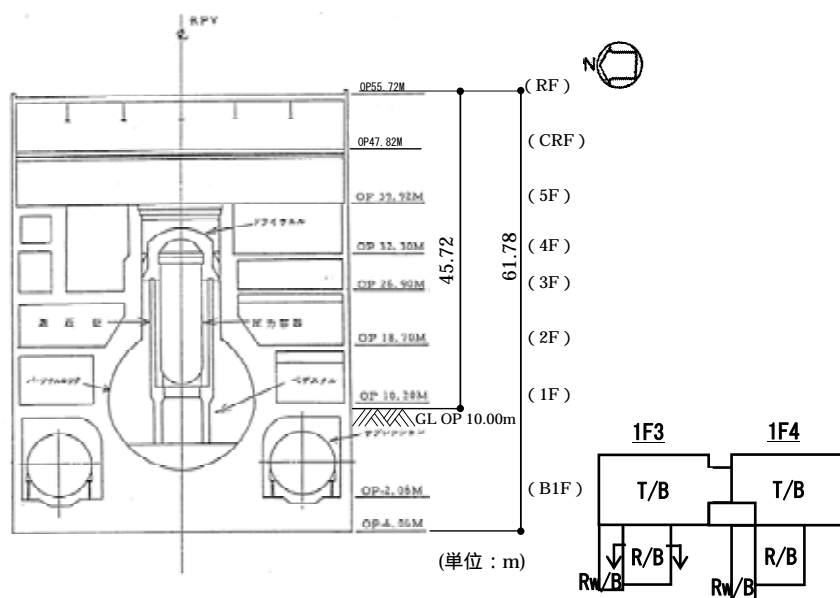


図1-3 断面図 (NS方向)

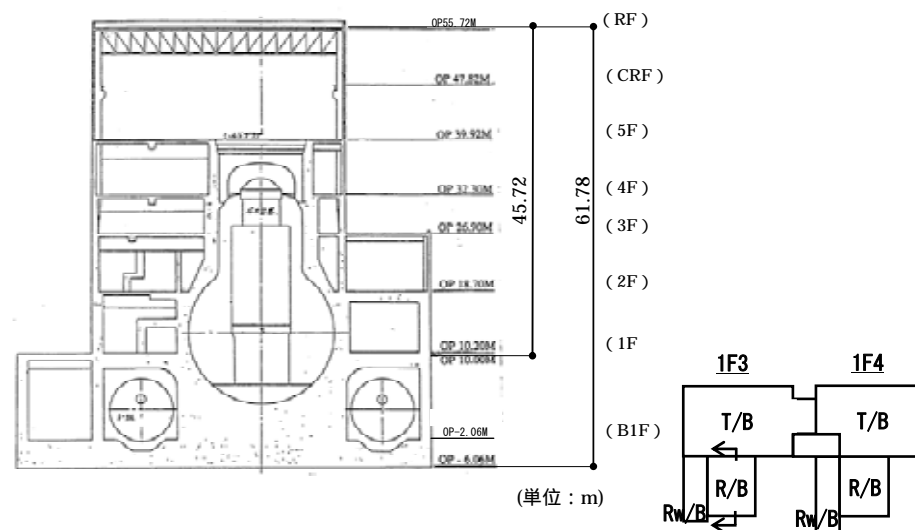


図1-4 断面図 (EW方向)

I . 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

2 基準地震動 S_s の概要

新指針に基づく基準地震動 S s

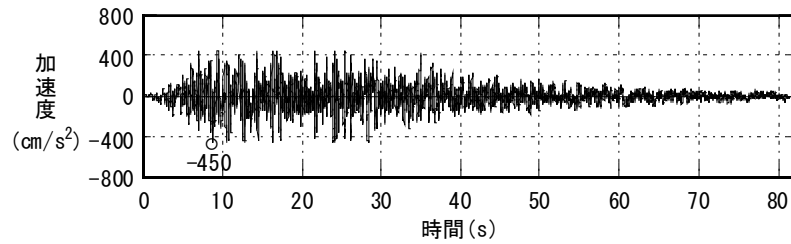


図2-1 加速度時刻歴波形
(Ss-1H)

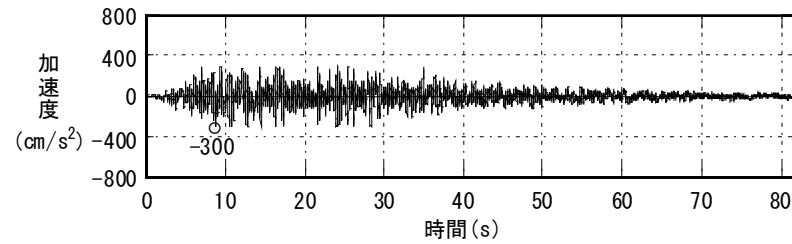


図2-4 加速度時刻歴波形
(Ss-1V)

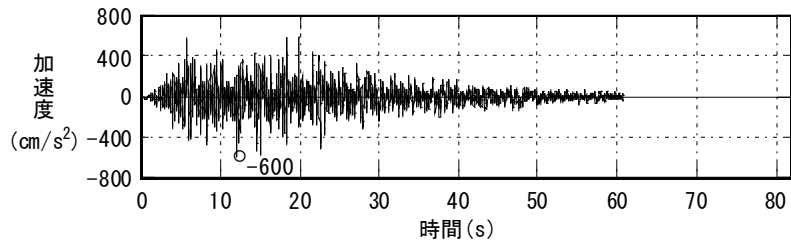


図2-2 加速度時刻歴波形
(Ss-2H)

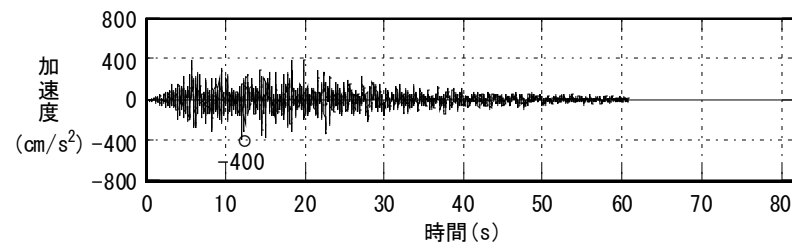


図2-5 加速度時刻歴波形
(Ss-2V)

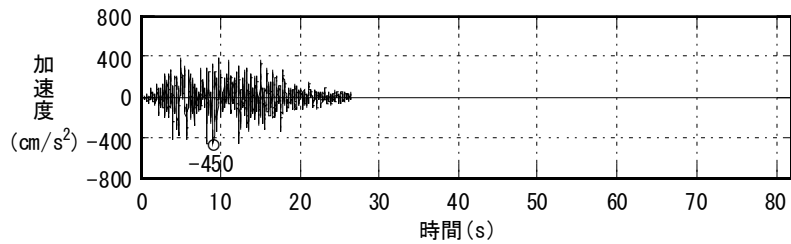


図2-3 加速度時刻歴波形
(Ss-3H)

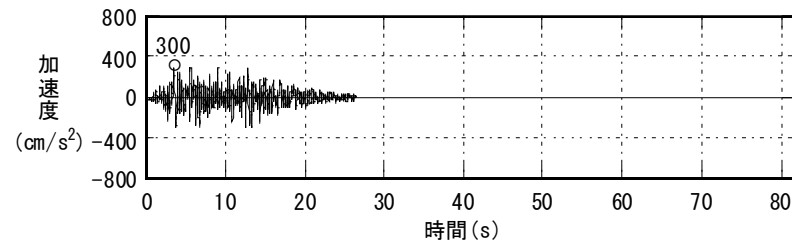


図2-6 加速度時刻歴波形
(Ss-3V)

新指針に基づく基準地震動 S s

新・旧指針による基準地震動の加速度応答スペクトルを示す。

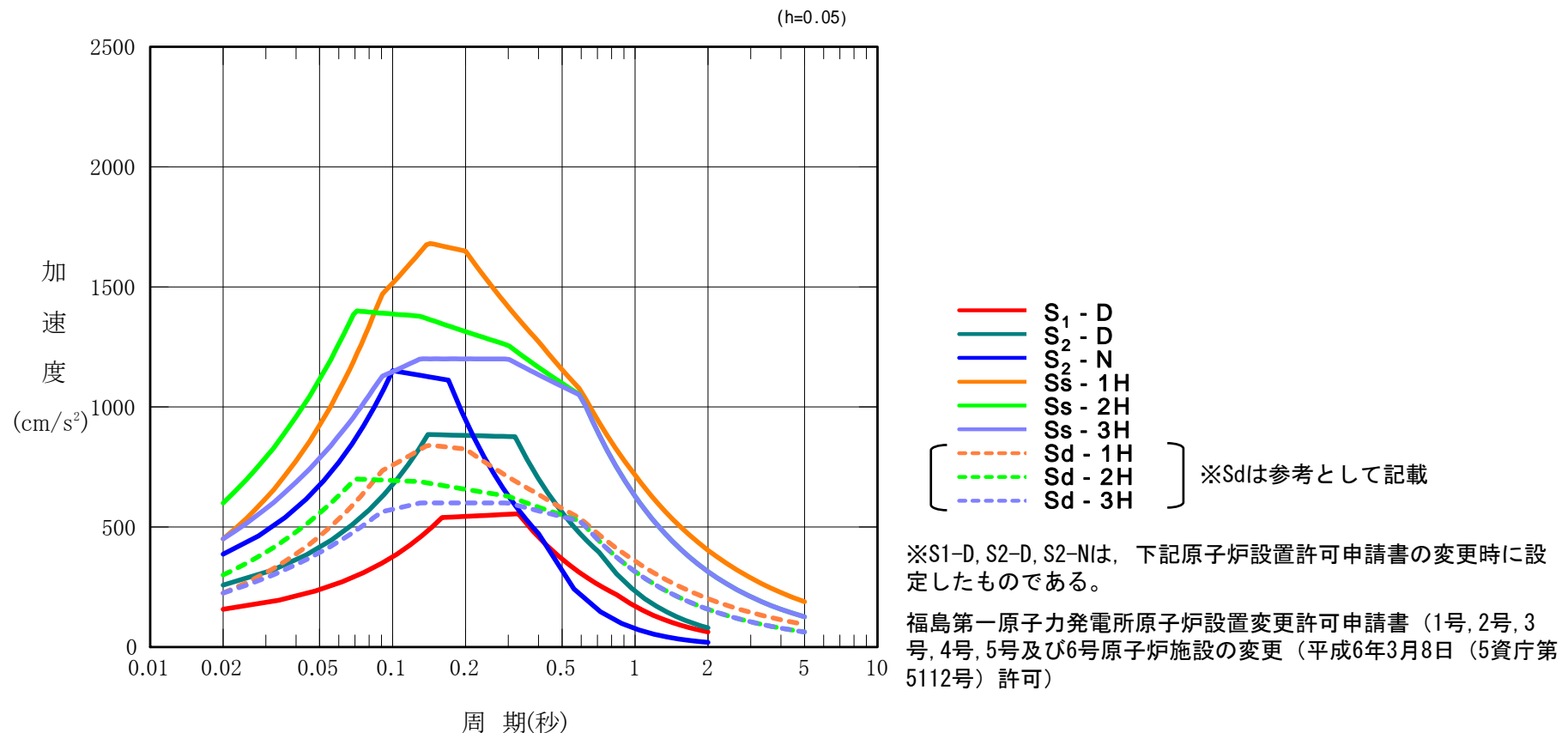
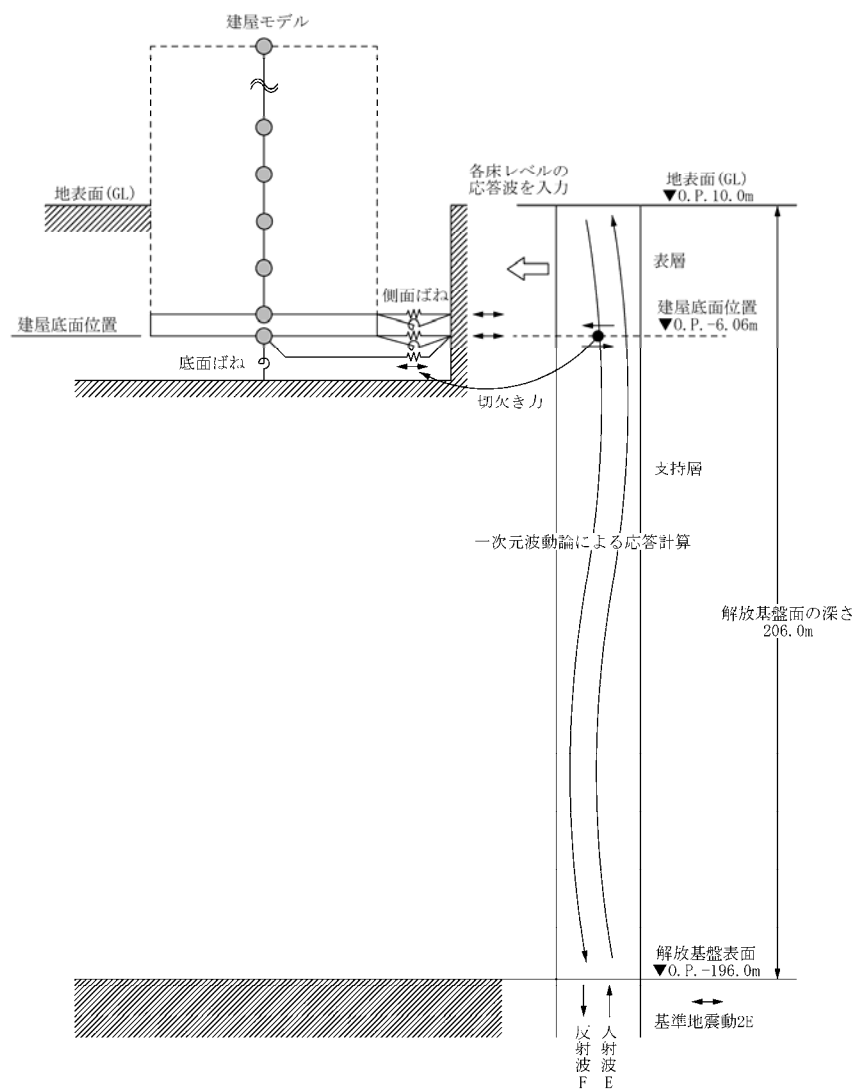


図2-7 新・旧指針による基準地震動の比較

I . 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

3 入力地震動の算定

入力地震動の算定（水平方向）



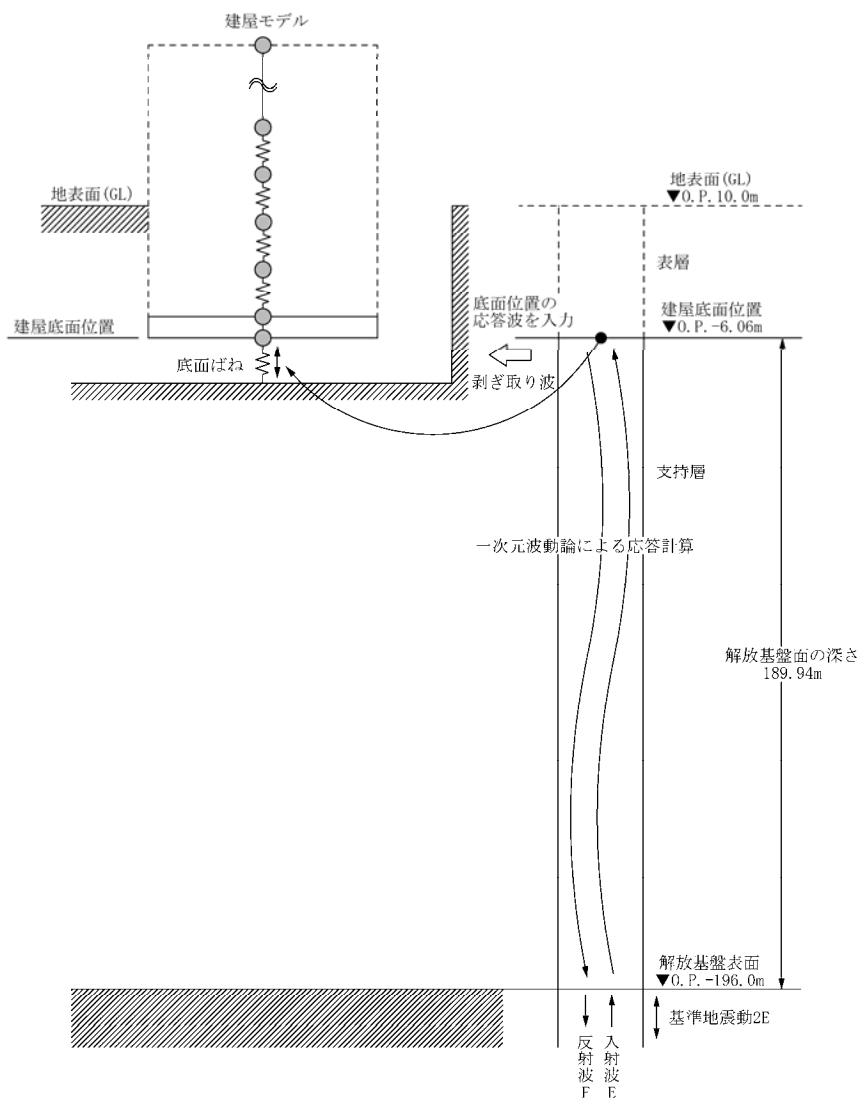
解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基盤表面から地表面までの速度構造を成層と仮定した地盤モデルを用いた一次元波動論による地震応答解析を行った。

一次元波動論による地震応答解析により算出した基礎底面位置及び側面ばね位置での地震動を原子炉建屋への入力地震動とした。

なお、建屋基礎底面位置におけるせん断力（切欠き力）を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮した。

図3-1 入力地震動の概念図（水平方向）

入力地震動の算定（鉛直方向）



解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基盤表面から基礎底面位置までの速度構造を成層と仮定した地盤モデルを用いた一次元波動論による地震応答解析を行った。

一次元波動論による地震応答解析により算出した基礎底面位置での地震動を原子炉建屋への入力地震動とした。

図3-2 入力地震動の概念図（鉛直方向）

地盤定数

地盤定数については、原子炉建屋付近の地盤の調査結果に基づき、せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性を考慮した等価線形解析により、基準地震動Ss-1、Ss-2及びSs-3のそれぞれについて個別に設定した。疎密波速度は、水平方向の入力地震動算定に用いた地盤モデルの等価せん断波速度とポアソン比から求めた。

表3-1 地盤定数

標高 O.P. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体 積重量 (kN/m ³)	ポア ソン 比	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁵ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀			せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)			ヤング 係数 E (×10 ⁵ kN/m ²)			剛性低下後 S波速度 Vs (m/s)			剛性低下後 P波速度 Vp (m/s)			減衰 定数 h (%)			層厚 H (m)
						Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	
10.0	砂岩	380	17.8	0.473	2.62	0.85	0.85	0.86	2.23	2.23	2.25	6.57	6.57	6.63	351	351	352	-	-	-	3	3	3	8.1
1.9																								
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	3.41	0.78	0.81	0.78	2.66	2.76	2.66	7.79	8.08	7.79	398	405	398	1530	1560	1530	3	3	3	11.9
-80.0		500	17.1	0.455	4.36				3.40	3.53	3.40	9.89	10.27	9.89	442	450	442	1540	1570	1540				70.0
-108.0		560	17.6	0.446	5.63				4.39	4.56	4.39	12.70	13.19	12.70	495	504	495	1580	1610	1580				28.0
-196.0		600	17.8	0.442	6.53				5.09	5.29	5.09	14.68	15.26	14.68	530	540	530	1640	1670	1640				88.0
-196.0	[解放基盤]	700	18.5	0.421	9.24	1.00	1.00	1.00	9.24	9.24	9.24	26.26	26.26	26.26	700	700	700	1890	1890	1890	-	-	-	-

入力地震動評価法の妥当性確認

入力地震動評価法の妥当性を確認するために、敷地内で比較的大きな加速度を観測した2003年宮城県沖の地震による観測記録（3号機原子炉建屋の炉心位置から約530m離れた地点の地中観測記録）を用いた一次元波動論によるシミュレーション解析を実施した。

○入力地震動 2003年5月26日宮城県沖の地震（北緯38度49.2分 東経141度39.0分 深さ72km M7.1）
O. P. -200mでの観測波

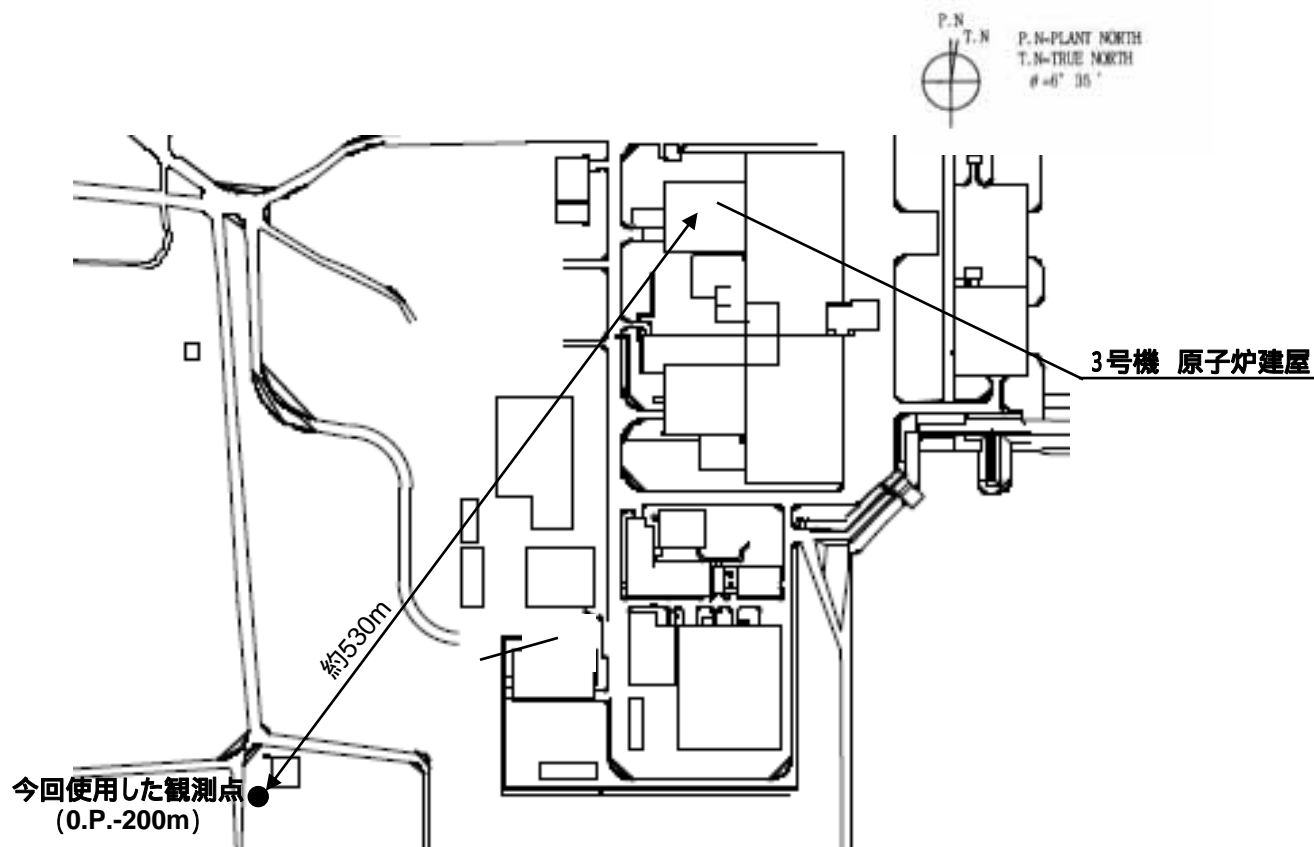


図3-3 福島第一原子力発電所 地震観測点配置図

入力地震動評価法の妥当性確認

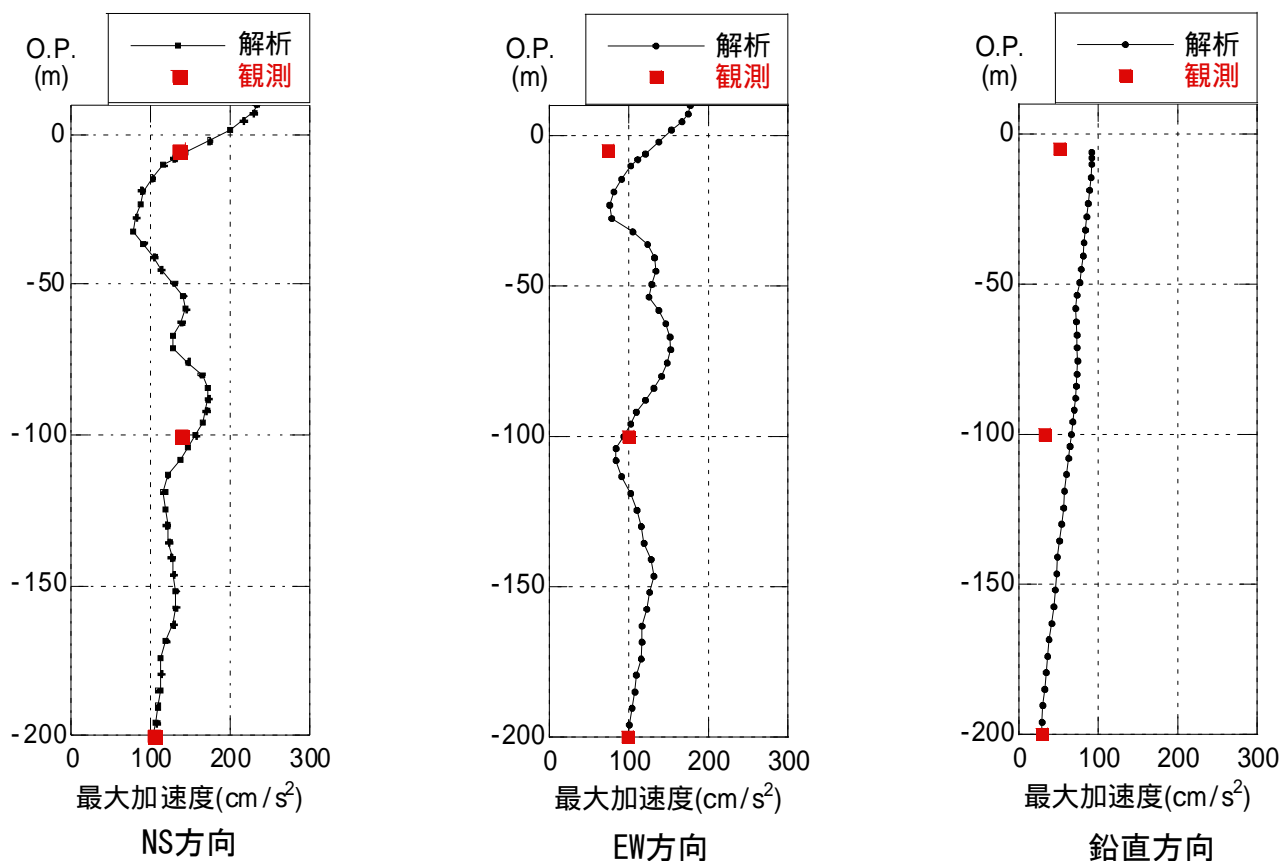


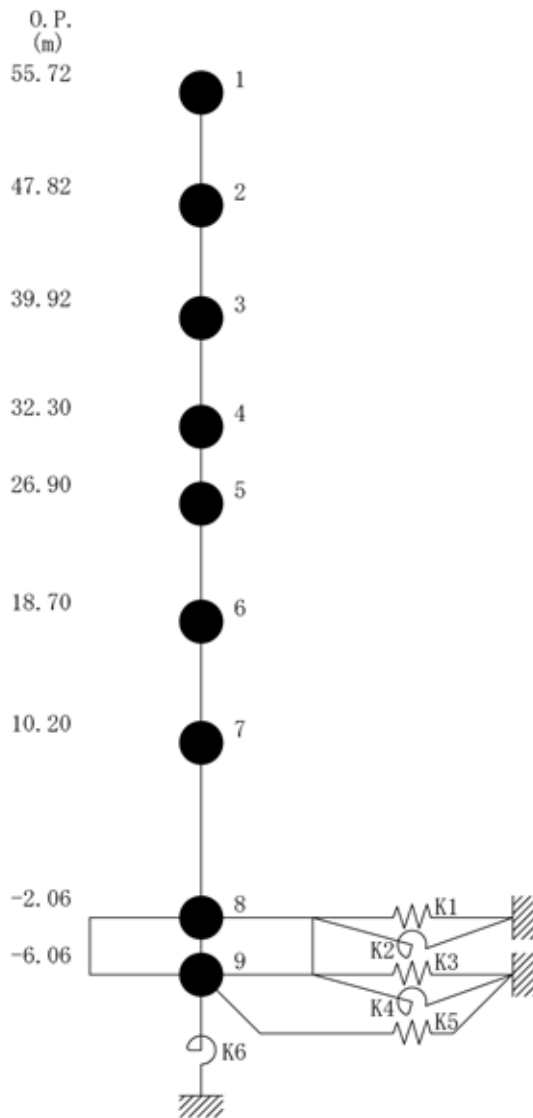
図3-4 地盤の最大応答加速度分布

入力地震動評価法の検証を行った結果、NS方向、EW方向とも最大加速度値は、観測記録にほぼ対応している。また、鉛直方向の最大加速度値は、観測記録に比べやや大きめの値を示している。

I . 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

4 地震応答解析モデルの設定

地震応答解析モデル（水平方向）



- 一軸多質点系モデル
 - ・ 建屋を等価な多質点系モデルに置き換え、質量は各階床に集中しているものとする
 - ・ 建屋と地盤との相互作用を考慮
 - ・ 耐震壁のせん断剛性と曲げ剛性を考慮
- 地盤ばね
 - ・ 建屋底面地盤ばね（水平・回転）は、JEAG4601-1991による振動アダムिटタンス理論に基づく近似ばね
 - ・ 建屋側面地盤ばね（水平・回転）は、JEAG4601-1991によるNOVAKの手法に基づく近似ばね
- 建屋の減衰
 - ・ モード減衰（ひずみエネルギー比例型）
- 建屋の減衰定数
 - ・ コンクリート部 : 5%
- 建屋耐震壁の非線形復元力特性
 - ・ せん断については、JEAG4601-1991に基づき、トリ・リニア型スケルトン曲線の最大点指向型
 - ・ 曲げモーメントについては、JEAG4601-1991に基づき、トリ・リニア型スケルトン曲線の第二折れ点までは最大点指向型、それ以降はディグレイディング型
- 地盤の回転ばねの非線形特性
 - ・ JEAG4601-1991に基づき、基礎浮上りによる地盤の回転ばねの幾何学的非線形を考慮

図4-1 地震応答解析モデル（水平方向）

地震応答解析モデル（水平方向）

表4-1 解析モデルの諸元（NS方向）

質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント $I (\text{m}^4)$
1	18,890	34.81		
2	15,670	28.83	28.2	14,571
3	74,990	138.08	28.2	15,986
4	88,070	162.10	206.3	27,958
5	109,640	201.82	212.2	38,723
6	130,160	239.58	237.3	56,230
7	226,760	417.47	208.6	60,144
8	301,020	554.17	458.7	112,978
9	127,000	233.79	2,697.8	496,620
合計	1,092,200			

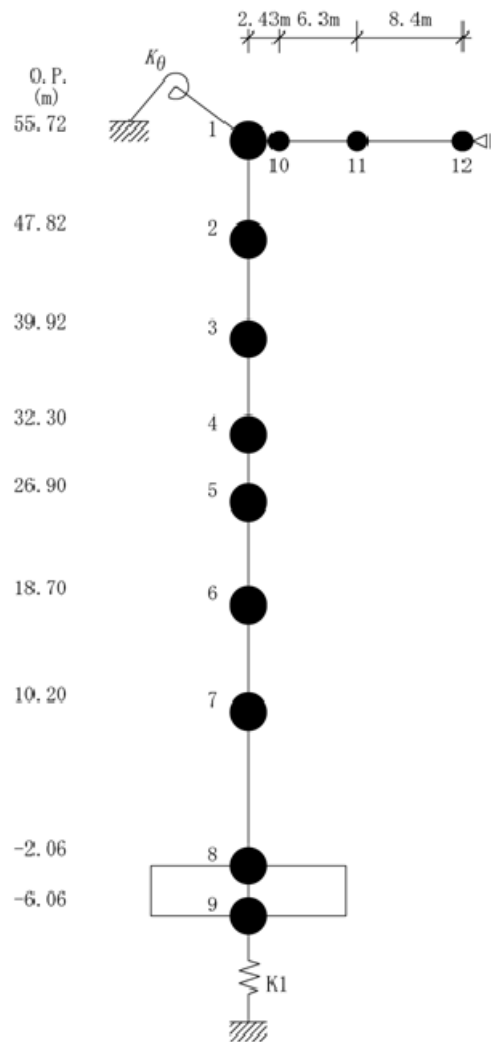
ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 0.20
 減衰 h 5%
 基礎形状 47.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)

表4-2 解析モデルの諸元（EW方向）

質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント $I (\text{m}^4)$
1	18,890	19.52		
2	15,670	16.18	21.1	8,529
3	74,990	77.47	28.2	9,057
4	88,070	90.91	103.2	14,172
5	109,640	201.82	150.8	21,844
6	130,160	239.58	204.1	41,352
7	226,760	622.62	226.6	61,084
8	301,020	826.50	431.3	135,128
9	127,000	348.72	2,697.8	740,717
合計	1,092,200			

ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 0.20
 減衰 h 5%
 基礎形状 47.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)

地震応答解析モデル（鉛直方向）



●一軸多質点系モデル

- ・ 建屋を等価な多質点系モデルに置き換え、質量は各階床および鉄骨部分に集中しているものとする
- ・ 耐震壁及び柱の軸剛性および屋根トラスのせん断剛性と曲げ剛性を考慮

●地盤ばね

- ・ 建屋底面地盤ばねは、JEAG4601-1991による振動アドミッタンス理論に基づく近似ばね

●建屋の減衰

- ・ モード減衰（ひずみエネルギー比例型）

●建屋の減衰定数

- ・ コンクリート部 : 5%
- ・ 鉄骨部（屋根トラス） : 2%

図4-2 地震応答解析モデル（鉛直方向）

地震応答解析モデル（鉛直方向）

表4-3 解析モデルの諸元（鉛直方向）

建屋				屋根			
質点番号	質点重量 W(kN)	軸断面積 $A_N(m^2)$	軸ばね剛性 $K_A(\times 10^8 kN/m)$	質点番号	質点重量 W(kN)	せん断断面積 $A_S(\times 10^{-2} m^2)$	断面2次モーメント $I(m^4)$
1	12,026			1	-		
2	15,670	68.0	2.21	10	1,881	13.03	0.852
3	74,990	74.9	2.44	11	3,172	11.56	0.852
4	88,070	293.3	9.89	12	1,811	5.96	0.852
5	109,640	373.0	17.75				
6	130,160	431.7	13.53				
7	226,760	423.0	12.79				
8	301,020	691.2	14.49				
9	127,000	2,697.8	173.33				
合計	1,092,200						

コンクリート部

ヤング係数 E_c 2.57×10^7 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 1.07×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 0.20
 減衰 h 5%

鉄骨部

ヤング係数 E_s 2.05×10^8 (kN/m²)
 せん断弾性係数 G 7.90×10^7 (kN/m²)
 ポアソン比 0.30
 減衰 h 2%

トラス端部回転拘束ばね K 2.36×10^7 (kN·m/rad)
 基礎形状 47.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)

解析に用いるコンクリートの物性値

表4-4 物性値

コンクリート	強度* ¹ Fc (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断弾性係数 G (N/mm ²)	ポアソン比 ν	単位体積重量* ² γ (kN/m ³)
	35.0	2.57 × 10 ⁴	1.07 × 10 ⁴	0.2	24
鉄筋	SD345相当 (SD35)				
鋼材	SS400, SM400A相当 (SS41, SM41A)				

表4-5 圧縮強度試験データ分析結果

設計基準強度	22.1	N/mm ²
試験体数	373	本
平均圧縮強度	37.4	N/mm ²
解析採用値	35.0	N/mm ²

* 1 : RC造部の剛性を評価する際に用いるコンクリート強度は、過去に原子力発電所内で実施された高経年化技術評価、コンクリート健全性評価及び建築設備点検等における圧縮強度試験結果から推定した実強度の値として、圧縮強度のばらつきを考慮し、平均値をやや下回る値を採用した。

* 2 : 鉄筋コンクリートの値を示す。

解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数 (Ss-1H)

表4-6 ばね定数と減衰係数 (Ss-1H)

(NS方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*) Cc	採用振動数 ^(*) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K5	9	底面・並進	5.37 × 10 ⁷	0.00	2.07 × 10 ⁶	2.53
K6	9	底面・回転	3.87 × 10 ¹⁰	0.00	3.21 × 10 ⁸	2.53

(*) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*) Cc	採用振動数 ^(*) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K5	9	底面・並進	5.27 × 10 ⁷	0.00	1.99 × 10 ⁶	2.65
K6	9	底面・回転	5.16 × 10 ¹⁰	0.00	5.51 × 10 ⁸	2.65

(*) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*) f₁は連成系の1次固有振動数

解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数 (Ss-2H)

表4-7 ばね定数と減衰係数 (Ss-2H)

(NS方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.56
K2	8	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	8.94 × 10 ⁷	2.56
K3	9	側面・並進	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.56
K4	9	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	8.94 × 10 ⁷	2.56
K5	9	底面・並進	5.56 × 10 ⁷	0.00	2.10 × 10 ⁶	2.56
K6	9	底面・回転	4.02 × 10 ¹⁰	0.00	3.25 × 10 ⁸	2.56

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.69
K2	8	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	9.06 × 10 ⁷	2.69
K3	9	側面・並進	2.40 × 10 ⁶	1.13	4.84 × 10 ⁵	2.69
K4	9	側面・回転	1.49 × 10 ⁹	0.01	9.06 × 10 ⁷	2.69
K5	9	底面・並進	5.45 × 10 ⁷	0.00	2.02 × 10 ⁶	2.69
K6	9	底面・回転	5.35 × 10 ¹⁰	0.00	5.60 × 10 ⁸	2.69

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数 (Ss-3H)

表4-8 ばね定数と減衰係数 (Ss-3H)

(NS方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.75 × 10 ⁵	2.53
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.80 × 10 ⁷	2.53
K5	9	底面・並進	5.37 × 10 ⁷	0.00	2.07 × 10 ⁶	2.53
K6	9	底面・回転	3.87 × 10 ¹⁰	0.00	3.21 × 10 ⁸	2.53

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

(EW方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*1) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*2) Cc	採用振動数 ^(*3) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K2	8	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K3	9	側面・並進	2.32 × 10 ⁶	1.11	4.76 × 10 ⁵	2.65
K4	9	側面・回転	1.44 × 10 ⁹	0.01	8.91 × 10 ⁷	2.65
K5	9	底面・並進	5.27 × 10 ⁷	0.00	1.99 × 10 ⁶	2.65
K6	9	底面・回転	5.16 × 10 ¹⁰	0.00	5.51 × 10 ⁸	2.65

(*1) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*2) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*3) f₁は連成系の1次固有振動数

解析に用いる地盤のばね定数と減衰係数 (Ss-1~3V)

表4-9 ばね定数と減衰係数 (Ss-1V : 鉛直方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 Kc(kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 Cc(kN・s/m)	採用振動数 ^(*) f ₁ (Hz)
K1	9	底面・鉛直	8.83 × 10 ⁷	0.00	4.77 × 10 ⁶	4.41

(*) f₁は連成系の1次固有振動数

表4-10 ばね定数と減衰係数 (Ss-2V : 鉛直方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 Kc(kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 Cc(kN・s/m)	採用振動数 ^(*) f ₁ (Hz)
K1	9	底面・鉛直	9.16 × 10 ⁷	0.00	4.87 × 10 ⁶	4.49

(*) f₁は連成系の1次固有振動数

表4-11 ばね定数と減衰係数 (Ss-3V : 鉛直方向)

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 Kc(kN/m)	採用振動数 (Hz)	減衰係数 Cc(kN・s/m)	採用振動数 ^(*) f ₁ (Hz)
K1	9	底面・鉛直	8.83 × 10 ⁷	0.00	4.77 × 10 ⁶	4.41

(*) f₁は連成系の1次固有振動数

地震応答解析モデルの変更点

表4-12 地震応答解析モデル及び手法の比較（水平方向）（1）

項目	内容	工認モデル	バックチェックモデル
入力地震動	入力地震動の算定方法	基礎マット下端に既往波（エルセントロ波及びタト波）を直接入力	解放基盤表面で定義した基準地震動Ssを一次元波動論により評価
建屋のモデル化	解析モデル	S Rモデル	埋込みS Rモデル
	材料特性	コンクリート設計基準強度 22.1N/mm ² (225kgf/cm ²) ヤング係数 2.06×10 ⁴ (N/mm ²) ポアソン比 0.167	コンクリート実強度 35.0N/mm ² ヤング係数 2.57×10 ⁴ (N/mm ²) ポアソン比 0.2
	剛性評価	耐震壁を考慮	同左
	減衰定数	R C : 5%	同左
	せん断断面積	耐震要素の全断面積の1/2	地震方向の耐震要素のせん断断面積の和
	断面2次モーメント	有効フランジ幅 1/2 中立軸：炉心位置 (オペフロ上部は中心位置)	有効フランジ幅 1/4 中立軸：耐震要素毎に算定
地盤のモデル化	底面ばね	水平及び回転を考慮	水平及び回転を考慮
	側面ばね	水平を考慮	水平及び回転を考慮
非線形特性	耐震壁	設定せず（線形）	非線形特性を設定
	底面ばね	設定せず（線形）	非線形特性を設定

地震応答解析モデルの変更点

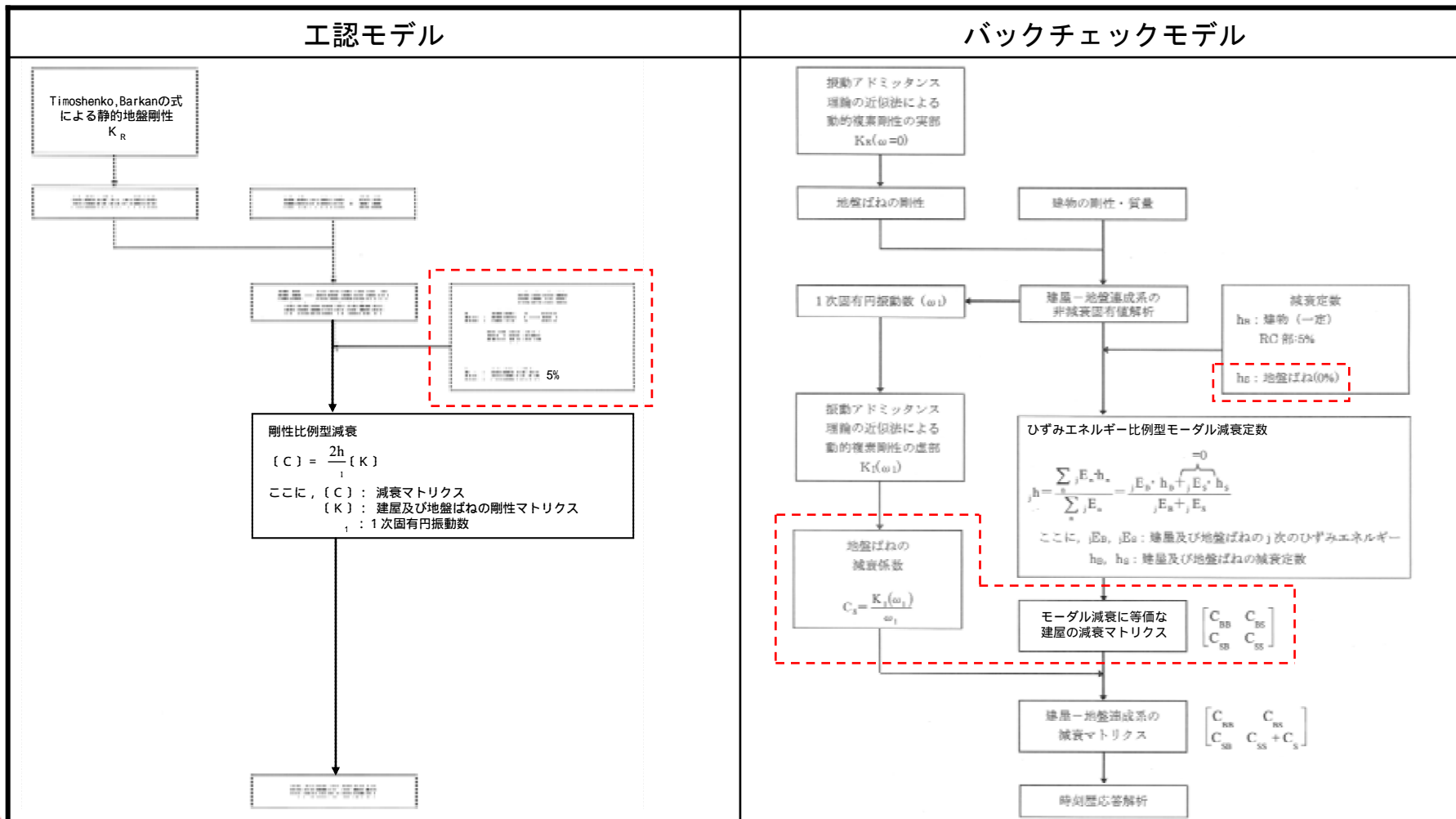
表4-12 地震応答解析モデル及び手法の比較（水平方向）（2）

		工認モデル	バックチェックモデル
解析モデル			
側面地盤ばね	剛性	NS方向解析時 水平ばね: 6.21×10^7 (kN/m) 回転ばね: 無し	基礎上端面までの各質点にNOVAKの方法により求め、JEAG4601-1991に基づき近似したばねを考慮 Ss-1H入力のNS方向解析時 水平ばね: 4.64×10^6 (kN/m) 回転ばね: 2.88×10^9 (kNm/rad)
	減衰	安全側に各モード5%として考慮	NOVAKの方法により求め、JEAG4601-1991に基づき近似した減衰係数を考慮
底面地盤ばね	剛性	NS方向解析時 水平ばね: 4.26×10^7 (kN/m) 回転ばね: 2.71×10^{10} (kNm/rad)	Ss-1H入力のNS方向解析時 水平ばね: 5.37×10^7 (kN/m) 回転ばね: 3.87×10^{10} (kNm/rad)
	減衰	安全側に各モード5%として考慮	振動アドミタンス理論により求め、JEAG4601-1991に基づき近似した減衰係数を考慮

地震応答解析モデルの変更点

表4-13 地盤ばねの減衰評価の比較

BCモデルの地盤ばねの減衰評価は、工認モデルでの5%一定減衰ではなく、JEAG4601-1991に基づき、地盤ばねの減衰定数を0%として算出した「モーダル減衰に等価な建屋の減衰マトリクス」に地盤ばねの減衰係数を後から足し込んでいる。



地震応答解析モデルのパラメータスタディ（水平方向）

建屋モデルの違いが建屋応答にあたる影響を確認するために、「コンクリート強度」「側面回転ばね」「建屋減衰」をパラメータにしたパラメータスタディを実施した。

表4-14 解析ケースの一覧（水平方向）

解析ケース	コンクリート強度	側面回転ばね	建屋減衰
バックチェックモデル	実強度	水平＋回転	5%
ケース1（設計強度）	<u>設計基準強度</u>	水平＋回転	5%
ケース2（側面回転ばね無視）	実強度	<u>水平</u>	5%
ケース3（建屋減衰3%）	実強度	水平＋回転	<u>3%</u>
ケース4（設計ベースモデル）	<u>設計基準強度</u>	<u>水平</u>	5%

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (NS方向)

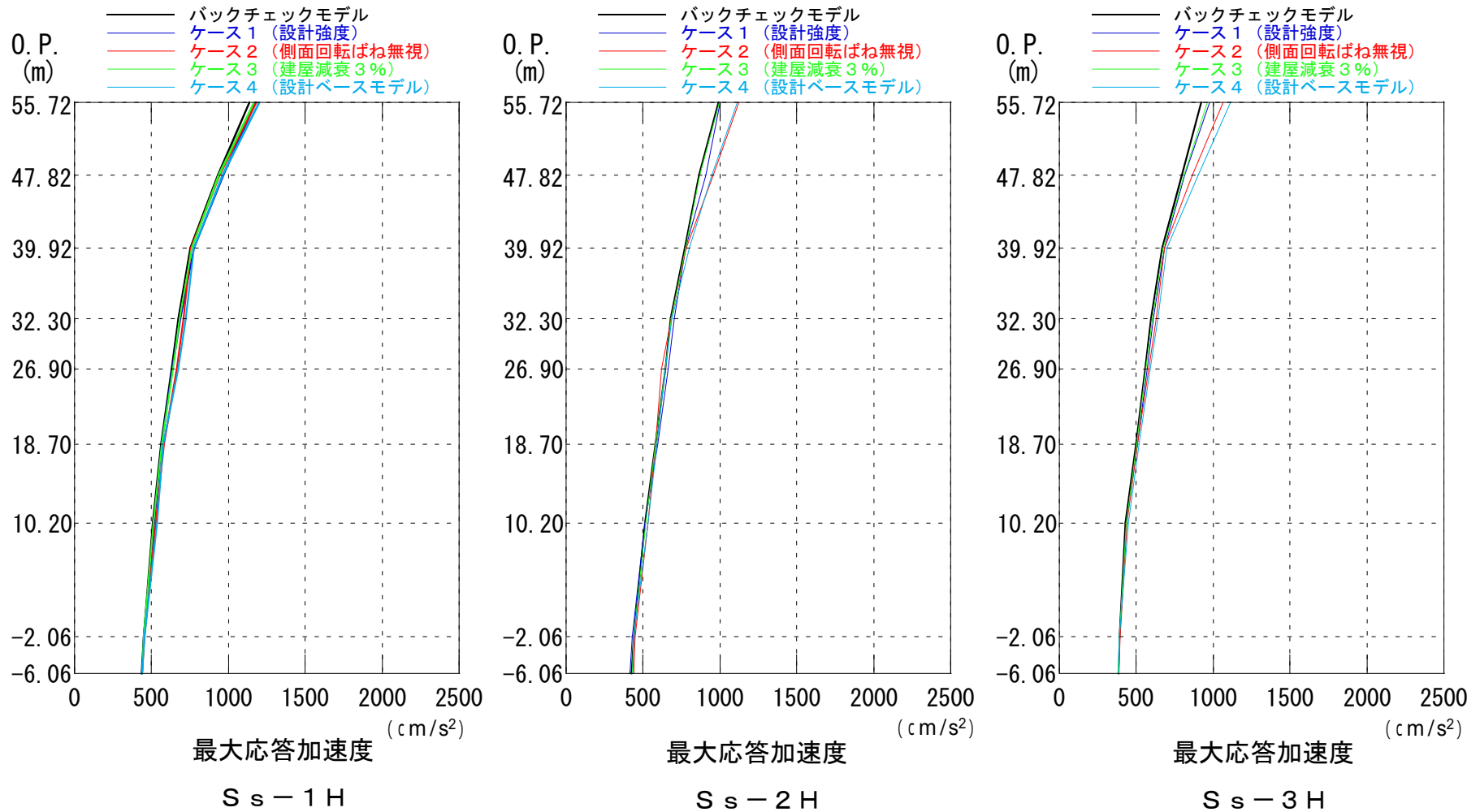


図4-3 最大応答加速度分布 (NS方向)

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (EW方向)

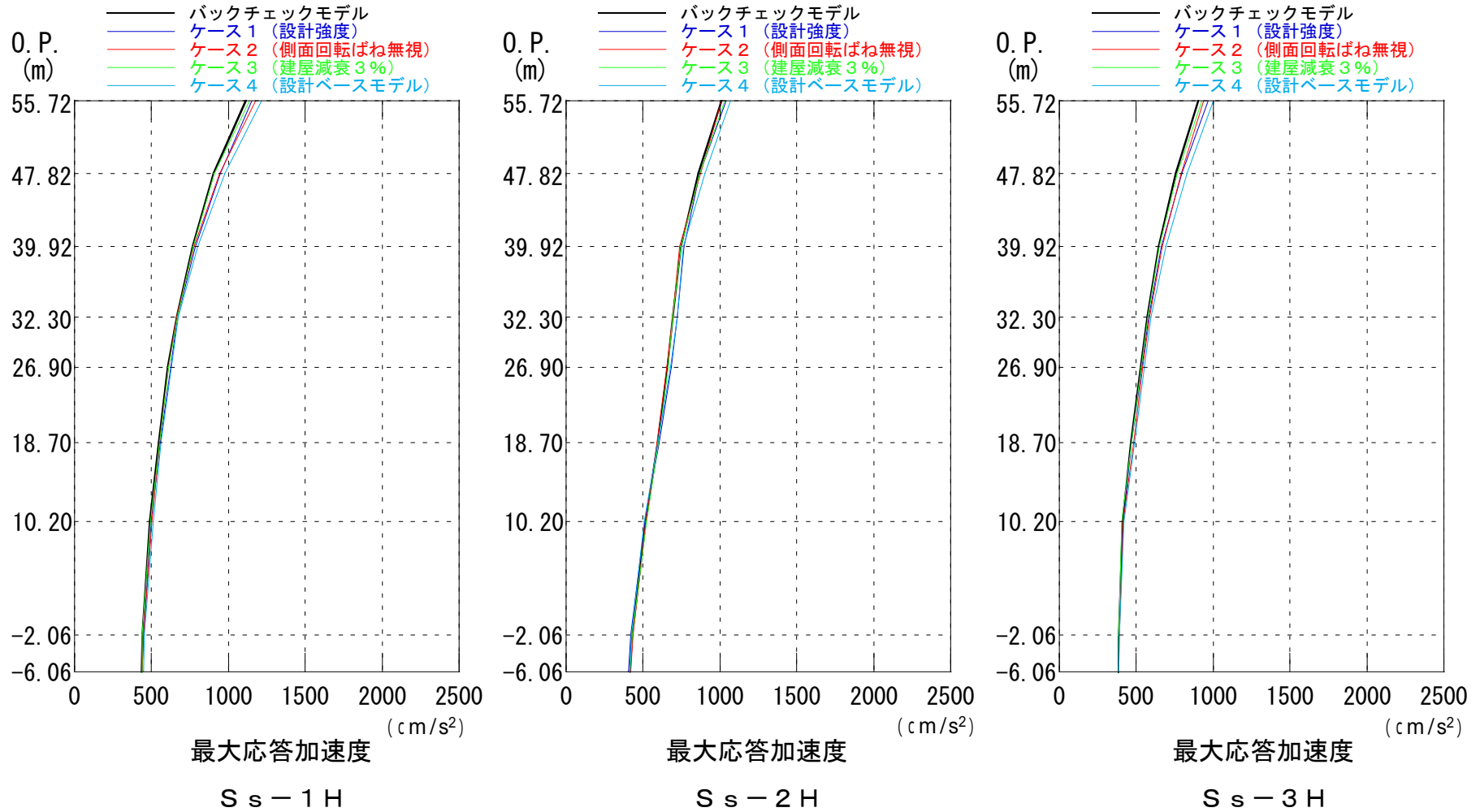
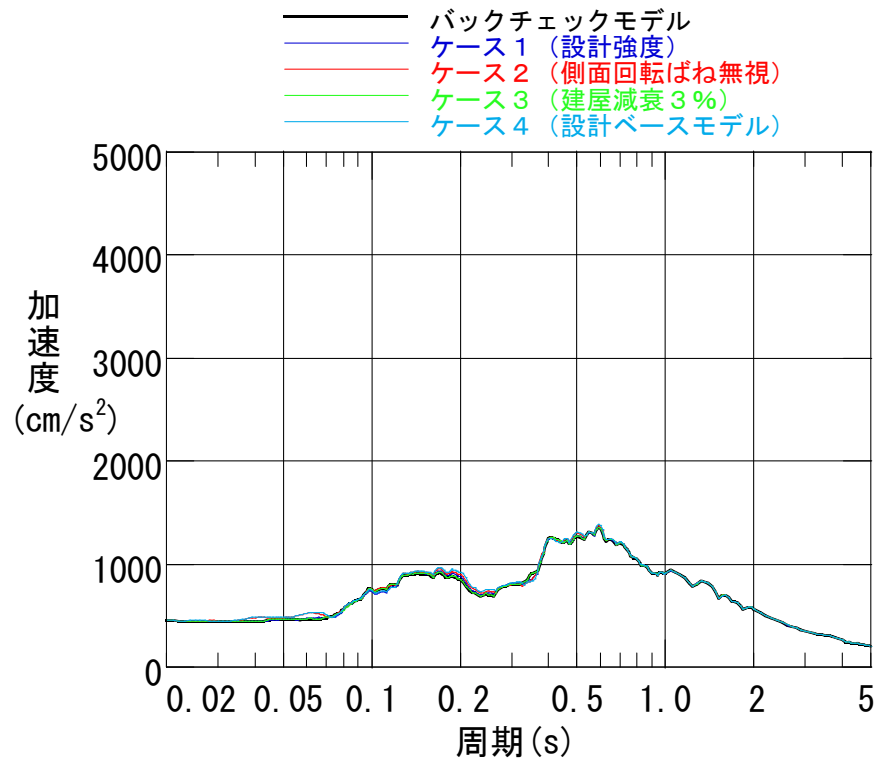
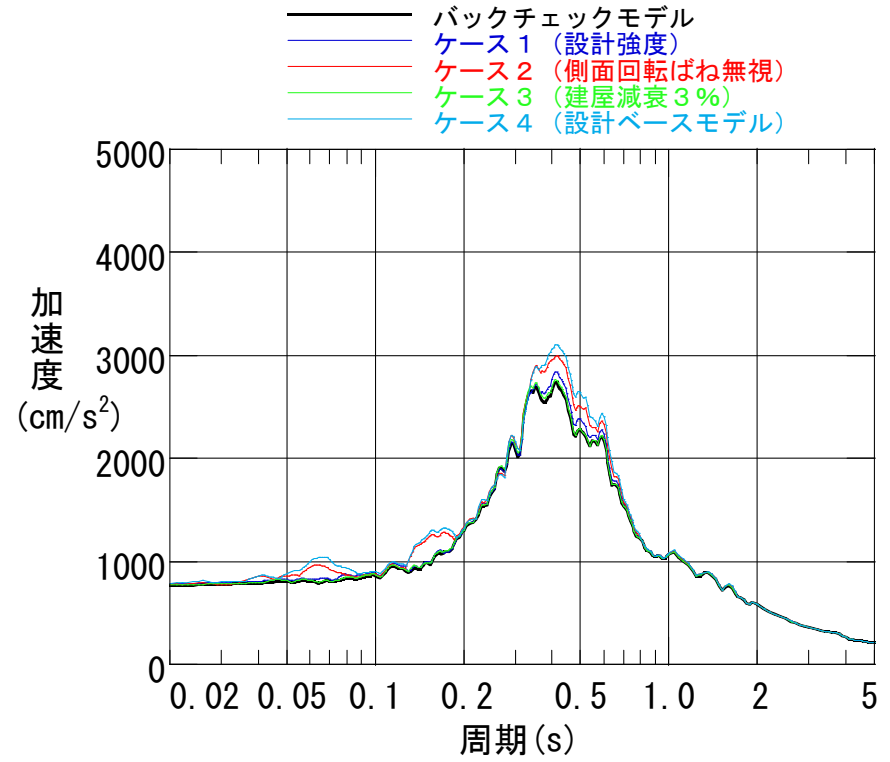


図4-4 最大応答加速度分布 (EW方向)

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (NS方向)



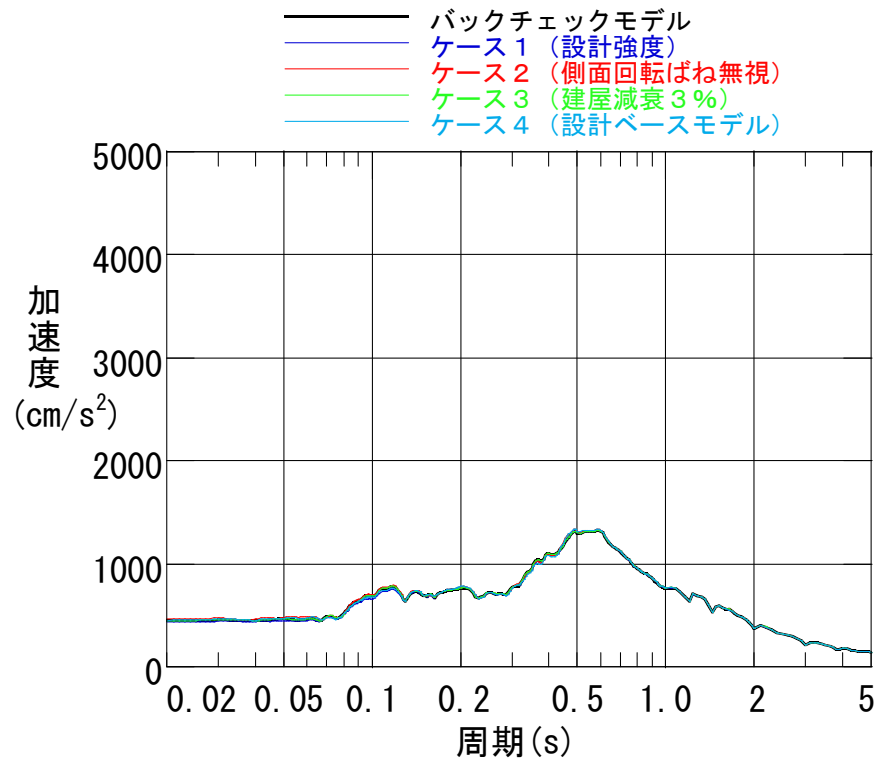
S s - 1 H基礎版上 (0.P. -2.06m)



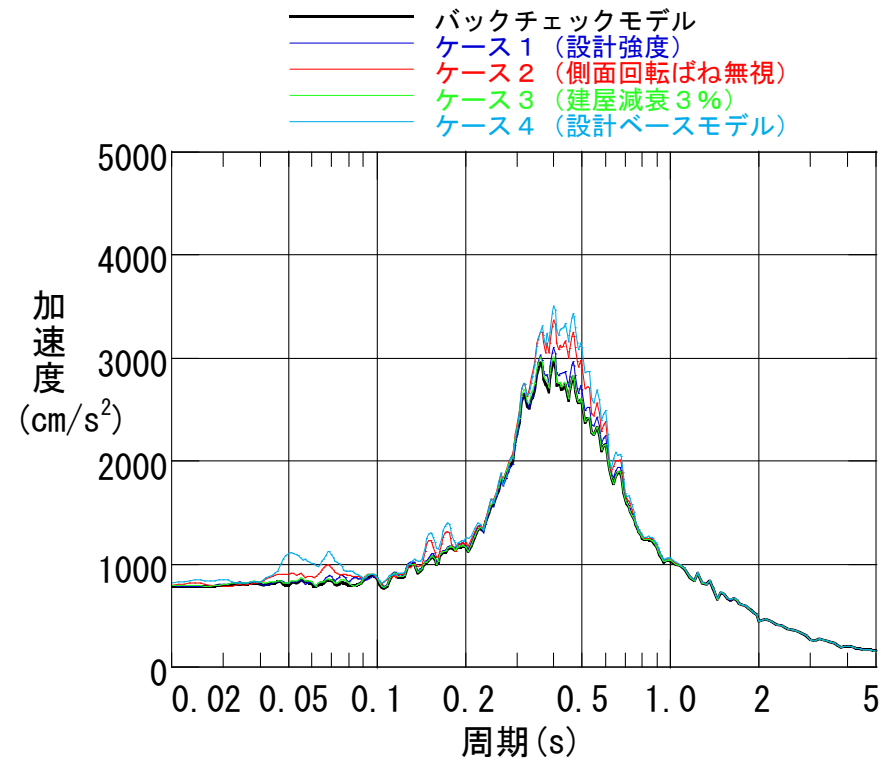
S s - 1 Hオペフロ (0.P. 39.92m)

図4-5(1) 床応答スペクトル (NS方向 : Ss-1H : h=0.05)

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (NS方向)



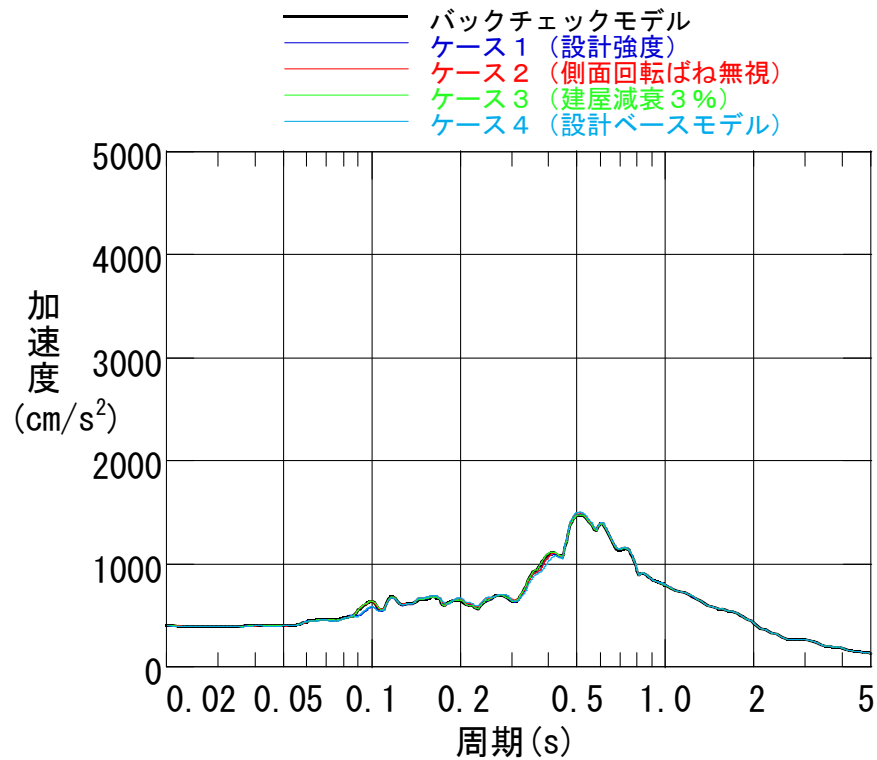
S_s-2H基礎版上 (0.P. -2.06m)



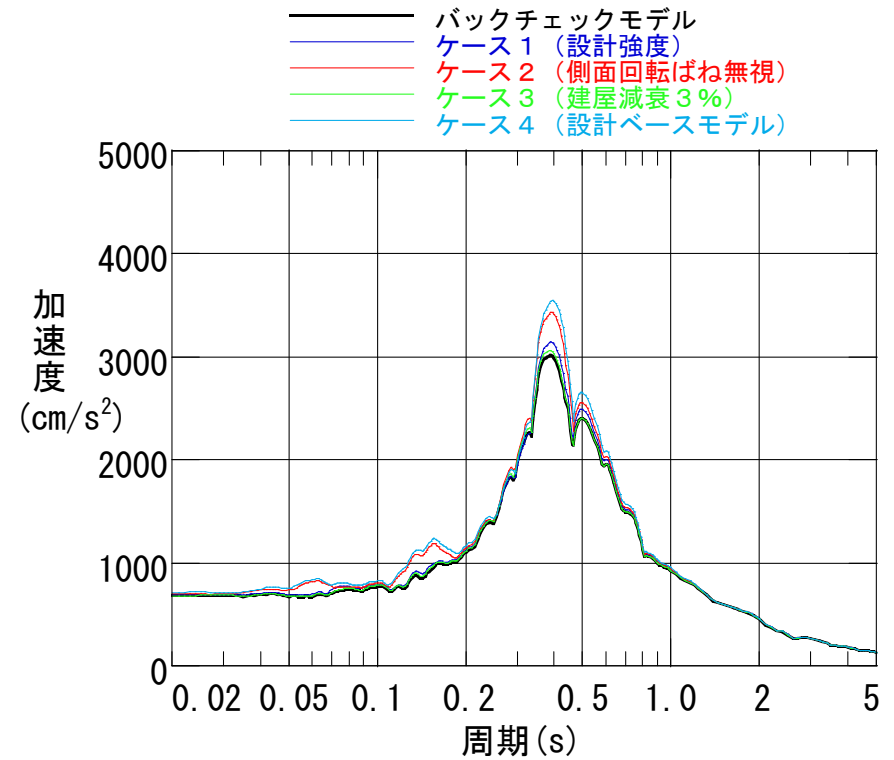
S_s-2Hオペフロ (0.P. 39.92m)

図4-5(2) 床応答スペクトル (NS方向 : S_s-2H : h=0.05)

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (NS方向)



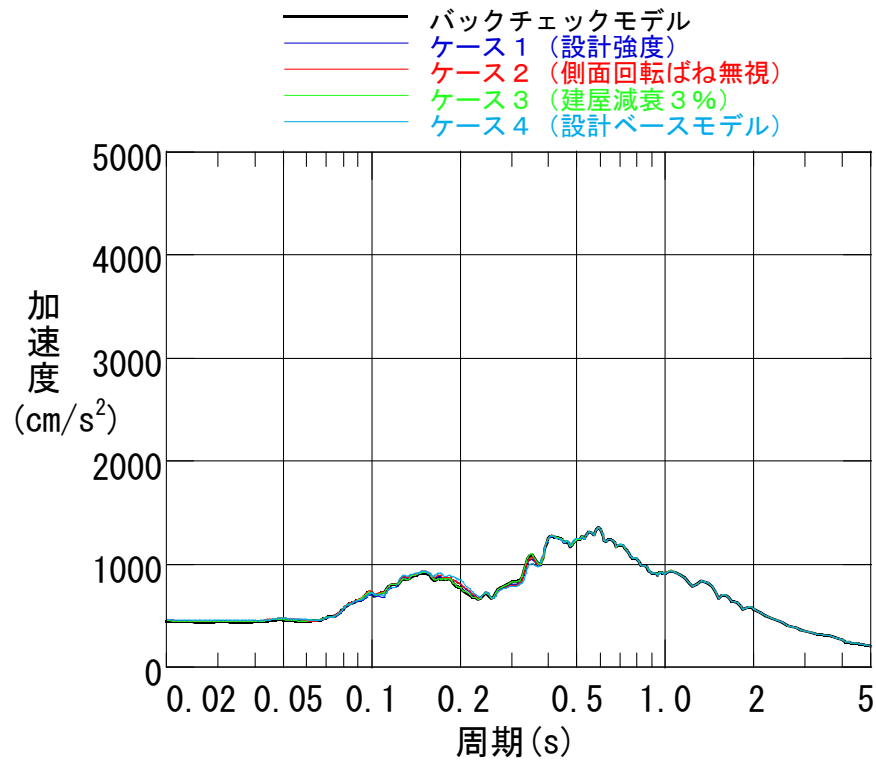
S_s-3H基礎版上 (O.P. -2.06m)



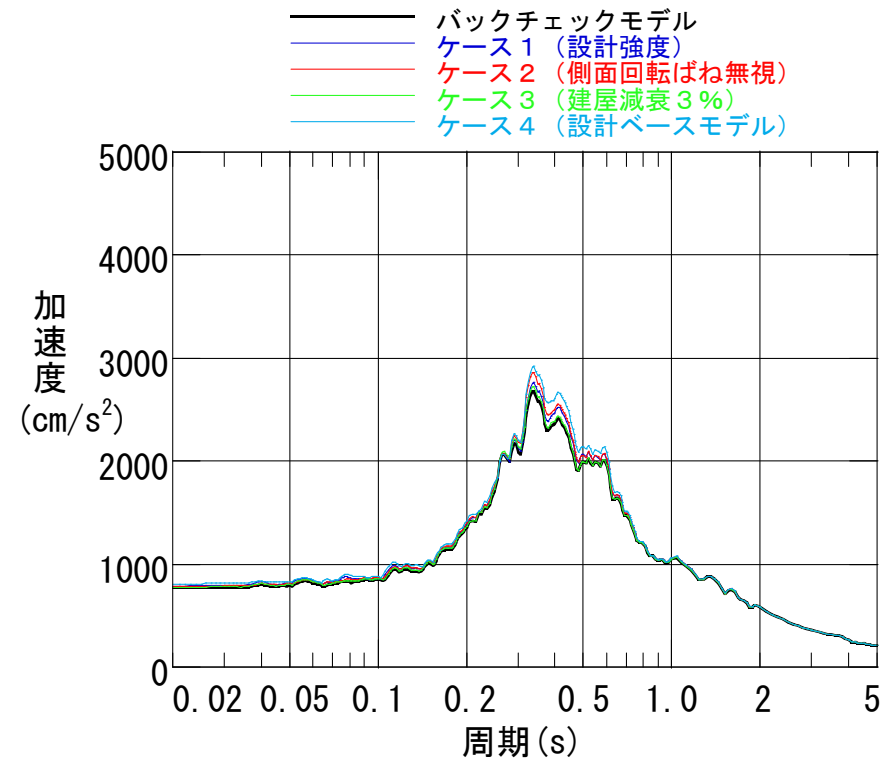
S_s-3Hオペフロ (O.P. 39.92m)

図4-5(3) 床応答スペクトル (NS方向 : S_s-3H : h=0.05)

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (EW方向)



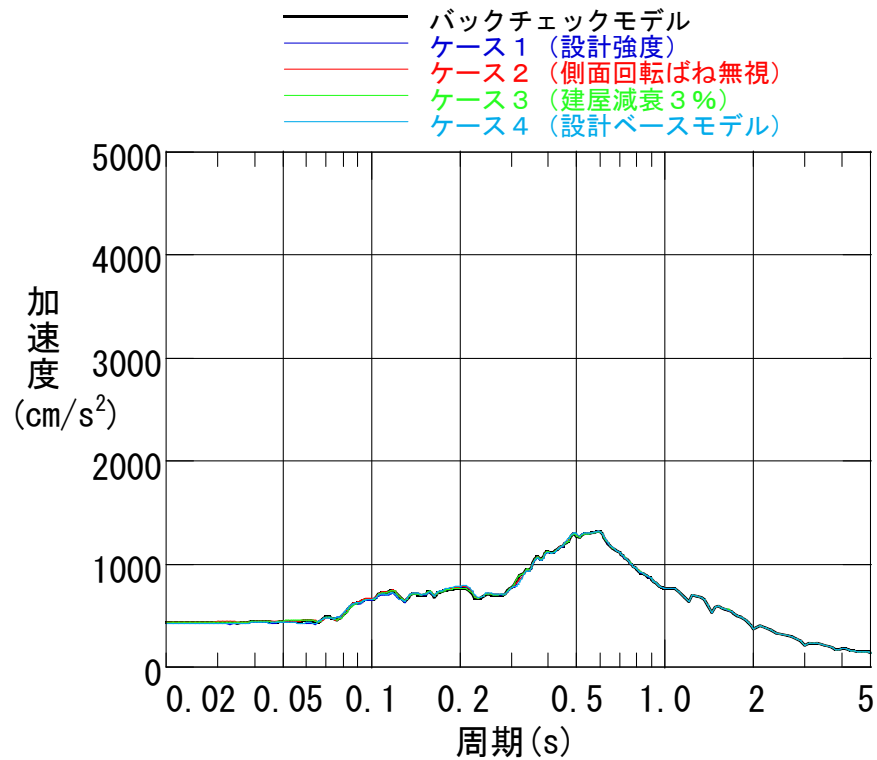
S s - 1 H基礎版上 (0.P. -2.06m)



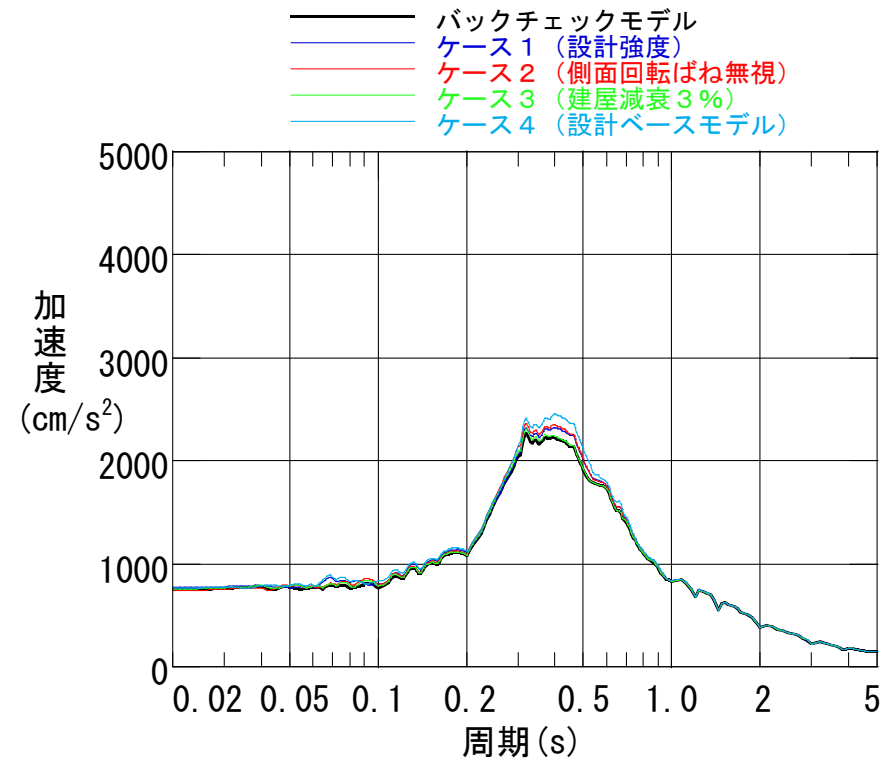
S s - 1 Hオペフロ (0.P. 39.92m)

図4-6(1) 床応答スペクトル (EW方向 : Ss-1H : h=0.05)

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (EW方向)



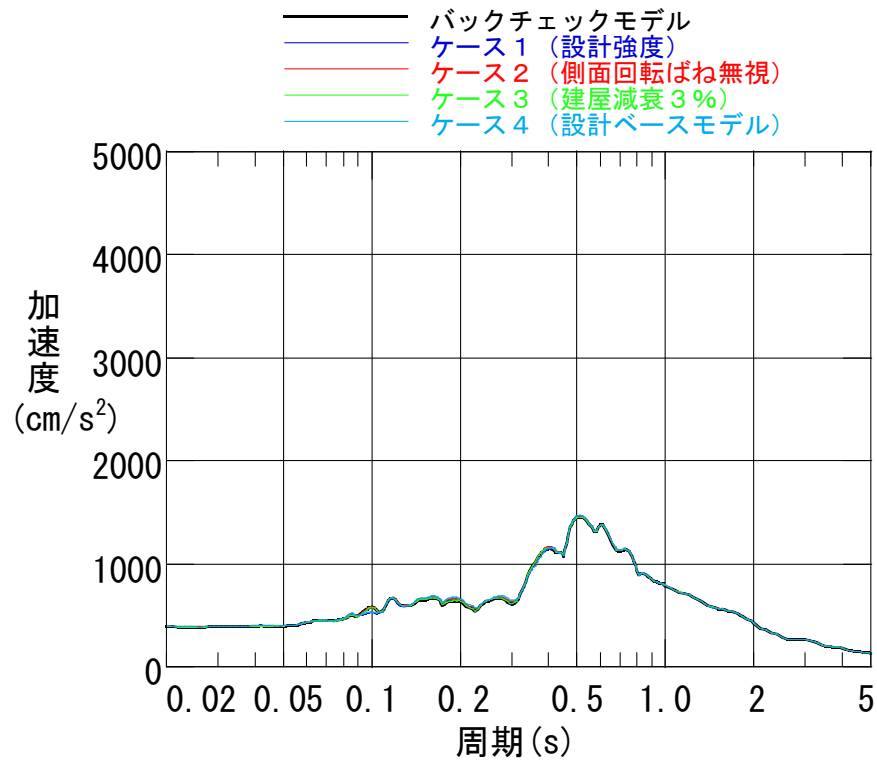
S s - 2 H基礎版上 (0.P. -2.06m)



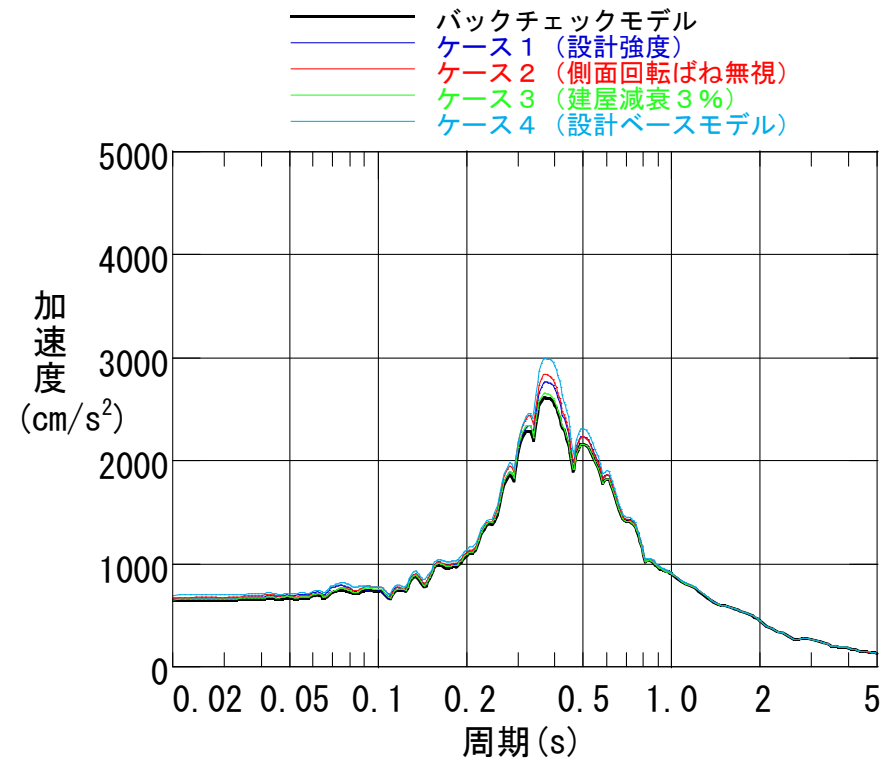
S s - 2 Hオペフロ (0.P. 39.92m)

図4-6(2) 床応答スペクトル (EW方向 : Ss-2H : h=0.05)

地震応答解析モデルのパラメータスタディ (EW方向)



S s - 3 H基礎版上 (O. P. -2.06m)



S s - 3 Hオペフロ (O. P. 39.92m)

図4-6(3) 床応答スペクトル (EW方向 : Ss-3H : h=0.05)

オペフロ階で若干のばらつきがあるが、建屋モデルの違いが建屋の応答に与える影響は小さい。

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）

建屋モデルの違いが建屋応答にあたえる影響を確認するために、「コンクリート強度」「建屋減衰」をパラメータにしたパラメータスタディを実施した。

表4-15 解析ケースの一覧（鉛直方向）

解析ケース	コンクリート強度	建屋減衰
バックチェックモデル	実強度	5%
ケース1（設計強度）	設計基準強度	5%
ケース3（建屋減衰3%）	実強度	3%

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）

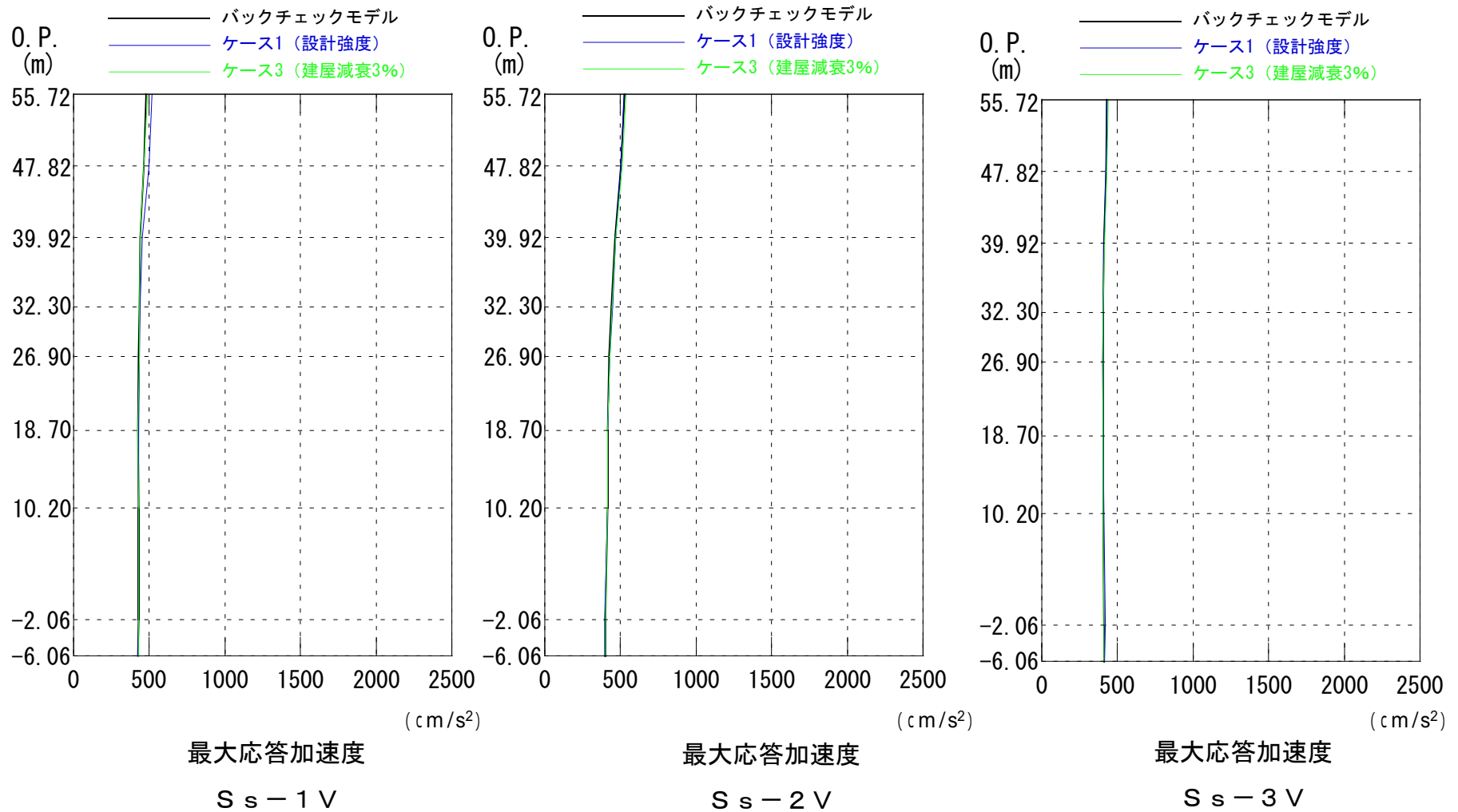


図4-7 最大応答加速度分布（鉛直方向）

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）

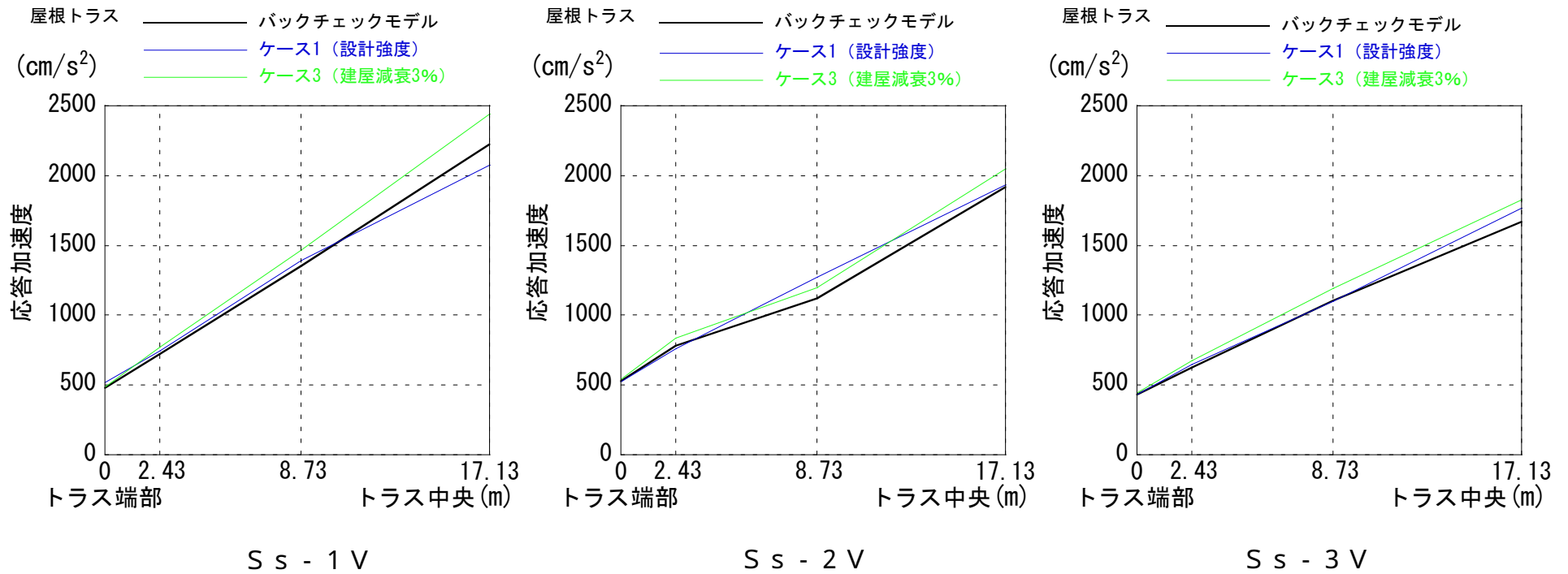
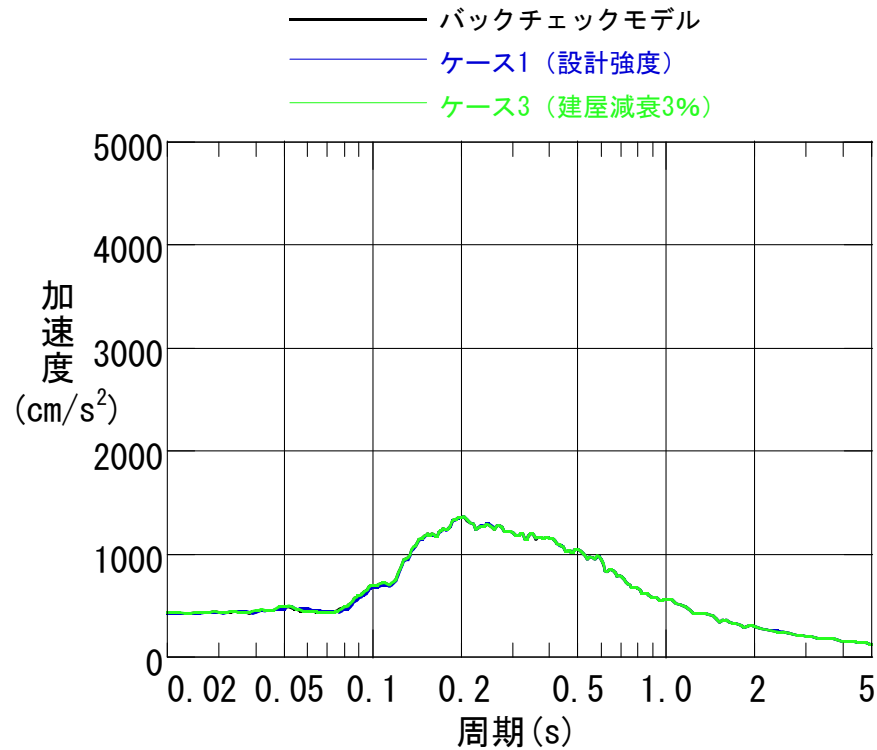
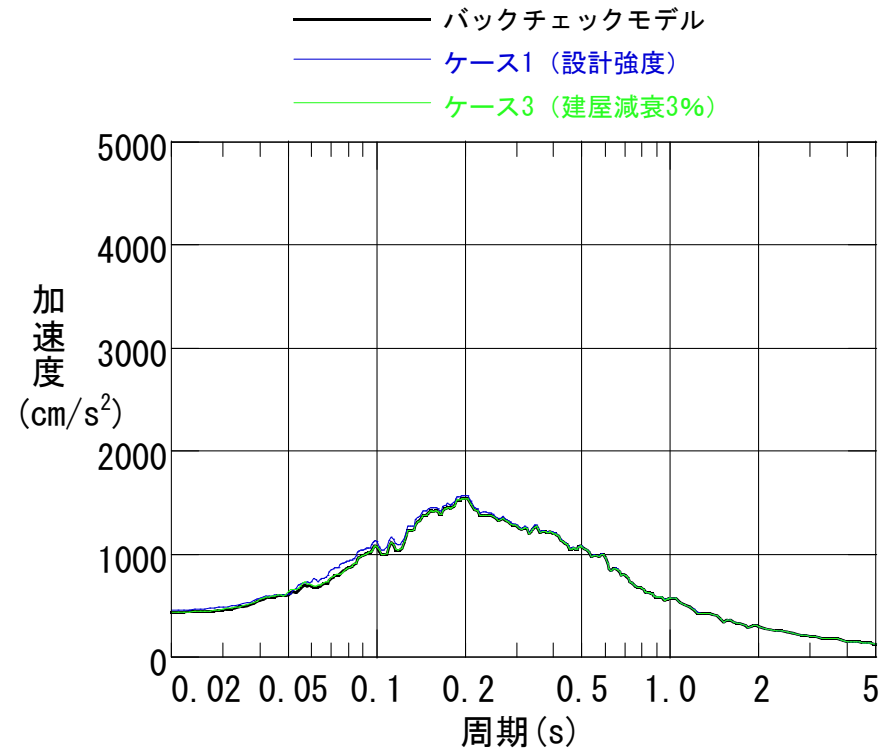


図4-8 最大応答加速度分布（鉛直方向：屋根トラス）

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）



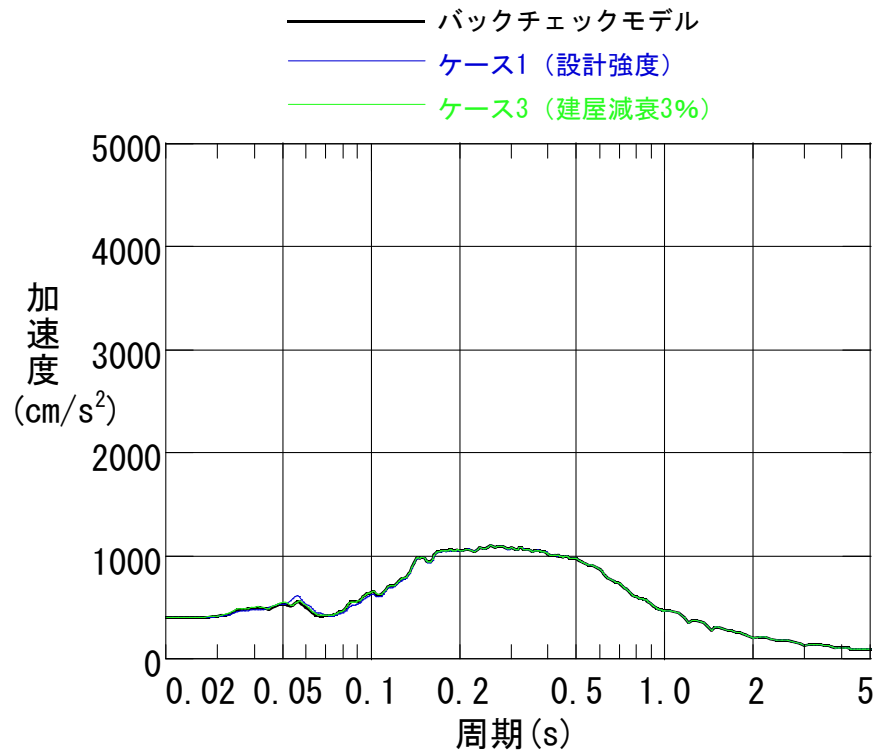
S s - 1 V 基礎版上 (0. P. -2.06m)



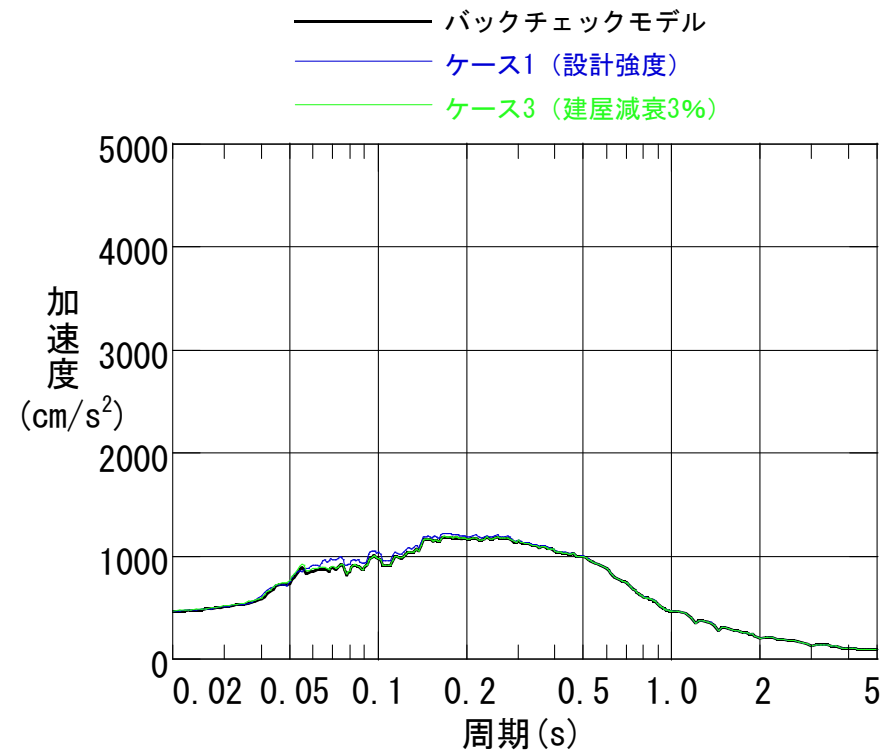
S s - 1 V オペフロ (0. P. 39.92m)

図4-9(1) 床応答スペクトル（鉛直方向：Ss-1V：h=0.05）

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）



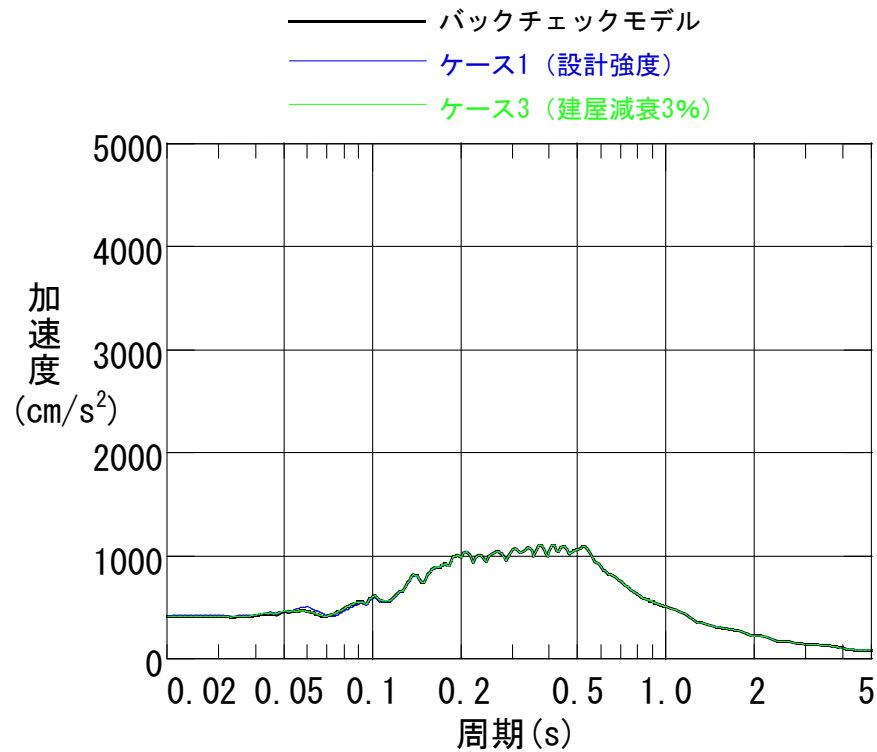
S s - 2 V 基礎版上 (0. P. -2.06m)



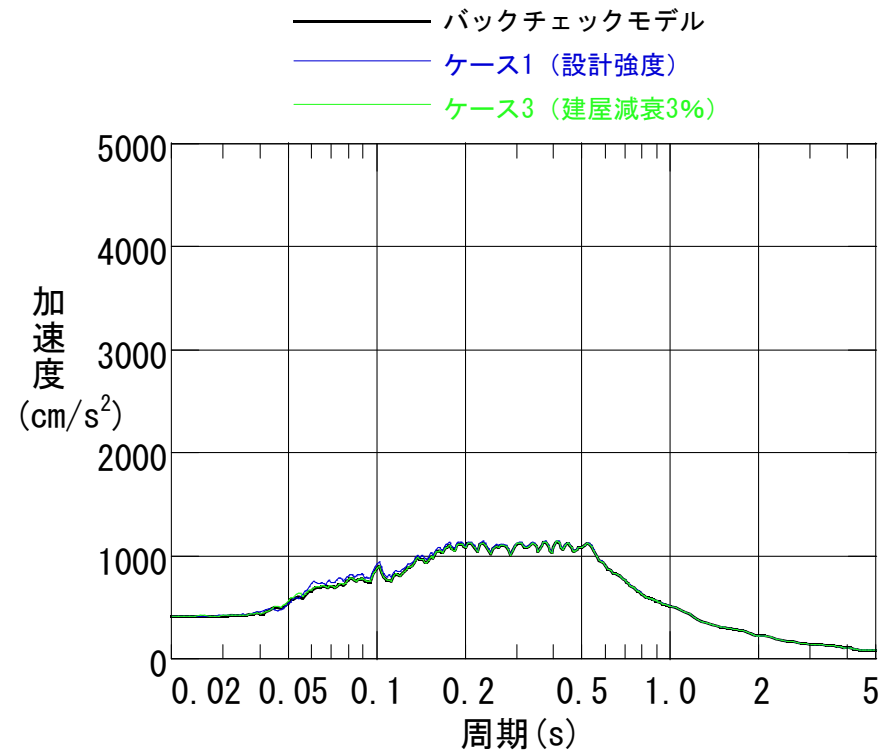
S s - 2 V オペフロ (0. P. 39.92m)

図4-9(2) 床応答スペクトル（鉛直方向：Ss-2V：h=0.05）

地震応答解析モデルのパラメータスタディ（鉛直方向）



S s - 3 V 基礎版上 (O. P. -2.06m)



S s - 3 V オペフロ (O. P. 39.92m)

図4-9(3) 床応答スペクトル（鉛直方向：Ss-3V：h=0.05）

オペフロ階で若干のばらつきがあるが、建屋モデルの違いが建屋の応答に与える影響は小さい。

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (床の柔軟性を考慮した検討結果について)

新潟県中越沖地震を踏まえ、床などの柔軟性を考慮した解析及び地震観測記録に基づいた解析などにより、耐震バックチェックで用いた水平方向の地震応答解析モデルによる耐震安全性評価に問題がないことを検討した。

検討は、2008年岩手・宮城内陸地震の観測記録のうち基礎版上の観測記録を入力として、耐震安全性評価モデル（以下「床剛モデル」）と床の柔軟性を考慮したモデル（以下「床柔モデル」）によるシミュレーション解析を実施した。

表4-16 解析モデルの条件

項目		床剛モデル (耐震安全性評価モデル)	床柔モデル
剛性評価	コンクリート強度	35.0N/mm ²	同左
	ヤング係数	25.7 × 10 ⁹ N/mm ² (2.62 × 10 ⁶ kgf/cm ²)	同左
	考慮範囲	耐震壁	同左
減衰定数	鉄筋コンクリート	5%(複素減衰：一定減衰)	同左
解析モデル	建屋-地盤相互作用	埋込みSRモデル	同左
	建屋モデル	質点系1軸モデル	質点系多軸モデル
	地盤ばね	JEAGによる近似法	同左
	側面ばね	水平・回転を考慮	同左
1次固有周期(sec)		0.362(NS) 0.347(EW)	0.373(NS) 0.358(EW)
解析手法		周波数応答解析	同左
入力地震動		基礎版上観測記録	同左

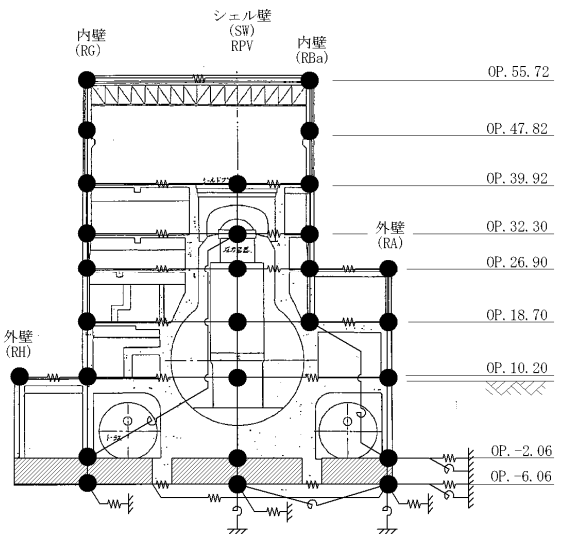


図4-10 床柔モデル (NS方向)

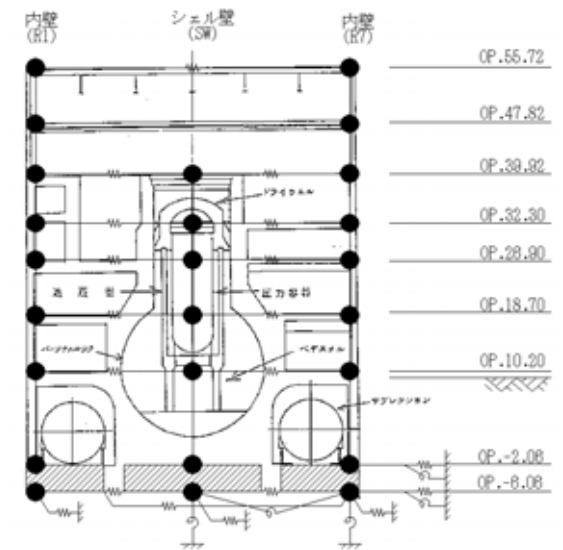


図4-11 床柔モデル (EW方向)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (検討に用いた地震)

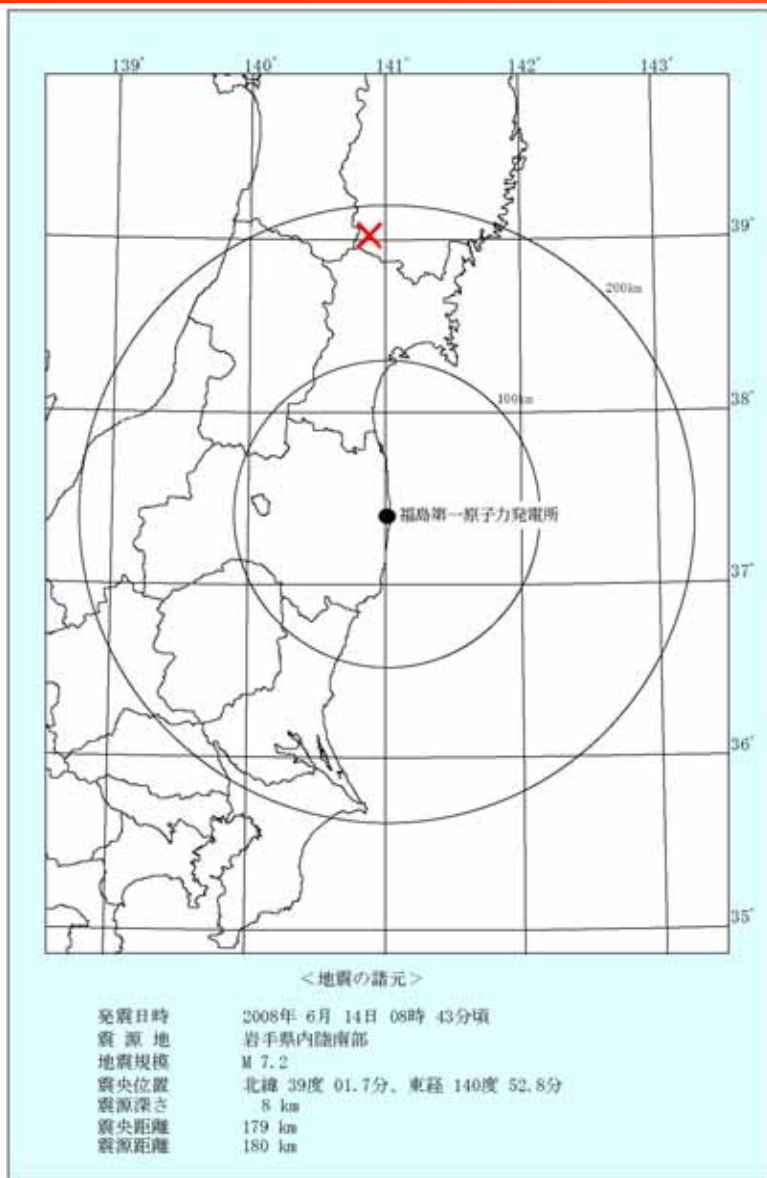


図4-12 地震の諸元

2008年6月14日の地震（岩手県内陸）の
基礎版上の観測記録
(平成20年岩手・宮城内陸地震)

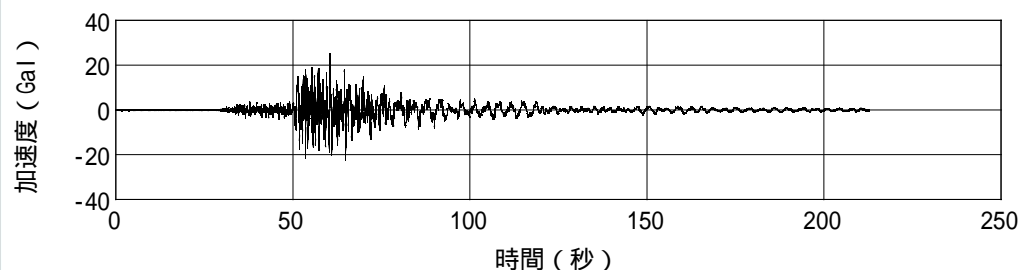


図4-13 加速度時刻歴波形 NS方向 Max=25 Gal

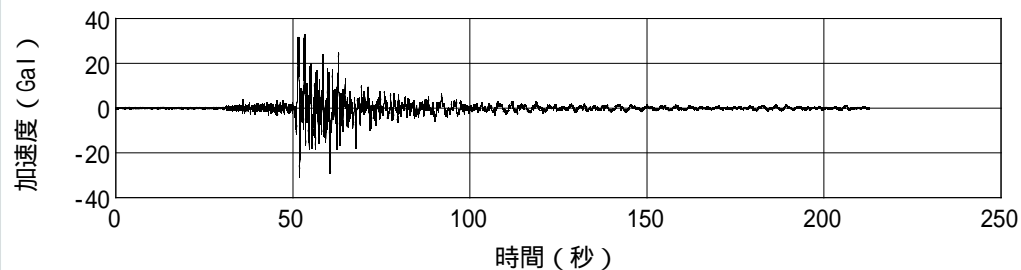
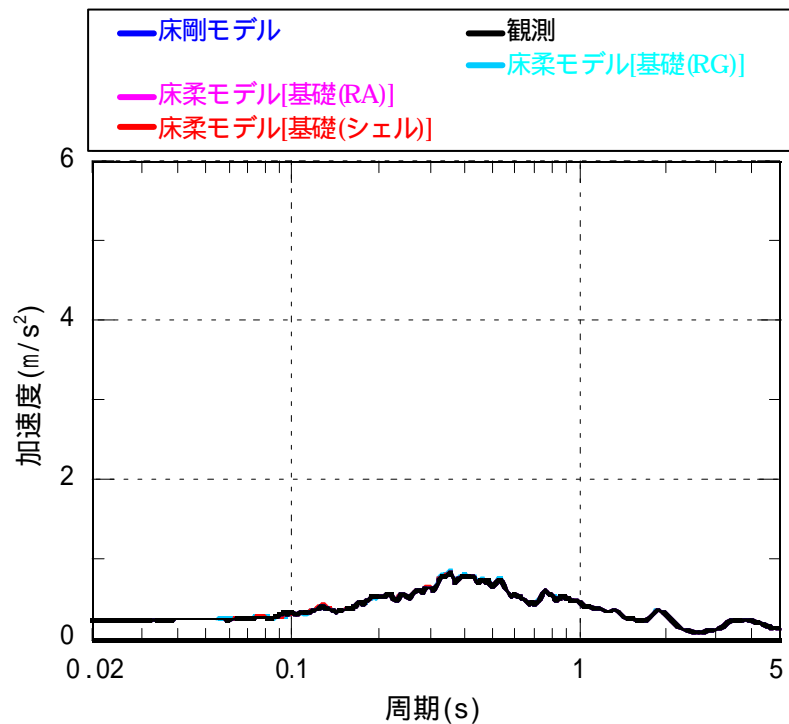
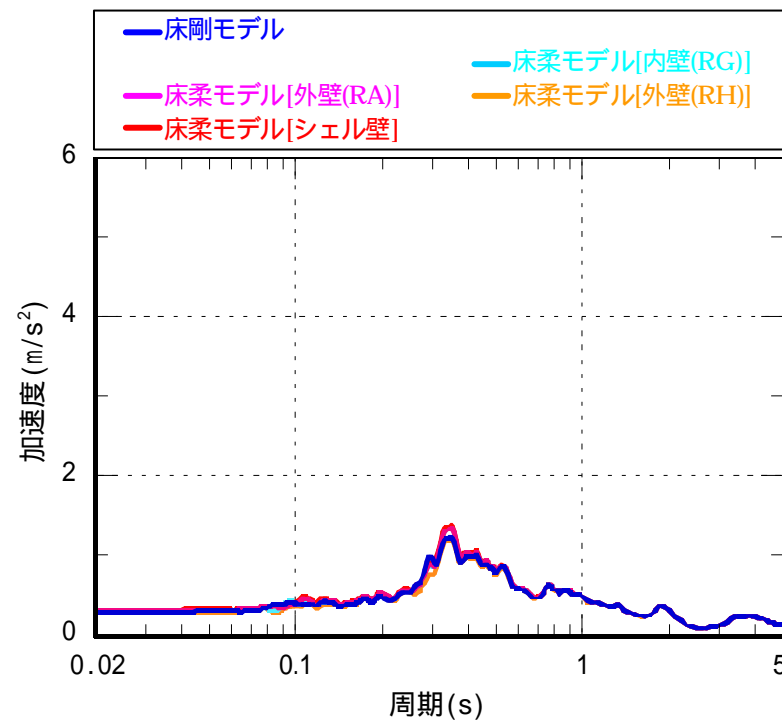


図4-14 加速度時刻歴波形 EW方向 Max=33 Gal

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (NS方向)



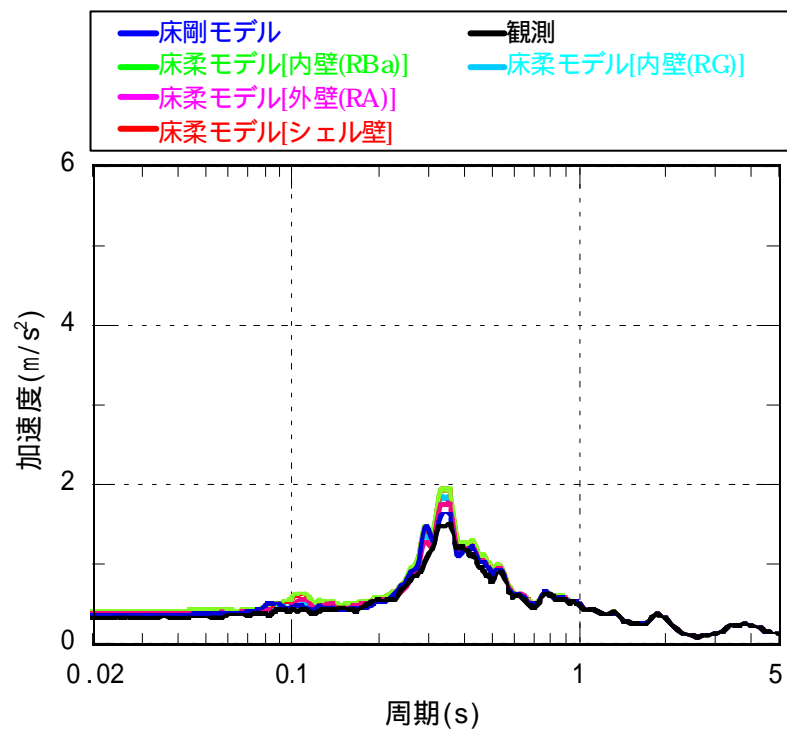
基礎版上 (O. P. -2.06m)



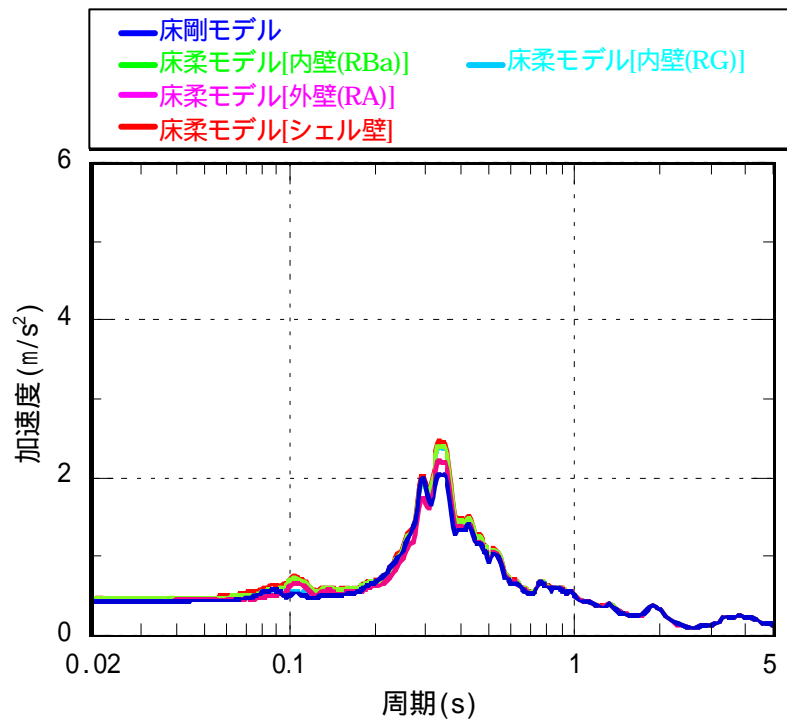
1階 (O. P. 10.2m)

図4-15(1) 床応答スペクトル (NS方向 h=0.05)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (NS方向)



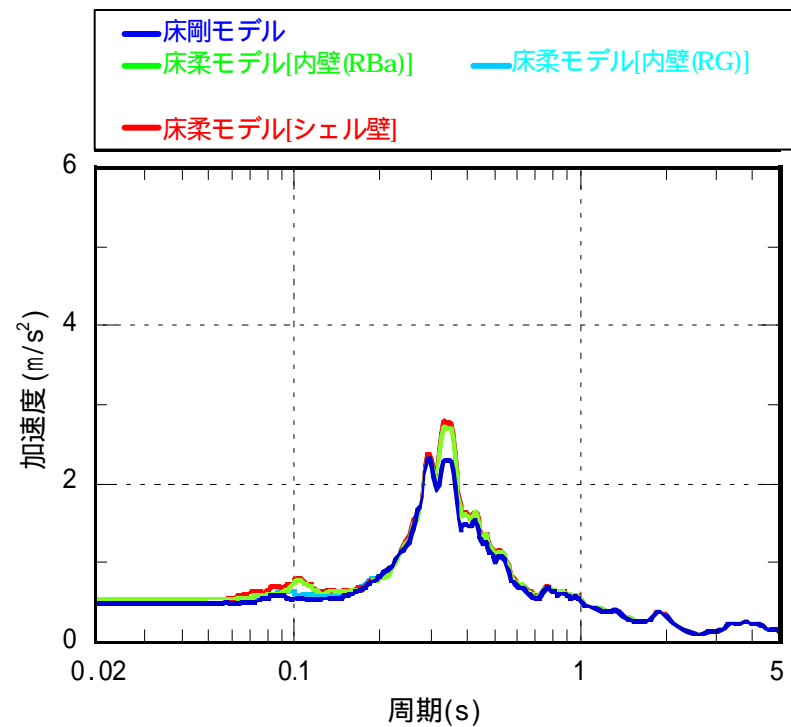
2階 (O.P. 18.7m)



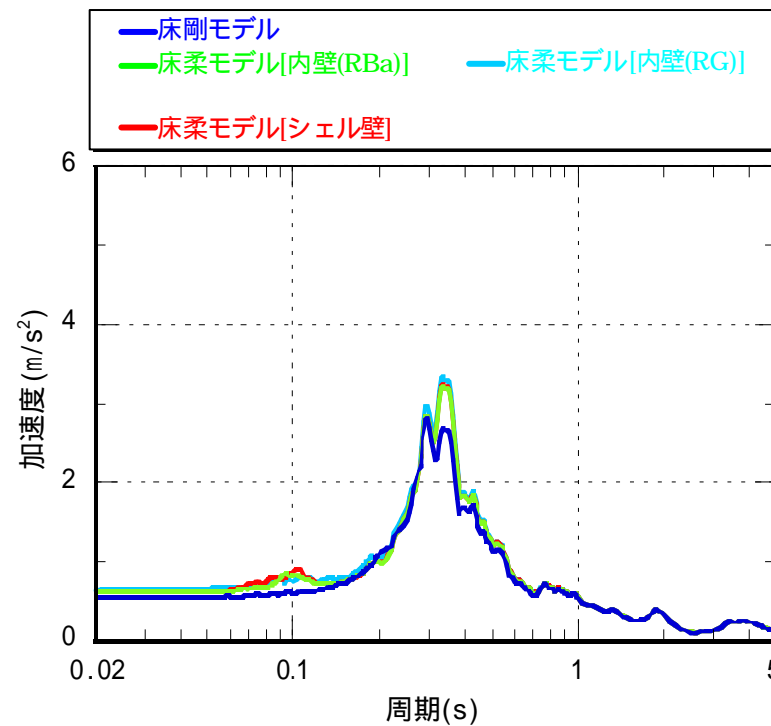
3階 (O.P. 26.9m)

図4-15(2) 床応答スペクトル (NS方向 h=0.05)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (NS方向)



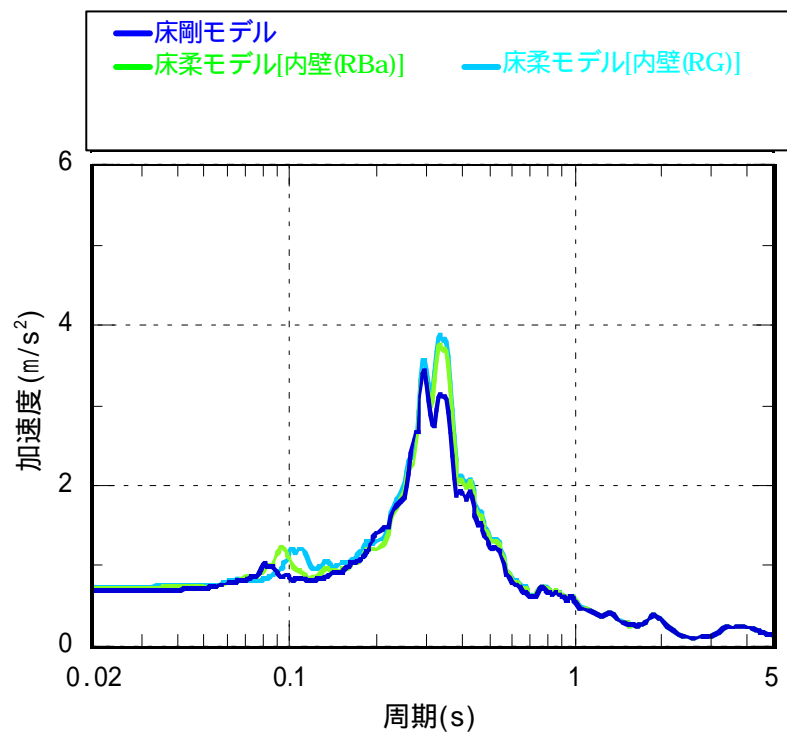
4階 (O.P. 32.3m)



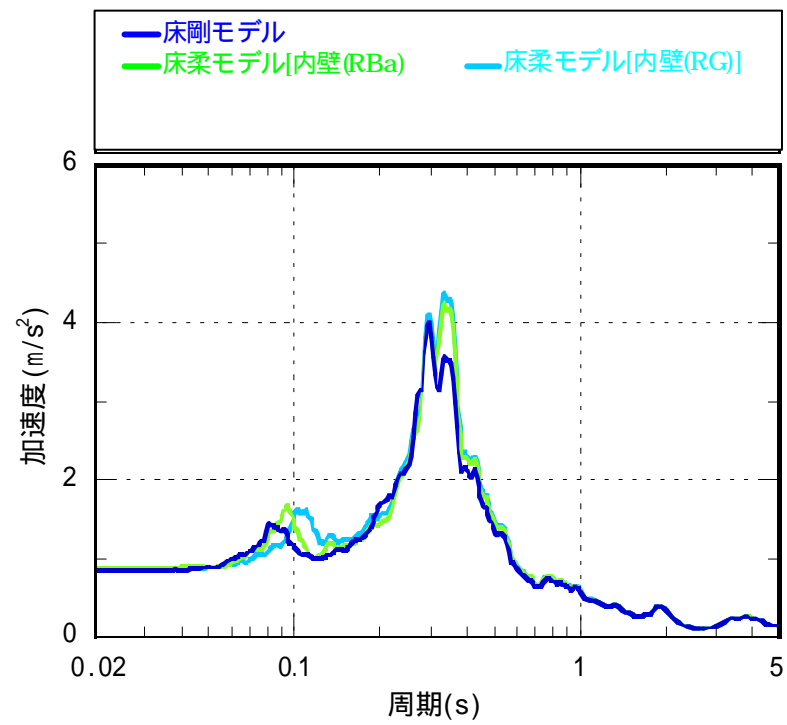
5階 (O.P. 39.92m)

図4-15(3) 床応答スペクトル (NS方向 h=0.05)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (NS方向)



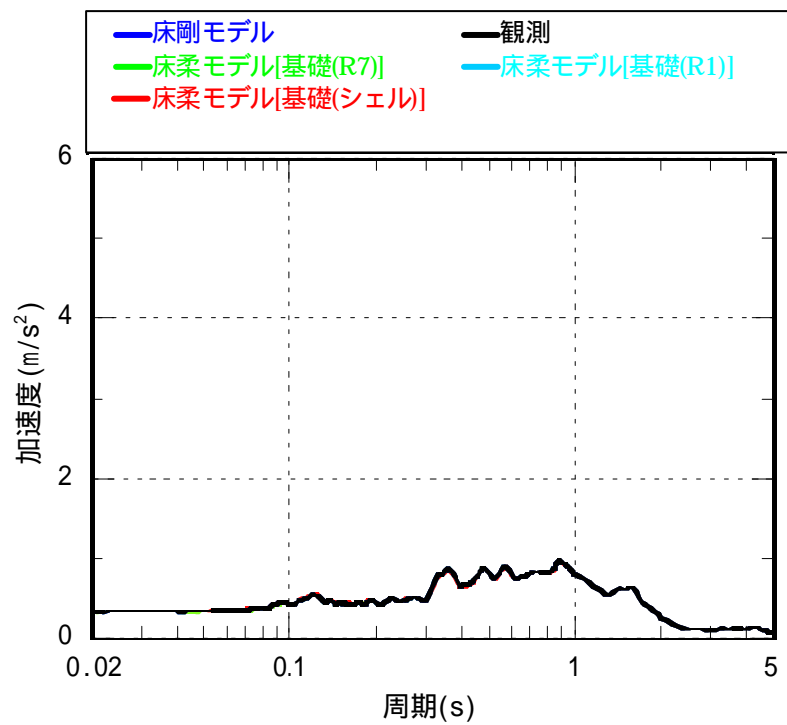
CR階 (O.P. 47.82m)



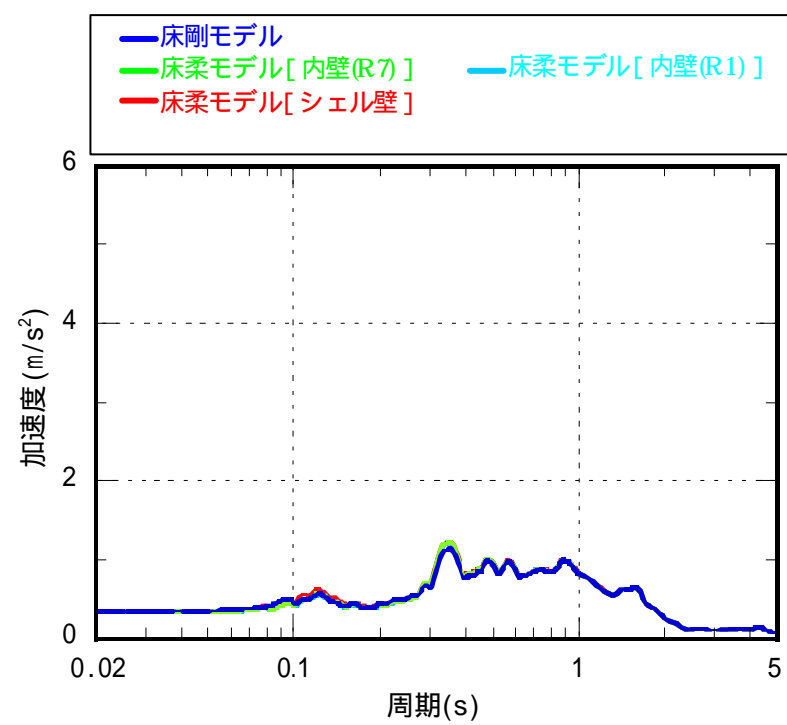
屋根 (O.P. 55.72m)

図4-15(4) 床応答スペクトル (NS方向 h=0.05)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (EW方向)



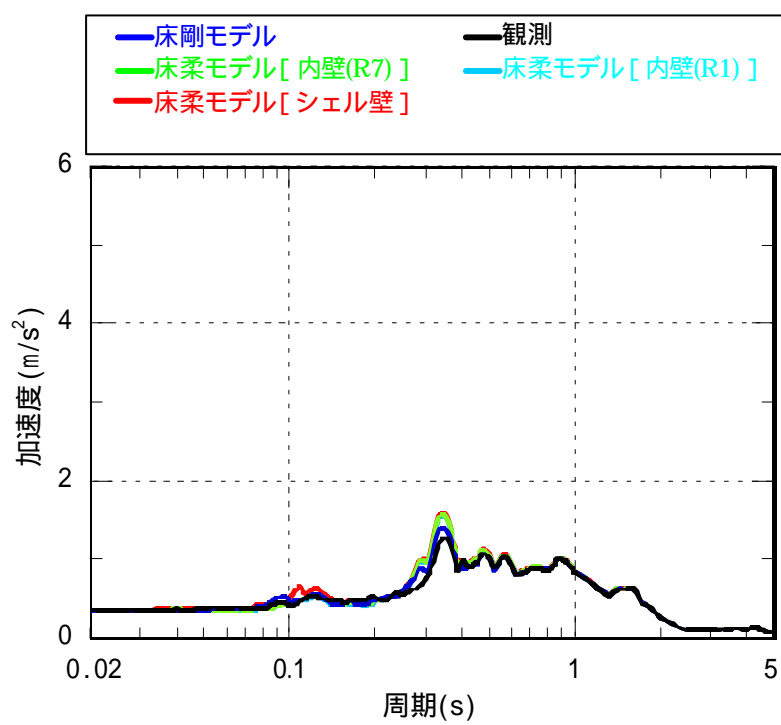
基礎版上 (O. P. -2.06m)



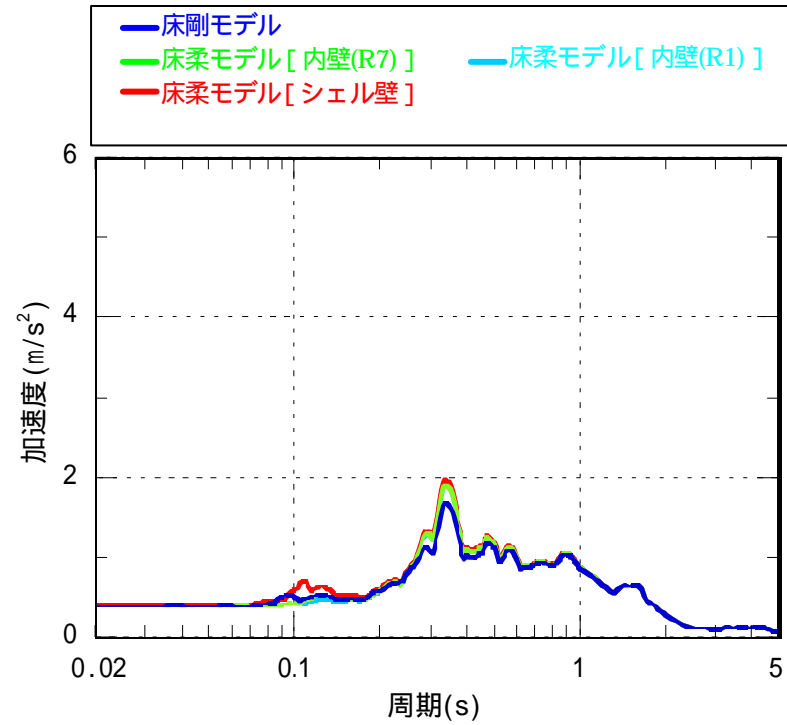
1階 (O. P. 10.2m)

図4-16(1) 床応答スペクトル (EW方向 h=0.05)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (EW方向)



2階 (O. P. 18.7m)



3階 (O. P. 26.9m)

図4-16(2) 床応答スペクトル (EW方向 h=0.05)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (EW方向)

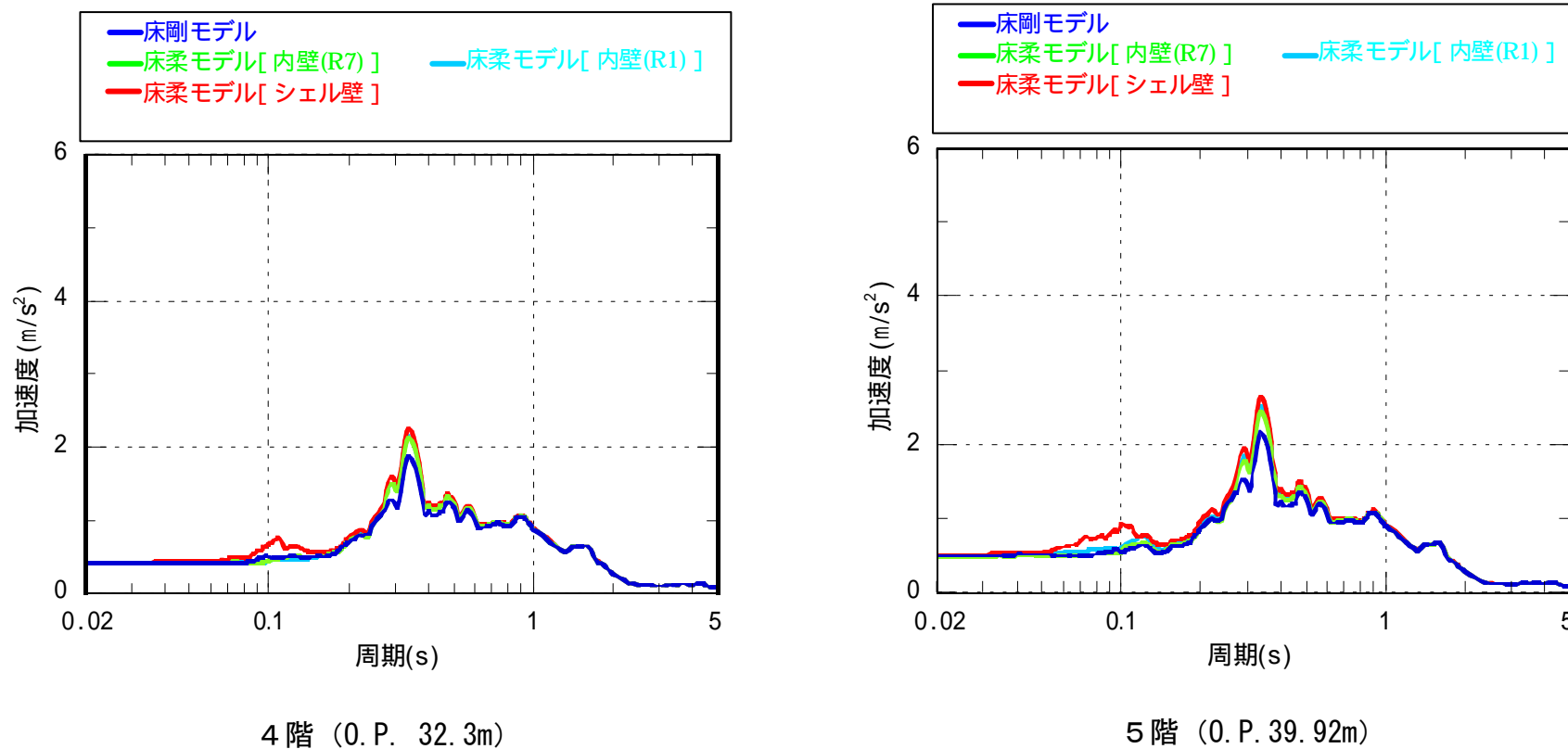


図4-16(3) 床応答スペクトル (EW方向 h=0.05)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認 (EW方向)

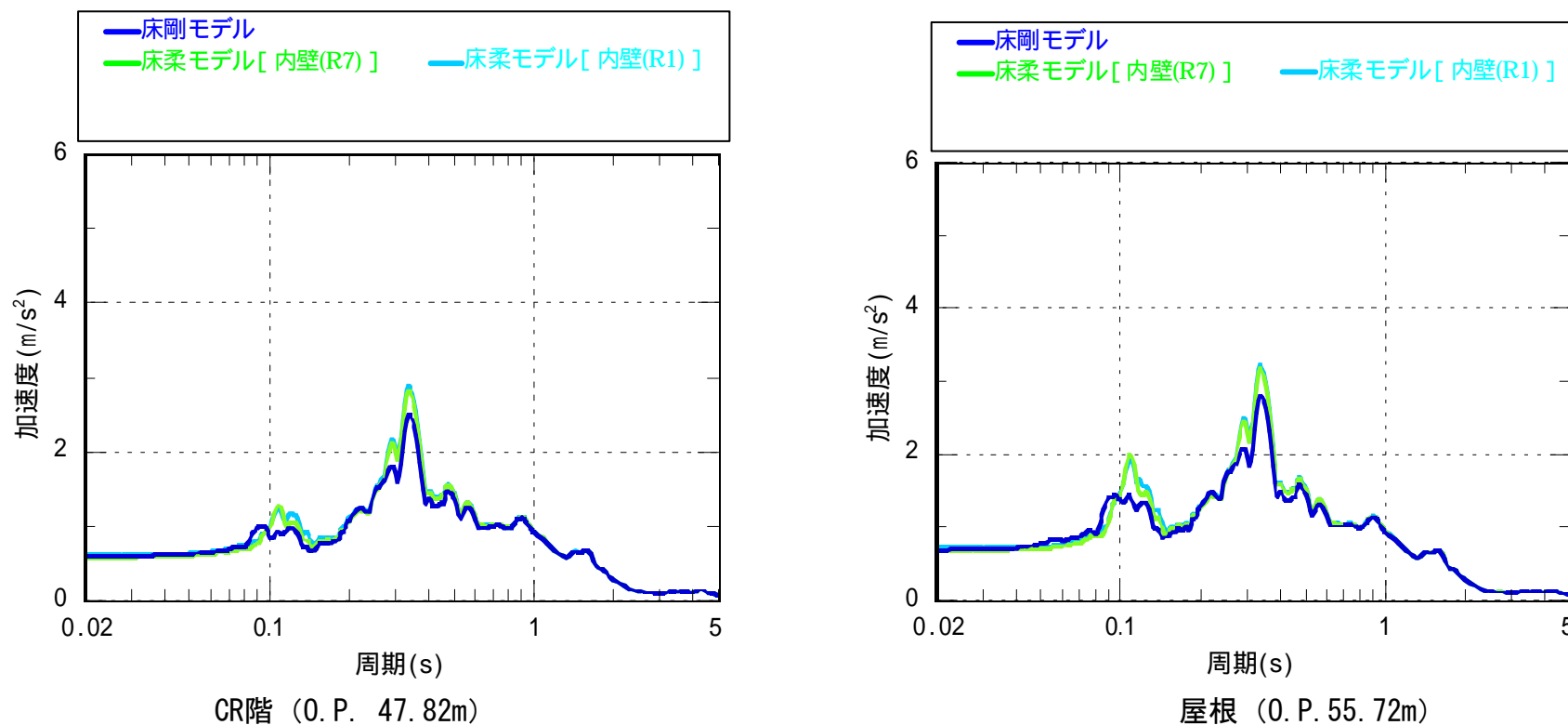


図4-16(4) 床応答スペクトル (EW方向 h=0.05)

新潟県中越沖地震を踏まえた地震応答解析モデルの妥当性確認

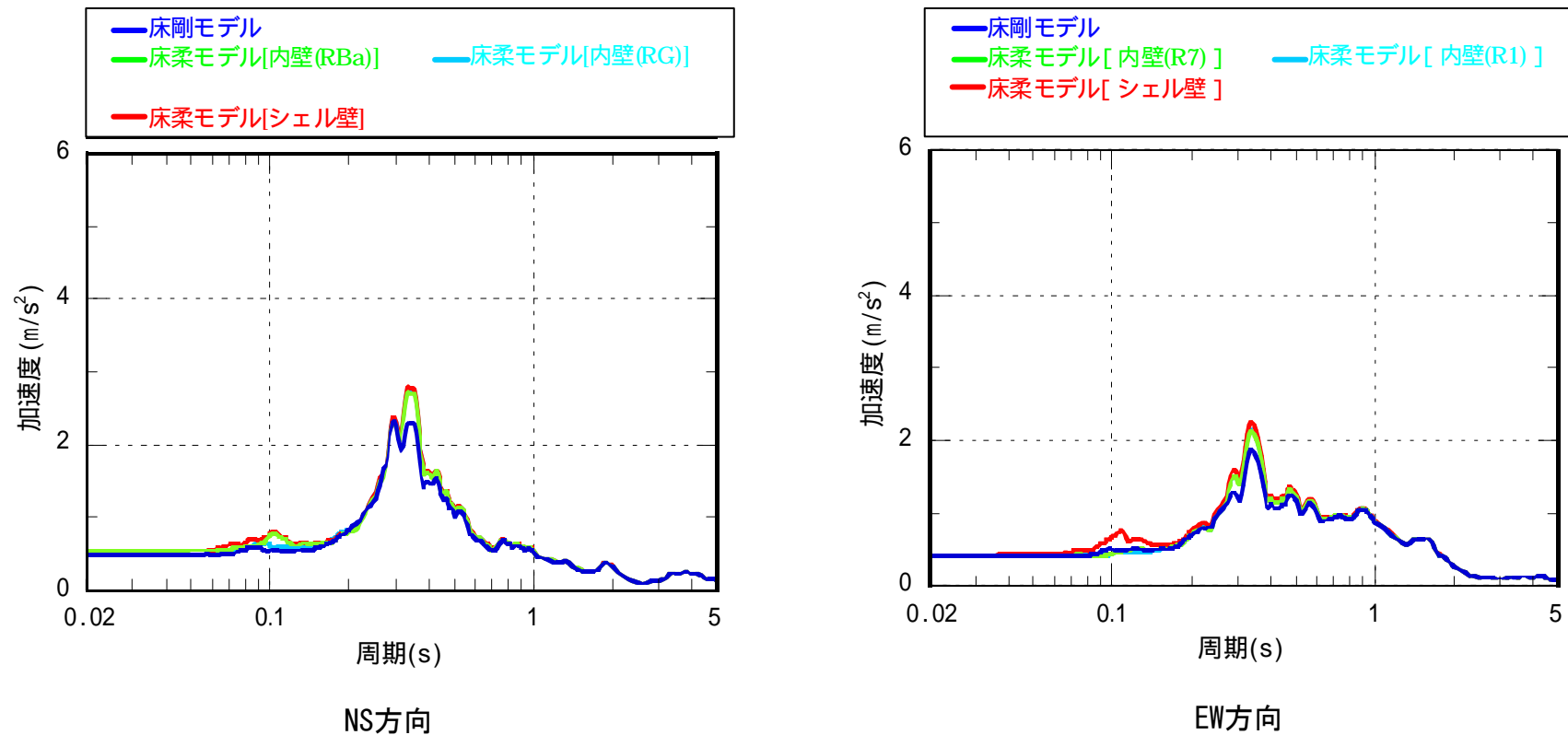


図4-16(5) 床応答スペクトル 4階 (O.P. 32.3m) (h=0.05) (再掲)

観測記録によるシミュレーション解析結果から

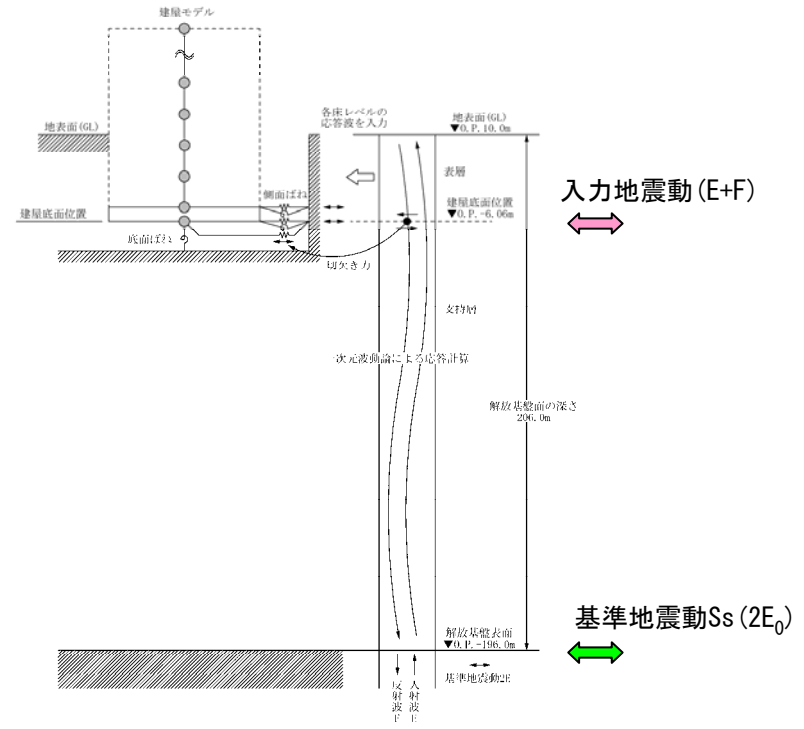
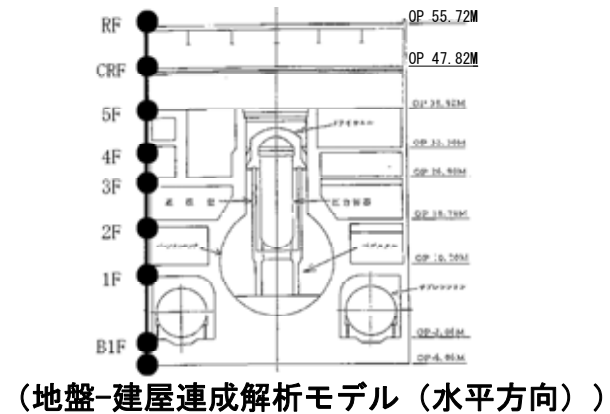
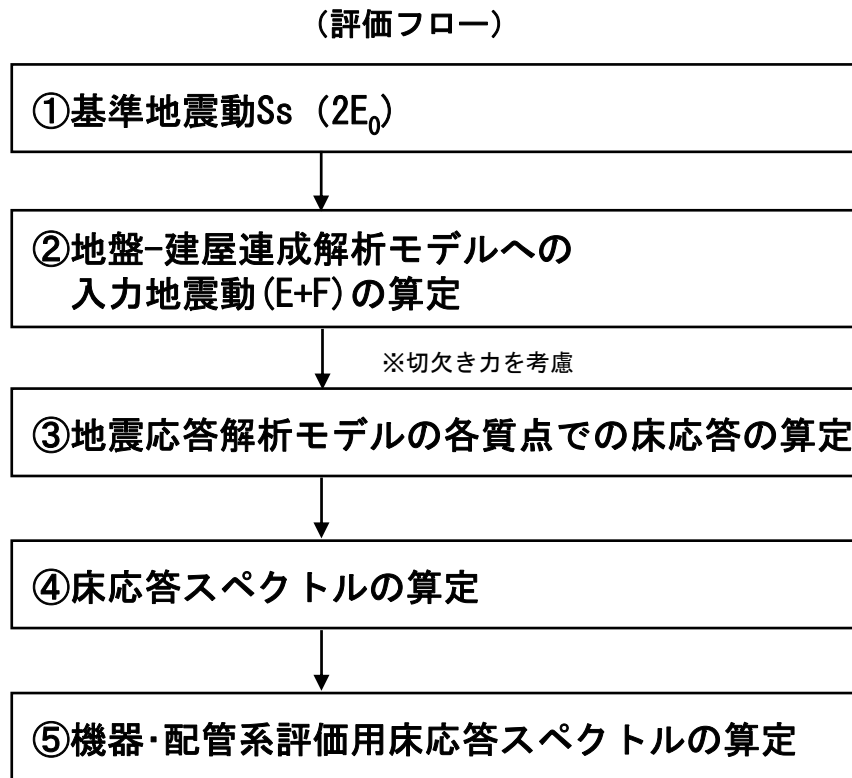
- ・ 床剛モデルの解析結果は、観測記録と概ね整合している。
- ・ 床柔モデルの解析結果は、床剛モデルと概ね良い対応を示し、床柔モデルの場合であっても、柏崎刈羽原子力発電所4号機の間階位置で見られたような特異な応答性状（周期0.1秒及び0.5秒に顕著なピーク）が現れていないことを確認した。

I . 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

5 地震応答解析結果

地震応答解析（水平方向）

水平方向の地震応答解析の評価フローを示す。



(入力地震動の概念図（水平方向）)

図5-1 水平方向の地震応答解析の評価フロー

地震応答解析（解放基盤表面に定義した基準地震動 S_s ）

①基準地震動 S_s ($2E_0$)

解放基盤表面に定義した基準地震動 S_s の加速度時刻歴波形を図5-2に、応答スペクトルを図5-3に示す。

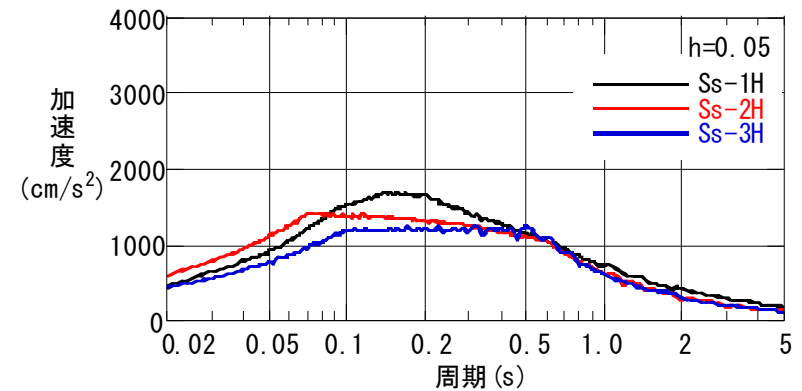
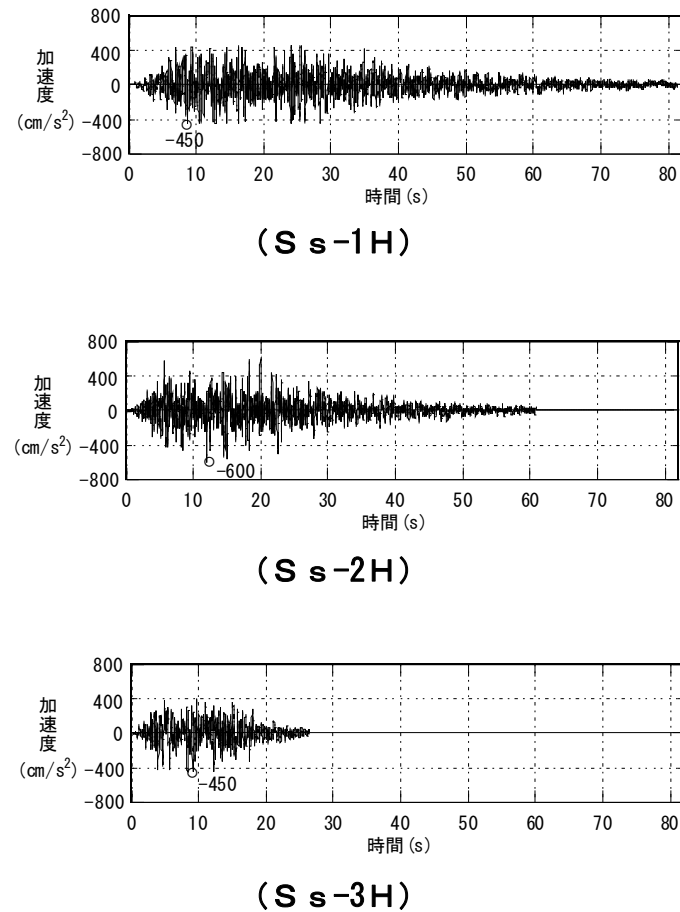


図5-3 基準地震動の応答スペクトル

図5-2 加速度時刻歴波形（水平方向）

地震応答解析（入力地震動）

②地盤-建屋連成解析モデルへの
入力地震動(E+F)の算定

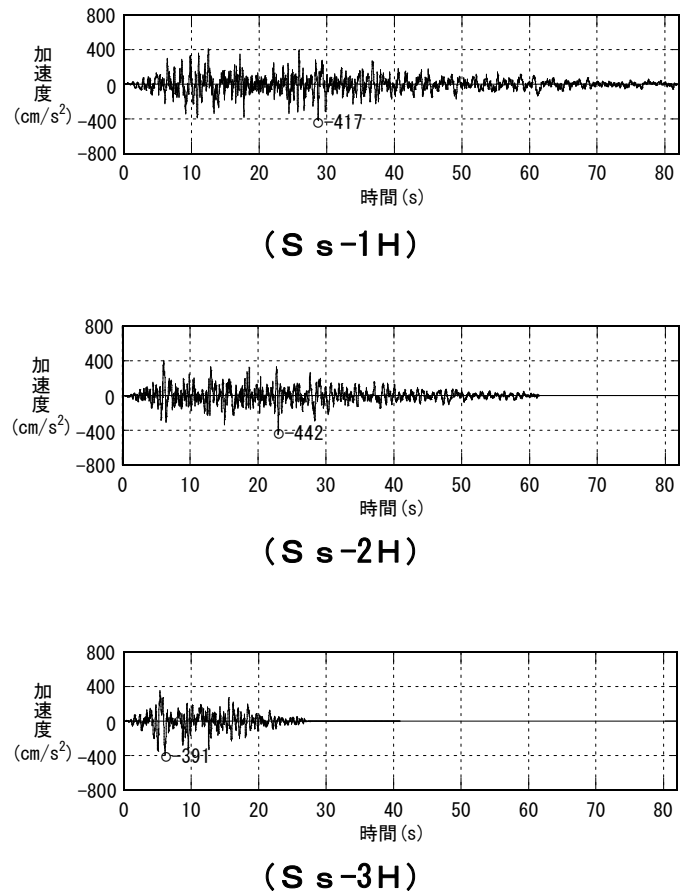


図5-4 加速度時刻歴波形

一次元波動論に基づく地盤応答解析を行い原子炉建屋基礎底面位置での入力地震動の加速度時刻歴波形を図5-4に、応答スペクトルを図5-5(1)に、また、参考として、入力地震動の応答スペクトルと基準地震動の応答スペクトルの比較を図5-5(2)に示す。

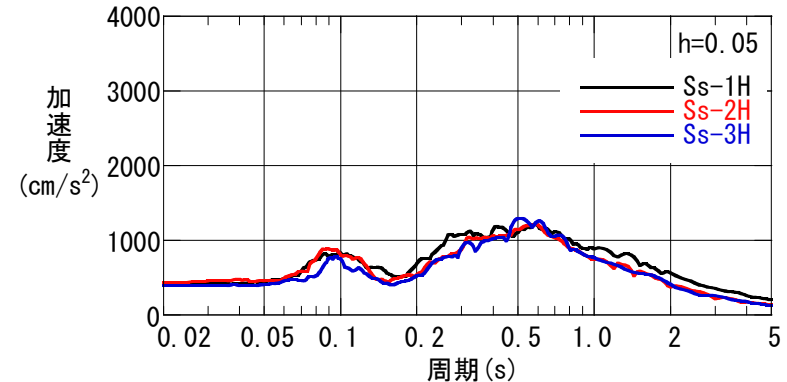


図5-5(1) 入力地震動の応答スペクトル
(基礎底面E+F)

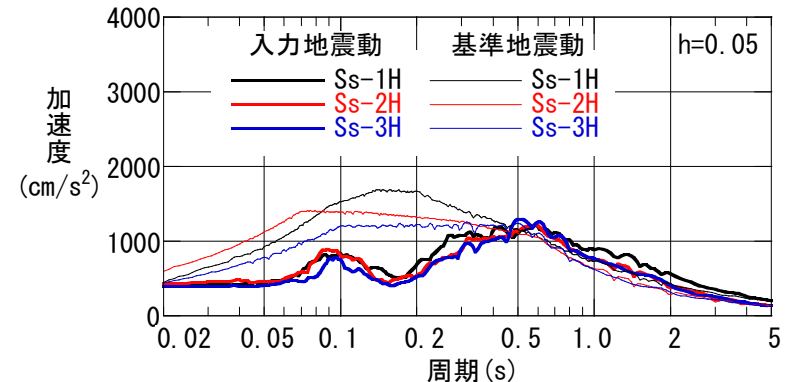


図5-5(2) 入力地震動の応答スペクトルと
基準地震動の応答スペクトルの比較

地震応答解析（床応答スペクトル（NS方向））

④床応答スペクトルの算定

地盤-建屋連成解析モデルによる地震応答解析結果に基づく応答スペクトルを図5-6, 図5-7に示す。

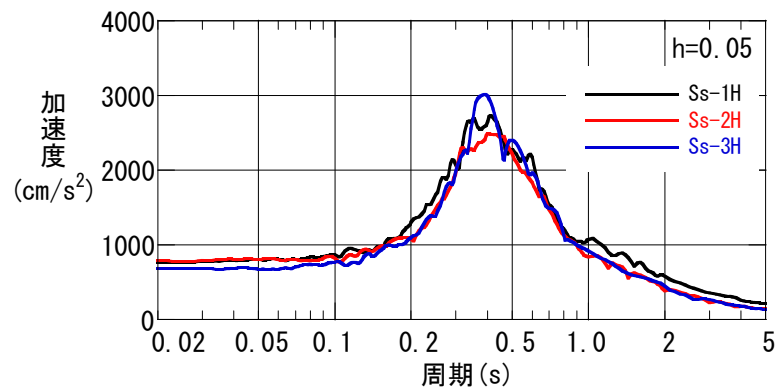


図5-6 床応答スペクトル
(オペレーティングフロア : 0. P. 39. 92m/NS方向)

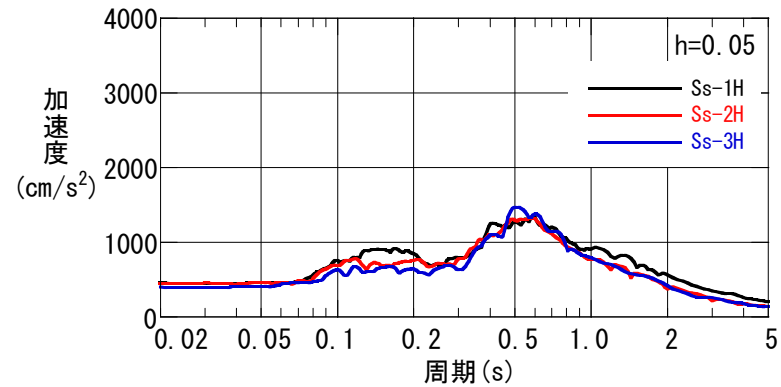
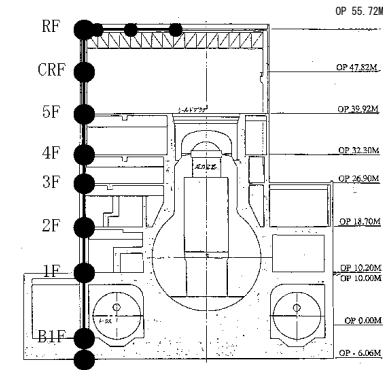
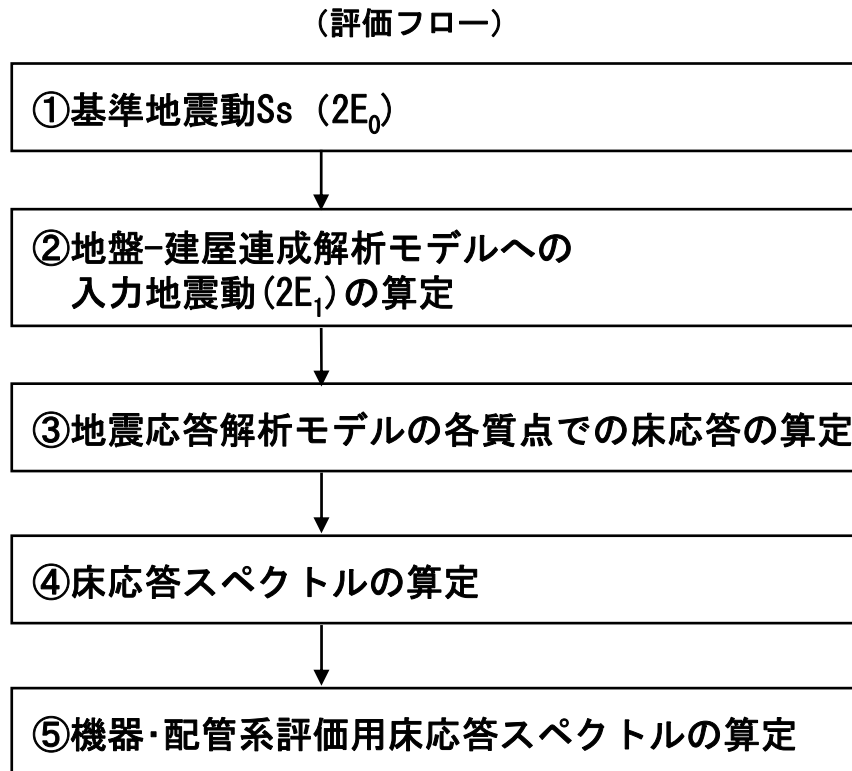


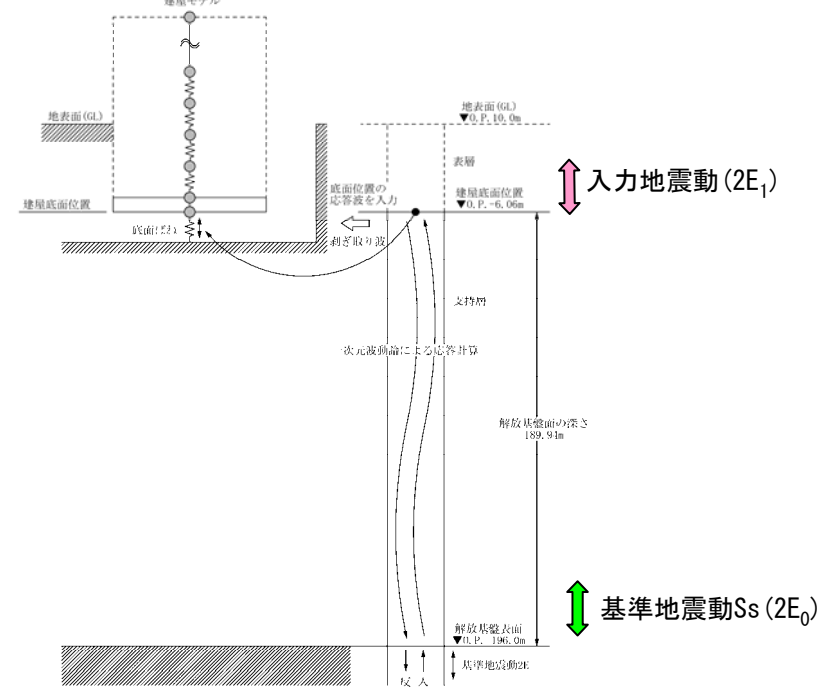
図5-7 床応答スペクトル
(基礎上面 : 0. P. -2. 06m/NS方向)

地震応答解析（鉛直方向）

鉛直方向の地震応答解析の評価フローを示す。



(地盤-建屋連成解析モデル（鉛直方向）)



(入力地震動の概念図（鉛直方向）)

図5-8 鉛直方向の地震応答解析の評価フロー

地震応答解析（解放基盤表面に定義した基準地震動S_s）

①基準地震動S_s (2E₀)

解放基盤表面に定義した基準地震動S_sの加速度時刻歴波形を図5-9に、応答スペクトルを図5-10に示す。

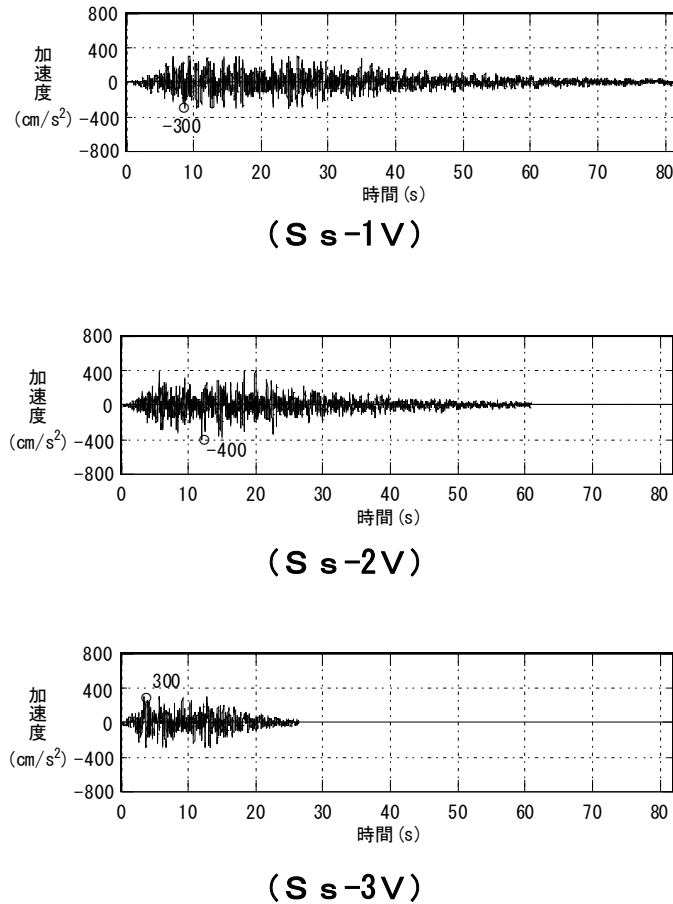


図5-9 加速度時刻歴波形（鉛直方向）

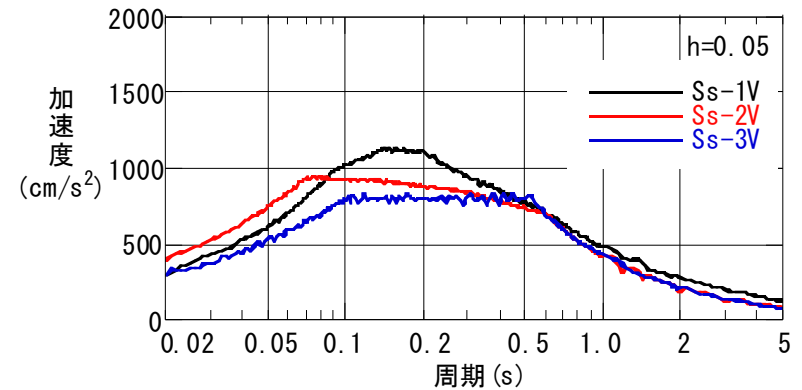


図5-10 基準地震動の応答スペクトル（鉛直方向）

地震応答解析（入力地震動）

②地盤-建屋連成解析モデルへの
入力地震動(2E₁)の算定

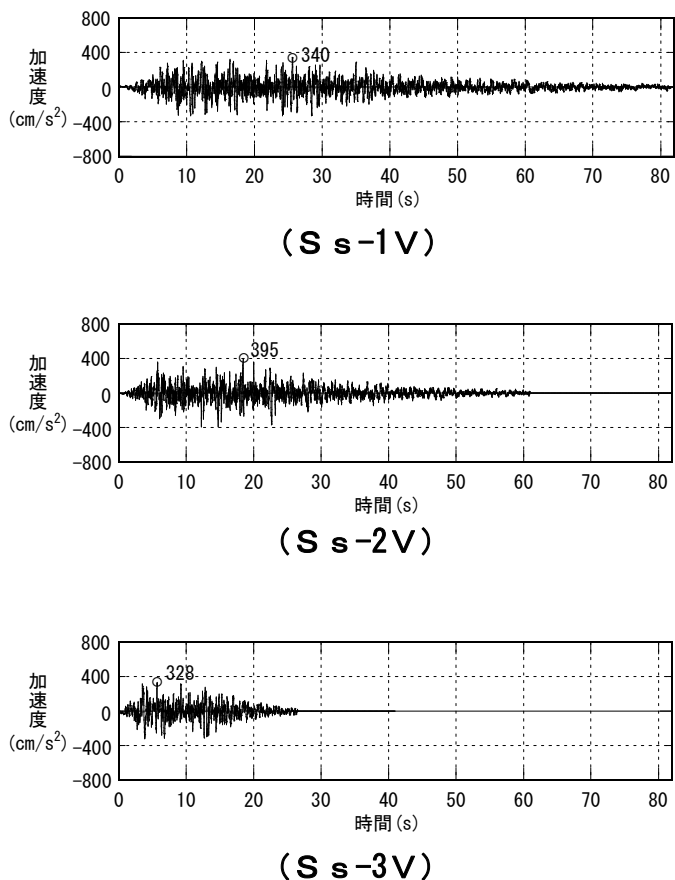


図5-11 加速度時刻歴波形（鉛直方向）

一次元波動論に基づく地盤応答解析を行い原子炉建屋基礎底面位置での入力地震動の加速度時刻歴波形を図5-11に、応答スペクトルを図5-12(1)に、また、参考として、入力地震動の応答スペクトルと基準地震動の応答スペクトルの比較を図5-12(2)に示す。

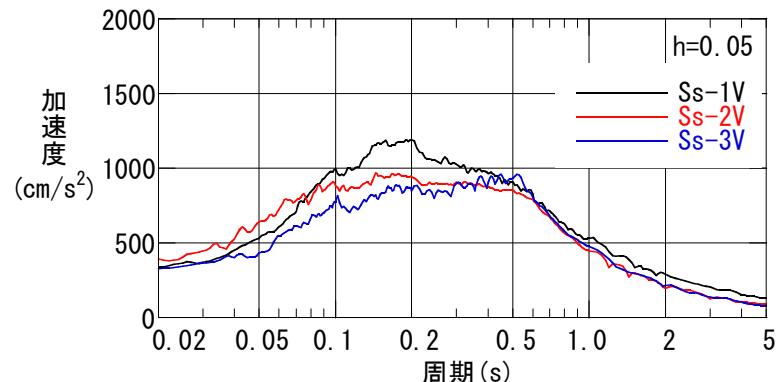


図5-12(1) 入力地震動の応答スペクトル
（基礎底面2E/鉛直方向）

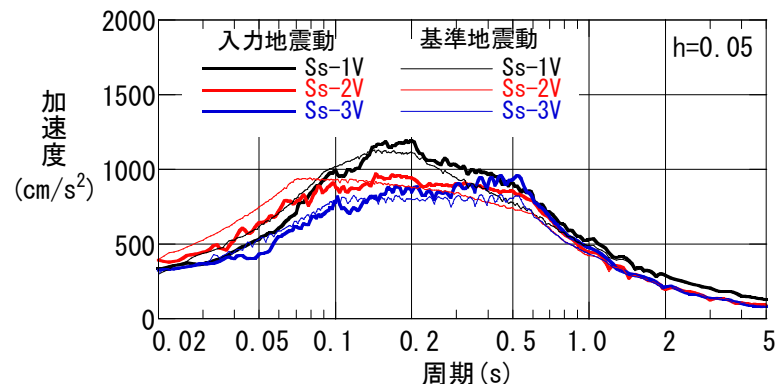


図5-12(2) 入力地震動の応答スペクトルと
基準地震動の応答スペクトルの比較

地震応答解析（床応答スペクトル）

④床応答スペクトルの算定

地盤-建屋連成解析モデルによる地震応答解析結果に基づく応答スペクトルを図5-13、図5-14に示す。

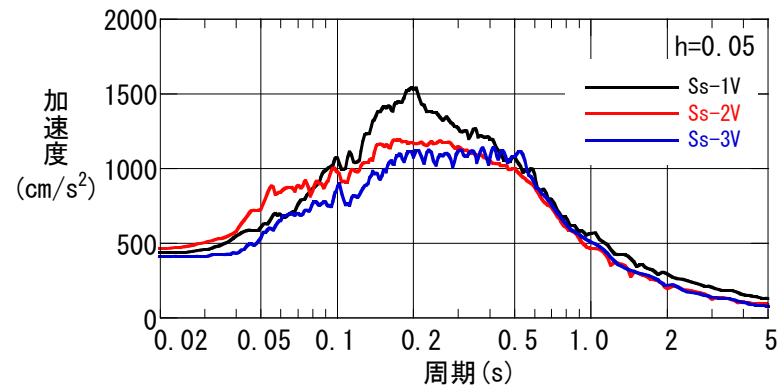


図5-13 床応答スペクトル
(オペレーティングフロア： O. P. 39.92m/鉛直方向)

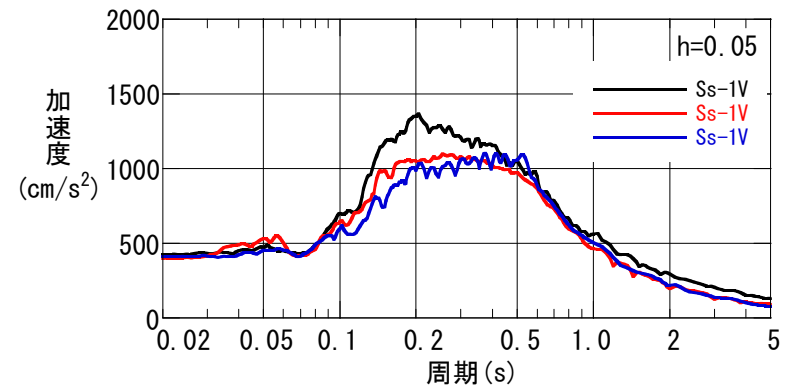


図5-14 床応答スペクトル
(基礎上面： O. P. -2.06m/鉛直方向)

固有値解析結果（水平）

表5-1 固有値（固有周期，固有振動数）
および刺激係数（水平方向，NS方向）

(Ss-1H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.396	2.53	1.755	地盤建屋連成一次
2	0.177	5.64	-0.921	
3	0.078	12.85	0.219	
4	0.060	16.59	-0.016	
5	0.051	19.73	-0.059	

(Ss-2H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.390	2.56	1.759	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.73	-0.932	
3	0.078	12.88	0.228	
4	0.060	16.63	-0.016	
5	0.051	19.74	-0.061	

(Ss-3H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.396	2.53	1.755	地盤建屋連成一次
2	0.177	5.64	-0.921	
3	0.078	12.85	0.219	
4	0.060	16.59	-0.016	
5	0.051	19.73	-0.059	

表5-2 固有値（固有周期，固有振動数）
および刺激係数（水平方向，EW方向）

(Ss-1H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.377	2.65	1.774	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.72	-0.980	
3	0.089	11.26	0.225	
4	0.065	15.41	0.032	
5	0.050	19.87	-0.063	

(Ss-2H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.372	2.69	1.780	地盤建屋連成一次
2	0.172	5.80	-0.995	
3	0.089	11.29	0.236	
4	0.065	15.44	0.032	
5	0.050	19.87	-0.065	

(Ss-3H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.377	2.65	1.774	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.72	-0.980	
3	0.089	11.26	0.225	
4	0.065	15.41	0.032	
5	0.050	19.87	-0.063	

固有値解析結果（鉛直）

表5-3 固有値（固有周期，固有振動数）
および刺激係数（鉛直方向）

(Ss-1V)

次数	固有周期(s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.292	3.43	3.474	屋根トラス一次
2	0.227	4.41	-2.571	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.108	
4	0.045	22.39	-0.266	
5	0.039	25.65	0.215	

(Ss-2V)

次数	固有周期(s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.292	3.43	3.308	屋根トラス一次
2	0.223	4.49	-2.410	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.113	
4	0.045	22.40	-0.277	
5	0.039	25.65	0.224	

(Ss-3V)

次数	固有周期(s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数	備考
1	0.292	3.43	3.474	屋根トラス一次
2	0.227	4.41	-2.571	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.108	
4	0.045	22.39	-0.266	
5	0.039	25.65	0.215	

地震応答解析結果 (NS方向)

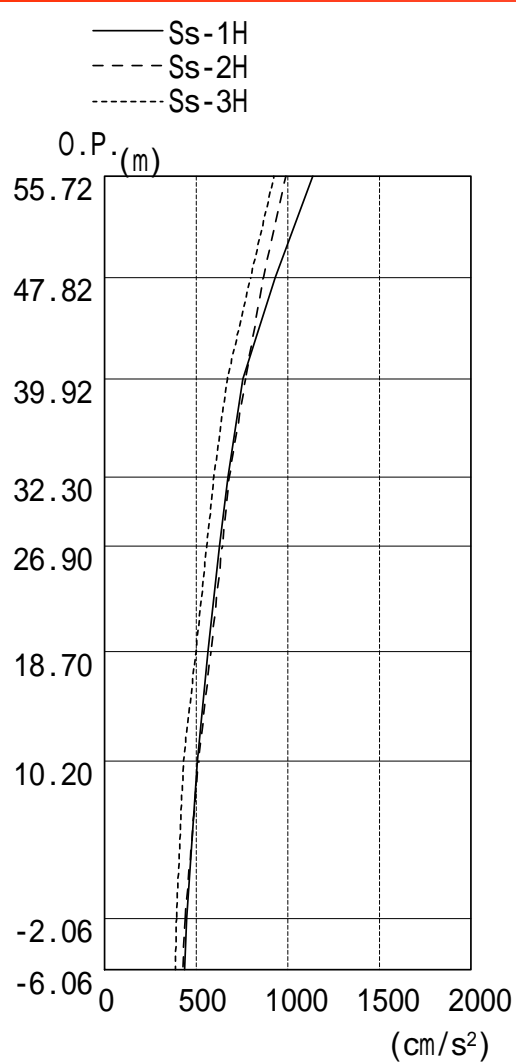


図5-15 最大応答加速度
(NS方向)

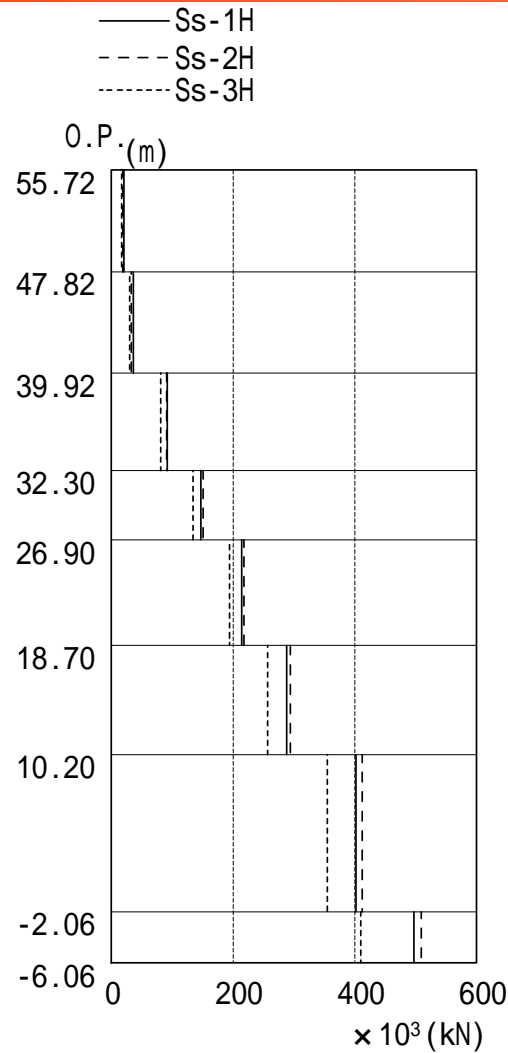


図5-16 最大応答せん断力
(NS方向)

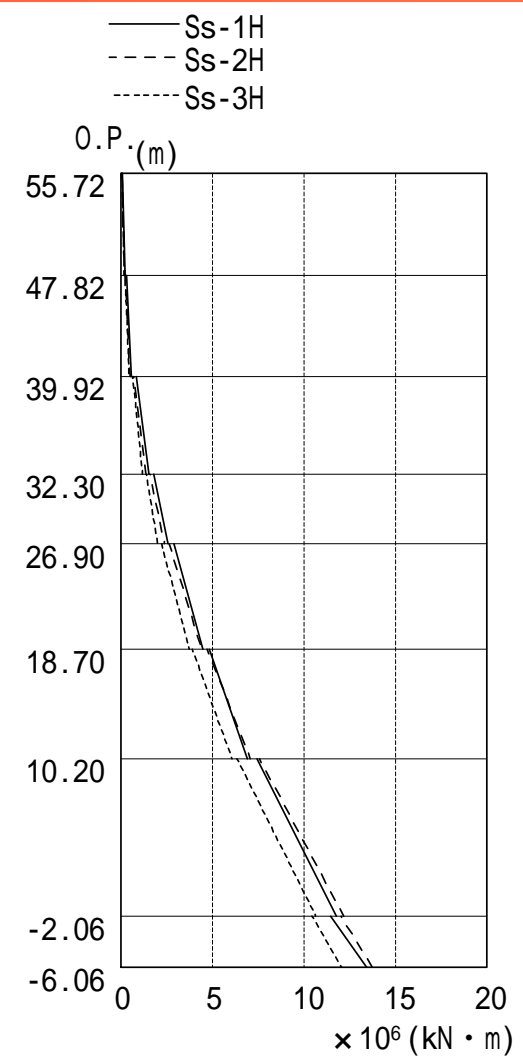


図5-17 最大応答曲げモーメント
(NS方向)

地震応答解析結果 (EW方向)

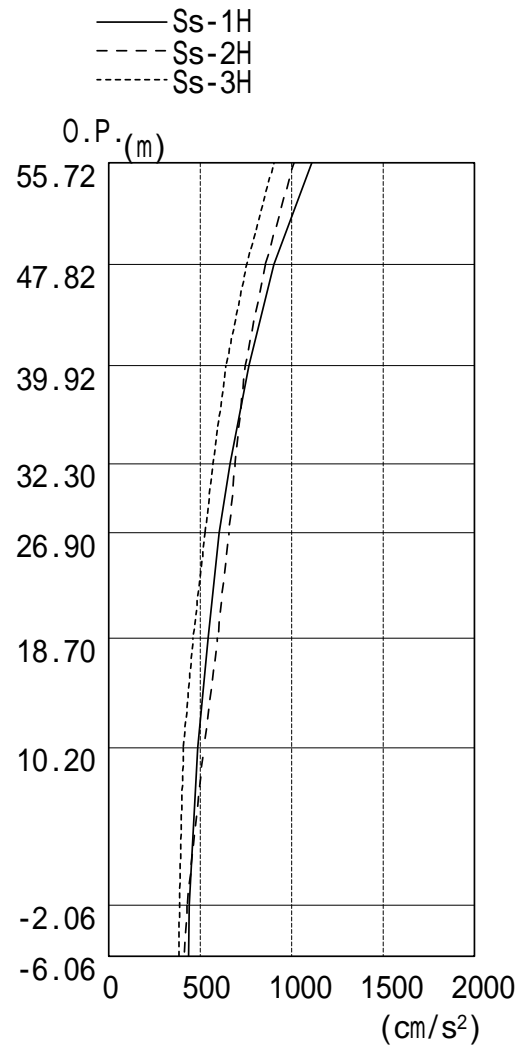


図5-18 最大応答加速度
(EW方向)

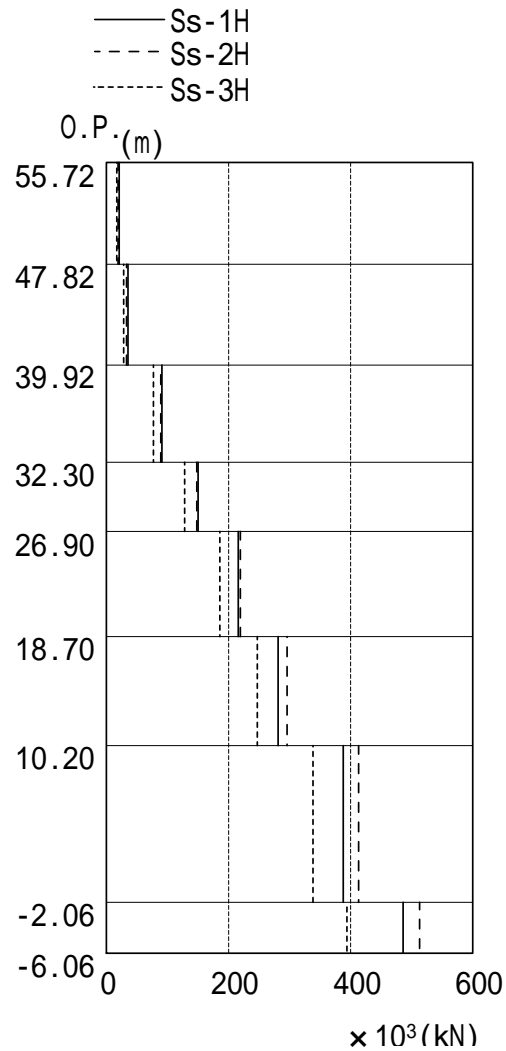


図5-19 最大応答せん断力
(EW方向)

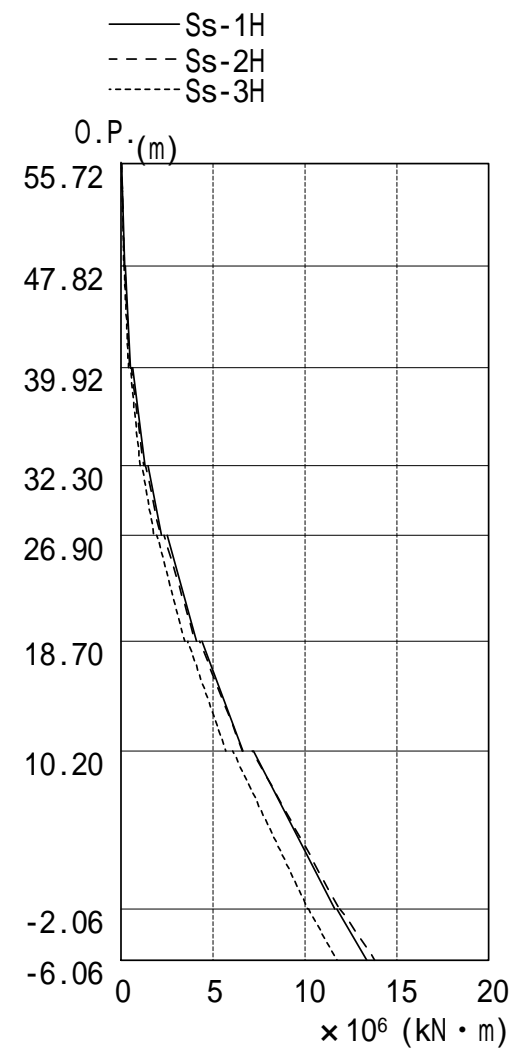


図5-20 最大応答曲げモーメント
(EW方向)

地震応答解析結果（鉛直方向）

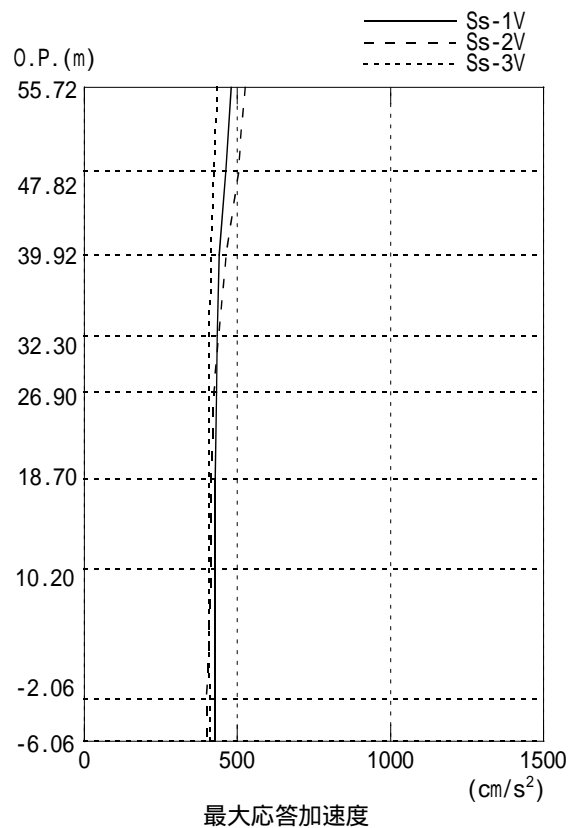


図5-21 最大応答加速度
(鉛直方向)

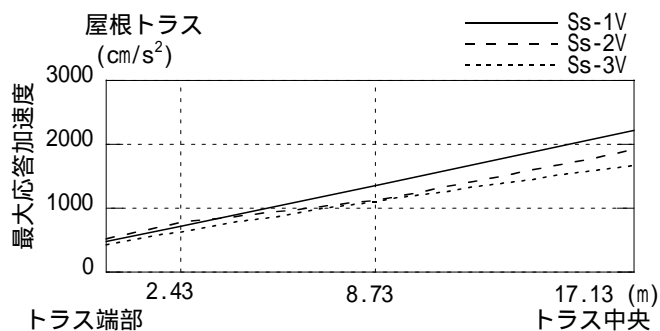


図5-22 最大応答加速度
(鉛直方向：屋根トラス)

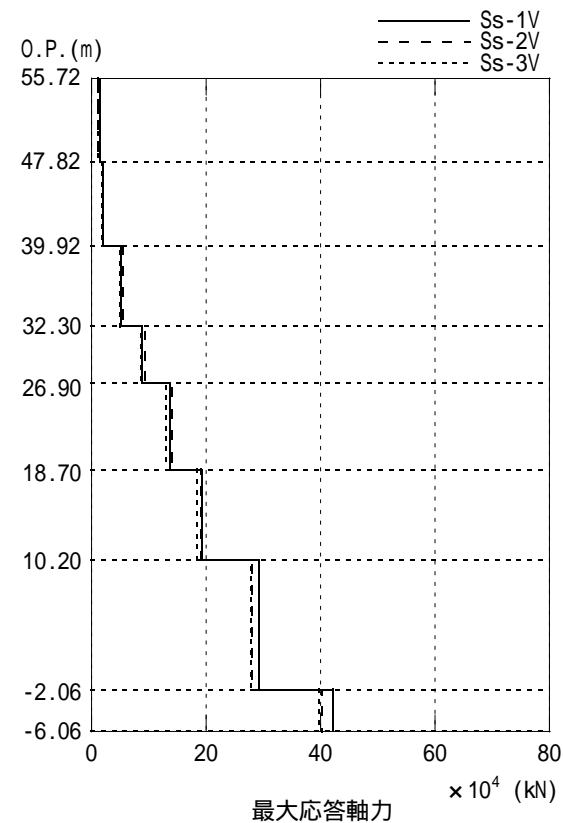


図5-23 最大応答軸力
(鉛直方向)

基礎浮上りの検討結果（接地率）

基礎浮上り非線形を考慮した地震応答解析結果の適用性を確認するため、地震応答解析から得られる最大転倒モーメントを用いて算出した原子炉建屋の接地率を表5-4に示す。

表5-4 接地率

(単位：%)

	S _s -1	S _s -2	S _s -3
NS方向	74.6	72.7	82.0
EW方向	87.8	85.7	95.4

建物の接地率は、JEAG4601-1991に基づき、地震応答解析の結果得られた最大転倒モーメントを用い、地反力を三角形分布と仮定して算出した。

接地率は下式により算出

$$\eta = \frac{1}{2} \left(3 - \frac{M}{M_0} \right) = 3 \left(\frac{1}{2} - \frac{M}{WL} \right)$$

- η：接地率（>1.0の場合は=100%とする。）
- M：最大転倒モーメント（基礎下端の最大応答モーメント）
- M₀：浮上り限界転倒モーメント
- W：建屋総重量（鉛直地震力は無視）
- L：加振方向の基礎長さ

接地率は、JEAG4601-1991追補版において基礎浮上り非線形性を考慮した地震応答解析の適用条件とされている「接地率 65%以上」をいずれも満足する。

参考にW（建屋総重量）に浮力を考慮した際の接地率を表5-5に示す。なお、水位は、原子炉建屋近傍にあるサブドレン設備の水中ポンプの起動レベル（O.P. -2.4m）とする。

表5-5 接地率（参考）

(単位：%)

	S _s -1	S _s -2	S _s -3
NS方向	67.2	65.2	75.3
EW方向	81.7	79.5	90.1

I . 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

6 耐震安全性評価結果

耐震安全性評価結果（耐震壁）

耐震安全性の評価は、基準地震動 S_s による各層の鉄筋コンクリート耐震壁の最大応答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。
地震応答解析から得られる最大せん断応答ひずみを表6-1に示す。

表6-1 耐震壁の最大応答せん断ひずみ一覧

基準地震動 S_s	NS方向		EW方向	
	最大応答 せん断ひずみ	部位	最大応答 せん断ひずみ	部位
$S_s - 1$	0.13×10^{-3}	1階	0.12×10^{-3}	5階
$S_s - 2$	0.13×10^{-3}	1階	0.12×10^{-3}	1階
$S_s - 3$	0.12×10^{-3}	1階	0.10×10^{-3}	1階

耐震安全性評価結果（耐震壁）

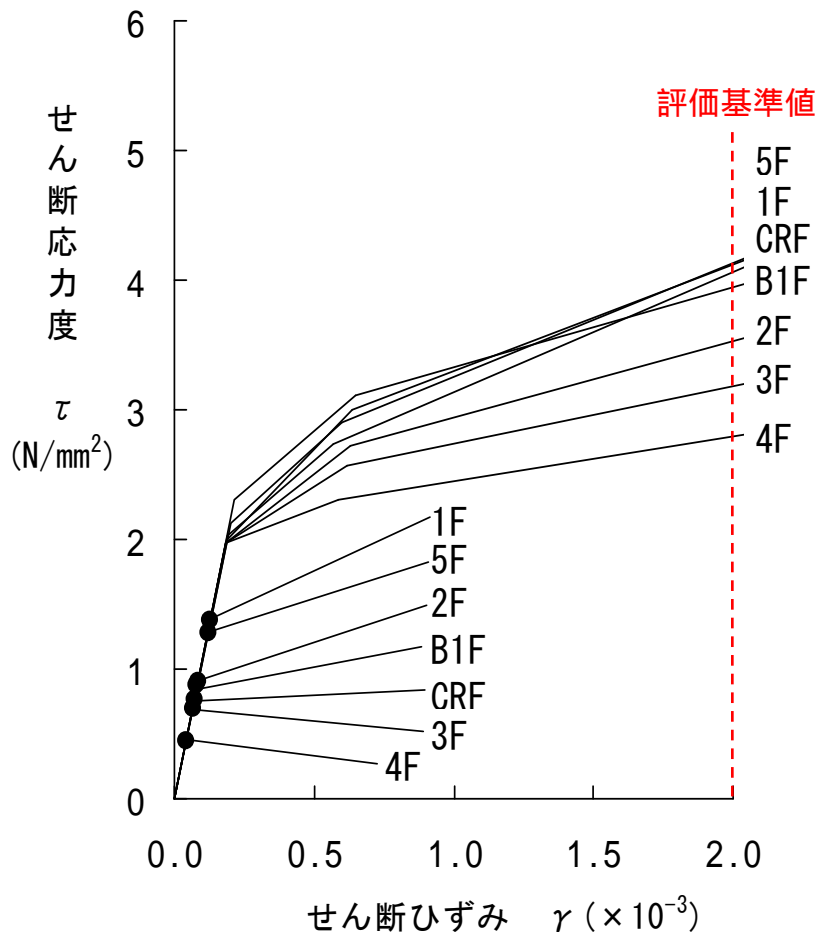


図6-1 せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(S s - 1 NS方向)

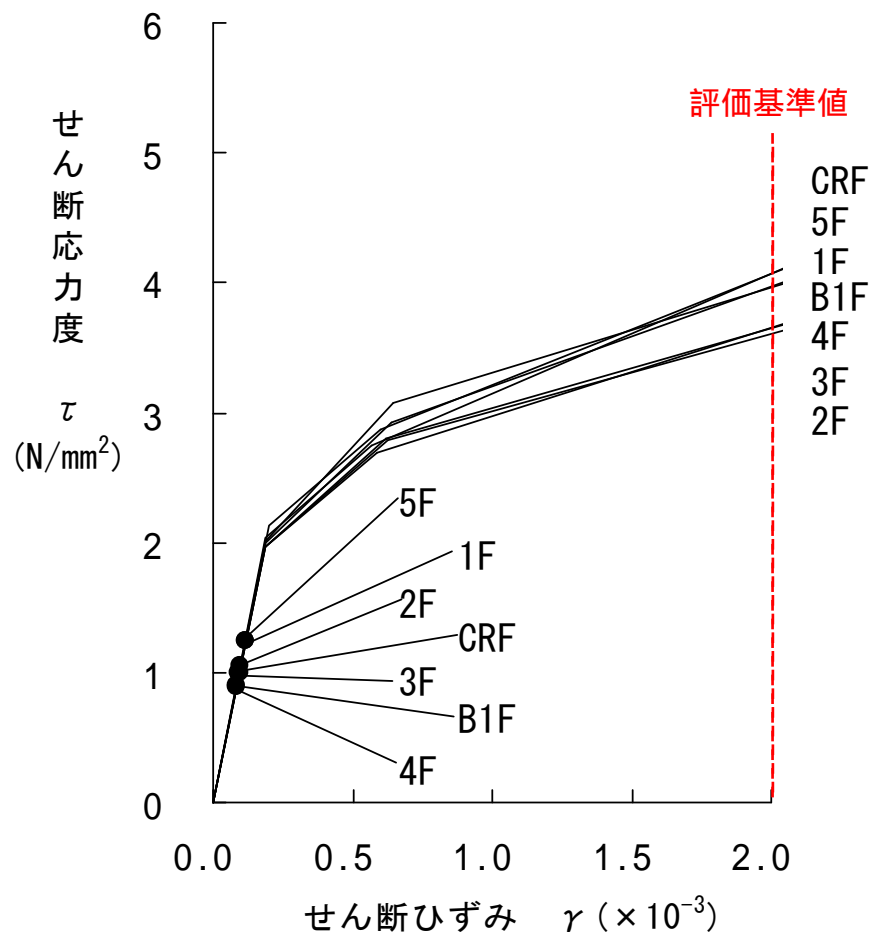


図6-2 せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(S s - 1 EW方向)

耐震安全性評価結果（耐震壁）

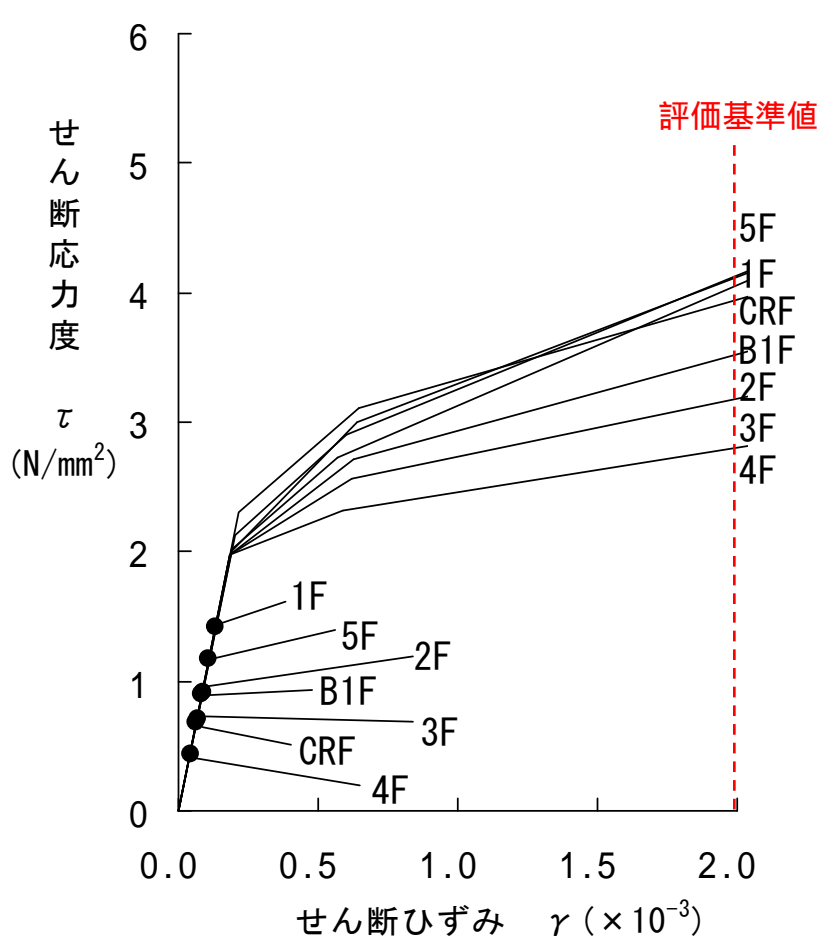


図6-3 せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(S s - 2 NS方向)

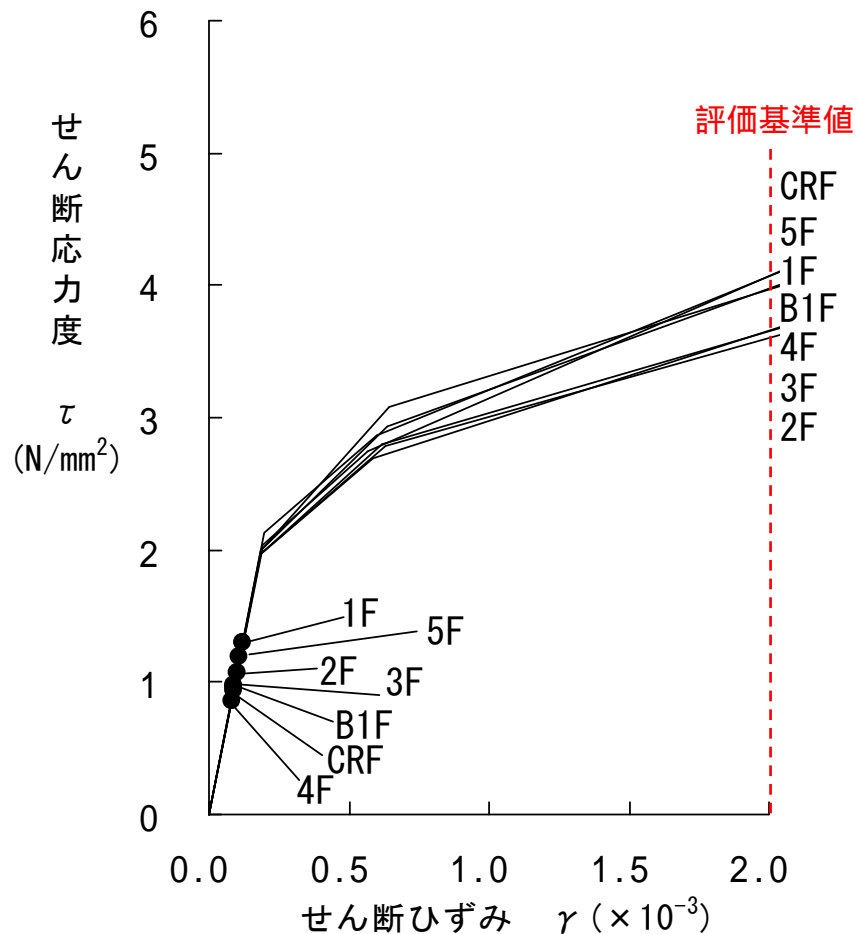


図6-4 せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(S s - 2 EW方向)

耐震安全性評価結果（耐震壁）

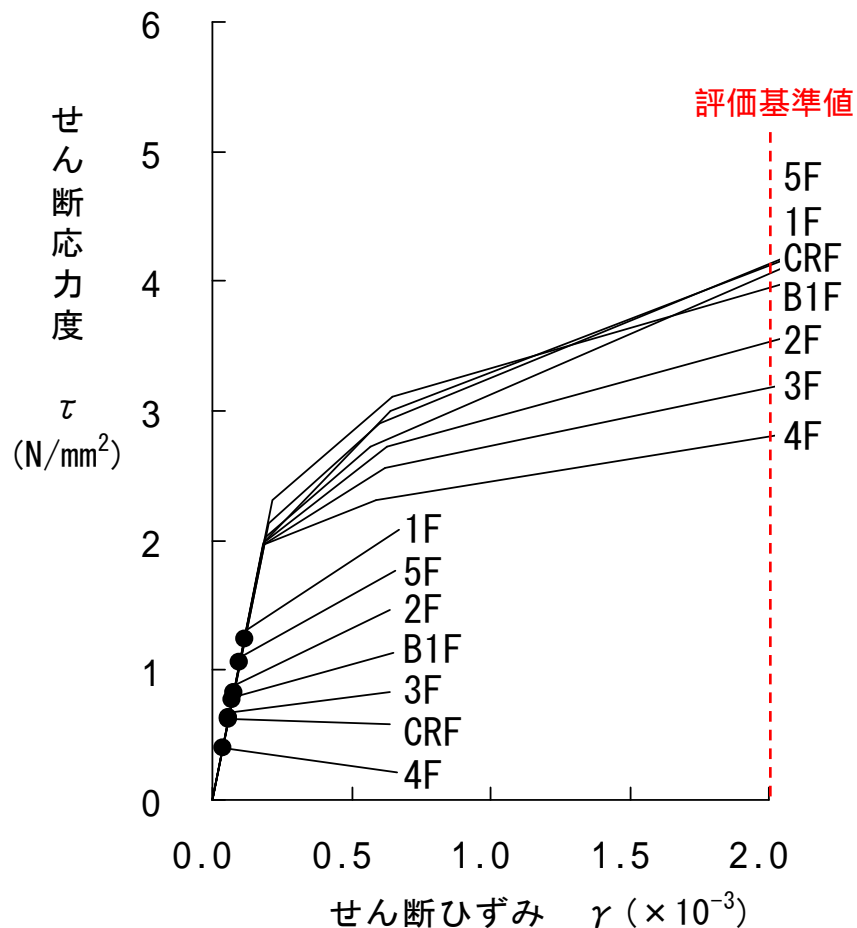


図6-5 せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(Ss-3 NS方向)

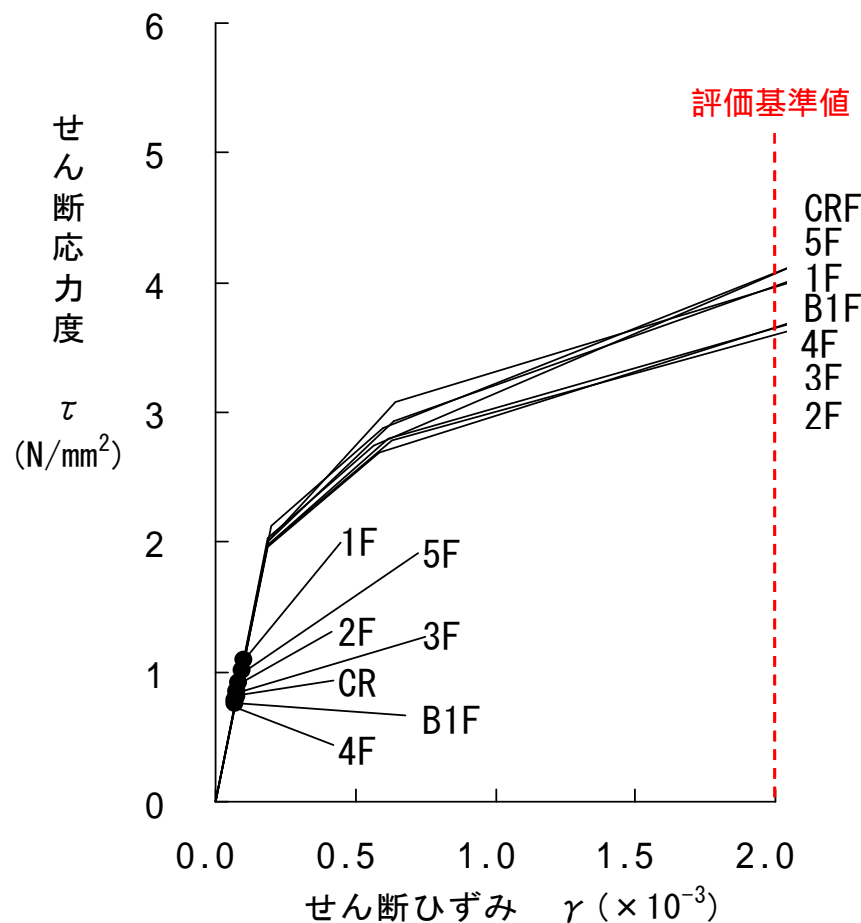


図6-6 せん断スケルトン曲線上の最大応答値
(Ss-3 EW方向)

耐震壁の最大応答せん断ひずみは、最大で 0.13×10^{-3} (Ss-2, NS方向, 1階)であり、評価基準値 (2.0×10^{-3}) を満たすことを確認した。

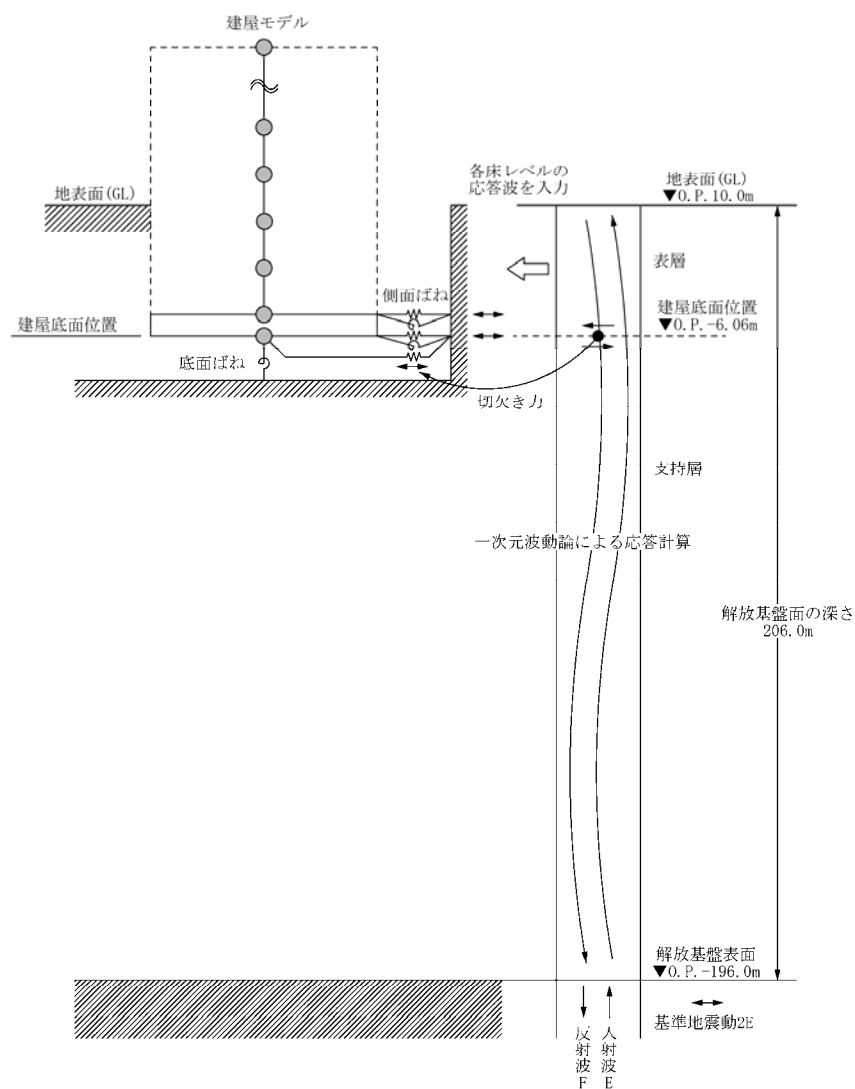
I . 安全上重要な建物・構築物の耐震安全性評価

7 補足説明

1. 入力地震動評価法の妥当性確認
2. 新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について
3. 地震応答解析モデルのパラメータスタディにおける床応答スペクトルに対する考察

1. 入力地震動評価法の妥当性確認

入力地震動の算定（水平方向）



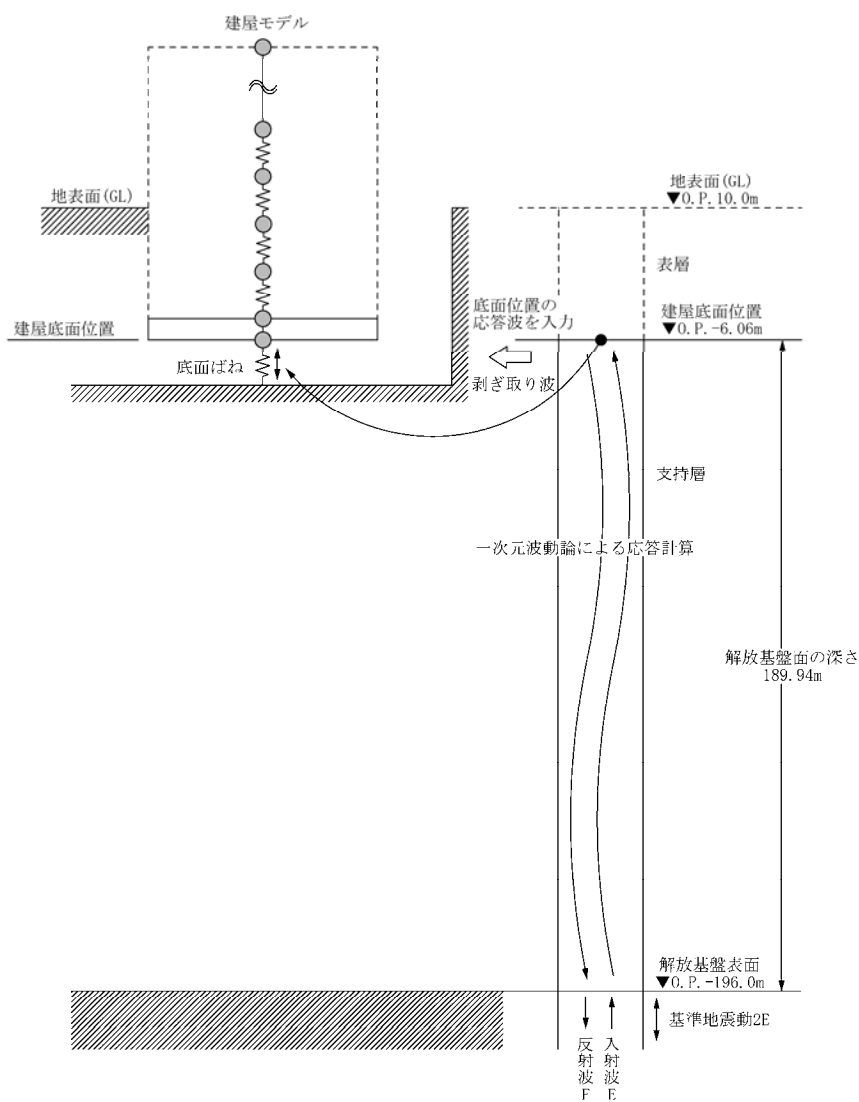
解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基盤表面から地表面までの速度構造を成層と仮定した地盤モデルを用いた一次元波動論による地震応答解析を行った。

一次元波動論による地震応答解析により算出した基礎底面位置及び側面ばね位置での地震動を原子炉建屋への入力地震動とした。

なお、建屋基礎底面位置におけるせん断力（切欠き力）を入力地震動に付加することにより、地盤の切欠き効果を考慮した。

図7-1 入力地震動の概念図（水平方向）

入力地震動の算定（鉛直方向）



解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を入力として、解放基盤表面から基礎底面位置までの速度構造を成層と仮定した地盤モデルを用いた一次元波動論による地震応答解析を行った。

一次元波動論による地震応答解析により算出した基礎底面位置での地震動を原子炉建屋への入力地震動とした。

図7-2 入力地震動の概念図（鉛直方向）

等価線形解析手法について

地盤定数については、原子炉建屋付近の地盤の調査結果に基づき、せん断弾性係数及び減衰定数のひずみ依存性を考慮した等価線形解析により、基準地震動 S_s それぞれについて個別に設定した。

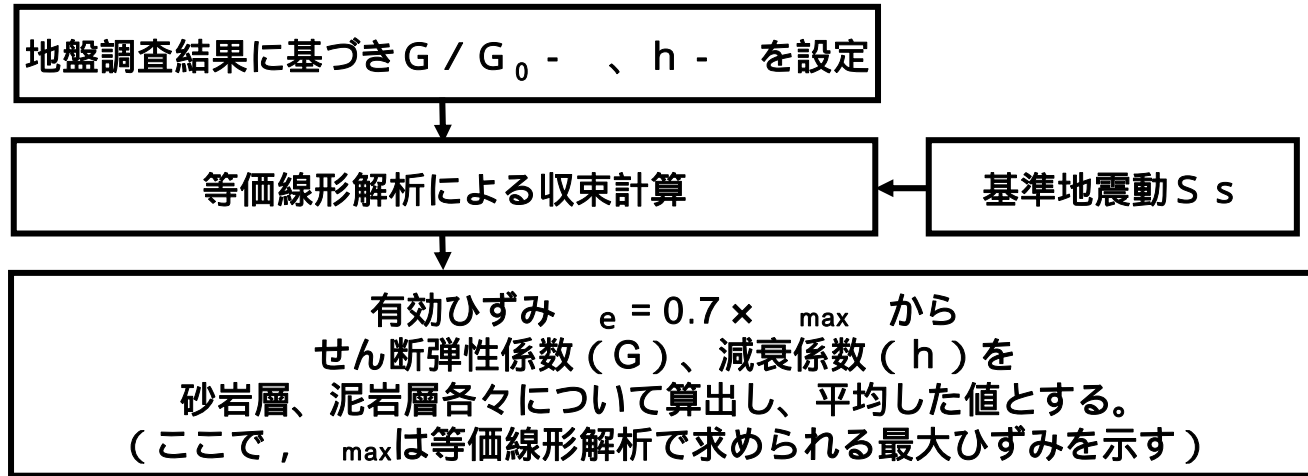
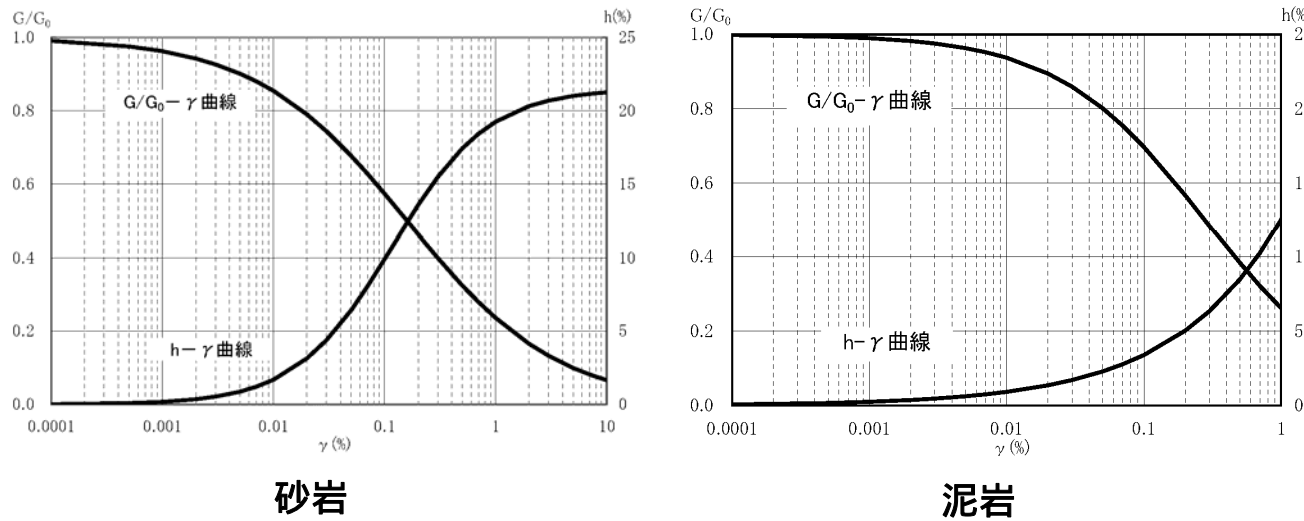


図7-3 地盤物性値の設定フロー



砂岩 泥岩
図7-4 $G/G_0 - \gamma$ 曲線および $h - \gamma$ 曲線

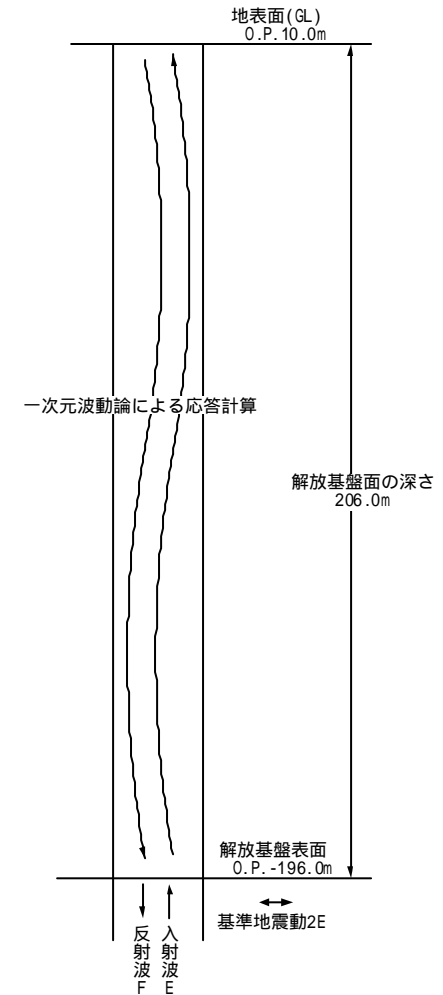


図7-5 等価線形解析概念図

地盤の地震応答解析モデルの剛性低下率について

表7-1 等価線形解析結果 (Ss-1H)

表7-1～表7-3に基準地震動Ssの等価線形解析結果を示す。

各層の有効ひずみから剛性低下率(G/G_0)及び減衰定数(h)が求まり、砂岩層、泥岩層各々について層厚を積み付けした平均値を算出している。

地層	LAYER	標高 O.P.(m)	層厚(m)	初期せん断波速度 Vs(m/s)	剛性低下率 G/G ₀	剛性低下率 層平均値	せん断波速度 Vs(m/s)	減衰定数 h	減衰定数 層平均値	減衰定数 まるめ	有効歪み (%)	
砂岩	1	10.000	2.700	380	0.92	0.85	351	0.030	0.0310	0.03	0.0037	
	2	7.300	2.700		0.84			0.0120				
	3	4.600	2.700		0.78			0.0213				
泥岩	4	1.900	2.380	450	0.90		398	0.030			0.0193	
	5	-0.480	2.380		0.88			0.0242				
	6	-2.860	2.380		0.86			0.0289				
	7	-5.240	2.380		0.85			0.0337				
	8	-7.620	2.380		0.83			0.0383				
	9	-10.000	4.375	500	0.85		442	0.030			0.0333	
	10	-14.375	4.375		0.83			0.0386				
	11	-18.750	4.375		0.82			0.0435				
	12	-23.125	4.375		0.81			0.0480				
	13	-27.500	4.375		0.80			0.0512				
	14	-31.875	4.375		0.79			0.0540				
	15	-36.250	4.375		0.78			0.0577				
	16	-40.625	4.375		0.78			0.0603				
	17	-45.000	4.375		0.77			0.0618				
	18	-49.375	4.375		0.77			0.0627				
	19	-53.750	4.375		0.77			0.0634				
	20	-58.125	4.375	0.77	0.0638							
	21	-62.500	4.375	0.76	0.0666							
	22	-66.875	4.375	0.75	0.0705							
	23	-71.250	4.375	0.75	0.0730							
	24	-75.625	4.375	0.75	0.0737							
	25	-80.000	4.000	560	0.78		495	0.030	0.0301	0.03	0.0565	
	26	-84.000	4.000		0.78			0.0587				
	27	-88.000	4.000		0.78			0.0604				
	28	-92.000	4.000		0.77			0.0616				
	29	-96.000	4.000		0.77			0.0625				
	30	-100.000	4.000		0.77			0.0632				
	31	-104.000	4.000		0.77			0.0636				
	32	-108.000	5.500	600	0.79		530	0.030			0.0545	
	33	-113.500	5.500		0.79			0.0550				
	34	-119.000	5.500		0.79			0.0544				
	35	-124.500	5.500		0.79			0.0554				
	36	-130.000	5.500		0.78			0.0587				
	37	-135.500	5.500		0.77			0.0612				
	38	-141.000	5.500		0.77			0.0632				
	39	-146.500	5.500		0.77			0.0649				
	40	-152.000	5.500		0.76			0.0659				
	41	-157.500	5.500		0.76			0.0660				
	42	-163.000	5.500		0.76			0.0657				
	43	-168.500	5.500		0.76			0.0657				
	44	-174.000	5.500		0.76			0.0676				
	45	-179.500	5.500		0.75			0.0712				
	46	-185.000	5.500		0.75			0.0742				
	47	-190.500	5.500	0.74	0.0768							
	(解放基盤)	48	-196.000	-	700	1.00	1.00	700	-	-	-	-

地盤の地震応答解析モデルの剛性低下率について

表7-2 等価線形解析結果 (Ss-2H)

地層	LAYER	標高 O.P.(m)	層厚(m)	初期せん断波速度 Vs(m/s)	剛性低下率 G/G ₀	剛性低下率 層平均値	せん断波速度 Vs(m/s)	減衰定数 h	減衰定数 層平均値	減衰定数 まるめ	有効歪み (%)			
砂岩	1	10.000	2.700	380	0.92	0.85	351	0.030	0.0310	0.03	0.0037			
	2	7.300	2.700		0.84			0.030			0.0119			
	3	4.600	2.700		0.79			0.033			0.0208			
泥岩	4	1.900	2.380	450	0.90	0.81	405	0.030	0.0300	0.03	0.0187			
	5	-0.480	2.380		0.88			0.030			0.0232			
	6	-2.860	2.380		0.87			0.030			0.0275			
	7	-5.240	2.380		0.85			0.030			0.0316			
	8	-7.620	2.380		0.84			0.030			0.0359			
	9	-10.000	4.375		0.85			0.030			0.0315			
	10	-14.375	4.375	0.84	0.030	0.0366								
	11	-18.750	4.375	0.83	0.030	0.0406								
	12	-23.125	4.375	0.82	0.030	0.0431								
	13	-27.500	4.375	0.81	0.030	0.0448								
	14	-31.875	4.375	0.81	0.030	0.0482								
	15	-36.250	4.375	0.79	0.030	0.0529								
	16	-40.625	4.375	0.78	0.030	0.0572								
	17	-45.000	4.375	0.78	0.030	0.0604								
	18	-49.375	4.375	0.77	0.030	0.0630								
	19	-53.750	4.375	0.76	0.030	0.0673								
	20	-58.125	4.375	0.75	0.030	0.0709								
	21	-62.500	4.375	0.75	0.030	0.0731								
	22	-66.875	4.375	0.75	0.031	0.0738								
	23	-71.250	4.375	0.75	0.031	0.0734								
	24	-75.625	4.375	0.75	0.030	0.0731								
	泥岩	25	-80.000	4.000	560	0.80	0.81	504			0.030	0.0300	0.03	0.0524
		26	-84.000	4.000		0.80					0.030			0.0522
		27	-88.000	4.000		0.80					0.030			0.0519
28		-92.000	4.000	0.80		0.030			0.0518					
29		-96.000	4.000	0.80		0.030			0.0513					
30		-100.000	4.000	0.80		0.030			0.0504					
31		-104.000	4.000	0.80	0.030	0.0495								
32		-108.000	5.500	600	0.82	0.81	540	0.030	0.0300	0.03	0.0418			
33		-113.500	5.500		0.82			0.030			0.0417			
34		-119.000	5.500		0.82			0.030			0.0417			
35		-124.500	5.500		0.82			0.030			0.0418			
36		-130.000	5.500		0.82			0.030			0.0419			
37		-135.500	5.500		0.82			0.030			0.0418			
38		-141.000	5.500		0.82			0.030			0.0417			
39		-146.500	5.500		0.82			0.030			0.0420			
40		-152.000	5.500		0.82			0.030			0.0423			
41		-157.500	5.500		0.82			0.030			0.0425			
42		-163.000	5.500		0.82			0.030			0.0422			
43		-168.500	5.500		0.82			0.030			0.0432			
44		-174.000	5.500	0.82	0.030	0.0438								
45		-179.500	5.500	0.82	0.030	0.0445								
46		-185.000	5.500	0.81	0.030	0.0474								
47		-190.500	5.500	0.80	0.030	0.0500								
(解放基盤)		48	-196.000	-	700	1.00	1.00	700			-			-

地盤の地震応答解析モデルの剛性低下率について

表7-3 等価線形解析結果 (Ss-3H)

地層	LAYER	標高 O.P.(m)	層厚(m)	初期せん断波速度 Vs(m/s)	剛性低下率 G/G ₀	剛性低下率 層平均値	せん断波速度 Vs(m/s)	減衰定数 h	減衰定数 層平均値	減衰定数 まるめ	有効歪み (%)			
砂岩	1	10.000	2.700	380	0.92	0.86	352	0.030	0.0303	0.03	0.0032			
	2	7.300	2.700		0.85			0.0104						
	3	4.600	2.700		0.80			0.0180						
泥岩	4	1.900	2.380	450	0.91	0.78	398	0.030	0.0305	0.03	0.0163			
	5	-0.480	2.380		0.89			0.0202						
	6	-2.860	2.380		0.88			0.0239						
	7	-5.240	2.380		0.87			0.0273						
	8	-7.620	2.380		0.86			0.0303						
	9	-10.000	4.375		500			0.87			0.78	442	0.030	0.0257
	10	-14.375	4.375					0.86					0.0288	
	11	-18.750	4.375	0.85		0.0328								
	12	-23.125	4.375	0.83		0.0377								
	13	-27.500	4.375	0.82		0.0420								
	14	-31.875	4.375	0.81		0.0459								
	15	-36.250	4.375	0.80		0.0495								
	16	-40.625	4.375	0.79		0.0529								
	17	-45.000	4.375	0.79		0.0560								
	18	-49.375	4.375	0.78		0.0586								
	19	-53.750	4.375	0.77		0.0611								
	20	-58.125	4.375	0.77		0.0630								
	21	-62.500	4.375	0.77		0.0645								
	22	-66.875	4.375	0.76		0.0654								
	23	-71.250	4.375	0.76	0.0652									
	24	-75.625	4.375	0.77	0.0650									
	25	-80.000	4.000	560	0.80	0.78	495	0.030			0.0490			
	26	-84.000	4.000		0.80			0.0501						
	27	-88.000	4.000		0.80			0.0520						
	28	-92.000	4.000		0.79			0.0553						
	29	-96.000	4.000		0.78			0.0595						
	30	-100.000	4.000		0.77			0.0634						
	31	-104.000	4.000		0.76			0.0669						
	32	-108.000	5.500	600	0.78	0.78	530	0.030			0.0589			
	33	-113.500	5.500		0.77			0.0624						
	34	-119.000	5.500		0.76			0.0674						
	35	-124.500	5.500		0.75			0.0722						
	36	-130.000	5.500		0.74			0.0765						
	37	-135.500	5.500		0.73			0.0797						
	38	-141.000	5.500		0.73			0.0820						
	39	-146.500	5.500		0.73			0.0834						
	40	-152.000	5.500		0.73			0.0842						
	41	-157.500	5.500		0.73			0.0843						
	42	-163.000	5.500		0.73			0.0834						
	43	-168.500	5.500		0.73			0.0820						
	44	-174.000	5.500		0.73			0.0806						
	45	-179.500	5.500		0.74			0.0789						
	46	-185.000	5.500		0.74			0.0767						
	47	-190.500	5.500		0.75			0.0741						
	(解放基盤)	48	-196.000		700	1.00	1.00	700			-	-	-	-

地盤定数

等価線形解析により求めた基準地震動Ss-1, Ss-2及びSs-3のそれぞれの地盤定数を表7-4に示す。疎密波速度は、水平方向の入力地震動算定に用いた地盤モデルの等価せん断波速度とポアソン比から求めた。

表7-4 地盤定数

標高 O.P. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単体体 積重量 (kN/m ³)	ポア ソン 比	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁵ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀			せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)			ヤング 係数 E (×10 ⁵ kN/m ²)			剛性低下後 S波速度 Vs (m/s)			剛性低下後 P波速度 Vp (m/s)			減衰 定数 h (%)			層厚 H (m)
						Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3	
10.0	砂岩	380	17.8	0.473	2.62	0.85	0.85	0.86	2.23	2.23	2.25	6.57	6.57	6.63	351	351	352	-	-	-	3	3	3	8.1
1.9																								
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	3.41	0.78	0.81	0.78	2.66	2.76	2.66	7.79	8.08	7.79	398	405	398	1530	1560	1530	3	3	3	11.9
-80.0		500	17.1	0.455	4.36				3.40	3.53	3.40	9.89	10.27	9.89	442	450	442	1540	1570	1540				70.0
-108.0		560	17.6	0.446	5.63				4.39	4.56	4.39	12.70	13.19	12.70	495	504	495	1580	1610	1580				28.0
-196.0		600	17.8	0.442	6.53				5.09	5.29	5.09	14.68	15.26	14.68	530	540	530	1640	1670	1640				88.0
-196.0	[解放基盤]	700	18.5	0.421	9.24	1.00	1.00	1.00	9.24	9.24	9.24	26.26	26.26	26.26	700	700	700	1890	1890	1890	-	-	-	-

地盤の地震応答解析モデルの剛性低下率について

砂岩ではSs-3に対する剛性低下率の値が大きいが、泥岩についてはSs-2に対する剛性低下率の値が大きくなっている。このように、基準地震動によって砂岩と泥岩の剛性低下率の傾向が変わることについて考察を行った。

表7-5 地盤定数（再掲）

標高 O.P. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体 積重量 (kN/m ³)	ポア ソン 比	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁵ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀			せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)		
						Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3
10.0											
1.9	砂岩	380	17.8	0.473	2.62	0.85	0.85	0.86	2.23	2.23	2.25
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	3.41	0.78	0.81	0.78	2.66	2.76	2.66
-80.0		500	17.1	0.455	4.36				3.40	3.53	3.40
-108.0		560	17.6	0.446	5.63				4.39	4.56	4.39
-196.0		600	17.8	0.442	6.53				5.09	5.29	5.09
	[解放基盤]	700	18.5	0.421	9.24	1.00	1.00	1.00	9.24	9.24	9.24

地盤の地震応答解析モデルの剛性低下率について

地盤の等価線形解析結果によると、O.P.-80.0m以深の地盤においてSs-2Hの剛性の低下が小さい(剛性低下率が大きい)。

O.P.-80.0m ~ O.P.1.9mについては、Ss-3Hによる剛性の低下が小さいが(剛性低下率が大きい)、その差は小さい。

砂岩については、基準地震動Ss-1 ~ 3による剛性低下率はほぼ同じである。

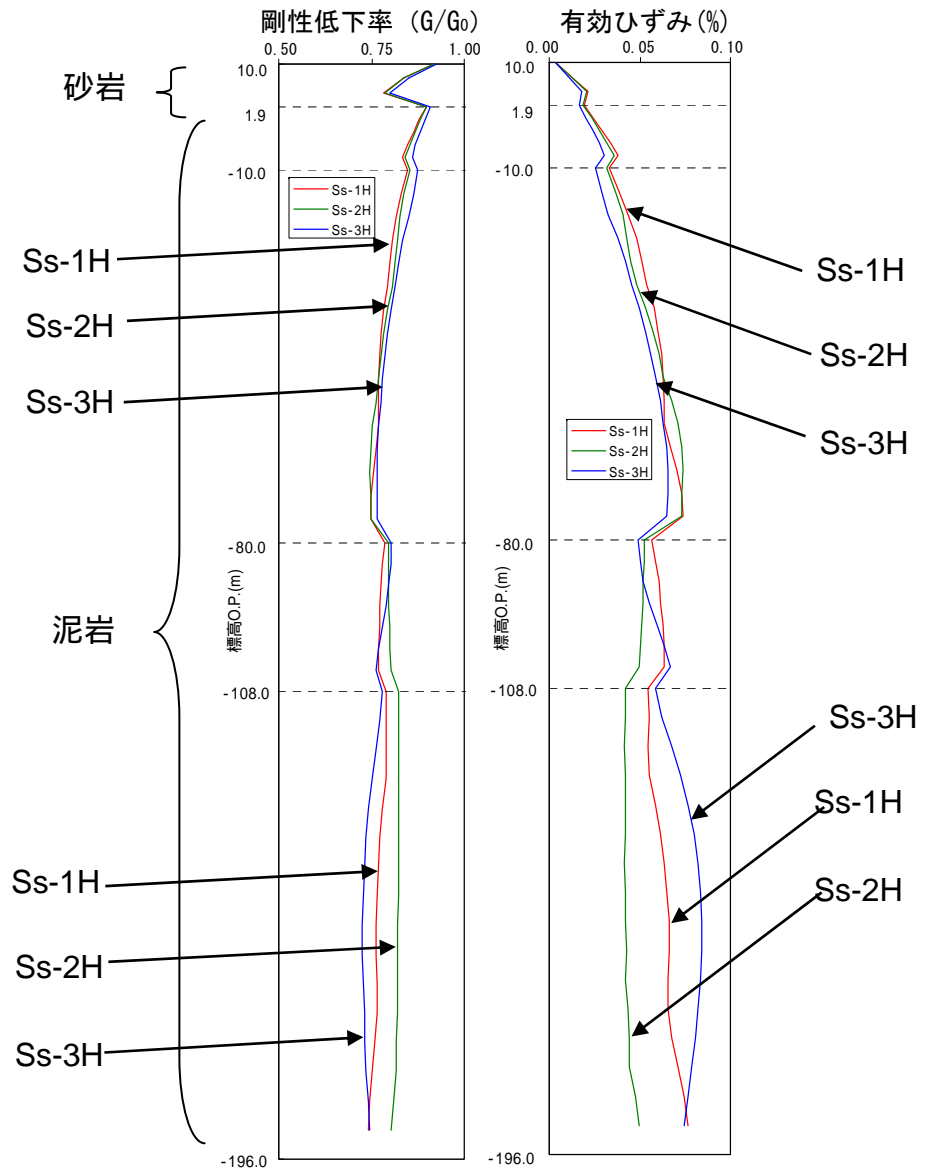


図7-6 地盤の等価線形解析結果

地盤の地震応答解析モデルの剛性低下率について

図7-8より、解放基盤に対するO.P. -80.0m、O.P. -108.0mの伝達関数から、O.P. -80.0m以深の地盤の一次固有周期が0.3秒~0.5秒付近であることがわかる。一方、図7-7より、周期0.3~0.5秒付近でSs-2の加速度応答スペクトルがSs-3の加速度応答スペクトルを下回っていることがわかる。

このことから、O.P. -80.0m以深の地盤については、基準地震動Ss-1、3に比べて、基準地震動Ss-2による剛性の低下が小さい（剛性低下率が大きい）と考えられる。

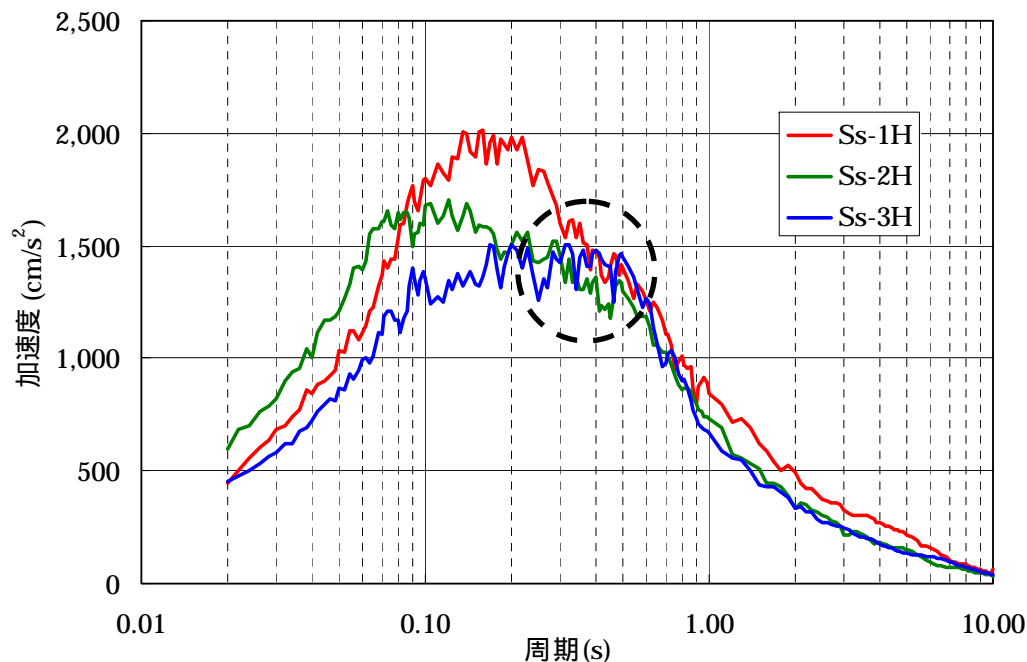
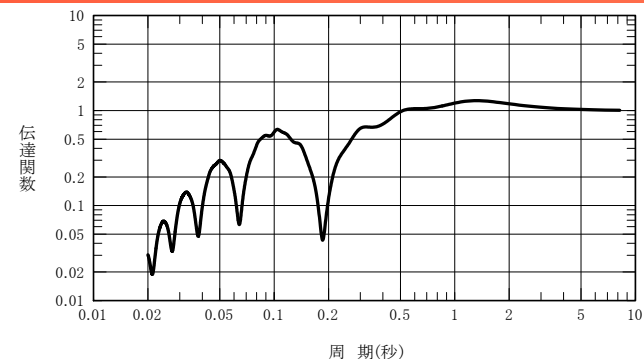
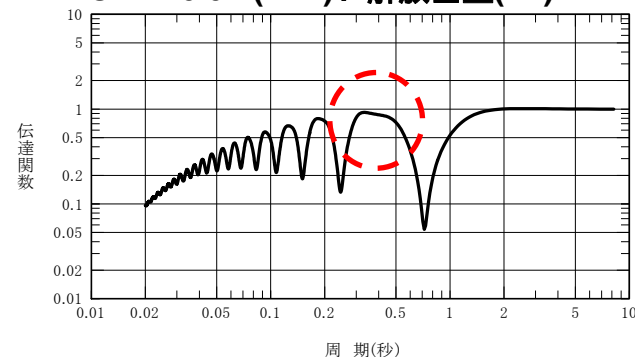


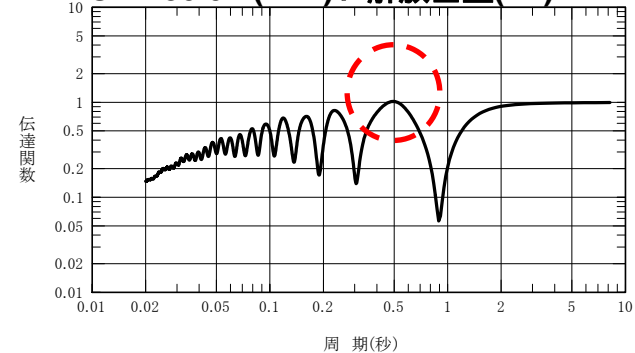
図7-7 解放基盤における基準地震動Ss-1、Ss-2、Ss-3の加速度応答スペクトルの比較(減衰3%)



O.P.-10.0m(E+F) / 解放基盤(2E)



O.P.-80.0m(E+F) / 解放基盤(2E)



O.P.-108.0m(E+F) / 解放基盤(2E)

図7-8 初期剛性を用いた地盤モデルの伝達関数

地盤の地震応答解析モデルの剛性低下率について

0. P. -80.0m~0. P. 1.9mの地盤については、Ss-3による剛性の低下が小さいが（剛性低下率が大きい）、その差は小さい。地盤定数における剛性低下率は泥岩全体に対して平均値を用いているため、0. P. -80.0m以深の影響を受け、基準地震動Ss-2による剛性低下率が基準地震動Ss-1、Ss-3に比べ、大きくなったと考えられる。

表7-6 地盤定数（再掲）

標高 O.P. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体 積重量 (kN/m ³)	ポア ソン 比	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁵ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀			せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m ²)		
						Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3
10.0	砂岩	380	17.8	0.473	2.62	0.85	0.85	0.86	2.23	2.23	2.25
1.9											
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	3.41				2.66	2.76	2.66
-80.0		500	17.1	0.455	4.36	0.78	0.81	0.78	3.40	3.53	3.40
-108.0		560	17.6	0.446	5.63				4.39	4.56	4.39
-196.0		600	17.8	0.442	6.53				5.09	5.29	5.09
-196.0	[解放基盤]	700	18.5	0.421	9.24	1.00	1.00	1.00	9.24	9.24	9.24

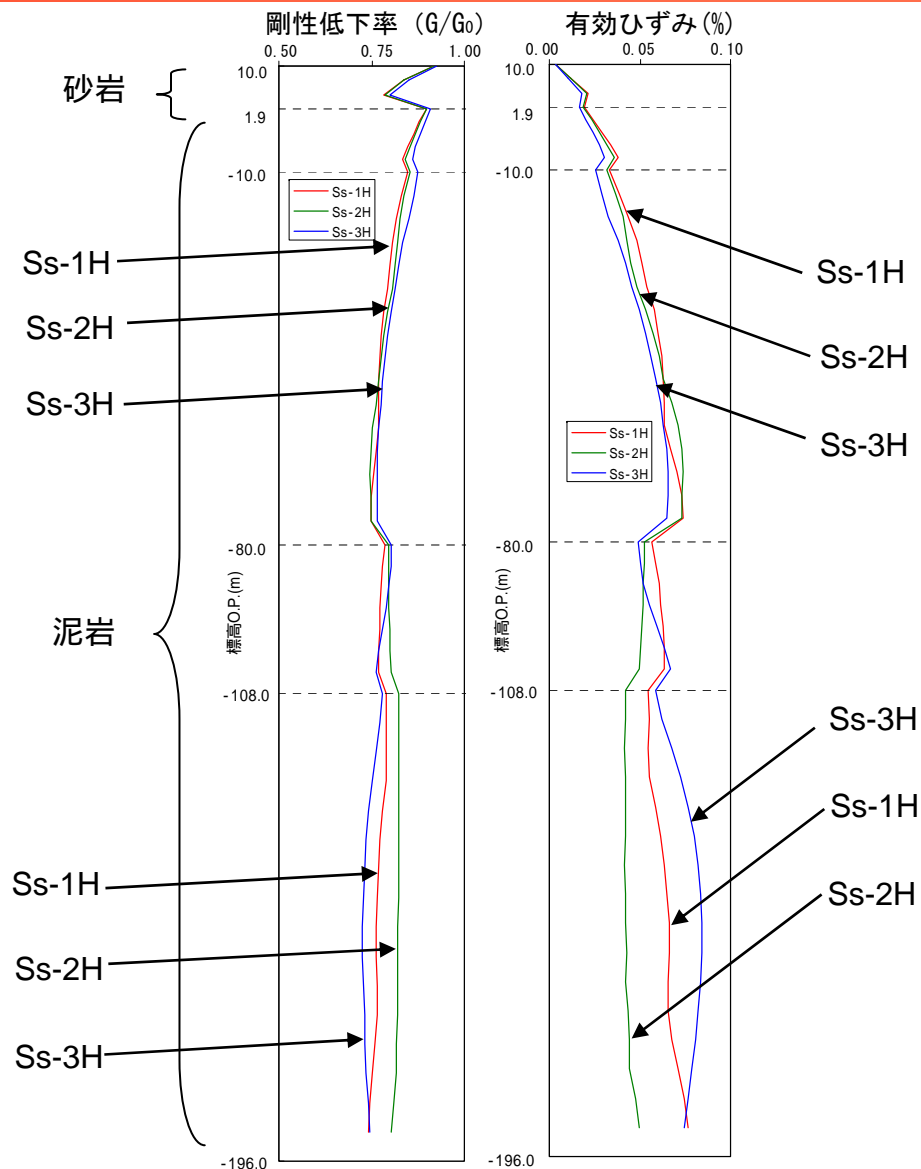
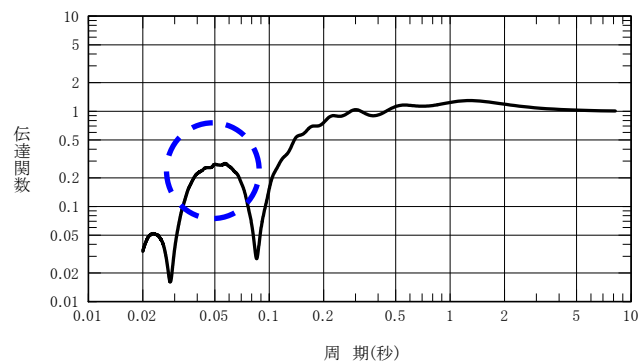


図7-9 地盤の等価線形解析結果（再掲）

地盤の地震応答解析モデルの剛性低下率について

砂岩については基準地震動Ss-1～3による剛性低下率はほぼ同じである。あえて考察するならば、図7-10より、砂岩部分（O.P. 1.9m～10.0m）については伝達関数の一次固有周期が0.05秒付近であると推定でき、図7-11より、その周期帯の加速度応答スペクトルは基準地震動Ss-3が最も小さい。よって基準地震動Ss-3による剛性の低下が小さい（剛性低下率が大きい）と考えられる。



O.P.1.9m(E+F) / 解放基盤(2E)

図7-10 初期剛性を用いた地盤モデルの伝達関数

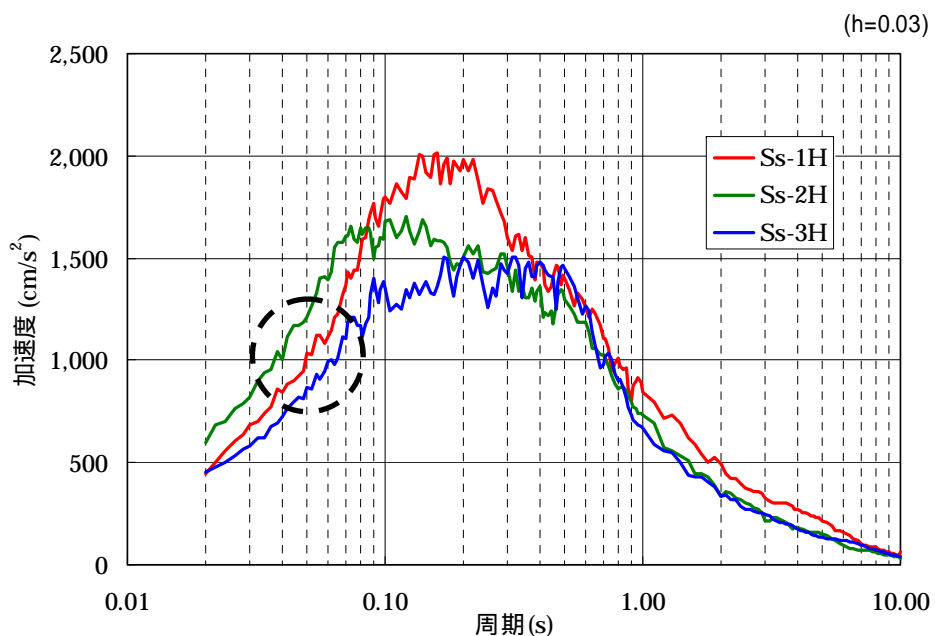


図7-11 解放基盤における基準地震動Ss-1、Ss-2、Ss-3の加速度応答スペクトルの比較(減衰3%) (再掲)

表7-7 地盤定数 (再掲)

標高 O.P. (m)	地質	せん断波 速度 Vs (m/s)	単位体 積重量 (kN/m³)	ポア ソン 比	初期せん断 弾性係数 G ₀ (×10 ⁵ kN/m²)	剛性 低下率 G/G ₀			せん断 弾性係数 G (×10 ⁵ kN/m²)		
						Ss-1	Ss-2	Ss-3	Ss-1	Ss-2	Ss-3
10.0	砂岩	380	17.8	0.473	2.62	0.85	0.85	0.86	2.23	2.23	2.25
1.9						泥岩	450	16.5	0.464	3.41	0.78
-10.0	500	17.1	0.455	4.36	3.40		3.53	3.40			
-80.0	560	17.6	0.446	5.63	4.39		4.56	4.39			
-108.0	600	17.8	0.442	6.53	5.09		5.29	5.09			
-196.0	[解放基盤]	700	18.5	0.421	9.24		1.00	1.00	1.00	9.24	

入力地震動評価法の妥当性確認

入力地震動評価法の妥当性を確認するために、敷地内で比較的大きな加速度を観測した2003年宮城県沖の地震による観測記録（3号機原子炉建屋の炉心位置から約530m離れた地点の地中観測記録）を用いた一次元波動論によるシミュレーション解析を実施した。

○入力地震動 2003年5月26日宮城県沖の地震（北緯38度49.2分 東経141度39.0分 深さ72km M7.1）
0. P. -200mでの観測波

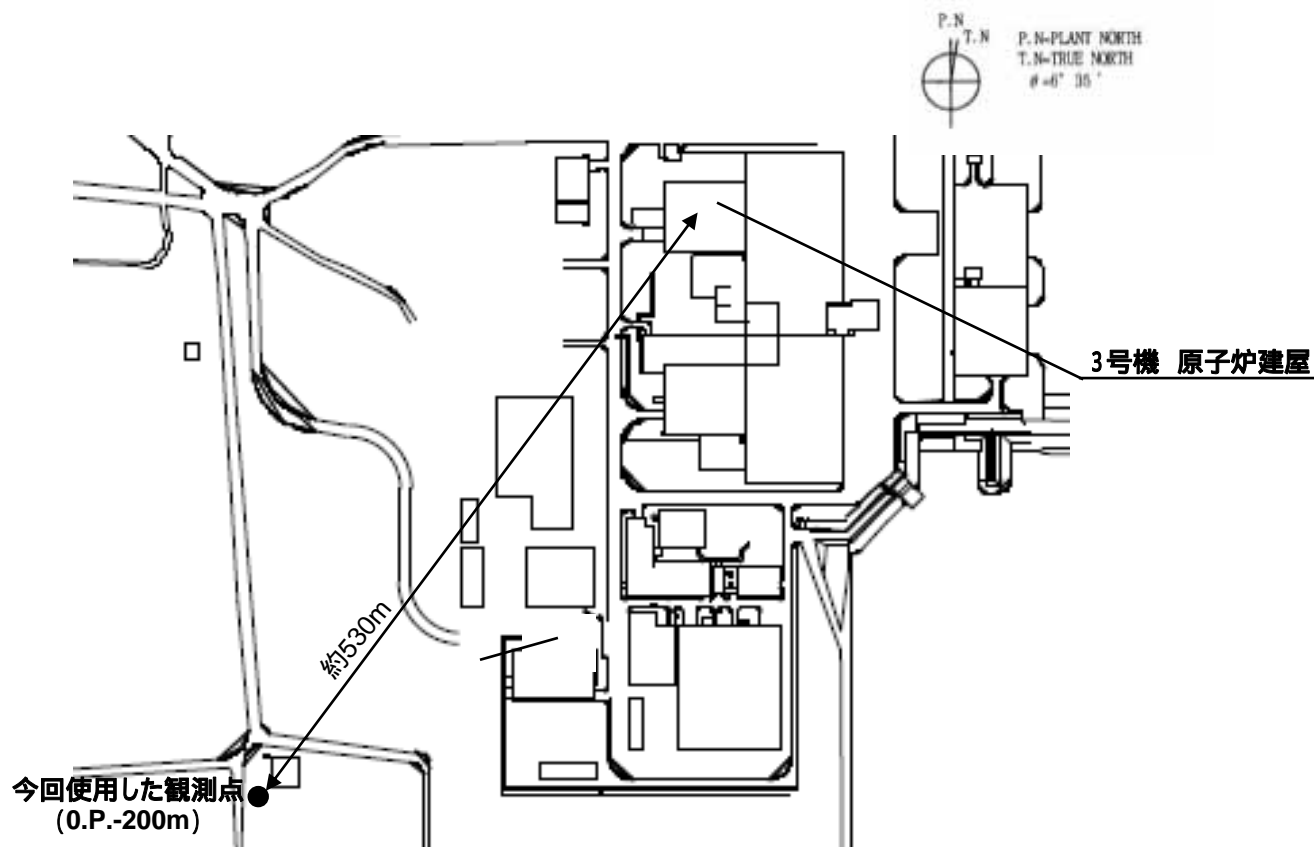
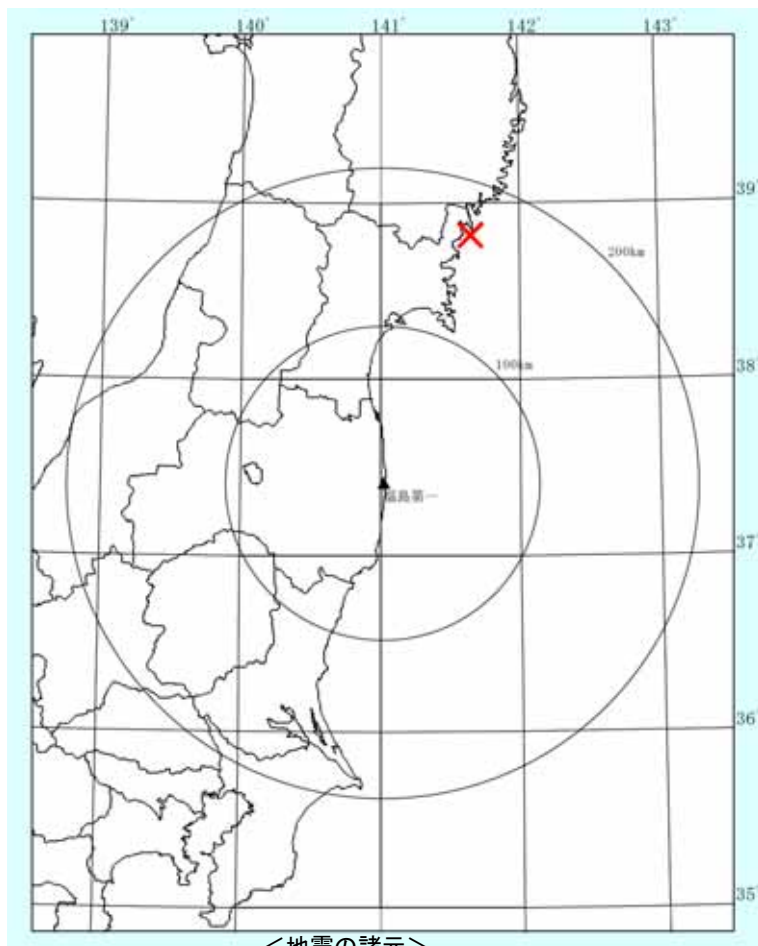


図7-12 福島第一原子力発電所 地震観測点配置図

入力地震動評価法の妥当性確認



- <地震の諸元>
- ・発生日時：平成15年5月26日18時24分
 - ・震源地：宮城県沖
 - ・地震規模：マグニチュード7.1
 - ・震央位置：北緯38度49.0分，東経141度39.2分
 - ・震源深さ：72km
 - ・震源距離：182km
 - ・震央距離：168km

図7-13 2003年宮城県沖の地震の諸元

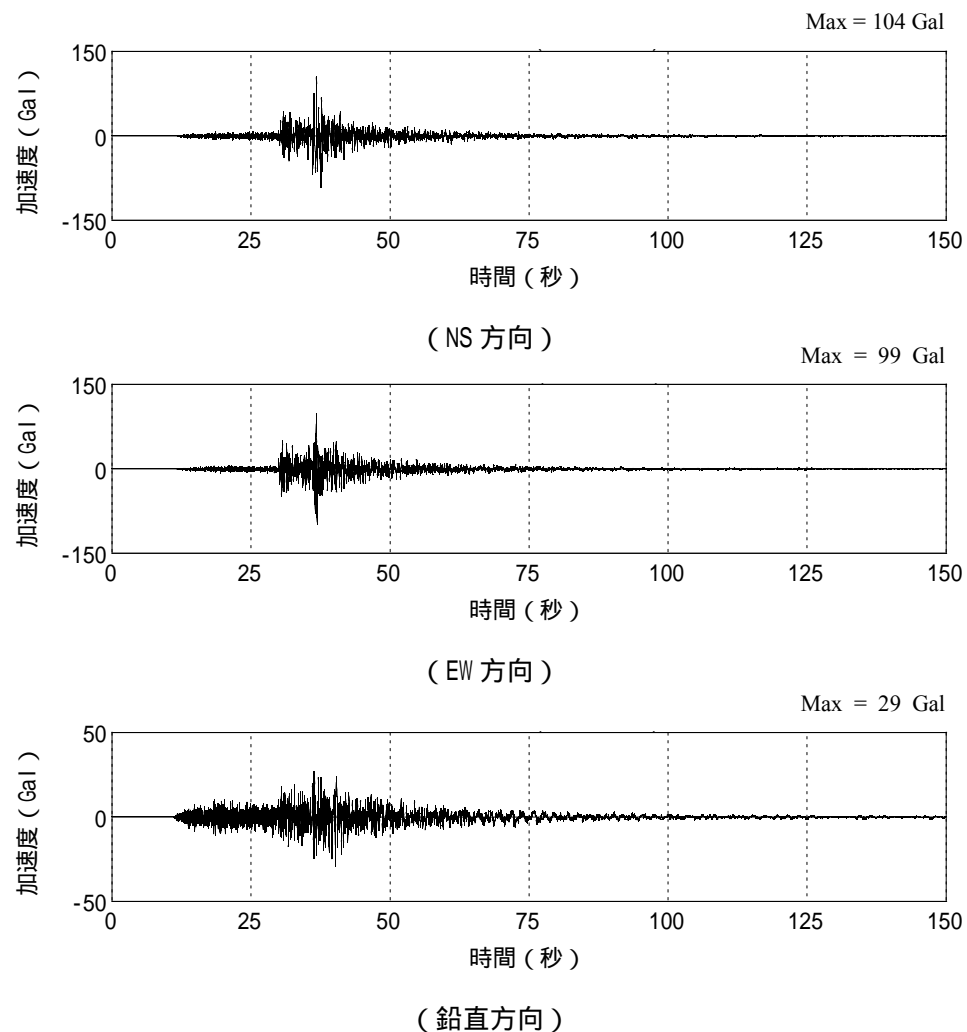


図7-14 シミュレーション解析に用いた観測記録の時刻歴波形 (O. P. -200.0m)

入力地震動評価法の妥当性確認

表7-8 等価線形解析結果（宮城県沖の地震・NS方向）

表7-8～表7-9に宮城県沖の地震に対する等価線形解析結果を示す。

各層の有効ひずみから剛性低下率(G/G_0)及び減衰定数(h)が求まり、砂岩層、泥岩層各々について層厚を重み付けした平均値を算出している。

地層	LAYER	標高 O.P.(m)	層厚(m)	初期せん断波速度 Vs(m/s)	剛性低下率 G/G ₀	剛性低下率 層平均値	せん断波速度 Vs(m/s)	減衰定数 h	減衰定数 層平均値	減衰定数 まるめ	有効歪み (%)				
砂岩	1	10.000	2.700	380	0.95	0.91	362	0.030	0.0300	0.03	0.0015				
	2	7.300	2.700		0.90			0.0048							
	3	4.600	2.700		0.87			0.0081							
泥岩	4	1.900	2.380	450	0.95	0.94	437	0.030	0.0300	0.03	0.0076				
	5	-0.480	2.380		0.94			0.0092							
	6	-2.860	2.380		0.93			0.0107							
	7	-5.240	2.380		0.93			0.0120							
	8	-7.620	2.380		0.92			0.0132							
	9	-10.000	4.375		0.93			0.0112							
	10	-14.375	4.375	0.93	0.0121										
	11	-18.750	4.375	0.92	0.0126										
	12	-23.125	4.375	0.92	0.0128										
	13	-27.500	4.375	0.92	0.0126										
	14	-31.875	4.375	0.92	0.0127										
	15	-36.250	4.375	0.92	0.0129										
	16	-40.625	4.375	0.92	0.0127										
	17	-45.000	4.375	0.92	0.0125										
	18	-49.375	4.375	0.93	0.0123										
	19	-53.750	4.375	0.93	0.0121										
	20	-58.125	4.375	0.93	0.0119										
	21	-62.500	4.375	0.93	0.0113										
	22	-66.875	4.375	0.94	0.0105										
	23	-71.250	4.375	0.94	0.0103										
	24	-75.625	4.375	0.94	0.0100										
	泥岩	25	-80.000	4.000	500		0.95	0.94			485	0.030	0.0300	0.03	0.0081
		26	-84.000	4.000			0.94					0.0087			
		27	-88.000	4.000			0.94					0.0091			
28		-92.000	4.000	0.94		0.0094									
29		-96.000	4.000	0.94		0.0095									
30		-100.000	4.000	0.94		0.0095									
31		-104.000	4.000	0.94	0.0093										
32		-108.000	5.500	0.95	0.0075										
33		-113.500	5.500	0.95	0.0081										
34		-119.000	5.500	0.94	0.0086										
35		-124.500	5.500	0.94	0.0089										
36		-130.000	5.500	0.94	0.0090										
37		-135.500	5.500	0.94	0.0088										
38		-141.000	5.500	0.94	0.0085										
39		-146.500	5.500	0.95	0.0083										
40		-152.000	5.500	0.95	0.0083										
41		-157.500	5.500	0.95	0.0084										
42		-163.000	5.500	0.94	0.0086										
43		-168.500	5.500	0.94	0.0087										
44		-174.000	5.500	0.94	0.0091										
45		-179.500	5.500	0.94	0.0095										
46		-185.000	5.500	0.94	0.0096										
47		-190.500	5.500	0.94	0.0095										
(解放基盤)		48	-196.000	-	700	1.00	1.00		700	0.000	-	-			-

入力地震動評価法の妥当性確認

表7-9 等価線形解析結果（宮城県沖の地震・EW方向）

地層	LAYER	標高 O.P.(m)	層厚(m)	初期せん断波速度 Vs(m/s)	剛性低下率 G/G ₀	剛性低下率 層平均値	せん断波速度 Vs(m/s)	減衰定数 h	減衰定数 層平均値	減衰定数 まるめ	有効歪み (%)					
砂岩	1	10.000	2.700	380	0.96	0.92	364	0.030	0.0300	0.03	0.0012					
	2	7.300	2.700		0.92			0.030			0.0038					
	3	4.600	2.700		0.89			0.030			0.0065					
泥岩	4	1.900	2.380	450	0.96	0.94	437	0.030	0.0300	0.03	0.0059					
	5	-0.480	2.380		0.95			0.030			0.0072					
	6	-2.860	2.380		0.95			0.030			0.0084					
	7	-5.240	2.380		0.94			0.030			0.0094					
	8	-7.620	2.380		0.93			0.030			0.0106					
	9	-10.000	4.375		500			0.94			0.94	485	0.030	0.0300	0.03	0.0092
	10	-14.375	4.375					0.94					0.030			0.0104
	11	-18.750	4.375	0.93		0.030	0.0113									
	12	-23.125	4.375	0.93		0.030	0.0119									
	13	-27.500	4.375	0.93		0.030	0.0122									
	14	-31.875	4.375	0.93		0.030	0.0122									
	15	-36.250	4.375	0.93		0.030	0.0119									
	16	-40.625	4.375	0.93		0.030	0.0113									
	17	-45.000	4.375	0.93		0.030	0.0105									
	18	-49.375	4.375	0.94		0.030	0.0096									
	19	-53.750	4.375	0.94		0.030	0.0088									
	20	-58.125	4.375	0.95		0.030	0.0079									
	21	-62.500	4.375	0.95		0.030	0.0080									
	22	-66.875	4.375	0.95		0.030	0.0084									
	23	-71.250	4.375	0.94	0.030	0.0094										
	24	-75.625	4.375	0.94	0.030	0.0102										
	25	-80.000	4.000	560	0.95	0.94	543	0.030	0.0300	0.03	0.0081					
	26	-84.000	4.000		0.95			0.030			0.0084					
	27	-88.000	4.000		0.95			0.030			0.0085					
	28	-92.000	4.000		0.94			0.030			0.0089					
	29	-96.000	4.000		0.94			0.030			0.0092					
	30	-100.000	4.000		0.94			0.030			0.0093					
	31	-104.000	4.000		0.94			0.030			0.0091					
	32	-108.000	5.500	600	0.95	0.94	582	0.030	0.0300	0.03	0.0073					
	33	-113.500	5.500		0.95			0.030			0.0066					
	34	-119.000	5.500		0.96			0.030			0.0065					
	35	-124.500	5.500		0.96			0.030			0.0065					
	36	-130.000	5.500		0.96			0.030			0.0064					
	37	-135.500	5.500		0.96			0.030			0.0064					
	38	-141.000	5.500		0.96			0.030			0.0066					
	39	-146.500	5.500		0.95			0.030			0.0067					
	40	-152.000	5.500		0.95			0.030			0.0068					
	41	-157.500	5.500		0.95			0.030			0.0069					
	42	-163.000	5.500		0.95			0.030			0.0069					
	43	-168.500	5.500		0.95			0.030			0.0076					
	44	-174.000	5.500		0.95			0.030			0.0083					
	45	-179.500	5.500		0.94			0.030			0.0086					
	46	-185.000	5.500		0.94			0.030			0.0088					
	47	-190.500	5.500	0.94	0.030	0.0091										
	(解放基盤)	48	-196.000	-	700	1.00	1.00	700	-	-	-	-				

入力地震動評価法の妥当性確認

耐震安全性評価で用いる剛性低下前の地盤定数を用いて、地中観測記録にて等価線形解析により求めたシミュレーション解析用の地盤定数を表7-10に示す。

表7-10 地盤定数 (2003年5月26日 宮城県沖の地震)

標高 O.P. (m)	地質	せん断 波速度 Vs (m/s)	単位体 積重量 (kN/m ³)	ポアソ ン比	初期せん断 弾性係数 G ₀ (× 10 ⁵ kN/m ²)	剛性 低下率 G/G ₀		せん断 弾性係数 G (× 10 ⁵ kN/m ²)		ヤング 係数 E (× 10 ⁵ kN/m ²)		剛性低下後 S波速度 Vs (m/s)		剛性低下後 P波速度 Vp (m/s)		減衰 定数 h (%)		層厚 H (m)	
						NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW		
10.0																			
1.9	砂岩	380	17.8	0.473	2.62	0.91	0.92	2.38	2.41	7.01	7.10	362	364	-	-	3	3	8.1	
-10.0	泥岩	450	16.5	0.464	3.41	0.94	0.94	3.21	3.21	9.40	9.40	437	437	1690	1690	3	3	11.9	
-80.0		500	17.1	0.455	4.36			4.10	4.10	11.93	11.93	485	485	1690	1690			70.0	
-108.0		560	17.6	0.446	5.63			5.29	5.29	15.30	15.30	543	543	1740	1740			28.0	
-196.0		600	17.8	0.442	6.53			6.14	6.14	17.71	17.71	582	582	1800	1800			88.0	
	[解放基盤]	700	18.5	0.421	9.24	1.00	1.00	9.24	9.24	26.26	26.26	700	700	1890	1890	-	-	-	

入力地震動評価法の妥当性確認

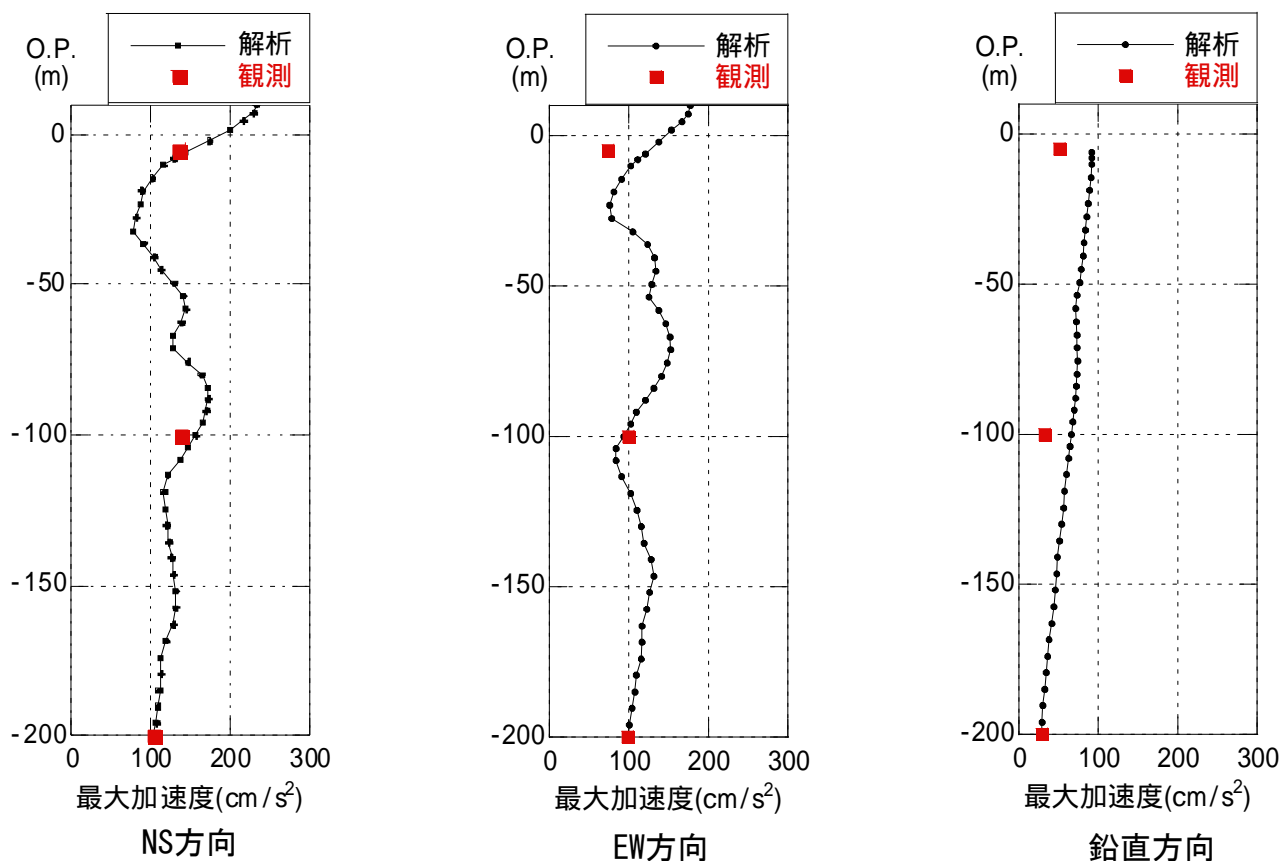


図7-15 地盤の最大応答加速度分布

入力地震動評価法の検証を行った結果、NS方向、EW方向とも最大加速度値は、観測記録にほぼ対応している。また、鉛直方向の最大加速度値は、観測記録に比べやや大きめの値を示している。

入力地震動評価法の妥当性確認

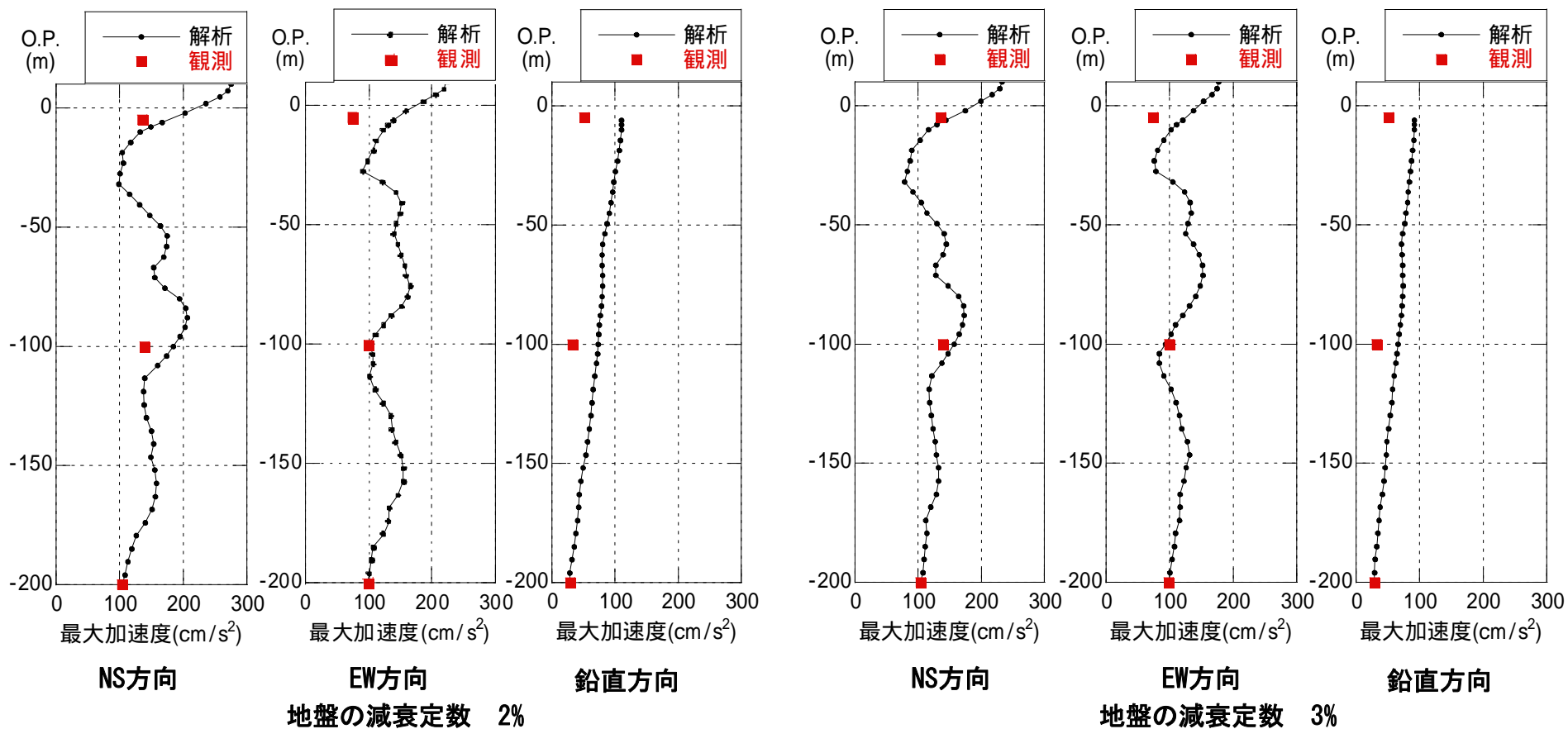


図7-16 (1) 地盤の最大応答加速度分布

図7-16 (2) 地盤の最大応答加速度分布

図7-16に地盤の減衰定数をそれぞれ2%、3%として行ったシミュレーション解析の結果を示す。慣用的に、今回用いた観測記録のような中小地震のシミュレーション解析では地盤の減衰定数2%を用い、基準地震動Ssのような大地震の場合は3%を用いているが、2003年の宮城県沖の地震のシミュレーション解析を行った場合、地盤の減衰定数を3%とした方が観測記録と整合する結果となった。

2. 新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について

新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について

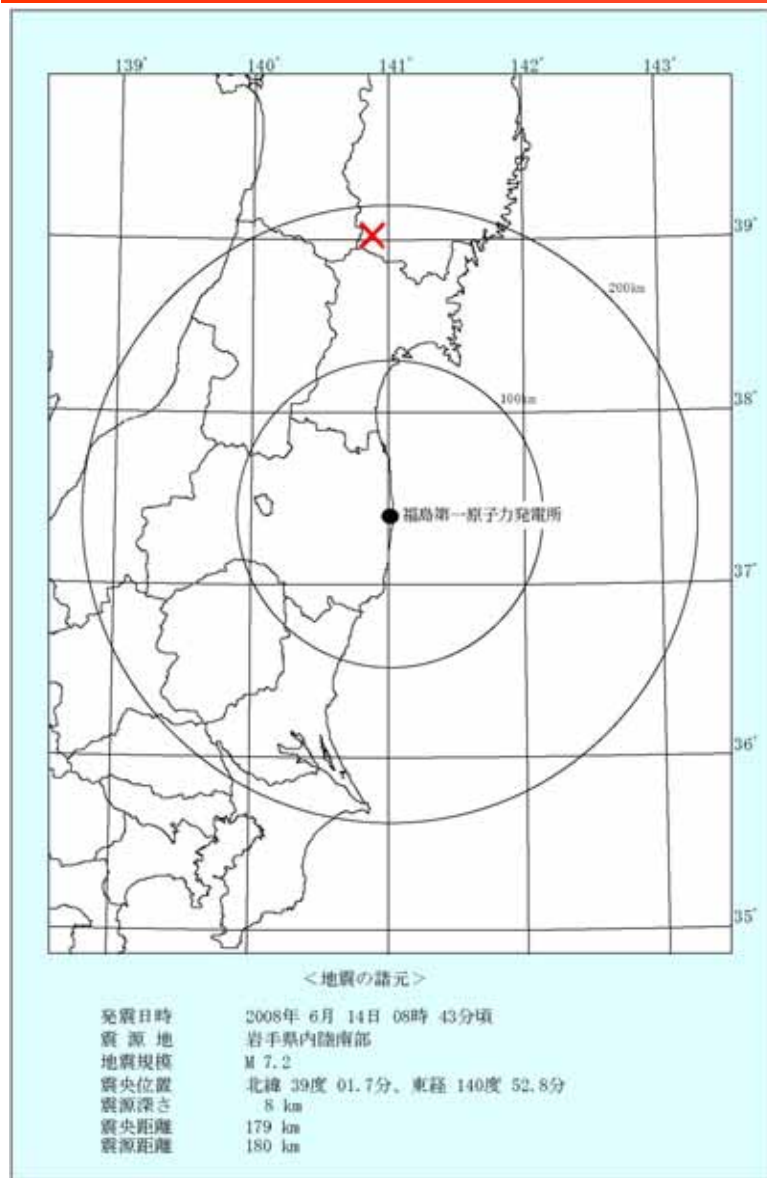


図7-17 地震の諸元

新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項に基づき、耐震安全性評価で用いた地震応答解析モデルに問題が無いことを確認するため、地震観測記録に基づいた解析などによる検討を行った。具体的な検討内容としては、2008年岩手・宮城内陸地震時における基礎版上の観測記録を入力としたシミュレーション解析を実施し、解析結果と建屋で得られた観測記録を比較する。

2008年6月14日 岩手・宮城内陸地震の
基礎版上の観測記録

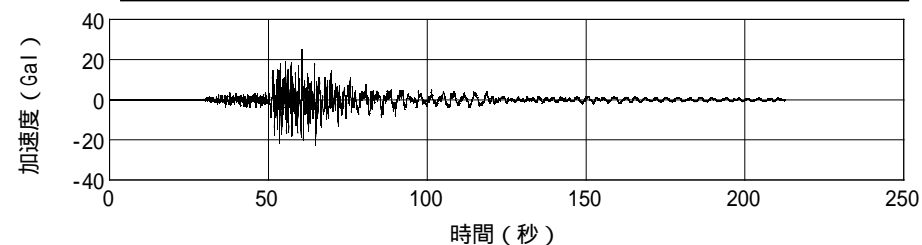


図7-18 (1) 加速度時刻歴波形 NS方向 Max=25 Gal

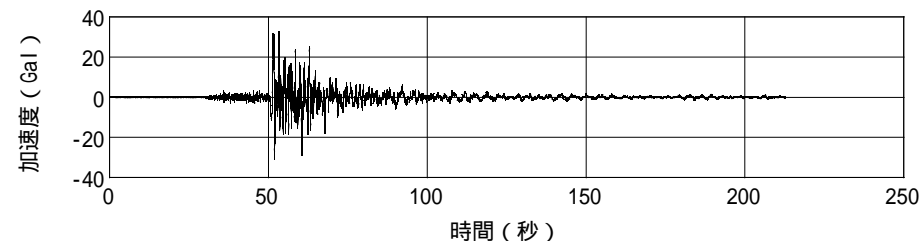


図7-18 (2) 加速度時刻歴波形 EW方向 Max=33 Gal

観測記録を用いたシミュレーション解析

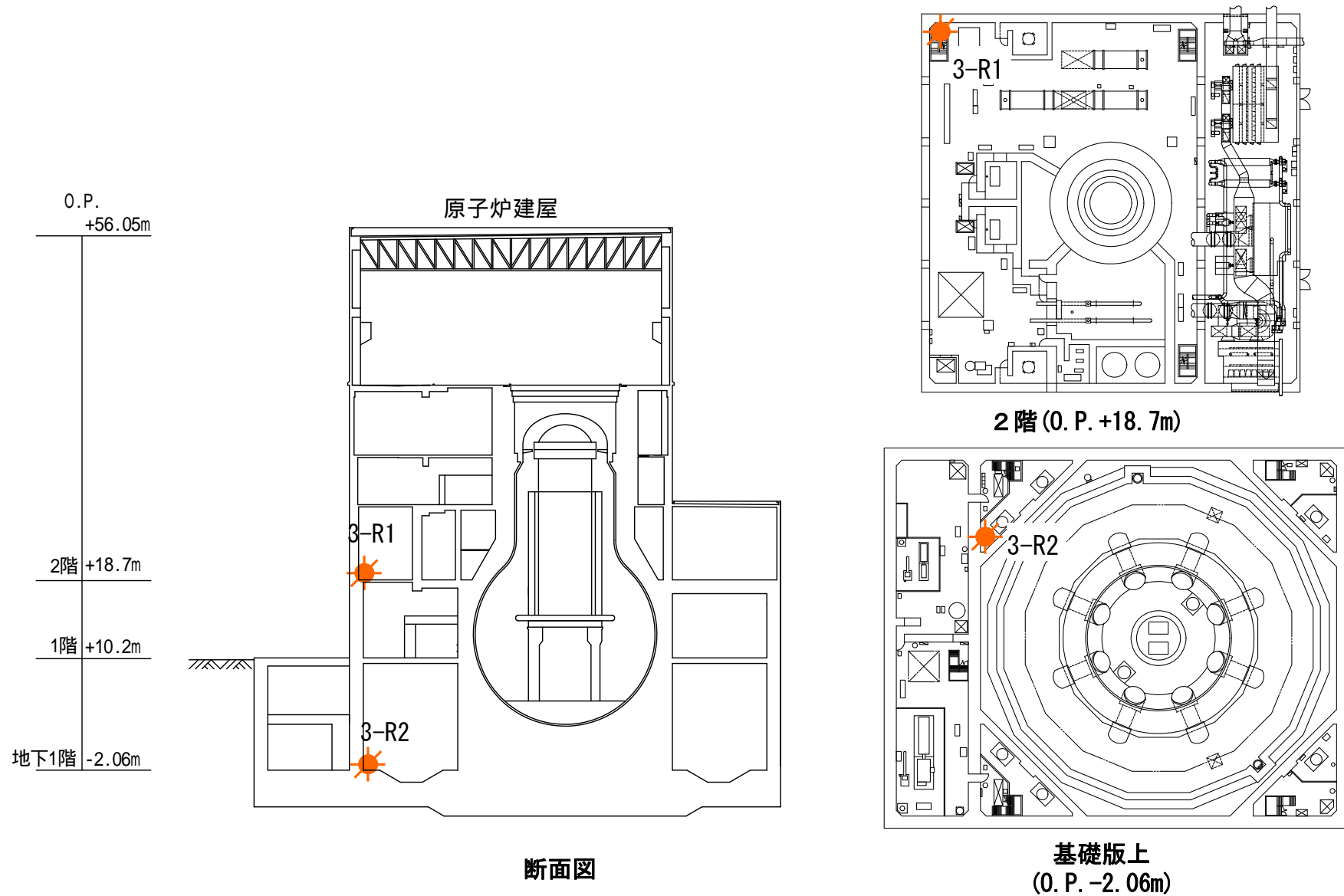


図7-19 福島第一 3号機原子炉建屋 地震計配置図

観測記録を用いたシミュレーション解析

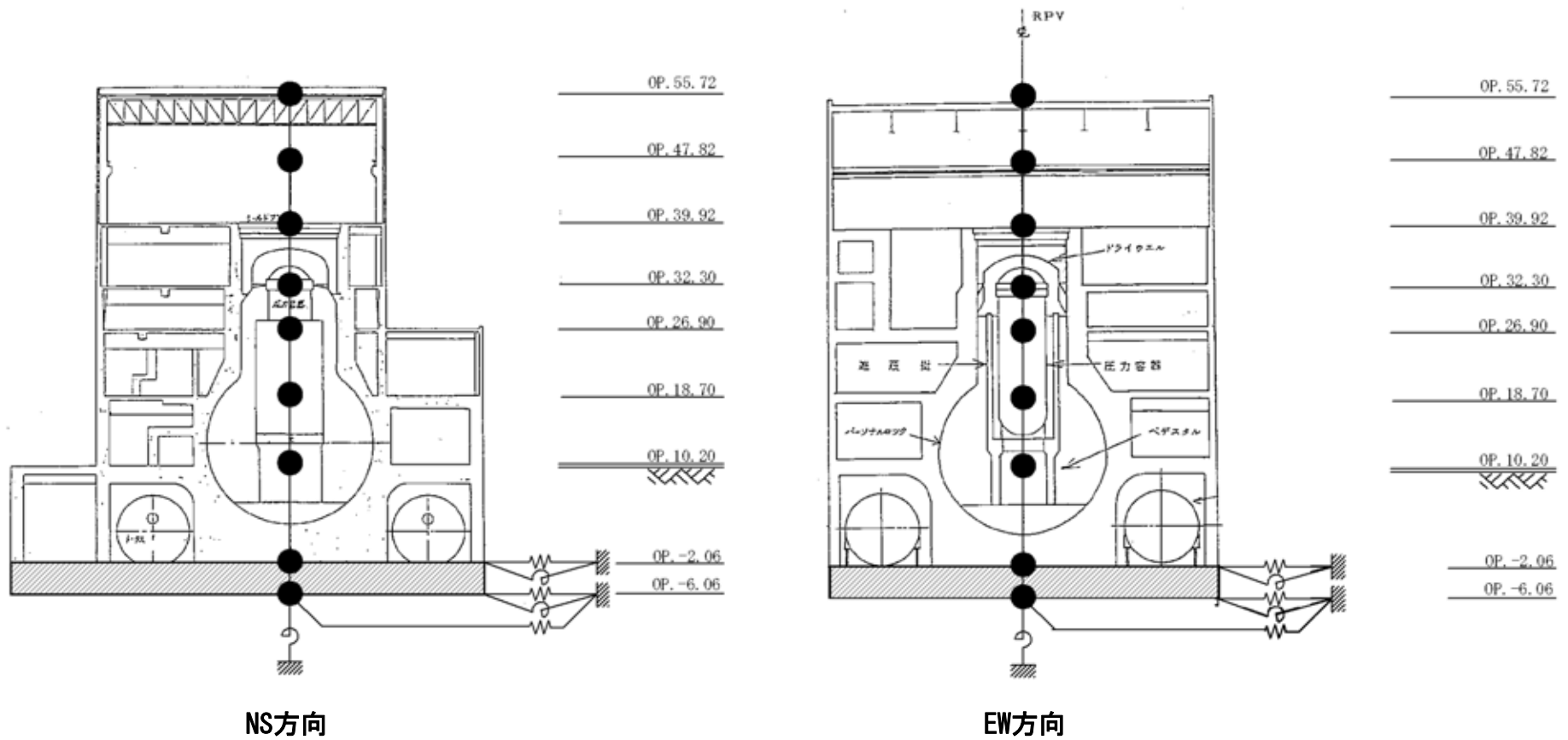


図7-20 福島第一 3号機原子炉建屋のシミュレーションモデル

観測記録を用いたシミュレーション解析

シミュレーション解析モデルの諸元は耐震安全性評価モデルに基づき設定する。(地盤モデルについては、観測記録を用いた等価線形解析より算出し、地盤ばねはその地盤モデルに基づいて算出している。)

表7-11 福島第一 3号機原子炉建屋のシミュレーション解析モデルの諸元

NS方向					EW方向				
質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{ kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント $I (\text{m}^4)$	質点番号	質点重量 W(kN)	回転慣性重量 $I_G (\times 10^5 \text{ kN}\cdot\text{m}^2)$	せん断断面積 $A_S (\text{m}^2)$	断面2次モーメント $I (\text{m}^4)$
1	18,890	34.81			1	18,890	19.52		
2	15,670	28.83	28.2	14,571	2	15,670	16.18	21.1	8,529
3	74,990	138.08	28.2	15,986	3	74,990	77.47	28.2	9,057
4	88,070	162.10	206.3	27,958	4	88,070	90.91	103.2	14,172
5	109,640	201.82	212.2	38,723	5	109,640	201.82	150.8	21,844
6	130,160	239.58	237.3	56,230	6	130,160	239.58	204.1	41,352
7	226,760	417.47	208.6	60,144	7	226,760	622.62	226.6	61,084
8	301,020	554.17	458.7	112,978	8	301,020	826.50	431.3	135,128
9	127,000	233.79	2,697.8	496,620	9	127,000	348.72	2,697.8	740,717
合計	1,092,200				合計	1,092,200			
		ヤング係数 E_c	$2.57 \times 10^7 (\text{ kN/m}^2)$				ヤング係数 E_c	$2.57 \times 10^7 (\text{ kN/m}^2)$	
		せん断弾性係数 G	$1.07 \times 10^7 (\text{ kN/m}^2)$				せん断弾性係数 G	$1.07 \times 10^7 (\text{ kN/m}^2)$	
		ポアソン比	0.20				ポアソン比	0.20	
		減衰 h	5%				減衰 h	5%	
		基礎形状	47.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)				基礎形状	47.0m(NS方向) × 57.4m(EW方向)	

観測記録を用いたシミュレーション解析

表7-12 地震応答解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰係数

NS方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*) Cc	採用振動数 ^(*) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.88 × 10 ⁶	1.24	5.30 × 10 ⁵	2.76
K2	8	側面・回転	1.79 × 10 ⁹	0.01	9.75 × 10 ⁷	2.76
K3	9	側面・並進	2.88 × 10 ⁶	1.24	5.30 × 10 ⁵	2.76
K4	9	側面・回転	1.79 × 10 ⁹	0.01	9.75 × 10 ⁷	2.76
K5	9	底面・並進	6.63 × 10 ⁷	0.00	2.29 × 10 ⁶	2.76
K6	9	底面・回転	4.82 × 10 ¹⁰	0.00	3.51 × 10 ⁸	2.76

(*) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*) f₁は連成系の1次固有振動数

EW方向

ばね番号	質点番号	地盤ばね成分	ばね		減衰	
			ばね定数 ^(*) Kc	採用振動数 (Hz)	減衰係数 ^(*) Cc	採用振動数 ^(*) f ₁ (Hz)
K1	8	側面・並進	2.84 × 10 ⁶	1.23	5.27 × 10 ⁵	2.88
K2	8	側面・回転	1.77 × 10 ⁹	0.01	9.82 × 10 ⁷	2.88
K3	9	側面・並進	2.84 × 10 ⁶	1.23	5.27 × 10 ⁵	2.88
K4	9	側面・回転	1.77 × 10 ⁹	0.01	9.82 × 10 ⁷	2.88
K5	9	底面・並進	6.45 × 10 ⁷	0.00	2.19 × 10 ⁶	2.88
K6	9	底面・回転	6.35 × 10 ¹⁰	0.00	6.00 × 10 ⁸	2.88

(*) K1, K3, K5はkN/m K2, K4, K6はkN・m/rad

(*) K1, K3, K5はkN・s/m K2, K4, K6はkN・s・m/rad

(*) f₁は連成系の1次固有振動数

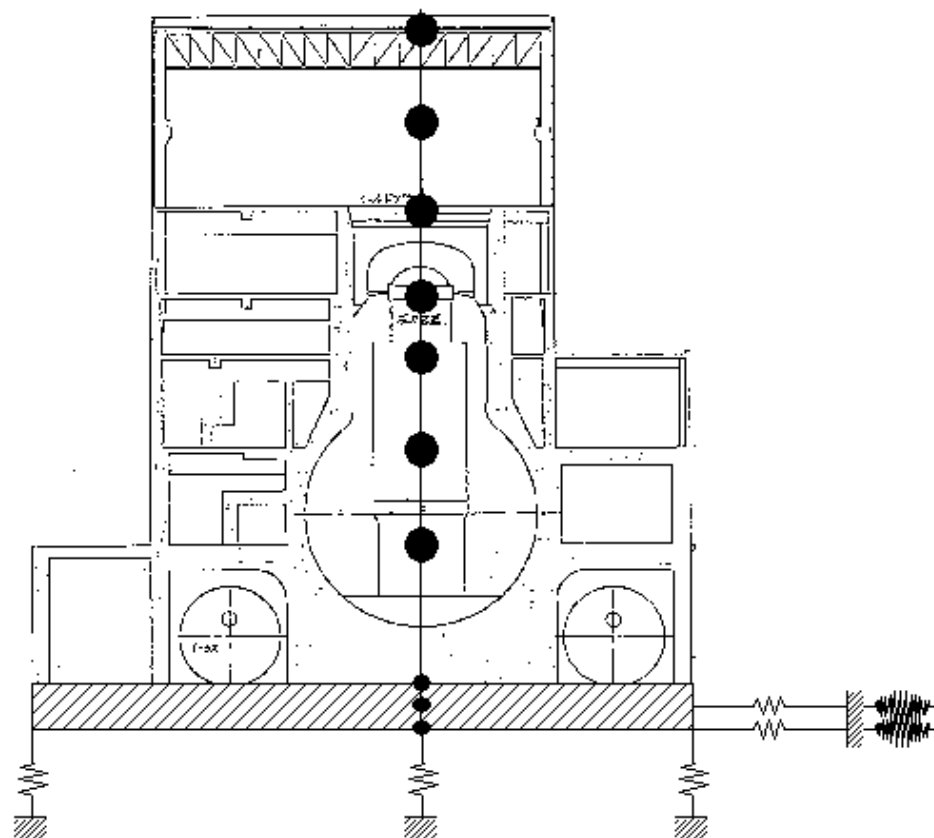
観測記録を用いたシミュレーション解析

表7-13 福島第一 3号機原子炉建屋 水平方向解析モデルの主な諸元の比較

項目	工認設計時のモデル	耐震安全性評価モデル	シミュレーションモデル	変更の考え方	応答に対する影響	
応答計算法	時刻歴応答解析	同左	周波数応答解析	-	-	
入力地震動	180galに基準化した既往波を直接入力	基準地震動Ssを一次元波動論によって評価(E+F)	基礎上端観測記録	耐震安全性評価では、E+F入力に変更した。シミュレーション解析では、基礎版上端観測記録を基礎上端に入力している。	-	
入力規定位置	基礎底面ばね外	基礎底面ばね外	基礎上端	-	-	
剛性評価	コンクリート強度	22.1N/mm ² (225kgf/cm ²)	35.0N/mm ²	同左	コンクリート強度を実状に近づけて評価	建屋の剛性は硬めの評価となる。
	ヤング係数	20.6 × 10 ⁶ N/mm ² (2.10 × 10 ⁶ kgf/cm ²)	25.7 × 10 ³ N/mm ² (2.62 × 10 ⁶ kgf/cm ²)	同左	コンクリートのヤング係数を実状に近づけて評価	-
	考慮範囲	耐震壁	同左	同左	-	-
減衰定数	鉄筋コンクリート	5% (一定減衰)	5% (歪エネルギー比例型)	5% (複素減衰：一定減衰)	耐震安全性評価の場合には、最新の知見を反映し、歪エネルギー比例型減衰とする。シミュレーション解析の減衰については、周波数応答解析法のため複素減衰とする。	応答に対する顕著な影響はない。
地盤モデル	剛性低下率、減衰定数	-	基準地震動各波に応じて算出	入力波に応じて算出	耐震安全性評価は最新の知見を反映して設定している。	-
解析モデル	建屋-地盤相互作用	SRモデル	埋込みSRモデル	同左	-	-
	建屋モデル	質点系1軸モデル	同左	同左	-	-
	底面ばね	静的地盤ばね	JEAGによる近似法	同左	耐震安全性評価は最新の知見を反映して設定している。	応答に対する顕著な影響はない。
	側面ばね	静的地盤ばね(水平)	JEAGによる近似法(水平、回転)	同左	耐震安全性評価は最新の知見を反映して設定している。	応答は若干低減する。
線形/非線形	線形	非線形	線形	耐震安全性評価では、Ss地震動による建屋応答レベルに応じた挙動を適切に評価するため非線形解析としている。	-	
1次固有周期(sec)	0.386(NS) 0.348(EW)	0.396(NS) ^{*1} 0.377(EW) ^{*1}	0.362(NS) 0.347(EW)	-	-	

*1: Ss-1H時

観測記録を用いたシミュレーション解析



(工認設計時のモデル)

図7-22 (1) 解析概要の比較

観測記録を用いたシミュレーション解析

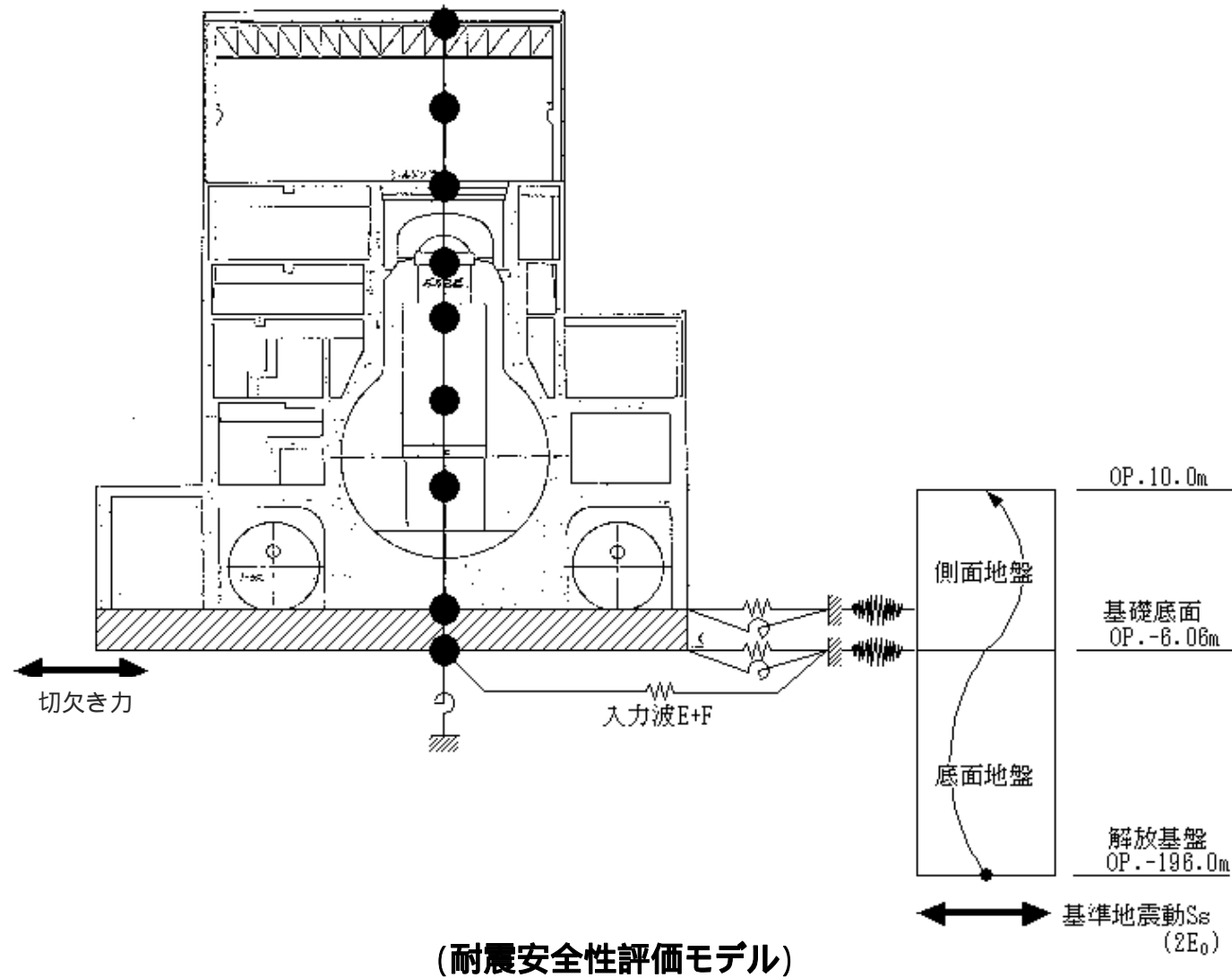
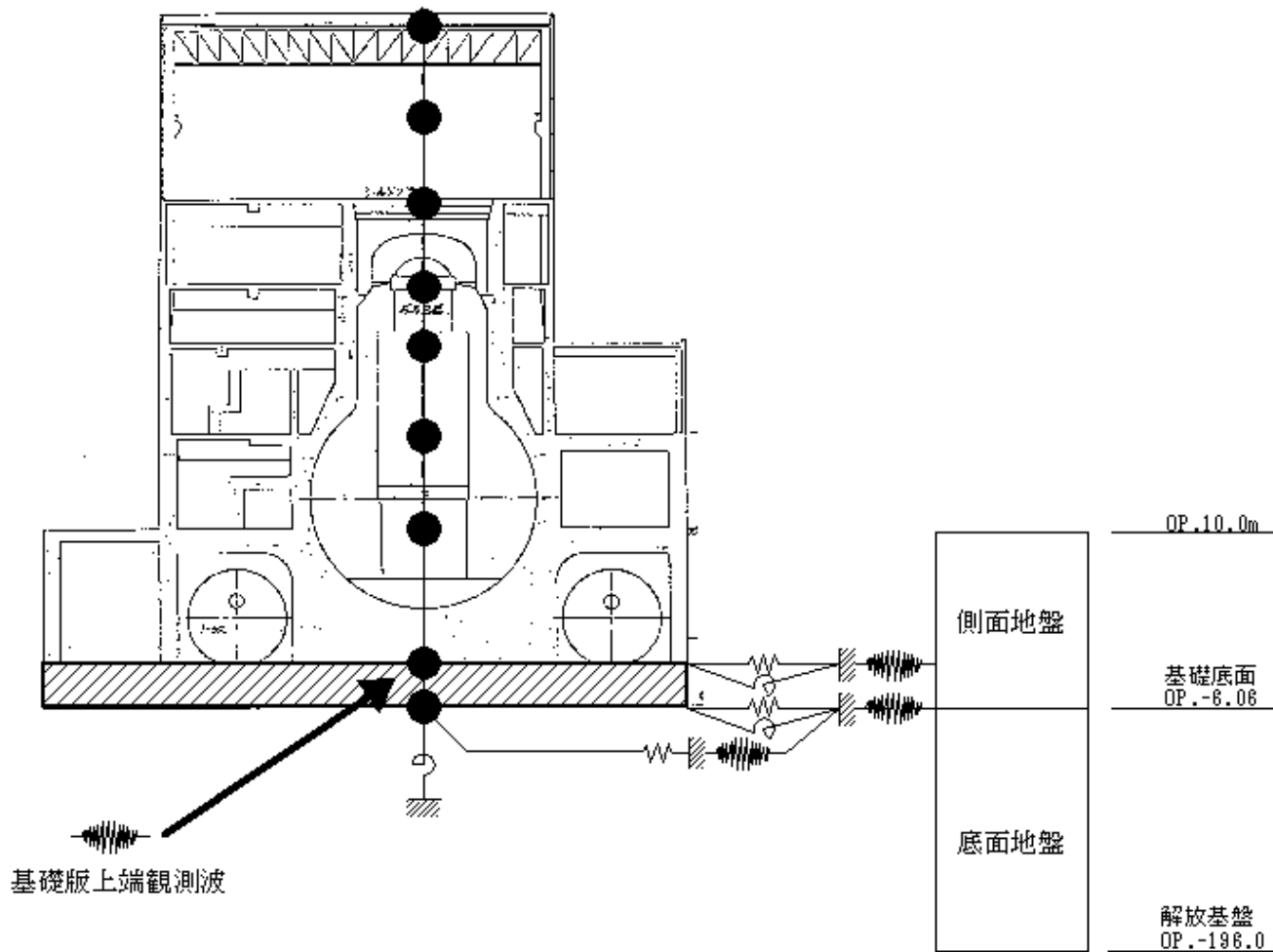


図7-21 (2) 解析概要の比較

観測記録を用いたシミュレーション解析



(シミュレーション解析モデル)

図7-22 (3) 解析概要の比較

観測記録を用いたシミュレーション解析

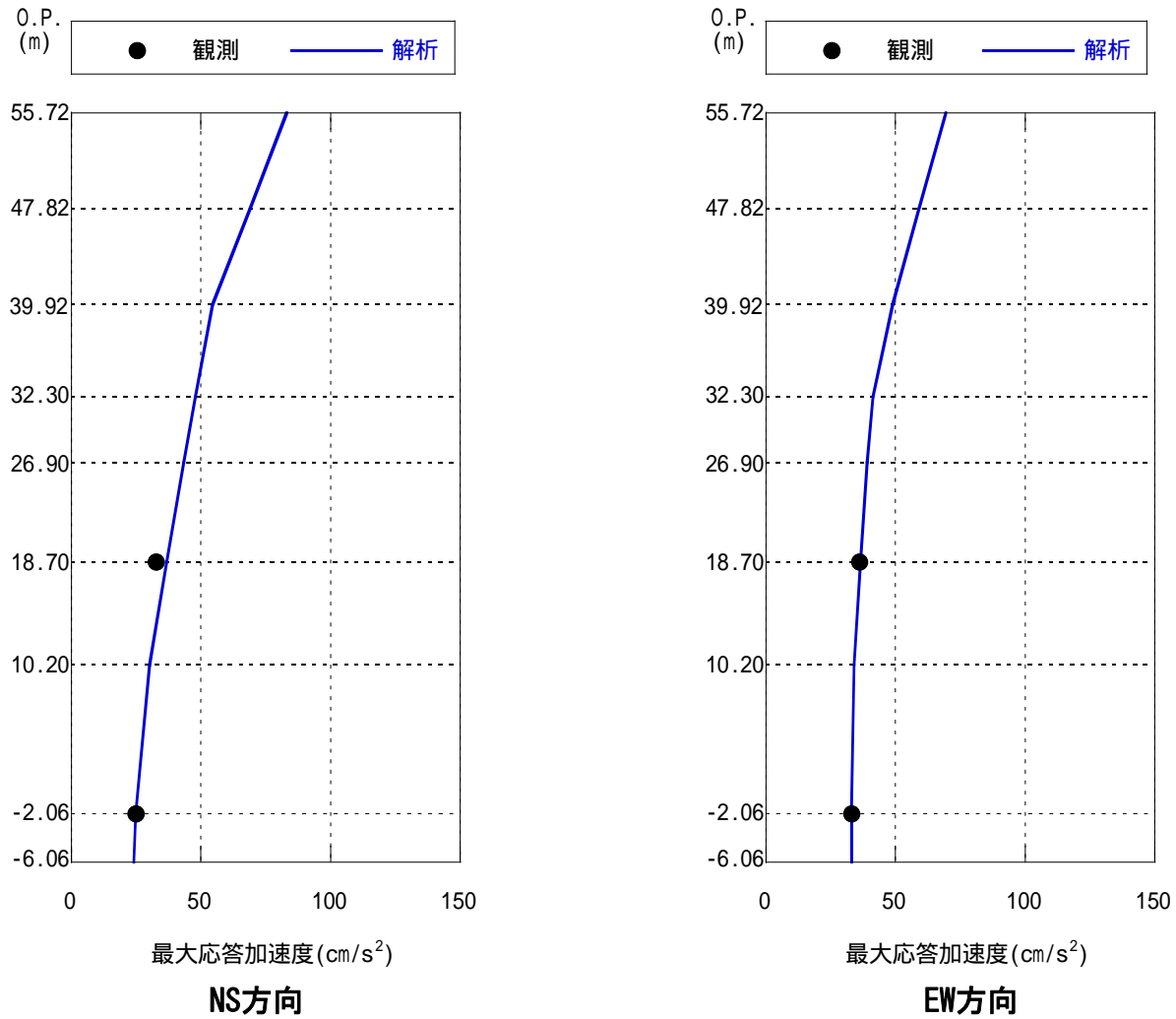


図7-23 建屋各階の最大応答加速度の比較

観測記録を用いたシミュレーション解析

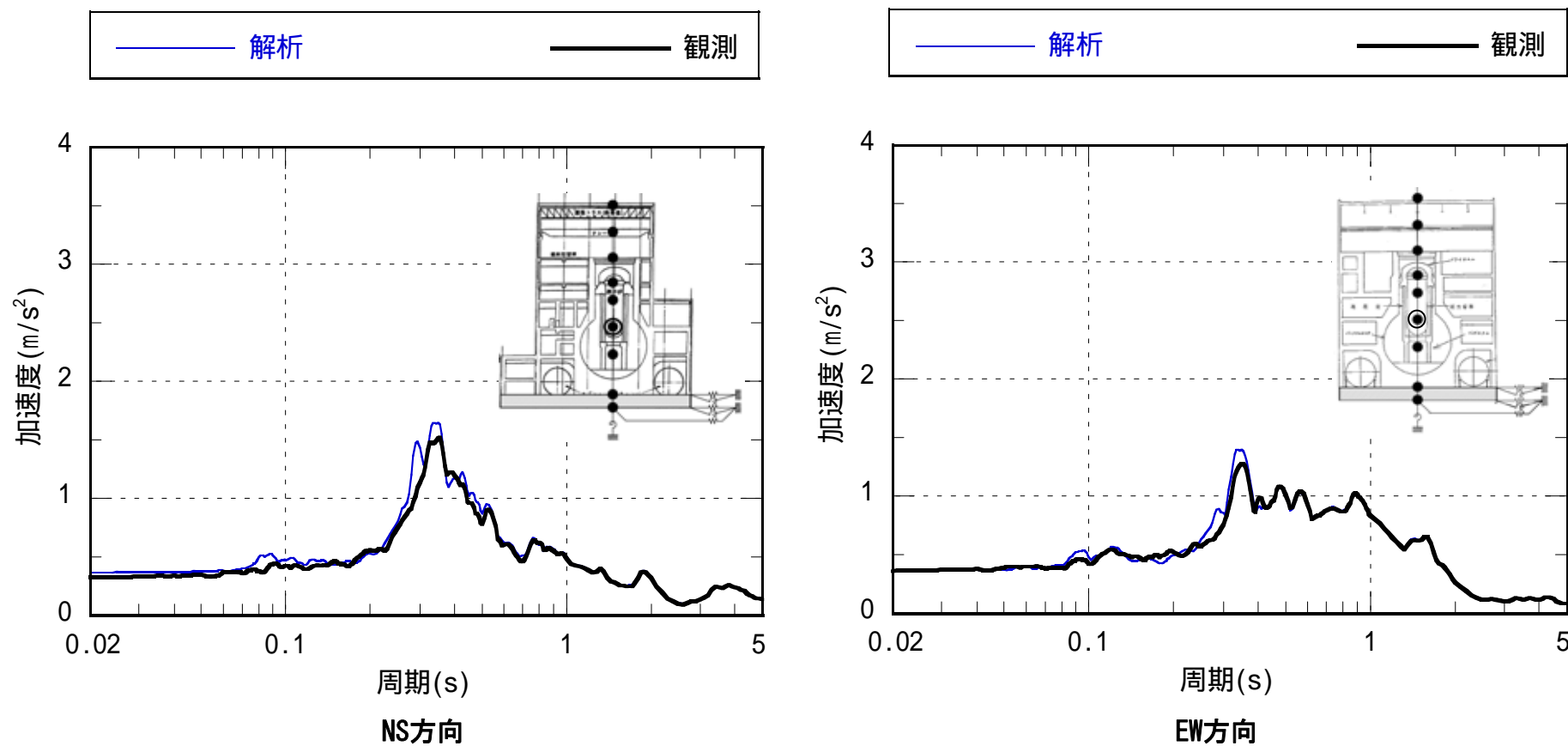


図7-24 応答スペクトルの比較

図7-23に示す最大応答加速度による比較、および図7-24に示す床応答スペクトルによる比較から、シミュレーション解析は概ね観測記録と整合している。

床などの柔軟性を考慮した解析

床などの柔軟性を考慮した解析あるいは地震観測記録に基づいた解析などにより検討を行い、耐震バックチェックで用いた水平方向の地震応答解析モデルによる耐震安全性評価に問題がないことを確認する。床などの柔軟性を考慮した解析モデル（以下、「床柔モデル」という。）では、耐震安全性評価およびシミュレーション解析に用いた床などを剛とした解析モデル（以下、「床剛モデル」という。）を基に、建屋の床の柔軟性を考慮できるようにシェル壁、内壁、外壁部の軸を分離した多軸モデルとしている。

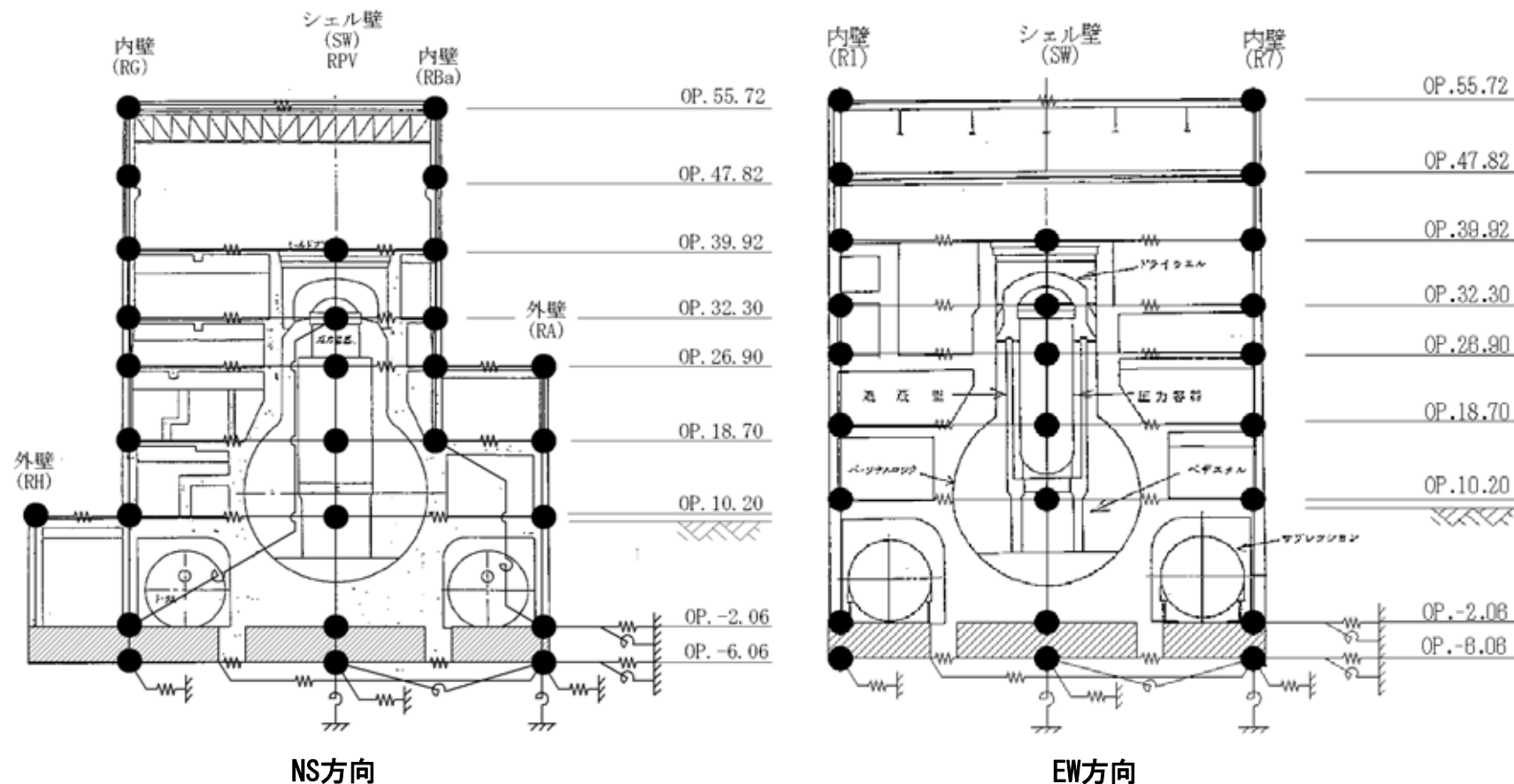


図7-25 福島第一 3号機原子炉建屋 床柔モデル

床などの柔軟性を考慮した解析

表7-14 解析モデルの条件

項目		床剛モデル (耐震安全性評価モデル)	床柔モデル	特記事項
剛性評価	コンクリート強度	35.0N/mm ²	同左	
	ヤング係数	25.7 × 10 ³ N/mm ² (2.62 × 10 ⁶ kgf/cm ²)	同左	
	考慮範囲	耐震壁	同左	
減衰定数	鉄筋コンクリート	5% (複素減衰：一定減衰)	同左	
地盤モデル	剛性低下率、減衰定数	入力波に応じて算出	同左	
解析モデル	建屋-地盤相互作用	埋め込みSRモデル	同左	
	建屋モデル	質点系1軸モデル	質点系多軸モデル	
	底面ばね	JEAGによる近似法	同左	減衰は1次固有振動数に応じて設定。 床柔モデルの地盤ばねは1軸モデル と同等のばねを、基礎版の柔軟性を考 慮して各軸に分割
	側面ばね	水平・回転を考慮	同左	減衰は1次固有振動数に応じて設定。 床柔モデルの地盤ばねは1軸モデル と同等のばねを、基礎版の柔軟性を考 慮して各軸に分割
1次固有周期 (sec)		0.362 (NS) 0.347 (EW)	0.373 (NS) 0.358 (EW)	
解析手法		周波数応答解析	同左	
入力地震動		基礎版上観測記録	同左	

床などの柔性を考慮した解析

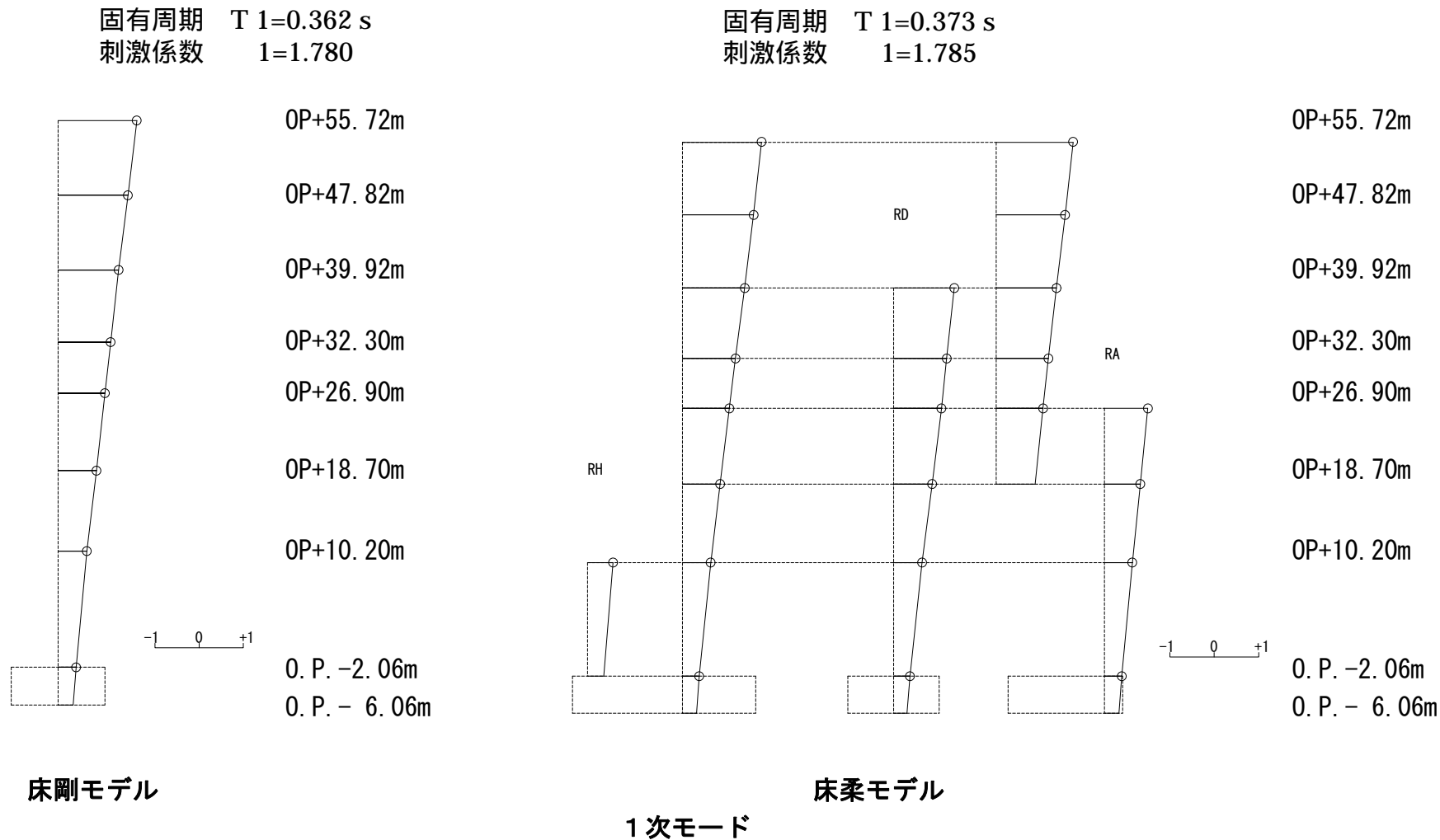


図7-26 (1) 主要な固有モード図の比較 (NS方向)

床などの柔性を考慮した解析

固有周期 $T_2=0.162\text{ s}$
 刺激係数 $\alpha=0.993$

固有周期 $T_2=0.166\text{ s}$
 刺激係数 $\alpha=1.116$

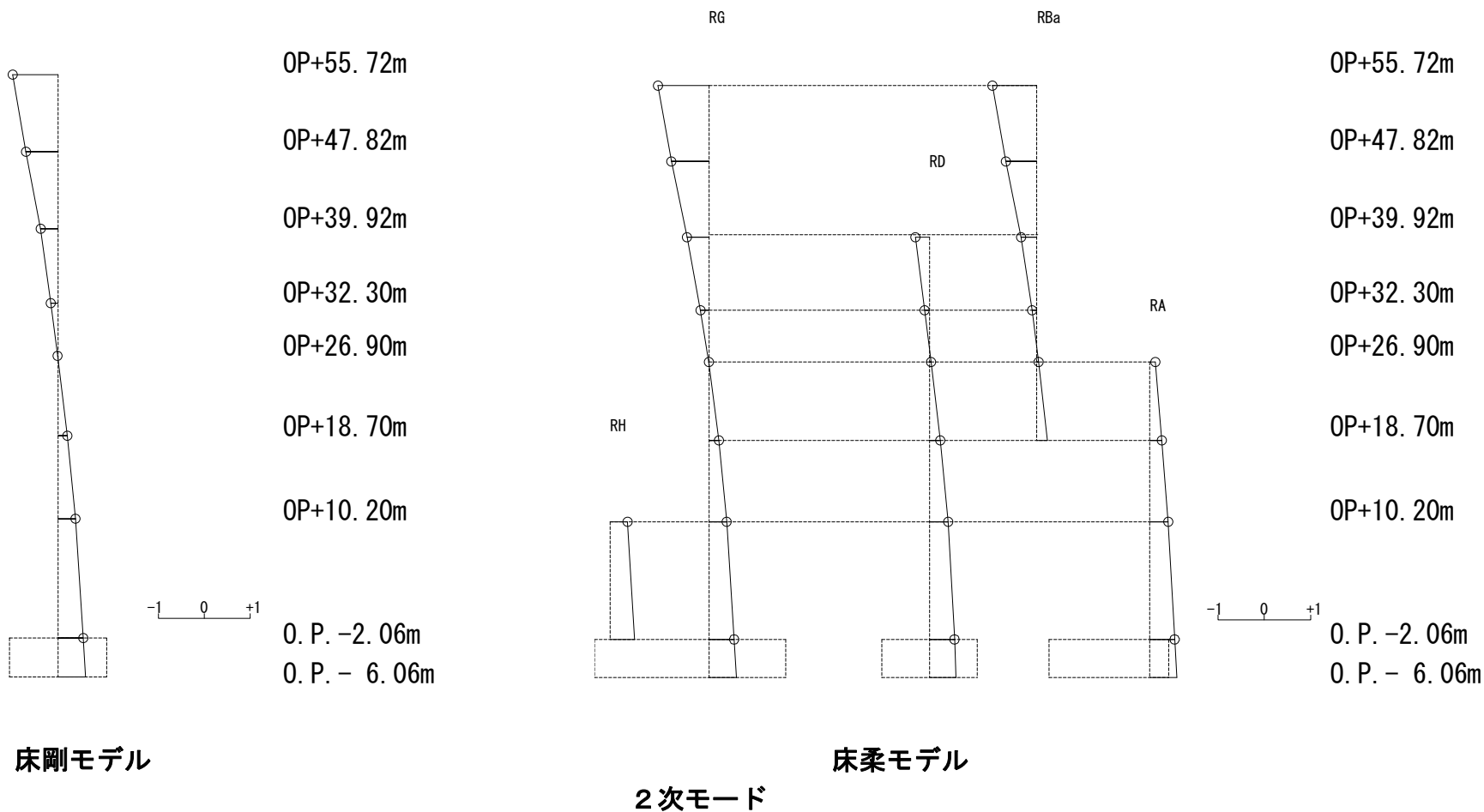
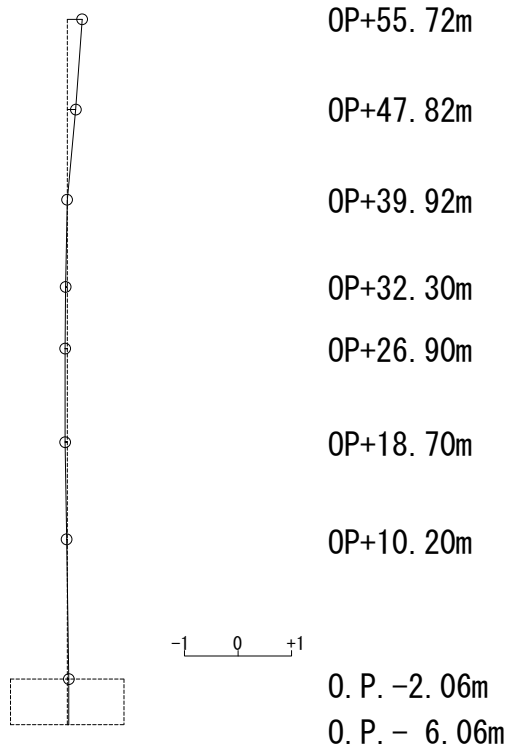


図7-26 (2) 主要な固有モード図の比較 (NS方向)

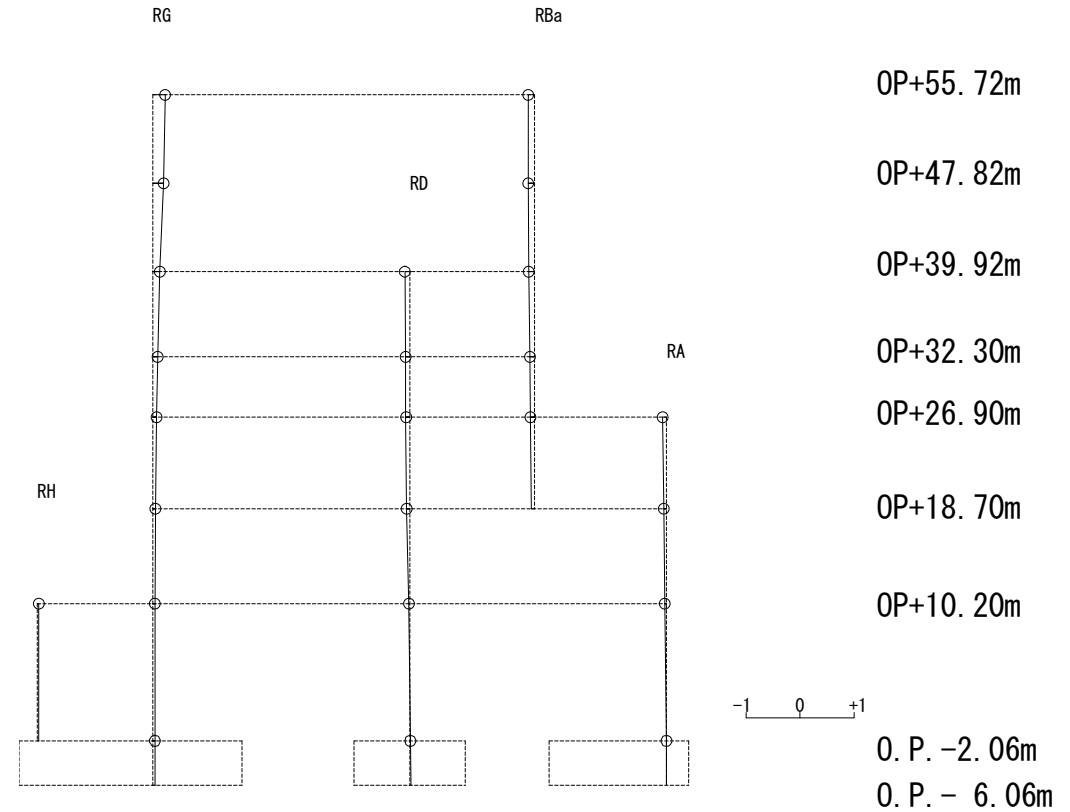
床などの柔性を考慮した解析

固有周期 $T_3=0.077\text{ s}$
 刺激係数 $\beta_3=0.283$

固有周期 $T_3=0.101\text{ s}$
 刺激係数 $\beta_3=0.230$



床剛モデル



床柔モデル

3次モード

図7-26 (3) 主要な固有モード図の比較 (NS方向)

床などの柔性を考慮した解析

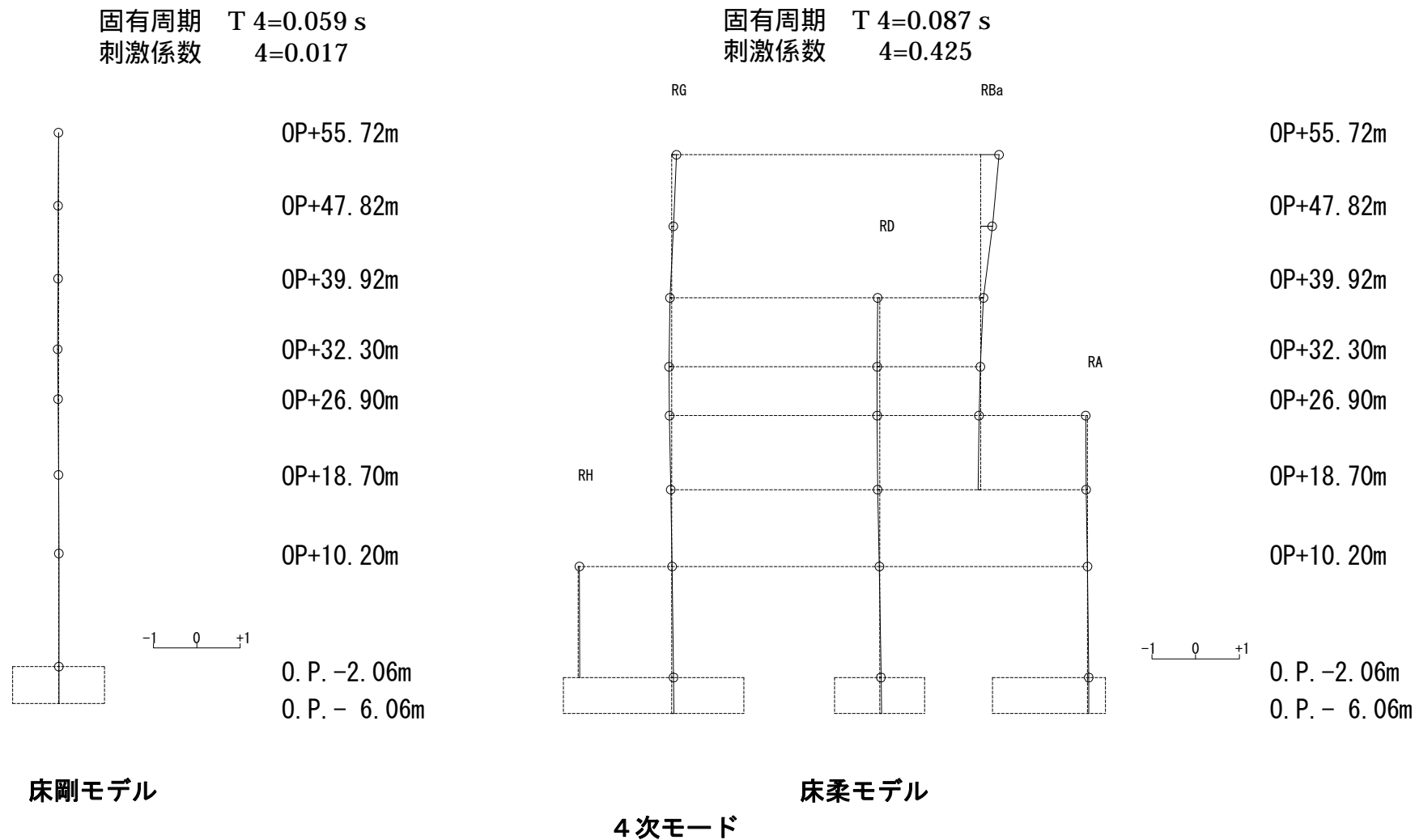


図7-26 (4) 主要な固有モード図の比較 (NS方向)

床などの柔性を考慮した解析

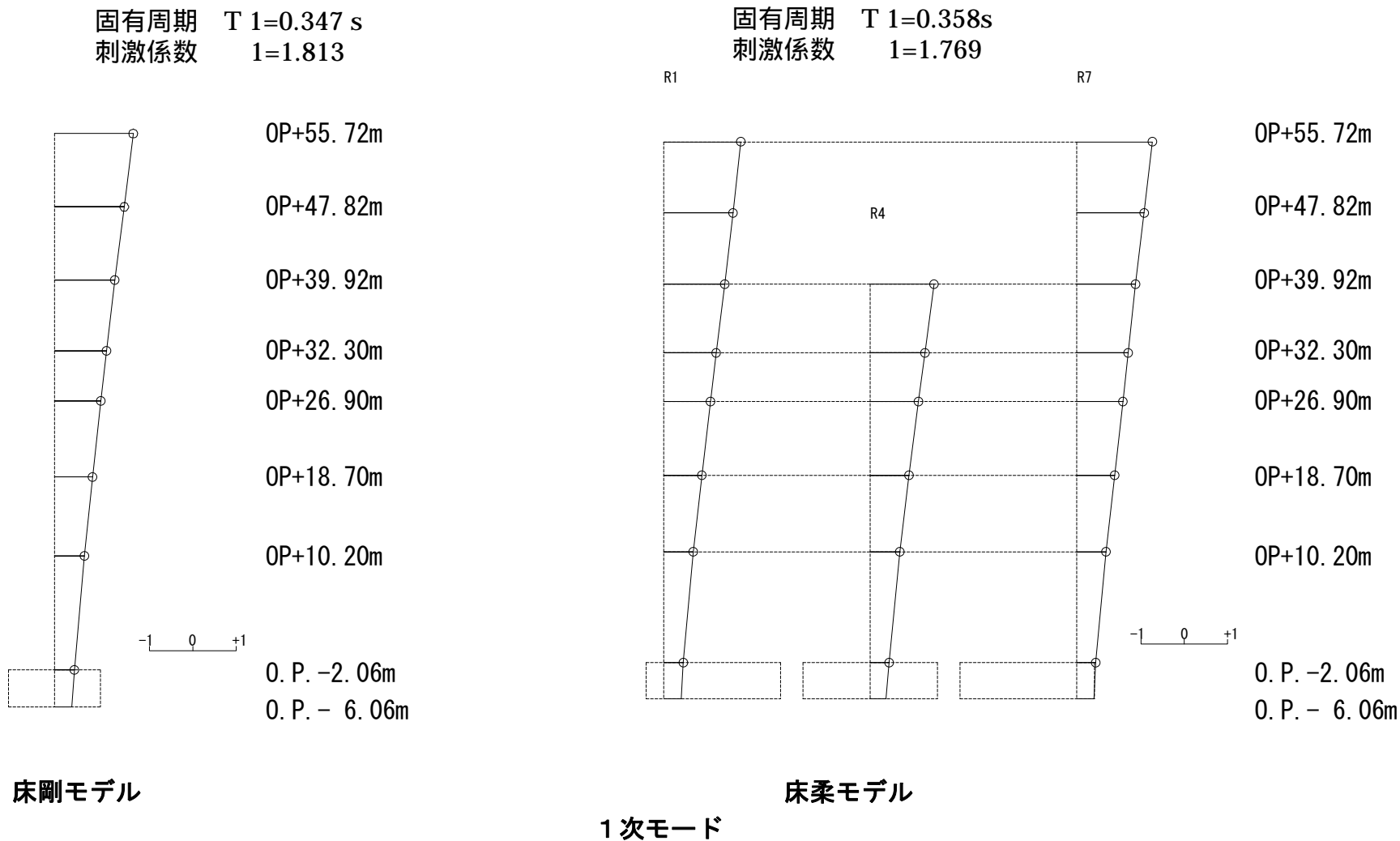


図7-27 (1) 主要な固有モード図の比較 (EW方向)

床などの柔性を考慮した解析

固有周期 $T_2=0.161s$
 刺激係数 $\alpha=1.080$

固有周期 $T_2=0.163s$
 刺激係数 $\alpha=1.118$

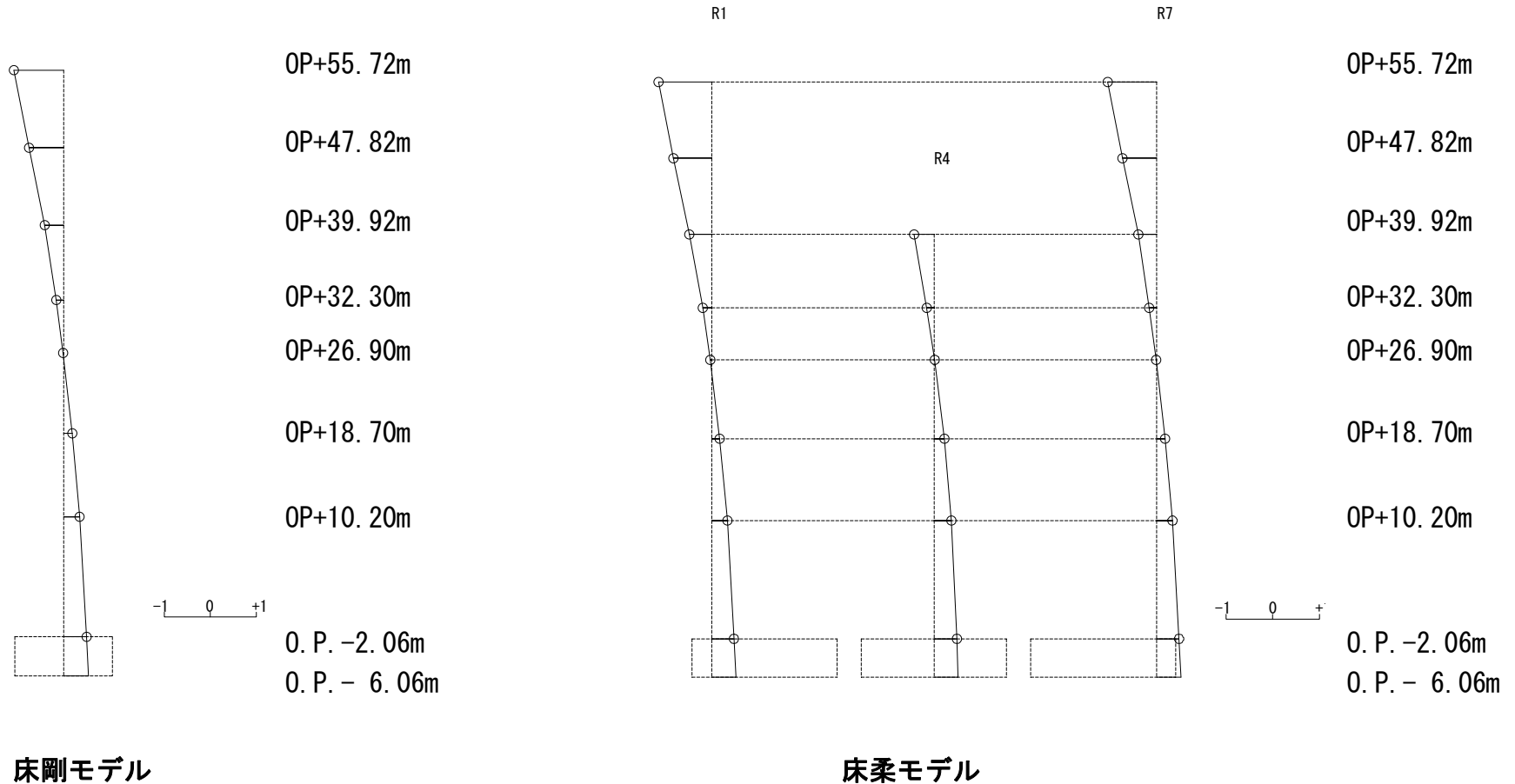


図7-27 (2) 主要な固有モード図の比較 (EW方向)

床などの柔性を考慮した解析

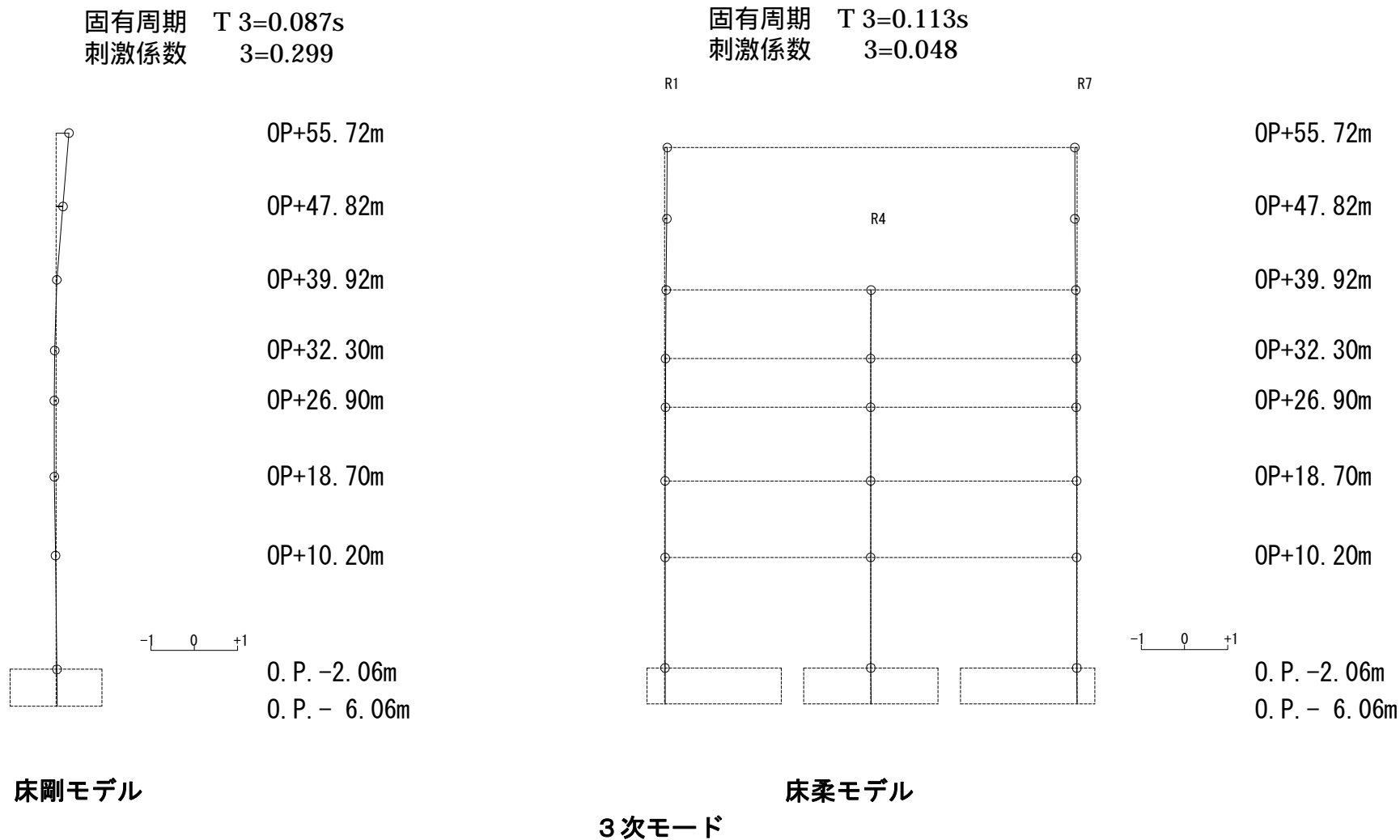
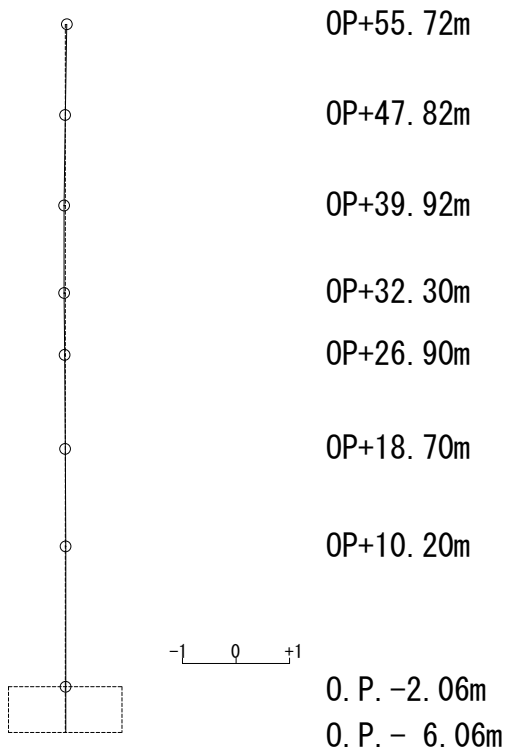


図7-27 (3) 主要な固有モード図の比較 (EW方向)

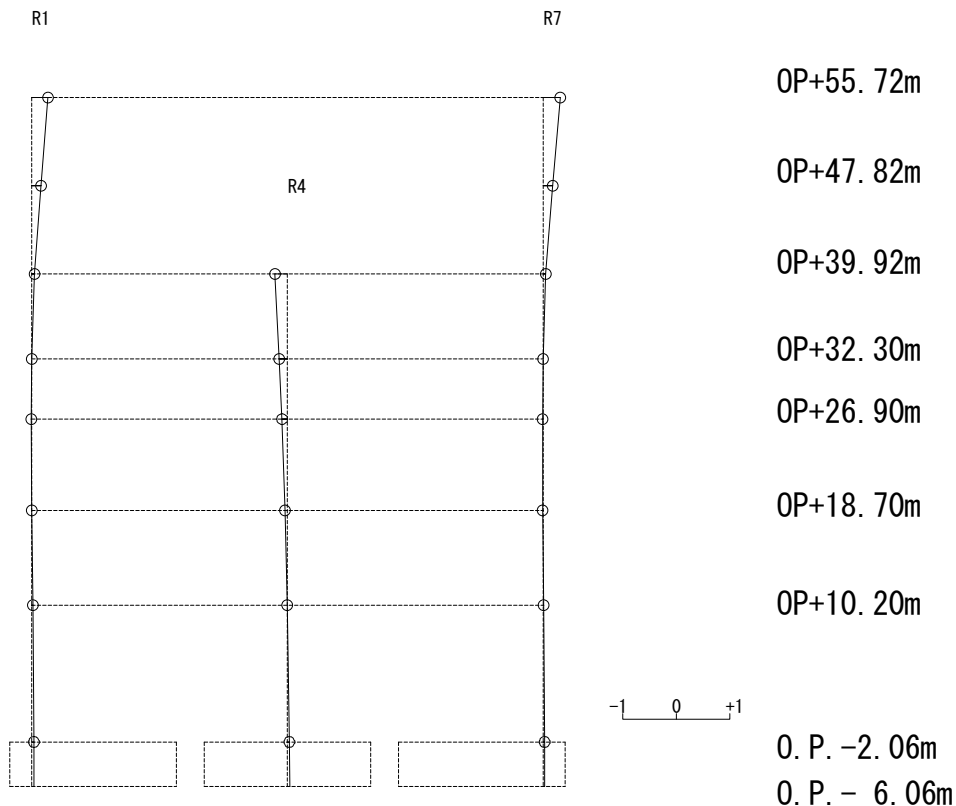
床などの柔性を考慮した解析

固有周期 $T_4=0.064s$
 刺激係数 $\lambda=0.031$



床剛モデル

固有周期 $T_4=0.100s$
 刺激係数 $\lambda=0.318$

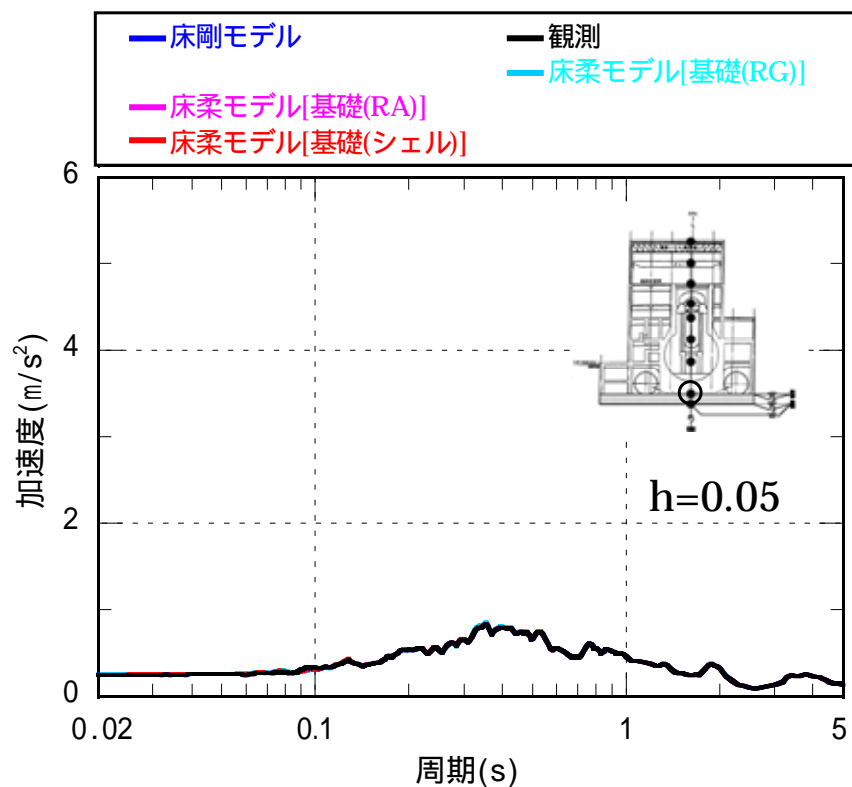


床柔モデル

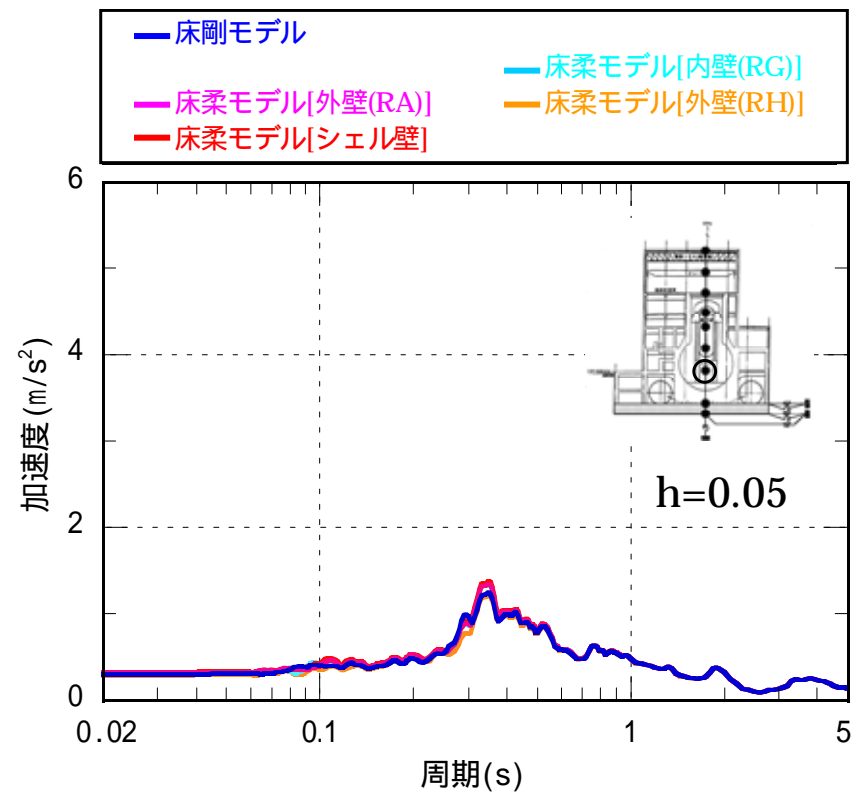
4次モード

図7-27 (4) 主要な固有モード図の比較 (EW方向)

床などの柔性を考慮した解析



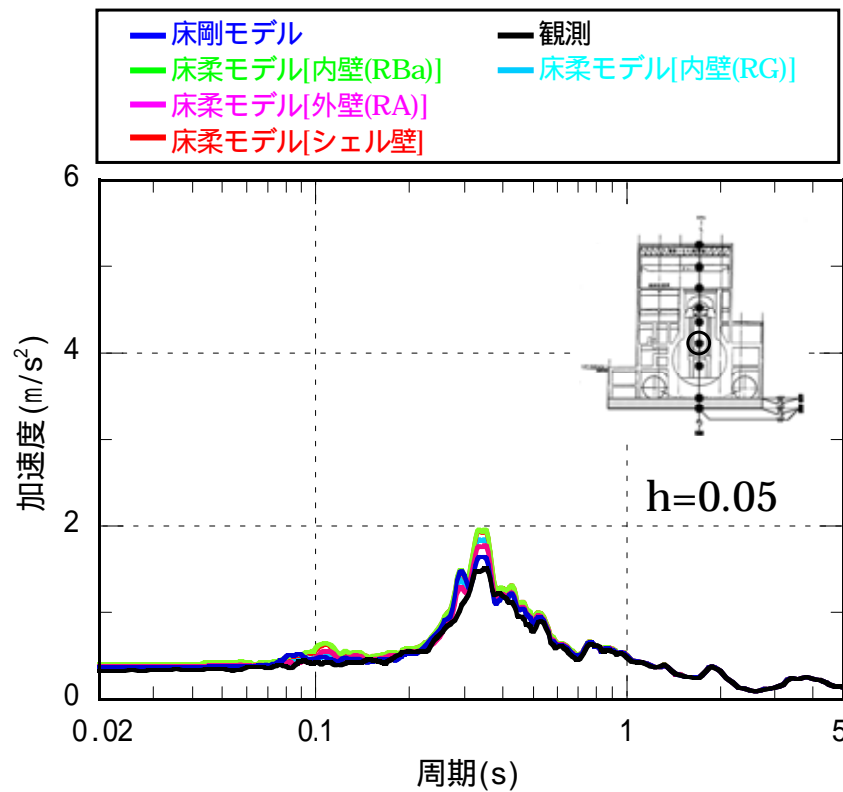
基礎版上 (O. P. -2.06m)



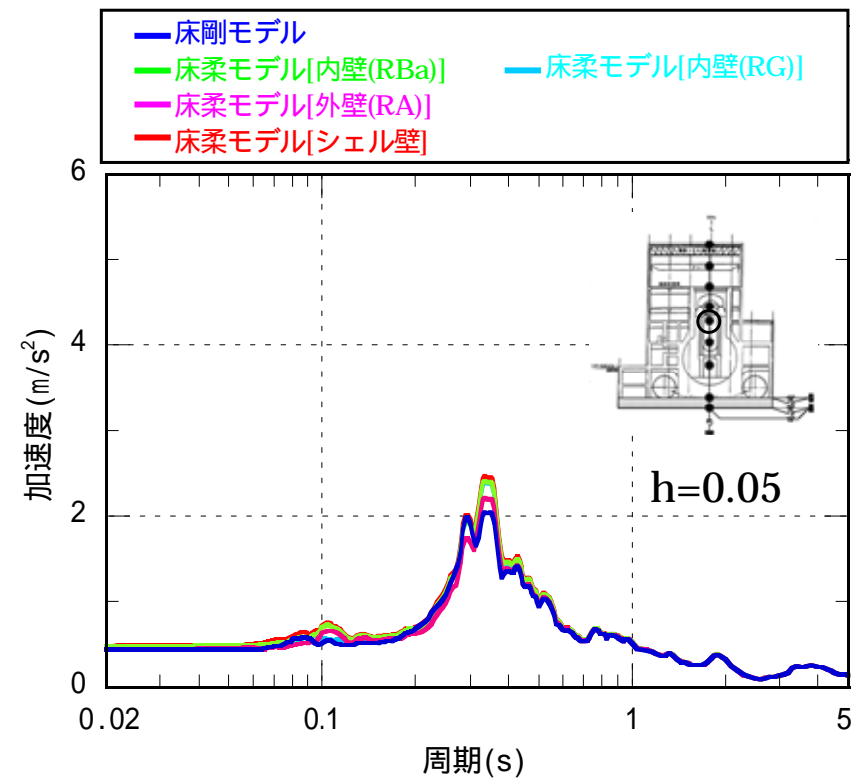
1階 (O. P. 10.2m)

図7-28 (1) 床応答スペクトル (NS方向 $h=0.05$)

床などの柔性を考慮した解析



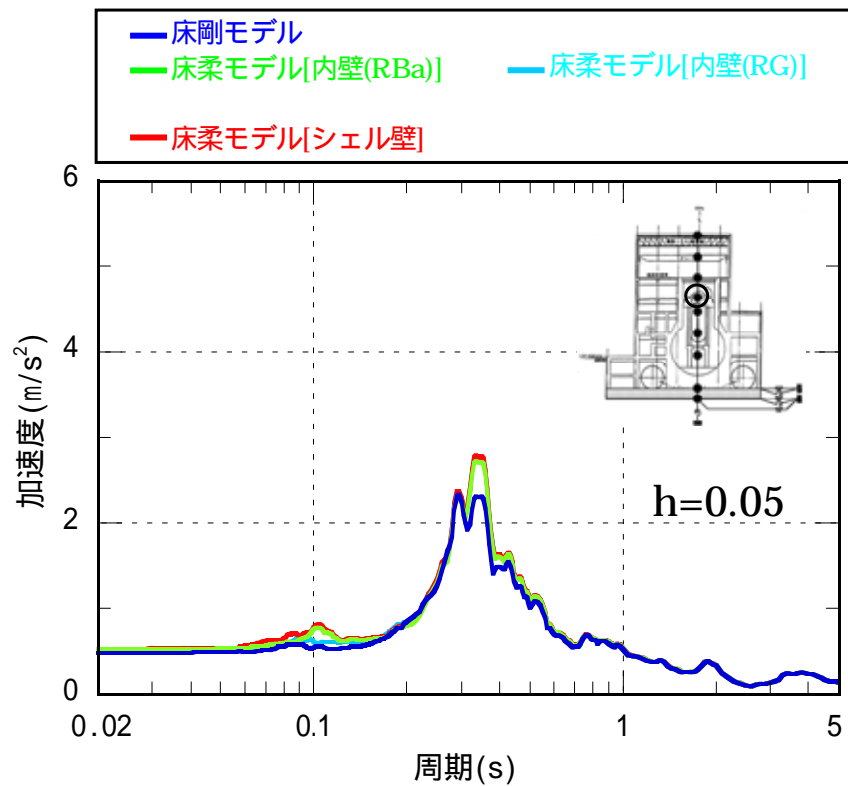
2階 (O.P. 18.7m)



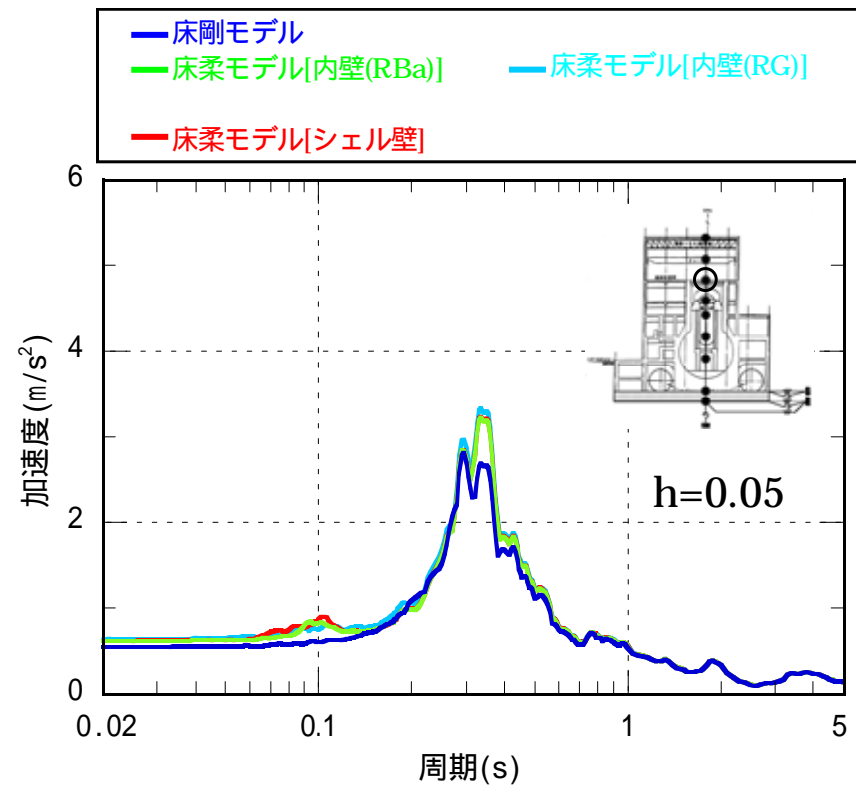
3階 (O.P. 26.9m)

図7-28 (2) 床応答スペクトル (NS方向 h=0.05)

床などの柔軟性を考慮した解析



4階 (O.P. 32.3m)



5階 (O.P. 39.92m)

図7-28 (3) 床応答スペクトル (NS方向 $h=0.05$)

床などの柔性を考慮した解析

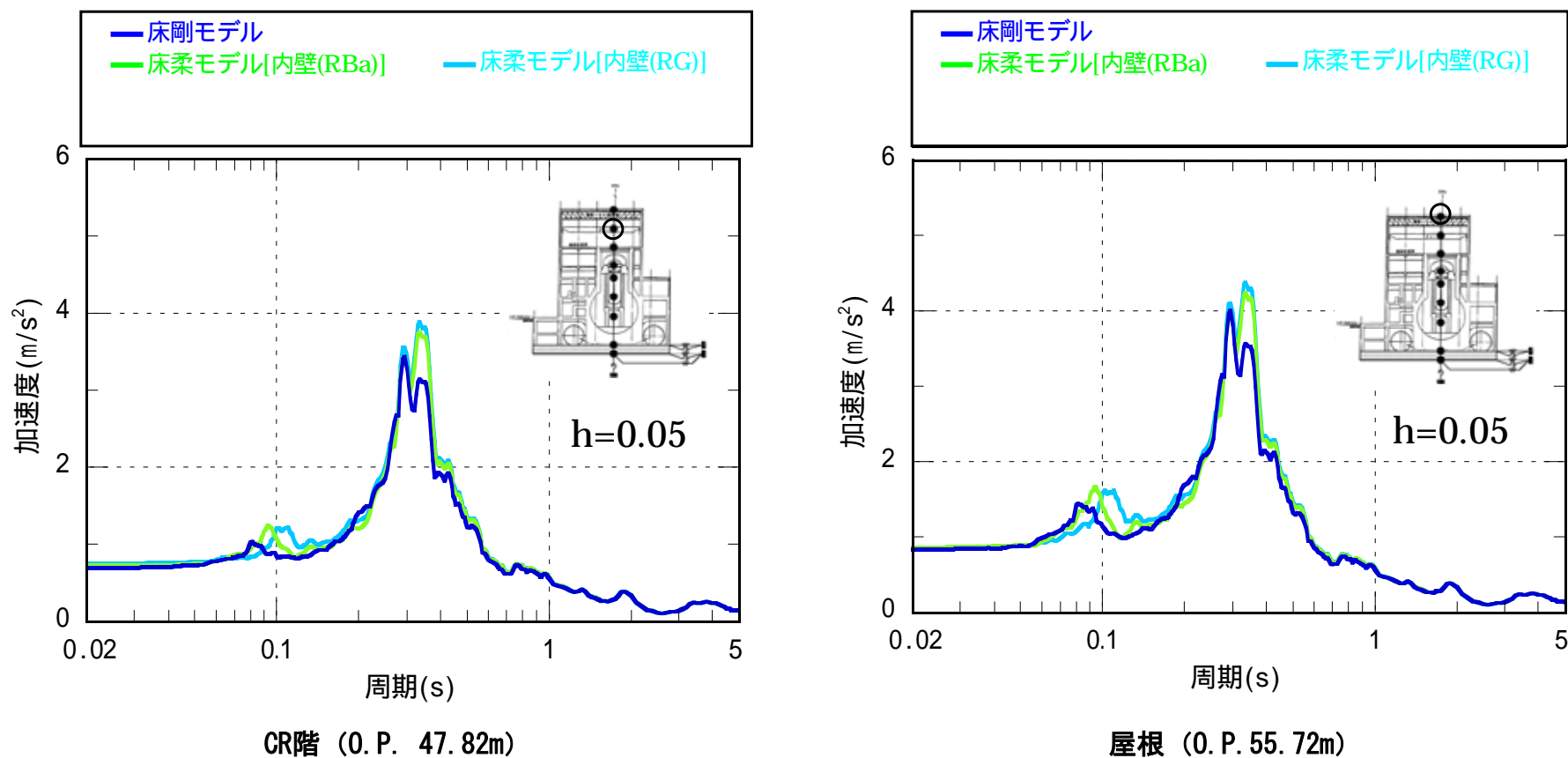
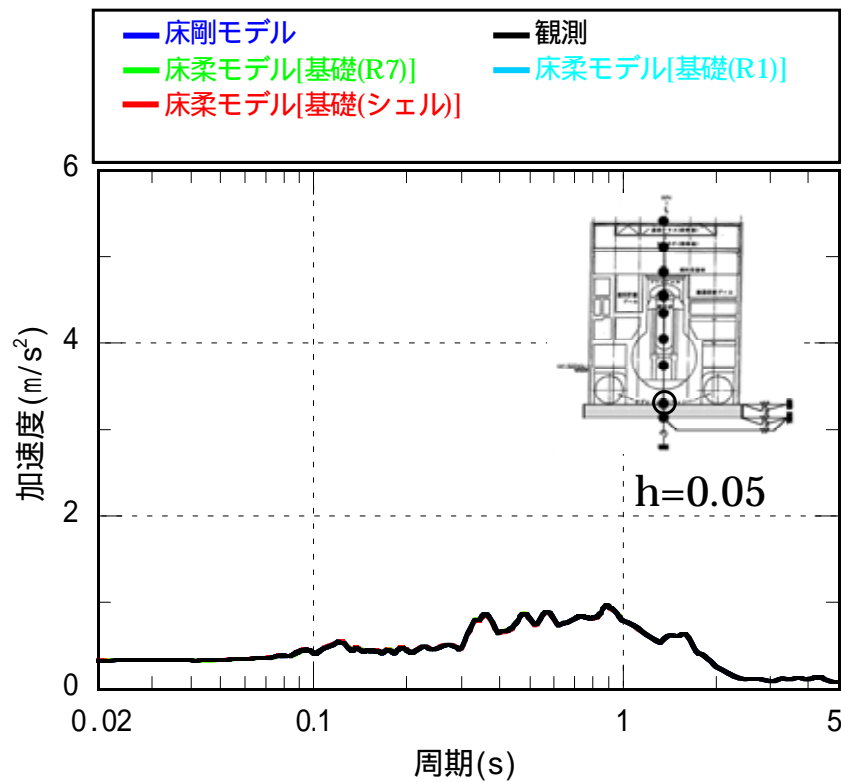
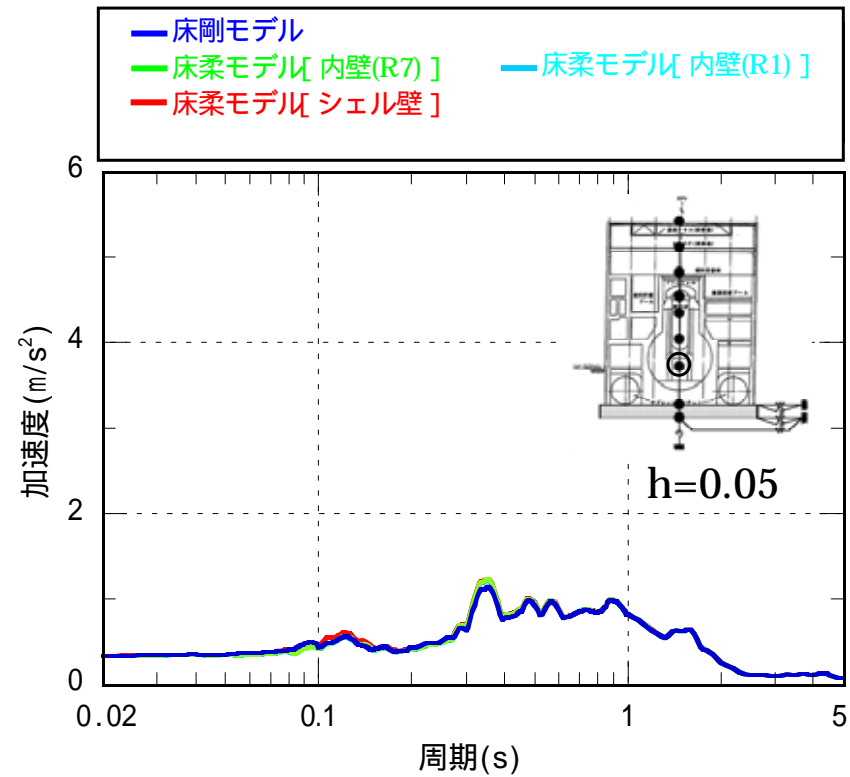


図7-28 (4) 床応答スペクトル (NS方向 $h=0.05$)

床などの柔性を考慮した解析



基礎版上 (O. P. -2.06m)



1階 (O. P. 10.2m)

図7-29 (1) 床応答スペクトル (EW方向 $h=0.05$)

床などの柔性を考慮した解析

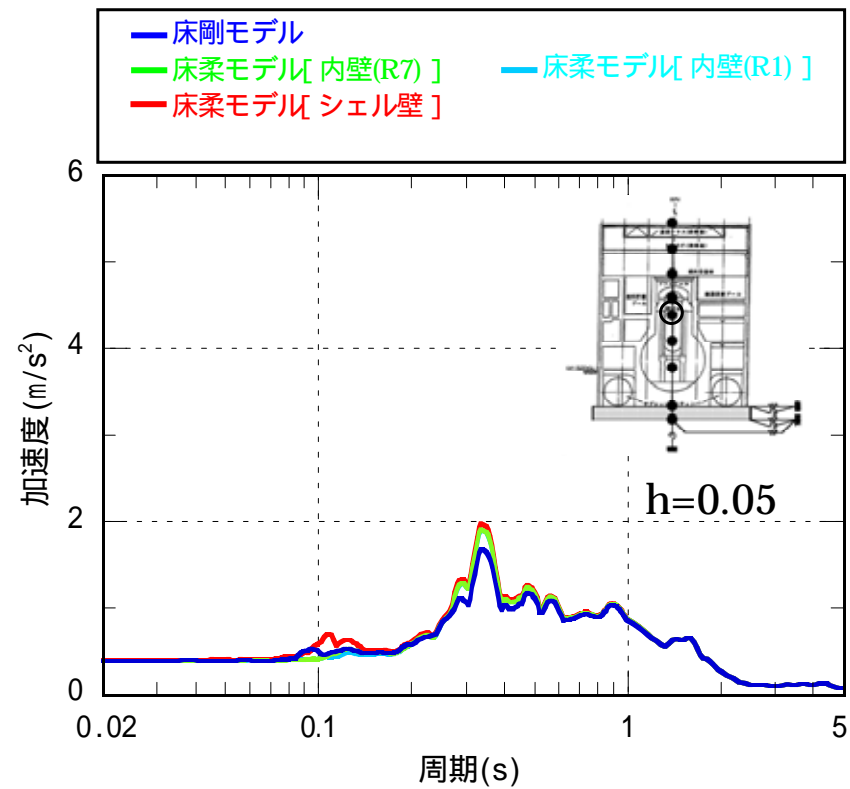
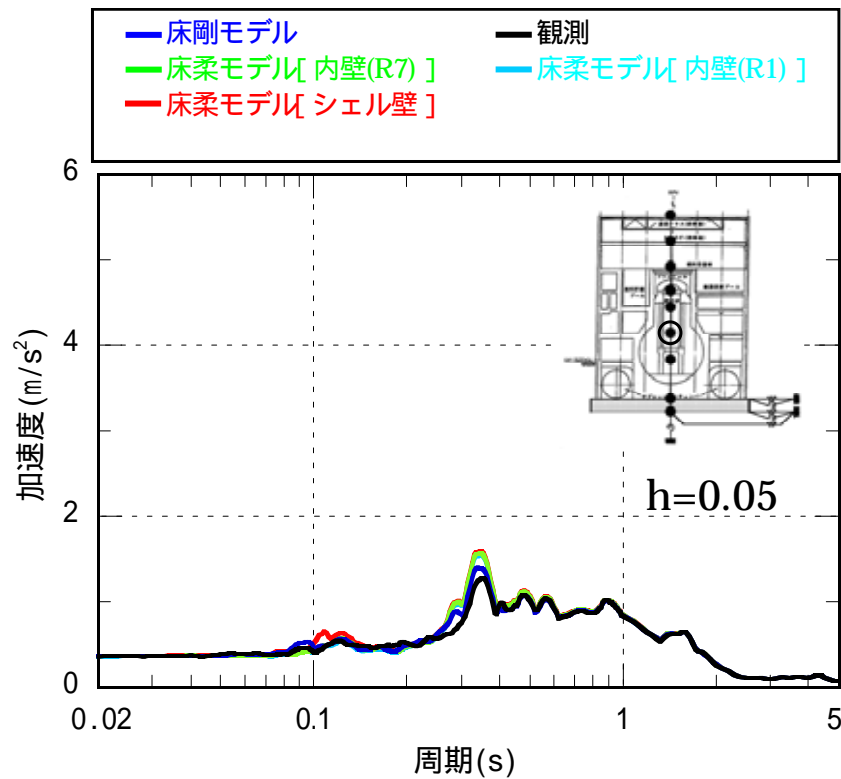
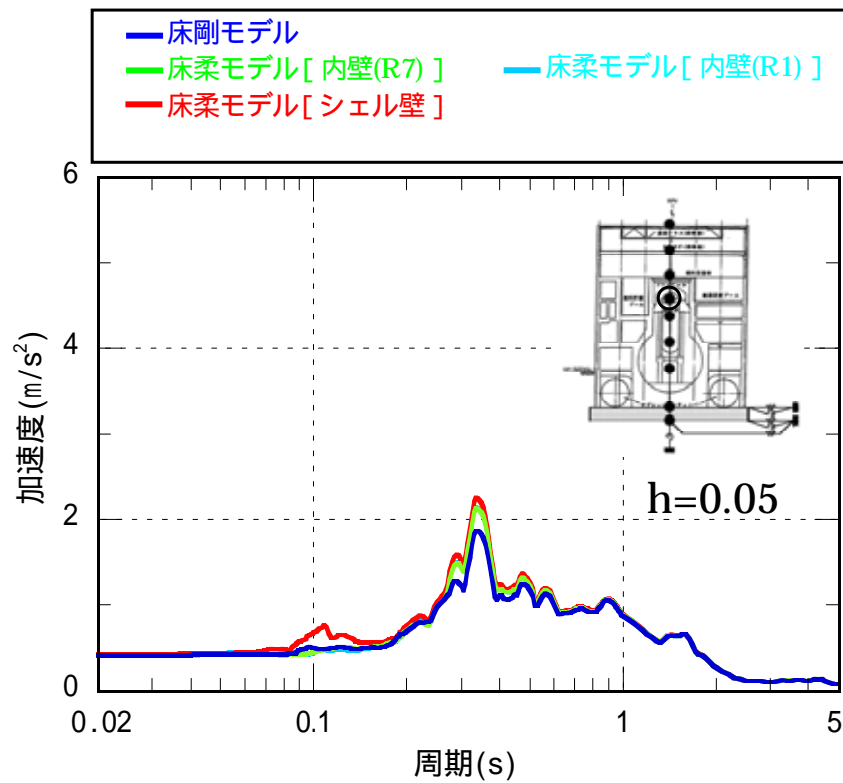
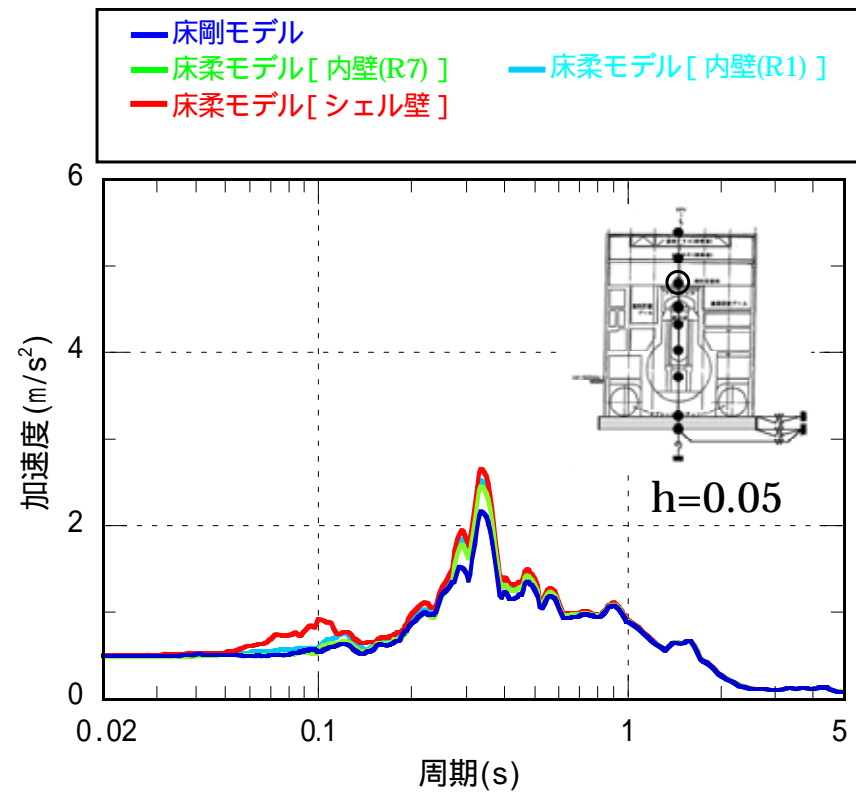


図7-29 (2) 床応答スペクトル (EW方向 h=0.05)

床などの柔性を考慮した解析



4階 (O. P. 32.3m)



5階 (O. P. 39.92m)

図7-29 (3) 床応答スペクトル (EW方向 h=0.05)

床などの柔性を考慮した解析

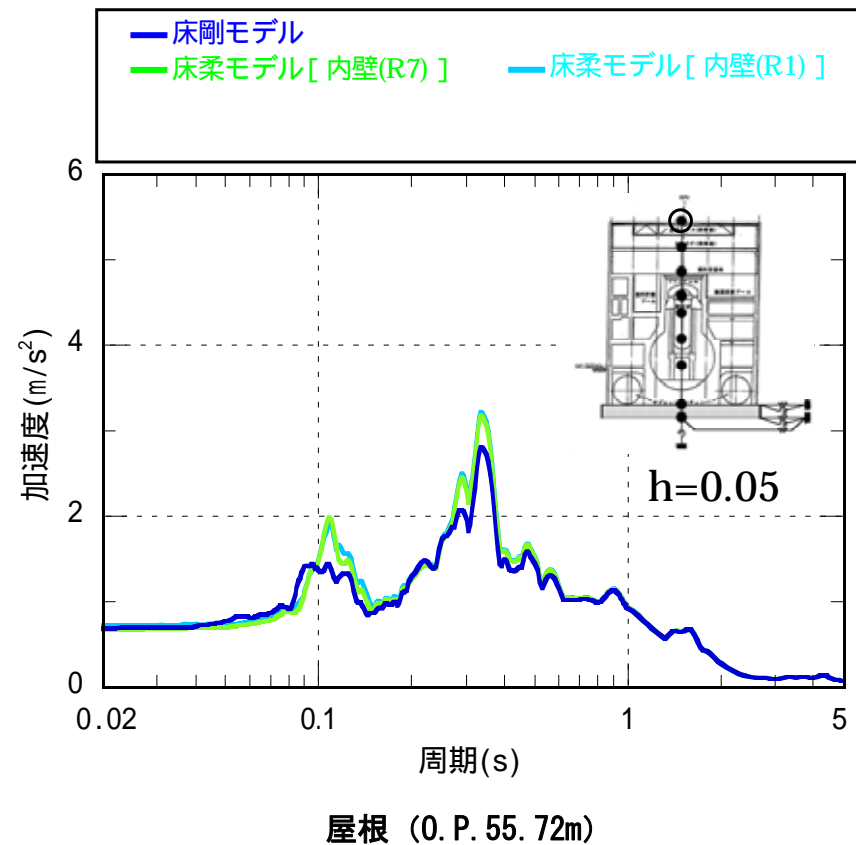
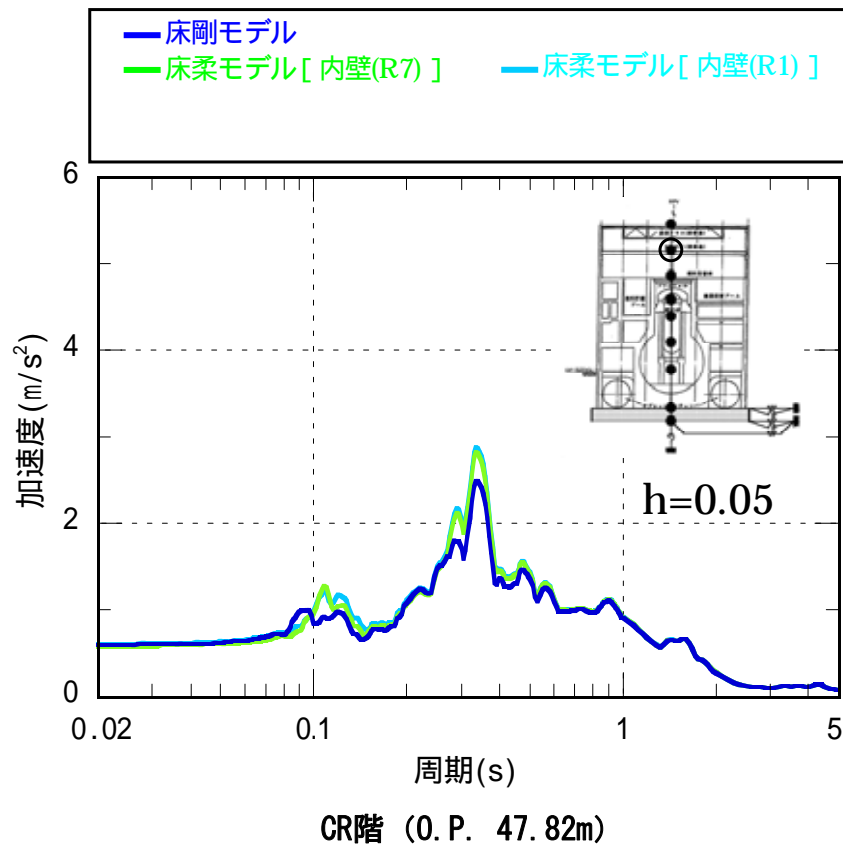


図7-29 (4) 床応答スペクトル (EW方向 $h=0.05$)

床などの柔性を考慮した解析

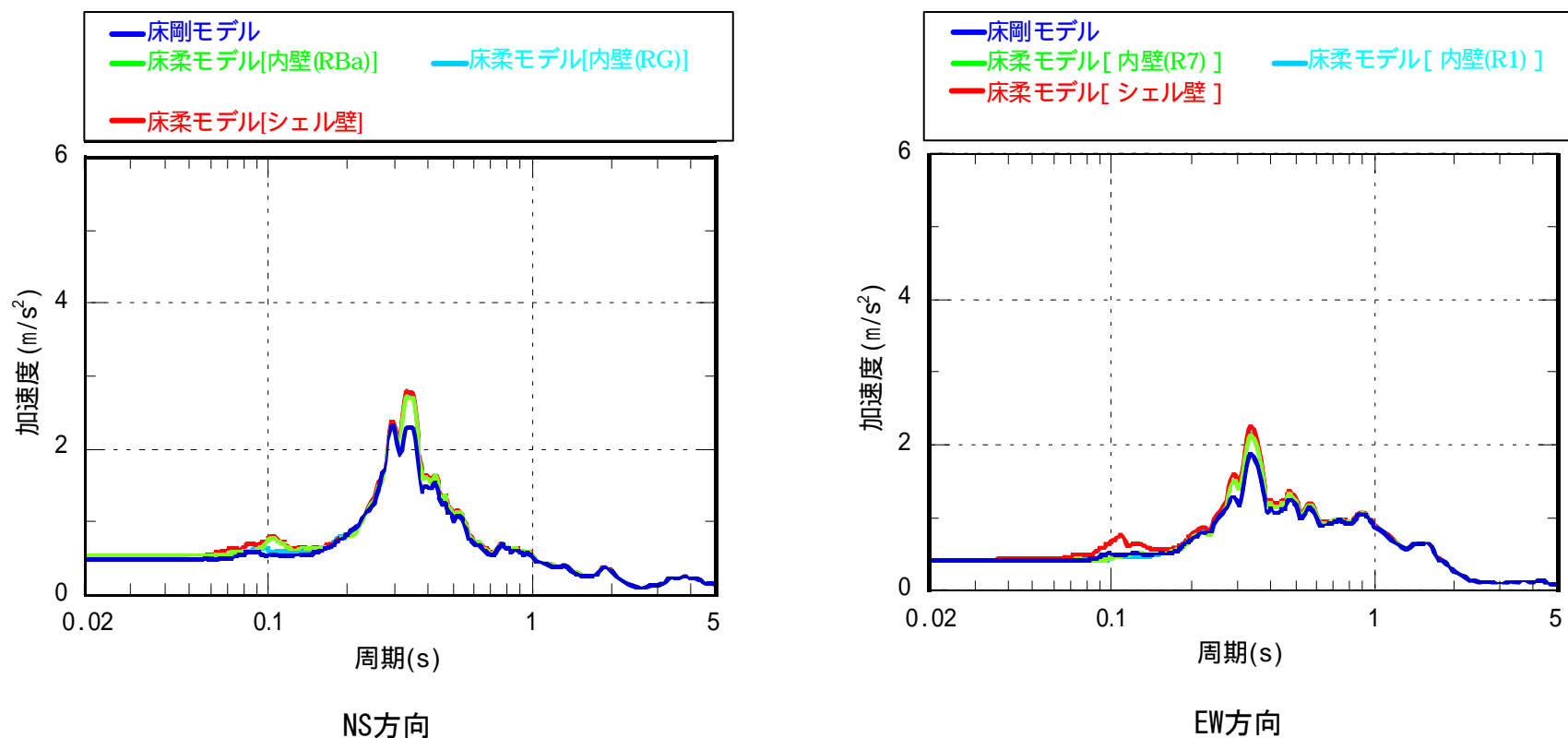


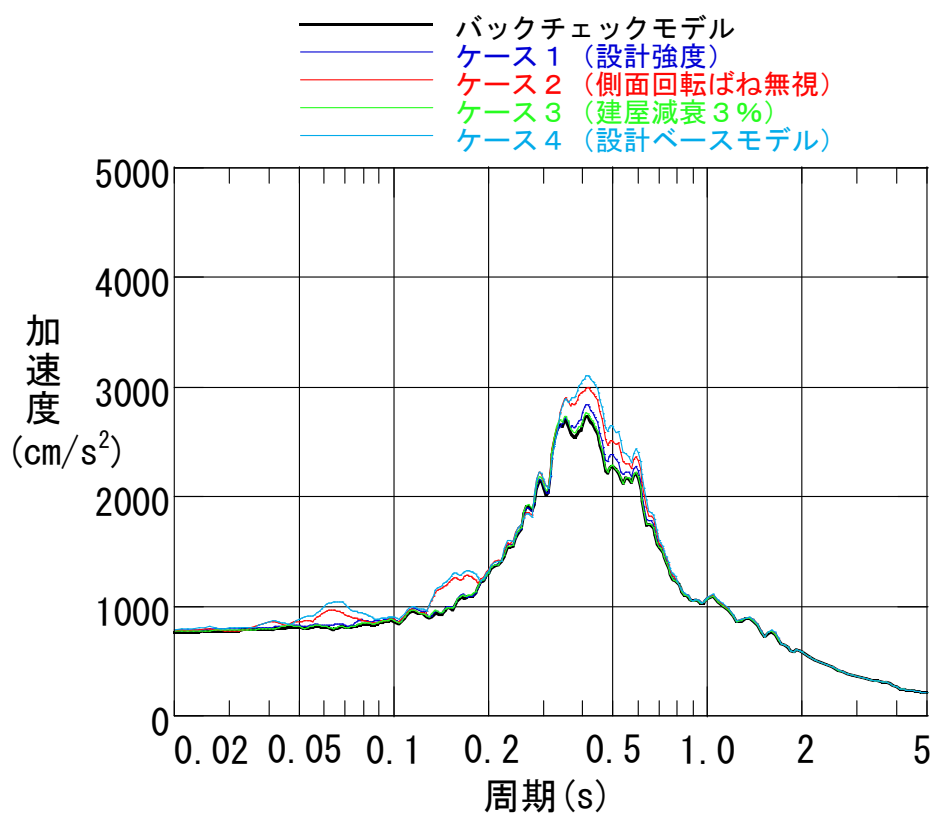
図7-29(5) 床応答スペクトル 4階 (O.P. 32.3m) (h=0.05) (再掲)

観測記録によるシミュレーション解析結果から

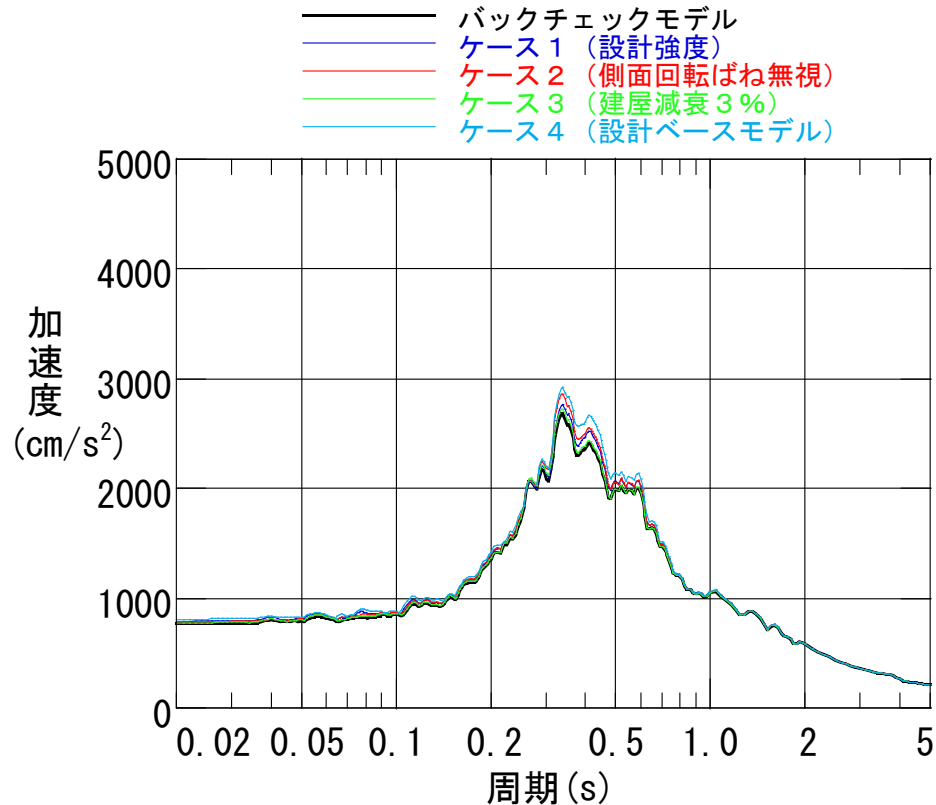
- ・ 床剛モデルの解析結果は、観測記録と概ね整合している。
- ・ 床柔モデルの解析結果は、床剛モデルと概ね良い対応を示し、床柔モデルの場合であっても、柏崎刈羽原子力発電所4号機の間階位置で見られたような特異な応答性状（周期0.1秒及び0.5秒に顕著なピーク）が現れていないことを確認した。

3. 地震応答解析モデルのパラメータスタディにおける床応答スペクトルに対する考察

地震応答解析モデルのパラメータスタディにおける 床応答スペクトルに対する考察



(a) NS方向 オペフロ : 0. P. 39. 92m



(b) EW方向 オペフロ : 0. P. 39. 92m

図7-30 床応答スペクトル (3号機 : Ss-1H:h=0.05)

地震応答解析モデルのパラメータスタディにおいて、側面回転ばねを無視したケース2及びケース4において、NS方向の床応答スペクトルの短周期側 (0.07秒及び0.17秒付近) に二つのピークが見られる。

地震応答解析モデルのパラメータスタディにおける 床応答スペクトルに対する考察

表7-15 解析ケース

解析ケース	コンクリート強度	側面回転ばね	建屋減衰
バックチェックモデル	実強度	水平＋回転	5%
ケース 1（設計強度）	設計基準強度	水平＋回転	5%
<u>ケース 2（側面回転ばね無視）</u>	実強度	<u>水平</u>	5%
ケース 3（建屋減衰3%）	実強度	水平＋回転	3%
<u>ケース 4（設計ベースモデル）</u>	設計基準強度	<u>水平</u>	5%

地震応答解析モデルのパラメータスタディにおける 床応答スペクトルに対する考察

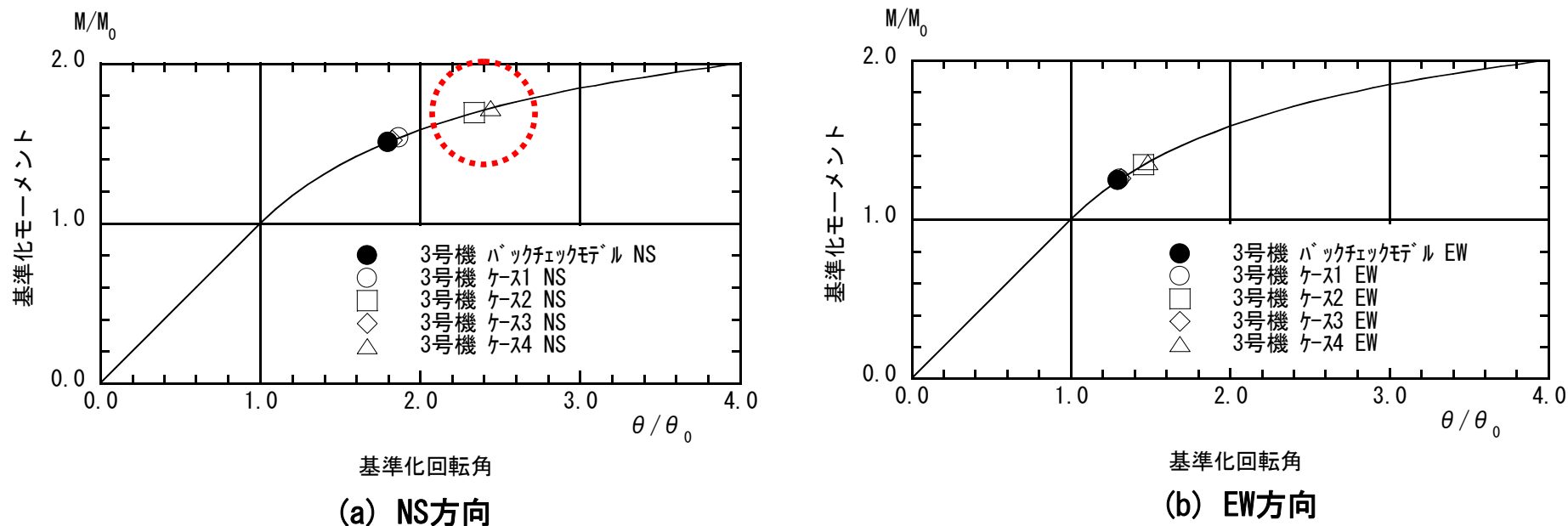


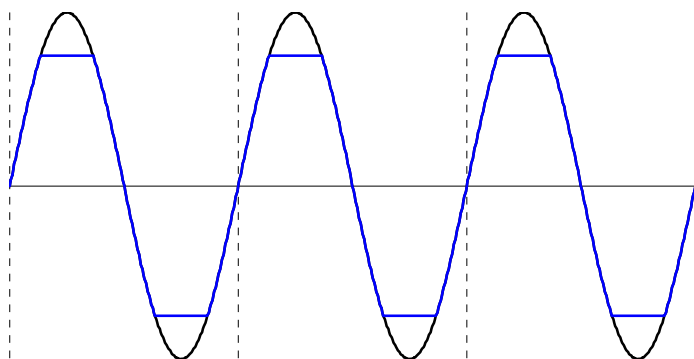
図7-31 底面回転ばねの曲げモーメントと回転角の関係
(3号機 : $S_s-1H:h=0.05$)

ケース2及びケース4のNS方向では、底面回転ばねの非線形化が進んでおり、短周期側にピークが出現するのは、側面回転ばねを無視したことによる応答増加により、底面回転ばねの非線形化が進んだためと考えられる。

地震応答解析モデルのパラメータスタディにおける 床応答スペクトルに対する考察

(1) ~ (3) の文献によると、底面回転ばねの非線形化が進むにつれて、応答加速度の水平成分に山つぶれ現象が発生し、応答スペクトルにおいて、加振振動数の奇数倍の成分が卓越するのが明瞭に確認できると、模型試験により示されている。

- (1) 半谷、秋野他 : 「原子炉建屋の基礎浮上りに関する模型試験 (その1) ~ (その6)」日本建築学会大会梗概集昭和61年8月
- (2) 同上 : 「原子炉建屋の基礎浮上りに関する現地試験 (その1) ~ (その6)」日本建築学会大会梗概集昭和62年10月
- (3) 同上 : 「原子炉建屋の基礎浮上りに関する模型試験・総合評価 (その1) ~ (その7)」日本建築学会大会梗概集昭和63年10月



底面回転ばねの非線形化による応答加速度の山つぶれ現象

地震応答解析モデルのパラメータスタディにおける 床応答スペクトルに対する考察

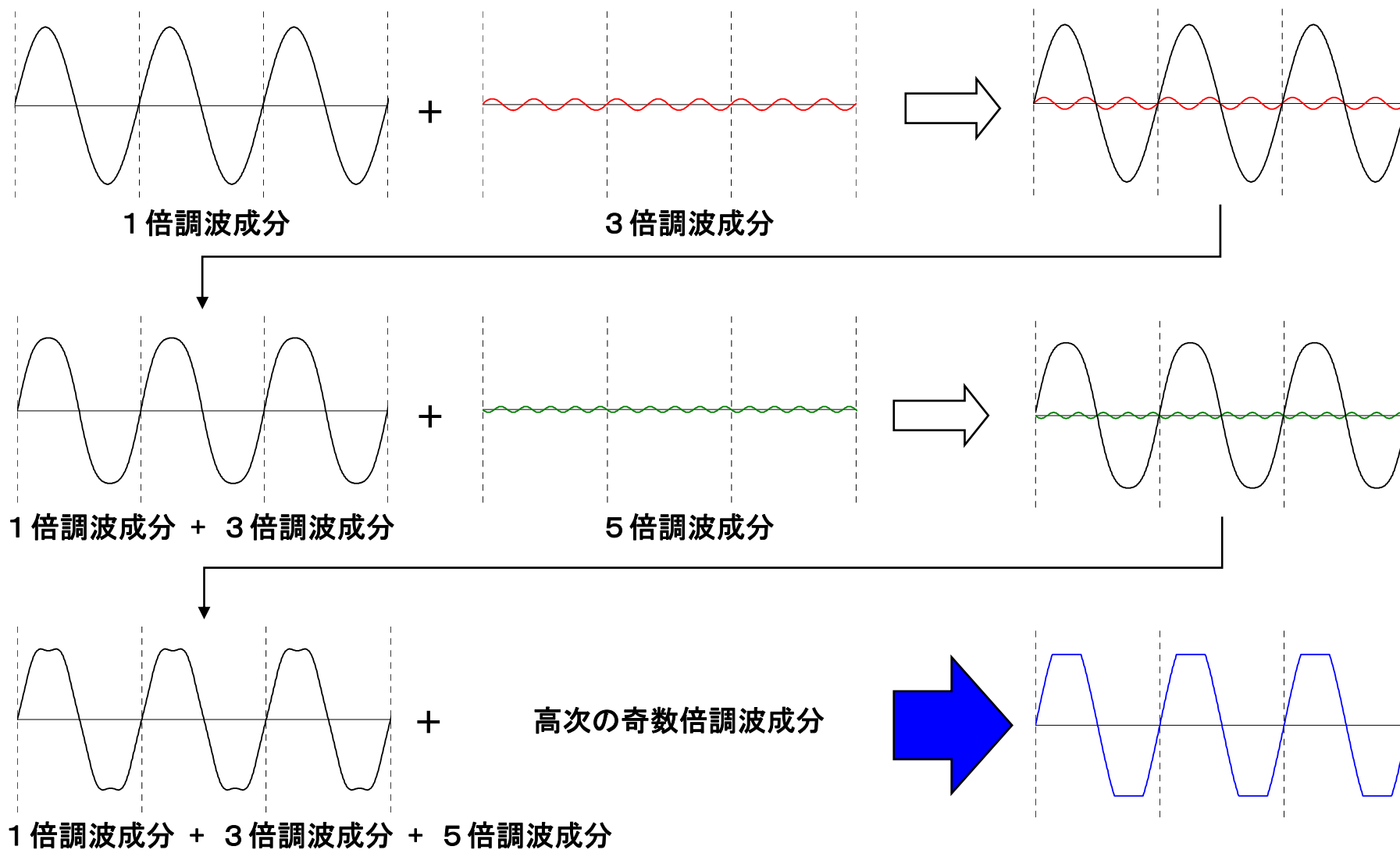


図7-32 山つぶれ波形の概念

地震応答解析モデルのパラメータスタディにおける 床応答スペクトルに対する考察

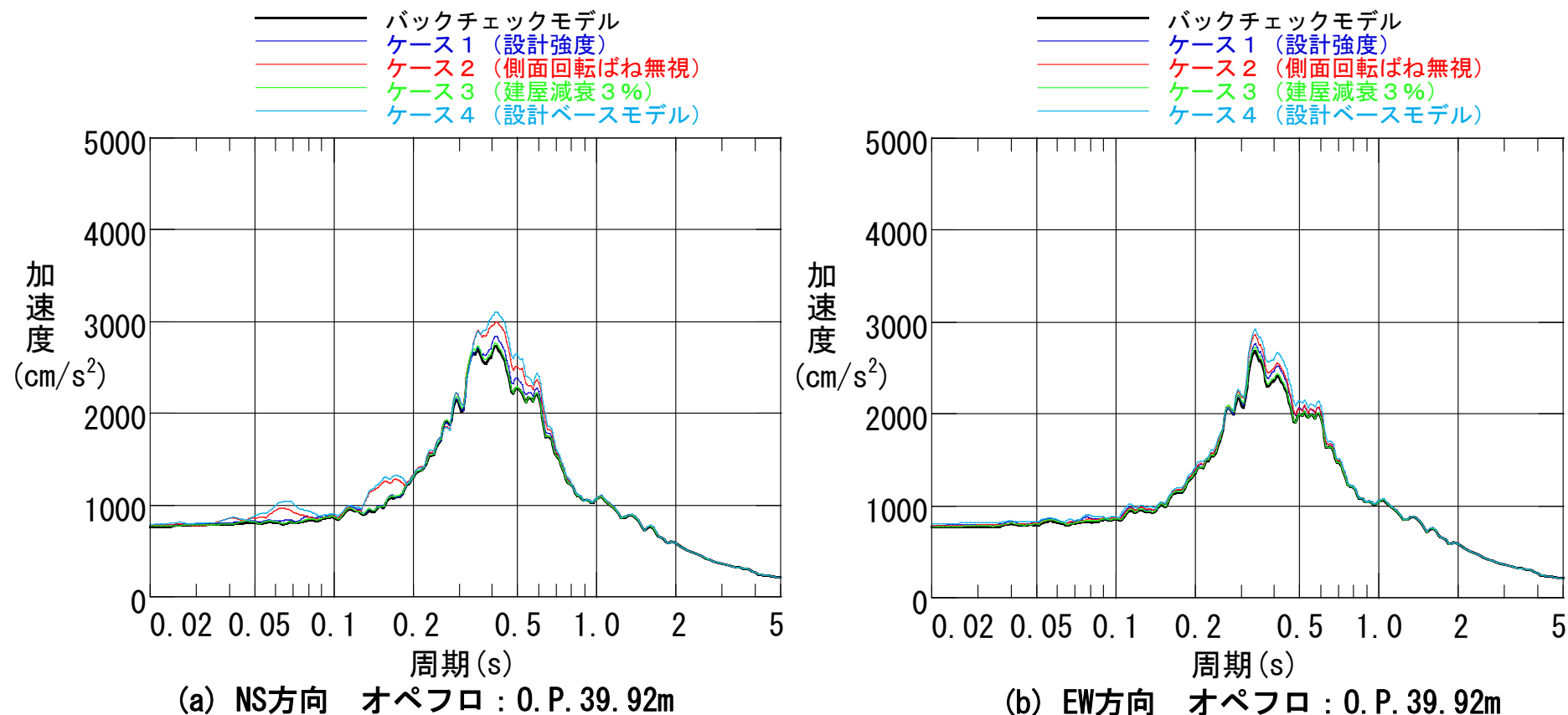


図7-33 床応答スペクトル (3号機 : Ss-1H:h=0.05)

NS方向の床応答スペクトルに見られる短周期側の二つのピークは、それぞれ、底面回転ばねの非線形化に伴う3倍調波および5倍調波によるものと考えられる。なお、3号機の基礎形状は47.0(NS)×57.4m(EW)となっており、長辺方向であるEW方向は、NS方向に比べて底面回転ばねの非線形化が生じにくく、NS方向のような現象は見られなかったものと考えられる。

地震応答解析モデルのパラメータスタディにおける 床応答スペクトルに対する考察

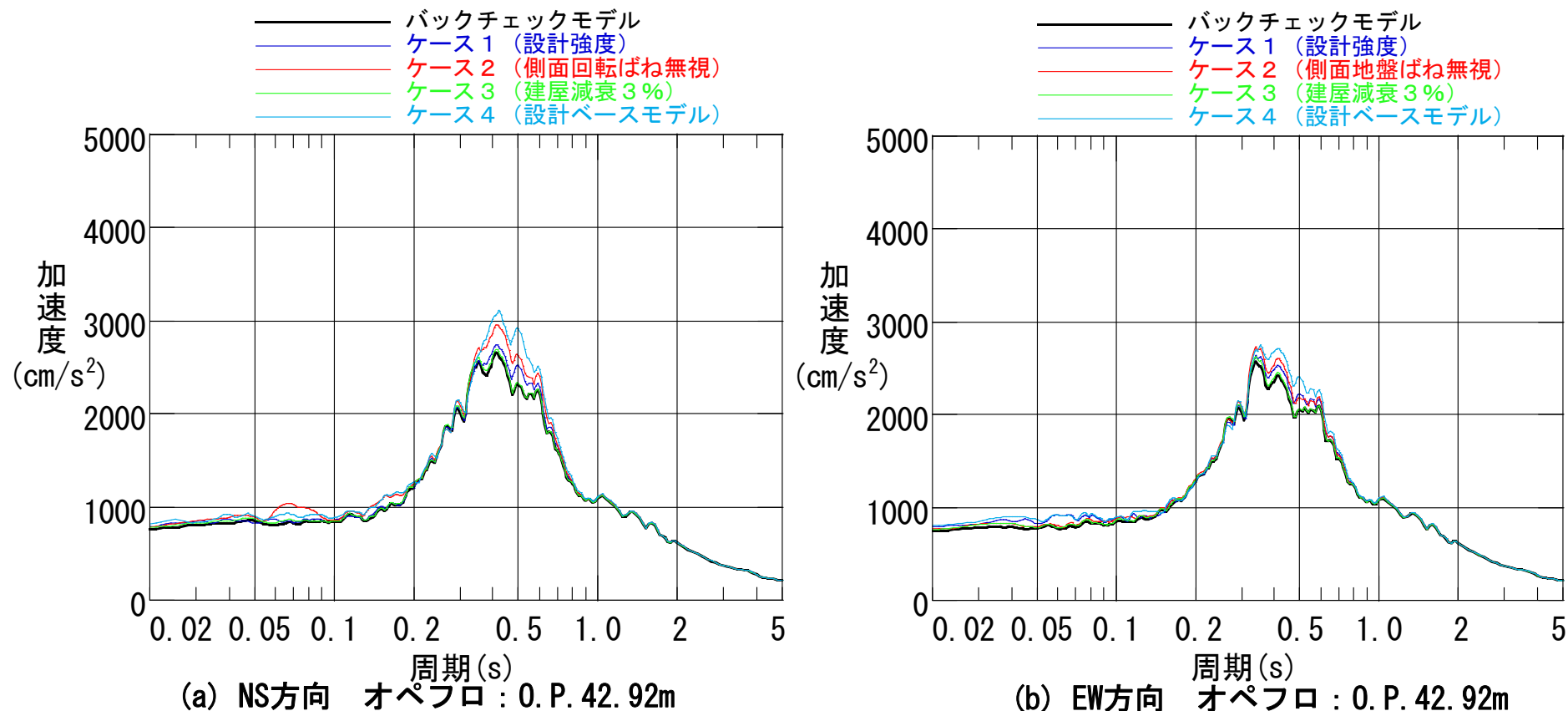
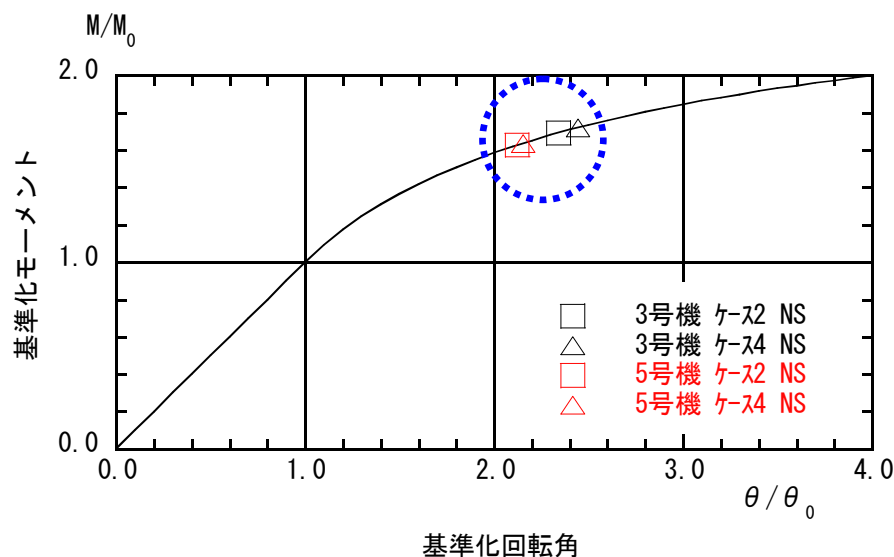


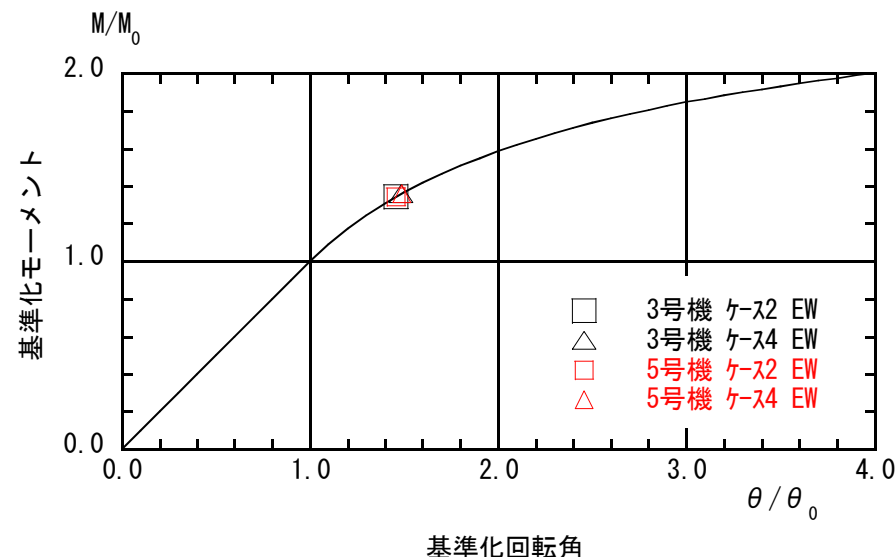
図7-34 床応答スペクトル (5号機 : Ss-1H : h=0.05)

3号機と同様に、5号機のNS方向においても、側面回転ばねを無視したケース2及びケース4において、床応答スペクトルの短周期側 (0.07秒及び0.17秒付近) に二つのピークがあるが、3号機に比べるとやや小さい。

地震応答解析モデルのパラメータスタディにおける 床応答スペクトルに対する考察



(a) ケース 2、4 : NS方向 : Ss-1H



(b) ケース 2、4 : EW方向 : Ss-1H

図7-35 底面回転ばねの曲げモーメントと回転角の関係
(3号機と5号機の比較)

3号機の基礎形状は47.0(NS)×57.4m(EW)、5号機の基礎形状は49.0(NS)×57.4m(EW)であり、5号機はNS方向の基礎幅が2m大きい。よって、図7-35に示すように、3号機に比べて、底面回転ばねの非線形化が起こりにくくなり、NS方向の床応答スペクトルに見られる二つのピークが小さくなっていると考えられる。

Ⅱ. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

1 評価概要

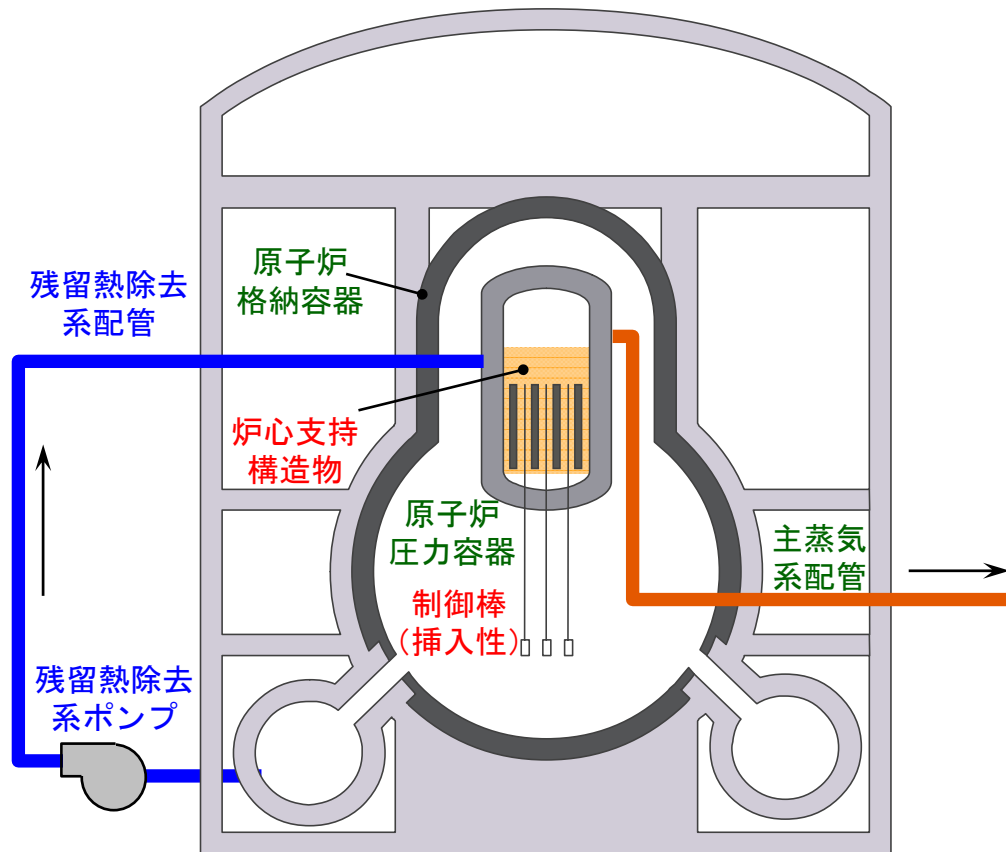
- 基準地震動 S_s に対する耐震設計上重要な機器・配管系の安全機能の保持の観点から耐震安全性の評価を実施
- 中間報告における評価対象施設は、新耐震指針によるSクラスの施設のうち、原子炉を「止める」、 「冷やす」、 放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する主要な施設

具体的な評価対象設備、評価内容等について、次ページ以降に示す

評価対象設備（福島第一原子力発電所3号機）

1F-5と同じ

- 原子炉を「止める」，「冷やす」，放射性物質を「閉じ込める」に係る安全上重要な機能を有する次の主要な施設

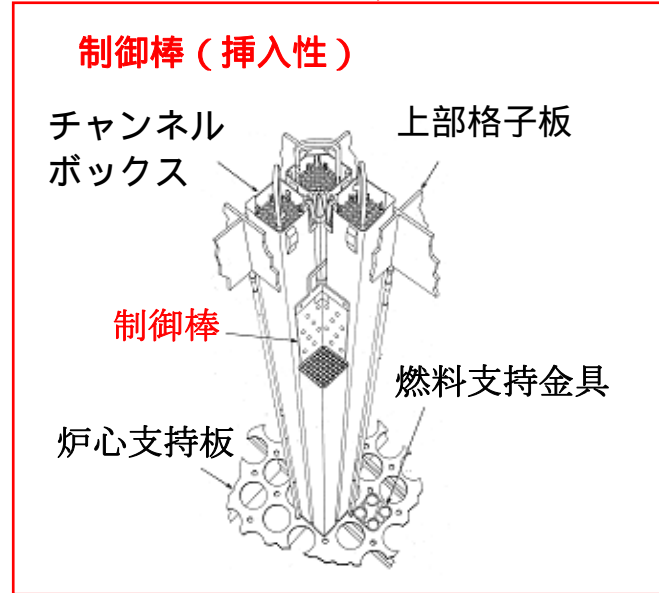
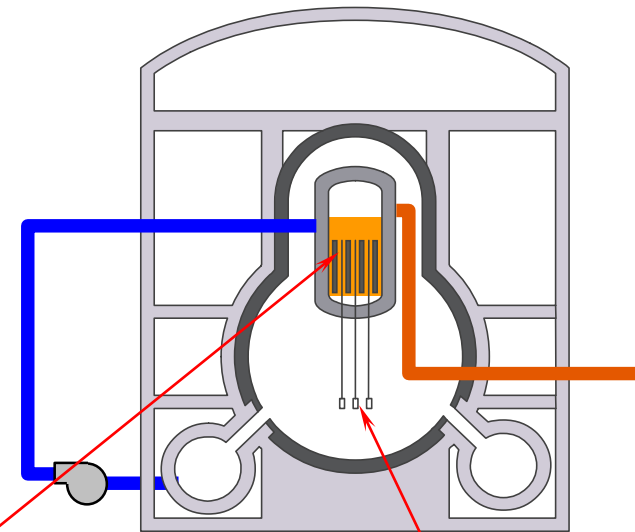
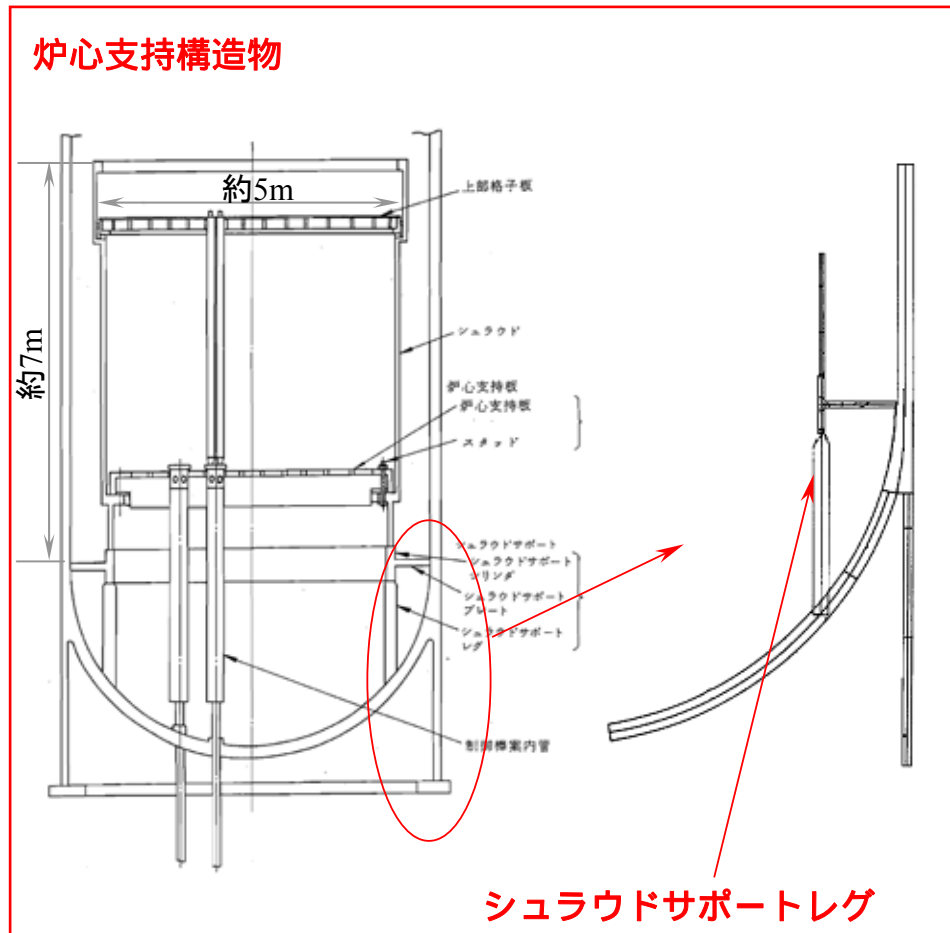


- 「止める」
 - ・ 制御棒（挿入性）
 - ・ 炉心支持構造物
- 「冷やす」
 - ・ 残留熱除去系ポンプ
 - ・ 残留熱除去系配管
- 「閉じ込める」
 - ・ 原子炉圧力容器
 - ・ 主蒸気系配管
 - ・ 原子炉格納容器

評価対象部位 (福島第一原子力発電所 3号機)

(1/3)

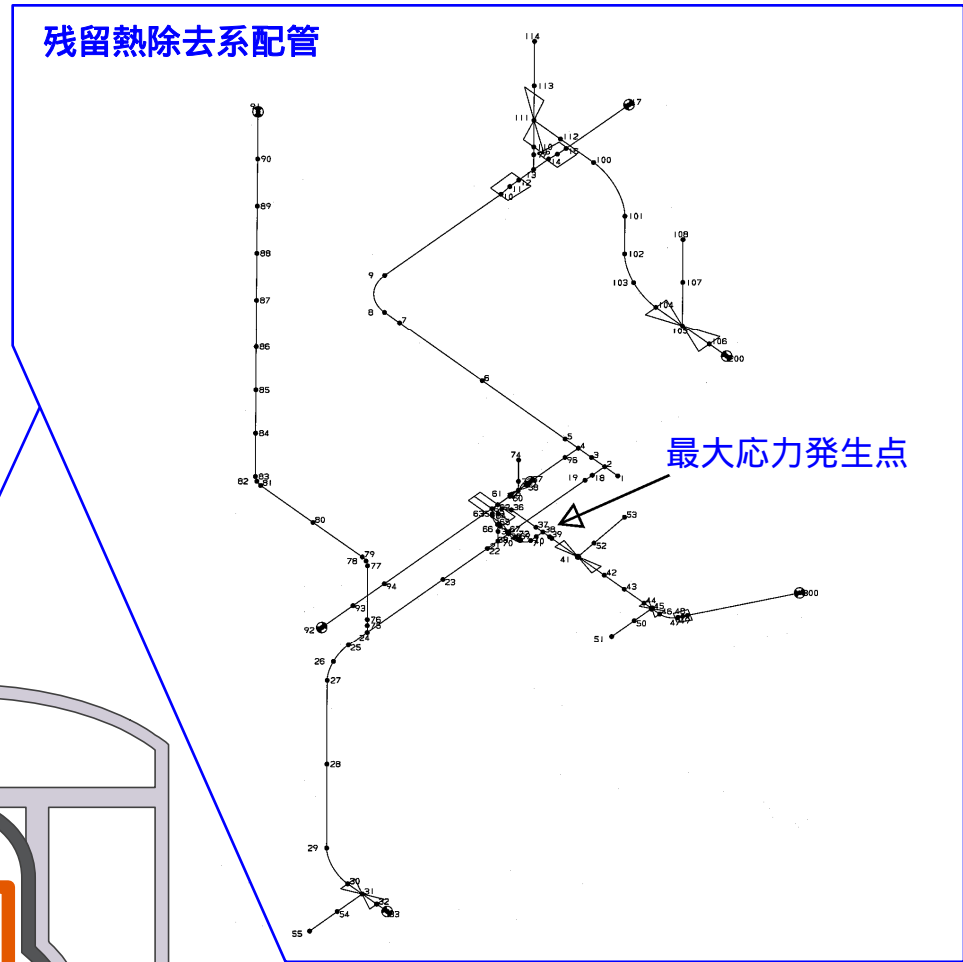
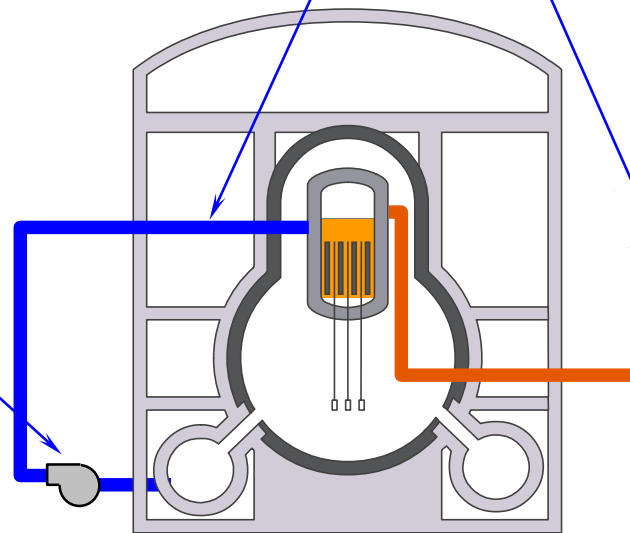
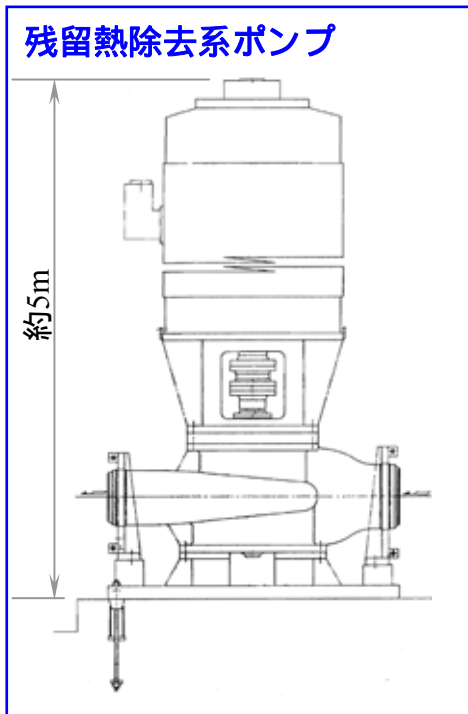
■ 「止める」



評価対象部位 (福島第一原子力発電所 3号機)

(2/3)

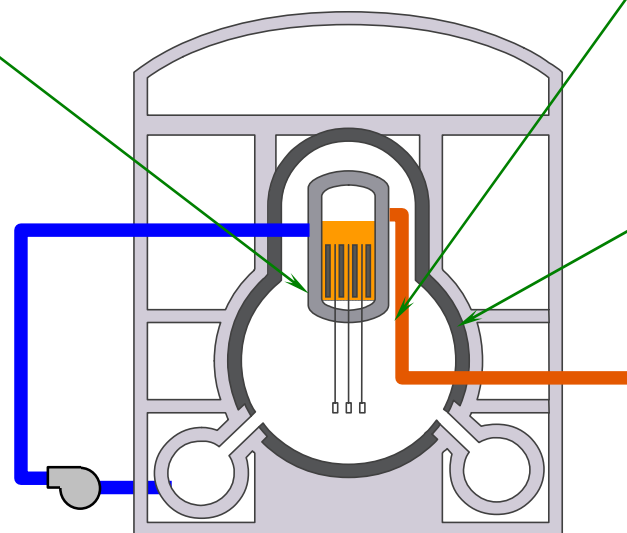
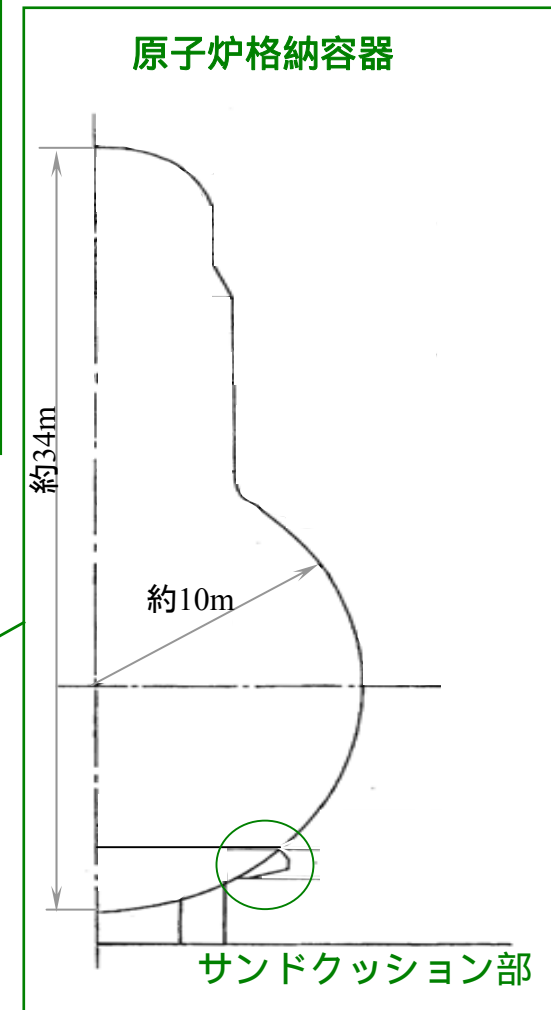
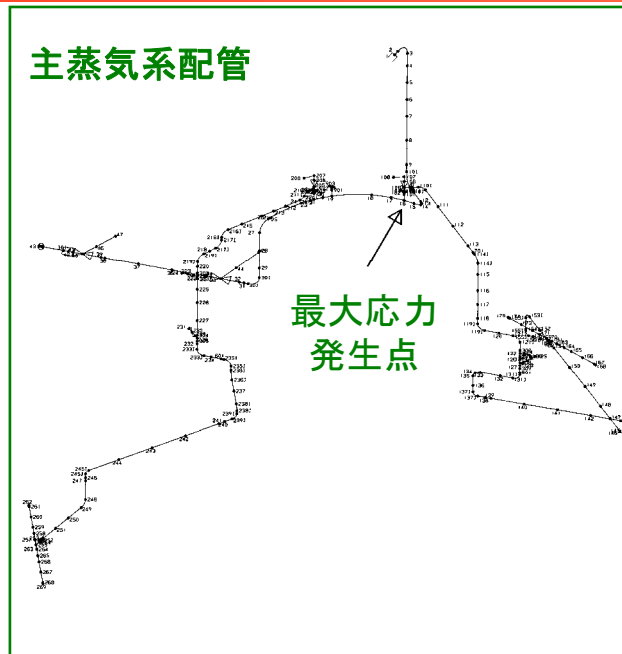
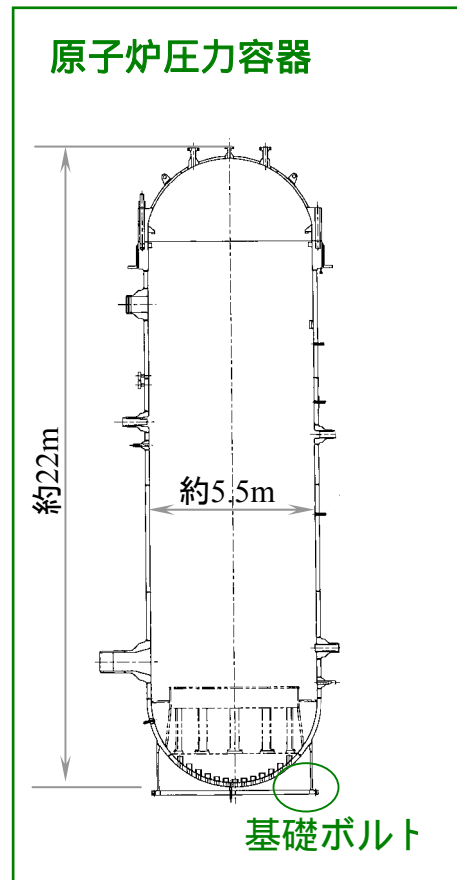
■ 「冷やす」



評価対象部位 (福島第一原子力発電所 3号機)

(3/3)

■ 「閉じ込める」



■ 構造強度評価

- 応答倍率法による評価や、スペクトルモーダル法や定式化された評価式を用いた解析法等による詳細評価を行い、基準地震動 S_s により設備に発生する応力を算出する。
- 基準地震動 S_s により設備に発生する応力^{※1}が、材料の許容される強度（評価基準値）以下であることを確認する。

※1 地震以外の荷重についても、適切に考慮した上で評価を実施する。

■ 動的機能維持評価（制御棒挿入性）

- 基準地震動 S_s による燃料集合体の相対変位を求め、その相対変位が試験により挿入性が確認された相対変位以下であることを確認。

■ 構造強度評価

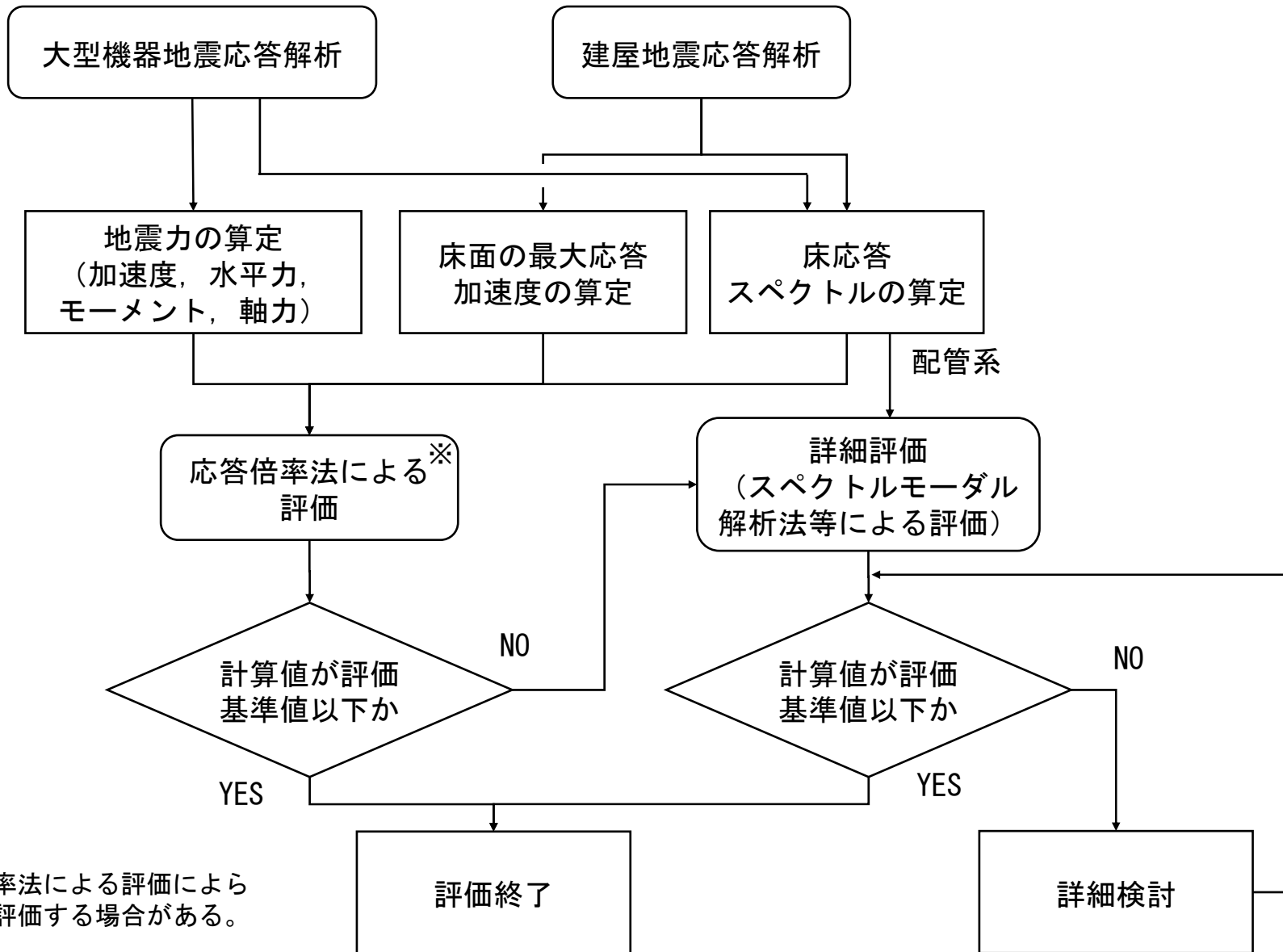
- 「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601－補・1984, JEAG4601－1987, JEAG4601－1991追補版」および「発電用原子力設備規格設計・建設規格 JSME S NC1－2005」に準拠するとともに、ほかの規格基準で規定されている値および実験等で妥当性が確認されている値等も用いる。

■ 動的機能維持評価

- 制御棒挿入性評価に用いる評価基準値の相対変位は、試験により挿入性が確認された相対変位を用いる。

構造強度評価の流れ

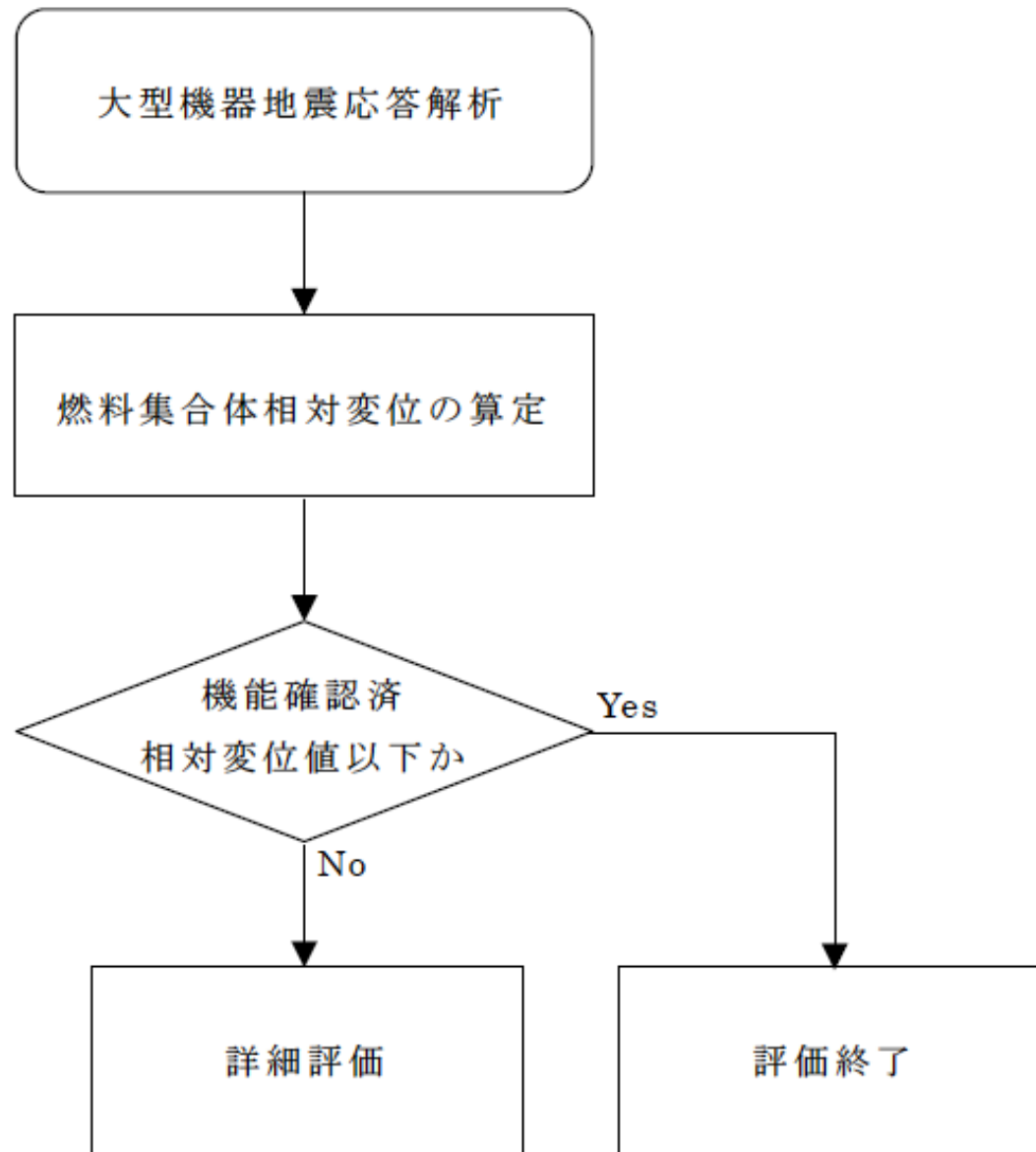
1F-5と同じ



*応答倍率法による評価によらず、詳細評価する場合がある。

動的機能維持評価の流れ（制御棒挿入性）

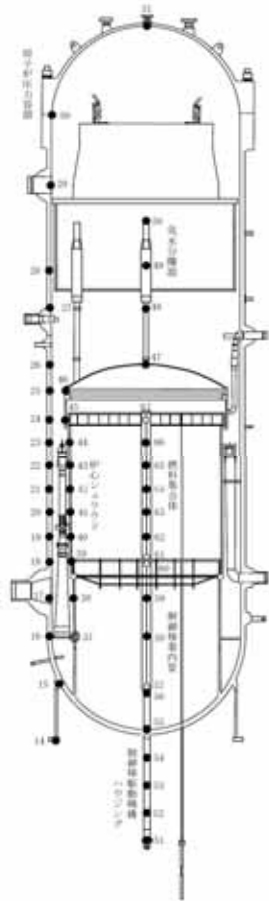
1F-5と同じ



炉内構造物の解析モデル例（福島第一原子力発電所3号機）

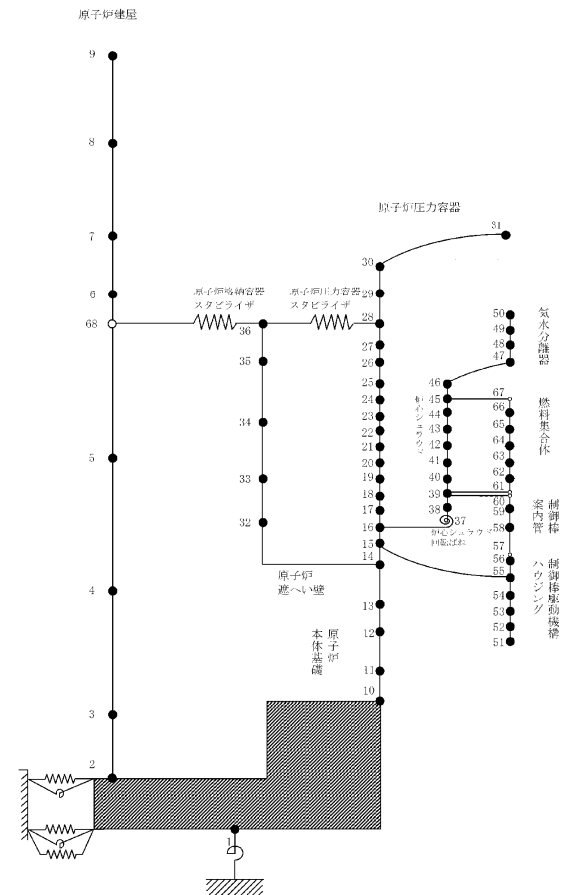
- 水平方向は，多質点モデル化し，それぞれの質点間を曲げ，せん断剛性を有するはり，またはばねにより結合する。

炉内構造物の概要



モデル化

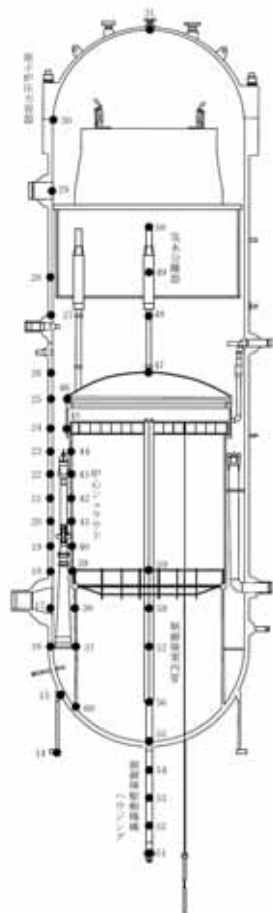
炉内構造物のモデル化（水平方向）



炉内構造物の解析モデル例（福島第一原子力発電所3号機）

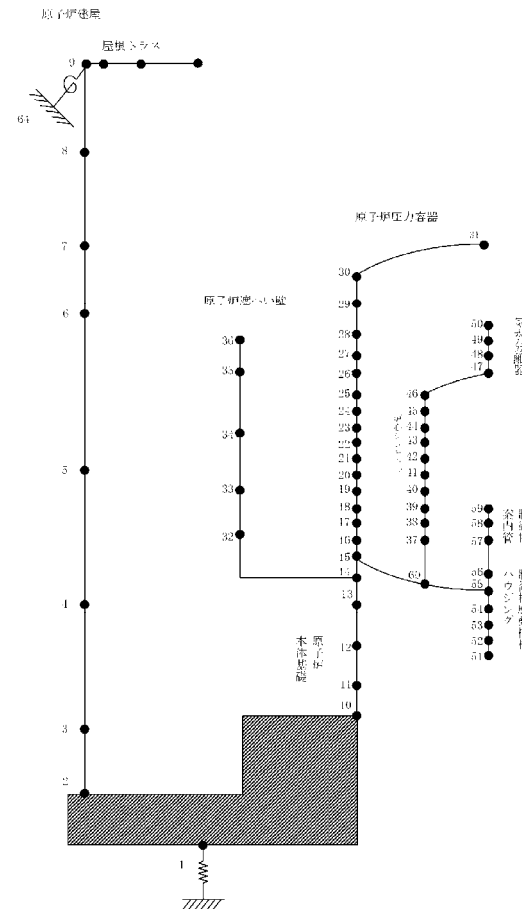
- 鉛直方向は、質点間を軸剛性（圧縮，引張に対する剛性）を有するばねにより結合する。

炉内構造物の概要



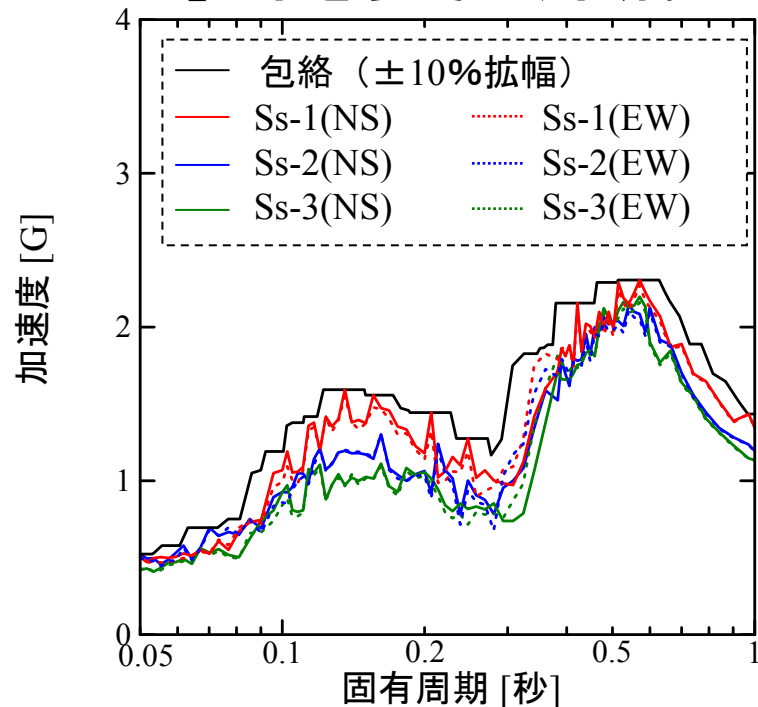
モデル化

炉内構造物のモデル化（鉛直方向）

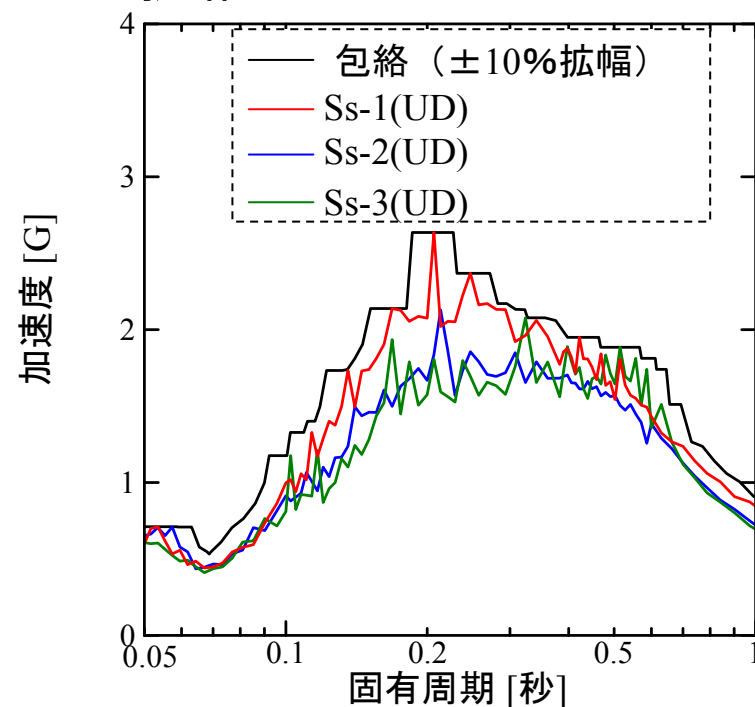


床応答スペクトル（福島第一原子力発電所3号機）

- 建物・構築物，大型機器の地震応答解析で得られた各位置の加速度応答時刻歴を用いて水平方向および鉛直方向について算定
- 算定にあたっては，地盤や建屋の物性等のばらつきが床応答に与える影響を考慮し，「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1987」等を参考に周期軸方向に±10%拡幅



福島第一3号機 原子炉建屋水平方向
(O.P.-2.06m, 減衰1.0%)
(Ss3波包絡)



福島第一3号機 原子炉建屋鉛直方向
(O.P.-2.06m, 減衰1.0%)
(Ss3波包絡)

減衰定数

- 原則として「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991 追補版」に規定された値とし，試験等で妥当性が確認された値も用いる。

対象施設	減衰定数 (%)		備考
	水平方向	鉛直方向	
溶接構造物	1.0	1.0	原子炉圧力容器（基礎ボルト） 原子炉格納容器（ドライウエル） 炉心支持構造物（シュラウドサポート）
ポンプ・ファン等の 機械装置	1.0	1.0	残留熱除去系ポンプ（基礎ボルト）
燃料集合体	7.0	1.0	制御棒挿入性
配管系	0.5～3.0	0.5～3.0	残留熱除去系配管（3.0%） 主蒸気系配管（2.0%）

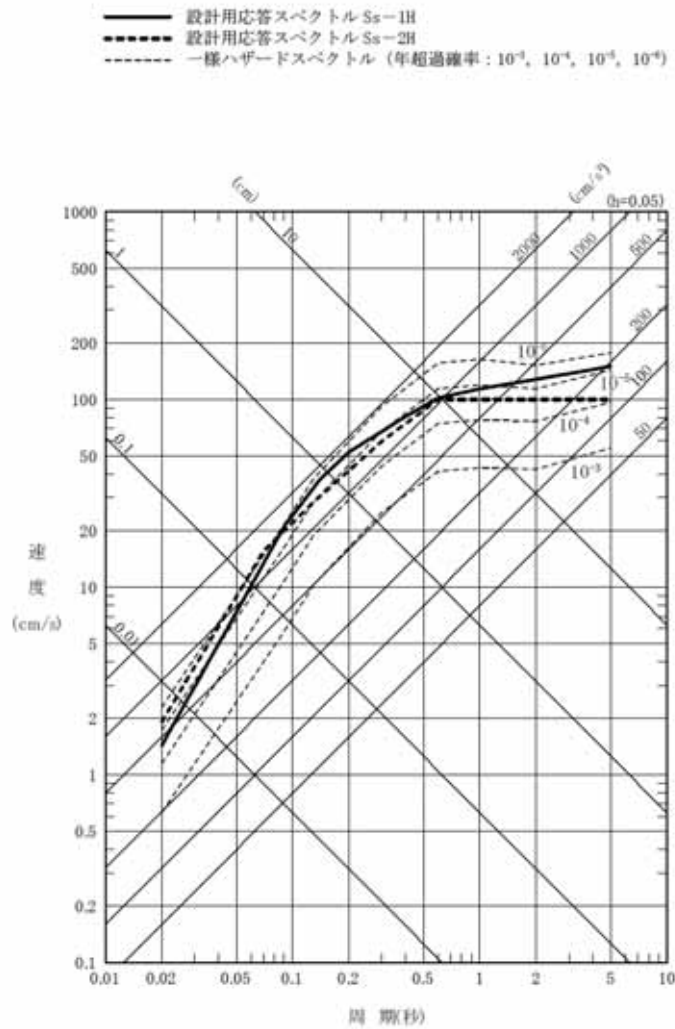
荷重の組合せ (1/3)

1F-5と同じ

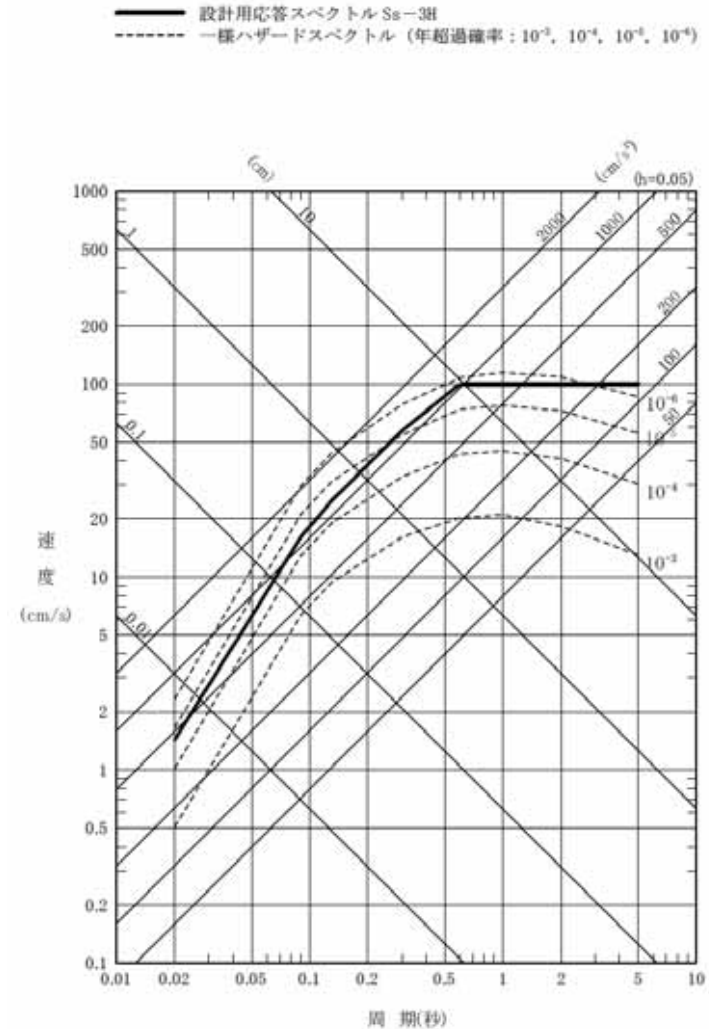
- 中間報告においては、「通常運転時に生じる荷重」および「運転時の異常な過渡変化時に生じる荷重」と基準地震動 S_s による地震力を組み合わせて評価する。
 - 福島第一原子力発電所における基準地震動 S_s の年超過確率は、概ね 10^{-4} /年から 10^{-6} /年である。
 - 「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1984」における運転状態と地震動との組合せに関する記載の中で、基準地震動 S_2 の発生確率は $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ /年としている。
 - JEAG4601-1984の考え方に基づけば、JEAG4601-1984にて想定している S_2 の発生確率よりも福島第一原子力発電所における基準地震動 S_s の年超過確率が小さいことから、これまでの工事計画認可において実績のある荷重組合せの考え方が適用できると考えている。
- 最終報告においては、上記の組み合わせに加えて、「事故時に生じる荷重」の発生確率と継続時間および地震動の超過確率の関係を踏まえ、「事故時に生じる荷重」については弾性設計用地震動 S_d との組み合わせを考慮した評価を実施する。

荷重の組合せ (2/3)

1F-5と同じ



福島第一原子力発電所における
Ss-1, Ss-2の年超過確率



福島第一原子力発電所における
Ss-3の年超過確率

荷重の組合せ (3/3)

1F-5と同じ

発生確率		1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
運転状態の発生確率 (1/年)		I	II	III	IV						
基準地震動の発生確率 (1/年)				S_1	S_2						
基準地震動 S_1 との組合せ	従属事象	S_2 従属									
	1分以内										S_1+II
	1時間以内							S_1+II			S_1+II
	1日以内						S_1+II		S_1+II		S_1+IV
	1年以内			S_1+II		S_1+III			S_1+IV		
基準地震動 S_2 との組合せ	従属事象	S_1 従属									
	1分以内	(S_2+II) は 10^{-9} 以下となる									
	1時間以内										S_2+II
	1日以内							S_2+II			S_2+III
	1年以内					S_2+II			S_2+III		S_2+IV

$5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5} / \text{年}$

※図中の基準地震動 S_1 および基準地震動 S_2 は、それぞれ弾性設計用地震動 S_d および基準地震動 S_s と読み替える。

注：(1) 発生確率から見て
 ← 組合せが必要なもの。
 ← 発生確率が 10^{-7} 以下となり組合せが不要となるもの。
 (2) 基準地震動 S_2 の発生確率は $10^{-4} \sim 10^{-5} / \text{サイト} \cdot \text{年}$ と推定されるが、ここでは $5 \times 10^{-4} \sim 10^{-5} / \text{サイト} \cdot \text{年}$ を用いた。
 (3) 表に示す発生確率は現在の知見によるものである。

運転状態と地震動との組合せの確率的評価
 (原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1984 P.38より引用)

評価結果（福島第一原子力発電所3号機）

- 基準地震動Ssによる計算値，相対変位が**評価基準値以下**であることを確認した。

- 構造強度評価

評価対象設備	評価部位	応力分類	計算値 (MPa)	評価基準値 (MPa)	評価※1 手法
原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張	36	222	②
原子炉格納容器	ドライウェル	膜	199	255	①
炉心支持構造物	シュラウドサポート	軸圧縮	33	208	①
残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	引張	42	185	②
残留熱除去系配管	配管本体	一次	268	363	②
主蒸気系配管	配管本体	一次	183	417	②

※1 ①：応答倍率法による評価、②：詳細評価

- 動的機能維持評価

評価対象設備	地震時の相対変位 (mm)	評価基準値 (mm)
制御棒（挿入性）	14.8	40.0

Ⅱ. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

2 減衰定数

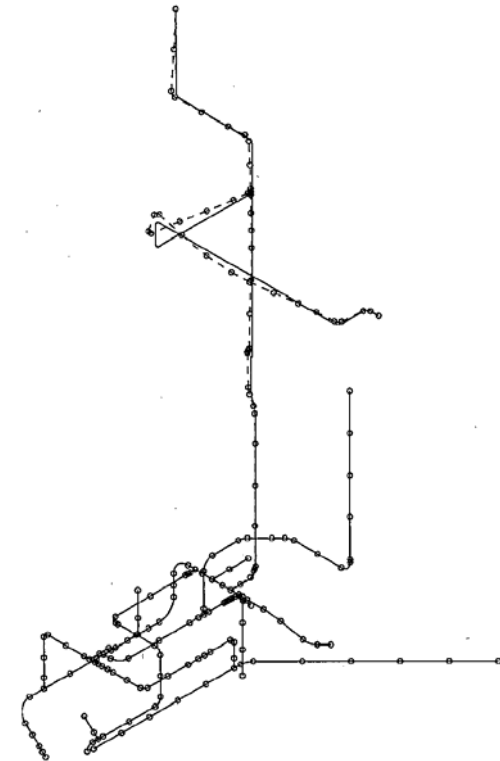
配管系の減衰定数（鉛直方向）

1F-5と同じ

- ✓ 配管系の減衰に寄与する要素には、主に配管と支持部の摩擦、配管と保温材の摩擦等による構造減衰がある。
- ✓ 配管系は、水平方向と鉛直方向に亘って立体的に引き回して施工するため、3次元の振動モードを有しており、**配管系の応答は水平方向と鉛直方向の応答が複合的に現れる。**



配管と支持部の摩擦、配管と保温材の摩擦等による構造減衰も、**水平・鉛直いずれの方向においても同じ機構で働くと考えられるため、配管系の鉛直方向の減衰定数については、水平方向と同じ減衰定数を適用。**



1F-5残留熱除去系配管の振動モード（例）

配管系の減衰定数（1/2）

KK-1で説明済
（構造W45-3-2より再掲）

- 配管系の設計用減衰定数は「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991追補版」に規定されているが、新たに実施した振動試験等をもとに、保温材の付加減衰定数およびUボルトを用いた支持具を有する配管系の減衰定数を定めた。

配管区分		減衰定数(%) ^{※1}	
		保温材有 ^{※2}	保温材無
I	スナッパ及び架構レストレイント支持主体の配管系で、その支持具(スナッパ又は架構レストレイント)の数が4個以上のもの	<u>3.0</u>	2.0
II	スナッパ、架構レストレイント、ロッドレストレイント、ハンガ等を有する配管系で、アンカ及びUボルトを除いた支持具の数が4個以上であり、配管区分 I に属さないもの	<u>2.0</u>	1.0
III	Uボルトを有する配管で、架構で水平配管の自重を受け、Uボルトの数が4以上のもの	<u>3.0</u>	<u>2.0</u>
IV	配管区分 I、II 及び III に属さないもの	<u>1.5</u>	0.5

※1 「原子力発電所耐震設計技術指針JEAG4601-1991 追補版」に追加および変更した箇所を下線で示す。

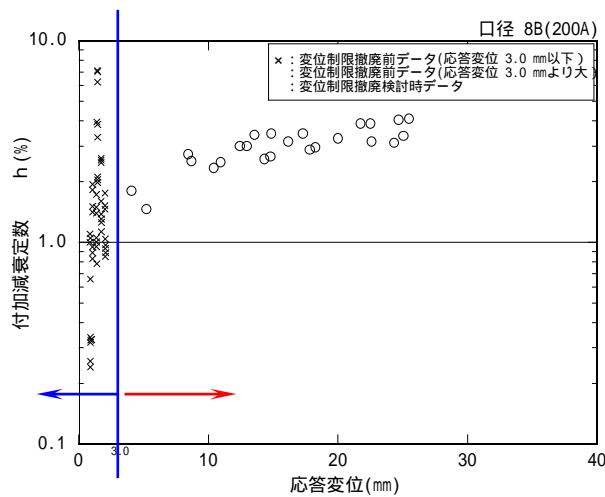
※2 保温材有の設計用減衰定数は、無機多孔質保温材による付加減衰として、1.0%を考慮したものである。金属保温材による付加減衰定数は、配管ブロック全体に対する金属保温材使用割合が40%以下の場合1.0%を適用してよいが、金属保温材使用割合が40%を超える場合は0.5%とする。

配管系の減衰定数 (2/2)

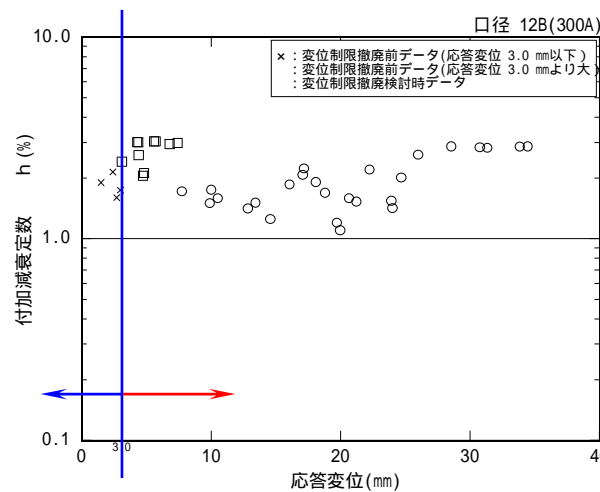
KK-1で説明済
(構造W45-3-2より再掲)

■ 保温材による設計用付加減衰定数について

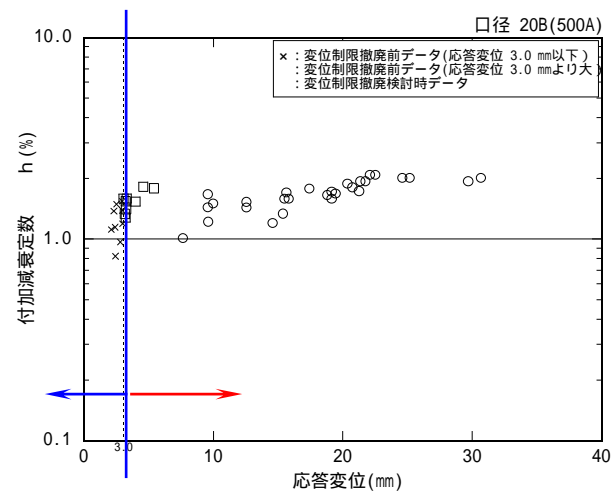
- ✓ 配管口径200A, 300A, 500Aの試験体を用いて振動試験を実施
- ✓ 応答変位3mm以上の領域において保温材による付加減衰定数は1.0%以上
- ✓ 3mm程度の応答変位では配管系に生じる応力が許容応力に対して十分余裕があることから、今回の付加減衰定数見直しは3mm以上のデータを対象に検討



200A



300A



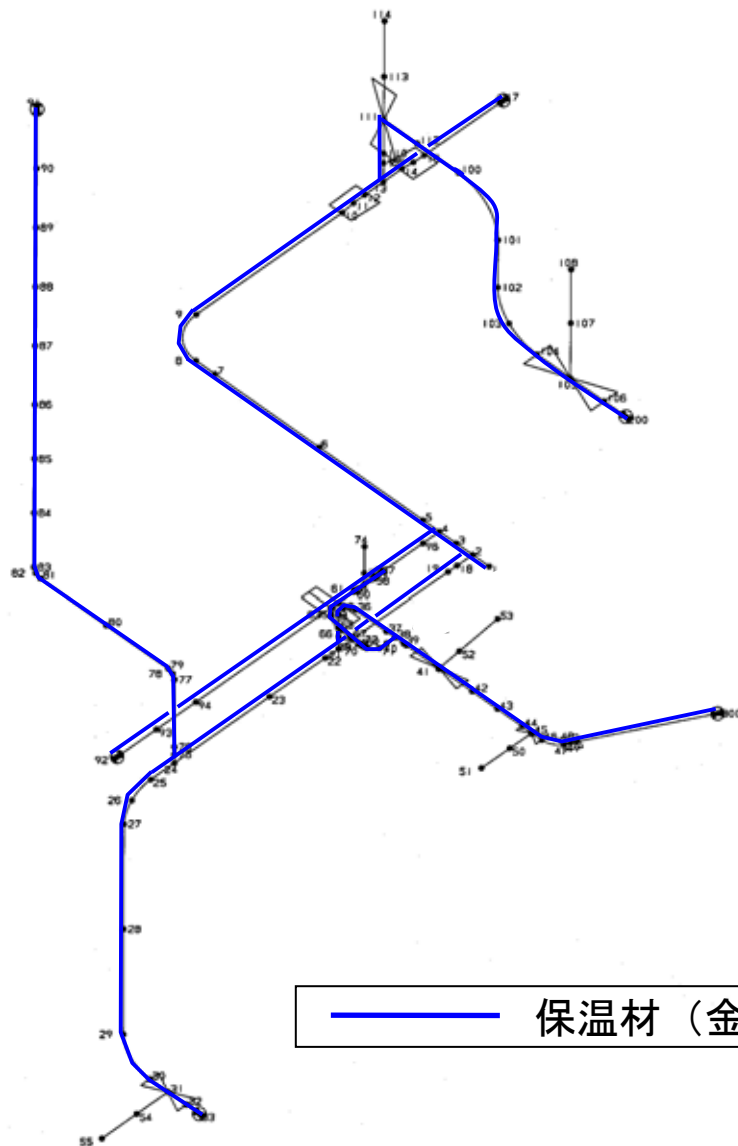
500A

付加減衰定数と応答変位

→ 検討対象の領域
← 配管系に生じる応力が許容応力に対して十分余裕がある領域

【参考文献】 (社)日本電気協会 (2006) : 配管系設計用減衰定数適正化に関する検討、
第9回機器・配管検討会資料No.9-3-2-2(5)、平成18年5月12日

残留熱除去系配管に使用されている保温材による付加減衰定数



- 当該モデルの配管は、全範囲で保温材が使用されているが、金属保温材は使用していない。
- よって、当該配管モデルにおいては、保温材による付加減衰定数として1%を適用した。

残留熱除去系配管モデル図

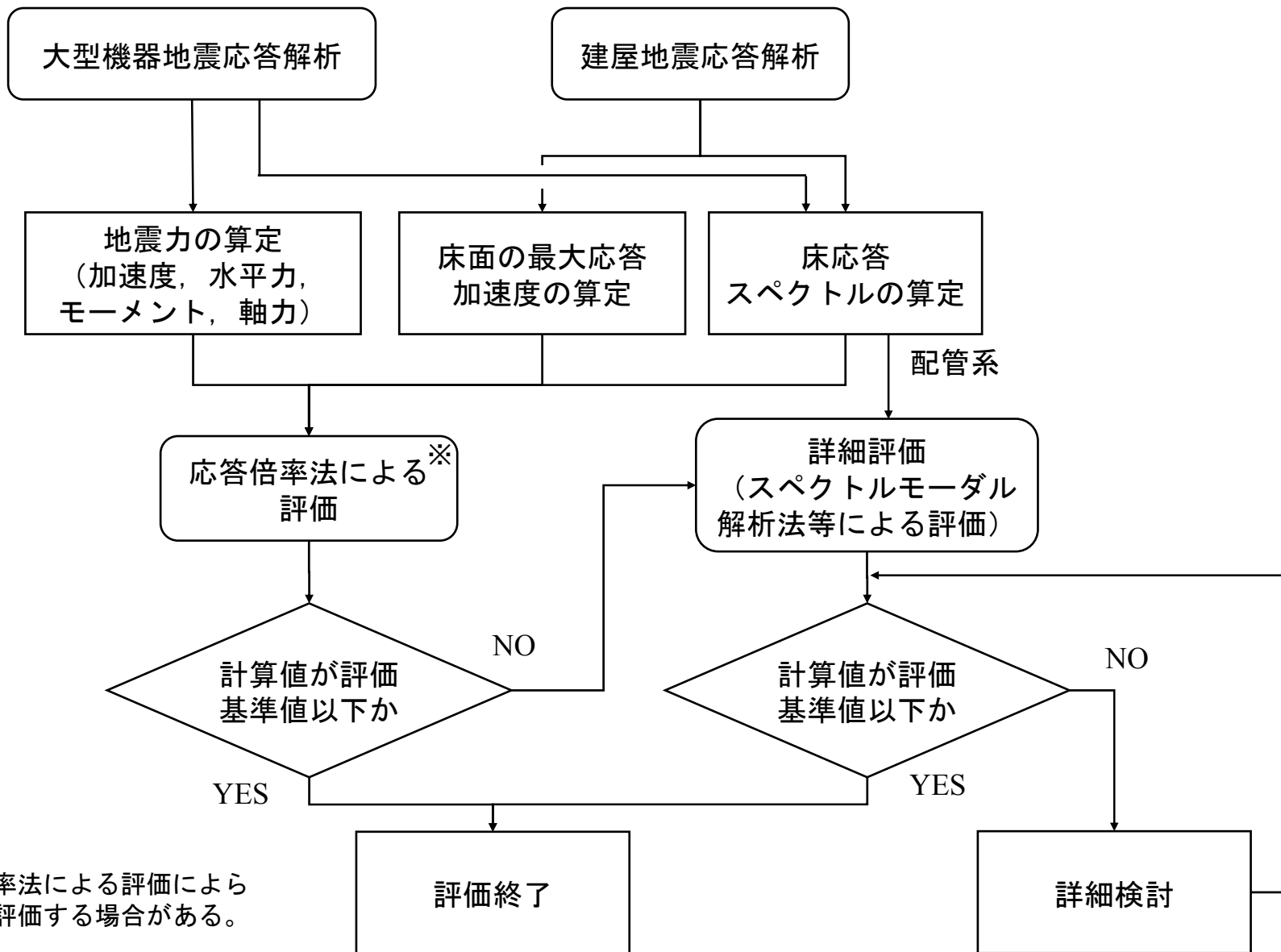
Ⅱ. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

3 応答倍率法の考え方

- 新耐震指針に照らした耐震安全性評価では、機器・配管系設備の評価手法として応答倍率法を適用
- 応答倍率法による評価の適用に関する整理を行い、本手法の適用性について検討

構造強度評価の流れ（再掲）

1F-5と同じ



※応答倍率法による評価によらず、詳細評価する場合があります。

応答倍率法の基本的な考え方

■ 応答倍率法とは

- ✓ 設計条件から基準地震動 S_s による評価条件への倍率（応答比）を算定して、設計時応力に乗じることで評価基準値を超えるかどうかの判定を行うもの。
- ✓ 応答倍率法による算出応力が評価基準値を超えた場合等においては、詳細評価を行う。

■ 応答倍率法の目的

- ✓ 原子力発電所は多数の設備を有しているため、耐震安全性評価に長期間を要している。
- ✓ できるだけ早期に評価結果を報告することは重要と考えており、そのための評価手法として、設備の算出応力を推定し、評価基準値を超えないことを速やかに確認することを目的に応答倍率法を採用。

応答倍率法による評価

- 設計時の耐震計算書等の既往評価条件と基準地震動 S_s の評価条件の比率（応答比）を算定して、その応答比を既往評価値に乗じることにより、基準地震動 S_s に対する評価対象設備の計算値が、評価基準値を上回らないことを確認する。

※応答比

A1：応答荷重比を用いた評価

設備の算出応力値を算定するにあたり、水平力、モーメント、軸力を用いる機器は、基準地震動 S_s による地震力と既往評価の地震力との比を応答比とする

A2：応答加速度比を用いた評価

設備の算出応力値を算定するにあたり、水平加速度、鉛直加速度を用いる機器は基準地震動 S_s による床応答スペクトル等と、既往評価で用いた床応答スペクトル等から水平加速度と鉛直加速度の比をそれぞれ求め、大きい方の値を応答比とする

$$\text{応答比} = \text{MAX} \left(\frac{C_H}{C_{H0}}, \frac{C_V}{C_{V0}} \right)$$

C_{H0} ：既往評価による水平加速度

C_H ：基準地震動 S_s による水平加速度

C_{V0} ：既往評価による鉛直加速度

C_V ：基準地震動 S_s による鉛直加速度

応答比の変更点

- 福島第一5号機の審議を踏まえ、福島第一3号機の耐震安全性評価における応答比は下表の通り見直している。

項目	福島第一5号機	福島第一3号機
応答比の算定 (床置き機器)	$\frac{\sqrt{(C_H)^2 + (1 + C_V)^2}}{\sqrt{(C_{H0})^2 + (1 + C_{V0})^2}}$	$\text{MAX} \left(\frac{C_H}{C_{H0}}, \frac{C_V}{C_{V0}} \right)$
応答比の算定 (原子炉格納容器、 原子炉圧力容器、 炉内構造物)	「1プラス鉛直動による応答加速度」の応答比を用いる設備もあり	「1プラス鉛直動による応答加速度」の応答比は用いない

応答比を用いた評価

1F-5と同じ

既往評価での評価方法に応じて、以下の方法①または方法②で実施

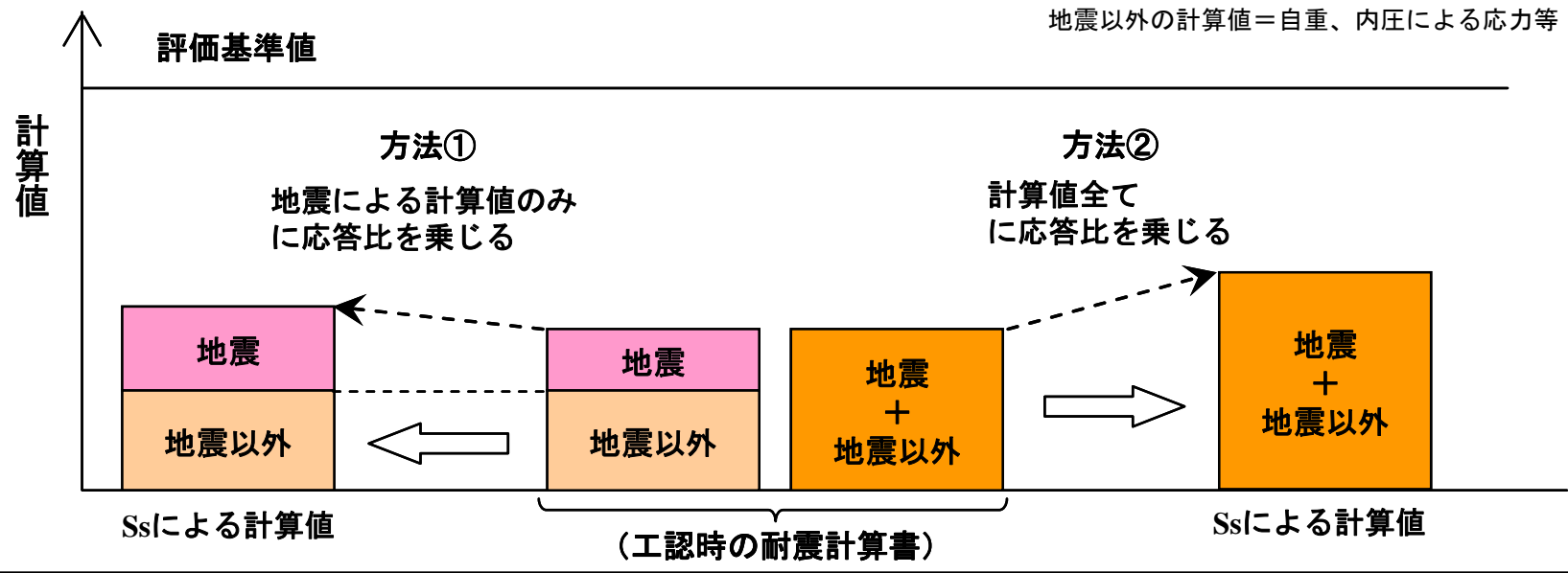
【方法①】：地震による計算値と地震以外による計算値が分離されている場合の取扱い

$$S_s\text{による計算値} = \begin{matrix} \text{地震以外による計算値} & + & \text{地震による計算値} \\ \text{(工認時の耐震計算書)} & & \text{(工認時の耐震計算書)} \end{matrix} \times \text{応答比}$$

【方法②】：地震による計算値と地震以外による計算値の合計が示されている場合の取扱い

$$S_s\text{による計算値} = \left(\text{地震以外による計算値} + \text{地震による計算値} \right) \times \text{応答比}$$

(工認時の耐震計算書)



■ 応答倍率法を適用する設備

① 設計時の余裕が比較的大きい設備

例) ポンプ, ファン等の床置機器

② 応答倍率法の精度の高さが期待できる設備

例) 原子炉圧力容器, 原子炉格納容器, 炉内構造物

■ 応答倍率法を適用しない設備

① 地震に対する応答が比較的複雑な設備

例) 配管類

② 指針改訂に伴い、従来の設計手法とは異なる手法の採用が適切な設備

例) 原子炉建屋クレーン

③ 耐震強化等の工事により、応答倍率法が適用できない設備

例) 配管類

応答倍率法の適用に関する整理(2/3)

1F-5と同じ

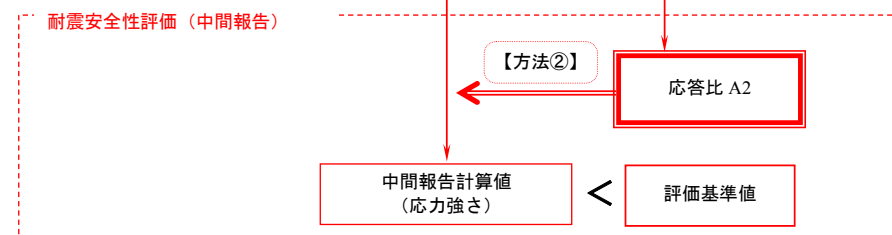
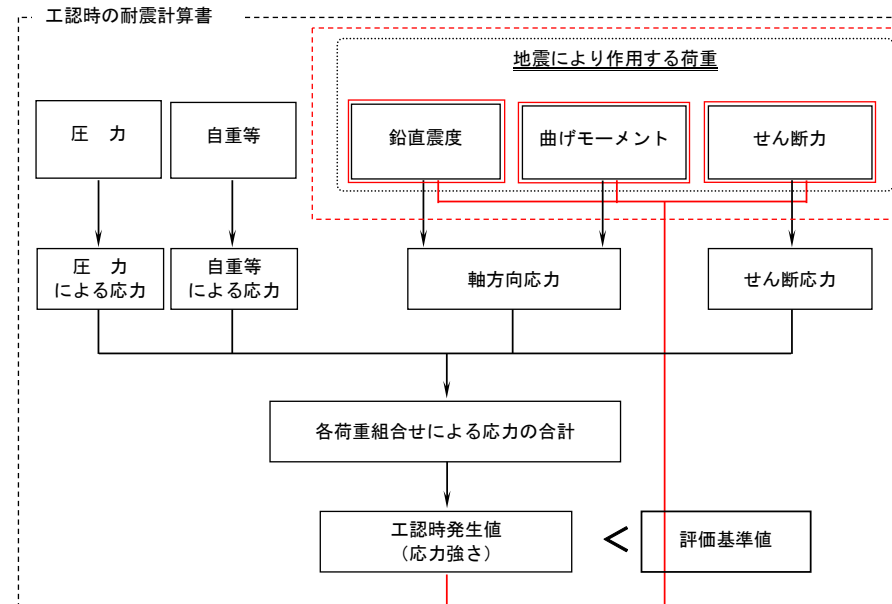
設備	設計手法の特徴	適用する 応答比	応答倍率法の適用に あたってのスタンス
原子炉 格納容器	建物と機器の連成解析により、各評価部位の荷重、加速度に基づき、応力を算出。	応答荷重比	荷重を用いて設計を行っている設備については、 <u>基準地震動Ssによる評価荷重が算出されていれば、加速度設計の設備よりも比較的精度よく応答値の予測が可能なので、応答倍率法を適用する。</u>
原子炉 圧力容器			
炉内構造物			
床置き機器 (ポンプ、 ファン、熱交換器、盤等)	主に建物の応答解析により、算出される床の応答加速度に基づき応力を算出。	応答加速度比	加速度を用いて設計している設備のうち、 <u>設計時の余裕が大きい設備については、詳細設計を行わずとも、評価基準値以下になることが容易に推定できるため、応答倍率法を適用する。</u> 比較的余裕が小さい設備に対しては、設計時の評価手法や地震の寄与等を検討し、必要に応じて詳細評価を実施する。

応答倍率法の適用に関する整理(3/3)

1F-5と同じ

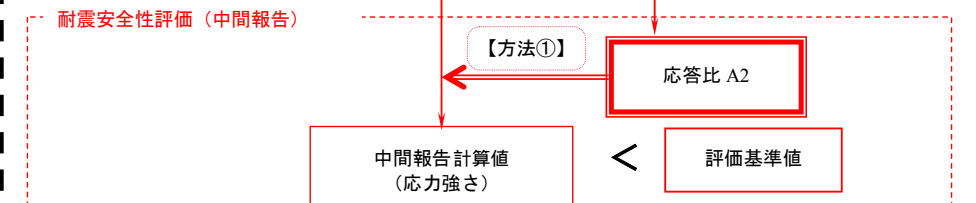
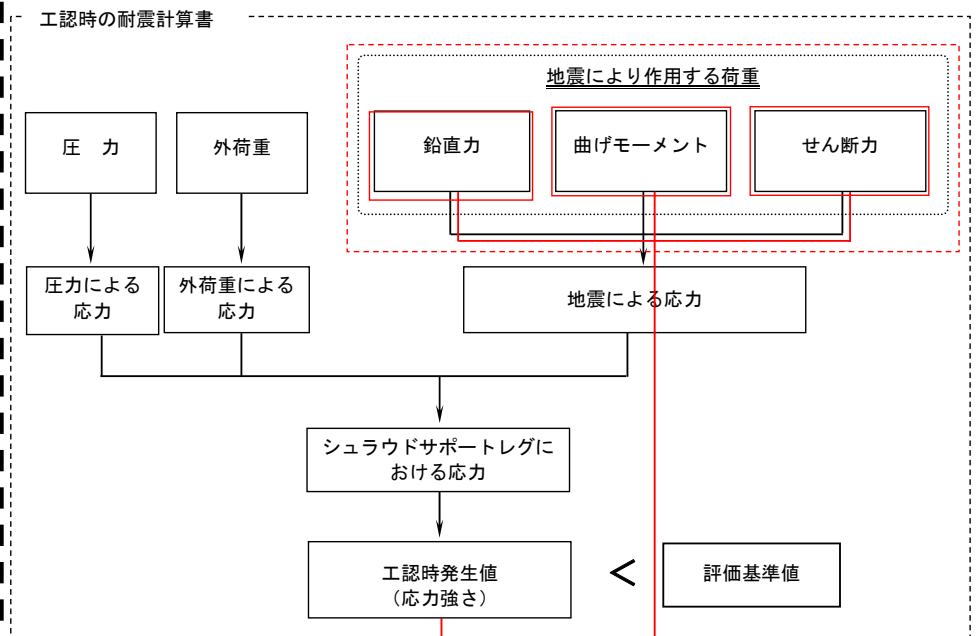
設備	設計手法の特徴	適用する 応答比	応答倍率法の適用に あたってのスタンス
配管	振動モードを考慮したスペクトルモーダル解析により応力を算出。	なし (詳細評価)	多数の振動モードを持つ特性を有する設備であり、応答倍率による <u>応答予測が困難であること</u> から <u>詳細評価を実施する</u> 。
クレーン	建物の応答解析による応答加速度に基づき応力を算出。	なし (詳細評価)	鉛直方向地震力を動的に考慮することは、 <u>設計時の手法にて適切な評価が困難であるため</u> 、 <u>詳細評価を実施する</u> 。

応答比を用いた評価手順



工認時手法 _____
 耐震安全性評価 _____
 (中間報告)

A1: 応答倍率法において、基準地震動 S_g による加速度と設計時の加速度との比を用いた評価方法
 A2: 応答倍率法において、基準地震動 S_g による地震力と設計時の地震力との比を用いた評価方法
 方法①: 地震による発生値のみに応答比を乗じる方法) による評価
 方法②: 発生値全てに応答比を乗じる方法) による評価



工認時手法 _____
 耐震安全性評価 _____
 (中間報告)

A1: 応答倍率法において、基準地震動 S_g による加速度と設計時の加速度との比を用いた評価方法
 A2: 応答倍率法において、基準地震動 S_g による地震力と設計時の地震力との比を用いた評価方法
 方法①: 地震による発生値のみに応答比を乗じる方法) による評価
 方法②: 発生値全てに応答比を乗じる方法) による評価

Ⅱ. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

4 各設備の評価プロセス

各設備の評価プロセス

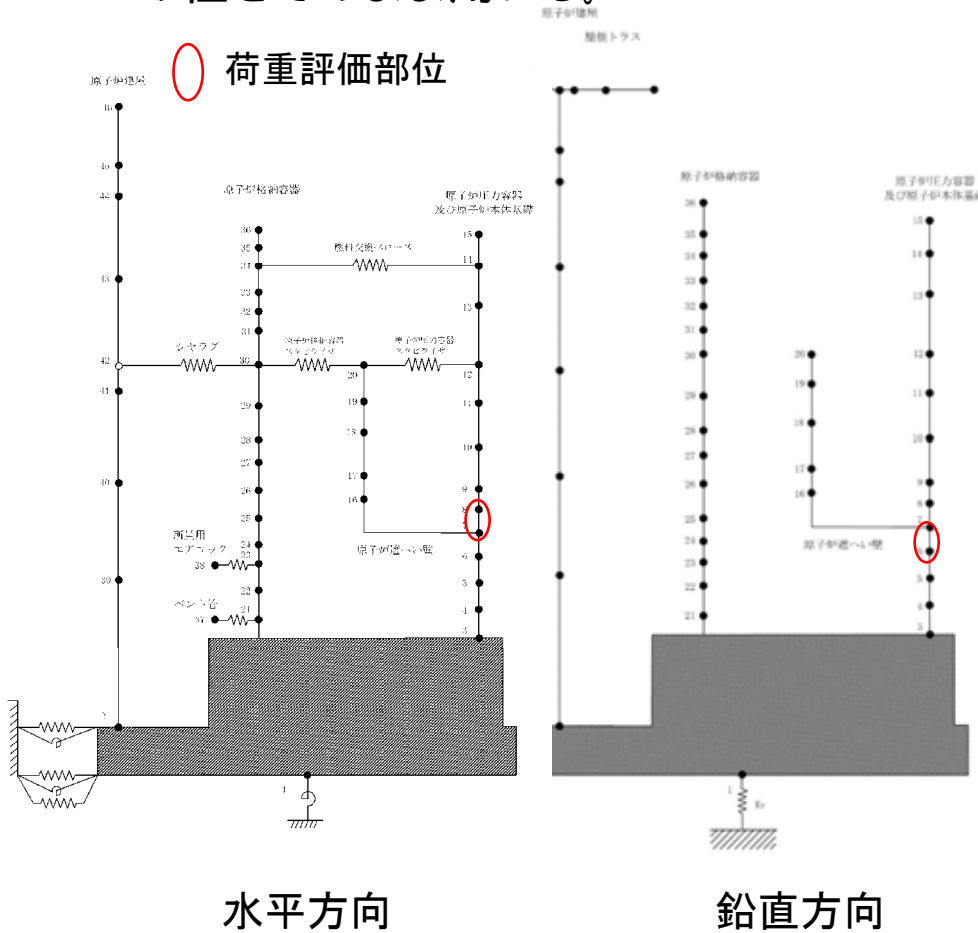
■福島第一原子力発電所3号機

- ✓原子炉圧力容器
- ✓原子炉格納容器
- ✓炉心支持構造物
- ✓残留熱除去系ポンプ
- ✓配管（残留熱除去系配管，主蒸気系配管）
- ✓制御棒挿入性

(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 原子炉压力容器 (基礎ボルト) (1/2)

- 原子炉格納容器 - 原子炉压力容器連成解析(以下, PCV-RPV連成解析)により, 地震による水平力, モーメント, 軸力が算出される。地震以外の荷重については, 設計時の値をそのまま用いる。



PCV-RPV連成解析モデル

荷重条件

荷重		Ss荷重	地震以外の荷重	Ss荷重+地震以外の荷重
軸力 [kN]	最大	5780	21080	26860
	最小	-5780	8880	3100
水平力 [kN]		4970	—	4970
曲げモーメント [kN・m]		30400	—	30400

一の位を切り上げた値を荷重条件とした

地震以外の荷重の内訳

	原子炉压力容器自重	スクラム反力	その他の活荷重	合計
最大 [kN]	11533	7927	1619	21079
最小 [kN]	11533	-4272	1619	8880

(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 原子炉压力容器 (基礎ボルト) (2/2)

- JEAG4601-1987に基づき右図のような応力分布を考え、下式の関係より基礎ボルトに作用する引張り応力を算出する。

$$\frac{t}{n \cdot c} = \frac{1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha}$$

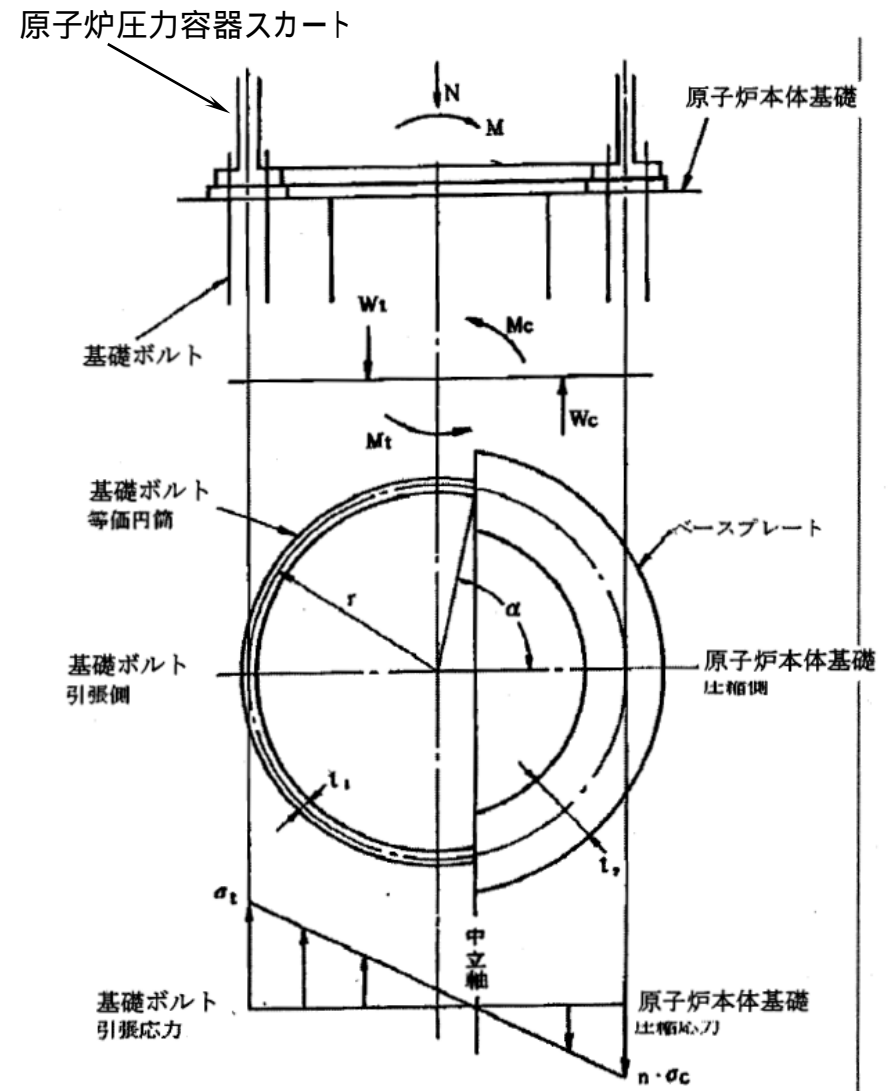
$$N + W_t - W_c = 0$$

$$M - N \cdot r \cos \alpha - M_t - M_c = 0$$

- t : 基礎ボルトに生じる引張り応力
- c : 原子炉本体基礎に生じる圧縮応力
- n : 基礎ボルトと原子炉本体基礎の縦弾性係数の比
- α : 中立軸の位置を示す角度
- N : 原子炉压力容器スカートに作用する鉛直力
- M : 原子炉压力容器スカートに作用するモーメント
- W_t : 基礎ボルトに作用する力の合計
- W_c : 原子炉本体基礎に作用する反力の合計
- M_t : W_t によるモーメント
- M_c : W_c によるモーメント

評価結果

応力分類	計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
引張	36	222

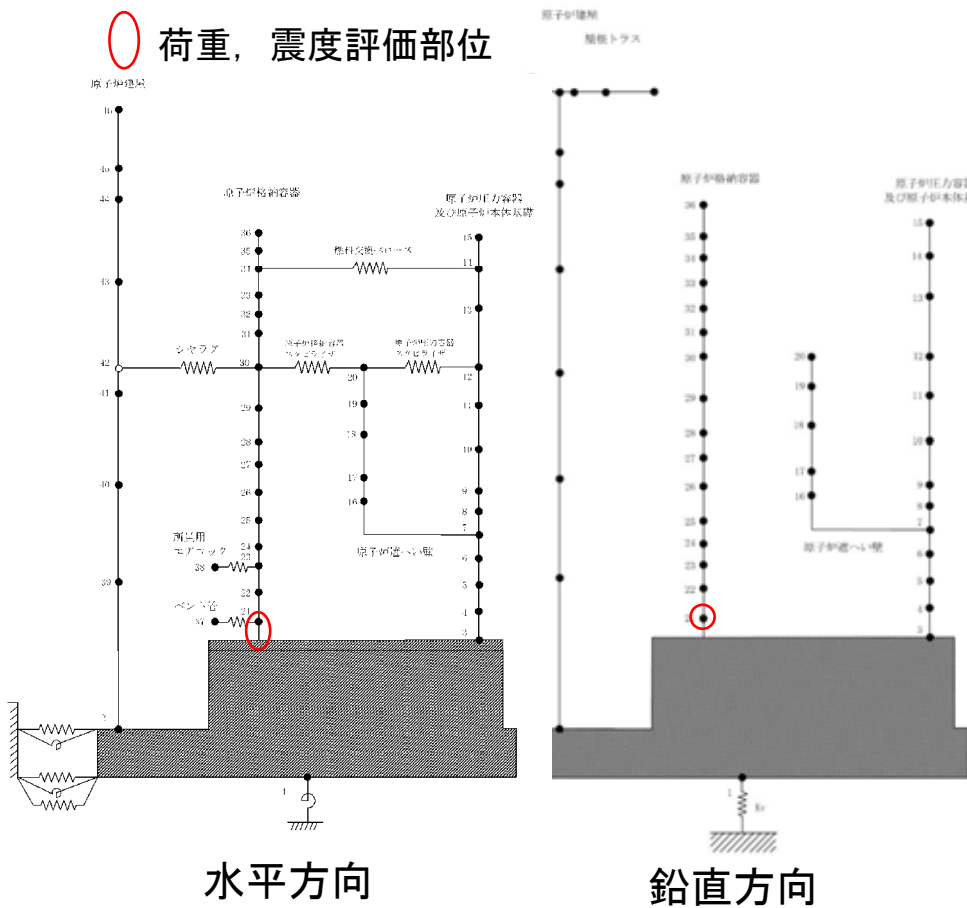


基礎ボルトの等価円筒及び応力分布

(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 原子炉格納容器 (サンドクッション部) (1/2)

- PCV-RPV連成解析により地震による水平力, モーメント, 鉛直震度が算出される。設計時の当該荷重, 耐震安全性評価時の当該荷重をそれぞれ比較することにより, 応答比を算出し, それぞれの比のうち最大の値1.84を評価に用いる。

○ 荷重, 震度評価部位



PCV-RPV連成解析モデル

$$H = \frac{H_{Ss}}{H_0}$$

$$M = \frac{M_{Ss}}{M_0}$$

$$C_v = \frac{C_{vSs}}{C_{v0}}$$

α_H : 水平力による応答比
 α_M : 曲げモーメントによる応答比
 α_{Cv} : 鉛直震度による応答比
 H_{Ss} : 基準地震動Ssによるせん断力
 H_0 : 設計時の水平力
 M_{Ss} : 基準地震動Ssによるモーメント
 M_0 : 設計時のモーメント
 C_{vSs} : 基準地震動Ssによる鉛直震度
 C_{v0} : 設計時の鉛直震度

応答比

荷重	設計時地震荷重, 震度	Ss地震荷重, 震度	応答比
水平力 [kN]	6865	7070	1.03
曲げモーメント [kN・m]	107900	123000	1.14
鉛直震度	0.24	0.44	1.84

(各設備の評価プロセス)
福島第一3号機 原子炉格納容器（サンドクッション部）（2/2）

- 設計時の計算値に応答比を乗じ，原子炉格納容器サンドクッション部の応力を算出する。

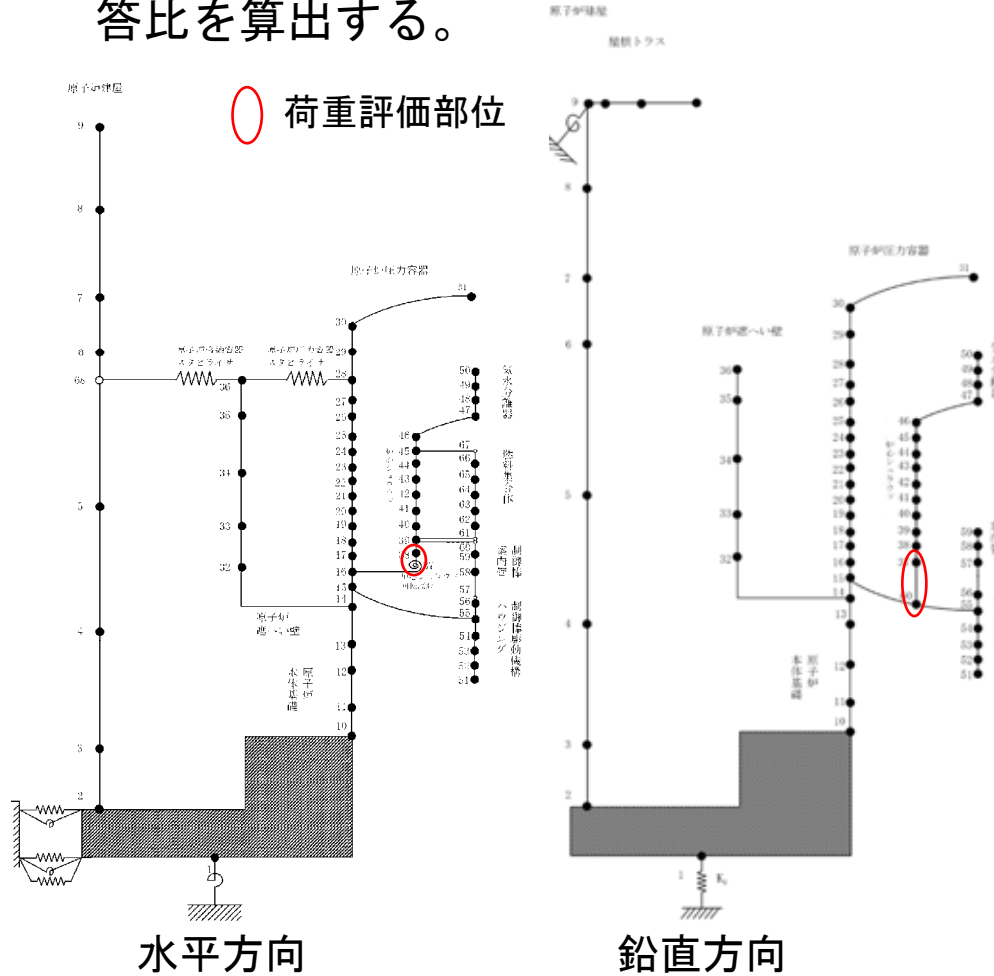
評価結果

応力分類	設計時 計算値 [MPa]	応答比	基準地震動 S_s による 計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
膜	108	1.84	199	255

(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 炉心支持構造物（シュラウドサポートレグ）（1/2）

- 炉内構造物の連成解析により地震による、モーメント，軸力が算出される。設計時の当該荷重，基準地震動Ssによる当該荷重をそれぞれ比較することにより，応答比を算出する。



$$H = \frac{H_{Ss}}{H_0}$$

$$M = \frac{M_{Ss}}{M_0}$$

$$V = \frac{V_{Ss}}{V_0}$$

α_H : 水平力による応答比
 α_M : 曲げモーメントによる応答比
 α_V : 鉛直力による応答比
 H_{Ss} : 基準地震動Ssによるせん断力
 H_0 : 設計時の水平力
 M_{Ss} : 基準地震動Ssによるモーメント
 M_0 : 設計時のモーメント
 V_{Ss} : 基準地震動Ssによる鉛直力
 V_0 : 設計時の鉛直力

応答比

荷重	設計時地震荷重, 震度	Ss地震荷重, 震度	応答比
水平力 [kN]	6767	2440	0.36
モーメント [kN・m]	34820	13600	0.39
鉛直力 [kN]	387	783	2.03

炉内構造物連成解析モデル

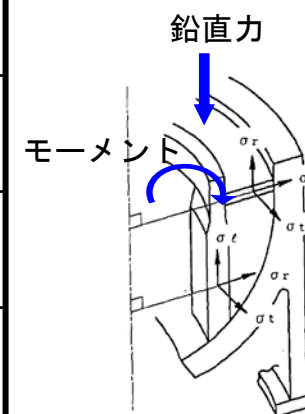
(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 炉心支持構造物（シュラウドサポートレグ）（2/2）

- 算出した応答比を設計時の軸圧縮応力の地震成分のうち、モーメントによる成分、軸力による成分に乘じ、設計時の地震以外の成分と組合せることでシュラウドサポートレグの軸圧縮応力を算出する。

応力評価

		設計時の応力 [MPa]	応答比	基準地震動Ss による応力[MPa]
地震による 応力	モーメント による応力	71.13	× 0.39	27.74
	鉛直力 による応力	0.87	× 2.03	1.77
地震以外による 応力	自重 による応力	3	× 1	3
地震による 応力 +	地震以外に よる応力			32.51

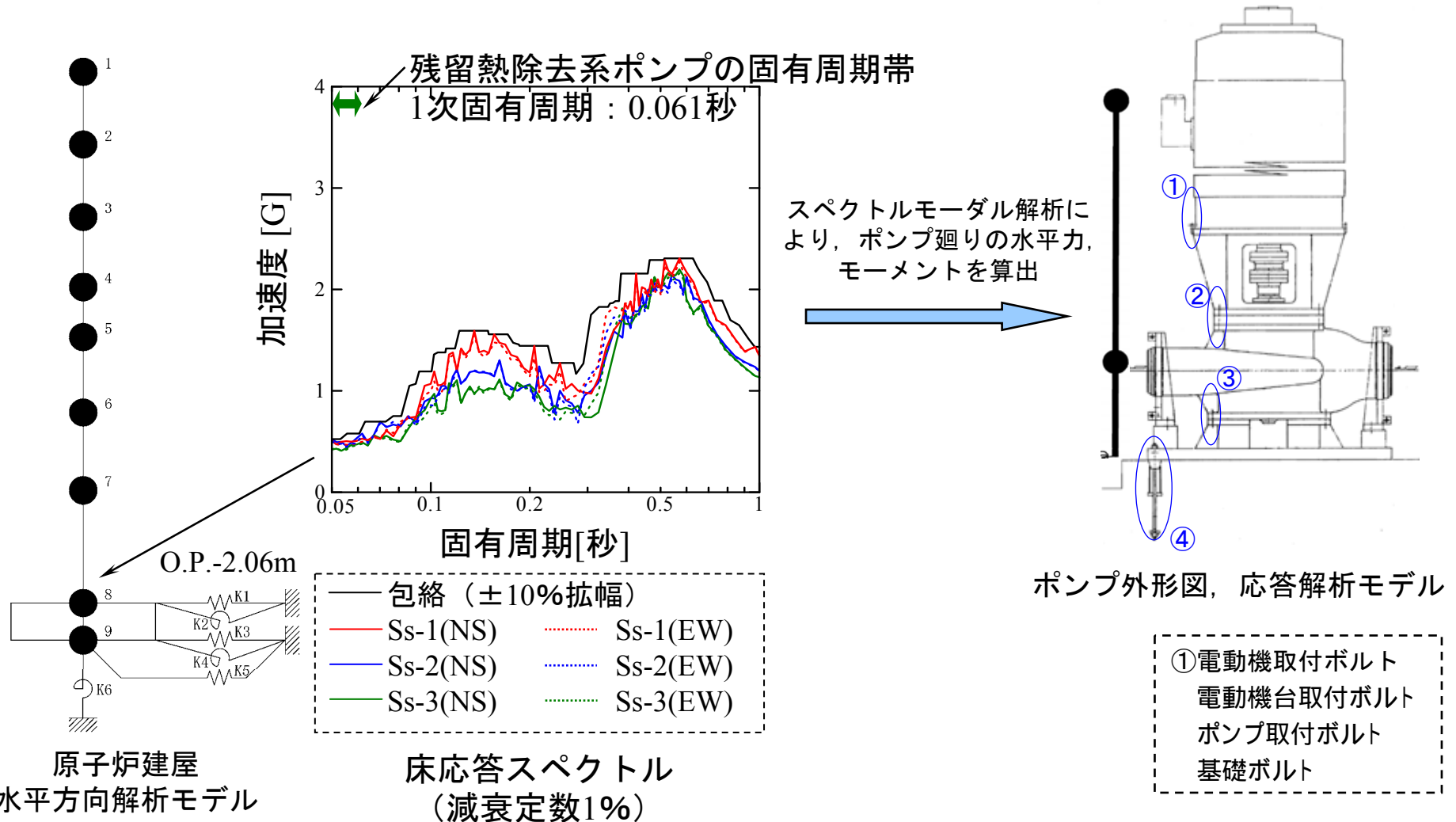


評価結果

応力分類	計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
軸圧縮	33	208

(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 残留熱除去系ポンプ（基礎ボルト）（1/2）

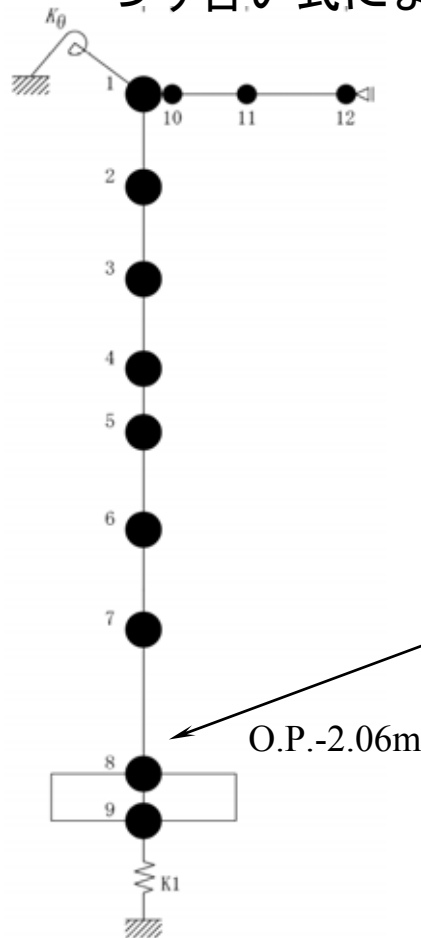
- 残留熱除去系ポンプは水平方向に関して柔なので、当該ポンプ設置階の床応答スペクトルに基づくスペクトルモーダル解析を実施し、ポンプ廻りの水平力、モーメントを算出する。



(各設備の評価プロセス)

福島第一3号機 残留熱除去系ポンプ（基礎ボルト）（2/2）

- 鉛直方向に関しては剛なので、ポンプ設置階の最大応答加速度を評価用震度として評価に用いる。これらの荷重，評価用震度を踏まえた基礎ボルトに関するつり合い式により残留熱除去系ポンプ基礎ボルトの応力を算出する。



スペクトルモーダル解析によって算出した
水平力，モーメント

地震荷重種別	Ss地震荷重
水平力 [kN]	52
モーメント [kN・m]	142

鉛直方向評価用震度

鉛直方向 評価用震度	0.53
---------------	------

つり合いの式により
応力算出

評価結果

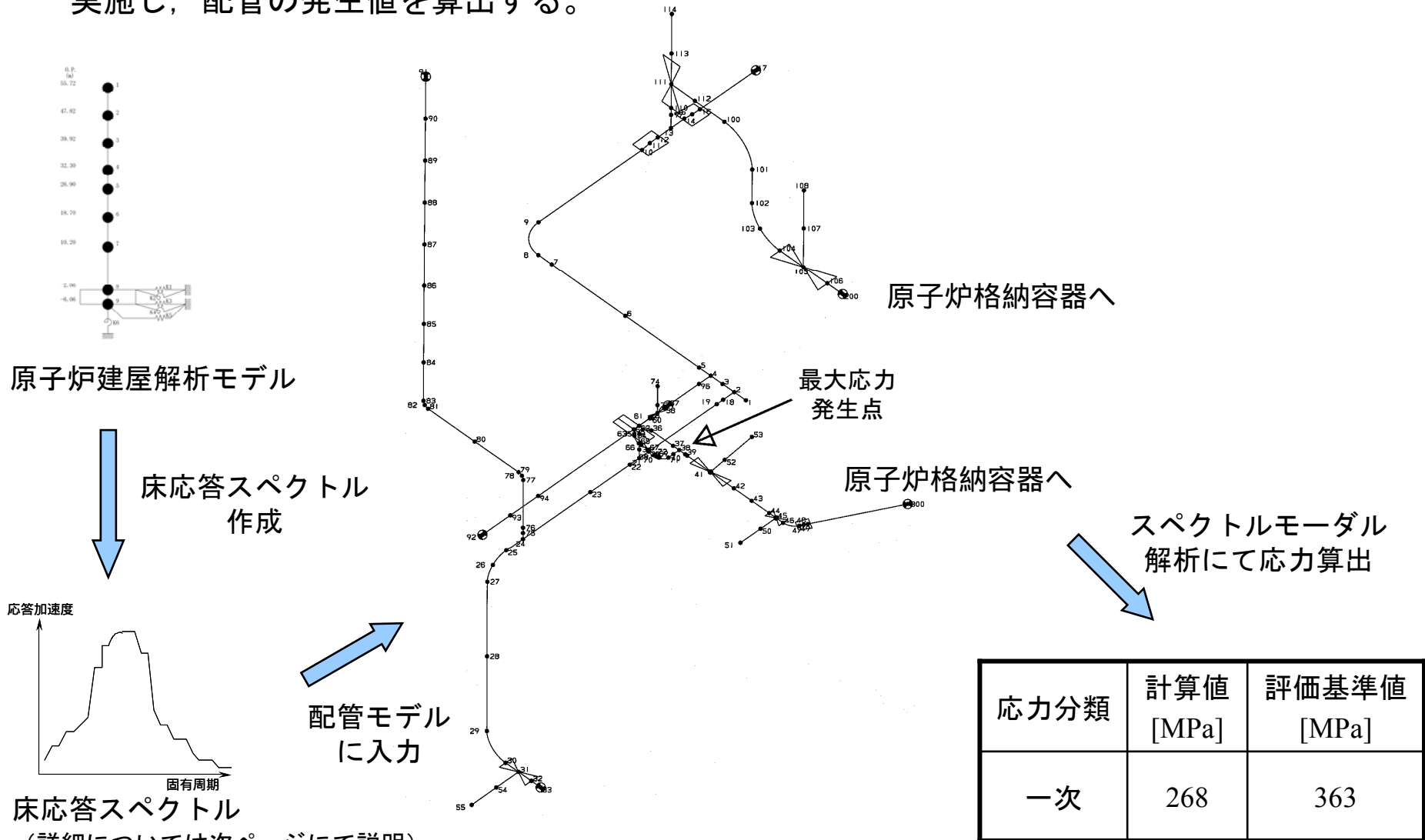
応力分類	計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
引張	42	185

※ボルト類の内、評価基準値／発生値が
最も小さい電動機取付ボルトの値を記載

原子炉建屋
鉛直方向解析モデル

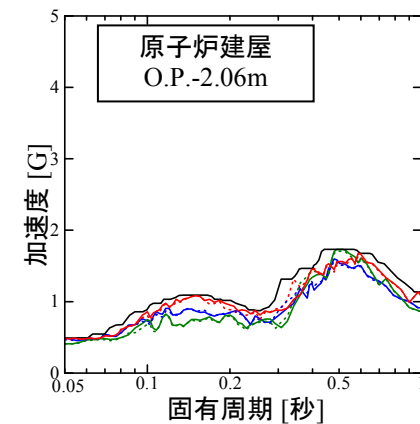
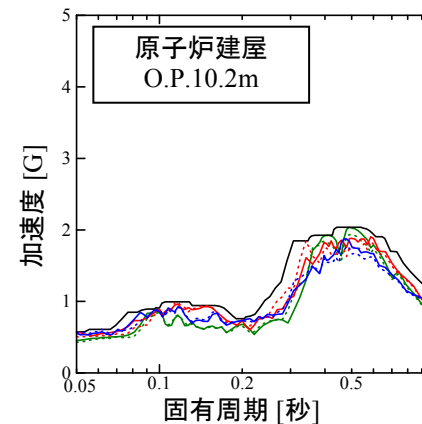
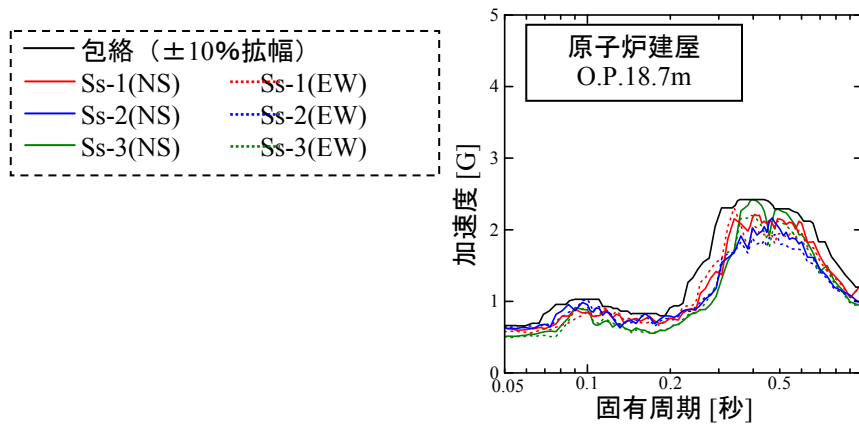
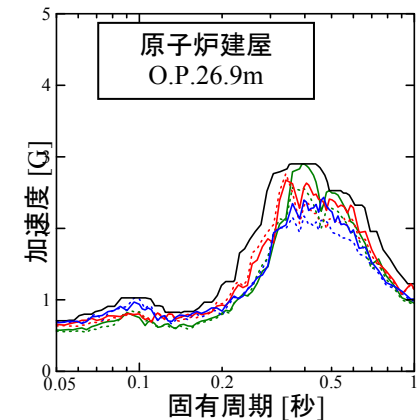
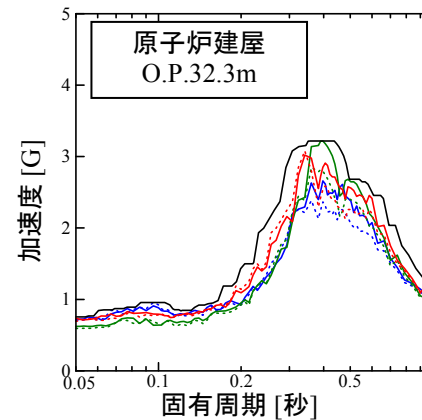
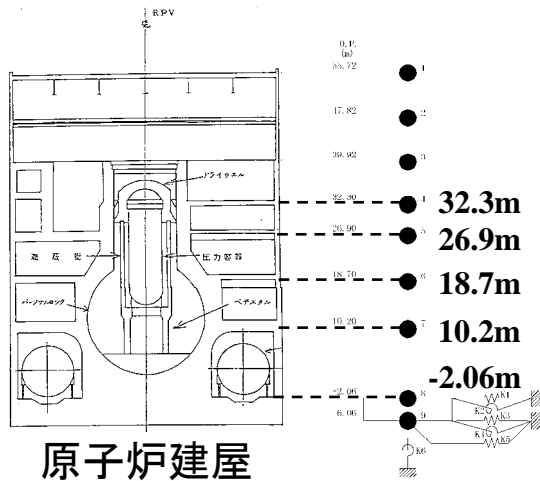
(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 配管 (残留熱除去系配管)

- 原子炉建屋の応答解析による床応答スペクトルに基づいて、スペクトルモーダル解析を実施し、配管の発生値を算出する。



(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 残留熱除去系配管の評価に用いた水平方向床応答スペクトル (1/2)

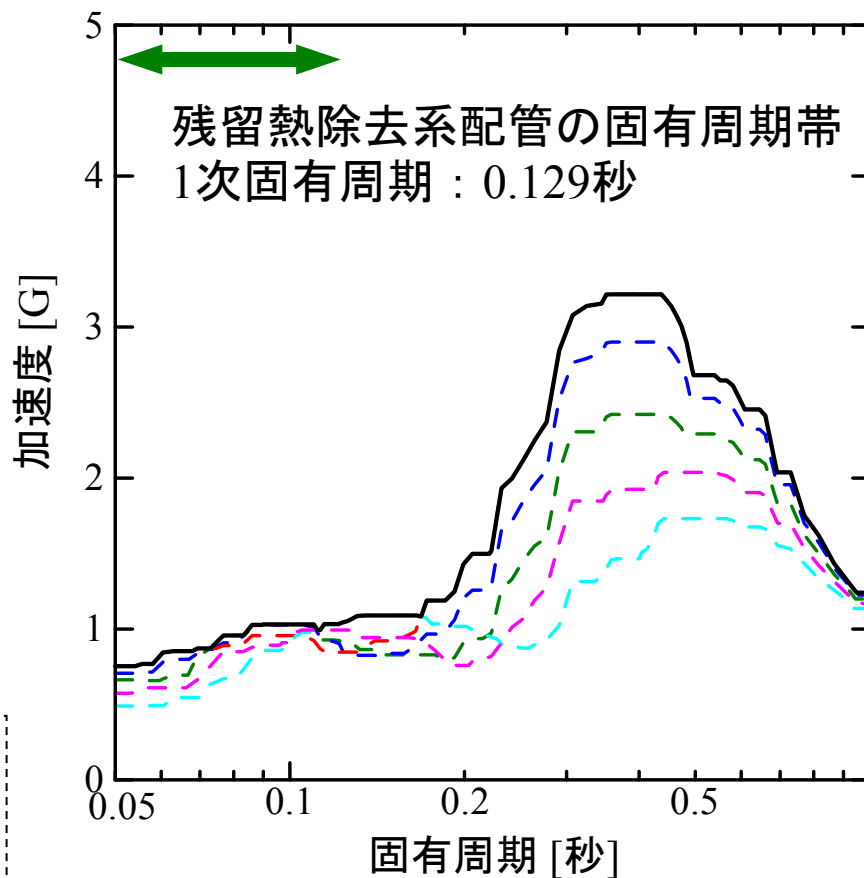
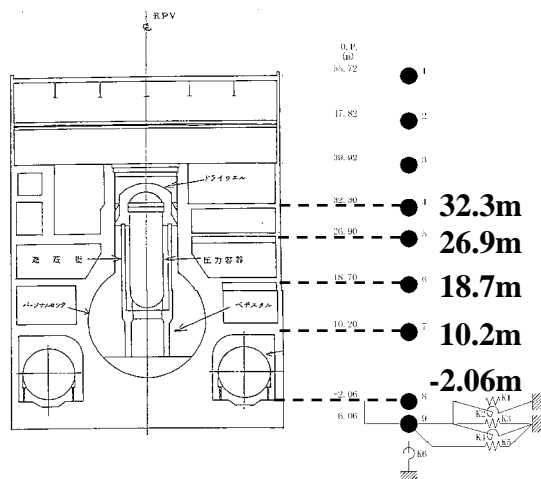
■ 原子炉建屋のO.P.32.3m, O.P.26.9m, O.P.18.7m, O.P.10.2m, O.P.-2.06m各フロアそれぞれにおいて, Ss-1(NS, EW), Ss-2(NS, EW), Ss-3(NS, EW)による床応答スペクトルを包絡, $\pm 10\%$ 拡張した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。



原子炉建屋各フロアの床応答スペクトル (水平方向, 減衰定数3.0%)

(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 残留熱除去系配管の評価に用いた水平方向床応答スペクトル (2/2)

- 原子炉建屋のO.P.32.3m, O.P.26.9m, O.P.18.7m, O.P.10.2m, O.P.-2.06m各フロアそれぞれにおいて, Ss-1(NS, EW), Ss-2(NS, EW), Ss-3(NS, EW)による床応答スペクトルを包絡, $\pm 10\%$ 拡幅した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。

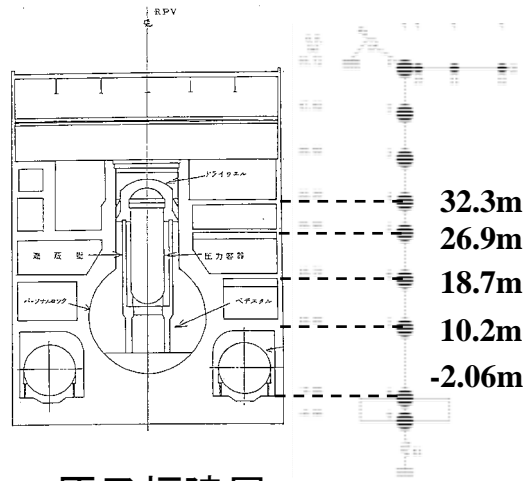


- 全フロア包絡
- - - O.P.32.3m包絡
- - - O.P.26.9m包絡
- - - O.P.18.7m包絡
- - - O.P.10.2m包絡
- - - O.P.-2.06m包絡

残留熱除去系配管の評価に用いた床応答スペクトル (水平方向, 減衰定数3.0%)

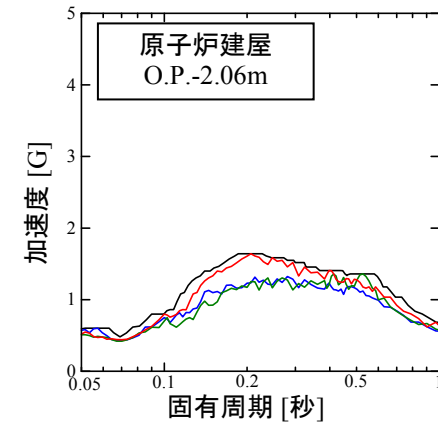
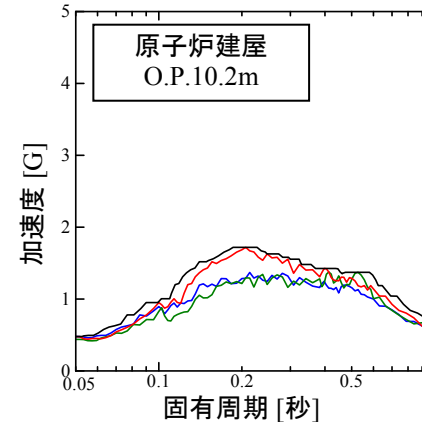
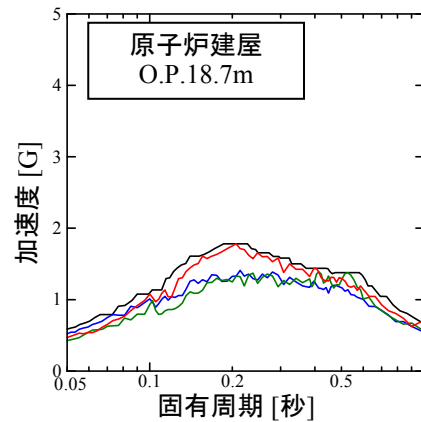
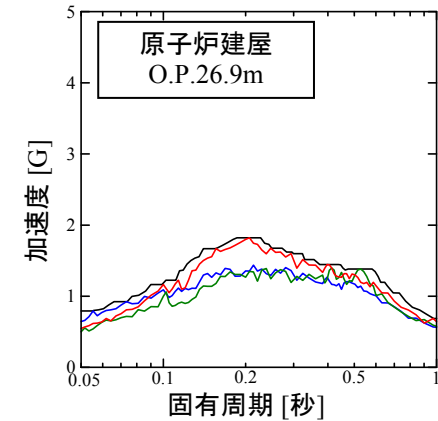
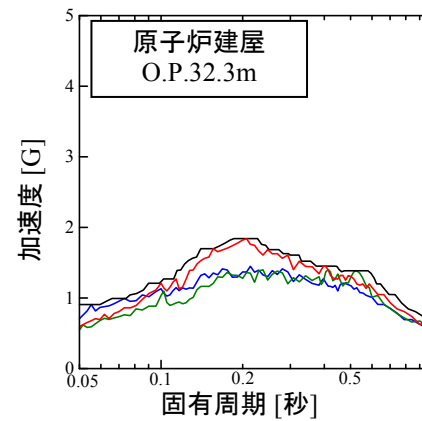
(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 残留熱除去系配管の評価に用いた鉛直方向床応答スペクトル (1/2)

- 原子炉建屋のO.P.32.3m, O.P.26.9m, O.P.18.7m, O.P.10.2m, O.P.-2.06m各フロアそれぞれにおいて, Ss-1, Ss-2, Ss-3による床応答スペクトルを包絡, ±10%拡幅した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。



原子炉建屋

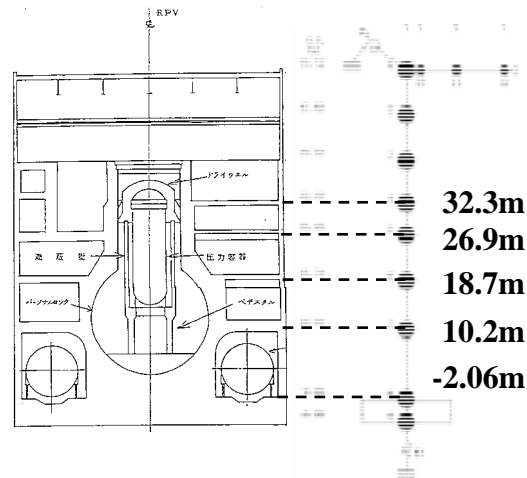
- 包絡 (±10%拡幅)
- Ss-1(UD)
- Ss-2(UD)
- Ss-3(UD)



原子炉建屋各フロアの床応答スペクトル (鉛直方向, 減衰定数3.0%)

(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機
 残留熱除去系配管の評価に用いた鉛直方向床応答スペクトル (2/2)

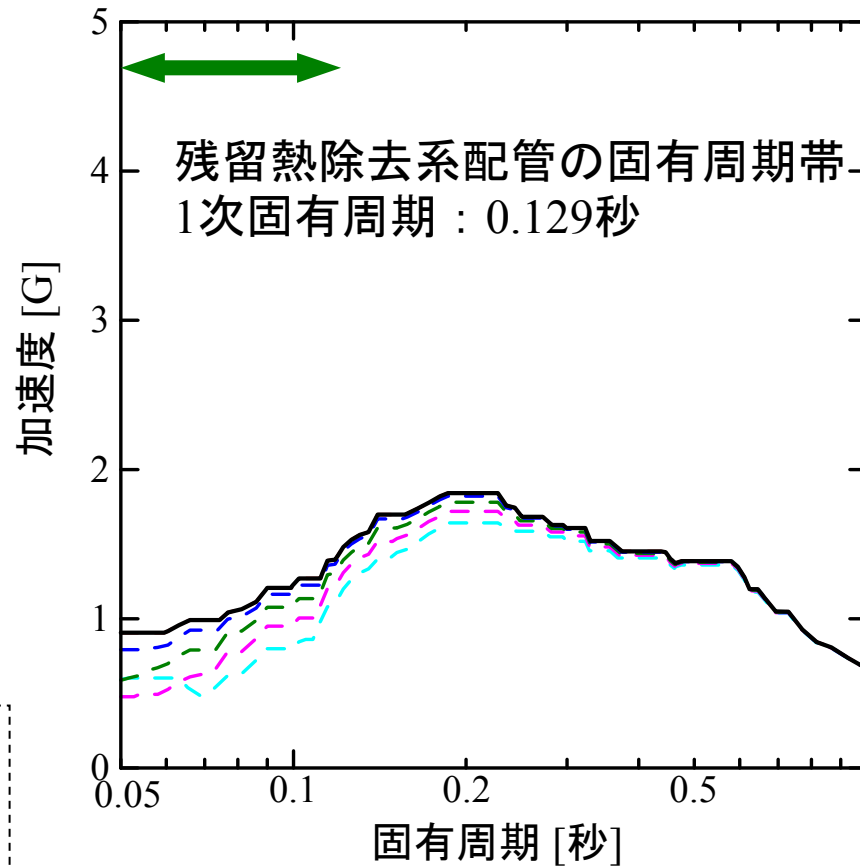
- 原子炉建屋のO.P.32.3m, O.P.26.9m, O.P.18.7m, O.P.10.2m, O.P.-2.06m各フロアそれぞれにおいて, Ss-1, Ss-2, Ss-3による床応答スペクトルを包絡, ±10%拡幅した上で, 各フロアのスペクトルを包絡して作成。



原子炉建屋

原子炉建屋
鉛直方向解析モデル

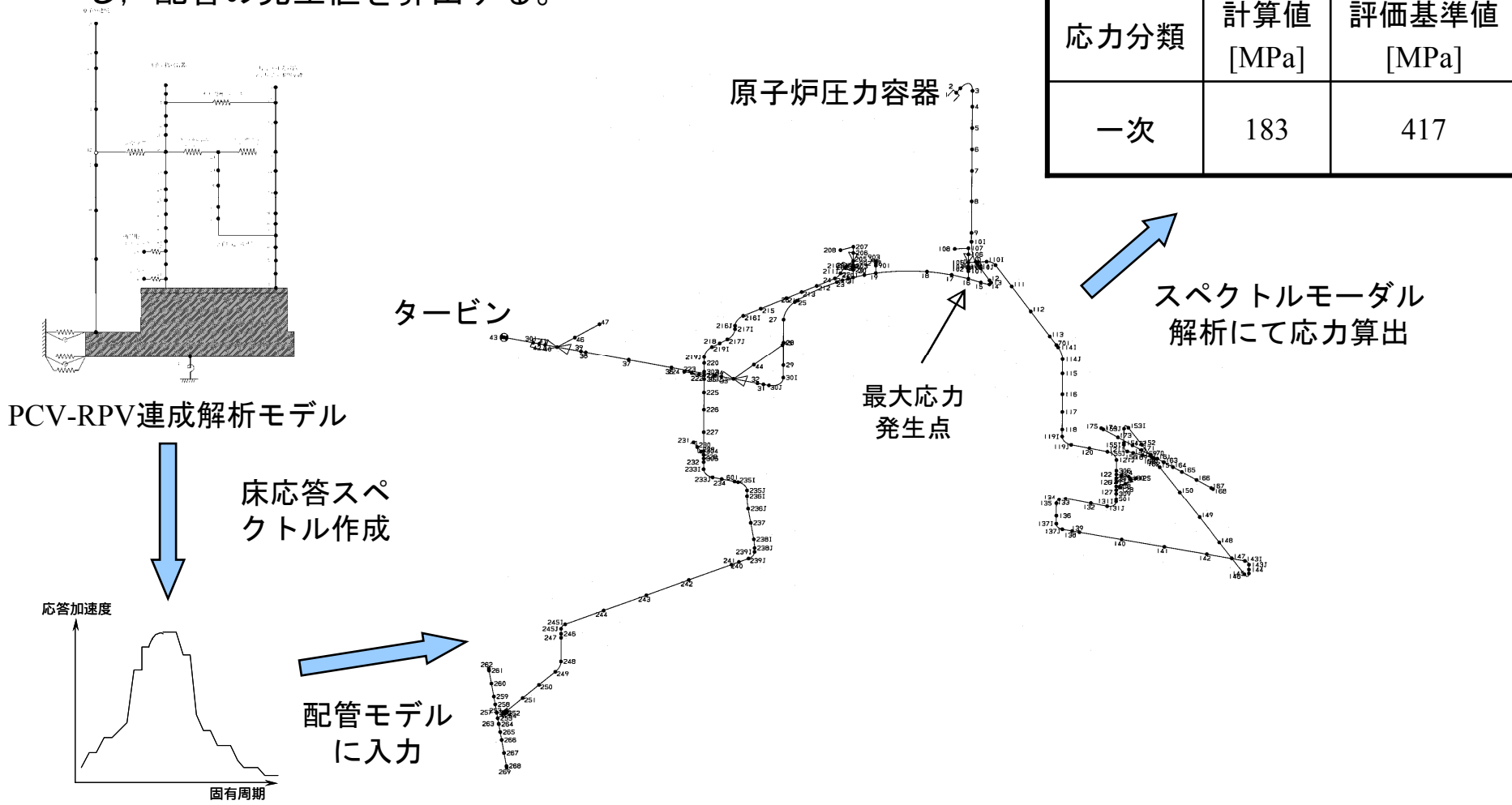
- 全フロア包絡
- - - O.P.35.3m包絡
- - - O.P.29.9m包絡
- - - O.P.21.7m包絡
- - - O.P.13.2m包絡
- - - O.P.0.94m包絡



残留熱除去系配管の評価に用いた床応答スペクトル (鉛直方向, 減衰定数3.0%)

(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 配管 (主蒸気系配管)

- PCV-RPV連成解析による床応答スペクトルに基づいて、スペクトルモーダル解析を実施し、配管の発生値を算出する。



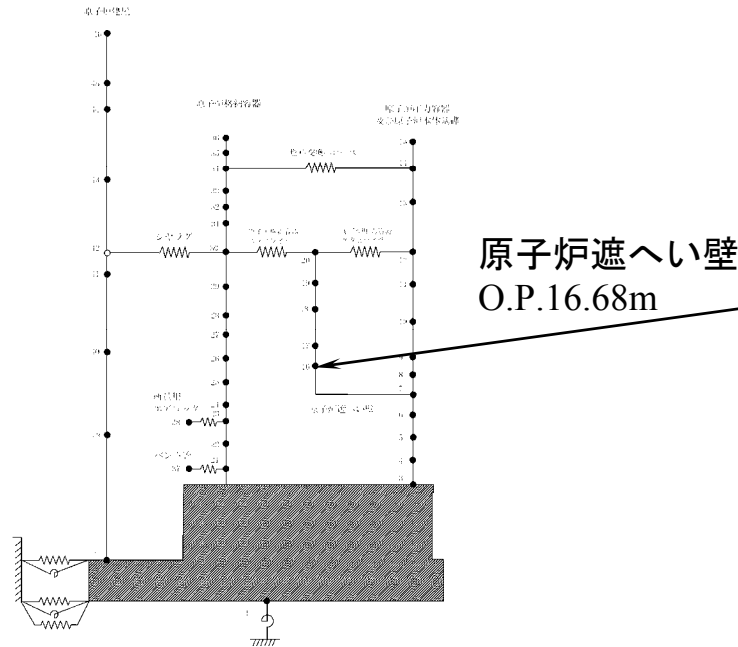
応力分類	計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
一次	183	417

スペクトルモーダル解析にて応力算出

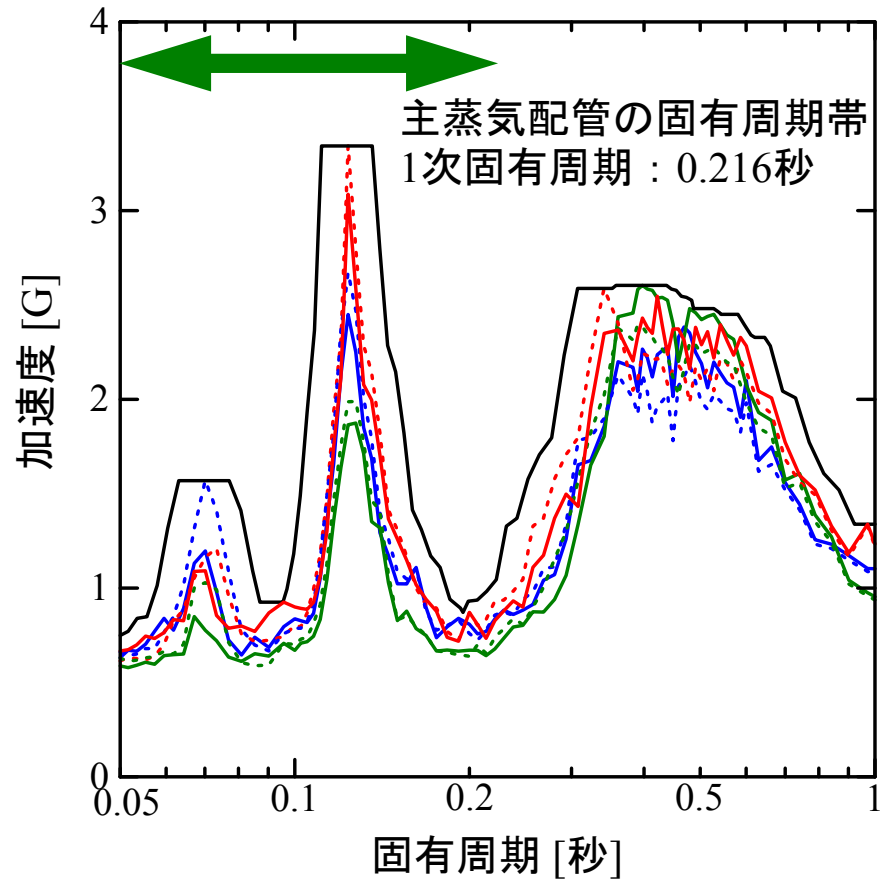
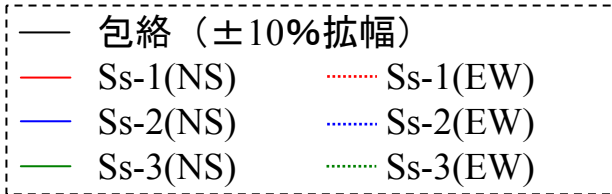
床応答スペクトル
(詳細については次ページにて説明)

(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 主蒸気系配管の評価に用いた水平方向床応答スペクトル

- 配管の重心に近い位置（原子炉遮へい壁のO.P.16.68m）において、_Ss-1(NS, EW), Ss-2(NS, EW), Ss-3(NS, EW)による床応答スペクトルを包絡し、±10% 拡幅して作成。



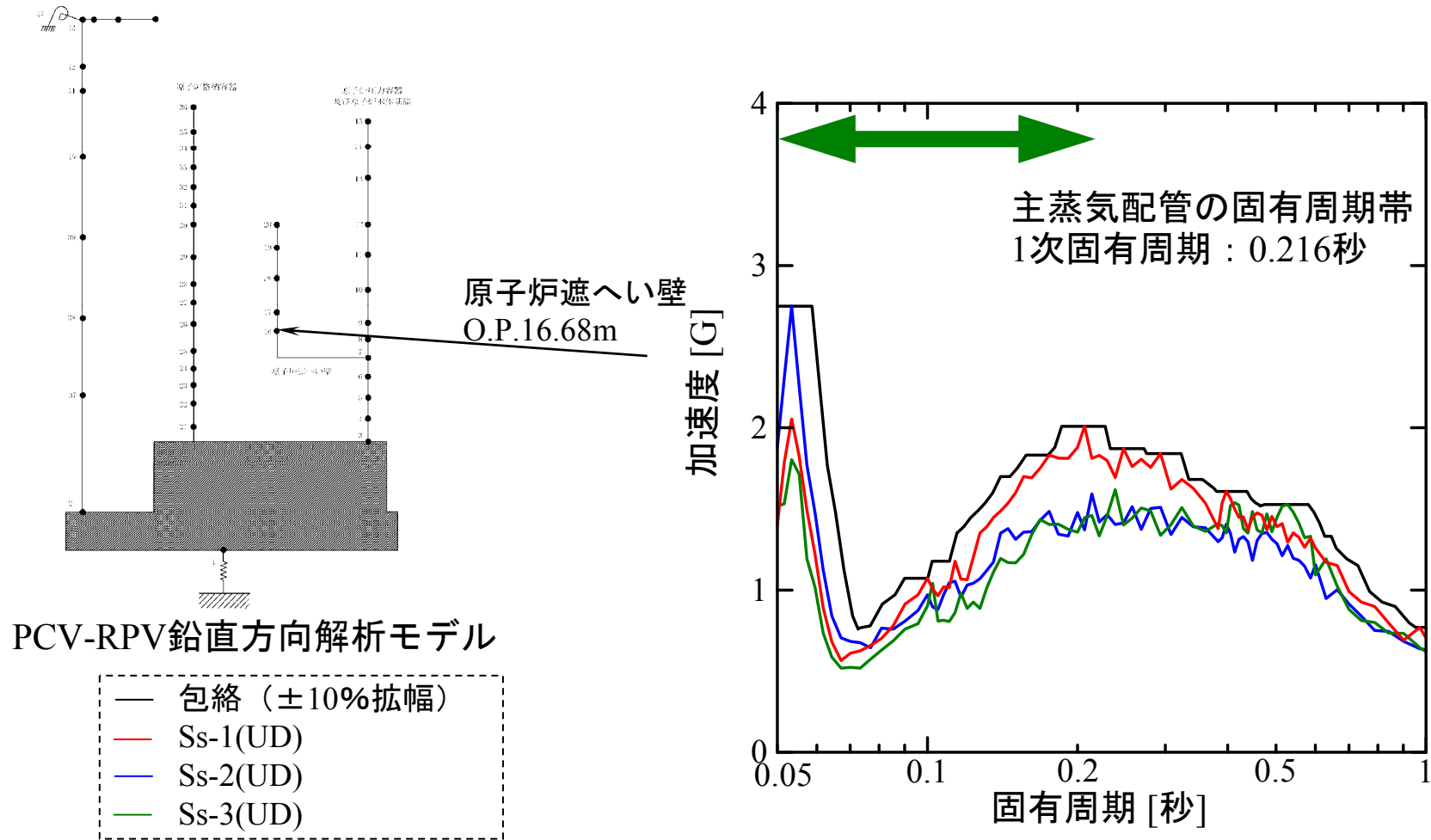
PCV-RPV水平方向解析モデル



主蒸気系配管の評価に用いた床応答スペクトル（水平方向，減衰定数2.0%）

(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 主蒸気系配管の評価に用いた鉛直方向床応答スペクトル

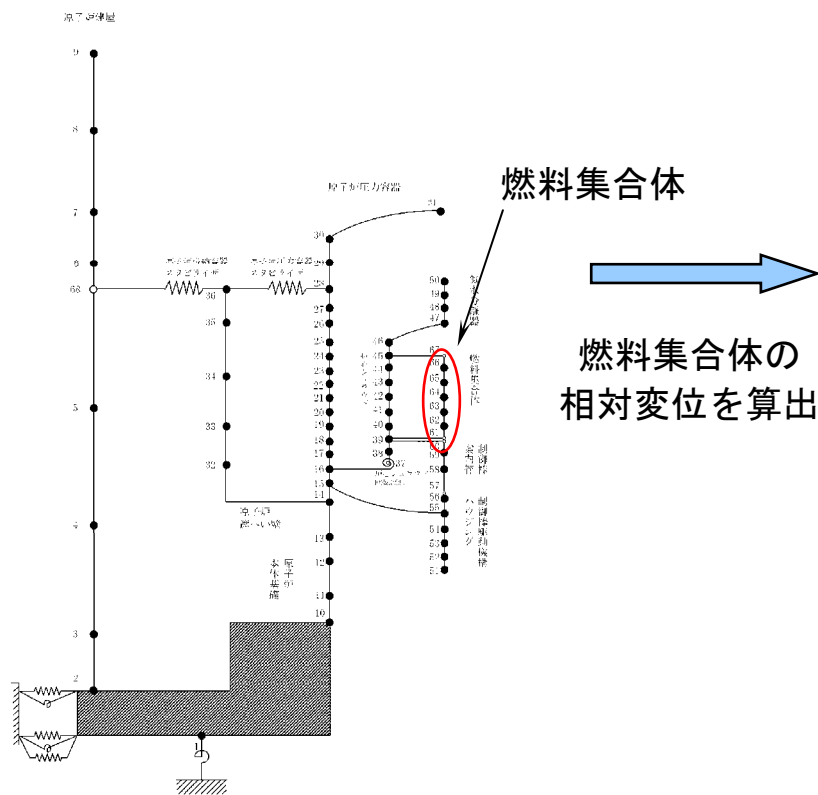
- 配管の重心に近い位置（原子炉遮へい壁のO.P.16.68m）において、Ss-1, Ss-2, Ss-3による床応答スペクトルを包絡し、±10%拡幅して作成。



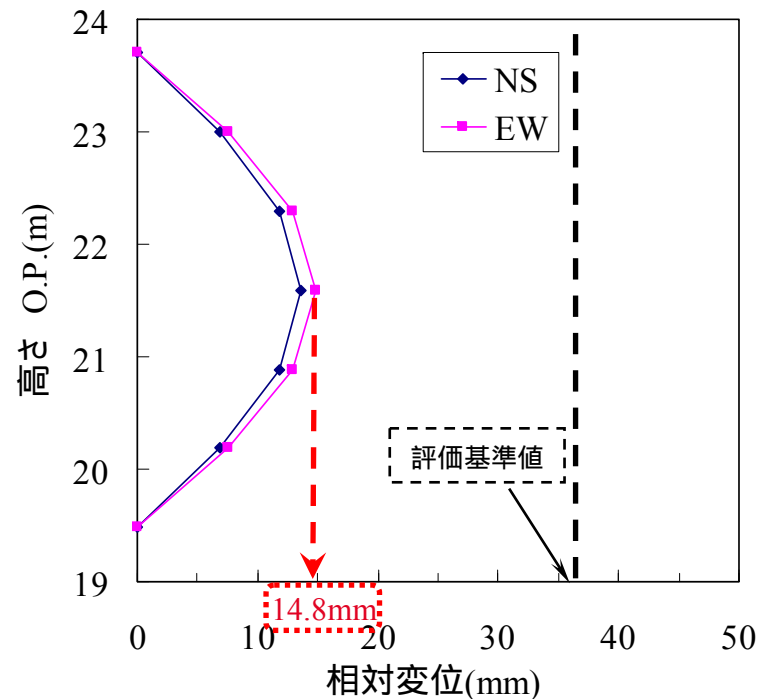
主蒸気系配管の評価に用いた床応答スペクトル（鉛直方向，減衰定数2.0%）

(各設備の評価プロセス) 福島第一3号機 制御棒 (挿入性)

- 制御棒の地震時挿入性については、地震による燃料集合体の相対変位が試験により挿入性が確認された相対変位以下であることを確認した。



炉内構造物連成解析モデル



3号機 燃料集合体相対変位

燃料集合体の地震時相対変位 (計算値) [mm]	確認済相対変位 [mm]
14.8	40.0

Ⅱ. 安全上重要な機器・配管系の耐震安全性評価

5 福島第一5号機と3号機における評価結果の比較

福島第一5号機と3号機における評価結果の比較

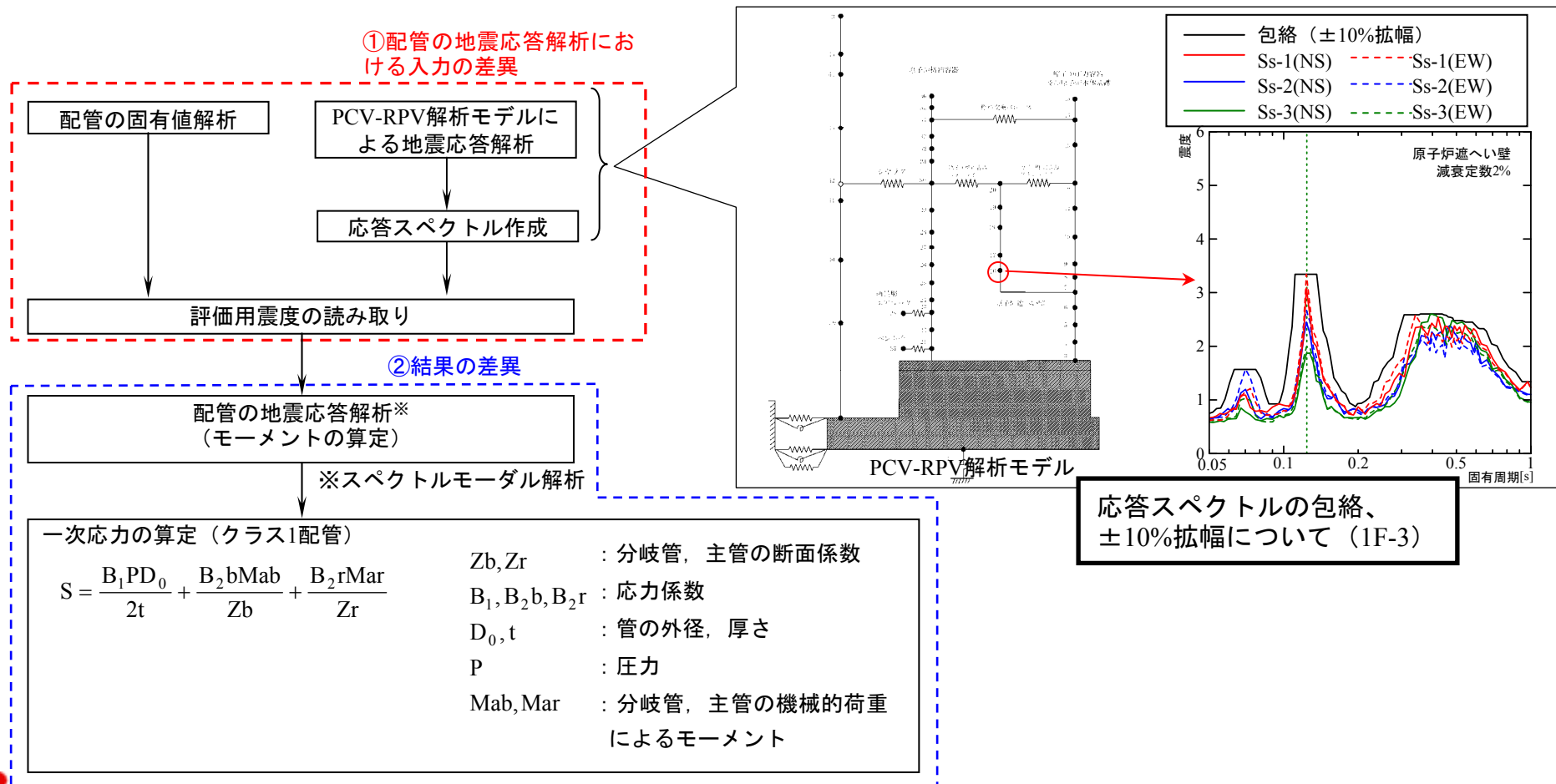
評価対象設備	評価部位	福島第一5号機				福島第一3号機				備考
		応力分類	計算値	評価基準値	評価手法※1	応力分類	計算値	評価基準値	評価手法※1	
原子炉圧力容器	基礎ボルト	引張	39	222	②	引張	36	222	②	概ね同じ
原子炉格納容器	ドライウエル	膜	90	255	①	膜	199	255	①	応答比の違いによる計算値等の違い
炉心支持構造物	シュラウドサポート	軸圧縮	24	231	②	軸圧縮	33	208	①	形状の違いによる計算値評価基準値の違い
		膜	86	300	②	膜	85	300	②	
残留熱除去系ポンプ	基礎ボルト	引張	29	202	②	引張	29	202	②	概ね同じ
	電動機取付ボルト	引張	42	185	②	引張	42	185	②	
残留熱除去系配管	配管本体	一次	197	364	②	一次	268	363	②	・配管のルーティングの違いによる最大応力発生部位および計算値の違い ・温度の違いによる評価基準値のわずかな違い
主蒸気系配管	配管本体	一次	356	417	②	一次	183	417	②	配管のルーティングの違いによる計算値の違い
制御棒挿入性	燃料集合体	相対変位	13.8 [mm]	40.0 [mm]	②	相対変位	14.8 [mm]	40.0 [mm]	②	概ね同じ

※1 ①：応答倍率法による評価、 ②：詳細評価

[単位：MPa]

主蒸気系配管の比較（評価の概要）

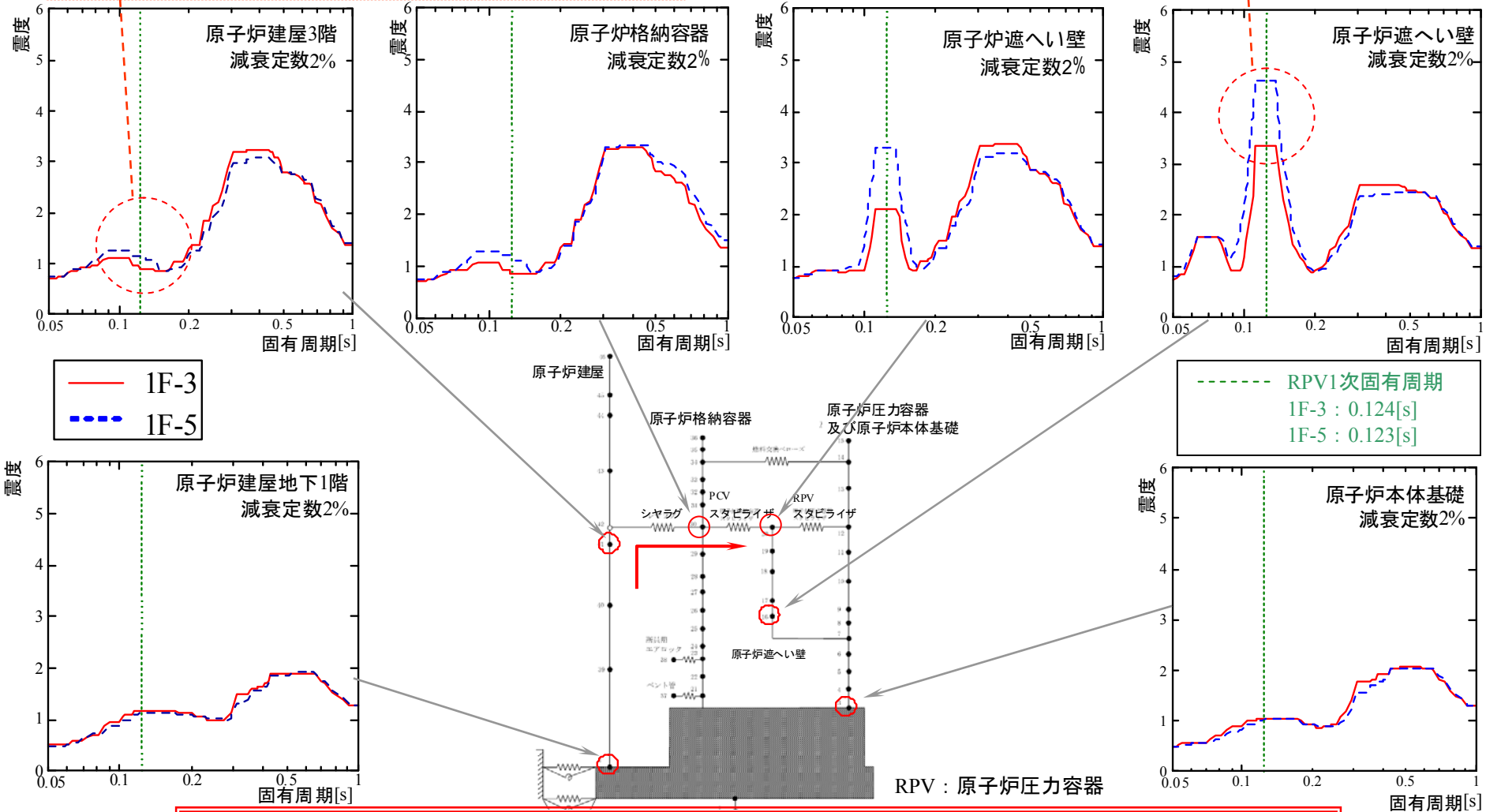
- 計算値の差異を以下の観点にて考察する。
 - ① 配管の地震応答解析における**入力**の差異
 - ② **結果**の差異（配管の固有周期等を踏まえて）



主蒸気系配管の比較 (①入力の違いについて (1/3))

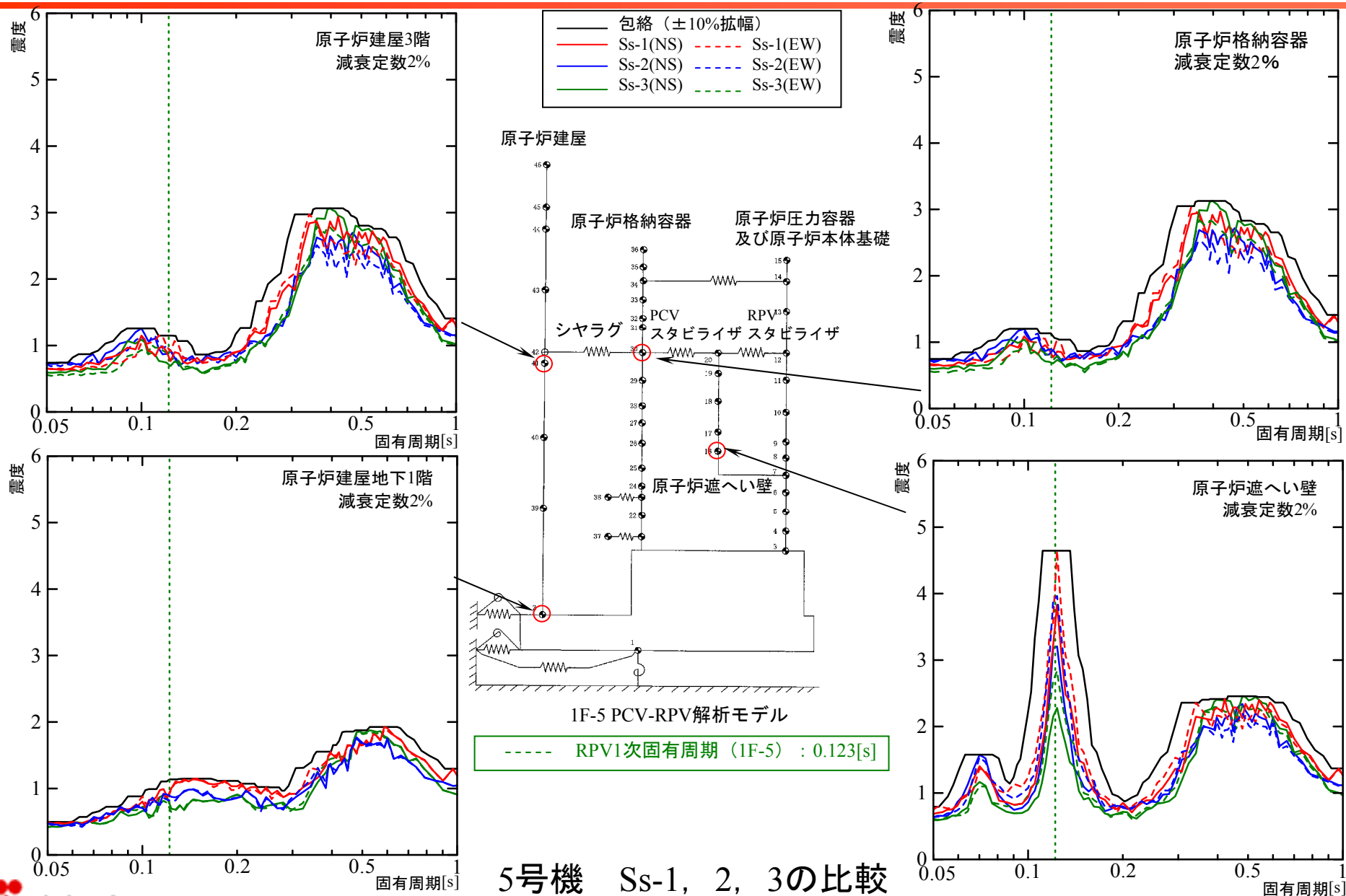
RPV1次固有周期における
原子炉建屋3階の応答は1F-5が約1.3倍

RPV1次固有周期における原子炉遮へい壁の応答
(主蒸気系配管評価に用いる)は1F-5が約1.4倍



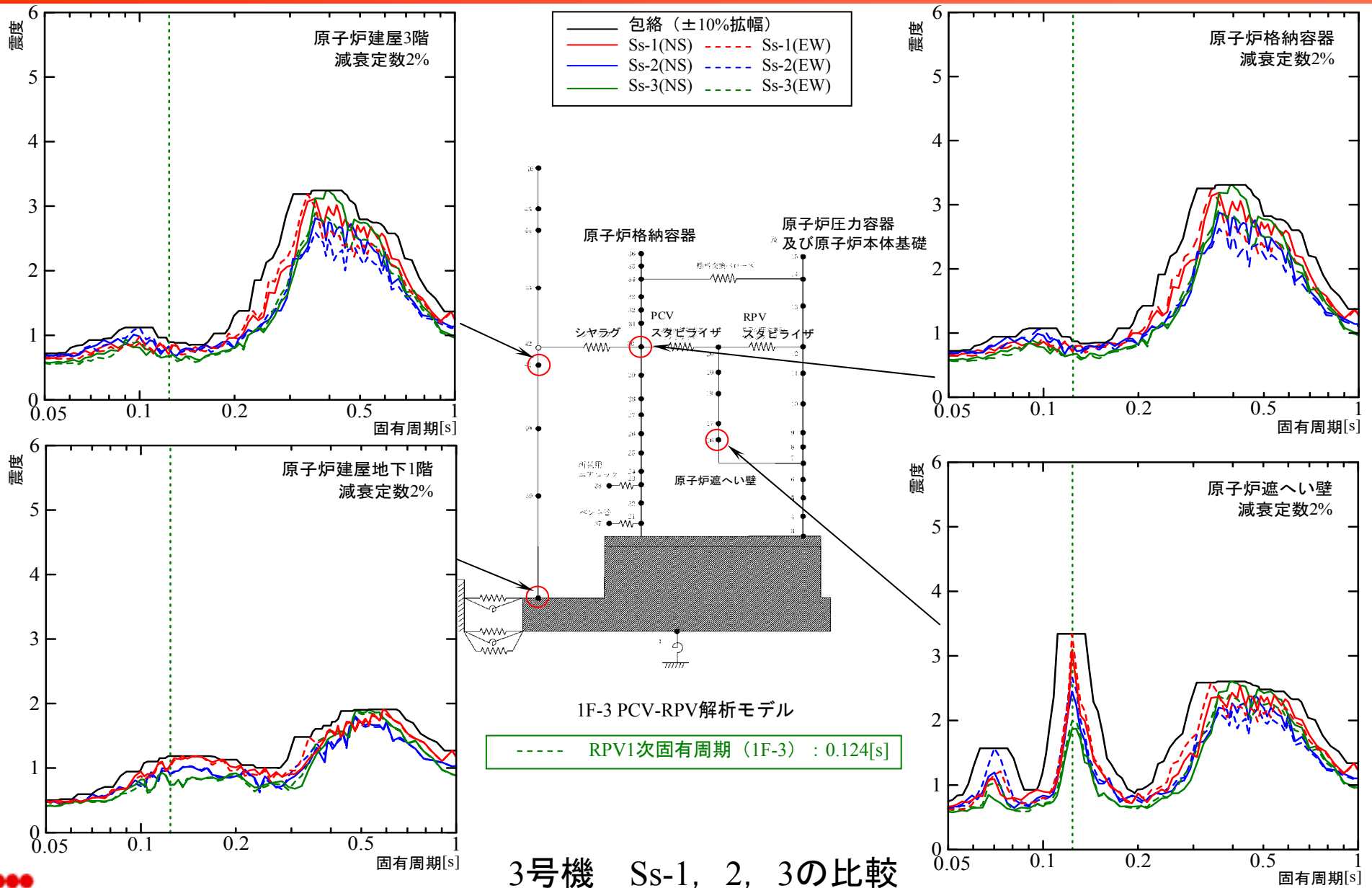
RPVの卓越する周期があり、当該周期における原子炉建屋の応答の特徴がシヤラグ、原子炉格納容器スタビライザを介してRPV系に入力されると考えられる。

主蒸気系配管の比較 (①入力の違いについて (2/3))



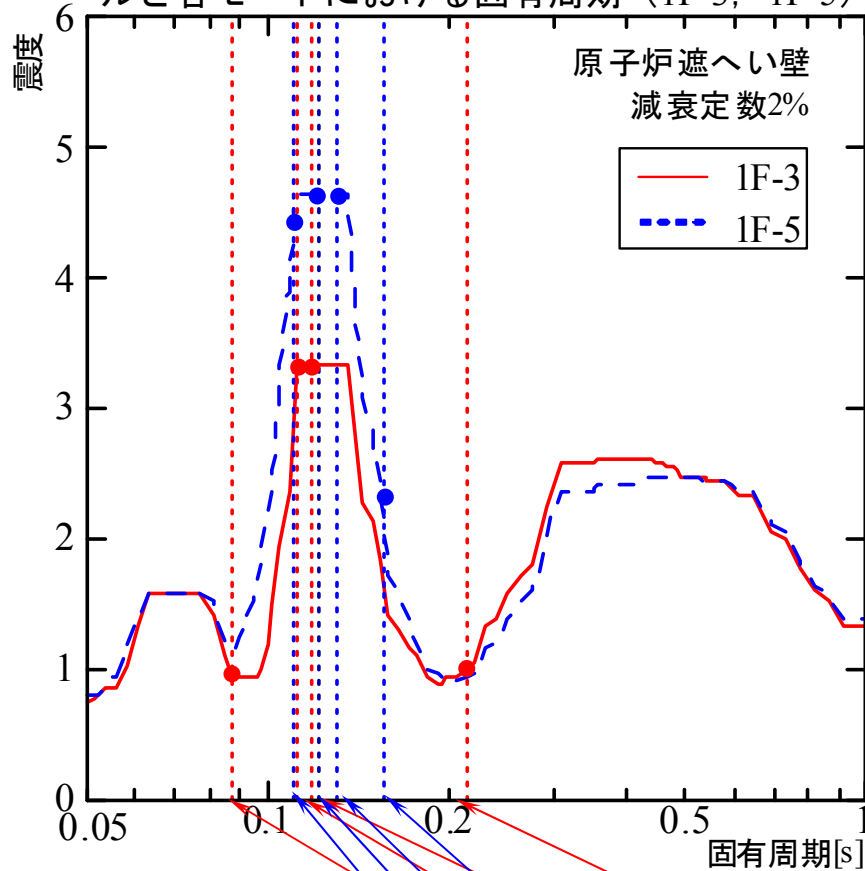
5号機 Ss-1, 2, 3の比較

主蒸気系配管の比較 (①入力の違いについて (3/3))



主蒸気系配管の比較 (②結果の差異について (1/8))

主蒸気系配管の評価に用いる水平方向応答スペクトルと各モードにおける固有周期 (1F-3, 1F-5)



計算値への寄与が大きいと考えられるモードに着目

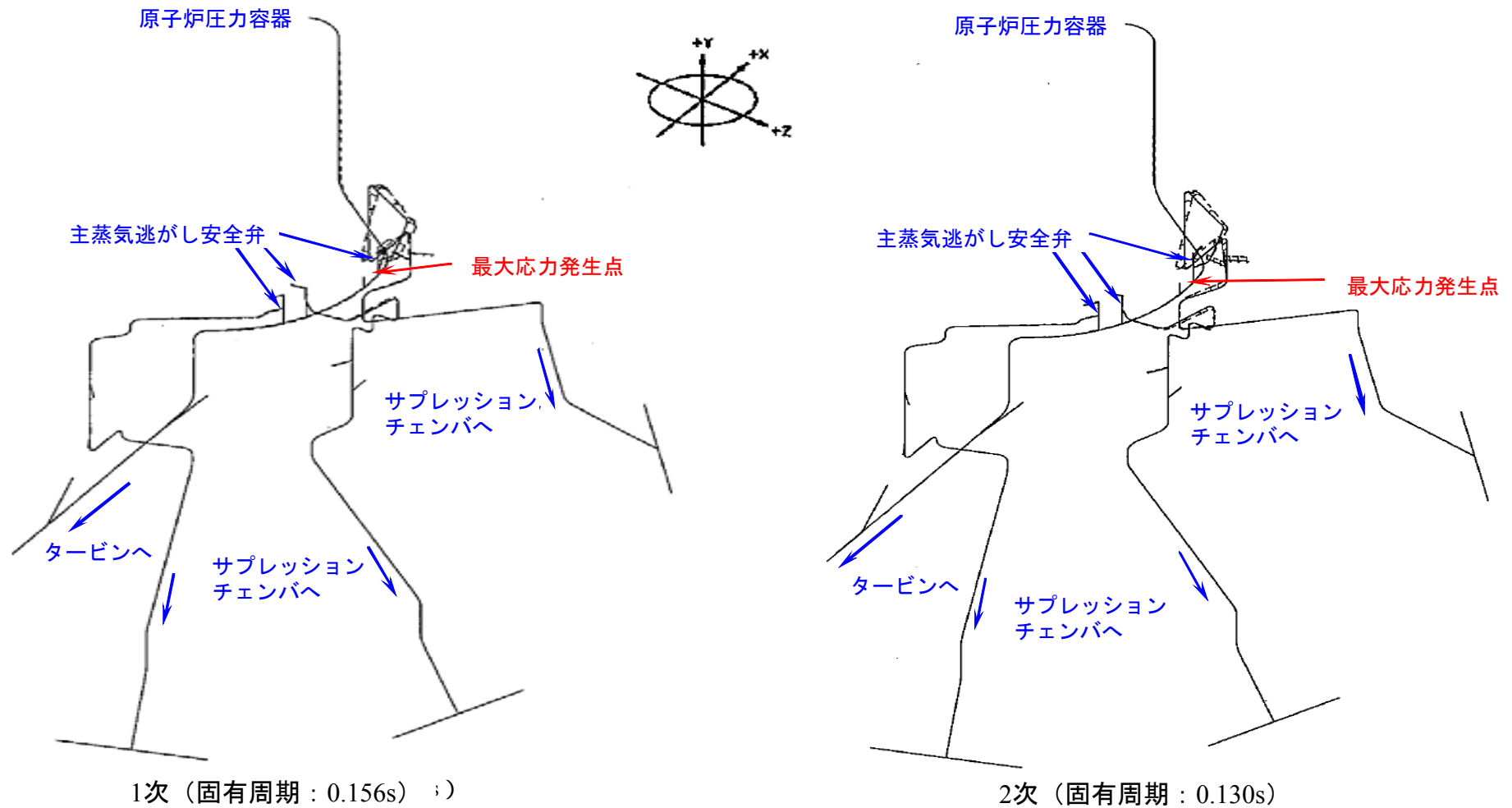


5号機の主蒸気系配管の方が1次固有周期が短周期側にあり、評価において3号機に比べて大きい震度を用いている

- 配管の1次固有周期 (1F-5)
- 配管の2次固有周期 (1F-5)
- 配管の3次固有周期 (1F-5)
- 配管の5次固有周期 (1F-5)

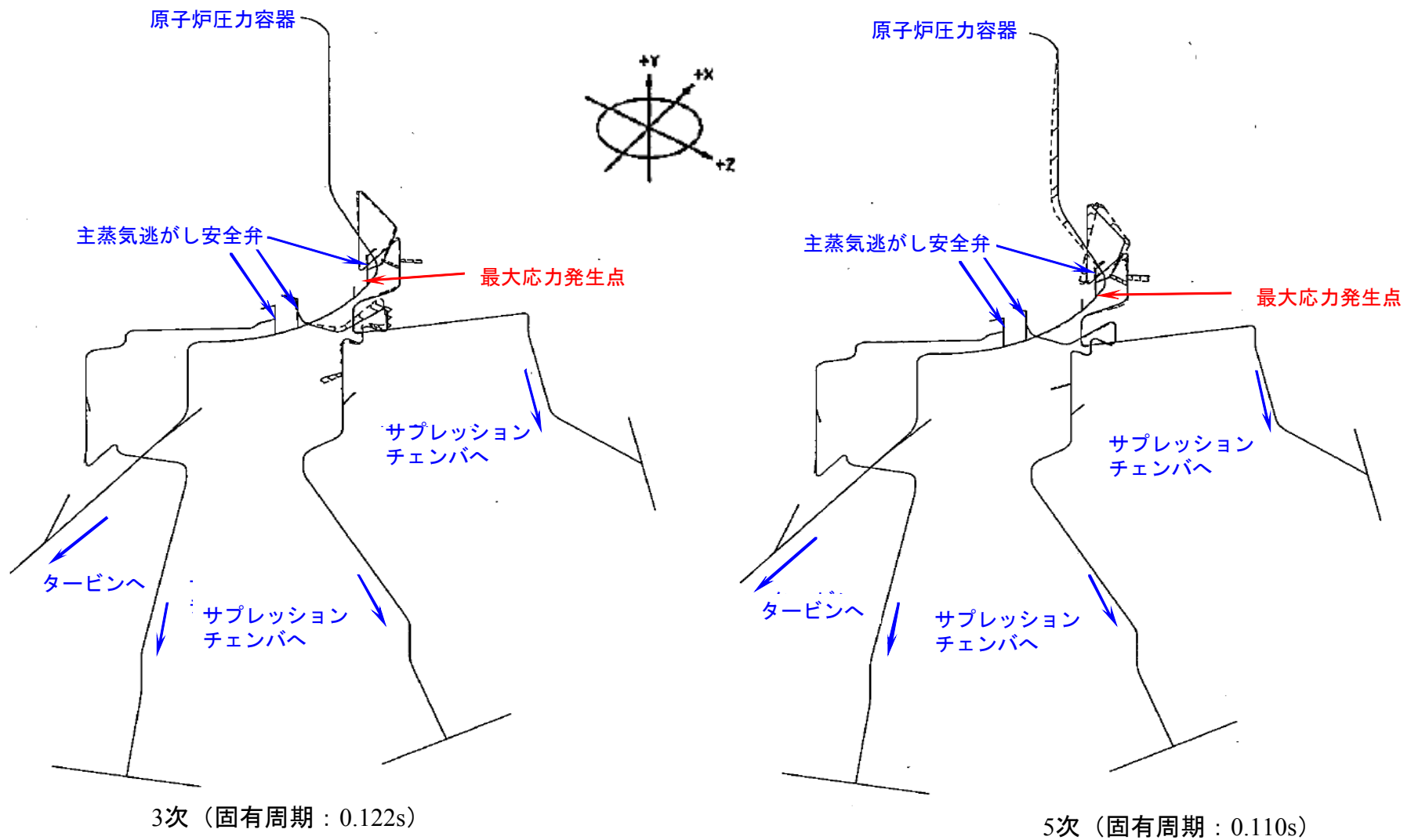
- 配管の1次固有周期 (1F-3)
- 配管の3次固有周期 (1F-3)
- 配管の4次固有周期 (1F-3)
- 配管の12次固有周期 (1F-3)

主蒸気系配管の比較 (②結果の差異について (2/8))



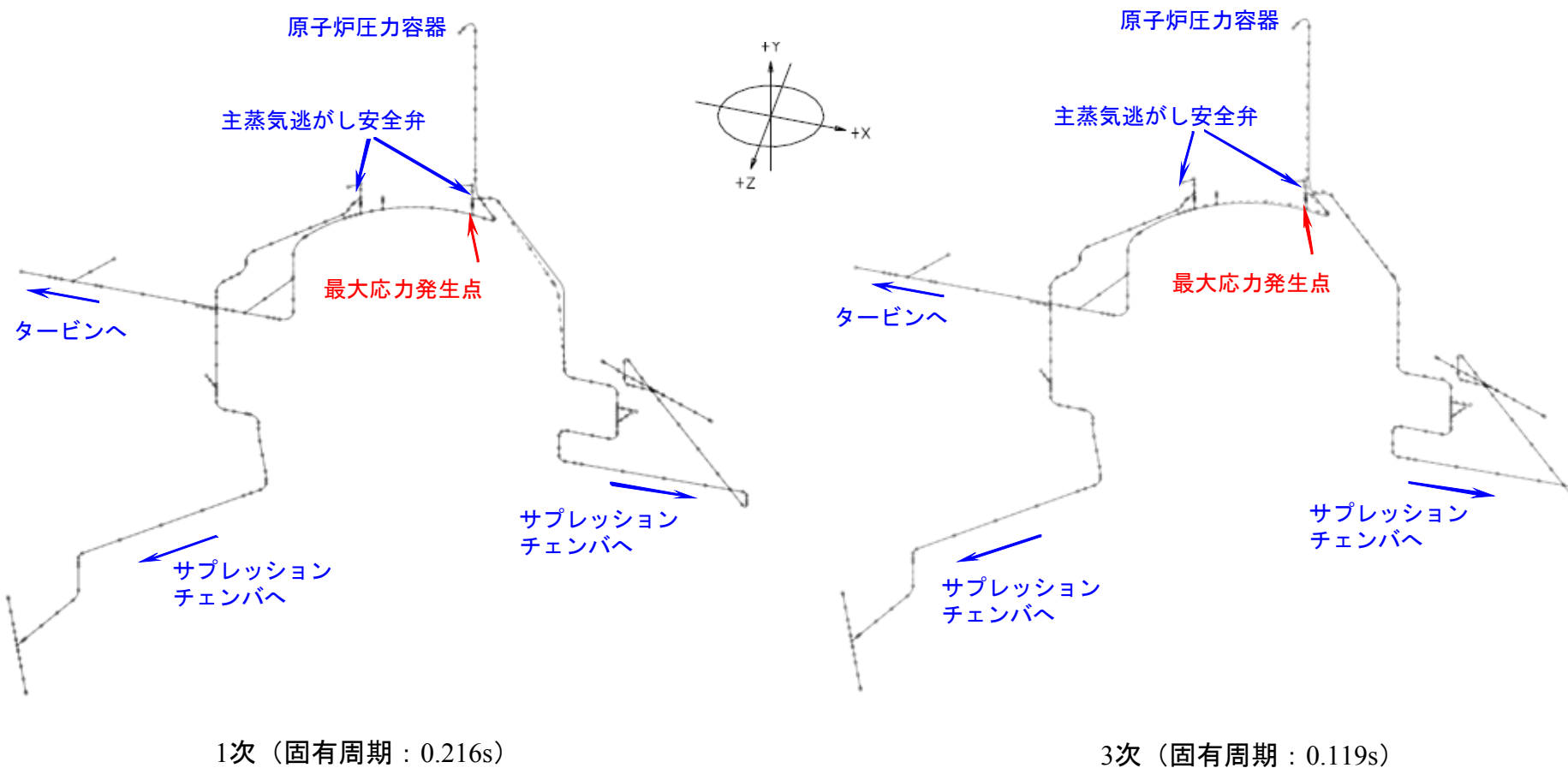
福島第一5号機 主蒸気系配管 振動モード図

主蒸気系配管の比較 (②結果の差異について (3/8))



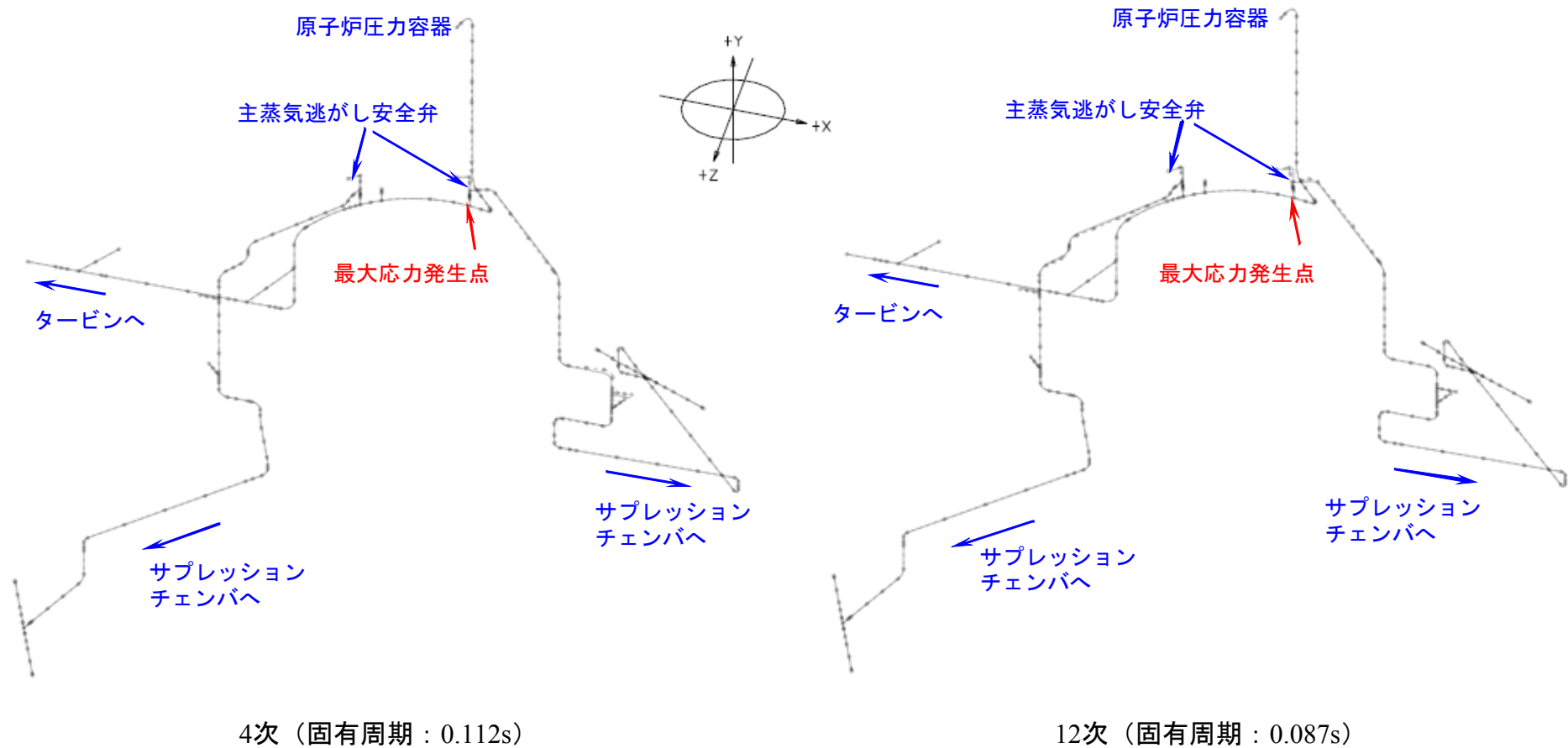
福島第一5号機 主蒸気系配管 振動モード図

主蒸気系配管の比較 (②結果の差異について (4/8))



福島第一3号機 主蒸気系配管 振動モード図

主蒸気系配管の比較 (②結果の差異について (5/8))



福島第一3号機 主蒸気系配管 振動モード図

主蒸気系配管の比較（②結果の差異について（6/8））

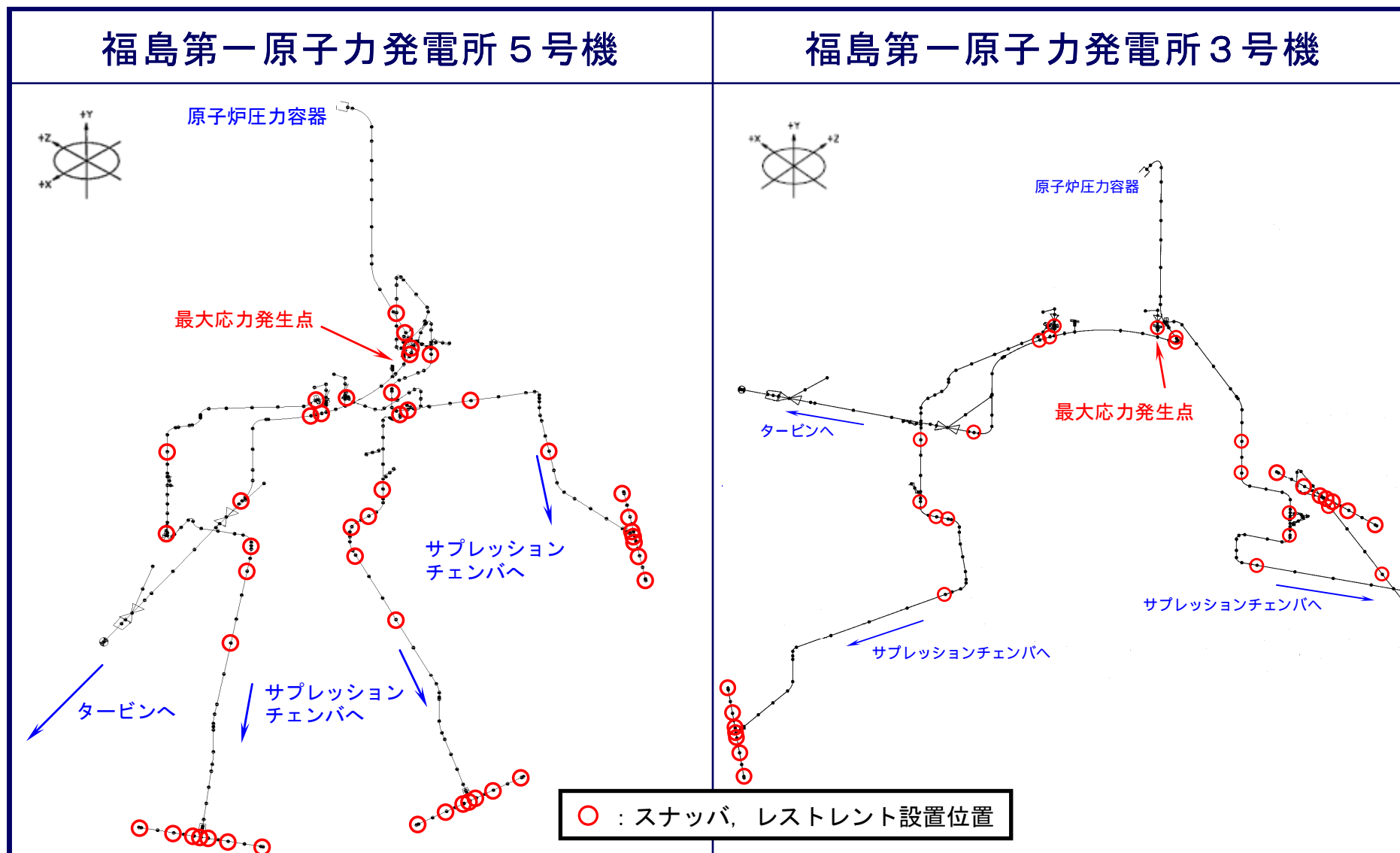
福島第一5号機の主蒸気系配管における主要な固有周期と刺激係数の関係

モード次数	固有周期 [s]	刺激係数		
		X	Y	Z
1次	0.156	0.147	0.429	0.478
2次	0.130	0.037	0.503	0.146
3次	0.122	0.197	0.046	0.210
5次	0.110	0.706	0.072	0.135

福島第一3号機の主蒸気系配管における主要な固有周期と刺激係数の関係

モード次数	固有周期 [s]	刺激係数		
		X	Y	Z
1次	0.216	0.130	0.022	0.233
3次	0.119	0.161	0.505	0.788
4次	0.112	0.422	0.166	0.284
12次	0.087	0.503	0.090	0.225

主蒸気系配管の比較 (②結果の差異について (7/8))



福島第一5号機と3号機における主蒸気系配管の地震応答解析モデル

主蒸気系配管の比較（②結果の差異について（8/8））

主蒸気系配管における検討ケースおよび結果

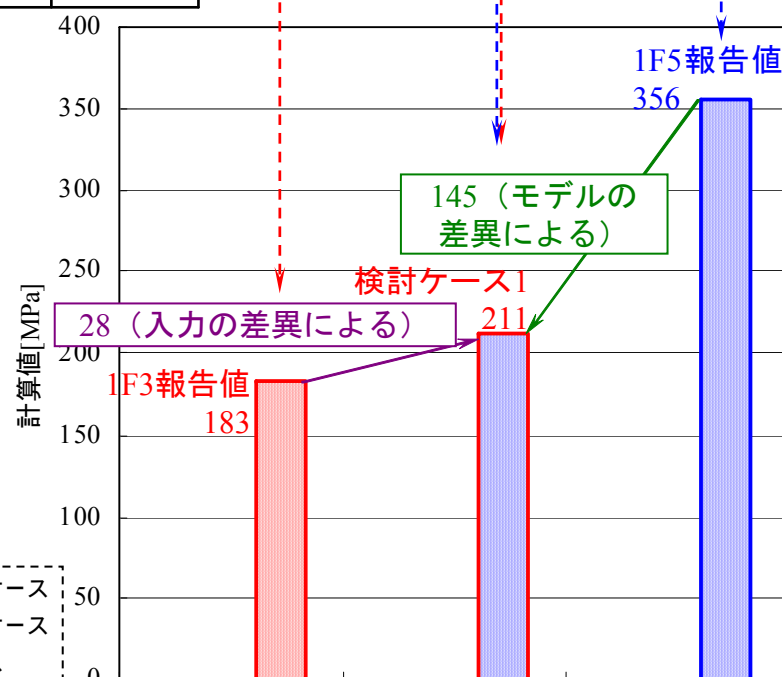
ケース	モデル	評価用床応答スペクトル	評価部位	計算値	評価基準値
報告値	1F-3の主蒸気系配管モデル (中間報告)	1F-3	逃がし安全弁の付け根部※	183MPa	417MPa
検討ケース1		1F-5	逃がし安全弁の付け根部※	211MPa	417MPa
報告値	1F-5の主蒸気系配管モデル (中間報告)	1F-5	逃がし安全弁の付け根部※	356MPa	417MPa
検討ケース2		1F-3	逃がし安全弁の付け根部※	324MPa	417MPa

※中間報告における最大応力発生点と同じ。

1F-3の主蒸気系配管モデルに1F-5の主蒸気系配管評価に用いた応答スペクトルを用いて地震応答解析を実施（検討ケース1）。

入力の差異による計算値の差異は約20%であり、モデルが異なることによる計算値の差異が約80%と大きいことを確認。

- : 1F-3の主蒸気系配管モデルを使用したケース
- : 1F-5の主蒸気系配管モデルを使用したケース
- : 1F-3の応答スペクトルを入力したケース
- : 1F-5の応答スペクトルを入力したケース



主蒸気系配管における検討結果

残留熱除去系配管の比較

■ 計算値の差異

- ✓ プラントによって配管の引き回しは異なることから、評価対象となる残留熱除去系配管の箇所が異なり、最大応力発生点も異なる（次ページ参照）

■ 評価基準値の差異

- ✓ 評価基準値はJEAG4601補-1984に基づき0.9Su（Su：設計引張強さ）である。
- ✓ 評価温度がそれぞれ94℃（5号機）、182℃（3号機）と異なることにより、Su値が異なる。

評価基準値算定に必要なデータ

号機	配管材料	評価温度	設計引張強さ Su	評価基準 0.9Su
5号機	STS410	94℃	405.48（線形補間）	364
3号機	STS410	182℃	404	363

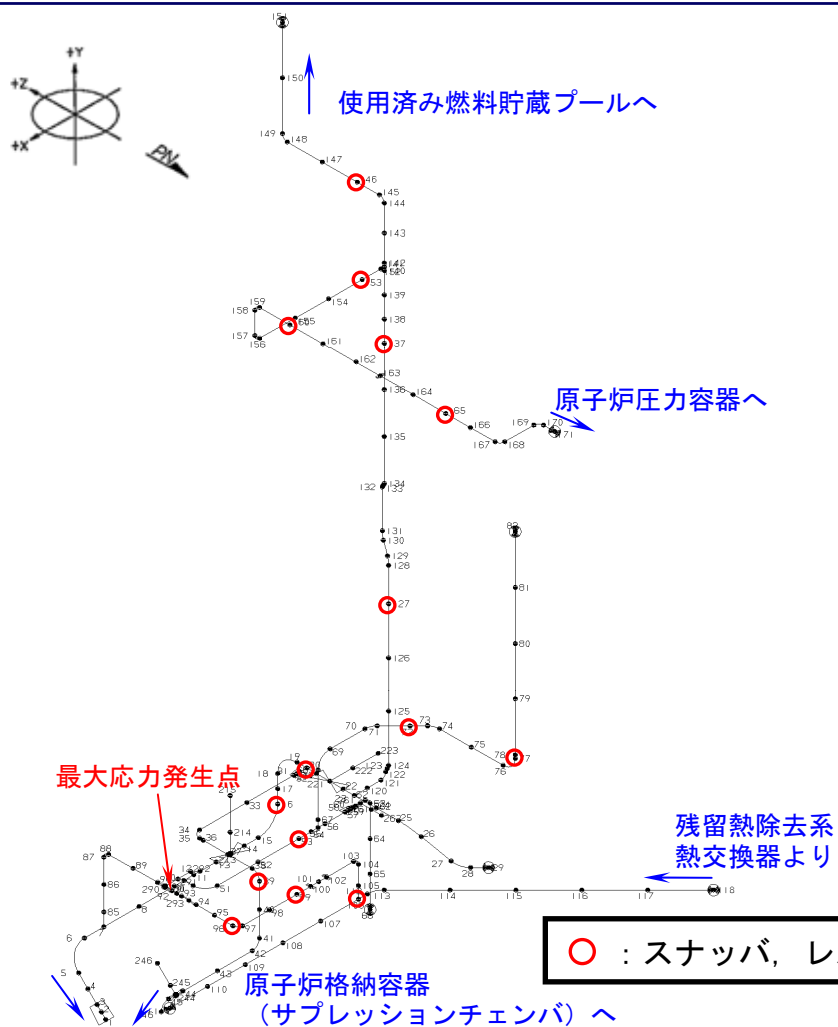
付録材料図表 Part 5 表9 材料の各温度における設計引張強さ S_u (MPa)

種類	種別	記号	最小引張強さ (MPa)	最小降伏点 (MPa)	温度 (℃)																
					-30	75	100	150	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425			
高圧配管用炭素鋼管 JIS G 3455(1988)	STS370		370	215	370	357	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	350	340			
	STS410		410	245	410	407	405	404	404	404	404	404	404	404	404	404	404	391			
	STS480		480	275	480	460	450	438	423	423	423	423	423	423	423	423	423	423			

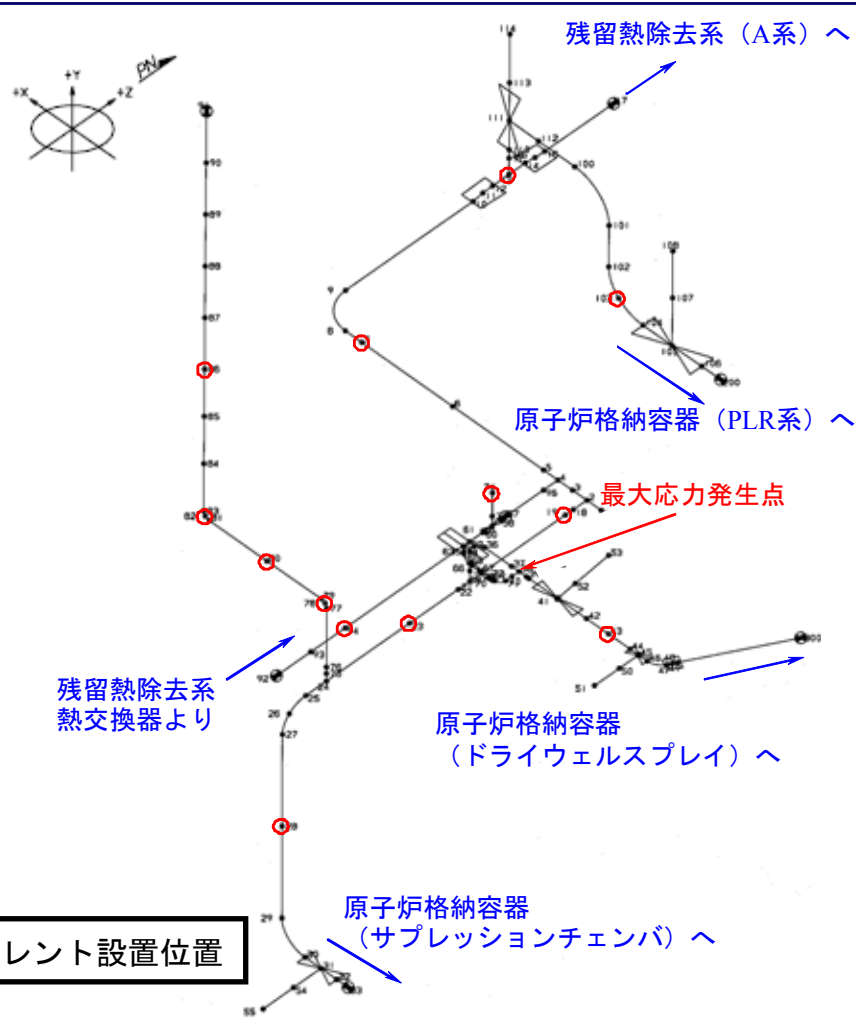
残留熱除去系配管における設計引張強さ（設計・建設規格（JSME S NC1-2005）抜粋）

残留熱除去系配管の比較

福島第一原子力発電所 5号機



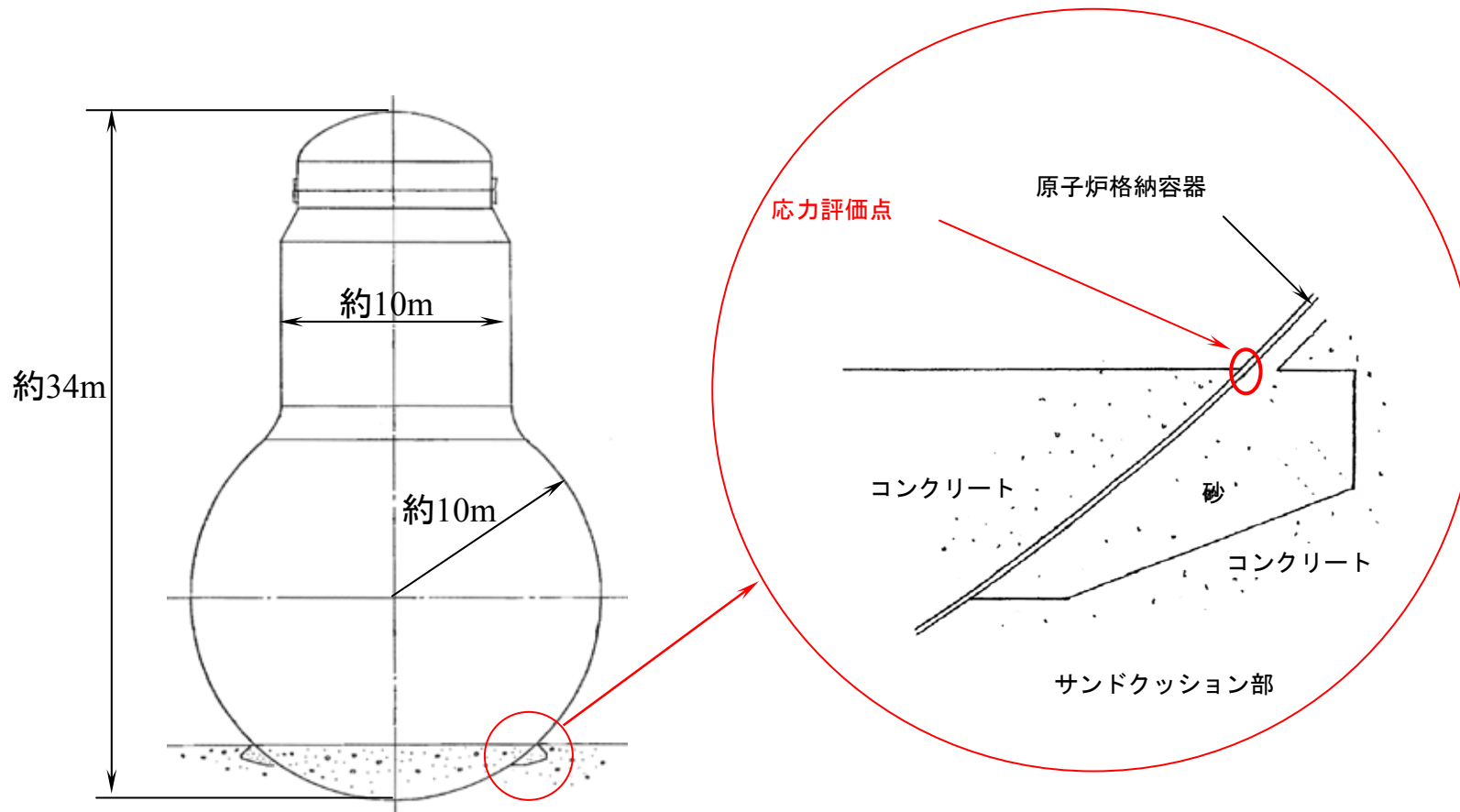
福島第一原子力発電所 3号機



福島第一5号機と3号機における残留熱除去系配管の地震応答解析モデル

原子炉格納容器の比較（構造の類似性）

- 5号機、3号機における原子炉格納容器の構造は同様であり、ともにサンドクッション部の評価結果を報告。



原子炉格納容器サンドクッション部

原子炉格納容器の比較（応答比の違い）

- 5号機、3号機の原子炉格納容器における耐震安全性は応答倍率法により評価。
- 3号機の耐震安全性評価においては、応答比の算定方法を変更。

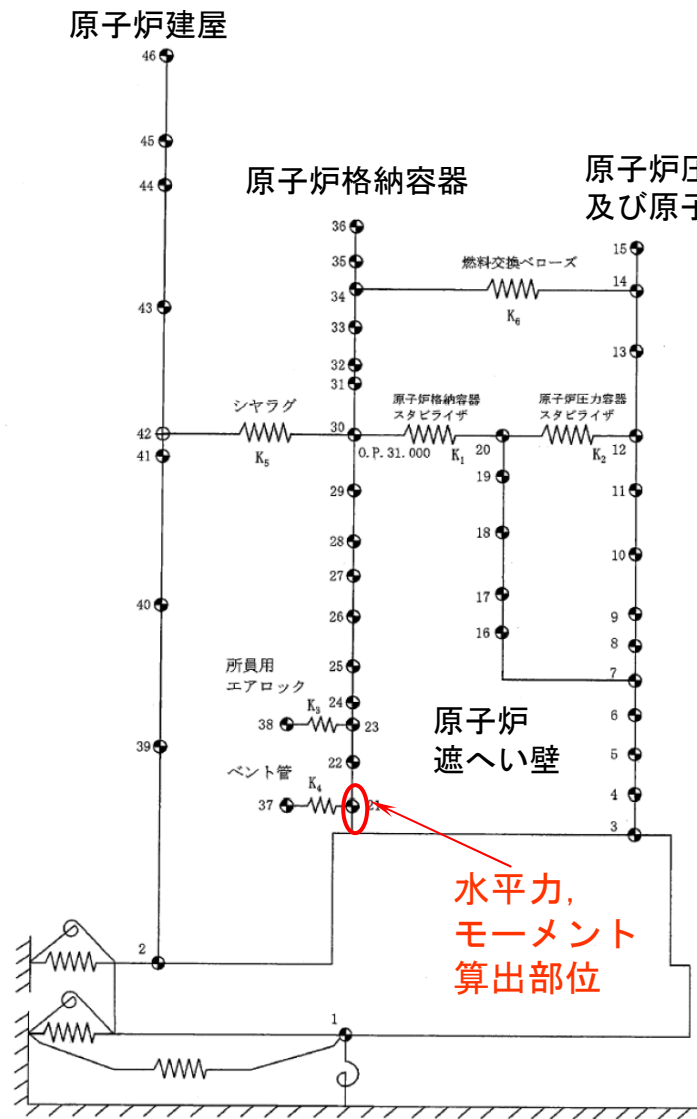
プラント	荷重, 震度	設計時	基準地震動 S_s	応答比算出式	応答比
福島第一 5号機	水平力 H [kN]	7885	8290	$\frac{H_{S_s}}{H_0}$	1.06
	モーメント M [kN・m]	129400	150000	$\frac{M_{S_s}}{M_0}$	1.16
	鉛直震度 C_v	0.24	0.45	$\frac{1 + C_{v_{S_s}}}{1 + C_{v_0}}$	1.17
福島第一 3号機	水平力 H [kN]	6865	7070	$\frac{H_{S_s}}{H_0}$	1.03
	モーメント M [kN・m]	107900	123000	$\frac{M_{S_s}}{M_0}$	1.14
	鉛直震度 C_v	0.24	0.44	$\frac{C_{v_{S_s}}}{C_{v_0}}$	1.84

応答比のうち、最も大きい
1.17を選定

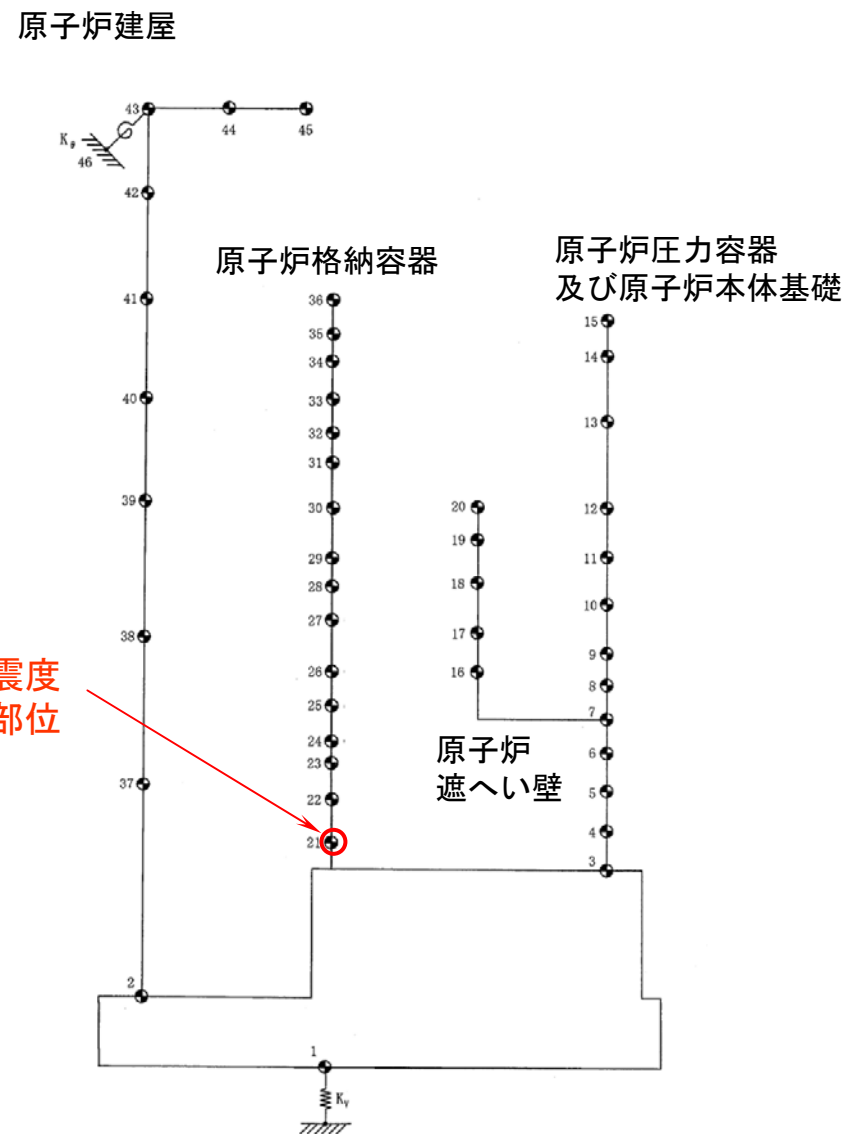
応答比のうち、最も大きい
1.84を選定

H_{S_s} : 基準地震動 S_s による水平力
 H_0 : 設計時の水平力
 M_{S_s} : 基準地震動 S_s による曲げモーメント
 M_0 : 設計時の曲げモーメント
 $C_{v_{S_s}}$: 基準地震動 S_s による鉛直震度
 C_{v_0} : 設計時の鉛直震度

原子炉格納容器の比較 (水平力、モーメント、鉛直震度算出部位)

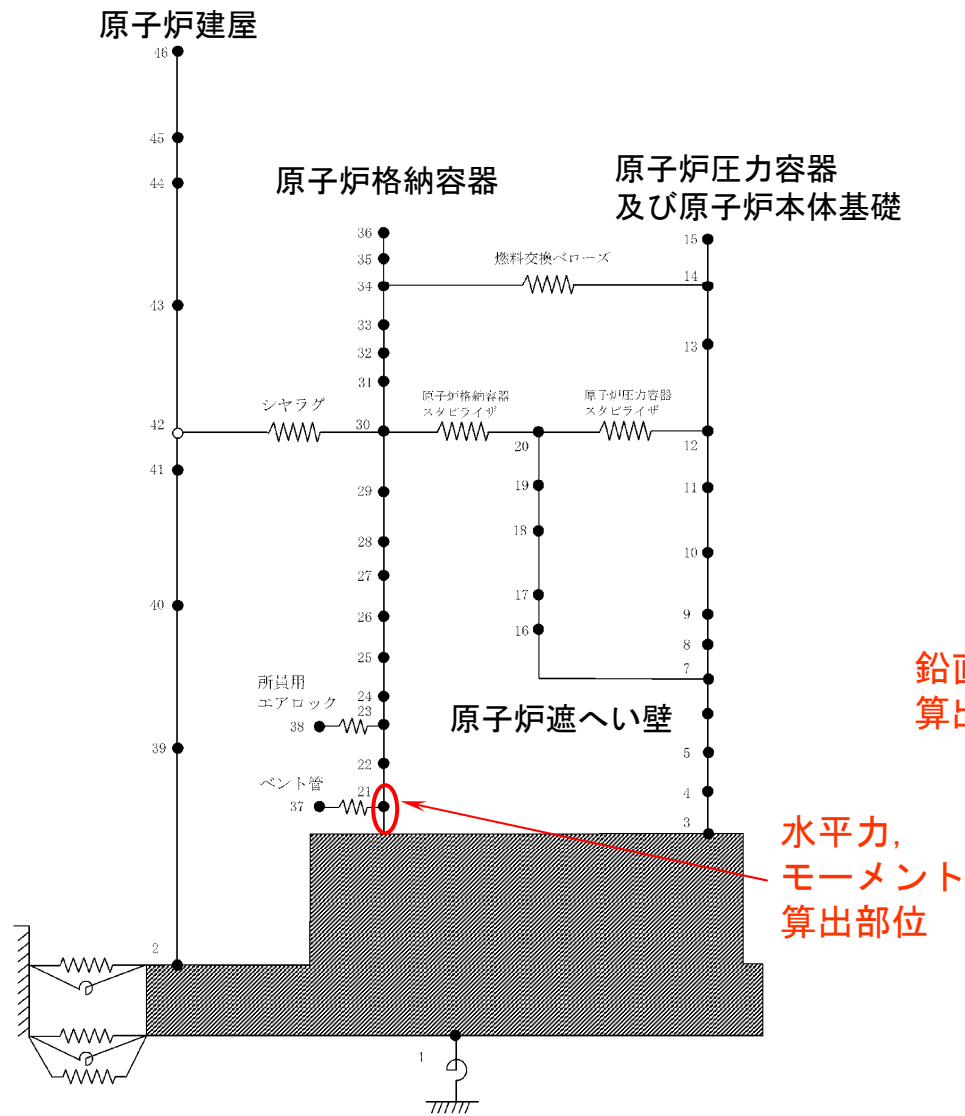


福島第一5号機 PCV-RPVモデル水平方向

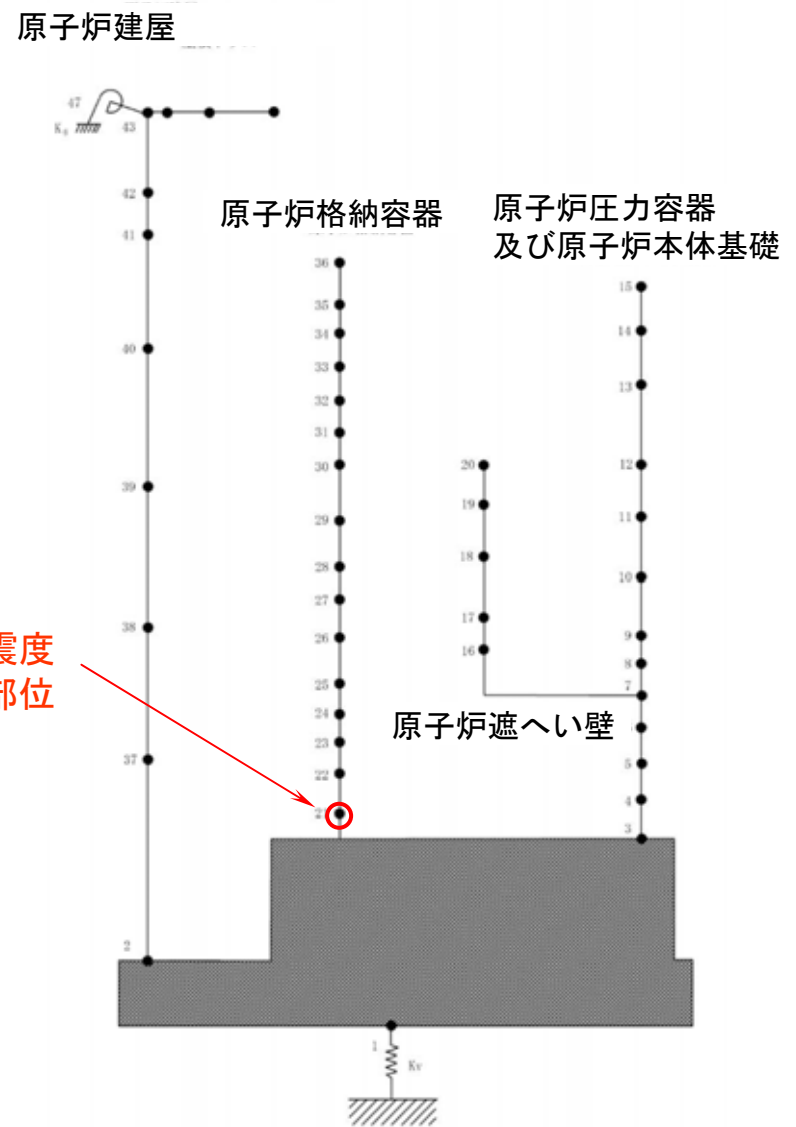


福島第一5号機 PCV-RPVモデル鉛直方向

原子炉格納容器の比較 (水平力、モーメント、鉛直震度算出部位)



福島第一3号機 PCV-RPVモデル水平方向



福島第一3号機 PCV-RPVモデル鉛直方向

原子炉格納容器の比較（計算値の違い）

- 3号機の計算値が、5号機よりも**約2.2倍**大きく算出されている理由
 - ✓ 設計時のサンドクッション部における計算値は3号機の方が**約1.4倍**大きい※。
 - ✓ 評価に用いる応答比は3号機の方が**約1.6倍**大きい。

※3号機の方が、サンドクッション部の断面係数を保守的に小さく算定していたことによる。

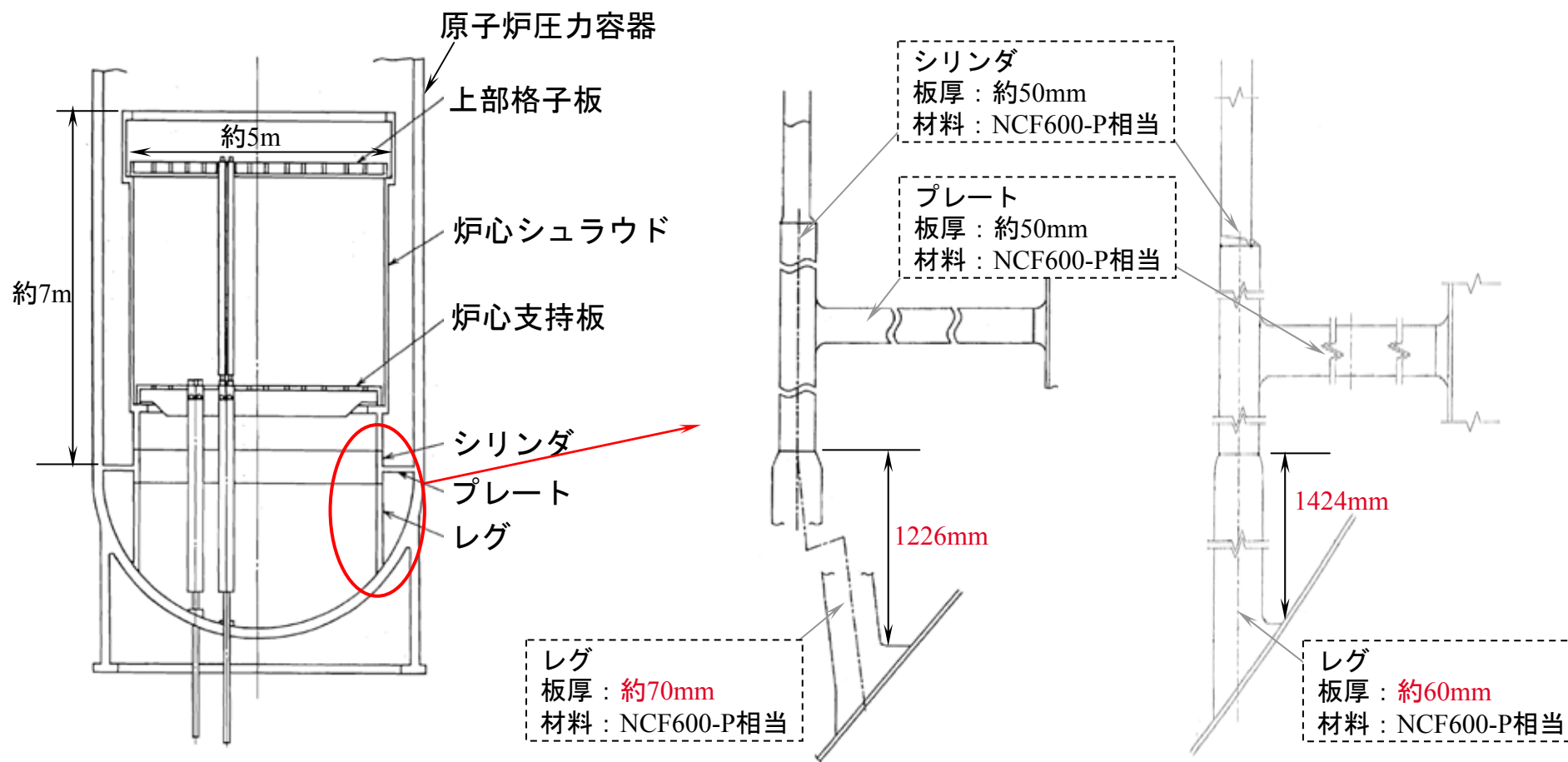
サンドクッション部の評価結果

プラント	応力分類	設計時 計算値 [MPa]	応答比	基準地震動Ssに よる計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
5号機	膜	77	1.17	90	255
3号機	膜	108	1.84	199	
3号機／5号機	—	約1.4倍	約1.6倍	約2.2倍	—

炉心支持構造物の比較（構造の違い）

■ 構造の違い

- ✓ 3号機のシュラウドサポートレグの方が、板厚が薄く、長い。



5号機シュラウドサポート外形図 3号機シュラウドサポート外形図

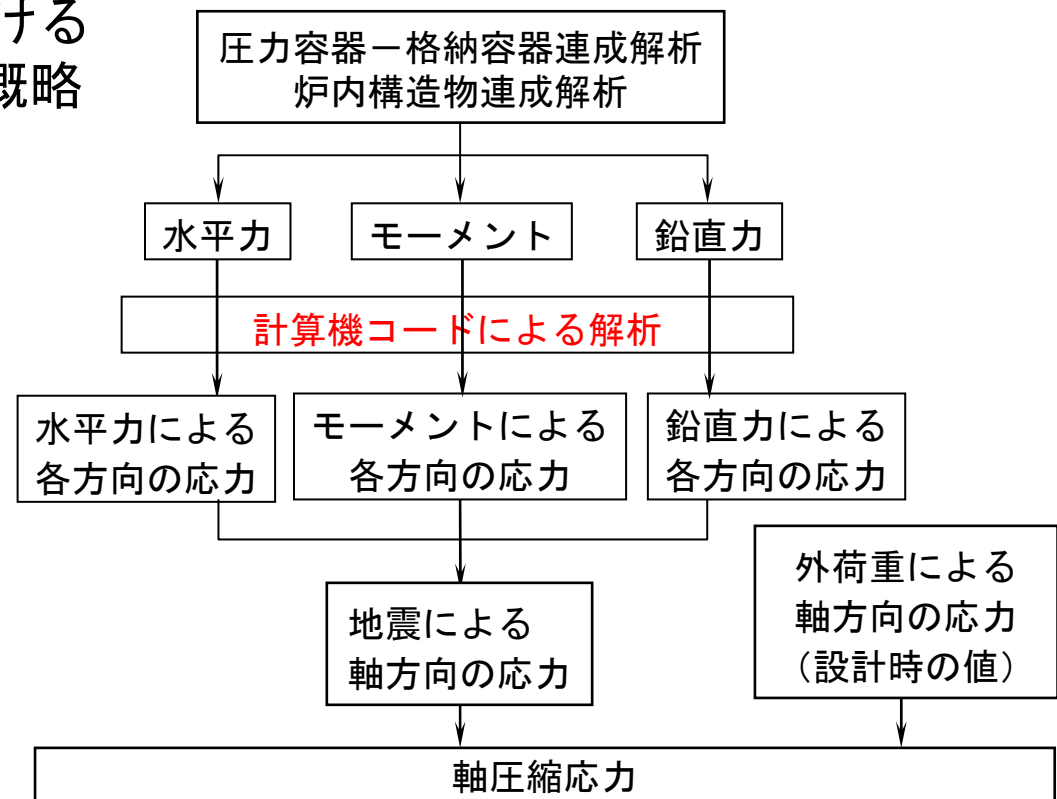
炉心支持構造物の比較（評価方法の違い）

■ シュラウドサポートにおける軸圧縮応力の評価方法

✓ 5号機：詳細評価、3号機：応答倍率法

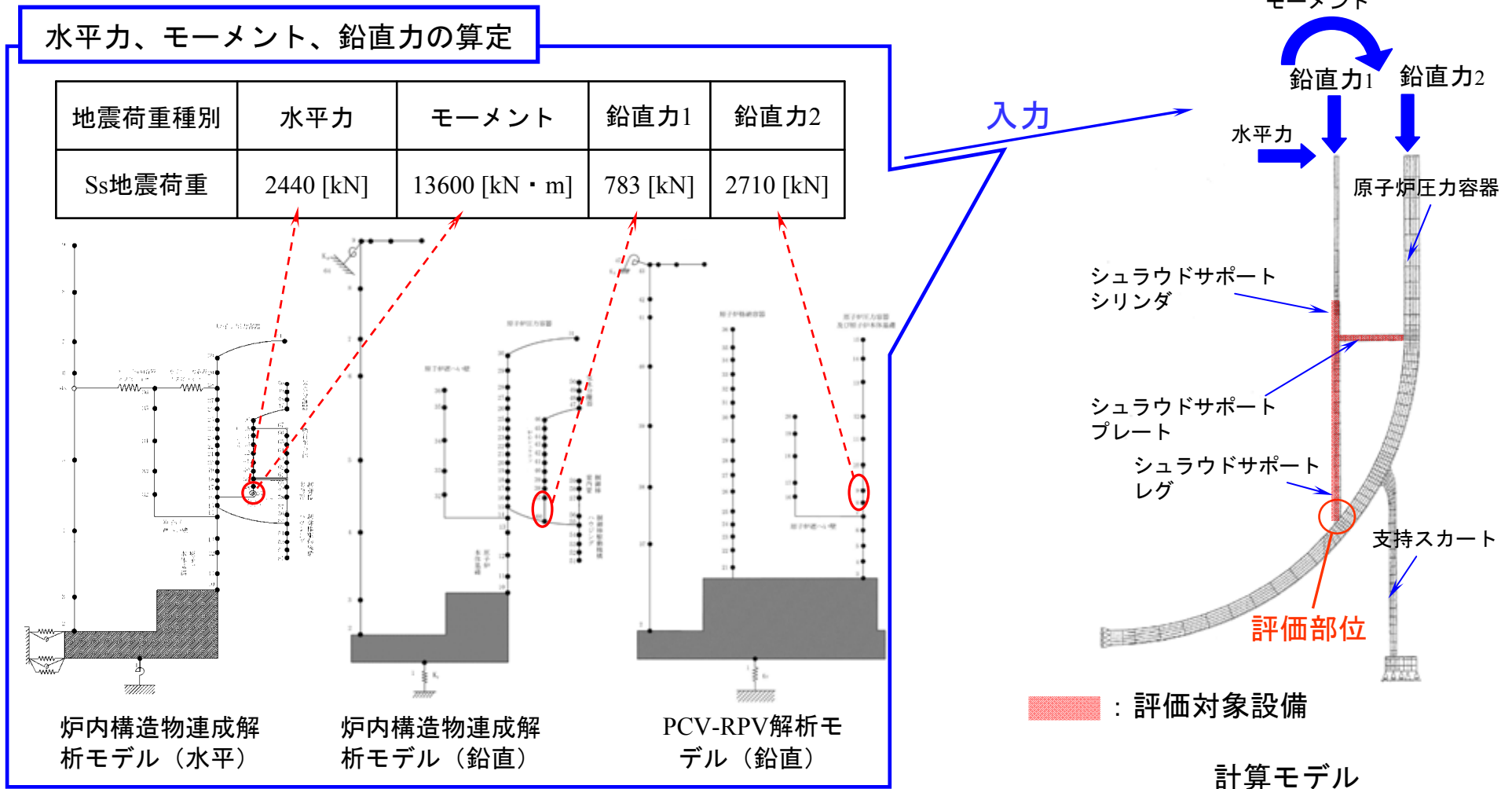
■ 差異の分析のために、3号機のシュラウドサポートにおいても軸圧縮応力の詳細評価を実施。

✓ シュラウドサポートにおける軸圧縮応力の詳細評価の概略

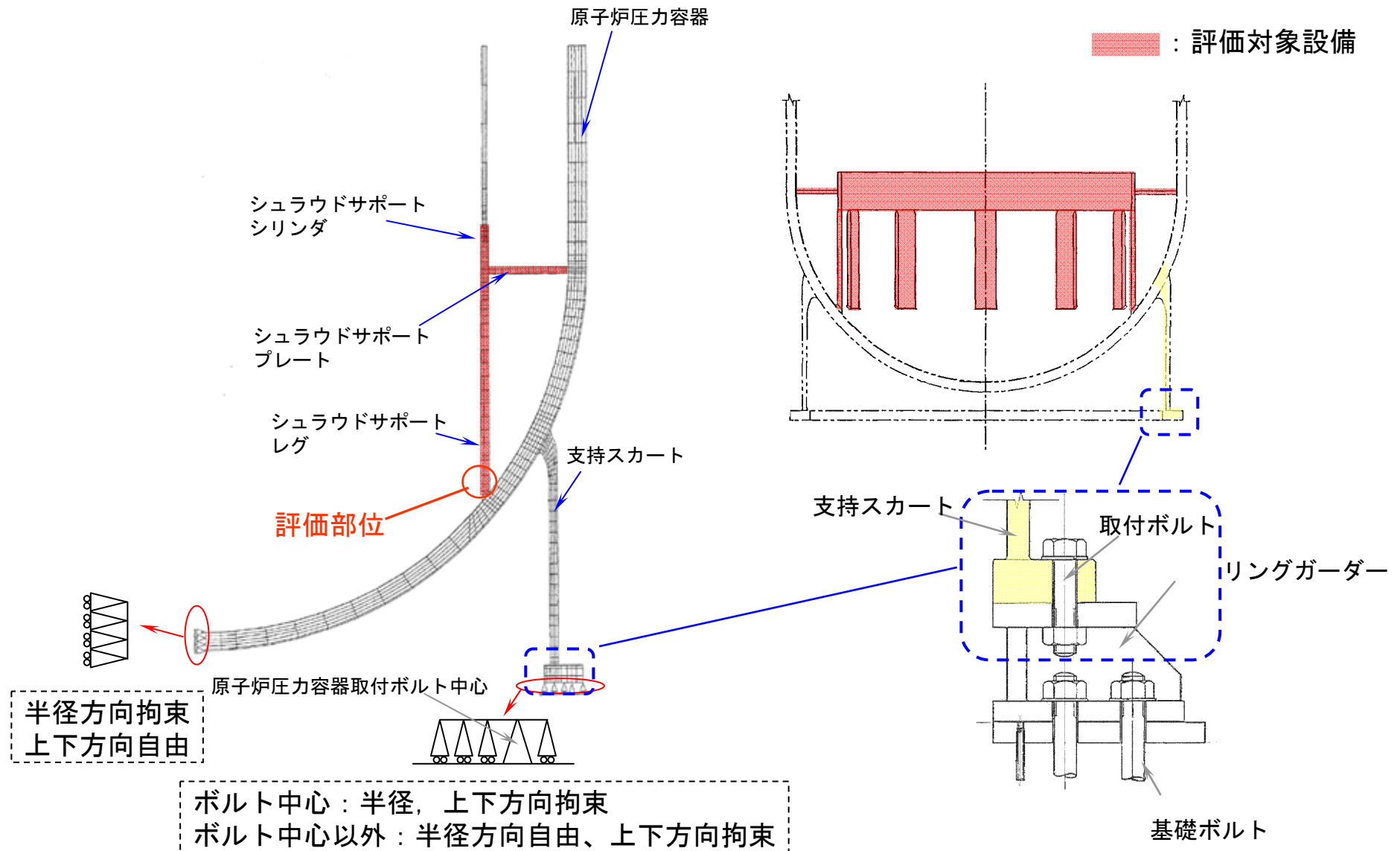


炉心支持構造物の比較（詳細評価のプロセス）

- 炉内構造物連成解析モデル、PCV-RPV解析モデルにより算出した水平力、モーメント、鉛直力を用いて、計算機コードによる解析を実施。



炉心支持構造物の比較（詳細評価のプロセス）



炉心支持構造物の比較（詳細評価のプロセス）

- 計算機コードにより算出した「水平力による軸方向応力」、「モーメントによる軸方向応力」、「鉛直力による軸方向応力」を組み合わせて地震による軸方向応力を算出する。
- 地震以外による応力と組み合わせた結果、評価基準値を下回ることを確認した。
- モーメントによる軸方向応力の割合が大きいことが特徴。

シュラウドサポートレグの軸圧応力評価結果

応力の分類		レグに発生する応力 [MPa]
基準地震動S _s による応力	水平力による軸方向応力	4.392
	モーメントによる軸方向応力	22.952
	鉛直力1による軸方向応力	1.502
	鉛直力2による軸方向応力	0.108
地震以外による応力（設計時の値）	外荷重による軸方向応力	3.0
地震による応力 + 地震以外による応力	軸圧縮応力（計算値）	32※
評価基準値		208

※小数点第一位を切り上げた値を記載した。

炉心支持構造物の比較（構造の違いと入力の違い）

■ 構造の違い

- ✓ 3号機のシュラウドサポートレグの方が、板厚が薄く、長い。
→ 3号機の方が応力が大きくなる傾向

■ 入力の違い

- ✓ 3号機の方がシュラウドサポートレグの評価に用いた水平力、モーメント、鉛直力が概ね小さい。
→ 3号機の方が応力が小さくなる傾向

プラント	水平力[kN]	モーメント[kN・m]	鉛直力1[kN]	鉛直力2[kN]
5号機	2640	16600	754	2800
3号機	2440	13600	783	2710

■ 考察の方針

- ✓ 計算値の大小という観点では、「構造」と「入力」で逆の傾向を示しているので、それらの影響について考察する。
- ✓ 軸圧縮応力の算出に支配的な入力は、モーメントである。「モーメント／断面係数」がそのままモーメントによるレグの軸圧縮応力成分となるわけではないが、モーメントと断面係数の関係について考察する。

炉心支持構造物の比較（構造の違いと入力の違い）

■ 構造の違い

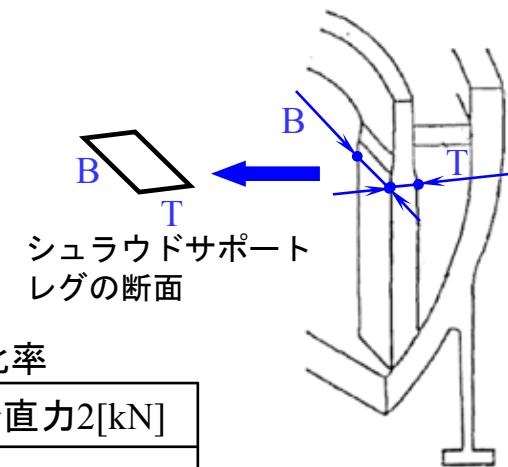
- ✓ シュラウドサポートレグの断面係数は、3号機の方が小さく、「3号機の断面係数／5号機の断面係数=0.73」である。

■ 入力の違い

- ✓ 評価に用いるモーメントは、3号機の方が小さく、「3号機のモーメント／5号機のモーメント=0.82」である。

シュラウドサポートレグの断面係数

プラント	レグの板厚 T [mm]	レグの幅 B [mm]	断面係数 (T ² B/6)	断面係数比 (3号機／5号機)
5号機	70	300	245000 mm ³	0.73
3号機	60	300	180000 mm ³	



シュラウドサポートの評価に用いた水平力、モーメント、鉛直力の比率

プラント	水平力[kN]	モーメント[kN・m]	鉛直力1[kN]	鉛直力2[kN]
5号機	2640	16600	754	2800
3号機	2440	13600	783	2710
比率 (3号機／5号機)	0.92	0.82	1.04	0.97

シュラウドサポート概略図

炉心支持構造物の比較（計算値の違い）

■ 構造の違い

- ✓ シュラウドサポートレグの断面係数は、3号機の方が小さく、「3号機の断面係数／5号機の断面係数=0.73」である。

■ 入力の違い

- ✓ 評価に用いるモーメントは、3号機の方が小さく、「3号機のモーメント／5号機のモーメント=0.82」である。

■ 計算値の違いに関する考察（モーメント／断面係数）

- ✓ 「モーメント／断面係数」がそのままモーメントによるレグの軸圧縮応力成分となるわけではないが、上記のモーメント比と断面係数比で計算すると、 $0.82 / 0.73 = 1.12$ となる。
- ✓ モーメントは3号機の方が小さくても、レグ形状の違いにより、モーメントによる応力は3号機の方が大きくなる結果となった。

号機	応力分類	計算値 [MPa]	評価基準値 [MPa]
5号機	軸圧縮	24	231
3号機	軸圧縮	33	208

以上より、評価に用いる入力は5号機の方が概ね大きいですが、レグの形状の違いにより、レグの軸圧縮応力は3号機の方が大きくなったと考えられる。

炉心支持構造物の比較（評価基準値の違い（1/2））

■ 評価基準値の算出式

- ✓ シュラウドサポートレグの軸圧縮応力の評価基準値は「発電用原子力設備規格設計・建設規格（JSME S NC1-2005）」に基づき、下式によって算出される。

$$f_c = 1.5 \times \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\square}{\square} \right)^2 \right\} \frac{F}{\square}$$

□ : 5号機と3号機で異なるパラメータ

f_c : 軸圧縮の評価基準値	T : レグの板厚
□ λ : 圧縮材の有効細長比	B : レグの幅
$= \frac{l_k}{i}$	A : レグ一本あたりの断面積
l_k : 座屈長さ (=0.7 l)	Λ : 限界細長比
l : レグの長さ	$= \sqrt{\frac{^2E}{0.6F}}$
i : 座屈軸についての断面二次半径	E : 縦弾性係数
$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$	F : Min[1.35Sy, 0.7Su, 1.2Sy(室温)]
I : 座屈についての断面二次モーメント	□ : 次の計算式により計算した値
$I = \frac{T^3 B}{12}$	$= 1.5 + \frac{2}{3} \left(\frac{\square}{\square} \right)^2$

炉心支持構造物の比較（評価基準値の違い（2/2））

■ 評価基準値の算出式

- ✓ シュラウドサポートレグの軸圧縮応力の評価基準値は「発電用原子力設備規格設計・建設規格（JSME S NC1-2005）」に基づき、下式によって算出される。

$$f_c = 1.5 \times \left\{ 1 - 0.4 \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^2 \right\} \frac{F}{A}$$

■ 評価基準値の違いの要因

- ✓ 3号機の方がレグが長く、板厚が小さいため、 λ 、 ν が大きい値となり、軸圧縮応力の評価基準値が小さくなる。

プラント	レグの長さ ℓ [mm]	レグの板厚T [mm]	λ	ν	評価基準値 (f_c) [MPa]
5号機	1226	70	42.46	1.597	231
3号機	1424	60	57.55	1.677	208

Ⅲ. 参考資料

(参考資料) 建屋の埋め込み状況について
【構造A18-2-1】P.9 ~ P.10

(参考資料) 側方地盤ばねの回転成分の考え方
【構造A5-3-1】P.3-1

(参考資料) コンクリート強度の設定について
【構造A5-3-1】P.2-1 ~ P.2-8 構造A8-2-2:P.4-1 ~ P.4-12

(参考資料) 建屋剛性の算定の考え方について
【構造A19-2-1】P.2 ~ P.3

(参考資料) モーダル減衰と地盤ばねの減衰定数について
【構造A8-2-2】:P.2-1 ~ P.2-18

(参考資料) 工認時の地震波を用いた検討について
【構造A8-2-2】:P.6-1 ~ P.6-4

(参考資料) 弾性設計用地震動 S_d の設定について

Ⅲ. 参考資料

(参考資料)鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討
【構造A19-2-1】P.4 ~ P.10

(参考資料)水平方向および鉛直方向の地震力の組合せ方法
【構造A7-2-3-1】P.参-1 ~ P.参-3

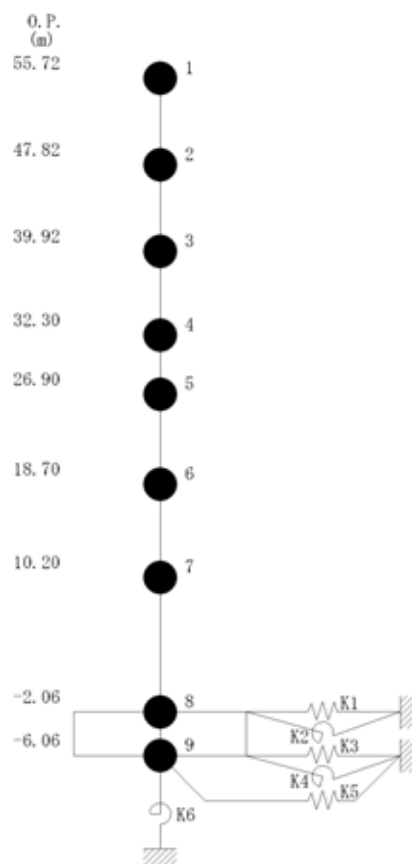
(参考資料)応答解析モデルに係る工認時との比較
【構造A19-2-3】P.7 ~ P.12

(参考資料)疲れ解析が必要な応答領域に達しているかの確認
【構造A19-2-3】P.15

(参考資料①) 建屋の埋め込み状況について

水平方向の地震応答解析モデルは、参図①-1に示すように、建屋を質点系とし地盤を等価なばねで評価した建屋-地盤連成モデルとしている。なお、建屋は曲げ変形とせん断変形をする質点系としてモデル化し、基礎版底面下の地盤は水平ばね及び回転ばねで置換している。

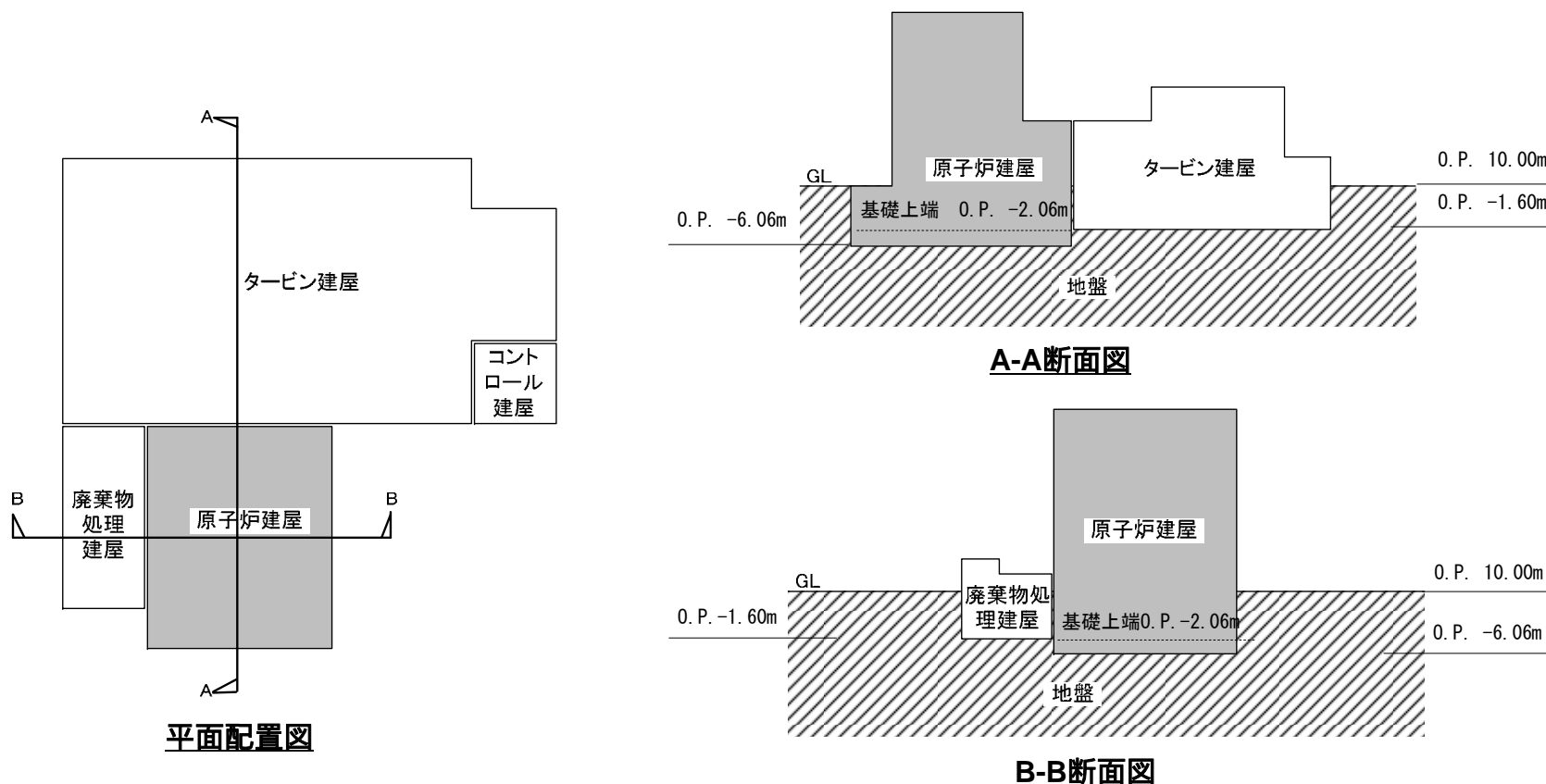
埋め込みについては、原子炉建屋の周辺状況を考慮し、基礎版側面について考慮している。



参図①-1 原子炉建屋 地震応答解析モデル

(参考資料①) 建屋の埋め込み状況について

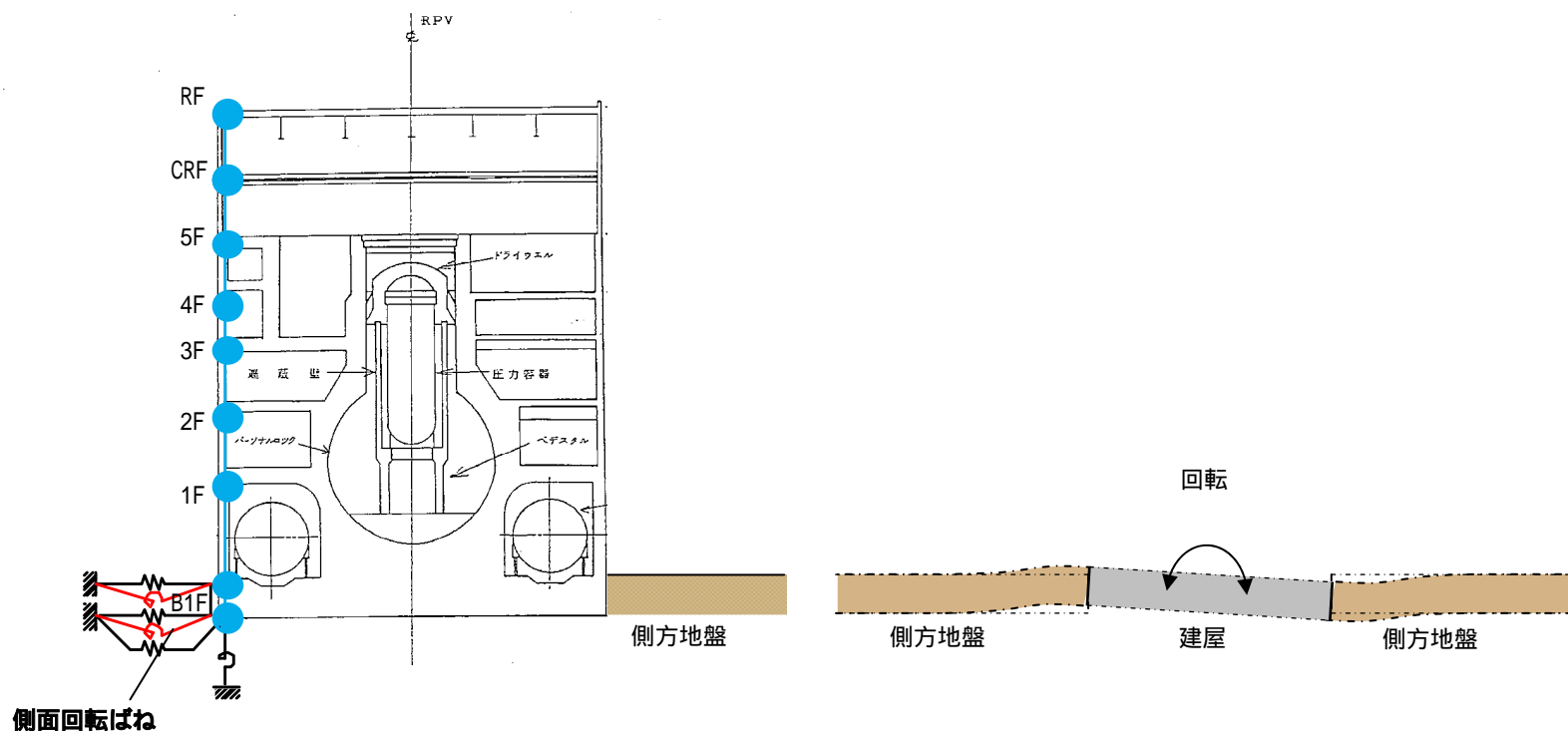
参図①-2に示すように、基礎版側面と地盤は密着（接地している割合100%）しており、変位の連続条件が成り立つと考えられるため、埋め込み部分の建屋側面の地盤はNOVAKの方法に基づき水平ばね及び回転ばねで考慮している。



参図①-2 原子炉建屋の周辺状況

(参考資料②) 側方地盤ばねの回転成分の考え方

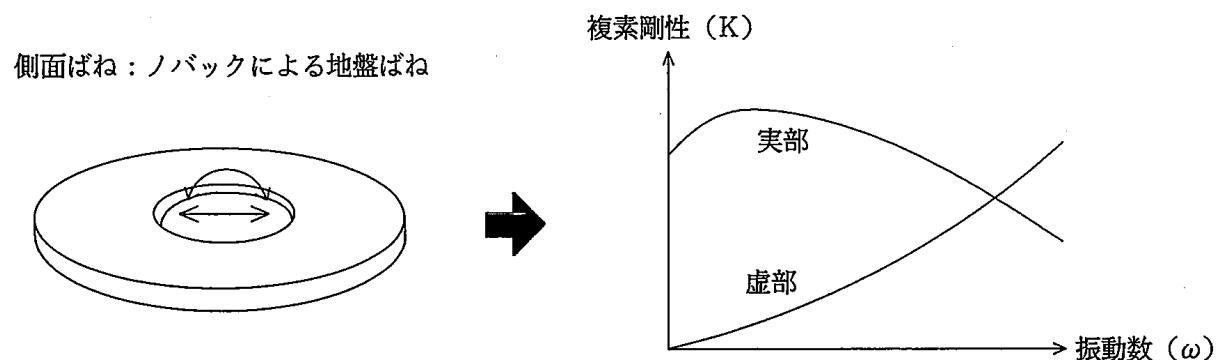
水平方向の地震応答解析モデルでは、埋込み部に側面回転ばねを考慮している（参図②-1）。これは、建屋の埋込み部の回転（ロッキング）変形に伴う側方地盤の抵抗（摩擦力）を評価する目的による。



参図②-1 地震応答解析モデル

(参考資料②) 側方地盤ばねの回転成分の考え方

建屋側面の地盤は、NOVAKの手法に基づいて参図②-2に示すような動的複素剛性として評価し、振動数に依存する実部（KR）と虚部（KI）から成る等価な水平ばね及び回転ばねを各床レベル毎に考慮する。



参図②-2 側面地盤ばねの評価

(参考資料③) コンクリート強度の設定について

■ コンクリート強度の設定根拠

- ・今回、解析に採用したコンクリートの実強度およびその設定根拠は福島第一原子力発電所5号機の耐震安全性評価と同じである。
- ・コンクリートの強度については、過去に原子力発電所内で実施された圧縮強度試験の結果から、一般に設計基準強度を上回るという知見が得られている。
- ・また、新潟県中越沖地震に対する柏崎刈羽原子力発電所の健全性評価においては、コンクリートの実強度を用いたシミュレーション解析を実施しており、より実状に近づけることで概ね地震観測記録を再現できるという知見も得られている。したがって、耐震安全性評価において、コンクリート実強度を用いることは、従来の評価実績および最近の知見の考慮であると考えている。

(参考資料③) コンクリート強度の設定について

解析において、実強度の設定にあたり使用した圧縮試験強度試験における試験体数を参表③-1に、圧縮強度試験一覧を参表③-2に示す。

参表③-1 圧縮強度試験試験における試験体数 (Fc=22.1N/mm²) 水平方向)

設計基準強度 Fc = 22.1N/mm ²	福島第一						福島第二	
	1号機	2号機	3号機	4号機	5号機	6号機	1号機	1/2号機 共用
原子炉建屋	37	22	21	39	33	15	11	-
タービン建屋	33	14	21	30	24	21	11	-
コントロール建屋	3	3	-	1	3	-	-	5
廃棄物処理建屋	6	3	-	3	3	-	-	5
チャコール建屋	6	-	-	-	-	-	-	-
計	373							

(参考資料③) コンクリート強度の設定について

参表③-2(1) 圧縮強度試験一覧 (Fc=22.1N/mm²)

号機	建屋名称	調査年	階	部位	方位	内外	試験体数	調査件名	
1号機	原子炉建屋	1988	1	外壁	西	-	1	社内調査研究	
			1	外壁	北	内側	1		
		1998	1	外壁	北	内側	1	建築設備点検	
			1	外壁	西	外側	1		
			1	外壁	北	内側	3		
		2001	1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価	
			1	RPV基礎	南	-	3		
		2005	1	大搬	南	内側	3	コンクリート健全性調査	
			3	外壁	東	外側	3		
		2006	1	MS室	東	内側	3	高経年化技術評価	
			3	外壁	東	内側	3		
			4	外壁	東	内側	3		
			1	外壁	西	内側	3		
			1	外壁	西	内側	3		
		タービン建屋	1998	1	外壁	北	内側	1	建築設備点検
	B1			外壁	東	内側	1		
	2001		1	外壁	北	内側	3	高経年化技術評価	
			1	外壁	東	外側	3		
	2006		2	T/G基礎	-	-	3	高経年化技術評価	
			2	T/G基礎	-	-	3		
			1	外壁	-	外側	3		
			B1	内壁	-	-	3		
			1	外壁	東	内側	3		
			1	外壁	北	内側	3		
	コントロール建屋	2006	1	外壁	東	内側	3	高経年化技術評価	
		廃棄物処理建屋	2006	1	外壁	北	内側	3	高経年化技術評価
			1	外壁	北	外側	3		
	チャコール建屋	2006	1	外壁	東	内側	3	高経年化技術評価	
			1	外壁	東	内側	3		
	2号機	原子炉建屋	1997	-	RPV基礎	北	-	2	社内調査研究
1				大搬	-	内側	1		
1998			1	外壁	北	内側	1	建築設備点検	
			1	外壁	西	外側	1		
			3	外壁	東	外側	3		
2005			1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価	
			4	外壁	西	内側	3		
			3	外壁	東	内側	3		
2005			1	大搬	北	内側	3	コンクリート健全性調査	
		2006	1	RPV基礎	-	-	2		高経年化技術評価
タービン建屋		1997	-	T/G基礎	-	-	3	社内調査研究	
			B1	外壁	東	内側	1		
		1998	1	外壁	北	外側	1	高経年化技術評価	
			1	外壁	南	外側	3		
		2005	1	外壁	南	内側	3	高経年化技術評価	
	2		T/G基礎	-	-	3			
コントロール建屋	2005	1	外壁	東	内側	3	高経年化技術評価		
廃棄物処理建屋	2005	1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価		

参表③-2(2) 圧縮強度試験一覧 (Fc=22.1N/mm²)

号機	建屋名称	調査年	階	部位	方位	内外	試験体数	調査件名
3号機	原子炉建屋	1999	1	外壁	北	内側	1	建築設備点検
			1	大搬	北	内側	1	
			1	外壁	南	外側	1	
		2000	B2	内壁	-	-	3	高経年化技術評価
			3	外壁	東	外側	3	
			1	外壁	北	内側	3	
		2002	3	外壁	東	外側	3	高経年化技術評価
			1	RPV基礎	-	-	3	
			2005	1	外壁	西	内側	
	タービン建屋	1999	B1	外壁	北	内側	1	建築設備点検
			1	外壁	北	内側	1	
			1	外壁	東	外側	1	
		2000	B2	内壁	-	-	3	高経年化技術評価
			1	外壁	東	外側	3	
			1	外壁	西	外側	3	
2002	1	外壁	北	内側	3	高経年化技術評価		
	1	外壁	東	外側	3			
	2	T/G基礎	-	-	3			
4号機	原子炉建屋	1999	B1	外壁	北	内側	1	建築設備点検
			1	大搬	北	内側	1	
			1	外壁	西	外側	1	
		2000	B2	内壁	-	-	3	高経年化技術評価
			3	外壁	東	外側	3	
			1	外壁	北	内側	3	
		2002	3	外壁	東	外側	3	高経年化技術評価
			1	RPV基礎	-	-	3	
			2005	1	外壁	西	内側	
	タービン建屋	2006	1	MS室	-	-	3	高経年化技術評価
			2	外壁	東	内側	3	
			1	外壁	西	外側	3	
		2007	1	外壁	南	外側	3	高経年化技術評価
			1	外壁	北	外側	3	
			2	RPV基礎	-	-	3	
タービン建屋	1999	1	外壁	東	内側	1	建築設備点検	
		B1	外壁	北	内側	1		
		1	外壁	東	外側	1		
	2000	1	内壁	-	-	3	高経年化技術評価	
		1	外壁	東	外側	3		
		1	外壁	西	外側	3		
	2002	1	外壁	東	内側	3	高経年化技術評価	
		1	外壁	東	外側	3		
		2	T/G基礎	-	-	3		
2006	B1	内壁	-	-	3	高経年化技術評価		
	1	外壁	西	外側	3			
	1	外壁	南	外側	3			
コントロール建屋	2006	1	外壁	東	内側	1	高経年化技術評価	
廃棄物処理建屋	2006	1	外壁	北	外側	3	高経年化技術評価	

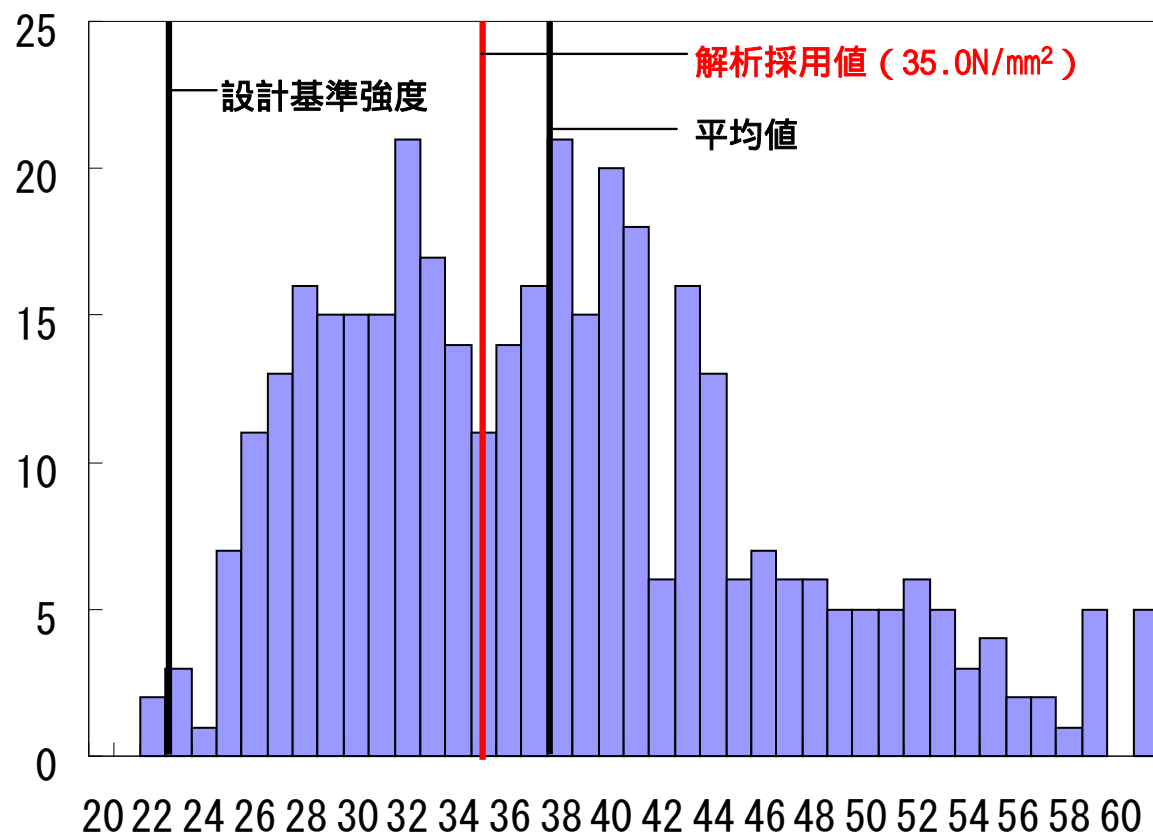
(参考資料③) コンクリート強度の設定について

参表③-2(3) 圧縮強度試験一覧 (Fc=22.1N/mm²)

号機	建屋名称	調査年	階	部位	方位	内外	試験体数	調査件名
福島第一 原子力発電所	5号機	2000	B2	内壁	-	-	3	高経年化技術評価
			3	外壁	東	外側	3	
		2003	3	外壁	東	内側	3	高経年化技術評価
			1	外壁	西	外側	3	
			3	外壁	東	外側	3	
		2005	1	RPV基礎	-	-	3	コンクリート健全性調査
			1	外壁	東	内側	3	
		2006	1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価
			1	外壁	南	外側	3	
		2007	1	外壁	北	外側	3	高経年化技術評価
	2		RPV基礎	-	-	3		
	タービン建屋	2000	B1	内壁	-	-	3	高経年化技術評価
			1	外壁	東	外側	3	
		2003	1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価
			1	外壁	東	内側	3	
			2	T/G基礎	-	-	3	
		2006	1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価
			1	外壁	南	外側	3	
コントロール建屋		2003	1	外壁	西	外側	3	高経年化技術評価
廃棄物処理建屋	2003	1	外壁	北	外側	3	高経年化技術評価	
6号機	原子炉建屋	2000	B2	内壁	-	-	3	高経年化技術評価
			3	外壁	東	外側	3	
		2005	1	外壁	西	内側	3	コンクリート健全性調査
			3	外壁	東	内側	3	
	2006	3	外壁	東	外側	3	高経年化技術評価	
		3	外壁	東	外側	3		
	タービン建屋	2000	1	内壁	-	-	3	高経年化技術評価
			1	外壁	東	外側	3	
		1	外壁	西	外側	3		
		2	T/G基礎	-	-	3		
2006		2	T/G基礎	-	-	3		
		1	外壁	東	内側	3		
福島第一 原子力発電所	1号機	1992	1	外壁	西	内側	1	建築設備点検
			1	外壁	南	外側	1	
		2001	B1	内壁	-	-	3	建築設備点検
			1	外壁	南	外側	3	
		2005	1	外壁	南	外側	3	コンクリート健全性調査
			1	内壁	-	-	3	
	タービン建屋	1992	1	外壁	南	内側	1	建築設備点検
			1	外壁	東	外側	1	
		2001	B1	内壁	-	-	3	
			1	外壁	南	外側	3	
1・2号機	コントロール建屋	1992	-	外壁	西	外側	1	建築設備点検
			-	外壁	西	内側	1	
	廃棄物処理建屋	2002	1	外壁	南	外側	3	建築設備点検
			1	内壁	-	-	1	
		1995	1	外壁	北	外側	1	建築設備点検
			1	外壁	東	外側	3	
					計	373		

(参考資料③) コンクリート強度の設定について

参図③-1にコンクリート圧縮強度試験結果の頻度分布図に平均値、設計基準強度および解析採用値を示す。なお、解析採用値は圧縮強度のばらつきを考慮し、平均値をやや下回る値とした。



参図③-1 コンクリート圧縮強度頻度分布図 (設計強度22.1N/mm²)

(参考資料)コンクリート強度の設定について

■設計基準強度と実強度より算出した剛性を用いた固有値解析結果及びモード図の比較について

地盤-建屋地震応答解析に用いる建屋モデルについて、建屋剛性に実強度と設計基準強度を用いた場合の固有値解析結果を比較する。

コンクリート物性値を参表③-3に、固有値解析結果の比較を参表③-4に固有モード図の比較を参図③-2～参図③-4に示す。

参表③-3 コンクリート物性値

解析ケース	強度 Fc (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν
実強度	35.0	2.57×10^4	0.2
設計基準強度	22.1	2.06×10^4	0.167

(参考資料③) コンクリート強度の設定について (固有値解析結果)

参表③-4 固有値解析結果の比較
(NS方向、Ss-1H)

次数	実強度			設計基準強度			備考
	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	
1	0.396	2.53	1.755	0.401	2.49	1.772	地盤建屋連成一次
2	0.177	5.64	-0.921	0.179	5.57	-0.970	
3	0.078	12.85	0.219	0.083	12.02	0.262	

(EW方向、Ss-1H)

次数	実強度			設計基準強度			備考
	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	
1	0.377	2.65	1.774	0.382	2.62	1.802	地盤建屋連成一次
2	0.175	5.72	-0.980	0.178	5.63	-1.052	
3	0.089	11.26	0.225	0.094	10.58	0.278	

(鉛直方向、Ss-1V)

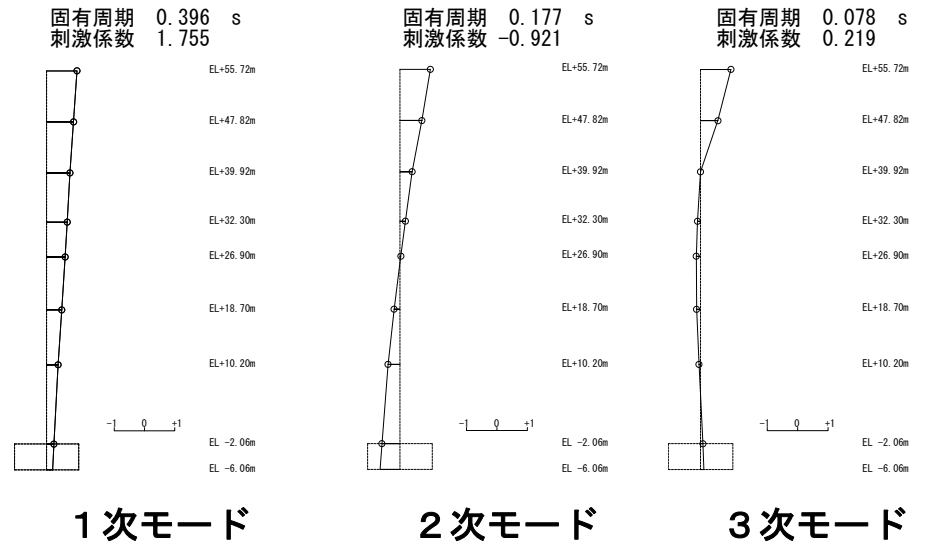
次数	実強度			設計基準強度			備考
	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	
1	0.292	3.43	3.474	0.298	3.36	3.322	屋根トラス一次
2	0.227	4.41	-2.571	0.228	4.39	-2.424	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.108	0.091	10.97	0.116	屋根トラス二次

注* : 各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

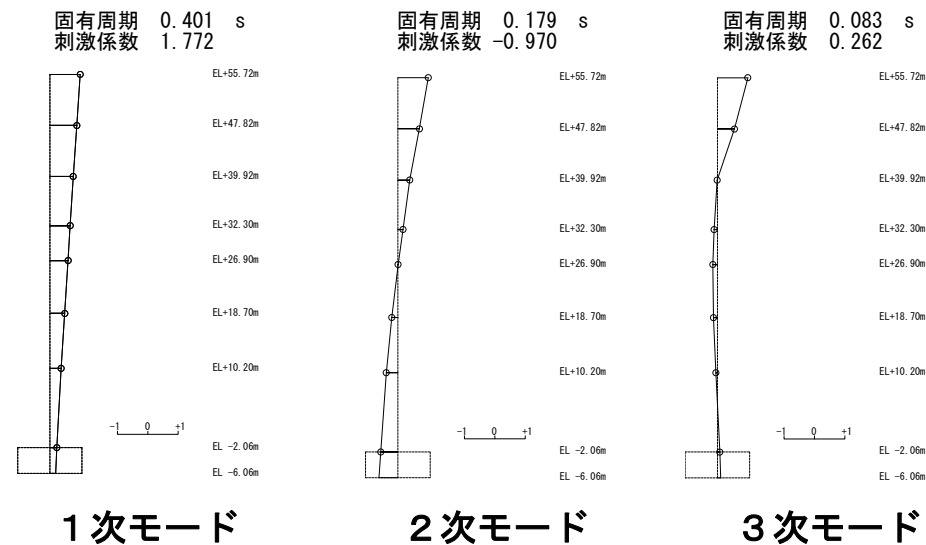
実強度および設計基準強度における固有値解析結果はほぼ同等となっている。

(参考資料③) コンクリート強度の設定について (固有モード図 NS方向)

(実強度)



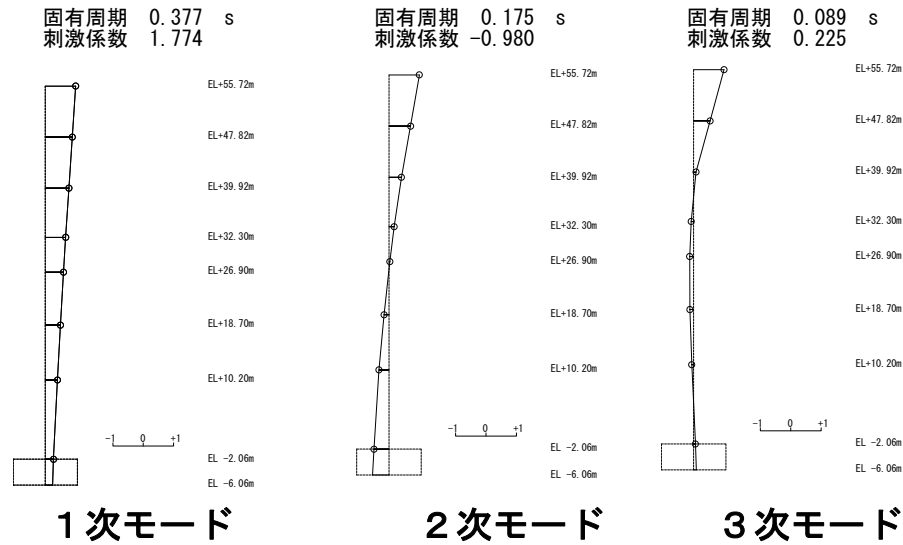
(設計基準強度)



実強度および設計基準強度とも、1次が地盤建屋連成のスウェイモード、2次が地盤建屋連成のロッキングモード、3次が建屋単独のモードとなっており、固有モードはほぼ同等となっている。

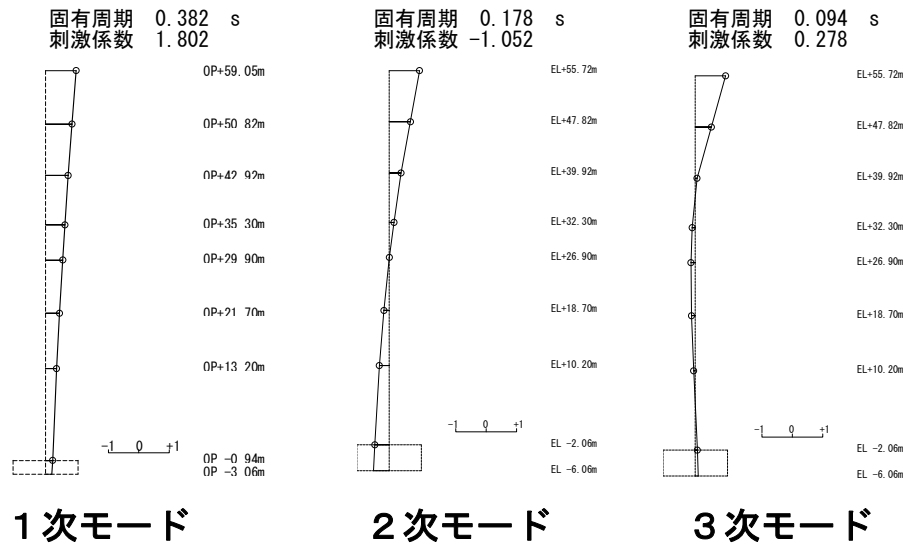
(参考資料③) コンクリート強度の設定について (固有モード図 EW方向)

(実強度)



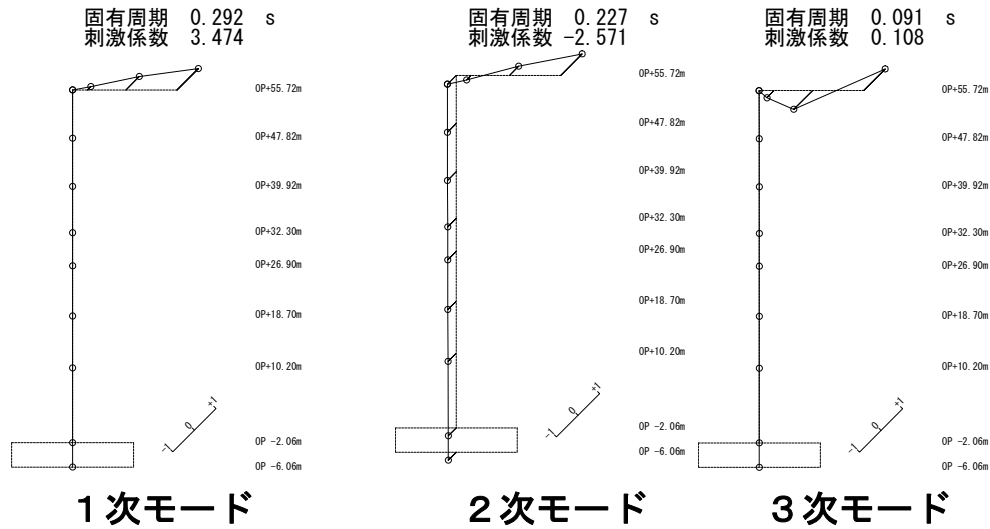
実強度および設計基準強度とも、1次が地盤建屋連成のスウェイモード、2次が地盤建屋連成のロッキングモード、3次が建屋単独のモードとなっており、固有モードはほぼ同等となっている。

(設計基準強度)

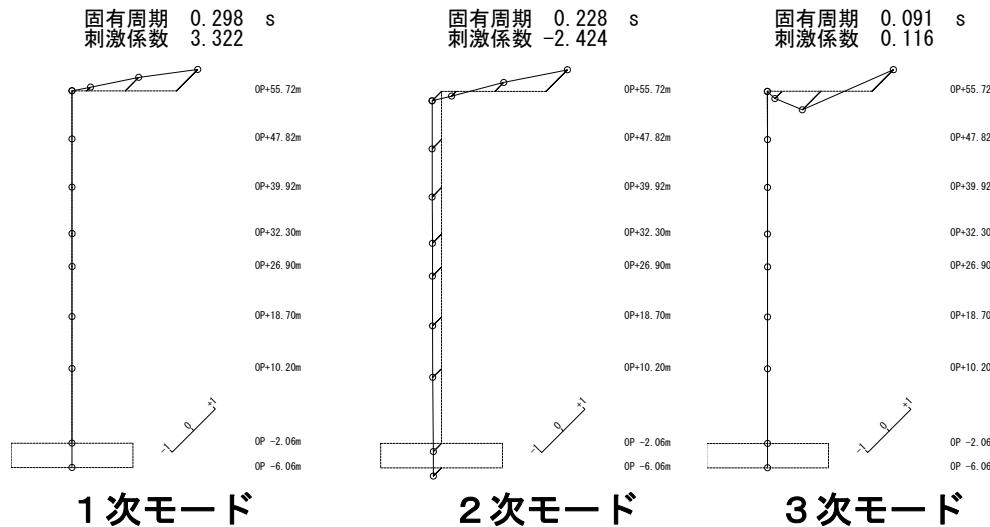


(参考資料③) コンクリート強度の設定について (固有モード図 鉛直方向)

(実強度)



(設計基準強度)



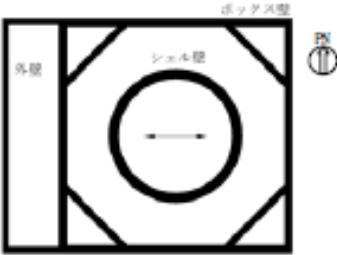
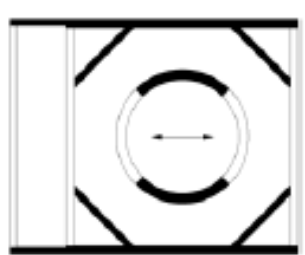
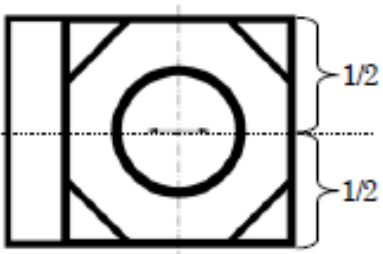
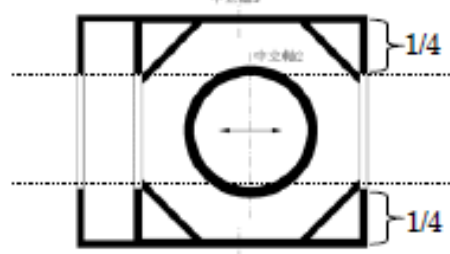
実強度および設計基準強度とも、1次が屋根トラスの一次モード、2次が地盤建屋連成の一次モード、3次が屋根トラスの二次モードとなっており、固有モードはほぼ同等となっている。

参図③-4 固有モード図 (鉛直方向, Ss-1V)

(参考資料④) 建屋剛性の算定の考え方について

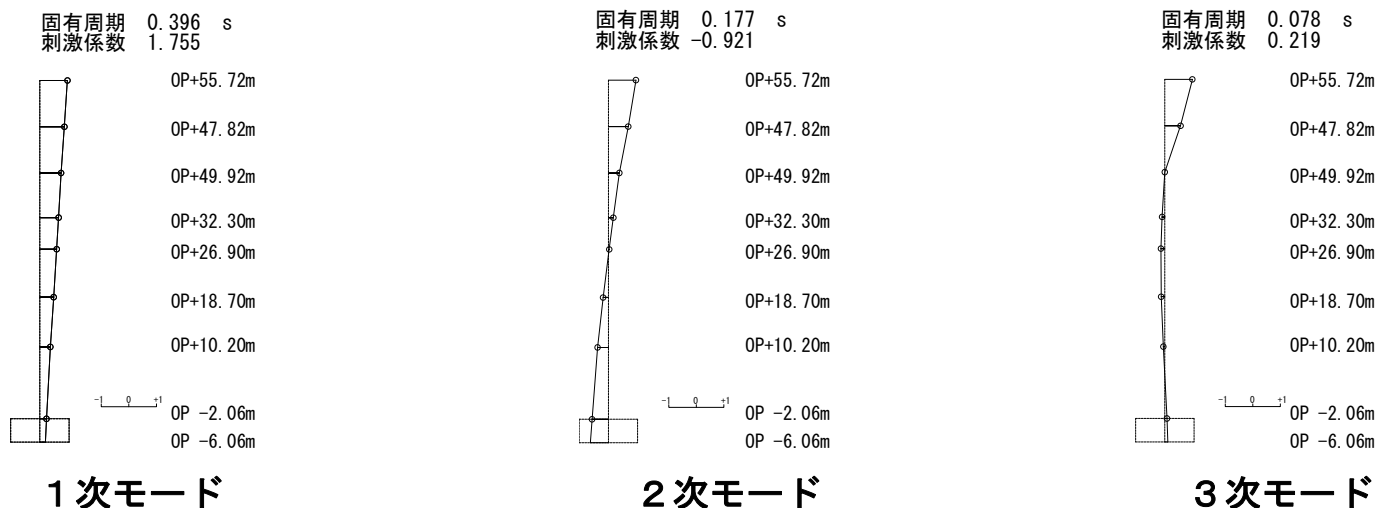
福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋の工認モデルと、バックチェックモデルの建屋剛性算定の考え方の概念を参表④に示す。

参表 建屋剛性の算定の考え方(概念図)

	工認モデル	バックチェックモデル
As	 <p>耐震要素の 全断面積の1/2</p>	 <p>地震方向の耐震要素の せん断断面積の和</p>
I	 <p>有効フランジ幅 1/2 中立軸：炉心位置 (ボックス上部は中心位置)</p>	 <p>有効フランジ幅 1/4 中立軸：耐震要素毎に算定</p>

(注) ←→は地震方向を示す。

(参考資料⑤) モーダル減衰と地盤ばねの減衰定数について (水平)



参図⑤ -1 原子炉建屋 固有モード (NS方向, Ss-1H)

参表⑤ -1 ひずみエネルギー比例型モーダル減衰定数の算定結果 (NS方向, Ss-1H)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	モーダル減衰定数 (%)	備考
1	0.396	2.53	1.755	15.85	地盤建屋連成一次
2	0.177	5.64	-0.921	32.79	
3	0.078	12.85	0.219	8.36	

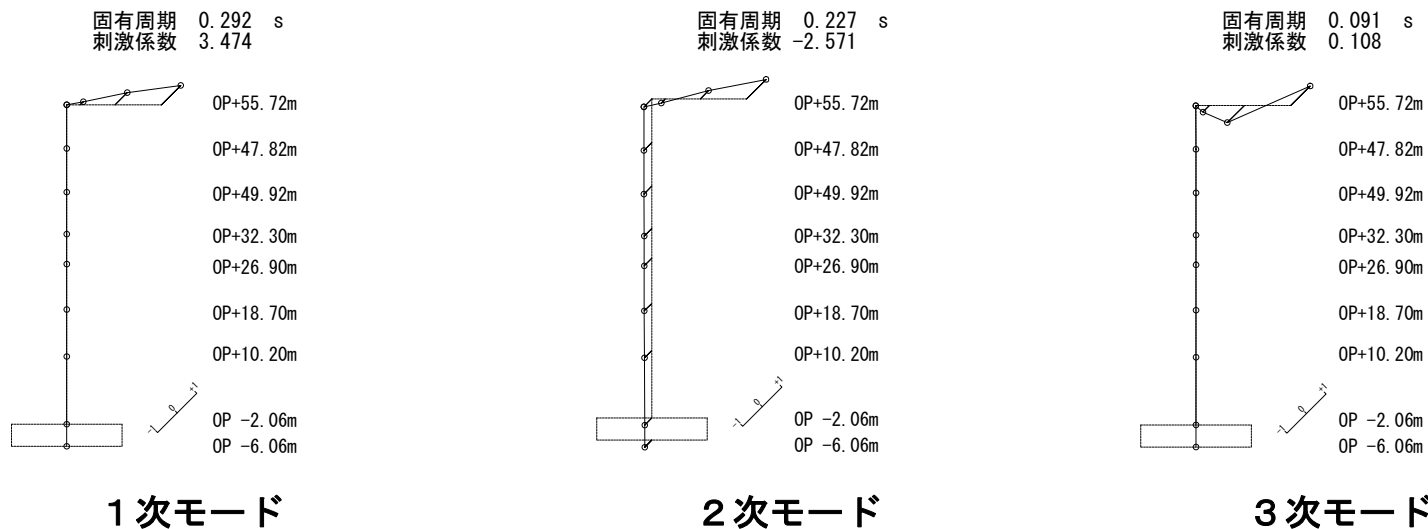
注*: 各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

参表⑤ -2 モーダル減衰定数及び算定に用いた数値 (NS方向, Ss-1H)

1F3			1次			2次			3次			
			①各部材の減衰定数	②歪エネルギーの比率	①×②	①各部材の減衰定数	②歪エネルギーの比率	①×②	①各部材の減衰定数	②歪エネルギーの比率	①×②	
建屋			5.0%	16.3%	0.8%	5.0%	15.6%	0.8%	5.0%	89.7%	4.5%	
地盤ばね	O.P.-2.06	側面	並進	59.4%	2.0%	1.2%	65.7%	2.0%	1.3%	68.5%	0.0%	0.0%
		回転	37.6%	1.7%	0.6%	53.9%	0.9%	0.5%	63.3%	0.3%	0.2%	
	O.P.-6.06	側面	並進	59.4%	1.4%	0.8%	65.7%	2.4%	1.6%	68.5%	0.1%	0.1%
		回転	37.6%	1.6%	0.6%	53.9%	0.9%	0.5%	63.3%	0.3%	0.2%	
	O.P.-6.06	底面	並進	27.1%	32.7%	8.9%	45.2%	55.0%	24.9%	58.9%	2.1%	1.3%
		回転	6.5%	44.3%	2.9%	14.3%	23.3%	3.3%	29.1%	7.4%	2.2%	
合計(モーダル減衰定数)					15.8%			32.8%			8.4%	

1次が地盤建屋連成のスウェイモード、2次が地盤建屋連成のロッキングモード、3次が建屋単独のモードとなっている。したがって、参表⑤-1及び参表⑤-2に示すモーダル減衰定数は、1次および2次では地盤減衰の影響が大きく、3次では地盤減衰の影響が比較的小さくなっている。

(参考資料⑤) モーダル減衰と地盤ばねの減衰定数について (鉛直)



参図⑤ -2 原子炉建屋 固有モード (鉛直方向, Ss-1V)

参表⑤ -3 ひずみエネルギー比例型モーダル減衰定数の算定結果 (鉛直方向, Ss-1V)

参表⑤ -4 モーダル減衰定数及び算定に用いた数値 (鉛直方向, Ss-1V)

次数	固有周期 (s)	固有振動数 (Hz)	刺激係数*	モーダル減衰定数 (%)	備考
1	0.292	3.43	3.474	3.61	屋根トラス一次
2	0.227	4.41	-2.571	44.30	地盤建屋連成一次
3	0.091	11.00	0.108	2.13	屋根トラス二次

注*: 各モードごとに固有ベクトルの最大値を1に基準化して得られる刺激係数を示す。

1F3	1次			2次			3次		
	① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②	① 各部材の 減衰定数	② 歪エネルギー の比率	①×②
屋根	2.0%	71.2%	1.4%	2.0%	1.7%	0.0%	2.0%	96.2%	1.9%
建屋	5.0%	26.8%	1.3%	5.0%	4.9%	0.2%	5.0%	3.8%	0.2%
底面地盤ばね	41.7%	2.0%	0.8%	47.1%	93.4%	44.0%	60.9%	0.0%	0.0%
合計(モーダル減衰定数)			3.6%			44.3%			2.1%

1次が屋根トラスの一次モード、2次が地盤建屋連成の一次モード、3次が屋根トラスの二次モードとなっている。したがって、参表⑤-3に示すモーダル減衰定数は、2次で地盤減衰の影響が大きく、1次および3次では地盤減衰の影響が比較的小さくなっている。

(参考資料⑥) 工認時の地震波を用いた検討について

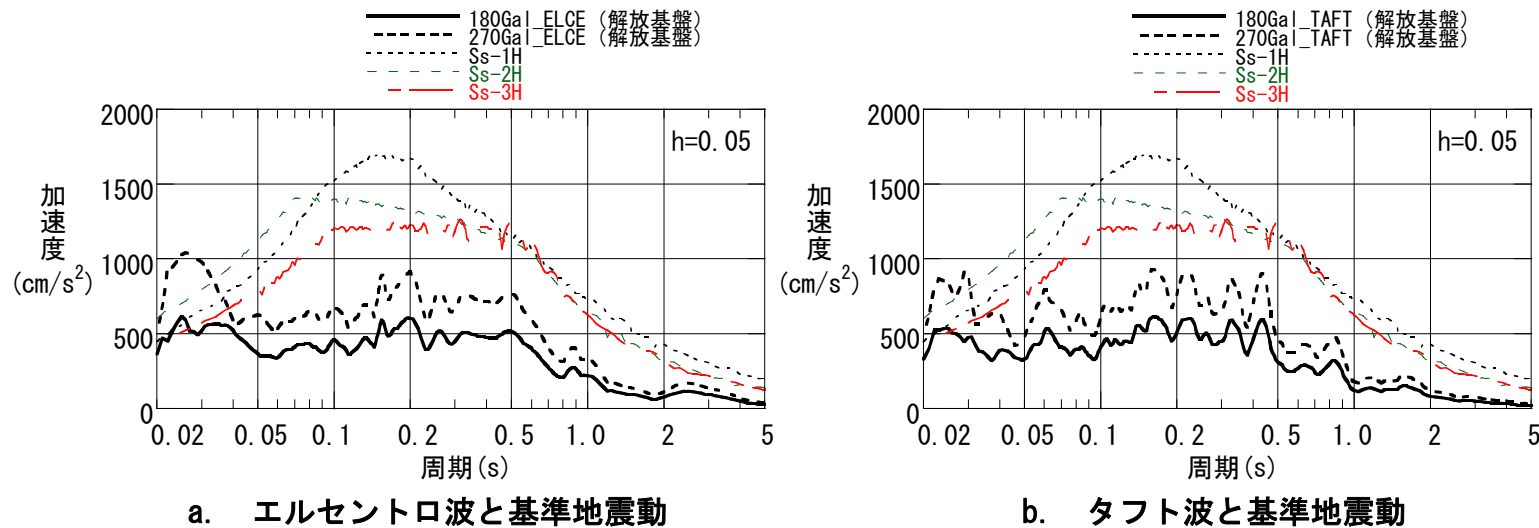
バックチェックモデルを用い、工認時の地震波（最大加速度を180Galに基準化したエルセントロ波とタフト波（以下、180Gal既往波という。）および270Galに基準化したエルセントロ波とタフト波（以下、270Gal既往波という。））を入力とした地震応答解析を行い、基準地震動 S_s によるバックチェックの応答結果と比較を行うとともに、工認時の応答結果と比較し、モデルの違いによる影響を確認する。

※工認時用いた180Gal既往波が S_1 相当であることを考慮し、参考として S_2 相当として270Gal既往波についても検討を行う。

(参考資料⑥) 工認時の地震波を用いた検討について

■ 解放基盤表面での180Gal既往波及び270Gal既往波と基準地震動Ssとの比較

基準地震動Ssと、180Gal既往波及び270Gal既往波を解放基盤表面上まで引き下げた地震動の応答スペクトルを参図⑥-1に示す。図より、基準地震動Ssの方が、建屋の主要周期帯において180Gal既往波及び270Gal既往波を解放基盤表面上まで引き下げた地震動より地震動レベルが大きい。

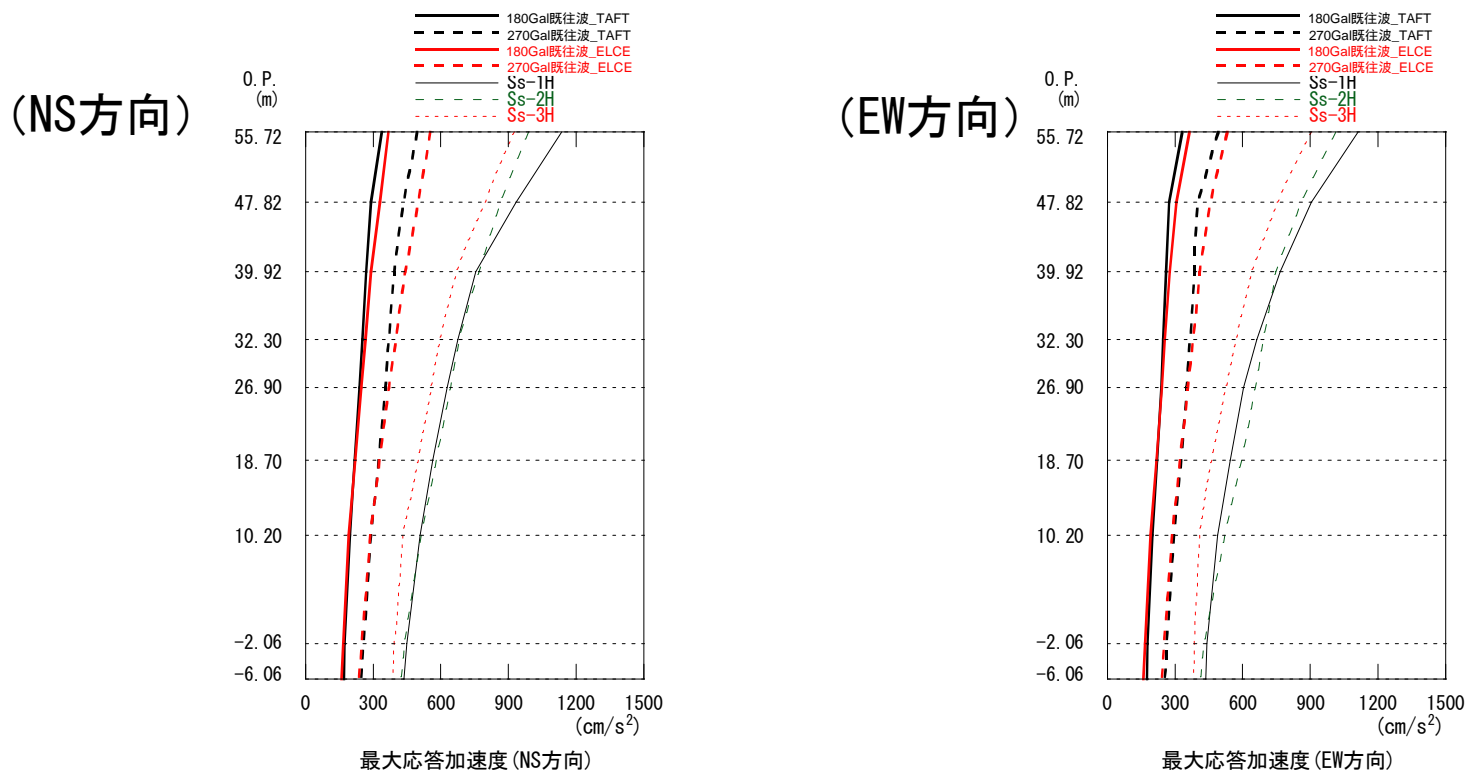


参図⑥-1 既往波(解放基盤表面)と基準地震動の加速度応答スペクトル (h=0.05)

(参考資料⑥) 工認時の地震波を用いた検討について

■ 180Gal 既往波および270Gal 既往波をバックチェックモデルに入力した際の応答結果とバックチェックにおける応答結果の比較

参図⑥-2に180Gal 既往波及び270Gal 既往波をバックチェックモデルに入力した際の最大応答加速度とバックチェックにおける最大応答加速度を比較して示す。図より、バックチェックの応答結果に比べ、180Gal 既往波及び270Gal 既往波を用いた解析結果のいずれも最大応答加速度が小さくなっている。これより、「最新の知見を取り入れた建屋モデル」とすることで、基準地震動Ssと180Gal 既往波及び270Gal 既往波の地震動レベルとの大小関係が応答結果とよく対応している。



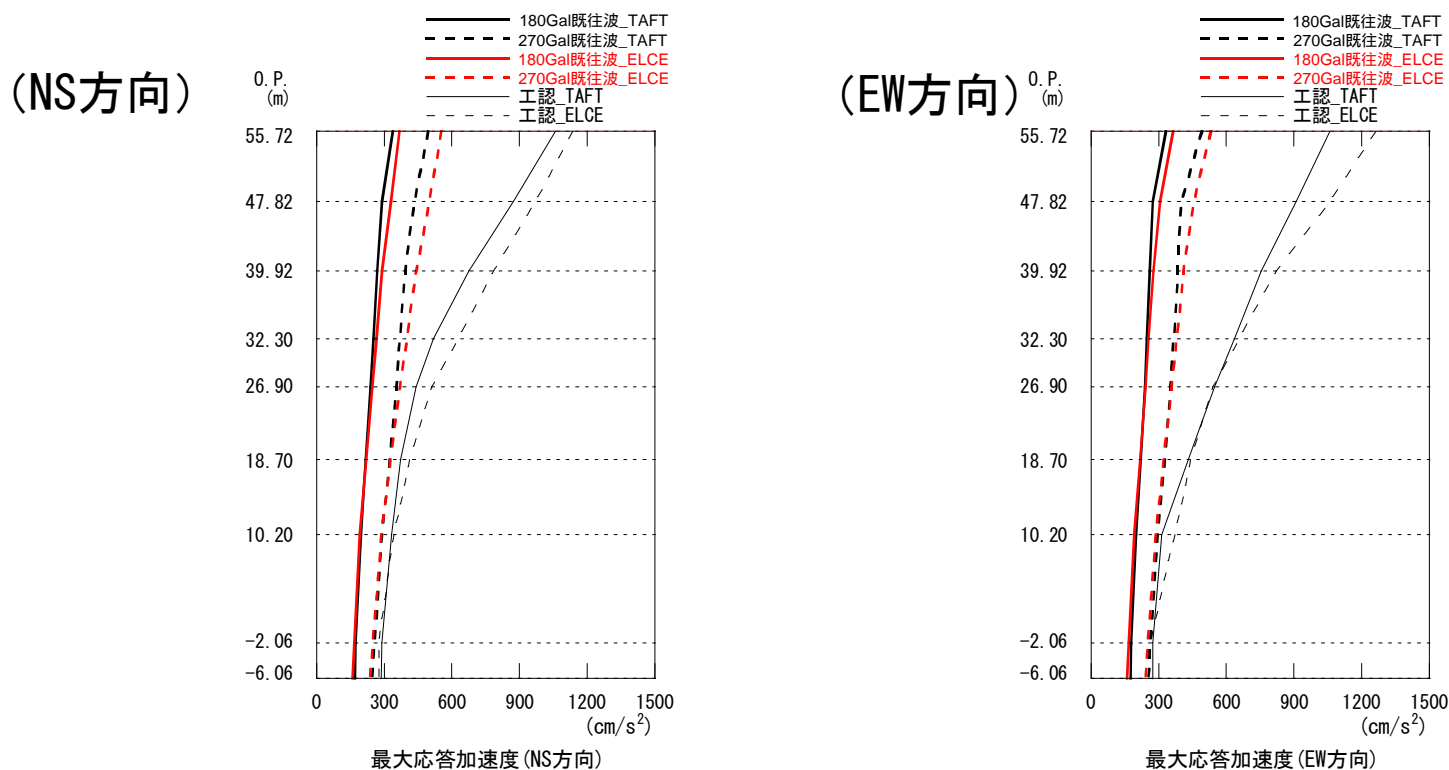
参図⑥-2 最大応答加速度の比較

(参考資料⑥) 工認時の地震波を用いた検討について

■ 180Gal 既往波および270Gal 既往波をバックチェックモデルに入力した際の応答結果と工認時の応答結果の比較

参図⑥-3に180Gal 既往波及び270Gal 既往波をバックチェックモデルに入力した際の最大応答加速度と工認時の最大応答加速度を比較して示す。図より、工認時（エルセントロ波及びタフト波）に比べ、180Gal 既往波及び270Gal 既往波を用いた解析結果の方が、最大応答加速度が小さくなっている。これより、工認時のモデルと「最新の知見を取り入れた建屋モデル」とでは、同じ地震動であっても、モデルの設定方法や入力方法が異なることにより応答結果に違いがあらわれている。

したがって、今回の耐震安全性評価と工認時とでは、建屋モデルの設定方法とその入力方法が異なることにより応答結果に違いがあらわれたものと考えられる。



参図⑥-3 最大応答加速度の比較

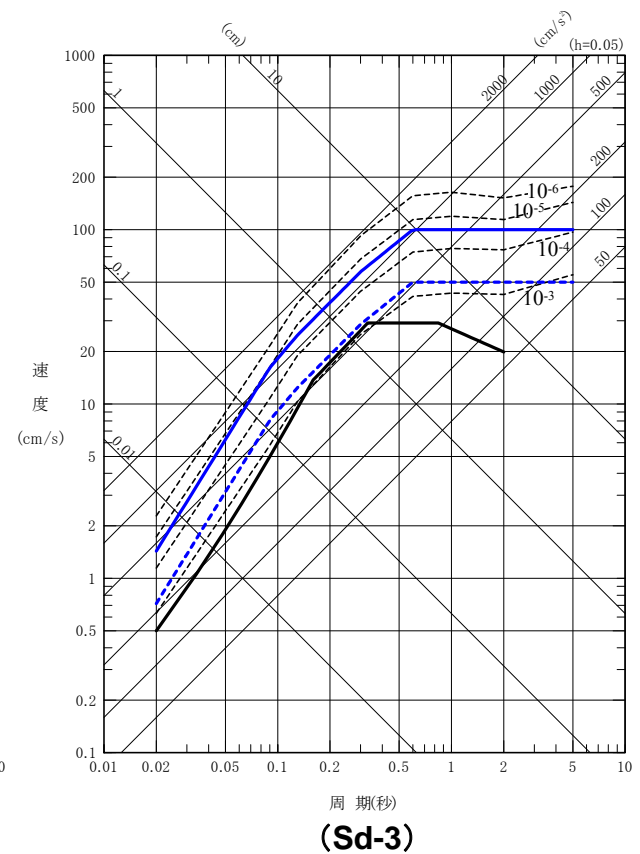
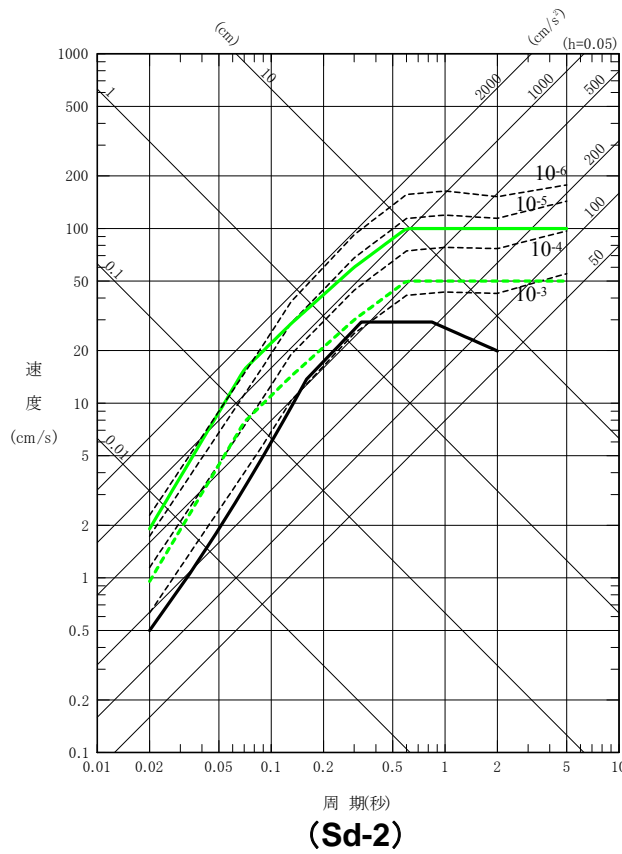
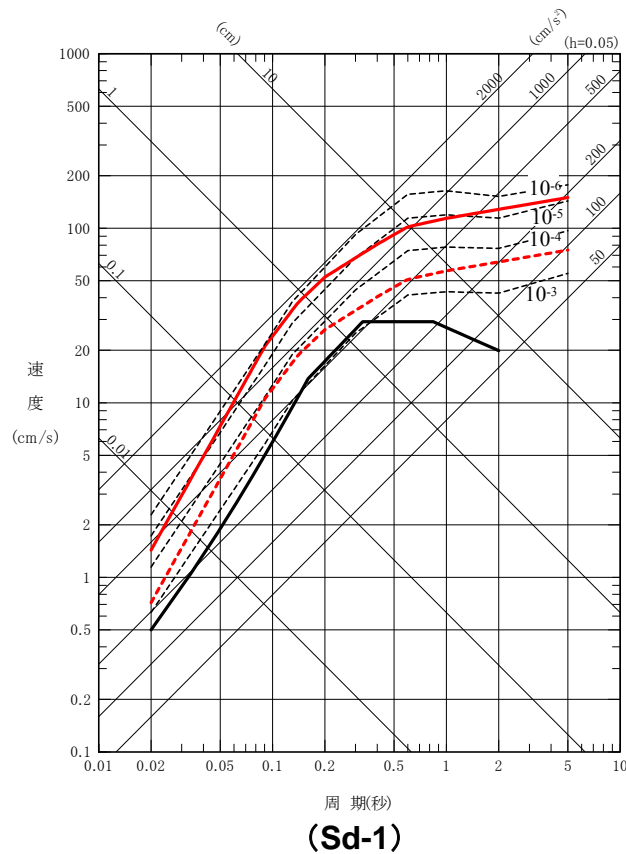
(参考資料⑦) 弾性設計用地震動 S d の設定について

弾性設計用地震動 S d は、基準地震動 S s による安全機能維持をより確実なものとする観点から、弾性設計用地震動 S d と基準地震動 S s の比率 (S d / S s) を 0.5 とし、旧耐震設計指針における基準地震動 S₁ (最大加速度振幅 180 cm/s²) の応答スペクトルを下回らないよう配慮し設定した。

- 設計用応答スペクトル Ss - 1H
- - - 設計用応答スペクトル Sd - 1H
- 設計用応答スペクトル S₁ - D
- - - 一様ハザードスペクトル

- 設計用応答スペクトル Ss - 2H
- - - 設計用応答スペクトル Sd - 2H
- 設計用応答スペクトル S₁ - D
- - - 一様ハザードスペクトル

- 設計用応答スペクトル Ss - 3H
- - - 設計用応答スペクトル Sd - 3H
- 設計用応答スペクトル S₁ - D
- - - 一様ハザードスペクトル

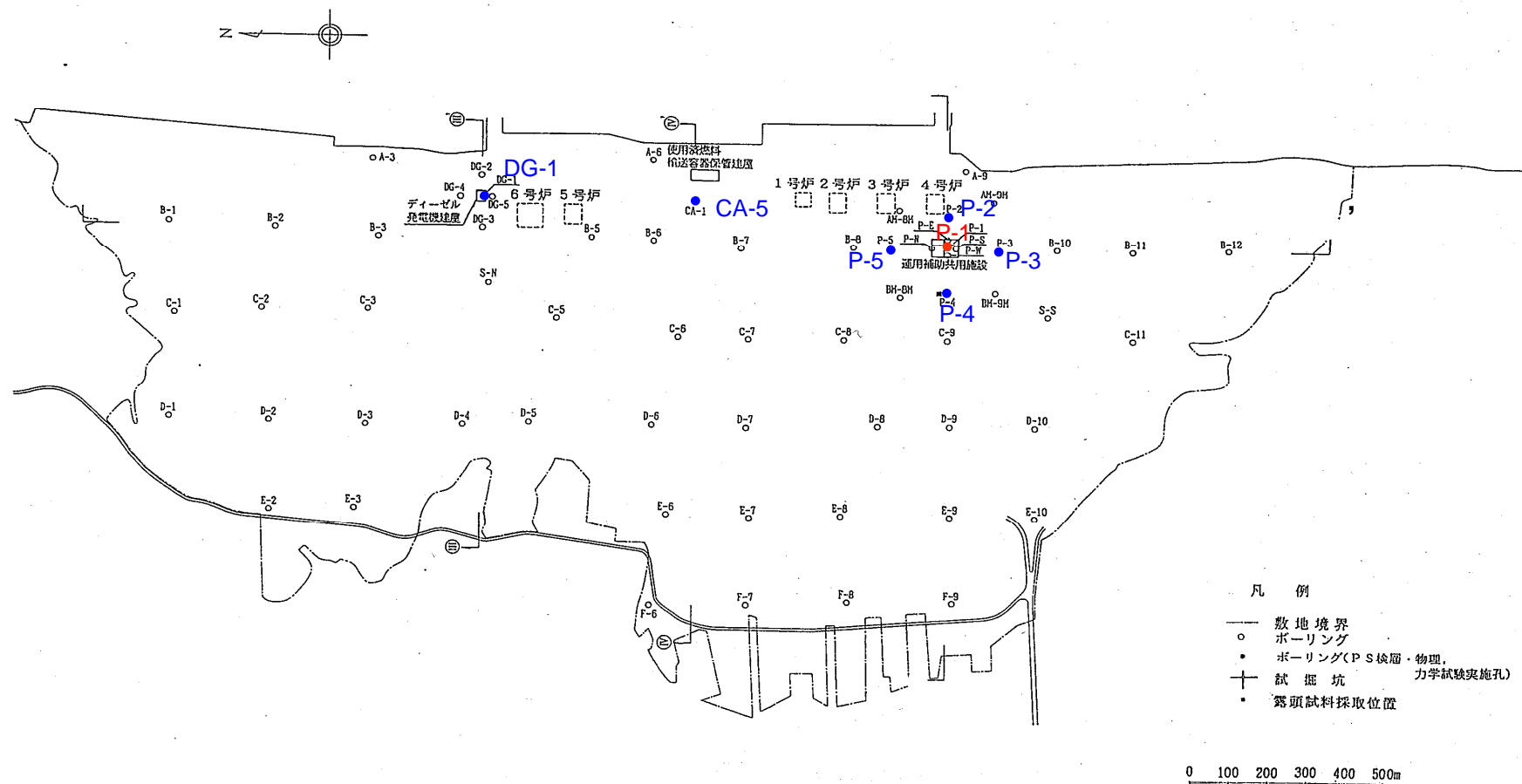


参図⑦ 弾性設計用地震動 S d の年超過確率

(参考資料⑧) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討

■ 地盤剛性の変動幅

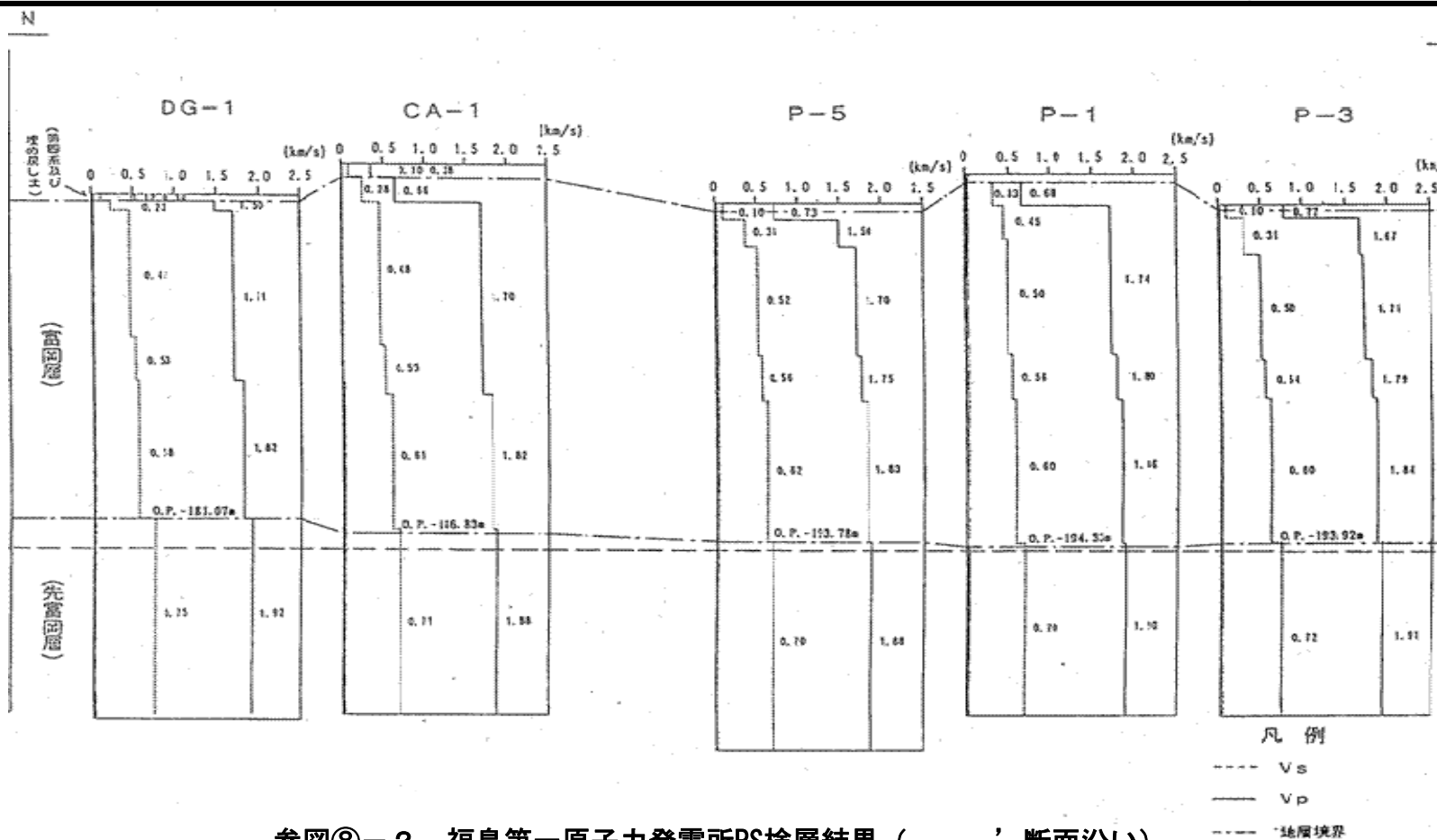
福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋の検討用地盤モデルは、参図⑧-1の敷地内地質調査位置図に示す運用補助共用施設(P-1)のPS検層により得られた弾性波速度に基づき設定されている。



参図⑧-1 福島第一原子力発電所 敷地内地質調査位置図

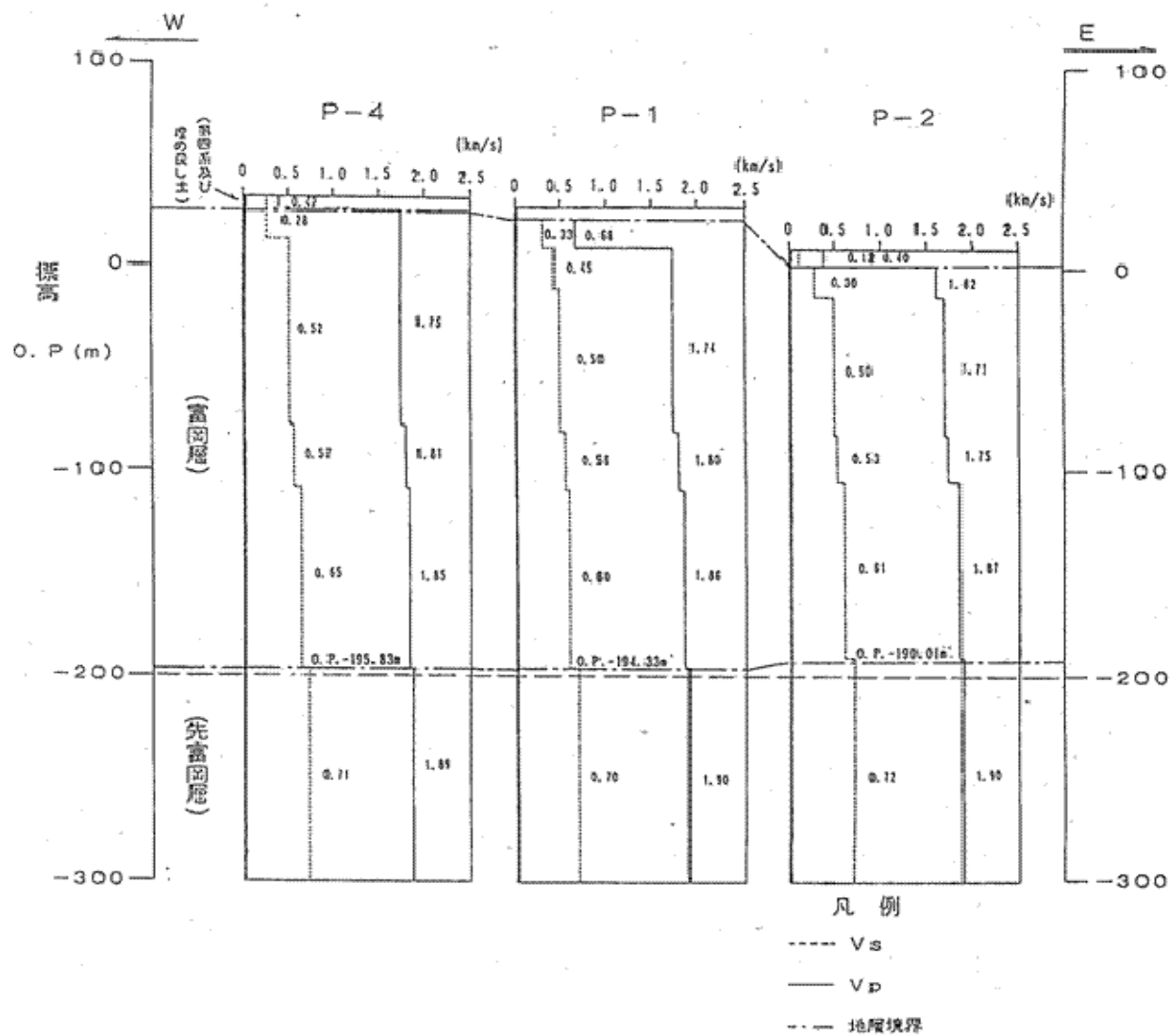
(参考資料⑧) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討

参図⑧-2及び参図⑧-3図に示す福島第一原子力発電所の原子炉設置変更許可申請時（1号，2号，3号，4号及び6号原子炉施設の変更 平成5年4月）の地質調査結果である7孔（DG-1，CA-1，P-1，P-2，P-3，P-4，P-5）のPS検層結果に基づき各層のS波速度及びせん断弾性係数について変動係数を算定した。



参図⑧-2 福島第一原子力発電所PS検層結果（ - ' 断面沿い）

(参考資料⑧) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討



参図⑧-3 福島第一原子力発電所PS検層結果 (- ' 断面沿い)

(参考資料⑧) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討

参表⑧-1 PS検層結果に基づく各層のS波速度の変動係数の算定

	S波速度 Vs (m/s)											P-1に対する 変動係数(%)	
	DG-1	CA-1	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	7孔平均	標準偏差	-	+	マイナス側	プラス側
O.P.-6.06m ~ O.P.-80.0m	476	482	497	479	464	521	501	489	19	469	508	-5.6	2.1
O.P.-80.0m以深	546	533	560	539	534	570	557	549	14	534	563	-4.6	0.5
	606	618	600	615	600	650	619	615	17	598	633	-0.3	5.4
	750	710	700	720	720	709	700	716	17	698	733	-0.2	4.7

参表⑧-2 PS検層結果に基づく各層のせん断弾性係数の変動係数の算定

	t (kN/m ³)	せん断弾性係数 Go (kN/m ²)											P-1に対する 変動係数(%)	
		DG-1	CA-1	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5	7孔平均	標準偏差	-	+	マイナス側	プラス側
O.P.-6.06m ~ O.P.-80.0m	17.1	395000	405000	431000	399000	376000	474000	438000	416857	32962	383895	449819	-10.9	4.4
O.P.-80.0m以深	17.6	535000	510000	563000	522000	512000	583000	557000	540286	27986	512299	568272	-9.0	0.9
	17.8	666000	694000	653000	687000	653000	767000	695000	687857	39287	648570	727144	-0.7	11.4
	18.5	1061000	951000	924000	978000	978000	948000	924000	966286	47240	919046	1013525	-0.5	9.7

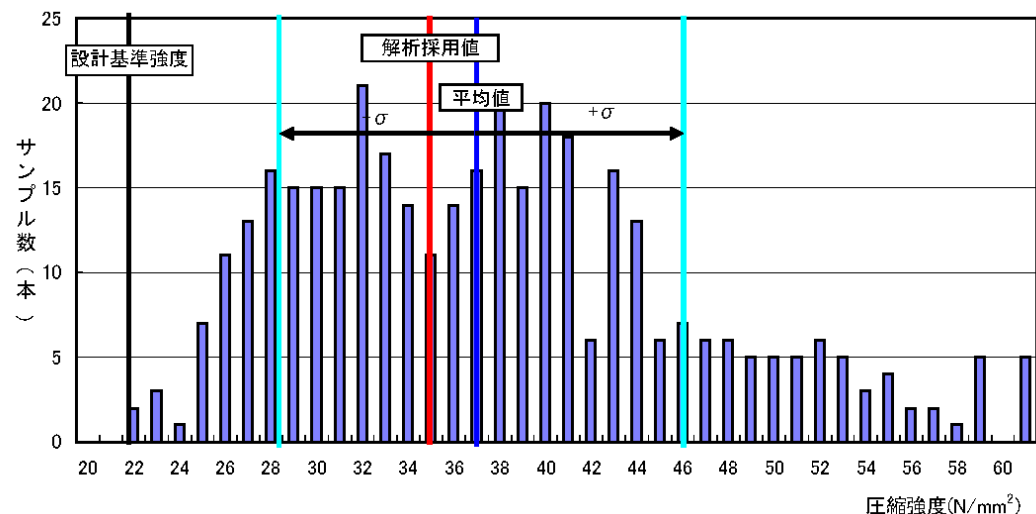
参表⑧-3 地盤剛性の変動幅

層区分	地盤剛性の変動幅
富岡層 O.P. -6.06m ~ O.P. -80.0m	-15% ~ 5%
富岡層 O.P. -80.0m以深	-10% ~ +15%

(参考資料⑧) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討

■ 建屋剛性の変動幅

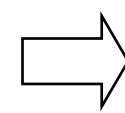
解析で採用した実強度を設定した際に使用したコンクリート圧縮強度の頻度分布を参図⑧-4に、分析結果を参表⑧-4に示す。参表⑧-4より建屋剛性の変動幅は-7%~15%の範囲である。



参図⑧-4 コンクリート圧縮強度の頻度分布図 (Fc=22.1 N/mm²)

参表⑧-4 コンクリート圧縮強度試験データ及びヤング係数の分析結果 (Fc=22.1 N/mm²)

	強度	ヤング係数
設計基準強度	22.1 N/mm ²	—
平均圧縮強度	37.4 N/mm ²	—
標準偏差	8.8 N/mm ²	—
解析採用値	35.0 N/mm ²	$E = 2.57 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
平均値-標準偏差	28.6 N/mm ²	$E = 2.40 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 解析採用値に対する変動係数：-6.5%
平均値+標準偏差	46.2 N/mm ²	$E = 2.94 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 解析採用値に対する変動係数：14.5%



建屋剛性の変動幅
-7%~15%

(参考資料⑧) 鉛直方向の拡幅率10%の適用性検討

これらの変動幅は、(社)日本電気協会の耐震設計分科会資料*「鉛直方向の設計用床応答スペクトルの拡幅率」に示される床応答スペクトルを±10%拡幅することによりカバーできる地盤剛性および建屋剛性の変動幅(それぞれ±50%, ±30%)の範囲内である。

*:(社)日本電気協会「参考資料4.7 鉛直方向の設計用床応答スペクトルの拡幅率」, 第29回耐震設計分科会資料No. 29-4-5-7, 平成20年1月18日

参表⑧-5 地盤剛性の変動幅

層区分	地盤剛性の変動幅
富岡層 O.P. -6.06m~O.P. -80.0m	-15% ~ 5%
富岡層 O.P. -80.0m以深	-10% ~ +15%

参表⑧-6 建屋剛性の変動幅

建屋剛性の変動幅
-7%~15%

(参考資料⑨) 水平方向および鉛直方向の地震力の組合せ方法

1F-5と同じ

- 既往評価（工認時の耐震計算）では、地震により構造物に生じる荷重を、水平および鉛直地震動各々により発生した最大荷重の絶対値を組合わせる「絶対和法」を用いている。
- 新耐震指針に照らした耐震安全性評価においては、地震により構造物に生じる荷重を、水平および鉛直地震動各々により発生した最大荷重の二乗和平方根として組合わせる「二乗和平方根（SRSS）法」を用いることとしている。

この方法は、水平および鉛直地震動を同時に入力した場合の最大荷重との比較において平均的な値を与え、設備における荷重分布は水平および鉛直地震動を同時に入力した場合の最大荷重分布に近い傾向を示すものである。

【参 考】日本電気協会「機器・配管系検討会No.10-4-1，平成18年6月9日」（抜粋）

水平および鉛直地震動による荷重をSRSS法により組合せた場合と水平および鉛直地震動を同時に入力する時刻歴法による場合とで比較した結果、以下を確認している

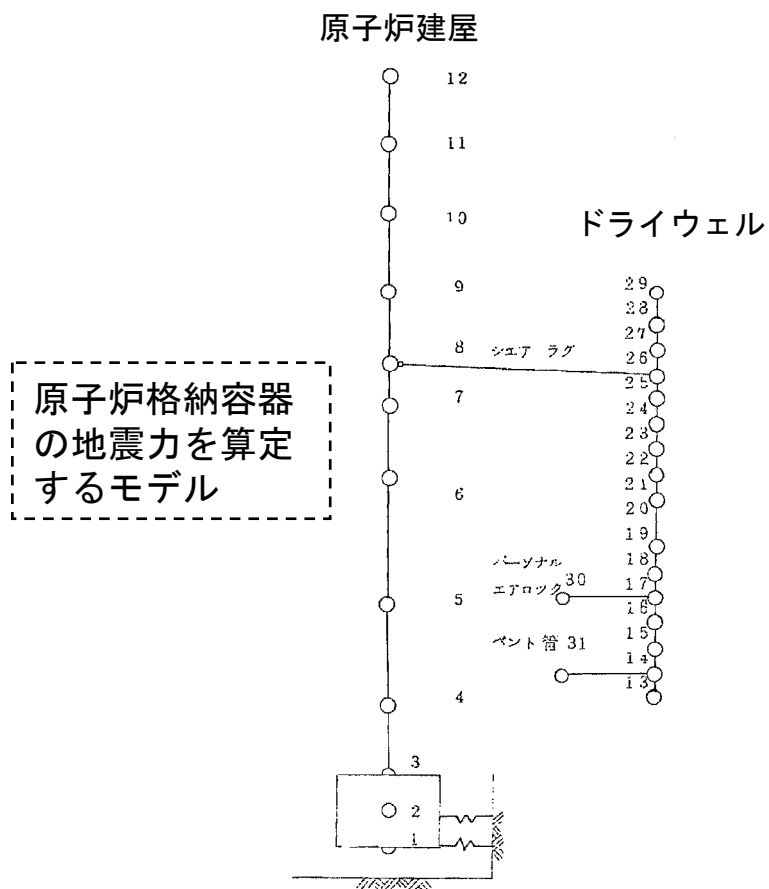
- (1) 水平および鉛直地震動各々に対する設備の応答は、最大値発生時刻に差があることから、互いに相関が小さい。
- (2) SRSS法による応答が同時入力の時刻歴法による応答を下回る地震発生時間中の頻度は小さく、実機配管系を例に解析した結果では0.1%未満であった。
- (3) 実機配管系において、水平および鉛直地震動による荷重とSRSS法と同時入力の時刻歴法で比較したところ、最大応力発生点およびこれに準ずる比較的応力の高い評価点では、SRSS法が時刻歴法より大きな応力となった。配管系全体にわたっては、SRSS法による応力は時刻歴法による応力を中心にばらつき、平均的な応答を与えた。

以上から、水平地震動と鉛直地震動による地震荷重の組合せ方法として、SRSS法を用いて差し支えない。

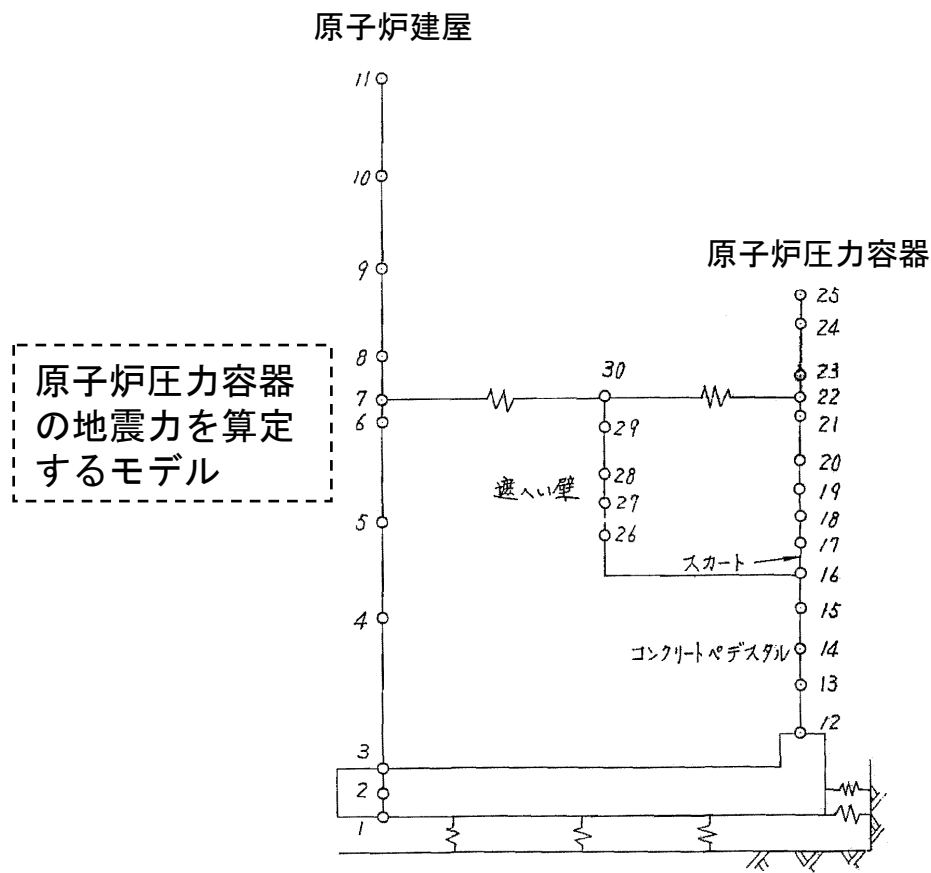
(参考資料⑩) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (1/6)

設計時は、以下の2つのモデルを用いて解析を実施している。

- ・ 原子炉建屋－原子炉格納容器連成モデル
- ・ 原子炉建屋－原子炉圧力容器連成モデル



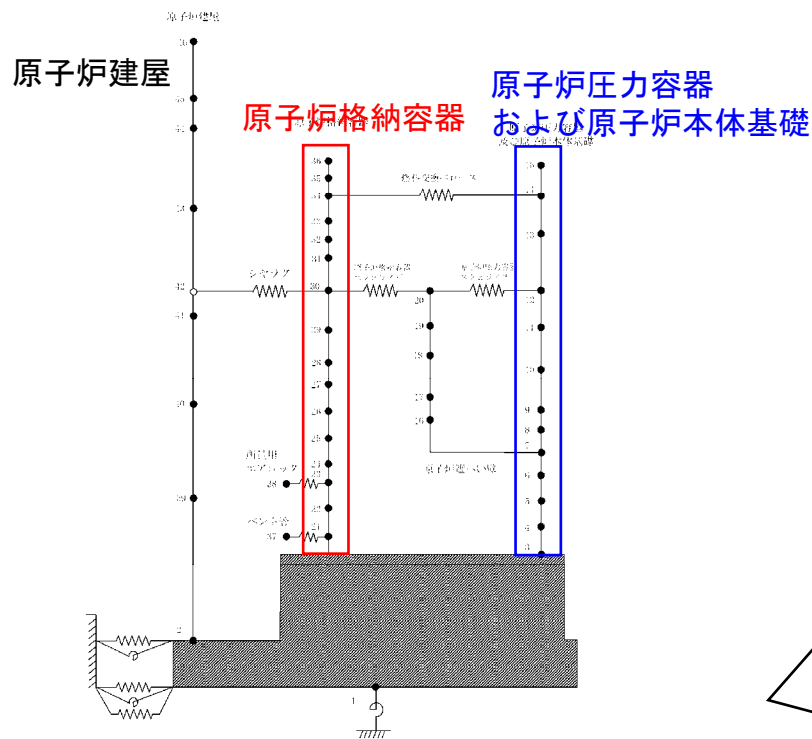
原子炉建屋－原子炉格納容器連成モデル (1F-3設計時)



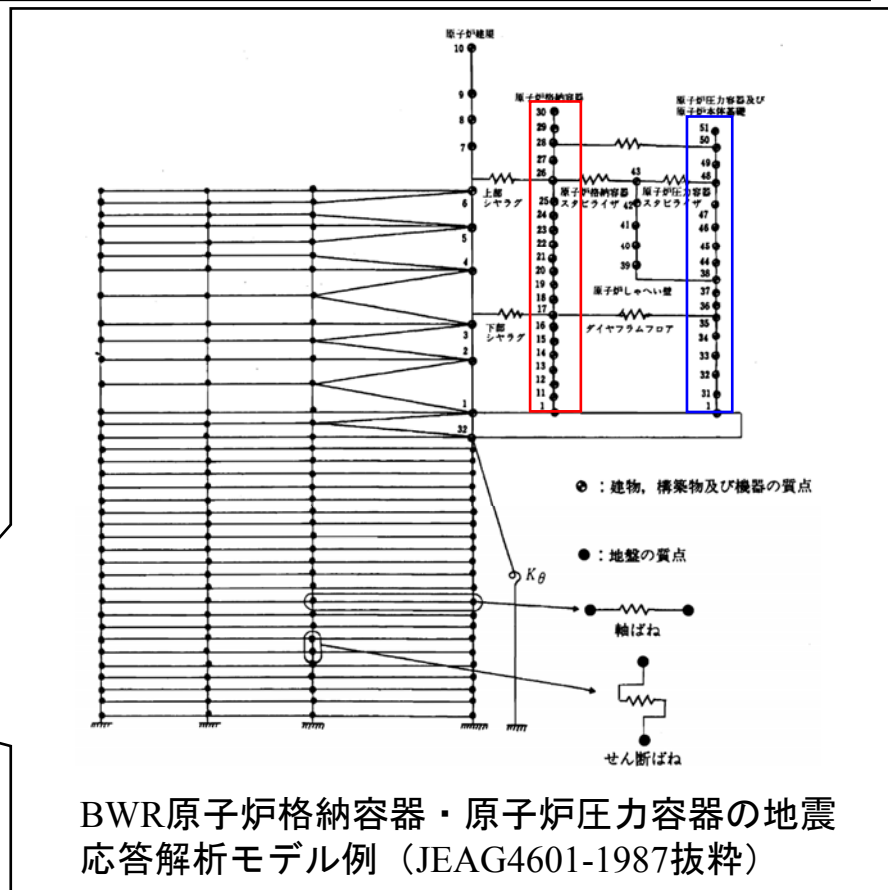
原子炉建屋－原子炉圧力容器連成モデル (1F-3設計時)

(参考資料⑩) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (2/6)

耐震安全性評価ではJEAG4601-1987に記載のとおり、最新のプラントと同様に、**原子炉建屋—原子炉格納容器—原子炉圧力容器連成モデル**としている。



原子炉格納容器—原子炉圧力容器
地震応答解析モデル (1F-3耐震安全性評価)

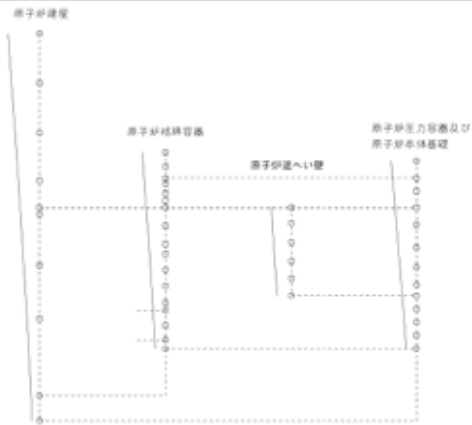


BWR原子炉格納容器・原子炉圧力容器の地震
応答解析モデル例 (JEAG4601-1987抜粋)

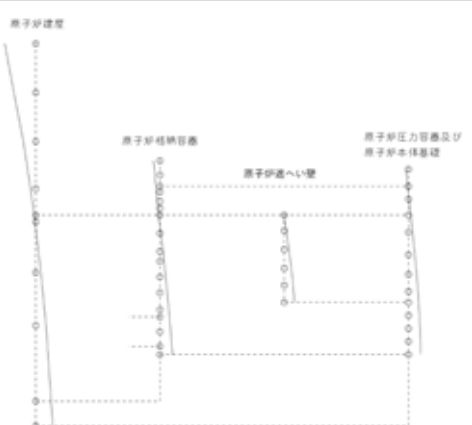
原子炉建屋と原子炉格納容器の間にあるシヤラグ, 原子炉格納容器と原子炉圧力容器の間にある燃料交換ベローズは, 耐震安全性評価においてはJEAG4601-1987に記載のとおり, 最新のプラントと同様にバネを用いてモデル化

(参考資料⑩) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (3/6)

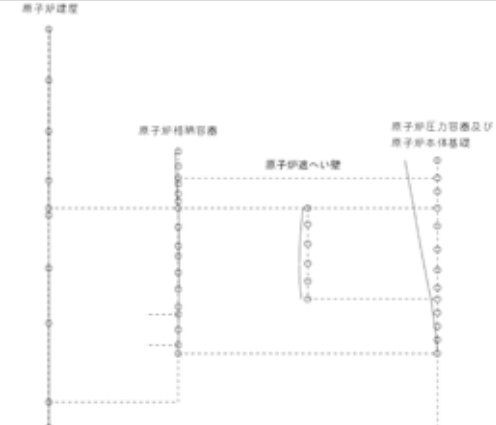
耐震安全性評価における振動モード図とそれに対応する設計時の振動モード図をそれぞれ比較すると、**原子炉建屋**、**原子炉格納容器**は同様な挙動を示している。



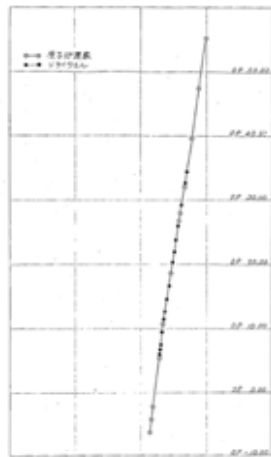
1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向1次モード)



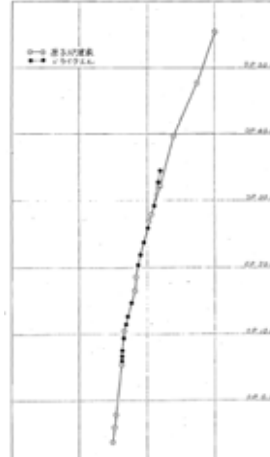
1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向2次モード)



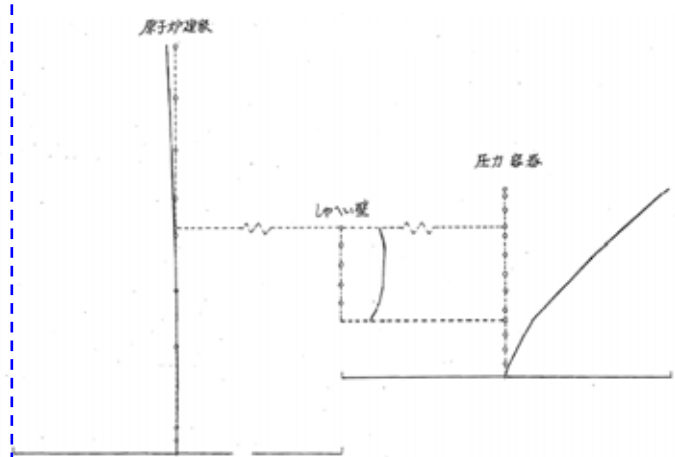
1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向3次モード)



1F-3原子炉建屋 - 原子炉格納容器
振動モード図 (設計時, EW方向1次モード)



1F-3原子炉建屋 - 原子炉格納容器
振動モード図 (設計時, EW方向2次モード)

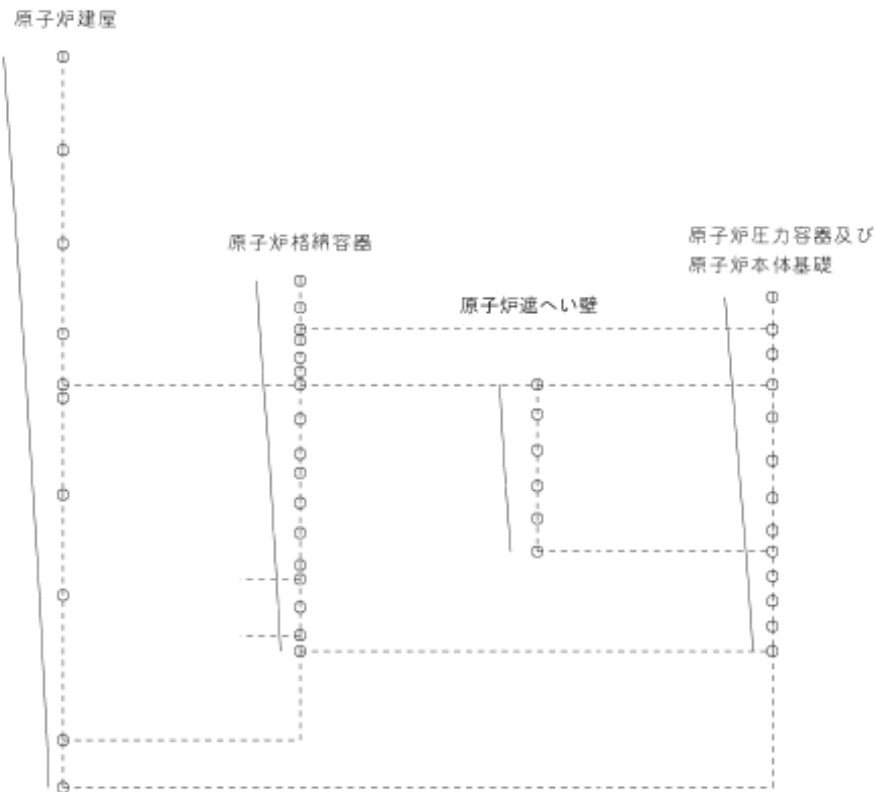


1F-3原子炉建屋 - 原子炉圧力容器
振動モード図 (設計時, EW方向2次モード)

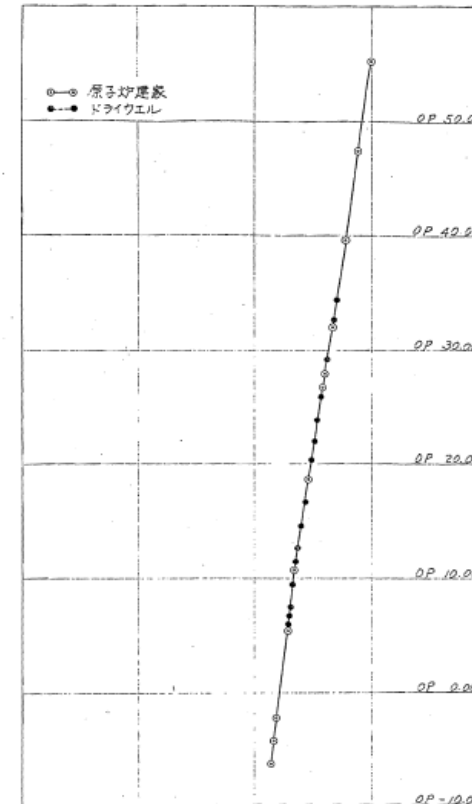
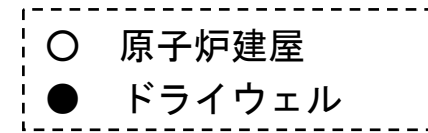
(参考資料⑩) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (4/6)

振動モード (拡大図)

原子炉格納容器の比較



1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向1次モード)

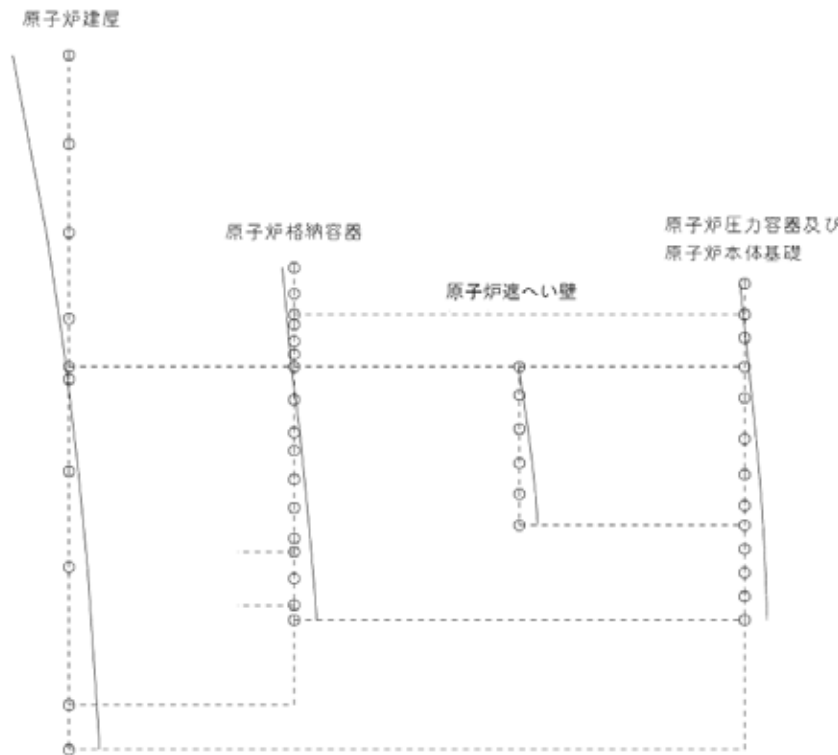


1F-3原子炉建屋 - 原子炉格納容器
振動モード図(設計時, EW方向1次モード)

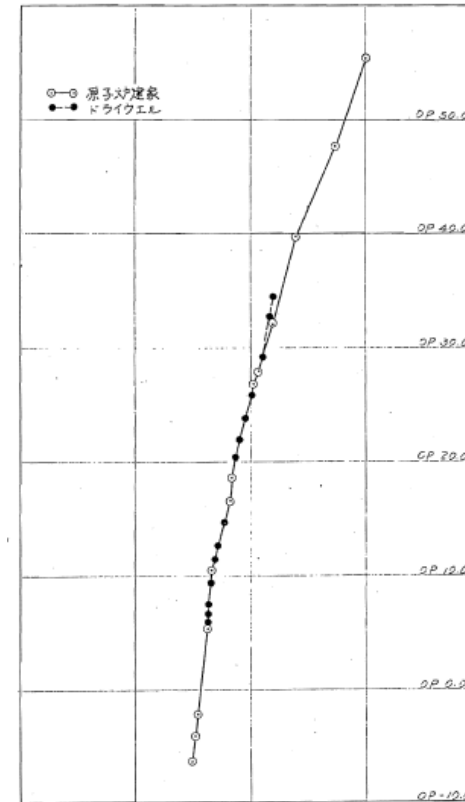
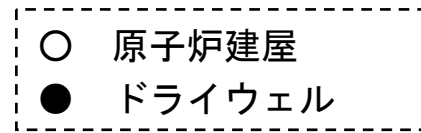
(参考資料⑩) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (5/6)

振動モード (拡大図)

原子炉格納容器の比較



1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向2次モード)

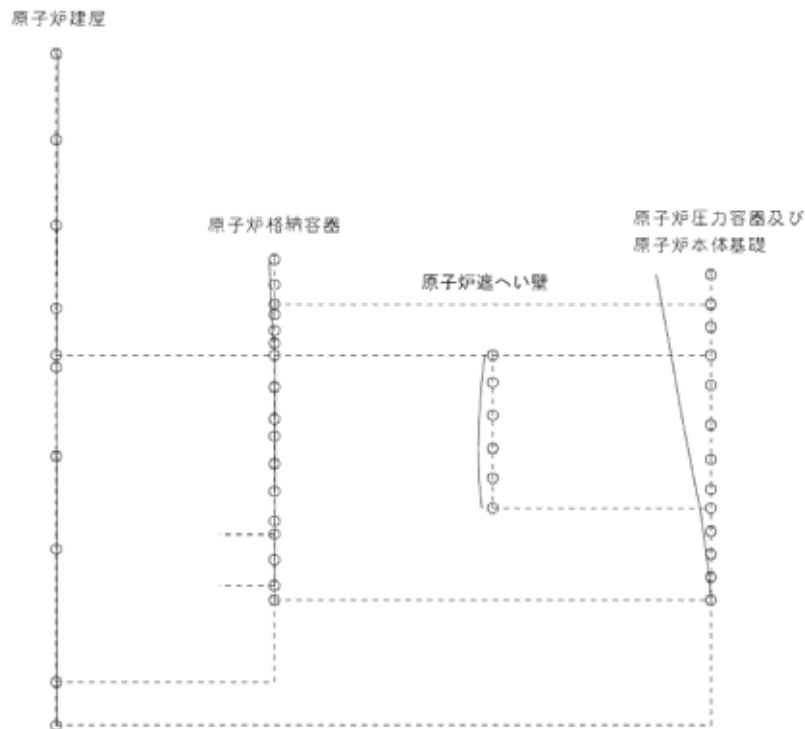


1F-3原子炉建屋—原子炉格納容器
振動モード図 (設計時, EW方向2次モード)

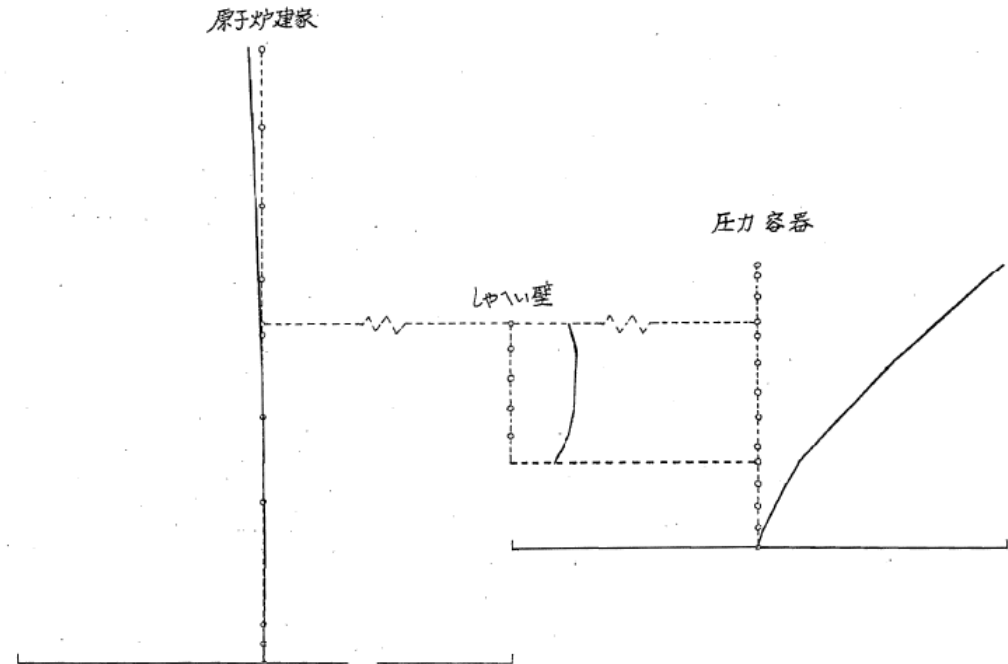
(参考資料⑩) 応答解析モデルに係る工認時との比較 (6/6)

振動モード (拡大図)

原子炉压力容器の比較



1F-3大型機器振動モード図
(耐震安全性評価, EW方向3次モード)



1F-3原子炉建屋—原子炉压力容器
振動モード図 (設計時, EW方向2次モード)

(参考資料⑪)

疲れ解析が必要な応答領域に達しているかの確認

新耐震指針に照らした耐震安全性評価では、耐震設計上重要な施設（Sクラス）について基準地震動 S_s に対する安全機能が保持されることの確認を目的としている。

その際、構造物の破壊に直結する一次応力が、評価基準値を上回らないことの確認を基本としており、対象とした機器・配管系について評価基準値以下であることを確認している。

管(第1種管)の設計

地震動のみによる疲れ解析を行い疲れ累積係数を求め、運転状態Ⅰ、Ⅱにおける疲れ累積係数との和が1.0以下であることを確認（原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601・補-1984））

管(第3種管)の設計

地震による1次+2次応力が評価基準値（ $2S_y$ ）を超える場合、疲れ解析を行い地震による疲れ累積係数が1.0以下であることを確認（原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601・補-1984））

福島第一3号機の主蒸気系配管について、疲れ解析を実施したところ、地震による疲れ累積係数と運転状態Ⅰ、Ⅱにおける疲れ累積係数の和が1.0以下であることを確認した。

福島第一3号機の残留熱除去系配管について、1次+2次応力評価を実施したところ、計算値が評価基準値以下であることを確認しており、疲れ解析は不要である。

(参考資料⑪)

疲れ解析が必要な応答領域に達しているかの確認

● 1次+2次応力評価の概要（3種管の例）

