

福島第一原子力発電所 3号機

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

平成 22 年 6 月 29 日

東京電力株式会社

1. はじめに

平成20年 9月 4日に原子力安全・保安院から「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」が原子力事業者等に通知された。この中で、施設の耐震安全性評価に当たっては、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋のシミュレーション解析に係る検討結果を踏まえ、以下の事項を考慮することとされている。

- (1) 地震応答解析においては、設計時の施設の剛性、振動特性等を用いた解析モデルによるほか、実際の地震記録等において建屋の剛性、機器などの振動特性等が把握されている場合は、当該剛性や振動特性などを考慮した解析モデルにより耐震安全性を評価することができるものとする。
- (2) 念のため、床などの柔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。

ここでは、柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋のシミュレーション解析に係る検討結果を踏まえ、福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋の耐震安全性評価に当たって考慮する事項について検討した結果を示す。

2. 検討内容

福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋の耐震安全性評価に当たっては、柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋のシミュレーション解析に係る検討結果を踏まえ、建屋実剛性および側面地盤ばねの評価方法を反映した解析モデルを採用している。

耐震安全性評価で用いた地震応答解析モデルを用いて、新たに地震観測記録に基づいた解析などにより検討を行い、解析モデルに問題ないことを確認する。

地震観測記録を用いた検討として、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年岩手・宮城内陸地震の諸元を第1図に、福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋基礎版上での観測記録を第2図に、検討に用いた地震観測点の配置図を第3図に示す。

今回の解析に用いた地震応答解析モデル(以下、「シミュレーションモデル」という。)を第4図に、解析モデルの諸元を第1表に、地震応答解析に用いる基礎地盤のばね定数と減衰係数を第2表に、解析の概要を第5図に示す。なお、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を実施して算出し、地盤ばねはその地盤モデルに基づいて算出している。)

また、福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋の設計で用いた地震応答解析モデル(工認設計時のモデル)と耐震安全性評価モデル、シミュレーション解析モデルの比較を第3表に、解析概要の比較を第6図に示す。

解析結果と建屋中間階(2階)で得られた観測記録について、最大応答加速度による比較を第7図に、床応答スペクトルによる比較を第8図に示す。

第7図および第8図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と言える。

さらに、柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋のシミュレーション解析に係る検討結果を踏まえ、2008年岩手・宮城内陸地震における基礎版上の観測記録を入力とした床などの柔性を考慮した解析を行い、解析結果に柏崎刈羽原子力発電所4号機の間階位置において、シミュレーションモデルでは再現できなかった周期0.1秒及び0.5秒付近に二つのピークがあらわれる特異な応答特性があらわれていないことを確認する。

床などの柔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。

また、床柔モデルでは、基礎版の柔性（面外変形）も考慮する。基礎版は耐震壁部とシェル壁に分割して、それぞれに対し、地盤の剛性を評価した地盤の水平・回転ばねを設けるとともに、各基礎版間の相互の影響を連成ばねにより評価する。床柔モデルを第9図に、解析モデルの条件を第4表に示す。解析モデルの主要なモード図を床剛モデルと比較して第10図および第11図に示す。

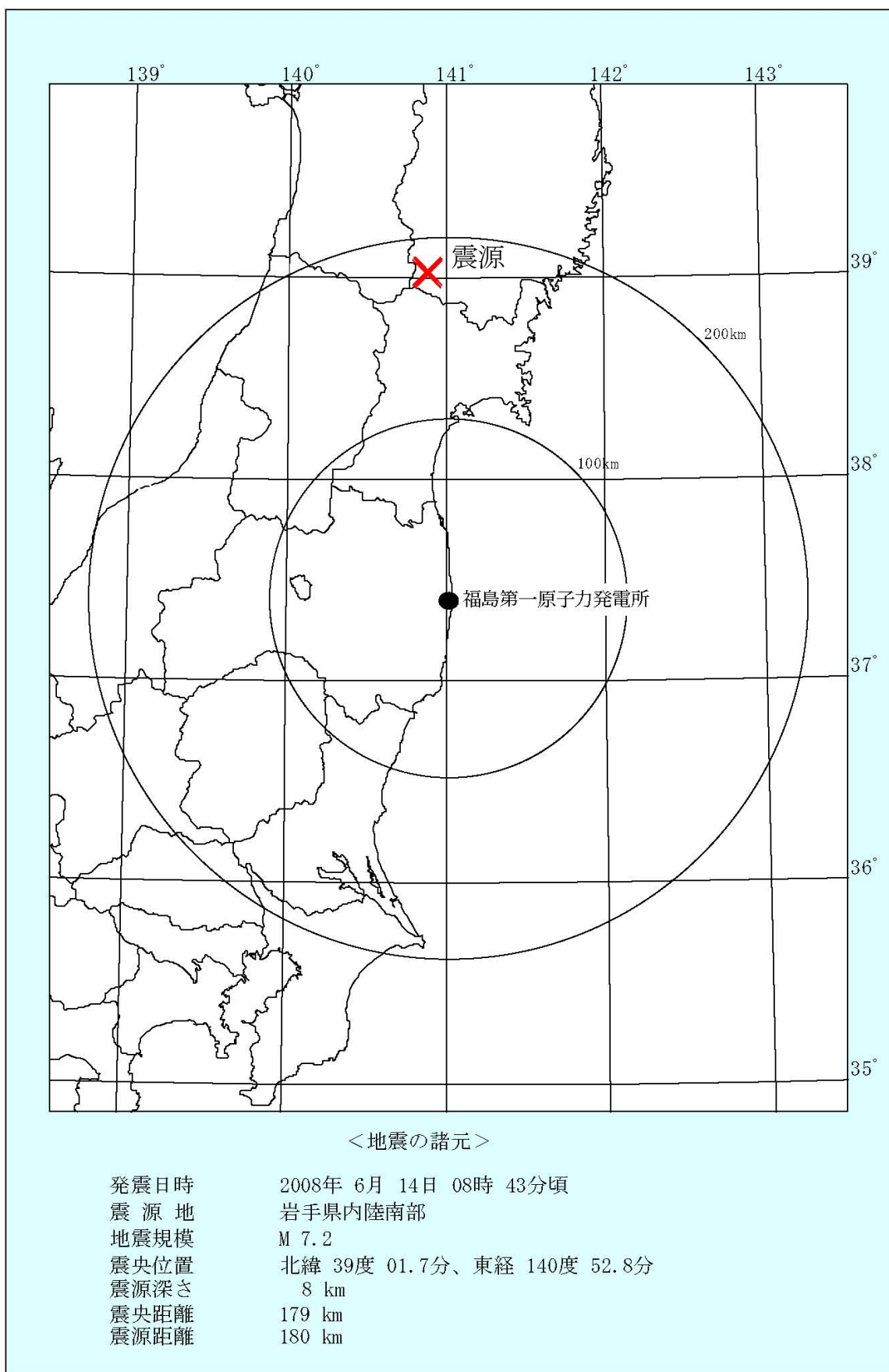
床柔モデルによる検討結果について、床応答スペクトルを、床剛モデルによる解析結果と2008年6月14日の地震（岩手・宮城内陸地震）の観測記録と併せて第12図および第13図に示す。

図より、床柔モデルの各床応答スペクトルは、床剛モデルおよび観測記録と概ね良い対応を示し、柏崎刈羽原子力発電所4号機間階位置で見られたような、シミュレーションモデルでは再現できなかった周期0.1秒及び0.5秒付近に二つのピークがあらわれる特異な応答特性が、床柔モデルによる解析においてもあらわれていないことを確認した。

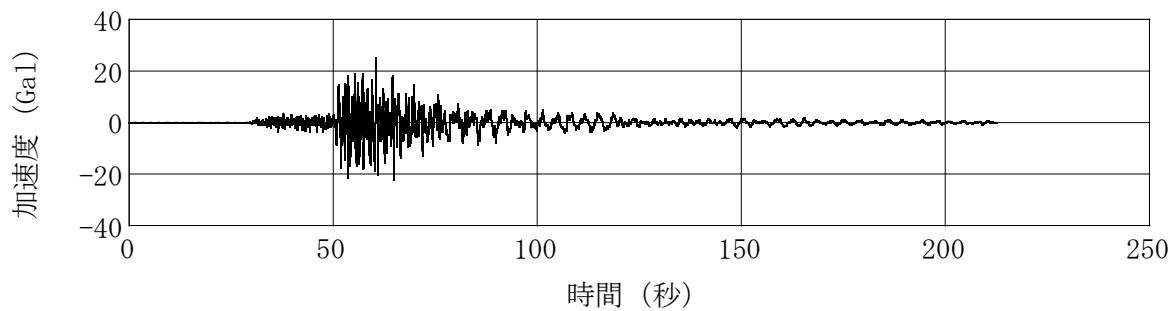
3. まとめ

福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋の耐震安全性評価では、柏崎刈羽原子力発電所の原子炉建屋のシミュレーション解析に係る検討結果を踏まえ、建屋実剛性を用いて評価を行っており、地震観測記録に基づいた解析等により検討を行った結果、耐震安全性評価で用いた水平方向の地震応答解析モデルによる評価に問題がないことを確認した。

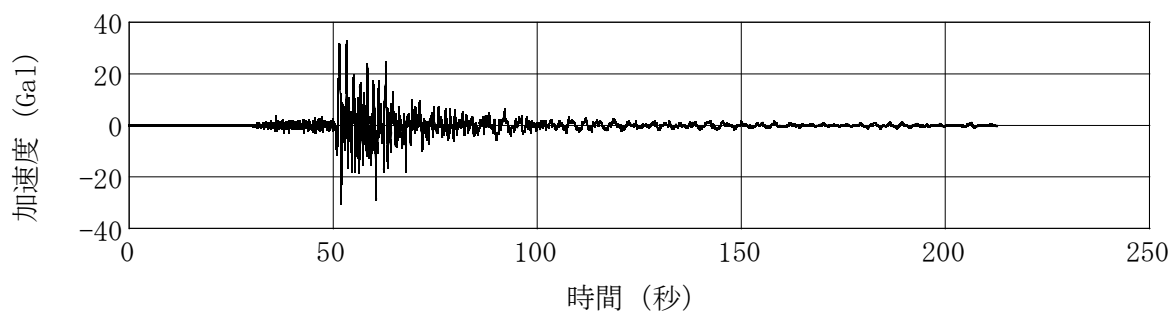
以上より、福島第一原子力発電所3号機原子炉建屋の新耐震指針に照らした耐震安全性評価は、「新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について」で示された施設の耐震安全性評価の考慮事項を適切に反映したものとなっている。



第1図 2008年岩手・宮城内陸地震の諸元

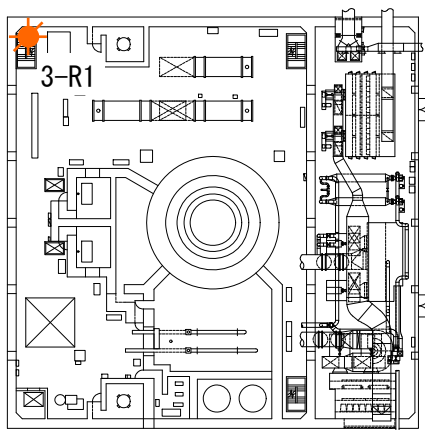


加速度波形 NS 方向 Max=25 Gal

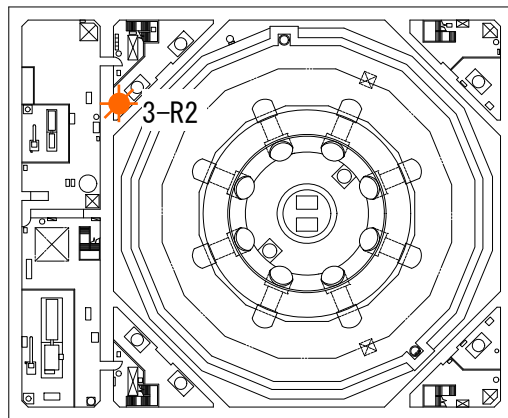


加速度波形 EW 方向 Max=33 Gal

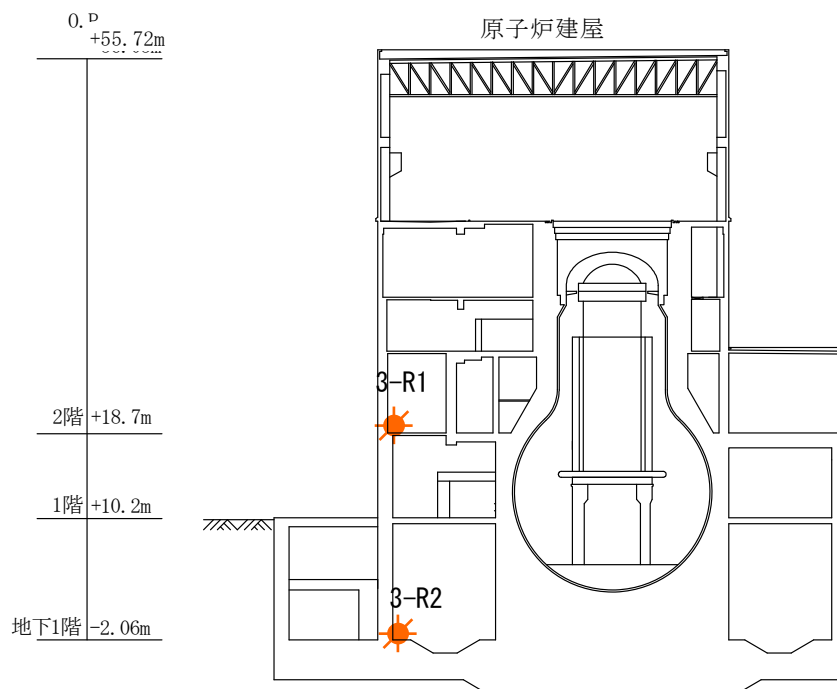
第 2 図 福島第一 3号機原子炉建屋
2008年6月14日の地震(岩手・宮城内陸)の基礎版上の観測記録



2階(O.P. +18.7m)

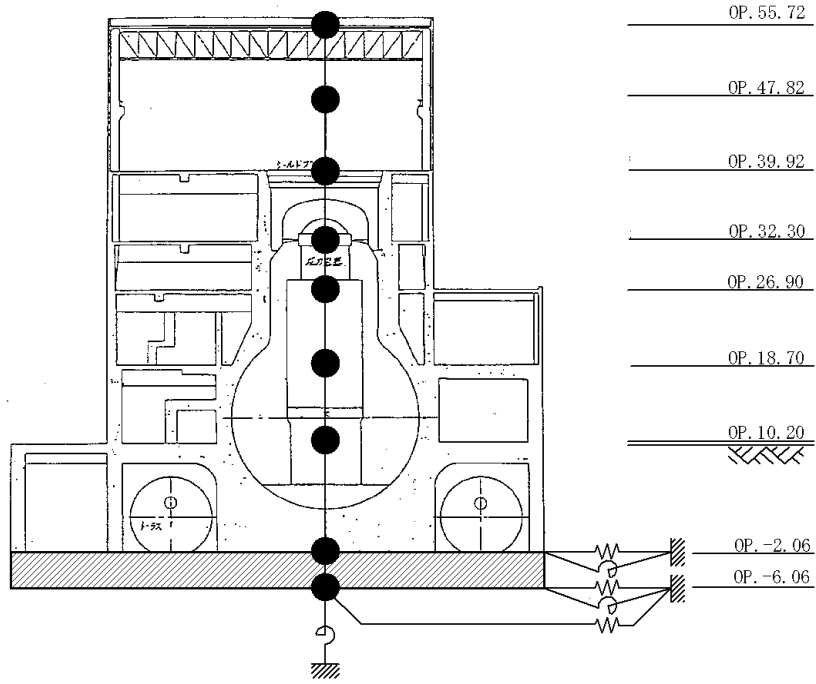


基礎版上
(O.P. -2.06m)

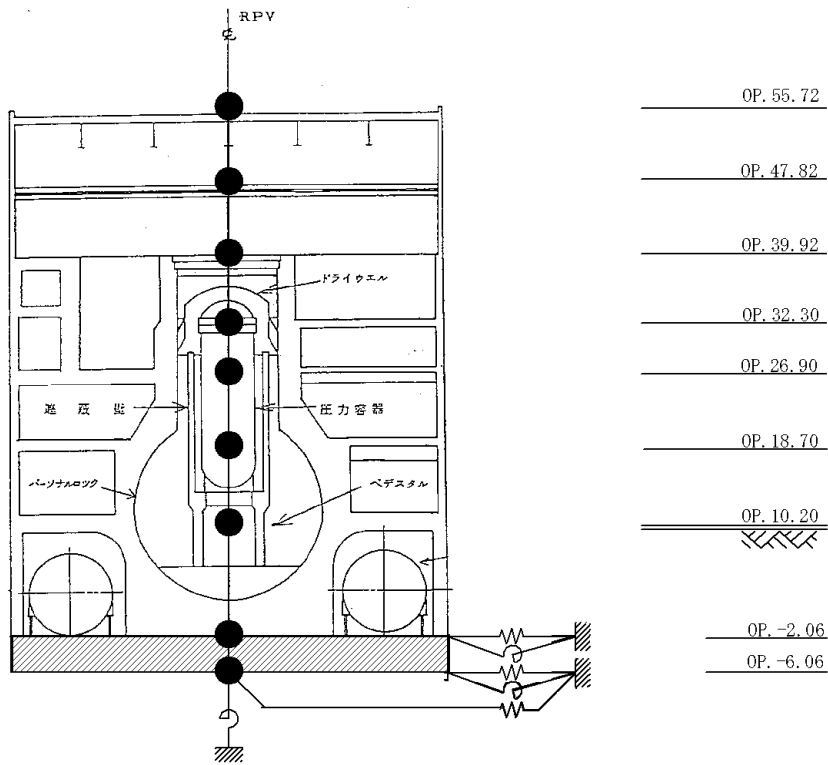


断面図

第3図 福島第一 3号機原子炉建屋 地震計配置図



(NS 方向)



(EW 方向)

第4図 福島第一 3号機原子炉建屋のシミュレーションモデル

第1表 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 (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 せん断弾性係数 G ポアソン比 ν 減衰 h 基礎形状	2.57×10^7 (kN/m^2) 1.07×10^7 (kN/m^2) 0.20 5% 47.0m(NS方向) \times 57.4m(EW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 (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 せん断弾性係数 G ポアソン比 ν 減衰 h 基礎形状	2.57×10^7 (kN/m^2) 1.07×10^7 (kN/m^2) 0.20 5% 47.0m(NS方向) \times 57.4m(EW方向)	

第2表 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 ^{(*)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	2.88 × 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

(*)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

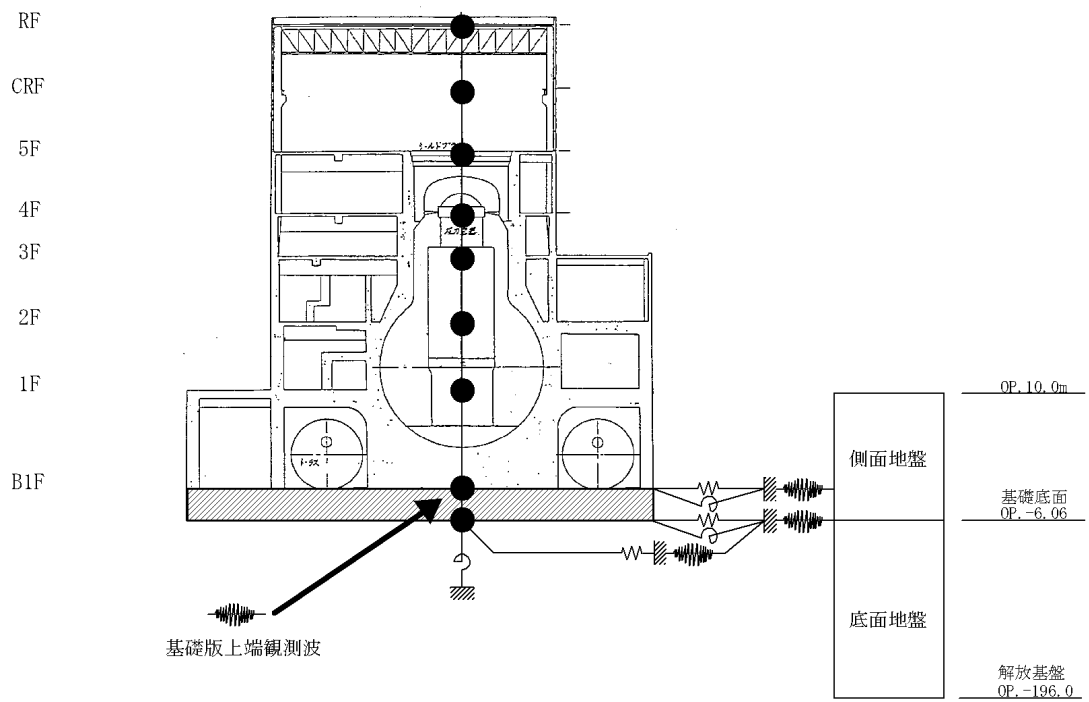
(EW 方向)

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	2.84 × 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

(*)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

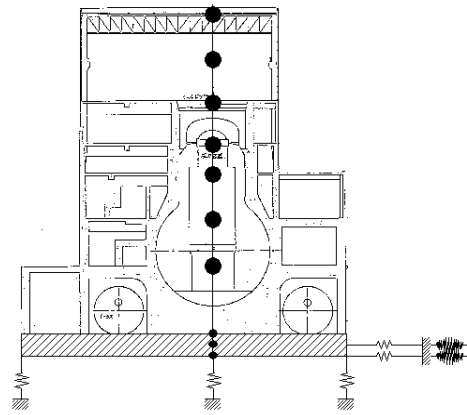


第5図 基礎版上の観測記録を用いたシミュレーション解析の概要

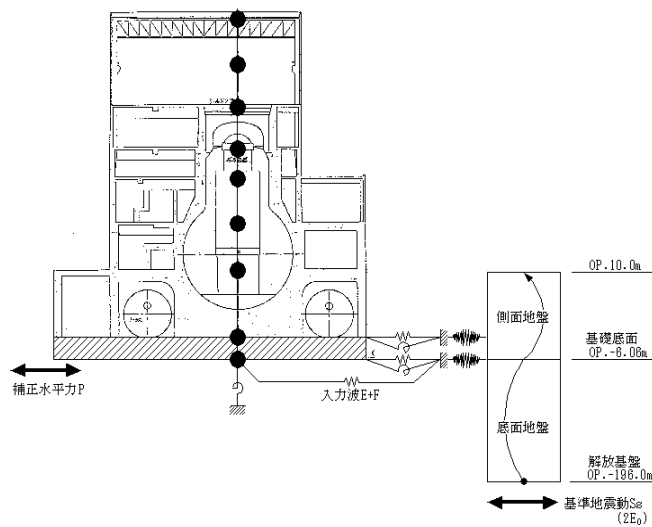
第3表 福島第一 3号機原子炉建屋 水平方向解析モデルの主な諸元の比較

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。	耐震安全性評価では最新の知見を反映している。	
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)	—	—	

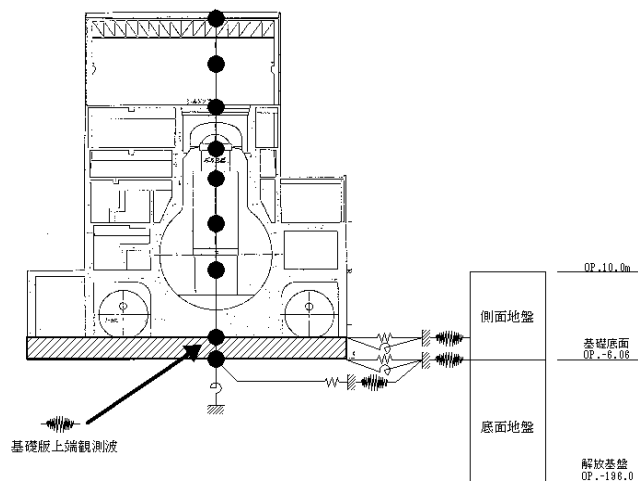
*1:Ss-1H時



(工認設計時のモデル)

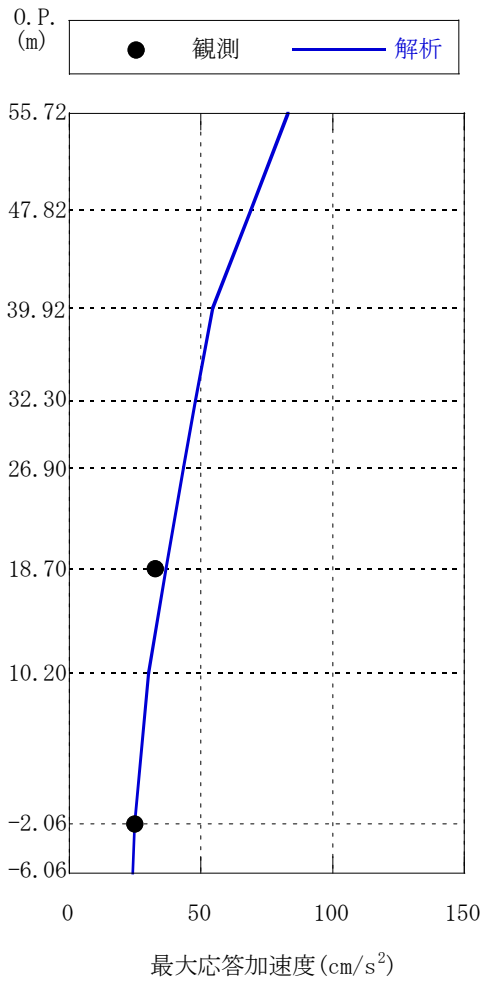


(耐震安全性評価モデル)

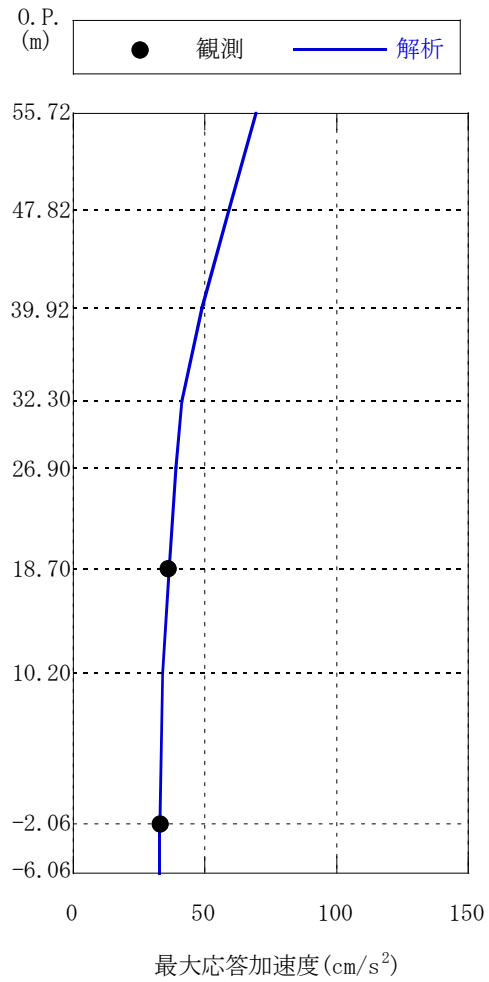


(シミュレーション解析モデル)

第6図 福島第一 3号機原子炉建屋 水平方向の解析概要の比較

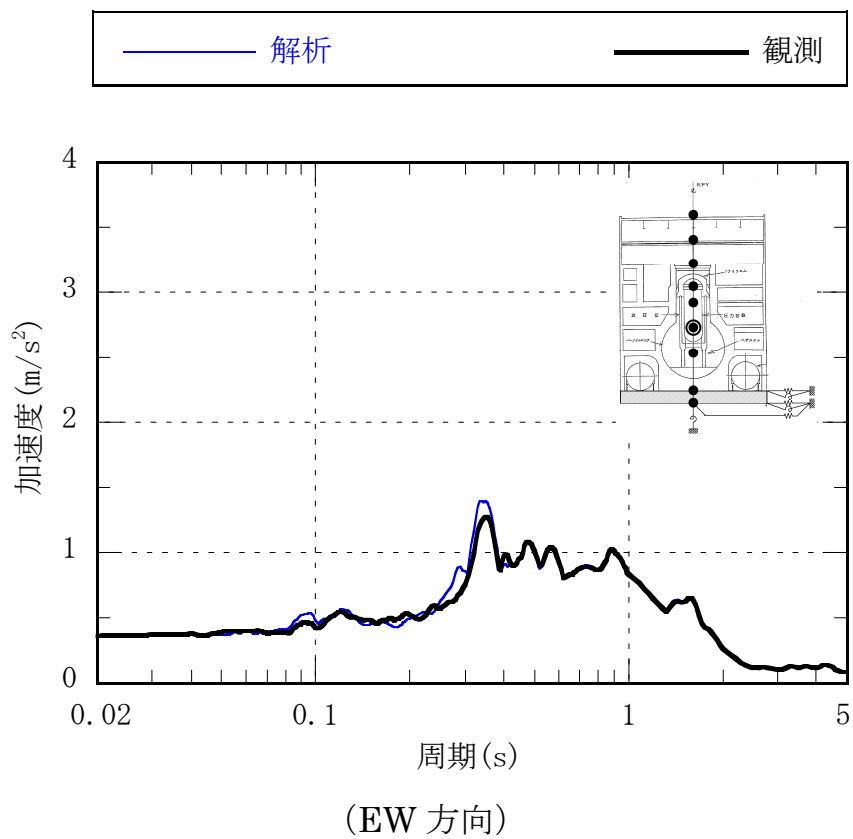
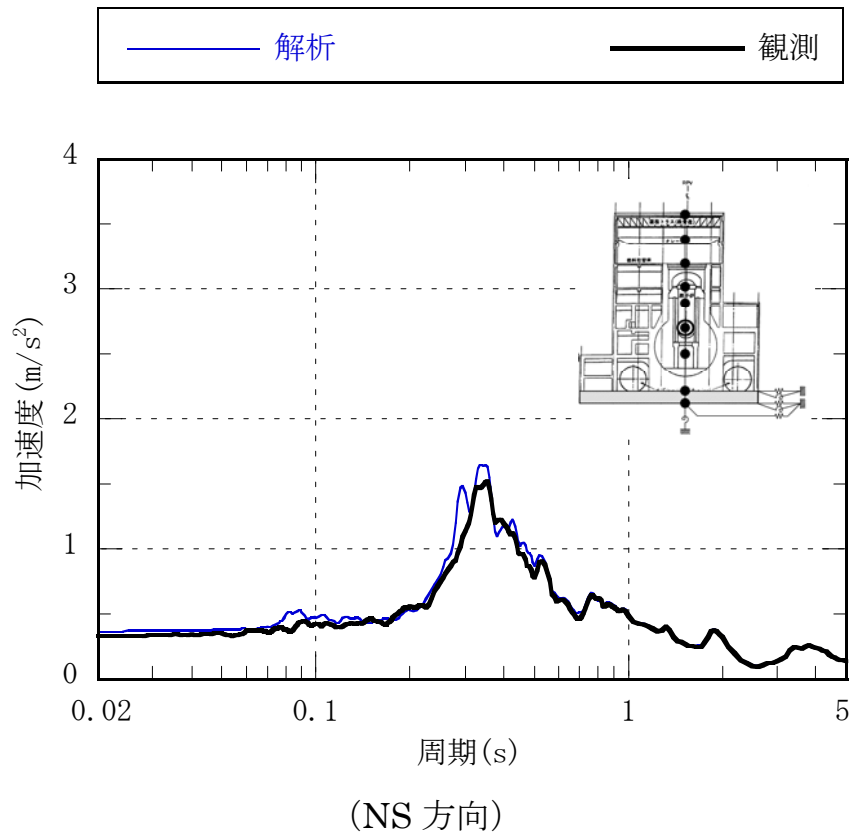


NS 方向

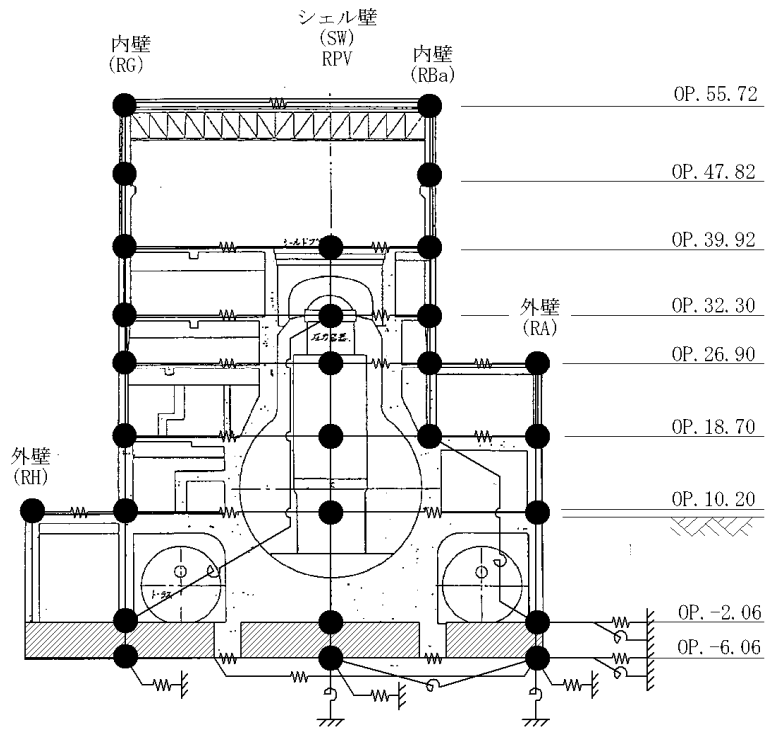


EW 方向

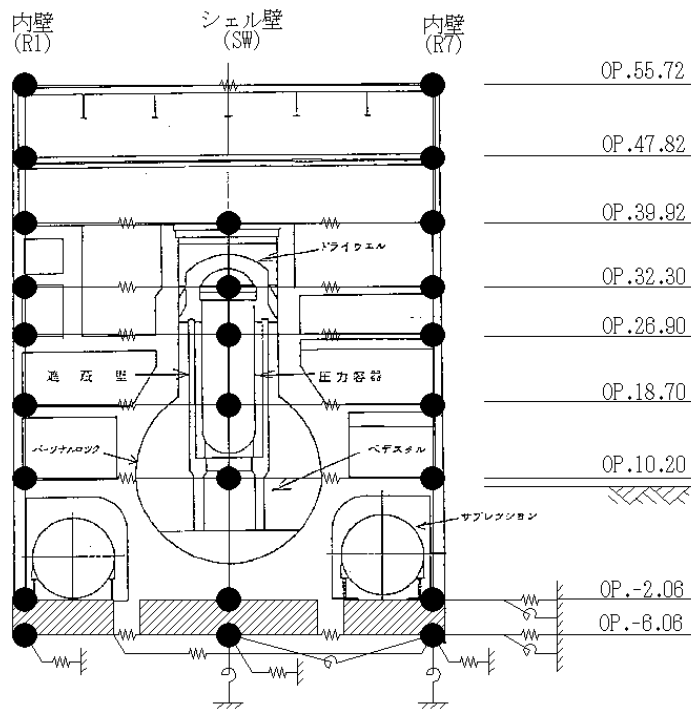
第 7 図 建屋各階の最大応答加速度の比較



第8図 応答スペクトルの比較



(NS 方向)



(EW 方向)

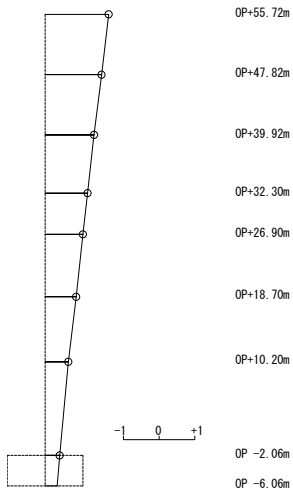
第9図 福島第一 3号機原子炉建屋 床柔モデル

第4表 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 ⁹ N/mm ² (2.62×10 ⁹ 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、振動方向に直行する壁の面積比にて分割
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	

固有周期 $T_1=0.362$ s

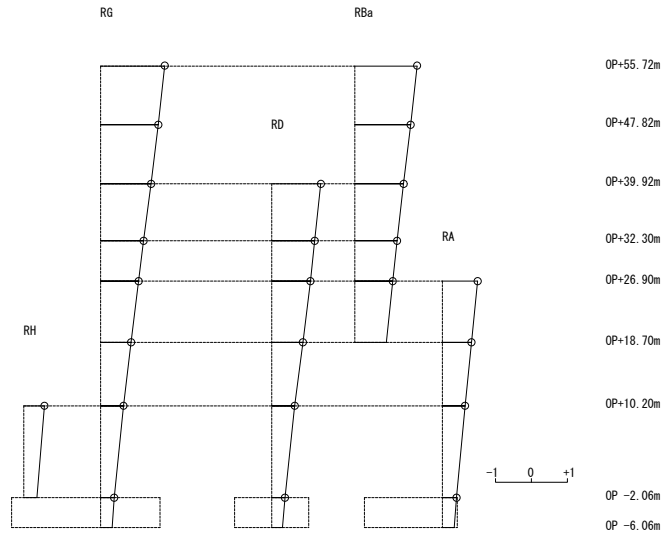
刺激係数 $\beta_1=1.780$



床剛モデル

固有周期 $T_1=0.373$ s

刺激係数 $\beta_1=1.785$

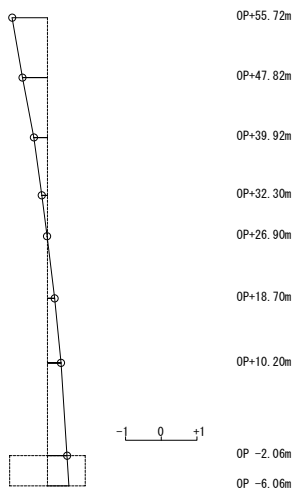


床柔モデル

1次モード

固有周期 $T_2=0.162$ s

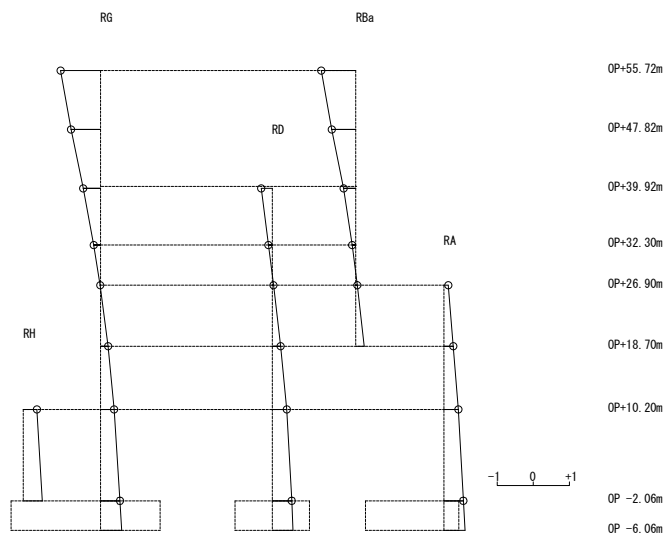
刺激係数 $\beta_2=0.993$



床剛モデル

固有周期 $T_2=0.166$ s

刺激係数 $\beta_2=1.116$



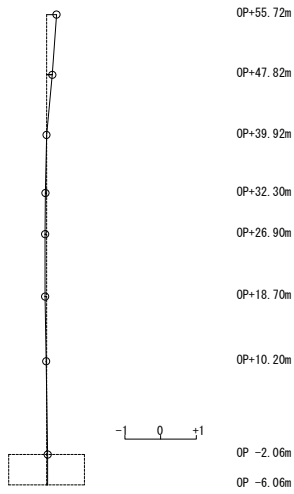
床柔モデル

2次モード

第10図(1) 主要な固有モード図の比較 (NS方向)

固有周期 $T_3=0.077\text{ s}$

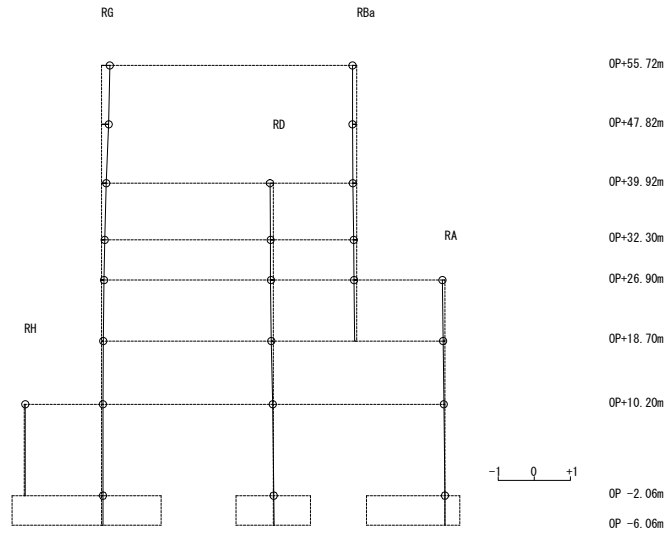
刺激係数 $\beta_3=0.283$



床剛モデル

固有周期 $T_3=0.101\text{ s}$

刺激係数 $\beta_3=0.230$

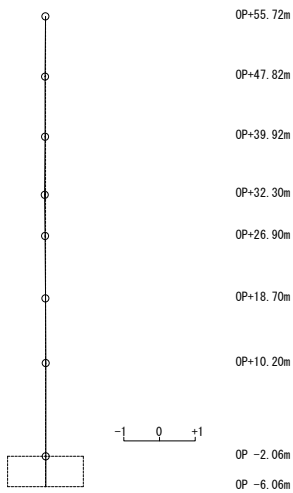


床柔モデル

3次モード

固有周期 $T_4=0.059\text{ s}$

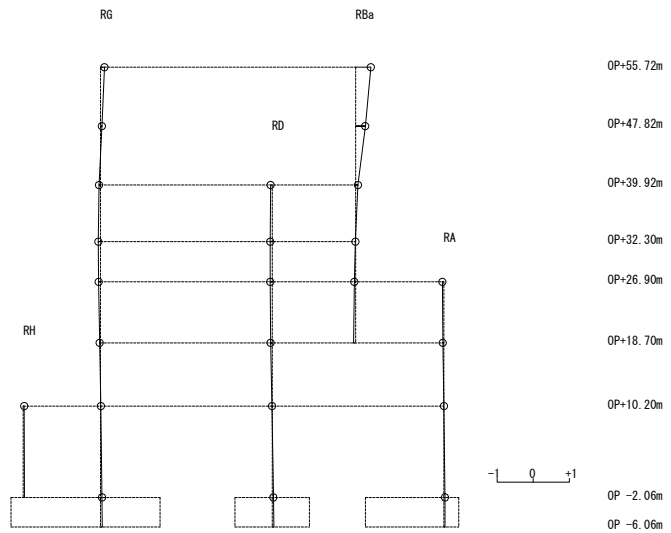
刺激係数 $\beta_4=0.017$



床剛モデル

固有周期 $T_4=0.087\text{ s}$

刺激係数 $\beta_4=0.425$



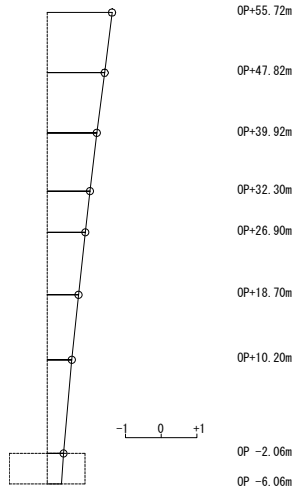
床柔モデル

4次モード

第10図(2) 主要な固有モード図の比較 (NS方向)

固有周期 $T_1=0.347\text{ s}$

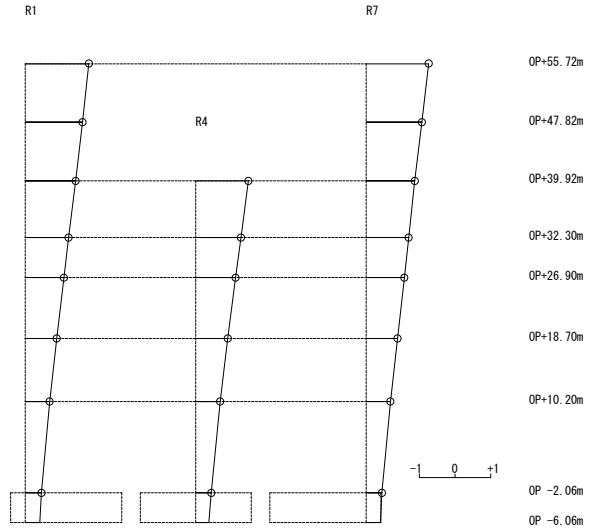
刺激係数 $\beta_1=1.813$



床剛モデル

固有周期 $T_1=0.358\text{ s}$

刺激係数 $\beta_1=1.769$

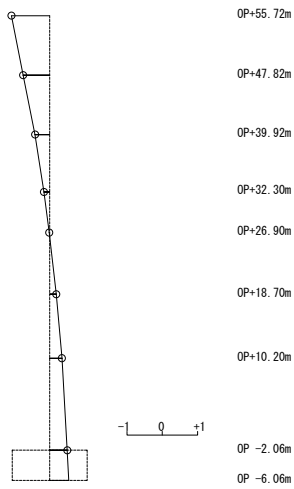


床柔モデル

1次モード

固有周期 $T_2=0.161\text{ s}$

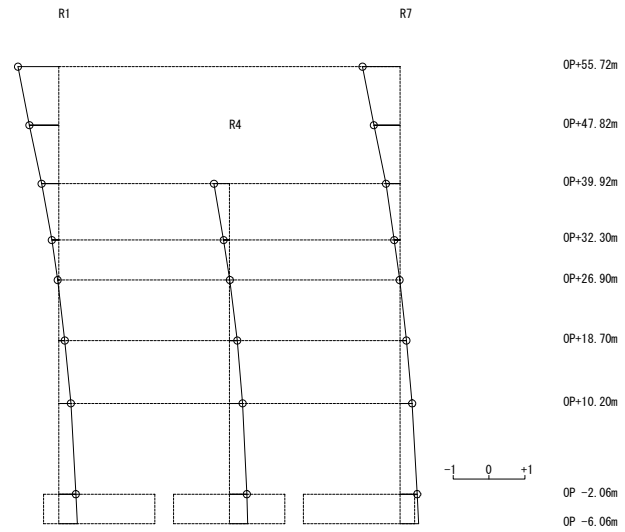
刺激係数 $\beta_2=1.080$



床剛モデル

固有周期 $T_2=0.163\text{ s}$

刺激係数 $\beta_2=1.118$



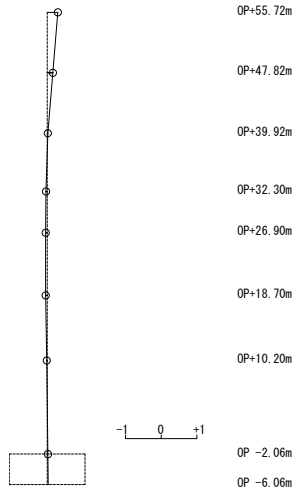
床柔モデル

2次モード

第 1 1 図 (1) 主要な固有モード図の比較 (EW 方向)

固有周期 $T_3=0.087s$

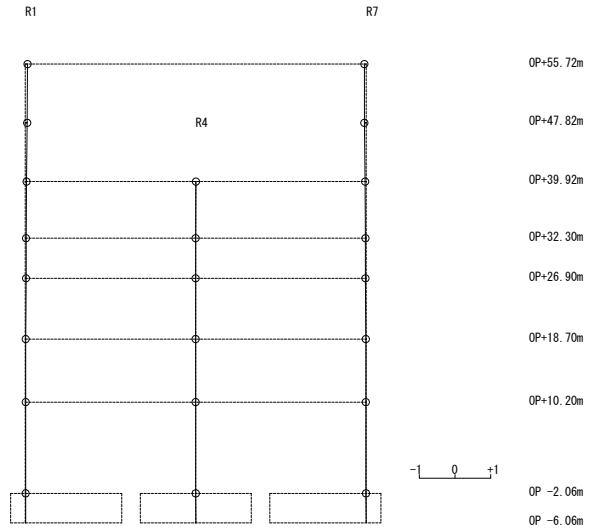
刺激係数 $\beta_3=0.299$



床剛モデル

固有周期 $T_3=0.113s$

刺激係数 $\beta_3=0.048$



床柔モデル

3次モード

固有周期 $T_4=0.064s$

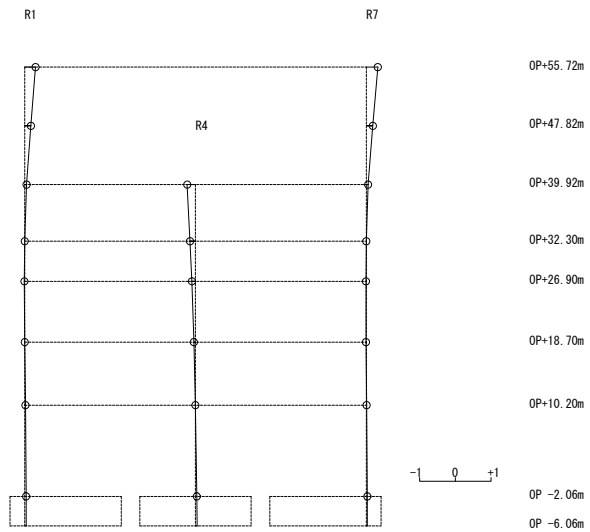
刺激係数 $\beta_4=0.031$



床剛モデル

固有周期 $T_4=0.100s$

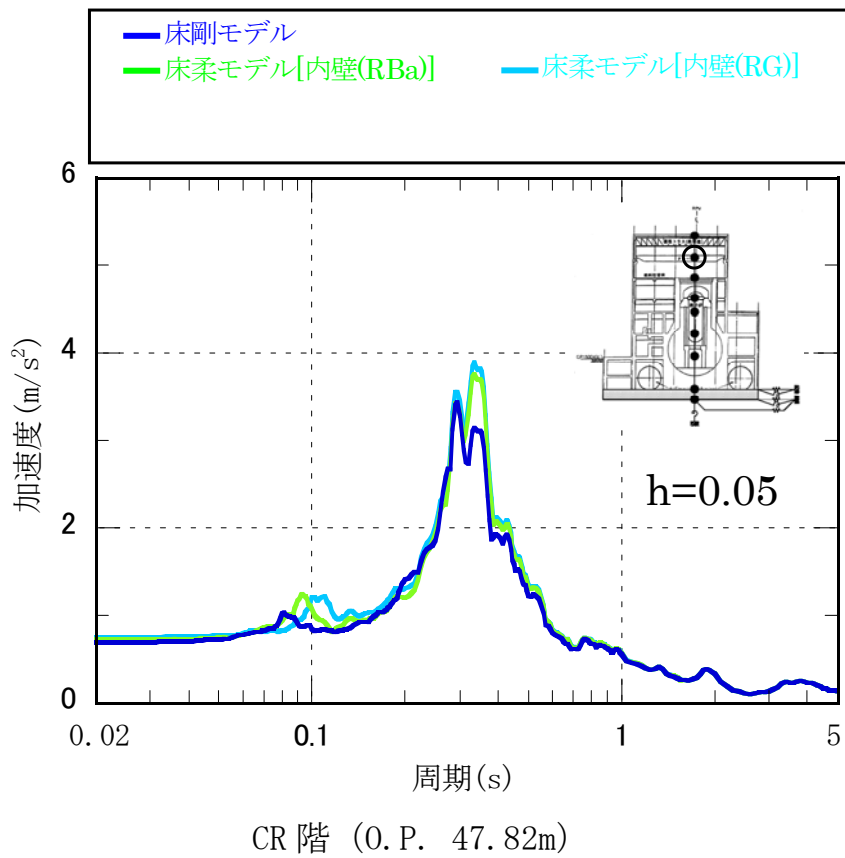
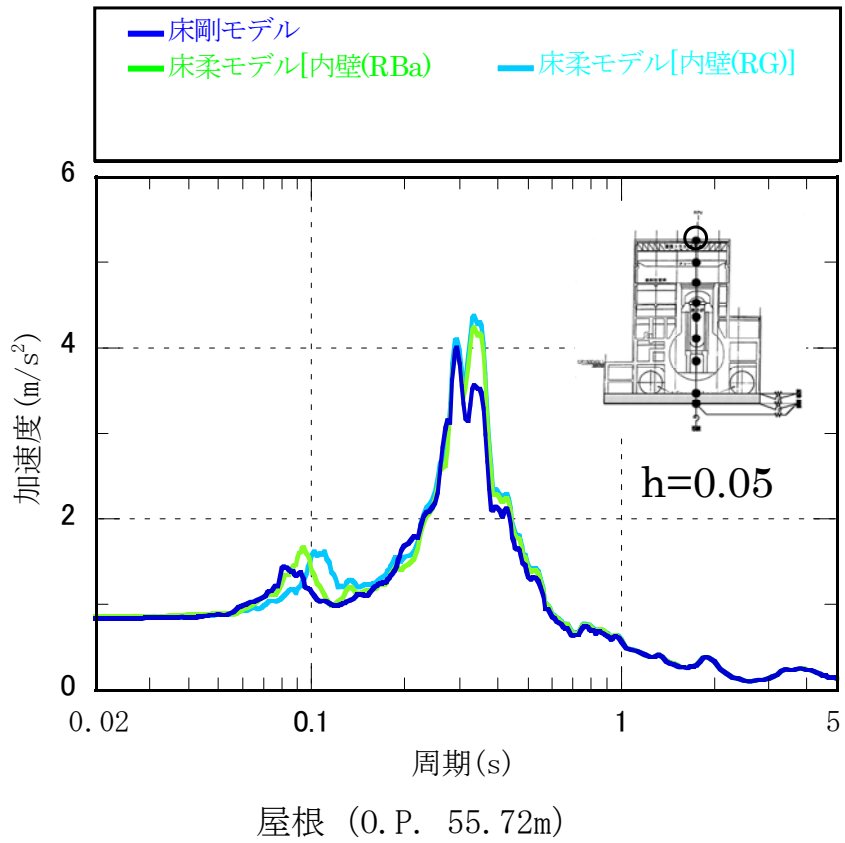
刺激係数 $\beta_4=0.318$



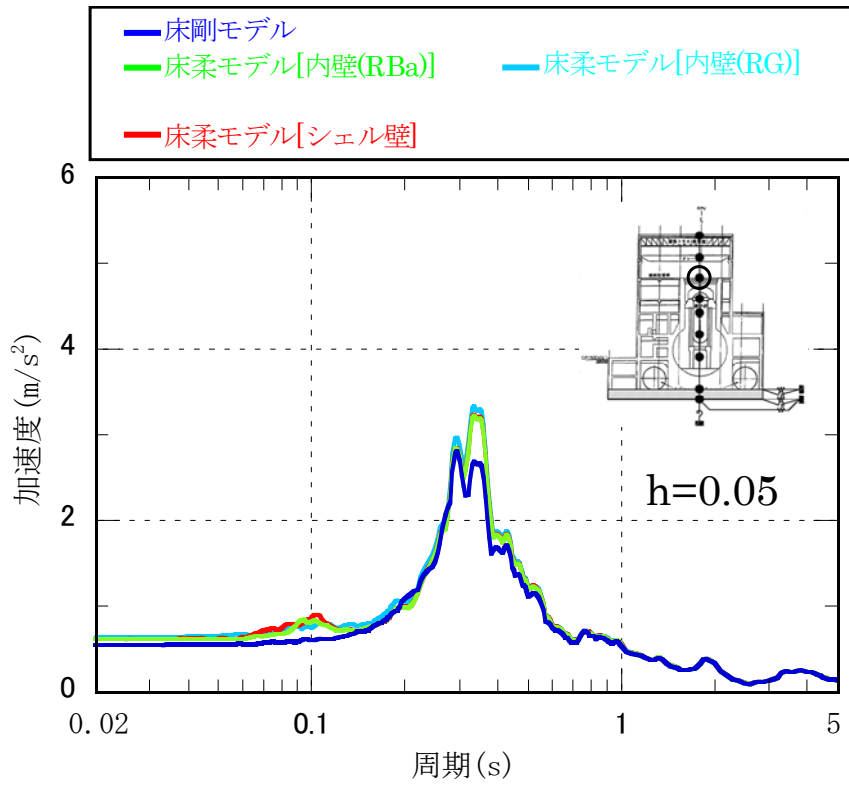
床柔モデル

4次モード

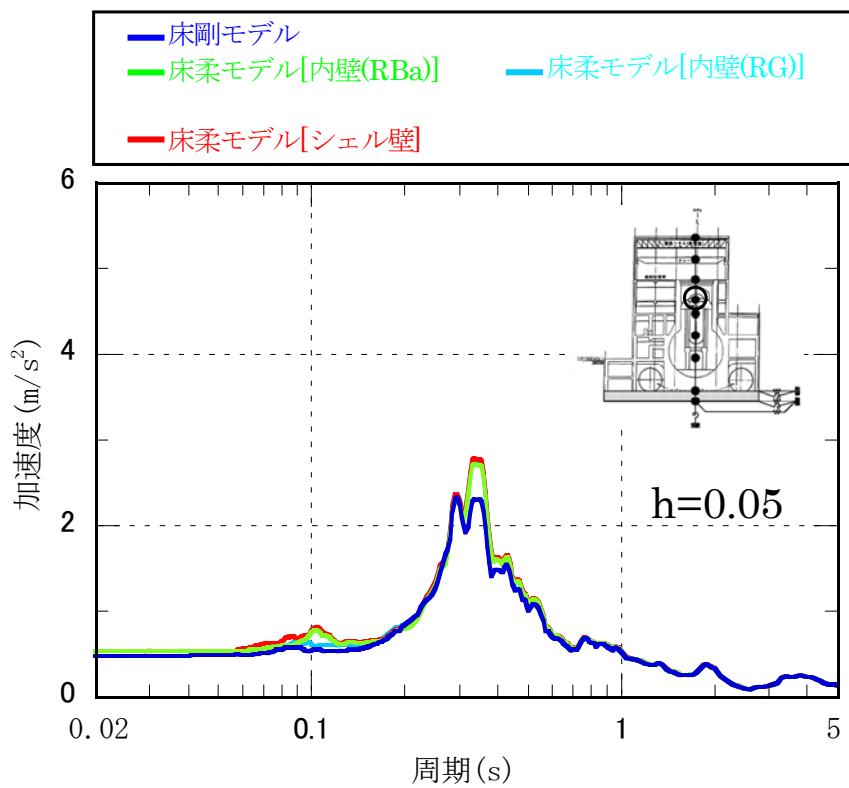
第11図(2) 主要な固有モード図の比較 (EW方向)



第 1 2 図(1) 床応答スペクトル (NS 方向)

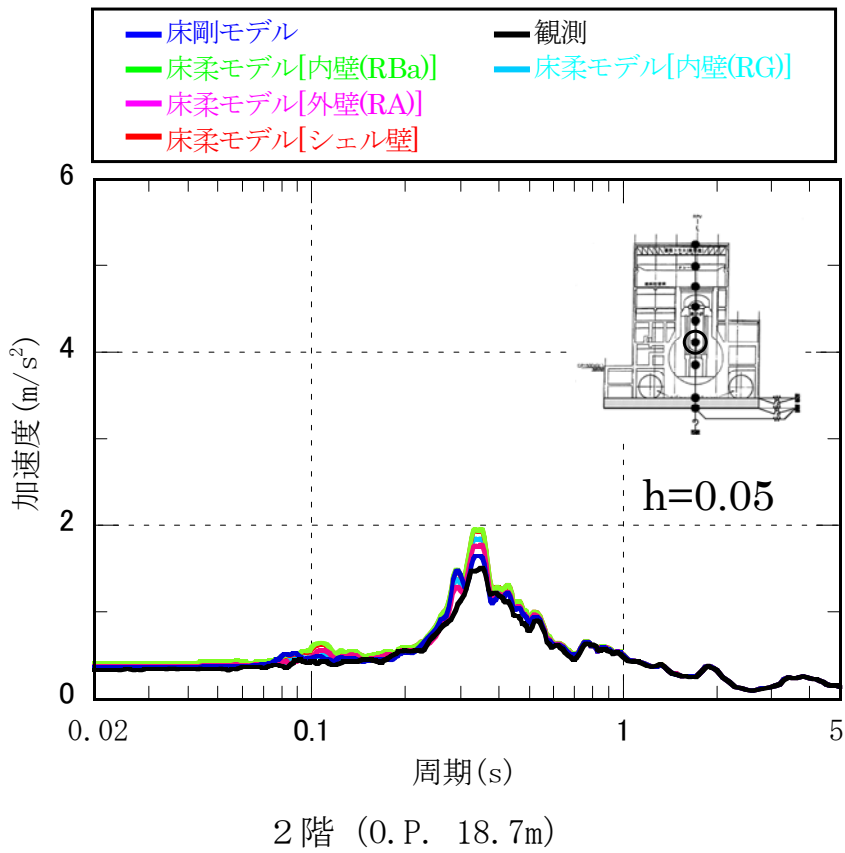
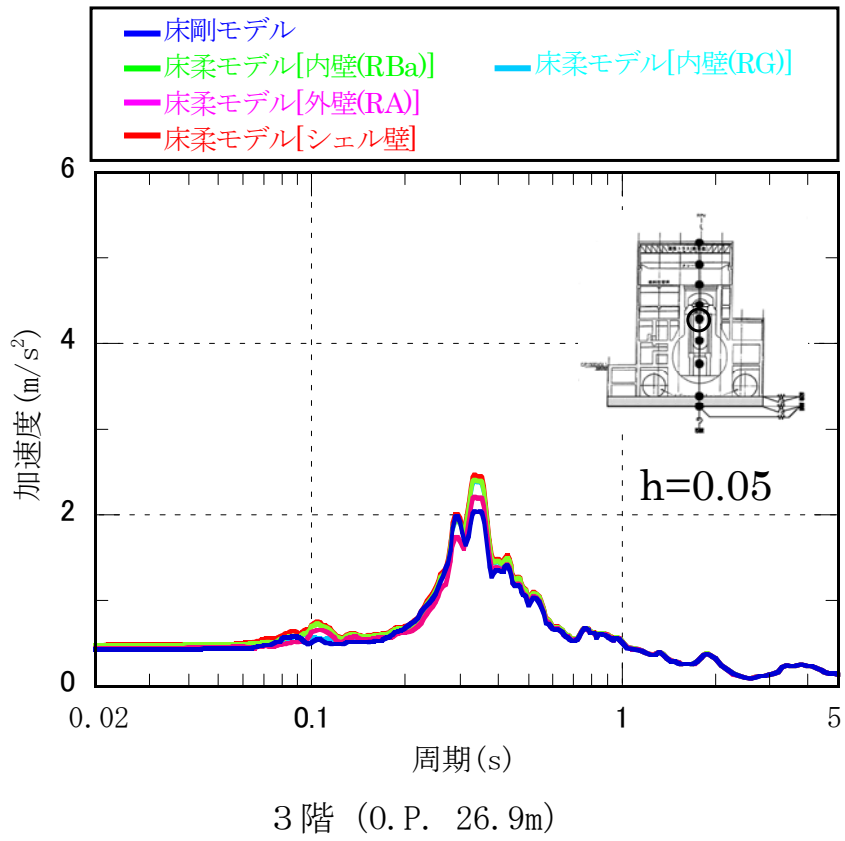


5階 (O.P. 39.92m)

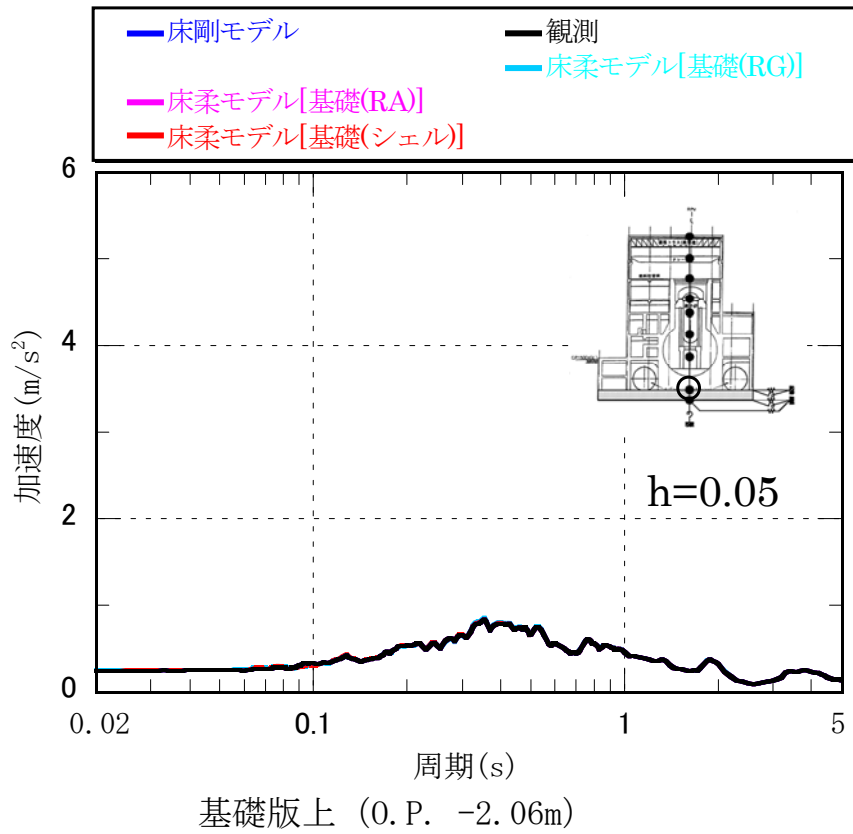
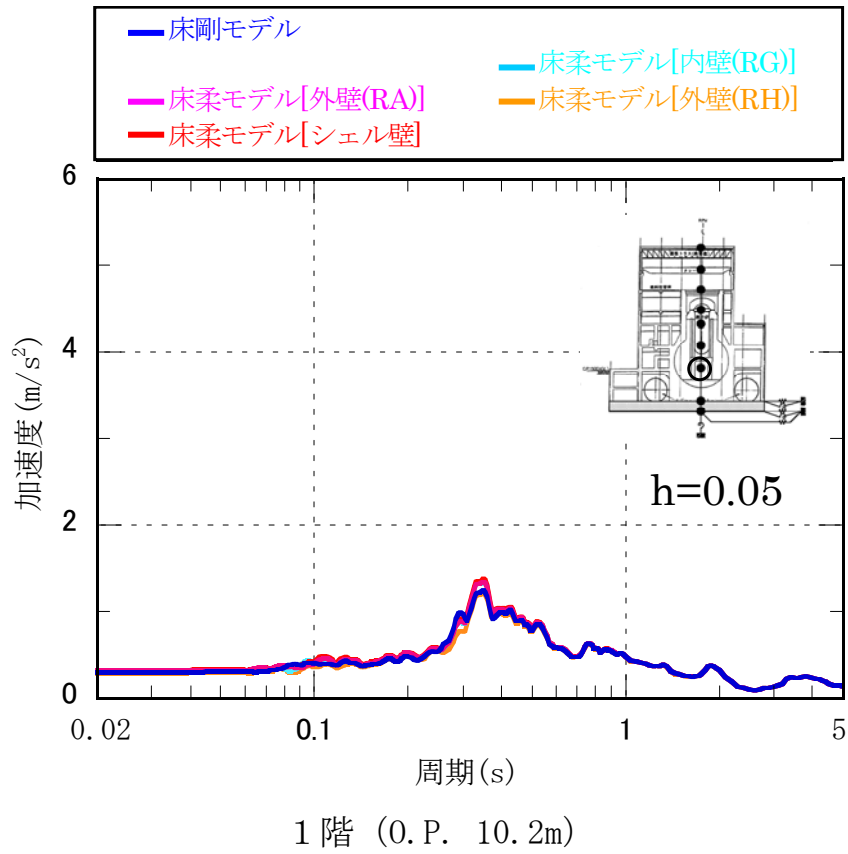


4階 (O.P. 32.3m)

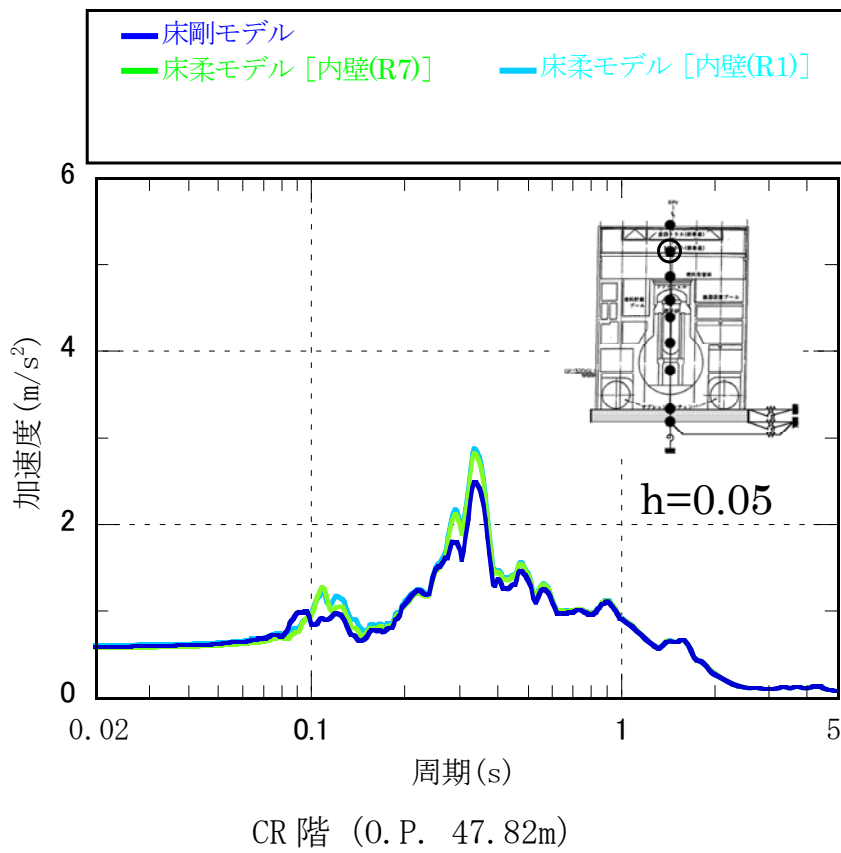
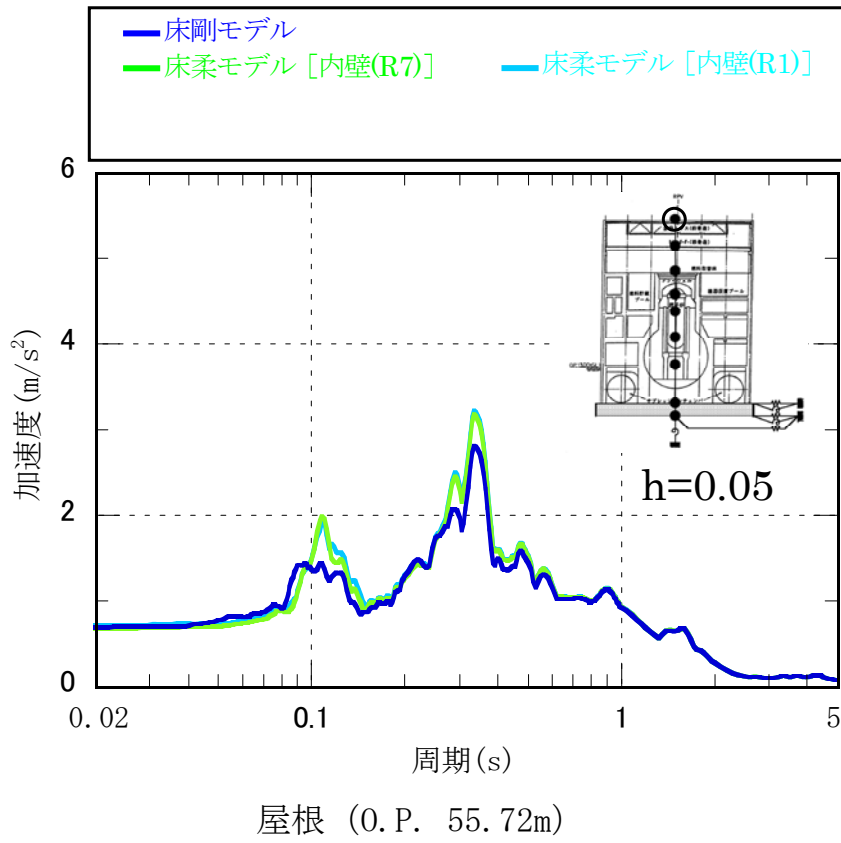
第12図(2) 床応答スペクトル (NS方向)



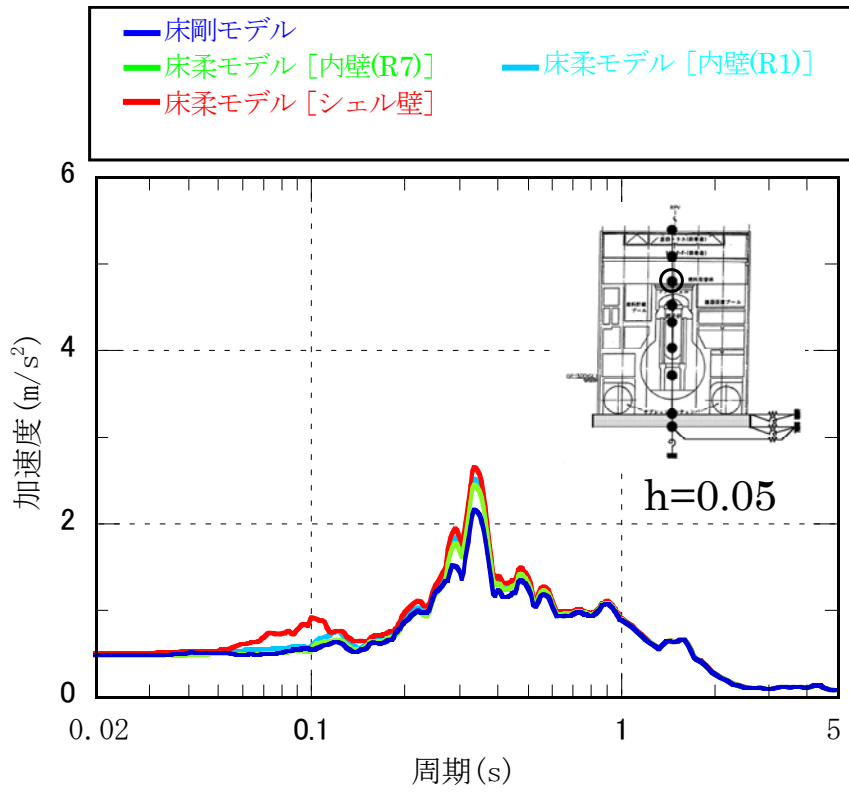
第1 2 図(3) 床応答スペクトル (NS 方向)



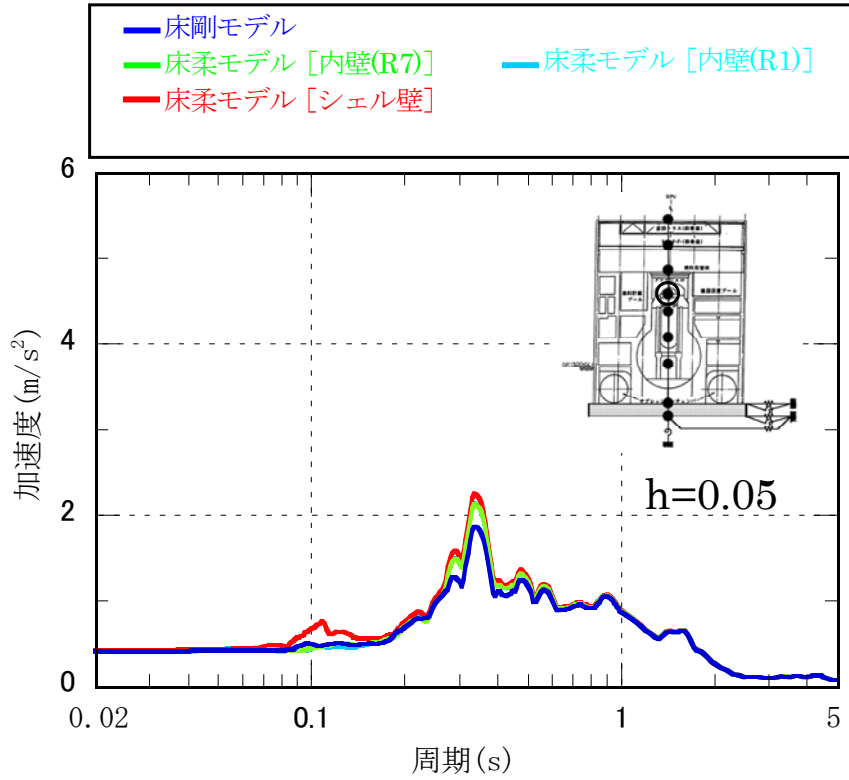
第 1 2 図(4) 床応答スペクトル (NS 方向)



第 1 3 図(1) 床応答スペクトル (EW 方向)

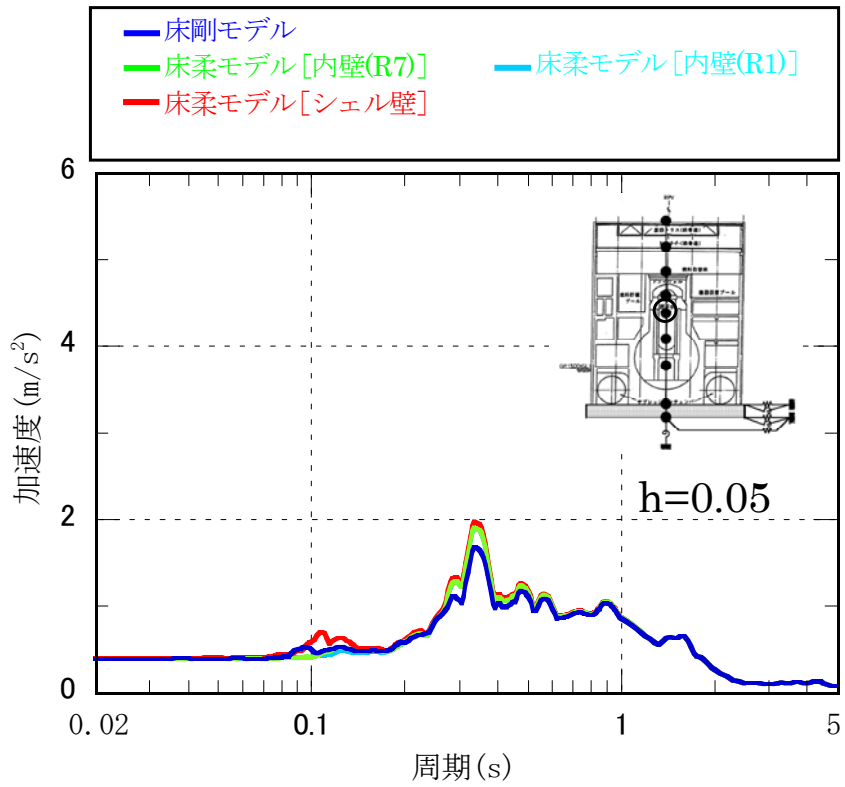


5階 (O.P. 39.92m)

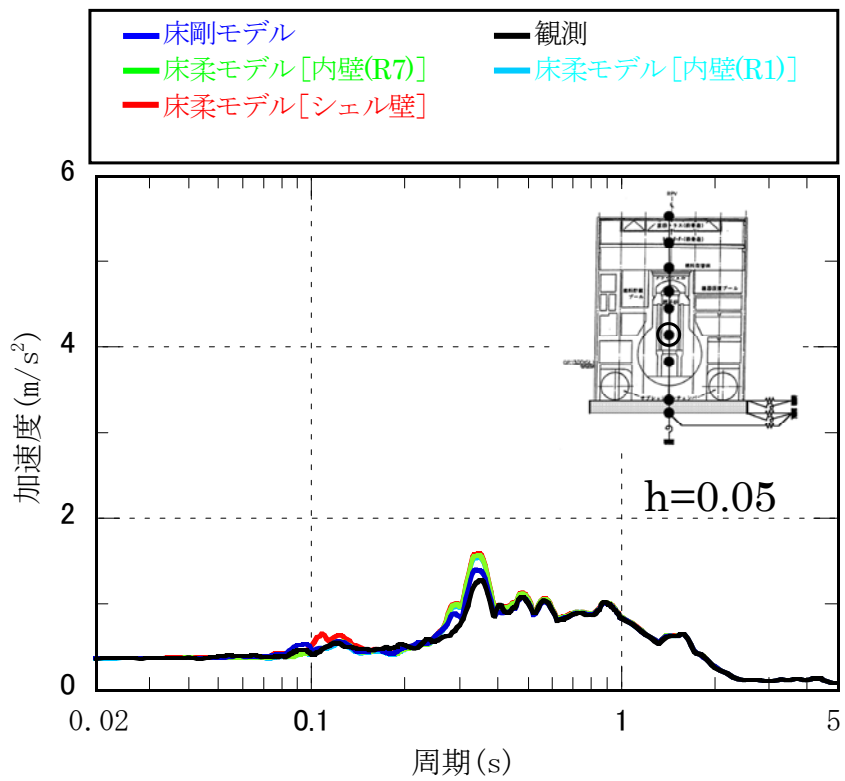


4階 (O.P. 32.3m)

第13図(2) 床応答スペクトル (EW方向)

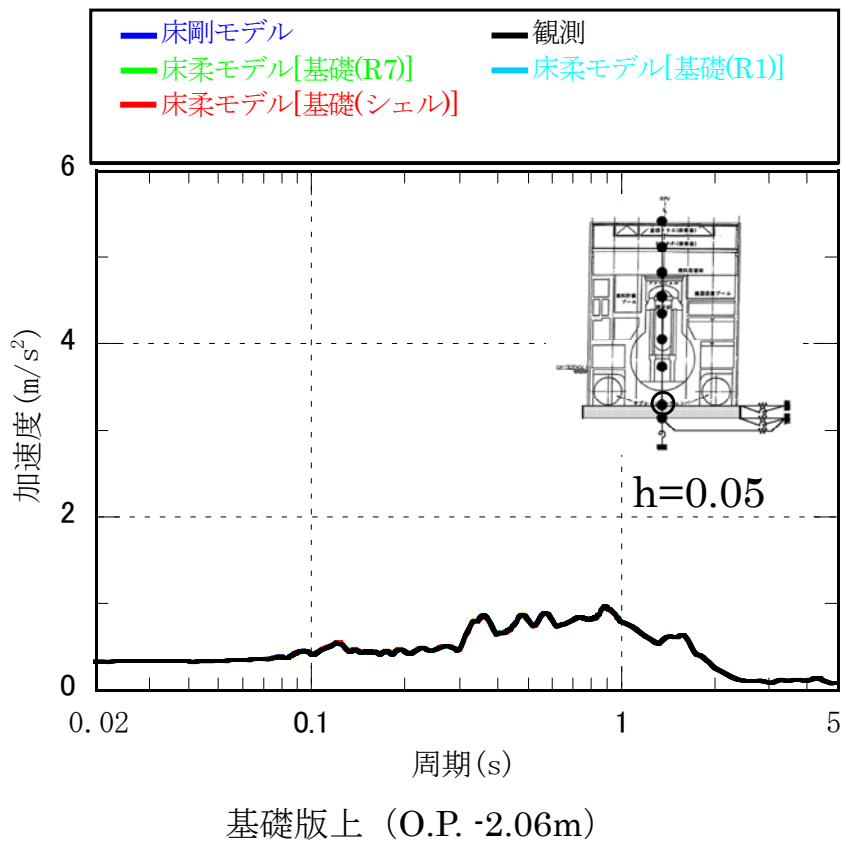
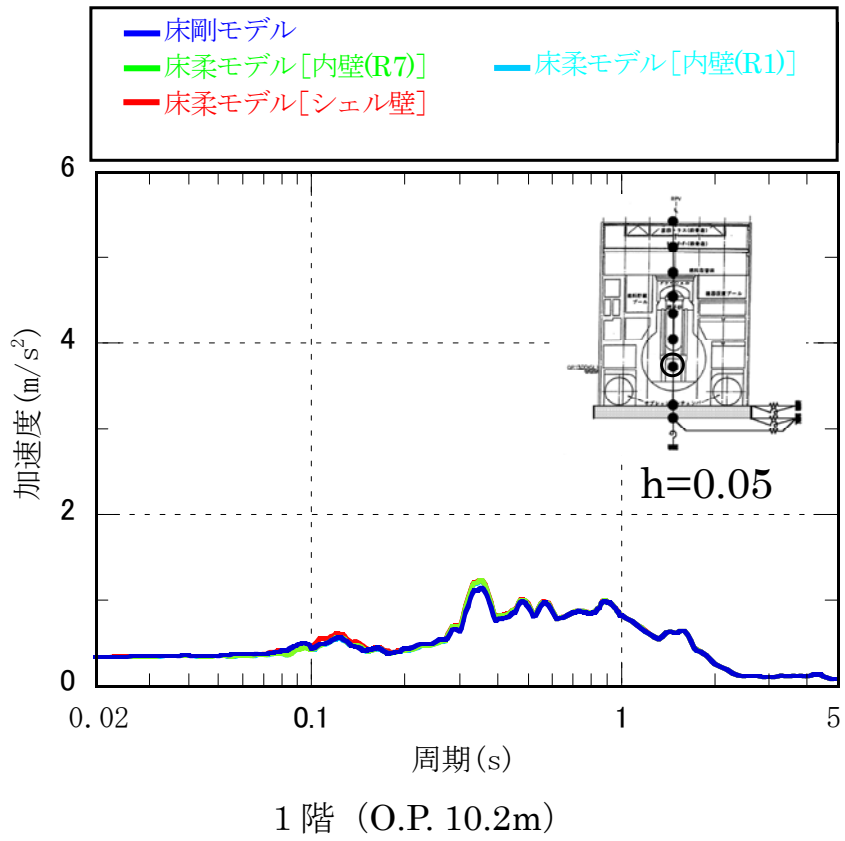


3階 (O.P. 26.9m)



2階 (O.P. 18.7m)

第 1 3 図(3) 床応答スペクトル (EW 方向)



第 1 3 図(4) 床応答スペクトル (EW 方向)