

2022年3月16日福島県沖の地震の観測記録を用いた
女川2号機原子炉建屋の地震応答解析結果について

2022年4月26日

東北電力株式会社

目 次

1. はじめに.....	1
2. 地震概要.....	2
3. 女川原子力発電所における地震観測記録.....	3
3.1 敷地地盤における観測記録.....	3
3.2 原子炉建屋における観測記録.....	6
4. 基礎版上の観測記録を用いた地震応答解析結果.....	9
4.1 地震応答解析による確認.....	9
4.2 せん断応力度による確認.....	9
5. まとめ.....	22

添付資料 3.16 地震の観測記録と 2011 年東北地方太平洋沖地震等の観測記録の比較

参考資料 3.16 地震の敷地地盤における観測記録と基準地震動 S_s の比較

1. はじめに

女川原子力発電所では、地盤における地震観測の他、建屋には保安確認用地震計並びに建屋観測用地震計を設置している。

保安確認用地震計は、地震直後に最大加速度値を表示するもので、速やかな公表および点検の際の目安に活用している。2022年3月16日福島県沖の地震（以下「3.16地震」という。）の発生により保安確認用地震計で観測された最大加速度値 367.5cm/s^2 は地震直後に速やかに公表している。建屋観測用地震計は、観測記録を地震後の評価分析に利用すること等を目的として設置しているものである。

一方、女川2号機の建屋の耐震設計について、原子炉をスクラムさせるようなある程度以上の地震が起こった場合には、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震等の影響を踏まえて設計体系に反映した事項（初期剛性低下の考慮等）について分析し、設計の妥当性を確認することとしている。

3.16地震では、上述のとおり保安確認用地震計で 367.5cm/s^2 の記録が得られており、原子炉の自動停止レベルを超える地震であったことから、自主的な保安活動の一環として、2号機原子炉建屋を代表に、耐震設計に適用した地震応答解析モデル※（以下「耐震設計モデル」という。）を用いた解析を実施し、観測記録との比較により耐震設計の妥当性を確認する。

※ 女川2号の工事計画認可申請書に記載した地震応答解析モデル

2. 地震概要

- ・ 発生日時：2022年3月16日23時36分頃
- ・ 震央地名：福島県沖
- ・ 地震諸元（気象庁）
 - 規 模：マグニチュード7.4
 - 震央位置：北緯37度41.8分，東経141度37.3分
 - 震源深さ：57 km
- ・ 女川原子力発電所との距離
 - 震央距離：78 km
 - 震源距離：98 km
- ・ 各地の震度
 - 震度6強：宮城県登米市，蔵王町，福島県相馬市，他
 - 震度6弱：宮城県石巻市，東松島市，福島県新地町，他

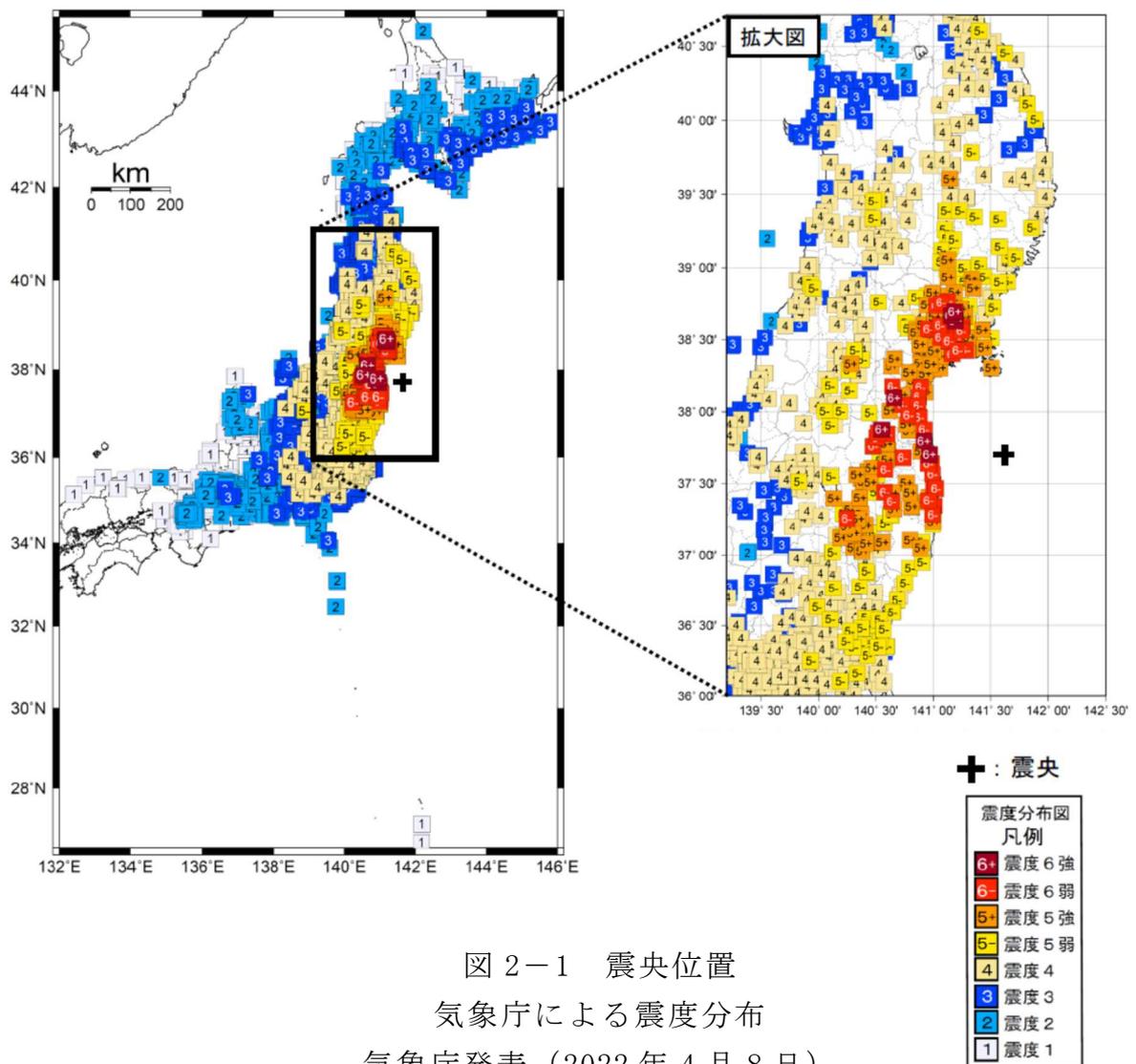


図2-1 震央位置
気象庁による震度分布
気象庁発表（2022年4月8日）

3. 女川原子力発電所における地震観測記録

女川原子力発電所では、地盤における地震観測の他、建屋には保安確認用地震計並びに建屋観測用地震計を設置している。

このうち、保安確認用地震計は、地震直後に最大加速度値を表示するもので1号機原子炉建屋内に設置している。建屋観測用地震計は、観測記録を地震後の評価分析に利用することを目的として原子炉建屋や制御建屋等の主要建屋に設置している。

3.1 敷地地盤における観測記録

女川原子力発電所では図 3-1 に示す位置で地盤の地震観測を行っている。解放基盤表面*¹の振動特性を表す自由地盤岩盤上部の地震観測点（O.P.*²-8.6m : G.L.-27.3m）で得られた地中記録の加速度波形を図 3-2 に、応答スペクトルを図 3-3 に示す。

注記*1：解放基盤表面のせん断波速度 $V_s=1500\text{m/s}$

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

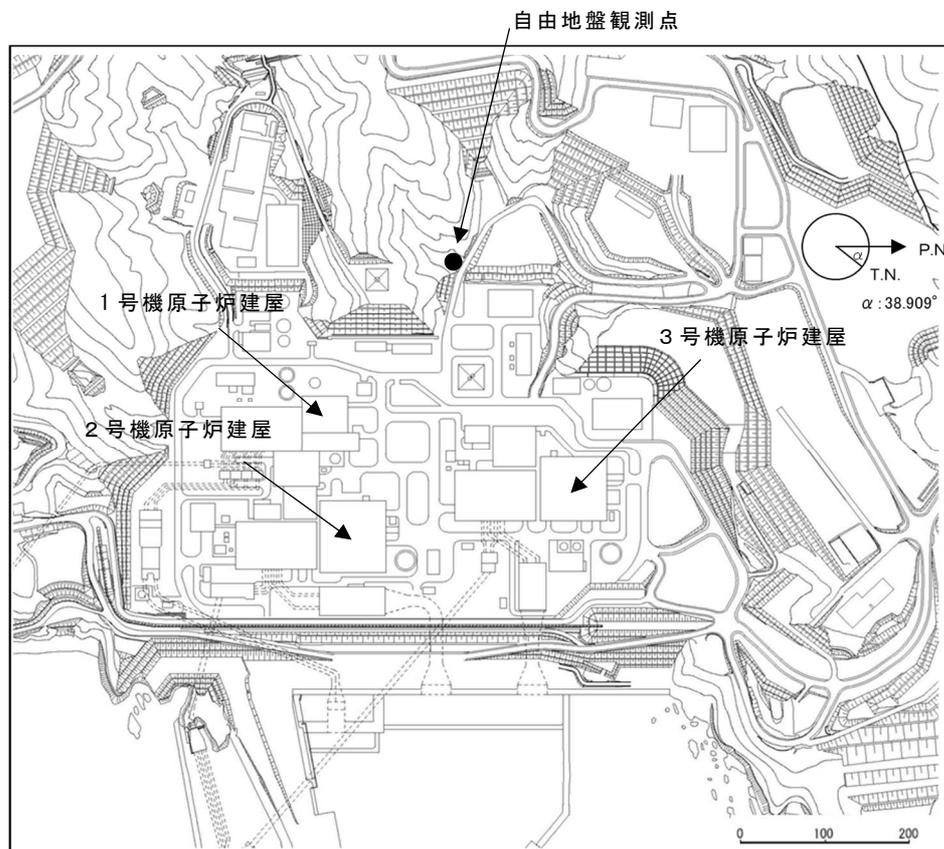
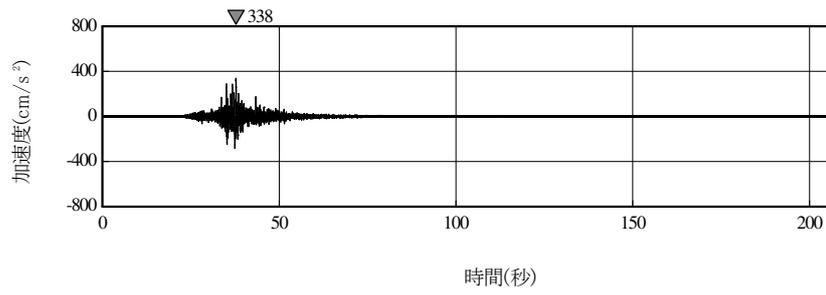
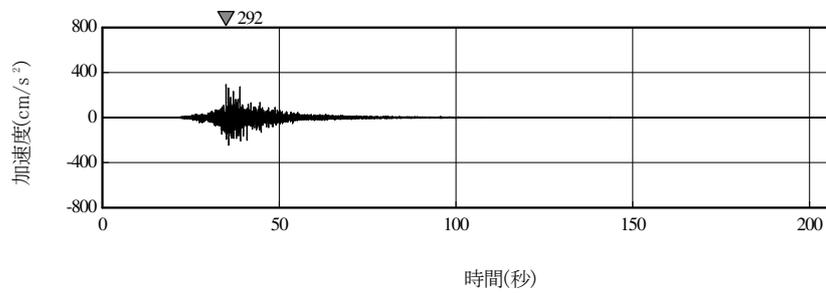


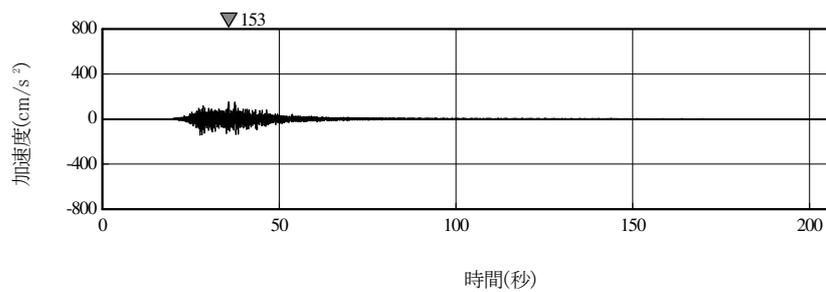
図 3-1 敷地自由地盤における地震観測点（自由地盤観測点）



NS 方向 (MAX = 338cm/s²)



EW 方向 (MAX = 292cm/s²)



UD 方向 (MAX = 153cm/s²)

図 3-2 解放基盤表面の振動特性を表す自由地盤岩盤上部の地震観測点 (O.P. -8.6m) の観測記録の加速度波形 (地中波, プラントノース (PN) に方位補正)

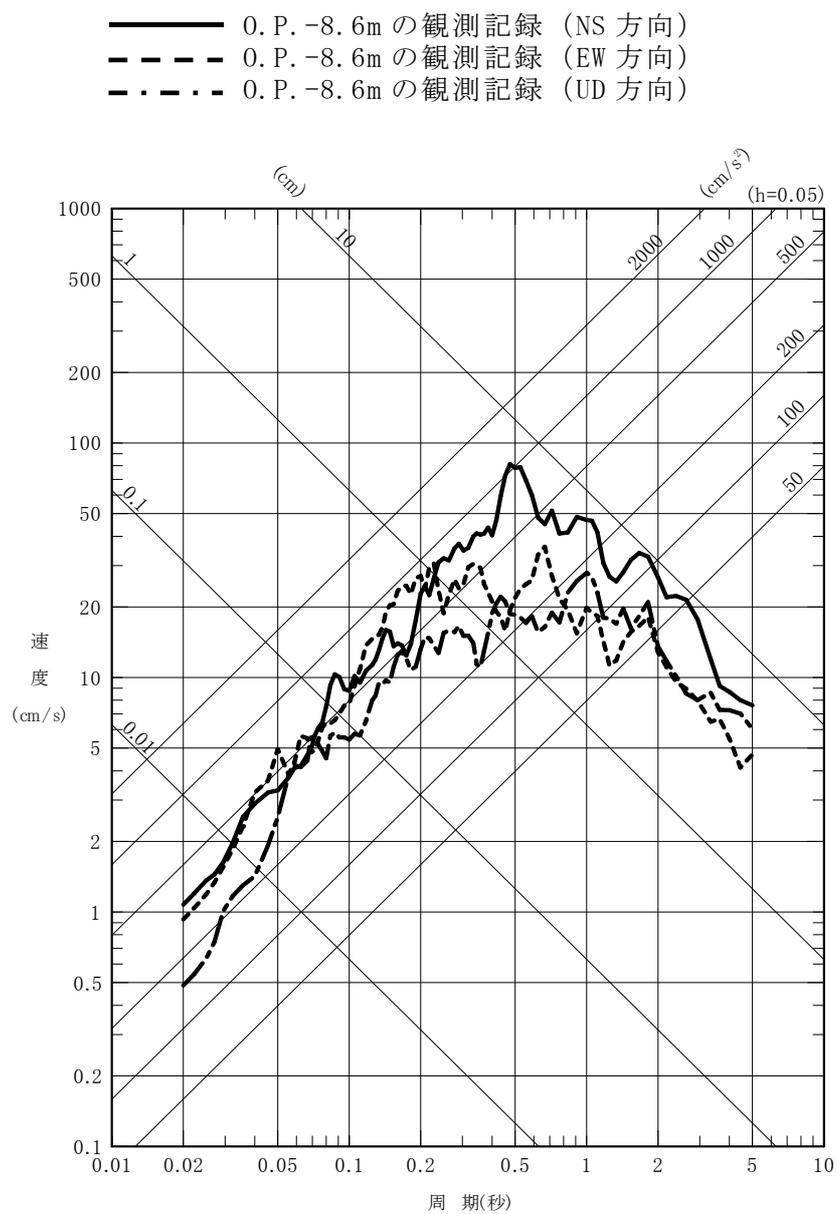


図 3-3 解放基盤表面の振動特性を表す自由地盤岩盤上部の地震観測点
 (O. P. -8. 6m) の観測記録の応答スペクトル
 (地中記録, プラントノース (PN) に方位補正)

3.2 原子炉建屋における観測記録

原子炉建屋には、保安確認用地震計および建屋観測用地震計を設置している。

保安確認用地震計は、1号機原子炉建屋基礎版上（地下2階）に2箇所設置している。各方向、各位置での最大加速度値を表3-1に示す。

一方、建屋観測用地震計は、原子炉建屋の地震時の基本的な振動性状を把握する目的で設置しているものと、基礎版等の部分的振動特性を解明し、設計の高度化に資する目的で設置しているものがある。2号機原子炉建屋の地震計の設置箇所は18箇所である。2号機原子炉建屋の観測記録の最大加速度値を表3-2に、地震計の位置を図3-4に示す。

表3-1 保安確認用地震計の最大加速度値

(単位：cm/s²)

設置位置		NS 方向	EW 方向	UD 方向
1号機原子炉建屋 基礎版上	トールラス室	367.5	279.9	202.0
	CS(B)室	352.4	302.6	254.0

表 3-2 2号機原子炉建屋 建屋観測用地震計の最大加速度値

観測点	高さ O. P. (m)	成分	最大加速度値 (cm/s ²)
屋上	O. P. +50.67m	NS	1440
		EW	1697
		UD	855
地上3階	O. P. +33.2m	NS	1081
		EW	748
		UD	529
地上3階 西	O. P. +33.2m	NS	916
		UD	466
地上3階 北	O. P. +33.2m	EW	766
		UD	414
地上3階 東	O. P. +33.2m	NS	832
		UD	445
地上2階	O. P. +22.5m	NS	765
		EW	571
		UD	467
地上1階	O. P. +15.0m	NS	551
		EW	468
		UD	281
地下1階	O. P. +6.0m	NS	485
		EW	338
		UD	225
地下2階	O. P. -0.8m	NS	398
		EW	288
		UD	203
基礎版上端 北	O. P. -8.1m	EW	285
		UD	267
基礎版上端 東	O. P. -8.1m	NS	407
		UD	197
基礎版上端 南	O. P. -8.1m	EW	238
		UD	250
基礎版上端 西	O. P. -8.1m	NS	394
		UD	236
基礎版上端 北内	O. P. -8.1m	UD	248
基礎版上端 東内	O. P. -8.1m	UD	234
基礎版上端 南内	O. P. -8.1m	UD	222
基礎版上端 西内	O. P. -8.1m	UD	209
基礎版上端 西外	O. P. -8.1m	NS	353
		EW	229
		UD	190

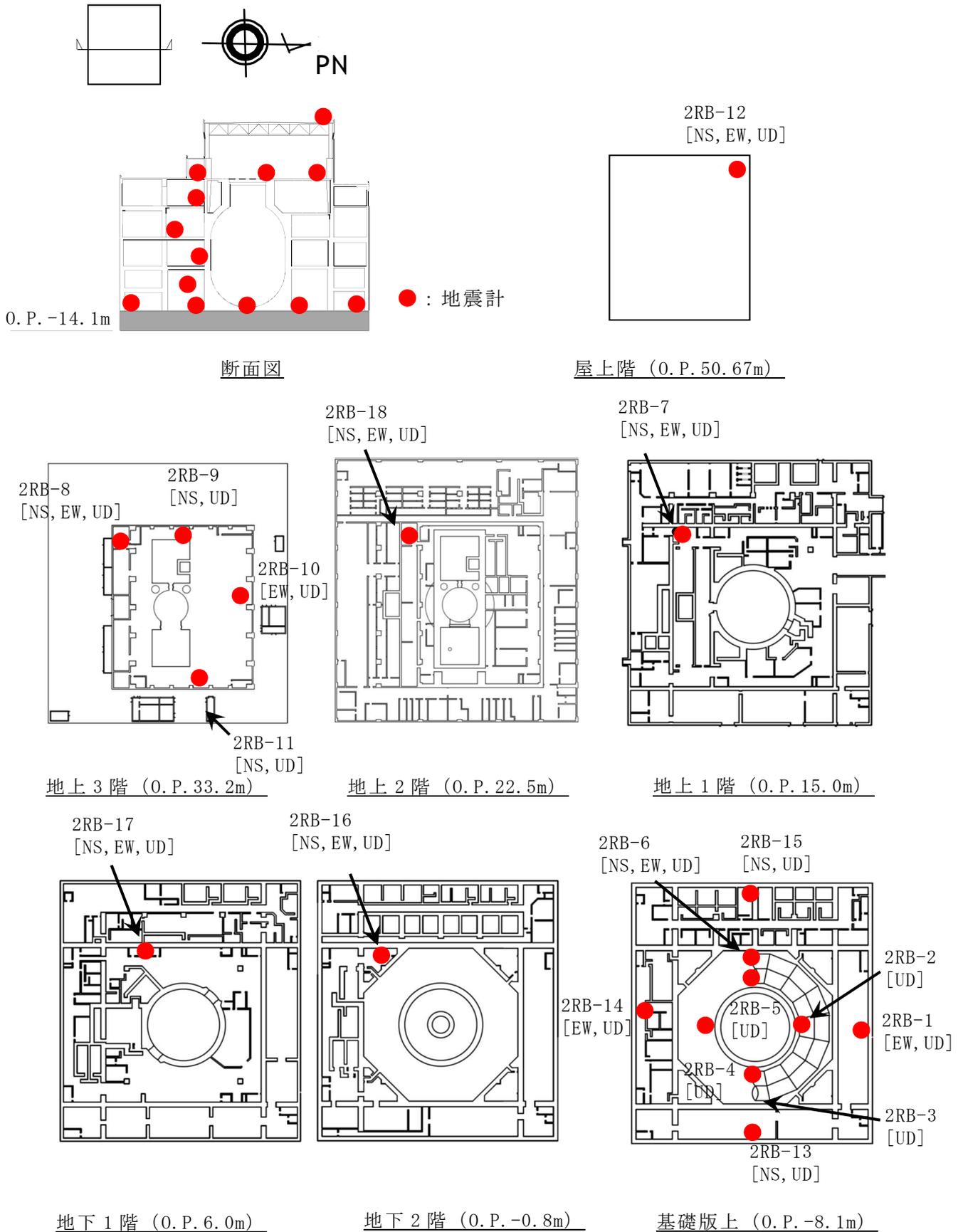


図 3-4 2号機原子炉建屋 地震計配置図 (建屋観測用地震計)

4. 基礎版上の観測記録を用いた地震応答解析結果

平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等の影響を踏まえて設計体系に反映した事項（初期剛性低下の考慮等）について分析し、耐震設計の妥当性を確認する観点から、2 号機原子炉建屋について、基礎版上の観測記録を用いた地震応答解析を実施し観測記録との比較結果を確認した。また、建屋の健全性を確認する観点から最大応答せん断力を確認した。

4.1 地震応答解析による確認

建屋解析モデルは耐震設計モデルを用いる。入力地震動は、建屋解析モデルを線形モデルとし、基礎版上の観測記録を基礎版上端に入力する周波数応答解析により建屋基礎下端に取り付く地盤ばね外での入力波を算定して求める。地震応答解析は、建屋解析モデルを非線形モデルとし、算定した入力地震動を建屋基礎下端に取り付く地盤ばねを介して直接入力する時刻歴応答解析により行う。地震応答解析モデルの諸元を表 4-1 に、地震応答解析の概要を図 4-1 に、地震応答解析モデル及び地震応答解析モデルの物性値を図 4-2、表 4-2 及び図 4-3 に示す。

解析結果について、最大加速度を観測記録と比較して図 4-4 に、加速度応答スペクトルを観測記録と比較して図 4-5 に示す。解析結果は、初期剛性低下を考慮した耐震設計モデルで、観測記録の最大応答加速度の大きさや応答スペクトルのピーク周期を概ね再現していることを確認した。

4.2 せん断応力度による確認

地震応答解析により得られた各階のせん断応力度を解析モデルの軸ごとに、設計配筋量のみで負担できる短期許容せん断応力度（ $p_w \cdot \sigma_y^*$ ）と併せて図 4-6 に示す。

各階のせん断応力度は、設計配筋量のみで負担できる短期許容せん断応力度に対する比率が最大でも NS 方向で 0.57、EW 方向で 0.70 であり、十分に下回っていることを確認した。

注記*： p_w ：耐震壁の設計鉄筋比

（タテ・ヨコ筋のうち鉄筋量の少ない方による値で、上限を 1.2%とする。）

σ_y ：鉄筋の短期許容応力度（SD345：345N/mm²）

表 4-1 地震応答解析モデルの諸元

項目		地震応答解析	入力地震動の算定
応答計算法		時刻歴応答解析	周波数応答解析
入力地震動		入力地震動の算定（右欄）で求めた基礎底面ばね外における入力波 2E	基礎版上端観測記録
入力規定位置		基礎底面ばね外	基礎上端
剛性評価	コンクリート強度	耐震設計モデル（表 4-2 参照）	同左
	ヤング係数	耐震設計モデル（表 4-2 参照）	同左
	考慮範囲	耐震壁	同左
減衰定数	鉄筋 コンクリート	5% (歪エネルギー比例型)	5% (複素減衰：一定減衰)
解析モデル	建屋-地盤相互作用	スウェイ・ロッキングモデル	同左
	建屋モデル	質点系多軸床柔モデル	同左
	地盤ばね	JEAG による近似法	JEAG による近似法と等価な複素ばね
解析手法		非線形解析	線形解析

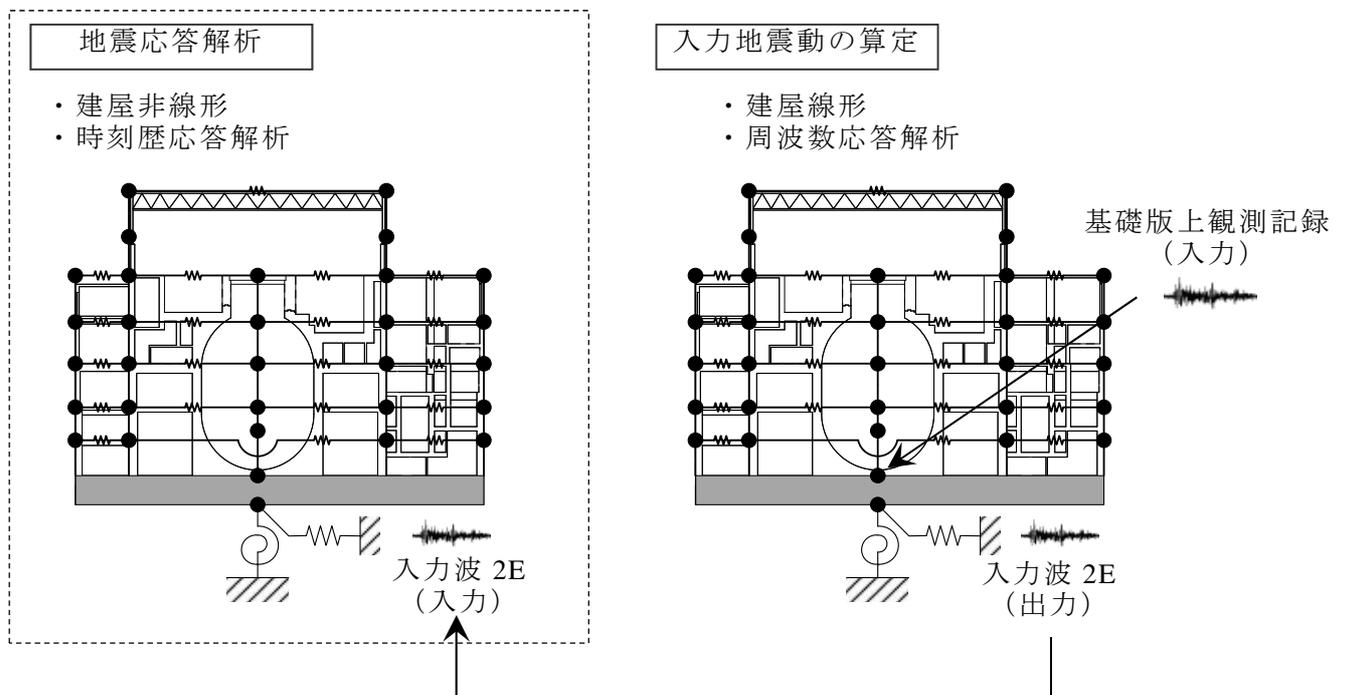


図 4-1 基礎版上の観測記録を用いた地震応答解析の概要

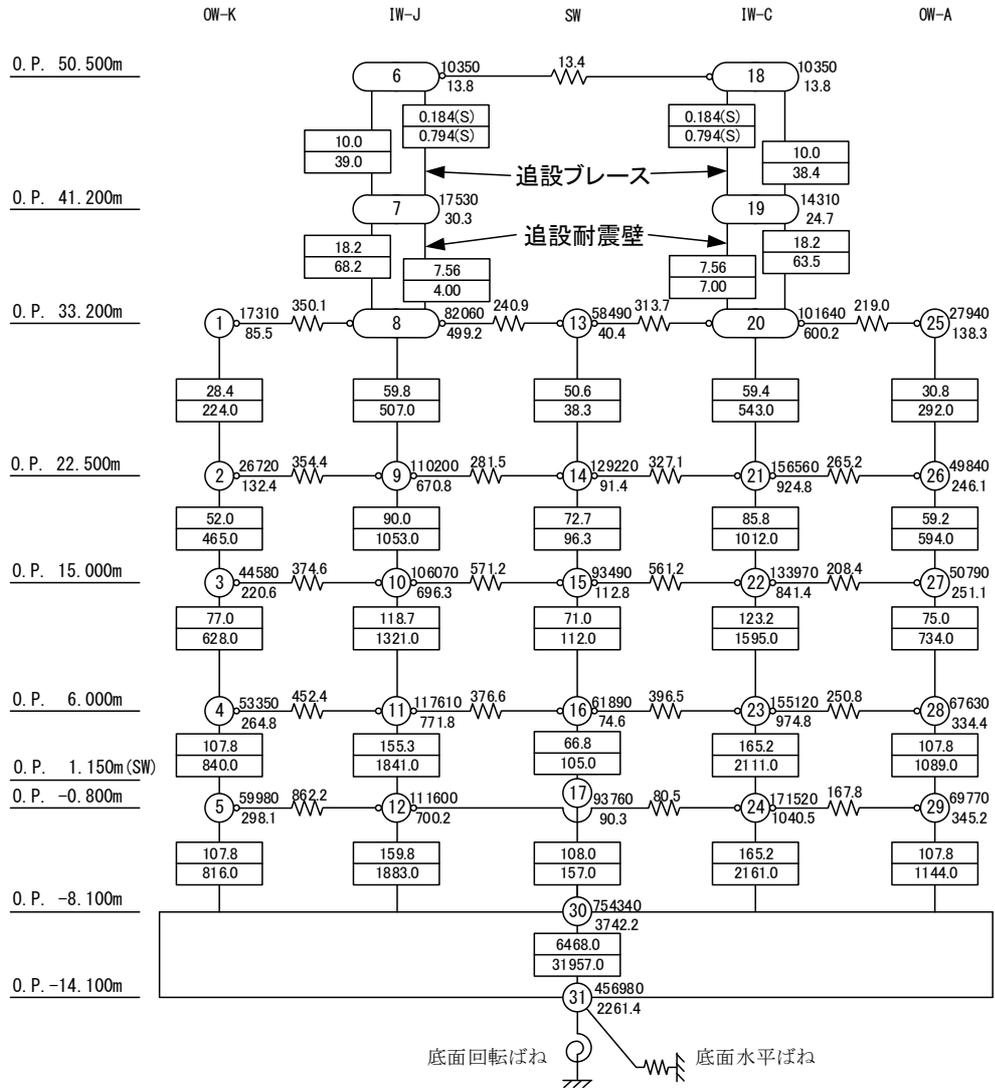
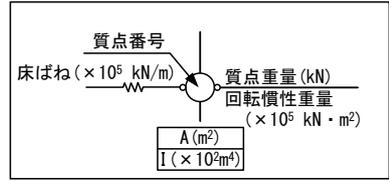
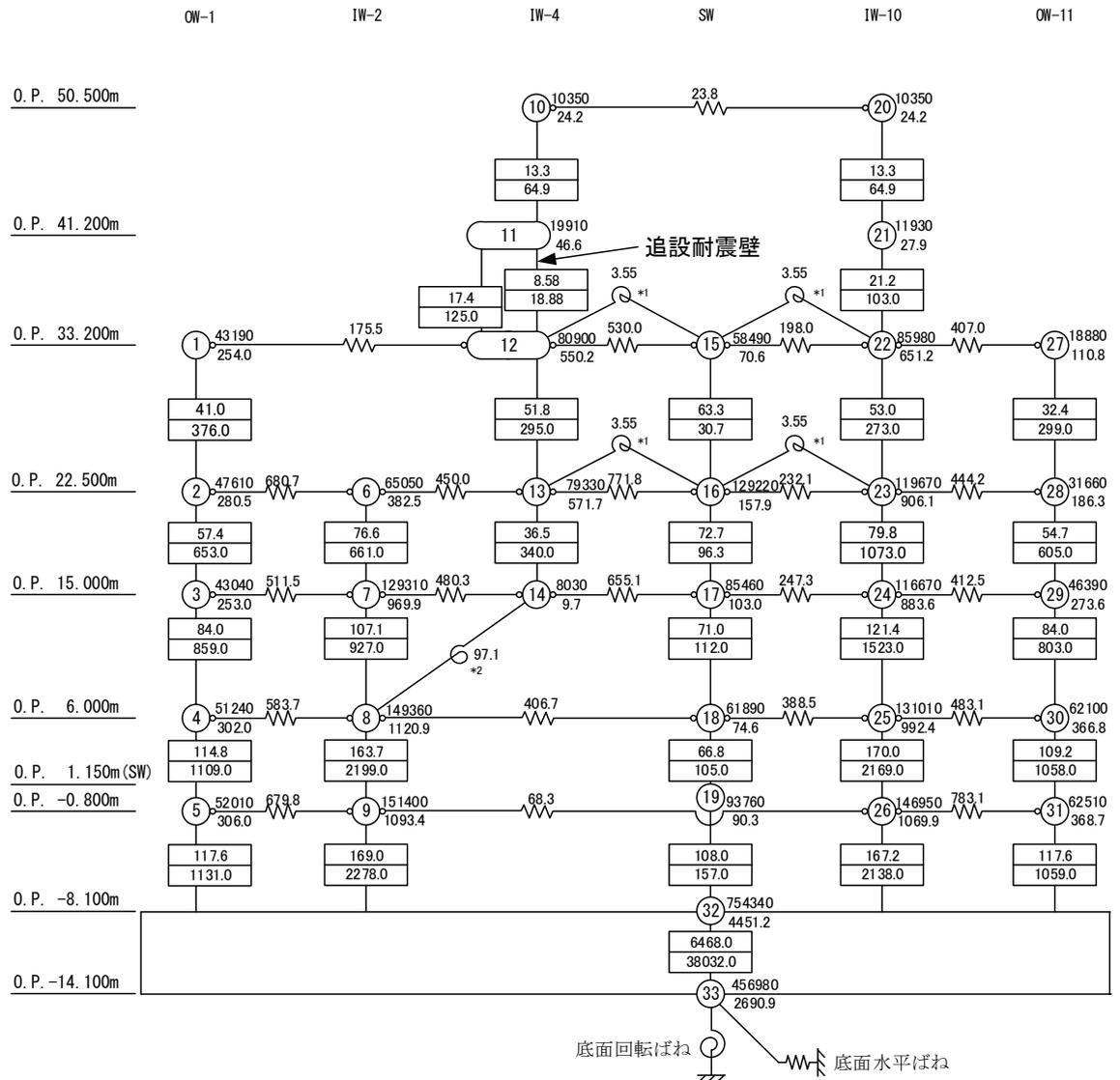
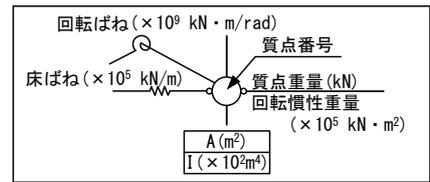


図 4-2(1) 2号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (NS 方向)



注記*1： プール壁の回転ばね

*2： 内部ボックス壁の軸抵抗を考慮した回転ばね

図 4-2(2) 2号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (EW 方向)

表 4-2 2号機原子炉建屋 地震応答解析モデルの物性値

材 料		方向	初期剛性 補正係数*	ヤング係数 E (N/mm ²)	せん断 弾性係数 G (N/mm ²)	減衰 定数 h (%)
コン ク リ ー ト	オペフロ 上部	NS	0.3	7.94×10^3	3.41×10^3	5
		EW	0.5	13.24×10^3	5.69×10^3	5
	オペフロ 下部	NS	0.75	19.86×10^3	8.53×10^3	5
		EW	0.80	21.18×10^3	9.10×10^3	5

注記*：初期剛性補正係数は、鉄筋コンクリート壁の設計基準強度に基づく初期剛性に対する係数。なお、追設耐震壁については補正を行わない。

設計基準強度に基づく初期剛性 ヤング係数 $2.65 \times 10^4 \text{N/mm}^2$
 せん断弾性係数 $1.14 \times 10^4 \text{N/mm}^2$

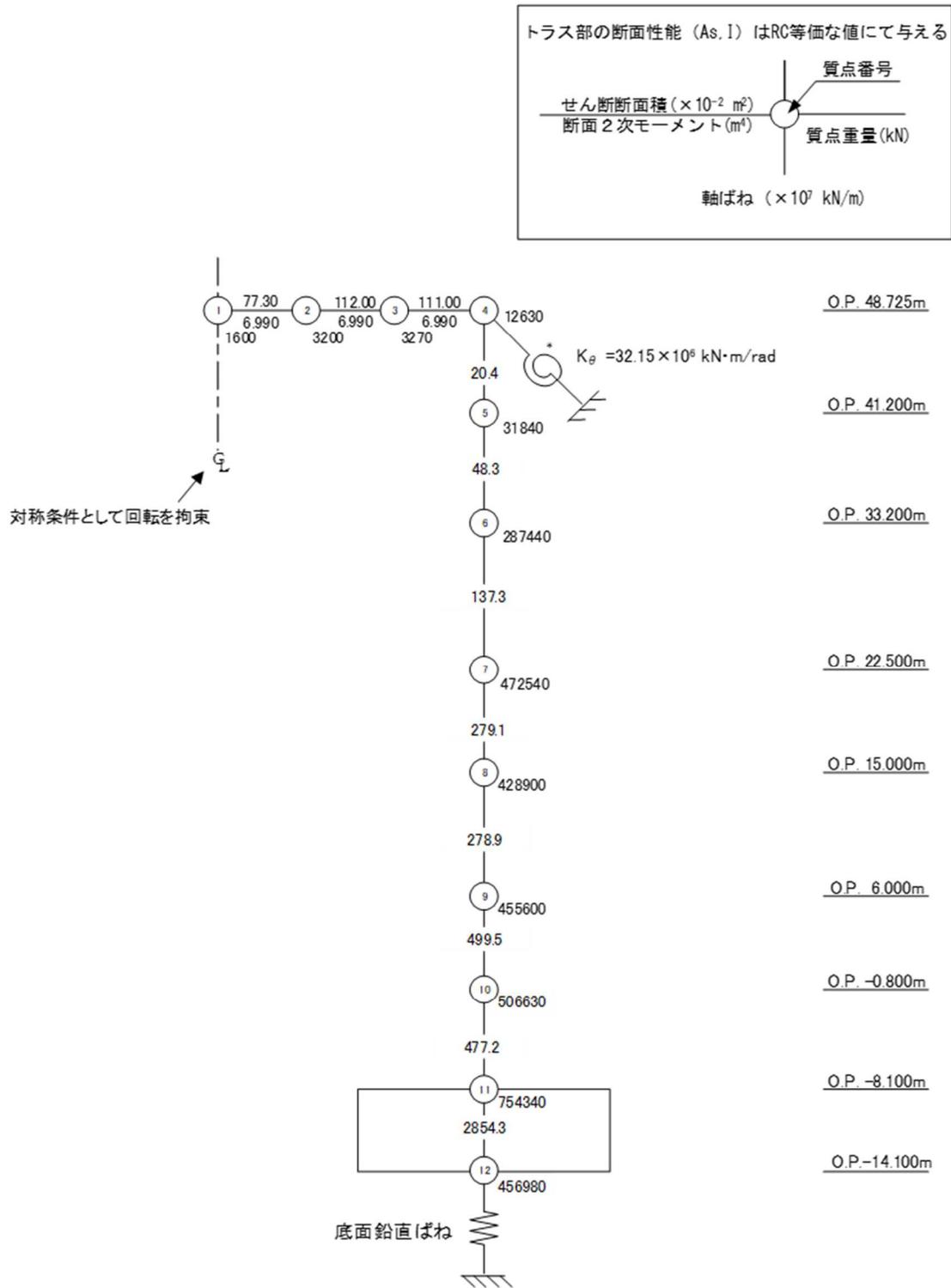
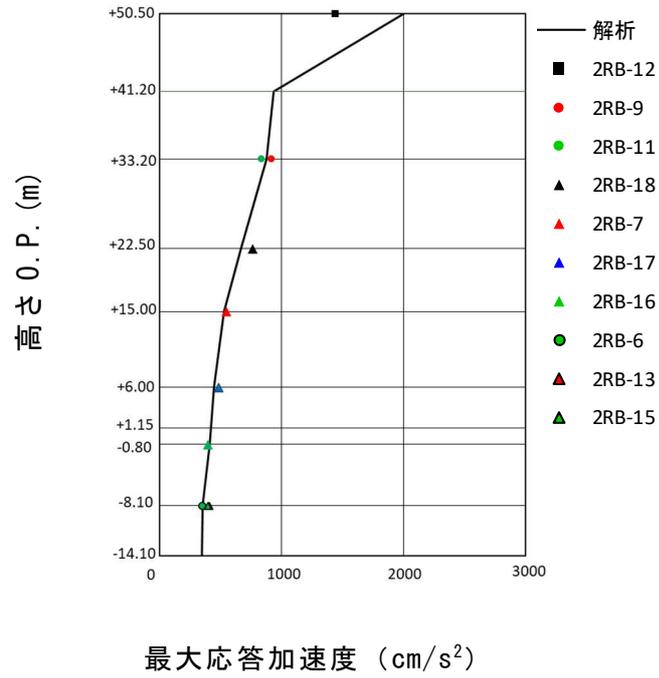
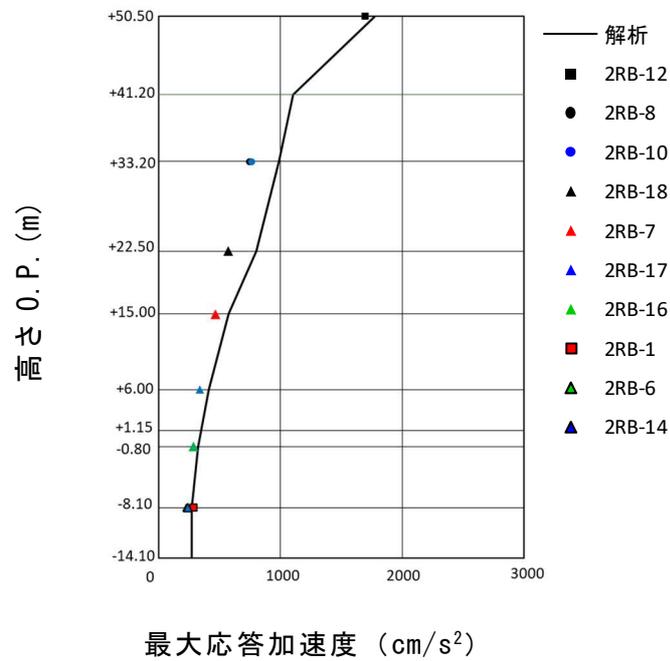


図 4-3 2号機原子炉建屋 地震応答解析モデル (UD 方向)



(a)NS 方向



(b)EW 方向

図 4-4(1) 2号機原子炉建屋 最大応答加速度の比較 (水平方向)

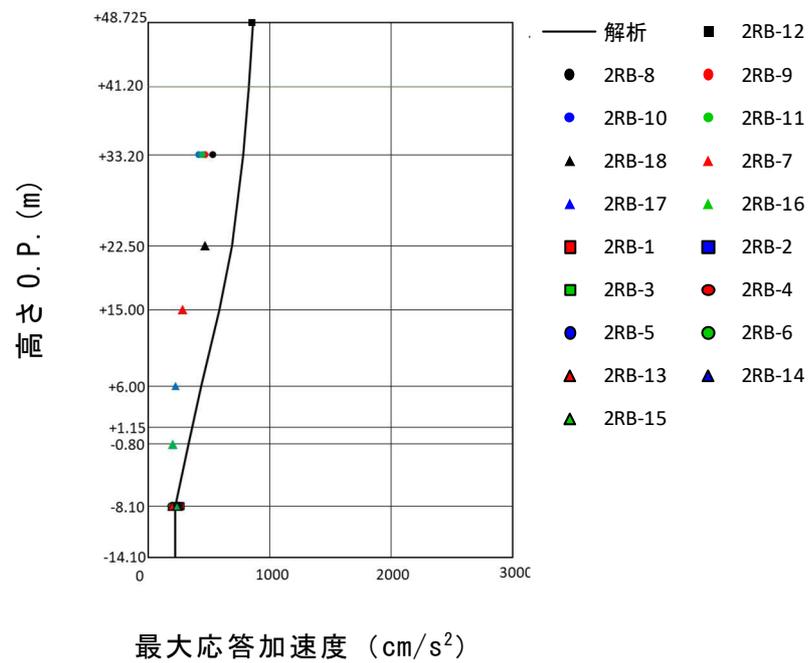


図 4-4(2) 2号機原子炉建屋 最大応答加速度の比較 (UD 方向)

注：解析結果の O.P. +48.725m は屋根トラス端部の値とした。

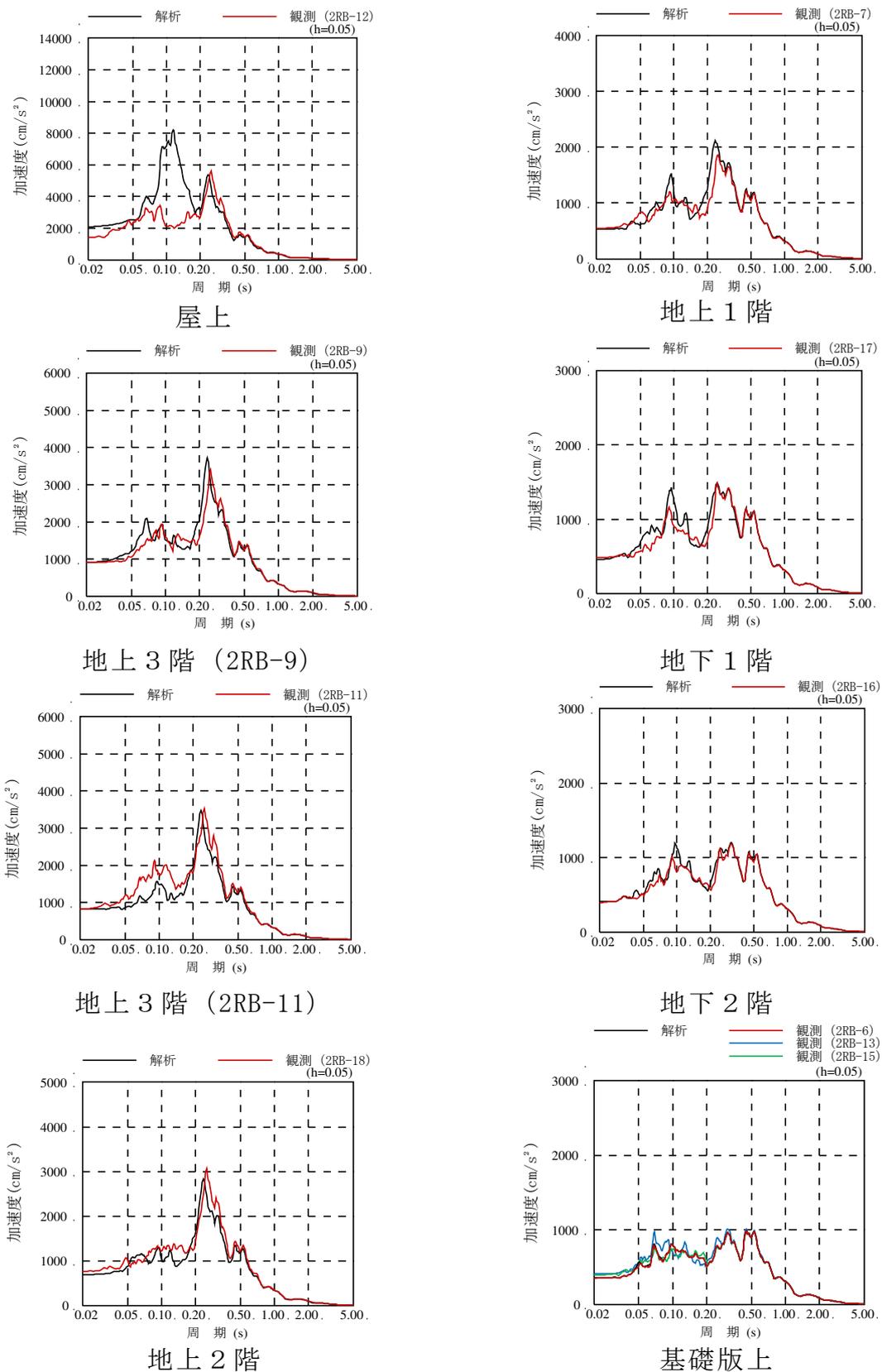


図 4-5(1) 2号機原子炉建屋 加速度応答スペクトルの比較 (NS方向)
(3.16地震観測記録と解析結果) (h=0.05)

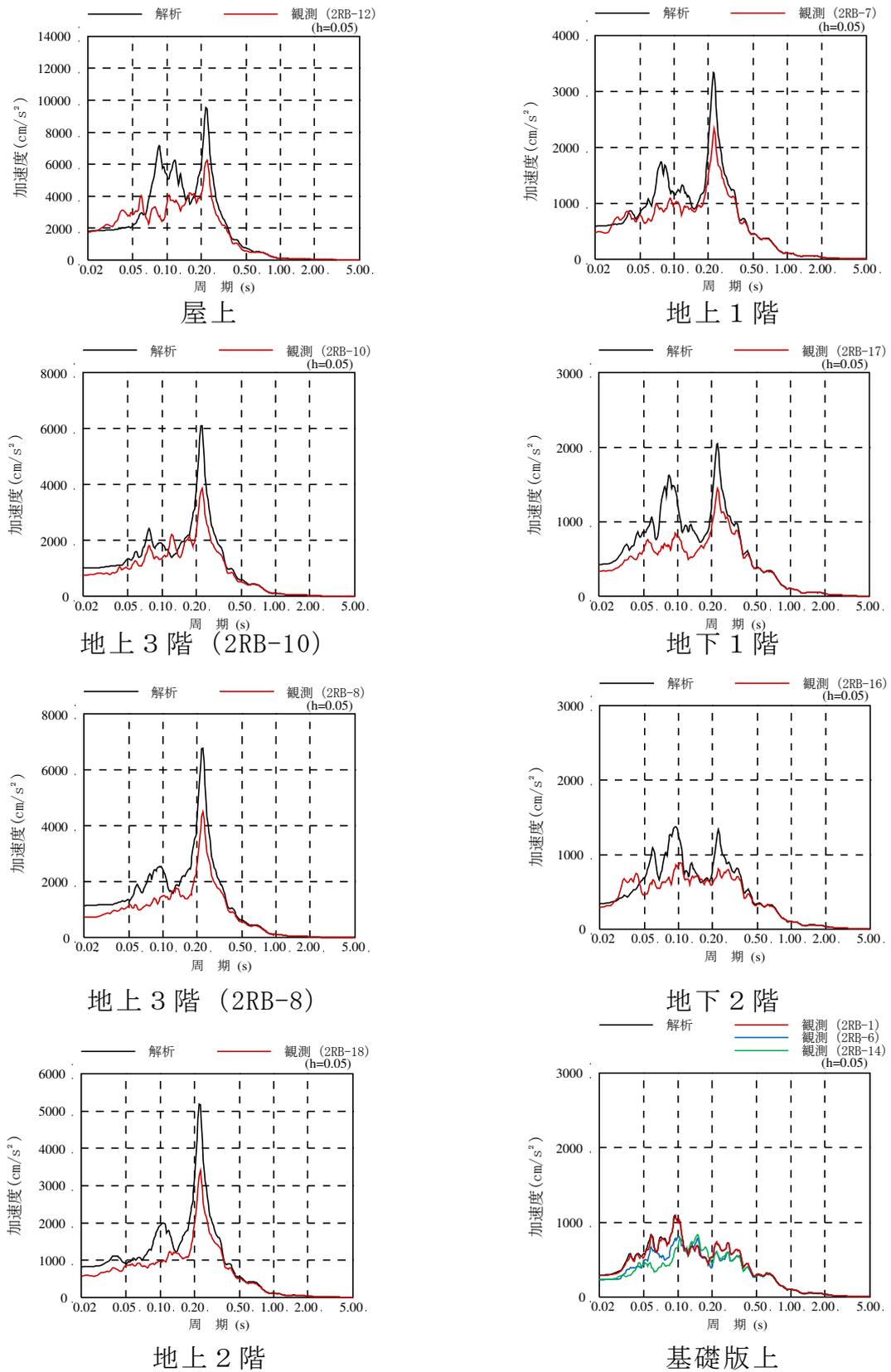


図 4-5(2) 2号機原子炉建屋 加速度応答スペクトルの比較 (EW 方向)
(3.16 地震観測記録と解析結果) (h=0.05)

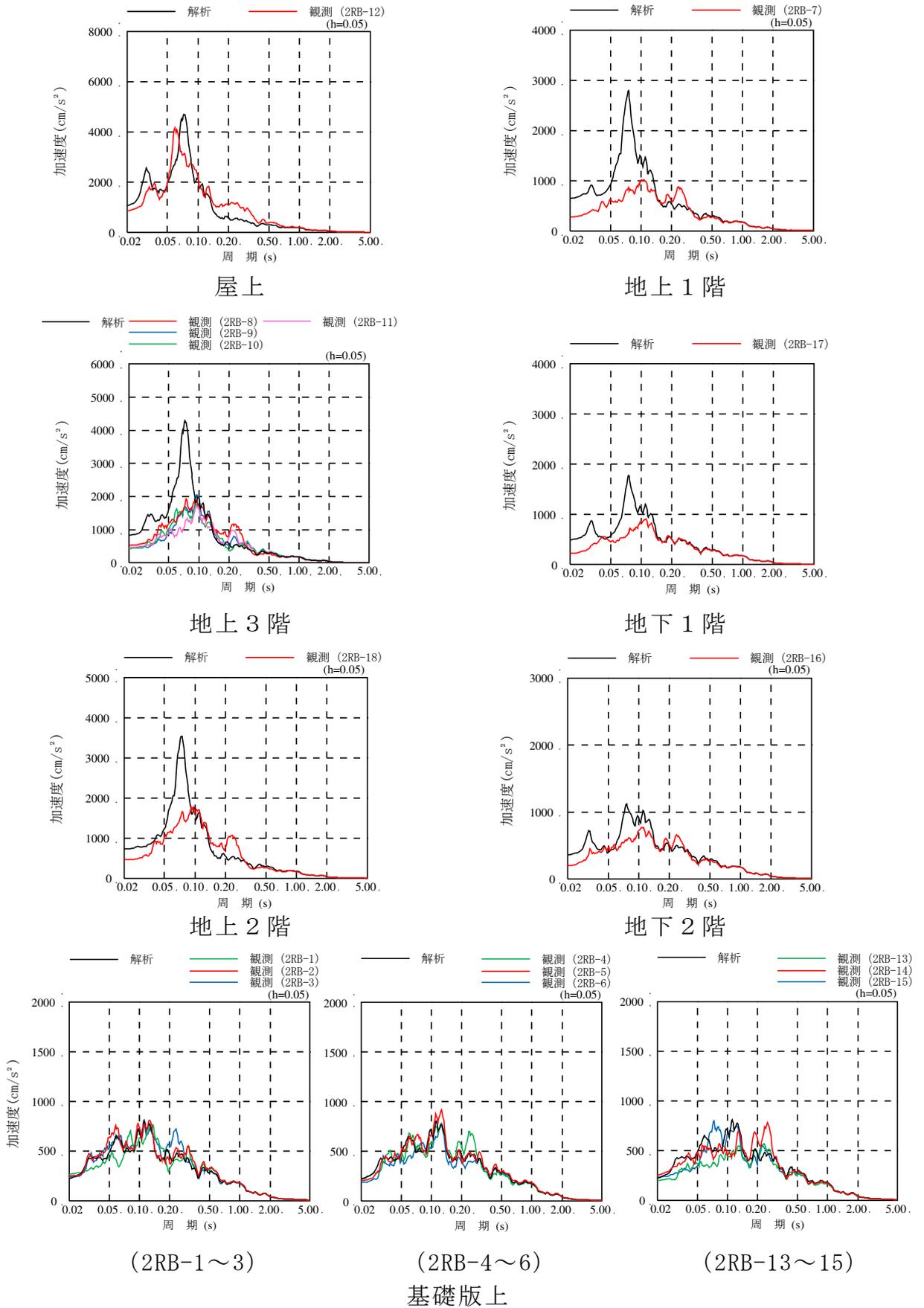
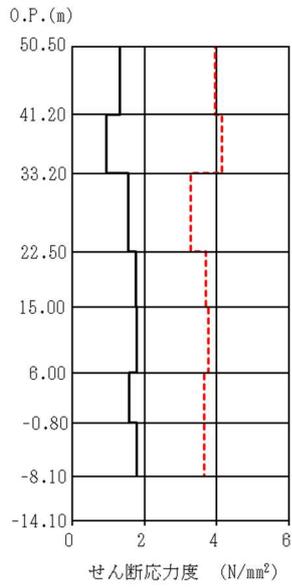
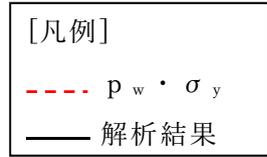
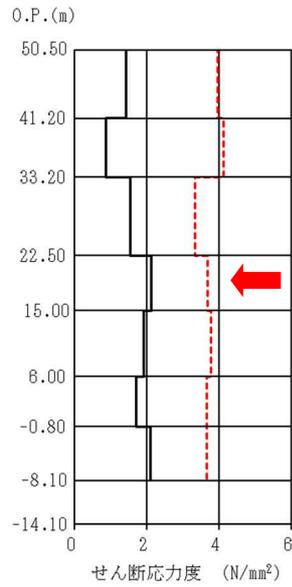


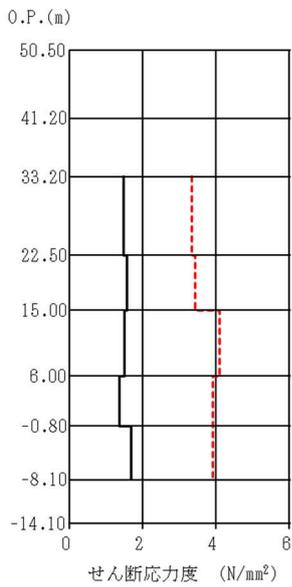
図 4-5(3) 2号機原子炉建屋 加速度応答スペクトルの比較 (UD 方向)
 (3.16 地震観測記録と解析結果) (h=0.05)



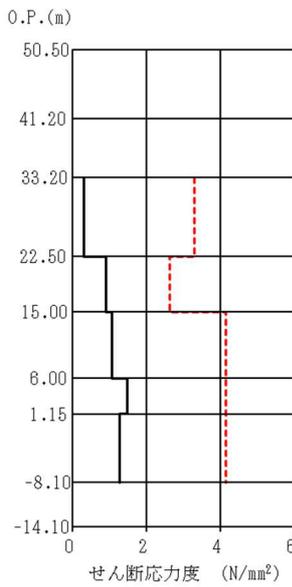
IW-J



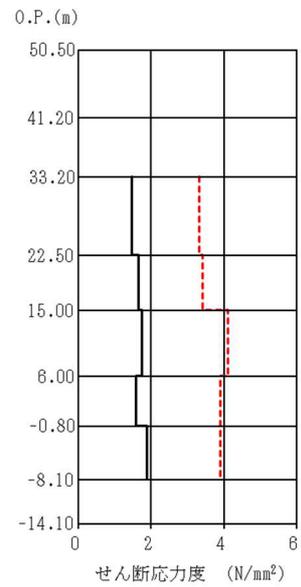
IW-C



OW-K



SW



OW-A

図 4-6(1) 2号機原子炉建屋 耐震壁のせん断応力度 (3.16地震 NS方向)

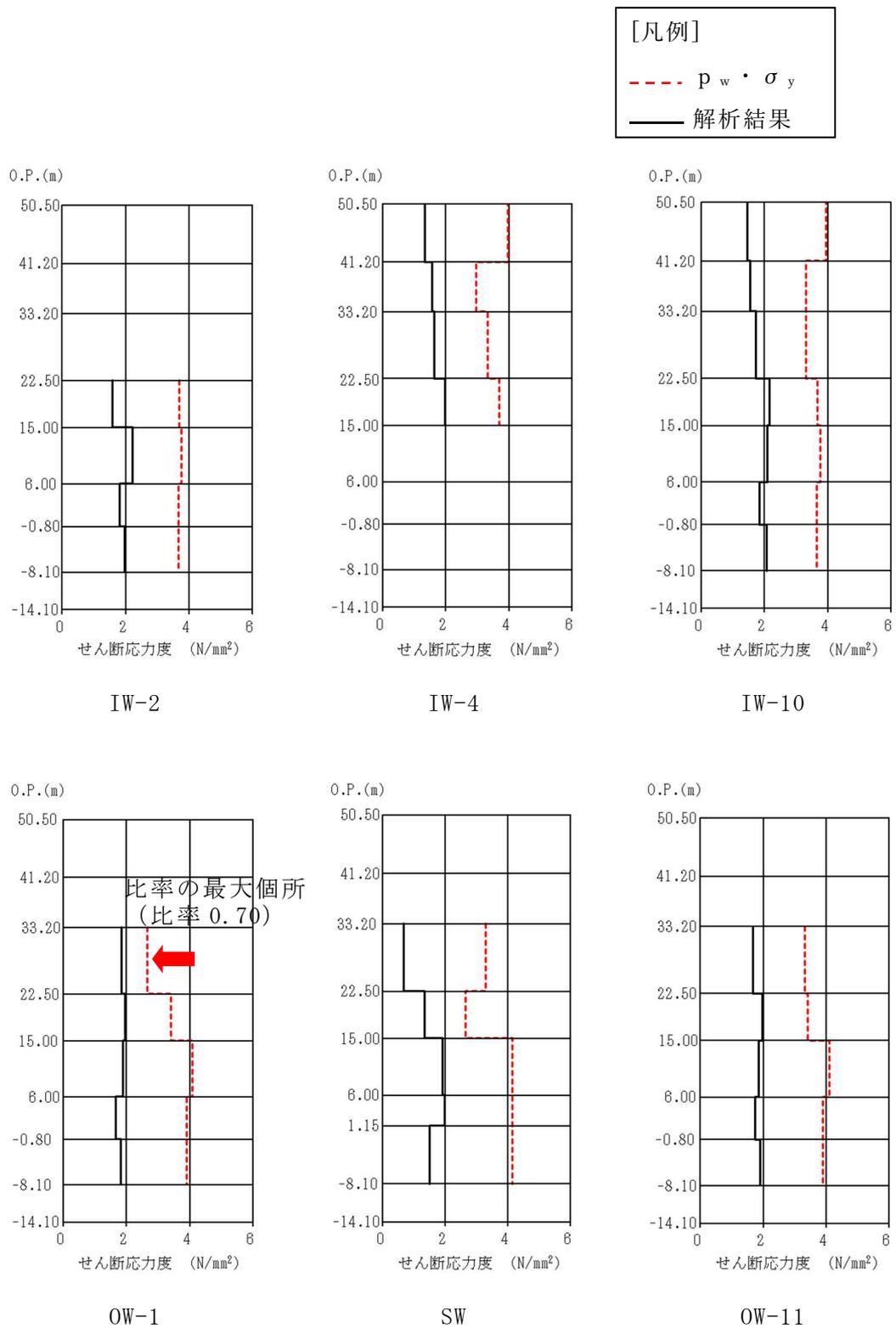


図 4-6(2) 2号機原子炉建屋 耐震壁のせん断応力度 (3.16地震 EW方向)

5. まとめ

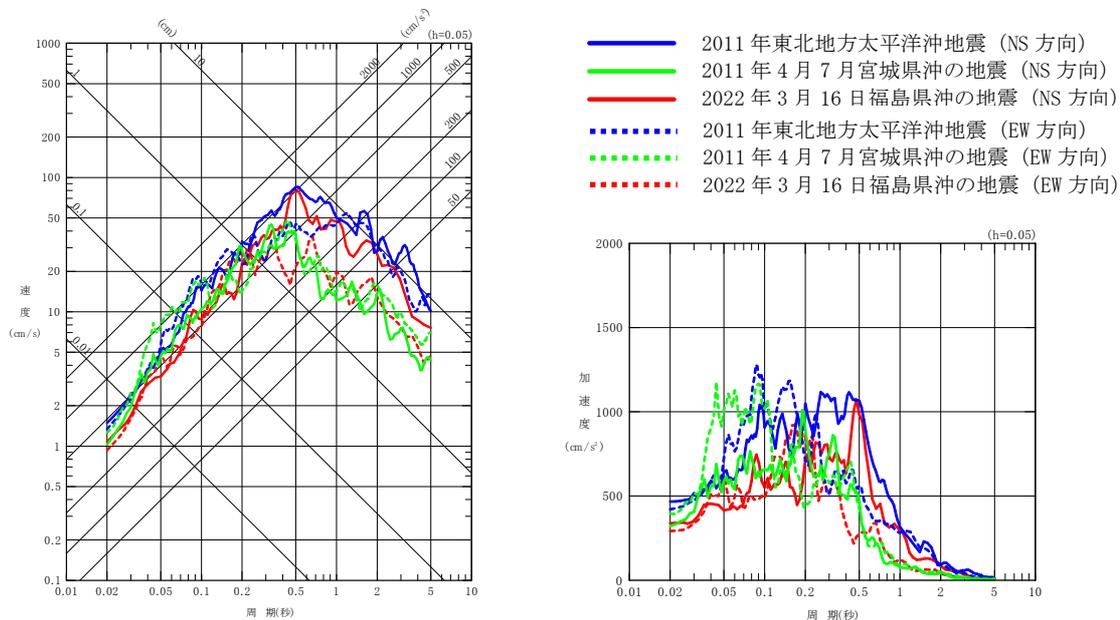
3.16 地震が原子炉の自動停止レベルを超える地震であったことを踏まえ、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等の影響を踏まえて設計体系に反映した事項（初期剛性低下の考慮等）について分析し、耐震設計の妥当性を確認する観点から、2 号機原子炉建屋について、基礎版上の観測記録を用いた地震応答解析を実施した。

初期剛性低下を考慮した耐震設計モデルによる解析結果は、観測記録の大きさや応答スペクトルの周期を概ね再現しており、耐震設計の妥当性を確認した。

また、建屋各階のせん断応力度は設計配筋量のみで負担できる短期許容せん断応力度に対して十分な裕度を有していることから、3.16 地震に対する原子炉建屋の健全性は十分に確保されていることを確認した。

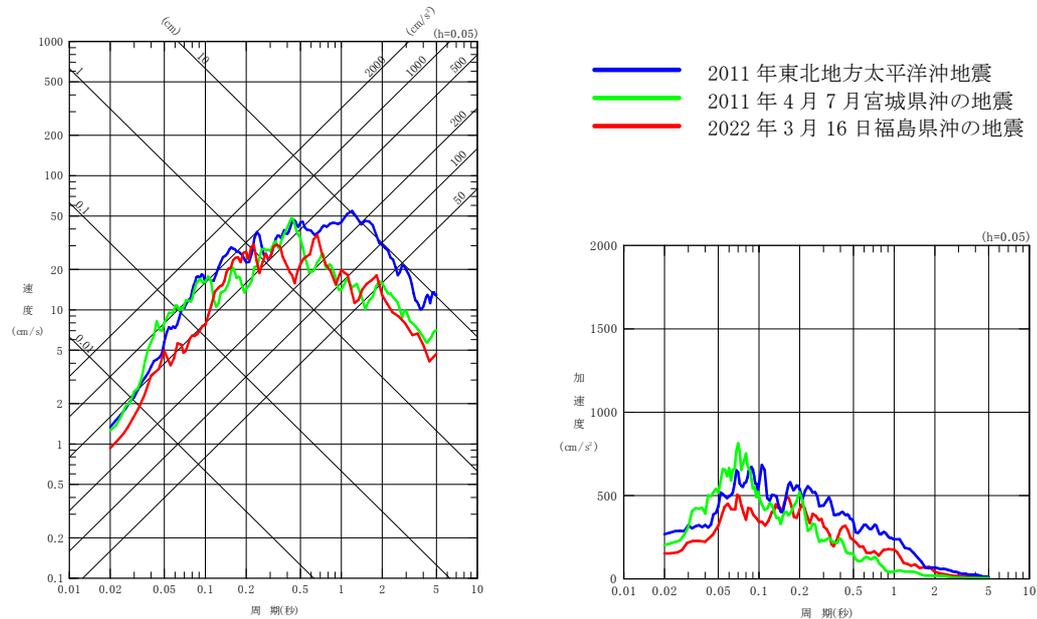
なお、添付資料「3.16 地震の観測記録と 2011 年東北地方太平洋沖地震等の観測記録の比較」に示すとおり、3.16 地震は、建屋が弾性範囲の応答であったことが確認されている 3.11 地震等よりも地震動が小さいレベルであり、これは上記の各階のせん断応力度の確認結果とも整合している。

3.16 地震の観測記録と 2011 年東北地方太平洋沖地震等の観測記録の比較



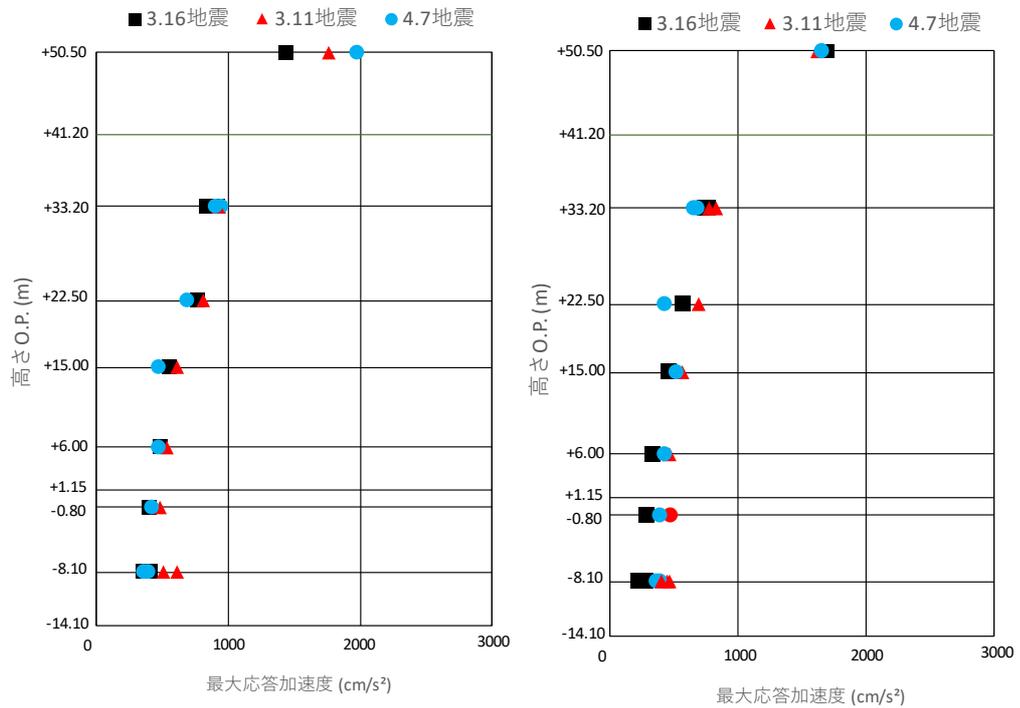
水平方向

(プラントノースに方位補正)



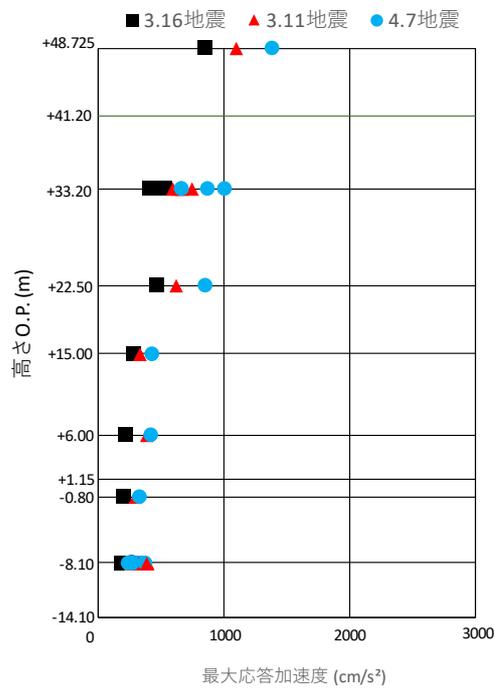
鉛直方向

図1 解放基盤表面の振動特性を表す自由地盤岩盤上部の地震観測点 (0. P. -8.6m) の観測記録の応答スペクトル (地中記録)



(a) NS 方向

(b) EW 方向



(c) UD 方向

図2 2号機原子炉建屋 最大応答加速度の比較
(3.16地震観測記録と3.11地震, 4.7地震観測記録)

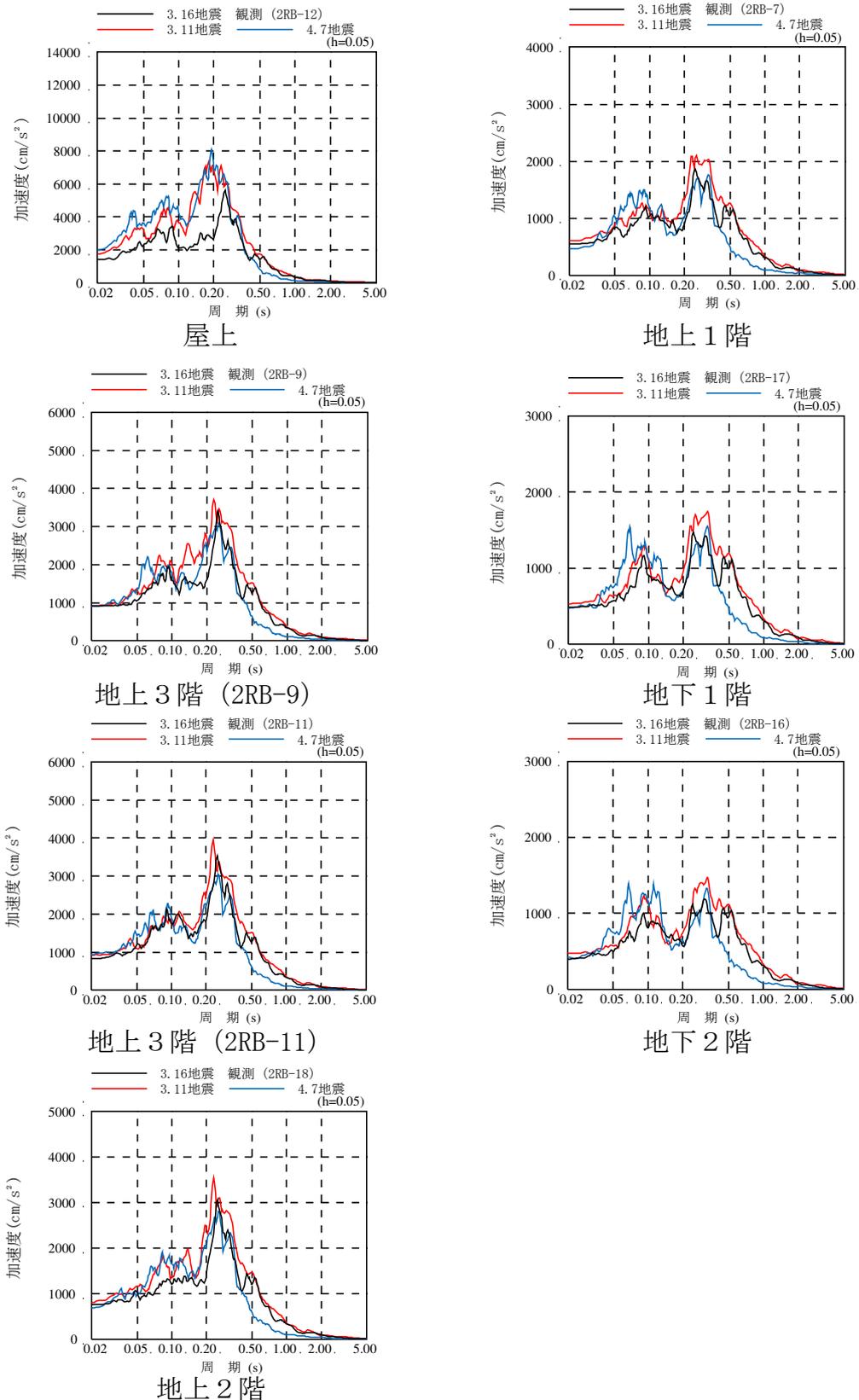
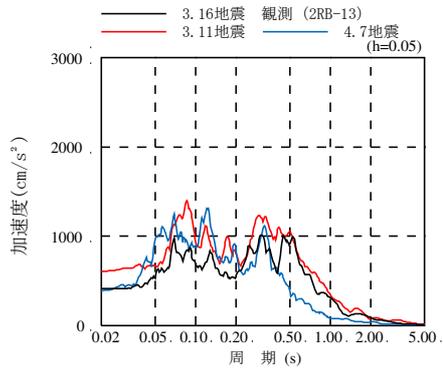
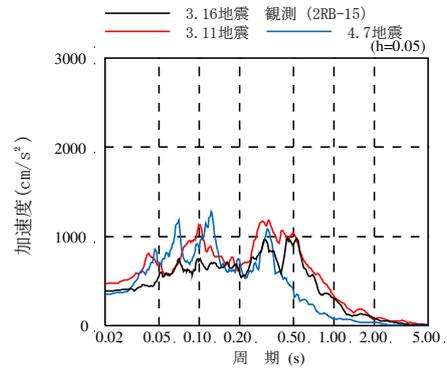


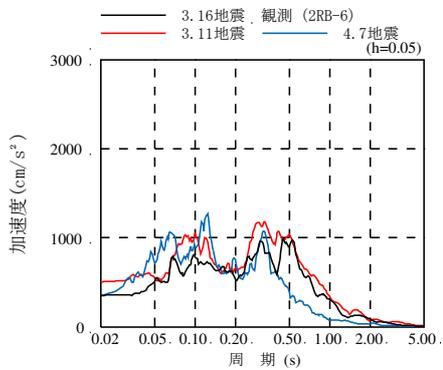
図3(1) 2号機原子炉建屋 加速度応答スペクトルの比較 (NS方向) (1)
 (3.16地震観測記録と3.11地震, 4.7地震観測記録) (h=0.05)



基礎版上 (2RB-13)



基礎版上 (2RB-15)



基礎版上 (2RB-6)

図 3(2) 2号機原子炉建屋 加速度応答スペクトルの比較 (NS 方向) (2)
(3.16 地震観測記録と 3.11 地震, 4.7 地震観測記録) (h=0.05)

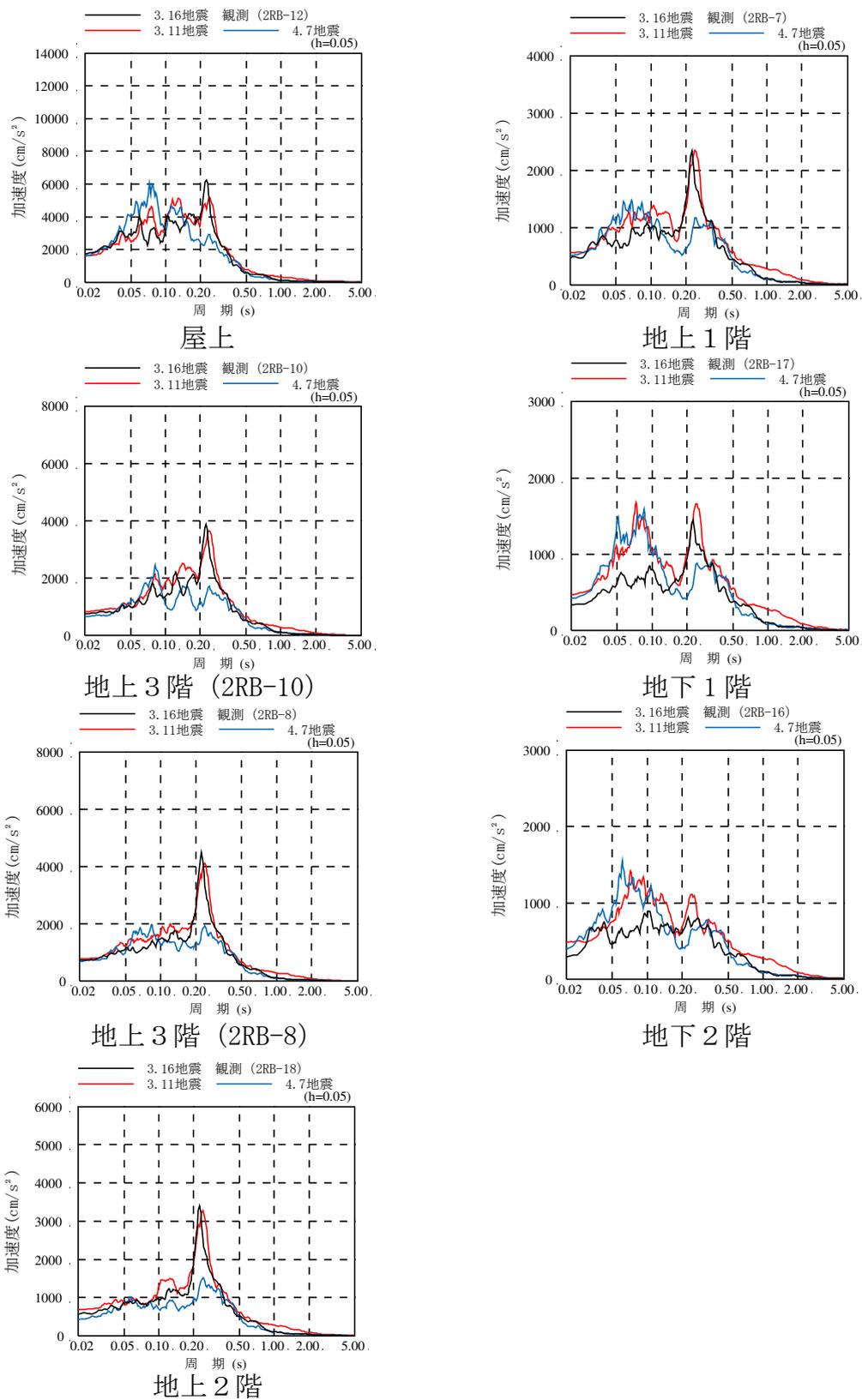
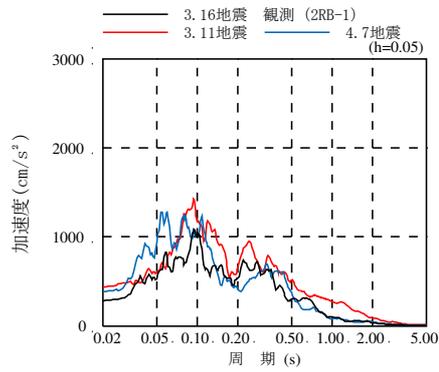
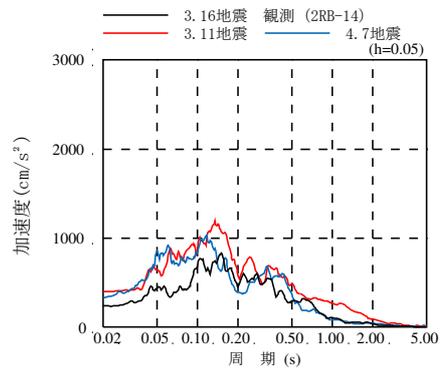


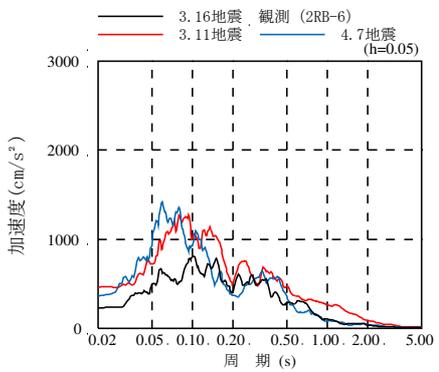
図 3(3) 2号機原子炉建屋 加速度応答スペクトルの比較 (EW 方向) (1)
 (3.16 地震観測記録と 3.11 地震, 4.7 地震観測記録) (h=0.05)



基礎版上 (2RB-1)



基礎版上 (2RB-14)



基礎版上 (2RB-6)

図 3(4) 2号機原子炉建屋 加速度応答スペクトルの比較 (EW 方向) (2)
(3.16 地震観測記録と 3.11 地震, 4.7 地震観測記録) (h=0.05)

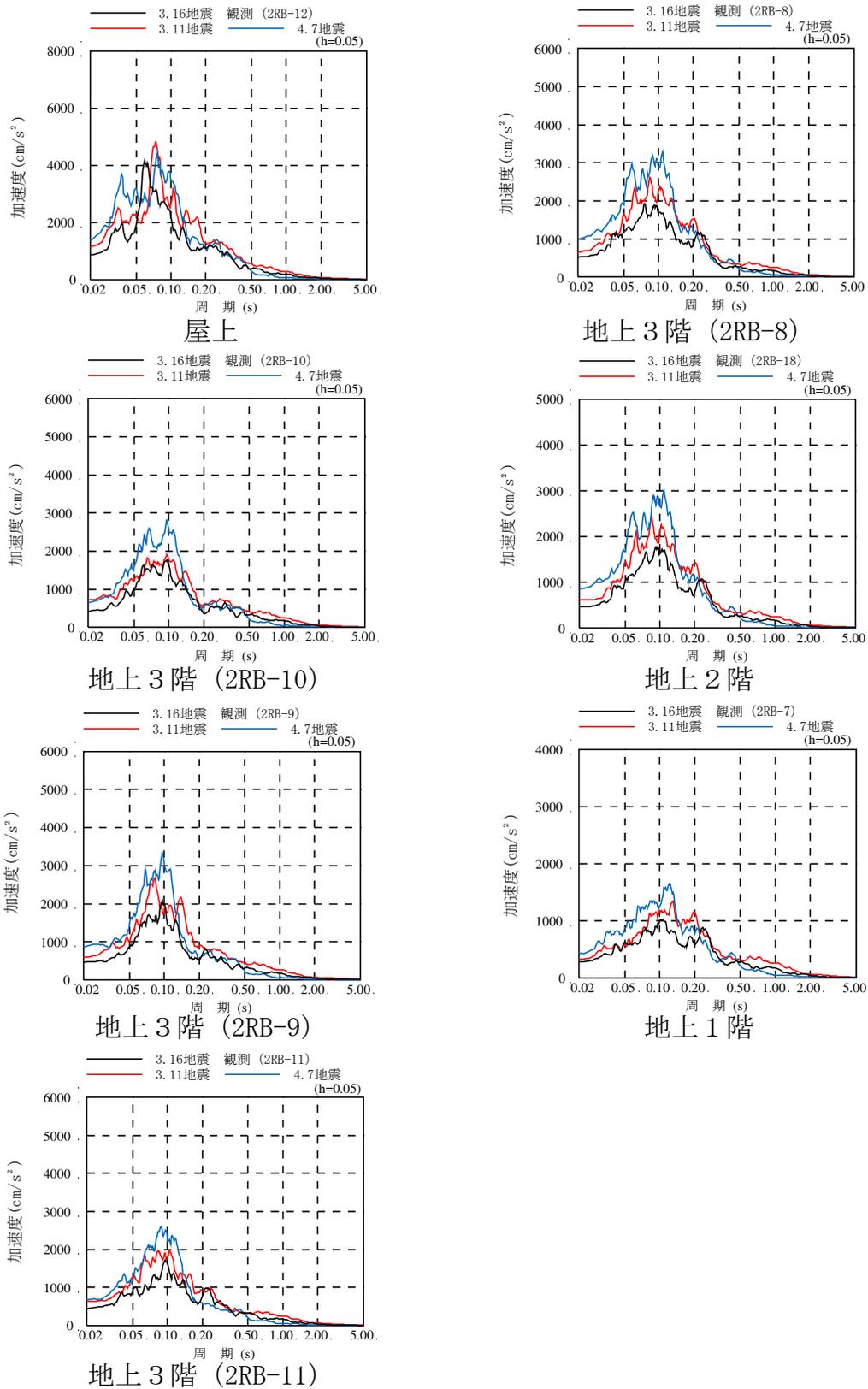


図 3(5) 2号機原子炉建屋 加速度応答スペクトルの比較 (UD方向) (1)
 (3.16地震観測記録と3.11地震, 4.7地震観測記録) (h=0.05)

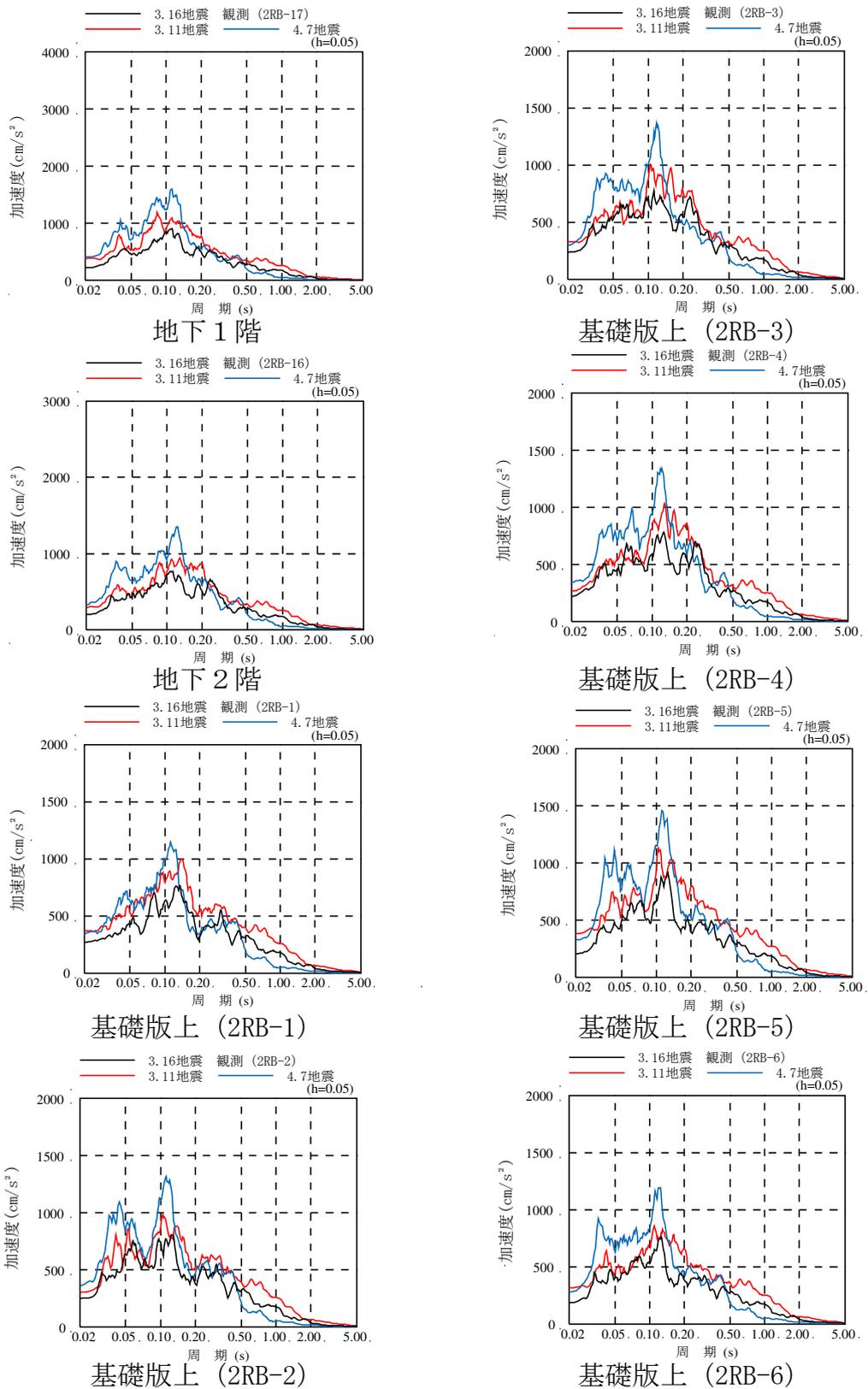
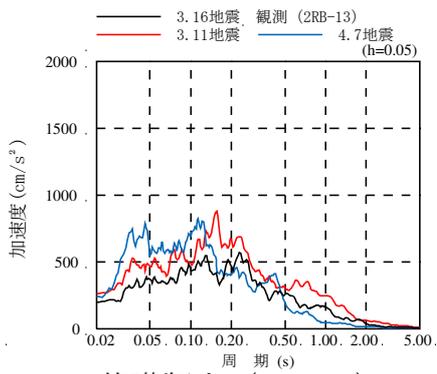
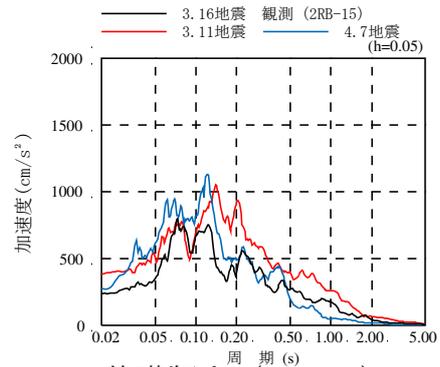


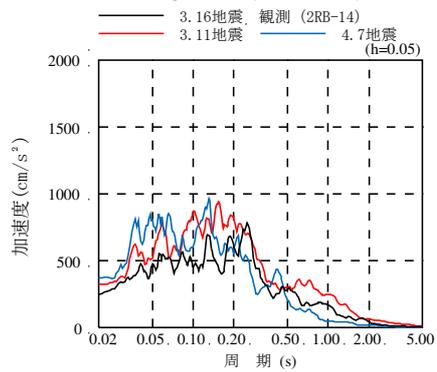
図 3(6) 2号機原子炉建屋 加速度応答スペクトルの比較 (UD方向) (2)
 (3.16地震観測記録と3.11地震, 4.7地震観測記録) (h=0.05)



基礎版上 (2RB-13)



基礎版上 (2RB-15)



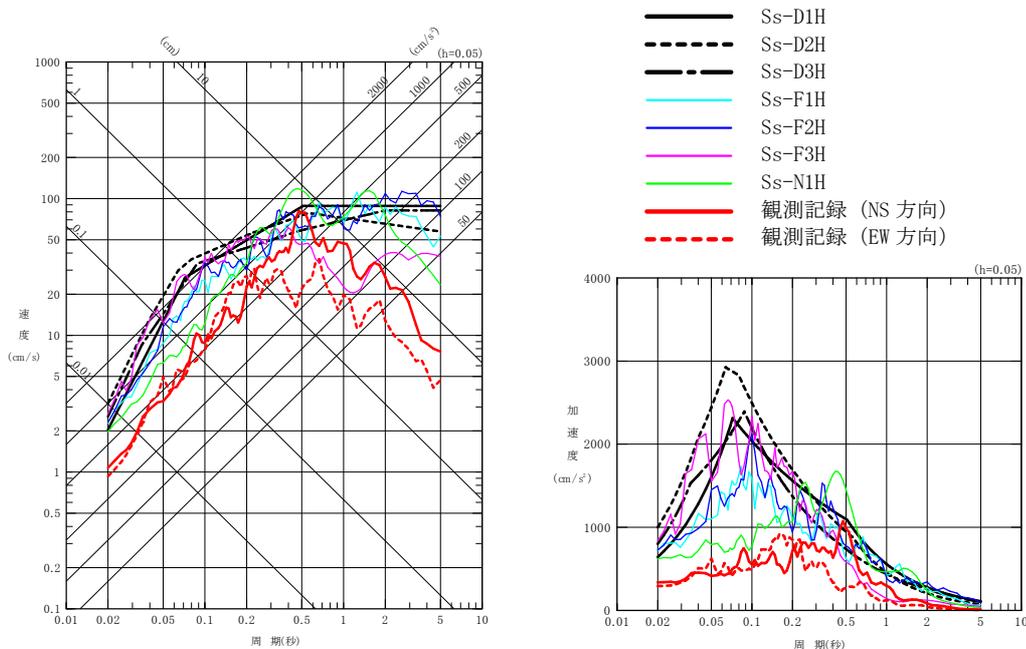
基礎版上 (2RB-14)

図 3(7) 2号機原子炉建屋 加速度応答スペクトルの比較 (UD 方向) (3)
(3.16 地震観測記録と 3.11 地震, 4.7 地震観測記録) (h=0.05)

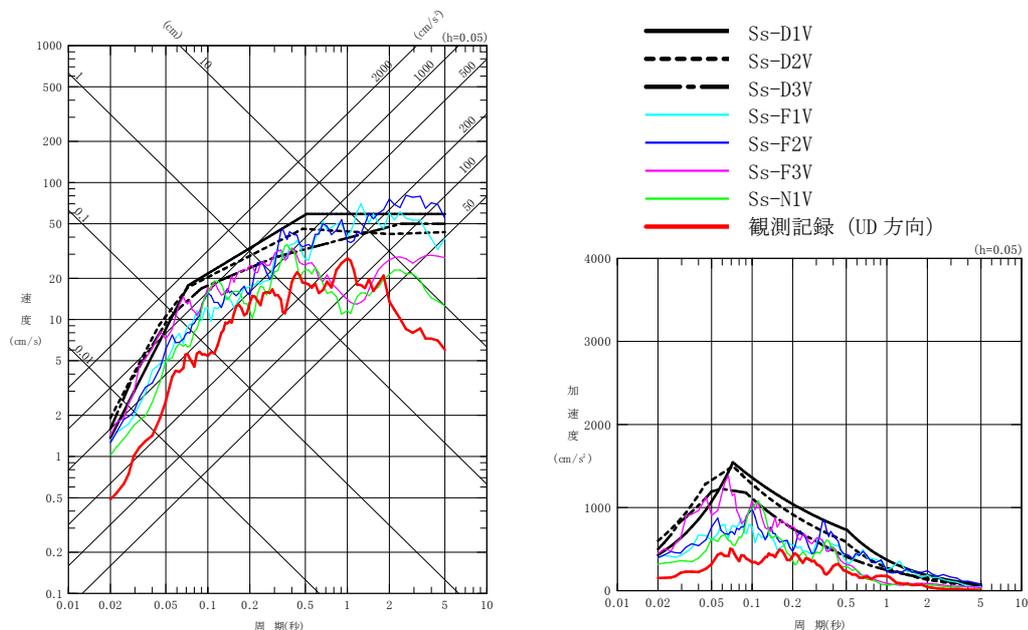
3.16 地震の敷地地盤における観測記録と基準地震動 S s の比較

解放基盤表面の振動特性を表す自由地盤岩盤上部の地震観測点 (0.P. -8.6m) で得られた地中記録の応答スペクトルと基準地震動 S s との比較を図に示す。

3.16 地震の観測記録は、基準地震動 S s を下回るものとなっている。



水平方向



鉛直方向

図 解放基盤表面の振動特性を表す自由地盤岩盤上部の地震観測点 (0.P. -8.6m) の観測記録の応答スペクトル (地中記録*, プラントノースに方位補正) と基準地震動 S s の比較

注記*: 基準地震動との比較としては今後はざとく解析が必要。