

女川原子力発電所2号炉
東北地方太平洋沖地震等に対する応答性状を踏まえた
原子炉建屋の地震応答解析モデルの策定概要について

平成29年1月
東北電力株式会社

目次

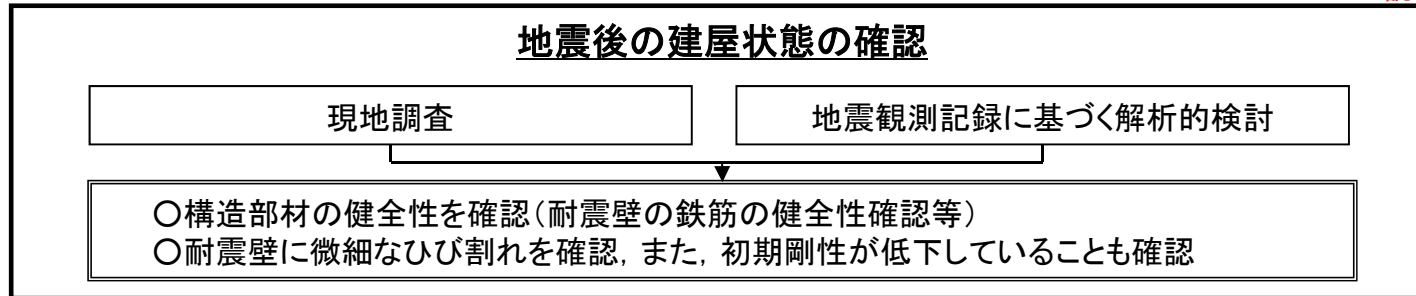
1. 資料の概要	.....	2
2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状	.....	4
3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響	.....	26
4. オペフロ上部耐震裕度向上工事の概要	.....	36
5. 設計に用いる地震応答解析モデルの設定	.....	40
6. その他の評価における初期剛性低下の反映について	.....	50
別紙1 女川2号炉原子炉建屋の概要および地震観測位置	.....	54
別紙2 シミュレーション解析モデルにおける観測記録と等価な剛性と復元力特性	.....	57

1. 資料の概要

1.資料の概要

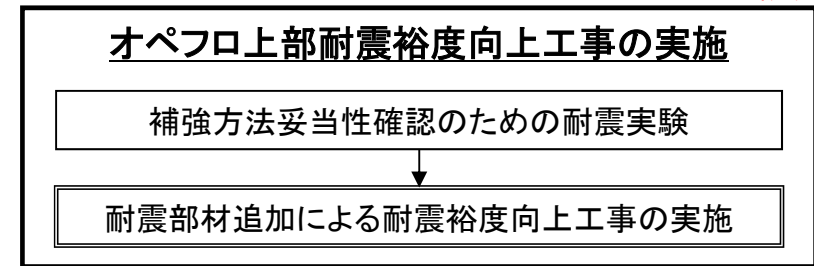
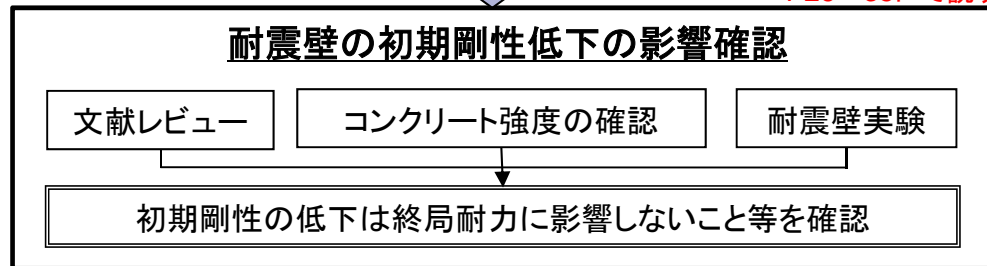
本資料は、2011年東北地方太平洋沖地震(以下、「3.11地震」と記載)及び2011年4月7日宮城県沖の地震(以下、「4.7地震」と記載)の影響を踏まえた2号炉原子炉建屋の地震応答解析モデルの設定概要について示したものである。

P4~25にて説明

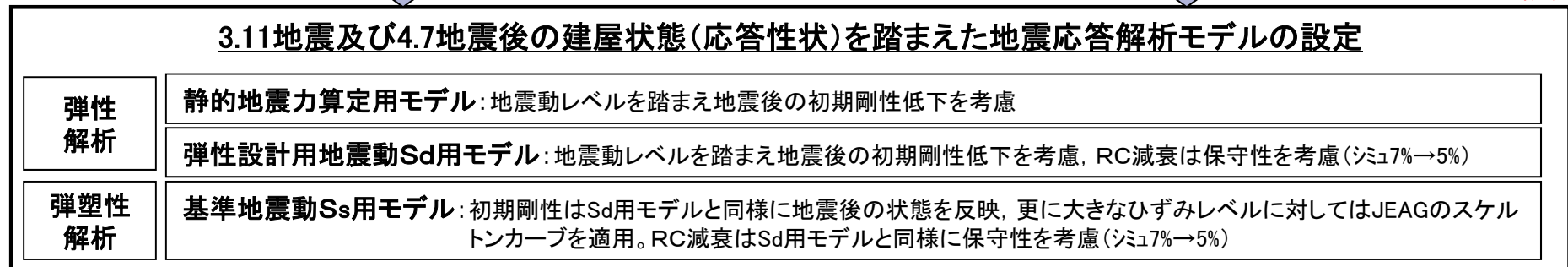


P26~35にて説明

P36~39にて説明



P40~49にて説明



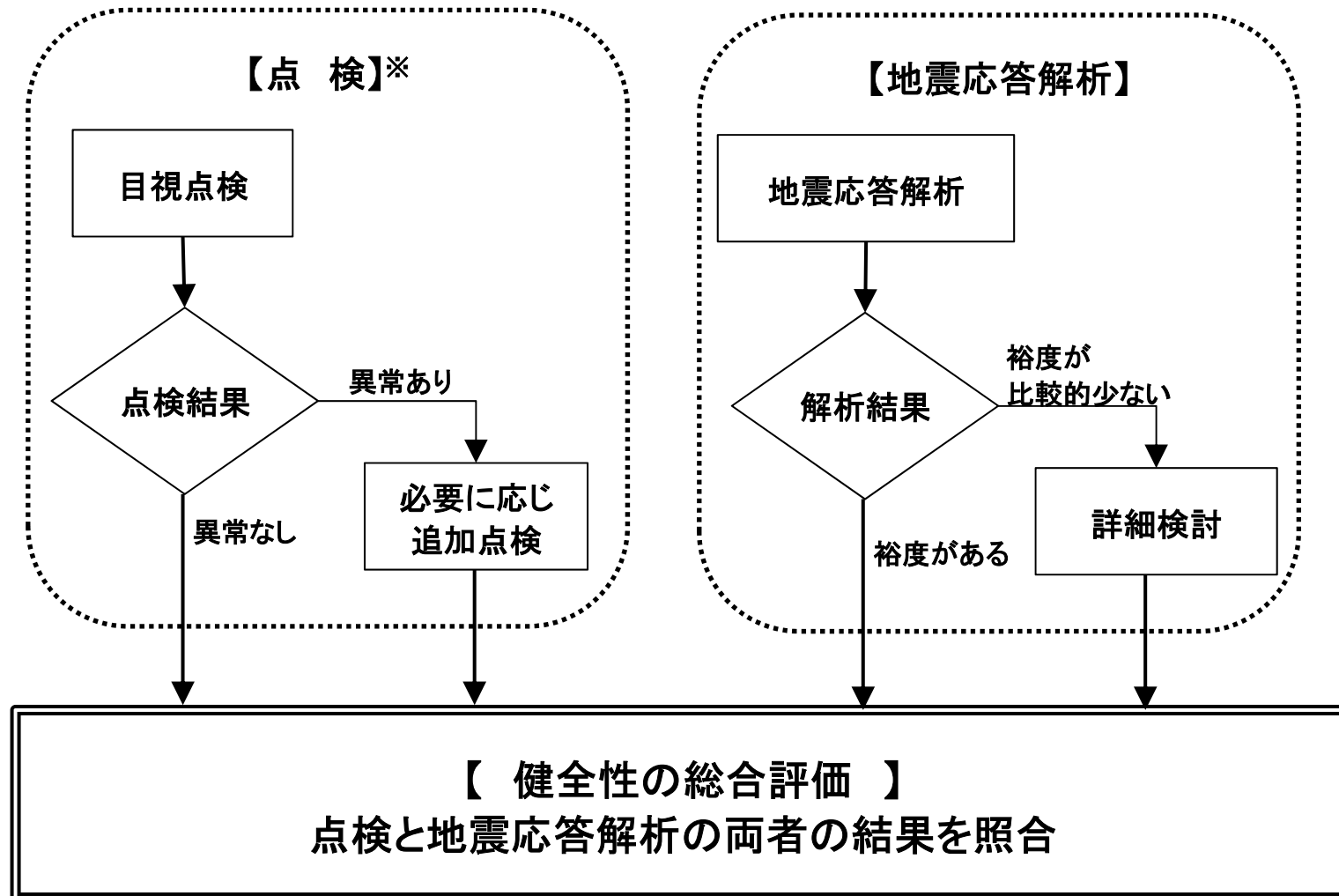
(参考)パラメータスタディの実施(既工認モデルとの比較等)

- ・弾性設計用地震動Sd(暫定): 既工認モデルとは1次固有周期のピークの位置の違いが認められる。
- ・基準地震動Ss(暫定): 既工認モデルと特に大きな違い無し。

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 健全性評価の概要

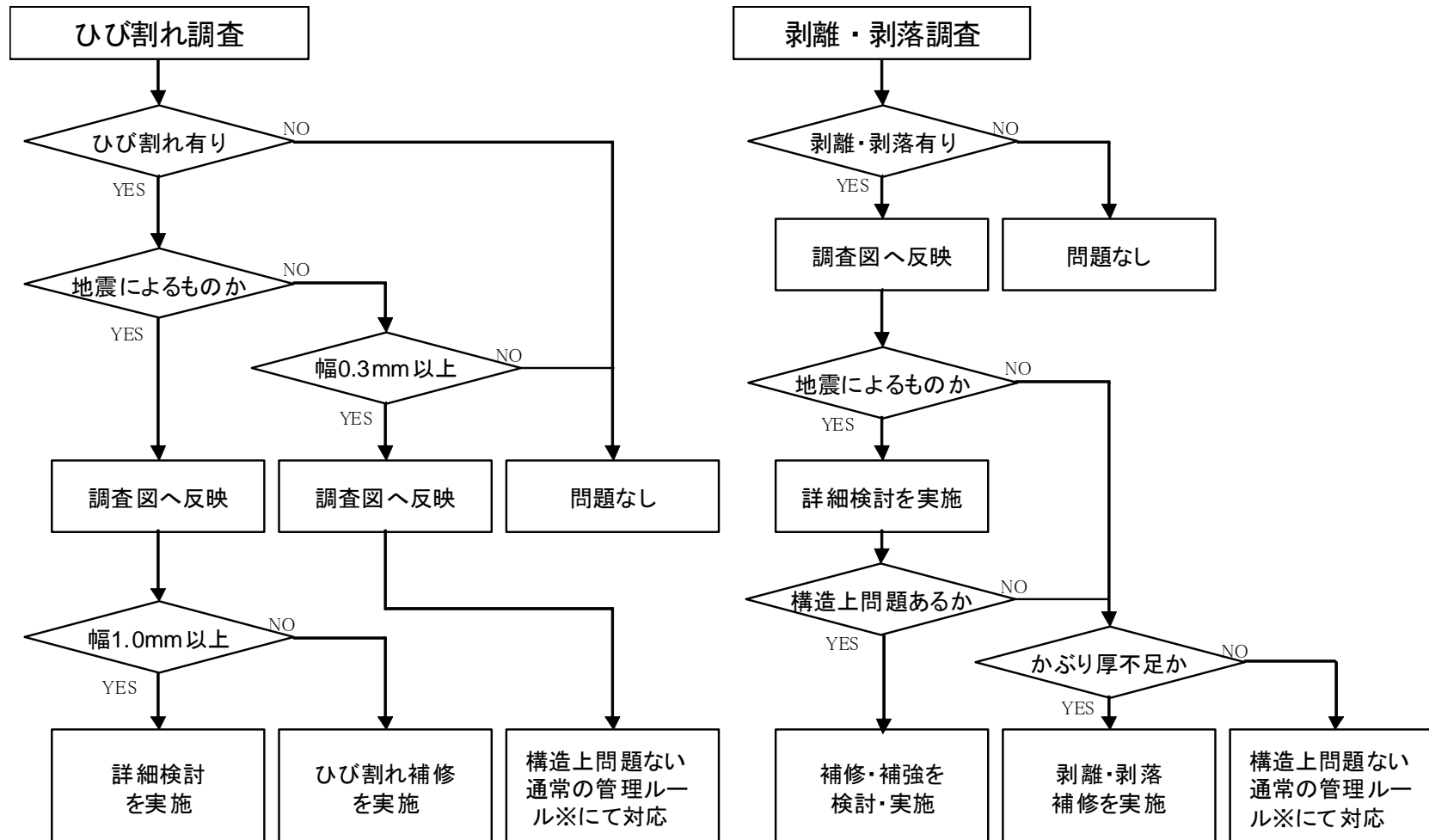
原子炉建屋の健全性評価に際しては、点検と地震応答解析を実施し両者の結果を照合して健全性の総合評価を行う。



※点検についての詳細は、資料1-4参照。

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 地震後点検評価の概要

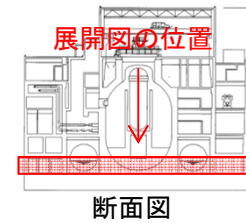
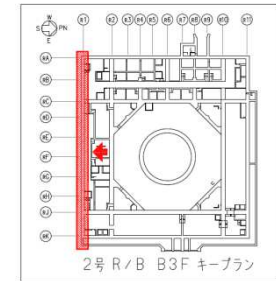
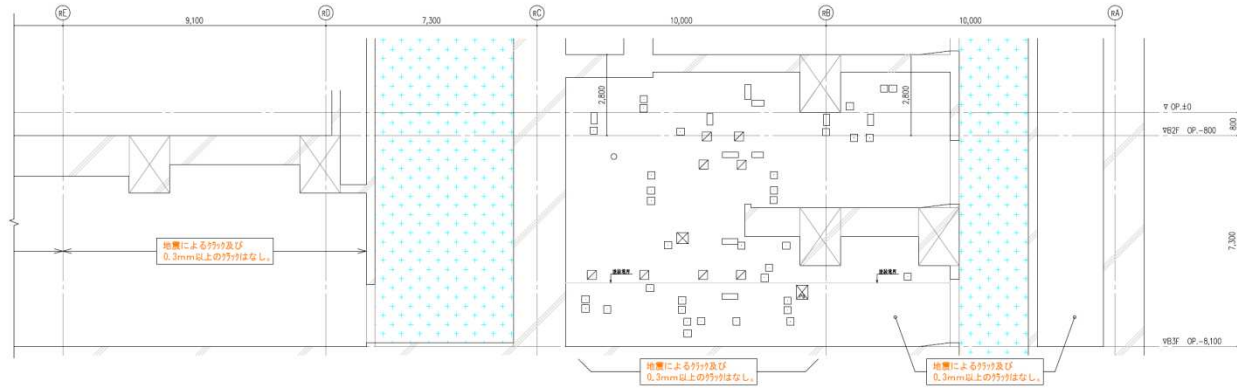
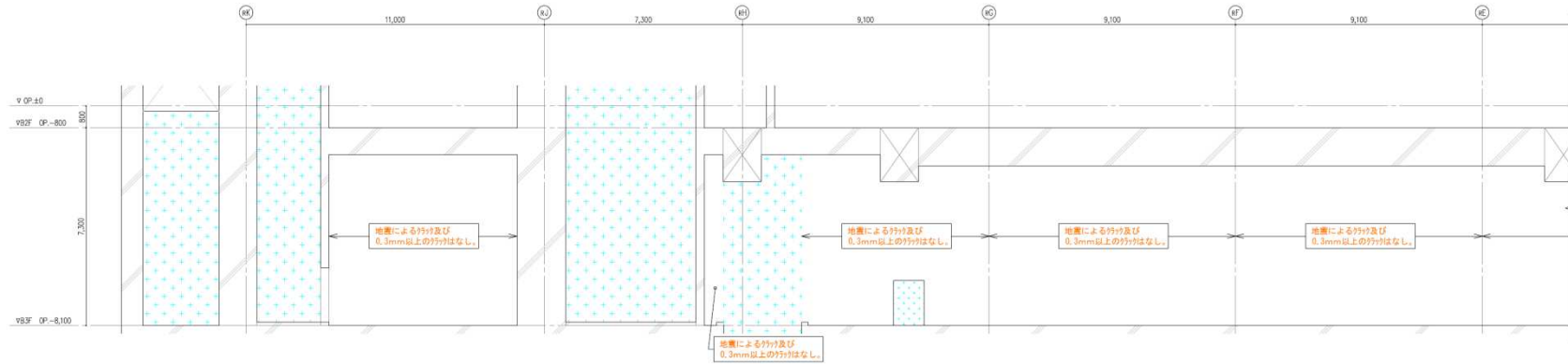
原子炉建屋の耐震壁の点検に基づく評価は、以下に示す流れで実施している。



※ 発電所ひび割れ管理・補修要領などの社内マニュアル

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 地震後点検結果の例(2号炉原子炉建屋 地下3階 R1通り)

点検の結果、ひび割れはほとんど認められず、追加調査の目安となる、地震により生じた幅1.0mm以上のひび割れは確認されなかった。

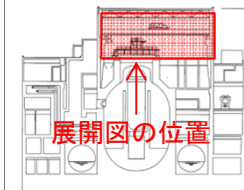
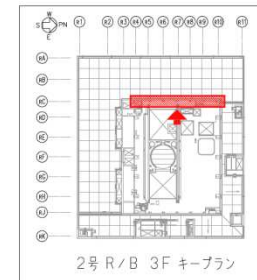
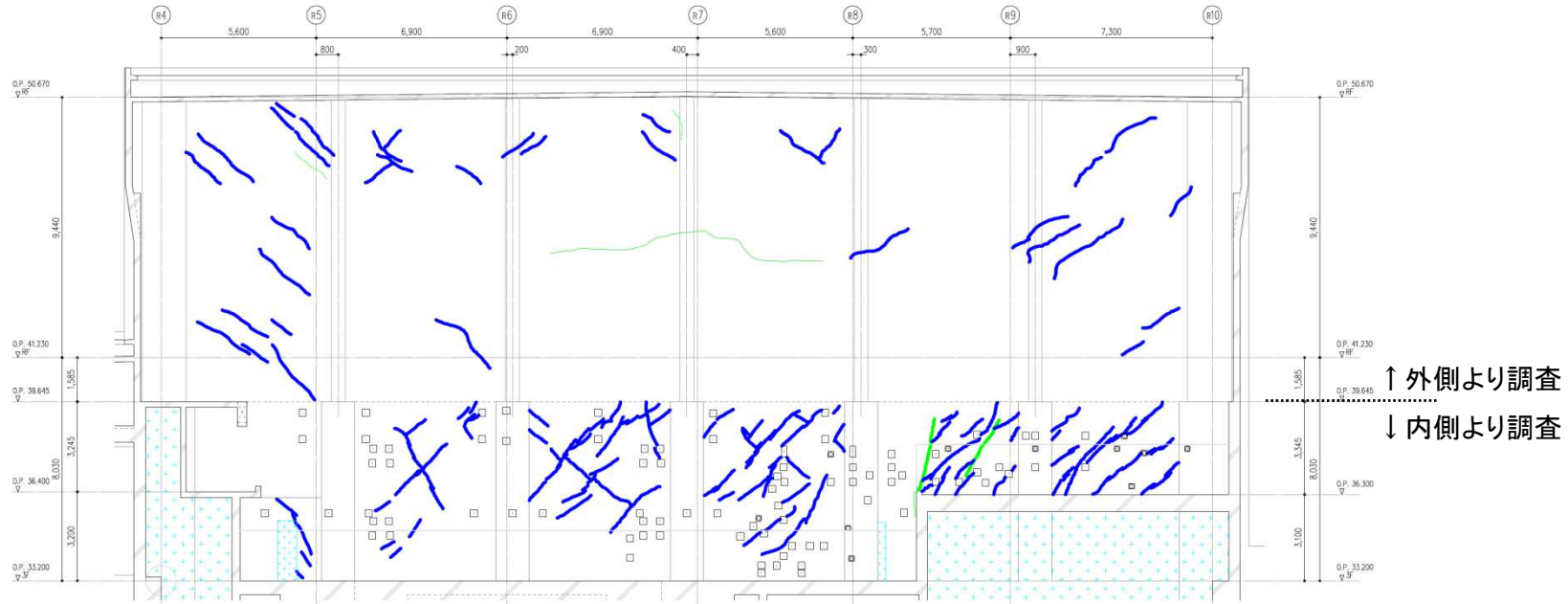


地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状

地震後点検結果の例(2号炉原子炉建屋 地上3階 RC通り)

点検の結果, 0.3mm未満の微小なひび割れは比較的多く認められたが, 追加調査の目安となる, 地震により生じた幅1.0mm以上のひび割れは確認されなかった。



断面図

地震による		地震以外			
	0.3mm未満		0.3mm以上~1.0mm未満		幅未確認
	0.3mm以上~1.0mm未満		1.0mm以上		はくらく
	1.0mm以上				確認不能の範囲

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 地震後点検結果の概要(2号炉原子炉建屋)

点検の結果, 3階(オペフロ階)に比較的多くの微小なひび割れが認められた。
但し, 全ての階において, 追加調査の目安となる, 地震により生じた幅1.0mm以上のひび割れは確認されなかった。

当該地震により発生したことが否定できないひび割れ及び剥離・剥落(耐震壁)

部位	ひび割れ箇所数(延べ長さ[m]) ^{※1}			基準値	剥離・剥落 ^{※2}
	$W < 0.3$	$0.3 \leq W < 1.0$	$1.0 \leq W$		
3階 (O.P. 33.2m)	699(852.9)	35(68.6)	0(0.0)	1.0mm	0
2階 (O.P. 22.5m)	139(127.5)	15(18.8)	0(0.0)		7(0.03)
1階 (O.P. 15.0m)	37(41.7)	7(6.6)	0(0.0)		0
地下1階 (O.P. 6.0m)	82(72.7)	12(17.8)	0(0.0)		0
地下2階 (O.P. -0.8m)	76(64.7)	7(9.1)	0(0.0)		0
地下3階 (O.P. -8.1m)	13(12.6)	8(5.8)	0(0.0)		0

※1 ひび割れ凡例 W:ひび割れ幅(mm)

※2 剥離・剥落の凡例 箇所数(延べ面積(m²))

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 地震応答解析 検討の概要

3. 11地震, 4. 7地震に対する2号炉原子炉建屋の解析的検討は, 以下の手順で実施。

既工認モデルを用いた地震応答解析

シミュレーション解析に先立ち, 既工認モデルを用いた地震応答解析を行い, 地震に対する建屋の応答性状について分析。



シミュレーションモデルによる検討

- ・既工認モデルによる地震応答解析結果を踏まえ, 初期剛性や減衰などについてチューニングを行い, より観測記録と整合するモデルを構築。
- ・構築したモデルによる地震応答解析より得られた応力を用い, 耐震壁が概ね弾性範囲であったことを確認。



詳細検討

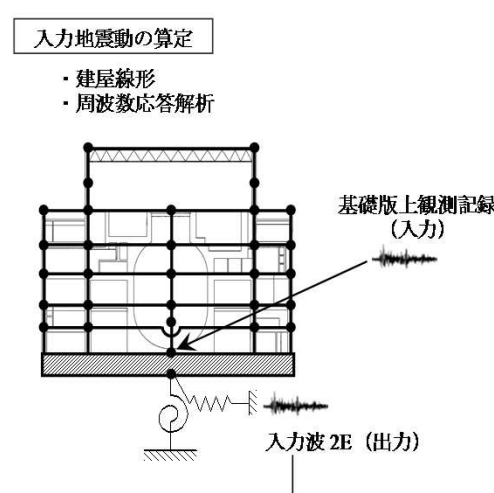
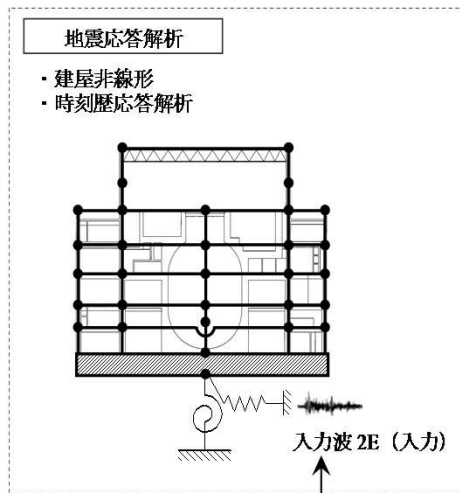
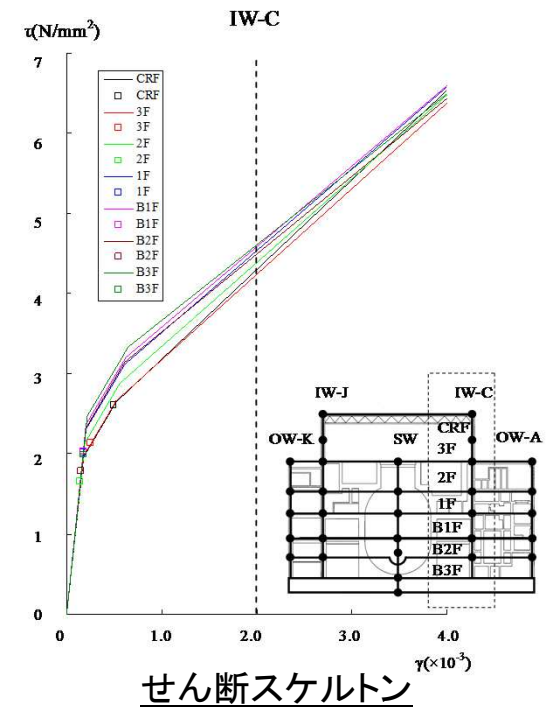
オペレーションフロア上部については, シミュレーション解析から得られた応答値に対し, 弾性限耐力(鉄筋(設計配筋量)のみで負担できる短期許容応力度($P_w \times \sigma_y$)から算定)の裕度が比較的少ないため, 詳細検討も実施し, 健全性の確認を行った。

本資料では詳細検討の記載は省略

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 既工認モデルを用いた応答評価(解析モデル)

既工認モデルに基礎版上で観測された地震観測記録を入力した地震応答解析を実施

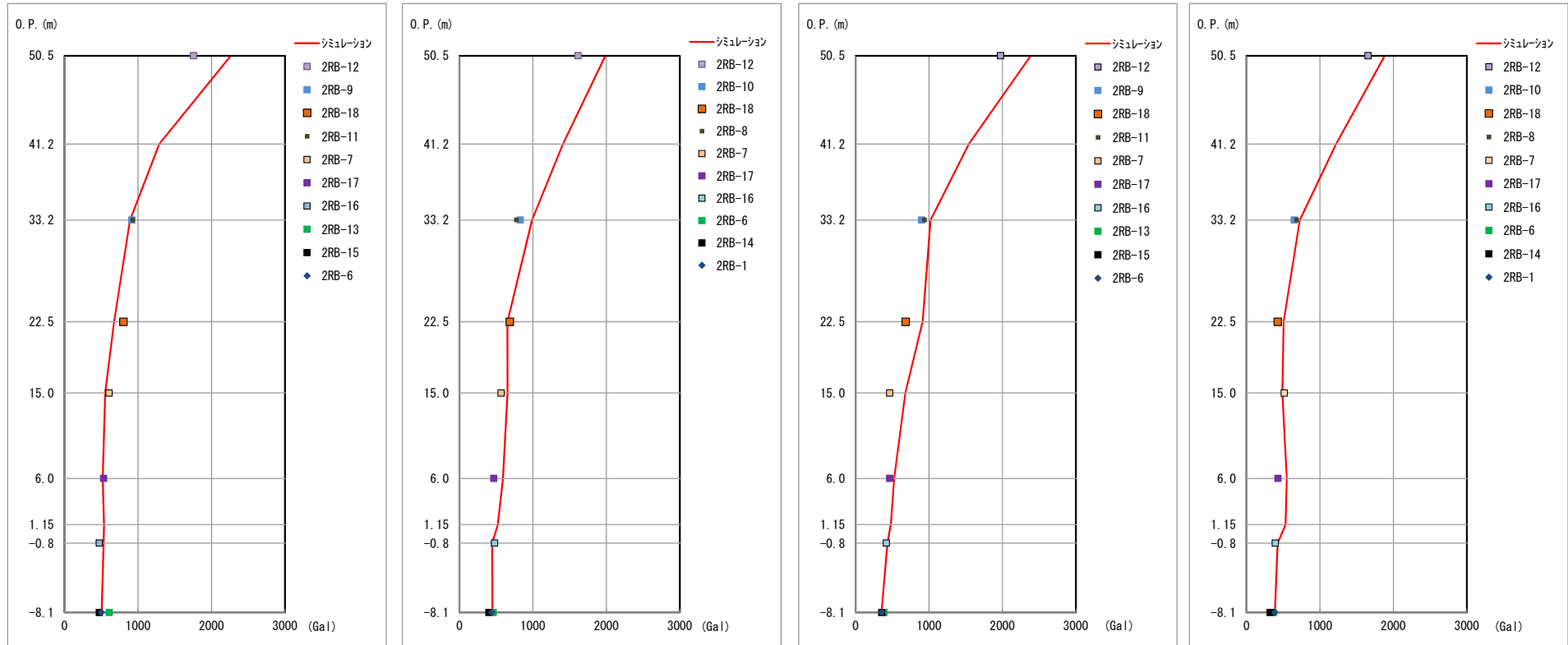
項目		地震応答解析	入力地震動の算定
応答計算法		時刻歴応答解析	周波数応答解析
入力地震動		入力地震動の算定(右欄)で求めた基礎底面ばね外における入力波 2E	基礎版上端観測記録
入力規定位置		基礎底面ばね外	基礎上端
剛性評価	コンクリート強度	設計値 32.4 N/mm ² (330 kgf/cm ²)	同左
	ヤング係数	設計値 女川2号機: 2.65×10 ⁴ N/mm ² (2.70×10 ⁶ tf/m ²)	同左
	考慮範囲	耐震壁	同左
減衰定数	鉄筋	5%	5%
	コンクリート	(歪エネルギー比例型)	(複素減衰: 一定減衰)
解析モデル	建屋-地盤相互作用	スウェイ・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



2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 既工認モデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋の最大加速度分布の比較

最大加速度分布の比較では、3.11地震および4.7地震とも概ね各階の観測記録の傾向を捉えている。



※シミュレーションの最大加速度分布は各階の最大値としている。

NS方向 EW方向
女川2号炉原子炉建屋 3.11地震
最大加速度分布の比較

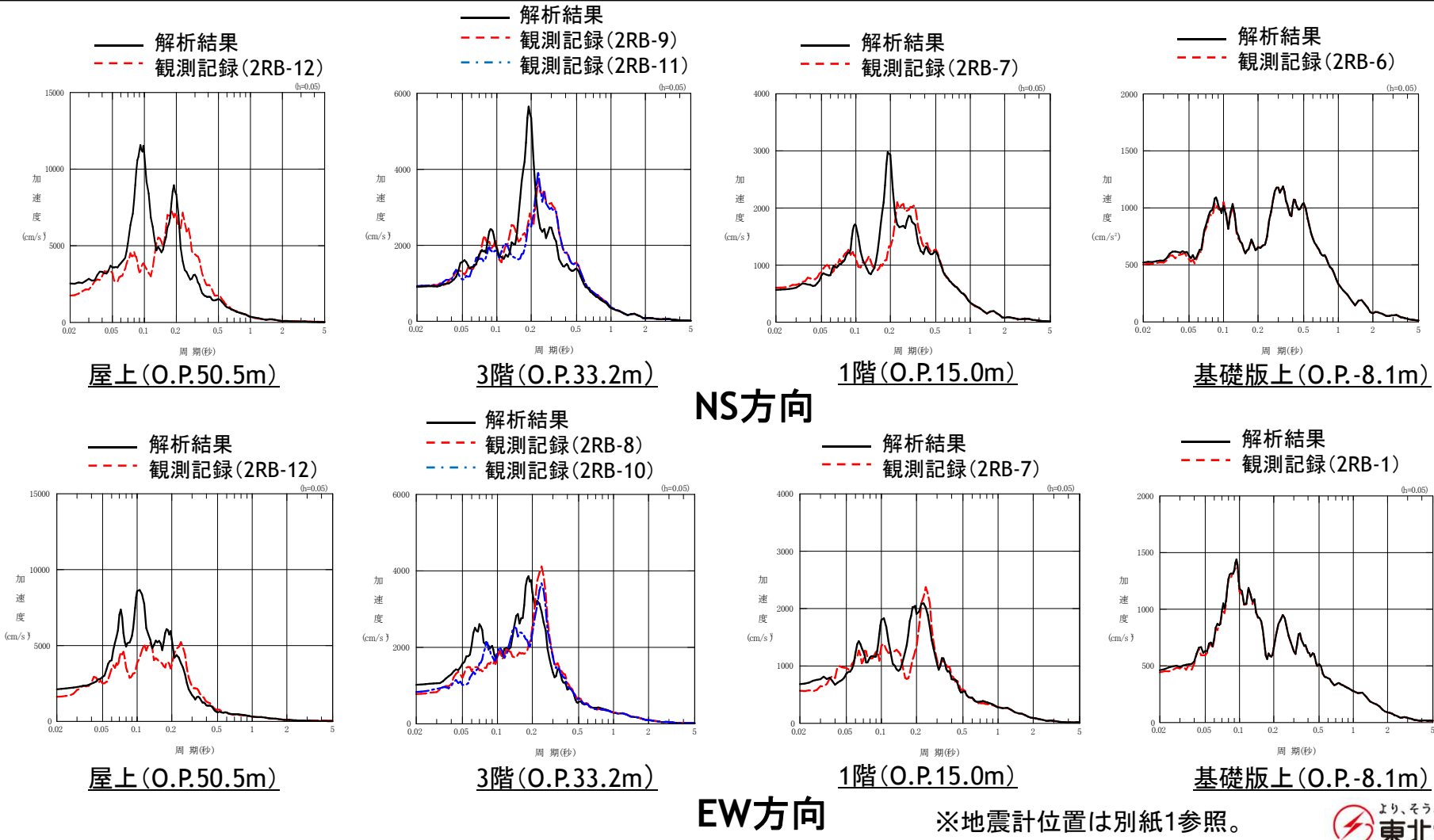
NS方向 EW方向
女川2号炉原子炉建屋 4.7地震
最大加速度分布の比較

※地震計位置は別紙1参照。

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 既工認モデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較(主な観測点) 3.11地震

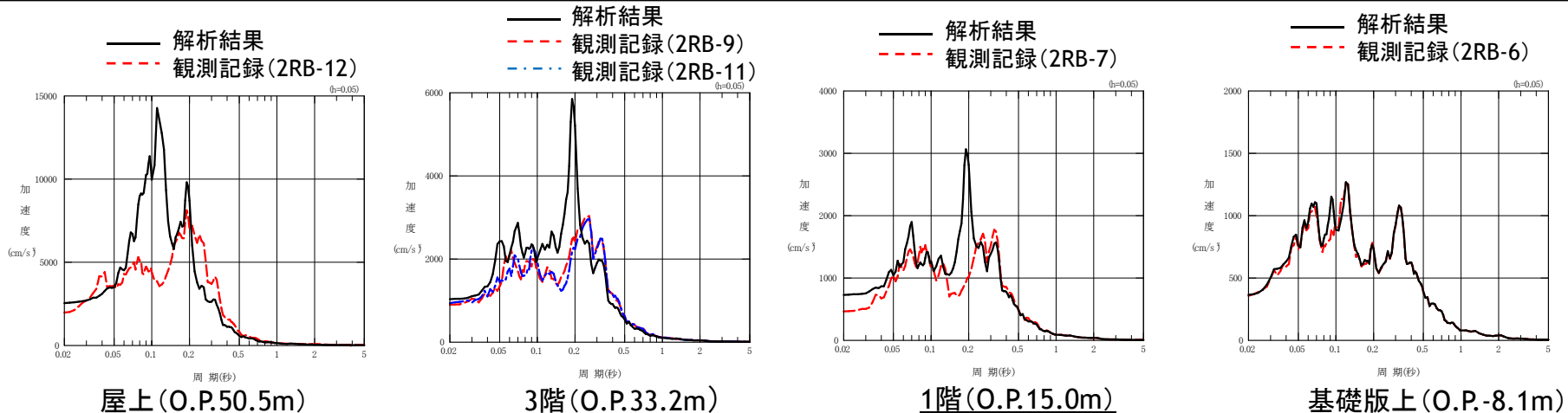
観測記録の卓越周期は地震応答解析結果の1次固有周期に相当する周期と比較して、若干長周期側となっている。屋上については、解析結果と観測記録の整合性も良くない。また、観測記録の卓越周期の振幅は、地震応答解析結果の1次固有周期に相当する振幅と比較して、若干小さい傾向にある。



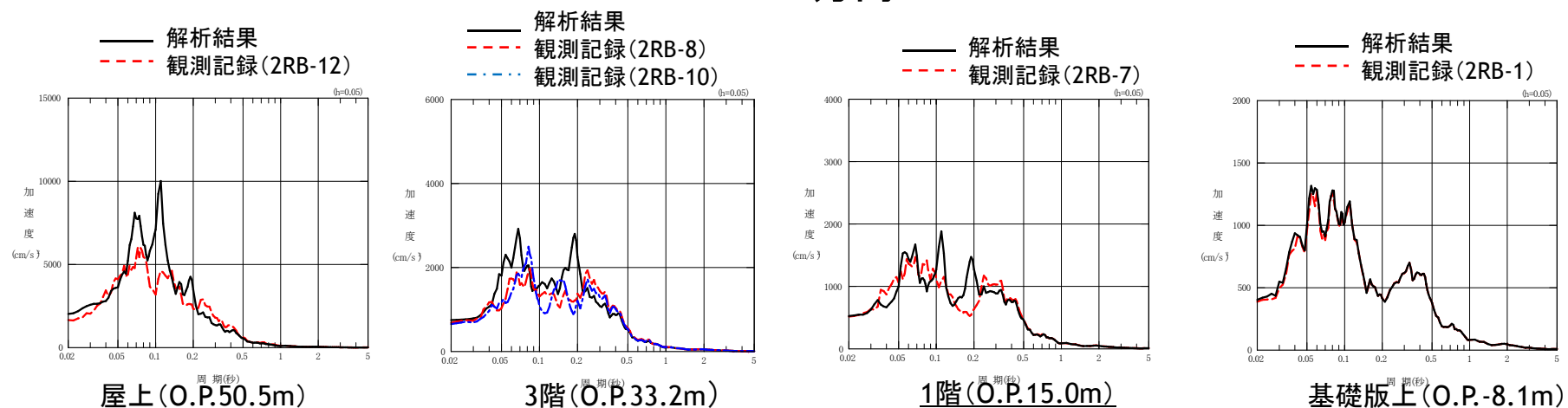
2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 既工認モデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較(主な観測点) 4.7地震

観測記録の卓越周期は地震応答解析結果の1次固有周期に相当する周期と比較して、若干長周期側となっている。屋上については、解析結果と観測記録の整合性も良くない。また、観測記録の卓越周期の振幅は、地震応答解析結果の1次固有周期に相当する振幅と比較して、若干小さい傾向にある。



NS方向



EW方向

※地震計位置は別紙1参照。

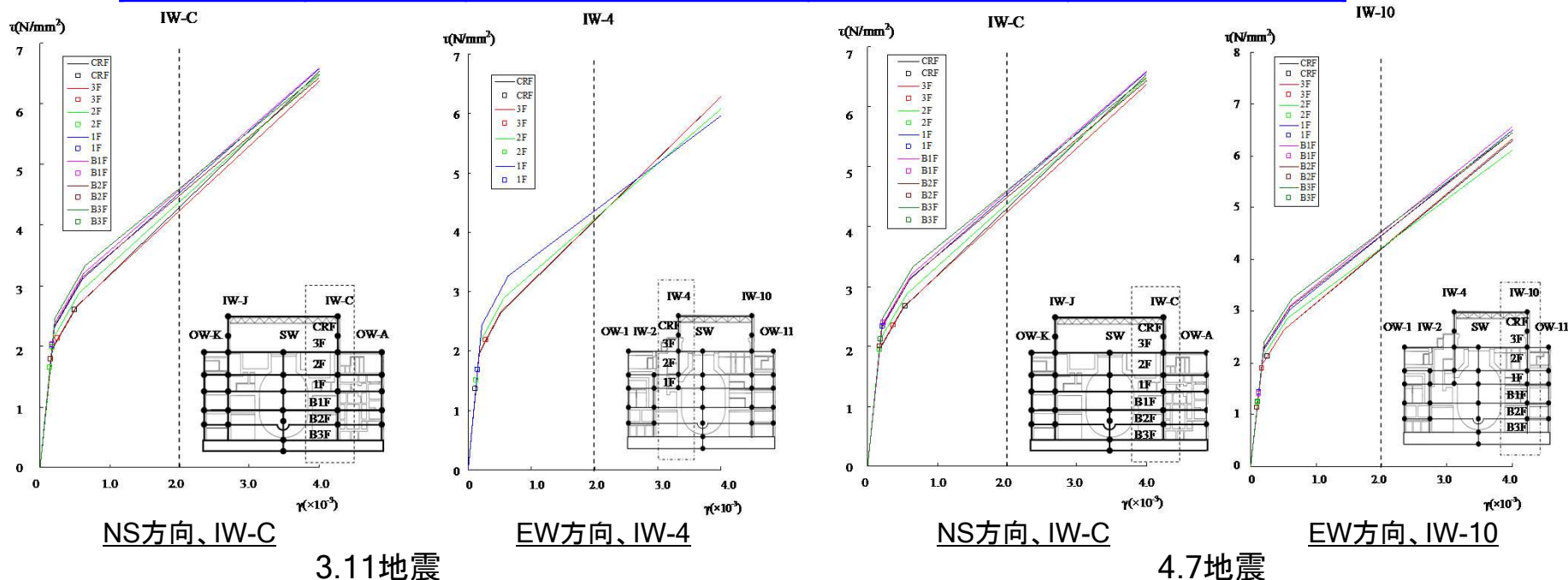
2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 既工認モデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋の最大応答せん断ひずみ

せん断スケルトン上の応答は第1折点を越えている箇所がある。オペフロ上部でひずみが大きくなるが、終局耐力に対し妥当な安全余裕を有し、機能保持限界との対応も考慮された評価基準値以下であった。

女川2号炉原子炉建屋耐震壁の最大応答せん断ひずみ

		解析結果		評価基準値
		最大応答せん断ひずみ	部位	
3.11地震	NS方向	0.49×10^{-3}	IW-C CRF	2.0×10^{-3}
	EW方向	0.28×10^{-3}	IW-4 3F	
4.7地震	NS方向	0.54×10^{-3}	IW-C CRF	
	EW方向	0.25×10^{-3}	IW-10 CRF	



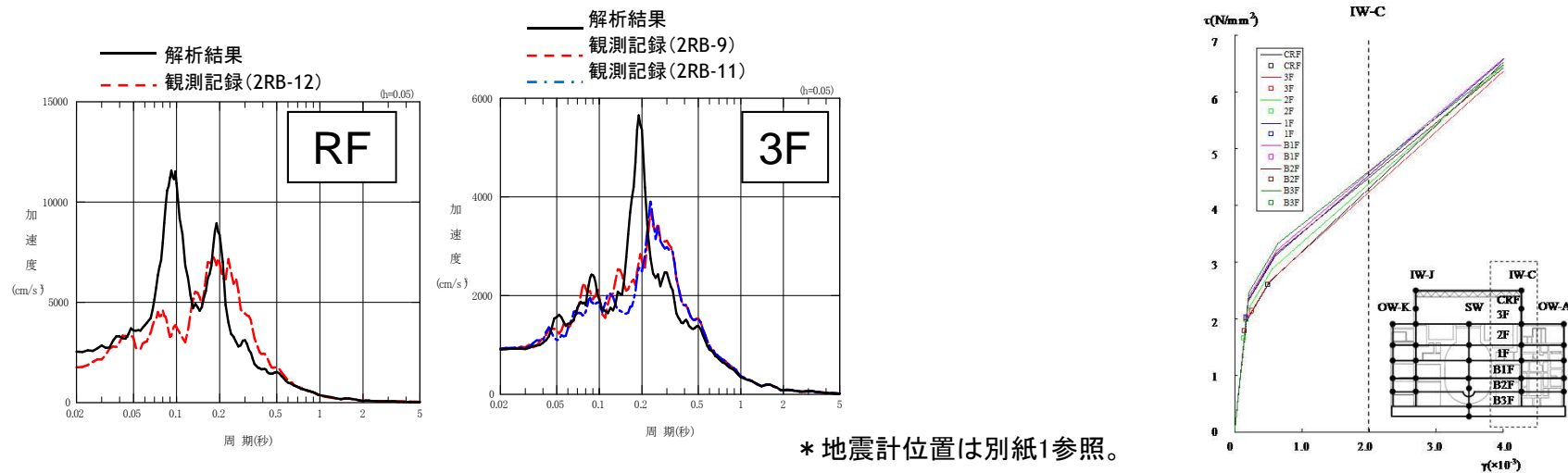
女川2号炉原子炉建屋 せん断スケルトン上の最大応答値

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 既工認モデルを用いた評価のまとめ

既工認モデル※1を用いた地震応答解析結果は、3.11地震および4.7地震とも、概ね各階の観測記録の傾向をとらえていることに加え、以下の特徴点がある。

- ①せん断スケルトン上の応答は第1折点付近の箇所があり、また、加速度応答スペクトルにおいて、観測記録の卓越周期は地震応答解析結果の1次固有周期に相当する周期と比較して、若干長周期側となっている。
- ②特にオペフロ階(3階)から上部の応答は、せん断スケルトンの第1折点を越えている。また、屋上の加速度応答スペクトルについては解析結果と観測記録の整合性も良くない。
- ③また、加速度応答スペクトルにおいて、観測記録の卓越周期の振幅は、地震応答解析結果の1次固有周期に相当する振幅と比較して、若干小さい傾向にある。

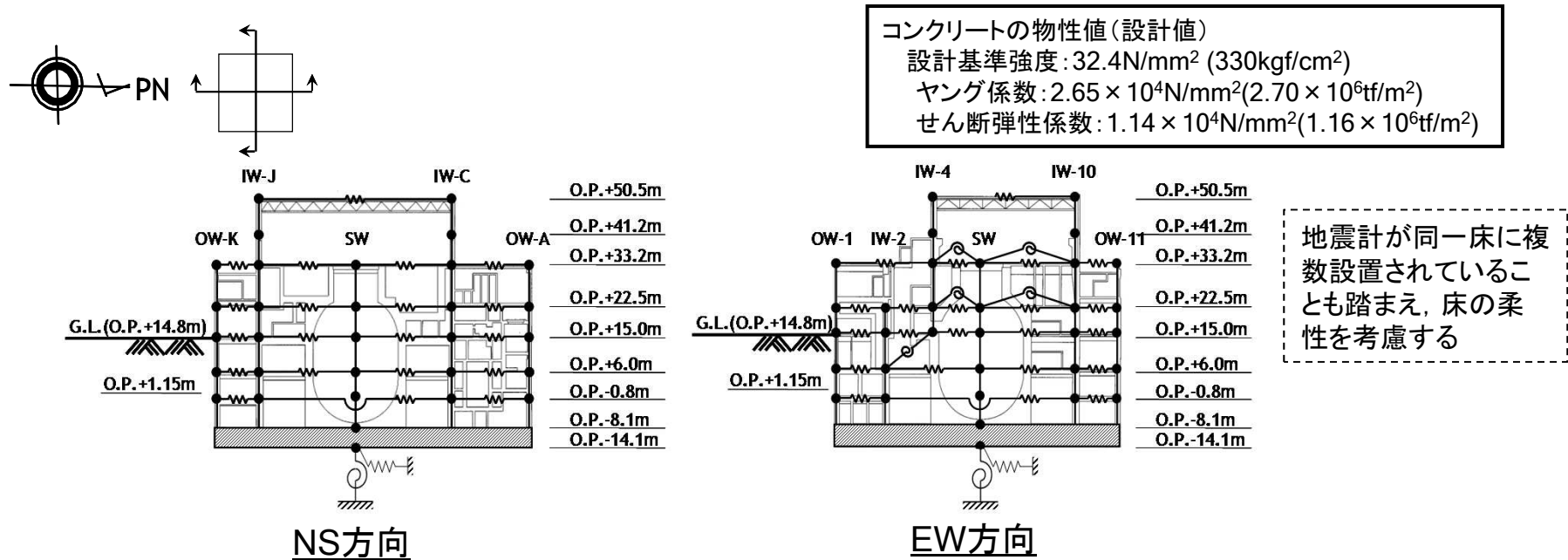
※1) 建屋の初期剛性は設計値(設計基準強度より求めた値)を使用、RC減衰5%、側面ばね考慮しない、床剛



3.11地震 女川2号炉原子炉建屋 NS方向

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 質点系シミュレーションモデルを用いた応答評価(解析モデル)

既工認モデルより観測記録と整合するシミュレーションモデルを作成し、その応答結果に基づいた建屋の健全性評価を実施した。



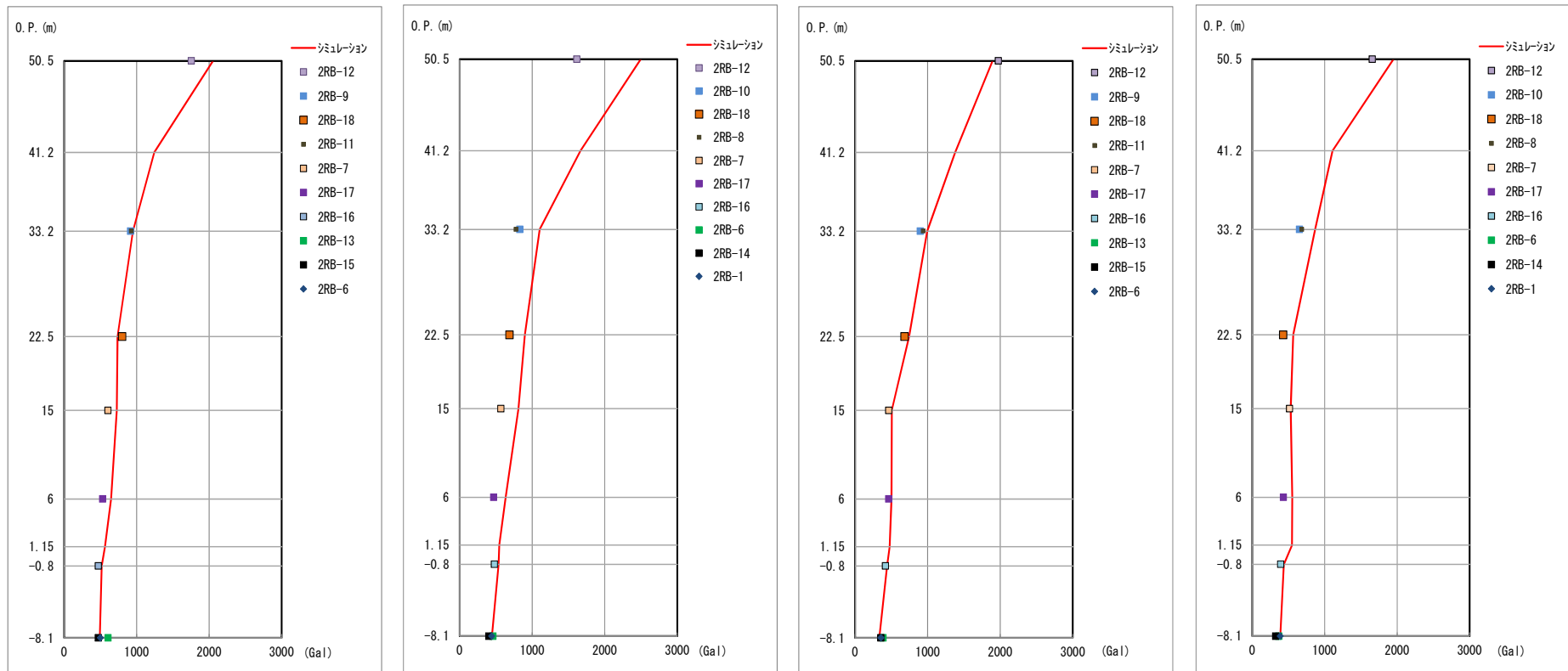
号機 建屋	地震	方向	コンクリート壁の初期剛性の設計値に対する補正係数 (観測記録と整合する等価な剛性)		減衰
			オペフロ階(3階)・クレーン階	地下3階~2階	
O-2	3.11	NS	0.3	0.75	0.07
R/B	4.7	EW	0.5	0.80	0.07

※コンクリート壁の初期剛性の設計値に対する補正係数は、観測記録との整合を確認しながらチューニングしている。補正係数の設定の考え方は別紙2参照

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 質点系シミュレーションモデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋の最大加速度分布の比較

最大加速度分布の比較では、3.11地震および4.7地震とも概ね各階の観測記録の傾向を捉えている。



※シミュレーションの最大加速度分布は各階の最大値としている。

NS方向 EW方向
女川2号炉原子炉建屋 3.11地震
最大加速度分布の比較

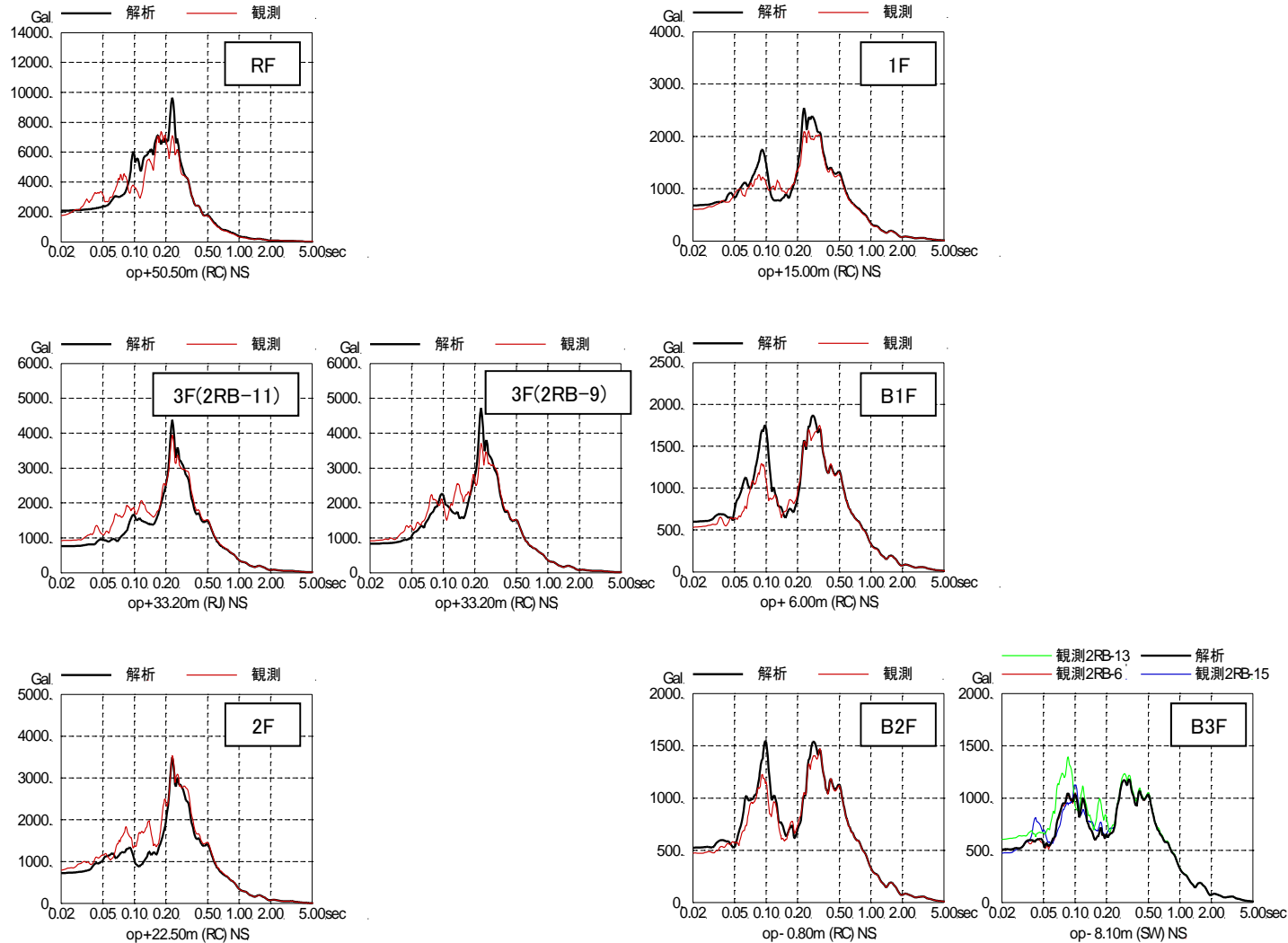
NS方向 EW方向
女川2号炉原子炉建屋 4.7地震
最大加速度分布の比較

※地震計位置は別紙1参照。

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 質点系シミュレーションモデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較(3.11地震 NS方向)

解析結果は、観測記録の卓越周期および振幅の傾向を捉えている。



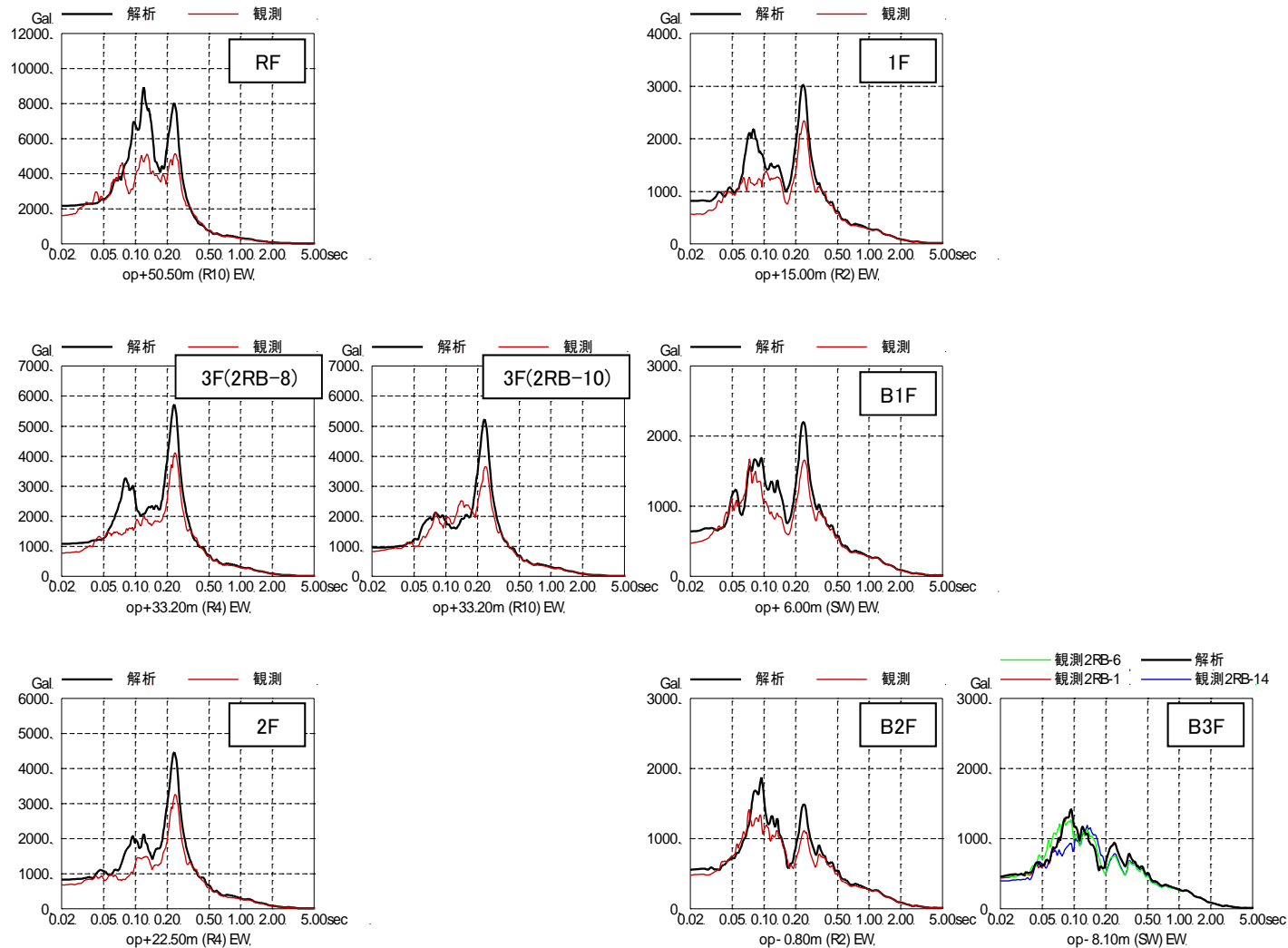
h=5%

※地震計位置は別紙1参照。

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 質点系シミュレーションモデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較(3.11地震 EW方向)

解析結果は、観測記録の卓越周期および振幅の傾向を捉えている。



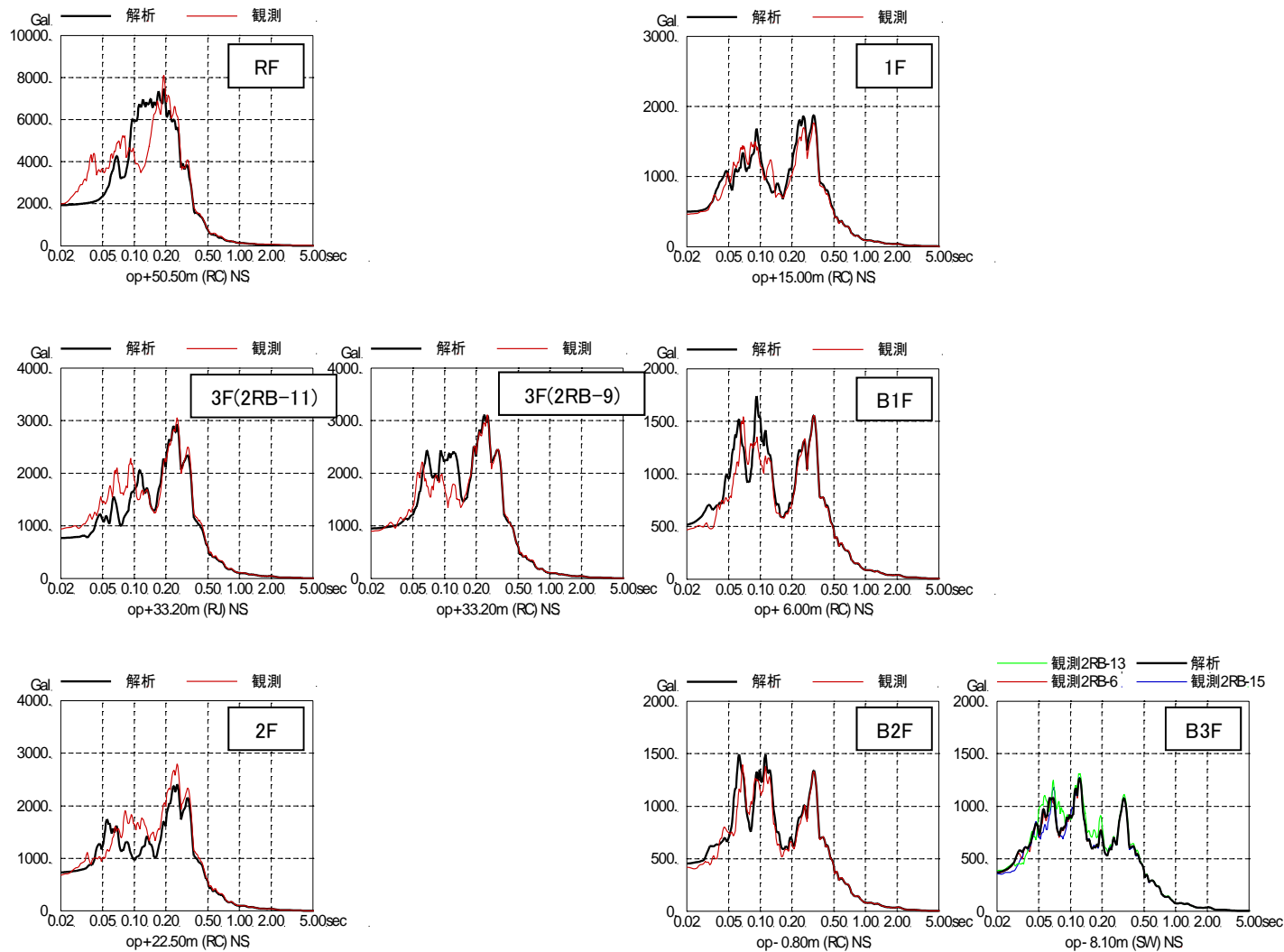
h=5%

※地震計位置は別紙1参照。

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 質点系シミュレーションモデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較(4.7地震 NS方向)

解析結果は、観測記録の卓越周期および振幅の傾向を捉えている。



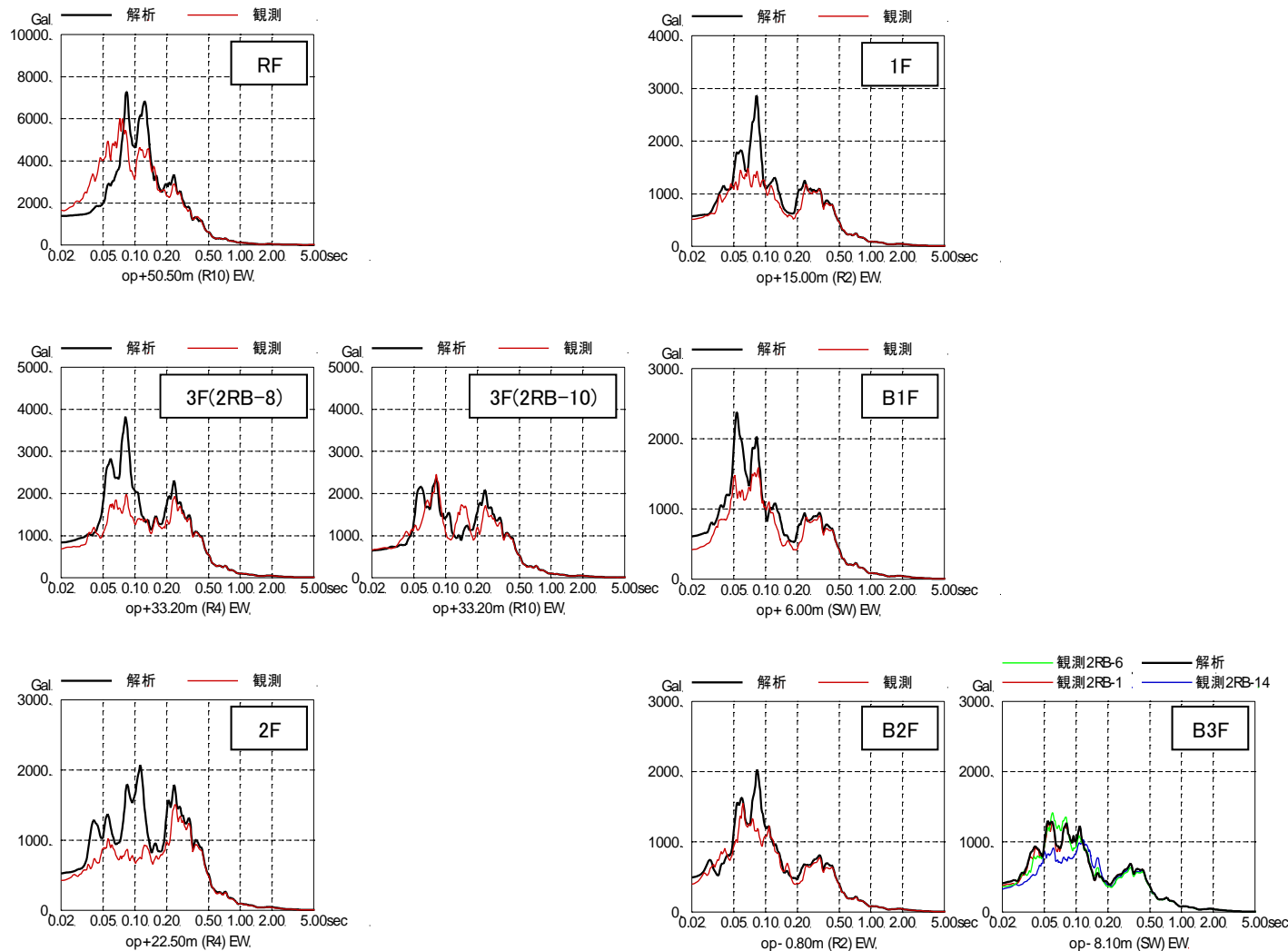
h=5%

※地震計位置は別紙1参照。

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 質点系シミュレーションモデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋の加速度応答スペクトルの比較(4.7地震 EW方向)

解析結果は、観測記録の卓越周期および振幅の傾向を捉えている。



2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 質点系シミュレーションモデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋 各階の層せん断力

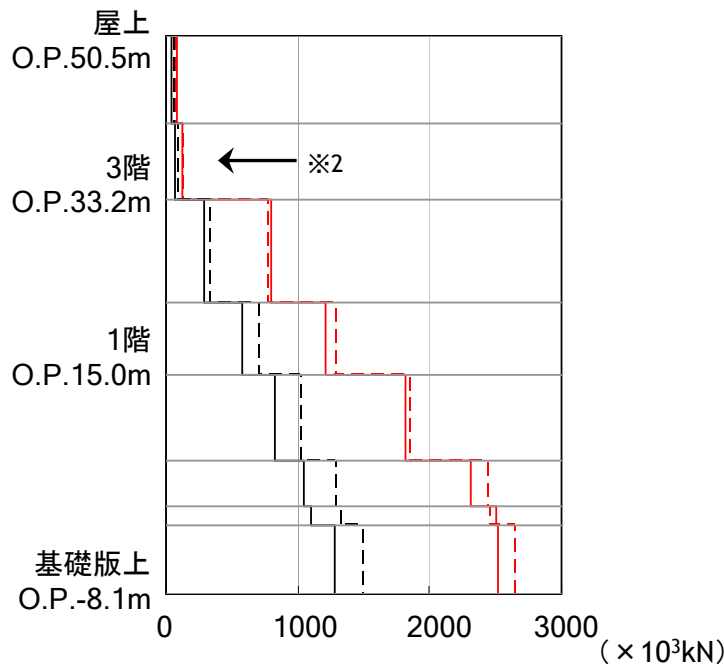
耐震壁の応答は、オペフロ上部でひずみが大きくなるが、各階の層せん断力は弾性限耐力^{※1}以下であり、鉄筋については弾性範囲であることを確認している。

なお、オペフロ上部については比較的裕度が小さいことから、断面検討や3次元FEM解析による詳細検討も実施し、鉄筋については弾性範囲であることを確認している(本資料では記載を省略)。

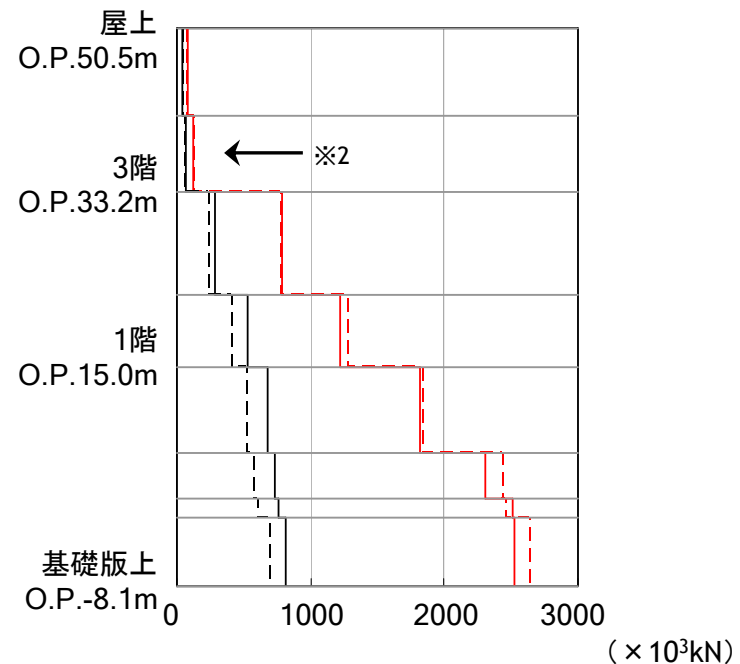
— 解析結果 (NS方向)
— 弾性限耐力(NS方向)
- - - 解析結果 (EW方向)
- - - 弾性限耐力(EW方向)

※2 比率(各階の層せん断力/弾性限耐力)の最大値は以下のとおりである。

3.11地震 :0.72(EW方向)
4.7地震 :0.60(NS方向)



シミュレーション解析結果 3.11地震



シミュレーション解析結果 4.7地震

※1 弾性限耐力:鉄筋(設計配筋量)のみで負担できる短期許容応力度 ($P_w \times \sigma_y$) から算定

P_w : せん断力を負担する耐震壁の鉄筋比

σ_y : 鉄筋の短期許容引張応力度

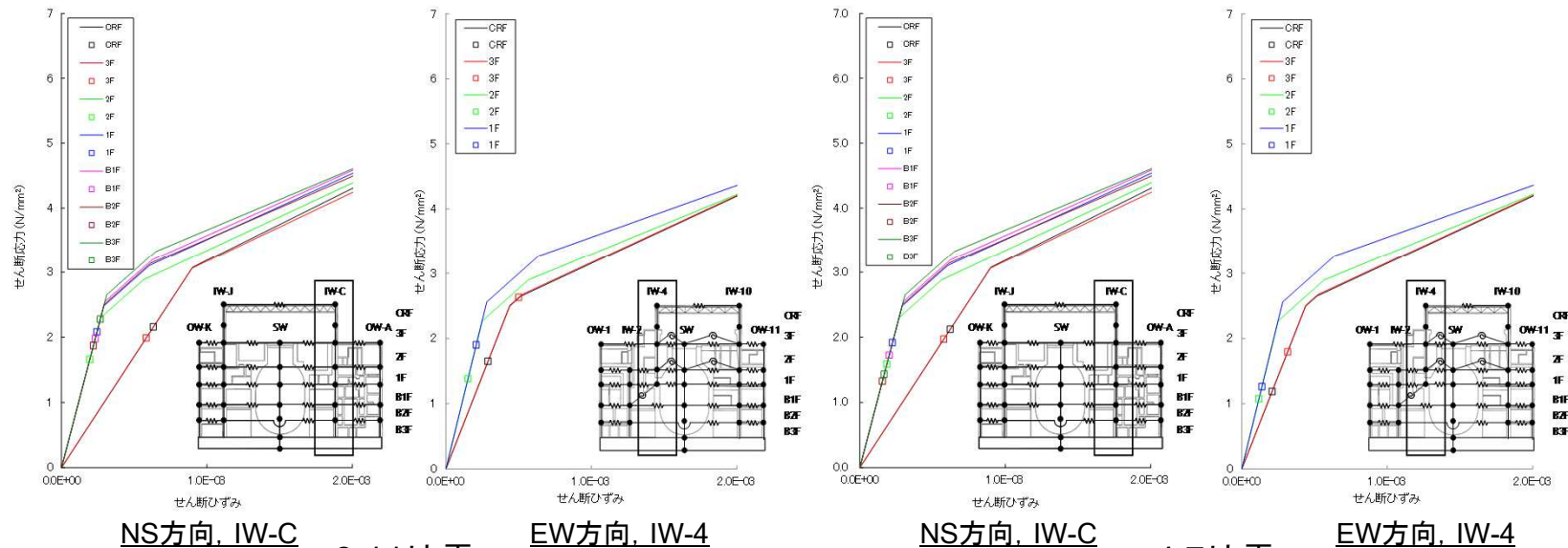
2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 質点系シミュレーションモデルを用いた応答評価(解析結果)

■ 女川2号炉原子炉建屋 耐震壁の最大応答せん断ひずみ

耐震壁の応答は、オペフロ下部は最大で $0.2 \sim 0.3 \times 10^{-3}$ であった。オペフロ上部でひずみが大きくなるが、終局耐力に対し妥当な安全余裕を有し、機能保持限界との対応も考慮された評価基準値以下であった。

原子炉建屋耐震壁の最大応答せん断ひずみ

		シミュレーション解析結果		評価基準値
		最大応答せん断ひずみ	部位	
3.11地震	NS方向	0.63×10^{-3}	IW-C CRF	2.0×10^{-3}
	EW方向	0.50×10^{-3}	IW-4 3F	
4.7地震	NS方向	0.62×10^{-3}	IW-C CRF	
	EW方向	0.32×10^{-3}	IW-4 3F	



3.11地震

4.7地震

女川2号炉原子炉建屋 せん断スケルトン上の最大応答値

2. 東北地方太平洋沖地震等に対する建屋の応答性状 まとめ

【原子炉建屋の健全性について】

- 地震後点検の結果、建屋の耐震壁にはひび割れの発生が認められたものの構造上問題となるひび割れは生じていなかった。
- シミュレーション解析の結果から、建屋の固有振動数が低下しているが耐震壁の鉄筋は弾性範囲にあり健全であることが確認された。従って、建屋は「概ね弾性範囲」であった。

【地震応答解析結果の特徴】

- 既工認モデルによる地震応答解析結果は、観測記録に対し、概ね保守的な傾向(大きい応答値)を与える。
- シミュレーションモデルではひび割れの少ないオペフロ下部においても、初期剛性は低下している。なお、RC減衰は7%程度と設計で採用している5%よりも大きな値となった。
- 耐震壁の初期剛性の低下率は3階(オペフロ上部)が大きいですが、これはひび割れの発生状況と整合的である。

→ オペフロ下部については概ね第一折点前の変形なのに対し、初期剛性の低下が認められたことについては、その要因について検討を実施した(次項)。

【今後の確認内容】

- 建屋シミュレーション解析としては、建屋全体3次元FEM解析モデルを用いた解析(等価線形解析、P52参照)も実施しており、部材毎の応力状態の確認が可能となっている。建屋の応答性状をより詳細に把握することを目的として、今後、3次元FEMモデル解析結果と点検結果によるひび割れ分布の対応について確認していく。

3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響

3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響

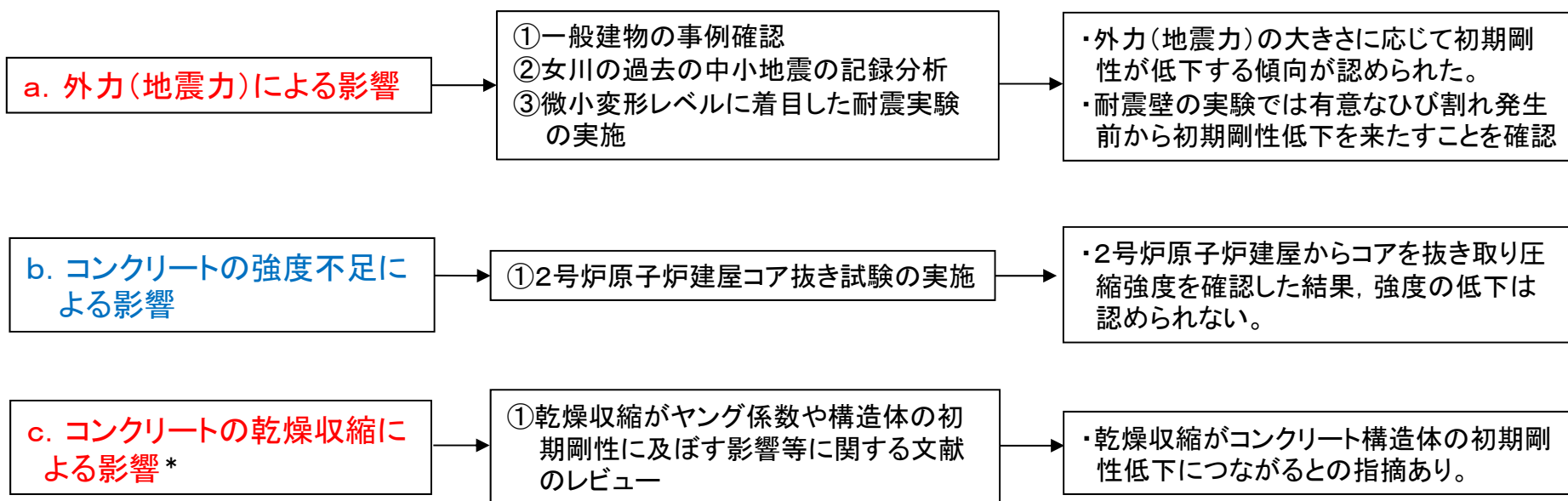
耐震壁の初期剛性低下の要因分析の概要

女川の建屋において初期剛性が低下している要因としてはa. 外力(地震力)による影響が大きいですが、オペフロ下部では弾性範囲の変形レベルに対し、初期剛性が設計値よりも低下している。この原因としては、外力(地震力)以外の影響が加わっていることが考えられる。この現象は女川の他の建屋でも認められる現象であることを踏まえると、共通して使用しているコンクリート材料が要因である可能性が高い。ここでは、地震力による初期剛性低下の傾向についての検討に加え、コンクリート材料についての検討も行った。

【初期剛性低下の要因(候補)】

【主な検討】

【検討結果】



*)女川原子力発電所では、これまで定期的に、乾燥収縮に伴い発生したひび割れの補修を実施してきている。

なお、3. 11地震に対する構造的損傷が初期剛性低下の複合的要因の一つになっている可能性もあるため、その可能性については改めて整理を行う。

3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響

耐震壁の初期剛性低下の要因分析 一般建築物における初期剛性低下の事例

【一般建築(RC, SRC造)における初期剛性低下の例】

下記に示すように一般建築においても, 3. 11地震前から建屋の固有振動数が低下し, 3. 11地震後にさらに固有振動数が低下する事例は, 特に構造被害がない場合でも多数報告されている。

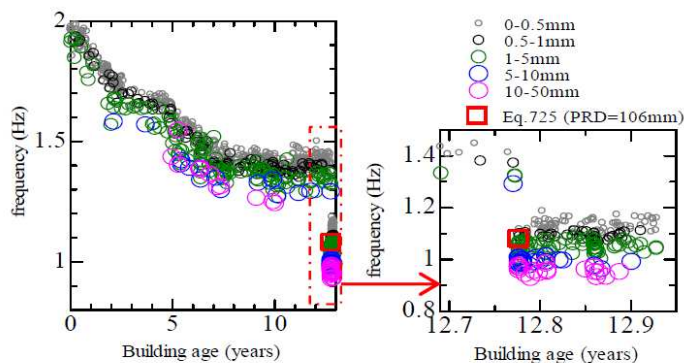


図3 1次固有振動数の経年変化

左: 竣工時からの全記録, 右: 3/11本震前後の拡大

(1) 吉田他(2012)

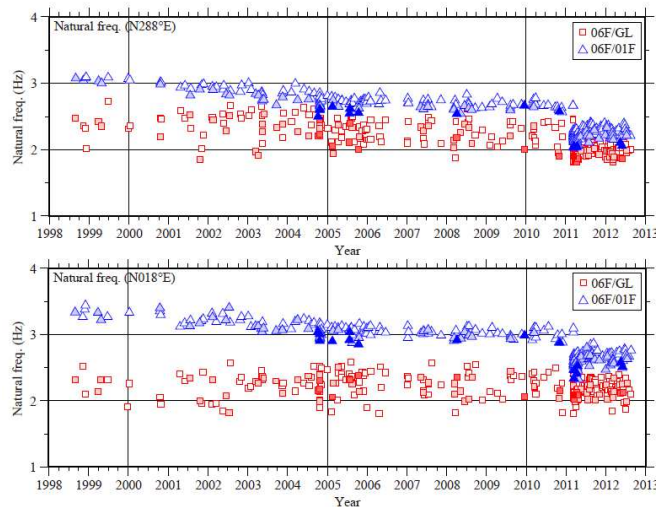
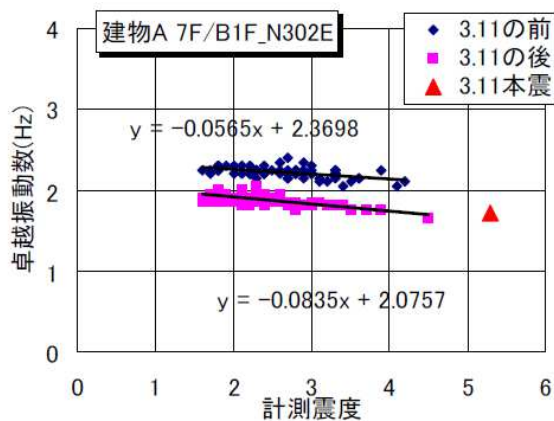
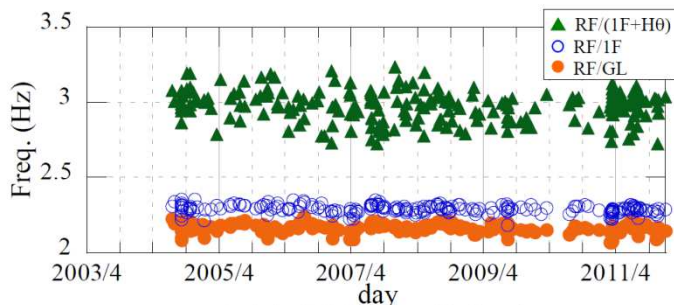


図3 固有振動数の経年変化

(2) 鹿嶋他(2013)



(3) 小山他(2012)



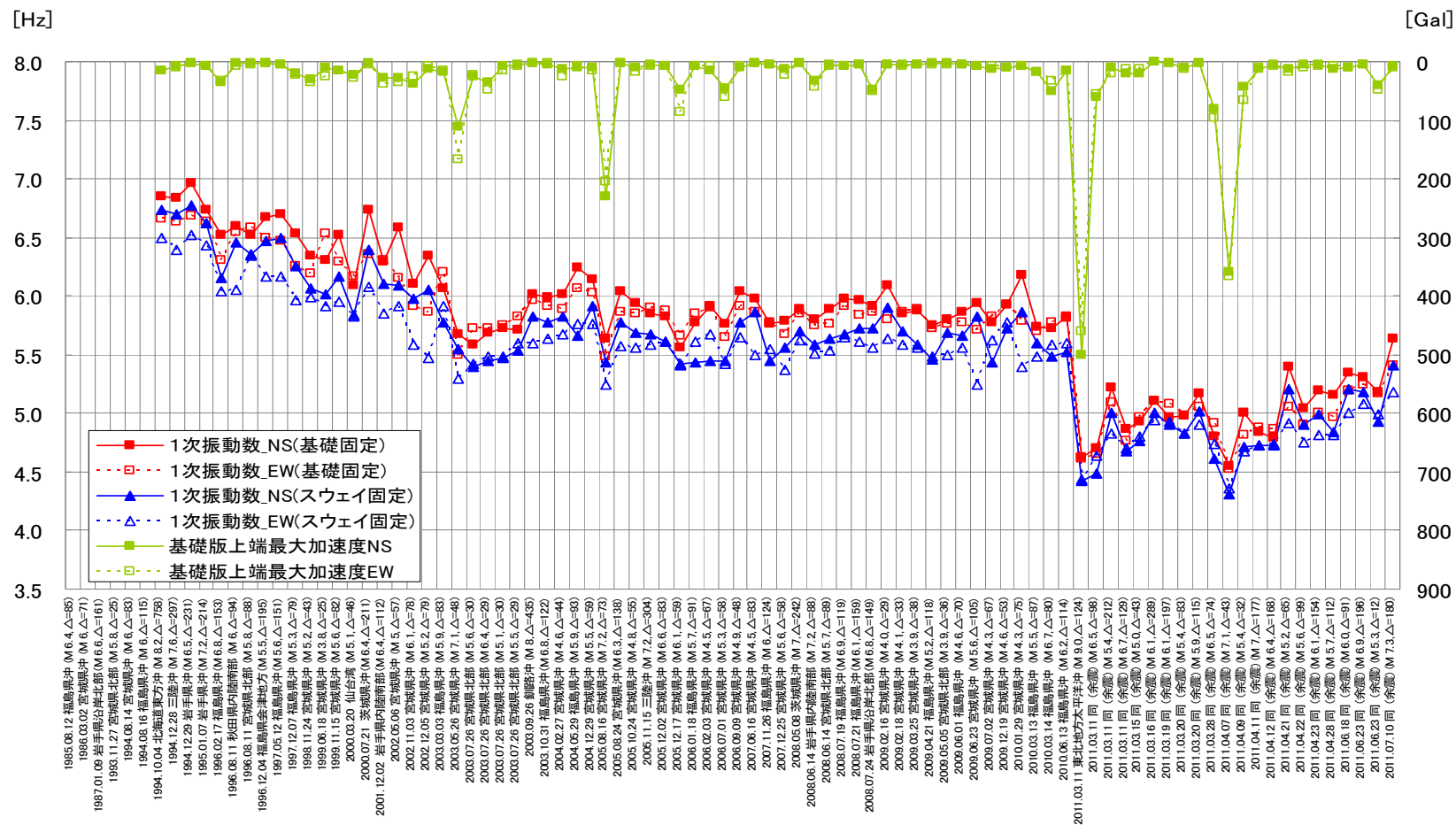
(d) 固有振動数 (短辺)

(4) 小島他(2012)

3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響

耐震壁の初期剛性低下の要因分析 過去の地震による初期剛性低下の傾向(2号炉原子炉建屋)

○女川2号炉原子炉建屋の観測記録においても、地震の振幅レベルに応じた初期剛性の低下が認められる。
 ○また、竣工直後から2003.5.26地震までは地震の経験とともに振動数が低下しているが、その後は2011.3.11地震まで比較的大きな地震を経験しても振動数が低下しない傾向が見られる。

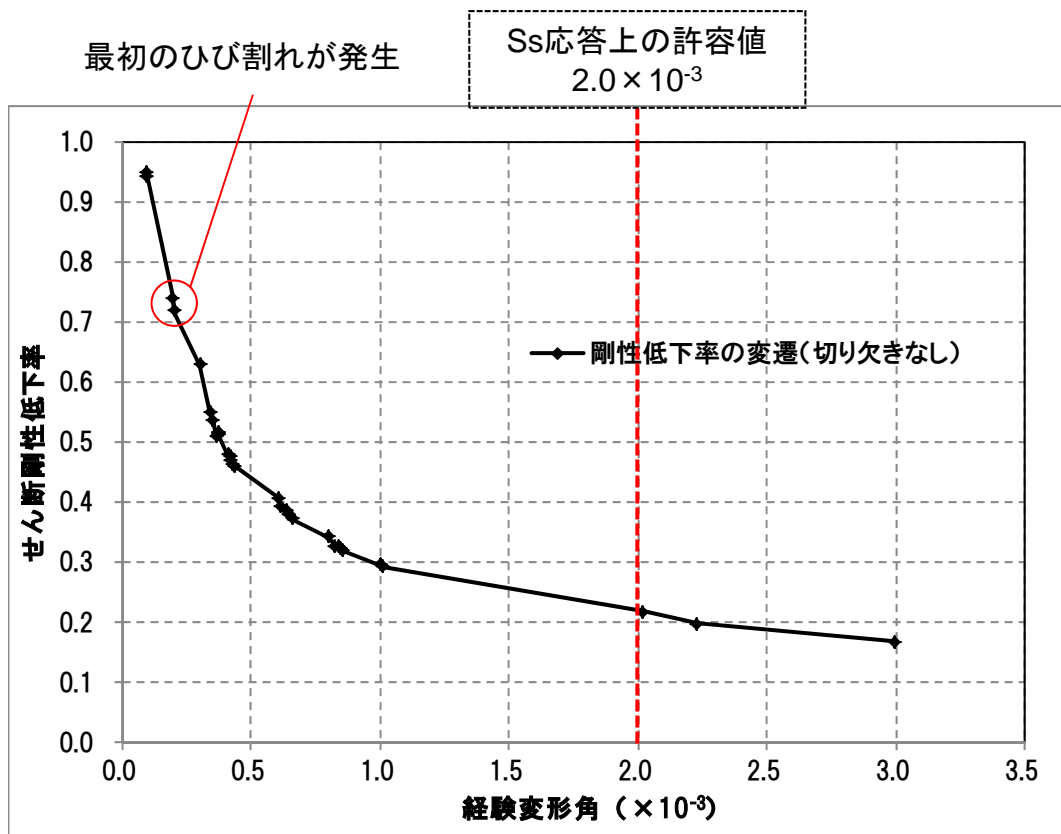


女川2号炉原子炉建屋 固有振動数低下の傾向

3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響

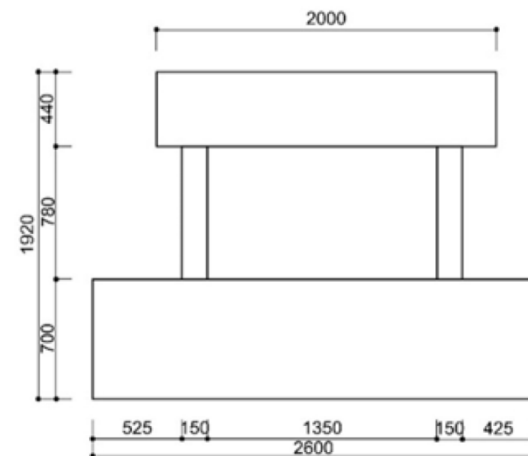
耐震壁の初期剛性低下の要因分析 微小変形レベルに着目した耐震実験

微小変形レベルから大変形レベルに至る耐震壁(4体)の静的加力実験を実施しており、初期剛性低下は最初のひび割れが発生する前後付近で既に生じることを確認した。

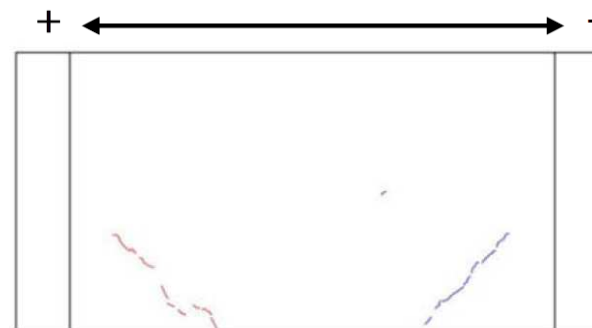


微小変形レベルにおける初期剛性低下の傾向

※試験体のコンクリート強度による初期剛性を基準とする



試験体概要



変形角 0.2×10^{-3} におけるひび割れ状況

他の試験体ではひび割れの発生が認められないものの、初期剛性が同程度低下したものもあった。

3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響

耐震壁の初期剛性低下の要因分析 2号炉原子炉建屋コア抜き試験

- オペフロ階(3階)において、耐震壁から2箇所(計6本)のコンクリートコアを採取し、コンクリート強度及び静弾性係数を評価した。
- 個々のコアの圧縮強度は設計基準強度 32.4N/mm^2 を上回る値が得られた。



- コンクリート壁の初期剛性の設計値に対する初期剛性の補正係数(初期剛性の低下)の主な要因は、コンクリート材料の圧縮強度の低下によるものではないと思われる。

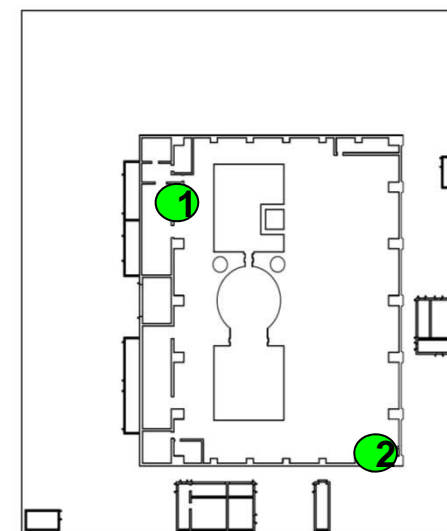
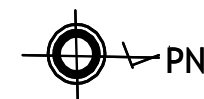
圧縮強度、静弾性係数試験結果(平成24年2月24日試験)

括弧内は設計値に対する比率を示す。

(設計値 設計基準強度: 32.4N/mm^2 、静弾性係数 26.5kN/mm^2)

	①-1	①-2	①-3	平均
圧縮強度 (N/mm^2)	46.9 (1.45)	46.4 (1.43)	44.3 (1.37)	45.9 (1.42)
静弾性係数 (kN/mm^2)	30.8 (1.16)	31.7 (1.20)	29.9 (1.13)	30.8 (1.16)

	②-1	②-2	②-3	平均
圧縮強度 (N/mm^2)	55.3 (1.71)	59.5 (1.84)	54.9 (1.69)	56.6 (1.75)
静弾性係数 (kN/mm^2)	33.2 (1.25)	34.2 (1.29)	33.1 (1.25)	33.4 (1.26)



コア採取位置

3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響

耐震壁の初期剛性低下の要因分析 コンクリートの乾燥収縮による影響(文献レビュー)

1. 乾燥収縮がコンクリートの初期剛性に与える影響

- ・供試体による試験:「骨材寸法が大きくて、乾燥によりコンクリートに内部ひび割れが発生すると、それに伴って、ヤング係数が低下する」(寺西・樋口(2013))。「これは、乾燥により生じた内部ひび割れが、ヤング係数試験の圧縮載荷時に徐々に閉じていき、その分の見かけ上のひずみが弾性ひずみに加わることが原因と推察される」(佐藤・他(2015))。
- ・乾燥を受けたコンクリート構造物の解析的検討:「乾燥を受けない供試体については鉄筋近傍よりひび割れが進展しており、そのとき全断面でほぼコンクリートの引張強度に達する」のに対し、「乾燥によりあらかじめ表面付近にひび割れが存在する供試体については表面でのひび割れが伸びている」、「特にひび割れ先端では応力集中が起きている」、「コンクリート全体で平均をとると貫通ひび割れ発生時の引張応力はコンクリートの引張強度に比べて低くなっている」。また、「ひずみが大きくなる領域では、引張応力は乾燥させない供試体の引張応力に漸近する。これはひずみの十分大きい領域では乾燥の影響に比べて載荷によって加わる力の影響が大きくなるためであると考えられる」(江間・石田・前川(2002))。
- ・コンクリート角柱供試体を用いた一軸引張試験:解析において見られた乾燥を受けた場合コンクリート表面からひび割れが進行するという現象も、実際に観測される現象を再現している」(江間・石田・前川(2002))。

2. 乾燥収縮の経年的変化

コンクリートの乾燥収縮に関しては、コンクリート打設後に急激に進行し、長期的には安定状態に入ることが知られている。日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」では経年的変化に関する評価式が提案されているが、これに基づき女川2号炉原子炉建屋の乾燥収縮の進行程度を評価すると、概ね収束した状態となっている。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = k \cdot t_0^{-0.08} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \cdot \left(\frac{t - t_0}{0.16 \cdot (V/S)^{1.8} + (t - t_0)} \right)^{1.4 \cdot (V/S)^{-0.18}} \quad (3.1)$$

$$k = (11 \cdot W - 1.0 \cdot C - 0.82 \cdot G + 404) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3$$

ここに、 $\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥開始材齢 t_0 日における材齢 t 日の収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

W : 単位水量 (kg/m^3)

C : 単位セメント量 (kg/m^3)

G : 単位粗骨材量 (kg/m^3)

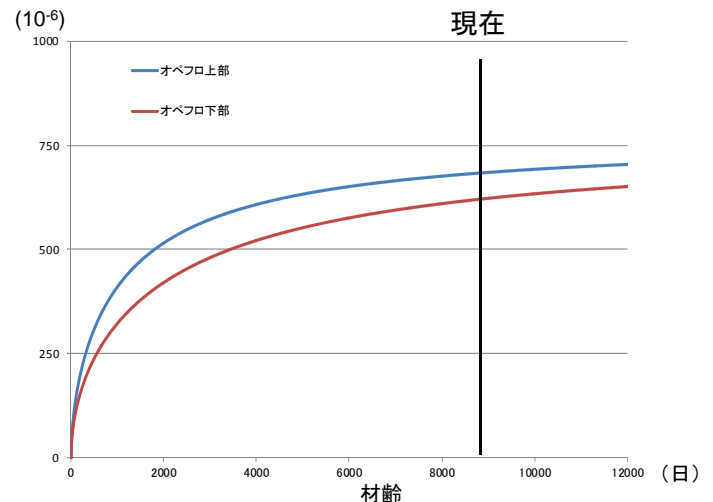
h : 相対湿度 (%) ($40\% \leq h \leq 100\%$)

V : 体積 (mm^3)

S : 外気に接する表面積 (mm^2)

V/S : 体積表面積比 (mm) ($V/S \leq 300\text{mm}$)

$\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: それぞれ、骨材の種類の影響、セメントの種類の影響、混和材の種類の影響を表す修正係数で、下表による



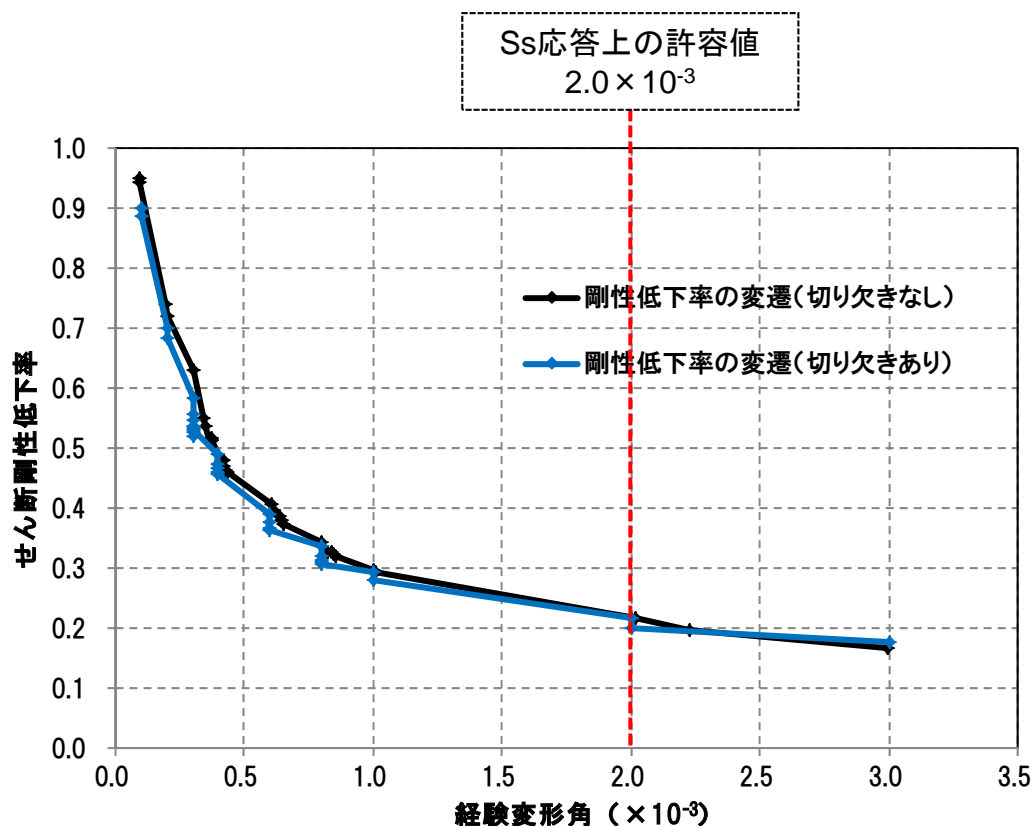
収縮ひずみの算定例(女川2号炉原子炉建屋)

「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」(日本建築学会)から抜粋

3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響

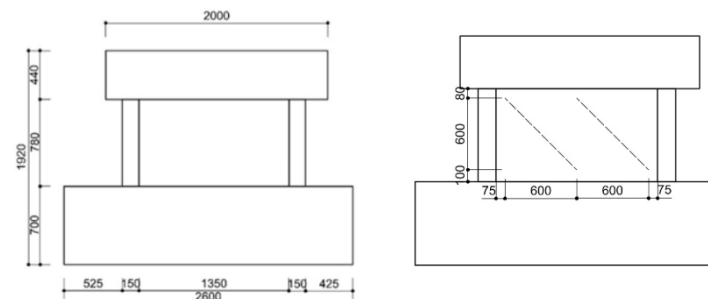
初期剛性低下が終局耐力に与える影響 繰り返し荷重を加えた実験

- ・微小変形レベルから大変形レベルに至る耐震壁の静的加力実験から、荷重の繰り返し数の多少が耐震壁の初期剛性低下に与える影響はほとんど無いこと(基本的には荷重の大きさが更新されない限り壁の初期剛性はほぼ一定であることを確認)。
- ・また、Ss応答に対する許容値付近では、壁には非常に多くのひび割れが発生した状態となり、初期段階にひび割れ相当切り欠きを設けた試験体との差異は認められないことを確認。



微小変形レベルにおける初期剛性低下の傾向

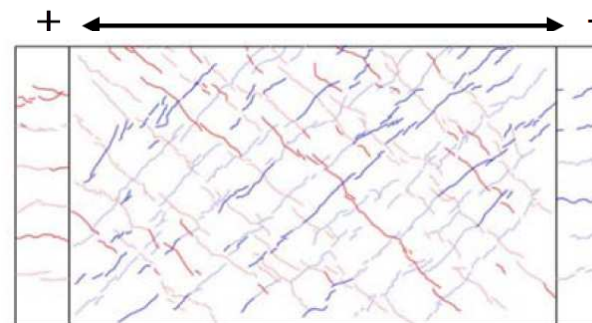
※試験体のコンクリート強度による初期剛性を基準とする



切り欠きなし

切り欠きあり

試験体概要

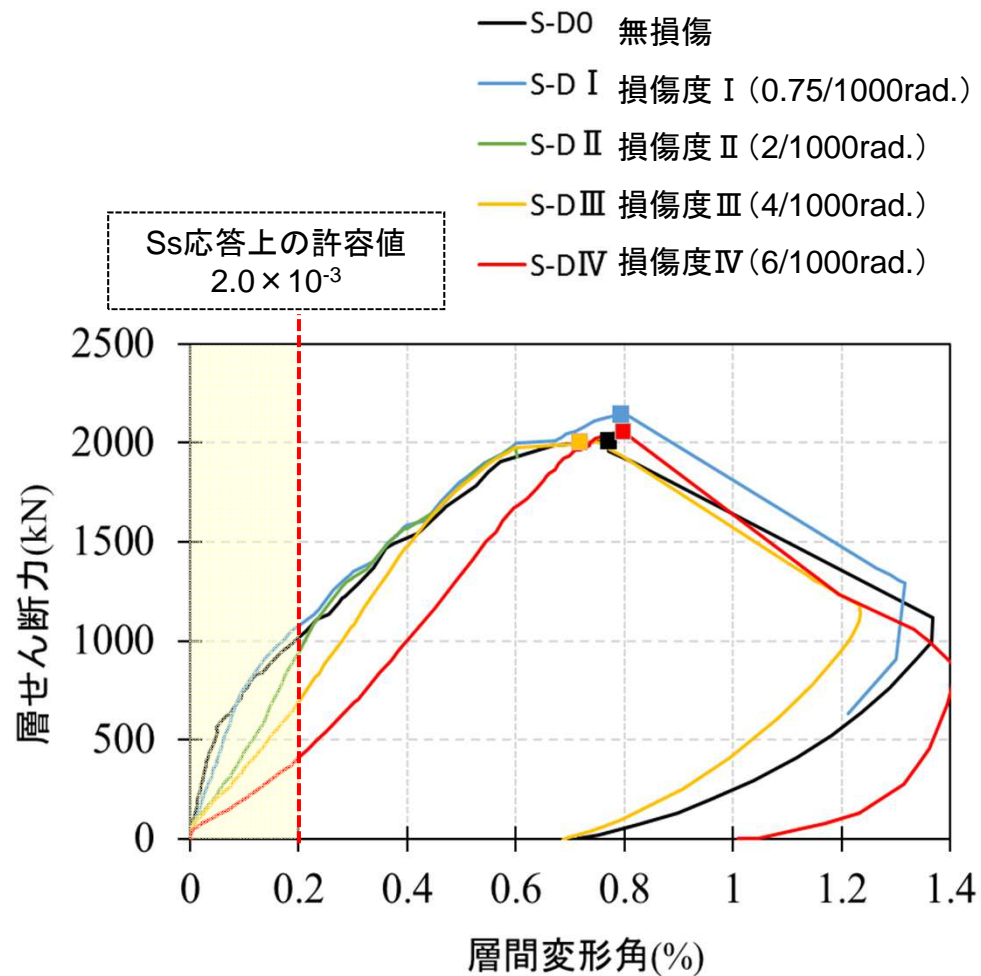


変形角 2.0×10^{-3} におけるひび割れ状況 (切り欠きなし)

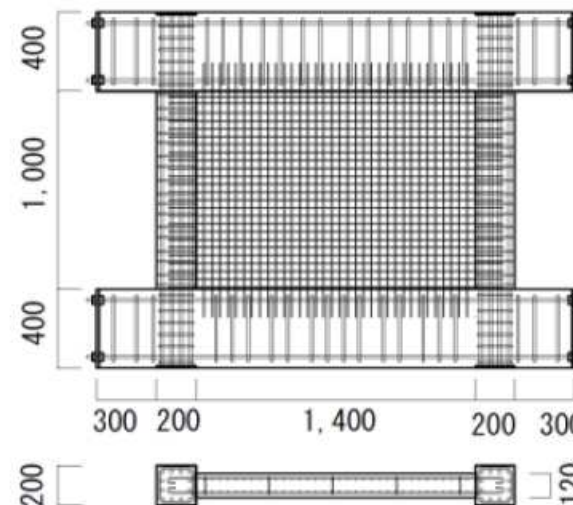
3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響

初期剛性低下が終局耐力に与える影響 損傷程度の違いが終局耐力に与える影響の確認実験

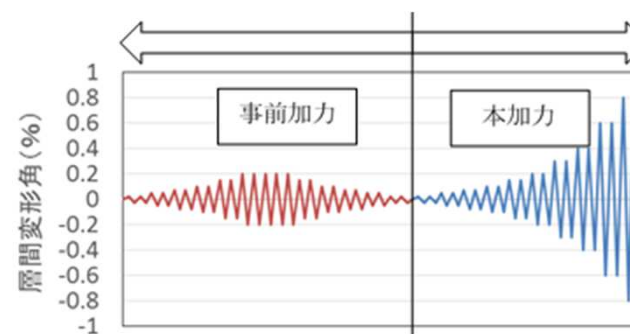
事前加力により損傷を与えた耐震壁と損傷を受けていない耐震壁の終局耐力を比較する静的加力実験を実施しており、耐震壁の終局耐力は損傷度合いにほとんど影響されないことを確認した。



事前に損傷を与えた各試験体の荷重－変形関係



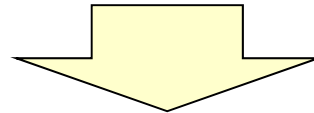
試験体概要



加力パターン概念図

3. 耐震壁の初期剛性低下の要因と終局耐力に与える影響 まとめ

- 女川の建屋の初期剛性の低下は、耐震壁の地震によるひび割れの発生と乾燥収縮による影響と考えられる。なお、女川2号炉の場合、乾燥収縮の進行は概ね収束した状態と評価される。
- 耐震壁の S_s に対する評価基準値(2.0×10^{-3})付近では、壁に多くのひび割れが発生した状態となり、初期段階のひび割れの多少の影響は受けない。
- 更に、損傷を受けてひび割れが多く発生した耐震壁の終局耐力は、その影響を受けていない耐震壁と同等である。

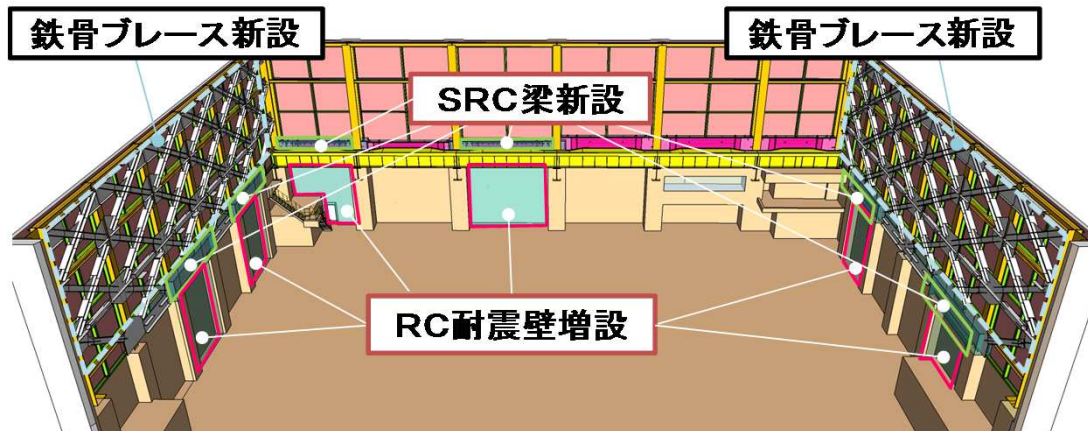
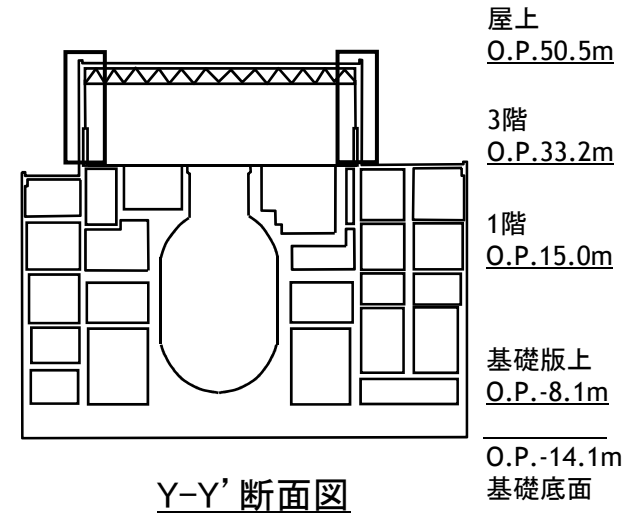
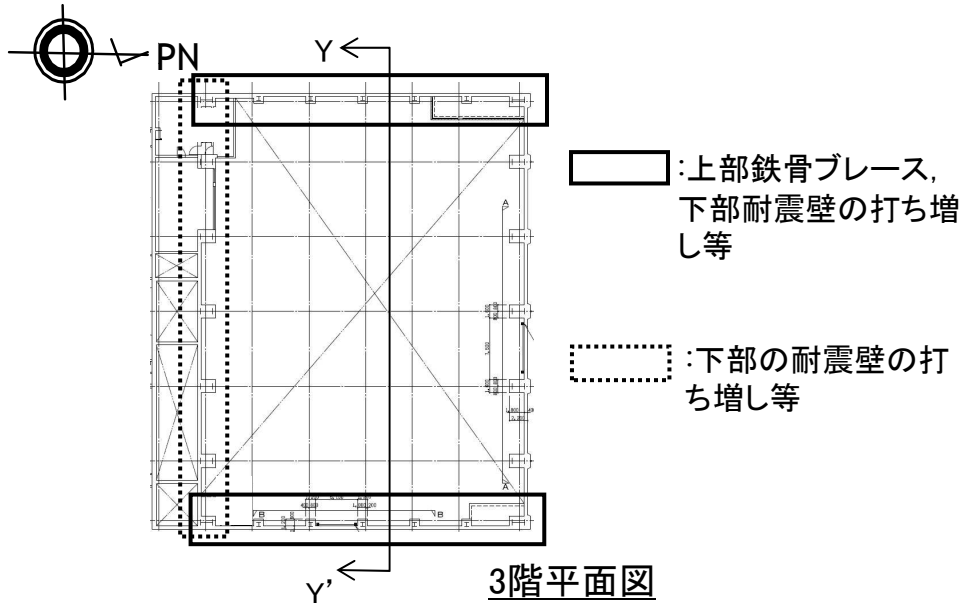


以上の傾向を設計に用いる地震応答解析モデルに反映する。

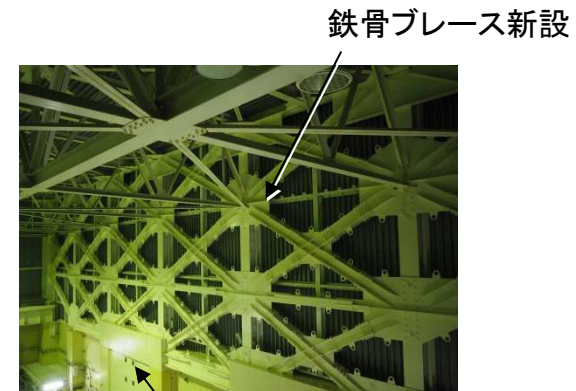
4. オペフロ上部耐震裕度向上工事の概要

4. オペフロ上部耐震裕度向上工事の概要 工法の概要と特徴

女川2号炉原子炉建屋については、基準地震動 S_s が従来より増大しているため、特に耐震裕度の低いオペフロ上部を対象に耐震裕度向上工事を実施しており、その結果を設計に用いる地震応答解析モデルに反映している。



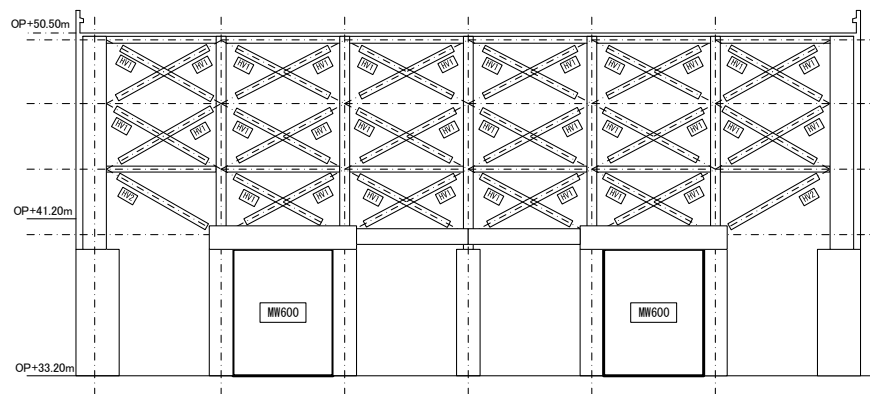
工事概要(北面より)



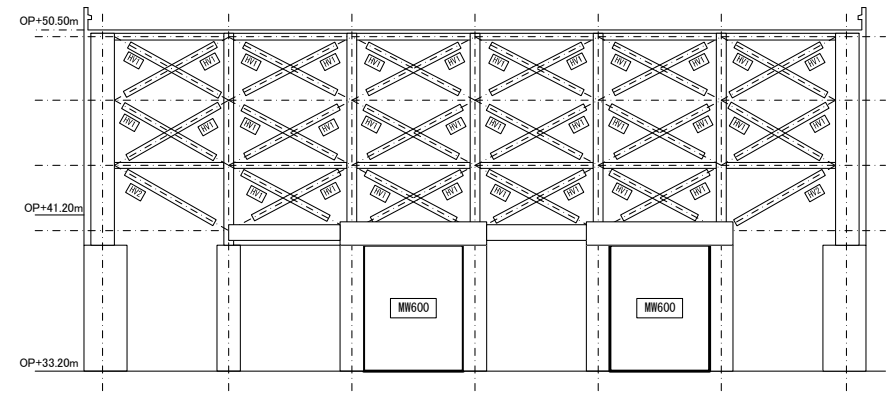
耐震工事状況

4. オペフロ上部耐震裕度向上工事の概要 工法の概要と特徴

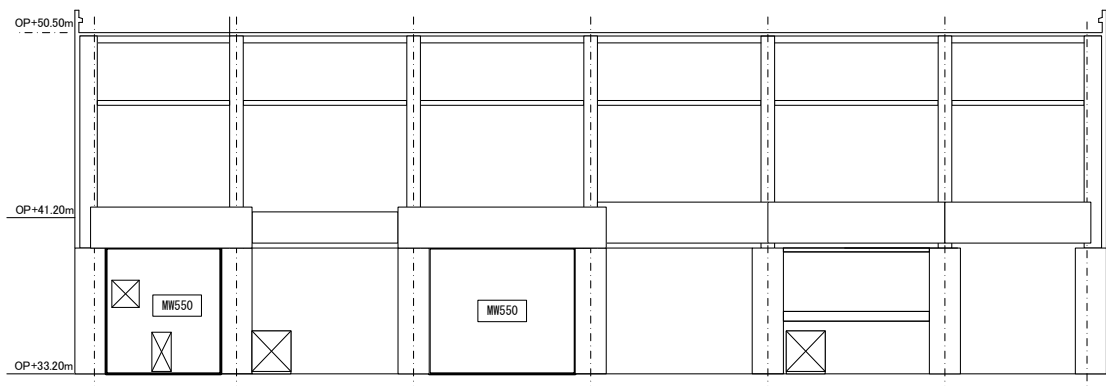
- 鉄骨ブレースのクレーン階レベルの端部は、既存クレーンのランウェイガータとの干渉を考慮した配置。
- 新設のRC造壁は、四辺拘束されるように天端には梁を追加設置。
- 東面と西面は、クレーン階から屋上階の鉄骨ブレースが負担する軸力が、新設RC造壁にスムーズに移行するように、RC造壁間はS造梁、新設RC造上部はSRC梁を設置。
- 南面は、下屋屋上を含む上部からの伝達される力を新設RC壁にスムーズに移行するように、クレーン階レベルにRC梁を配置。



IW-C通り面



IW-J通り面

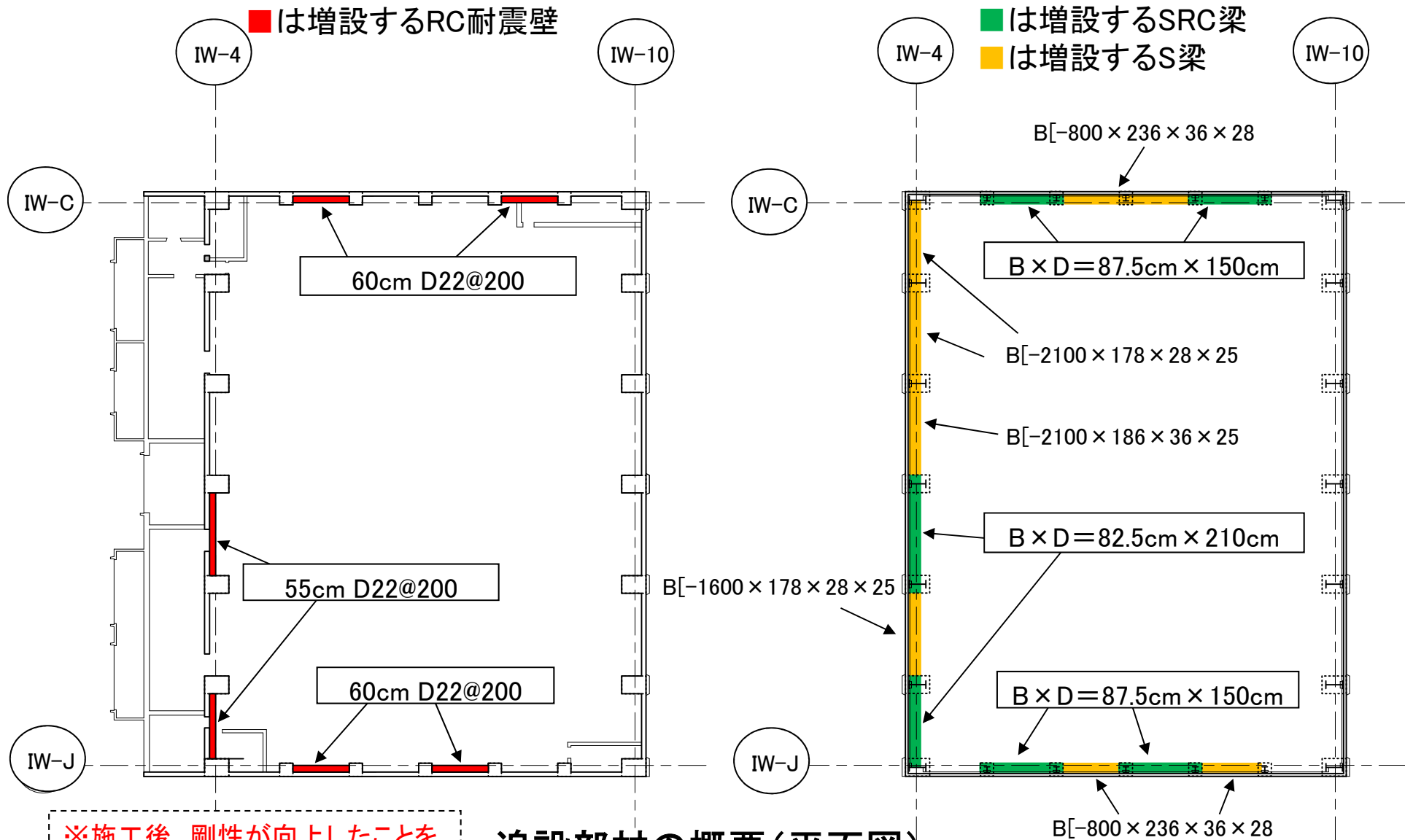


IW-4通り面

※事前に工法の有効性を確認するための耐震実験も実施している

追設部材の概要(立面図)

4. オペフロ上部耐震裕度向上工事の概要 工法の概要と特徴



※施工後、剛性が向上したことを地震観測記録から確認している。

追設部材の概要(平面図)

5. 設計に用いる地震応答解析モデルの設定

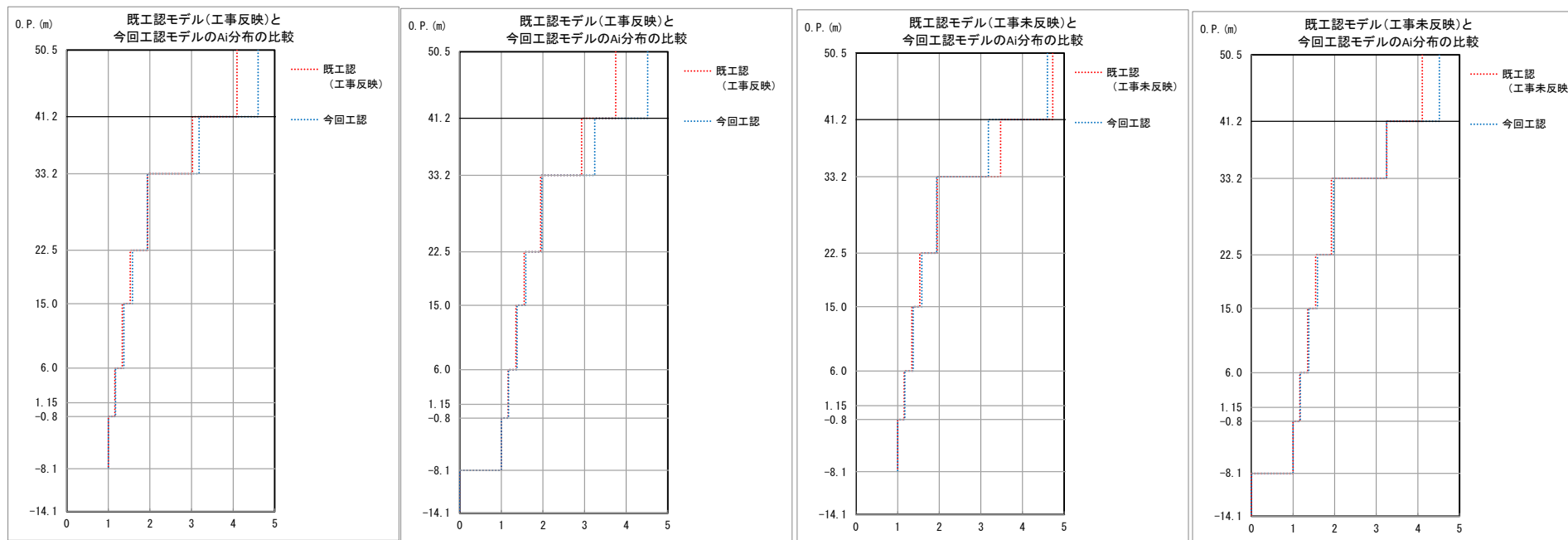
静的地震力評価(地震層せん断力分布係数評価)に用いるモデル

モデル設定の基本的考え方

	既工認モデル	耐震バックフィットモデル(既工認との違い)
モデル設定の考え方	<ul style="list-style-type: none"> ・女川の場合, 硬質岩盤でまた動的地震力に対する地震応答解析モデルでは埋込み効果を見逃していることから, 静的地震力(3Ci, 保有水平耐力)は弾性設計用地震動による地震力に対して同等となっている。このことから, 静的地震力を算定する際に用いるAi分布は, 弾性設計用のモデルによる固有値解析結果に基づき設定している。 	<ul style="list-style-type: none"> ・弾性設計用地震動Sd(暫定)と静的地震力の関係は既工認と同様のため, 静的地震力(3Ci, 保有水平耐力)を算定する際に用いるAi分布は, 弾性設計用のモデルによる固有値解析結果に基づき設定している。 ・なお, オペフロ上部については耐震裕度向上工事を反映している。

5. 設計に用いる地震応答解析モデルの設定 地震層せん断力分布係数 A_i 分布の比較

- ①既工認モデル(工事反映, 初期剛性低下非考慮)と今回工認モデル(工事反映, 初期剛性低下考慮)の比較では、オペフロ上部において今回工認モデルが優位に上回っている。
- ②既工認モデル(工事未反映, 初期剛性低下非考慮)と今回工認モデル(工事反映, 初期剛性低下考慮)の比較では、オペフロ上部においてEW方向は今回工認モデルが若干上回っているが、NS方向では若干下回る結果となった。



NS方向

EW方向

NS方向

EW方向

Ai分布の比較

5. 設計に用いる地震応答解析モデルの設定 弾性設計用地震動Sd評価に用いるモデル

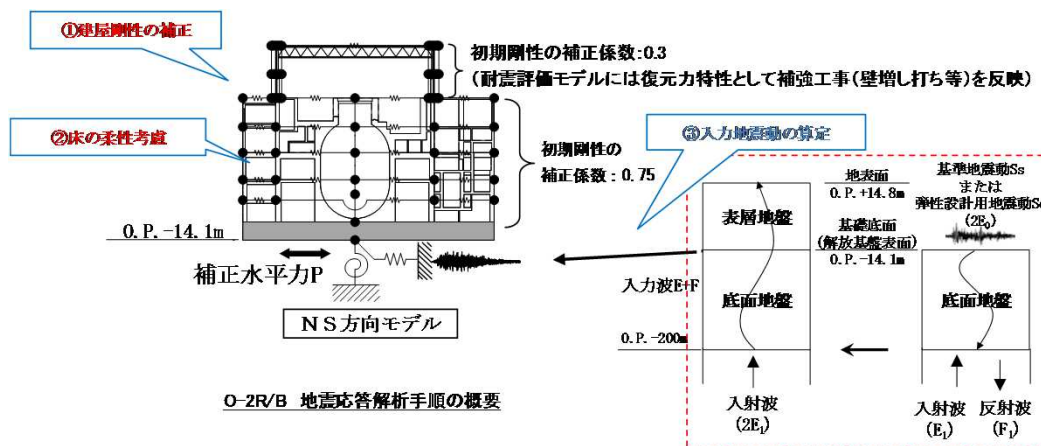
モデル設定の基本的考え方

【入力地震動】

・既工認における基準地震動S2に対する評価では解放基盤表面で定義される基準地震動を直接入力としていたが、耐震バックフィットではJEAG4601-1987に準拠し、原子炉建屋が約30m埋め込まれている効果(掘り込み効果)を考慮する。なお、建屋周辺の表層地盤の物性については、3. 11地震他の地震観測記録を用い弾性設計用地震動Sdによるひずみレベルを評価している。

【上部構造モデル】

	既工認モデル	耐震バックフィットモデル(既工認との違い)
モデル設定の考え方	<ul style="list-style-type: none"> 弾性設計として許容応力度設計とすること、耐震壁の壁厚は、算定される応力が概ね弾性範囲となる目安値相当となるように設定したことから、弾性モデルを採用している。 地盤の埋め込みによる効果は考慮せず、かつ、RC減衰は5%を採用することにより保守性を持たせている。 その他は基本的にはJEAGに基づく。 	<ul style="list-style-type: none"> 弾性設計用地震動Sdによる応答も概ね弾性範囲となるため、弾性モデルを採用。この際、初期剛性は現状(3. 11地震によって評価される初期剛性)を反映。 シミュレーションではRC減衰は7%(埋込み無し)と評価されたが、5%を採用することにより保守性を持たせている。 オペフロ上部については耐震裕度向上工事を反映。

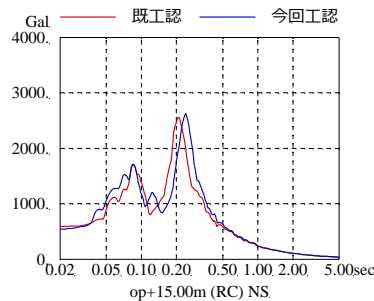
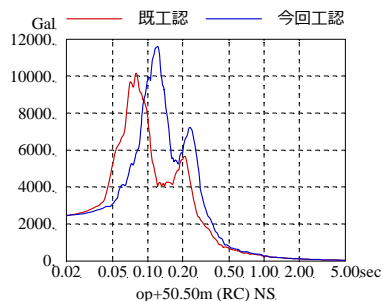


5. 設計に用いる地震応答解析モデルの設定

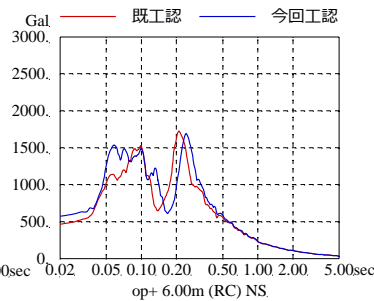
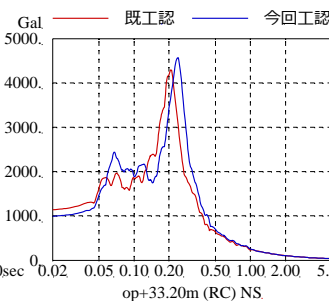
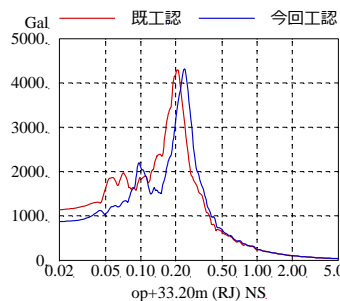
(参考検討)モデルの違いが応答結果に与える影響(弾性設計用地震動Sd(暫定波)評価)

■ 女川2号炉原子炉建屋の加速度応答スペクトルと最大加速度分布の比較(弾性設計用地震動Sd-D2 NS方向)

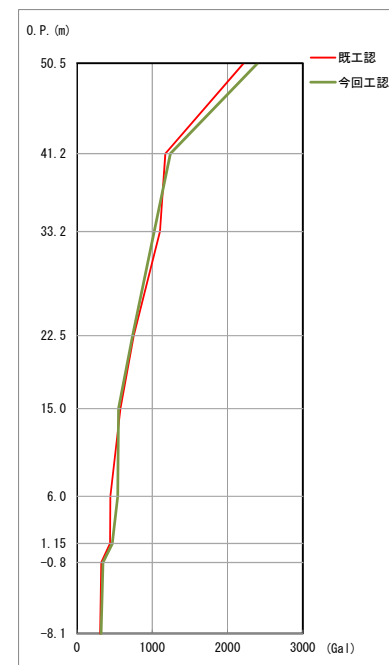
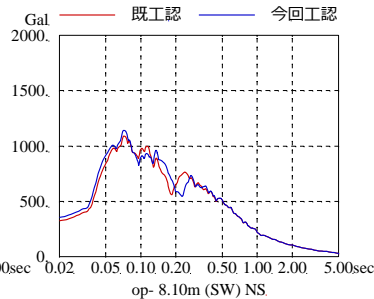
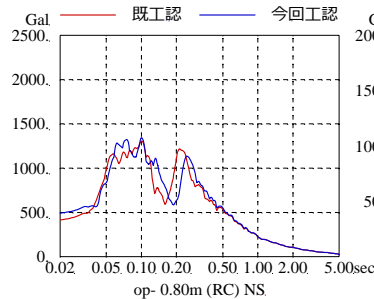
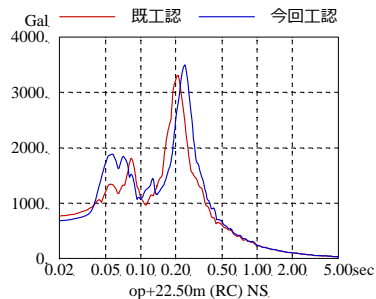
弾性設計用地震動Sd(暫定波)に対する応答結果では初期剛性低下の影響による固有周期の違いが認められる。




- ①既工認モデル
(オペフロ上部工事反映, 入力変換考慮)
②耐震バックフィットモデル
の比較



h=5%



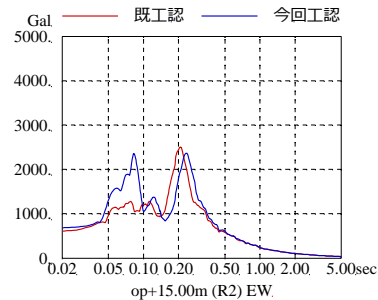
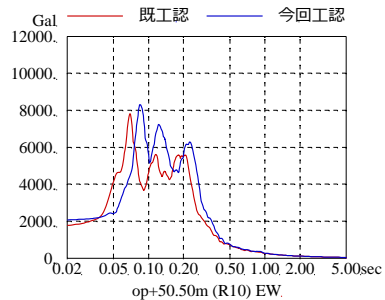
※最大加速度分布は各階の最大値としている。  より、そう、ちから。 東北電力

5. 設計に用いる地震応答解析モデルの設定

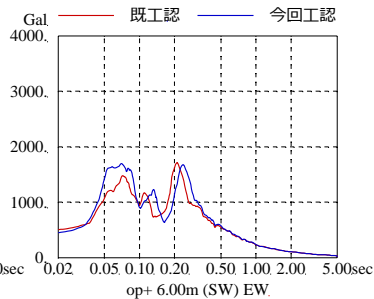
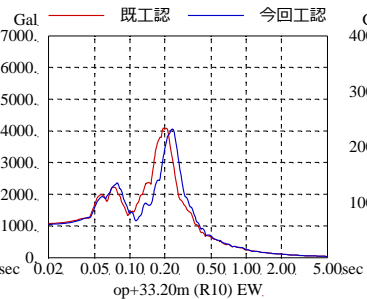
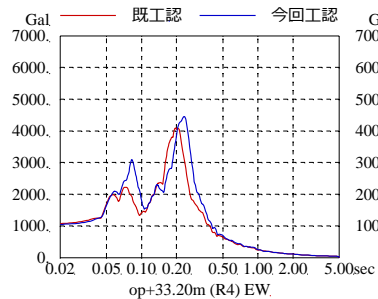
(参考検討)モデルの違いが応答結果に与える影響(弾性設計用地震動Sd(暫定波)評価)

■ 女川2号炉原子炉建屋の加速度応答スペクトルと最大加速度分布の比較(弾性設計用地震動Sd-D2 EW方向)

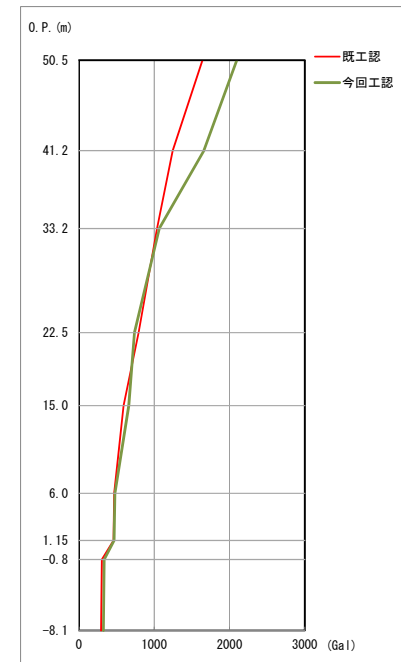
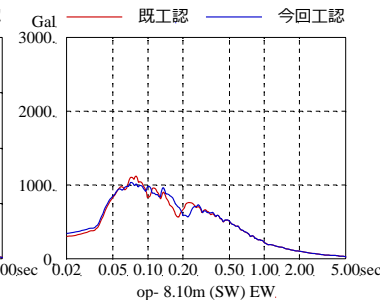
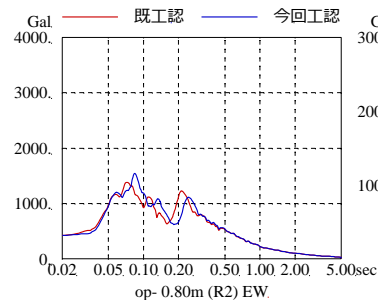
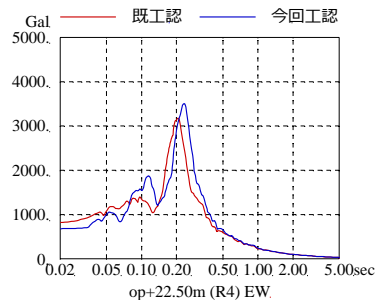
弾性設計用地震動Sd(暫定波)に対する応答結果では初期剛性低下の影響による固有周期の違いが認められる。




- ①既工認モデル
(オペフロ上部工事反映, 入力変換考慮)
②耐震バックフィットモデル
の比較



h=5%



※最大加速度分布は各階の最大値としている。  より、そう、ちから。東北電力

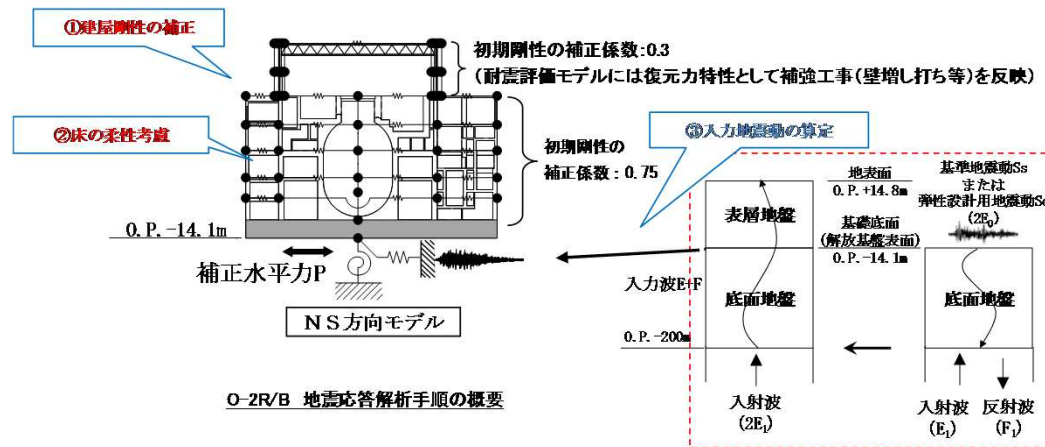
5. 設計に用いる地震応答解析モデルの設定 基準地震動Ss評価に用いるモデル

モデル設定の基本的考え方

【入力地震動】 弾性設計用地震動Sdに対する地震応答解析と同様に掘り込み効果を考慮。

【上部構造モデル】

	既工認モデル	耐震バックフィットモデル(既工認との違い)
モデル設定の考え方	<ul style="list-style-type: none"> ・応答が一部非線形領域に達するため、弾性設計用地震応答解析モデルをベースに、JEAGに基づくスケルトンカーブを採用。 ・地盤の埋め込みによる効果は考慮せず、かつ、RC減衰は5%を採用することにより保守性を持たせている。 	<ul style="list-style-type: none"> ・応答が非線形領域に達するため、弾性設計用地震応答解析モデル(3.11地震によって評価される初期剛性を反映)をベースに、スケルトンカーブを採用。 ・ひずみレベルの大きい領域では基本的には初期剛性低下の影響は受けないことから、第2折点やそれ以降のスケルトンカーブについてはJEAGに基づき評価。 ・シミュレーションではRC減衰は7%(埋込み無し)と評価されたが、5%を採用することにより保守性を持たせている。 ・オペフロ上部については耐震裕度向上工事を反映。

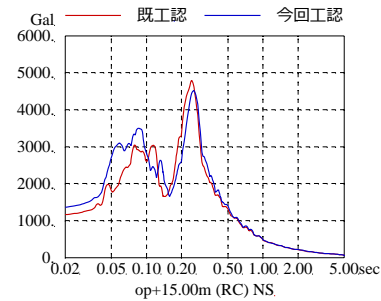
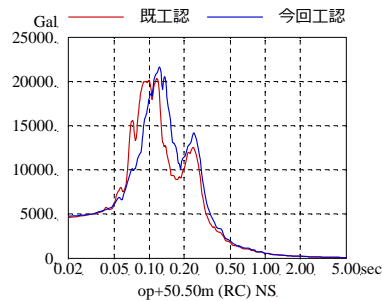


5. 設計に用いる地震応答解析モデルの設定

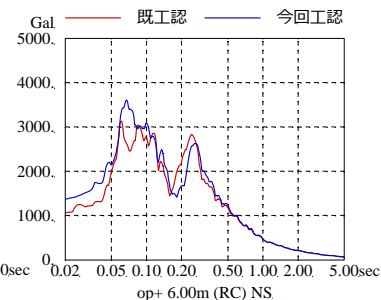
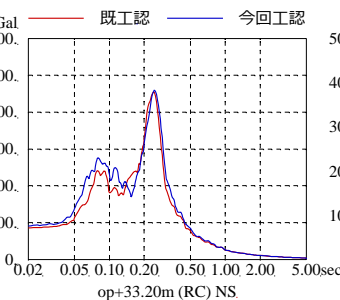
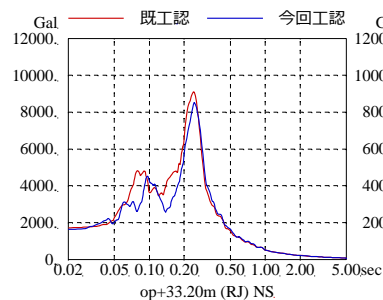
(参考検討)モデルの違いが応答結果に与える影響(基準地震動S_s(暫定波)評価)

■ 女川2号炉原子炉建屋の加速度応答スペクトルと最大加速度分布の比較(基準地震動S_s-D2 NS方向)

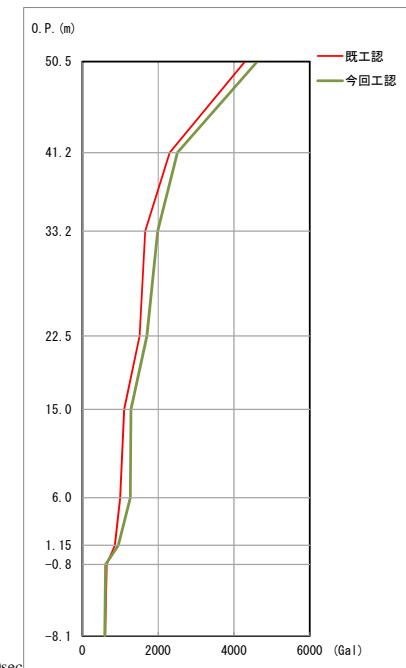
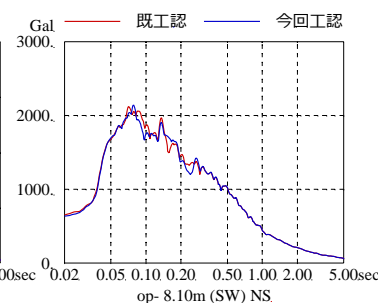
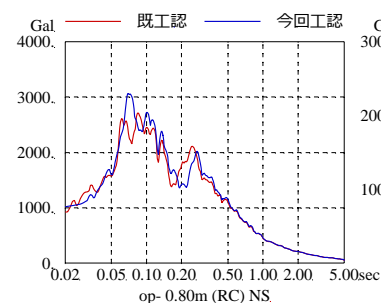
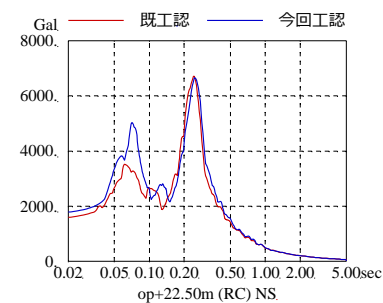
基準地震動S_s(暫定波)に対する応答結果では、両者には大きな違いは認められなかった。




- ①既工認モデル
(オペフロ上部工事反映, 入力変換考慮)
②耐震バックフィットモデル
の比較



h=5%



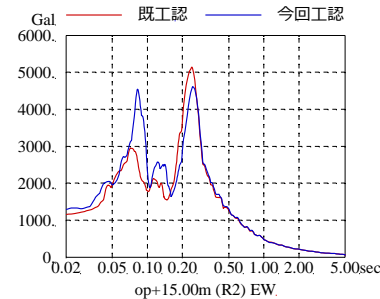
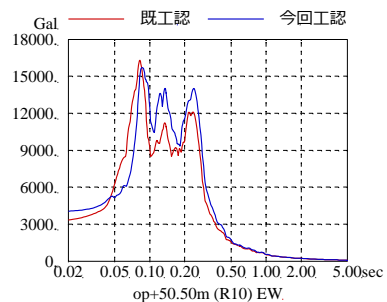
※最大加速度分布は各階の最大値としている。  より、そう、ちから。東北電力

5. 設計に用いる地震応答解析モデルの設定

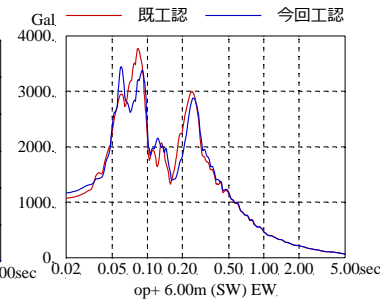
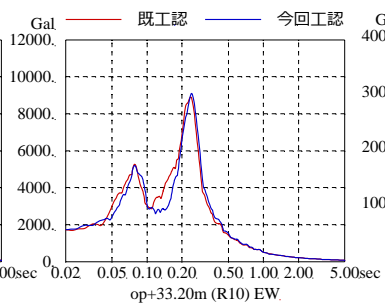
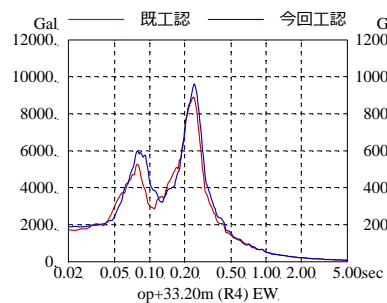
(参考検討)モデルの違いが応答結果に与える影響(基準地震動S_s(暫定波)評価)

■ 女川2号炉原子炉建屋の加速度応答スペクトルと最大加速度分布の比較(基準地震動S_s-D2 EW方向)

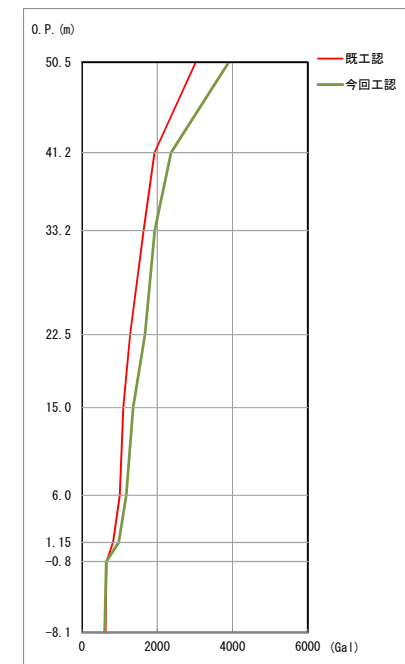
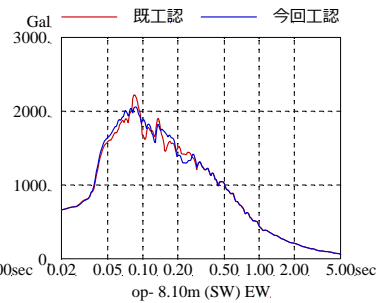
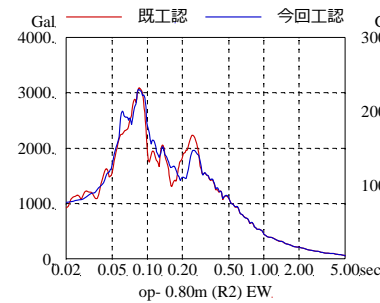
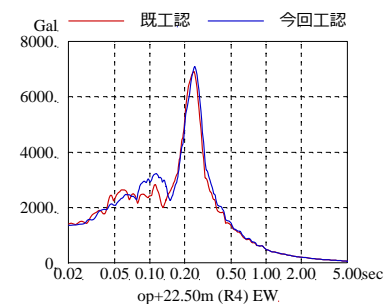
基準地震動S_s(暫定波)に対する応答結果では、両者には大きな違いは認められなかった。




- ①既工認モデル
(オペフロ上部工事反映, 入力変換考慮)
②耐震バックフィットモデル
の比較



h=5%



※最大加速度分布は各階の最大値としている。  より、そう、ちから。東北電力

5. 設計に用いる地震応答解析モデルの設定 まとめ

- 静的地震力(3Ci, 保有水平耐力)算定に用いるAi分布や弾性設計用地震動Sdの評価に用いる地震応答解析モデルは地震動レベルも考慮し, 3. 11地震等によって評価された初期剛性を反映したモデルを採用した。
- 基準地震動Ssの評価に用いる地震応答解析モデルは, 弾性設計用地震動Sdによるモデルをベースに, ひずみレベルの大きい領域に対してはJEAGによるスケルトンカーブを反映したモデルとした。なお, RC減衰については5%を採用し保守性を持たせた。
- 設定したモデルと既工認モデル(オペフロ上部耐震裕度向上工事反映, 入力変換考慮)の応答の比較を行ったところ, 弾性設計用地震動Sd(暫定波)に対する応答結果では初期剛性低下の影響による固有周期の違いが認められるが, 基準地震動Ss(暫定波)に対する応答結果では, 両者には大きな違いは認められなかった。これは, 基準地震動Ss(暫定波)に対する応答は, 第2折点以降の非線形領域に達しているためと考えられる。

なお, 鉛直動については, 観測記録からは有意な初期剛性低下の傾向は認められず, また, 既工認モデルによるシミュレーション解析により観測記録を概ね再現できた※ことから地震後の建屋工認モデルとしてそのまま採用している。

※今回の資料には記載していない

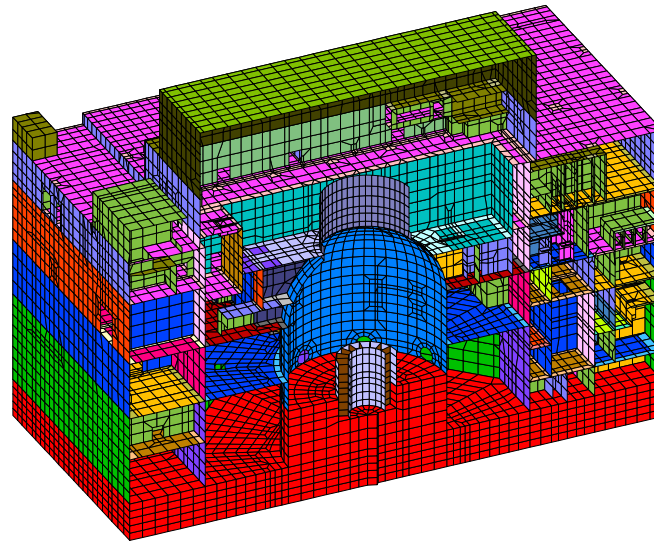
6. その他の評価における初期剛性低下の反映について

断面設計における初期剛性低下の考え方について

- 断面設計における静的解析においては、初期剛性低下を考慮した質点系モデルによる地震応答解析結果を外力として部材評価用の解析モデルに入力する。この静的解析では、地震力を強制変形または応力として与えている。
- 強制変形の大きさを一定として与えた場合は、現実的な剛性として初期剛性低下を考慮すると応力が小さく評価されるため保守的に初期剛性低下を考慮しない評価とする。応力として与えた場合は、部材の硬さ(剛性)に関わらず断面内の力の釣り合いによって応力評価するため大きな差異は生じない。
- 応力算定後の断面算定においては、コンクリートの圧縮強度は低下していないものとして扱い、従来設計と同様に設計基準強度とする。また、コンクリートの引張強度は、初期剛性低下に伴い低下していると考えられるが、従来設計と同様に保守的に引張強度はないものとして扱う。

6. その他の評価における初期剛性低下の反映について 水平2方向同時入力による影響検討

- 水平2方向入力時の建屋応答への影響については、建屋全体の3次元FEM解析モデルを用いて検討を実施する。
- ここで用いる3次元FEM解析モデルにおいては、3.11地震、4.7地震の観測記録と整合するモデルを採用しており、質点系モデルと同様に初期剛性の低下を考慮した、等価線形モデルとしている。



女川2号炉 原子炉建屋
建屋全体3次元FEM解析モデル

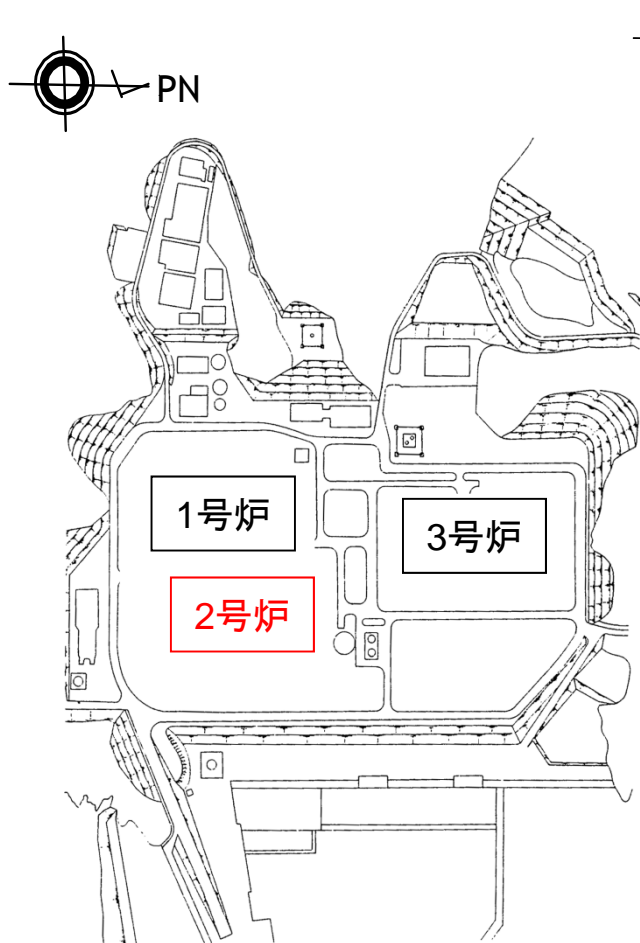
参考文献

1. 吉田昂希他(2012): 2011年東北地方太平洋沖地震を経験したSRC造建物の固有振動数と層剛性の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)構造Ⅱ, pp.545-546
2. 鹿嶋俊英他(2013): 地震観測に基づく杭基礎建物の地震入力・応答評価 その2 6階建RC建物の強震観測, 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)構造Ⅱ, pp.3-4
3. 小島宏章他(2012): 長期の強震観測に基づく中低層建物の応答性状に関する研究(その2)2011年東北地方太平洋沖地震前後の振動特性の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)構造Ⅱ, pp.1161-1162
4. 小山他(2012): 2011年東北地方太平洋沖地震前後での卓越振動数の変化, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)構造Ⅱ, pp.537-538
5. 寺西 浩司, 樋口優香(2013): 乾燥がコンクリートの力学的性質に及ぼす影響(その1. 骨材寸法の影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集(北海道)材料施工, pp.25-26
6. 佐藤 晴香, 寺西 浩司, 中村 雄一(2015): 日常環境下の乾燥がコンクリートの乾燥収縮歪および力学的特性に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1
7. 江間 智広, 石田 哲也, 前川 宏一(2002): 鉄筋コンクリートの引張特性に及ぼす乾燥収縮の影響, コンクリート工学年次論文集 Vol.24, No.1, pp.435-440
8. Nobuhiro Chijiwa, Koichi Maekawa(2015): Thermo-Hygral Case-Study on Full Scale RC Building under Corrosive Environment and Seismic Actions, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.13, No.10, pp.465-478

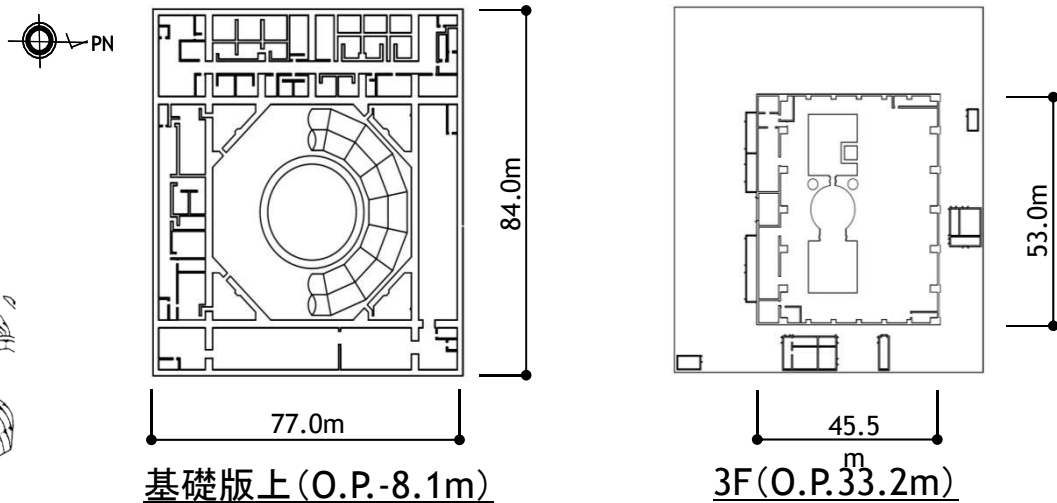
別紙1

女川2号炉原子炉建屋の概要および地震観測位置

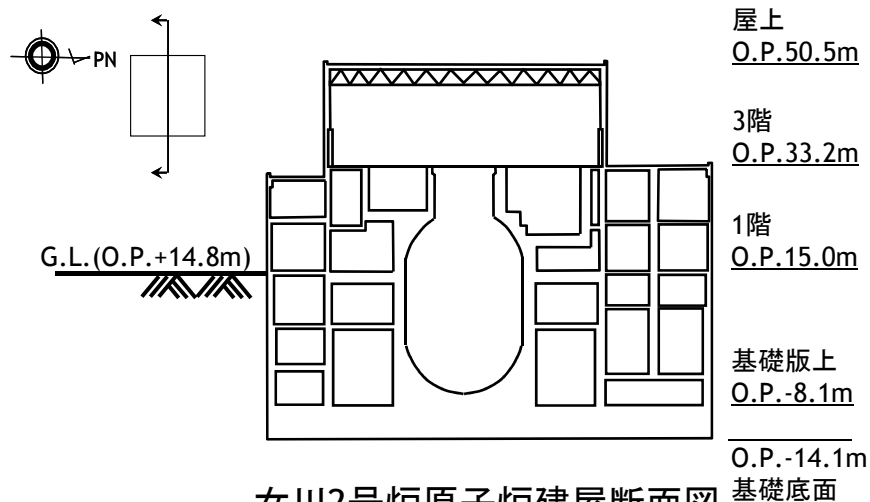
■女川2号炉 配置図、原子炉建屋平面図・断面図



女川原子力発電所配置図



女川2号炉原子炉建屋平面図

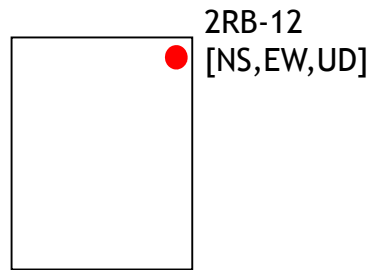


女川2号炉原子炉建屋断面図

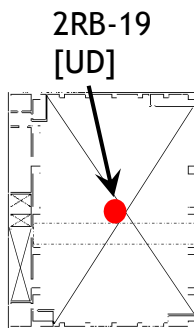
基礎版厚 6.0m
Vs=1300m/s(等価Vs=1820m/s)

■女川2号炉原子炉建屋地震計位置図

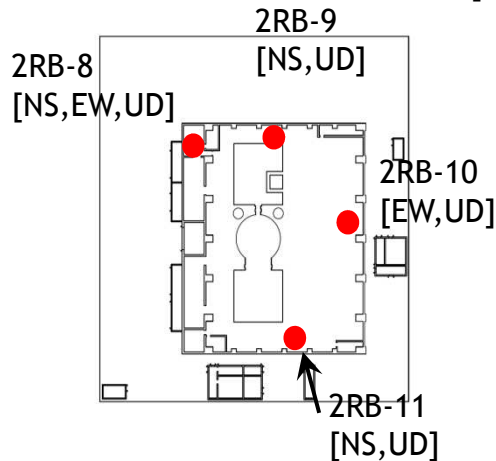
※2RB-19はセンサーが機械的に壊れたため、シミュレーション対象外とする。



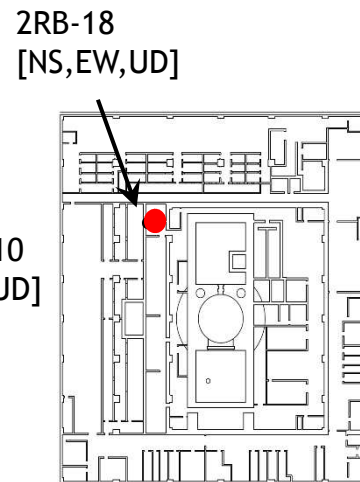
RF (O.P.50.5m)



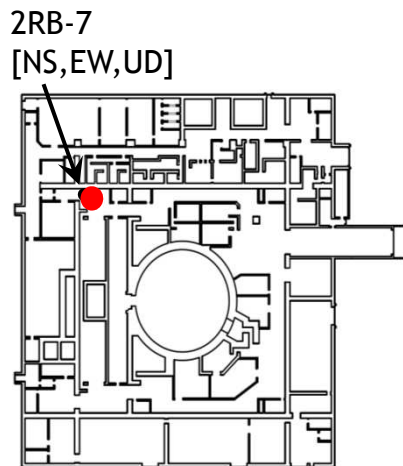
屋根トラス (O.P.46.95m)



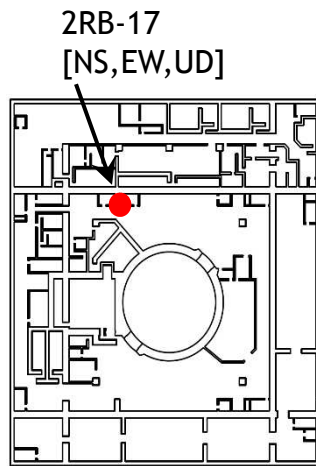
3F (O.P.33.2m)



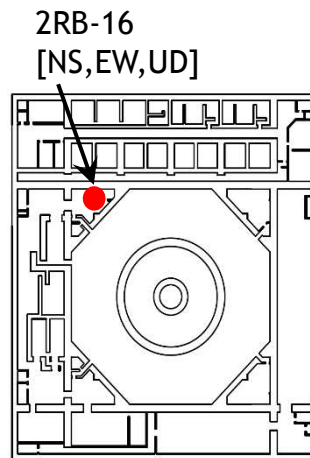
2F (O.P.22.5m)



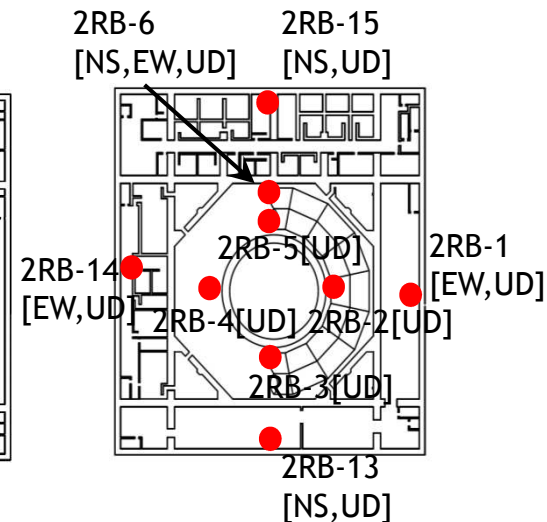
1F (O.P.15.0m)



B1F (O.P.6.0m)



B2F (O.P.-0.8m)



基礎版上 (O.P.-8.1m)

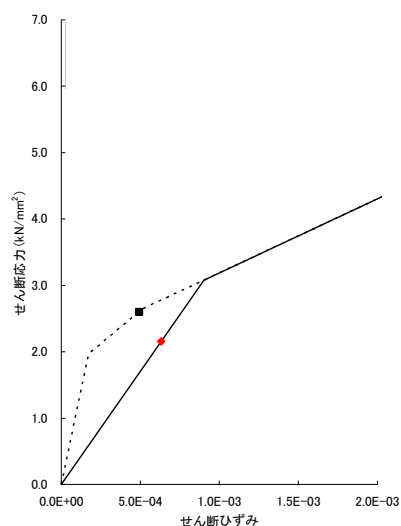
別紙2

シミュレーション解析モデルにおける 観測記録と等価な剛性と復元力特性

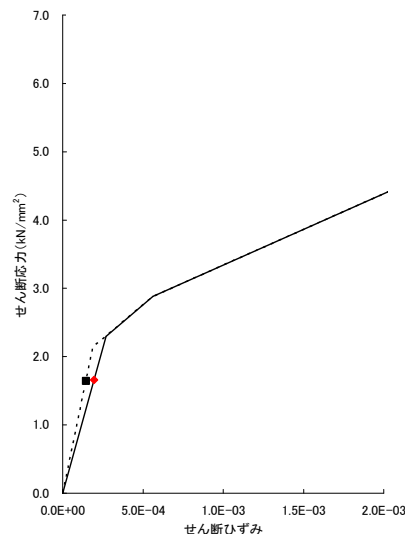
■シミュレーション解析の剛性・復元力特性の設定の考え方と設定例

- 観測記録と整合する等価な初期剛性のモデル化は、コンクリート壁のヤング係数・せん断弾性係数を設計値から低減する補正係数を設定することにより行う。
- 初期剛性の低下は耐力に影響しないことを実験により確認しているため復元力特性は既工認モデルのスケルトンと接続する。
- 特にオペフロ上部は過去の弾性範囲のシミュレーション解析でも観測記録との整合性が良くない結果であること、今回地震ではさらに初期剛性が低下し塑性化もしていることが予想されるため、オペフロ下部より小さな補正係数を設定する。
- なお、復元力特性はコンクリート実強度による復元力特性(スケルトン)に接続する方法もあるが、ここでは終局耐力が安全側となるコンクリート物性を設計値とした復元力特性(スケルトン)を採用した。

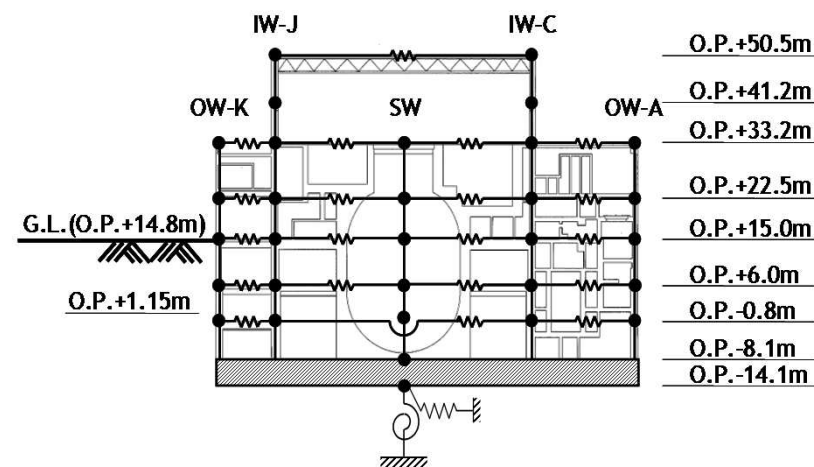
----- 設計値の剛性によるせん断スケルトン : プロット■は既工認モデルによる基礎版上記録を用いた解析結果
 ———— 観測記録と等価な剛性によるせん断スケルトン : プロット◆はシミュレーション解析結果



CR階(3階) IW-C通り
初期剛性の補正係数0.3



2階 IW-C通
初期剛性の補正係数0.75



女川2号炉原子炉建屋 NS方向
シミュレーション解析モデル

女川2号炉原子炉建屋 NS方向 せん断スケルトンの比較 3.11地震