

**女川原子力発電所2号炉
原子炉建屋基礎版の**

応力解析モデルへの弾塑性解析の適用

(第628回審査会合 [平成30年9月25日] 指摘事項に対する回答)

**平成30年11月29日
東北電力株式会社**

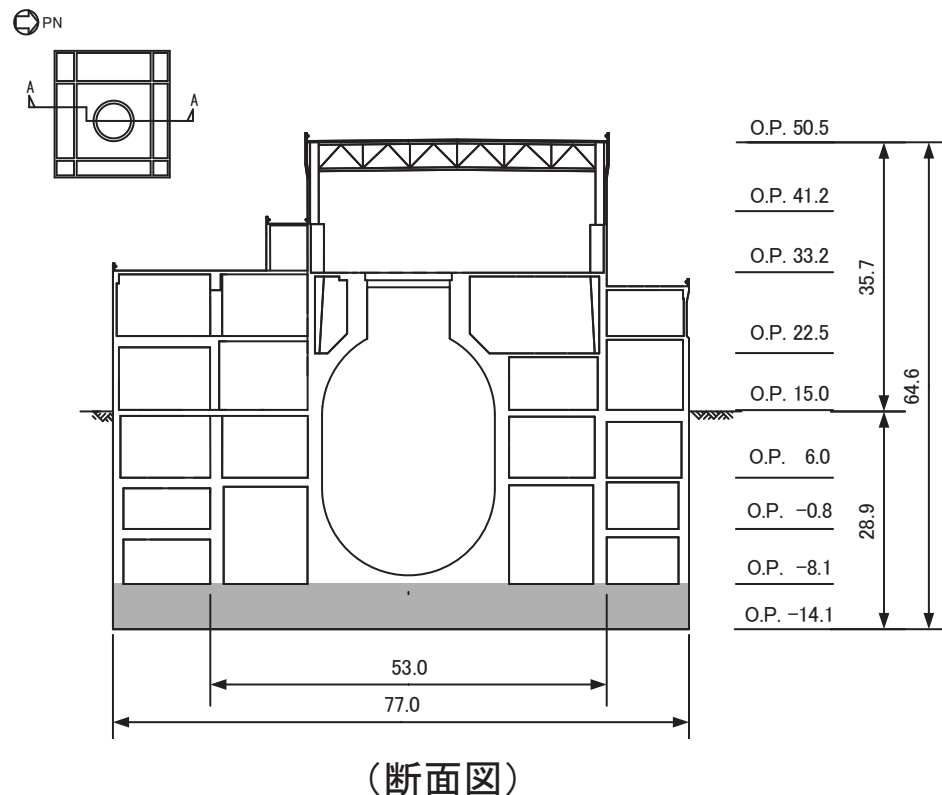
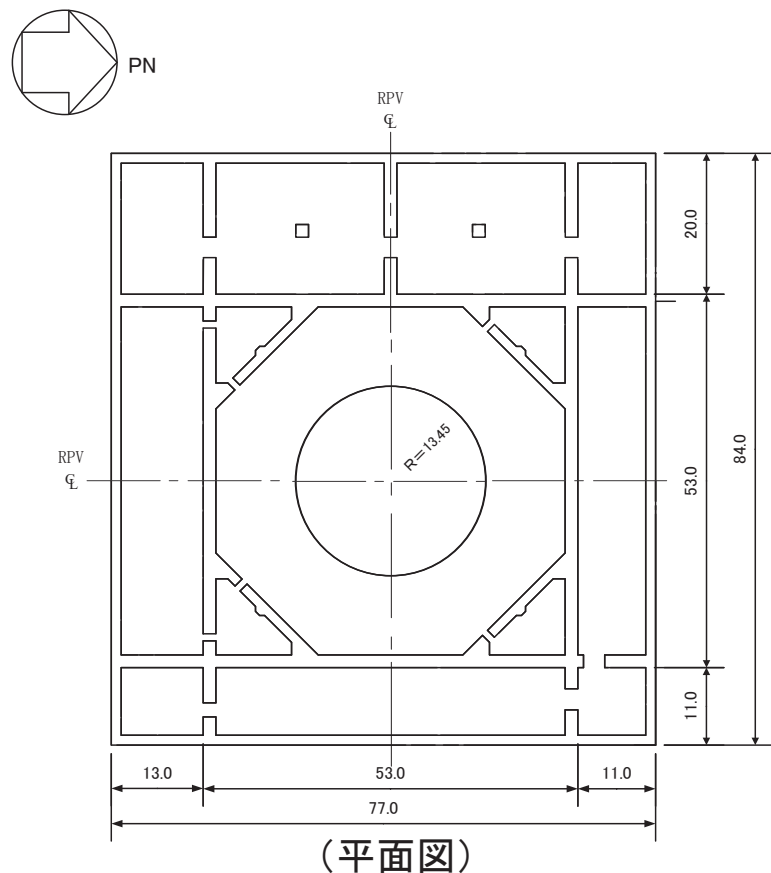
審査会合における指摘事項(基礎版)

No	審査会合日	項目
102	平成30年9月25日	基礎版の常時荷重及び弾性設計用地震動Sdに対する解析モデルについての考え方を示すとともに今回採用する弾塑性解析モデルとの関係を整理して提示すること。
103	平成30年9月25日	耐震壁をシェル要素でモデル化することによるボックス効果等が基礎版や耐震壁へ与える影響について整理すること。
104	平成30年9月25日	基礎版上に設置した地震計による観測記録から剛性低下を生じているか否か判断をするプロセスを提示すること。
105	平成30年9月25日	既往研究を踏まえ、基礎版をシェル要素でモデル化することの妥当性を、曲げモーメント及び面外せん断それぞれに対して、提示すること。
106	平成30年9月25日	基礎版における応力解析モデル及び手法の比較について、先行プラントでの審査実績を追加した上で、相違点に対する考察を提示すること。

指摘事項No.103, 105に対する回答

No	審査会合日	項目
103	平成30年9月25日	耐震壁をシェル要素でモデル化することによるボックス効果等が基礎版や耐震壁へ与える影響について整理すること。
105	平成30年9月25日	既往研究を踏まえ、基礎版をシェル要素でモデル化することの妥当性を、曲げモーメント及び面外せん断それぞれに対して、提示すること。

・基礎版は厚さ6.0mの鉄筋コンクリートの平板であり、外部ボックス壁、内部ボックス壁、火打ち壁、シェル壁、RPVペダスタル等から伝わる上部構造物や機器配管系の荷重を支持する部材である。

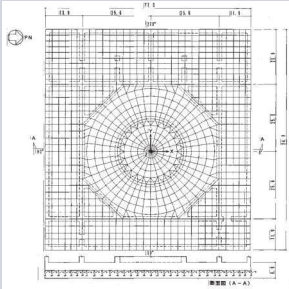
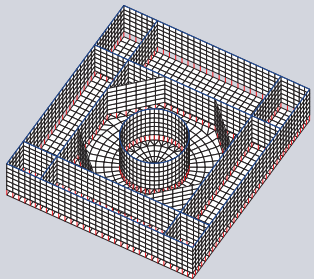


2号炉原子炉建屋 基礎版の概要(単位:m)

既工認モデルと今回工認で採用予定のモデルの差異について

・既工認と今回工認ともシェル要素によるFEMモデルを基本としているが、解析モデルとして、今回工認では応力解析に弾塑性解析を採用することに加え、以下の2点に差異がある。

- (1) 一部耐震壁をシェル要素でモデル化すること
- (2) コンクリートの物性値(ヤング係数, ポアソン比)

項目	既工認時	今回工認時	
解析手法	・弾性地盤上に支持された厚さ6.0mの一枚の版として有限要素法により解析する。	・同左	
解析コード	・NASTRAN	・ABAQUS	
荷重	・固定荷重, 機器配管荷重, 積載荷重, 地震荷重(S2), 土圧等	・固定荷重, 機器配管荷重, 積載荷重, 地震荷重(Ss), 土圧等	
モデル化	モデル化範囲	・基礎版全体と剛性の高い一部壁をモデル化する。	・同左
	メッシュサイズ	・モデル全体でおおむね1~3m程度	・同左
	要素タイプ	・基礎版全体をシェル要素でモデル化する。 ・外部, 内部ボックス壁, 火打ち壁, シェル壁等の剛性の高い壁は, 等価な剛性を考慮した梁要素でモデル化する。	・同左 ・地下部分の一部はシェル要素でモデル化し, 壁の立体的な形状による剛性への寄与を考慮する。
材料物性	・コンクリートのヤング係数 $E=2.7 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.167$	・コンクリートのヤング係数 $E=2.51 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ※1 ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.2$ ※1	
評価方法	応力解析	・弾性解析 (機能維持)	・弾塑性解析 (機能維持)
	許容限界	部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。接地圧が地盤の許容支持力度を超えないことを確認する。	部材に生じる応力, ひずみが許容限界を超えないことを確認する。※2 接地圧が地盤の許容支持力度を超えないことを確認する。
モデル	基礎版より立ち上がっている耐震壁はその剛性を考慮して梁要素としてモデル化, 底面には支持地盤と等価な弾性ばねをモデル化 	基礎版より立ち上がっている耐震壁はその剛性を考慮してシェル要素及び梁要素でモデル化, 底面には支持地盤と等価な弾性ばねをモデル化 	

※1: コンクリートのヤング係数及びポアソン比は, 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説・許容応力度設計法-1999」による計算式に基づく値を用いる。なお, 地震応答解析モデルと同様の初期剛性低下については, 地震観測記録の分析等を踏まえて, その影響を考慮することとする。

※2: 許容限界についてはCCV規格によるものを基本とする。

既工認モデルと今回工認で採用予定のモデルの差異について

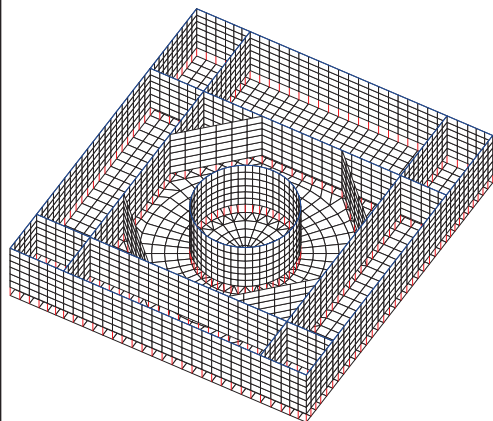
基礎版の応力解析におけるモデル化, 境界条件, 拘束条件

モデル概要

- モデル化範囲 基礎版, B3F耐震壁, B2F耐震壁, B1F耐震壁, 1F耐震壁, 2F耐震壁
- 使用要素 シェル要素, 梁要素

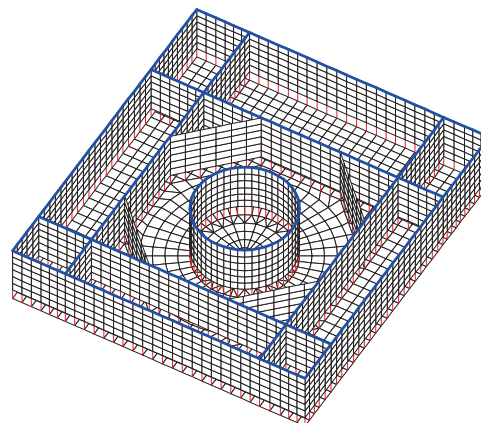
境界条件, 拘束条件

本解析モデルではB3FとB2Fの耐震壁をシェル要素でモデル化する。
それより上部の耐震壁の剛性はO.P.6.0m位置に梁要素でモデル化する。
基礎底面各節点にはウインクラー型の地盤ばねと浮上りを考慮するためのGAP要素をモデル化する。



モデル全体図

*青太線は、線材要素を示す。
*赤太線は、剛体を示す。

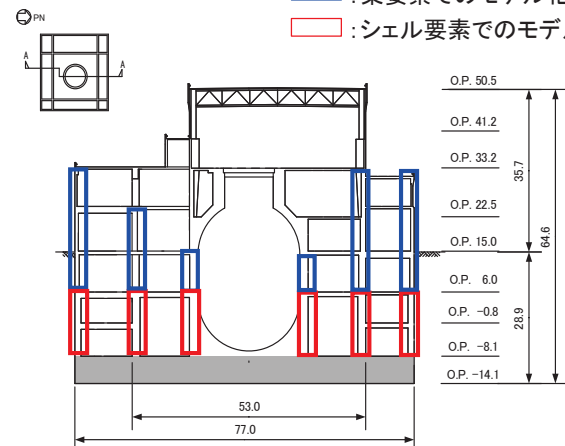


梁要素による建屋上部剛性のモデル化(青色部)



地盤ばね

- : 梁要素でのモデル化範囲
- : シェル要素でのモデル化範囲

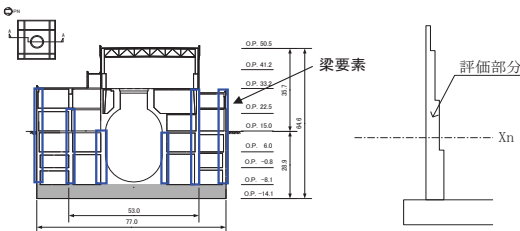
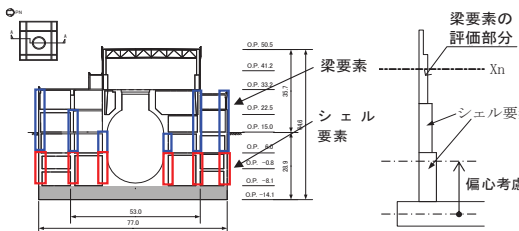
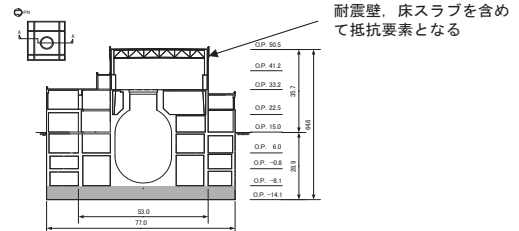


耐震壁のモデル化範囲(単位:m)

既工認との差異の扱い

一部耐震壁のシェル要素でのモデル化

・実機では基礎版上端から上部全体の耐震壁及び床スラブが一体として拘束効果を発揮するのに対し、今回工認モデルではシェル要素でモデル化するのは基礎版直上の2層分の耐震壁のみであり、拘束効果は実機より小さいものとなる。

項目	既工認	今回工認	実機の状態（想定される実現象）
上部躯体の剛性	<p>地下3階から地上2階までの外部、内部ボックス壁、火打ち壁、シェル壁等の剛性の高い壁</p> 	<p>同左</p> 	<p>建屋全体として、耐震壁、床スラブも抵抗要素となる</p> 
	<p>影響範囲（モデル化範囲）</p>	<p>地下3階から地下2階までをシェル要素、地下1階より上部は梁要素でモデル化</p>	<p>地下3階から地上2階までの壁を対象としたせん断面積、断面二次モーメントから等価な1本の梁要素に置き換えている ⇒拘束効果は実機及び今回工認モデルより弱い 壁の曲げ剛性は壁の図心位置で評価したものを基礎版中心位置に設定しており偏心が考慮されないため、今回工認モデルより小さい</p>
要素タイプ	モデル化範囲の耐震壁は、等価な剛性を考慮した梁要素でモデル化	—	—
剛性評価	—	—	—
土圧に対する挙動	<p>抵抗要素</p> <p>基礎版のみ</p>	<p>基礎版及びシェル要素でモデル化した耐震壁（地下3階及び地下2階）</p>	<p>基礎版及び地下耐震壁（地下3階から地表まで）</p>
	<p>土圧の負担要素</p> <p>土圧による荷重はすべて基礎版が負担するモデルとなっている。 ⇒実機及び今回工認モデルより負担要素は少ない</p>	<p>基礎版に加え直上の2層の耐震壁をモデル化することにより、耐震壁の面外剛性及び直交する耐震壁の面内剛性を考慮し、既工認モデルよりも実機に近いモデルとし、荷重を負担させる。 ⇒実機より負担要素は少ない</p>	<p>基礎版に加え地下3階から地表までの3層分の耐震壁及び各階の床スラブが荷重を負担する。</p>
基礎版の評価におけるモデル化の特徴及び保守性	<p>既工認モデルは当時の計算能力の制約もあり、上部躯体の立体的構造をモデル化しないシンプルなモデルとしているため、モデル化した範囲の荷重を基礎版がすべて負担するモデルとなっている。 このようなモデル化により、基礎版の評価において実挙動に対して保守的なモデルとなっている。</p>	<p>今回工認モデルは基礎版以外の床スラブはモデル化していないため、これらの床スラブを含めた建屋上部躯体全体としての拘束効果は考慮されていない。 このようなモデル化により、基礎版の評価において実挙動に対して保守的なモデルとなっている。</p>	—

既工認との差異の扱い

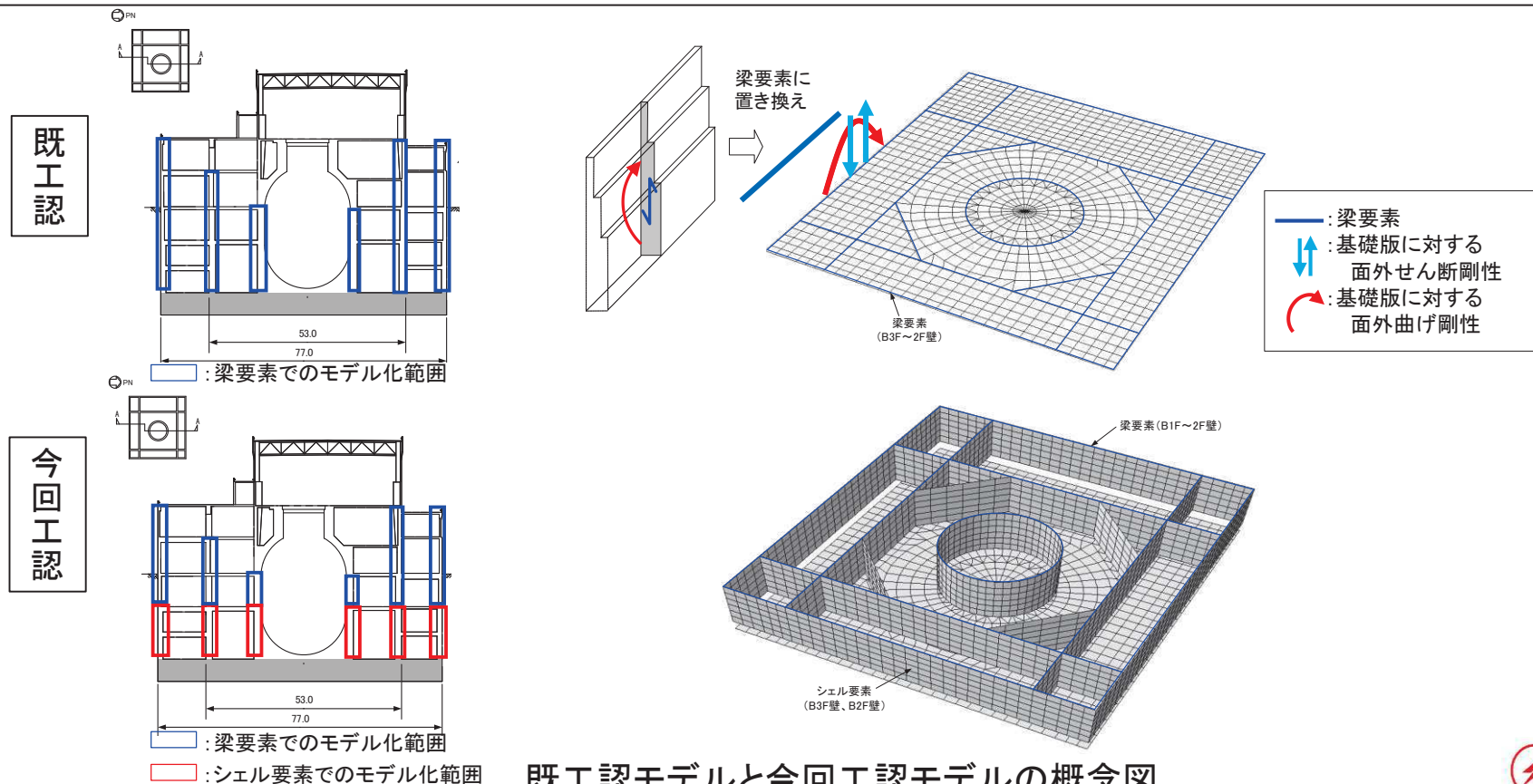
耐震壁のシェル要素でのモデル化の影響

耐震壁が基礎版に与える評価方法は既工認と今回工認では以下の違いがある。

既工認：梁要素は基礎版に対する面外剛性として寄与。本来、基礎版より上階において直交する耐震壁は相互につながっているが、その効果は考慮されない。

今回工認：上記に加え、壁全体として基礎版への拘束部材として寄与。例えば、地震荷重時に基礎版が面外に変形しながら浮上りを生ずる挙動に対して、地震方向の耐震壁と直交方向の耐震壁が一体性を保持しつつ、立体的に抵抗する。また、既工認モデルの梁要素は中立軸を耐震壁の図心として評価したものを基礎版中心位置に設定しており偏心が考慮されないのに対し、今回工認モデルではシェル要素を基礎版上端より立ち上げるため、基礎版中心(モデル化位置)と耐震壁の図心の偏心距離が考慮されることにより曲げ剛性が大きく評価される。これらの結果、基礎版の面外変形が既工認モデルに比較して小さくなり、基礎版の応力は低減することとなる。以上のとおり、今回工認モデルの方が、より実現象に近い応答性状を与えるモデルとなっている。

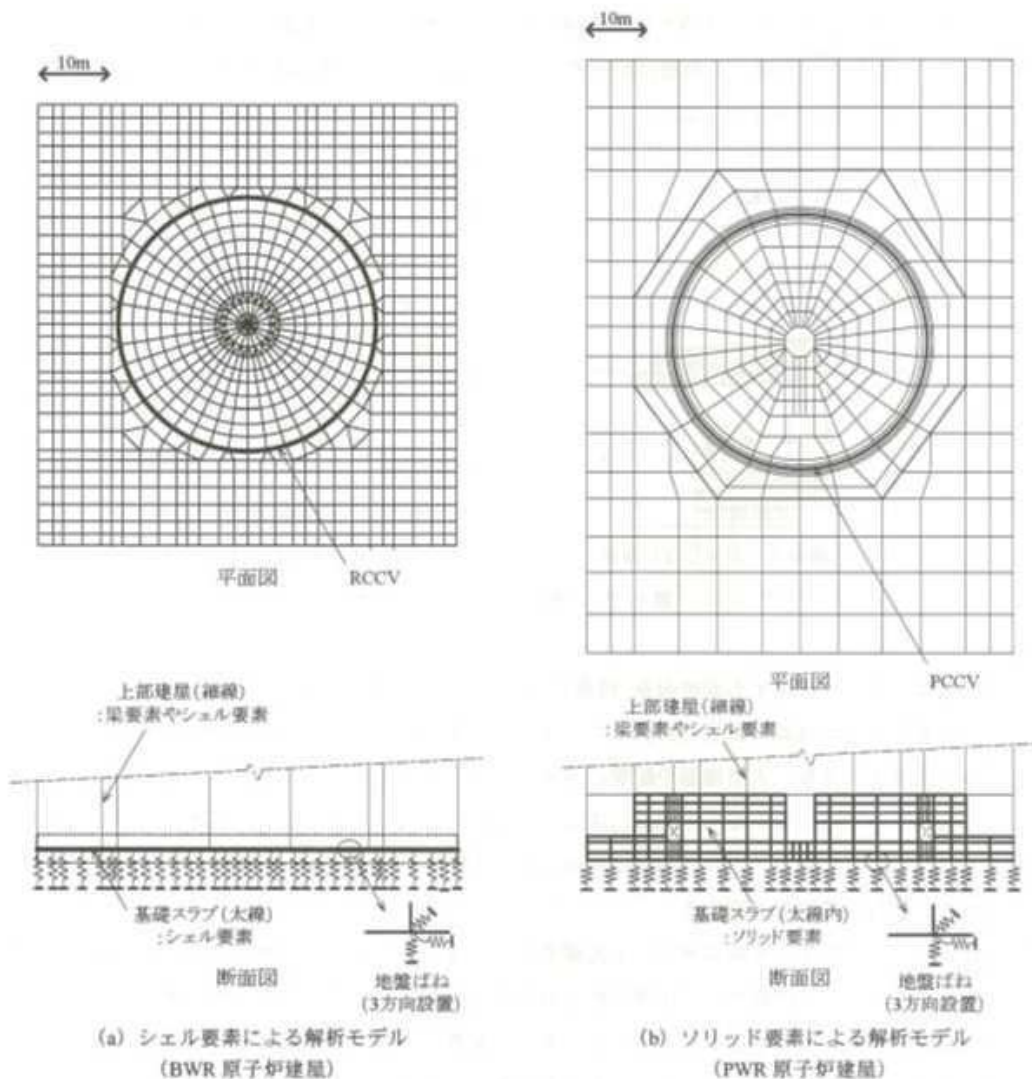
なお、耐震壁の地震力算定に用いる地震応答解析では基礎版は剛体として扱っていること、また、耐震壁の土圧荷重の評価において一方向版を仮定し、基礎版との接続部で固定とする等の評価を実施していることなどから、耐震壁には十分な余裕があるが、シェル要素でモデル化した耐震壁に発生する応力については、念のため詳細設計段階でその影響について確認する。



既工認モデルと今回工認モデルの概念図

・JEAG4601(1987)には、「格納施設の基礎マット等の厚いコンクリート構造のFEM解析のモデル化については、基礎の幾何学的形状、上部構造及び基礎の解析モデル作成上の整合性を考慮して適切な要素を選択しなければならない。一般的に、原子炉建屋の基礎マットのようにマット厚の厚い部位の3次元FEM解析にはソリッド要素、又は面外せん断を考慮した平板要素を採用するのが良い。」と記載されている。ここで、面外せん断を考慮した平板要素とは、今回適用するシェル要素に該当する。

・原子炉施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(2005)には、「基礎スラブは荷重状態が複雑なため、弾性地盤に支持された板としてFEMでモデル化する場合が多い。要素としてはシェル要素またはソリッド要素が用いられる。」とされており、また、「11条 基礎スラブ」の解説には、「原子炉建屋の基礎スラブの解析モデルは図11.1に示すように基礎スラブの形状に応じて、シェル要素やソリッド要素によりモデル化する。また、ボックス壁やボックス壁に接合する上層の床スラブによる全体変形の拘束効果を適切に反映する。」として、シェル要素を用いた基礎版のモデル化例が記載されている。



FEMによる解析モデルの例
 (原子炉施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(2005), 図11.1)

既往研究に基づく弾塑性解析の妥当性・適用性 ②

- 小柳他, 小林他(2009)の既往文献※においては, 基礎版の曲げモーメントに対してはシェル要素の弾性解析及び弾塑性解析を, 面外せん断力に対してはソリッド要素を用いて検討を実施している。これらより, 曲げモーメントに関しては, シェル要素の弾性解析結果と弾塑性解析結果の比較により平均化応力の範囲を検討し, 既往知見の**塑性ヒンジ領域と同等**であることが確認された(下図:シェル要素を用いた基礎版の弾塑性解析結果の概要)。また, ソリッド要素によるモデルでは, 基礎版の圧縮ストラット角度を $30\sim 45^\circ$ と評価し, 圧縮ストラット角度から面外せん断力に関する**平均化応力の範囲は平均的には基礎版厚さの1.0倍程度**と想定できること, この結果は実験等による既往知見ともおおむね対応していることが示されている(下図:ソリッド要素を用いた基礎版の弾塑性解析結果の概要)。これらの結果より, **検討に用いているモデルは違うものの, シェル要素とソリッド要素を用いた検討では同程度の平均化応力の範囲を示していることが確認された。**
- 以上から, 原子炉建屋の基礎版の応力解析において, **シェル要素を用いた弾塑性解析による手法を採用することは妥当であると考えられる。**
- また, シェル要素を用いた応力解析の検証の観点から, 面外せん断応力が大きい場合には, 詳細設計段階において代表ケースを選定してソリッド要素で基礎版をモデル化した解析を行い, モデル化手法による比較を行うこととする。

弾性解析結果と弾塑性解析結果の比較により
平均化応力の範囲は既往知見の塑性ヒンジ領域
と同等(基礎版厚さ程度)であることを確認

基礎版の断面内の応力分布から圧縮ストラット
角度を $30\sim 45^\circ$ と評価
⇒圧縮ストラット角度から面外せん断力
に関する平均化応力の範囲を平均的
には基礎版厚さの1.0倍程度と想定

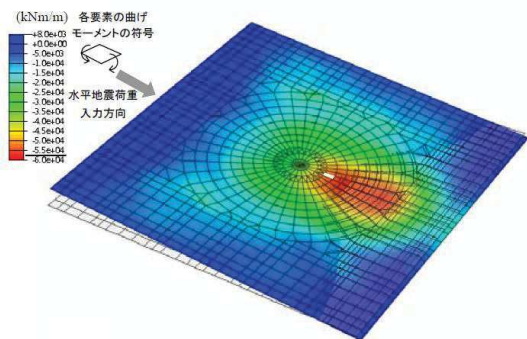


図-3 弾塑性解析 (M-2) による曲げモーメント分布

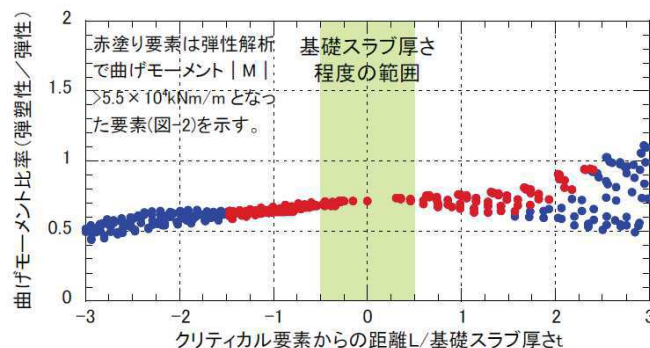


図-4 白塗り要素中心からの距離と曲げモーメント比率

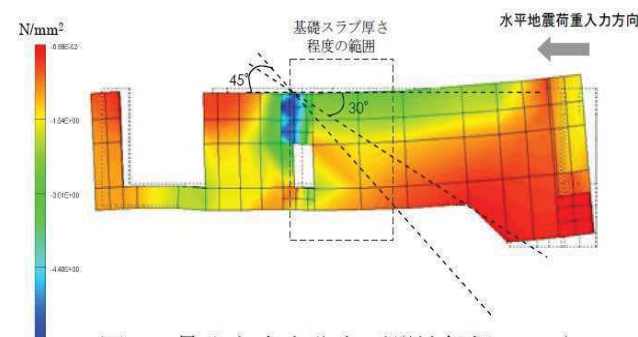


図-6 最小主応力分布 (弾性解析、Q-1)

ソリッド要素を用いた基礎版の弾塑性解析結果の概要(小林他(2009))

※小柳他: 原子炉建屋基礎スラブの合理的応力評価方法に関する解析的検討(その1)基礎スラブの試解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造II, pp.1039-1040, 2009

小林他: 原子炉建屋基礎スラブの合理的応力評価方法に関する解析的検討(その2)合理的応力評価法(案), 日本建築学会学術講演梗概集, 構造II, pp.1041-1042, 2009

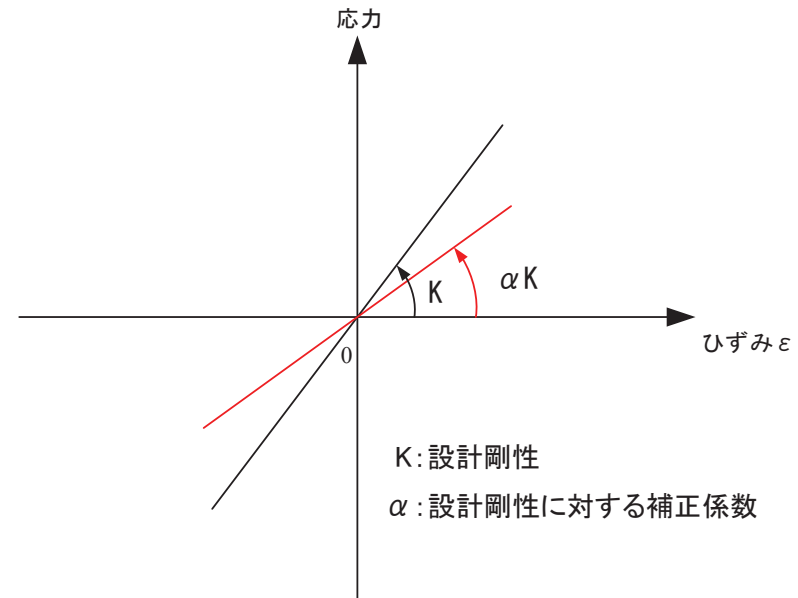
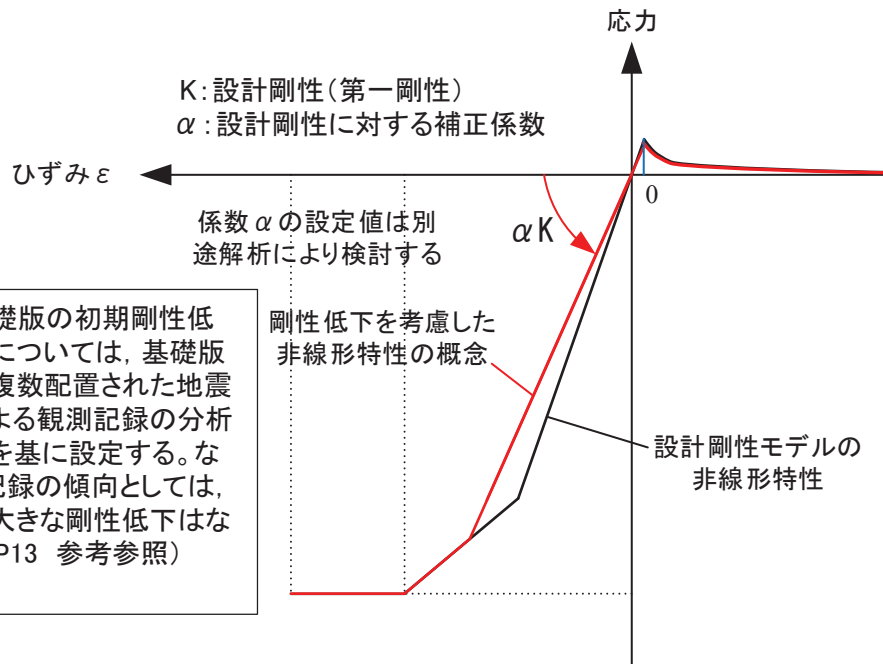
指摘事項No.104に対する回答

No	審査会合日	項目
104	平成30年9月25日	基礎版上に設置した地震計による観測記録から剛性低下を生じているか否か判断をするプロセスを提示すること。

弾塑性解析を採用するに当たっての初期剛性の低下

鉄筋コンクリート構造物の初期剛性低下

- ・3.11地震に対する2号炉原子炉建屋のシミュレーション解析では、耐震壁の初期剛性を低下させることにより観測記録との整合性が図られており、その傾向を基礎版の弾塑性解析にも適用する。
- ・基礎版の弾塑性解析では、基礎版の剛性を低下させた解析が、低下させない解析と比較し、必ずしもすべてのメッシュが安全側に評価される訳ではないことから、解析としては基礎版の初期剛性を既工認と同様に設計基準強度ベースで評価したケースと、それから更に初期剛性低下を考慮したケースの2ケースを実施する。
- ・3.11地震に関する点検・解析結果では、基礎版には地震によるひび割れは発生していないことを踏まえ、既工認と同様に設計基準強度ベースで剛性を評価したケースを基本ケースとし、更に初期剛性を低下させるケースは不確かさケースとして扱う。
- ・不確かさケースに用いる初期剛性の低下量については、基礎版上に設置されている地震観測記録の分析等を踏まえ設定する。材料構成則への反映方法は、コンクリートの材料構成則の初期剛性を低下させることとし、圧縮側も引張側も同じ値で低下させることとする。
- ・壁部分については、剛性低下を考慮する。シェル要素についてはコンクリートの材料構成則の初期剛性を低下させることとし、圧縮側も引張側も地震応答解析と整合する値で低下させることとする。梁要素については上部耐震壁の地震応答解析の初期剛性低下に整合するように補正する。



基礎版及びシェル要素の耐震壁の剛性低下の考え方

梁要素の耐震壁の剛性低下の考え方

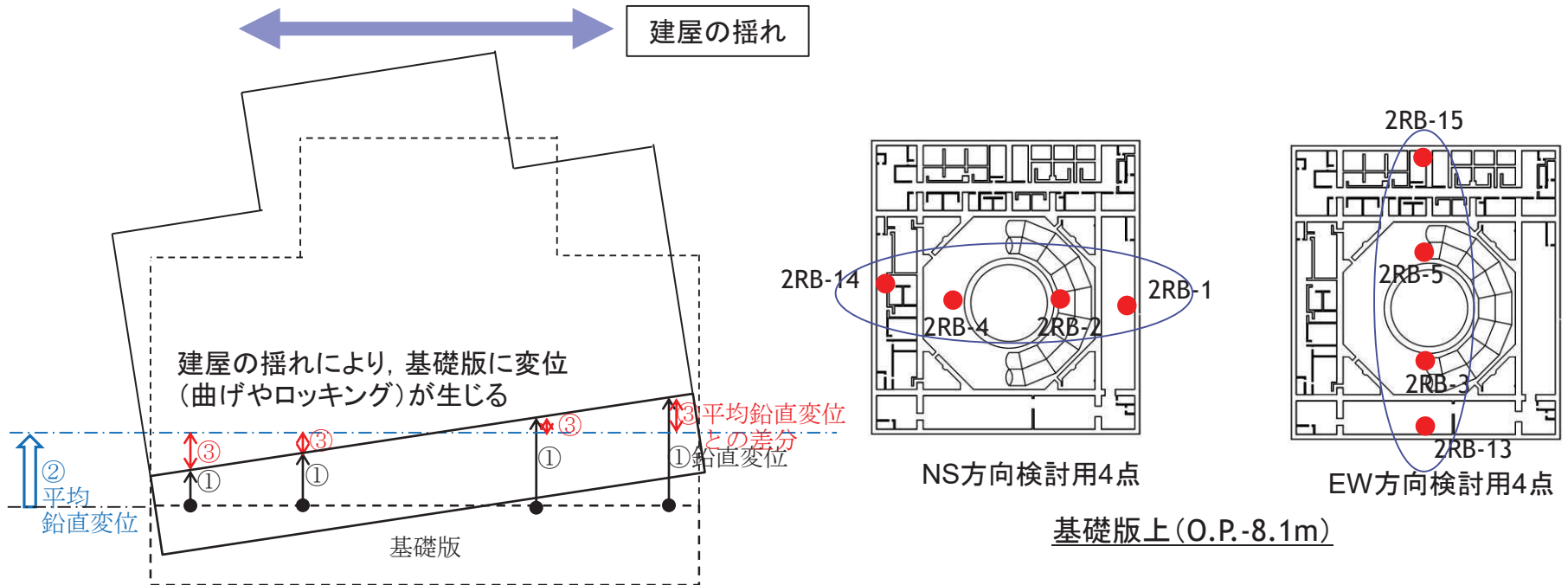
基礎版上の地震観測記録に基づく剛性低下の検討

不確かさケースに用いる初期剛性の低下量については、基礎版上に設置されている地震観測記録の分析を踏まえ設定するが、具体的検討は以下のとおり実施する。

・基礎版上には鉛直動用の地震計がNS方向、EW方向に各4箇所配置されており、3.11地震を含めた複数地震に対して、鉛直方向の相対変位量と、基礎版に作用した地震力の大きさの相関性について検討する。

【具体的検討例】

- ① 過去の主要地震について鉛直方向の加速度記録を積分して変位波形を算定する。
- ② 直線上に並ぶ4点の変位波形から平均変位波形を時刻歴上で算定する。
- ③ 平均変位波形と各観測点の変位波形の差分の最大値(絶対値)を算定する。
- ④ 算定した各観測点の変位差分の最大値と建屋への入力地震動の大きさ(例えば質点系モデルを用いたシミュレーション解析より算定されるベースシャー係数)の関係をプロットする。
- ⑤ プロットしたベースシャー係数と鉛直変位の関係より基礎版の剛性を分析する。



検討方法の概念図

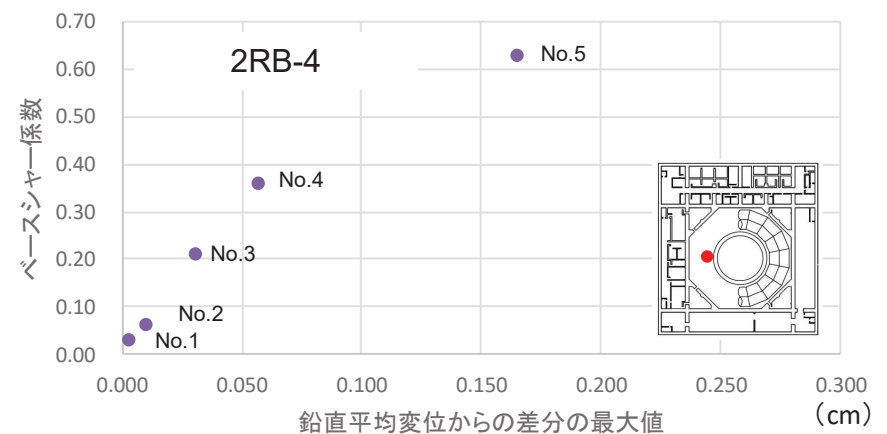
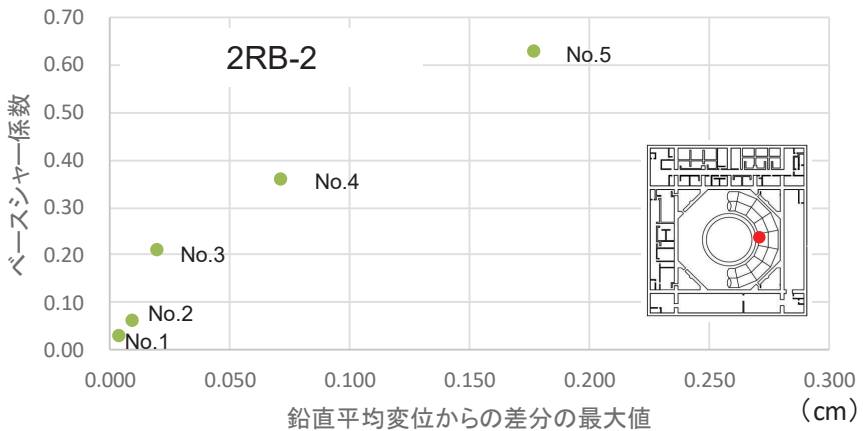
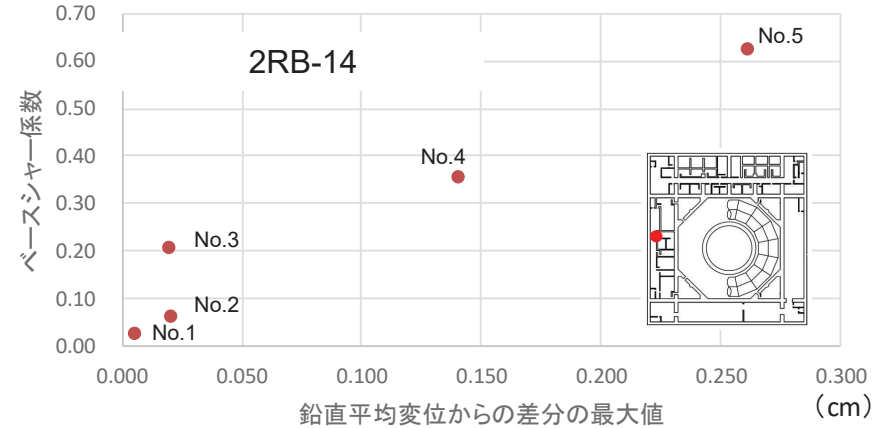
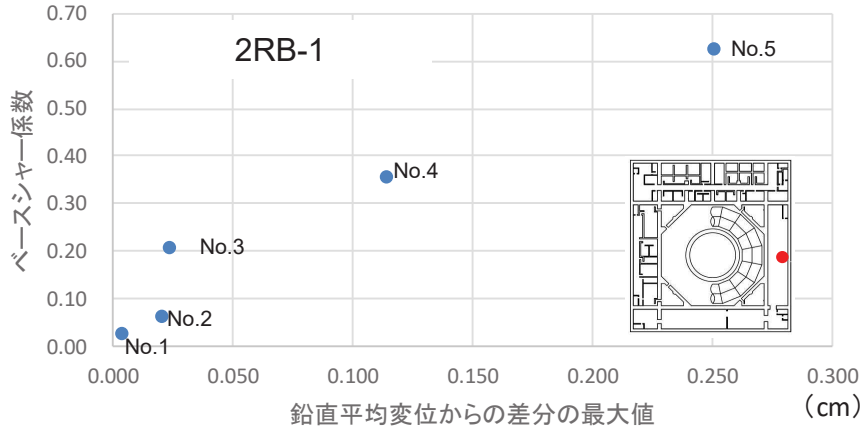
2号炉原子炉建屋 基礎版上地震観測位置(鉛直方向)

(参考)基礎版上の地震観測記録に基づく剛性低下の試検討

・鉛直変位とベースシャー係数の関係はおおむね比例関係となっている。

【凡例】

- No.1: 1994/10/4 22:22北海道東方沖の地震
- No.2: 1996/2/17 0:22福島県沖の地震
- No.3: 2003/5/26 18:24宮城県沖の地震
- No.4: 2005/8/16 11:46宮城県沖の地震
- No.5: 2011/3/11 14:46.11地震



NS方向 ベースシャー係数と鉛直変位の比較

指摘事項No.102, 106に対する回答

No	審査会合日	項目
102	平成30年9月25日	基礎版の常時荷重及び弾性設計用地震動Sdに対する解析モデルについての考え方を示すとともに今回採用する弾塑性解析モデルとの関係を整理して提示すること。
106	平成30年9月25日	基礎版における応力解析モデル及び手法の比較について、先行プラントでの審査実績を追加した上で、相違点に対する考察を提示すること。

弾塑性解析の適用に関する先行プラントとの比較

プラント	女川2号炉	柏崎刈羽6号及び7号炉(参考)※
部位	原子炉建屋の基礎	RCCVコンクリート部
分類	間接支持構造物(検討用地震動: Ss)	主要設備(Sクラス)
解析手法	・3次元FEMモデルを用いた応力解析	・3次元FEMモデルを用いた応力解析
解析コード	ABAQUS	NASTRAN
荷重状態	-	荷重状態Ⅰ～Ⅲ
考慮する荷重	・固定荷重, 機器配管荷重, 積載荷重, 地震荷重(Ss), 土圧等	・死荷重, 運転時圧力等
モデル化	モデル化範囲	・基礎版全体と剛性の高い一部壁をモデル化
	メッシュサイズ	・モデル全体でおおむね1~3m程度
	要素タイプ	・基礎版全体をシェル要素でモデル化する。 ・外部, 内部ボックス壁, 火打ち壁, シェル壁等の剛性の高い壁をシェル要素及び梁要素でモデル化
材料物性	・コンクリートのヤング係数 $E=2.51 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ※1 ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.2$ ※1	・コンクリートのヤング係数 $E=2.88 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.2$
評価方法	応力解析	・弾塑性解析※2
	許容限界	(機能維持) 部材に生じる応力, ひずみが許容限界を超えないことを確認する。 ※3 接地圧が地盤の許容支持力度を超えないことを確認する。
境界条件及びモデル図	基礎版より立ち上がっている耐震壁はその剛性を考慮してシェル要素及び梁要素でモデル化, 底面には支持地盤と等価な弾性ばねをモデル化 ※4	基礎スラブとシェル部とは固定とし, シェル部及びプルガーダーに取り付く床スラブはそれぞれ梁要素としてモデル化
		
備考	<p>※1: コンクリートのヤング係数及びポアソン比は, 日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説・許容応力度設計法-1999」による計算式に基づく値を用いる。なお, 地震応答解析モデルと同様の初期剛性低下については, 地震観測記録の分析等を踏まえて, その影響を考慮することとする。</p> <p>※2: 終局強度設計の許容値に基づく評価を実施することとした。</p> <p>※3: 許容限界についてはCCV規格によるものを基本とする。</p> <p>※4: 基準地震動Ss以外の荷重(常時荷重及び弾性設計用地震動Sd)に対して検討する場合は, 基準地震動Ssに対する検討に用いる解析モデルを採用する予定である。また, そのクライテリアはそれぞれの荷重に対する要求機能を踏まえた設定とする。</p>	<p>・荷重状態Ⅰ～Ⅲに対しては弾性解析を実施する。荷重状態Ⅰ～Ⅲについては, RCCVの挙動を弾性範囲内に収めるという設計思想に基づき設計が行われており, 許容値も弾性範囲内とされていること, 並びに, 温度荷重により発生する熱応力については荷重状態Ⅰ及び荷重状態Ⅱにおいては弾性剛性を1/2に, 荷重状態Ⅲにおいては弾性剛性を1/3に一律低減して算定することにより考慮することから既工認時と同様に弾性解析を実施することとし, 荷重状態Ⅳについては, 評価基準値が塑性化を許容した終局強度設計を行っており, 許容値も塑性化を考慮した数値となっていることから, 弾塑性解析を実施することとした。</p> <p>・許容限界については, 既工認時: 通商産業省告示452号「コンクリート製原子炉格納容器に関する構造等の技術基準」 今回工認: CCV規格に基づき設定しているが, 数値は同じである。荷重状態Ⅳ(S(既工認時はS2)を含む荷重組合せ等)の場合は, 鉄筋: 5000 μ, コンクリート: 3000 μ</p>

※他サイトの情報に係る記載内容については, 公開資料を基に弊社の責任において独自に解釈したものです。