

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画認可申請に係る論点整理について

TEPCO

2020年6月15日
東京電力ホールディングス株式会社

【説明内容】

- 下記の工事計画認可申請に係る論点及び第830回審査会合における指摘事項に対する回答について説明する。

■ 耐震評価に関する論点整理・指摘事項への回答

分類	No.	説明項目（論点/指摘事項への回答）	関連する 主な説明事項
耐震	1	建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点【指摘事項に対する回答】	[3]－4
	2	建物・構築物の応力解析における弾塑性解析の採用	[3]－6

【論点1】

建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点
【指摘事項に対する回答】

本日のご説明内容

➤ 原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合の指摘事項に対する回答

No.	実施日	指摘事項
1	令和2年2月4日 第830回 審査会合	地震応答解析モデルにおいて補助壁を耐震要素として考慮することに関連して、設計体系の他のプロセスにおいての補助壁の取扱いを整理するとともに、設計体系の合理性及び結果の保守性の観点から設計体系の考え方を説明すること。

目次

1. 指摘事項の背景及び課題
2. 既工認時及び今回工認のフローの整理
3. 補助壁の取扱いの整理並びに設計体系の合理性及び結果の保守性の確認

1. 指摘事項の背景及び課題

第830回 審査会合（令和2年2月4日）における説明

- 前回の審査会合では、地震応答解析モデルの既工認からの変更点として、コンクリート実剛性の採用、補助壁の考慮、側面地盤回転ばねの考慮、表層地盤ばねの非考慮の4点を説明した。

【論点5】建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点(1/6) **TEPCO**

1. 概要

(1) 主要な変更項目

基準地震動のレベルの増大に伴い、より現実に近い地震応答を算出することを目的として、下記を変更した地震応答解析モデルを採用する。

項目	既工認モデル	今回工認の動解モデル	主な目的
コンクリート実剛性の採用	コンクリート剛性に設計基準強度に基づく剛性を使用	コンクリート剛性にコンクリート強度データに基づく剛性を使用	建屋全体の剛性を設計時の条件に基づくものから現実のデータに基づくものに変更することで、建屋の振動性状や変形をより実状に近い応答に適正化
補助壁の考慮	耐震要素として外壁などの主要な壁のみモデル化	設計時には耐震要素として考慮していなかったが耐震要素として考慮可能な壁（補助壁）を追加でモデル化	建屋全体の剛性を、より実態に近い条件に基づくものに変更することで、建屋の振動性状や変形をより実状に近い応答に適正化
側面地盤回転ばねの考慮	地盤が建屋の回転を抑制する効果を考慮せず	地盤が建屋の回転を抑える効果をモデル化	建屋地下躯体部分と地盤間の接触部に生じる摩擦による拘束効果を回転ばねとして考慮することにより、建屋の接地率を改善するとともに、建屋の振動性状をより実状に近い応答に適正化
表層地盤ばねの非考慮	表層部の地盤ばねを考慮	表層部の地盤ばねを非考慮	地盤表層部については、地震動の増大に伴い、地盤—建屋相互作用効果が見込めないと考えられる事から、ばね評価を行わない

審査会合での指摘事項

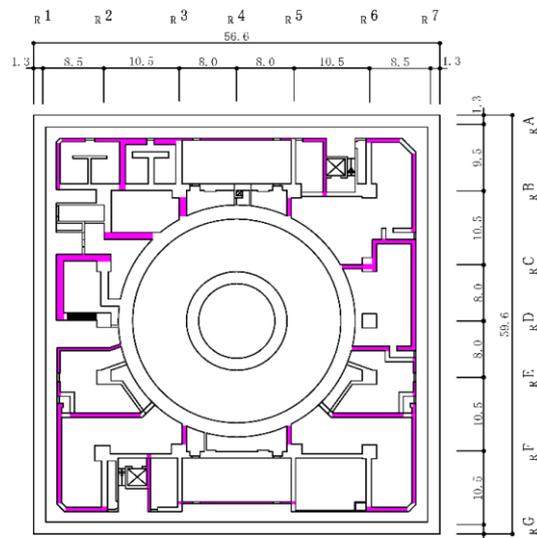
- 前回の審査会合では、地震応答解析モデルの既工認からの変更点のうち補助壁の考慮に関連し、以下の指摘を受けた。

■ 指摘事項No.1

地震応答解析モデルにおいて補助壁を耐震要素として考慮することに関連して、設計体系の他のプロセスにおいての補助壁の取扱いを整理するとともに、設計体系の合理性及び結果の保守性の観点から設計体系の考え方を説明すること。

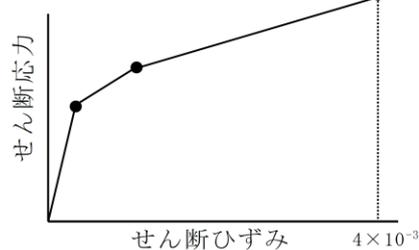
指摘事項の背景

- 今回工認の地震応答解析においては、以下のとおり補助壁を考慮することの妥当性を確認している。
 - 「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005制定）」（RC-N規準）を参考としたプロセスにより間仕切壁から補助壁を選定しており，耐震要素として考慮可能な条件を満たしている。
 - 「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1991 追補版（（社）日本電気協会）」（J E A G 4 6 0 1-1991 追補版）で評価される第1折点で降伏する，完全弾塑性型のせん断スケルトン曲線で評価しており，保守的な設定としている。
 - 2007年新潟県中越沖地震のシミュレーション解析により，地震時の挙動をより実応答に近い形で評価できることを確認している。
- 上記の地震応答解析の結果は，後段の設計プロセスである耐震壁，RCCV，基礎スラブの評価に用いる。



補助壁の考慮範囲の例（B3F）

J E A G 4 6 0 1-1991 追補版 終局点



(a) 耐震壁



(b) 補助壁

せん断スケルトン曲線の概念図

指摘事項に対する課題の整理及び回答

■ 指摘事項No.1

地震応答解析モデルにおいて補助壁を耐震要素として考慮することに関連して、設計体系の他のプロセスにおいての補助壁の取扱いを整理するとともに、設計体系の合理性及び結果の保守性の観点から設計体系の考え方を説明すること。



■ 課題

- ・ 地震応答解析の他の設計プロセスである耐震壁，RCCV，基礎スラブの評価において，補助壁の取扱いが整理されていない。
- ⇒設計体系全体として，補助壁を考慮することの合理性及び結果の保守性が確認できていない。



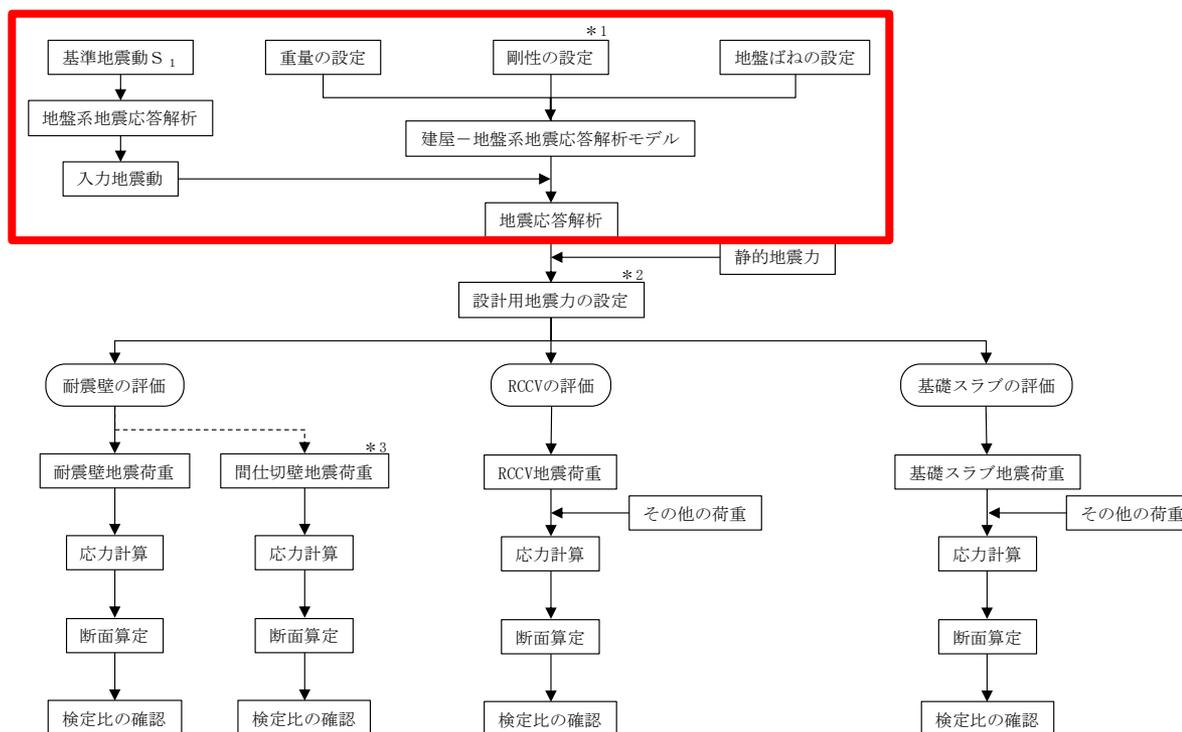
■ 回答

- ・ 設計体系のプロセスについて，既工認時及び今回工認における地震応答解析，設計用地震力，評価のフローを整理した。
- ・ 今回工認の耐震壁，RCCV，基礎スラブの評価における補助壁の取扱いを整理し，各部材の設計体系の合理性及び結果の保守性を確認した。

2. 既工認時及び今回工認のフローの整理

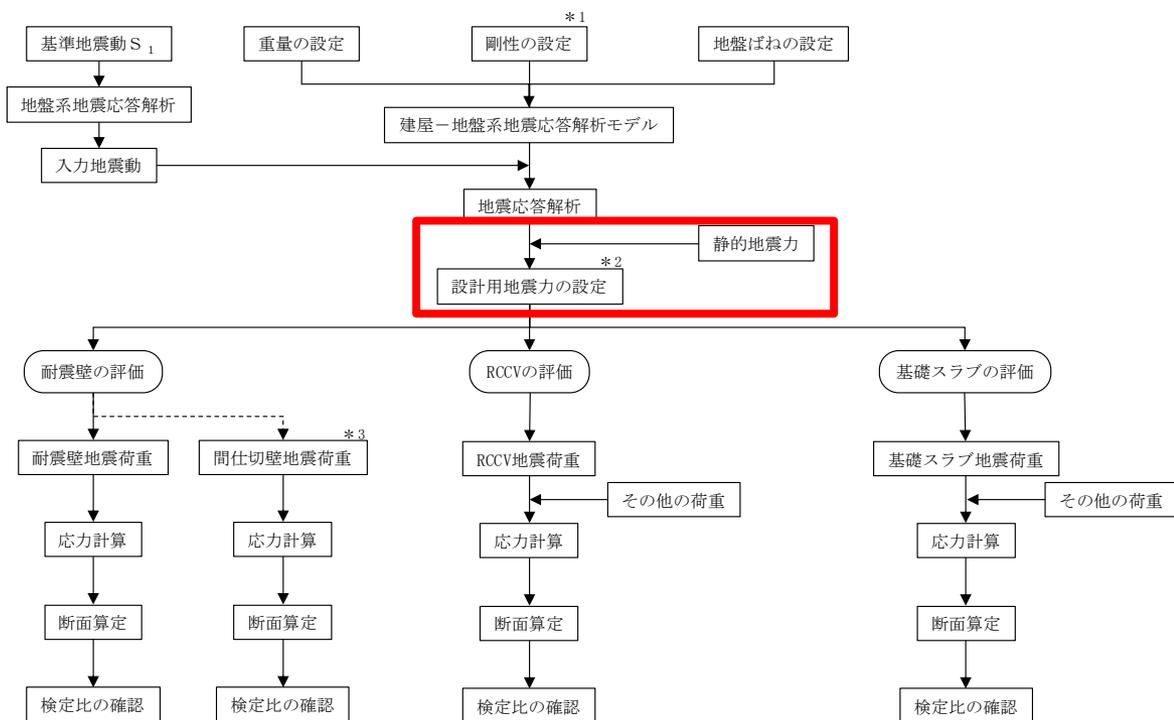
既工認時のフロー（地震応答解析）

- 原子炉建屋は、既工認時において、外壁及び中間壁（以下これらを「耐震壁」という。）並びにRCCVを耐震要素とし、それ以外の壁を間仕切壁として設計している。
- 既工認時の地震応答解析における建屋剛性としては、耐震壁及びRCCVのみを考慮し、間仕切壁は考慮せず解析を実施している。（* 1）



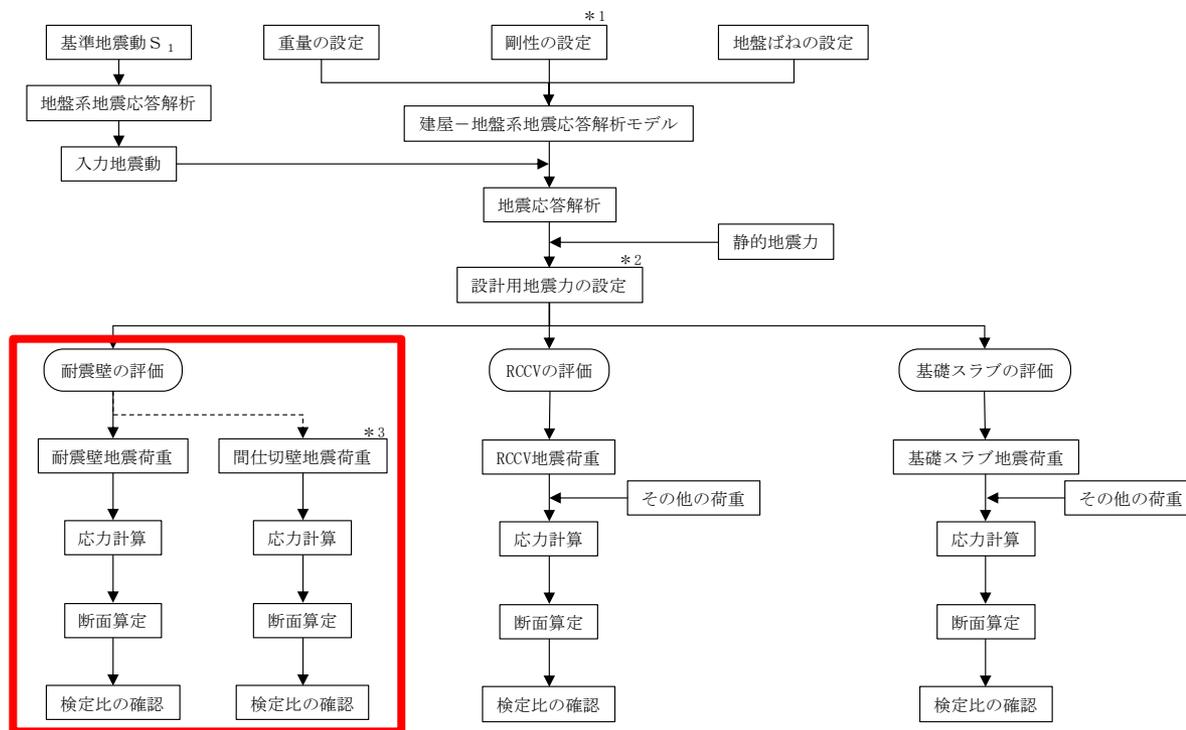
既工認時のフロー（設計用地震力）

- 既工認時における設計用地震力は、基準地震動 S_1 による動的地震力並びに層せん断力係数 $3.0 C_i$ 及び地下部分の水平震度 K による静的地震力より設定している。（*2）
- 静的地震力は建屋全体で評価されるため、耐震壁及びRCCVの地震荷重は、それぞれの剛性を考慮して配分している。この際、間仕切壁は地震荷重を負担しないものとしている。
- なお、基準地震動 S_2 による動的地震力は、設計用地震力を下回ることを確認している。



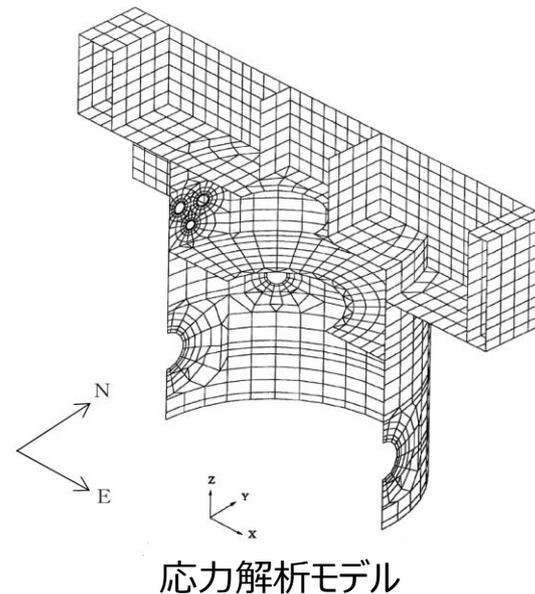
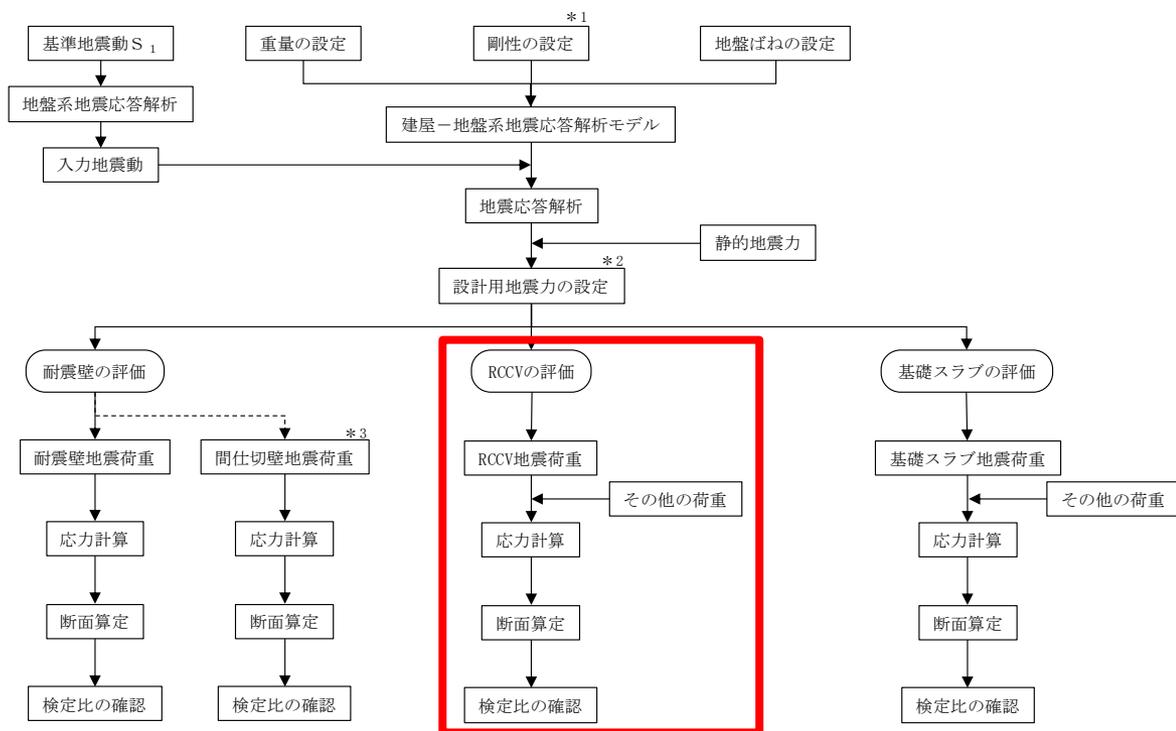
既工認時のフロー（耐震壁の評価）

- 既工認時における耐震壁の評価は、耐震壁の地震荷重に対する応力計算及び断面算定を実施し、許容応力度に対する発生応力度の比率（検定比）を確認している。
- なお、地震荷重はすべて耐震壁で負担する設計としており、間仕切壁は地震荷重を負担しないものの、耐震壁の地震荷重から、間仕切壁の分類に応じた地震荷重を設定して設計している。（*3）



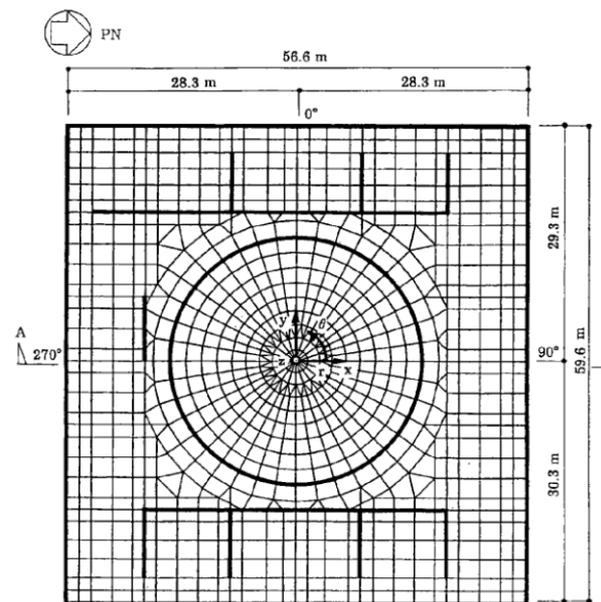
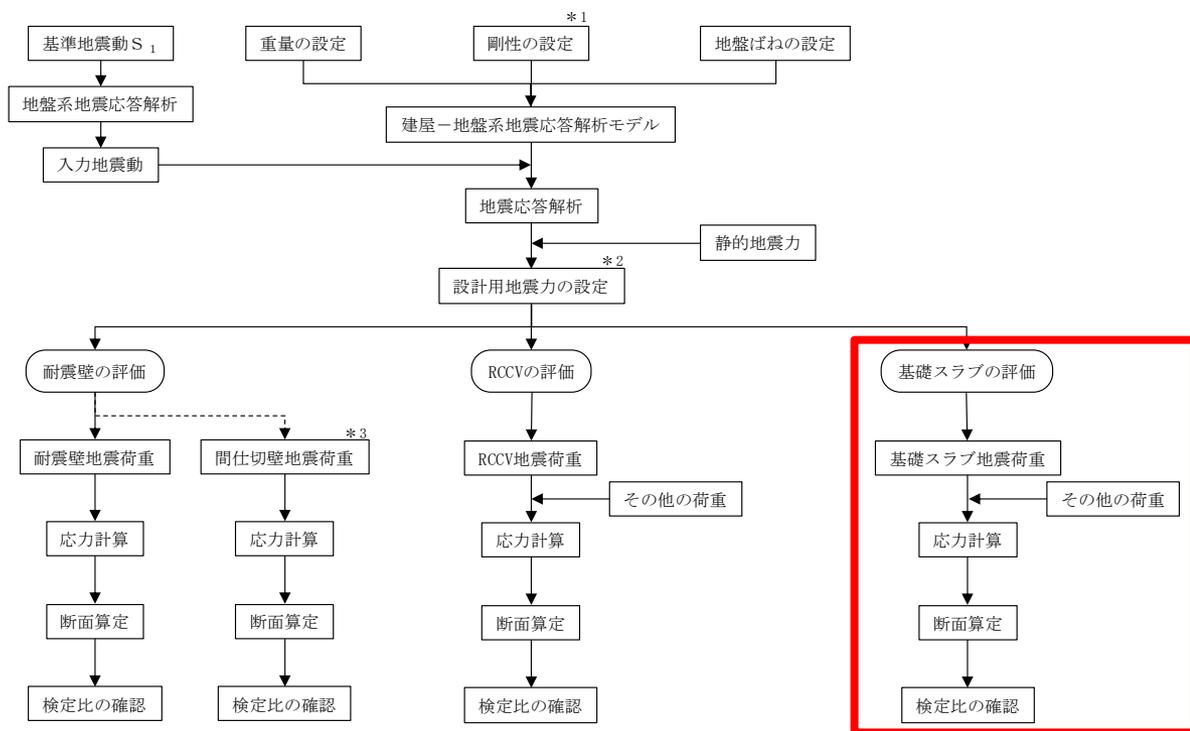
既工認時のフロー（RCCVの評価）

- 既工認時におけるRCCVの評価は、RCCVの地震荷重とその他の荷重を組み合わせることで応力計算及び断面算定を実施し、検定比を確認している。
- 応力解析モデルは、RCCV及びプール部をモデル化し、間仕切壁をモデル化せず、地震荷重は、地震応答解析モデルの各質点に相当する位置に入力している。



既工認時のフロー（基礎スラブの評価）

- 既工認時における基礎スラブの評価は、耐震壁及びRCCVの地震荷重とその他の荷重を組み合わせることで応力計算及び断面算定を実施し、検定比を確認している。
- 応力解析モデルは、基礎スラブに加えて耐震壁及びRCCVの拘束効果をモデル化し、間仕切壁をモデル化せず、地震荷重は、耐震壁及びRCCVの脚部に対応する位置に入力している。



注：太線は耐震壁及びRCCVを示す。

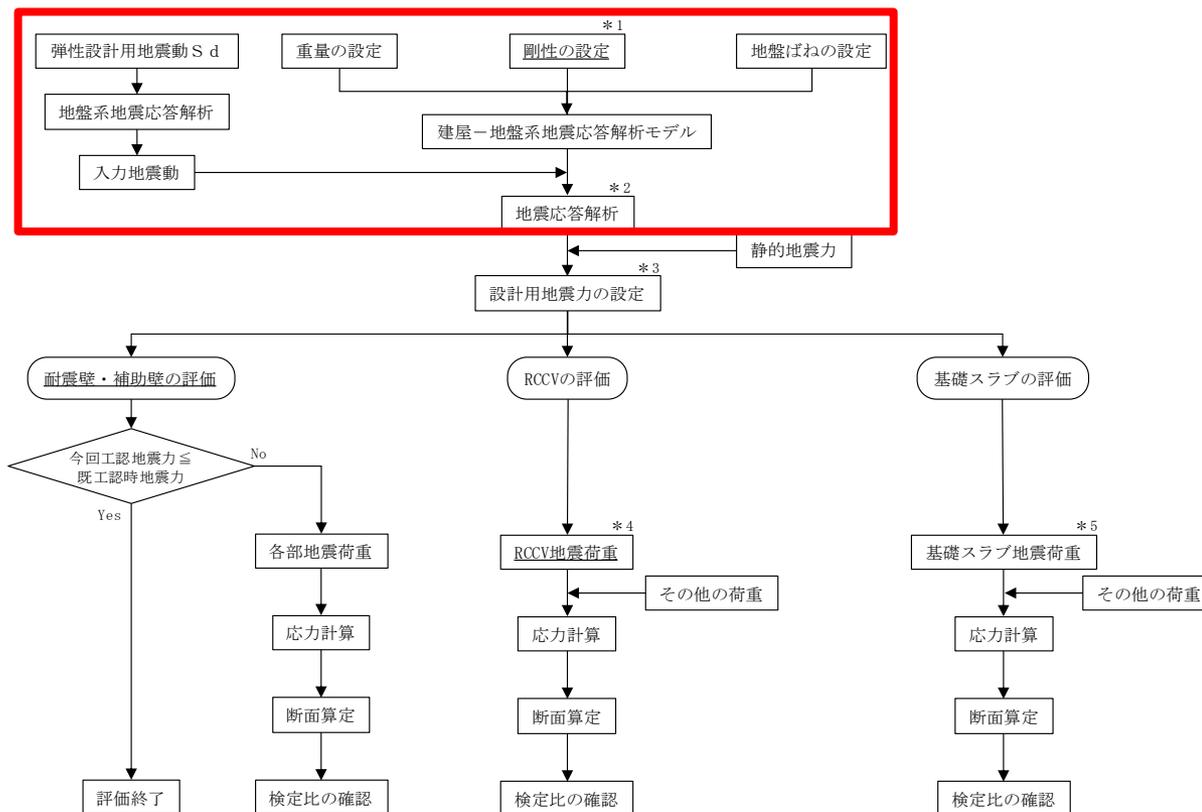
応力解析モデル

今回工認のフロー

- 既工認時は、基準地震動 S_2 による動的地震力が、基準地震動 S_1 による動的地震力及び静的地震力を下回っていたため、1つのフローで示すことができた。
- 一方、今回工認では、基準地震動 S_s による動的地震力（ S_s 地震時）が、弾性設計用地震動 S_d 及び静的地震力（ S_d 地震時）を上回るため、 S_d 地震時と S_s 地震時の2つのフローとなる。
- 以降では、まず S_d 地震時のフローを示したのち、 S_s 地震時のフローで S_d 地震時のフローとの差分を示す。

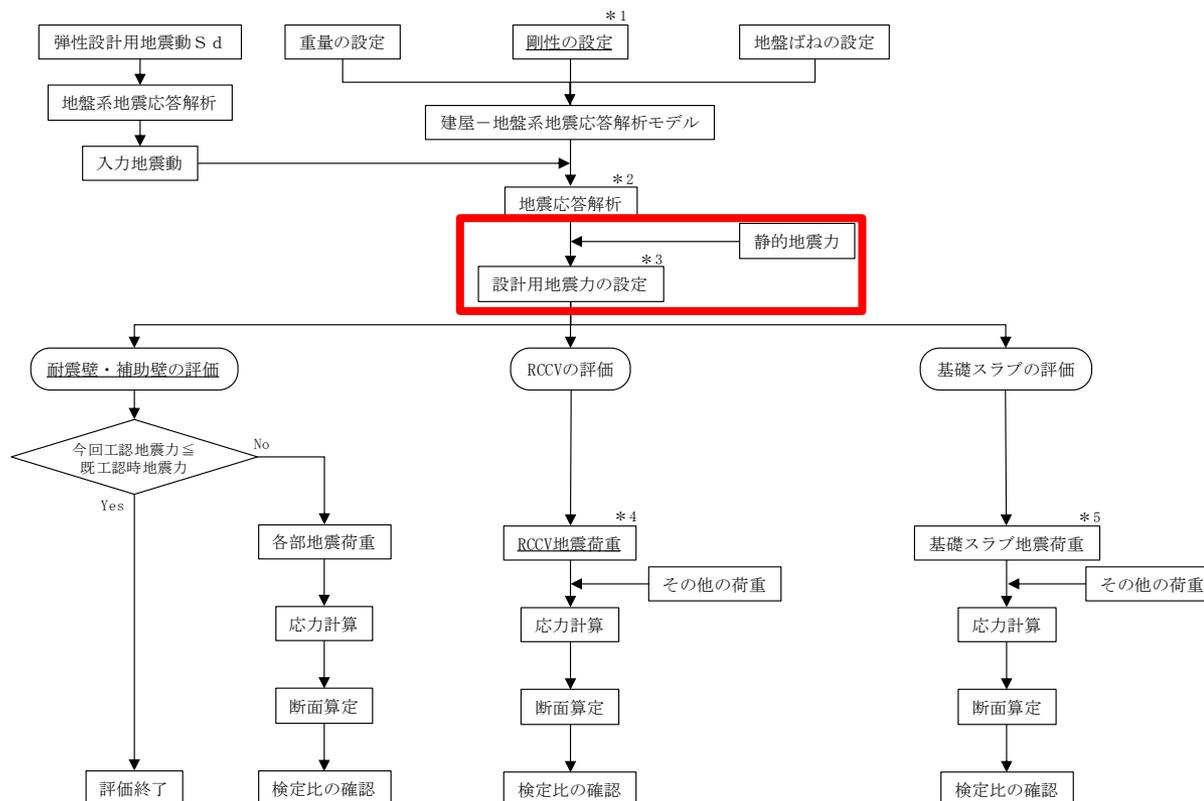
今回工認の S d 地震時のフロー（地震応答解析）

- 今回工認における地震応答解析では、地震時の挙動をより実応答に近い形で評価するため、建屋剛性として補助壁のせん断剛性を考慮している。（* 1）
- 補助壁は第1折点で降伏する完全弾塑性型のせん断スケルトン曲線で評価しており、保守的な設定としている。なお、補助壁のせん断終局強度は、第1折点のせん断力を上回ることを確認している。



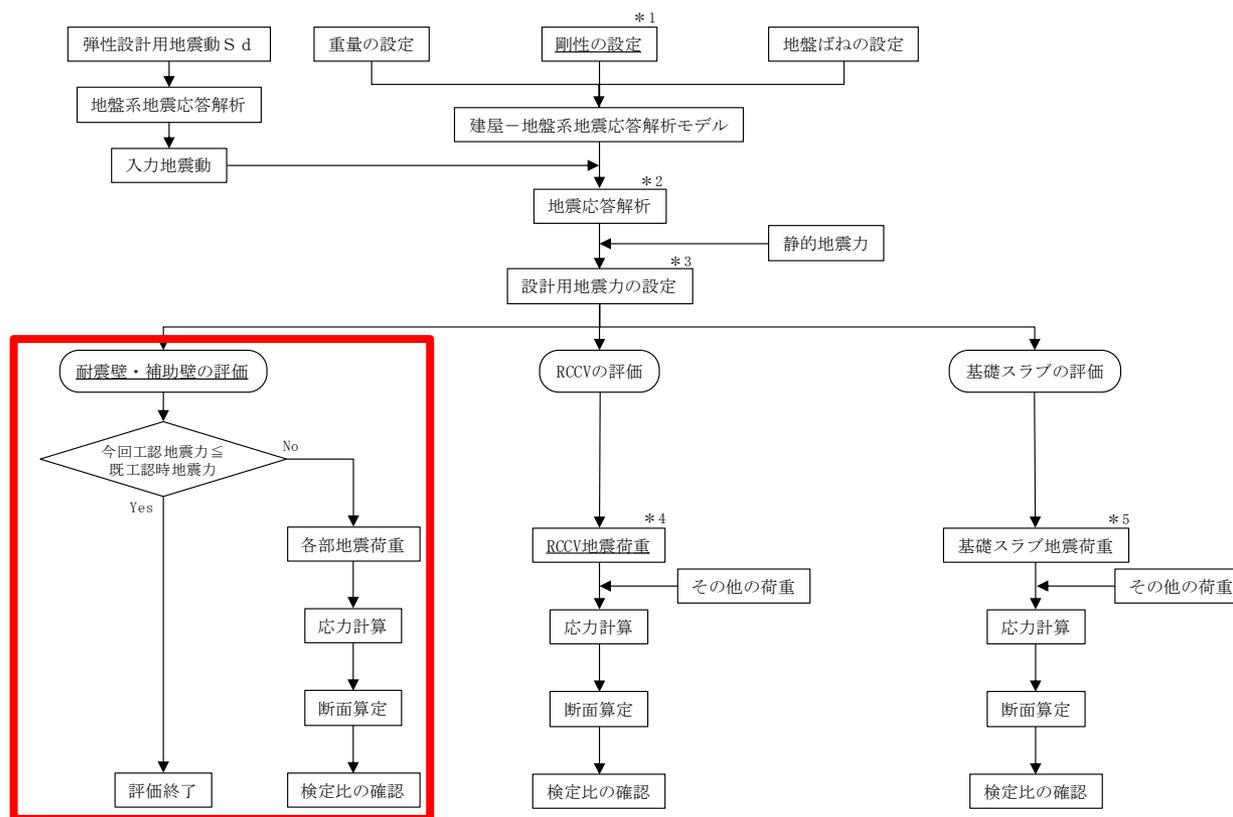
今回工認の S d 地震時のフロー（設計用地震力）

- 今回工認における設計用地震力は、弾性設計用地震動 S dによる動的地震力及び静的地震力より設定している。（*3）
- 静的地震力は既工認時の値を用いており，耐震壁及びRCCVへの配分も既工認時と同じとしている。



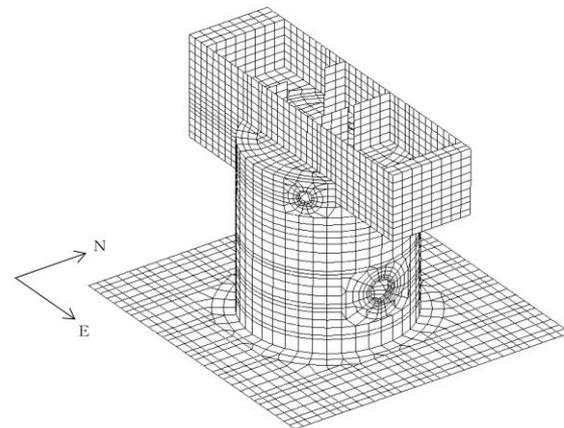
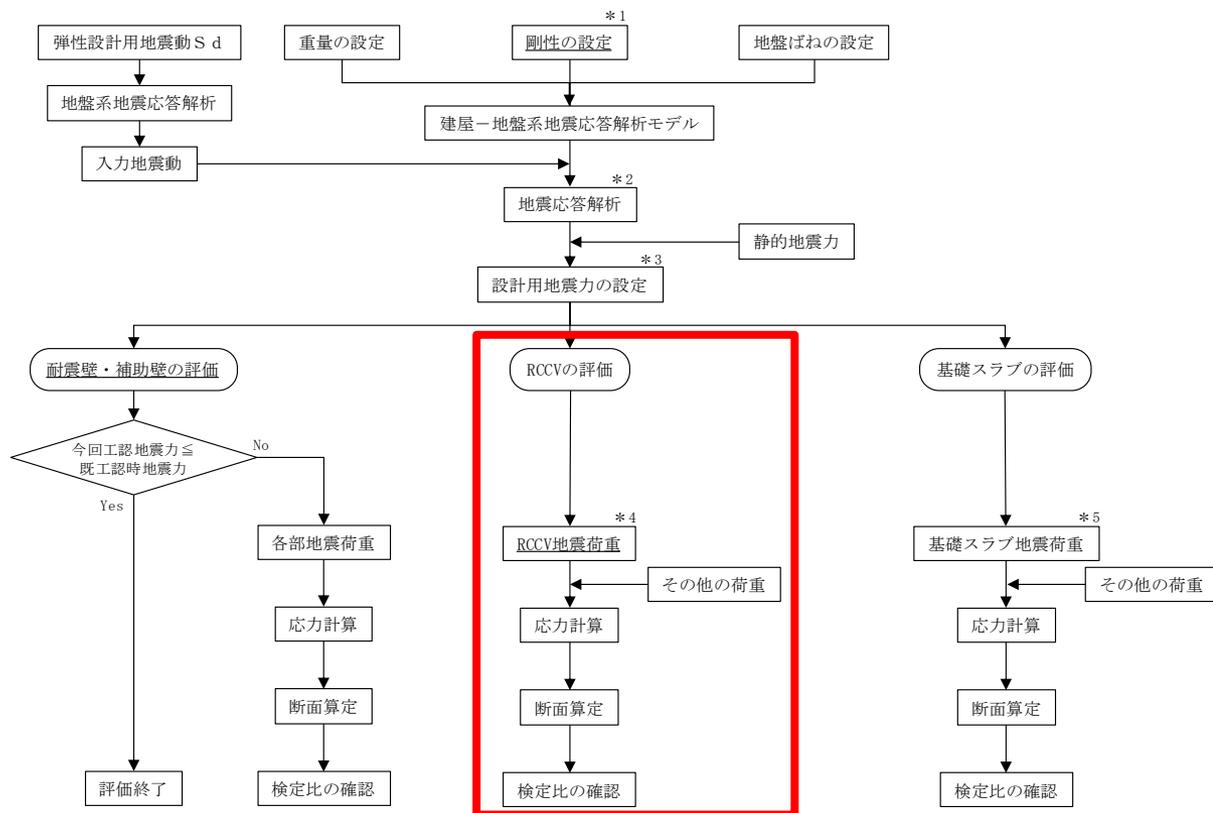
今回工認の S d 地震時のフロー（耐震壁及び補助壁の評価）

- 今回工認における耐震壁の評価では、層せん断力について、今回工認における S d 地震時が既工認時の設計用地震力を下回り、耐震壁のみで負担できることを確認している。
- なお、弾性設計用地震動 S d に対する地震応答解析結果において、層に生じるせん断応力度が、J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版により評価されるせん断スケルトンの第1折点のせん断応力度より小さいことを確認している。



今回工認の S d 地震時のフロー（RCCVの評価）

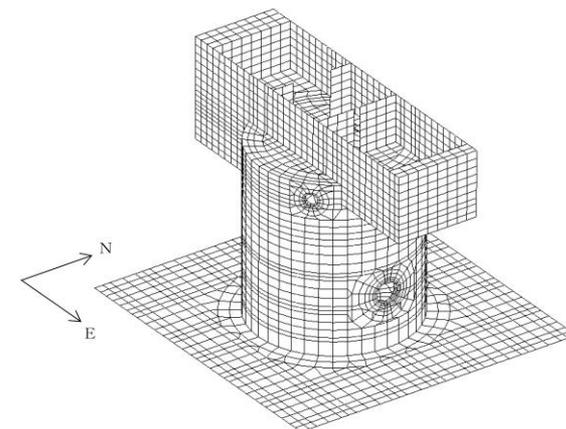
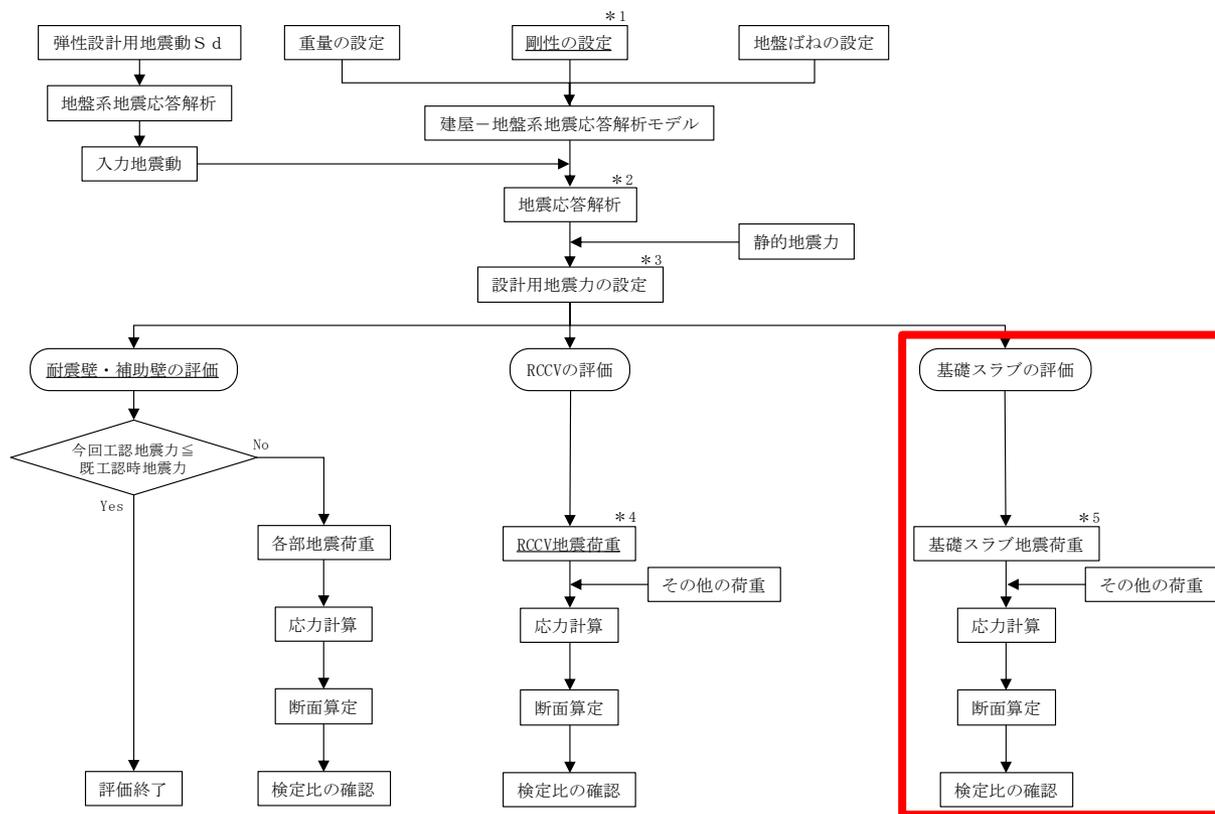
- 今回工認におけるRCCVの評価では、弾性設計用地震動 S d による動的地震力について、RCCVに入力するせん断力を精緻化するため、RCCVと補助壁のせん断断面積比により算定した補助壁が負担するせん断力を、地震応答解析におけるRCCV部の最大応答せん断力から除いて算定している。（* 4）
- 今回工認においてはRCCVは基礎スラブと一体でモデル化しているが、既工認時と同様に、応力解析モデルは、RCCV及びプール部をモデル化し、間仕切壁及び補助壁をモデル化せず、地震荷重は、地震応答解析モデルの各質点に相当する位置に入力している。



応力解析モデル

今回工認の S d 地震時のフロー（基礎スラブの評価）

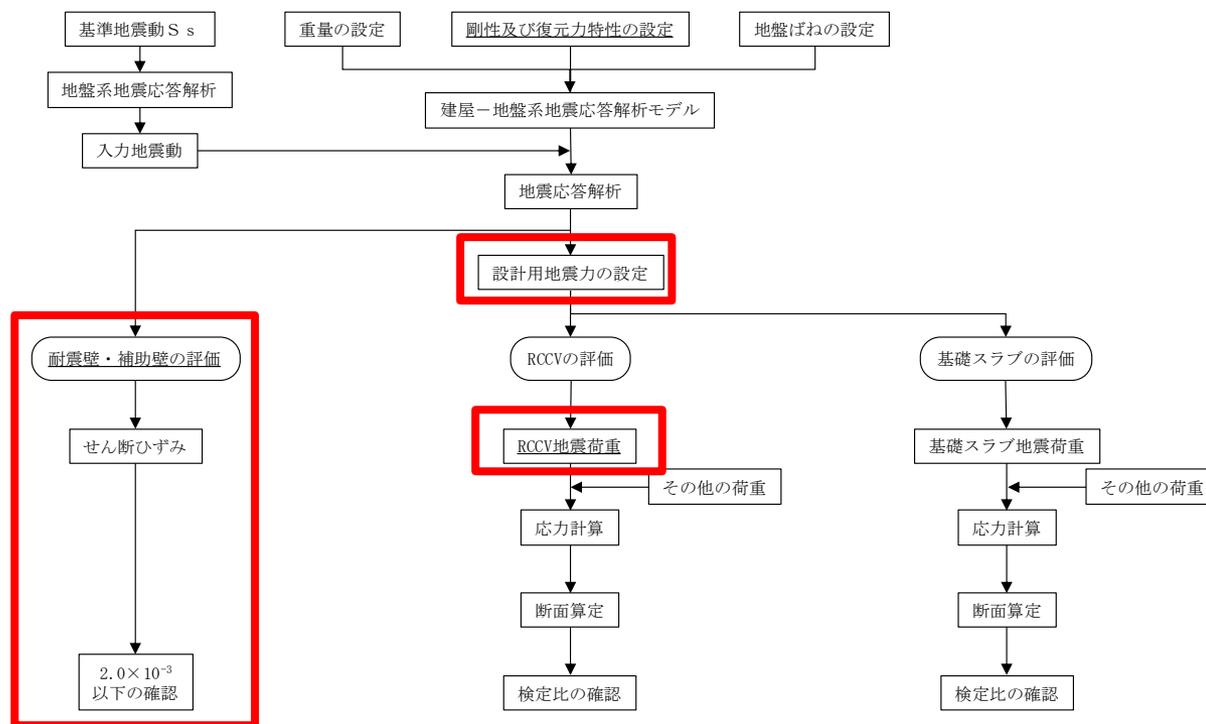
- 今回工認における基礎スラブの評価では、基礎スラブに入力するせん断力は、補助壁が負担するせん断力は除かず、耐震壁及びRCCVの地震荷重に含んでいる。（* 5）
- 今回工認においてはRCCVは基礎スラブと一体でモデル化しているが、既工認時と同様に、応力解析モデルは、基礎スラブに加えて耐震壁及びRCCVの拘束効果をモデル化し、間仕切壁及び補助壁をモデル化せず、地震荷重は、耐震壁及びRCCVの脚部に対応する位置に入力している。



応力解析モデル

今回工認の S s 地震時のフロー

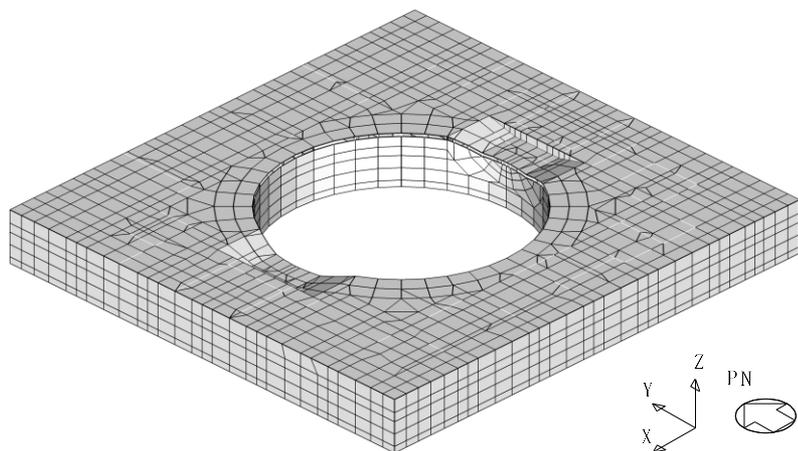
- S s 地震時のフローは、S d 地震時のフローと概ね同様であり、S d 地震時と異なる点は以下のとおりである。
- 耐震壁及び補助壁の評価では、地震応答解析結果より、層としてのせん断ひずみが 2.0×10^{-3} 以下であることを確認している。
- RCCV及び基礎スラブの評価では、基準地震動 S s に対する動的地震力より設計用地震力を設定している。
- RCCVに入力するせん断力は、RCCVと補助壁のせん断断面積比により算定した補助壁が負担するせん断力と、補助壁のせん断スケルトン曲線における第1折点のせん断耐力の90%のうち、小さい方の値を地震応答解析におけるRCCV部の最大応答せん断力から除いて算定している。



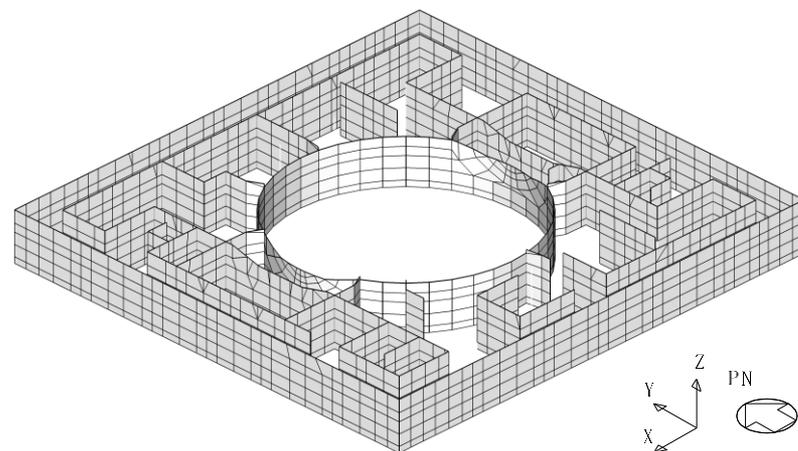
3. 補助壁の取扱いの整理並びに設計体系の合理性及び結果の保守性の確認

3次元FEMモデルを用いたせん断力負担割合の検討（検討方針）

- 今回工認のRCCVの評価において、RCCVに入力するせん断力をRCCVと補助壁のせん断断面積比により算定していることの妥当性を確認するため、3次元FEMモデルを用いたせん断力負担割合の検討を実施した。
- 本検討は、地震応答解析より算定される地震荷重が最も大きく、中間壁へのせん断力の分配も確認できるB3Fを代表して検討を行う。
- 原子炉建屋のB3Fを取り出した3次元FEMモデルを用いて、B2F床スラブ位置に単位長さの強制変位を入力した際のボックス壁、RCCV、中間壁及び補助壁が負担するせん断力の割合を算定し、RCCVの評価に用いるせん断力負担割合が妥当であることを確認する。
- なお、本検討は、原子炉建屋の高さ及び平面形状が共通であることを踏まえ、柏崎刈羽原子力発電所6号機原子炉建屋を対象に実施したものである。



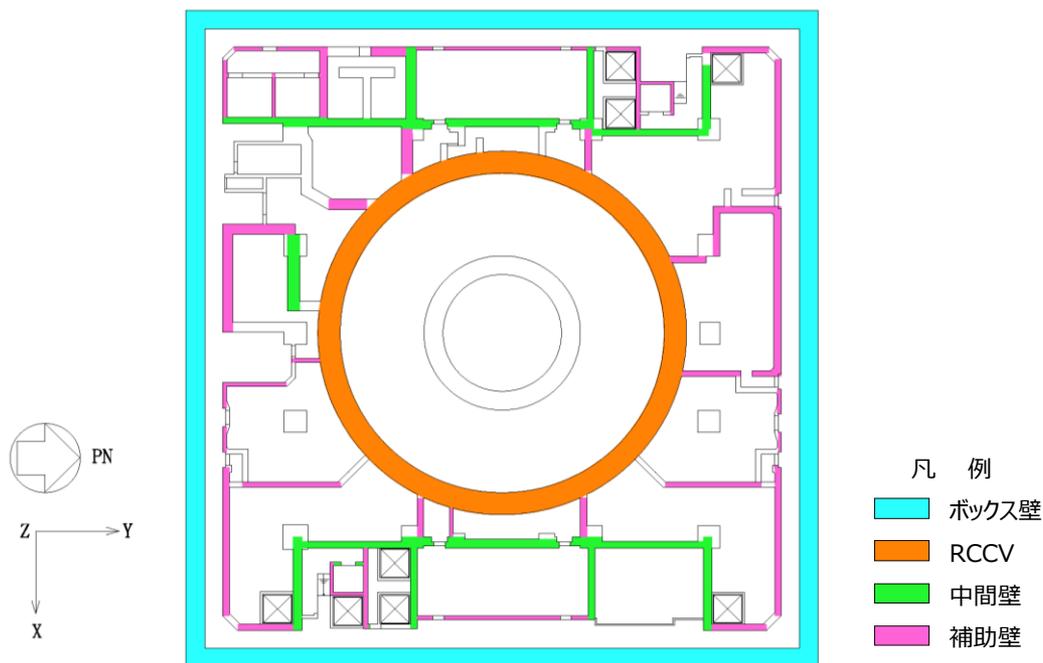
モデル全体図



モデル壁図

3次元FEMモデルを用いたせん断力負担割合の検討（せん断力負担割合の算出方針）

- 3次元FEMモデルによるせん断力負担割合は、3次元FEMモデルを用いた弾性応力解析結果における各壁脚部の反力値を、ボックス壁、RCCV、中間壁及び補助壁ごとに集計し、その比率により負担割合を算出する。
- RCCVの評価におけるせん断力負担割合は、せん断断面積比により算定した補助壁が負担するせん断力と、補助壁のせん断スケルトン曲線における第1折れ点のせん断耐力の90%のうち、小さい方を補助壁の負担せん断力として、せん断面積比により算定する。



B3Fの各壁の分類

3次元FEMモデルを用いたせん断力負担割合の検討（検討結果）

- 3次元FEMモデルを用いて算出したせん断力負担割合は、RCCVの評価で用いるせん断力負担割合と概ね同程度となっていることを確認した。
- 以上より、今回工認のRCCVの評価において、RCCVに入力するせん断力をせん断断面積比により算定していることの妥当性を確認した。

各壁せん断力負担割合の比較（NS方向）

	3次元FEM	RCCVの評価
ボックス壁	0.51	0.53
RCCV	0.24	0.24
中間壁	0.12	0.11
補助壁	0.13	0.12

各壁せん断力負担割合の比較（EW方向）

	3次元FEM	RCCVの評価
ボックス壁	0.53	0.54
RCCV	0.22	0.23
中間壁	0.08	0.10
補助壁	0.17	0.13

耐震壁の評価における補助壁の取扱い並びに各部材の設計体系の合理性及び結果の保守性

- 既工認時は、間仕切壁（補助壁含む）を考慮せずに設計用地震力を設定しており、耐震壁のみで地震荷重を負担する設計としていた。
- 今回工認では、弾性設計用地震動 S_d による動的地震力及び静的地震力は、既工認時の設計用地震力を下回ることを確認しており、耐震壁のみで負担できることを確認している。
- また、基準地震動 S_s に対しては、耐震壁及び補助壁のせん断ひずみが 2.0×10^{-3} 以下であることを確認している。
- 以上より、耐震壁の評価における補助壁の取扱い並びに各部材の設計体系の合理性及び結果の保守性を確認した。

項目	内容	既工認時	今回工認	備考
設計用地震力	設計用地震力の設定	<ul style="list-style-type: none"> • 基準地震動 S_1 による動的地震力及び静的地震力より設定（間仕切壁は地震荷重を負担しない） （基準地震動 S_2 による動的地震力は設計用地震力を下回る） 	<ul style="list-style-type: none"> • 弾性設計用地震動 S_d による動的地震力及び静的地震力より設定（静的地震力は既工認時と同じ） • 基準地震動 S_s による動的地震力より設定 	-
耐震壁及び補助壁の評価	断面算定	耐震壁の地震荷重に対する応力計算及び断面算定を実施し、許容応力度に対する発生応力度の比率（検定比）を確認	弾性設計用地震動 S_d による動的地震力及び静的地震力は、既工認時の設計用地震力を下回ることを確認	補助壁分の地震荷重を耐震壁のみで負担する
	地震応答解析による評価	耐震壁のせん断ひずみが 2.0×10^{-3} 以下であることを確認	耐震壁及び補助壁のせん断ひずみが 2.0×10^{-3} 以下であることを確認	耐震壁、補助壁ともに健全性を確認

RCCVの評価における補助壁の取扱い並びに各部材の設計体系の合理性及び結果の保守性

- 既工認時は、地震応答解析では間仕切壁（補助壁含む）を考慮しておらず、応力解析においても間仕切壁（補助壁含む）をモデル化せず、RCCVのみで地震荷重を負担する設計としていた。
- 今回工認では、地震応答解析では補助壁を考慮しているが、応力解析では補助壁をモデル化していないことを踏まえ、RCCVに入力する地震荷重を精緻化するため、補助壁分のせん断力を除いた地震荷重をRCCVで負担する評価を実施している。
- 補助壁にせん断力を負担させることについては、3次元FEMモデルを用いたせん断力負担割合の検討により、妥当性を確認している。
- せん断力を負担させた補助壁の健全性については、弾性設計用地震動 S_d による動的地震力では、補助壁がRC-N規準を参考とした耐震要素の条件を満たしており、地震応答解析結果においてせん断応力度がせん断スケルトンの第1折点のせん断応力度より小さいことにより確認している。
- せん断力を負担させた補助壁の健全性については、基準地震動 S_s による動的地震力では、地震応答解析結果において、補助壁に発生するせん断力が終局強度を下回ること、せん断ひずみが 2.0×10^{-3} 以下であることにより確認している。
- 以上より、RCCVの評価における補助壁の取扱い並びに各部材の設計体系の合理性及び結果の保守性を確認した。

項目	内容		既工認時	今回工認	備考
RCCVの評価	応力解析による評価	モデル化	間仕切壁をモデル化せず	間仕切壁及び補助壁をモデル化せず	—
		地震荷重	RCCVのみで負担	補助壁のせん断力の負担分を考慮 (せん断断面積比より算定)	補助壁にせん断力を負担させること について、妥当性及び補助壁の健全性を確認

基礎スラブの評価における補助壁の取扱い並びに各部材の設計体系の合理性及び結果の保守性

- 既工認時は、地震応答解析では間仕切壁（補助壁含む）を考慮しておらず、応力解析においても間仕切壁（補助壁含む）をモデル化せず、耐震壁及びRCCVのみから地震荷重を作用させる設計としていた。
- 今回工認では、地震応答解析では補助壁を考慮しているが、応力解析では既工認時と同様に補助壁をモデル化せず、補助壁分のせん断力も含め耐震壁及びRCCVのみから地震荷重を作用させる評価を実施している。
- これは、基礎スラブ上には耐震壁及びRCCVだけでなく補助壁も存在しているが、地震荷重を作用させる際には補助壁分も耐震壁及びRCCVに集中させ、基礎スラブを保守的に評価するためである。
- 以上より、基礎スラブの評価における補助壁の取扱い並びに各部材の設計体系の合理性及び結果の保守性を確認した。

項目	内容		既工認時	今回工認	備考
基礎スラブの評価	応力解析による評価	モデル化	間仕切壁をモデル化せず	間仕切壁及び補助壁をモデル化せず	—
		地震荷重	耐震壁及びRCCVのみから作用させる	同左	補助壁分も含め、地震荷重を耐震壁及びRCCVのみから作用させる

まとめ

1. 指摘事項の背景及び課題

- 指摘事項を踏まえ、背景及び課題を整理した。

2. 既工認時及び今回工認のフローの整理

- 設計体系のプロセスについて、既工認時及び今回工認における地震応答解析、設計用地震力、評価のフローを整理した。

3. 補助壁の取扱いの整理並びに設計体系の合理性及び結果の保守性の確認

- 今回工認の耐震壁，RCCV，基礎スラブの評価における補助壁の取扱いを整理し，各部材の設計体系の合理性及び結果の保守性を確認した。

【論点2】

建物・構築物の応力解析における弾塑性解析の採用

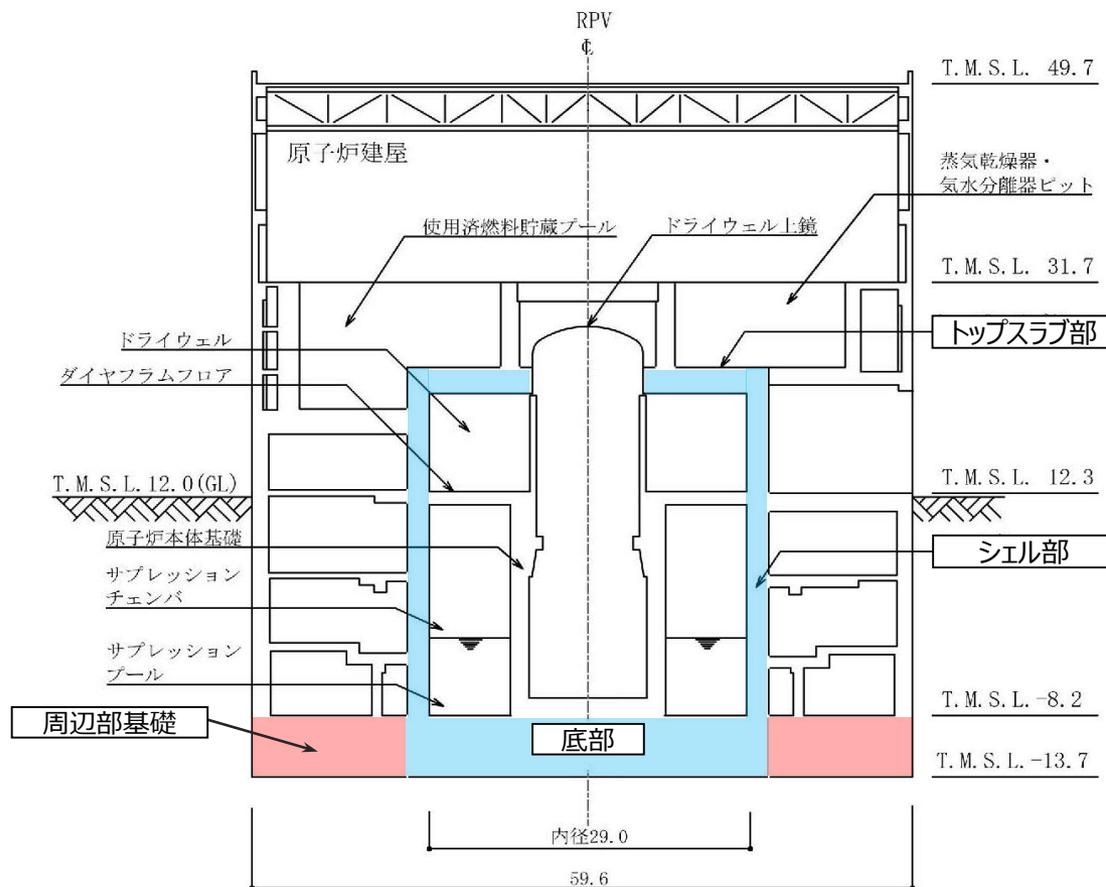
目次

1. 原子炉格納容器コンクリート部及び原子炉建屋基礎スラブの弾塑性解析の概要
2. 弾塑性解析及びRCCVの評価についての課題
3. 各課題に対する検討

1. 原子炉格納容器コンクリート部及び原子炉建屋 基礎スラブの弾塑性解析の概要

構造概要

- 原子炉格納容器コンクリート部(RCCV)は、シェル部、トップスラブ部及び底部で構成される。
- 原子炉建屋基礎スラブは、RCCV底部及び周辺部基礎で構成される。
- 構造形式は、いずれも鉄筋コンクリート造である。

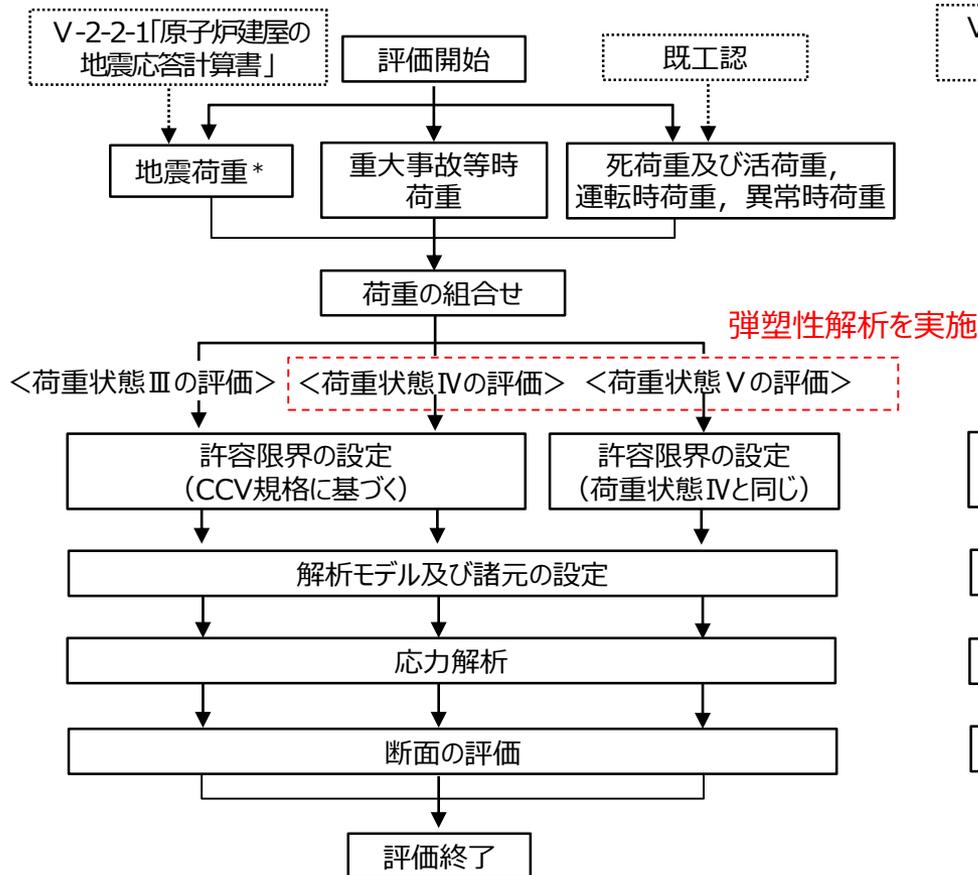


原子炉建屋の概略断面図

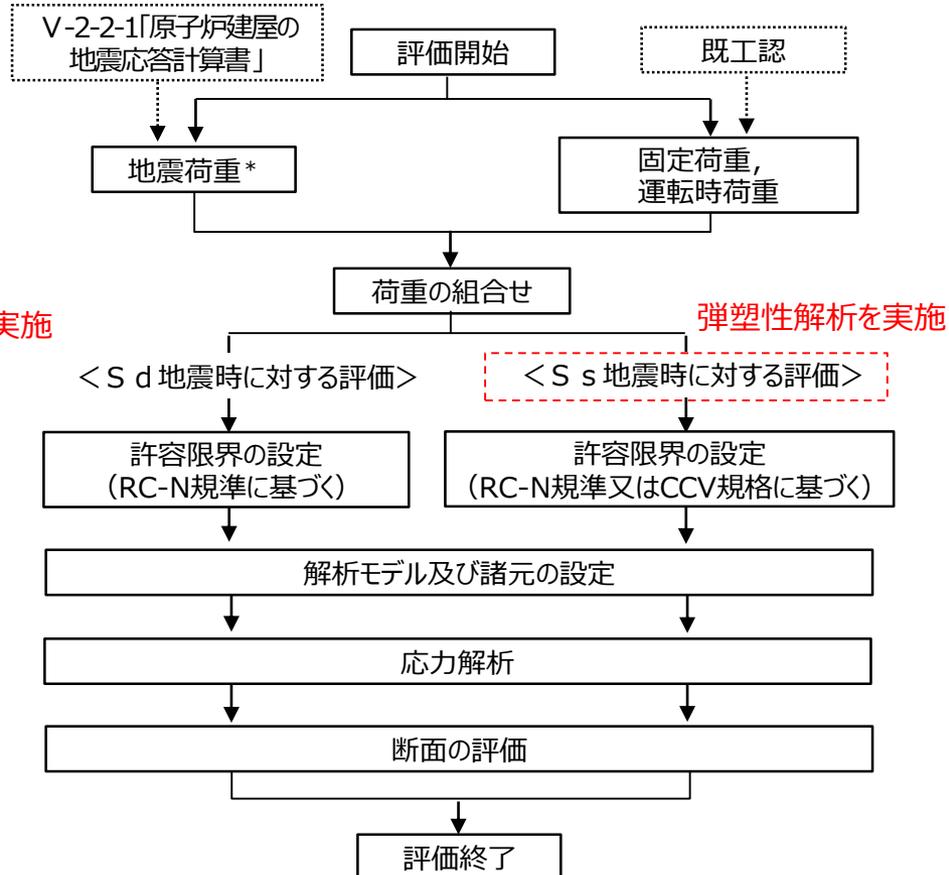
評価対象部位及び評価方針

- RCCVの評価対象部位は、シェル部、トップスラブ部、底部、貫通部及び局部である。
- 基礎スラブの評価対象部位は、周辺部基礎である。
- 荷重状態Ⅳ及びⅤの評価並びにS s地震時に対する評価は、弾塑性解析により実施している。

【RCCVの評価フロー】



【周辺部基礎の評価フロー】



注記* : 地震荷重に対しては、地震応答解析における材料物性の不確かさを考慮する。

荷重及び荷重の組合せ

- 弾塑性解析の対象となる荷重及び荷重の組合せは、以下のとおりである。
- 周辺部基礎の評価対象であるS s地震時は、RCCVの荷重状態IV・地震時（2）に相当する。

RCCVの荷重の組合せ

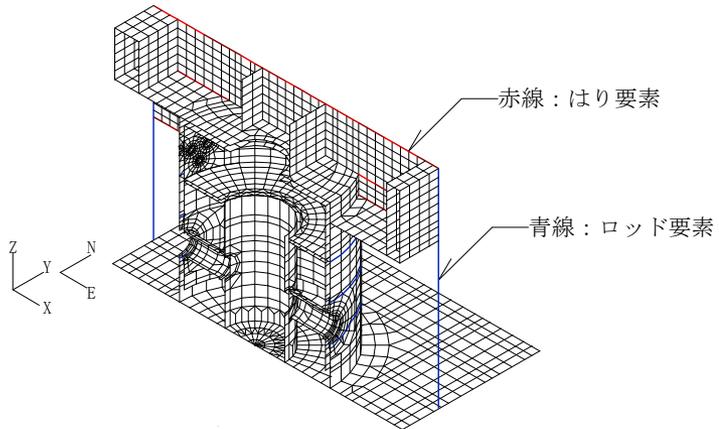
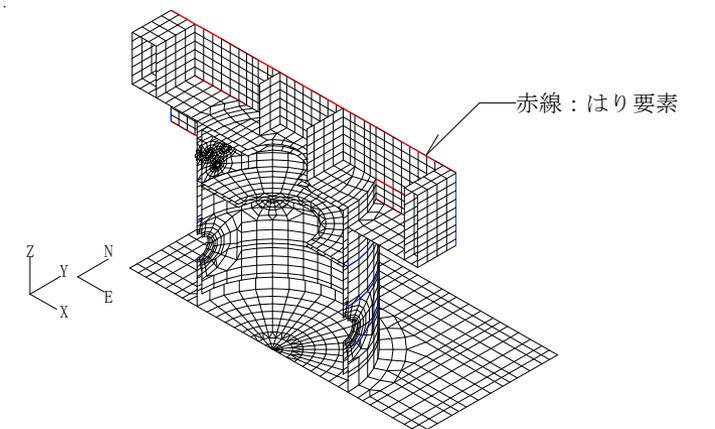
荷重状態	荷重時	荷重番号	荷重の組合せ
IV	地震時（2）	3	$DL + P_1 + H_1 + K_s + R_s + E_s$
	（異常＋地震）時（2）	4	$DL + P_{21} + K_d + R_d + E_d$
V	（異常＋地震）時（3）	5	$DL + P_{SAL} + HS_{SAL} + H_{SA} + K_d + R_d + E_d$
	（異常＋地震）時（4）	6	$DL + P_{SALL} + HS_{SALL} + K_s + R_s + E_s$

DL : 死荷重及び活荷重
 P_1 : 運転時圧力
 H_1 : 逃がし安全弁作動時荷重
 P_{21} : 異常時圧力（直後）
 P_{SAL} : SA（L）時圧力
 HS_{SAL} : SA（L）時水圧荷重
 H_{SA} : チャギング荷重（SA時）
 P_{SALL} : SA（LL）時圧力
 HS_{SALL} : SA（LL）時水圧荷重

K_d : S d地震荷重
 K_s : S s地震荷重
 R_d, R_s : 地震時配管荷重
 E_d, E_s : 地震時土圧荷重

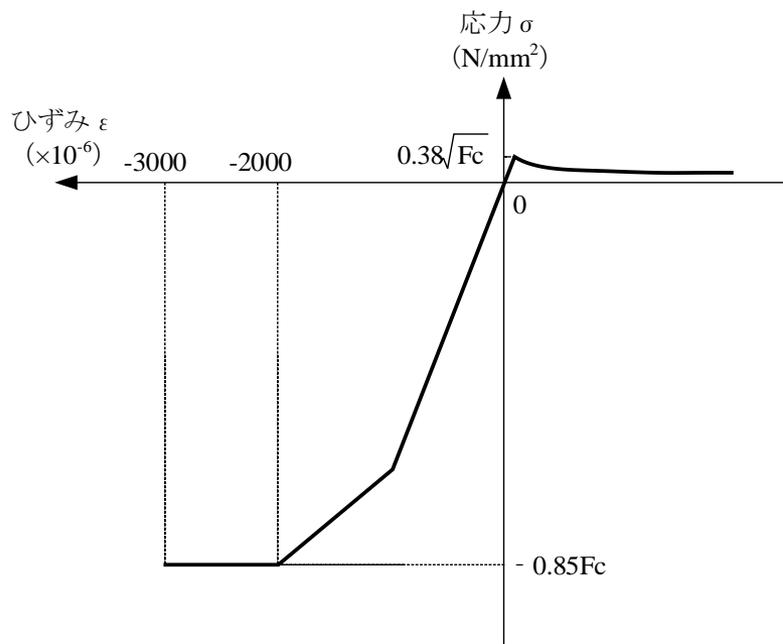
解析モデル及び諸元 (1/2)

- 解析モデルは、RCCVと基礎スラブを一体化したモデルを用いる。
- 解析コードはAbaqusとし、鉄筋層をモデル化した異方性材料による積層シェル要素を採用する。
- 解析モデルは、荷重の種類に応じてモデル化範囲及び境界条件を変更する。応力解析時は、基礎スラブの浮上り非線形性を考慮し、固定荷重及び活荷重、圧力及び配管荷重並びに水力学的動荷重、地震荷重の順で荷重を入力する。

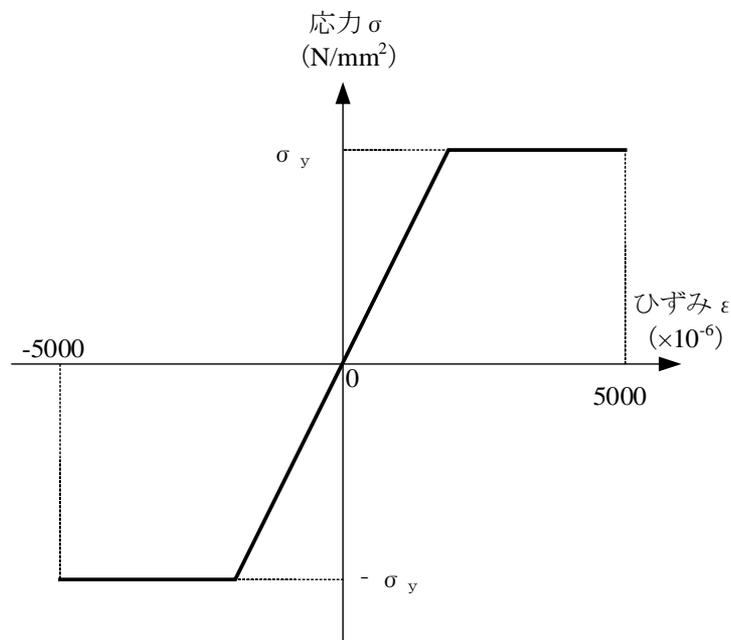
	地震荷重以外の荷重時	地震荷重時
境界・拘束条件	<ul style="list-style-type: none"> RCCVは、周辺床（はり要素、ロッド要素）及び外壁（ロッド要素）の剛性による拘束を考慮する。 基礎スラブは、外壁（多点拘束）及び中間壁（はり要素）の剛性による拘束を考慮する。 	<ul style="list-style-type: none"> RCCVは、周辺床（はり要素、ロッド要素）の剛性による拘束を考慮するが、外壁の拘束は考慮しない。 基礎スラブは、外壁（多点拘束）及び中間壁（はり要素）の剛性による拘束を考慮する。ただし、地震による剛性低下は考慮しない。 原子炉本体基礎及び下部ドライウエルアクセストンネルはモデル化しない。
モデル図	 <p>赤線：はり要素 青線：ロッド要素</p> <p>(北側半分図化)</p>	 <p>赤線：はり要素</p> <p>(北側半分図化)</p>

解析モデル及び諸元 (2/2)

- コンクリートの圧縮側の構成則は、CEB-FIP Model codeに基づき設定する（引用文献①参照）。また、ひび割れ発生後の引張軟化曲線は、出雲ほか（1987）による式とする（引用文献②参照）。
- コンクリートの剛性は実強度に基づくが、強度は設計基準強度 F_c を用いる。
- 鉄筋はバイリニア型とし、規格降伏点強度 σ_y に基づく。
- 軸力及び曲げモーメントに対して、材料の非線形特性を考慮する。面外せん断力に対しては、材料の非線形特性を考慮できない。



コンクリートの応力－ひずみ関係



鉄筋の応力－ひずみ関係

引用文献① : Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE)

引用文献② : 出雲淳一, 島弘, 岡村甫 : 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9, 1987.9

断面の評価方法（適用規格・基準等）

- 断面の評価は、RCCVでは「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格（（社）日本機械学会，2003）」（CCV規格）に、周辺部基礎ではCCV規格又は「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005制定）」（RC-N規準）に基づき行う。
- 弾塑性解析において材料の非線形特性を考慮できない面外せん断力に対しては、必要に応じて部材厚の範囲内における平均応力を用いて断面の評価を実施する。なお、貫通部の面外せん断力に対する断面の評価では、開口の縁から直径の3/4倍の範囲における平均応力を用いる。

断面の評価方法

評価項目	シェル部 局部	トップスラブ部 底部	貫通部	周辺部基礎
軸力*及び 曲げモーメント	CCV規格 CVE-3511.2	CCV規格 CVE-3521.2	CCV規格 CVE-3532	CCV規格 CVE-3521.2
膜力	CCV規格 CVE-3511.3	—	—	—
面内せん断力	CCV規格 CVE-3512.2	—	—	—
面外せん断力	CCV規格 CVE-3513.2	CCV規格 CVE-3522	CCV規格 CVE-3531,3532	RC-N規準 20条

注記*：シェル部、貫通部及び局部では等価膜力を指す。

$$Q_{ave} = \sum(Q_i \times A_i) / \sum A_i$$

Q_{ave} : 平均化後の面外せん断力
 Q_i : 平均化前の各要素の面外せん断力
 A_i : 各要素の面積

面外せん断力の平均応力の計算方法

評価結果 (1/5)

- 各評価項目に対して、検定値（発生値／許容値）が1.0以下であることを確認した。

シェル部の検定値一覧

評価項目		荷重状態Ⅳ		荷重状態Ⅴ	
		地震時 (2)	(異常+地震) 時 (2)	(異常+地震) 時 (3)	(異常+地震) 時 (4)
等価膜力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ	0.228	0.092	0.146	0.255
	鉄筋ひずみ	0.171	0.086	0.216	0.218
膜力	圧縮応力度	0.692	0.301	0.393	0.739
面内せん断力	面内せん断応力度	0.698	0.423	0.429	0.679
面外せん断力	面外せん断応力度	0.500	0.266	0.514	0.485

評価結果 (2/5)

- 各評価項目に対して、検定値（発生値／許容値）が1.0以下であることを確認した。

トップスラブ部及び底部の検定値一覧

部位	評価項目		荷重状態Ⅳ		荷重状態Ⅴ	
			地震時 (2)	(異常+地震)時 (2)	(異常+地震)時 (3)	(異常+地震)時 (4)
トップスラブ部	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ	0.069	0.054	0.105	0.055
		鉄筋ひずみ	0.041	0.039	0.162	0.033
	面外せん断力	面外せん断応力度	0.875	0.742	0.860	0.897
底部	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ	0.153	0.065	0.083	0.160
		鉄筋ひずみ	0.067	0.025	0.062	0.080
	面外せん断力	面外せん断応力度	0.832*	0.502	0.872	0.967

注記* : 応力平均化後の値を示す。

評価結果 (3/5)

- 各評価項目に対して、検定値（発生値／許容値）が1.0以下であることを確認した。

貫通部の検定値一覧

部位	評価項目		荷重状態Ⅳ		荷重状態Ⅴ	
			地震時 (2)	(異常+地震)時 (2)	(異常+地震)時 (3)	(異常+地震)時 (4)
主蒸気配管 及び 給水配管 開口	等価膜力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ	0.122	0.081	0.168	0.133
		鉄筋ひずみ	0.100	0.100	0.230	0.131
	面外せん断力	面外せん断応力度*	0.716	0.535	0.894	0.709
下部ドライ ウェルアク セストンネル 開口	等価膜力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ	0.280	0.161	0.295	0.325
		鉄筋ひずみ	0.284	0.132	0.376	0.324
	面外せん断力	面外せん断応力度*	0.174	0.155	0.329	0.264

注記*：応力平均化後の値を示す。

評価結果 (4/5)

- 各評価項目に対して、検定値（発生値／許容値）が1.0以下であることを確認した。

局部の検定値一覧

評価項目		荷重状態Ⅳ		荷重状態Ⅴ	
		地震時 (2)	(異常+地震)時 (2)	(異常+地震)時 (3)	(異常+地震)時 (4)
等価膜力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ	0.093	0.063	0.158	0.123
	鉄筋ひずみ	0.043	0.047	0.176	0.075
膜力	圧縮応力度	0.250	0.153	0.052	0.220
面内せん断力	面内せん断応力度	0.541	0.348	0.253	0.524
面外せん断力	面外せん断応力度	0.967	0.487	0.677	0.944

評価結果 (5/5)

- 各評価項目に対して、検定値（発生値／許容値）が1.0以下であることを確認した。

周辺部基礎の検定値一覧

評価項目		S s 地震時
軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ	0.088
	鉄筋ひずみ	0.046
面外せん断力	面外せん断応力度	0.785

2. 弾塑性解析及びRCCVの評価についての課題

背景

- 今回工認のRCCV及び原子炉建屋基礎スラブの応力解析においては、基準地震動 S_s の策定による地震荷重の増大、重大事故等対処施設として申請範囲となったことによる圧力の増大に伴い、弾塑性解析を用いている。
- RCCV及び原子炉建屋基礎スラブに弾塑性解析を適用することについては、材料構成則の適用性の検討、既往文献との解析条件の比較により妥当性を確認しているものの、弾塑性解析による応力又はひずみに対する断面の評価については、先行審査実績がない。
- ABWRの新規制基準適合性審査は柏崎刈羽原子力発電所第7号機が初であり、RCCVの評価について先行審査実績がない。

課題の整理 (1/2)

①弾塑性解析についての課題

①－ 1 : 応力平均化

今回工認のRCCV及び原子炉建屋基礎スラブの断面の評価に適用しているCCV規格は、許容値は塑性域のひずみとしており、弾塑性解析を否定していないものの、弾性解析を基本としている。また、今回工認のRCCVの面外せん断力に対する断面の評価では、応力平均化を適用している。

⇒ 弾塑性解析による面外せん断力に対する断面の評価での、応力平均化の適用性が確認されていない。

①－ 2 : 荷重の入力順序

弾塑性解析では、コンクリートや鉄筋が塑性領域に入った場合、荷重を入力する順序が解析結果に影響する可能性がある。

⇒ 弾塑性解析での、荷重の入力順序の妥当性が確認されていない。

課題の整理 (2/2)

②RCCVの評価についての課題

②- 1 : 地震による壁の塑性化

原子炉建屋の基準地震動 S_s に対する地震応答解析では、せん断スケルトン曲線上の最大応答値が第1折点を超え、壁が塑性化する結果となっているが、RCCVの応力解析で境界条件として考慮している壁は弾性部材として設定しており、塑性化を考慮していない。

⇒ 地震による壁の塑性化を考慮することで、応力解析結果に影響を与える可能性がある。

②- 2 : 高温による剛性低下

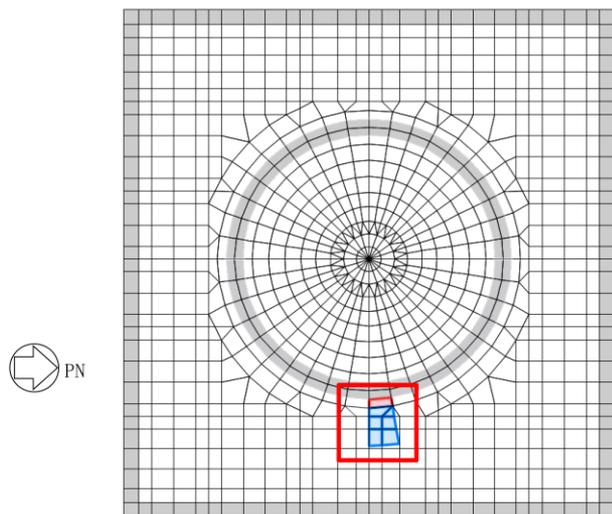
地震荷重と組み合わせる耐震評価では、重大事故等時の高温による剛性低下を考慮していないが、地震荷重と組み合わせない強度計算では、重大事故等時の高温による剛性低下を考慮している。

⇒ 重大事故等時の高温による剛性低下の考え方が整理されていない。

3. 各課題に対する検討

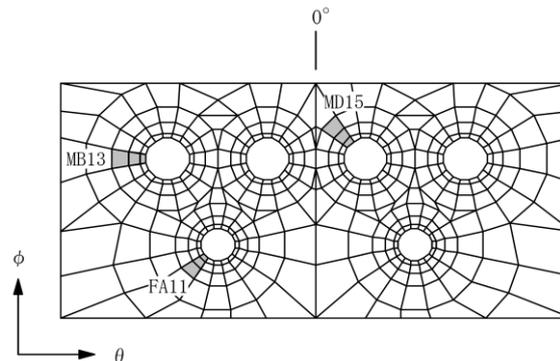
応力平均化の適用箇所 (① - 1 : 応力平均化)

- RCCVの底部では、RC-N規準を参考に、壁面から基礎スラブの部材厚の範囲で、面外せん断力に対して応力平均化を適用している。
- RCCVの貫通部では、CCV規格に基づき、開口の縁から直径の3/4倍の範囲で、面外せん断力に対して応力平均化を適用している。

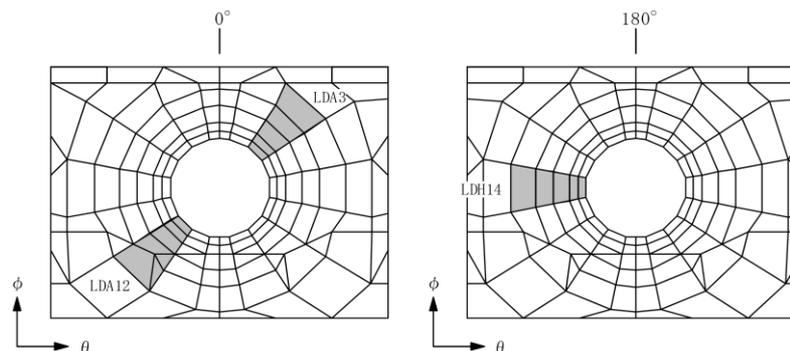


- 応力平均化実施要素
- 平均化実施に用いた周辺要素

底部の応力平均化範囲



貫通部の応力平均化範囲
(主蒸気配管及び給水配管開口)



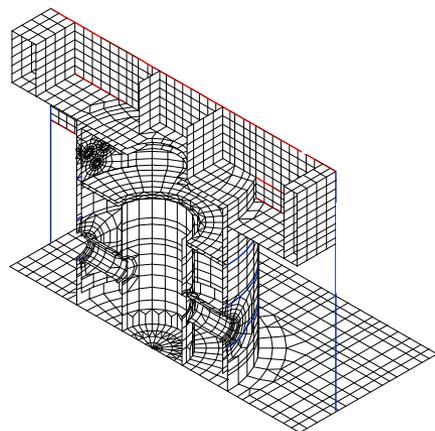
貫通部の応力平均化範囲
(下部ドライウェルアクセストンネル開口)

弾塑性解析における応力平均化の考え方 (① - 1 : 応力平均化)

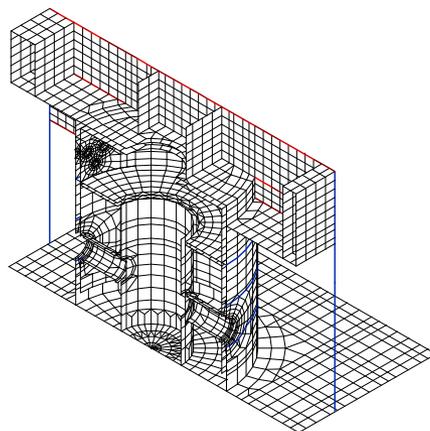
- 先行審査においては、応力解析は弾性解析であるが、応力平均化については、面外せん断力に対する断面の評価だけでなく、面外せん断力以外に対する断面の評価においても適用実績があり、適用性が確認されている。
- 今回のRCCVの応力解析には弾塑性解析を採用し、材料の非線形特性を設定しており、面外せん断力以外に対する断面の評価では、応力平均化を適用していない。
- 一方、面外せん断力に対しては非線形特性を考慮できず、弾性として解析を行っているため、算出された応力に対して平均化を行っている。
- 以上より、弾塑性解析においても、面外せん断力に対する断面の評価に応力平均化を適用することは妥当と考える。

荷重の入力順序の考え方 (① - 2 : 荷重の入力順序)

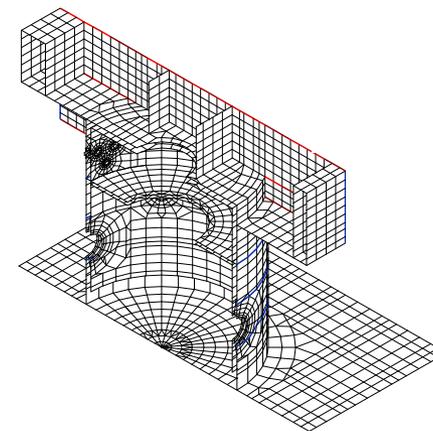
- 今回のRCCVの弾塑性解析では、固定荷重及び活荷重、圧力及び配管荷重並びに水力学的動荷重、地震荷重の順で荷重を入力している。
- この入力順序については、運転時や重大事故等時に、RCCV内に圧力等が発生している状態で、地震が発生するというように、実際に事象の発生する順序を模擬しており、実現象を捉えている。
- 以上より、RCCVの弾塑性解析における荷重の入力順序は妥当と考える。



固定荷重及び活荷重
を入力



圧力及び配管荷重並びに
水力学的動荷重を入力

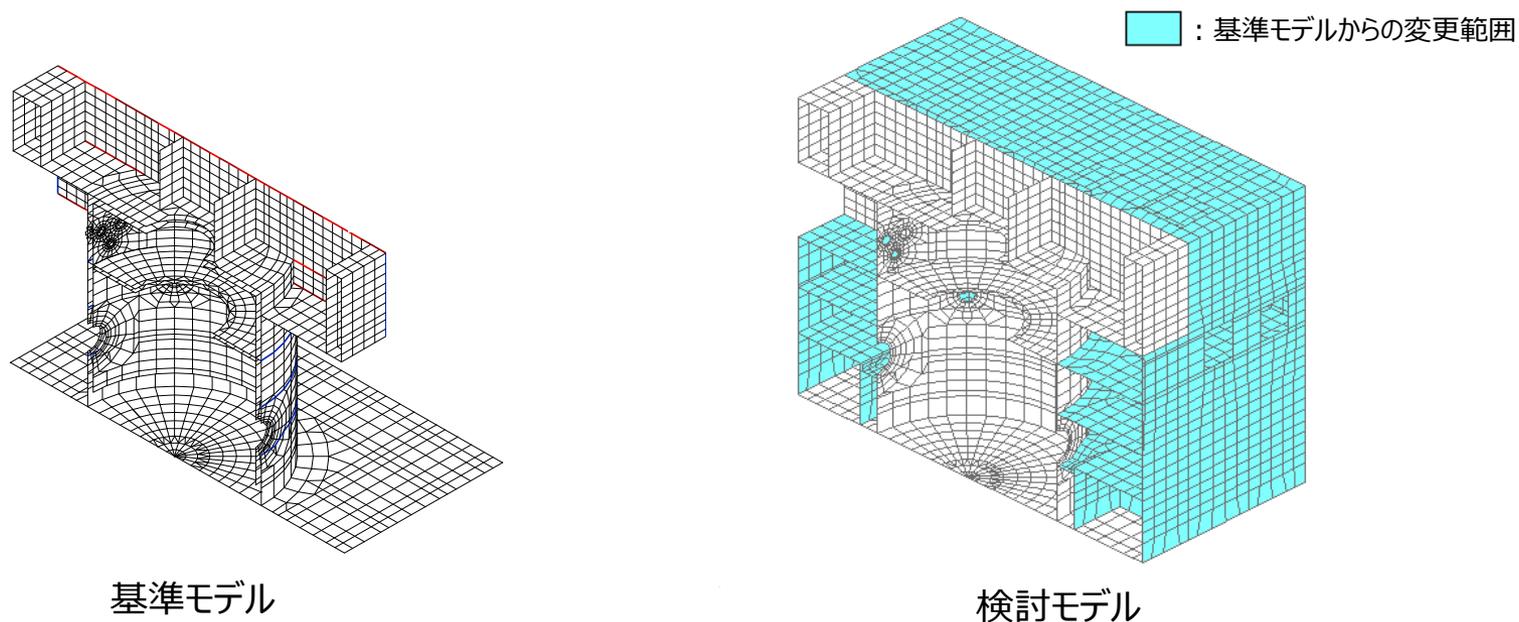


地震荷重を入力

荷重の入力順序

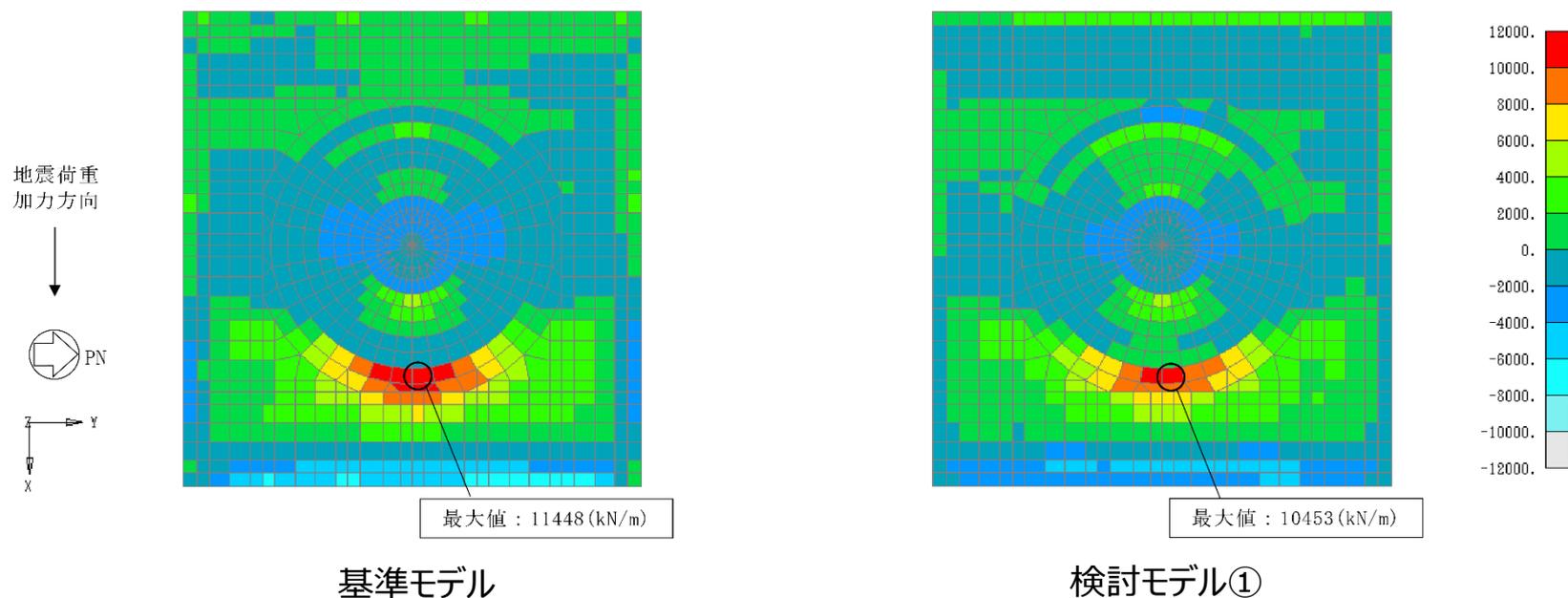
影響検討 (②-1 : 地震による壁の塑性化)

- RCCV底部及び周辺部基礎の応力解析モデル（基準モデル）で境界条件として考慮している壁（中間壁及びボックス壁）について、地震時の塑性化が基礎スラブの応力に及ぼす影響を確認するため、影響検討を実施する。
- 影響検討は、中間壁及びボックス壁を、拘束効果及び塑性化をより忠実に再現できるシェル要素に変更したモデル（検討モデル）を用いて実施する。
- 検討項目は、RCCV底部及び周辺部基礎の断面の評価において検定値が最も大きくなる面外せん断力とする。
- 今回工認における弾塑性解析においても、面外せん断力に対しては非線形特性を考慮できず、弾性として解析を行っているため、本検討は弾性応力解析にて実施する。
- 検討方向は、RCCV底部及び周辺部基礎の評価において検定値が最も大きくなる荷重の組合せケースを参考に、加力方向は水平方向W→E、鉛直方向上向きとする。



検討モデルの妥当性確認 (②-1: 地震による壁の塑性化)

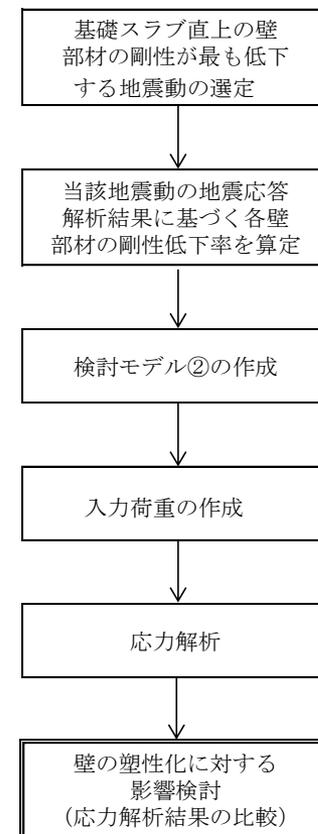
- まず、検討モデルの妥当性を確認するため、塑性化を考慮しない条件の検討モデル(検討モデル①)を用いたSs地震荷重による応力解析を行い、基準モデルの結果との比較を行う。
- 入力荷重は、基礎スラブの浮上り性状を適切に評価するため、固定荷重、水平地震荷重及び鉛直地震荷重とする。
- 基準モデルと検討モデル①の面外せん断力分布は同様の傾向であり、最大面外せん断力もほぼ同じであることから、検討モデルの妥当性を確認した。



面外せん断力分布

影響検討方針 (②-1: 地震による壁の塑性化)

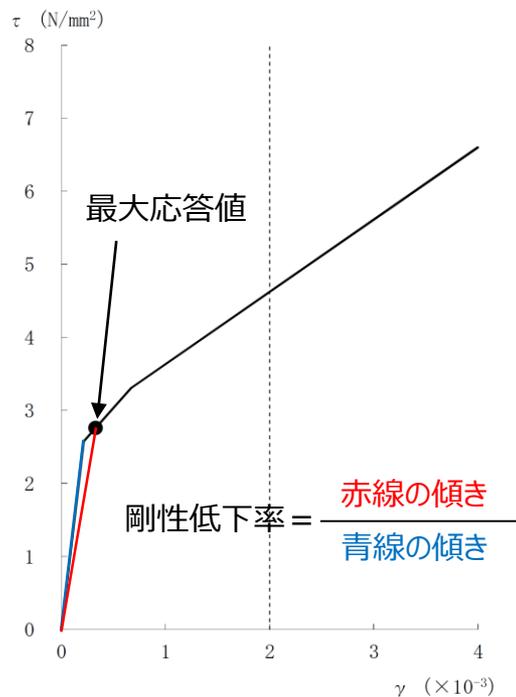
- 検討モデルにおける中間壁及びボックス壁に対して、地震による壁の塑性化を考慮したモデル（検討モデル②）を用いたS s地震荷重による応力解析を行い、基準モデルの結果との比較を行うことで、壁の塑性化に対する影響を検討する。
- まず、基準地震動S sに対する地震応答解析の基本ケース（ケース1）及び材料物性の不確かさを考慮したケース（ケース2～6）における外壁部及びRCCV部の基礎スラブ直上要素の応答値に基づき、基礎スラブ直上の壁部材の剛性が最も低下する地震動を選定する。
- 次に、選定した地震動に対する地震応答解析結果に基づき、各壁部材の剛性低下率を算定する。
- そして、検討モデル①における壁の剛性に対して、各壁部材の剛性低下率を乗じることで、検討モデル②を作成する。
- 入力地震荷重は、選定した地震動に対する地震応答解析の応答値に基づき算定する。
- 最後に、検討モデル②による応力解析を実施し、基準モデル及び検討モデル①の応力解析結果との比較を行い、壁の塑性化に対する影響を検討する。



影響検討フロー

検討用地震動の選定 (②-1: 地震による壁の塑性化)

- 基礎スラブ直上の壁部材の剛性低下率を算定する。
- 剛性低下率は、初期剛性に対するせん断スケルトン曲線の最大応答値と原点を結んだ割線剛性の比として算定する。
- 剛性低下率の最小値は、Ss-2ケース5（建屋剛性 - 2σ）の地震動により生じていることから、当該地震動を検討用地震動とする。
- 応力解析で入力する地震荷重は、Ss-2ケース5の地震動による地震応答解析の応答値に基づき算定する。



剛性低下率の算定方法のイメージ

基礎スラブ直上の壁部材の剛性低下率の算定結果

検討ケース	剛性低下率			
	外壁部		RCCV部	
ケース1	Ss-2	0.71	Ss-2	0.82
ケース2	Ss-2	0.76	Ss-2	0.84
ケース3	Ss-2	0.76	Ss-2	0.80
ケース4	Ss-2	0.90	-	-
ケース5	Ss-2	<u>0.61</u>	Ss-2	0.69
ケース6	Ss-2	0.76	Ss-2	0.84

注1: 「-」は、塑性化していないことを示す。

注2: 下線部は、剛性低下率の最小値を示す。

各壁部材の剛性低下率の算定 (②-1 : 地震による壁の塑性化)

- Ss-2ケース5の地震動による地震応答解析結果に基づき、各壁部材の剛性低下率を算定する。
- 検討モデル②は、検討モデル①における中間壁、ボックス壁及びRCCVシエル部の剛性（ヤング係数）に対して、この剛性低下率を乗じる。

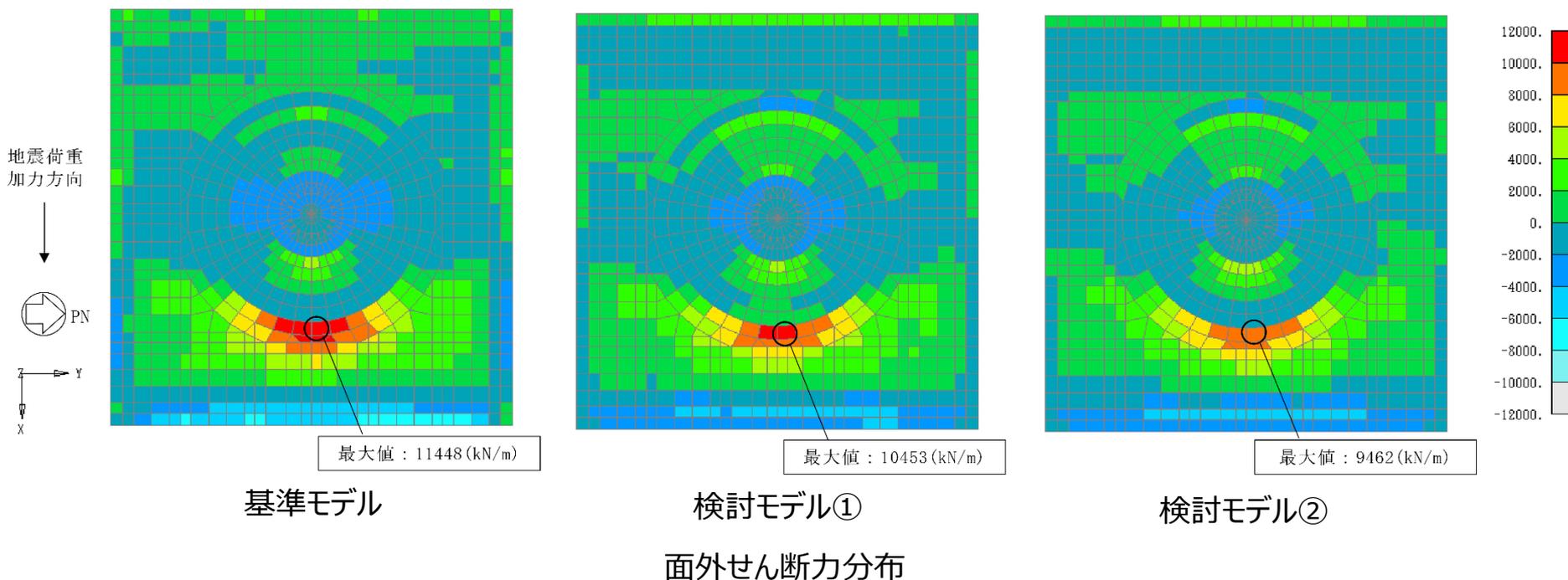
各壁部材の剛性低下率の算定結果

方向	T.M.S.L. (m)	外壁部	RCCV部
NS	23.5~31.7	-	-
	18.1~23.5	-	-
	12.3~18.1	-	-
	4.8~12.3	0.99	-
	-1.7~4.8	0.91	-
	-8.2~-1.7	-	-
EW	23.5~31.7	-	-
	18.1~23.5	0.85	-
	12.3~18.1	0.72	-
	4.8~12.3	0.48	0.58
	-1.7~4.8	0.49	0.56
	-8.2~-1.7	0.61	0.69

注：「-」は、塑性化していないことを示す。

影響検討結果 (②-1: 地震による壁の塑性化)

- 検討モデル②による応力解析を実施し、基準モデル及び検討モデル①の応力解析結果との比較を行い、壁の塑性化に対する影響を検討する。
- 検討モデル①と検討モデル②の面外せん断力分布は同様の傾向であり、壁の塑性化に対する影響は小さい。
- 基礎スラブの最大面外せん断力は、基準モデルよりも検討モデル②の方が小さくなる。
- 以上より、今回工認における基礎スラブの応力は、最も壁が塑性化した状態での応力に対して、保守的に評価していることを確認した。



重大事故等時の高温状態に対する強度及び剛性への影響 (②-2: 高温による剛性低下)

- 以下の既往の文献・規格等により、重大事故等時の高温状態に対して鉄筋コンクリート構造物の強度及び剛性への影響が小さいことから、鉄筋コンクリート構造物においては剛性低下を考慮しないことを基本としている。
 - 「構造材料の耐火性ガイドブック ((社) 日本建築学会, 2009) 」
 - コンクリートについては、温度が190℃付近では結晶水が解放され始め、更に高温になると脱水現象が著しくなるため、コンクリートの特性に影響が出始めるとされる。
 - 鉄筋については、強度及び剛性は、概ね200℃から300℃までは常温時の特性を保持するとされている。
 - RCCVの状態
 - RCCVシェル部及びトップスラブ部は、高温となる内表面が鋼製ライナで覆われていることから、高温によるコンクリートからの水分逸散のないシール状態にある。
 - RCCV底部は、鋼製ライナとコンクリートが一体となっていること、重大事故等時に下部ドライウェル及びサプレッションプールが水で満たされていることから、高温によるコンクリートからの水分逸散のないシール状態にある。
 - 既往の文献 (引用文献③～⑨参照)
 - コンクリート強度については、加熱温度175℃では、シール状態において強度は熱水反応により一様な変化は示さないとされており、加熱期間91日までは、概ね加熱前と強度は同等と考えられる。また、加熱温度110℃では、加熱期間3.5年間について、強度の低下傾向は認められないとされている。
 - コンクリートの剛性については、加熱温度175℃において、シール状態では大きな低下はなく、加熱温度110℃では加熱後ごく初期に剛性の変化は収束するとされている。

引用文献③: 川口 徹, 高橋久雄: 高温 (175℃) を受けたコンクリートの強度性状, セメント・コンクリートNo.449, July 1984

引用文献④: 長尾覚博, 中根 淳: 高温履歴を受けるコンクリートの物性に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集 第457号, 1994年3月

引用文献⑤: 長尾覚博ほか: 熱影響場におけるコンクリートの劣化に関する研究, 第48回セメント技術大会講演集, 1994

引用文献⑥: 木場将雄ほか: 長期高温加熱がコンクリートの力学特性に及ぼす影響の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北陸), 2010年9月

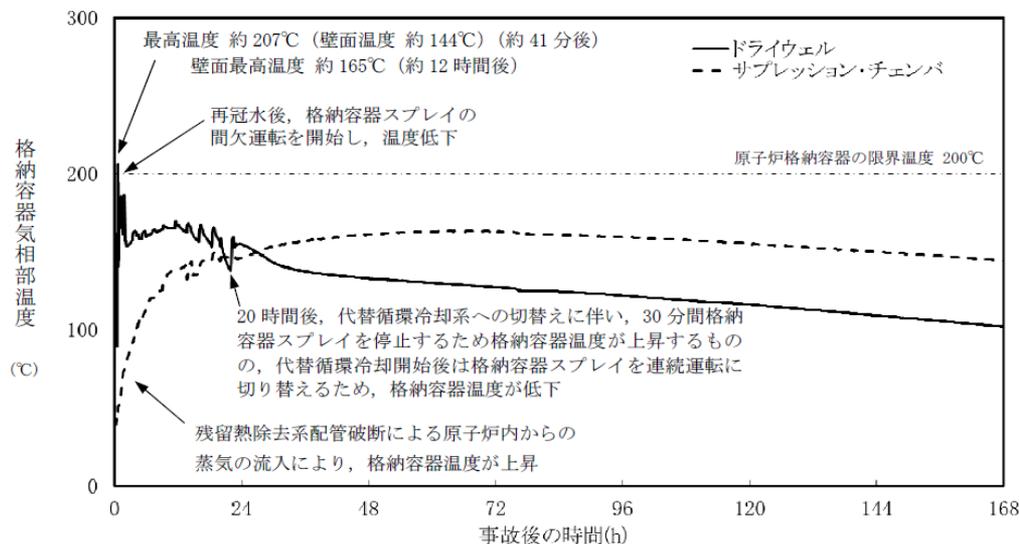
引用文献⑦: 園田 敏ほか: 長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験的研究 (その1 実験計画と結果概要), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999年9月

引用文献⑧: 池内俊之ほか: 長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験的研究 (その2 普通コンクリートの力学特性試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999年9月

引用文献⑨: 大池 武ほか: 長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験的研究 (その3 耐熱コンクリートの力学特性試験結果), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (中国), 1999年9月

重大事故等時の高温による剛性低下の考え方 (②-2: 高温による剛性低下)

- 重大事故等時において、格納容器気相部温度は一時的に200℃を超えるが、構造健全性評価上考慮すべき壁面の温度は最高で約165℃である
- 地震荷重と組み合わせる耐震評価では、事象発生後以降の最高となる壁面温度である約165℃を包絡する値として、限界圧力(0.62MPa)における飽和温度(約168℃)を考慮することとしている。
- 地震荷重と組み合わせない強度計算では、重大事故等時の原子炉格納容器の放射性物質閉じ込め機能の確認を行うために、評価温度として設定しており、その温度は、産業界でシビアアクシデント時の原子炉格納容器の耐性の指標として用いられている200℃としている。この温度は、耐震評価における温度の考え方を踏まえると、実現象を超えた保守的な設定値となっていると言える。
- 以上より、鉄筋コンクリート構造物においては剛性低下を考慮しないことが基本であるが、強度計算においては、実現象を超えた評価温度として高い値を設定していることから、重大事故等時の温度影響を確認する観点から剛性低下を考慮することとしている。



重大事故等時の原子炉格納容器温度の変化

まとめ

1. 原子炉格納容器コンクリート部及び原子炉建屋基礎スラブの弾塑性解析の概要

- RCCV及び原子炉建屋基礎スラブの弾塑性解析による評価の概要を示した。

2. 弾塑性解析及びRCCVの評価についての課題

- 背景及び課題を整理し，4つの課題を抽出した。

3. 各課題に対する検討

①－1：応力平均化

- 弾塑性解析における応力平均化の考え方を整理し，面外せん断力に対する断面の評価に応力平均化を適用することの妥当性を確認した。

①－2：荷重の入力順序

- RCCVの弾塑性解析における荷重の入力順序について，実現象と比較し，妥当性を確認した。

②－1：地震による壁の塑性化

- 地震応答解析に基づく壁の塑性化を考慮したモデルで影響検討を実施し，今回工認における基礎スラブの応力が，最も壁が塑性化した状態での応力に対して，保守的に評価していることを確認した。

②－2：高温による剛性低下

- 重大事故等時の温度と評価上の温度の設定の確認により，剛性低下の考え方を整理した。

【参考】

主な説明事項		
[1] 詳細設計段階における設置変更 許可審査時からの設計変更	1	中央制御室待避室の遮蔽設計の見直し
	2	5号機原子炉建屋内緊急時対策所の遮蔽設計の見直し
	3	5号機原子炉建屋内緊急時対策所可搬型電源設備の保管方法の変更
	4	復水移送ポンプ周りの手動弁の電動弁化及び屋内アクセスルートの見直し
[2] 設計方針に関する説明事項	1	使用済燃料貯蔵プール水位の監視
	2	重大事故等時の格納容器評価における評価条件
	3	火災感知器の配置
	4	地下水に対する浸水防護対策
	5	竜巻設計飛来物の感度解析
	6	ブローアウトパネル及びブローアウトパネル閉止装置
[3] 耐震・強度評価に関する説明事項	1	津波漂流物の衝撃荷重（海水貯留堰）
	2	地盤物性の設定
	3	基礎地盤傾斜による建物・構築物及び機器の耐震性への影響
	4	建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点
	5	原子炉本体基礎の復元力特性
	6	建物・構築物の応力解析における弾塑性解析の採用
	7	格納容器圧力逃がし装置基礎の地震応答解析モデルのモデル化方針
	8	屋外重要土木建造物のモデル化方針
	9	耐震評価における等価繰返し回数
	10	加振試験に基づく使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数の設定
	11	弁の動的機能維持評価（一定の余裕の確保）
	12	燃料集合体の耐震性
	13	制御棒・破損燃料貯蔵ラックにおける排除水体積質量減算の適用
	14	ECCSストレナの耐震・強度評価への流動解析の適用