

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7補足-026-11 改7
提出年月日	2020年7月15日

原子炉格納容器コンクリート部の耐震性についての
計算書に関する補足説明資料

2020年7月

東京電力ホールディングス株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

V-2-9-2-1「原子炉格納容器コンクリート部の耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 1 応力解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 2 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方

別紙 3 地震荷重の入力方法

別紙 4 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙 5 応力解析における応力平均化の考え方

別紙 6 地震荷重の算定方法

別紙 7 貫通部における平均応力の考え方

別紙 8 重大事故等時の高温による剛性低下の考え方

下線：今回ご提示資料

別紙2 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件の考え方

目 次

1. 概要 別紙 2-1
2. 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件 別紙 2-2

1. 概要

本資料は、原子炉格納容器コンクリート部（以下「RCCV」という。）の応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件についての概要を示すものである。

2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

RCCV の応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件を表 2-1 に示す。

直接基礎の底面及び側面の地盤ばねの設定における基本的な考え方は，以下のとおり。

(1) 底面地盤ばね

- ・ 水平ばね

振動アドミタンス理論に基づく水平ばねより算出する。

- ・ 鉛直ばね

基礎浮上りを考慮し，回転ばね反力として生じる転倒モーメントを適切に評価するため，振動アドミタンス理論に基づく回転ばねより算出する。

(2) 側面地盤ばね

- ・ 水平ばね

Novak の手法に基づく水平ばねにより算出する。

- ・ 鉛直ばね

Novak の手法に基づく回転ばねにより算出する。

有限要素法を用いた解析モデルにおける要素分割の考え方*については，以下のとおり。

- ・ はり要素

はり要素の場合は，曲げの変位関数が 3 次で精度が高いため，基本的に要素分割の細分化は不要であるが，部材の接合点間で変位情報出力や荷重入力がある場合には複数要素に細分し，曲線部材がある場合は，その曲線が直線近似できる程度の分割にすることが一般的である。また，分布荷重がある場合や分布質量が関係する自重荷重などの計算では，要素分割することにより質量分布がより正確になり，解析結果の精度が向上する。更に，要素分割の細分化により，変形図やモード図で構造物の変形状態を容易に把握することが可能となる。

- ・ シェル要素

要素分割は，基本的には発生する応力状態によって決まり，構造形状と荷重条件より要素分割数を考慮する。要素形状の縦横比（アスペクト比）は，重要部分で 1:2 以下，その他の領域や応力変化が少ない領域では，1:3 程度までで，分割に際しては 4 角形要素を利用して格子状とするのが一般的である。曲面板構造の場合は，平板要素や軸対称シェル要素の大きさは，集中荷重や不連続部を含む曲面部近傍では $2.5\sqrt{R/t}$ を 10~20 分割すると適切な応力分布が求められ，構造物の半径 (R) と板厚 (t) が考慮されている。また，面内曲げ・軸力及び面外のせん断や曲げを受ける部材のシェル要素の辺の長さは，シェルの広がり方向の応力分布の状態から決まり，応力変化が大きい領域は要素を小さくする必要がある。

注記*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2008 年）

表 2-1 モデル化, 境界条件及び拘束条件 (1/6)

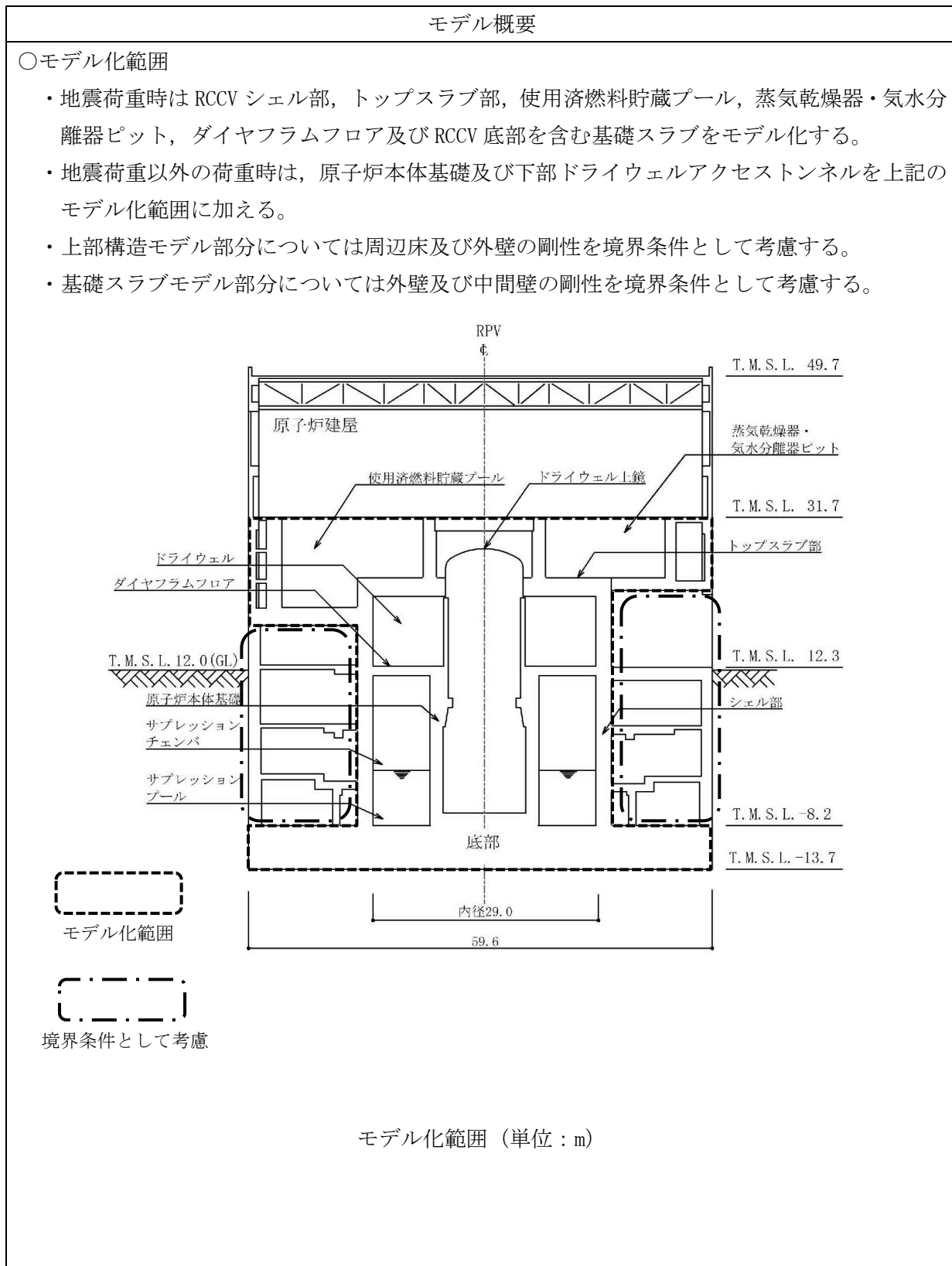


表 2-1 モデル化、境界条件及び拘束条件 (2/6)

モデル概要

○使用要素

【荷重状態Ⅲ】

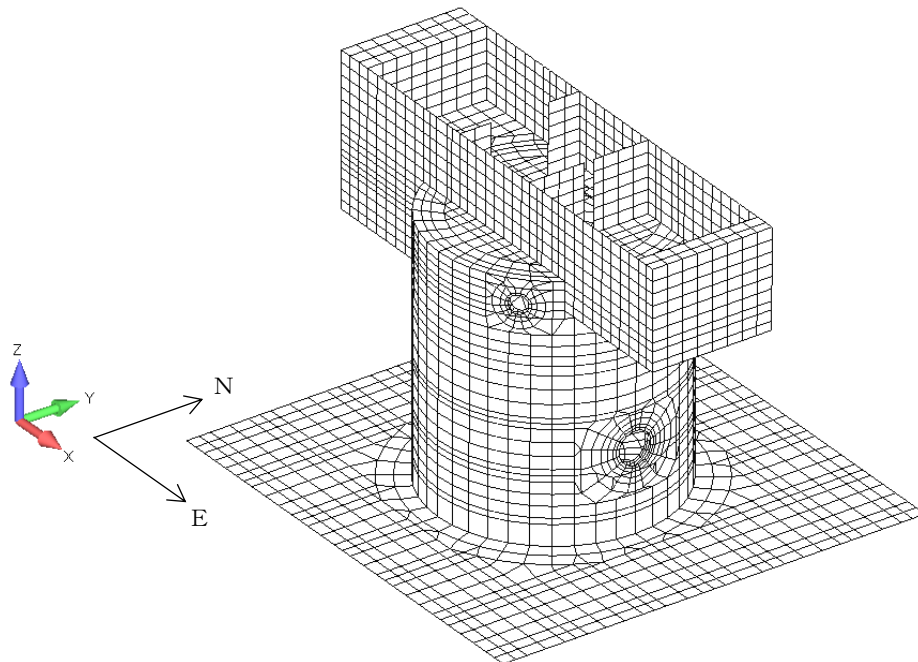
- ・シェル要素

【荷重状態Ⅳ, Ⅴ】

- ・積層シェル要素

○要素分割

- ・要素の一边の長さを 2.0m 程度とし、壁、スラブ及び開口の配置を考慮して分割する。



モデル概要

表 2-1 モデル化, 境界条件及び拘束条件 (3/6)

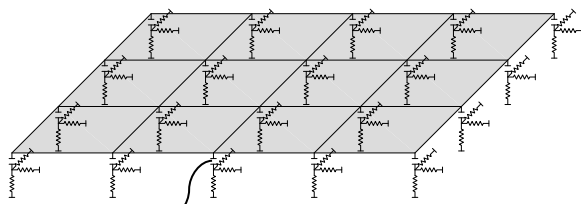
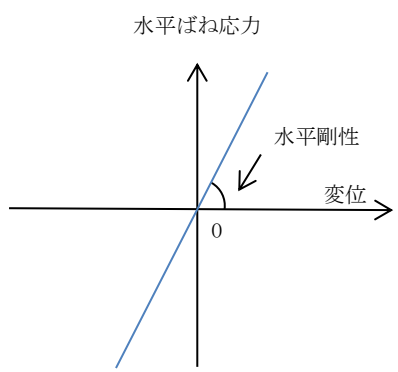
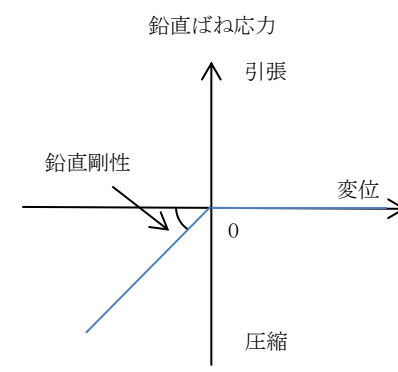
境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎スラブの境界	
<ul style="list-style-type: none"> 基礎スラブと上部構造物の境界部においては, 上部構造物の剛性を考慮することで, 基礎スラブの応力・変形状態を評価する。 外壁の脚部については, 多点拘束を設ける。(外壁の脚部の節点の鉛直方向が平面保持するように変形を拘束する。) 中間壁の脚部については, はり要素を設ける。 開口部については, はり要素の剛性を低減することで考慮する。 基礎スラブから立ち上がる独立柱については, その剛性を考慮しない。 	
はり要素の剛性 (断面性能)	
<ul style="list-style-type: none"> 曲げ剛性 (断面二次モーメント) : $I = t \times h^3 / 12$ せん断剛性 (せん断断面積) : $A_s = t \times h$ 	<ul style="list-style-type: none"> t : 壁の厚さ h : モデル化する壁の高さ
基礎スラブと地盤の境界	
<ul style="list-style-type: none"> 地震時の評価については, 基礎スラブと底面地盤との間に底面地盤を表現するギャップ要素を設け, 基礎スラブと底面地盤との間の剝離 (基礎スラブの浮上り) を考慮している。 地震時以外の評価については, 基礎スラブの浮上りは考慮せず, 静的地盤定数から算定される地盤ばねを設ける。なお, 静的地盤ばね定数は既工認と同じ値とする。 	
 <p>ギャップ要素</p>	
モデル概要	
○ギャップ要素	
鉛直ばねに引張力が発生した際に, 水平剛性及び鉛直剛性をゼロとし, 浮上りを考慮する。	
	
注: 鉛直ばねに引張力が発生した場合には, 水平剛性もゼロとする。	
(a) 水平剛性	(b) 鉛直剛性
ギャップ要素の概念図	

表 2-1 モデル化, 境界条件及び拘束条件 (4/6)

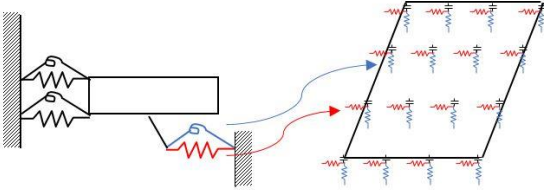
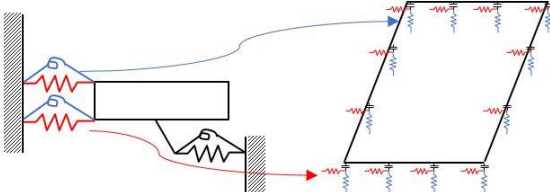
境界条件, 拘束条件
<p>基礎スラブと地盤の境界</p> <p>○底面地盤ばね</p> <p>水平剛性及び鉛直剛性は以下のとおり設定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 水平剛性：振動アドミタンス理論による水平ばね K_H を節点支配面積 A_i で離散化。 $K_{Hi} = (K_{HNS}/A + K_{HEW}/A) / 2 \times A_i$ A : 基礎スラブの底面積 鉛直剛性：地震時は, 転倒モーメントが支配的となるため振動アドミタンス理論による回転ばね K_R を節点支配面積 A_i で離散化。地震時以外は, 静的地盤ばね定数 K_V を節点支配面積 A_i で離散化。 地震時 : $K_{Vi} = (K_{RNS}/I_{NS} + K_{REW}/I_{EW}) / 2 \times A_i$ I : 基礎スラブの断面二次モーメント 地震時以外 : $K_{Vi} = (K_V/A) \times A_i$ A : 基礎スラブの底面積 <div style="text-align: center;">  <p>基礎スラブ底面全体で 離散化</p> <p>底面地盤ばね</p> </div> <p>○側面地盤ばね</p> <p>水平剛性及び鉛直剛性は以下のとおり設定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> 水平剛性：Novak の手法に基づく側面水平地盤ばね定数 ${}_sK_s$ を節点支配長さ L_i で離散化。 ${}_s k_{si} = ({}_s K_s / (2 \times L_{NS} + 2 \times L_{EW})) \times L_i$ L_{NS} : 基礎スラブ辺長 (NS 方向) L_{EW} : 基礎スラブ辺長 (EW 方向) 鉛直剛性：Novak の手法に基づく側面回転地盤ばね定数 ${}_sK_r$ を節点支配長さ L_i で離散化。 ${}_s k_{vi} = ({}_s K_r / I'_{NS} + {}_s K_r / I'_{EW}) / 2 \times L_i$ $I'_{NS(EW)} = L_{EW(NS)} \times L_{NS(EW)}^2 / 2 + L_{NS(EW)}^3 / 6$ <div style="text-align: center;">  <p>基礎スラブ外周で 離散化</p> <p>側面地盤ばね</p> </div>

表 2-1 モデル化, 境界条件及び拘束条件 (5/6)

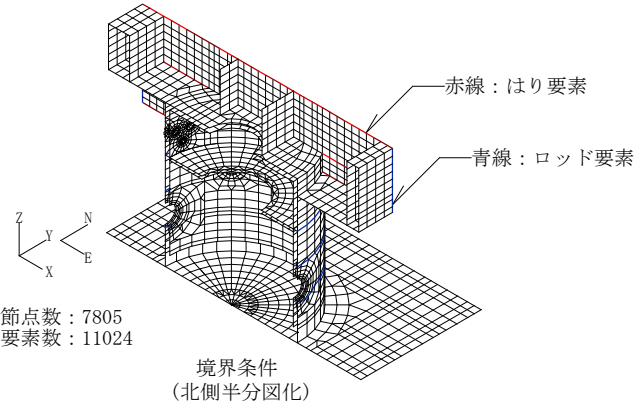
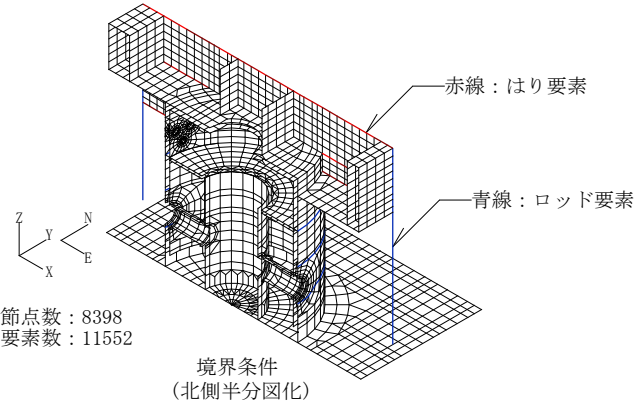
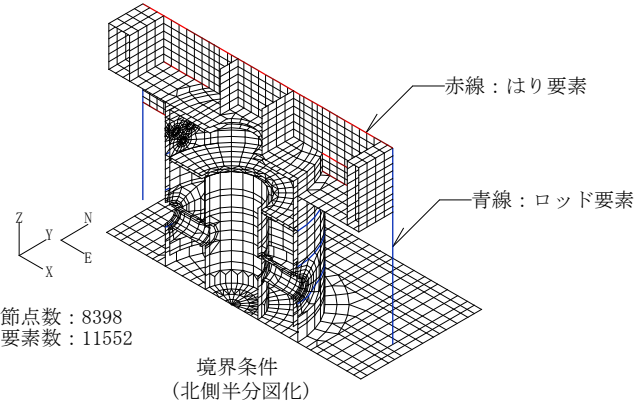
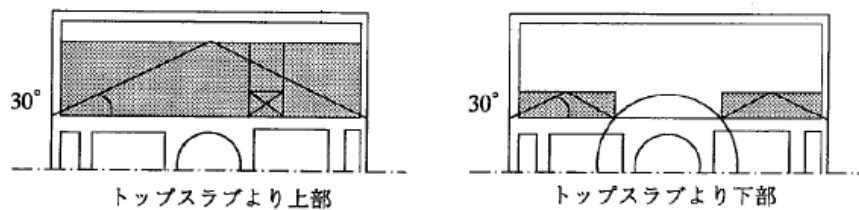
境界条件, 拘束条件	
上部構造物と周辺構造物との境界	
地震荷重時	
 <p>赤線：はり要素 青線：ロッド要素</p> <p>節点数：7805 要素数：11024</p> <p>境界条件 (北側半分図化)</p>	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉本体基礎及び下部ドライウエルアクセストンネルはモデル化しない。 RCCV シェル部, トップスラブ部, 使用済燃料貯蔵プール及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットは, 周辺床 (はり要素, ロッド要素) の剛性による拘束を考慮するが, 外壁の剛性を考慮したロッド要素は基礎スラブに接続しない。 ライナの剛性は考慮しない。
地震荷重及び温度荷重以外の荷重時	
 <p>赤線：はり要素 青線：ロッド要素</p> <p>節点数：8398 要素数：11552</p> <p>境界条件 (北側半分図化)</p>	<ul style="list-style-type: none"> RCCV シェル部, トップスラブ部, 使用済燃料貯蔵プール及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットは, 周辺床 (はり要素, ロッド要素) の剛性による拘束を考慮し, 外壁の剛性を考慮したロッド要素は基礎スラブに接続する。 ライナの剛性は考慮しない。
温度荷重時	
 <p>赤線：はり要素 青線：ロッド要素</p> <p>節点数：8398 要素数：11552</p> <p>境界条件 (北側半分図化)</p>	<ul style="list-style-type: none"> RCCV シェル部, トップスラブ部, 使用済燃料貯蔵プール及び蒸気乾燥器・気水分離器ピットは, 周辺床 (はり要素, ロッド要素) の剛性による拘束を考慮し, 外壁の剛性を考慮したロッド要素は基礎スラブに接続する。 ライナの剛性を考慮する。

表 2-1 モデル化, 境界条件及び拘束条件 (6/6)

境界条件, 拘束条件		
上部構造物と周辺構造物との境界		
はり要素の剛性 (断面性能)		
<ul style="list-style-type: none"> ・ 軸剛性 (軸断面積) : $A = t \times h$ ・ 曲げ剛性 (断面二次モーメント) : $I = t \times h^3 / 12 + A \times (h/2 + D/2)^2$ ・ せん断剛性 (せん断断面積) : $A_s = t \times h$ 		<ul style="list-style-type: none"> t : 床の厚さ h : モデル化する床の幅^{*1} D : 壁の厚さ
ロッド要素の剛性 (断面性能)		
<ul style="list-style-type: none"> ・ 軸剛性 (軸断面積^{*2}) : $A = t \times h$ 		<ul style="list-style-type: none"> t : 壁の厚さ h : モデル化する壁の幅^{*3}

注記*1: プールガーダに取り付く床の幅については, 既工認と同様に, 下図のとおりプールの最外端からプールガーダに対して 30° の角度の範囲として設定する。



*2: RCCV 周辺床の軸断面積については, 既工認と同様に, 各階の床スラブと等価な面積となる穴あき円盤の半径方向軸剛性をもとに設定する。

*3: プールガーダに取り付く外壁の幅については, 既工認と同様に, 東側及び西側の外壁長さの 1/2 として設定する。

別紙 6 地震荷重の算定方法

目 次

1. 概要	別紙 6-1
2. 動的地震力の算定	別紙 6-2
2.1 上部構造物	別紙 6-6
2.1.1 動的水平地震力	別紙 6-6
2.1.2 動的鉛直地震力	別紙 6-13
2.2 基礎スラブ	別紙 6-14
2.2.1 動的水平地震力	別紙 6-14
2.2.2 動的鉛直地震力	別紙 6-20
3. 静的地震力の算定	別紙 6-22
4. 地震時土圧荷重の算定	別紙 6-23
4.1 算定方法	別紙 6-23
4.2 算定結果	別紙 6-25
5. 地震時配管荷重の算定	別紙 6-26

別紙 6-1 原子炉建屋の 3 次元 FEM モデルを用いたせん断力負担割合の検討

下線：今回ご提示資料

別紙 6-1 原子炉建屋の 3 次元 FEM モデルを用いた
せん断力負担割合の検討

目 次

1. 概要	別紙 6-1-1
2. 検討方針	別紙 6-1-2
3. 検討条件	別紙 6-1-3
3.1 モデル化の基本方針	別紙 6-1-3
3.2 せん断力負担割合の算出方針	別紙 6-1-6
4. 検討結果	別紙 6-1-8
5. まとめ	別紙 6-1-9

1. 概要

本資料は、原子炉建屋の外壁（以下「ボックス壁」という。）、鉄筋コンクリート製原子炉格納容器（以下「RCCV」という。）、RCCV とボックス壁の間の耐震壁（以下「中間壁」という。）及び補助壁が負担するせん断力の割合を、3次元 FEM を用いて確認した結果を示すものである。

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。

2. 検討方針

原子炉建屋の一層分を取り出した 3 次元 FEM モデルを用いて、上階の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、応力解析に用いているせん断力負担割合が妥当であることを確認する。

本検討においては、以下の理由により B3F を代表して検討を行う。

- ・地震応答解析で発生する層せん断力が最も大きく、RCCV 部のせん断力が最も大きくなる層である。
- ・中間壁は B3F の NS 方向及び EW 方向と B2F の NS 方向の一部のみに存在しており、ボックス壁，RCCV，中間壁及び補助壁へのせん断力の分配が網羅的に確認できる層である。
- ・一層分を取り出し、地震応答解析モデルと同様の床剛の仮定に基づき一様の強制変位を入力し各壁のせん断力負担割合を算定した場合、他の階でも同様の結果となることが予想される。
- ・建屋上層まで 3 次元 FEM でモデル化し、上部に強制変形を加え最下層で評価する検討方法も考えられるが、原子炉建屋の耐震壁の変形はせん断変形の割合が大きく、最下層のみをモデル化し強制変形を与えた場合と同等の結果になると予想される。

3. 検討条件

3.1 モデル化の基本方針

本検討では、3次元 FEM モデルを用いた弾性応力解析を実施する。

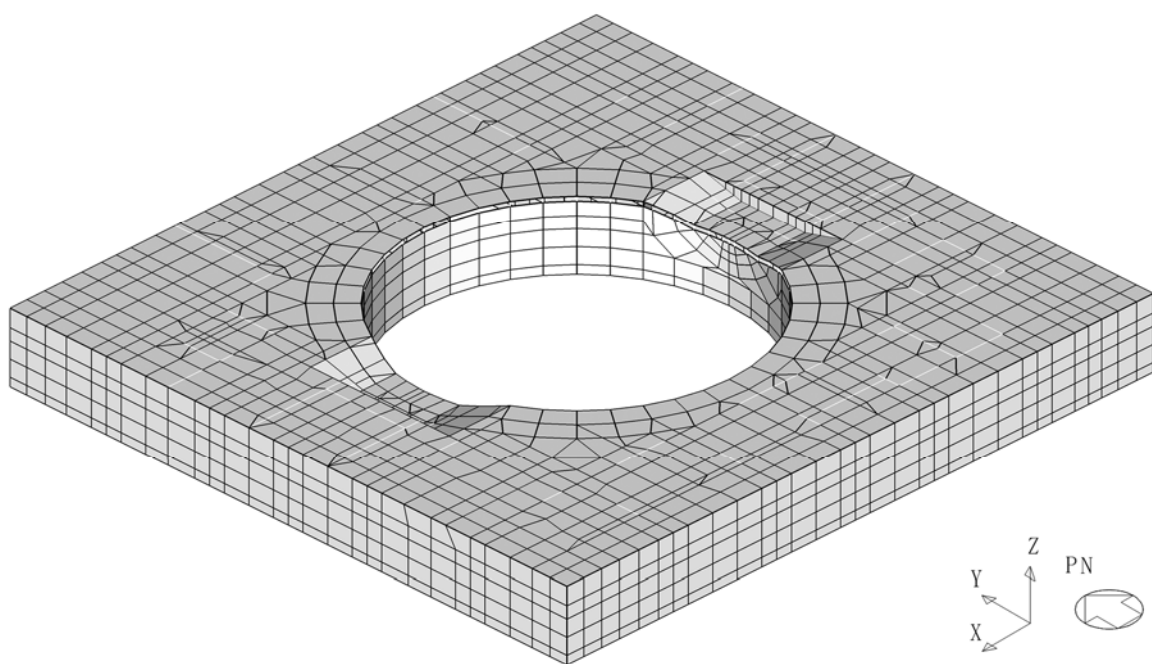
応力解析モデルは、原子炉建屋の B3F のボックス壁、RCCV、中間壁、補助壁及び B2F の床スラブを取り出したモデルである。

解析モデルに使用する FEM 要素は、シェル要素とする。使用する要素は四辺形及び三角形で、この要素は均質等方性材料によるシェル要素である。

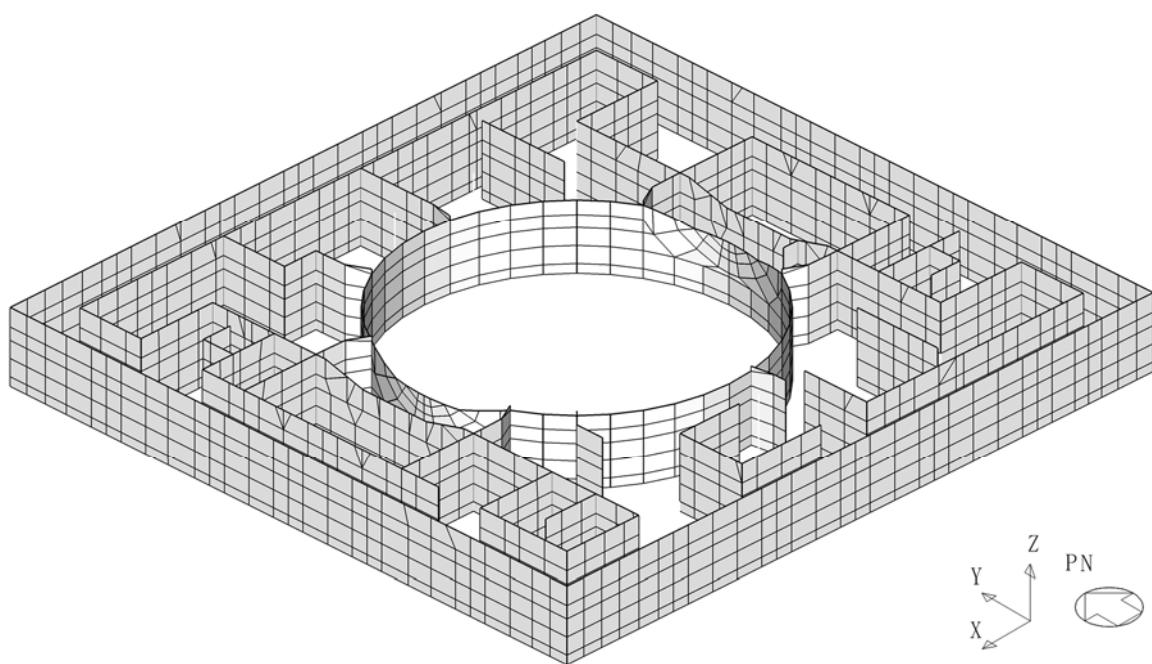
境界条件は、B3F の各壁脚部を固定条件とし、B2F の床スラブ全節点に NS 方向と EW 方向のそれぞれに単位長さの強制変位を与える。B2F の床スラブ全節点は、NS 方向と EW 方向の水平方向の強制変位以外の拘束は考慮せず、B2F 床スラブの面外剛性のみが壁部材の鉛直方向の変形を拘束する条件としている。

なお、基準地震動 S_s により各壁部材の剛性が低下することが考えられるが、外壁部及び RCCV 部が同様に剛性低下した場合、強制変位を与えた際の各壁のせん断力負担割合は剛性低下を考慮しない場合と変わらないことから、弾性応力解析を用いる。

3次元 FEM モデルを図 3-1 に、使用材料の物性値を表 3-1 に示す。



(a) モデル全体図 (南西面)



(b) モデル壁図 (南西面)

図 3-1 3次元 FEM モデル図

表 3-1 使用材料（コンクリート）の物性値

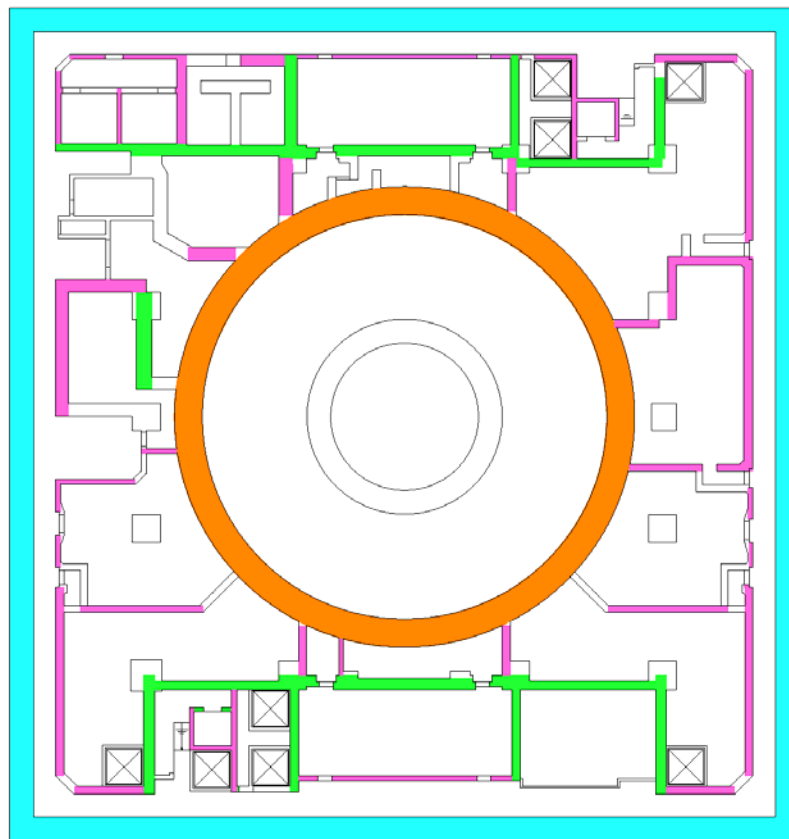
諸元	物性値
ヤング係数 (N/mm ²)	2.88×10 ⁴ *
ポアソン比	0.2

注記*：剛性はコンクリートの実強度（43.1N/mm²）に基づく。

3.2 せん断力負担割合の算出方針

3次元 FEM モデルの各壁脚部に生じる加力方向と同方向の水平反力値を，ボックス壁，RCCV，中間壁及び補助壁ごとに集計し，各壁の水平反力値の合計値に対する各壁の水平反力値の比率をせん断力の負担割合として算出する。その際，集計する各壁は，地震応答解析モデルで考慮している壁と同様とするが，地震応答解析モデルで考慮している壁に，直交して取り付く壁に発生する水平反力値についても，取り付いている壁の水平反力値として集計する。

6号機原子炉建屋のB3Fの各壁分類を図3-2に示す。



凡 例

-  ボックス壁
-  RCCV
-  中間壁
-  補助壁

図 3-2 B3F の各壁の分類 (6号機原子炉建屋)

4. 検討結果

本検討によるせん断力負担割合（以下「3次元FEMせん断力負担割合」という。）を、別紙6「地震荷重の算定方法」の「2.1.1(1) 入力せん断力」の方法で算定したせん断力に基づくせん断力負担割合（以下「応力解析せん断力負担割合」という。）と比較して表4-1に示す。

3次元FEMせん断力負担割合は、応力解析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。

なお、直交して取り付く壁のせん断力負担割合に対する影響は小さい。また、表4-1に示す応力解析せん断力負担割合のうち、補助壁の負担割合は、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、小さい方のせん断力による負担割合を示している。

表4-1(a) 各壁せん断力負担割合 NS方向

	3次元FEM せん断力負担割合	応力解析 せん断力負担割合
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

表4-1(b) 各壁せん断力負担割合 EW方向

	3次元FEM せん断力負担割合	応力解析 せん断力負担割合
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

5. まとめ

3次元 FEM モデルを用いて算出したせん断力負担割合を，応力解析で用いているせん断力負担割合と比較し，応力解析に用いているせん断力負担割合が妥当であることを確認した。

別紙 7 貫通部における平均応力の考え方

目 次

1. 概要	別紙 7-1
2. 貫通部における平均応力	別紙 7-2
3. まとめ	別紙 7-4

1. 概要

原子炉格納容器コンクリート部（以下「RCCV」という。）の応力解析においては、弾塑性解析を採用している。一方、貫通部の断面の評価においては、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）（以下「CCV 規格」という。）の CVE-3531 に基づく平均応力を用いている。本資料は，その妥当性について説明するものである。

2. 貫通部における平均応力

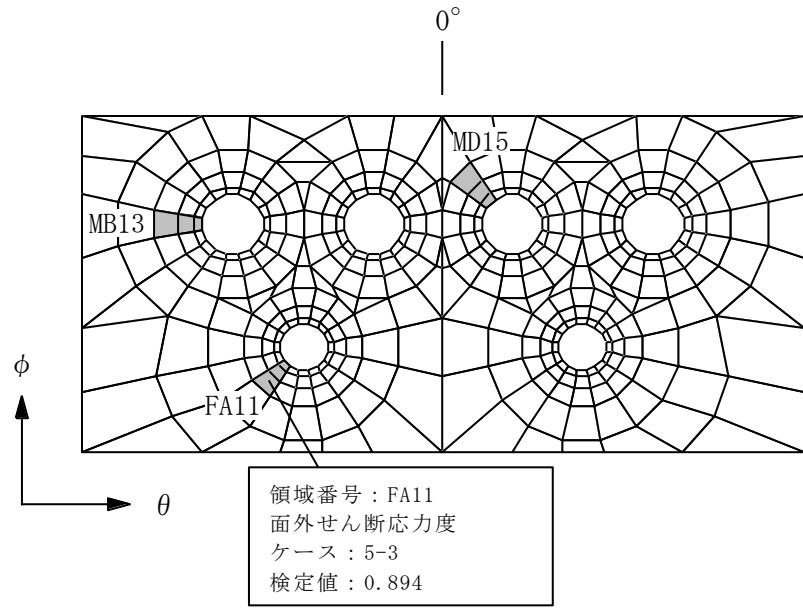
RCCV の応力解析では、V-2-9-2-1「原子炉格納容器コンクリート部の耐震性についての計算書」（以下「RCCV の耐震計算書」という。）に示すとおり、荷重状態Ⅳ及びⅤに対する評価では弾塑性解析を採用している。また、CCV 規格の CVE-3531 では、弾性解析により求まる応力に対して検討を行う場合、開口の直径の $3/4$ 倍を超えない範囲の平均応力を用いることができるとされている。

RCCV の耐震計算書の「6.1.2 貫通部の評価結果」における荷重状態Ⅳ及びⅤに対する貫通部の断面の評価のうち、膜力及び曲げモーメント並びに面外せん断力に対する断面の評価の検定値が最大となる領域及び断面の評価結果を図 2-1 に示す。

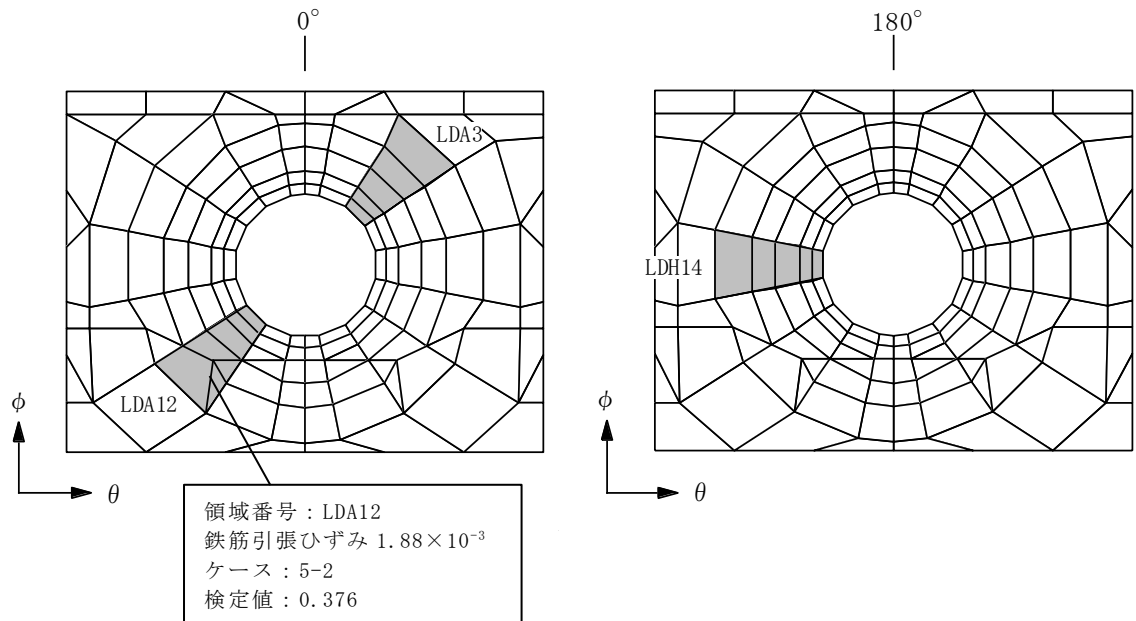
膜力及び曲げモーメントに対する断面の評価に用いるコンクリート及び鉄筋のひずみについては、材料の非線形特性を考慮して算定しているため、平均応力を用いず、各領域内で要素ごとに算定されたひずみの最大値を用いた評価を行っている。

それに対して、面外せん断力に対する断面の評価に用いる面外せん断力については、弾塑性解析においても材料の非線形特性を考慮できないことから、平均応力を用いた断面の評価を行っている。なお、応力解析モデルにおける開口の周辺は、シェル部厚の $1/2$ 程度以下の幅で詳細にモデル化している。このような場合には、開口の縁から適切な範囲での平均的な応力に対して構造の検討を実施することができると考えられる。

以上より、今回工認では荷重状態Ⅳ及びⅤに対する評価において弾塑性解析を採用しているものの、貫通部の断面の評価において CCV 規格における平均応力の規定を適用することは妥当である。



(a) 主蒸気配管及び給水配管開口



(b) 下部ドライウェルアクセストンネル開口

図 2-1 膜力及び曲げモーメント並びに面外せん断力に対する断面の評価の
検定値が最大となる領域及び断面の評価結果 (荷重状態IV及びV)

3. まとめ

RCCV の貫通部の断面の評価において、弾塑性解析を用いた評価を行う場合に、CCV 規格に基づき平均応力の規定を適用することの妥当性を確認した。