

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4
提出年月日	2020年6月10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6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 3 地震荷重の入力方法

目 次

1. 概要	別紙 3-1
2. 地震荷重の入力方法	別紙 3-2

1. 概要

本資料は、コンクリート製原子炉格納容器（以下「RCCV」という。）に作用する地震荷重の入力方法について示すものである。

2. 地震荷重の入力方法

RCCV の応力解析に当たって、FEM モデルに入力する地震荷重として、水平地震力、鉛直地震力及び地震時土圧荷重を考慮する。

地震荷重の入力は、基準地震動 S_s 、弾性設計用地震動 S_d 及び静的地震力に対する地震応答解析結果を考慮し、FEM モデルに入力する水平力、曲げモーメント及び鉛直力が、各質点位置で地震応答解析結果と等価になるように設定する。

具体的には、水平地震力については、地震応答解析により求まる各層の最大応答せん断力に基づく水平力を FEM モデルに入力する。上部構造モデル部分については、地震応答解析モデルの各質点位置に相当する FEM モデルの各節点に節点荷重として入力する。上部構造物から作用する基礎スラブへの地震時反力については、FEM モデルにおける上部構造物脚部に対応する各節点に、節点の支配面積に応じて分配し、節点荷重として入力する。基礎スラブモデル部分については、地震応答解析より求まる基礎スラブ底面地盤ばねと基礎スラブ側面地盤ばねのそれぞれの最大水平力の合算値から、上部構造物から作用する水平力を差し引いた値と等価になる荷重（以下「付加せん断力」という。）を FEM モデルの基礎スラブの各節点に、節点の支配面積に応じて分配し、節点荷重として入力する。

また、地震応答解析により求まる各質点の最大応答曲げモーメントと FEM モデルに入力した水平力により発生する曲げモーメントの差分を FEM モデルに入力する。上部構造モデル部分については、偶力に置換して節点荷重として入力する。上部構造物から作用する基礎スラブへの地震時反力は、偶力に置換して水平力の入力位置に節点荷重として入力する。基礎スラブモデル部分については、地震応答解析より求まる基礎スラブ底面地盤ばねと基礎スラブ側面地盤ばねのそれぞれの最大曲げモーメントの合算値から、上部構造物から作用する曲げモーメントを差し引いた値と等価になる荷重（以下「付加曲げモーメント」という。）を FEM モデルの基礎スラブの各節点に、節点の支配面積と中心位置からの距離に応じて偶力に置換して分配し、節点荷重として入力する。EW 方向のプール部の回転ばねによる曲げモーメントについては、プールガーダの長さで除して求めた外壁からの鉛直方向の反力を、プールガーダの端部及び基礎スラブの外壁脚部に節点荷重として入力する。

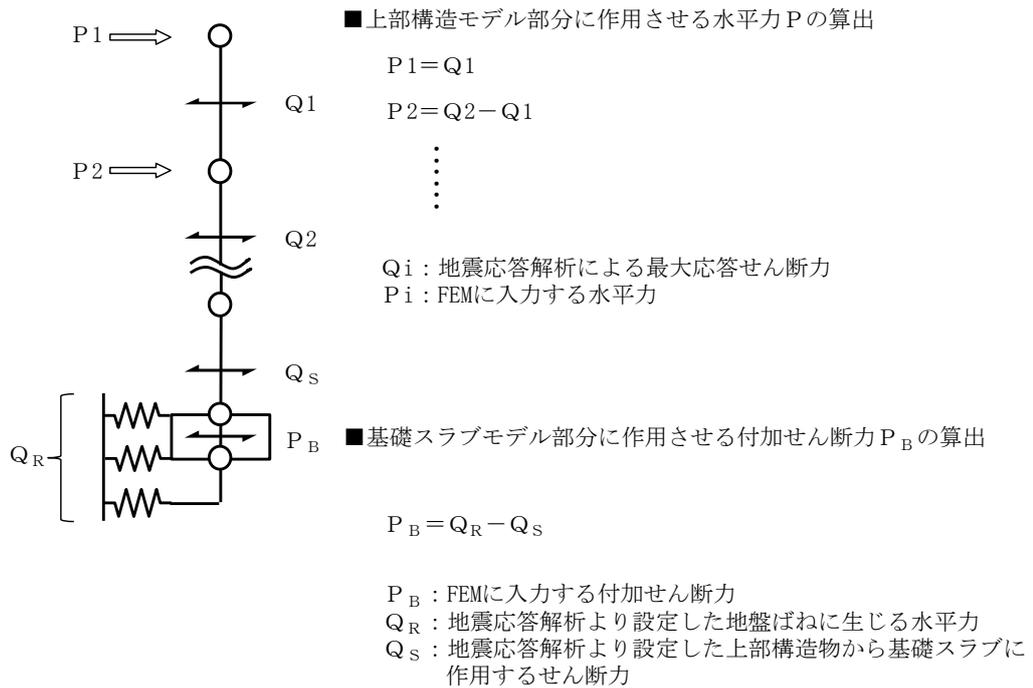
なお、水平地震力及び曲げモーメントについては、耐震壁の位置に対応する節点に入力することを原則とするが、プールガーダは建屋中央部の耐震壁と同じ厚さの壁が外壁まで連続することから、プールガーダ全体に対応する節点に入力する。また、曲げモーメントの偶力への置換については、建屋中心軸からの平面保持を仮定している。外壁部については、地震応答解析モデルの曲げ剛性評価において考慮しているフランジ部脚部への入力も可能であるが、外壁脚部は多点拘束していることから、フランジ部の負担分を含め、ウェブ部にのみ入力する。

鉛直地震力については、地震応答解析により求まる各質点の最大応答加速度及び基礎

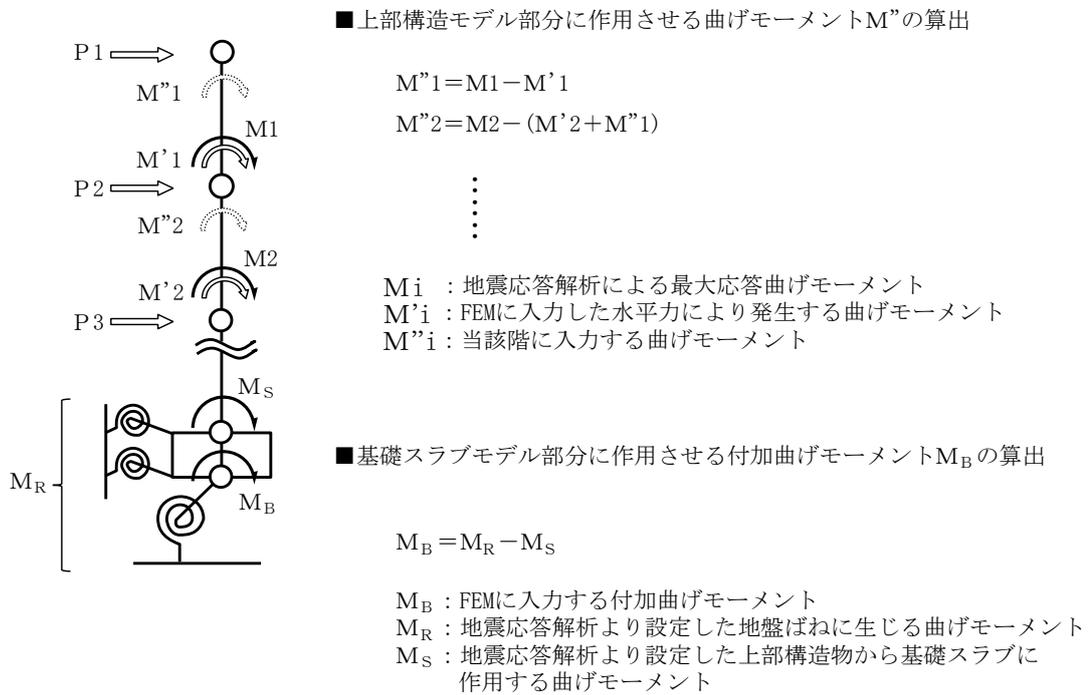
直上の部材の軸力から算出した鉛直震度及び軸力係数に基づく鉛直力を FEM モデルに入力する。上部構造モデル部分については、FEM モデルの各節点に、節点の支配重量に鉛直震度を乗じた節点荷重として入力する。上部構造物から作用する基礎スラブへの地震時反力については、FEM モデルにおける上部構造物脚部位置に対応する各節点の支配面積に応じて上部構造物の重量を分配した支配重量に鉛直震度（軸力係数）を乗じた節点荷重として入力する。基礎スラブモデル部分については、地震応答解析より求まる基礎スラブ底面地盤ばねの鉛直力から上部構造物から作用する鉛直力を差し引いた値と等価になる荷重（以下「付加軸力」という。）を基礎スラブの重量で除して付加軸力係数を算定する。そして、FEM モデルの基礎スラブの各節点の支配重量に付加軸力係数を乗じた節点荷重として入力する。

地下外壁部に作用する地震時土圧荷重により基礎スラブに作用する荷重は、外壁を各階スラブ位置で支持した連続ばりモデルを用いて算定する。算定した外壁脚部に生じる単位長さ当たりの曲げモーメント及びせん断力は、基礎スラブ外周の節点の支配長さに応じて分配し、節点荷重として入力する。なお、曲げモーメントについては、壁厚を考慮した偶力に置換し、節点荷重として入力する。

FEM モデルに入力する地震荷重の概念図を図 2-1 に示す。また、FEM モデルに入力する地震荷重を図 2-2 に示す。なお、図 2-2 における地震時土圧荷重は、地震時増分土圧荷重として示す。

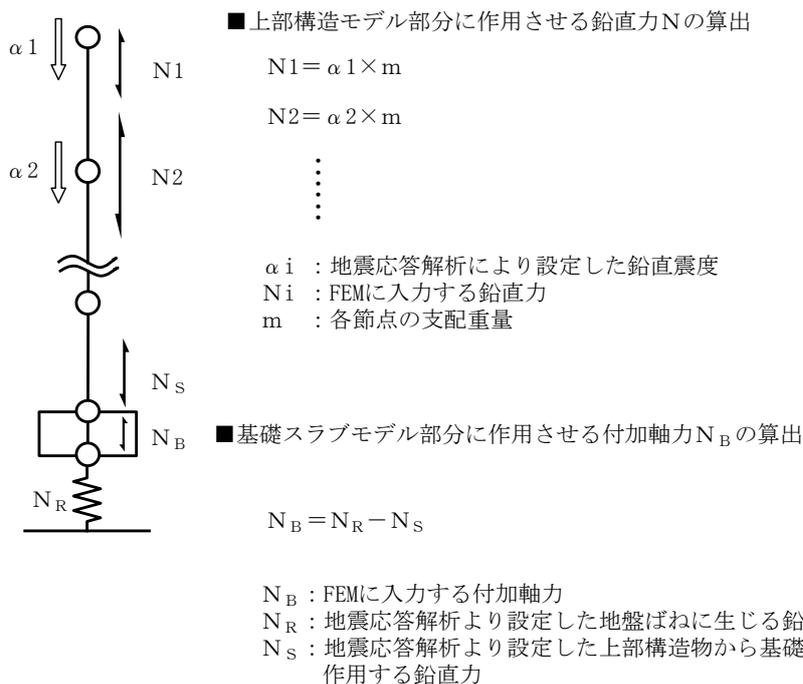


(a) 水平地震力

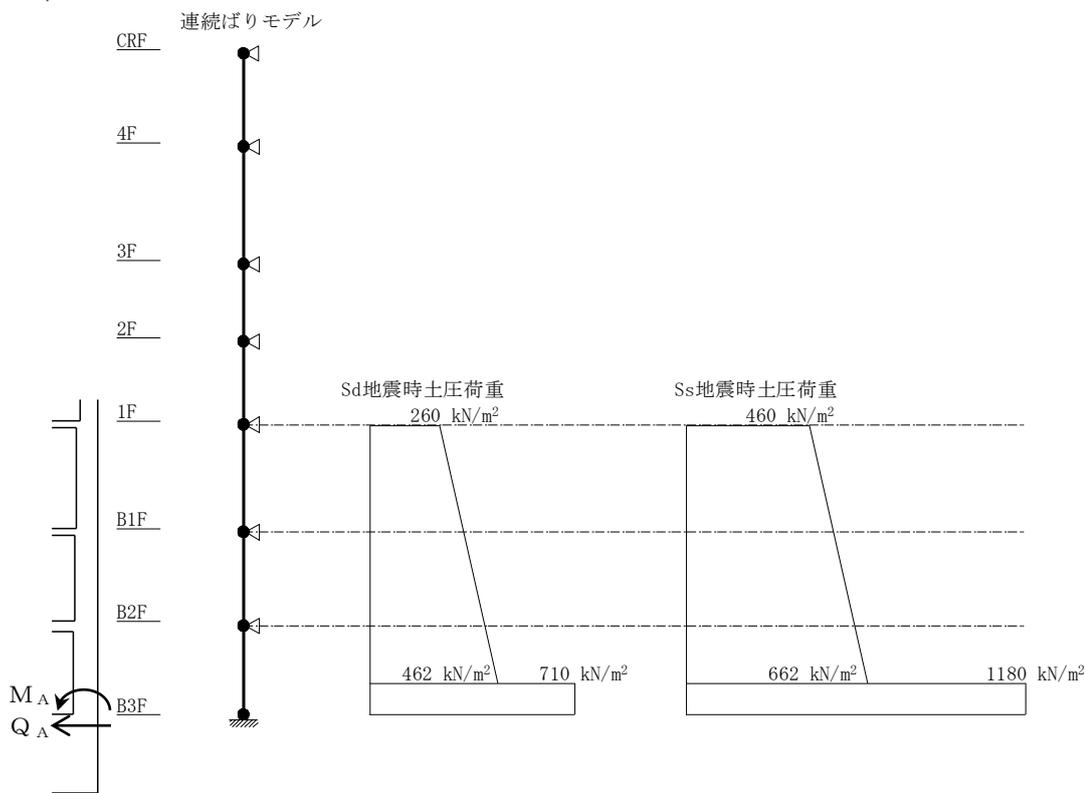


(b) 曲げモーメント

図 2-1 FEM モデルに入力する地震荷重の概念図 (1/2)



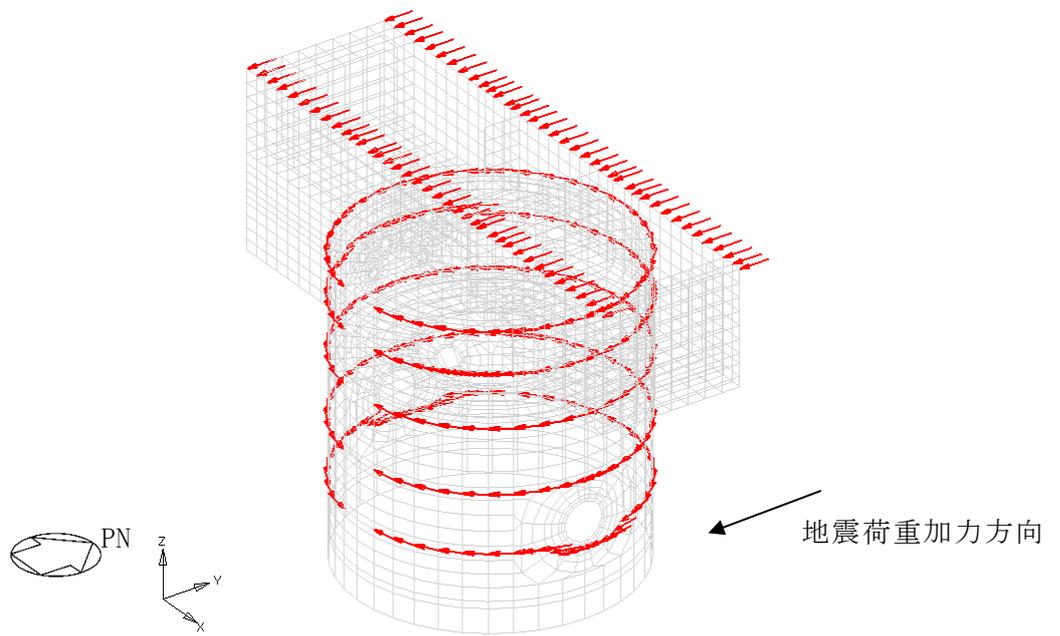
(c) 鉛直地震力



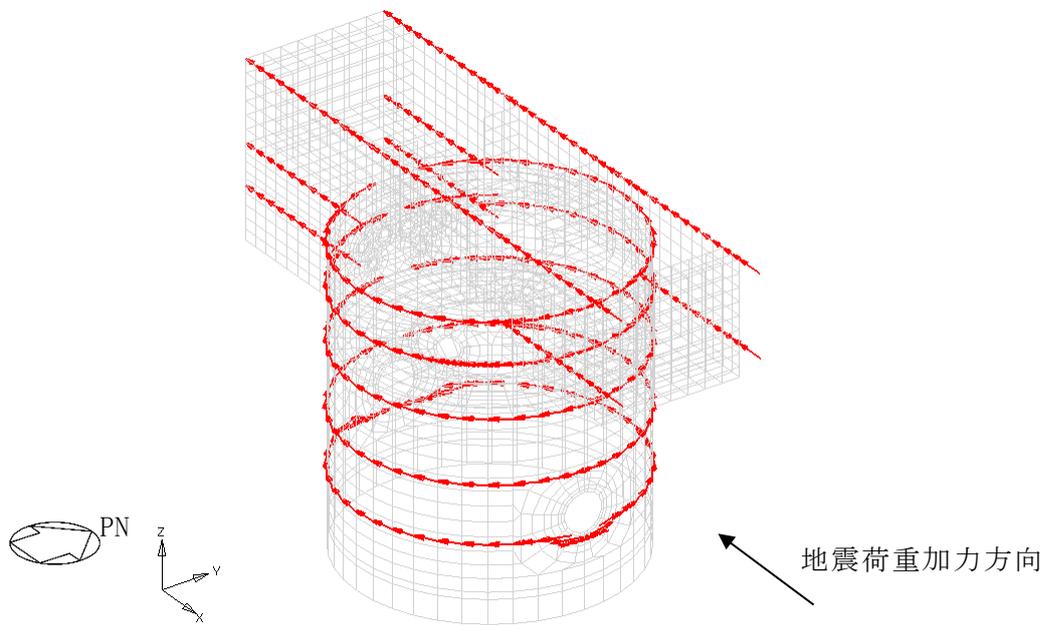
Q_A : 基礎スラブに入力するせん断力
 M_A : 基礎スラブに入力する曲げモーメント

(d) 地震時土圧荷重

図 2-1 FEM モデルに入力する地震荷重の概念図 (2/2)

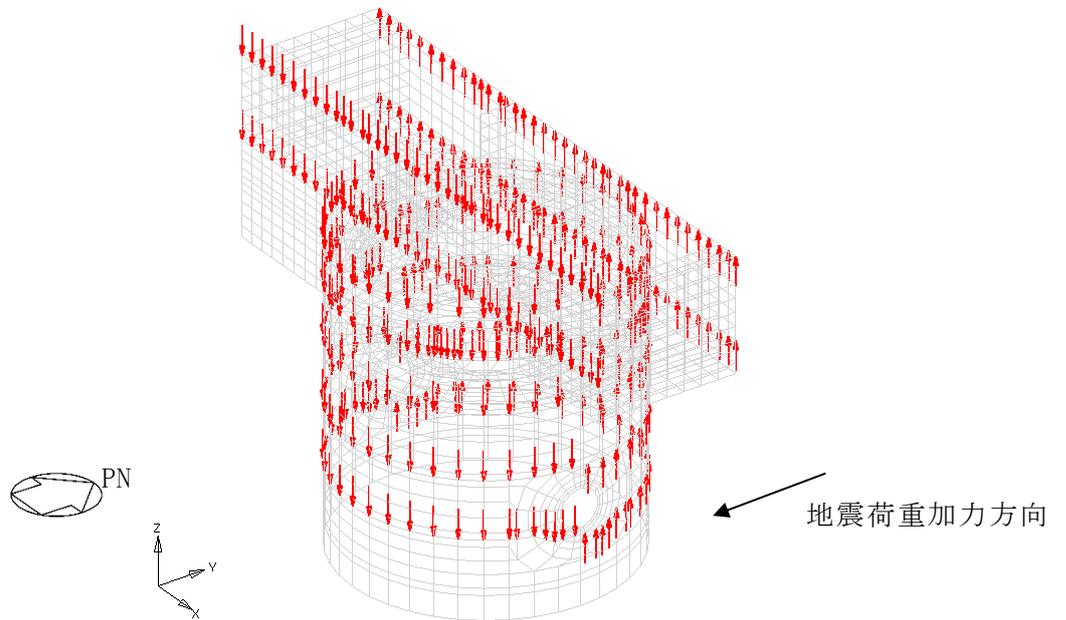


(a) 水平力 (NS 方向) 上部構造モデル部分

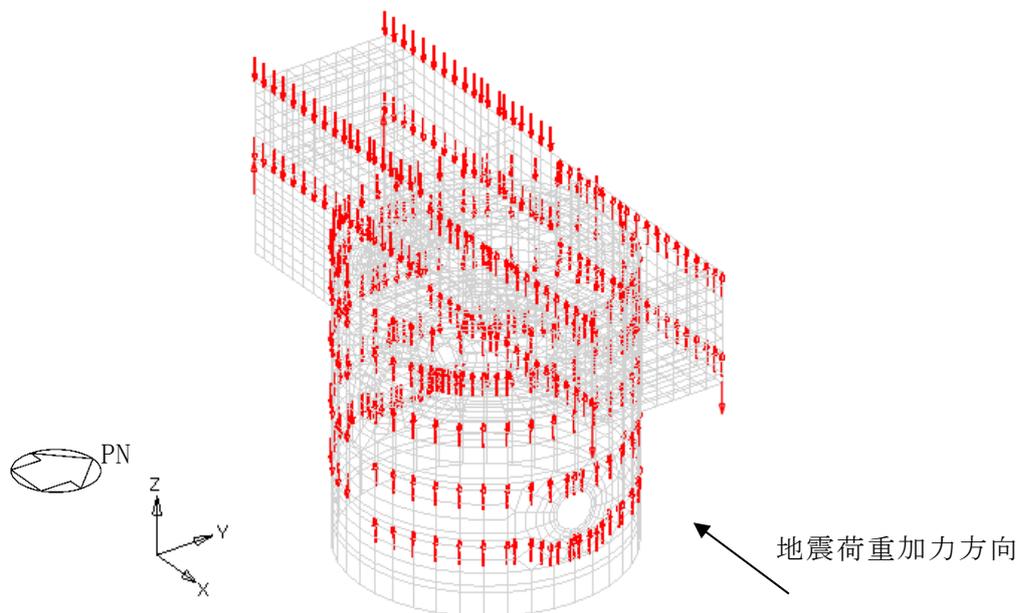


(b) 水平力 (EW 方向) 上部構造モデル部分

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (1/11)

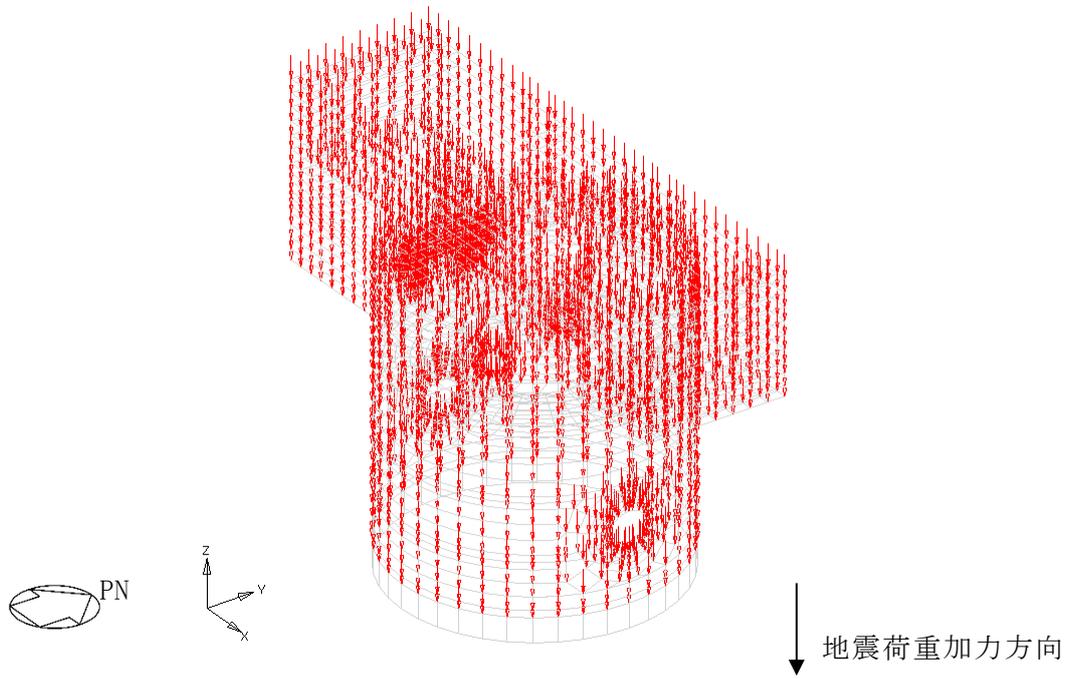


(c) 曲げモーメント (NS 方向) 上部構造モデル部分



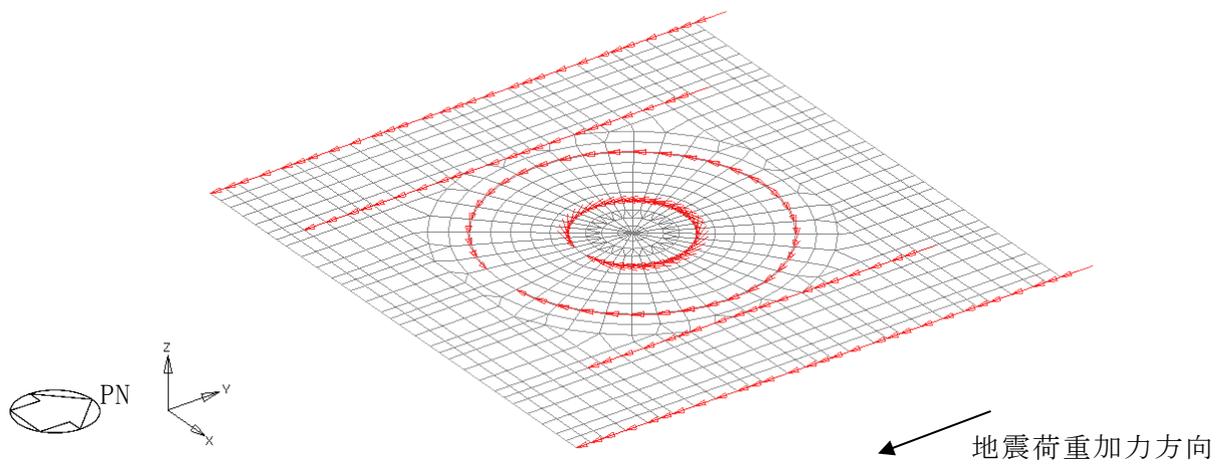
(d) 曲げモーメント (EW 方向) 上部構造モデル部分

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (2/11)

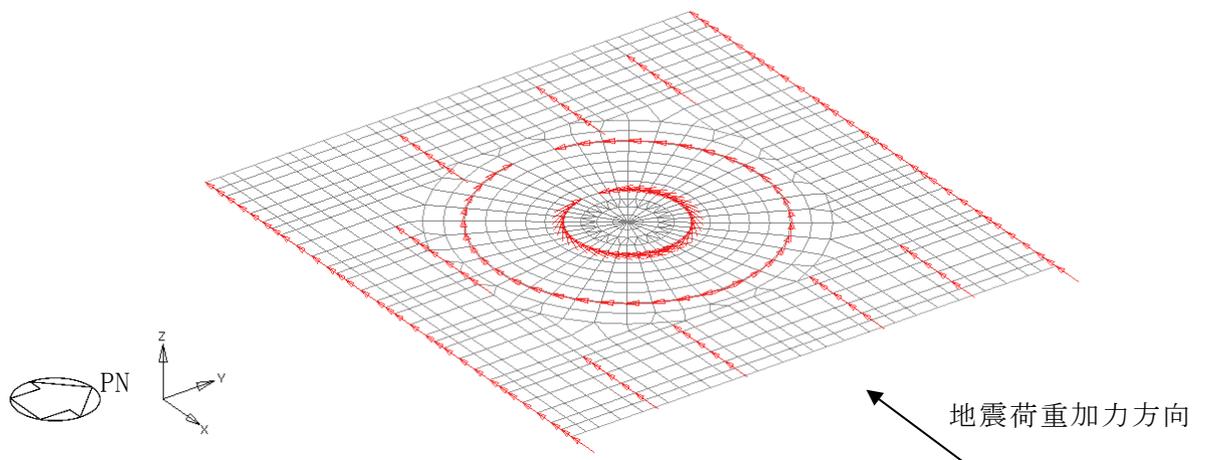


(e) 鉛直力 上部構造モデル部分

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (3/11)

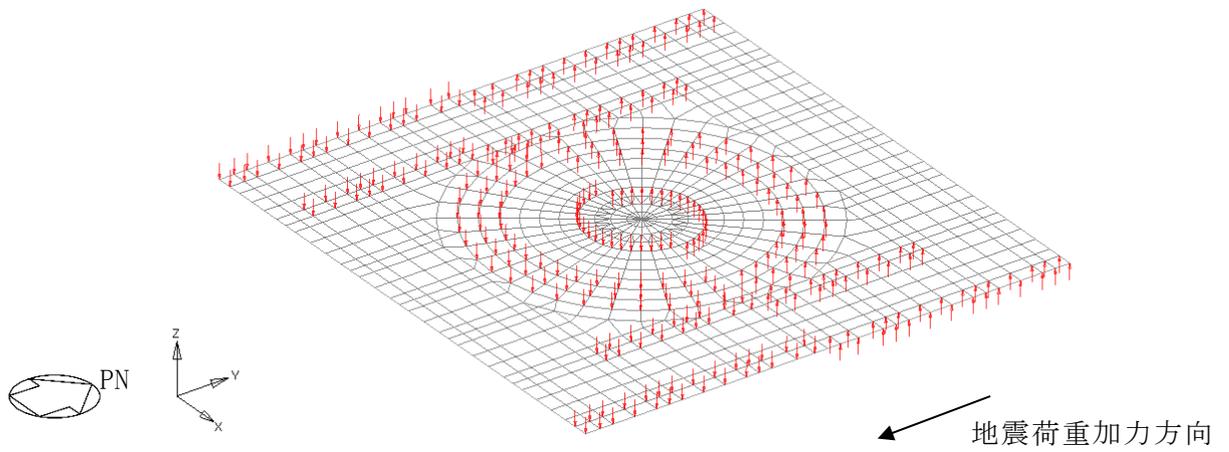


(f) 水平力 (NS 方向) 基礎スラブモデル部分

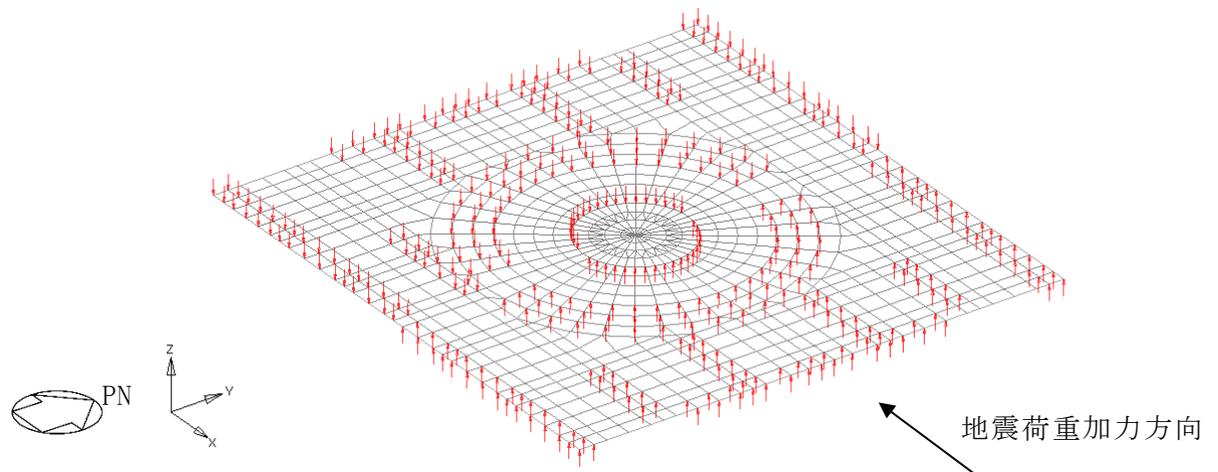


(g) 水平力 (EW 方向) 基礎スラブモデル部分

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (4/11)

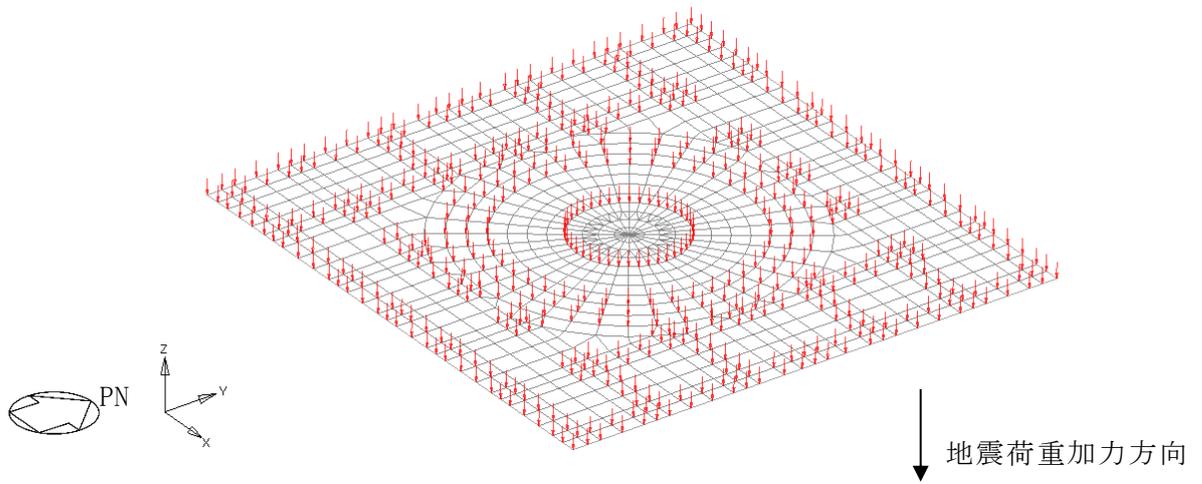


(h) 曲げモーメント (NS 方向) 基礎スラブモデル部分



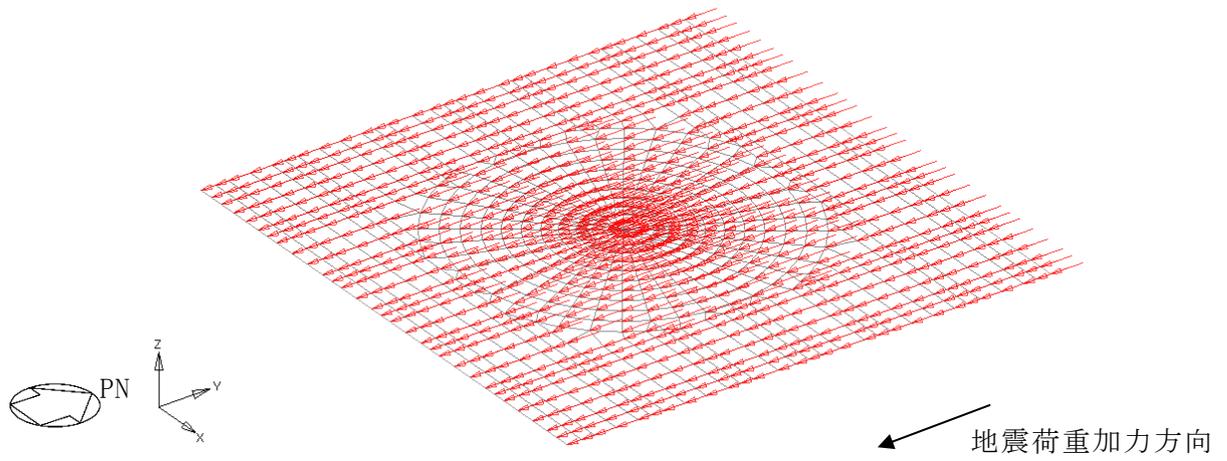
(i) 曲げモーメント (EW 方向) 基礎スラブモデル部分

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (5/11)

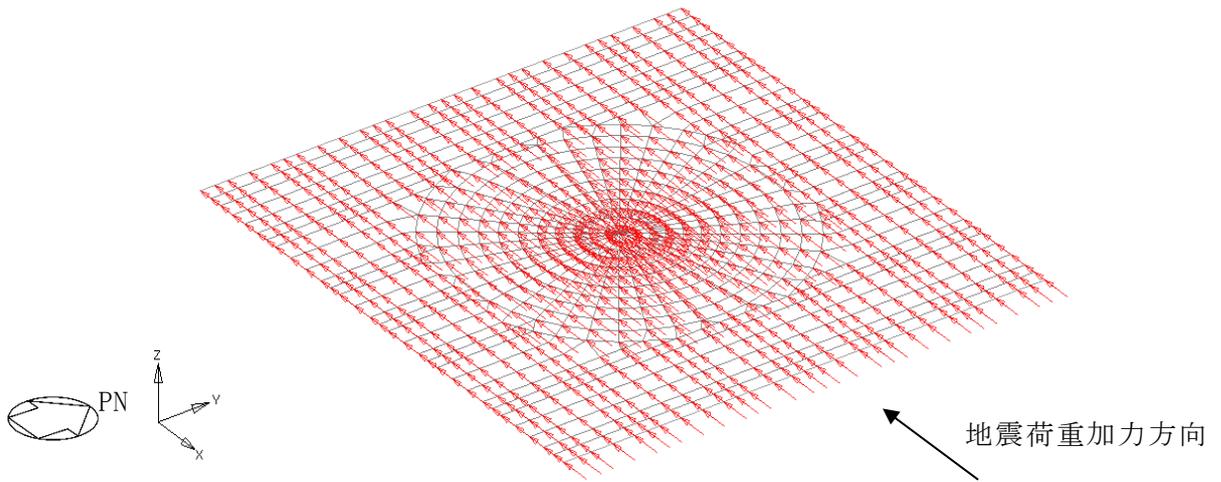


(j) 鉛直力 基礎スラブモデル部分

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (6/11)

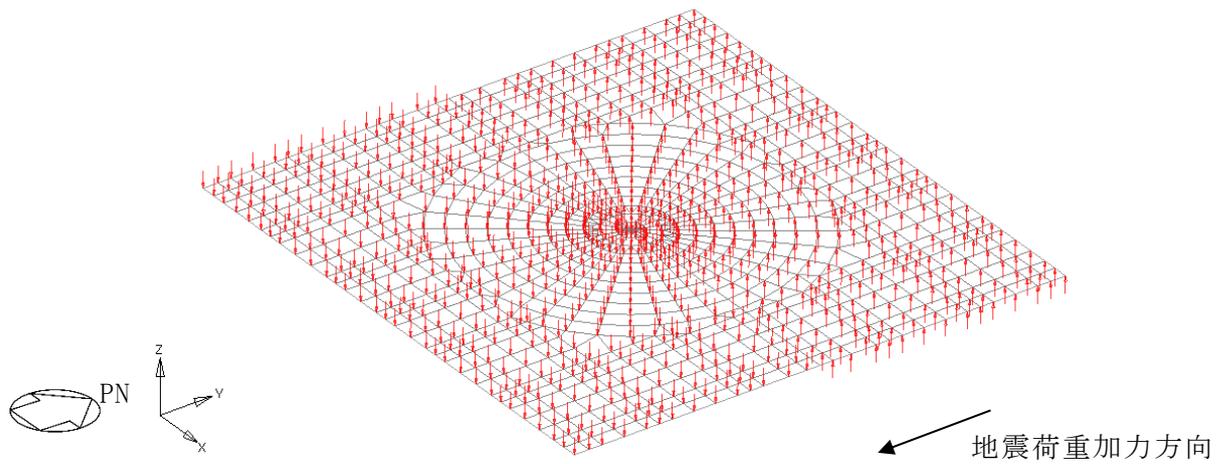


(k) 付加せん断力 (NS 方向)

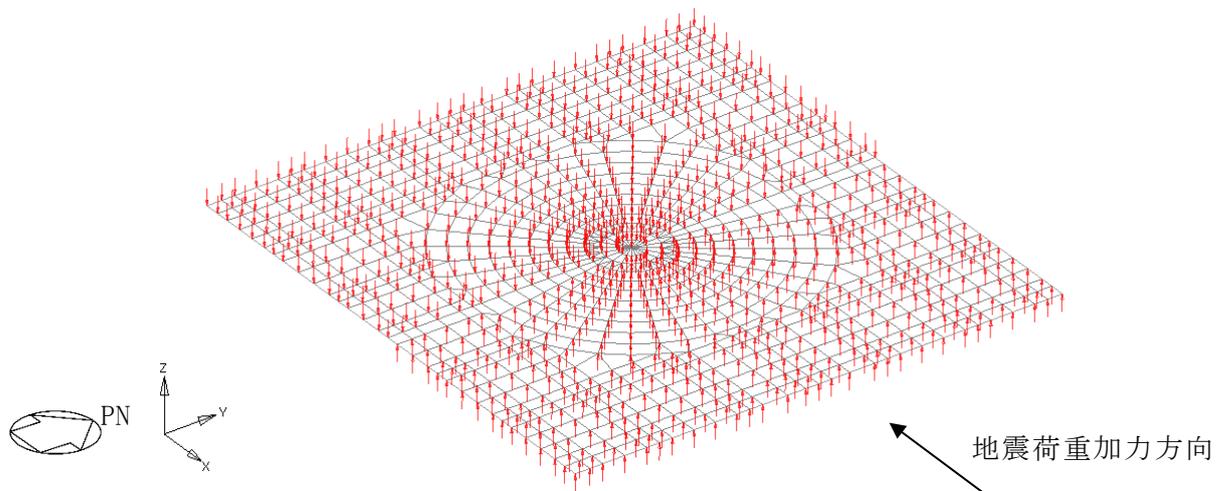


(l) 付加せん断力 (EW 方向)

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (7/11)

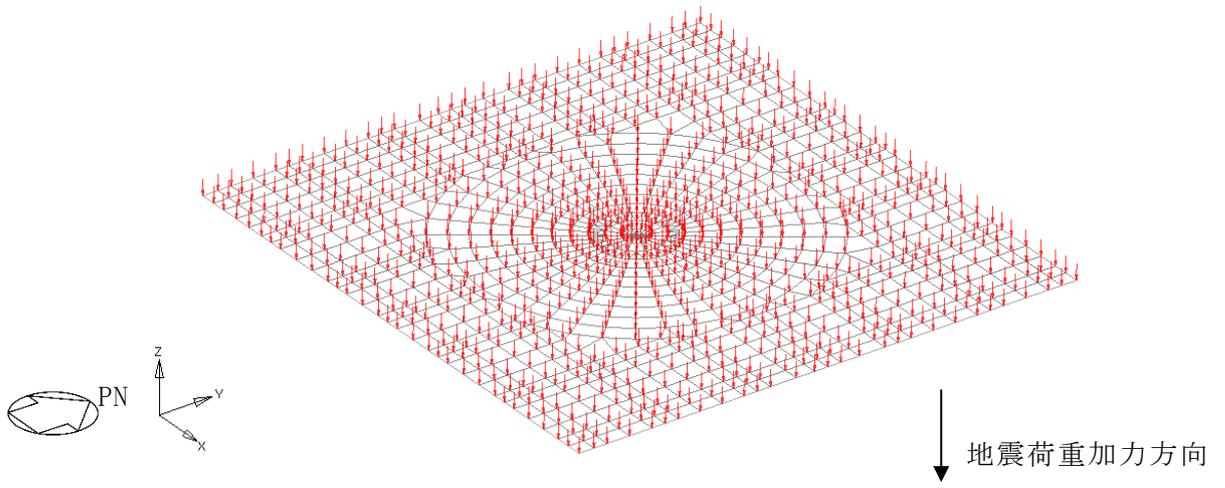


(m) 付加曲げモーメント (NS 方向)



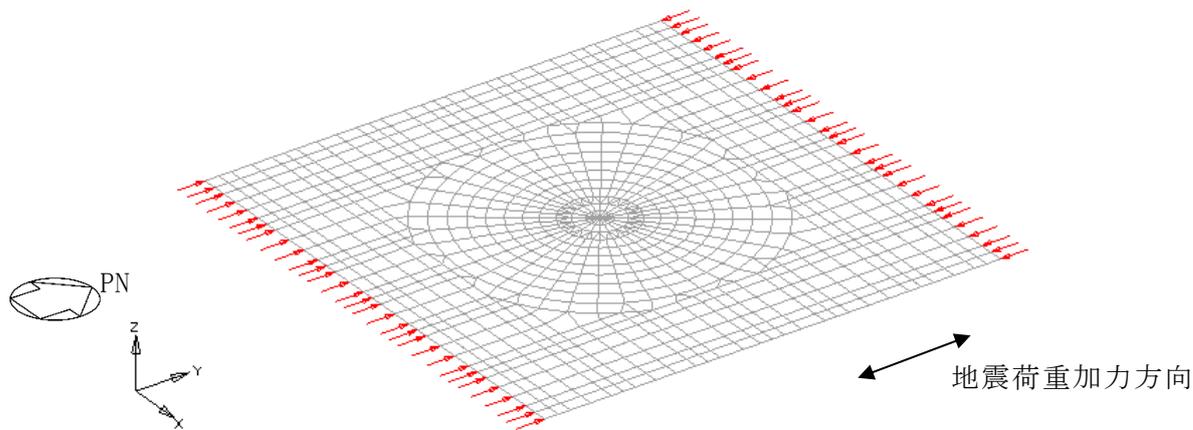
(n) 付加曲げモーメント (EW 方向)

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (8/11)

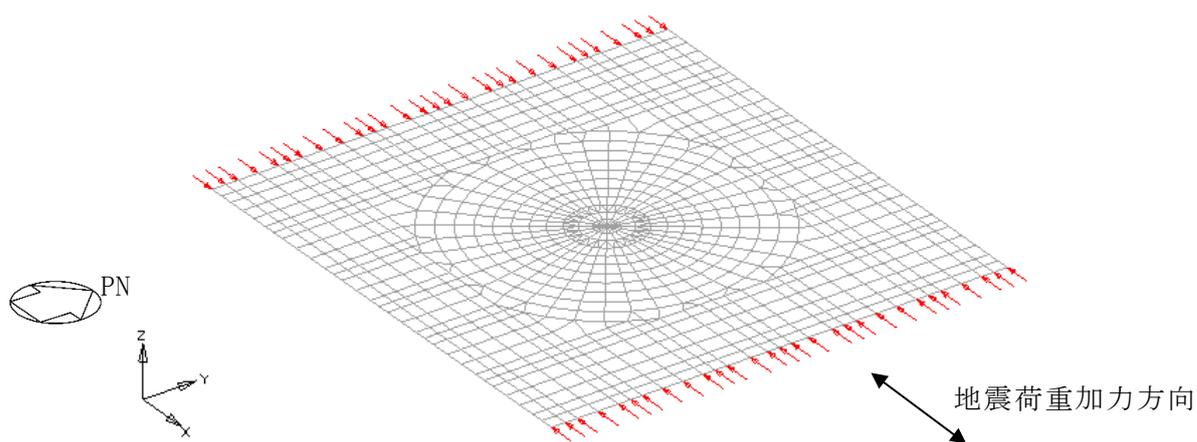


(o) 付加軸力

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (9/11)

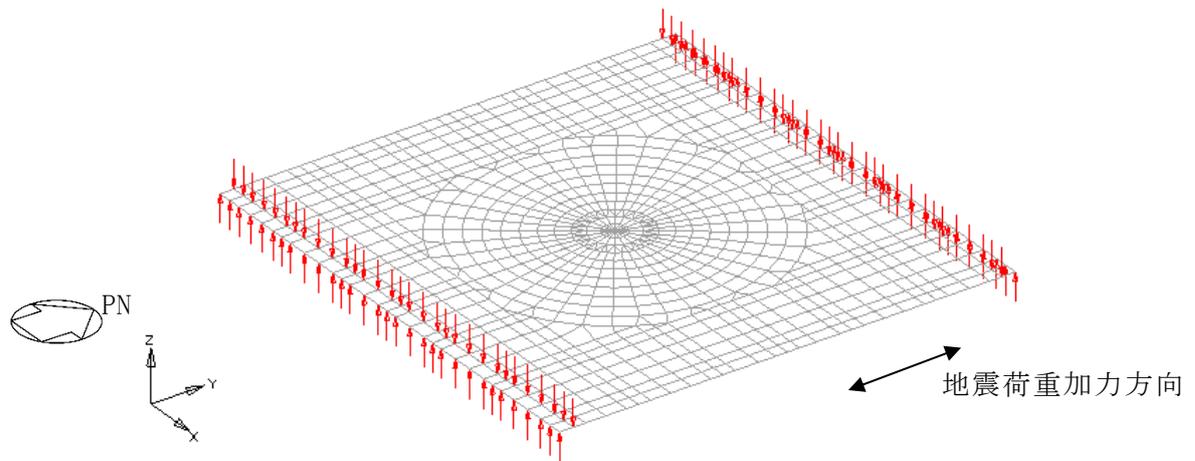


(p) 地震時増分土圧荷重 (NS 方向) せん断力

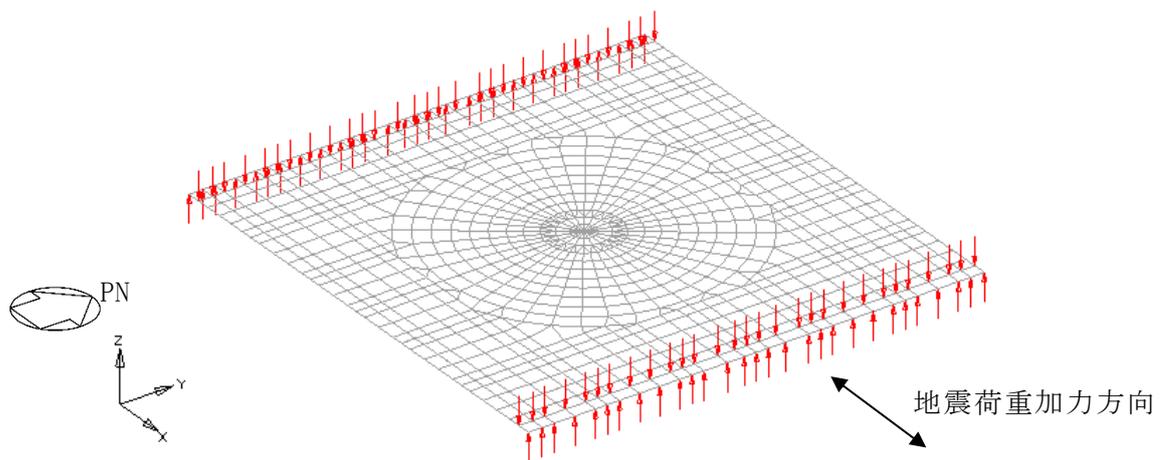


(q) 地震時増分土圧荷重 (EW 方向) せん断力

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (10/11)



(r) 地震時増分土圧荷重 (NS 方向) 曲げモーメント



(s) 地震時増分土圧荷重 (EW 方向) 曲げモーメント

図 2-2 FEM モデルに入力する地震荷重 (11/11)

別紙 5 応力解析における応力平均化の考え方

目 次

1. 概要	別紙 5-1
2. 応力平均化の考え方	別紙 5-2
2.1 応力平均化を実施した領域における断面の評価要素	別紙 5-2
2.2 応力平均化の方法	別紙 5-4
2.3 応力平均化の結果	別紙 5-10
2.4 断面の評価結果	別紙 5-12

1. 概要

3次元 FEM モデルを用いた応力の算定において、FEM 要素に応力集中等が見られる場合については、「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）」（以下「RC-N 規準」という。）に基づき、応力の再配分等を考慮してある一定の領域の応力を平均化したうえで断面の評価を行っている。この場合、当該要素における応力度ではなく、周囲の複数の要素で平均化した応力度に対して断面の評価を実施していることから、本資料では、原子炉格納容器コンクリート部（以下「RCCV」という。）における複数の要素での応力平均化の考え方及びその結果を示す。

2. 応力平均化の考え方

2.1 応力平均化を実施した領域における断面の評価要素

断面の評価要素は、応力平均化を行うことによって応力が変わることから、応力平均化前の断面力に対する検定値を元に選定している。

RCCV 底部では、応力平均化前の応力分布において、局所的に大きな面外せん断力が発生している要素を断面の評価要素とし、応力平均化を行い、応力平均化後の値に対する断面の評価を実施した。

応力平均化を実施した要素を表 2-1、要素位置図を図 2-1 に示す。

表 2-1 応力平均化要素

部位	評価項目		方向	要素番号	組合せ ケース	平均化前の検定値 (発生値/許容値)
底部	面外 せん断力	面外 せん断 応力度	放射	10002370	3-2 (荷重状態Ⅳ・ 地震時(2))	1.01
			放射	10002371	3-2 (荷重状態Ⅳ・ 地震時(2))	1.02

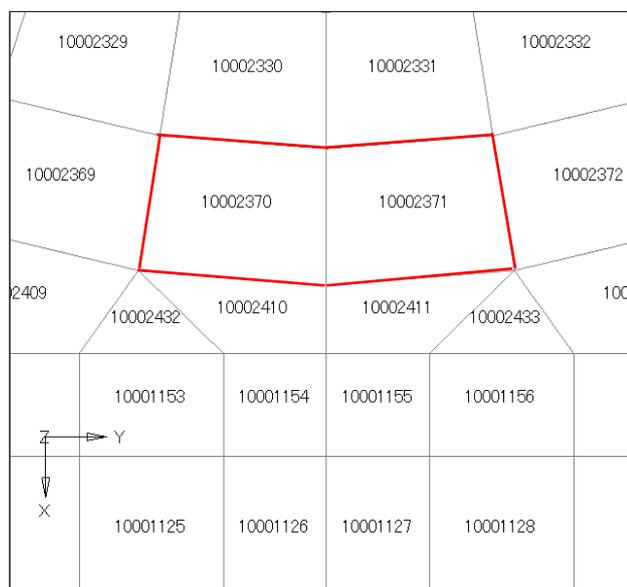
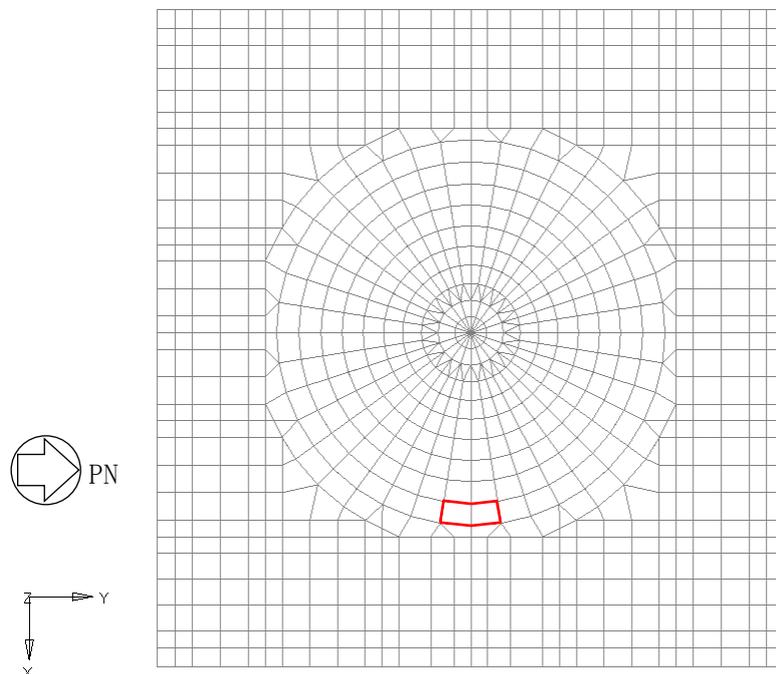


图 2-1 要素位置图

2.2 応力平均化の方法

3次元 FEM モデルを用いた応力解析においては、部材断面やモデル形状が大きく変化して不連続になっている箇所は、局所的な応力集中が発生しやすい。

図 2-2 に RCCV の 3次元 FEM モデルを示す。図 2-2 に示すように、当該部はシェル部との接続部分であり、応力が集中しやすい。図 2-3 に示す面外せん断力のコンター図を見ると、当該要素周辺では大きな面外せん断力が発生していることが分かる。

そこで、今回の RCCV の応力解析においては、RC-N 規準を参考に、コンクリートのひび割れによる応力の再配分を考慮し、応力の平均化を行った。なお、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いるが、面外せん断力に対しては非線形特性を考慮できないことから、算出された応力に対して平均化を行った。

RC-N 規準においては、「線材では、部材端に生じる斜めせん断ひび割れによって部材有効せい程度離れた断面の引張鉄筋の応力度が部材端と同じ大きさまで増大する現象（テンションシフト）が生じるが、面材では、斜めひび割れが発生した場合においても、材軸直交方向への応力再配分によって、線材におけるテンションシフトのような現象は生じにくいと考えられる。」とされており、耐震壁の面外せん断力について、「面材であるため、局所的に応力の集中があったとしても、応力の再配分を生じ、破壊に至ることはない。」とされている。また、基礎スラブのような大断面を有する面材の面外せん断力について、「通常の場合、FEM 解析の要素サイズは、基礎スラブ版厚より小さいため、付図 2.2 に模式的に示されるように設計用面外せん断力は想定されるひび割れ領域での平均面外せん断力に対して大きめの評価となっているといえる。また、基礎スラブにおいても、耐震壁と同様、面材における面外せん断力の再配分も期待できる。」とされている。RC-N 規準の付図 2.2 を図 2-4 に示す。

壁、床スラブ、基礎スラブのような面材については、RC-N 規準に示されるように、面材に荷重を作用させる直交部材からせん断破壊面が 45 度の角度で進展すると考えられることから、せん断破壊面が面材の表面から裏面まで貫通する範囲、すなわち部材厚の範囲に応力が再配分されると考えられる。RCCV 底部における面外せん断力に対する応力平均化の考え方を図 2-5 に示す。

以上より、応力の平均化は、応力コンター図及び基礎スラブの直上の壁配置等を考慮し、当該要素の壁から離れる側の**応力方向に位置する**隣接要素に対して、壁面から基礎スラブの部材厚である 5.5m 分の範囲で行った。各要素について応力平均化範囲を図 2-6 に示す。なお、応力平均化範囲には中間壁が存在するが、図 2-5 のとおり、せん断破壊面が中間壁の下部を通ること、図 2-3 のとおり、中間壁の位置でせん断力分布が不連続になっていないことから、中間壁の下部も応力平均化範囲として考慮する。

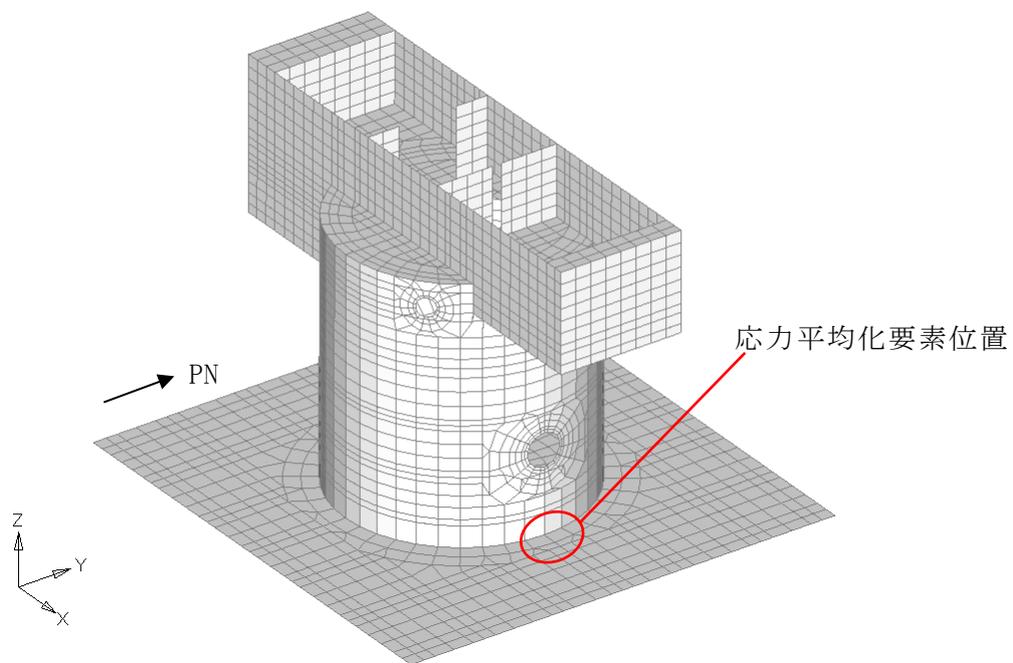
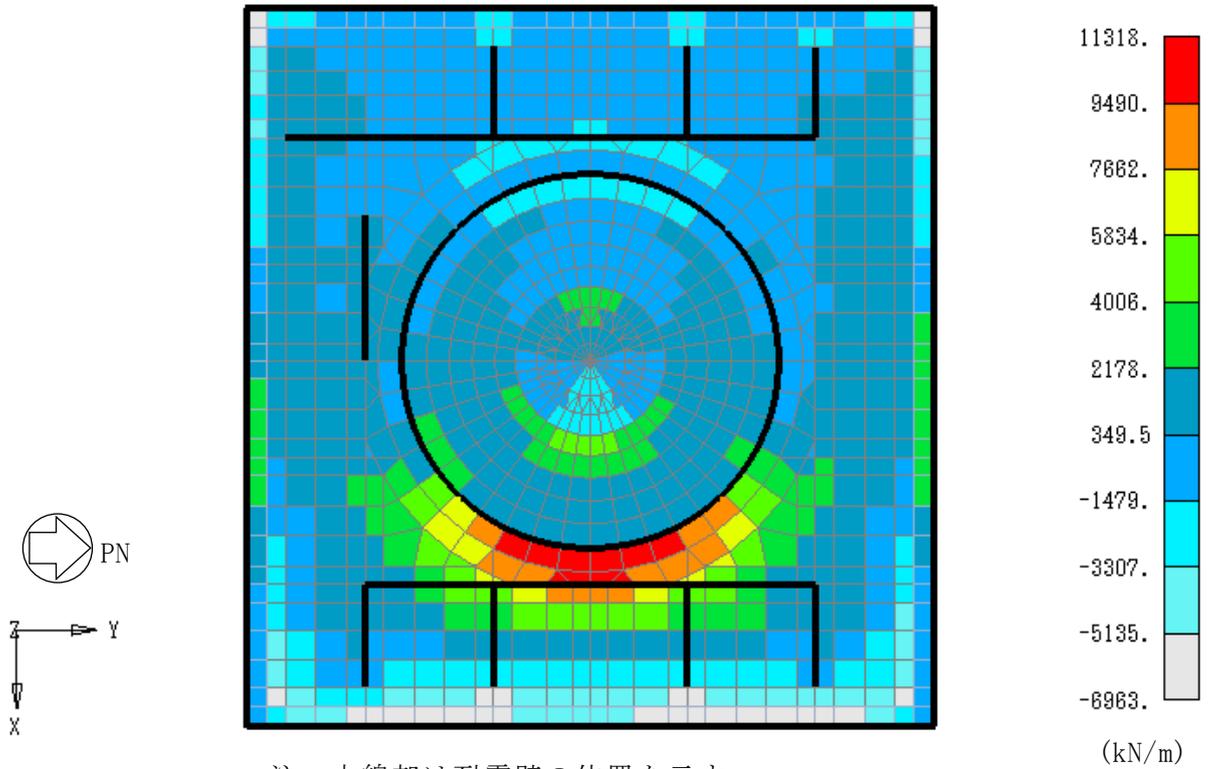


図 2-2 RCCV の 3 次元 FEM モデル



注：太線部は耐震壁の位置を示す。

組合せケース 3-2 (放射方向)
図 2-3 面外せん断力のコンター図

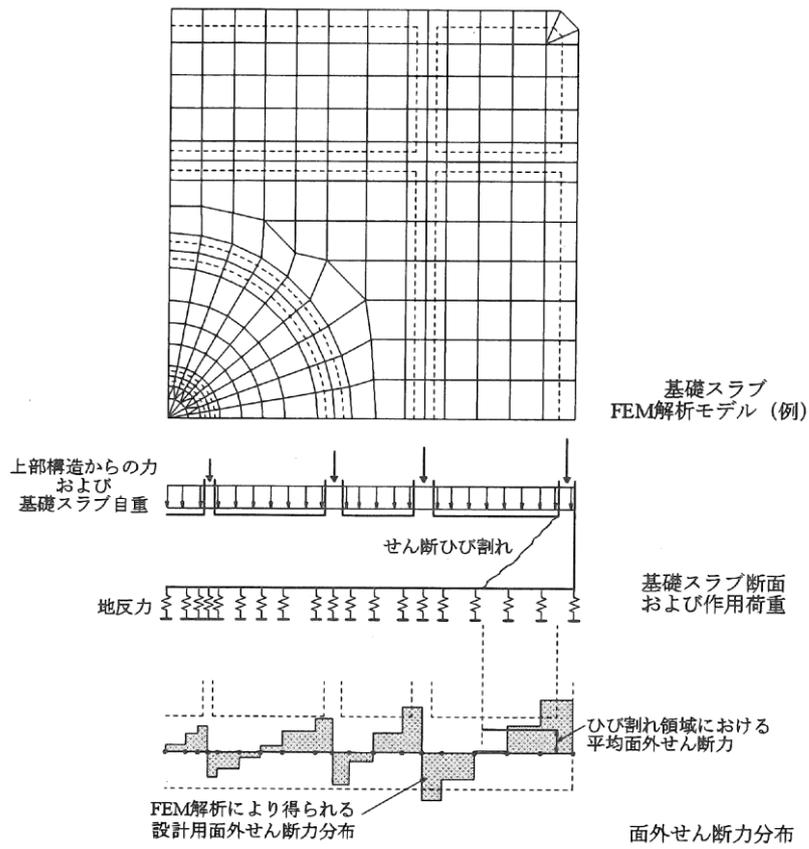


図 2-4 RC-N 規準の付図 2.2

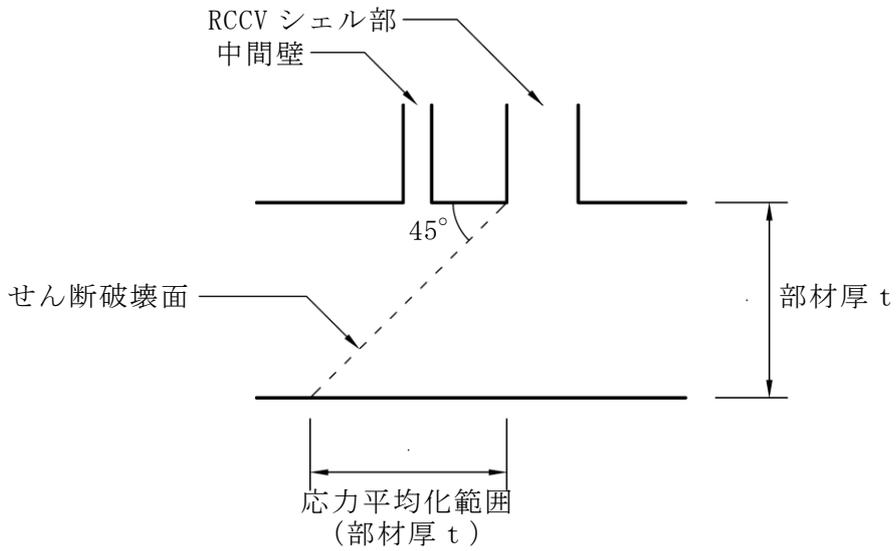
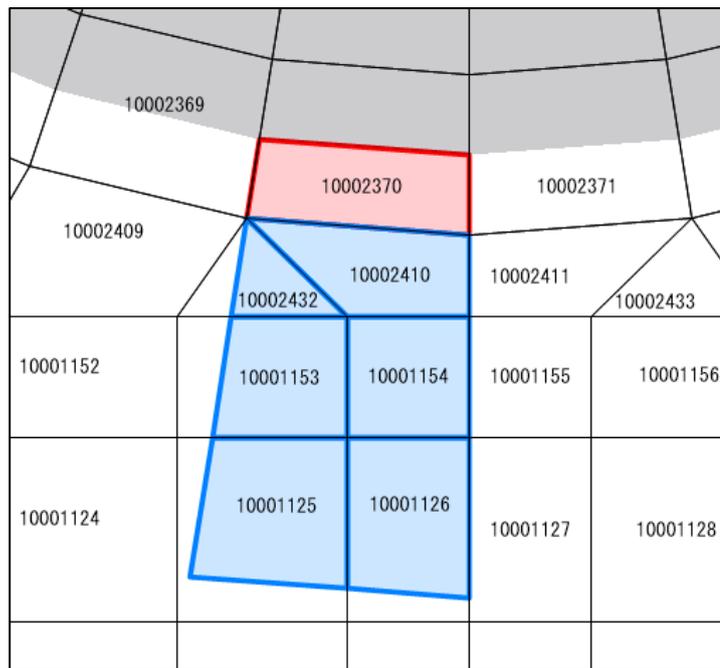
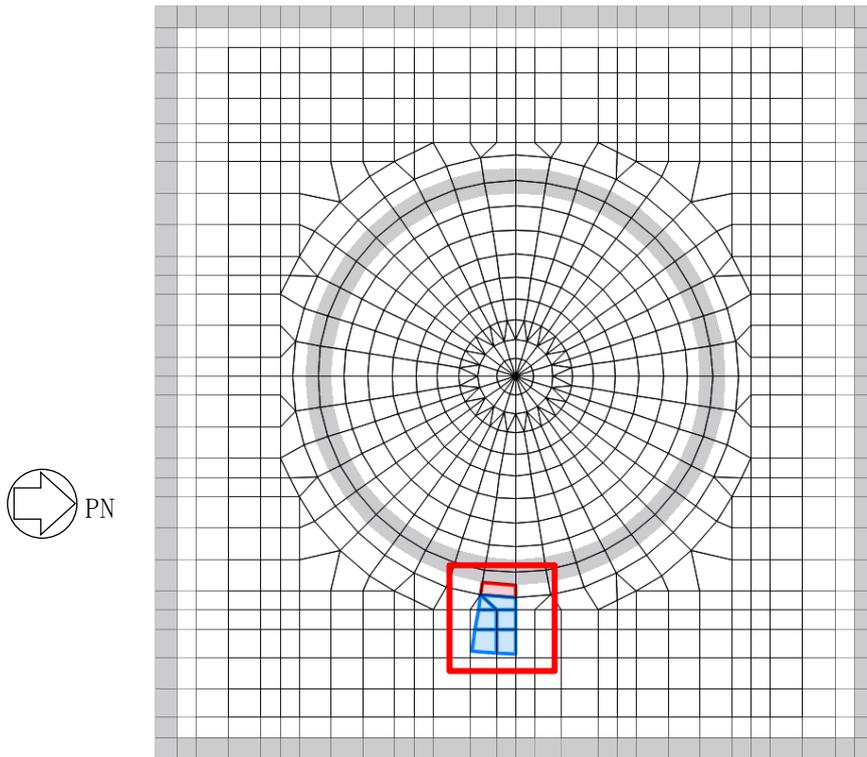


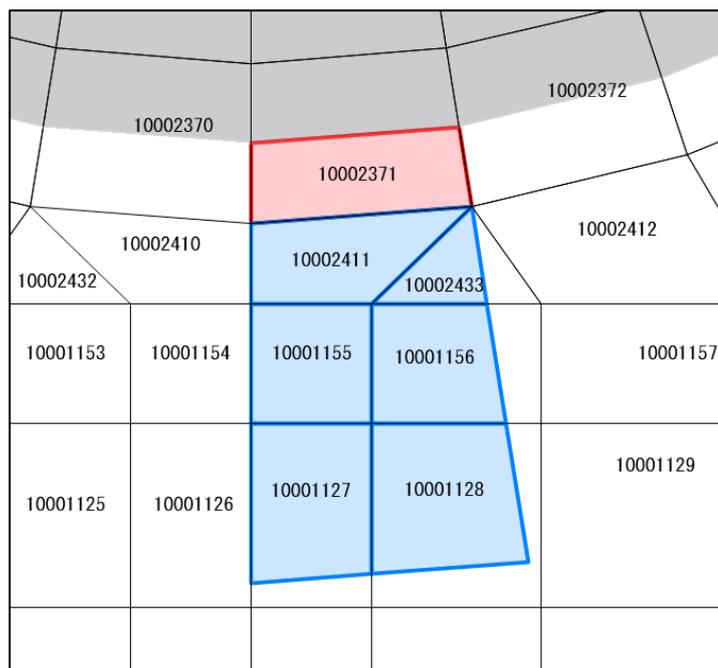
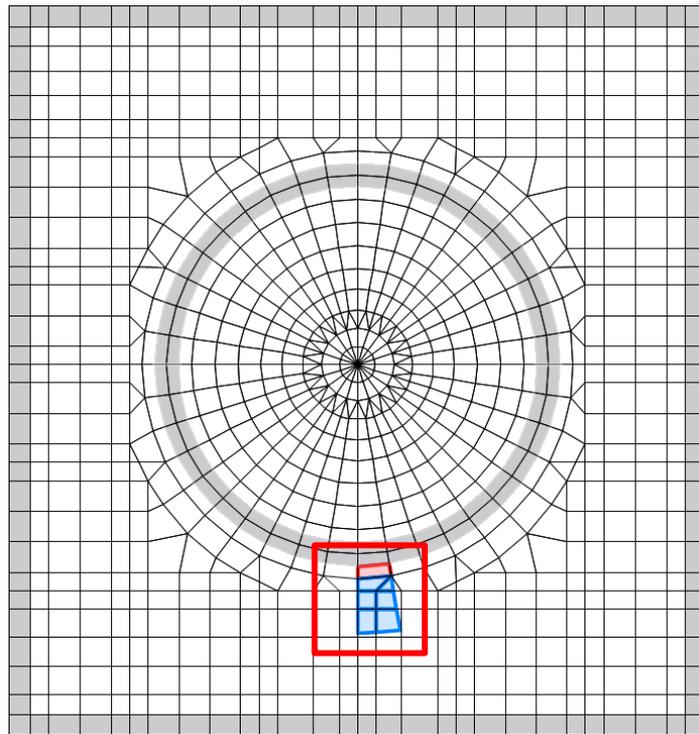
図 2-5 RCCV 底部における面外せん断力に対する応力平均化の考え方



- 応力平均化実施要素
- 平均化実施に用いた周辺要素
- 壁直下の範囲（平均化対象外）

(a) 要素番号 10002370

図 2-6 応力平均化範囲 (1/2)



- 応力平均化実施要素
- 平均化実施に用いた周辺要素
- 壁直下の範囲（平均化対象外）

(b) 要素番号 10002371

図 2-6 応力平均化範囲 (2/2)

2.3 応力平均化の結果

応力平均化の手法として、下式のとおり、要素面積を考慮した重み付け平均で平均化を行っている。応力平均化に用いる各要素の発生値、面積及び重み付け値を表2-2に示す。また、応力平均化の結果を表2-3に示す。

$$\tau_{ave} = \Sigma (\tau_i \times A_i) / \Sigma A_i$$

ここで、

τ_{ave} : 平均化後の面外せん断応力度

τ_i : 平均化前の各要素の面外せん断応力度（発生値）

A_i : 応力平均化範囲における各要素の面積

表2-2 応力平均化に用いる各要素の発生値、面積及び重み付け値

応力平均化対象要素	方向	組合せケース	要素番号	発生値 τ_i (N/mm ²)	要素面積 A_i (m ²)	重み付け値 $\tau_i \times A_i$ ($\times 10^6$ N)
10002370	放射	3-2	10001125	1.23	3.27	4.01
			10001126	1.28	2.91	3.71
			10001153	1.89	2.32	4.39
			10001154	1.86	2.25	4.19
			10002410	2.35	2.28	5.37
			10002432	2.22	0.87	1.93
			10002370	3.04	2.66	8.08
				合計	16.56	31.68
10002371	放射	3-2	10001127	1.28	2.91	3.73
			10001128	1.25	3.27	4.08
			10001155	1.87	2.25	4.21
			10001156	1.92	2.32	4.46
			10002411	2.37	2.28	5.40
			10002433	2.28	0.87	1.98
			10002371	3.07	2.66	8.18
				合計	16.56	32.04

表2-3 応力平均化結果

要素番号	方向	組合せケース	面外せん断応力度 (N/mm ²)	
			平均化前	平均化後
10002370	放射	3-2	3.04	1.91
10002371	放射	3-2	3.07	1.93

2.4 断面の評価結果

2.4.1 断面の評価方法

荷重状態Ⅳ・地震時(2)の面外せん断応力度について、発生値が許容値を超えないことを確認する。許容値は、「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)」に基づき算出する。

2.4.2 断面の評価結果

応力平均化後の評価結果を表2-4に示す。表2-4より、応力平均化後の面外せん断応力度の発生値が許容値を超えないことを確認した。

表2-4 応力平均化後の評価結果

要素番号	方向	組合せケース	面外せん断応力度 (N/mm ²)		平均化後の検定値 (発生値/許容値)
			発生値	許容値	
10002370	放射	3-2	1.91	2.32	0.824
10002371	放射	3-2	1.93	2.32	0.832