

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0610-8_改7
提出年月日	2021年11月8日

補足-610-8 原子炉建屋基礎版の耐震性についての計算書に関する
補足説明資料

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

添付書類「VI-2-9-3-4 原子炉建屋基礎版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1-1 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

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 最大接地圧について

別紙6 原子炉建屋基礎版の応力解析における応力平均化の考え方

別紙7 原子炉建屋基礎版の応力解析における浮力の影響検討

別紙8 原子炉建屋基礎版の応力解析における地震時増分土圧の算定と隣接構造物の影響について

別紙9 原子炉建屋基礎版評価における誘発上下動の取り扱いについて

 本日の説明範囲

別紙 6 原子炉建屋基礎版の応力解析における応力平均化の考え方

目 次

1. 概要	別紙 6- 1
2. 応力平均化の考え方	別紙 6- 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 6- 2
2.2 応力平均化の方法	別紙 6- 4
2.3 応力平均化の結果	別紙 6- 9
2.4 断面の評価結果	別紙 6-11
2.4.1 断面の評価方法	別紙 6-11
2.4.2 断面の評価結果	別紙 6-11

1. 概要

本資料は、補足説明資料「補足-610-8 原子炉建屋基礎版の耐震性評価についての計算書に関する補足説明資料」のうち「別紙 6 剛性低下を考慮した影響検討」の不確かさケースの初期剛性に基づく解析ケース及び基本ケースの初期剛性に基づく解析ケース（工認ケース）を対象として、原子炉建屋基礎版の応力解析における応力平均化の考え方について示すものである。

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、「日本建築学会 2005 年 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（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、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。

原子炉建屋基礎版では、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

(a) 不確かさケースの初期剛性に基づく解析モデル

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)
面外せん断 応力度	NS	1158	4	1.00

(b) 基本ケースの初期剛性に基づく解析モデル

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)
面外せん断 応力度	NS	1158	4	0.98

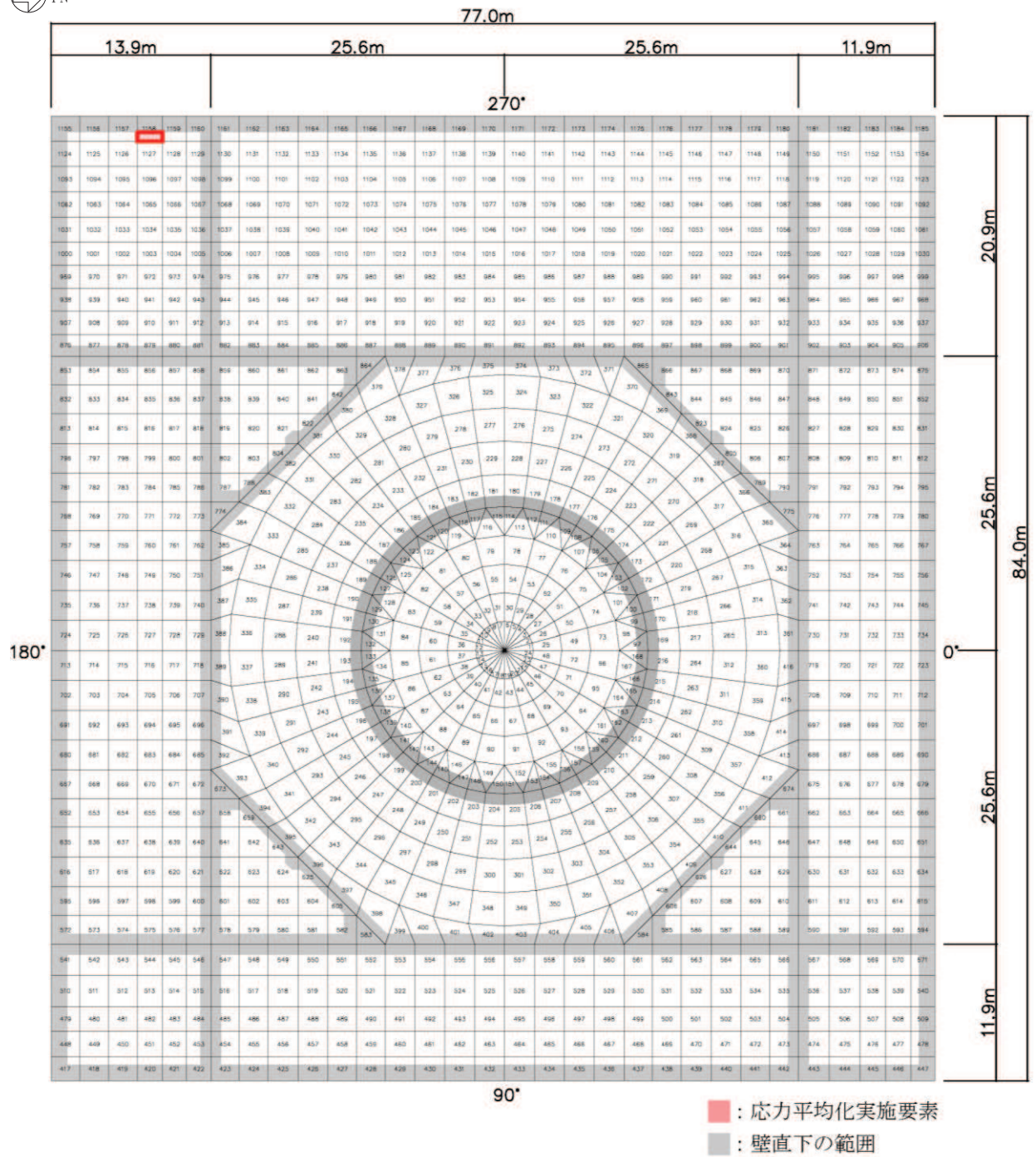


図 2-1 要素位置図

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、局部的な応力集中が発生しやすい。原子炉建屋基礎版の3次元 FEM モデルを用いた応力解析において、当該部は図 2-2 に示すようにシェル壁、耐震壁と隣接した要素であり、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、今回の原子炉建屋基礎版の応力解析においては、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、「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、基礎版全体でも鉄筋ひずみの最大値は、工認ケースで 0.488×10^{-3} 、不確かさケースの初期剛性に基づく解析モデルで 0.512×10^{-3} であり、鉄筋降伏時のひずみ 1.68×10^{-3} を下回っていること、応力平均化範囲及びその周辺領域では全面的な曲げ降伏状態には至っていないことを確認している。

「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、局部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、基礎版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、基礎版においても、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、基礎版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。原子炉建屋基礎版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版の直上の壁配置等を考慮し、当該要素の応力方向に位置する要素に対して、壁面から基礎版の部材厚である 6.0m 分の範囲で行った。また、応力平均化に用いる一連の要素が連続した壁により拘束される場合には、これらが壁直下の範囲に含まれていること、図 2-3 に示す面外せん断力のコンター図より、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を踏まえると応力方向の直交方向にも応力が再配分されると考え、応力方向の直交方向に隣接する要素を含む範囲で平均化を行った。各要素について応力平均化範囲を図 2-6 に示す。

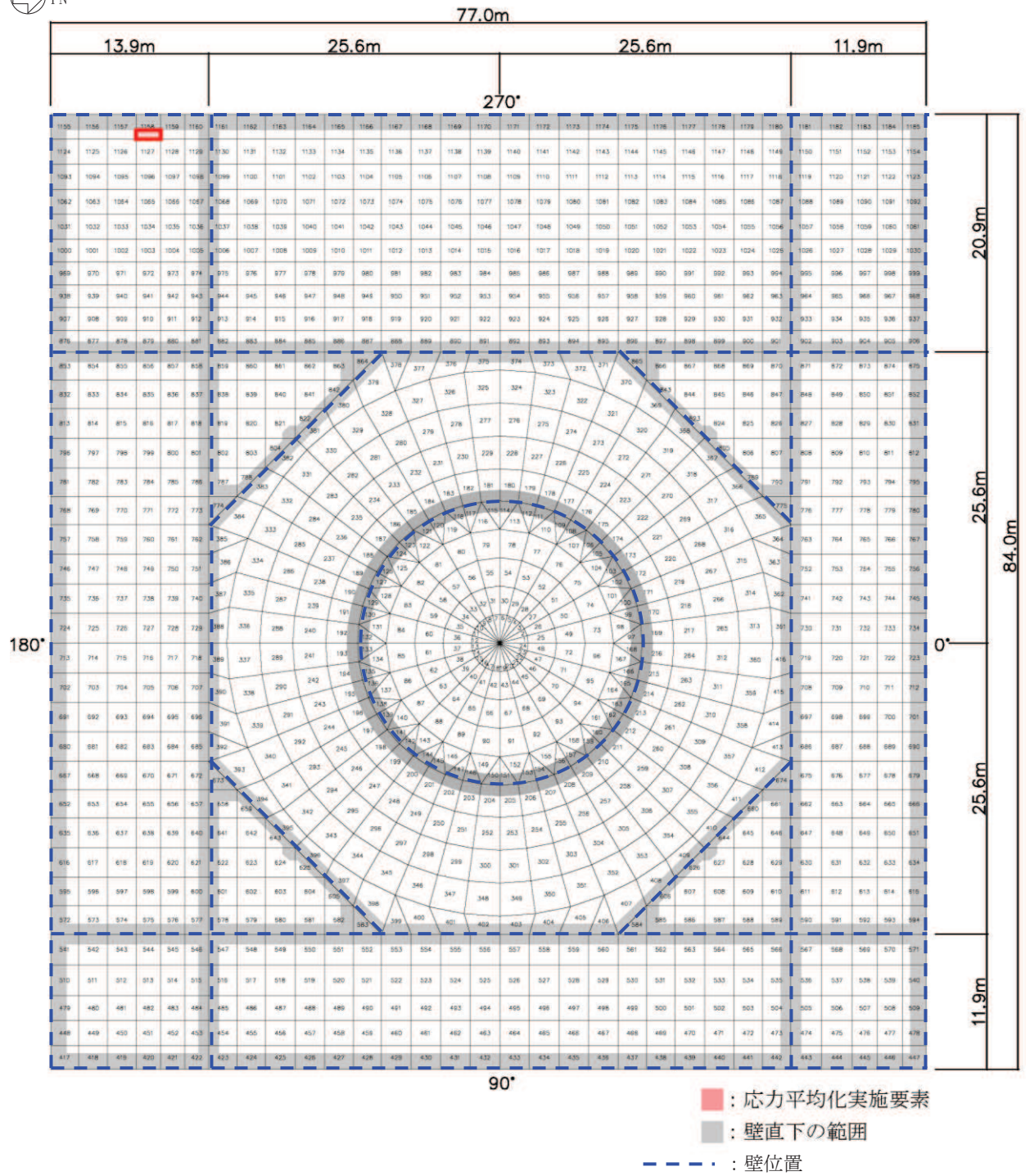
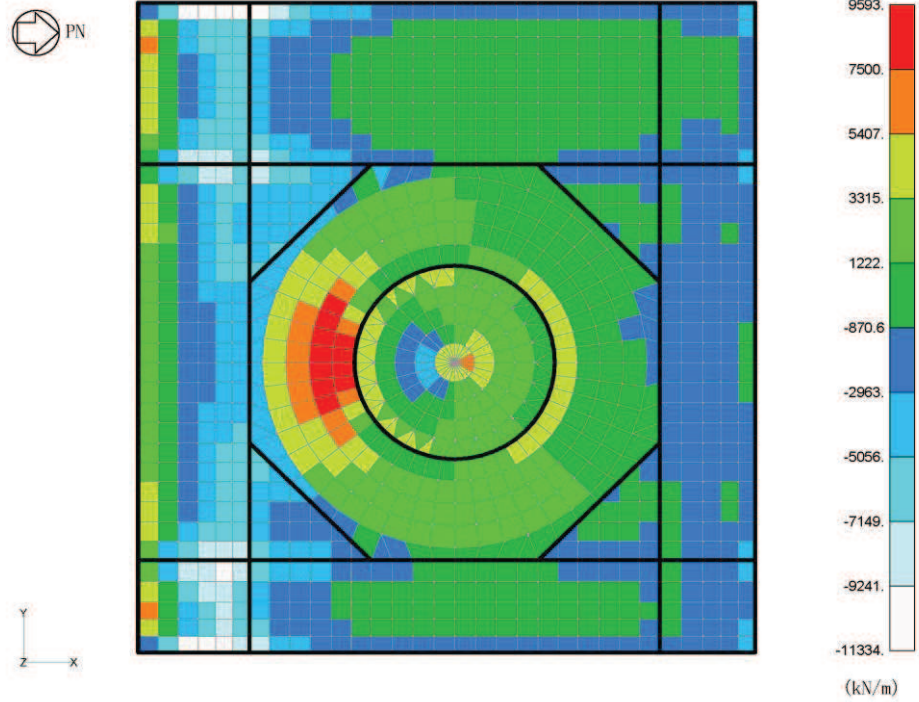


図 2-2 原子炉建屋基礎版に接続する壁の配置

c4004 Qx

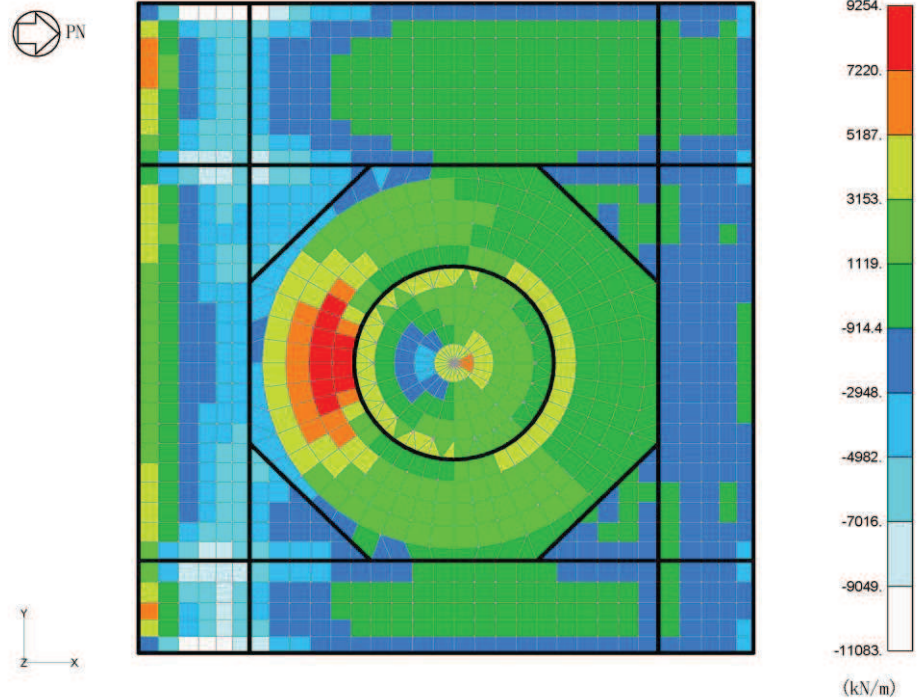


※要素25~360は円周方向を示す。
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 4 (放射方向, NS 方向)

(a) 不確かさケースの初期剛性に基づく解析モデル

c3004 Qx



※要素25~360は円周方向を示す。
※太線部は壁の位置を示す。

組合せケース 4 (放射方向, NS 方向)

(b) 基本ケースの初期剛性に基づく解析モデル

図 2-3 面外せん断力のコンター図

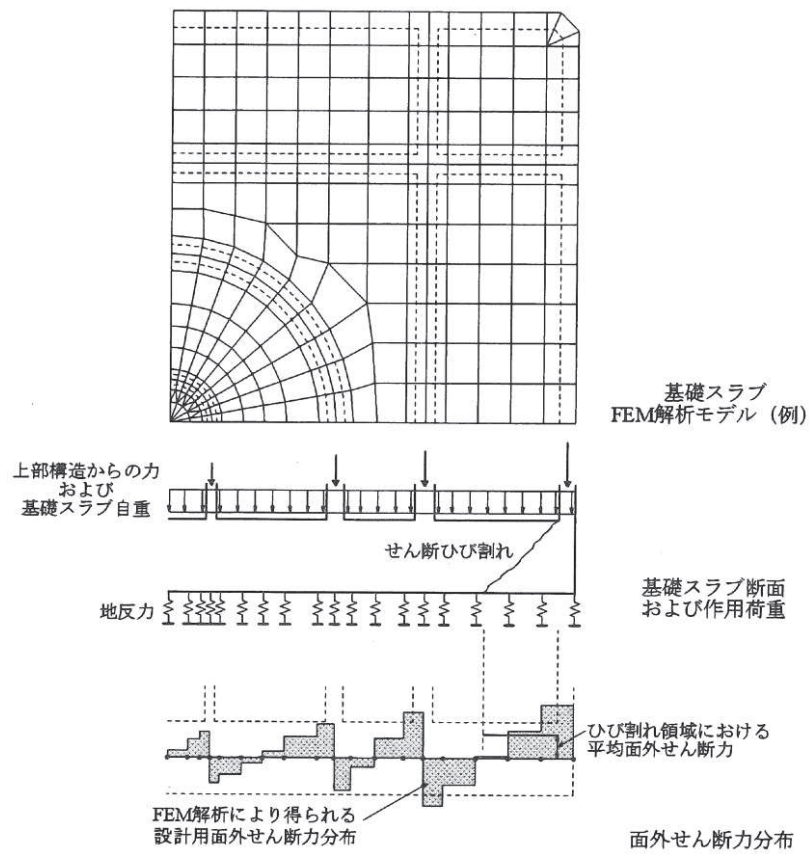


図 2-4 「RC-N規準」の付図 2.2

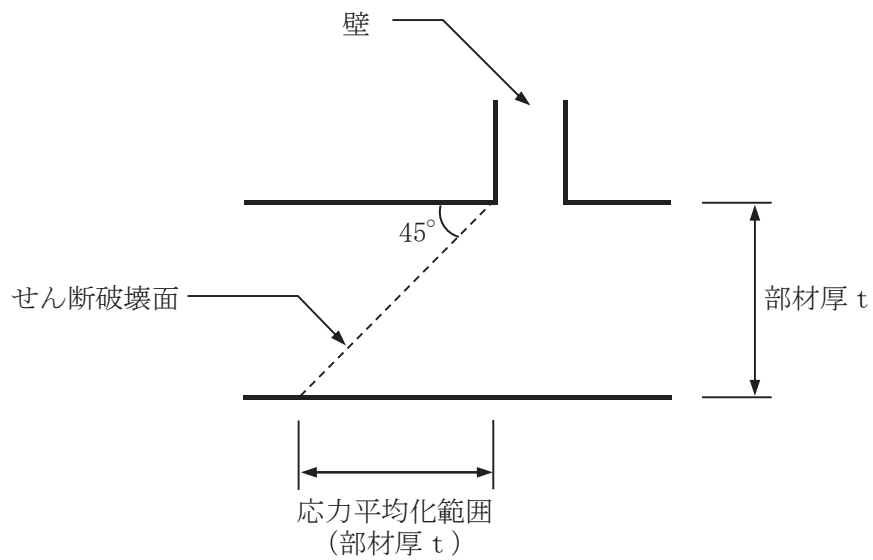
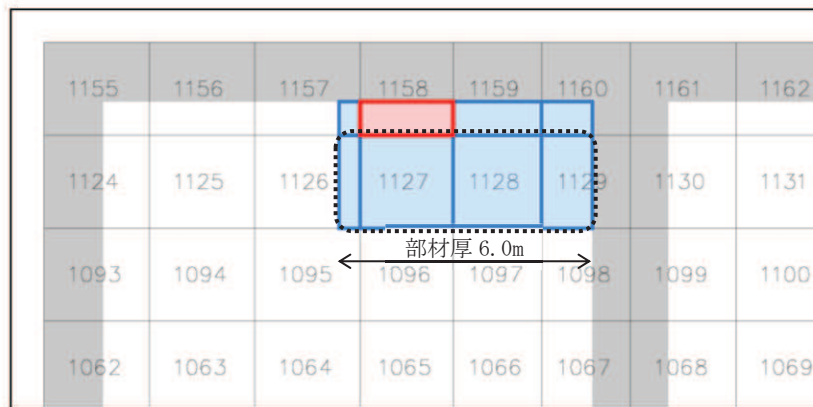
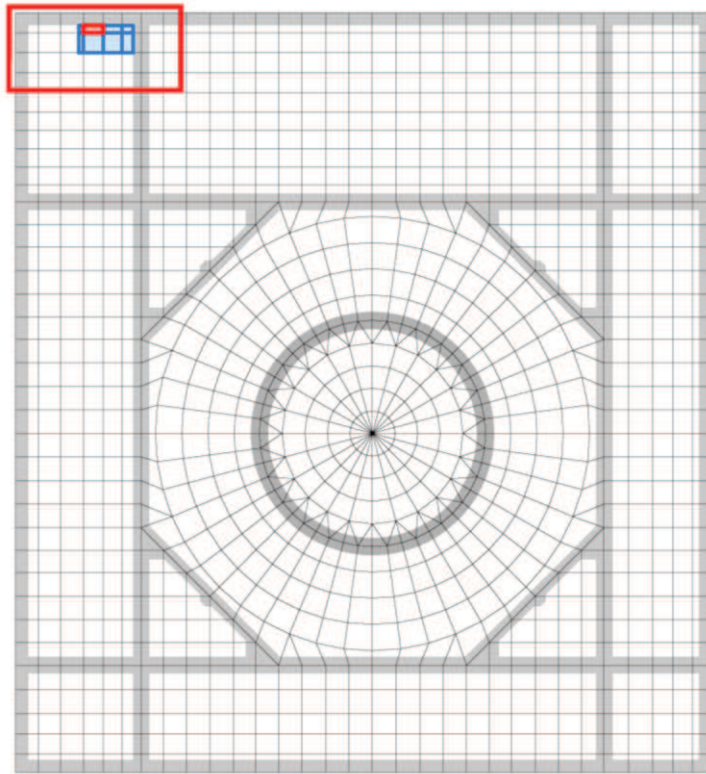


図 2-5 原子炉建屋基礎版における面外せん断力に対する応力平均化の考え方



- : 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)
- : 隣接要素への応力平均化範囲

NS 方向 要素番号 1158

図 2-6 応力平均化範囲

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及び表2-4に示す。また、応力平均化の結果を表2-3及び表2-5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
(不確かさケースの初期剛性に基づく解析モデル)

方向	応力平均化対象要素	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)
NS	1158	4	1126	0.74	1.10	0.82
			1127	1.16	4.84	5.61
			1128	1.48	4.62	6.85
			1129	1.46	2.64	3.86
			1157	2.13	0.40	0.86
			1158	2.41	1.76	4.25
			1159	2.39	1.68	4.01
			1160	2.16	0.96	2.07
合計					18.00	28.33

表 2-3 応力平均化結果
(不確かさケースの初期剛性に基づく解析モデル)

方向	要素番号	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
NS	1158	4	2.41	1.57

表 2-4 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
(基本ケースの初期剛性に基づく解析モデル)

方向	応力平均化 対象要素	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)
NS	1158	4	1126	0.72	1.10	0.79
			1127	1.12	4.84	5.41
			1128	1.43	4.62	6.62
			1129	1.40	2.64	3.69
			1157	2.04	0.40	0.82
			1158	2.36	1.76	4.16
			1159	2.32	1.68	3.90
			1160	2.08	0.96	2.00
合計					18.00	27.39

表 2-5 応力平均化結果
(基本ケースの初期剛性に基づく解析モデル)

方向	要素番号	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
NS	1158	4	2.36	1.52

2.4 断面の評価結果

2.4.1 断面の評価方法

断面の評価方法として、面外せん断力の発生値が許容値を超えないことを確認する。許容値は、「RC-N規準」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2-6に示す。表2-6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2-6 応力平均化後の評価結果

(a) 不確かさケースの初期剛性に基づく解析モデル

方向	要素番号	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	
NS	1158	4	1.57	2.42	0.66

注記*：許容せん断力の割増し係数を算定する際の曲げモーメント及びせん断力は、
応力平均化範囲の要素面積を考慮した重み付け値とする。

(b) 基本ケースの初期剛性に基づく解析モデル

方向	要素番号	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	
NS	1158	4	1.52	2.42	0.63

注記*：許容せん断力の割増し係数を算定する際の曲げモーメント及びせん断力は、
応力平均化範囲の要素面積を考慮した重み付け値とする。