

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-370-12 改7
提出年月日	平成30年7月19日

建物・構築物の耐震計算についての補足説明資料

補足-370-12 【原子炉建屋基礎盤の耐震性評価に関する補足説明】

## 目次

資料 1	耐震重要度分類について	.....
資料 2	面外せん断終局耐力への荒川 mean 式の適用性について	.....16
資料 3	格納容器底部コンクリートマットの荷重組み合わせに対する 原子炉建屋基礎盤の影響評価	

資料2 面外せん断終局耐力への荒川 mean 式の適用性について

## 1. はじめに

原子炉棟基礎の基礎スラブの耐震評価において、面外せん断の許容限界として荒川 mean 式による終局せん断強度を用いている。ここでは、基礎スラブの面外せん断耐力評価式への荒川 mean 式の適用性について示す。

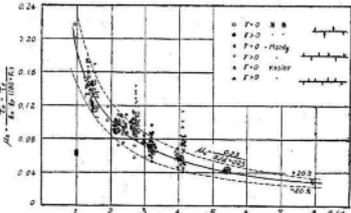
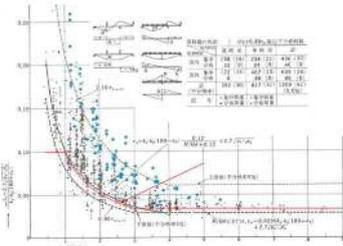
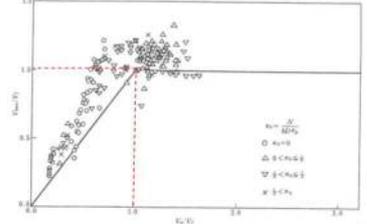
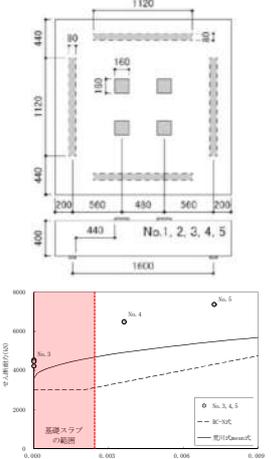
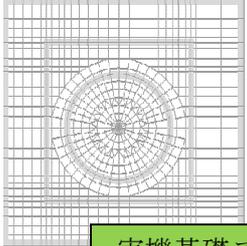
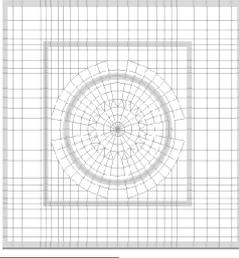
具体的には、荒川 mean 式が提案された後に多数の実験と比較した場合、平均よりも下限に近い傾向を示すこと、また、上部壁からの地震力と地盤からの反力を受ける基礎スラブと類似の応力分布を示す分布荷重を受ける単純梁に対しては下限を押さえていることから、基礎スラブの終局耐力の評価式として適用することが妥当であることを示す。(2章)

また、基礎スラブを対象とした面外せん断耐力の実験と荒川 mean 式の比較において、実機の配筋状況や応力状態を考慮し、基礎スラブの耐力は梁に対し余裕があることを定量的に示すとともに、基礎スラブに生じる軸力による耐力増加についても検討する。(3, 4章)

さらに、実験の下限値に基づく評価式を適用しても、安全余裕が保たれると考える背景として、応力解析の拘束条件による保守性及びコンクリート実強度による耐力についても述べる。(6, 7章)

本資料の構成及び耐力評価に含まれる裕度の概要を表 1-1 に示す。

表 1-1 実験と評価式の関係及び実機基礎スラブの評価に含まれる裕度

	軸力なし		軸力あり
	集中荷重	分布荷重	
梁	<p>【2章】 (a) 集中荷重梁実験 (荒川 mean 式)</p> 	<p>【2章】 (b) 分布荷重梁実験</p> 	<p>【4章】 (e) 軸力載荷梁実験 (修正荒川 mean 式)</p> 
	<p>裕度① 17% (単純平均)</p>	<p>裕度② 10%</p>	<p>実機基礎スラブの配筋・形状等を考慮 裕度②a (基本) : 0%, 裕度②b (せん断スパン比) : 13%, 裕度②=②a×②b, 変動係数 2.7%</p>
基礎スラブ	<p>【3章】 (c) 集中荷重基礎スラブ実験</p> 	<p>【4章】 (d) 実機 (分布荷重・軸力無視)</p> 	<p>【4章】 (f) 実機 (軸力考慮)</p> 
		<p>裕度③ 9%</p>	<p>実機基礎スラブの軸力を考慮</p>
			<p>荒川 mean 式が有する裕度 (②×③) 15%程度</p>

評価式に含まれる余裕以外の余裕

- ・【6章】人工岩盤を考慮することによる裕度 (応力が大きい範囲において 35%程度) 裕度④
- ・【7章】実強度による裕度 (実強度を小さく見積もった場合において 10%程度) 裕度⑤

## 2. 面外せん断耐力評価式について

面外せん断耐力の評価式について、RC-N式(短期許容せん断力)と荒川 mean 式、修正荒川 mean 式を以下に示す。なお、荒川 mean 式は「建築物の構造関係の技術基準解説書」において、梁部材の終局せん断耐力式として記載されている。

- ・ RC-N 式(短期許容せん断力)

$$Q_A = bj\alpha f_s$$
$$Q_A = bj\{\alpha f_s + 0.5 f_t (p_w - 0.002)\} \quad (p_w \leq 1.2\%)$$

$$\alpha = \frac{4}{\frac{M}{Qd} + 1} \quad \text{かつ} \quad 1 \leq \alpha \leq 2$$

- ・ 荒川 mean 式

$$Q_u = \left\{ \frac{0.068 \cdot P_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} bj \quad (1 \leq M/Qd \leq 3)$$

- ・ 修正荒川 mean 式

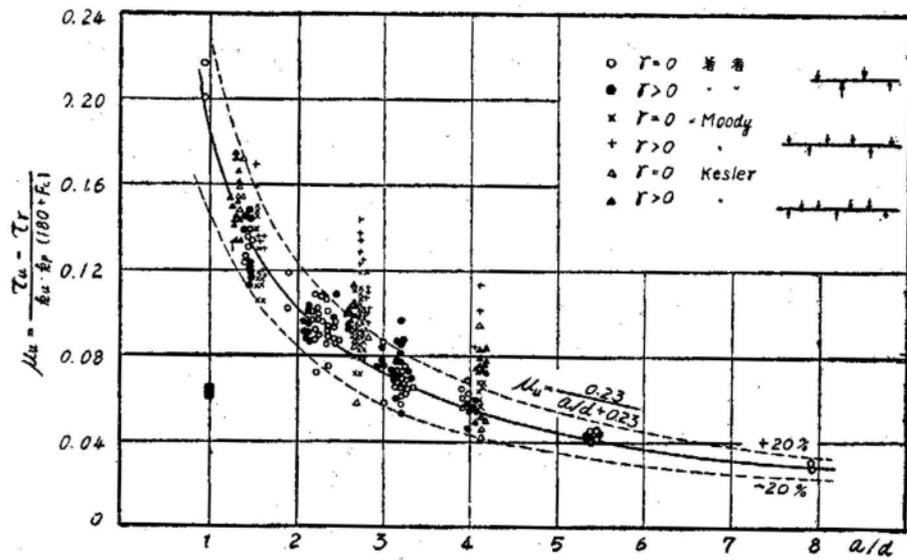
$$Q_u = \left\{ \frac{0.068 \cdot P_t^{0.23} (F_c + 18)}{M/(Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy}} \right\} bj + 0.1\sigma_0 bj \quad (1 \leq M/Qd \leq 3 \quad \sigma_0 = N/bD \leq 0.4F_c)$$

荒川 mean 式は、1960年に鉄筋コンクリート梁に集中荷重を載荷した際のせん断抵抗に関する実験(試験体数：約290体)より得られた終局せん断強度の実験式である。ここで、荒川自身の実験では、鉄筋は丸鋼を用いている。その後、1969年までに実施された国内外の約1200体の実験結果との比較が実施されている。実験結果と荒川 mean 式の比較を

図2-1に示す。

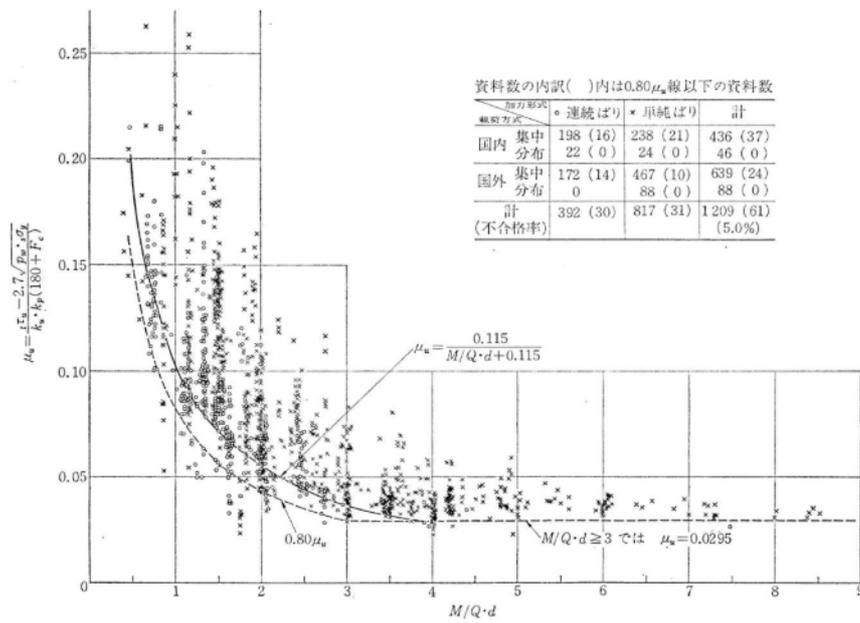
図2-1(1)に示すように、当初は実験結果の平均値を示していたが、追加された各種荷条件による実験結果(例えば文献1)は荒川 mean 式より耐力が高くなる傾向になっている。

図2-1(2)を元に作成された「日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010の解説図15.2」に荒川 mean 式を赤線で、単純梁の分布荷重載荷時の実験結果上に青丸を、連続梁の分布荷重載荷時の実験結果上に緑丸を追記した比較を図2-2に示す。図2-2に示すように、分布荷重が作用する単純梁に対して、荒川 mean 式は下限を押さえ、分布荷重が作用する連続梁に対しては、概ね分布荷重の実験結果の下限を押さえている。一部の試験体(5体)で荒川 mean 式を下回る結果となっているが、これらは梁スパン中央を中心としたスパン長の1/2の領域のみに分布荷重を載荷した実験結果(図中黄色丸、M/Qdは約1.1及び約2.1)であり、実際には集中荷重と分布荷重の中間にあたる。実機の基礎スラブは下方から土圧による分布荷重を受けるものであるため、スパン長全域に分布荷重を受ける実験に相当し、荒川 mean 式を基礎スラブに適用する場合に対して同様の保守性を有すると考えられる。



(1) 約 290 体の実験結果との比較

「荒川 卓，鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗に関する研究（実験結果の総括），日本建築学会論文報告集 第66号，昭和35年10月，pp437-440」より抜粋



(2) 約 1200 体の実験結果との比較

「荒川 卓，鉄筋コンクリートはりの許容せん断応力度とせん断補強について—実験結果による再検討—，コンクリート・ジャーナル Vol.8 No.7, July 1970, pp11-20」より抜粋

図2-1 実験結果と荒川 mean 式の比較

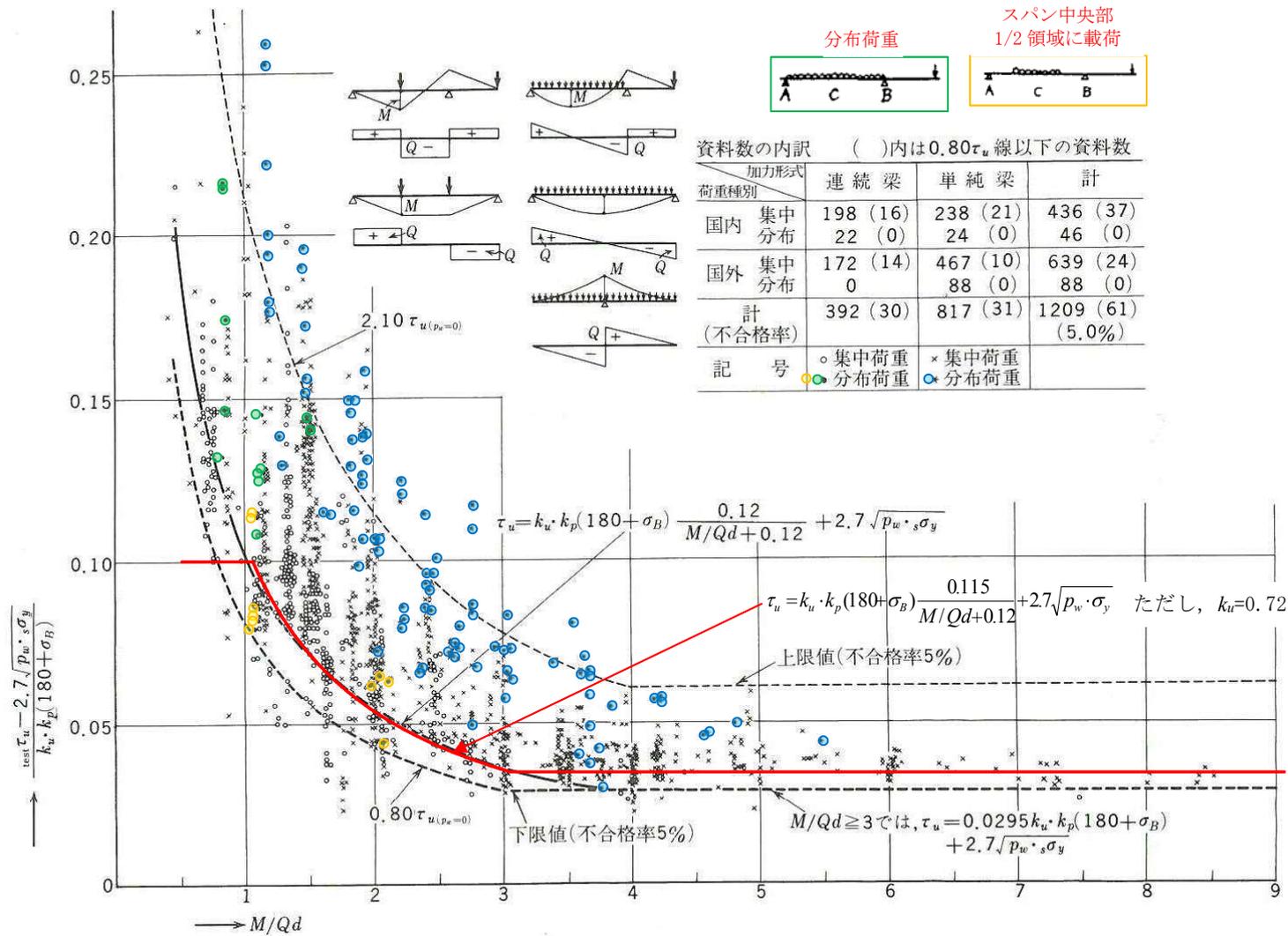
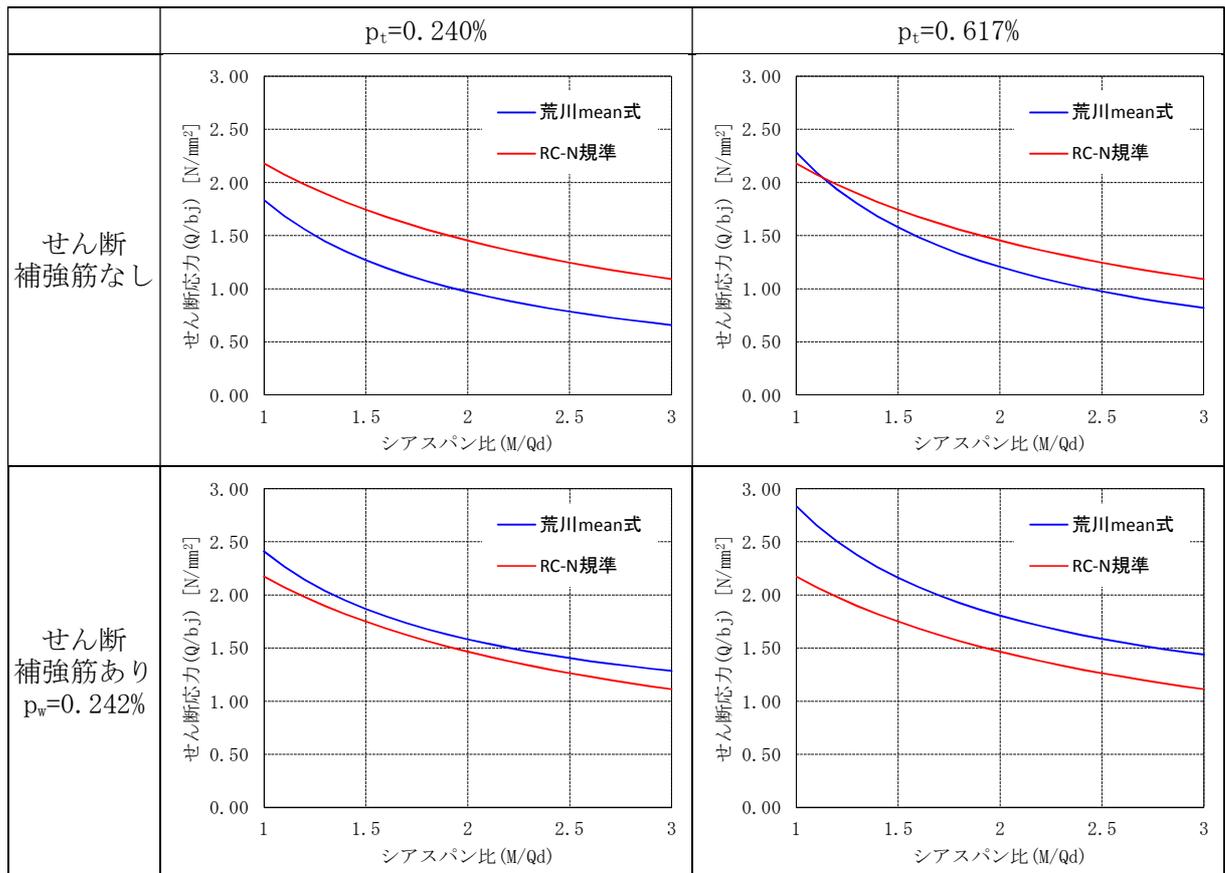


図 2-2 普通コンクリート梁のせん断破壊時における実験値と計算値の比較  
 (赤線は修正荒川 mean 式を, 青丸は単純梁, 緑丸は連続梁の分布荷重載荷を示す)  
 (日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010 の解説図 15.2 に一部加筆)

RC-N式及び荒川mean式によるせん断耐力の比較を表2-1に示す。ここで、基礎スラブ主筋の鉄筋比は0.240%~0.617%、せん断補強筋比は0.242%であるため、鉄筋比0.240%と0.617%、せん断補強筋比は0.242%として耐力を比較している。

表2-1に示すようにせん断補強筋が無い場合はRC-N式(短期許容せん断力)が荒川mean式に比べ耐力が高くなる。一方、せん断補強筋が有る場合については、荒川mean式はRC-N式(短期許容せん断力)の耐力を最大で約2割程度、高く評価することになる。

表2-1 各耐力式によるせん断耐力の比較



### 3. 面外せん断耐力評価式と実験値の比較

#### (1) 実験結果の概要

文献 2 に示されているスラブの面外せん断加力実験の実験結果と荒川 mean 式の比較を表 3-1 及び図 3-1 に示す。文献 2 に用いた試験体は厚さ 400mm, 長さ 2000mm×2000mm, 支持スパン 1600mm とした 8 種類(計 20 体)の正方形スラブである。試験パラメータは主筋比, せん断補強筋比, せん断スパン比で, 主筋比及びせん断補強筋比は試験体の配筋を変更し, せん断スパン比は載荷位置を変更している。なお, No. 1~No. 3, No. 6~No. 8 の試験体については, 各パラメータに対し 3 体実施し, 各パラメータに対して求めた強度の変動係数の平均は 2.7%であり, 強度のばらつきは小さい。試験体の加圧板・支持板の位置を図 3-2 に示す。加力板上のジャッキは同じ荷重となるように制御している。加力は片振幅の漸増繰返し載荷を行った後に単調載荷により破壊に至らせている。目標繰返し荷重は 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000 kN としているが, 繰返し載荷は試験体にせん断ひび割れが発生しない荷重レベルまでとしている。

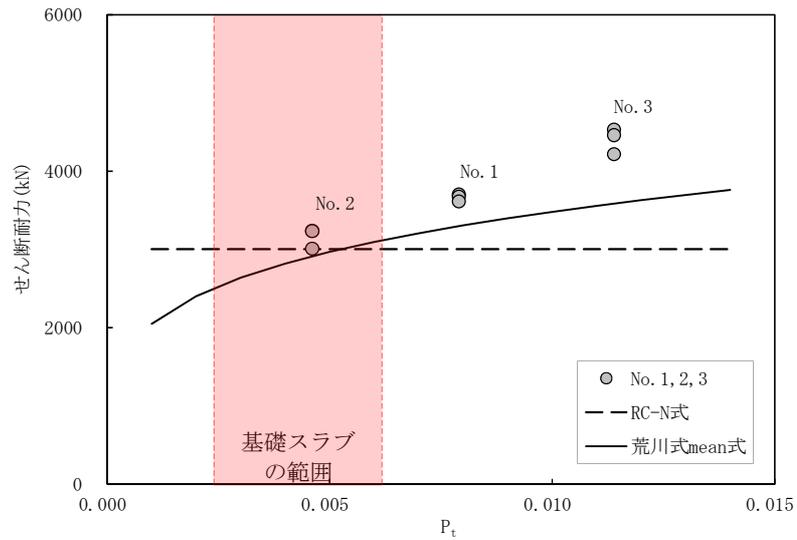
また, 図 3-2 に示すように, 加圧板と支持板の中間位置における周長を幅  $b$  として荒川 mean 式によるせん断耐力を算定している。

表 3-1 及び図 3-1 に示すように, 荒川 mean 式によるせん断耐力は実験値の 1.00~1.35 倍, 平均で 1.17 倍 [裕度①] となっており, 梁のせん断耐力式である荒川 mean 式を基礎スラブの設計に準用した場合, 面外せん断耐力のほぼ下限を評価できている。なお, 荒川 mean 式によるせん断耐力と実験値の比率は, せん断スパン比が 1.89 と大きく, 耐力比の低い No. 7 試験体も含まれており, 実機における基礎盤の条件を考慮すると耐力比は保守的な算定になっている。実機の条件における裕度については「(2) 実験と実機の比較」で後述する。

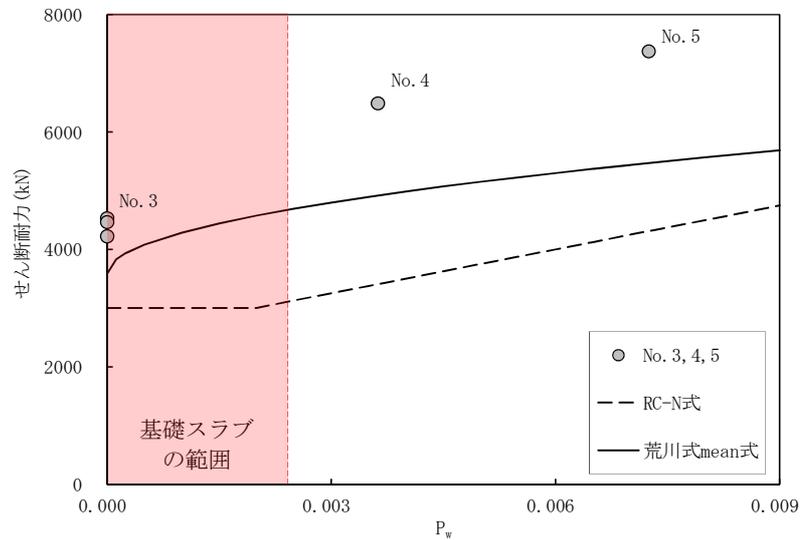
文献 2 : 熊谷仁志, 貫井泰, 今村晃, 寺山武志, 小島功 : RC 基礎スラブの面外せん断耐力に関する実験的研究, 終局強度に関する研究, 構造工学科論文集 Vol. 55B, pp. 323-330, 2009. 4

表 3-1 実験結果と荒川 mean 式の比較

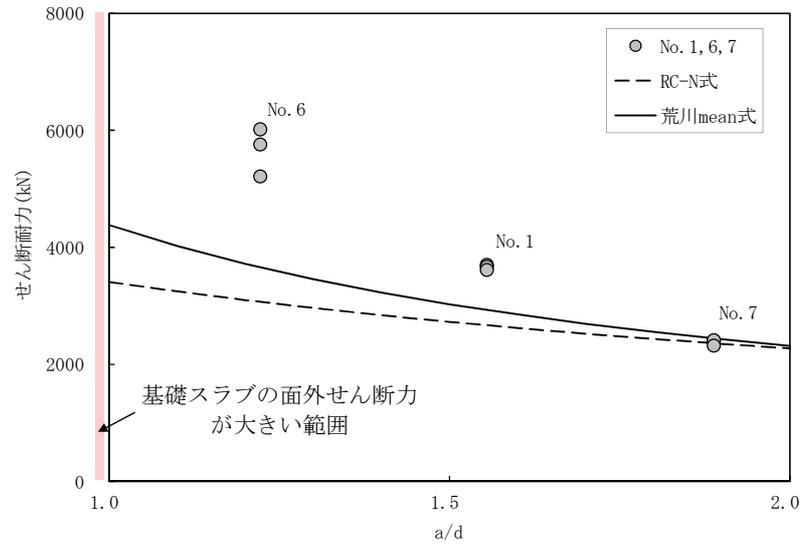
試験体 No.	主筋比 $P_t$ (%)	せん断補 強筋比 $P_w$ (%)	せん断 スパン比 $a/d$	最大荷重 $Q$ (kN)	最大荷重 の変動係数 (%)	荒川 mean 式 $Q_u$ (kN)	耐力比 $Q/Q_u$	耐力比 (平均) $Q/Q_u$	耐力比 ( $-1\sigma$ )	
1-1	0.79	0	1.56	3706	1.04	3275	1.13	1.12	1.11	1.11
1-2				3673			1.12			1.11
1-3				3614			1.10			1.11
2-1	0.46	0	1.56	3010	3.36	2995	<u>1.00</u>	1.05	1.01	1.01
2-2				3237			1.08			1.01
2-3				3234			1.08			1.01
3-1	1.14	0	1.56	4533	3.03	3575	1.27	1.23	1.19	1.19
3-2				4462			1.25			1.19
3-3				4221			1.18			1.19
4	1.14	0.36	1.56	6485	—	4918	1.32	—	1.32	1.32
5	1.14	0.73	1.56	7372	—	5470	1.35	—	1.35	1.35
6-1	0.79	0	1.22	6018	5.92	4474	1.35	1.27	1.19	1.19
6-2				5759			1.29			1.19
6-3				5214			<u>1.17</u>			1.19
7-1	0.79	0	1.89	2407	1.76	2328	1.03	1.02	1.00	1.00
7-2				2414			1.04			1.00
7-3				2322			1.00			1.00
8-1	0.79	0	1.56	3902	1.10	3290	1.19	1.18	1.17	1.17
8-2				3915			1.19			1.17
8-3				3819			<u>1.16</u>			1.17
				平均	2.70	平均	1.17		平均	1.13



(1) 主筋の影響



(2) せん断補強筋比の影響



(3) せん断スパン比の影響

図 3-1 各種せん断強度算定式と実験値の比較

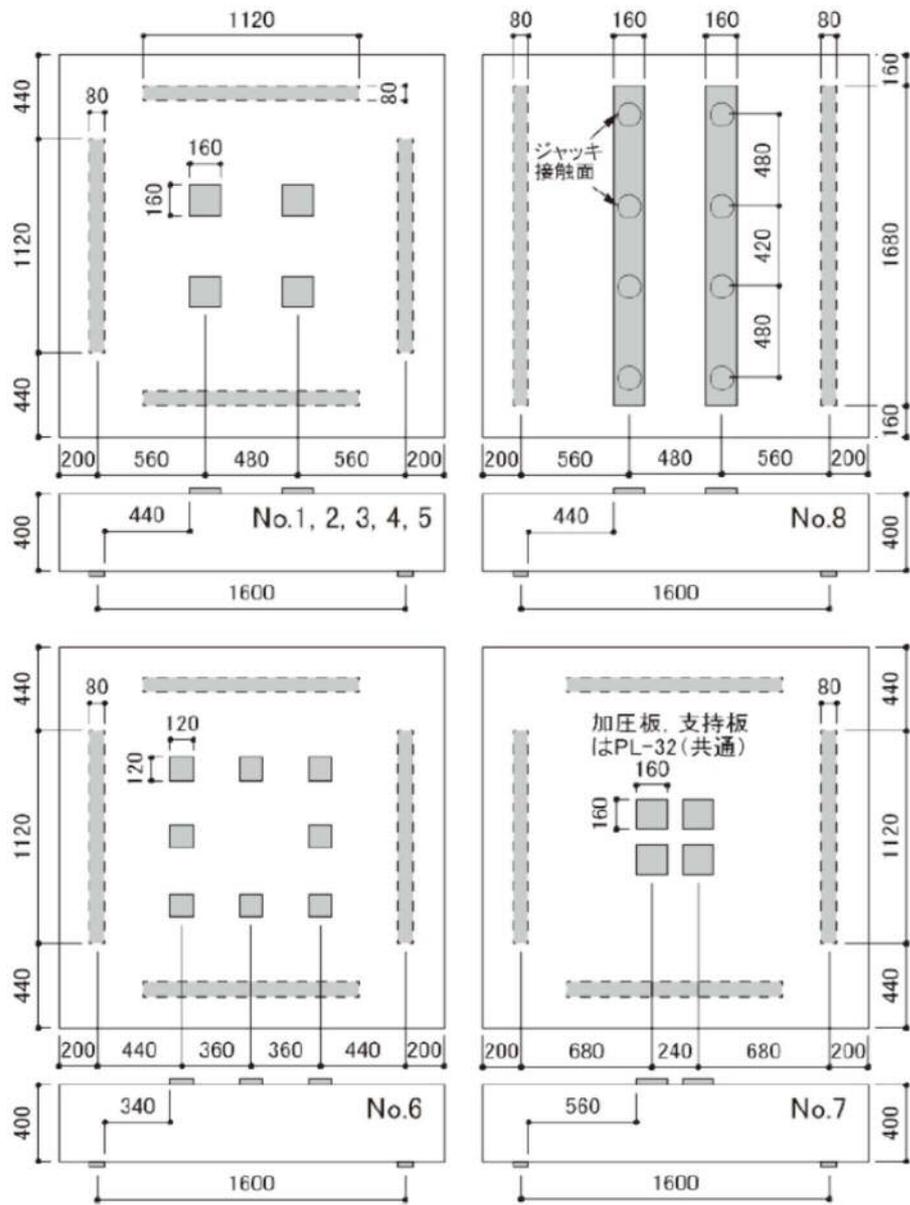


図 3-2 試験体の加圧板・支持板の位置(文献 2 より転載)

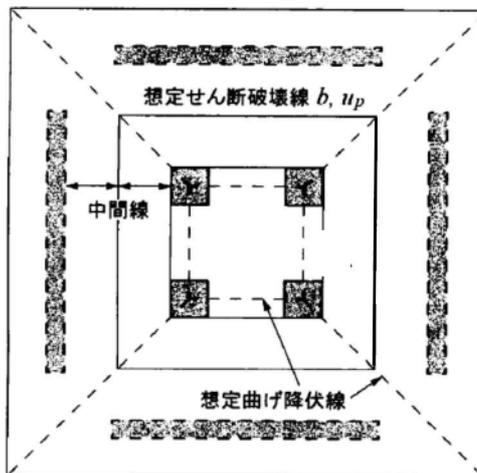


図 3-2 荒川 mean 式による耐力評価に用いる幅(文献 2 より転載・加筆)

## (2) 実験と実機の比較

実験と実機で各種パラメータを比較するとともに実機に荒川 mean 式を適用した場合の傾向について分析する。

主筋比を比較すると、実機の内部ボックス壁の内側の鉄筋比は 0.36%~0.62%、外側の鉄筋比は 0.24%~0.38%であり、試験体 No. 2 の主筋比 (0.46%) に近い。No. 2 の試験体は荒川 mean 式による耐力に比べ約 1.05 倍の耐力となっているが、主筋比が小さくなると実験結果の荒川 mean 式に対する裕度が小さくなることから、主筋比による裕度は 1.00 倍〔裕度②a〕とする。

原子炉棟基礎周辺で面外せん断力が大きくなる領域は、内部ボックス壁とシェル壁の間のスパンの最も短くなる領域及び内部ボックス壁外側の南西、北東角部である。これらの領域のせん断スパン比は 0.6~1.0 程度であり、荒川 mean 式におけるせん断スパン比の頭打ち 1.0 より小さくなる。このため、荒川 mean 式による耐力は保守的であると考えられる。なお、実験ではせん断スパン比が 1.56 の試験体 No. 1 と、せん断スパン比が最も小さい 1.22 の試験体 No. 6 の耐力比は約 1.13 倍(1.27/1.12)〔裕度②b〕となっている。

以上より、実験結果から実機のパラメータを考慮すると、荒川 mean 式の耐力に比べ約 1.13 倍 = (1.00×1.13) の耐力を有していると評価できる。また、実験のばらつき(変動係数 2.7%)を考慮しても 1.10 倍〔裕度②〕 (=1.13×97.3%) の耐力が見込める。

また、上記の裕度の考慮について、さらに保守的な評価として各ケースの実験結果の耐力比の下限值に基づき検討を行う。基礎盤の評価条件と同等となるパラメータについて下限値を適用することとし No. 2 は 1.00、No. 6 は 1.17 とする。これらと対比を確認する No. 1 については耐力比の平均値の 1.12 とする。上記と同様に算定すると、主筋比の影響が 1.00、せん断スパン比の効果が 1.17/1.12=1.04 となり合わせて 4%程度の裕度がある。

#### 4. 基礎スラブに発生する軸力の影響

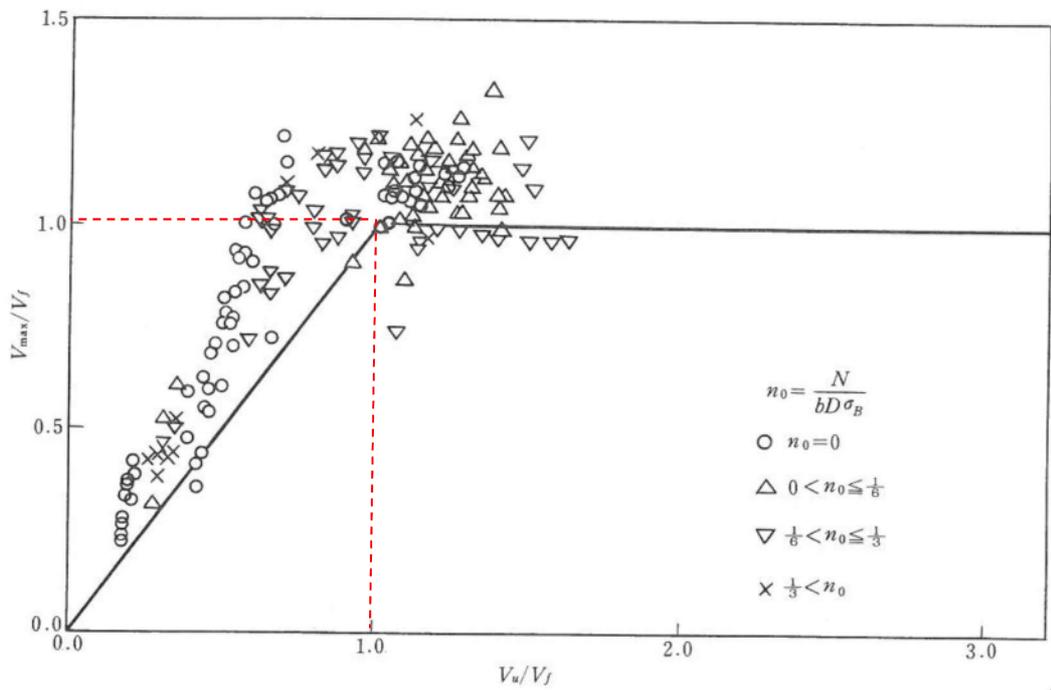
##### (1) 修正荒川 mean 式について

基礎スラブには水平地震力や土圧による軸力が作用するため、接地領域では圧縮軸力が作用することになる。

文献 3 に示されている軸力の影響を考慮した修正荒川 mean 式と実験値の比較を図 4-1、図 4-2 に示す。図 4-1 の縦軸は  $V_{\max}/V_f$  であり、横軸は  $V_u/V_f$  である。ここで、 $V_{\max}$  は実験最大せん断強度、 $V_f$  は危険断面が解析上の曲げ強度に達した時のせん断力、 $V_u$  は修正荒川 mean 式によるせん断強度である。すなわち、図 4-1 の横軸及び縦軸が 1.0 以下となる領域が、せん断破壊が先行する試験体を示しており、実線の上側のプロットが修正荒川式によるせん断耐力を上回る試験体を示している。また、図 4-2 の横軸は  $V_{\max}/V_u$  であり、縦軸が、修正荒川式によるせん断耐力を上回る試験体数を示している。なお、図 4-1、図 4-2 に示す検討に用いた試験体は、引張鉄筋比 0.39～3.21%、せん断補強筋比 0%～2.44%、軸力比 0～0.732 で、せん断破壊した試験体のせん断補強筋比は 0.12～1.13% である。

図 4-1 より修正荒川 mean 式は実験による破壊モードを精度良く推定できること、図 4-2 よりせん断破壊する試験体のせん断強度は、修正荒川 mean 式による耐力より平均で 1.44 倍程度大きくなることが示されている。

文献 3：日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型 耐震設計指針・同解説



解図6.8 (解6.10) 式によるせん断強度算定値と実験値の比較

図 4-1 修正荒川 mean 式によるせん断強度算定値と実験値の比較

(縦軸, 横軸共に 1.0 以下がせん断破壊が先行する領域)

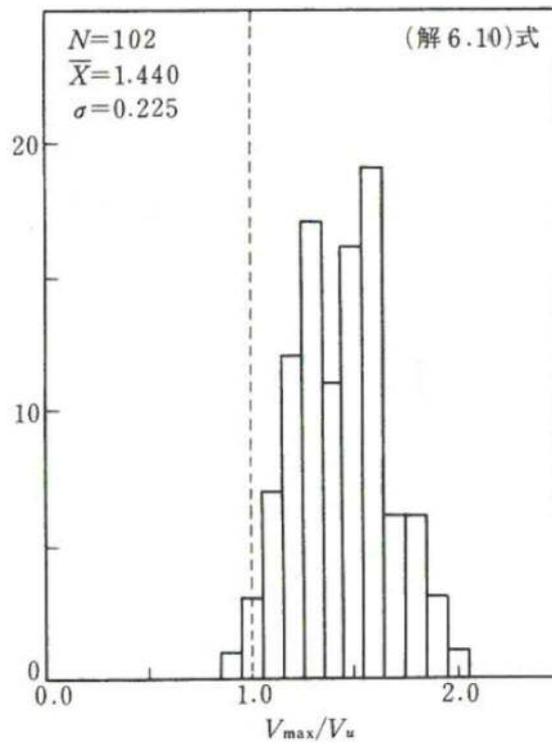


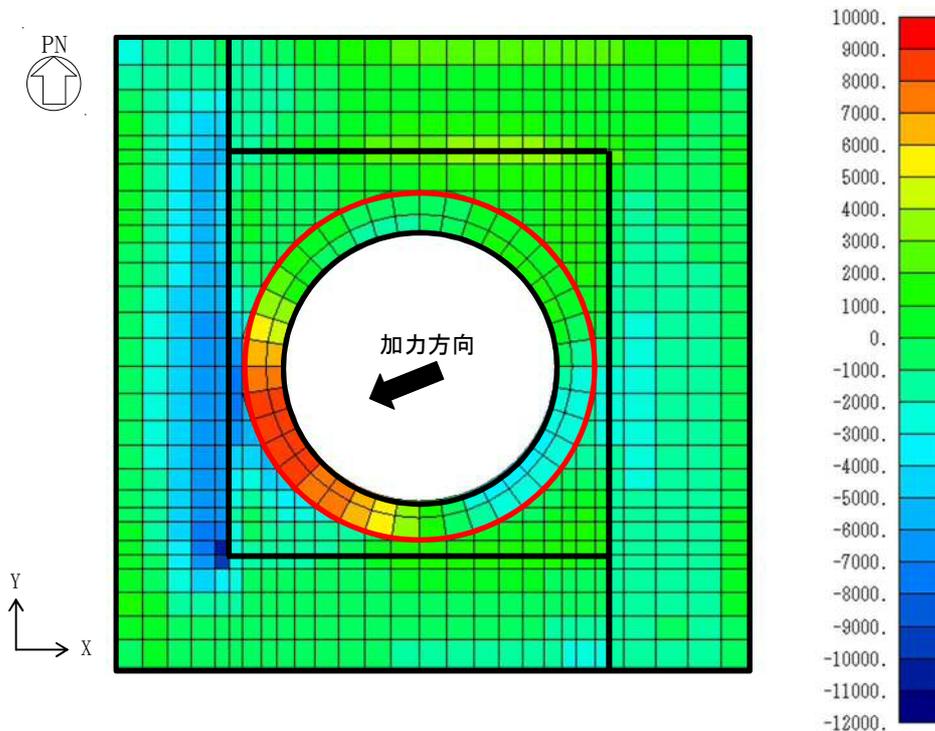
図 4-2  $V_{max}/V_u$  比の度数分布

(2) 軸力を考慮した場合の実機の裕度

ここでは、基礎スラブに生じる軸力を考慮し、修正荒川 mean 式を適用した検討を行い、基礎スラブに生じる軸力の影響について検討する。

図 4-3 に基礎スラブの応力解析結果のうち、基礎スラブの面外せん断に対する検定比が最も厳しくなる荷重組合せケース (0.4N→S+1.0E→W+0.4D→U, Ss-31) における X 方向または半径方向の面外せん断力、軸力及び曲げモーメントの分布を、図 4-4 に荒川 mean 式による検定比を、図 4-5 に荒川 mean 式に対する修正荒川 mean 式の面外せん断耐力の比率を示す。また、表 4-1 に、せん断補強筋があり荒川 mean 式による検定比が 0.9 以上の要素における面外せん断力と各式による検定比を示す。

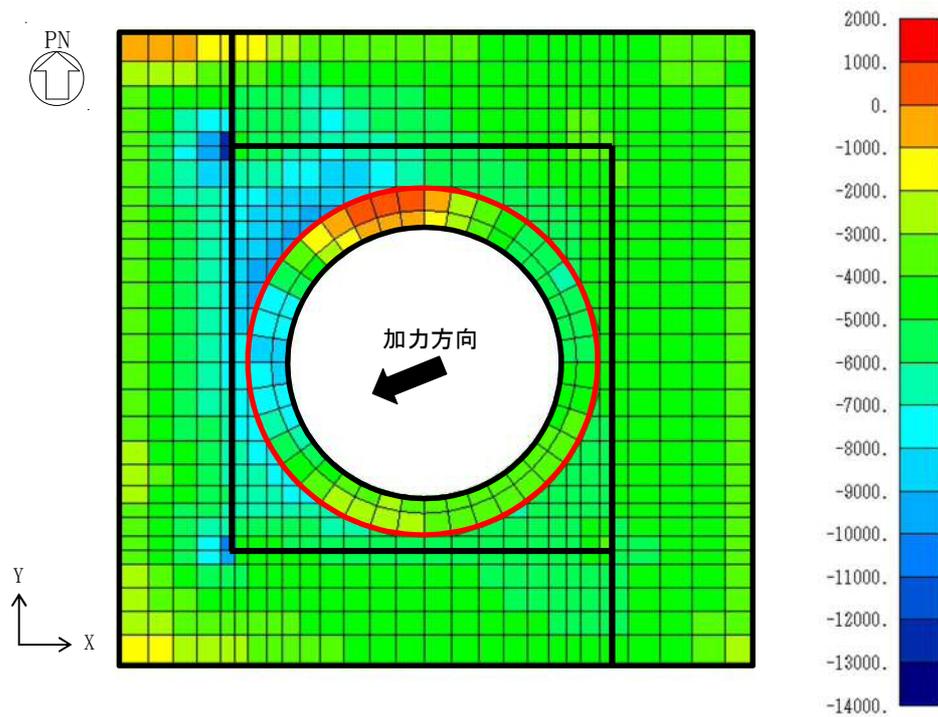
図 4-3 より、面外せん断力が大きな部分には圧縮軸力が作用していることがわかる。また、図 4-4 及び図 4-5 より、修正荒川 mean 式の耐力は荒川 mean 式の耐力に比べ最大で 30%程度、表 4-1 より、検定値が 0.9 以上の要素でかつせん断補強筋の有る要素においては平均で約 9% [裕度③] 程度大きくなる結果となっている。



注) 赤枠内は半径方向、それ以外は X 方向の面外せん断力を示す。  
黒太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

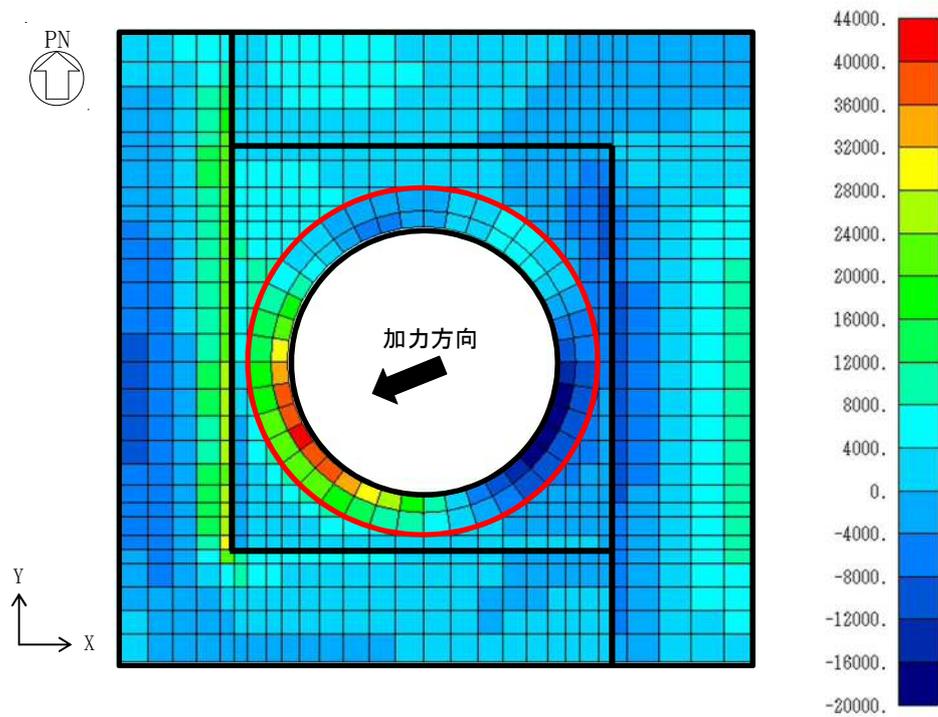
(1) 面外せん断力 (単位: kN/m)

図 4-3(1/2) 基礎スラブの発生応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の軸力を示す。  
 黒太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

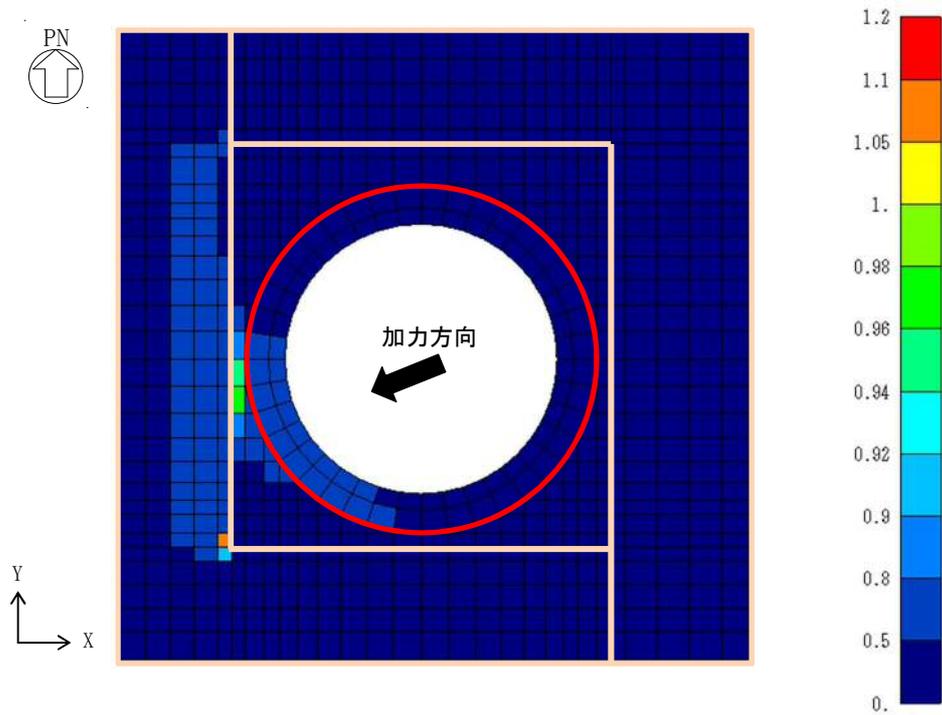
(2) 軸力 (単位: kN/m)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の曲げモーメントを示す。  
 黒太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

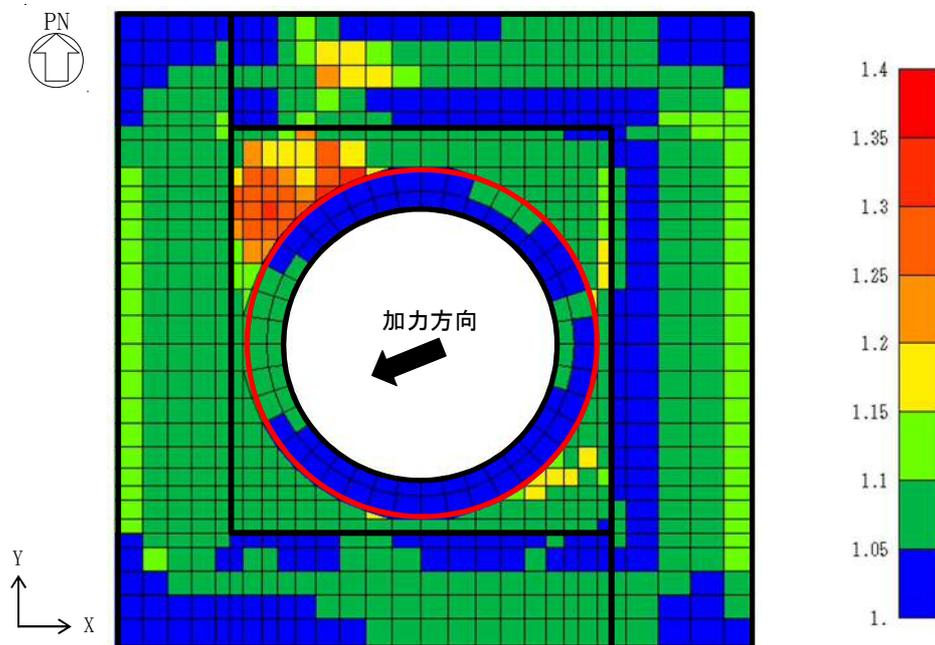
(3) 曲げモーメント (単位: kN·m/m)

図 4-3(2/2) 基礎スラブの発生応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の検定比を示す。  
太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

図 4-4 荒川 mean 式による検定比 (0.4N→S+1.0E→W+0.4D→U, Ss-31)



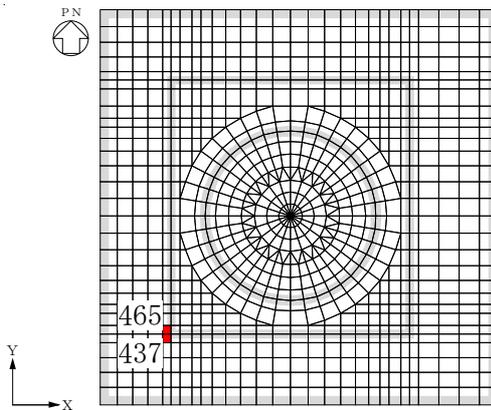
注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の比率を示す。  
黒太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

最大値 : 1.31

図 4-5 修正荒川 mean 式 / 荒川 mean 式 (0.4N→S+1.0E→W+0.4D→U, Ss-31)

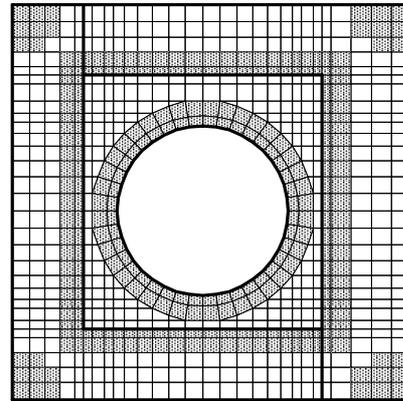
表 4-1 荒川 mean 式による面外せん断検定比が 0.9 以上かつ  
せん断補強筋のある要素の検定比

要素 番号	荒川 mean 式 による検定比	面外せん断力 (kN/m)	修正荒川式/荒川式
437	0.916	9255	1.087
465	1.073	10842	1.096
平均値			1.092



注 1 網掛けは耐震壁を示す

(1) 要素番号

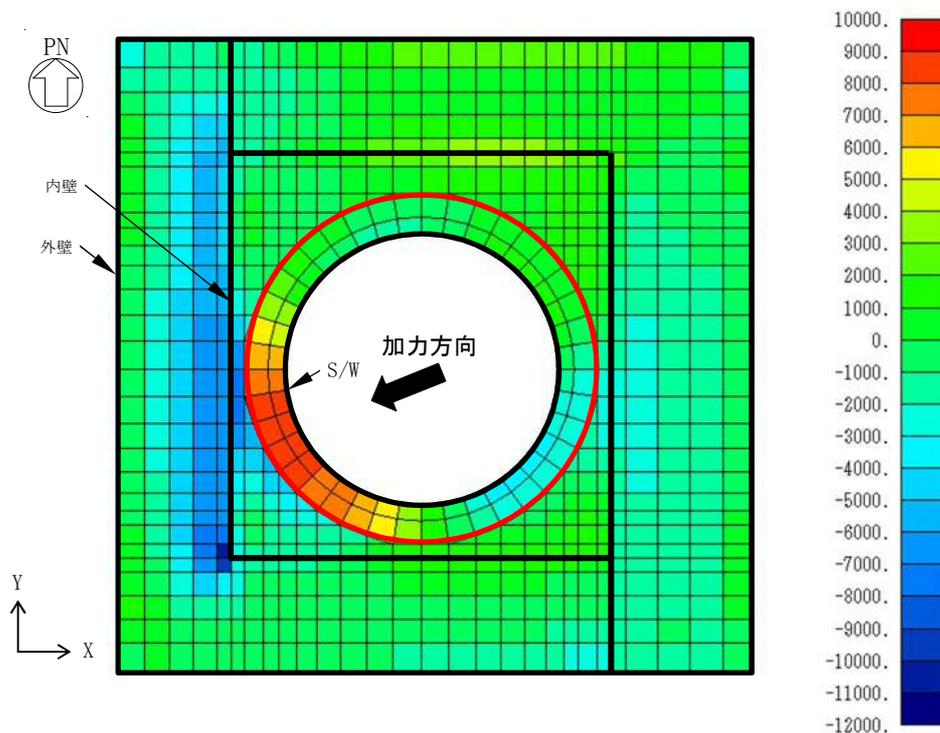


注 2 太線は基礎スラブに取り付く壁,  
網掛けはせん断補強筋のある要素を示す。

(2) せん断補強筋

5. 基礎スラブの面外せん断に対する破壊モードについて

原子炉建屋原子炉棟の脚部周辺の基礎スラブの面外せん断力の分布を図5-1に示す。図5-1に示すように、加振方向に発生する面外せん断力は、主に加振方向と直交する壁の脚部に生じ、加振方向に平行に配置された壁の脚部では生じない結果となっている。したがって、**基礎スラブ**の面外せん断に対する破壊モードは、**壁脚部周辺かつ壁に平行方向にひび割れが発生すること**から、原子炉建屋原子炉棟の直接設備としての機能（気密・遮蔽）に影響することはなく、基礎スラブの支持機能を維持することによって、原子炉建屋原子炉棟の機能も維持できる。



注) 赤枠内は半径方向、それ以外はX方向の面外せん断力を示す。  
黒太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

図5-1 基礎スラブの発生応力 (X方向もしくは半径方向の面外せん断力)

(0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)

## 6. 人工岩盤を考慮した場合の応力解析結果について

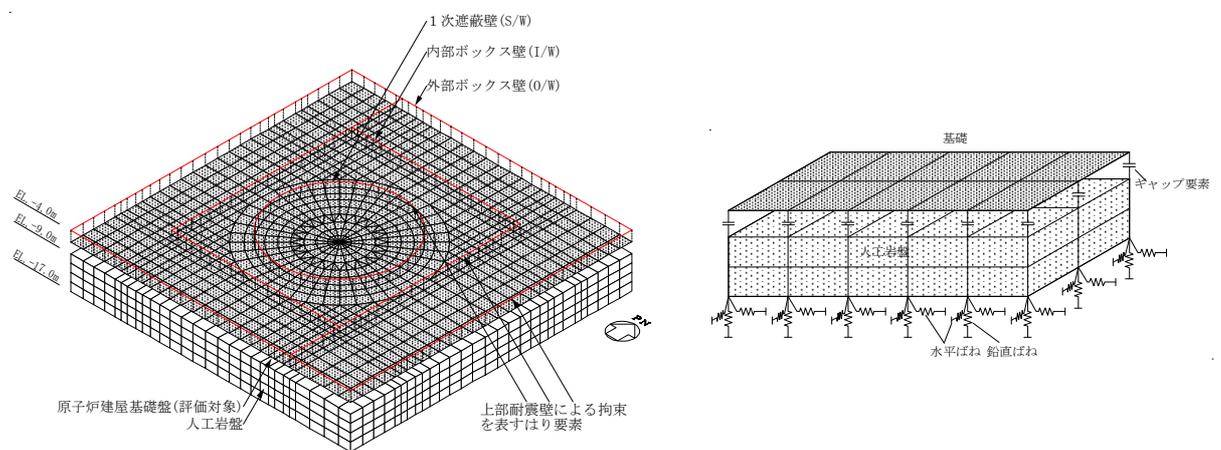
東海第二発電所原子炉建屋は人工岩盤上に設置されている。原子炉棟基礎の基礎スラブの耐震評価では、人工岩盤を考慮せず応力解析を実施している。ここでは、人工岩盤部をソリッド要素でモデル化した場合の応力状態を示すとともに、荒川 mean 式による面外せん断力の検定比を示す。

### (1) 応力解析モデル

人工岩盤を考慮した応力解析モデルを図 6-1 に示す。人工岩盤はソリッド要素でモデル化し、基礎スラブをモデル化したシェル要素の節点とソリッド要素上端の節点間は引張力が作用した際には軸剛性及びせん断剛性共にゼロになるギャップ要素をモデル化している。なお、ギャップ要素が閉じた際の鉛直方向及び水平方向のばね定数は基礎スラブの 1/2 の版厚と等価なばね定数を与えている。

人工岩盤下端には、支持岩盤をモデル化したばね要素をモデル化している。なお、ばね要素は人工岩盤を考慮しない応力解析モデルの地盤ばねと同じ物性を用いており、振動アドミタンスより求めた水平及び回転ばねを離散化して求めている。

人工岩盤のせん断弾性係数は  $7.83 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$  であり、人工岩盤直下の支持地盤である Km 層のせん断弾性係数  $2.84 \times 10^2 \text{ N/mm}^2$  ( $\rho = 1.72 \text{ t/m}^3$ , 等価  $V_s = 406 \text{ m/s}$ ) に対し剛性が約 30 倍となっている。



(1) 解析モデル

(2) 境界条件

図 6-1 人工岩盤を考慮した応力解析モデル

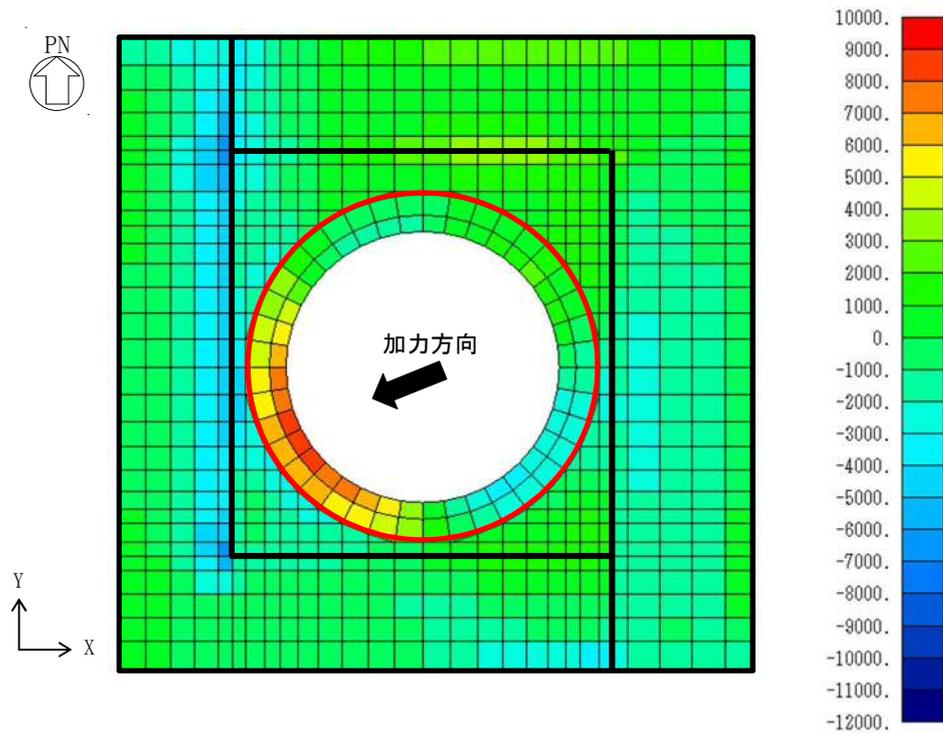
## (2) 応力解析結果

図 6-2 に荷重組合せケース (0.4N→S+1.0E→W+0.4D→U, Ss-31) における X 方向または半径方向の面外せん断力、軸力及び曲げモーメントの分布を、図 6-3 に荒川 mean 式に対する修正荒川 mean 式の面外せん断耐力の比率を示す。図 6-3 より、人工岩盤を考慮した場合の修正荒川 mean 式の耐力は荒川 mean 式の耐力に比べて最大で 35%程度大きくなっているが、人工岩盤を無視した場合に検定値が 0.9 以上である要素においては、増加率が平均で 5%程度であり(表 6-2 参照)、人工岩盤を無視した場合の増加率(9%程度)と比べるとやや小さくなる。

図 6-4 に荒川 mean 式を用いた面外せん断力に対する検定比を、また、人工岩盤の有無による配筋領域ごとの面外せん断力の最大値の比較を表 6-1 に示す。

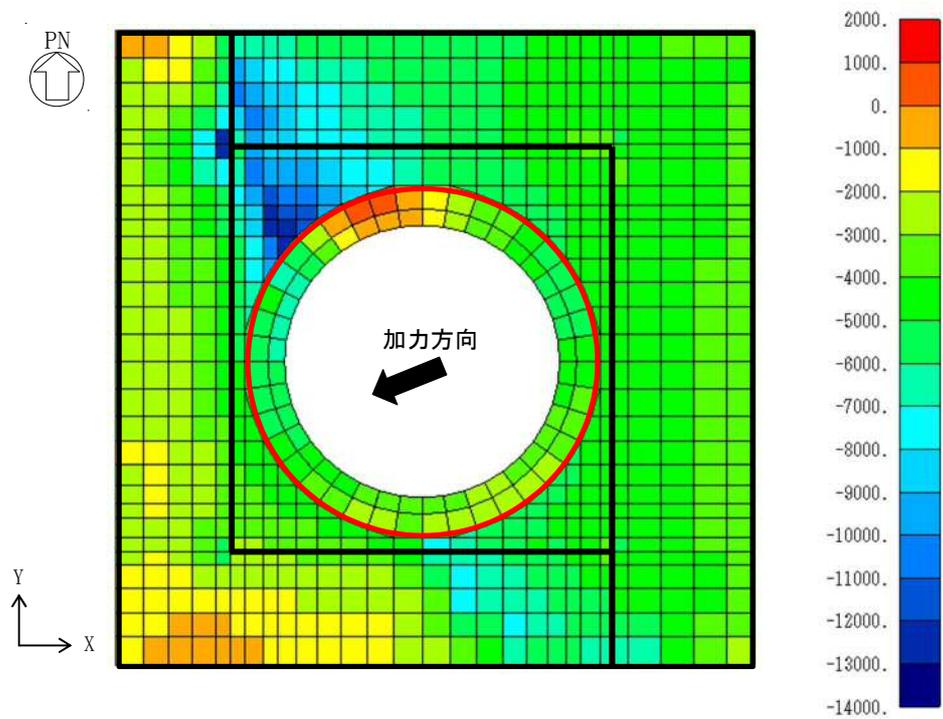
表 6-1 に示すように、人工岩盤を考慮すると人工岩盤を無視した場合に比べ、内部ボックス壁脚部における面外せん断力が大きな領域では面外せん断力が 35%程度低下する。なお、シェル壁脚部では内部ボックス壁ほどの応力低下は生じず 3%程度の低下となっているが、地震力により押し込まれる領域を見ると、大きな面外せん断力が生じる領域は減少している。また、面外せん断力が比較的小さな領域では、人工岩盤を考慮することによる面外せん断力の低下率は小さくなっている。

図 6-4 に示すように、人工岩盤を考慮した場合には、人工岩盤を無視した場合に比べ、検定比が小さくなっており、表 6-2 に示すように人工岩盤を無視した場合に検定値が 0.9 以上である要素の面外せん断力は、人工岩盤を考慮することで 35%程度 [裕度④] 低下する。



注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の面外せん断力を示す。  
黒太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

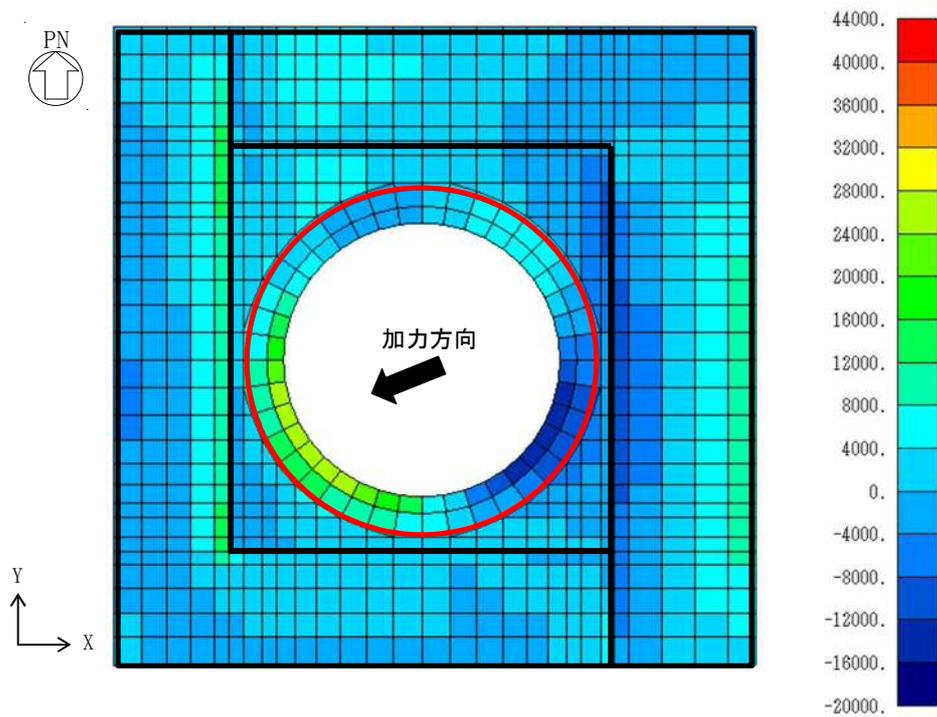
(1) 面外せん断力 (単位: kN/m)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の軸力を示す。  
黒太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

(2) 軸力 (単位: kN/m)

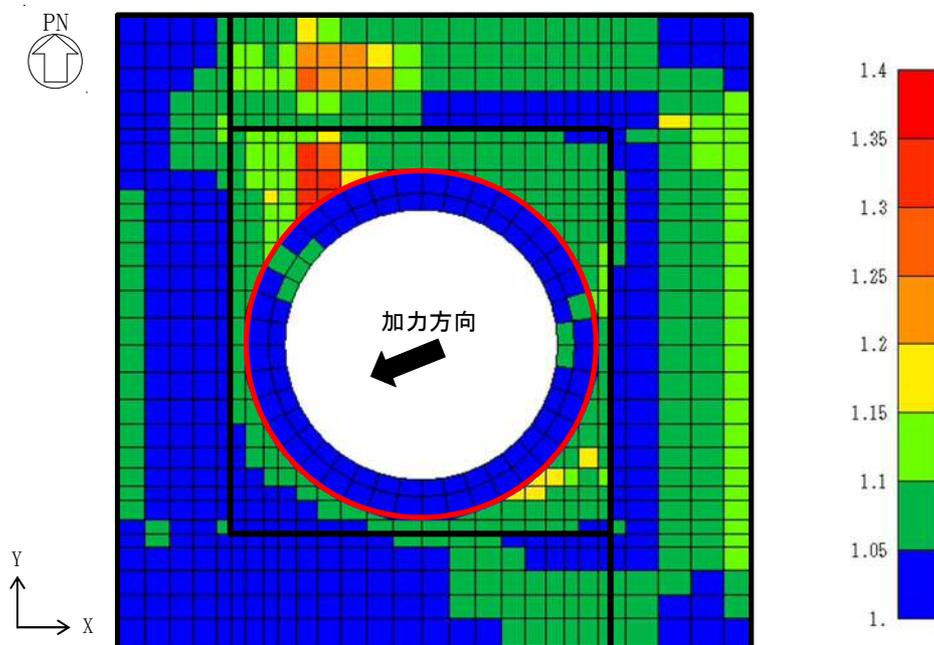
図 6-2(1/2) 基礎スラブの発生応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外はX方向の**曲げモーメント**を示す。  
 黒太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

(3) 曲げモーメント (単位: kN・m/m)

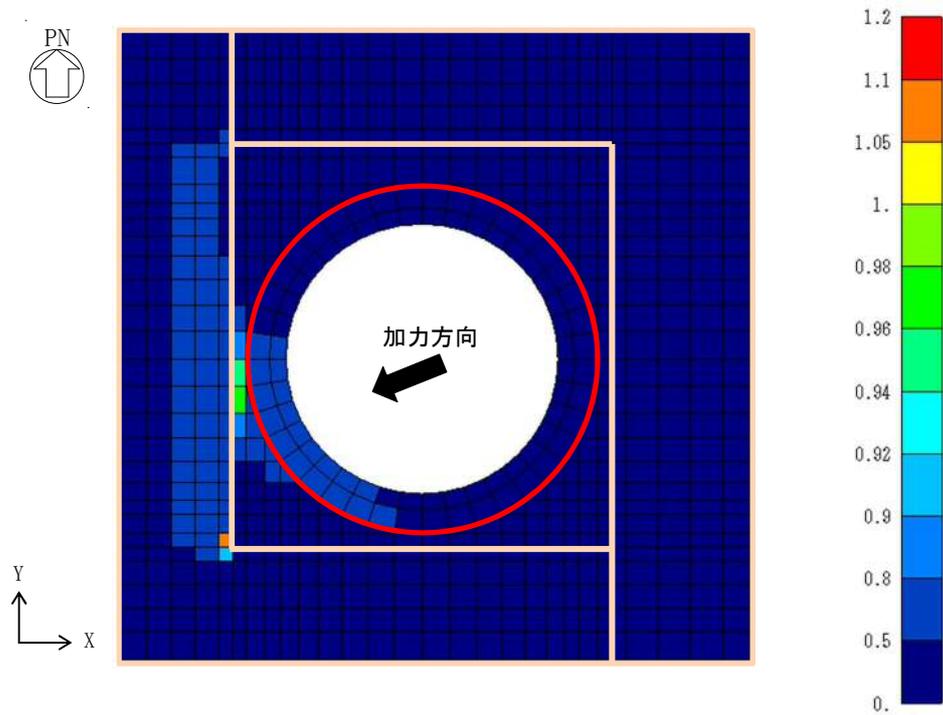
図 6-2(2/2) 基礎スラブの発生応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外はX方向の**比率**を示す。  
 黒太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

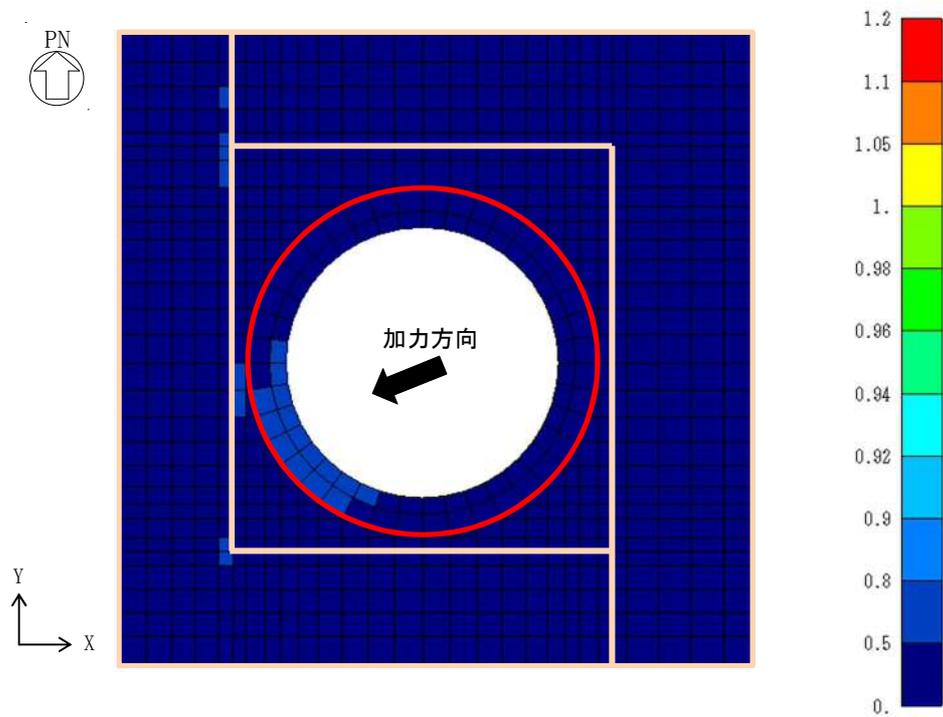
最大値: 1.35

図 6-3 修正荒川 mean 式/荒川 mean 式 (0.4N→S+1.0E→W+0.4D→U, Ss-31)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の検定比を示す。  
太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

(1) 人工岩盤無視



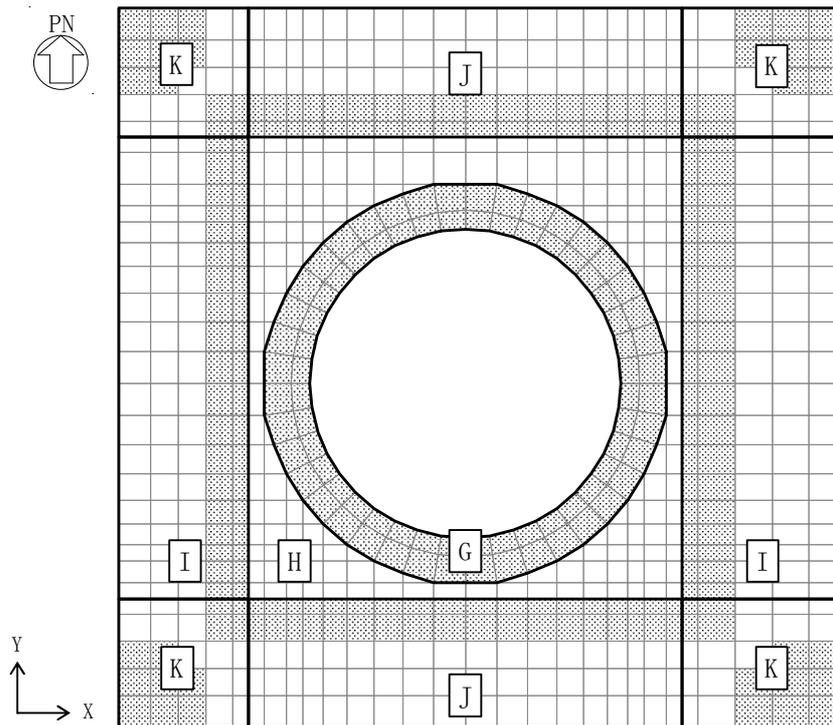
注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の検定比を示す。  
太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

(2) 人工岩盤考慮

図 6-4 荒川 mean 式による面外せん断力の検定比 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)

表 6-1 面外せん断力の比較

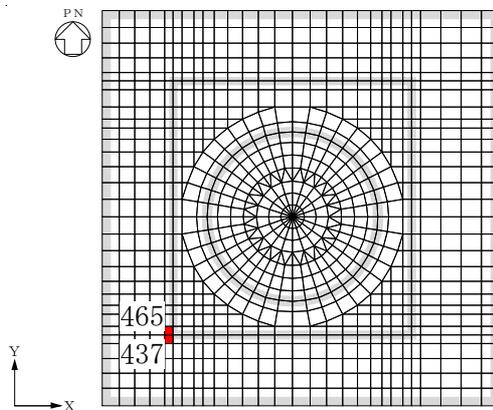
配筋領域	最大面外せん断力 (kN/m)		人工岩盤考慮／無視
	人工岩盤 無視	人工岩盤 考慮	
G	8424	8185	0.972
H	7364	4158	0.565
I	10842	6901	0.637
J	3330	3284	0.986
K	9255	6040	0.653



配筋領域図

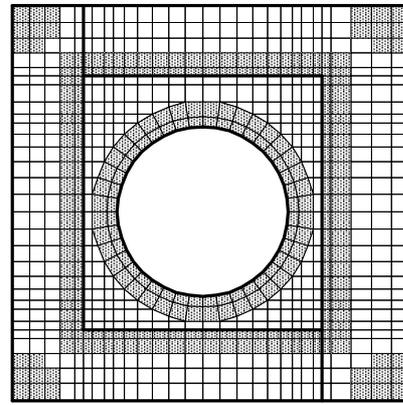
表 6-2 荒川 mean 式による面外せん断検定比が 0.9 以上かつ  
せん断補強筋のある要素の検定比

要素 番号	検定値 (MMR 無)	面外せん断力 (kN/m)			修正荒川式/荒川式	
		MMR 無	MMR 有	有/無	MMR 無	MMR 有
437	0.916	9255	5798	0.626	1.087	1.048
465	1.073	10842	6901	0.637	1.096	1.054
平均値				0.632	1.092	1.051



注 1 網掛けは耐震壁を示す

(1) 要素番号



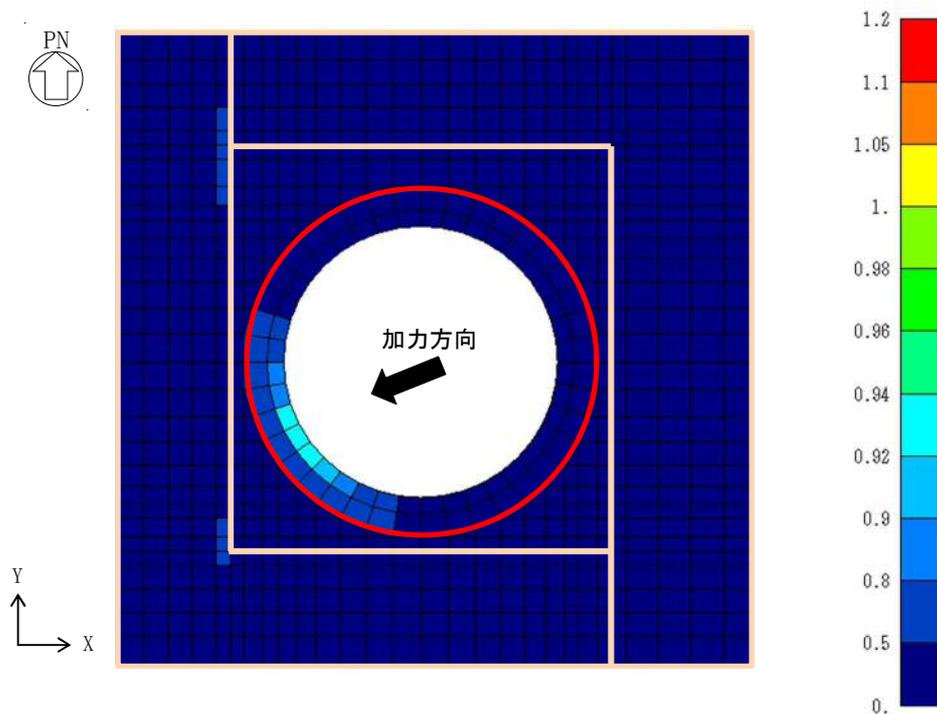
注 2 太線は基礎スラブに取り付く壁、  
網掛けはせん断補強筋のある要素を示す。

(2) せん断補強筋

(3) RC-N式(短期許容せん断力)を用いた検定比

ここでは、人工岩盤を考慮し、許容限界をRC-N式(短期許容せん断力)を用いた検討を実施する。図6-5に面外せん断に対する検定比を示す。図6-5に示すように、全要素で検定比が1.0未満となっている。

以上より、安全裕度として考えている人工岩盤のモデル化を考慮すれば、先行プラント同様に短期許容応力度におさまることを確認した。



注) 赤枠内は半径方向、それ以外はX方向の検定比を示す。

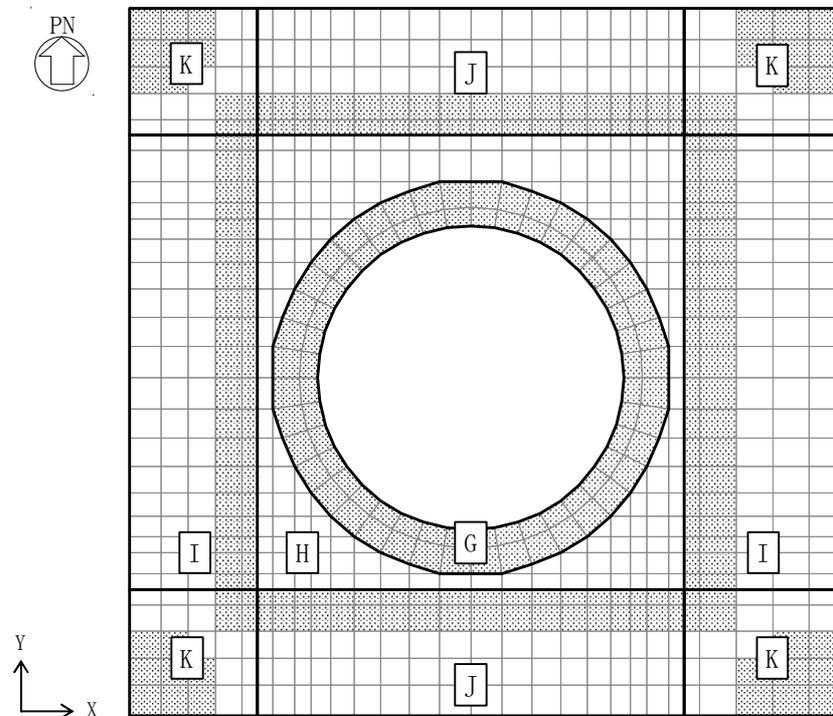
太線は基礎スラブに取り付く壁を示す。

図6-5 RC-N式による面外せん断力の検定比(人工岩盤考慮,  $0.4N \rightarrow S + 1.0E \rightarrow W + 0.4$ 上,  $Ss-$ 31)

## 7. 実強度の影響について

原子炉棟基礎の基礎スラブの面外せん断力に対する検討では、コンクリート強度として設計基準強度  $22.1 \text{ N/mm}^2$  を用いている。平成9年から平成27年にかけて原子炉建屋から採取した合計51体の供試体のコンクリート実強度は  $42.1 \text{ N/mm}^2$  (標準偏差: 8.9) である。基礎スラブの配筋領域を図7-1に、実強度を用いた荒川 mean 式によるせん断耐力を表7-1に示す。せん断補強筋が無い部位は約1.50倍、せん断補強筋がある部位は約1.22倍～約1.37倍、大きくなる。

また、基礎スラブより採取した供試体(3体)のコンクリート強度の平均値は  $38.0 \text{ N/mm}^2$  である。この平均値に原子炉建屋全体のコンクリート強度のばらつき  $\sigma$  を考慮すると、コンクリート強度は  $29.1 \text{ N/mm}^2$  になる。コンクリート強度に  $29.1 \text{ N/mm}^2$  を用いた荒川 mean 式によるせん断耐力を表7-2に示す。せん断補強筋が無い部位は約1.17倍、せん断補強筋がある部位は約1.08倍～約1.13倍であり、実強度を考慮した場合 10%程度 [裕度⑤] の耐力増加が見込める。



・せん断補強筋は、網掛け部のみに考慮する。

図7-1 配筋領域

表 7-1 許容せん断力の比較 (コンクリート強度 : 42.1 N/mm<sup>2</sup>)

配筋領域	主筋比 (%)	せん断補強筋比 (%)	M/(Qd)	荒川 mean 式による 許容せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )			備考
				設計基準強度	実強度	増加率	
H~K	—	0.0	—	—	—	1.50	(42.1+18)/(22.1+18)
G	0.490	0.242	1	2.84	3.87	1.36	
			3	1.51	1.88	1.25	
	0.617		1	2.95	4.04	1.37	
			3	1.55	1.94	1.25	
I, J	0.240	0.242	1	2.53	3.40	1.34	
			3	1.40	1.72	1.23	
	0.377		1	2.72	3.69	1.36	
			3	1.47	1.82	1.24	
K	0.240	0.242	1	2.53	3.40	1.34	
			3	1.40	1.72	1.23	
	0.248		1	2.54	3.42	1.35	
			3	1.41	1.72	1.22	

表 7-2 許容せん断力の比較 (コンクリート強度 : 29.1 N/mm<sup>2</sup>)

配筋領域	主筋比 (%)	せん断補強筋比 (%)	M/(Qd)	荒川 mean 式による 許容せん断応力度 (N/mm <sup>2</sup> )			備考
				設計基準強度	実強度	増加率	
H~K	—	0.0	—	—	—	1.17	(29.1+18)/(22.1+18)
G	0.490	0.242	1	2.84	3.20	1.13	
			3	1.51	1.64	1.09	
	0.617		1	2.95	3.33	1.13	
			3	1.55	1.69	1.09	
I, J	0.240	0.242	1	2.53	2.83	1.12	
			3	1.40	1.51	1.08	
	0.377		1	2.72	3.06	1.13	
			3	1.47	1.59	1.08	
K	0.240	0.242	1	2.53	2.83	1.12	
			3	1.40	1.51	1.08	
	0.248		1	2.54	2.85	1.12	
			3	1.41	1.52	1.08	

## 8. 荒川 mean 式の適用性について

原子炉棟基礎の基礎スラブのせん断耐力の評価式には、荒川 mean 式を用いている。

「2. 面外せん断耐力評価式について」に示すように、せん断補強筋の有る部位では荒川 mean 式は RC-N 式の耐力を上回るものの、せん断補強筋の無い部位では、荒川 mean 式は RC-N 式の耐力を下回り、「3. 面外せん断耐力評価式と実験値の比較」に示すように、荒川 mean 式はスパン全長にわたり分布荷重を受ける実験値の下限を示し、文献 2 で示した実験結果では、全試験体の裕度の平均値として約 17%が見込まれ、実機の配筋やせん断スパン比を考慮すると約 10%の裕度が見込まれる。

また、「4. 基礎スラブに発生する軸力の影響」に示すように、実験値が圧縮軸力による影響を考慮した修正荒川 mean 式によるせん断耐力を上回ることが示され、原子炉棟基礎の基礎スラブでは軸力を考慮した基礎スラブの面外せん断力に対する評価では修正荒川 mean 式を用いることで最大で 30%程度、検定値 0.9 以上の要素の平均で 9%程度、面外せん断耐力が増加する。

さらに、「6. 人工岩盤を考慮した場合の応力解析結果について」に示すように人工岩盤を考慮した現実的に生じると考えられる面外せん断応力は、人工岩盤を考慮しない場合に検定値が 0.9 以上となっていた要素において平均で約 35%小さくなっている。ただし、人工岩盤を考慮した場合については、修正荒川 mean 式による面外せん断耐力の増加率は最大で 35%程度であるが、人工岩盤を無視した場合に検定値が 0.9 以上である要素においては、増加率が平均で 5%程度であり、人工岩盤を無視した場合の増加率（9%程度）と比べるとやや小さくなる。

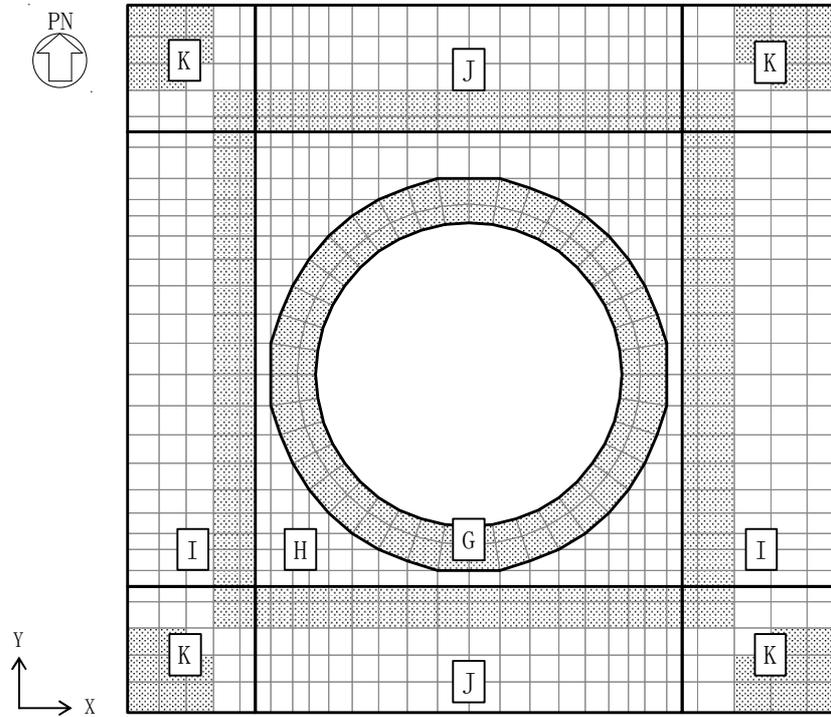
以上より、人工岩盤を考慮しない基礎スラブの応力解析結果に対し、許容限界として荒川 mean 式による終局面外せん断耐力を適用することは、荒川 mean 式の裕度が 10%、軸力の影響による裕度が 5%程度見込め、全体として 15%程度の裕度を有している。

さらに、実際には人工岩盤があり、基礎スラブに生じる面外せん断力は特に応力が大きい部位において 35%程度低減されること（「6. 人工岩盤を考慮した場合の応力解析結果について」参照）、コンクリートの実強度を考慮すると実際の耐力は小さく見積もっても 10%程度大きくなること（「7. 実強度の影響について」参照）も加味すると、全体として 1.5 倍以上の裕度があると言える。

したがって、荒川 mean 式による終局強度を許容限界として基礎スラブの面外せん断力の評価を行うことは、十分な保守性があり、仮に解析評価上、許容限界を超える要素が生じたとしても、支持機能を失うような破壊に至ることはない。

付録1 基礎スラブの配筋

原子炉棟基礎及び付属棟基礎の基礎スラブの許容せん断力算定の際に用いる各要素の配筋について、付図 1-1 に配筋の分類領域図を、付表 1-1 に分類領域ごとの配筋一覧を示す。



・せん断補強筋は、網掛け部だけに考慮する。

付図 1-1 配筋領域図

付表 1-1 分類領域ごとの配筋一覧

(a) 格子配筋 (上段：配筋, 下段：引張鉄筋比)

領域	方向	上端筋	下端筋
H	EW	3-D38@200 (0.362%)	3-D38@200 (0.377%)
	NS	3-D38@200 (0.362%)	3-D38@200 (0.377%)
I	EW	D38@200+2-D38@400 (0.240%)	D38@200+2-D38@400 (0.248%)
	NS	3-D38@200 (0.362%)	3-D38@200 (0.377%)
J	EW	3-D38@200 (0.362%)	3-D38@200 (0.377%)
	NS	D38@200+2-D38@400 (0.240%)	D38@200+2-D38@400 (0.248%)
K	EW	D38@200+2-D38@400 (0.240%)	D38@200+2-D38@400 (0.248%)
	NS	D38@200+2-D38@400 (0.240%)	D38@200+2-D38@400 (0.248%)

(b) r-θ 方向配筋 (上段：配筋, 下段：引張鉄筋比)

領域	方向	上端筋	下端筋
G	半径	68-D38/45° (4段) (外側：0.542%, 内側：0.617%)	68-D38/45° (4段) (外側：0.490%, 内側：0.557%)
	円周	4-D38@200 (0.556%)	4-D38@200 (0.502%)

(c) せん断補強筋 (上段：配筋, 下段：せん断補強筋比)

領域	方向	せん断補強筋
共通	共通	D22@400 (0.242%)

## 付録2 基礎スラブの応力状態

基礎スラブに作用する地震力のうち、最も大きな地震力は基礎スラブに取り付く耐震壁脚部より作用する荷重である。耐震壁脚部より作用する転倒モーメントは鉛直方向の偶力として基礎スラブに作用する。また、上部構造の自重等の鉛直荷重の大部分も耐震壁脚部より作用する。

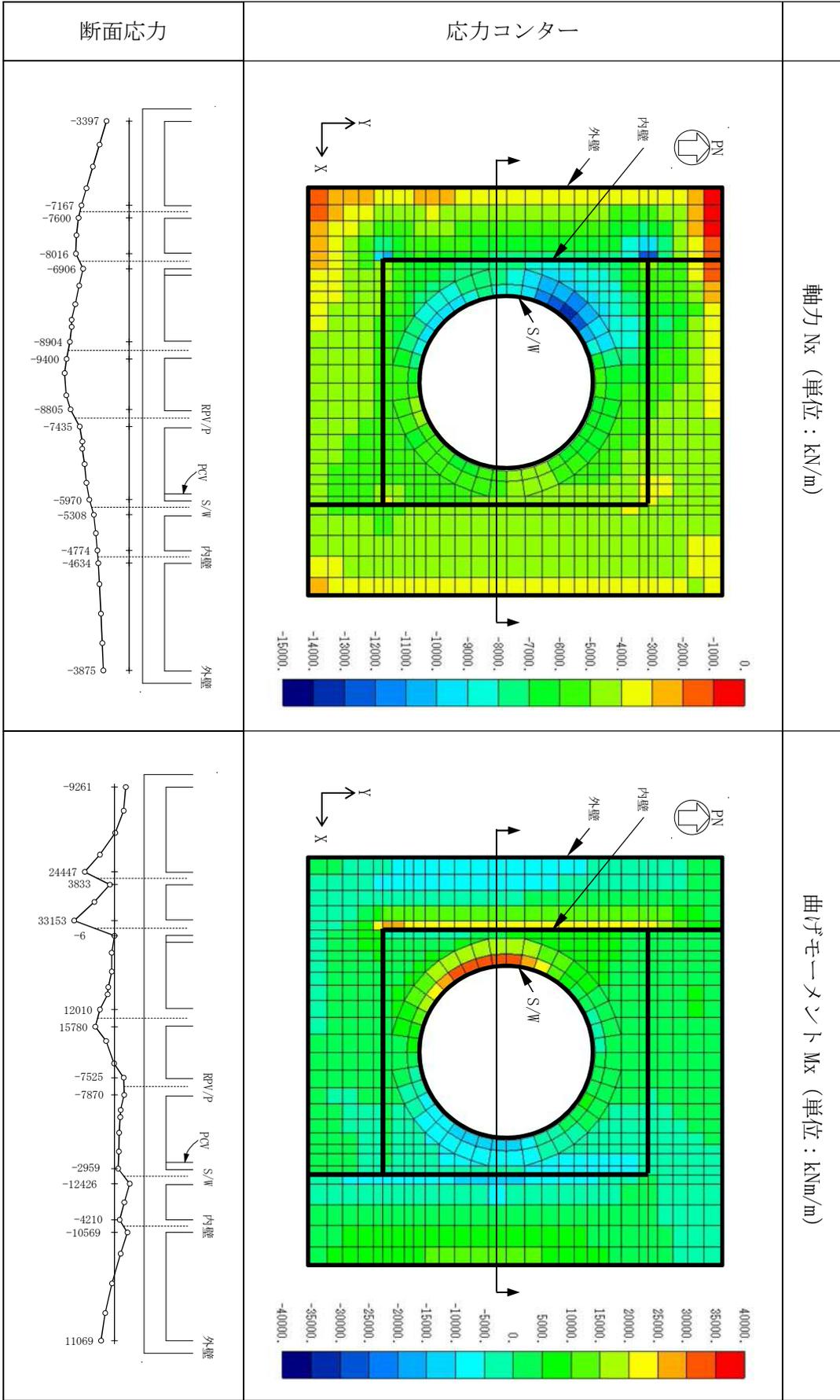
これらの荷重は、基礎スラブを介して底面地盤に伝達され地盤ばねの反力が接地圧となる。すなわち、基礎スラブの応力解析結果は、基礎スラブに取り付く耐震壁を固定点にし、各節点に接地圧に相当する節点荷重を作用させた応力解析結果と等しくなる。

ここでは、基礎スラブの発生応力について考察を行い、基礎スラブに発生する応力が、梁に分布荷重を載荷した場合に近いことを確認する。

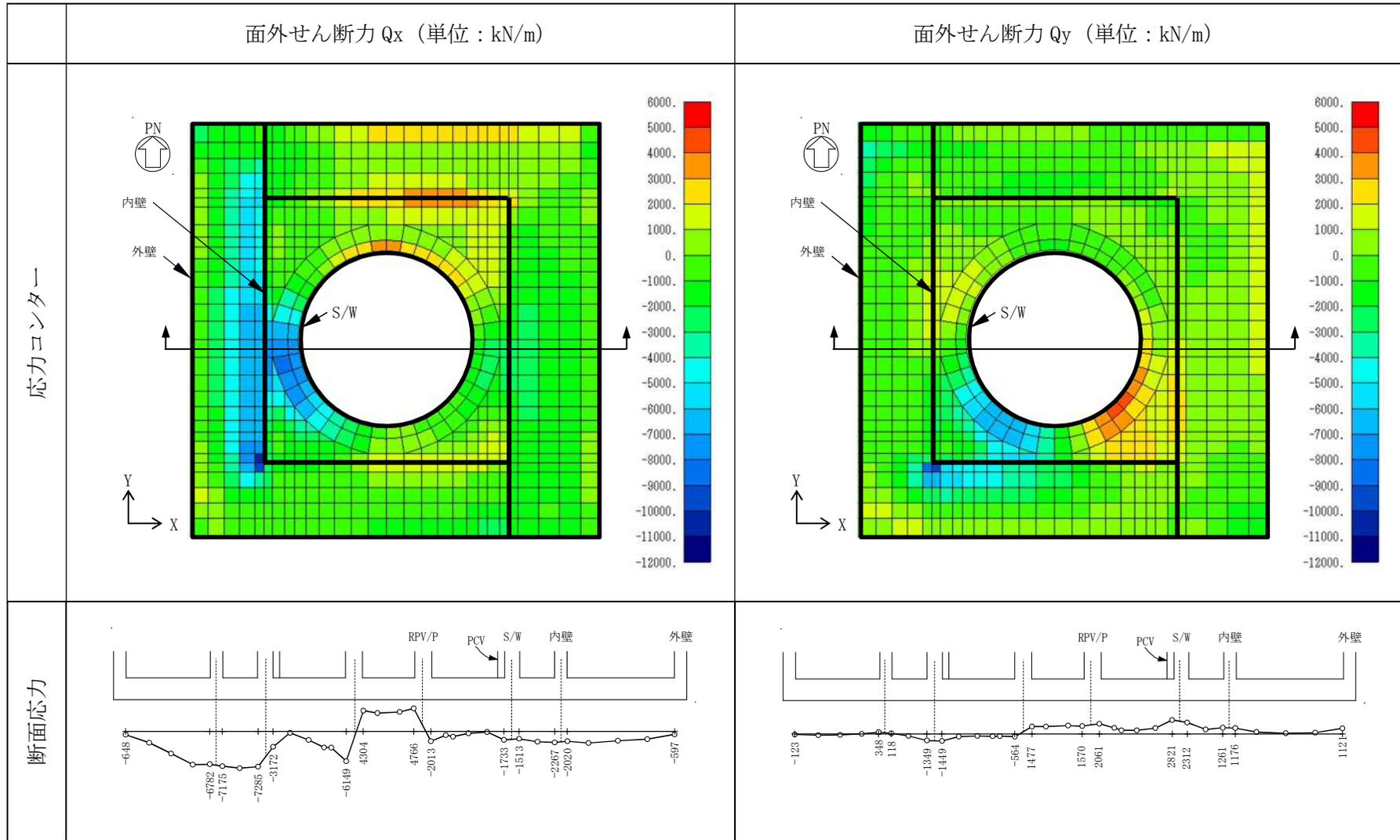
荷重組合せケース (0.4N→S+1.0E→W+0.4D→U, Ss-31) の基礎スラブの X 方向(東西方向)の発生応力を付図 2-1 に、変形図を付図 2-2 に、接地圧分布を付図 2-3 に示す。なお、付図 2-1 には、Y 方向(南北方向)の面外せん断力も併せて示している。ここで、断面応力は要素中心での値を示し、基礎盤に直交する壁直下の要素は要素中心が壁面位置になるよう要素分割している。

付図 2-3 に示すように、面外せん断力に対する検定比が厳しくなる押し込みの厳しい南西部付近の S/W と内壁の間では、接地圧は分布荷重になっていることがわかる。

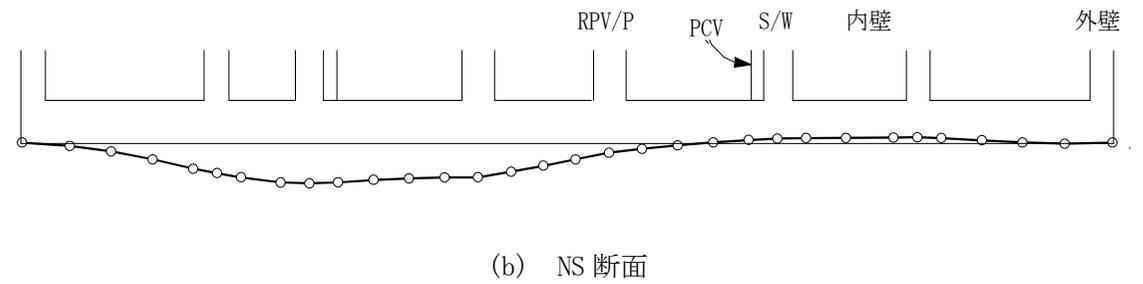
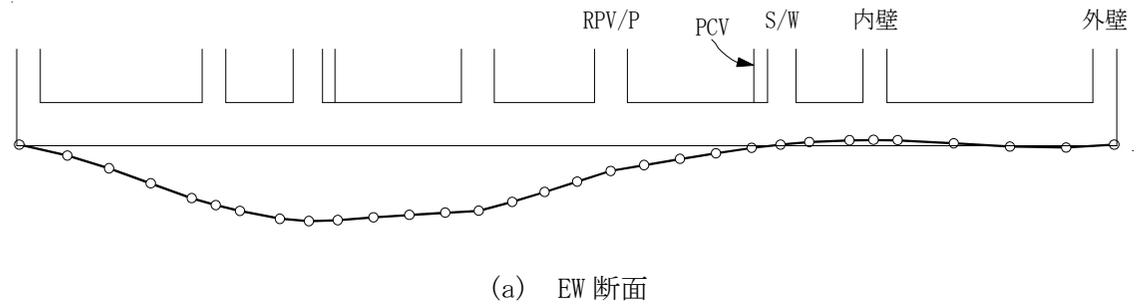
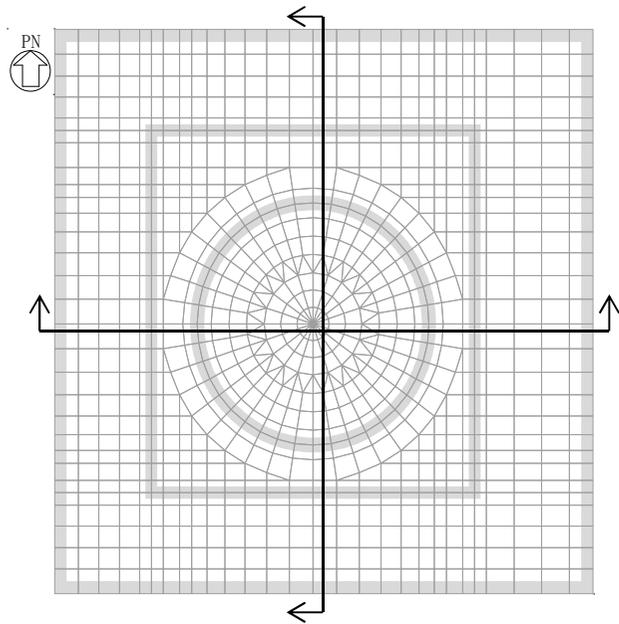
また、付図 2-1 (2/2)に示すように、内部ボックス壁の南西角部では Y 方向の面外せん断力も大きくなっているものの、**それ以外**の面外せん断の大きい部位では、X 方向と Y 方向共に面外せん断力が大きくなる部位は少ない。付図 2-4 に面外せん断力の主方向に対する直交方向の比率を示す。ここで、主方向は  $Q_x$  と  $Q_y$  の絶対値の大きい方向を指す。付図 2-4 に示すように、シェル壁と内部ボックス壁の間の面外せん断の大きい部位では、直交方向の面外せん断力は小さく、主方向に対する比率は 0.2 以下で、 $Q_x$  と  $Q_y$  の最大値に対する二乗和平方根の増加率は 2%程度である。したがって、2 方向のせん断力の組合せによる影響は小さいと考えられる。



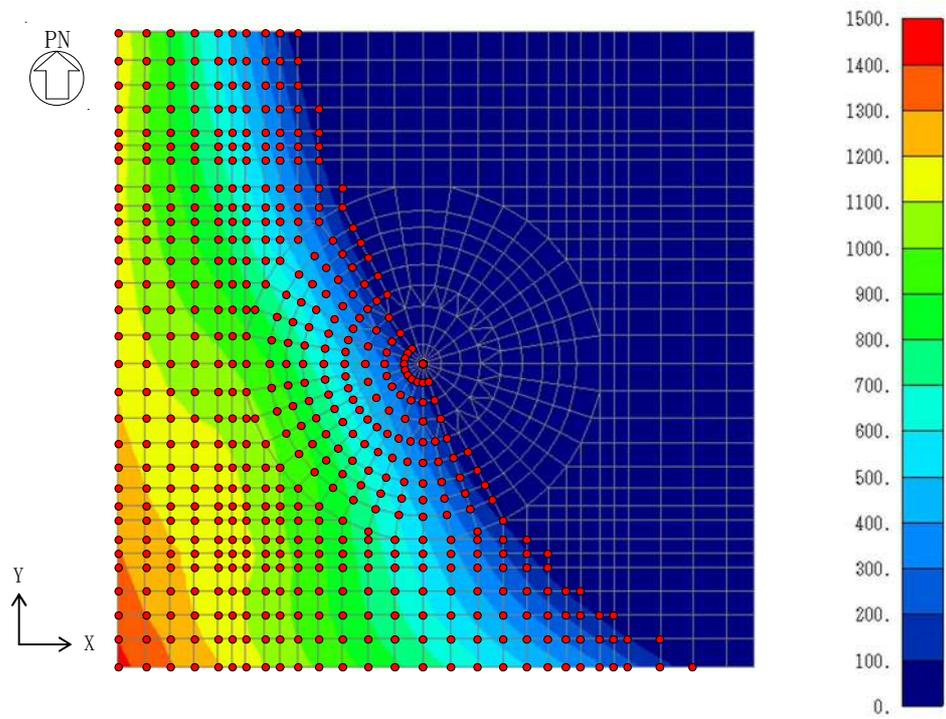
付図 2-1 (1/2) 基礎スラブの断面応力 ( $N_x$ ,  $M_x$  / 0.4N → S + 1.0E → W + 0.4上, Ss-31)



付図 2-1(2/2) 基礎スラブの断面応力 ( $Q_x, Q_y / 0.4N \rightarrow S + 1.0E \rightarrow W + 0.4$  上,  $S_s-31$ )

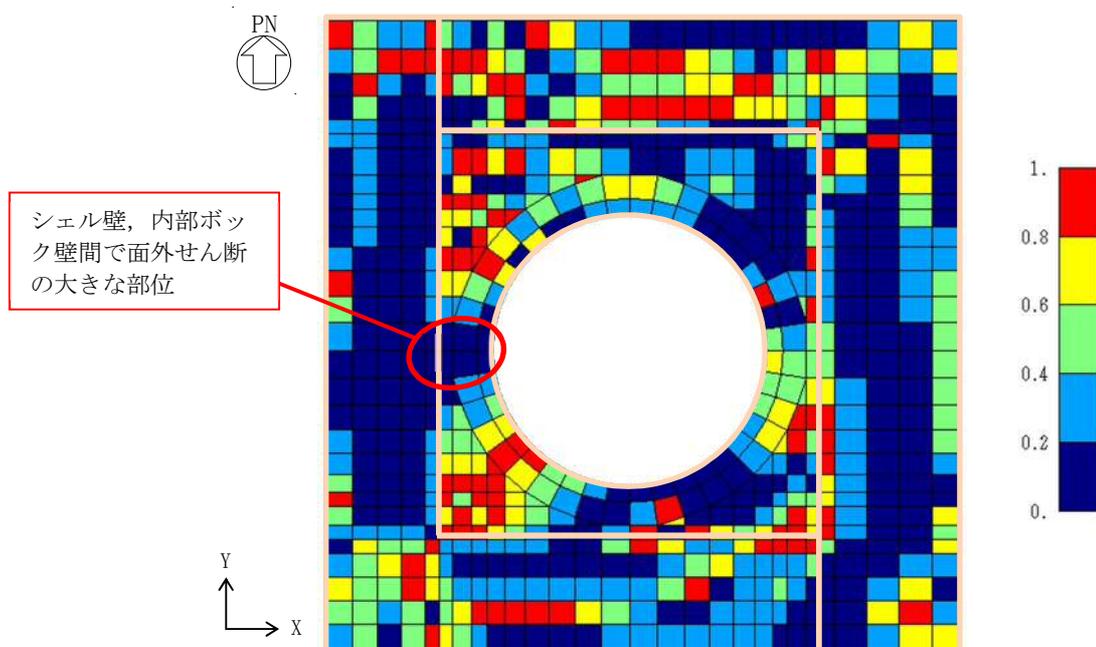


付図 2-2 基礎スラブの面外方向の変形図 (0.4N→S+1.0E→W+0.4 上, Ss-31)



●は接地領域を示す。

付図 2-3 接地圧分布 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



シェル壁, 内部ボックス壁間で面外せん断の大きな部位

付図 2-4 面外せん断力の比(直交方向/主方向, 0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)

付録3 面外せん断耐力評価式による評価結果の比較

荷重組合せケース (0.4N→S+1.0E→W+0.4D→U, Ss-31) における、各評価式による許容せん断力及び検定比を付図 3-1 に、要素 302, 465 及び 610 における許容せん断力を付表 3-1 に示す。

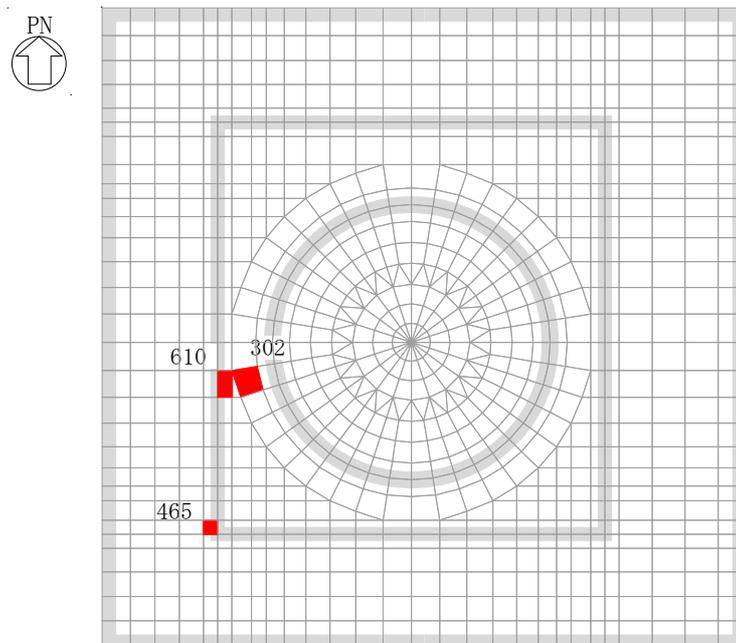
RC-N 式は、せん断スパン比及びせん断補強筋比によって変動するが、せん断補強筋が入っている場合でもせん断補強筋比は 0.242% であり、強度に大きくは寄与せずせん断スパン比の大小により強度が決まっている。また、荒川 mean 式と比較すると、せん断補強筋の入っていない要素では、基本的に RC-N 式のほうが大きくなっている。

修正荒川式による軸力項の寄与分は、軸力にもよるが 5%~10% 程度となっている。

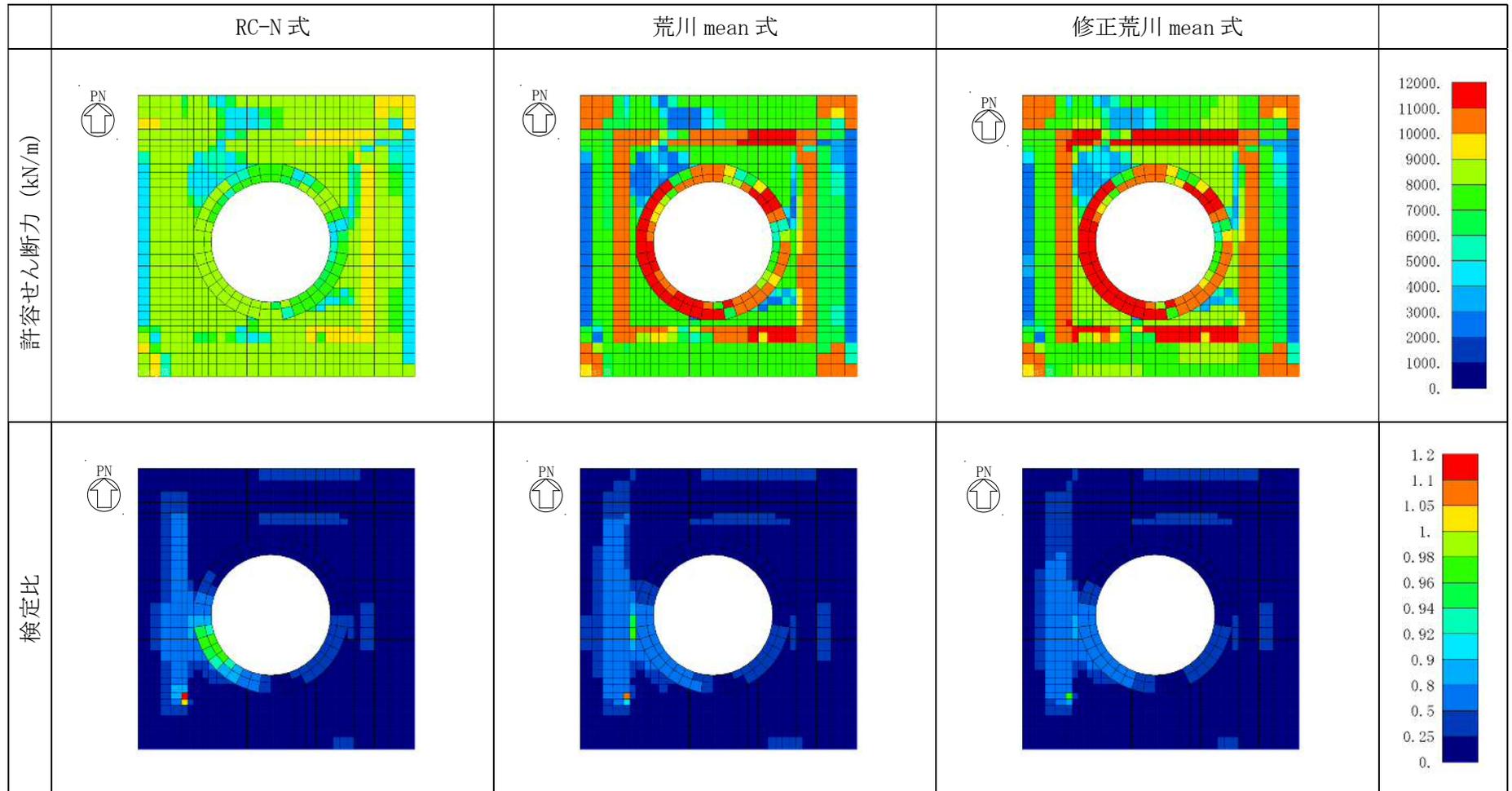
荒川 mean 式に対する修正荒川 mean 式の比率及び RC-N 式に対する荒川 mean 式の比率を付図 3-2 及び付図 3-3 に示す。

付表 3-1 許容せん断力の比較

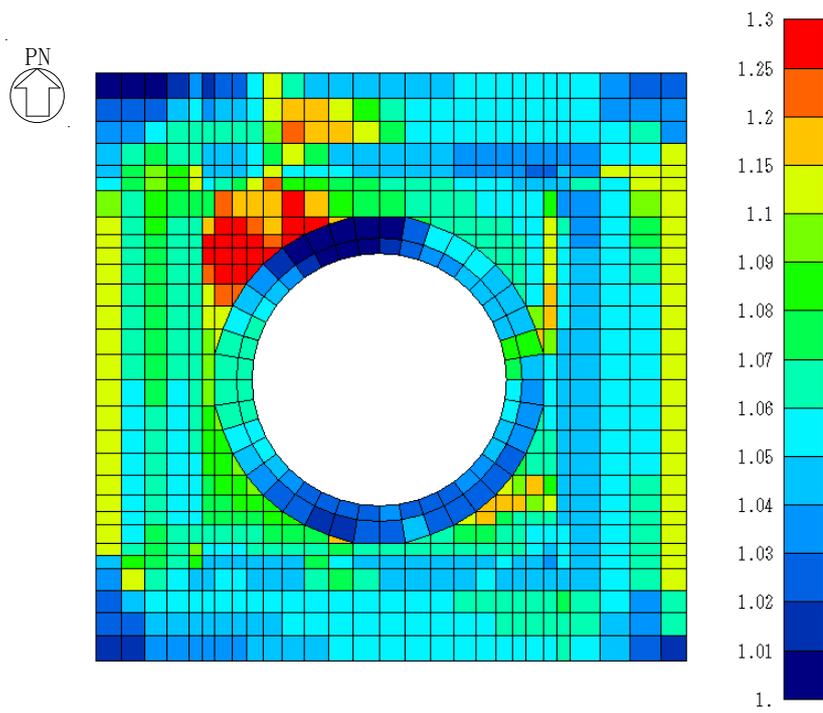
要素 番号	せん断 補強筋比 (%)	M/(Qd)	発生 せん断力 (kN/m)	許容せん断力 (kN/m)		
				RC-N 式	荒川 mean 式	修正 荒川 mean 式
302	0.242	1.0	$8.34 \times 10^3$	$8.71 \times 10^3$	$1.11 \times 10^4$	$1.18 \times 10^4$
465	0.242	1.0	$1.08 \times 10^4$	$8.82 \times 10^3$	$1.01 \times 10^4$	$1.11 \times 10^4$
610	0.0	1.0	$7.36 \times 10^3$	$8.42 \times 10^3$	$7.56 \times 10^3$	$8.22 \times 10^3$



要素位置

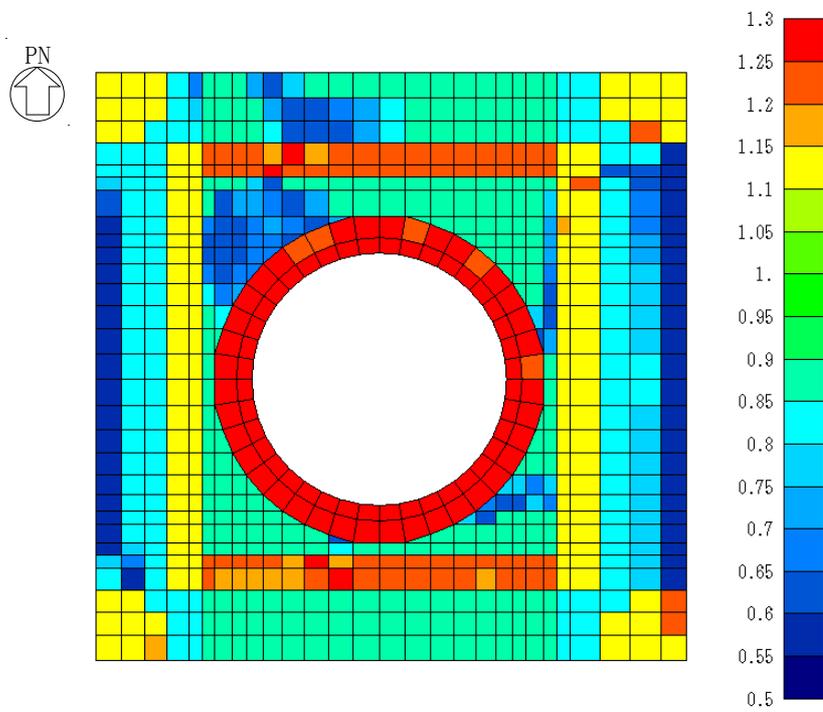


付図 3-1 基礎盤の許容せん断力と検定比の比較【0.4N→S+1.0E→W+0.4上 (Ss-31)】



最大值：1.31

付図 3-2 修正荒川 mean 式 / 荒川 mean 式



最大值：1.35

最小値：0.59

付図 3-3 荒川 mean 式 / RC-N 式

#### 付録4 安全余裕度について

JEAG4601-1987では「5.3.5 安全余裕度」において、安全余裕度の下限値の例として「鉄筋コンクリート造耐震壁の終局耐力のバラツキを定量的に評価し、さらに支持機能についても検討した上で工学的に設定した」値として各層の終局せん断耐力に対して1.5倍の目安値が示されている。

また、動的地震力に対する評価において、「実験による耐震壁の終局変形のバラツキを定量的に評価し、これに応答などの設計上のバラツキを考慮して多少の余裕を見て定められたもの」として、各層の終局せん断ひずみ度( $4.0 \times 10^{-3}$ )に対して2倍の目安値が示されている。これは、JEAC 4601-2008の「3.6.1 基準地震動  $S_s$  に対する検討 3.6.1.1 鉄筋コンクリート造耐震壁の評価」の許容限界のせん断ひずみ度  $2.0 \times 10^{-3}$  としても示されており、終局せん断ひずみ度 ( $4.0 \times 10^{-3}$ ) に2倍の安全率、実験値の下限値及びバラツキを考慮した95%信頼下限値を包絡した値に対しても1.5倍以上の安全率を有していると説明されている。

付録5 基礎スラブ及び人工岩盤のコンクリート強度について

基礎スラブ及び人工岩盤のコンクリート強度について、建設時の強度管理記録及び平成9年から平成27年にかけてコア採取した供試体による強度を整理して付表5-1～付表5-3に示す。

付表5-1 コア採取(平成9年～平成27年)による原子炉建屋のコンクリート強度

部位	サンプル数	設計 基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度		
			平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	標準偏差	変動係数 (%)
建屋全体*	51	22.1	42.1	8.9	21.1
基礎スラブ	3	22.1	38.0	—	—

※建屋全体の値には基礎スラブの供試体3体を含む

付表5-2 建設時の強度管理記録による基礎スラブのコンクリート強度

部位	サンプル数	設計 基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (4週強度)		
			平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	標準偏差	変動係数 (%)
基礎スラブ	138	22.1	31.0	3.3	10.6

付表5-3 建設時の強度管理記録による人工岩盤のコンクリート強度

部位	サンプル数	設計 基準強度 (N/mm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (4週強度)		
			平均値 (N/mm <sup>2</sup> )	標準偏差	変動係数 (%)
人工岩盤	150	13.7	16.9	1.8	10.7