

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-370-12 改1
提出年月日	平成30年6月5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】

平成30年6月

日本原子力発電株式会社

目次

資料1	耐震重要度分類について	2
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	11

資料 1 耐震重要度分類について

1. 耐震重要度分類の考え方

東海第二発電所は、昭和56年の耐震設計審査指針の制定前に建設されたプラントであり、重要度分類の考え方が現在とは異なる。

現行の規制基準では、主要設備、補助設備、直接支持構造物、間接支持構造物、波及的影響を検討すべき設備に区分することとされている。一方、東海第二発電所の建設時の考え方では、建屋ごとに重要度分類を設定することを原則としており、原子炉建屋であれば建屋全体をAクラス（原子炉格納容器を構成する底部コンクリートマットはAsクラス）に分類している。

以上を踏まえ、今回工認では現行の規制基準の考え方に従い、耐震重要度分類を設定する。

建設工認 耐震設計の基本方針（抜粋）

発電所のすべての建屋、構築物、機器・配管系は発電所の安全性に対する重要度に応じて耐震設計上次の原則にしたがって分類する。

Aクラス：その機能喪失が重大な事故をおこすおそれのあるものおよび原子炉事故の際に放射線障害から公衆を守るために必要なもの。

耐震設計に係る工認審査ガイド（抜粋）

2. 共通基本事項

2.2 耐震設計上の重要度分類

【審査における確認事項】

(2) 施設を構成する設備を適切に区分し、その区分ごとに耐震設計上の重要度分類を適用していること。

【確認内容】

(2) 施設を構成する設備は、JEAG4601の規定を参考に、主要設備、補助設備、直接支持構造物、間接支持構造物、波及的影響を検討すべき設備に区分していること、また、設備の区分ごとに、JEAG4601の規定を参考に、昭和56年設計審査指針によるAsクラスを含むAクラスの施設をSクラスの施設と読み替え、規制基準の要求事項に留意して、耐震設計上の重要度分類を適用していること。

2. 原子炉建屋の基礎の耐震重要度分類

耐震重要度分類は、各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度（耐震重要度）に応じて分類することとされている。BWR MARK-IIの原子炉棟基礎については、J E A G 4 6 0 1 - 1987 において、「格納容器底部外基礎マット」と区分された部位として、耐漏洩機能は求められておらず、支持機能を有することとなっている（図1）。従って、原子炉棟基礎はSクラスの設備ではなく、Sクラスの設備の間接支持構造物として分類されると考えられる。

また、先行プラントにおいては、原子炉棟の基礎及びアニュラス区画構造物の基礎に該当する部位については、Sクラスの設備としているものとSクラスの設備の間接支持構造物としているものがある（表1）。

以上を踏まえ、東海第二の原子炉棟基礎盤については、Sクラスの設備ではなく、Sクラスの設備の間接支持構造物として整理する。

3. Sクラスの設備の間接支持構造物としての許容限界

表1に示す通り、先行プラントの原子炉建屋の間接支持構造物の許容限界として短期許容応力度が適用されている。その他の建屋では、使用済燃料乾式貯蔵建屋の既工認において、基礎スラブの基準地震動S2に対する面外せん断の許容限界に修正荒川 mean 式を適用した実績がある。

以上を踏まえ、原子炉棟基礎の許容限界は荒川 mean 式による終局せん断強度を用いることとし、荒川 mean 式によっても安全余裕があることを示す。

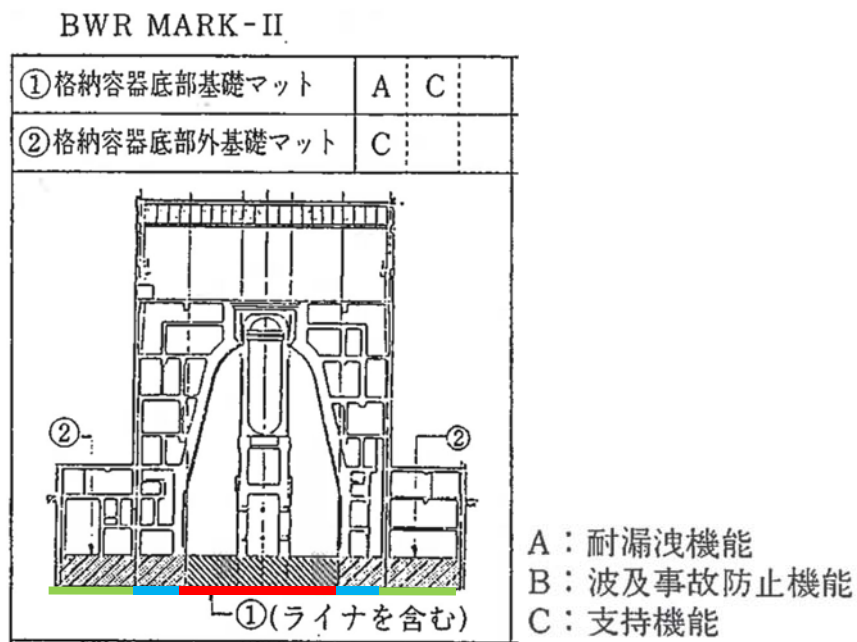
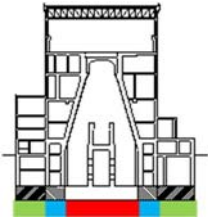
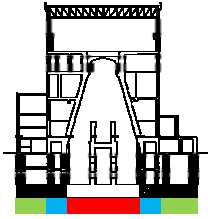
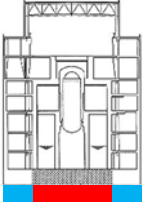
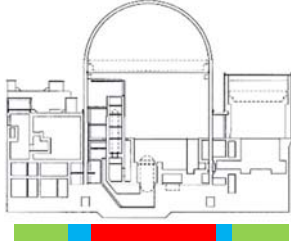
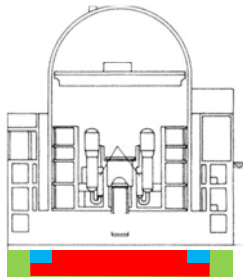


図5.3.4-1 機能維持を要求される原子炉建屋各部位（BWR）

図1-1 原子炉建屋の基礎と要求機能

（JEAG4601-1987 抜粋に加筆）

表 1-1 原子炉建屋の基礎の耐震重要度分類（上段）及び許容限界（下段）の比較

サイト炉型	基礎の区分	格納容器の底部	原子炉棟基礎 アニュラス基礎	左記以外の 領域
東海第二 （今回） BWR MARK-II		Sクラス	間接支持構造物	間接支持構造物
		CCV 規格 荷重 状態IVにおけ る許容値	終局強度 （荒川 mean 式）	終局強度 （荒川 mean 式）
東海第二 （建設時）*1 BWR MARK-II		A _s クラス	Aクラス （2次格納施設 基礎盤）	Aクラス
		降伏しない*3	評価なし	評価なし
大間 1 号 ABWR		Sクラス	Sクラス （二次格納施設 基礎スラブ）	—
		CCV 規格 荷重 状態IVにおけ る許容値	CCV 規格 荷重 状態IVにおけ る許容値	—
玄海 3/4 号 PWR		Sクラス	間接支持構造物	間接支持構造物
		CCV 規格 荷重 状態IVにおけ る許容値	RC-N 短期 許容応力度	RC-N 短期 許容応力度
大飯 3/4 号 PWR		Sクラス	Sクラス （格納容器底部 に含む）	間接支持構造物
		CCV 規格 荷重 状態IVにおけ る許容値	CCV 規格 荷重 状態IVにおけ る許容値	RC-N 終局耐力*4

*1 機能維持確認用の「0.27g 地震」に対する許容限界を示す。

*2 重要度分類表に記載はないが、建屋全体をAクラスとして設計している。

*3 結果として短期許容応力度に収まっており、具体的な許容限界は記載されていない。

*4 面外せん断力は短期許容応力度と同じ。

(参考1) 各サイトの原子炉建屋(原子炉格納容器除く)に関する耐震重要度分類の記載

[] 以外はSクラスを示す。

	設置許可 添付書類八	工事計画認可
東海第二(建設)	原子炉建屋〔A〕	2次格納施設基礎盤〔A〕
東海第二(今回)	原子炉建屋原子炉棟	原子炉建屋原子炉棟
大間1号	原子炉建屋原子炉区域	原子炉建屋原子炉区域 原子炉建屋基礎スラブ
大飯3/4号		アニュラス区画構造物
玄海3/4号		アニュラス区画構造物

(参考2)

実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈 (抜粋)
別記2

(略) 地震により発生するおそれがある設計基準対象施設の安全機能の喪失(地震に伴って発生するおそれがある津波及び周辺斜面の崩壊等による安全機能の喪失を含む。)及びそれに続く放射線による公衆への影響を防止する観点から、各施設の安全機能が喪失した場合の影響の相対的な程度(以下「耐震重要度」という。)をいう。設計基準対象施設は、耐震重要度に応じて、以下のクラス(以下「耐震重要度分類」という。)に分類するものとする。

耐震設計に係る工認審査ガイド(抜粋)

2. 共通基本事項

2.2 耐震設計上の重要度分類

【審査における確認事項】

耐震設計上の重要度分類については以下を確認する。

(1) 施設の耐震設計上の重要度を、地震により発生する可能性のある安全機能の喪失及びそれに続く環境への放射線による影響を防止する観点、並びにこれらの影響の大きさから、規制基準に則り施設の機能に応じて適切に分類していること。

(2) 施設を構成する設備を適切に区分し、その区分ごとに耐震設計上の重要度分類を適用していること。

【確認内容】

耐震設計上の重要度分類については以下を確認する。

(1) 施設の耐震設計上の重要度分類は、JEAG4601の規定を参考に、昭和56年設計審査指針によるAsクラスを含むAクラスの施設をSクラスの施設と読み替え、規制基準の要求事項に留意して用いていること。例えば、津波防護施設、浸水防止設備及び津波監視設備については、地震により発生する可能性のある当該機能の喪失による安全機能への影響の観点から、Sクラスとしていること。

(2) 施設を構成する設備は、JEAG4601の規定を参考に、主要設備、補助設備、直接支持構造物、間接支持構造物、波及的影響を検討すべき設備に区分していること、また、設備の区分ごとに、JEAG4601の規定を参考に、昭和56年設計審査指針によるAsクラスを含むAクラスの施設をSクラスの施設と読み替え、規制基準の要求事項に留意して、耐震設計上の重要度分類を適用していること。

(参考3) J E A C 4 6 0 1 -2008 (抜粋)

解表 3.6.4-1 建物・構築物の部位に要求される機能の例 (BWR)

建物・構築物の部位	クラス別施設	耐震クラス	確認用地震動	機能要求
コンクリート製原子炉格納容器 (参考)	原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故時の際に、圧力障壁となり放射物質の放散を直接防ぐための施設	Sクラス ^{*1}	—	耐圧・漏えい防止機能 (漏えい防止は鋼製ライナが分担)
原子炉建屋の一部 (二次格納施設)	放射線物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するための設備	Sクラス ^{*1}	—	負圧維持機能 (非常用ガス処理系作動時)
使用済燃料プール	使用済燃料を貯蔵するための施設	Sクラス ^{*1}	—	液体の漏えい防止機能 (鋼製ライナが分担)
制御建屋の一部 (中央制御室の遮へい)	原子炉冷却系圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するための施設	Sクラス ^{*1}	—	遮へい機能
原子炉建屋の一部及びタービン建屋の一部 (放射線低減効果の大きい遮へい)	放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により、公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設	Bクラス ^{*2}	—	遮へい機能
原子炉建屋の一部及び制御建屋の一部	Sクラスの主要設備、補助設備等の間接支持構造物	—	基準地震動S _s	支持機能(間接)
原子炉建屋の一部及びタービン建屋の一部	Bクラスの主要設備、補助設備等の間接支持構造物	—	S _B ^{*3}	支持機能(間接)
廃棄物処理建屋の一部	Bクラスの主要設備、補助設備等の間接支持構造物	—	S _B ^{*3}	支持機能(間接)
原子炉建屋の一部及び制御建屋の一部	Sクラスの主要設備、補助設備等への波及的影響の防止	—	基準地震動S _s	波及的影響防止
原子炉建屋の一部及びタービン建屋の一部	Bクラスの主要設備、補助設備等への波及的影響の防止	—	S _B ^{*3}	波及的影響防止
廃棄物処理建屋の一部	Bクラスの主要設備、補助設備等への波及的影響の防止	—	S _B ^{*3}	波及的影響防止

- *1: Sクラスの建物・構築物は、基準地震動 S_s に対して安全機能の保持を、弾性設計用地震動 S_d 等及び静的地震力に対して耐えることを確認する。
- *2: Bクラスの建物・構築物は、静的地震力に対して耐えることを確認する
- *3: Bクラスの施設に要求される地震力を S_B という。

解表 3.6.4-2 建物・構築物の部位に要求される機能の例 (PWR)

建物・構築物の部位	クラス別施設	耐震クラス	確認用地震動	機能要求
コンクリート製原子炉格納容器 (参考)	原子炉冷却材圧力バウンダリ破損事故時の際に、圧力障壁となり放射物質の放散を直接防ぐための施設	Sクラス ^{*1}	—	耐圧・漏えい防止機能 (漏えい防止は鋼製ライナが分担)
原子炉建屋の一部 (アニュラスシールド部)	放射線物質の放出を伴うような事故の際に、その外部放散を抑制するための設備	Sクラス ^{*1}	—	負圧維持機能 (非常用ガス処理系作動時)
使用済燃料ピット	使用済燃料を貯蔵するための施設	Sクラス ^{*1}	—	液体の漏えい防止機能 (鋼製ライナが分担)
制御建屋の一部 (中央制御室の遮へい)	原子炉冷却系圧力バウンダリ破損事故後、炉心から崩壊熱を除去するための施設	Sクラス ^{*1}	—	遮へい機能
原子炉建屋の一部 (放射線低減効果の大きい遮へい)	放射性廃棄物以外の放射性物質に関連した施設で、その破損により、公衆及び従事者に過大な放射線被ばくを与える可能性のある施設	Bクラス ^{*2}	—	遮へい機能
原子炉建屋の一部及び制御建屋の一部	Sクラスの主要設備、補助設備等の間接支持構造物	—	基準地震動S _s	支持機能(間接)
原子炉建屋の一部	Bクラスの主要設備、補助設備等の間接支持構造物	—	S _B ^{*3}	支持機能(間接)
廃棄物処理建屋の一部	Bクラスの主要設備、補助設備等の間接支持構造物	—	S _B ^{*3}	支持機能(間接)
原子炉建屋の一部及び制御建屋の一部	Sクラスの主要設備、補助設備等への波及的影響の防止	—	基準地震動S _s	波及的影響防止
原子炉建屋の一部	Bクラスの主要設備、補助設備等への波及的影響の防止	—	S _B ^{*3}	波及的影響防止
廃棄物処理建屋の一部	Bクラスの主要設備、補助設備等への波及的影響の防止	—	S _B ^{*3}	波及的影響防止

- *1: Sクラスの建物・構築物は、基準地震動 S_s に対して安全機能の保持を、弾性設計用地震動 S_d 及び静的地震力に対して耐えることを確認する。
- *2: Bクラスの建物・構築物は、静的地震力に対して耐えることを確認する
- *3: Bクラスの施設に要求される地震力を S_B という。

BWR MARK-I

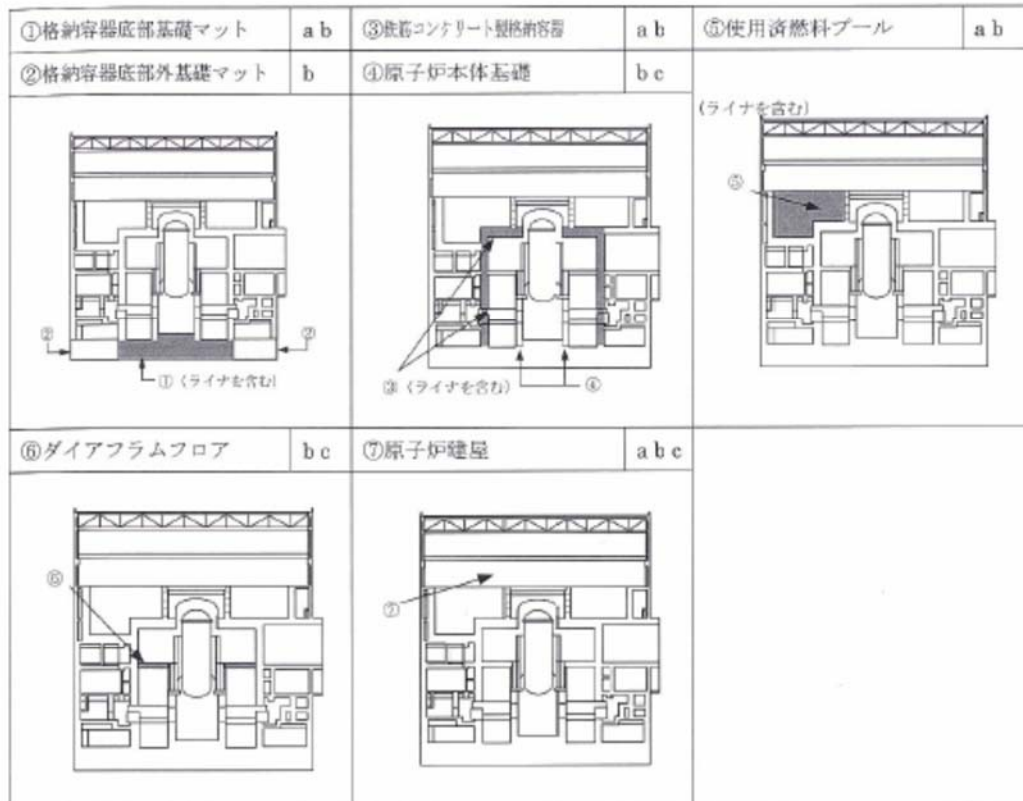
①格納容器底部基礎マット	b	③原子炉本体基礎	b c	⑤使用済燃料プール	a b
②格納容器底部外基礎マット	b	④シェル壁	b c		
⑥原子炉建屋原子炉棟	a b c	⑦原子炉建屋付属棟	b c		

BWR MARK-II

①格納容器底部基礎マット	a b	③原子炉本体基礎	b c	⑤使用済燃料プール	a b
②格納容器底部外基礎マット	b	④シェル壁	b c		
⑥ダイヤモンドフロア	b c	⑦原子炉建屋原子炉棟	a b c	⑧原子炉建屋付属棟	b c

a: 負圧維持機能あるいは漏えい防止機能
 b: 支持機能
 c: 波及的影響防止

解図 3.6.4-1 機能保持を要求される原子炉建屋各部位 (BWR) の例



a : 負圧維持機能あるいは漏えい防止機能
b : 支持機能
c : 波及的影響防止

解図 3.6.4-2 機能保持を要求される原子炉建屋各部位 (ABWR) の例

PWR 3LOOP

①基礎マット	b	②内部コンクリート	b c	③使用済燃料ピット (ライナを含む)	a b
④燃料取扱棟	b c	⑤原子炉周辺補機棟	b c	⑥外部遮へい建屋 (アニュラス部を含む)	a b c

PWR 4LOOP

①基礎マット (格納容器底部ライナを含む)	a b	②内部コンクリート	b c	③使用済燃料ピット (ライナを含む)	a b
④燃料取扱棟	b c	⑤原子炉周辺補機棟 (アニュラス部を含む)	a b c		

a : 負圧維持機能あるいは漏えい防止機能
 b : 支持機能
 c : 波及的影響防止

解図 3.6.4-3 機能保持を要求される原子炉建屋各部位 (PWR) の例

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

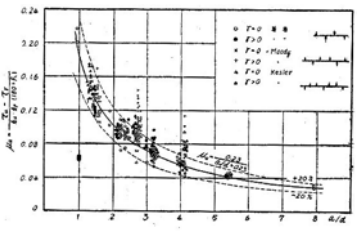
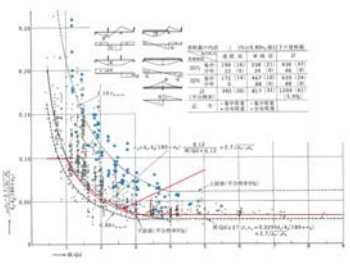
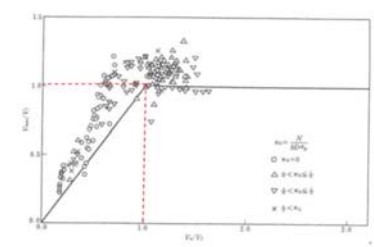
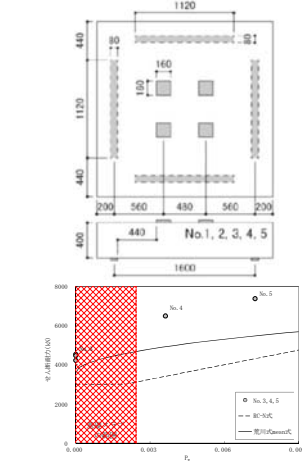
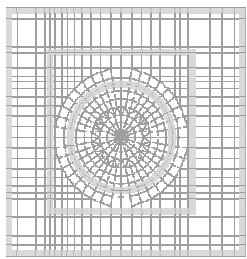
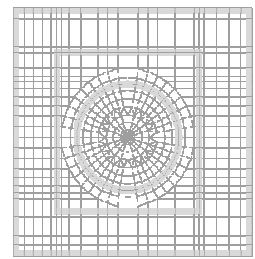
1. はじめに

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、基礎盤の面外せん断耐力の評価式への荒川 mean 式の適用性について示す。

具体的には、面外せん断耐力の評価に荒川 mean 式を用いた場合に、実機の配筋状況や応力状態を考慮し、十分な裕度を有していることを確認することにより、適用性を判断する。

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】 ① 集中荷重梁実験 (荒川 mean 式)</p> 	<p>【2章】 ② 分布荷重梁実験</p> 	<p>【4章】 ⑤ 軸力載荷梁実験 (修正荒川 mean 式)</p> 
基礎スラブ	<p>【3章】 ③ 集中荷重基礎スラブ実験</p> 	<p>【4章】 ④ 実機 (分布荷重・軸力無視)</p> 	<p>【4章】 ⑥ 実機 (軸力考慮)</p> 
<p>裕度① 17% (単純平均) 裕度② 24%</p> <p>実機基礎スラブの配筋・形状等を考慮 基本：5%，せん断スパン比：13%，荷条件：5% 裕度②a 裕度②b 裕度②c</p> <p>裕度③ 8%</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) 30%程度</p>			

(その他の余裕)

- ・【5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 30%程度) 裕度④
- ・【6章】実強度による裕度 (20~50%程度) 裕度⑤ ⇒評価全体の裕度 2倍以上

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。

- ・ RC-N 式(短期許容せん断力)

$$Q_A = bj\alpha f_s$$

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

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

- ・ 荒川 mean 式

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

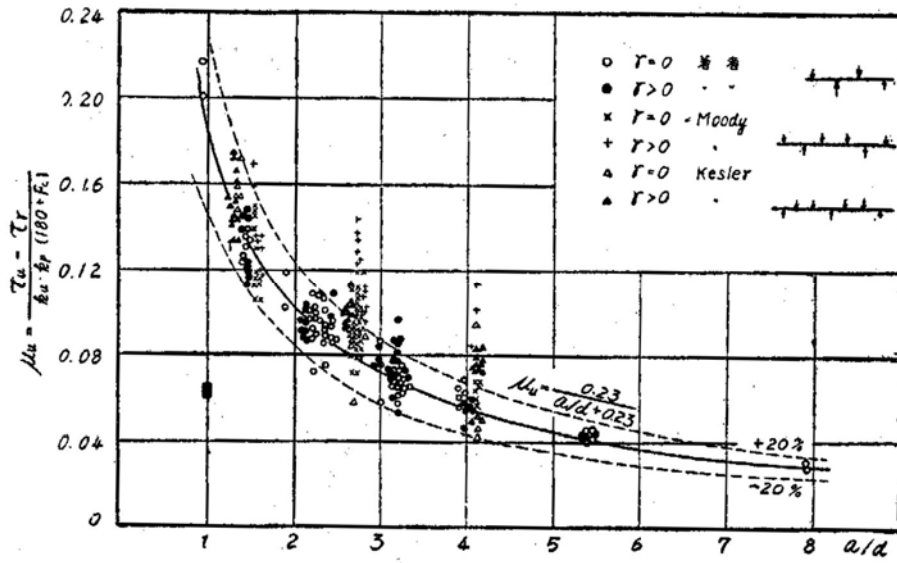
- ・ 修正荒川 mean 式

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

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。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 に示すように、当初は実験結果の平均値を示していたが、追加された各種載荷条件による実験結果は荒川 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、単純はりの分布荷重載荷時の実験結果上に青丸を追記した比較を図 2-2 に示す。分布荷重が作用する単純はりに対して、荒川 mean 式は下限を押さえている。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、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。

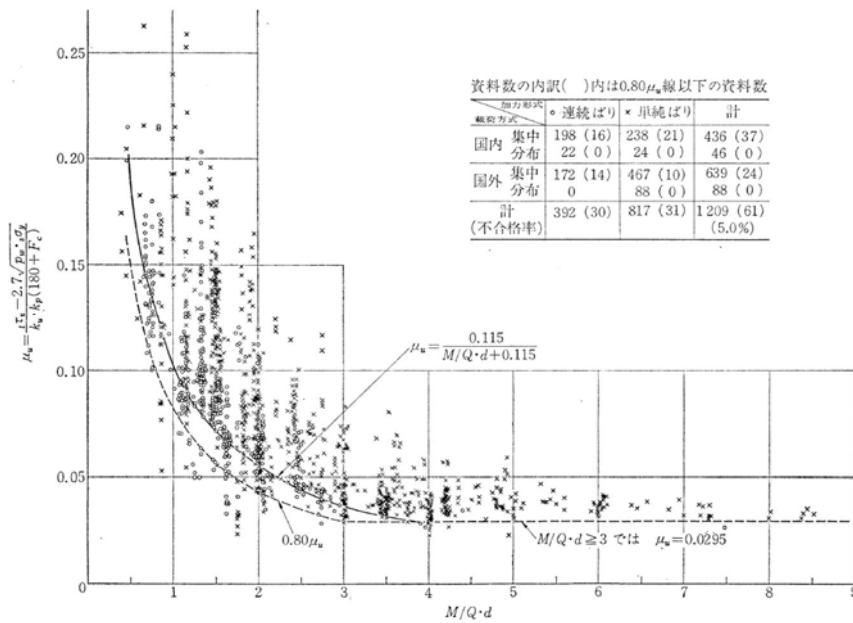
RC-N 式及び荒川 mean 式によるせん断耐力の比較を図 2-3 に示す。ここで、鉄筋量は、原子炉棟基礎の主筋の鉄筋比 0.362%~0.617%、シェル壁周囲のせん断補強筋比 0.242%であるため、せん断補強筋が無い場合は鉄筋比 0.35%、せん断補強筋が有る場合は鉄筋比 0.50%として耐力比較している。

図 2-3 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っている。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。



(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

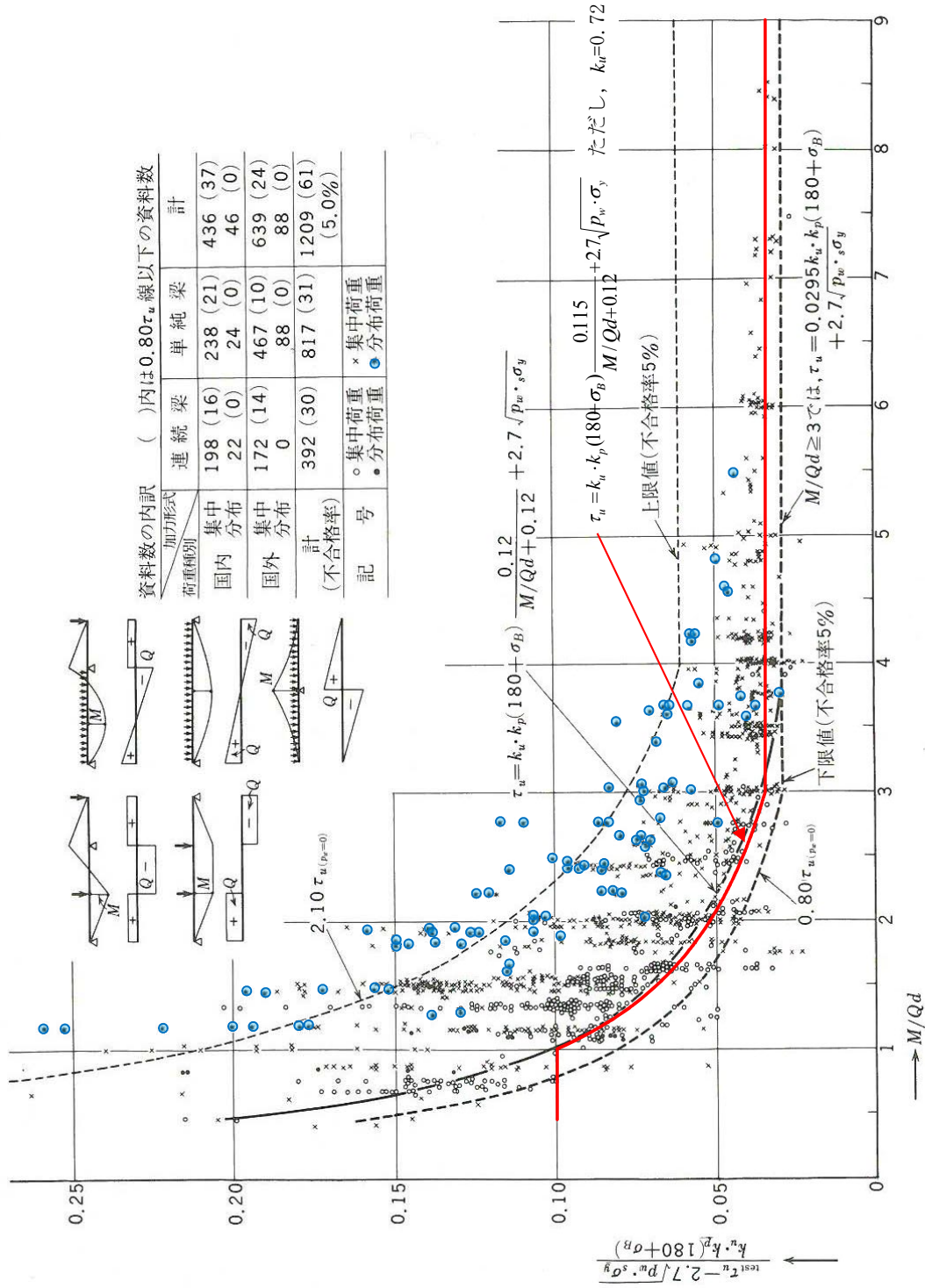
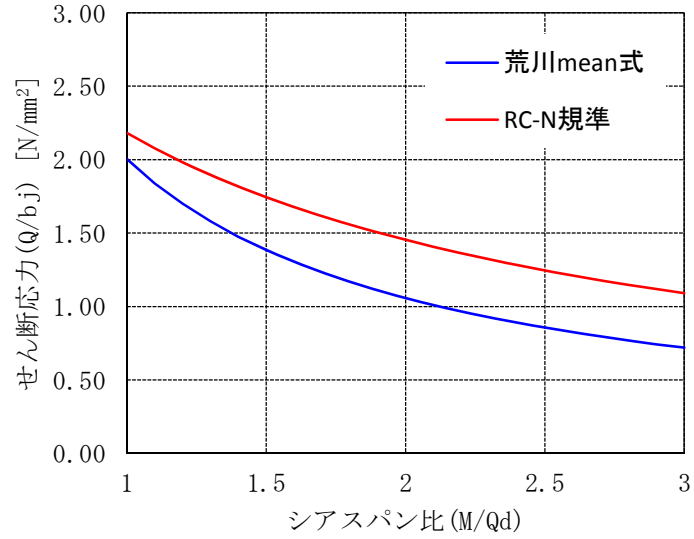
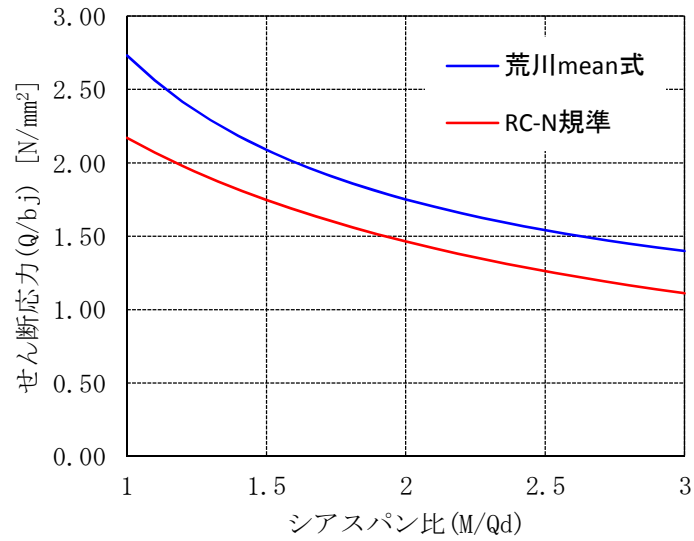


図 2-2 普通コンクリート梁のせん断破壊時における実験値と計算値の比較 (赤線は修正荒川 mean 式を, 青丸は単純梁の分布荷重載荷を示す)
 (日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010 の解説図 15.2 に一部加筆)



(1) $P_t=0.35\%$, $P_w=0\%$



(2) $P_t=0.50\%$, $P_w=0.242\%$

図 2-3 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 1 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 1 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。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, 3000kN 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。

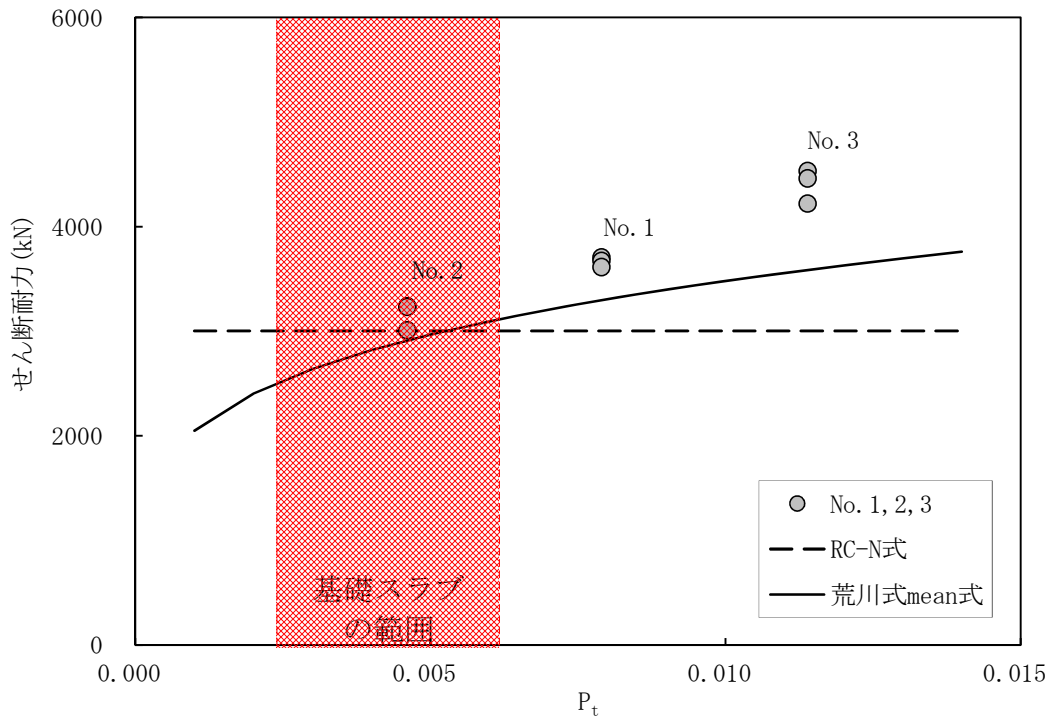
また, 図 3-3 に示すように, 加圧板と支持板の中間位置における周長を幅 b として荒川 mean 式によるせん断耐力を算定している。

表 3-1, 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。

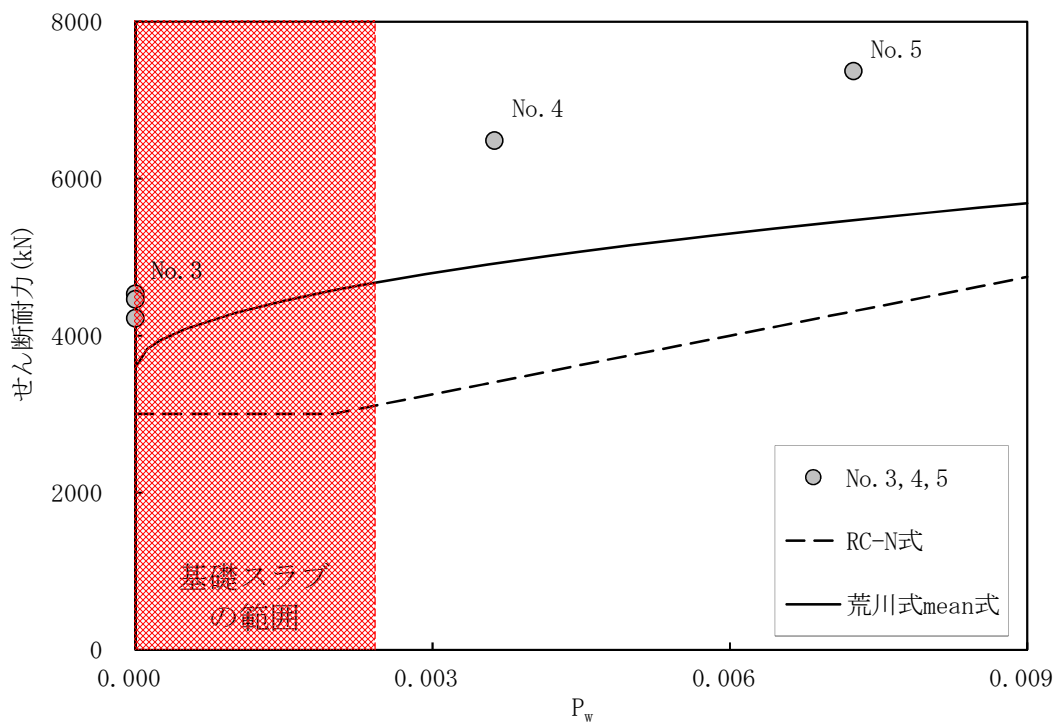
文献 1 : 熊谷仁志, 貫井泰, 今村晃, 寺山武志, 小島功 : RC 基礎スラブの面外せん断耐力に関する実験的研究, 終局強度に関する研究, 構造工学科論文集 Vol. 55B, pp. 323-330, 2009. 4

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)	荒川 mean 式 Q_u (kN)	耐力比 Q/Q_u	耐力比 (平均) Q/Q_u
1-1	0.79	0	1.56	3706	3275	1.13	1.12
1-2				3673		1.12	
1-3				3614		1.10	
2-1	0.46	0	1.56	3010	2995	1.00	1.05
2-2				3237		1.08	
2-3				3234		1.08	
3-1	1.14	0	1.56	4533	3575	1.27	1.23
3-2				4462		1.25	
3-3				4221		1.18	
4	1.14	0.36	1.56	6485	4918	1.32	—
5	1.14	0.73	1.56	7372	5470	1.35	—
6-1	0.79	0	1.22	6018	4474	1.35	1.27
6-2				5759		1.29	
6-3				5214		1.17	
7-1	0.79	0	1.89	2407	2328	1.03	1.02
7-2				2414		1.04	
7-3				2322		1.00	
8-1	0.79	0	1.56	3902	3290	1.19	1.18
8-2				3915		1.19	
8-3				3819		1.16	
					平均	1.17	

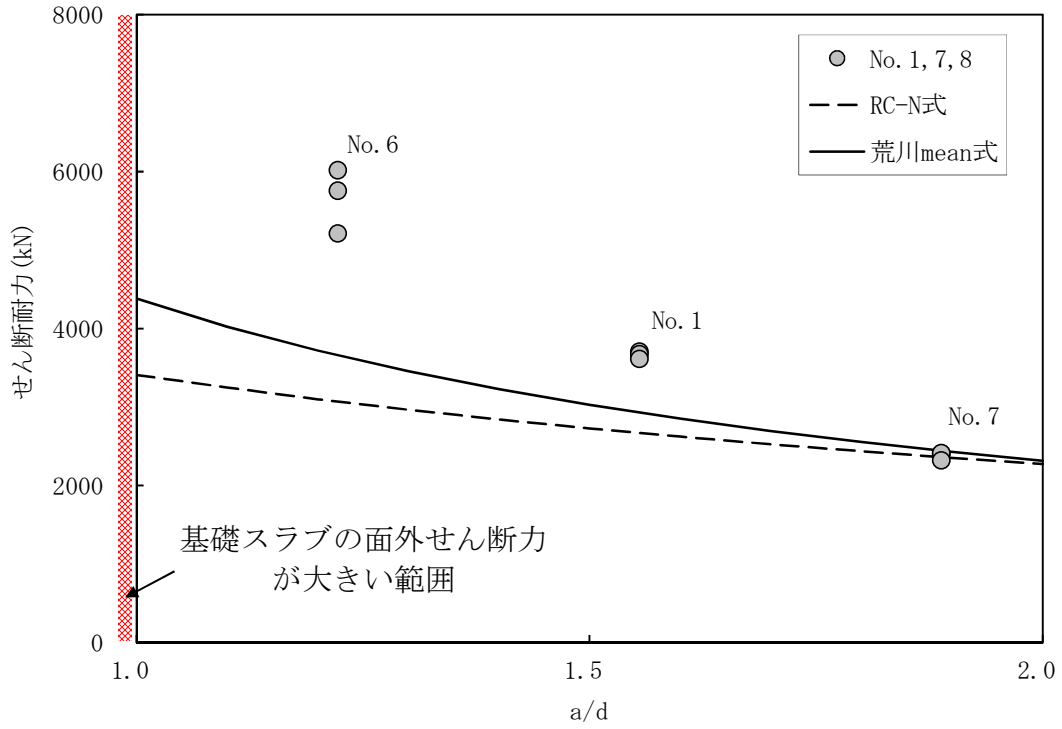


(1) 主筋の影響

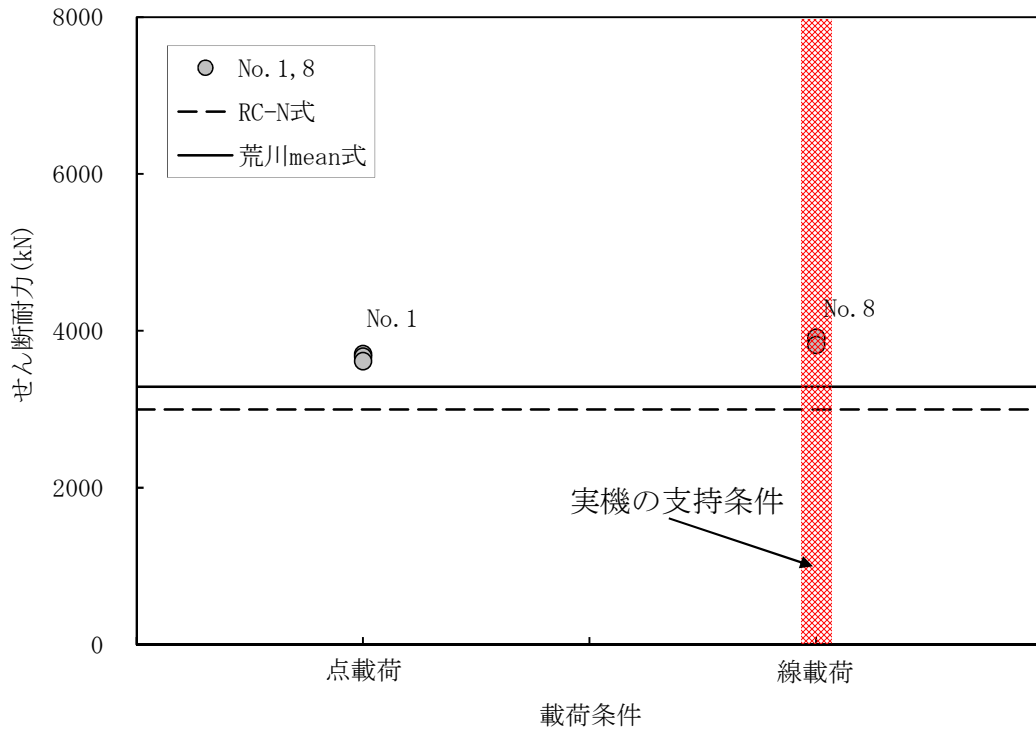


(2) せん断補強筋比の影響

図 3-1(1/2) 各種せん断強度算定式と実験値の比較



(3) せん断スパン比の影響



(4) 荷条件の影響

図 3-1(2/2) 各種せん断強度算定式と実験値の比較

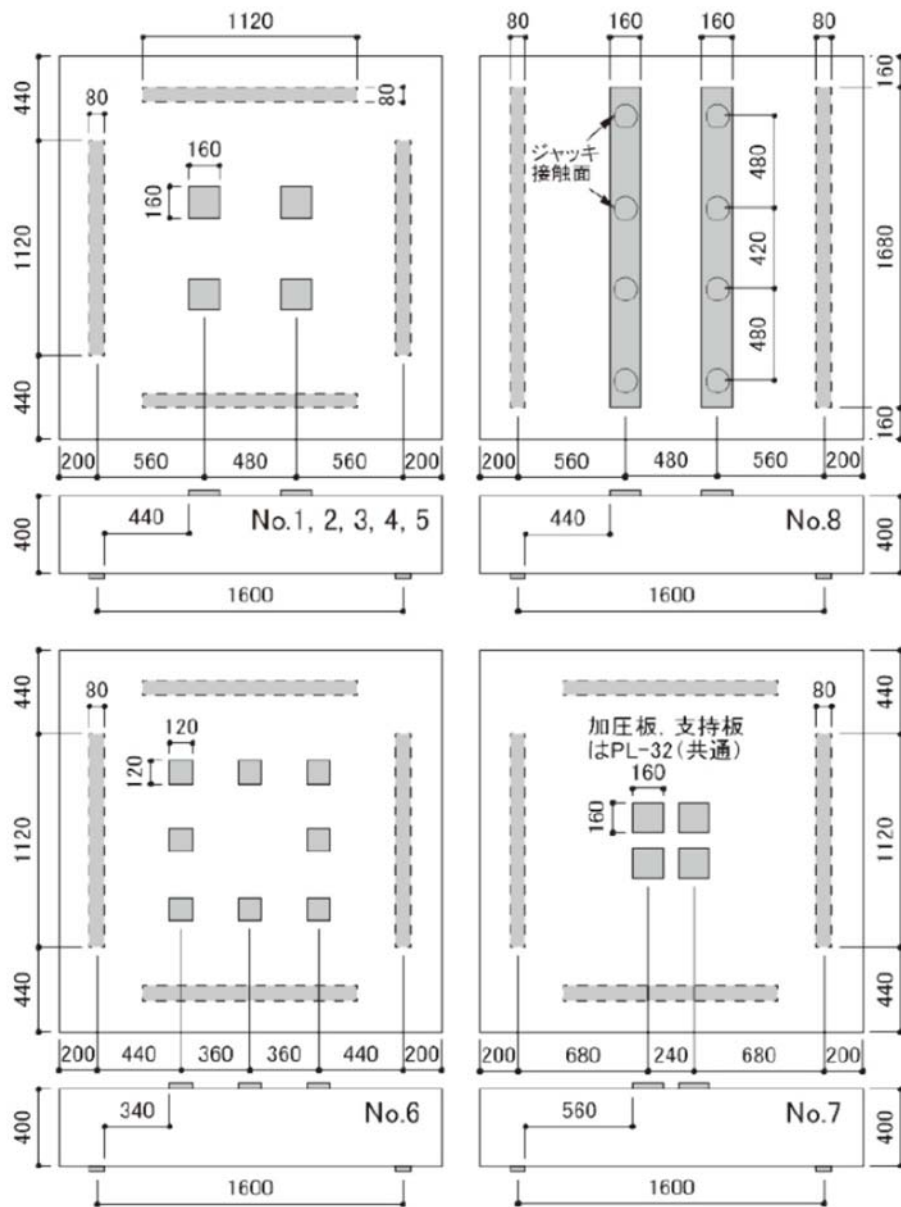


図 3-2 試験体の加圧板・支持板の位置(文献 1 より転載)

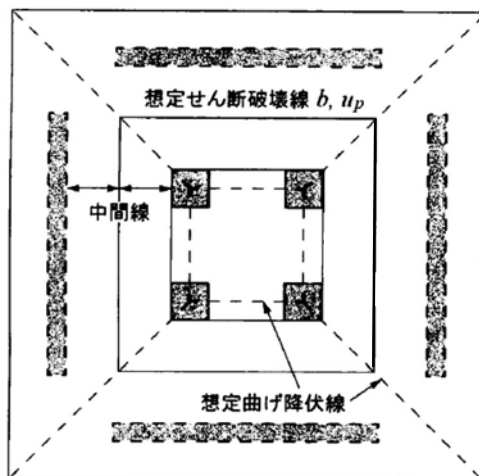


図 3-3 荒川 mean 式による耐力評価に用いる幅(文献 1 より転載・加筆)

(2) 実験と実機の比較

実機と実験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%であり、試験体 No.2 の主筋比に近い。No.2 の試験体は荒川 mean 式による耐力に比べ約 1.05 倍 [裕度②a] の耐力となっている。

原子炉棟基礎の面外せん断力が大きくなるシェル壁と内部ボックス壁の間のせん断スパン比は0.8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より小さくなるため荒川 mean 式による耐力は保守的であると考えられる。また、実験ではせん断スパン比が1.56の試験体と、せん断スパン比が最も小さい1.22のNo.6の試験体の耐力比は約 1.13 倍 (1.27/1.12) [裕度②b] となっている。

原子炉棟基礎の基礎スラブの常時荷重と地震荷重は基礎版に取りつく壁から作用する。したがって、基礎スラブに対し、線状に荷重が作用する。線載荷のNo.8の試験体と点載荷のNo.1の試験体の耐力比は約 1.05 倍 (1.18/1.12) [裕度②c] 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 1.24 倍 [裕度②] ($=1.05 \times 1.13 \times 1.05$) の耐力を有していると評価できる。

4. 基礎スラブに発生する軸力の影響

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。

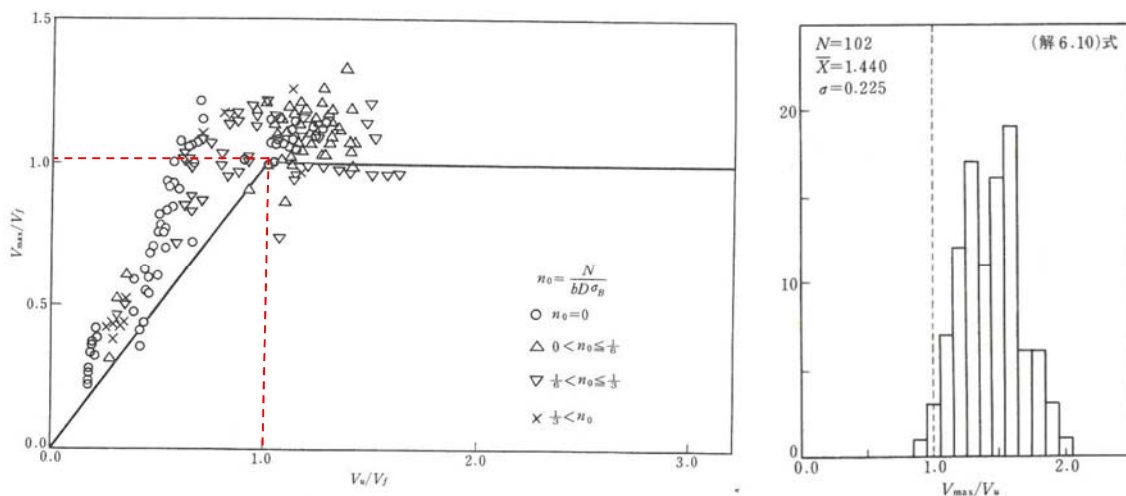
文献2に示されている軸力の影響を考慮した修正荒川 mean 式と実験値の比較を図4-1、図4-2に示す。図4-1の縦軸は V_{max}/V_f であり、横軸は V_u/V_f である。ここで、 V_{max} は実験最大せん断強度、 V_f は危険断面が解析上の曲げ強度に達した時のせん断力、 V_u は修正荒川 mean 式によるせん断強度である。すなわち、図4-1の横軸及び縦軸が1.0以下となる領域が、せん断破壊が先行する試験体を示しており、実線の上側のプロットが修正荒川式によるせん断耐力を上回る試験体を示している。また、図4-2の横軸は V_{max}/V_u であり、縦軸が、修正荒川式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。

また、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 式に対する修正荒川 mean 式の面外せん断耐力の比率を示す。

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、検定値が0.9以上の要素においては平均で約8%〔裕度③〕大きくなる結果となっている。

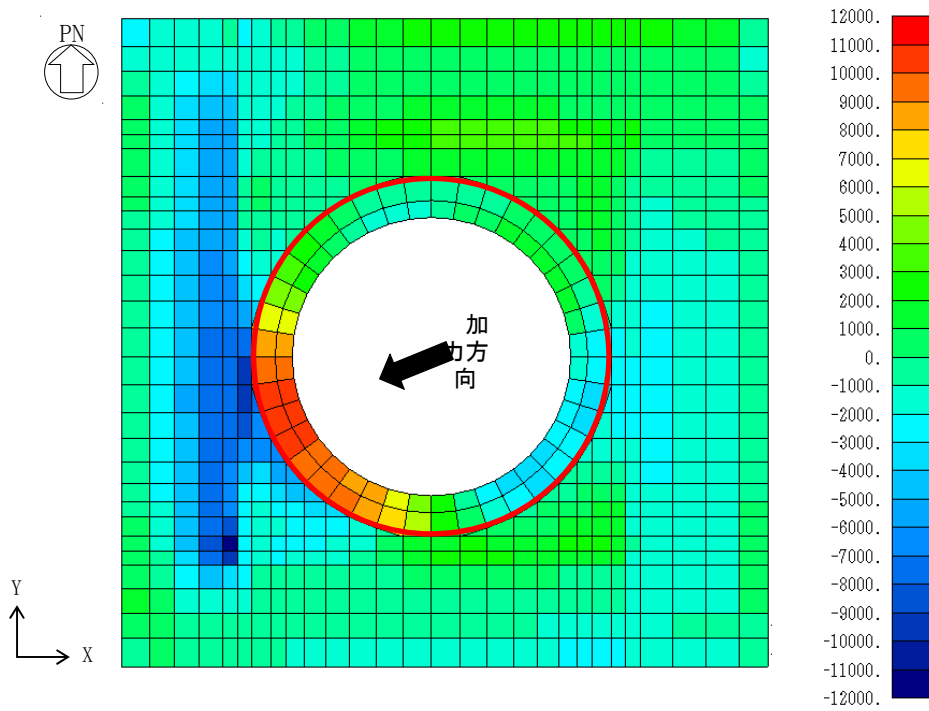
文献2：日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型 耐震設計指針・同解説



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

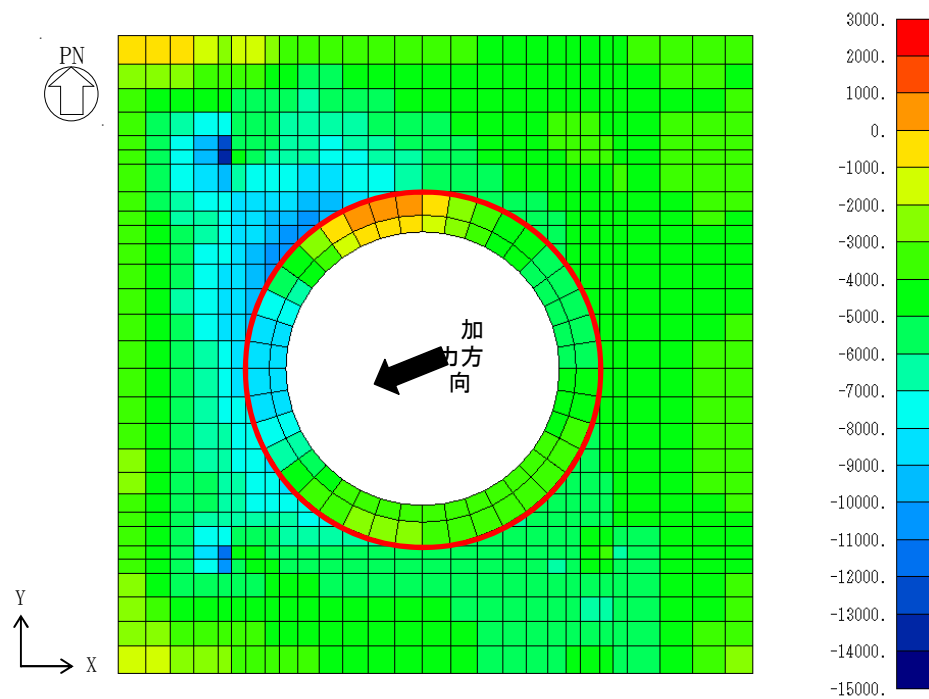
図4-1 修正荒川 mean 式によるせん断強度算定値と実験値の比較(縦軸、横軸共に1.0以下がせん断破壊が先行する領域)

図4-2 V_{max}/V_u 比の度数分布



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。

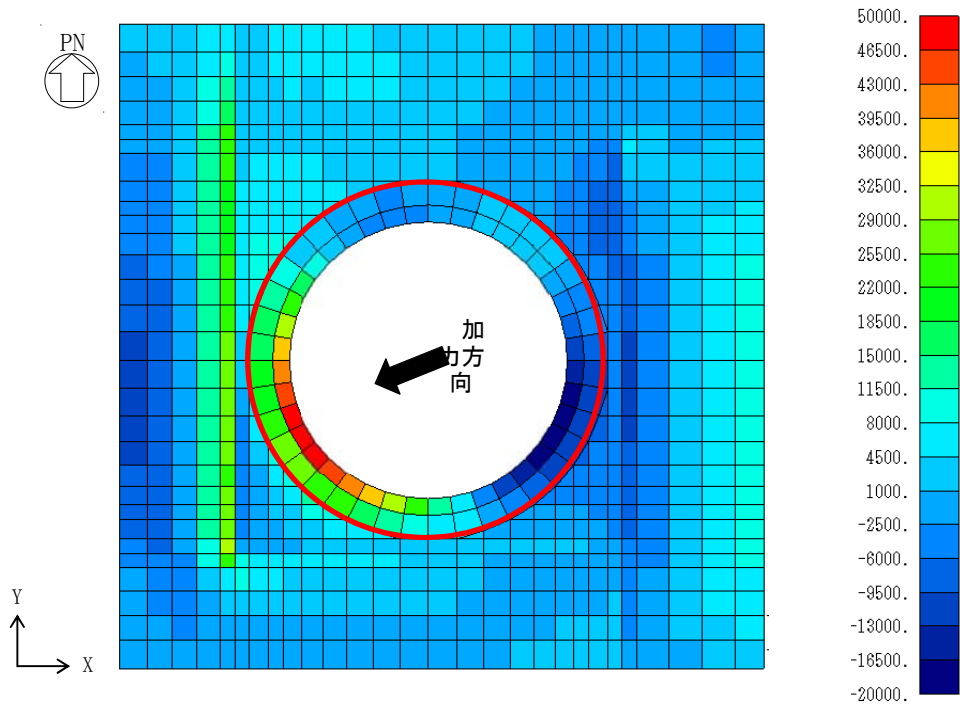
(1) 面外せん断力 (単位: kN/m)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の軸力を示す。

(2) 軸力 (単位: kN/m)

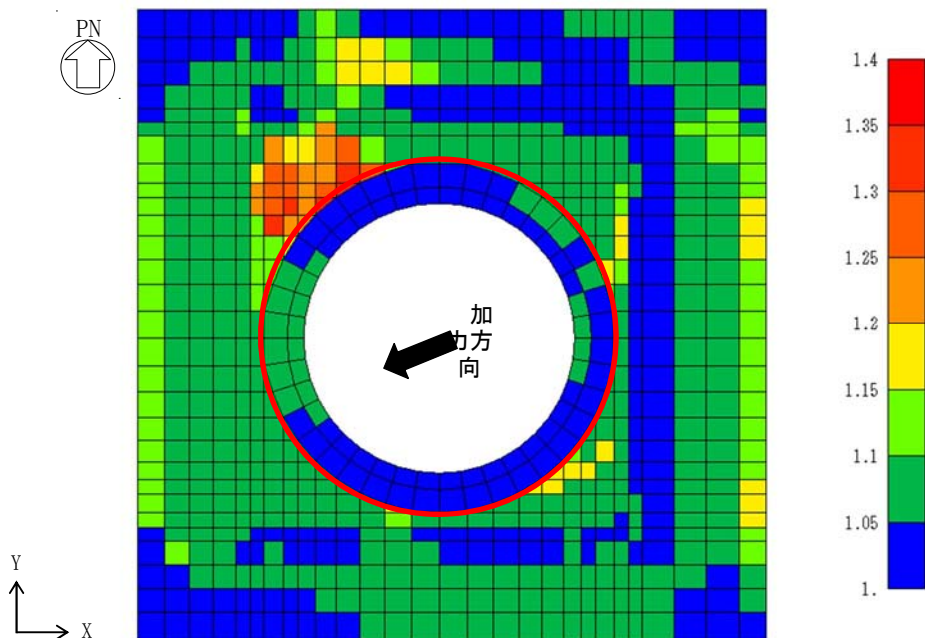
図 4-3a 基礎スラブの発生応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



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。

(3) 曲げモーメント (単位: $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)

図 4-3b 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 方向の面外せん断耐力比を示す。

最大値: 1.32

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

5. 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。

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。

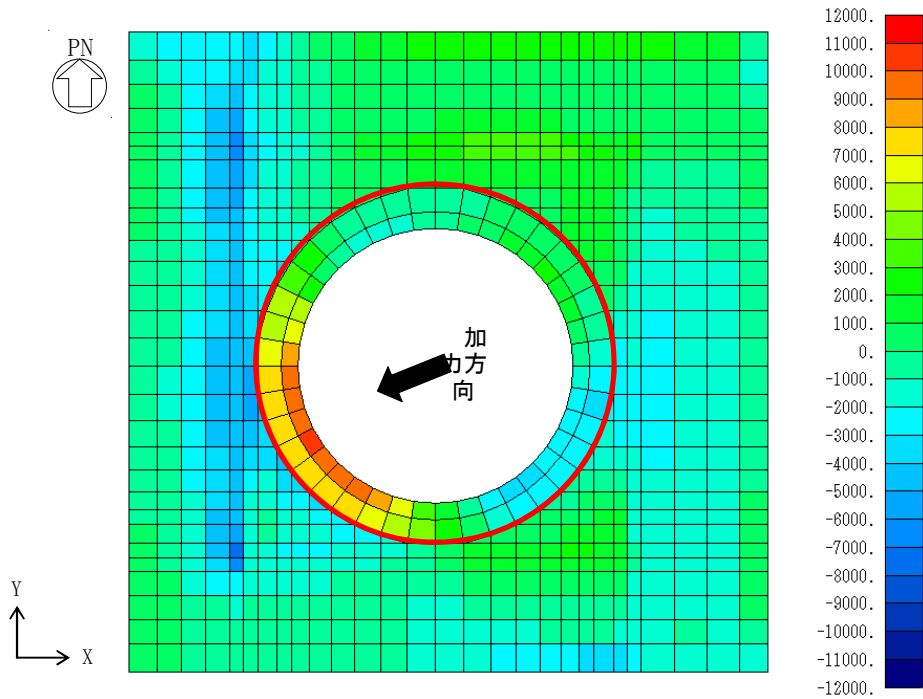
ここでは、人工岩盤部をソリッド要素でモデル化した場合の応力状態を示すとともに、荒川 mean 式による面外せん断力の検定比を示す。

図 5-1 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 5-2 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 5-2 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 38%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、人工岩盤を無視した場合の増加率 (8%程度) と比べるとやや小さくなる。

図 5-3 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 5-1 に示す。

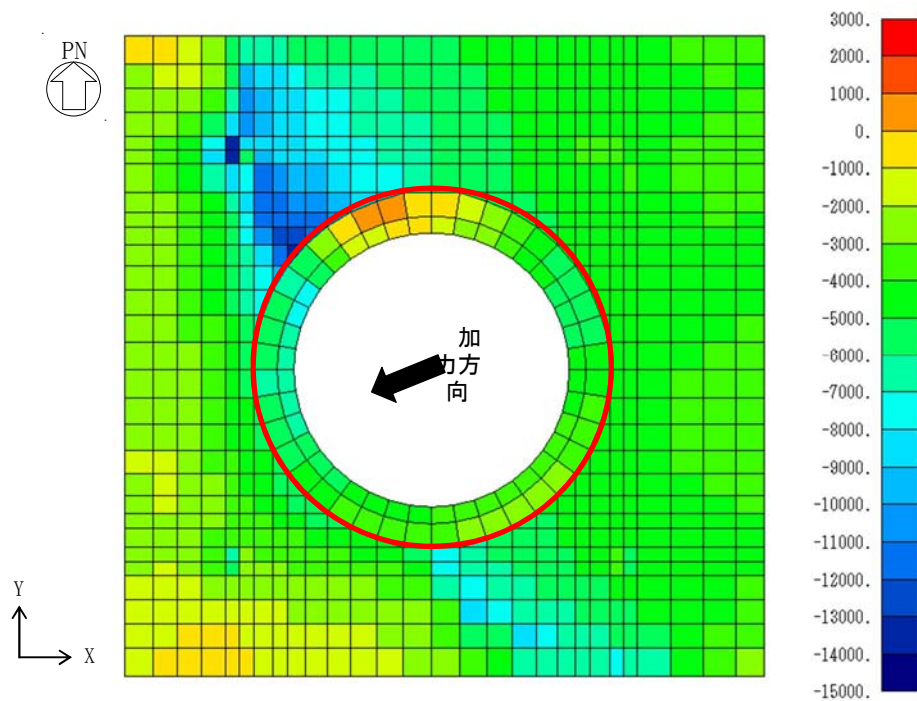
表 5-1 に示すように、人工岩盤を考慮すると人工岩盤を無視した場合に比べ、内部ボックス壁脚部における面外せん断力が大きな領域では面外せん断力が 30%程度低下する。なお、シェール壁脚部では内部ボックス壁ほどの応力低下は生じず 7%程度の低下となっているが、地震力により押し込まれる領域を見ると、大きな面外せん断力が生じる領域は減少している。また、面外せん断力が比較的小さな領域では、人工岩盤を考慮することによる面外せん断力の低下率は小さくなっている。

図 5-3 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、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 30%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。

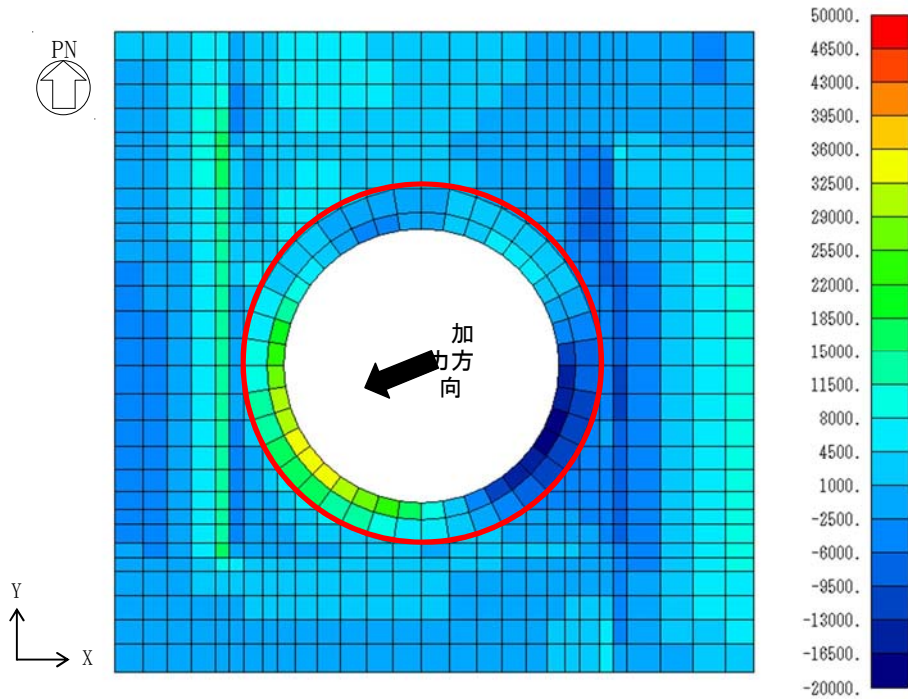
(1) 面外せん断力 (単位: kN/m)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の軸力を示す。

(2) 軸力 (単位: kN/m)

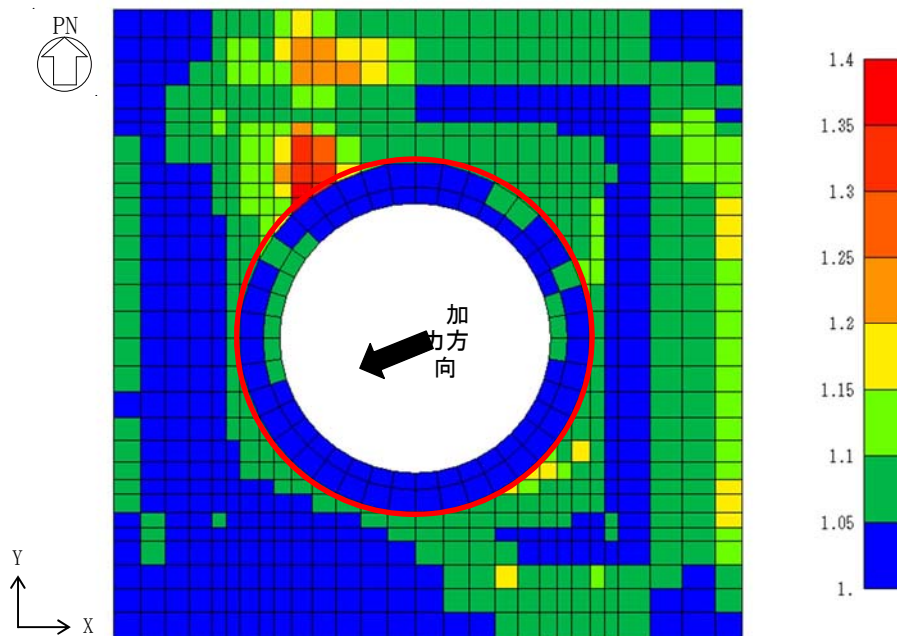
図 5-1(1/2) 基礎スラブの発生応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



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。

(3) 曲げモーメント (単位: $\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}$)

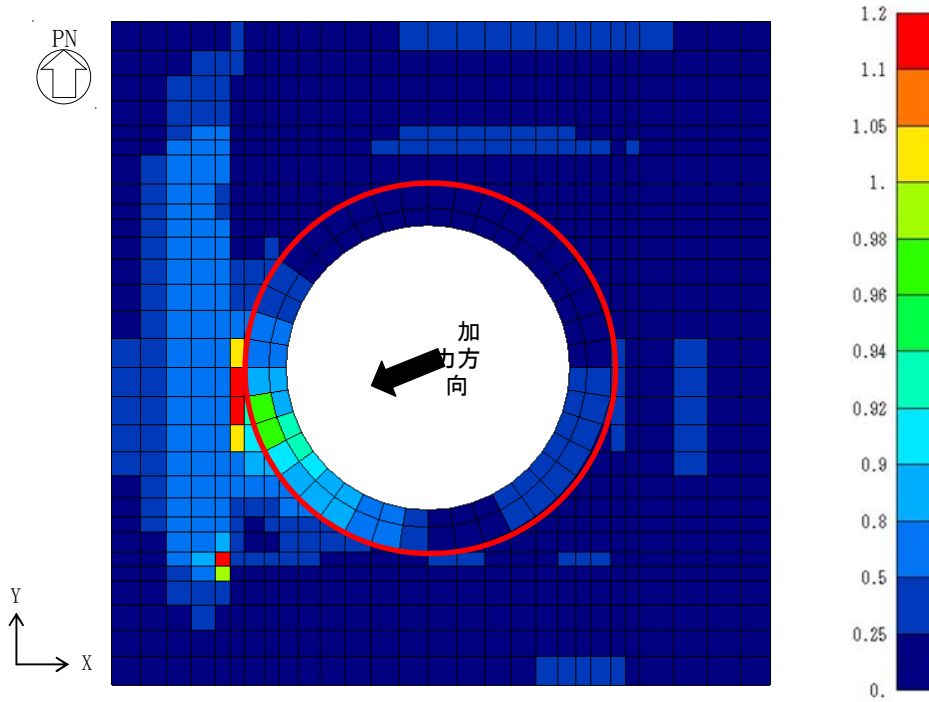
図 5-1(2/2) 基礎スラブの発生応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の面外せん断耐力比を示す。

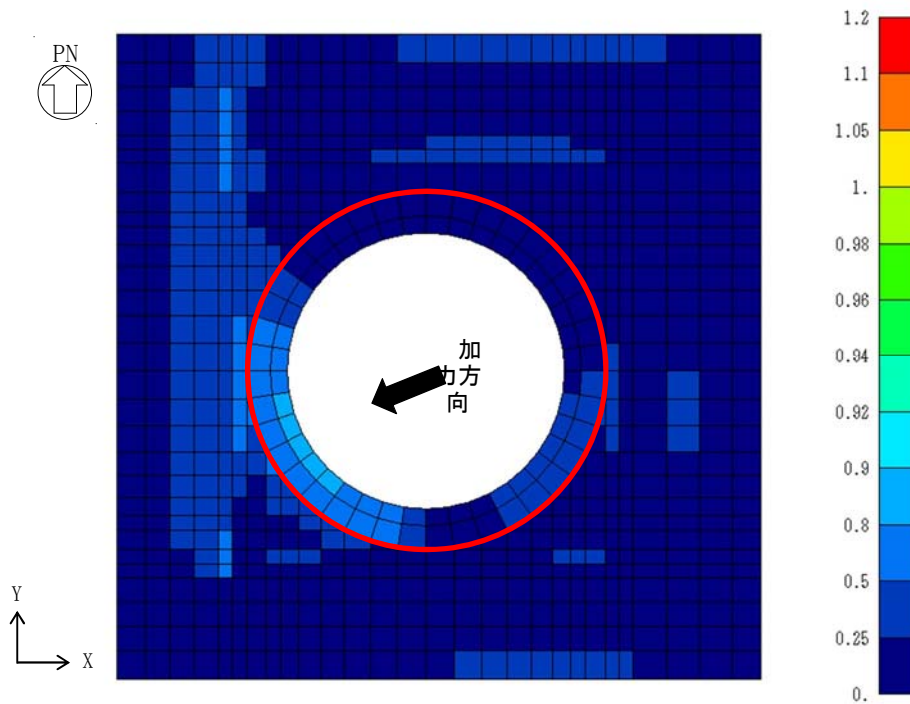
最大値: 1.38

図 5-2 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 方向の軸力を示す。

(1) 人工岩盤無視



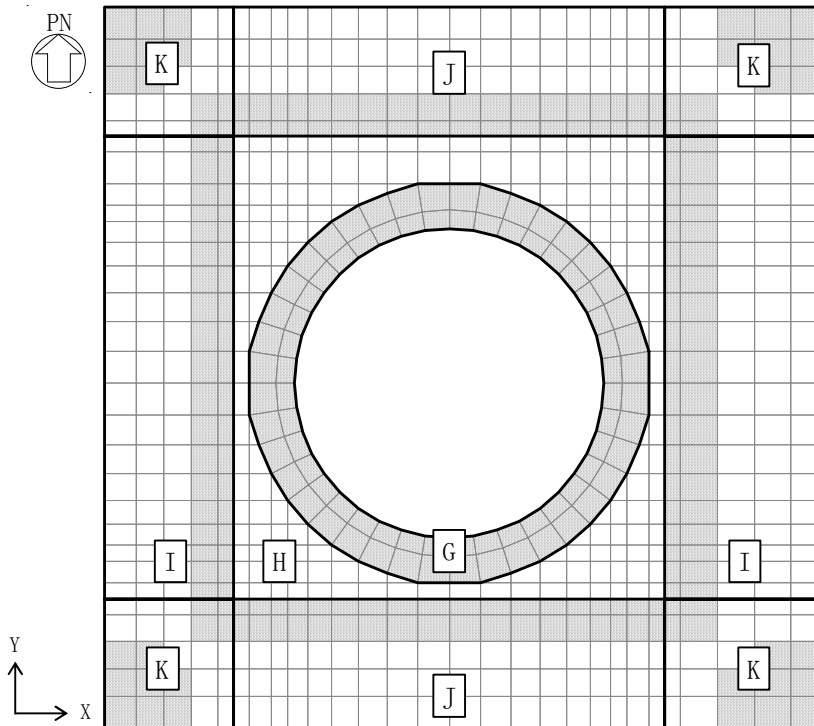
注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の軸力を示す。

(2) 人工岩盤考慮

図 5-3 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 5-1 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	10774	10012	0.929
H	9336	5433	0.582
I	11727	7627	0.650
J	3504	3323	0.948
K	9925	6624	0.667



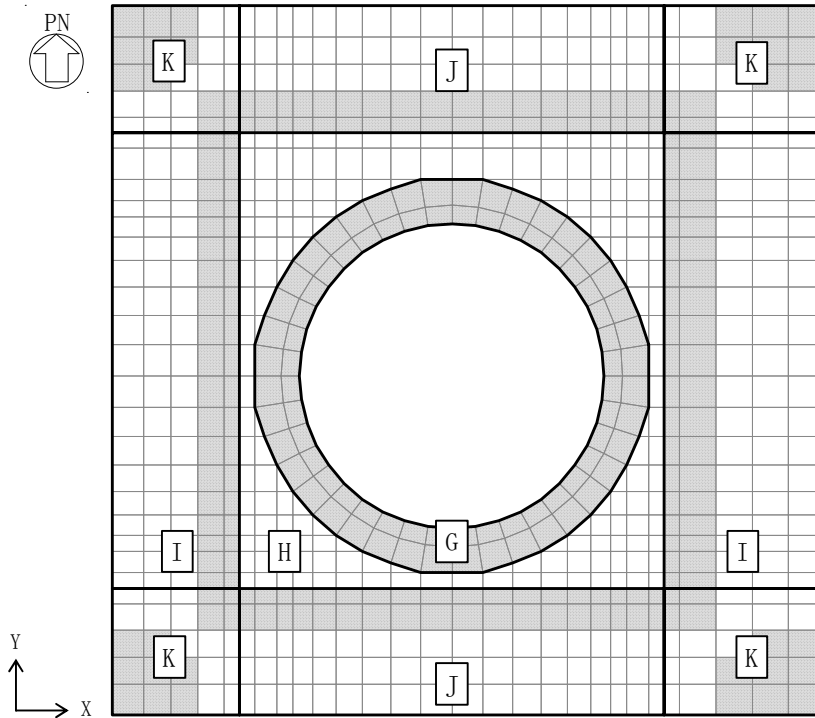
配筋領域図

6. 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 N/mm²を用いている。これに対し実強度は 42.1 N/mm²であり、荒川 mean 式によるせん断耐力はせん断補強筋が無い部位は約 1.48 倍、せん断補強筋がある部位は約 1.22 倍～約 1.37 倍であり、実強度を考慮した場合 20～50%程度〔裕度⑤〕の耐力が大きくなる。

表 6-1 許容せん断力の比較

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 ²)			備考
				設計基準強度	実強度	増加率	
H~K	—	0.0	—	—	—	1.48	(42.1+18)/(22.1+18)
G	0.490	0.242	1	3.87	2.84	1.36	
			3	1.88	1.51	1.25	
	0.617		1	4.04	2.95	1.37	
			3	1.94	1.55	1.25	
I, J	0.240	0.242	1	3.40	2.53	1.34	
			3	1.72	1.40	1.23	
	0.377		1	3.69	2.72	1.36	
			3	1.82	1.47	1.24	
K	0.240	0.242	1	3.40	2.53	1.34	
			3	1.72	1.40	1.23	
	0.248		1	3.42	2.54	1.35	
			3	1.72	1.41	1.22	



・せん断補強筋は、網掛け部のみに考慮する。

配筋領域

7. 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の比較」に示すように、荒川 mean 式は実験値の下限を示し、文献 1 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 24%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8%程度、面外せん断耐力が増加する。

さらに、「5. 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 30%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 式による増加率の最大は 38%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（8%程度）と比べるとやや小さくなる。

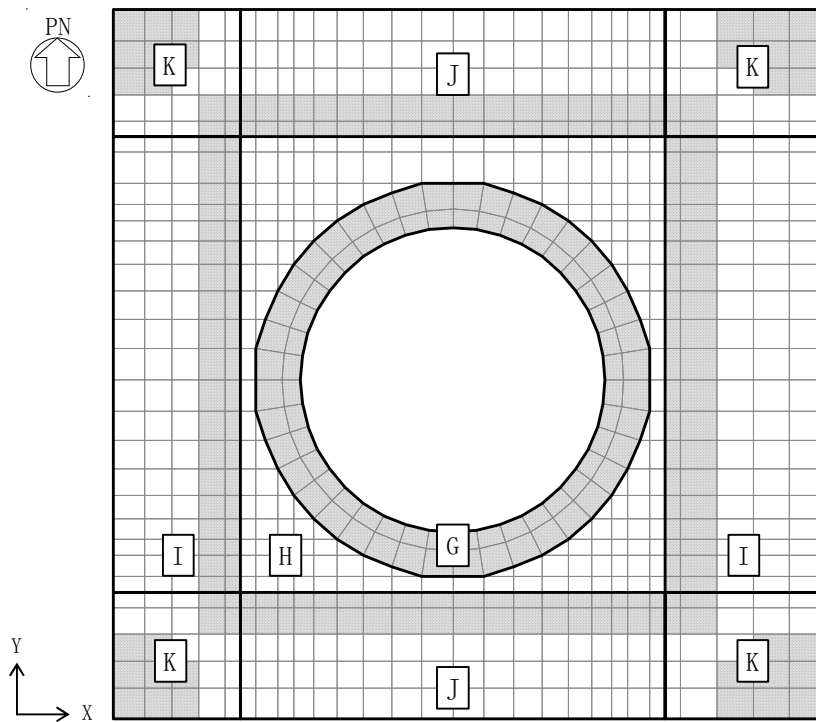
以上より、人工岩盤を考慮しない基礎スラブの応力解析結果に対し、許容限界として荒川 mean 式による終局面外せん断耐力を適用することは、荒川 mean 式の裕度が 24%、軸力の影響による裕度が 5%程度見込み、全体として3割程度の裕度を有しており、安全余裕があると言える。

さらに、実際には人工岩盤があり、基礎盤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30%程度低減されること、コンクリートの実強度を考慮すると実際の耐力は20~50%程度大きくなることも加味すると、全体として2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、網掛け部のみに考慮する。

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

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%)

() 内は引張鉄筋比を示す。

(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%)

() 内は引張鉄筋比を示す。

(c) せん断補強筋 (上段：配筋, 下段：せん断補強筋比)

領域	方向	上端筋
共通	共通	D22@400 (0.242%)

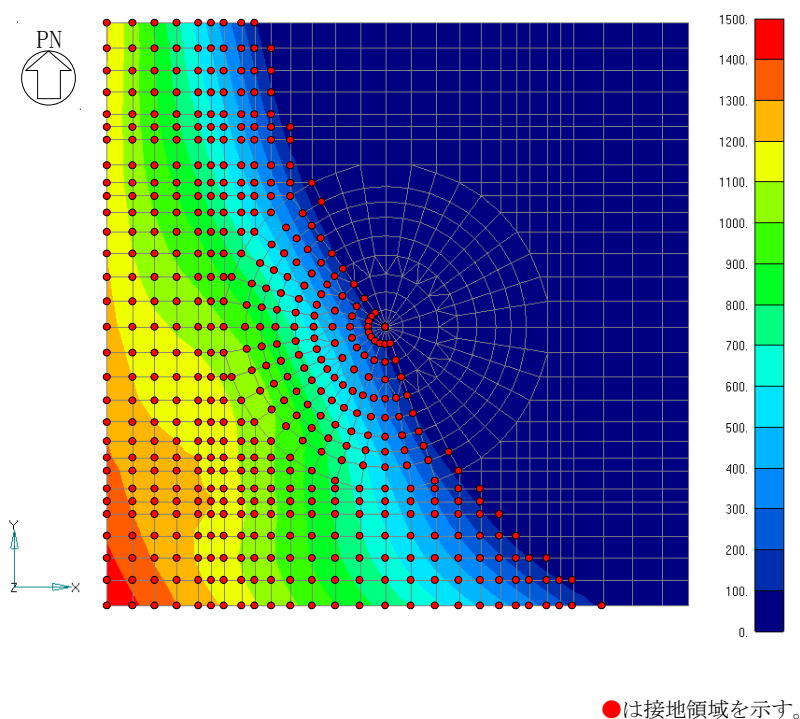
() 内は引張鉄筋比を示す。

付録2 基礎スラブの応力状態

荷重組合せケース (0.4N→S+1.0E→W+0.4D→U, Ss-31) の接地圧分布を付図 2-1 に、基礎スラブの X 方向の発生応力を付図 2-2 に、変形図を付図 2-3 に示す。

付図 2-1 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。

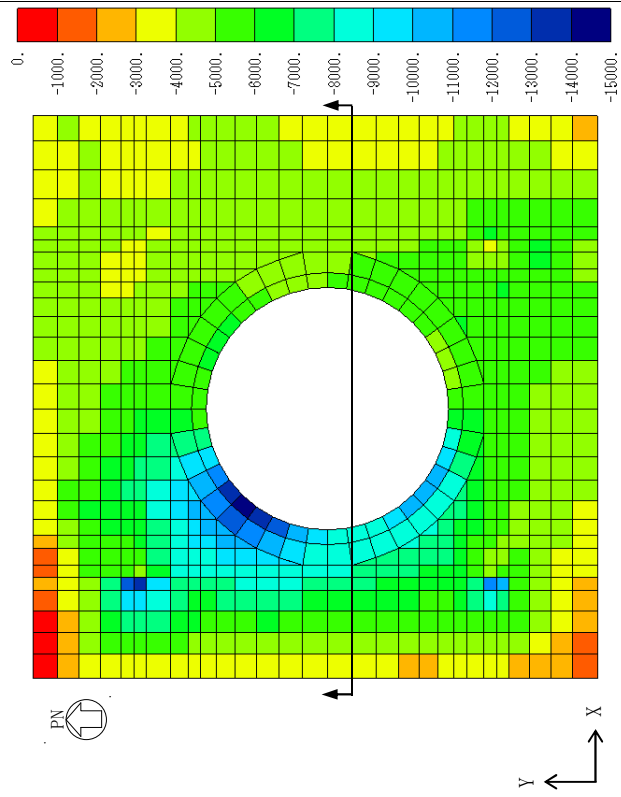
また、付図 2-2 (2/2) に示すように、内部ボックス壁の南西角部では Y 方向(南北方向)の面外せん断力も大きくなっているものの、シェル壁と内部ボックス壁の間では、X 方向(東西方向)と Y 方向共に面外せん断力が大きくなる部位は少なく、**2 方向のせん断力の組合せによる影響は小さいと考えられる。**



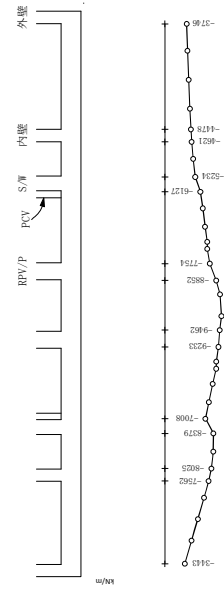
付図 2-1 接地圧分布 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)

応力コンター

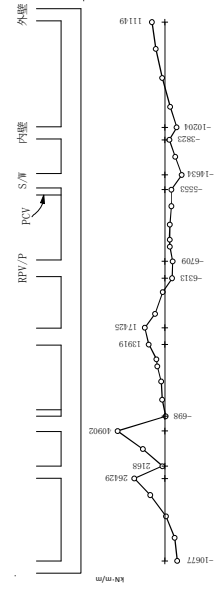
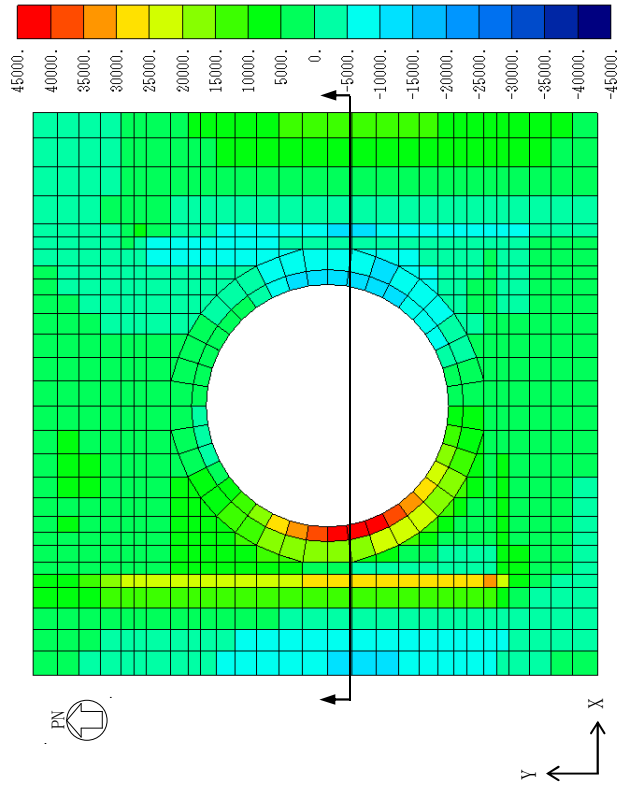
軸力 N_x (単位: kN/m)



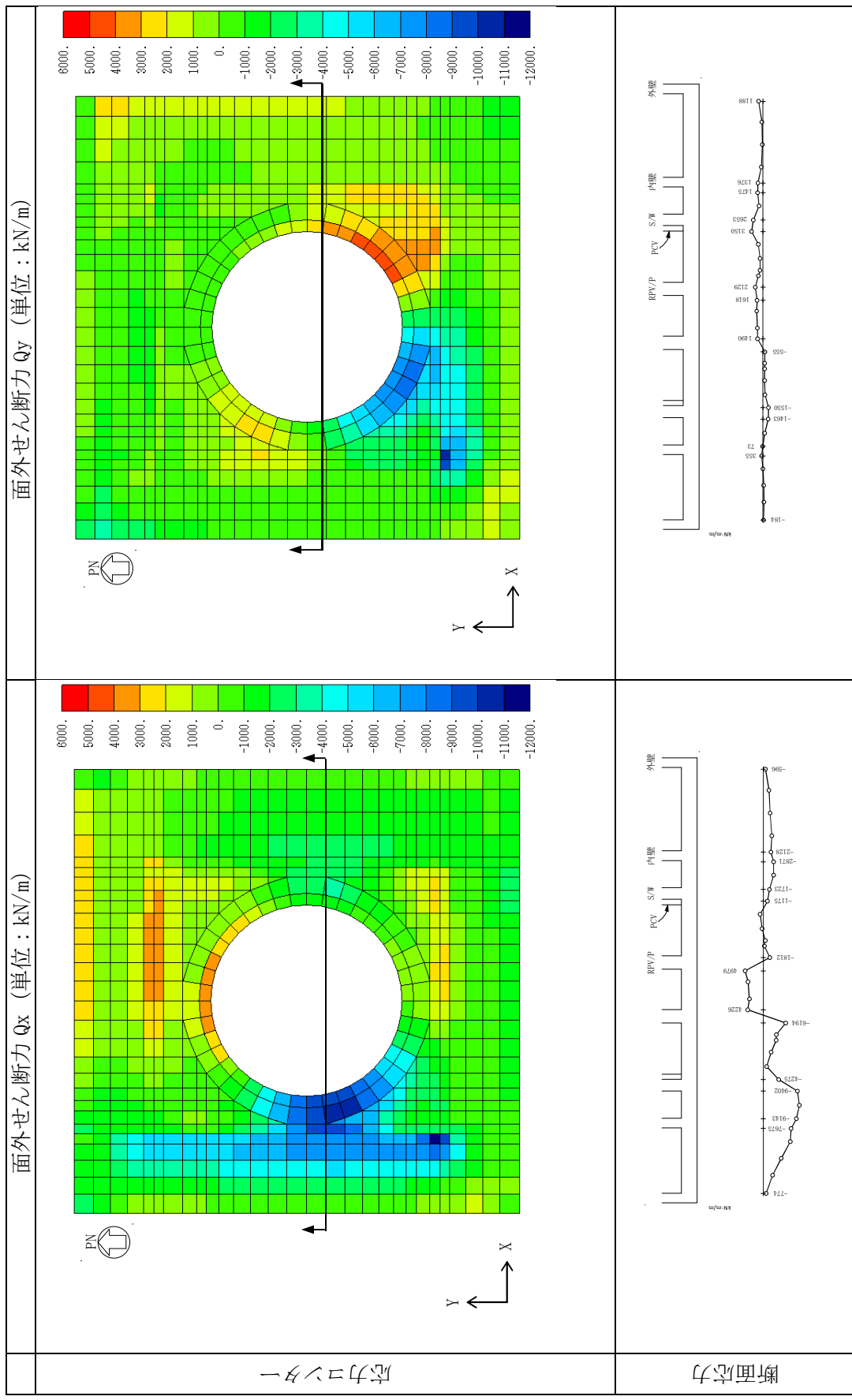
断面応力



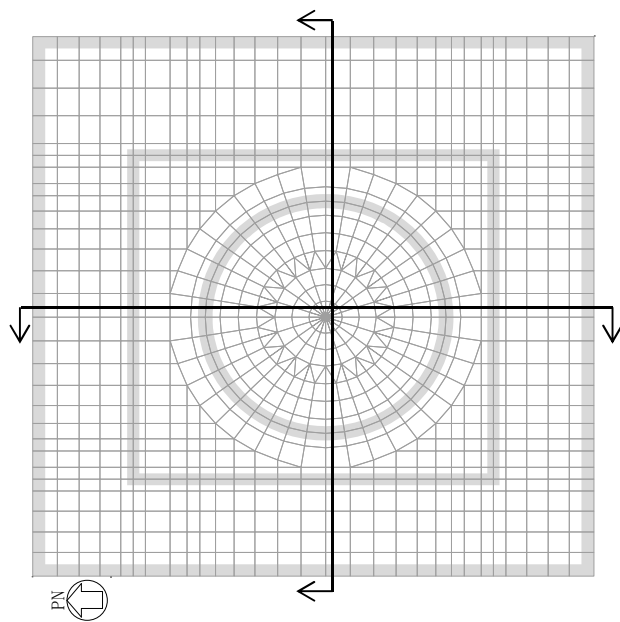
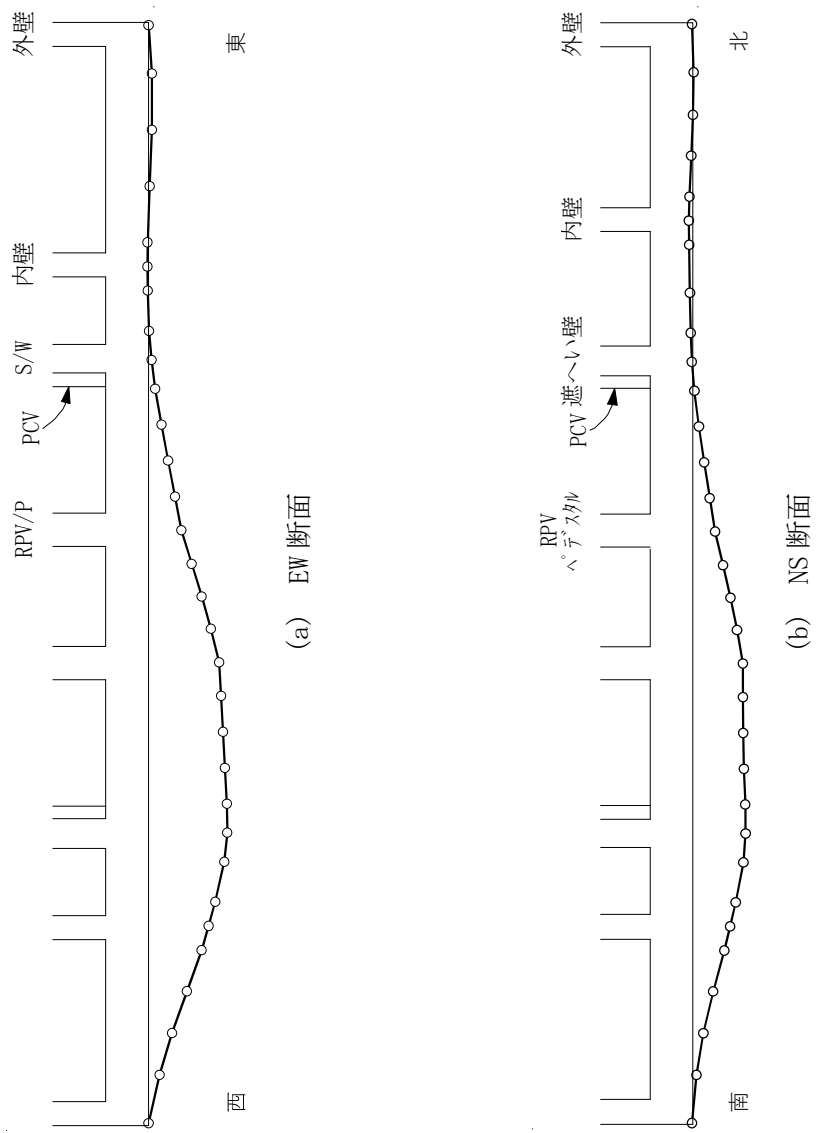
曲げモーメント M_x (単位: kNm/m)



付図 2-2 (1/2) 基礎盤の断面応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



付図 2-2 (2/2) 基礎盤の断面応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



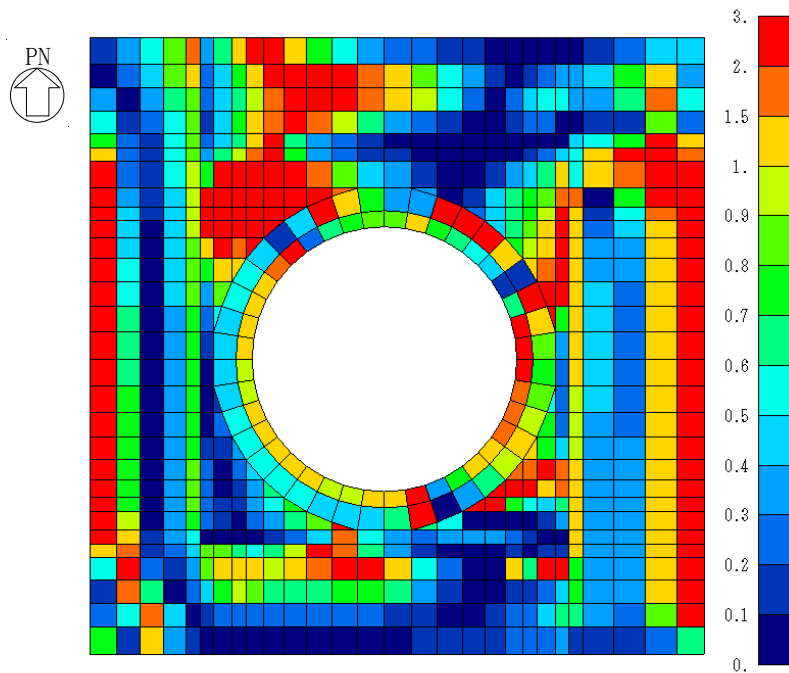
付図 2-3 基礎版の面外方向の変形図 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)

付録3 せん断スパン比の影響について

荷重組合せケース (0.4N→S+1.0E→W+0.4D→U, Ss-31) の、面外せん断耐力の算定に用いたせん断スパン比(M/Qd)の分布を付図3-1に示す。

せん断スパン比は、部位により変動するが、押し込みの厳しい南西部付近については、ほとんどの要素で1.0以下となっており、荒川 mean 式では、せん断スパン比が1.0より小さい場合、1.0とするため、せん断スパン比による割増しは最大限考慮されている。

しかしながら、要素の発生応力より求めたせん断スパン比は1.0を下回るため、せん断スパン比による割増は荒川 mean 式による耐力より大きくなると考えられる。



付図3-1 せん断スパン比 (M/Qd) (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)

付録4 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および検定比を付図4-1に、要素302, 465および610における許容せん断力を付表4-1に示す。

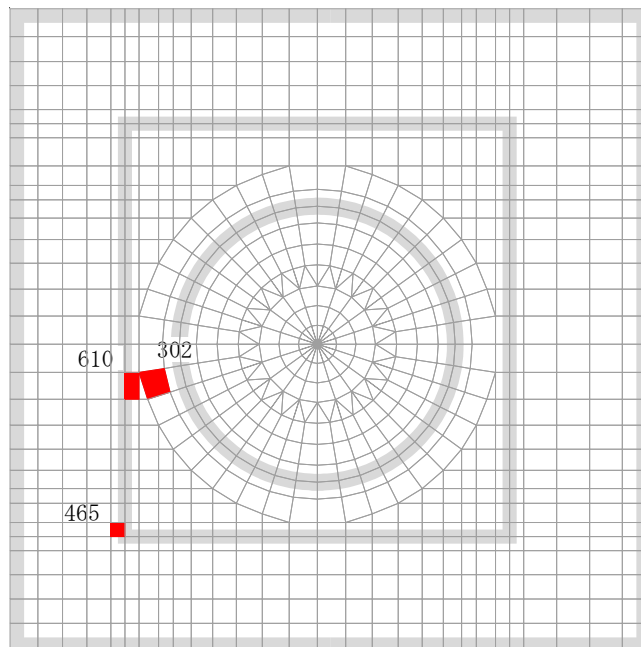
RC-N式は、せん断スパン比およびせん断補強筋比によって変動するが、せん断補強筋が入っている場合でもせん断補強筋比は0.242%であり、強度に大きくは寄与せずせん断スパン比の大小により強度が決まっている。また、荒川 mean 式と比較すると、せん断補強筋の入っていない要素では、基本的にRC-N式のほうが大きくなっている。

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。

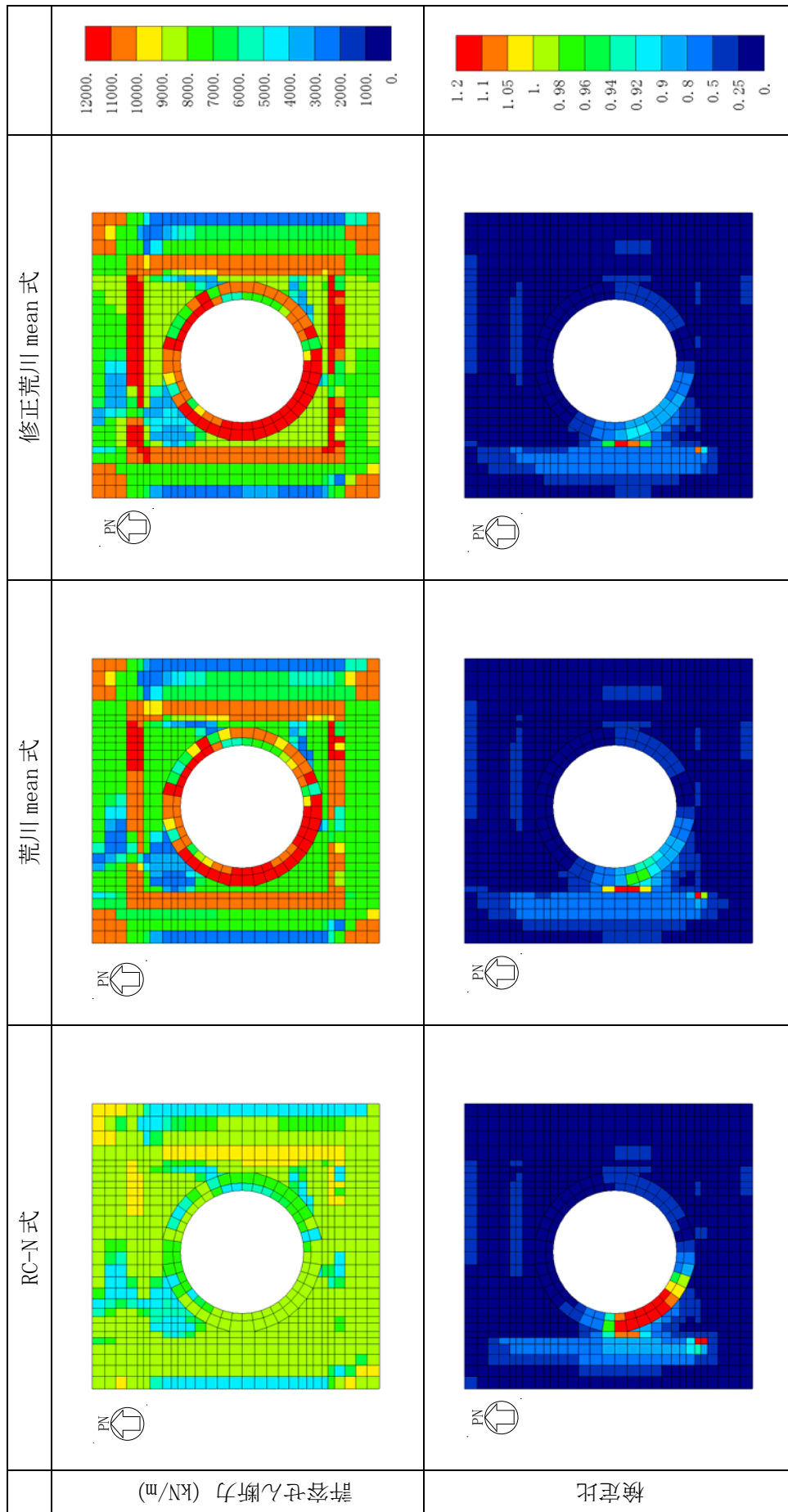
荒川 mean 式に対する修正荒川 mean 式の比率およびRC-N式に対する荒川 mean 式の比率を付図4-2および付図4-3に示す。

付表4-1 許容せん断力の比較

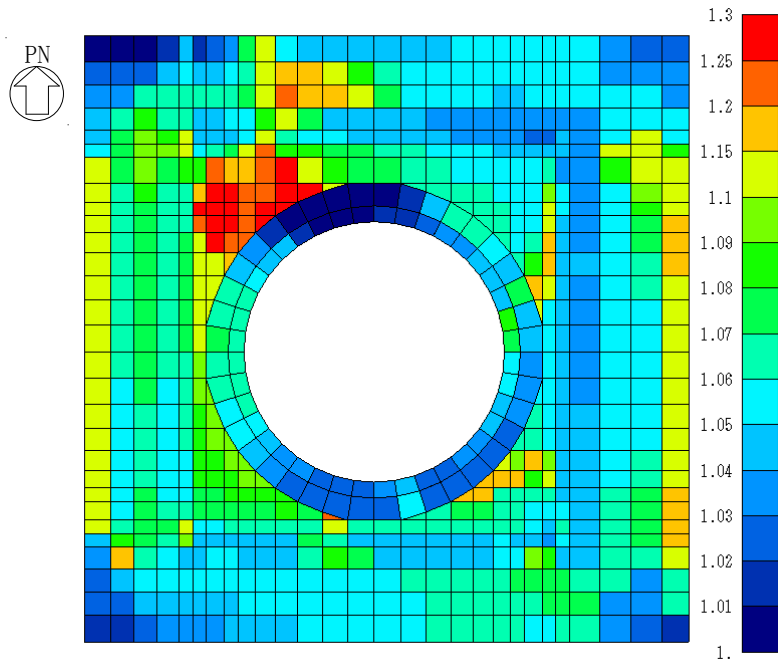
要素番号	せん断補強筋比 (%)	M/(Qd)	発生せん断力 (kN/m)	許容せん断力 (kN/m)		
				RC-N 式	荒川 mean 式	修正荒川 mean 式
302	0.242	1.0	1.08×10^4	8.71×10^3	1.11×10^4	1.18×10^4
465	0.242	1.0	1.17×10^4	8.82×10^3	1.01×10^4	1.11×10^4
610	0.0	1.0	9.33×10^3	8.77×10^3	7.87×10^3	8.60×10^3



要素位置

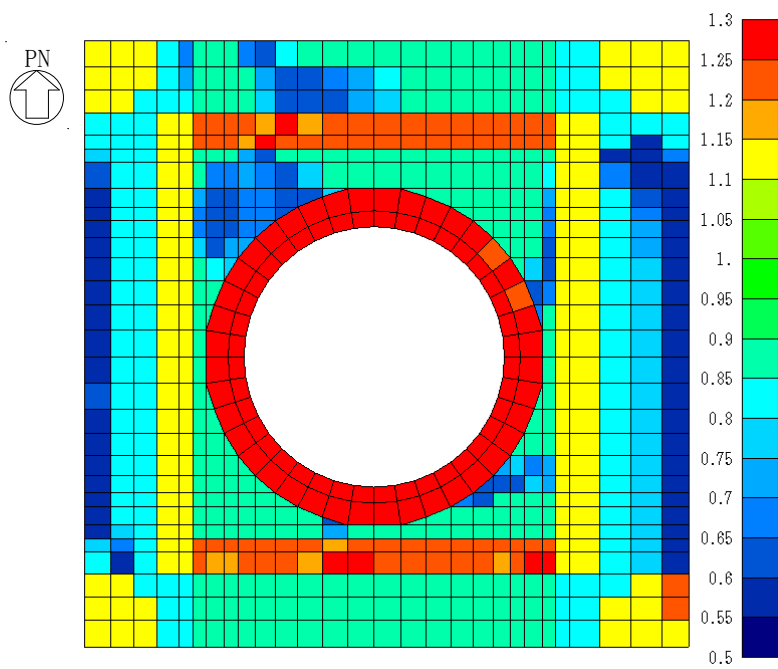


付図 4-1 基礎盤の許容せん断力と検定比の比較【0.4N→S+1.0E→W+0.4上 (Ss-31) (既往の結果)】



最大值：1.33

付図 4-2 修正荒川 mean 式 / 荒川 mean 式



最大值：1.35

最小値：0.59

付図 4-3 荒川 mean 式 / RC-N 式

付表 面外せん断の検定値が0.9以上の要素

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
263	0.914	10369	9993	0.964	1.060	1.049
264	0.914	10041	10012	0.997	1.055	1.047
302	0.954	10774	7632	0.708	1.064	1.048
303	0.945	10669	7809	0.732	1.058	1.046
304	0.905	10216	7744	0.758	1.050	1.042
437	0.970	-9925	-6359	0.641	1.090	1.050
465	1.146	-11727	-7627	0.650	1.100	1.056
596	1.012	-8071	-4351	0.539	1.089	1.054
610	1.171	-9336	-5249	0.562	1.092	1.057
611	0.911	-7037	-4073	0.579	1.093	1.060
624	1.183	-9143	-5433	0.594	1.094	1.060
636	1.016	-7847	-4923	0.627	1.099	1.065
平均値				0.696	1.079	1.053