

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-370-12 改4
提出年月日	平成30年6月25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	1
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 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（耐震設計に係る工認審査ガイド）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、J E A G 4 6 0 1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、J E A G 4 6 0 1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 1-1）。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 1-1）。表 1-1には、Ss地震時に対する面外せん断の許容限界を合わせて示す。

ここで大間1号においては、平成18年の耐震設計審査指針を適用して建設されたプラントである。建設時の設計においては、建屋全体にあるクラスに相当する地震力を設定することがあり、大間1号においてはSクラスの原子炉格納容器底部に対し、底部以外の基礎（二次格納施設基礎スラブ）についても、底部との連続性を考慮して底部と同様の方法で検討されている。すなわち、二次格納施設基礎スラブについては、その機能からはSクラスとなるものではないが、設計上の扱いとしてSクラスと設定したものと解釈できる。

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。

また、建設工認において、Aクラスとして設計（180Galの地震動による地震力及び静的地震力に対し弾性設計）していたことを踏まえ、今回工認においてもSd地震時に対する評価を実施する。

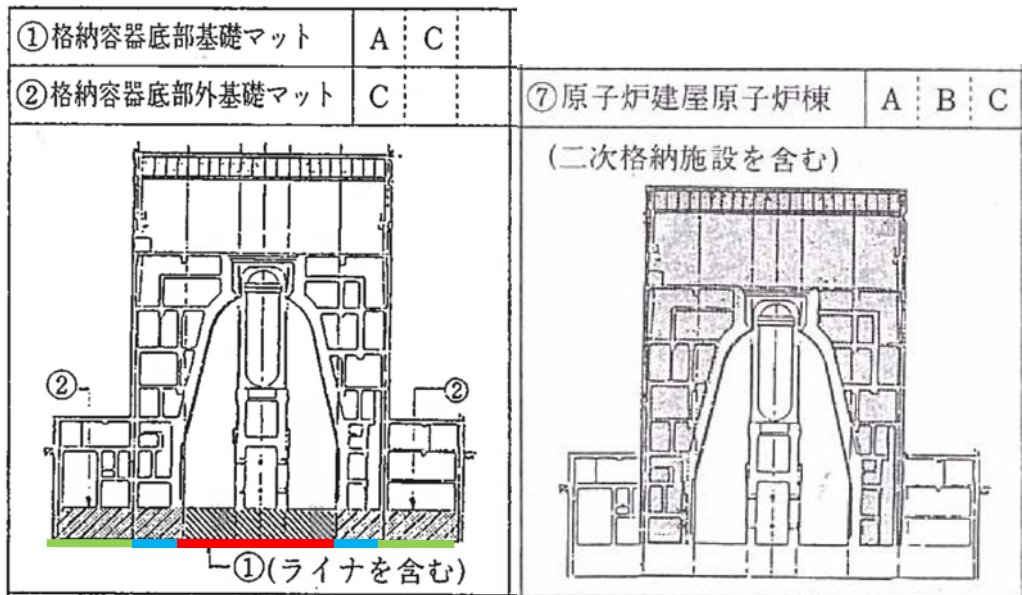
3. Sクラスの設備の間接支持構造物としての許容限界

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。

使用済燃料乾式貯蔵建屋においては、主要設備である使用済燃料乾式貯蔵容器と間接支持構造物である基礎スラブは直接支持構造物となるアンカーボルトによって連結されるものであり、構造的には分離している。一方、原子炉建屋においては、主要設備である原子炉建屋原子炉棟の壁と間接支持構造物である原子炉棟基礎が同じ鉄筋コンクリート構造として一体となっている。ここで、原子炉建屋原子炉棟の壁脚部周辺の基礎スラブの面外せん断力に対する破壊モードは、壁に平行なひび割れとなることから、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いと見られ、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。（詳細は資料2に示す。）

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する。Ss地震時の許容限界（終局耐力）として、原子炉棟基礎に荒川 mean 式による終局強度を適用する妥当性を資料2に示す。

BWR MARK-II

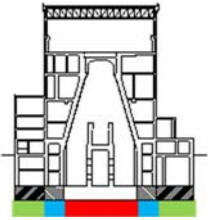
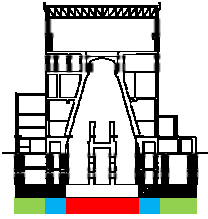
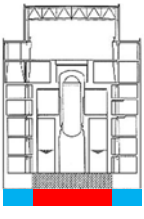
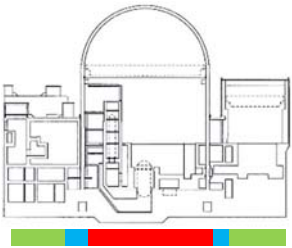
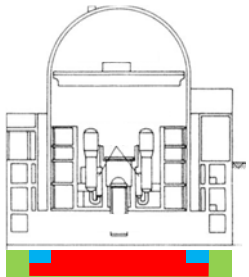


- A : 耐漏洩機能
- B : 波及事故防止機能
- C : 支持機能

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 Ss 地震時の許容限界（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) BWR MARK-II*2		Asクラス	Aクラス*1	Aクラス*1
		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*4 (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*4	—
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*5

*1 建屋全体をAクラスとして設計している。

*2 機能維持確認用の「0.27g地震」に対する許容限界を示す。

*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 底部との連続性を考慮して底部と同様の方法で評価している。

*5 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 (建設工認)	原子炉建屋 [A]	2次格納施設基礎盤 [A]
東海第二 (今回工認)	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) JEAG 4601-1987 (抜粋)

表5.3.4-1 機器系から要求される原子炉建屋各部位の機能維持上の許容限界

	部 位	地震	機器系としての クライテリア	機能維持のための 代 用 特 性	許 容 値 等
耐漏洩機能	原子炉建屋原子炉棟 外部しゃへい建屋 原子炉周辺補機棟	S ₁	S ₁ 地震において建屋 外への放射性物質の漏 洩を防止する	負担を維持する	
	(MARK-I, II) (3 LOOP) (4 LOOP)				
	使用済燃料プール 使用済燃料ピット	S ₁ S ₂	液体を貯蔵する部分の ライナ部分が健全であ ること	ライナ部に亀裂が入ら ない	コンクリート格納容器ライナの許容膜歪を準用
波及事故防止機能	格納容器底部基礎マット 基礎マット	S ₁ S ₂	基礎マットにコンクリ ート格納容器ライナの 追従不可能な変形が生 じないこと		MARK-II 膜歪 S ₁ S ₂ 圧縮 0.004 0.005 引張 0.002 0.003 4 LOOP 膜歪 S ₁ S ₂ 圧縮 0.005 引張 0.003
	原子炉本体基礎 シェル壁 原子炉建屋原子炉棟 原子炉建屋付属棟 ダイヤフラムフロア 内部コンクリート 燃料取扱棟 原子炉周辺補機棟 外部しゃへい建屋	S ₁ S ₂	下位の耐震クラスに相 当する建物・構築物が 破損し、落下または転 倒することによってAs , Aクラスの設備に要 求されている安全機能 を阻害するような事故 を防止する	建物・構築物またはそ の一部分が崩壊しない	躯体の許容限界値
支 持 機 能	格納容器底部基礎マット 格納容器底部外基礎マット	S ₁ S ₂	機器・配管が本来の支 持位置から空間的に許 容できる範囲内におさ まること 〔 機器が移動、転倒、 落下しない、 支持点が相対的に ずれない、 支持点がはずれない 〕	部位 I • 過大な変形を起こさ ない • アンカー部等が健全 である 部位 II • 部位 I を支持できる • 部位 I に過大な変形 を起こさせない 部位 III • 崩壊しない	部位 I • 面内は躯体の許容限界変形以内で機器の許容移 動量内 • 面外は降伏メカニズムを形成しない 部位 II • 躯体の許容限界変形以内で、部位 I の許容移動 量内 • 鉛直方向に対し、メカニズムを形成しない 部位 III • 躯体の許容限界値
	原子炉本体基礎 シェル壁 使用済燃料プール ダイヤフラムフロア 原子炉建屋原子炉棟 原子炉建屋付属棟 基礎マット 内部コンクリート 使用済燃料ピット 燃料取扱棟 原子炉周辺補機棟 外部しゃへい建屋				

BWR MARK-I

① 格納容器底部基礎マット	C	③ 原子炉本体基礎	B C	⑤ 使用済燃料プール	A C
② 格納容器底部外基礎マット	C	④ シェル壁	B C		
⑥ 原子炉建屋原子炉棟		⑦ 原子炉建屋付属棟			
(二次格納施設を含む)					

BWR MARK-II

① 格納容器底部基礎マット	A C	③ 原子炉本体基礎	B C	⑤ 使用済燃料プール	A C
② 格納容器底部外基礎マット	C	④ シェル壁	B C		
⑥ ダイアフラムフロア		⑦ 原子炉建屋原子炉棟		⑧ 原子炉建屋付属棟	
		(二次格納施設を含む)			

A: 耐漏洩機能
 B: 波及事故防止機能
 C: 支持機能

図 5.3.4-1 機能維持を要求される原子炉建屋各部位 (BWR)

PWR 3LOOP

①基礎マット	C	②内部コンクリート	B C	③使用済燃料ピット	A C
④燃料取扱棟	B C	⑤原子炉周辺補機棟	B C	⑥外部しゃへい建屋	A B C
				(アニュラス部を含む) 	

PWR 4LOOP

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

A：耐漏洩機能
B：波及事故防止機能
C：支持機能

図 5.3.4-2 機能維持を要求される原子炉建屋各部位 (PWR)

(参考4) 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 ₀	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 ₀	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S₀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 ₀	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 ₀	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S₀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

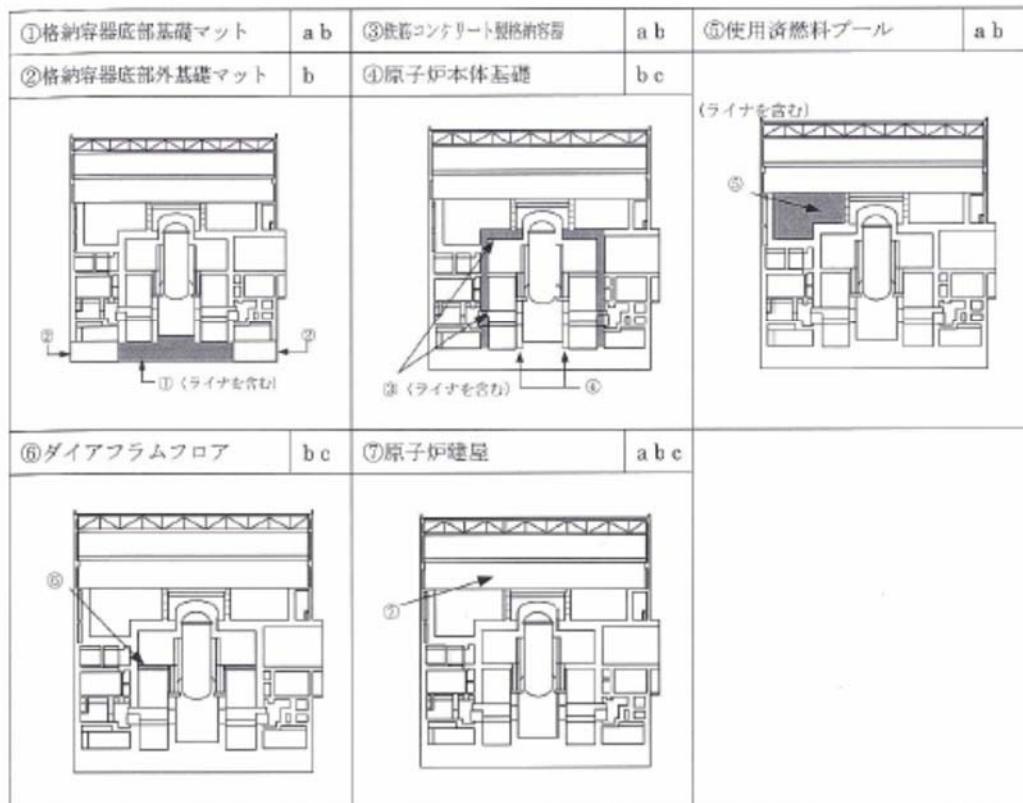
①格納容器底部基礎マット	b	③原子炉本体基礎	b c	⑤使用済燃料プール	a b
②格納容器底部外基礎マット	b	④シェル壁	b c		
⑥原子炉建屋原子炉棟	a b c	⑦原子炉建屋付属棟	b c		

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ダイアフラムフロア	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

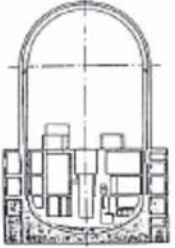
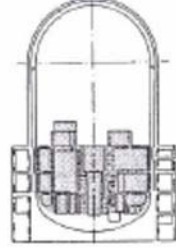
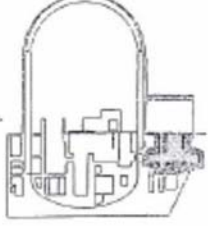
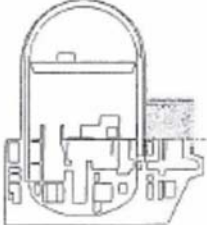
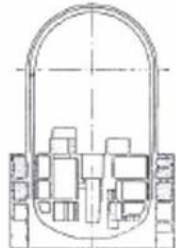
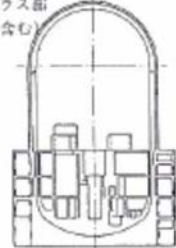
解図 3.6.4-1 機能保持を要求される原子炉建屋各部位 (BWR) の例



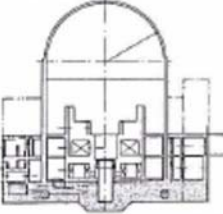
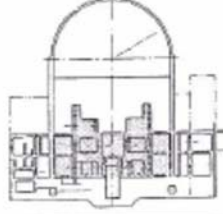
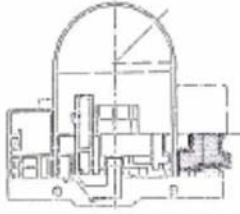
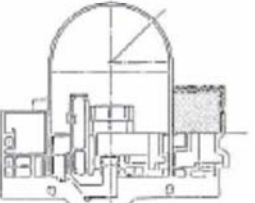
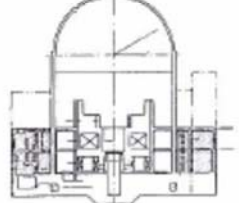
a : 負圧維持機能あるいは漏えい防止機能
b : 支持機能
c : 波及的影響防止

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

(参考5) 大間1号の荷重の組合せ

表 大間1号 原子炉格納施設の荷重の組合せ

荷重状態	荷重時名称	荷重番号	荷重の組合せ
I	通常運転時	1	$DL + P_1 + T_1$
II	逃がし安全弁作動時	2	$DL + P_1 + T_1 + H_1$
	試験時	3	$DL + P_0$
III	地震時 (1)	4	$DL + P_1 + T_1 + H_1 + K_1$
	異常時 (1)	5	$DL + P_{21} + T_{21} + H_{21}$
	異常時 (2)	6	$DL + P_{22} + T_{22} + H_{22}$
	異常時 (3)	7	$DL + P_{23} + T_{23} + H_1 + H_{22}$
	異常時 (4)	8	$DL + P_{24} + T_{24}$
	(異常+地震)時 (1)	9	$DL + P_{25} + T_{25} + K_1$
IV	地震時 (2)	10	$DL + P_1 + H_1 + K_2$
	異常時 (5)	11	$DL + 1.5 \cdot P_D$
	ジェット力作用時	12	$DL + P_3 + H_3$
	(異常+地震)時 (2)	13	$DL + P_{21} + K_1$

注1：荷重番号1, 2及び4~9については、温度荷重のない場合も考慮する。

注2：温度荷重は、夏及び冬を考慮する。

注3：地震荷重は、NS方向及びEW方向並びに鉛直方向を考慮する。

注4：荷重番号9及び11~13については、RCCV底部のみに適用する。

大間1号では、原子炉格納容器底部コンクリートマットを除く原子炉建屋基礎スラブについて、地震時としてSd, Ssの地震荷重に対する検討を行っている。

東海第二の今回工認においては、前述のとおり、建設工認においてAクラスとして設計(180Galの地震動による地震力及び静的地震力に対し弾性設計)していたことを踏まえ、今回工認においてもSd地震時に対する評価を実施している。また、原子炉格納容器底部コンクリートマットとの連続性を考慮し、荷重状態III及びIVにおける(異常+地震)時について検討し、資料3に示す。

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。

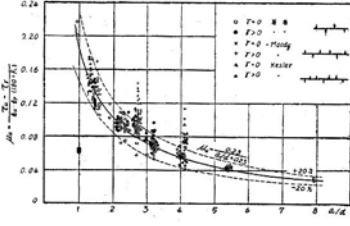
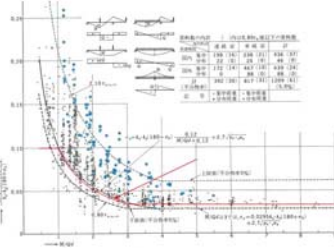
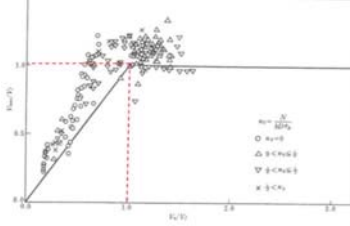
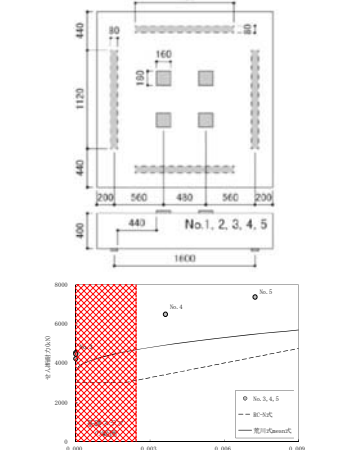
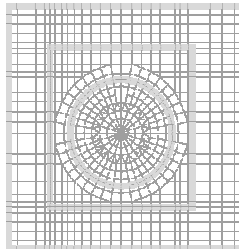
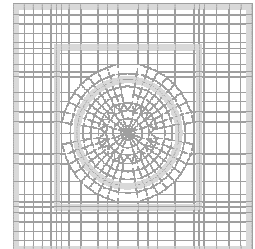
具体的には、荒川 mean 式が提案された後に多数の実験と比較した場合、平均よりも下限に近い傾向を示すこと、また、上部壁からの地震力と地盤からの反力を受ける基礎スラブと類似の応力分布を示す分布荷重を受ける単純梁に対しては下限を押さえていることから、基礎スラブの終局耐力の評価式として適用することが妥当であることを示す。(2章)

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、梁に対し余裕があることを定量的に示す。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。(5, 6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】 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> 
	<p>裕度① 17% (単純平均)</p>	<p>裕度② 20%</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%，荷重条件：5% 変動係数 裕度②a 裕度②b 裕度②c 2.7%</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③ 8%</p>	<p>実機基礎スラブの軸力を考慮 荒川 mean 式が有する裕度 (②×③) 30%程度</p>

評価式に含まれる余裕以外の余裕

- ・【5章】 人工岩盤を考慮することによる余裕 (応力が大きい範囲において 30%程度) 裕度④
- ・【6章】 実強度による余裕 (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)

$$Q_A = bj\alpha f_s$$

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

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

- ・ 荒川 mean 式

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

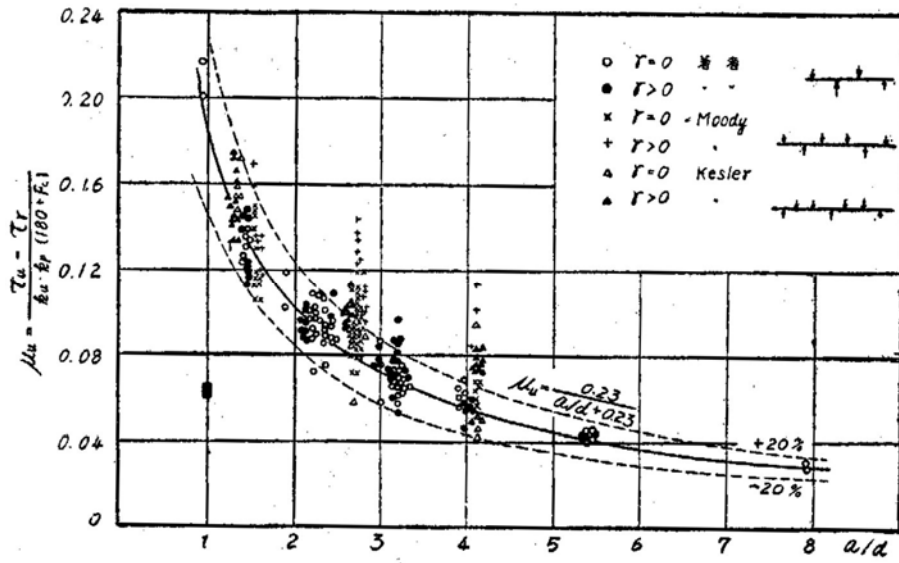
- ・ 修正荒川 mean 式

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

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。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 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。

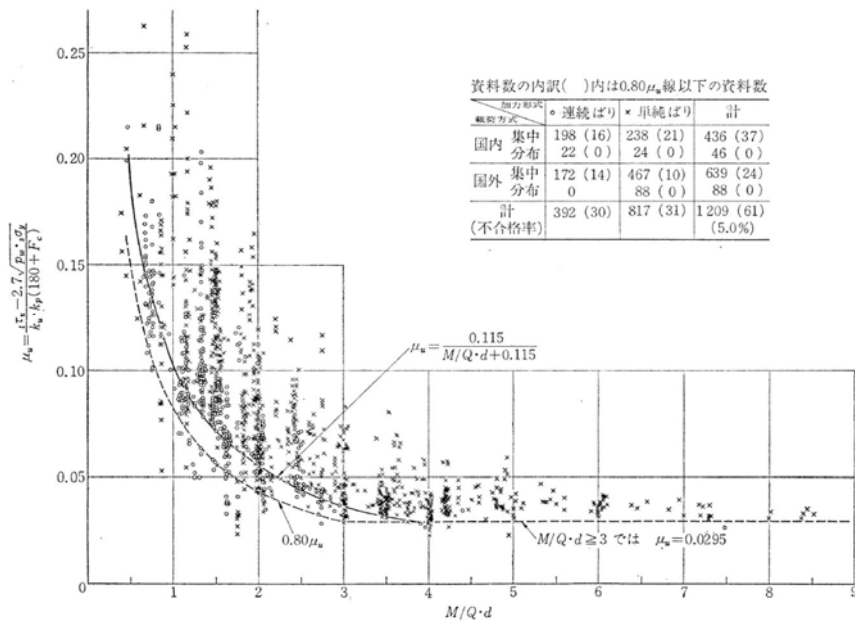
RC-N 式及び荒川 mean 式によるせん断耐力の比較を図 2-3 に示す。ここで, 鉄筋量は, 原子炉棟基礎の主筋の鉄筋比 0.362%~0.617%, シェル壁周囲のせん断補強筋比 0.242%であるため, せん断補強筋が無い場合は鉄筋比 0.35%, せん断補強筋が有る場合は鉄筋比 0.50%として耐力比較している。

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

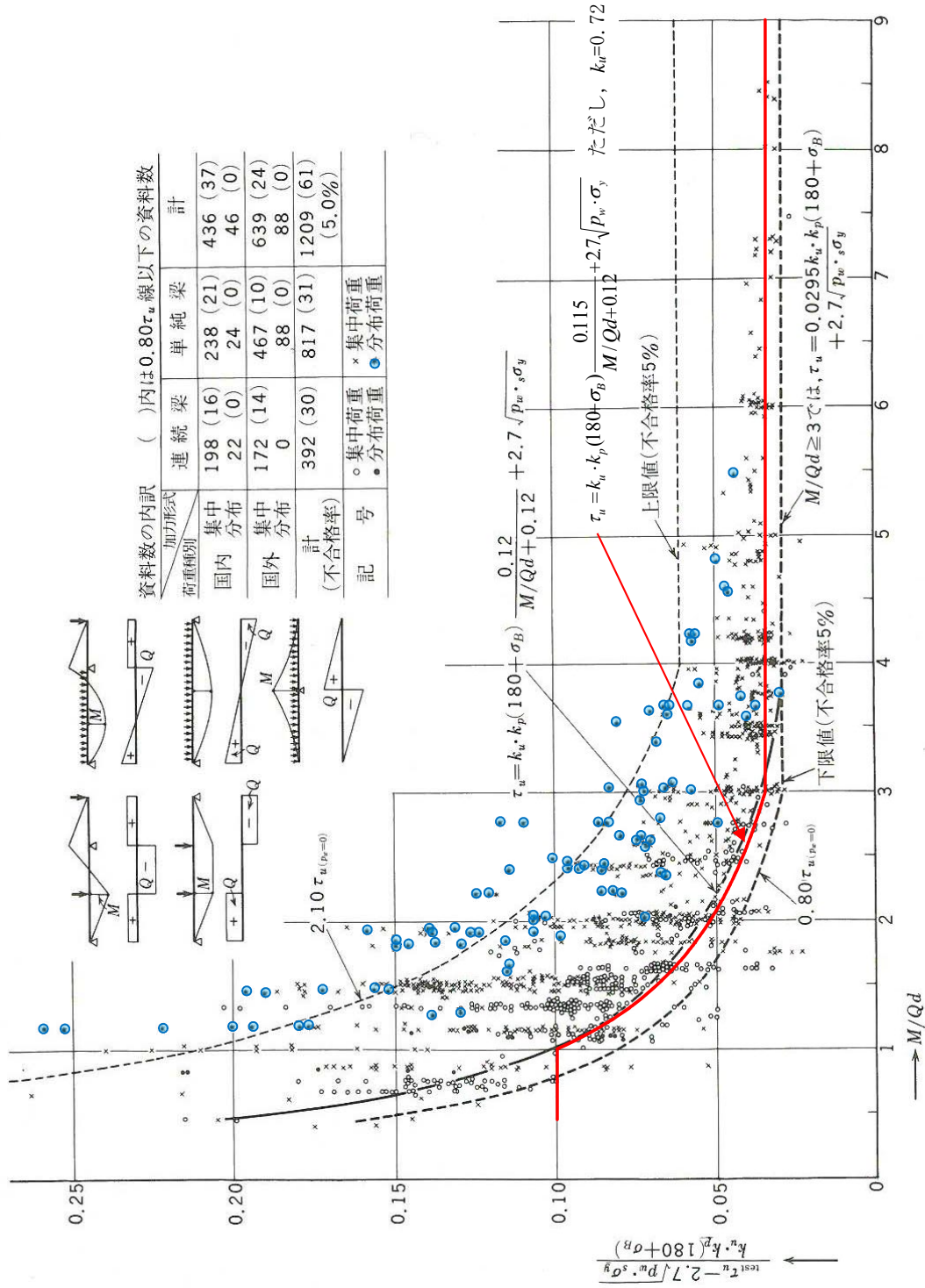
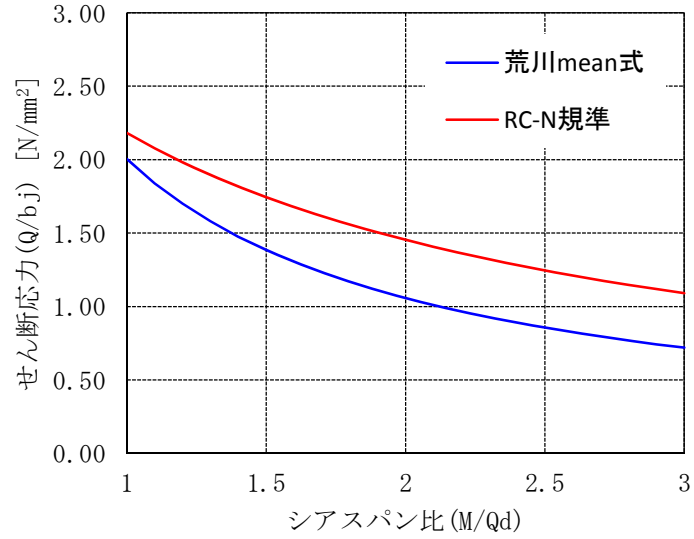
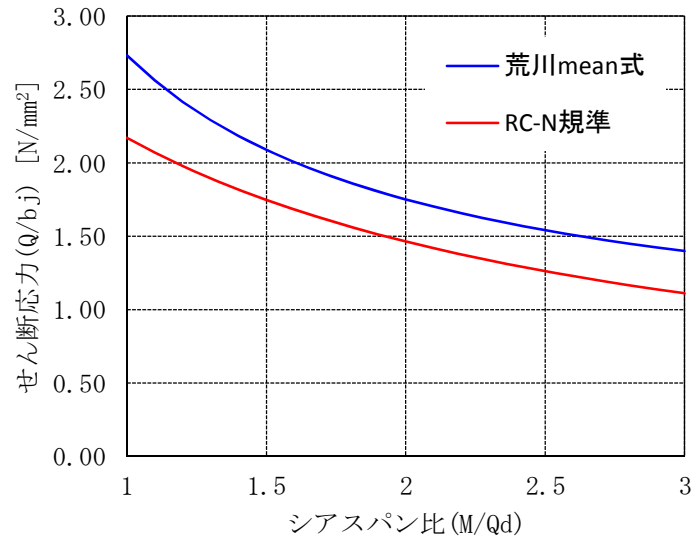


図 2-2 普通コンクリート梁のせん断破壊時における実験値と計算値の比較 (赤線は修正荒川 mean 式を, 青丸は単純梁の分布荷重載荷を示す)
 (日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2010 の解説図 15.2 に一部加筆)



(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。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%となっており, 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, 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。

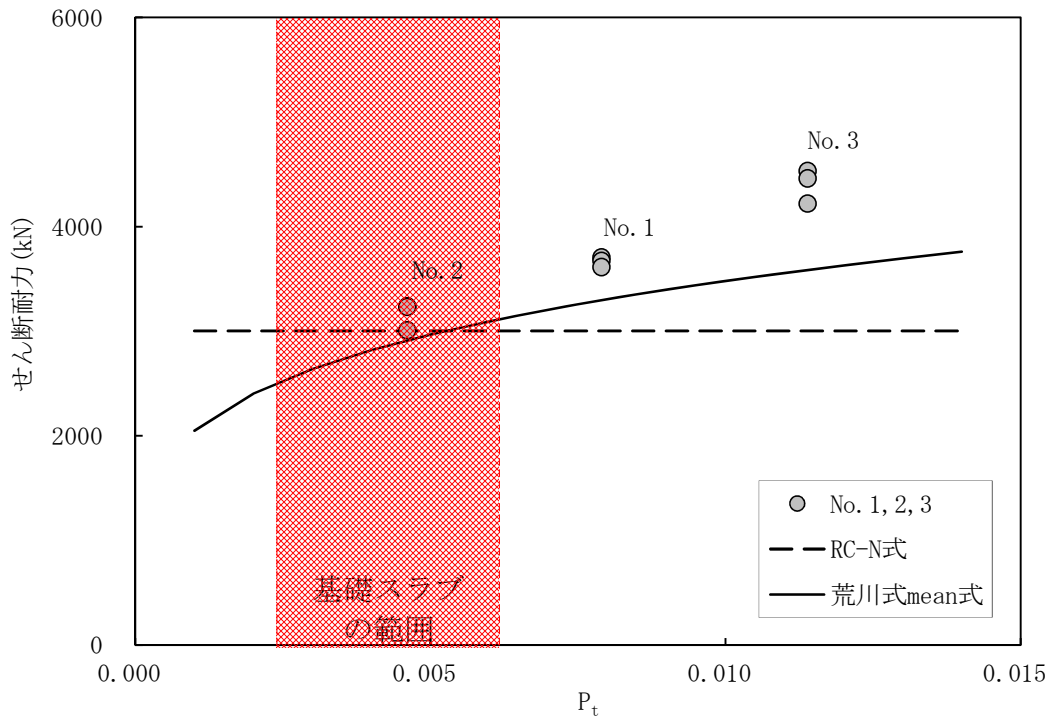
また, 図 3-3 に示すように, 加圧板と支持板の中間位置における周長を幅 b として荒川 mean 式によるせん断耐力を算定している。

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。なお, 荒川 mean 式によるせん断耐力と実験値の比率は, せん断スパン比が大きく, 耐力比の低い No. 7 試験体も含んでおり, 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。

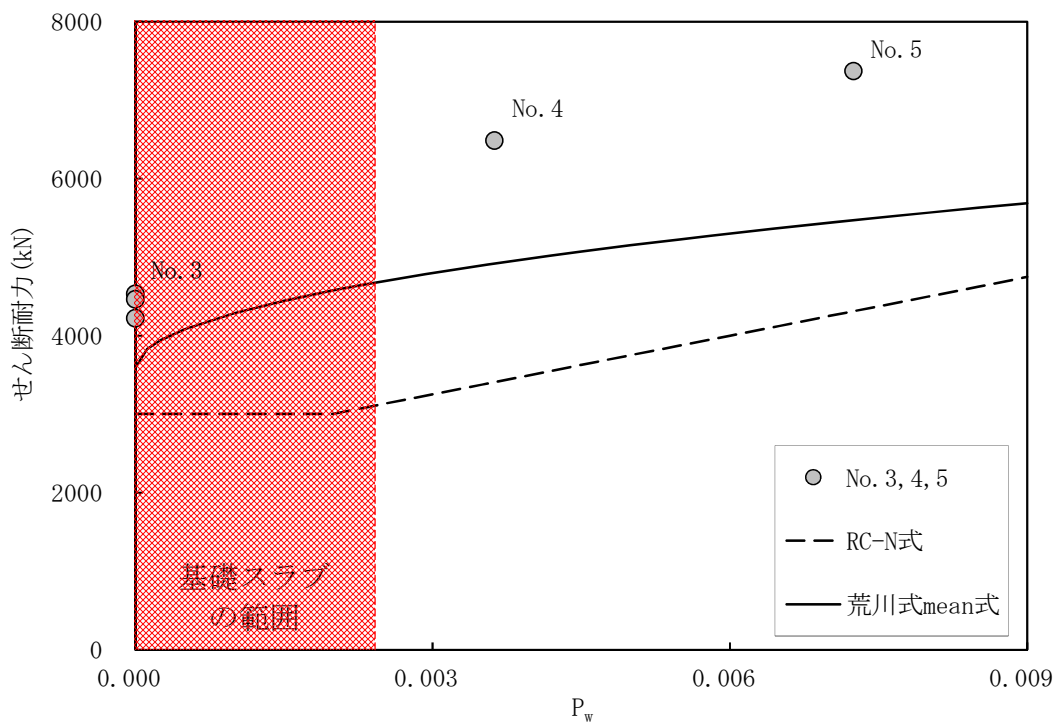
文献 1 : 熊谷仁志, 貫井泰, 今村晃, 寺山武志, 小島功 : RC 基礎スラブの面外せん断耐力に関する実験的研究, 終局強度に関する研究, 構造工学科論文集 Vol. 55B, pp. 323-330, 2009. 4

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)	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
1-1	0.79	0	1.56	3706	1.04	3275	1.13	1.12
1-2				3673			1.12	
1-3				3614			1.10	
2-1	0.46	0	1.56	3010	3.36	2995	1.00	1.05
2-2				3237			1.08	
2-3				3234			1.08	
3-1	1.14	0	1.56	4533	3.03	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	5.92	4474	1.35	1.27
6-2				5759			1.29	
6-3				5214			1.17	
7-1	0.79	0	1.89	2407	1.76	2328	1.03	1.02
7-2				2414			1.04	
7-3				2322			1.00	
8-1	0.79	0	1.56	3902	1.10	3290	1.19	1.18
8-2				3915			1.19	
8-3				3819			1.16	
				平均	2.70	平均	1.17	

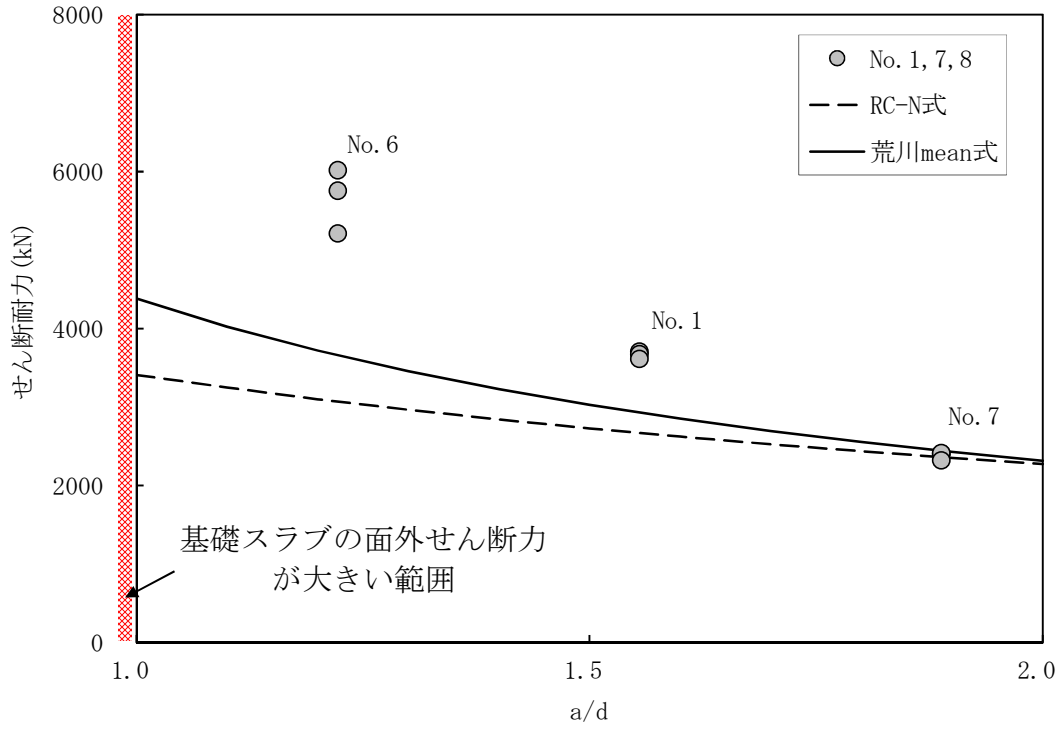


(1) 主筋の影響

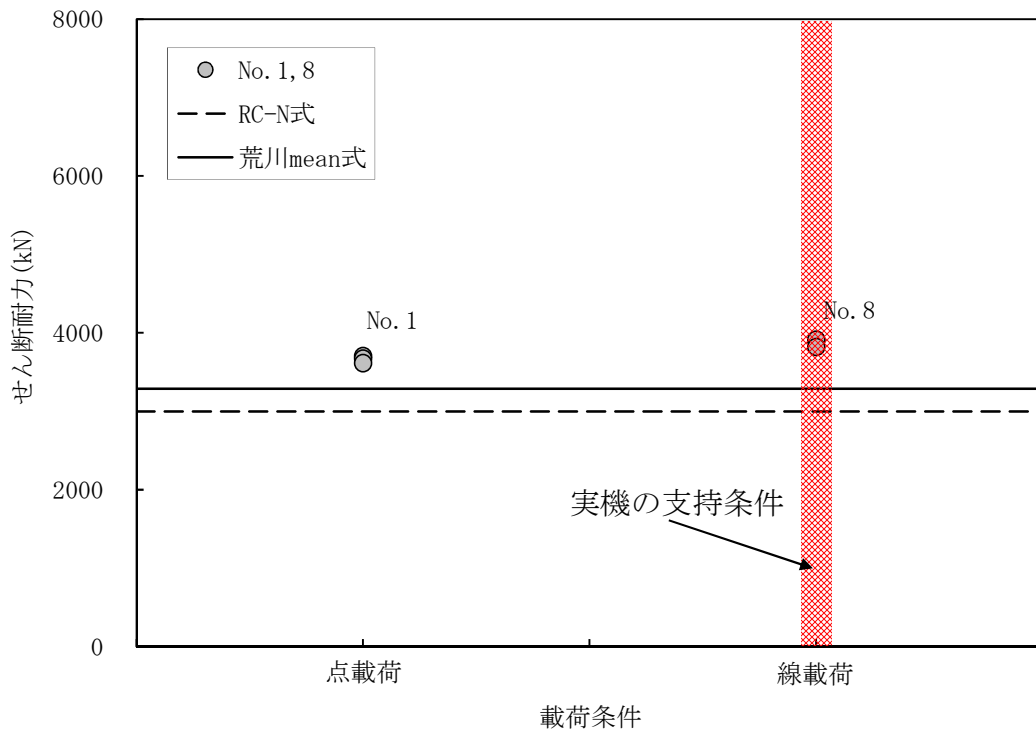


(2) せん断補強筋比の影響

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

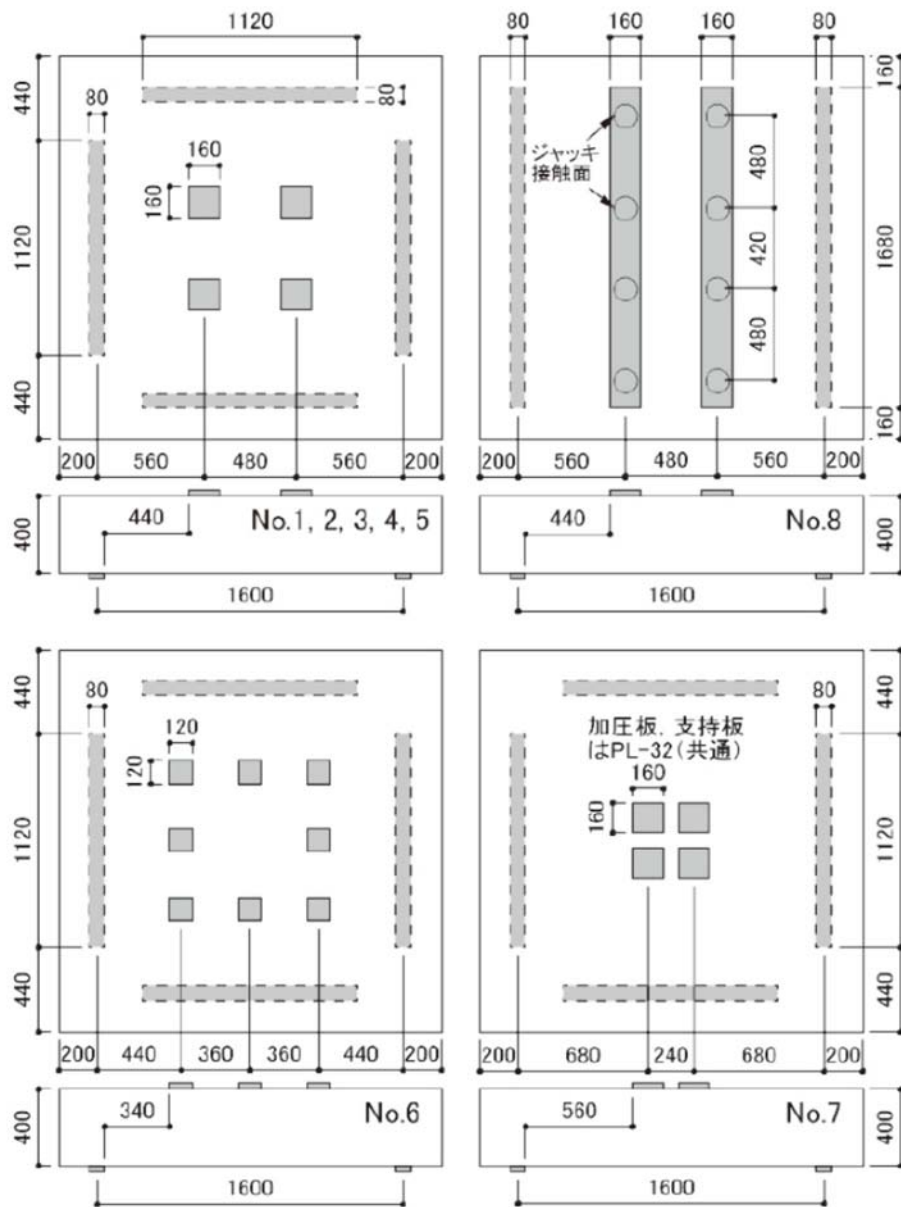


図 3-2 試験体の加圧板・支持板の位置(文献 1 より転載)

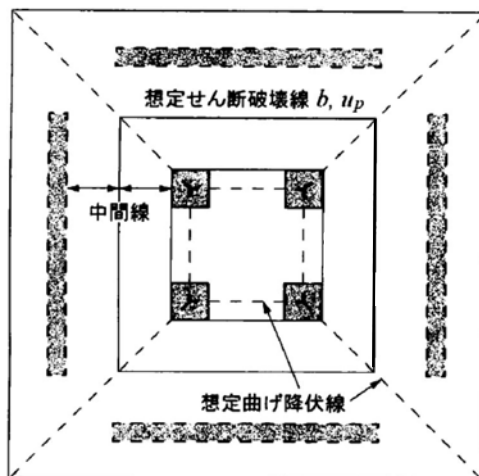


図 3-3 荒川 mean 式による耐力評価に用いる幅(文献 1 より転載・加筆)

(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 = $(1.05 \times 1.13 \times 1.05)$ 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 1.2 倍〔裕度②〕 (= $1.24 \times 97.3\%$) の耐力が見込める。

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。

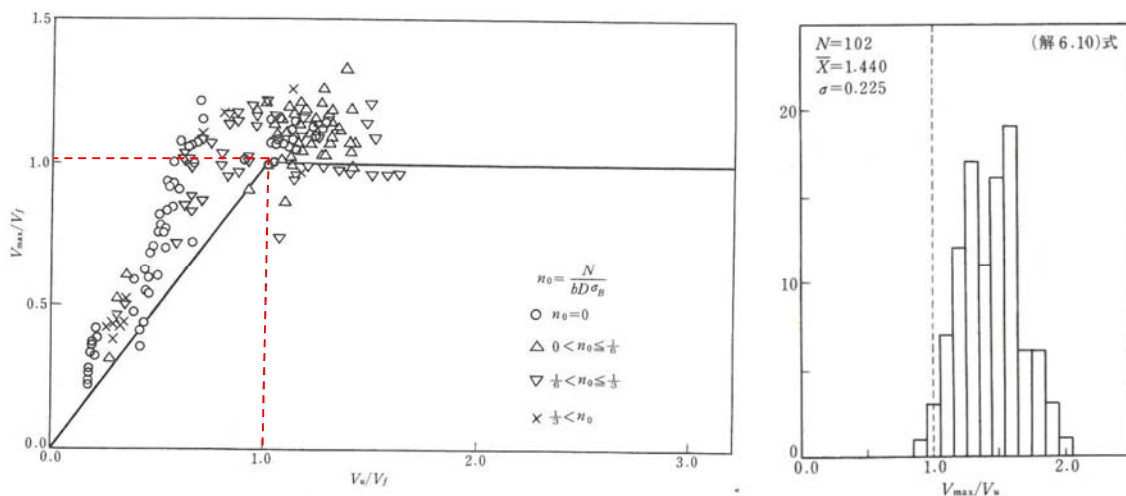
文献2に示されている軸力の影響を考慮した修正荒川 mean 式と実験値の比較を図 4-1、図 4-2 に示す。図 4-1 の縦軸は V_{max}/V_f であり、横軸は V_u/V_f である。ここで、 V_{max} は実験最大せん断強度、 V_f は危険断面が解析上の曲げ強度に達した時のせん断力、 V_u は修正荒川 mean 式によるせん断強度である。すなわち、図 4-1 の横軸及び縦軸が 1.0 以下となる領域が、せん断破壊が先行する試験体を示しており、実線の上側のプロットが修正荒川式によるせん断耐力を上回る試験体を示している。また、図 4-2 の横軸は V_{max}/V_u であ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

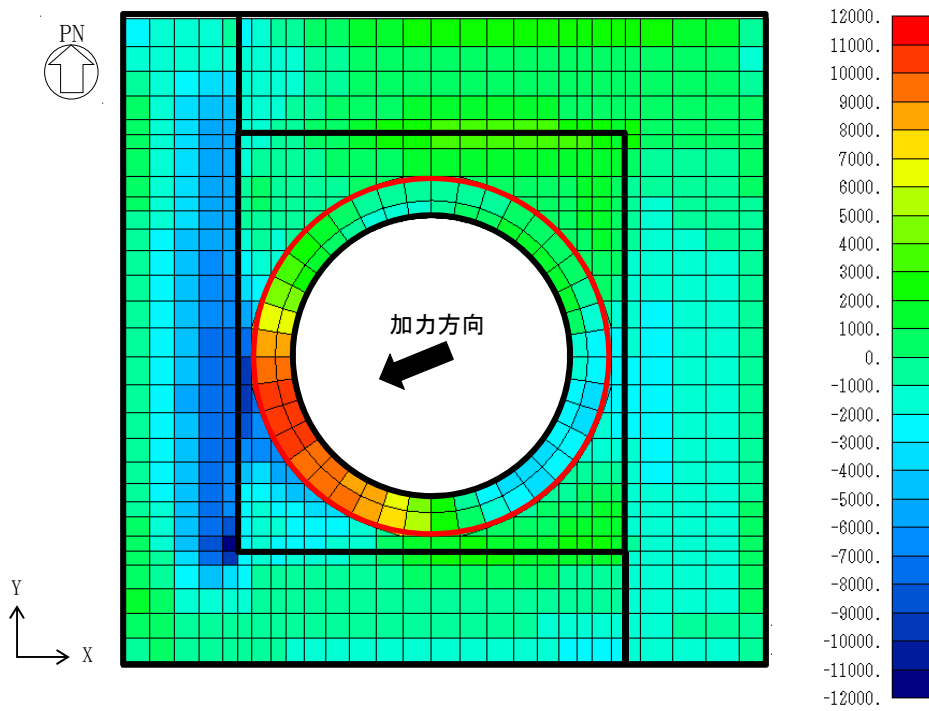
文献2：日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型 耐震設計指針・同解説



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

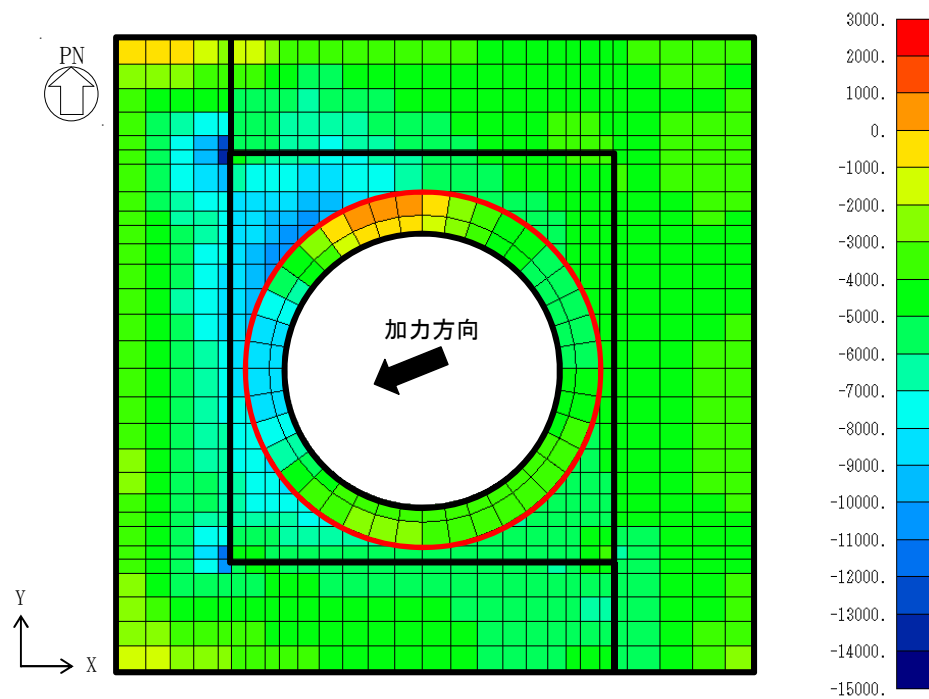
図 4-1 修正荒川 mean 式によるせん断強度算定値と実験値の比較(縦軸、横軸共に 1.0 以下がせん断破壊が先行する領域)

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。

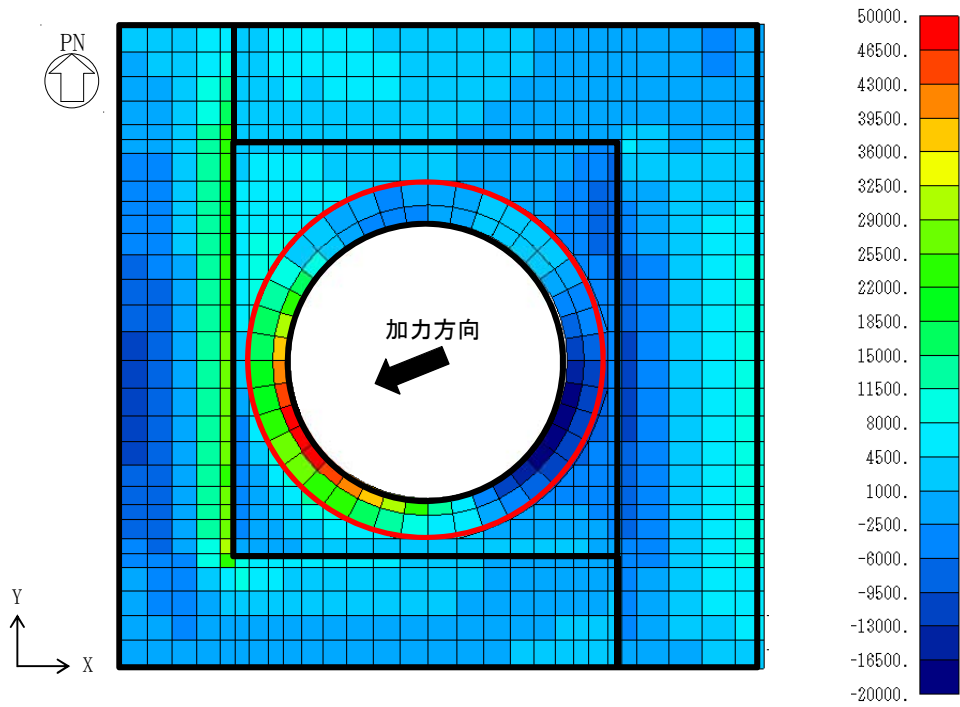
(1) 面外せん断力 (単位: kN/m)



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)

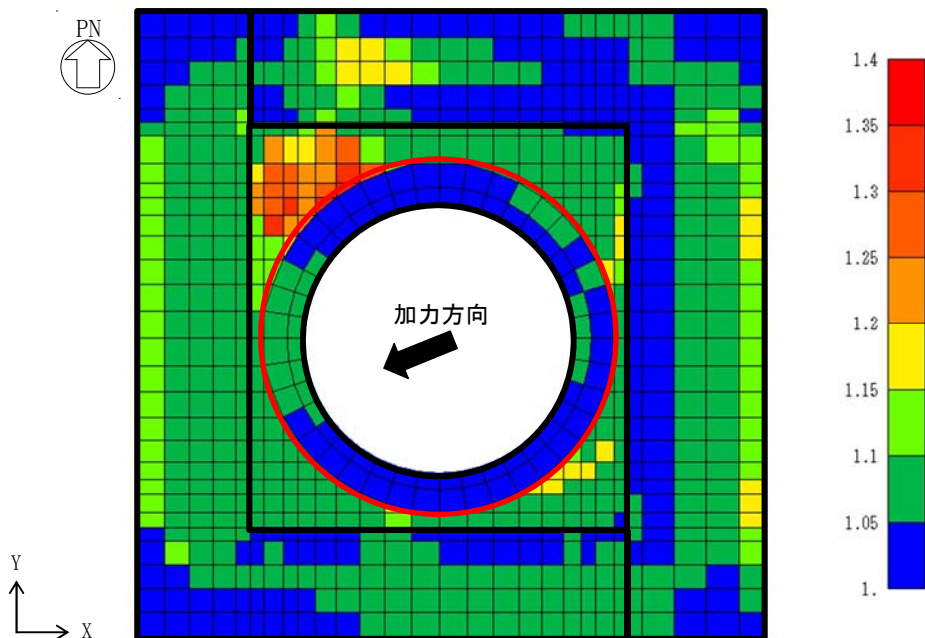
図 4-3a 基礎スラブの発生応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



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: kN·m/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)



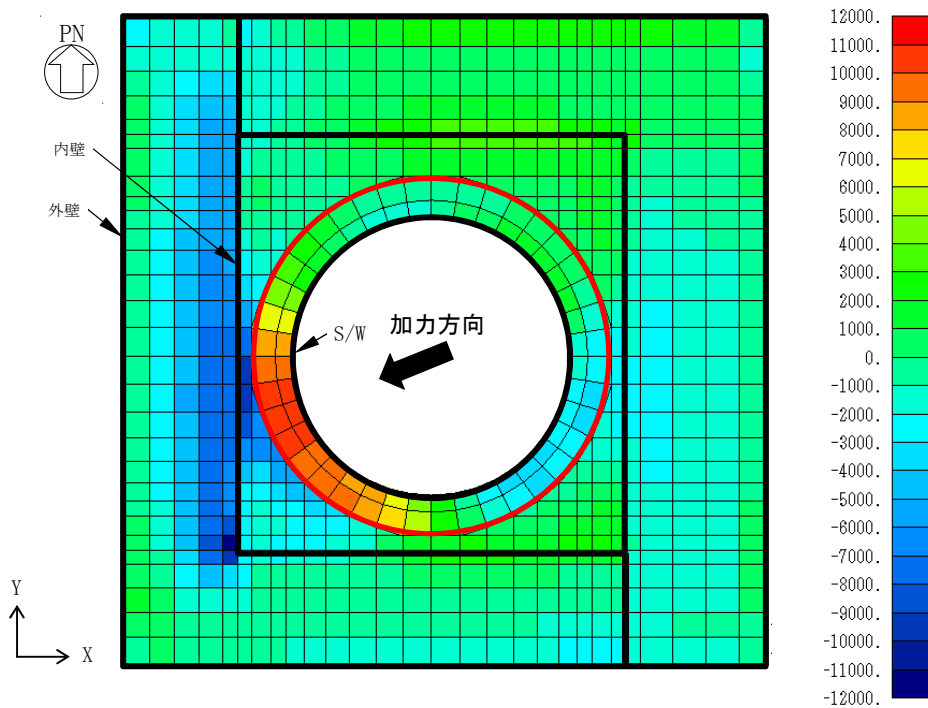
注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の面外せん断耐力比を示す。

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. 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、面外せん断に対する破壊モードは、壁に平行なひび割れとなることから、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。

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、振動アドミッタンスより求めた水平およ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。

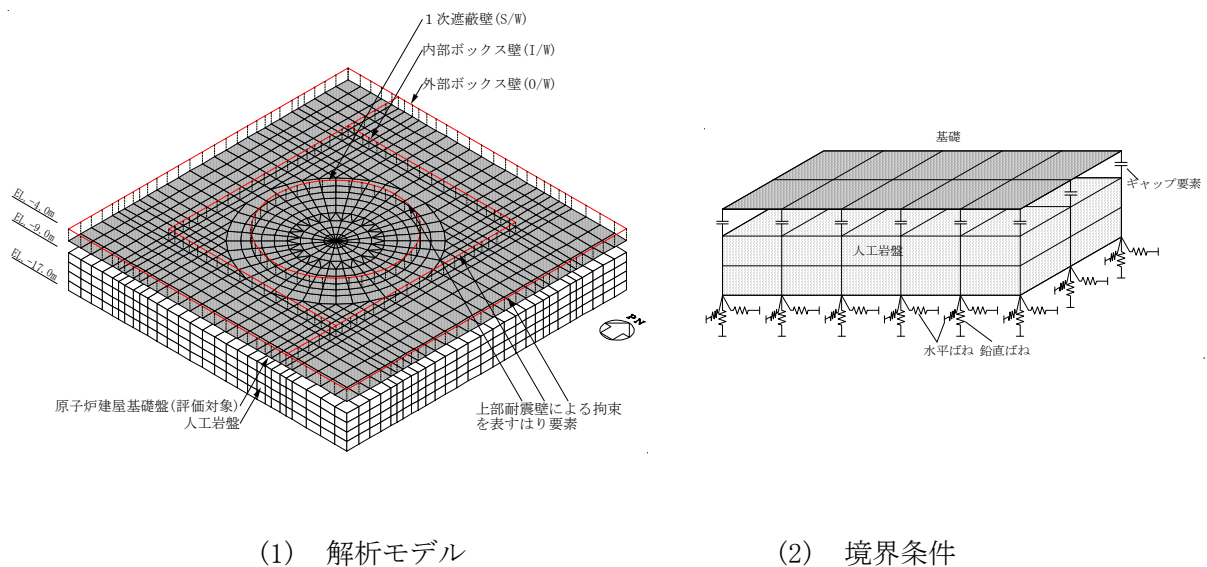


図 6-1 人工岩盤を考慮した応力解析モデル

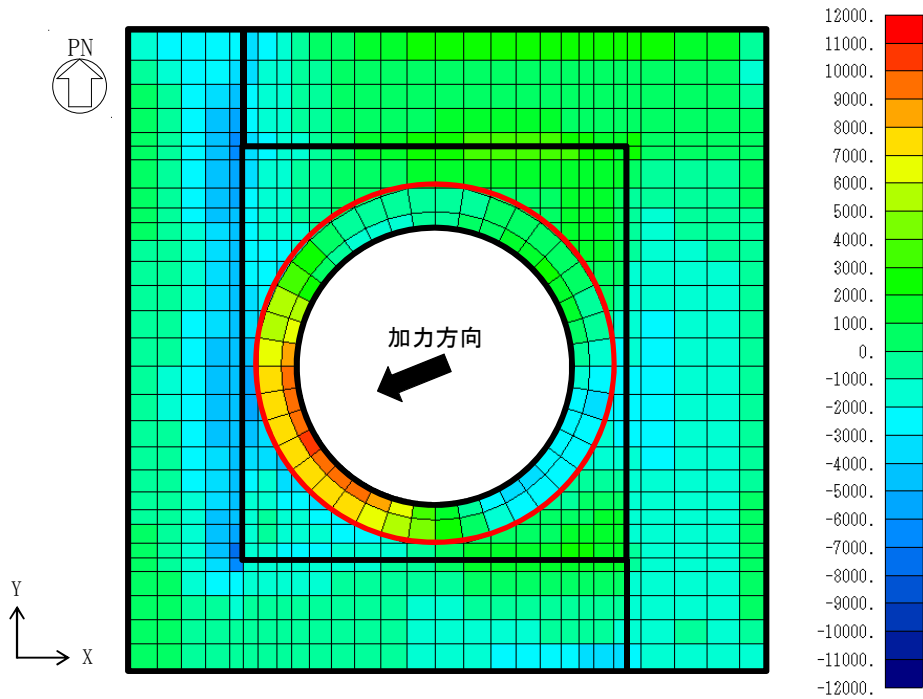
(2) 応力解析結果

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 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 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。

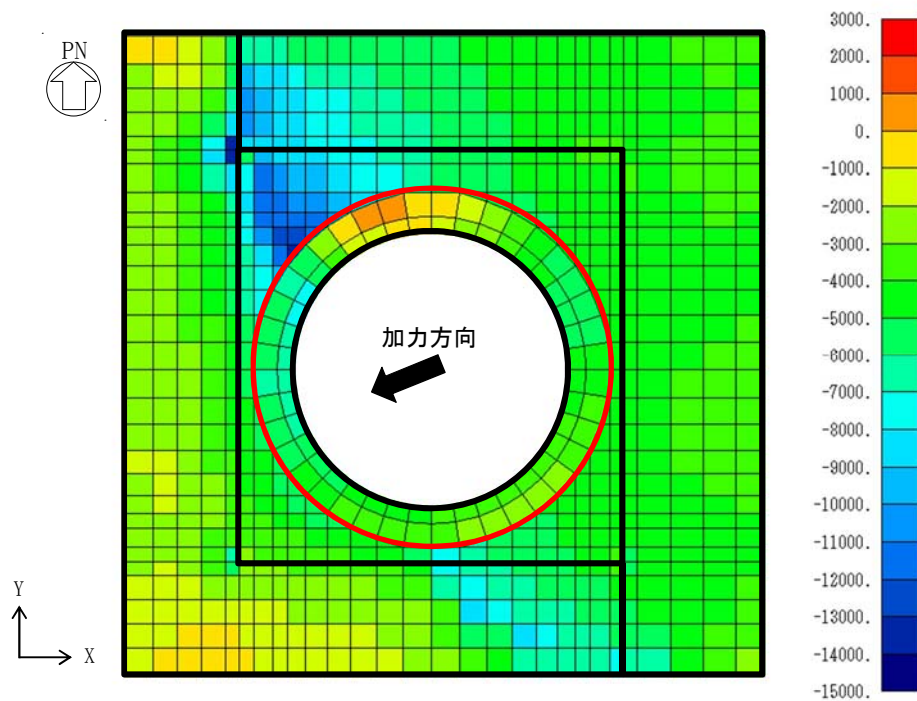
表 6-1 に示すように, 人工岩盤を考慮すると人工岩盤を無視した場合に比べ, 内部ボックス壁脚部における面外せん断力が大きな領域では面外せん断力が 30%程度低下する。なお, シェル壁脚部では内部ボックス壁ほどの応力低下は生じず 7%程度の低下となっているが, 地震力により押し込まれる領域を見ると, 大きな面外せん断力が生じる領域は減少している。また, 面外せん断力が比較的小さな領域では, 人工岩盤を考慮することによる面外せん断力の低下率は小さくなっている。

図 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, 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。

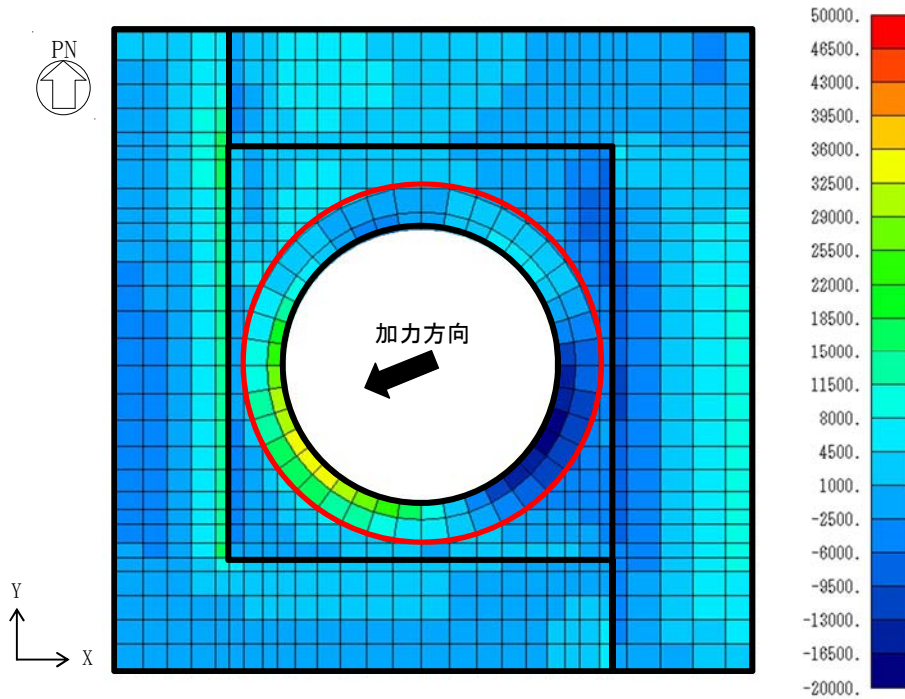
(1) 面外せん断力 (単位: kN/m)



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)

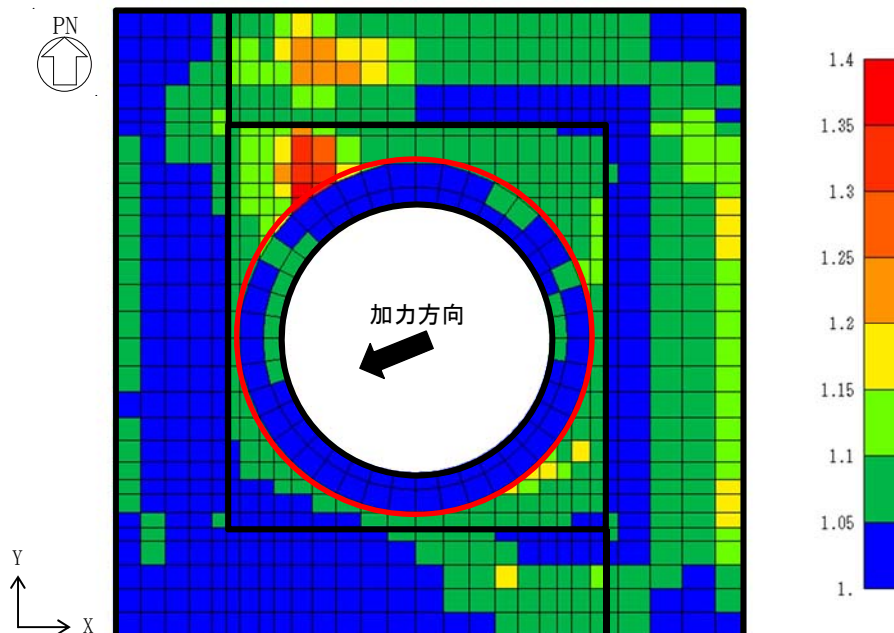
図 6-2(1/2) 基礎スラブの発生応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



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。

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

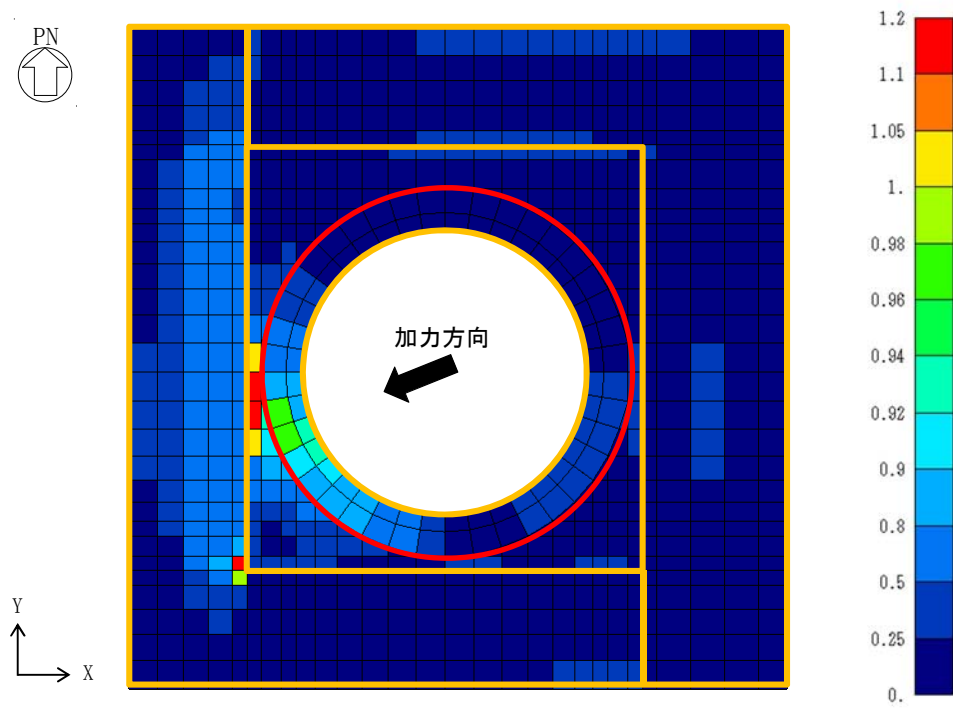
図 6-2(2/2) 基礎スラブの発生応力 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の面外せん断耐力比を示す。

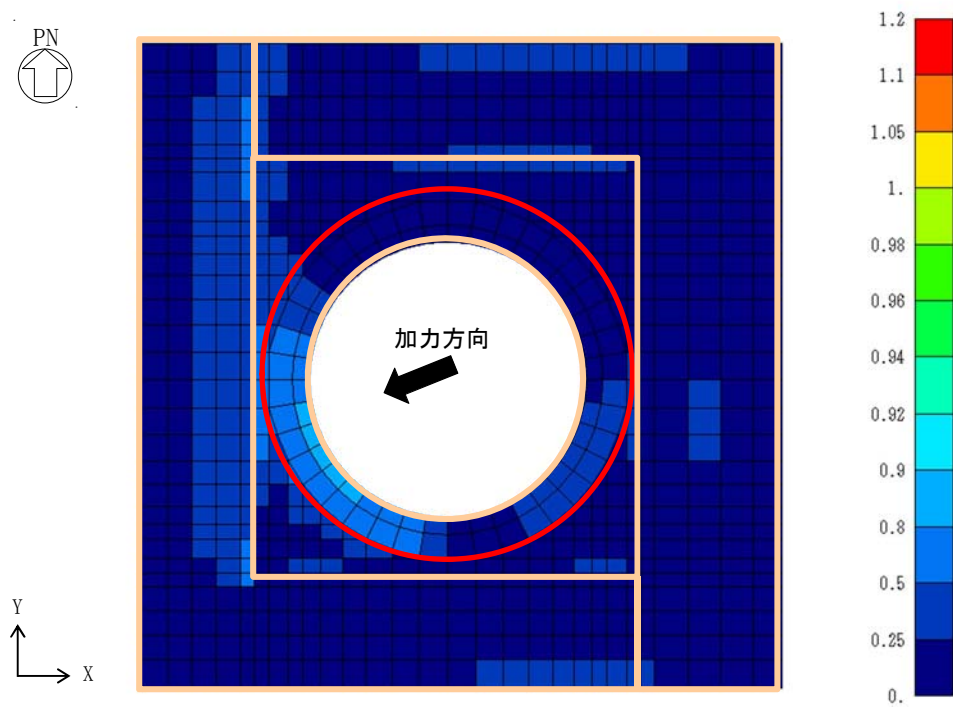
最大値: 1.38

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



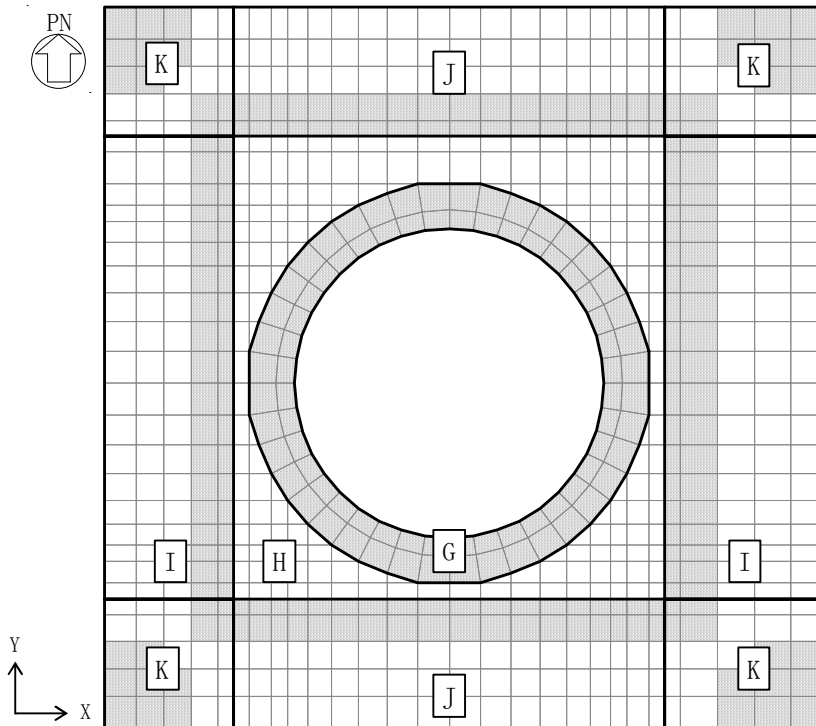
注) 赤枠内は半径方向, それ以外は X 方向の軸力を示す。

(2) 人工岩盤考慮

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



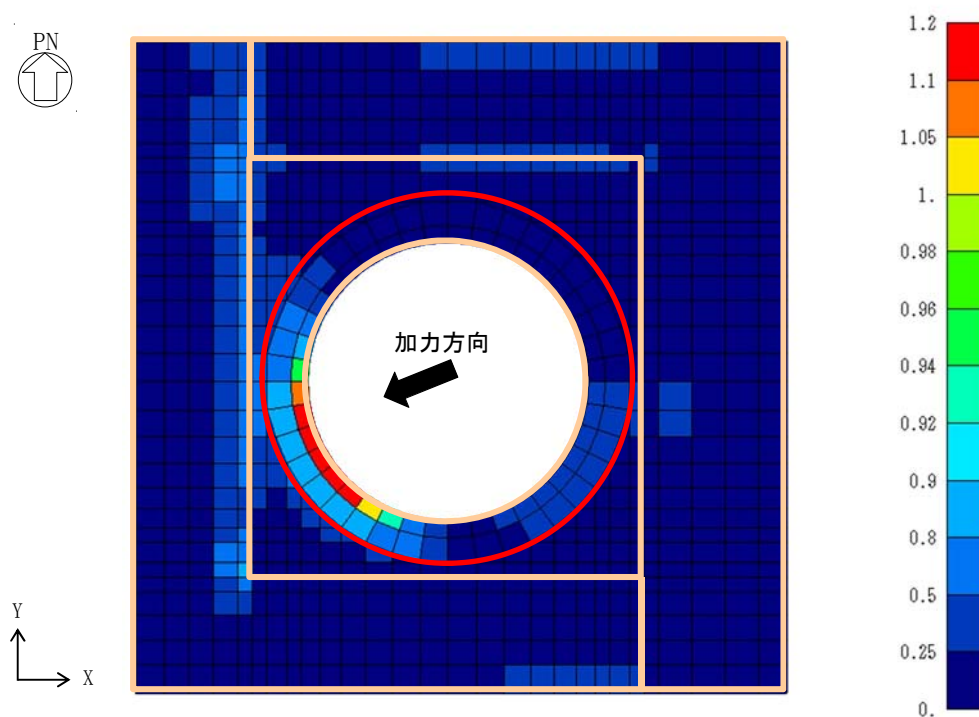
配筋領域図

(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、シェル壁脚部の南西側の 7 要素で、検定比が 1.0 を超過する。ただし、応力平均化を用いれば、検定比は 1.0 以下となる。表 5-2 に応力平均化前後の検定比を示す。

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。

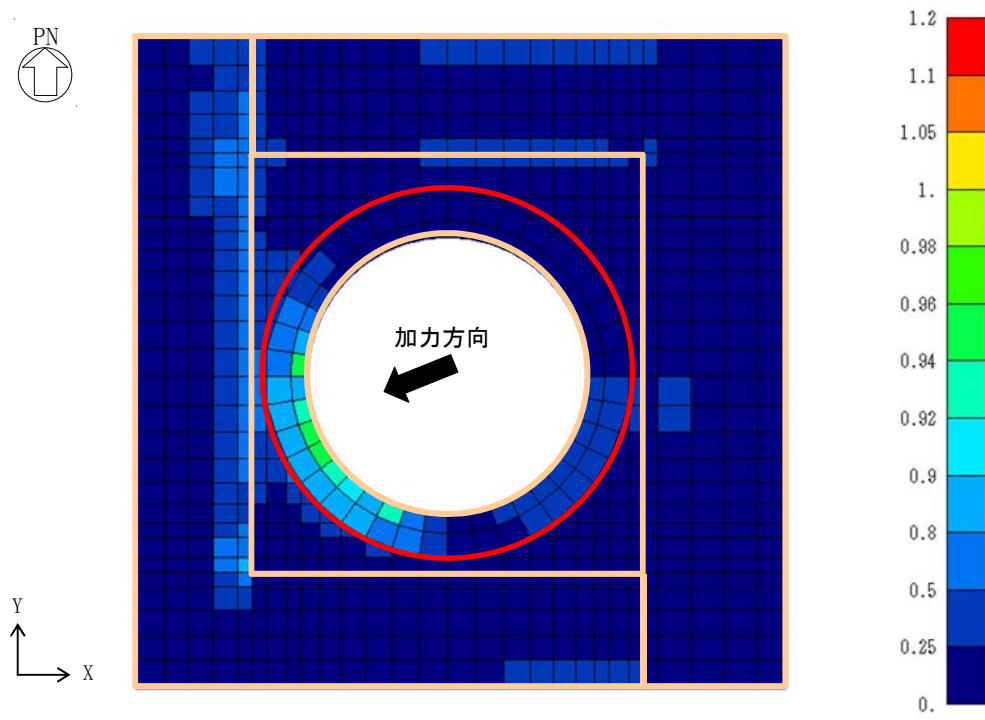


注) 赤枠内は半径方向、それ以外は X 方向の軸力を示す。

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→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)

表 6-2 応力平均化による検定結果

要素 番号	平均化前				平均化後			
	Mr kNm/m	Qr kN/m	Qa kN/m	検定比	Mr kNm/m	Qr kN/m	Qa kN/m	検定比
261	27328	9190	8710	1.06	14368	7652	8710	0.88
262	30186	9711	8710	1.11	16175	8124	8710	0.93
263	32224	9993	8710	1.15	18146	8326	8710	0.96
264	33537	10012	8710	1.15	19628	8301	8710	0.95
265	33837	9902	8710	1.14	20233	8182	8710	0.94
266	32882	9635	8710	1.11	19703	7967	8710	0.91
267	30560	9123	8710	1.05	18026	7628	8710	0.88



(b) 平均化後

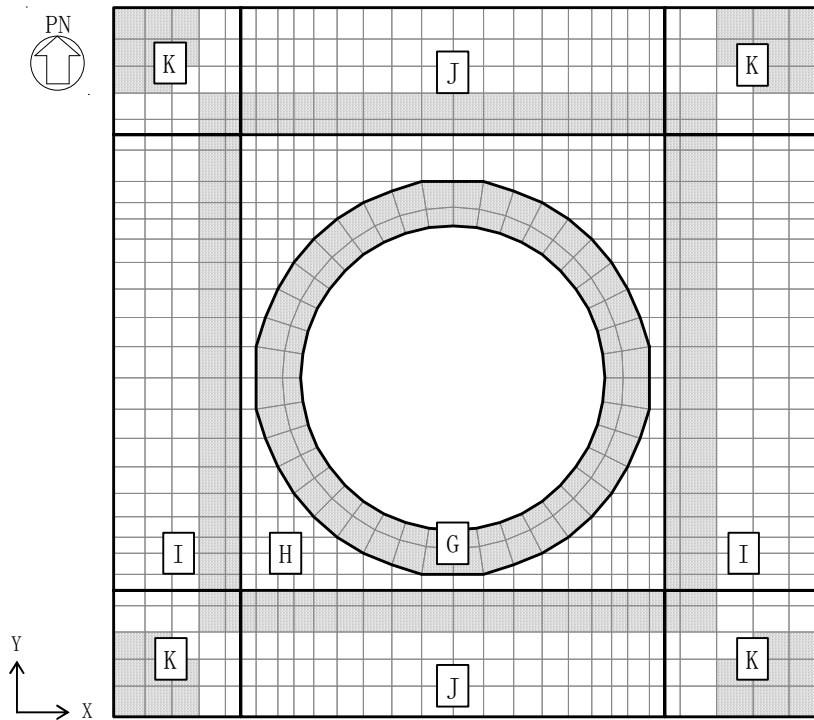
参考図 RC-N 式による面外せん断力の検定比

(人工岩盤考慮, 応力平均化後 0.4N→S+1.0E→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 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 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 6-1 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 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 σ を考慮すると、コンクリート強度は 29.1 N/mm^2 になる。コンクリート強度に 29.1 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/mm²)

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	—	—	—	1.50	(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/mm²)

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	—	—	—	1.17	(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 20%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、「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 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。

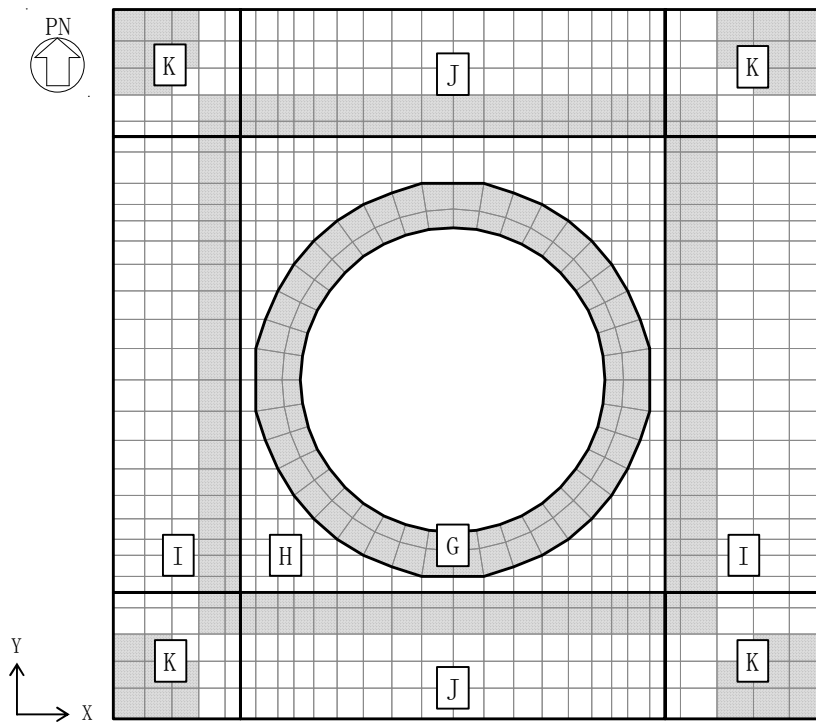
以上より、人工岩盤を考慮しない基礎スラブの応力解析結果に対し、許容限界として荒川 mean 式による終局面外せん断耐力を適用することは、荒川 mean 式の裕度が 20%、軸力の影響による裕度が 5%程度見込め、全体として 25%程度の裕度を有している。

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（「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) $r-\theta$ 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 修正追而

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、各節点到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。

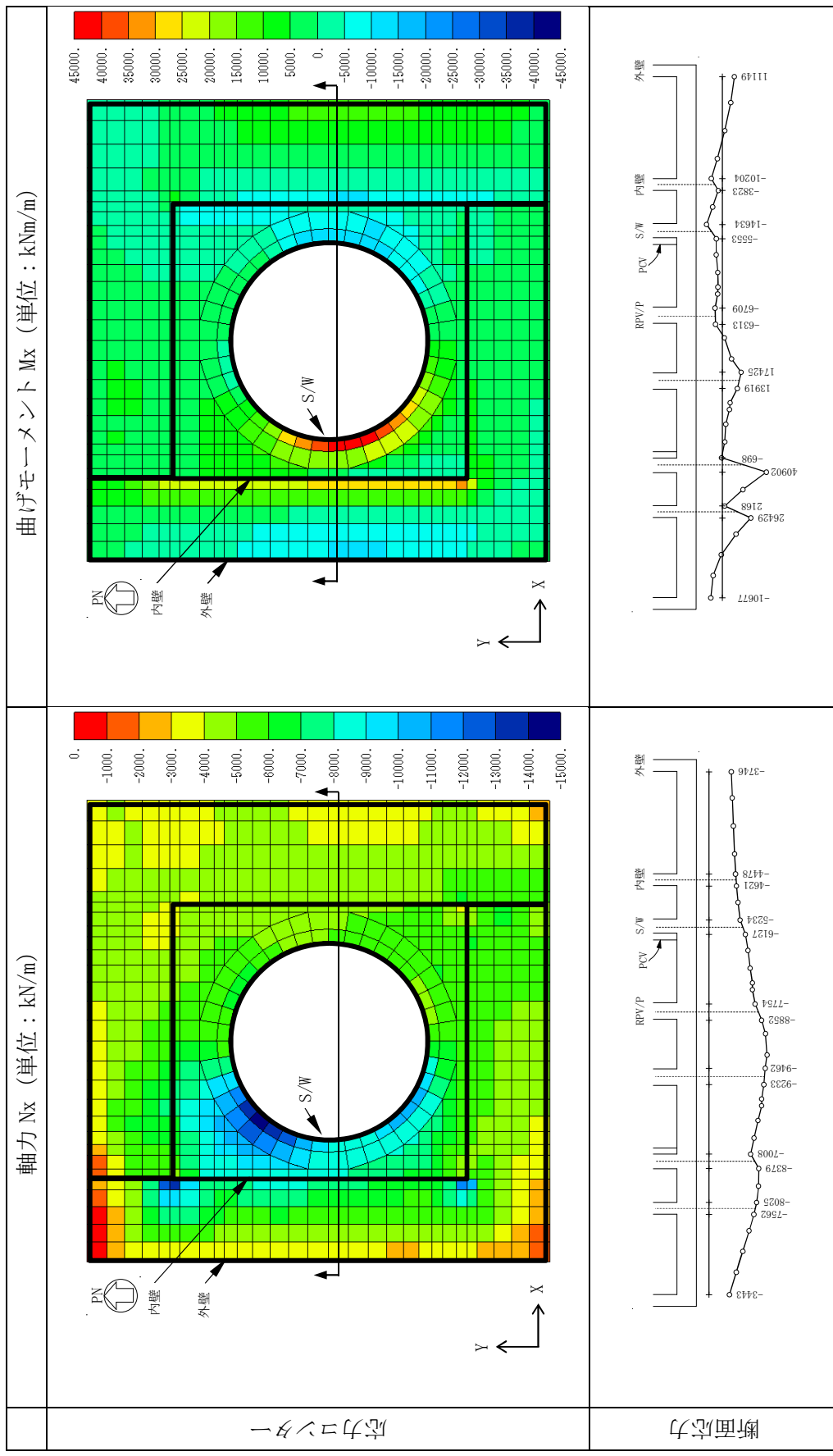
ここでは、付表 2-1 に示す荷重組合せケースに対する基礎スラブの発生応力について考察を行い、基礎スラブに発生する応力が、単純梁に等分布荷重を載荷した場合に近いことを確認する。

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。

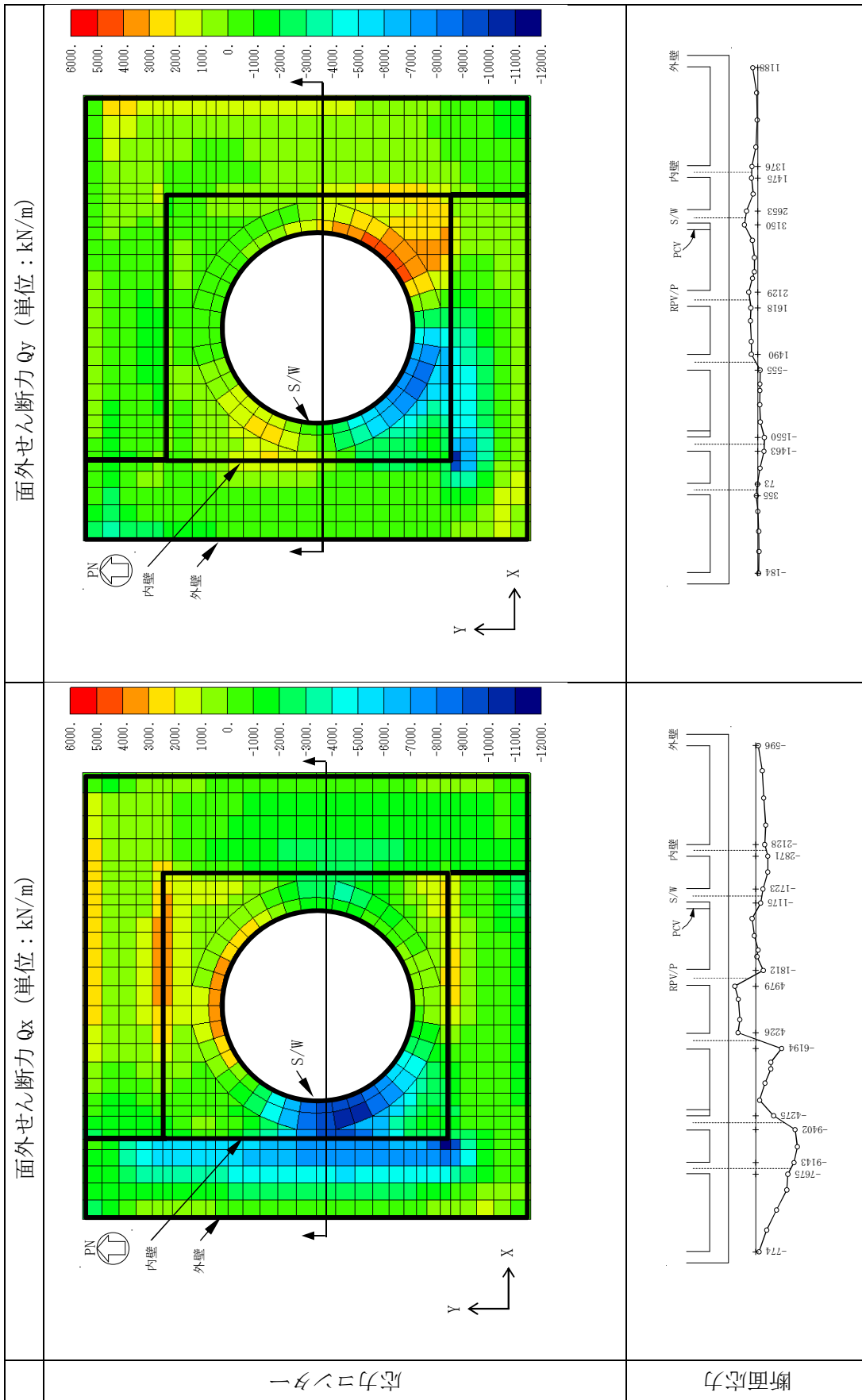
付図 2-3 に示すように、面外せん断力に対する検定比が厳しくなる押し込みの厳しい南西部付近の S/W と内壁の間では、接地圧は分布荷重になっていることがわかる。

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、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、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。

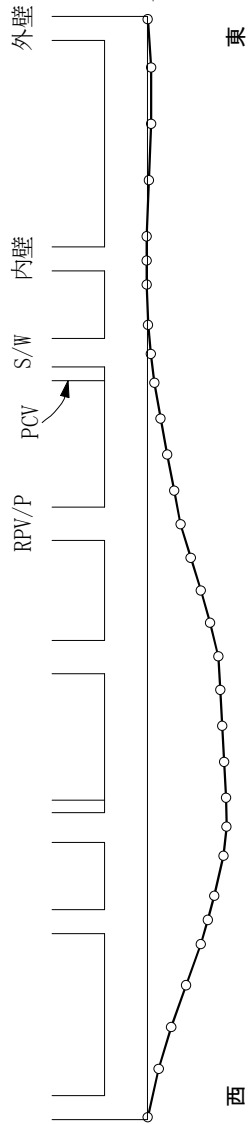
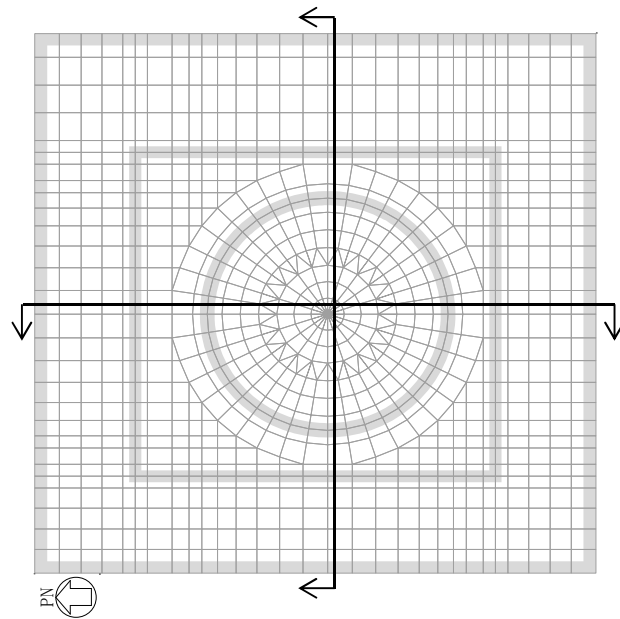
付図 2-5 に自重のみ載荷した場合の基礎スラブの発生応力を、付図 2-6 に自重と地震による転倒モーメントのみを載荷した場合の基礎スラブの発生応力を示す。付図 2-5 に示す曲げモーメントの断面応力を見ると、自重による発生応力は連続梁に等分布荷重を載荷した場合の応力状態に近くなっている。一方、付図 2-6 に示す自重と地震による転倒モーメントのみを載荷した場合の基礎スラブの応力状態は、軸力を除き付図 2-1 に示す応力状態と等しくなっている。この、自重と地震による転倒モーメントのみを載荷した場合の基礎スラブの応力状態は、壁の取り付く位置での曲げモーメントは、一端が 0、他端が最大となっており、片持梁に等分布荷重を載荷した場合の応力状態に近くなっている。なお、図 2-2 に示す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では、片持梁に等分布荷重を載荷した結果は単純梁の等分布載荷として分類されている。



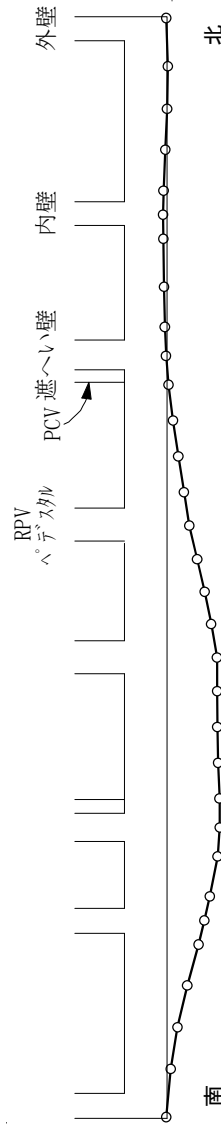
付図 2-1 (1/2) 基礎盤の断面応力 (N_x , M_x / 0.4N → S + 1.0E → W + 0.4上, S_s -31)



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

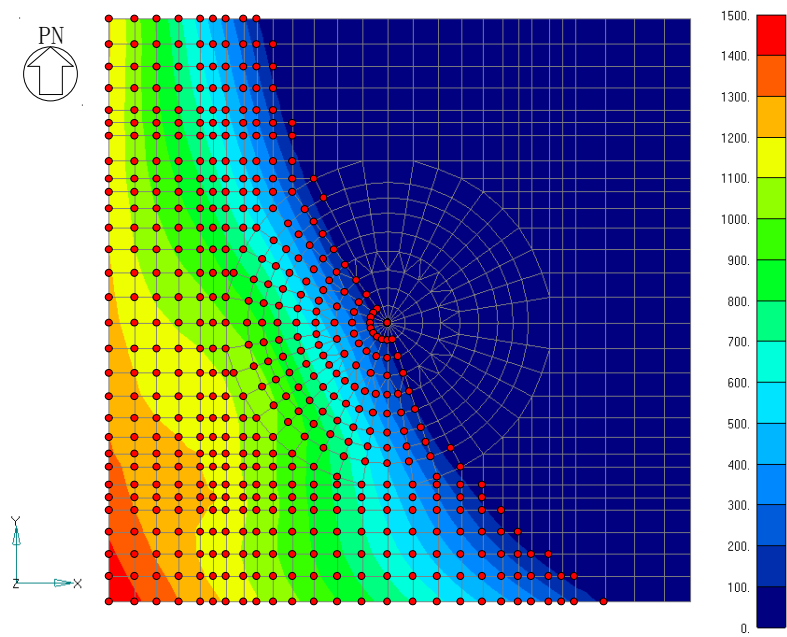


(a) EW 断面



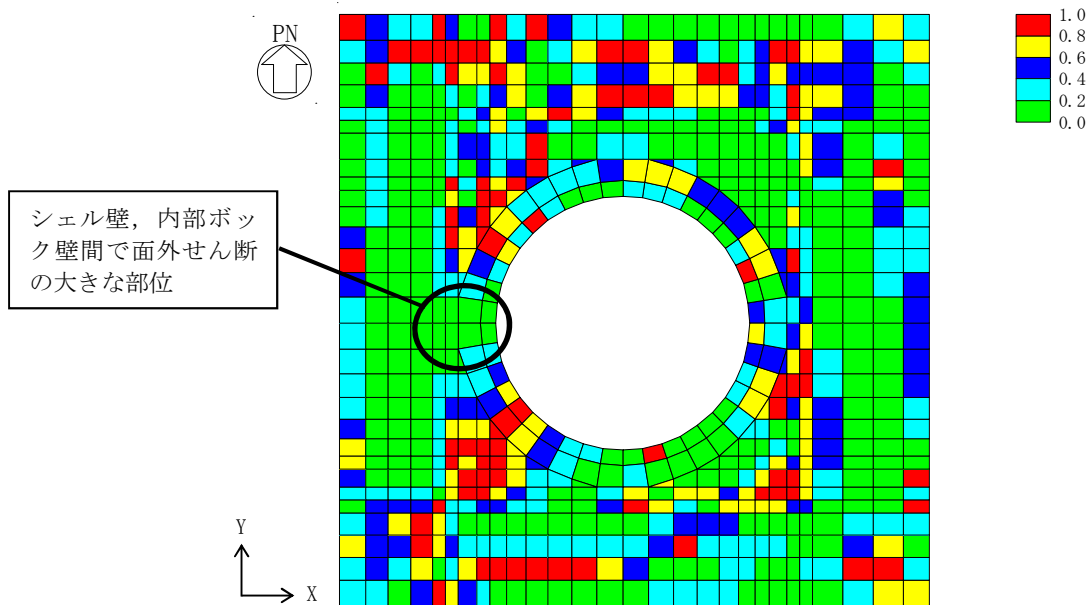
(b) NS 断面

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

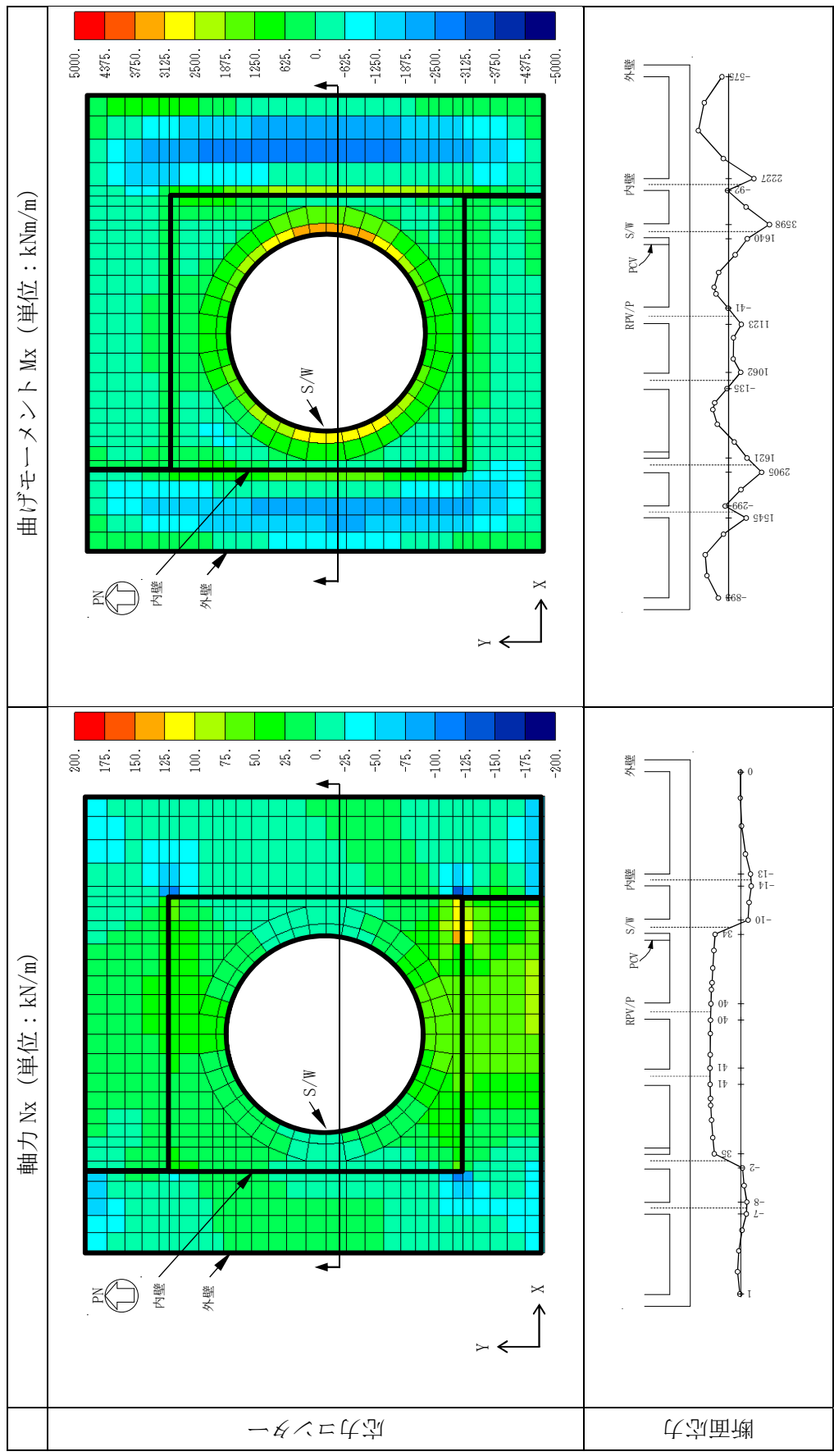


●は接地領域を示す。

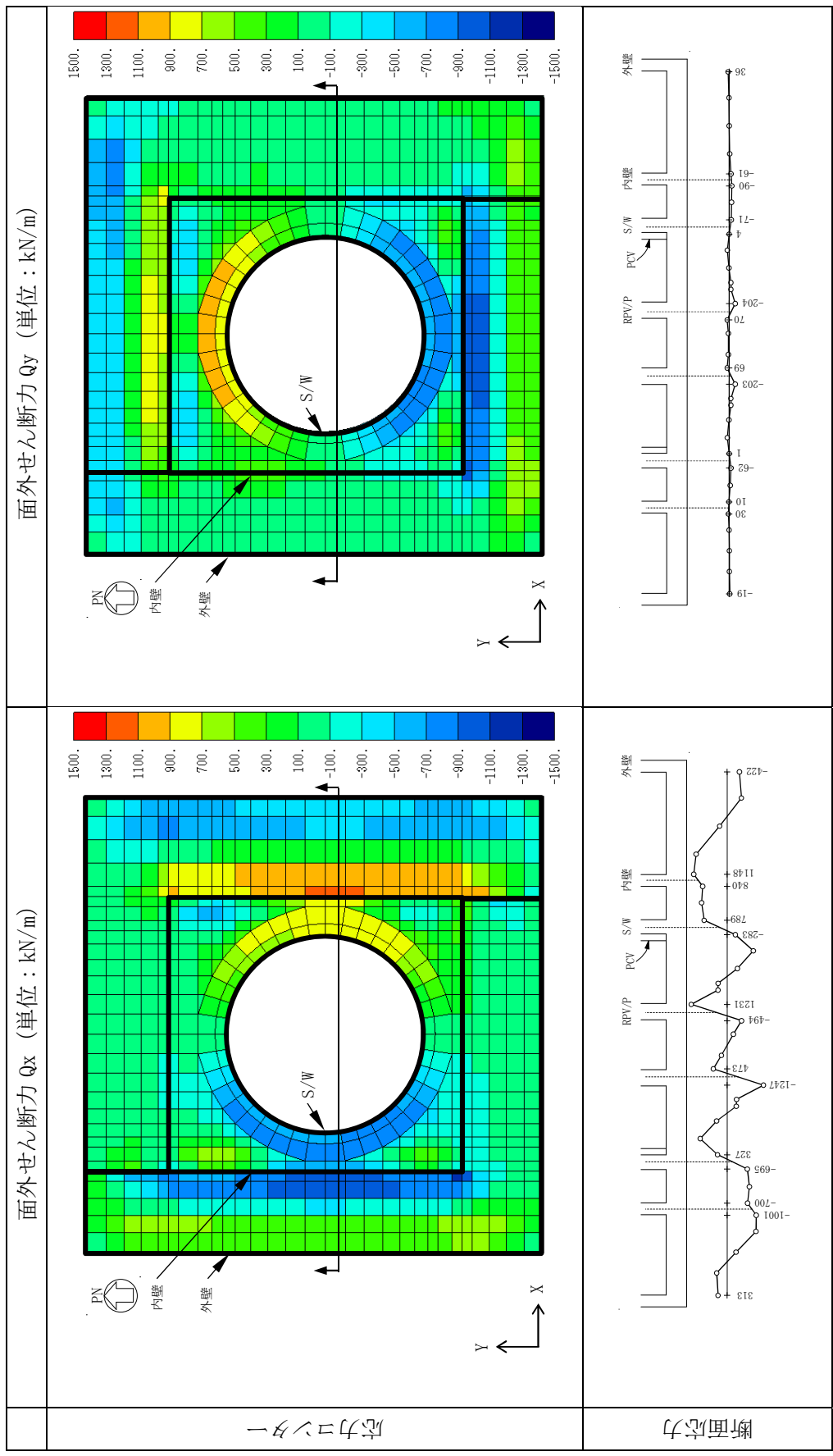
付図 2-3 接地圧分布 (0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



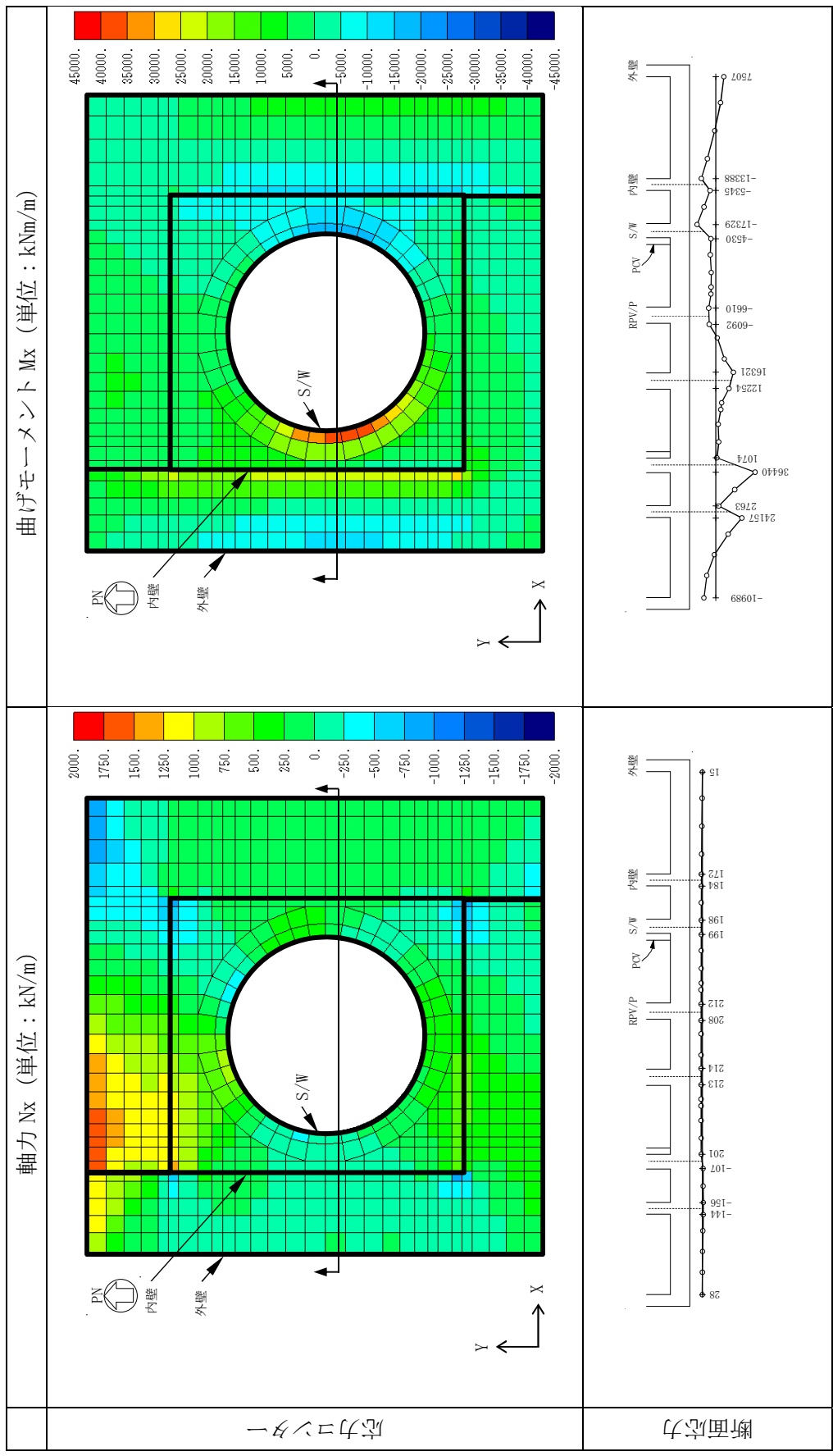
付図 2-4 面外せん断力の比(直交方向/主方向, 0.4N→S+1.0E→W+0.4上, Ss-31)



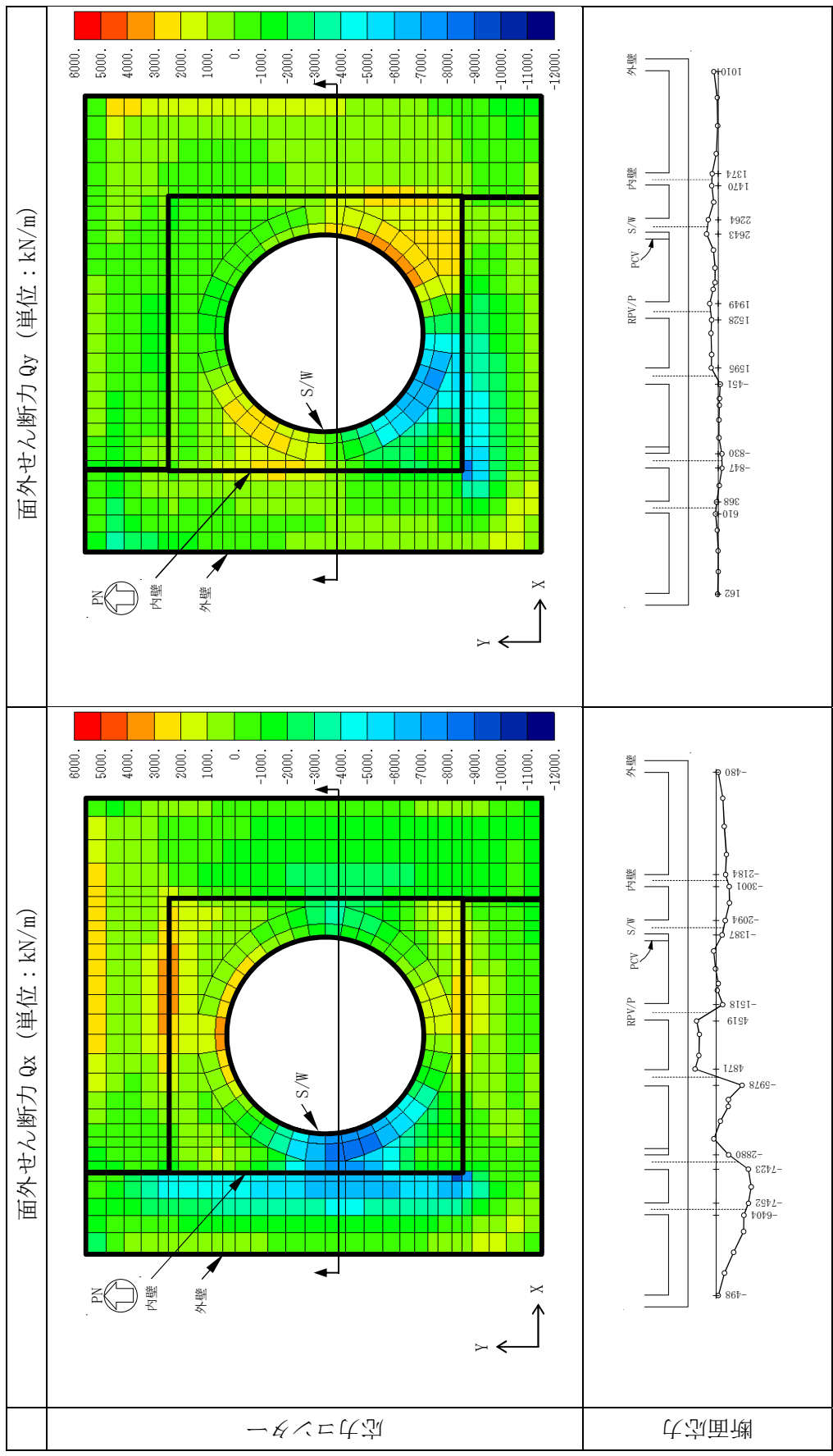
付図 2-5(1/2) 基礎盤の断面応力 (N_x, M_x / 自重のみ)



付図 2-5 (2/2) 基礎盤の断面応力 (Q_x, Q_y / 自重のみ)



付図 2-6(1/2) 基礎盤の断面応力 (N_x, M_x / 自重 + 転倒モーメント ($0.4N \rightarrow S + 1.0E \rightarrow W$))



付図 2-6(2/2) 基礎盤の断面応力 (Q_x, Q_y / 自重 + 転倒モーメント (0.4N → S + 1.0E → W))

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および検定比を付図 3-1 に、要素 302, 465 および 610 における許容せん断力を付表 3-1 に示す。

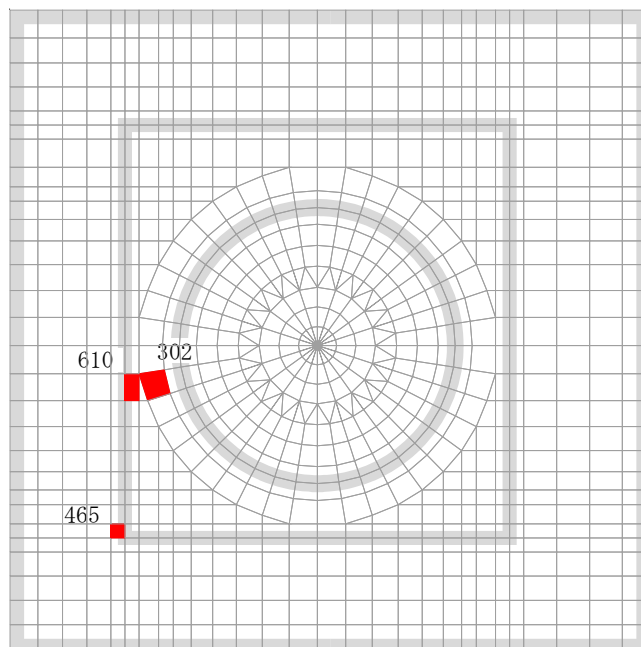
RC-N 式は、せん断スパン比およびせん断補強筋比によって変動するが、せん断補強筋が入っている場合でもせん断補強筋比は 0.242% であり、強度に大きくは寄与せずせん断スパン比の大小により強度が決まっている。また、荒川 mean 式と比較すると、せん断補強筋の入っていない要素では、基本的に RC-N 式のほうが大きくなっている。

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。

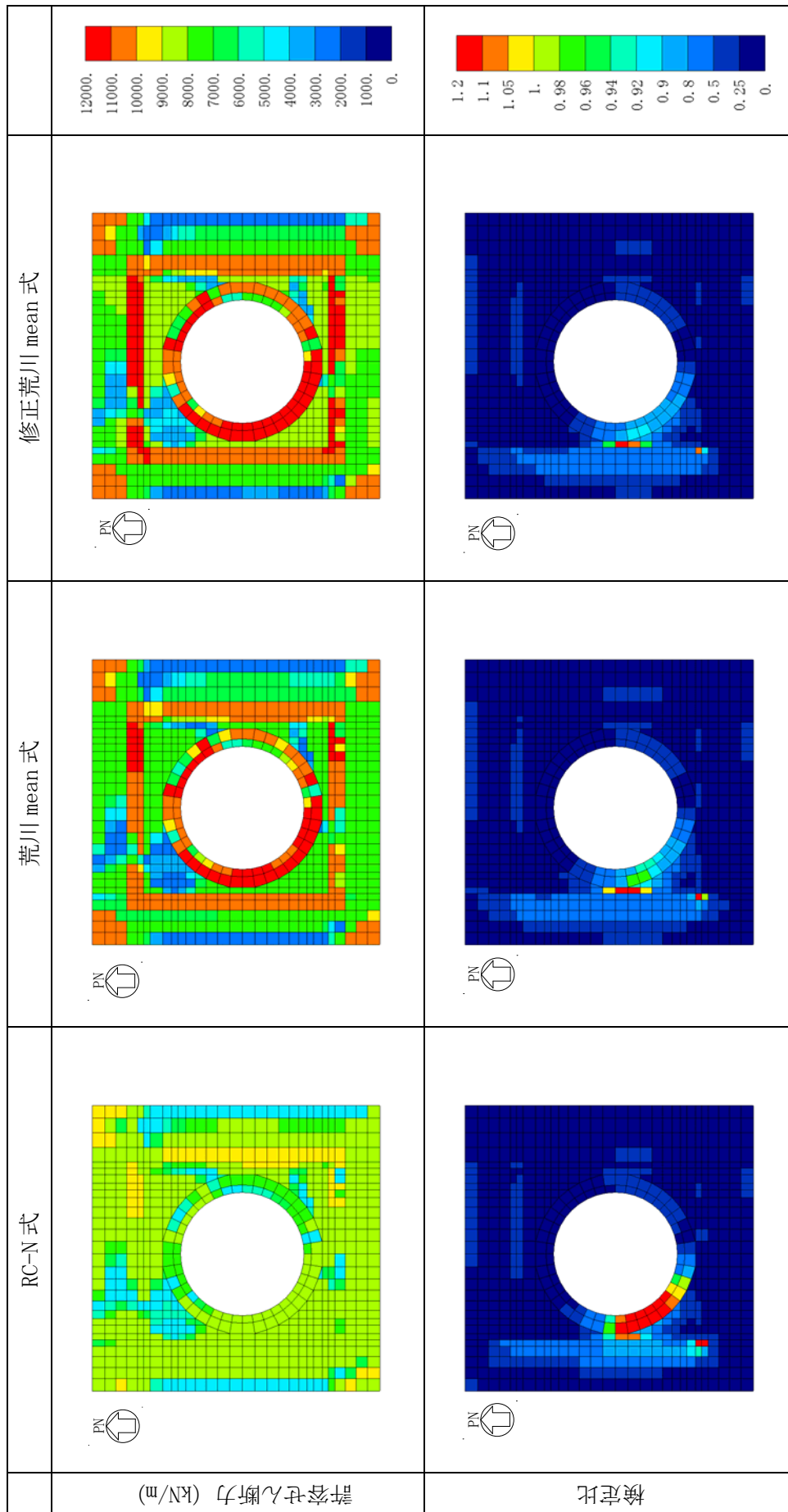
荒川 mean 式に対する修正荒川 mean 式の比率および RC-N 式に対する荒川 mean 式の比率を付図 3-2 および付図 3-3 に示す。

付表 3-1 許容せん断力の比較

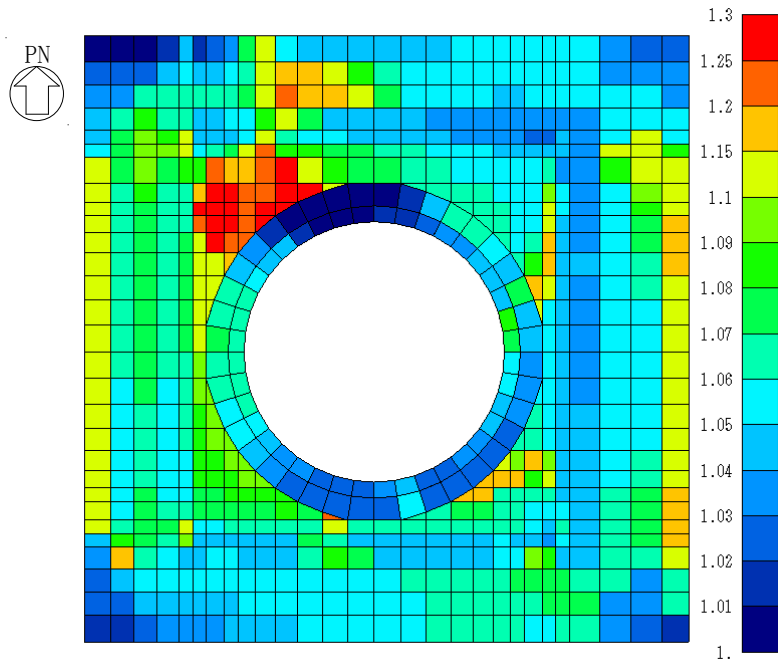
要素 番号	せん断 補強筋比 (%)	M/(Qd)	発生 せん断力 (kN/m)	許容せん断力 (kN/m)		
				RC-N 式	荒川 mean 式	修正 荒川 mean 式
302	0.242	1.0	1.08×10^4	8.71×10^3	1.11×10^4	1.18×10^4
465	0.242	1.0	1.17×10^4	8.82×10^3	1.01×10^4	1.11×10^4
610	0.0	1.0	9.33×10^3	8.77×10^3	7.87×10^3	8.60×10^3



要素位置

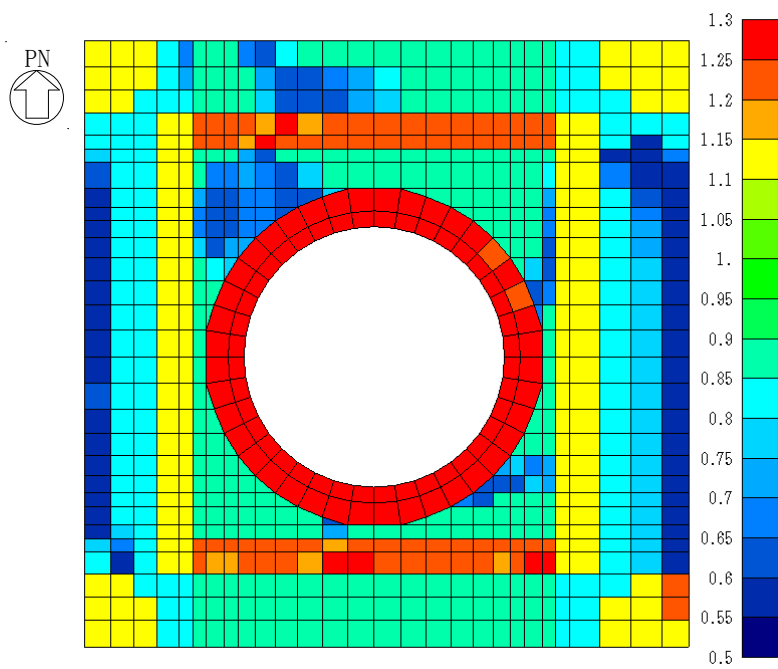


付図 3-1 基礎盤の許容せん断力と検定比の比較【0.4N→S+1.0E→W+0.4上 (Ss-31) (既往の結果)】



最大值：1.33

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 人工岩盤の有無による修正荒川 mean 式と荒川式による検定比の比較

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

付録5 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(4.0×10^{-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 2.0×10^{-3} としても示されており、終局せん断ひずみ度(4.0×10^{-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。

また、JEAG4601-1987の「5.3.5 安全余裕度」では、表5.3.5-1に代表的な部材耐力評価式が示されており、その中で鉄筋コンクリートはり、柱のせん断耐力評価式として、修正荒川 mean 式と荒川 min 式に軸力項を考慮した評価式が示されている。

JEAG4601-1987では「5.3.4 機能維持の検討 (2) 許容限界の考え方」に、基礎スラブについては「終局強度設計」と記載されている。ただし、「5.3.4 機能維持の検討 (3) 終局強度設計」には、「面外せん断補強や面内外の力を受ける部材などでは、応力レベルをほぼ許容応力におさめるようにするなど十分な余裕をみている。」と記載されている。

付録6 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6-1～付表6-3に示す。

付表6-1 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 ²)	圧縮強度		
			平均値 (N/mm ²)	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6-2 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 ²)	圧縮強度 (4週強度)		
			平均値 (N/mm ²)	標準偏差	変動係数 (%)
基礎スラブ	138	22.1	31.0	3.3	10.6

付表6-3 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

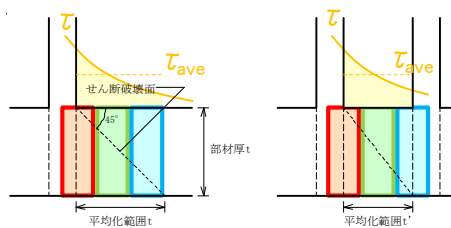
部位	サンプル数	設計 基準強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (4週強度)		
			平均値 (N/mm ²)	標準偏差	変動係数 (%)
人工岩盤	150	13.7	16.9	1.8	10.7

付録7 応力平均化について **削除追而**

応力平均化は、せん断破壊面が複数の要素で共有されることを踏まえ、付図 7-1 に示すように図中に赤、緑、青で示す複数要素による応力平均化を行うこととする。なお、平均化範囲は部材厚 t とする。部材厚の範囲内に耐震壁がある場合は壁面の内法を平均化範囲とする。

ただし、本検討では、応力平均化はシェル壁直下の要素とその 1 要素外周の要素の 2 要素の応力を用いて行う。また、各要素の応力は要素面積の重み付け平均とする。

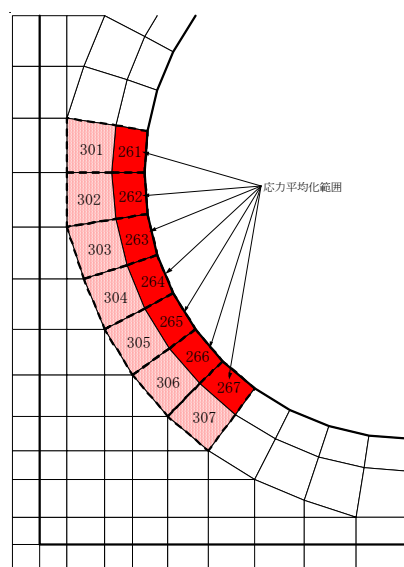
応力平均化前後の応力を表 6-1 に平均化の対象要素を図 7-2 に示す。



付図 7-1 応力平均化の概念図

表 7-1 平均化前後の応力の比較

平均化前の応力								平均化後の応力		
要素番号	Mr kNm/m	Qr kN/m	面積比	要素番号	Mr kNm/m	Qr kN/m	面積比	要素番号	Mr kNm/m	Qr kN/m
261	27328	9190	0.24	301	10353	7176	0.76	261	14368	7652
262	30186	9711	0.24	302	11833	7632	0.76	262	16175	8124
263	32224	9993	0.24	303	13784	7809	0.76	263	18146	8326
264	33537	10012	0.25	304	15100	7744	0.75	264	19628	8301
265	33837	9902	0.25	305	15804	7622	0.75	265	20233	8182
266	32882	9635	0.25	306	15412	7424	0.75	266	19703	7967
267	30560	9123	0.25	307	13946	7141	0.75	267	18026	7628



付図 6-2 応力平均化範囲