

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-025-11 改 05
提出年月日	2023年3月27日

原子炉建物基礎スラブの耐震性についての計算書  
に関する補足説明資料

2023年3月

中国電力株式会社

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

VI-2-9-3-4「原子炉建物基礎スラブの耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

今回提出範囲：

別紙 1 応力解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

別紙 1-1 基礎スラブの応力解析モデルへの弾塑性解析の適用について

別紙 1-1-1 許容限界設定の考え方について

別紙 1-1-2 コンクリート圧縮側の応力ひずみ曲線の設定について

別紙 1-1-3 ドライウェル外側壁内部の構造物から基礎スラブに伝達される荷重等の考え方について

別紙 2 応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件の考え方

別紙 2-1 応力解析モデルでモデル化している部材の扱いについて

別紙 3 地震荷重の入力方法

別紙 3-1 原子炉本体基礎からの反力等の影響について

別紙 4 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙 5 地震応答解析による壁の塑性化に対する影響検討

別紙 6 最大接地圧について

別紙 7 原子炉建物基礎スラブの応力解析における浮力の影響検討

別紙 8 原子炉建物基礎スラブの弾性設計用地震動  $S_d$  による検討

別紙 9 原子炉建物基礎スラブのポンプピット周辺の構造について

別紙 2-1 応力解析モデルでモデル化している部材の  
扱いについて

## 目 次

1. 概要 .....	別紙 2-1-1
2. 応力解析でモデル化した部材の設計上の扱い .....	別紙 2-1-2
3. 今回工認モデルの耐震壁における確認事項 .....	別紙 2-1-4
3.1 評価方針 .....	別紙 2-1-4
3.2 評価方法 .....	別紙 2-1-6
3.2.1 面内せん断力に対する検討 .....	別紙 2-1-6
3.2.2 面外せん断力に対する検討 .....	別紙 2-1-9
3.3 評価結果 .....	別紙 2-1-10
3.3.1 面内せん断力に対する検討 .....	別紙 2-1-10
3.3.2 面外せん断力に対する検討 .....	別紙 2-1-13
4. まとめ .....	別紙 2-1-15

## 1. 概要

原子炉建物の耐震性についての計算においては、質点系モデルを用いた地震応答解析を実施し、耐震壁が基準地震動  $S_s$  に対して構造強度を有すること及び原子炉建物原子炉棟（二次格納施設）として機能維持することを確認している。

一方で、3次元FEMモデルを用いた原子炉建物基礎スラブの応力解析においては、拘束条件として耐震壁等もモデル化し、評価対象部位である基礎スラブが基準地震動  $S_s$  に対して構造強度を有すること及び機能維持することを確認している。

本資料は、原子炉建物基礎スラブの応力解析においてモデル化している耐震壁について、応力解析により発生している応答値の設計上の扱いを整理し、耐震壁の健全性を確認するものである。

## 2. 応力解析でモデル化した部材の設計上の扱い

原子炉建物基礎スラブの応力解析モデル（以下「今回工認モデル」という。）でモデル化している範囲と申請上の位置付けの整理を表 2-1 に示す。また、今回工認モデルの概念図を図 2-1 に示す。

今回工認モデルでは基礎スラブに発生する応力を精緻に算定するため、評価対象部位である基礎スラブに加え、拘束条件として EL 1.3m～EL 42.8m の剛性の高い一部壁及び床スラブを積層シェル要素又ははり要素でモデル化している。

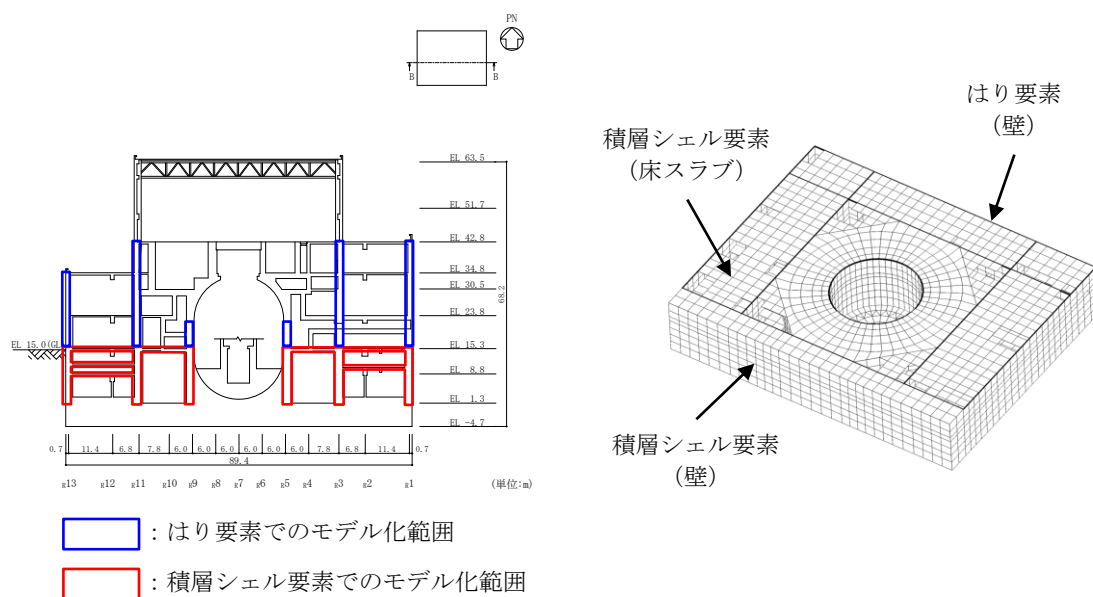
これらの評価対象部位以外の部材は、基礎スラブを評価するために必要十分な精度のモデル化としているものの、当該部材を直接評価するためにモデル化した部材ではない。そのため、評価対象部位である基礎スラブは弾塑性部材としているが、評価対象部位ではない部材は弾性部材\*としており、部材に発生する応力は設計に直接反映していない。しかし、基礎スラブの応力解析においては、評価対象部位以外の部材も解析上応力を負担していることから、その発生応力に対する耐震壁の健全性を確認することとする。

注記\*：原子炉建物基礎スラブの弾塑性応力解析に用いる解析コード「ABAQUS」の検証及び妥当性確認には積層シェル要素が用いられていることから、弾性部材を積層シェル要素でモデル化している。

表 2-1 今回工認モデルでモデル化している範囲と申請上の位置付けの整理

応力解析モデル	・原子炉建物基礎スラブ
評価目的	・基礎スラブが基準地震動 $S_s$ に対して、構造強度を有すること及び機器・配管系等の設備を支持する機能を損なわないことを確認
評価対象部位 (評価結果を設計に反映する部位)	・基礎スラブ
評価対象部位以外でモデル化している部位	・EL 1.3m～EL 42.8m までの内部ボックス壁、外部ボックス壁、火打ち壁、ドライウェル外側壁等の剛性の高い壁 ・EL 8.8m, EL 10.3m, EL 12.5m 及び EL 15.3m の床スラブ
今回工認モデルの耐震壁における確認事項	・面内せん断力 ・面外せん断力
備考	・既工認ではり要素でモデル化していた壁の一部を今回工認では積層シェル要素でモデル化*

注記\* : NS2-補-025-11「原子炉建物基礎スラブの耐震性についての計算書に関する補足説明資料」の別紙 1「応力解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較」参照。



注 : 右図の黒太線は、はり要素を示す。

図 2-1 今回工認モデルの概念図

### 3. 今回工認モデルの耐震壁における確認事項

#### 3.1 評価方針

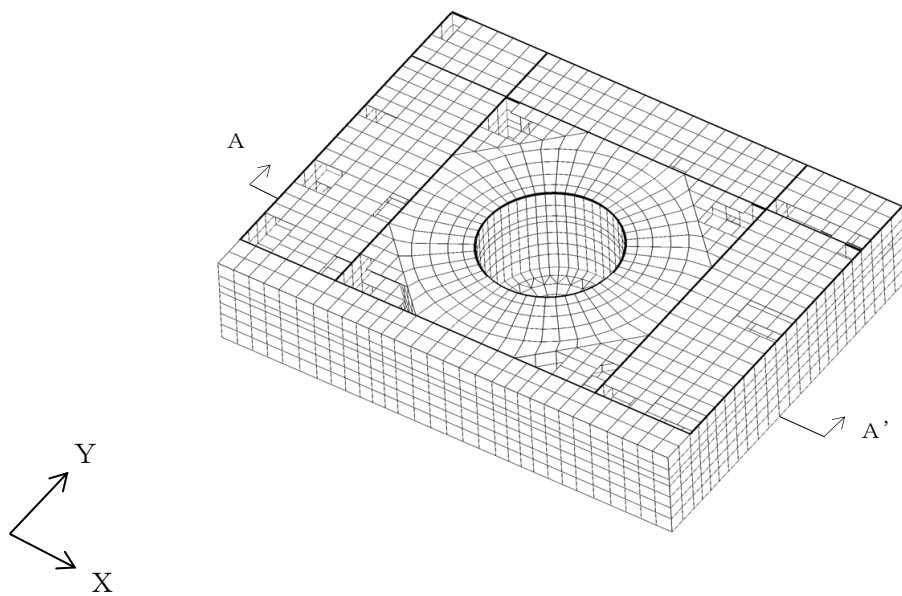
原子炉建物基礎スラブの応力解析において、拘束条件として考慮している各耐震壁（ドライウェル外側壁（DW）、内部ボックス壁（IW）及び外部ボックス壁（OW））の面内せん断力及び面外せん断力について確認する。

面内せん断力については、地震応答解析に基づく各耐震壁のせん断力に、原子炉建物基礎スラブの応力解析において積層シェル要素及びはり要素でモデル化している壁が負担するせん断力を加えることで生じる最大応答せん断ひずみが、許容限界（ $2.0 \times 10^{-3}$ ）を超えないことを確認する。ただし、はり要素については、二次格納施設バウンダリを構成する内部ボックス壁をモデル化した範囲を評価対象とする。

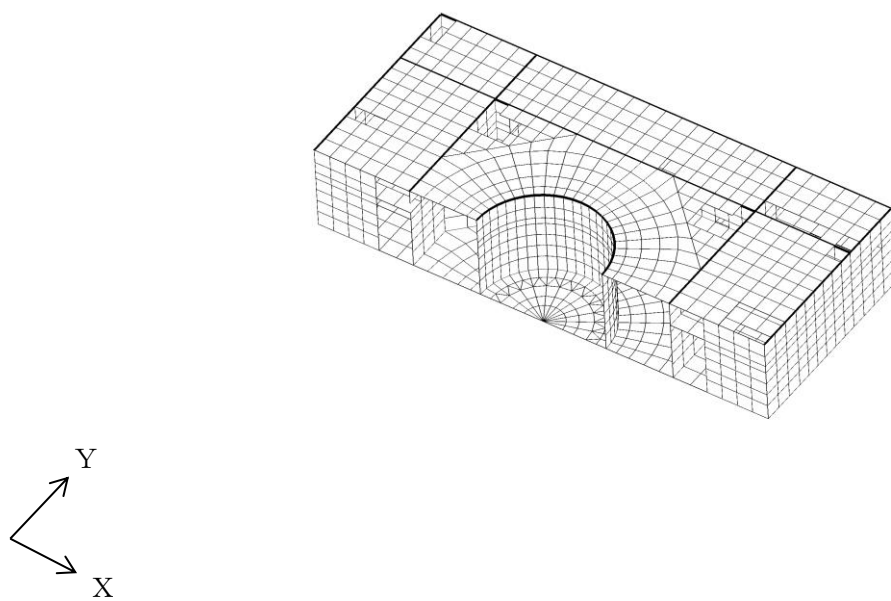
面外せん断力については、原子炉建物基礎スラブの応力解析において積層シェル要素でモデル化している各耐震壁が負担する面外せん断応力度が、コンクリートの短期許容応力度を超えないことを確認する。

今回工認モデルを図 3-1 に示す。





(a) 全体鳥瞰図



(b) 全体鳥瞰断面図 (A-A' 断面)

図 3-1 今回工認モデル

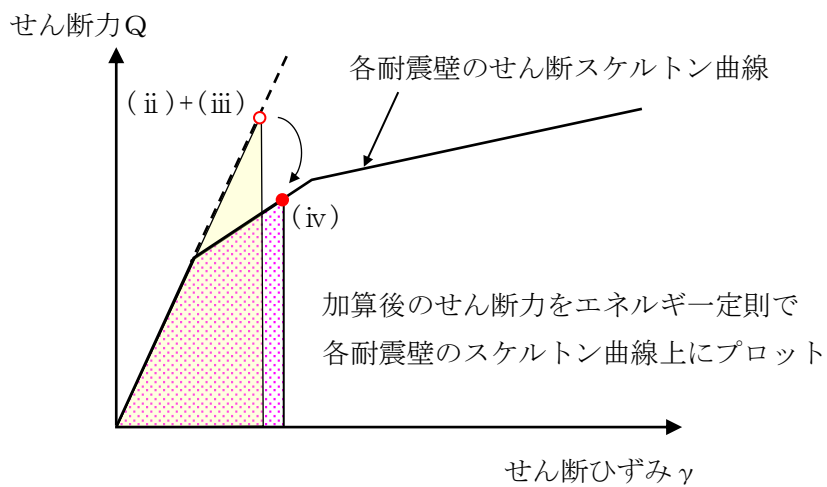
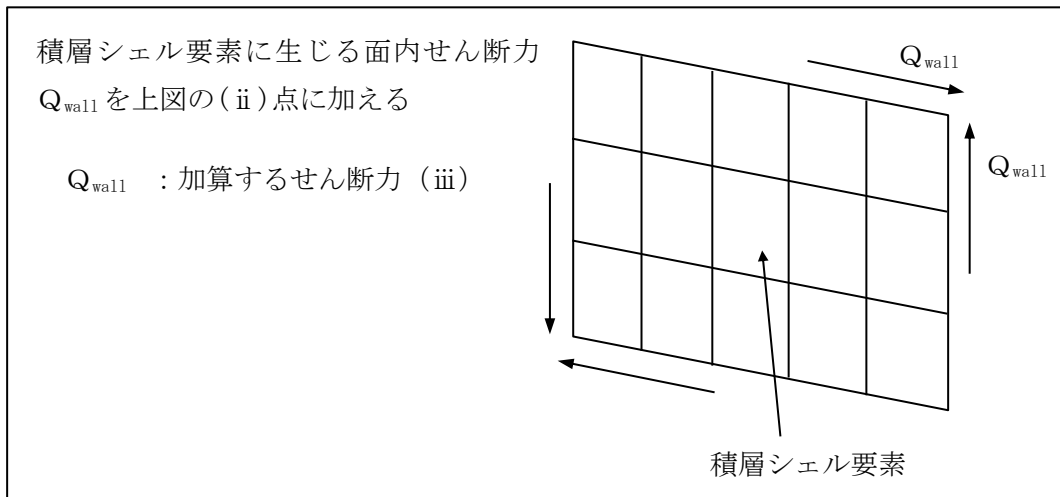
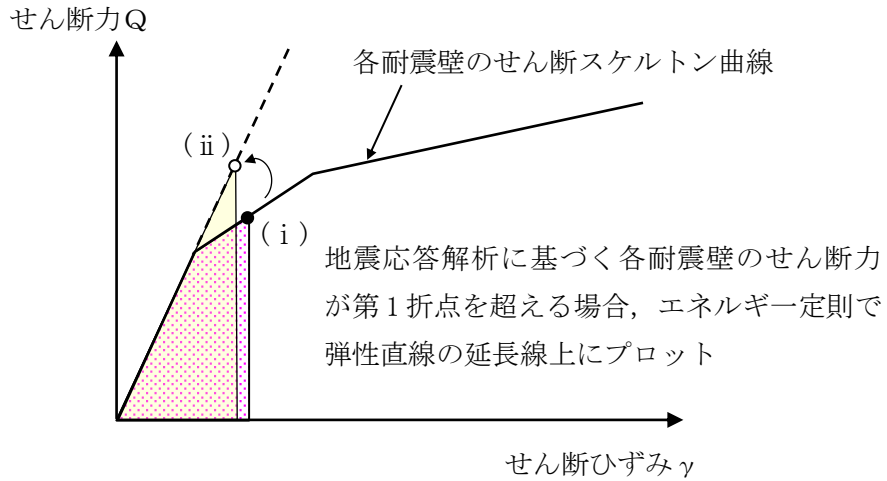
## 3.2 評価方法

### 3.2.1 面内せん断力に対する検討

原子炉建物基礎スラブの応力解析による影響を考慮した各耐震壁の最大応答せん断ひずみを算定し、許容限界 ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) を超えないことを確認する。

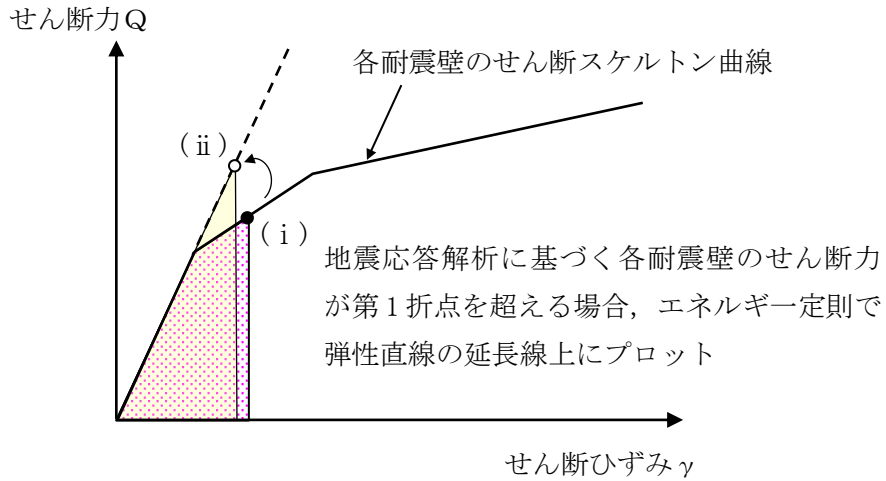
最大応答せん断ひずみは、地震応答解析に基づく各耐震壁のせん断力に、原子炉建物基礎スラブの応力解析において壁をモデル化した積層シェル要素に生じる面内せん断力又ははり要素に生じるせん断力を加え、各耐震壁のせん断スケルトン曲線上にプロットすることで算定する。なお、はり要素に生じるせん断力は、EL 15.3m～EL 23.8mの耐震壁に加算するものとする。

ここで、各耐震壁のせん断力及びせん断ひずみが弾性限界（せん断スケルトン曲線上の第1折点）を超える場合には、エネルギー一定則を用いてせん断力及びせん断ひずみを算定する。エネルギー一定則に基づく各耐震壁のせん断力及びせん断ひずみの算定方法を図3-2に示す。



(a) 積層シェル要素

図 3-2(1) エネルギー一定則に基づく各耐震壁のせん断力及びせん断ひずみの算定方法



はり要素に生じるせん断力 $Q_{wall}$ を上図の(ii)点に加える

$$Q_{wall} = \frac{Q_{bar}}{A_{bar}} A_{wall}$$

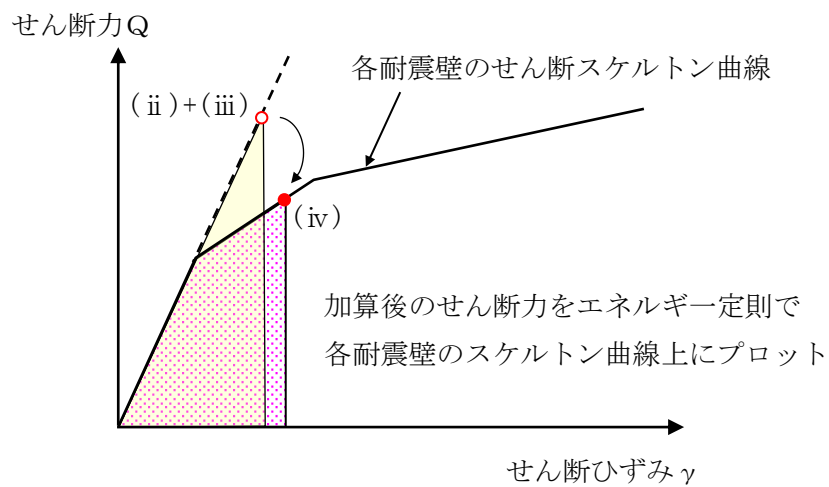
$Q_{wall}$  : 加算するせん断力 (iii)

$Q_{bar}$  : はり要素に生じるせん断力

$A_{bar}$  : はり要素のせん断断面積

$A_{wall}$  : 各耐震壁のせん断断面積

はり要素



(b) はり要素

図 3-2(2) エネルギー一定則に基づく各耐震壁のせん断力及びせん断ひずみの算定方法

### 3.2.2 面外せん断力に対する検討

原子炉建物基礎スラブの応力解析において、各耐震壁に生じる面外せん断応力度がコンクリートの短期許容断応力度を超えないことを確認する。

表 3-1 にコンクリートの短期許容断応力度を示す。

表 3-1 コンクリートの短期許容断応力度

(単位 :  $\text{N}/\text{mm}^2$ )

設計基準強度 $F_c$	せん断
23.5	1.08

### 3.3 評価結果

#### 3.3.1 面内せん断力に対する検討

地震応答解析に基づく各耐震壁のせん断力及び原子炉建物基礎スラブの応力解析により得られる壁の面内せん断力より、図 3-2 に示す方法で算定した最大応答せん断ひずみを表 3-2 に示す。

表 3-2 より、応力解析による影響を考慮した各耐震壁の最大応答せん断ひずみは、 $0.92 \times 10^{-3}$  (NS 方向, 要素番号 18) であり、許容限界 ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) を超えないことを確認した。

表 3-2(1) 応力解析による影響を考慮した最大応答せん断ひずみ

(a) NS方向

部位	EL (m)	要素 番号	加算前			(iii) 加算せん断力 $Q_{wall}$ ( $\times 10^4$ kN)	(ii)+(iii) せん断力 ( $\times 10^4$ kN)	加算後* (iv) せん断ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )
			(i) せん断力 ( $\times 10^4$ kN)	(i) せん断ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	(ii) 面積等価 せん断力 ( $\times 10^4$ kN)			
OW-13	15.3~8.8	4	26.7	0.43	42.2	1.8	44.0	0.46
	8.8~1.3	5	31.9	0.52	53.9	2.6	56.4	0.56
IW-11	23.8~15.3	11	29.8	0.38	43.0	0.02	43.0	0.38
	15.3~8.8	12	39.2	0.43	58.8	9.5	68.3	0.53
	8.8~1.3	13	43.1	0.52	69.0	8.2	77.2	0.61
DW	15.3~10.1	18	23.6	0.77	41.4	5.5	46.9	0.92
	10.1~1.3	19	30.8	0.22	30.8	9.4	40.1	0.29
IW-3	23.8~15.3	25	32.0	0.38	45.7	0.01	45.7	0.38
	15.3~8.8	26	39.3	0.42	58.7	9.7	68.4	0.52
	8.8~1.3	27	43.2	0.53	69.4	7.8	77.3	0.61
OW-1	15.3~8.8	32	27.1	0.42	41.9	2.5	44.4	0.45
	8.8~1.3	33	32.5	0.52	54.4	3.3	57.7	0.57

注記\* : エネルギー一定則を適用し、スケルトン曲線上にプロットした値。

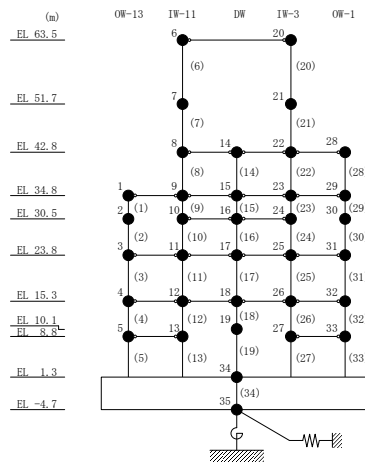
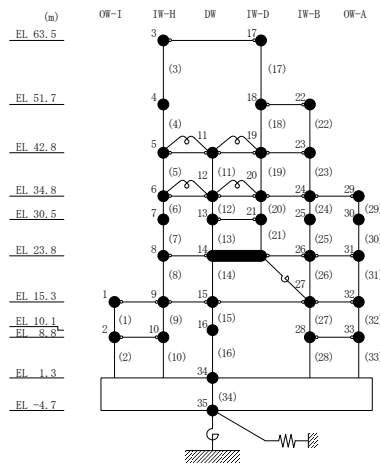


表 3-2(2) 応力解析による影響を考慮した最大応答せん断ひずみ

(b) EW方向

部位	EL (m)	要素番号	加算前			(iii) 加算せん断力 $Q_{wall}$ ( $\times 10^4 kN$ )	(ii)+(iii) せん断力 ( $\times 10^4 kN$ )	加算後* (iv) せん断ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )
			(i) せん断力 ( $\times 10^4 kN$ )	(i) せん断ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	(ii) 面積等価 せん断力 ( $\times 10^4 kN$ )			
OW-I	15.3~8.8	1	25.0	0.32	36.8	2.1	38.9	0.35
	8.8~1.3	2	23.6	0.23	27.9	2.7	30.6	0.25
IW-H	23.8~15.3	8	47.8	0.50	77.6	0.004	77.6	0.50
	15.3~8.8	9	49.2	0.31	63.7	7.9	71.5	0.36
	8.8~1.3	10	57.3	0.22	57.7	6.3	63.9	0.25
DW	15.3~10.1	15	17.9	0.29	19.3	1.1	20.4	0.31
	10.1~1.3	16	23.1	0.16	23.1	3.4	26.5	0.19
IW-B	23.8~15.3	26	37.8	0.50	61.6	0.009	61.6	0.51
	15.3~8.8	27	37.9	0.22	39.2	8.8	48.0	0.28
	8.8~1.3	28	42.6	0.30	52.9	8.3	61.2	0.36
OW-A	23.8~15.3	31	31.3	0.50	53.1	0.03	53.2	0.51
	15.3~8.8	32	27.0	0.22	29.6	2.8	32.4	0.25
	8.8~1.3	33	30.4	0.30	39.0	3.6	42.6	0.34

注記\* : エネルギー一定則を適用し、スケルトン曲線上にプロットした値。





### 3.3.2 面外せん断力に対する検討

原子炉建物基礎スラブの応力解析において、各耐震壁に生じる面外せん断応力度が最大となるケース 1-4\*の面外せん断応力度のコンター図を図 3-3 に示す。

図 3-3 より、面外せん断応力度はおおむね  $0.5\text{N/mm}^2$  以下となっている。要素ごとの最大値でも  $0.896\text{N/mm}^2$  であり、コンクリートの短期許容せん断応力度 ( $1.08\text{N/mm}^2$ ) を超えないことを確認した。

注記\*：荷重の組合せ  $G + P + 1.0 S_{S NS} + 0.4 S_{S DU}$

ここで、

G : 固定荷重

P : 積載荷重

$S_{S NS}$  : N→S 方向  $S_s$  地震荷重 (地震時土圧を含む)

$S_{S DU}$  : 鉛直方向 (上向き)  $S_s$  地震荷重

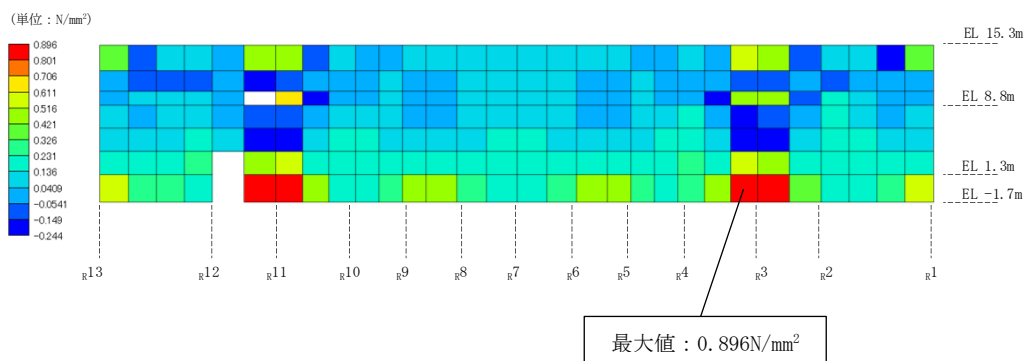
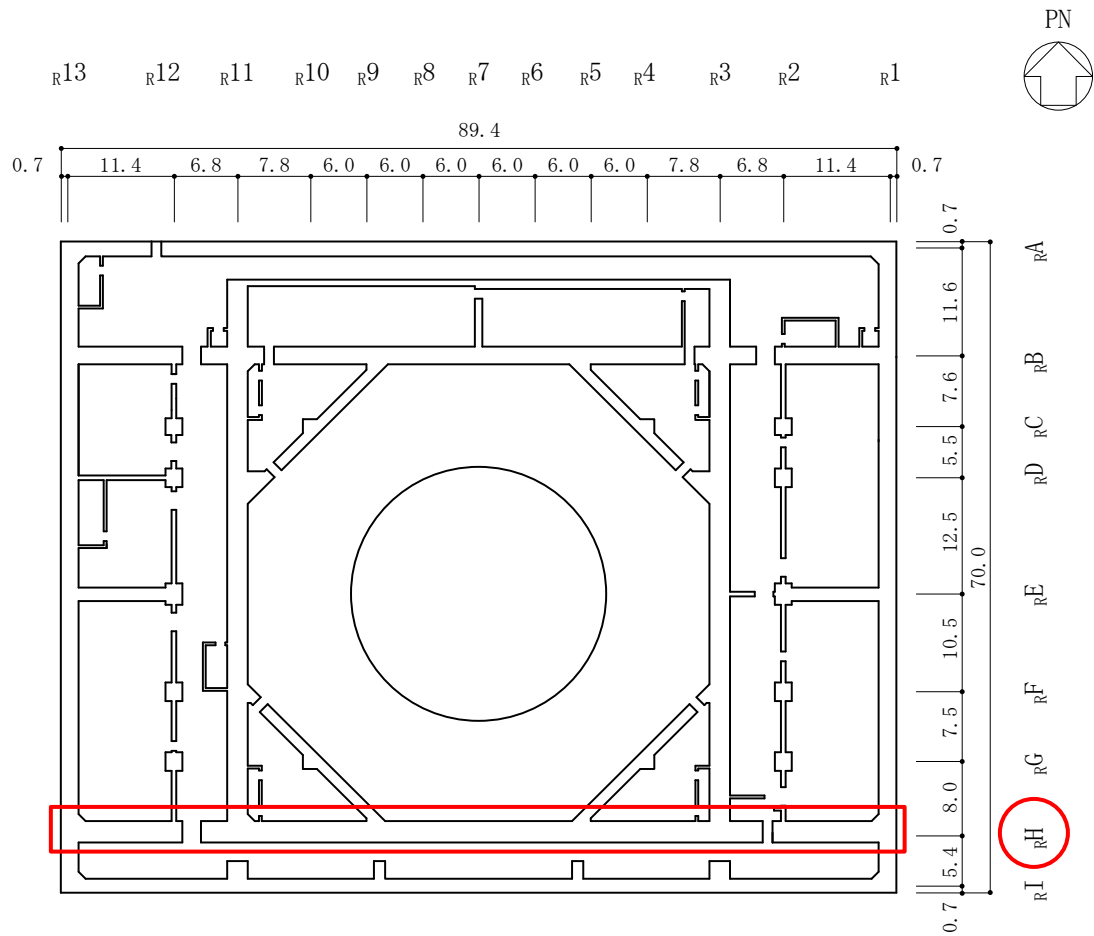


図 3-3 面外せん断応力度のコンター図 (鉛直方向, ケース 1-4, rH 通り)

#### 4. まとめ

原子炉建物基礎スラブの応力解析モデルについて、モデル化した部材の設計上の扱いを整理した。また、原子炉建物基礎スラブの応力解析において、積層シェル要素又ははり要素でモデル化した壁に発生する応力の影響について検討を行った。

検討の結果、応力解析モデルの壁に発生する面内せん断力を考慮した各耐震壁の最大応答せん断ひずみが許容限界を超えないことを確認した。また、応力解析モデルの各耐震壁の面外せん断応力度がコンクリートの短期許容せん断応力度を超えないことを確認した。

以上のことから、原子炉建物基礎スラブの応力解析において、拘束条件としてモデル化している壁に発生する応力が耐震壁の健全性に及ぼす影響はないことを確認した。

別紙 9 原子炉建物基礎スラブのポンプピット周辺の  
構造について

## 目 次

1. 概要 .....	別紙 9-1
2. ポンプピットの検討 .....	別紙 9-2
2.1 検討対象 .....	別紙 9-2
2.2 検討方法 .....	別紙 9-4
2.2.1 応力算定方法 .....	別紙 9-5
2.2.2 曲げモーメントに対する断面の評価方法 .....	別紙 9-5
2.2.3 面外せん断力に対する断面の評価方法 .....	別紙 9-6
2.3 検討結果 .....	別紙 9-7
3. まとめ .....	別紙 9-9

## 1. 概要

原子炉建物基礎スラブには高圧炉心スプレイ系（HPC S）、低圧炉心スプレイ系（LPC S）及び残留熱除去系（RHR）のポンプを設置するために円形のピットがあり、昭和59年2月24日付け58資庁第15180号にて認可された工事計画の添付資料IV-1-3「原子炉格納施設の基礎に関する説明書」（以下「既工認」という。）において、基準地震動 $S_1$ による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力（以下「 $S_1$ 地震時」という。）及び基準地震動 $S_2$ による地震力（以下「 $S_2$ 地震時」という。）に対する評価を行っている。

本資料は、原子炉建物基礎スラブにあるポンプピットについて、既工認で $S_1$ 地震時及び $S_2$ 地震時の評価を行っていることを踏まえ、弾性設計用地震動 $S_d$ による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力（以下「 $S_d$ 地震時」という。）及び基準地震動 $S_s$ による地震力（以下「 $S_s$ 地震時」という。）に対する評価を実施し、ポンプピットの要求機能である支持機能を維持することを確認するものである。

## 2. ポンプピットの検討

### 2.1 検討対象

ポンプピットの配置図を図2-1に示す。

検討対象とするポンプピットは、深さが最も深い高圧炉心スプレイ系（HPCS）ポンプピットとし、検討対象部位は躯体厚が薄いピット底部とする。

検討対象ピットの断面図を図2-2に示す。

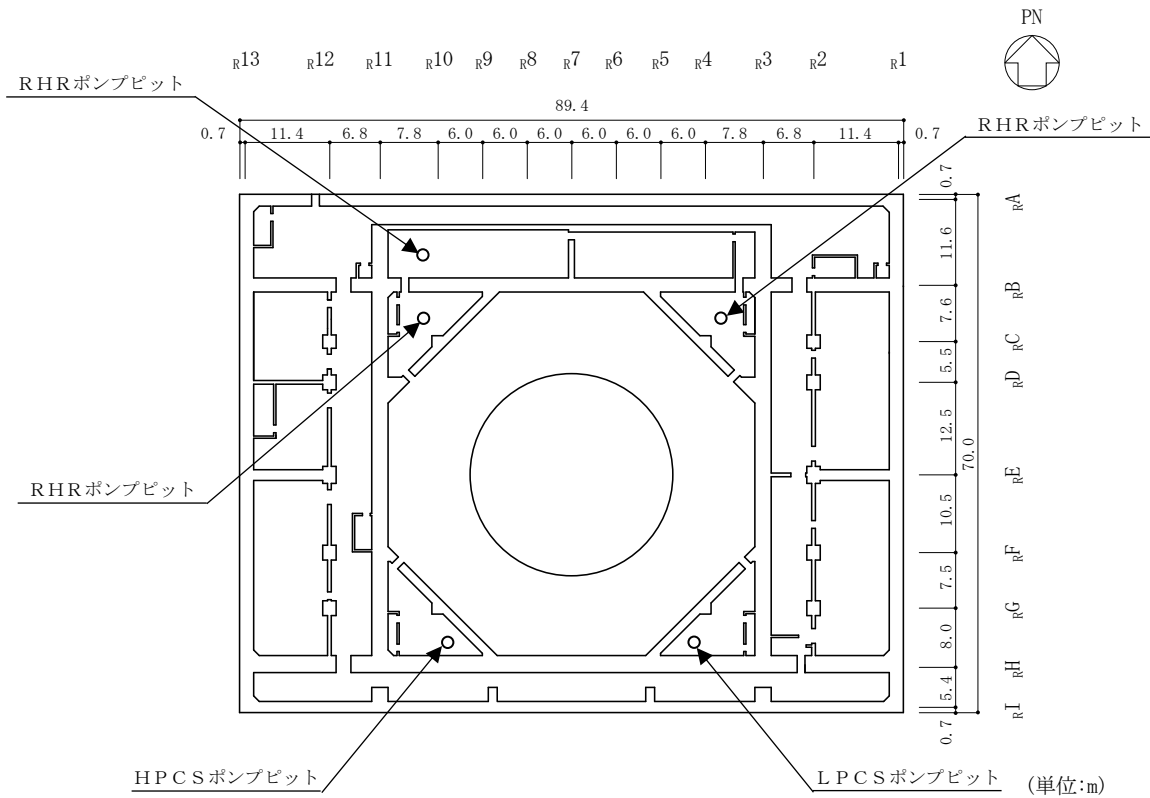


図2-1 ポンプピットの配置図 (EL 1.3m\*)

注記\* : 「EL」は東京湾平均海面 (T.P.) を基準としたレベルを示す。

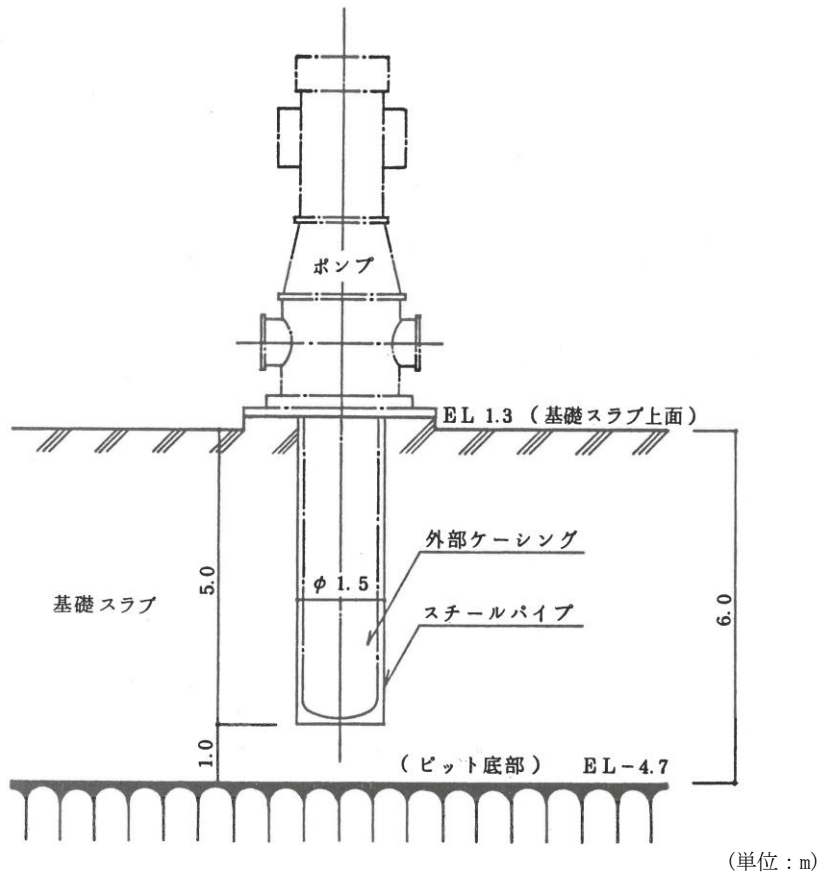


図 2-2 検討対象ピットの断面図



## 2.2 検討方法

ピット底部を等分布荷重を受ける周辺をピン支持とした円版とし、 $S_s$ 地震時の最大接地圧及び浮力による応力に対する断面の評価を行う。なお、 $S_d$ 地震時に対する評価は、 $S_s$ 地震時の評価に包絡されるため、検討を省略する。コンクリート及び鉄筋の許容応力度を表 2-1 及び表 2-2 に示す。

表 2-1 コンクリートの短期許容応力度

(単位：N/mm<sup>2</sup>)

設計基準強度 $F_c$	せん断
23.5	1.08

表 2-2 鉄筋の短期許容応力度

(単位：N/mm<sup>2</sup>)

種別	引張及び圧縮	せん断
SD35 (SD345 相当)	345	345

### 2.2.1 応力算定方法

等分布荷重  $w$  を受ける周辺をピン支持とした円版の曲げモーメント及び面外せん断力は下式により求める。

曲げモーメント

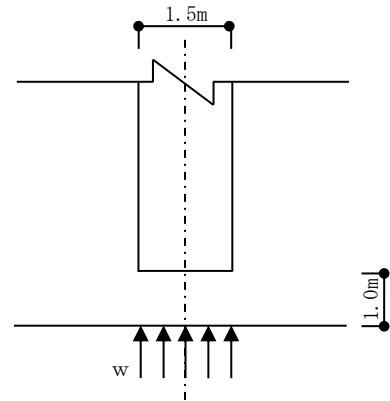
$$M = \frac{(3 + \nu)}{16} \cdot w \cdot r^2$$

面外せん断力

$$Q = w \cdot r^2 \cdot \pi$$

ここで、

- $\nu$  : ポアソン比 (0.2)
- $w$  :  $w_R + w_W$  ( $2.02 \times 10^3 \text{kN/m}^2$ )
- $w_R$  :  $S_s$  地震時の最大接地圧 ( $2.01 \times 10^3 \text{kN/m}^2$ )
- $w_W$  : 浮力 ( $7.8 \text{kN/m}^2$ )
- $r$  : ピット底部の半径 (0.75m)



### 2.2.2 曲げモーメントに対する断面の評価方法

断面の評価は、「原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2005 制定）」（以下「RC-N規準」という。）に基づき，次式をもとに計算した評価対象部位に生じる曲げモーメントによる鉄筋応力度が，許容限界を超えないことを確認する。

$$\sigma_t = \frac{M}{a_t \cdot j}$$

ここで、

- $\sigma_t$  : 鉄筋の引張応力度 ( $\text{N/mm}^2$ )
- $M$  : 曲げモーメント ( $\text{N}\cdot\text{mm}$ )
- $a_t$  : 引張鉄筋断面積 ( $\text{mm}^2$ )
- $j$  : 断面の応力中心間距離で，断面の有効せいの  $7/8$  倍の値 ( $\text{mm}$ )

### 2.2.3 面外せん断力に対する断面の評価方法

断面の評価は、「RC-N規準」に基づき、評価対象部位に生じる面外せん断力が、次式をもとに計算した許容面外せん断力を超えないことを確認する。

$$Q_A = b \cdot j \cdot \{ \alpha \cdot f_s + 0.5 \cdot w f_t \cdot (p_w - 0.002) \}$$

ここで、

- $Q_A$  : 許容面外せん断力 (N)  
 $b$  : 断面の幅\*1 (mm)  
 $j$  : 断面の応力中心間距離で、断面の有効せいの7/8倍の値 (mm)  
 $\alpha$  : 許容せん断力の割り増し係数  
(2を超える場合は2, 1未満の場合は1とする。)

$$\alpha = \frac{4}{M / (Q \cdot d) + 1}$$

- $M$  : 曲げモーメント (N・mm)  
 $Q$  : せん断力 (N)  
 $d$  : 断面の有効せい (mm)  
 $f_s$  : コンクリートの短期許容せん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $w f_t$  : せん断補強筋の短期許容引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $p_w$  : せん断補強筋比で、次式による。(0.002以上とする。\*2)

$$p_w = \frac{a_w}{b \cdot x}$$

- $a_w$  : せん断補強筋の断面積 (mm<sup>2</sup>)  
 $x$  : せん断補強筋の間隔 (mm)

注記\*1: ピット底部においては、円版の円周とする。

\*2: せん断補強筋がない領域については、第2項を0とする。

(なお、ピット底部には、面外せん断補強筋は入っていない。)

### 2.3 検討結果

ポンプピットの構造図を図2-3に、ピット底部の評価結果を表2-3に示す。

表2-3より、S<sub>s</sub>地震時において、曲げモーメントに対する鉄筋応力度及び面外せん断力が許容限界を超えないことを確認した。

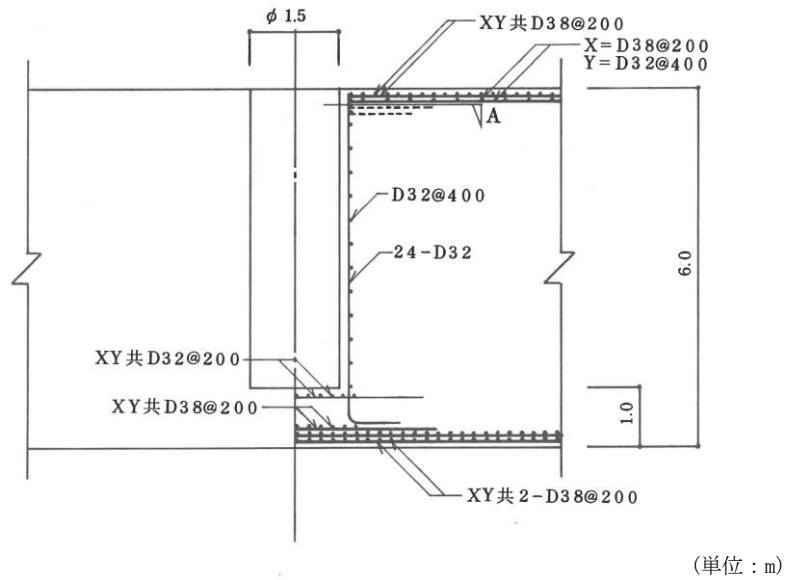


図2-3 ポンプピットの構造図

表 2-3 ピット底部の評価結果

半径 r (mm)		750
厚さ t (mm)		1000
有効せい d (mm)		850
配筋 (鉄筋断面積)	上ば筋	D32@200 (3970mm <sup>2</sup> /m)
	下ば筋	3-D38@200 (17100mm <sup>2</sup> /m)
曲げモーメント	発生曲げモーメント M (kN・m/m)	227.0
	鉄筋応力度 $\sigma_t$ (N/mm <sup>2</sup> )	76.9
	許容限界 (N/mm <sup>2</sup> )	345
	検定値	0.23
面外せん断力	発生せん断力 Q ( $\times 10^3$ kN)	3.57
	せん断スパン比による 割増し係数 $\alpha$	2.00
	許容限界 ( $\times 10^3$ kN)	7.57
	検定値	0.48
判定		可

### 3. まとめ

原子炉建物基礎スラブにあるポンプピットの底部について、S s 地震時の応力に対する断面の評価を実施し、S d 地震時及びS s 地震時にポンプピットが支持機能を維持することを確認した。