

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-025-05 改 02
提出年月日	2023年5月31日

緊急時対策所の耐震性についての計算書に関する

補足説明資料

2023年5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-2-2-12「緊急時対策所の耐震性についての計算書」の記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙1 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件の考え方

別紙2 地震荷重の入力方法

別紙3 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙4 最大接地圧について

別紙 1 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

目 次

1. 概要 別紙 1-1
2. 応力解析におけるモデル化, 境界条件及び拘束条件 別紙 1-2

1. 概要

本資料は、緊急時対策所の基礎スラブの応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件についての概要を示すものである。

2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

緊急時対策所の基礎スラブの応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件を表 2-1 に示す。

直接基礎の底面の地盤ばねの設定における基本的な考え方は，以下のとおり。なお，地震時の評価を行うことから，各荷重に共通で動的な地盤物性に基づく地盤ばねを用いる。

・水平ばね

振動アドミッタンス理論に基づく水平ばねより算出する。

・鉛直ばね

基礎浮上りを考慮し，回転ばね反力として生じる転倒モーメントを適切に評価するため，振動アドミッタンス理論に基づく回転ばねより算出する。

有限要素法を用いた解析モデルにおける要素分割の考え方*については，以下のとおり。

・はり要素

はり要素の場合は，曲げの変位関数が 3 次で精度が高いため，基本的に要素分割の細分化は不要であるが，部材の接合点間で変位情報出力や荷重入力がある場合には複数要素に細分し，曲線部材がある場合は，その曲線が直線近似できる程度の分割にすることが一般的である。また，分布荷重がある場合や分布質量が関係する自重荷重などの計算では，要素分割することにより質量分布がより正確になり，解析結果の精度が向上する。さらに，要素分割の細分化により，変形図やモード図で構造物の変形状態を容易に把握することが可能となる。

・シェル要素

要素分割は，基本的には発生する応力状態によって決まり，構造形状と荷重条件より要素分割数を考慮する。要素形状の縦横比（アスペクト比）は，重要部分で 1:2 以下，その他の領域や応力変化が少ない領域では，1:3 程度までで，分割に際しては 4 角形要素を利用して格子状とするのが一般的である。曲面板構造の場合は，平板要素や軸対称シェル要素の大きさは，集中荷重や不連続部を含む曲面近傍では $2.5\sqrt{R/t}$ を 10~20 分割すると適切な応力分布が求められ，構造物の半径 (R) と板厚 (t) が考慮されている。また，面内曲げ・軸力及び面外のせん断や曲げを受ける部材のシェル要素の辺の長さは，シェルの広がり方向の応力分布の状態から決まり，応力変化が大きい領域は要素を小さくする必要がある。


注記*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2006 年）

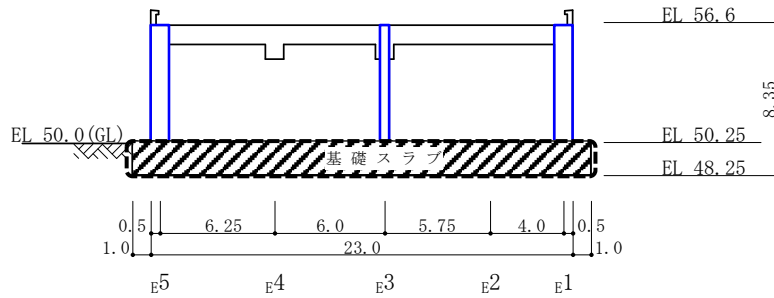
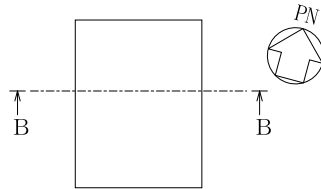
表 2-1(1) モデル化, 境界条件及び拘束条件

モデル概要


○モデル化範囲

- ・評価対象である基礎スラブ全体をモデル化する。
- ・上部構造物については, 基礎スラブより立ち上がる剛性の高い一部壁の剛性を拘束条件として考慮する。

 : はり要素でのモデル化範囲
(拘束条件として考慮)



(単位:m)


評価対象のモデル化範囲

モデル化範囲

表 2-1(2) モデル化, 境界条件及び拘束条件

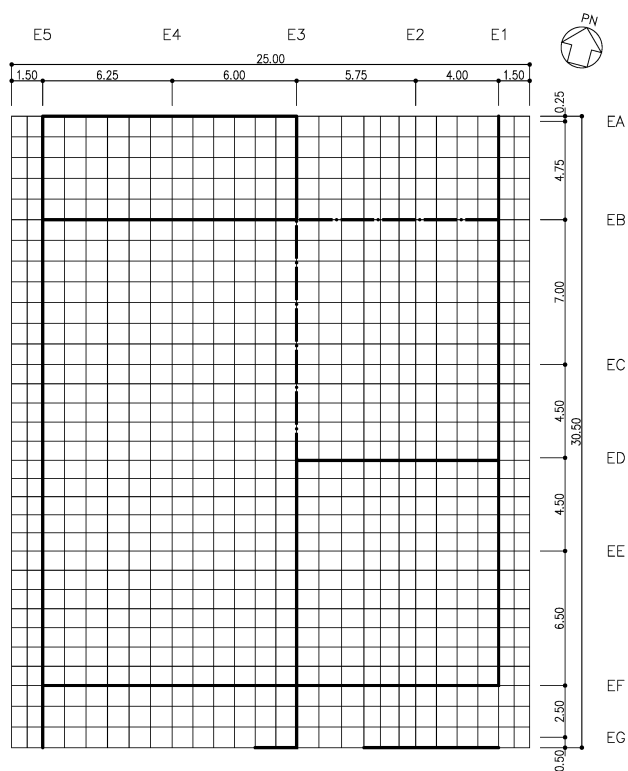
モデル概要

○使用要素

- ・シェル要素
- ・はり要素

○要素分割

- ・要素の一边の長さを 1.0m 程度とし, 壁の配置を考慮して分割する。



————— : 耐震壁

- - - - - : 間仕切壁

(単位 : m)

モデル概要

表 2-1(3) モデル化, 境界条件及び拘束条件

境界条件	
基礎スラブと地盤の境界	
<p>・基礎スラブと底面地盤との間に底面地盤を表現するギャップ要素を設け, 基礎スラブと底面地盤との間の剝離(基礎スラブの浮上り)を考慮している。</p>	<p style="text-align: center;">ギャップ要素</p> <p style="text-align: center;">モデル概要</p>
<p>○ギャップ要素</p> <p>鉛直ばねに引張力が発生した際に, 水平剛性及び鉛直剛性をゼロとし, 浮上りを考慮する。</p>	
<p style="text-align: center;">(a) 水平剛性</p>	<p style="text-align: center;">(b) 鉛直剛性</p>
<p>注：鉛直ばねに引張力が発生した場合には, 水平剛性もゼロとする。</p> <p style="text-align: center;">ギャップ要素の概念図</p>	
<p>○底面地盤ばね</p> <p>水平剛性及び鉛直剛性は以下のとおり設定する。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・水平剛性：振動アドミタンス理論による水平ばねK_Hを節点支配面積A_iで離散化。 $K_{Hi} = (K_{HNS}/A + K_{HEW}/A) / 2 \times A_i$ A：基礎スラブの底面積 ・鉛直剛性：転倒モーメントが支配的となるため振動アドミタンス理論による回転ばねK_Rを節点支配面積A_iで離散化。 $K_{Vi} = (K_{RNS}/I_{NS} + K_{REW}/I_{EW}) / 2 \times A_i$ I：基礎スラブの断面二次モーメント 	
<p style="text-align: center;">底面地盤ばね</p>	<p>基礎スラブ底面全体で 離散化</p>

表 2-1(4) モデル化, 境界条件及び拘束条件

拘束条件	
上部構造物と基礎スラブの境界	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 基礎スラブと上部構造物の境界部においては, 上部構造物の剛性を考慮することで, 基礎スラブの応力・変形状態を評価する。 ・ 上部構造物の剛性は EL 50.25m~EL 56.6m の壁の剛性をはり要素として考慮する。 	
はり要素の剛性 (断面性能)	
<ul style="list-style-type: none"> ・ 曲げ剛性 (断面二次モーメント) $I = t \cdot h^3 / 12$ ・ せん断剛性 (せん断断面積) $A_s = t \cdot h$ 	<ul style="list-style-type: none"> t : 壁の厚さ h : モデル化する壁の高さ

別紙 2 地震荷重の入力方法

目 次

1. 概要	別紙 2-1
2. 地震荷重の入力方法	別紙 2-2

1. 概要

本資料は、緊急時対策所の基礎スラブに作用する地震荷重の入力方法について示すものである。

2. 地震荷重の入力方法

緊急時対策所の基礎スラブの応力解析に当たって、FEMモデルに入力する地震荷重として、水平地震力及び鉛直地震力を考慮する。

地震荷重の入力は、基準地震動 S_s に対する地震応答解析結果を考慮し、FEMモデルに入力する水平力、曲げモーメント及び鉛直力が、各質点位置で地震応答解析結果と等価になるように設定する。

具体的には、水平地震力については、地震応答解析により求まる最大応答せん断力に基づく水平力をFEMモデルに入力する。上部構造物から作用する基礎スラブへの地震時反力については、FEMモデルにおける上部構造物脚部に対応する各節点に、節点の支配面積に応じて分配し、節点荷重として入力する。基礎スラブモデル部分については、地震応答解析より求まる基礎スラブ底面地盤ばねの最大水平力から、上部構造物から作用する水平力を差し引いた値と等価になる荷重（以下「付加せん断力」という。）をFEMモデルの基礎スラブの各節点に、節点の支配面積に応じて分配し、節点荷重として入力する。

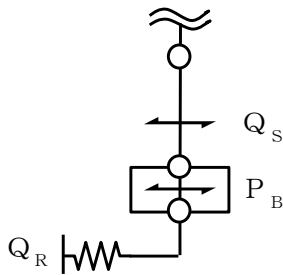
また、地震応答解析により求まる最大応答曲げモーメントをFEMモデルに入力する。上部構造物から作用する基礎スラブへの地震時反力は、偶力に置換して水平力を入力位置に節点荷重として入力する。基礎スラブモデル部分については、地震応答解析より求まる基礎スラブ底面地盤ばねの最大曲げモーメントから、上部構造物から作用する曲げモーメントを差し引いた値と等価になる荷重（以下「付加曲げモーメント」という。）をFEMモデルの基礎スラブの各節点に、節点の支配面積と中心位置からの距離に応じて偶力に置換して分配し、節点荷重として入力する。

なお、水平地震力及び曲げモーメントについては、荷重分配解析によって分配し、耐震壁の位置に対応する節点に入力する。また、曲げモーメントの偶力への置換については、平面保持を仮定している。

鉛直地震力については、地震応答解析により求まる基礎スラブ直上の部材の軸力から算出した軸力係数に基づく鉛直力をFEMモデルに入力する。上部構造物から作用する基礎スラブへの地震時反力については、FEMモデルにおける上部構造物脚部位置に対応する各節点の支配面積に応じて上部構造物の重量を分配した支配重量に軸力係数を乗じた節点荷重として入力する。基礎スラブモデル部分については、地震応答解析より求まる基礎スラブ底面地盤ばねの鉛直力から上部構造物から作用する鉛直力を差し引いた値と等価になる荷重（以下「付加軸力」という。）を基礎スラブの重量で除して付加軸力係数を算定する。そして、FEMモデルの基礎スラブの各節点の支配重量に付加軸力係数を乗じた節点荷重として入力する。

FEMモデルに入力する地震荷重の概念図を図2-1に示す。また、FEMモデルに入力する地震荷重を図2-2に示す。

■基礎スラブモデル部分に作用させる付加せん断力 P_B の算出



$$P_B = Q_R - Q_S$$

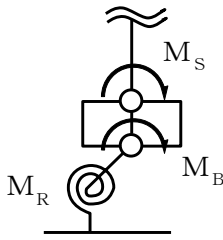
P_B : FEMにする付加せん断力

Q_R : 地震応答解析より設定した地盤ばねに生じる水平力

Q_S : 地震応答解析より設定した上部構造物から基礎スラブに作用するせん断力

(a) 水平地震力

■基礎スラブモデル部分に作用させる付加曲げモーメント M_B の算出



$$M_B = M_R - M_S$$

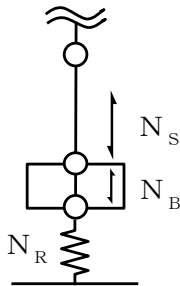
M_B : FEMにする付加曲げモーメント

M_R : 地震応答解析より設定した地盤ばねに生じる曲げモーメント

M_S : 地震応答解析より設定した上部構造物から基礎スラブに作用する曲げモーメント

(b) 曲げモーメント

■基礎スラブモデル部分に作用させる付加軸力 N_B の算出



$$N_B = N_R - N_S$$

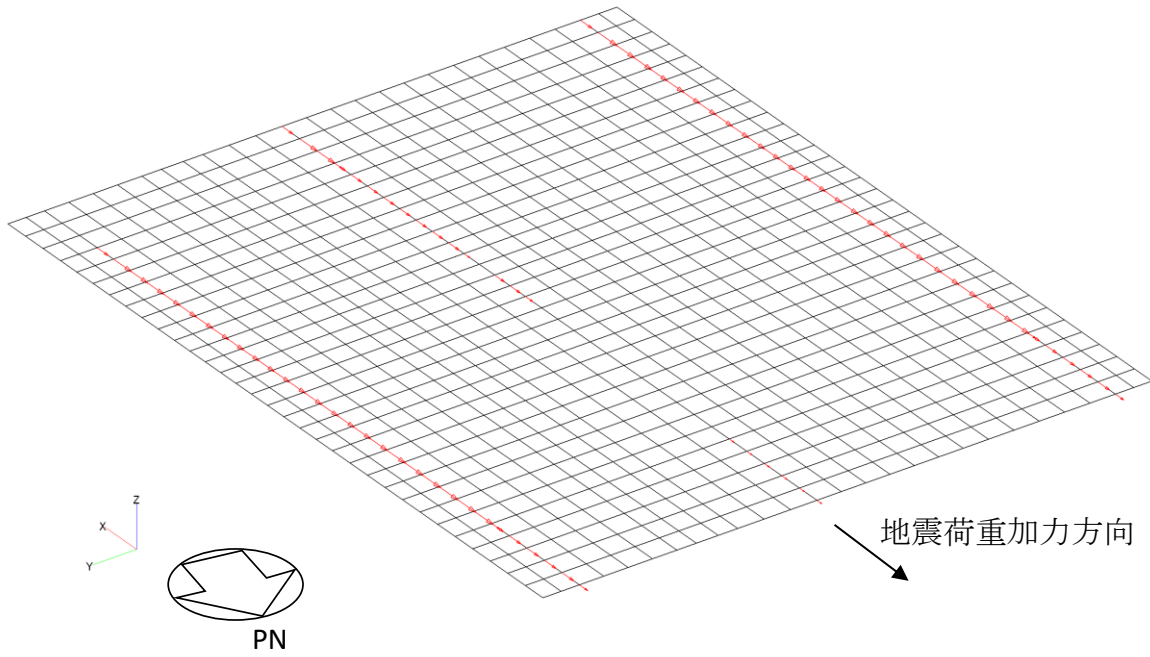
N_B : FEMにする付加軸力

N_R : 地震応答解析より設定した地盤ばねに生じる鉛直力

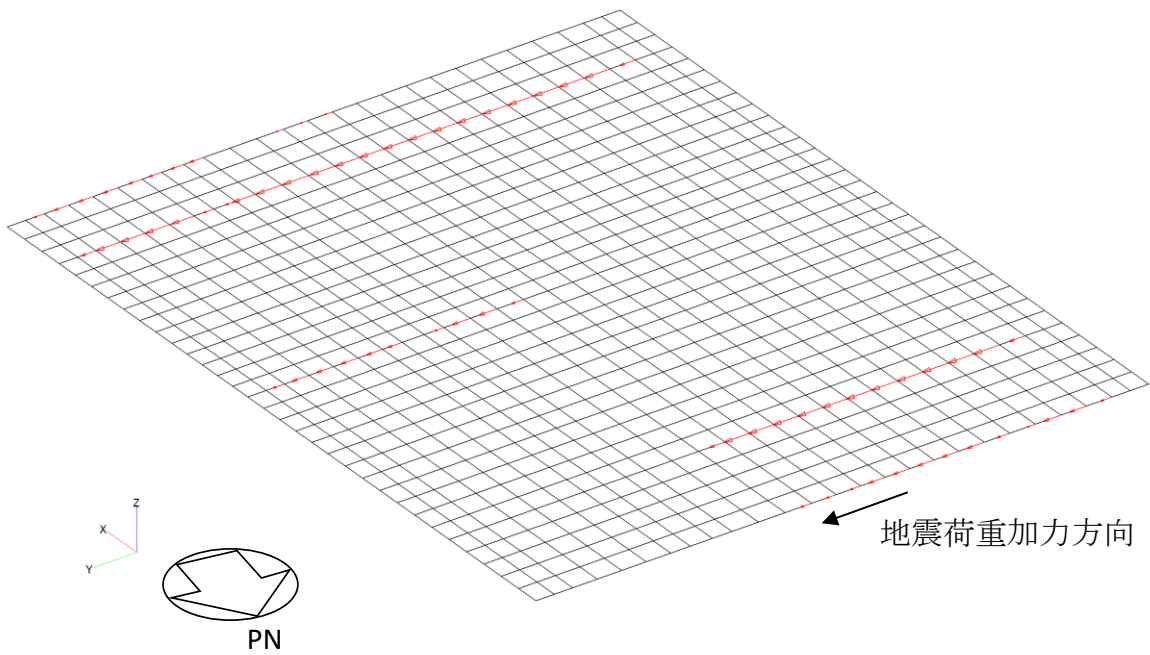
N_S : 地震応答解析より設定した上部構造物から基礎スラブに作用する鉛直力

(c) 鉛直地震力

図 2-1 FEMモデルにする地震荷重の概念図

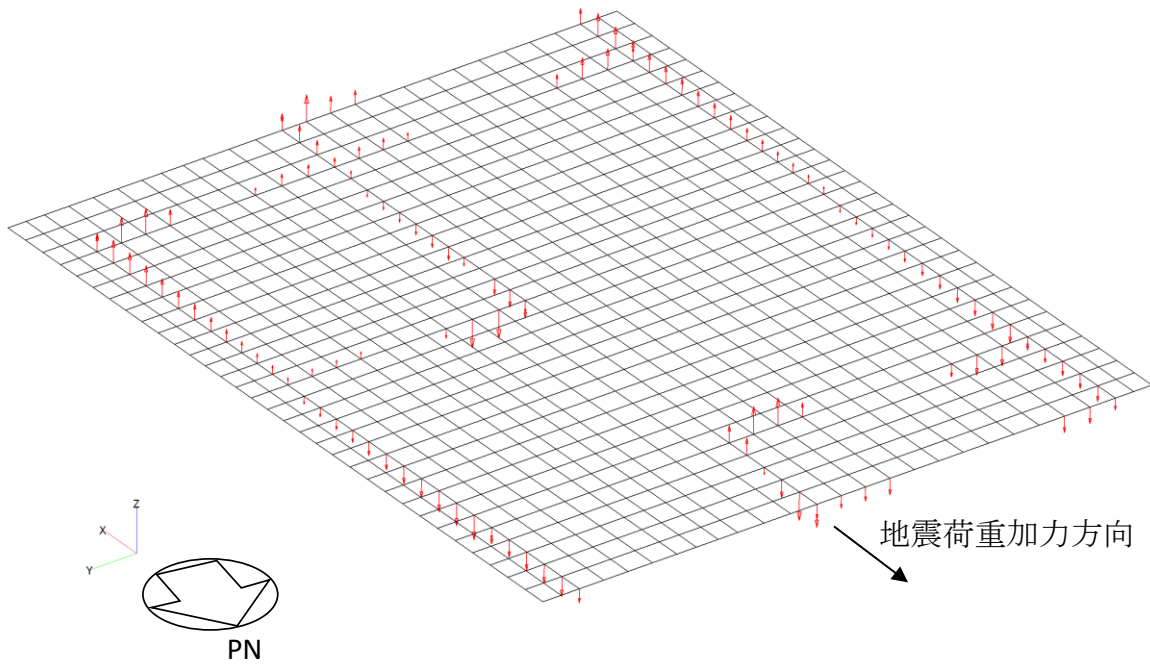


(a) 水平力 (NS方向)

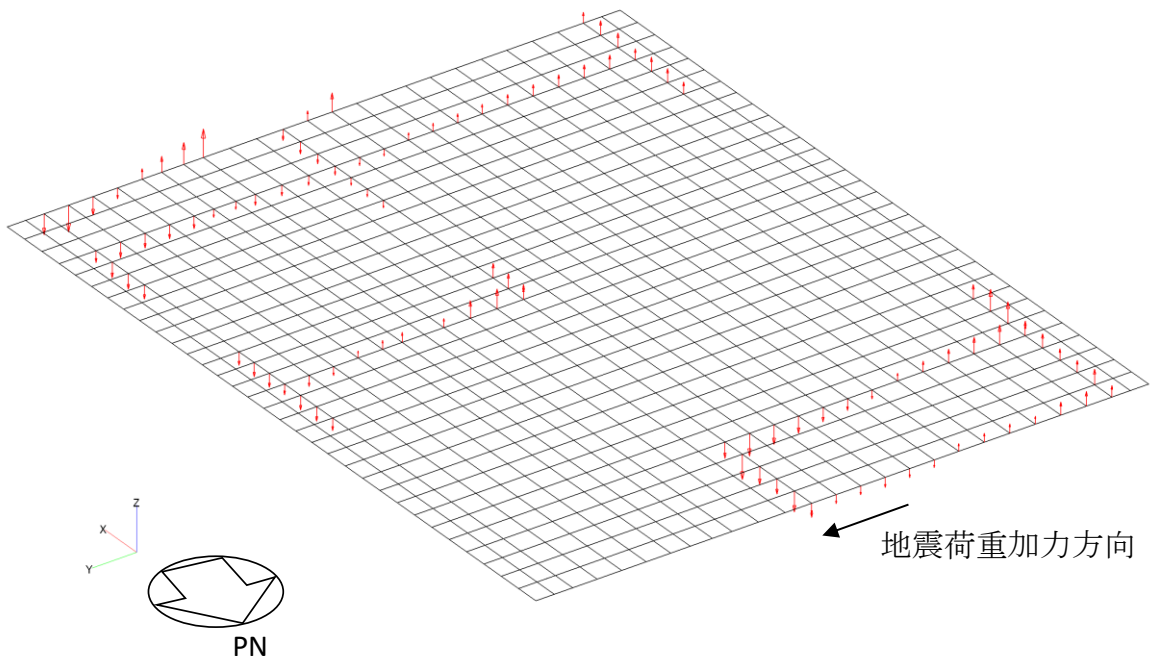


(b) 水平力 (EW方向)

図 2-2(1) FEMモデルに入力する地震荷重

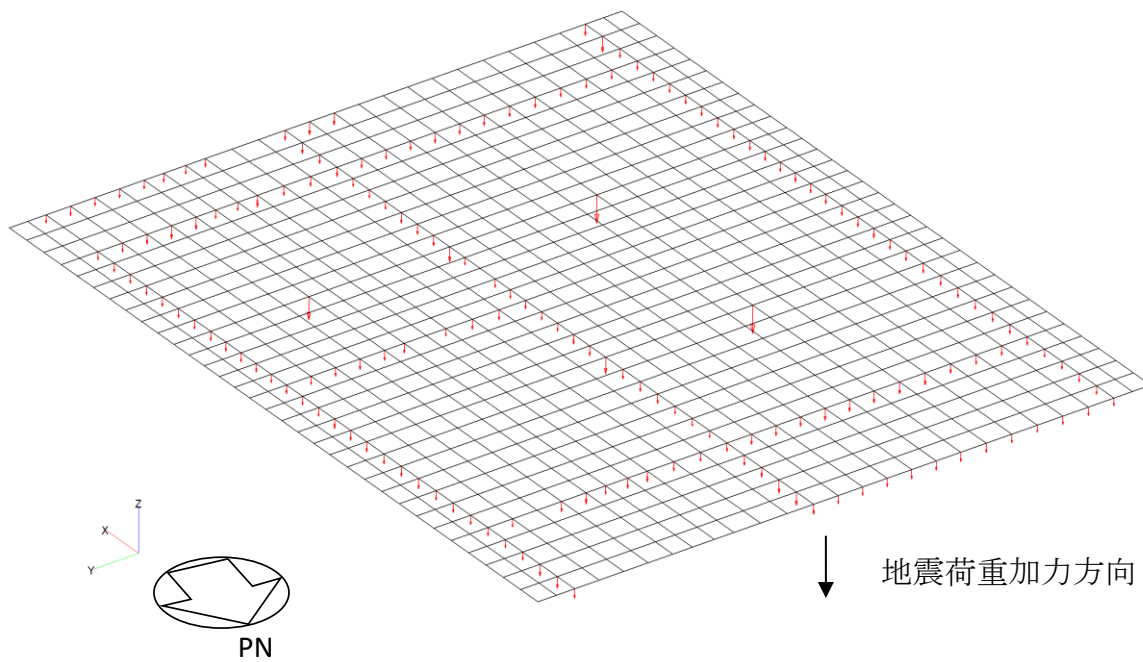


(c) 曲げモーメント (NS方向)



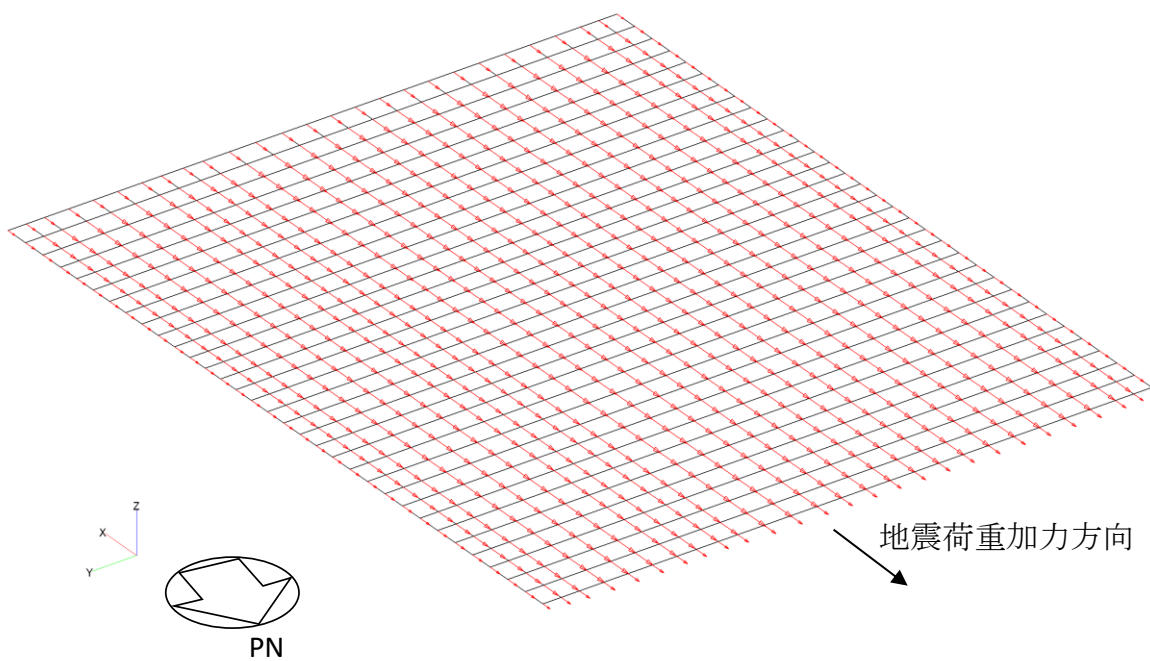
(d) 曲げモーメント (EW方向)

図 2-2(2) FEMモデルに入力する地震荷重

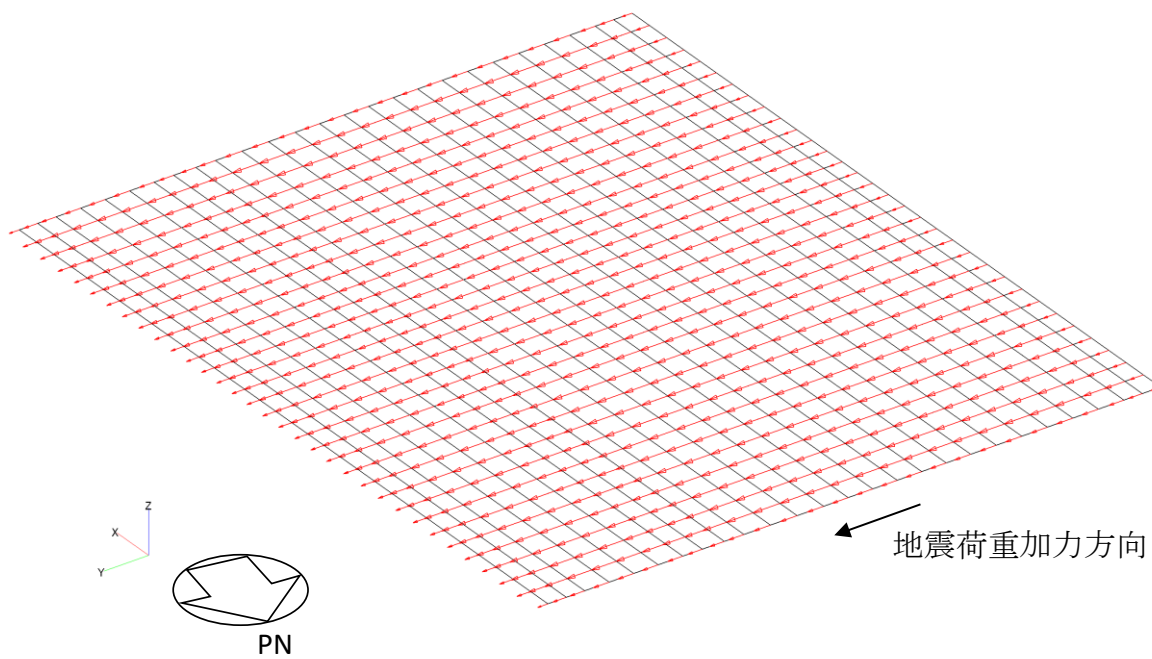


(e) 鉛直力

図 2-2 (3) FEMモデルに入力する地震荷重

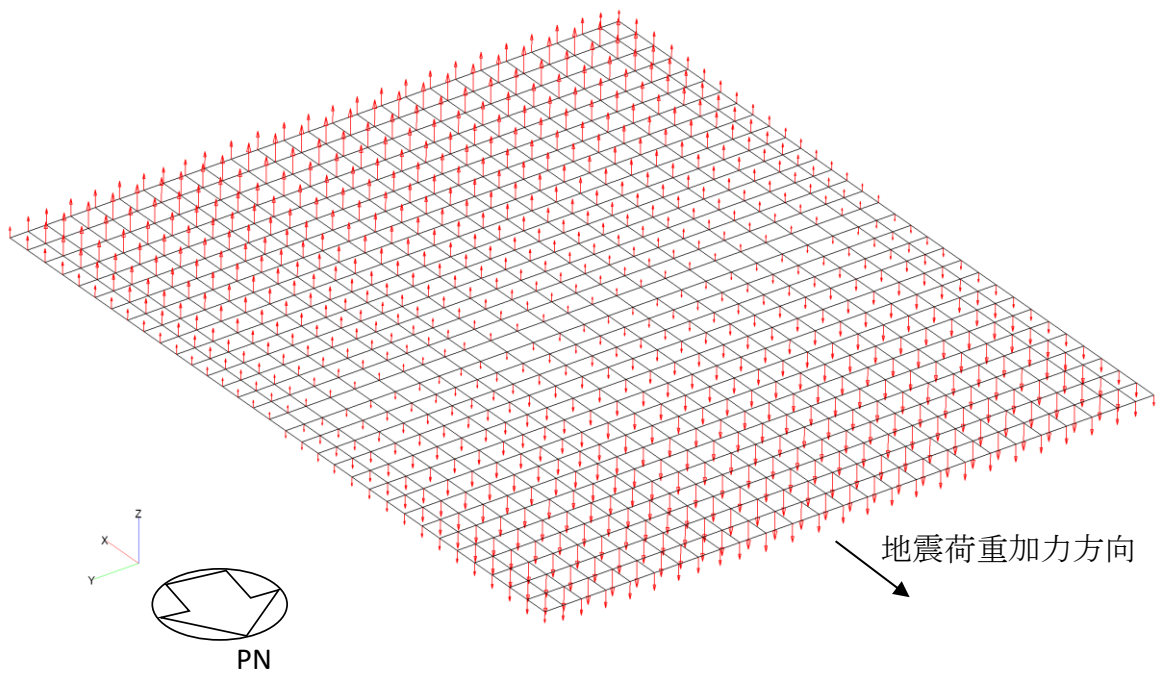


(f) 付加せん断力 (N S 方向)

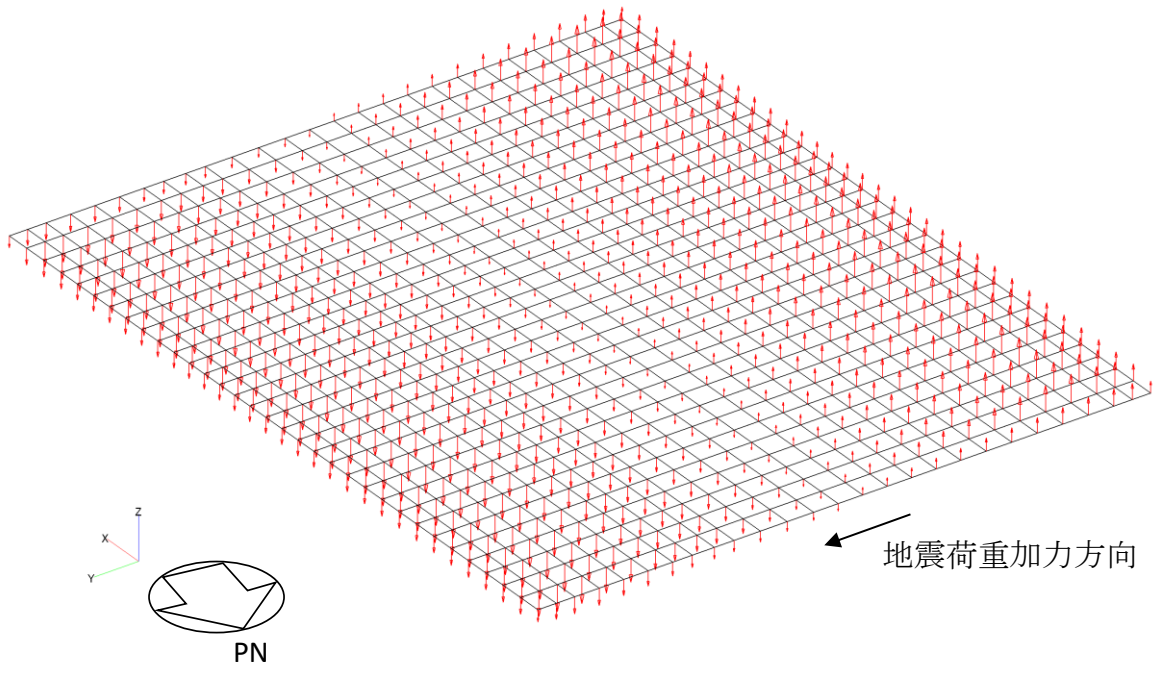


(g) 付加せん断力 (E W 方向)

図 2-2(4) F E Mモデルに入力する地震荷重

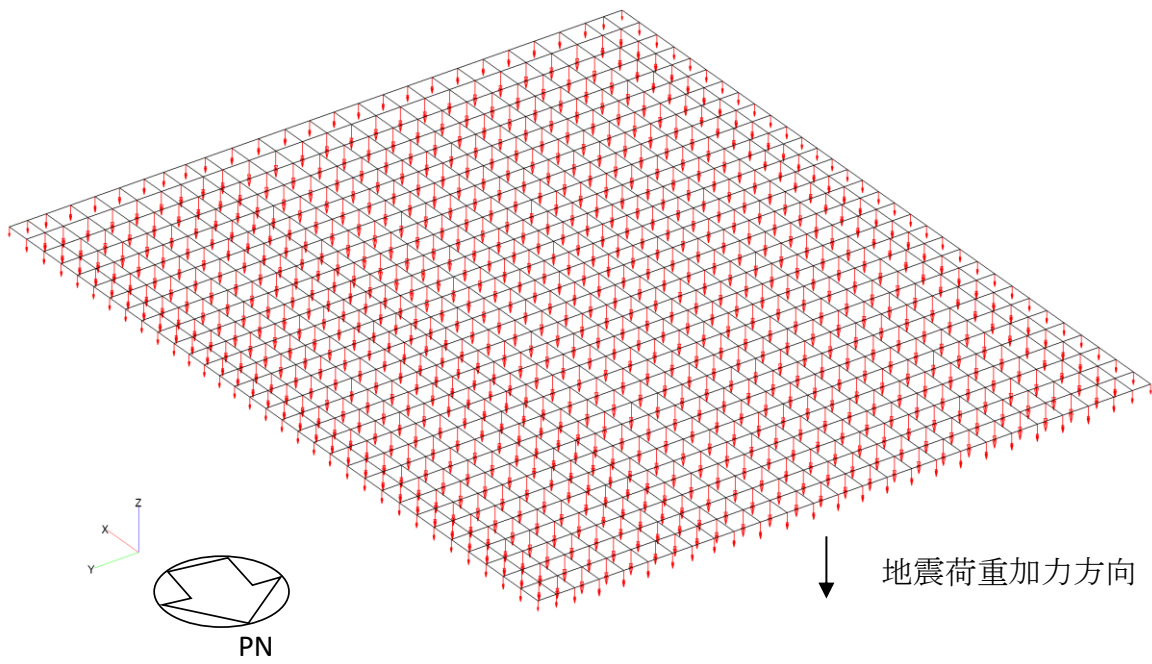


(h) 付加曲げモーメント (N S方向)



(i) 付加曲げモーメント (E W方向)

図 2-2(5) F E Mモデルに入力する地震荷重



(j) 付加軸力

図 2-2(6) FEMモデルに入力する地震荷重

別紙 3 応力解析における断面の評価部位の選定

目 次

1. 概要	別紙 3-1
2. 断面の評価部位の選定	別紙 3-2

1. 概要

本資料は、緊急時対策所の基礎スラブの応力解析における断面の評価部位の選定について示すものである。

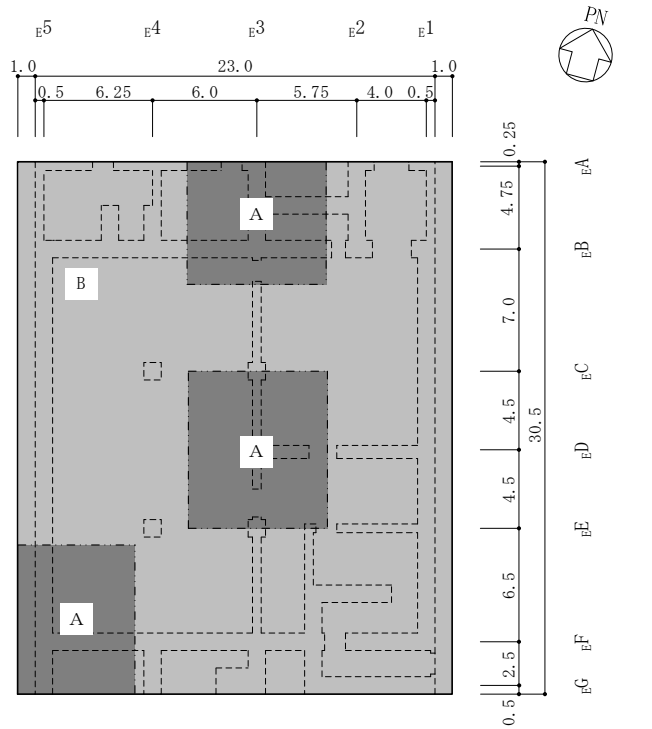
2. 断面の評価部位の選定

緊急時対策所の基礎スラブの荷重の組合せケースを表2-1に、配筋領域図を図2-1に、配筋一覧を表2-2に示す。

各評価項目の検定値一覧を表2-3に、断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果を図2-2に、断面の評価部位の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図を図2-3に示す。

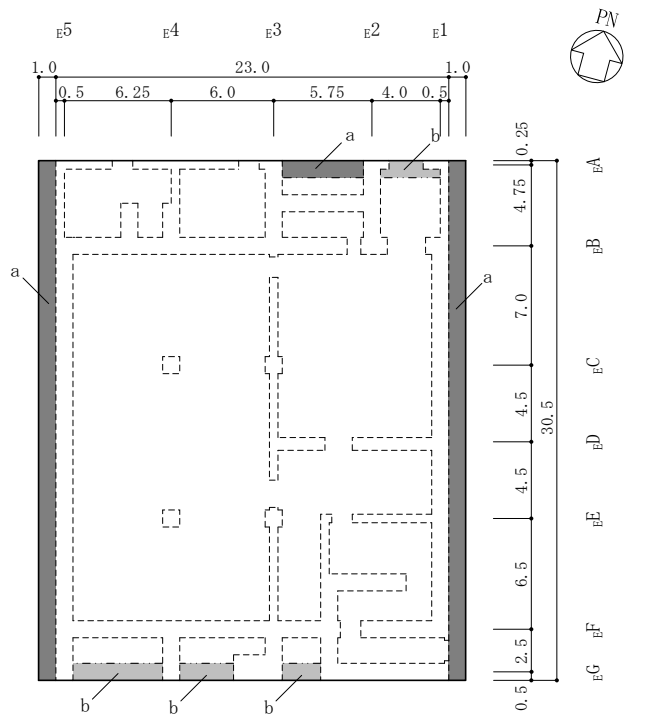
表 2-1 荷重の組合せケース

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S _s 地震時	1	$G + P + 1.0S_{NS} + 0.4S_{UD}$
	2	$G + P + 1.0S_{SN} + 0.4S_{UD}$
	3	$G + P + 1.0S_{NS} + 0.4S_{DU}$
	4	$G + P + 1.0S_{SN} + 0.4S_{DU}$
	5	$G + P + 1.0S_{EW} + 0.4S_{UD}$
	6	$G + P + 1.0S_{WE} + 0.4S_{UD}$
	7	$G + P + 1.0S_{EW} + 0.4S_{DU}$
	8	$G + P + 1.0S_{WE} + 0.4S_{DU}$
	9	$G + P + 0.4S_{NS} + 1.0S_{UD}$
	10	$G + P + 0.4S_{SN} + 1.0S_{UD}$
	11	$G + P + 0.4S_{NS} + 1.0S_{DU}$
	12	$G + P + 0.4S_{SN} + 1.0S_{DU}$
	13	$G + P + 0.4S_{EW} + 1.0S_{UD}$
	14	$G + P + 0.4S_{WE} + 1.0S_{UD}$
	15	$G + P + 0.4S_{EW} + 1.0S_{DU}$
	16	$G + P + 0.4S_{WE} + 1.0S_{DU}$



(単位:m)

(a) 主筋



(単位:m)

(b) せん断補強筋

図 2-1 配筋領域図

表 2-2 配筋一覧

(a) 主筋

領域	方向	上げ筋	下げ筋
A	N S	2-D38@200	2-D38@200
	E W	2-D38@200	2-D38@200
B	N S	D38@200+D38@400	D38@200+D38@400
	E W	D38@200+D38@400	D38@200+D38@400

(b) せん断補強筋

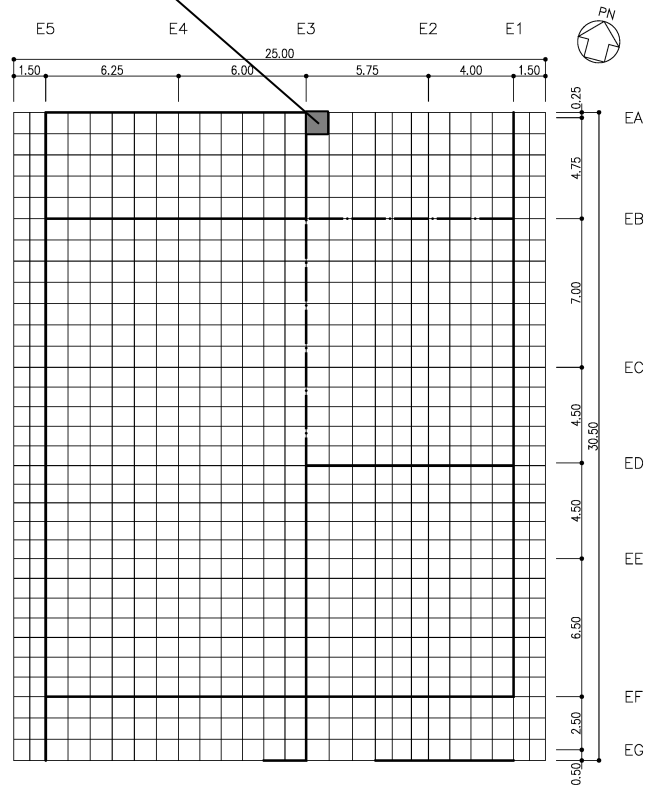
領域	配筋
a	D29@400×200
b	D29@400×400

表 2-3 各評価項目の検定値一覧

評価項目		方向	要素 番号	組合せ ケース	検定値
軸力 + 曲げモーメント	必要鉄筋比	E W	449	8	0.72
面外せん断力	面外せん断力	E W	449	8	0.72

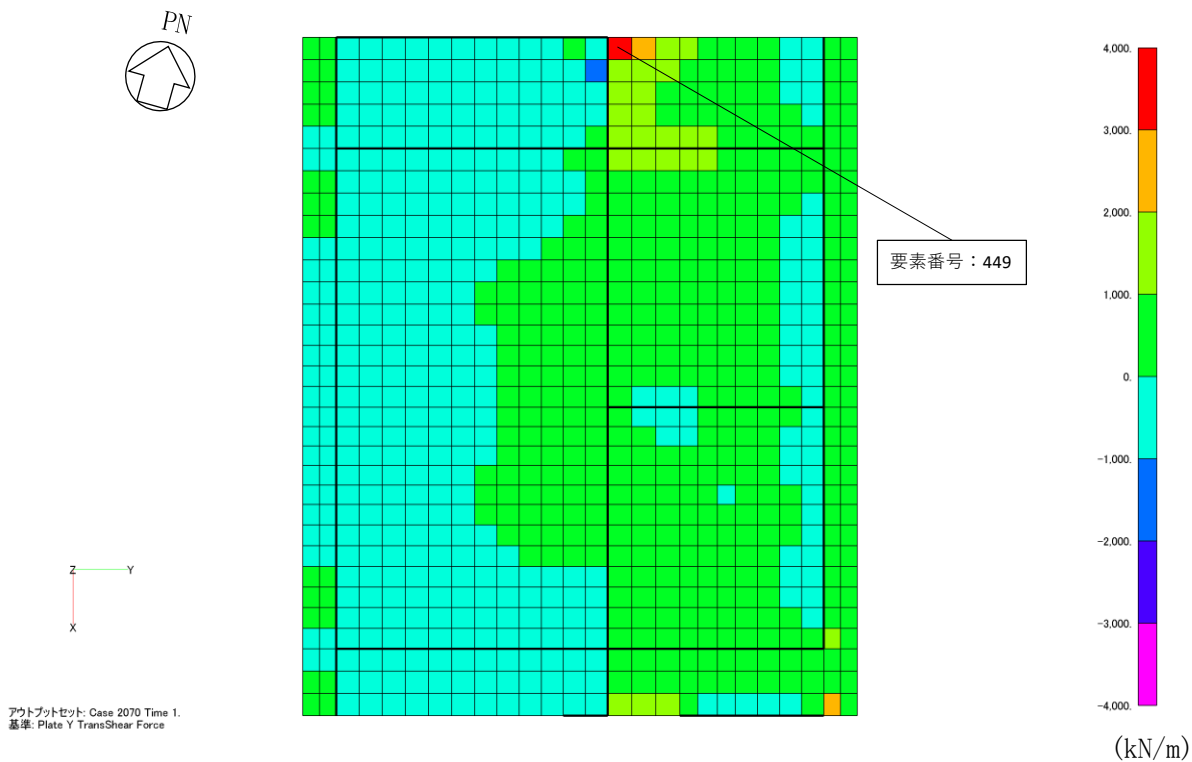
注：□ は、検定値が最大となる要素を示す。

要素番号 : 449 軸力+曲げモーメント ケース : 8 検定値 : 0.72	要素番号 : 449 面外せん断力 ケース : 8 検定値 : 0.72
---	---



注 : は、検定値が最大となる要素を示す。

図 2-2 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果



面外せん断力 (EW方向, ケース 8)

図 2-3 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図

別紙 4 最大接地圧について

目 次

1. 概要	別紙 4-1
2. 接地圧	別紙 4-2

1. 概要

本資料は、緊急時対策所の基礎スラブの基準地震動 S_s による地震力（以下「 S_s 地震時」という。）に対する接地圧を示すものである。

2. 接地圧

S s 地震時の最大接地圧が、岩盤の極限支持力度 ($9.8 \times 10^3 \text{kN/m}^2$) を超えないことを確認する。

S s 地震時の接地圧を表 2-1～表 2-8 に示す。材料物性の不確かさを考慮した S s 地震時の最大接地圧は $0.512 \times 10^3 \text{kN/m}^2$ であることから、岩盤の極限支持力度を超えないことを確認した。なお、鉛直力及び転倒モーメントは減衰力を含んだ反力とする。

表 2-1 S s 地震時の接地圧 (ケース 1, NS 方向)

基準地震動 S s	鉛直力 N ($\times 10^4 \text{kN}$)	転倒モーメント M ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	最大接地圧 ($\times 10^3 \text{kN/m}^2$)
S s - D	7.04	0.620	0.319
S s - F 1	4.32	0.386	0.244
S s - F 2	5.17	0.519	0.283
S s - N 1	4.68	0.373	0.243
S s - N 2 NS	6.53	0.391	0.257
S s - N 2 EW	6.53	0.437	0.269

表 2-2 S s 地震時の接地圧 (ケース 1, EW 方向)

基準地震動 S s	鉛直力 N ($\times 10^4 \text{kN}$)	転倒モーメント M ($\times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}$)	最大接地圧 ($\times 10^3 \text{kN/m}^2$)
S s - D	7.04	0.627	0.502
S s - F 1	4.32	0.478	0.295
S s - F 2	5.17	0.382	0.269
S s - N 1	4.68	0.372	0.264
S s - N 2 NS	6.53	0.452	0.298
S s - N 2 EW	6.53	0.403	0.283

表 2-3 S s 地震時の接地圧 (ケース 2, NS 方向)

基準地震動 S s	鉛直力 N ($\times 10^4$ kN)	転倒モーメント M ($\times 10^6$ kN・m)	最大接地圧 ($\times 10^3$ kN/m ²)
S s - D	6.68	0.549	0.298

表 2-4 S s 地震時の接地圧 (ケース 2, EW 方向)

基準地震動 S s	鉛直力 N ($\times 10^4$ kN)	転倒モーメント M ($\times 10^6$ kN・m)	最大接地圧 ($\times 10^3$ kN/m ²)
S s - D	6.68	0.580	0.388

表 2-5 S s 地震時の接地圧 (ケース 3, NS 方向)

基準地震動 S s	鉛直力 N ($\times 10^4$ kN)	転倒モーメント M ($\times 10^6$ kN・m)	最大接地圧 ($\times 10^3$ kN/m ²)
S s - D	7.47	0.614	0.319

表 2-6 S s 地震時の接地圧 (ケース 3, EW 方向)

基準地震動 S s	鉛直力 N ($\times 10^4$ kN)	転倒モーメント M ($\times 10^6$ kN・m)	最大接地圧 ($\times 10^3$ kN/m ²)
S s - D	7.47	0.610	0.488

表 2-7 S s 地震時の接地圧 (ケース 4, NS 方向)

基準地震動 S s	鉛直力 N ($\times 10^4$ kN)	転倒モーメント M ($\times 10^6$ kN・m)	最大接地圧 ($\times 10^3$ kN/m ²)
S s - D	7.06	0.626	0.321

表 2-8 S s 地震時の接地圧 (ケース 4, EW 方向)

基準地震動 S s	鉛直力 N ($\times 10^4$ kN)	転倒モーメント M ($\times 10^6$ kN・m)	最大接地圧 ($\times 10^3$ kN/m ²)
S s - D	7.06	0.632	0.512