

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0610-9_改0
提出年月日	2021年 5月 17日

補足-610-9 【制御建屋の耐震性についての計算書に関する
補足説明資料】

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

添付書類「VI-2-2-4 制御建屋の耐震性についての計算書」, 「VI-2-8-4-3 中央制御室しゃへい壁の耐震性についての計算書」及び「VI-2-8-4-4 中央制御室待避所遮蔽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 応力解析における既工認と今回工認の解析モデル及び手法の比較

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3 地震荷重の入力方法

別紙4 応力解析における断面の評価部位の選定

別紙5 最大接地圧について

別紙6 応力解析における応力平均化の考え方

別紙7 剛性低下を考慮した影響検討

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

目 次

1. 概要 別紙 1-1
2. 応力解析モデル及び手法の比較 別紙 1-2

1. 概要

本資料は、制御建屋基礎版の既工認時及び今回工認時の応力解析モデル及び手法の比較を示すものである。

2. 応力解析モデル及び手法の比較

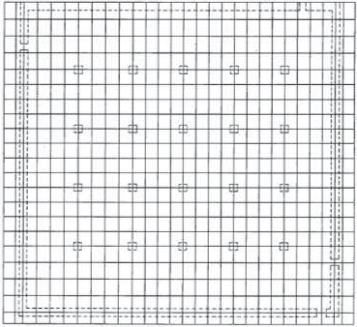
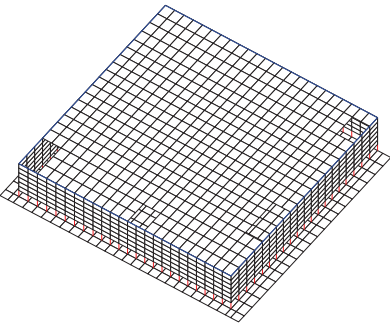
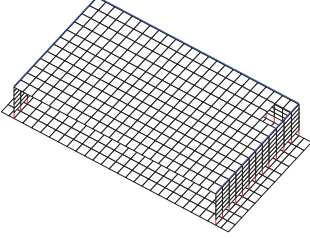
制御建屋基礎版の応力解析モデル及び手法の比較を表2-1に示す。また、今回工認時の応力解析モデルを図2-1に示す。

比較に用いる既工認時の応力解析モデル及び手法は、平成2年5月24日付け元資庁第14466号にて認可された既工事計画認可申請書 第2回申請 添付書類「IV-2-4 制御建屋の耐震性についての計算書」（以下「既工認」という。）のものである。

表 2-1 (1) 応力解析モデル及び手法の比較 (制御建屋基礎版) (1/2)

項目	内容	既工認	今回工認	備考
解析手法		・ 3次元 FEM モデルを用いた応力解析 (弾性解析)	・ 3次元 FEM モデルを用いた応力解析 (弾塑性解析)	(1)
解析コード		・ N A S T R A N	・ A B A Q U S	(1)
モデル	モデル化範囲	(基礎版部分) ・ 基礎版 (上部構造モデル部分) ・ 基礎版より立ち上がる耐震壁	(基礎版部分) ・ 同左 (上部構造モデル部分) ・ 基礎版より立ち上がる耐震壁及び床スラブ	(2)
	材料物性	検討時の各規準, コンクリートの設計基準強度に基づき設定 ・ コンクリートのヤング係数: $E = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (SI 換算) ・ コンクリートのポアソン比: $\nu = 0.167$	適用規準等の見直しによる再設定 耐震壁の剛性は, 制御建屋の地震応答解析モデルに基づき設定 ・ コンクリートのヤング係数 基礎版 : $E = 2.51 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 耐震壁 (NS 方向) : $E = 1.00 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 耐震壁 (EW 方向) : $E = 1.26 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ 床スラブ : $E = 2.51 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ・ コンクリートのポアソン比: $\nu = 0.2$ ・ 鉄筋のヤング係数: $E = 2.05 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$	(3)
	要素種別	・ 基礎版全体をシェル要素でモデル化 ・ 外部、内部ボックス壁の剛性の高い壁は、等価な剛性を考慮したはり要素でモデル化	・ 基礎版全体をシェル要素でモデル化 ・ 地下部分の一部はシェル要素でモデル化し、壁及び床スラブの立体的な形状による剛性への寄与を考慮	(2)
	境界条件	・ 底面を弾性地盤ばねにより支持 ・ 底面の弾性地盤ばねは、浮上りを考慮 ・ B2F~3F の耐震壁の剛性を考慮	・ 底面を弾性地盤ばねにより支持 ・ 底面の弾性地盤ばねは、浮上りを考慮 ・ B2F~3F の耐震壁の剛性を考慮 ・ B1F の床スラブの剛性を考慮	(2)
	非線形特性	・ 考慮しない	コンクリート ・ 圧縮側のコンクリート構成則 : CEB-FIP Model code に基づき設定 ・ ひび割れ発生後の引張軟化曲線 : 出雲ほか (1987) による式 鉄筋 ・ バイリニア型	(1)
地震荷重との組合せ	$G + P + S_1$ $G + P + S_2$ G : 固定荷重 (浮力を含む) P : 積載荷重 S_1 : S_1 地震荷重と $3.0C_i$ 静的地震荷重の包絡荷重 (地震時土圧荷重を含む) S_2 : S_2 地震荷重 (地震時土圧荷重を含む)	$G + P + S_s$ G : 固定荷重 (浮力を含む) P : 積載荷重 S_s : S_s 地震荷重 (地震時土圧荷重を含む)	—	

表 2-1 (2) 応力解析モデル及び手法の比較 (制御建屋基礎版) (2/2)

項目	内容	既工認	今回工認	備考
荷重の設定	固定荷重及び積載荷重	・固定荷重, 配管荷重, 機器荷重, 積載荷重及び浮力	・同左	—
	地震荷重	・上部構造からの地震力 (水平力, 曲げモーメント, 鉛直力) 及び基礎部の付加地震力を入力	・同左	—
	地震時土圧荷重	$P = 10.0 + 0.6 \cdot \gamma \cdot h$ γ : 土の単位体積重量 (t/m ³) h : 地表面からの深さ (m)	$P = 0.5 \cdot \gamma \cdot h + C$ γ : 土の単位体積重量 (kN/m ³) h : 地表面からの深さ (m) C : 地震時増分土圧 (kN/m ²)	・地震時土圧は, 常時土圧に地震時増分土圧を加えて算出 ・地震時増分土圧は「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版 ((社) 日本電気協会)」に基づき有限要素モデルより算出した荷重を包絡したものと評価
評価方法	応力解析	・発生応力が許容応力度を超えないことを確認	・鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断力が評価基準値を超えないことを確認	(4) (5)
解析モデル		 <p>(a) 平面図</p>	 <p>(a) 全体図</p> <p>*青太線は、線材要素を示す。 *赤太線は、剛体を示す。</p>  <p>(b) 西側半分図化</p>	

【主要な差異】（表の備考欄に対応）

- (1) 既工認では弾性解析を採用しているが、今回工認では弾塑性解析を採用する。（詳細は「補足-610-8 原子炉建屋基礎版の耐震性についての計算書に関する補足説明資料」に示す。）
- (2) 今回工認では一部耐震壁及び床スラブをシェル要素でモデル化する。
- (3) コンクリートのヤング係数については、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説―許容応力度設計法―」（社）日本建築学会，1999 改定）に基づき再計算し，地震応答解析モデルと同様に，初期剛性低下については地震観測記録の分析等を踏まえてその影響を考慮する。
- (4) 「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格」（社）日本機械学会，2003），「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）に基づき評価。
- (5) 荷重の種類で区分した解析ステップごとに荷重を入力する一連の解析を実施し，最終的な応力又はひずみにより評価を実施する。なお，解析ステップは地震荷重以外の荷重，地震荷重の順である。

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

目 次

1. 概要 別紙 2-1
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 2-2

1. 概要

本資料は、制御建屋基礎版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

制御建屋基礎版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。

- ・ 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。更に，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部近傍では $2.5\sqrt{R/t}$ 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。

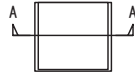
注記*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2008 年）

表 2-1(1) モデル化, 境界条件及び拘束条件 (1/4)

モデル概要

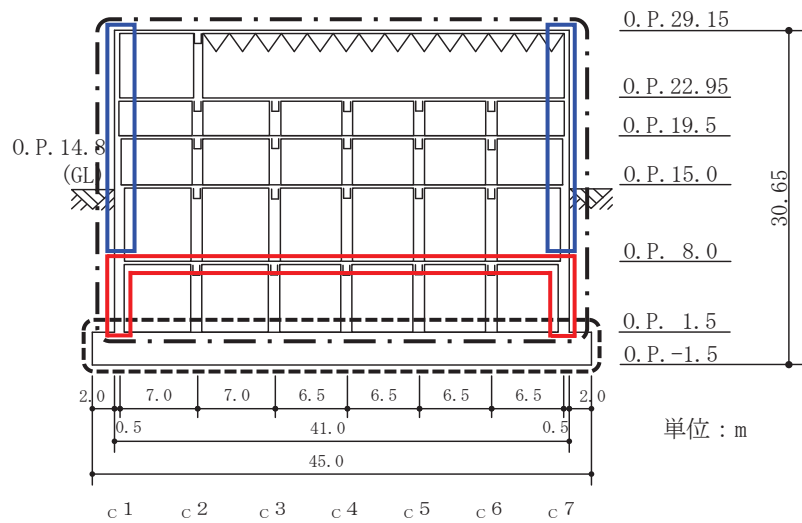
○モデル化範囲

- ・基礎版全体及び上部構造モデル部分については基礎版より立ち上がる耐震壁及び床スラブの剛性を境界条件として考慮する。



□ : はり要素でのモデル化範囲

□ : シェル要素でのモデル化範囲



単位 : m

境界条件として考慮

モデル化範囲

モデル化範囲 (単位 : m)

表 2-1(2) モデル化, 境界条件及び拘束条件 (2/4)

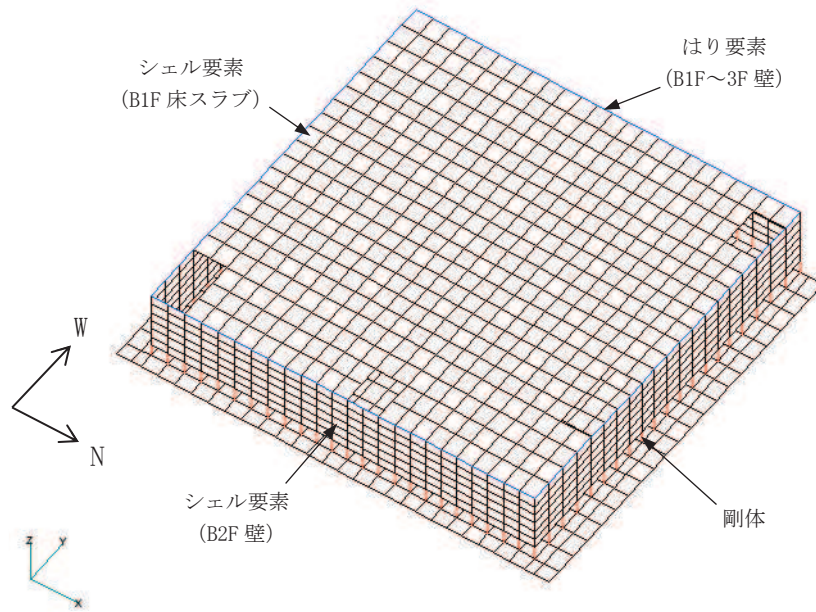
モデル概要

○使用要素

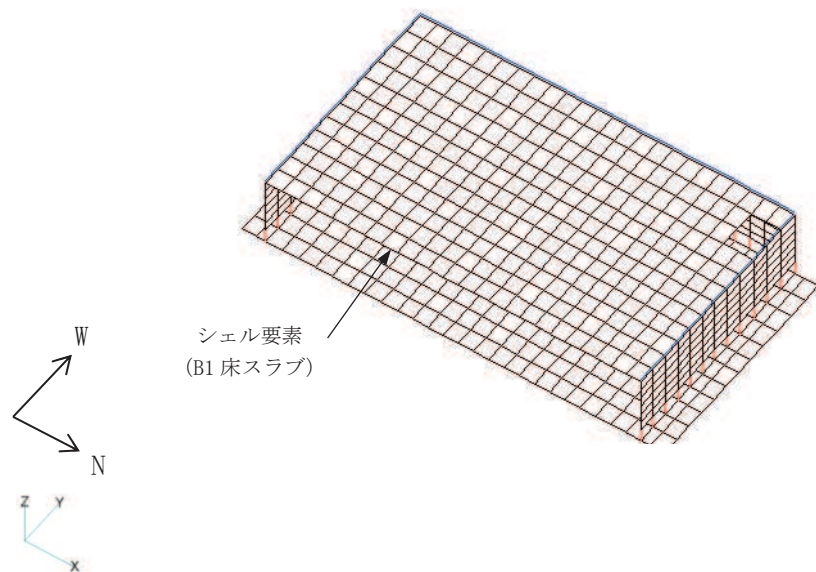
- ・積層シェル要素

○要素分割

- ・要素の一边の長さを 2.0m 程度とし, 壁及びスラブの配置を考慮して分割する。



(a) 全体図



(b) 西側半分図化

節点数 : 1684
要素数 : 1662

モデル概要

表 2-1(3) モデル化, 境界条件及び拘束条件 (3/4)

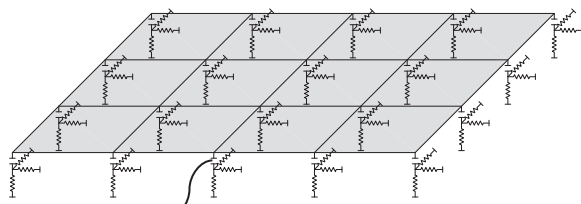
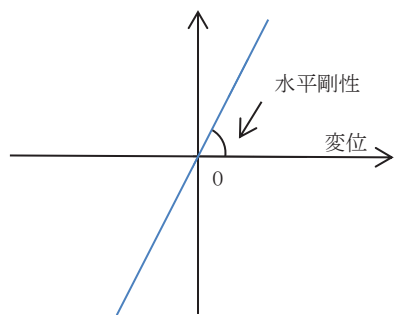
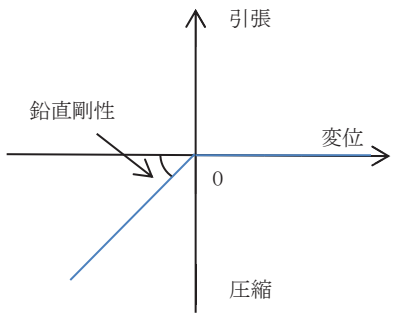
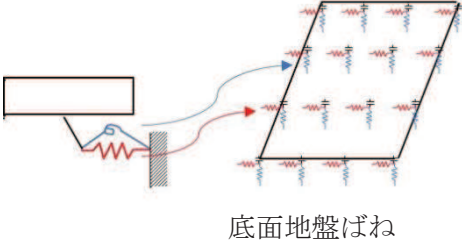
境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎版の境界	
<ul style="list-style-type: none"> 基礎版と上部構造物の境界部においては, 上部構造物の剛性を考慮することで, 基礎版の応力・変形状態を評価する。 B2F の耐震壁をシェル要素でモデル化する。それより上部の B1F, 1F, 2F 及び 3F の耐震壁の剛性は 0. P. 8. 0m 位置にはり要素でモデル化する。 B1F の床スラブをシェル要素でモデル化する。 	
はり要素の剛性 (断面性能)	
<ul style="list-style-type: none"> 曲げ剛性 (断面二次モーメント) : $I = t \times h^3 / 12 + t \times h \times y^2$ せん断剛性 (せん断断面積) : $A_s = t \times h$ 	<ul style="list-style-type: none"> t : 壁の厚さ h : モデル化する壁の高さ y : 基礎版上ばから壁図芯までの距離
基礎版と地盤の境界	
<ul style="list-style-type: none"> 基礎版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, 基礎版と底面地盤との間の剥離 (基礎版の浮上り) を考慮している。 	 <p style="text-align: center;">ギャップ要素</p> <p style="text-align: center;">モデル概要</p>
○ギャップ要素	
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 style="text-align: center;">水平ばね応力</p> 	<p style="text-align: center;">鉛直ばね応力</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。	
(a) 水平剛性	(b) 鉛直剛性
ギャップ要素の概念図	

表 2-1(4) モデル化, 境界条件及び拘束条件 (4/4)

境界条件, 拘束条件
<p>基礎版と地盤の境界</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。 $K_{Hi} = (K_{H\ NS}/A + K_{H\ EW}/A) / 2 \times A_i \quad A: \text{基礎版の底面積}$ ・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。 $: K_{Vi} = (K_{R\ NS}/I_{NS} + K_{R\ EW}/I_{EW}) / 2 \times A_i$ $I: \text{基礎版の断面二次モーメント}$ <div style="text-align: center;">  <p>底面地盤ばね</p> </div> <p style="text-align: right;">基礎版底面全体で 離散化</p>

別紙 3 地震荷重の入力方法

目 次

1. 概要	別紙 3-1
2. 地震荷重の入力方法	別紙 3-2

1. 概要

本資料は、制御建屋基礎版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

制御建屋基礎版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、鉛直地震力及び地震時土圧荷重を考慮する。

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。

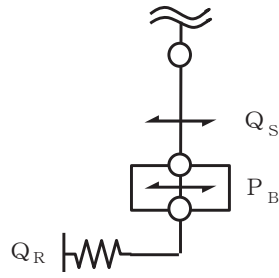
具体的には、水平地震力については、地震応答解析により求まる最大応答せん断力に基づく水平力を FEM モデルに入力する。上部構造物から作用する基礎版への地震時反力については、FEM モデルにおける上部構造物脚部に対応する各節点に、節点の支配面積に応じて分配し、節点荷重として入力する。基礎版モデル部分については、地震応答解析より求まる基礎版底面地盤ばねの最大水平力から、上部構造物から作用する水平力を差し引いた値と等価になる荷重（以下「付加せん断力」という。）を FEM モデルの基礎版の各節点に、節点の支配面積に応じて分配し、節点荷重として入力する。

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版への地震時反力は、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。基礎版モデル部分については、地震応答解析より求まる基礎版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 モデルの基礎版の各節点に、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。

鉛直地震力については、地震応答解析により求まる基礎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版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。基礎版モデル部分については、地震応答解析より求まる基礎版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。）を基礎版の重量で除して付加軸力係数を算定する。そして、FEM モデルの基礎版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。

地下外壁部に作用する地震時土圧荷重により基礎版に作用する荷重は、外壁を各階スラブ位置で支持した連続はりモデルを用いて算定する。算定した外壁脚部に生じる単位長さ当たりの曲げモーメントは、基礎版外周の節点の支配長さに応じて分配し、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。

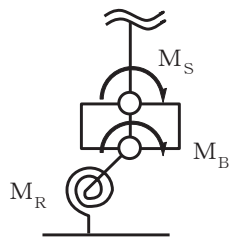


■基礎版モデル部分に作用させる付加せん断力 P_B の算出

$$P_B = Q_R - Q_S$$

- 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版に作用するせん断力

(a) 水平地震力

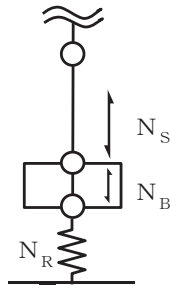


■基礎版モデル部分に作用させる付加曲げモーメント M_B の算出

$$M_B = M_R - M_S$$

- 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版に作用する曲げモーメント

(b) 曲げモーメント



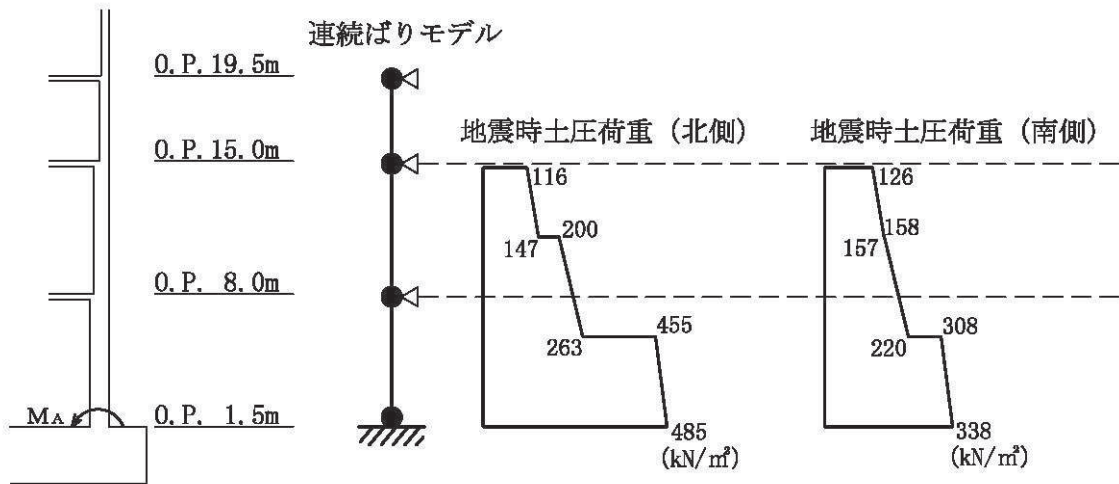
■基礎版モデル部分に作用させる付加軸力 N_B の算出

$$N_B = N_R - N_S$$

- 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版に作用する鉛直力

(c) 鉛直地震力

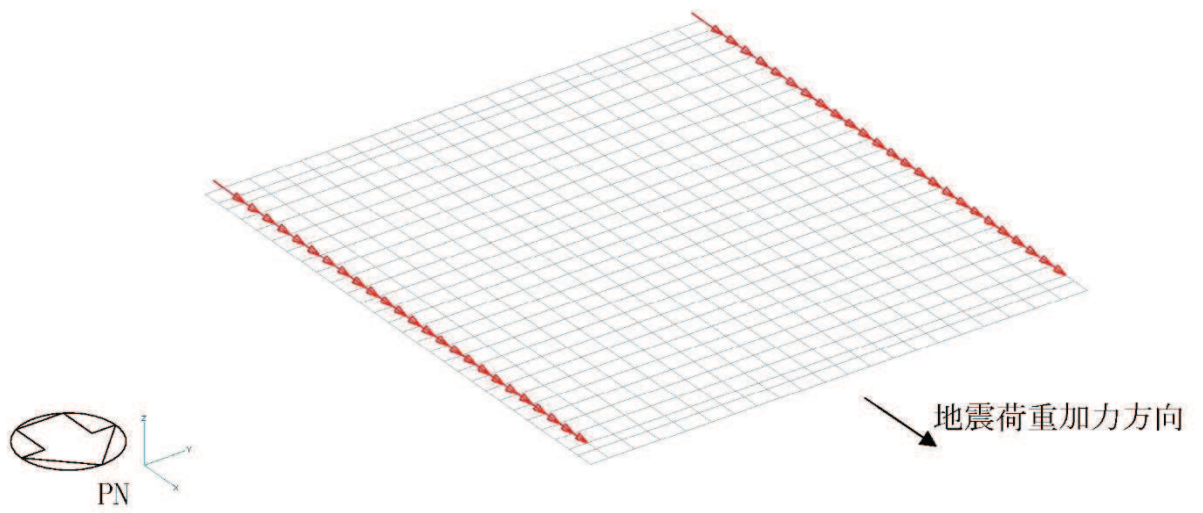
図 2-1(1) FEM モデルにする地震荷重の概念図 (1/2)



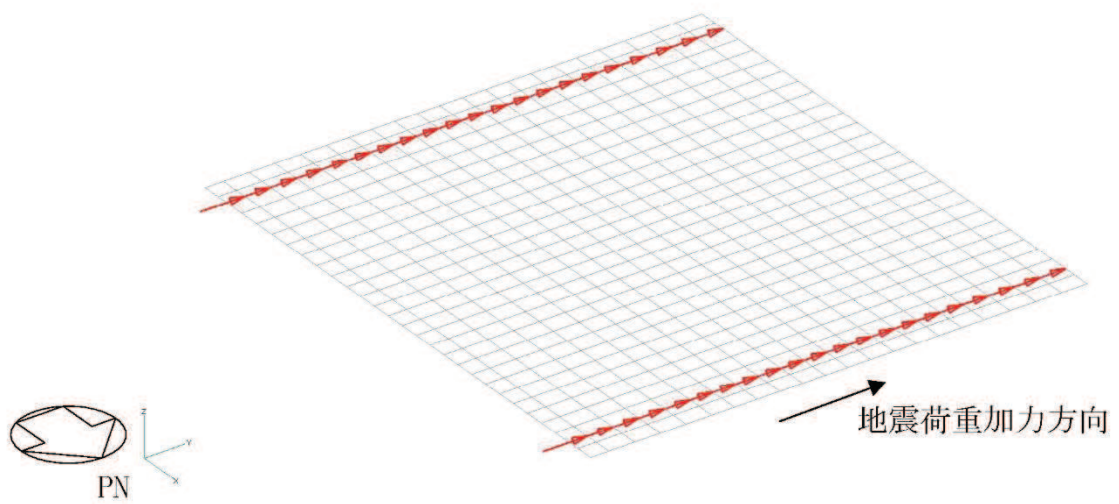
M_A : 基礎版に入力する曲げモーメント

(d) 地震時土圧荷重 (c1 通りの cA~cD 間, c7 通りの cA~cD 間)

図 2-1(2) FEM モデルに入力する地震荷重の概念図 (2/2)

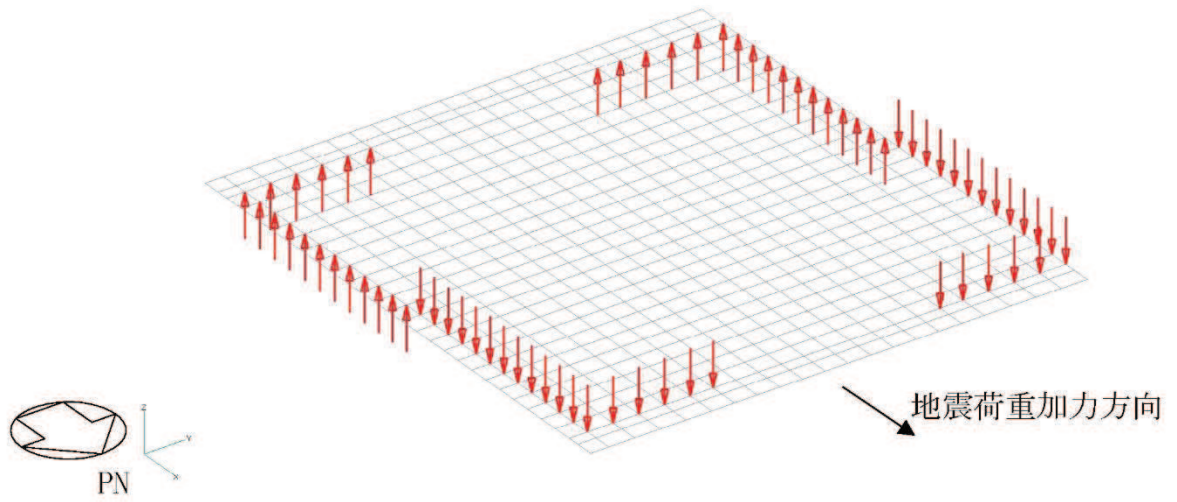


(a) 水平力 (SN 方向) 基礎版モデル部分

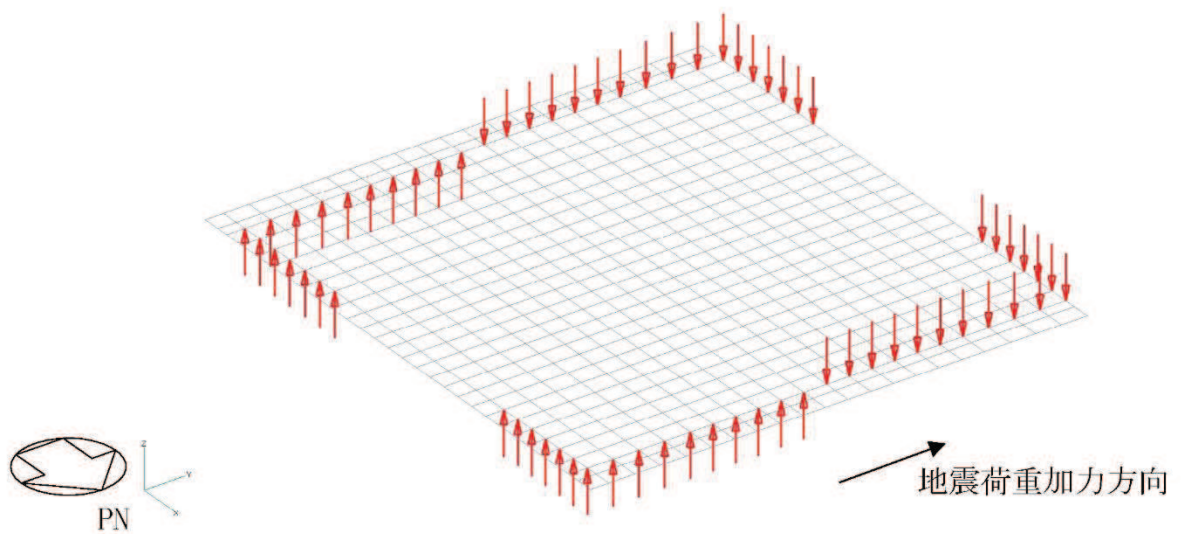


(b) 水平力 (EW 方向) 基礎版モデル部分

図 2-2(1) FEM モデルに入力する地震荷重 (1/6)

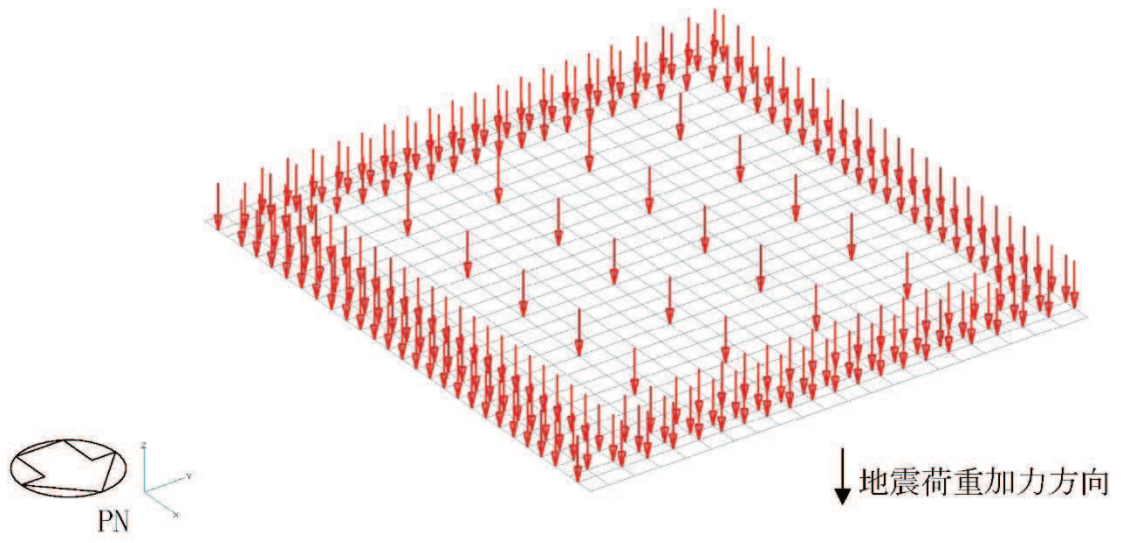


(c) 曲げモーメント (SN 方向) 基礎版モデル部分



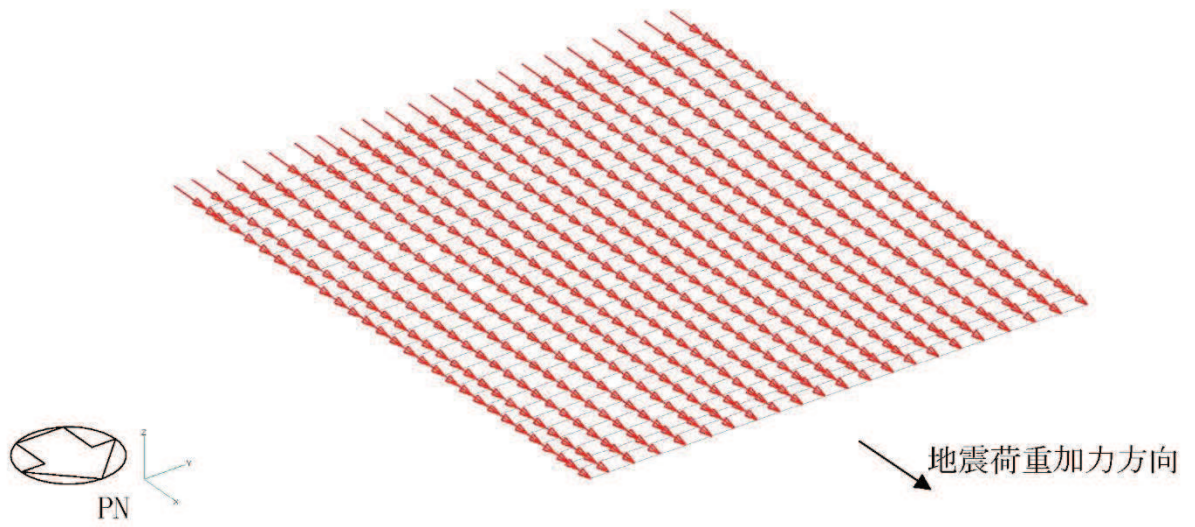
(d) 曲げモーメント (EW 方向) 基礎版モデル部分

図 2-2(2) FEM モデルに入力する地震荷重 (2/6)

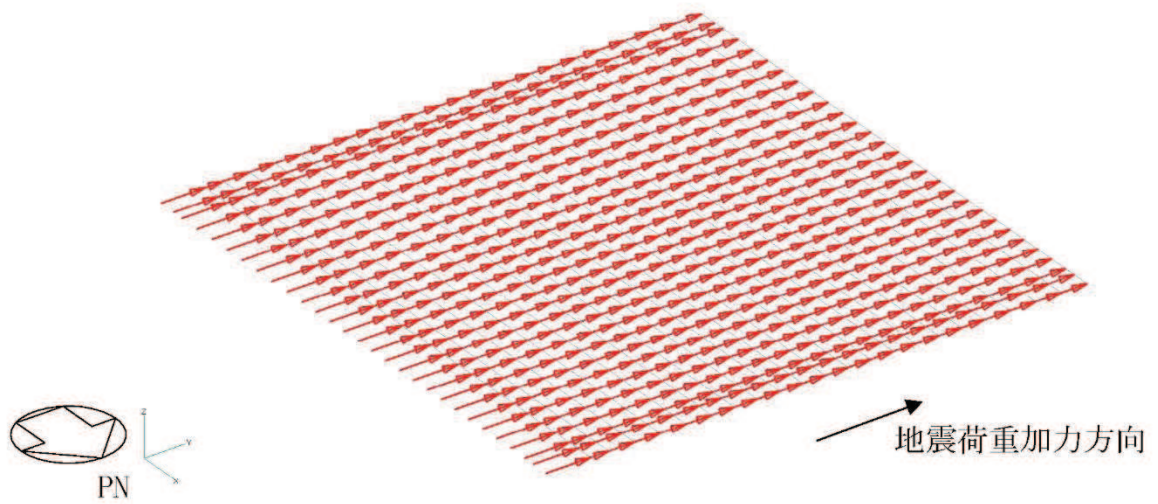


(e) 鉛直力 基礎版モデル部分

図 2-2(3) FEM モデルに入力する地震荷重 (3/6)

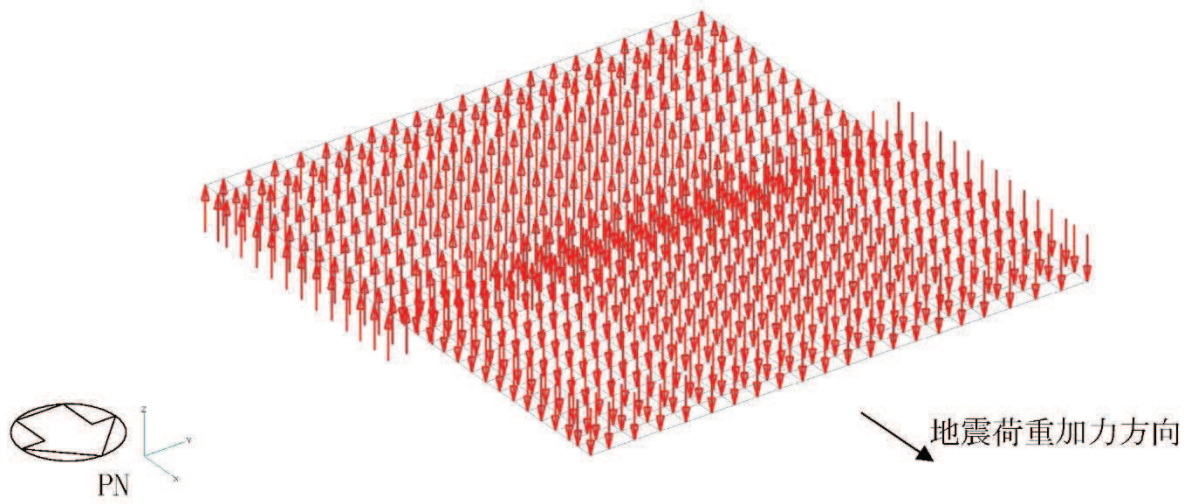


(f) 付加せん断力 (SN 方向)

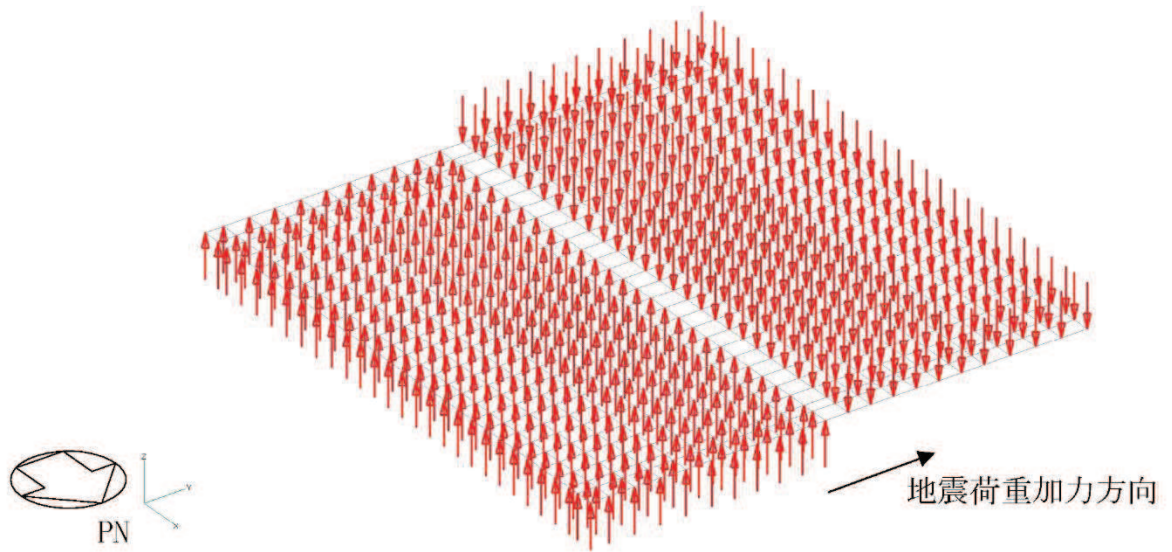


(g) 付加せん断力 (EW 方向)

図 2-2(4) FEM モデルに入力する地震荷重 (4/6)

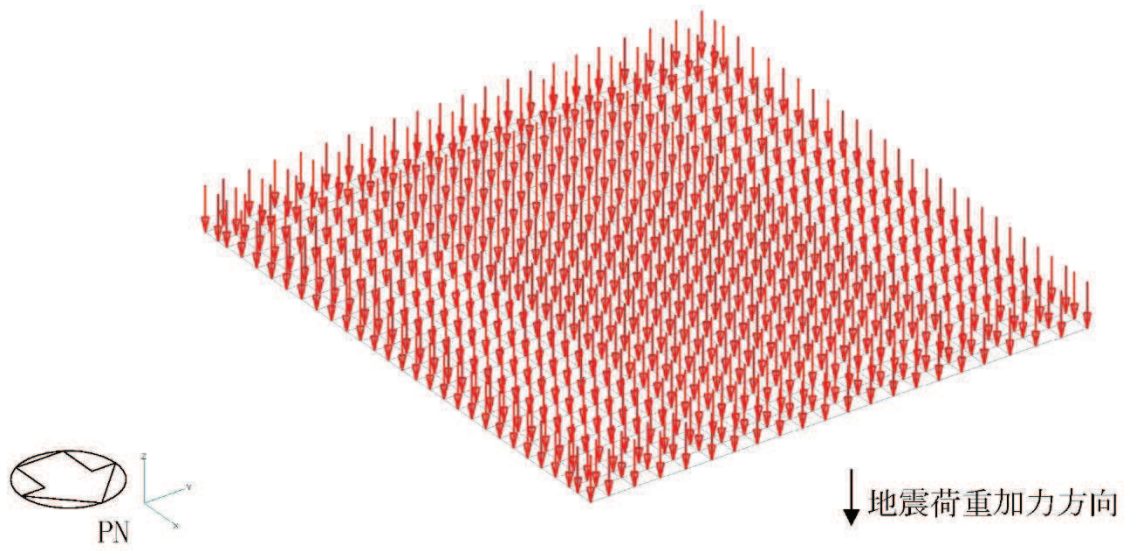


(h) 付加曲げモーメント (SN 方向)



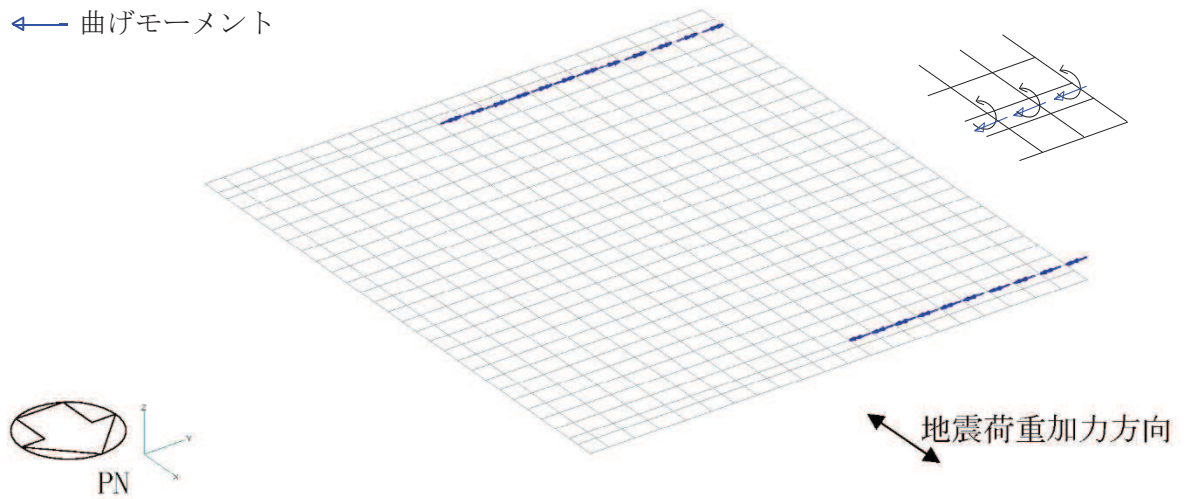
(i) 付加曲げモーメント (EW 方向)

図 2-2(5) FEM モデルに入力する地震荷重 (5/6)



(j) 付加軸力

← 曲げモーメント



(k) 地震時土圧荷重 (SN 方向) 曲げモーメント

図 2-2(6) FEM モデルに入力する地震荷重 (6/6)

別紙 4 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 4-1
2. 断面の評価部位の選定 別紙 4-2

1. 概要

本資料は、制御建屋基礎版の応力解析における断面の評価部位の選定に関し、工認記載の断面の評価要素の選定結果について示すものである。

2. 断面の評価部位の選定

制御建屋基礎版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	$G + P + 1.0 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ UD}$
	2	$G + P + 1.0 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ DU}$
	3	$G + P + 1.0 S_{s\ NS} + 0.4 S_{s\ UD}$
	4	$G + P + 1.0 S_{s\ NS} + 0.4 S_{s\ DU}$
	5	$G + P + 1.0 S_{s\ EW} + 0.4 S_{s\ UD}$
	6	$G + P + 1.0 S_{s\ EW} + 0.4 S_{s\ DU}$
	7	$G + P + 1.0 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$
	8	$G + P + 1.0 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ DU}$
	9	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} + 1.0 S_{s\ UD}$
	10	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} + 1.0 S_{s\ DU}$
	11	$G + P + 0.4 S_{s\ NS} + 1.0 S_{s\ UD}$
	12	$G + P + 0.4 S_{s\ NS} + 1.0 S_{s\ DU}$
	13	$G + P + 0.4 S_{s\ EW} + 1.0 S_{s\ UD}$
	14	$G + P + 0.4 S_{s\ EW} + 1.0 S_{s\ DU}$
	15	$G + P + 0.4 S_{s\ WE} + 1.0 S_{s\ UD}$
	16	$G + P + 0.4 S_{s\ WE} + 1.0 S_{s\ DU}$

G : 固定荷重

P : 積載荷重

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

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

$S_{s\ EW}$: E→W 方向 S s 地震荷重 (地震時土圧を含む)

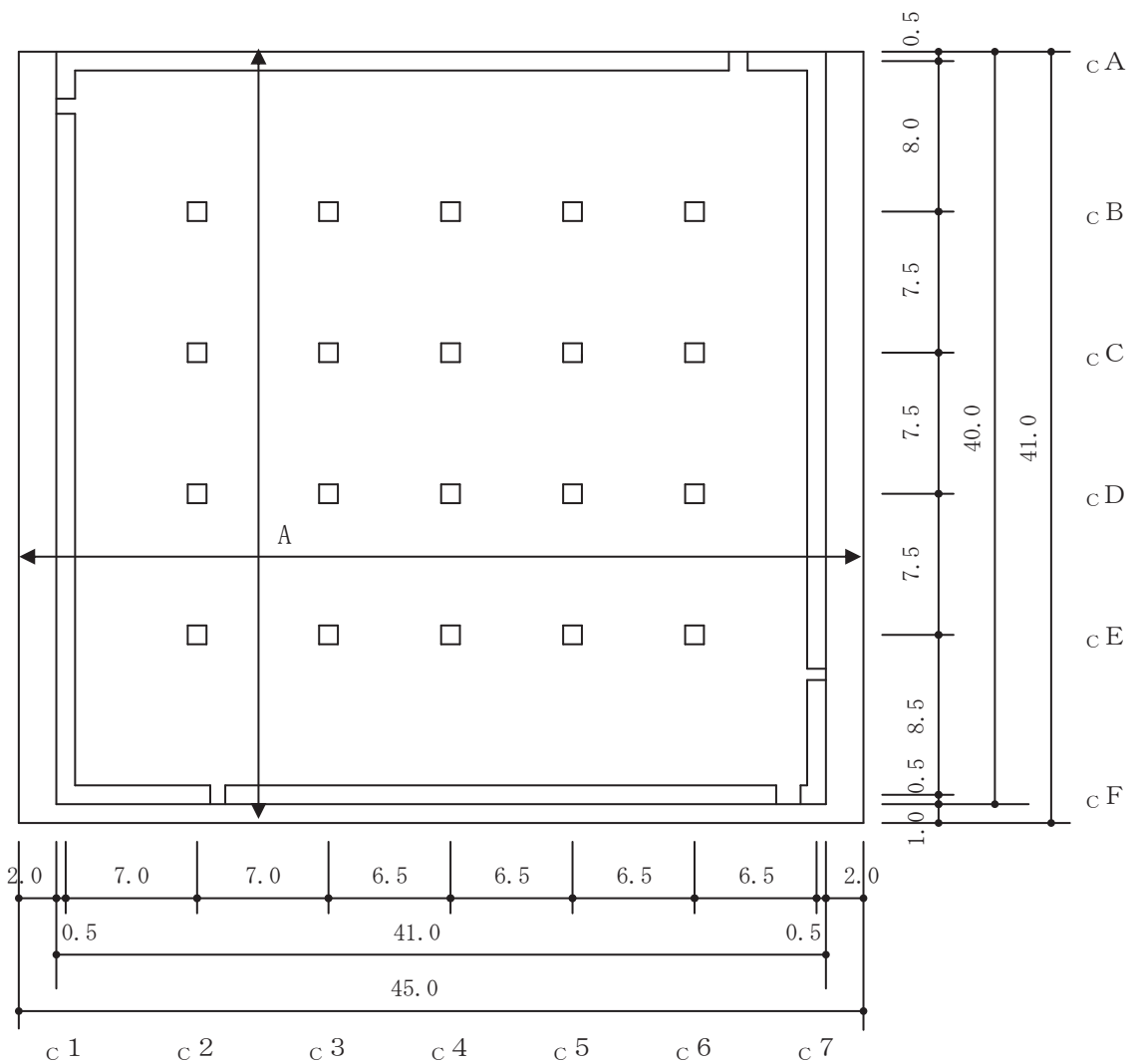
$S_{s\ WE}$: W→E 方向 S s 地震荷重 (地震時土圧を含む)

$S_{s\ UD}$: 鉛直方向 (下向き) S s 地震荷重

$S_{s\ DU}$: 鉛直方向 (上向き) S s 地震荷重

表 2-2 配筋一覧

領域	上ば筋		下ば筋	
	方向	配筋	方向	配筋
A	NS	D38@200	NS	D38@200
	EW	D38@200	EW	D38@200



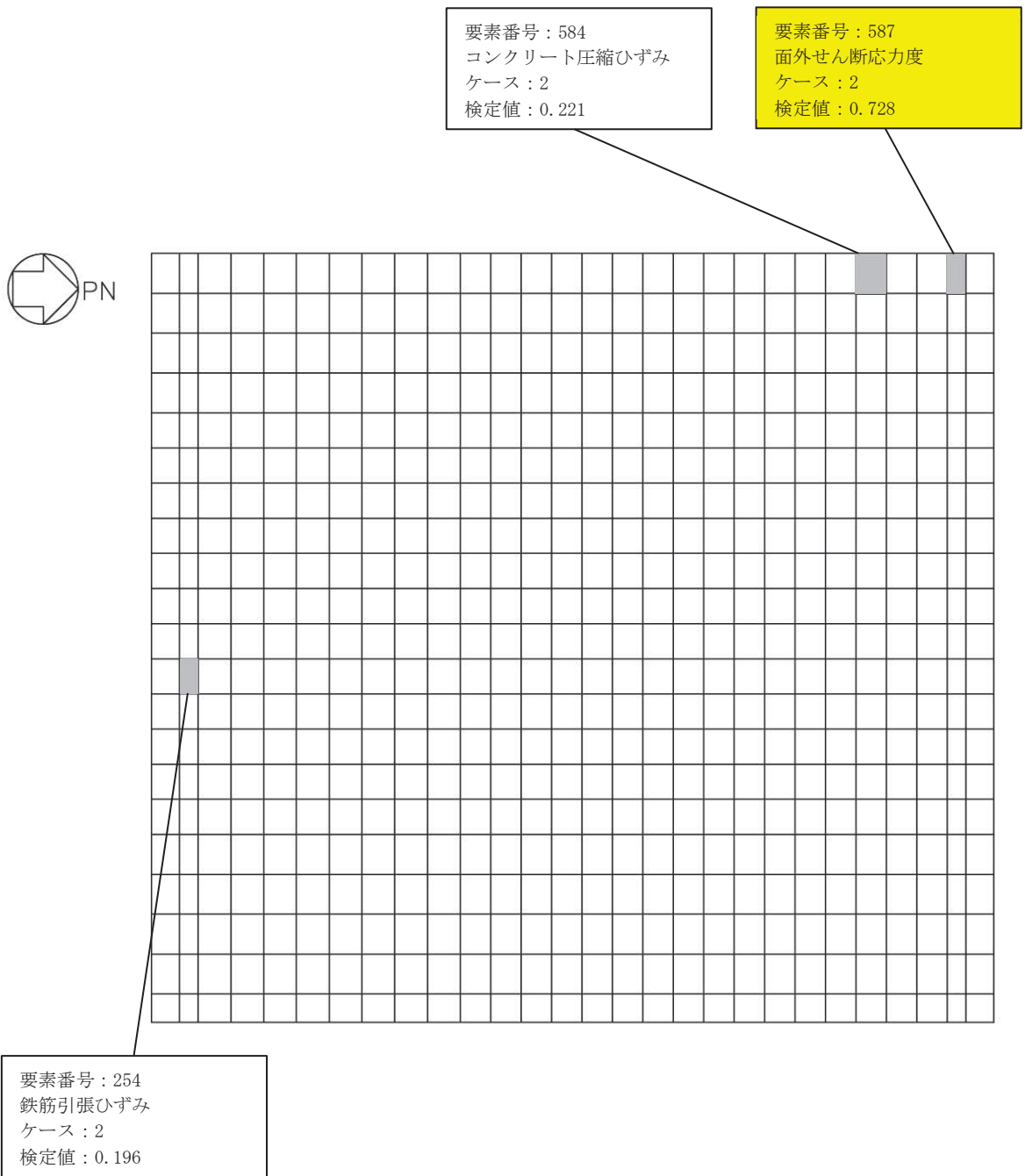
(単位 : m)

図 2-1 配筋領域図

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	コンクリート圧縮ひずみ	NS	584	2	0.221
	鉄筋引張ひずみ	EW	254	2	0.196
面外せん断力	面外せん断応力度	NS	587	2	0.728

注： は、検定値が最大となる要素を示す。

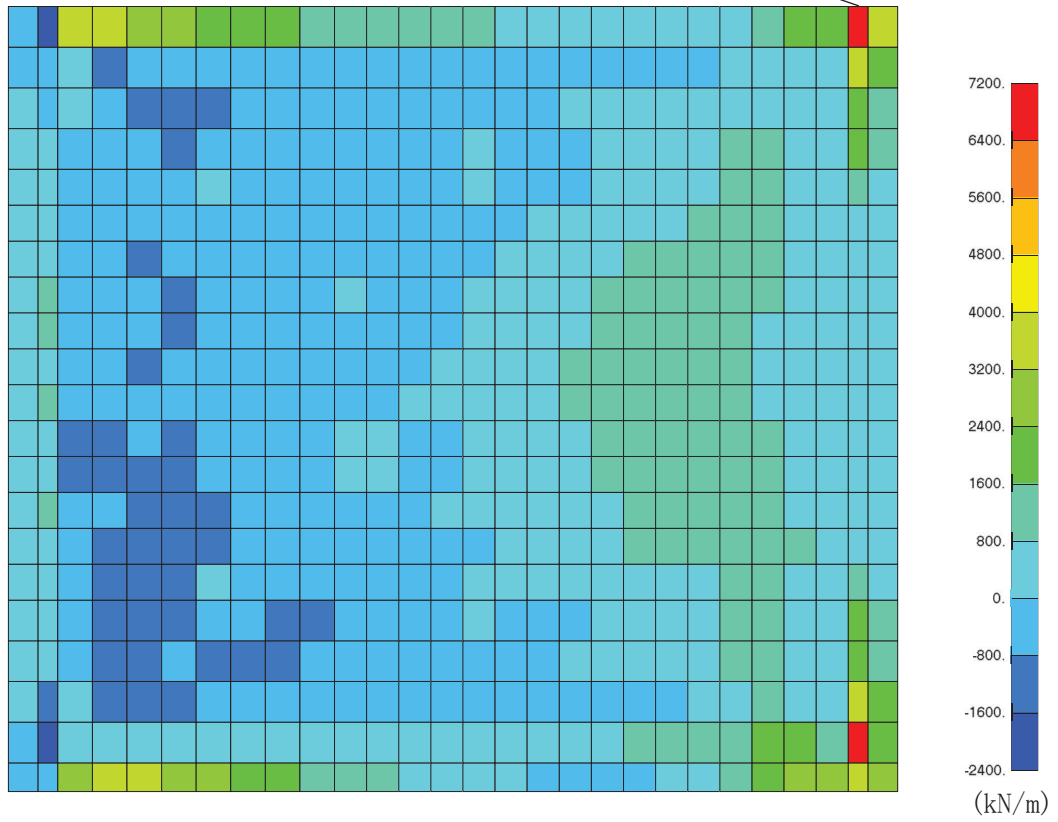


注：黄色は、検定値が最大となる要素を示す。

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



要素番号 : 587



面外せん断力 (NS 方向, ケース 2)

図 2-3 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

別紙 5 最大接地圧について

目 次

1. 概要	別紙 5-1
2. 接地圧	別紙 5-2

1. 概要

本資料は、制御建屋基礎版の基準地震動 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、地盤の極限支持力度（13700 kN/m²）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2-12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3740 kN/m²であることから、地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（基本ケース、NS方向）

基準地震動S _s	鉛直力 N(×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M(×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D1*	2.97	5.62	2070
S _s -D2*	2.77	5.67	1770
S _s -D3	2.56	5.04	890
S _s -F1	1.69	4.25	580
S _s -F2*	1.75	5.30	830
S _s -F3	2.63	5.01	900
S _s -N1*	1.67	5.31	820

注記*：誘発上下動考慮モデル

表2-2 S_s地震時の接地圧（基本ケース、EW方向）

基準地震動S _s	鉛直力 N(×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M(×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D1*	2.97	4.94	1560
S _s -D2*	2.77	4.93	1320
S _s -D3*	2.56	4.99	1230
S _s -F1	1.69	4.20	630
S _s -F2	1.75	3.88	580
S _s -F3*	2.63	5.13	1480
S _s -N1	1.67	4.17	620

注記*：誘発上下動考慮モデル

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 (×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D 1 *	2.98	5.60	2070
S _s -D 2 *	2.82	5.66	1820
S _s -D 3	2.58	5.02	880
S _s -F 3	2.66	5.05	920
S _s -N 1 *	1.67	5.28	810

注記* : 誘発上下動考慮モデル

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 (×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D 1 *	2.98	4.91	1540
S _s -D 2 *	2.82	4.93	1360
S _s -D 3 *	2.58	5.01	1260
S _s -F 3 *	2.66	5.12	1490
S _s -N 1	1.67	4.14	610

注記* : 誘発上下動考慮モデル

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 (×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D 1 *	2.94	5.63	2050
S _s -D 2 *	2.73	5.67	1700
S _s -D 3	2.54	5.08	900
S _s -F 3	2.59	4.96	860
S _s -N 1 *	1.66	5.34	830

注記* : 誘発上下動考慮モデル

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 (×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D 1 *	2.94	4.96	1560
S _s -D 2 *	2.73	4.94	1280
S _s -D 3 *	2.54	4.97	1190
S _s -F 3 *	2.59	5.14	1470
S _s -N 1	1.66	4.22	630

注記* : 誘発上下動考慮モデル

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 (×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D 1 *	2.97	5.59	1990
S _s -D 2 *	2.77	5.60	1610
S _s -D 3	2.56	4.52	670
S _s -F 3	2.63	4.59	710
S _s -N 1 *	1.67	5.92	1130

注記* : 誘発上下動考慮モデル

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 (×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D 1 *	2.97	5.34	3490
S _s -D 2 *	2.77	5.28	2120
S _s -D 3 *	2.56	4.94	1170
S _s -F 3 *	2.63	5.11	1460
S _s -N 1 *	1.67	5.53	1240

注記* : 誘発上下動考慮モデル

表 2-9 S_s 地震時の接地圧 (ケース 5, NS 方向)

基準地震動 S _s	鉛直力 N (×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D1*	2.98	5.57	1970
S _s -D2*	2.82	5.61	1700
S _s -D3	2.58	4.52	680
S _s -F3	2.66	4.61	720
S _s -N1*	1.67	5.93	1140

注記* : 誘発上下動考慮モデル

表 2-10 S_s 地震時の接地圧 (ケース 5, EW 方向)

基準地震動 S _s	鉛直力 N (×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D1*	2.98	5.35	3740
S _s -D2*	2.82	5.28	2260
S _s -D3*	2.58	4.96	1200
S _s -F3*	2.66	5.12	1490
S _s -N1*	1.67	5.53	1240

注記* : 誘発上下動考慮モデル

表 2-11 S_s地震時の接地圧 (ケース 6, NS 方向)

基準地震動 S _s	鉛直力 N (×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D1*	2.94	5.62	2000
S _s -D2*	2.73	5.58	1520
S _s -D3	2.54	4.50	670
S _s -F3	2.59	4.57	690
S _s -N1*	1.66	5.92	1120

注記* : 誘発上下動考慮モデル

表 2-12 S_s地震時の接地圧 (ケース 6, EW 方向)

基準地震動 S _s	鉛直力 N (×10 ⁵ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (kN/m ²)
S _s -D1*	2.94	5.36	3430
S _s -D2*	2.73	5.32	2150
S _s -D3*	2.54	4.93	1150
S _s -F3*	2.59	5.11	1410
S _s -N1*	1.66	5.55	1250

注記* : 誘発上下動考慮モデル

別紙 6 応力解析における応力平均化の考え方

目 次

1. 概要	別紙 6- 1
2. 応力平均化の考え方	別紙 6- 2
2.1 応力平均化を実施した領域における断面の評価要素	別紙 6- 2
2.2 応力平均化の方法	別紙 6- 4
2.3 応力平均化の結果	別紙 6- 9
2.4 断面の評価結果	別紙 6-10

1. 概要

3次元 FEM モデルを用いた応力の算定において、FEM 要素に応力集中等が見られる場合については、「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）」（以下「RC-N 規準」という。）に基づき、応力の再配分等を考慮してある一定の領域の応力を平均化したうえで断面の評価を行っている。この場合、当該要素における応力度ではなく、周囲の複数の要素で平均化した応力度に対して断面の評価を実施していることから、本資料では、制御建屋基礎版における複数の要素での応力平均化の考え方及びその結果を示す。

2. 応力平均化の考え方

2.1 応力平均化を実施した領域における断面の評価要素

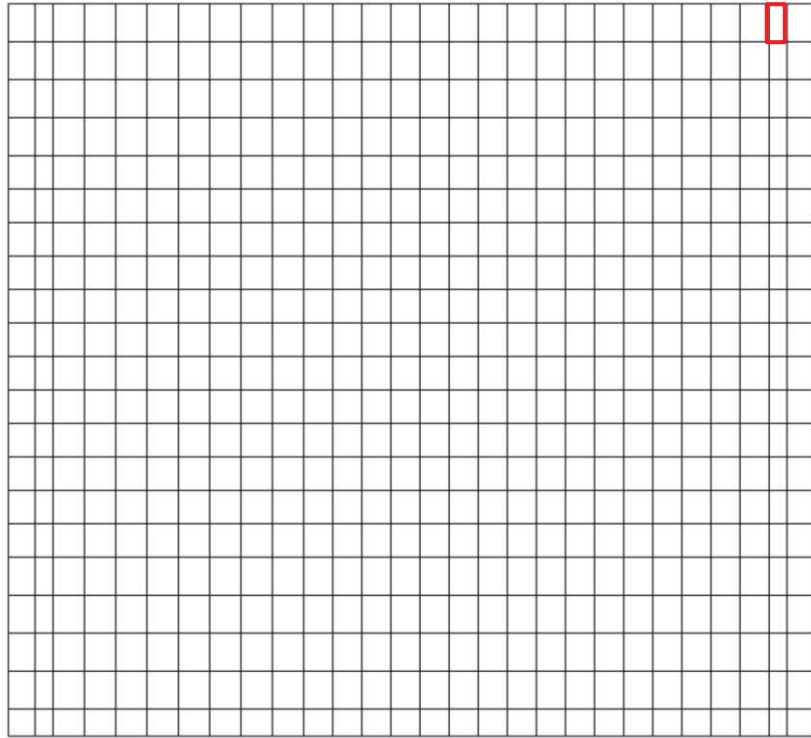
断面の評価要素は、応力平均化を行うことによって応力が変わることから、応力平均化前の断面力に対する検定値を元に選定している。

制御建屋基礎版では、応力平均化前の応力分布において、局所的に大きな面外せん断力が発生している要素を断面の評価要素とし、応力平均化を行い、応力平均化後の値に対する断面の評価を実施した。

応力平均化を実施した要素を表 2-1、要素位置図を図 2-1 に示す。

表 2-1 応力平均化要素

部位	評価項目		方向	要素番号	組合せケース	平均化前の検定値 (発生値/許容値)
基礎版	面外せん断力	面外せん断応力度	NS	587	2	1.24



583	584	585	586	587	588
555	556	557	558	559	560
527	528	529	530	531	532

図 2-1 要素位置図

2.2 応力平均化の方法

3次元 FEM モデルを用いた応力解析においては、部材断面やモデル形状が大きく変化して不連続になっている箇所は、局所的な応力集中が発生しやすい。

図 2-2 に制御建屋基礎版の 3次元 FEM モデルを示す。図 2-2 に示すように、当該部は剛体との接続部分であり、応力が集中しやすい。図 2-3 に示す面外せん断力のコンター図を見ると、当該要素周辺では大きな面外せん断力が発生していることが分かる。

そこで、今回の制御建屋基礎版の応力解析においては、RC-N 規準を参考に、コンクリートのひび割れによる応力の再配分を考慮し、応力の平均化を行った。なお、今回の制御建屋基礎版の応力解析には弾塑性解析を採用し、材料の非線形特性を設定しているが、面外せん断力に対しては非線形特性を考慮できないことから、算出された応力に対して平均化を行った。

RC-N 規準においては、「線材では、部材端に生じる斜めせん断ひび割れによって部材有効せい程度離れた断面の引張鉄筋の応力度が部材端と同じ大きさまで増大する現象（テンションシフト）が生じるが、面材では、斜めひび割れが発生した場合においても、材軸直交方向への応力再配分によって、線材におけるテンションシフトのような現象は生じにくいと考えられる。」とされており、耐震壁の面外せん断力について、「面材であるため、局所的に応力の集中があったとしても、応力の再配分を生じ、破壊に至ることはない。」とされている。また、基礎版のような大断面を有する面材の面外せん断力について、「通常の場合、FEM 解析の要素サイズは、基礎版厚より小さいため、付図 2.2 に模式的に示されるように設計用面外せん断力は想定されるひび割れ領域での平均面外せん断力に対して大きめの評価となっているといえる。また、基礎版においても、耐震壁と同様、面材における面外せん断力の再配分も期待できる。」とされている。RC-N 規準の付図 2.2 を図 2-4 に示す。

壁、床スラブ、基礎版のような面材については、RC-N 規準に示されるように、面材に荷重を作用させる直交部材からせん断破壊面が 45 度の角度で進展すると考えられることから、せん断破壊面が面材の表面から裏面まで貫通する範囲、すなわち部材厚の範囲に応力が再配分されると考えられる。制御建屋基礎版における面外せん断力に対する応力平均化の考え方を図 2-5 に示す。

以上より、応力の平均化は、応力コンター図及び基礎版の直上の壁配置等を考慮し、当該要素の壁から離れる側の応力方向に位置する隣接要素に対して、壁面から基礎スラブの部材厚である 3m 分の範囲で行った。各要素について応力平均化範囲を図 2-6 に示す。なお、応力平均化箇所については外壁から跳出端部までの長さが 2m のため、応力平均化はスラブの部材厚である 3m より狭い、外壁から跳出端部までの 2m の範囲とする。

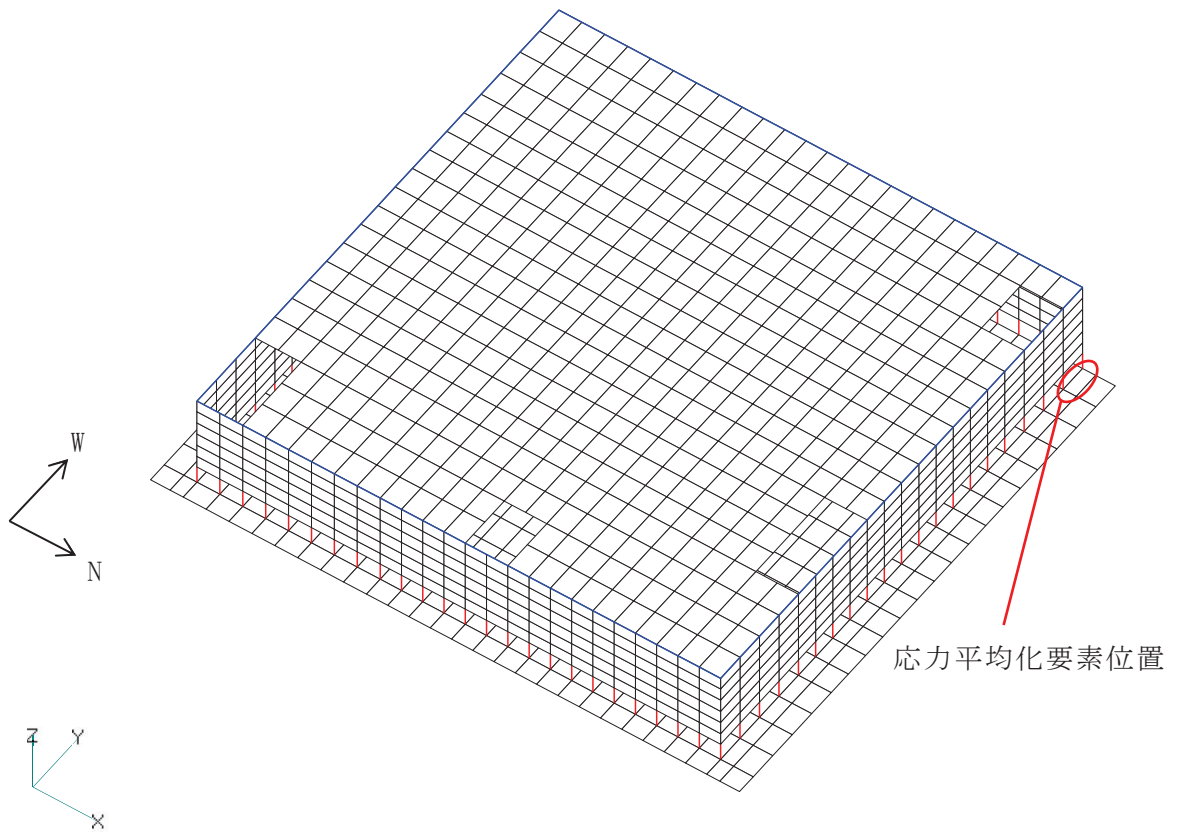
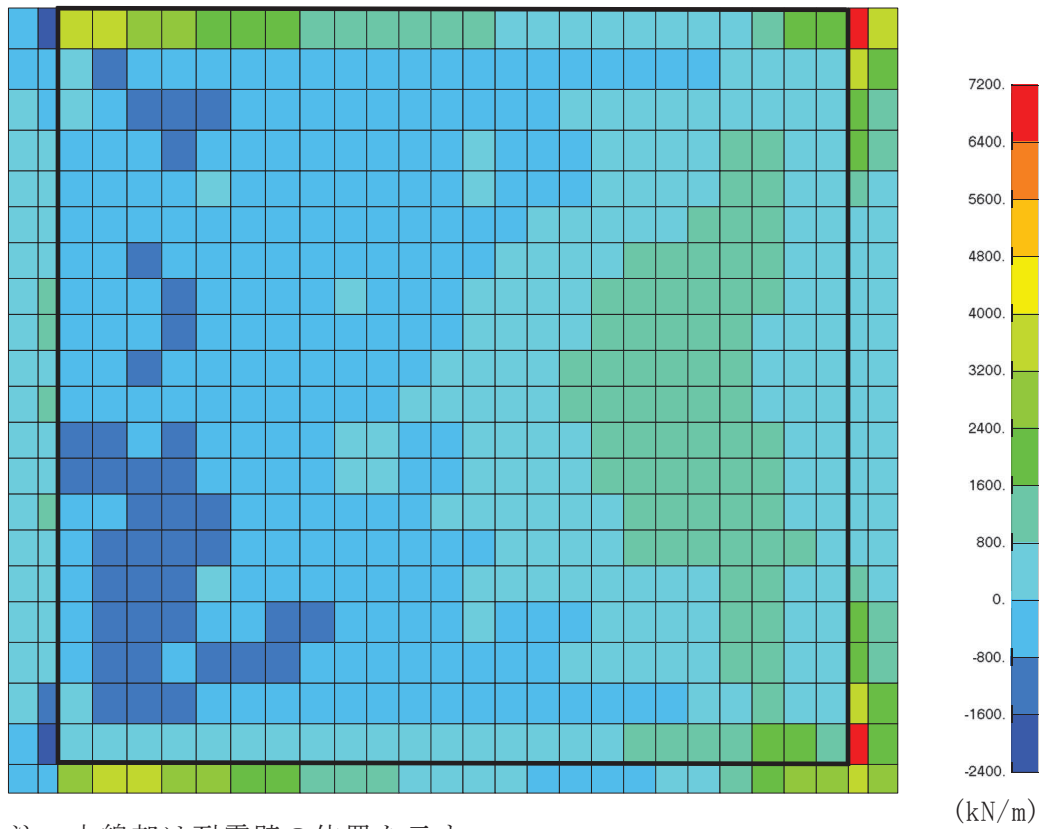


図 2-2 制御建屋基礎版の 3 次元 FEM モデル



注：太線部は耐震壁の位置を示す。

組合せケース 2 (NS 方向)

図 2-3 面外せん断力のコンター図

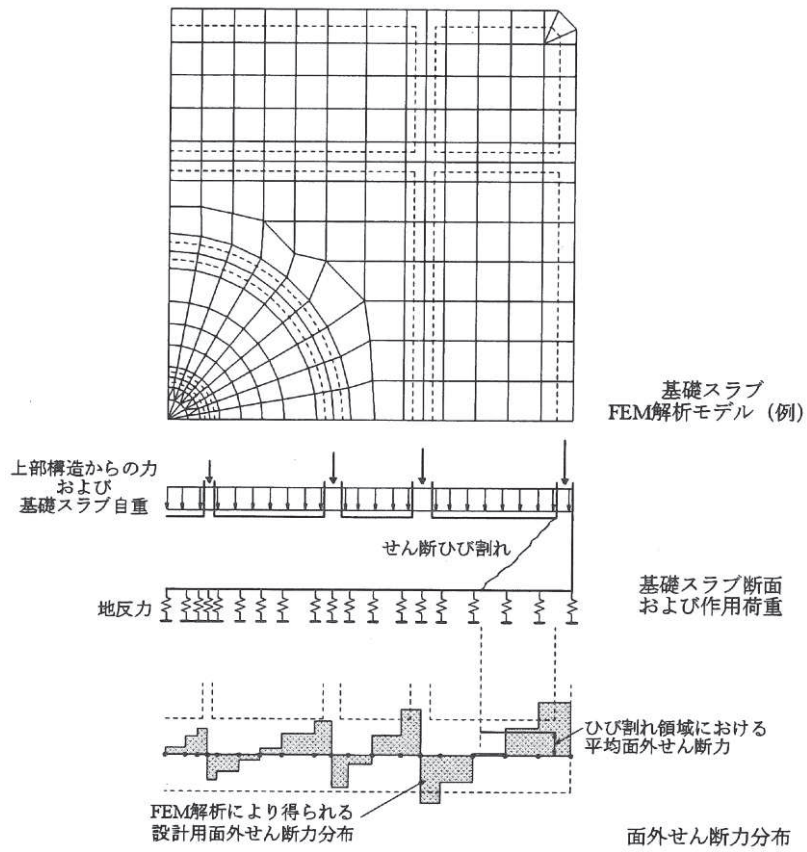


図 2-4 RC-N 規準の付図 2.2

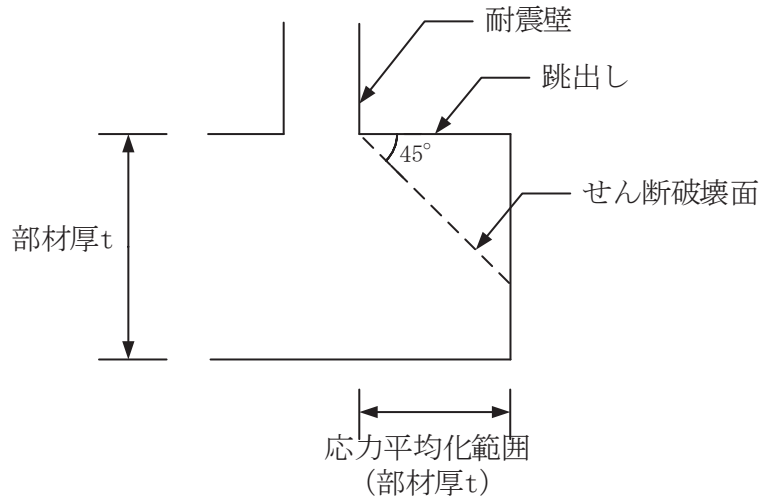
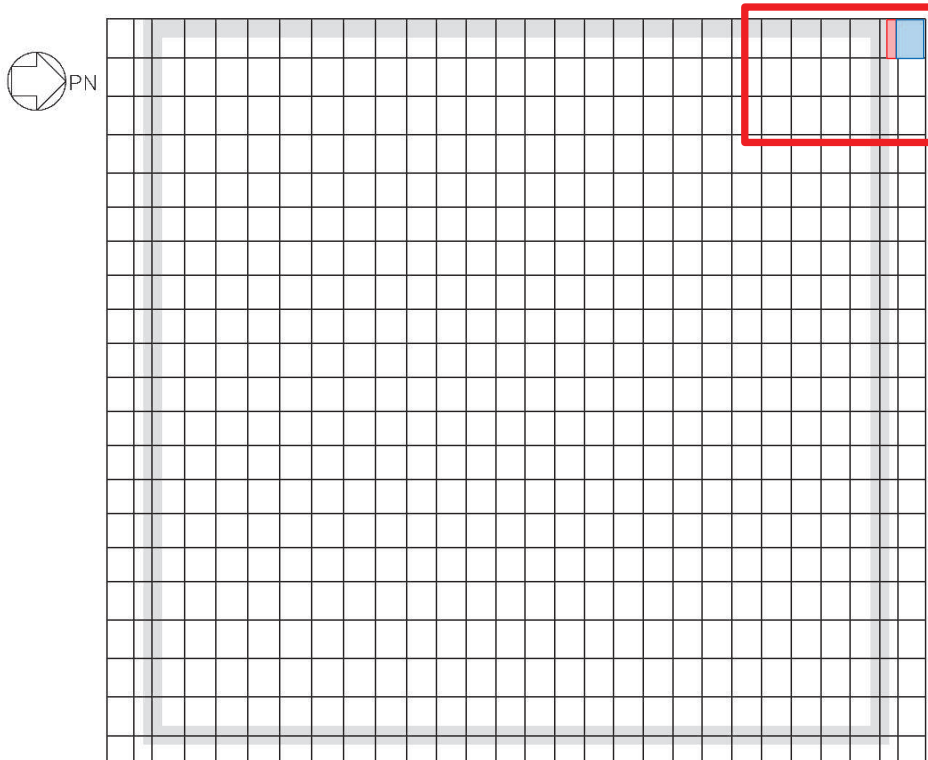


図 2-5 制御建屋基礎版における面外せん断力に対する応力平均化の考え方



	583	584	585	586	587	588
	555	556	557	558	559	560
	527	528	529	530	531	532

- 応力平均化実施要素
- 平均化実施に用いた周辺要素
- 壁直下の範囲（平均化対象外）

要素番号 587

図 2-6 応力平均化範囲

2.3 応力平均化の結果

応力平均化の手法として、下式のとおり、要素面積を考慮した重み付け平均で平均化を行っている。応力平均化に用いる各要素の発生値、面積及び重み付け値を表2-2に示す。また、応力平均化の結果を表2-3に示す。

$$\tau_{ave} = \Sigma (\tau_i \times A_i) / \Sigma A_i$$

ここで、

τ_{ave} : 平均化後の面外せん断応力度

τ_i : 平均化前の各要素の面外せん断応力度（発生値）

A_i : 応力平均化範囲における各要素の面積

表2-2 応力平均化に用いる各要素の発生値、面積及び重み付け値

応力平均化対象要素	方向	組合せケース	要素番号	発生値 τ_i (N/mm ²)	要素面積 A_i (m ²)	重み付け値 $\tau_i \times A_i$ ($\times 10^6$ N)
587	NS	2	587	2.98	1.0625	3.17
			588	1.35	3.1875	4.30
合計					4.25	7.47

表2-3 応力平均化結果

要素番号	方向	組合せケース	面外せん断応力度 (N/mm ²)	
			平均化前	平均化後
587	NS	2	2.98	1.76

2.4 断面の評価結果

2.4.1 断面の評価方法

組合せケース 2 の面外せん断応力度について、発生値が許容値を超えないことを確認する。許容値は、「発電用原子力設備規格 コンクリート製原子炉格納容器規格（(社)日本機械学会，2003）」に基づき算出する。

2.4.2 断面の評価結果

応力平均化後の評価結果を表 2-4 に示す。表 2-4 より、応力平均化後の面外せん断応力度の発生値が許容値を超えないことを確認した。

表 2-4 応力平均化後の評価結果

要素番号	方向	組合せ ケース	面外せん断応力度 (N/mm ²)		平均化後の検定値 (発生値/許容値)
			発生値	許容値	
587	NS	2	1.76	2.42	0.73

別紙 7 剛性低下を考慮した影響検討

目 次

1. 検討の概要	別紙 7- 1
2. 検討方針	別紙 7- 4
3. 荷重及び荷重の組合せ	別紙 7- 4
4. 使用材料の許容限界	別紙 7- 4
5. 応力解析	別紙 7- 5
6. 評価方法	別紙 7- 9
7. 評価結果	別紙 7- 9
8. 検討のまとめ	別紙 7-13

1. 検討の概要

3.11 地震に対する制御建屋の質点系モデルを用いたシミュレーション解析では、耐震壁の初期剛性を低下させることにより観測記録との整合性が図られている。これを踏まえ、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等の地震やコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ等に伴う初期剛性の低下については、観測記録や試験データなどから適切に地震応答解析モデルへ反映し、保守性を確認した上で適用することとし、地震応答解析モデルの耐震壁の初期剛性を低減している（以下「基本ケースの初期剛性」という）。

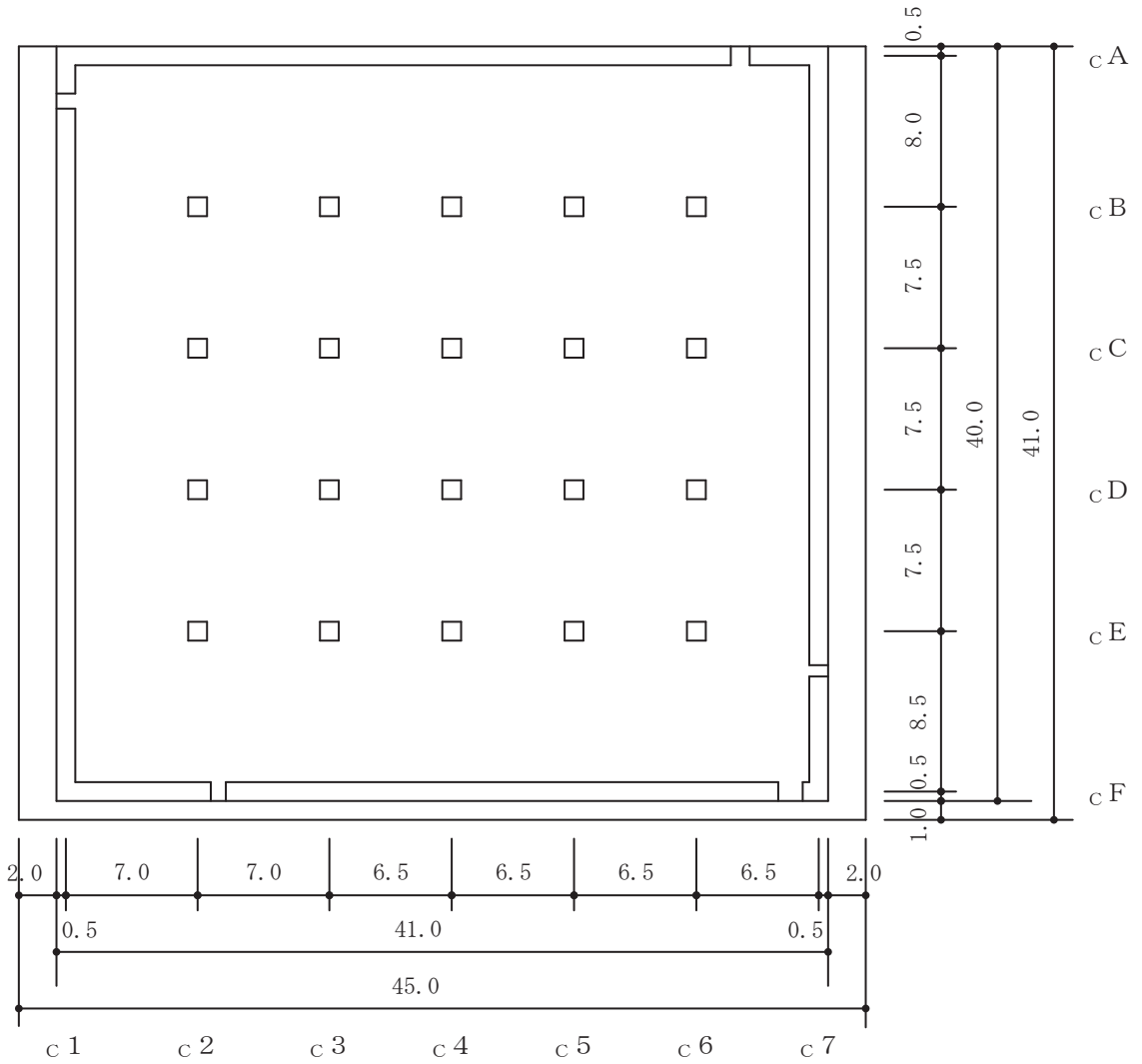
一方、地震応答解析の不確かさケースのうち、建屋剛性の不確かさについて、水平方向については、全ての基準地震動 S_s 入力後の建屋全体の平均的な剛性低下を全ての基準地震動 S_s について評価し、最も剛性低下するケースの低下後の剛性を初期剛性の不確かさとして考慮することとしている（以下「不確かさケースの初期剛性」という）。

添付書類「VI-2-2-4 制御建屋の耐震性についての計算書」における基礎版の耐震評価（以下「基礎版の耐震計算書」という。）では、解析モデルにおいてモデル化した耐震壁の剛性については、基本ケースの初期剛性として評価を行っている。ここでは、剛性低下を考慮した影響検討として、不確かさケースの初期剛性にに基づき評価を実施する。

なお、基礎版部分については、原子炉建屋における観測記録に基づく分析の結果、剛性低下は認められないことを踏まえ、基礎版の耐震計算書と同様にコンクリート設計基準強度に基づく剛性を設定する。

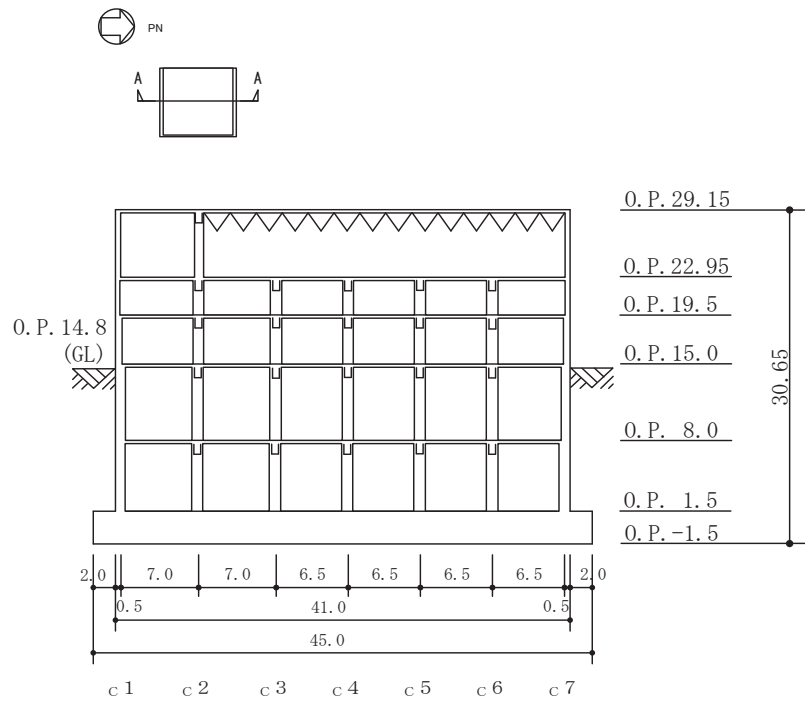
制御建屋基礎版の平面形状は、南北方向 45.0m、東西方向 41.0m の矩形であり、厚さは 3.0m である。

制御建屋基礎版の概略平面図及び概略断面図を図 1-1 及び図 1-2 に示す。



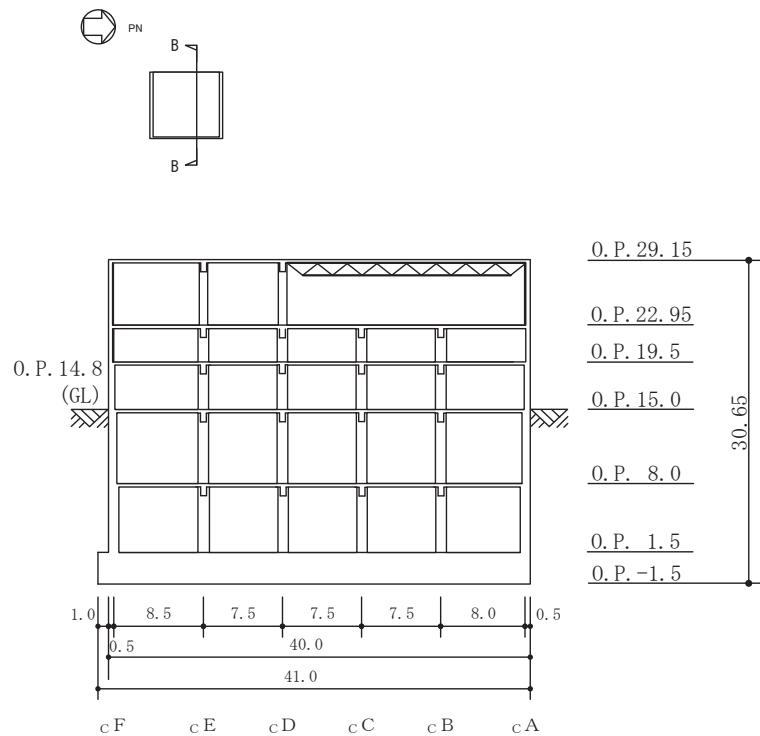
(単位 : m)

図 1-1 制御建屋基礎版の概略平面図 (0. P. 1.5 m)



(単位 : m)

図 1-2(1) 制御建屋基礎版の概略断面図 (A-A 断面 NS 方向)



(単位 : m)

図 1-2(2) 制御建屋基礎版の概略断面図 (B-B 断面 EW 方向)

2. 検討方針

剛性低下を考慮した影響検討として、耐震壁部分の剛性を不確かさケースの初期剛性とした場合の制御建屋基礎版の評価を行う。

評価に当たっては、 S_s 地震時に対して、3次元FEMモデルの応力解析結果を用いた断面の評価について、許容値を超えないことを確認する。

解析モデルの詳細及び許容値については、基礎版の耐震計算書に示すものと同一である。

3. 荷重及び荷重の組合せ

荷重の組合せは、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき設定する。また、荷重の組合せを表3-1に示す。荷重の詳細は、基礎版の耐震計算書に示す固定荷重(G)、積載荷重(P)及び地震荷重(S_s)と同一である。

表3-1 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
S_s 地震時	G + P + S_s

G : 固定荷重

P : 積載荷重

S_s : 地震荷重 (地震時土圧を含む)

4. 使用材料の許容限界

コンクリート及び鉄筋の許容限界は、基礎版の耐震計算書の「4.3 許容限界」に示す内容と同一である。

5. 応力解析

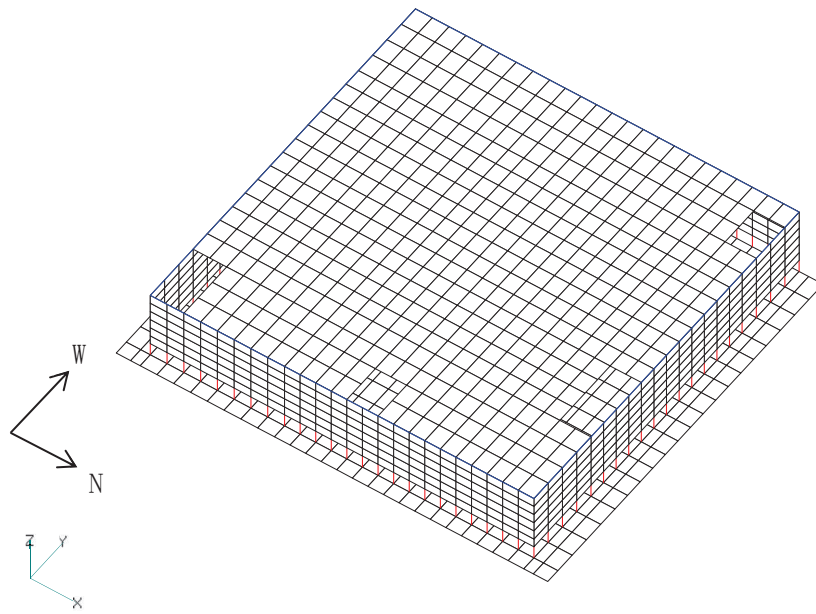
解析モデル図を図 5-1 に示す。解析モデルの詳細は、コンクリートの剛性を除き基礎版の耐震計算書の「4.4 解析モデル及び諸元」に示す内容と同一である。

材料構成則への反映方法は、コンクリートの材料構成則の初期剛性を低下させることとし、圧縮側も引張側も同じ値で低下させることとする。不確かさケースの初期剛性に基づく解析モデルのコンクリートの物性値を表 5-1 に、基本ケースの初期剛性に基づく解析モデル（設計ケース）のコンクリートの物性値を表 5-2 に示す。

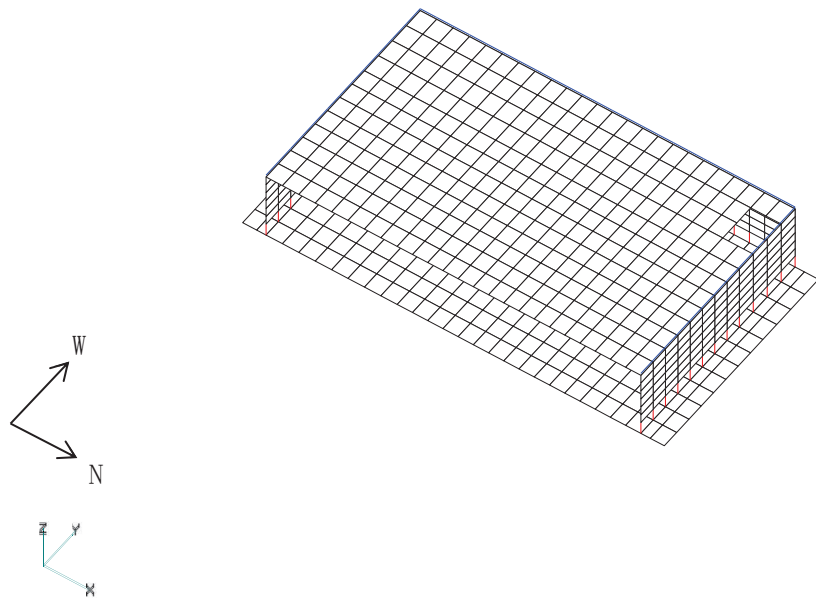
S_s地震時の応力は、基礎版の耐震計算書の「4.5.1 応力解析方法」に示す、次の荷重を組み合わせて求める。

G	: 固定荷重
P	: 積載荷重
S _s S _{SN}	: S→N 方向 S _s 地震荷重（地震時土圧を含む）
S _s S _{NS}	: N→S 方向 S _s 地震荷重（地震時土圧を含む）
S _s S _{EW}	: E→W 方向 S _s 地震荷重（地震時土圧を含む）
S _s S _{WE}	: W→E 方向 S _s 地震荷重（地震時土圧を含む）
S _s S _{UD}	: 鉛直方向（下向き） S _s 地震荷重
S _s S _{DU}	: 鉛直方向（上向き） S _s 地震荷重

水平地震力と鉛直地震力の組合せは、「原子力発電所耐震設計技術規程（J E A C 4 6 0 1 - 2015）」を参考に、組合せ係数法（組合せ係数は 1.0 と 0.4）を用いるものとする。荷重の組合せケースを表 5-3 に示す。



(a) 全体鳥瞰図



(b) 全体鳥瞰断面図

図 5-1(1) 解析モデル (1/2)

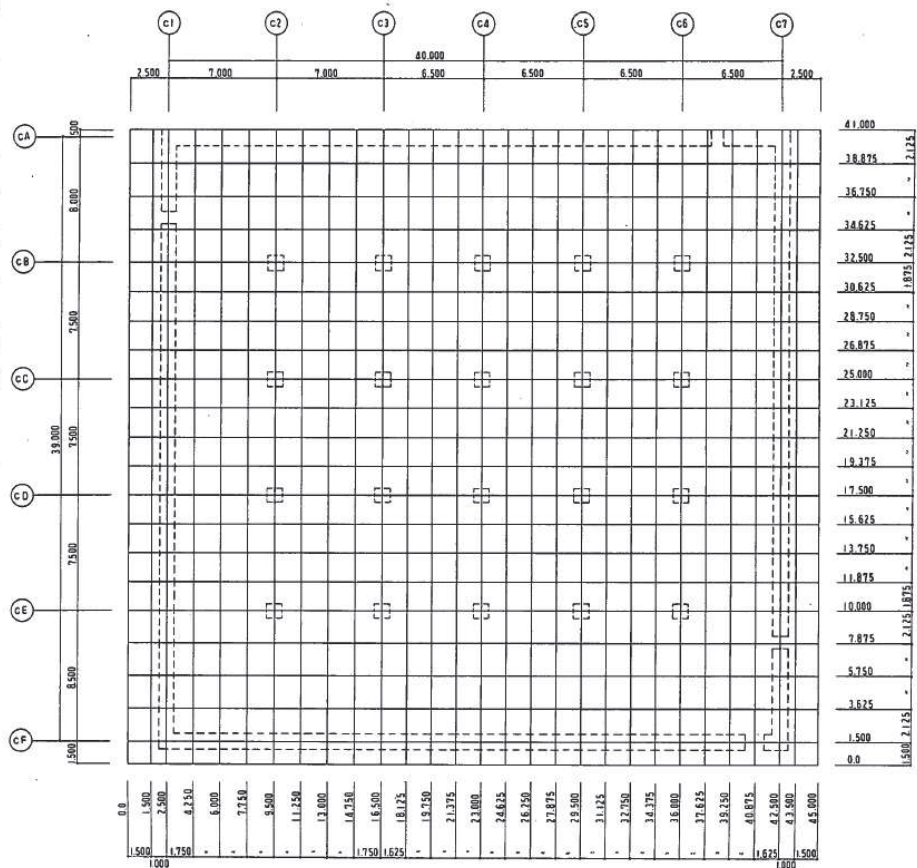


図4-1 解析モデル：モデル図

(単位：mm)

(c) 基礎版要素分割図

図5-1(2) 解析モデル (2/2)

表5-1 コンクリートの物性値 (不確かさケースの初期剛性に基づく解析モデル)

部 位	設計基準強度 F _c (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν
基礎版・床スラブ	32.4	2.51×10 ⁴	0.2
耐震壁 (NS 方向)		7.03×10 ³	
耐震壁 (EW 方向)		8.79×10 ³	

表5-2 コンクリートの物性値 (基本ケースの初期剛性に基づく解析モデル)

部 位	設計基準強度 F _c (N/mm ²)	ヤング係数 E (N/mm ²)	ポアソン比 ν
基礎版・床スラブ	32.4	2.51×10 ⁴	0.2
耐震壁 (NS 方向)		1.00×10 ⁴	
耐震壁 (EW 方向)		1.26×10 ⁴	

表 5-3 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	$G + P + 1.0 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ UD}$
	2	$G + P + 1.0 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ DU}$
	3	$G + P + 1.0 S_{s\ NS} + 0.4 S_{s\ UD}$
	4	$G + P + 1.0 S_{s\ NS} + 0.4 S_{s\ DU}$
	5	$G + P + 1.0 S_{s\ EW} + 0.4 S_{s\ UD}$
	6	$G + P + 1.0 S_{s\ EW} + 0.4 S_{s\ DU}$
	7	$G + P + 1.0 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$
	8	$G + P + 1.0 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ DU}$
	9	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} + 1.0 S_{s\ UD}$
	10	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} + 1.0 S_{s\ DU}$
	11	$G + P + 0.4 S_{s\ NS} + 1.0 S_{s\ UD}$
	12	$G + P + 0.4 S_{s\ NS} + 1.0 S_{s\ DU}$
	13	$G + P + 0.4 S_{s\ EW} + 1.0 S_{s\ UD}$
	14	$G + P + 0.4 S_{s\ EW} + 1.0 S_{s\ DU}$
	15	$G + P + 0.4 S_{s\ WE} + 1.0 S_{s\ UD}$
	16	$G + P + 0.4 S_{s\ WE} + 1.0 S_{s\ DU}$

6. 評価方法

基礎の断面の評価は、基礎版の耐震計算書の「4.5.2 断面の評価方法」に示す方法と同一である。

7. 評価結果

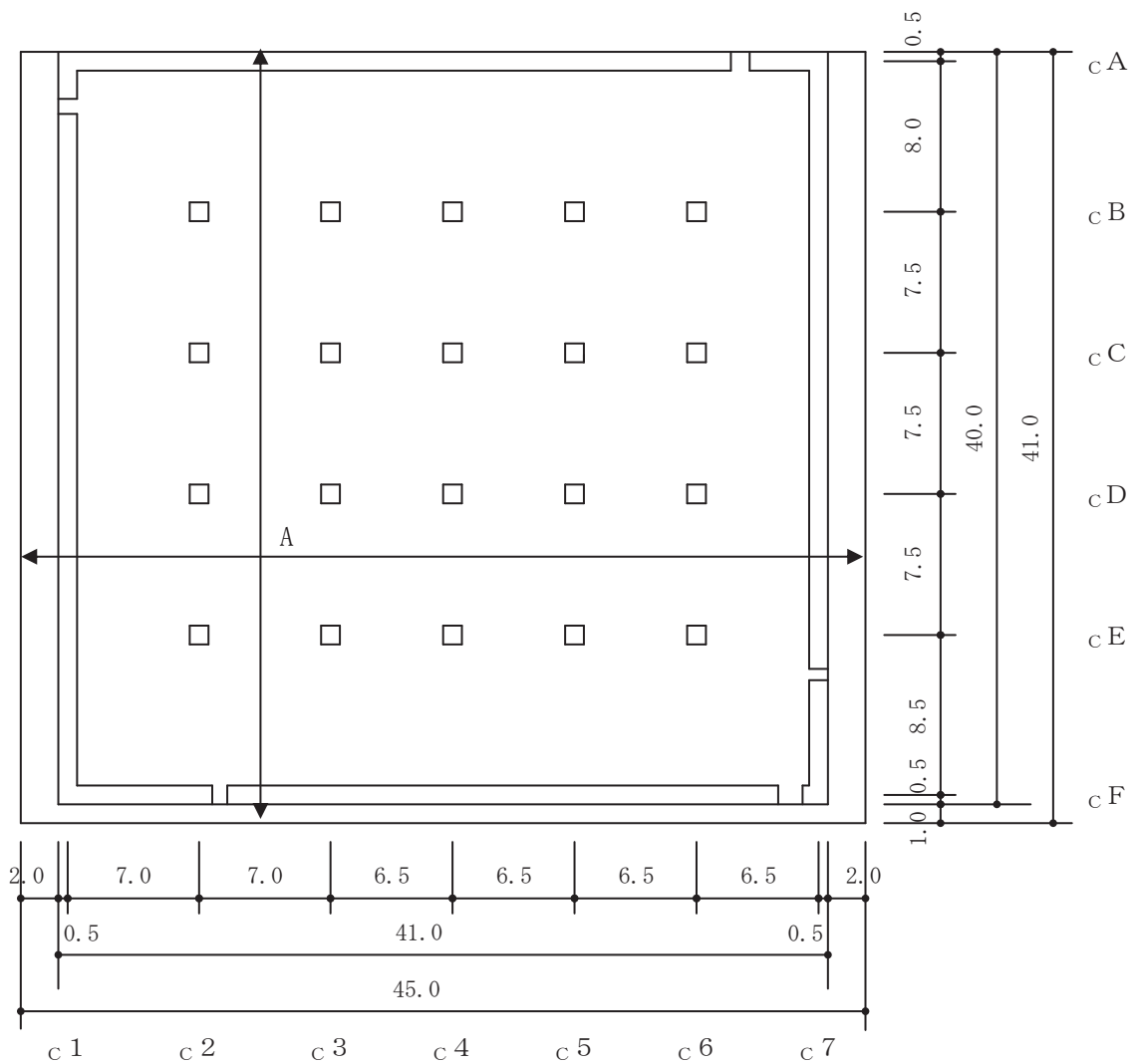
断面の評価結果を以下に示す。また、3次元 FEM モデルの配筋領域図及び配筋一覧を図 7-1 及び表 7-1 に示す。断面の評価結果を記載する要素は、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断力に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素とする。

選定した要素の位置を図 7-2 に、評価結果を表 7-2 に示す。

S s 地震時における剛性低下を考慮した影響検討結果と、設計ケースの評価結果とを比較すると、剛性低下の影響により発生値は増加傾向にあるが、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。

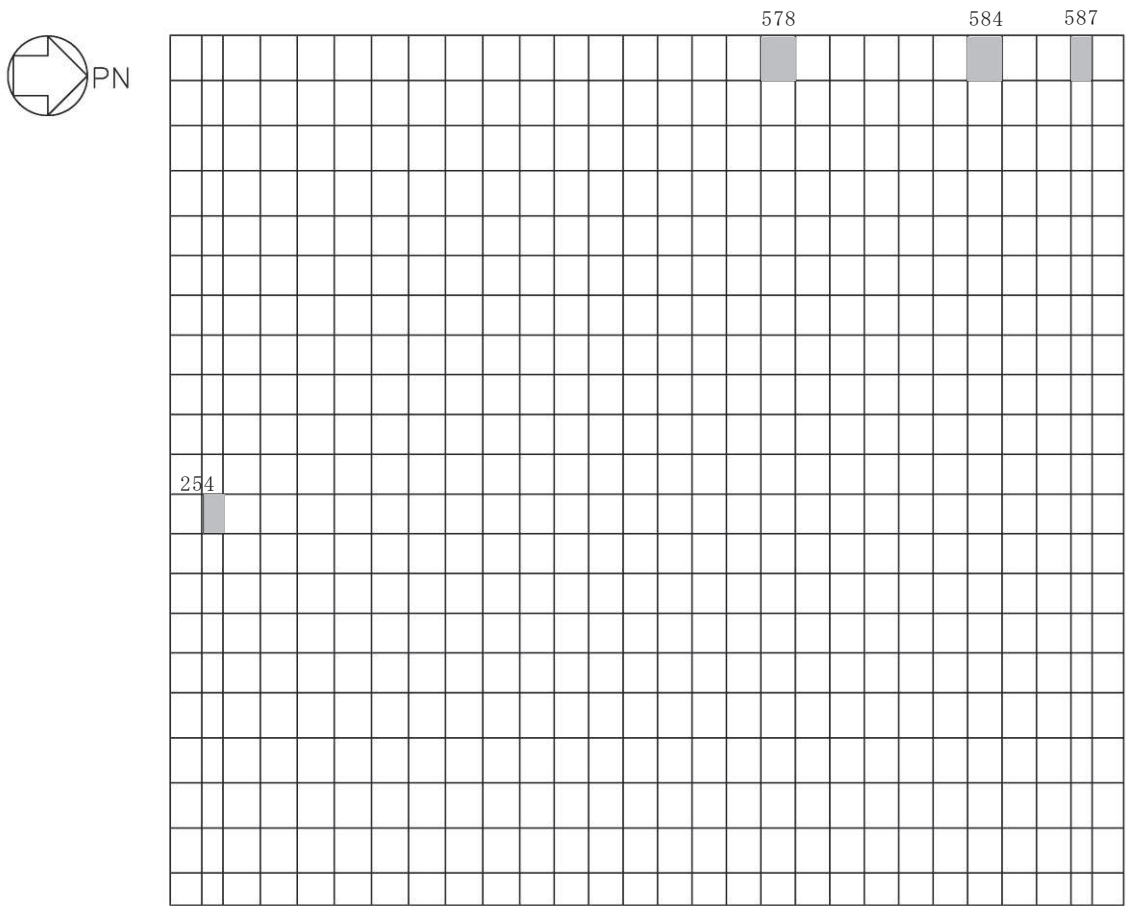
表 7-1 配筋一覧

領域	上ば筋		下ば筋	
	方向	配筋	方向	配筋
A	NS	D38@200	NS	D38@200
	EW	D38@200	EW	D38@200



(単位 : m)

図 7-1 配筋領域図



注：数字は要素番号を示す。

図 7-2 選定した要素の位置 S s 地震時

表 7-2 制御建屋基礎版の評価結果 S s 地震時

(a) 不確かさケースの初期剛性に基づく解析モデル

評価項目		方向	要素 番号	組合せ ケース	発生値	許容値
軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	NS	584	2	0.721	3.00
	鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	NS	578	8	1.191	5.00
面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	NS	587	2	1.76*	2.42

注記*：応力の再分配を考慮して、応力平均化を行った結果。

(b) 基本ケースの初期剛性に基づく解析モデル

評価項目		方向	要素 番号	組合せ ケース	発生値	許容値
軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$)	NS	584	2	0.661	3.00
	鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	EW	254	2	0.980	5.00
面外せん断力	面外せん断応力度 (N/mm^2)	NS	587	2	1.76*	2.42

注記*：応力の再分配を考慮して、応力平均化を行った結果。

8. 検討のまとめ

制御建屋基礎版の耐震評価にあたり，剛性低下を考慮した影響検討を実施した。

検討の結果，剛性低下を考慮した影響検討結果と設計ケースによる評価結果とを比較すると，剛性低下の影響により発生値は増加傾向にあるが，軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断応力度が，各許容値を超えないことを確認した。

以上のことから，剛性低下を考慮した影響検討の結果，制御建屋基礎版が有する耐震性への影響はないことを確認した。