

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-025-02 改 06
提出年月日	2023年6月7日

制御室建物の耐震性についての計算書に関する
補足説明資料

2023年6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-2-2-6「制御室建物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 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 基礎スラブの耐震性への水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響について

別紙 8 側面地盤ばねを考慮した地震応答解析による設計用地震力への影響について

別紙 8-1 側面地盤ばねの適用性について

別紙 9 応力解析モデルにおける基礎スラブと壁の接続部のモデル化に関する影響検討

(参考資料 1) 計算機プログラム (解析コード) の概要

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
2.1 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	別紙 1-2
2.2 今回工認モデルについて	別紙 1-6
2.2.1 弾塑性解析の採用	別紙 1-6
2.2.2 一部壁の積層シェル要素でのモデル化	別紙 1-6

1. 概要

本資料は、制御室建物の基礎スラブ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

2.1 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

制御室建物の基礎スラブの応力解析モデル及び手法の比較を表 2-1 に示す。

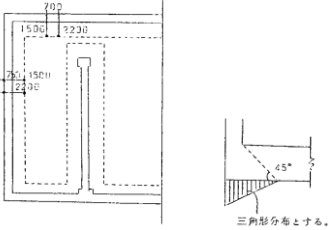
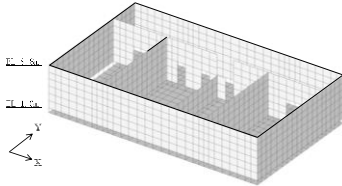
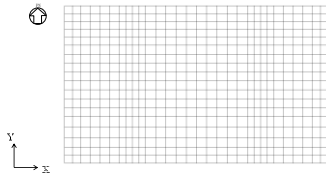
比較に用いる既工認時の応力解析モデル及び手法は、昭和 46 年 3 月 20 日付け 45 公第 11110 号にて認可された工事計画の参考資料 7 「制御室建物に関する説明書」（以下「既工認」という。）のものである。

表 2-1(1) 応力解析モデル及び手法の比較 (制御室建物の基礎スラブ)

項目	内容	既工認	今回工認	備考
解析手法		公式による応力計算	3次元 F E Mモデルを用いた応力解析 (弾塑性解析)	①
解析コード		—	A B A Q U S	①
モデル	モデル化範囲	・壁より45° の範囲をはりとしてモデル化	(基礎スラブモデル部分) ・基礎スラブ全体 (上部構造物モデル部分) ・基礎スラブより立ち上がる剛性の高い一部壁	②
	材料物性	—	適用規準の見直しによる再設定 ・コンクリートのヤング係数： E = 2.20 × 10 ⁴ N/mm ² ・コンクリートのポアソン比： ν = 0.2 ・鉄筋のヤング係数： E = 2.05 × 10 ⁵ N/mm ²	③
	要素種別	—	(基礎スラブモデル部分) ・積層シェル要素 (上部構造物モデル部分) ・積層シェル要素 ・はり要素	②
	拘束条件	—	・EL 1.6m~EL 8.8mの一部壁の剛性を積層シェル要素で考慮 ・EL 8.8m~EL 22.05mの一部壁の剛性をはり要素で考慮	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* ・側面の水平及び回転ばねを考慮	—
	非線形特性	—	(基礎スラブモデル部分) 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 鉄筋の構成則 ・バイリニア型 (上部構造物モデル部分) ・考慮せず	①
地震荷重との組合せ	G + P + S G : 固定荷重 P : 積載荷重 S : 地震荷重	—	S s 地震時 : G + P + S s G : 固定荷重 P : 積載荷重 S s : S s 地震荷重	—

注記* : 鉛直ばねに付着力 0.40N/mm² を超える引張力が発生した際に浮上りを考慮する。(別紙 2 「応力解析におけるモデル化, 境界条件および拘束条件の考え方」 参照。)

表 2-1(2) 応力解析モデル及び手法の比較 (制御室建物の基礎スラブ)

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	躯体自重, 機器配管重量, 上部構造物からの荷重	同左	—
	地震荷重	上部構造物からの地震力 (曲げモーメント, 鉛直力) を入力	上部構造物からの地震力 (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	—
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) 全体鳥瞰図</p>  <p>(b) 基礎スラブ要素分割図</p> <p>注: 黒太線は, はり要素を示す。</p>	②	

【具体的な反映事項】（表の備考欄に対応）

- ① 既工認では公式による応力計算を実施しているが、今回工認では弾塑性解析を採用する。（詳細は「2.2.1 弾塑性解析の採用」に示す。）
- ② 今回工認では剛性の高い一部壁を積層シェル要素及びはり要素でモデル化する。（詳細は「2.2.2 一部壁の積層シェル要素でのモデル化」に示す。）
- ③ コンクリートのヤング係数及びポアソン比については、「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）」に基づく。
- 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，20
03）」に基づき評価する。
- 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。

2.2 今回工認モデルについて

2.2.1 弾塑性解析の採用

応力解析に弾塑性解析を採用することについては、基準地震動 S_s による入力が増大に伴い、制御室建物の鉄筋コンクリート構造全体としての挙動が塑性域に入ると考えられるため、その塑性域の挙動を適切に評価するために採用するものである。

また、準拠する規格・基準について、制御室建物の基礎スラブに要求される機能は、基準地震動 S_s に対する間接支持構造物としての機能であり、許容限界としては機能維持となる。一方、鉄筋コンクリート造構造物に関する規格である「発電用原子力設備規格 鉄筋コンクリート製原子炉格納容器規格（（社）日本機械学会，2003）」（以下「CCV規格」という。）は、基準地震動 S_s に対して主要施設としての機能確保が必要な施設に対する設計規格であるため、制御室建物の基礎スラブの弾塑性解析は「CCV規格」に基づき実施する。

2.2.2 一部壁の積層シェル要素でのモデル化

制御室建物の基礎スラブの応力解析モデルでは、壁の立体的な形状による剛性への寄与を考慮することを目的として、耐震壁等の剛性の高い壁のうち、EL 1.6m～EL 8.8m の壁を積層シェル要素でモデル化する。また、EL 8.8m～EL 22.05m の一部壁をはり要素でモデル化する。

応力解析モデルのモデル化方法を表 2-2 に、今回工認モデルの概念図を図 2-1 に示す。

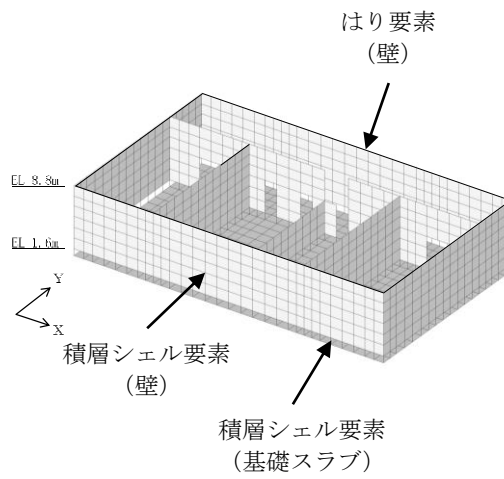
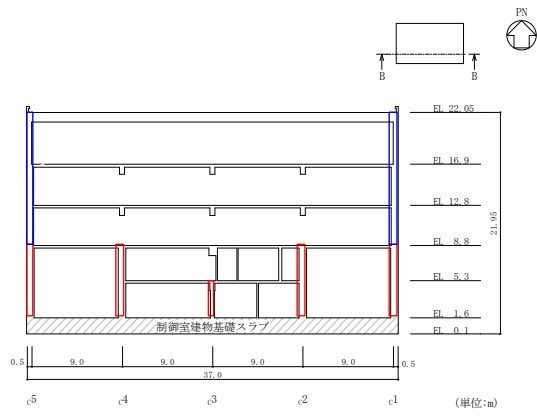
なお、今回工認モデルにおいて、EL 1.6m～EL 8.8m の一部壁は積層シェル要素でモデル化しているが、弾性部材*としてモデル化している。一方、VI-2-2-5「制御室建物の地震応答計算書」に示すとおり、制御室建物の地震応答解析では弾塑性時刻歴応答解析を実施しており、 S_s 地震時にせん断スケルトン曲線上の最大応答値が第 1 折れ点を超え、塑性化する結果となっていることから、壁が塑性化することによる影響について確認する。確認結果については、別紙 5「地震応答解析による壁の塑性化に対する影響検討」に示す。

注記*：制御室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 2-2 応力解析モデルのモデル化方法

部位	EL (m)	今回工認モデル*	備考
壁	8.8～22.05	はり要素	
	1.6～8.8	積層シェル要素	

注記*：壁は弾性部材としてモデル化。



- : はり要素でのモデル化範囲
- : 積層シェル要素でのモデル化範囲

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

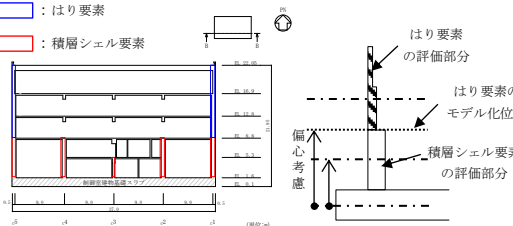
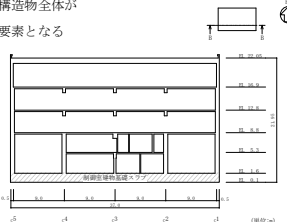
今回工認モデルではEL 1.6m～EL 8.8mの一部壁を積層シェル要素でモデル化していることから、基礎スラブに対する面外剛性に加えて、壁の面外剛性、面内剛性も考慮される。これらの壁が全体として基礎スラブへの拘束部材となり、より実状に近い構造挙動となる。例えば、地震荷重時に基礎スラブが面外に変形しながら浮上りを生ずる挙動に対して、地震方向と直交方向の壁が一体性を保持しつつ、立体的に抵抗することとなる。また、今回工認モデルでは壁の積層シェル要素を基礎スラブ上端より立ち上げるため、基礎スラブ中心（モデル化位置）からの偏心距離が考慮される。

ただし、実機では上部構造物全体の壁及びスラブが一体となって拘束効果を発揮するのに対し、今回工認モデルではEL 1.6m～EL 8.8mの一部壁のみを積層シェル要素でモデル化することから、拘束効果は実機より小さく保守的である。

なお、耐震壁の地震力算定に用いる地震応答解析では基礎スラブを剛体として扱っているため、基礎スラブの柔性等の実際の柔らかさを考慮する場合に対し基本的に耐震壁が負担する地震力を保守的に評価している。

上部構造物のモデル化における解析上の影響を表2-3に示す。

表 2-3 上部構造物のモデル化における解析上の影響

項目	今回工認モデル	実機の状態 (想定される実現象)
上部構造物の剛性 影響範囲 (モデル化範囲)	<ul style="list-style-type: none"> EL 1.6m～EL 8.8m までの耐震壁等の剛性の高い壁 	<ul style="list-style-type: none"> 建物全体の壁及びスラブが抵抗要素となる
	 <p> □ : はり要素 □ : 積層シェル要素 </p> <p> はり要素の評価部分 はり要素のモデル化位置 積層シェル要素の評価部分 偏心考慮 </p>	 <p> 上部構造物全体が抵抗要素となる </p>
	<ul style="list-style-type: none"> EL 1.6m～EL 8.8m までの一部壁を積層シェル要素でモデル化 EL 8.8m～EL 22.05m までの一部壁を等価な剛性を考慮したはり要素でモデル化 	<p style="text-align: center;">—</p>
剛性評価	<ul style="list-style-type: none"> EL 1.6m～EL 8.8m までは中立軸に対する一部壁の曲げ剛性を考慮しており、実機の状態に近いモデルとなっている。床スラブはモデル化しておらず、その拘束は考慮していないことから、拘束効果は実機より弱い。 壁の曲げ剛性は基礎スラブ中心からの偏心が考慮されており、実機により近いモデルとなっている。 	<ul style="list-style-type: none"> スラブの拘束等により、およそ層毎に中立軸に対する曲げ剛性が働くと考えられ、建物上部躯体全体として拘束効果を発揮する。
基礎スラブの評価におけるモデル化の特徴及び保守性	<p> 今回工認モデルは床スラブはモデル化していないため、これらの床スラブを含めた建物上部躯体全体としての拘束効果は考慮されていない。 このようなモデル化により、基礎スラブの評価において実挙動に対して保守的なモデルとなっている。 </p>	<p style="text-align: center;">—</p>

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、制御室建物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

制御室建物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。

直接基礎の底面及び側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。

(1) 底面地盤ばね

・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。

なお，建物基礎底面と地盤の間の付着力 $0.40\text{N}/\text{mm}^2$ を超える引張力が発生したときに浮上りを考慮する。

(2) 側面地盤ばね

・水平ばね

基礎スラブの埋込み部分については，基礎スラブの側面が側面地盤（MMR^{*1} 含む）又は隣接建物基礎スラブと接する。地震応答解析モデルでは，保守的な評価となるように側面地盤による拘束効果を考慮していないが，応力解析においては地震時の基礎スラブの水平方向の拘束効果として側面水平ばねを考慮する。ばね値は N o v a k の手法に基づく水平ばねにより算出する。

・鉛直ばね

基礎スラブの埋込み部分については，基礎スラブの側面が側面地盤（MMR 含む）又は隣接建物基礎スラブと接する。地震応答解析モデルでは，保守的な評価となるように側面地盤による拘束効果を考慮していないが，応力解析においては地震時の基礎スラブの回転に対する拘束効果として側面回転ばねを考慮する。ばね値は N o v a k の手法に基づく回転ばねにより算出する。

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^{*2}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。

- ・積層シェル要素

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、平板要素や軸対称の積層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積層シェル要素の辺の長さは、積層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*1：マンメイドロック（人工岩盤）の略称


*2：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

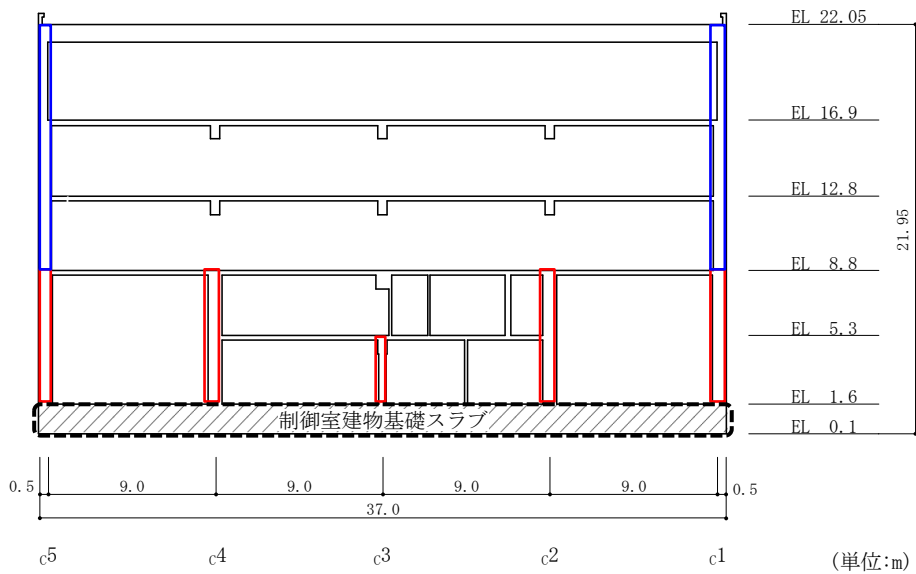
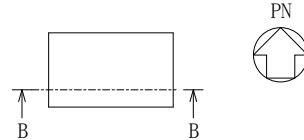
モデル概要

○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)

 : 積層シェル要素でのモデル化範囲
(拘束条件として考慮)



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

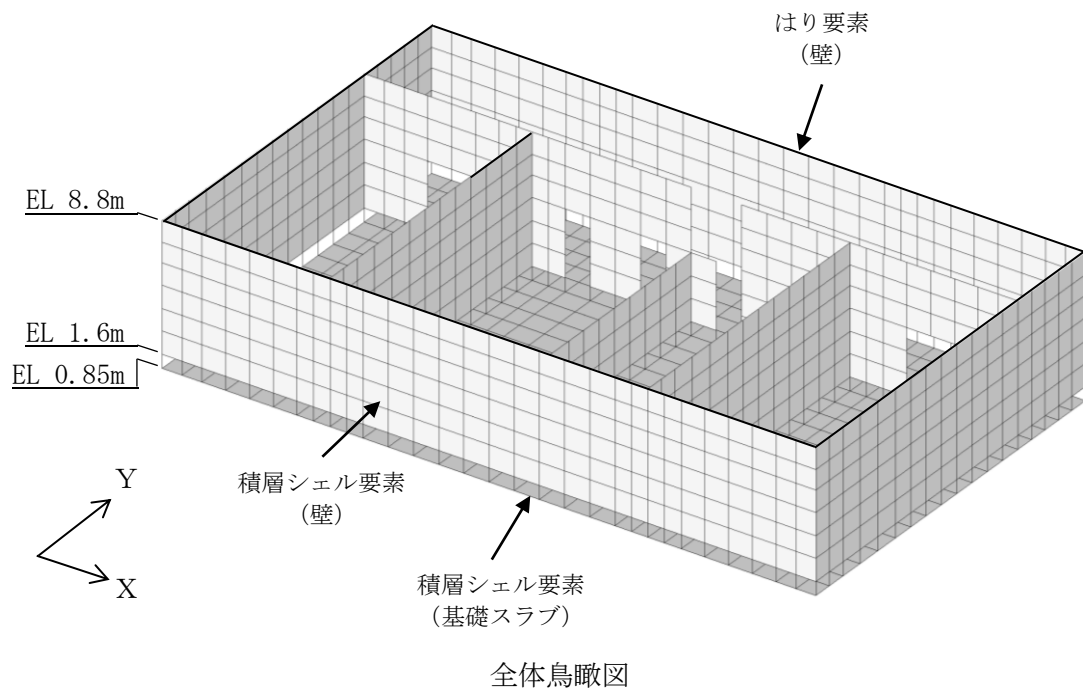
モデル概要

○使用要素

- ・積層シェル要素
- ・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。



注 1 : 黒太線は, はり要素を示す。

注 2 : EL 0.85m~EL 1.6m は剛体要素でモデル化。

モデル概要

表 2-1(3) モデル化, 境界条件及び拘束条件

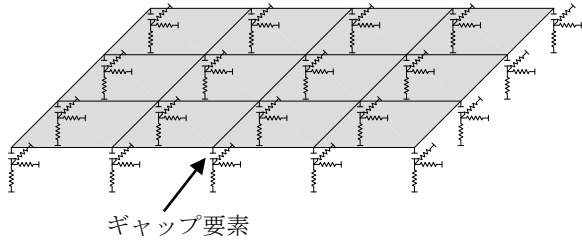
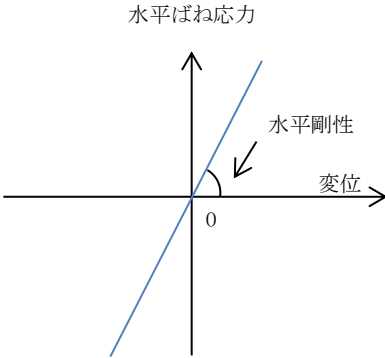
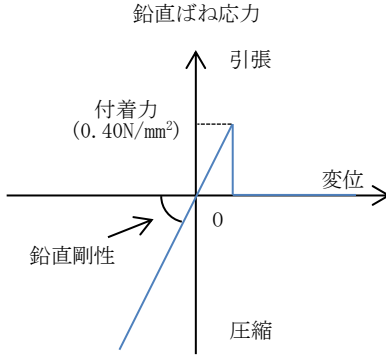
境界条件	
基礎スラブと地盤の境界	
<p>・ 基礎スラブと底面地盤との間に付着力 0.40N/mm^2 を考慮した底面地盤を表現するギャップ要素を設け, 基礎スラブと底面地盤との間の剥離 (基礎スラブの浮上り) を考慮している。</p>	 <p>ギャップ要素</p>
モデル概要	
○ギャップ要素	
鉛直ばねに付着力 0.40N/mm^2 を超える引張力が発生した際に, 水平剛性及び鉛直剛性をゼロとし, 浮上りを考慮する。	
<p>水平ばね応力</p> 	<p>鉛直ばね応力</p> 
注: 鉛直ばねに付着力 0.40N/mm^2 を超える引張力が発生した場合には, 水平剛性もゼロとする。	
(a) 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

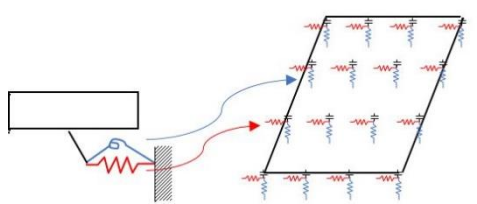
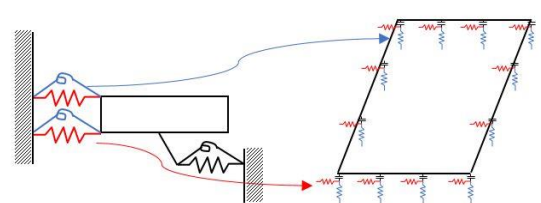
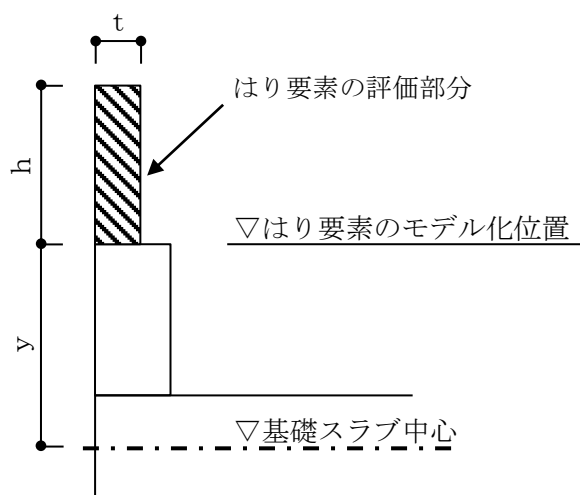
境界条件
<p>基礎スラブと地盤の境界</p> <p>VI-2-2-5「制御室建物の地震応答計算書」における地震応答解析モデルでは保守的に側面地盤ばねは考慮しないが、基礎スラブの応力解析モデルにおいては、基礎スラブ側面が側面地盤（MMR 含む）又は隣接建物基礎スラブと接することを踏まえ、水平及び鉛直方向に対する拘束効果として側面地盤ばね（水平及び回転）を考慮する。地震応答解析モデルに対して側面地盤ばねを考慮しないことの保守性については、別紙 8「側面地盤ばねを考慮した地震応答解析による設計用地震力への影響について」に示す。</p> <p>○底面地盤ばね</p> <p>水平剛性及び鉛直剛性は以下のとおり設定する。</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 <div style="text-align: center;">  <p style="text-align: center;">底面地盤ばね</p> </div> <p>○側面地盤ばね</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：N o v a k の手法に基づく側面水平地盤ばね定数${}_s K_s$を節点支配長さL_iで離散化。 ${}_s k_{si} = ({}_s K_s / (2 \times L_{NS} + 2 \times L_{EW})) \times L_i$ L_{NS}：基礎スラブ辺長（NS方向），L_{EW}：基礎スラブ辺長（EW方向） ・鉛直剛性：N o v a k の手法に基づく側面回転地盤ばね定数${}_s K_r$を節点支配長さL_iで離散化。 ${}_s k_{vi} = ({}_s K_r / I'_{NS} + {}_s K_r / I'_{EW}) / 2 \times L_i$ $I'_{NS(EW)} = L_{EW(NS)} \times L_{NS(EW)}^2 / 2 + L_{NS(EW)}^3 / 6$ <div style="text-align: center;">  <p style="text-align: center;">側面地盤ばね</p> </div>

表 2-1(5) 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以下のとおり考慮する。なお, 上部構造物は弾性要素としている。 <ol style="list-style-type: none"> EL 1.6m~EL 8.8m の一部壁の剛性を積層シェル要素として考慮する。 EL 8.8m~EL 22.05m の一部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) $I = t \cdot h^3 / 12 + t \cdot h \cdot y^2$ 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* y : 基礎スラブ中心から壁のモデル化位置までの距離*

注記* : 下図参照。



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、制御室建物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

制御室建物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。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。

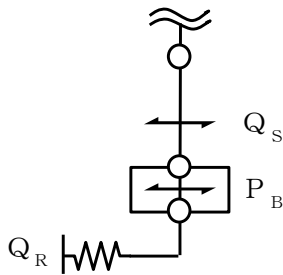
また、地震応答解析により求まる最大応答曲げモーメントをFEMモデルに入力する。上部構造物から作用する基礎スラブへの地震時反力は、偶力に置換して水平力を入力位置に節点荷重として入力する。基礎スラブモデル部分については、地震応答解析より求まる基礎スラブ底面地盤ばねの最大曲げモーメントから、上部構造物から作用する曲げモーメントを差し引いた値と等価になる荷重（以下「付加曲げモーメント」という。）をFEMモデルの基礎スラブの各節点に、節点の支配面積と中心位置からの距離に応じて偶力に置換して分配し、節点荷重として入力する。

なお、水平地震力及び曲げモーメントについては、各耐震壁のせん断断面積及び断面二次モーメントの比率に応じて分配し、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基礎スラブの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。）を基礎スラブの質点重量で除して付加軸力係数を算出する。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及び面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



$$P_B = Q_R - Q_S$$

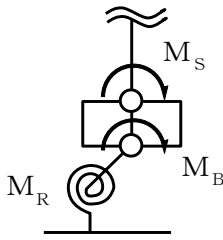
P_B : FEMにする付加せん断力

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



$$M_B = M_R - M_S$$

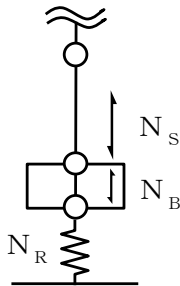
M_B : FEMにする付加曲げモーメント

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

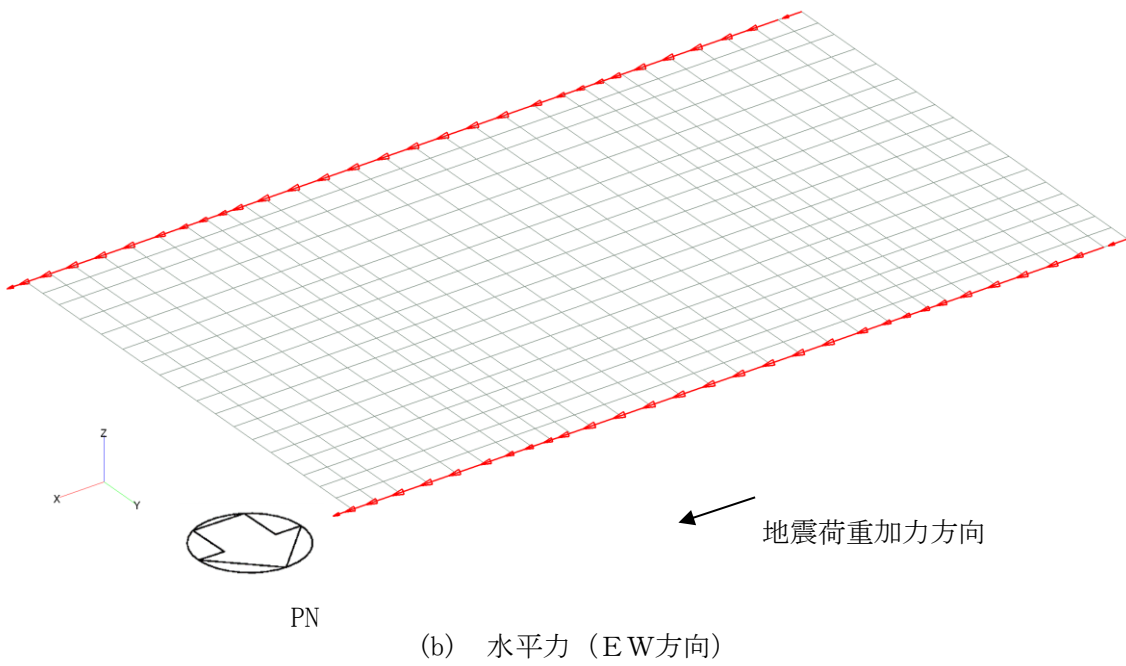
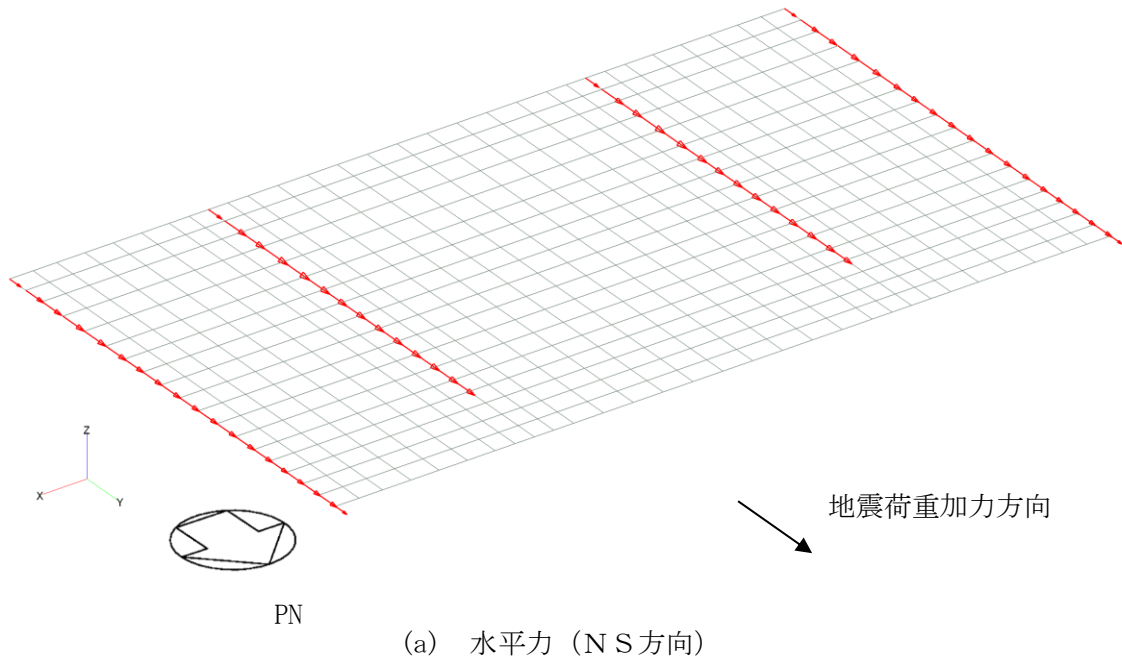
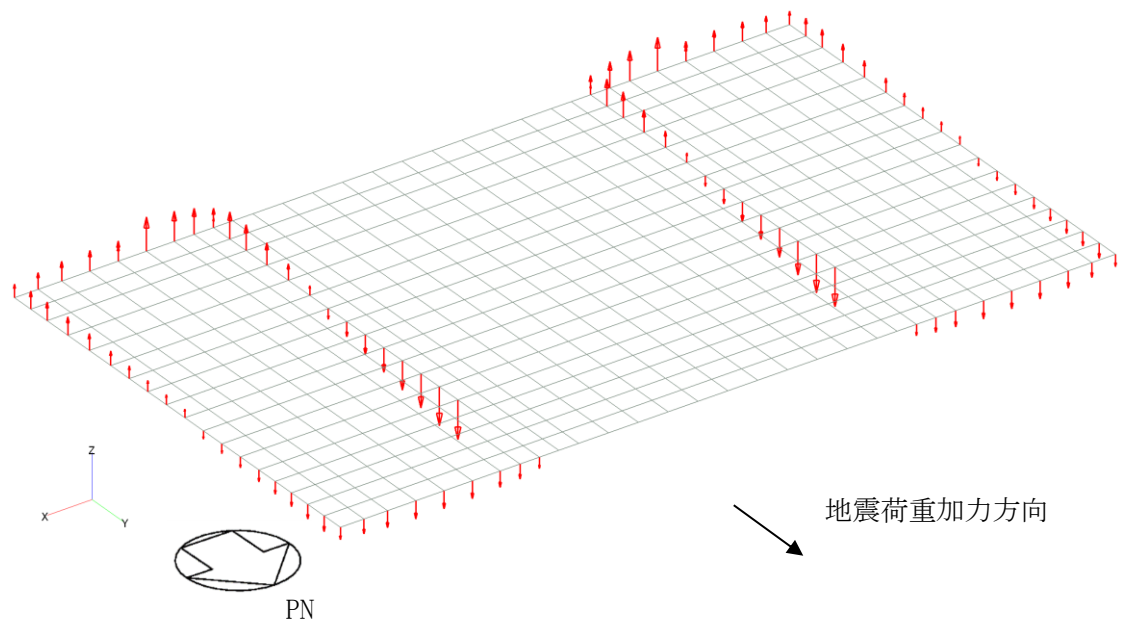
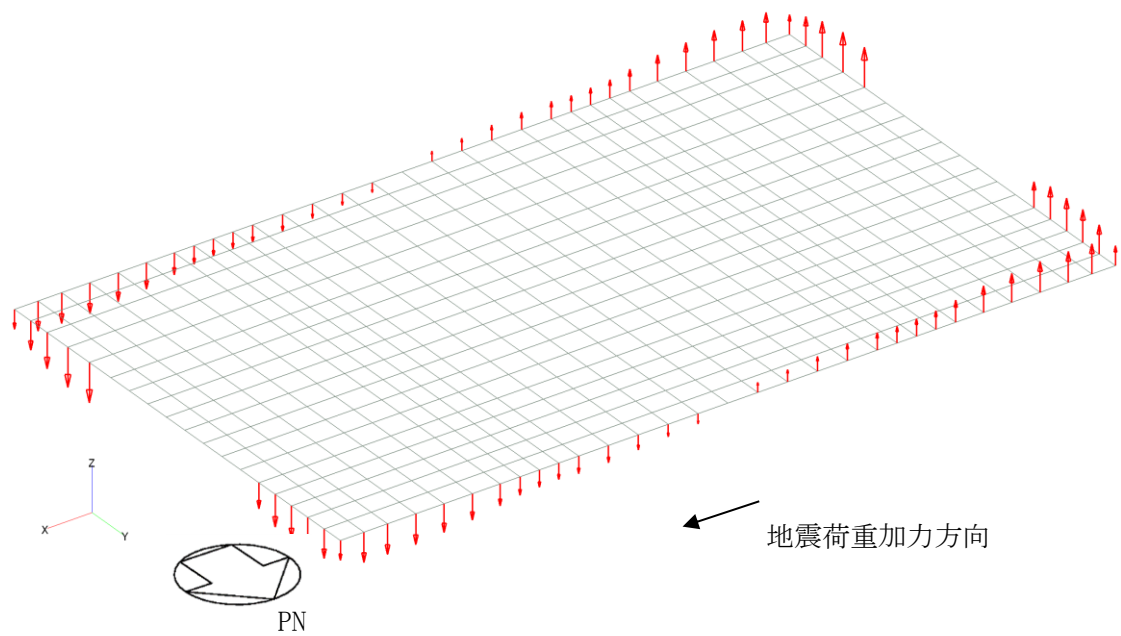


図 2-2(1) FEMモデルに入力する地震荷重

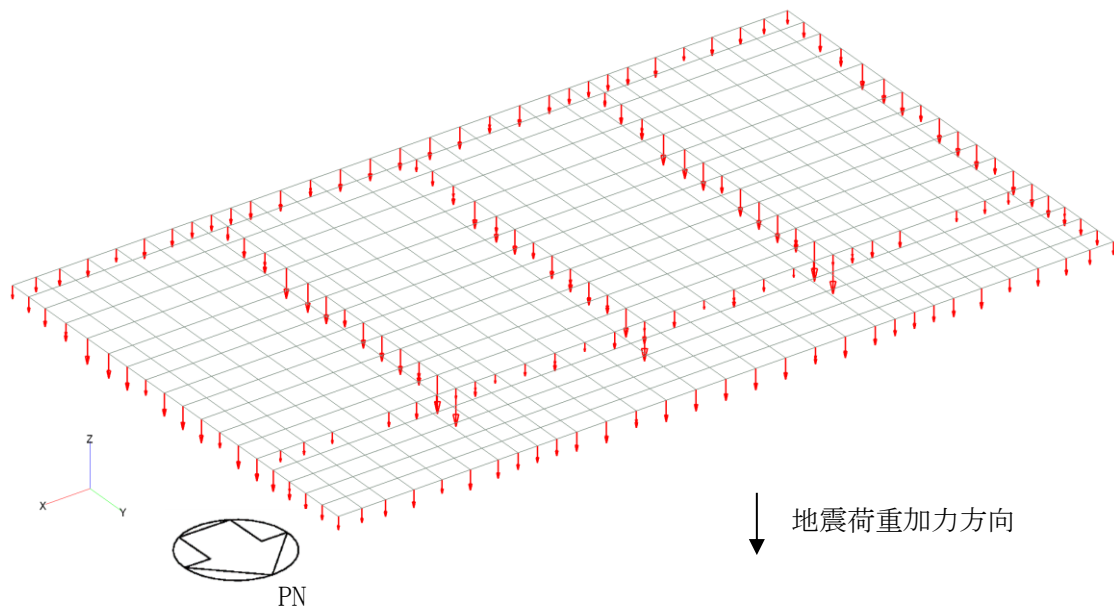


(c) 曲げモーメント (NS方向)



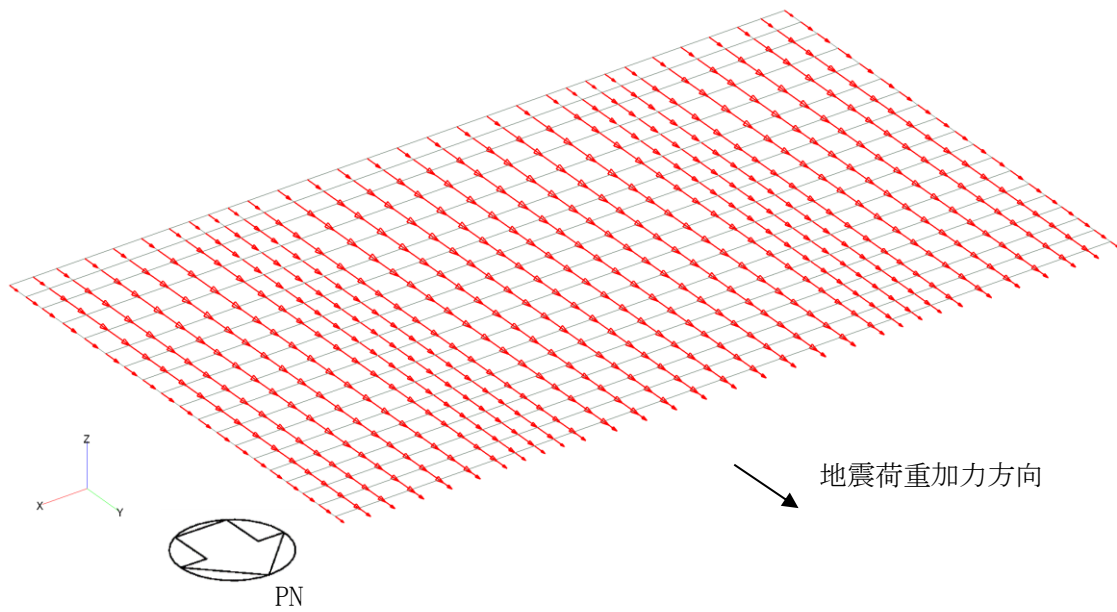
(d) 曲げモーメント (EW方向)

図 2-2(2) FEMモデルに入力する地震荷重

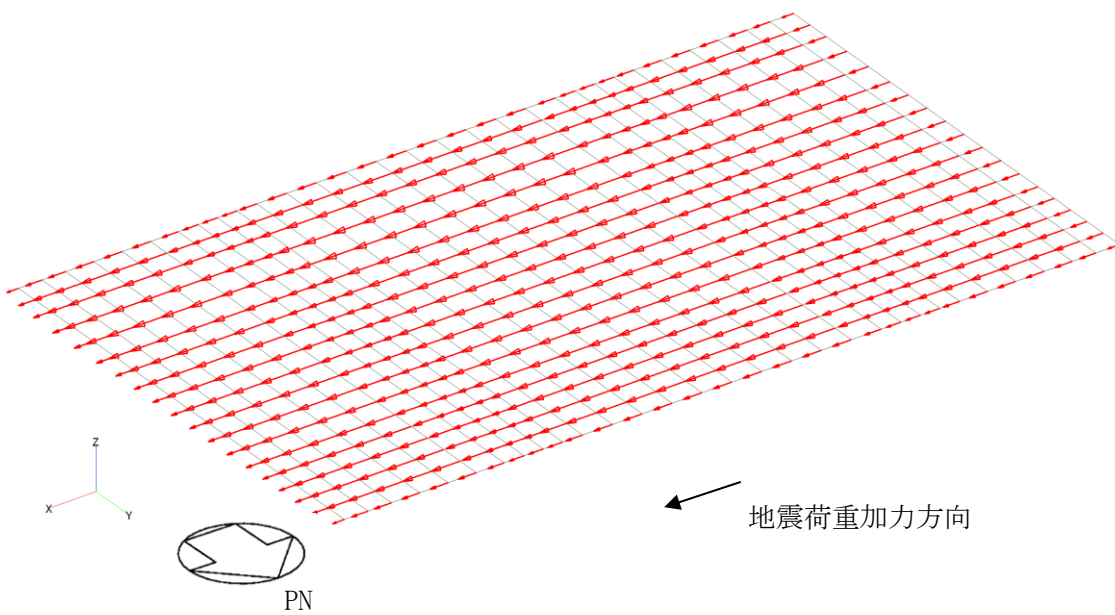


(e) 鉛直力

図 2-2 (3) FEMモデルに入力する地震荷重

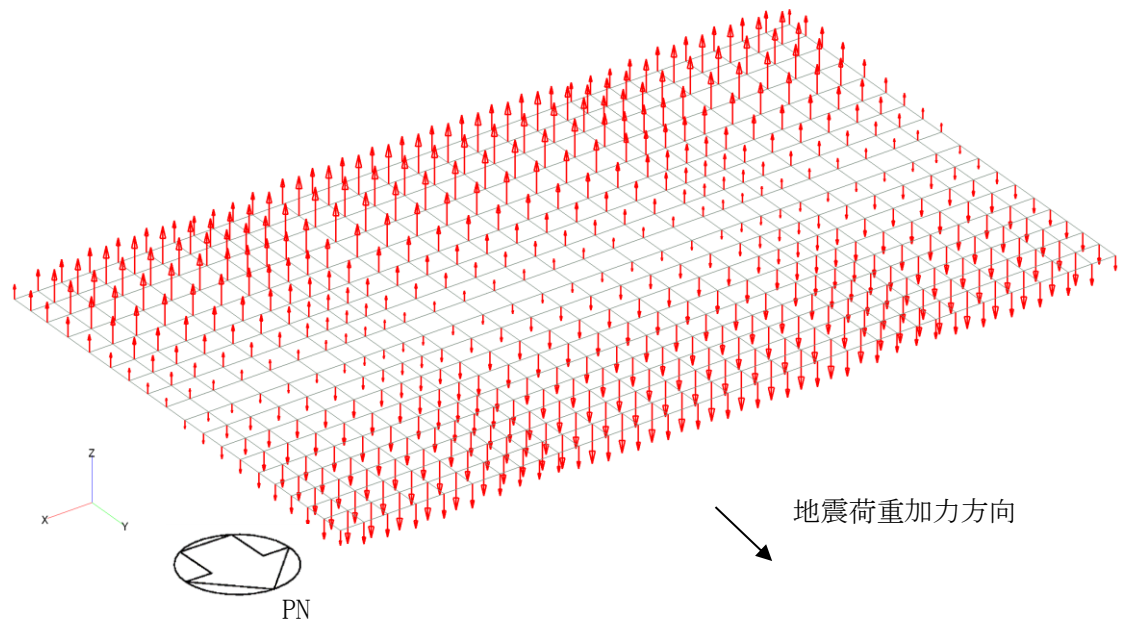


(f) 付加せん断力 (N S方向)

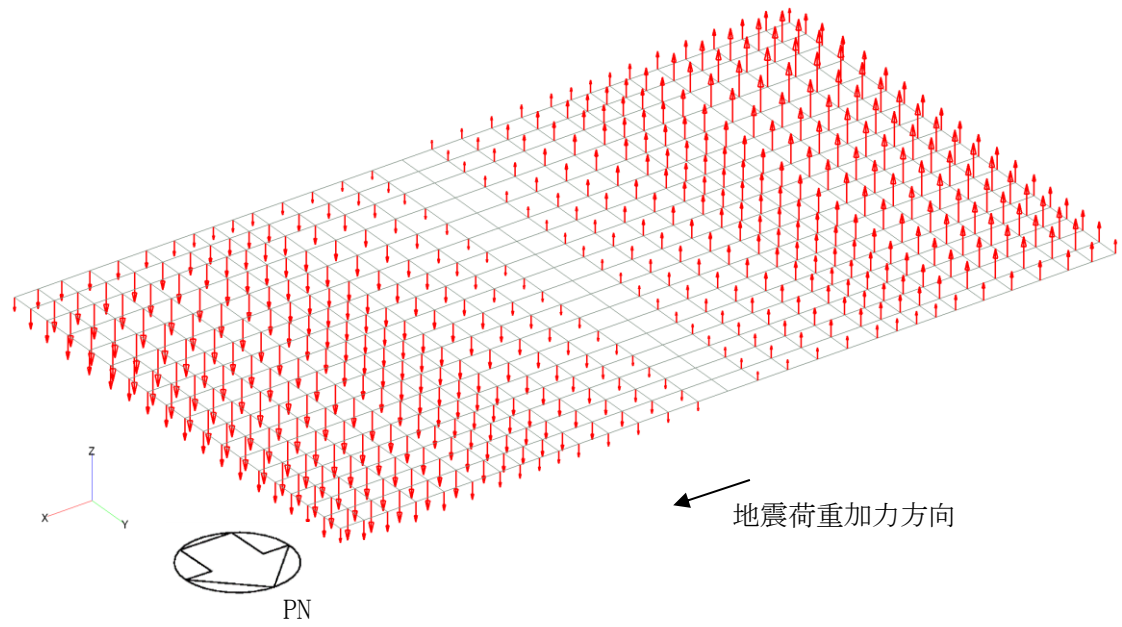


(g) 付加せん断力 (E W方向)

図 2-2(4) F E Mモデルに入力する地震荷重

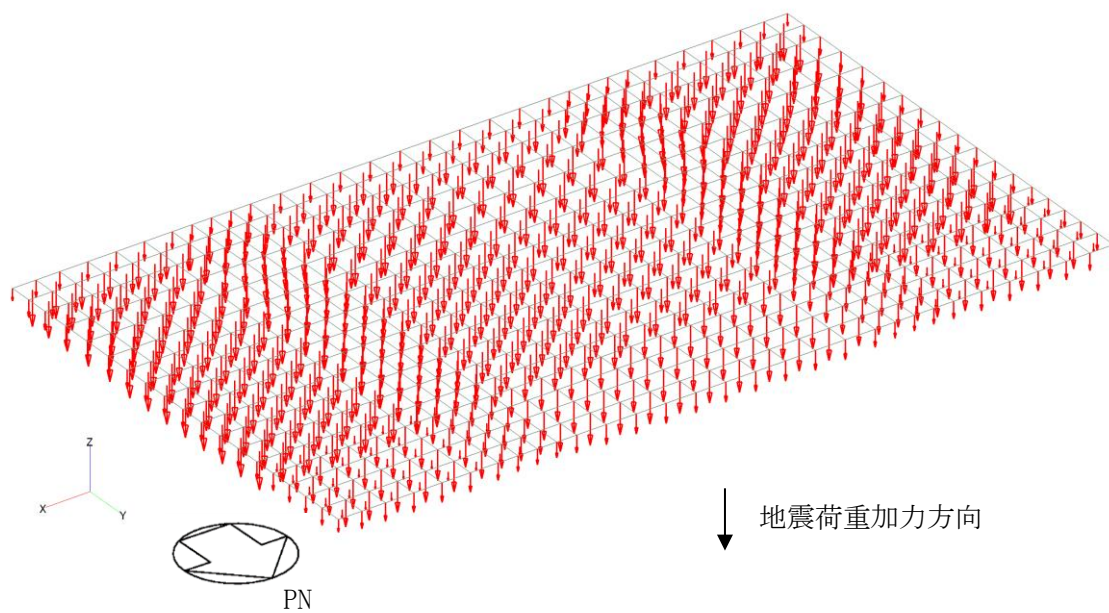


(h) 付加曲げモーメント (N S 方向)



(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 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、制御室建物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

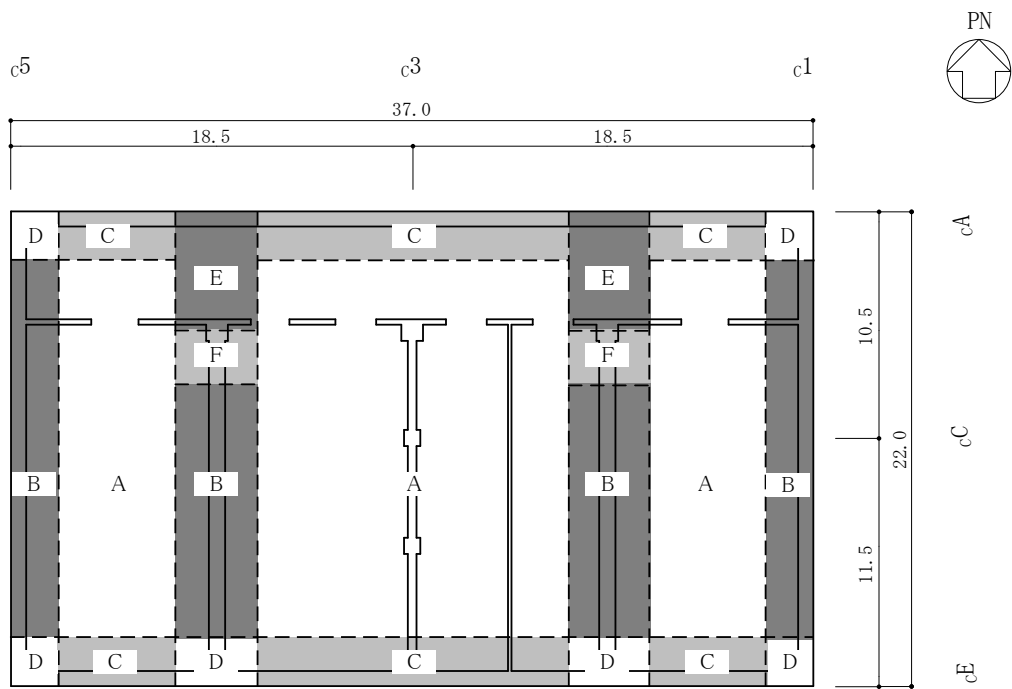
制御室建物の基礎スラブの荷重の組合せケースを表 2-1 に、配筋領域図を図 2-1 に、配筋一覧を表 2-2 に示す。

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カウンター図を図 2-3 に示す。

今回工認では、基準地震動 S_s による入力が増大に伴い、制御室建物の鉄筋コンクリート構造全体としての挙動が塑性域に入ると考えられるため、その塑性域の挙動を適切に評価するために制御室建物の基礎スラブの応力解析に弾塑性解析を採用している。制御室建物は基礎スラブ厚が 1.5m と比較的薄いですが、図 2-3 に示すとおり、基礎スラブに特異な応力分布は生じていないこと及びコンクリート、鉄筋が強非線形領域に至っていないことから、弾塑性解析を採用することは妥当であると考えます。

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



(単位:m)

図 2-1 配筋領域図

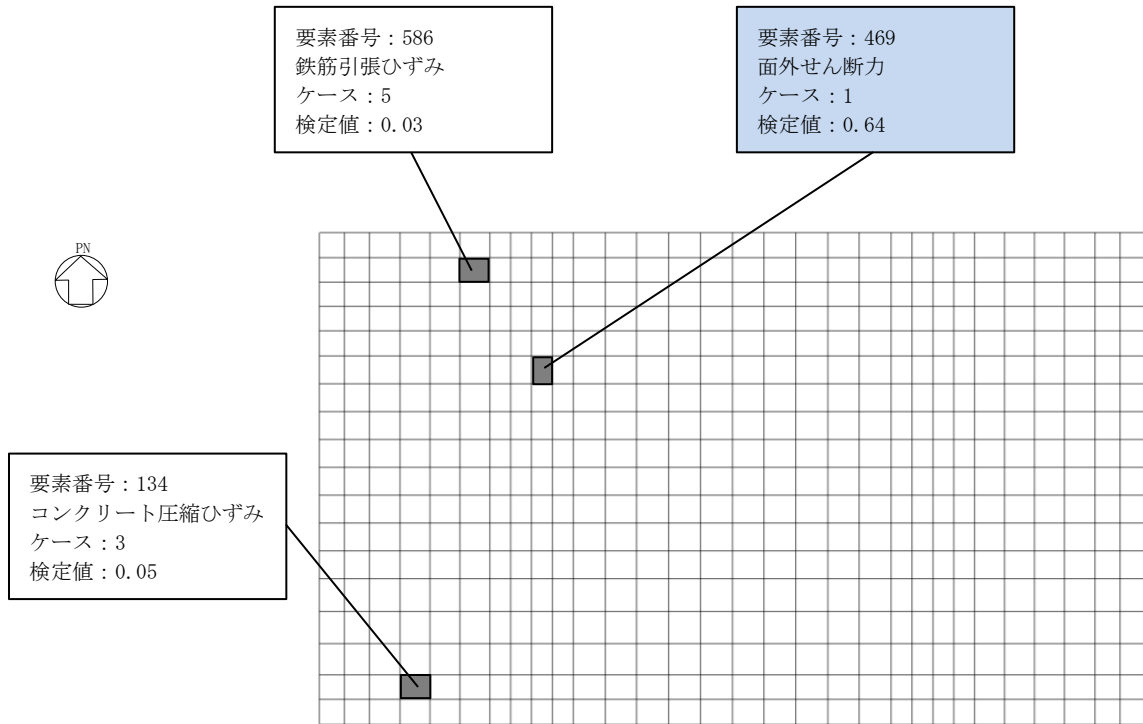
表 2-2 配筋一覧

領域	上ば筋		下ば筋	
	方向	配筋	方向	配筋
A	N S	D25@300	N S	D25@300
	E W	D25@300	E W	D25@300
B	N S	D25@300	N S	D25@300
	E W	D25@300	E W	D25@150
C	N S	D25@300	N S	D25@150
	E W	D25@300	E W	D25@300
D	N S	D25@300	N S	D25@150
	E W	D25@300	E W	D25@150
E	N S	D25 + D32@150 (交互)	N S	D32@150
	E W	D25@300	E W	D25@150
F	N S	D25@300	N S	D32@150
	E W	D25@300	E W	D25@150

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	N S	134	3	0.05
	鉄筋圧縮ひずみ	N S	586	5	0.03
面外せん断力	面外せん断力	E W	469	1	0.64

注：□ は、検定値が最大となる要素を示す。



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

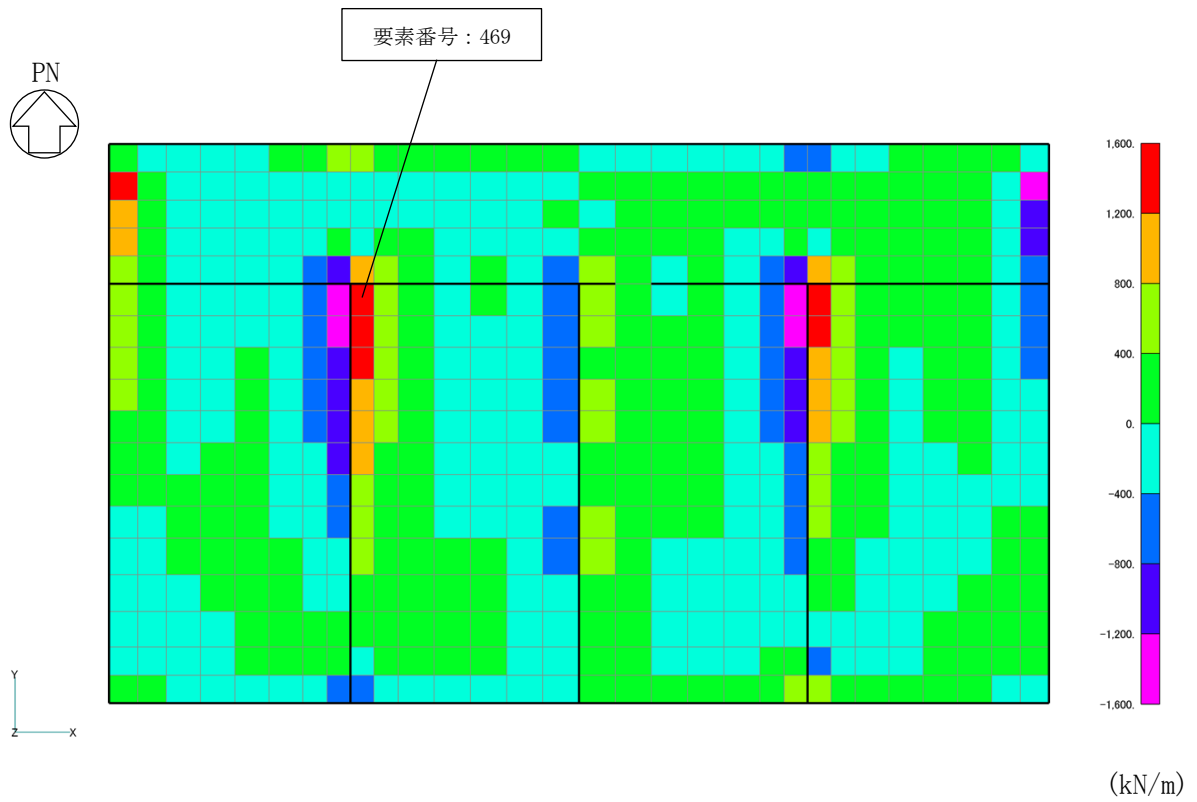


図 2-3 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図

別紙 5 地震応答解析による壁の塑性化に対する影響検討

目 次

1. 概要	別紙 5-1
2. 壁の塑性化に対する影響検討	別紙 5-2
2.1 検討方針	別紙 5-2
2.2 検討方法	別紙 5-2
2.3 解析モデル	別紙 5-4
2.4 検討結果	別紙 5-6
3. まとめ	別紙 5-8

1. 概要

VI-2-2-5「制御室建物の地震応答計算書」に示すように、制御室建物は基準地震動 S_s について弾塑性時刻歴応答解析を実施しており、せん断スケルトン曲線上の最大応答値が第1折点を超え、塑性化する結果となっている。

一方、制御室建物の基礎スラブの応力解析では、VI-2-2-6「制御室建物の耐震性についての計算書」における「4.4 解析モデル及び諸元」に示すように、基礎スラブの積層シェル要素では材料物性の塑性化を考慮しているが、基礎スラブへの拘束効果を考慮するためにモデル化した壁については、弾性部材*としており、塑性化を考慮していない。

本資料は、制御室建物の基礎スラブの応力解析において、地震時の壁の塑性化が基礎スラブの応力に及ぼす影響を検討するものである。

注記*：制御室建物の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。

2. 壁の塑性化に対する影響検討

2.1 検討方針

制御室建物の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。）における壁に対して、地震応答解析に基づく壁の塑性化を考慮したモデル（以下「検討モデル」という。）を用いたS s地震荷重による応力解析を行い、今回工認モデルのS s地震荷重による応力解析結果との比較を行うことで、壁の塑性化に対する影響を検討する。

検討項目は、基礎スラブにおける発生値に対する許容値の比が最も小さくなる面外せん断力とする。

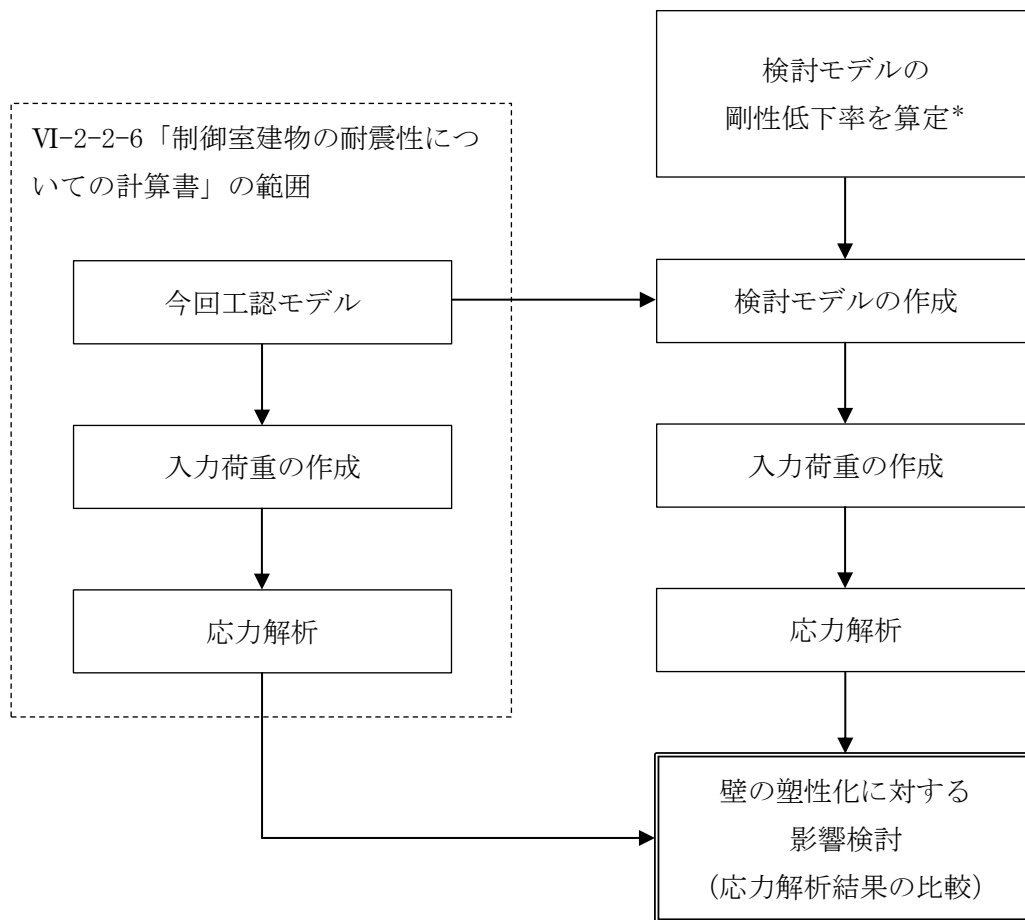
2.2 検討方法

図2-1に壁の塑性化に対する影響検討フローを示す。

まず、検討モデルの剛性低下率を算定する。

次に、今回工認モデルにおける各壁の剛性に対して、検討モデルの剛性低下率を乗じることによって、検討モデルを作成する。入力地震荷重は、今回工認モデルの検討に用いたものと同じとし、解析ケースは、今回工認モデルで検定値が最も厳しい結果となるケース（組合せケース1 EW方向（面外せん断力））を対象とする。

最後に、検討モデルによる応力解析を実施し、今回工認モデルの応力解析結果との比較を行い、壁の塑性化に対する影響を検討する。



注記*：ケース1～ケース4の地震応答解析結果に基づき算定。

図2-1 壁の塑性化に対する影響検討フロー

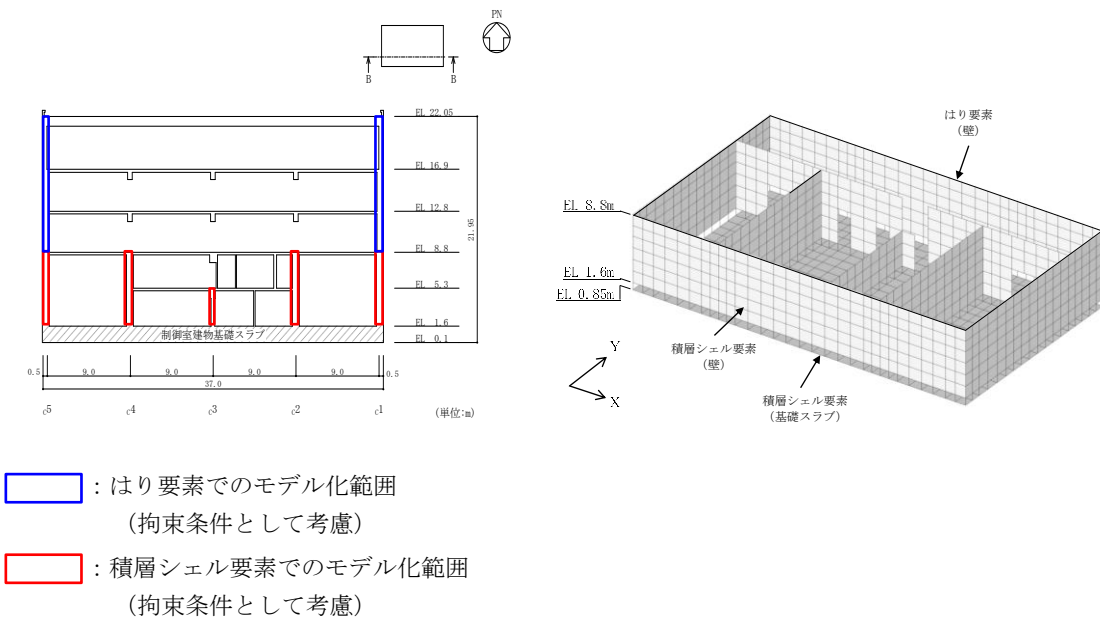
2.3 解析モデル

解析に用いる検討モデルは、図 2-2 に示す今回工認モデルにおける壁の積層シェル要素及びはり要素のヤング係数に対して、検討モデルの剛性低下率を乗じたものとする。

具体的には、検討モデルの剛性低下率を各フロアで統一し、制御室建物の基準地震動 S_s に対する地震応答解析の基本ケース（ケース 1）及び材料物性の不確かさを考慮したケース（ケース 2～ケース 4）における応答値*に基づき算定した各壁部材の剛性低下率のフロアごとの最小値とする。ただし、壁をはり要素でモデル化している EL 8.8m～EL 22.05m については、当該範囲の各壁部材の剛性低下率の最小値とする。

表 2-1 に制御室建物の地震応答解析結果に基づく各壁部材の剛性低下率を、表 2-2 に設定した検討モデルの剛性低下率を示す。

注記*：「NS2-補-024-02 制御室建物の地震応答計算書に関する補足説明資料」の別紙 4-2 「材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果」参照。



注：右図の黒太線は、はり要素を示す。

図 2-2 今回工認モデルの概念図

表 2-1(1) 制御室建物の地震応答解析結果に基づく各壁部材の剛性低下率

(a) N S 方向

EL (m)	剛性低下率
22.05~16.9	0.642
16.9~12.8	0.552
12.8~8.8	0.456
8.8~1.6(C1, C5)	—
8.8~1.6(C2, C4)	—

(b) E W 方向

EL (m)	剛性低下率
22.05~16.9	—
16.9~12.8	0.584
12.8~8.8	0.501
8.8~1.6	0.524

注 1 : 「—」は、塑性化していないことを示す。

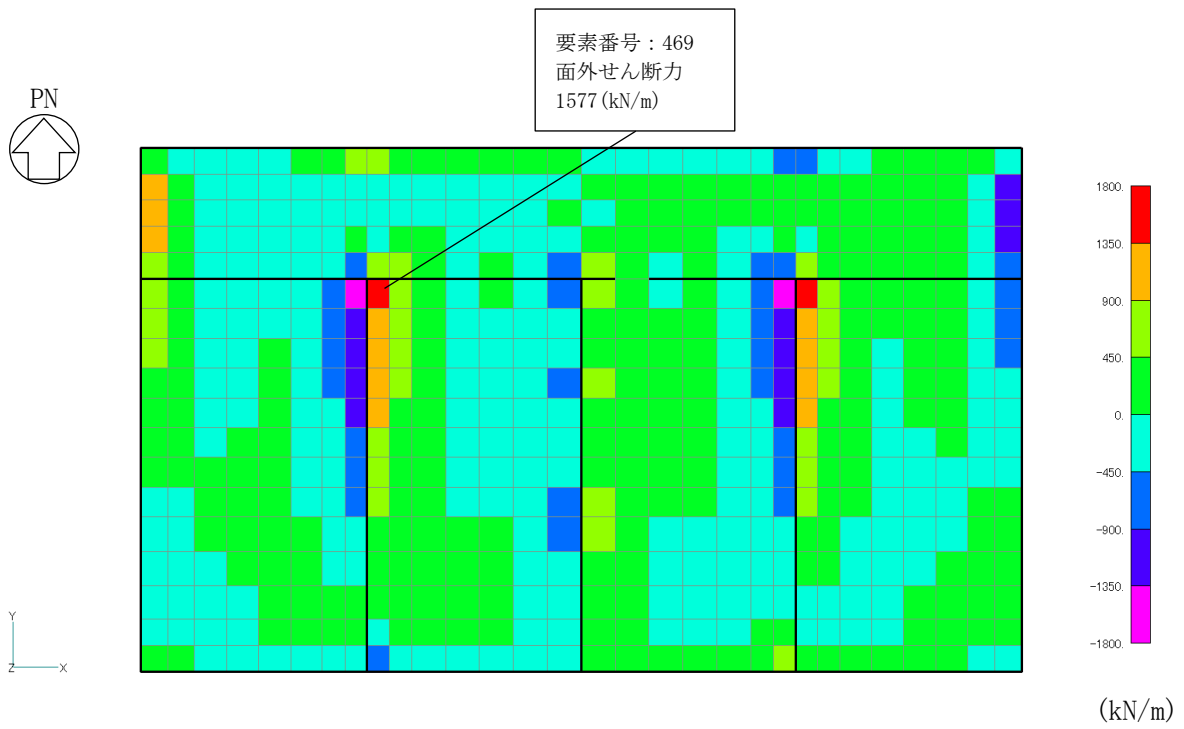
注 2 : EL 1.6m~EL 8.8m は各フロアの最小値 (N S 方向及び E W 方向包絡) を、EL 8.8m~EL 22.05m は当該範囲の最小値 (N S 方向及び E W 方向包絡) をハッチングで示す。

表 2-2 検討モデルの剛性低下率

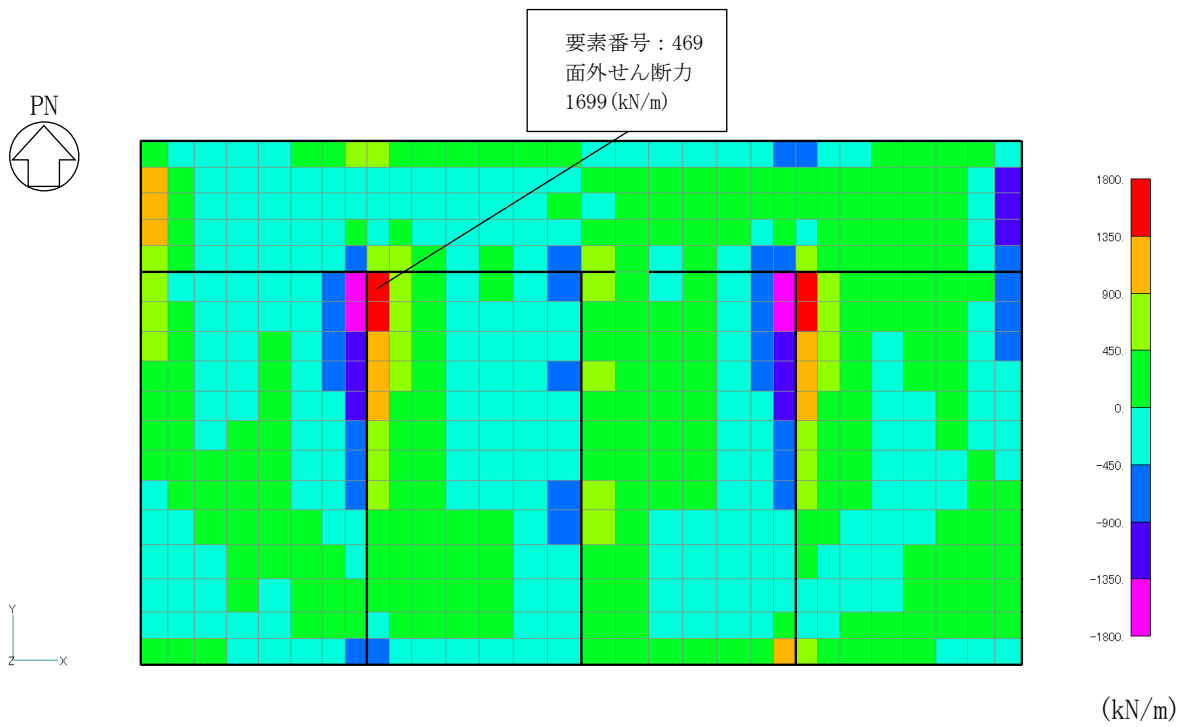
EL (m)	剛性低下率
22.05~8.8	0.456
8.8~1.6	0.524

2.4 検討結果

基礎スラブの面外せん断力のコンター図について、検討モデルの解析結果を、今回工認モデルの解析結果と比較して図 2-3 に示す。基礎スラブの最大面外せん断力は、今回工認モデルよりも検討モデルの方が大きくなるが、許容面外せん断力 ($2.50 \times 10^3 \text{kN/m}$) を下回っている。このことから、壁の塑性化による基礎スラブの耐震性への影響がないことを確認した。



(a) 今回工認モデル



(b) 検討モデル

図 2-3 基礎スラブの面外せん断力のコンター図 (EW方向, ケース 1)

3. まとめ

制御室建物の基礎スラブの応力解析において、地震時の壁の塑性化が基礎スラブの応力に及ぼす影響を検討した。その結果、制御室建物の基礎スラブは、最も壁が塑性化した状態での応力に対して、耐震性を有していることを確認した。

別紙 6 最大接地圧について

目 次

1. 概要	別紙 6-1
2. 接地圧	別紙 6-2

1. 概要

本資料は、制御室建物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 $0.691 \times 10^3 \text{kN/m}^2$ 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	7.69	1.45	0.687
S s - F 1	6.67	1.36	0.652
S s - F 2	6.01	1.25	0.609
S s - N 1	5.71	1.17	0.582
S s - N 2 NS	9.33	1.18	0.602
S s - N 2 EW	9.33	1.19	0.606

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	7.69	2.13	0.624
S s - F 1	6.67	1.80	0.554
S s - F 2	6.01	1.81	0.552
S s - N 1	5.71	1.31	0.450
S s - N 2 NS	9.33	1.12	0.431
S s - N 2 EW	9.33	1.61	0.529

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 ⁴ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (×10 ³ kN/m ²)
S _s -D	7.79	1.44	0.682
S _s -F1	6.82	1.32	0.637
S _s -F2	5.96	1.24	0.607
S _s -N2NS	9.29	1.21	0.613
S _s -N2EW	9.29	1.22	0.617

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 ⁴ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (×10 ³ kN/m ²)
S _s -D	7.79	2.10	0.619
S _s -F1	6.82	1.79	0.552
S _s -F2	5.96	1.79	0.548
S _s -N2NS	9.29	1.10	0.427
S _s -N2EW	9.29	1.58	0.523

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 ⁴ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (×10 ³ kN/m ²)
S _s -D	8.63	1.40	0.673
S _s -F1	6.91	1.29	0.628
S _s -F2	6.12	1.21	0.599
S _s -N2NS	8.74	1.13	0.584
S _s -N2EW	8.74	1.14	0.588

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 ⁴ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (×10 ³ kN/m ²)
S _s -D	8.63	2.12	0.628
S _s -F1	6.91	1.83	0.561
S _s -F2	6.12	1.83	0.557
S _s -N2NS	8.74	1.13	0.431
S _s -N2EW	8.74	1.55	0.514

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 ⁴ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (×10 ³ kN/m ²)
S _s -D	7.75	1.46	0.691
S _s -F1	6.68	1.37	0.655
S _s -F2	6.02	1.26	0.614
S _s -N2NS	9.38	1.18	0.603
S _s -N2EW	9.38	1.19	0.606

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 ⁴ kN)	転倒モーメント M (×10 ⁶ kN・m)	最大接地圧 (×10 ³ kN/m ²)
S _s -D	7.75	2.11	0.622
S _s -F1	6.68	1.83	0.559
S _s -F2	6.02	1.82	0.555
S _s -N2NS	9.38	1.15	0.437
S _s -N2EW	9.38	1.64	0.535

別紙 7 基礎スラブの耐震性への水平 2 方向及び
鉛直方向地震力の組合せの影響について

目 次

1. 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 7-8
7. 評価結果	別紙 7-8
8. まとめ	別紙 7-13

1. 概要

制御室建物の基礎スラブは、矩形であり直交する水平 2 方向の荷重が隅部に応力集中する可能性がある。また、VI-2-2-6「制御室建物の耐震性についての計算書」（以下「耐震計算書」という。）における基礎スラブの応力解析においては、基礎スラブ底面の地盤ばねについて、建物基礎底面と地盤の間の付着力 0.40N/mm^2 を超える引張力が発生したときに浮上りを考慮することとしており、直交する水平 2 方向の荷重による基礎浮上りにより応力分布に影響を及ぼす可能性がある。以上のことから、本資料では、 S_s 地震時を対象として水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せによる耐震性への影響を検討する。

制御室建物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。

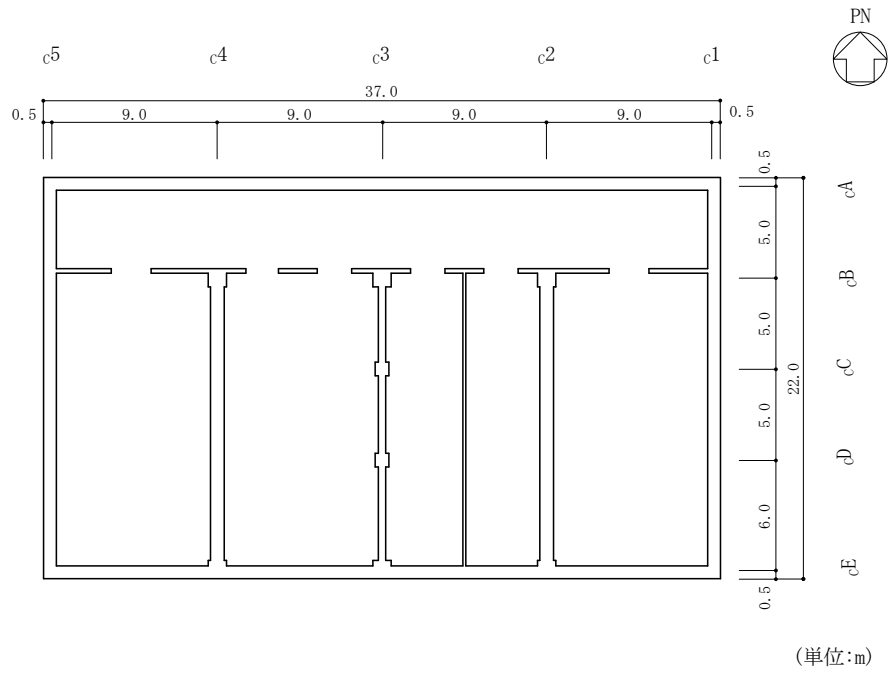


図 1-1 制御室建物の概略平面図 (EL 1.6m*)

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。

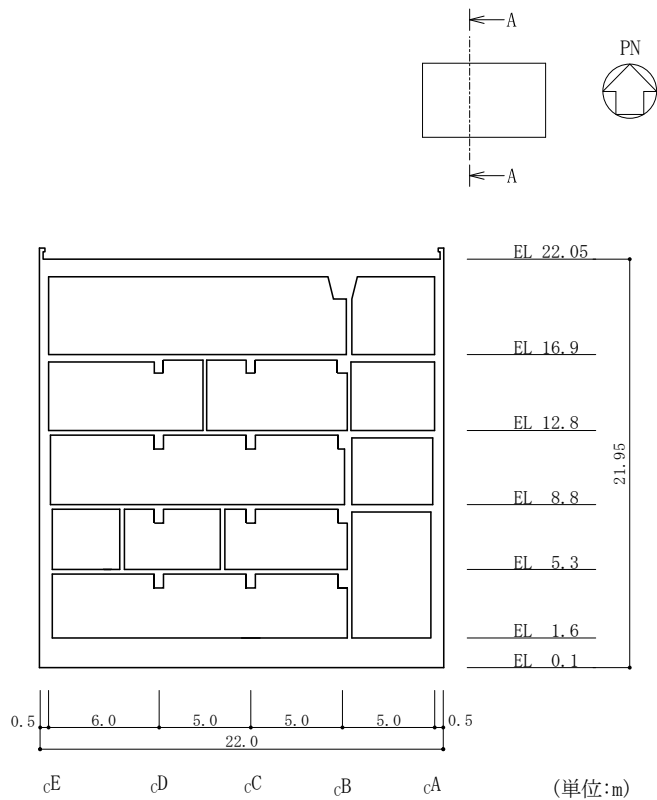


図 1-2(1) 制御室建物の概略断面図 (A-A断面, NS方向)

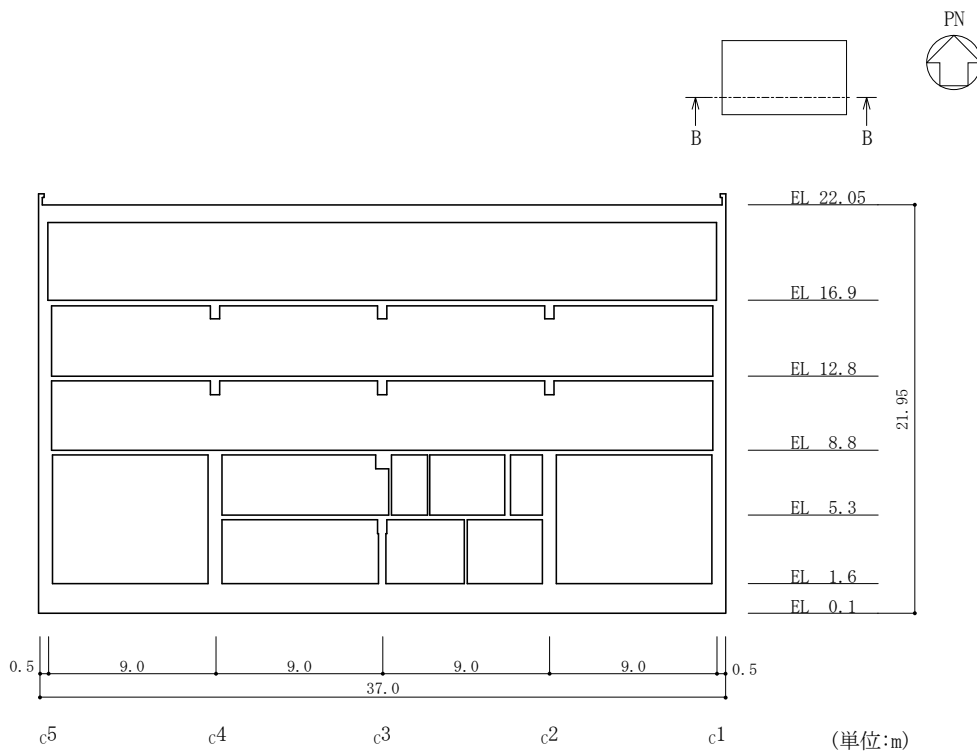


図 1-2(2) 制御室建物の概略断面図 (B-B断面, EW方向)

2. 検討方針

水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せの影響評価として、制御室建物の基礎スラブについて評価を行う。

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、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、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、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

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、耐震計算書の「4.3 許容限界」に示す内容と同一である。

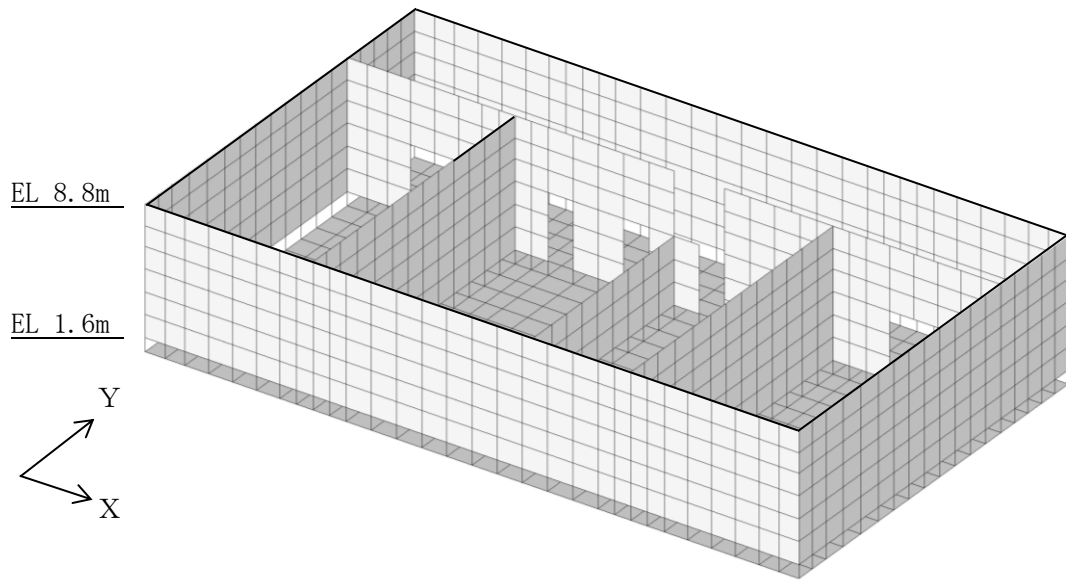
5. 応力解析

解析モデル図を図 5-1 に示す。解析モデルの詳細は、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。

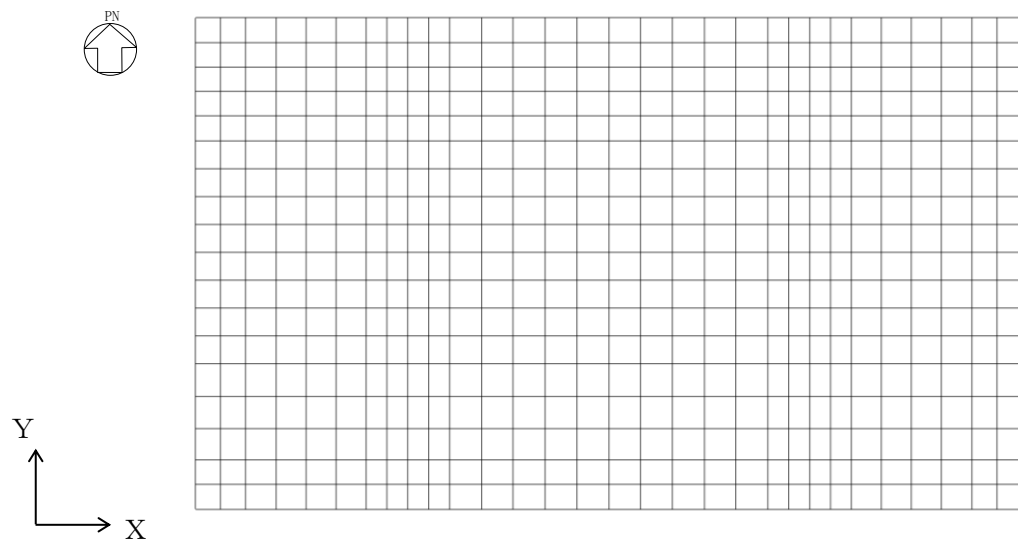
S s 地震時の応力は、耐震計算書の「4.5.1 応力解析方法」に示す、次の荷重ケースによる応力を組み合わせて求める。

G	: 固定荷重
P	: 積載荷重
S s SN	: S→N方向 S s 地震荷重
S s NS	: N→S方向 S s 地震荷重
S s EW	: E→W方向 S s 地震荷重
S s WE	: W→E方向 S s 地震荷重
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

水平地震力と鉛直地震力による応力の組合せは、米国 Regulatory Guide 1.92 の「2. Combining Effects Caused by Three Spatial Components of an Earthquake」を参考に、組合せ係数法（1.0 : 0.4 : 0.4）に基づいて評価する。荷重の組合せケースを表 5-1 に示す。



(a) 全体鳥瞰図



(b) 基礎スラブ要素分割図

図 5-1 解析モデル

表 5-1 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	2-1	$G + P + 1.0 S_{SN} + 0.4 S_{EW} + 0.4 S_{UD}$
	2-2	$G + P + 1.0 S_{SN} + 0.4 S_{EW} + 0.4 S_{DU}$
	2-3	$G + P + 1.0 S_{SN} + 0.4 S_{WE} + 0.4 S_{UD}$
	2-4	$G + P + 1.0 S_{SN} + 0.4 S_{WE} + 0.4 S_{DU}$
	2-5	$G + P + 1.0 S_{NS} + 0.4 S_{EW} + 0.4 S_{UD}$
	2-6	$G + P + 1.0 S_{NS} + 0.4 S_{EW} + 0.4 S_{DU}$
	2-7	$G + P + 1.0 S_{NS} + 0.4 S_{WE} + 0.4 S_{UD}$
	2-8	$G + P + 1.0 S_{NS} + 0.4 S_{WE} + 0.4 S_{DU}$
	2-9	$G + P + 0.4 S_{SN} + 1.0 S_{EW} + 0.4 S_{UD}$
	2-10	$G + P + 0.4 S_{SN} + 1.0 S_{EW} + 0.4 S_{DU}$
	2-11	$G + P + 0.4 S_{SN} + 1.0 S_{WE} + 0.4 S_{UD}$
	2-12	$G + P + 0.4 S_{SN} + 1.0 S_{WE} + 0.4 S_{DU}$
	2-13	$G + P + 0.4 S_{NS} + 1.0 S_{EW} + 0.4 S_{UD}$
	2-14	$G + P + 0.4 S_{NS} + 1.0 S_{EW} + 0.4 S_{DU}$
	2-15	$G + P + 0.4 S_{NS} + 1.0 S_{WE} + 0.4 S_{UD}$
	2-16	$G + P + 0.4 S_{NS} + 1.0 S_{WE} + 0.4 S_{DU}$
	2-17	$G + P + 0.4 S_{SN} + 0.4 S_{EW} + 1.0 S_{UD}$
	2-18	$G + P + 0.4 S_{SN} + 0.4 S_{EW} + 1.0 S_{DU}$
	2-19	$G + P + 0.4 S_{SN} + 0.4 S_{WE} + 1.0 S_{UD}$
	2-20	$G + P + 0.4 S_{SN} + 0.4 S_{WE} + 1.0 S_{DU}$
	2-21	$G + P + 0.4 S_{NS} + 0.4 S_{EW} + 1.0 S_{UD}$
	2-22	$G + P + 0.4 S_{NS} + 0.4 S_{EW} + 1.0 S_{DU}$
	2-23	$G + P + 0.4 S_{NS} + 0.4 S_{WE} + 1.0 S_{UD}$
	2-24	$G + P + 0.4 S_{NS} + 0.4 S_{WE} + 1.0 S_{DU}$

6. 評価方法

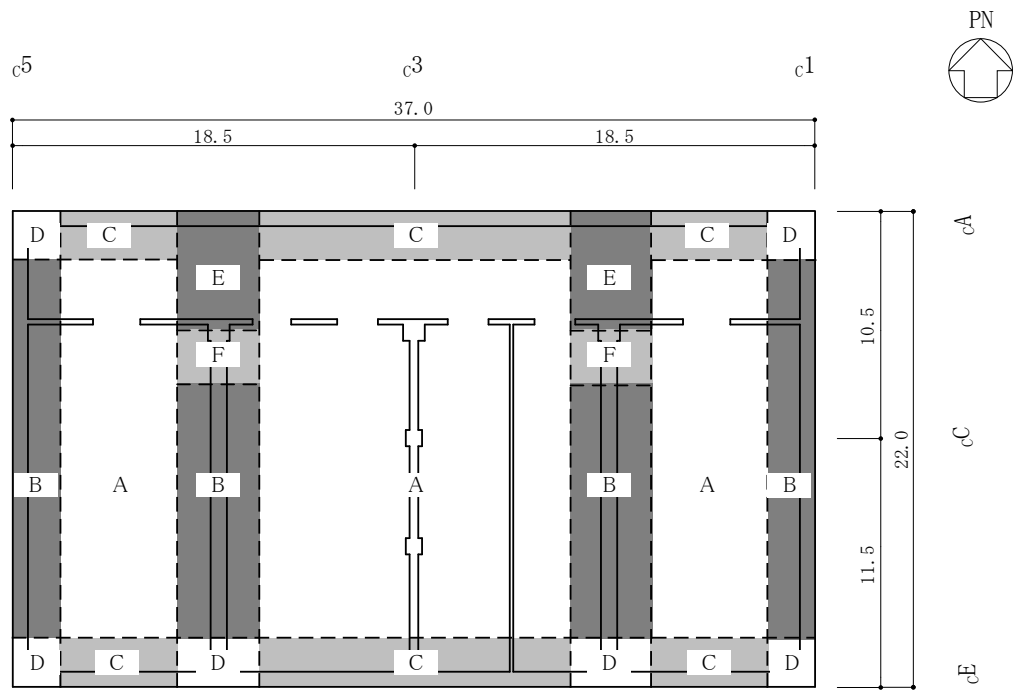
基礎スラブの断面の評価は、耐震計算書の「4.5.2 断面の評価方法」に示す方法と同一である。

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を図7-1に、配筋一覧を表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。また、接地率が最小となるケースの基礎スラブの地反力分布及び接地率について、水平1方向及び鉛直方向地震力の組合せの場合とともに図7-3に示す。

Ss地震時における水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せにおいて、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。



(単位:m)

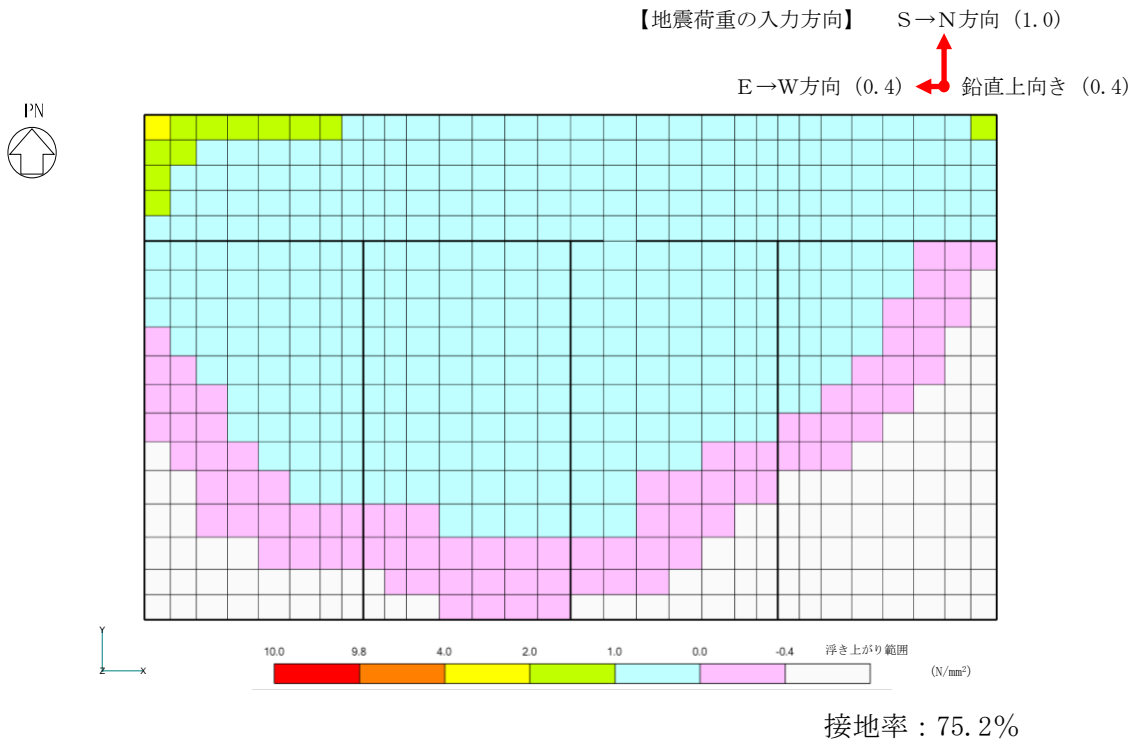
図 7-1 配筋領域図

表 7-1 配筋一覧

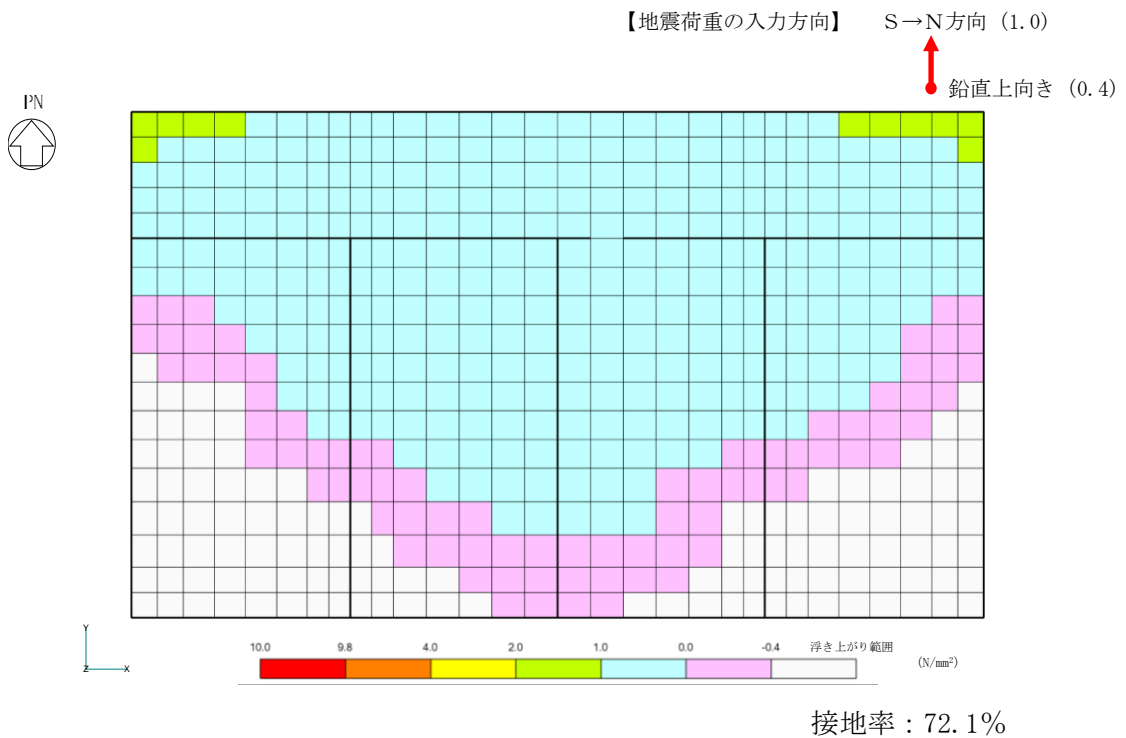
領域	上ば筋		下ば筋	
	方向	配筋	方向	配筋
A	N S	D25@300	N S	D25@300
	E W	D25@300	E W	D25@300
B	N S	D25@300	N S	D25@300
	E W	D25@300	E W	D25@150
C	N S	D25@300	N S	D25@150
	E W	D25@300	E W	D25@300
D	N S	D25@300	N S	D25@150
	E W	D25@300	E W	D25@150
E	N S	D25 + D32@150 (交互)	N S	D32@150
	E W	D25@300	E W	D25@150
F	N S	D25@300	N S	D32@150
	E W	D25@300	E W	D25@150

表 7-2 評価結果

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 ($\times 10^{-3}$)	N S	157	2-7	0.159	3.00
	鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$)	N S	606	2-11	0.196	5.00
面外せん断力	面外せん断力 ($\times 10^3 \text{kN/m}$)	E W	131	2-5	1.80	2.50



(a) 水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せ (ケース : 2-2)



(b) 水平1方向及び鉛直方向地震力の組合せ (ケース : 2)

注1 : 接地率は、基礎スラブと底面地盤が剥離していないギャップ要素の支配面積を基礎底面全体の面積で除して算定した値。

注2 : コンター図は、各要素を構成する節点における地盤ばね反力の平均値を要素面積で除して算定した接地圧を示す。

図7-3 接地圧分布及び接地率

8. まとめ

制御室建物の基礎スラブについて、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対して、3次元 FEMモデルを用いた応力解析を実施した。

検討の結果、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、水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに対し、制御室建物の基礎スラブが有する耐震性への影響はないことを確認した。

別紙 8 側面地盤ばねを考慮した地震応答解析による
設計用地震力への影響について

目 次

1. 概要	別紙 8-1
2. 検討に用いる地震波及び地震応答解析モデル	別紙 8-2
3. 側面地盤ばねを考慮した場合の解析結果	別紙 8-6

別紙 8-1 側面地盤ばねの適用性について

1. 概要

VI-2-2-5「制御室建物の地震応答計算書」（以下「地震応答計算書」という。）では、基礎スラブ側面の地盤ばね（水平及び回転）は考慮しない地震応答解析モデル（以下「今回工認モデル」という。）を採用して地震応答解析を行っている。

一方、制御室建物の基礎スラブの応力解析においては、VI-2-2-6「制御室建物の耐震性についての計算書」（以下「耐震計算書」という。）に示すとおり、基礎スラブをモデル化したシェル要素の建物外周にあたる周囲部分に、基礎側面地盤の拘束効果を考慮している。この拘束効果は、基礎スラブ側面に接する側面地盤（MMR*含む）又は隣接建物基礎スラブを考慮して設定しているばねであり、Novakの手法により評価した水平及び回転ばねを等価な水平方向及び鉛直方向ばねに置換したものである。

本資料では、基礎スラブ側面の地盤ばねを考慮した地震応答解析モデル（以下「側面地盤ばね考慮モデル」という。）による地震応答解析を行い、今回工認モデルに基づく最大応答値と比較することで、地震応答解析に基礎スラブ側面の地盤ばねを考慮しないことが保守的な評価となることを確認するものである。

注記*：マンメイドロック（人工岩盤）の略称

2. 検討に用いる地震波及び地震応答解析モデル

側面地盤ばねを設定した検討は、基準地震動 S_s のうち位相特性の偏りがなく、全周期帯において安定した応答を生じさせる基準地震動 $S_s - D$ に対して実施することとし、N S 方向及び E W 方向モデルに対して実施する。

側面地盤ばねの算定に用いる解析用物性値は、制御室建物の基礎スラブに接する隣接建物基礎スラブのコンクリートの物性値とし、保守的にコンクリート強度が小さい 1 号機建物のコンクリートの設計基準強度に基づき設定する。また、側面地盤ばね以外の地震応答解析モデルの諸元は今回工認モデル（基本ケース）と同一とする。

側面地盤ばねを含む地盤ばね定数と減衰係数の算定結果を表 2-1 に、側面地盤ばね考慮モデルを図 2-1 に示す。

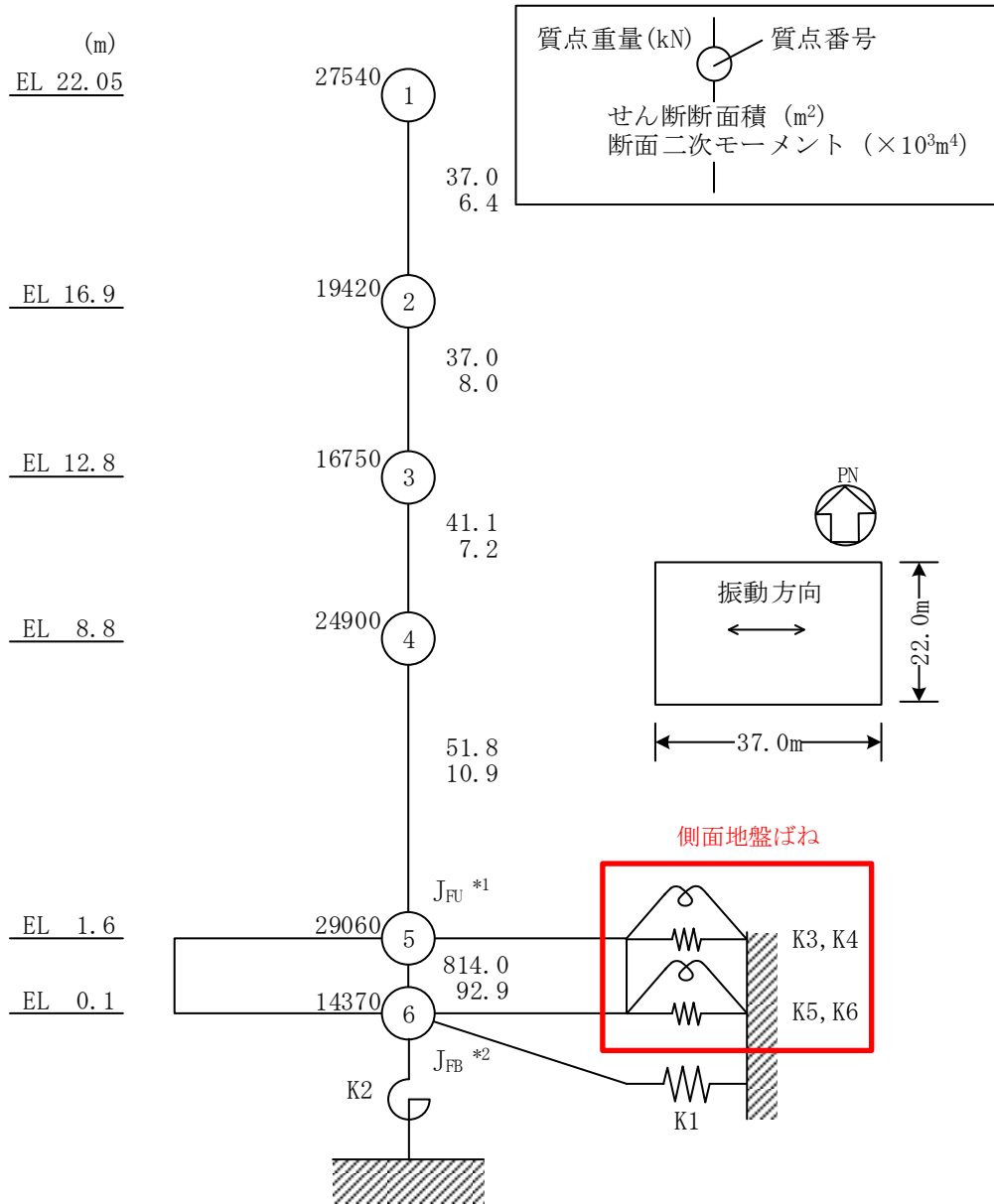
表2-1 地盤ばね定数と減衰係数（水平方向）

(a) NS方向

ばね番号	地盤ばね成分	質点番号	ばね定数 K c	減衰係数 C c
K1	底面・水平	6	5.10×10^8 (kN/m)	2.84×10^6 (kN・s/m)
K2	底面・回転	6	7.45×10^{10} (kN・m/rad)	2.15×10^7 (kN・m・s/rad)
K3	側面・水平	5	2.04×10^7 (kN/m)	4.97×10^5 (kN・s/m)
K4	側面・回転	5	4.79×10^9 (kN・m/rad)	1.82×10^7 (kN・m・s/rad)
K5	側面・水平	6	2.40×10^7 (kN/m)	5.83×10^5 (kN・s/m)
K6	側面・回転	6	5.61×10^9 (kN・m/rad)	2.14×10^7 (kN・m・s/rad)

(b) EW方向

ばね番号	地盤ばね成分	質点番号	ばね定数 K c	減衰係数 C c
K1	底面・水平	6	4.86×10^8 (kN/m)	2.58×10^6 (kN・s/m)
K2	底面・回転	6	1.57×10^{11} (kN・m/rad)	1.20×10^8 (kN・m・s/rad)
K3	側面・水平	5	2.04×10^7 (kN/m)	4.77×10^5 (kN・s/m)
K4	側面・回転	5	4.79×10^9 (kN・m/rad)	2.07×10^7 (kN・m・s/rad)
K5	側面・水平	6	2.40×10^7 (kN/m)	5.59×10^5 (kN・s/m)
K6	側面・回転	6	5.61×10^9 (kN・m/rad)	2.43×10^7 (kN・m・s/rad)



注記*1：回転慣性重量（基礎スラブ上端）（ $13.42 \times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}^2$ ）

*2：回転慣性重量（基礎スラブ下端）（ $1.64 \times 10^6 \text{kN} \cdot \text{m}^2$ ）

図2-1(2) 側面地盤ばね考慮モデル（EW方向）

3. 側面地盤ばねを考慮した場合の解析結果

側面地盤ばね考慮モデルと今回工認モデルの地震応答解析の応答値の比較結果を示す。最大応答加速度、最大応答せん断力及び最大応答曲げモーメントを図3-1～図3-6に、加速度応答スペクトルの比較を図3-7及び図3-8に示す。

最大応答加速度分布については、概ね同等の結果となっている。

最大応答せん断力分布及び最大応答曲げモーメント分布については、今回工認モデルの結果が側面地盤ばね考慮モデルの結果を包絡している。

各階の床面における加速度応答スペクトルについては、スペクトル形状及び応答レベルが同等であることを確認した。

側面地盤ばね考慮モデルの結果が今回工認モデルの結果を一部上回るものの、耐震計算書に示す最大応答せん断ひずみは 0.60×10^{-3} であり評価基準値 (2.0×10^{-3}) に対して十分な余裕があることから、耐震性への影響はないと判断する。また、床面における加速度応答スペクトルの形状及び応答レベルが同等であることから、機器・配管系の耐震性への影響はないと判断する。なお、基礎スラブの応力解析では、1F (EL 1.6m～EL 8.8m) の最大応答せん断力及び最大応答曲げモーメントを用いることを考慮すると、地震応答解析において側面地盤ばねを考慮しないことは保守的な評価となる。

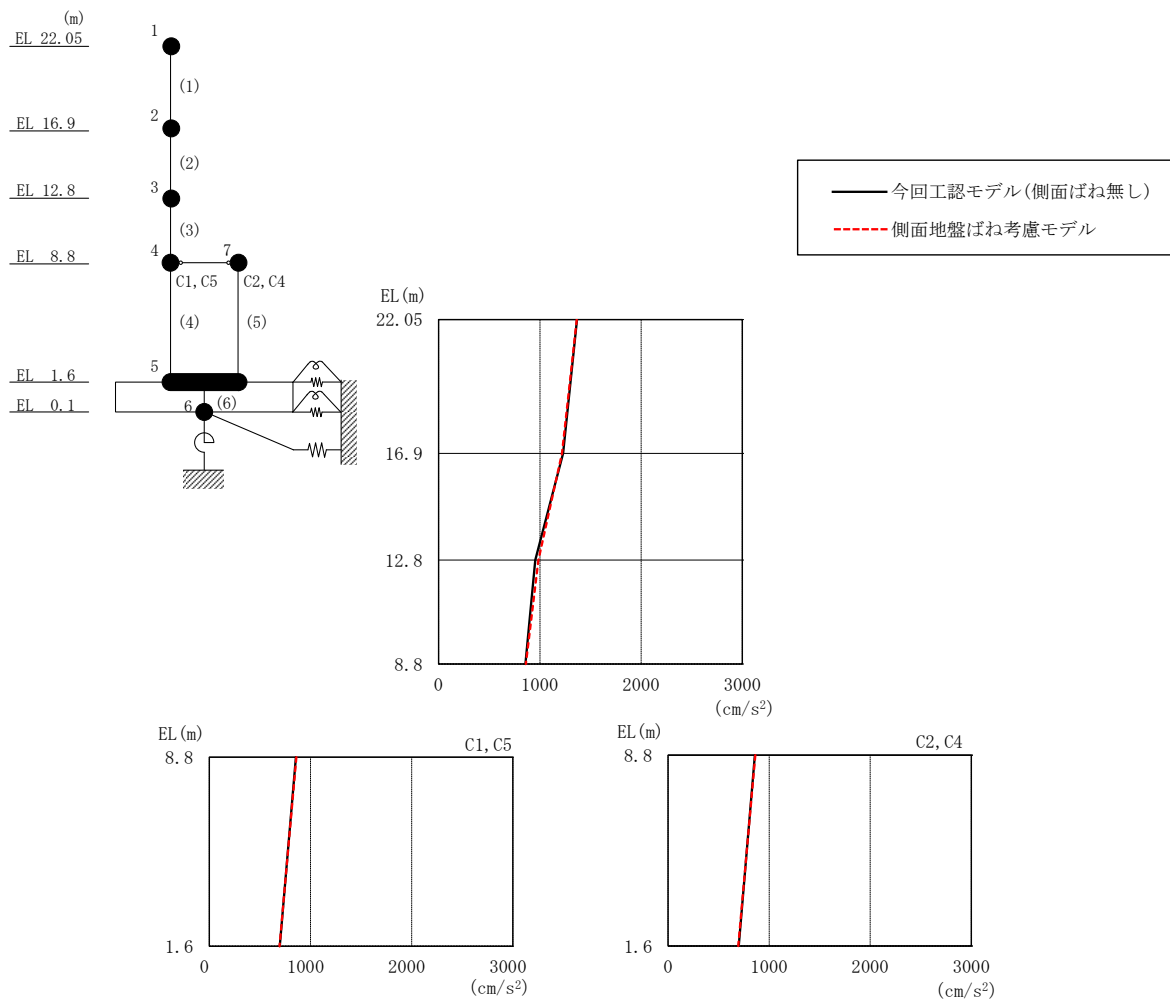


図 3-1 最大応答加速度 (基準地震動 $S_s - D$, NS 方向)

表 3-1 最大応答加速度一覧 (基準地震動 $S_s - D$, NS 方向)

EL (m)	質点番号	最大応答加速度 (cm/s^2)	
		今回工認モデル (側面ばね無し)	側面地盤ばね 考慮モデル
22.05	1	1367	1364
16.9	2	1229	1217
12.8	3	955	985
8.8 (C1, C5)	4	858	862
1.6	5	698	695
8.8 (C2, C4)	7	858	862

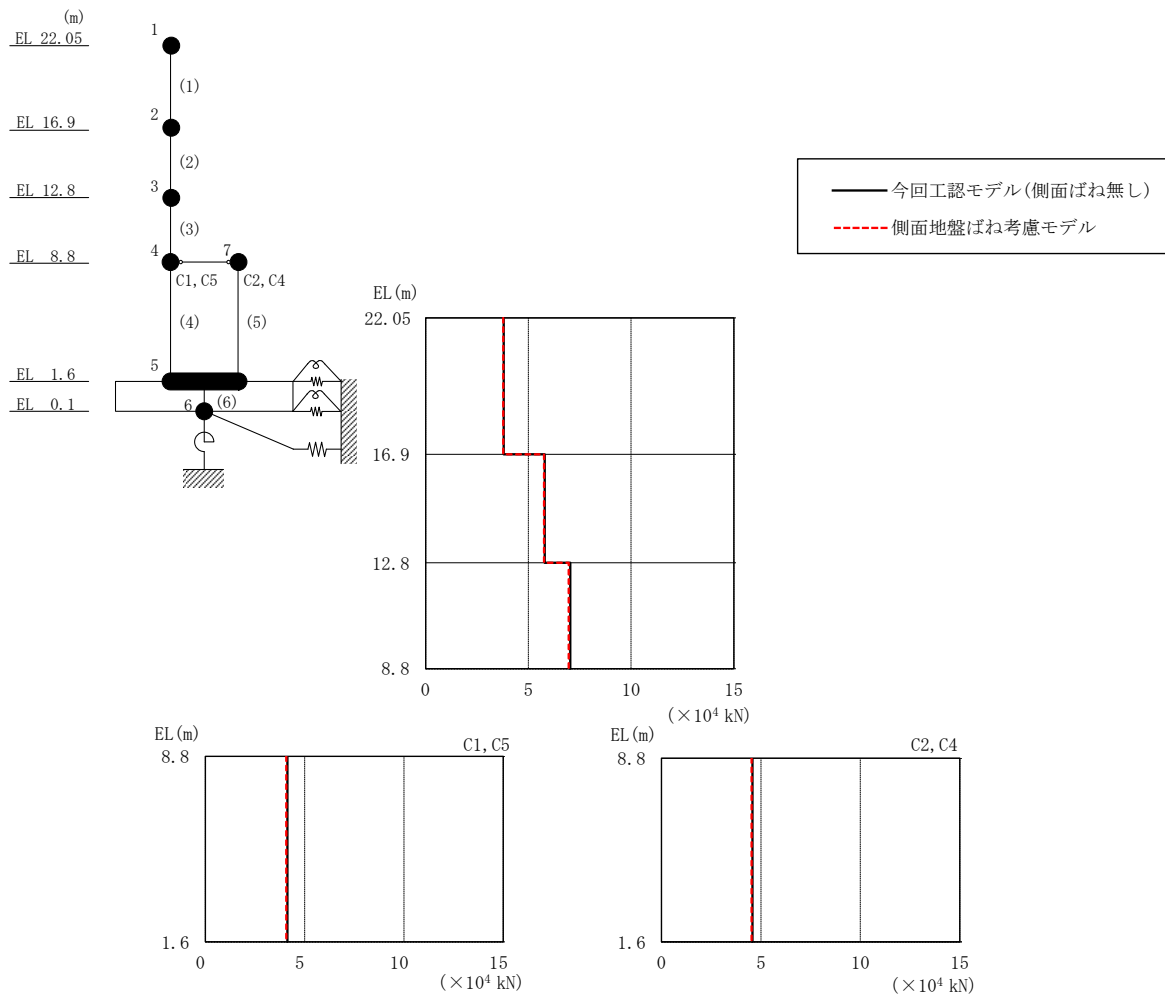


図 3-2 最大応答せん断力 (基準地震動 S s -D, NS 方向)

表 3-2 最大応答せん断力一覧 (基準地震動 S s -D, NS 方向)

EL (m)	要素番号	最大応答せん断力 ($\times 10^4$ kN)	
		今回工認モデル (側面ばね無し)	側面地盤ばね 考慮モデル
22.05~16.9	1	3.80	3.77
16.9~12.8	2	5.80	5.76
12.8~8.8	3	7.04	6.97
8.8~1.6 (C1, C5)	4	4.13	4.07
8.8~1.6 (C2, C4)	5	4.57	4.52

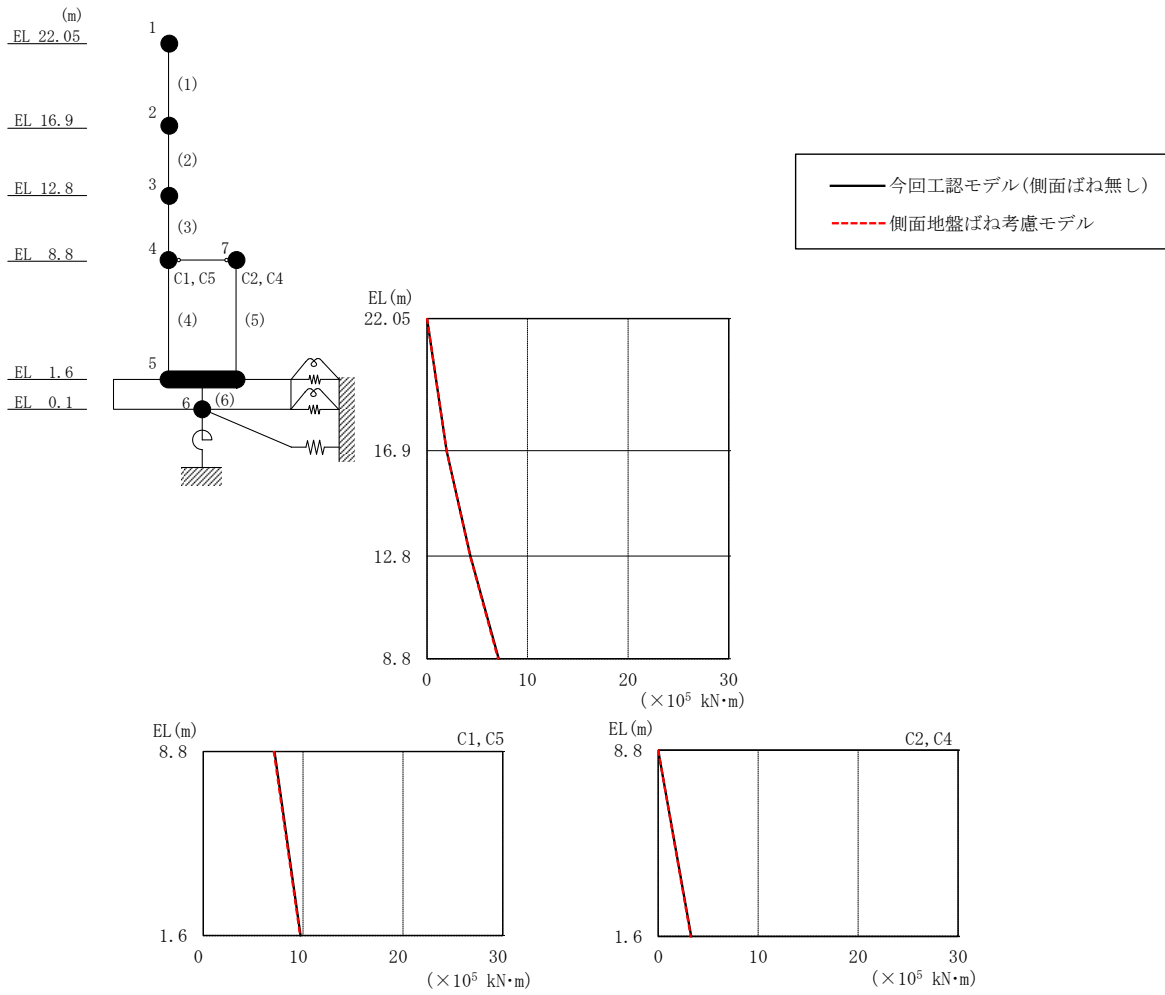


図 3-3 最大応答曲げモーメント (基準地震動 S s - D, NS 方向)

表 3-3 最大応答曲げモーメント一覧 (基準地震動 S s - D, NS 方向)

EL (m)	要素番号	最大応答曲げモーメント ($\times 10^5$ kN·m)	
		今回工認モデル (側面ばね無し)	側面地盤ばね考慮モデル
22.05~16.9	1	0.00	0.00
		1.96	1.94
16.9~12.8	2	1.96	1.94
		4.32	4.29
12.8~8.8	3	4.32	4.29
		7.12	7.06
8.8~1.6 (C1, C5)	4	7.12	7.06
		9.75	9.69
8.8~1.6 (C2, C4)	5	0.00	0.00
		3.29	3.26

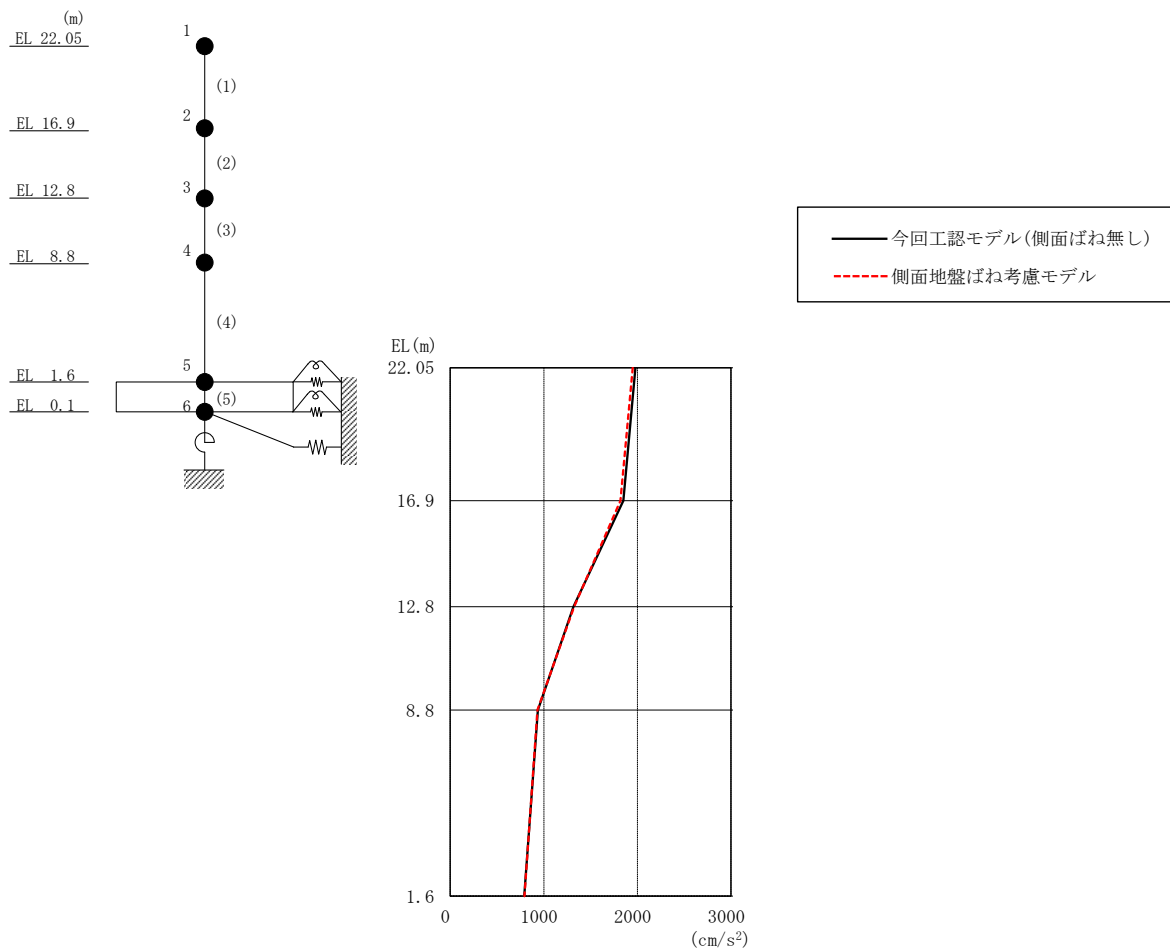


図 3-4 最大応答加速度（基準地震動 S s - D，EW 方向）

表 3-4 最大応答加速度一覧（基準地震動 S s - D，EW 方向）

EL (m)	質点 番号	最大応答加速度 (cm/s^2)	
		今回工認モデル (側面ばね無し)	側面地盤ばね 考慮モデル
22.05	1	1979	1949
16.9	2	1849	1819
12.8	3	1315	1323
8.8	4	938	933
1.6	5	790	793

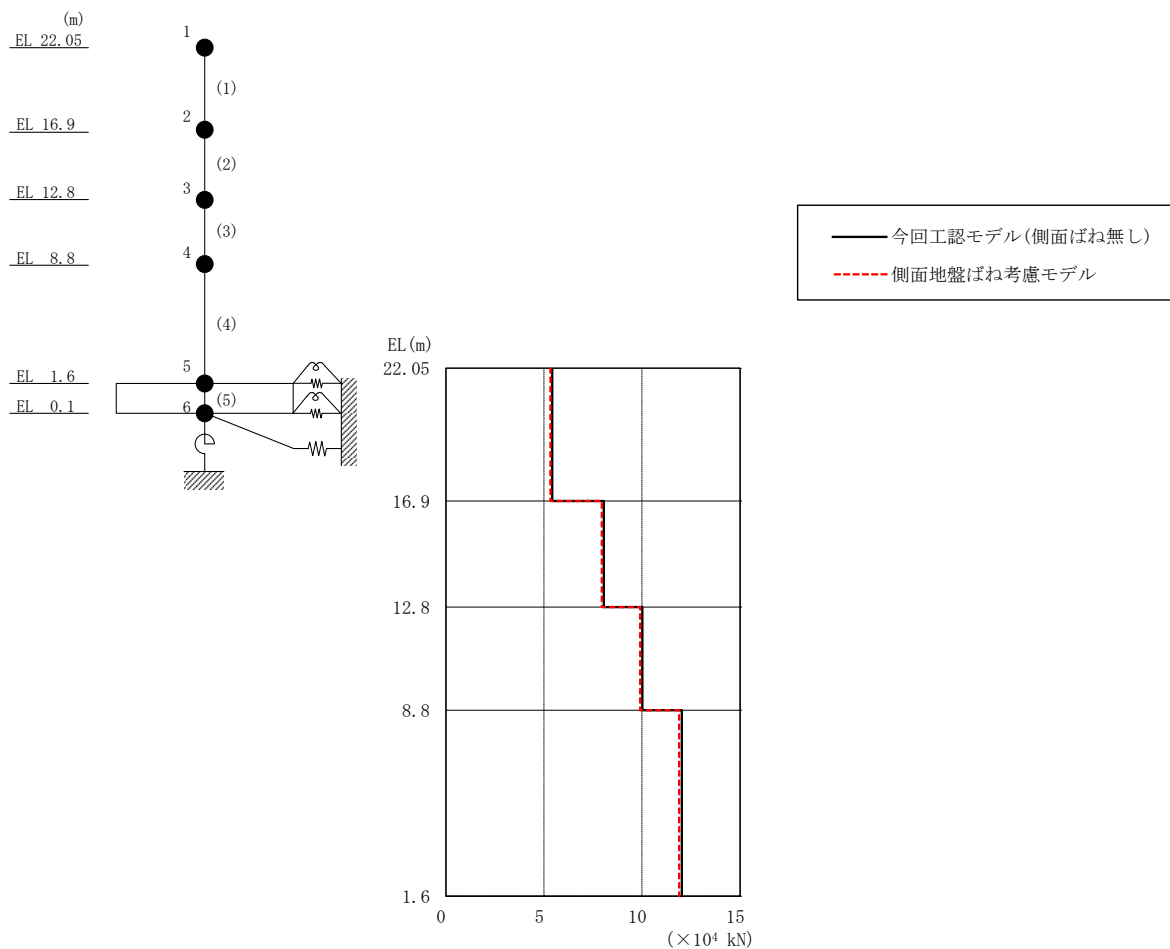


図 3-5 最大応答せん断力 (基準地震動 S_s-D, EW方向)

表 3-5 最大応答せん断力一覧 (基準地震動 S_s-D, EW方向)

EL (m)	要素 番号	最大応答せん断力 ($\times 10^4$ kN)	
		今回工認モデル (側面ばね無し)	側面地盤ばね 考慮モデル
22.05~16.9	1	5.42	5.33
16.9~12.8	2	8.05	7.95
12.8~8.8	3	10.0	9.90
8.8~1.6	4	12.0	11.9

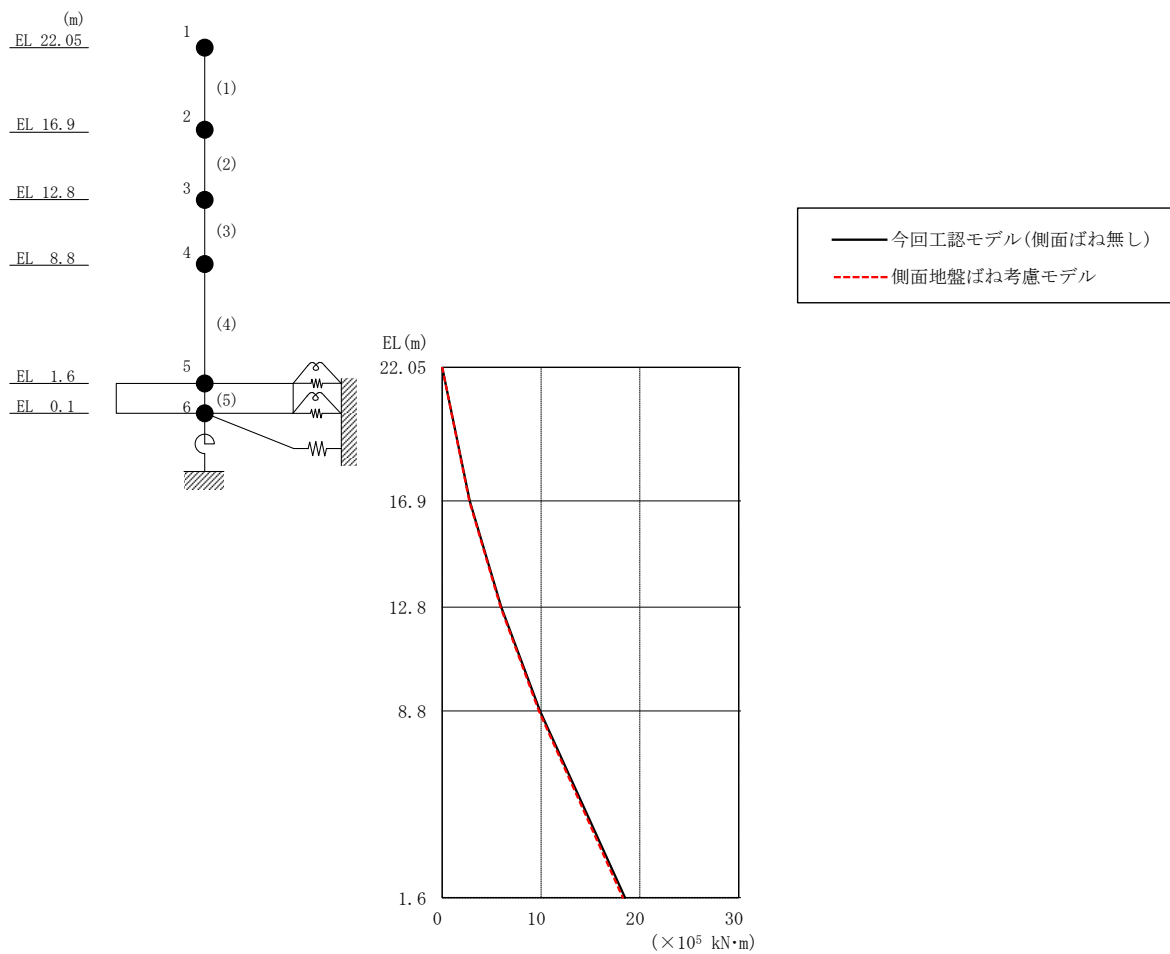


図 3-6 最大応答曲げモーメント（基準地震動 S s - D，EW 方向）

表 3-6 最大応答曲げモーメント一覧（基準地震動 S s - D，EW 方向）

EL (m)	要素 番号	最大応答 曲げモーメント ($\times 10^5$ kN·m)	
		今回工認モデル (側面ばね無し)	側面地盤ばね 考慮モデル
22.05~16.9	1	0.00	0.00
		2.79	2.75
16.9~12.8	2	2.79	2.75
		5.98	5.90
12.8~8.8	3	5.98	5.90
		9.90	9.78
8.8~1.6	4	9.90	9.78
		18.5	18.3

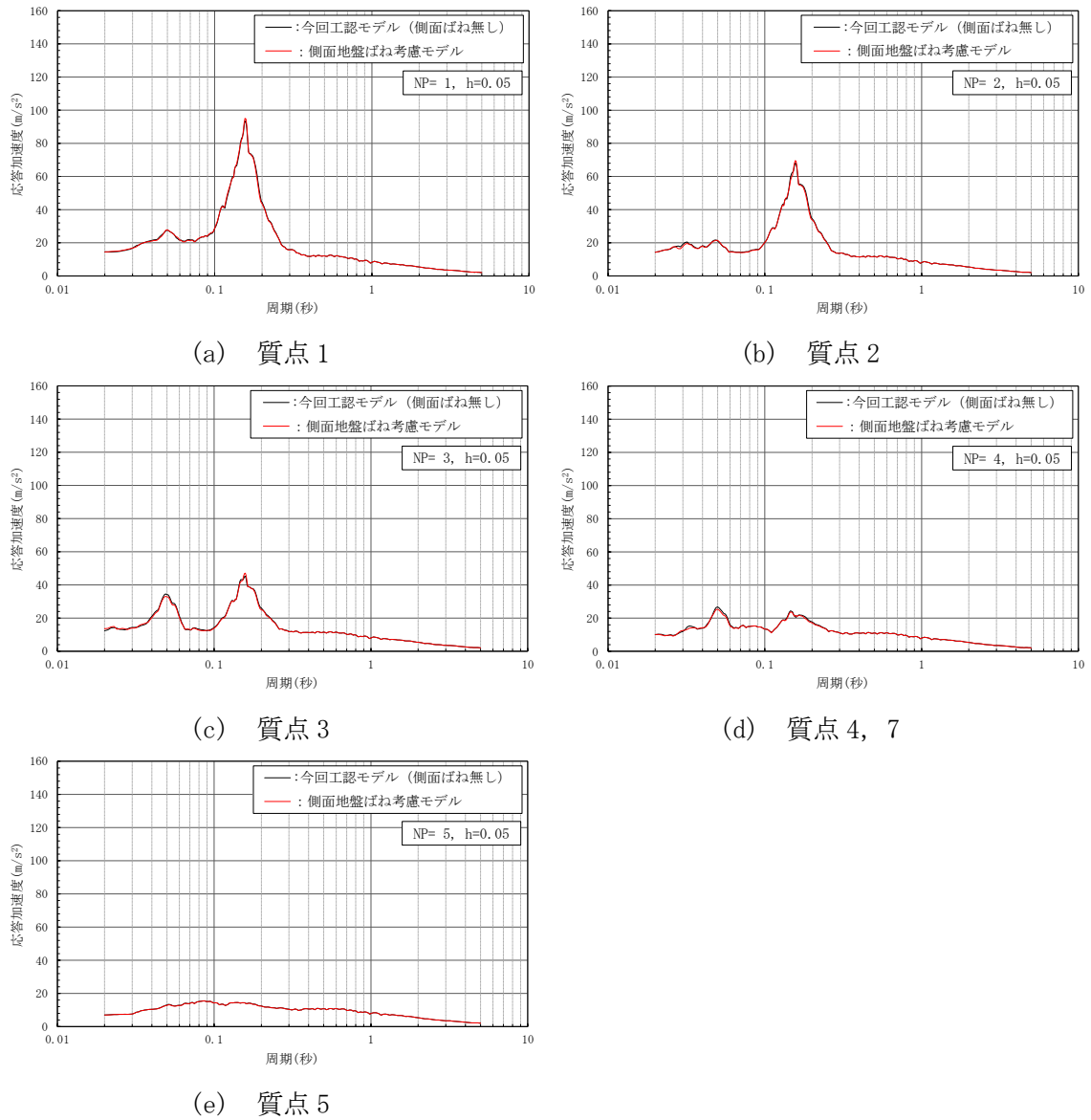
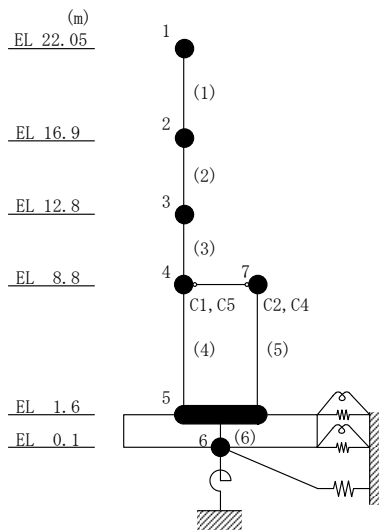


図 3-7 加速度応答スペクトルの比較 (基準地震動 $S_s - D$, NS 方向)



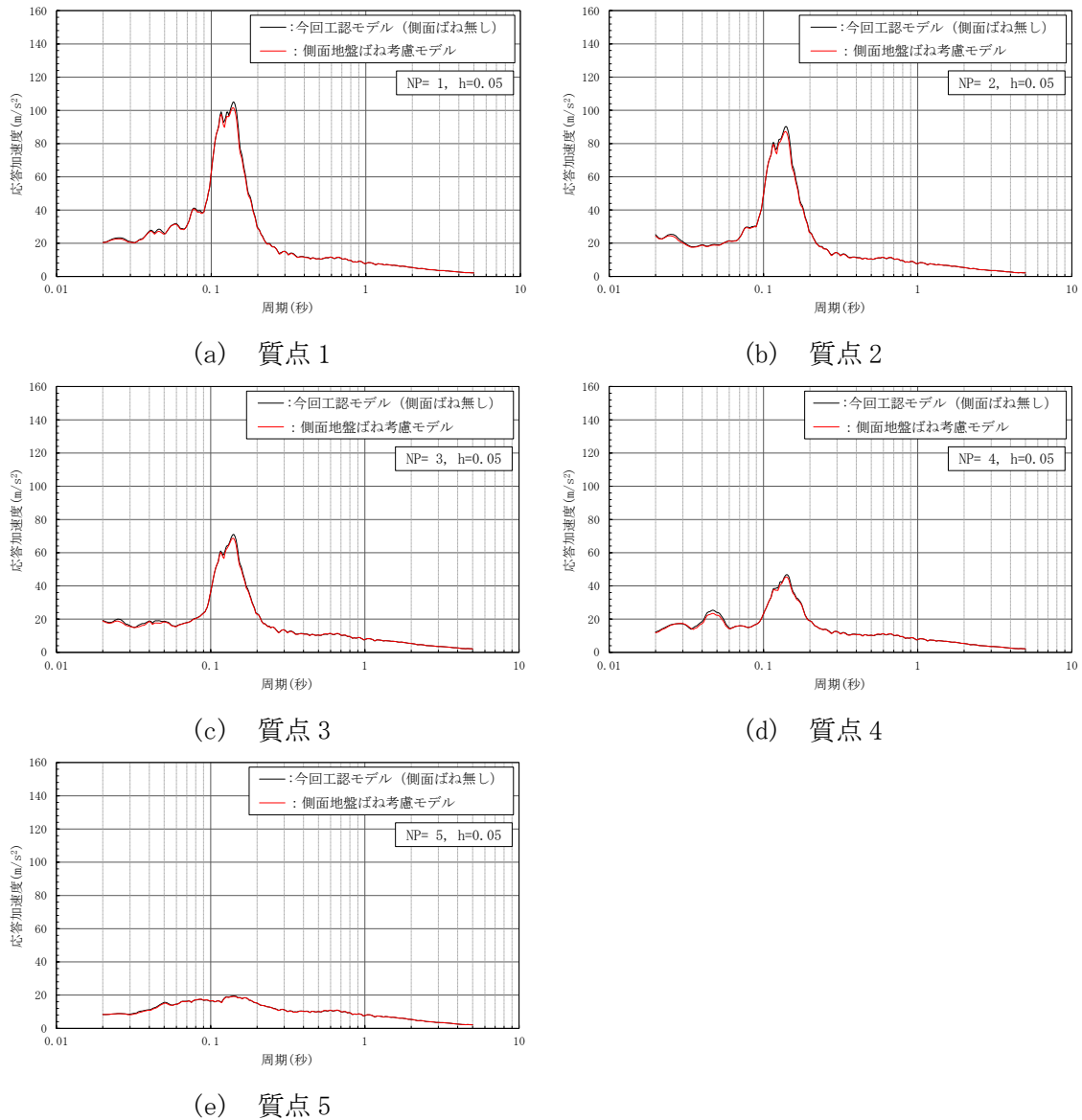
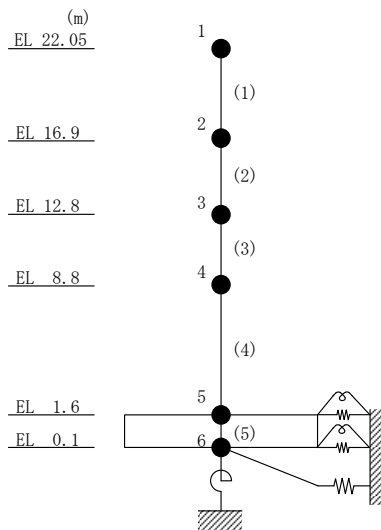


図 3-8 加速度応答スペクトルの比較 (基準地震動 $S_s - D$, EW方向)



別紙 8-1 側面地盤ばねの適用性について

目 次

1. 概要	別紙 8-1-1
2. 側面地盤ばねの設定の考え方について	別紙 8-1-1
2.1 建物埋込効果の考え方	別紙 8-1-1
2.2 制御室建物における側面地盤ばねの設定の考え方	別紙 8-1-1
3. 制御室建物の基礎スラブ側面地盤の埋戻し状況	別紙 8-1-5
4. 参考文献	別紙 8-1-7

1. 概要

別紙 8「側面地盤ばねを考慮した地震応答解析による設計用地震力への影響について」において、制御室建物の基礎スラブ側面の地盤ばねを考慮した地震応答解析を実施している。

本資料は、制御室建物の側面地盤の埋込み状況を確認し、建物側面の地盤ばねの適用性について確認するものである。

2. 側面地盤ばねの設定の考え方について

2.1 建物埋込効果の考え方

地震応答解析に当たっては、「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)」(以下「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」という。)に示されるとおり、建物と地盤の相互作用を考慮することとしている。また、「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」において引用先となっている「建屋埋込み効果の評価法の標準化に関する調査報告書」⁽¹⁾(以下「標準化報告書」という。)に基づく、「埋込効果を見込むためには、建屋は少なくとも三面が埋め込まれていることが必要である」とされている。

なお、「原子力発電所耐震設計技術規程 J E A C 4 6 0 1 -2008 ((社) 日本電気協会)」(以下「J E A C 4 6 0 1 -2008」という。)の引用文献「埋め込み基礎の接触状況が構造物の応答に与える影響について」では、建物・構築物の地下部分の大部分(3面または面積で75%以上)が周辺地盤と接している場合には、全面埋め込みと同様な埋込効果が期待できるものとされている。

「J E A G 4 6 0 1 -1991 追補版」では、埋め込まれた建物の地震応答解析において、水平方向の地震応答解析モデルに対して、基礎底面地盤ばねに加え、基礎側面水平地盤ばねを適用することができるとされている。

また、「標準化報告書」では、基礎側面地盤ばねは、図 2-1 に示すとおり、水平移動成分と回転成分の合成に近似でき、基礎側面回転地盤ばねについては、N o v a k の側面回転ばねで表現できるとされている。

2.2 制御室建物における側面地盤ばねの設定の考え方

制御室建物の埋込み状況を図 2-2 に示す。赤色の破線で囲まれた範囲が、側面地盤ばねを考慮した範囲である。赤色の破線で囲まれた範囲では、灰色で示される「制御室建物が側面地盤(MMR*含む)又は隣接建物基礎スラブと接する範囲」が占める割合が75%以上であることから、埋込効果を期待して、制御室建物の水平方向の地震応答解析モデルにおいては、側面地盤ばねを設定している。

図 2-3 に制御室建物の水平方向の地震応答解析モデルを示す。赤枠で囲まれた部分が、側面地盤ばねを表している。

注記* : マンメイドロック(人工岩盤)の略称

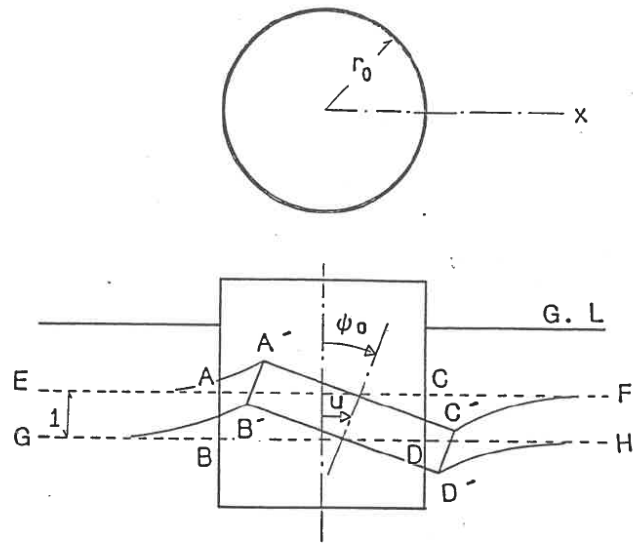


図 4.1.2 埋込み建屋の変位

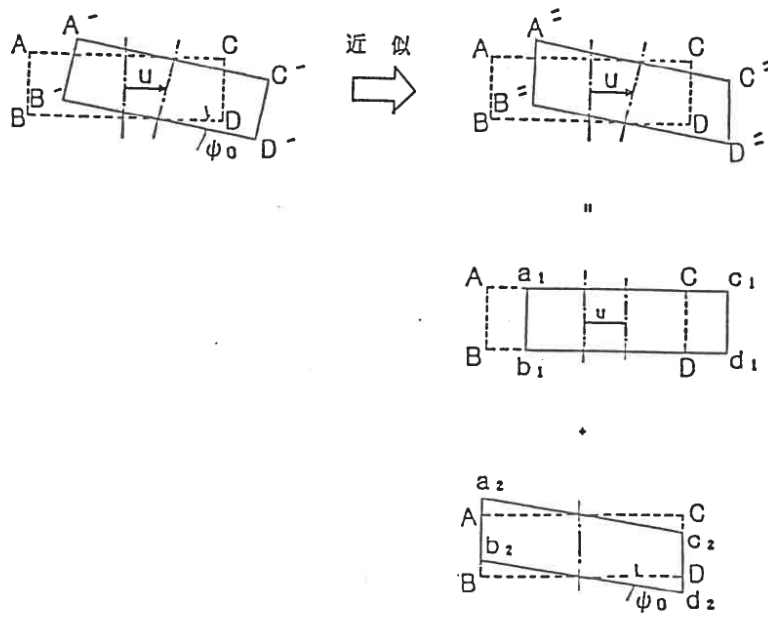
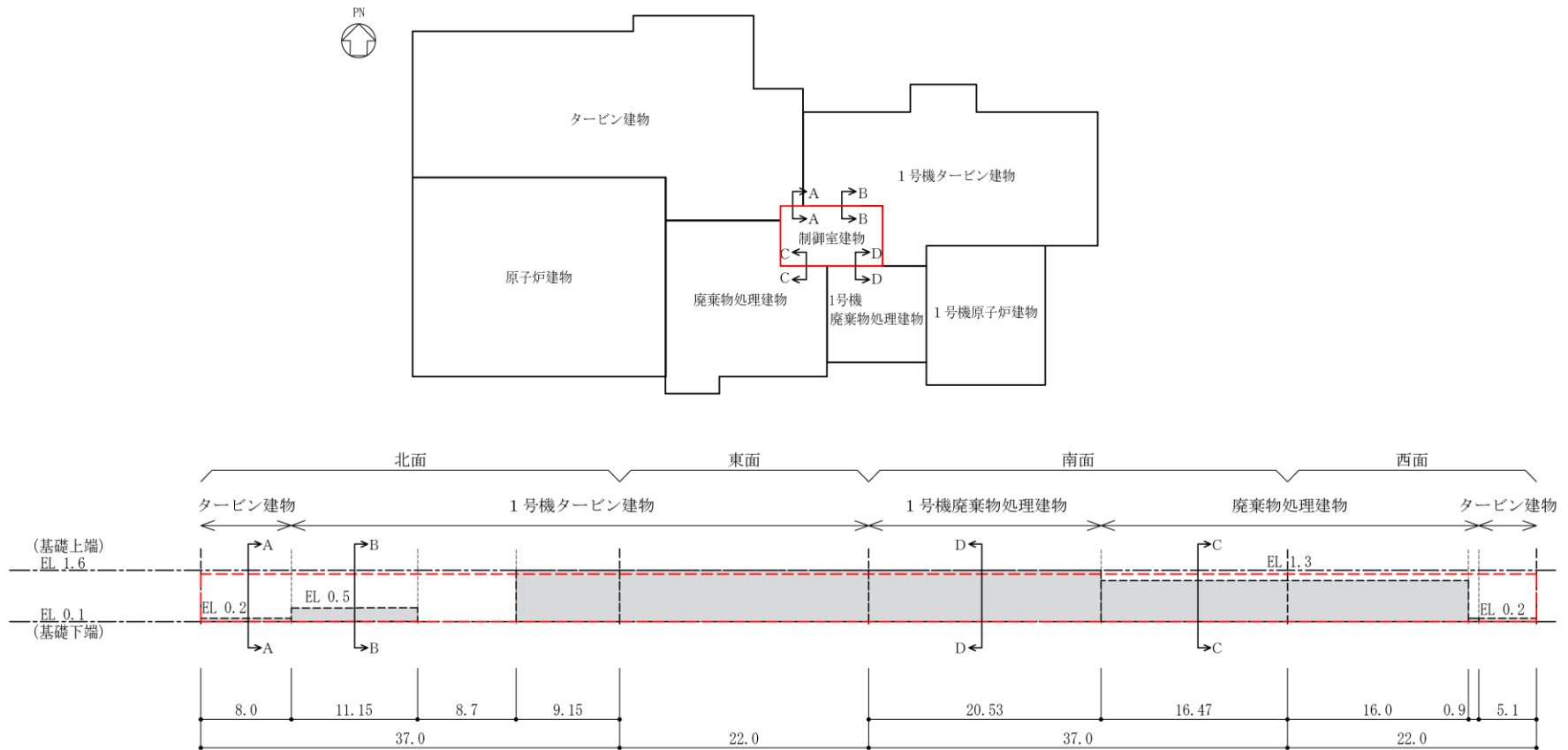


図 4.1.3 変位の合成

図 2-1 埋込み効果のモデル化の概念図
(文献(1)より引用)



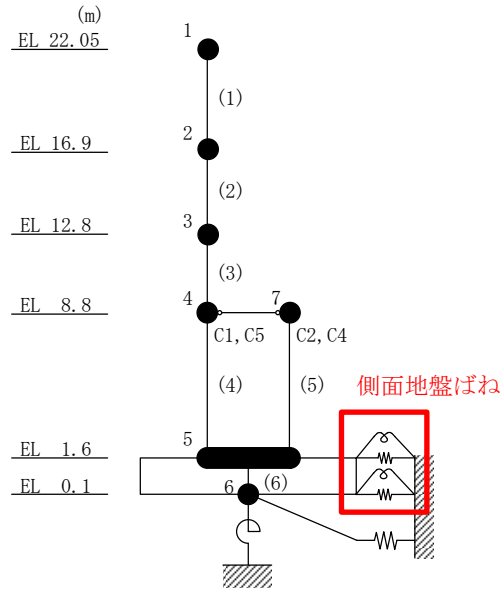
■ : 側面地盤 (MMR 含む) 又は隣接建物基礎スラブと接する範囲

▭ : 埋め込み考慮範囲 (EL 0.1~EL 1.49)

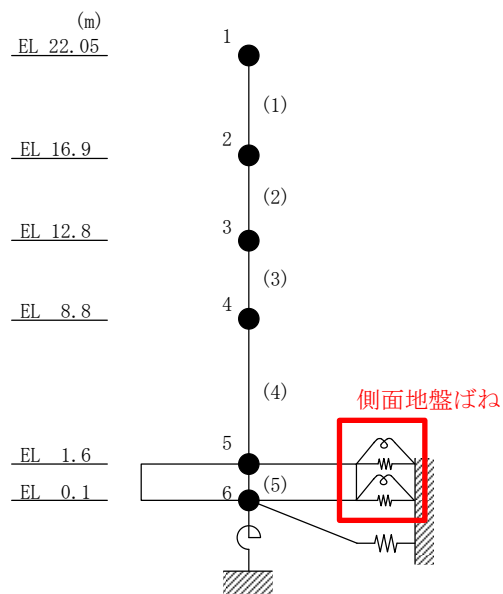
(単位 : m)

注 : A-A~D-Dは図3-1における断面図切断位置を示す。

図 2-2 制御室建物の埋込み状況



(a) N S 方向



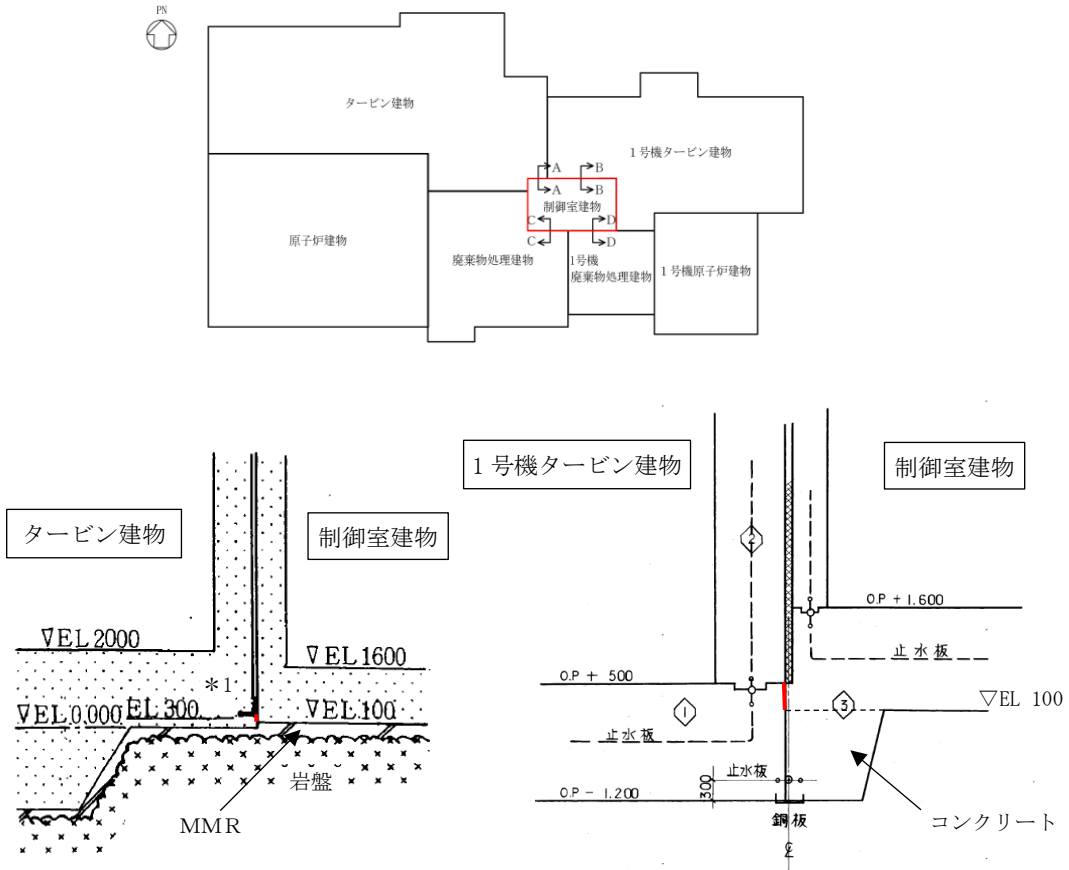
(b) E W 方向

図 2-3 制御室建物の水平方向の地震応答解析モデル

3. 制御室建物の基礎スラブ側面地盤の埋戻し状況

制御室建物の側面地盤の埋戻し状況を図 3-1 に示す。図 3-1 に示すとおり、埋込み効果を期待する制御室建物が側面地盤（MMR 含む）又は隣接建物基礎スラブと接する範囲には防水層等が介在していない。

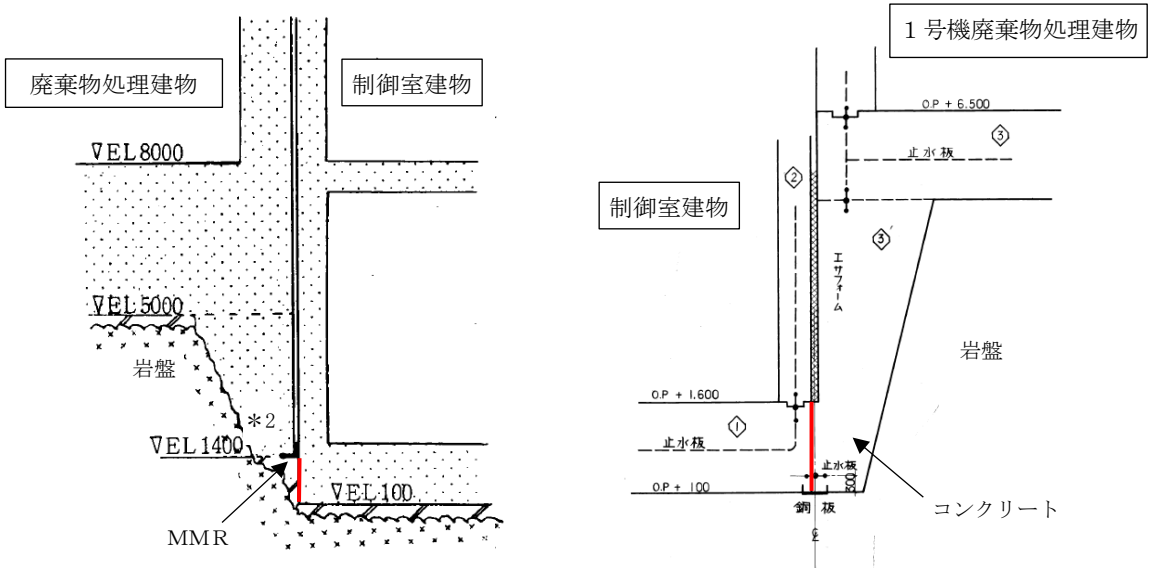
以上を踏まえると、制御室建物については、建物基礎スラブと側面地盤（MMR 含む）又は隣接建物基礎スラブの間に地中上下方向せん断力が発生し、十分な拘束効果が期待できることから、実状を踏まえ、制御室建物の水平方向の地震応答解析モデルにおいては、基礎側面地盤ばねを適用できると考えられる。



注記*1：止水板の下端はEL 0.2m

(a) A-A断面

(b) B-B断面



*2：止水板の下端はEL 1.3m

(c) C-C断面

(d) D-D断面

—：側面地盤（MMR含む）又は隣接建物基礎スラブと接する範囲

図3-1 埋戻し状況を示す断面図（建設時竣工図に加筆）

4. 参考文献

- (1) 社団法人日本電気協会、電気技術基準調査委員会：建屋埋込み効果の評価法の標準化に関する調査報告書，昭和 62 年 6 月

別紙 9 応力解析モデルにおける基礎スラブと壁の接続部の
モデル化に関する影響検討

目 次

1. 概要	別紙 9-1
2. 基礎スラブと壁の接続部のモデル化に関する影響検討	別紙 9-2
2.1 検討方針	別紙 9-2
2.2 検討方法	別紙 9-2
2.3 解析モデル	別紙 9-3
2.4 検討結果	別紙 9-4
3. まとめ	別紙 9-6

1. 概要

制御室建物の基礎スラブの応力解析モデルは、VI-2-2-6「制御室建物の耐震性についての計算書」における「4.4 解析モデル及び諸元」に示すように、基礎スラブについては積層シェル要素、基礎スラブより立ち上がっている壁については、EL 1.6m～EL 8.8mを積層シェル要素、EL 8.8m～EL 22.05mをはり要素としてモデル化している。

基礎スラブはスラブの厚さの中心位置（EL 0.85m）でモデル化し、基礎スラブと壁の接続部（EL 0.85m～EL 1.6m）は剛体要素でモデル化している。

本資料は、制御室建物の基礎スラブの応力解析において、基礎スラブと壁の接続部を積層シェル要素でモデル化した場合の影響を検討するものである。

2. 基礎スラブと壁の接続部のモデル化に関する影響検討

2.1 検討方針

VI-2-2-6「制御室建物の耐震性についての計算書」に示す制御室建物の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。）における基礎スラブと壁の接続部を積層シェル要素としたモデル（以下「検討モデル」という。）を用いた S_s 地震荷重による応力解析を行い、今回工認モデルの S_s 地震荷重による応力解析結果との比較を行うことで、基礎スラブと壁の接続部のモデル化の違いによる影響を検討する。

検討項目は、基礎スラブにおける発生値に対する許容値の比が最も小さくなる面外せん断力とする。

2.2 検討方法

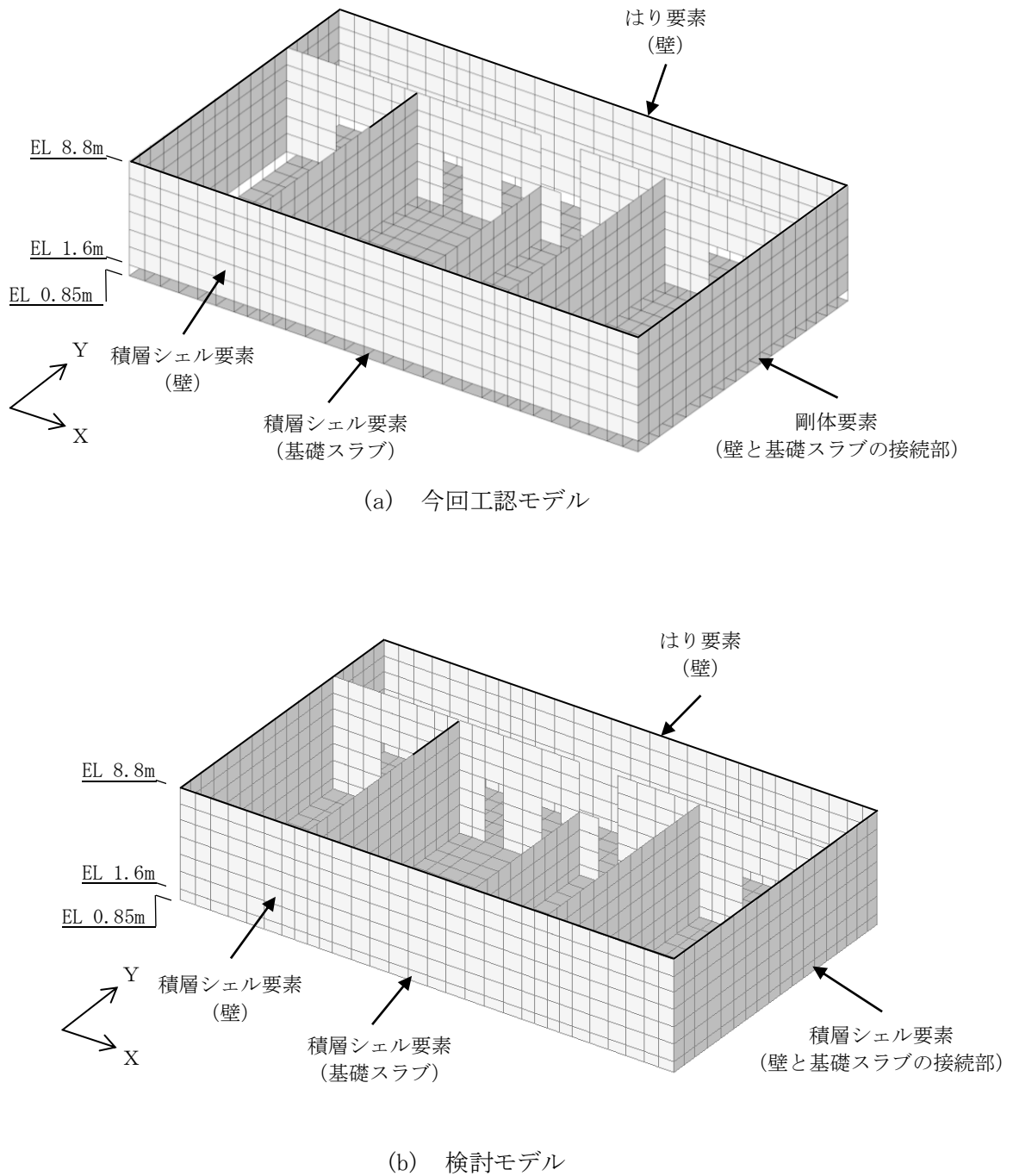
今回工認モデルにおける基礎スラブと壁の接続部を積層シェル要素に変更した検討モデルを作成する。入力地震荷重は、今回工認モデルの検討に用いたものと同じとし、解析ケースは、今回工認モデルで検定値が最も厳しい結果となるケース（組合せケース 1, $1.0 \times S_{sSN} + 0.4 \times S_{sUD}$ ）を対象とする。

検討モデルによる応力解析を実施し、今回工認モデルの応力解析結果との比較を行い、基礎スラブと壁の接続部のモデル化の違いによる影響を検討する。

2.3 解析モデル

解析に用いる検討モデルは、今回工認モデルにおける基礎スラブと壁の接続部を積層シェル要素に変更したものとす。接続部における物性値及び材料構成則については基礎スラブ直上の壁と同一とする。

今回工認モデル及び検討モデルの解析モデルを図2-1に示す。



注：図中の黒太線は、はり要素を示す。

図2-1 解析モデル

2.4 検討結果

基礎スラブの面外せん断力のコンター図について、検討モデルの解析結果を、今回工認モデルの解析結果と比較して図 2-3 に示す。基礎スラブの最大面外せん断力は、今回工認モデルと同程度であり、許容面外せん断力 ($2.50 \times 10^3 \text{kN/m}$) を下回っている。このことから、基礎スラブと壁の接続部のモデル化の違いによる耐震性への影響がないことを確認した。

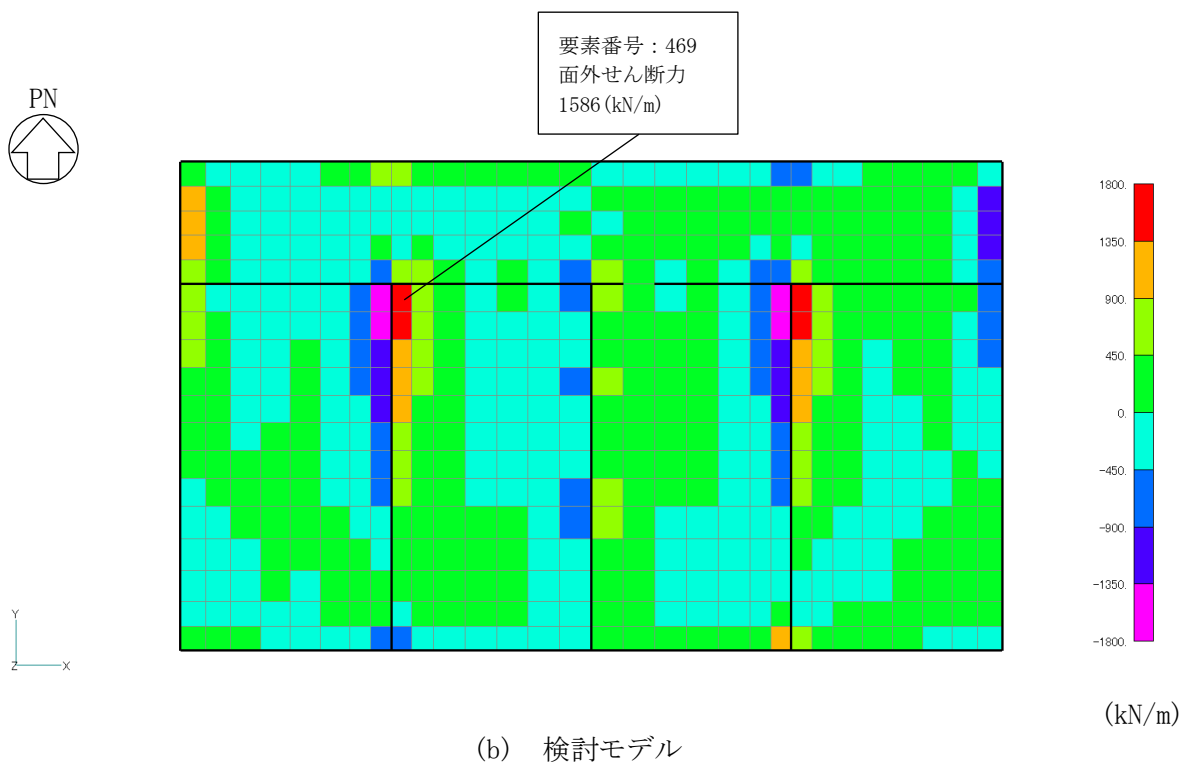
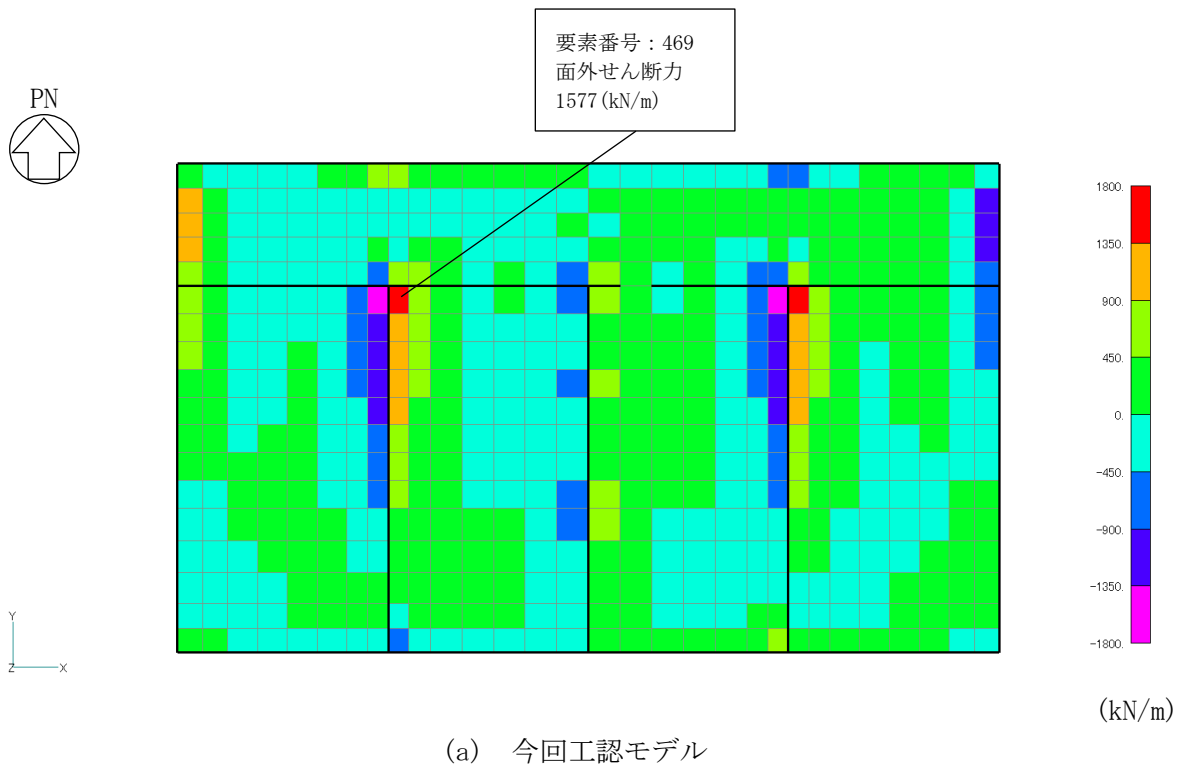


図 2-3 基礎スラブの面外せん断力のコンター図 (E W方向, ケース 1)

3. まとめ

制御室建物の基礎スラブの応力解析において、基礎スラブと壁の接続部のモデル化の影響を検討した。その結果、基礎スラブと壁の接続部を積層シェル要素でモデル化した場合においても、制御室建物の基礎スラブは耐震性を有していることを確認した。

(参考資料 1) 計算機プログラム (解析コード) の概要

目次

1. はじめに	参 1-1
2. 使用状況一覧	参 1-2
3. 解析コードの概要	参 1-3

1. はじめに

本資料は、補足説明資料「NS2-補-025-02 制御室建物の耐震性についての計算書に関する補足説明資料」において使用した計算機プログラム（解析コード）について説明するものである。

本解析コードを使用した補足説明資料を示す使用状況一覧、解析コードの概要を以降に記載する。

2. 使用状況一覧

使用補足説明資料		バージョン
別紙 8	側面地盤ばねを考慮した地震応答解析による設計用地震力への影響について	Ver. 1.3.3

3. 解析コードの概要

項目	コード名 NOVAK
使用目的	水平方向の地震応答解析モデルにおける側面地盤ばね算定
開発機関	鹿島建設株式会社
開発時期	1984年
使用したバージョン	Ver. 1.3.3
コードの概要	NOVAK（以下「本解析コード」という。）は、Novakの論文*に基づき、水平動、鉛直動、回転動に対する建物側面地盤の複素ばね剛性を振動数領域で算出するプログラムである。
検証 (Verification) 及び 妥当性確認 (Validation)	<p>【検証 (Verification)】 本解析コードの検証内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードの計算機能が適正であることは、後述する妥当性確認の中で確認している。 ・本解析コードの運用環境について、動作環境を満足する計算機にインストールして用いていることを確認している。 <p>【妥当性確認 (Validation)】 本解析コードの妥当性確認内容は以下のとおりである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・本解析コードは日本国内の原子力施設で多数の工事計画に使用されており、十分な使用実績があるため信頼性があることを確認している。 ・Novakの論文*に記載されている水平、鉛直、回転ばねと同一地盤定数を用いた本解析コードによる解析結果を比較し、両者が一致することを確認している。 ・本工事計画において使用する Ver. 1.3.3 は、他プラントの既工事計画において使用されているものと同じであることを確認している。 ・本工事計画における用途及び適用範囲が上述の妥当性確認の範囲内であることを確認している。

注記* : M. NOVAK, T. NOGAMI and F. ABOUL-ELLA, "DYNAMIC SOIL REACTION FOR PLANE STRAIN CASE", EM4, ASCE, 1978年