

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-025-03 改 03
提出年月日	2023年6月7日

タービン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-2-2-8「タービン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 応力解析における応力平均化の考え方

別紙 8 蒸気タービンの基礎を逆位相とした場合の影響検討

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
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 既工認モデルと今回工認モデルの差異について	別紙 1-6
2.2.1 弾塑性解析の採用	別紙 1-6
2.2.2 壁及び床スラブ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、タービン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

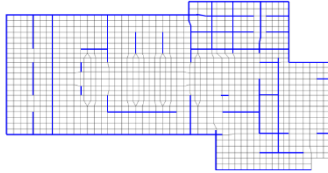
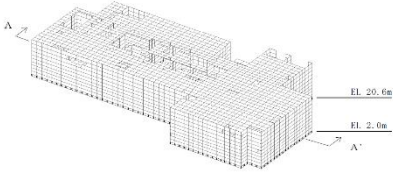
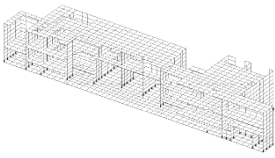
タービン建物の基礎スラブの応力解析モデル及び手法の比較を表 2-1 に示す。

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 59 年 9 月 17 日付け 59 資庁第 8283 号にて認可された工事計画の IV-2-7 「タービン建物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 (タービン建物の基礎スラブ)

項目	内容	既工認	今回工認	備考
解析手法		3次元 F E Mモデルを用いた応力解析 (弾性解析)	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		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	(基礎スラブモデル部分) ・同左 (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及び床スラブ	②
	材料物性	検討時の規準に基づき設定 ・コンクリートのヤング係数: $E = 2.06 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (SI換算) ・コンクリートのポアソン比: $\nu = 0.167$	適用規準の見直しによる再設定 ・コンクリートのヤング係数: $E = 2.25 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ・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	(基礎スラブモデル部分) ・シェル要素 (上部構造物モデル部分) ・はり要素	(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	②
	拘束条件	・EL 2.0m~EL 41.6mの一部壁の剛性をはり要素で考慮	・EL 2.0m~EL 20.6mの一部壁の剛性を積層シェル要素で考慮 ・EL 2.0m~EL 20.6mの床スラブの剛性を積層シェル要素で考慮	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	同左	—
	非線形特性	考慮せず	(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	$S_B$ 地震時: $G + P + S_B$ $S_2$ 地震時: $G + P + S_2$  G : 固定荷重 (浮力を含む) P : 積載荷重 $S_B$ : 1.5 C i 地震荷重 (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)	$S_s$ 地震時: $G + P + S_s$  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 (タービン建物の基礎スラブ)

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及び浮力	同左	—
	地震荷重	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	同左	—
	地震時土圧荷重	$S_B$ 地震時 北側: $0.29 \cdot \gamma \cdot h$ 西側, 東側: $0.32 \cdot \gamma \cdot h$ $S_2$ 地震時 北側: $1.32 \cdot \gamma \cdot h$ 西側, 東側: $1.80 \cdot \gamma \cdot h$  $\gamma$ : 土の単位体積重量 ( $t/m^3$ ) $h$ : 地表面からの深さ (m)	北側, 西側, 東側: $186.2 + 0.5 \cdot \gamma \cdot h$  $\gamma$ : 土の単位体積重量 ( $kN/m^3$ ) $h$ : 地表面からの深さ (m)  ・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)」に基づき算出した加力側増分土圧荷重及び支持側増分土圧を包絡したものととして評価	—
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>注: 青太線は, はり要素を示す。</p>	 <p>(a) 全体鳥瞰図</p>  <p>(b) 全体鳥瞰断面図 (A-A' 断面)</p>	②	



【具体的な反映事項】（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「2.2.1 弾塑性解析の採用」に示す。）
- ② 今回工認ではEL 2.0m～EL 20.6mの剛性の高い一部壁及び床スラブを積層シェル要素でモデル化する。（詳細は「2.2.2 一部壁及び床スラブ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）」に基づき再計算する。
- 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）」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 既工認モデルと今回工認モデルの差異について

### 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、タービン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、タービン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、タービン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 壁及び床スラブの積層シェル要素でのモデル化

既工認モデルは、耐震壁等の剛性の高い壁を、その剛性を考慮した等価なはり要素でモデル化していた。一方、今回工認モデルでは、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、既工認モデルでははり要素でモデル化していた壁のうち、EL 2.0m～EL 20.6m の壁を積層シェル要素でモデル化する。また、EL 2.0m～EL 20.6m に存在する床スラブを積層シェル要素でモデル化する。

既工認からのモデル化方法の変更点を表 2-2 に、既工認モデルと今回工認モデルの概念図を図 2-1 に示す。

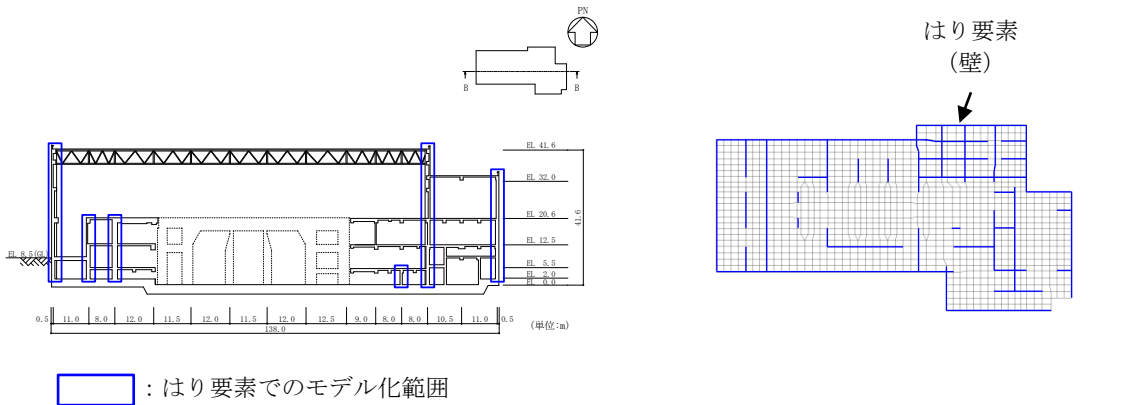
なお、今回工認モデルにおいて、EL 2.0m～EL 20.6m の壁及び床スラブは積層シェル要素でモデル化しているが、弾性部材\*としてモデル化している。一方、VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」に示すとおり、タービン建物の地震応答解析では弾塑性時刻歴応答解析を実施しており、 $S_s$  地震時にせん断スケルトン曲線上の最大応答値が第 1 折れ点を超え、塑性化する結果となっていることから、壁が塑性化することによる影響について確認する。確認結果については、別紙 5「地震応答解析による壁の塑性化に対する影響検討」に示す。

注記\*：タービン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 既工認からのモデル化方法の変更点

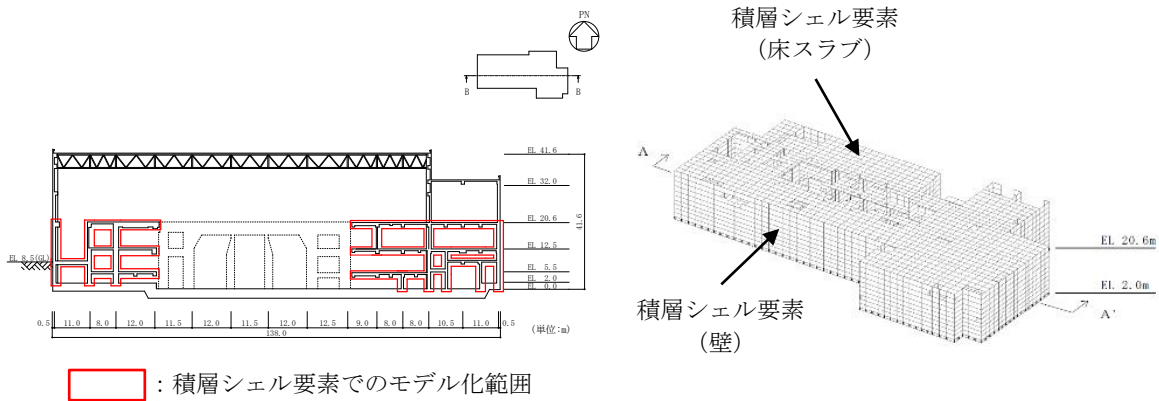
部位	EL (m)	既工認モデル*	今回工認モデル*	備考
壁	20.6~41.6	はり要素	—	
	2.0~20.6	はり要素	積層シェル要素	
床スラブ	2.0~20.6	—	積層シェル要素	

注記\*：壁及び床スラブは弾性部材としてモデル化。



注：右図の青太線は、はり要素を示す。

(a) 既工認モデル



(b) 今回工認モデル

図 2-1 既工認モデルと今回工認モデルの概念図

既工認モデルは、耐震壁等の剛性の高い壁を等価な剛性を考慮したはり要素でモデル化しているが、考慮している剛性は基礎スラブ面外方向の剛性のみとしている。本来、基礎スラブより上階において耐震壁等の直交する壁は相互につながっているが、その効果は考慮されていない。

一方、今回工認モデルでは EL 2.0m～EL 20.6m の壁を積層シェル要素でモデル化していることから、既工認モデルでははり要素として考慮していた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。また、EL 2.0m～EL 20.6m の床スラブを積層シェル要素でモデル化している。これらの壁及び床スラブ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、既工認モデルのはり要素は中立軸を壁の図心として評価したものを基礎スラブ中心位置に設定しており偏心が考慮されないのに対し、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ことにより曲げ剛性が大きく評価される。これらの結果、基礎スラブの面外変形が既工認モデルと比較して小さくなり、基礎スラブの応力は低減することとなる。

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 2.0m～EL 20.6m 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。また、耐震壁の土圧荷重の評価においては一方向版を仮定し、基礎スラブとの接続部で固定とする等の評価を実施していることから耐震壁には十分な余裕がある。

上部構造物のモデル化方法の変更に伴う解析上の影響を表 2-3 に示す。

表 2-3 上部構造物のモデル化方法の変更に伴う解析上の影響

項目	既工認モデル	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	<p>影響範囲 (モデル化範囲)</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>EL 2.0m~EL 41.6m までの耐震壁等の剛性の高い壁</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EL 2.0m~EL 20.6m までの耐震壁等の剛性の高い壁</li> <li>EL 2.0m~EL 20.6m の床スラブ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>建物全体の壁及び床スラブが抵抗要素となる</li> </ul>	
	要素種別	<ul style="list-style-type: none"> <li>EL 2.0m~EL 41.6m までの壁を等価な剛性を考慮したはり要素でモデル化</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EL 2.0m~EL 20.6m までの壁及び床スラブを積層シェル要素でモデル化</li> </ul>	-
	剛性評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>EL 2.0m~EL 41.6m までの壁を対象としたせん断断面積、断面二次モーメントから等価な 1 本のはり要素に置き換えており、拘束効果は実機より弱い。</li> <li>壁の曲げ剛性は壁の図心位置で評価したものを基礎スラブ中心位置に設定しており、偏心が考慮されないため、実機より小さい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EL 2.0m~EL 20.6m までは中立軸に対する曲げ剛性を考慮しており、既工認モデルに比べて実機の状態に近いモデルとなっている。EL 20.6m より上にある壁および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。</li> <li>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、既工認モデルと比べて実機により近いモデルとなっている。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul>
土圧の負担要素	<ul style="list-style-type: none"> <li>土圧による荷重は全て基礎スラブが負担するモデルとなっており、実機及び今回工認モデルより負担要素は少ない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>土圧による荷重は基礎スラブに加え、地下部分の壁及び床スラブが荷重を負担するモデルとなっており、実機と同等である。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>土圧による荷重は基礎スラブに加え、地下部分の壁及び床スラブが荷重を負担する。</li> </ul>	
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>既工認モデルは当時の計算能力の制約もあり、上部構造物の立体的構造をモデル化しないシンプルなモデルとしているため、モデル化した範囲の荷重を基礎スラブがすべて負担するモデルとなっている。</p> <p>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>今回工認モデルは EL 20.6m より上にある壁および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上部構造物全体としての拘束効果は考慮されていない。</p> <p>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>	-	

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、タービン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

タービン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。

### ・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，2006 年）


表 2-1(1) モデル化, 境界条件及び拘束条件

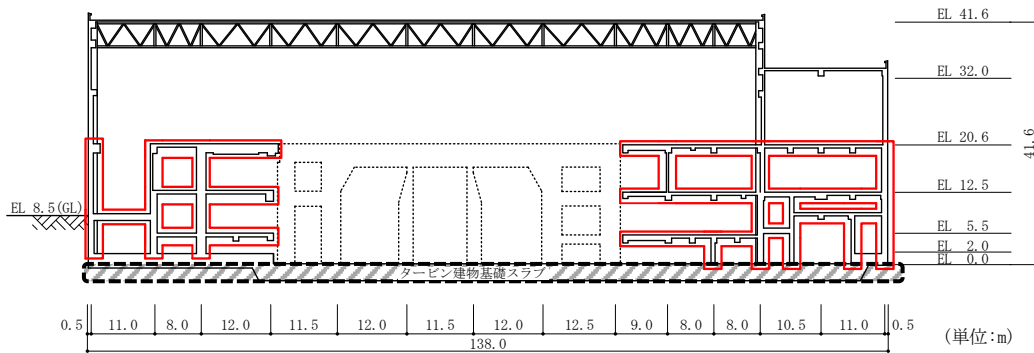
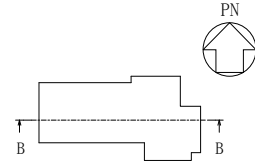
モデル概要

○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及び床スラブの剛性を拘束条件として考慮する。

 : 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

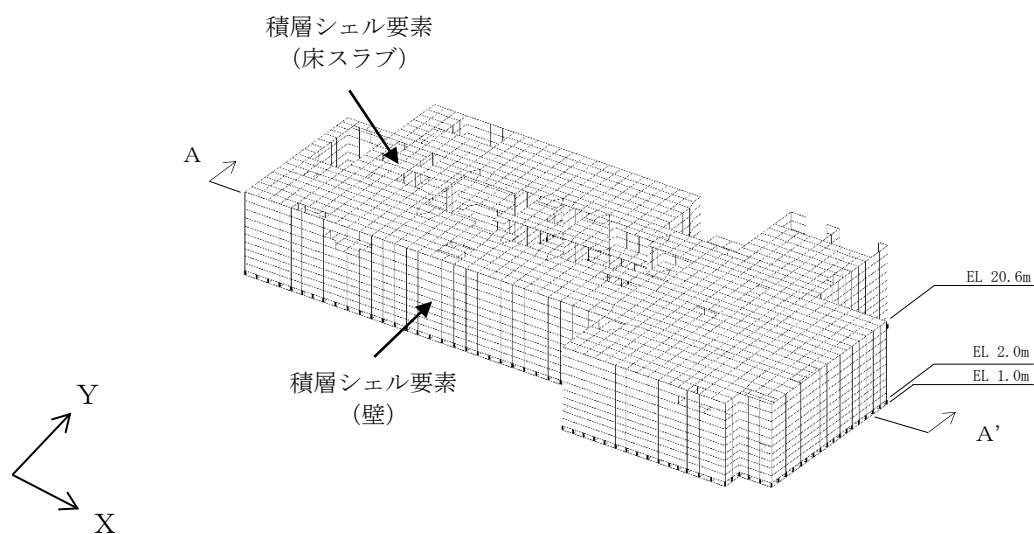
モデル概要

○使用要素

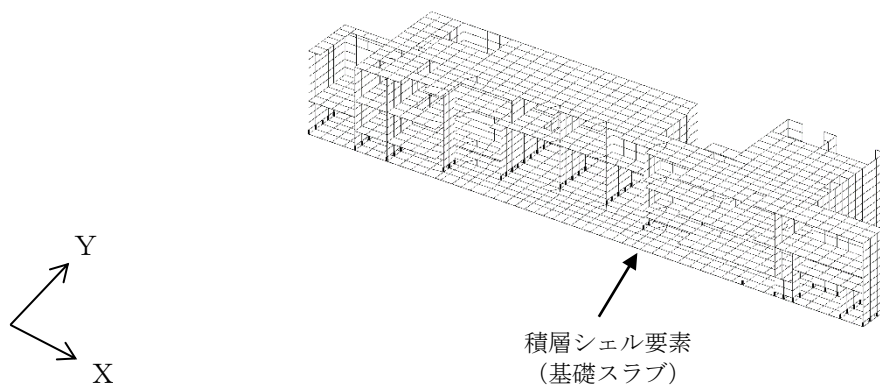
- ・積層シェル要素

○要素分割

- ・要素の一边の長さを 2.0~3.0m 程度とし, 壁及びスラブの配置を考慮して分割する。



全体鳥瞰図



全体鳥瞰断面図 (A-A' 断面)

注: EL 1.0m~EL 2.0m 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

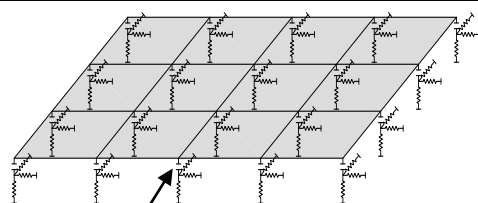
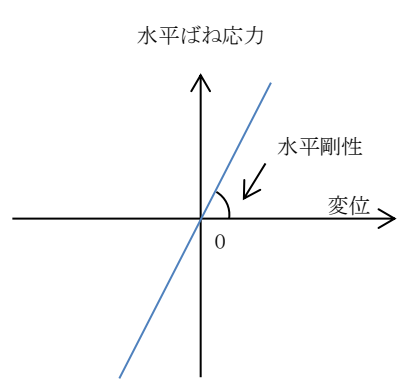
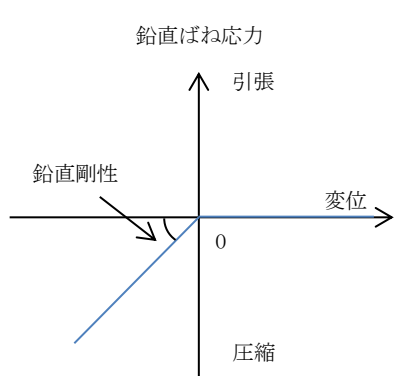
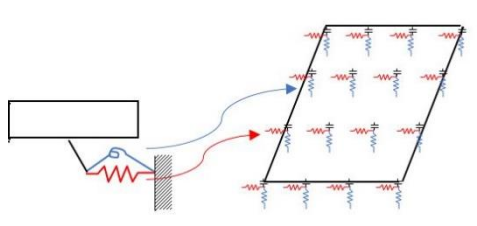
境界条件	
基礎スラブと地盤の境界	
<p>・基礎スラブと底面地盤との間に底面地盤を表現するギャップ要素を設け、基礎スラブと底面地盤との間の剥離（基礎スラブの浮上り）を考慮している。</p>	 <p style="text-align: center;">ギャップ要素 モデル概要</p>
<p>○ギャップ要素</p> <p>鉛直ばねに引張力が発生した際に、水平剛性及び鉛直剛性をゼロとし、浮上りを考慮する。</p>	
 <p style="text-align: center;">(a) 水平剛性</p>	 <p style="text-align: center;">(b) 鉛直剛性</p>
<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"> <li>・水平剛性：振動アドミタンス理論による水平ばね<math>K_{HNS(EW)}</math>を節点支配面積<math>A_i</math>で離散化。  <math display="block">K_{HiNS(EW)} = (K_{HNS(EW)} / A) \times A_i</math> <math>A</math>：基礎スラブの底面積</li> <li>・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<math>K_R</math>を節点支配面積<math>A_i</math>で離散化。  <math display="block">K_{Vi} = (K_{RNS} / I_{NS} + K_{REW} / I_{EW}) / 2 \times A_i</math> <math>I</math>：基礎スラブの断面二次モーメント</li> </ul>	
 <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"><li>・ 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。</li><li>・ 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"><li>(1) EL 2.0m~EL 20.6m の一部の壁の剛性を積層シェル要素として考慮する。</li><li>(2) EL 2.0m~EL 20.6m の床スラブの剛性を積層シェル要素として考慮する。</li></ol></li></ul>

## 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、タービン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

タービン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、鉛直地震力、地震時土圧荷重及び蒸気タービンの基礎反力を考慮する。

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。

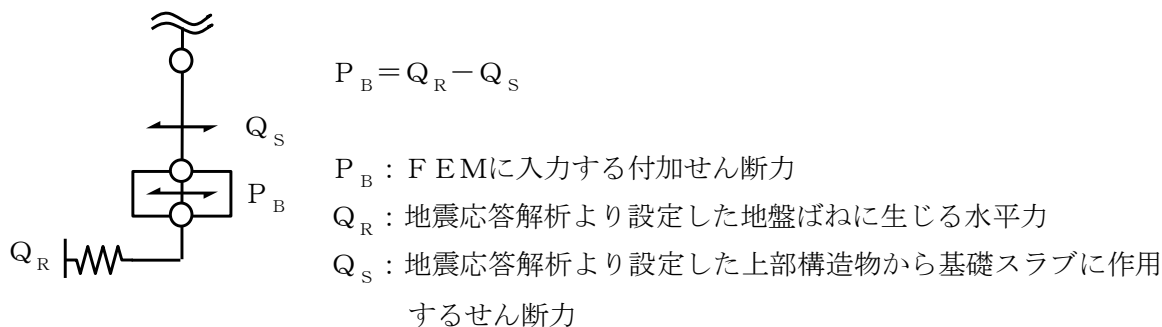
地下外壁部に作用する地震時土圧荷重により基礎スラブに作用する荷重は、せん断力及び曲げモーメントを考慮し、外壁を各階スラブ位置で支持した連続はりモデルを用いて算出する。算出した外壁脚部に生じる単位長さあたりのせん断力及び曲げモーメントは、基礎スラブ外周の節点の支配長さに応じて分配し、節点荷重として入力する。

蒸気タービンの基礎反力は、島根原子力発電所第2号機『工事計画届出書 V-5「蒸気タービンの基礎に関する説明書」(電原設第54号 平成27年2月25日届出)』で用いた蒸

気タービンの基礎の 3 次元フレームモデルにより算出した柱脚反力を，FEMモデルにおける蒸気タービンの基礎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。

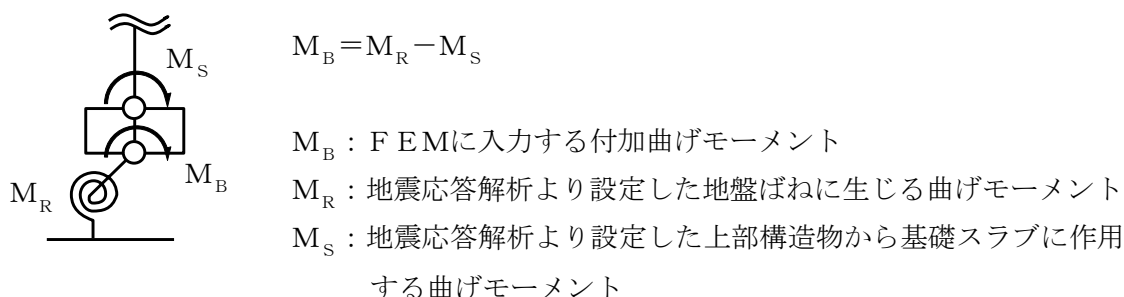
FEMモデルに入力する地震荷重の概念図を図 2-1 に示す。また，FEMモデルに入力する地震荷重を図 2-2 に示す。

■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



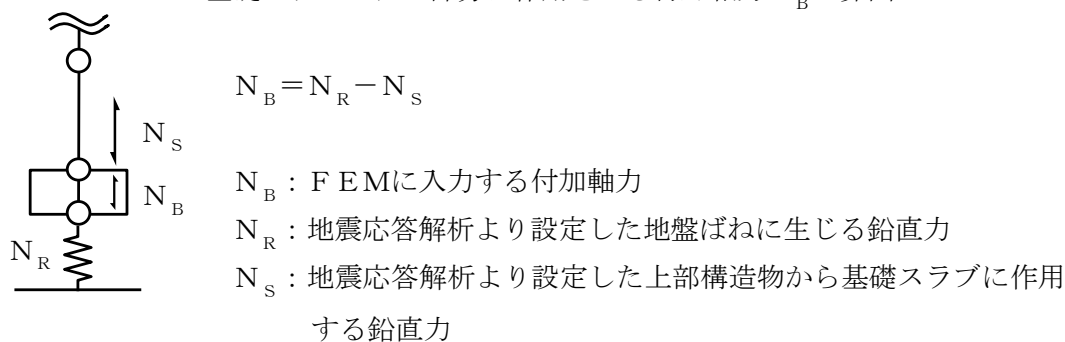
(a) 水平地震力

■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



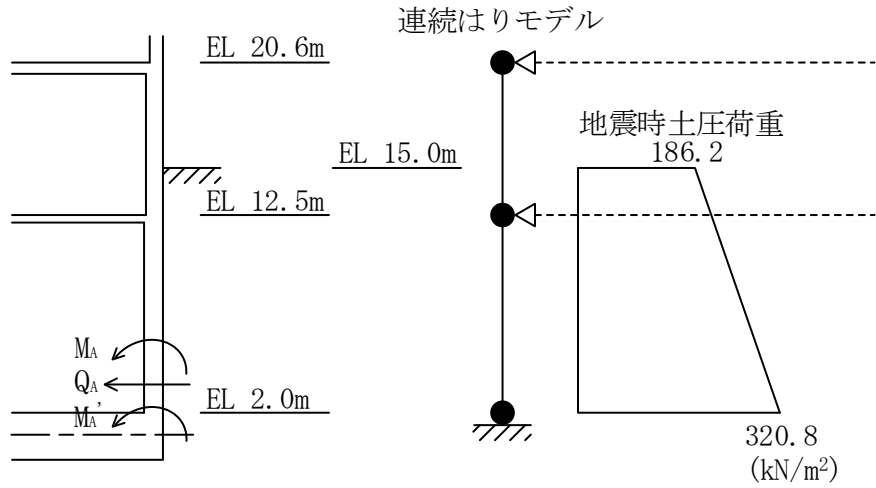
(b) 曲げモーメント

■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



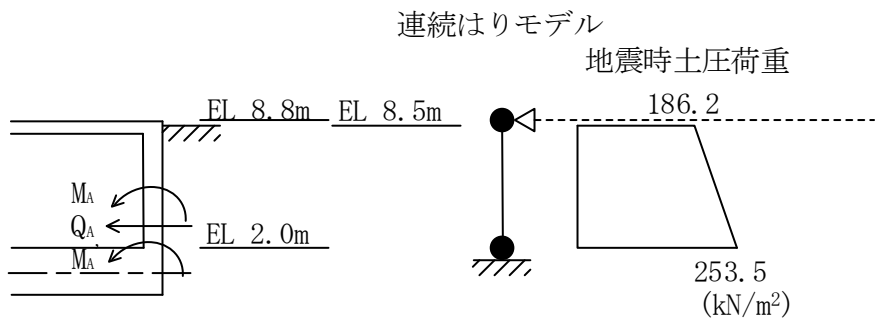
(c) 鉛直地震力

図 2-1(1) FEMモデルに入力する地震荷重の概念図



$M_A$  : 基礎スラブに入力する曲げモーメント  
 $Q_A$  : 基礎スラブに入力するせん断力  
 $M_A'$  : せん断力により発生する付加曲げモーメント

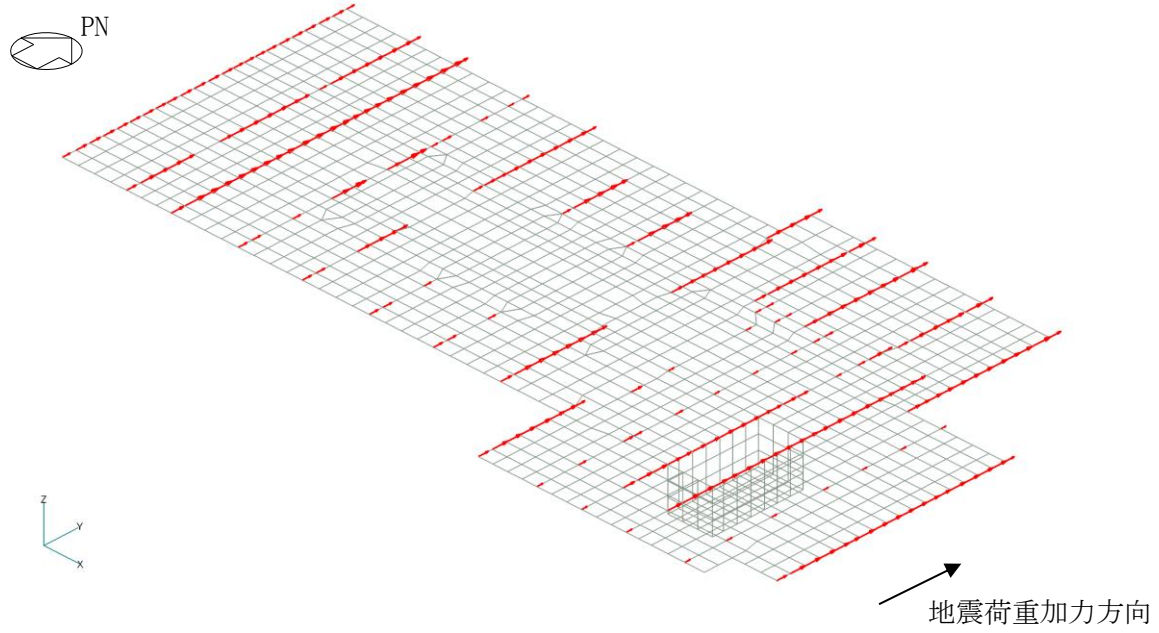
(d) 地震時土圧荷重 ( $\tau_{14}$  通り,  $\tau_D \sim \tau_F$  通り)



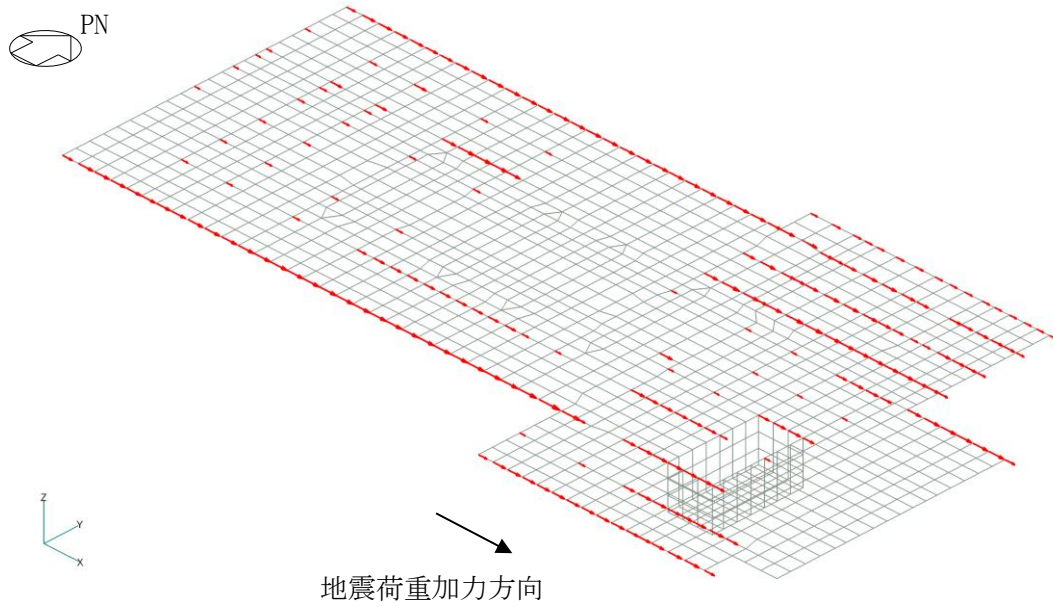
$M_A$  : 基礎スラブに入力する曲げモーメント  
 $Q_A$  : 基礎スラブに入力するせん断力  
 $M_A'$  : せん断力により発生する付加曲げモーメント

(e) 地震時土圧荷重 ( $\tau_X$  通り,  $\tau_{2'} \sim \tau_7$  通り)

図 2-1(2) FEMモデルに入力する地震荷重の概念図

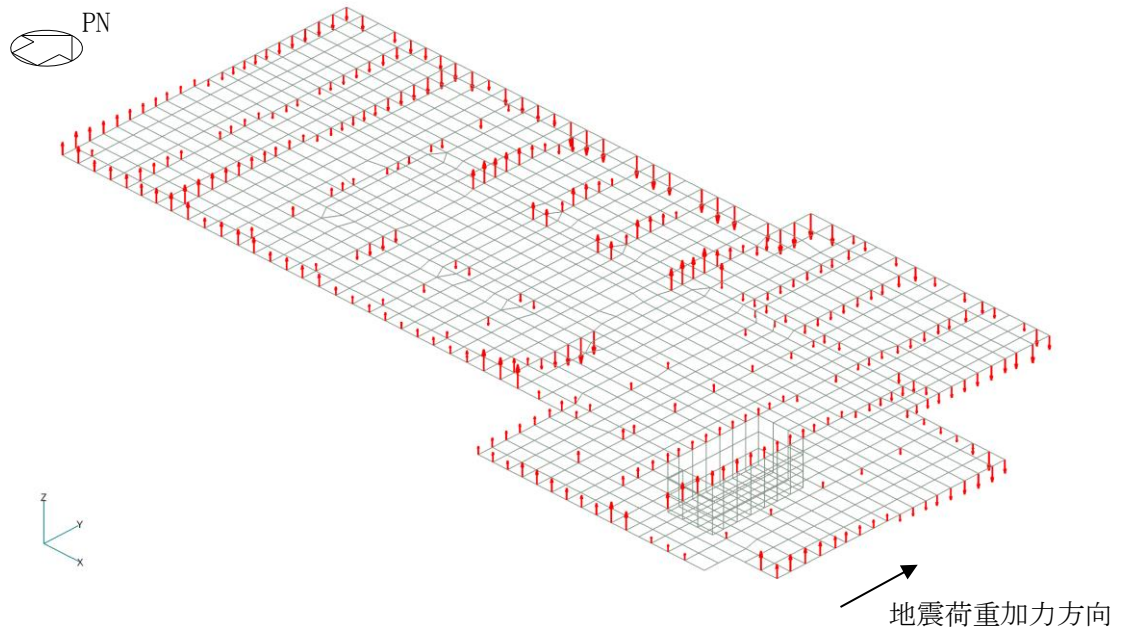


(a) 水平力 (NS方向)

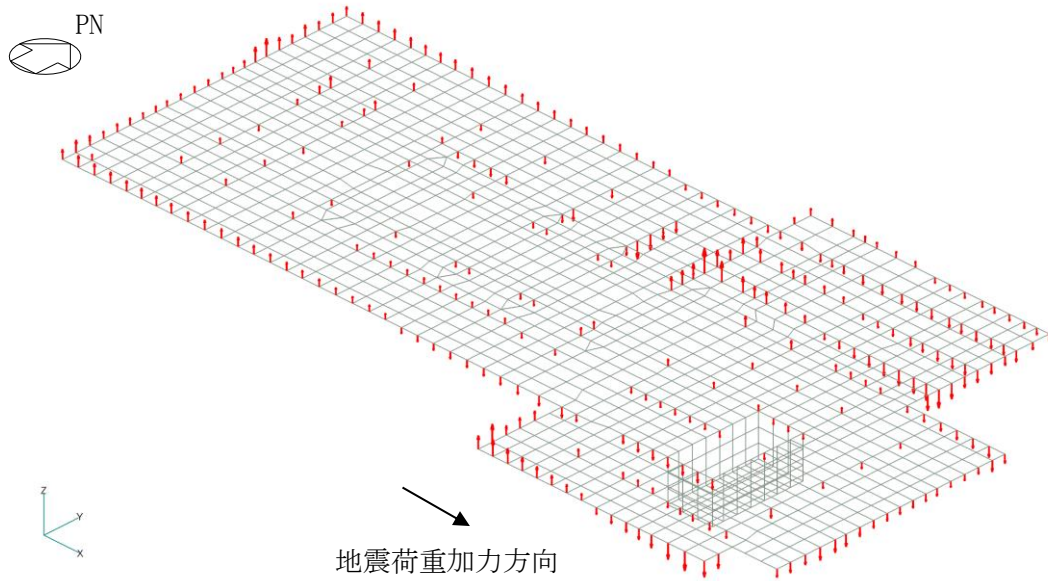


(b) 水平力 (EW方向)

図 2-2(1) FEMモデルに入力する地震荷重

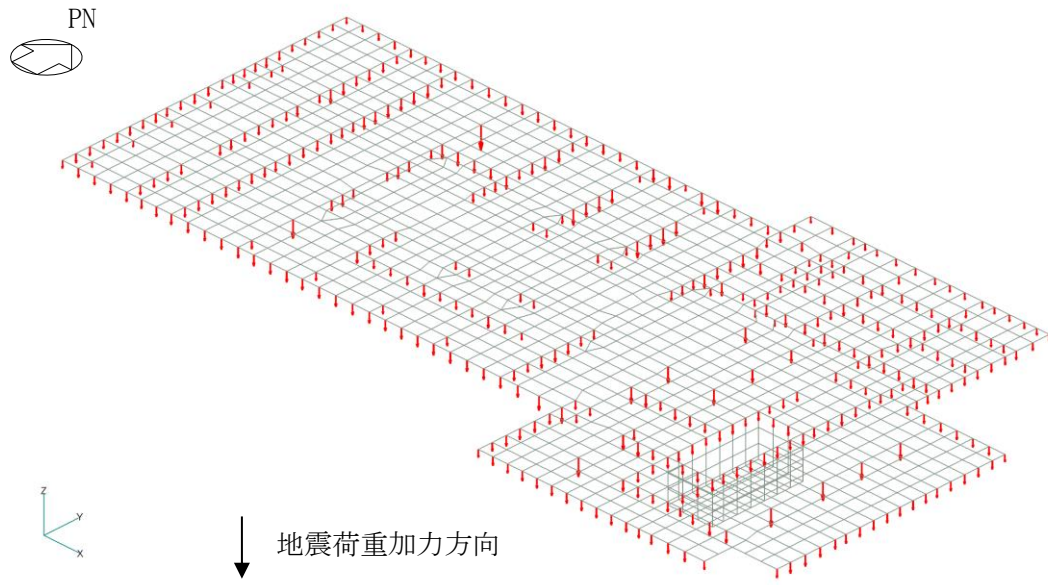


(c) 曲げモーメント (NS方向)



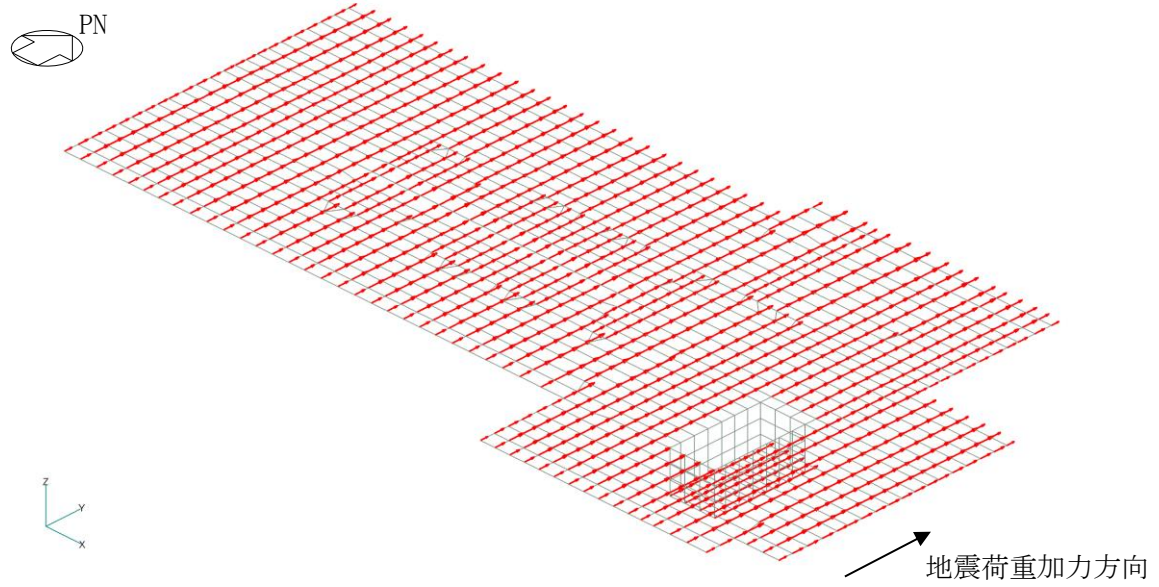
(d) 曲げモーメント (EW方向)

図 2-2(2) FEMモデルに入力する地震荷重

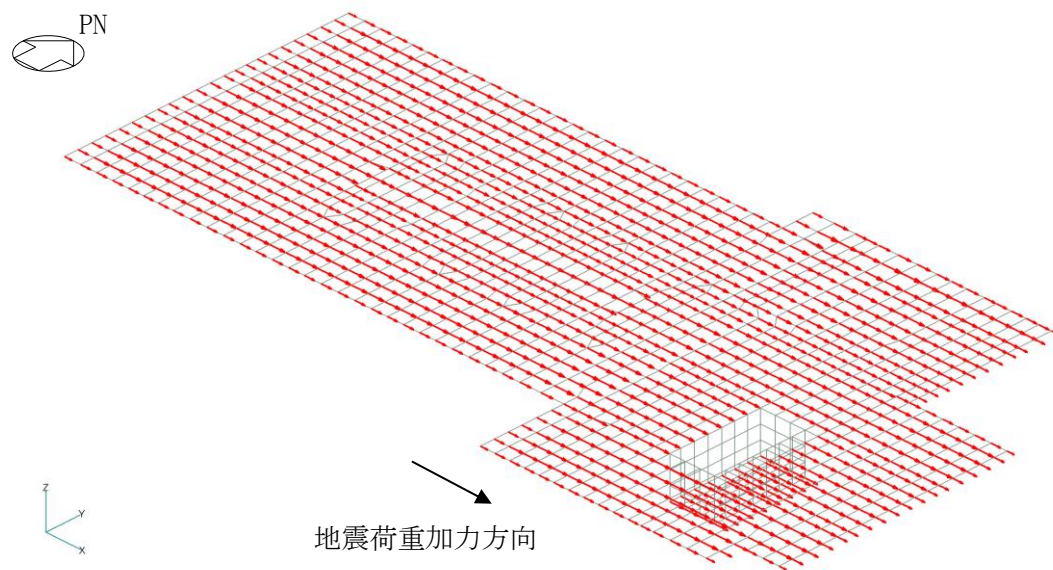


(e) 鉛直力

図 2-2(3) FEMモデルに入力する地震荷重

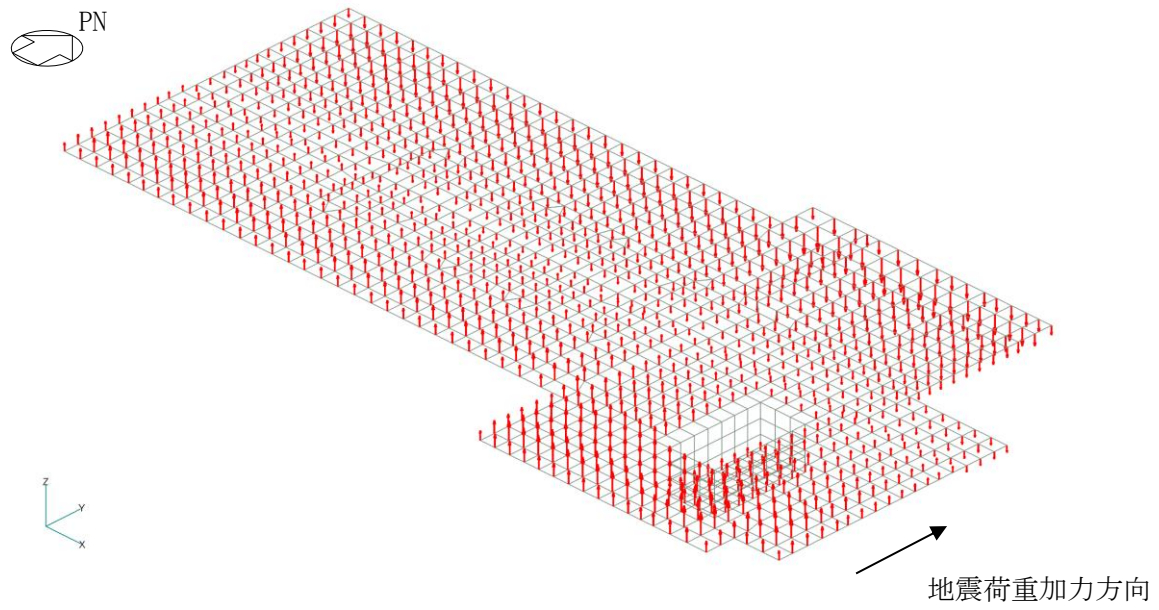


(f) 付加せん断力 (N S 方向)

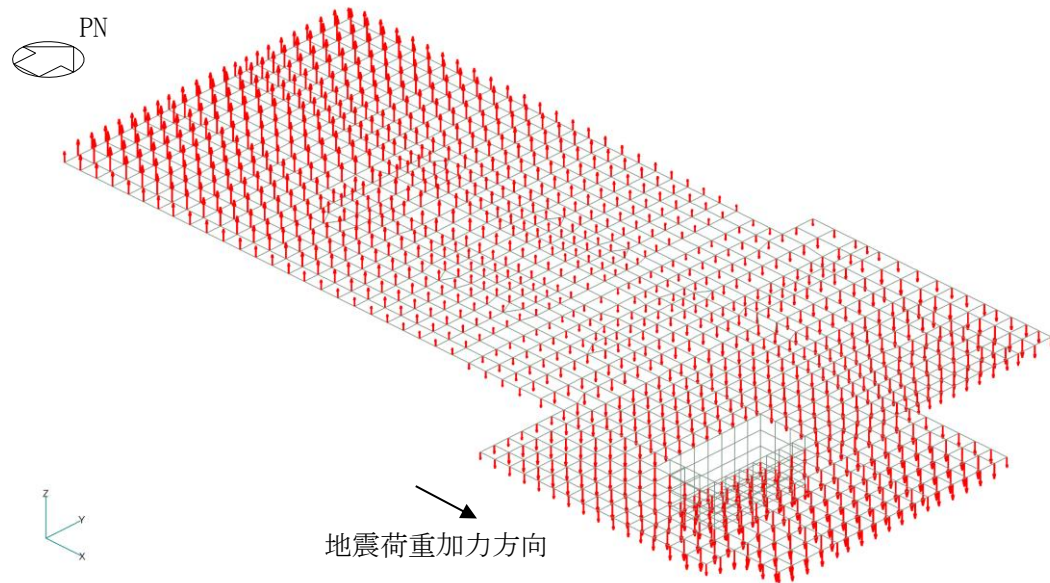


(g) 付加せん断力 (E W 方向)

図 2-2(4) F E Mモデルに入力する地震荷重



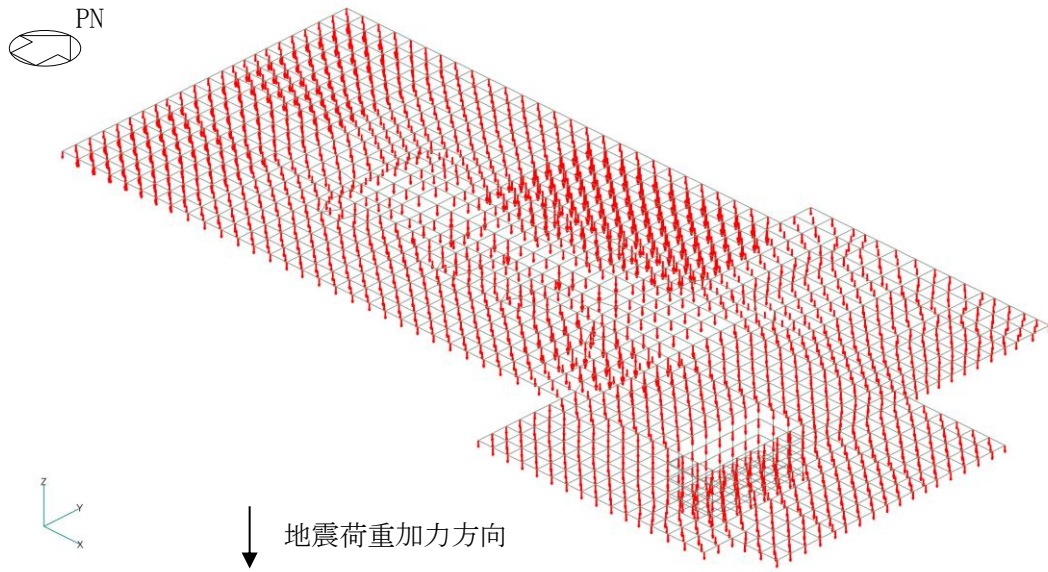
(h) 付加曲げモーメント (N S方向)



(i) 付加曲げモーメント (E W方向)

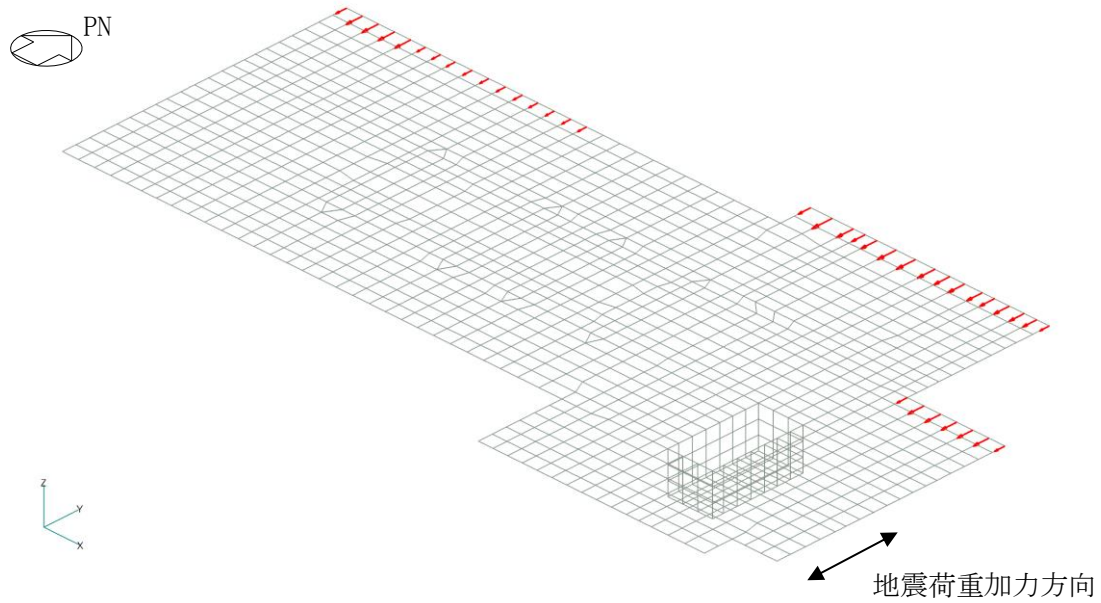
図 2-2(5) F E Mモデルに入力する地震荷重



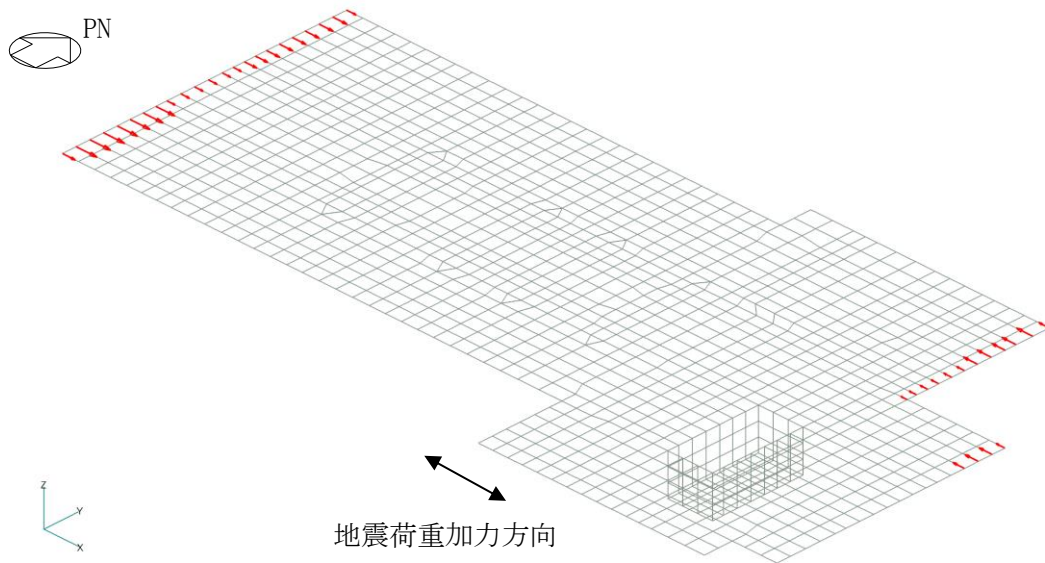


(j) 付加軸力

図 2-2(6) FEMモデルに入力する地震荷重

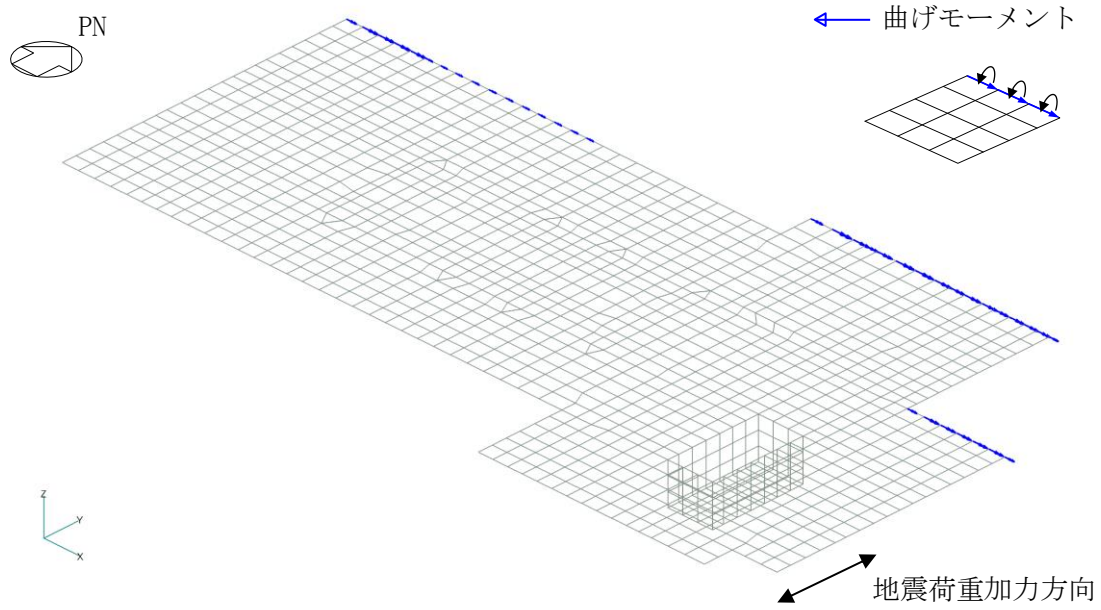


(k) 地震時土圧荷重 (せん断力) (N S方向)

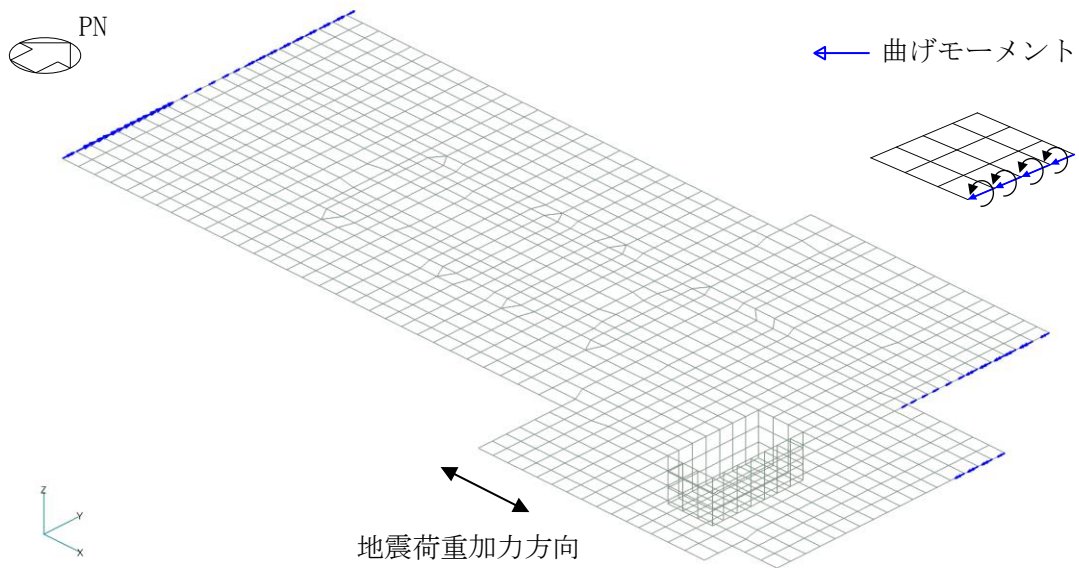


(l) 地震時土圧荷重 (せん断力) (E W方向)

図 2-2(7) FEMモデルに入力する地震荷重

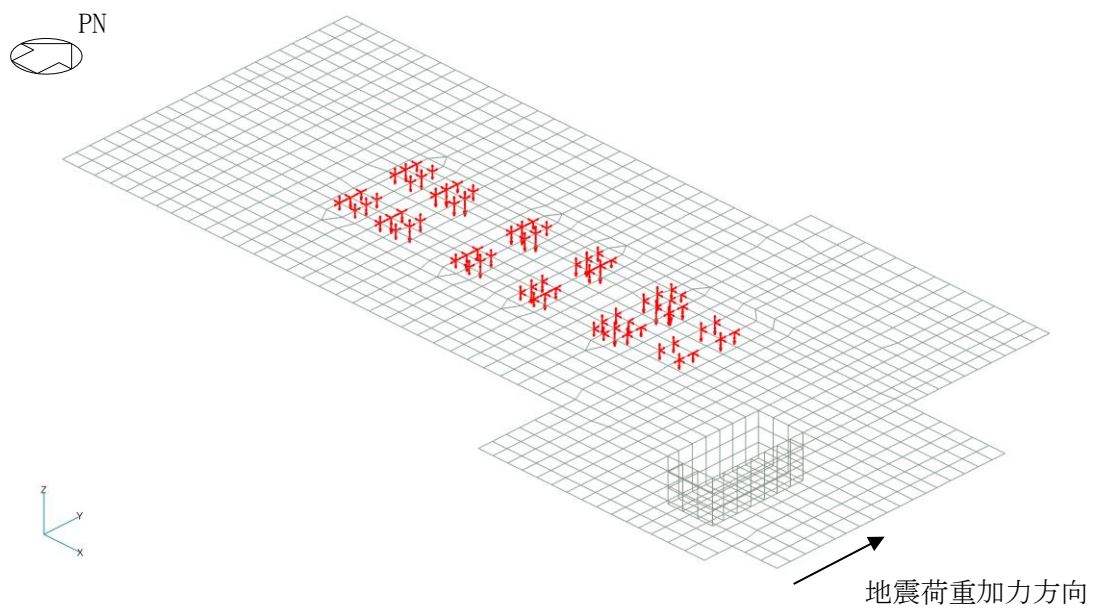


(m) 地震時土圧荷重（曲げモーメント）（NS方向）

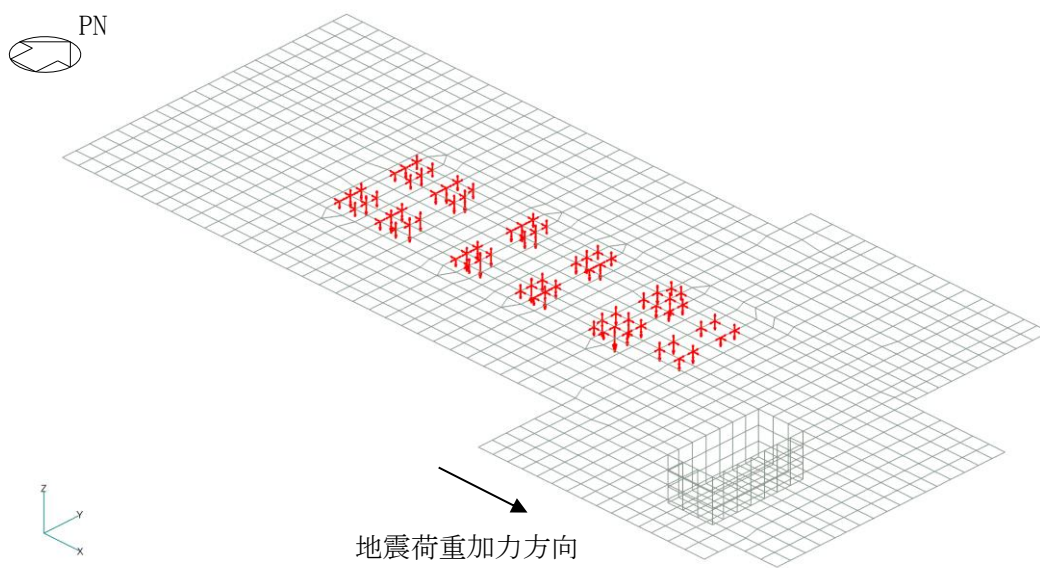


(n) 地震時土圧荷重（曲げモーメント）（EW方向）

図 2-2(8) FEMモデルに入力する地震荷重

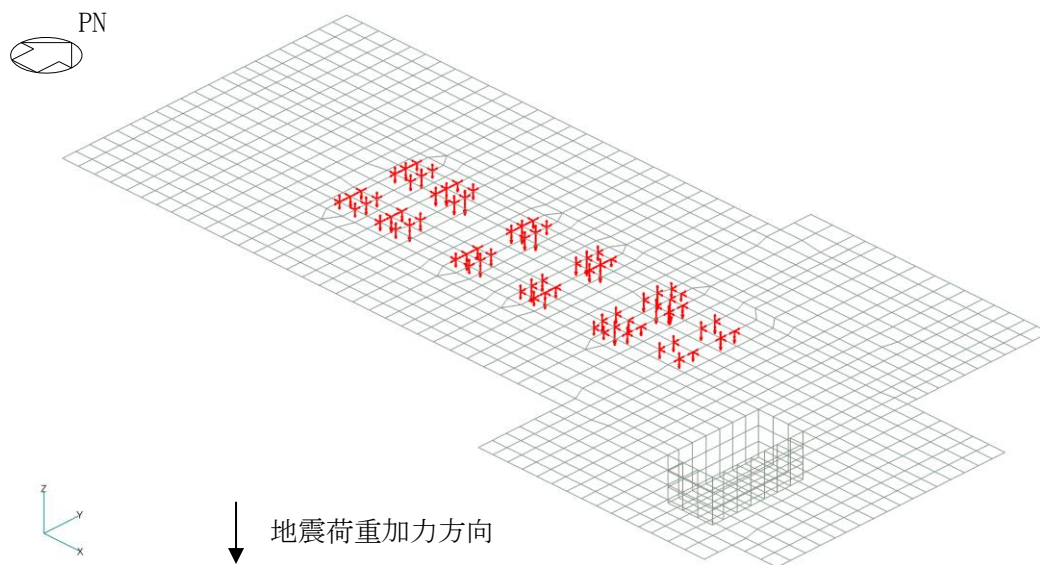


(o) 蒸気タービンの基礎反力 (NS方向)



(p) 蒸気タービンの基礎反力 (EW方向)

図 2-2(9) FEMモデルに入力する地震荷重



(q) 蒸気タービンの基礎反力（鉛直方向）

図 2-2(10) 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、タービン建物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

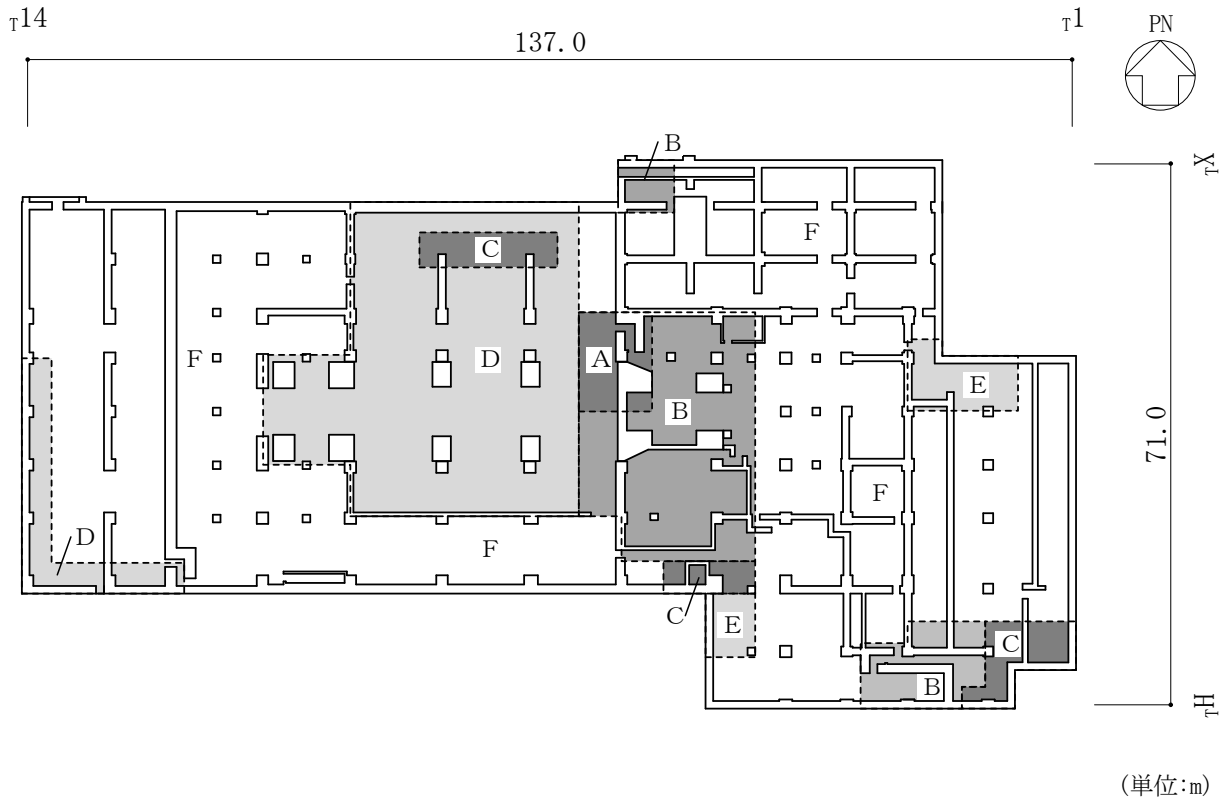
タービン建物基礎スラブの荷重の組合せケースを表 2-1 に、配筋領域図を図 2-1 に、配筋一覧を表 2-2 に示す。

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。

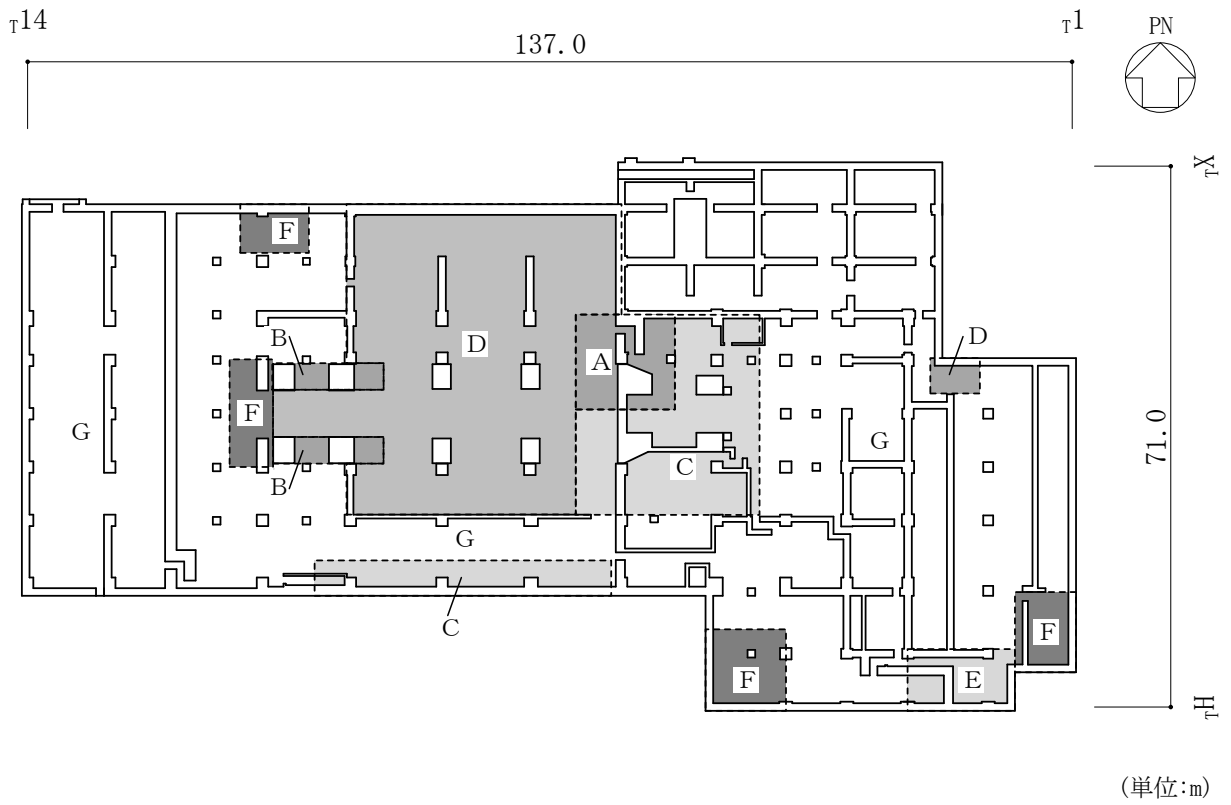
今回工認では、基準地震動  $S_s$  による入力が増大に伴い、タービン建物の鉄筋コンクリート構造全体としての挙動が塑性域に入ると考えられるため、その塑性域の挙動を適切に評価するためにタービン建物の基礎スラブの応力解析に弾塑性解析を採用している。タービン建物は基礎スラブ厚が 2.0m~2.5m と比較的薄く、基礎スラブ上に耐震壁が偏在する構造となっているが、図 2-3 に示すとおり、基礎スラブに特異な応力分布は生じていないこと及びコンクリート、鉄筋が強非線形領域に至っていないことから、弾塑性解析を採用することは妥当であると考えられる。

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

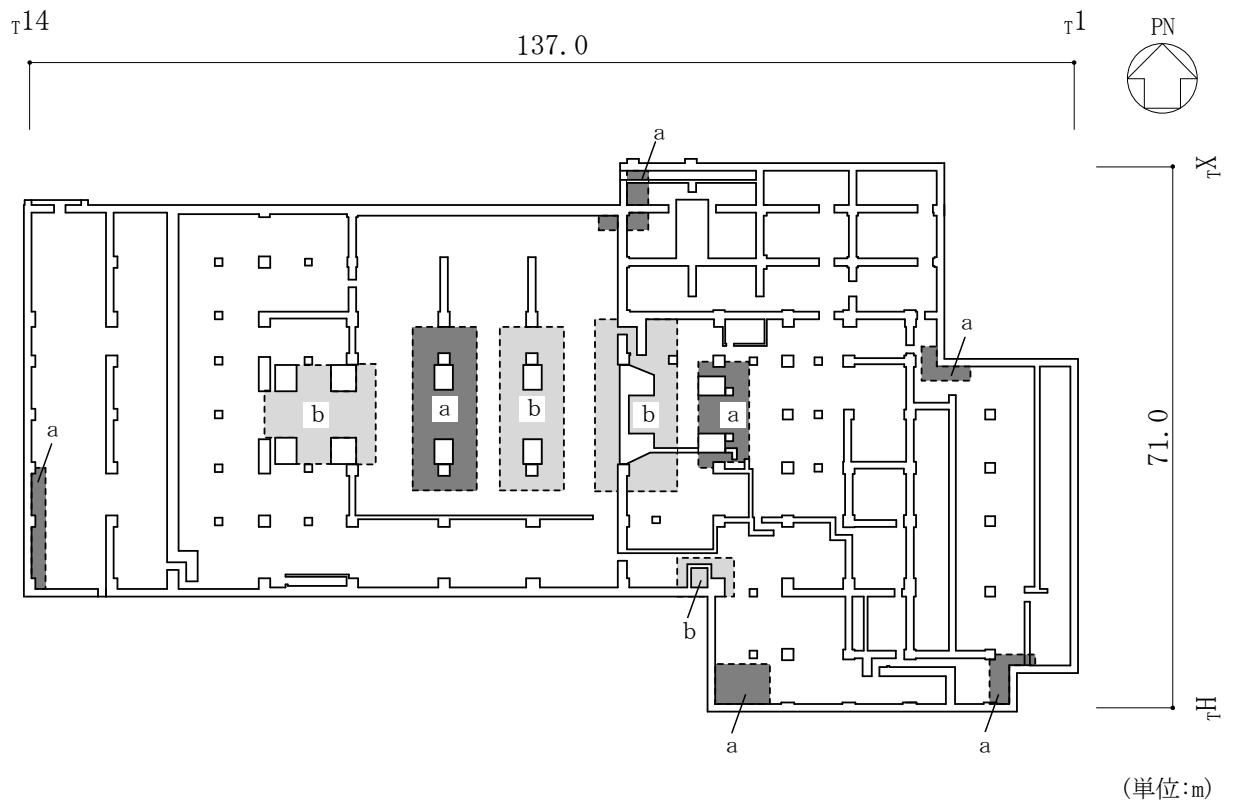


(a) 主筋（下ば筋）



(b) 主筋（上ば筋）

図 2-1(1) 配筋領域図



(c) せん断補強筋

図 2-1(2) 配筋領域図

表 2-2(1) 配筋一覽

(a) 主筋 (下ば筋)

領域	方向	配筋
A	N S	3-D32@200
	E W	3-D32@200
B	N S	2-D32@200
	E W	2-D32@200
C	N S	2-D32@200 + D32@400
	E W	2-D32@200 + D32@400
D	N S	D32@200 + D32@400
	E W	2-D32@200
E	N S	2-D32@200
	E W	D32@200 + D32@400
F	N S	D32@200
	E W	D32@200

表 2-2(2) 配筋一覧

(b) 主筋 (上ば筋)

領域	方向	配筋
A	N S	2-D38@200 + D32@400
	E W	2-D38@200 + D32@200
B	N S	2-D32@200 + D32@400
	E W	2-D32@200 + D32@400
C	N S	2-D32@200
	E W	2-D32@200
D	N S	D32@200 + D32@400
	E W	2-D32@200
E	N S	2-D32@200
	E W	D32@200 + D32@400
F	N S	D32@200 + D32@400
	E W	D32@200 + D32@400
G	N S	D32@200
	E W	D32@200

(c) せん断補強筋

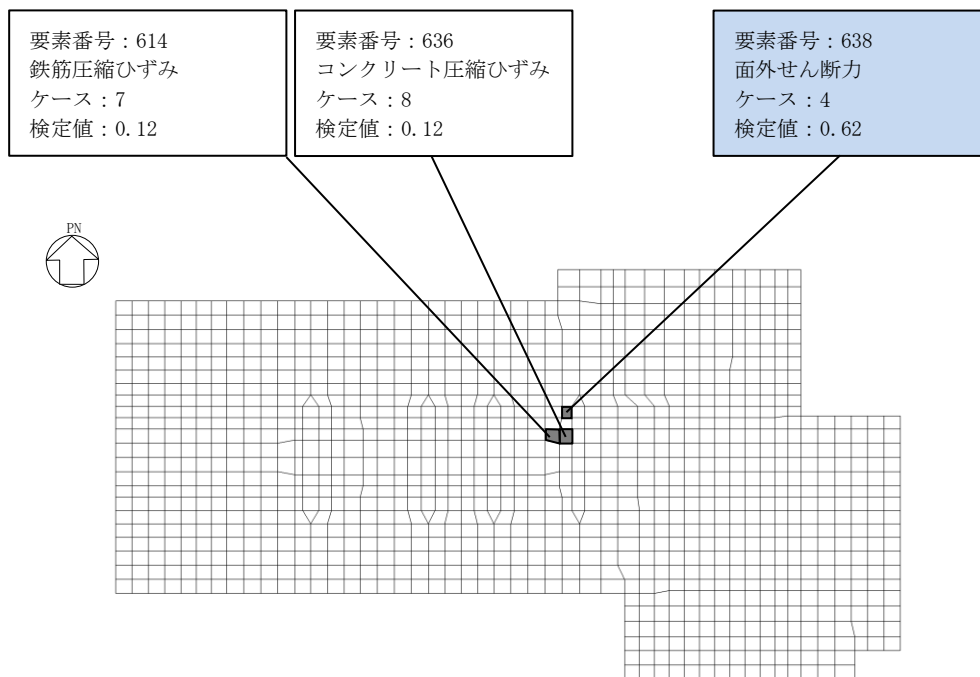
領域	配筋
a	D32@400 × 400
b	D38@400 × 400

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	コンクリート圧縮ひずみ	E W	636	8	0.12
	鉄筋圧縮ひずみ	E W	614	7	0.12
面外せん断力	面外せん断力	E W	638	4	0.62 (1.06)

注1：□ は、検定値が最大となる要素を示す。

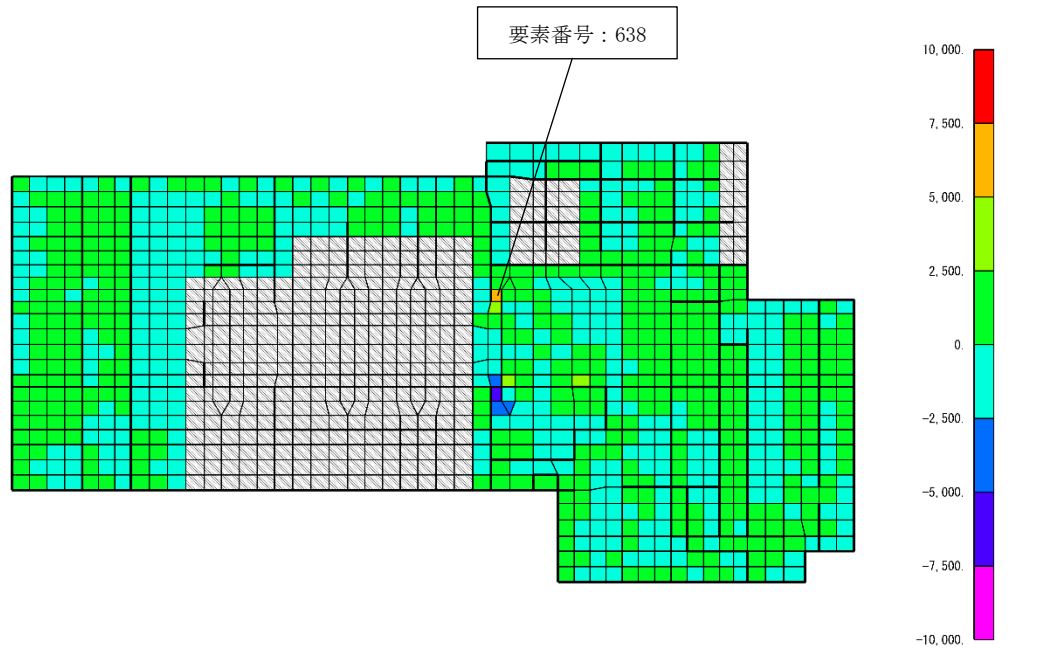
注2：( )内は応力平均化前の値を示す。



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





注：グレーハッチ箇所は機能維持範囲外のエリアを示す。

面外せん断力（EW方向，ケース4）

(kN/m)

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 5-7
3. まとめ	別紙 5-9

## 1. 概要

VI-2-2-7「タービン建物の地震応答計算書」に示すように、タービン建物は基準地震動  $S_s$  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、タービン建物の基礎スラブの応力解析では、VI-2-2-8「タービン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、タービン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。

## 2. 壁の塑性化に対する影響検討

### 2.1 検討方針

タービン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。

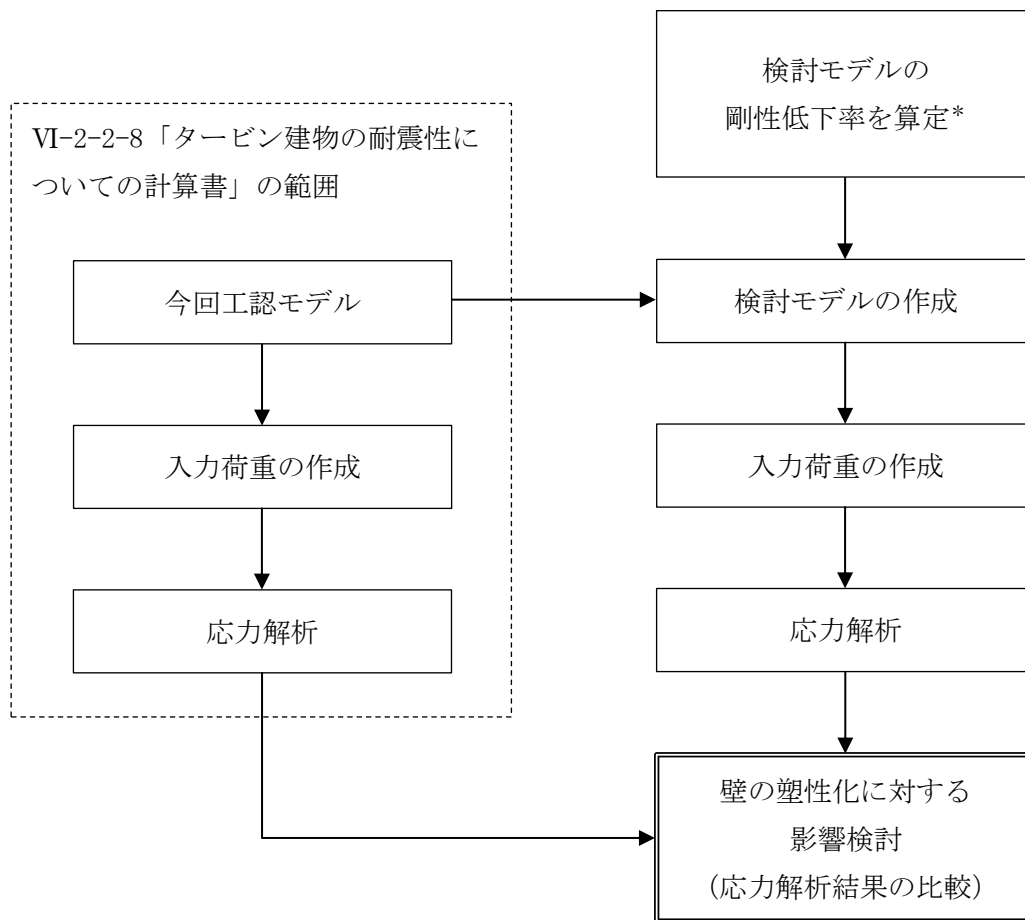
### 2.2 検討方法

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4 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、タービン建物の基準地震動  $S_s$  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。

表 2-1 にタービン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-024-03 タービン建物の地震応答計算書に関する補足説明資料」の別紙 3-2 「材料物性の不確かさを考慮した地震応答解析結果」参照。

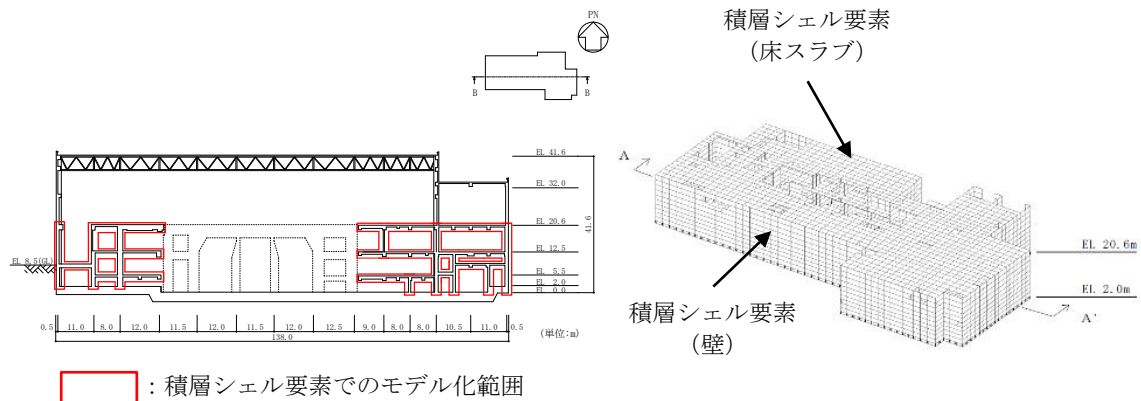


図 2-2 今回工認モデルの概念図

表 2-1(1) タービン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

部位	EL (m)	剛性低下率
T1-T2	20.6~12.5	0.893
	12.5~9.0	—
	9.0~2.0	0.374
T3-T6	20.6~12.5	—
	12.5~5.5	0.408
	5.5~2.0	0.663
T7-T10(TA側)	20.6~12.5	—
	12.5~5.5	—
	5.5~2.0	0.989
T7-T10(TF側)	20.6~12.5	0.293
	12.5~5.5	0.484
	5.5~2.0	0.354
T11-T13	20.6~12.5	—
	12.5~5.5	—
	5.5~2.0	0.707
T14	20.6~12.5	—
	12.5~2.0	—

注1：「—」は、塑性化していないことを示す。

注2：各フロアの最小値（N S 方向及びE W 方向包絡）をハッチングで示す。



表 2-1(2) タービン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

(b) E W方向

部位	EL (m)	剛性低下率
TX-TZ (T14 側)	20.6~12.5	0.548
	12.5~5.5	0.422
TX-TZ (T1 側)	20.6~8.8	0.287
	8.8~5.5	—
TX-TZ	5.5~2.0	0.840
TA-TC	20.6~12.5	0.476
TA-TC (T14 側)	12.5~5.5	0.602
	5.5~2.0	0.635
TA-TC (T1 側)	12.5~5.5	0.494
	5.5~2.0	0.602
TC-TF	20.6~12.5	—
	12.5~5.5	0.388
	5.5~2.0	0.551
TG-TH	20.6~12.5	0.838
	12.5~5.5	0.473
	5.5~2.0	0.521

注 1 : 「—」は、塑性化していないことを示す。

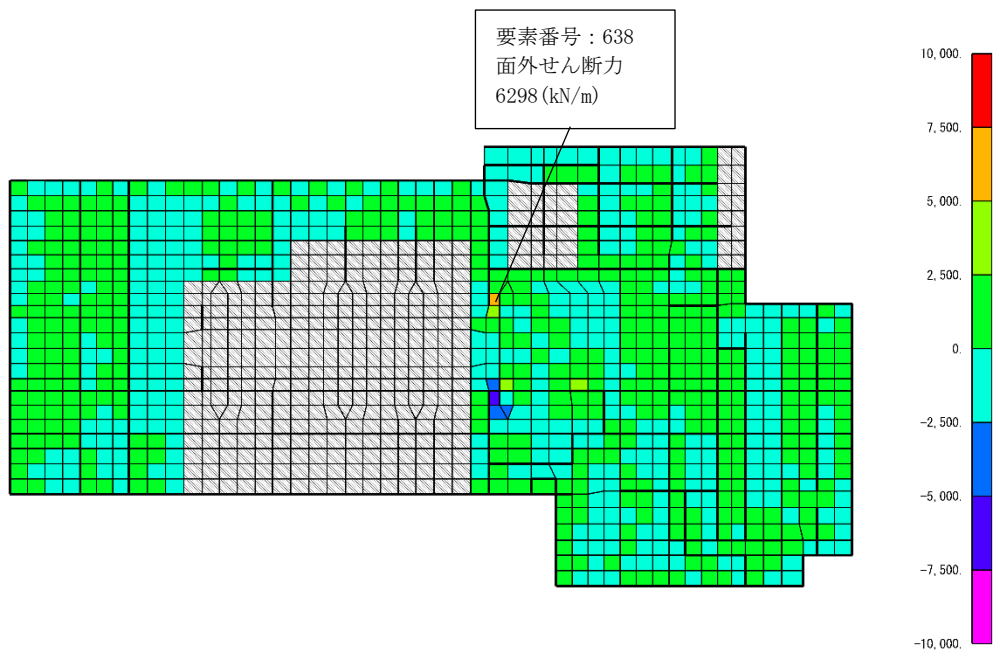
注 2 : 各フロアの最小値 (N S 方向及び E W 方向包絡) をハッチングで示す。

表 2-2 検討モデルの剛性低下率

EL (m)	剛性低下率
20.6~12.5	0.287
12.5~5.5	0.287
5.5~2.0	0.354

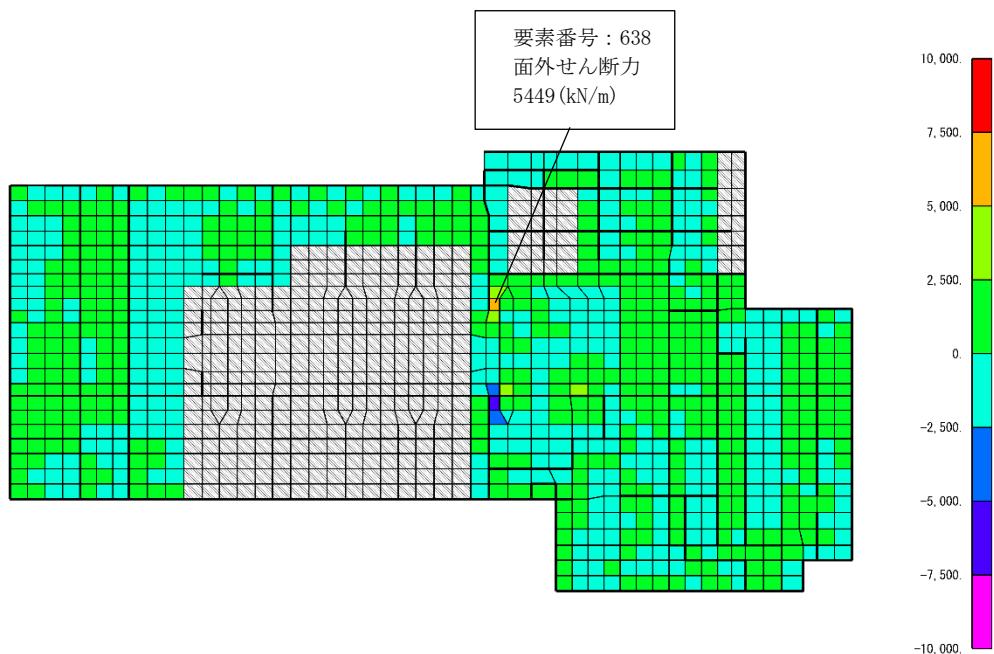
#### 2.4 検討結果

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小さくなる。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。



(単位：kN/m)

(a) 今回工認モデル



(単位：kN/m)

(b) 検討モデル

注：グレーハッチ箇所は機能維持範囲外エリアを示す。

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 4)

### 3. まとめ

タービン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、タービン建物の基礎スラブは、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、タービン建物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  $0.660 \times 10^3 \text{kN/m}^2$  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	133	21.6	0.623
S s - F 1	99.9	15.2	0.523
S s - F 2	100	17.8	0.558
S s - N 1	89.3	24.7	0.640
S s - N 2 NS	138	21.2	0.621
S s - N 2 EW	138	19.0	0.593

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	133	27.8	0.518
S s - F 1	99.9	30.1	0.514
S s - F 2	100	28.3	0.503
S s - N 1	89.3	26.1	0.484
S s - N 2 NS	138	21.2	0.479
S s - N 2 EW	138	23.8	0.495



表 2-3 S<sub>s</sub>地震時の接地圧 (ケース 2, NS方向)

基準地震動 S <sub>s</sub>	鉛直力 N (×10 <sup>4</sup> kN)	転倒モーメント M (×10 <sup>6</sup> kN・m)	最大接地圧 (×10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub> -D	134	20.9	0.615
S <sub>s</sub> -F1	103	15.9	0.533
S <sub>s</sub> -F2	99.6	16.4	0.538
S <sub>s</sub> -N1	89.9	23.4	0.623
S <sub>s</sub> -N2NS	130	20.0	0.601
S <sub>s</sub> -N2EW	130	18.6	0.583

表 2-4 S<sub>s</sub>地震時の接地圧 (ケース 2, EW方向)

基準地震動 S <sub>s</sub>	鉛直力 N (×10 <sup>4</sup> kN)	転倒モーメント M (×10 <sup>6</sup> kN・m)	最大接地圧 (×10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub> -D	134	26.8	0.512
S <sub>s</sub> -F1	103	29.6	0.513
S <sub>s</sub> -F2	99.6	27.1	0.495
S <sub>s</sub> -N1	89.9	25.0	0.477
S <sub>s</sub> -N2NS	130	21.3	0.475
S <sub>s</sub> -N2EW	130	23.8	0.491

表 2-5 S<sub>s</sub>地震時の接地圧 (ケース 3, NS方向)

基準地震動 S <sub>s</sub>	鉛直力 N (×10 <sup>4</sup> kN)	転倒モーメント M (×10 <sup>6</sup> kN・m)	最大接地圧 (×10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub> -D	133	23.1	0.643
S <sub>s</sub> -F1	105	17.3	0.553
S <sub>s</sub> -F2	104	18.9	0.573
S <sub>s</sub> -N1	90.9	26.1	0.660
S <sub>s</sub> -N2NS	138	22.8	0.642
S <sub>s</sub> -N2EW	138	19.9	0.604

表 2-6 S<sub>s</sub>地震時の接地圧 (ケース 3, EW方向)

基準地震動 S <sub>s</sub>	鉛直力 N (×10 <sup>4</sup> kN)	転倒モーメント M (×10 <sup>6</sup> kN・m)	最大接地圧 (×10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub> -D	133	29.0	0.525
S <sub>s</sub> -F1	105	30.3	0.518
S <sub>s</sub> -F2	104	28.1	0.504
S <sub>s</sub> -N1	90.9	26.4	0.486
S <sub>s</sub> -N2NS	138	22.8	0.489
S <sub>s</sub> -N2EW	138	24.5	0.499

表 2-7 S<sub>s</sub>地震時の接地圧 (ケース 4, NS方向)

基準地震動 S <sub>s</sub>	鉛直力 N (×10 <sup>4</sup> kN)	転倒モーメント M (×10 <sup>6</sup> kN・m)	最大接地圧 (×10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub> -D	133	21.4	0.621
S <sub>s</sub> -F1	99.1	14.8	0.518
S <sub>s</sub> -F2	102	18.3	0.564
S <sub>s</sub> -N1	89.5	25.0	0.645
S <sub>s</sub> -N2NS	138	21.4	0.623
S <sub>s</sub> -N2EW	138	19.0	0.592

表 2-8 S<sub>s</sub>地震時の接地圧 (ケース 4, EW方向)

基準地震動 S <sub>s</sub>	鉛直力 N (×10 <sup>4</sup> kN)	転倒モーメント M (×10 <sup>6</sup> kN・m)	最大接地圧 (×10 <sup>3</sup> kN/m <sup>2</sup> )
S <sub>s</sub> -D	133	28.8	0.524
S <sub>s</sub> -F1	99.1	29.8	0.513
S <sub>s</sub> -F2	102	28.4	0.505
S <sub>s</sub> -N1	89.5	26.3	0.486
S <sub>s</sub> -N2NS	138	21.3	0.480
S <sub>s</sub> -N2EW	138	24.0	0.497

## 別紙 7 応力解析における応力平均化の考え方

## 目 次

1. 概要	別紙 7-1
2. 応力平均化の考え方	別紙 7-2
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 7-2
2.2 応力平均化の方法	別紙 7-4
2.3 応力平均化の結果	別紙 7-9
2.4 断面の評価	別紙 7-10
2.4.1 断面の評価方法	別紙 7-10
2.4.2 断面の評価結果	別紙 7-10

## 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 制定）」（以下「RC-N規準」という。）に基づき、応力の再配分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ではなく、周囲の複数の要素で平均化した応力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、タービン建物の基礎スラブ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

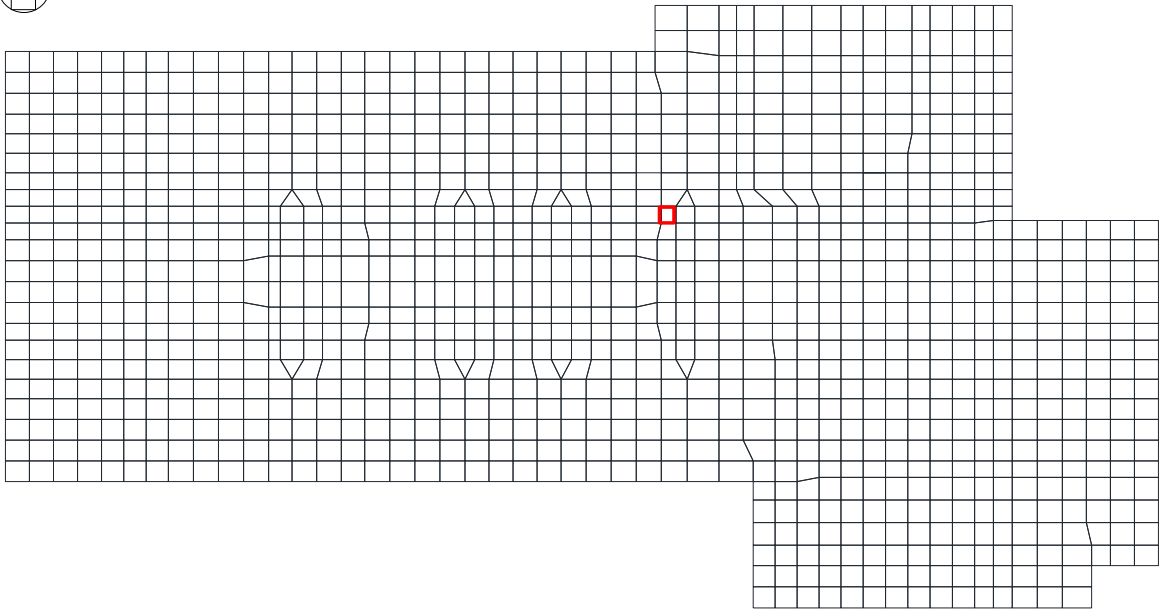
断面の評価要素は，応力平均化を行うことによって応力が変わることから，応力平均化前の断面力に対する検定値をもとに選定している。

タービン建物の基礎スラブでは，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)
基礎スラブ	面外 せん断力	面外せん 断応力度	E W	638	4	1.06



617	639	658	673	697
616	638	657	672	696
615	637	656	671	695

图 2-1 要素位置图



## 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。

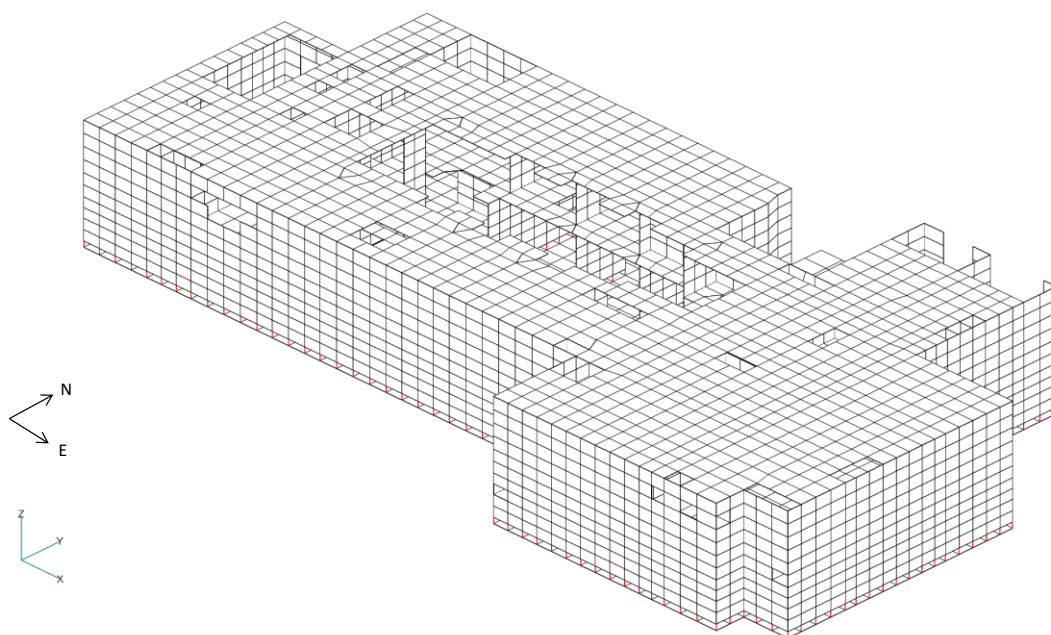
図2-2にタービン建物の基礎スラブの3次元FEMモデルを示す。図2-2に示すように、当該部は耐震壁との接続部分であり、応力が集中しやすい。図2-3に示す面外せん断力のコンター図を見ると、当該要素周辺では大きな面外せん断力が発生していることが分かる。

そこで、タービン建物の基礎スラブの応力解析において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、「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、基礎スラブ全体でも鉄筋のひずみの最大値は、 $0.576 \times 10^{-3}$ であり、鉄筋降伏時のひずみ  $1.68 \times 10^{-3}$ を下回っていること、応力平均化範囲及びその周辺領域では全面的な曲げ降伏状態には至っていないことを確認している。

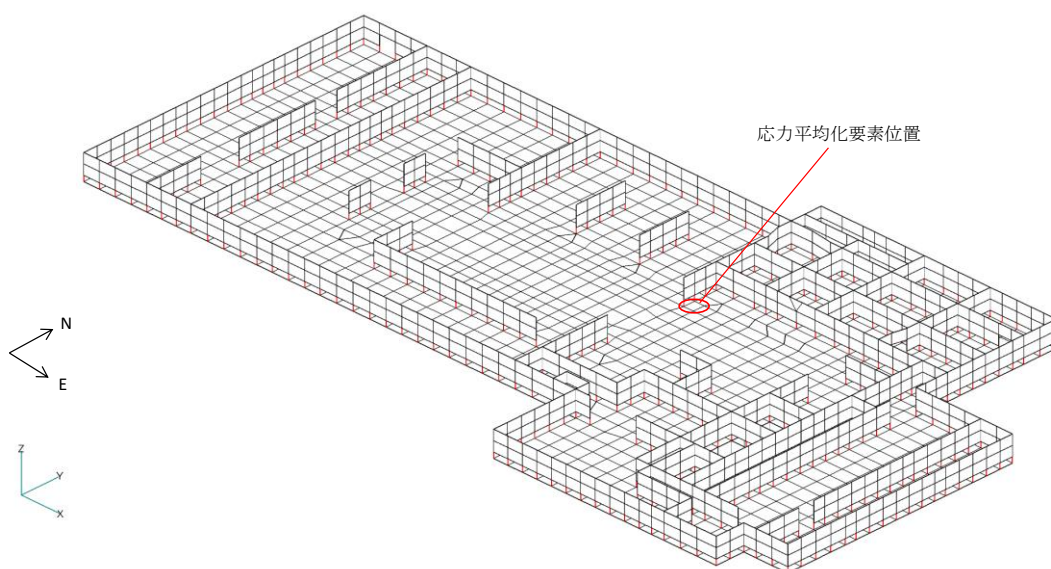
「RC-N規準」においては、「線材では、部材端に生じる斜めせん断ひび割れによって部材有効せい程度離れた断面の引張鉄筋の応力度が部材端と同じ大きさまで増大する現象（テンションシフト）が生じるが、面材では、斜めひび割れが発生した場合においても、材軸直交方向への応力再配分によって、線材におけるテンションシフトのような現象は生じにくいと考えられる。」とされており、耐震壁の面外せん断力について、「面材であるため、局部的に応力の集中があったとしても、応力の再配分を生じ、破壊に至ることはない。」とされている。また、基礎スラブのような大断面を有する面材の面外せん断力について、「通常の場合、FEM解析の要素サイズは、基礎スラブ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、基礎スラブにおいても、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、床スラブ又は基礎スラブ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。タービン建物の基礎スラブ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スラブ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2.5m分の範囲で行った。応力平均化範囲を図2-6に示す。

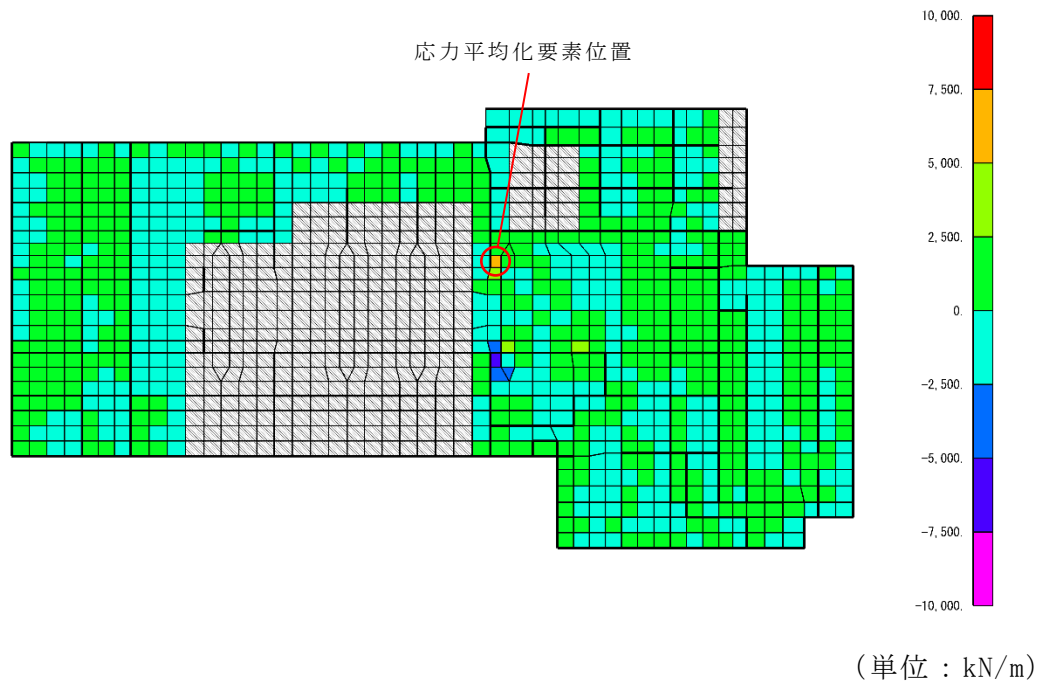
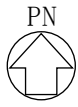


(全体)



(最下階)

図 2-2 タービン建物の基礎スラブの 3 次元 F E M モデル



注：太線部は耐震壁の位置を示す。

グレーハッチ箇所は機能維持範囲外エリアを示す。

図 2-3 面外せん断力のコンター図

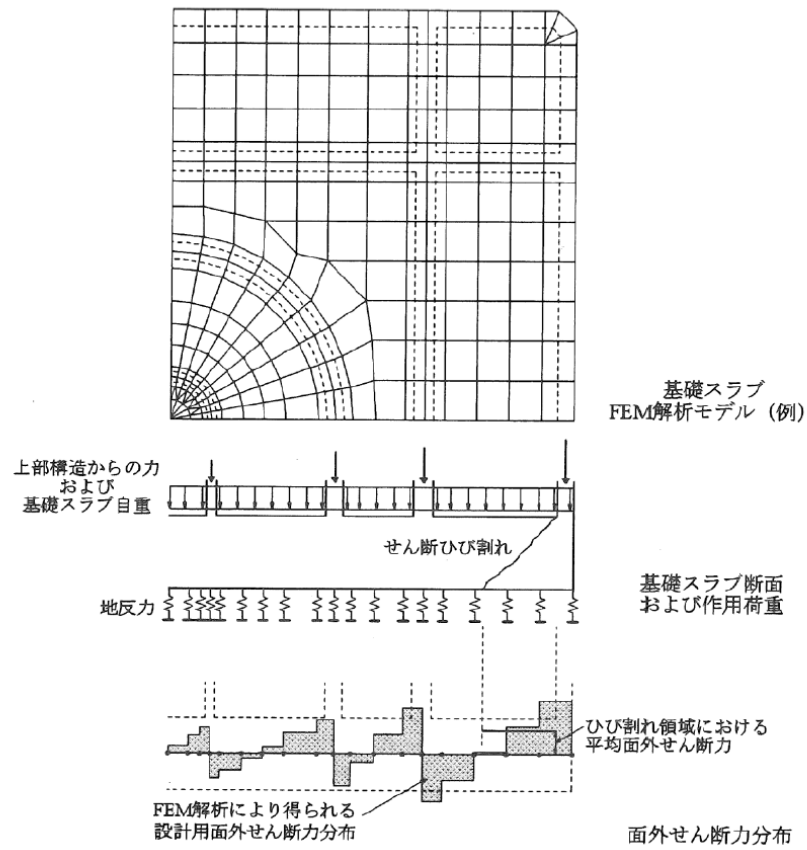


図 2-4 「RC-N 規準」の付図 2.2

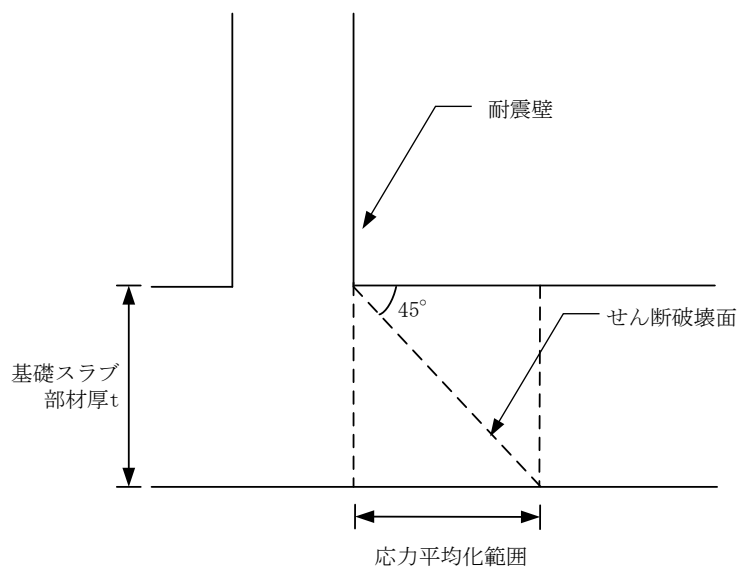
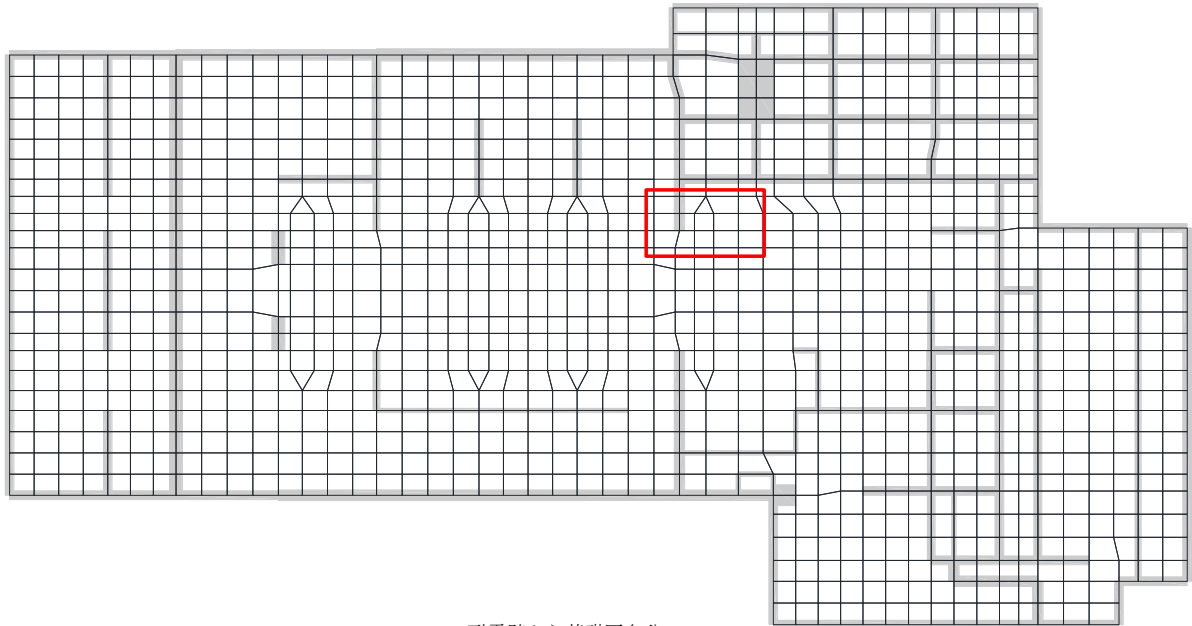
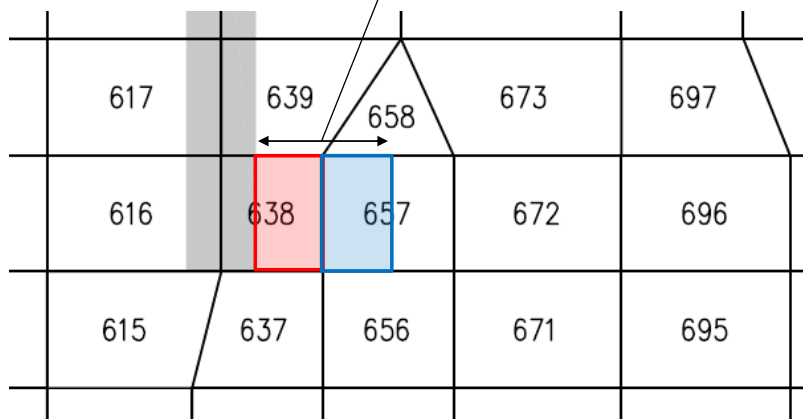


図 2-5 タービン建物の基礎スラブにおける面外せん断力に対する応力平均化の考え方



耐震壁から基礎厚さ分の長さ2.5mの範囲






-  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)

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。

$$Q_{ave} = \Sigma (Q_i \times A_i) / \Sigma A_i$$

ここで、

$Q_{ave}$  : 平均化後の面外せん断力

$Q_i$  : 平均化前の各要素の面外せん断力 (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 $Q_i$ ( $\times 10^3 \text{kN/m}$ )	要素面積 $A_i$ ( $\text{m}^2$ )	重み付け値 $Q_i \times A_i$
638	E W	4	638	6.30	2.3	14.5
			657	0.146	2.7	0.394
合計					5.0	14.9

表 2-3 応力平均化の結果

要素番号	方向	組合せ ケース	面外せん断力 ( $\times 10^3 \text{kN/m}$ )	
			平均化前	平均化後
638	E W	4	6.30	2.98

## 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 4 の面外せん断力について、発生値が許容値を超えないことを確認する。許容値は、「RC-N規準」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力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	面外せん断力 ( $\times 10^3 \text{kN/m}$ )		平均化後の検定値 (発生値/許容値)
			発生値	許容値	
638	E W	4	2.98	4.83	0.62

注：許容せん断力は、発生値と同様に要素面積を考慮した重み付け平均値とする。

## 別紙 8 蒸気タービンの基礎を逆位相とした場合の影響検討



## 目 次

1. 概要	別紙 8-1
2. 影響検討	別紙 8-1
2.1 検討方法	別紙 8-1
2.2 荷重の組合せ	別紙 8-2
2.3 検討結果	別紙 8-3

## 1. 概要

VI-2-2-8「タービン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評価では，建物のロックングによる基礎浮上りが基礎スラブの接地面に局所的に過大な応力を発生させることが考えられることから，基礎浮上りが起こりやすい条件として，タービン建物と蒸気タービンの基礎の振動の位相を同位相となるように荷重を設定していた。

本検討では，タービン建物と蒸気タービンの基礎が逆位相で振動する場合の影響を検討する。

## 2. 影響検討

### 2.1 検討方法

タービン建物と蒸気タービンの基礎が逆位相の振動をする場合の基礎スラブの評価では，耐震計算書の応力解析モデルに入力している荷重のうち，蒸気タービンの基礎からの反力を逆方向に作用させる。なお，入力する荷重の大きさは耐震計算書における基礎スラブに入力するS s地震荷重と同じであり，応力解析モデルは工認モデルからの変更はない。

## 2.2 荷重の組合せ

解析ケースは組合せ係数法に基づいて、表 2-1 に示す 16 ケースとした。

表 2-1 解析ケース

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ*	蒸気タービンの基礎反力 (水平方向)
S s 地震時	1	$G + P + 1.0 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ UD}$	$1.0 T G_{NS}$
	2	$G + P + 1.0 S_{s\ NS} + 0.4 S_{s\ UD}$	$1.0 T G_{SN}$
	3	$G + P + 1.0 S_{s\ SN} + 0.4 S_{s\ DU}$	$1.0 T G_{NS}$
	4	$G + P + 1.0 S_{s\ NS} + 0.4 S_{s\ DU}$	$1.0 T G_{SN}$
	5	$G + P + 1.0 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ UD}$	$1.0 T G_{EW}$
	6	$G + P + 1.0 S_{s\ EW} + 0.4 S_{s\ UD}$	$1.0 T G_{WE}$
	7	$G + P + 1.0 S_{s\ WE} + 0.4 S_{s\ DU}$	$1.0 T G_{EW}$
	8	$G + P + 1.0 S_{s\ EW} + 0.4 S_{s\ DU}$	$1.0 T G_{WE}$
	9	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} + 1.0 S_{s\ UD}$	$0.4 T G_{NS}$
	10	$G + P + 0.4 S_{s\ NS} + 1.0 S_{s\ UD}$	$0.4 T G_{SN}$
	11	$G + P + 0.4 S_{s\ SN} + 1.0 S_{s\ DU}$	$0.4 T G_{NS}$
	12	$G + P + 0.4 S_{s\ NS} + 1.0 S_{s\ DU}$	$0.4 T G_{SN}$
	13	$G + P + 0.4 S_{s\ WE} + 1.0 S_{s\ UD}$	$0.4 T G_{EW}$
	14	$G + P + 0.4 S_{s\ EW} + 1.0 S_{s\ UD}$	$0.4 T G_{WE}$
	15	$G + P + 0.4 S_{s\ WE} + 1.0 S_{s\ DU}$	$0.4 T G_{EW}$
	16	$G + P + 0.4 S_{s\ EW} + 1.0 S_{s\ DU}$	$0.4 T G_{WE}$

注記\* : 水平地震力に蒸気タービンの基礎反力は含まない。

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

$T G_{SN}$  : S → N 方向 蒸気タービンの基礎反力

$T G_{NS}$  : N → S 方向 蒸気タービンの基礎反力

$T G_{EW}$  : E → W 方向 蒸気タービンの基礎反力

$T G_{WE}$  : W → E 方向 蒸気タービンの基礎反力

### 2.3 検討結果

表 2-2 及び図 2-1 にタービン建物と蒸気タービンの基礎が逆位相となる場合の検討結果を示す。比較のために表 2-3 及び図 2-2 に工認モデル（蒸気タービンの基礎同位相）の検討結果も示す。蒸気タービンの基礎を逆位相とした場合、図 2-1 及び図 2-2 に示すとおり、最大値発生位置に変動は生じるものの、コンクリートの最大圧縮ひずみ、鉄筋最大ひずみ及び面外せん断力は、いずれも許容限界内であることを確認した。

表 2-2 最大値一覧（蒸気タービンの基礎逆位相）

項目	方向	要素番号	荷重ケース	解析結果	許容限界
コンクリート 最大圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	N S	637	4	0.652	3.00
	E W	638	4	0.351	3.00
鉄筋最大ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	N S	637	3	1.66	5.00
	E W	258	4	0.953	5.00
面外せん断力 ( $\times 10^3$ kN/m)	N S	655	3	5.30	5.99
	E W	616	4	5.23	5.99

表 2-3 最大値一覧（工認モデル（蒸気タービンの基礎同位相））

項目	方向	要素番号	荷重ケース	解析結果	許容限界
コンクリート 最大圧縮ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	N S	290	4	0.318	3.00
	E W	636	8	0.344	3.00
鉄筋最大ひずみ ( $\times 10^{-3}$ )	N S	457	4	0.402	5.00
	E W	614	7	0.576	5.00
面外せん断力 ( $\times 10^3$ kN/m)	N S	638	3	4.32	5.99
	E W	638	4	2.98* (6.30)	4.83

注記\*：応力の再配分を考慮して、応力平均化を行った結果であり、( )内は、  
応力平均化前の値を示す。

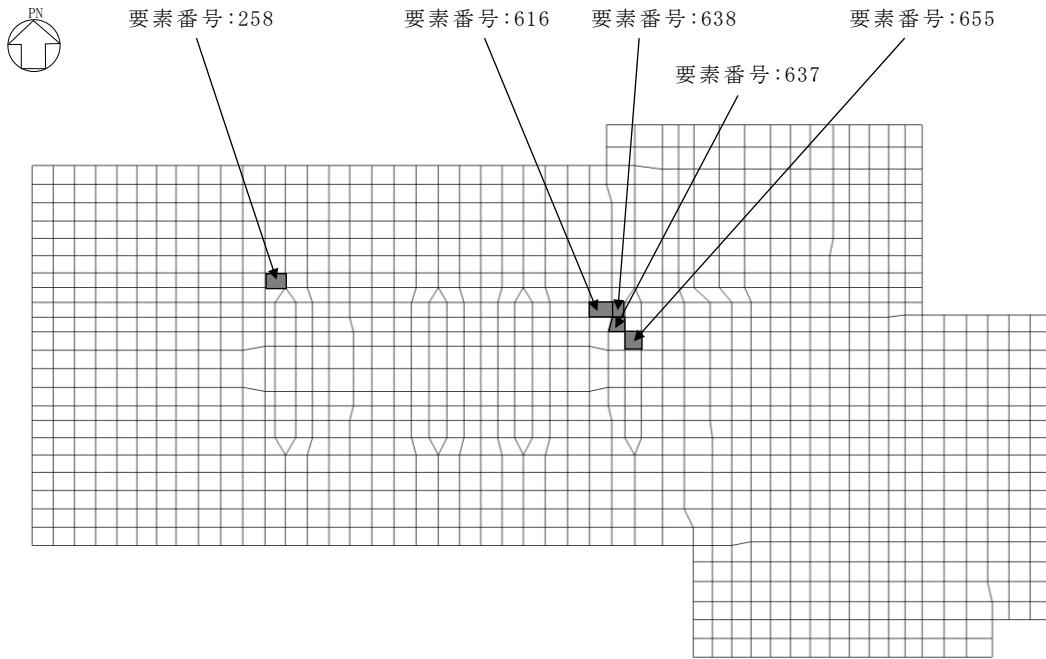


図 2-1 最大値発生位置（蒸気タービンの基礎逆位相）

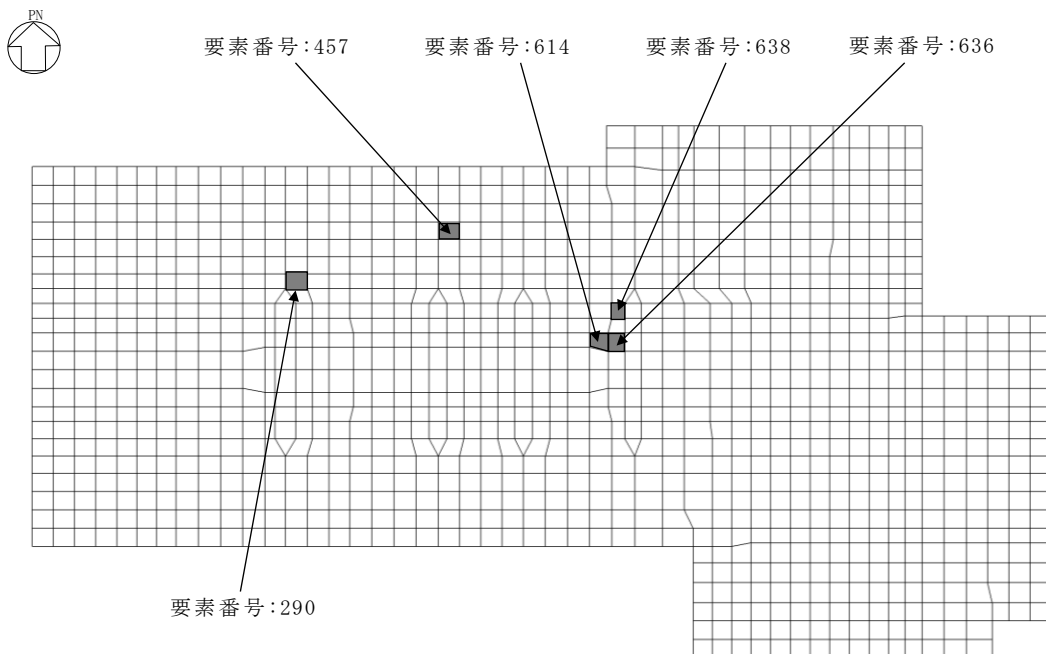


図 2-2 最大値発生位置（工認モデル（蒸気タービンの基礎同位相））