

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
営業秘密又は防護上の観点から  
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-370-2 改6
提出年月日	平成30年10月2日

建物・構築物の耐震計算についての補足説明資料

補足-370-2【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】

平成30年10月

日本原子力発電株式会社

## 目次

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

## 1. 概要

本資料は、使用済燃料乾式貯蔵建屋、緊急時対策所建屋、主排気筒、非常用ガス処理系配管支持架構、格納容器圧力逃がし装置格納槽、原子炉建屋原子炉棟、使用済燃料プール、原子炉格納容器底部コンクリートマット、及び原子炉建屋基礎盤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。

また、本資料は、以下の添付書類の補足説明をするものである。

- ・添付書類「V-2-2-5 使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「V-2-2-11 緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「V-2-2-15-1 主排気筒の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「V-2-2-15-2 主排気筒の基礎の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「V-2-2-17 非常用ガス処理系配管支持架構の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「V-2-2-19 格納容器圧力逃がし装置格納槽の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「V-2-4-2-1 使用済燃料プールの耐震性についての計算書」
- ・添付書類「V-2-9-2-2 原子炉格納容器底部コンクリートマットの耐震性についての計算書」
- ・添付書類「V-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「V-2-9-3-4 原子炉建屋基礎盤の耐震性についての計算書」

## 2. 応力解析におけるモデル化、境界条件及び拘束条件

各建物・構築物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～表 2-9 に示す。

直接基礎の底面地盤ばねの設定における基本的な考え方については、以下の通り。

### ・水平ばね

水平ばねについては、振動アドミタンス理論に基づく水平ばねより算出する。

### ・鉛直ばね

水平加力時の鉛直ばねについては、**基礎浮き上がり**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、振動アドミタンス理論に基づく回転ばねより算出する。

鉛直加力時及び常時の鉛直ばねについては、基礎浮き上りを考慮する建物・構築物については、水平加力・上下加力・常時を同時に評価するため、水平加力時と同様とする。広がりのある建物・構築物については、ロッキング挙動が卓越しないため、振動アドミタンス理論に基づく鉛直ばねより算出する。

なお、格納容器圧力逃がし装置格納槽の地盤ばね剛性の算出については、2次元 FEM モデルによる加振解析で算出したインピーダンスの実部の値とする。

杭基礎の底面地盤ばねの設定における基本的な考え方については、以下の通り。

### ・水平ばね

水平ばねについては、三次元薄層要素法に基づく水平ばねより算出する。

### ・鉛直ばね

水平加力時の鉛直ばねについては、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、三次元薄層要素法に基づく回転ばねより算出する。

鉛直加力時及び長期荷重時の鉛直ばねについては、ロッキング挙動が卓越しないため、三次元薄層要素法に基づく鉛直ばねより算出する。

ただし、主排気筒及び非常用ガス処理系配管支持架構については、基礎から地盤への直接的な応力伝達を考慮せず、杭位置で支持し、杭頭固定により生じる曲げモーメントを考慮することにより、基礎には保守的な条件で設計をしているため、底面地盤ばねを用いていない。

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、以下の通り。

### ・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 原子炉格納容器底部コンクリートマット及び原子炉建屋基礎盤 (1/2)



モデル概要	
<p>○モデル化範囲</p> <ul style="list-style-type: none"><li>原子炉格納容器底部コンクリートマット並びに、原子炉棟基礎及び付属棟基礎を含む原子炉建屋基礎盤及び、これから立ち上がる耐震壁をモデル化する。</li><li>耐震壁は、外部ボックス壁 (O/W)、内部ボックス壁 (I/W)、1次遮蔽壁 (S/W) とし、EL. -4.0 m~14.0 m までの曲げ、せん断及び軸剛性を考慮しモデル化する。</li></ul> 	
<p>○使用要素</p> <ul style="list-style-type: none"><li>原子炉格納容器底部コンクリートマット, 原子炉棟基礎及び付属棟基礎 : シェル要素</li><li>耐震壁 : はり要素</li></ul>	
<p>○要素分割</p> <ul style="list-style-type: none"><li>要素の一片の長さを 2.0m 程度とし、耐震壁、PCV 及び RPV 基礎の配置を考慮して分割する。</li></ul> 	
図 2 モデル概要	

表 2-1 原子炉格納容器底部コンクリートマット及び原子炉建屋基礎盤 (2/2)

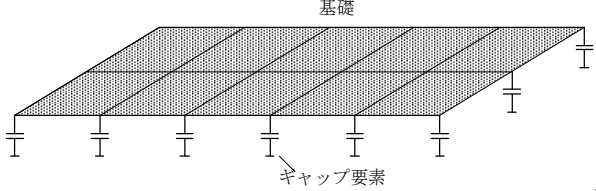
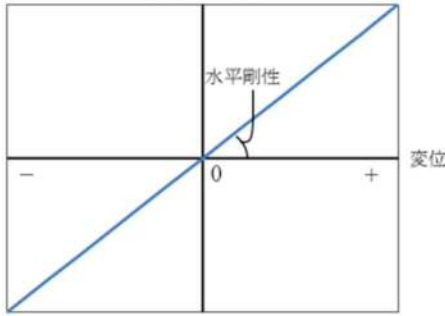
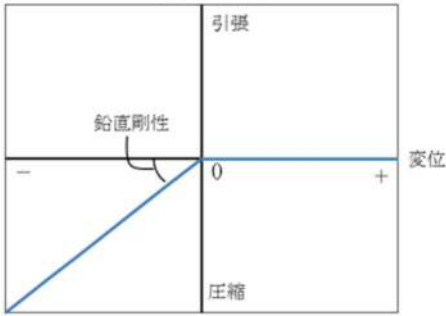
境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎の境界	
<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉格納容器底部コンクリートマット並びに, 原子炉棟基礎及び付属棟基礎を含む原子炉建屋基礎盤と耐震壁の境界部は上部構造物の剛性による拘束を考慮するため各耐震壁の脚部に, はり要素を設けるとともに, 上部構造物からの曲げ, せん断力及び軸力を節点荷重として考慮。</li> <li>原子炉本体の基礎及び原子炉格納容器については, 各節点に節点荷重を考慮。</li> </ul>	
はり要素の剛性 (断面性能)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>軸剛性 (軸断面積) : <math>A = t \times h</math></li> <li>曲げ剛性 (断面二次モーメント) : <math>I = t \times h^3 / 12 + A \times (h/2 + D/2)^2</math></li> <li>せん断剛性 (せん断断面積) : <math>A_s = t \times h</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>t : 壁厚</li> <li>h : モデル化する壁の高さ</li> <li>D : 基礎盤厚 (5.0m)</li> </ul>
基礎と地盤の境界	
<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎スラブと底面地盤との間には, 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 (基礎の浮上り) を考慮している。</li> </ul>	 <p>図 3 モデル概要</p>
○ギャップ要素	
<p>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。水平剛性及び鉛直剛性は以下の通り設定する。なお, 剛性は NS 方向及び EW 方向の剛性の平均値とする。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>水平剛性 <math>K_{Hi}</math> : 振動アドミッタンス理論による水平ばね <math>K_H</math> を節点支配面積 <math>A_i</math> で離散化。 <math display="block">K_{Hi} = (K_H / A) \times A_i \quad A : \text{基礎の底面積}</math> </li> <li>鉛直剛性 <math>K_{Vi}</math> : 地震時は, 転倒モーメントが支配的となるため振動アドミッ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_R / I) \times A_i \quad I : \text{基礎の断面二次モーメント}</math> <p>地震時以外は, ロッキング挙動が卓越しないため, 振動アドミッタンス理論による鉛直ばね <math>K_V</math> を節点支配面積 <math>A_i</math> で離散化。</p> <math display="block">K_{Vi} = (K_V / A) \times A_i \quad A : \text{基礎の底面積}</math> </li> </ul>	
 <p>(a) 水平剛性</p>	 <p>(b) 鉛直剛性</p>
<p>注 : 引張力が作用する場合には, 水平剛性もゼロとする。</p>	
図 4 ギャップ要素の概念図	

表 2-2 原子炉建屋原子炉棟（屋根トラス）（1/2）

モデル概要

○モデル化範囲

- ・EL. 46.5 m より上部の鉄筋コンクリート造及び鉄骨造部分をモデル化。

○モデル化範囲

- ・鉄筋コンクリート部：シェル要素（耐震壁），梁要素（柱・梁）
  - ・鉄骨部：梁要素（主トラス弦材，上弦面つなぎ梁），トラス要素（主トラス斜材・束材，上弦面水平ブレース，母屋）。
- \*屋根スラブについては，トラスの応力負担が大きくなるように，屋根スラブの剛性は考慮しない。

○要素分割

- ・評価対象である鉄骨部の部材長さに合わせて分割する。

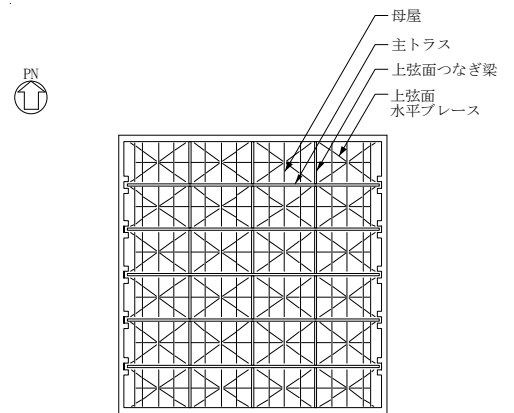


図 1 モデル化範囲

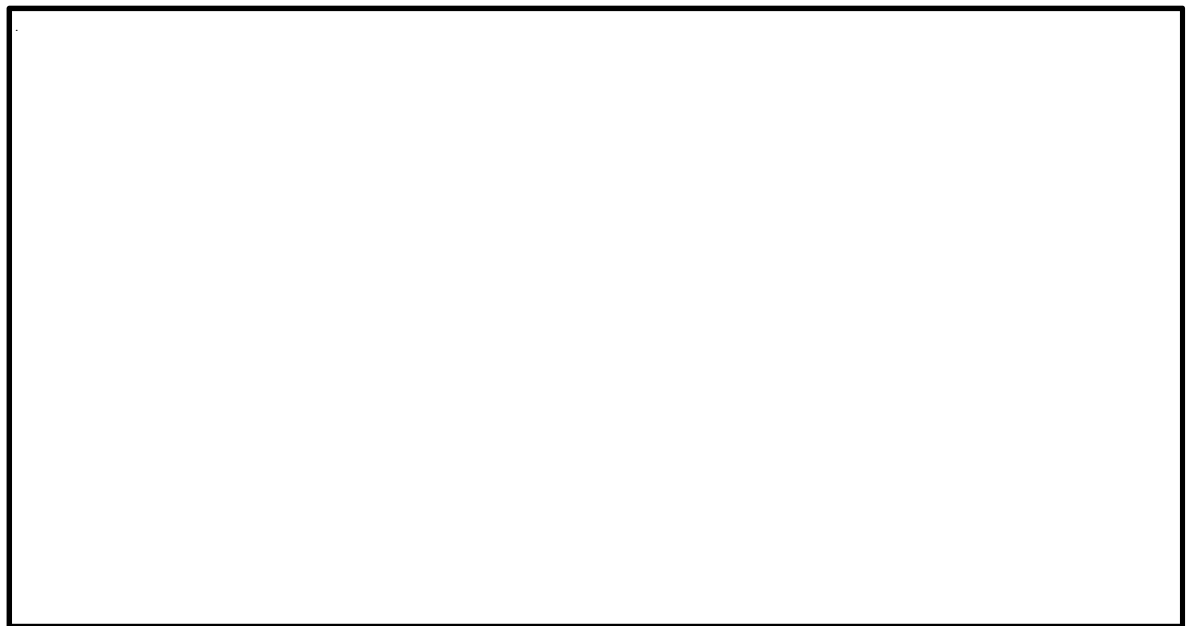


図 2 3次元FEMモデル



表 2-2 原子炉建屋原子炉棟（屋根トラス）（2/2）

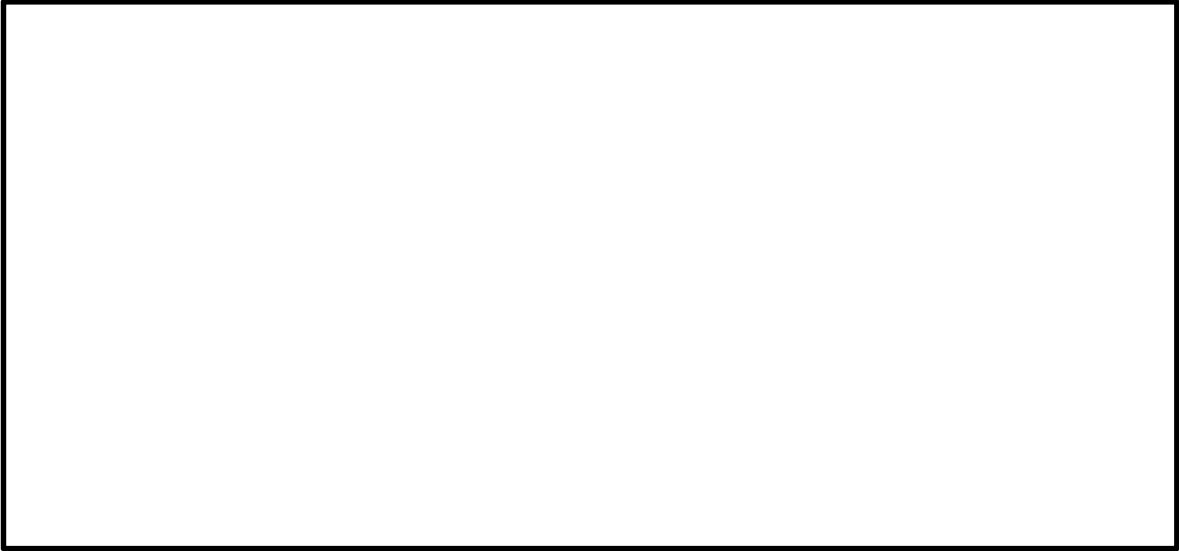
境界条件及び拘束条件
モデル下端の境界
<p>○境界条件</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・モデル下端の境界条件は、EL. 46.5 m 位置について固定とする。</li></ul> <p>○荷重の入力方法</p> <ul style="list-style-type: none"><li>・長期荷重は、全体下向きの重力加速度を作用させることで入力する。</li><li>・地震荷重は、質点系地震応答解析結果の EL. 46.5 m の質点の応答時刻歴（水平，鉛直，回転：回転中心はモデル中心）を入力する。</li></ul> 
図 3 境界条件（下方からの見上げ図）

表 2-3 使用済燃料プール (1/4)

モデル概要
<p>○モデル化範囲</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉建屋 (R/B) のうち, 使用済燃料プール (SFP) と, その周囲 (EL. 33.09m~EL. 46.5m) をモデル化。</li> <li>・SFP に作用する周辺構造物からの地震時反力を適切に評価するために, 以下の通り, 使用済燃料プールと蒸気乾燥器・気水分離機ピット (DSP) (以下, SFP 及び DSP の両方を示す場合は, これを「プール部」という。), 原子炉ウェル, 原子炉格納容器周囲の鉄筋コンクリート製 1 次遮蔽壁 (S/W) の一部, 原子炉棟の外壁 (I/W) 及びプール部周囲の床・壁をモデル化。</li> </ul> <p><b>【モデル化範囲】</b></p> <p>SFP 北側 : SFP 北側に位置する床及び原子炉棟外壁からの反力を適切に考慮するために, SFP 周辺構造物を原子炉棟の外壁 (I/W) 位置までモデル化。</p> <p>SFP 東側 : SFP 東側に位置する床の拘束効果を適切に評価するために, プール部周囲の床を原子炉棟の外壁 (I/W) 位置までモデル化。</p> <p>SFP 南側 : SFP 南側に位置する, 原子炉ウェル, S/W の一部及び DSP の反力を適切に評価するために, SFP 周辺構造物を外壁 (I/W) 位置までモデル化。</p> <p>SFP 西側 : SFP 西側に位置する床の拘束効果を適切に評価するために, プール部周囲の床を原子炉棟の外壁 (I/W) 位置までモデル化。</p> <div style="border: 2px solid black; height: 200px; width: 100%; margin: 10px 0;"></div> <p style="text-align: center;">図 1 3次元FEMモデル</p> <p>○要素分割</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・要素の一片の長さを 1.5m 程度とし, 原子炉ウェル, DSP 及び I/W の配置を考慮して分割する。</li> </ul>

表 2-3 使用済燃料プール (2/4)

モデル概要

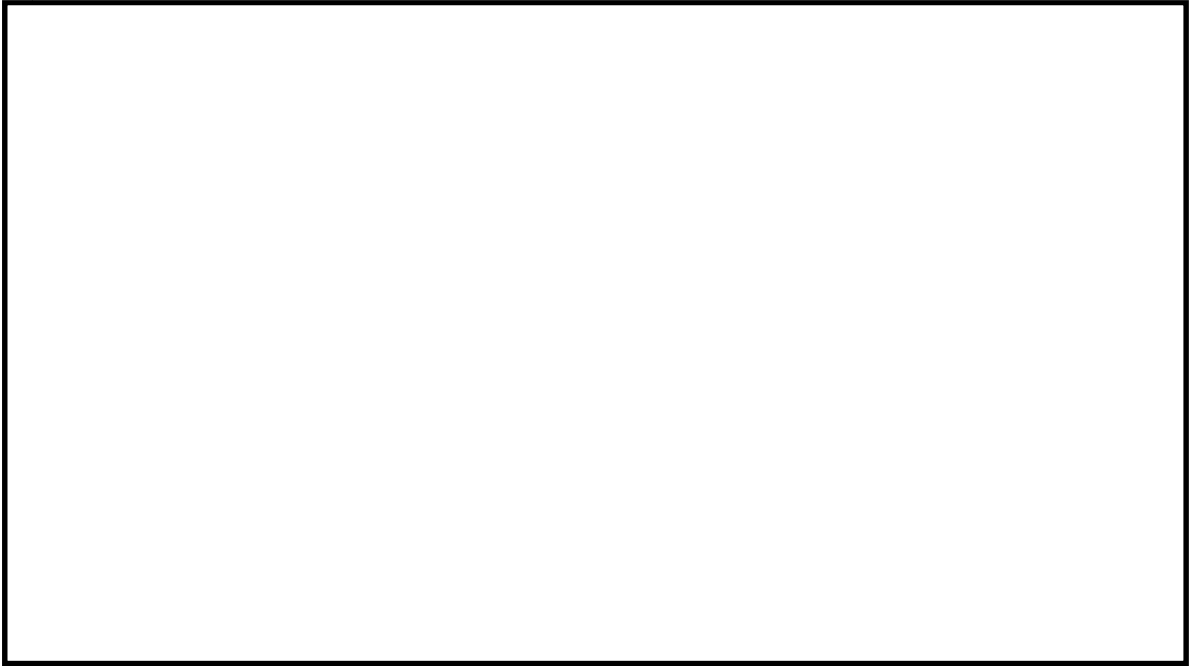


図 2 モデル化範囲 (概略図)

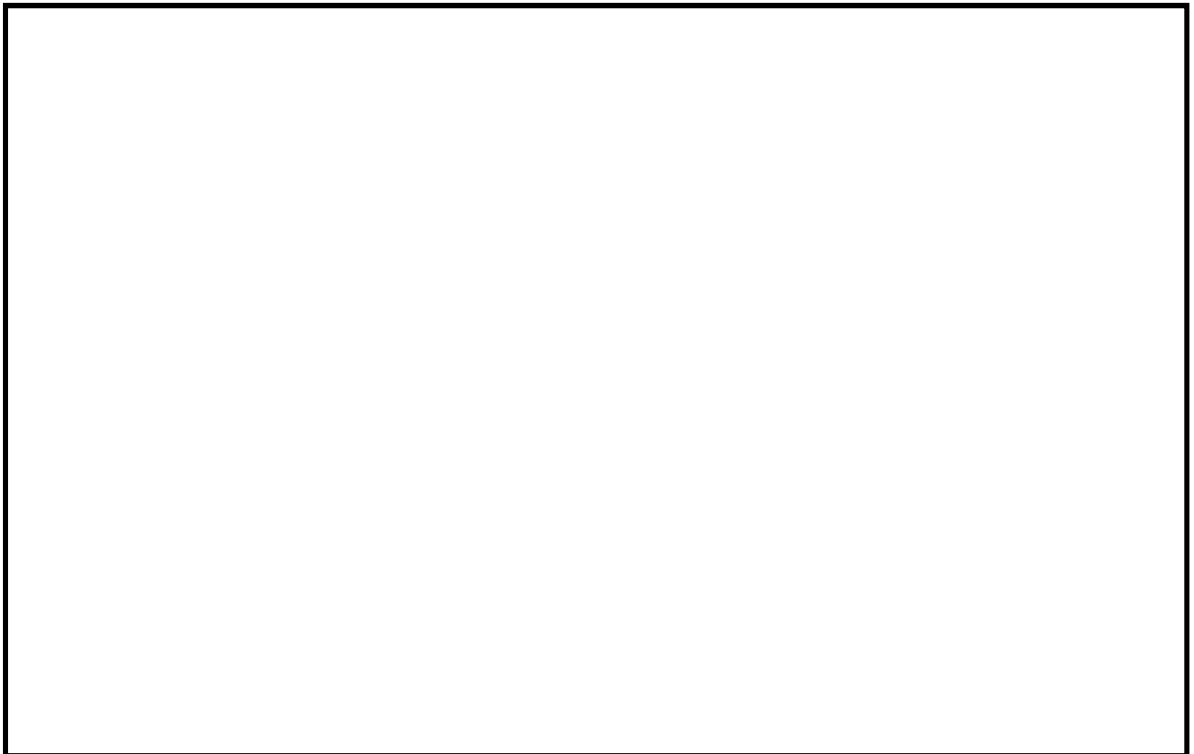


図 3 モデル化範囲 (詳細図)

表 2-3 使用済燃料プール (3/4)

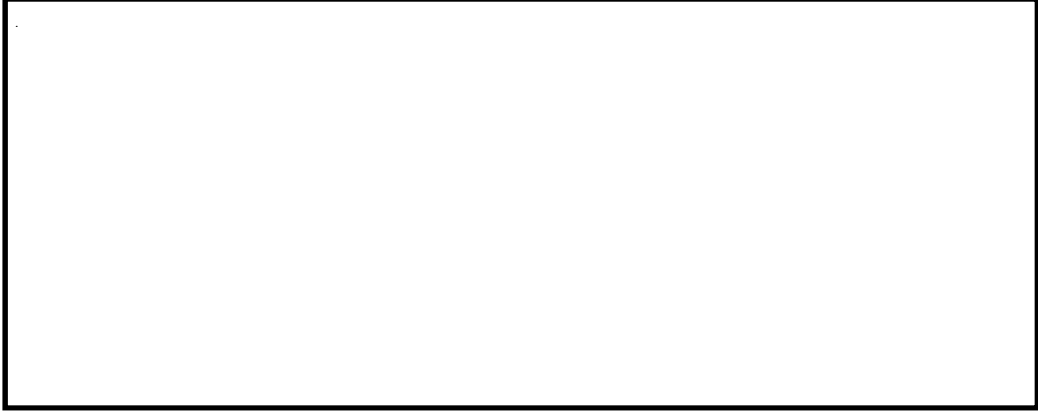


境界条件, 拘束条件	
使用済燃料プールと周辺構造物との境界	
<p>・使用済燃料プール (シェル要素) は, 周辺構造物 (シェル要素, はり要素) と境界部で節点を共有しており, 周辺構造物との間で生じる荷重の伝達や建屋の剛性による拘束を考慮している。</p>	
 <p>(a) 3次元FEMモデル</p>	
 <p>(b) 平面図</p>	
 <p>(c) A-A断面図</p>	
図 4 モデル境界	
① : EL. 46.5 m の床	② : EL. 38.8 m の床
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EL. 46.5 m の床の面内剛性 (曲げ剛性, せん断剛性, 軸剛性) を評価した, はり要素をモデル化。</li> <li>・ 全体座標系の X-Z 平面内の剛性は無視。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ EL. 38.8 m の床の面内剛性 (曲げ剛性, せん断剛性, 軸剛性) を評価した, はり要素をモデル化。</li> <li>・ 全体座標系の X-Z 平面内の剛性は無視。</li> </ul>
③ : I/W (上面)	④ : I/W (側面)
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ I/W の面内剛性 (曲げ剛性, せん断剛性, 軸剛性) を評価した, はり要素でモデル化。</li> <li>・ 全体座標系の X-Z 平面内の剛性は無視。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ I/W の面内剛性 (曲げ剛性, せん断剛性, 軸剛性) を評価した, はり要素でモデル化。</li> <li>・ 全体座標系の X-Z 平面内の剛性は無視。</li> </ul>
はり要素の剛性 (断面性能)	
<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 軸剛性 (軸断面積) : <math>A = t \times W</math></li> <li>・ 曲げ剛性 (断面二次モーメント) : <math>I = t \times W^3 / 12</math></li> <li>・ せん断剛性 (せん断面積) : <math>A_s = t \times W</math></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>t : 壁もしくは床の版厚</li> <li>W : 壁もしくは床のモデル化する領域の幅</li> </ul>

表 2-3 使用済燃料プール (4/4)

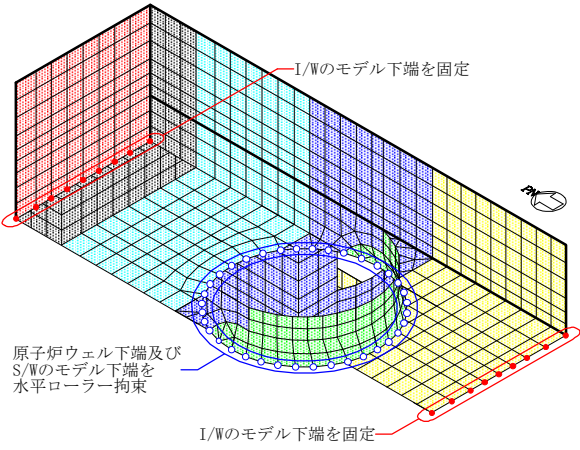
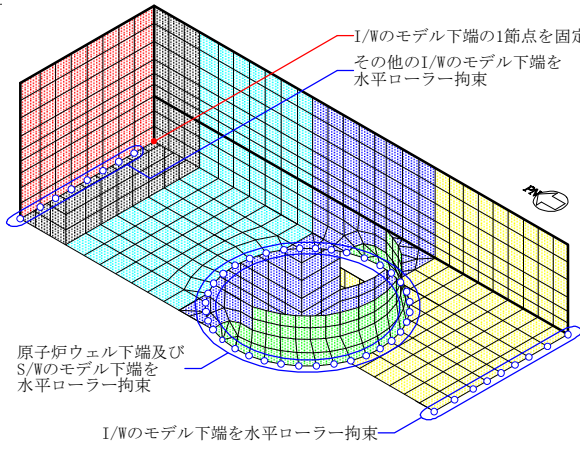
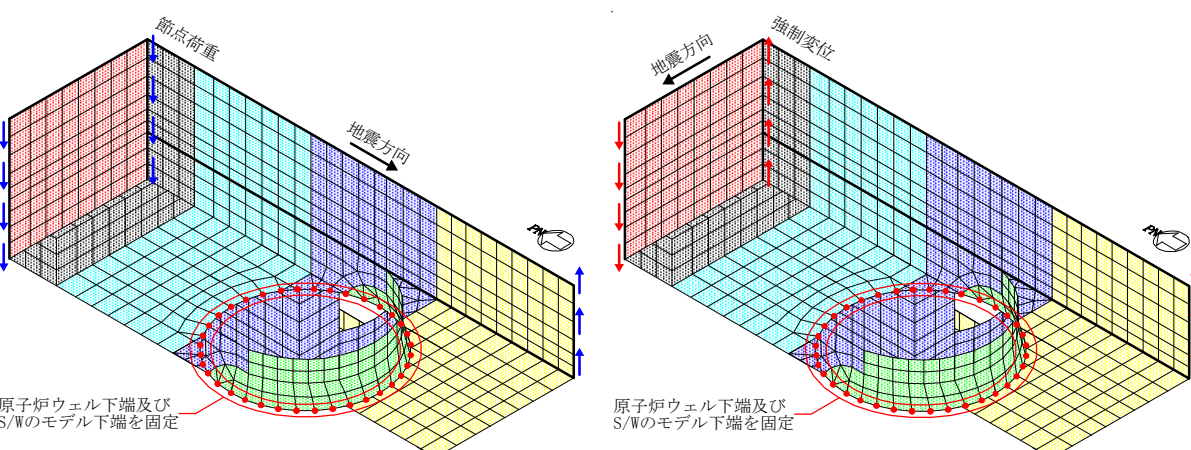
境界条件, 拘束条件	
固定荷重・動水圧荷重・鉛直地震力	温度荷重
<p>・モデル下端位置は, 原子炉ウェル下端を水平ローラー拘束, I/W 下端を固定。</p>  <p>&lt;モデル図を北西下側から俯瞰&gt;</p>	<p>・モデル下端位置は, I/W 下端の 1 節点を固定, 原子炉ウェル及びその他の I/W 下端を水平ローラー拘束。</p>  <p>&lt;モデル図を北西下側から俯瞰&gt;</p>
水平地震力	
<p>・モデル下端位置は, 原子炉ウェル下端を固定。</p> <p>・NS 方向は, プールガーダーに生じるせん断力を考慮するため, I/W(側面) 端部に節点荷重を適用。</p> <p>・EW 方向は, 原子炉ウェル部と I/W に生じる異なる回転変形量を考慮するため, I/W(側面) 端部に強制変位を適用。</p>  <p>NS 方向地震時</p> <p>EW 方向地震時</p> <p>&lt;モデル図を北西下側から俯瞰&gt;</p>	

表 2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎スラブ及び杭 (1/4)

モデル概要 (3次元FEMモデル)

○モデル化範囲及び評価対象

- ・ 上部構造物 (EL. 8.30 m~EL. 29.20 m) 及び基礎スラブ (EL. 5.80 m~EL. 8.30 m), 杭及び地盤 (EL. -15.90 m~EL. 5.80 m)
- ・ FEMモデルは基礎スラブを評価対象とする (杭応力は図 5 の弾性支承ばりモデルで評価)。

○使用要素

- ・ 梁要素：柱及び梁(屋根トラスを含む) ※<sup>1</sup>
- ・ シェル要素：基礎スラブ, 床スラブ及び壁
- ・ ばね要素：杭及び地盤※<sup>2</sup>

注記 ※<sup>1</sup>：大断面の柱・梁はシェル要素でモデル化

※<sup>2</sup>：杭と地盤は薄層要素法による等価ばねを  
応力解析モデルの基礎スラブ底面のばね  
要素としてモデル化。(図 3 を参照)

○要素分割

上部構造については,水平及び上下方向ともに既工  
認から要素サイズを半分程度に細分化した。基礎  
スラブについては変更は無い。

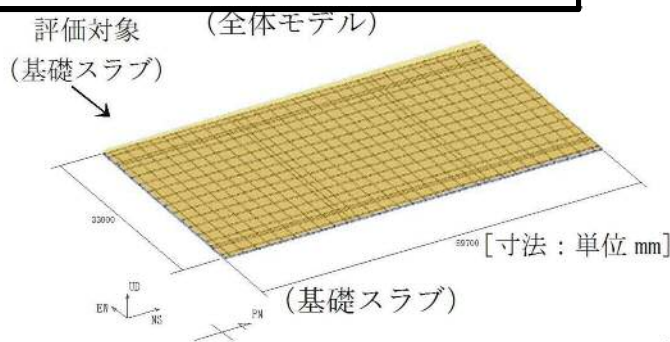
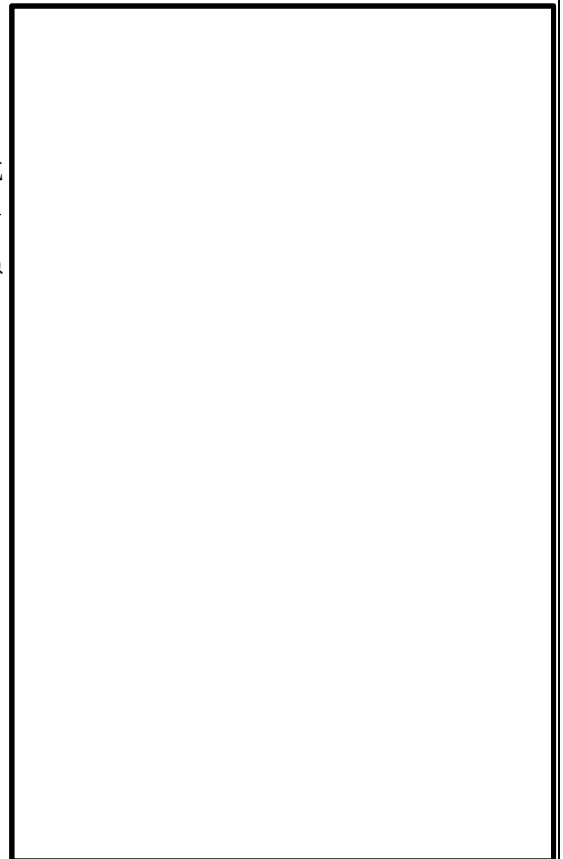


図 1 3次元FEMモデル及び構造図

表 2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎スラブ及び杭 (2/4)

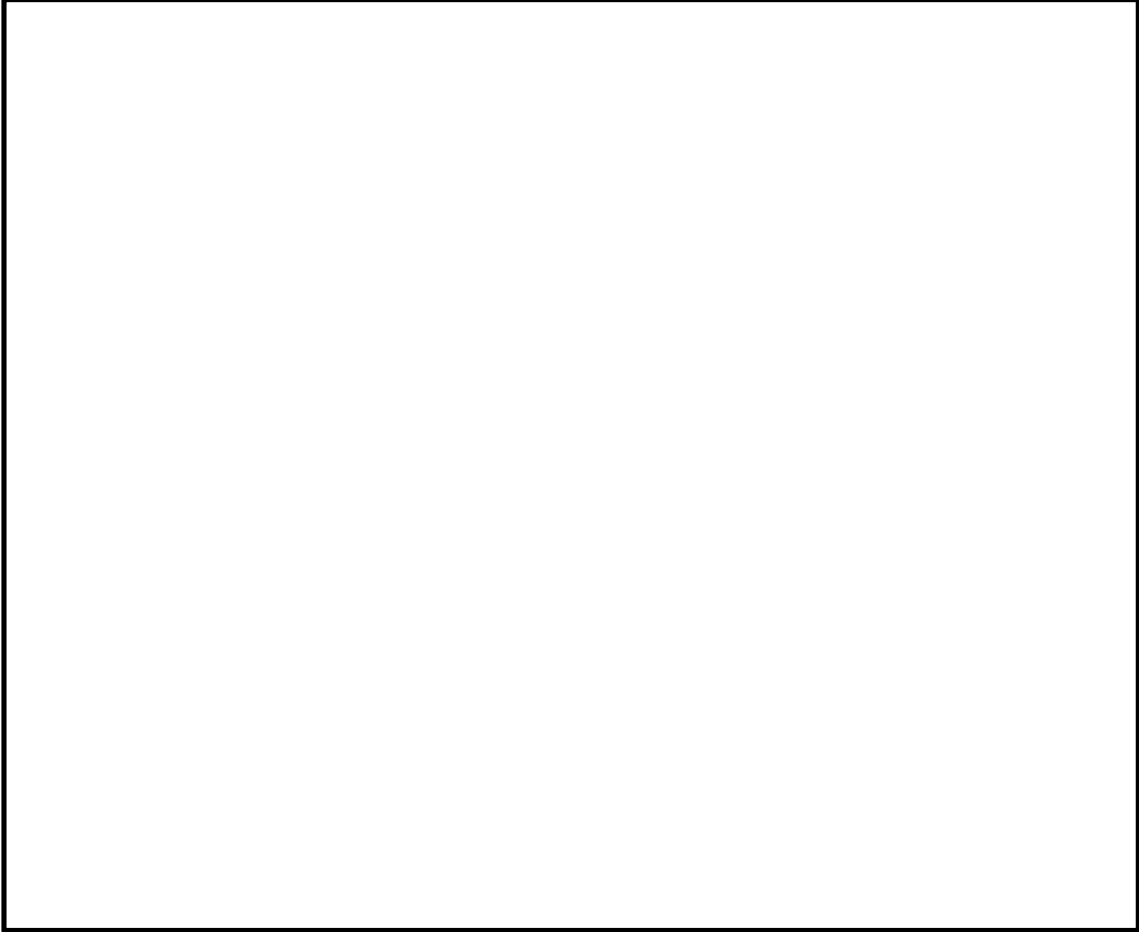
境界条件, 拘束条件
上部構造物と基礎スラブの境界
<ul style="list-style-type: none"> <li>・基礎スラブは上部構造物との境界部で節点を共有し, 上部構造物の剛性による拘束を考慮する。但し, 上部構造の壁脚部と基礎スラブの節点位置が異なる部位については, 不連続節点間の自由度を結合し一体化している。図 2 に上部構造物と基礎スラブの境界及び拘束条件を示す。</li> <li>・基礎スラブは既工認と同じ要素分割とし, 各杭の配置を反映。(次頁図 4 参照)</li> <li>・上部構造物の要素分割は 1 スパンを 4 分割して既工認モデルから細分化。</li> </ul>

<p>図 2 上部構造物と基礎スラブの境界及び拘束条件</p>

表 2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎スラブ及び杭 (3/4)

境界条件・拘束条件

基礎スラブと地盤との境界

- ・基礎スラブ底面の杭-地盤ばね(図3参照, 地震応答解析モデルに基づき設定)  
 水平ばね: 薄層要素法<sup>\*3</sup>による水平ばねを離散化  
 鉛直ばね: 水平加力時は薄層要素法<sup>\*3</sup>による回転ばねを鉛直ばねに変換して離散化。常時及び鉛直加力時は薄層要素法<sup>\*3</sup>による鉛直ばねを離散化。  
 \*3: 薄層要素法 杭-地盤系の相互作用を評価するため三次元薄層要素法(杭及び半無限地盤を水平な薄層に分割し, 杭の点加振より得られるインピーダンスを算定)により地震応答解析モデルにおける基礎スラブ底面の動的地盤ばねを評価
- ・上記の底面地盤ばね(3方向)は各杭の位置に設置する。

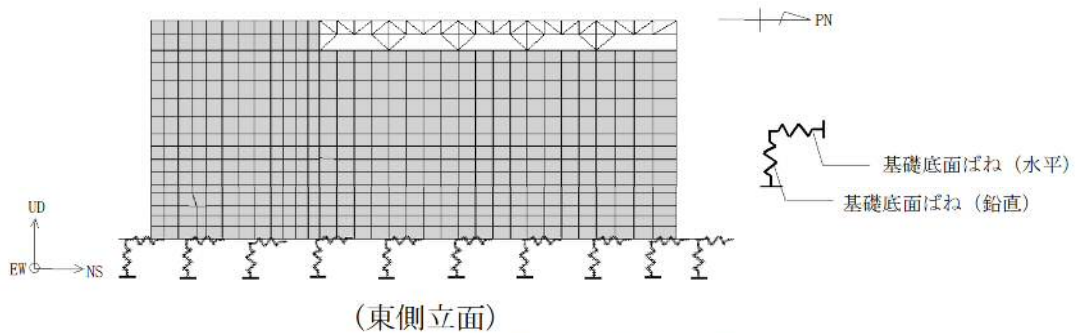


図3 基礎スラブ底面の杭

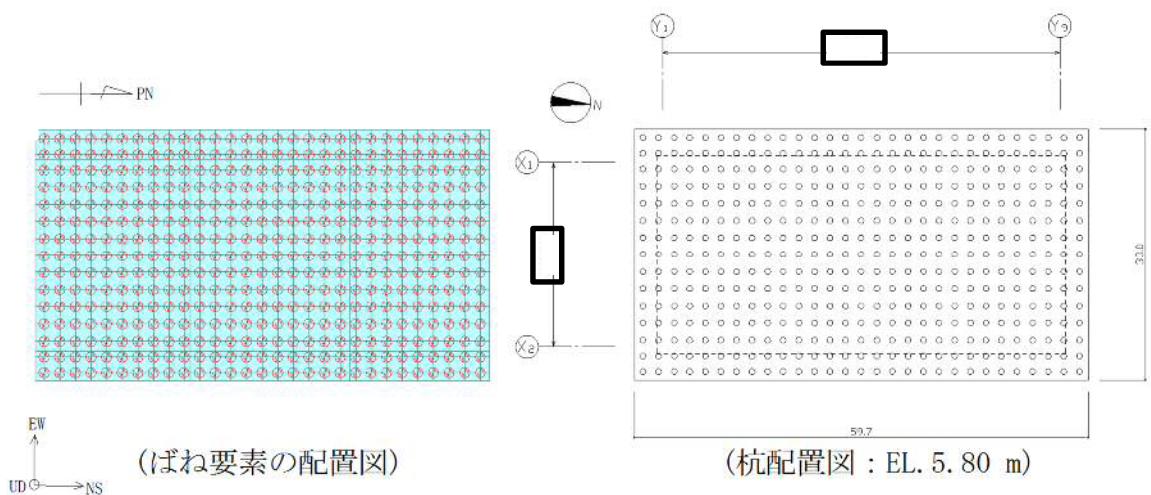


図4 ばね要素の配置図及び杭配置図(鋼管杭 435 本)



表 2-4 使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎スラブ及び杭 (4/4)

モデル概要 (梁と地盤ばねによるモデル)

杭と杭周地盤ばね(水平地盤ばね)

○モデル化範囲及び評価対象

- ・ 杭と杭周の地盤(EL. -15.90 m~EL. 5.80 m)
- ・ 梁と地盤ばねによるモデルでは杭を評価対象とし、建屋慣性力及び地盤変位による杭応力(せん断力と曲げモーメント\*4)を評価。

\*4: 杭頭に生じる曲げモーメントは、杭頭曲げ戻し反力として、基礎スラブ側の応力に別途加算し、基礎スラブの断面検定に反映する。(図 6 参照)

○使用要素

- ・ 杭: 梁要素
- ・ 杭周の地盤: ばね要素

○境界条件及び拘束条件

- ・ 杭頭固定(回転自由度拘束) - 杭先端ピン(水平自由度拘束)条件
- ・ 水平ばね(水平地盤反力係数  $k_H$  は杭の水平載荷試験結果\*5に基づき設定した表 1 の値に、杭径と杭の中心間隔から求める群杭係数を考慮。)

\*5: 原子炉設置変更許可申請(平成 9 年 9 月 17 日)添付書類六, 1. 2. 4. 2. 3 原位置試験結果, (3)杭の水平載荷試験

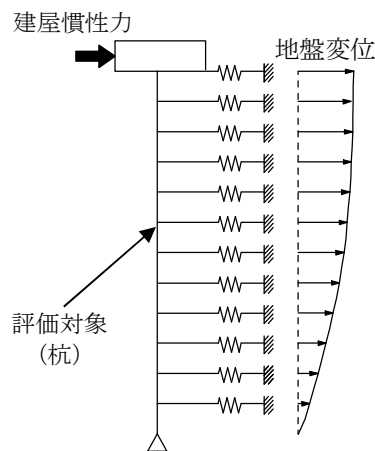
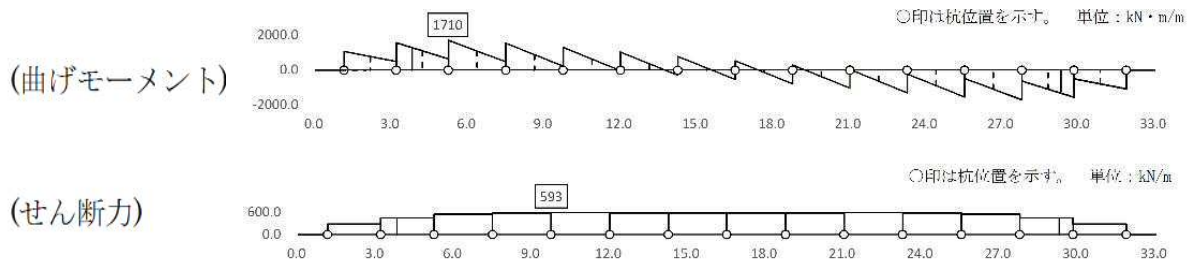


図 5 梁と地盤ばねによるモデル図

表 1 各層の水平地盤反力係数

地層	水平地盤反力係数 $k_h$ (kN/m <sup>3</sup> )
du	$1.67 \times 10^4$
Ag2	$5.00 \times 10^4$
D2c-3	$2.94 \times 10^4$
D2g-3	$5.00 \times 10^4$
Km	$6.96 \times 10^4$



(各杭位置 ○ に、図 5 に示すモデルで求めた杭頭曲げモーメントを載荷した時の基礎スラブ応力を示す。)

図 6 杭頭曲げ戻し反力による基礎スラブの付加応力(EW 方向地震時)

表 2-5 緊急時対策所建屋の基礎スラブ及び杭 (1/3)

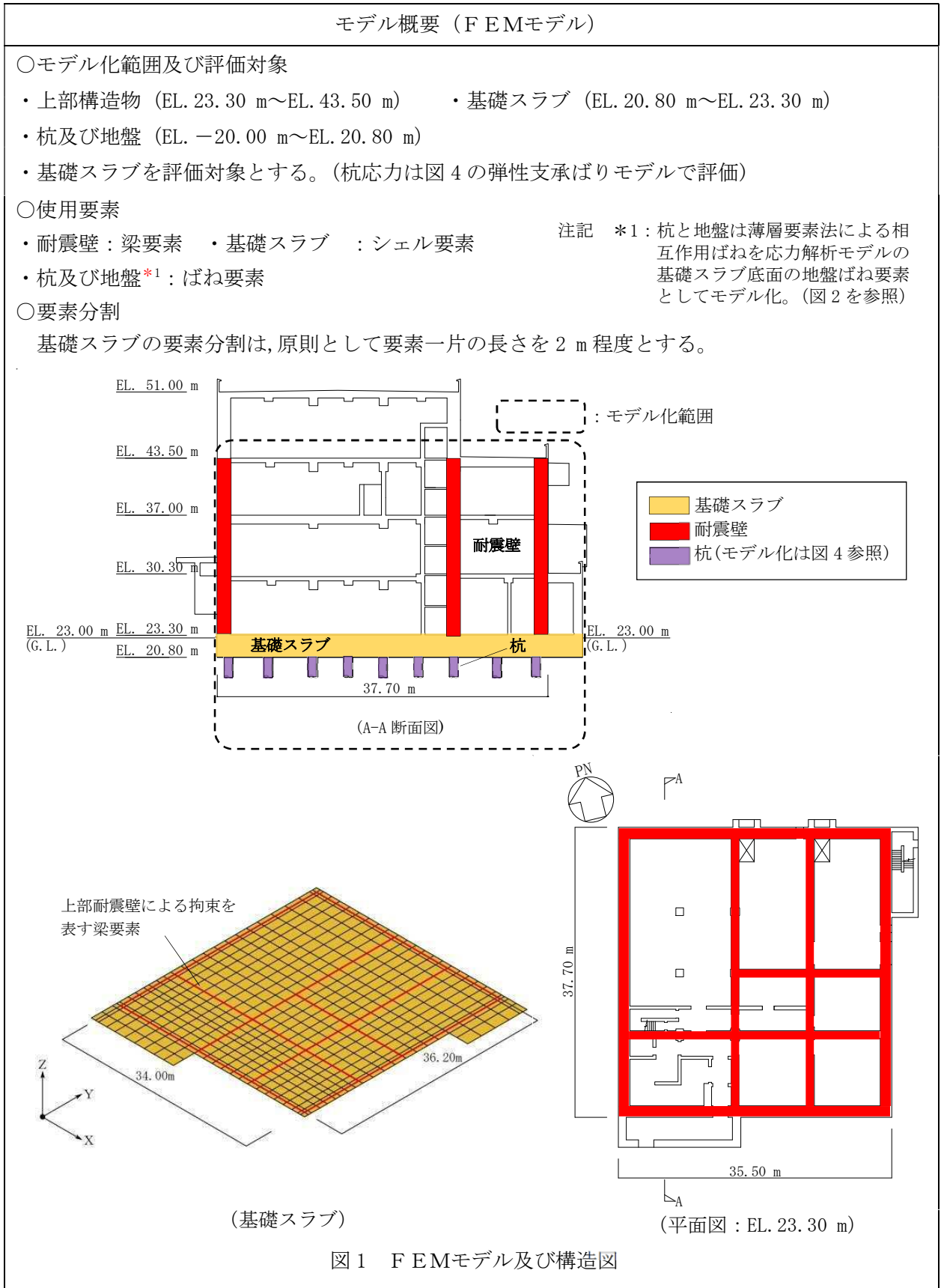


表 2-5 緊急時対策所建屋の基礎スラブ及び杭 (2/3)

境界条件, 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 (シェル要素) と耐震壁 (はり要素) の境界部で節点を共有し, 上部構造物の剛性による拘束を考慮するため各耐震壁の脚部にはり要素を設けるとともに, 上部構造物からの曲げモーメント, せん断力, 軸力を節点荷重として考慮する。</li> </ul>
基礎スラブと地盤との境界	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎スラブ底面の杭-地盤ばね(図 2 参照)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>水平ばね: 薄層要素法による水平ばねを離散化</li> <li>鉛直ばね: 水平加力時は薄層要素法による回転ばねを離散化して鉛直ばねを算定 常時及び鉛直加力時は薄層要素法による鉛直ばねを離散化</li> </ul> </li> <li>上記の底面地盤ばね(3 方向)は各杭の位置に設置する。</li> </ul>

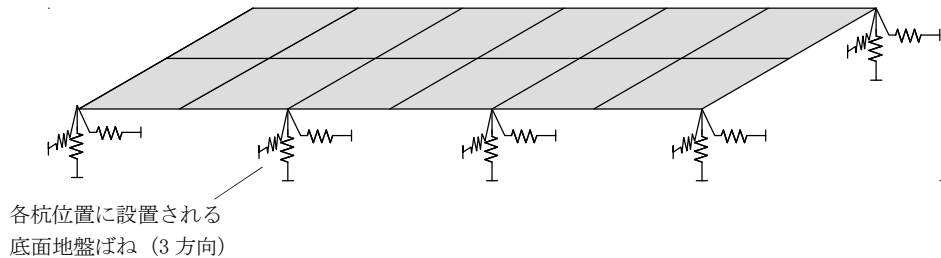


図 2 境界条件の概念図

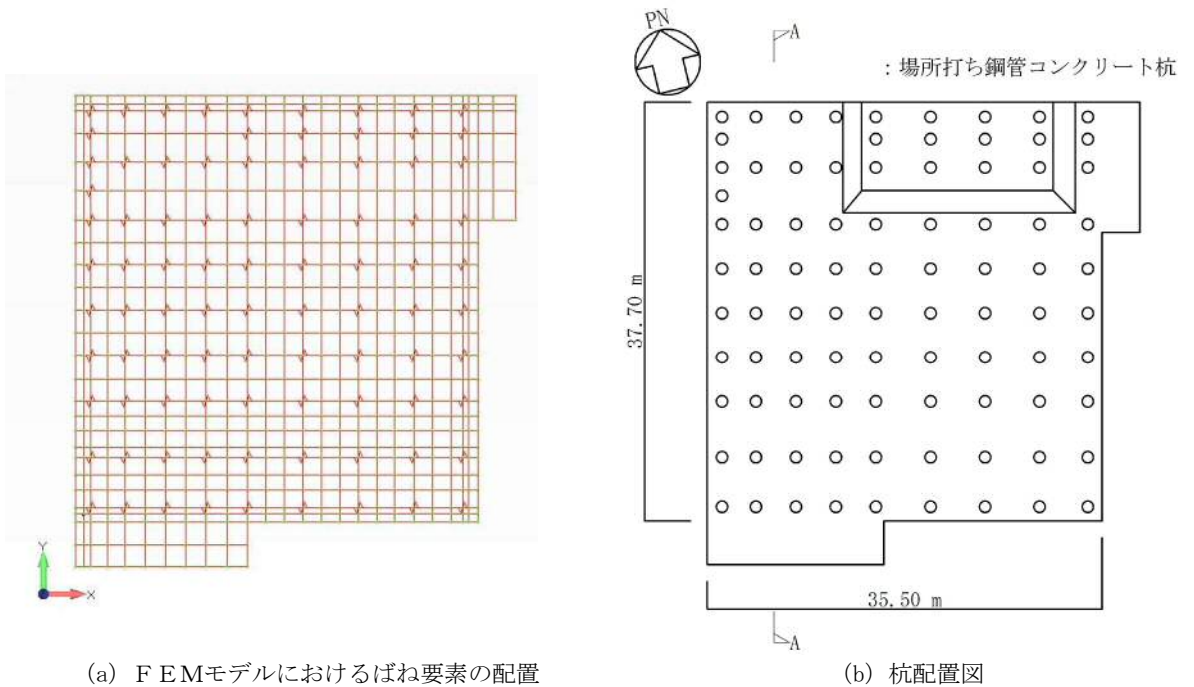


図 3 ばね要素の配置図及び杭配置図 (場所打ち鋼管コンクリート杭 88 本)

表 2-5 緊急時対策所建屋の基礎スラブ及び杭 (3/3)

モデル概要 (弾性支承ばりモデル)																												
杭と杭周地盤ばね(水平地盤ばね)																												
<p>○モデル化範囲及び評価対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・杭と杭周の地盤 (EL. -20.00 m~EL. 20.80 m)</li> <li>・弾性支承ばりモデルでは杭を評価対象とし、建屋からの水平力及び地盤変位による杭応力(せん断力と曲げモーメント*2) を評価。</li> </ul> <p>*2: 杭頭に生じる曲げモーメントは、杭頭曲げ戻し反力として、基礎スラブの応力解析に節点荷重として考慮する。</p> <p>○使用要素</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・杭: 梁要素</li> <li>・杭周の地盤: ばね要素</li> </ul> <p>○境界条件及び拘束条件</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・杭頭固定(回転自由度拘束) - 杭先端ピン(水平自由度拘束)条件</li> <li>・水平ばね (水平地盤反力係数 <math>K_h</math> は「日本建築学会: 建築基礎構造設計指針 (2001)」に基づき算定し、表 1 の通り設定*3する。)</li> </ul> <p>*3: 設定根拠に関しては「緊急時対策所建屋の耐震性評価に関する補足説明資料」の「水平地盤反力係数 <math>k_h</math> の設定について」の項に記載する。</p>																												
表 1 水平地盤反力係数 (工認基本モデル)																												
<p>建屋からの水平力</p> <p>地盤変位</p> <p>評価対象 (杭)</p>	<table border="1"> <thead> <tr> <th>標高 EL. (m)</th> <th>地層名</th> <th>水平地盤反力係数 <math>k_h</math> (kN/m<sup>3</sup>)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20.8 ~ 19.0</td> <td>改良土(f1)</td> <td><math>4.70 \times 10^7</math></td> </tr> <tr> <td>19.0 ~ 15.3</td> <td>改良土(du)</td> <td><math>4.70 \times 10^7</math></td> </tr> <tr> <td>15.3 ~ 13.6</td> <td>改良土(D2c-3)</td> <td><math>4.70 \times 10^7</math></td> </tr> <tr> <td>13.6 ~ 7.2</td> <td>D2g-3</td> <td><math>6.66 \times 10^4</math></td> </tr> <tr> <td>7.2 ~ 1.0</td> <td>D2c-3</td> <td><math>3.23 \times 10^4</math></td> </tr> <tr> <td>1.0 ~ -5.5</td> <td>D2s-3</td> <td><math>8.62 \times 10^4</math></td> </tr> <tr> <td>-5.5 ~ -15.2</td> <td>D2g-3</td> <td><math>1.80 \times 10^5</math></td> </tr> <tr> <td>-15.2 ~ -20.0</td> <td>Km</td> <td><math>1.09 \times 10^5</math></td> </tr> </tbody> </table>	標高 EL. (m)	地層名	水平地盤反力係数 $k_h$ (kN/m <sup>3</sup> )	20.8 ~ 19.0	改良土(f1)	$4.70 \times 10^7$	19.0 ~ 15.3	改良土(du)	$4.70 \times 10^7$	15.3 ~ 13.6	改良土(D2c-3)	$4.70 \times 10^7$	13.6 ~ 7.2	D2g-3	$6.66 \times 10^4$	7.2 ~ 1.0	D2c-3	$3.23 \times 10^4$	1.0 ~ -5.5	D2s-3	$8.62 \times 10^4$	-5.5 ~ -15.2	D2g-3	$1.80 \times 10^5$	-15.2 ~ -20.0	Km	$1.09 \times 10^5$
標高 EL. (m)	地層名	水平地盤反力係数 $k_h$ (kN/m <sup>3</sup> )																										
20.8 ~ 19.0	改良土(f1)	$4.70 \times 10^7$																										
19.0 ~ 15.3	改良土(du)	$4.70 \times 10^7$																										
15.3 ~ 13.6	改良土(D2c-3)	$4.70 \times 10^7$																										
13.6 ~ 7.2	D2g-3	$6.66 \times 10^4$																										
7.2 ~ 1.0	D2c-3	$3.23 \times 10^4$																										
1.0 ~ -5.5	D2s-3	$8.62 \times 10^4$																										
-5.5 ~ -15.2	D2g-3	$1.80 \times 10^5$																										
-15.2 ~ -20.0	Km	$1.09 \times 10^5$																										
図 4 弾性支承梁の概念図																												

表 2-6 格納容器圧力逃がし装置格納槽(1/3)

モデル概要

○モデル化範囲及び評価対象

・上部構造物(EL. -12.80 m~EL. 8.00 m)及び基礎スラブ(EL. -15.80 m~EL. -12.80 m)

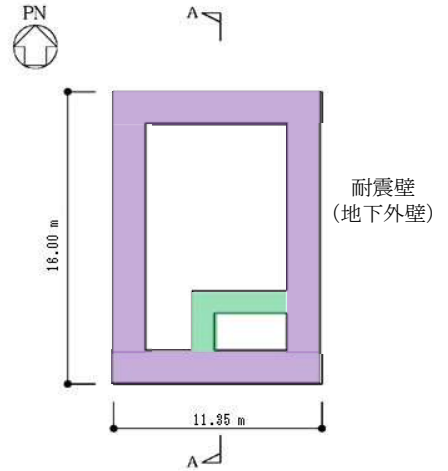
・FEMモデルは基礎スラブ, 耐震壁(地下外壁)及び上版を評価対象とする。

○使用要素

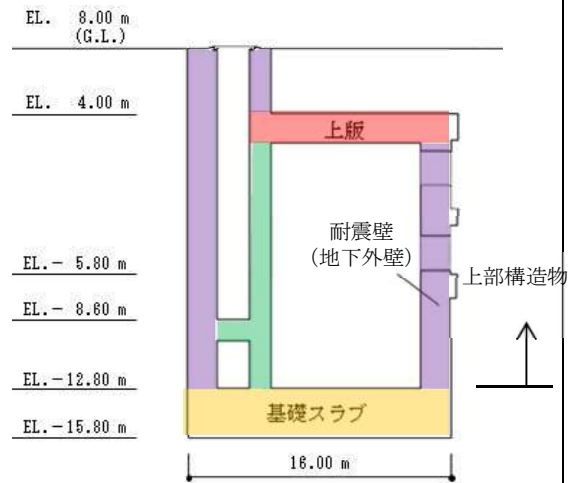
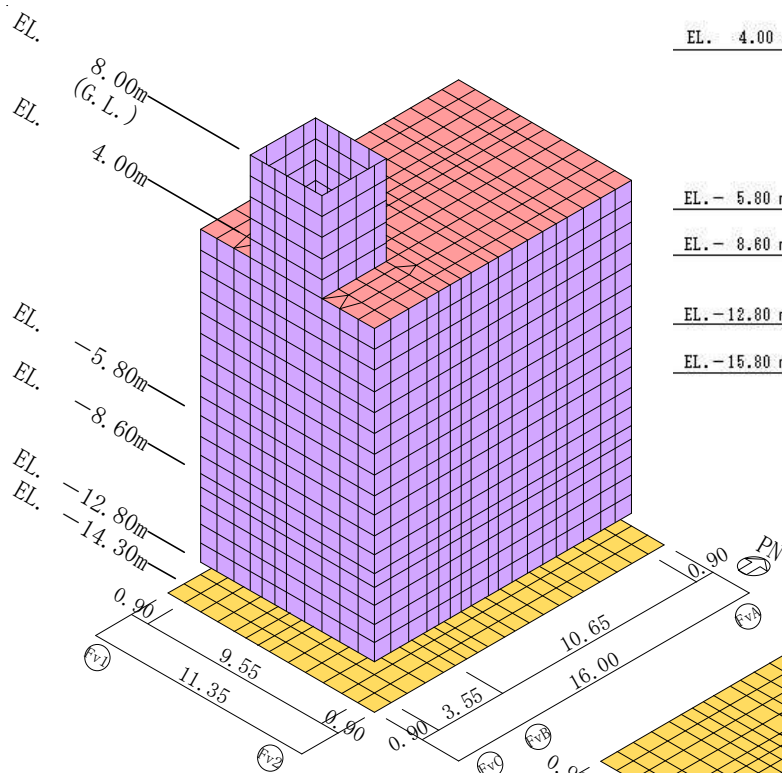
・シェル要素: 基礎スラブ, 耐震壁及び上版

○要素分割

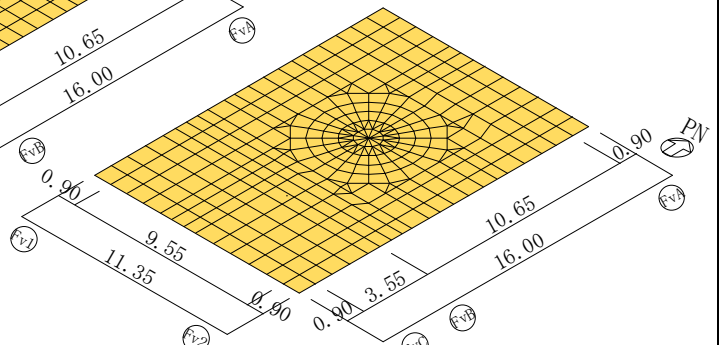
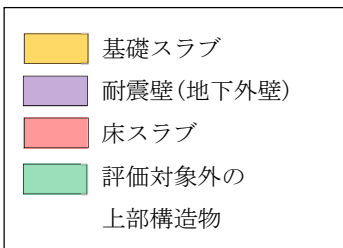
要素の一片の長さを1 m程度以下とし, 耐震壁及びフィルタ装置の配置を考慮して分割する。



(平面図: EL. -12.80 m)



(A-A 断面図)



(基礎スラブのみを表記)

図 1 3次元FEM解析モデル

表 2-6 格納容器圧力逃がし装置格納槽(2/3)

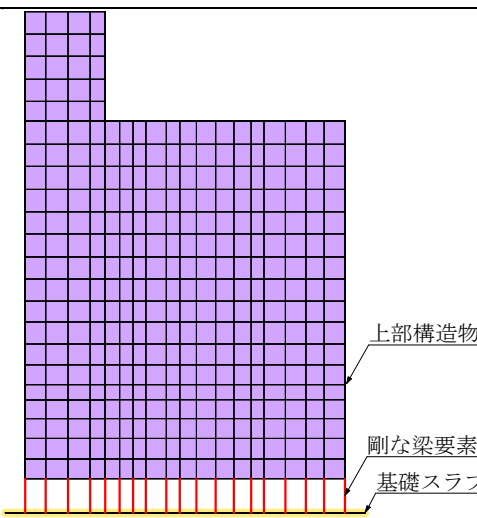
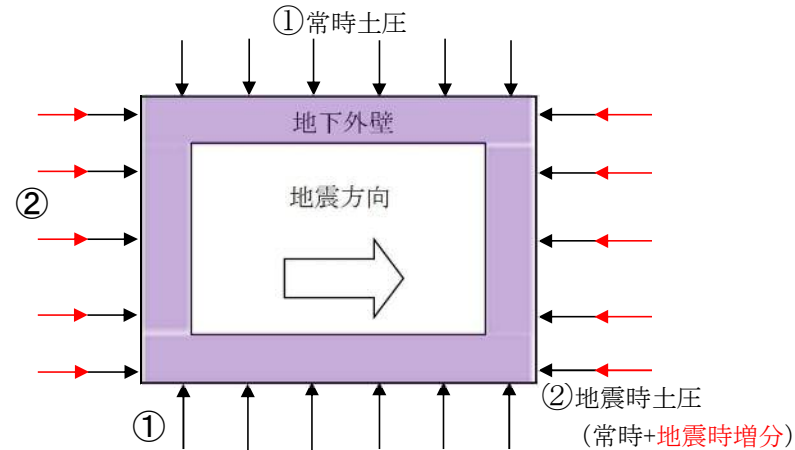
境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎スラブの境界	
<ul style="list-style-type: none"> <li>上部構造物と基礎スラブの境界については, 上部構造物からの曲げモーメントを基礎スラブ中心高さでの値として適切に評価するため, 上部構造物要素下端と基礎スラブ要素を基礎スラブ厚の半分 (1.5 m) 離してモデル化する。</li> <li>上部構造物と基礎スラブの境界には, 剛な梁要素を設置し, 基礎スラブ厚の範囲を剛域としてモデル化する。</li> <li>上記の通りモデル化することで, 上部構造物と基礎スラブの連続性を確保する。</li> </ul>	 <p style="text-align: center;">図 2 剛な梁要素概要</p>
地下外壁と側面地盤の境界	
<ul style="list-style-type: none"> <li>地下外壁と側面地盤との境界の影響として土圧を考慮する。土圧は常時土圧及び地震時増分土圧を以下の通り考慮する。                      常時土圧 : 地下外壁全方位に外力として入力                      地震時増分土圧: 地震方向の正負両方向に外力として入力</li> <li>地下外壁と側面地盤の境界に, 地盤ばねによる拘束条件は設定しない。</li> </ul>	 <p style="text-align: center;">図 3 NS 方向地震時土圧概要 (平面図)</p>

表 2-6 格納容器圧力逃がし装置格納槽(3/3)

境界条件, 拘束条件

基礎スラブと底面地盤の境界

- 基礎スラブと底面地盤との間には, 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(基礎の浮上り)を考慮している。

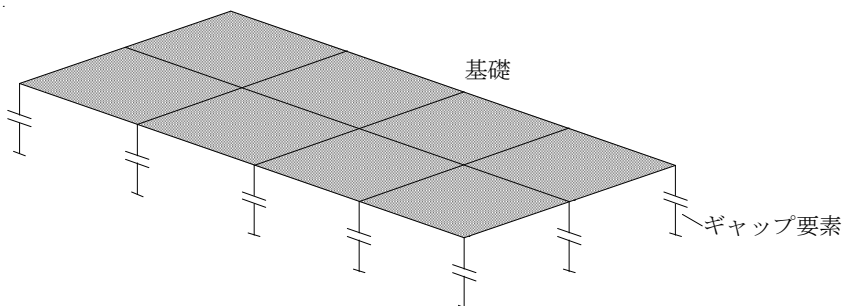


図 4 境界条件の概念図

- ギャップ要素

引張力が発生した時に浮上りを考慮する。水平剛性及び鉛直剛性は以下の通り設定する。なお, 剛性は NS 方向及び EW 方向の剛性の平均値とする。

水平剛性  $K_{Hi}$ : 地震応答解析モデルにより算出したインピーダンスの実部を用いて水平地盤ばね  $K_H$  を作成。それを節点支配面積  $A_i$  により離散化。

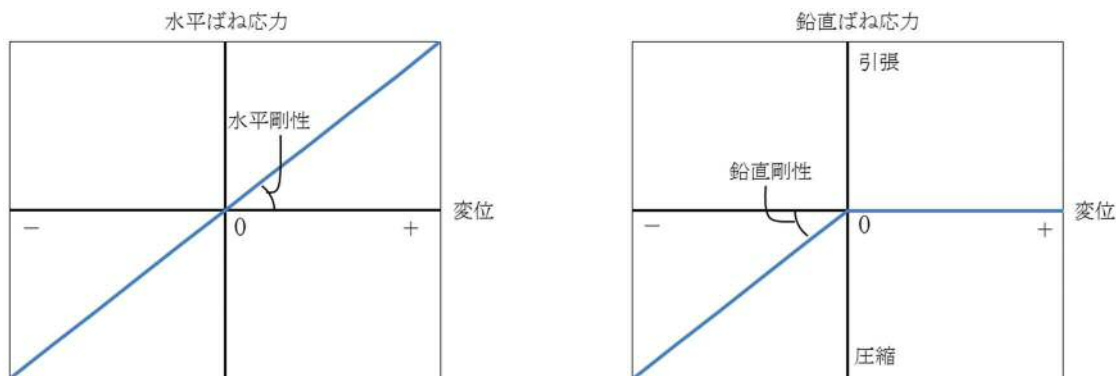
$$K_{Hi} = (K_H / A) \times A_i$$

A: 基礎スラブの断面積

鉛直剛性  $K_{Vi}$ : 地震応答解析モデルにより算出したインピーダンスの実部を用いて回転地盤ばね  $K_R$  を作成。それを鉛直ばねとして節点支配面積  $A_i$  により離散化。

$$K_{Vi} = (K_R / I) \times A_i$$

I: 基礎スラブの断面二次モーメント



注: 鉛直変位が 0 を超えて基礎が浮上る場合, 水平剛性を 0 とする。

(a) 水平剛性

(b) 鉛直剛性

図 5 ギャップ要素の概念図

表 2-7 主排気筒（上部構造物）（1/4）

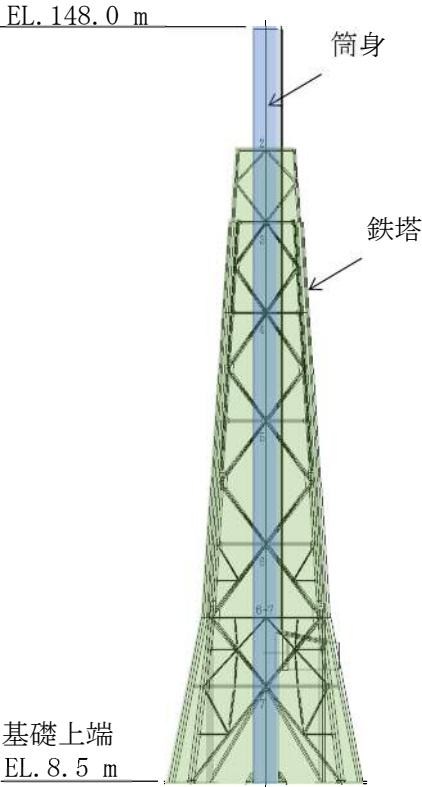
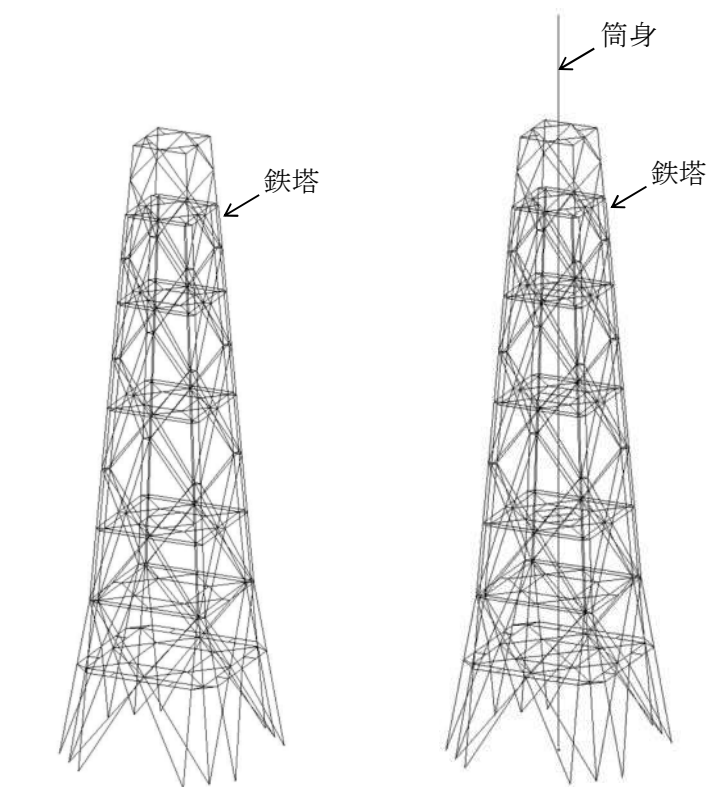
モデル概要	
<p>○モデル化範囲，対象部材</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・基礎上端より上部の（EL. 8.5 m～EL. 148.0 m）の範囲</li> <li>・筒身，鉄塔構成部材（主柱材，斜材，水平材，補助主柱材，補助斜材，補助水平材）</li> </ul>	
<p>○使用要素</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・梁要素：筒身，鉄塔構成部材（主柱材，斜材，水平材，補助主柱材，補助斜材，補助水平材）</li> </ul>	
<p>&lt;解析モデルの使い分け&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・地震荷重：2軸の質点系モデル（応力伝達考慮）による地震応答解析により鉄塔と筒身の応答が分離して出力される。このため，各応答に対する部材応力評価モデルとして，鉄塔については，トラス構造の各部材の応力を計算するため鉄塔のみの立体骨組モデルを使用し，筒身については1本の連続梁とみなして手計算を実施する。</li> <li>・風荷重：鉄塔－筒身間の応力伝達を評価するため，鉄塔と筒身をモデル化する。両者の応力伝達を担うダンパ部について，オイルダンパは風荷重（静的荷重）に対して効かないためモデル化せず，弾塑性ダンパは風荷重に対して塑性変形しない設計としているため，鉄塔－筒身間の応力伝達部材の一部としてモデル化する。</li> </ul>	
 <p>図 1 モデル化範囲</p>	 <p>地震荷重による応力評価用</p> <p>風荷重による応力評価用</p> <p>図 2 解析モデル</p>



表 2-7 主排気筒（上部構造物）（2/4）

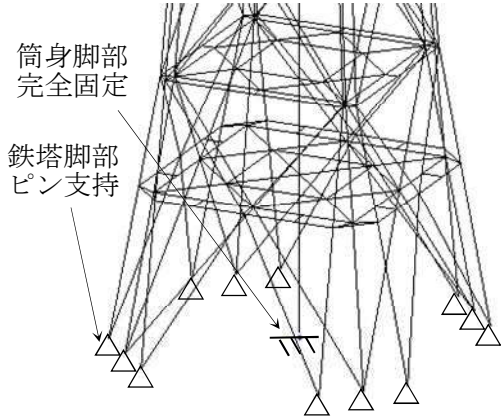
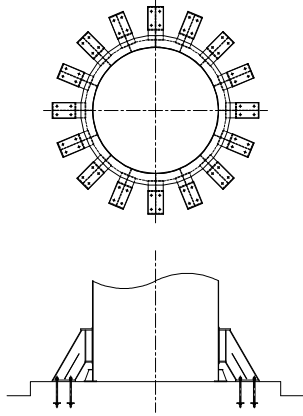
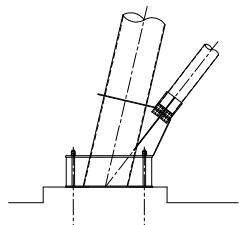
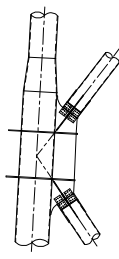
境界条件，拘束条件	
上部構造物と基礎の境界	
<p>○境界条件及び拘束条件</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>筒身脚部と基礎の境界は，<math>\phi 4m</math> の構造体が接地しており，軸力，せん断力，曲げモーメントとも伝達するため完全固定（移動，回転とも拘束），筒身脚部の構造は図 4 を参照</li> <li>鉄塔脚部と基礎の境界は，鉄塔がトラス構造で脚部には軸力，せん断力のみが発生するためピン接合（移動拘束），鉄塔脚部の構造は図 5 を参照</li> <li>主柱材同士，補助主柱材同士，筒身同士については，溶接もしくはフランジ接合で軸力，せん断力，曲げモーメントとも伝達するため剛接合</li> <li>その他部材同士については，ガセットを介した高力ボルト摩擦接合としており，ガセット剛性が部材に与える曲げモーメントの影響は小さいことからピン接合，その他部材同士（例：鉄塔継手部）の構造は図 6 を参照</li> </ul> <p>○部材の要素分割</p> <p>鉄塔はトラス構造のため，モデルは梁要素で構成され，部材交点ごとに要素分割している。</p> <p>○荷重の入力方法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>長期荷重は，排気筒頂部，主柱材，補強主柱材の支持平面レベルに質点荷重として入力</li> <li>地震荷重（鉄塔）は，地震応答解析により得られた最大応答（曲げモーメント，せん断力）に対し，等価な曲げモーメント及びせん断力分布となる水平荷重及びモーメントを算出し，これを地震荷重として，鉄塔のみの解析モデルに入力</li> <li>地震荷重（筒身）は，連続梁とみなして，地震応答解析により得られた最大応答（曲げモーメント，せん断力）を断面力として使用</li> <li>風荷重は，鉄塔－筒身間の応力伝達を評価するため，鉄塔及び筒身をモデル化した解析モデルに入力</li> <li>地震荷重及び風荷重は，筒身頂部及び各支持平面の 4 隅に均等に入力</li> </ul>	 <p style="text-align: center;">図 3 境界条件</p>  <p style="text-align: center;">図 4 筒身脚部</p>  <p style="text-align: center;">図 5 補助主柱材脚部</p>  <p style="text-align: center;">図 6 鉄塔継手部（代表例）</p>

表 2-7 主排気筒（上部構造物）（3/4）

境界条件, 拘束条件
<p>オイルダンパの解析モデル上の扱い</p> <p>○渦励振による風直交方向風荷重について</p> <p>1) 渦励振現象</p> <p>流れ場にある円筒構造物には、後方にカルマン渦と呼ばれる交番渦が発生する。この交番渦が起振源となり、円筒構造物が流れと直交方向に振動する現象を「渦励振」と言う。渦励振の概念図を図 8 に示す。</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>図 8 渦励振の概念図</p> <p>2) 主排気筒に対する渦励振の影響</p> <p>「煙突構造設計指針」によれば、渦励振を抑制するための対策として以下の記載がある。          (2) 減衰付加による対策 <span style="float: right;">(煙突構造設計指針 抜粋)</span></p> <p>減衰付加による対策とは、煙突に減衰性能を付加することで、風方向、風直行方向、近接する構造物の空力干渉による振動を抑制するものである。煙突の場合は、渦励振を抑えるために TMD（同調形質量ダンパー）を用いることが多いが、チェーンを使用した衝撃ダンパーなどを用いることもある。</p> <p>東海第二発電所の主排気筒に設置しているオイルダンパ<sup>*</sup>についても、上述の煙突の構造減衰を増大させるための措置の一種であり、渦励振の影響は抑えられていることから、本評価においても渦励振に対する考慮は不要としている。また、煙突分野の設計においては、渦励振のような定常的な振動は、地震のような非定常な振動のある特殊な状態であるとみなされており、地震用のオイルダンパが設置されていれば、風（渦励振）による振動も制御できるとみなされている。</p> <p><small>※東海第二発電所『既工事計画届出書 添付資料IV-1-2「主排気筒の耐震性についての計算書」(発室発第 583 号) 平成 21 年 3 月 9 日届出』</small></p> <p>3) オイルダンパの解析モデル上の扱い</p> <p>主排気筒の風荷重に対する応力評価では、鉄塔と筒身をモデル化した解析モデルに対し、基準風速 30 m/s を静的負荷として主排気筒に作用させる。このとき、オイルダンパは、振動現象に対しては効果を発揮するものの、静的変位に対しては静的に伸縮するのみであり、応力伝達をしないため、モデル化はしない。一方、弾塑性ダンパについては、弾塑性ダンパは風荷重に対して塑性変形しない設計としているため、鉄塔-筒身間の応力伝達部材の一部としてモデル化する。</p>

表 2-7 主排気筒（上部構造物）（4/4）

境界条件, 拘束条件	
渦励振に関する考察	
○渦励振の共振風速と設計風速の比較	
<p>「煙突構造設計指針」より、渦励振の共振風速 <math>U_r</math>（円形断面）を、以下の式により算定する。</p> $U_r = 5 \cdot f \cdot D = 5 \times 0.86 \times 4.532 \div 19.5 \text{ m/s}$ <p>ここで、<math>U_r</math> : 共振風速（円形断面）（m/s）  <math>f</math> : 風直交方向振動の一次固有振動数 0.86（Hz）  <math>D</math> : 円形断面を有する煙突の高さ <math>2H/3</math> における外径 4.532（m）</p> <p>上記の共振風速は主排気筒の <math>2/3</math> 高さ（93.3 m）における共振風速であり、建築基準法で定める設計風速は地上 10 m における値であるため、共振風速を地上 10 m での風速に換算する。風速がべき乗則に従うとして、「建築物荷重指針」の計算式より、以下のとおり計算する。</p> $U_{r10} = U_r \cdot (10/93.3)^\alpha = 19.5 \cdot (10/93.3)^{0.15} \div 13.9 \text{ m/s}$ <p>ここで、<math>U_{r10}</math> : 地上 10 m 位置での共振風速（m/s）  <math>\alpha</math> : 風速の鉛直分布を定めるパラメータ（-）</p> <p>以上より、主排気筒の設計風速は 30 m/s は、地上 10m での共振風速 <math>U_{r10} = 13.9 \text{ m/s}</math> を上回る。</p>	
○渦励振に対する影響検討	
<p>「煙突構造設計指針」の渦励振の判定式によると、以下の条件に当てはまることから、渦励振に対する検討が必要となる。</p> $U_H / (f \cdot D) = 30 / (0.86 \times 4.532) \div 7.7 \geq 4.2$ <p>ここで、<math>U_H</math> : 設計風速 30（m/s）  <math>f</math> : 風直交方向振動の一次固有振動数 0.86（Hz）  <math>D</math> : 円形断面を有する煙突の高さ <math>2H/3</math> における外径 4.532（m）</p> <p>渦励振の影響の程度を確認するため、オイルダンパによる主排気筒の構造減衰を 3 次元 FEM モデルより求め*、「煙突構造設計指針」の渦励振による風直交方向荷重の算定式に基づき渦励振による荷重を計算し、他の荷重を比較した。この結果、渦励振による荷重は、他の荷重に対して小さいことを確認した。渦励振による荷重と他の荷重を比較した結果を図 9 に示す。</p>	
<p>図 9 は、煙突の高さ（y 軸、0 から 160 m）と転倒モーメント（x 軸、0 から 1,000,000 kN・m）の関係を比較したグラフである。グラフには 5 つのデータ系列が含まれている:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>地震荷重 (赤線): 転倒モーメントが約 700,000 kN・m で高さが 0 m になる。</li> <li>風向方向風荷重 (黄色線): 転倒モーメントが約 100,000 kN・m で高さが 0 m になる。</li> <li>地震荷重 + 風向方向風荷重 (黒線): 転倒モーメントが約 800,000 kN・m で高さが 0 m になる。</li> <li>風直交方向荷重 (0° 方向) (青線): 転倒モーメントが約 100,000 kN・m で高さが 0 m になる。</li> <li>風直交方向荷重 (45° 方向) (緑線): 転倒モーメントが約 100,000 kN・m で高さが 0 m になる。</li> </ul>	<p>図 9 渦励振による荷重と他の荷重を比較した結果</p>
<p>注記 * : 3 次元 FEM モデルの筒身頂部に強制変位を与え、変位を解除した際の主排気筒の挙動を解析により求め、得られた減衰曲線から主排気筒全体の構造減衰を算定した。</p>	

表 2-8 主排気筒（基礎梁）（1/2）

モデル化概要

○モデル化範囲

- ・解析モデルの範囲は基礎梁全体とする。基礎梁としてモデル化する部材は、構造体として考慮している筒身基礎、鉄塔基礎、格子梁、斜め梁とする。
- ・基礎梁は、杭位置で支持された厚さ 4.0 m (EL. 4.5 m～EL. 8.5 m) の一枚の版として有限要素法により解析する。
- ・要素は四角形及び三角形とする。要素分割は、基礎梁の応力状態を適切に把握できるような要素の大きさ（概ね 1.0 m 程度）を基準に行う。

○使用要素

- ・シェル要素：基礎梁（筒身基礎、鉄塔基礎、格子梁、斜め梁）

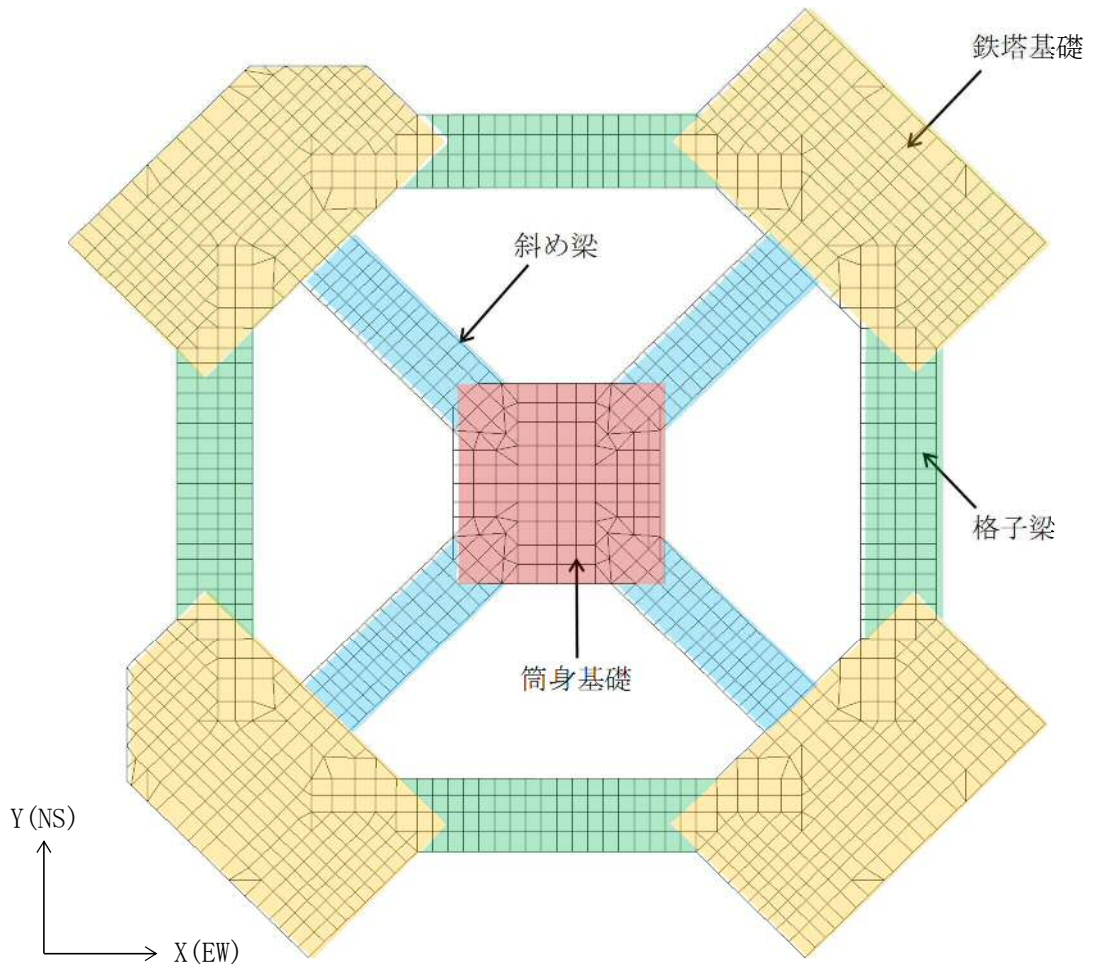


図 1 3次元FEMモデル

表 2-8 主排気筒（基礎梁）（2/2）

境界条件，拘束条件

基礎梁と杭の境界

○境界条件  
 ・基礎梁と杭の境界条件は，全ての杭の位置にてピン支持とする。基礎梁と地盤との境界条件は設定しない。

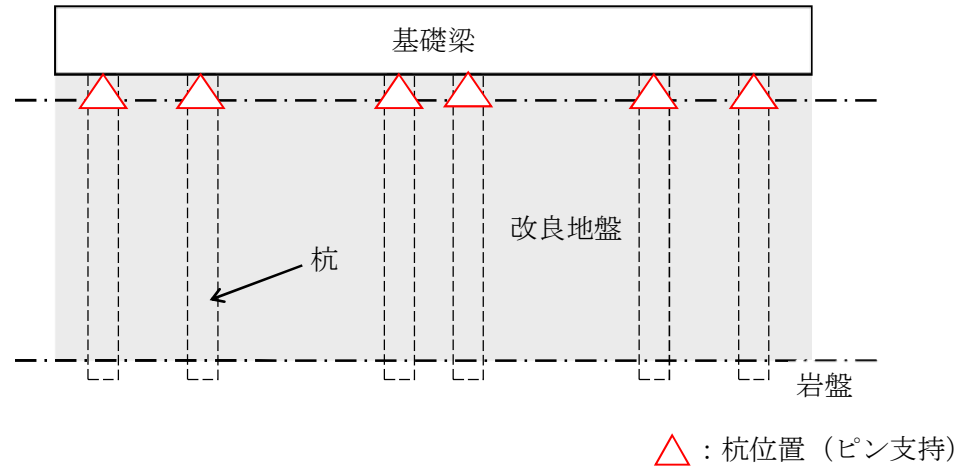


図 2 側面から見た解析モデルの支持状況の概念図

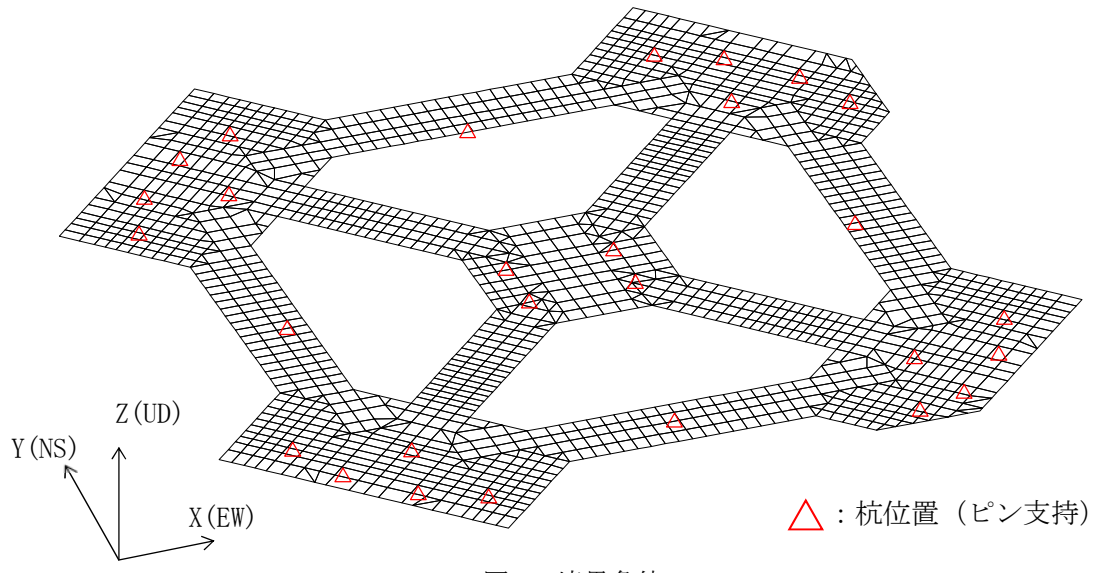


図 3 境界条件

○荷重の入力方法  
 ・基礎梁への上部構造物からの荷重は，筒身及び鉄塔からの曲げ，せん断応力，軸力を節点荷重として考慮する。  
 ・基礎梁への杭からの荷重は，付加軸力，付加曲げ，付加せん断力を節点荷重として考慮する。

表 2-9 非常用ガス処理系配管支持架構 (1/2)

モデル化概要

○モデル化範囲

- ・ 架構の柱脚 (EL. 7.7 m) より上部の柱, 梁, ブレースをモデル化する。

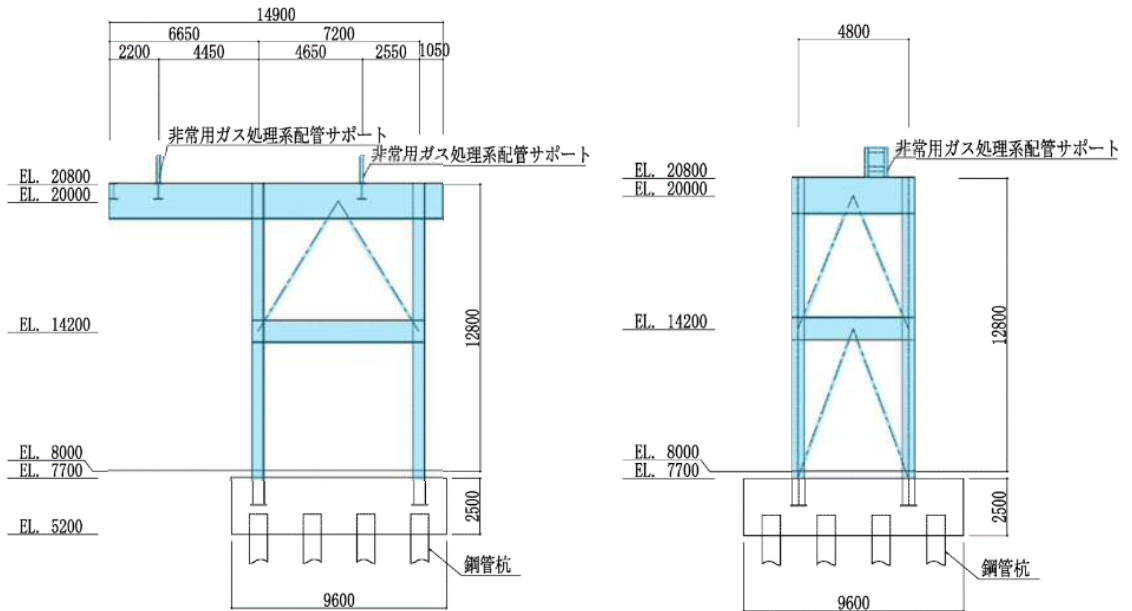


図 1 構造図及びモデル化範囲

○使用要素

- ・ 梁要素 : 柱, 梁 (曲げ, せん断及び軸力を考慮)
- ・ ロッド要素 : ブレース (軸力のみ考慮)

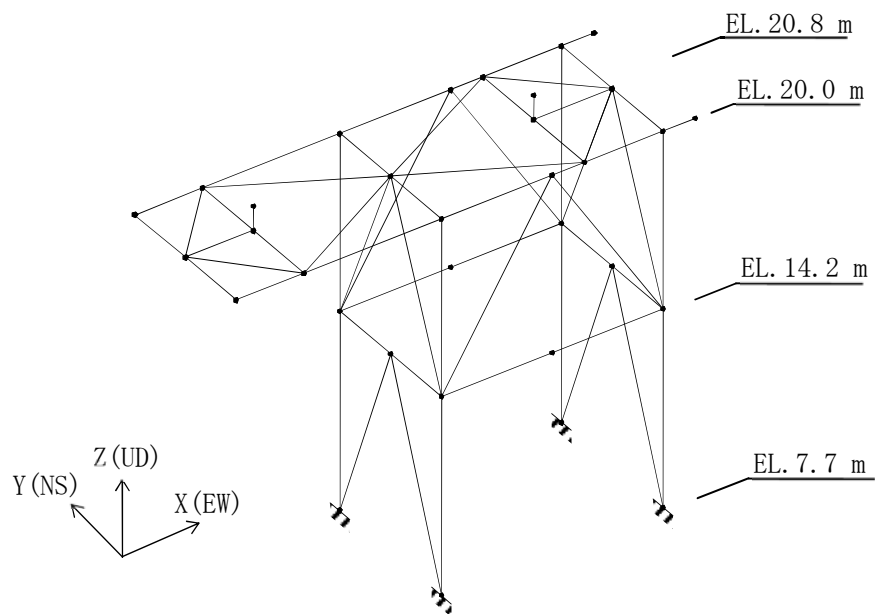
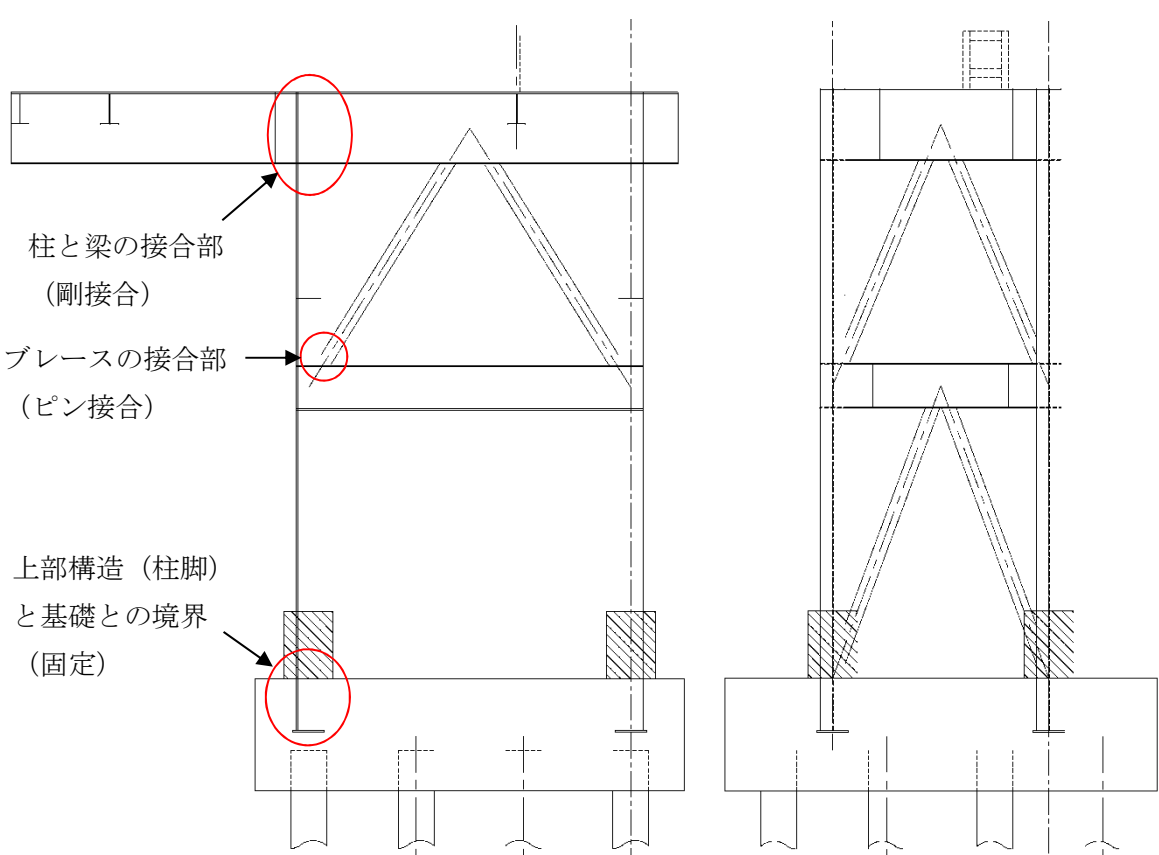


図 2 3次元FEMモデル

表 2-9 非常用ガス処理系配管支持架構 (2/2)

境界条件, 拘束条件
上部構造物と基礎の境界
<p>○境界条件</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 上部構造物と基礎との境界は, 柱脚を基礎スラブに埋め込むため, 柱脚位置にて固定とする。</li> <li>・ 柱と梁は, 軸力, せん断, 曲げモーメントを伝達するため, 剛接合とする。</li> <li>・ ブレースの両端は, 軸力のみ伝達するため, ピン接合とする。</li> </ul>
 <p>柱と梁の接合部 (剛接合)</p> <p>ブレースの接合部 (ピン接合)</p> <p>上部構造 (柱脚) と基礎との境界 (固定)</p>
<p>図 3 非常用ガス処理系配管支持架構の構造と境界条件</p>
<p>○荷重の入力方法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 鉛直方向の固定荷重は, 線分布荷重又は集中荷重により評価する。</li> <li>・ 地震荷重及び風荷重は, 基礎下端から最上部までの柱と梁等の交点の節点に集中荷重として入力する。</li> </ul>