

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2
提出年月日	平成30年6月8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6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、以下の添付資料の補足説明をするものである。

- ・ 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」
- ・ V-2-2-10-1 「緊急時対策所建屋の耐震性についての計算書」
- ・ V-2-2-14 「主排気筒の耐震性についての計算書」
- ・ V-2-2-16 「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」
- ・ V-2-2-18 「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」
- ・ 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」
- ・ V-2-9-1-1-1 「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」
- ・ V-2-9-1-10 「原子炉建屋原子炉棟の耐震性についての計算書」
- ・ V-2-9-1-13 「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。

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

○モデル化範囲

- ・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。
- ・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。



図 1 モデル化範囲

○使用要素

- ・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
- ・耐震壁 : はり要素

○要素分割

- ・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。

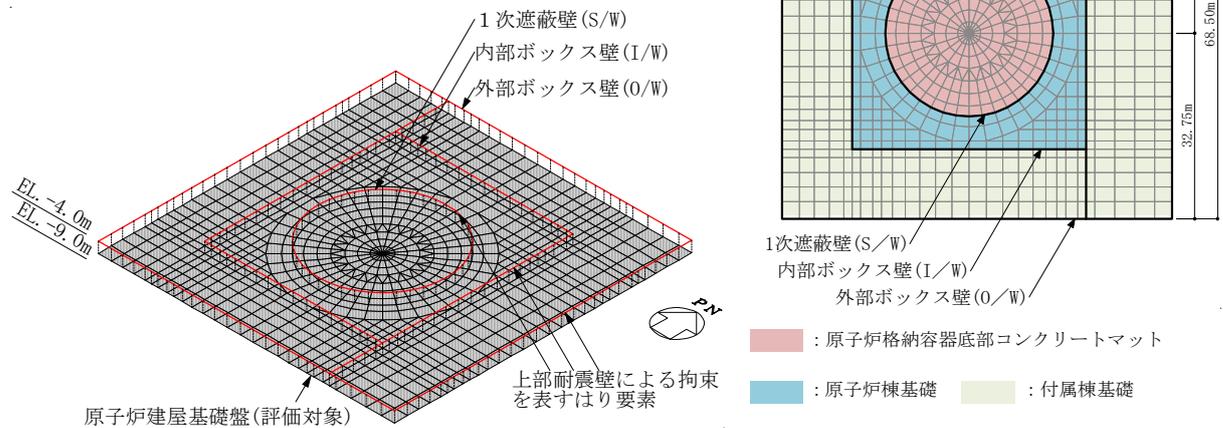


図 2 モデル概要

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)

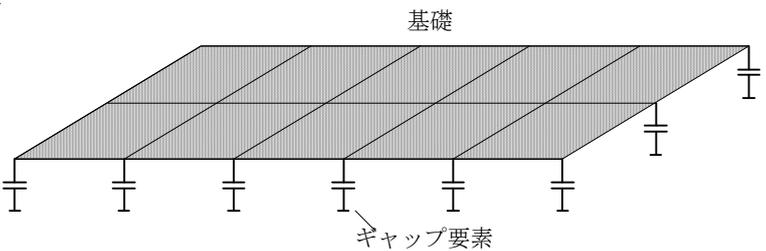
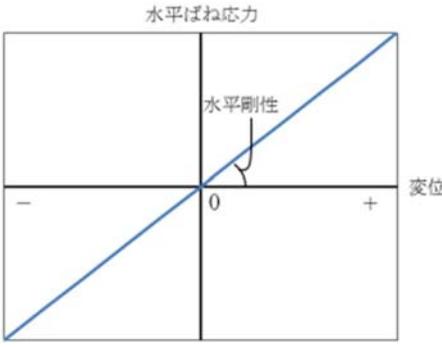
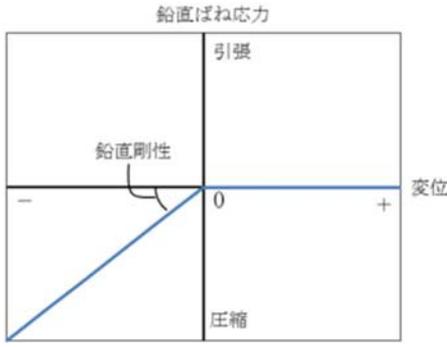
境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎の境界	
<ul style="list-style-type: none"> 原子炉格納容器底部コンクリートマット並びに, 原子炉棟基礎及び付属棟基礎を含む原子炉建屋基礎盤と耐震壁の境界部は, 上部構造物の剛性による拘束を考慮するため各耐震壁の脚部に, はり要素を設けるとともに, 上部構造物からの曲げ, せん断力及び軸力を節点荷重として考慮。 原子炉本体の基礎及び原子炉格納容器については, 各節点に節点荷重を考慮。 	
基礎と地盤の境界	
<ul style="list-style-type: none"> 基礎スラブと底面地盤との間には, 底面地盤を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。 	 <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"> 水平剛性 K_{Hi}: 振動アドミッタンス理論による水平ばね K_H を節点支配面積 A_i で離散化。 	
$K_{Hi} = (K_H / A) \times A_i \quad A: \text{基礎の底面積}$	
<ul style="list-style-type: none"> 鉛直剛性 K_{Vi}: 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 K_R を節点支配面積 A_i で離散化。 	
$K_{Vi} = (K_R / I) \times A_i \quad I: \text{基礎の断面二次モーメント}$	
<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 K_V を節点支配面積 A_i で離散化。</p>	
$K_{Vi} = (K_V / A) \times A_i \quad A: \text{基礎の底面積}$	
 <p>(a) 水平剛性</p>	 <p>(b) 鉛直剛性</p>
<p>※: 引張力が作用する場合には, 水平剛性もゼロとする。</p>	
<p>図 4 ギャップ要素の概念図</p>	

表 2-2 原子炉建屋原子炉棟（屋根トラス）（1/2）

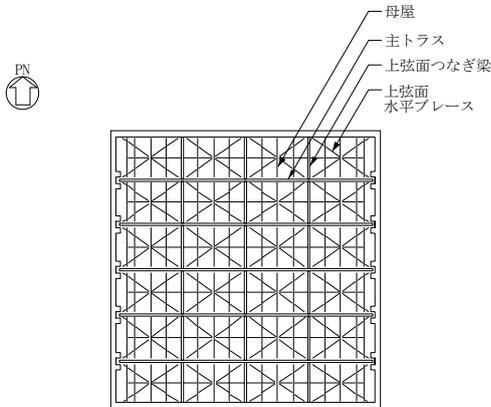
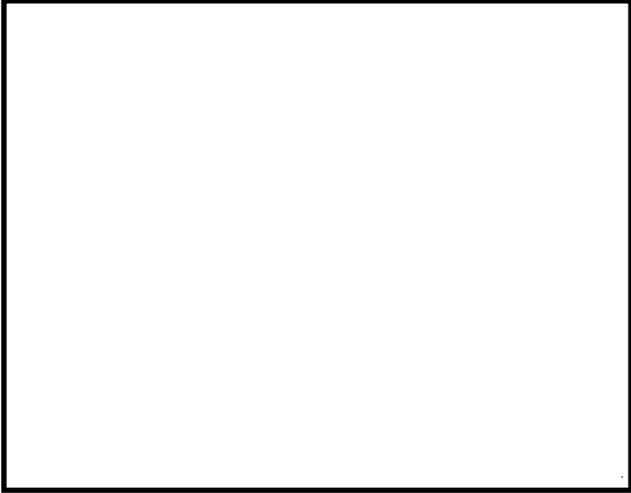
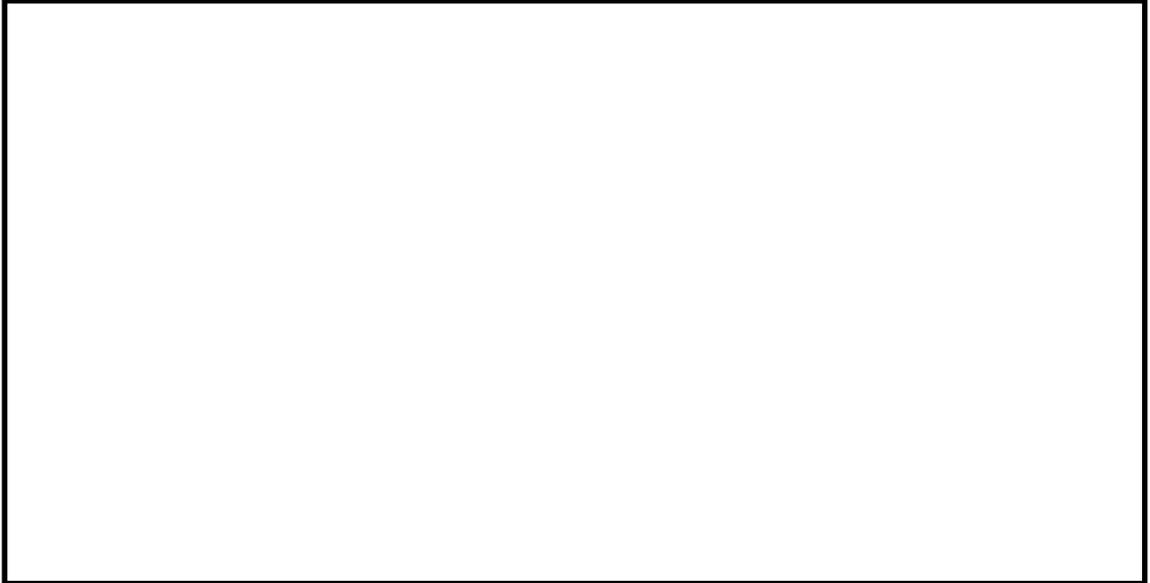
モデル概要	
<p>○モデル化範囲</p> <ul style="list-style-type: none"> ・EL. 46.5 m より上部の鉄筋コンクリート造及び鉄骨造部分をモデル化。 <p>○モデル化範囲</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鉄筋コンクリート部：シェル要素（耐震壁），梁要素（柱・梁） ・鉄骨部：梁要素（主トラス弦材，上弦面つなぎ梁），トラス要素（主トラス斜材・束材，上弦面水平ブレース，母屋）。 <p>○要素分割</p> <ul style="list-style-type: none"> ・評価対象である鉄骨部の部材長さに合わせて分割する。 	 <p>母屋 主トラス 上弦面つなぎ梁 上弦面 水平ブレース</p>
	
<p>図 1 モデル化範囲</p>	
	
<p>図 2 3次元FEMモデル</p>	

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">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。 <p>○荷重の入力方法</p> <ul style="list-style-type: none">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。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。 <div data-bbox="357 786 1350 1323" style="border: 1px solid black; height: 240px; margin: 20px 0;"></div> <p style="text-align: center;">図 3 境界条件（下方からの見上げ図）</p>

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"> 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。 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。 <p>【モデル化範囲】</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>	<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"> 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。 	

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)

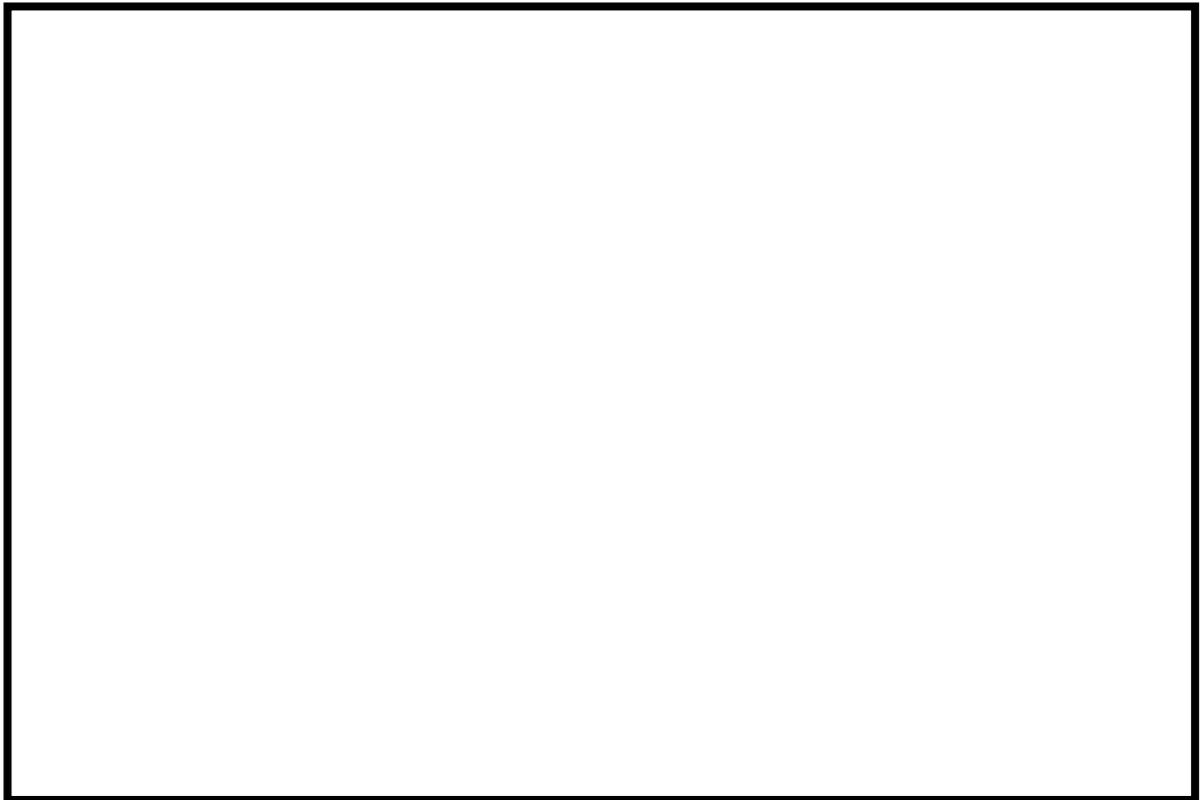


図 3 モデル化範囲 (詳細図)

表 2-3 使用済燃料プール (3/4)

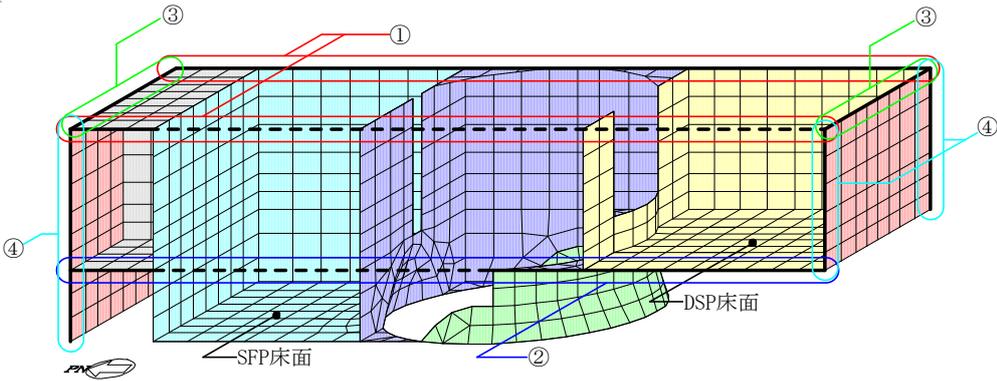
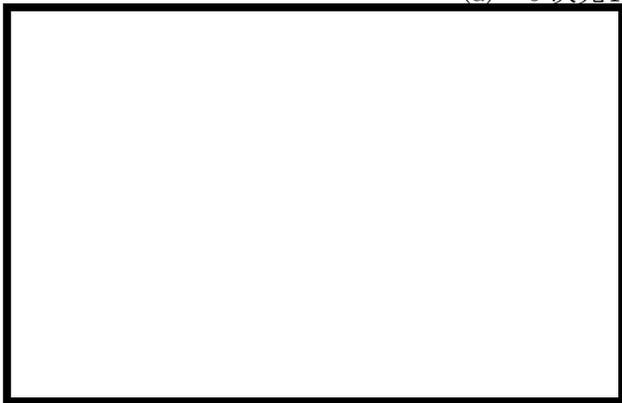
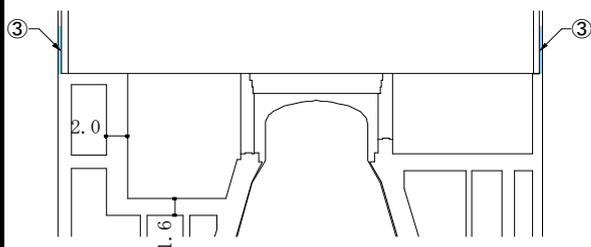
境界条件, 拘束条件	
使用済み燃料プールと周辺構造物との境界	
<p>・使用済燃料プール（シェル要素）は，周辺構造物（シェル要素，はり要素）と境界部で節点を共有しており，周辺構造物との間で生じる荷重の伝達や建屋の剛性による拘束を考慮している。</p>	
 <p>(a) 3次元FEMモデル</p>	
 <p>(b) 平面図</p>	 <p>(c) 断面図</p>
<p>図 4 モデル境界</p>	
<p>① : EL. 46.5m の床</p>	<p>② : EL. 38.8m の床</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・ EL. 46.5m の床の面内剛性(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。 ・ 全体座標系の X-Z 平面内の剛性は無視。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ EL. 38.8m 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。 ・ 全体座標系の X-Z 平面内の剛性は無視。
<p>③ : I/W(上面)</p>	<p>④ : I/W(側面)</p>
<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 全体座標系の X-Z 平面内の剛性は無視。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 全体座標系の X-Z 平面内の剛性は無視。

表 2-3 使用済燃料プール (4/4)

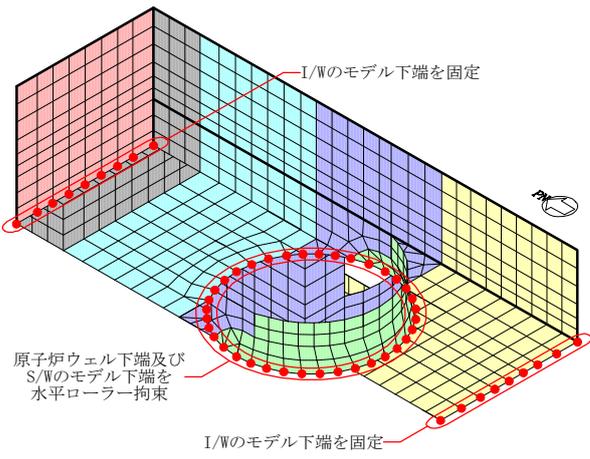
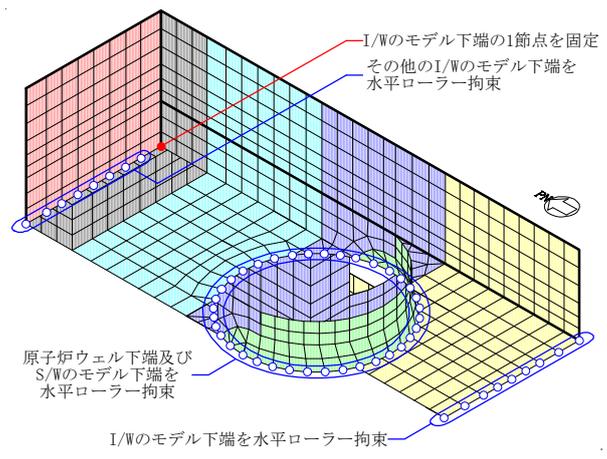
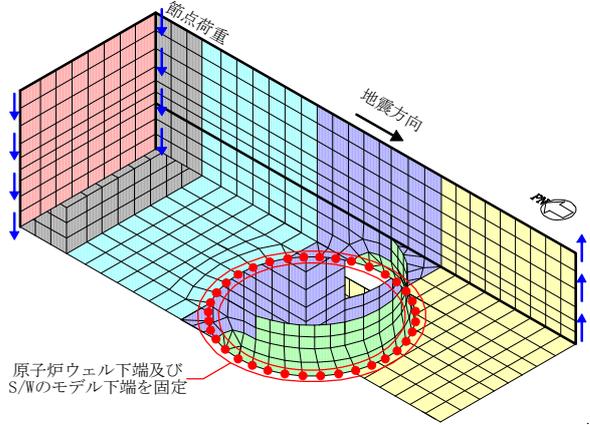
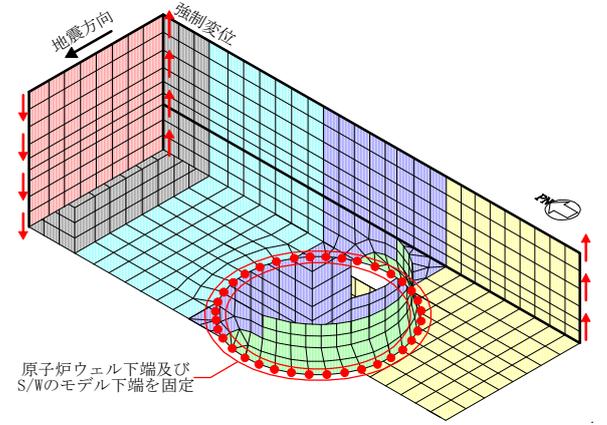
境界条件, 拘束条件	
固定荷重・動水圧荷重・鉛直地震力	温度荷重
<p>・モデル下端位置は, 原子炉ウェル及び I/W 下端を固定。</p>  <p><モデル図を北西下側から俯瞰></p>	<p>・モデル下端位置は, I/W 下端の 1 節点を固定, 原子炉ウェル及びその他の I/W 下端を水平ローラー拘束。</p>  <p><モデル図を北西下側から俯瞰></p>
水平地震力	
<p>・モデル下端位置は, 原子炉ウェル下端を固定。</p> <p>・NS 方向は, プールガードーに生じるせん断力を考慮するため, I/W(側面) 端部に節点荷重を適用。</p> <p>・EW 方向は, 原子炉ウェ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

・ 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※2

※1 : 大断面の柱・梁はシェル要素でモデル化

※2 : 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)



(全体モデル)

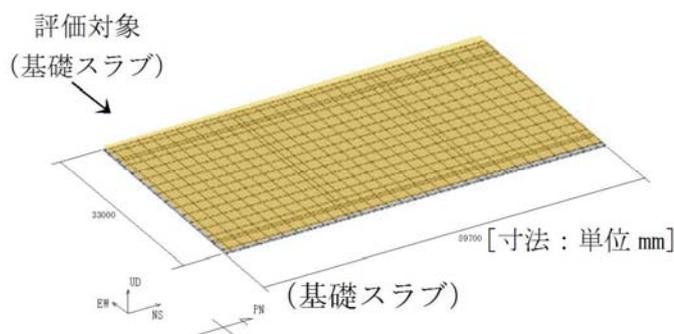


図 1 3次元FEMモデル及び構造図

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
<p>上部構造物と基礎スラブの境界</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。 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) 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。 <div style="border: 1px solid black; height: 300px; width: 100%; margin: 10px 0;"></div> <p>多点拘束: 壁の節点 A(■)の変位は基礎スラブの節点①②③④の変位に基づき補間される。</p> <p>■ : 基礎スラブの節点 ■ : 壁の節点 (多点拘束の節点)</p>
<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^{※3}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^{※3}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^{※3}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。

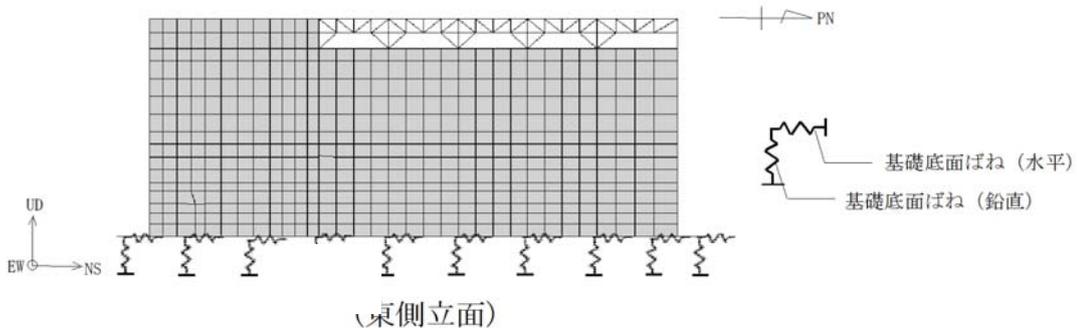


図 3 基礎スラブ底面の杭

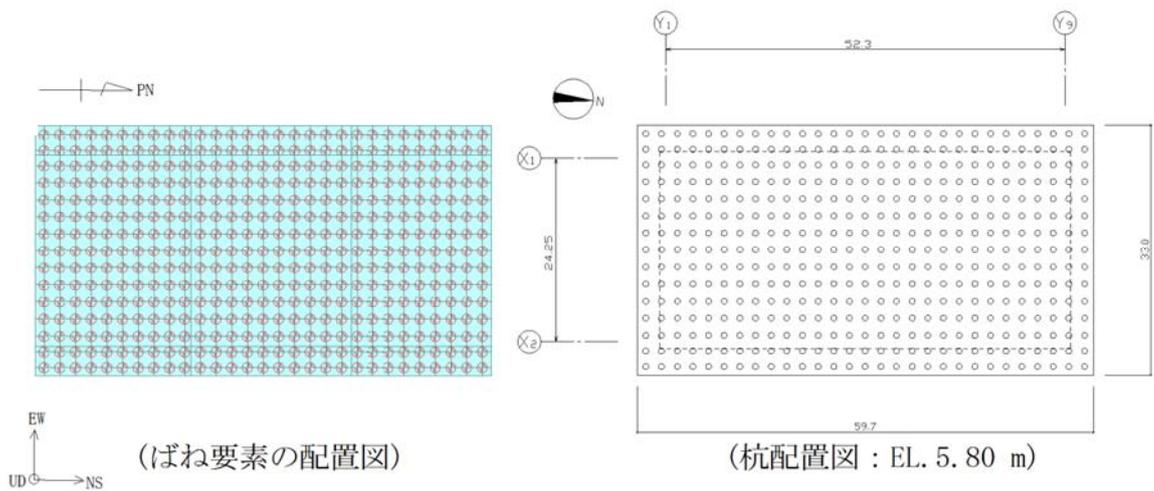


図 4 ばね要素の配置図及び杭配置図(鋼管杭 435 本)

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 (弾性支承ばりモデル)

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)
- ・弾性支承ばりモデルでは杭を評価対象とし、地震時水平加力及び地盤震動による杭応力(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

- ・はり要素: 杭
- ・ばね要素: 杭周の地盤

○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)

※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

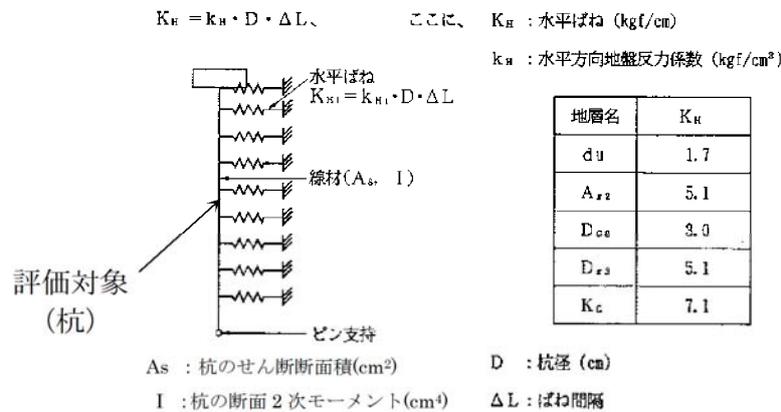
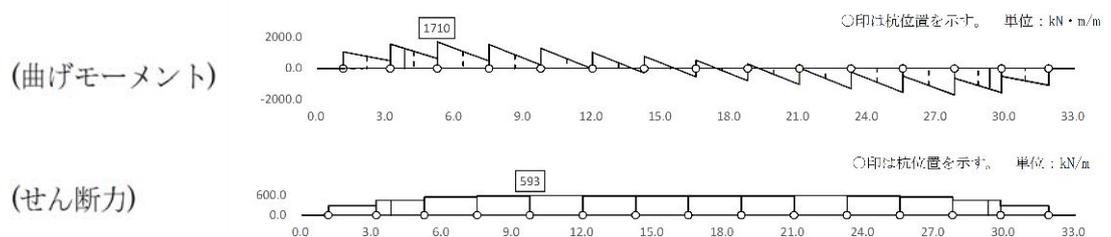


図 5 弾性支承ばりモデル図



(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)

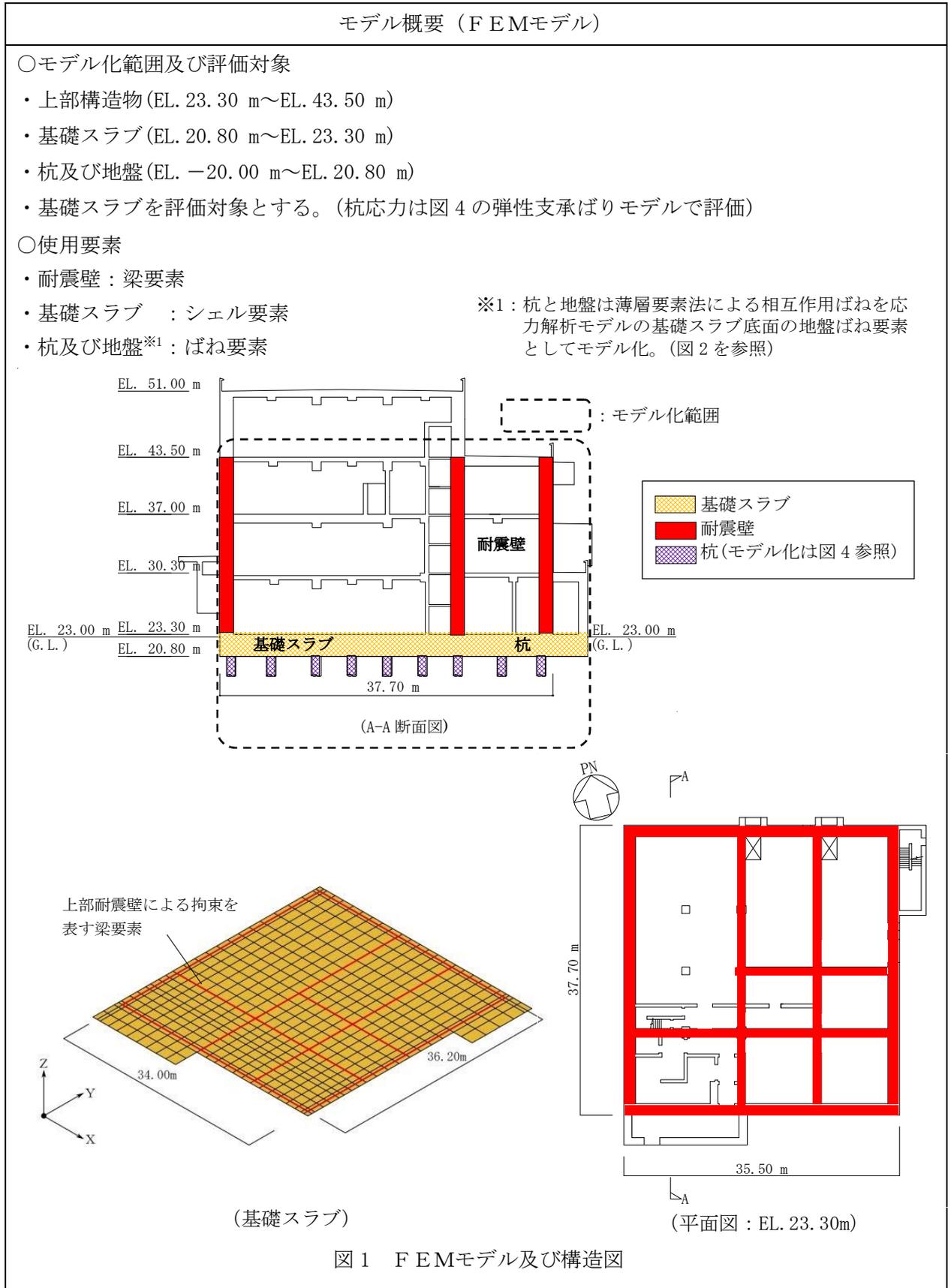


表 2-5 緊急時対策所建屋の基礎スラブ及び杭 (2/3)

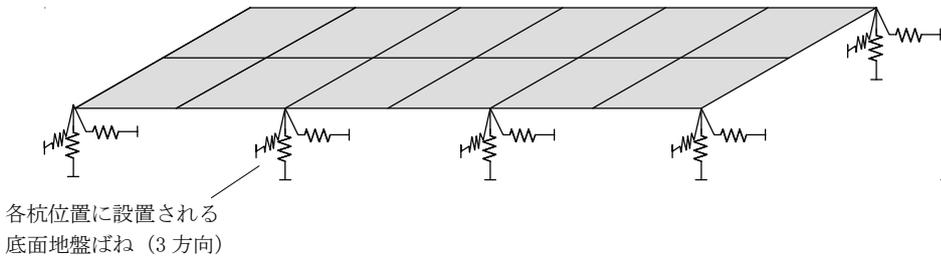
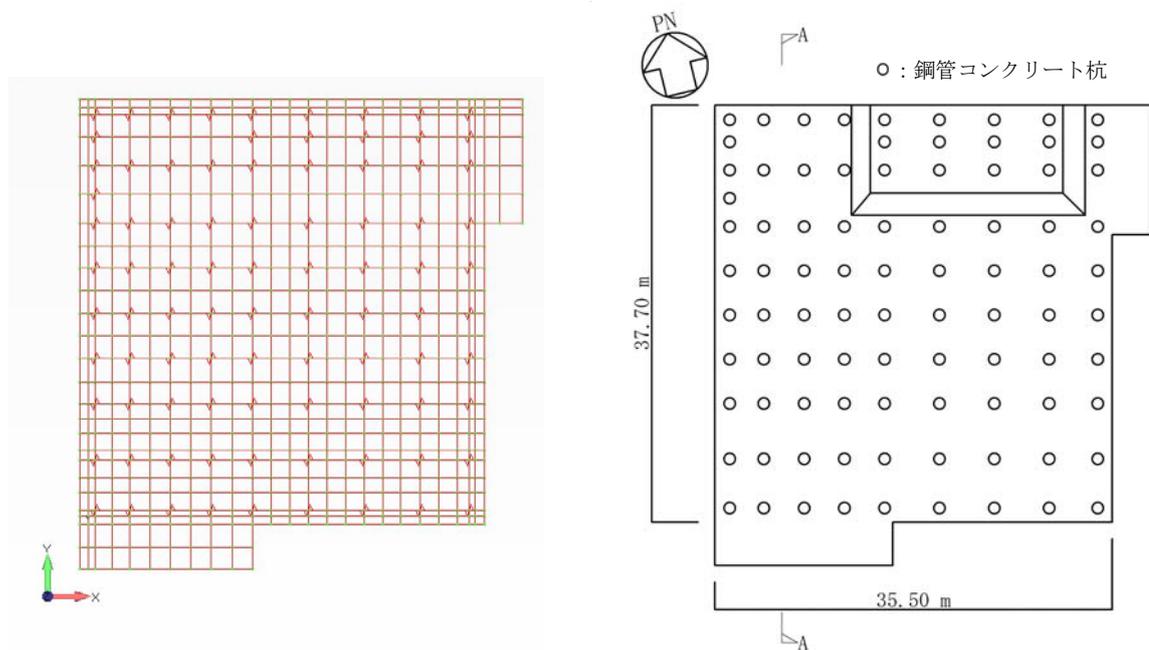
境界条件, 拘束条件
<p>上部構造物と基礎スラブの境界</p>
<ul style="list-style-type: none"> 基礎スラブ (シェル要素) と耐震壁 (はり要素) の境界部で節点を共有し, 上部構造物の剛性による拘束を考慮するため各耐震壁の脚部にはり要素を設けるとともに, 上部構造物からの曲げモーメント, せん断力, 軸力を節点荷重として考慮する。
<p>基礎スラブと地盤との境界</p>
<ul style="list-style-type: none"> 基礎スラブ底面の杭-地盤ばね(図 2 参照) <ul style="list-style-type: none"> 水平ばね: 薄層要素法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 上記の底面地盤ばね(3 方向)は各杭の位置に設置する。
 <p>各杭位置に設置される底面地盤ばね (3 方向)</p>
<p>図 2 境界条件の概念図</p>
 <p>(a) FEMモデルにおけるばね要素の配置図</p> <p>(b) 杭配置図</p> <p>○: 鋼管コンクリート杭</p> <p>37.70 m</p> <p>35.50 m</p>
<p>図 3 ばね要素の配置図及び杭配置図 (鋼管コンクリート杭 88 本)</p>

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"> 杭と杭周の地盤 (EL. -20.00 m~EL. 20.80 m) 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。 <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"> 杭: 梁要素 杭周の地盤: ばね要素 <p>○境界条件及び拘束条件</p> <ul style="list-style-type: none"> 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「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。) <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 k_h 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)																												
図 4 弾性支承梁の概念図																												
<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 k_h (kN/m²)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>20.8 ~ 19.0</td> <td>改良体 (fs)</td> <td>4.70×10^7</td> </tr> <tr> <td>19.0 ~ 15.3</td> <td>改良体 (du)</td> <td>4.70×10^7</td> </tr> <tr> <td>15.3 ~ 13.6</td> <td>改良体 (D2c-3)</td> <td>4.70×10^7</td> </tr> <tr> <td>13.6 ~ 7.2</td> <td>D2g-3</td> <td>6.66×10^4</td> </tr> <tr> <td>7.2 ~ 1.0</td> <td>D2c-3</td> <td>3.23×10^4</td> </tr> <tr> <td>1.0 ~ -5.5</td> <td>D2s-3</td> <td>8.62×10^4</td> </tr> <tr> <td>-5.5 ~ -15.2</td> <td>D2g-3</td> <td>1.80×10^5</td> </tr> <tr> <td>-15.2 ~ -20.0</td> <td>Km</td> <td>1.09×10^5</td> </tr> </tbody> </table>		標高 EL. (m)	地層名	水平地盤反力係数 k_h (kN/m ²)	20.8 ~ 19.0	改良体 (fs)	4.70×10^7	19.0 ~ 15.3	改良体 (du)	4.70×10^7	15.3 ~ 13.6	改良体 (D2c-3)	4.70×10^7	13.6 ~ 7.2	D2g-3	6.66×10^4	7.2 ~ 1.0	D2c-3	3.23×10^4	1.0 ~ -5.5	D2s-3	8.62×10^4	-5.5 ~ -15.2	D2g-3	1.80×10^5	-15.2 ~ -20.0	Km	1.09×10^5
標高 EL. (m)	地層名	水平地盤反力係数 k_h (kN/m ²)																										
20.8 ~ 19.0	改良体 (fs)	4.70×10^7																										
19.0 ~ 15.3	改良体 (du)	4.70×10^7																										
15.3 ~ 13.6	改良体 (D2c-3)	4.70×10^7																										
13.6 ~ 7.2	D2g-3	6.66×10^4																										
7.2 ~ 1.0	D2c-3	3.23×10^4																										
1.0 ~ -5.5	D2s-3	8.62×10^4																										
-5.5 ~ -15.2	D2g-3	1.80×10^5																										
-15.2 ~ -20.0	Km	1.09×10^5																										

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. -15.80m~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

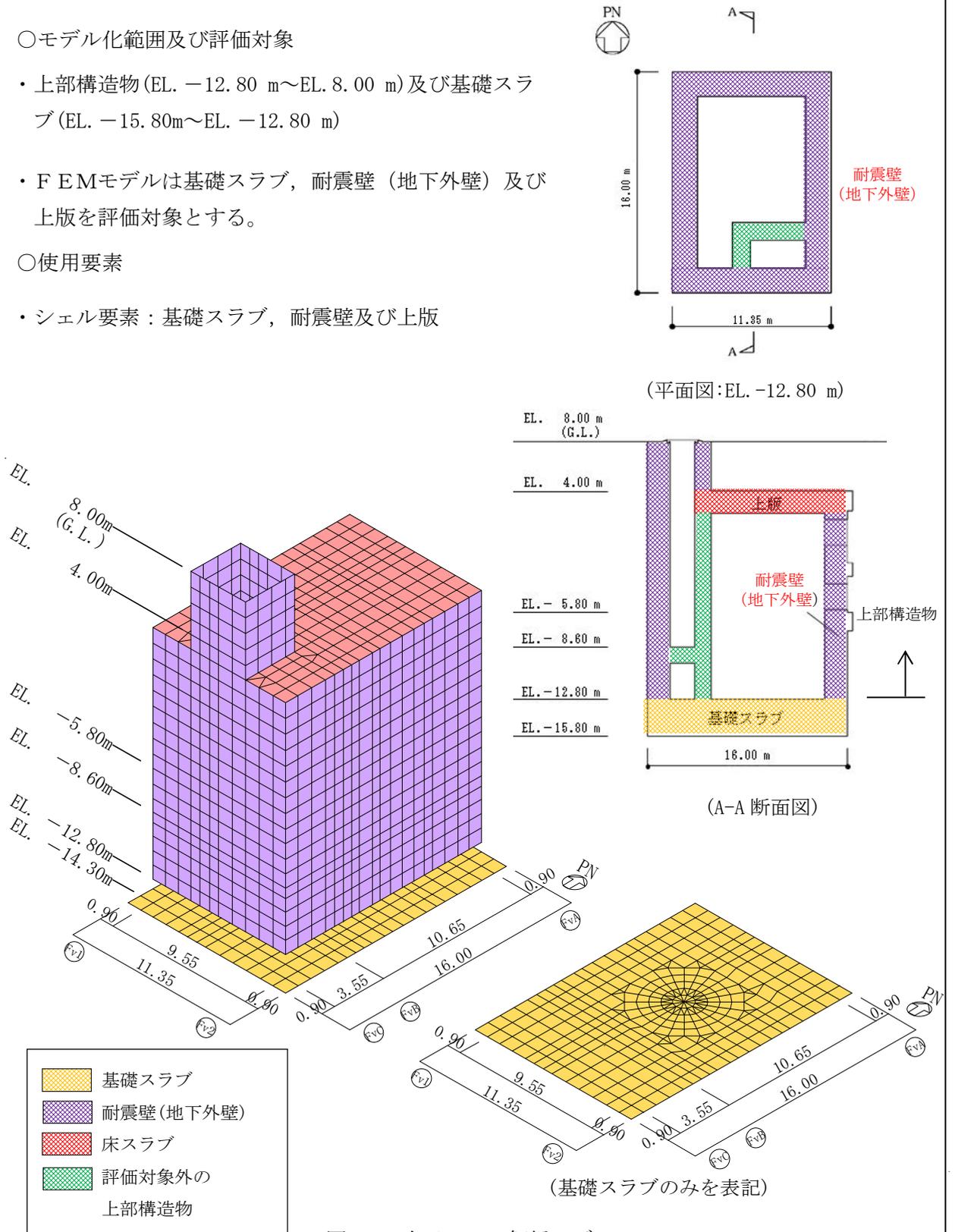


図 1 3次元FEM解析モデル

表 2-6 格納容器圧力逃がし装置格納槽 (2/3)

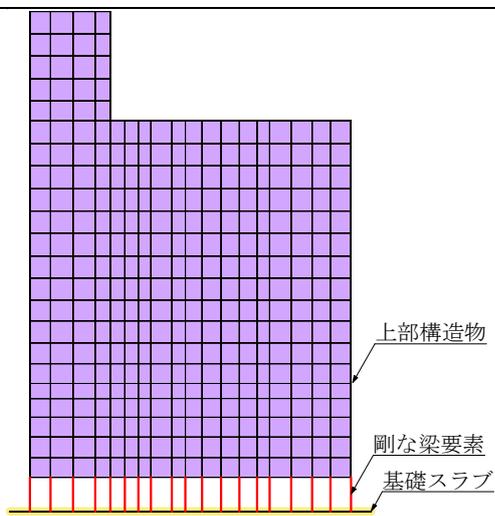
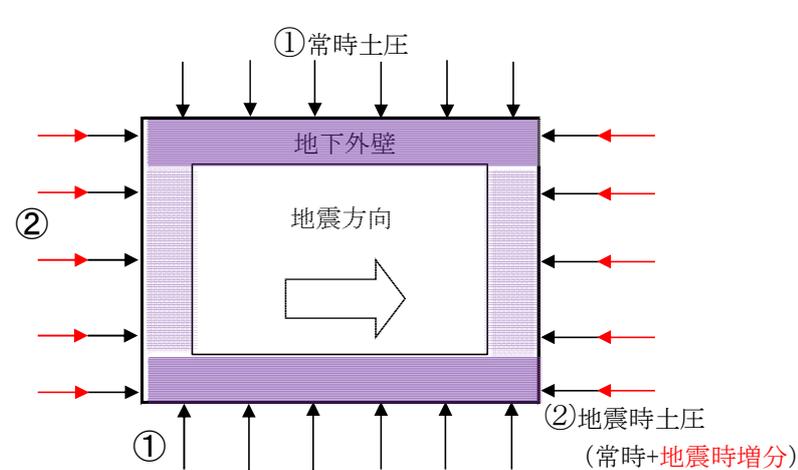
境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎スラブの境界	
<ul style="list-style-type: none"> ・上部構造物と基礎スラブの境界については, 上部構造物からの曲げモーメントを基礎スラブ中心高さでの値として適切に評価するため, 上部構造物要素下端と基礎スラブ要素を基礎スラブ厚の半分 (1.5m) 離してモデル化する。 ・上部構造物と基礎スラブの境界には, 剛な梁要素を設置し, 基礎スラブ厚の範囲を剛域としてモデル化する。 ・上記の通りモデル化することで, 上部構造物と基礎スラブの連続性を確保する。 	
図 2 剛な梁要素概要	
地下外壁と側面地盤の境界	
<ul style="list-style-type: none"> ・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。 <p style="margin-left: 20px;">常時土圧 : 地下外壁全方位に外力として入力</p> <p style="margin-left: 20px;">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</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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。 	
	
図 3 NS 方向地震時土圧概要 (平面図)	

表 2-6 格納容器圧力逃がし装置格納槽 (3/3)

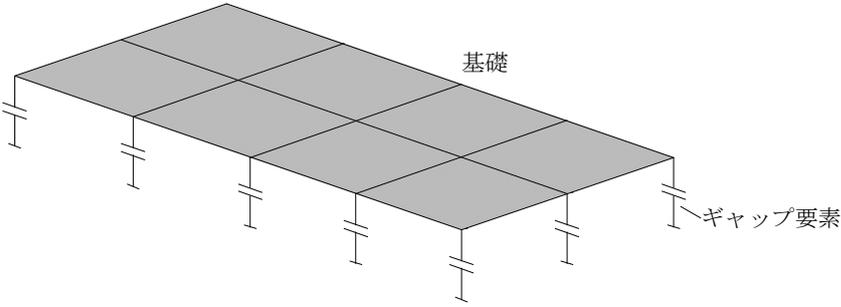
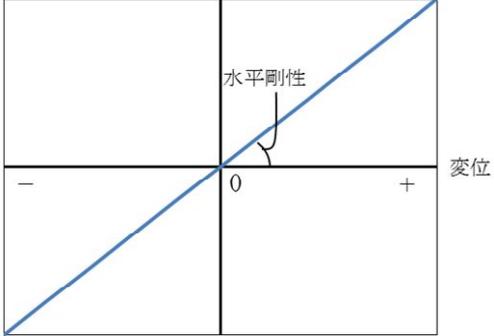
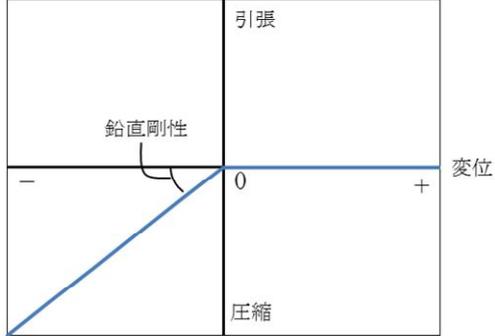
境界条件, 拘束条件	
基礎スラブと底面地盤の境界	
<ul style="list-style-type: none"> 基礎スラブと底面地盤の間には, 底面地盤を表現するギャップ要素を設け, 基礎スラブと底面地盤との間の剥離 (基礎の浮上り) を考慮している。 	
図 4 境界条件の概念図	
<ul style="list-style-type: none"> ギャップ要素 引張力が発生した時に浮上りを考慮する。水平剛性及び鉛直剛性は以下の通り設定する。なお, 剛性は NS 方向及び EW 方向の剛性の平均値とする。 	
<p>水平剛性 K_{Hi} : 地震応答解析モデルにより算出したイ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。</p> $K_{Hi} = (K_H / A) \times A_i$ <p style="text-align: center;">A : 基礎スラブの断面積</p>	
<p>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。</p> $K_{Vi} = (K_R / I) \times A_i$ <p style="text-align: center;">I : 基礎スラブの断面二次モーメント</p>	
<p>水平ばね応力</p>  <p style="text-align: center;">(a) 水平剛性</p>	<p>鉛直ばね応力</p>  <p style="text-align: center;">(b) 鉛直剛性</p>
<p>* 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。</p>	
図 5 ギャップ要素の概念図	

表 2-7 主排気筒（上部構造物）（1/3）

モデル概要

○モデル化範囲，対象部材

- ・基礎上端より上部の（EL. 8.5m～EL. 148.0m）の範囲
- ・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）

○使用要素

- ・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）

<解析モデルの使い分け>

- ・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。
- ・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。

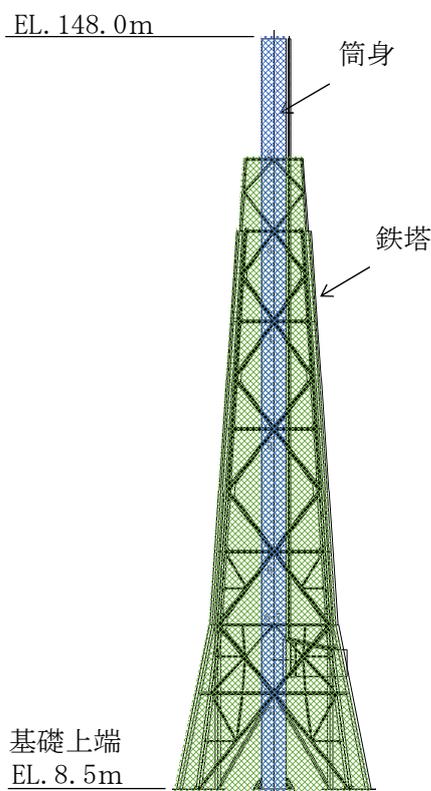
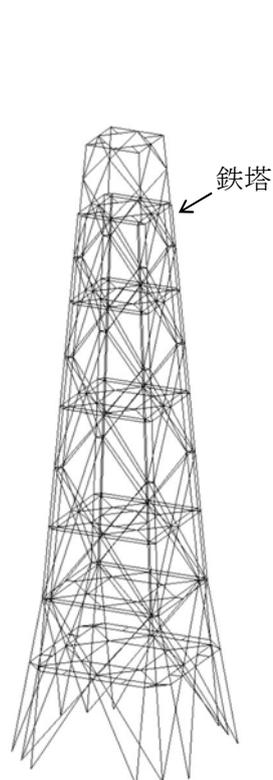
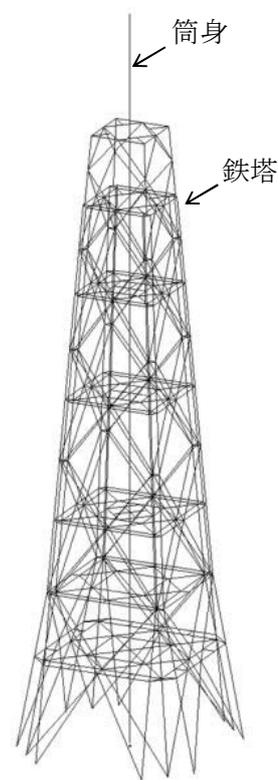


図1 モデル化範囲



地震荷重による応力評価用



風荷重による応力評価用

図2 解析モデル

表 2-7 主排気筒（上部構造物）（2/3）

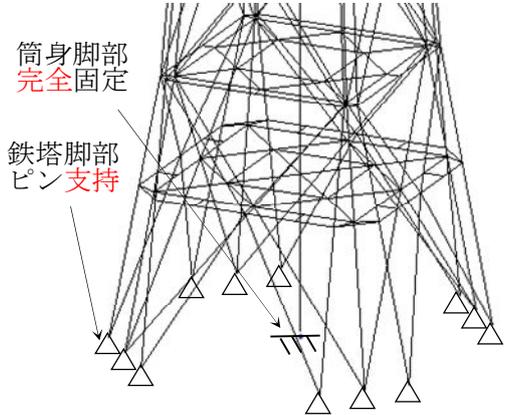
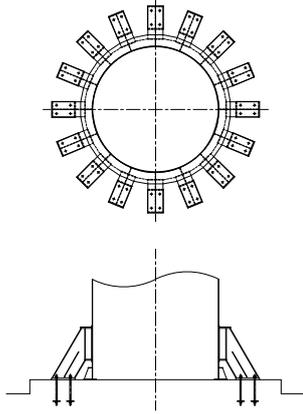
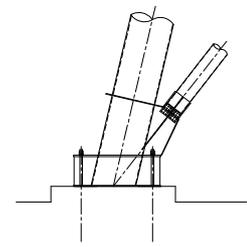
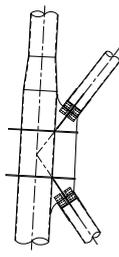
境界条件, 拘束条件	
上部構造物と基礎の境界	
<p>○境界条件及び拘束条件</p> <ul style="list-style-type: none"> 筒身脚部と基礎の境界は、$\phi 4m$ の構造体が接地しており、軸力、せん断力、曲げモーメントとも伝達するため完全固定（移動、回転とも拘束）、筒身脚部の構造は図 5 を参照 鉄塔脚部と基礎の境界は、鉄塔がトラス構造で脚部には軸力、せん断力のみが発生するためピン接合（移動拘束）、鉄塔脚部の構造は図 6 を参照 主柱材同士、補助主柱材同士、筒身同士については、溶接もしくはフランジ接合で軸力、せん断力、曲げモーメントとも伝達するため剛接合 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 7 を参照 <p>○部材の要素分割</p> <p style="padding-left: 2em;">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"> 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 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 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 風荷重は、鉄塔一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 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 	 <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 補助鉄塔脚部</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）（3/3）

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。渦励振のイメージを図 8 に示す。</p> <div style="text-align: center;"> </div> <p>図 8 渦励振のイメージ</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。</p> <div style="border: 1px dashed black; padding: 5px;"> <p>(2) 減衰付加による対策</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> </div> <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、渦励振に対する対策は実施済みであることから、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、一般的に、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>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 30m/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 2-8 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 4.0m (EL. 4.5m~EL. 8.5m) 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 1.0m 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）

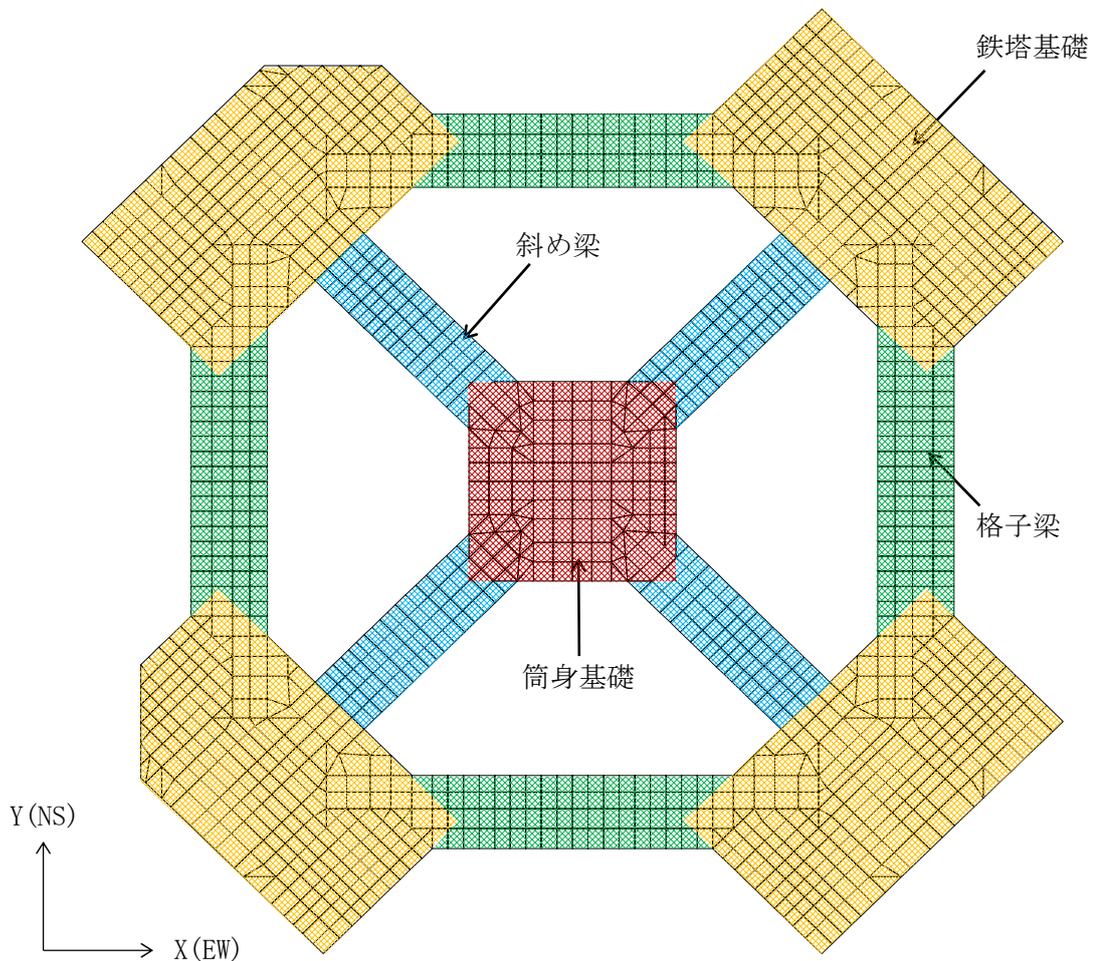


図 1 3次元FEMモデル

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。

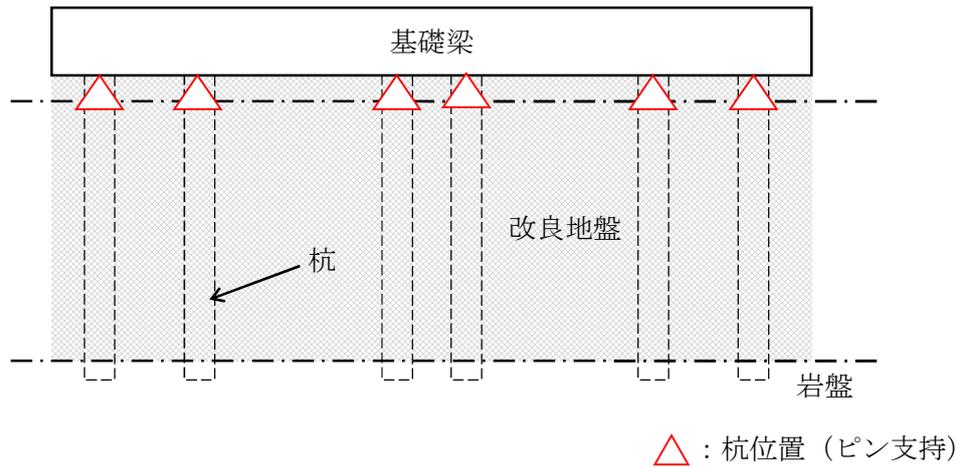


図 2 側面から見た解析モデルの支持状況の概念図

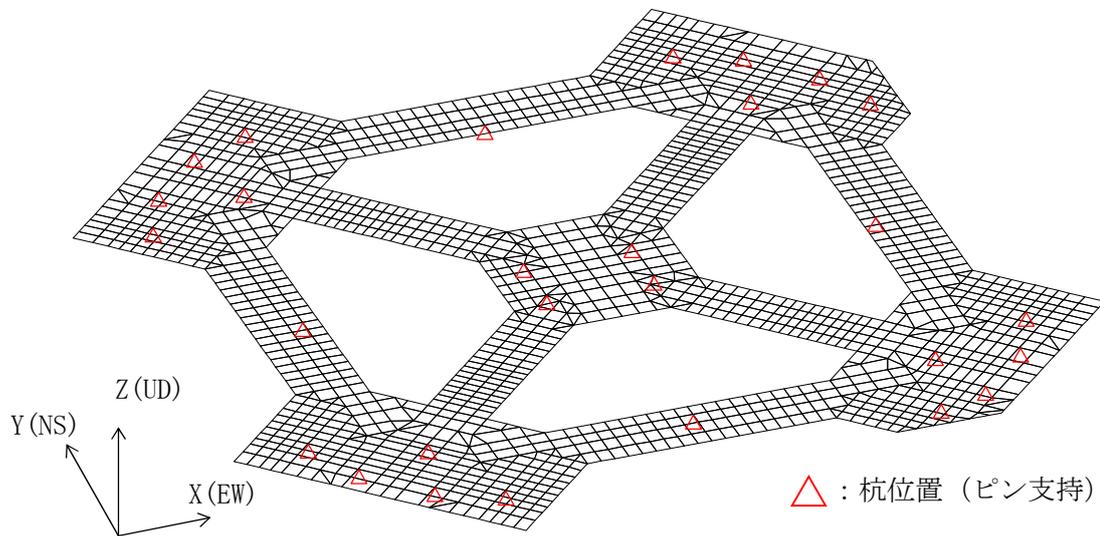


図 3 境界条件

○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. +7.7m) より上部の柱, 梁, ブレースをモデル化する。

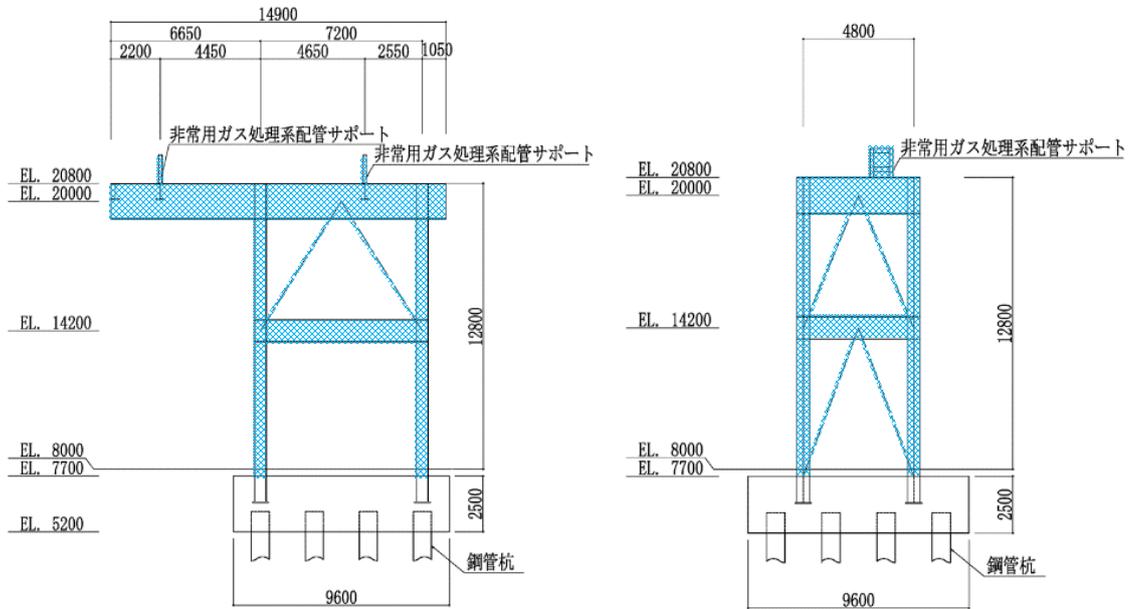


図 1 構造図及びモデル化範囲

○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)

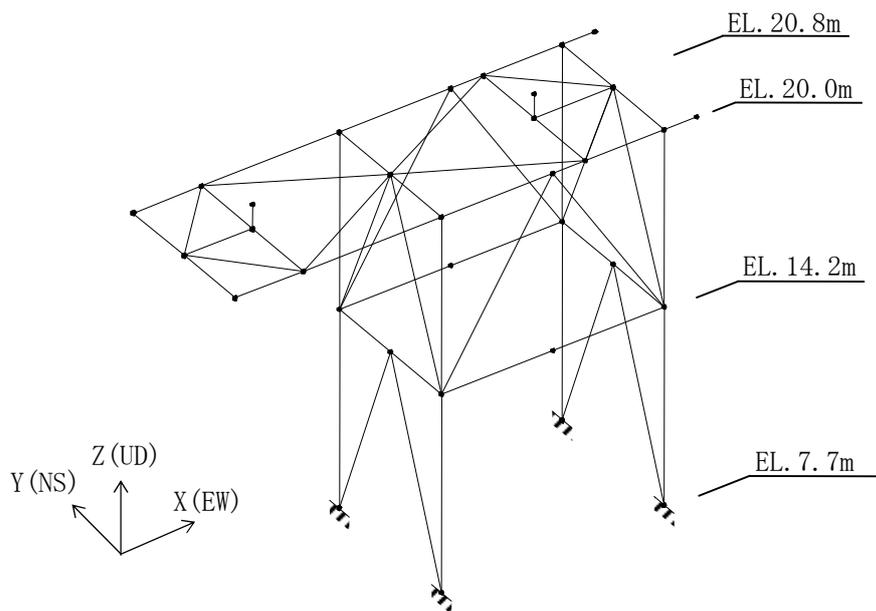


図 2 3次元FEMモデル

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

○境界条件

- ・ 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。
- ・ 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。
- ・ 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。

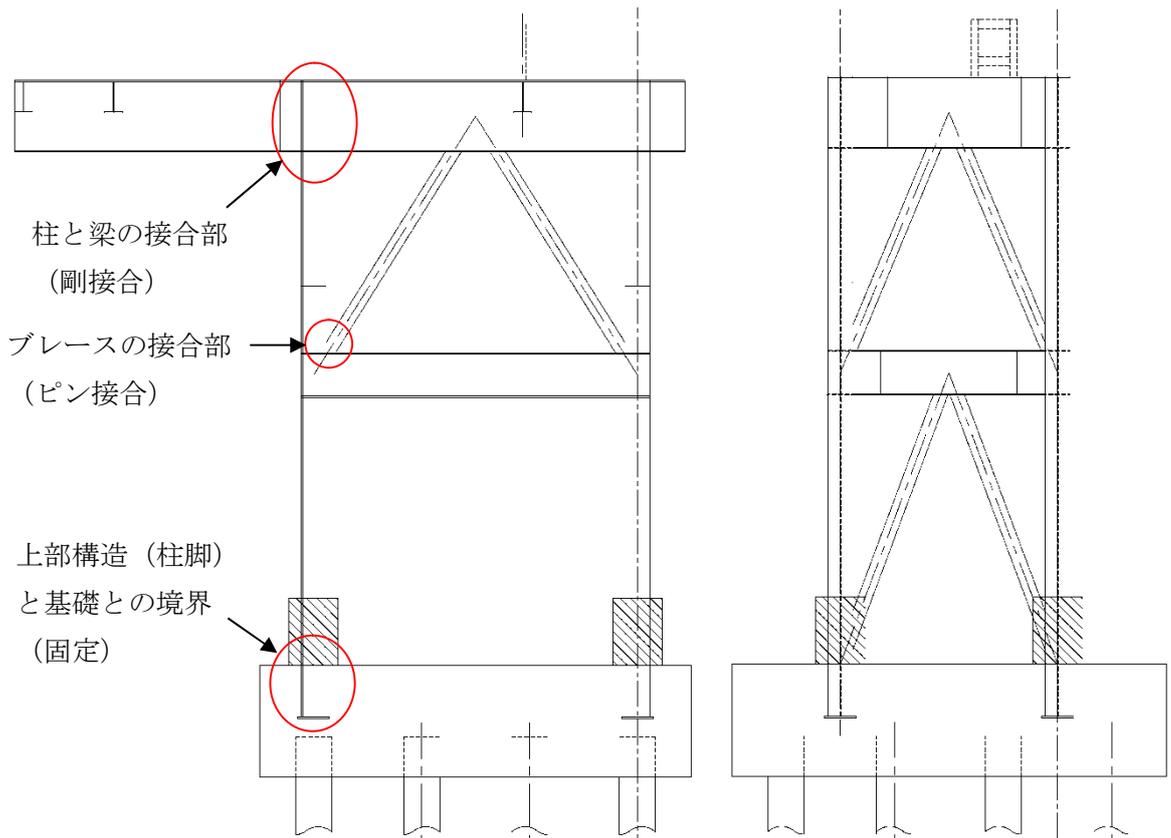


図 3 非常用ガス処理系配管支持架構の構造と境界条件

○荷重の入力方法

- ・ 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。
- ・ 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。