

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0
提出年月日	平成30年4月16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4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」

追而

追而

追而

追而

追而

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 2-3 に示す。

表 2-1 原子炉建屋基礎盤及び原子炉格納容器底部コンクリートマット

モデル概要	境界条件, 拘束条件
<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> <li>人工岩盤による支持状況を反映するため, EL. -17.0 m~EL. -9.0 m までをモデル化する。</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: シェル要素</li> <li>耐震壁 : はり要素</li> <li>人工岩盤 : ソリッド要素</li> </ul>	<p>上部構造物と基礎部の境界</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(シェル要素)と耐震壁(はり要素)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, せん断応力, 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>
	<p>基礎部と人工岩盤の境界</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>基礎下端には, 人工岩盤を表現するソリッド要素を, 人工岩盤下端には, 支持地盤を表現する地盤ばねを設けている。</li> <li>基礎と人工岩盤との間には, ギャップ要素を設け, 基礎と人工岩盤との間の剥離を考慮している。</li> </ul> <p>図 2 境界概要</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ギャップ要素 基礎厚さの下半分(2.5 m)の軸剛性及びせん断剛性を考慮。引張力が発生した時に浮上りを考慮する。</li> </ul>
<p>図 1 3次元FEM解析モデル</p>	<p>人工岩盤と地盤の境界</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>底面地盤ばね 水平ばね: 振動アドミタンス理論による水平ばねを離散化 鉛直ばね: 振動アドミタンス理論による回転ばねを離散化</li> </ul>

表 2-2 原子炉建屋原子炉棟（屋根トラス）

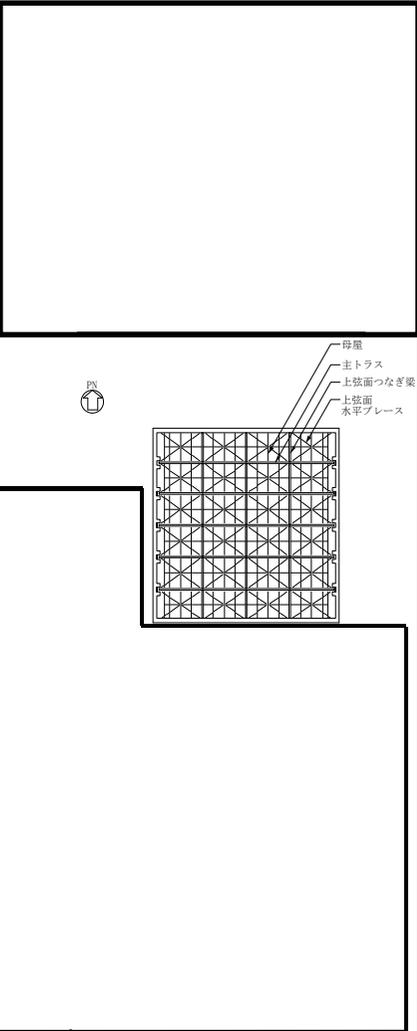
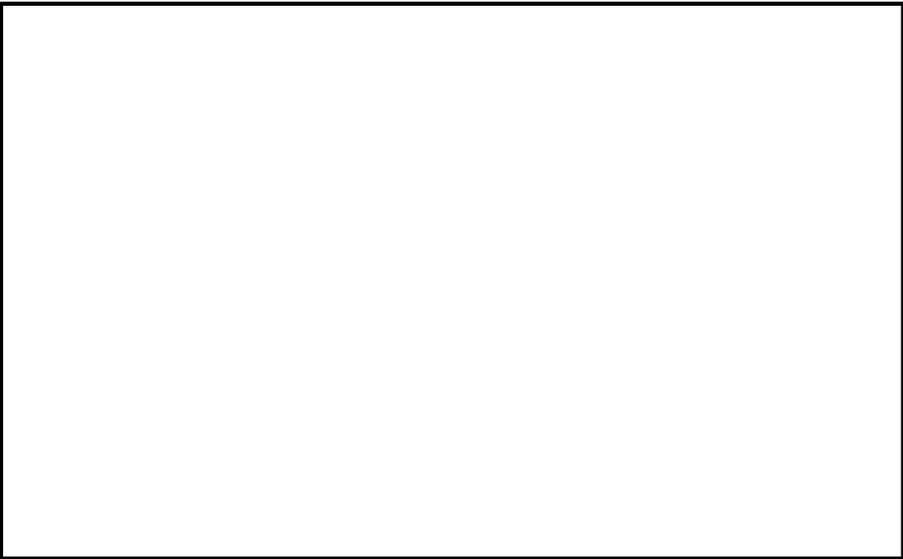
モデル概要	境界条件及び拘束条件
<p>○モデル化範囲</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>EL. 46.5 m より上部の鉄筋コンクリート造及び鉄骨造部分をモデル化。</li> </ul> <p>○使用要素</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>鉄筋コンクリート部：シェル要素（耐震壁），梁要素（柱・梁）。</li> <li>鉄骨部：梁要素（主トラス弦材，上弦面つなぎ梁），トラス要素（主トラス斜材・束材，上弦面水平ブレース，母屋）。</li> </ul> 	<p>モデル下端の境界</p> <p>○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> 
<p>図 1 3次元FEMモデル</p>	<p>図 2 境界条件（下方からの見上げ図）</p>

表 2-3 使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎スラブ及び杭 (1/2)

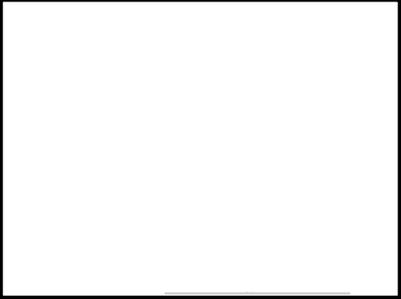
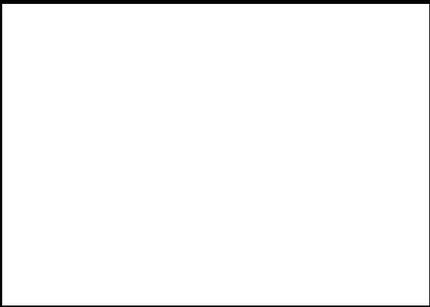
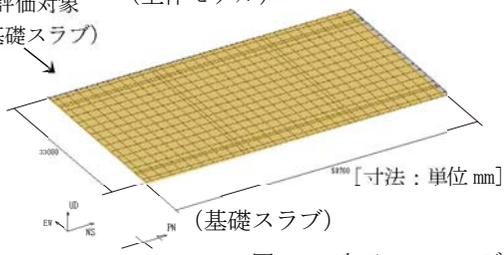
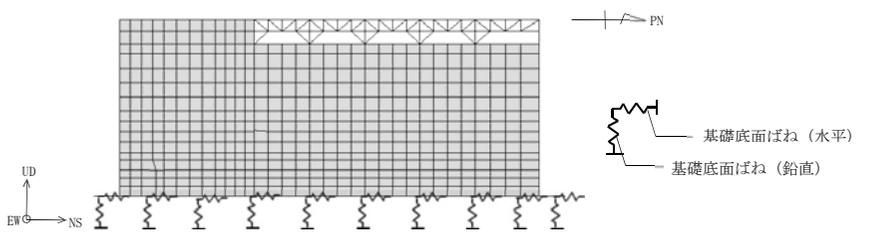
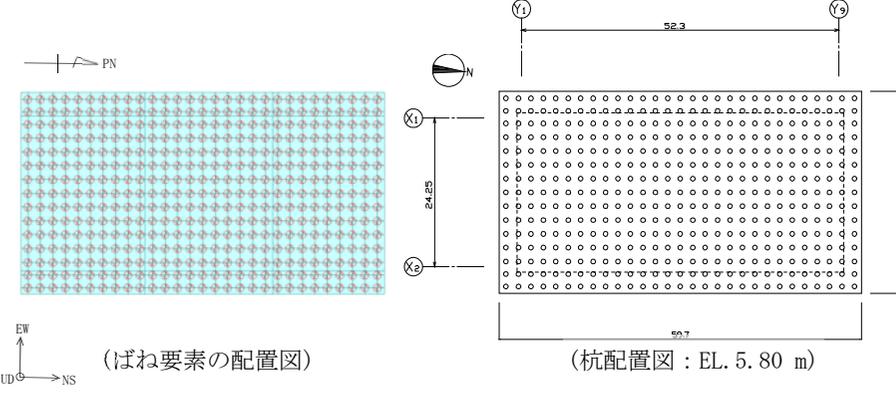
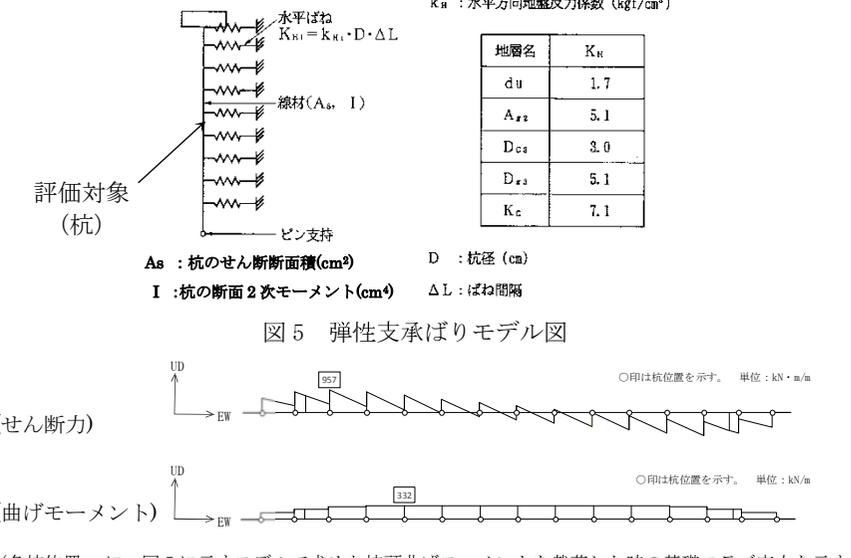
モデル概要 (3次元FEMモデル)	境界条件, 拘束条件
<p>○モデル化範囲及び評価対象</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・上部構造物(EL. 8.30 m～EL. 29.20 m)及び基礎スラブ(EL. 5.80 m～EL. 8.30 m), 杭及び地盤(EL. -15.90 m～EL. 5.80 m)</li> <li>・FEMモデルは基礎スラブを評価対象とする。 (杭応力は図5の弾性支承ばりモデルで評価)</li> </ul> <p>○使用要素</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・梁要素: 柱及び梁(屋根トラスを含む) ※1</li> <li>・シェル要素: 基礎スラブ, 床スラブ及び壁</li> <li>・ばね要素: 杭及び地盤 ※2</li> </ul> <p>※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。(次頁図3を参照)</p> <div style="text-align: center;">  <p>(A-A 断面図)</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>(平面図: EL. 8.30 m)</p> </div>	<p>上部構造物と基礎スラブの境界</p> <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>
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;"> <p>評価対象 (全体モデル)</p> <p>(基礎スラブ)</p>  <p>(基礎スラブ)</p> </div> <div style="flex: 1; border: 1px solid black; padding: 5px;"> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: yellow; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 基礎スラブ</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightgrey; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 壁(耐震壁は建屋外周壁のみ)</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: pink; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 床スラブ</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightgreen; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 屋根トラス</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: lightblue; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 柱・梁</li> <li><span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: purple; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> 杭(モデル化は図5参照)</li> </ul> </div> </div> <p style="text-align: center;">図1 3次元FEMモデル及び構造図</p>	<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> <ul style="list-style-type: none"> <li>■: 基礎スラブの節点</li> <li>■: 壁の節点 (多点拘束の節点)</li> </ul> <p style="text-align: center;">図2 基礎スラブと上部構造物の境界及び拘束条件</p>

表 2-3 使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎スラブ及び杭 (2/2)

境界条件・拘束条件	モデル概要 (弾性支承ばりモデル)												
<p>基礎スラブと地盤との境界</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>基礎スラブ底面の杭-地盤ばね(図3参照)</li> <li>水平ばね: 薄層要素法<sup>※3</sup>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<sup>※3</sup>による回転ばねを離散化 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</li> </ul> <p>※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</p> <ul style="list-style-type: none"> <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>	<p>杭と杭周地盤ばね(水平地盤ばね)</p> <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. -15.90 m~EL. 5.80 m)</li> <li>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<sup>※4</sup>)を評価。</li> </ul> <p>※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)</p> <p>○使用要素</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>はり要素: 杭</li> <li>ばね要素: 杭周の地盤</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> は杭の水平載荷試験結果に基づき設定)</li> </ul>												
 <p>(東側立面)</p> <p>図3 基礎スラブ底面の杭</p>  <p>(ばね要素の配置図)</p> <p>(杭配置図: EL. 5.80 m)</p> <p>図4 ばね要素の配置図及び杭配置図(鋼管杭 435 本)</p>	<p><math>K_H = k_H \cdot D \cdot \Delta L</math>、ここに、<math>K_H</math>: 水平ばね (kgf/cm)</p> <p><math>k_H</math>: 水平方向地盤反力係数 (kgf/cm<sup>3</sup>)</p> <p><math>K_{H1} = k_H \cdot D \cdot \Delta L</math></p> <p>水平ばね</p> <p>鋼材(A<sub>s</sub>, I)</p> <p>ピン支持</p> <table border="1" data-bbox="1590 829 1769 1021"> <thead> <tr> <th>地層名</th> <th><math>K_H</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>d<sub>u</sub></td> <td>1.7</td> </tr> <tr> <td>A<sub>zz</sub></td> <td>5.1</td> </tr> <tr> <td>D<sub>ca</sub></td> <td>3.0</td> </tr> <tr> <td>D<sub>sz</sub></td> <td>5.1</td> </tr> <tr> <td>K<sub>c</sub></td> <td>7.1</td> </tr> </tbody> </table> <p><math>A_s</math>: 杭のせん断面積(cm<sup>2</sup>)      D: 杭径(cm)</p> <p>I: 杭の断面2次モーメント(cm<sup>4</sup>)      ΔL: ばね間隔</p> <p>図5 弾性支承ばりモデル図</p>  <p>○印は杭位置を示す。単位: kN・m/m</p> <p>(せん断力)</p> <p>○印は杭位置を示す。単位: kN/m</p> <p>(曲げモーメント)</p> <p>(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。)</p> <p>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)</p>	地層名	$K_H$	d <sub>u</sub>	1.7	A <sub>zz</sub>	5.1	D <sub>ca</sub>	3.0	D <sub>sz</sub>	5.1	K <sub>c</sub>	7.1
地層名	$K_H$												
d <sub>u</sub>	1.7												
A <sub>zz</sub>	5.1												
D <sub>ca</sub>	3.0												
D <sub>sz</sub>	5.1												
K <sub>c</sub>	7.1												