

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-370-1 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-370-1 【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】

平成30年4月

日本原子力発電株式会社

目次

1. 概要 1
2. 応力解析モデル及び手法の比較 2

1. 概要

本資料は、東海第二発電所の原子炉格納容器底部コンクリートマット，原子炉建屋原子炉棟基礎及び付属棟基礎を含む原子炉建屋基礎盤，並びに使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎（基礎スラブ及び杭）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。

また，本資料は，以下の資料の補足説明をするものである。

- 資料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」
- 資料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」
- 資料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. 応力解析モデル及び手法の比較

東海第二発電所の建物・構築物の応力解析モデル及び手法の比較を，表2-1～表2-4に示す。また，今回工認時の応力解析モデルを図2-1～図2-4に示す。

比較に用いる既工認時の地震応答解析モデル及び手法は，建設工認（原子炉格納容器底部コンクリートマット，原子炉建屋原子炉棟基礎及び附属棟基礎を含む原子炉建屋基礎盤については，47公第12076号昭和48年4月9日認可，使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎（基礎スラブ及び杭）については，平成11・06・25資第1号平成11年9月2日認可）時のものである。

表 2-1 応力解析モデル及び手法の比較 (原子炉格納容器底部コンクリートマット)

項目	内容	既工認※	今回工認	備考
解析手法		・ 3次元 FEMモデルを用いた応力解析	・ 同左	—
解析コード		・ MSC NASTRAN	・ MSC NASTRAN Ver. 2016.1.1	—
モデル	材料物性	検討時の各規準に基づき設定 ・ コンクリートのヤング係数 : $E_c = 20.6 \text{ kN/mm}^2$ (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 : $E_c = 22.1 \text{ kN/mm}^2$ ・ コンクリートのポアソン比 : $\nu = 0.2$	①
	要素種別	・ 上部構造 : 壁下端の鉛直変位を直線状に拘束 (MPC 拘束) ・ 基礎 : シェル要素	・ 上部構造 : はり要素 ・ 基礎 : シェル要素 ・ 人工岩盤 : ソリッド要素	②
	境界条件	・ 基礎スラブ底面を弾性地盤ばねにより支持 ・ 基礎スラブ底面の弾性地盤ばねは浮上りを考慮 ・ 構造物の対称性を考慮して基礎半分をモデル化 ・ 上部構造の剛性を考慮	・ 基礎スラブ底面をソリッド要素 (人工岩盤) で支持 ・ 基礎スラブ底面と人工岩盤間の浮上り考慮 ・ 人工岩盤底面を弾性地盤ばねにより支持 ・ 原子炉建屋基礎盤の全体をモデル化 ・ 上部構造の剛性を考慮	②
	非線形特性	・ 考慮せず	・ 同左	—
地震荷重との組合せ		D+0+S ₁ D+0+S ₂ , D+0+L+S ₁ D : 死荷重 0 : 通常運転時荷重 L : 事故時の荷重 S ₁ : 設計地震荷重 S ₂ : 0.27 g 地震荷重	荷重状態Ⅳ : D+L+P ₁ +H ₁ +K _S 荷重状態Ⅴ : D+L+P _{SAL} +H _{SAL} +K _{SAd} , D+L+P _{SALL} +H _{SALL} +K _S D : 死荷重 (静止土圧による荷重を含む) L : 活荷重 (地震時の積雪荷重を含む) P ₁ : 運転時圧力 H ₁ : 運転時水圧荷重 K _S : 基準地震動 S _s による地震力 K _{SAd} : 弾性設計用地震動 S _d による地震力 P _{SAL} , P _{SALL} : SA 時圧力 H _{SAL} , H _{SALL} : SA 時水圧荷重	—
荷重の設定	死荷重 活荷重	・ 基礎の自重及び上部構造物からの荷重	・ 基礎の自重及び上部構造物からの荷重, 静止土圧による荷重	③
	運転時荷重	・ 運転時圧力及び運転時水圧荷重	・ 同左	—
	温度荷重	・ シェル要素に等価線形温度を考慮	・ シェル要素に等価線形温度を考慮 (荷重状態Ⅳ, Ⅴでは熱応力は考慮しない)	④
	L 事故時圧力	・ L 事故時圧力を考慮	・ L 事故時の荷重組合せケースは実施しない。	⑤
	SA 時圧力 SA 時水圧荷重	・ 考慮せず	・ SA 事故時圧力, SA 事故時水圧荷重を考慮	—
評価方法	線形応力解析	・ D+0+S ₁ に対して発生応力が短期許容応力度を超えないことを確認 ・ D+0+S ₂ 及び D+0+L+S ₁ に対して発生応力により降伏状態にならないことを確認	・ 荷重状態Ⅳ, Ⅴ : 発生応力又はひずみが許容限界を超えないことを確認	④, ⑤

※ : 建設時の工事計画認可 (47 公第 12076 号 昭和 48 年 4 月 9 日認可)

【具体的な反映事項】(表の備考欄に対応)

- ①ヤング係数及びせん断弾性係数については、「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)に基づき再計算。
- ②モデル適正化により, 1/2 モデルより全体モデルに変更し, 上部構造の拘束効果を実状に応じて変更するとともに, 人工岩盤による支持状況を反映。
- ③荷重適正化により, 静止土圧により地下外壁脚部に生じる反力を荷重として考慮。
- ④「発電用原子力設備規格—コンクリート製格納容器規格」(2003 年日本建築学会)
- ⑤応答に対して支配的となる水平方向の弾性設計用地震動 S_a による地震力及び静的地震力が既工認の地震荷重よりも小さいことから, 既工認の評価に包絡される。

表 2-2 応力解析モデル及び手法の比較 (原子炉建屋基礎盤 (原子炉格納容器底部コンクリートマットを除く))

項目	内容	既工認 ^{※1}	今回工認	備考
解析手法		・ 3次元 FEMモデルを用いた応力解析	・ 同左	—
解析コード		・ MSC NASTRAN	・ MSC NASTRAN Ver. 2016.1.1	—
モデル	材料物性	検討時の各規準に基づき設定 ・ コンクリートのヤング係数 : $E_c=20.6 \text{ kN/mm}^2$ (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 : $E_c=22.1 \text{ kN/mm}^2$ (SI 換算) ・ コンクリートのポアソン比 : $\nu=0.2$	①
	要素種別	・ 上部構造 : 壁下端の鉛直変位を直線状に拘束 (MPC 拘束) ・ 基礎 : シェル要素	・ 上部構造 : はり要素 ・ 基礎 : シェル要素 ・ 人工岩盤 : ソリッド要素	②
	境界条件	・ 基礎スラブ底面を弾性地盤ばねにより支持 ・ 基礎スラブ底面の弾性地盤ばねは、浮上りを考慮 ・ 構造物の対称性を考慮して、基礎半分をモデル化 ・ 上部構造の剛性考慮	・ 基礎スラブ底面をソリッド要素 (人工岩盤) で支持 ・ 基礎スラブ底面と人工岩盤間の浮上り考慮 ・ 人工岩盤底面を弾性地盤ばねにより支持 ・ 原子炉格納容器底部コンクリートマットを含む基礎盤全体をモデル化 ・ 上部構造の剛性を考慮	②
	非線形特性	・ 考慮せず	・ 同左	—
地震荷重との組合せ	$D+0+S_1$ D : 死荷重 0 : 通常運転時荷重 S_1 : 設計地震荷重	$DL+SNL_{地震時}+P_1+H_1+K_S$ DL : 固定荷重 (積載荷重を含む) $SNL_{地震時}$: 積雪荷重 P_1 : 運転時圧力 [※] H_1 : 運転時水圧荷重 [※] K_S : S_s 地震荷重 ※ : 原子炉格納容器底部コンクリートマットに作用	—	
荷重の設定	死荷重 活荷重	・ 基礎の自重及び上部構造からの荷重	・ 基礎の自重及び上部構造からの荷重、静止土圧による荷重	③
	運転時荷重	・ 運転時圧力及び運転時水圧荷重	・ 同左	—
	温度荷重	・ 考慮せず	・ 同左	—
	L 事故時圧力	・ 考慮せず	・ 同左	—
地震荷重	・ 上部構造からの地震力 (鉛直力, せん断力, 転倒モーメント) 及び基礎部の付加地震力を考慮	・ 同左	—	
評価方法	線形応力解析	・ S_1 (設計地震荷重) 地震力による発生応力が短期許容応力度を超えないことを確認	・ S_s 地震力による発生応力が終局耐力を超えないことを確認	④

※1 : 建設時の工事計画認可 (47 公第 12076 号 昭和 48 年 4 月 9 日認可)

【具体的な反映事項】 (表の備考欄に対応)

①ヤング係数及びせん断弾性係数については、「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」((社)日本建築学会, 1999)に基づき再計算。

②モデル適正化により, 1/2 モデルより全体モデルに変更し, 上部構造の拘束効果を実状に応じて変更するとともに, 人工岩盤による支持状況を反映。

③荷重適正化により, 静止土圧により地下外壁脚部に生じる反力を荷重として考慮。

④2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書 (国土交通省住宅局建築指導課・国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所・日本建築行政会議, 2015)

表 2-3 応力解析モデル及び手法の比較 (使用済燃料乾式貯蔵建屋 基礎スラブ)

項目	内容	既工認 ^{※1}	今回工認	備考
解析手法		・ 3次元 FEMモデルを用いた応力解析	・ 同左	—
解析コード		・ MSC NASTRAN	・ MSC NASTRAN ver. 2008 r1	—
モデル	材料物性	検討時の各規準に基づき設定 ・ コンクリートのヤング係数 : $E_c = 22.6 \text{ kN/mm}^2$ (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 : $E_c = 23.5 \text{ kN/mm}^2$ ・ コンクリートのポアソン比 : $\nu = 0.2$	①
	要素種別	・ 耐震壁, 屋根スラブ及び基礎スラブ : シェル要素 ・ 柱及び梁 : 梁要素	・ 同左	②
	境界条件	・ 底面を弾性ばねにより支持 ・ 地盤ばねには引張力を作用させない	・ 底面を弾性ばねにより支持 ・ 底面地盤ばねに引張力を作用させる	③
	非線形特性	・ 考慮しない	・ 同左	—
地震荷重との組合せ	G+E+P+CL+K G : 固定荷重 E : 機器荷重 P : 積載荷重 CL : クレーン荷重 K : 地震荷重	G+E+P _{地震時} +S _{地震時} +CL+K _S G : 固定荷重 E : 機器荷重 P _{地震時} : 積載荷重 S _{地震時} : 積雪荷重 CL : クレーン荷重 K _S : S _s 地震荷重	④	
荷重の設定	固定荷重	・ 構造体の自重を考慮	・ 同左	—
	地震荷重	・ 基礎自体の物体力及び上部構造物からの地震力 (転倒モーメント, 水平力, 鉛直力) を入力	・ 同左	
評価方法	線形応力解析	・ 静的地震力に対しては, 発生応力が短期許容応力度を超えないこと, S ₂ 地震力に対しては, 部材の終局強度以内であることを確認	・ S _s 地震力に対して, 発生応力が終局耐力を超えないことを確認	⑤

※1 : 『既工事計画認可申請書 添付資料 V-2-3 「使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書」 (平成 11・06・25 資第 1 号 平成 11 年 9 月 2 日認可)』

【具体的な反映事項】 (表の備考欄に対応)

- ① ヤング係数及びせん断弾性係数については, 「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」 ((社) 日本建築学会, 1999) に基づき再計算。
- ② メッシュサイズを細分割した。約 2.5 m×約 4.0 m を約 1.3 m×約 2.0 m とした。
- ③ 実状に合うように杭の引抜き抵抗力を考慮。
- ④ 積雪荷重を考慮。
- ⑤ 2015 年版 建築物の構造関係技術基準解説書 (国土交通省住宅局建築指導課・国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所・日本建築行政会議, 2015)

表 2-4 応力解析モデル及び手法の比較 (使用済燃料乾式貯蔵建屋 杭)

項目	内容	既工認 ^{※1}	今回工認	備考
解析手法		・弾性支承ばりによる応力解析	・同左	—
解析コード		・MSC NASTRAN	・MSC NASTRAN ver.2008 r1	—
モデル	材料物性	検討時の各規準に基づき設定 ・鋼管杭のヤング係数： $E_s = 206 \text{ kN/mm}^2$ (SI 換算) ・鋼管杭のポアソン比： $\nu = 0.3$	適用基準の見直しによる再設定 ・鋼管杭のヤング係数： $E_s = 205 \text{ kN/mm}^2$ (SI 換算) ・鋼管杭のポアソン比：同左	①
	要素種別	・鋼管杭：梁要素 ・杭周地盤：ばね要素 (水平)	・同左	—
	杭周地盤ばねの算定方法	・杭の水平載荷試験に基づき設定	・同左	—
	境界条件	・杭頭：水平方向ローラー，回転方向拘束 ・杭先端：水平方向及び鉛直方向拘束	・同左	—
	非線形特性	・考慮しない	・同左	—
地震荷重との組合せ	G+E+P+CL+K G：固定荷重 E：機器荷重 P：積載荷重 CL：クレーン荷重 K：地震荷重	G+E+P _{地震時} +S _{地震時} +CL+K _S G：固定荷重 E：機器荷重 P _{地震時} ：積載荷重 S _{地震時} ：積雪荷重 CL：クレーン荷重 K _S ：S _g 地震荷重		②
荷重の設定	固定荷重	・構造体の自重を考慮	・同左	—
	地震荷重	・静的地震時：上部構造からの慣性力のみを考慮 ・S ₂ 地震時：上部構造からの慣性力及び地盤震動による地盤変位を入力	S _g 地震時：上部構造からの慣性力及び地盤震動による地盤変位を入力	—
評価方法	応力解析	・静的地震力に対しては、杭の軸力が杭載荷試験結果に基づいて設定した短期支持力以下であることを確認、また、杭応力が短期許容応力度を超えないことを確認 ・S ₂ 地震力に対しては、杭の軸力が許容支持力以下であることを確認、また、杭に生じる曲げモーメントが杭断面の軸方向力を考慮した全塑性モーメントを超えないことを確認	・S _g 地震力に対して、杭の軸力が許容支持力以下であることを確認、杭に生じる曲げモーメントが杭断面の軸方向力を考慮した全塑性曲げモーメントを超えないこと及びせん断力が終局耐力以下であることを確認	③

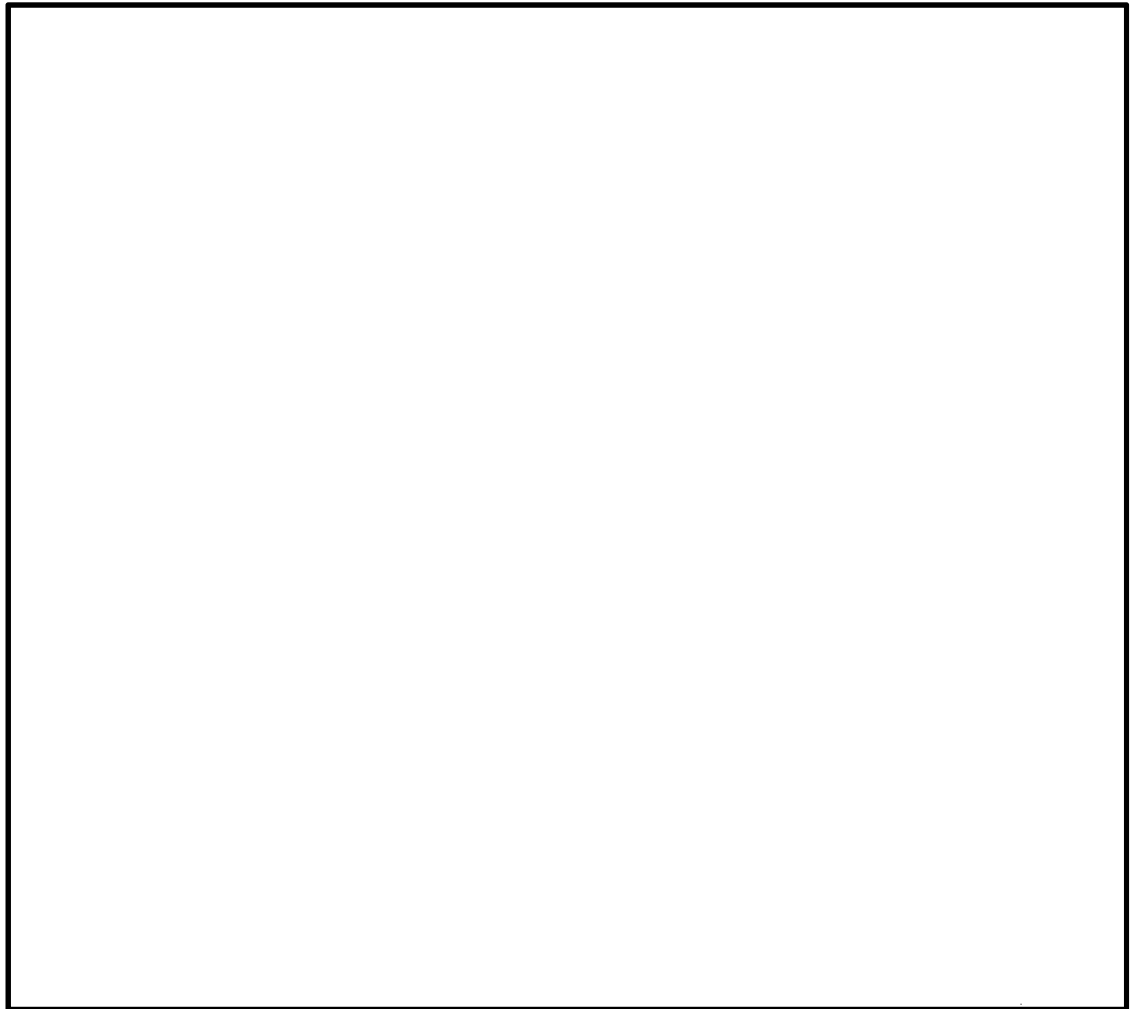
※1：『既工事計画認可申請書 添付資料 V-2-3 「使用済燃料乾式貯蔵建屋の耐震性についての計算書」(平成 11・06・25 資第 1 号 平成 11 年 9 月 2 日認可)』

【具体的な反映事項】(表の備考欄に対応)

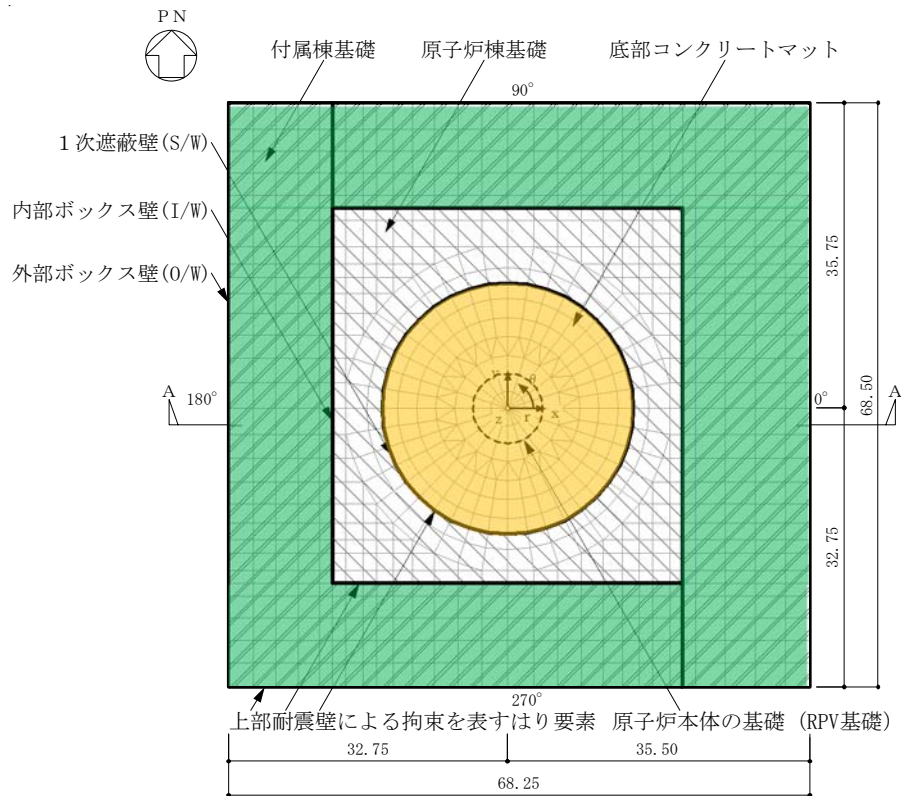
①鋼管杭のヤング係数及びについては、「鋼構造設計規準—許容応力度設計— ((社) 日本建築学会, 2005)」に基づく。

②積雪荷重を考慮。

③既工認は、「建築基礎構造設計指針」((社) 日本建築学会, 1989) に基づき評価。今回工認は、「建築基礎構造設計指針」((社) 日本建築学会, 2001) に基づき評価。

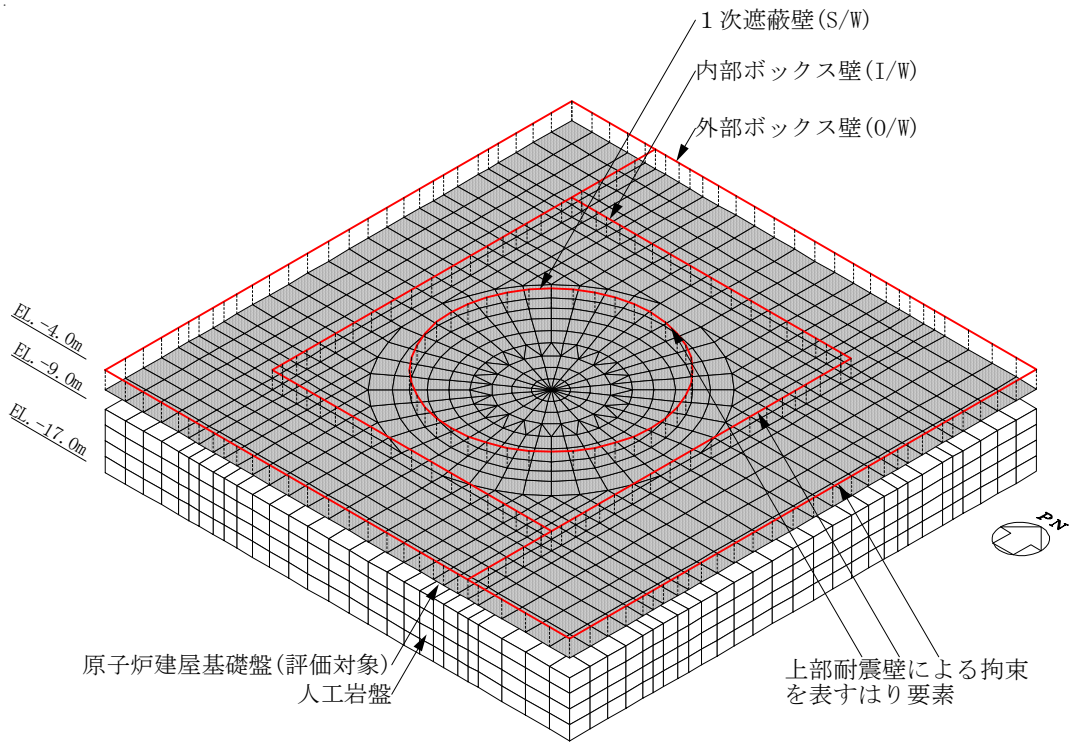


(a) 原子炉建屋 A-A 断面図

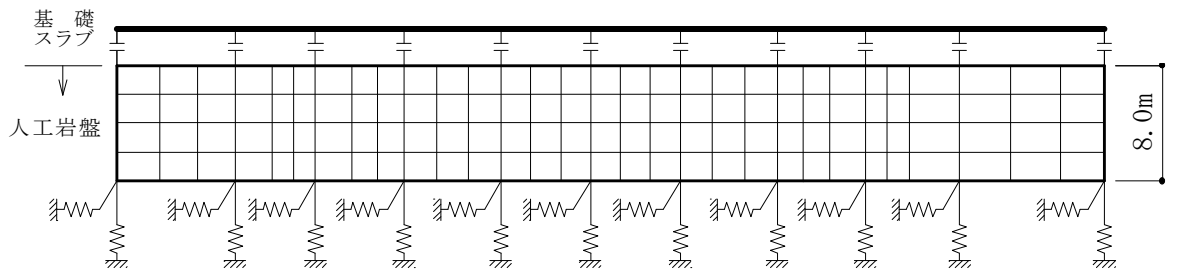


(b) 応力解析モデル (平面図)

図 2-1 応力解析モデル図 (原子炉格納容器底部コンクリートマット, 原子炉建屋原子炉棟基礎及び附属棟基礎を含む基礎盤)



(a) 応力解析モデル (全体鳥瞰図)



※ギャップ要素は、基礎スラブと人工岩盤の対応する全ての節点同士を接続する。
ばね要素は、人工岩盤下端の全ての節点に設ける。

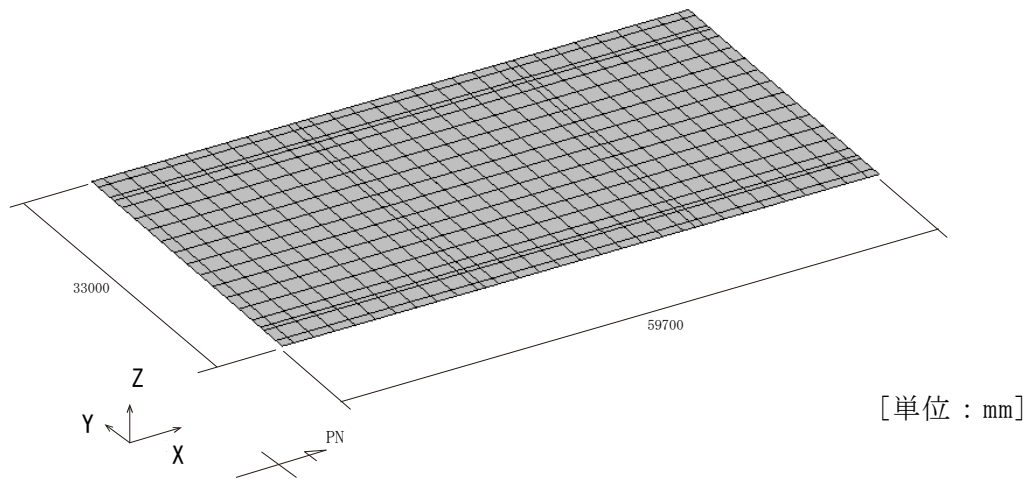
(b) 解析モデル模式断面図

図 2-2 応力解析モデル図

(原子炉格納容器底部コンクリートマット，原子炉建屋原子炉棟基礎及び付属棟基礎を含む基礎盤)



(a) 全体図



(b) 基礎スラブ

図 2-3 応力解析モデル図（使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎スラブ）（1/2）

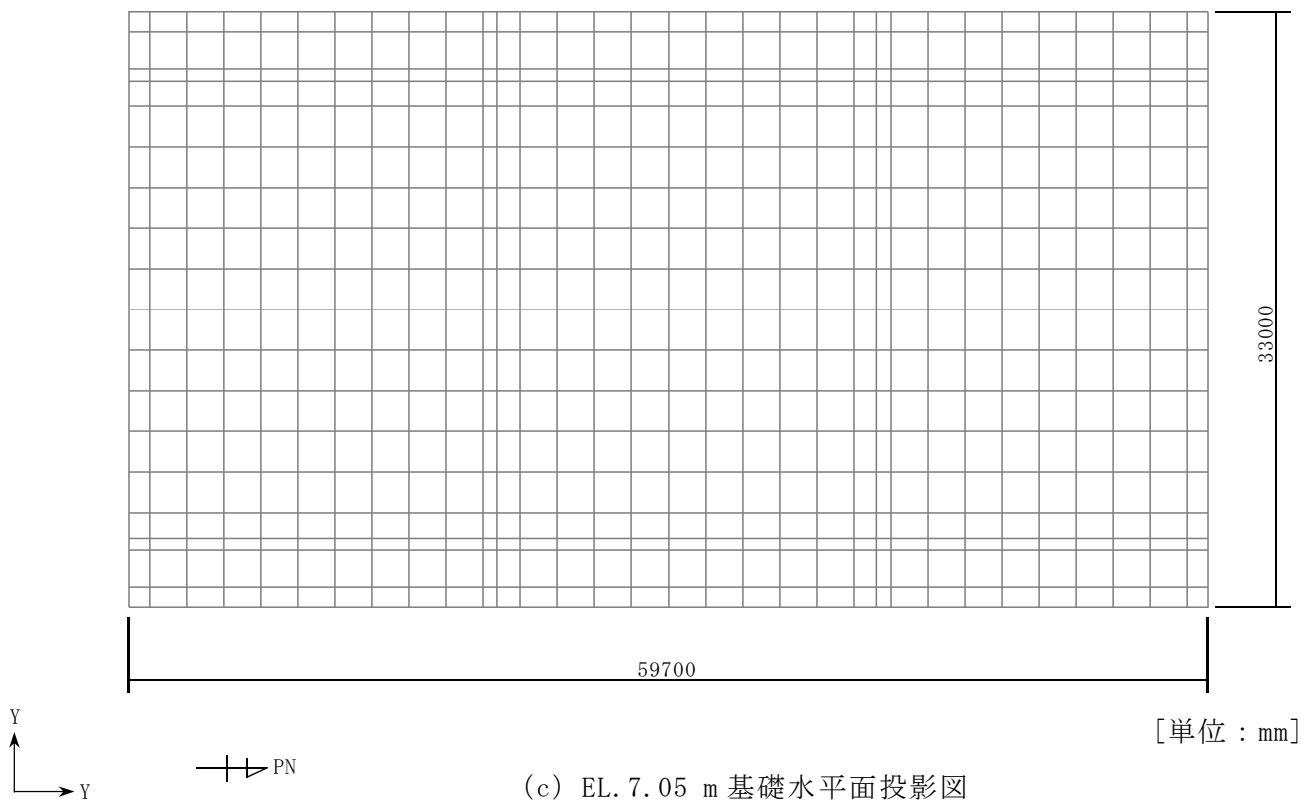


図 2-4 応力解析モデル図 (使用済燃料乾式貯蔵建屋の基礎スラブ) (2/2)

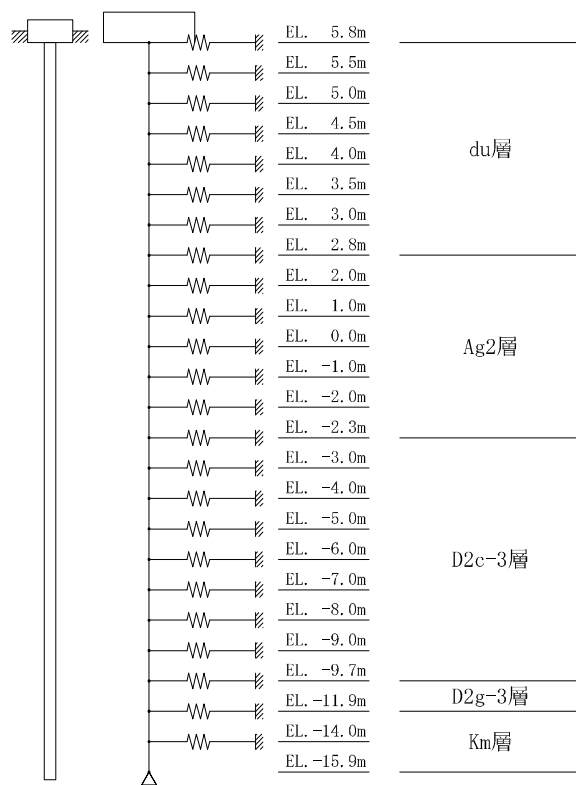


図 2-4 応力解析モデル図 (使用済燃料乾式貯蔵建屋の杭)