

| | |
|-----------------------|---------------------|
| 女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料 | |
| 資料番号 | 02-補-E-19-0610-3_改1 |
| 提出年月日 | 2021年8月2日 |

補足-610-3 使用済燃料プールの耐震性についての計算書に関する
補足説明資料

1. 工事計画添付書類に係る補足説明資料

添付書類「VI-2-4-2-1 使用済燃料プール（キャスクピットを含む）（第1, 2号機共用）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 応力解析における応力平均化の考え方

別紙6 剛性低下を考慮した影響検討

別紙7 鋼製ライナの検討

別紙8 使用済燃料貯蔵ラックの地震時反力の検討

別紙8-1 ラック反力に対する使用済燃料プールの応力解析における応力平均化の考え方

 本日の説明範囲

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、使用済燃料プール及びキャスクピット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

使用済燃料プール及びキャスクピット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、鉛直地震力及び地震時動水圧荷重を考慮する。

地震荷重の入力は、基準地震動 S_s 、弾性設計用地震動 S_d に対する地震応答解析結果及び静的地震力を考慮し、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使用済燃料プール及びキャスクピットの位置する階の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。水平力は、使用済燃料プール及びキャスクピットの位置に相当する FEM モデルの各節点に節点荷重として入力する。

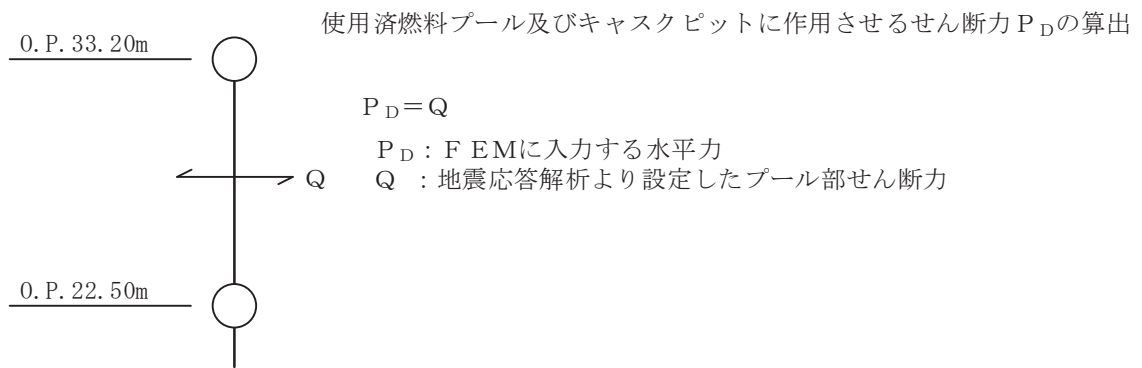
また、地震応答解析により求まる使用済燃料プール及びキャスクピットの位置する階の最大応答曲げモーメントと FEM モデルに入力した水平力により発生する曲げモーメントの差分を FEM モデルに入力する。曲げモーメントは、三角形分布荷重に変換し節点の支配長さに応じた節点荷重として入力する。EW 方向のプール部の回転ばねによる曲げモーメントについては、プールガーダの長さで除して求めた内部ボックス壁からの鉛直方向の反力を、プールガーダの端部に節点荷重として入力する。

なお、水平地震力及び曲げモーメントについては、耐震壁の位置に対応する節点に入力することを原則とするが、プールガーダは建屋中央部の耐震壁と同じ厚さの壁が内部ボックス壁まで連続することから、プールガーダ全体に対応する節点に入力する。

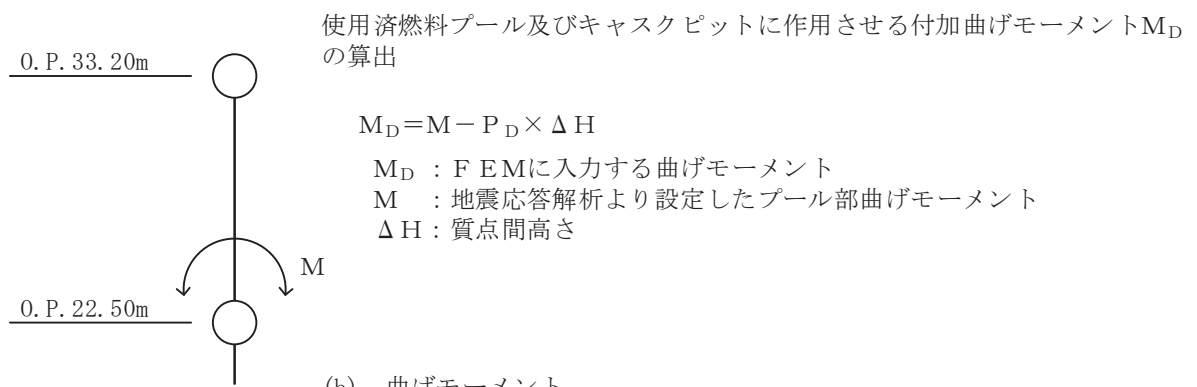
鉛直地震力については、地震応答解析により求まる使用済燃料プール及びキャスクピットの位置する階の最大応答軸力から算出した軸力係数に基づく鉛直力を FEM モデルに入力する。鉛直力は、FEM モデルの各節点に、節点の支配重量に軸力係数を乗じた節点荷重として入力する。

使用済燃料プール及びキャスクピットの壁部に作用する地震時動水圧荷重は、壁の各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。

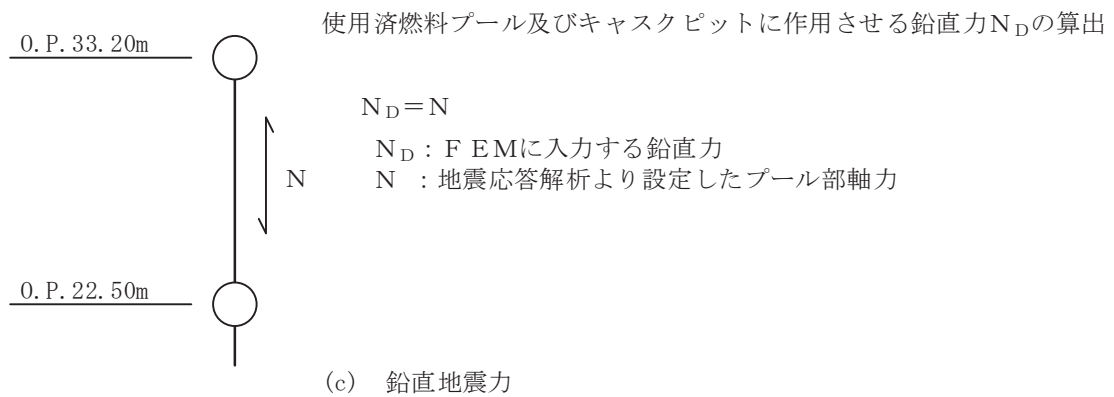
FEM モデルに入力する地震荷重の概念図を図 2-1 に示す。また、FEM モデルに入力する地震荷重を図 2-2 に示す。



(a) 水平地震力

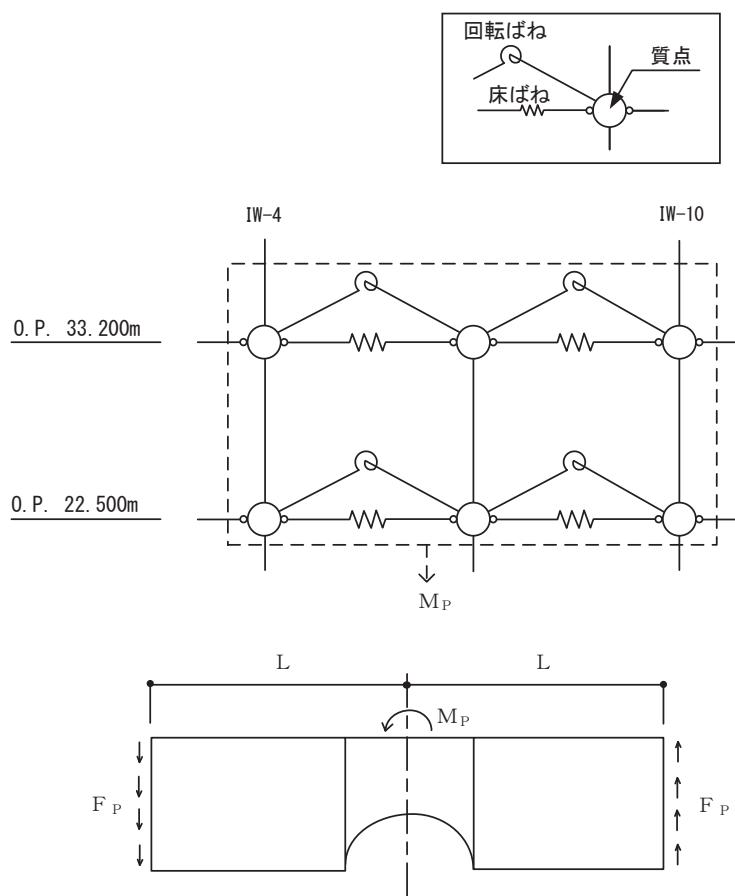


(b) 曲げモーメント



(c) 鉛直地震力

図 2-1 (1) FEM モデルにする地震荷重の概念図 (1/2)

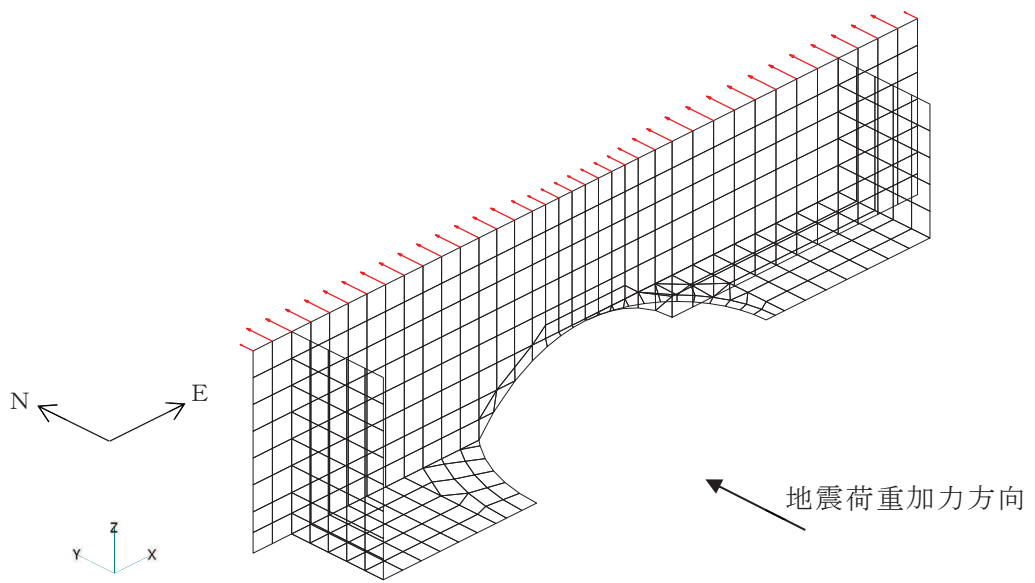


$$F_P = M_P / (2 \times L)$$

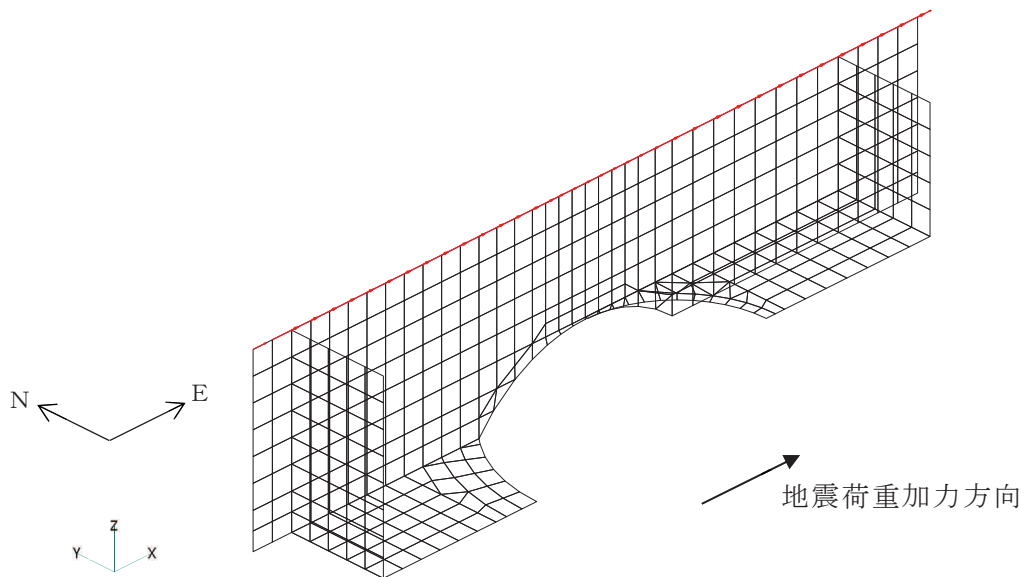
M_P : 地震応答解析による回転ばねの反力 (4本の合計)

(d) プール部の回転ばねによる曲げモーメント

図 2-1 (2) FEM モデルに入力する地震荷重の概念図 (2/2)

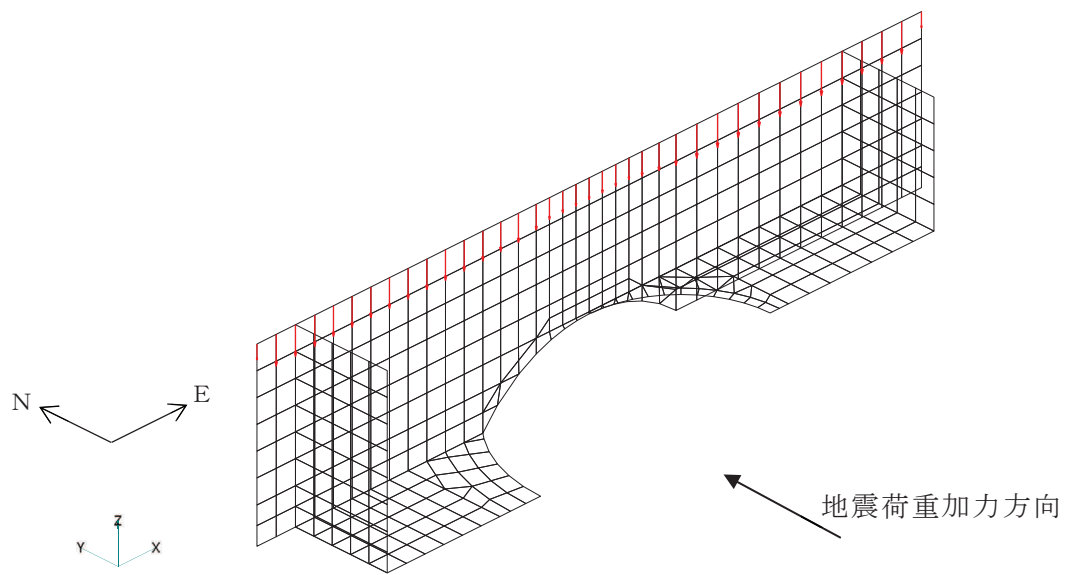


(a) 水平力 (NS 方向)

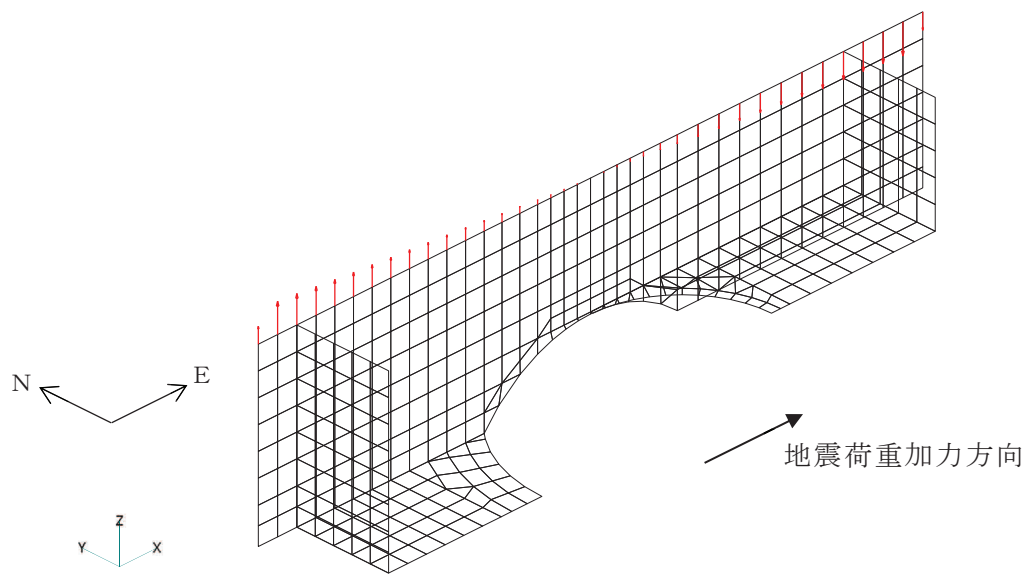


(b) 水平力 (EW 方向)

図 2-2 (1) FEM モデルに入力する地震荷重 (1/4)

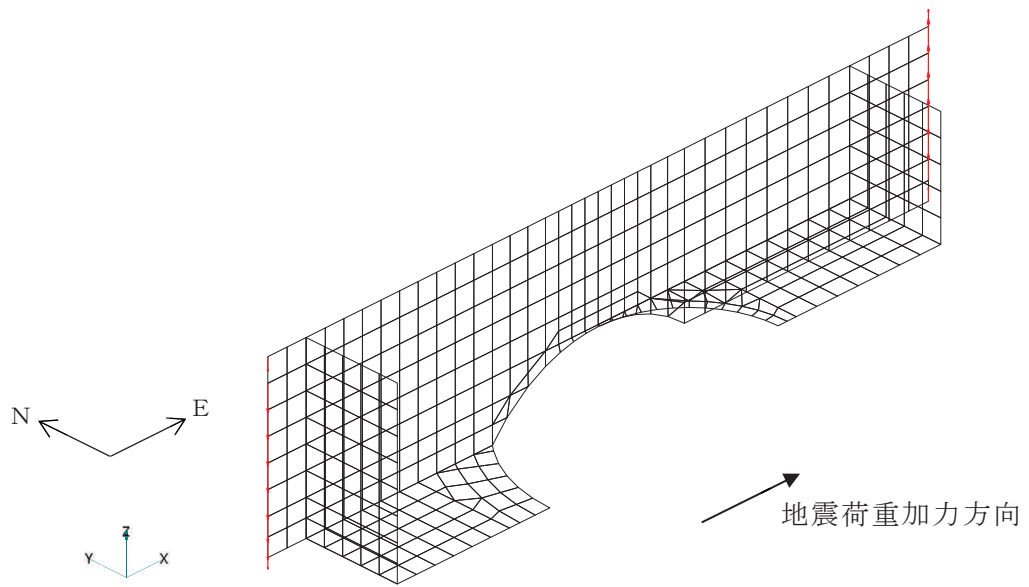


(c) 曲げモーメント (NS 方向)

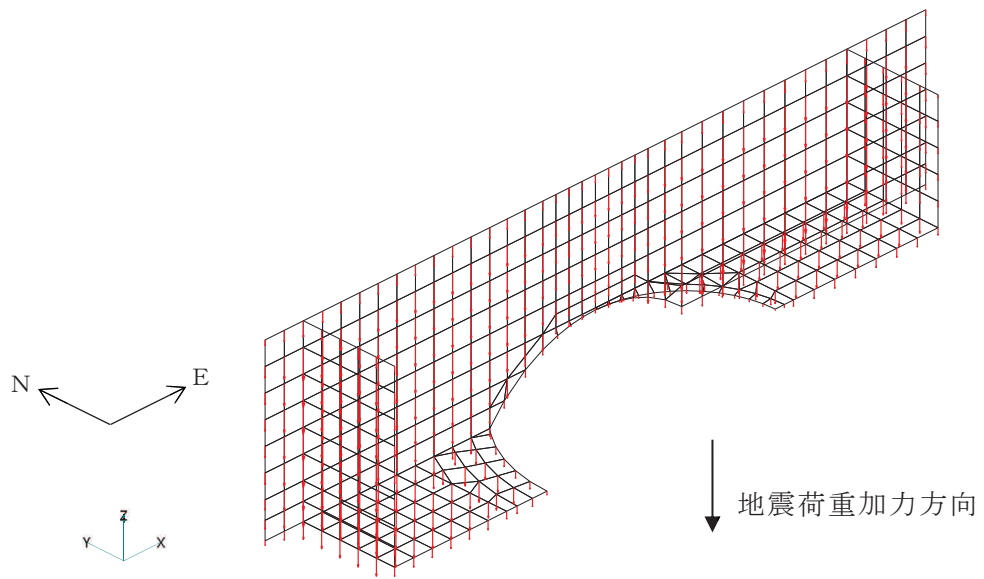


(d) 曲げモーメント (EW 方向)

図 2-2 (2) FEM モデルに入力する地震荷重 (2/4)



(e) 回転ばね反力



(f) 鉛直力

図 2-2 (3) FEM モデルに入力する地震荷重 (3/4)

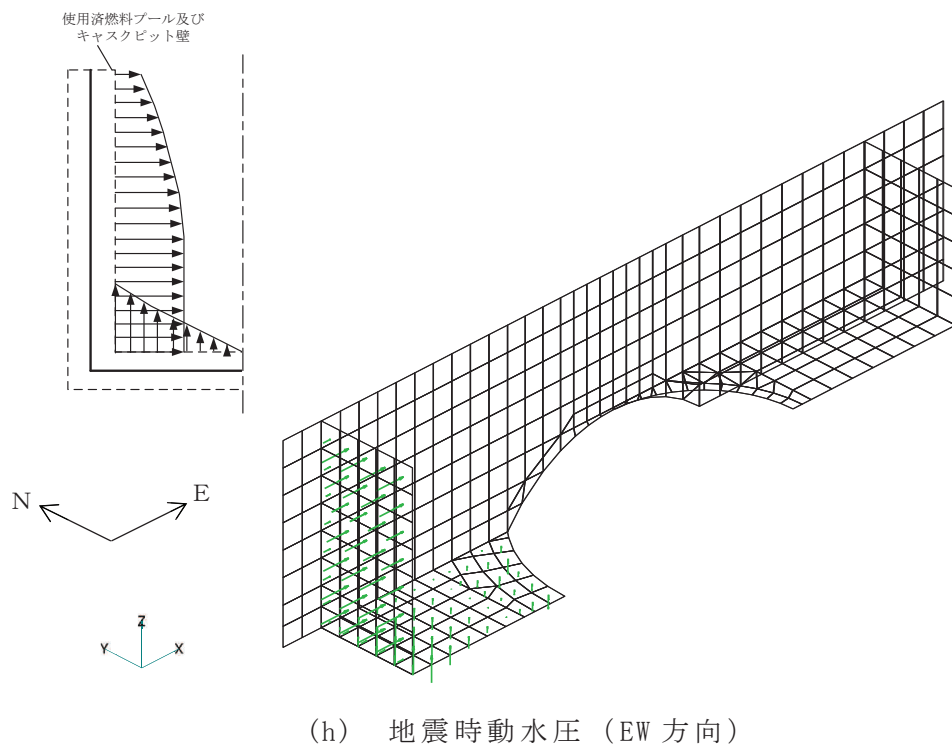
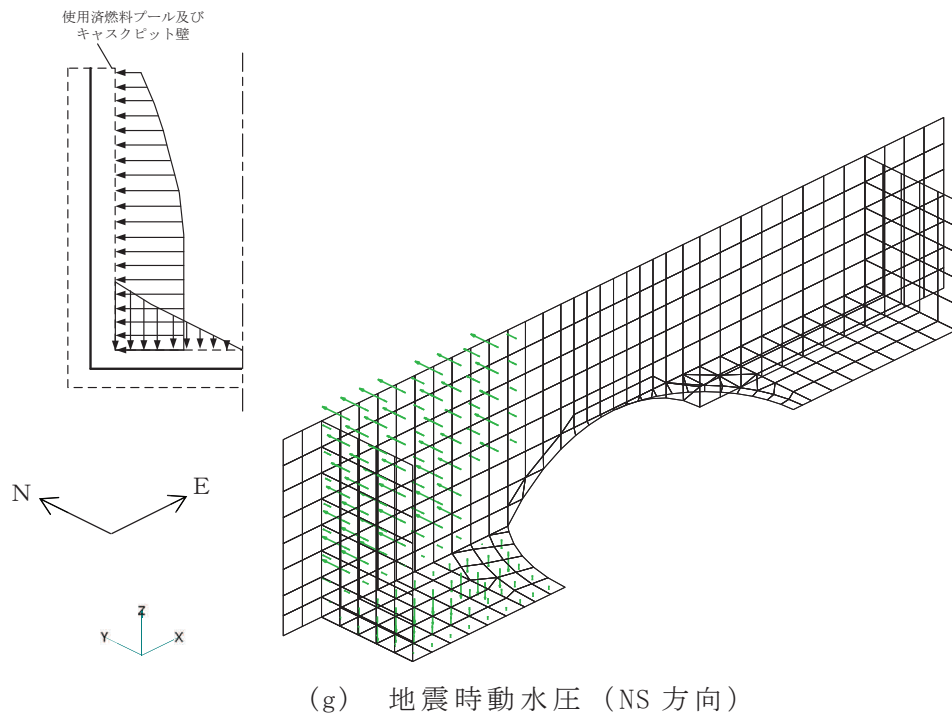


図 2-2 (4) FEM モデルに入力する地震荷重 (4/4)

別紙 6 剛性低下を考慮した影響検討

目 次

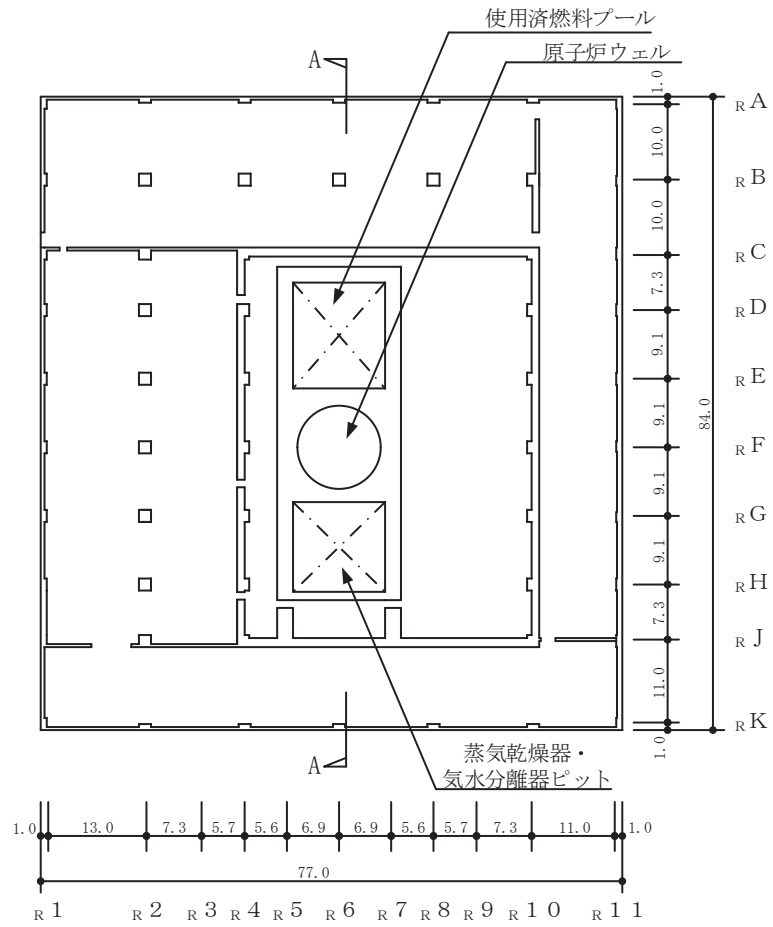
| | |
|----------------|---------|
| 1. 検討の概要 | 別紙 6- 1 |
| 2. 検討方針 | 別紙 6- 4 |
| 3. 荷重及び荷重の組合わせ | 別紙 6- 5 |
| 4. 使用材料の許容限界 | 別紙 6- 5 |
| 5. 応力解析 | 別紙 6- 6 |
| 6. 評価方法 | 別紙 6-11 |
| 7. 評価結果 | 別紙 6-11 |
| 8. 検討のまとめ | 別紙 6-18 |

1. 検討の概要

3.11 地震に対する原子炉建屋の質点系モデルを用いたシミュレーション解析では、耐震壁の初期剛性を低下させることにより観測記録との整合性が図られている。これを踏まえ、平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震等の地震やコンクリートの乾燥収縮によるひび割れ等に伴う初期剛性の低下については、観測記録や試験データなどから適切に地震応答解析モデルへ反映し、保守性を確認した上で適用することとし、地震応答解析モデルの原子炉ウェルを含む耐震壁の初期剛性を低減している。

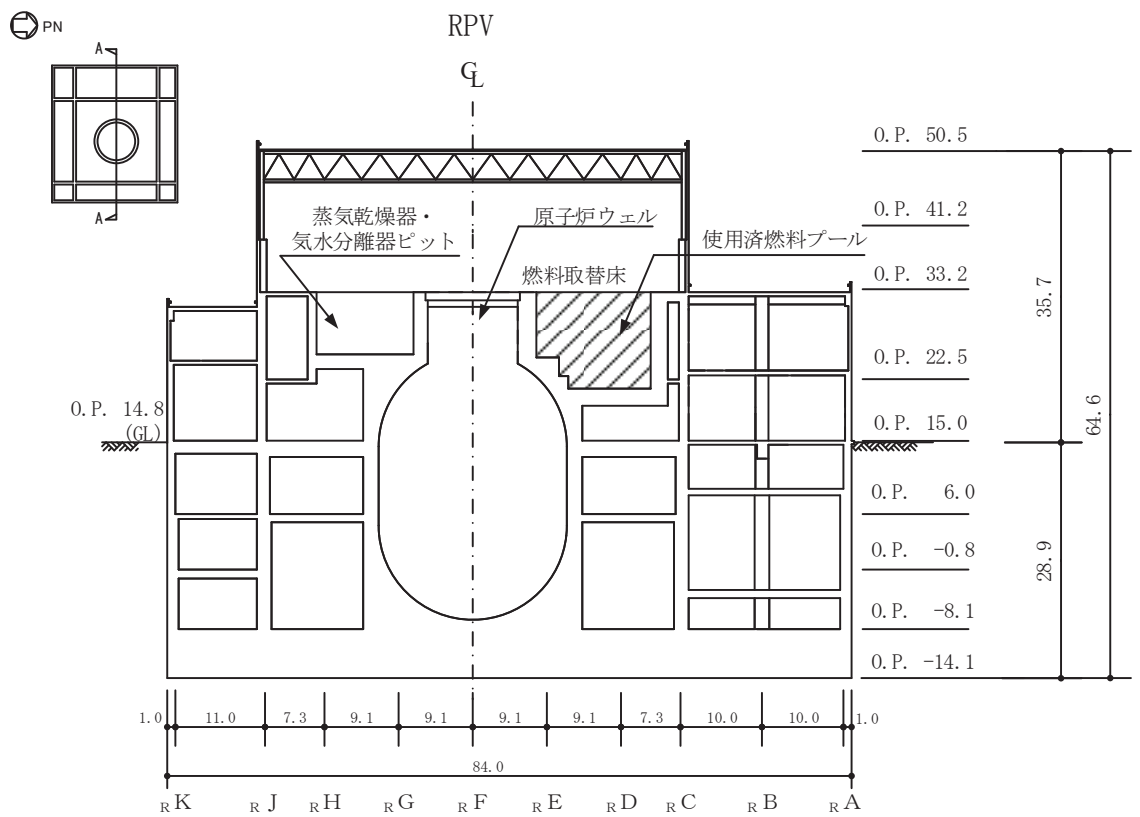
一方、添付書類「VI-2-4-2-1 使用済燃料プール（キャスクピットを含む）（第 1, 2 号機共用）の耐震性についての計算書」（以下「SFP の耐震計算書」という。）では、コンクリート設計基準強度に基づく剛性を設定した評価を行っている。ここでは、S s 地震時を対象として原子炉ウェルの剛性低下を考慮した影響を検討する。

使用済燃料プールの概略平面図及び概略断面図を図 1-1 及び図 1-2 に示す。



(単位 : m)

図 1-1 使用済燃料プール及びキャスクピットを含む原子炉建屋の概略平面図
(O. P. 33. 2m)



(単位：m)

図 1-2 使用済燃料プール及びキャスクピットを含む原子炉建屋の概略断面図
(A-A 断面)

2. 検討方針

剛性低下を考慮した影響検討として、使用済燃料プール及びキャスクピットについて、原子炉ウェル部の剛性低下を考慮した検討を行う。

評価に当たっては、S s 地震時に対して、3次元 FEM モデルの応力解析結果を用いた断面の評価について、許容値を超えないことを確認する。

解析モデルの詳細及び許容値については、SFP の耐震計算書に示すものと同一である。

3. 荷重及び荷重の組合わせ

荷重の組合せは、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき設定する。荷重の組合せを表 3-1 に示す。荷重の詳細は、SFP の耐震計算書の「3.2.1 荷重」に示す固定荷重 (G)、積載荷重 (P) 及び地震荷重 (S_s) と同一である。

表 3-1 荷重の組合せケース (S_s 地震時)

| 外力の状態 | 荷重の組合せ |
|-----------|---------------|
| S_s 地震時 | $G + P + S_s$ |

- G : 固定荷重
P : 積載荷重 (運転時温度荷重含む)
 S_s : 地震荷重 (地震時動水圧荷重を含む)

4. 使用材料の許容限界

コンクリート及び鉄筋の許容限界は、SFP の耐震計算書の「3.3 許容限界」に示す内容と同一である。

5. 応力解析

解析モデル概要図を図 5-1 に示す。解析モデルの詳細は、SFP の耐震計算書の「3.4 解析モデル及び諸元」に示す内容と同一である。

建屋内に設置されている地震観測記録の分析等を踏まえ原子炉ウエルの剛性低下を考慮する。具体的には、原子炉建屋の EW 方向の地震応答解析モデルに設定している初期剛性を踏まえ、原子炉ウエル部の剛性を 0.8 倍する。材料物性値への反映方法は、コンクリートの初期剛性を低下させることとし、圧縮側も引張側も同じ値で低下させることとする。剛性低下を考慮したコンクリートの物性値を図 5-2 に示す。

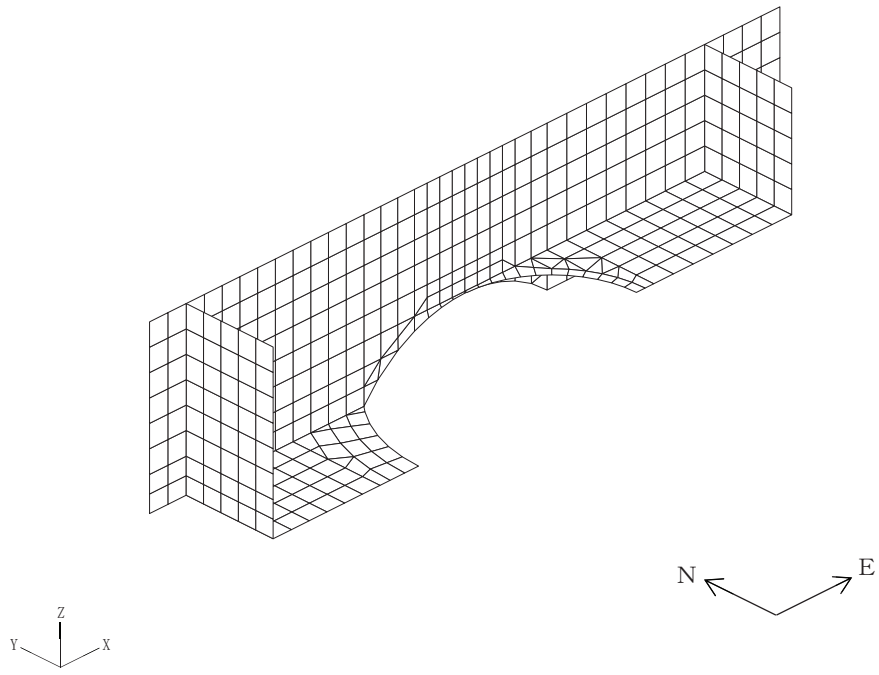
S_s 地震時の応力は、SFP の耐震計算書の「3.5.1 応力解析方法」に示す、次の荷重ケースによる応力を組み合わせて求める。

- G : 固定荷重
- P : 積載荷重 (運転時温度荷重を含む)
- S_s S_{SN}* : S→N 方向 S_s 地震荷重 (S_s 地震時動水圧荷重を含む)
- S_s S_{WE}* : W→E 方向 S_s 地震荷重 (S_s 地震時動水圧荷重を含む)
- S_s S_{UD}* : 鉛直方向 S_s 地震荷重

注記* : 計算上の座標軸を基準として、EW 方向は W→E 方向の加力、NS 方向は S→N 方向の加力、鉛直方向は下向きの加力を記載している。

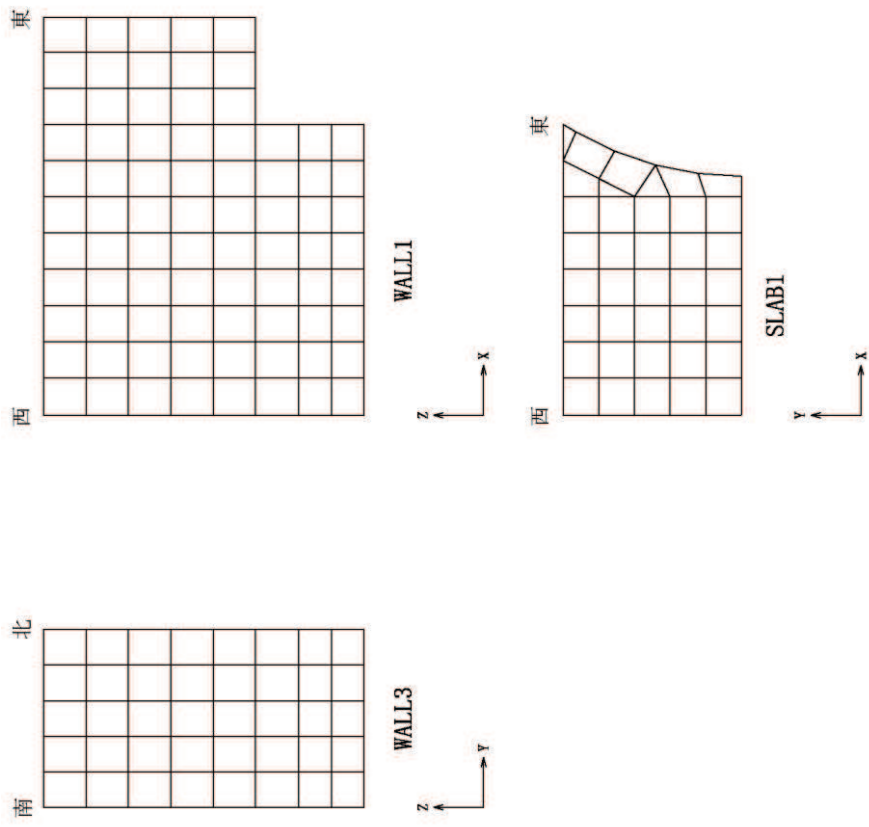
荷重の組合せケースを表 5-1 に示す。

水平地震力と鉛直地震力による応力の組合せは、「原子力発電所耐震設計技術規程 (J E A C 4 6 0 1 -2008)」を参考に、組合せ係数法 (組合せ係数は 1.0 と 0.4) を用いるものとする。

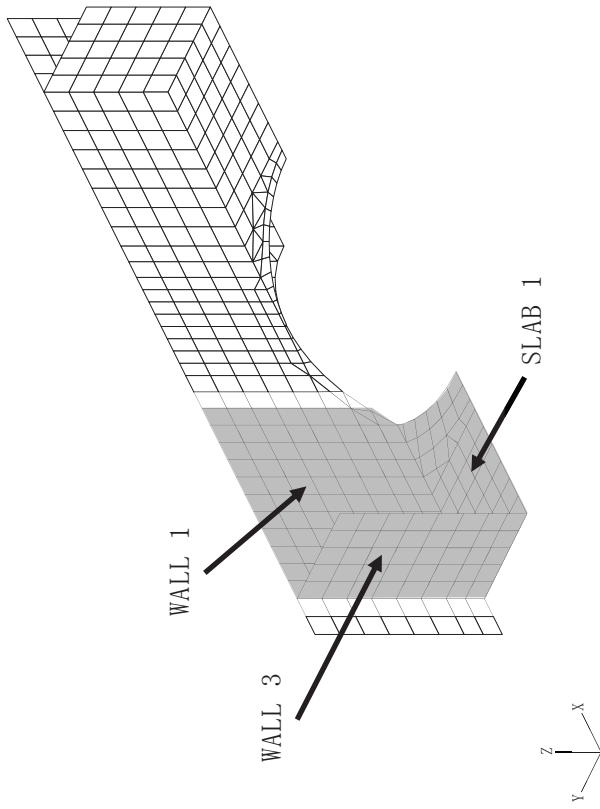


(a) 全体鳥瞰図

図 5-1(1) 解析モデル概要図 (1/2)



注：X, Y, Zは全体座標系を示す。



(b) プール部要素分割図

図 5-1 (2) 解析モデル概要図 (2/2)

| 材料特性 番号 | 設計基準強度 F_c (N/mm ²) | ヤング係数 E (N/mm ²) | ポアソン比 ν |
|------------|--------------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| 1 | 32.4 | 25100 | 0.2 |
| 2 | | 25100 | |
| 3 | | 25100 | |
| 4 | | 20100 | |

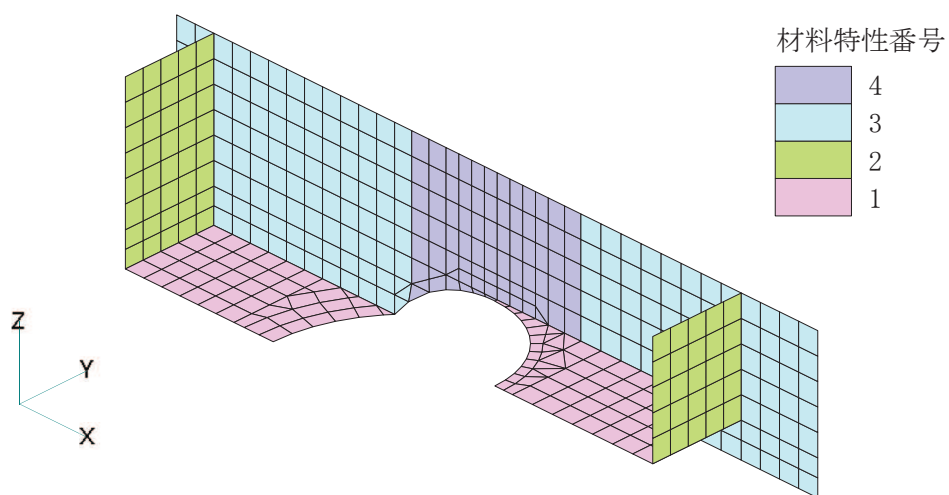


図 5-2 コンクリート物性値（原子炉ウェル剛性低下考慮）

表 5-1 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 | 2-1 | $G + P + 1.0 S_{s_{SN}} + 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-2 | $G + P - 1.0 S_{s_{SN}} + 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-3 | $G + P - 1.0 S_{s_{WE}} + 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-4 | $G + P + 1.0 S_{s_{WE}} + 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-5 | $G + P + 1.0 S_{s_{SN}} - 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-6 | $G + P - 1.0 S_{s_{SN}} - 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-7 | $G + P - 1.0 S_{s_{WE}} - 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-8 | $G + P + 1.0 S_{s_{WE}} - 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-9 | $G + P + 0.4 S_{s_{SN}} + 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-10 | $G + P - 0.4 S_{s_{SN}} + 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-11 | $G + P - 0.4 S_{s_{WE}} + 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-12 | $G + P + 0.4 S_{s_{WE}} + 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-13 | $G + P + 0.4 S_{s_{SN}} - 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-14 | $G + P - 0.4 S_{s_{SN}} - 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-15 | $G + P - 0.4 S_{s_{WE}} - 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-16 | $G + P + 0.4 S_{s_{WE}} - 1.0 S_{s_{UD}}$ |

6. 評価方法

使用済燃料プールの壁及び底面スラブの評価は、SFP の耐震計算書の「3.5.2 断面の評価方法」に示す方法と同一である。

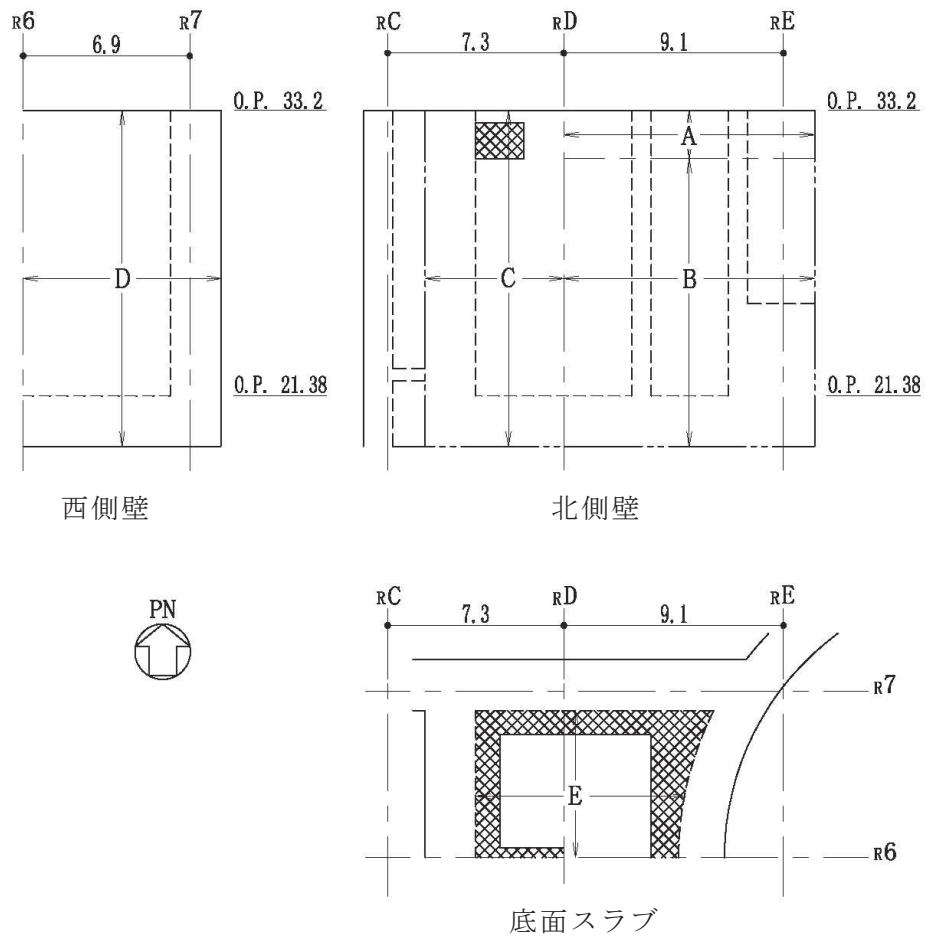
7. 評価結果

断面の評価結果を以下に示す。また、3次元 FEM モデルの配筋領域図を図 7-1 に、配筋一覧を表 7-1 に示す。

断面の評価結果を記載する要素は、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素とする。

選定した要素の位置を図 7-2 に、評価結果を表 7-2 に示す。

S s 地震時において、壁について、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。また、底面スラブについて、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。



注：面外せん断補強筋  : D22@200×@400

図 7-1 配筋領域図

表 7-1 配筋一覧

(a) 北側壁

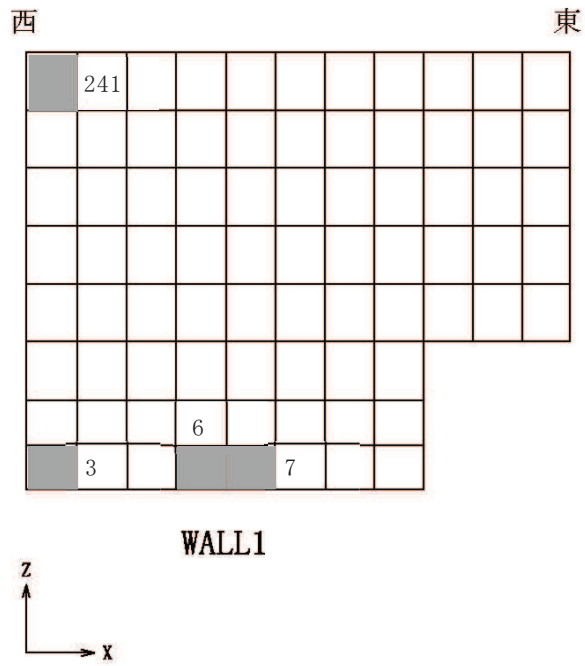
| 区分 | タテ方向 | ヨコ方向 |
|----|--|--|
| A | (内側) 2-D38@200+D38@400 (外側) 2-D38@200+2-D38@400 | (内側) 3-D38@200 (外側) 4-D38@200 |
| B | (内側) 2-D38@200+D38@400 (外側) 2-D38@200+2-D38@400 | (内側) 3-D38@200 (外側) 3-D38@200+D38@400 |
| C | (内側) 3-D38@200+D38@400 (外側) 3-D38@200 | (内側) 2-D38@200+2-D38@400 (外側) 3-D38@200 |

(b) 西側壁

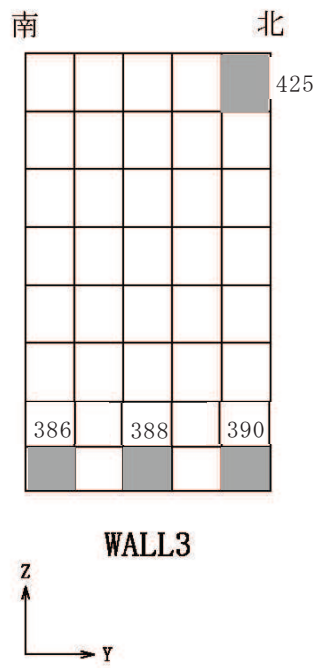
| 区分 | タテ方向 | ヨコ方向 |
|----|--|--|
| D | (内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+2-D38@400 | (内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400 |

(c) 底面スラブ

| 区分 | EW 方向 | NS 方向 |
|----|----------------------------------|--|
| E | (上ば) 3-D38@200 (下ば) 4-D38@200 | (上ば) 2-D38@200+D38@400 (下ば) 3-D38@200+D38@400 |

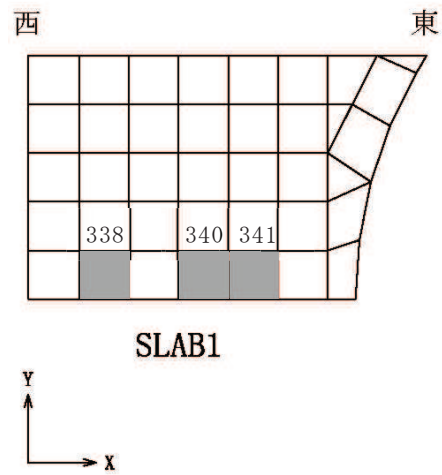


(a) 北側壁



(b) 西側壁

図 7-2(1) 選定した要素の位置 S s 地震時 (1/2)



(c) 底面スラブ

図 7-2(2) 選定した要素の位置 S s 地震時 (2/2)

表 7-2(1) 評価結果 S s 地震時 剛性低下考慮

| 部位 | 評価項目 | | 方向 | 要素番号 | 組合せケース | 発生値 | 許容値 |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------|----|------|--------|-------|------|
| 北側壁 | 軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力 | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 7 | 2-9 | 0.273 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 6 | 2-9 | 1.29 | 5.00 |
| | 軸力 | 圧縮応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 3 | 2-10 | 2.43 | 21.6 |
| | 面内せん断力 | 面内せん断応力度 (N/mm^2) | — | 3 | 2-11 | 2.24 | 5.99 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | 水平 | 241 | 2-1 | 0.920 | 2.08 |
| 西側壁 | 軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力 | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 386 | 2-11 | 0.502 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 水平 | 425 | 2-1 | 1.35 | 5.00 |
| | 軸力 | 圧縮応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 390 | 2-12 | 2.43 | 21.6 |
| | 面内せん断力 | 面内せん断応力度 (N/mm^2) | — | 388 | 2-10 | 1.15 | 4.02 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 386 | 2-11 | 0.808 | 1.44 |
| 底面 スラブ | 軸力 + 曲げモーメント | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | EW | 340 | 2-12 | 0.409 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | EW | 341 | 2-11 | 0.970 | 5.00 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | EW | 338 | 2-11 | 1.89* | 2.59 |

注記*：応力の再分配等を考慮して、応力平均化を行った結果。

表 7-2(2) 評価結果 S s 地震時 設計剛性

| 部位 | 評価項目 | | 方向 | 要素 番号 | 組合せ ケース | 発生値 | 許容値 |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------|----|----------|------------|-------|------|
| 北側壁 | 軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力 | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 7 | 2-9 | 0.269 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 6 | 2-9 | 1.28 | 5.00 |
| | 軸力 | 圧縮応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 3 | 2-10 | 2.40 | 21.6 |
| | 面内せん断力 | 面内せん断応力度 (N/mm^2) | — | 3 | 2-11 | 2.21 | 5.99 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | 水平 | 241 | 2-1 | 0.892 | 2.08 |
| 西側壁 | 軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力 | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 386 | 2-11 | 0.502 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 水平 | 425 | 2-1 | 1.30 | 5.00 |
| | 軸力 | 圧縮応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 390 | 2-12 | 2.40 | 21.6 |
| | 面内せん断力 | 面内せん断応力度 (N/mm^2) | — | 388 | 2-10 | 1.14 | 4.02 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 386 | 2-11 | 0.808 | 1.44 |
| 底面 スラブ | 軸力 + 曲げモーメント | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | EW | 340 | 2-12 | 0.409 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | EW | 341 | 2-11 | 0.964 | 5.00 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | EW | 338 | 2-11 | 1.89* | 2.59 |

注記*：応力の再分配等を考慮して、応力平均化を行った結果。

8. 検討のまとめ

剛性低下を考慮した影響評価として、3次元FEMモデルを用いた応力解析を実施した。

検討の結果、剛性低下を考慮したケースに対する評価結果を設計基準強度に基づき剛性を評価したケースに対する評価結果と比較すると、剛性低下の影響により発生値は増加傾向にあるが、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。

以上のことから、剛性低下を考慮した影響評価において、使用済燃料プールが有する耐震性への影響はないことを確認した。

別紙7 鋼製ライナの検討

目次

| | |
|---------------------------|--------|
| 1. 概要 | 別紙 7-1 |
| 2. 使用済燃料プールの鋼製ライナひずみの算出方法 | 別紙 7-1 |
| 3. 許容値の設定 | 別紙 7-2 |
| 4. 鋼製ライナひずみの検討結果 | 別紙 7-3 |
| 5. まとめ | 別紙 7-3 |

1. 概要

使用済燃料プールはコンクリート躯体に鋼製ライナを内張りしたもので、鋼製ライナは耐漏洩機能を、鉄筋コンクリート部分は支持機能を有しており、内張りの下のコンクリート躯体で強度を保持しているため、添付書類「VI-2-4-2-1 使用済燃料プール(キャスクピットを含む)(第1,2号機共用)の耐震性についての計算書」では、鉄筋コンクリート部分の構造強度の確認による評価を実施している。

本資料は、使用済燃料プールの内面におけるステンレス鋼製ライナひずみの検討の補足説明資料であり、添付書類「VI-2-4-2-1 使用済燃料プール(キャスクピットを含む)(第1,2号機共用)の耐震性についての計算書」の補足説明をするものである。

2. 使用済燃料プールの鋼製ライナひずみの算出方法

使用済燃料プールの鋼製ライナひずみは、添付書類「VI-2-4-2-1 使用済燃料プール(キャスクピットを含む)(第1,2号機共用)の耐震性についての計算書」に示す応力解析結果を元に算出し、鋼製ライナ側コンクリート表面の最大主ひずみ(ϵ_1)と最小主ひずみ(ϵ_2)の絶対値が大きい方の値とする。

使用済燃料プール内面の鋼製ライナについては、躯体に追従するため、鉄筋コンクリートのひずみを鋼製ライナに生じるひずみとみなして、ひずみの検討を行うことで、耐漏洩機能の確認を行う。

図2-1に使用済燃料プールの鋼製ライナひずみの算出対象要素を示す。

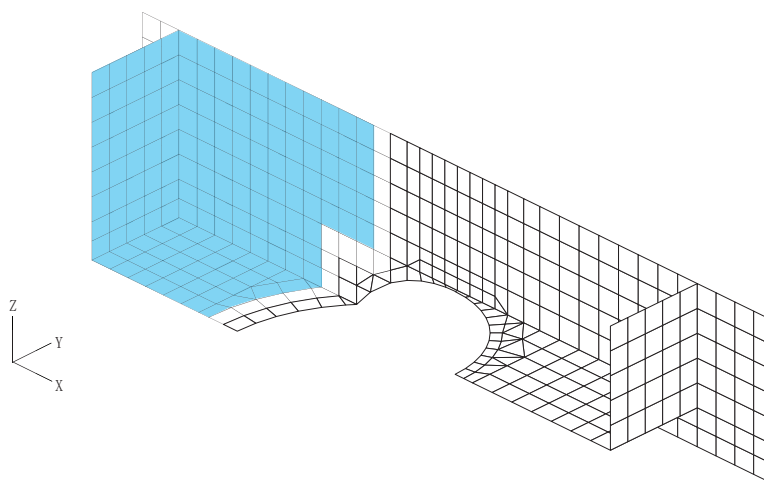


図2-1 使用済燃料プールの鋼製ライナひずみの算出対象要素

3. 許容値の設定

鋼製ライナひずみの許容値は、J S M E S N E 1-2003 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（以下「CCV規格」という。）を準用し、表 CVE-3611-1 ライナプレートの許容ひずみより、引張： 3.0×10^{-3} 、圧縮： 5.0×10^{-3} とする。

CCV規格の許容値は、コンクリート製原子炉格納容器の円筒部ライナプレートに限定されるものではなく、底部の平面のライナプレートにも適用されるものであるため、適用性について形状に依存するものではない。また、ライナプレートは鉄筋コンクリート部分の変形によるひずみに対し、漏洩を生じることなく追従できる変形性能を有していればよい（解説 CVE-3611）。よって、要求機能の観点からも、使用済燃料プールは鉄筋コンクリートに強度を、鉄製ライナに耐漏洩性をもたせた構造となっているため、CCV規格におけるライナプレートの許容ひずみを準用することは問題ないものとする。

4. 鋼製ライナひずみの検討結果

鋼製ライナひずみの検討結果を表 4-1 に示す。また, 図 4-1 に最大ひずみの要素位置を示す。

表 4-1 検討結果

| 検討項目 | 最大ひずみの発生要素 | 解析結果 | 許容値 | 備考 |
|------|------------|-----------------------|----------------------|------------------------|
| ひずみ | 7 | 0.25×10^{-3} | 3.0×10^{-3} | S d 地震時 (運転時温度荷重含む) |

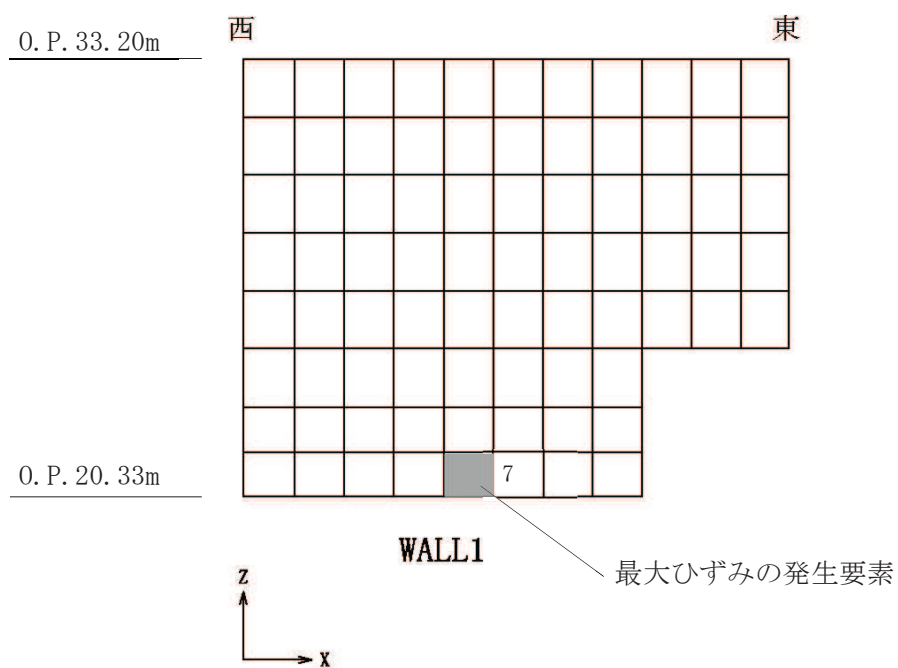


図 4-1 最大ひずみの要素位置図 (北側壁)

5. まとめ

使用済燃料プールの内面の鋼製ライナについて, ひずみの検討を行った。その結果, 最大ひずみは 0.25×10^{-3} であり, 許容値 3.0×10^{-3} に対して十分小さいことを確認した。

別紙 8 使用済燃料貯蔵ラックの地震時反力の検討

目 次

| | |
|---------------|---------|
| 1. 検討の概要 | 別紙 8- 1 |
| 2. 検討方針 | 別紙 8- 4 |
| 3. 荷重及び荷重の組合せ | 別紙 8- 5 |
| 4. 使用材料の許容限界 | 別紙 8- 6 |
| 5. 応力解析 | 別紙 8- 6 |
| 6. 評価方法 | 別紙 8-10 |
| 7. 評価結果 | 別紙 8-10 |
| 8. 検討のまとめ | 別紙 8-17 |

別紙 8-1 ラック反力に対する使用済燃料プールの応力解析における応力平均化の考え方

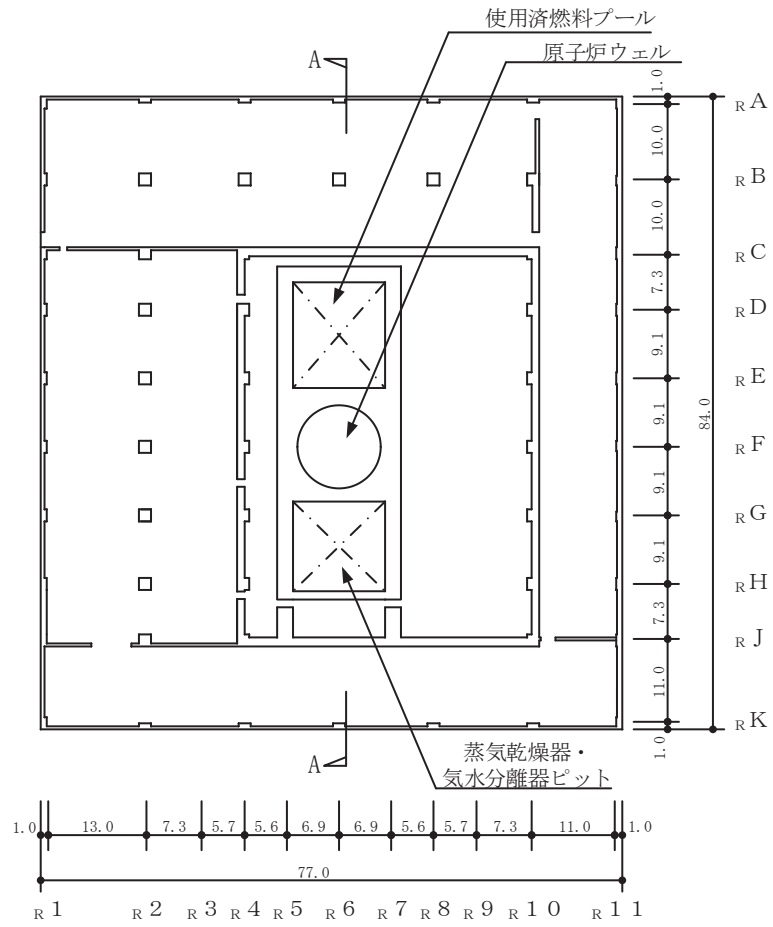
1. 検討の概要

添付書類「VI-2-4-2-1 使用済燃料プール（キャスクピットを含む）（第 1, 2 号機共用）の耐震性についての計算書」（以下「SFP の耐震計算書」という。）において、使用済燃料プールの解析モデルでは、使用済燃料貯蔵ラックの質量は固定荷重として扱うことで、重量及び鉛直方向地震時に使用済燃料貯蔵ラックに作用する地震荷重を考慮している。

一方で、添付書類「VI-2-4-2-2 使用済燃料貯蔵ラック（第 1, 2 号機共用）の耐震性についての計算書」では基準地震動 S_s に対する使用済燃料貯蔵ラックの検討を行っており、使用済燃料プールの底面スラブに作用する使用済燃料貯蔵ラックからの地震時反力が算定される。

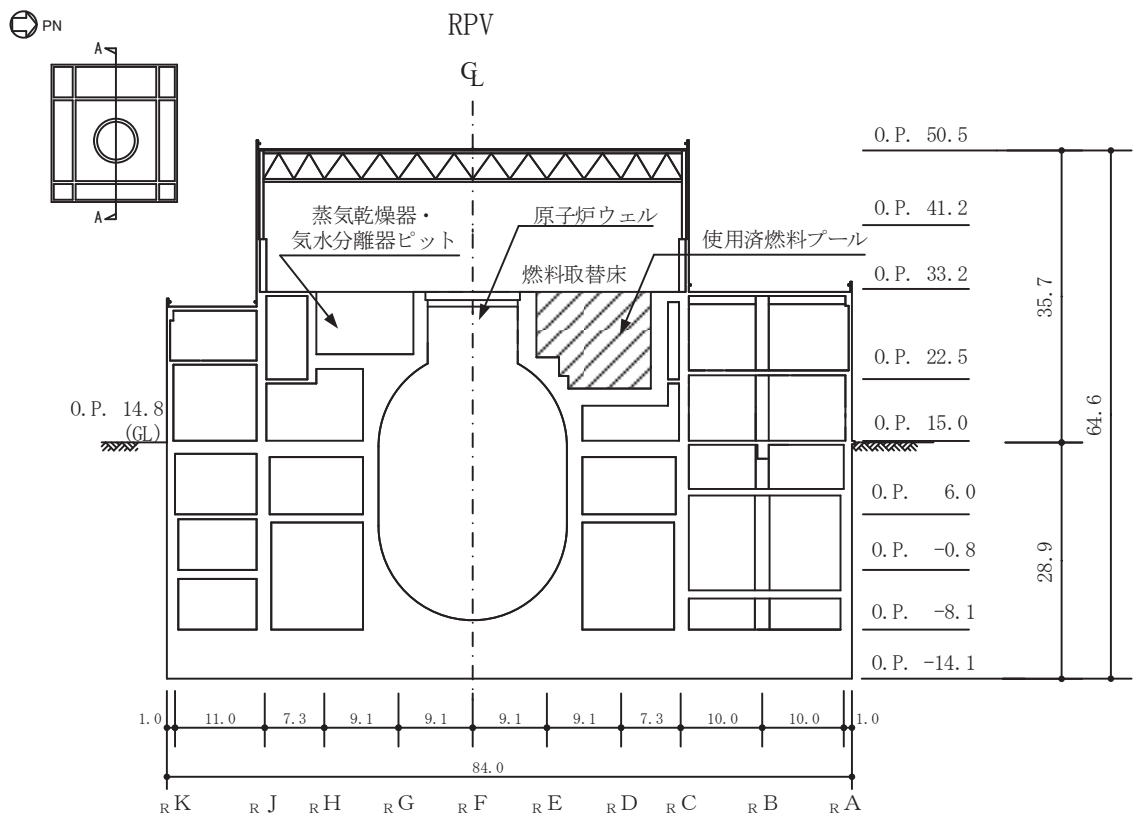
本資料では、使用済燃料貯蔵ラックの基準地震動 S_s に対する反力に対し、使用燃料プールの検討を行う。

使用済燃料プールの概略平面図及び概略断面図を図 1-1 及び図 1-2 に示す。



(単位 : m)

図 1-1 使用済燃料プール及びキャスクピットを含む原子炉建屋の概略平面図
(O. P. 33. 2m)



(単位：m)

図 1-2 使用済燃料プール及びキャスクピットを含む原子炉建屋の概略断面図
(A-A 断面)

2. 検討方針

使用済燃料貯蔵ラックの基準地震動 S_s に対する反力に対し、使用済燃料プール及びキャスクピットについて、検討を行う。

検討は、SFP の耐震計算書に示す 3次元 FEM モデルを用い、使用済燃料貯蔵ラックの基準地震動 S_s に対する反力を考慮した応力解析を行い、断面の評価において許容値を超えないことを確認する。

解析モデルの詳細及び許容値については、SFP の耐震計算書に示すものと同一である。

3. 荷重及び荷重の組合せ

使用済燃料貯蔵ラックの基準地震動 S_s に対する反力の値を表 3-1 に示す。なお、SFP の耐震書においてもラック重量は積載荷重 (P) に含まれている。

表 3-1 使用済燃料貯蔵ラックの反力 (1 体当たり 基準地震動 S_s)

| 使用済燃料貯蔵ラック | ラック反力 | 方向 | 鉛直方向地震時 | EW 方向地震時 | NS 方向地震時 |
|-------------------------|----------------|----|---------|----------|----------|
| 110 体 (10×11) 8 台 | 水平・鉛直荷重 (kN) | X | — | ±1435 | — |
| | | Y | — | — | ±1614 |
| | | Z | ±836.1 | — | — |
| | 曲げモーメント (kN・m) | X | — | — | ±5138 |
| | | Y | — | ±4098 | — |
| | | Z | — | — | — |
| 170 体 (10×17) 8 台 | 力 (kN) | X | — | ±2071 | — |
| | | Y | — | — | ±2518 |
| | | Z | ±1266 | — | — |
| | 曲げモーメント (kN・m) | X | — | — | ±7836 |
| | | Y | — | ±6659 | — |
| | | Z | — | — | — |

荷重の組合せは、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき設定する。荷重の組合せを表 3-2 に示す。荷重の詳細は、SFP の耐震計算書の「3.2.1 荷重」に示す固定荷重 (G)、積載荷重 (P) 及び地震荷重 (S_s) と同一である。

表 3-2 荷重の組合せケース (S_s 地震時)

| 外力の状態 | 荷重の組合せ |
|-----------|---------------|
| S_s 地震時 | G + P + S_s |

G : 固定荷重

P : 積載荷重

S_s : 地震荷重 (地震時動水圧荷重及び地震時ラック反力を含む)

4. 使用材料の許容限界

コンクリート及び鉄筋の許容限界は、SFP の耐震計算書の「3.3 許容限界」に示す内容と同一である。

5. 応力解析

解析モデル概要図を図 5-1 に示す。解析モデルの詳細は、SFP の耐震計算書の「3.4 解析モデル及び諸元」に示す内容と同一である。

S_s地震時の応力は、SFP の耐震計算書の「3.5.1 応力解析方法」に示す、次の荷重ケースによる応力を組み合わせて求める。

G : 固定荷重

P : 積載荷重（使用済燃料貯蔵ラック重量を含む）

S_s_{SN}* : S→N 方向 S_s地震荷重（地震時動水圧荷重及び地震時ラック反力を含む）

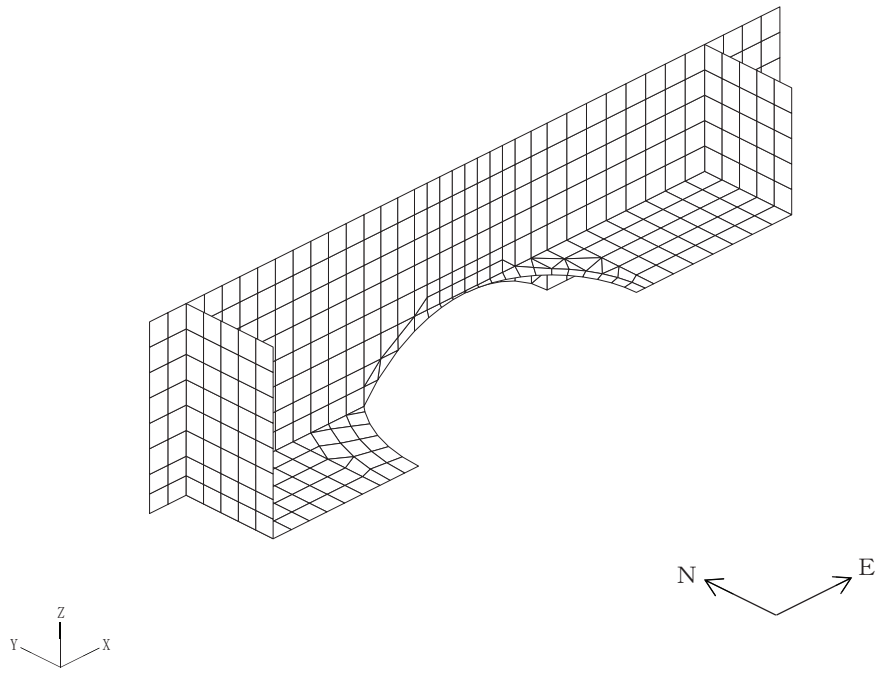
S_s_{WE}* : W→E 方向 S_s地震荷重（地震時動水圧荷重及び地震時ラック反力を含む）

S_s_{UD}* : 鉛直方向 S_s地震荷重（地震時ラック反力を含む）

注記* : 計算上の座標軸を基準として、EW 方向は W→E 方向の加力、NS 方向は S→N 方向の加力、鉛直方向は下向きの加力を記載している。

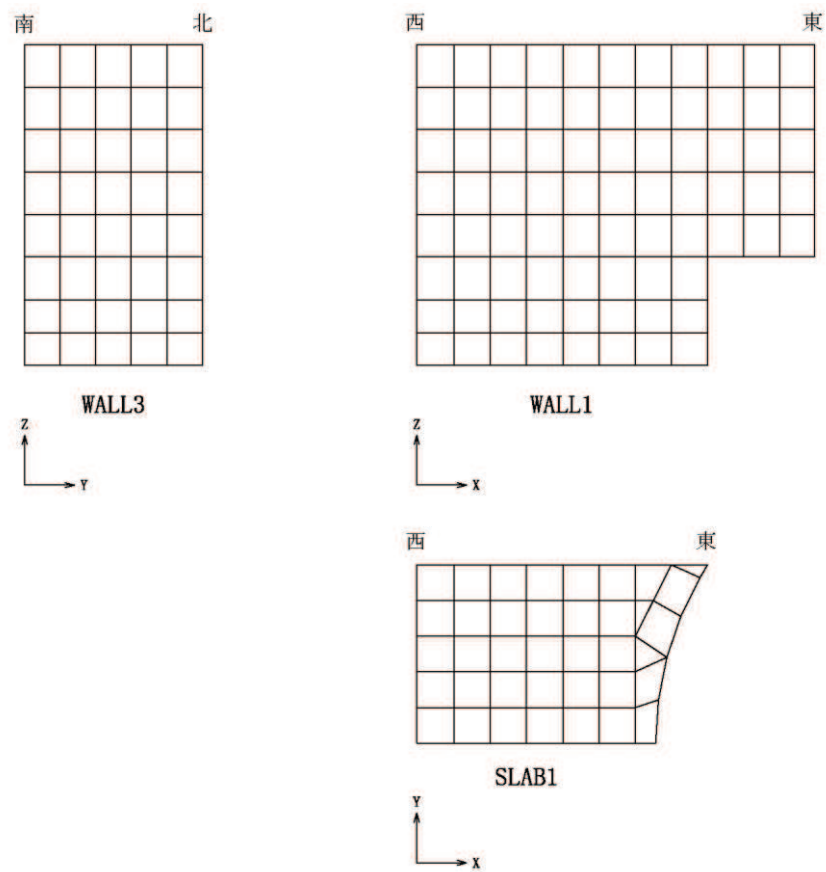
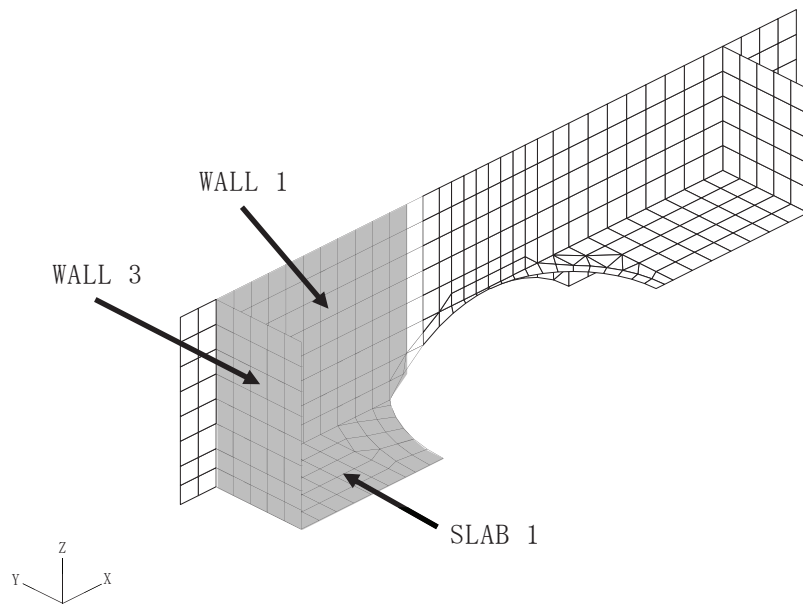
荷重の組合せケースを表 5-1 に示す。

水平地震力と鉛直地震力による応力の組合せは、「原子力発電所耐震設計技術規程（J E A C 4 6 0 1 - 2008）」を参考に、組合せ係数法（組合せ係数は 1.0 と 0.4）を用いるものとする。



(a) 全体鳥瞰図

図 5-1(1) 解析モデル概要図 (1/2)



注：X，Y，Zは全体座標系を示す。

(b) プール部要素分割図

図 5-1(2) 解析モデル概要図 (2/2)

表 5-1 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 | 2-1 | $G + P + 1.0 S_{s_{SN}} + 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-2 | $G + P - 1.0 S_{s_{SN}} + 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-3 | $G + P - 1.0 S_{s_{WE}} + 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-4 | $G + P + 1.0 S_{s_{WE}} + 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-5 | $G + P + 1.0 S_{s_{SN}} - 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-6 | $G + P - 1.0 S_{s_{SN}} - 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-7 | $G + P - 1.0 S_{s_{WE}} - 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-8 | $G + P + 1.0 S_{s_{WE}} - 0.4 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-9 | $G + P + 0.4 S_{s_{SN}} + 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-10 | $G + P - 0.4 S_{s_{SN}} + 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-11 | $G + P - 0.4 S_{s_{WE}} + 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-12 | $G + P + 0.4 S_{s_{WE}} + 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-13 | $G + P + 0.4 S_{s_{SN}} - 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-14 | $G + P - 0.4 S_{s_{SN}} - 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-15 | $G + P - 0.4 S_{s_{WE}} - 1.0 S_{s_{UD}}$ |
| | 2-16 | $G + P + 0.4 S_{s_{WE}} - 1.0 S_{s_{UD}}$ |

6. 評価方法

使用済燃料プールの壁及び底面スラブの評価は、SFP の耐震計算書の「3.5.2 断面の評価方法」に示す方法と同一である。

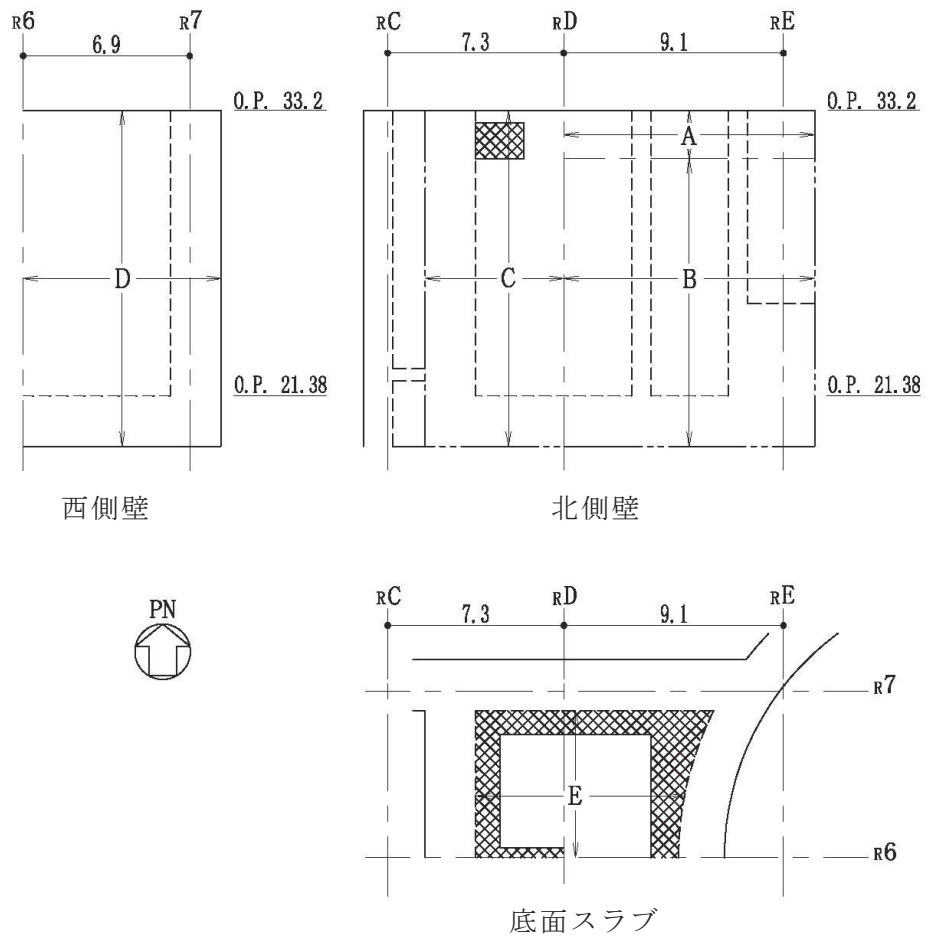
7. 評価結果

3次元 FEM モデルの配筋領域図を図 7-1 に、配筋一覧を表 7-1 に示す。

断面の評価結果を記載する要素は、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度に対する評価において、発生値に対する許容値の割合が最小となる要素とする。

選定した要素の位置を図 7-2 に、評価結果を表 7-2 に示す。

S s 地震時において、壁について、軸力、曲げモーメント及び面内せん断力による鉄筋及びコンクリートのひずみ、軸力による圧縮応力度、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。また、底面スラブについて、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。



注：面外せん断補強筋  : D22@200×@400

図 7-1 配筋領域図

表 7-1 配筋一覧

(a) 北側壁

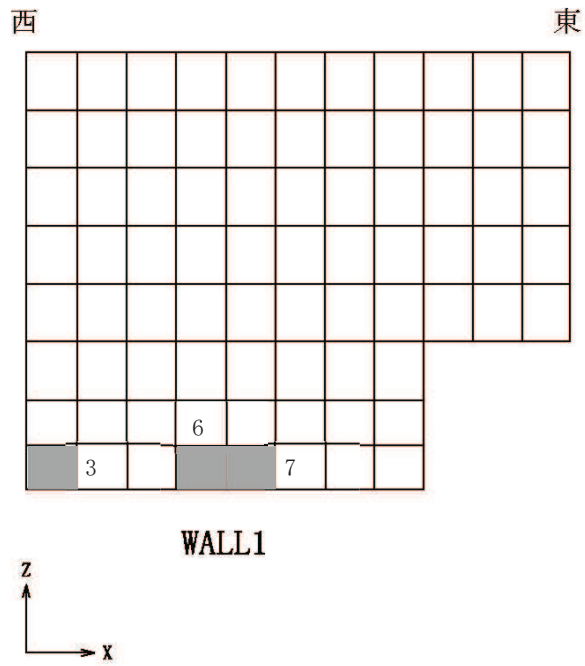
| 区分 | タテ方向 | ヨコ方向 |
|----|--|--|
| A | (内側) 2-D38@200+D38@400 (外側) 2-D38@200+2-D38@400 | (内側) 3-D38@200 (外側) 4-D38@200 |
| B | (内側) 2-D38@200+D38@400 (外側) 2-D38@200+2-D38@400 | (内側) 3-D38@200 (外側) 3-D38@200+D38@400 |
| C | (内側) 3-D38@200+D38@400 (外側) 3-D38@200 | (内側) 2-D38@200+2-D38@400 (外側) 3-D38@200 |

(b) 西側壁

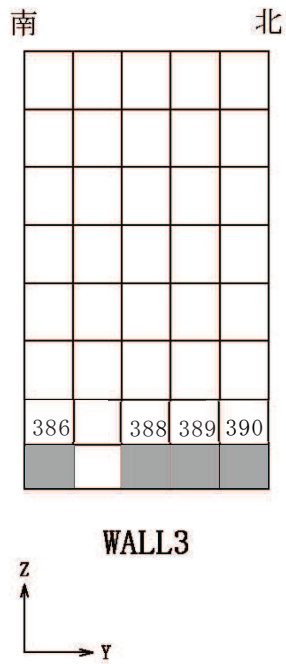
| 区分 | タテ方向 | ヨコ方向 |
|----|--|--|
| D | (内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+2-D38@400 | (内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400 |

(c) 底面スラブ

| 区分 | EW 方向 | NS 方向 |
|----|----------------------------------|--|
| E | (上ば) 3-D38@200 (下ば) 4-D38@200 | (上ば) 2-D38@200+D38@400 (下ば) 3-D38@200+D38@400 |

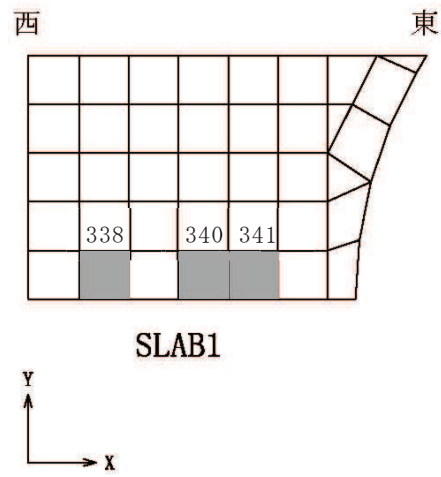


(a) 北側壁



(b) 西側壁

図 7-2(1) 選定した要素の位置 S s 地震時 (1/2)



(c) 底面スラブ

図 7-2(2) 選定した要素の位置 S s 地震時 (2/2)

表 7-2(1) 評価結果 S s 地震時 (使用済燃料貯蔵ラック反力考慮)

| 部位 | 評価項目 | | 方向 | 要素番号 | 組合せケース | 発生値 | 許容値 |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------|----|------|--------|-------|------|
| 北側壁 | 軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力 | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 7 | 2-1 | 0.303 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 6 | 2-1 | 1.51 | 5.00 |
| | 軸力 | 圧縮応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 3 | 2-10 | 2.47 | 21.6 |
| | 面内せん断力 | 面内せん断応力度 (N/mm^2) | — | 3 | 2-11 | 2.21 | 5.96 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 7 | 2-9 | 0.675 | 1.47 |
| 西側壁 | 軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力 | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 386 | 2-11 | 0.546 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 389 | 2-3 | 1.42 | 5.00 |
| | 軸力 | 圧縮応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 390 | 2-12 | 2.45 | 21.6 |
| | 面内せん断力 | 面内せん断応力度 (N/mm^2) | — | 388 | 2-10 | 1.15 | 4.02 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 386 | 2-11 | 0.824 | 1.40 |
| 底面 スラブ | 軸力 + 曲げモーメント | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | EW | 340 | 2-12 | 0.450 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | EW | 341 | 2-11 | 1.04 | 5.00 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | EW | 338 | 2-11 | 1.94* | 2.59 |

注記* : 応力の再分配等を考慮して、応力平均化を行った結果。

表 7-2(2) 評価結果 S s 地震時 (使用済燃料貯蔵ラック反力非考慮)

| 部位 | 評価項目 | | 方向 | 要素番号 | 組合せケース | 発生値 | 許容値 |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------------------|----|------|--------|-------|------|
| 北側壁 | 軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力 | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 7 | 2-9 | 0.269 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 6 | 2-9 | 1.28 | 5.00 |
| | 軸力 | 圧縮応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 3 | 2-10 | 2.40 | 21.6 |
| | 面内せん断力 | 面内せん断応力度 (N/mm^2) | — | 3 | 2-11 | 2.21 | 5.99 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | 水平 | 241 | 2-1 | 0.892 | 2.08 |
| 西側壁 | 軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力 | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 鉛直 | 386 | 2-11 | 0.502 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | 水平 | 425 | 2-1 | 1.30 | 5.00 |
| | 軸力 | 圧縮応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 390 | 2-12 | 2.40 | 21.6 |
| | 面内せん断力 | 面内せん断応力度 (N/mm^2) | — | 388 | 2-10 | 1.14 | 4.02 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | 鉛直 | 386 | 2-11 | 0.808 | 1.44 |
| 底面 スラブ | 軸力 + 曲げモーメント | コンクリート圧縮ひずみ ($\times 10^{-3}$) | EW | 340 | 2-12 | 0.409 | 3.00 |
| | | 鉄筋引張ひずみ ($\times 10^{-3}$) | EW | 341 | 2-11 | 0.964 | 5.00 |
| | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 (N/mm^2) | EW | 338 | 2-11 | 1.89* | 2.59 |

注記* : 応力の再分配等を考慮して、応力平均化を行った結果。

8. 検討のまとめ

使用済燃料貯蔵ラックの基準地震動 S_s に対する反力に対し、3次元 FEM モデルを用いた応力解析により使用燃料プールの検討を行った。

検討の結果、使用済燃料貯蔵ラックの基準地震動 S_s に対する反力を考慮することで、使用済燃料貯蔵ラックの質量は固定荷重として扱った評価結果と比較すると発生値は増加傾向にあるが、軸力及び曲げモーメントによる鉄筋及びコンクリートのひずみ、面内せん断応力度並びに面外せん断応力度が、各許容値を超えないことを確認した。

以上のことから、使用済燃料貯蔵ラックの基準地震動 S_s に対する反力に対し、使用済燃料プールが有する耐震性への影響はないことを確認した。

別紙 8-1 ラック反力に対する使用済燃料プールの応力解析における
応力平均化の考え方

目 次

| | |
|-----------------------------|-----------|
| 1. 概要 | 別紙 8-1- 1 |
| 2. 応力平均化の考え方 | 別紙 8-1- 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 8-1- 2 |
| 2.2 応力平均化の方法 | 別紙 8-1- 4 |
| 2.3 応力平均化の結果 | 別紙 8-1- 9 |
| 2.4 断面の評価結果 | 別紙 8-1-10 |

1. 概要

本資料は、「補足-610-3 使用済燃料プールの耐震性についての計算書に関する補足説明資料」のうち「別紙 8 使用済燃料貯蔵ラックの地震時反力の検討」に基づく解析ケースを対象として、使用済燃料プール及びキャスクピット（以下「SFP」という。）における応力平均化の考え方について示すものである。

3次元 FEM モデルを用いた応力の算定において、FEM 要素に応力集中等が見られる場合については、「日本建築学会 2005 年 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」（以下「RC-N 規準」という。）に基づき、応力の再配分等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度ではなく、周囲の複数の要素で平均化した応力度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、SFP 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元に選定している。

SFPの底面スラブでは、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) |
|-------|--------|----------|----|------|------------------------------|-----------------------|
| 底面スラブ | 面外せん断力 | 面外せん断応力度 | EW | 338 | 2-11 (S _s 地震時) | 1.46 |

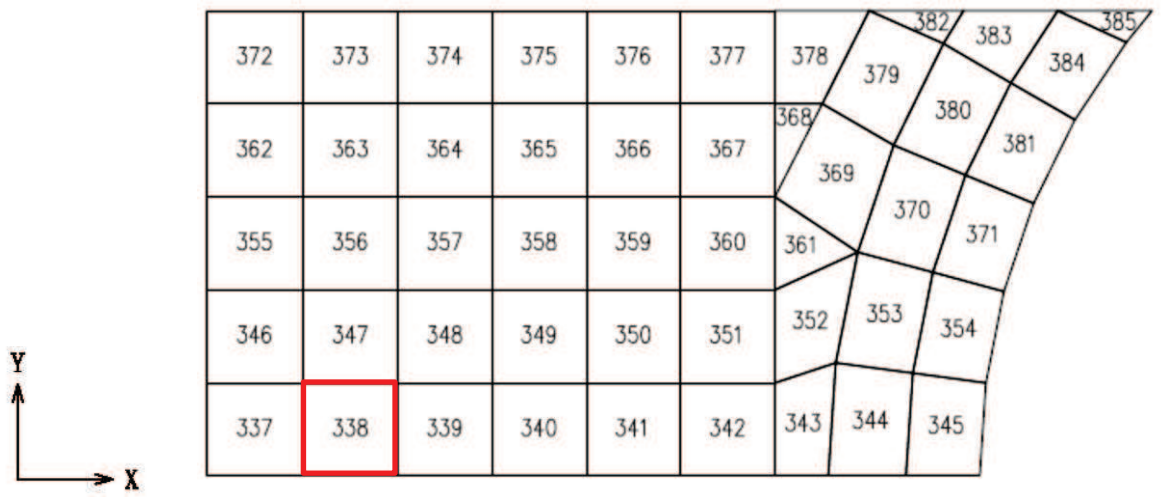


図 2-1 要素位置図

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 SFP の 3次元 FEM モデルを示す。図 2-2 に示すように、当該部は西側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、今回の SFP の応力解析においては、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。

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、局所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、RC-N 規準の付図 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、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。SFP の底面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、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、壁面から底面スラブの部材厚である 2.1m 分の範囲で行った。該当要素について応力平均化範囲を図 2-6 に示す。

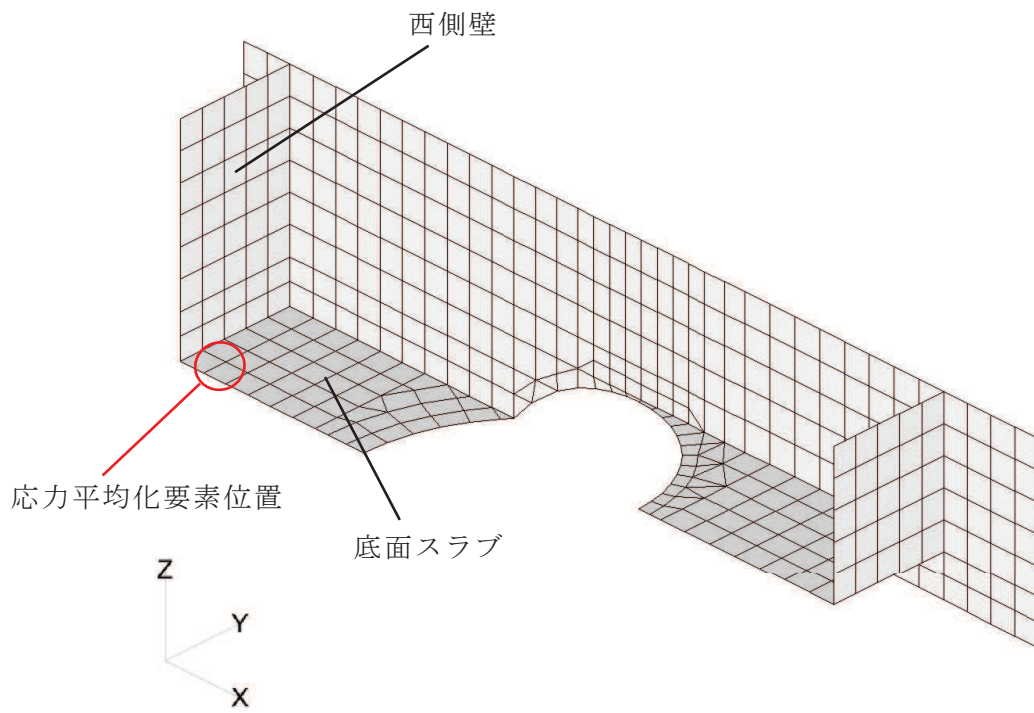
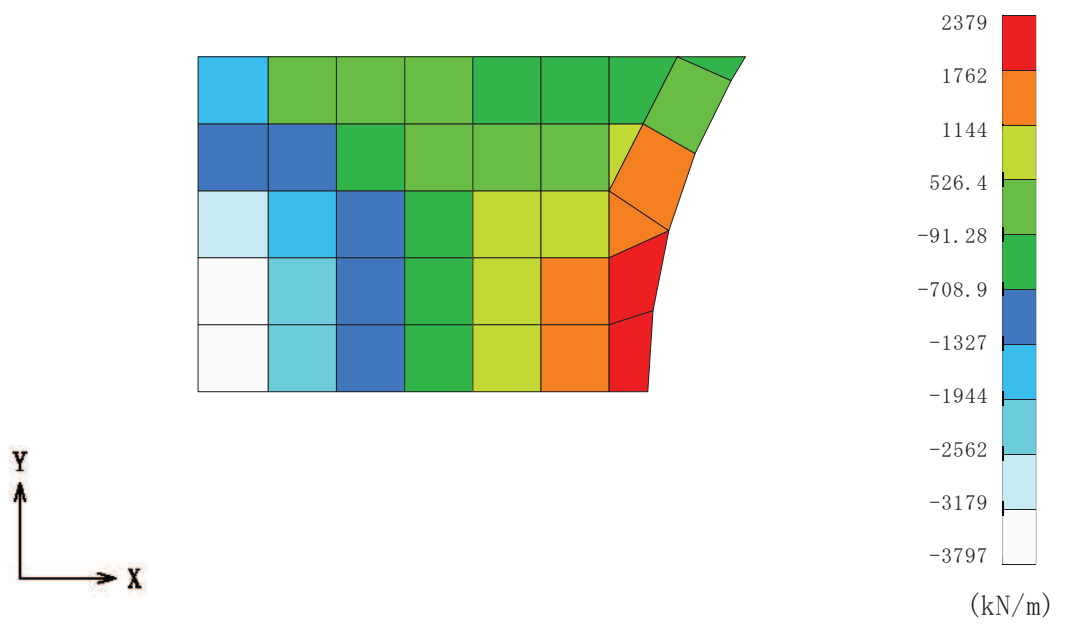


図 2-2 SFP の 3 次元 FEM モデル



組合せケース 2-11 (EW 方向)

図 2-3 面外せん断力のコンター図

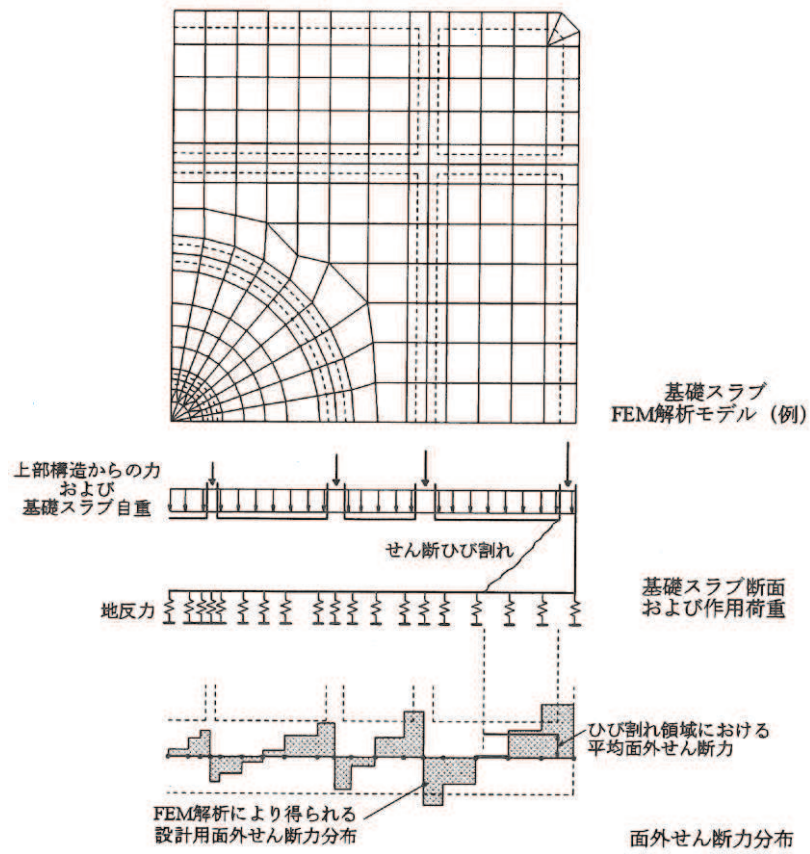


図 2-4 RC-N 規準の付図 2.2

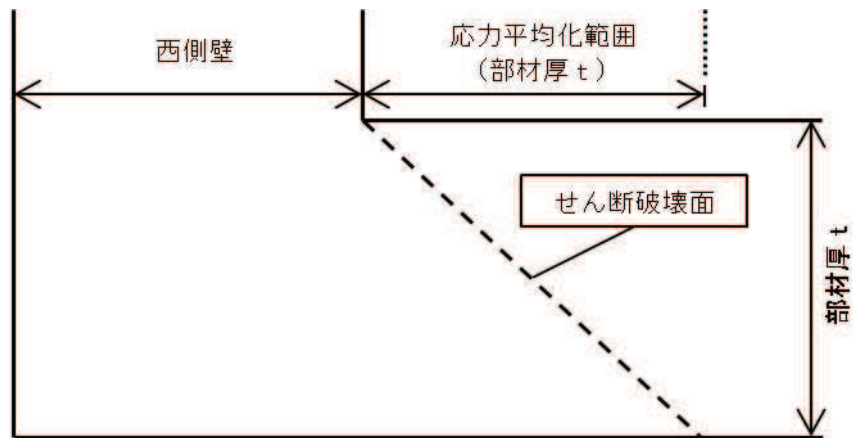


図 2-5 SFP の底面スラブにおける面外せん断力に対する応力平均化の考え方

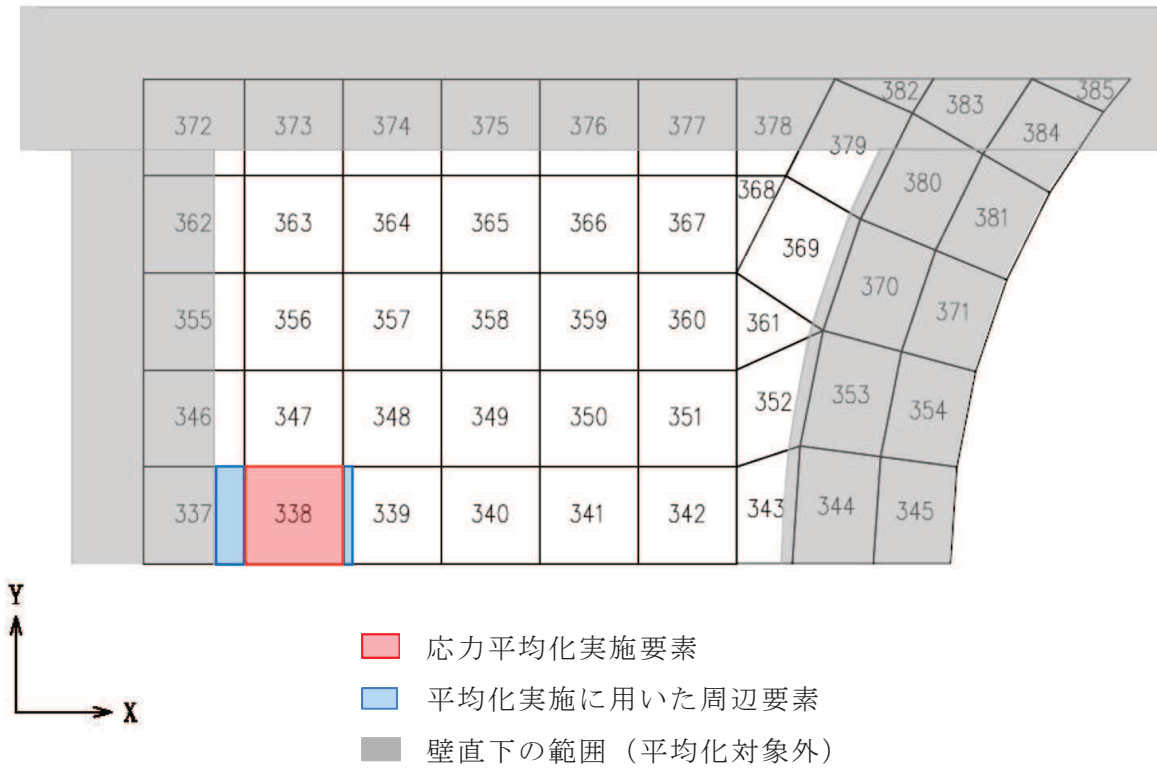


図 2-6 応力平均化範囲

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。

$$\tau_{ave} = \Sigma (\tau_i \times A_i) / \Sigma A_i$$

ここで、

τ_{ave} : 平均化後の面外せん断応力度

τ_i : 平均化前の各要素の面外せん断応力度 (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 τ_i (N/mm ²) | 要素面積 A_i (m ²) | 重み付け値 $\tau_i \times A_i$ ($\times 10^6$ N) |
|-----------|----|--------|------|---|------------------------------------|--|
| 338 | EW | 2-11 | 337 | 2.94 | 0.65 | 1.90 |
| | | | 338 | 1.76 | 2.08 | 3.67 |
| | | | 339 | 0.90 | 0.27 | 0.25 |
| 合計 | | | | | 3.00 | 5.81 |

表2-3 応力平均化結果

| 応力平均化対象要素 | 方向 | 組合せケース | 要素番号 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | |
|-----------|----|--------|------|----------------------------------|------|
| | | | | 平均化前 | 平均化後 |
| 338 | EW | 2-11 | 337 | 2.94 | 1.94 |
| | | | 338 | 1.76 | |
| | | | 339 | 0.90 | |

2.4 断面の評価結果

2.4.1 断面の評価方法

S s 地震時の面外せん断応力度について、発生値が許容値を超えないことを確認する。許容値は、「J S M E S N E 1 -2003 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」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応力度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 | 面外せん断応力度 (N/mm ²) | | 平均化後の検定値 (発生値/許容値) |
|------|----|--------|----------------------------------|-------|-----------------------|
| | | | 発生値 | 許容値 | |
| 338 | EW | 2-11 | 1.94 | 2.59* | 0.750 |

注記*：応力平均化範囲に存在する面外せん断補強筋を考慮して許容値を算定