

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0
提出年月日	2021年 5月 24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

 本日の説明範囲

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

目 次

1. 概要 別紙 1-1
2. 応力解析モデル及び手法の比較 別紙 1-2

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。

2. 応力解析モデル及び手法の比較

使用済燃料プール及びキャスクピットの応力解析モデル及び手法の比較を表2-1に示す。また、今回工認時の応力解析モデルを図2-1に示す。

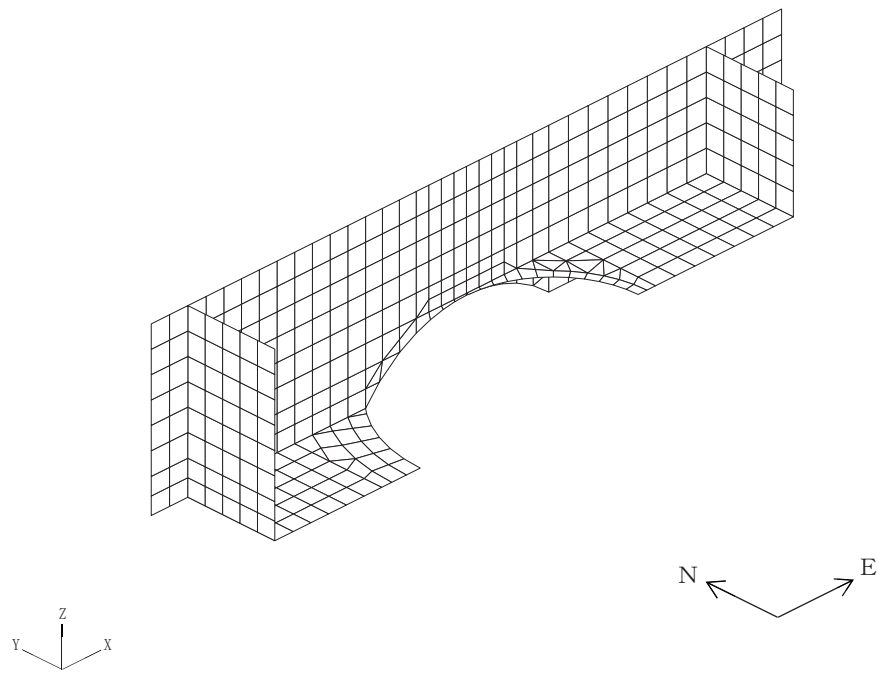
比較に用いる既工認時の応力解析モデル及び手法は、平成4年1月13日付け3資庁第10518号にて認可された工事計画の添付資料IV-2-6-2-1「使用済燃料プール（キャスクピットを含む。）の耐震性についての計算書」（以下「既工認」という。）のものである。

表 2-1 応力解析モデル及び手法の比較 (使用済燃料プール及びキャスクピット)

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 (弾性解析)	・同左	—
解析コード		・N A S T R A N	・同左 (M S C N A S T R A N)	—
モデル	モデル化範囲	・使用済燃料プール及び蒸気乾燥器・気水分離器ピット (東西軸に対して北半分をモデル化)	・同左	—
	材料物性	検討時の各規準, コンクリートの設計基準強度に基づき設定 ・コンクリートのヤング係数: $E = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ (SI 換算) ・コンクリートのポアソン比: $\nu = 0.167$	適用規準等の見直しによる再設定 ・コンクリートのヤング係数: $E = 2.51 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ・コンクリートのポアソン比: $\nu = 0.2$	①
	要素種別	・シェル要素	・同左	—
	境界条件	・東西軸に対して対称 ・シェル壁との接続部で固定	・同左	—
	非線形特性	・考慮しない	・同左	—
地震荷重との組合せ	S_1 地震時: $DL (+T) + K + KH$ S_2 地震時: $DL + K + KH$ DL: 固定荷重及び積載荷重 T: 運転時温度荷重 K: 地震荷重 KH: 地震時動水圧荷重	S_d 地震時: $DL (+T) + K + KH$ S_s 地震時: $DL + K + KH$ DL: 固定荷重及び積載荷重 T: 運転時温度荷重 K: 地震荷重 KH: 地震時動水圧荷重	—	
荷重の設定	固定荷重及び積載荷重	・躯体自重, 機器配管重量, 静水圧	・同左	—
	運転時温度荷重	・プール部に生じる温度変化による荷重, プール部の内部と外部との温度差荷重, シェル壁及び耐震壁からの強制変位	・同左	—
	地震荷重	・燃料取替床位置に地震力 (水平力, 曲げモーメント, 鉛直力) を入力	・同左	—
	地震時動水圧荷重	・Housner 理論に基づく地震時動水圧荷重	・同左	—
評価方法	応力解析 ・ S_1 地震時: 発生応力が許容限界を超えないことを確認 ・ S_2 地震時: 発生応力又はひずみが生じないことを確認	・ S_d 地震時: 発生応力が許容限界を超えないことを確認 ・ S_s 地震時: 発生応力又はひずみが生じないことを確認	②	

【具体的な反映事項】 (表の備考欄に対応)

- ① コンクリートの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 改定) に基づき再計算
- ② 「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」 ((社) 日本機械学会, 2003) に基づき評価



全体図

図 2-1 応力解析モデル図

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

目 次

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

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。

2. 応力解析におけるモデル化，境界条件及び拘束条件

使用済燃料プール及びキャスクピット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 に示す。

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，以下のとおり。

・ 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。

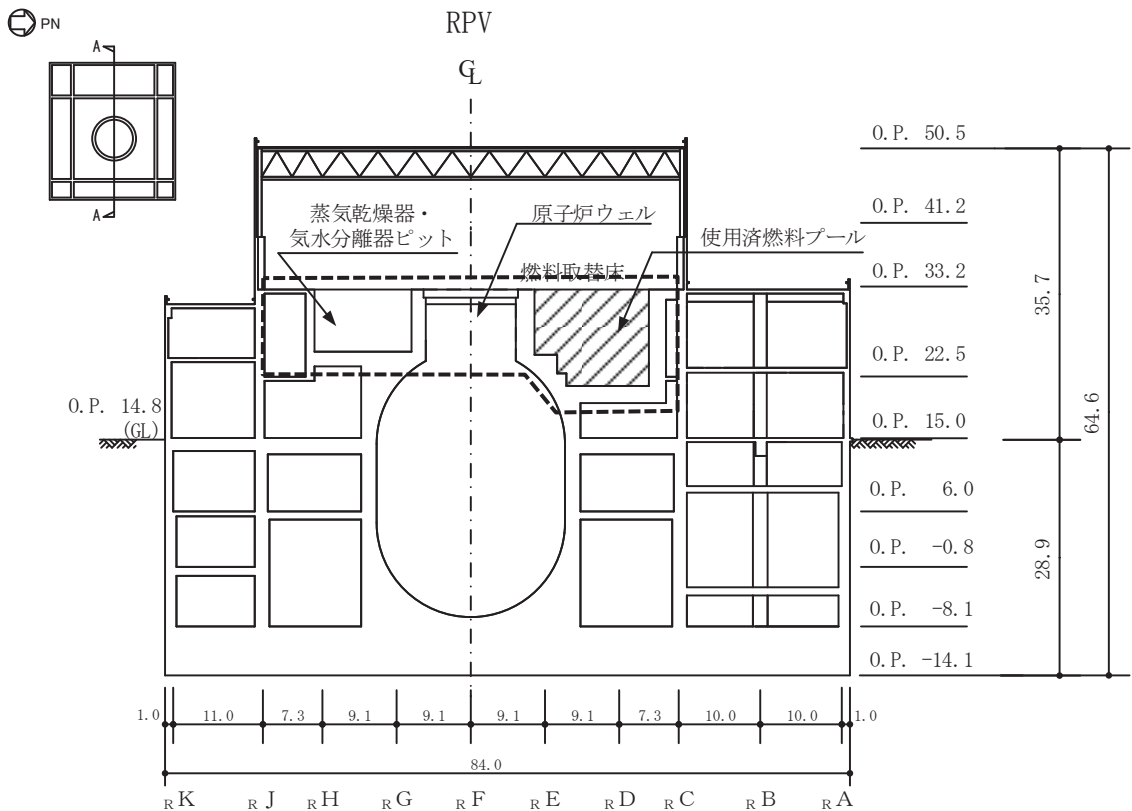
注記*：構造解析のための有限要素法実践ハンドブック（非線形 CAE 協会，2008 年）

表 2-1 モデル化、境界条件及び拘束条件 (1/4)

モデル概要

○モデル化範囲

- ・原子炉建屋 (R/B) のうち、使用済燃料プール (SFP) と、その周囲 (O. P. 21. 38 m~O. P. 33. 2m) 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。) 及び原子炉ウエルをモデル化。
- ・プール部は炉心を通る東西軸に対してほぼ対称であるため、その北側半分をモデル化。



モデル化範囲

モデル化範囲 (単位 : m)

表 2-1 モデル化, 境界条件及び拘束条件 (2/4)

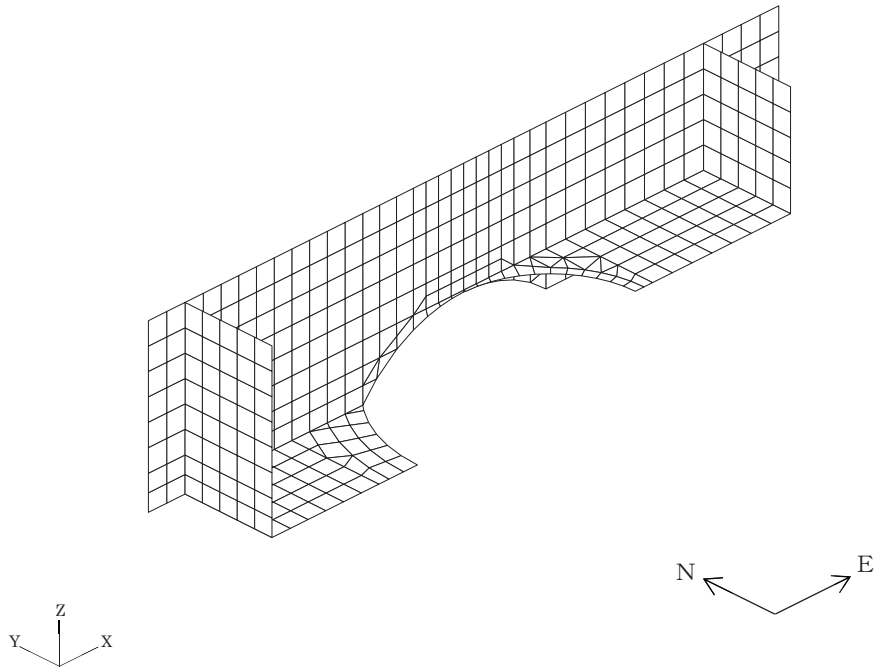
モデル概要

○使用要素

- ・シェル要素

○要素分割

- ・要素の一边の長さを 1.0~1.7m 程度とし, 壁及びスラブの配置を考慮して分割する。



モデル概要 (地震荷重時)

表 2-1 モデル化, 境界条件及び拘束条件 (3/4)

境界条件, 拘束条件	
使用済燃料プールと周辺床スラブとの境界	
<ul style="list-style-type: none"> 周辺床スラブについては, その剛性を考慮しない。使用済燃料プールと周辺床スラブの境界部は自由端とする。 	
使用済燃料プールとその他周辺構造物との境界	
地震荷重時	
	<ul style="list-style-type: none"> モデル下端位置は, シェル壁との接続部について変位及び回転を拘束。 EW 方向は, 原子炉ウェル部と内部ボックス壁 (I/W) に生じる異なる回転変形を考慮するため, I/W (側面) 端部に鉛直方向荷重を入力。 NS 方向地震時はモデル対称軸は逆対称条件を設定。EW 方向地震時はモデル対称軸は対称条件を設定。
地震荷重及び温度荷重以外の荷重時	
	<ul style="list-style-type: none"> モデル下端位置は, シェル壁との接続部について変位及び回転を拘束, 内部ボックス壁 (I/W) 接続部について鉛直方向変位を拘束。 モデル対称軸は対称条件を設定。

表 2-1 モデル化, 境界条件及び拘束条件 (4/4)

境界条件, 拘束条件	
使用済燃料プールとその他周辺構造物との境界	
温度荷重時	
	<p>温度作用時</p> <ul style="list-style-type: none"> モデル下端位置は, シェル壁との接続部について変位及び回転を拘束, 内部ボックス壁 (I/W) 接続部について鉛直方向変位を拘束。 モデル対称軸は対称条件を設定。 <p>シェル壁からの強制変位作用時</p> <ul style="list-style-type: none"> 原子炉ウエルの脚部には回転拘束のうえ, 温度荷重によりシェル壁に生ずる水平・鉛直方向の変位を与える。 内部ボックス壁 (I/W) 接続部について温度荷重により I/W に生ずる鉛直方向に強制変位を与える。 モデル対称軸は対称条件を設定。

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。

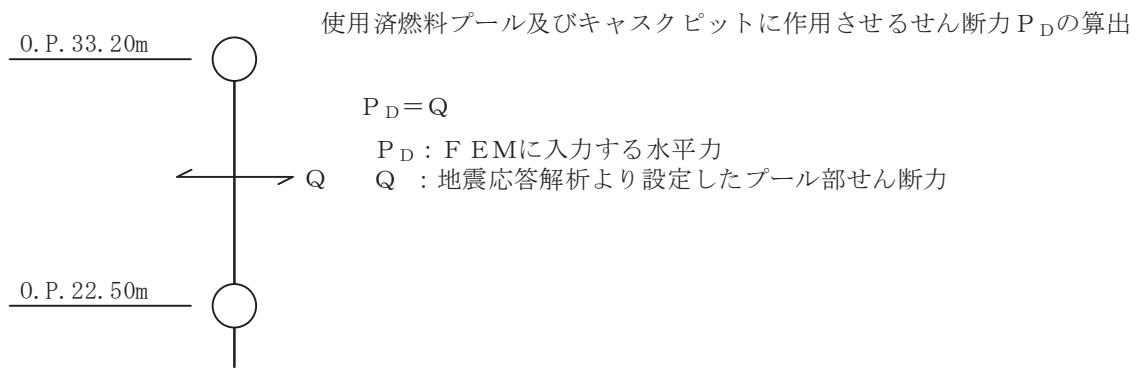
また、地震応答解析により求まる使用済燃料プール及びキャスクピットの位置する階の最大応答曲げモーメントと FEM モデルに入力した水平力により発生する曲げモーメントの差分を FEM モデルに入力する。曲げモーメントは、三角形分布荷重に変換し節点の支配長さに応じた節点荷重として入力する。EW 方向のプール部の回転ばねによる曲げモーメントについては、プールガーダの長さで除して求めた内部ボックス壁からの鉛直方向の反力を、プールガーダの端部に節点荷重として入力する。

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。

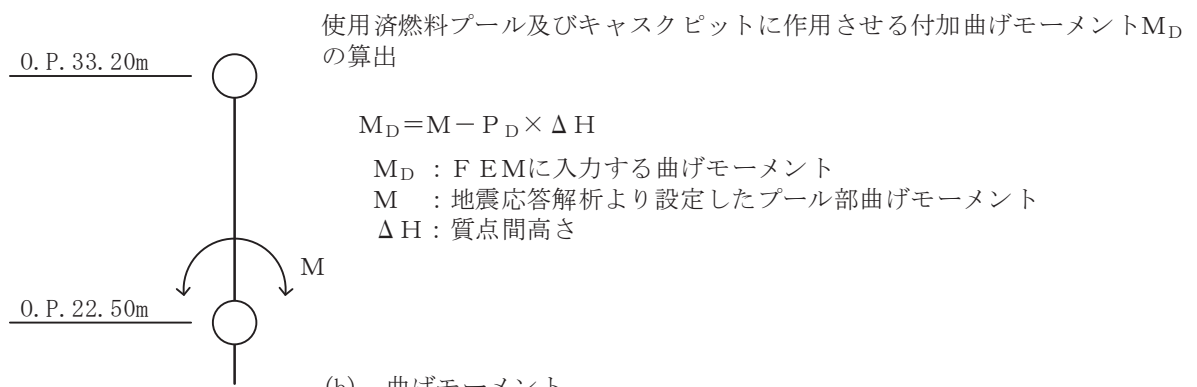
鉛直地震力については、地震応答解析により求まる使用済燃料プール及びキャスクピットの位置する階の最大応答軸力から算出した軸力係数に基づく鉛直力を FEM モデルに入力する。鉛直力は、FEM モデルの各節点に、節点の支配重量に軸力係数を乗じた節点荷重として入力する。

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。

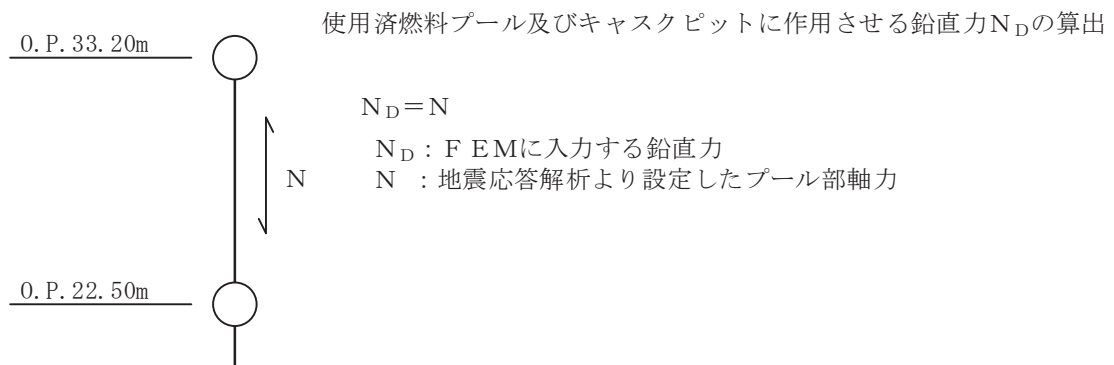
FEM モデルに入力する地震荷重の概念図を図 2-1 に示す。また、FEM モデルに入力する地震荷重を図 2-2 に示す。



(a) 水平地震力

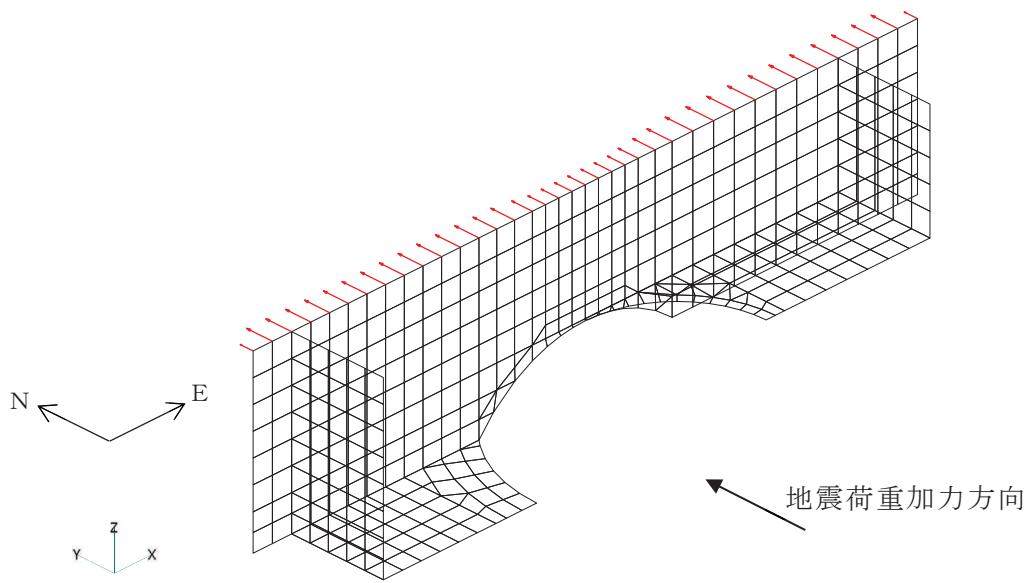


(b) 曲げモーメント

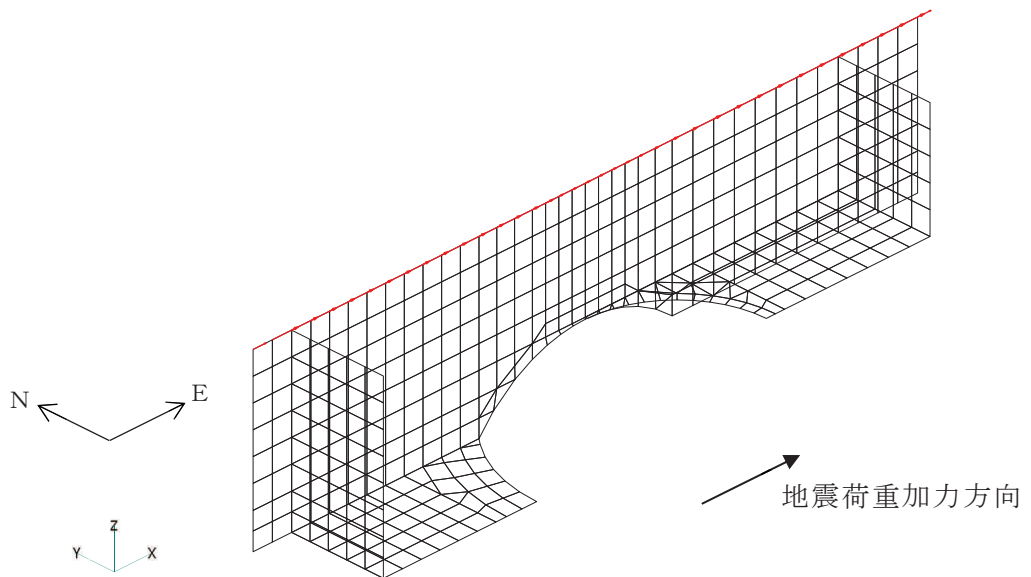


(c) 鉛直地震力

図 2-1 FEM モデルにする地震荷重の概念図

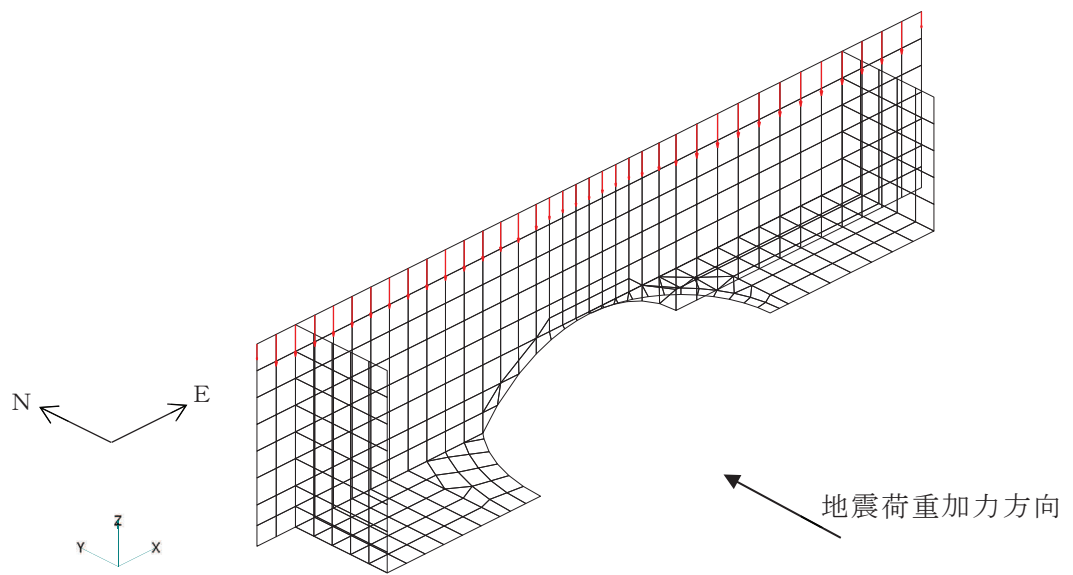


(a) 水平力 (NS 方向)

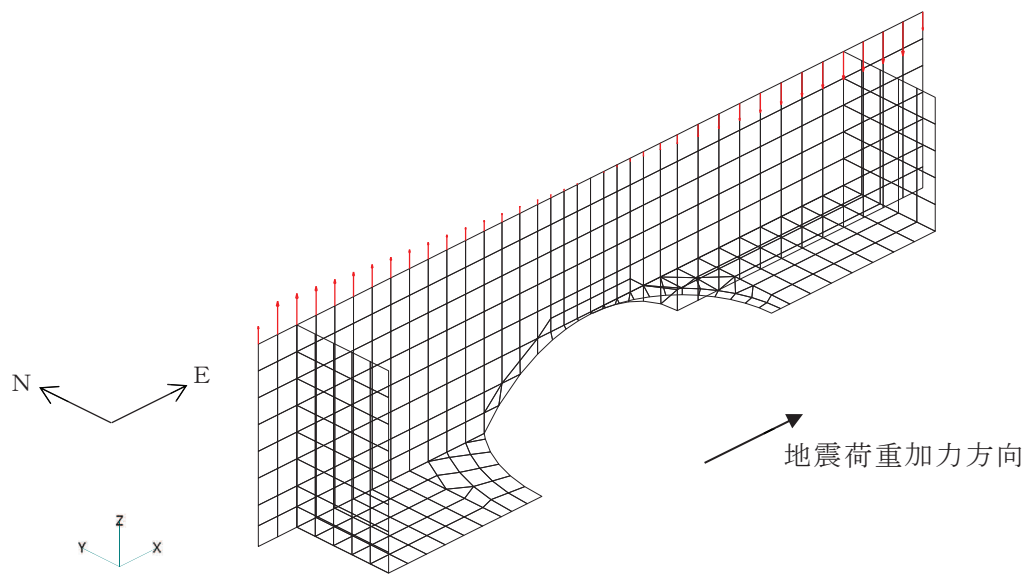


(b) 水平力 (EW 方向)

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)

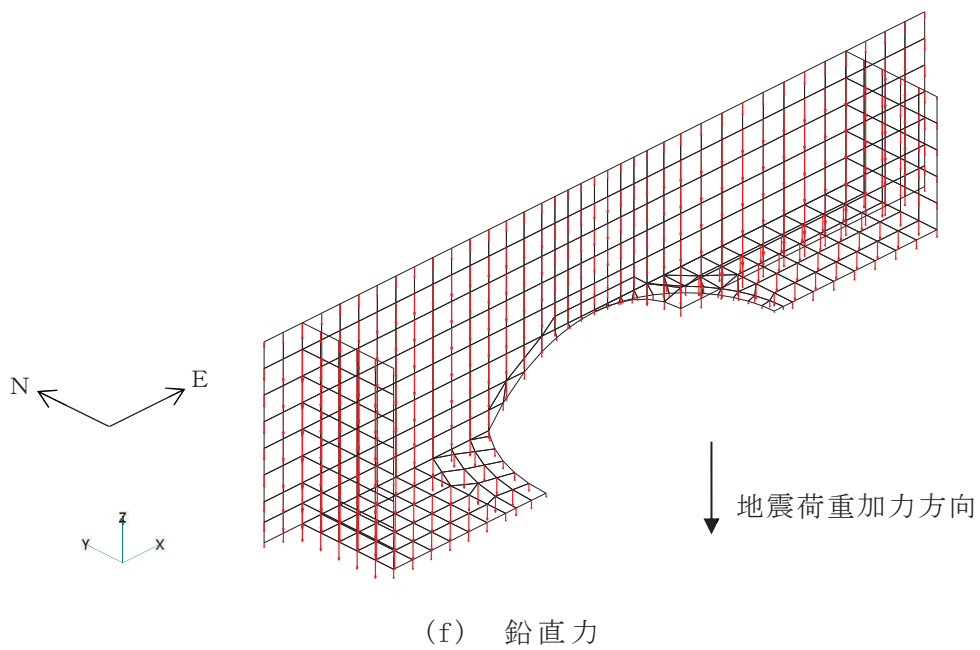
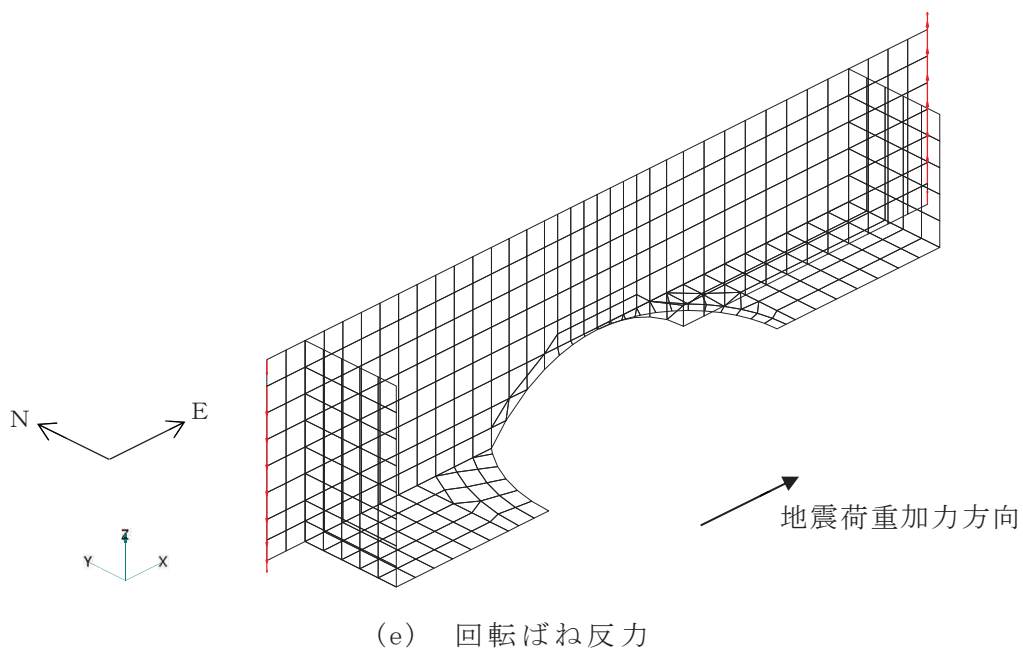


図 2-2 (3) FEM モデルに入力する地震荷重 (3/4)

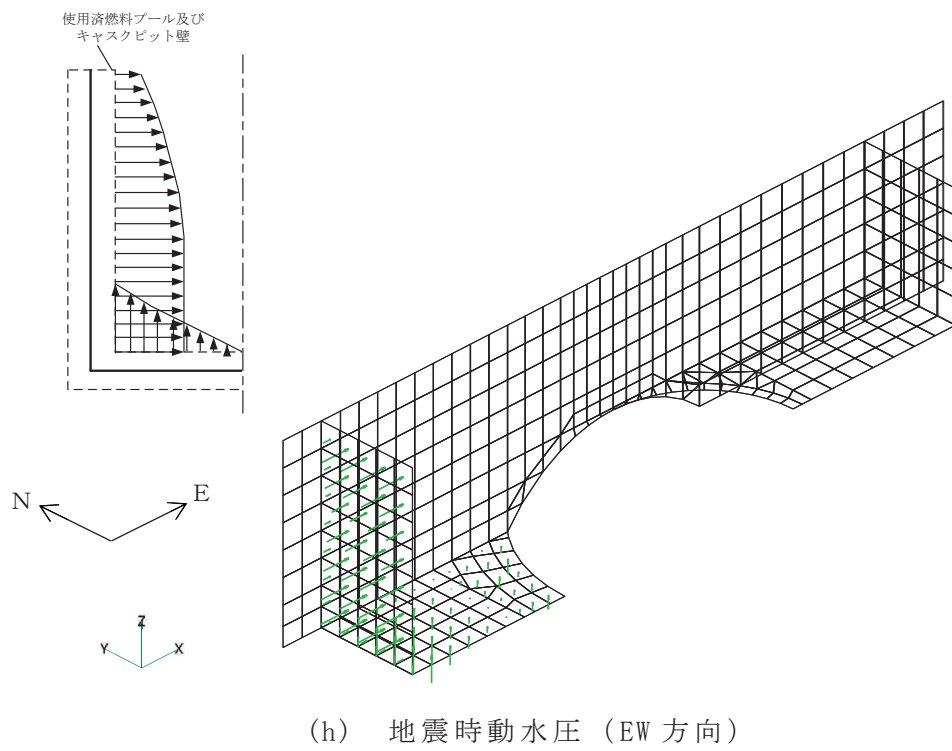
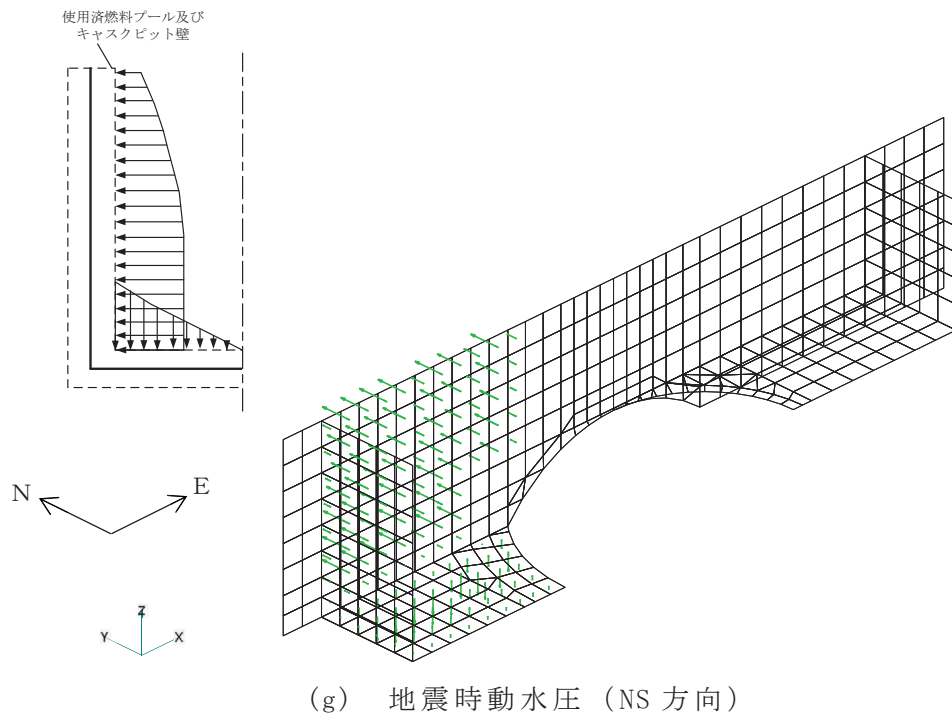


図 2-2 (4) FEM モデルに入力する地震荷重 (4/4)

別紙 4 応力解析における断面の評価部位の選定

目 次

1. 概要 別紙 4-1
2. 断面の評価部位の選定 別紙 4-2

1. 概要

本資料は、使用済燃料プール及びキャスクピットの応力解析における断面の評価部位の選定に関し、工認記載の断面の評価要素の選定結果について示すものである。

2. 断面の評価部位の選定

使用済燃料プール及びキャスクピットの荷重の組合せケースを表 2-1 に、配筋領域図を図 2-1 に、配筋一覧を表 2-2 に示す。

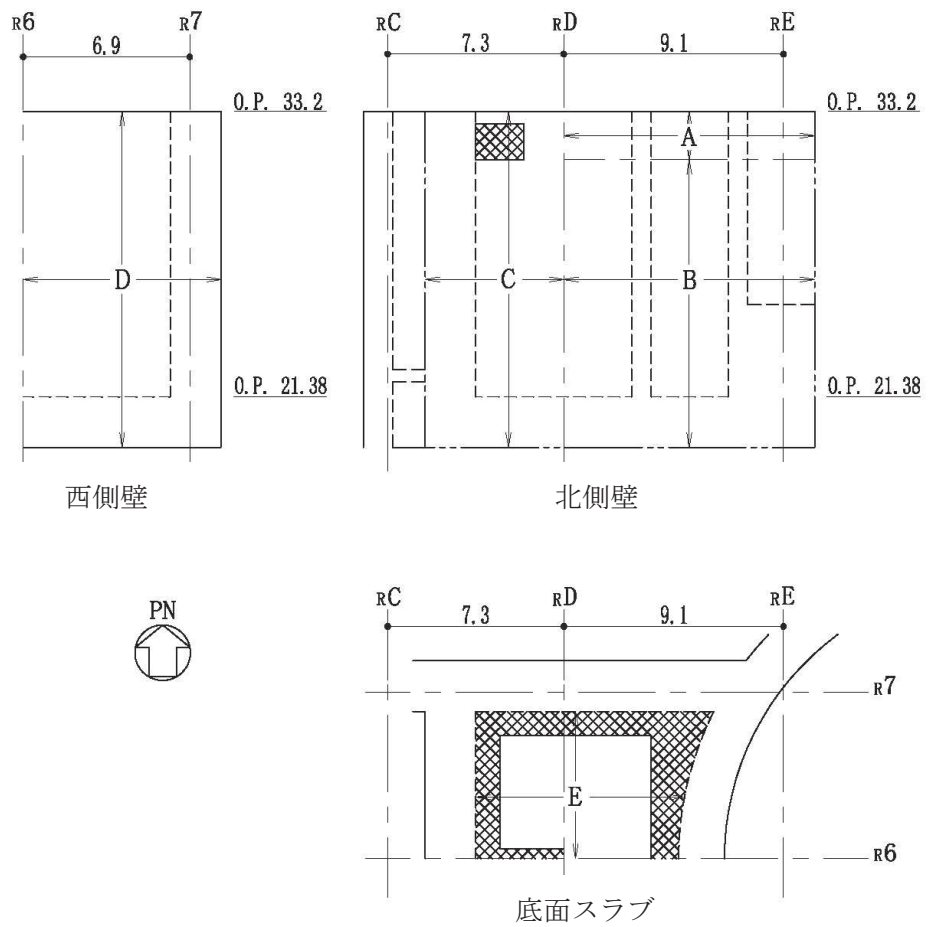
各評価項目の検定値一覧を表 2-3 に、各壁及び底面スラブに対して断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果を図 2-2 及び図 2-3 に、断面の評価部位の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図を図 2-4～図 2-6 に示す。

表 2-1 荷重の組合せケース (1/2)

外力の状態	ケース No.	荷重の組合せ
S d 地震時	1-1	$G + P + 1.0 S_{d_{SN}} + 0.4 S_{d_{UD}}$
	1-2	$G + P - 1.0 S_{d_{SN}} + 0.4 S_{d_{UD}}$
	1-3	$G + P - 1.0 S_{d_{WE}} + 0.4 S_{d_{UD}}$
	1-4	$G + P + 1.0 S_{d_{WE}} + 0.4 S_{d_{UD}}$
	1-5	$G + P + 1.0 S_{d_{SN}} - 0.4 S_{d_{UD}}$
	1-6	$G + P - 1.0 S_{d_{SN}} - 0.4 S_{d_{UD}}$
	1-7	$G + P - 1.0 S_{d_{WE}} - 0.4 S_{d_{UD}}$
	1-8	$G + P + 1.0 S_{d_{WE}} - 0.4 S_{d_{UD}}$
	1-9	$G + P + 0.4 S_{d_{SN}} + 1.0 S_{d_{UD}}$
	1-10	$G + P - 0.4 S_{d_{SN}} + 1.0 S_{d_{UD}}$
	1-11	$G + P - 0.4 S_{d_{WE}} + 1.0 S_{d_{UD}}$
	1-12	$G + P + 0.4 S_{d_{WE}} + 1.0 S_{d_{UD}}$
	1-13	$G + P + 0.4 S_{d_{SN}} - 1.0 S_{d_{UD}}$
	1-14	$G + P - 0.4 S_{d_{SN}} - 1.0 S_{d_{UD}}$
	1-15	$G + P - 0.4 S_{d_{WE}} - 1.0 S_{d_{UD}}$
	1-16	$G + P + 0.4 S_{d_{WE}} - 1.0 S_{d_{UD}}$

表 2-1 荷重の組合せケース (2/2)

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	$G + P + 0.4 S_{s_{WE}} - 1.0 S_{s_{UD}}$



注：面外せん断補強筋  : D22@200×@400

(単位：m)

図 2-1 配筋領域図

表 2-2 使用済燃料プール及びキャスクピットの配筋一覧

(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

表 2-3 (1) 各評価項目の検定値一覧 (1/2)
(a) S d 地震時

部位	評価項目		方向	要素番号	組合せケース	検定値
北側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮応力度	水平	210	1-1	0.198
		鉄筋引張応力度	鉛直	6	1-9	0.569
	面内せん断力	面内せん断応力度	—	51	1-4	0.351
	面外せん断力	面外せん断応力度	水平	241	1-1	0.586
西側壁	軸力 + 曲げモーメント + 面内せん断力	コンクリート圧縮応力度	鉛直	386	1-11	0.344
		鉄筋引張応力度	鉛直	389	1-3	0.551
	面内せん断力	面内せん断応力度	—	390	1-9	0.338
	面外せん断力	面外せん断応力度	鉛直	386	1-11	0.544
底面 スラブ	軸力 + 曲げモーメント	コンクリート圧縮応力度	EW	340	1-12	0.383
		鉄筋引張応力度	EW	340	1-11	0.534
	面外せん断力	面外せん断応力度	EW	338	1-11	0.533 (1.10)

注 1 : は、検定値が最大となる要素を示す。

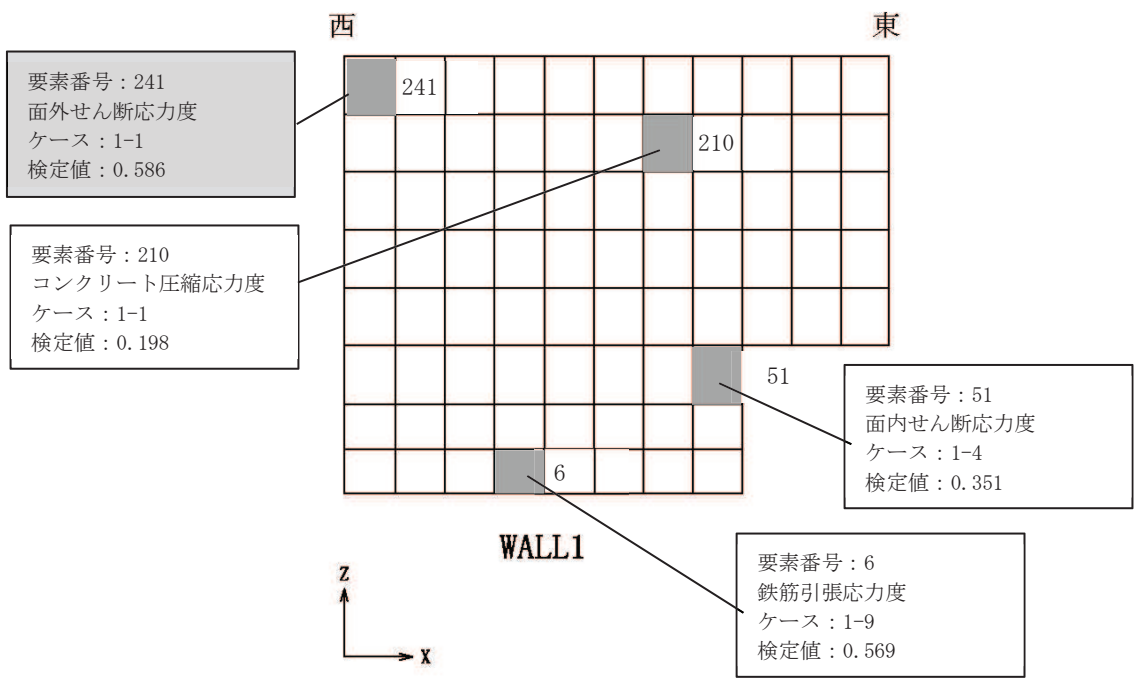
注 2 : () 内は、応力平均化前の値を示す。

表 2-3 (2) 各評価項目の検定値一覧 (2/2)
(b) S s 地震時

部位	評価項目		方向	要素番号	組合せケース	検定値
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	鉛直	7	2-9	0.090
		鉄筋引張ひずみ	鉛直	6	2-9	0.256
	軸力	圧縮応力度	鉛直	3	2-10	0.112
	面内せん断力	面内せん断応力度	—	3	2-11	0.369
	面外せん断力	面外せん断応力度	水平	241	2-1	0.429
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	鉛直	386	2-11	0.168
		鉄筋引張ひずみ	水平	425	2-1	0.260
	軸力	圧縮応力度	鉛直	390	2-12	0.112
	面内せん断力	面内せん断応力度	—	388	2-10	0.284
	面外せん断力	面外せん断応力度	鉛直	386	2-11	0.562
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	EW	340	2-12	0.137
		鉄筋引張ひずみ	EW	341	2-11	0.193
	面外せん断力	面外せん断応力度	EW	338	2-11	0.730 (1.51)

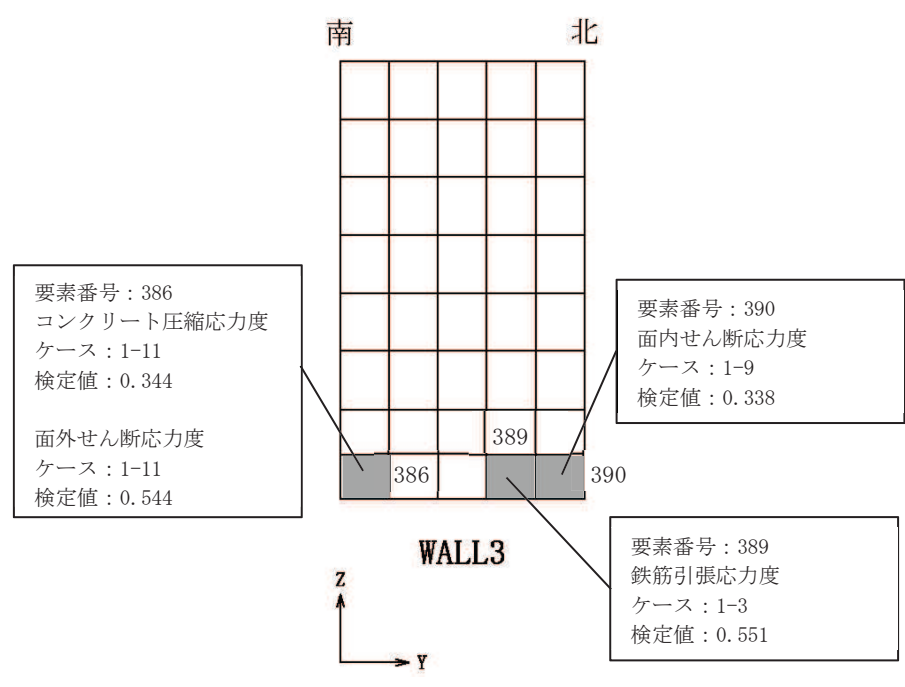
注 1 : は、検定値が最大となる要素を示す。

注 2 : () 内は、応力平均化前の値を示す。



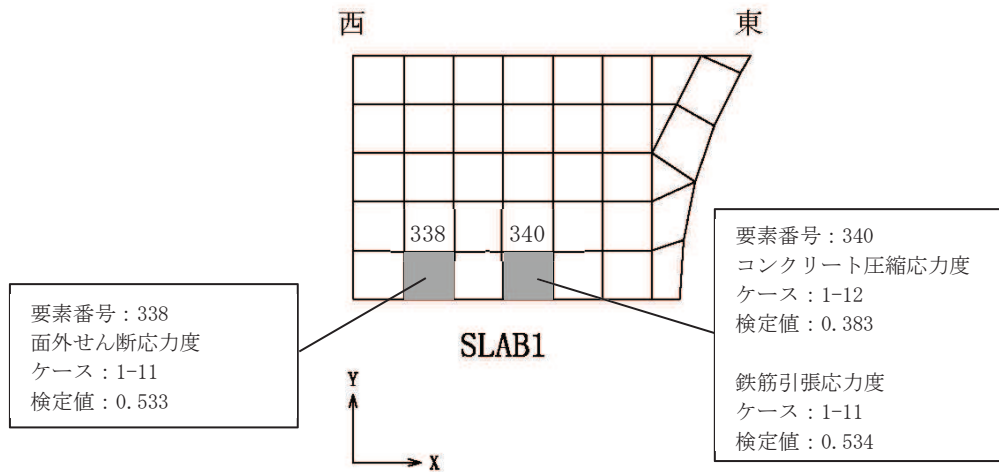
注 : ■ は、検定値が最大となる要素を示す。

(a) 北側壁



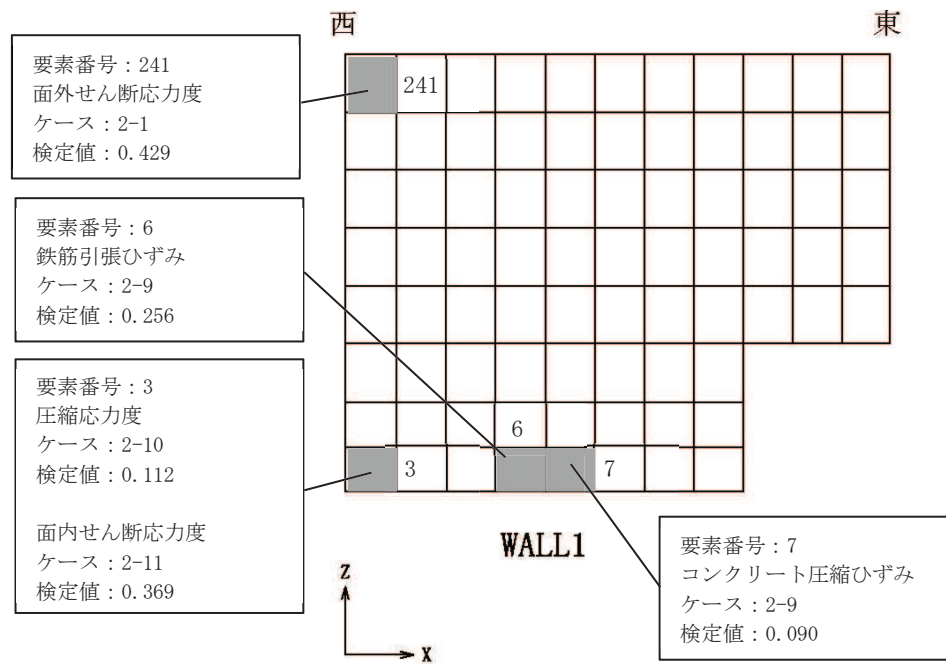
(b) 西側壁

図 2-2 (1) 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果 S d 地震時 (1/2)

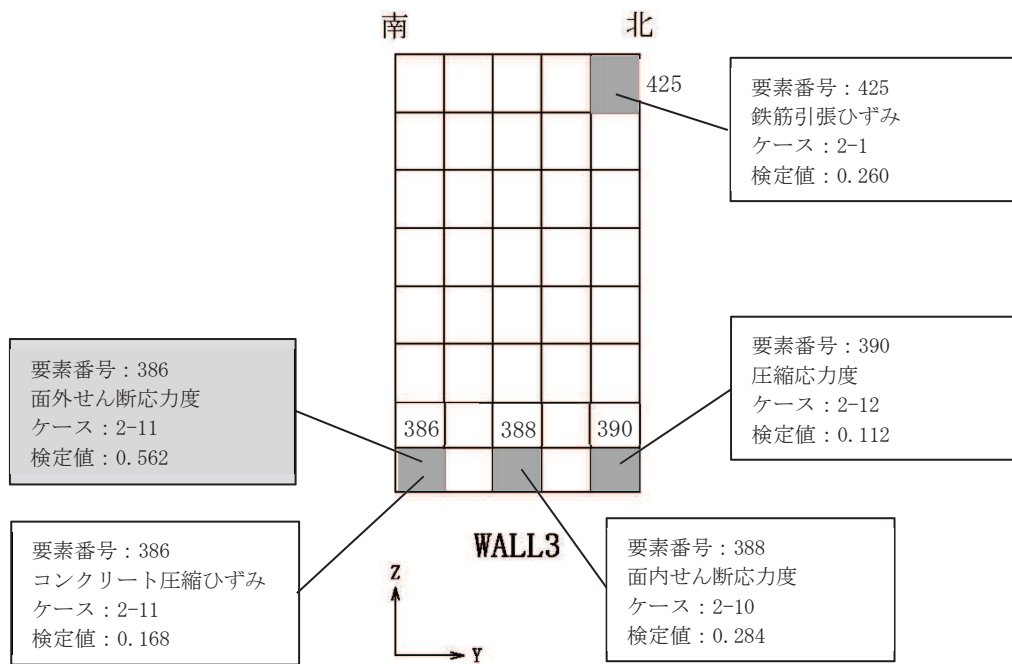


(c) 底面スラブ

図 2-2 (2) 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果 S d 地震時 (2/2)



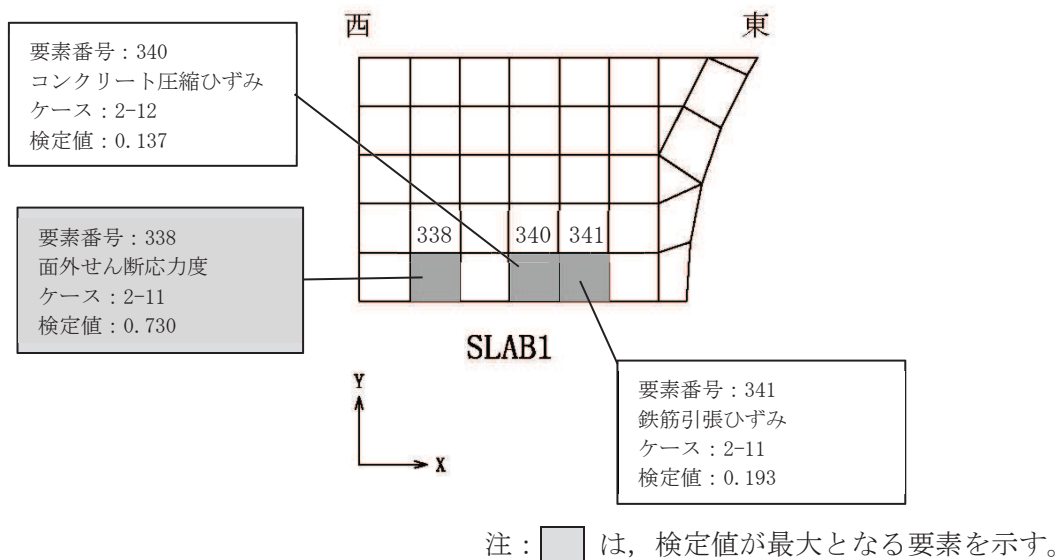
(a) 北側壁



注 : ■ は、検定値が最大となる要素を示す。

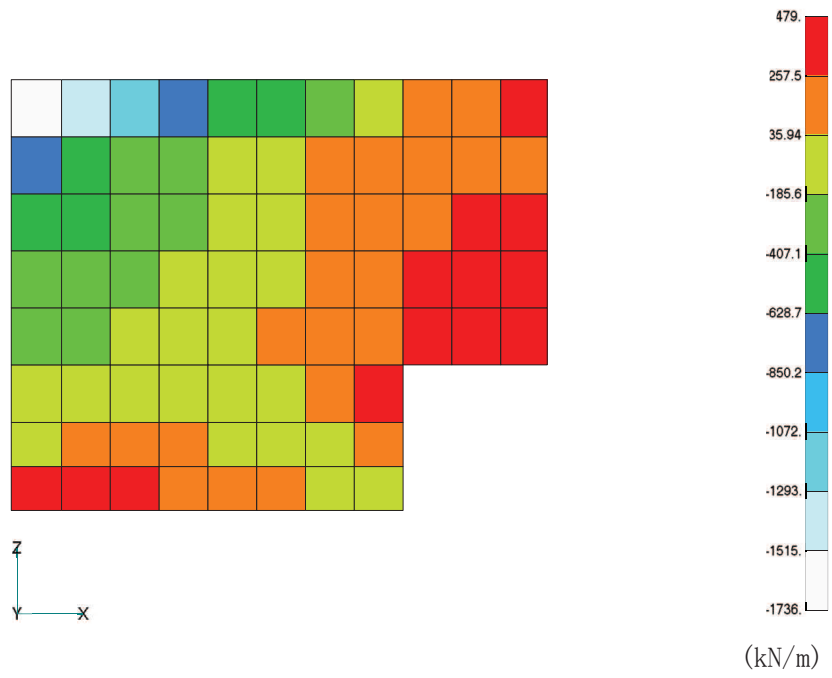
(b) 西側壁

図 2-3 (1) 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果 S s 地震時 (1/2)



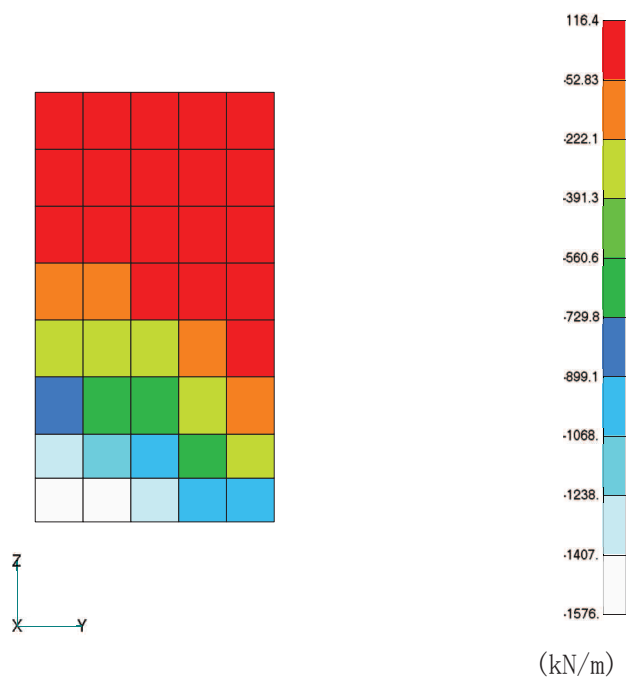
(c) 底面スラブ

図 2-3 (2) 断面力ごとの検定値が最大となる要素及び断面の評価結果 S s 地震時 (2/2)



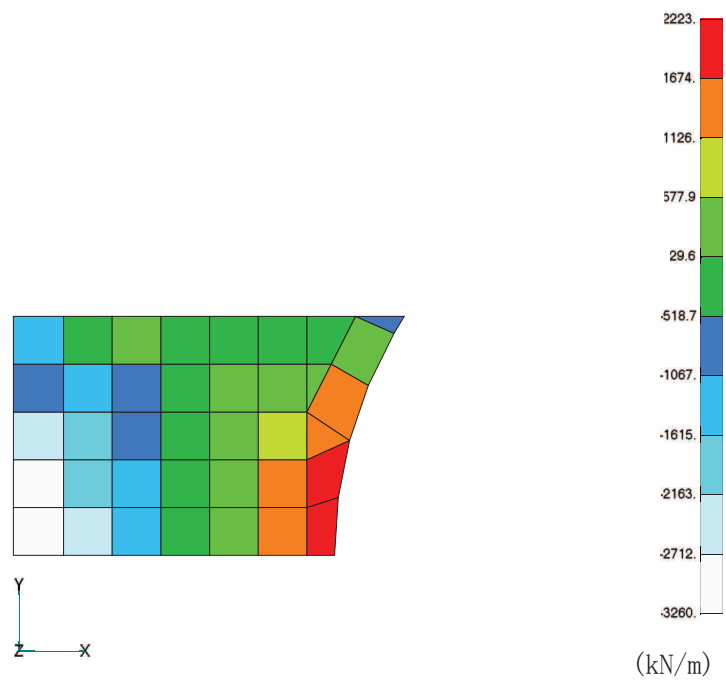
面外せん断力（水平方向，ケース 1-1）

図 2-4 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 北側壁



面外せん断力（鉛直方向，ケース 2-11）

図 2-5 断面の評価部分の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 西側壁



面外せん断力 (EW 方向, ケース 2-11)

図 2-6 断面の評価部位の選定に関する荷重組合せケースの断面力コンター図 底面スラブ

別紙 5 応力解析における応力平均化の考え方

目 次

1. 概要	別紙 5- 1
2. 応力平均化の考え方	別紙 5- 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 5- 2
2.2 応力平均化の方法	別紙 5- 4
2.3 応力平均化の結果	別紙 5- 9
2.4 断面の評価結果	別紙 5-10

1. 概要

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、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)	1.51

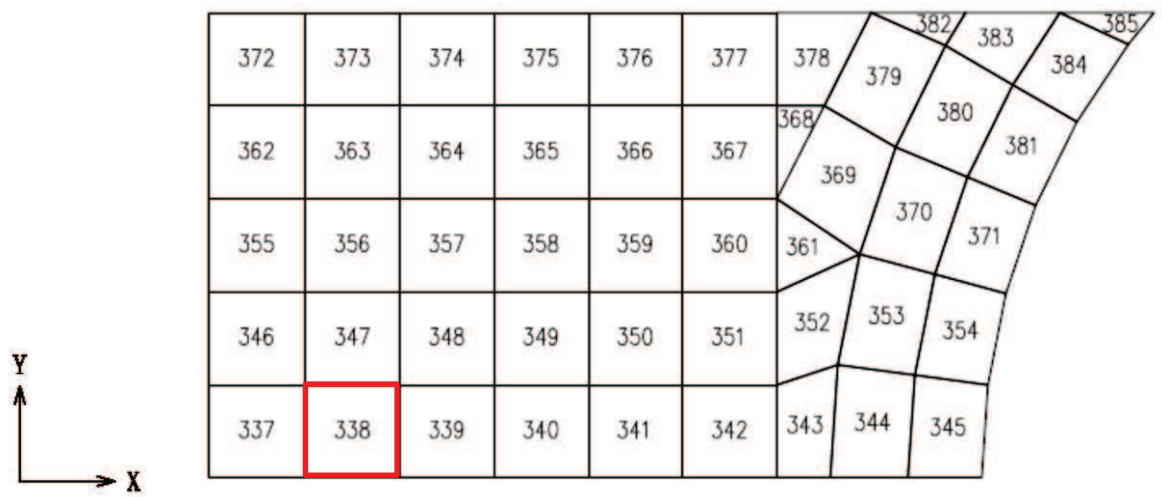


図 2-1 要素位置図

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。

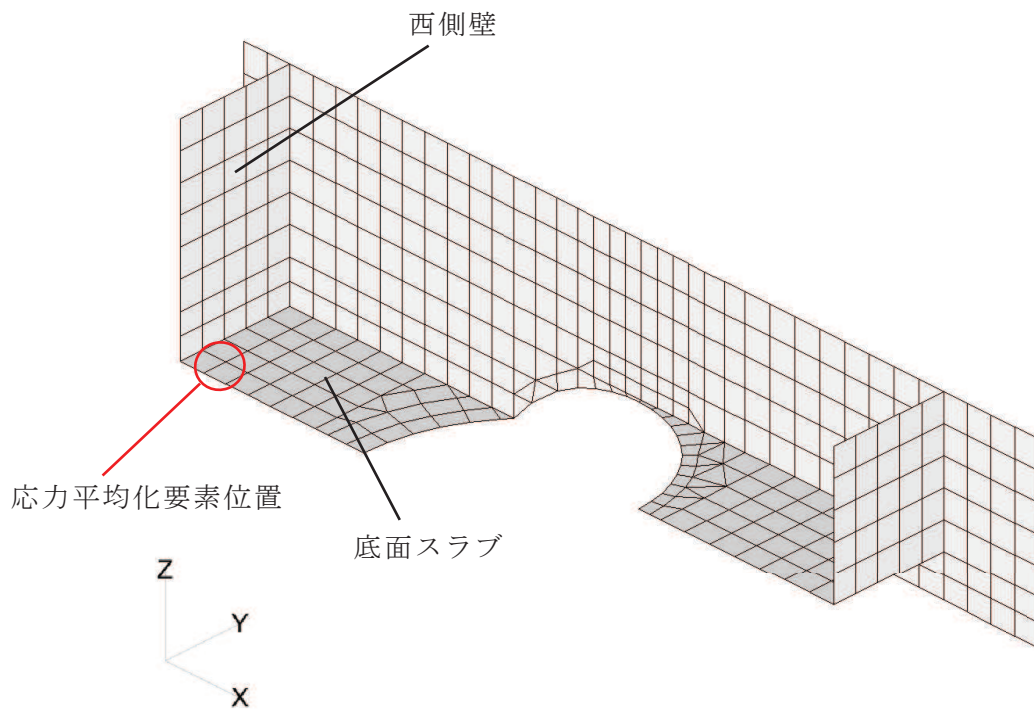
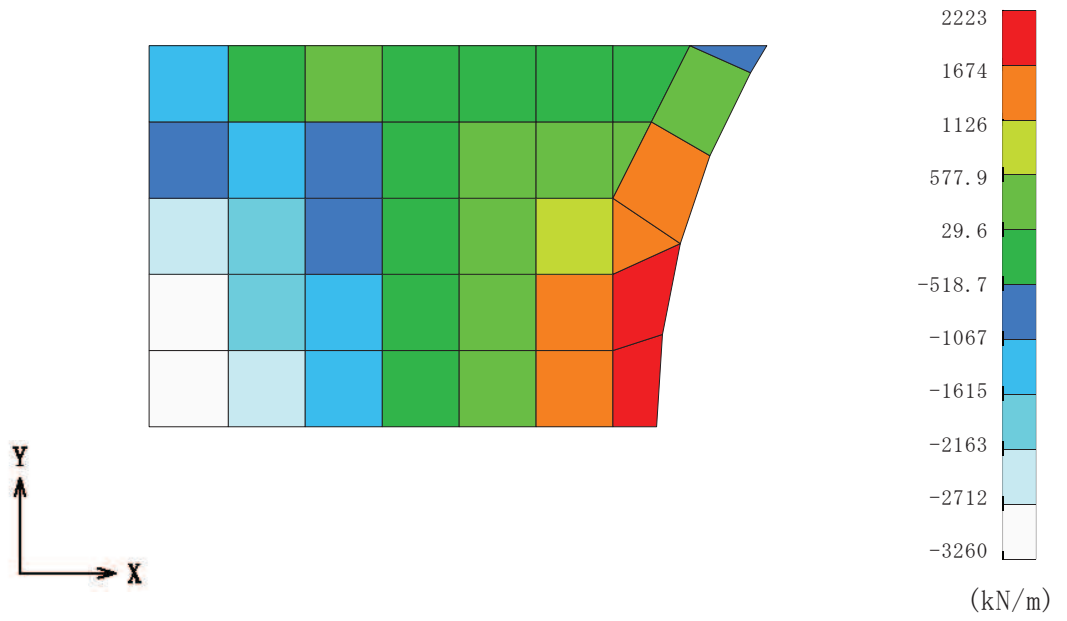


図 2-2 SFP の 3 次元 FEM モデル



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

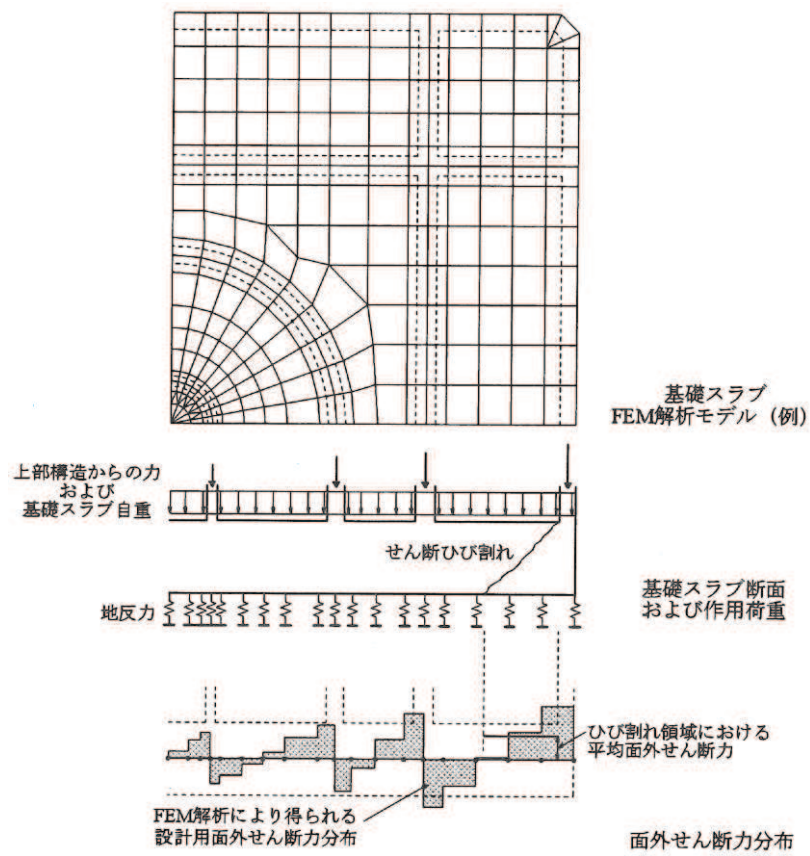


図 2-4 RC-N 規準の付図 2.2

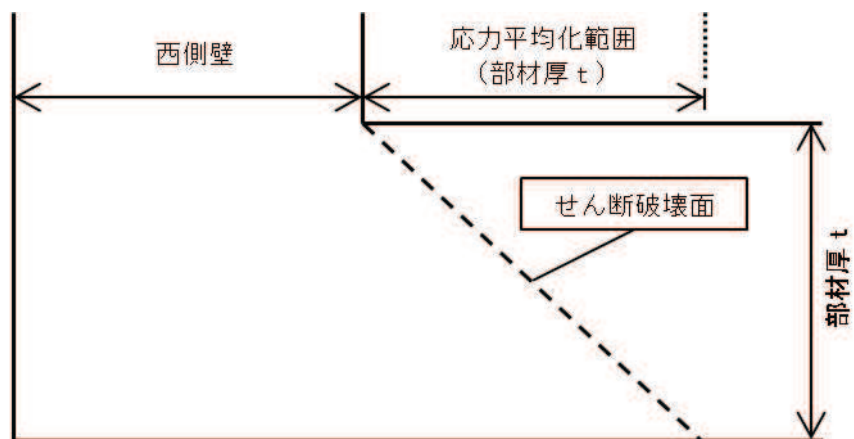


図 2-5 SFP の底面スラブにおける面外せん断力に対する応力平均化の考え方

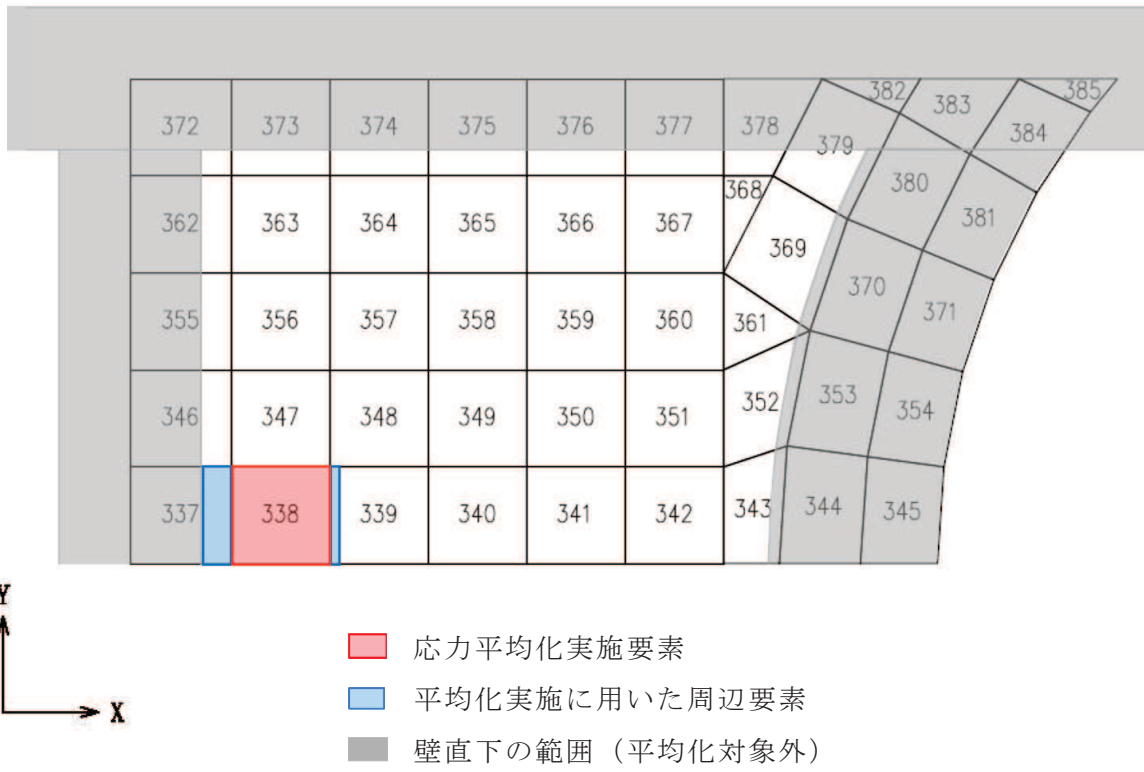


図 2-6 応力平均化範囲

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	2.47	0.65	1.60
			338	1.82	2.08	3.79
			339	0.99	0.27	0.27
合計					3.00	5.66

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	2.47	1.89
			338	1.82	
			339	0.99	

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	1.89	2.59*	0.730

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

別紙 6 剛性低下を考慮した影響検討

目 次

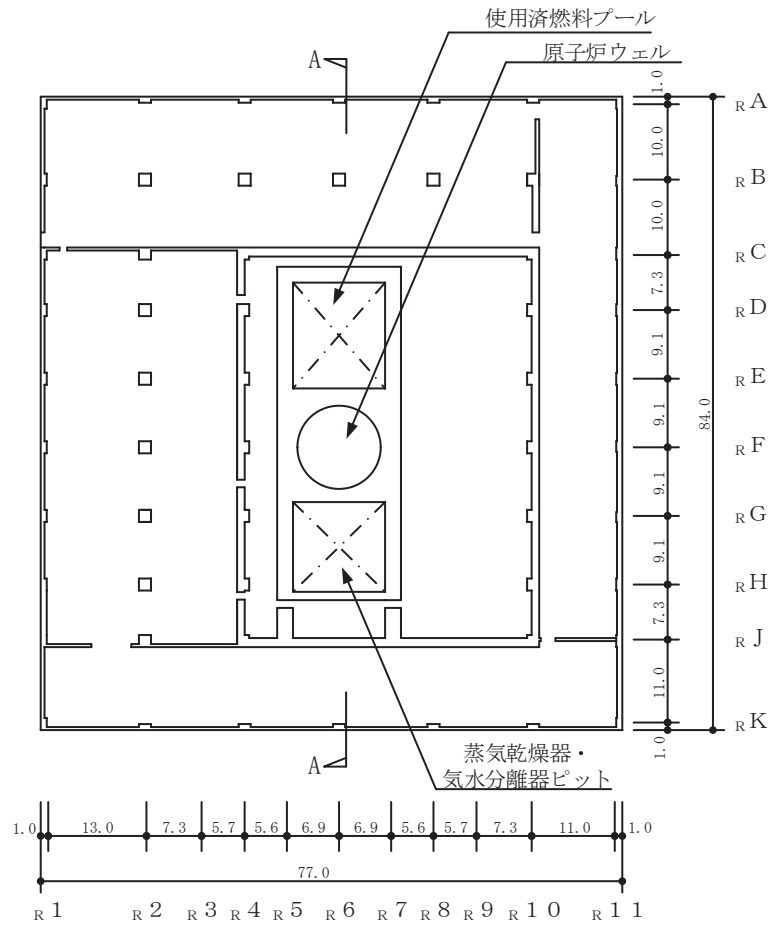
1. 検討の概要	別紙 6- 1
2. 検討方針	別紙 6- 4
3. 荷重及び荷重の組合わせ	別紙 6- 5
4. 使用材料の許容限界	別紙 6- 5
5. 応力解析	別紙 6- 6
6. 評価方法	別紙 6-11
7. 評価結果	別紙 6-11
8. 検討のまとめ	別紙 6-18

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。

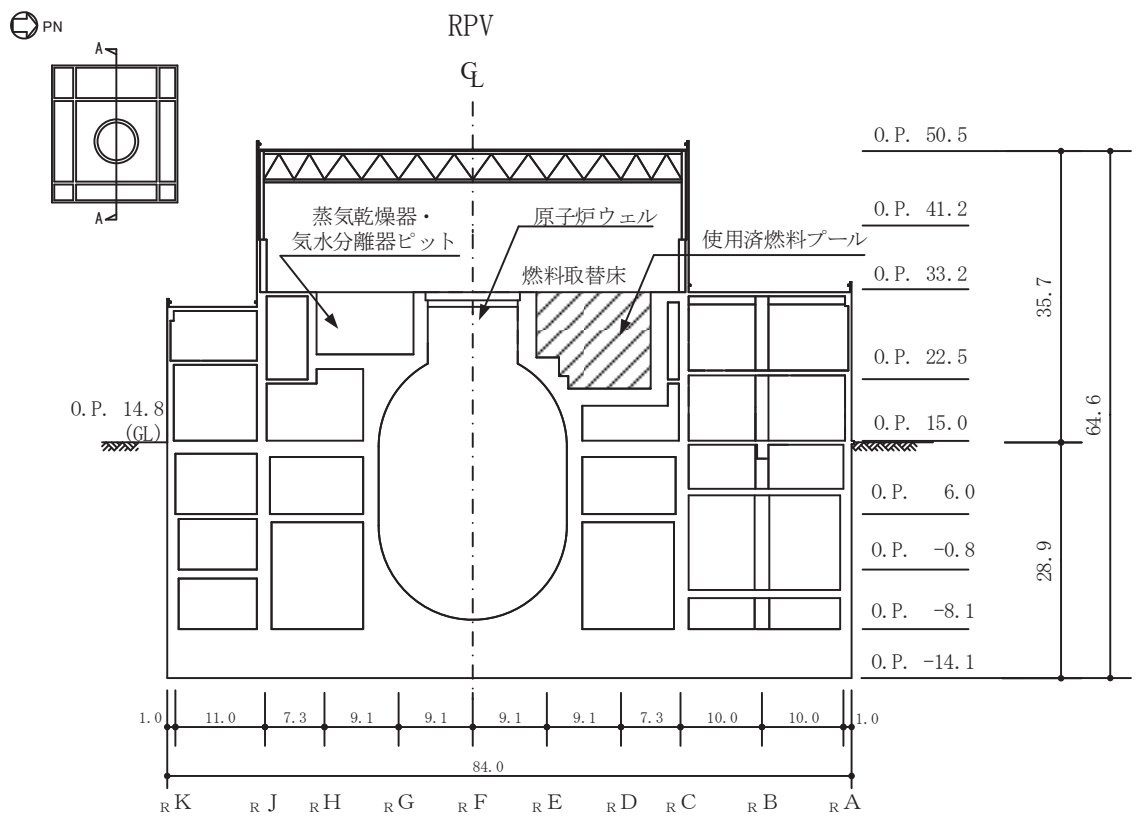
一方、添付書類「VI-2-4-2-1 使用済燃料プール（キャスクピットを含む）（第 1, 2 号機共用）の耐震性についての計算書」（以下「SFP の耐震計算書」という。）では、コンクリート設計基準強度に基づく剛性を設定した評価を行っている。ここでは、S s 地震時を対象として原子炉ウェルの剛性低下を考慮した影響を検討する。

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。材料構成則への反映方法は、コンクリートの材料構成則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。

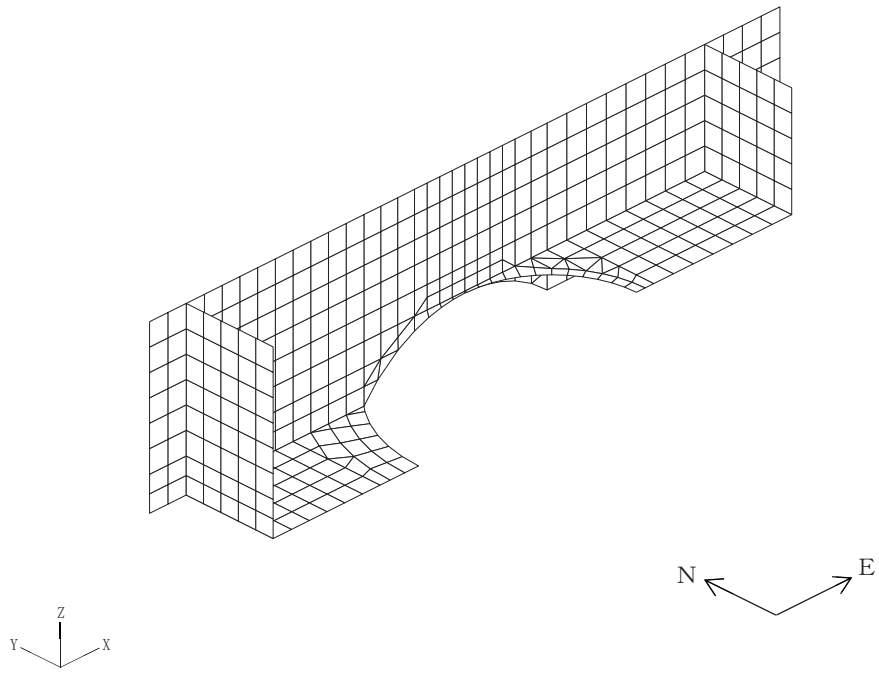
S_s 地震時の応力は、SFP の耐震計算書の「3.5.1 応力解析方法」に示す、次の荷重ケースによる応力を組み合わせて求める。

- 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。

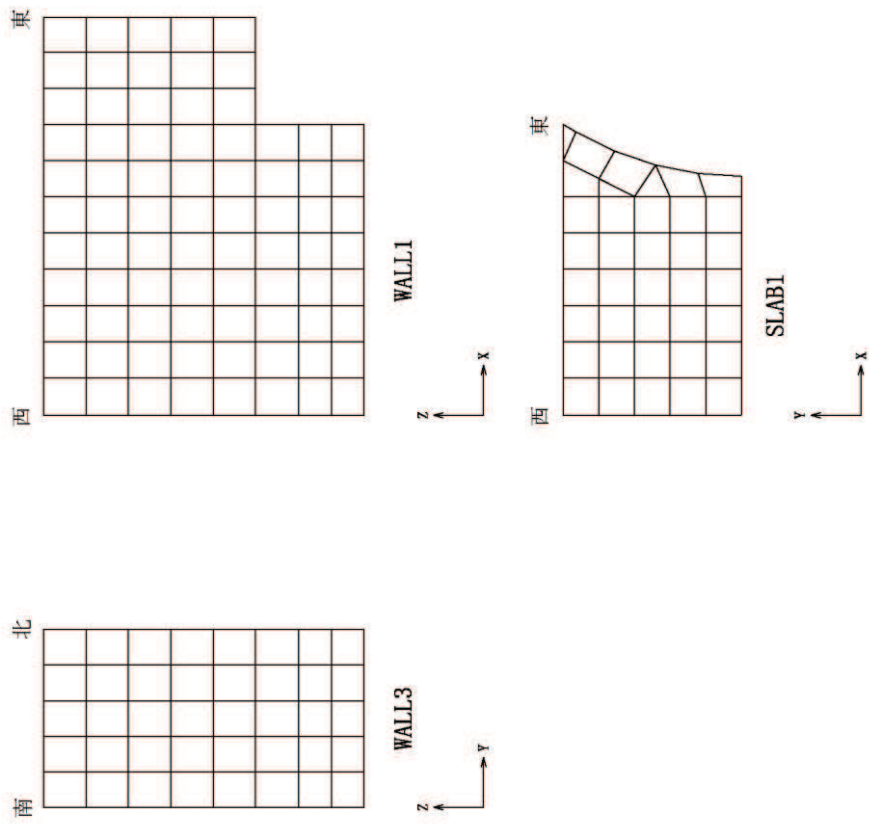
荷重の組合せケースを表 5-1 に示す。

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。

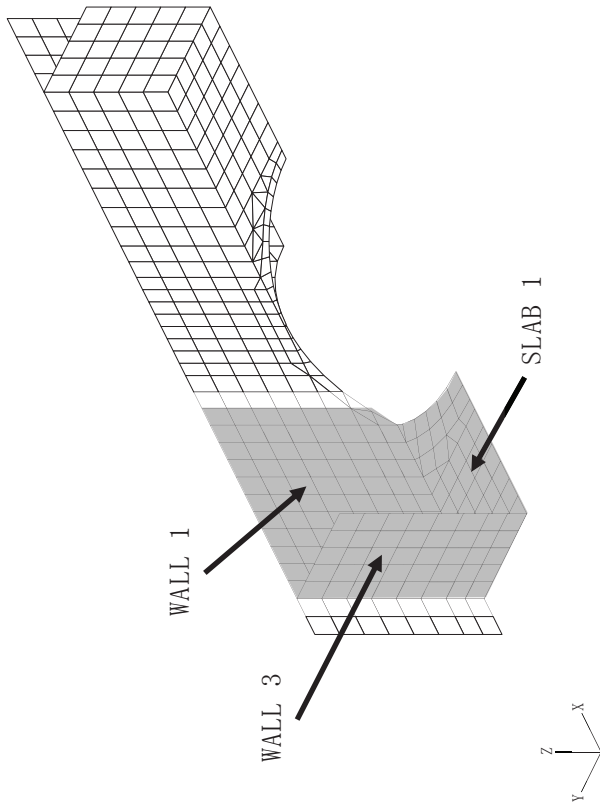


(a) 全体鳥瞰図

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	

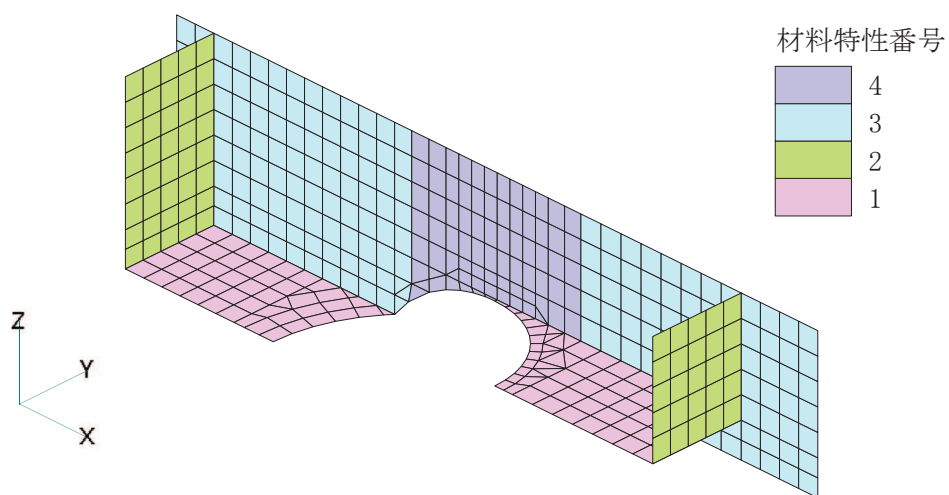


図 5-2 コンクリート物性値（原子炉ウェル剛性低下考慮）

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。

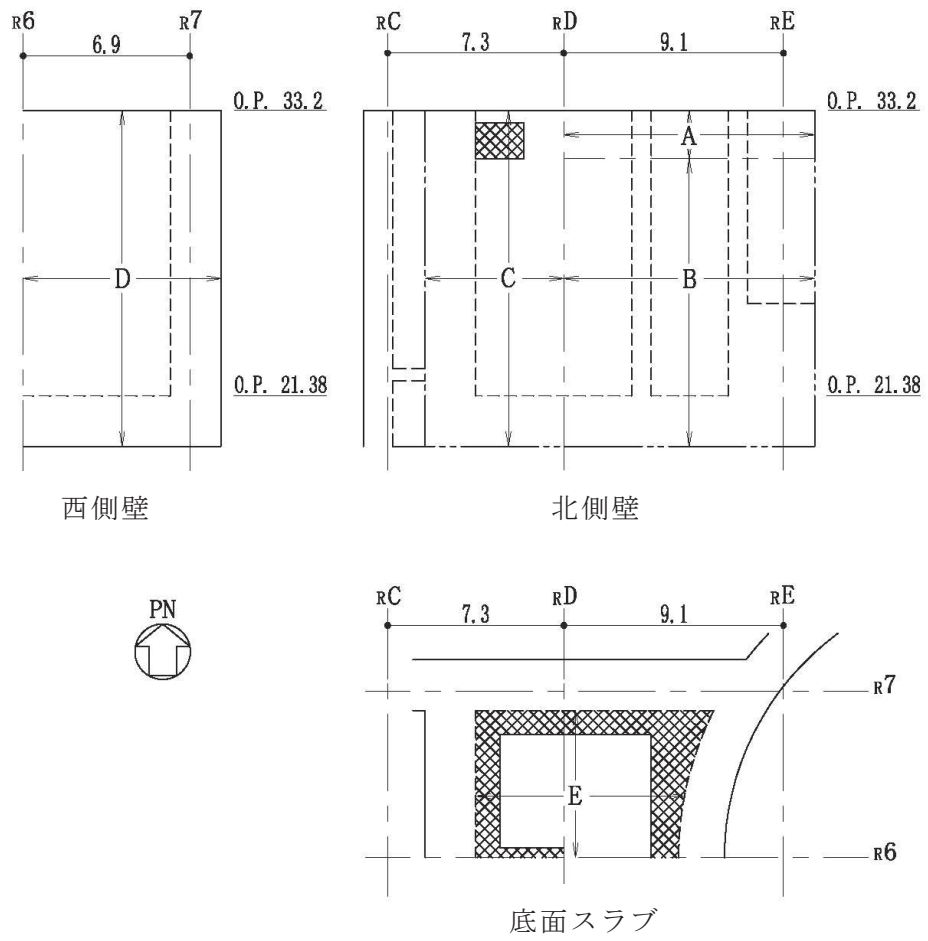
7. 評価結果

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

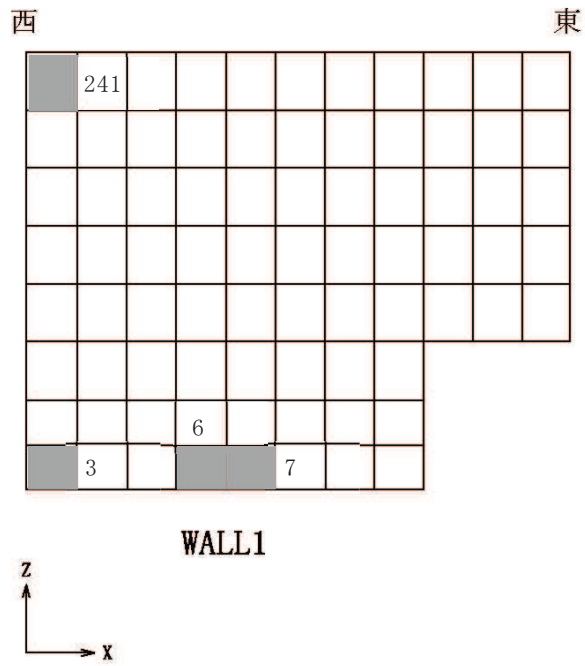
区分	タテ方向	ヨコ方向
A	(内側) 2-D38@200+D38@400 (外側) 2-D38@200+2-D38@400	(内側) 3-D38@200 (外側) 4-D38@200
B	(内側) 2-D38@200+D38@400 (外側) 2-D38@200+2-D38@400	(内側) 3-D38@200 (外側) 3-D38@200+D38@400
C	(内側) 3-D38@200+D38@400 (外側) 3-D38@200	(内側) 2-D38@200+2-D38@400 (外側) 3-D38@200

(b) 西側壁

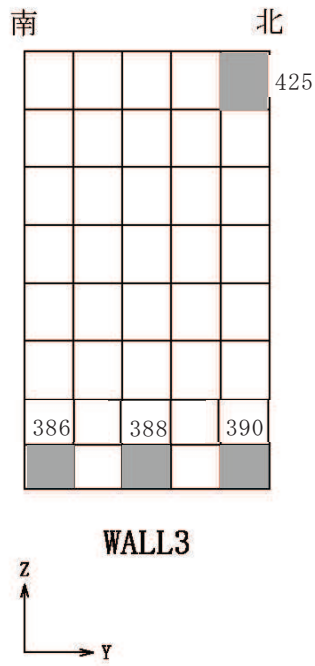
区分	タテ方向	ヨコ方向
D	(内側) D38@200+D38@400 (外側) D38@200+2-D38@400	(内側) 2-D38@200 (外側) 2-D38@200+D38@400

(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

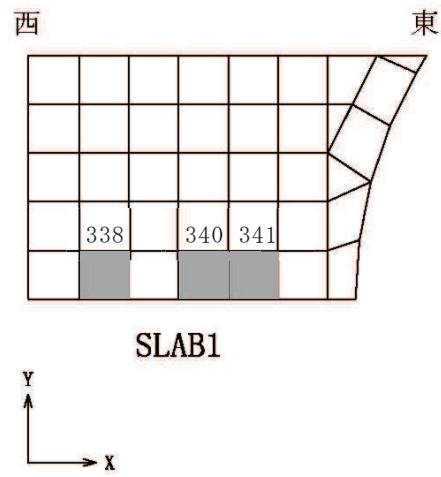


(a) 北側壁



(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 8 使用済燃料貯蔵ラックの地震時反力の検討

目 次

1. 概要 別紙 8-1
2. 解析モデルについて 別紙 8-1
3. 使用済燃料貯蔵ラックと原子炉建屋の質量比較について..... 別紙 8-1
4. まとめ 別紙 8-1

1. 概要

本資料は、使用済燃料貯蔵ラックの地震時反力の検討に関する説明資料であり、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. 解析モデルについて

使用済燃料貯蔵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っている。これは、使用済燃料貯蔵ラックの質量が、躯体に対して大きくないことから、評価上連成させる必要がないと考えられるためである。

以下に、使用済燃料貯蔵ラックと躯体の質量比較を行う。

3. 使用済燃料貯蔵ラックと原子炉建屋の質量比較について

使用済燃料貯蔵ラックと原子炉建屋の質量比較検討結果を表3-1に示す。算出した使用済燃料貯蔵ラックの質量と原子炉建屋の質量を比較した結果、使用済燃料貯蔵ラックの質量は躯体の質量に対して、割合が小さいことを確認した。

表 3-1 質量比較検討結果

検討項目	使用済燃料貯蔵ラック [kN]	原子炉建屋 [kN]
質量	10790* ¹	3414970* ²

注記*1：使用済燃料プール内の使用済燃料貯蔵ラック総質量

*2：VI-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」より質点重量の合計値

4. まとめ

使用済燃料貯蔵ラックの地震時の挙動について、原子炉建屋との質量比較の検討を行った結果、使用済燃料貯蔵ラックは原子炉建屋に対して十分質量が小さいことを確認した。よって、使用済燃料貯蔵ラックの質量はモデル上、固定荷重として考慮すれば、連成の考慮は不要であることを確認した。

以上のことから、使用済燃料プール躯体側の評価としては、固定荷重のみ考慮すれば問題なく、反力の考慮は不要といえる。