

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-19-0610-1_改4
提出年月日	2021年10月25日

補足-610-1 建屋耐震評価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

建屋耐震評価に関する記載内容を補足するための資料を以下に示す。

別紙 1 応力解析モデルでモデル化している部材の扱いについて

別紙 2 新設建屋の設計用地下水位に伴う浮力に関する整理

別紙 3 基礎版及び屋根トラスの応力解析における耐震性に影響を及ぼす要因の整理

本資料は、以下の添付資料の補足説明をするものである。

- ・添付書類「VI-2-2-1 原子炉建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「VI-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟（二次格納施設）の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-9-3-4 原子炉建屋基礎版の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-12 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」
- ・添付書類「VI-2-2-4 制御建屋の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-21 緊急用電気品建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-22 緊急用電気品建屋の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-23 緊急時対策建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-24 緊急時対策建屋の耐震性についての計算書」

別紙 1 応力解析モデルでモデル化している部材の扱いについて

目 次

1. 概要.....	別紙 1- 1
2. 応力解析でモデル化した部位の設計上の扱い.....	別紙 1- 2
2.1 既工認モデルと今回工認モデルの比較（屋根トラス）.....	別紙 1- 4
2.2 既工認モデルと今回工認モデルの比較（基礎版）.....	別紙 1- 6
3. 屋根トラス評価モデルの耐震壁における確認事項.....	別紙 1- 8
3.1 応力分布の比較.....	別紙 1- 8
3.1.1 確認方法.....	別紙 1- 8
3.1.2 解析モデルと解析条件.....	別紙 1-10
3.1.3 燃料取替床レベル上部耐震壁の応力分布の比較結果.....	別紙 1-11
3.2 質点系モデルとの比較.....	別紙 1-20
3.2.1 評価方針.....	別紙 1-20
3.2.2 評価方法.....	別紙 1-20
3.2.3 評価結果.....	別紙 1-21
3.3 気密性に関する確認.....	別紙 1-24
3.3.1 評価方針.....	別紙 1-24
3.3.2 評価方法.....	別紙 1-24
3.3.3 評価結果.....	別紙 1-25
4. 基礎版評価モデルの耐震壁における確認事項.....	別紙 1-26
4.1 評価方針.....	別紙 1-26
4.2 評価方法.....	別紙 1-27
4.2.1 面内せん断力に対する検討.....	別紙 1-27
4.2.2 面外せん断力に対する検討.....	別紙 1-28
4.3 評価結果.....	別紙 1-29
4.3.1 面内せん断力に対する評価結果.....	別紙 1-29
4.3.2 面外せん断力に対する評価結果.....	別紙 1-31

1. 概要

原子炉建屋の耐震性についての計算においては、主たる耐震要素である耐震壁に対して質点系モデルを用いた地震応答解析を実施し、耐震壁が構造強度を有すること、機能維持することを確認している。また、各部の応力解析では、地震応答解析結果を踏まえて、それぞれの評価部位が構造強度を有すること、機能維持することを確認している。

一方で、3次元 FEM モデルを用いた応力解析においては、評価対象部位ではない耐震壁をモデル化しているものもあるため、本資料では建屋の主たる耐震要素である耐震壁について、応力解析により耐震壁に発生している応答値の設計上の扱いの整理、質点系モデルによる応答との傾向の比較を行うものである。

また、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力に対する検討においては、3次元 FEM モデルを用いて建屋全体をモデル化していることから、応力解析モデルと建屋全体 3次元 FEM モデルで発生している応力の分布状況について比較を実施する。

本資料は、以下の添付書類の補足説明をするものである。

- ・添付書類「VI-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟（二次格納施設）の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-9-3-4 原子炉建屋基礎版の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-12 水平 2 方向及び鉛直方向地震力の組合せに関する影響評価結果」

2. 応力解析でモデル化した部位の設計上の扱い

原子炉建屋の各部位の 3 次元 FEM モデルを用いた応力解析のうち，屋根トラス及び基礎版評価におけるそれぞれの解析モデルでモデル化している範囲と申請上の位置付けを整理して表 2-1 に示す。

3 次元 FEM モデルによる応力解析においてモデル化している部材は，評価対象部位に発生する応力を精緻に算定するためにモデル化しており，評価対象部位以外の部材は評価対象部位を評価するために必要十分な精度のモデル化としているものの，評価対象部位以外の部材を直接評価するためにモデル化した部材ではない。例えば，屋根トラスを主な評価対象部位としている燃料取替床レベル上部の 3 次元弾塑性 FEM モデルでは，評価対象としていない耐震壁は線形でモデル化している。したがって，評価対象部位以外の部材に発生する応力等は設計に直接反映しないこととしている。

しかし，評価対象部位以外の部材においても解析上応力を負担していることから，その応力発生状況が他の解析モデルと大きく異なることを主たる耐震要素である耐震壁に対して確認することとする。確認する対象は，既工認から新たに耐震壁をモデル化した屋根トラスの応力解析及び既工認から耐震壁のモデル化を梁要素からシェル要素に変更した基礎版の応力解析について実施する。

既工認モデルと今回工認モデルの差異は，屋根トラスの応力解析モデルについては「2.1 既工認モデルとの今回工認モデルの比較（屋根トラス）」に，基礎版の応力解析モデルについては「2.2 既工認モデルと今回工認モデルの比較（基礎版）」に示す。

表 2-1 応力解析モデルでモデル化している部材と申請上の位置付けの整理

応力解析モデル	評価目的	評価対象部位 (評価結果を設計に反映する部位)	評価対象部位以外 でモデル化している部材	モデル化している 耐震壁における確認事項	備考
屋根トラス	屋根トラスが基準地震動 S_s に対して、屋根スラブを支持できる構造強度を有すること、屋根トラス自体が構造強度を有することを確認する	屋根トラス (主トラス, サブトラス, 母屋, 方杖)	<ul style="list-style-type: none"> ・燃料取替床レベル上部の耐震壁 (燃料取替床レベル上部 [O. P. 33. 2m より上部]) ・屋根スラブ 	<ul style="list-style-type: none"> ①建屋全体 3 次元 FEM モデルとの応力分布の比較 ②質点系モデルとの面内せん断ひずみの比較 ③屋根トラス評価モデルによる面内せん断ひずみの確認 (気密性への影響確認) 	既工認ではモデル化していない燃料取替床レベル上部の耐震壁をモデル化
基礎版	基礎版が基準地震動 S_s に対して、機器・配管系等の設備を支持する機能を損なわないこと、構造強度を有することを確認する	基礎版	<ul style="list-style-type: none"> ・耐震壁 (地下階 [O. P. -8. 1~O. P. 15. 0m]) ・床スラブの一部 	<ul style="list-style-type: none"> ①面内せん断ひずみの確認 ②面外せん断力の確認 	既工認では梁要素でモデル化していた耐震壁を一部シェル要素でモデル化

2.1 既工認モデルと今回工認モデルの比較（屋根トラス）

屋根トラスの解析モデルは、既工認では主トラス構面を2次元フレームとしてモデル化し、主トラス及び同じ構面の鉄筋コンクリート造（一部、鉄骨鉄筋コンクリート造）の柱・梁をモデル化対象としている。このモデルにおいては、屋根スラブ、燃料取替床上部の耐震壁は考慮していない。

一方、今回工認時では、サブトラス、屋根スラブ、燃料取替床上部の耐震壁を含む、燃料取替床上部の架構を3次元FEMの立体架構モデルとしている。

今回工認時において新しくモデル化した部材は、サブトラス、屋根スラブ、燃料取替床上部の耐震壁であり、これらの部材を追加した目的は、燃料取替床上部の架構を精緻にモデル化することにより、各部材による拘束効果や部材間の荷重伝達等の屋根トラスの立体的な挙動を考慮できるモデルとするためである。

既工認と今回工認における屋根トラスの応力解析モデルの比較を表2-2に示す。

表 2-2 屋根トラスの応力解析モデルの比較

項目	内容	既工認	今回工認
解析手法		・ 2次元フレームモデルを用いた応力解析 (静的弾性解析)	・ 3次元 FEM モデルを用いた応力解析 (時刻歴弾塑性解析)
解析コード		・ S D	・ fappase
解析モデル	モデル化範囲	1F, O.P. 15.0m より上部の柱, はり部材をモデル化し, フレーム構面内にある 1 階, 2 階の壁の影響を考慮する。 フレーム構面内の燃料取替床レベル (3F, O.P. 33.2m) より上部の壁はモデル化していない	燃料取替床レベル (3F, O.P. 33.2m) より上部の鉄筋コンクリート造, 鉄骨鉄筋コンクリート造及び鉄骨造部分をモデル化する。
	要素種別	<ul style="list-style-type: none"> ・ はり要素: 主トラスの上下弦材, 柱, はり ・ トラス要素: 主トラスの斜材, 束材 ・ シェル要素: 1 階, 2 階の壁 	<ul style="list-style-type: none"> ・ はり要素: 主トラス及びサブトラスの上下弦材, 母屋, 柱, はり ・ トラス要素: 主トラス及びサブトラスの斜材・束材, 方杖, 壁面補強ブレース ・ シェル要素: 既設耐震壁, 追設耐震壁, 間仕切壁, スラブ
	モデル図		

2.2 既工認モデルと今回工認モデルの比較（基礎版）

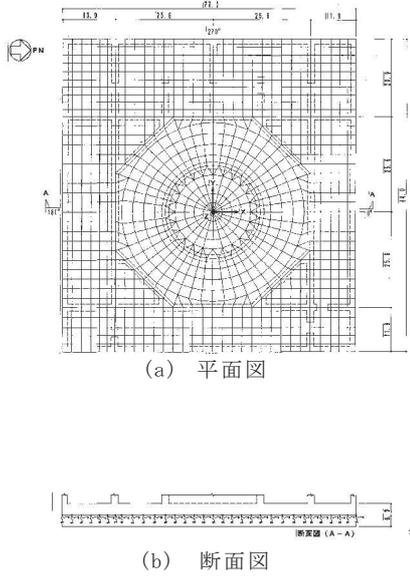
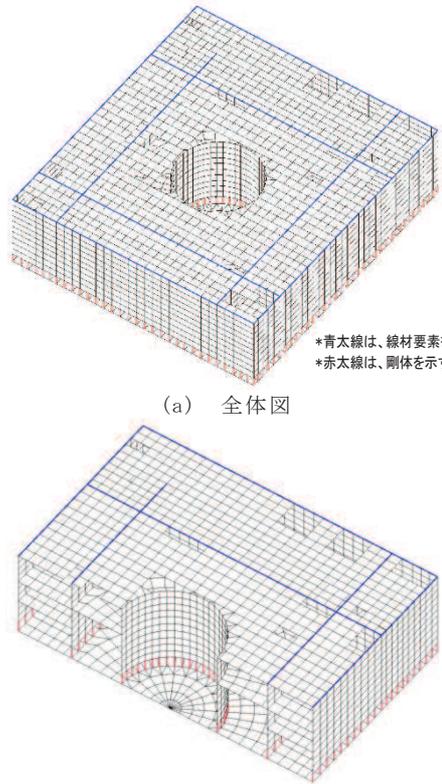
既工認時は、基礎版をシェル要素でモデル化し、基礎版に対する拘束部材としてボックス壁、火打ち壁、シェル壁等の剛性の高い上部壁を等価な剛性を考慮したはり要素でモデル化している。本来、基礎版より上階において直交する耐震壁は相互につながっているが、その効果は考慮されない。

一方、今回工認時では、地下3階、地下2階及び地下1階の耐震壁をシェル要素でモデル化し、地下2階、地下1階及び1階の床スラブをシェル要素でモデル化している。

今回工認モデルにおいて地下3階、地下2階、地下1階の耐震壁及び地下2階、地下1階、1階の床スラブをシェル要素でモデル化することは、基礎版に対する上部構造の立体的な形状による剛性を拘束効果として表現することを目的として採用している。既工認時にははり要素で考慮していた基礎版に対する面外剛性に加えて、耐震壁の面外剛性、面内剛性も考慮されることとなり、これらの壁及び床スラブが全体として基礎版への拘束部材となり、より実状に近い構造挙動となる。

既工認と今回工認における基礎版の応力解析モデルの比較を表2-3に示す。

表 2-3 原子炉建屋基礎版の応力解析モデルの比較

項目	内容	既工認	今回工認
解析手法		・ 3次元 FEM モデルを用いた応力解析 (弾性解析)	・ 3次元 FEM モデルを用いた応力解析 (弾塑性解析)
解析コード		・ NASTRAN	・ ABAQUS
解析モデル	モデル化範囲	(基礎版部分) ・ 基礎版 (上部構造モデル部分) ・ 基礎版より立ち上がる耐震壁	(基礎版部分) ・ 同左 (上部構造モデル部分) ・ 基礎版より立ち上がる耐震壁及び床スラブ
	要素種別	・ 基礎版全体をシェル要素でモデル化 ・ 外部、内部ボックス壁、火打ち壁、シェル壁等の剛性の高い壁は、等価な剛性を考慮したはり要素でモデル化	・ 基礎版全体をシェル要素でモデル化 ・ 地下部分の一部はシェル要素でモデル化し、壁及び床スラブの立体的な形状による剛性への寄与を考慮
	モデル図	 <p>(a) 平面図</p> <p>(b) 断面図</p>	 <p>(a) 全体図</p> <p>(b) 西側半分図化</p> <p>*青太線は、線材要素を示す。 *赤太線は、剛体を示す。</p>

3. 屋根トラス評価モデルの耐震壁における確認事項

屋根トラス評価モデルにおいても燃料取替床レベル上部が 3 次元 FEM でモデル化されている。一方、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力に対する検討においては、3 次元 FEM モデルを用いて建屋全体をモデル化している。そこで、両モデルにおいて共通にモデル化されている燃料取替床レベル上部の既設耐震壁について、応力分布の比較を行う。ただし、検討している地震動は、屋根トラスの評価では基準地震動 S_s 、水平 2 方向及び鉛直方向の地震力に対する検討では弾性設計用地震動 S_d と異なるため、基準化した応力分布による比較を実施する。

また、燃料取替床レベル上部の既設耐震壁は、気密性を担保する躯体となっているため、面内せん断ひずみについて設計で用いている質点系モデルの応答と比較し、屋根トラス評価モデルと質点系モデルの応答性状を確認する。さらに、屋根トラス評価モデルの耐震壁の各要素において発生する局所的な面内せん断ひずみにおいても気密性が確保されていることを確認する。

3.1 応力分布の比較

3.1.1 確認方法

屋根トラス評価モデルは、燃料取替床レベルより上部の耐震壁、鉄骨造の屋根トラス等を立体的にモデル化している。この屋根トラス評価を目的としたモデルでは、屋根トラス自体の評価を主に検討していたが、ここでは燃料取替床レベルより上部の既設耐震壁の応力について、建屋全体をモデル化した 3 次元 FEM モデルによる評価結果と発生する応力分布について比較考察した結果を示す。

図 3-1 に屋根トラス評価モデルと建屋全体 3 次元 FEM モデルを示す。

3.1.2 解析モデルと解析条件

屋根トラス評価モデルと建屋全体をモデル化した 3 次元 FEM モデルについて、解析モデルと解析条件を比較して表 3-1 に示す。

また、屋根トラス評価モデルでは屋根トラスの弾塑性特性を考慮して基準地震動 S_s に対する検討を行っており、建屋全体 3 次元 FEM モデルでは弾性応答解析のため弾性設計用地震動 S_d に対する検討を行っているため検討に用いる地震動はそれぞれ基準地震動 $S_s - D2$ 及び弾性設計用地震動 $S_d - D2$ とする。地震動の入力レベルの違いがあることから応力分布の傾向について比較を実施する。

表 3-1 屋根トラス評価モデルと建屋全体 3 次元 FEM モデルの解析条件の比較

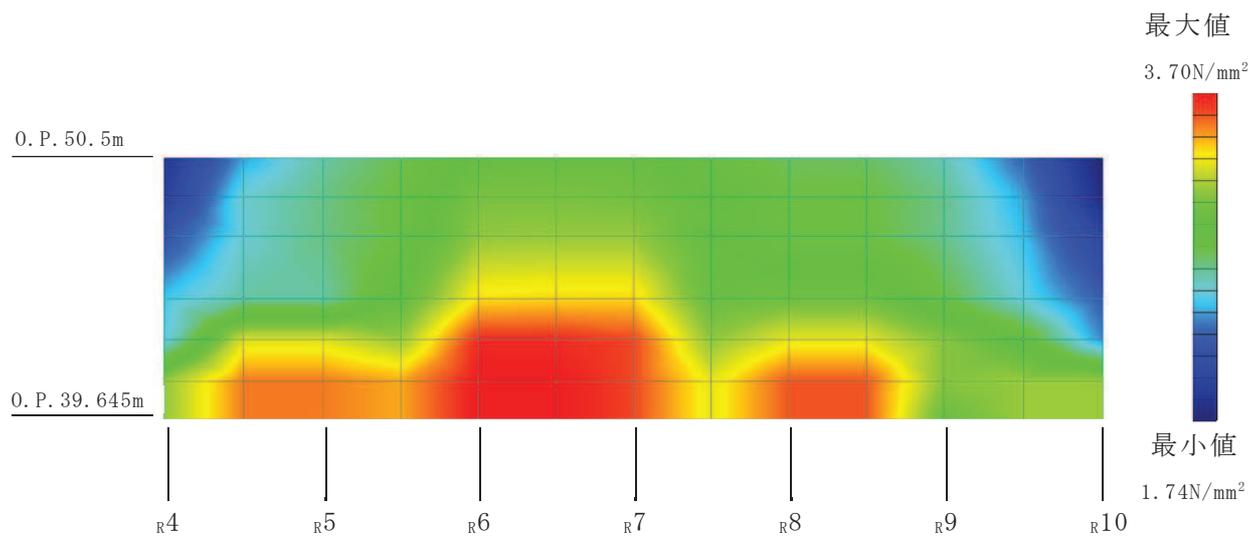
項 目	屋根トラス評価モデル	建屋全体 3 次元 FEM モデル
モデル化範囲	燃料取替床レベル（3F, O.P. 33.2m）より上部	建屋全体
燃料取替床レベル上部耐震壁の補強	モデル化に反映	モデル化に反映
屋根トラスの補強	モデル化に反映	接合部補強の重量を考慮（質点系モデルと対応）
屋根スラブの面外剛性	非考慮	考慮
屋根トラスの非線形性	考慮（但し、結果は弾性）	非考慮
既設耐震壁の初期剛性	初期剛性低下を考慮（方向別に設定）	初期剛性低下を考慮（方向別に設定）
耐震壁の非線形性	非考慮	非考慮
検討に用いる地震動	$S_s - D2$	$S_d - D2$
入力方向と組合せ	NS+UD, EW+UD	NS+UD, EW+UD
地震動入力位置	燃料取替床レベル	基礎底面位置
解析モデルの境界条件	燃料取替床レベルで固定	基礎底面位置で地盤ばね支持

3.1.3 燃料取替床レベル上部耐震壁の応力分布の比較結果

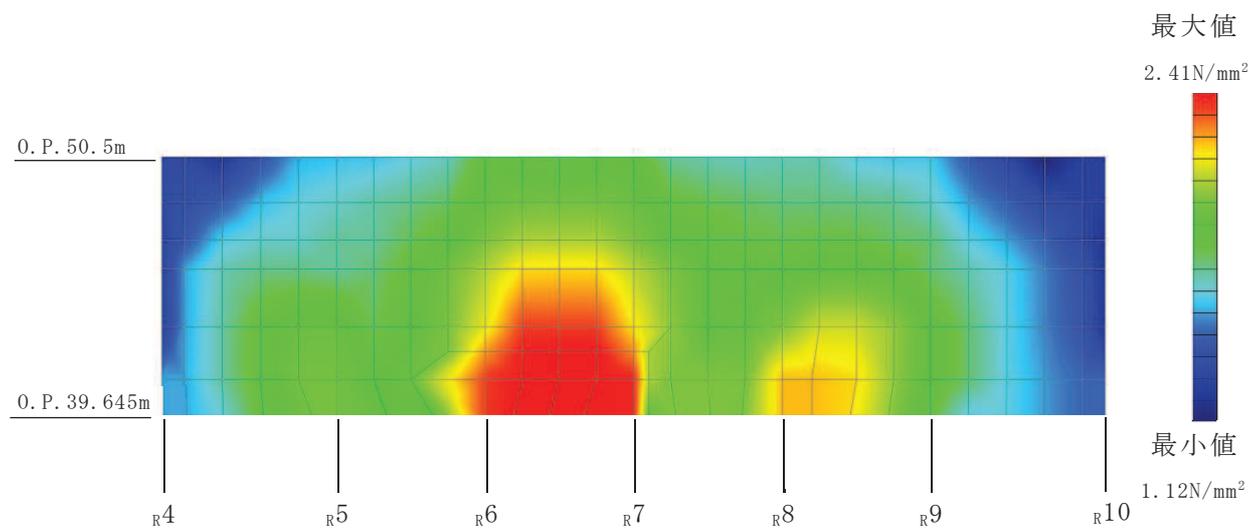
燃料取替床レベル（3F, O.P. 33.2m）より上部の既設耐震壁に発生する面内せん断応力について、屋根トラス評価モデルによる解析結果と建屋全体 3次元 FEM モデルによる解析結果を比較して、図 3-2～図 3-9 に示す。なお、屋根トラス評価モデルの結果は基準地震動 S_s に対する結果であり、建屋全体 3次元 FEM モデルの結果は弾性設計用地震動 S_d に対する結果であることから、直接的な数値の比較ではなく壁厚の異なる O.P. 33.2m～O.P. 39.645m 及び O.P. 39.645m～O.P. 50.5m それぞれにおいて最大値と最小値で基準化した応力コンター図による応力分布を示す。

これらより、屋根トラス評価モデルと建屋全体 3次元 FEM モデルの燃料取替床レベル上部の既設耐震壁に発生する面内せん断応力の分布に大きな違いはないことが確認できる。また、図 3-3 を見ると、追設耐震壁を設置している $R_5 \sim R_6$ 通り間、 $R_7 \sim R_8$ 通り間では追設耐震壁に応力が流れていることから両モデルとも応力が小さいことを示す青系の色となっており、図 3-5、図 3-7 においても同様に追設耐震壁を設置している部分では両モデルともに応力が小さくなる傾向を確認できる。

なお、南面の開口形状は、建屋全体 3次元 FEM モデルでは開口形状を比較的忠実にモデル化しているが、屋根トラス評価モデルではメッシュ形状を変形させない範囲で近似的にモデル化しているため、開口形状が若干異なっている。

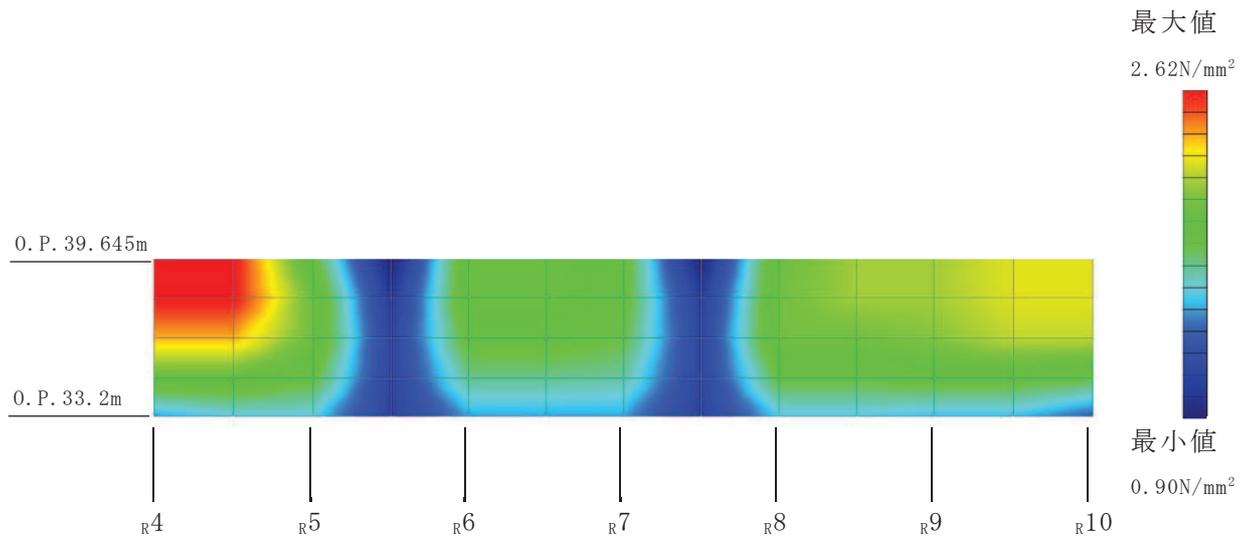


(a) 屋根トラス評価モデル

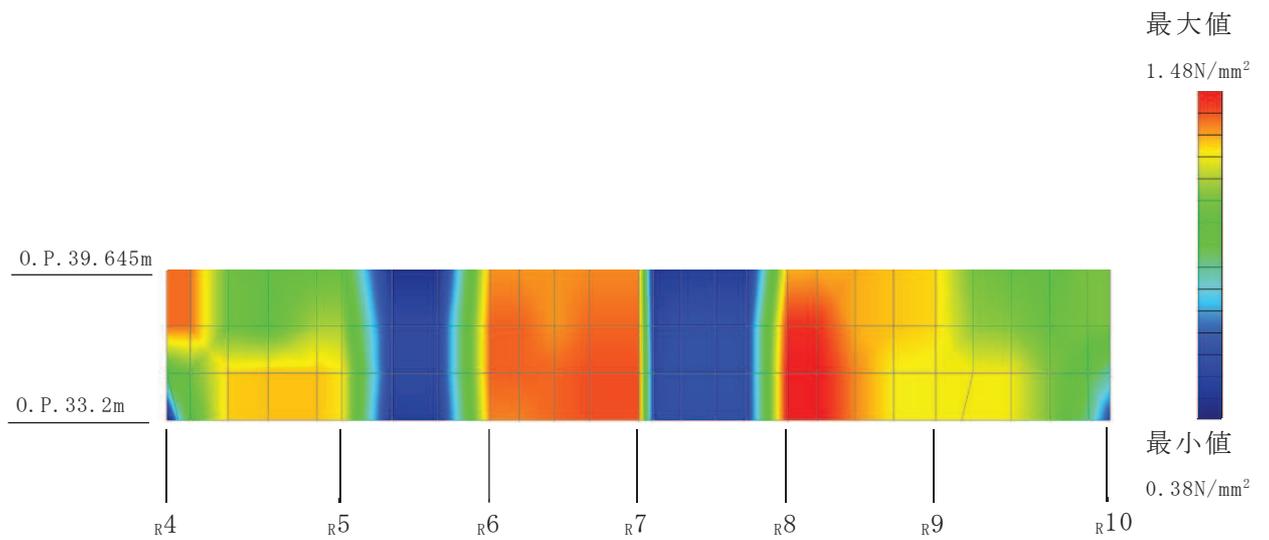


(b) 建屋全体 3次元 FEM モデル

図 3-2 NS+UD 入力時の東面 (R_J 通り) の面内せん断応力分布
(0. P. 39. 645m ~ 0. P. 50. 5m)

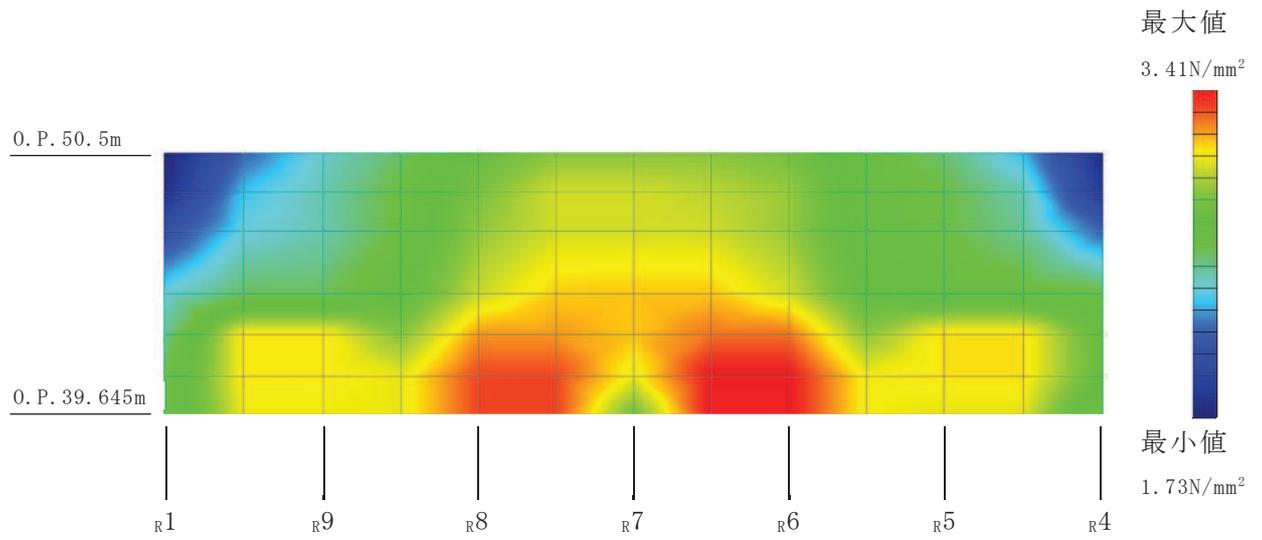


(a) 屋根トラス評価モデル

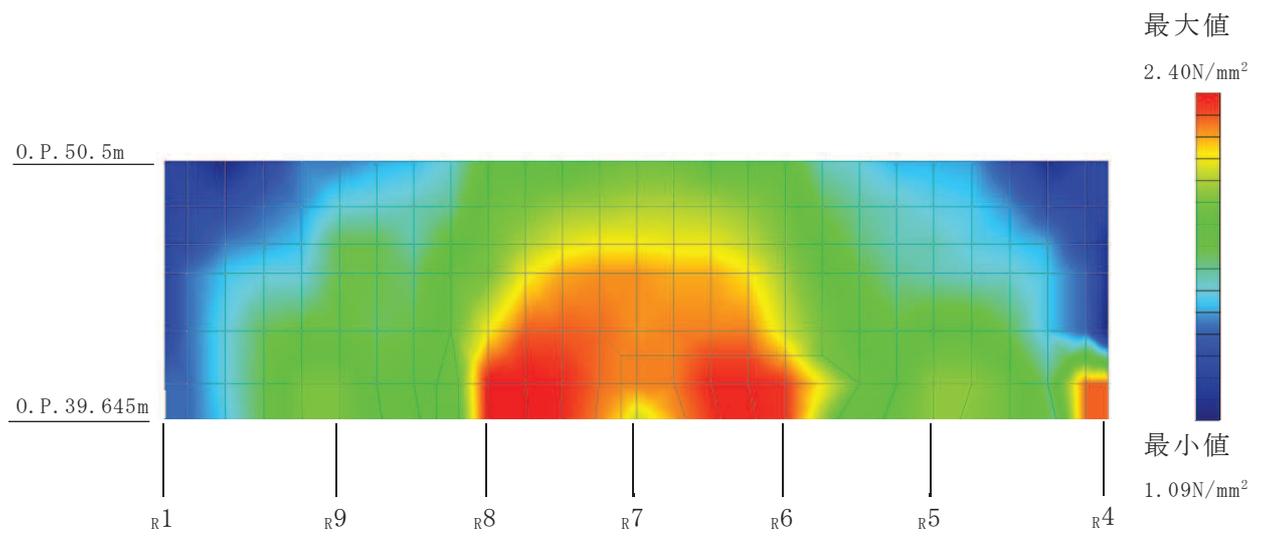


(b) 建屋全体 3次元 FEM モデル

図 3-3 NS+UD 入力時の東面 (R_J 通り) の面内せん断応力分布
(O.P. 33.2m ~ O.P. 39.645m)

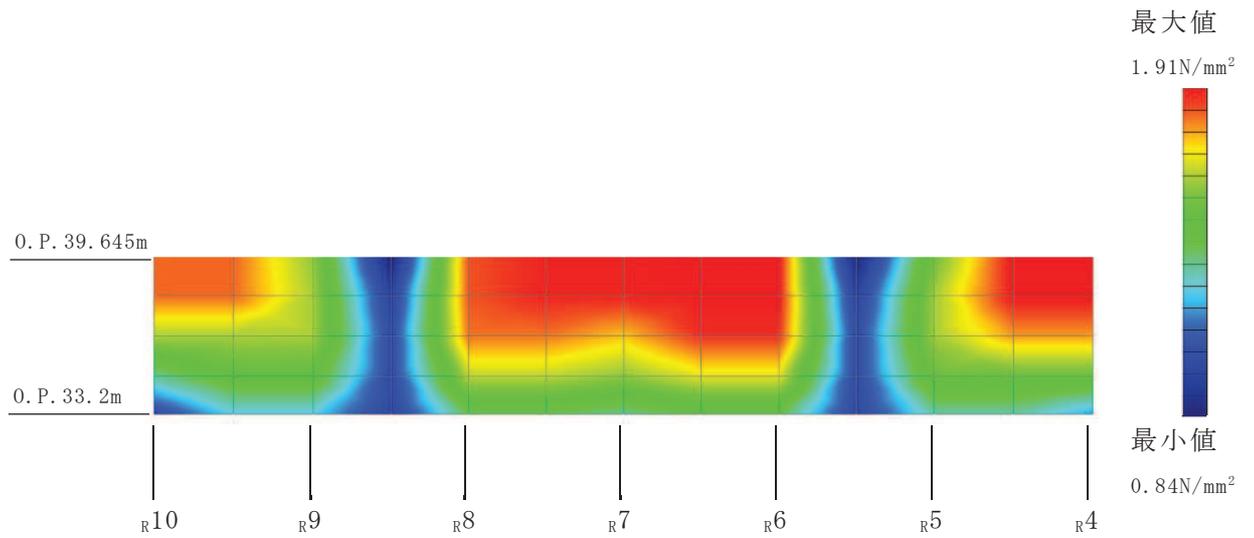


(a) 屋根トラス評価モデル

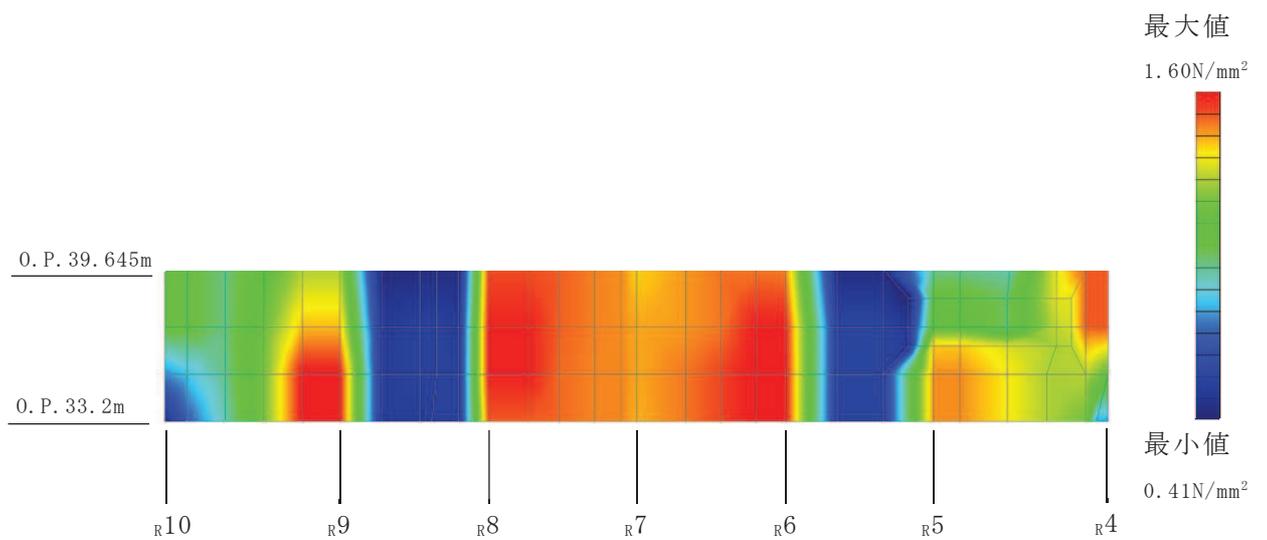


(b) 建屋全体 3次元 FEM モデル

図 3-4 NS+UD 入力時の西面 (R_C 通り) の面内せん断応力分布
(0. P. 39.645m ~ 0. P. 50.5m)

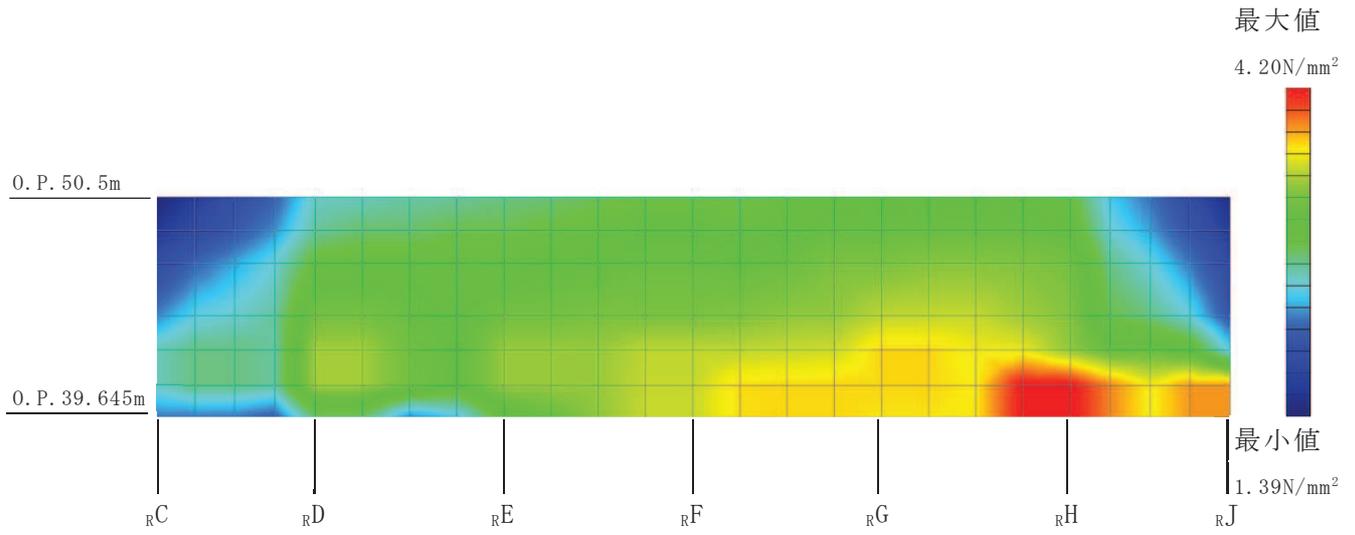


(a) 屋根トラス評価モデル

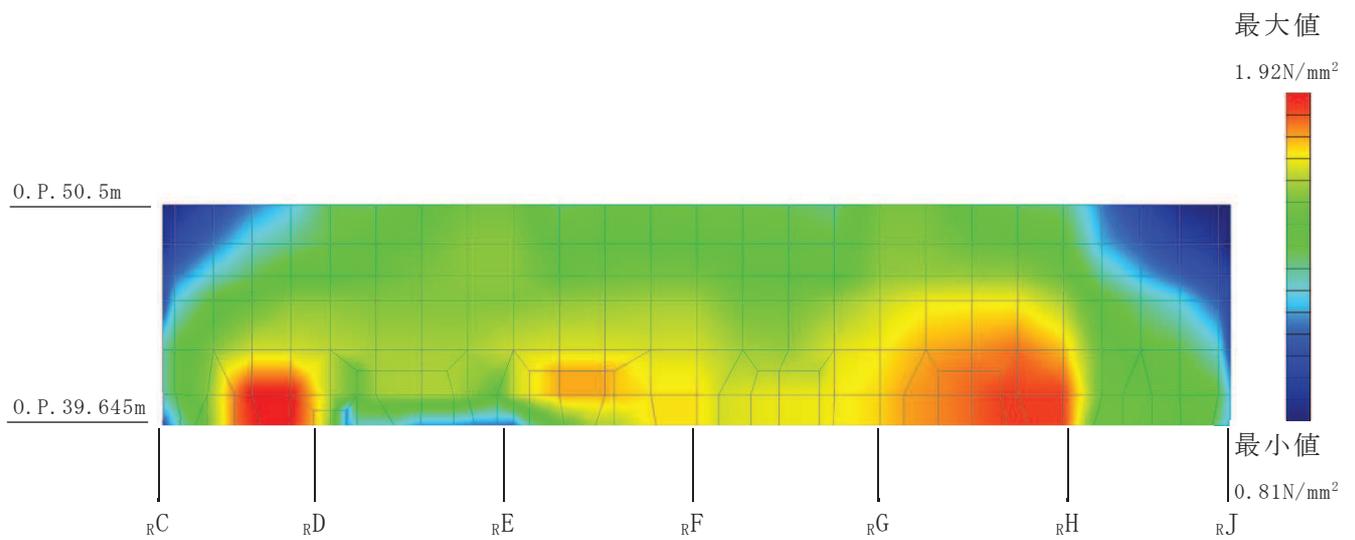


(b) 建屋全体 3次元 FEM モデル

図 3-5 NS+UD 入力時の西面 (R_C 通り) の面内せん断応力分布
(O. P. 33.2m ~ O. P. 39.645m)

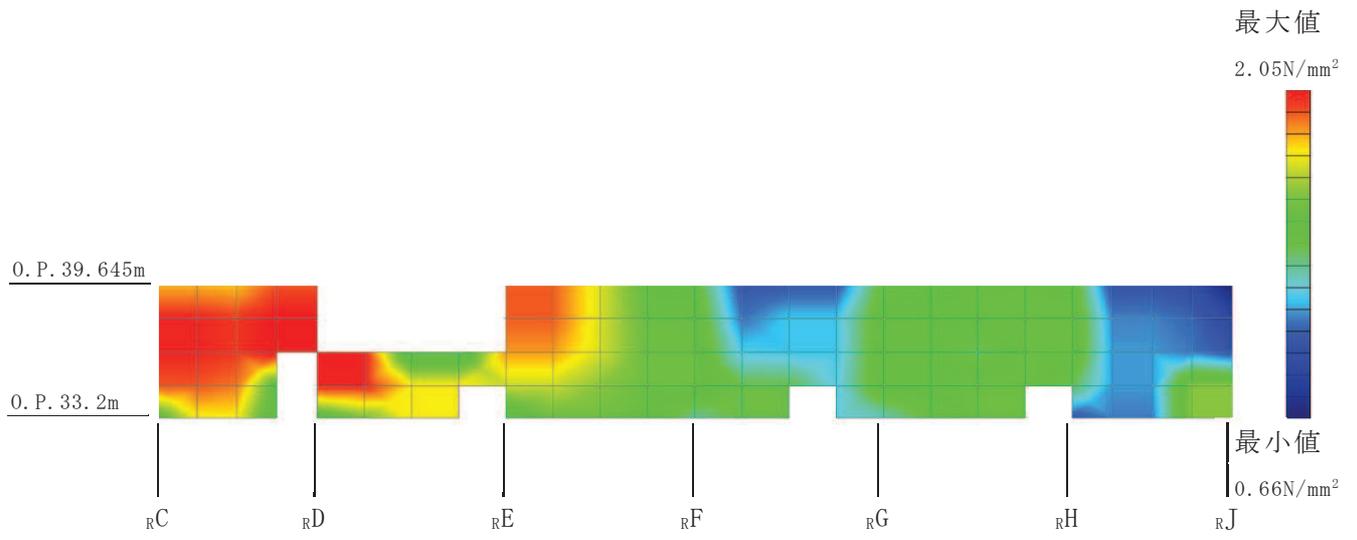


(a) 屋根トラス評価モデル

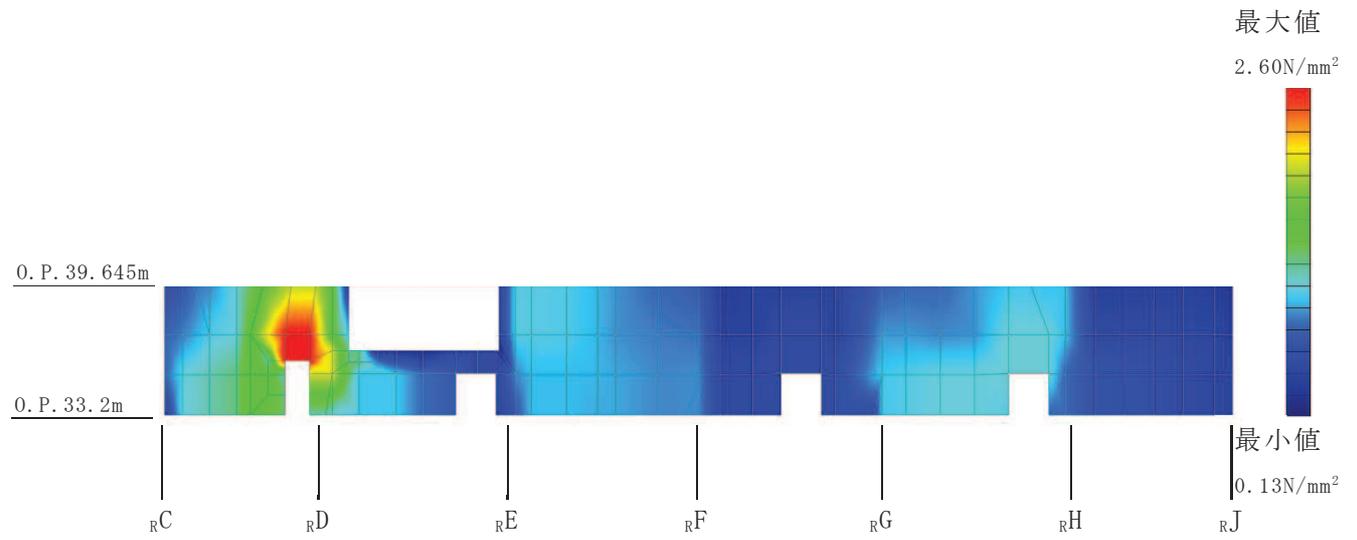


(b) 建屋全体 3次元 FEM モデル

図 3-6 EW+UD 入力時の南面 (R₄ 通り) の面内せん断応力分布
(O.P. 39.645m ~ O.P. 50.5m)

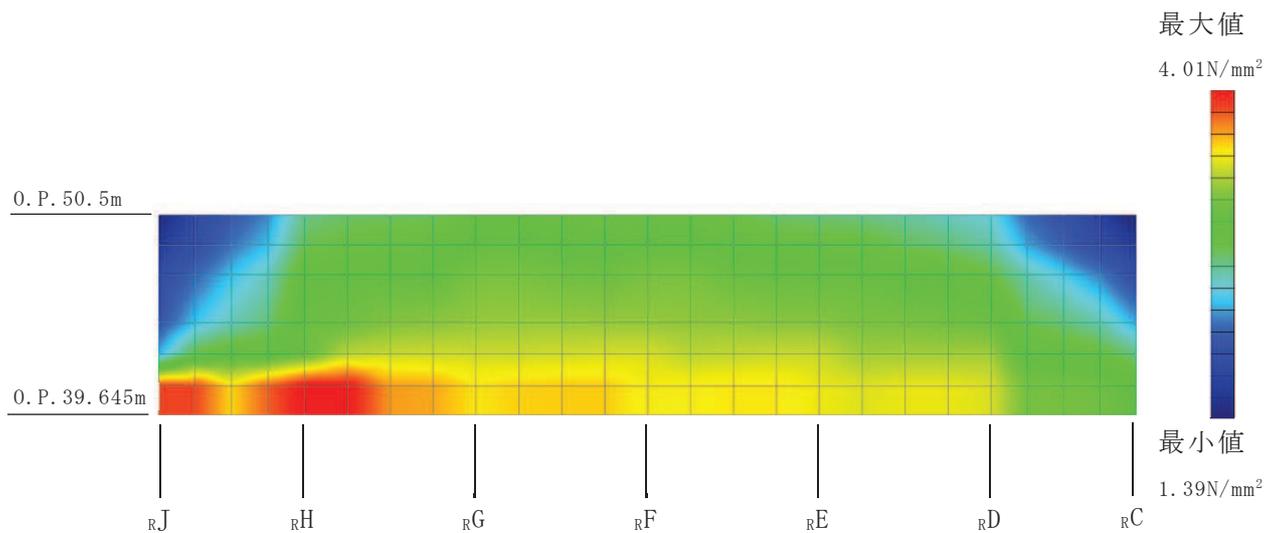


(a) 屋根トラス評価モデル

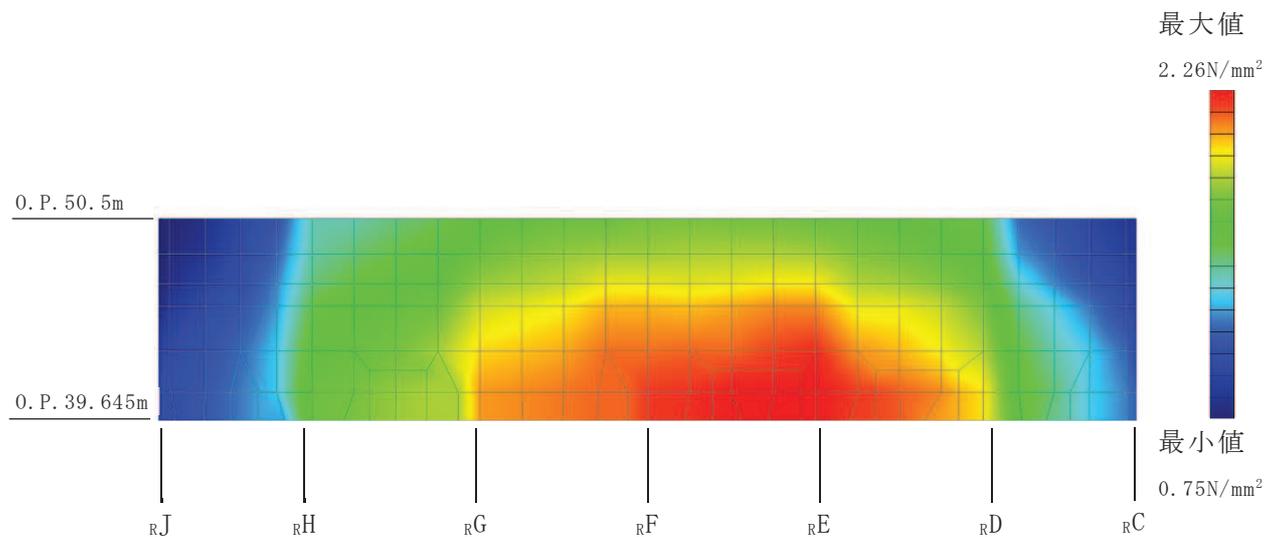


(b) 建屋全体 3次元 FEM モデル

図 3-7 EW+UD 入力時の南面 (R4 通り) の面内せん断応力分布
(0. P. 33.2m ~ 0. P. 39.645m)

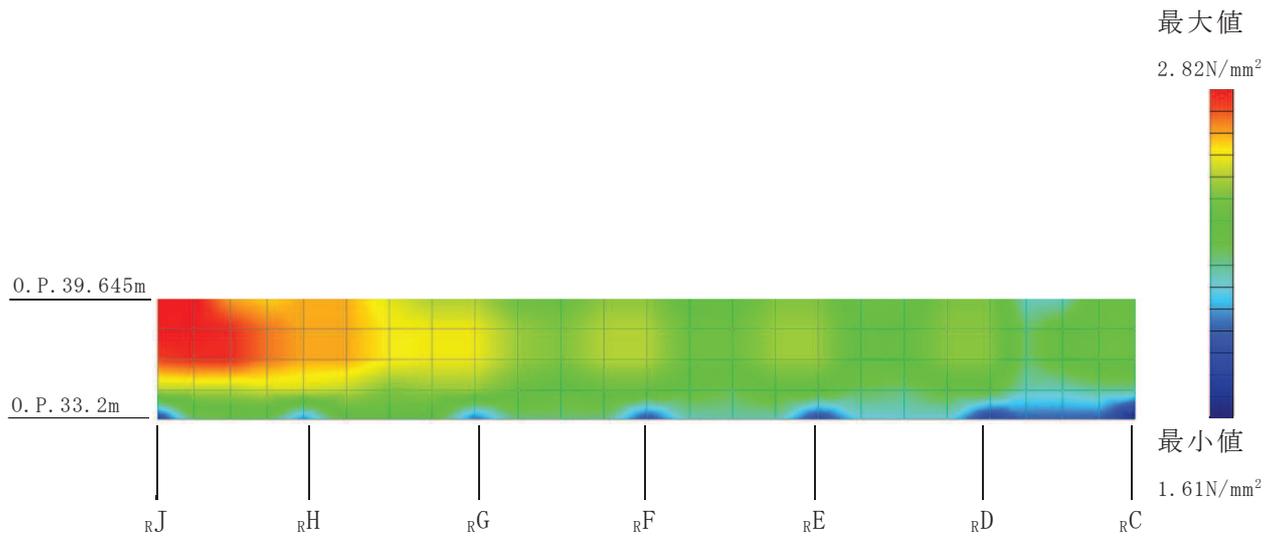


(a) 屋根トラス評価モデル

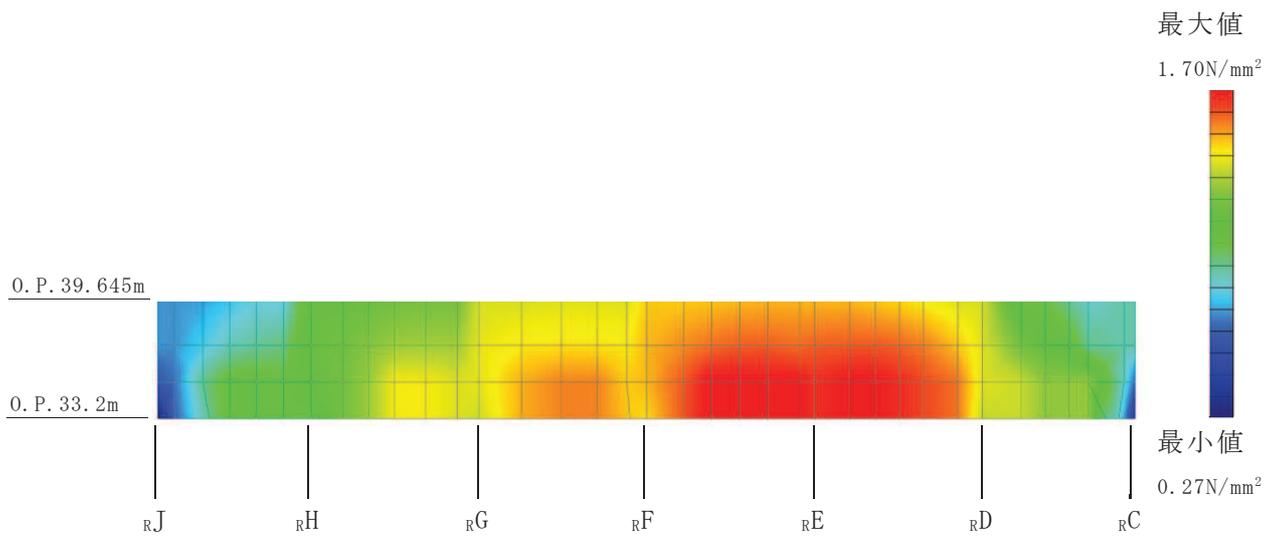


(b) 建屋全体 3次元 FEM モデル

図 3-8 EW+UD 入力時の北面 (R10 通り) の面内せん断応力分布
(0. P. 39.645m ~ 0. P. 50.5m)



(a) 屋根トラス評価モデル



(b) 建屋全体 3次元 FEM モデル

図 3-9 EW+UD 入力時の北面 (R10 通り) の面内せん断応力分布
(0. P. 33.2m ~ 0. P. 39.645m)

3.2 質点系モデルとの比較

3.2.1 評価方針

屋根トラス評価モデルでモデル化されている燃料取替床レベル上部の既設耐震壁の面内せん断ひずみについて、設計で用いている質点系モデルのせん断スケルトンカーブ上の応答と比較し、屋根トラス評価モデルと質点系モデルの応答性状を確認する。

3.2.2 評価方法

燃料取替床レベル上部の既設耐震壁について、壁厚の異なる O.P. 33.2m～O.P. 39.645m 及び O.P. 39.645m～O.P. 50.5m において、それぞれ各要素の面積で重み付け平均した面内せん断応力を算出する。この平均面内せん断応力を、図 3-10 のようにエネルギー等価な耐震壁のスケルトン上の応答値に換算し、屋根トラス評価モデルの平均面内せん断応力に相当する面内せん断ひずみが質点系モデルの応答値と比較して応答性状に大きな差がないことを確認する。比較に用いる地震動は「3.1 応力分布の比較」と同様に基準地震動 S s - D 2 とする。

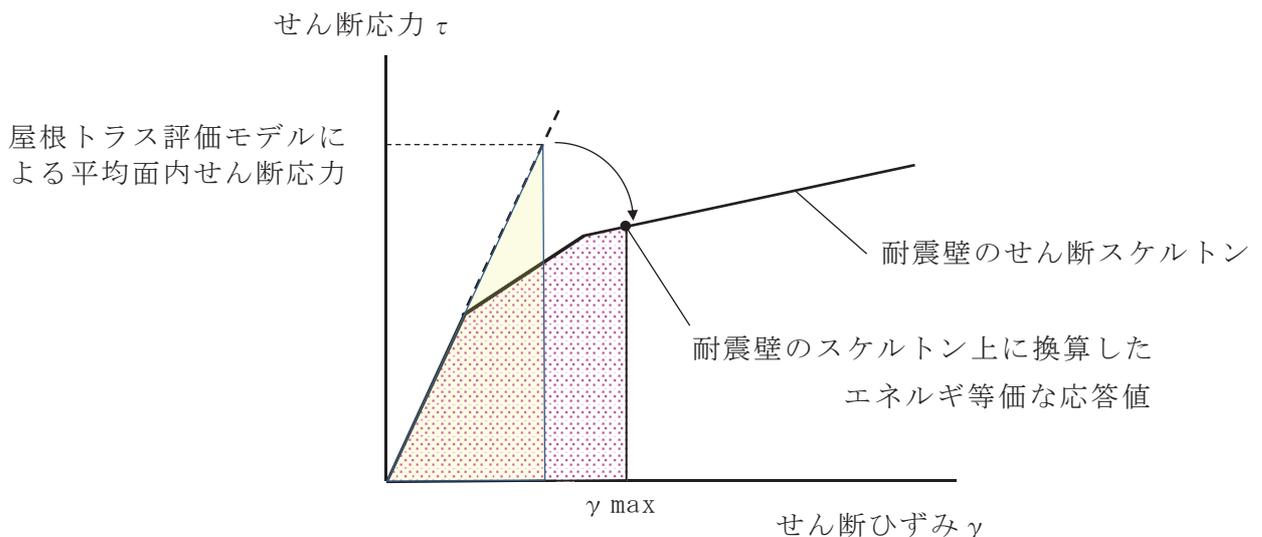


図 3-10 エネルギー一定則に基づく各耐震壁のせん断ひずみの評価方法

3.2.3 評価結果

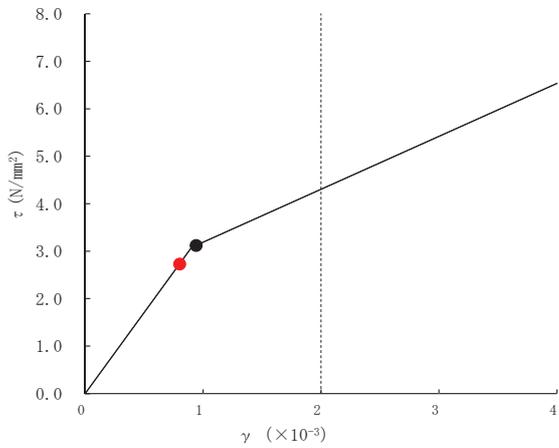
屋根トラス評価モデルの既設耐震壁の平均面内せん断応力を構面毎，レベル毎に算出し，耐震壁のスケルトン上の応答値に換算した結果を質点系モデルの応答値と比較して図 3-11 及び図 3-12 に示す。

屋根トラス評価モデルの既設耐震壁部分の応答は，クレーン階（CRF，O.P. 41.2m）より上部では質点系モデルの応答と概ね対応している。燃料取替床レベル（3F，O.P. 33.2m）からクレーン階（CRF，O.P. 41.2m）では屋根トラス評価モデルの既設耐震壁部分の応答は質点系モデルより小さめに評価され，質点系モデルが保守的な評価であることが確認できる。クレーン階（CRF，O.P. 41.2m）より下部で屋根トラス評価モデルの既設耐震壁部分の応答が小さい理由として，以下のことが考えられる。

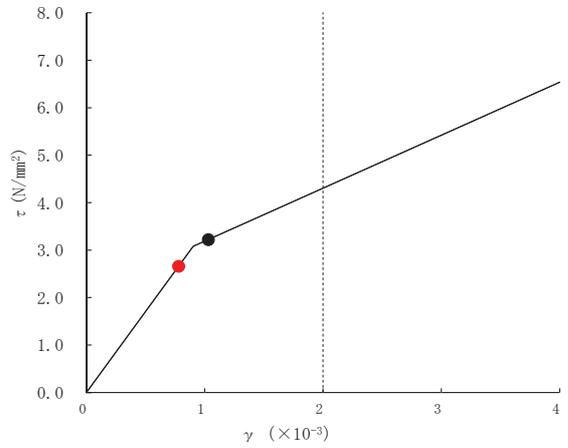
- 1) 屋根トラス評価モデルでは，クレーン階（CRF，O.P. 41.2m）より下部の下屋の壁や，直交方向の壁等，質点系モデルで考慮されていない部分もせん断力を負担している。
- 2) 屋根トラス評価モデルでは既設耐震壁，追設耐震壁を線形部材としてモデル化しており，初期剛性低下を考慮している既設耐震壁に比べ，設計剛性でモデル化した追設耐震壁ではせん断断面積に対するせん断力の負担割合が大きくなり，既設耐震壁は小さくなる傾向がある。この傾向は，図 3-3，図 3-5，図 3-7 に示す面内せん断応力分布において，追設耐震壁を設置している部分の既設耐震壁の応力負担が小さいことから確認できる。

一方，質点系モデルでは既設耐震壁，追設耐震壁ともに非線形特性を考慮しており，追設耐震壁が非線形領域に入ることにより，既設耐震壁のせん断力の負担割合が屋根トラス評価モデルでの負担割合に比べて相対的に大きくなる傾向があると考えられる。

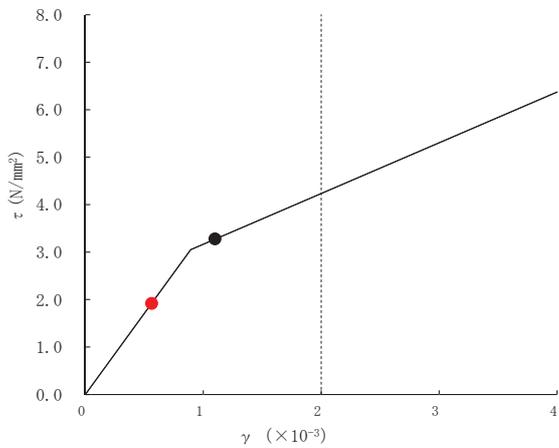
したがって，屋根トラス評価モデルの既設耐震壁部分の応答はクレーン階（CRF，O.P. 41.2m）より上部の応答は質点系モデルと概ね対応し，クレーン階（CRF，O.P. 41.2m）より下部の応答は質点系モデルよりも若干小さい結果であるが，屋根トラスの評価モデルと質点系モデルは概ね対応しており，質点系モデルは保守的な傾向を示していることを確認した。



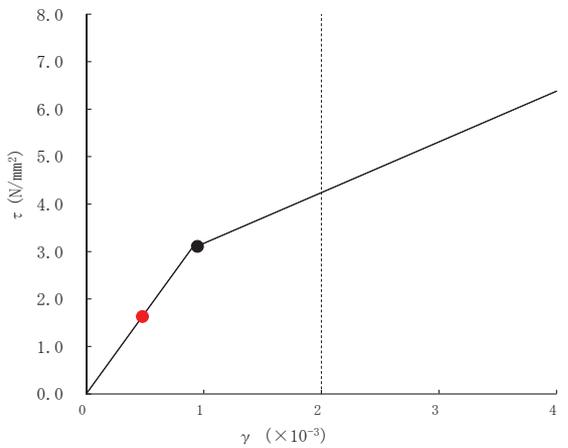
(a) 東面 (R_J 通り) 既設耐震壁
クレーン階～R 階



(b) 西面 (R_C 通り) 既設耐震壁
クレーン階～R 階

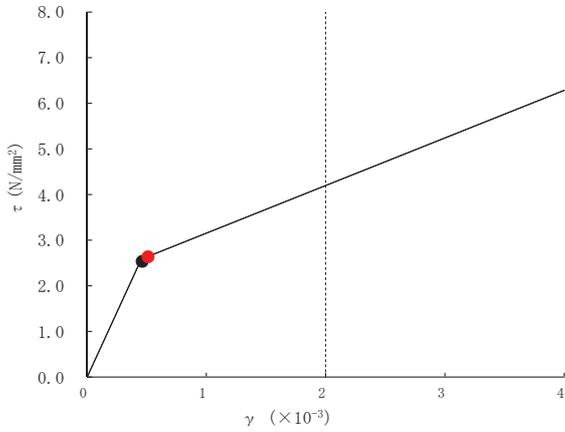


(c) 東面 (R_J 通り) 既設耐震壁
3 階～クレーン階

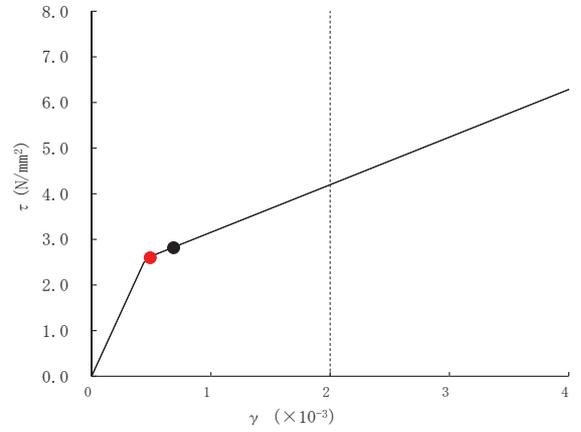


(d) 西面 (R_C 通り) 既設耐震壁
3 階～クレーン

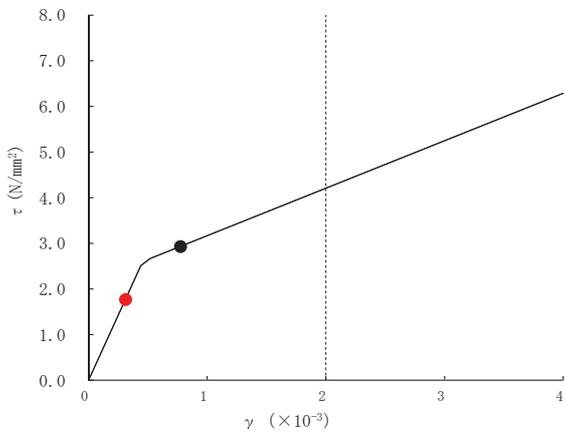
図 3-11 屋根トラス評価モデル耐震壁の平均せん断応力から換算した応答値と質点系モデルの応答値との比較 (NS 方向耐震壁)



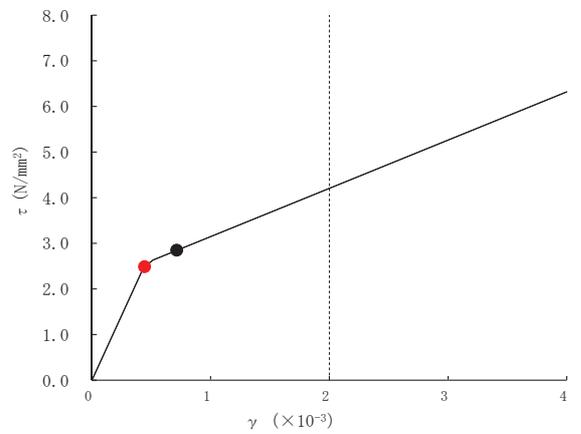
(a) 南面 (R4 通り) 既設耐震壁
クレーン階～R 階



(b) 北面 (R10 通り) 既設耐震壁
クレーン階～R 階



(c) 南面 (R4 通り) 既設耐震壁
3 階～クレーン階



(d) 北面 (R10 通り) 既設耐震壁
3 階～クレーン

図 3-12 屋根トラス評価モデル耐震壁の平均せん断応力から換算した応答値と質点系モデルの応答値との比較 (EW 方向耐震壁)

3.3 気密性に関する確認

3.3.1 評価方針

屋根トラス評価モデルでモデル化されている燃料取替床レベル上部の既設耐震壁について、既設耐震壁の各要素において発生する局所的な面内せん断ひずみにあっても気密性が確保されていることを確認する。

3.3.2 評価方法

燃料取替床レベル上部の各面の既設耐震壁について、局所的に発生する最大せん断ひずみを図 3-13 のようにエネルギー等価な耐震壁のスケルトン上の応答値に換算し、局所的にも最大せん断ひずみが 2000μ 以下であることを確認する。比較に用いる地震動は「3.1 応力分布の比較」と同様に基準地震動 $S_s - D2$ とする。

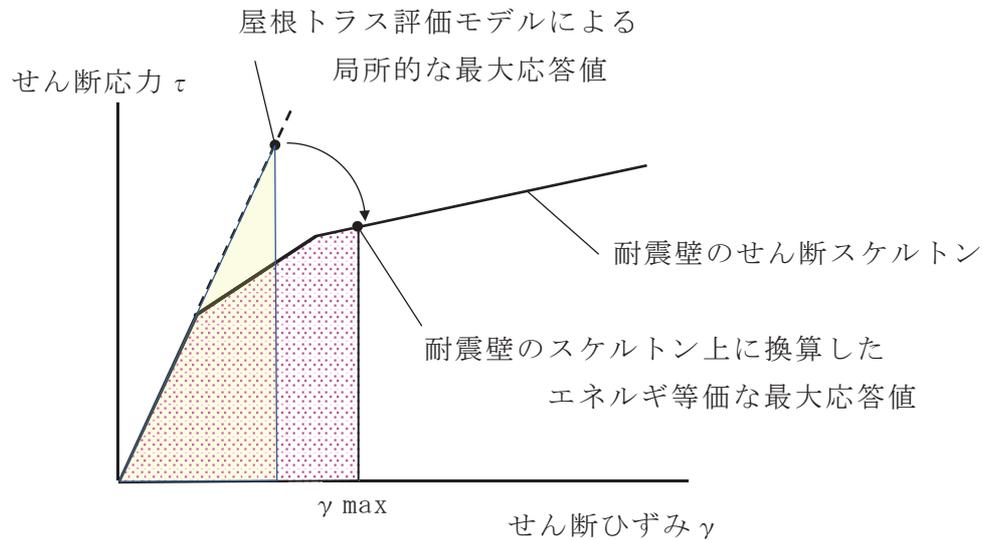


図 3-13 エネルギー一定則に基づく各耐震壁のせん断ひずみの評価方法

3.3.3 評価結果

屋根トラス評価モデルの既設耐震壁に局所的に発生する最大面内せん断ひずみを構面毎、レベル毎に算出した結果を表 3-2 に示す。

屋根トラス評価モデルの既設耐震壁に局所的に発生する面内せん断ひずみは、許容限界（せん断ひずみ 2.0×10^{-3} ）を超えないことを確認した。

表 3-2 屋根トラス評価モデルによる最大面内せん断ひずみ
(S s - D 2)

位置	レベル	屋根トラスモデル線形応答値		等価 最大面内 せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)
		最大面内 せん断応力度 (N/mm^2)	最大面内 せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	
東面 (_R J通り)	0. P. 41. 2m ~0. P. 50. 5m	3. 65	1. 069	1. 079
	0. P. 33. 2m ~0. P. 41. 2m	3. 70	1. 085	1. 098
西面 (_R C通り)	0. P. 41. 2m ~0. P. 50. 5m	3. 26	0. 955	0. 956
	0. P. 33. 2m ~0. P. 41. 2m	3. 41	1. 000	1. 004
南面 (_R 4通り)	0. P. 41. 2m ~0. P. 50. 5m	3. 73	0. 656	0. 691
	0. P. 33. 2m ~0. P. 41. 2m	4. 20	0. 740	0. 803
北面 (_R 10通り)	0. P. 41. 2m ~0. P. 50. 5m	3. 41	0. 600	0. 619
	0. P. 33. 2m ~0. P. 41. 2m	4. 01	0. 705	0. 757

4. 基礎版評価モデルの耐震壁における確認事項

水平 2 方向及び鉛直方向の地震力に対する検討においては、3次元 FEM モデルを用いて建屋全体をモデル化しており、基礎版評価モデルで新たにシェル要素としてモデル化した耐震壁もモデル化されているが、基礎版評価モデルによる評価では地震時の浮上り状況が応力分布に大きな影響を与える一方で 3次元 FEM モデルでは建屋の浮上りを考慮できないこと、基礎版評価においては新たにシェル要素としてモデル化した部材は境界条件として位置付けていることから地震荷重や鉛直荷重を加えていないこと等、建屋全体の 3次元 FEM 解析と基礎版解析では解析の目的が異なり、応力性状に支配的な設定条件が異なるため同等の比較が困難であることから、ここでは、基礎版評価モデルにおいて基礎版に対する拘束効果として期待しているシェル要素でモデル化した耐震壁が過度な荷重の負担状況となっていないか、面内応答と面外応答について確認する。

4.1 評価方針

原子炉建屋基礎版の応力解析において境界条件として考慮している各耐震壁（シェル壁（S/W）、内部ボックス壁（I/W）及び外部ボックス壁（O/W））の面内せん断力及び面外せん断力の応力レベルについて確認をする。

面内せん断力については、原子炉建屋基礎版の応力解析において、発生する各耐震壁の最大応答せん断ひずみが基準地震動 S_s における耐震壁の支持性能を維持するための許容限界（せん断ひずみ 2.0×10^{-3} ）に対して十分余裕があることを確認する。

面外せん断力については、原子炉建屋基礎版の応力解析において耐震壁が負担する面外せん断力が面外せん断に対するコンクリートの短期許容応力以内に収まっていることを確認する。

原子炉建屋基礎版の耐震壁配置状況を図 4-1 に示す。

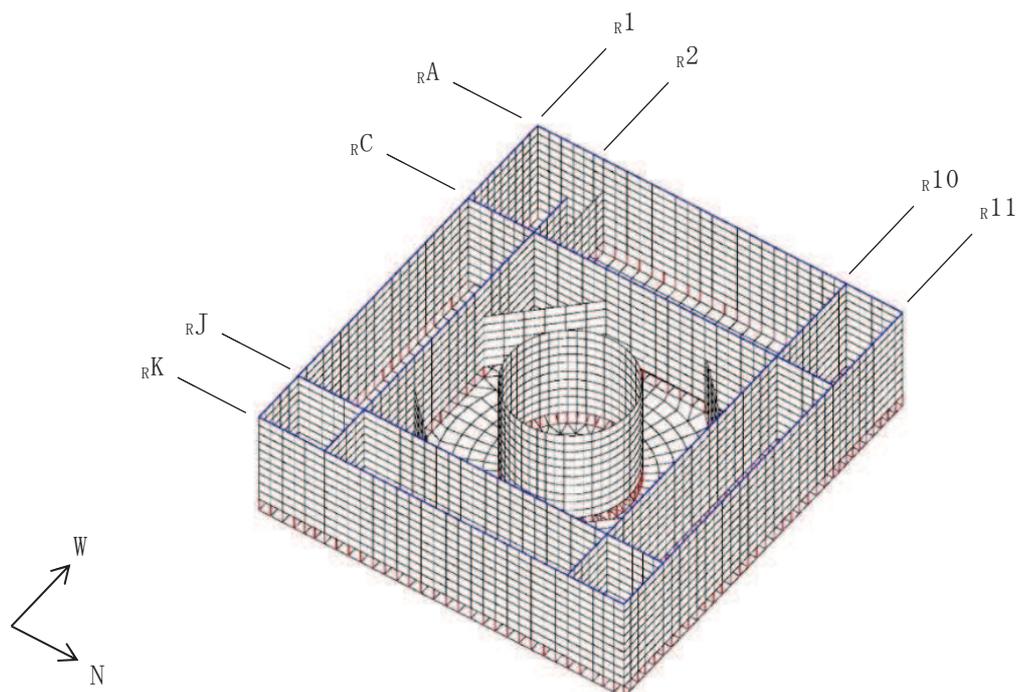


図 4-1 耐震壁配置状況

4.2 評価方法

4.2.1 面内せん断力に対する検討

原子炉建屋基礎版の応力解析において耐震壁の剛性を考慮しているシェル要素に生じる面内せん断力に対して、各耐震壁のせん断スケルトンカーブ上にプロットすることで、応力解析による各耐震壁のせん断ひずみのレベルを確認する。シェル要素に生じる面内せん断力は、耐震壁を一定範囲で分割したうえで平均化した値とする。分割範囲は耐震壁の端部でせん断応力度が大きくなる分布状況を考慮し、分割した範囲内で平面的に概ね均等になるように壁長さ方向に5分割とし、高さ方向には地下3階から地下1階の階毎に3分割とする。図4-3に平均化範囲の分割例としてR2通りの耐震壁の分割範囲を示す。

ここで、各耐震壁のせん断力及びせん断ひずみが弾性限界（せん断スケルトンカーブ上の第一折点）を超えている場合には、エネルギー一定則を用いてせん断力及びせん断ひずみを算定する。エネルギー一定則に基づく各耐震壁のせん断力及びせん断ひずみの算出方法を図4-2に示す。

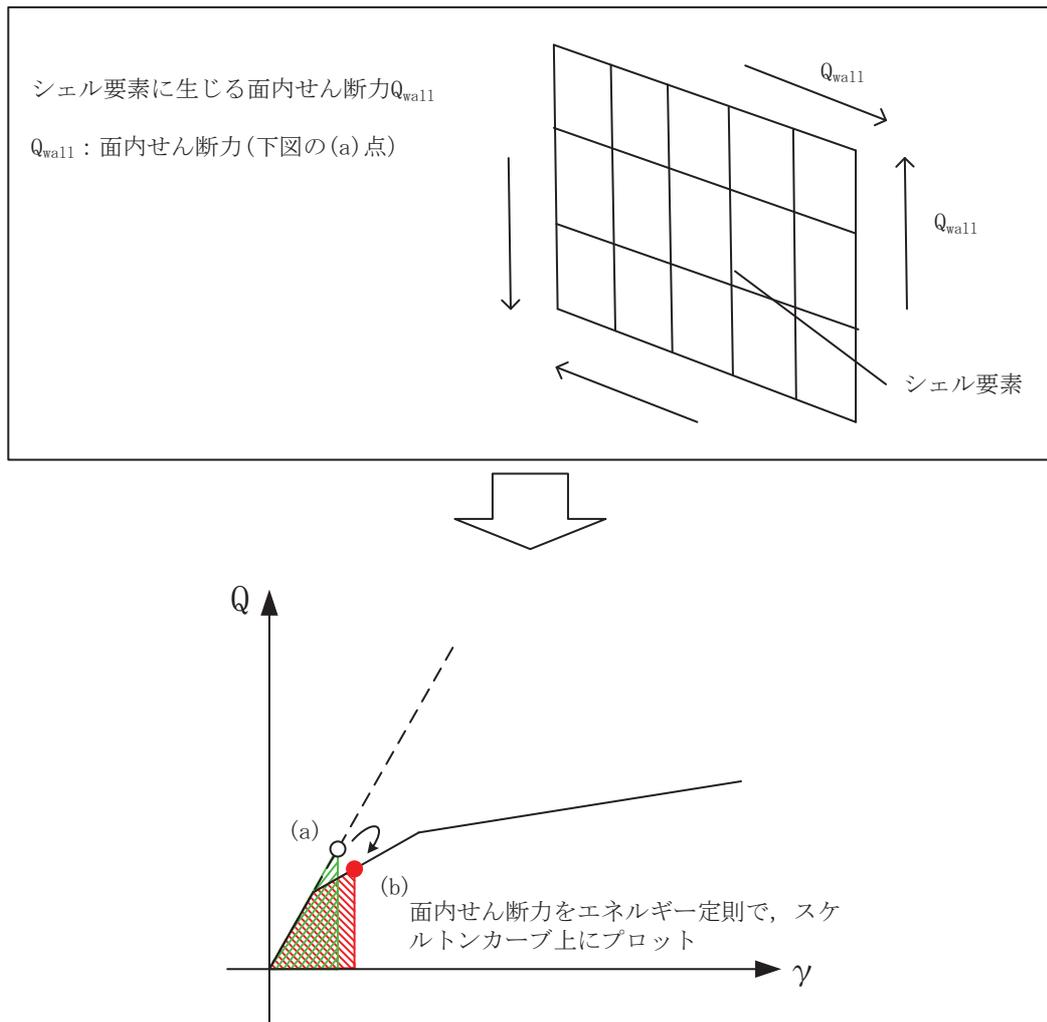


図4-2 エネルギー一定則に基づく各耐震壁のせん断ひずみの評価方法

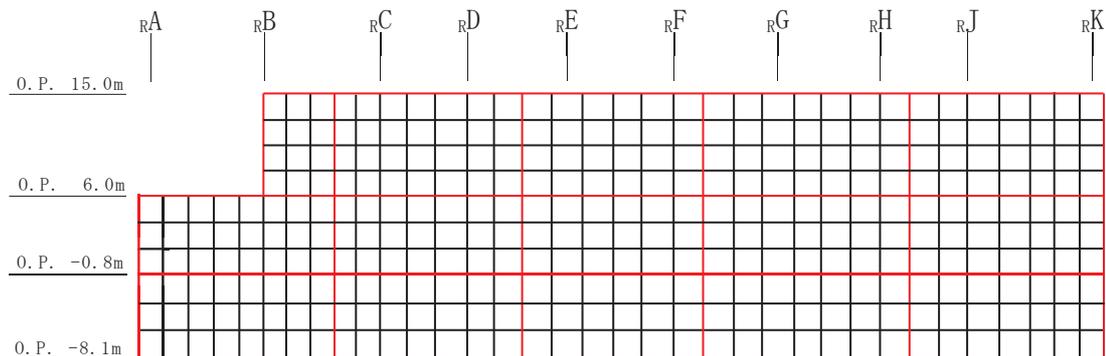


図 4-3 平均化範囲の分割図 (R2 通り)

(赤線で囲まれた範囲が平均化範囲を示す。)

4.2.2 面外せん断力に対する検討

原子炉建屋基礎版の応力解析において耐震壁に生じる面外せん断力が、コンクリートの短期許容応力度以下に収まっていることを確認する。表 4-1 にコンクリートの短期許容せん断応力度を示す。

表 4-1 コンクリートの短期許容せん断応力度

設計基準強度 F_c (N/mm^2)	短期
	せん断 (N/mm^2)
32.4	1.21

4.3 評価結果

4.3.1 面内せん断力に対する評価結果

応力解析により耐震壁に生じるせん断ひずみが最大となる組合せケースにおける面内せん断応力度のコンター図を図4-4に示す。また、図4-4の赤枠で囲まれた範囲で平均化して求めた耐震壁の面内せん断力より、図4-2に示す方法で算定したせん断ひずみを表4-2に示す。なお、図4-4において $rB-rC$ 通り間に応力が集中している理由は、図4-4に示す組合せケースは rK 通り側から rA 通り側に水平地震荷重が作用するケースであり、 rK 通り側から基礎版が浮き上がる様な変形状態となり rA 通り側の基礎版部分に大きな接地圧が作用し、当該部に接続する耐震壁に面内方向の変形が生じること、地上1階の $rA-rB$ 通り間に耐震壁が存在せず $rA-rB$ 通り間より面内剛性の大きい $rB-rC$ 通り間の耐震壁で基礎版を拘束していることが考えられる。

表4-2より、耐震壁の最大応答せん断ひずみは、地下3階2通りにおける内部ボックス壁（EW方向）の 0.505×10^{-3} であり、許容限界のせん断ひずみ 2.0×10^{-3} に対して十分余裕があることを確認した。なお、基礎版評価の応力解析では地震荷重は基礎版位置に載荷しているため、表4-2に示すせん断ひずみには耐震壁の地震荷重分が含まれていない。表4-2のせん断ひずみに対し、保守的に質点系地震応答解析で発生する基準地震動 S_s に対する最大応答せん断ひずみを加算した場合の耐震壁の最大せん断ひずみを表4-3に示す。保守的に加算した場合のせん断ひずみも許容限界のせん断ひずみ 2.0×10^{-3} に対して十分余裕があることを確認した。

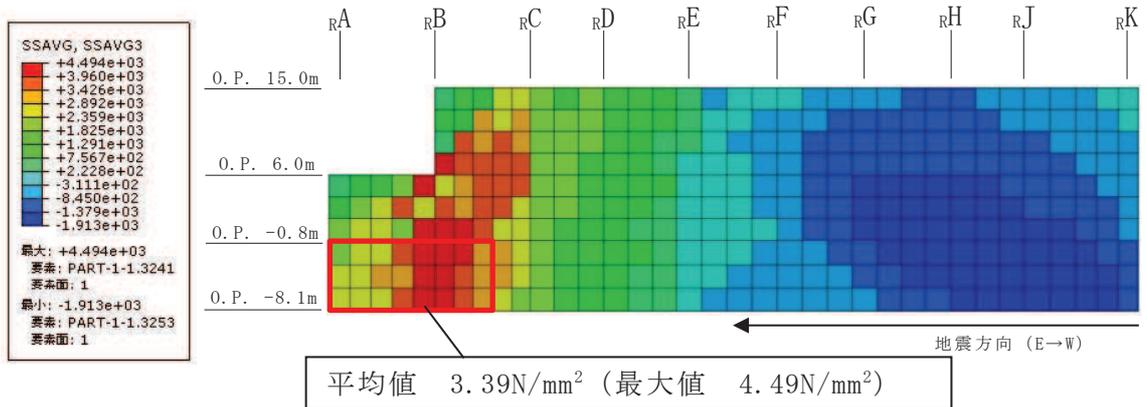


図4-4 面内せん断応力度のコンター図（ $r2$ 通り・組合せケース6*）

（赤枠で囲まれた範囲が平均化範囲を示す。）

注記*：荷重の組合せ $G + P + 1.0 S_{sEW} + 0.4 S_{sDU}$

ここで、G：固定荷重，P：積載荷重，

S_{sEW} ：E→W方向 S_s 地震荷重，

S_{sDU} ：鉛直方向（上向き） S_s 地震荷重

表 4-2 基礎版解析により耐震壁に生じるせん断ひずみ

部位	組合せケース	(a) シェル要素 に生じる 面内せん断力 $Q_{wa11} (\times 10^3 \text{kN})$	スケルトンプロット後*	
			(b) せん断力 ($\times 10^3 \text{kN}$)	(b) せん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)
B3 階 I/W (R2 通り)	6	716	512	0.505

注記* : エネルギー一定則を適用し、スケルトンカーブ上にプロットした値

表 4-3 耐震壁の最大せん断ひずみ

部位	基礎版解析により 生じるせん断ひずみ ($\times 10^{-3}$)	地震応答解析により生 じる最大応答せん断ひ ずみ* ($\times 10^{-3}$)	せん断ひずみ合計 ($\times 10^{-3}$)
B3 階 I/W (R2 通り)	0.505	0.678	1.183

注記* : 地震応答解析結果の不確かさケースを含む最大値

4.3.2 面外せん断力に対する評価結果

応力解析により耐震壁に生じる面外せん断応力度が最大となる組合せケースにおける面外せん断応力度のコンター図を図4-5に示す。

図4-4より面外せん断応力度は概ね 0.4N/mm^2 以下となっている。要素ごとの最大値でも、 1.14N/mm^2 であり、コンクリートの短期許容せん断応力度(1.21N/mm^2)に収まる結果となっている。

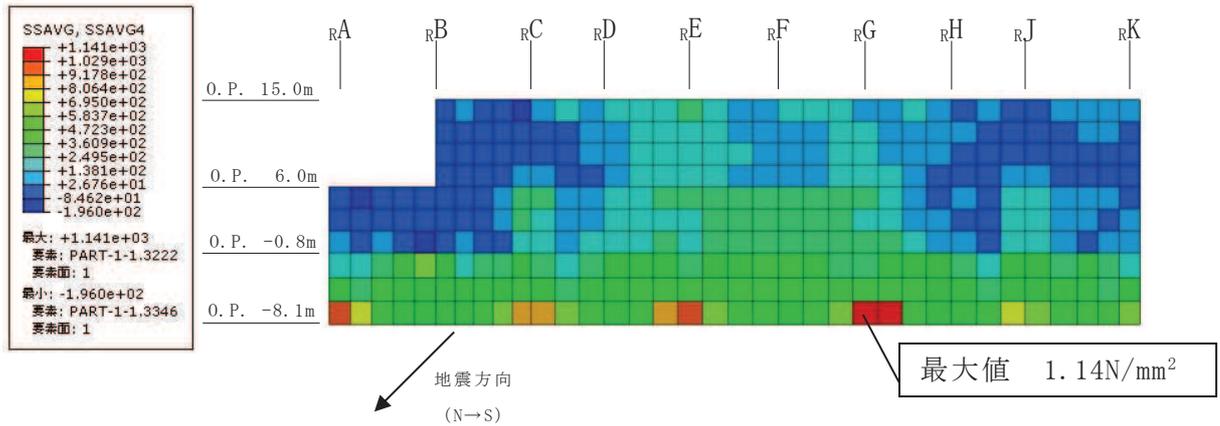


図4-5 面外せん断応力度のコンター図 (R2 通り, 組合せケース 4*, τ_y)

注記*: 荷重の組合せ $G + P + 1.0 S_{NS} + 0.4 S_{DU}$

ここで, G: 固定荷重, P: 積載荷重,

S_{NS} : N→S 方向 S_s 地震荷重,

S_{DU} : 鉛直方向 (上向き) S_s 地震荷重

別紙 2 新設建屋の設計用地下水位に伴う浮力に関する整理

1. 新設建屋の設計用地下水位に伴う浮力に関する整理

緊急用電気品建屋及び緊急時対策建屋（以下「新設建屋」という。）の設計用地下水位は、補足-600-1「地盤の支持性能について」に示すとおり、地表面に設定しており、浮力の影響を受ける。

本資料では、新設建屋の地震応答解析及び耐震性評価における設計用地下水位に伴う浮力の考え方について、特に以下の観点から整理して説明するものである。

- ・基礎版設計における浮力の妥当性
- ・耐震壁の復元力特性設定
- ・S Rモデル採用の妥当性

整理した結果を表1に示す。

また、本資料は、以下の添付書類の補足説明をするものである。

- ・添付書類「VI-2-2-21 緊急用電気品建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-22 緊急用電気品建屋の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-23 緊急時対策建屋の地震応答計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-24 緊急時対策建屋の耐震性についての計算書」

表1 新設建屋の設計用地下水位に伴う浮力に関する整理

項目	設計における考え方	関連図書
基礎版設計における浮力の妥当性	<ul style="list-style-type: none"> 基礎版の評価に当たっては浮力を考慮した評価を実施している。 一方で、保守性を考慮して設定した設計用地下水位と浸透流解析結果には差異があることから、その差異が最も大きい原子炉建屋を代表に影響評価を実施している。原子炉建屋基礎版の評価結果では鉛直上向きの荷重ケースで面外せん断が最も厳しい結果となっているが、浮力を低減した場合には、面外せん断の検定値が小さくなることを確認している。 新設建屋の基礎版評価においても、面外せん断が厳しい荷重ケースは鉛直上向きとなっており、同様の結果が得られると考えられる。 	<p>補足-610-8 原子炉建屋基礎版の耐震性についての計算書に関する補足説明資料 別紙7 原子炉建屋基礎版の応力解析における浮力の影響検討</p>
耐震壁の復元力特性設定	<ul style="list-style-type: none"> 新設建屋の地震応答解析結果からは、緊急用電気品建屋では全ての質点で第1折れ点以下、緊急時対策建屋では一部で第1折れ点を上回る質点があるものの、おおむね第1折れ点以下の応答結果が得られている。 復元力特性の第1折れ点に着目した場合、関連するパラメータはF_c（コンクリート強度）とσ_v（軸応力度）となるが、いずれも浮力の影響を受けないため、復元力特性設定への浮力の影響は無い。 	<p>—</p>
SRモデル採用の妥当性	<ul style="list-style-type: none"> 新設建屋の地震応答解析に当たっては、建屋を曲げ変形とせん断変形をする耐震壁からなる質点系モデルとし、地盤を等価なばねで評価した建屋—地盤連成モデル（SRモデル）としている。 地下水位を地表面とした場合の影響を考慮するために地盤の有効応力の変化を考慮した地震応答解析（有効応力解析）を行い、SRモデルによる地震応答解析結果と比較した結果、SRモデルの応答結果の保守性を確認したことから、SRモデルを適用することの妥当性があるものと判断した。 	<p>補足-610-10 緊急用電気品建屋の耐震性についての計算書に関する補足説明資料 別紙1-1-1 SRモデルを適用することの妥当性について 補足-610-11 緊急時対策建屋の耐震性についての計算書に関する補足説明資料 別紙1-1-1 SRモデルを適用することの妥当性について</p>

別紙 3 基礎版及び屋根トラスの応力解析における
耐震性に影響を及ぼす要因の整理

1. 基礎版及び屋根トラスの応力解析における耐震性に影響を及ぼす要因の整理

原子炉建屋及び制御建屋の基礎版並びに原子炉建屋屋根トラスの耐震評価に当たって、耐震性に影響を及ぼす要因を抽出の上で影響検討を行っていることから、検討内容と検討結果、申請上の位置づけについて整理して表 1 に示す。

なお、本資料は、以下の添付書類の補足説明をするものである。

- ・添付書類「VI-2-9-3-4 原子炉建屋基礎版の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-2-4 制御建屋の耐震性についての計算書」
- ・添付書類「VI-2-9-3-1 原子炉建屋原子炉棟（二次格納施設）の耐震性についての計算書」

表 1 基礎版及び屋根トラスの応力解析における耐震性に影響を及ぼす要因の整理

対象の施設	耐震性に影響を及ぼす要因	検討内容	検討結果	申請上の位置付け
原子炉建屋基礎版 制御建屋基礎版	耐震壁部分の剛性低下	原子炉建屋及び制御建屋の基礎版の解析モデルにおいて、境界条件としてモデル化している耐震壁部分について、工認ケースでは質点系モデルの基本ケースと同様の剛性低下を考慮している。 影響確認として、質点系モデルにおける不確かさケースと同様に、耐震壁部分の更なる剛性低下を考慮した場合の影響を確認した。	耐震壁部分の更なる剛性低下を考慮しても、基礎版の耐震性が確保されることを確認した。	耐震壁部分の更なる剛性低下は質点系モデルでは各施設の耐震計算書に示していることを踏まえ、 各施設の耐震計算書の別紙 にて説明する。
原子炉建屋屋根トラス	耐震壁部分の剛性低下	原子炉建屋屋根トラスの解析モデルにおいて、モデル化している耐震壁部分について、工認ケースでは質点系モデルの基本ケースと同様の剛性低下を考慮している。 影響確認として、質点系モデルにおける不確かさケースと同様に、耐震壁部分の更なる剛性低下を考慮した場合の影響を確認した。	耐震壁部分の更なる剛性低下を考慮しても、屋根トラスの耐震性が確保されることを確認した。	耐震壁部分の更なる剛性低下は質点系モデルでは各施設の耐震計算書に示していることを踏まえ、 各施設の耐震計算書の別紙 にて説明する。
原子炉建屋屋根トラス	屋根スラブ面外剛性考慮	原子炉建屋屋根トラスの工認ケースでは屋根スラブの面外剛性を保守的に考慮していないため、面外剛性を考慮した場合の影響を確認した。	屋根スラブの面外剛性を考慮した場合でも、屋根トラスの耐震性が確保されること、また、屋根スラブの二次格バウンダリとしての機能が確保されることを確認した。	設計条件と同等の応答であり、その内容について、屋根スラブの二次格バウンダリとしての機能が確保されることも含めて 補足説明資料 にて説明する。
原子炉建屋屋根トラス	レーリー減衰	原子炉建屋屋根トラスの工認ケースでは剛性比例型減衰としているが、剛性比例型減衰以外の減衰としてレーリー減衰とした場合の影響を確認した。	レーリー減衰とした場合でも、工認ケースと同等の応答であり、また、屋根トラスの耐震性が確保されることを確認した。	設計条件と同等の応答であり、その内容について 補足説明資料 にて説明する。