

本資料のうち、枠組みの内容は機密事項又は商業機密に属しますので公開できません。

※なお、本資料は抜粋版のため、公開できない箇所はありません。

資料 1-1-5

女川原子力発電所 2 号炉

設計基準対象施設について

(第 4 条 地震による損傷の防止)

平成 30 年 11 月

東北電力株式会社

第4条：地震による損傷の防止

<目 次>

第1部

1. 基本方針
 - 1.1 要求事項の整理
 - 1.2 追加要求事項に対する適合性
 - (1) 位置，構造及び設備
 - (2) 安全設計方針
 - (3) 適合性説明
 - 1.3 気象等
 - 1.4 設備等
 - 1.5 手順等

第2部

1. 耐震設計の基本方針
 - 1.1 基本方針
 - 1.2 適用規格
2. 耐震設計上の重要度分類
 - 2.1 重要度分類の基本方針
 - 2.2 耐震重要度分類
3. 設計用地震力
 - 3.1 地震力の算定法
 - 3.2 設計用地震力
4. 荷重の組合せと許容限界
 - 4.1 基本方針
5. 地震応答解析の方針
 - 5.1 建物・構築物
 - 5.2 機器・配管系
 - 5.3 屋外重要土木構造物
 - 5.4 津波防護施設，浸水防止設備及び津波監視設備並びに浸水防止設備又は津波監視設備が設置された建物・構築物
6. 設計用減衰定数
7. 耐震重要施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響
8. 水平2方向及び鉛直方向の地震力の組合せに関する影響評価方針
9. 構造計画と配置計画

(別 添)

- 別添－ 1 設計用地震力
- 別添－ 2 動的機能維持の評価
- 別添－ 3 弾性設計用地震力 S_d ・静的地震力による評価
- 別添－ 4 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討について
- 別添－ 5 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方針
- 別添－ 6 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定の考え方
- 別添－ 7 主要建屋の構造概要及び解析モデルについて
- 別添－ 8 入力地震動について

(別 紙)

- 別紙－ 1 既工認との手法の相違点の整理（設置変更許可申請段階での整理）
- 別紙－ 2 上位クラス施設の安全機能への下位クラス施設の波及的影響の検討
- 別紙－ 3 水平 2 方向及び鉛直方向の適切な組合せに関する検討について
- 別紙－ 4 サプレッションチェンバ内部水質量の考え方の変更について
- 別紙－ 5 竜巻防護ネットの耐震構造設計について
- 別紙－ 6 原子炉本体の基礎の復元力特性について
- 別紙－ 7 使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について
- 別紙－ 8 規格適用範囲外の動的機能維持の評価
- 別紙－ 9 海水ポンプ室門型クレーンへの非線形時刻歴応答解析の適用
- 別紙－ 10 地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持について
- 別紙－ 11 東北地方太平洋沖地震等による影響を踏まえた建屋耐震設計方法への反映について
- 別紙－ 12 埋め込まれた建屋の周辺地盤による影響について
- 別紙－ 13 原子炉建屋屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－ 14 原子炉建屋基礎版の応力解析モデルへの弾塑性解析の適用
- 別紙－ 15 屋外重要土木構造物の耐震評価における断面選定について
- 別紙－ 16 土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化について
- 別紙－ 17 後施工せん断補強筋による耐震補強について
- 別紙－ 18 液状化影響の検討方針について
- 別紙－ 19 地下水位低下設備について

下線部：今回提出資料

原子炉建屋屋根トラスの
解析モデルへの弾塑性解析の適用

目 次

1. 概要
2. 原子炉建屋屋根トラスについて
 - 2.1 原子炉建屋屋根トラスの概要
 - 2.2 原子炉建屋屋根スラブの概要
 - 2.3 原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析モデルと設計クライテリア
 - 2.4 既工認と今回工認における原子炉建屋屋根トラスの解析モデルの比較
 - 2.5 弾塑性解析の採用について
 - 2.6 原子炉建屋屋根トラスの評価に関するまとめ
3. まとめ

- 参考資料 1 原子炉建屋屋根トラスの特徴
参考資料 2 原子炉建屋屋根トラスの地震時シミュレーション
参考資料 3 剛性比例型減衰の妥当性について
参考資料 4 屋根トラスの入力地震動及び固有振動数・固有モードについて
参考資料 5 屋根トラスの入力地震動に係る影響検討について

1. 概要

2号炉の建物・構築物のうち、鉄骨構造部の詳細評価モデルを構築して評価を実施している原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析モデルについては、既工認では弾性解析を採用しているが、今回工認では弾塑性解析を採用する予定である。

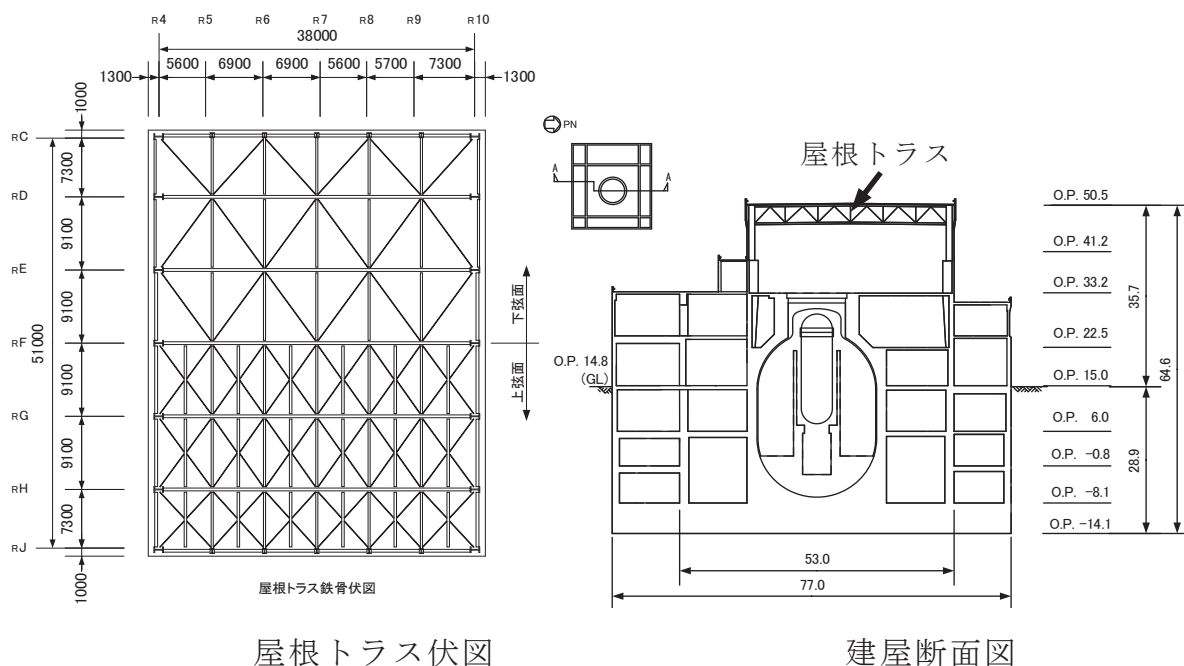
本資料では、屋根トラスが二次格納施設のバウンダリを構成する屋根スラブの間接支持構造物であることから、屋根トラスの3次元弾塑性解析の妥当性・適用性について確認し、屋根スラブの二次格納施設としての機能維持評価について説明する。

2. 原子炉建屋屋根トラスについて

2.1 原子炉建屋屋根トラスの概要

原子炉建屋の上部構造は、鉄筋コンクリート造陸屋根をもつ屋根トラスで構成されている。屋根トラスの平面は、38.0m(南北)×51.0m(東西)の長方形をなしており、燃料取替床レベル(O.P. 33.2m)からの高さは17.3mである。屋根トラスの概要を第2.1-1図に示す。第2.1-1表にトラス部材の諸元のうち、 rF 通りの主トラス材について例示する。なお、屋根トラスについては2011年東北地方太平洋沖地震(以下、「3.11地震」という。)後に補強工事を実施している。

第2.1-2表に屋根トラスの各部材の機能を示す。



第2.1-1図 原子炉建屋屋根トラスの概要

第 2.1-1 表 R_F 通り主トラスの部材諸元

部位	使用部材
上弦材	H-350×350×12×19
下弦材	H-350×350×12×19
斜材	2CTs-175×350×12×19
	2CTs-150×300×10×15
束材	2CTs-100×200×8×12

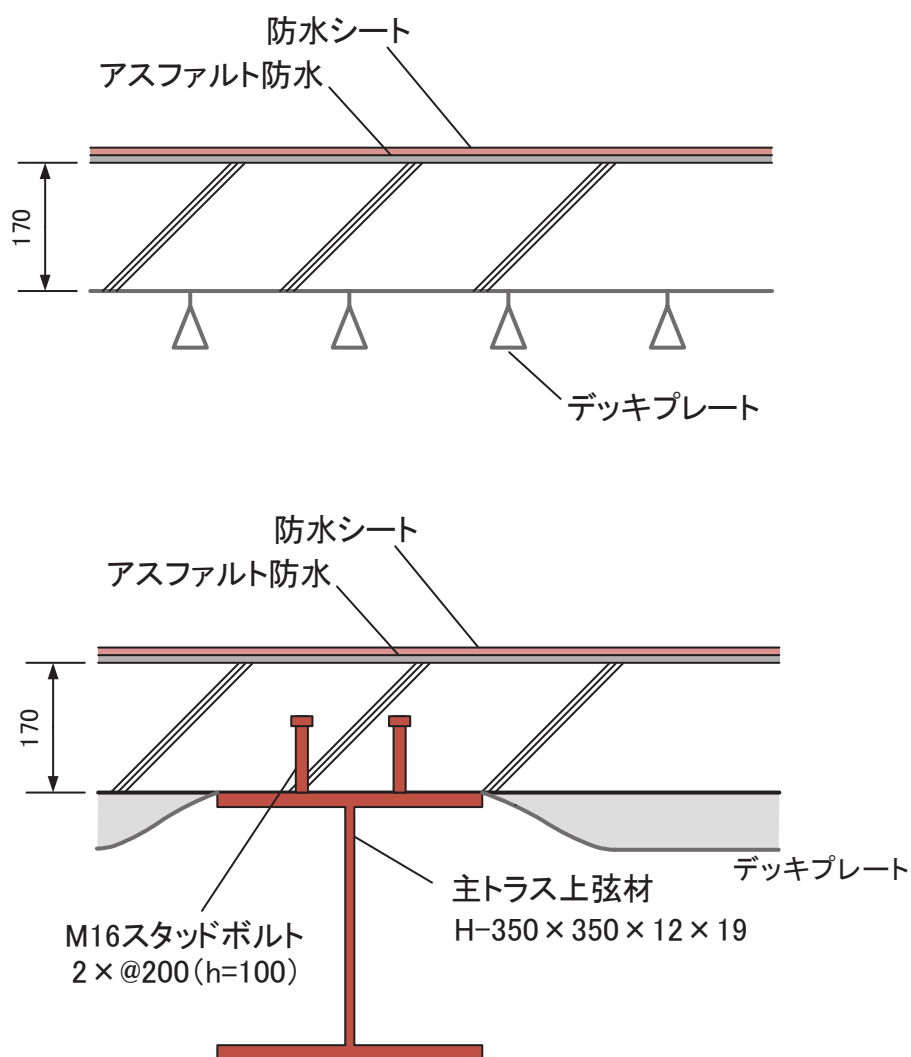
第 2.1-2 表 屋根トラスの各部材の機能

部位	部材	機能
主トラス	上弦材	鉛直荷重の支持 フレームを構成する部材として 水平地震荷重，クレーン荷重の支持
	下弦材	
	束材	
	斜材	
サブトラス	上弦材	鉛直荷重の支持
	下弦材	
	斜材	
母屋		鉛直荷重の支持
水平ブレース		- (仮設材)

2.2 原子炉建屋屋根スラブの概要

原子炉建屋の屋根スラブは南北方向 40.6m×東西方向 53.0mの平面寸法、厚さ 17cm の鉄筋コンクリート構造である。外周部は厚さ 25cm の鉄筋コンクリート造の耐震壁で支持されており、南北方向に配置された 5 構面の主トラス、東西方向の 5 構面のサブトラスとサブトラスの中間の母屋で支持されている。屋根スラブ下面に取りつく主トラス上弦材、サブトラス上弦材及び母屋は H 型断面の鋼材であり、スタッドで屋根スラブと一体化することにより面内及び面外に高い剛性を確保している。屋根スラブの断面図を第 2.2-1 図に示す。

屋根スラブには気密性の維持機能が要求されるため、換気性能とあいまって維持する方針である。なお、屋上面には防水材を施すことにより、防水性を確保している。



第 2.2-1 図 屋根スラブ断面図

2.3 原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析モデルと設計クライテリア

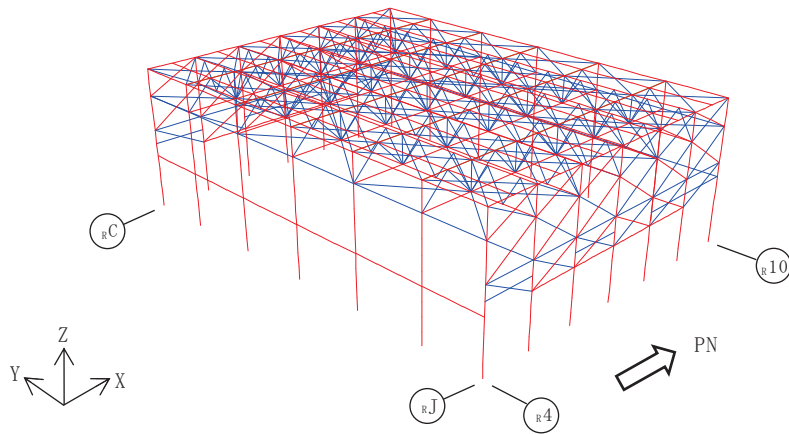
(1) 解析モデルの概要

原子炉建屋屋根トラスは、鉛直方向の地震動の影響を受けやすいと考えられるため、水平方向と鉛直方向地震力の同時入力による評価を行うために3次元モデルによる地震応答解析を採用する。

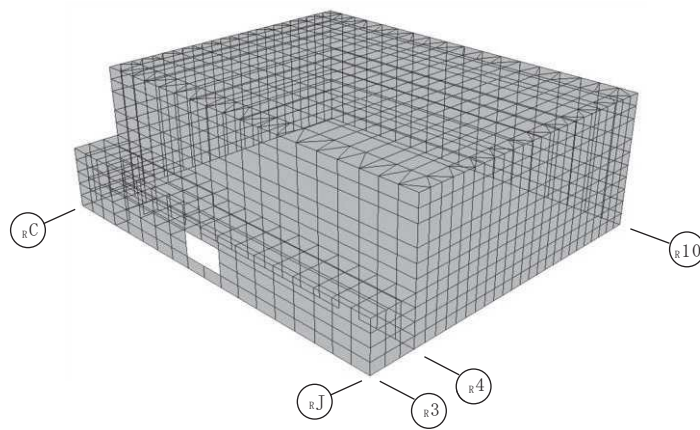
地震応答解析モデルは、燃料取替床レベル（O.P. 33.2m）より上部の躯体（屋根鉄骨、柱、梁、耐震壁、屋根スラブ、下屋部屋根スラブ）をモデル化した立体フレームモデルとし、部材に発生する応力を地震応答解析によって直接評価できるモデルとしている。解析モデルの概要を第2.3-1図に示す。

屋根トラス部は、主トラス（上下弦材、斜材、束材）、サブトラス（上下弦材、斜材等）、母屋、水平ブレース（上下弦面）、外周鉄骨梁をモデル化する。各鉄骨部材は軸、曲げ変形を考慮した梁要素（トラスの上下弦材）と軸変形のみを考慮したトラス要素（屋根面水平ブレース、トラスの斜材及び束材等）としてモデル化する。また、耐震壁及び外周梁は各々シェル要素及び軸、曲げ変形を考慮した梁要素としてモデル化し、耐震壁の開口部についても考慮する。なお、柱脚の条件は固定とする。また、解析に用いる材料の物性値を第2.3-1表に示す。

また、屋根トラスは屋根スラブとスタッドで一体化されていることにより高い剛性を確保しているため、屋根トラスの地震応答解析モデルにおいても屋根スラブの面内剛性を考慮することとする。なお、屋根トラス部材の応力評価に対する保守性を考慮し、屋根スラブの面外剛性は考慮しないこととする。屋根スラブのシェル要素は主トラス、サブトラス、母屋の各交点で節点を共有するようにモデル化する。



(a) 線材によるモデル化部分



(b) 面材によるモデル化部分

- : 梁要素
- : トラス要素
- : シェル要素

第 2.3-1 図 屋根トラスの解析モデルの概要

第 2.3-1 表 解析に用いる材料定数

部位	材料	ヤング係数 (N/mm^2)	ポアソン比	減衰定数
屋根トラス	鉄骨	2.05×10^5	0.3	0.02
躯体	コンクリート	2.51×10^4 *1	0.2	0.05

※1：地震応答解析モデルと同様の初期剛性低下については，地震観測記録の分析等を踏まえて，その影響を考慮することとする。その考え方については第 2.3-3 図に示す。

(2) 鉄骨部材の弾塑性評価

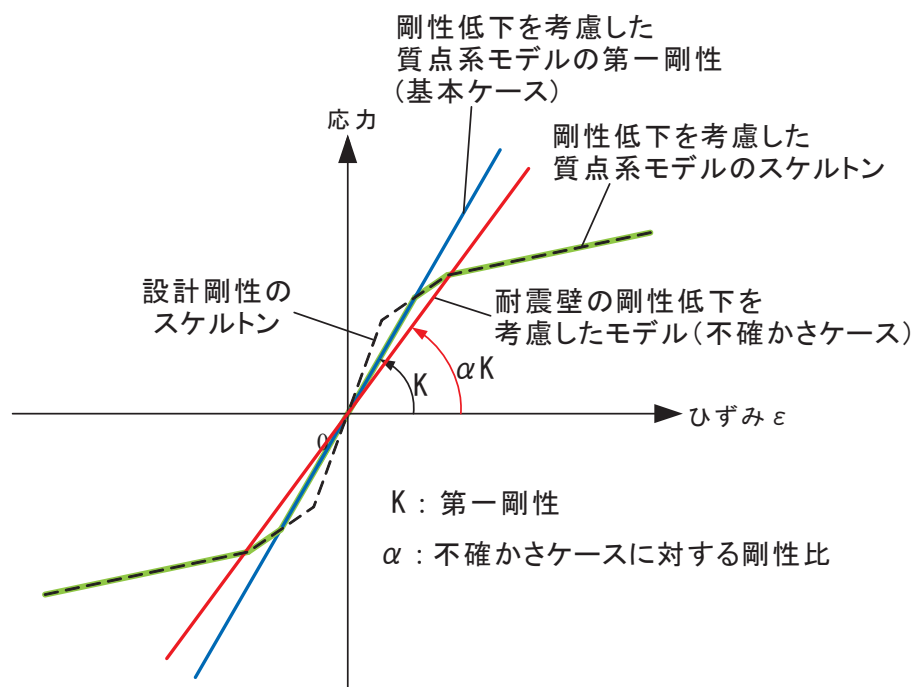
基準地震動 S_s に対する評価を実施する際、トラス材としてモデル化した部材の一部については塑性域に入ると考えられるため、部材座屈後の挙動を模擬できる手法（修正若林モデル）に基づく弾塑性特性を考慮している。考慮した弾塑性特性の詳細については、「2.5 弾塑性解析の採用について」で示すこととする。

(3) 耐震壁，屋根スラブの剛性補正

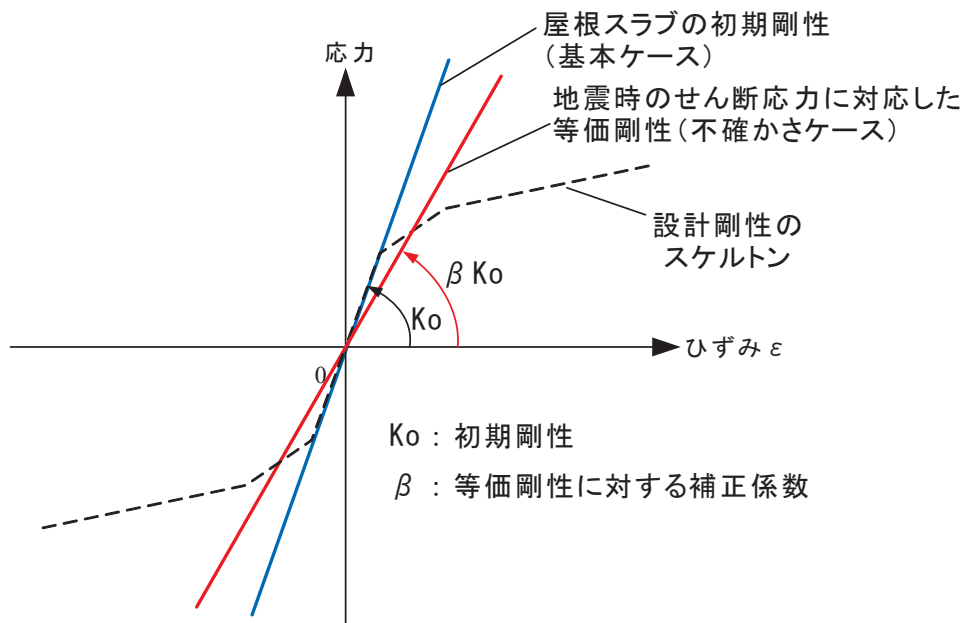
耐震壁及びスラブのシェル要素については、解析コード上の制限により弾性モデルとなっている。

耐震壁のモデル化に当たっては、質点系モデルにおける上部耐震壁の初期剛性低下に整合するよう剛性を補正する方針とする。また、基準地震動 S_s に対しては、質点系モデルにおける耐震壁の復元力特性モデルに基づく剛性低下（非線形化）が生じることから、質点系モデルの非線形化後と同等の剛性低下も考慮する。壁剛性の補正の考え方を第 2.3-2 図に示す。

屋根スラブについては面内剛性のみ考慮するものとするが、耐震壁に比べて生じる面内せん断ひずみは小さい（別紙 11 添付 3-3 参照）ことから設計剛性を基本ケースとする。なお、地震時の応答を踏まえて剛性低減を等価剛性（不確かさケース）として考慮したモデルについても検討する。屋根スラブの剛性の考え方を第 2.3-3 図に示す。



第 2.3-2 図 耐震壁の剛性の考え方



第 2.3-3 図 屋根スラブの剛性の考え方

(4) 入力地震動，材料減衰

解析モデルへの入力地震動は，原子炉建屋の質点系モデルによる地震応答解析結果から得られる燃料取替床レベル (0. P. 33. 2m) の応答結果 (水平，鉛直及び回転成分) を用いることとし，燃料取替床位置を固定として，同時入力による地震応答解析を実施する。原子炉建屋水平方向の質点系モデルは床ばねモデルを採用しているため，入力波はモデル脚部の 2 質点の平均波を入力する。また，地震応答解析における減衰評価は，水平材の応答に影響の大きい鉛直方向 1 次固有振動数 (3. 01Hz) に対して，鉄骨造部分の減衰定数が 2%，鉄筋コンクリート造及び鉄骨鉄筋コンクリート造部分の減衰定数は 5% とし，NS，EW 方向の短い方の 1 次周期に対して減衰係数を設定する剛性比例型内部粘性減衰 (各部別) とする。

(5) 要求機能に対する設計方針 (設計クライテリア)

屋根トラスの要求機能は屋根スラブの間接支持構造物であり，基準地震動 S_s に対し二次格納施設のバウンダリを構成する屋根スラブの要求機能である気密性が確保されるように屋根トラスの設計を行う。

屋根スラブの評価方針は，面内方向については屋根トラスの地震応答解析モデルにおいて屋根スラブの面内剛性を考慮しているため，屋根ス

ラブに発生する面内応力を対象に機能維持評価を実施する。面外方向については、質点系モデルの屋根面に対応する鉛直方向震度を用いて、サブトラス上弦材と母屋に支持される一方向版として評価する。また、屋根トラスの地震応答解析モデルにおいては屋根スラブの面外剛性は考慮していないが、詳細設計段階では面外剛性を考慮した解析により、屋根スラブの応答性状や応力分布などの確認を行う。

屋根トラスの評価方針については、基準地震動 S_s に対して屋根スラブを支持できることを確認する。

第 2.3-2 表に屋根スラブ、屋根トラスの機能維持の評価方針を示す。

なお、屋根スラブにはひび割れに対して追従性のある防水材を全面に施工することにより、防水性を確保している。また、屋根スラブには防水材の他に下部の全面にデッキプレートを敷設してあり、これらは気密性に対し有効な機能を有すると考えられるが、今回の気密性の検討においては、特にその性能は考慮しない。

第 2.3-2 表 機能維持の評価方針

部位	要求機能	評価方針
屋根スラブ	気密性	<p>(面内) おおむね弾性範囲内であることを算定される応力度より確認する。弾性範囲を超える場合は、面内せん断ひずみの許容値である最大せん断ひずみ (2.0×10^{-3}) での漏えい量を算定し換気能力を下回ることを確認する。</p> <p>(面外) 辺長比を考慮して、サブトラス上弦材と母屋に支持される一方向版として、鉛直方向の震度を考慮して、面外曲げに対して、鉄筋が降伏しないこと^{※1}を確認する。 (鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討)</p>
屋根トラス	間接支持 構造物	基準地震動 S_s に対して屋根スラブを支持できること。(各部材のクライテリアは第 2.5-2 表参照)

※1 鋼材の基準強度 1.1 倍を超えないこと

2.4 既工認と今回工認における原子炉建屋屋根トラスの解析モデルの比較

原子炉建屋屋根トラスの解析モデルについて、既工認で採用した解析モデルと今回工認で採用する予定の解析モデルとの差異を整理する。既工認における屋根トラスの解析モデルと今回工認で採用予定の解析モデルの比較表を第2.4-1表に示す。

第2.4-1表のうち、解析コード、要素分割及び地震荷重の差異については、解析手法を変更したことに伴う変更である。また、モデル化については、原子炉建屋屋根トラスが鉛直方向の地震動の影響を受けやすいと考えられるため、水平方向と鉛直方向地震力の同時入力による評価を適切に行うことを目的として3次元フレームモデルによる弾塑性時刻歴応力解析を採用している。

以上を踏まえると、既工認と今回工認における主要な差異として、「原子炉建屋屋根トラスに対する弾塑性時刻歴応力解析の採用」を抽出し、以下で検討を行うこととした。

なお、今回工認の弾塑性時刻歴応力解析では、解析モデル全体の自重による変形及び地震時挙動を精度良く評価するために、屋根スラブも含めてモデル化している。屋根トラスは鉛直荷重を支持する部材として設計されており、主トラスについてはフレームを構成する部材として地震時の荷重も負担する設計としている。従って、屋根トラスの各部材に生じる応力としては、鉛直方向の自重による初期応力のほか、屋根スラブと一体となった屋根トラスの鉛直方向の面外振動による応力が加わる。また、主トラス方向の地震荷重に対しては主トラスの上下弦材やトラス材に応力が発生する。このように動的な地震応答解析では、屋根スラブをモデル化することにより、地震時の挙動が適切に評価される。

以上のように、今回工認では、オペフロ上部を立体的なモデルとして動的な地震応答解析を実施しているが、解析手法の妥当性については3.11地震のシミュレーション解析により確認している。

第 2.4-1 表 原子炉建屋屋根トラスの解析モデルの比較

項目	既工認	今回工認
解析手法	・静的応力解析	・時刻歴応力解析（弾塑性解析）
解析コード	・SD（鹿島建設所有）	・fappase（鹿島建設所有）
モデル化	・2次元フレームモデル	・3次元フレームモデル
要素分割	梁要素： 主トラスの上下弦材，鉄骨柱，RC柱 トラス要素： 主トラスの斜材，束材	梁要素： 主トラス及びサブトラスの上下弦材，母屋，外周鉄骨梁，鉄骨柱，RC柱 トラス要素： 主トラスの斜材，束材，サブトラスの斜材，水平ブレース シェル要素： 耐震壁，屋根スラブ
材料物性	・鉄骨のヤング係数 $E=2.1 \times 10^7$ (t/m ²) ・コンクリートのヤング係数 $E=2.7 \times 10^6$ (t/m ²) ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.167$	・鉄骨のヤング係数 $E=2.05 \times 10^5$ (N/mm ²) ・コンクリートのヤング係数 $E=2.51 \times 10^4$ (N/mm ²) ※ ¹ ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.2$ ※ ²
評価方法	・S1地震及び静的地震力に対して短期許容応力度設計	・Ss地震に対し主トラスの各部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認 ・弾塑性特性（修正若林モデル）を適用する部材※ ³ が過度な塑性化はしないことを確認
地震荷重	・水平：原子炉建屋の質点系モデルの地震応答解析結果に基づく荷重（変位）を静的に考慮 ・鉛直：静的震度を鉛直力として入力	・水平及び鉛直：モデル脚部に原子炉建屋の質点系モデルの地震応答解析による応答を同時入力

※1：コンクリートのヤング係数としては、日本建築学会「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」（1999）による計算式により算定した数値を用いる。

※2：適用基準を日本建築学会「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」（1999）に見直したことによる。

※3：軸力のみを負担するトラス要素でモデル化した部材に弾塑性特性を考慮する。

2.5 弾塑性解析の採用について

2.5.1 弾塑性解析を採用することの目的

原子炉建屋屋根トラスについては、基準地震動 S_s による地震動の増大に伴い、トラスを構成する部材の一部が塑性域に入ると考えられるが、弾性解析では当該部材の塑性化による影響を考慮できないため、解析と実現象に乖離が生じることになる。そこで今回工認では、屋根トラスの弾塑性挙動を適切に評価することを目的として、部材の弾塑性特性を考慮した地震応答解析を採用する予定としている。

原子炉建屋屋根トラスの応力解析に弾塑性解析を取り入れることによる利点としては、既工認で採用していた弾性解析では表現出来ないような大入力時の弾塑性挙動を評価できることにある。弾塑性挙動の適切な評価に当たっては、部材の弾塑性特性を適切に設定し解析を実施する必要があると考えられる。

今回工認で採用予定の屋根トラス部材の弾塑性特性を第 2.5-1 表に示す。第 2.5-1 表に示すとおり、軸力のみを負担するトラス要素に対してのみ弾塑性特性として修正若林モデルを採用する予定である。当該モデルについては、先行審査にて採用実績があり、モデルの妥当性自体に大きな論点はないと考えられるものの、原子炉建屋屋根トラス部材の評価への適用性については、十分に確認する必要があると考えられる。

以下では、修正若林モデルの概要を確認した上で、原子炉建屋屋根トラス部材への適用性を検討する。また、修正若林モデルを用いた弾塑性解析を実施することにより、一部部材の塑性化を考慮することとなるため、当該部材のクライテリアについても検討する。

第 2.5-1 表 屋根トラス部材の弾塑性特性について

評価部位		モデル要素	弾塑性特性
主トラス	上弦材	梁要素	考慮しない（弾性）
	下弦材		
	斜材	トラス要素	弾塑性（修正若林モデル）
	束材		
サブトラス	上弦材	梁要素	考慮しない（弾性）
	下弦材		
	斜材	トラス要素	弾塑性（修正若林モデル）
母屋		梁要素	考慮しない（弾性）
水平ブレース	上弦面	トラス要素	弾塑性（修正若林モデル）※1
	下弦面		
外周鉄骨梁		梁要素	考慮しない（弾性）
鉄骨柱		梁要素	考慮しない（弾性）

※1：水平ブレースの細長比は修正若林モデルの適用範囲より大きいですが，部材剛性と部材重量を考慮するため解析モデルに考慮する。ただし，水平ブレースの部材断面は小さいため，剛性と部材重量の影響は軽微であると考えられる。水平ブレースの破断に対する対策として，すべての部材をワイヤーで吊り下げて，万一破断しても落下しないように対策している。

2.5.2 弾塑性特性の設定の妥当性・適用性について

(1) 今回工認で採用予定の弾塑性特性（修正若林モデル）の概要

原子炉建屋屋根トラスを構成する部材のうち、軸力のみを負担するトラス要素としてモデル化した部材については、弾塑性特性として修正若林モデルを使用している。

修正若林モデルは、原子力発電所建屋（実機）を対象として実施された谷口らの研究^[1]に示される部材レベルの弾塑性特性である。修正若林モデルは、若林モデル^[2]を基本としているが、谷口らの研究^[1]で実施された実験のシミュレーション解析を踏まえて、繰返し载荷による初期座屈以降の耐力低下を累積塑性歪の関数で表現し、実験との対応度を向上させた手法であり、式（1）により評価される。

$$n/n_0 = 1/(\bar{\zeta} - Pn)^{1/6} \leq 1 \quad (1)$$

$$n = N/N_y \quad N: \text{軸力} \quad N_y: \text{降伏軸力}$$

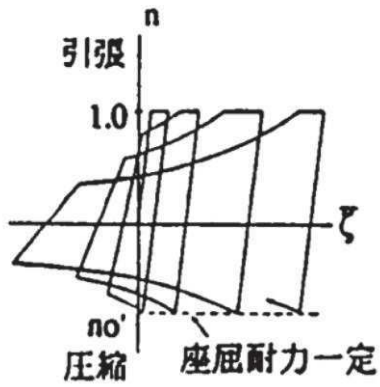
$$n_0: \text{無次元化初期座屈耐力} \quad \bar{\zeta}: \text{無次元化圧縮側累積塑性歪}$$

$$Pn = (n_E/4) - 5 \quad n_E = \pi^2 E / (\lambda e^2 \sigma_y) \quad \lambda e: \text{有効細長比}$$

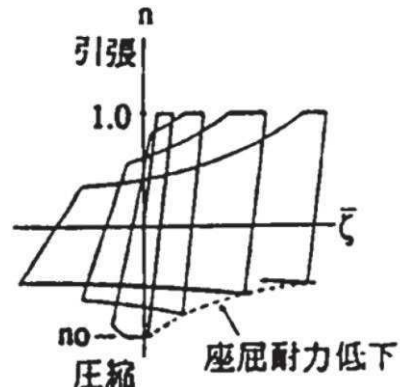
修正若林モデルの弾塑性特性を第 2.5-1 図に示す。

谷口らの研究^[1]においては、実機の特徴を反映した X 型ブレース架構の静的繰返し実験を実施している。また、修正若林モデルの妥当性を確認するに当たって、ブレース部材の弾塑性特性として修正モデルを適用した解析モデルによる実験のシミュレーション解析を実施しており、解析結果は実験結果をおおむねよく捉えているとしている。試験体の概要を第 2.5-2 図、解析モデルを第 2.5-3 図、解析結果と実験結果の比較を第 2.5-4 図に示す。

なお、本弾塑性特性については、前述のとおり、川内原子力発電所タービン建屋の解析で考慮したブレースの弾塑性特性として採用されており、認可実績がある。

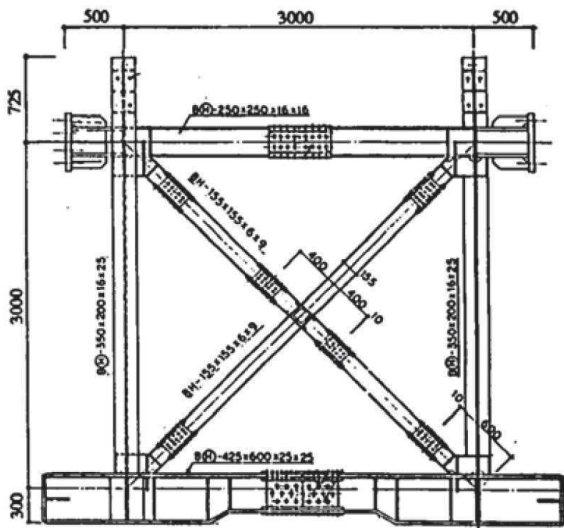


(参考) 若林モデル

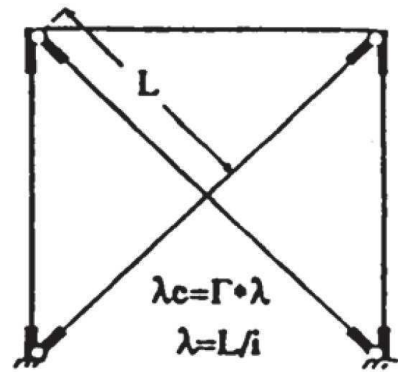


修正モデル

第 2.5-1 図 修正若林モデルの弾塑性特性 ([1]より引用, 一部加筆)

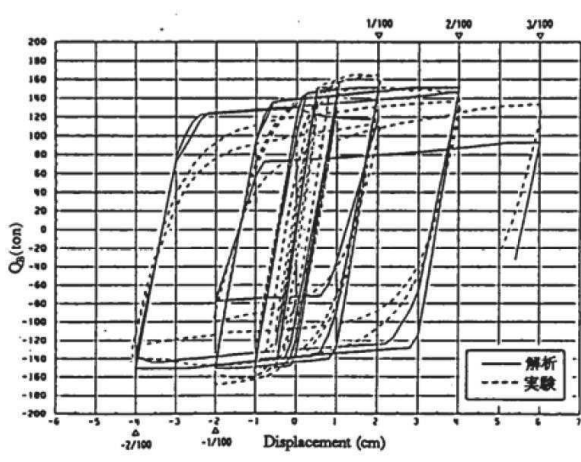


第 2.5-2 図 試験体の概要 ([1]より引用)

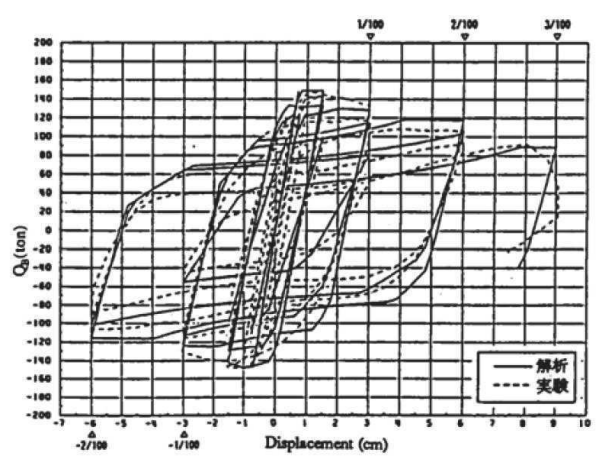


Γ ; 等価座屈長さ係数
 λ_c ; 有効細長比
 λ ; 細長比(芯々)

第 2.5-3 図 解析モデル ([1]より引用)



SXII - 40.9 - B



SXIII - 60.9 - B

第 2.5-4 図 解析結果と実験結果の比較 ([1]より引用)

(2) 原子炉建屋屋根トラスに対する検証例

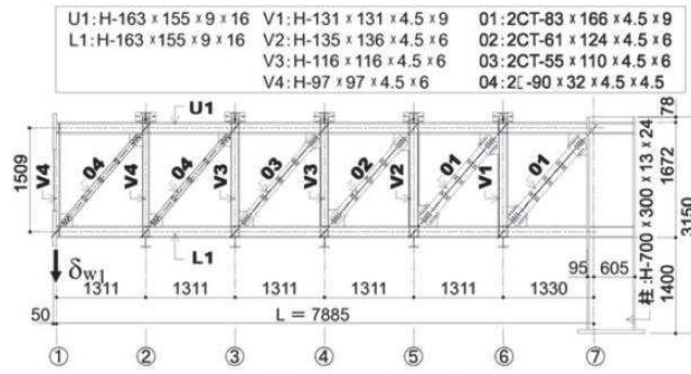
谷口らの研究^[1]は、X型ブレース架構を対象としたものであったが、原子炉建屋屋根トラスに対して本弾塑性特性を適用した検討例として、鈴木らの研究^[3]がある。

この研究は、原子炉建屋屋根トラスの終局耐力について検討したものであるが、実験結果を高精度にシミュレーションするために構築したモデルの中で本弾塑性特性が適用されている。

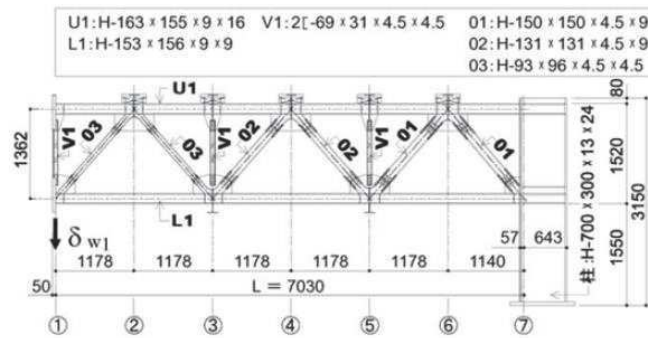
鈴木らの研究^[3]では、終局耐力を検討するに当たり原子炉建屋屋根トラスを模擬した縮小試験体を製作し、トラスの崩壊挙動に与える影響が大きい鉛直動的荷重を模擬した静的载荷試験により、その弾塑性挙動を確認している。なお、試験に当たっては、原子力発電所鉄骨屋根トラスがプラット形とワーレン形の2種類に分類されることを踏まえ、この2種類のトラス形式についての試験体を製作している。原子炉建屋屋根トラスはこのうち、ワーレン形に該当する。試験体の概要を第2.5-5図に示す。

実験のシミュレーション解析においては、トラス要素としてモデル化した部材の弾塑性特性として修正若林モデルが適用されており、実験結果とシミュレーション解析を比較し、精度良く実験結果を追跡できているとしている。結果の比較を第2.5-6図に示す。

以上のように修正若林モデルは、提案当初のX型ブレース材に加えて、ワーレン形、プラット形の鉄骨トラスでも実験結果を精度良く追跡できている。幅広い鉄骨架構形式において軸力のみを負担する部材の弾塑性特性として適用可能であると考えられる。

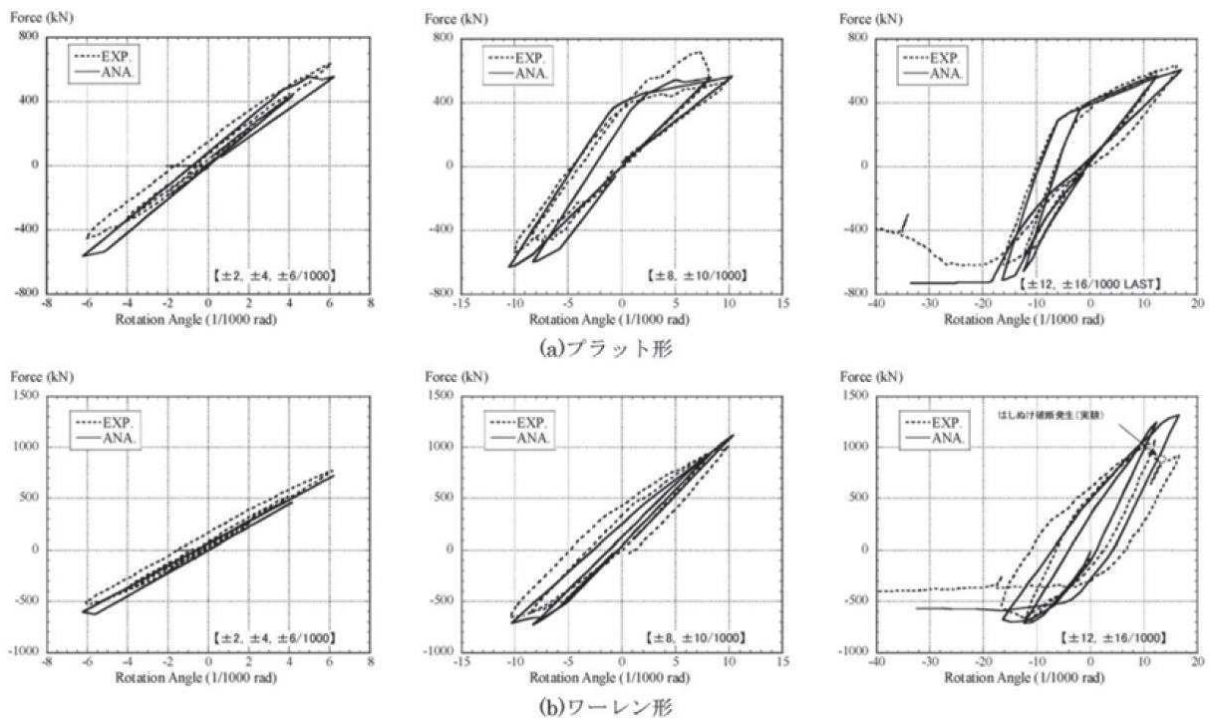


(a)プラット形試験体



(b)ワーレン形試験体

第 2.5-5 図 試験体の概要 ([3]より引用)



(b)ワーレン形

第 2.5-6 図 実験のシミュレーション解析結果 ([3]より引用)

(3) 原子力発電所鉄骨屋根トラスへの適用性

今回採用を予定している修正若林モデルについては、提案当初より、原子力発電所（実機）を対象として実施された実験により妥当性が検証されており、また、原子炉建屋鉄骨屋根トラスを模擬した加力実験のシミュレーション解析においてもその適用性・妥当性が検証されている。これより、原子炉建屋屋根トラスの鉄骨部材のうち、トラス要素としてモデル化した部材の弾塑性特性として、修正若林モデルを採用することは妥当であると考えられる。

2.5.3 各部材のクライテリアについて

入力地震動の増大に伴い鉄骨部材の一部が塑性域に入ると考えられることから、今回工認においては、弾塑性解析による評価を実施する。

弾性部材としてモデル化している上弦材，下弦材，母屋については，主要部材が弾性範囲であることを確認する方針とする。

弾塑性特性を考慮してモデル化している斜材，束材については，過度な塑性化はしないことを確認する方針とする。ただし，主トラスの斜材，束材については，既工認時から地震力を負担する部材として取り扱われており，既工認と同様に主要部材が弾性範囲であることを確認する方針とする。

弾性範囲であることを確認する部材について，弾性範囲を上回る応答が生じた場合は別途詳細な検討を行う。

第2.5-2表に各部材のクライテリアを示す。

過度な塑性化はしないことの確認に当たっては，各部材の累積塑性変形倍率を整理した上で，累積塑性変形倍率が最も大きい部材について，破断の可能性がないことを検討する。検討は，当該部材の履歴ループを参照し，局部集中ひずみの繰返し回数が，中込ほか(1995)^[4]に基づき算定される，当該部材の最大ひずみ度に対する破断寿命（繰返し回数）を下回っていることを確認する。この手法は先行審査（川内原子力発電所タービン建屋）でも認可実績のある手法であることから，手法自体に技術的な論点はないものと考えられる。

第 2.5-2 表 今回工認における屋根トラス各部材のクライテリア

評価部位		要求機能	弾塑性特性	評価方法
主トラス	上弦材	鉛直荷重の支持, フレームを構成する部材として水平地震荷重, クレーン荷重の支持	考慮しない (弾性)	主要部材が弾性範囲であることを確認 ^{※1} (弾性範囲を上回る場合は別途詳細検討)
	下弦材		弾塑性(修正 若林モデル)	
	斜材			
	束材			
サブトラス	上弦材	鉛直荷重の支持	考慮しない (弾性)	主要部材が弾性範囲であることを確認 ^{※1} (弾性範囲を上回る場合は別途詳細検討)
	下弦材			
	斜材		弾塑性(修正 若林モデル)	過度な塑性化はしないことを確認
母屋		鉛直荷重の支持	考慮しない (弾性)	主要部材が弾性範囲であることを確認 ^{※1} (弾性範囲を上回る場合は別途詳細検討)
水平 ブレース	上弦面	- (仮設材)	弾塑性(修正 若林モデル)	仮設材のため評価対象外
	下弦面	- (仮設材)		仮設材のため評価対象外

※1 鋼材の基準強度 1.1 倍を超えないこと

2.6 原子炉建屋屋根トラスの評価に関するまとめ

今回工認では、原子炉建屋屋根トラスの評価に当たって、3次元フレームモデルによる弾塑性解析（弾塑性特性としては修正若林モデルを考慮）を採用する予定である。修正若林モデルは先行審査で採用実績のある弾塑性特性であるが、X型ブレースを対象として検討されたものであったため、既往文献（原子炉建屋鉄骨屋根トラスを模擬した加力実験のシミュレーション解析）を参照し、その適用性・妥当性が検証されていることを確認した。また、屋根スラブの要求機能と評価方針を踏まえ、弾塑性特性を考慮する鉄骨部材のクライテリアについて整理した。

以上より、今回工認において原子炉建屋屋根トラスの評価に弾塑性解析を採用することは妥当であると考ええる。また、弾塑性解析の結果を踏まえ、屋根トラスの評価及び屋根スラブの検討により、屋根スラブの二次格納施設としての機能維持の評価方針を整理した。

なお、原子炉建屋屋根トラスは、原子炉建屋の地震応答解析結果に基づく燃料取替床（オペフロ）レベルの応答を入力地震動として評価を実施しており、入力地震動の不確かさ（建屋応答の不確かさ）を踏まえた場合でも許容値を満足することを確認することにより保守性に配慮した設計とする予定である。

3. まとめ

2号炉原子炉建屋の屋根トラスについて、既工認と今回工認における解析モデル及び解析手法を比較した。その結果、既工認と差異が認められる部分についてはその妥当性・適用性について検討を行い、今回工認で使用する解析モデルとして妥当であることを確認した。

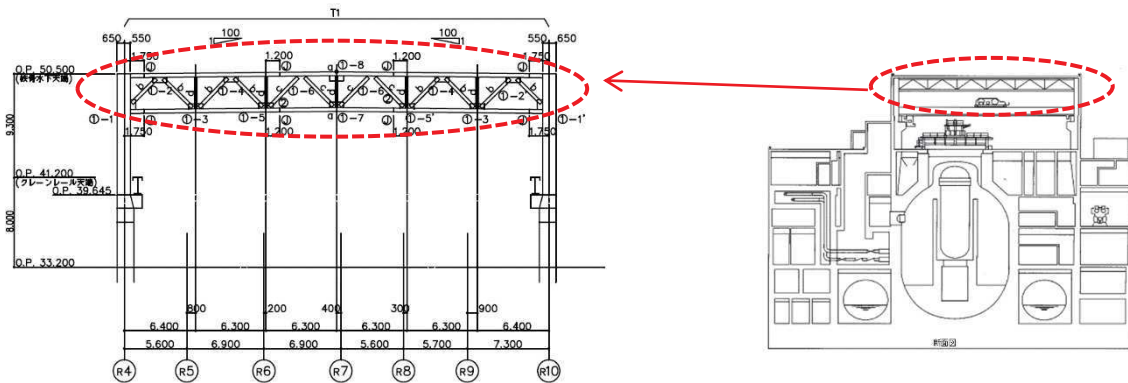
【参考文献】

- [1] 谷口ほか：鉄骨 X 型ブレース架構の復元力特性に関する研究，日本建築学会構造工学論文集 Vol. 37B 号，1991 年 3 月，pp303-316
- [2] 柴田ほか：鉄骨筋違の履歴特性の定式化，日本建築学会構造系論文集第 316 号，昭和 57 年 6 月，pp18-24
- [3] 鈴木ほか：原子力発電所鉄骨屋根トラスの終局限界に関する研究，日本建築学会構造系論文集 Vol. 76No. 661，2011 年 3 月，P571-580
- [4] 中込ほか（1995）：繰返し力を受ける SM490 鋼の疲労性に関する研究 日本建築学会構造系論文集 No. 469, 127-136, 1995. 3

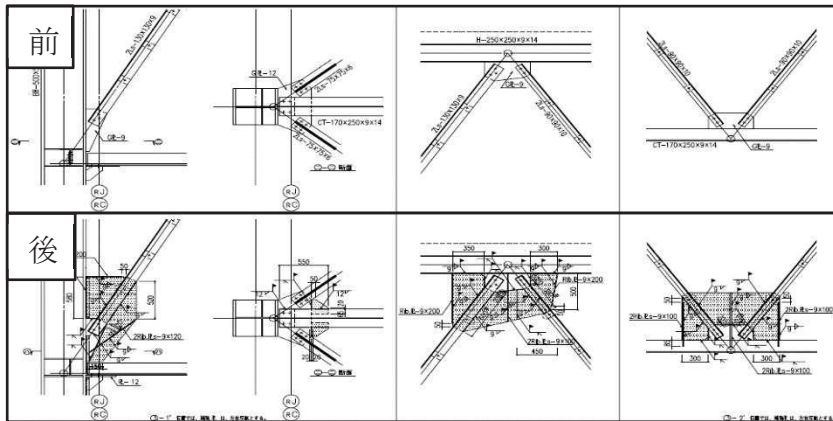
原子炉建屋屋根トラスの特徴

1. 原子炉建屋屋根トラスの特徴

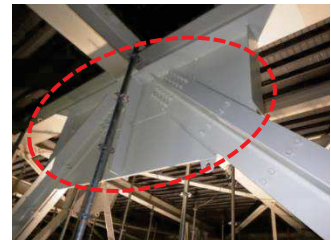
原子炉建屋屋根トラスについては、3.11地震後に接合部の補強を実施している。補強状況を参考 1-1 図に示す。



断面図

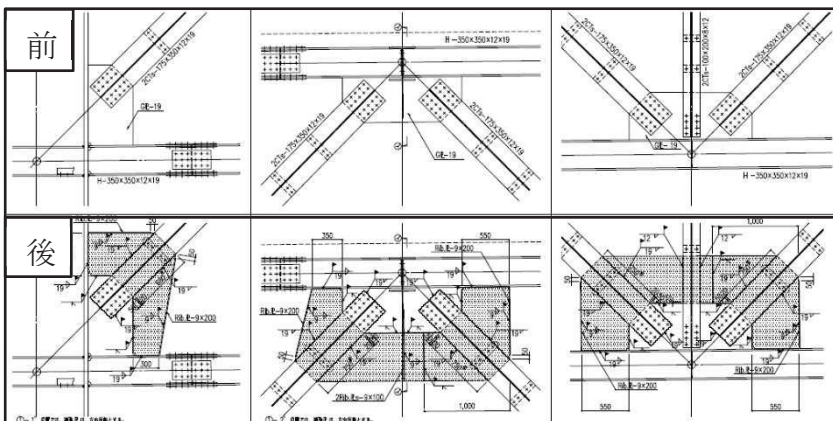


サブトラス：補強前後



(水平ブレースの落下防止ワイヤー)

屋根トラス接合部の補強状況写真



主トラス：補強前後

参考 1-1 図 原子炉建屋屋根トラスの補強状況

原子炉建屋屋根トラスの地震時シミュレーション

1. 屋根トラスの地震時シミュレーション

2号炉原子炉建屋の屋根トラスのモデル化の妥当性を確認するために、地震観測記録を用いてシミュレーション解析を実施している。検討対象地震は、3.11地震の観測記録とし、燃料取替床（オペフロ）の観測記録を入力地震動として、屋上の地震観測記録のシミュレーション解析を実施している。解析結果は別紙 11 添付 3-5 に示す。

屋上位置のシミュレーション解析と観測記録の加速度応答スペクトルを比較すると、各方向ともおおむね整合する結果となっている。

このことから、オペフロ階の耐震壁に対する補強工事（鉄骨ブレースの設置や鉄筋コンクリート壁の増設等）前において屋根トラスのモデルについては妥当と考えられる。

なお、今回工認の屋根トラスの解析モデルにおいては、屋根トラスに対する保守性を考慮した設計的観点及び3.11地震後に実施した補強工事等を考慮して、参考 2-1 表に示す項目を、このシミュレーションモデルから変更している。

参考 2-1 表 シミュレーション解析モデルと今回工認モデルの比較

項目	シミュレーション 解析モデル	今回工認モデル	
目的	地震観測記録の再現	保守性を考慮した設計	
モデル化	合成梁	主トラス上弦材, サブトラス上弦材, 母屋, 外周鉄骨梁を合成梁として考慮	考慮しない
	屋根面のシェル要素	面内剛性, 面外剛性を考慮	面内剛性のみ考慮
	燃料取替床上部耐震補強工事	工事前の状態(補強なし)	工事後の追設部材をモデル化
	積載荷重	実状を勘案し, 屋根面の積載荷重は考慮しない	設計として屋根面の積載荷重を考慮

剛性比例型減衰の妥当性について

1. はじめに

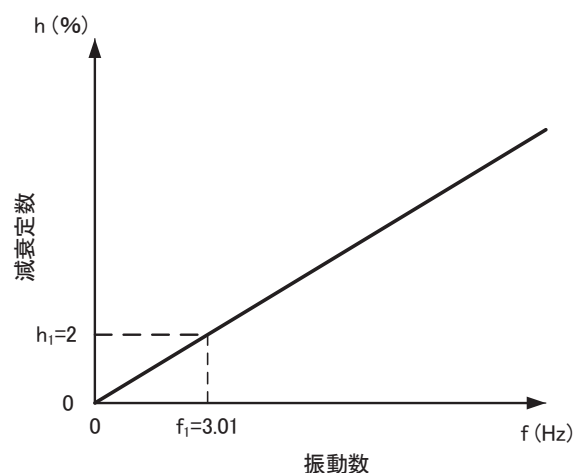
今回工認では、原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析における減衰評価について、鉄骨造の構造物に対して一般的に適用している剛性比例型としている。

参考 3-1 表に原子炉建屋屋根トラスの暫定の固有値解析結果を、参考 3-1 図に剛性比例型減衰による減衰定数と振動数の関係を示す。

鉄骨造の屋根トラスは、水平材として鉛直方向の挙動が卓越すると考えられるため、水平材の応答に影響の大きい鉛直方向 1 次固有振動数 (3.01Hz) に対して減衰定数が $h=2\%$ となる剛性比例型減衰を与えている。参考 3-1 図より、剛性比例型減衰の特徴として高次モードの減衰を大きくとることになるが、高次モードが屋根トラスの応答へ及ぼす影響は小さいため、剛性比例型減衰の採用が屋根トラスの応答へ与える影響は小さいと考える。

参考 3-1 表 原子炉建屋屋根トラスの固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			備考
			NS方向 (X)	EW方向 (Y)	鉛直方向 (Z)	
1	3.01	0.332	0.036	0.008	2.272	鉛直方向1次
46	5.19	0.193	-0.010	0.140	1.350	鉛直方向2次
78	6.80	0.147	2.802	0.417	0.039	N S 方向1次
102	8.34	0.120	0.759	-7.982	0.320	E W 方向1次



参考 3-1 図 剛性比例型減衰による減衰定数と振動数の関係

2. 剛性比例型減衰設定の妥当性の確認

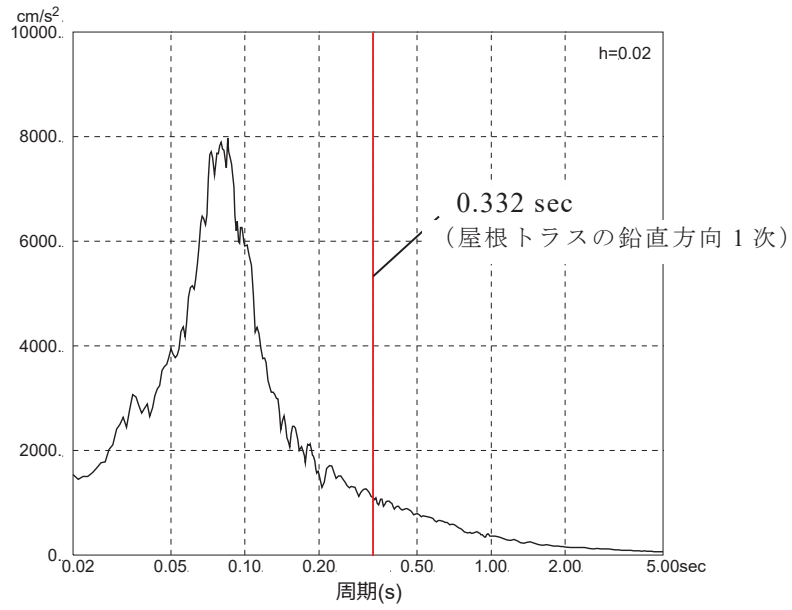
参考 3-1 表に示すとおり屋根トラスの水平方向の 1 次固有振動数(固有周期)は、NS 方向 : 6.80Hz (0.147sec), EW 方向 : 8.34Hz (0.120sec)であり、鉛直方向の 1 次固有振動数は、3.01Hz (0.332sec)である。剛性比例型減衰の採用にあたっては、上記の振動数のいずれかの振動数を基準に設定することとする。

原子炉建屋の地盤-建屋連成系の水平方向の 1 次固有振動数は NS 方向 4.21Hz (0.237sec), EW 方向 4.36Hz (0.230sec)である。鉛直方向については、地盤-建屋相互作用系の 1 次固有振動数は 9.96Hz (0.100sec)である。これらの 1 次固有振動数から屋根トラスの応答に影響が大きい成分を判断することは難しい。屋根トラスの構造面からは、鉛直方向の振動の影響が大きいと判断されるため、剛性比例型減衰の設定は鉛直方向の 1 次固有振動数に対して設定することとする。

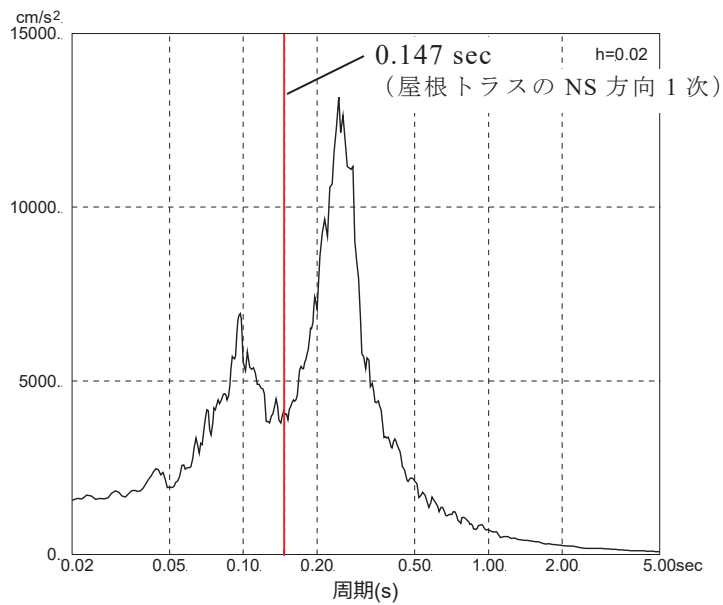
また、参考として屋根トラスの各方向の固有周期と解析モデルへの入力地震動の加速度応答スペクトルの関係を参考 3-2 図に示す。入力地震動の応答スペクトルの卓越周期は原子炉建屋の地盤-建屋連成系の各方向の 1 次周期におおむね対応しており、いずれの方向についても赤線で示す屋根トラスの 1 次固有周期とは離れた周期となっている。

以上のことから、屋根トラスの応答は、建屋の各方向の 1 次固有振動数(固有周期)との関連性が小さいため減衰を過大に評価することが無く、屋根トラスモデルの固有振動数のうち、応答性状に支配的と考えられる鉛直の 1 次固有振動数(3.01Hz)に対して減衰定数が $h=2\%$ となる剛性比例型減衰を設定することは妥当であると考えられる。

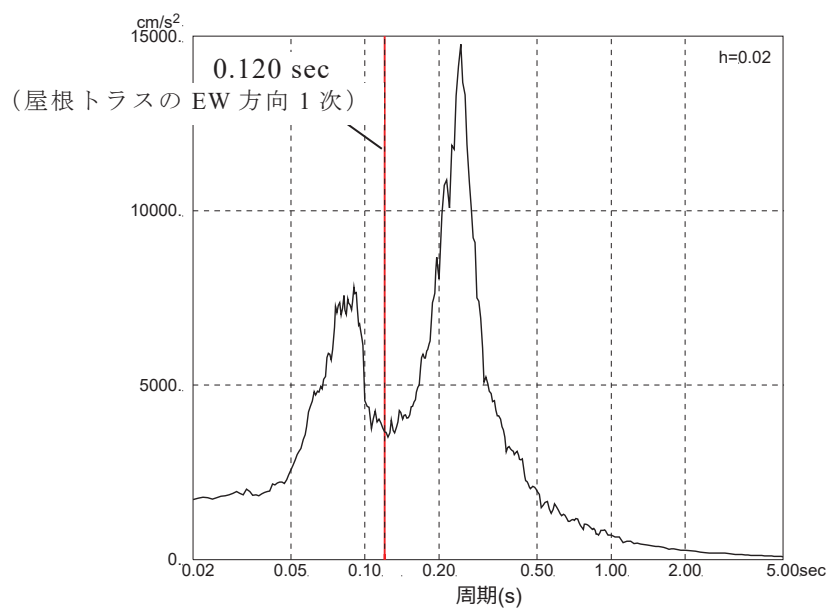
なお、詳細設計においては、必要に応じて剛性比例型以外の減衰(例えば鉛直 1 次と 2 次で規定したレイリー減衰)を用いて、高次モードの影響を確認することとする。



参考 3-2 図 (a) 屋根トラスの固有周期と
 入力地震動の加速度応答スペクトルの関係
 鉛直方向



参考 3-2 図 (b) 屋根トラスの固有周期と
 入力地震動の加速度応答スペクトルの関係
 NS 方向

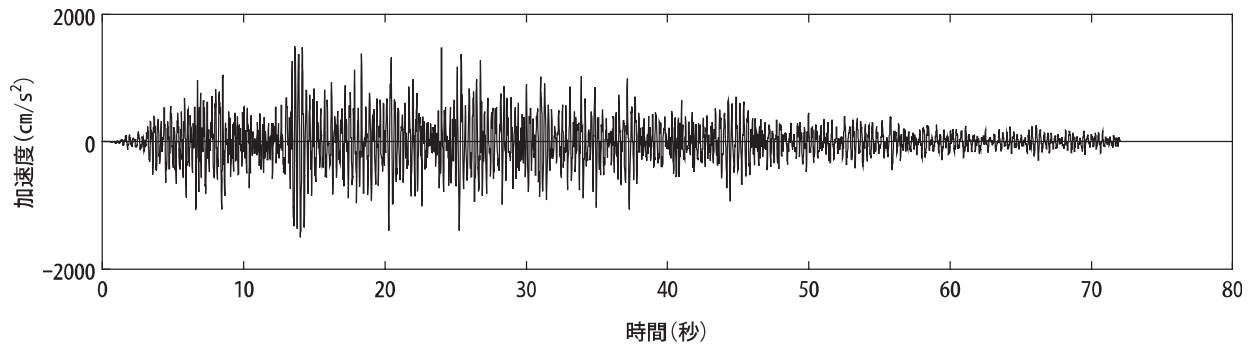


参考 3-2 図 (c) 屋根トラスの固有周期と
 入力地震動の加速度応答スペクトルの関係
 EW 方向

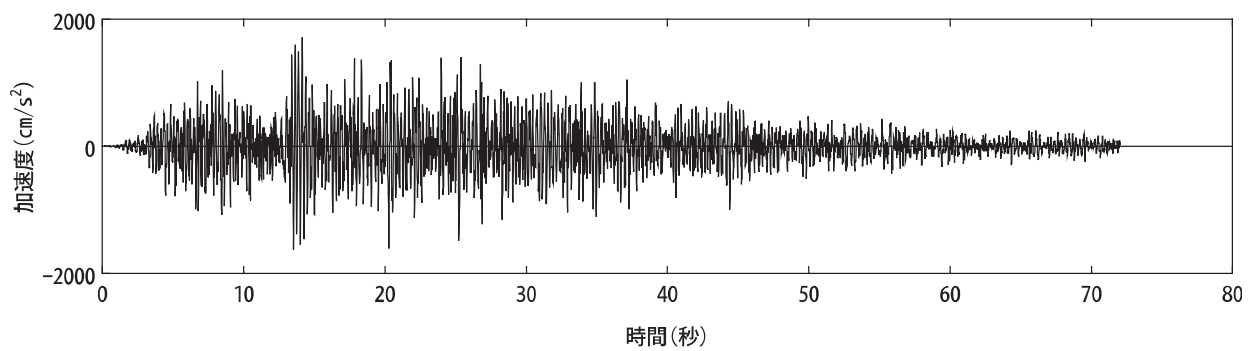
屋根トラスの入力地震動及び固有振動数・固有モードについて

1. 屋根トラスの入力地震動

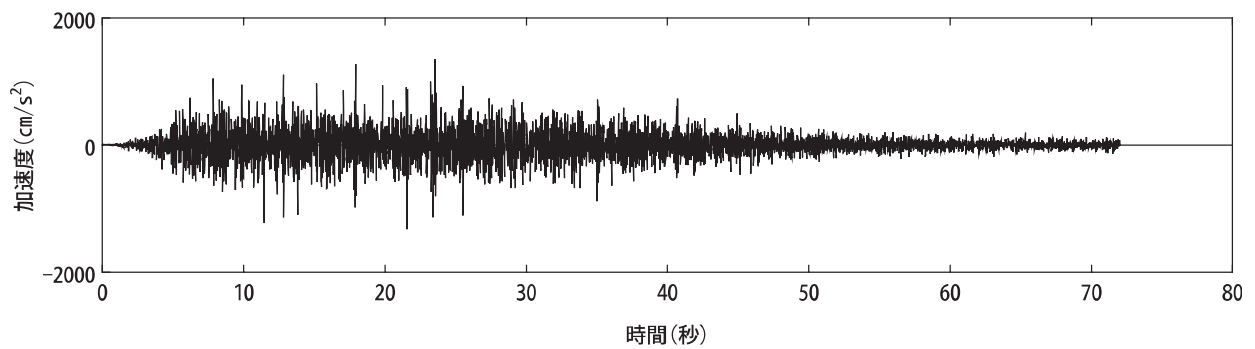
屋根トラスへの入力として用いている入力地震動(原子炉建屋の質点系モデルによる地震応答解析結果から得られる燃料取替床レベル(0. P. 33. 2m)の応答結果)の時刻歴波形(暫定応答)について、Ss-D2を例として参考4-1図に示す。地震応答解析を実施する際には、水平、鉛直成分は加速度時刻歴波形を、回転成分は回転角加速度時刻歴波形を入力している。



(a) 南北方向 (水平)

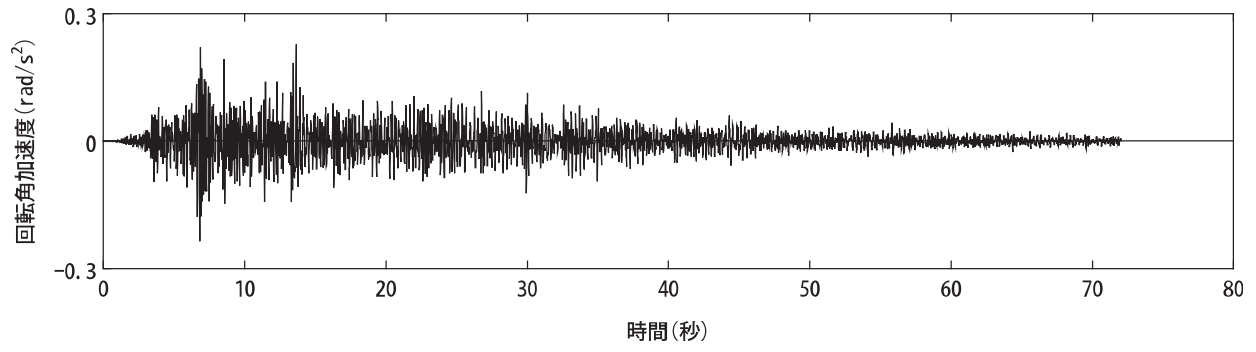


(b) 東西方向 (水平)

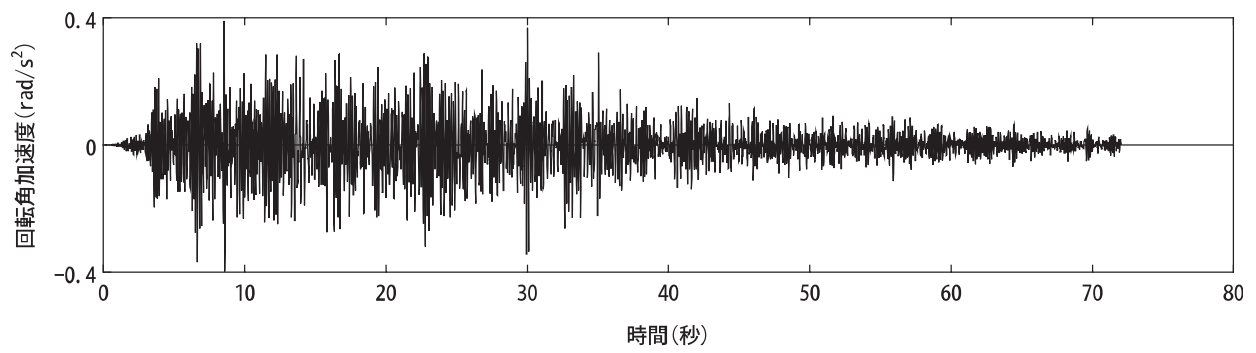


(c) 鉛直方向

参考4-1図(1) 入力地震動の時刻歴波形
(加速度, 水平, 鉛直成分)



(a) 南北方向 (回転)



(b) 東西方向 (回転)

参考4-1図(2) 入力地震動の時刻歴波形
(加速度, 回転成分)

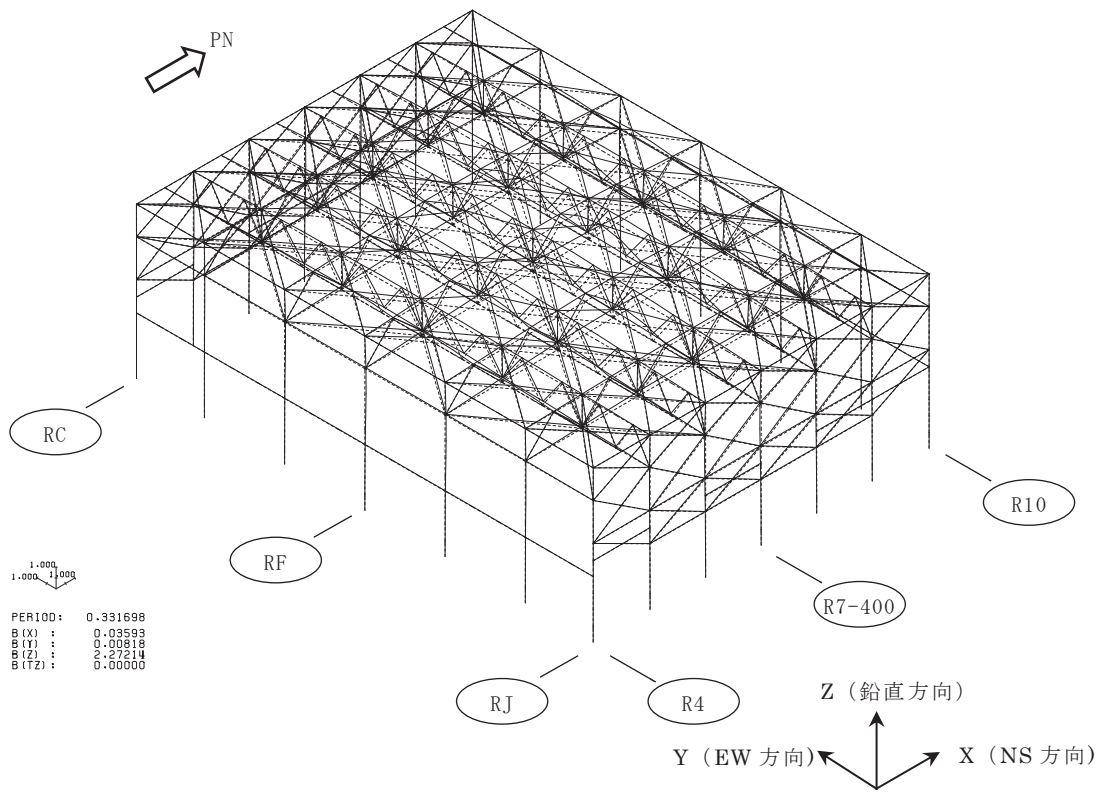
2. 屋根トラスの固有値解析結果

屋根トラスの暫定の固有値解析結果を参考 4-1 表及び参考 4-2 図に示す。

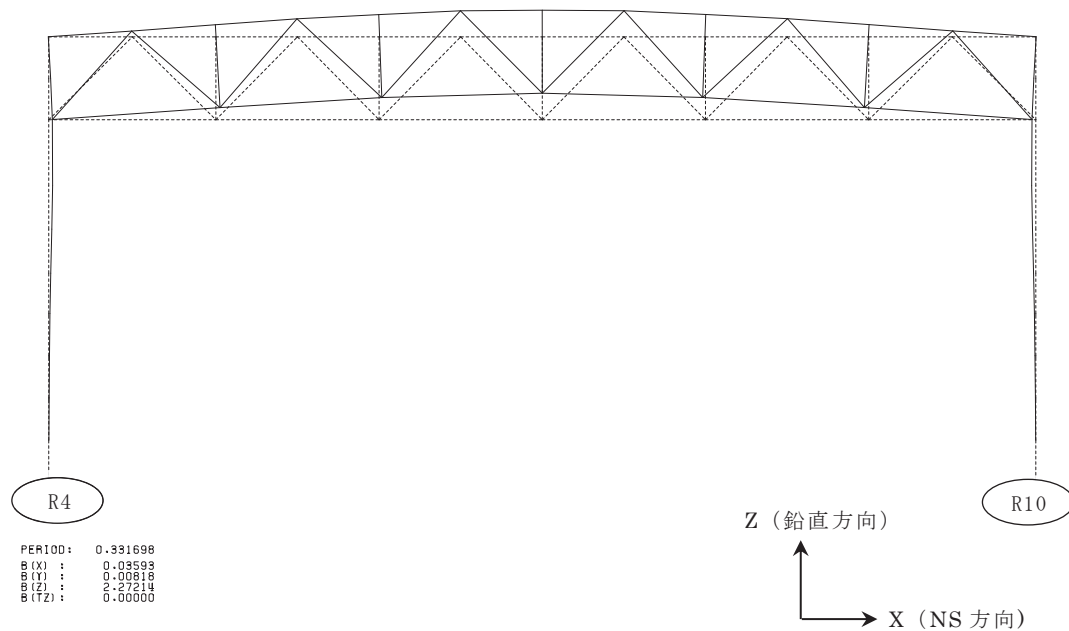
1 次固有振動数は鉛直方向で 3.01Hz, 水平方向で 6.80Hz (NS 方向), 8.34Hz (EW 方向) となる。

参考 4-1 表 固有値解析結果

次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数			備考
			NS方向 (X)	EW方向 (Y)	鉛直方向 (Z)	
1	3.01	0.332	0.036	0.008	2.272	鉛直方向1次
46	5.19	0.193	-0.010	0.140	1.350	鉛直方向2次
78	6.80	0.147	2.802	0.417	0.039	N S 方向1次
102	8.34	0.120	0.759	-7.982	0.320	E W 方向1次

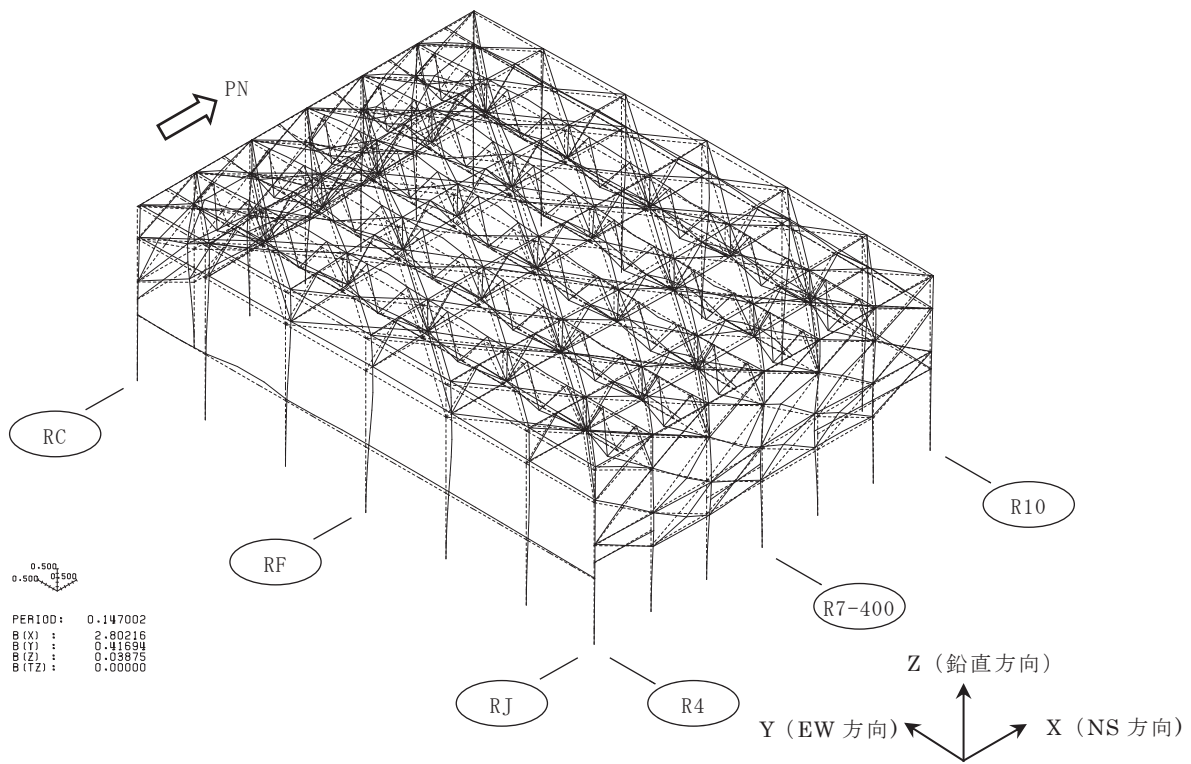


(a) 全体

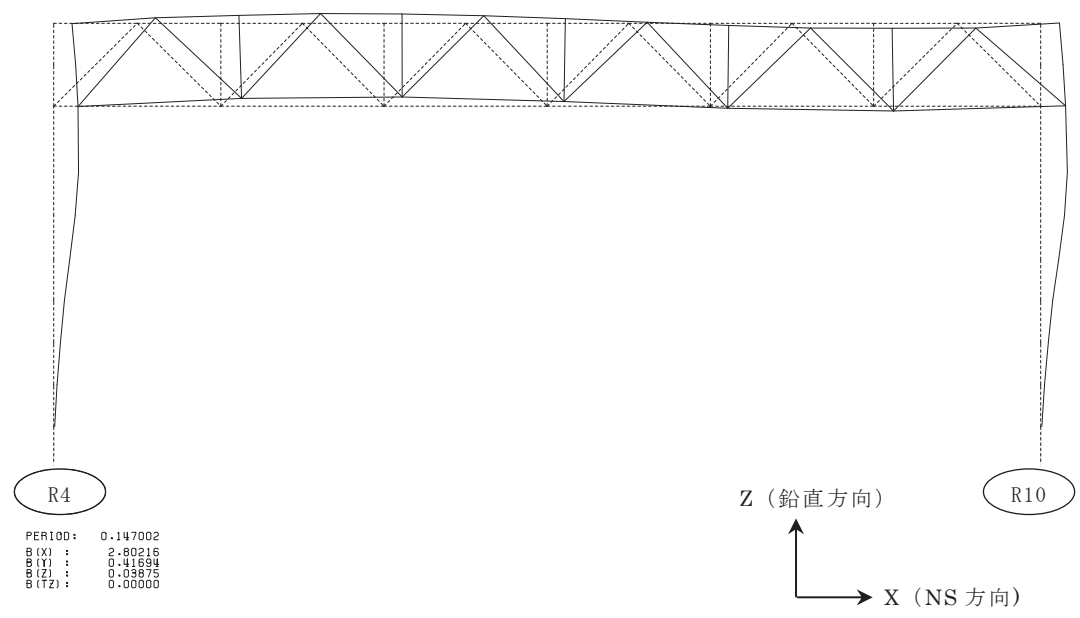


(b) 主トラス構面 (RF 通り)

参考 4-2 図 (1) 固有モード図(全体 1 次 : 屋根の鉛直 1 次)

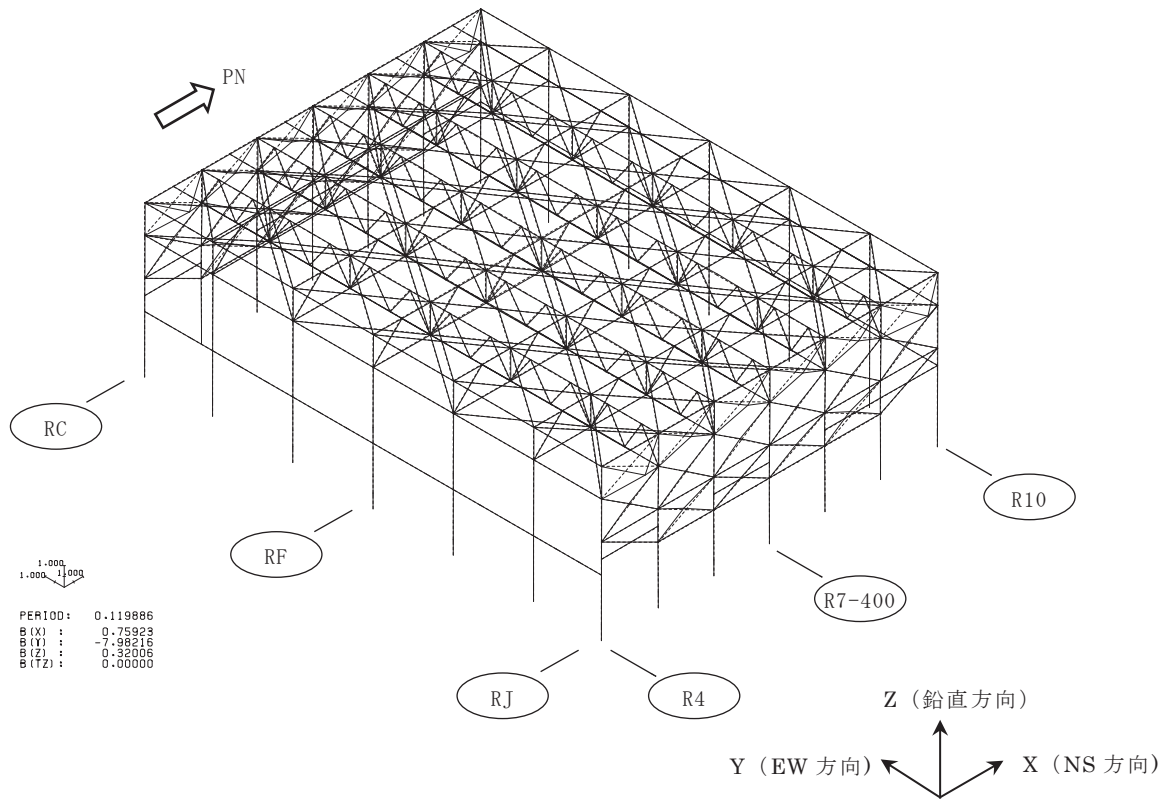


(a) 全体

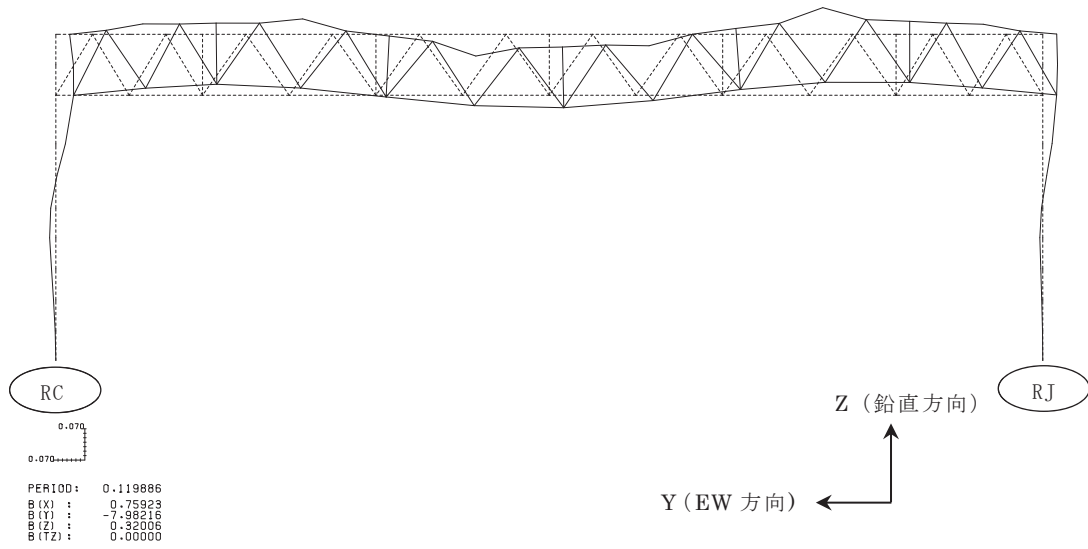


(b) 主トラス構面 (RF 通り)

参考 4-2 図 (2) 固有モード図(全体 78 次 : NS 方向水平 1 次)



(a) 全体



(b) サブトラス構面 (R7-400 通り)

参考 4-2 図 (3) 固有モード図(全体 102 次 : EW 方向水平 1 次)

3. 屋根トラスの耐震評価の見通し

屋根トラスの主要部材については、おおむね弾性範囲となる見込みであるが、一部の部材が弾性範囲を超える場合については、詳細設計段階で別途詳細な検討をしていく。

屋根トラスの入力地震動に係る影響検討について

1. 概要

原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析モデルへの入力地震動は、原子炉建屋の質点系モデルによる地震応答解析結果から得られる燃料取替床レベル（0. P. 33. 2m）の応答時刻歴波形を用いるが、鉛直動に対する質点系モデルでは、屋根スラブの剛性は考慮していない。

鉛直動に対する質点系モデルにおいて、屋根スラブの剛性を考慮した場合についても解析を実施し、原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析モデルへの入力地震動に与える影響を確認する。

2. 検討結果

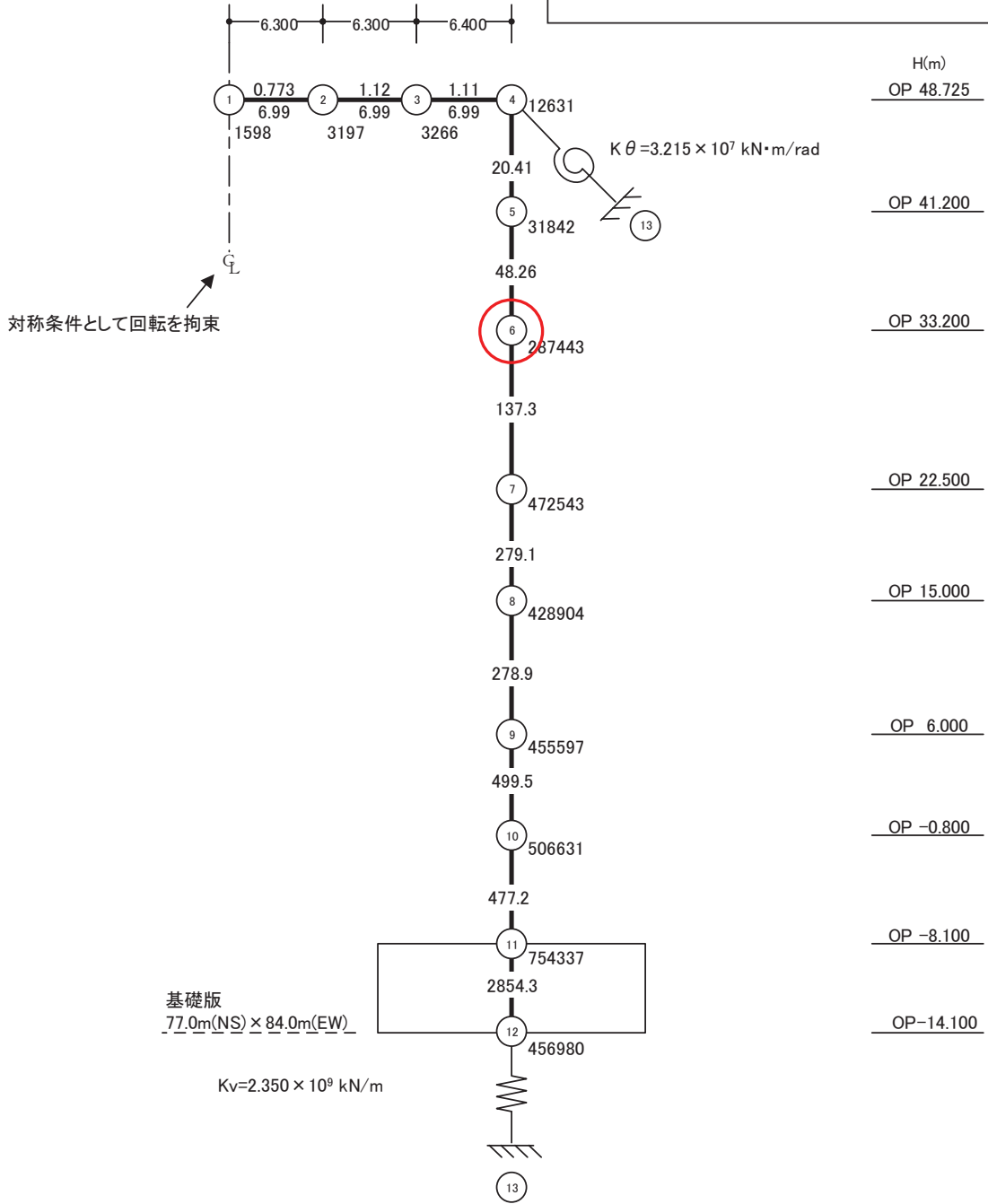
鉛直動に対する質点系モデルを参考 5-1 図に、屋根スラブの面外剛性を屋根部分の剛性に考慮したモデルを参考 5-2 図に示す。

上記 2 つのモデルによる燃料取替床レベル（0. P. 33. 2m）の応答スペクトル（ $h=2\%$ ）の比較を、 S_s-D1 、 S_s-D2 を例に参考 5-3 図に示す。

全周期帯にわたり、2 つのモデルによる応答値の差は、ほとんど無く、屋根トラスの評価において無視できる範囲である。

設計基準強度 : $F_c = 32.4 \text{ N/mm}^2$
 ヤング係数 : $E_c = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 セン断弾性係数 : $G_c = 1.14 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 減衰定数 : $h = 5\%$ (RC造)
 : $h = 2\%$ (トラス部)

トラス部の断面性能 (A_s, I) はRC等価な値にて与える



参考 5-1 図 鉛直動に対する質点系モデル
 (屋根の面外剛性非考慮)

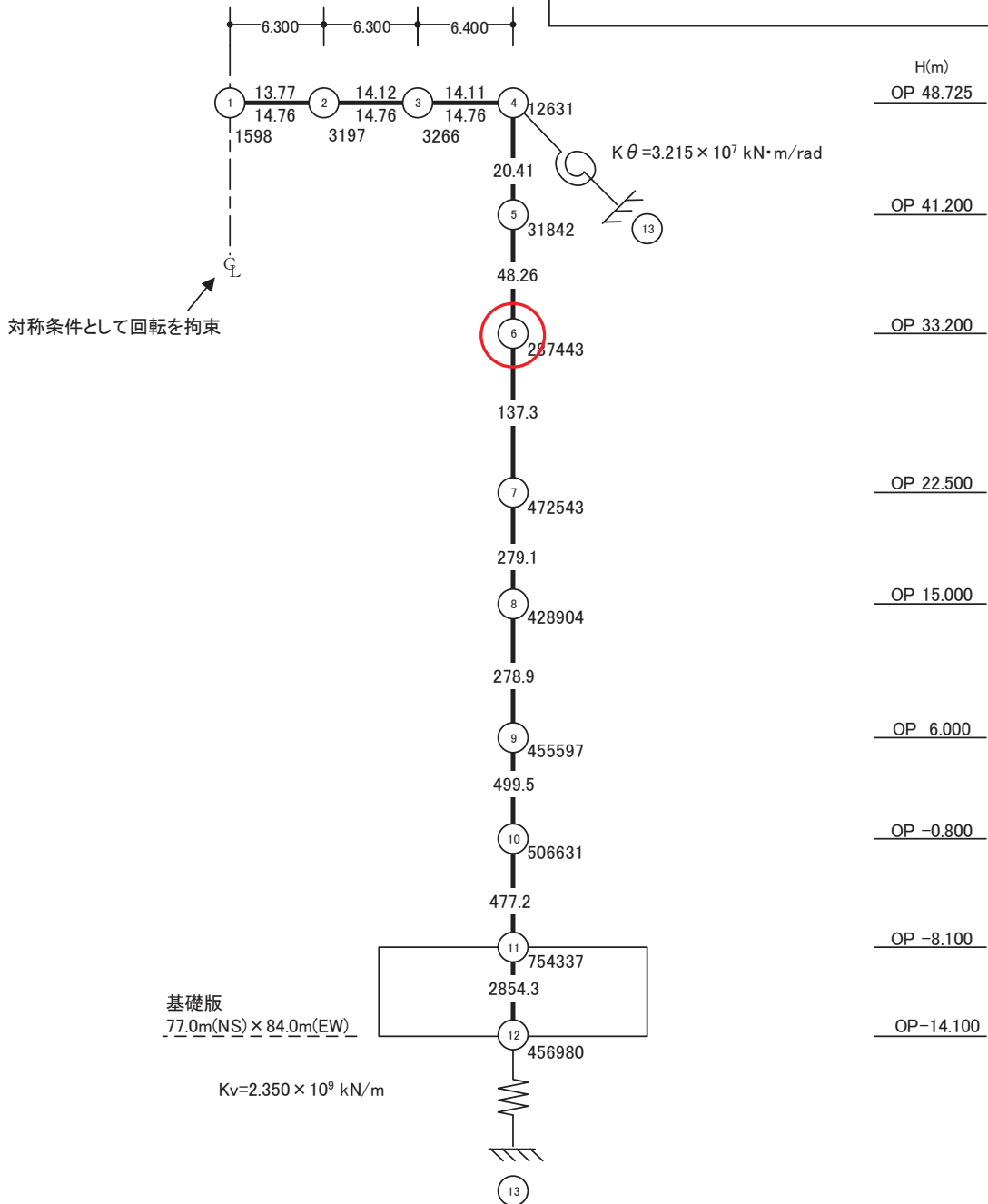
設計基準強度 : $F_c = 32.4 \text{ N/mm}^2$
 ヤング係数 : $E_c = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 せん断弾性係数 : $G_c = 1.14 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$
 減衰定数 : $h = 5\%$ (RC造)
 : $h = 2\%$ (トラス部)

トラス部の断面性能 (A_s, I) はRC等価な値にて与える

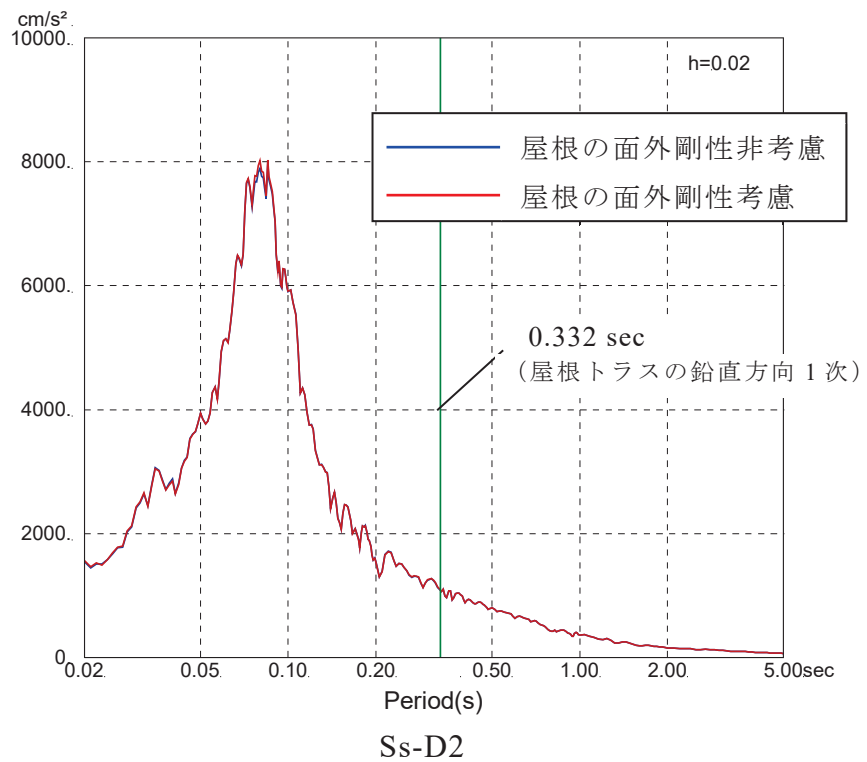
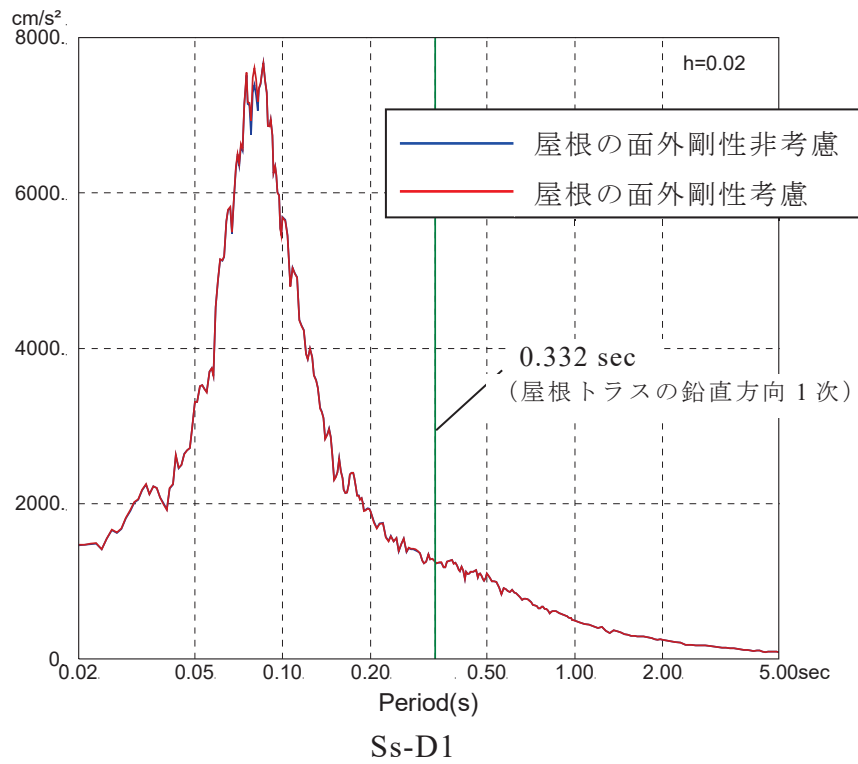
せん断断面積 (m^2)
 断面2次モーメント (m^4)

No.

質点重量 (kN)
 軸ばね ($\times 10^7 \text{ kN/m}$)



参考 5-2 図 鉛直動に対する質点系モデル (屋根の面外剛性を考慮した場合)



参考 5-3 図 燃料取替床レベル (0. P. 33. 2m) の応答スペクトル (h=2%) の比較

原子炉建屋基礎版の
応力解析モデルへの弾塑性解析の適用

目 次

1. 概要
2. 原子炉建屋基礎版の概要
 - 2.1 原子炉建屋基礎版の構造概要
 - 2.2 基礎版における地震観測
3. 既工認モデルと今回工認で採用予定のモデルの差異に対する扱い
 - 3.1 既工認モデルと今回工認で採用予定のモデルの差異について
 - 3.2 既工認との差異の扱い
4. 弾塑性解析採用の論点に対する対応について
 - 4.1 弾塑性解析を採用する目的とその効果
 - 4.2 弾塑性解析を採用するに当たっての具体的論点
5. 材料構成則の適用性・妥当性について
 - 5.1 コンクリート（引張側）
 - 5.2 コンクリート（圧縮側）
 - 5.3 鉄筋（引張側，圧縮側）
6. 既往研究に基づく弾塑性解析の妥当性・適用性
7. まとめ

添付 1 CCV 規格等における許容限界設定の考え方について

参考資料 1 2号炉原子炉建屋 地震計配置

参考資料 2 弾塑性解析の適用に関する先行プラントとの比較

参考資料 3 地震観測記録に基づく基礎版の剛性低下に係る試検討

1. 概要

2号炉原子炉建屋の基礎版等の応力解析においては、既工認では弾性解析を採用しているが、今回工認では弾塑性解析を採用する予定である。

本資料は、基礎版の3次元弾塑性解析の妥当性・適用性について説明するものである。

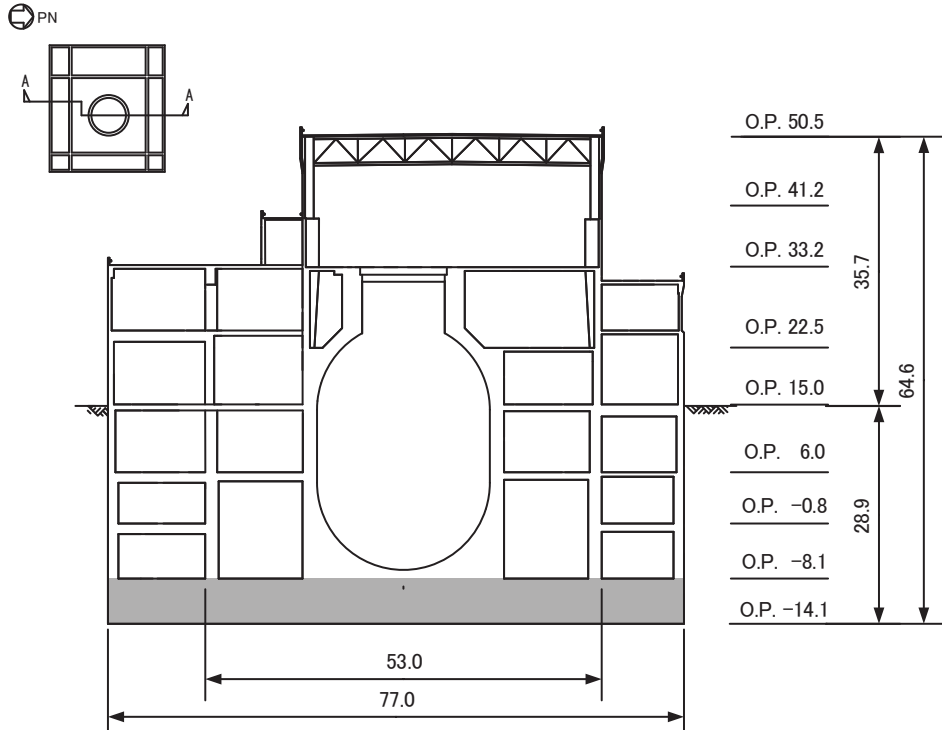
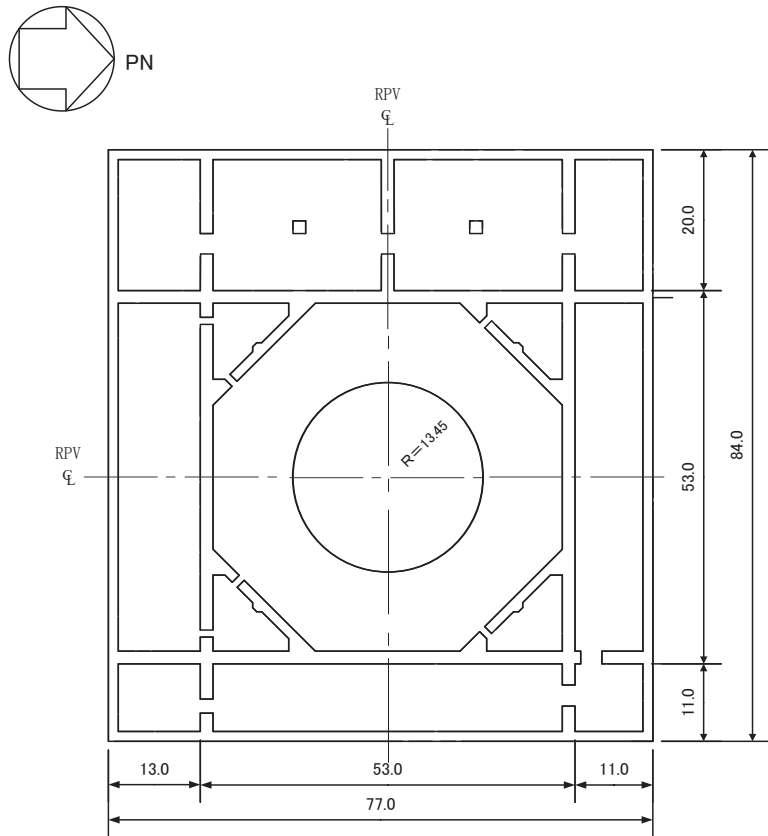
2. 原子炉建屋基礎版の概要

2.1 原子炉建屋基礎版の構造概要

基礎版は厚さ 6.0m の鉄筋コンクリートの平板であり、外部ボックス壁、内部ボックス壁、火打ち壁、シェル壁、RPV ペデスタル等から伝わる上部構造物や機器配管系の荷重を支持する部材である。第 2-1 図に基礎版の概要を示す。

2.2 基礎版における地震観測

基礎版上には地震計を複数設置し地震観測を実施しており、東北地方太平洋沖地震等の観測記録が得られている。解析モデルの策定に当たっては、これらの記録の分析結果を考慮する。



第 2-1 図 基礎版の概要 (単位:m)

3. 既工認モデルと今回工認で採用予定のモデルの差異に対する扱い

3.1 既工認モデルと今回工認で採用予定のモデルの差異について

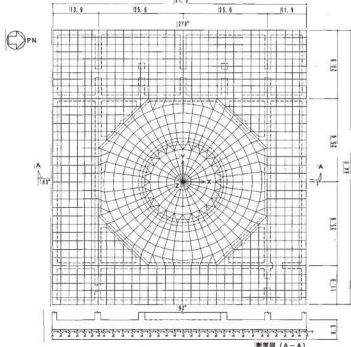
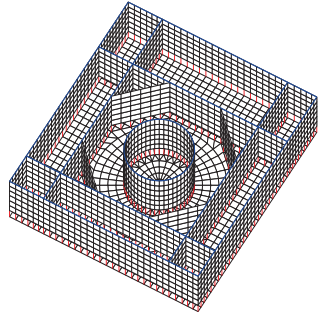
既工認で採用した基礎版の解析モデルと今回工認で採用する予定の解析モデルとの差異を整理し、論点となり得る項目を整理する。

既工認における基礎版の解析モデルと今回工認で採用予定の解析モデルの比較表を第 3-1 表に示す。また、今回工認で採用予定の解析モデルの境界条件、拘束条件を第 3-2 表、第 3-1 図に示す。

第 3-1 表で整理したとおり、既工認と今回工認ともシェル要素による FEM モデルを基本としているが、解析モデルとして、今回工認では応力解析に弾塑性解析を採用することに加え、以下の 2 点に差異がある。

- (1) 一部耐震壁をシェル要素でモデル化すること
- (2) コンクリートの物性値（ヤング係数，ポアソン比）

第 3-1 表 応力解析モデル及び手法の比較（基礎版）

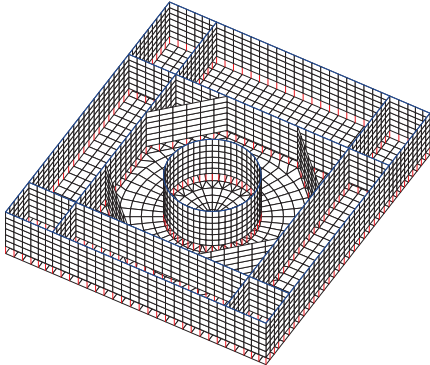
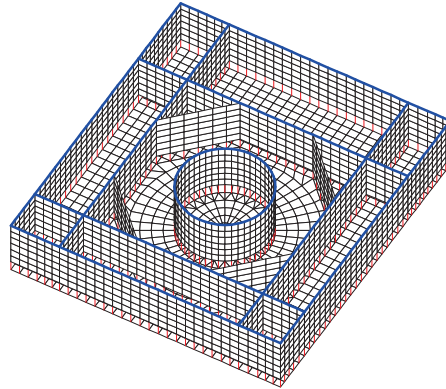

項目		既工認時	今回工認時
解析手法		・弾性地盤上に支持された厚さ6.0mの一枚の版として有限要素法により解析する。	・同左
解析コード		・NASTRAN	・ABAQUS
荷重		・固定荷重, 機器配管荷重, 積載荷重, 地震荷重(S2), 土圧等	・固定荷重, 機器配管荷重, 積載荷重, 地震荷重(Ss), 土圧等
モデル化	モデル化範囲	・基礎版全体と剛性の高い一部壁をモデル化する。	・同左
	メッシュサイズ	・モデル全体でおおむね1～3m程度	・同左
	要素タイプ	・基礎版全体をシェル要素でモデル化する。 ・外部、内部ボックス壁、火打ち壁、シェル壁等の剛性の高い壁は、等価な剛性を考慮した梁要素でモデル化する。	・同左 ・地下部分の一部はシェル要素でモデル化し、壁の立体的な形状による剛性への寄与を考慮する。
材料物性		・コンクリートのヤング係数 $E=2.7 \times 10^9 \text{ t/m}^2$ ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.167$	・コンクリートのヤング係数 $E=2.51 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ※1 ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.2$ ※1
評価方法	応力解析	・弾性解析	・弾塑性解析※2
	許容限界	(機能維持) 部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。接地圧が地盤の許容支持力度を超えないことを確認する。	(機能維持) 部材に生じる応力、ひずみが許容限界を超えないことを確認する。※3 接地圧が地盤の許容支持力度を超えないことを確認する。
モデル		<p>基礎版より立ち上がっている耐震壁はその剛性を考慮して梁要素としてモデル化、底面には支持地盤と等価な弾性ばねをモデル化</p> 	<p>基礎版より立ち上がっている耐震壁はその剛性を考慮してシェル要素及び梁要素でモデル化、底面には支持地盤と等価な弾性ばねをモデル化</p> 

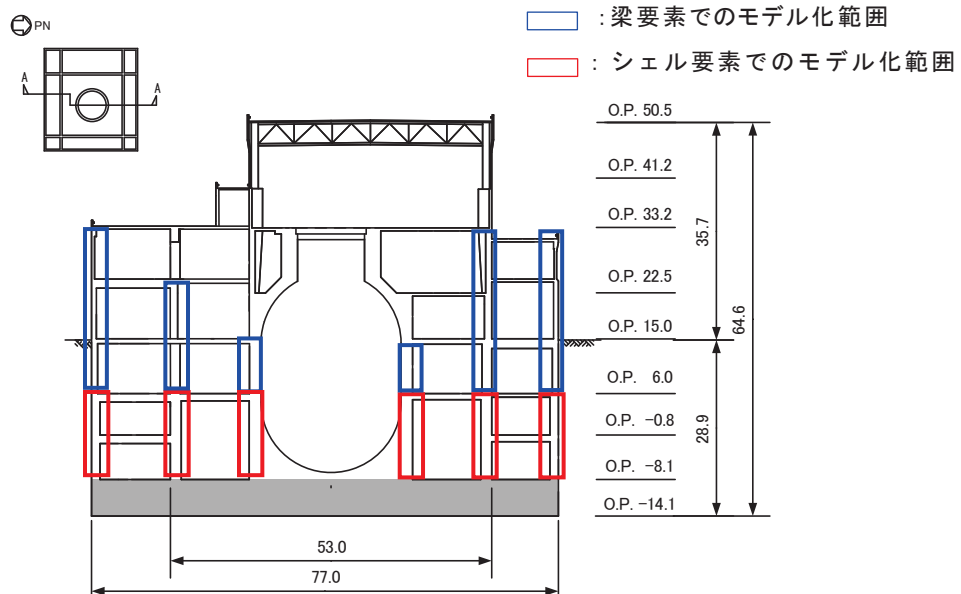
※1：コンクリートのヤング係数及びポアソン比は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説・許容応力度設計法-1999」による計算式に基づく値を用いる。なお、地震応答解析モデルと同様の初期剛性低下については、地震観測記録の分析等を踏まえて、その影響を考慮することとする。

※2：終局強度設計の許容値に基づく評価を実施することとした。

※3：許容限界についてはCCV規格によるものを基本とし、設定の考え方については添付1に示す。

第 3-2 表 基礎版の応力解析におけるモデル化，境界条件，拘束条件

モデル概要	境界条件, 拘束条件
<p>○モデル化範囲 基礎版, B3F耐震壁, B2F耐震壁, B1F耐震壁, 1F耐震壁, 2F耐震壁</p> <p>○使用要素 シェル要素, 梁要素</p>	<p>本解析モデルではB3FとB2Fの耐震壁をシェル要素でモデル化する。それより上部の耐震壁の剛性はO.P.6.0m位置に梁要素でモデル化する。</p> <p>基礎底面各節点にはウインクラー型の地盤ばねと浮上りを考慮するためのGAP要素をモデル化する。</p>
 <p>モデル全体図</p> <p>※青太線は、線材要素を示す。 ※赤太線は、剛体を示す。</p>	 <p>梁要素による建屋上部剛性のモデル化(青色部)</p>  <p>地盤ばね</p>



第 3-1 図 耐震壁のモデル化範囲 (単位:m)

3.2 既工認との差異の扱い

(1) 弾塑性解析の採用

a. 採用目的

応力解析に弾塑性解析を採用することについては、基準地震動 S_s による入力が増大に伴い、原子炉建屋の鉄筋コンクリート構造全体としての挙動が塑性域に入ると考えられるため、その塑性域の挙動を適切に評価するために採用するものである。

b. 準拠する規格・基準

女川2号炉原子炉建屋の基礎版に要求される機能は、基準地震動 S_s に対する間接支持構造物としての機能であり、許容限界としては機能維持となる。一方、鉄筋コンクリート造構造物に関する規格である「日本機械学会 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）」は、基準地震動 S_s に対して主要施設としての機能確保が必要な施設に対する設計規格であるため、女川2号炉原子炉建屋基礎版の弾塑性解析はCCV規格に基づき実施する。

c. 主な論点

コンクリートの弾塑性状態における材料構成則（応力-ひずみ関係）の設定方法の妥当性、また、女川の場合、建屋の地震応答解析において認められた初期剛性の低下について、応力解析への反映方法の適切性が論点として整理される。

なお、弾塑性解析の採用に当たって解析コードとして「ABAQUS」を採用しているが、汎用の有限要素解析コードであり、ここでは論点として取り上げないこととする。なお、今回工認では、添付資料として「計算機プログラム（解析コード）の概要」を添付し、その妥当性を説明する予定である。

(2) 一部耐震壁のシェル要素でのモデル化

既工認時は、ボックス壁、火打ち壁、シェル壁等の剛性の高い壁を等価な剛性を考慮した梁要素でモデル化している。このうち地下部分の一部をシェル要素でモデル化することは、壁の立体的な形状による剛性への寄与を考慮することを目的に採用するものである。

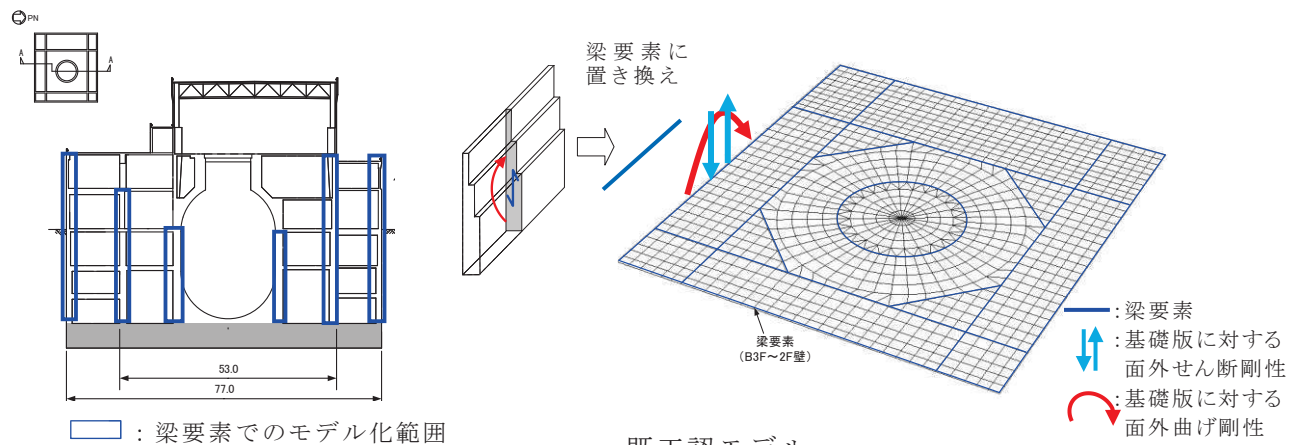
この既工認との差異は、より実状に近い構造挙動となるため、本資料における論点としては取り扱わないこととするが、既工認時には梁要素でモデル化している耐震壁について、地下部分の一部をシェル要素でモデル化することによる影響を以下に示す。また、既工認と今回工認の耐震壁の剛性評価及び解析上の影響について第3-3表に示す。

既工認時はボックス壁、火打ち壁、シェル壁等の剛性の高い壁を等価な剛性を考慮した梁要素でモデル化しているが、考慮している剛性は基礎版面外方向の剛性のみとしている。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。

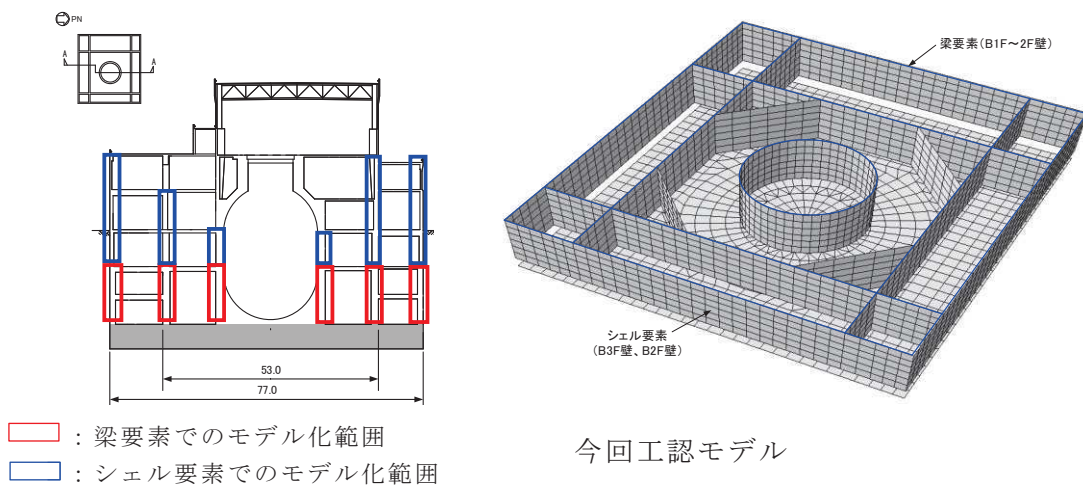
一方、今回工認では B3F、B2F の壁をシェル要素でモデル化していることから、既工認時に梁要素で考慮していた基礎版に対する面外剛性に加えて、耐震壁の面外剛性、面内剛性も考慮される。これらの壁が全体として基礎版への拘束部材となり、より実状に近い構造挙動となる。例えば、地震荷重時に基礎版が面外に変形しながら浮上りを生ずる挙動に対して、地震方向の耐震壁と直交方向の耐震壁が一体性を保持しつつ、立体的に抵抗することとなる。また、既工認モデルの梁要素は中立軸を耐震壁の図心として評価したものを基礎版中心位置に設定しており偏心が考慮されないのに対し、今回工認モデルではシェル要素を基礎版上端より立ち上げるため、基礎版中心（モデル化位置）と耐震壁の図心の偏心距離が考慮されることにより曲げ剛性が大きく評価される。これらの結果、基礎版の面外変形が既工認モデルに比較して小さくなり、基礎版の応力は低減することとなる。

ただし、実機では基礎版上端から上部全体の耐震壁及び床スラブが一体として拘束効果を発揮するのに対し、今回工認モデルではシェル要素でモデル化するのは基礎版直上の 2 層分の耐震壁のみであり、拘束効果は実機より小さく保守的である。

なお、耐震壁の地震力算定に用いる地震応答解析では基礎版を剛体として扱っているため、基礎版の柔性等の実際の柔らかさを考慮する場合に対し基本的に耐震壁が負担する地震力を保守的に評価している。また、耐震壁の土圧荷重の評価においては一方向版を仮定し、基礎版との接続部で固定とする等の評価を実施していることなどから耐震壁には十分な余裕があるが、シェル要素でモデル化した耐震壁に発生する応力については、念のため詳細設計段階でその影響について確認する。



既工認モデル



今回工認モデル

第3-2図 既工認モデルと今回工認モデルの概念図

第 3-3 表 一部耐震壁をシェル要素へ変更したことに伴う解析上の影響

項目	既工認	今回工認	実機の状態（想定される実現象）
上部躯体の剛性	<p>影響範囲（モデル化範囲）</p> <p>地下3階から地上2階までの外部、内部ボックス壁、火打ち壁、シェル壁等の剛性の高い壁</p>	<p>同左</p>	<p>建屋全体として、耐震壁、床スラブも抵抗要素となる</p>
	<p>要素タイプ</p> <p>モデル化範囲の耐震壁は、等価な剛性を考慮した梁要素でモデル化</p>	<p>地下3階から地下2階までをシェル要素、地下1階より上部は梁要素でモデル化</p>	<p>—</p>
	<p>剛性評価</p> <p>地下3階から地上2階までの壁を対象としたせん断断面積、断面二次モーメントから等価な1本の梁要素に置き換えている ⇒拘束効果は実機及び今回工認モデルより弱い 壁の曲げ剛性は壁の図心位置で評価したものを基礎版中心位置に設定しており偏心が考慮されないため、今回工認モデルより小さい</p>	<p>地下3階及び地下2階は層毎に中立軸に対する曲げ剛性を考慮しており、既工認モデルに比べてより実機の状態に近いモデルとなっている ⇒拘束効果は実機より弱い 壁の曲げ剛性は基礎版中心からの偏心が考慮されており既工認より大きい、実機よりは小さい</p>	<p>床スラブの拘束等により、およそ層毎に中立軸に対する曲げ剛性が働くと考えられ、建屋上部躯体全体として拘束効果を発揮する</p>
土圧に対する挙動	<p>抵抗要素</p> <p>基礎版のみ</p>	<p>基礎版及びシェル要素でモデル化した耐震壁（地下3階及び地下2階）</p>	<p>基礎版及び地下耐震壁（地下3階から地表まで）</p>
	<p>土圧の負担要素</p> <p>土圧による荷重はすべて基礎版が負担するモデルとなっている。 ⇒実機及び今回工認モデルより負担要素は少ない</p>	<p>基礎版に加え直上の2層の耐震壁をモデル化することにより、耐震壁の面外剛性及び直交する耐震壁の面内剛性を考慮し、既工認モデルよりも実機に近いモデルとし、荷重を負担させる。 ⇒実機より負担要素は少ない</p>	<p>基礎版に加え地下3階から地表までの3層分の耐震壁及び各階の床スラブが荷重を負担する。</p>
<p>基礎版の評価におけるモデル化の特徴及び保守性</p>	<p>既工認モデルは当時の計算能力の制約もあり、上部躯体の立体的構造をモデル化しないシンプルなモデルとしているため、モデル化した範囲の荷重を基礎版がすべて負担するモデルとなっている。 このようなモデル化により、基礎版の評価において実挙動に対して保守的なモデルとなっている。</p>	<p>今回工認モデルは基礎版以外の床スラブはモデル化していないため、これらの床スラブを含めた建屋上部躯体全体としての拘束効果は考慮されていない。 このようなモデル化により、基礎版の評価において実挙動に対して保守的なモデルとなっている。</p>	<p>—</p>

(3) コンクリートの物性値（ヤング係数，ポアソン比）

コンクリートの物性値のうち，ヤング係数については，設計基準強度に基づき算定した値を採用する予定である。なお，地震応答解析モデルと同様の初期剛性低下については，地震観測記録の分析等を踏まえて，その影響を考慮することとする。その考え方については4.2にて示す。

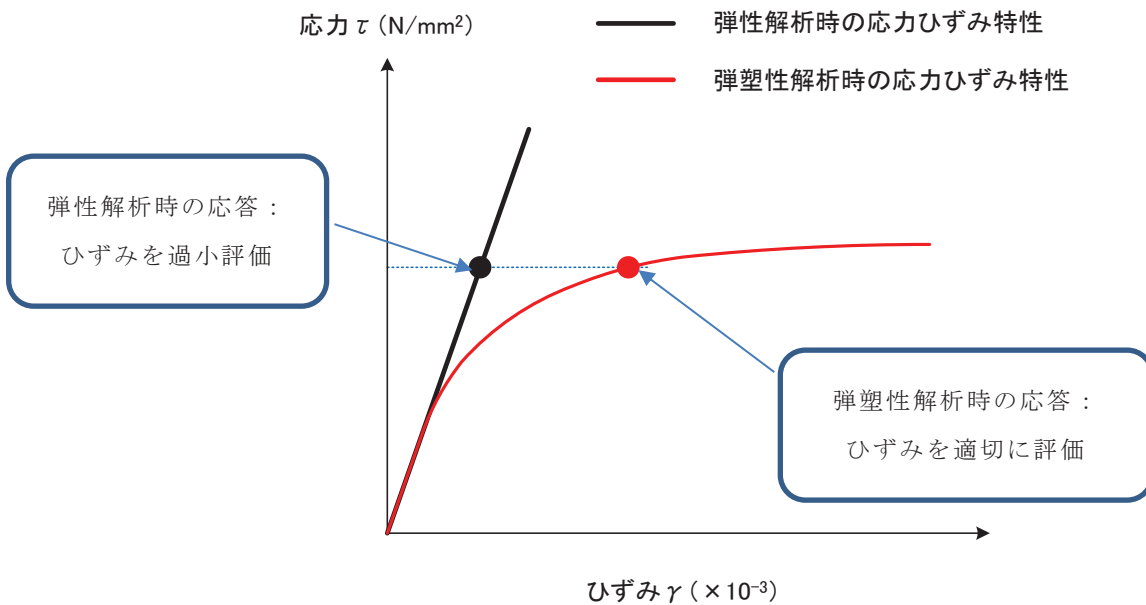
一方，ポアソン比の変更については適用規準を日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説・許容応力度設計法-1999」に見直したことによるものであり，同様の変更については先行審査でも認可実績があり，論点とはならないと考えている。

4. 弾塑性解析採用の論点に対する対応について

4.1 弾塑性解析を採用する目的とその効果

弾性解析と弾塑性解析の応答性状の違いを示した概念図を第4-1図に示す。弾性解析は、どれだけ入力が大きくなっても初期の剛性が維持され続けるという仮定での解析を実施することとなるため、入力レベルが小さい場合は実現象を精度良く再現することができるが、入力の増大により挙動が塑性域に入るような場合、部材の塑性化により剛性が低下する現象を模擬できない。そのため、実挙動が塑性域に入る場合に弾性解析を用いると、応力を過大に評価する場合やひずみ（変形量）を過小に評価する場合がある。第4-1図は入力を応力で与える場合の傾向を示しており、入力する応力が大きくなるに従い、ひずみが過小に評価される傾向を示している。

今回工認では、基準地震動 S_s による入力の増大に伴い、原子炉建屋の鉄筋コンクリート構造全体としての挙動が塑性域に入ると考えられることから、入力レベルに応じた構造物の挙動を適切に評価することを目的として弾塑性解析を採用することが必要であると判断した。



第4-1図 弾性解析と弾塑性解析の違い（概念図）

4.2 弾塑性解析を採用するに当たっての具体的論点

(1) 材料構成則の妥当性

基礎版の応力解析に弾塑性解析を取り入れることによる利点は、既工認で採用していた弾性解析では表現出来ないような大入力時の弾塑性挙動を評価できることにある。弾塑性挙動を適切に評価するには、塑性域を含めた鉄筋及びコンクリートの材料構成則（材料の応力とひずみの関係をモデル化したもの）を適切に設定し解析を実施する必要がある。

今回工認で採用予定の材料構成則を第 4-2 図に示す。ここで、コンクリート（圧縮側）は CEB-FIP^[1]モデル、コンクリート（引張側）は RC 規準^[2]（ひび割れ点の評価）と岡村・出雲モデル^[3]（ひび割れ点以降の引張軟化曲線）、鉄筋（圧縮・引張側）は完全弾塑性型を用いているが、弾塑性挙動へ与える影響が大きいため、その設定の妥当性・適用性については十分に確認する必要があると判断し、「材料構成則の設定の妥当性」を弾塑性解析採用に当たっての論点として位置づけ、その妥当性・適用性を検討することとする。

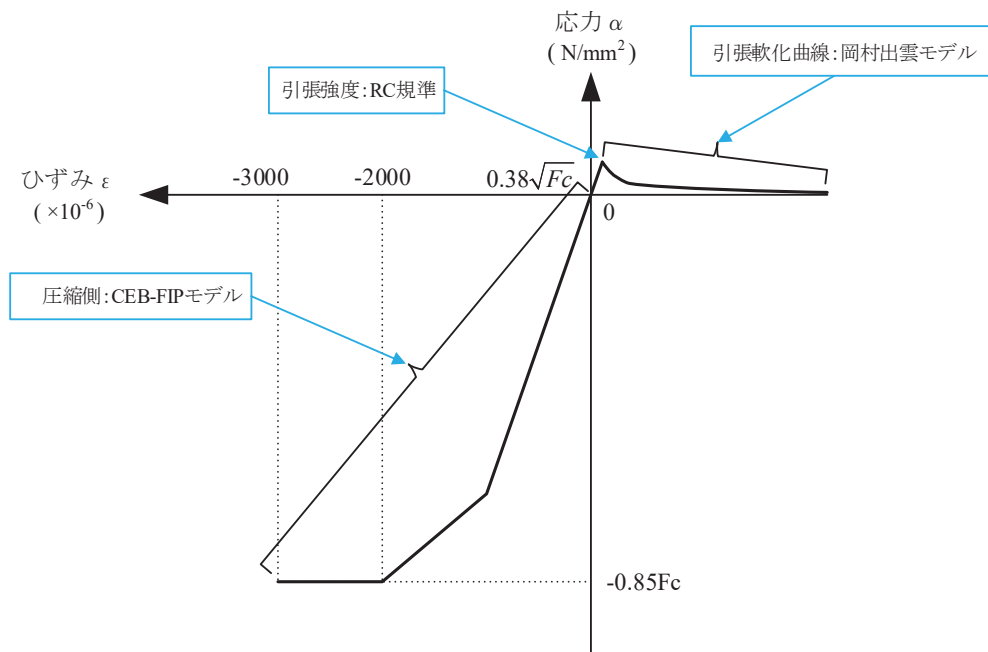
(2) 鉄筋コンクリート構造物の初期剛性低下

東北地方太平洋沖地震に対する女川 2 号炉原子炉建屋の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おり、その傾向を基礎版の弾塑性解析にも適用する。

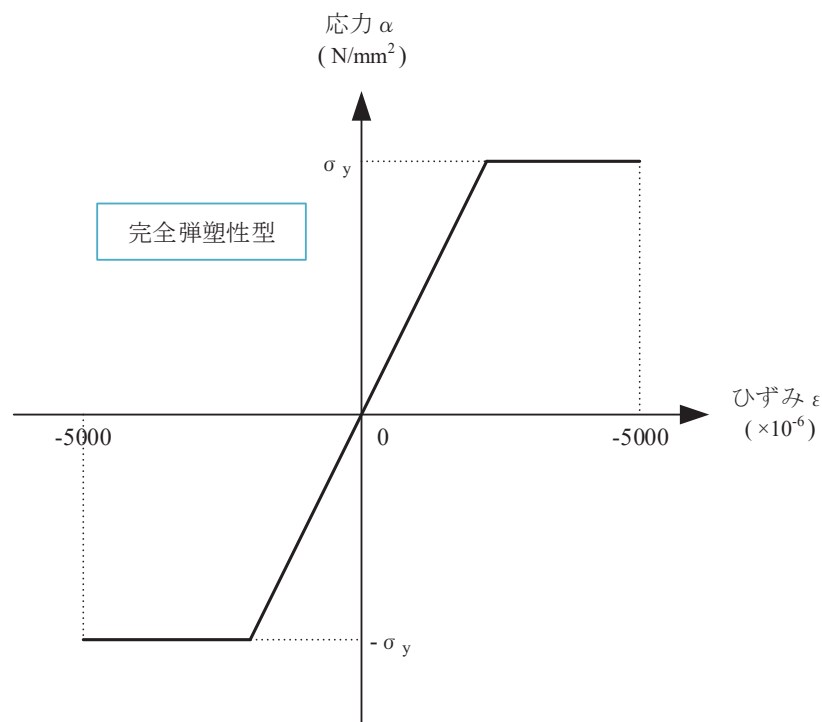
具体的には、以下の解析を実施する。

- ・基礎版の弾塑性解析では、基礎版の剛性を低下させた解析が、低下させない解析と比較し、必ずしもすべてのメッシュが安全側に評価される訳ではないことから、解析としては基礎版の初期剛性を既工認と同様に設計基準強度ベースで評価したケースと、それから更に初期剛性低下を考慮したケースの 2 ケースを実施する。
- ・東北地方太平洋沖地震に関する点検・解析結果では、基礎版には地震によるひび割れは発生していないことを踏まえ、既工認と同様に設計基準強度ベースで剛性を評価したケースを基本ケースとし、更に初期剛性を低下させるケースは不確かさケースとして扱う。
- ・不確かさケースに用いる初期剛性の低下量については、参考資料 3 に示す基礎版上に設置されている地震観測記録の分析等を踏まえ設定する。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。
- ・壁部分については、剛性低下を考慮する。シェル要素について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、圧縮側も引張側も地震応答解析と整合する値で低下させることとする。梁要

素については上部耐震壁の地震応答解析の初期剛性低下に整合するように補正する。補正の考え方を第 4-3 図，第 4-4 図に示す。



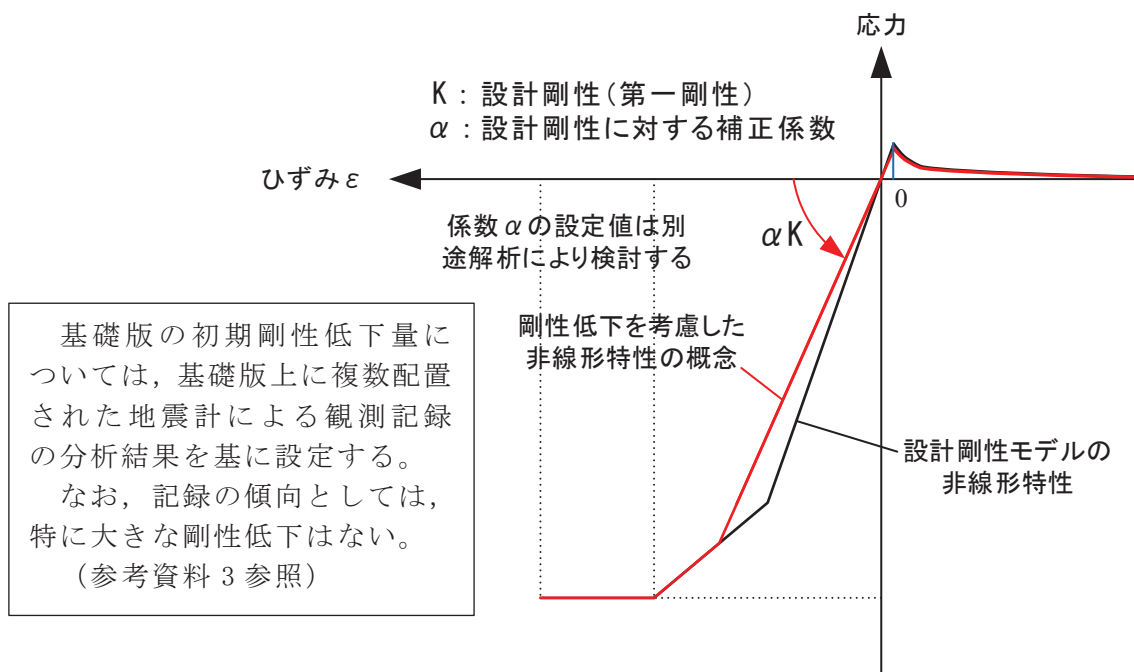
(a) コンクリートの応力-ひずみ関係



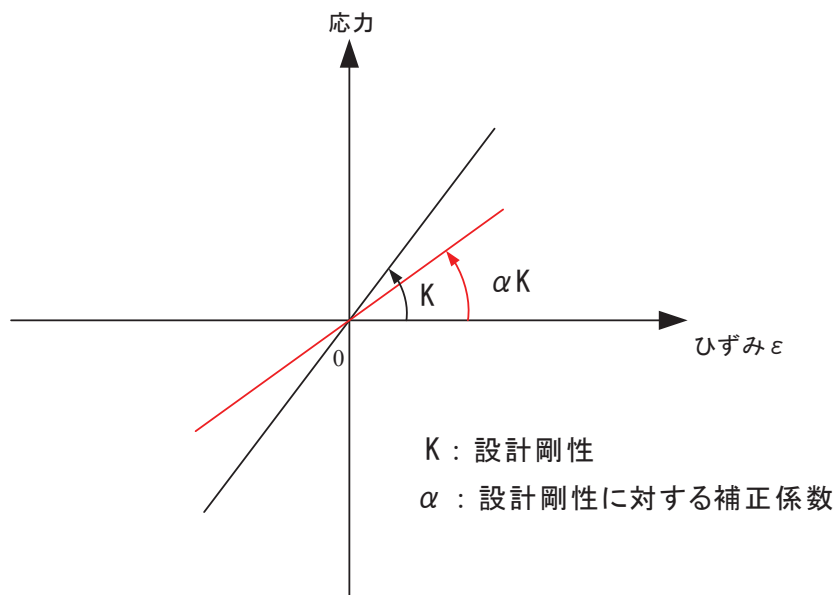
(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係

F_c :コンクリートの設計基準強度, σ_y :鉄筋の降伏強度

第 4-2 図 採用予定の材料構成則



第 4-3 図 基礎版及びシェル要素の耐震壁の剛性低下の考え方



第 4-4 図 梁要素の耐震壁の剛性低下の考え方

5. 材料構成則の適用性・妥当性について

基礎版の応力解析では、基準地震動 S_s による外力の増大に伴い、鉄筋コンクリート部材の塑性化が想定されることから、鉄筋コンクリートの弾塑性挙動を踏まえた適切な評価を実施するために弾塑性解析を採用する予定である。その中でも適用した材料構成則が弾塑性挙動に直結する項目であることから、弾塑性解析を採用する上での論点として位置づけ、以下で設定に当たって適用した文献の内容を整理し、その妥当性・適用性を検討する。

5.1 コンクリート（引張側）

コンクリートの引張側の材料構成則のうち、ひび割れが発生するまでのコンクリートの剛性は圧縮側の初期剛性と同様の値とし、引張強度については、RC 規準^[2]における曲げひび割れ時のコンクリート引張強度に関する記載である(5.1)式を参考に、その下限値を設定している。なお、RC 規準は、既工認でも適用実績のある規格規準である。

$${}_c\sigma_t = (0.38 \sim 0.75) \sqrt{\sigma_B} \quad (5.1)$$

${}_c\sigma_t$: コンクリートの引張強度

σ_B : コンクリートの圧縮強度

また、ひび割れ発生後は応力再配分により力の大部分は鉄筋が負担することとなるものの、実現象としては、鉄筋とコンクリート間の付着によりひび割れ後のコンクリートも構造全体に生じる応力の一部を負担することから、ひび割れ後の性状を考慮するために、ひび割れ点以降のコンクリートの構成則として引張軟化曲線を定義している。引張軟化曲線としては、弾塑性解析で使用する計算機コード「ABAQUS」で、各種実験結果との対応が良いことが確認されている岡村・出雲モデル^[3]を採用する予定である。

岡村・出雲モデルは、既往文献における知見を参照して設定した項目であり、既工認で適用実績がないため、以下で、モデルの概要（モデルが提唱された論文における妥当性検証の内容含む）について整理した上で、既往の検討例を整理することにより基礎版の弾塑性解析への適用性を検討する。

(1) 岡村・出雲モデルの概要

岡村・出雲モデルは、文献^[3]に示されるコンクリートの引張軟化曲線であり、ひび割れた鉄筋コンクリートの引張軟化曲線を評価する際に設定する。鉄筋に関係なく、ひび割れ後のコンクリートの平均応力-平均ひずみの関係を与えているのが特徴であり、下記の式により表現される。

$$\frac{\sigma_t}{f_t} = \left(\frac{\varepsilon_{cr}}{\varepsilon_t} \right)^c \quad (5.2)$$

σ_t : ひび割れと直角方向のコンクリートの平均引張応力

f_t : 2軸応力下のコンクリートの引張強度

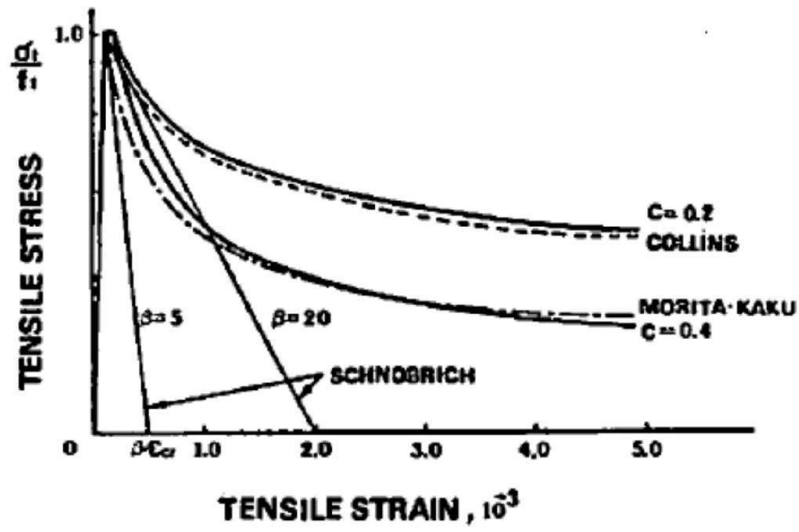
ε_{cr} : ひび割れ発生時の平均引張ひずみ

ε_t : ひび割れと直角方向の平均引張ひずみ

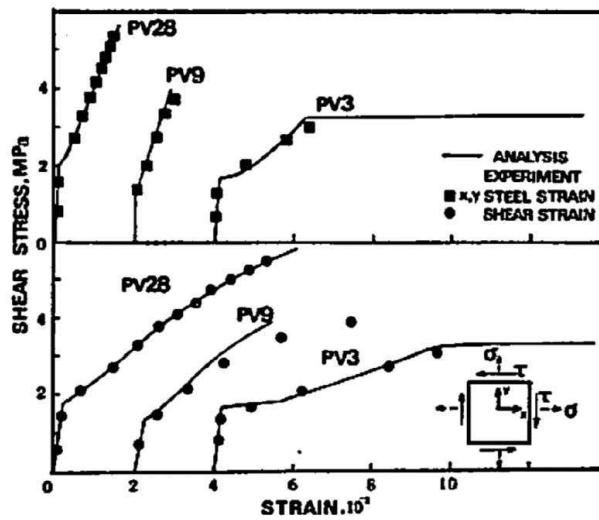
c : 付着性状を表すパラメータ

本モデルの妥当性については、原論文においても既往の実験結果との比較により検証されているため、以下ではその概要について記載する。

原論文では、(5.2)式を用いることで既往の実験 (Collins-Vecchio の実験^[4]、森田・角の実験^[5]) から求められたコンクリートの平均応力-平均ひずみ曲線をほぼ再現できることを確認している (第 5-1 図)。ここで、付着性状を表すパラメータ c としては、鉄筋として溶接された金網を用いた Collins-Vecchio の実験^[4]では $c=0.2$ 、異形鉄筋を用いた森田・角の実験^[5]は $c=0.4$ が採用されている。また、ひび割れ後のコンクリートの構成則として(5.2)式を用いた検討を実施し、既往の実験時の挙動を再現できるかを確認している。ここでは、既往の実験 (Collins-Vecchio の実験^[4]及び青柳・山田の実験^[6]) からコンクリートの引張剛性の影響を受ける供試体を選定し、鉄筋コンクリート部材の挙動 (せん断ひずみ、鉄筋のひずみ) が実験値とよく一致する結果となることを確認している (第 5-2 図)。このことから岡村・出雲モデルがひび割れ後の挙動をよく表現できるモデルであるとしている。



第 5-1 図 岡村・出雲モデルと他のモデルとの比較 ([3]より引用)



第 5-2 図 コンクリート引張剛性モデルの検証結果 ([3]より引用)

(2) 解析プログラム「ABAQUS」を用いた検討例

日本建築学会「コンクリート系構造の部材解析モデルと設計への応用」^[7]には、基礎版の応力解析でも用いる予定の解析プログラム「ABAQUS」を使用した解析例が示されている。

ここでもコンクリートの引張軟化曲線として岡村・出雲モデルを用いた検討例が示されており、既往の試験結果と解析結果との対応が良好であることが確認されている。

本文献においては、簡易要素ベンチマークテスト、梁せん断試験、床曲げ試験の検討例が示されている。以下にその概要を述べる。

梁せん断破壊試験については、既往の文献^[8]に示される試験体を模擬して、試験体中央部に鉛直方向単調荷重を変位制御で載荷する静的漸増非線形解析を実施し、「ABAQUS」で用いる塑性損傷モデルに係るパラメータを検討したものである（第 5-3 図）。ここでの検討の結論としても、コンクリートの引張軟化曲線は、岡村・出雲モデルを用いた検討ケースが文献における実験結果との対応が良好とされている。

鉄筋コンクリート床の曲げ破壊試験については、既往の文献^[9]に示される試験体を模擬し、荷重積載部に鉛直方向単位荷重を変位制御で載荷する静的漸増非線形解析を実施し、「ABAQUS」で用いる塑性損傷モデルに係るパラメータを検討したものである（第 5-4 図）。ここでの検討の結論としても、コンクリートの引張軟化曲線は、岡村・出雲モデルを用いた検討ケースが文献における実験結果との対応が良好とされている。

また、弾塑性解析による既往の検討^{[10][11]}では、基礎版をシェル要素でモデル化した場合の面外せん断変形時の応力分布性状に関する比較検討を行っており、AIJ 指針、道路橋示方書、鉄道構造物等設計標準、Eurocode に記述されている柱・梁部材の塑性ヒンジ領域の長さや部材せいの関係におおむね整合する解析結果が得られることを示している（第 5-5 図）。

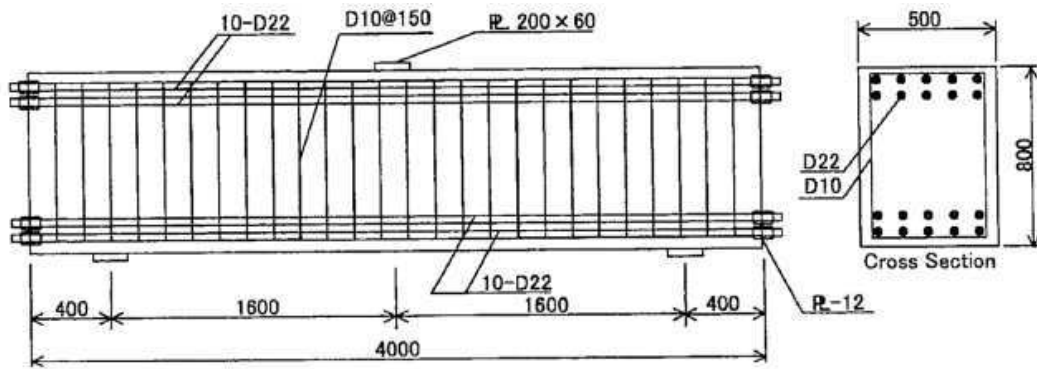


図-4.3.9 試験体諸元 (単位: mm)

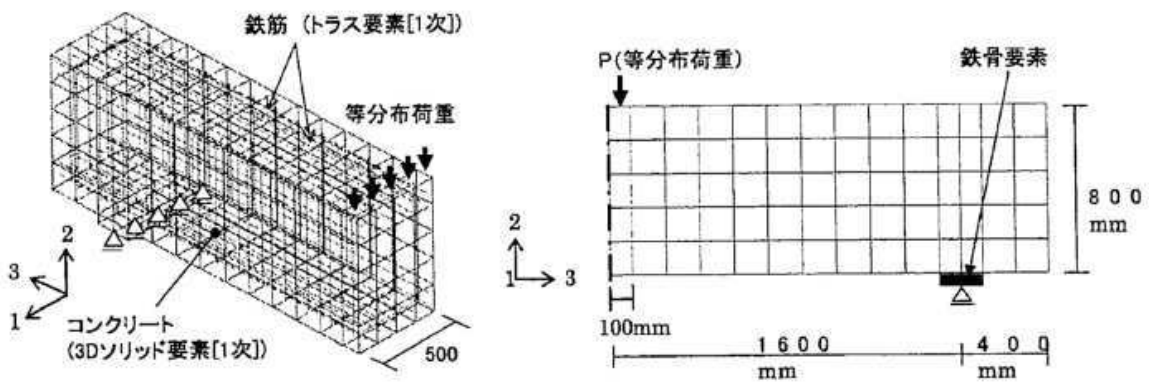


図-4.3.10 解析モデル

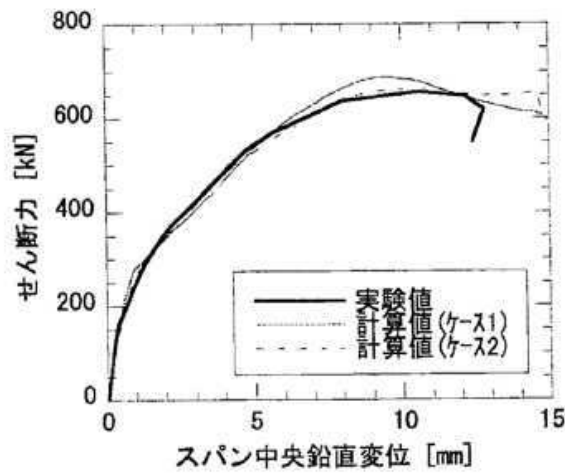


図-4.3.11 せん断力-スパン中央鉛直変位関係

第 5-3 図 梁せん断破壊試験に基づく検証結果 ([7]より引用)

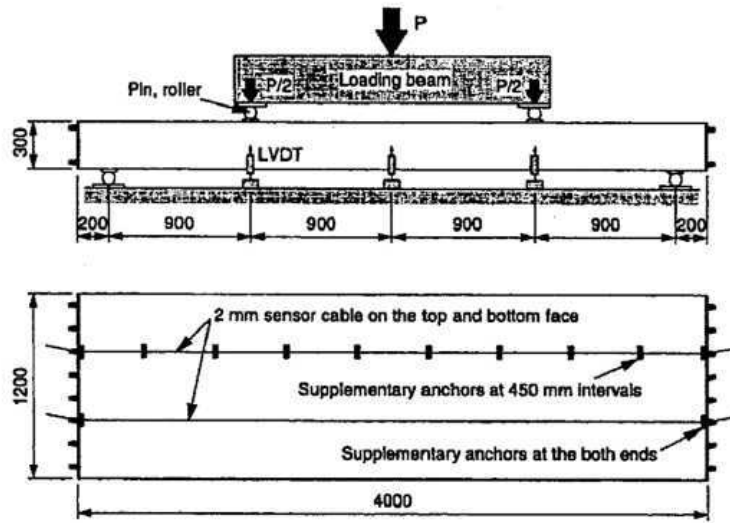


図-4.3.12 試験体諸元

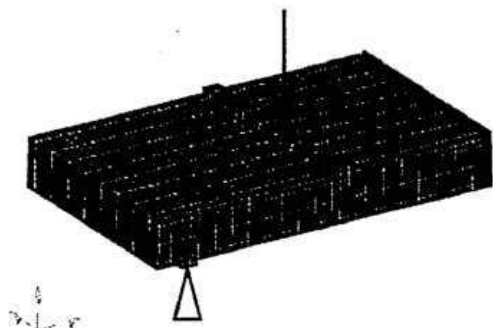


図-4.3.13 解析モデル

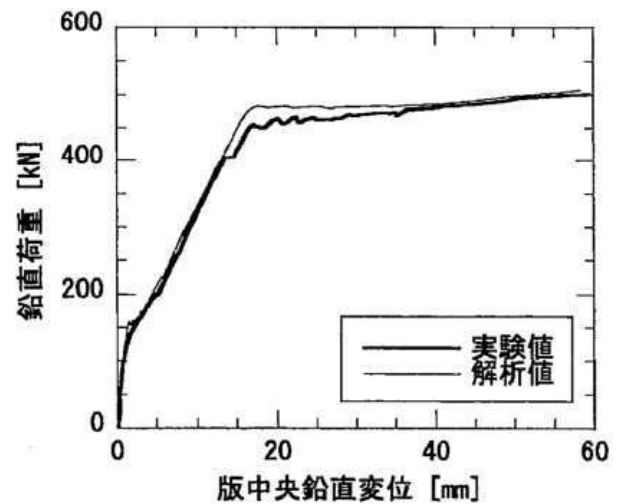


図-4.3.14 鉛直荷重—版中央鉛直変位関係

第 5-4 図 鉄筋コンクリートの曲げ破壊試験に基づく検証結果
([7]より引用)

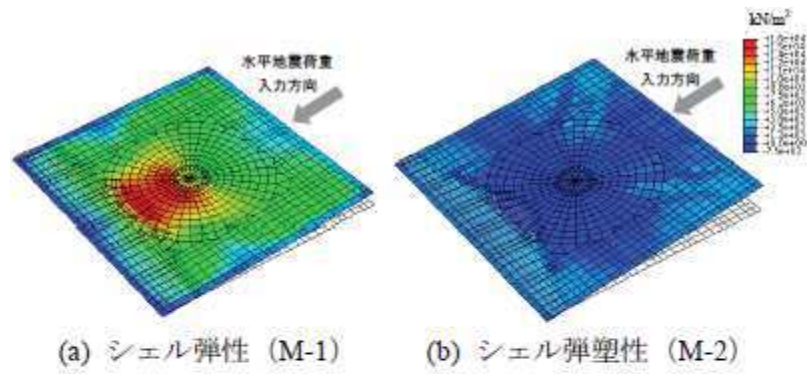


図-5 基礎スラブコンクリート部の最大主応力分布

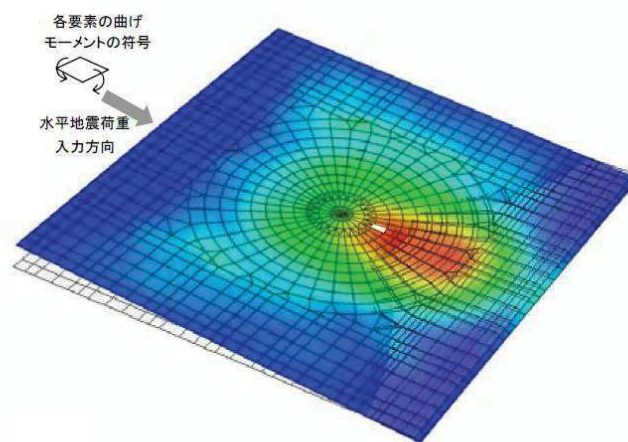


図-3 弾塑性解析 (M-2) による曲げモーメント分布

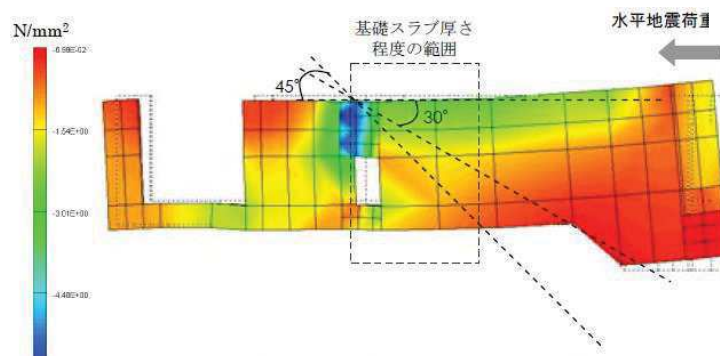


図-6 最小主応力分布 (弾性解析、Q-1)

第 5-5 図 弾塑性解析による既往の検討例
([10], [11]より引用)

(3) 岡村・出雲モデルの基礎版応力解析への適用性について

岡村・出雲モデルは、提案時より既往の複数の実験結果を用いて妥当性が十分に検証されていることから、3次元 FEM モデルによる弾塑性解析を実施する際のコンクリート（引張側）の構成則（引張軟化曲線）として、採用することは妥当であると考えられる。

5.2 コンクリート(圧縮側)

コンクリートの圧縮応力度とひずみの関係は、CCV規格の図 CVE3511.2-1を参考にした上で、パラボラ型の応力ひずみ曲線を想定するに当たって標準的なCEB-FIP Model Code^[1]に基づき設定している。

CEB-FIP Model Codeにおけるコンクリート(圧縮側)の構成則は以下の(5.3)式により規定されている。なお、(5.3)式に基づく場合、女川2号のコンクリート圧縮強度は50MPa(N/mm²)以下であるため、終局ひずみは0.0035となるが、CCV規格における終局ひずみは0.003であるため基礎版の応力解析で用いるのは0.003までの範囲内とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cd} &= 0.85f_{cd} \left[2\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}}\right) - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cl}}\right)^2 \right] && (\varepsilon_c < \varepsilon_{cl} \text{ の場合}) \\ \sigma_{cd} &= 0.85f_{cd} && (\varepsilon_{cl} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \text{ の場合}) \\ \sigma_{cd} &= 0 && (\varepsilon_{cu} < \varepsilon_c \text{ の場合}) \end{aligned} \right\} \quad (5.3)$$

ここで $\varepsilon_{cl} = 0.002$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0035 \quad (f_{ck} \leq 50\text{MPa} \text{ の場合})$$

$$\varepsilon_{cu} = 0.0035 \left(\frac{50}{f_{ck}} \right) \quad (50\text{MPa} \leq f_{ck} \leq 80\text{MPa} \text{ の場合})$$

σ_{cd} : コンクリートの応力

ε_c : コンクリートのひずみ

ε_{cu} : コンクリートの終局ひずみ

f_{cd}, f_{ck} : コンクリート圧縮強度

5.3 鉄筋(引張側, 圧縮側)

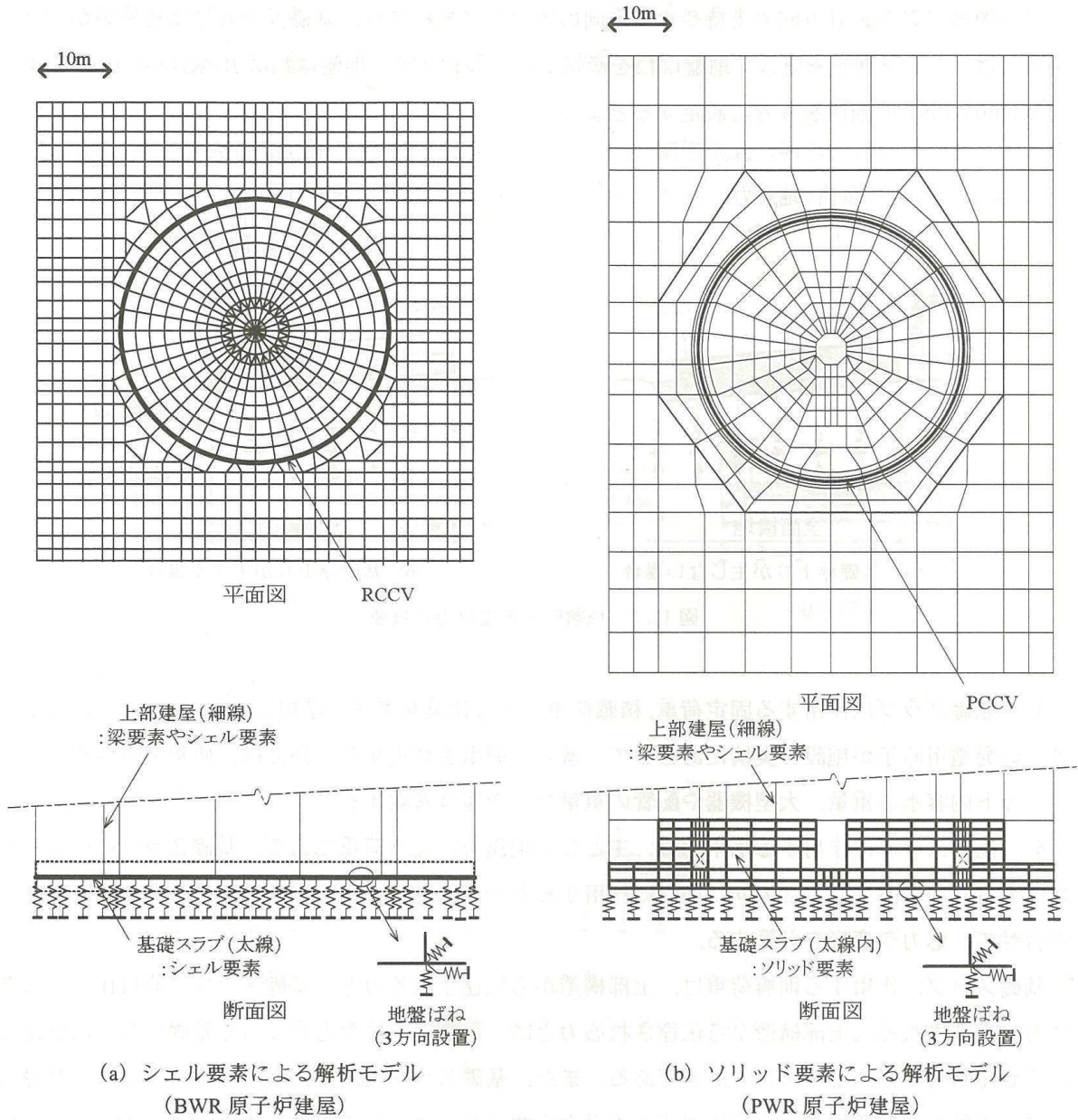
鉄筋の非線形特性については、CCV規格(CVE-3511.2の記載)に基づき完全弾塑性型として設定している。このことから、第4-2図(b)に示した鉄筋の非線形特性を採用することは妥当であると考えられる。

6. 既往研究に基づく弾塑性解析の妥当性・適用性

(1) 基礎版の応力解析における適用要素の規基準類上の扱い

「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601 1987（社）日本電気協会」の「5.3.2 応力解析」には、「格納施設の基礎マット等の厚いコンクリート構造の FEM 解析のモデル化については、基礎の幾何学的形状、上部構造及び基礎の解析モデル作成上の整合性を考慮して適切な要素を選択しなければならない。一般的に、原子炉建屋の基礎マットのようにマット厚の厚い部位の 3次元 FEM 解析にはソリッド要素、又は面外せん断を考慮した平板要素を採用するのが良い。」と記載されている。ここで、面外せん断を考慮した平板要素とは、今回適用するシェル要素に該当する。

「原子炉施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 2005（社）日本建築学会」の「8条 構造解析の基本事項」の解説には、「基礎スラブは荷重状態が複雑なため、弾性地盤に支持された板として FEM でモデル化する場合が多い。要素としてはシェル要素またはソリッド要素が用いられる。」とされており、また、「11条 基礎スラブ」の解説には、「原子炉建屋の基礎スラブの解析モデルは図 11.1 に示すように基礎スラブの形状に応じて、シェル要素やソリッド要素によりモデル化する。また、ボックス壁やボックス壁に接合する上層の床スラブによる全体変形の拘束効果を適切に反映する。」として、シェル要素を用いた基礎版のモデル化例（第 6-1 図）が記載されている。



第 6-1 図 FEM による解析モデルの例 (文献 [12] より引用)

(2) 弾塑性解析を用いた解析的検討

小柳他が実施した「原子炉建屋基礎スラブの合理的応力評価方法に関する解析的検討」^{[10] [11]}においては、基礎版をシェル要素でモデル化した場合とソリッド要素でモデル化した場合の弾性解析及び弾塑性解析を実施し、曲げモーメント及びせん断力の応力性状について比較検討することにより、合理的な応力評価法について検討している。

検討に当たっては、曲げモーメントについては、厚さ 5.5m 程度の基礎版を対象に積層シェル要素を、面外せん断力に対しては厚さ 8m 程度の基礎版を対象にソリッド要素をそれぞれ用いて検討を実施している。解析結果の概要を第 6-2 図及び第 6-3 図に示す。

第 6-2 図に示したシェル要素によるモデルでは、弾塑性解析結果の各要素の曲げモーメントと弾性解析結果の曲げモーメントの比率の分析から、これらの比率が一定とみなせる範囲を評価している。この結果、基礎版程度の厚さの範囲では応力比率がほぼ一定であり、弾塑性モデルにおいてコンクリートのひび割れ等により応力が平均化されていると評価している。また、この結果は既往知見に基づく柱・梁接合部の塑性ヒンジ領域と同等であるとしている。

第 6-3 図に示したソリッド要素によるモデルの場合は、基礎版の断面内の応力分布から圧縮ストラット角度を 30~45° と評価し、柱・梁部材に関する既往知見とおおむね対応することを示している。圧縮ストラット角度から面外せん断力に関する平均化応力の範囲を基礎版厚さの 0.8 倍~1.4 倍、平均的には 1.0 倍程度と想定できると評価している。また、この結果は実験等による既往知見ともおおむね対応しているとしている。

本文献は、塑性化が生じる応力レベルの基礎版の部位についての合理的な応力評価法について検討した文献であり、検討の過程において厚さ 5.5m 程度の基礎版の曲げモーメントに対してはシェル要素の弾性解析及び弾塑性解析を、厚さ 8m 程度の基礎版の面外せん断力に対してはソリッド要素を用いて検討を実施している。これらより、曲げモーメントに関しては、弾性解析結果と弾塑性解析結果の比較により平均化応力の範囲を検討し、既往知見の塑性ヒンジ領域と同等であることが確認された。また、検討に用いているモデルは違うものの、シェル要素とソリッド要素を用いた検討では同程度の平均化応力の範囲を示していることが確認された。

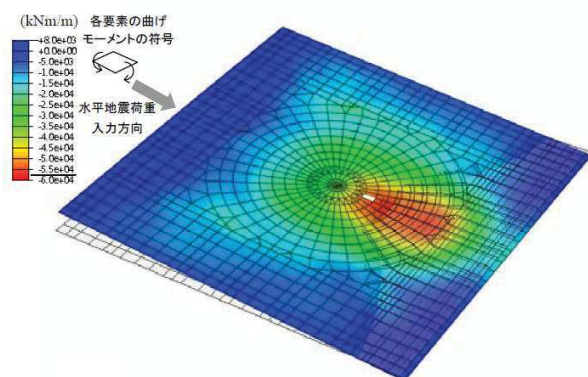


図-3 弾塑性解析 (M-2) による曲げモーメント分布

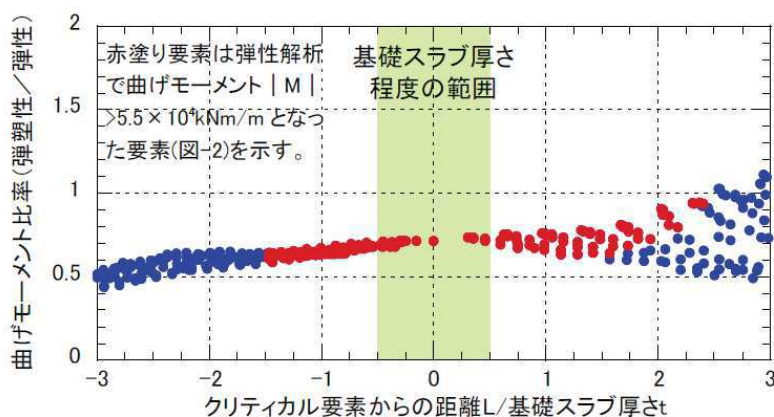


図-4 白塗り要素中心からの距離と曲げモーメント比率

第 6-2 図 シェル要素を用いた基礎版の弾塑性解析結果の概要
(文献 [11] より引用)

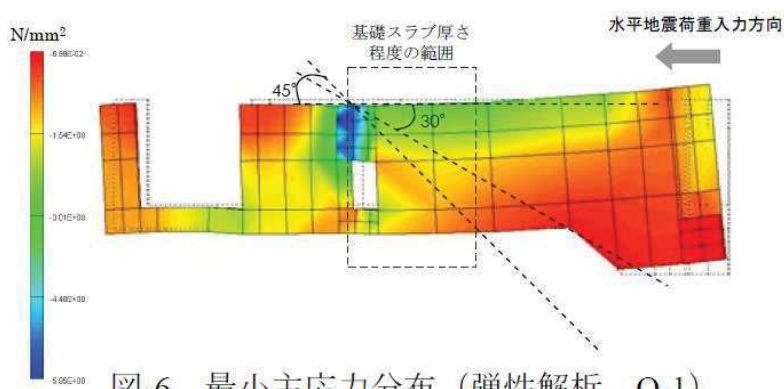


図-6 最小主応力分布 (弾性解析、Q-1)

第 6-3 図 ソリッド要素を用いた基礎版の弾塑性解析結果の概要
(文献 [11] より引用)

(3) ソリッド要素と梁要素及びシェル要素の比較検討

山田が実施した「FEMにおける構造モデリング—ソリッド要素と構造要素（はり，シェル）の選択—」^[13]においては、「コンピュータ性能の飛躍的な進歩により，非常に大規模な連続体の数値シミュレーションが可能となっている現状では，はり要素やシェル要素によってモデル化されてきた対象を，連続体としてソリッド要素によってモデル化し，大規模問題として複雑な構造物の応力解析を行うことが可能となっている。しかしながら，工学的観点で計算の精度や効率を考えたとき，すべてをソリッド要素でモデル化することは必ずしも適切ではない」との観点に基づき，モデル化の選択について考察を加えている。本文献では，はり要素やシェル要素の構造要素とソリッド要素とした場合について，片持ちはりを対象とした解析を行い，たわみの理論値との比較から要素選定に関する検討を行っている。

第6-1表及び第6-4図は，せん断変形の影響が表れる問題として，片持ちはりの長さが比較的短い場合の結果であり，たわみの数値をソリッド要素（双1次四辺形要素）とティモシェンコはり要素で比較したものである。表中の値は，ソリッド要素を用いた詳細な分割（1000×2000）による結果を参照解として正規化したものである。局所的な応力集中がなく曲げとほぼ一様なせん断変形が支配的な状況においては，はり要素が適用可能であること，また，ある程度詳細な要素分割を行うことで，ソリッド要素についても適用可能であることが分かる。「以上では，はりにより議論を進めてきたが，シェル要素についても基本的には同様である」とされている。

なお，基礎版に支配的な地震時においては，ほぼ同様な応力状態にあると考えられる。

本論文では，はり，シェルの構造要素について，「一般に構造要素が適用可能な場合には，連続体としてソリッド要素によりモデル化するよりも効率的で精度の高いシミュレーションが可能となる」としている。

第6-1表 梁モデルを用いたソリッド要素と梁要素の解析結果の概要
(文献 [13] より引用)

表3 短い片持ちはりに対するたわみ

L	双1次四辺形要素			ティモシェンコ はり要素	
	分割	変位型	改良型	分割	1次要素
3	3×2	0.697	0.952	5	0.995
	6×4	0.898	0.984	10	1.002
	12×8	0.971	0.995	20	1.004
5	5×2	0.703	0.978	5	0.993
	10×4	0.902	0.992	10	1.000
	20×8	0.973	0.997	20	1.002

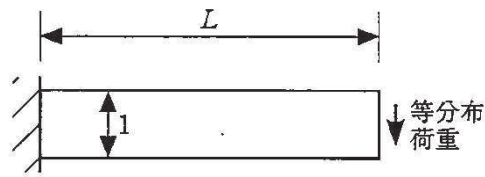


図7 一定断面片持ちはりの問題

第6-4図 梁モデルを用いたソリッド要素と梁要素の解析検討モデル概要図
(文献 [13] より引用)

(4) まとめ

既往研究に基づき、弾塑性解析の妥当性・適用性についての検討を行った結果、シェル要素を用いた基礎版の応力解析については規基準類上採用できること、また既往文献における適用実績があることを確認した。

以上より、原子炉建屋の基礎版の応力解析において、シェル要素を用いた弾塑性解析による手法を採用することは妥当であると考えられる。

また、シェル要素を用いた応力解析の検証の観点から、面外せん断応力が大きい場合には、詳細設計段階において代表ケースを選定してソリッド要素で基礎版をモデル化した解析を行い、モデル化手法による比較を行うこととする。

7. まとめ

基礎版の応力解析で採用予定の解析モデルについて、既工認との手法の差異を整理した。論点として、弾塑性挙動に与える影響が大きい材料構成則（鉄筋、コンクリート）を抽出した。その上で適用文献の内容を整理し、その適用性・妥当性を確認した。また、女川2号炉原子炉建屋で確認されている初期剛性低下について、材料構成則への反映方法について確認した。

以上より、今回採用予定の応力解析モデルの妥当性を確認した。

<参考文献>

- [1] Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE), 1993
- [2] 日本建築学会 : 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-1999, 1999年
- [3] 出雲, 島, 岡村 : 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9.1987.9
- [4] M.P.Collins, F.J. Vecchio: The response of reinforced concrete to in-plane shear and normal stresses, University of Toronto, March 1982
- [5] 森田司郎・角徹三 : 鉄筋コンクリート部材の引張試験による付着効果の研究, セメント技術年報, Vol.18, pp.426-430, 昭39
- [6] 山田一字・青柳征夫 : ひび割れ面におけるせん断伝達, 第2回鉄筋コンクリート構造物のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集, pp.19-26, 1983.10
- [7] 日本建築学会 : コンクリート系構造の部材解析モデルと設計への応用, 2008年
- [8] Saito,H et al. : Ultimate strength of reinforced concrete members subjected to transient high temperature distribution, Transactions of the 12th international conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT), Volume H, pp.31-36, Aug. 1993
- [9] Kumagai,H. et al.:Fiber optic distributed sensor for concrete structures,Proceeding of the 1st fib Congress, Session 15, pp.179-184,2002
- [10] 小柳他 : 原子炉建屋基礎スラブの合理的応力評価方法に関する解析的検討(その1)基礎スラブの試解析, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.1039-1040, 2009
- [11] 小林他 : 原子炉建屋基礎スラブの合理的応力評価方法に関する解析的検討(その2)合理的応力評価法(案), 日本建築学会学術講演梗概集, 構造Ⅱ, pp.1041-1042, 2009
- [12] 日本建築学会 : 原子力施設鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 2005年
- [13] 山田貴博 : FEMにおける構造モデリング—ソリッド要素と構造要素(はり, シェル)の選択—, 精密工学会誌 Vol.77, No.9, 2011

CCV 規格等における許容限界設定の考え方について

CCV 規格等におけるコンクリート及び鉄筋のひずみ、面外せん断力の許容限界設定の考え方について以下に示す。

1. コンクリート

CCV 規格においてコンクリートのひずみの許容値としては、 $0.003(3000\mu)$ が採用されている。

これは、American Concrete Institute「Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-02)」の Chapter 10 Flexural and axial loads の記載に基づき設定されている。

コンクリートのひずみが 3000μ に達した状態は、最大圧縮強度時のひずみ (2000μ 程度) を超えた応力下降域 (軟化域) の状態にあり、若干のひび割れが入っているものの、ある程度の強度を有している状態である。また、一般的に、コンクリートのひび割れは、スリット状ではなく、複雑な形状で生じるため、放射線の低減効果が期待でき、遮蔽性能に与える影響は無い。

なお、コンクリートの最大圧縮強度については、American Concrete Institute「Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-02)」の Chapter 10 Flexural and axial loads の記載に基づき、 $0.85F_c$ (設計基準強度の 0.85 倍) に制限しており、実際のコンクリートの最大圧縮強度に対して余裕を見込んだ数値が設定されている。

2. 鉄筋

CCV 規格において鉄筋のひずみの許容値としては、 $0.005(5000\mu)$ が採用されている。

鉄筋のひずみを 5000μ とした理由について、CCV 規格の解説に「部材の変形が過大にならないように配慮して定めた」とし、「一般的に多く使用されている SD345 及び SD390 の降伏ひずみ (中略) は 0.0017 及び 0.0019 であり、鉄筋の最大ひずみはこれら降伏ひずみの 2 から 3 倍程度とした」と記載されている。

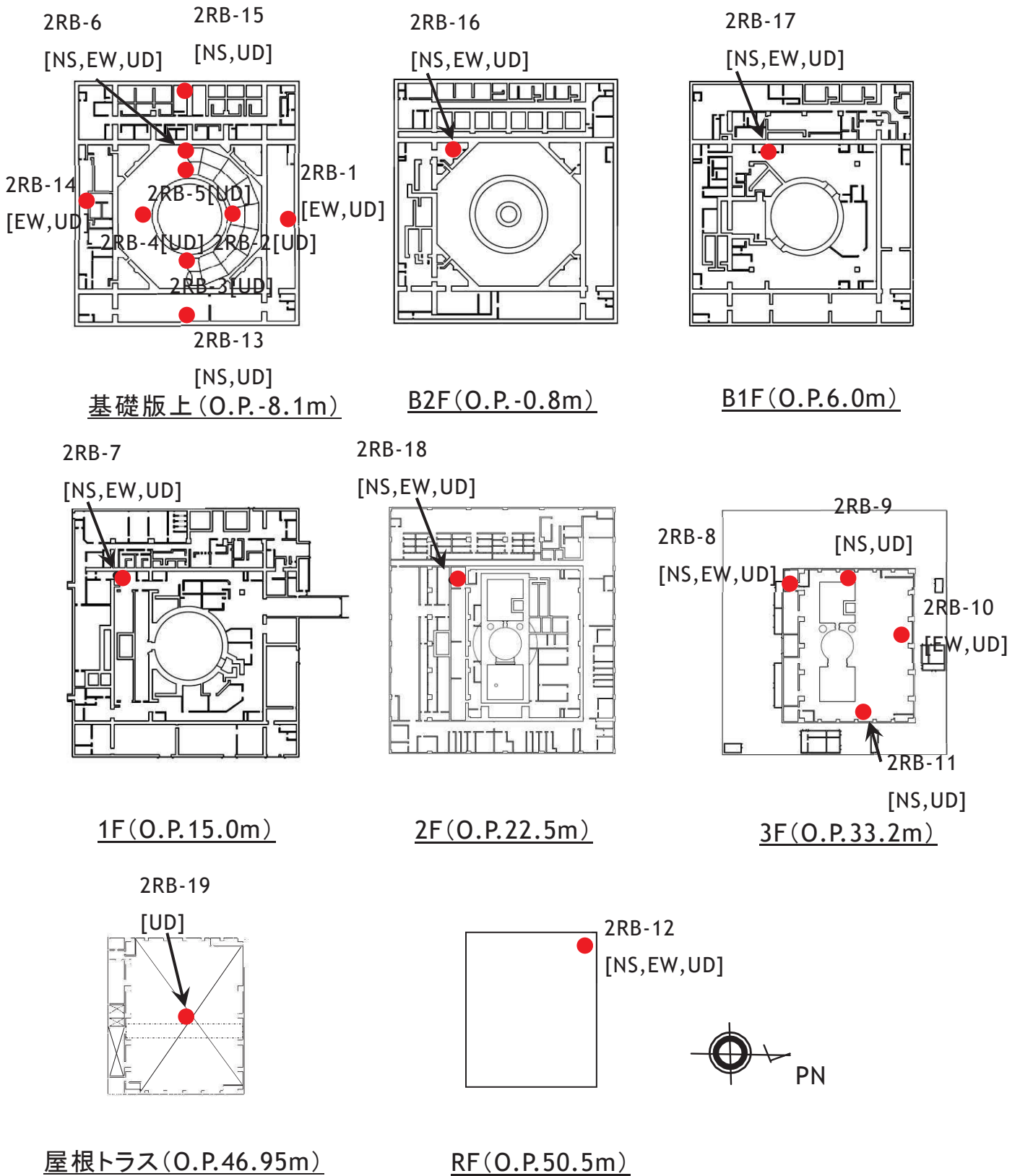
一般に、鉄筋のひずみが 5000μ に達した状態は、降伏ひずみの 2~3 倍程度であり、最大引張強度に至るまでには程遠い状態である。また、JIS に示される鉄筋の機械的性質としては、SD345 及び SD390 の場合、伸びが $16\sim 19\%$ ($160000\sim 190000\mu$) 以上とされており、 5000μ は破断に対しても十分余裕のある状態にあるといえる。

3. 鉄筋コンクリートの面外せん断力

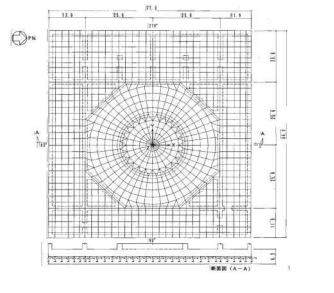
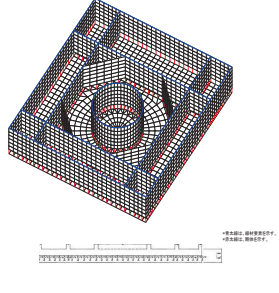
面外せん断力の許容値は，短期許容応力度を基本とし，発生値が短期許容応力度を上回る場合には RC-N 規準（2005）に記載の荒川平均式等の適用を検討する。

なお，荒川平均式等を適用した場合における設備の支持性能については，地震によってコンクリートにひび割れが発生した場合の設備への影響を詳細設計段階で詳細な説明を行う。

2号炉原子炉建屋 地震計配置



弾塑性解析の適用に関する先行プラントとの比較

プラント		女川2号炉	柏崎刈羽6号及び7号炉(参考)※
部位		原子炉建屋の基礎	RCCVコンクリート部
項目		既工認時	今回工認時
分類		間接支持構造物 (検討用地震動:S2)	主要設備(Sクラス)
解析手法		・弾性地盤上に支持された厚さ6.0mの一枚の版として有限要素法により解析する。	・3次元FEMモデルを用いた応力解析
解析コード		・NASTRAN	・NASTRAN ・ABAQUS
荷重状態		-	荷重状態Ⅰ～Ⅲ 荷重状態Ⅳ
考慮する荷重		・固定荷重, 機器配管荷重, 積載荷重, 地震荷重(S2), 土圧等	・死荷重, 運転時圧力等 ・死荷重, 運転時圧力, 地震荷重等
モデル化	モデル化範囲	・基礎版全体と剛性の高い一部壁をモデル化	・360° 全周をモデル化
	メッシュサイズ	・モデル全体でおおむね1~3m程度	・モデル全体でおおむね1~2m程度
	要素タイプ	・基礎版全体をシェル要素でモデル化する。 ・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梁要素でモデル化する。	・同左 ・地下部分の一部はシェル要素でモデル化し、壁の立体的な形状による剛性への寄与を考慮する。
材料物性		・コンクリートのヤング係数 $E=2.7 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.167$	・コンクリートのヤング係数 $E=2.51 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ※1 ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.2$ ※1
評価方法	応力解析	・弾性解析	・弾性解析 ・弾塑性解析
	許容限界	(機能維持) 部材に発生する応力が許容限界を超えないことを確認する。接地圧が地盤の許容支持力度を超えないことを確認する。	(機能維持) 部材に生じる応力、ひずみが許容限界を超えないことを確認する。 ※3 接地圧が地盤の許容支持力度を超えないことを確認する。
境界条件及びモデル図		<p>基礎版より立ち上がっている耐震壁はその剛性を考慮して梁要素としてモデル化、底面には支持地盤と等価な弾性ばねをモデル化</p> 	<p>基礎版より立ち上がっている耐震壁はその剛性を考慮してシェル要素及び梁要素でモデル化、底面には支持地盤と等価な弾性ばねをモデル化 ※4</p> 
備考		<p>※1: コンクリートのヤング係数及びポアソン比は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規程・同解説-許容応力度設計法-1999」による計算式に基づく値を用いる。なお、地震応答解析モデルと同様の初期剛性低下については、地震観測記録の分析等を踏まえて、その影響を考慮することとする。</p> <p>※2: 終局強度設計の許容値に基づく評価を実施することとする。</p> <p>※3: 許容限界についてはOCV規格によるものを基本とする。</p> <p>※4: 基準地震動Ss以外の荷重(常時荷重及び弾性設計用地震動Sd)に対して検討する場合については、基準地震動Ssに対する検討に用いる解析モデルを採用する予定である。また、そのクライテリアはそれぞれの荷重に対する要求機能を踏まえた設定とする。</p>	<p>・荷重状態Ⅰ～Ⅲに対しては弾性解析を実施する。荷重状態Ⅰ～Ⅲについては、RCCVの挙動を弾性範囲内に収めようという設計思想に基づき設計が行われており許容値も弾性範囲内とされていること、並びに、温度荷重により発生する熱応力については荷重状態Ⅰ及び荷重状態Ⅱにおいては弾性剛性を1/2に荷重状態Ⅲにおいては弾性剛性を1/3に一律低減して算定することにより考慮することから既工認時と同様に弾性解析を実施することとし、荷重状態Ⅳについては評価基準値が塑性化を許容した終局強度設計を行っており許容値も塑性化を考慮した数値となっていることから、弾塑性解析を実施することとした。</p> <p>・許容限界については既工認時「通商産業省告示452号「コンクリート製原子炉格納容器に関する構造等の技術基準」 今回工認:OCV規格に基づき設定しているが数値は同じである。荷重状態Ⅳ(Ss既工認時はS2)を含む荷重組合せ等の場合は、鉄筋5000μ、コンクリート3000μ</p>

※他サイトの情報に係る記載内容については、公開資料を基に弊社の責任において独自に解釈したものです。

地震観測記録に基づく基礎版の剛性低下に係る試検討

1. はじめに

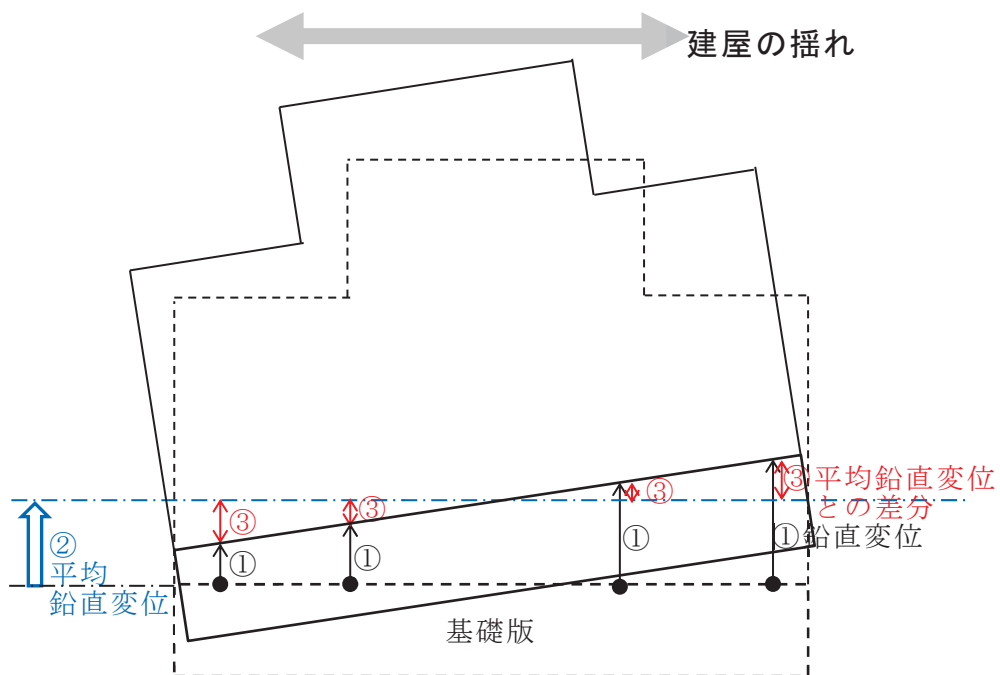
基礎版の応力解析モデルについては、既工認と同様に設計基準強度ベースで剛性を評価したケースを基本ケースとし、更に初期剛性を低下させるケースは不確かさケースとして扱う方針としている。不確かさケースに用いる初期剛性の低下量については、基礎版上に設置されている地震観測記録の分析を踏まえ設定する方針としており、ここではその検討例を示す。

2. 検討方法

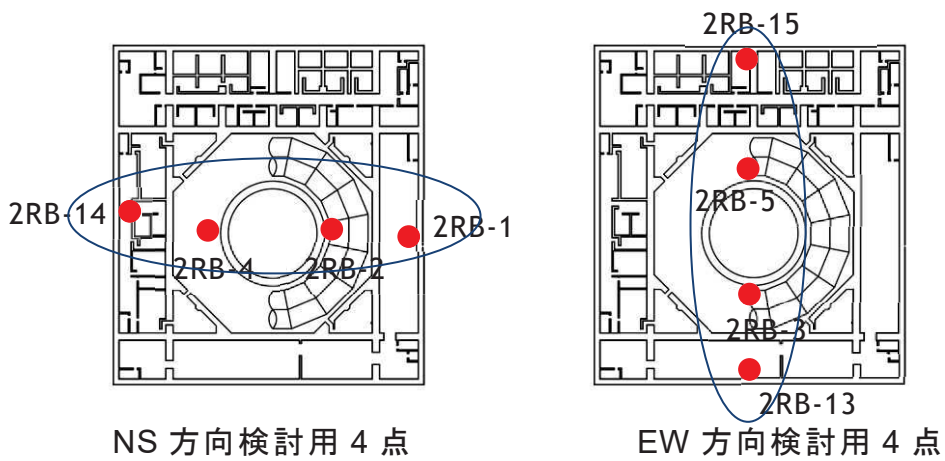
基礎版上には鉛直方向の地震動を観測する地震計がNS方向、EW方向に各4箇所配置されており、3.11地震を含めた複数地震に対して、鉛直方向の相対変位量と、基礎版に作用した地震力の大きさの相関性について、以下の手順にて検討する。

検討方法の概念図を参考第2-1図に、地震観測位置を参考第2-2図に、検討用地震を参考第2-1表にそれぞれ示す。

- ① 参考第2-1表に示す過去の主要地震について、鉛直方向の加速度記録を積分して変位波形を算定する。
- ② 直線上に並ぶ4点の変位波形から平均変位波形を時刻歴上で算定する。
- ③ 平均変位波形と各観測点の変位波形の差分の最大値(絶対値)を算定する。
- ④ 算定した各観測点の変位差分の最大値と建屋への入力地震動の大きさ(例えば質点系モデルを用いたシミュレーション解析より算定されるベースシャー係数(最下層の層せん断力係数))の関係をプロットする。
- ⑤ プロットしたベースシャー係数と鉛直変位の関係より基礎版の剛性を分析する。



参考第 2-1 図 検討方法の概念図



基礎版上 (O.P.-8.1m)

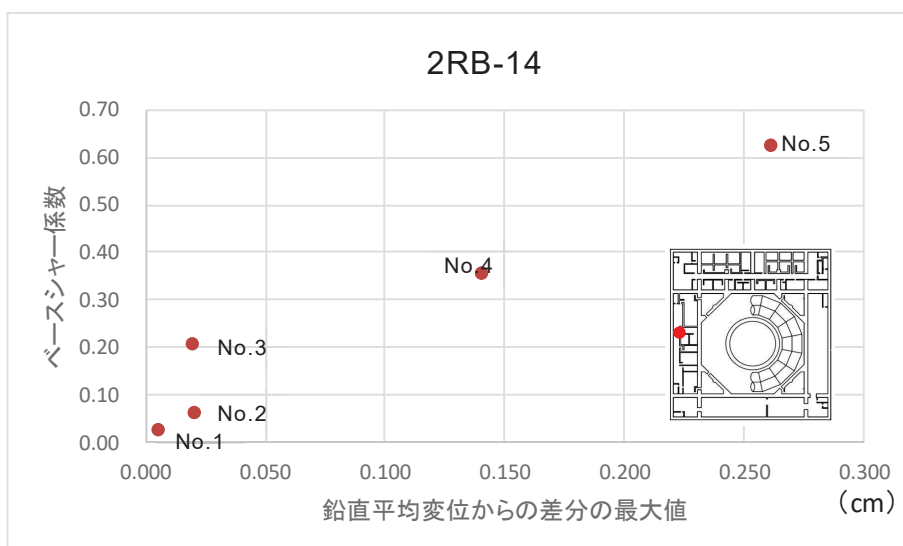
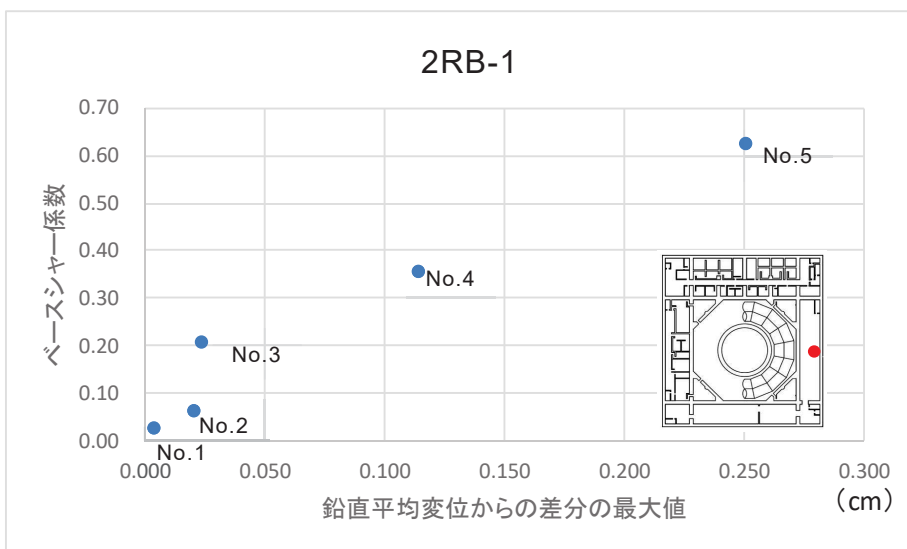
参考第 2-2 図 地震観測位置 (2号炉原子炉建屋基礎版, 鉛直方向)

参考第 2-1 表 検討用地震

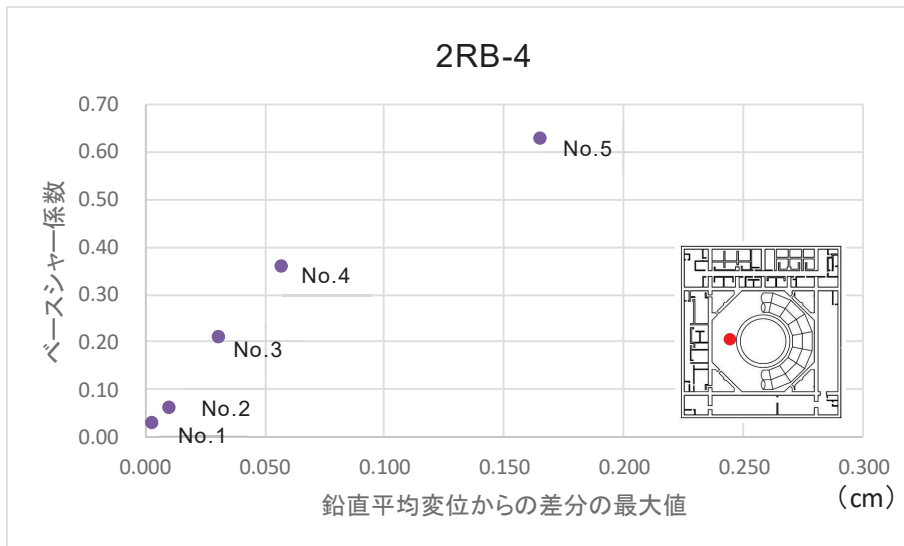
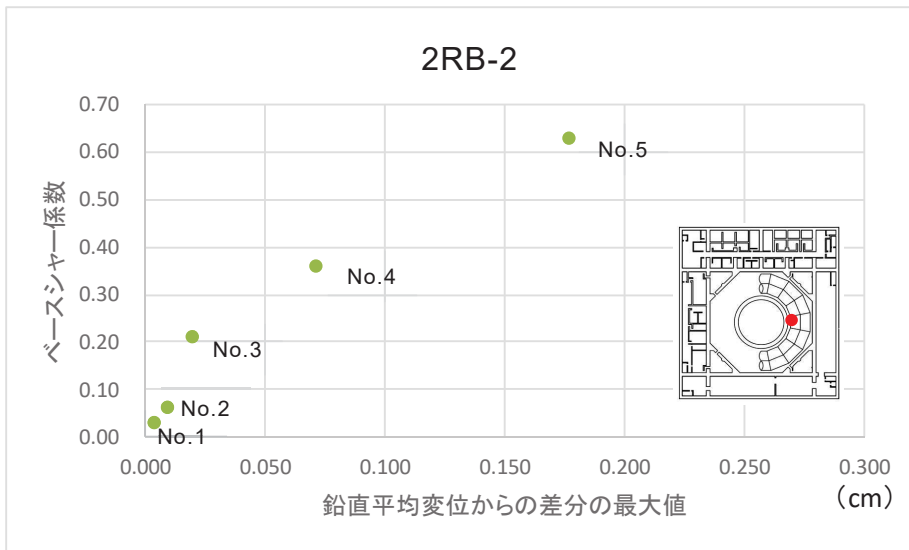
No.	日時	検討用地震	ベースシャー係数	
			NS 方向	EW 方向
1	1994/10/4 22:22	北海道東方沖の地震	0.03	0.02
2	1996/2/17 0:22	福島県沖の地震	0.06	0.05
3	2003/5/26 18:24	宮城県沖の地震	0.21	0.20
4	2005/8/16 11:46	宮城県沖の地震	0.36	0.20
5	2011/3/11 14:46	東北地方太平洋沖地震	0.63	0.74

3. 検討結果

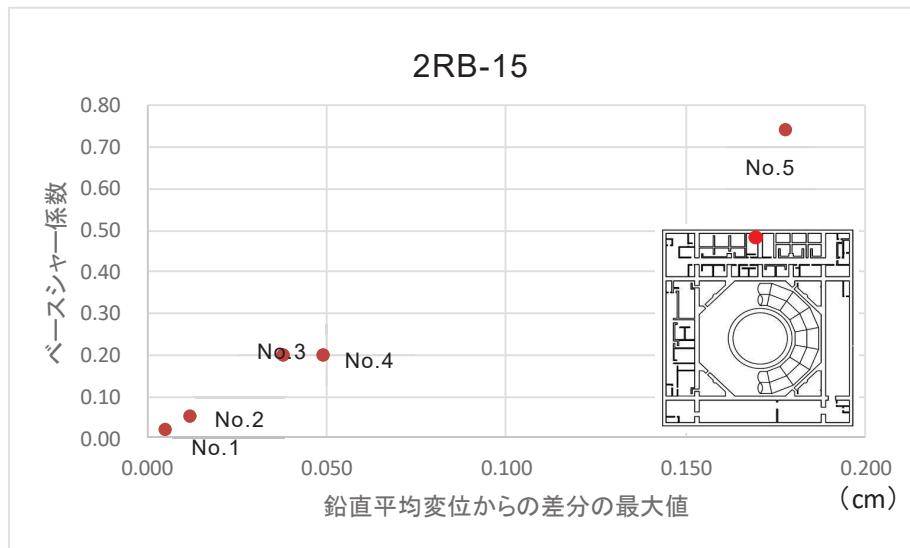
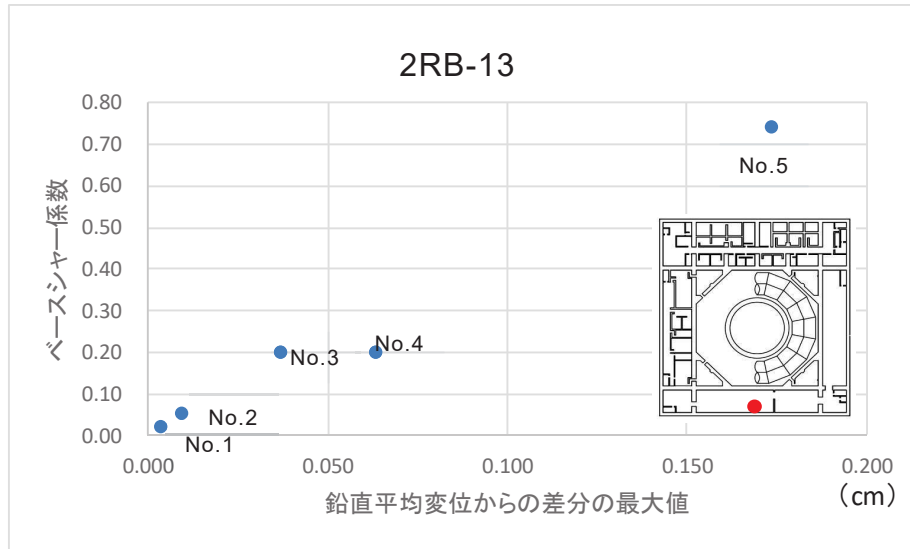
前述の方法により算定した鉛直変位とベースシャー係数の関係（参考第 3-1 図～参考第 3-4 図）はおおむね比例関係となっていることから、剛性が低下するような傾向は認められないと考えられる。



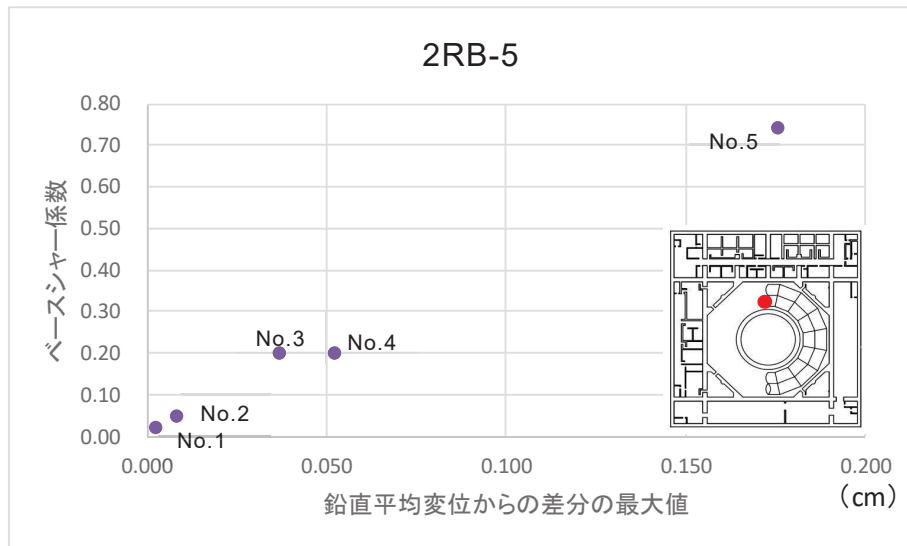
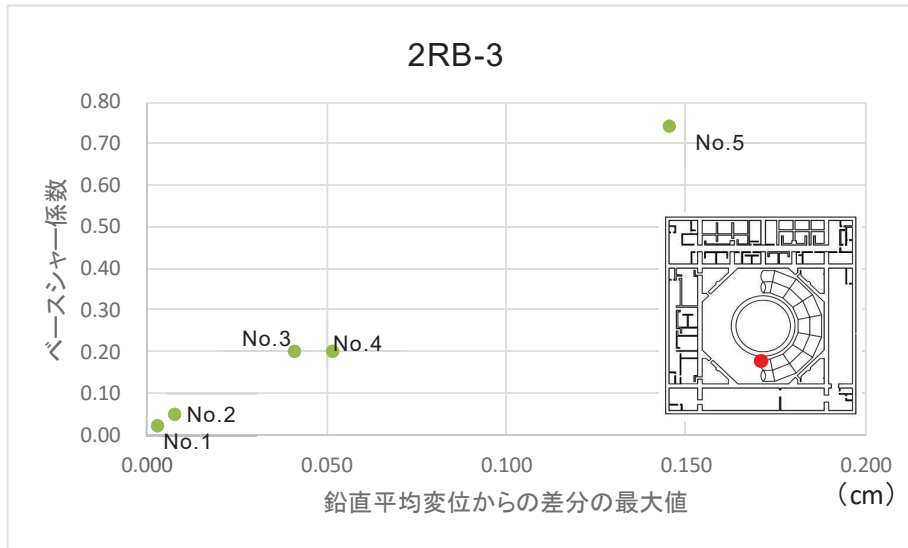
参考第 3-1 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (NS 方向) (1/2)



参考第 3-2 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (NS 方向) (2/2)



参考第 3-3 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (EW 方向) (1/2)



参考第 3-4 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (EW 方向) (2/2)