

本資料のうち、枠囲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 1-4

## 女川原子力発電所 2 号炉

### 設計基準対象施設について

平成 3 1 年 2 月

東北電力株式会社



## 目次

- 4 条 地震による損傷の防止
- 5 条 津波による損傷の防止
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（その他外部事象）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（竜巻）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（火山）
- 6 条 外部からの衝撃による損傷の防止（外部火災）
- 7 条 発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止
- 8 条 火災による損傷の防止
- 9 条 溢水による損傷の防止等
- 10 条 誤操作の防止
- 11 条 安全避難通路等
- 12 条 安全施設
- 14 条 全交流動力電源喪失対策設備
- 16 条 燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設
- 17 条 原子炉冷却材圧力バウンダリ
- 23 条 計測制御系統施設（第 16 条に含む）
- 24 条 安全保護回路
- 26 条 原子炉制御室等
- 31 条 監視設備
- 33 条 保安電源設備
- 34 条 緊急時対策所
- 35 条 通信連絡設備

下線は、今回の提出資料を示す。



本資料のうち、枠囲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。

## 女川原子力発電所 2 号炉

### 地震による損傷の防止



## 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 地震時における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 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



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

## 目 次

1. 概要
2. 初期剛性が設計より低下している要因の検討
  - 2.1 検討の概要
  - 2.2 3.11 地震等に対する主要建屋のシミュレーション解析
    - (1) 検討の目的
    - (2) 2号炉原子炉建屋（水平動，鉛直動）
    - (3) 3号炉原子炉建屋（水平動，鉛直動）
    - (4) 検討結果
  - 2.3 地震等による構造的影響
    - 2.3.1 検討概要
    - 2.3.2 実機の3.11地震等に対する建屋の振動特性の把握
      - (1) 検討の目的
      - (2) 女川原子力発電所主要建屋の剛性低下の傾向分析（水平動，鉛直動）
      - (3) 東通原子力発電所の傾向との比較
      - (4) 検討結果
    - 2.3.3 3.11地震等における構造的損傷の有無の確認
      - (1) 検討の目的
      - (2) 2号炉原子炉建屋の点検評価，解析的評価による構造的影響評価結果の概要
      - (3) 補足検討
        - a. 3次元的なねじれの影響確認
        - b. 残留変形の確認
        - c. 鉛直動の影響の大きい床等の面外応力に対する影響確認
      - (4) 検討結果
    - 2.3.4 3次元FEMモデルによるオペフロ上部の剛性低下（大架構）
      - (1) 検討の目的
      - (2) 検討の概要
      - (3) 検討結果
    - 2.3.5 繰返し試験体（耐震実験[1]）による確認
      - (1) 検討の目的
      - (2) 実験の概要
      - (3) 検討結果
    - 2.3.6 地震等による構造的影響に関する検討結果のまとめ
  - 2.4 コンクリートの乾燥収縮の影響
    - 2.4.1 検討概要
    - 2.4.2 乾燥収縮の影響に関する文献レビュー

- (1) 現状の建物設計における乾燥収縮ひび割れの扱い
- (2) 乾燥収縮と剛性低下の関係を指摘している研究
- 2.4.3 実機の乾燥収縮状態等の把握
  - (1) 検討の目的
  - (2) 乾燥収縮の進行度合い
  - (3) 使用コンクリートに関する材料試験による確認
  - (4) 乾燥収縮ひび割れ調査
  - (5) 検討結果
- 2.4.4 乾燥試験体（耐震実験 [3]）による確認
  - (1) 検討の目的
  - (2) 実験の概要
  - (3) 検討結果
- 2.4.5 コンクリートの乾燥収縮の影響に関する検討結果のまとめ
- 2.5 その他の要因影響
  - 2.5.1 支持地盤の剛性低下の有無の確認
    - (1) 検討の目的
    - (2) 2号炉原子炉建屋シミュレーションによる支持地盤の支持力確認
    - (3) 自由地盤と建屋直下の観測記録の比較
    - (4) 側面地盤が建屋の振動特性に与える影響の確認
    - (5) 検討結果
  - 2.5.2 実機コンクリート圧縮強度の設計基準強度との比較
    - (1) 検討の概要
    - (2) 調査方法
    - (3) 調査結果
  - 2.5.3 その他の要因影響に関する検討結果のまとめ
- 2.6 初期剛性が設計より低下している要因の検討のまとめ
- 3. 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響
  - 3.1 検討概要
  - 3.2 地震による事前損傷が終局耐力等に与える影響
    - 3.2.1 事前損傷試験体（耐震実験 [2]）による確認
      - (1) 検討の目的
      - (2) 実験の概要
      - (3) 検討結果
  - 3.3 乾燥収縮が終局耐力等に与える影響
    - 3.3.1 乾燥試験体（耐震実験 [3]）による確認
      - (1) 検討の目的
      - (2) 実験の概要

- (3) 検討結果
- (4) 耐震実験を踏まえた剛性低下の要因分析についての考察
- 3.3.2 乾燥収縮の影響に関する文献レビュー
- 3.4 初期剛性低下の要因が終局耐力等に与える影響のまとめ
  
- 4. 2号炉原子炉建屋オペフロ上部耐震補強工事
  - 4.1 耐震補強工事の概要
  - 4.2 耐震補強工事の有効性確認
  - 4.3 耐震補強工事の地震応答特性への影響検討
  
- 5. 設計体系への反映
  - 5.1 地震応答解析モデルの策定
    - 5.1.1 基本モデル策定の考え方
    - 5.1.2 2号炉原子炉建屋の基本モデルの諸元
    - 5.1.3 設計用地震力の評価方針
  - 5.2 地震応答解析モデルに考慮する不確かさに関する検討
  - 5.3 原子炉建屋の代表性
    - 5.3.1 オペフロ上部の検討を踏まえた原子炉建屋の代表性
    - 5.3.2 原子炉建屋以外の既設建屋への水平展開の考え方
    - 5.3.3 新設建屋への初期剛性低下の考慮方針
  - 5.4 部材評価における評価方針
  - 5.5 設備評価への反映方針
  - 5.6 建屋の部位への要求機能を踏まえた影響検討
  
- 6. まとめ
  - 6.1 検討結果の概要
  - 6.2 剛性低下を踏まえた建屋解析手法の高度化

- 添付 1 東北地方太平洋沖地震等に対する主要建屋のシミュレーション解析
- 添付 2 各建屋の剛性低下（固有振動数低下）の地震観測記録による傾向分析
- 添付 3-1 東北地方太平洋沖地震等に対する構造的影響評価（点検結果）
- 添付 3-2 東北地方太平洋沖地震等に対する構造的影響評価  
（追加評価に係る点検結果）
- 添付 3-3 3次元 FEM 等価線形モデルによるシミュレーション解析（原子炉建屋）
- 添付 3-4 3次元 FEM 非線形モデルによるシミュレーション解析  
（原子炉建屋オペフロ上部）
- 添付 3-5 3次元立体架構モデルによる屋根トラスのシミュレーション解析
- 添付 3-6 建屋の 3 次元的なねじれの影響について
- 添付 3-7 オペフロ上部変位計測システムと計測変位
- 添付 3-8 床等の面外応力に対する影響確認
- 添付 4 原子炉建屋オペフロ上部の剛性と耐力に関する検討
- 添付 5 耐震実験による中小地震レベルの繰返し加力による影響検討（耐震実験[1]）
- 添付 6 乾燥収縮等が初期剛性や終局耐力等に与える影響に関する文献について
- 添付 7 実機の乾燥収縮の状況に関する検討
- 添付 8 耐震実験による乾燥収縮が終局耐力に与える影響検討（耐震実験[3]）
- 添付 9 建屋支持地盤の剛性低下に関する検討
- 添付 10 建屋コンクリートの圧縮強度の確認
- 添付 11 耐震実験による事前損傷が終局耐力に与える影響検討（耐震実験[2]）
- 添付 12 原子炉建屋オペフロ上部の耐震補強
- 添付 13 地震応答解析モデルの基本ケースと不確かさケースの設定
- 添付 14 乾燥収縮ひび割れによる機器アンカーへの影響検討
- 添付 15 床応答スペクトルの拡幅率について
- 添付 16 鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響を踏まえた要求機能に対する各条文の機能維持の方針の整理

下線は、今回の提出資料を示す。

## 5. 設計体系への反映

### 5.1 地震応答解析モデルの策定

・・・添付 13

#### 5.1.1 基本モデル策定の考え方

- 設計よりも初期剛性が低下した要因は、3.11 地震等の地震力の影響と乾燥収縮の影響の重畳と考えられることから、その要因と今後の進展に関するこれまでの検討内容を踏まえて、基本モデルのスケルトンカーブを設定する。

#### (1) 基本モデルのスケルトンカーブの設定の考え方

事前損傷、乾燥収縮及び大架構は、JEAG 式の評価基準値付近に影響を与えないこと、実機の乾燥収縮はほぼ定常状態にあることから、ベースとするスケルトンカーブは、既工認と同様、JEAG 式を基本モデルに適用する。また、初期剛性の考え方は以下のとおりとする。

#### 【建屋の初期剛性（水平動）】

初期剛性を低下させた 3.11 地震等のシミュレーション解析において、オペフロ上部のように折点を超えるような応答に対しても十分観測記録との整合性が確保できること、また、基準地震動  $S_s$  に対しては第一、第二折点を超えた応答となるため、初期剛性の違いが応答結果に与える影響が小さくなることも踏まえ、初期剛性は 3.11 地震、4.7 地震時の低下した状態を採用する。

#### 【建屋の初期剛性（鉛直動）】

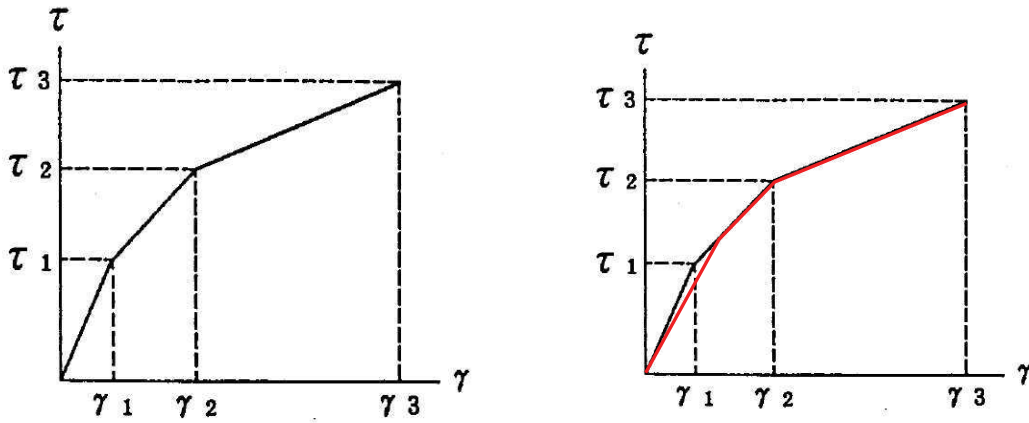
水平動に比べ建設時からの剛性低下は小さく、これまでの地震の経験において設計剛性を下回っていないこと、建屋シミュレーション解析では既工認モデルで記録を再現できたことから、既工認モデルの剛性を採用する。

#### 【基本モデルのせん断スケルトンカーブの概要】

- 耐震壁の初期剛性低下の影響については、トリ・リニア型スケルトン曲線の第一勾配を緩く傾斜させ、元の JEAG のスケルトン曲線に接続することで考慮している。
- せん断力復元力特性モデルは、下右図に示すように元の復元力特性の考え方で剛性が低下していった場合と同様とし、最大点指向型履歴ループを用いる。
- したがって、初期剛性を現在の建屋状態に合わせているが、その力-変形関係は基本的に JEAG に則った復元力特性を用いており、JEAG に適合するものとしている。
- このような初期剛性を低下させた復元力特性モデルでは、最大加速度が 3.11 地震、弾性設計用地震動  $S_d$  レベルの入力の場合には第一勾配内での応答となり等価線形応答となる。最大加速度が弾性設計用地震動  $S_d$  を超え基準地

震動 Ss レベルの入力になると、応答が大きくなり第二勾配（又は第三勾配）に入る非線形応答となる。

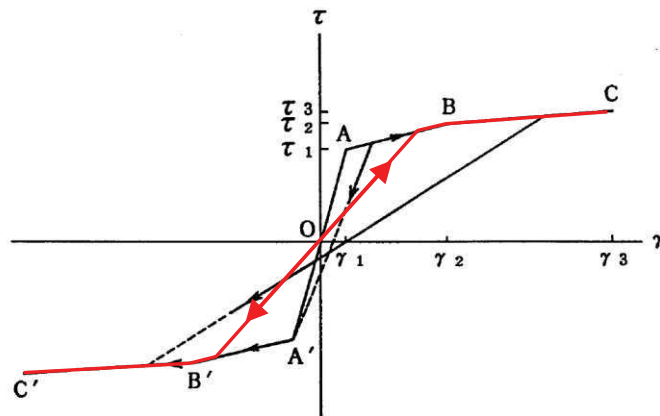
- ・なお、曲げスケルトンカーブについても JEAG に基づく復元力特性とし、初期剛性はせん断と同様に低下させたモデルとする。



設計時のスケルトン曲線

初期剛性を低下させた場合のスケルトン曲線

第 5. 1. 1-1 図 せん断スケルトン曲線の設定



第 5. 1. 1-2 図 初期剛性を低下させたせん断力復元力特性の設定

(2) 基本モデル策定の考え方（その他の解析物性値の設定）

基本モデルの解析物性値の内、スケルトンカーブ以外の建屋内部減衰等の設定は、3.11 地震等の傾向、地盤調査結果及び耐震補強工事を反映する。

第 5.1.1-1 表 基本モデル策定の考え方（その他の解析物性値の設定）

項目	基本モデルへの適用
建屋内部減衰	<p><b>【水平動】</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>・ 3.11 地震における建屋内部減衰は 7% と評価されており、これは初期剛性の低下の影響（履歴的な減衰効果）も含まれたものと考えられる。基本モデルにおいては、この効果を安全側に無視し、既工認と同様の減衰 5% を採用する。</li></ul> <p><b>【鉛直動】</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>・ 3.11 地震のシミュレーション解析では既工認と同様の減衰（5%）を採用し観測記録を再現出来たことから、5% を採用する。</li></ul>
底面地盤ばね	<ul style="list-style-type: none"><li>・ 底面地盤については実測した地盤のせん断波速度の平均値を採用。建屋直下の PS 検層を 9 箇所実施し、その平均値よりせん断波速度を設定。</li></ul>
耐震補強部材の反映	<ul style="list-style-type: none"><li>・ オペフロ階～屋上階には耐震補強工事を実施していることから、追設ブレース及び追設耐震壁をモデルに反映する。</li><li>・ 追設耐震壁は、既存躯体及び鋼製型枠により覆われているため、乾燥収縮の影響を受けにくい構造であり、また、大きな地震を経験していないことから、初期剛性低下は考慮しないこととする。なお、初期剛性の不確かさケースにおいては、追設耐震壁についても一律初期剛性低下を考慮する。</li></ul>

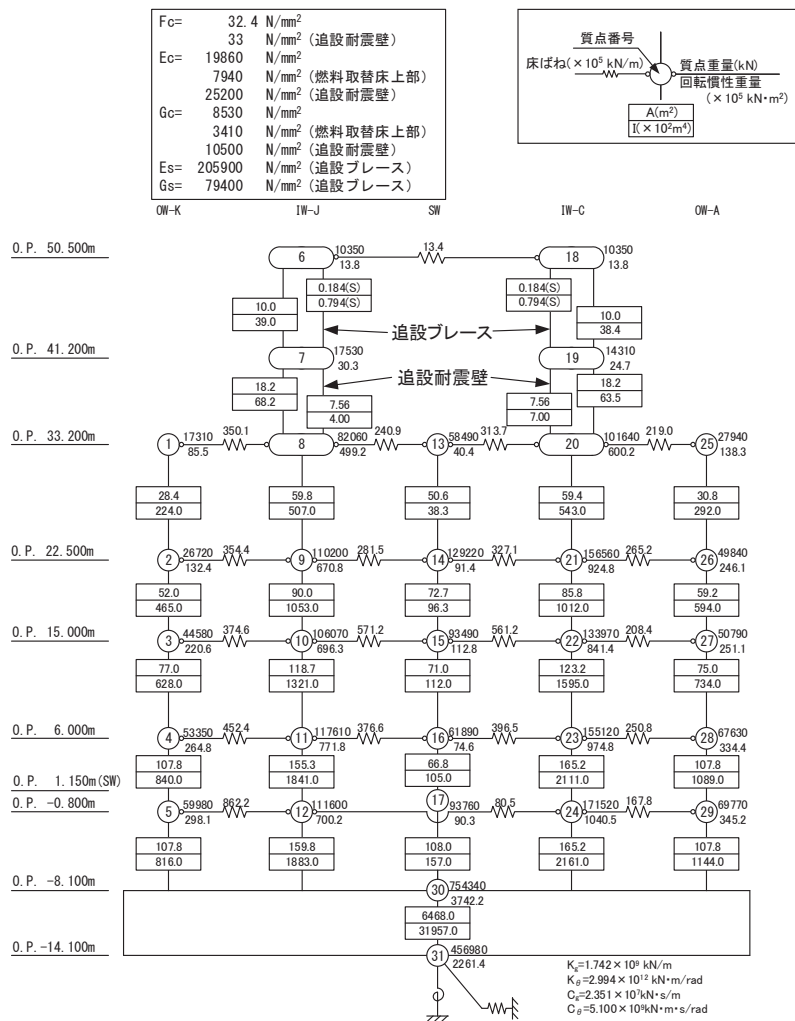


5.1.2 2号炉原子炉建屋の基本モデルの諸元

2号炉原子炉建屋の基本モデルの諸元を第5.1.2-1表及び第5.1.2-1図に示す。  
また、既工認モデルとの差異を第5.1.2-2表に示す。

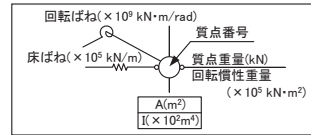
第5.1.2-1表 コンクリート壁の初期剛性の設計値に対する補正係数と建屋減衰

号炉 建屋	方向	コンクリート壁の初期剛性の設計値に対する 補正係数		建屋 減衰
		オペフロ階(3階) ・クレーン階	地下3階~2階	
0-2 R/B	NS	0.30	0.75	0.05
	EW	0.50	0.80	0.05
	UD	1.00	1.00	0.05

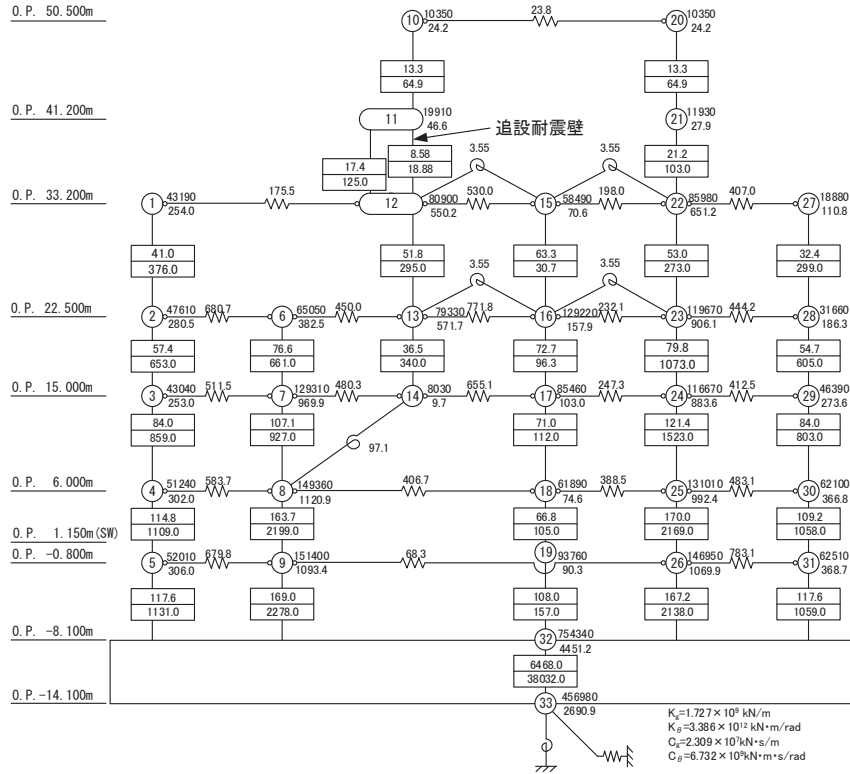


第5.1.2-1図 (1) 女川2号炉原子炉建屋 地震応答解析モデル NS方向

$F_c =$	32.4	N/mm <sup>2</sup>
$E_c =$	33	N/mm <sup>2</sup> (追設耐震壁)
	21180	N/mm <sup>2</sup>
	13240	N/mm <sup>2</sup> (燃料取替床上部)
	25200	N/mm <sup>2</sup> (追設耐震壁)
$G_c =$	9100	N/mm <sup>2</sup>
	5690	N/mm <sup>2</sup> (燃料取替床上部)
	10500	N/mm <sup>2</sup> (追設耐震壁)



OW-1      IW-2      IW-4      SW      IW-10      OW-11



第 5.1.2-1 図 (2) 女川 2 号炉原子炉建屋 地震応答解析モデル EW 方向

第 5.1.2-2 表 既工認モデルとの差異

項目		既工認モデル	今回工認モデル
入力地震動		直接入力	表層地盤の影響を考慮して基礎下の入力地震動を算定
応答計算法		時刻歴応答解析 (非線形解析)	同左
建屋モデル		質点系多軸モデル・床剛 (側面地盤との相互作用は考慮しない)	質点系多軸モデル・床の柔性考慮 (側面地盤との相互作用は考慮しない)
剛性 評価 (RC)	考慮範囲	耐震壁	同左
	ヤング係数 せん断弾性 係数	コンクリートの設計基 準強度より算定	3.11 地震等の観測記録との整合 を踏まえて剛性低下を考慮
建屋 減衰	鉄筋コンク リート	5%	5% (3.11 地震等のシミュレーショ ン解析では 7%相当であるが保守 的に設定)
解析 モデル	建屋-地盤 相互作用	スウェイ・ロッキングモ デル (側面地盤との相互作用 は考慮しない)	同左
地盤ばね		JEAG による近似法	同左

### 5.1.3 設計用地震力の評価方針

#### (1) 設計用地震力の設定方針

静的地震力の算定に用いる  $A_i$  分布は、初期剛性の低下を考慮した今回工認モデルが現状の地震時の振動特性を持つ精緻なモデルであるため、これにより  $A_i$  分布を算定する。ただし、念のため初期剛性低下を考慮しない設計剛性モデルでの  $A_i$  分布も確認する。

今回工認における設計用地震力は、静的地震力、弾性設計用地震動  $S_d$  による動的地震力により設定し、既工認における設計用地震力も包絡する。

#### (2) 静的地震力、必要保有水平耐力の設定方法

##### 【静的地震力（水平）】

原子炉建屋の水平の静的地震力は算定用の基準面を基礎スラブ上端 (0.P. -8.1m) とし、地震層せん断力係数を用いて次式によって算定する

$$Q_i = n \cdot Z \cdot C_i \cdot W_i$$
$$C_i = \beta \cdot R_t \cdot A_i \cdot C_0$$

##### 【静的地震力（鉛直）】

鉛直の静的地震力は、次式による鉛直震度から算定する。

$$K_v = R_v \cdot 0.3$$

##### 【必要保有水平耐力】

必要保有水平耐力は、次式によって算定する。

$$Q_{un} = D_S \cdot F_{es} \cdot Q_{ud}$$
$$Q_{ud} = n \cdot Z \cdot C_i$$
$$C_i = R_t \cdot A_i \cdot C_0$$

ここで、

$Q_i$  : 基準面より上の部分に作用する水平地震力

$n$  : 施設の重要度分類に応じた係数(3.0)

$Z$  : 地震地域係数(1.0 とする)

$C_i$  : 地震層せん断力係数

$W_i$  : 当該部分が支える固定荷重と積載荷重の和

$R_t$  : 振動特性係数(1.0 とし、 $\beta$ で補正する)

$\beta$  : 補正係数(0.8)

$A_i$  : 地震層せん断力係数の高さ方向の分布係数

$C_0$  : 標準せん断力係数

(静的地震力 : 0.2, 必要保有水平耐力 : 1.0 とする)

$K_v$  : 鉛直震度

- $R_v$  : 鉛直方向振動特性係数(0.8)
- $Q_{un}$  : 各層の必要保有水平耐力
- $D_s$  : 各層の構造特性係数 (0.55 とする)
- $F_{es}$  : 各層の形状特性係数
- $Q_{un}$  : 地震力によって各層に生じる水平力

(3) 静的地震力と動的地震力の比較

今回工認では、すべての階で静的地震力に比べて弾性設計用地震動  $S_d$  による動的地震力の方が大きくなっている。なお、既工認時では、静的地震力に比べて基準地震動  $S_1$  による動的地震力の方が大部分の階で大きく、動的地震力により設計断面が決定される箇所が多い。静的地震力と動的地震力の比較を第 5.1.3-1 表に示す。

第 5.1.3-1 表 (1) 静的地震力と動的地震力の比較 (NS 方向)

レベル O.P. (m)	階高 (m)	今回工認 静的地震力	弾性設計用 地震動 $S_d$	既工認 設計用地震力	(参考) 既工認 静的地震力	(参考) 既工認 動的地震力 (基準地震動 $S_1$ )
		$Q_i$ (kN)	$Q_i$ (kN)	$Q_i$ (kN)	$Q_i$ (kN)	$Q_i$ (kN)
50.5						
	9.3	45670	60948	51799	50289	34206
41.2						
	8.0	80218	98979	84376	81915	59742
33.2						
	10.7	316519	383901	362787	314166	342203
22.5						
	7.5	615887	664155	788386	596970	723799
15.0						
	9.0	819336	882255	1069582	797310	1005152
6.0						
	6.8	955423	1096217	1287996	942762	1226586
-0.8						
	7.3	1057755	1252113	1493474	1057059	1419140
-8.1						

第 5.1.3-1 表 (2) 静的地震力と動的地震力の比較 (EW 方向)

レベル O.P. (m)	階高 (m)	今回工認 静的地震力	弾性設計用 地震動 Sd	既工認 設計用地震力	(参考) 既工認 静的地震力	(参考) 既工認 動的地震力 (基準地震動 S1)
		Qi (kN)	Qi (kN)	Qi (kN)	Qi (kN)	Qi (kN)
50.5						
	9.3	44836	48867	44983	43679	29341
41.2						
	8.0	81846	96890	78914	76610	60281
33.2						
	10.7	321619	426109	362797	309812	337800
22.5						
	7.5	619143	676276	779129	600226	700312
15.0						
	9.0	820581	864829	1045850	804773	961022
6.0						
	6.8	955423	1054833	1229519	946146	1153723
-0.8						
	7.3	1057755	1207993	1426730	1057069	1334842
-8.1						

(4) 必要保有水平耐力の比較

既工認と今回工認における必要保有水平耐力は、おおむね同程度の値となっている。3階より上部では、地震等による初期剛性低下や耐震補強工事等の影響により、 $A_i$  分布が変動した影響として、今回工認モデルの方が、必要保有水平耐力が小さくなっている。必要保有水平耐力の比較を第 5. 1. 3-2 表に示す。

第 5. 1. 3-2 表 既工認と今回工認における必要保有水平耐力の比較

レベル O.P. (m)	階高 (m)	既工認 Qun (kN)		今回工認 Qun (kN)	
		NS	EW	NS	EW
50.5					
	9.3	46101	40041	41874	41109
41.2					
	8.0	75060	70235	73501	75040
33.2					
	10.7	288002	283942	290022	294876
22.5					
	7.5	546927	550496	564863	567550
15.0					
	9.0	731105	737244	751062	751748
6.0					
	6.8	863564	867300	876430	875489
-0.8					
	7.3	968985	968985	969603	969603
-8.1					

耐震設計に係わる工認審査ガイドでは、

- ・地震応答解析に用いる材料定数のうち解析モデルの剛性評価に用いる定数については、材料のばらつきによる定数の変動幅が適切に設定されていること
- ・材料定数の変動が建物・構築物の振動性状（固有周期、固有モード、等）や応答性状に及ぼす影響を検討し、必要に応じて、建物・構築物の地震力や機器・配管系の入力地震力に及ぼす影響を設計に考慮することを要求している。

ここでは、女川原子力発電所の特徴を踏まえて、地震応答解析結果へ影響を与える材料物性値について検討の上、ばらつきによる変動幅を考慮する項目を抽出する。

建屋の耐震評価に用いる動的地震力は、地震応答解析（時刻歴応答解析法）により求められており、地盤物性、建屋剛性、地盤のばね定数及び減衰定数、地震動の位相特性などの影響を受ける。特に床応答スペクトルの変動に影響を及ぼす要因は、建物剛性及び地盤物性であることが確認されている。

女川では3.11地震等の記録によって初期剛性が低下していることが確認されていることから、剛性低下の要因（地震による影響（大架構の影響含む）、乾燥による影響）が建屋初期剛性や終局耐力に与える検討結果を踏まえ、これらの要因に対する不確かさケースについて検討する。また、3.11地震に対する2号炉原子炉建屋のシミュレーション解析では、建屋内部減衰として7%の値を採用することにより観測記録との整合性が図られており、建屋内部減衰に対する不確かさケースについて検討を行う。

建屋と地盤との相互作用を考慮したモデルによる地震応答解析においては、地盤物性は地盤調査結果から地盤のせん断波速度を用いて算出していること、また、入力地震動の評価において表層地盤の影響を考慮しているが、これについても調査結果を踏まえて地盤モデルを設定していることから、地盤物性に対する不確かさケースについて検討を行う。

以上より、建屋の地震応答解析における材料物性値の内、

- ①建屋初期剛性、②終局耐力、③建屋内部減衰、④地盤物性  
についてばらつきによる変動幅を検討する。

以上を踏まえた地震応答解析モデルへの反映に際しての考え方を第5.2-1表に、検討ケース一覧を第5.2-2表に示す。



第 5.2-1 表 (1) 基準地震動  $S_s$  に対する不確かさケースの設定の考え方

項目	基本ケースへの適用	不確かさケースへの適用
建屋 初期 剛性	<p><b>【建屋の初期剛性（水平動）】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>初期剛性を低下させた等価線形解析によるシミュレーション解析では、オペフロ上部のように折点を超えるような応答に対しても十分観測記録との整合性が確保できること、また、基準地震動 <math>S_s</math> に対しては第一、第二折点を越えた応答となるため、初期剛性の多少の違いが応答結果に与える影響は小さいことも踏まえ、初期剛性は 3.11 地震等によって低下した状態を採用する。</li> </ul>	<p><b>【建屋の初期剛性（水平）】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>初期剛性の多少の違いが応答結果に与える影響は小さいが、一方で、過去の中小地震も含めた記録では時間経過に伴い剛性が低下する傾向の他に、更新地震によっても剛性が低下する傾向が認められていることから、初期剛性低下の影響を保守的に反映するモデルを不確かさケースとして採用する。</li> <li>具体的には、更なる剛性低下として、基本モデルを用いた基準地震動 <math>S_s</math> の応答結果として得られる剛性低下（原子炉建屋の場合 0.78 倍）を考慮する。また、不確かさモデルへの適用にあたっては、この非線形化による剛性低下を初期剛性低下とみなし、全ての耐震壁におけるスケルトンカーブの初期剛性の低下として一律に考慮することにより保守性を確保する。</li> <li>採用する初期剛性低下が、女川の観測記録から類推される基準地震動 <math>S_s</math>-D2 時の剛性低下量よりも小さいことも合わせて確認する。</li> <li>なお、宮城県沖では、3.11 地震（巨大プレート間地震）の約一カ月後に 4.7 地震（プレート内地震）が発生しているが、不確かさケースは大きな地震の一定期間後に基準地震動 <math>S_s</math> の揺れに見舞われる事象に対する保守的評価にも該当する。</li> </ul>

項目	基本ケースへの適用	不確かさケースへの適用
建屋初期剛性	<p>【建屋の初期剛性（鉛直動）】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水平動に比べ剛性の低下率は小さく，これまでの経年変化によって設計剛性を下回っていないこと，建屋シミュレーション解析では既工認モデルで記録を再現できたことから，既工認モデルの剛性を採用する。</li> </ul>	<p>【建屋の初期剛性（鉛直）】</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・ 水平動に比べ剛性の低下率は小さくこれまでの経年変化によって設計剛性を下回っていないこと，建屋シミュレーション解析では既工認モデルで記録を再現できたこと，また，剛性の変化が建屋応答に与える感度が小さいことから，鉛直動に対しては初期剛性の不確かさは考慮しない。</li> </ul>
終局耐力	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 地震による事前損傷は，JEAG 式の評価基準値付近の耐力低下要因とはならない。</li> <li>・ 乾燥収縮は初期剛性低下に寄与するものの，JEAG 式の評価基準値付近での耐力は JEAG 式を上回る。乾燥度合が進行したとしても，更なる剛性低下に寄与しない。</li> <li>・ 建設後の経過年数から女川 2 号炉建屋の乾燥状態はほぼ定常状態にある。</li> <li>・ オペフロ上部の大架構は，設計の評価法に比べ実際の初期剛性は小さいが JEAG 式の評価基準値付近では評価式と同程度。 → 以上を踏まえ，評価基準値付近のスケルトンカーブについては，既工認と同様，JEAG 式を基本ケースに適用する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 実機のコンクリート強度は設計基準強度より高い傾向にあり，終局耐力はその分高い方に上振れすることが考えられるが，終局耐力の増加は建屋の変形を抑制する方向の評価となることから，これを考慮しない。</li> </ul>

項目	基本ケースへの適用	不確かさケースへの適用
建屋 内部 減衰	<p><b>【水平動】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3.11 地震における建屋内部減衰は7%と評価されており、これは初期剛性の低下の影響（履歴的な減衰効果）も含まれたものと考えられる。基本ケースにおいては、この効果を安全側に無視し、既工認と同様の減衰5%を採用する。</li> </ul> <p><b>【鉛直動】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>3.11 地震のシミュレーション解析では既工認と同様の減衰（5%）を採用し観測記録を再現出来たことから、5%を採用する。</li> </ul>	<p><b>【水平動】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>基本的には、基本ケースに採用した建屋内部減衰の値を適用する。</li> <li>基本モデルを用いた基準地震動 <math>S_s</math> の応答値が多くの部位で第二折点を越えるような場合は、剛性低下量を初期剛性に反映した不確かさモデルでは履歴減衰が考慮されないため、建屋内部減衰として基本ケースよりも大きい値が採用可能か検討した上でその値を採用する。</li> </ul> <p><b>【鉛直動】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>鉛直動シミュレーションでは減衰5%を採用しており、不確かさケースでもこれを用いる。</li> </ul>
地盤 物性	<ul style="list-style-type: none"> <li>底面地盤については実測した地盤のせん断波速度の平均値を採用。</li> <li>入力地震動の算定に用いる表層地盤上部、下部とも3.11地震等のシミュレーション解析結果を踏まえた値・手法を採用。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>底面地盤については、実測値のばらつきを考慮。</li> <li>表層地盤のばらつきが建屋応答に与える影響は小さいが、表層地盤下部については非線形性を考慮せず一定値を採用しているため、底面地盤と同程度のばらつきとして、せん断波速度<math>\pm 100\text{m/s}</math>を考慮する。</li> </ul>

第 5.2-1 表 (2) 弾性設計用地震動 Sd に対する不確かさケースの設定の考え方

項目	基本ケースへの適用	不確かさケースへの適用
建屋 剛性, 内部 減衰	<ul style="list-style-type: none"> <li>・弾性設計用地震動 Sd の建屋応答は 3.11 地震による応答と同程度あることから, 3.11 建屋シミュレーション解析の剛性を採用する。</li> <li>・内部減衰は 3.11 地震における建屋の内部減衰は 7% と評価されたが, 保守的に 5% を採用する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・先行プラントでは構造の複雑さによる減衰効果が期待しにくい単純な構造の建物に RC 減衰 3% を適用しているが, 女川の原子炉建屋では弾性設計用地震動 Sd と同等レベルの 3.11 地震において内部減衰 7% の評価結果が得られており, 減衰 3% の不確かさは考慮しない。他の建屋については, 3.11 地震の傾向や建屋の特徴も踏まえて必要に応じ考慮する。</li> </ul>

第 5.2-2 表 検討ケース一覧

対象地震動	ケース名	スケルトンカーブ		建屋内部減衰	地盤物性	
		初期剛性	終局耐力		入力地震動	底面地盤ばね
基準地震動 Ss (水平動)	ケース1 (基本ケース)	3.11 地震 シミュレーション	設計基準強度を用い JEAG 式で評価 (=既工認)	5% (=既工認)	表層上部非線形 表層下部 Vs900m/s	標準地盤 (=既工認)
	ケース2	同上	同上	同上	表層上部非線形 表層下部 Vs900+100m/s	標準地盤 + $\sigma$
	ケース3				表層上部非線形 表層下部 Vs900-100m/s	標準地盤 - $\sigma$
	ケース4	基本ケースの 0.78 倍 (原子炉建屋の場合)	同上	5% (原子炉建屋の場合)	表層上部非線形 表層下部 Vs900m/s	標準地盤 (=既工認)
	ケース5				表層上部非線形 表層下部 Vs900+100m/s	標準地盤 + $\sigma$
	ケース6				表層上部非線形 表層下部 Vs900-100m/s	標準地盤 - $\sigma$
基準地震動 Ss (鉛直動)	ケース1 (基本ケース)	3.11 地震 シミュレーション (=既工認)	—	5% (3.11 地震シミュレ ーション) (=既工認)	直接入力 (=既工認)	標準地盤 (=既工認)
	ケース2	同上	—	同上	同上	標準地盤 + $\sigma$
	ケース3				標準地盤 - $\sigma$	
弾性設計用 地震動 Sd (水平, 鉛直)	ケース1 (基本ケース)	3.11 地震 シミュレーション	—	5% (水平, 鉛直とも) (=既工認)	(水平) 表層上部非線形 表層下部 Vs900m/s (鉛直) 直接入力	標準地盤 (=既工認)
	ケース2	同上	—	同上	表層上部非線形 表層下部 Vs900+100m/s	標準地盤 + $\sigma$
	ケース3				表層上部非線形 表層下部 Vs900-100m/s	標準地盤 - $\sigma$

### 5.3 原子炉建屋の代表性

#### 5.3.1 オペフロ上部の検討を踏まえた原子炉建屋の代表性

設計体系に反映すべき事項の整理にあたっては、原子炉建屋のオペフロ上部を対象として3.11地震等による初期剛性低下とその耐力への影響についても検討を行っているが、オペフロ上部は以下の特徴がある。

- ①原子炉建屋のオペフロ上部は、地震によるひび割れが多く確認されており、他建屋の地震後点検を踏まえても、原子炉建屋オペフロ上部の方がひび割れが多い傾向にある
- ②原子炉建屋のオペフロ上部の初期剛性低下は、他の主要建屋の初期剛性低下よりも大きく評価されている
- ③耐震壁の厚さが比較的薄く（25cm, 40cm）、他建屋と比較しても、オペフロ上部の耐震壁の方が薄い
- ④基準地震動  $S_s$  に対し所要の耐震性を確保するために、補強工事を実施している

これらの特徴から、その他の原子炉建屋よりも規模が小さい建屋、比較的壁の薄い建屋等へも同様の考え方を適用可能と考えられる。したがって、主要な建屋には地震計が設置されていることから、地震観測記録による固有振動数の分析も含めて設計モデルの策定に際して原子炉建屋同様の考え方を基本とする。

#### 5.3.2 原子炉建屋以外の既設建屋への水平展開の考え方

原子炉建屋以外の既設建屋の地震応答解析モデルの策定は、2号炉原子炉建屋オペフロ上部における検討と同様の考え方を適用することによって構築していく。原子炉建屋以外の既設建屋への水平展開の考え方を第5.3.2-1表に示す。

第 5.3.2-1 表 原子炉建屋以外の既設建屋への水平展開の考え方

検討項目	女川 2 号炉原子炉建屋 オペフロ上部	既設建屋 <sup>*</sup> への展開と 地震応答解析モデルへの反映	既設建屋の 現状の具体的検討状況
【3.11 地震等に対する建屋状態の評価】	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震後点検，コンクリートコア強度等の現地調査，また，質点系モデルや 3 次元 FEM モデルによるシミュレーション解析による解析的検討により建屋の状態を評価。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>点検と解析的検討の両面から，3.11 地震後の建屋状態について評価し，原子炉建屋オペフロ上部と同様におおむね弾性範囲であることを確認。</li> <li>仮に耐力低下の傾向が認められる場合は，必要な処置（補強工事等）を取る。</li> <li>解析は質点系モデルによるシミュレーション解析を実施する。また，必要に応じて FEM 系の詳細解析も実施する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>全ての建屋<sup>*</sup>においておおむね弾性範囲となっている。</li> </ul>
【初期剛性低下の傾向分析（観測記録による検討）】	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去の地震観測記録の傾向分析</li> <li>質点系モデルによるシミュレーション解析</li> <li>大架構部分の 3 次元 FEM 解析</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>過去の地震観測記録の傾向分析を実施し剛性低下の傾向について確認する。</li> <li>質点系シミュレーション解析に基づき建屋初期剛性や建屋内部減衰を評価し，剛性低下については基本ケースに反映。</li> <li>建屋内部減衰については 5 % 以上の値が得られることを確認。なお，地震応答解析モデルの減衰として 5 % 以上の値を採用する場合は，解析結果の保守性や振動レベルと減衰の相関性について検討した上で適用。</li> <li>比較的薄い耐震壁が配置されている箇所については，質点系シミュレーション解析の信頼性を FEM 解析等で確認する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>程度の違いはあるが，全ての建屋<sup>*</sup>において設計剛性に対し初期剛性の低下を確認。</li> <li>比較的壁の薄い 2 号炉制御建屋については FEM 解析を実施。</li> <li>建屋減衰は全ての建屋<sup>*</sup>で 5 % を採用予定。</li> </ul>
【乾燥収縮の状態確認】	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾燥収縮ひび割れ状況調査</li> <li>乾燥収縮の経年的変化の確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2 号炉と建設時期が異なる建屋については，乾燥収縮状況について確認・評価し，乾燥収縮の程度・傾向が 2 号炉建屋と相違する場合は，その違いを不確かさケースに反映。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>建設時期の新しい 3 号炉海水熱交換器建屋の乾燥収縮ひび割れ状態はほぼ同等であることを確認。</li> </ul>
【補強工事】	<ul style="list-style-type: none"> <li>追設耐震壁，ブレースの設置</li> <li>観測記録による補強工事効果の確認</li> <li>補強工事の悪影響の有無の確認</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準地震動 <math>S_s</math> に対し所要の耐震性を確保するための補強工事については検討結果を踏まえ必要に応じ実施。</li> <li>その際は，オペフロ上部同様に効果の確認，悪影響の有無について検討を実施し，効果を確認した上で，地震応答解析モデルに反映。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>基準地震動 <math>S_s</math> の応答結果を踏まえ補強工事を計画している建屋は，現状では無い。</li> </ul>

※2 号炉に関連した建屋で，基準地震動  $S_s$  等に対し機能を有する建屋

2 号炉制御建屋：S クラス（中央制御室しゃへい壁），S クラス設備の間接支持機能

2 号炉タービン建屋：B クラス（補助しゃへい壁），B クラス設備（ $S_d$  機能維持設備含む）の間接支持機能

3 号炉海水熱交換器建屋：2 号炉浸水防護施設の間接支持機能

### 5.3.3 新設建屋への初期剛性低下の考慮方針

#### (1) 新設建屋の構造的特徴と原子炉建屋との類似性

新設建屋は岩盤に設置し、地下階を有する計画としている。主たる耐震要素は原子炉建屋等と同様に耐震壁としており、全方向に耐震壁が配置されたマツシブな構造となっている。また、基準地震動  $S_s$  に対しておおむね弾性範囲に留まる設計（短期許容応力度設計）を目指している。なお、新設建屋においても既設と同様のコンクリート材料を用いる予定としている。

#### (2) 類似建屋の 3.11 地震に対する剛性低下の特徴

2号炉原子炉建屋のオペフロ下部は、3.11地震に対し、おおむね第一折点程度の応答を示したが、その際の剛性低下は設計剛性に対し0.8倍程度となっている。

#### (3) 新設建屋の地震応答解析モデル

新設建屋の地震応答解析においては、基本ケースとしては地震の影響を受けていないことから設計剛性（設計基準強度）を用いた地震応答解析モデルを採用する。

新設建屋は基準地震動  $S_s$  に対して短期許容応力度設計を目指していることから耐震壁の断面厚が厚くなるため、基準地震動  $S_s$  に対して初期剛性が低下したとしても、その低下の度合は、コンクリートの設計基準強度と実強度の乖離分で吸収可能と考える。また、評価基準値（耐震壁のせん断ひずみ： $2.0 \times 10^{-3}$ ）に対しても十分な余裕を有するため、耐震安全性は基本ケースの解析で確認可能と考える。

ただし、念のため、不確かさケースとして、耐震壁の厚さが厚い原子炉建屋のオペフロ下部の3.11地震に対する剛性低下量（0.8倍程度）を考慮することで設計における保守性を確保する。

なお、具体的な低下量は今後の新設建屋の詳細設計を踏まえ決定する。



#### 5.4 部材評価における評価方針

原子炉建屋の初期剛性低下の要因を分析した結果、その要因は鉄筋コンクリート造の耐震壁の乾燥収縮と地震による揺れが重畳したことによること、また、初期剛性低下による耐力への影響はないことを確認している。

そのため、鉄筋コンクリート造の耐震壁を主体構造としている建物・構築物について、初期剛性（主に地震応答解析）、耐力（主に構造強度評価）に係る設計への反映について第 5.4.1-1 表に整理した。

第 5.4.1-1 表 初期剛性低下の反映に係る考え方

対象		設計への反映	
		初期剛性（主に地震応答解析）	耐力（主に構造強度評価）
建物 構築物	既設の主要建屋 （耐震壁）	<ul style="list-style-type: none"> <li>初期剛性低下を考慮する</li> <li>基本ケースでは建屋シミュレーション解析に基づく初期剛性低下を考慮する</li> <li>不確かさケースでは基準地震動 <math>S_s</math> による地震応答解析結果による低下量を初期剛性低下に考慮する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾燥収縮の影響はないことから設計値を採用する</li> </ul>
	新設の主要建屋 <sup>*1</sup> （耐震壁）	<ul style="list-style-type: none"> <li>初期剛性低下を不確かさケースとして考慮する</li> <li>剛性低下量は、新設建屋の構造的特徴と乾燥試験体の耐震実験[3]を踏まえ設定</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾燥収縮の影響はないことから設計値を採用する</li> </ul>
	FEM 部材評価 （基礎版等）	<ul style="list-style-type: none"> <li>初期剛性低下を考慮した検討を実施する</li> <li>剛性低下量は地震応答解析モデルの低下量を踏まえ考慮する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>乾燥収縮の影響はないことから設計値を採用する</li> </ul>

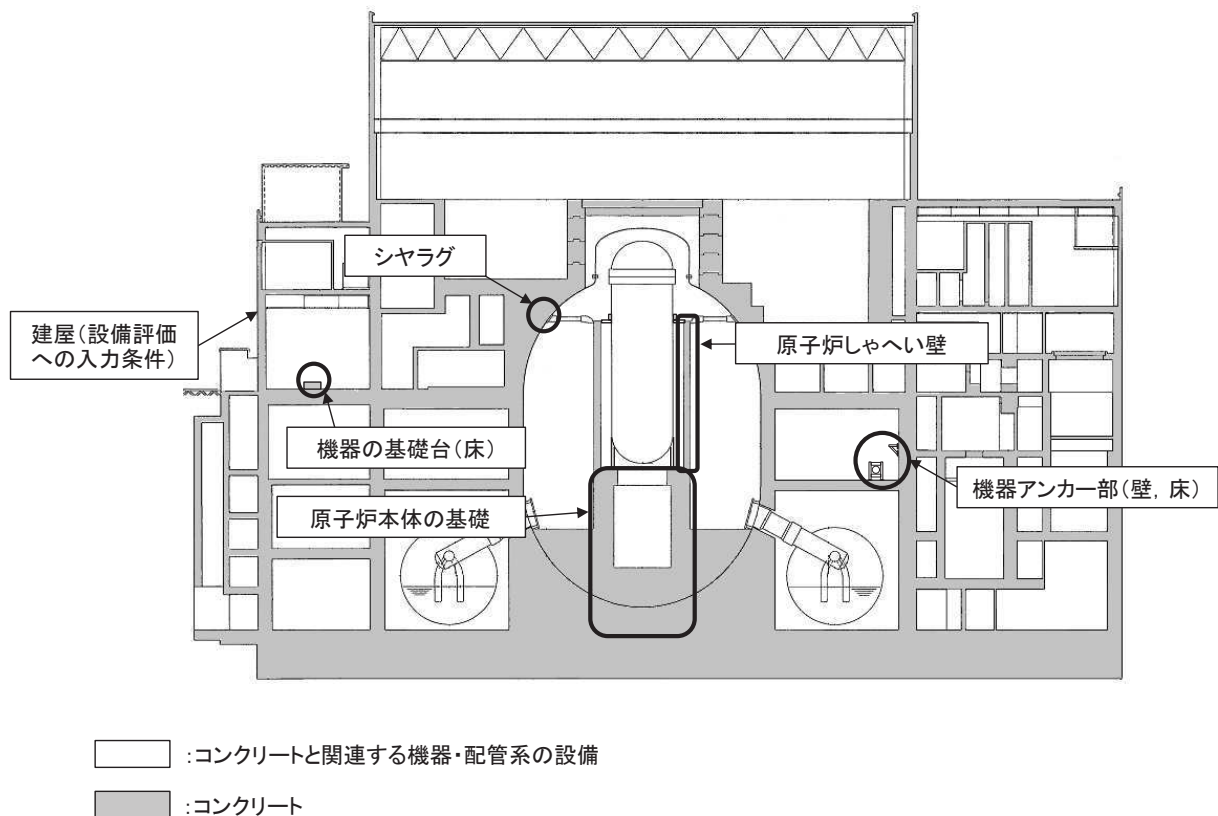
\*1：新設建屋の工事に使用するコンクリートの骨材の一部は、既設建屋に用いたコンクリートの骨材と同じものを使用する予定

【参考】屋外重要土木構造物は基本的に弱軸方向を評価対象としており、それらは地中構造物のため、その応答は周囲の地盤の影響が支配的となる。

## 5.5 設備評価への反映方針

機器・配管系の設備評価においては、5.2 項に示した建屋の地震応答解析モデルにおける材料物性値のばらつきによる変動を考慮した建屋の地震応答解析結果を踏まえることとし、第 5.5-1 表に示す基本ケース及び不確かさケースの地震応答（床応答スペクトル、最大応答加速度、荷重等）を比較し、基本ケースの地震応答を超過する場合、機器・配管系の設計用地震力に及ぼす影響を検討し、設計に反映する。

ここで、材料物性値のうち建屋の初期剛性については、乾燥収縮及び地震影響によるコンクリートのひび割れが建屋の地震応答だけでなく、設備評価への影響の可能性が考えられる機器・配管系の設備を構造的な分類によって抽出し、設備の耐震評価において考慮すべき内容を整理する。第 5.5-1 図に抽出された設備の耐震評価において考慮すべき内容は、コンクリートのひび割れに係る建屋側の影響検討結果（建屋の初期剛性が低下していること、建屋躯体の耐力への影響が小さいこと）、設備の構造特徴等を踏まえて、評価対象部位ごとに地震応答解析及び構造強度評価に区分して検討を行うとともに、その検討結果を第 5.5-4 表にまとめる。



第 5.5-1 図 コンクリートと関連する機器・配管系の設備

第 5.5-1 表 検討ケース一覧 (第 5.2-2 表再掲)

対象地震動	ケース名	スケルトンカーブ		建屋内部減衰	地盤物性	
		初期剛性	終局耐力		入力地震動	底面地盤ばね
基準地震動 Ss (水平動)	ケース1 (基本ケース)	3.11 地震 シミュレーション	設計基準強度を用い JEAG 式で評価 (=既工認)	5% (=既工認)	表層上部非線形 表層下部 Vs900m/s	標準地盤 (=既工認)
	ケース2	同上	同上	同上	表層上部非線形 表層下部 Vs900+100m/s	標準地盤 + $\sigma$
	ケース3				表層上部非線形 表層下部 Vs900-100m/s	標準地盤 - $\sigma$
	ケース4	基本ケースの 0.78 倍 (原子炉建屋の場合)	同上	5% (原子炉建屋の場合)	表層上部非線形 表層下部 Vs900m/s	標準地盤 (=既工認)
	ケース5				表層上部非線形 表層下部 Vs900+100m/s	標準地盤 + $\sigma$
	ケース6				表層上部非線形 表層下部 Vs900-100m/s	標準地盤 - $\sigma$
基準地震動 Ss (鉛直動)	ケース1 (基本ケース)	3.11 地震 シミュレーション (=既工認)	—	5% (3.11 地震シミュレ ーション) (=既工認)	直接入力 (=既工認)	標準地盤 (=既工認)
	ケース2	同上	—	同上	同上	標準地盤 + $\sigma$
	ケース3				標準地盤 - $\sigma$	
弾性設計用 地震動 Sd (水平, 鉛直)	ケース1 (基本ケース)	3.11 地震 シミュレーション	—	5% (水平, 鉛直とも) (=既工認)	(水平) 表層上部非線形 表層下部 Vs900m/s (鉛直) 直接入力	標準地盤 (=既工認)
	ケース2	同上	—	同上	表層上部非線形 表層下部 Vs900+100m/s	標準地盤 + $\sigma$
	ケース3				表層上部非線形 表層下部 Vs900-100m/s	標準地盤 - $\sigma$

第 5.5-2 表 設備の耐震評価上考慮すべき内容の整理結果

	評価対象部位	応答解析における考慮	強度評価における考慮
コンクリートのひび割れの影響	建屋（設備評価への入力条件）	<ul style="list-style-type: none"> <li>床応答スペクトルは、建屋の地震応答解析モデルの基本ケースに対する振幅率±10%と不確かさケースの比較を行い、その結果を設計に反映する。なお、フロアごとに全質点の床応答スペクトルを包絡して評価に用いることを基本とする（添付 15 参照）。</li> <li>原子炉建屋と連成解析を行う大型機器は、建屋の地震応答解析モデル（基本ケース、不確かさケース）を踏まえた建屋応答解析結果を用いた設計とする。</li> </ul>	-
	原子炉本体の基礎	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉本体の基礎のコンクリートは、鋼板で覆われているため、乾燥収縮の影響はないと考えられるが、念のため、建屋側と同様に剛性低下を考慮した地震応答解析を行い、影響を確認して設計へ反映する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>内部に充填されたコンクリートには、強度を期待せず、鋼板のみで耐える設計とする【従来同様】。</li> </ul>
	機器の基礎台	<ul style="list-style-type: none"> <li>機器の基礎台は、剛性が十分に大きくなるように設計していることから、コンクリートのひび割れが地震応答解析モデルに与える影響はない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>建屋躯体と同様の構造であり、耐力への影響はないことから、JEAG4601 に基づく設計とする【従来同様】。</li> </ul>
	機器アンカー部	<ul style="list-style-type: none"> <li>機器アンカー部は、建屋躯体と十分に深い位置で定着させる設計であり、建屋躯体と一体となって挙動するため、コンクリートのひび割れが地震応答解析モデルに与える影響はない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>JEAG4601 に基づく設計とする（コンクリートのコーン状破壊の評価において、建屋の面内せん断ひずみ度に応じた低減係数を考慮）【従来同様】（添付 14 参照）。</li> </ul>
	原子炉しゃへい壁	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子炉しゃへい壁は、鋼板の剛性のみを考慮した地震応答解析を実施しているため、コンクリートのひび割れの影響はない【従来同様】。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>内部に充填されたモルタルには強度を期待せず、鋼板のみで耐える設計とする【従来同様】。</li> </ul>
	シヤラグ	<ul style="list-style-type: none"> <li>シヤラグの地震応答解析に用いるばね定数は、鋼材の物性値により設定されるため、コンクリートひび割れの影響はない【従来同様】。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリートの圧縮に係る評価には、ひび割れの影響は無視できること、建屋躯体の耐力への影響はないことから、JEAG4601 に基づく設計とする【従来同様】。</li> </ul>

(1) 建屋（設備評価への入力条件）

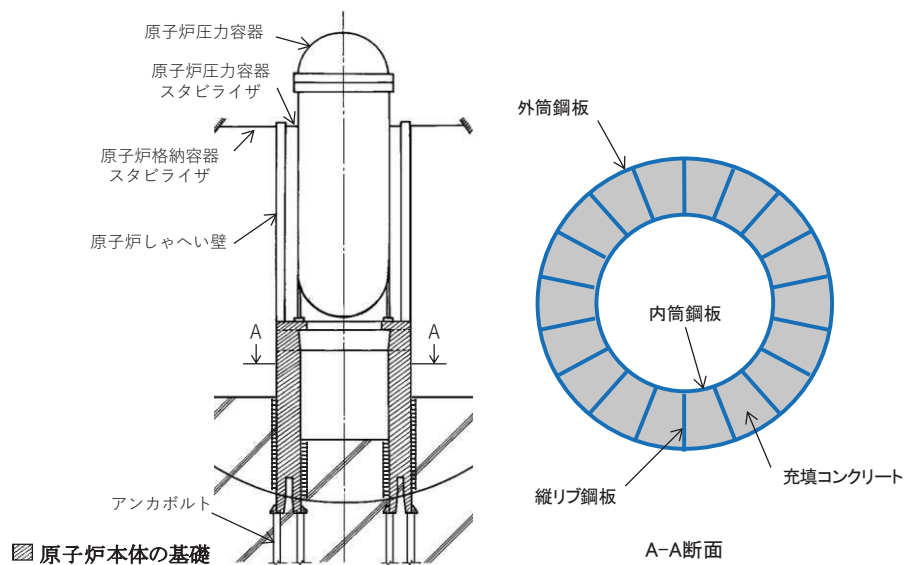
建屋の地震応答は設備評価への入力条件となるため、既工認の評価と同様に建屋の地震応答解析モデルの基本ケースの床応答スペクトルを±10%拡幅して評価に用いる（添付 15 参照）。また、不確かさケースの床応答スペクトルと比較し、不確かさケースの応答が基本ケースの応答を上回る場合には設計に反映する。なお、女川 2 号炉原子炉建屋の地震応答解析モデルは、床の柔性を考慮しているため、フロアごとに全質点の応答スペクトルを包絡して評価に用いることを基本とする。

原子炉建屋と連成解析を行う大型機器（原子炉圧力容器、原子炉格納容器等）に対する設備評価においても、基本ケースだけでなく、不確かさケースを踏まえた建屋応答解析結果を用いた設計とする。

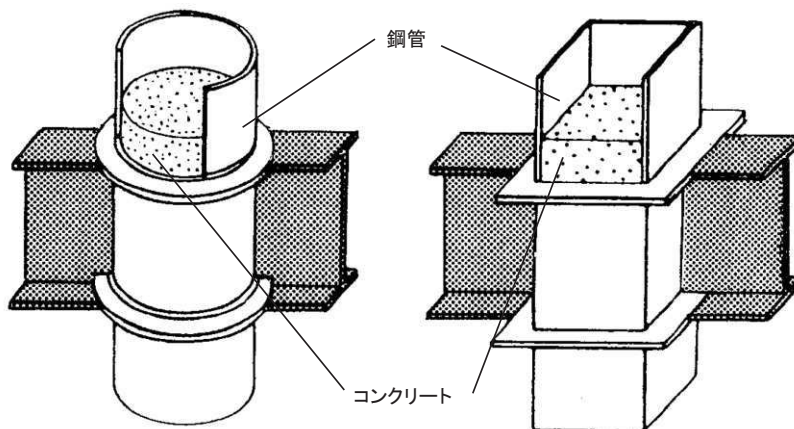
(2) 原子炉本体の基礎

原子炉本体の基礎の構造図を第 5.5-2 図に示す。原子炉本体の基礎は、外筒鋼板と内筒鋼板の間にコンクリートが充填された構造である。原子炉本体の基礎のコンクリートは、鋼板で覆われていることから、乾燥収縮の影響はないと考えられるが、念のため、原子炉本体の基礎のコンクリート剛性について、建屋側と同様に剛性低下を考慮した地震応答解析を行い、影響を確認して設計へ反映する。なお、コンクリートが鋼管によって密閉された状況のもとで固結するとき、乾燥が進まず、ほとんど収縮が起こらないため、コンクリートの乾燥収縮を無視しても差しつかえない、との知見がある<sup>(1)</sup>。

原子炉本体の基礎の強度評価においては、既工認と同様、内部のコンクリート強度には期待せず、鋼板のみで耐える設計としていることから、コンクリートのひび割れの影響はない。



第 5.5-2 図 原子炉本体の基礎の構造図



第 5.5-3 図 CFT 構造のイメージ図 (参考図書(1)より引用)

### (3) 機器の基礎台

機器の基礎台に対する設備設計においては、剛性が十分に大きくなるように設計していることから、機器の基礎台は剛構造として扱い、機器の応答解析モデルには考慮しない。

ここで、機器の基礎台が剛構造であることの確認として、耐震 S クラスの機器（原子炉補機冷却水ポンプ、残留熱除去系熱交換器、ほう酸水注入系貯蔵タンク）の基礎台を例として、形状に基づいた剛性を試算する。第 5.5-4 図に、試算における基礎台のイメージ図を示す。

水平荷重  $Q$  が作用した際の曲げによる変位  $\delta_b$ 、せん断による変位  $\delta_s$ 、基礎台の剛性  $K$  及び固有振動数  $f$  を式 1～式 4 によって算出する。計算結果を第 5.5-3 表に示す。なお、計算上の扱いとして、固有振動数が小さく算出されるように、機器の基礎台の質量は、重心位置ではなく基礎台頂部に設定している。

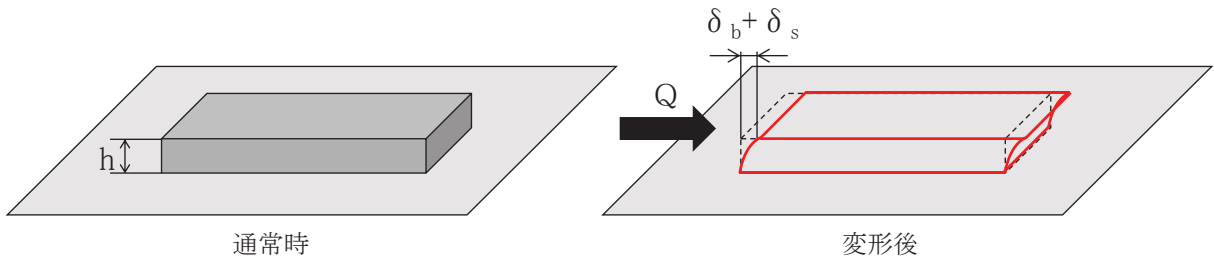
$$\delta_b = \frac{Q \cdot h^3}{3E_c \cdot I} \dots\dots\dots \text{式 1}$$

$$\delta_s = \frac{Q \cdot h}{A_s \cdot G_c} \dots\dots\dots \text{式 2}$$

$$Q = K(\delta_b + \delta_s) \dots\dots\dots \text{式 3}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} \dots\dots\dots \text{式 4}$$

- Q : 水平荷重
- h : 高さ
- A<sub>s</sub> : せん断断面積
- G<sub>c</sub> : コンクリートのせん断弾性係数
- E<sub>c</sub> : コンクリートのヤング係数
- I : 断面二次モーメント
- K : 剛性
- δ<sub>b</sub> : 曲げによる変位
- δ<sub>s</sub> : せん断による変位
- f : 固有振動数
- m : 質量



第 5.5-4 図 剛性の試算における基礎台のイメージ図

第 5.5-3 表 耐震 S クラス機器の基礎台の剛性及び固有振動数

名称	寸法 (mm)	高さ (mm)	剛性 (kN/mm)		固有振動数 (Hz)	
			短辺方向	長辺方向	短辺方向	長辺方向
原子炉補機冷却水 ポンプ基礎台	3,950×1,500	200	3.27×10 <sup>5</sup>	3.36×10 <sup>5</sup>	1,690	1,711
残留熱除去系 熱交換器基礎台	1,720×1,020	1,350	3.69×10 <sup>3</sup>	7.18×10 <sup>3</sup>	126	134
	1,800×1,100		4.65×10 <sup>3</sup>	8.48×10 <sup>3</sup>	177	181
ほう酸水注入系 貯蔵タンク基礎台	φ 3,300	605	1.49×10 <sup>5</sup>		546	

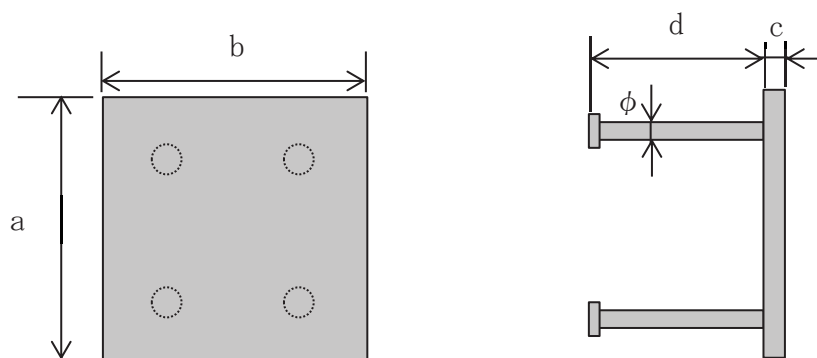
第 5.5-3 表のとおり、機器の基礎台の剛性及び固有振動数は非常に大きく、コンクリートにひび割れが生じた場合においても十分剛構造であると考えられるため、コンクリートのひび割れが応答解析モデルに与える影響はない。

機器の基礎台に対する強度評価においては、建屋躯体と同様の構造であり、耐力への影響はないことから、既工認と同様 JEAG4601 に基づく設計とする。

#### (5) 機器アンカー部

機器アンカー部の設計においては、建屋躯体と十分に深い位置で定着させており、建屋躯体と一体となって挙動するため、機器の地震応答解析モデルには考慮しない。

ここで、女川 2 号炉の機器・配管系に使用する機器アンカー部の標準的な埋め込み金物の形状及び寸法の概要を第 5.5-5 図に、埋め込み金物の仕様を第 5.5-4 表に示す。機器アンカー部の埋め込み金物は、耐震クラスによらず、配管、トレイ、空調ダクト、盤等の支持に使用されており、各々の作用荷重やサポートの鋼材のサイズを考慮して選定している。



第 5.5-5 図 埋め込み金物の形状及び寸法



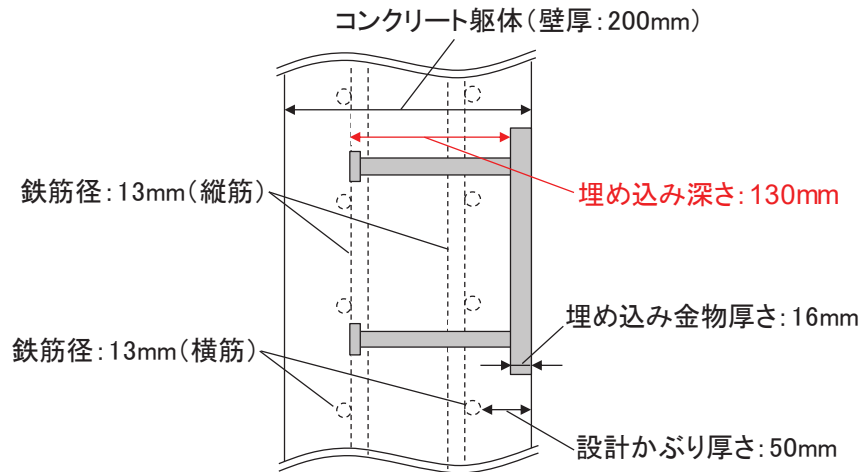
第 5.5-4 表 女川 2 号炉の機器・配管系に使用する機器アンカー部の標準埋め込み金物の仕様一覧

No.	金物寸法 a×b (mm)	埋め込み金物 厚さ c (mm)	埋め込み深さ d (mm)	スタッド本数 φ (mm)× (本)	備考
1	200×200	12	170	φ 16×4	
2	250×250	16	170	φ 16×4	
3	250×250	16	130	φ 16×4	薄壁 (200 mm) 専用
4	300×300	25	220	φ 22×4	
5	300×300	22	180	φ 19×4	
6	400×400	32	300	φ 22×8	
7	450×450	36	300	φ 22×8	
8	250×100	16	160	φ 16×2	
9	400×200	19	160	φ 19×8	使用実績なし*
10	450×250	19	160	φ 16×6	
11	800×125	9	100	φ 13×10	使用実績なし*
12	400 ~ 1300 ×200	19	260	φ 22×6~18	
13	300×300	16	130	φ 16×4	薄壁 (200 mm) 専用

※：女川 2 号炉での使用実績がないことを踏まえ、3 号炉以降では設計仕様から削除

女川 2 号炉のアンカーの埋め込み深さは 100 mm~300 mm であり、使用実績を踏まえると、埋め込み深さが最小となるのは 130 mm (薄壁専用) である。なお、当該の金物は原子炉建屋には使用されておらず、制御建屋の階段室等、壁の薄い箇所 (壁厚：200 mm) に使用されており、実機における埋め込み金物の設置状況を第 5.5-6 図に示す。

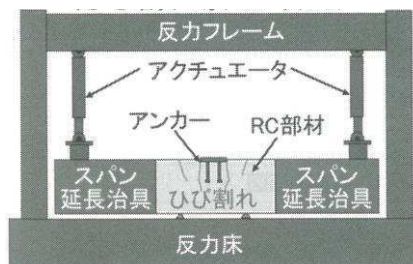
実機におけるアンカー端部は、設計かぶり厚さ 50 mm と鉄筋径 13 mm を考慮すると、主筋位置よりも十分深い位置で定着されている。



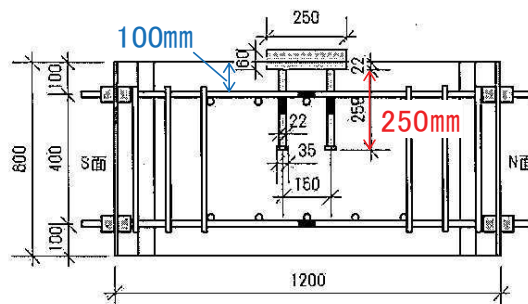
第 5.5-6 図 実機における埋め込み金物の設置状況

アンカー部のひび割れに対する剛性低下に係る参考知見として、ひび割れを付与した機器アンカー部の耐力試験<sup>(2)</sup>について確認する。

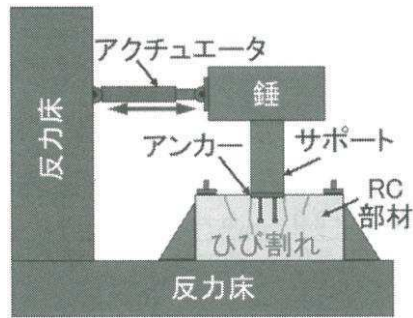
本試験は、ひび割れがアンカー耐力に及ぼす影響を確認することを目的として、アンカーの定着部付近に対して、主筋が降伏する程度の曲げ加力（2点支持，2点载荷）によって、ひび割れを付与した後、鋼製サポートを模擬した片持ち梁及び配管を模擬した錘をアンカープレートに設置し、アクチュエータによる繰返し载荷試験を行った。また、曲げ加力によって試験体に生じるひび割れ幅は約 2 mm であり、女川 2 号炉で確認されているひび割れ幅（大部分が 0.3 mm 未満）を上回る、より厳しい条件での試験となっている。第 5.5-7 図にひび割れ導入方法の概要図、第 5.5-8 図に試験体の外形図、第 5.5-9 図に加力試験の概要図を示す。



第 5.5-7 図 ひび割れ導入方法の概要図（参考資料(2)より引用）

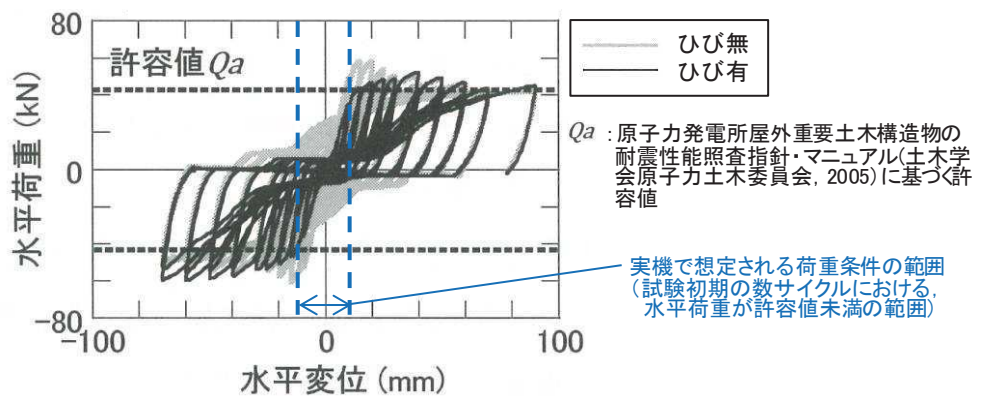


第 5.5-8 図 試験体の外形図（参考資料(2)より引用，一部加筆）



第 5.5-9 図 加力試験の概要図（参考資料(2)より引用）

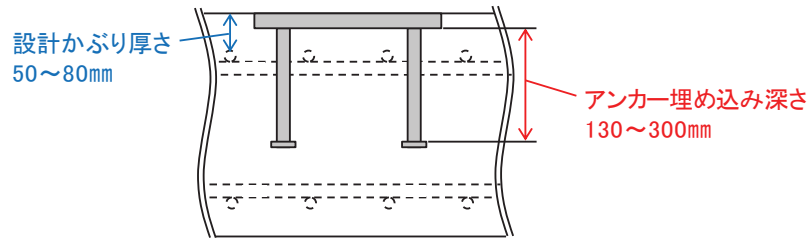
本試験における水平荷重と水平変位の関係を第 5.5-10 図に示す。試験結果は、耐力の低下が確認されるまで荷重を増加させたものであるが、実機で想定される荷重条件（試験初期の数サイクルにおける、水平荷重が許容値未満の範囲）においては、ひびがない場合と比較して剛性低下は僅かであり、耐力の低下も認められないことが分かる。



第 5.5-10 図 水平荷重と水平変位の関係（参考資料(2)より引用，一部加筆）

ここで、第 5.5-11 図に示すとおり、女川 2 号炉の実機におけるアンカー端部は、試験体と同様に主筋よりも深い位置にあり、女川 2 号炉のひび割れ幅は、試験体よりも小さいことから、コンクリートのひび割れによる剛性低下の影響は小さいと考えられる。

機器アンカー部の強度評価においては、コンクリートのコーン状破壊の評価について、建屋の面内せん断ひずみ度に応じた低減係数を考慮し、既工認と同様、JEAG4601 に基づく設計とする（添付 14 参照）。



第 5.5-11 図 女川 2 号炉のアンカーと主筋の位置関係

(6) 原子炉しゃへい壁

原子炉しゃへい壁は、鋼板の剛性のみを考慮した地震応答解析を実施しているため、コンクリートのひび割れの影響はなく、地震応答解析モデルへの反映事項はない。

原子炉しゃへい壁の強度評価においては、内部に充填されたモルタルには強度を期待せず、鋼板のみで耐える設計としていることから、既工認と同様の設計とする。

(7) シヤラグ

シヤラグの地震応答解析に用いるばね定数は、鋼材の物性値により設定されるため、コンクリートのひび割れの影響はなく、地震応答解析モデルへの反映事項はない。

シヤラグの強度評価においては、シヤラグから建屋に作用する荷重が圧縮荷重であり、コンクリートの圧縮に係る評価には、ひび割れの影響は無視できること、建屋躯体の耐力への影響はないことから、既工認と同様、JEAG4601 に基づく設計とする。

参考文献

- (1) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計（1）基礎編：理論編
- (2) 土木学会：原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針〈技術資料〉2018

## 5.6 建屋の部位への要求機能を踏まえた影響検討

### (1) 建屋の部位への要求機能を踏まえた影響検討

3.11 地震等による建屋の初期剛性低下の影響を耐震設計に反映することに加え、各条文の機能要求を踏まえ、乾燥収縮等の影響を考慮するものを網羅的に検討した。(添付 16 参照)

その結果、第 5.6-1 表のとおり、各条文に対する要求機能と該当部に対して、乾燥収縮による影響を検討、整理した。

なお、表中以外の条文による要求機能については、コンクリートの乾燥収縮等に対して直接的な影響のないものとして整理される。

第 5.6-1 表 各要求機能に対する乾燥収縮ひび割れ等の影響の考慮方針

条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
3 条	地盤	耐震性	原子炉建屋他基礎 地盤	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルに基づき地盤安定解析用 FEM モデルを作成し, 地盤の安定性を確認する。</li> </ul>
4 条 39 条	耐震設計 耐震設計	耐震性	各設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 建屋は, 初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルによる地震応答解析結果を用いて, 各設備の耐震設計・評価を実施する。</li> <li>▶ 屋外重要土木構造物は, 地中構造物のため応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため, 初期剛性の影響は小さいと考えられる。</li> <li>▶ 建屋及び屋外重要土木構造物に設置される設備の支持機能 (アンカー部) は, JEAG4601 及び各種合成構造設計指針・同解説に基づき, 低減係数を考慮した設計を実施する。</li> <li>▶ 土木構造物は, 地中構造物のため応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため, 初期剛性の影響は小さい。また, 土木構造物に作用する主たる荷重である土圧は, 剛性が小さいほど小さく評価されることから, 作用外力としては乾燥収縮と地震の重畳による剛性低下を見込まないほうが安全側の評価となる。</li> </ul>
5 条 40 条	耐津波設計 耐津波設計	止水性	海水ポンプ室等	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 通常時は, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから, 津波来襲前に止水性に影響するひび割れはない。</li> <li>▶ 津波時の止水性のうち, 面内変形については, 耐震実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことから, 地震応答解析結果の変形に基づき評価する。</li> <li>▶ 津波時の止水性のうち, 面外変形については, 地震応答解析の結果に対し, 顕著なひび割れが発生していないことを解析等により確認するか, 許容値に対し裕度を持たせることにより, 止水性に問題ないことを確認する。</li> </ul>

条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
6条	外部からの衝撃による損傷の防止	建屋の構造健全性	原子炉建屋等	<p>➤ 風（台風），竜巻，凍結，降水，積雪，落雷，火山の影響，生物学的事象，外部火災，有毒ガスの発生に対して，建屋の構造健全性（外殻としての機能，耐火性，止水性，気密性等）が維持されることを確認する。</p> <p>➤ 機能維持においては，乾燥収縮ひび割れについて，実験結果から，乾燥収縮ひび割れの多寡による地震によるひび割れの進展への影響は，ほとんどないことを確認していることを踏まえ，以下のとおり対応する。</p> <p>[外殻としての機能]</p> <p>➤ 竜巻飛来物に対する躯体の衝突評価及び裏面剥離評価としては，コンクリートの設計基準強度を用いて，貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さを評価するが，実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を上回っていることを確認しており，外殻としての機能の評価への影響はない。</p> <p>➤ 竜巻による各荷重に対する建屋全体の変形評価においては，初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルの荷重 - 変形関係を用いることから，乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。</p> <p>[耐火性]</p> <p>➤ 外部火災の耐火性の評価としては，最大の輻射熱の発生が考えられる原子炉建屋の表面温度をコンクリートの圧縮強度が維持される保守的な温度である 200℃以下（加熱温度と圧縮強度の関係を実験で確認した文献より設定）とすることで，外部事象防護対象施設の安全性を損なわない設計としている。</p> <p>➤ 乾燥収縮は，建屋全体の剛性として力学的性質に影響を与えるが，乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり，実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を上回っていること，また，耐震実験により乾燥収縮</p>

条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
				<p>が終局耐力に影響を与えないことを確認しており構造体として問題はないことから、外部火災上の耐火性に問題はない。</p> <p>[止水性]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 降水等に対する止水性については、アスファルト防水などにより機能を確保している。アスファルト防水等は乾燥収縮や地震によるひび割れに追従する構造であるため、問題はない</li> </ul> <p>[気密性]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 通常時の気密性については、乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから問題はない。</li> <li>▶ 地震時の気密性について、面内変形に対しては、耐震壁のせん断ひずみがおおむね弾性状態にとどまることを基本とする。おおむね弾性状態を超える場合は、地震応答解析による耐震壁のせん断ひずみから算定した空気漏えい量が設置する換気設備の性能を下回ること必要な気密性を維持する設計とする。その場合、気密性を要求される施設に対し、基準地震動 <math>S_s</math> による鉄筋コンクリート造耐震壁の許容限界として設定している最大せん断ひずみ <math>2.0 \times 10^{-3}</math> の適用性を確認する。</li> <li>▶ また、面外変形に対しては、地震時に生じる応力に対して鉄筋が降伏しないことを確認（鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討）することで、気密性を維持する設計とする。</li> <li>▶ 地震応答解析においては、初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから、乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。</li> <li>▶ 空気漏洩量の算定においては、「原子炉建屋の弾塑性試験に関する報告書（（財）原子力発電技術機構）※」にて提案されている評価式について、乾燥収縮ひび割</li> </ul>



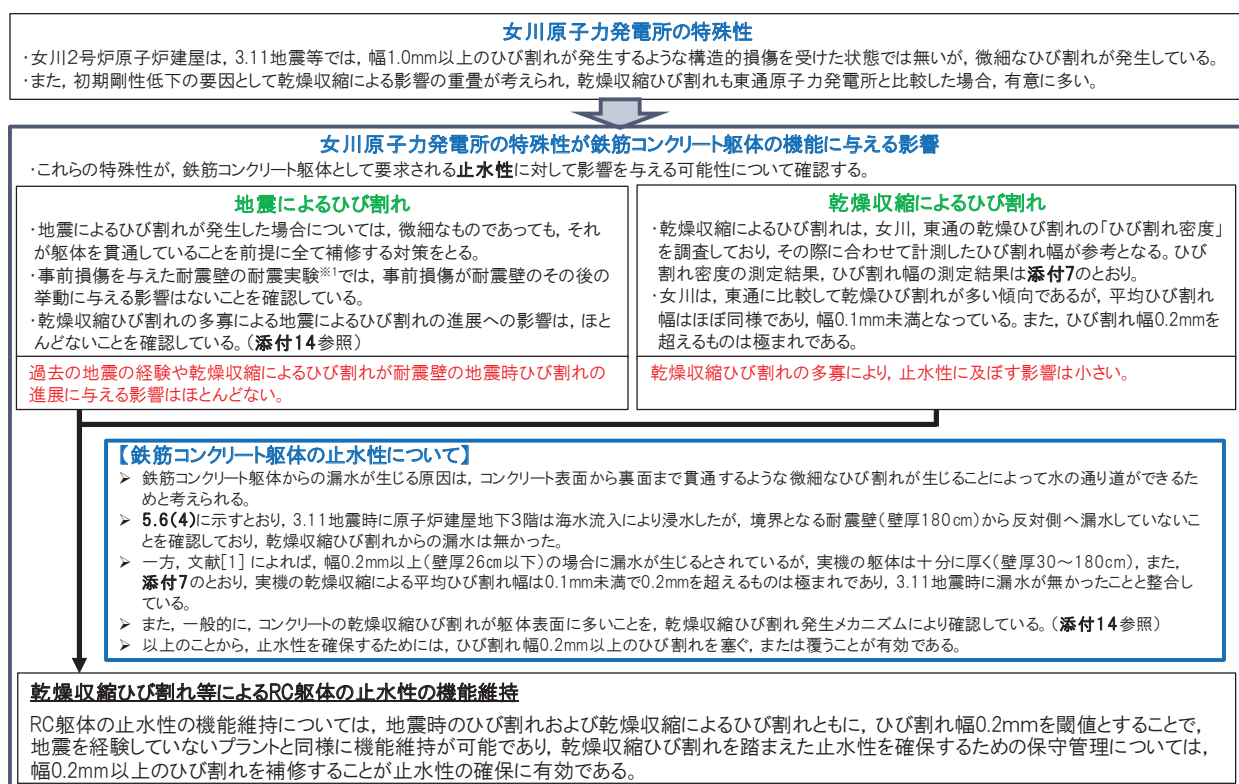
条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
				<p>れのある建屋における気密性能検査から十分な保守性を確認した上で適用する。</p> <p>※財団法人 原子力発電技術機構「耐震安全解析コード改良試験 原子炉建屋の弾塑性試験 試験結果の評価に関する報告書 平成5年度」</p>
8 条 41 条	火災による損傷の防止	耐火性 (内部火災)	原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 内部火災の耐火性の評価としては, 150mm 以上のコンクリート壁が 3 時間耐火性能をもつことを文献で確認している。</li> <li>▶ この 3 時間耐火性能は遮熱性の観点での評価であり, 壁厚やコンクリートの種類に応じた遮熱特性係数により耐火性能時間を算定しているものである。乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり, 躯体厚さや遮熱特性係数へ影響を及ぼすものではないことから, 内部火災の耐火性に影響を与えるものではない。</li> </ul>
9 条	内部溢水	止水性	原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 通常時は, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから, 溢水により安全施設の機能へ影響するひび割れはない。</li> <li>▶ 地震時の止水性については, 実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことを確認していることから, 基準地震動 Ss に対して応答ひずみが大きく評価される不確かさケース (基本ケースよりも更に初期剛性低下を考慮したモデル) によるせん断ひずみ度から残留ひび割れ幅を算定し, 0.2 mm 未満であることを確認することにより止水性を維持する。</li> </ul>
16 条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	想定外の重量物落下が生じないこと	原子炉建屋屋根, 壁	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ 屋根スラブは, 鋼板 (デッキプレート) の上に鉄筋コンクリート造の屋根を設けた構造であり, 地震により剥落しない設計であることから影響はない。</li> <li>▶ 3 階床面より上部を構成する壁については, 鉄筋コンクリート造の耐震壁であり, 3 階床面より下部の耐震壁とあわせて地震により落下しないことを確認する。</li> <li>▶ 地震応答解析においては, 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから, 乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。</li> </ul>

条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
26条 59条	原子炉制御室 原子炉制御室	気密性, 遮蔽性	原子炉制御室，緊急時対策所，原子炉建屋等	<p>➤ 乾燥収縮ひび割れについては，実験結果から，乾燥収縮ひび割れの多寡による地震によるひび割れの進展への影響は，ほとんどないことを確認していることを踏まえ，居住性が確保されていることについて，気密性・遮蔽性の観点から以下のとおり対応する。</p> <p>➤ また，新設建屋の地震応答解析においては，設計剛性（設計基準強度）を用いた地震応答解析モデルを基本とするが，念のため，耐震壁の厚さが厚い原子炉建屋のオペフロ下部の3.11地震に対する剛性低下量（0.8倍程度）を不確かさケースとして考慮する。</p> <p>[気密性]（6条[気密性]と同じ）</p> <p>[遮蔽性]</p> <p>➤ 設計基準対象施設の耐震重要度分類及び重大事故等対処施設の施設区分に応じた地震動に対して構造強度を確保し，遮蔽体の形状及び厚さを確保することで，地震後における残留ひずみを小さくし，ひび割れがほぼ閉鎖し，貫通するひび割れが直線的に残留しないこととすることで，遮蔽性を維持する設計とする。</p> <p>➤ 地震応答解析においては，初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから，乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。</p> <p>[止水性]（9条と同じ）</p>
34条 61条	緊急時対策所 緊急時対策所	気密性, 遮蔽性		
29条	直接ガンマ線等からの防護	遮蔽性		
30条	放射線からの放射線業務従事者の防護	遮蔽性, 気密性, 止水性		
32条	原子炉格納施設	気密性		

(2) 乾燥収縮ひび割れ等による鉄筋コンクリート躯体の止水性について

乾燥収縮ひび割れ等による鉄筋コンクリート躯体の止水性について、女川原子力発電所の特殊性がその機能に与える影響について、地震によるひび割れ及び乾燥収縮ひび割れに対して確認を行った。(第5.6-1図)

その結果、RC躯体の止水性の機能維持については、地震時のひび割れ及び乾燥収縮によるひび割れとともに、ひび割れ幅0.2mmを閾値とすることで、地震を経験していないプラントと同様に機能維持が可能であり、乾燥収縮ひび割れを踏まえた止水性を確保するための保守管理については、幅0.2mm以上のひび割れを補修することが止水性の確保に有効であると考えられる。



文献[1] コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針—2013—：社団法人 日本コンクリート工学協会  
 ※1 耐震実験[2] 耐震実験による事前損傷が終局耐力に与える影響検討 (添付11)

第5.6-1図 乾燥収縮ひび割れ等によるRC躯体の止水性の機能維持方針

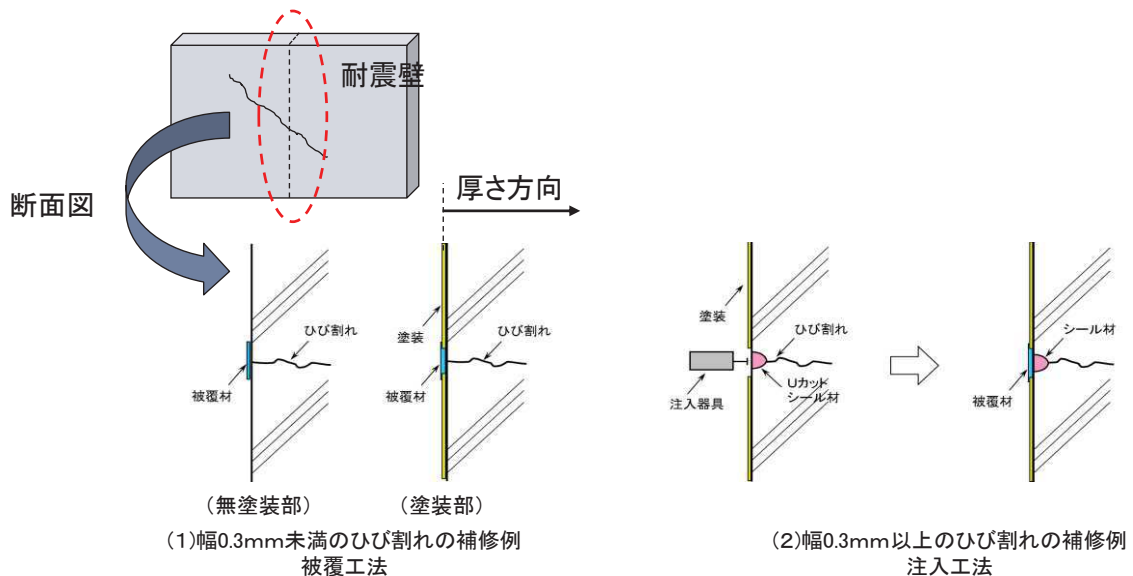
(3) 乾燥収縮ひび割れを踏まえた止水性を確保するための保守管理について

乾燥収縮によるひび割れの補修に際しては、ひび割れ幅 0.2mm 以上のものを補修することで止水性を十分に確保できると考えられるため、内部溢水評価における最終貯留区画については、現在、乾燥収縮は収束しており（添付 7 参照）、乾燥収縮ひび割れが毎年増大していく状態ではないことから、点検・補修を定期的実施していくこととし、以下の通り保守管理する方針とする。

- ・ひび割れ幅 0.05mm を超えるもの～0.2mm 未満のひび割れについては、ひび割れ調査を実施し、乾燥ひび割れの進展状況を観察することとし、ひび割れ幅 0.2mm 以上のひび割れについては、対象となるひび割れすべての調査図を作成し管理する
- ・ひび割れ幅 0.2mm 以上となったひび割れは、すべて補修を実施する

補修方法については、0.3mm 未満のひび割れ幅ではエポキシ樹脂等の注入は困難であるため、被覆材により表面を覆う工法（被覆工法）とする（第 5.6-2 図）。

なお、最終貯留区画に集水するまでの経路上の止水性については、階段室、床ドレン、開口部などを通じて下階へ溢水伝播され長時間貯留されることはなく、内部溢水評価への影響はないことから、ひび割れ点検及び補修等の維持管理については社内マニュアルに基づき適切に実施する。

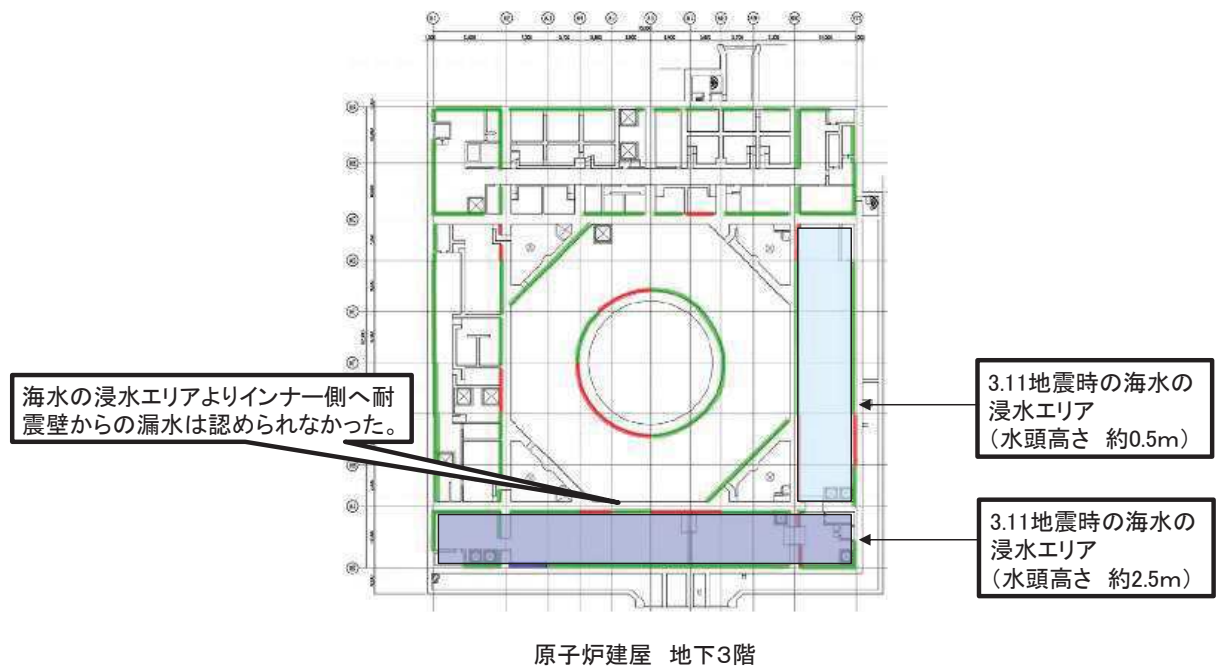


第 5.6-2 図 鉄筋コンクリート躯体の補修方法

(4) 3.11 地震時の海水流入の際の乾燥収縮ひび割れ等の影響について

3.11 地震時において、下図に示す原子炉建屋地下3階は海水流入により浸水したが、境界となる耐震壁から反対側へ漏水していないことを確認していることから乾燥収縮ひび割れからの漏水はないと言える。

女川の乾燥収縮ひび割れは、添付7に示す通りほとんど幅0.1mm未満であり、ひび割れ幅0.2mmを超えるものは極まれである。文献[1]によれば、ひび割れ幅0.2mm未満であれば止水性が確保されることから、幅0.2mm以上の乾燥収縮によるひび割れを適切に補修することで漏水は生じない。



第 5.6-3 図 3.11 地震時の海水流入範囲

文献[1] コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針-2013- : 社団法人 日本コンクリート工学協会

## 6. まとめ

### 6.1 検討結果の概要

女川原子力発電所は、3.11地震等による地震動を受けており、主要建屋で観測された地震観測記録から、建屋の剛性が設計で考慮している初期剛性に比べ低下している傾向が確認された。

初期剛性が設計より低下している要因としては地震動と乾燥収縮の影響の重畳と考えられるが、それぞれの因子が終局耐力に影響を与えないことを確認した上で、基準地震動  $S_s$  に対する地震応答解析モデルを策定した。また、不確かさケースとして、更なる初期剛性の低下を考慮したモデルを策定した。なお、静的地震力の評価や基礎版（FEMモデル）においても剛性低下の影響を確認する。

鉄筋コンクリートの耐震以外の機能（支持性能、気密性、遮蔽性、止水性）に対しても女川の状況を踏まえ、保守性を考慮した評価を適用するとともに、モニタリングの充実<sup>※1</sup>を図る。

#### ※1 モニタリングの充実

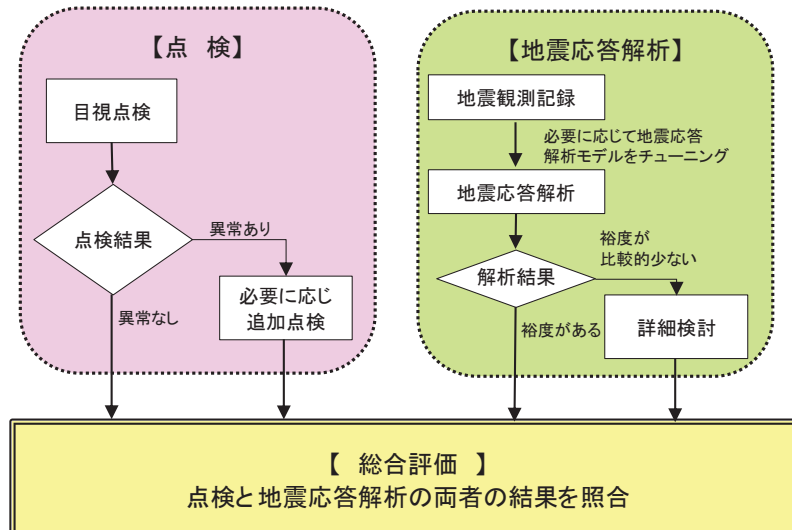
- ・これまで耐震壁の保守管理における点検では、乾燥収縮等によるひび割れは幅 0.2mm 以上のみ概略位置を記録していたが、乾燥収縮等によるひび割れをより詳細に記録するための点検、記録方法の充実を図り、地震後の点検との比較評価が可能となるようにする。
- ・また、層間変位計測システムにより計測された変位より、オペフロ上部には耐震性に影響はないが、わずかな残留変位が認められた。残留変位とひび割れ本数、幅との関係について、更なる検討を進め、今後の維持管理に反映していく。
- ・新たに設置する安全上重要な建屋については、地震観測装置を設置する。また、既設建屋についても3.11地震に対する振動性状の詳細検討結果に応じて観測の充実を図る。

また、将来地震に見舞われた時は、特別な保全計画に基づく地震後健全性評価に加え、3.11地震等の影響を踏まえて設計体系に反映した事項（初期剛性低下の考慮等）について分析し、設計の妥当性を確認する。なお、必要に応じてその結果を踏まえた基準地震動  $S_s$  に対する健全性確認を行う。

上記の方針については、既設建屋及び新設建屋ともに確認を行うこととし、設置許可段階での申請上は、「添付書類八 原子炉施設の安全設計に関する説明書 1.3 耐震設計」に、『耐震性の確認』の項目として反映<sup>※2</sup>する。

#### ※2 具体的な反映事項

- ・新たに設置する安全上重要な建屋については、地震観測装置を設置する。また、既設建屋についても3.11地震に対する振動性状の詳細検討結果に応じて観測の充実を図る。
- ・将来地震に見舞われた時は、3.11地震等の影響を踏まえて設計体系に反映した事項（初期剛性低下の考慮等）について分析し、設計の妥当性を確認する。



第 6.1-1 図 特別な保全計画に基づく地震後健全性評価の全体フロー

## 6.2 剛性低下を踏まえた建屋解析手法の高度化

地震による建屋の剛性低下について、動的振動台を用いた実験等を通じ、剛性低下を反映した建屋解析手法の高度化等、以下の検討に取り組む。

### (1) 大入力に対する建屋挙動

- ・ 建屋 3 次元 FEM 解析による建屋挙動に関する知見の蓄積

### (2) 実建屋の地震観測による 3 次元振動特性同定法開発

- ・ 建屋の 3 次元振動特性評価手法

### (3) 地震経験を考慮した地震荷重評価法の開発

- ・ 地震後剛性低下を考慮した RC 部材の地震荷重評価法の整備

これらの取り組みには、原子力リスク研究センターが主体となって進めるが、情報共有して進めていく。

## 乾燥収縮ひび割れによる機器アンカーへの影響検討

### 1. はじめに

乾燥収縮によるひび割れの機器アンカーへの影響について、文献レビュー、実機のひび割れ傾向の確認等から乾燥収縮ひび割れが機器アンカーに及ぼす影響について検討を行った。



## 2. 乾燥収縮ひび割れの特徴に関する文献レビュー

「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」(日本建築学会)によれば、コンクリートは乾燥に伴い収縮する性質を有しており、収縮ひび割れはコンクリート部材が自由に収縮しようとしたときに、それが何らかの形で拘束されることによって生じる。

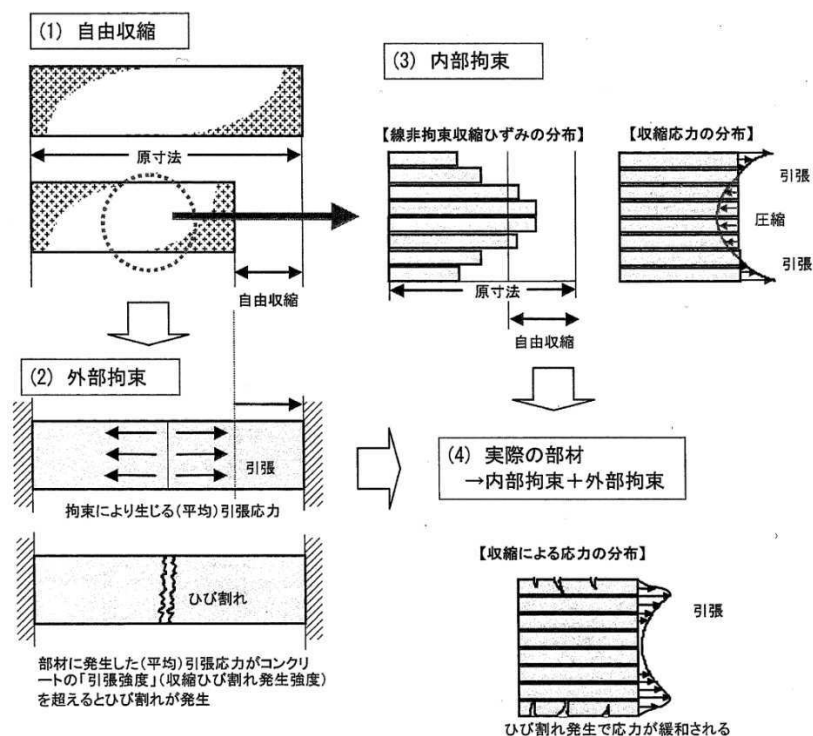
拘束には外部から受けるもの(外部拘束)と内部から受けるもの(内部拘束)とがあり、拘束を受けることによってコンクリートに引張応力が生じ、コンクリートの引張強度を超えたときにひび割れが発生する。

外部拘束を引き起こす例としては、壁を取り囲む柱や梁、さらには内部の鉄筋等がある。

一方、内部拘束はコンクリート部材内部で生じる拘束である。表面部分と内部とでは、乾燥の程度に応じて収縮する量が異なるが、実際には部材は一体となって収縮するため、表面は引張力を、内部は圧縮力を受けた状態となる。(第2-1図(3)の状態)

一般に、乾燥収縮試験において測定されているコンクリートの自由収縮といえ、第2-1図(3)右側に示す状態での収縮を意味している。

したがって、たとえ自由収縮の場合であっても表面にはひび割れが発生する可能性があり、外部拘束にしても内部拘束にしても、コンクリートにひび割れが発生すると、応力緩和が生じる。



第2-1図 乾燥収縮ひび割れの発生メカニズム

(日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2 P. 51-52 記載抜粋)

### 3. ひび割れがあるアンカー部の耐力試験（文献レビュー）

電力共通研究<sup>\*1</sup>として、乾燥収縮ひび割れが機器支持部アンカーに与える影響を把握するために、アンカー部試験体にひび割れを導入し、ひび割れがアンカーのコーン破壊挙動に及ぼす影響を把握するための耐力試験を実施している。

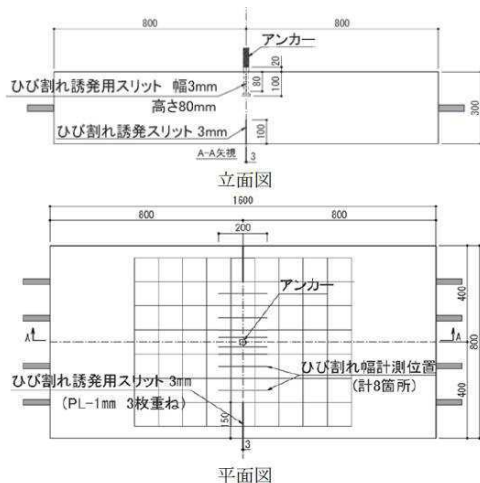
その結果、アンカー部を貫通するひび割れのひび割れ幅が0.4mmの場合では、貫通ひび割れが存在するにもかかわらず、円形ではないものの貫通ひび割れの両側にひび割れが進展しており、ひび割れが存在しても、その幅によっては引張力が伝達されることを示していると考えられる、とされている。また、ひび割れが無い場合の70%程度の耐力を示し、各種合成構造設計指針（日本建築学会）によるアンカー部の短期許容引張力<sup>\*2</sup>を上回っていることが確認されている。

※1 中村ほか（2018） ひび割れがあるアンカー部の耐力試験（その1：試験計画・ひび割れ導入），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）

水谷ほか（2018） ひび割れがあるアンカー部の耐力試験（その2：ひび割れがアンカー耐力に及ぼす影響），日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）

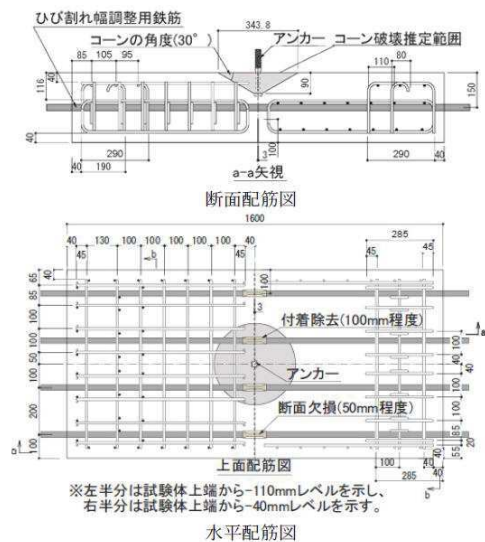
※2 短期許容引張力の算定式： $2/3 \times 0.31Ac\sqrt{Fc}$

（参考） JEAG4601 におけるコンクリート躯体がコーン状破壊する場合の基礎ボルト1本当たりの許容引張荷重は、 $0.31K1Ac\sqrt{Fc}$  ( $K1 = 0.6$  [許容応力状態：IVAS]) で算定されることから、実験結果はJEAG4601の許容引張荷重を上回っている。



・曲げ加力によりひび割れを導入するために試験体を長方形とし、ひび割れがアンカー位置を貫通するように、試験体の上下面および側面にスリットを設けている。  
 ・アンカーを貫通するひび割れ幅をパラメータ(0.0, 0.4, 1.0mm)とし、ひび割れ幅の違いがアンカーのコーン破壊挙動に及ぼす影響について検討している。

ひび割れアンカー試験体の概要



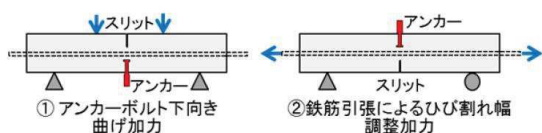
配筋がコーン破壊挙動に影響を及ぼさないように、コンクリートのコーン破壊推定領域として、コーンの角度を保守的に30度と仮定し、さらに余裕を考慮した外側の領域も含めて一切鉄筋を配筋しない設計としている。

アンカー試験体の配筋図

第3-1図 (1) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験概要 (1)

### 試験ケース

ひび割れ幅 (mm)	補修なし	エポキシ系補修材	セメント系補修材
なし	#1	—	—
0.4	#2	—	—
1.0	#3, #6	#4	#5



### ひび割れ導入方法

アンカーボルト下向き状態での4点加力により、アンカー位置に曲げひび割れを発生させた。(上図①参照)  
 曲げ加力だけでは断面を貫通するひび割れを導入することができないので、ひび割れ幅調整用鉄筋4本を同時に引張り、鉄筋を塑性化させることにより、ひび割れを全断面に貫通させ、ひび割れ幅を調整した。



a) 試験体#1(ひび割れなし)      b) 試験体#2(0.4mm)

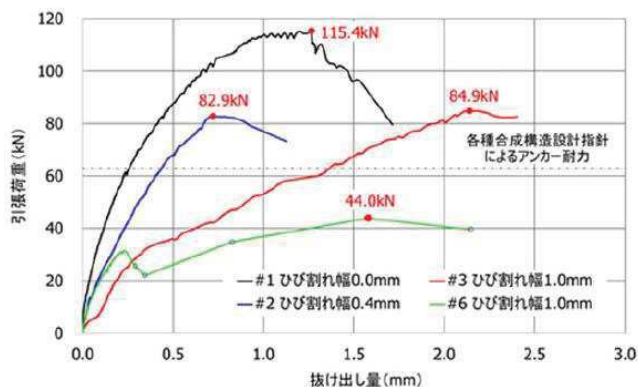
### コーンひび割れ形状

第 3-1 図 (2) ひび割れがあるアンカー部の耐力試験概要 (2)

### アンカー試験結果(アンカー耐力検討)

試験体番号	ひび割れ幅 (mm)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	最大荷重 (kN)	抜け出し量 (mm)
#1	なし	35.6	33.0	3.19	115.4	1.27
#2	0.4	34.1	33.0	3.23	82.9	0.72
#3	1.0	34.1	33.0	3.23	84.9	2.14
#6	1.0	34.5	34.5	3.11	44.0	1.58

A1J 各種合成構造設計指針による 4 試験体のアンカー耐力平均値: 62.9kN、  
 4 試験体のアンカーの短期/長期許容引張力平均値: 41.9kN/21.0kN



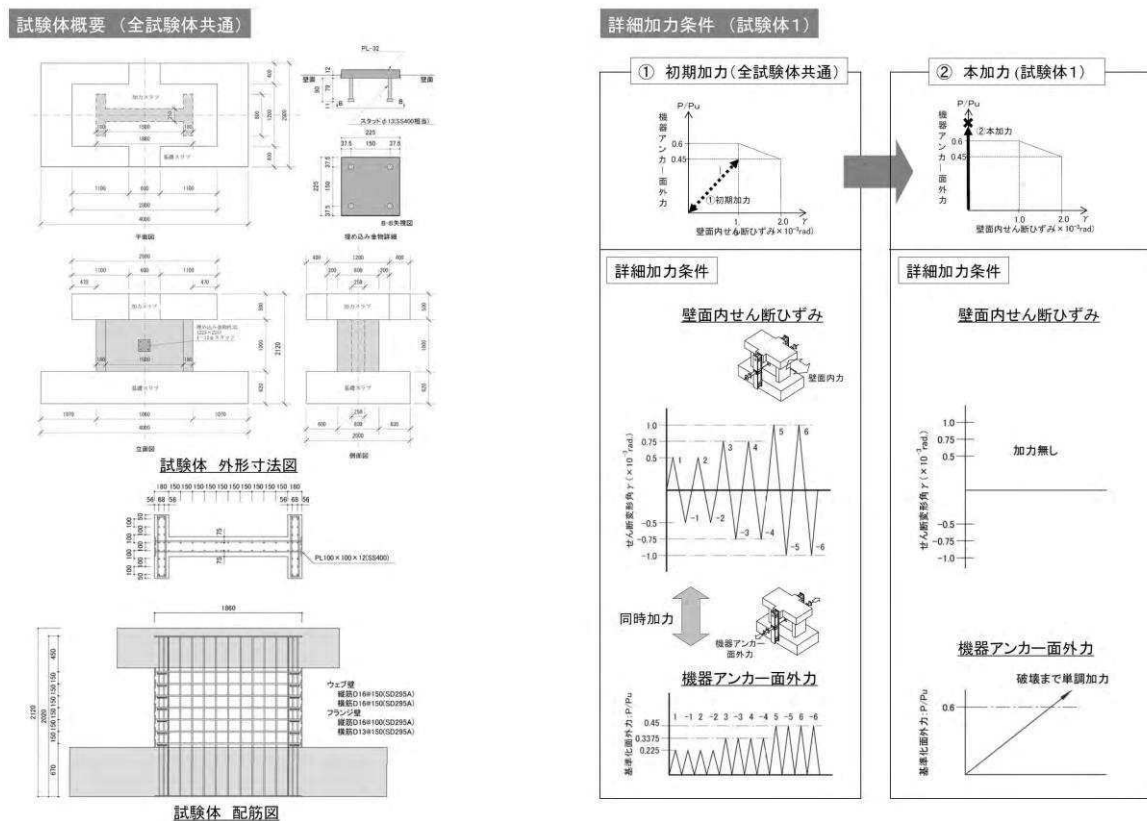
アンカーボルトの抜け出し量－引張荷重関係

#### 4. 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験（文献レビュー）

JNES の試験<sup>※1</sup>では、機器アンカー部に事前に初期加力によるひび割れを生じさせた状態で試験が実施されており、その状態であっても JEAG の許容耐力の低減値を満足することが確認されている。

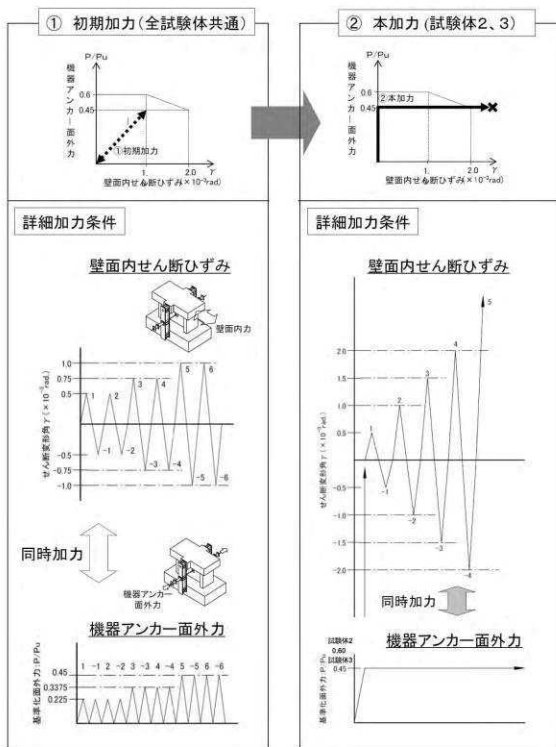
また、女川2号炉建屋のコンクリートの乾燥収縮ひずみは、コンクリートの試験結果より最大約  $800\mu$  と測定されている。このひずみがすべて地震により生じたと仮定した場合であっても、JNES の試験における初期加力条件に含まれていることから、その影響は、JEAG における許容範囲内のものになり、特にアンカー耐力の低下につながるものではない。

※1 JNES 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験に係る報告書

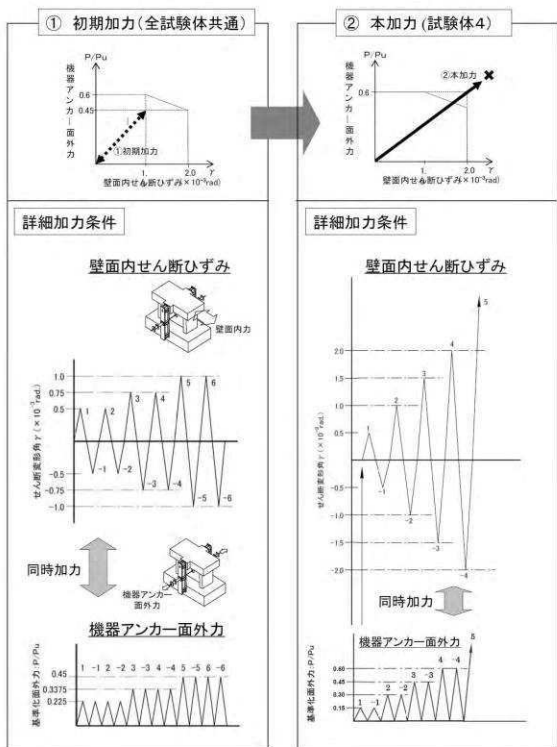


第 4-1 図 (1) 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験の概要 (1)

詳細加力条件 (試験体2, 3)



詳細加力条件 (試験体4)



第 4-1 図 (2) 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験の概要 (2)

**試験状況写真**

2000kN 押引油圧ジャッキ (形状試験体せん断載荷用)

RC 壁 H 形鋼試験体 (両側埋込金物付)

2000kN 押引油圧ジャッキ (形状試験体せん断載荷用)

試験体: 西面  
裏面

計測フレーム

埋込金物

500kN 油圧ジャッキ (埋込金物引張載荷用)

**試験体1 結果概要**

**荷重-変形 関係**

壁面内せん断力-せん断変形角(ひずみ)  $\gamma$

初期加力

本加力

最大荷重 132 kN (0.83 ×  $P_u$ )

2次加力のみ

初期加力終了時

実測: 正加力時発生ひび割れ破線; 負加力時発生ひび割れ

ひび割れ幅: 0.08mm

ひび割れ幅: 0.20mm

【ひび割れ発生状況(-1サイクル目:  $\gamma = -0.5 \times 10^{-3}$ )】

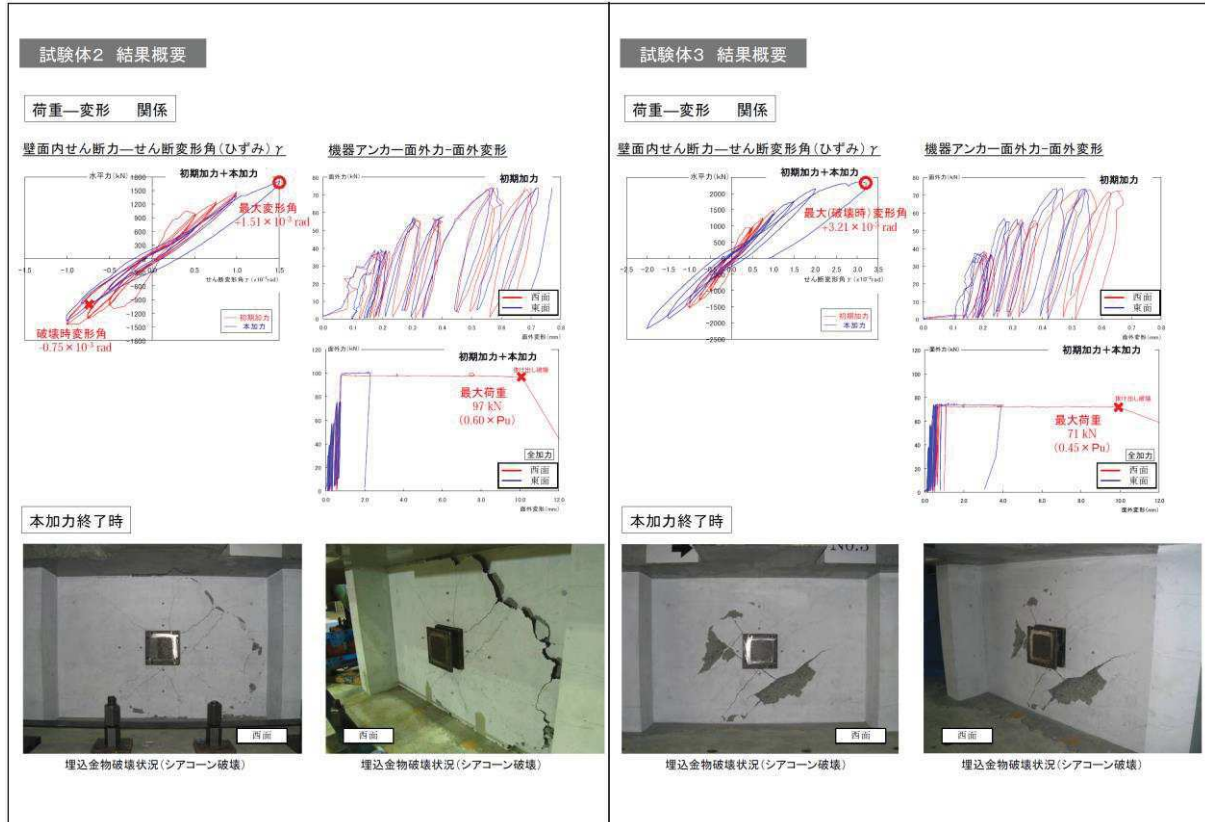
【ひび割れ発生状況(+6サイクル目:  $\gamma = 1.0 \times 10^{-3}$ )】

本加力終了時

埋込金物破壊状況(シアコン破壊)

埋込金物破壊状況(シアコン破壊)

第 4-1 図 (3) 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験の概要 (3)



第 4-1 図 (4) 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験の概要 (4)

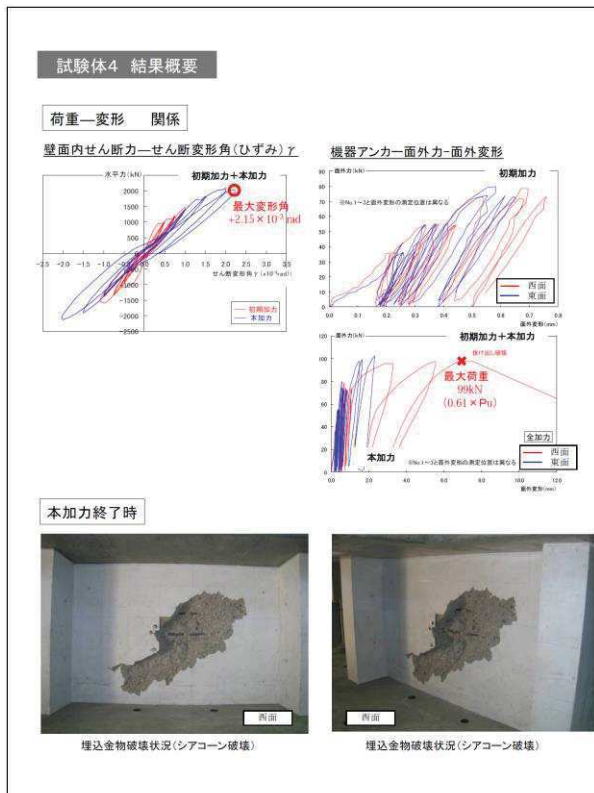


表 6.1.1-1 機器アンカー部(埋込金物)の引抜耐力に及ぼす地震履歴の影響

加力条件	地震履歴(初期加力 <sup>0</sup> )の影響 面外力0.45Pu、面内せん断変形角(ひずみ) $1.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$	JEA4601 設計許容限界(案)との関係 $L.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$
面外力のみ (試験体1)	既往の初期加力無しの場合に比し、引抜耐力が低下した。	引抜耐力は設計許容限界(面外力で0.6Pu)を上回った。
面外力と面内せん断変形角(ひずみ)の組合せ	既往の初期加力無しの場合に比し、同等以上の面内せん断変形角(ひずみ)で破壊した。	引抜耐力は設計許容限界(面外力、面内せん断変形角(ひずみ)で0.6Pu、 $1 \times 10^{-3} \text{ rad}$ )、(0.45Pu、 $2 \times 10^{-3} \text{ rad}$ )を上回った。
此に準増 (試験体4)	既往の初期加力無しの場合に比し、引抜耐力が20~30%程度低下した。	引抜耐力は設計許容限界(面外力、面内せん断変形角(ひずみ)で0.5Pu、 $1.67 \times 10^{-3} \text{ rad}$ )を上回った。

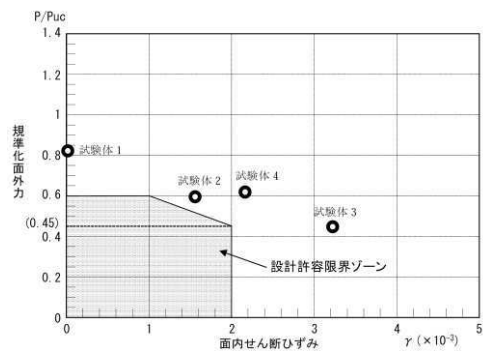


図 6.1.1-8 本試験結果と設計許容限界ゾーン(JEA4601案)との比較

第 4-1 図 (5) 地震履歴を受けた機器アンカー部の耐力試験の概要 (5)

## 5. 機器アンカーの鉄筋による拘束効果（文献レビュー）

松尾・金津（2014）※1では、鉄筋コンクリート部材に生じる曲げ損傷がアンカーの破壊性状に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、アンカーの引き抜き実験を実施している。

その中で、アンカーの埋込長がかぶり厚さよりも長い場合には、鉄筋の効果でコーン状破壊の破壊面積は増大することが確認されている。

鉄筋が降伏する段階では、ボルト長が100mmの場合、コーン状破壊後に割裂ひび割れを伴って終局に至っているが、ボルト長が200mmの場合は、主筋が持ち上がり、破壊面が部材全域に広がるような状況が観察された。

これは、コーン状の破壊面が主筋にかかり、主筋ごと引っ張りあげられるためと考えられる。このため、ボルト頭部が主筋や配力筋の内側に位置する場合には、通常のコーン状破壊よりも引き抜き破壊面積が大きくなると考えられる。

※1 曲げ損傷を受けた鉄筋コンクリート部材に定着されたアンカーの引張耐力に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 36, No. 2, 2014

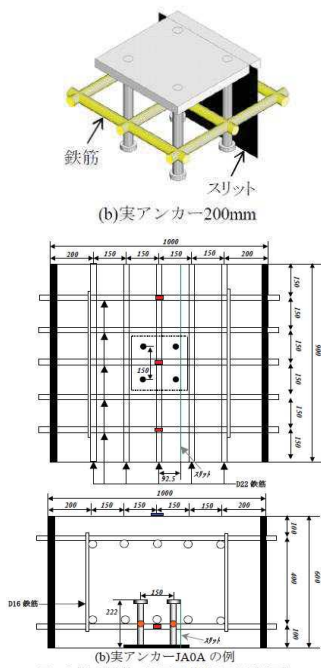


図-3 RC 試験体の断面図（横断面と縦断面）  
ひび割れアンカー試験体の概要

実験ケース  
(b)実アンカー

ケース名	ボルト長(mm)	損傷程度	スリット
JA0N	100	なし	なし
JA0A	100	なし	あり
JA1N	100	鉄筋降伏	なし
JA1A	100	鉄筋降伏	あり
JA2N	100	コンクリート剥離	なし
JA2A	100	コンクリート剥離	あり
JB0N	200	なし	なし
JB0A	200	なし	あり
JB1N	200	鉄筋降伏	なし
JB1A	200	鉄筋降伏	あり
JB2N	200	コンクリート剥離	なし
JB2A	200	コンクリート剥離	あり

・実アンカーの検討パラメータは、ボルト長、損傷状態、スリットの有無・位置としている。  
・スリット(2mm幅)の設置位置はアンカー位置と一致させた場合(スリット中央)およびアンカー位置からボルト長の半分だけ水平方向に離れた位置とした場合(スリット偏心)としている。



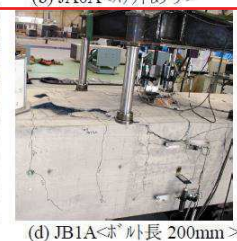
(a) JA0N<スリットなし>



(b) JA0A<スリットあり>



(c) JA1A<ボルト長 100mm>



(d) JB1A<ボルト長 200mm>

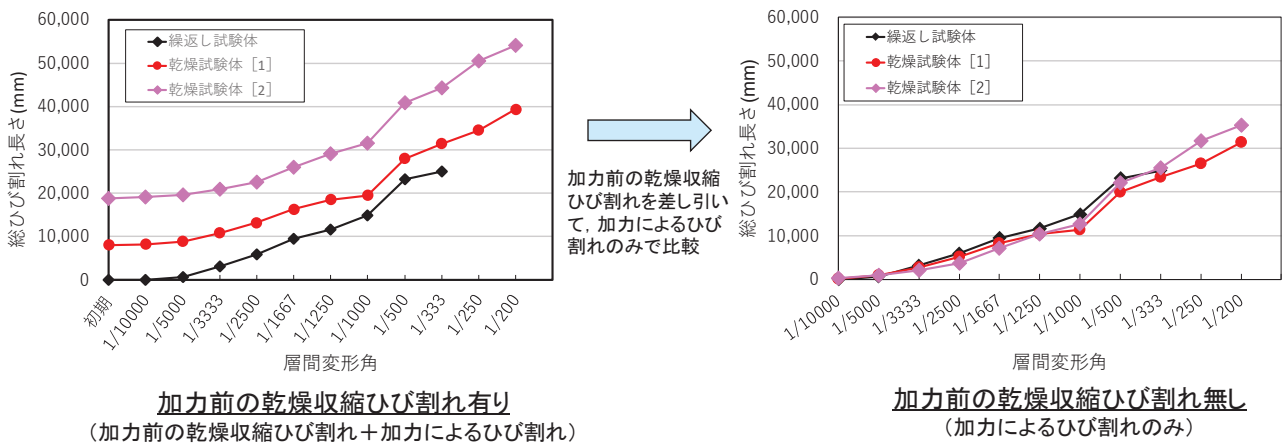
終局状況

第 5-1 図 機器アンカーの鉄筋による拘束効果に関する実験概要

## 6. 乾燥収縮が地震によるひび割れの進展に与える影響

当社で実施した耐震実験（添付 5，添付 8）における総ひび割れ長さ（層間変形角）関係の図とひび割れ状況図から、乾燥試験体は加力前に乾燥収縮ひび割れが生じているが、加力後に生じるひび割れ（地震時ひび割れ）長さは、乾燥させない試験体と同等のひび割れ長さとなっている。したがって、加力前に生じている乾燥収縮ひび割れは、地震時のひび割れの発生の方には大きな影響を与えないことが確認できる。

また、地震によるひび割れが進展した状態では、ひび割れの量は地震によるひび割れが多くなるため、乾燥収縮ひび割れの影響はその点からも小さいものとなる。

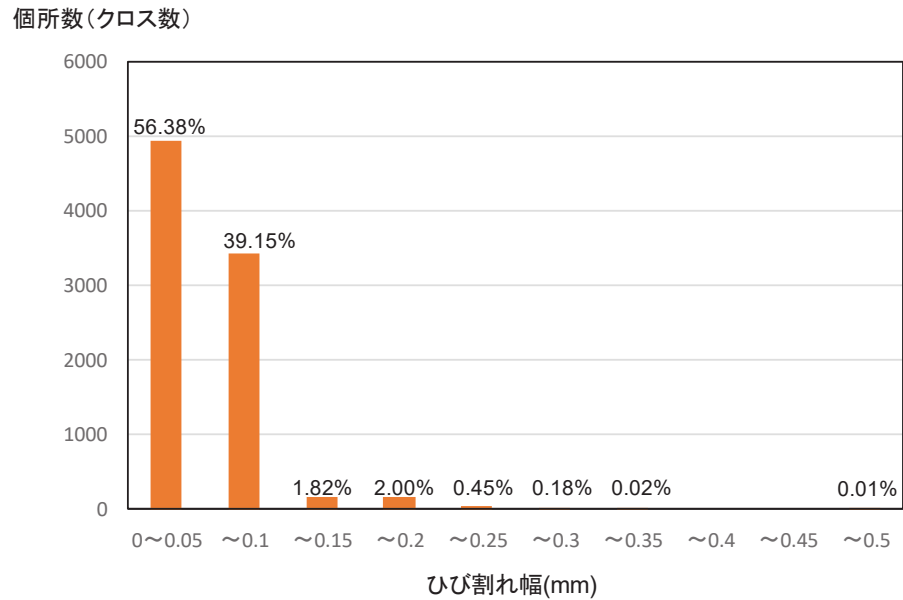


第 6-1 図 耐震実験における総ひび割れ長さ－層間変形角関係



## 7. 実機における乾燥収縮ひび割れの傾向

2号炉原子炉建屋の乾燥収縮ひび割れ調査結果（添付7）によるひび割れ幅の度数分布から、乾燥収縮ひび割れによるひび割れ幅は、0.05mm以下が約56%、0.05mmを超えて0.1mm以下が約39%の微小なひび割れであり、3.11地震時に生じたひび割れ幅（大部分は幅0～0.3mm未満）に比較して非常に小さい。



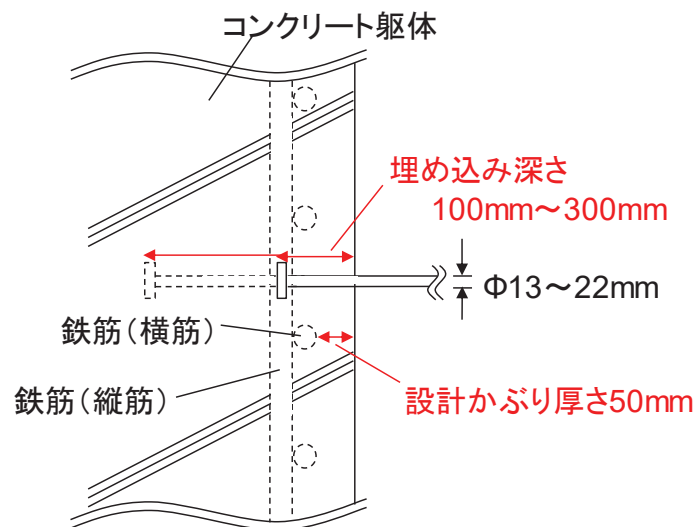
第7-1 図 乾燥収縮ひび割れ調査結果（女川2号炉原子炉建屋）

## 8. 機器アンカーと躯体の位置関係

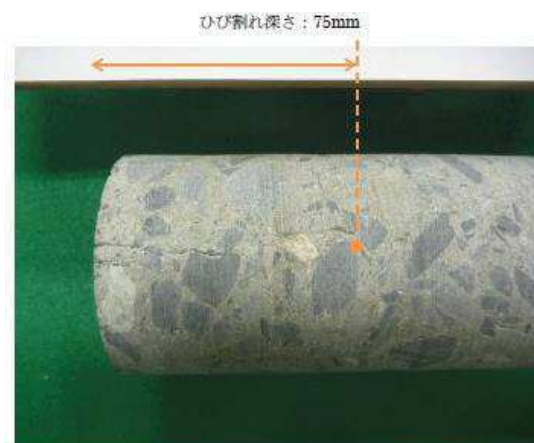
鉄筋による拘束によって、アンカーのコーン状破壊の破壊面積が増大することが確認されており（松尾・金津（2014））、アンカーが鉄筋位置より深い位置で配置されると、ひび割れの影響は更に低減される。

実機におけるアンカー部の埋め込み深さは、標準的な埋込金物で 100～300 mm であり、アンカー部の端部は鉄筋位置よりもおおむね深くなっている。

また、躯体表面に乾燥収縮ひび割れが生じている箇所から採取したコンクリートコアでは、乾燥収縮ひび割れ深さは鉄筋位置程度となっている。



第 8-1 図 実機における機器アンカーと RC 造建屋躯体及び配筋の位置関係（例）



本コアの例ではひび割れ深さが75mm程度であり、横筋表面よりも深い位置となっている。

第 8-2 図 ひび割れ箇所から採取したコンクリートコアの例

## 9. まとめ

3. 及び7. より、電力共通研究のひび割れ幅が0.4mmの場合の試験結果から、引張力が十分伝達されること、AIJ指針及びJEAG4601の許容耐力を上回ることを確認できたが、実機の乾燥収縮ひび割れ幅は0.4mmに対して有意に小さく、その影響は小さいと考えられる。

4. 及び6. より、JNESの試験結果を踏まえた考察として、女川の乾燥状態のひずみがJEAG4601による設計に与える影響は小さいこと、また、当社実施の耐震実験から、乾燥収縮ひび割れは地震時のひび割れの発生仕方には大きな影響を与えないことを確認した。

5. 及び8. より、実機においては標準的なアンカー部はかぶり厚さより深いことから、鉄筋の拘束効果もあり、耐力に余裕があると考えられる。

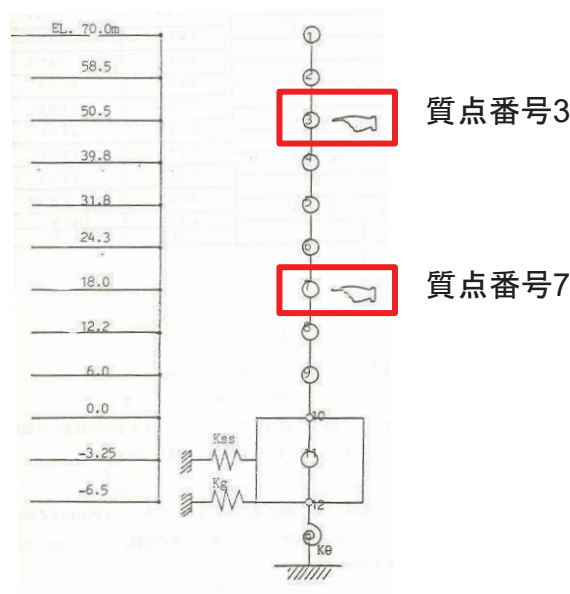
以上のことから、乾燥収縮ひび割れが生じていても、アンカー部への影響は小さく、地震力が大きくなりひずみが進んだ状態においては、地震によるひび割れが支配的となり、JEAG4601に基づく設計が適用できると考えられる。

## 床応答スペクトルの拡幅率について

## 1. 既往知見を踏まえた考察

機器・配管系の設備評価に当たり、既工認において床応答スペクトルの拡幅率を±10%としていることについての妥当性を示す。

通商産業省（現：経済産業省）において検討が進められた軽水炉の改良・標準化の中でまとめられた「昭和 55 年度耐震設計の標準化に関する調査報告書別冊 2（機器系）」では、BWR1, 100MWe 級基本モデルを用いた標準的原子炉建屋を対象として、地盤ばねを考慮した 1 軸多質点系モデルを用いた解析を行い、その応答結果（質点番号 3 及び質点番号 7）を用いて、各パラメータが床応答スペクトルに与える影響を検討し、床応答スペクトルの拡幅率 10%としている。解析モデル及び検討条件を第 1 図及び第 1 表に示す。



第 1 図 1 軸多質点系モデルの概要図

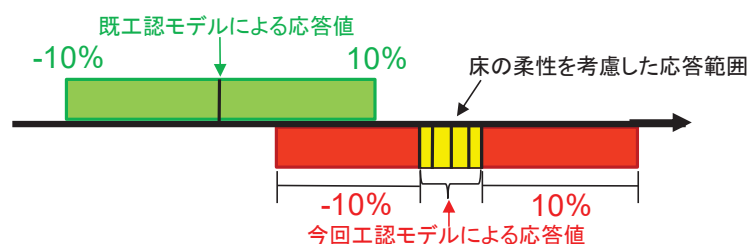
第 1 表 検討条件

地盤剛性	$E=7 \times 10^4 \sim 4 \times 10^6 \text{ t/m}^2$ で変動
地盤ばね定数の算出方法	標準地盤 ( $V_s=500, 1,000, 1,500\text{m/s}$ ) から算出 田治見式, Whitman 式, Barkan 式 の 3 式を使用
建屋剛性 (ばらつき考慮)	±20%のばらつきを考慮し、建屋剛性を 0.8 倍, 1.0 倍, 1.2 倍に設定
地盤ばねの減衰定数	一定値 ( $K_H=20\%$ , $K_\theta=7.5\%$ , $K_{SS}=5\%$ ) 及び 逸散減衰定数 (振動アドミッタンス)
入力地震波	高地震地帯向 S1 (遠地) M8.4 286.15Gal

検討結果としては、地盤剛性 E の変動による床応答スペクトル変動を論議する際には現実的な地盤減衰定数をカップルして考えることが必須であり、このベースに立てば、地盤剛性 E の変動範囲中、機器設計に対して最も厳しい（剛側の）地盤剛性 E を基準とすれば拡幅率±10%は十分安全側である。地盤剛性 E の変動に建屋剛性の±20%程度までの変動を重ねて考えても、地盤減衰定数にアドミッタンスを適用すれば拡幅率は±10%程度で包絡可能と推測される、と結論づけられている。

検討条件に対する女川の特徴を踏まえると、既工認と同様の±10%拡幅の採用は、以下のとおり、既工認と同等の保守性を有していると考えられる。

- 地盤剛性、地盤ばね定数の算出方法及び地盤ばねの減衰定数については、JEAG4601に基づく手法を採用しており、また、女川は硬質岩盤であることから、その変動の影響は小さい。
- 入力地震波については、強震記録を用いた検討を踏まえ、入力地震動には表層地盤の影響を考慮しており、その精度は高い。
- 建屋剛性（ばらつき考慮）については、建屋剛性のばらつき要因として、設計基準強度と実強度の乖離、間仕切り壁の影響、床の柔性の影響等が考えられるが、女川の場合、強震動記録により、現状の建屋剛性が精度よく把握されている。
- 地震応答解析結果がおおむね弾性範囲の場合、今回採用している地震応答解析モデルは、東北地方太平洋沖地震の観測記録を精度良く表現できるモデルを採用しており、既工認時に比べて弾性範囲内の応答に対しては床応答スペクトルの精度が向上している。今回工認では、この床応答スペクトルをベースに±10%の拡幅スペクトルを作成するため、既工認と比べて保守的評価となっている。拡幅スペクトルで考慮される周期帯のイメージ図を第2図に示す。

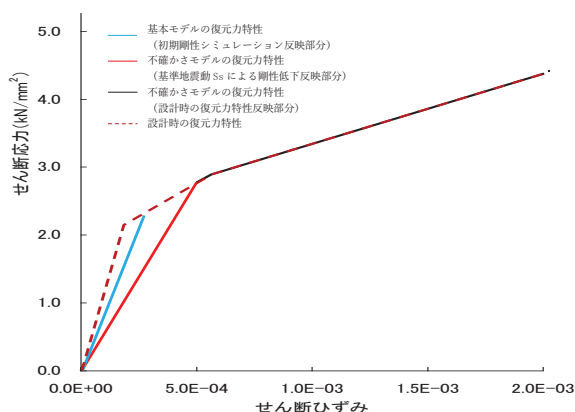


第2図 拡幅スペクトルで考慮される周期帯のイメージ図

- 地震応答解析結果が非線形に及ぶ場合には、初期剛性の低下要因の検討を踏まえ、基準地震動  $S_s$  に対する地震応答解析モデルのスケルトンカーブにおける評価基準値付近の非線形特性は既工認と同じ JEAG 式を採用している。したがって、基準地震動  $S_s$  によって強非線形状態となった場合の地震応答解析の精度は既工認モデルと同等である。

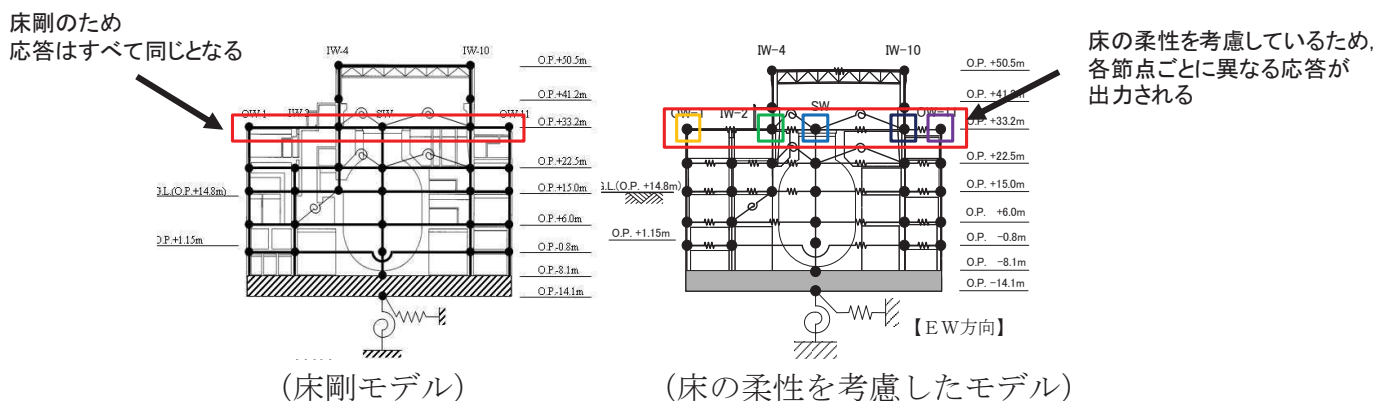
## 2. 女川2号炉の建屋地震応答解析モデルの扱い

今回工認で採用するスケルトンカーブを第3図に示す。



第3図 今回工認で採用するスケルトンカーブ

前項で説明した調査報告書では、拡幅率を検討する際に、一軸の質点系モデル（床剛モデル）を基にしているが、女川では多軸の質点系モデル（床の柔性考慮モデル）としている。女川2号炉の原子炉建屋質点系モデルを第4図に示す。

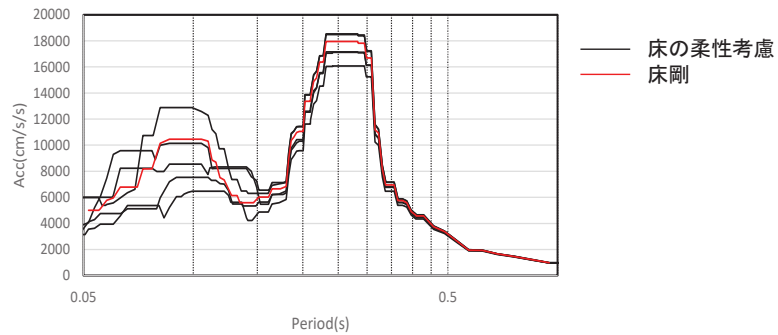


第4図 女川2号炉原子炉建屋質点系モデル

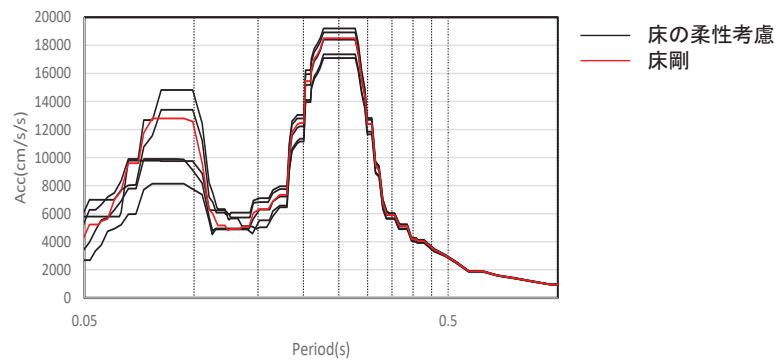
床剛モデルでは、同一フロアの床応答は質点によらず全て同じとなるが、床の柔性を考慮したモデルの場合は質点ごとに異なる。床の柔性を考慮したモデルにおいて、各フロアの床応答スペクトルとして全ての質点の拡幅スペクトルを包絡するスペクトルを採用した場合、床剛モデルの拡幅スペクトルに比べ保守的となる。女川2号炉の今回工認における床応答スペクトルには、基本的に全ての質点の拡幅スペクトルを包絡するスペクトルを採用する予定である。

また、拡幅スペクトルを検討する際の実強度を反映した建屋の地震応答解析モデルは、実強度もしくは実ヤング係数を実機から採取したコンクリートコアの強度試験結果等を踏まえて推定し、復元力特性は、初期剛性としては3.11地震等のシミュレーション解析で設定した剛性を採用し、それ以降はJEAG式に基づく実強度を考慮した復元力特性を参考に設定する。

床剛モデル及び床の柔性を考慮したモデルにおける拡張スペクトルの試算結果を第5図及び第6図に示す。



第5図 拡張スペクトルの比較（地上3階NS方向）



第6図 拡張スペクトルの比較（地上3階EW方向）

参考資料

軽水炉改良標準化耐震設計小委員会 昭和55年度耐震設計の標準化に関する調査報告書 別冊2（機器系）

## 鉄筋コンクリート躯体の乾燥収縮及び地震影響を踏まえた要求機能に対する各条文の機能維持の方針の整理

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
1	1 条	適用範囲	—	—	—
2	2 条	定義	—	—	—
3	3 条	設計基準対象施設の地盤	設計基準対象施設の地盤の支持性能 (耐震性)	原子炉建屋他基礎地盤	・初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルに基づき地盤安定解析用 FEM モデルを作成し, 地盤の安定性を確認する。
4	4 条	地震による損傷の防止	各設備の機能維持 (耐震性)	各設備	・建屋は, 初期剛性低下を考慮した地震応答解析モデルによる地震応答解析結果を用いて, 各設備の耐震設計・評価を実施する。 ・屋外重要土木構造物は, 地中構造物のため応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため, 初期剛性の影響は小さいと考えられる。
5	4 条	地震による損傷の防止	支持性能 (アンカ部の耐震性)	各設備のアンカ部	・建屋及び屋外重要土木構造物に設置される設備の支持機能 (アンカー部) は, JEAG4601 及び各種合成構造設計指針・同解説に基づき, 低減係数を考慮した設計を実施する。
6	4 条	地震による損傷の防止	設計基準対象施設の耐震性 (土木構造物)	土木構造物	・土木構造物は, 地中構造物のため応答は周囲の地盤の振動が支配的となるため, 初期剛性の影響は小さい。また, 土木構造物に作用する主たる荷重である土圧は, 剛性が小さいほど小さく評価されることから, 作用外力としては乾燥収縮と地震の重畳による剛性低下を見込まないほうが安全側の評価となっている。
7	5 条	津波による損傷の防止	設計基準対象施設の浸水防護 (土木構造物) (止水性)	海水ポンプ室	・通常時は, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから, 津波来襲前に止水性に影響するひび割れはない。 ・津波時の止水性は, 面内変形については, 耐震実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことから, 地震応答解析結果の変形により評価する。面外変形については, 地震応答解析の結果に対し, 顕著なひび割れが発生していないことを解析等により確認するか, 許容値に対し裕度を持たせることにより, 止水性に問題ないことを確認する。



No.	条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
8	5条	津波による損傷の防止	津波防護施設（止水性）	防潮堤，防潮壁	<ul style="list-style-type: none"> <li>・通常時は，乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから，津波来襲前に止水性に影響するひび割れはない。</li> <li>・津波時の止水性は，面内変形については，耐震実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことから，地震応答解析結果の変形により評価する。面外変形については，耐力に対する初期剛性の影響はないことから，許容値（耐力）以下とすることで，津波防護機能に影響を及ぼすような顕著なひび割れが発生しない設計とする。</li> </ul>
9	6条	外部からの衝撃による損傷の防止	建屋の構造健全性	原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> <li>・風（台風），竜巻，凍結，降水，積雪，落雷，火山の影響，生物学的事象，外部火災，有毒ガスの発生に対して，建屋の構造健全性（外殻としての機能，耐火性，止水性，気密性等）が維持されることを確認する。</li> <li>・機能維持にあたっては，乾燥収縮ひび割れについて，実験結果から，乾燥収縮ひび割れの多寡による地震によるひび割れの進展への影響は，ほとんどないことを確認していることを踏まえ，以下のとおり対応する。</li> </ul> <p>▶外殻としての機能</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・乾燥収縮は，建屋全体の剛性として力学的性質に影響を与えるが，乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり，実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を上回っていること，また，耐震実験により乾燥収縮が終局耐力に影響を与えないことを確認しており構造体として問題はない。</li> <li>・竜巻飛来物に対する躯体の衝突評価及び裏面剥離評価としては，コンクリートの設計基準強度を用いて，貫通限界厚さ及び裏面剥離限界厚さを評価するが，上記のことから外殻としての機能の評価への影響はない。</li> <li>・竜巻による各荷重に対する建屋全体の変形評価においては，初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルの荷重 - 変形関係を用いることから，乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。</li> </ul> <p>▶耐火性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・外部火災の耐火性の評価としては，最大の輻射熱の発生が考えられる原子炉建屋の表面温度をコンクリートの圧縮強度が維持される保守的な温度である 200℃以下（加熱温度と圧縮強度の関係を実験で確認した文献より設定）とすることで，外部事象防護対象施設の安全性を損なわな</li> </ul>

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
					<p>い設計としている。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>乾燥収縮は、建屋全体の剛性として力学的性質に影響を与えるが、乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり、実機からのコア抜きによりコンクリートの圧縮強度が設計基準強度を上回っていること、また、耐震実験により乾燥収縮が終局耐力に影響を与えないことを確認しており構造体として問題はないことから、外部火災上の耐火性に問題はない。</li> </ul> <p>▶ 止水性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>降水等に対する止水性については、アスファルト防水等により機能を確保している。アスファルト防水等は乾燥収縮や地震によるひび割れに追従する構造であるため問題はない。</li> </ul> <p>▶ 気密性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>通常時の気密性については、乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから問題はない。</li> <li>地震時の気密性について、面内変形に対しては、耐震壁のせん断ひずみがおおむね弾性状態にとどまることを基本とする。おおむね弾性状態を超える場合は、地震応答解析による耐震壁のせん断ひずみから算定した空気漏えい量が設置する換気設備の性能を下回ること必要な気密性を維持する設計とする。その場合、基準地震動 <math>S_s</math> による気密性を要求される鉄筋コンクリート造の施設に対し、許容限界を最大せん断ひずみ <math>2.0 \times 10^{-3}</math> とし、その適用性を確認する。地震応答解析においては、初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから、乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。</li> <li>また、面外変形に対しては、地震時に生じる応力に対して鉄筋が降伏しないことを確認（鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討）することで、気密性を維持する設計とする。地震応答解析においては、初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから、乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。</li> <li>空気漏洩量の算定においては、「原子炉建屋の弾塑性試験に関する報告書（(財) 原子力発電技術機構）※」にて提案されている評価式について</li> </ul>

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
					<p>て, 乾燥収縮ひび割れのある建屋における気密性能検査から十分な保守性を確認した上で適用する。</p> <p>※財団法人 原子力発電技術機構「耐震安全解析コード改良試験 原子炉建屋の弾塑性試験 試験結果の評価に関する報告書 平成 5 年度」</p>
10	7 条	発電用原子炉施設への人の不法な侵入等の防止	・直接的な要求なし (発電用原子炉施設への人の不法な侵入の防止, 不正な持ち込み防止, 不正アクセスの防止をするための設備)	—	—
11	8 条	火災による損傷の防止	耐火性 (内部火災) (150mm 以上の壁厚を有するコンクリート壁が 3 時間耐火性能をもつこと)	原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> <li>内部火災の耐火性の評価としては, 150mm 以上のコンクリート壁が 3 時間耐火性能をもつことを文献で確認している。</li> <li>この 3 時間耐火性能は遮熱性の観点での評価であり, 壁厚やコンクリートの種類に応じた遮熱特性係数により耐火性能時間を算定しているものである。乾燥収縮はコンクリート材料の一般的な性質であり, 躯体厚さや遮熱特性係数へ影響を及ぼすものではないことから, 内部火災の耐火性に影響を与えるものではない。</li> </ul>
12	9 条	溢水による損傷の防止等	止水性 (循環水管等が破損し, 溢水した海水が安全施設の機能へ影響しないこと) (土木構造物)	海水ポンプ室	<ul style="list-style-type: none"> <li>通常時は, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから, 溢水により安全施設の機能へ影響するひび割れはない。</li> <li>溢水時は, 部材に水圧が作用し面外変形が生じることから, 顕著なひび割れが発生していないことを解析等により確認するか, 許容値に対し余裕を持たせることにより, 止水性に問題ないことを確認し, 安全施設の機能へ影響がないことを確認する。</li> </ul>
13	9 条	溢水による損傷の防止等	止水性 (放射性物質を含む液体があふれ出た場合において, 当該液体が管理区域外へ漏えいしないこと)	原子炉建屋等	<ul style="list-style-type: none"> <li>通常時は, 乾燥収縮ひび割れ等を考慮した保守管理をすることから, 溢水により安全施設の機能へ影響するひび割れはない。</li> <li>地震時の止水性については, 実験より乾燥収縮が地震時のひび割れ発生に大きな影響を与えないことを確認していることから, 基準地震動 Ss に対して応答ひずみが大きく評価される不確かさケース (基本ケースよりも更に初期剛性低下を考慮したモデル) によるせん断ひずみ度から残留ひび割れ幅を算定し, 0.2 mm 未満であることを確認することにより止水性</li> </ul>

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
					<p>を維持する。</p> <p><b>【乾燥収縮ひび割れを踏まえた止水性を確保するための保守管理について】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>乾燥収縮によるひび割れの補修に際しては、ひび割れ幅 0.2mm 以上のものを補修することで止水性を十分に確保できると考えられるため、内部溢水評価における最終貯留区画については、現在、乾燥収縮は収束しており、乾燥収縮ひび割れが毎年増大していく状態ではないことから、点検・補修を定期的実施していくこととし、以下の通り保守管理する方針とする。 <ul style="list-style-type: none"> <li>(1) ひび割れ幅 0.05mm を超えるもの～0.2mm 未満のひび割れについては、ひび割れ調査を実施し、乾燥ひび割れの進展状況を観察することとし、ひび割れ幅 0.2mm 以上のひび割れについては、対象となるひび割れすべての調査図を作成し管理する</li> <li>(2) ひび割れ幅 0.2mm 以上となったひび割れは、すべて補修を実施する</li> </ul> </li> <li>補修方法については、0.3mm 未満のひび割れ幅ではエポキシ樹脂等の注入は困難であるため、被覆材により表面を覆う工法（被覆工法）とする。</li> <li>なお、最終貯留区画に集水するまでの経路上の止水性については、階段室、床ドレン、開口部などを通じて下階へ溢水伝播され長時間貯留されることはなく、内部溢水評価への影響はないことから、ひび割れ点検及び補修等の維持管理については社内マニュアルに基づき適切に実施する。</li> </ul>
14	9 条	溢水による損傷の防止等	止水性 (想定している溢水経路以外の区画に漏れ出すことがないこと)	各溢水経路最終貯留区画	[No. 13 (9 条) 止水性と同一]
15	10 条	誤操作の防止	・直接的な要求なし (誤操作を防止するための措置・操作の容易性)	—	—
16	11 条	安全避難通路等	・直接的な要求なし (避難通路・作業用照明の設置)	—	—
17	12 条	安全施設	・直接的な要求なし	—	—

No.	条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
18	13条	運転時の異常な過渡変化及び設計基準事故の拡大の防止	・直接的な要求なし	—	—
19	14条	全交流動力電源喪失対策設備	・直接的な要求なし (SBO時の電源確保)	—	—
20	15条	炉心等	・直接的な要求なし	—	—
21	16条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	・想定外の重量物落下が生じないこと	原子炉建屋屋根、壁	<ul style="list-style-type: none"> <li>・屋根スラブは、鋼板（デッキプレート）の上に鉄筋コンクリート造の屋根を設けた構造であり、地震により剥落しない設計であることから影響はない。</li> <li>・3階床面より上部を構成する壁については、鉄筋コンクリート造の耐震壁であり、3階床面より下部の耐震壁とあわせて地震により落下しないことを確認する。</li> <li>・地震応答解析においては、初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから、乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。</li> </ul>
22	17条	原子炉冷却材圧力バウンダリ	・直接的な要求なし	—	—
23	18条	蒸気タービン	・直接的な要求なし	—	—
24	19条	非常用炉心冷却設備	・直接的な要求なし	—	—
25	20条	一次冷却材の減少分を補給する設備	・直接的な要求なし	—	—
26	21条	残留熱を除去することができる設備	・直接的な要求なし	—	—
27	22条	最終ヒートシンクへ熱を輸送することができる設備	・直接的な要求なし	—	—
28	23条	計測制御系統施設	・直接的な要求なし (設計基準事故時の計測・記録)	—	—

No.	条文	項目	要求機能	該当部 (例)	影響検討, 機能維持評価の方針
29	24 条	安全保護回路	・直接的な要求なし (安全保護回路の設置・不正アクセス対策)	—	—
30	25 条	反応度制御系統及び原子炉制御系統	・直接的な要求なし	—	—
31	26 条	原子炉制御室等	居住性確保 ・気密性 (漏えい率 (インリーク量) が規定値を満足すること) ・遮蔽性	原子炉制御室	<p>・乾燥収縮ひび割れについては, 実験結果から, 乾燥収縮ひび割れの多寡による地震によるひび割れの進展への影響は, ほとんどないことを確認していることを踏まえ, 居住性が確保されていることについて, 気密性・遮蔽性の観点から以下のとおり対応する。</p> <p>▶気密性 [No. 9 (6 条) 気密性と同じ] ※空気漏えい量の算定方法は 6 条と同じ</p> <p>▶遮蔽性</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・設計基準対象施設の耐震重要度分類及び重大事故等対処施設の施設区分に応じた地震動に対して構造強度を確保し, 遮蔽体の形状及び厚さを確保することで, 地震後における残留ひずみを小さくし, ひび割れがほぼ閉鎖し, 貫通するひび割れが直線的に残留しないこととすることで, 遮蔽性を維持する設計とする。</li> <li>・地震応答解析においては, 初期剛性低下を考慮した建屋地震応答解析モデルを用いることから, 乾燥収縮等の影響を考慮した評価としている。</li> </ul>
32	27 条	放射性廃棄物の処理施設	・直接的な要求なし	—	—
33	28 条	放射性廃棄物の貯蔵施設	・直接的な要求なし	—	—
34	29 条	工場等周辺における直接ガンマ線等からの防護	・遮蔽性	原子炉建屋等	[No. 31 (26 条) 遮蔽性と同じ]

No.	条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
35	30条	放射線からの放射線業務従事者の防護	<ul style="list-style-type: none"> <li>・遮蔽性</li> <li>・気密性</li> <li>・止水性</li> </ul>	原子炉建屋等	[No. 31 (26条) 遮蔽性と同じ] [No. 9 (6条) 気密性と同じ] [No. 13 (9条) 止水性と同じ]
36	31条	監視設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直接的な要求なし（MPの非常用電源への接続，伝送の多様性）</li> </ul>	—	—
37	32条	原子炉格納施設	<ul style="list-style-type: none"> <li>・気密性</li> </ul>	原子炉建屋原子炉棟	[No. 9 (6条) 気密性と同じ] ※空気漏えい量の算定方法は6条と同じ
38	33条	保安電源設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直接的な要求なし（DG・蓄電池多重性・独立性，外部電源設備設置）</li> </ul>	—	—
39	34条	緊急時対策所	居住性確保 <ul style="list-style-type: none"> <li>・気密性（漏えい率（インリーク量）が規定値を満足すること）</li> <li>・遮蔽性</li> </ul>	緊急時対策所	[No. 31 (26条) と同じ] ※空気漏えい量の算定方法は26条と同じ <ul style="list-style-type: none"> <li>・新設建屋の地震応答解析においては，設計剛性（設計基準強度）を用いた地震応答解析モデルを基本とするが，念のため，耐震壁の厚さが厚い原子炉建屋のオペフロ下部の3.11地震に対する剛性低下量（0.8倍程度）を不確かさケースとして考慮する。</li> <li>・なお，免震構造から耐震構造に変更しており，基準地震動Ssに対して短期許容応力度相当の設計としている。</li> </ul>
40	35条	通信連絡設備	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直接的な要求なし</li> </ul>	—	—
41	36条	補助ボイラー	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直接的な要求なし</li> </ul>	—	—
42	37条	重大事故等の拡大防止	<ul style="list-style-type: none"> <li>・直接的な要求なし</li> </ul>	—	—
43	38条	重大事故等対処施設の地盤	重大事故等対処施設の地盤の支持性能（耐震性）	緊急時対策建屋	<ul style="list-style-type: none"> <li>・緊急時対策建屋の質点系SRモデルにより剛性低下を考慮した場合，建屋底面のせん断力に大きな差がなく，地盤に作用する力に影響がないことから，地盤の安定性には影響がないことを確認する。</li> </ul>
44	39条	SA設備の耐震設計	各設備の機能維持（耐震性）	各設備	[No. 4 (4条) と同じ]
45	39条	SA設備の耐震設計	支持性能（アンカ部の耐震性）	各設備のアンカ部	[No. 5 (4条) と同じ]

No.	条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
46	39条	地震による損傷の防止	重大事故等対処対象施設の耐震性（土木構造物）	土木構造物	[No. 6（4条）と同じ]
47	40条	津波による損傷の防止	重大事故等対処施設の浸水防護（土木構造物）（止水性）	海水ポンプ室	[No. 7（5条）と同じ]
48	41条	内部火災	耐火性（内部火災） （150mm以上の壁厚を有するコンクリート壁が3時間耐火性能をもつこと）	原子炉建屋等	[No. 11（8条）耐火性と同じ]
49	42条	特定重大事故等対処施設	原子炉建屋と同様の各要求機能（耐震性，止水性等）に対する機能維持	各設備	・原子炉建屋と同様に各機能に対して各設備の評価を実施する。
50	43条	重大事故等対処設備	・直接的な要求なし	—	—
51	44条	緊急停止失敗時に発電用原子炉を未臨界にするための設備	・直接的な要求なし	—	—
52	45条	原子炉冷却材圧力バウンダリ高圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	・直接的な要求なし	—	—
53	46条	原子炉冷却材圧力バウンダリを減圧するための設備	・直接的な要求なし	—	—



No.	条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
54	47条	原子炉冷却材圧力バウンダリ低圧時に発電用原子炉を冷却するための設備	・直接的な要求なし	—	—
55	48条	最終ヒートシンクへ熱を輸送するための設備	・直接的な要求なし	—	—
56	49条	原子炉格納容器内の冷却等のための設備	・直接的な要求なし	—	—
57	50条	原子炉格納容器の過圧破損を防止するための設備	・直接的な要求なし	—	—
58	51条	原子炉格納容器下部の溶融炉心を冷却するための設備	・直接的な要求なし	—	—
59	52条	水素爆発による原子炉格納容器の破損を防止するための設備	・直接的な要求なし	—	—
60	53条	水素爆発による原子炉建屋等の損傷を防止するための設備	・直接的な要求なし	—	—
61	54条	使用済燃料貯蔵槽の冷却等のための設備	・直接的な要求なし	—	—
62	55条	工場等外への放射性物質の拡散を抑制するための設備	・直接的な要求なし	—	—

No.	条文	項目	要求機能	該当部（例）	影響検討，機能維持評価の方針
63	56 条	重大事故等の収束に必要となる水の供給設備	・直接的な要求なし	—	—
64	57 条	電源設備	・直接的な要求なし	—	—
65	58 条	計装設備	・直接的な要求なし	—	—
66	59 条	原子炉制御室	居住性確保 ・気密性（漏えい率（インリーク量）が規定値を満足すること） ・遮蔽性	原子炉制御室	[No. 31（26 条）と同じ]
67	60 条	監視測定設備	・直接的な要求なし	—	—
68	61 条	緊急時対策所	居住性確保 ・気密性（漏えい率（インリーク量）が規定値を満足すること） ・遮蔽性	緊急時対策所	[No. 39（34 条）と同じ]
69	62 条	通信連絡を行うために必要な設備	・直接的な要求なし	—	—

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
- 参考資料 6 二次格納施設のバウンダリを形成するオペフロ上部の耐震壁に係る気密性評価の整理

注：水平ブレースの扱いについては、16条の適合性に係る指摘を踏まえて検討中。

## 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。

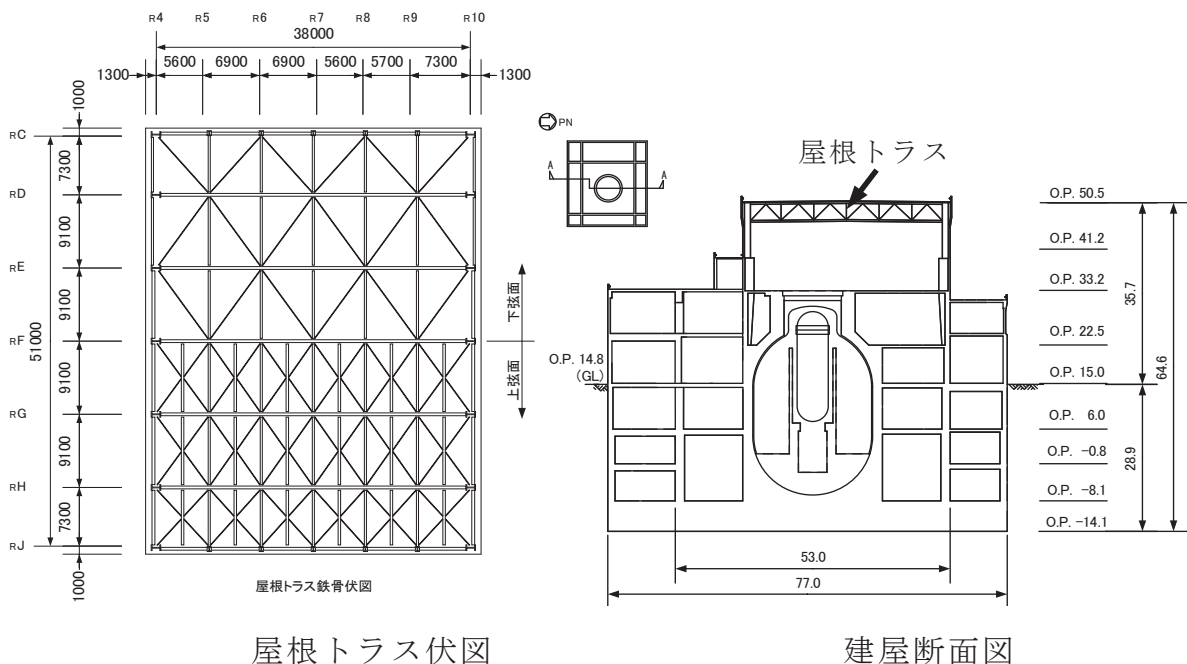
本資料では、屋根トラスが二次格納施設のバウンダリを構成する屋根スラブの間接支持構造物であることから、屋根トラスの3次元弾塑性解析の妥当性・適用性について確認し、屋根スラブの二次格納施設としての機能維持評価について説明する。

## 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、 $R_F$ 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

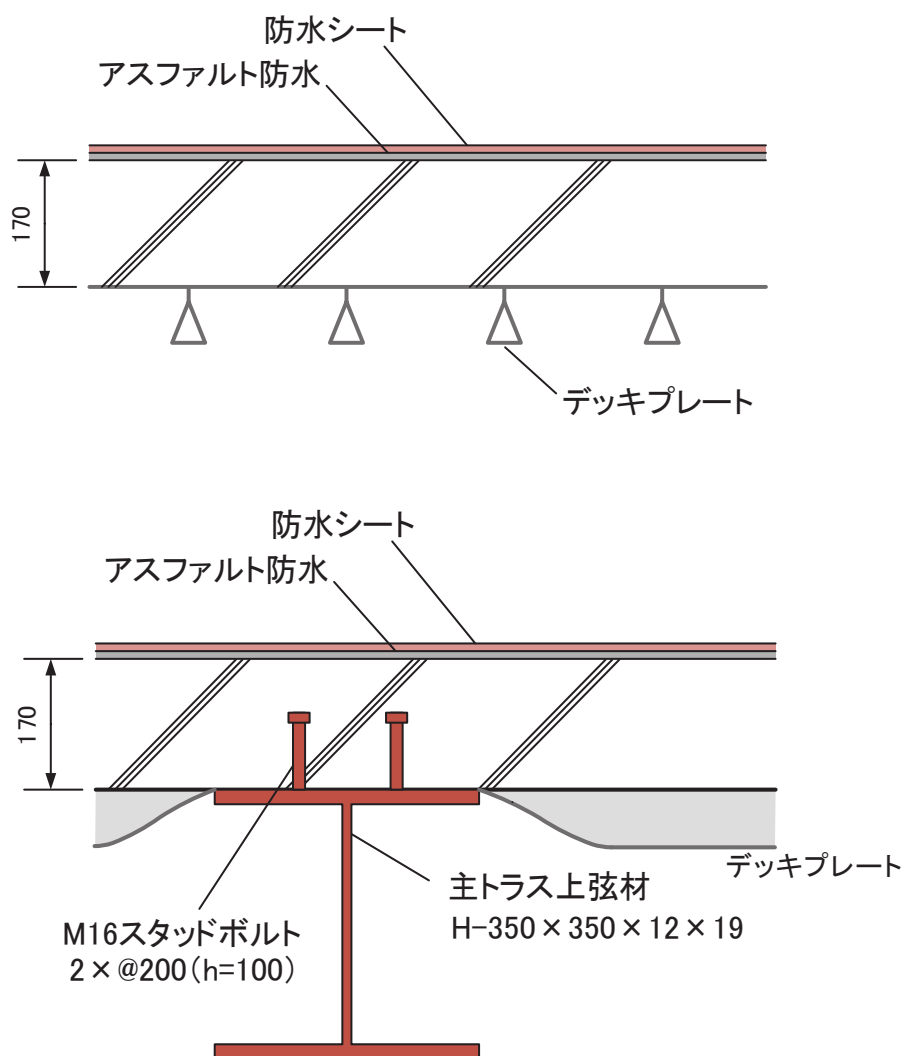
第 2.1-2 表 屋根トラスの各部材の機能

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

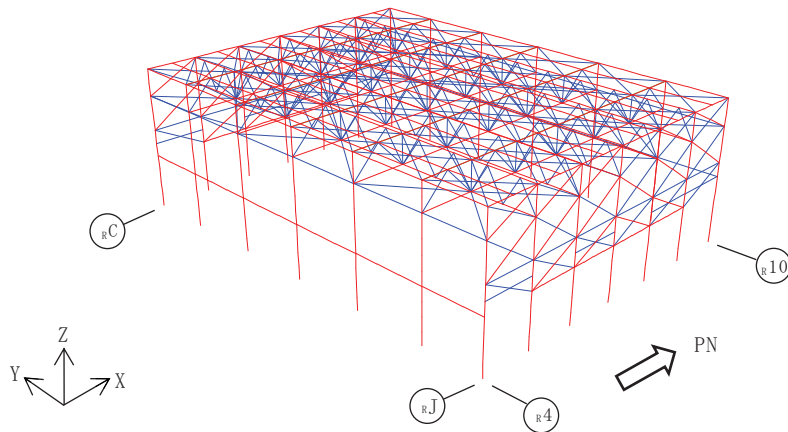
原子炉建屋屋根トラスは、鉛直方向の地震動の影響を受けやすいと考えられるため、水平方向と鉛直方向地震力の同時入力による評価を行うために3次元モデルによる地震応答解析を採用する。

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。

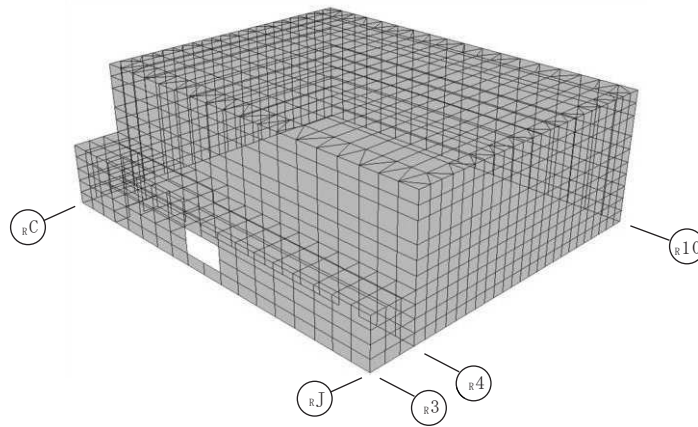
屋根トラス部は、主トラス（上下弦材、斜材、束材）、サブトラス（上下弦材、斜材等）、母屋、**水平ブレース（上下弦面）**、外周鉄骨梁をモデル化する。各鉄骨部材は軸、曲げ変形を考慮した梁要素（トラスの上下弦材）と軸変形のみを考慮したトラス要素（**屋根面水平ブレース**、トラスの斜材及び束材等）としてモデル化する。また、耐震壁及び外周梁は各々シェル要素及び軸、曲げ変形を考慮した梁要素としてモデル化し、耐震壁の開口部についても考慮する。なお、柱脚の条件は固定とする。また、解析に用いる材料の物性値を第2.3-1表に示す。

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

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	$2.05 \times 10^5$	0.3	0.02
躯体	コンクリート	$2.51 \times 10^4$ *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

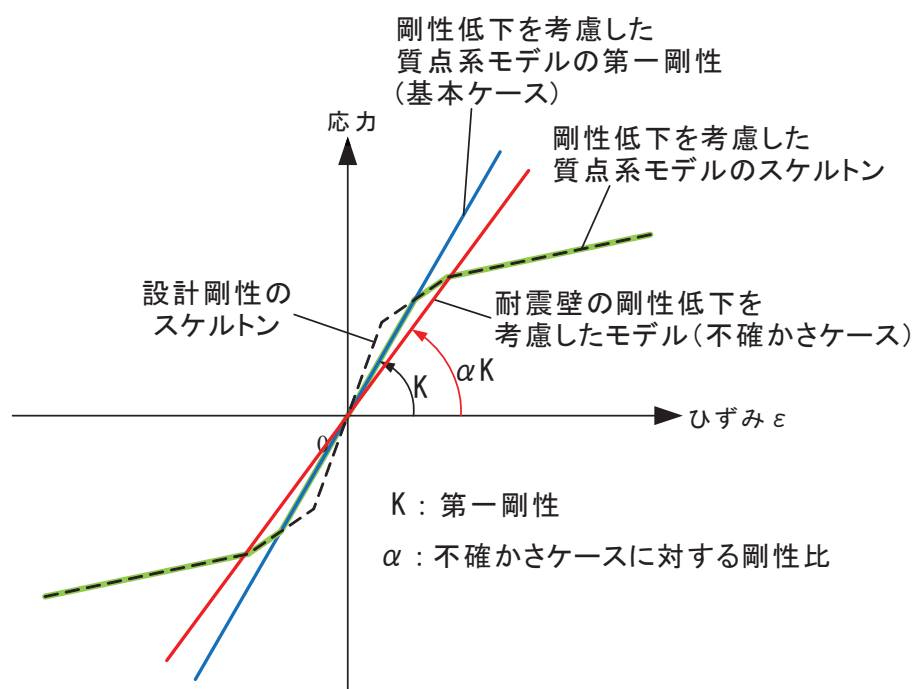
基準地震動  $S_s$  に対する評価を実施する際、トラス材としてモデル化した部材の一部については塑性域に入ると考えられるため、部材座屈後の挙動を模擬できる手法（修正若林モデル）に基づく弾塑性特性を考慮している。考慮した弾塑性特性の詳細については、「2.5 弾塑性解析の採用について」で示すこととする。

## (3) 耐震壁，屋根スラブの剛性補正

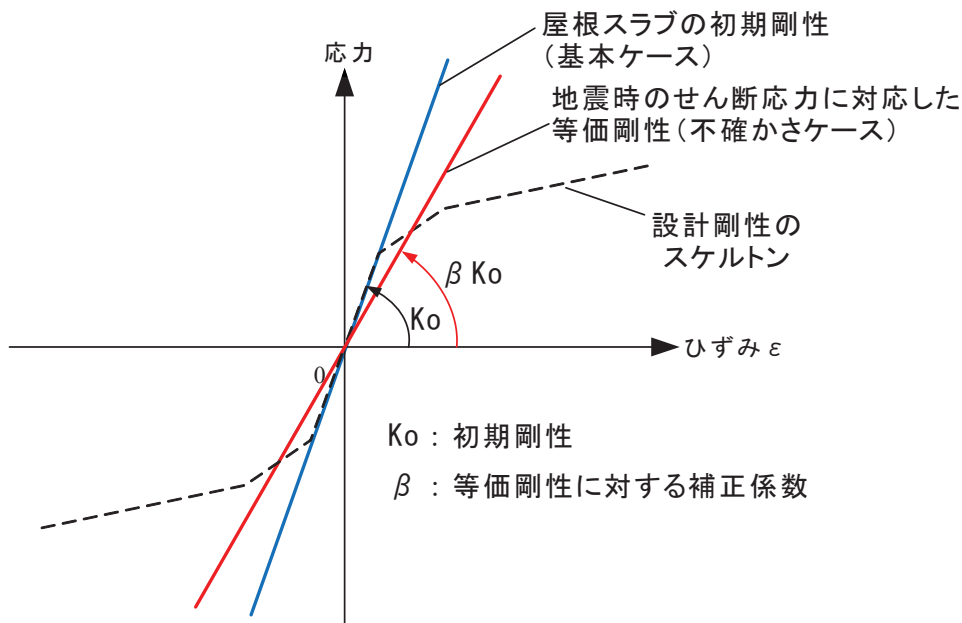
耐震壁及びスラブのシェル要素については、解析コード上の制限により弾性モデルとなっている。

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 (O. 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を確認のうえ機能維持評価を実施する。

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。

また、屋根トラスの解析モデルのうち、二次格納施設のバウンダリを構成する耐震壁について、気密性の維持を確認する。

第 2.3-2 表に屋根トラスの解析モデルのうち二次格納施設のバウンダリを構成する屋根スラブ、耐震壁、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、クレーン階より上部の耐震壁にも、建屋内部側にデッキプレートが存在する。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、耐震壁 ※1	気密性	(面内) おおむね弾性状態であることを算定される応力度より確認する。おおむね弾性状態を超える場合は、面内せん断ひずみの許容値である最大せん断ひずみ ( $2.0 \times 10^{-3}$ ) 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。 (面外) 面外曲げに対して、鉄筋が降伏しないこと※2を確認する※3。(鉄筋が降伏する場合は別途詳細検討)
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 耐震壁の気密性については質点系モデルによる算定結果を採用するが、屋根トラスのモデルによる応答性状と比較した上で、必要に応じオペフロ上部の耐震壁のせん断ひずみ等の評価に反映する。

※2 鋼材の基準強度 1.1 倍を超えないこと

※3 屋根スラブについては、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する。

## 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， <b>水平ブレース</b> 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 <sup>2</sup> ) ・コンクリートのヤング係数 $E=2.7 \times 10^6$ (t/m <sup>2</sup> ) ・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 <sup>2</sup> ) ・コンクリートのヤング係数 $E=2.51 \times 10^4$ (N/mm <sup>2</sup> ) ※ <sup>1</sup> ・コンクリートのポアソン比 $\nu=0.2$ ※ <sup>2</sup>
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※ <sup>3</sup> 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でき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。



## 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<sup>[1]</sup>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<sup>[2]</sup>を基本としているが、谷口らの研究<sup>[1]</sup>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。

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

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

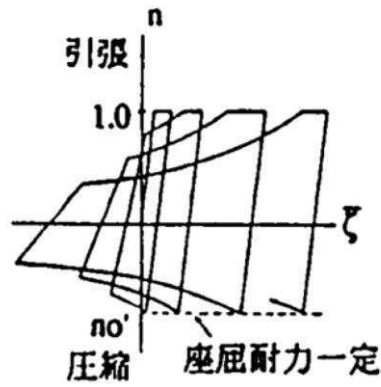
$$n_0: \text{無次元化初期座屈耐力} \quad \bar{\zeta}: \text{無次元化圧縮側累積塑性歪}$$

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

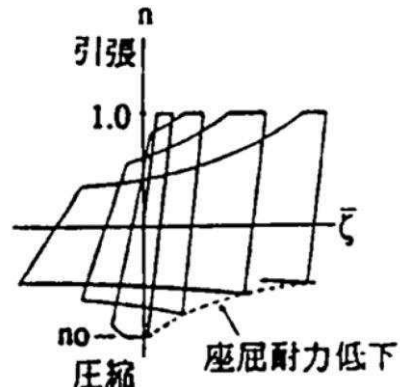
修正若林モデルの弾塑性特性を第 2.5-1 図に示す。

谷口らの研究<sup>[1]</sup>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。

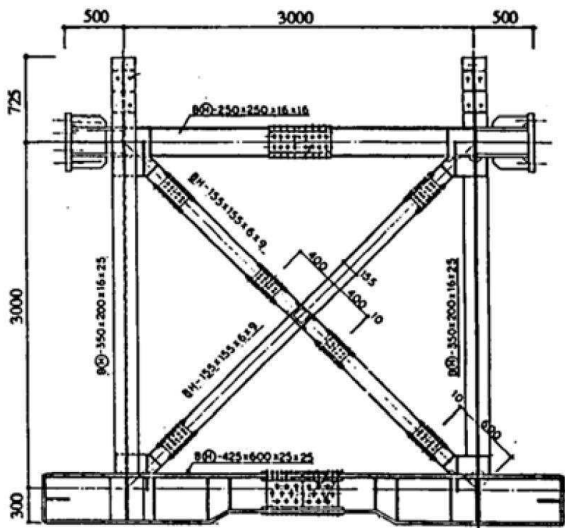


(参考) 若林モデル

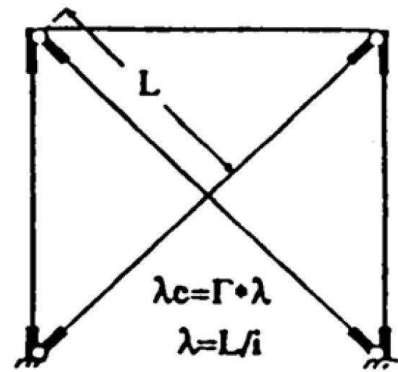


修正モデル

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)

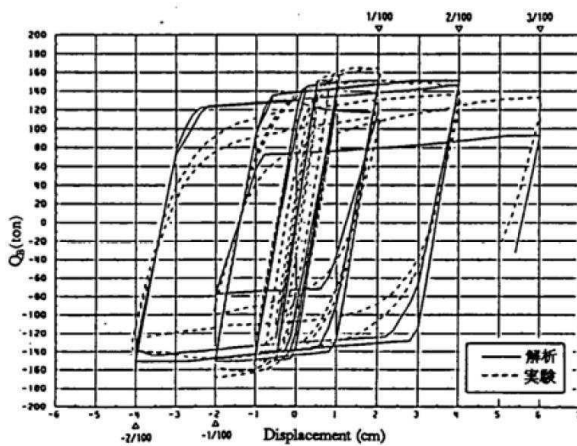


第 2.5-2 図 試験体の概要 ([1]より引用)

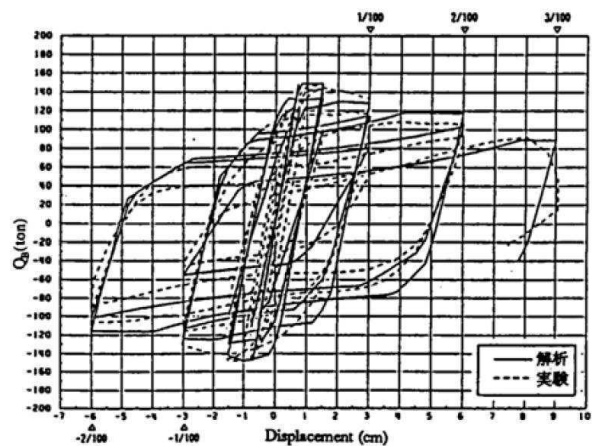


Γ; 等価座屈長さ係数  
 $\lambda_c$ ; 有効細長比  
 $\lambda$ ; 細長比(芯々)

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

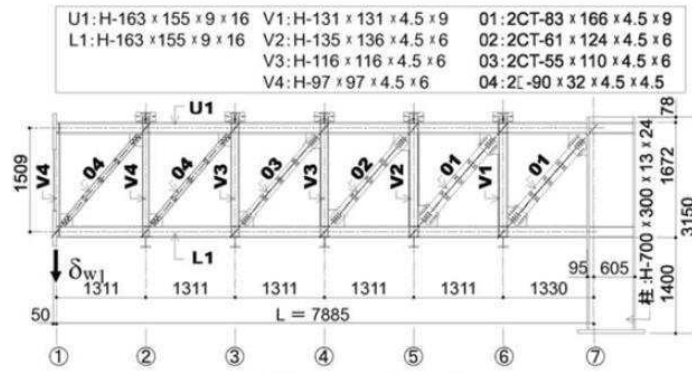
谷口らの研究<sup>[1]</sup>は、X型ブレース架構を対象としたものであったが、原子炉建屋屋根トラスに対して本弾塑性特性を適用した検討例として、鈴木らの研究<sup>[3]</sup>がある。

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。

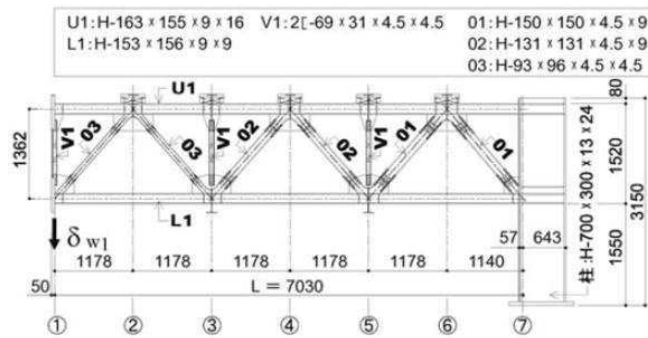
鈴木らの研究<sup>[3]</sup>では、終局耐力を検討するに当たり原子炉建屋屋根トラスを模擬した縮小試験体を製作し、トラスの崩壊挙動に与える影響が大きい鉛直動的荷重を模擬した静的載荷試験により、その弾塑性挙動を確認している。なお、試験に当たっては、原子力発電所鉄骨屋根トラスがプラット形とワーレン形の2種類に分類されることを踏まえ、この2種類のトラス形式についての試験体を製作している。原子炉建屋屋根トラスはこのうち、ワーレン形に該当する。試験体の概要を第2.5-5図に示す。

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。

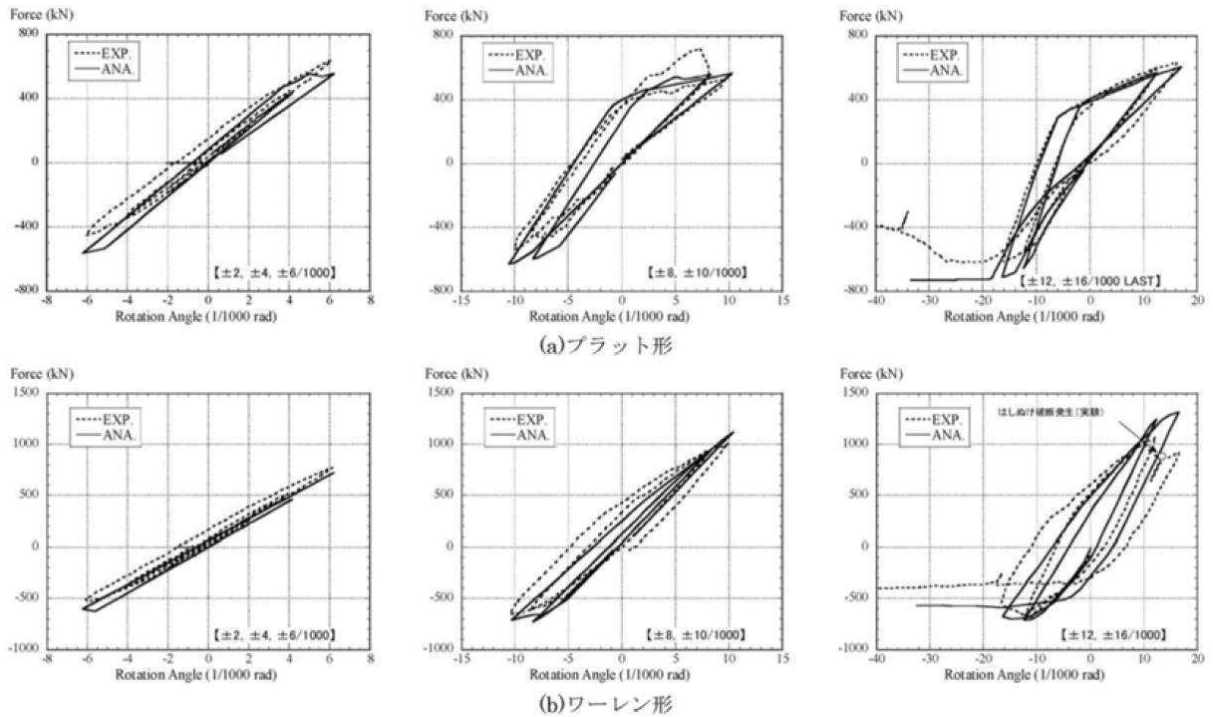


(a) プラット形試験体



(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)



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)<sup>[4]</sup>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 <sup>※1</sup> （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）	
	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 <sup>※1</sup> （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）	
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 <sup>※1</sup> （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られる。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。

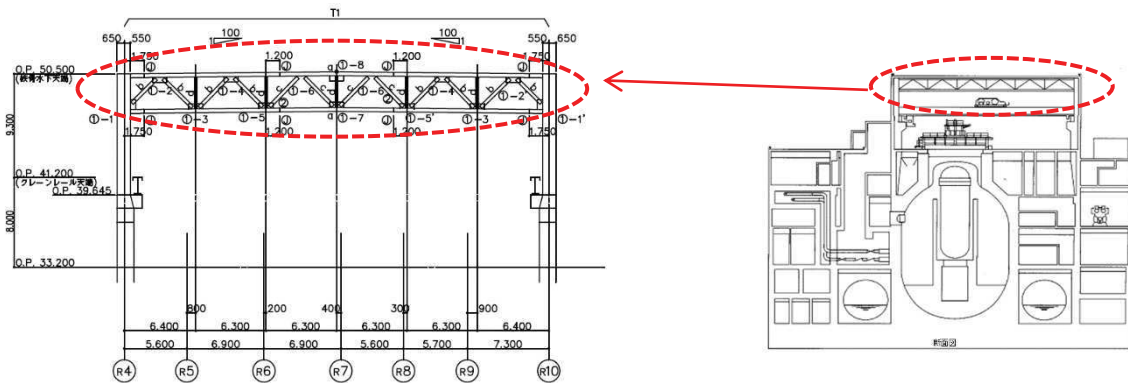
【参考文献】

- [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

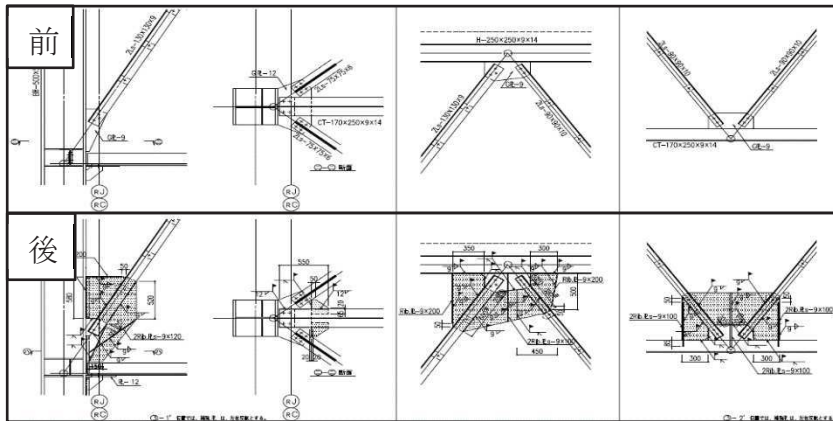
原子炉建屋屋根トラスの特徴

1. 原子炉建屋屋根トラスの特徴

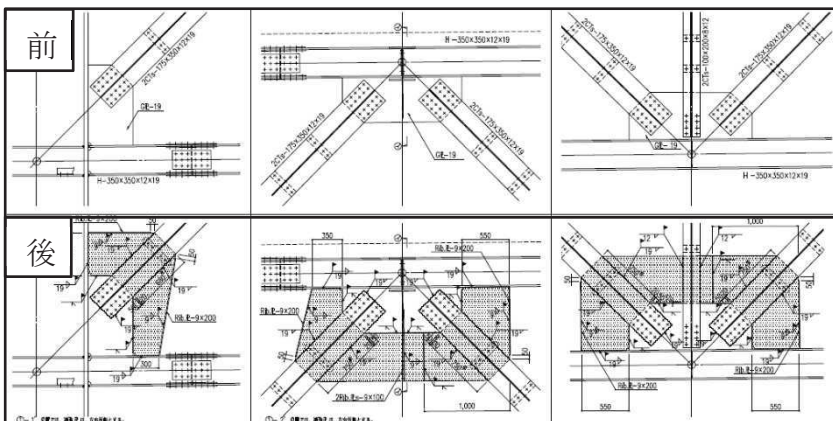
原子炉建屋屋根トラスについては、3. 11 地震後に接合部の補強を実施している。補強状況を参考 1-1 図に示す。



断面図



サブトラス：補強前後



主トラス：補強前後



屋根トラス接合部の補強状況写真

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

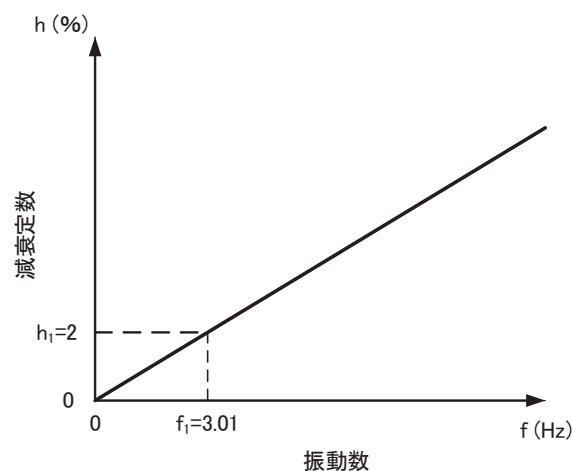
今回工認では、原子炉建屋屋根トラスの地震応答解析における減衰評価について、鉄骨造の構造物に対して一般的に適用している剛性比例型としている。

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	NS方向1次
102	8.34	0.120	0.759	-7.982	0.320	EW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

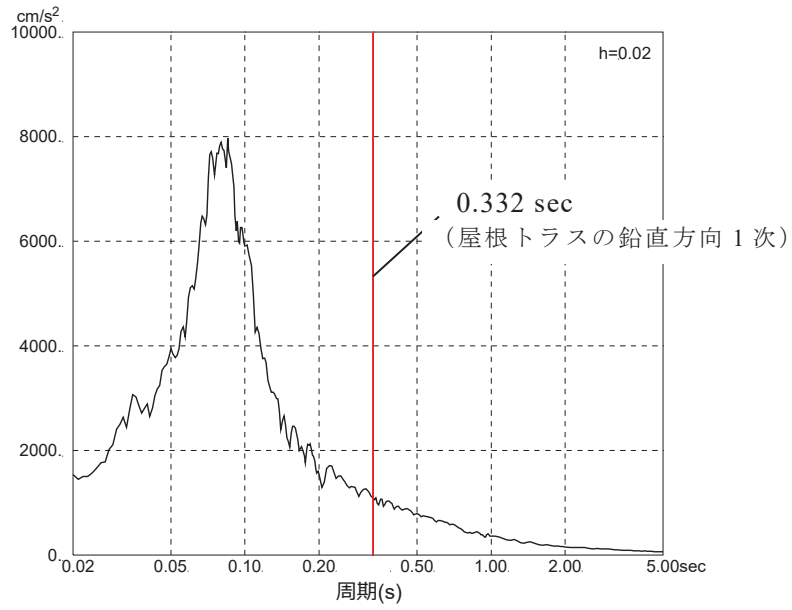
参考 3-1 表に示すとおり屋根トラスの水平方向の 1 次固有振動数（固有周期）は、NS 方向：6.80Hz（0.147sec）、EW 方向：8.34Hz（0.120sec）であり、鉛直方向の 1 次固有振動数は、3.01Hz（0.332sec）である。剛性比例型減衰の採用にあたっては、上記の振動数のいずれかの振動数を基準に設定することとする。

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。

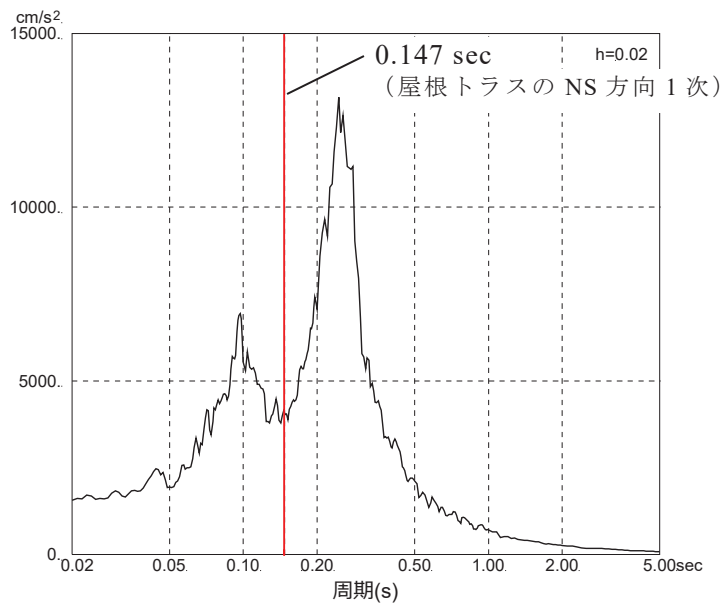
また、参考として屋根トラスの各方向の固有周期と解析モデルへの入力地震動の加速度応答スペクトルの関係を参考 3-2 図に示す。入力地震動の応答スペクトルの卓越周期は原子炉建屋の地盤-建屋連成系の各方向の 1 次周期におおむね対応しており、いずれの方向についても赤線で示す屋根トラスの 1 次固有周期とは離れた周期となっている。

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。

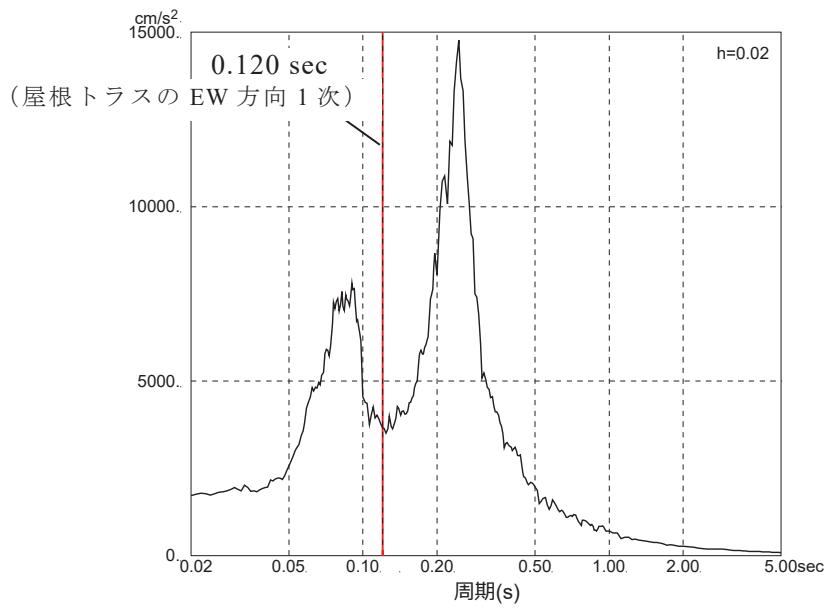
なお、詳細設計においては、必要に応じて剛性比例型以外の減衰（例えば鉛直 1 次と 2 次で規定したレイリー減衰）を用いて、高次モードの影響を確認することとする。



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



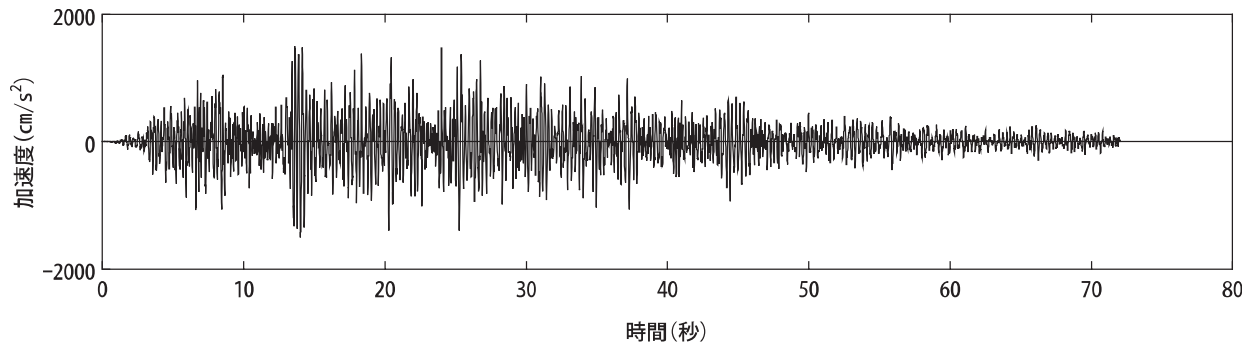
参考 3-2 図 (c) 屋根トラスの固有周期と  
 入力地震動の加速度応答スペクトルの関係  
 EW 方向



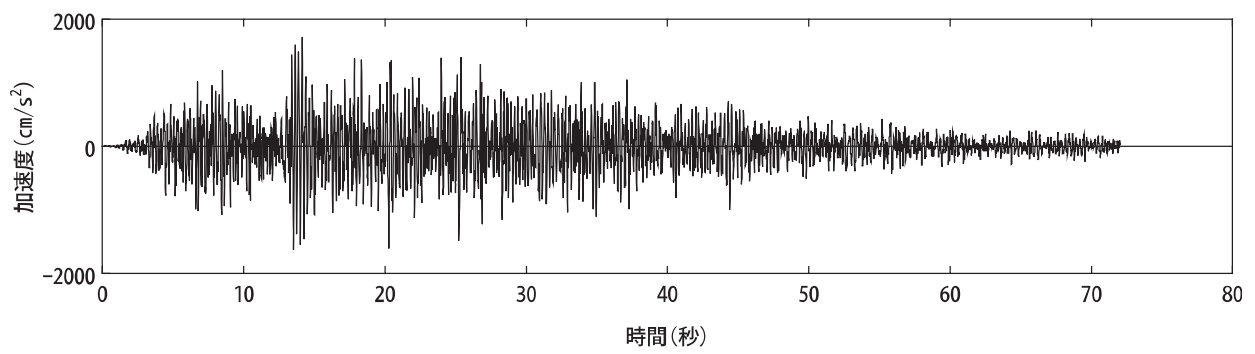
## 屋根トラスの入力地震動及び固有振動数・固有モードについて

## 1. 屋根トラスの入力地震動

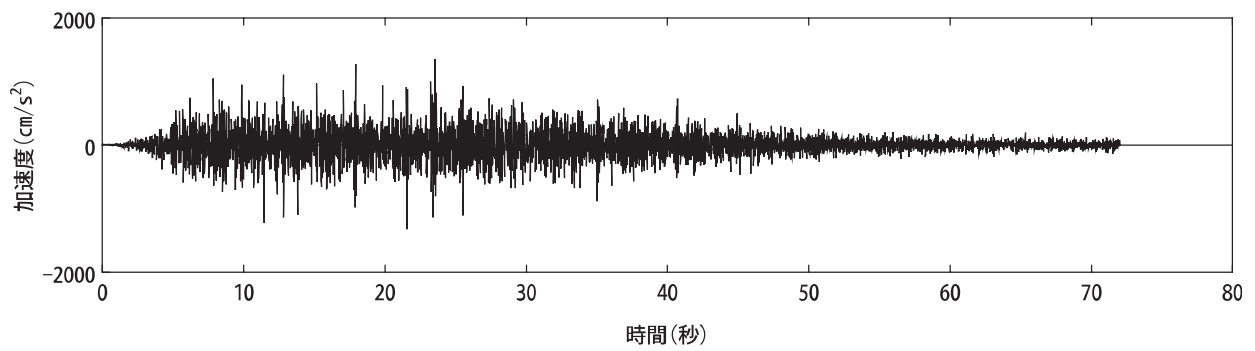
屋根トラスへの入力として用いている入力地震動（原子炉建屋の質点系モデルによる地震応答解析結果から得られる燃料取替床レベル（O.P. 33.2m）の応答結果）の時刻歴波形（暫定応答）について，Ss-D2 を例として参考 4-1 図に示す。地震応答解析を実施する際には，水平，鉛直成分は加速度時刻歴波形を，回転成分は回転角加速度時刻歴波形を入力している。



(a) 南北方向 (水平)

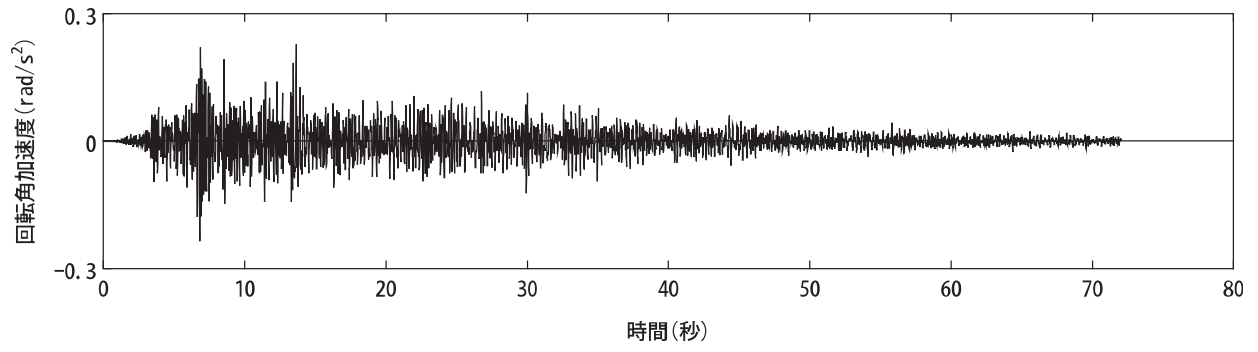


(b) 東西方向 (水平)

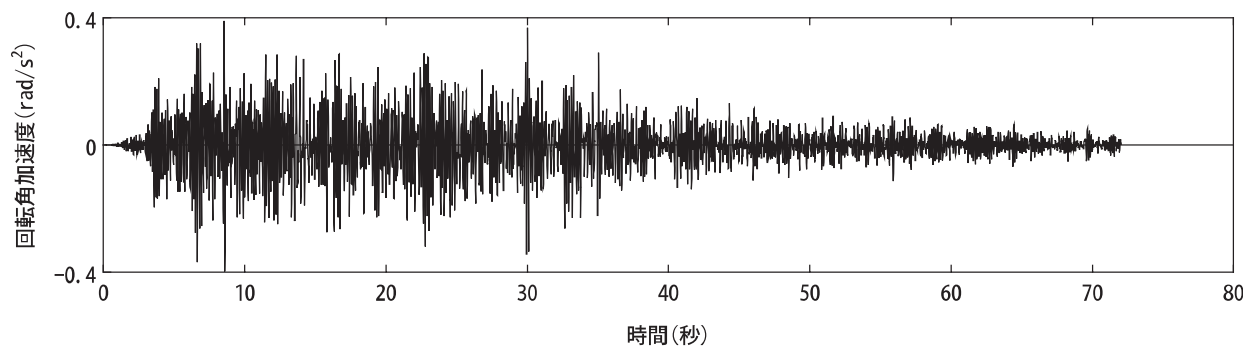


(c) 鉛直方向

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)

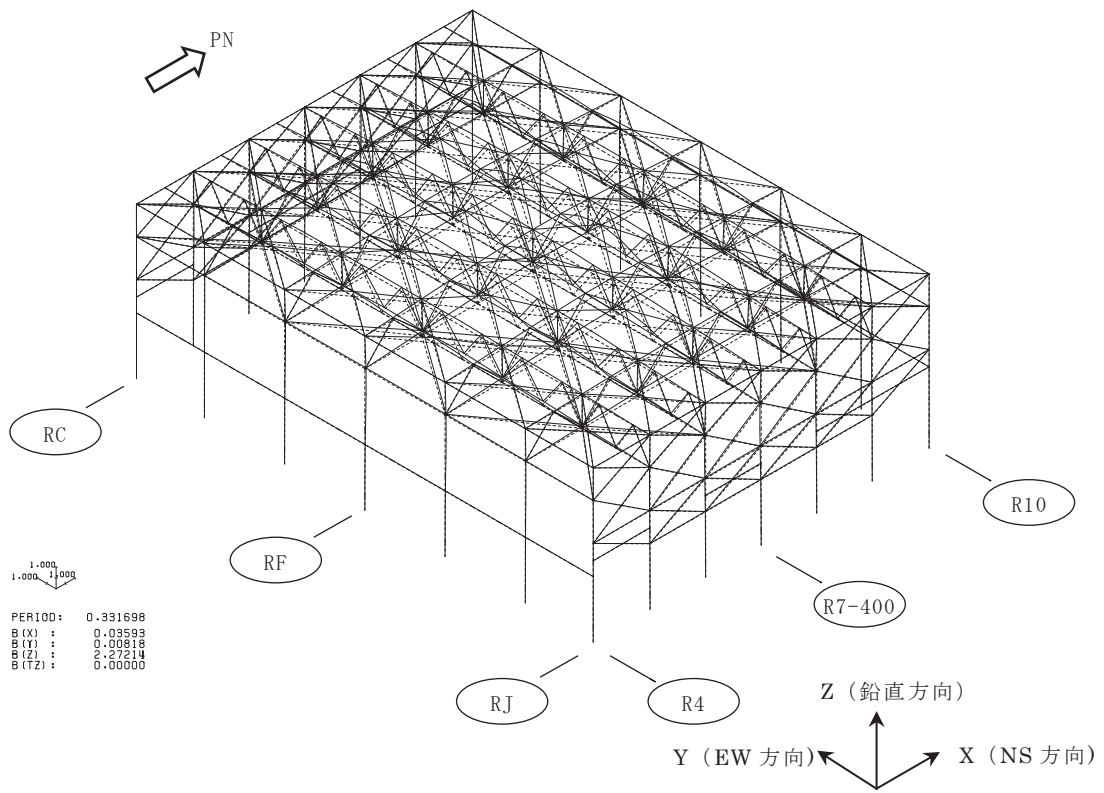
## 2. 屋根トラスの固有値解析結果

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。

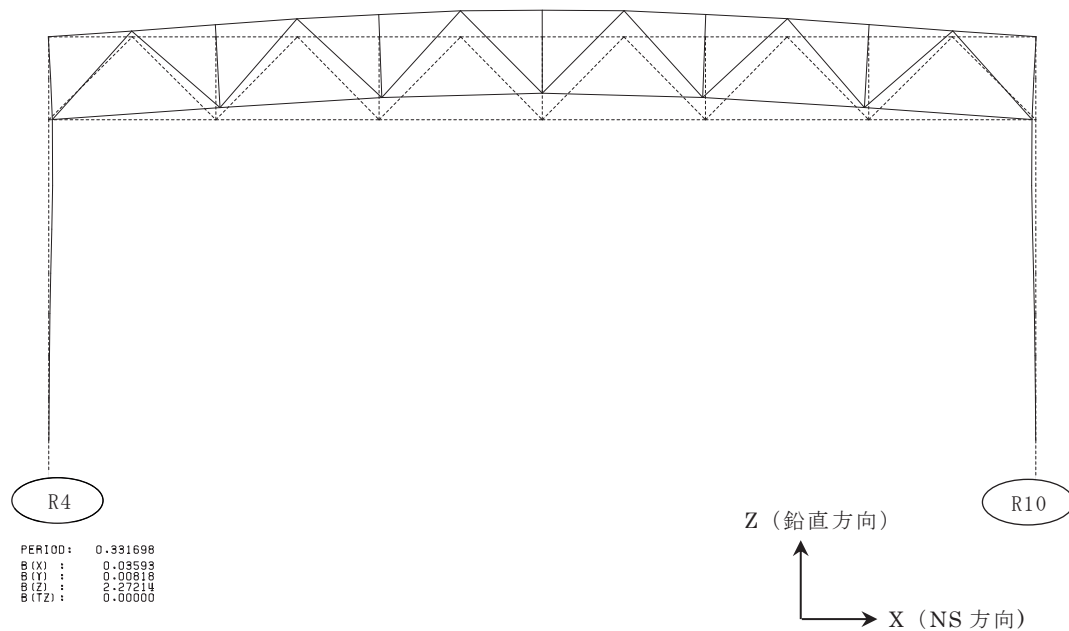
1 次固有振動数は鉛直方向で 3.01Hz, 水平方向で 6.80Hz (NS 方向), 8.34Hz (EW 方向) となる。

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	NS方向1次
102	8.34	0.120	0.759	-7.982	0.320	EW方向1次

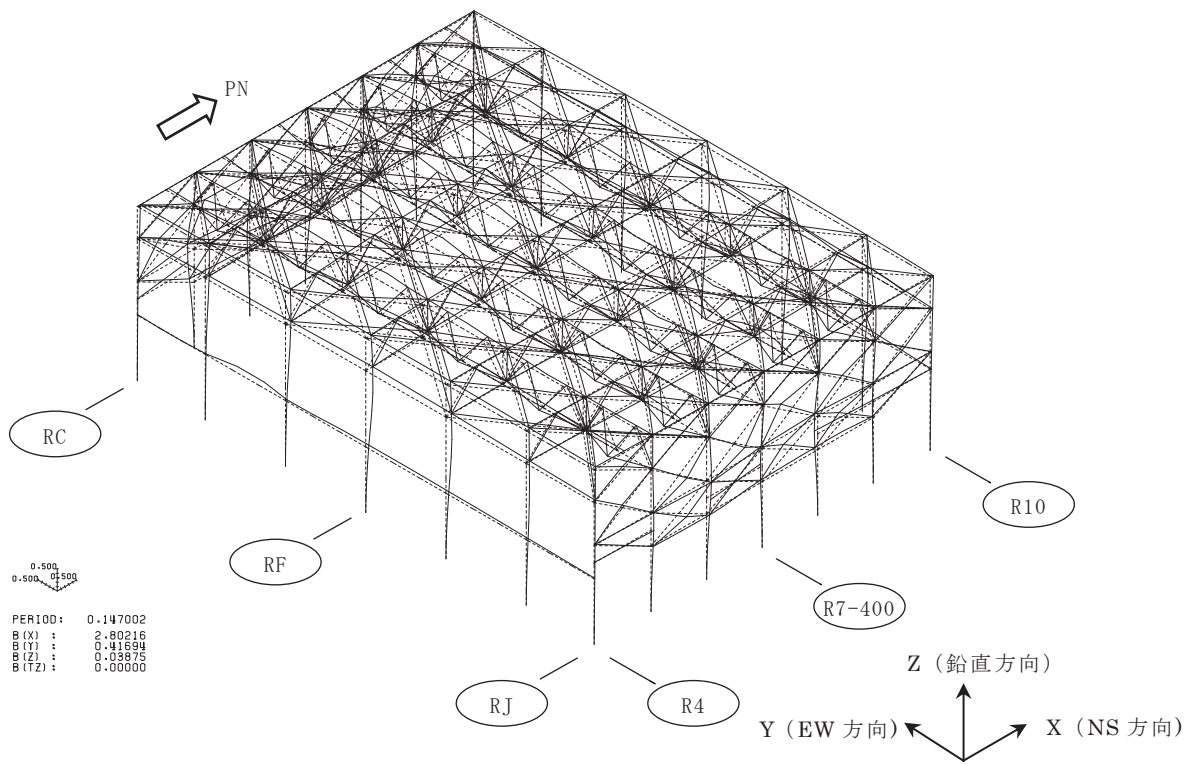


(a) 全体

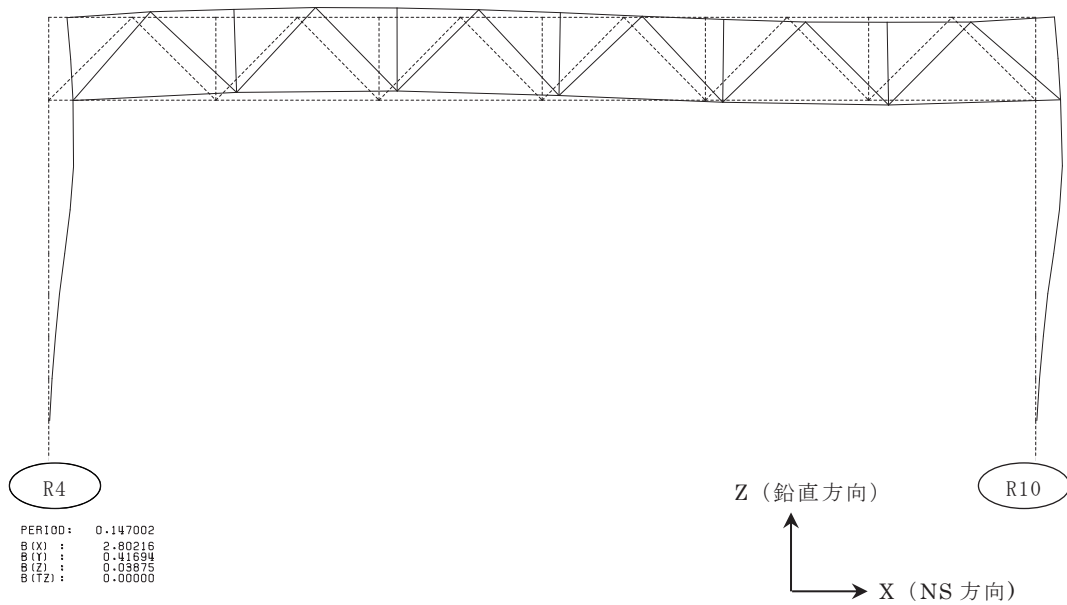


(b) 主トラス構面 (RF 通り)

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

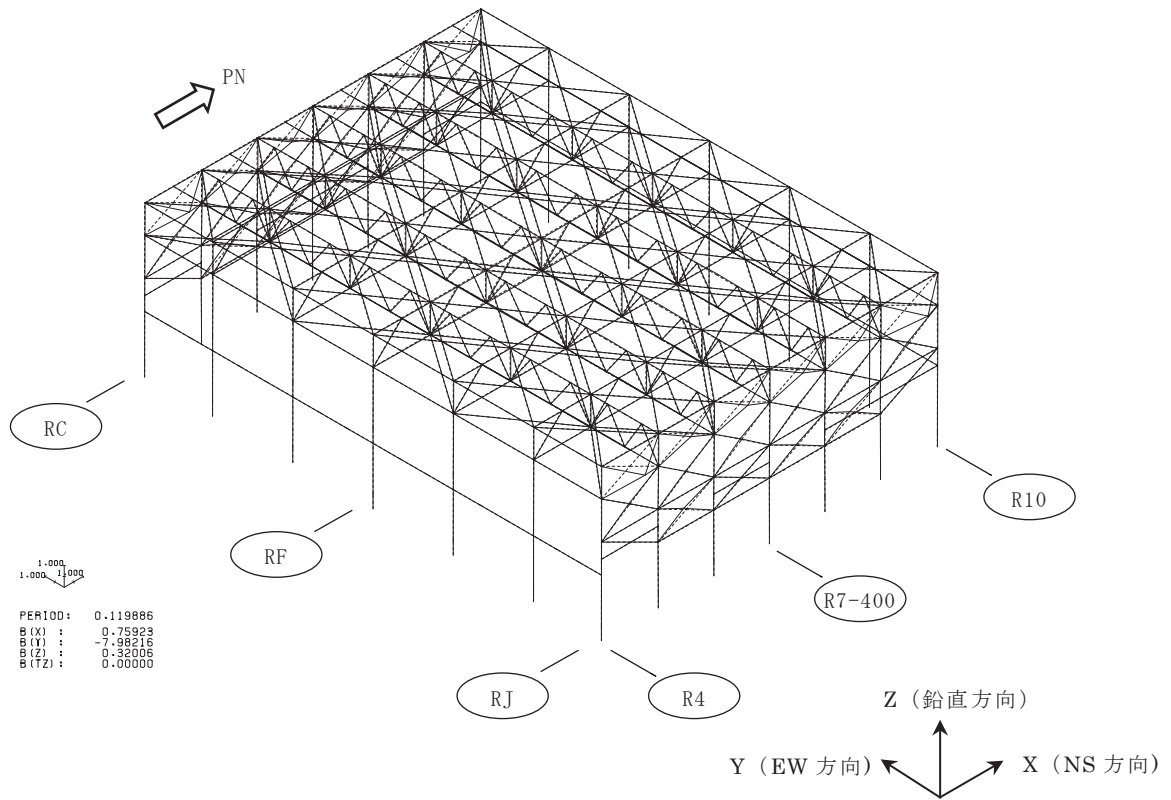


(a) 全体

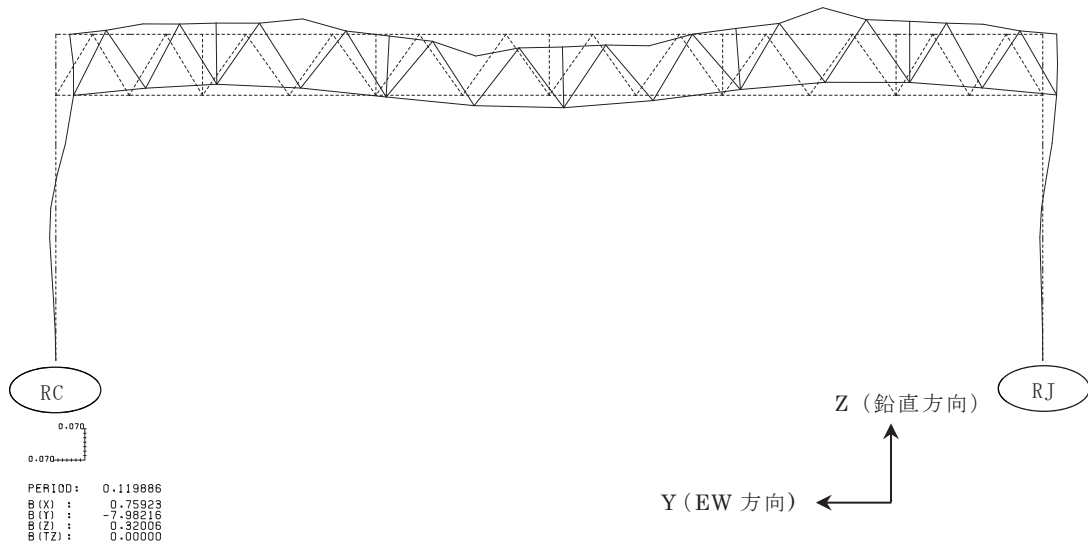


(b) 主トラス構面 (RF 通り)

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。

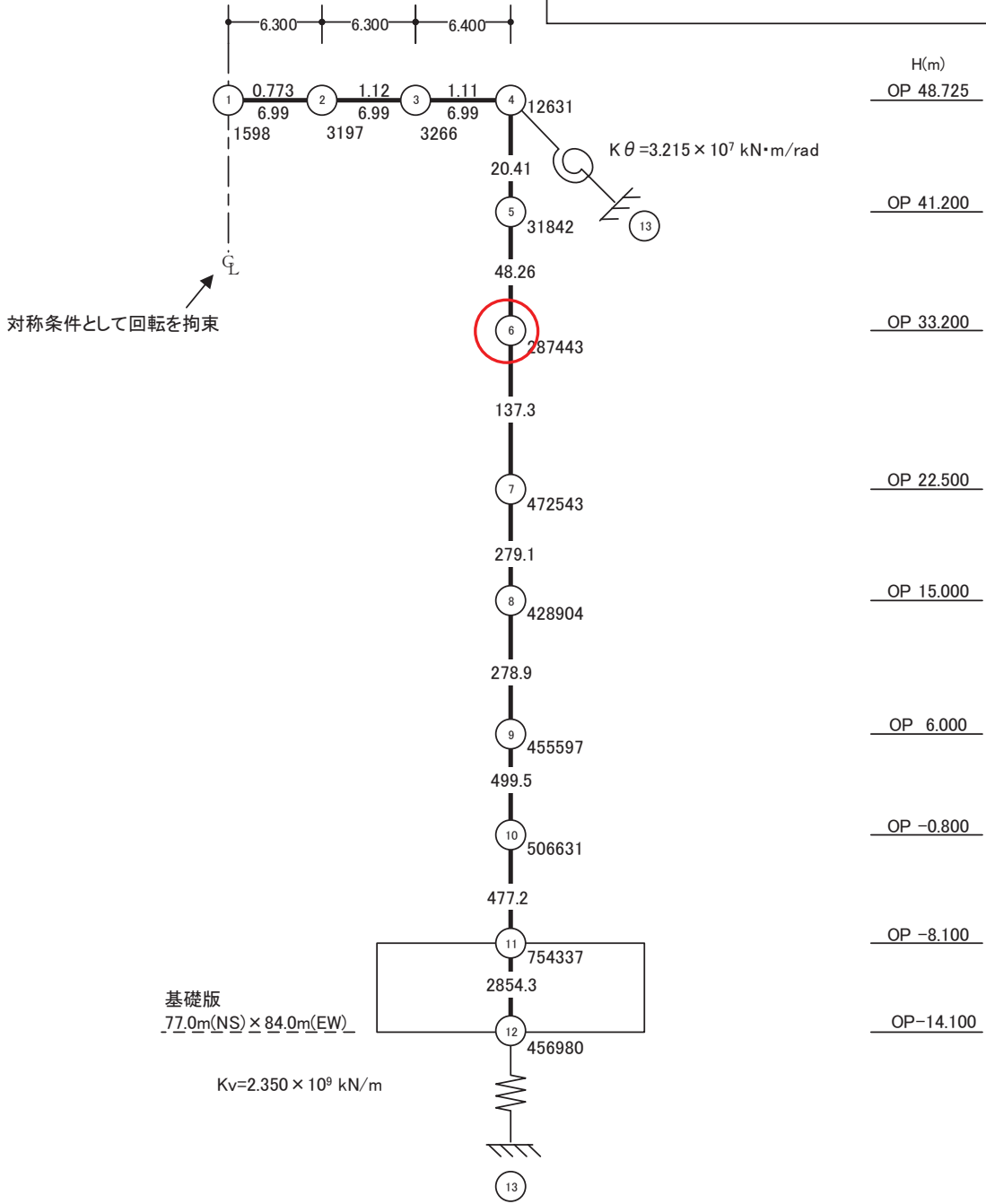
上記 2 つのモデルによる燃料取替床レベル（0. P. 33. 2m）の応答スペクトル（ $h=2\%$ ）の比較を、 $S_s-D1$ 、 $S_s-D2$  を例に参考 5-3 図に示す。

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 :  $E_c = 2.65 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$   
 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

せん断面積( $m^2$ )  
 断面2次モーメント( $m^4$ )  
 質点重量(kN)  
 軸ばね( $\times 10^7 \text{ kN/m}$ )



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)

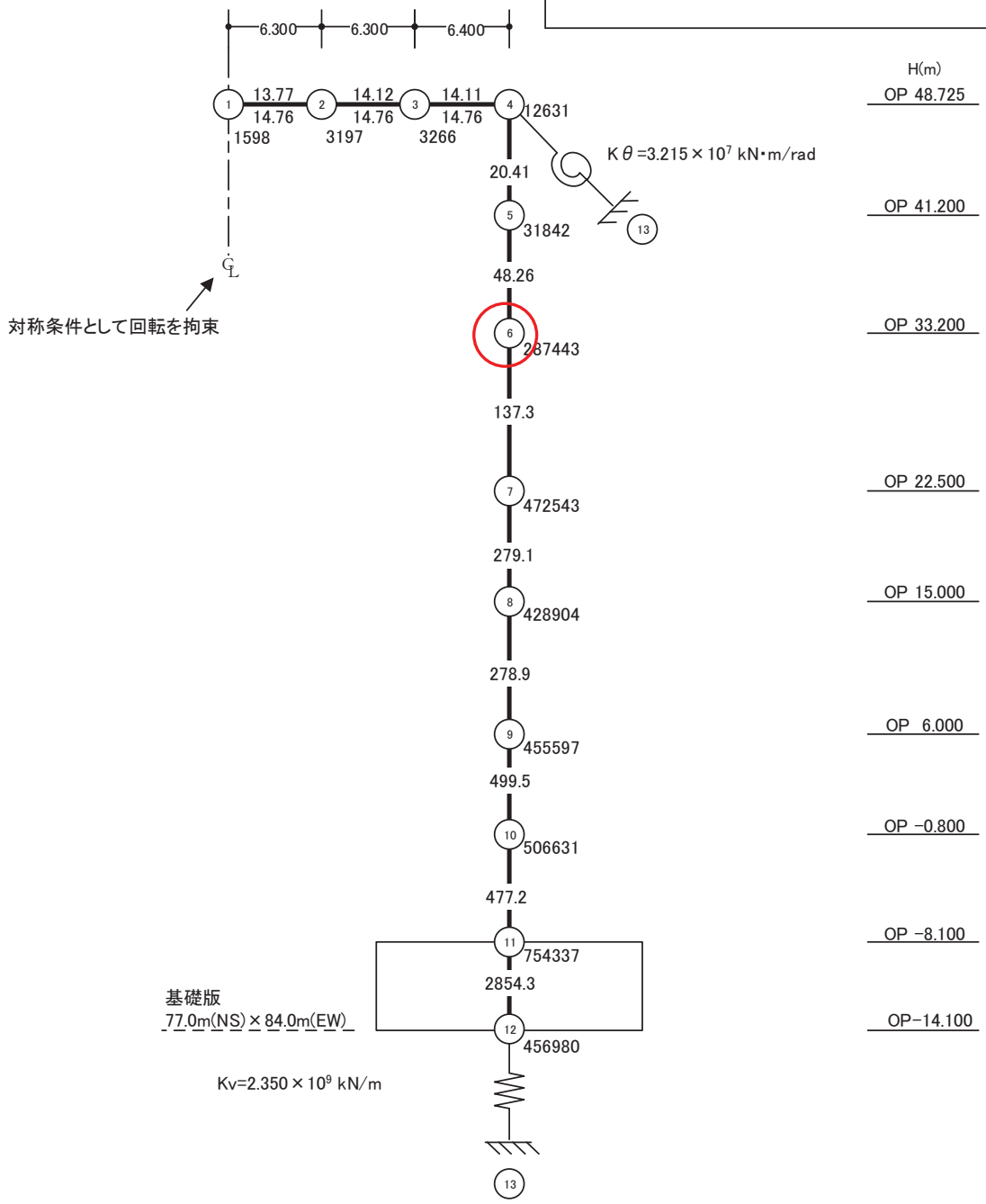
トラス部の断面性能 ( $A_s, I$ ) はRC等価な値にて与える

せん断断面積 ( $m^2$ )  
 断面2次モーメント ( $m^4$ )

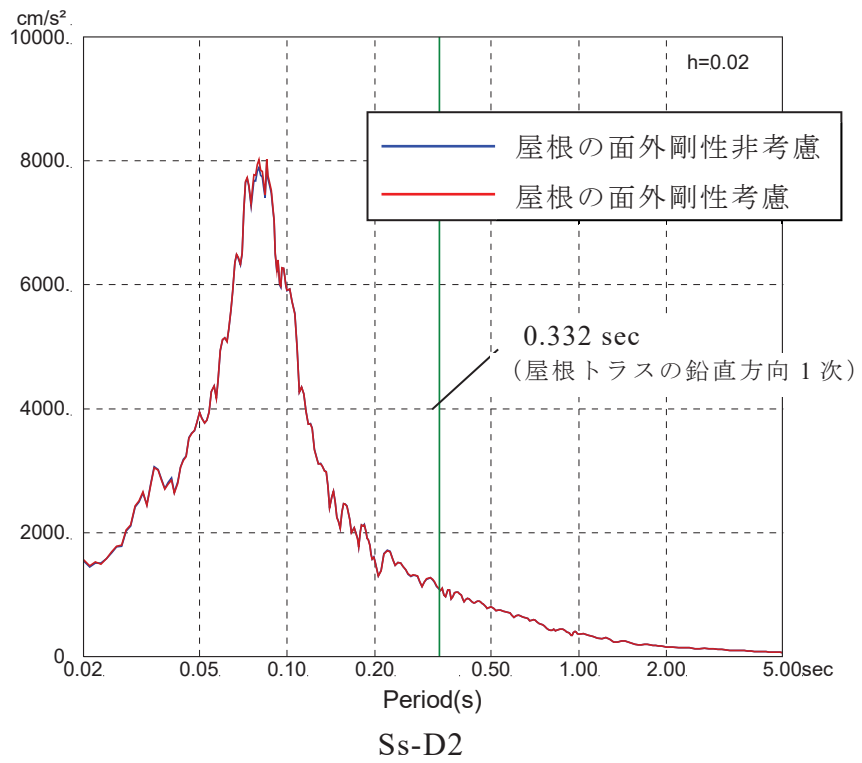
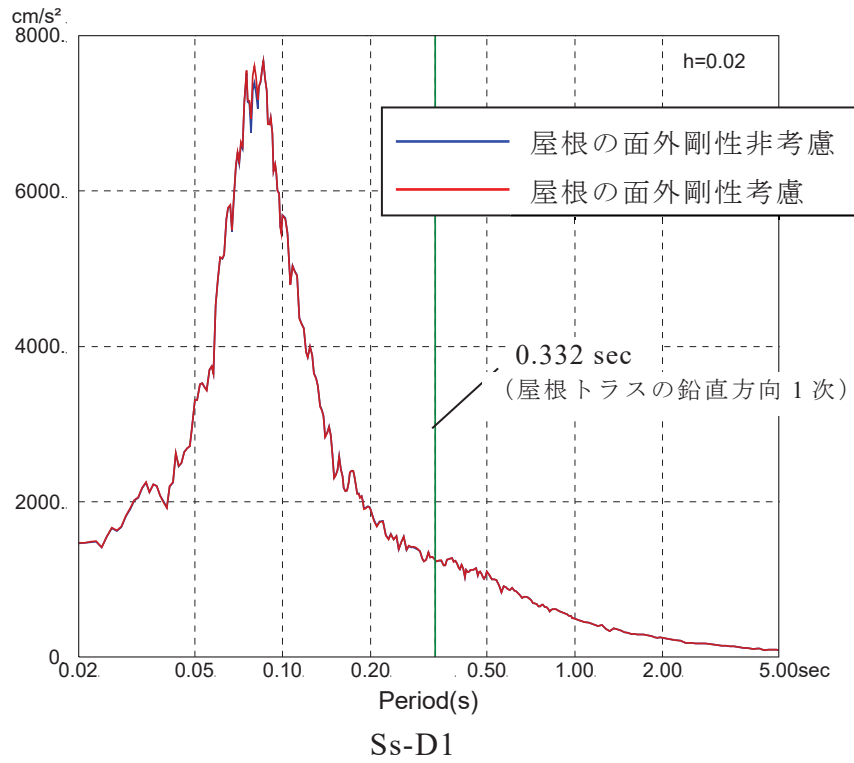
No.

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)

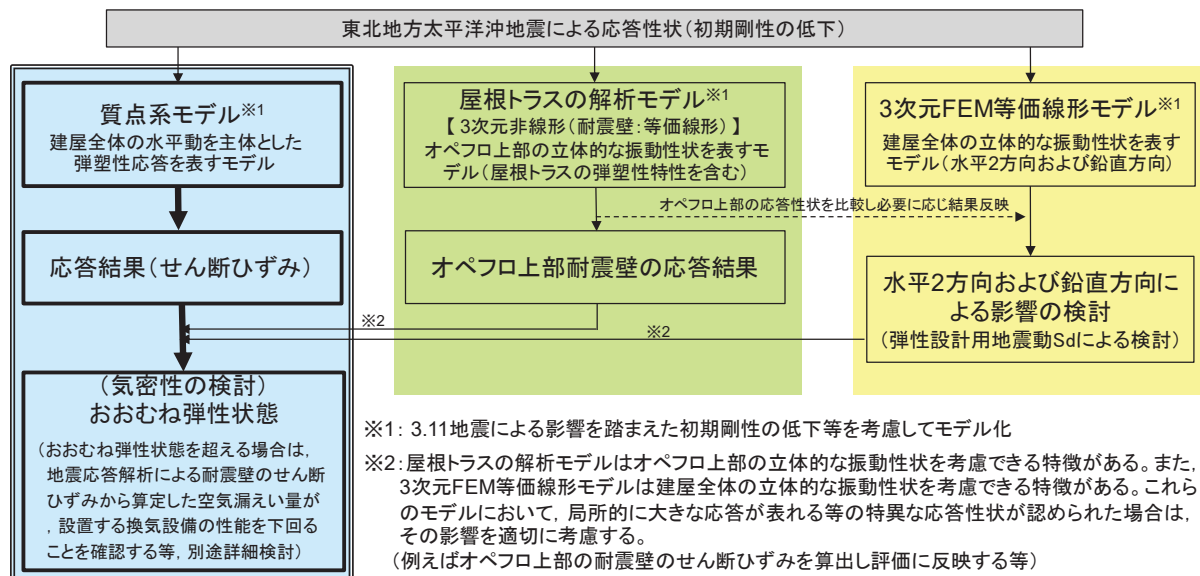


参考 5-3 図 燃料取替床レベル (O. P. 33. 2m) の応答スペクトル (h=2%) の比較

二次格納施設のバウンダリを形成するオペフロ上部の耐震壁に係る  
気密性評価の整理

鉄筋コンクリート構造の耐震壁の気密性の維持については、耐震壁のせん断ひずみがおおむね弾性状態にとどまることを基本とする。おおむね弾性状態を超える場合は、地震応答解析による耐震壁のせん断ひずみから算定した空気漏えい量が、設置する換気設備の性能を下回ることで必要な気密性を維持する設計とする。その場合、基準地震動  $S_s$  による気密性を要求される鉄筋コンクリート造の施設に対し、許容限界を最大せん断ひずみ  $2.0 \times 10^{-3}$  とし、その適用性を確認する。

オペフロ上部の耐震壁のせん断ひずみは、建屋全体の水平動を主体とした弾塑性応答を表す質点系モデルによる算定結果を採用するが、オペフロ上部については初期剛性の低下量が多いこと、水平2方向入力の影響検討として、初期剛性低下を考慮した3次元FEM等価線形モデル（建屋全体モデル）による解析を行うこと、屋根トラスの耐震性評価として、トラスの弾塑性特性の反映、および耐震壁の初期剛性低下を考慮した屋根トラス解析モデルによる解析を行うことから、これらのモデルによる応答性状と質点系の応答性状を比較した上で、必要に応じオペフロ上部の耐震壁のせん断ひずみ等の評価に反映する。



参考 6-1 図 オペフロ上部の耐震壁に係る気密性評価の整理



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
- 添付 2 基礎版と耐震壁の剛性の組合せの考え方について
- 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。

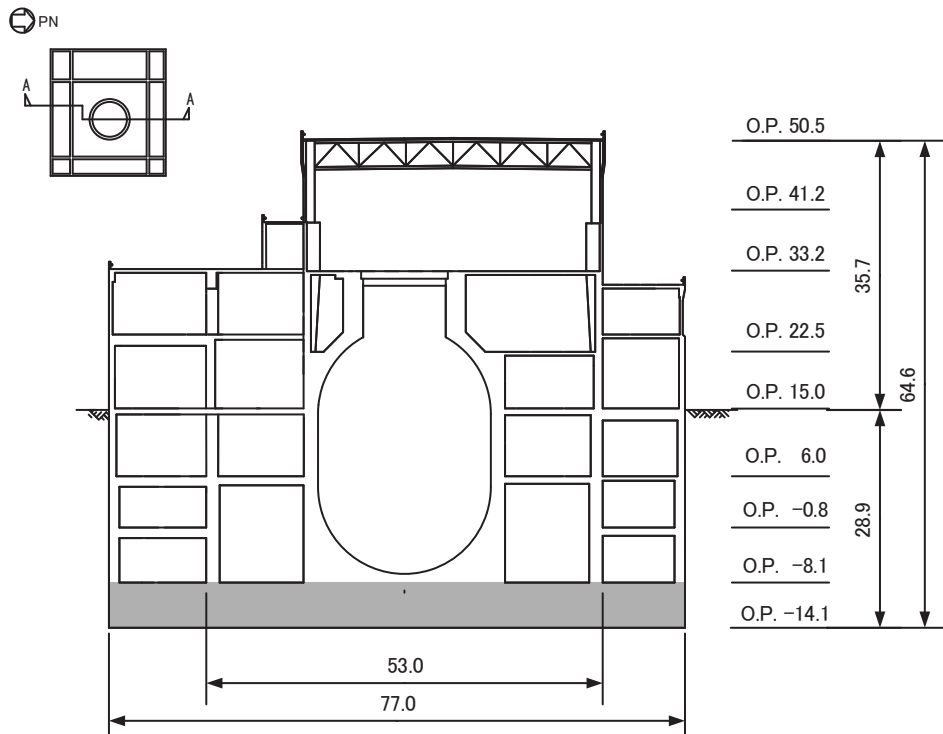
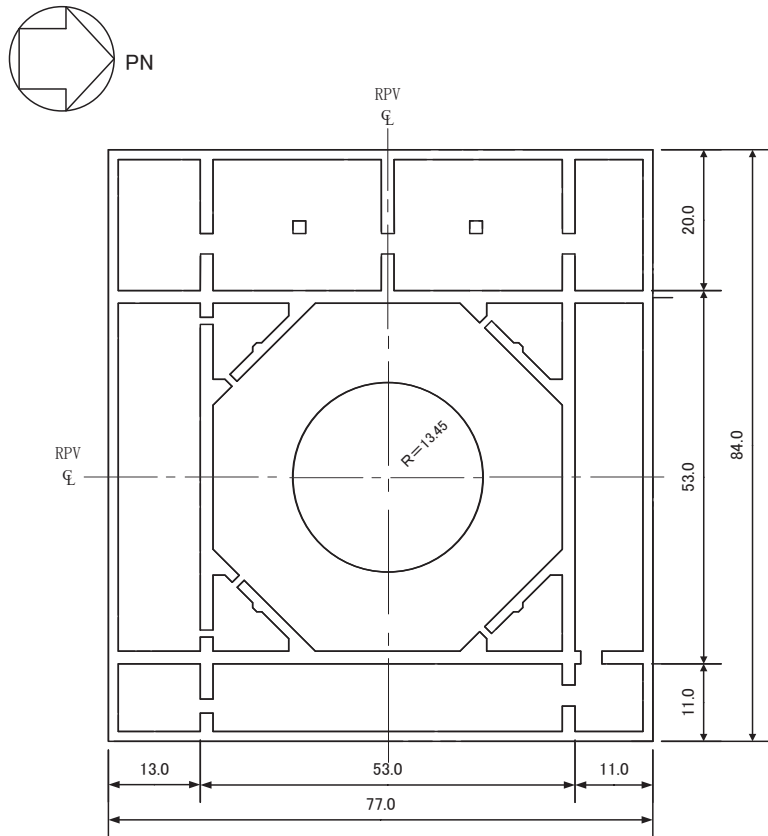
## 2. 原子炉建屋基礎版の概要

### 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て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

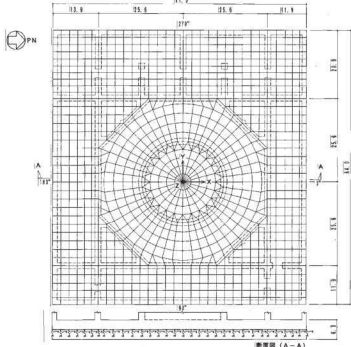
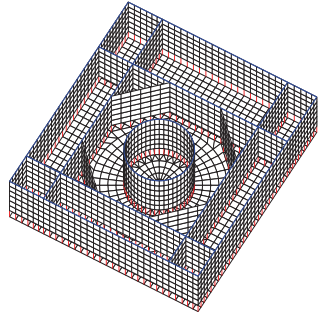
既工認で採用した基礎版の解析モデルと今回工認で採用する予定の解析モデルとの差異を整理し、論点となり得る項目を整理する。

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）

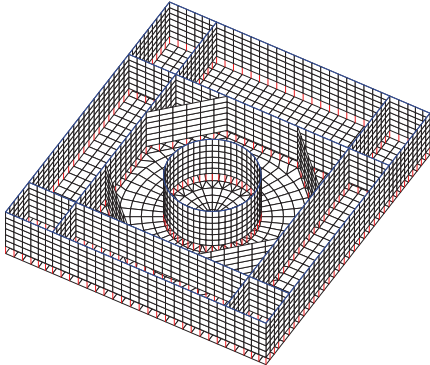
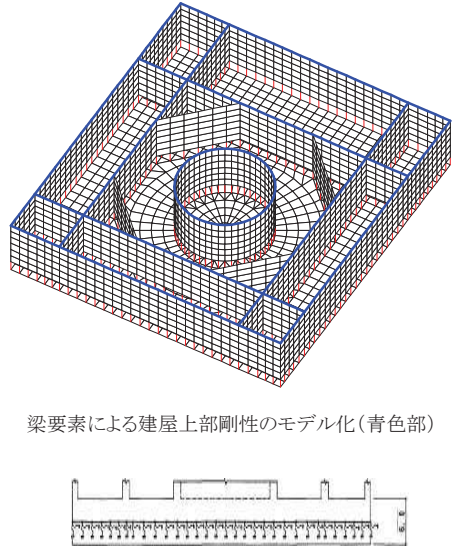
項目		既工認時	今回工認時
解析手法		・弾性地盤上に支持された厚さ6.0mの一枚の版として有限要素法により解析する。	・同左
解析コード		・NASTRAN	・ABAQUS
荷重		・固定荷重, 機器配管荷重, 積載荷重, 地震荷重(S2), 土圧等	・固定荷重, 機器配管荷重, 積載荷重, 地震荷重(Ss), 土圧等
モデル化	モデル化範囲	・基礎版全体と剛性の高い一部壁をモデル化する。	・同左
	メッシュサイズ	・モデル全体でおおむね1～3m程度	・同左
	要素タイプ	・基礎版全体をシェル要素でモデル化する。 ・外部、内部ボックス壁、火打ち壁、シェル壁等の剛性の高い壁は、等価な剛性を考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> 

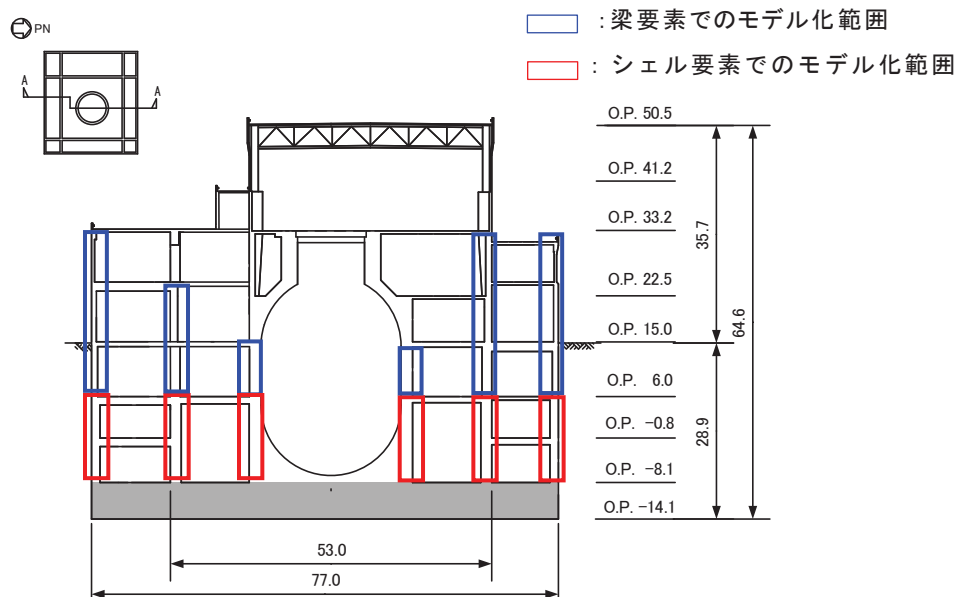
※1：コンクリートのヤング係数及びポアソン比は、日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説・許容応力度設計法-1999」による計算式に基づく値を用いる。なお、地震応答解析モデルと同様の初期剛性低下については、地震観測記録の分析等を踏まえて、その影響を考慮することとする。

※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><small>*青色線は、梁要素を示す。 *赤太線は、剛体を示す。</small></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。

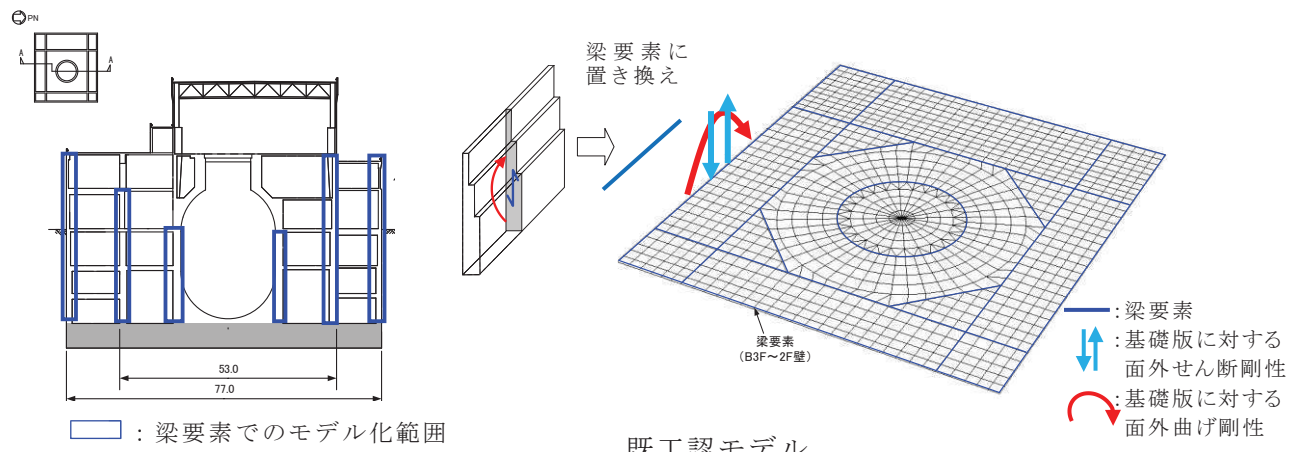
この既工認との差異は、より実状に近い構造挙動となるため、本資料における論点としては取り扱わないこととするが、既工認時には梁要素でモデル化している耐震壁について、地下部分の一部をシェル要素でモデル化することによる影響を以下に示す。また、既工認と今回工認の耐震壁の剛性評価及び解析上の影響について第3-3表に示す。

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。

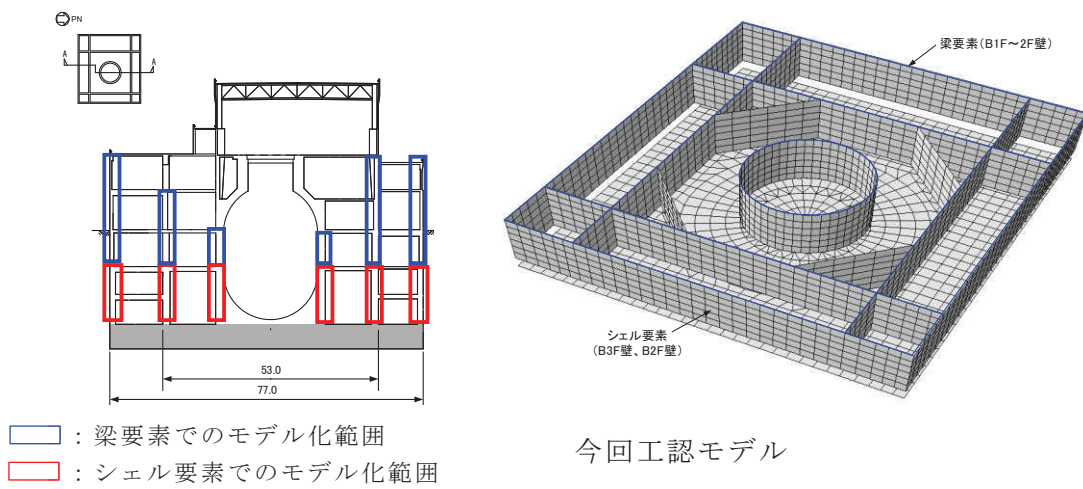
一方、今回工認では B3F、B2F の壁をシェル要素でモデル化していることから、既工認時に梁要素で考慮していた基礎版に対する面外剛性に加えて、耐震壁の面外剛性、面内剛性も考慮される。これらの壁が全体として基礎版への拘束部材となり、より実状に近い構造挙動となる。例えば、地震荷重時に基礎版が面外に変形しながら浮上りを生ずる挙動に対して、地震方向の耐震壁と直交方向の耐震壁が一体性を保持しつつ、立体的に抵抗することとなる。また、既工認モデルの梁要素は中立軸を耐震壁の図心として評価したものを基礎版中心位置に設定しており偏心が考慮されないのに対し、今回工認モデルではシェル要素を基礎版上端より立ち上げるため、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

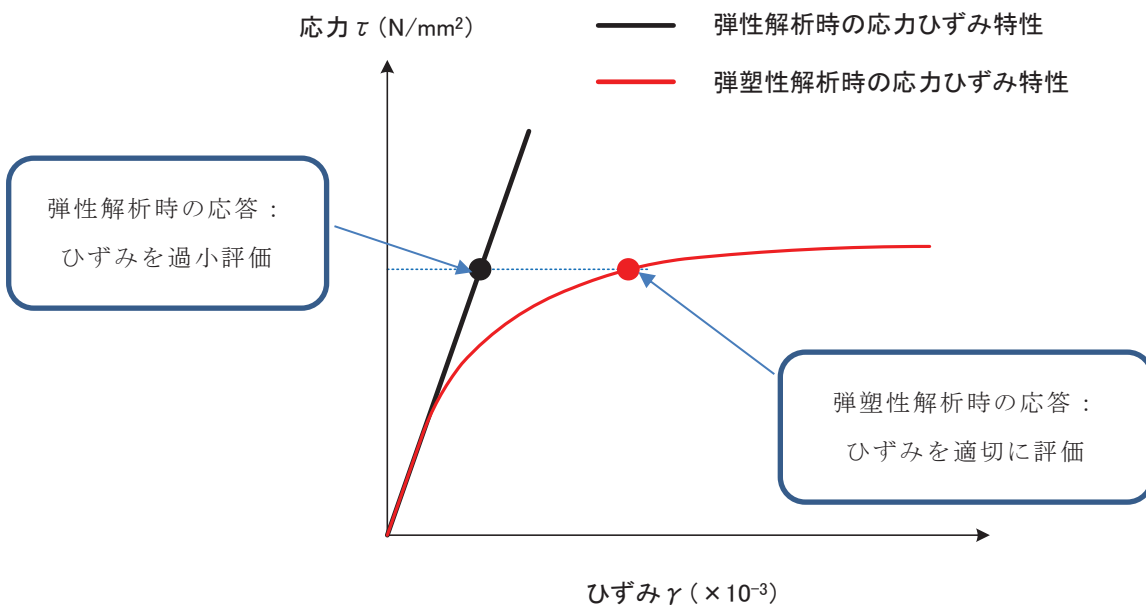
一方，ポアソン比の変更については適用規準を日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説・許容応力度設計法-1999」に見直したことによるものであり，同様の変更については先行審査でも認可実績があり，論点とはならないと考えている。

#### 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でき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<sup>[1]</sup>モデル、コンクリート（引張側）は RC 規準<sup>[2]</sup>（ひび割れ点の評価）と岡村・出雲モデル<sup>[3]</sup>（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。

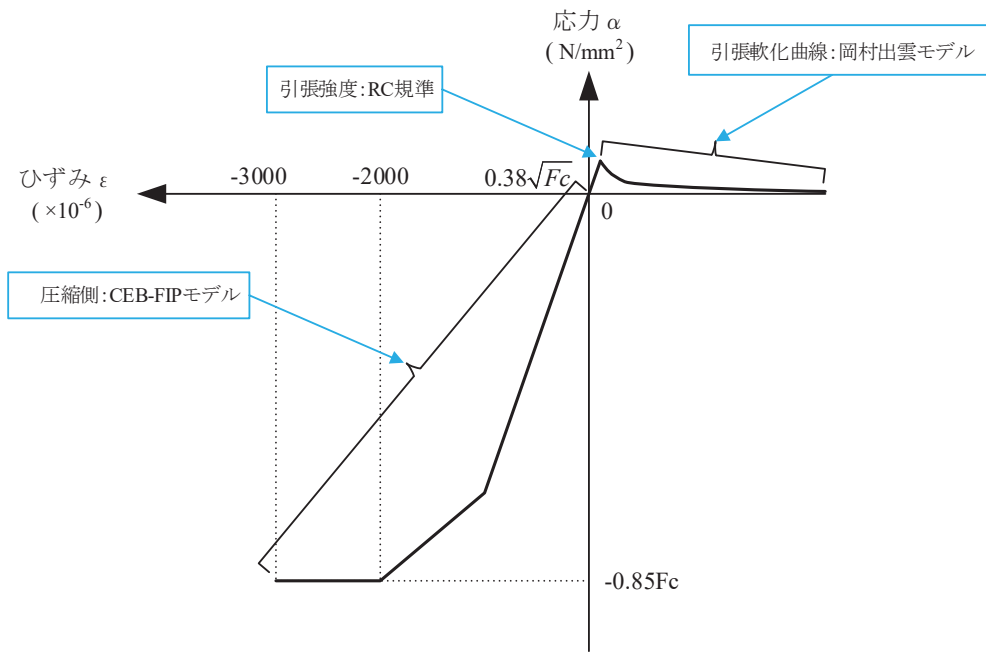
### (2) 鉄筋コンクリート構造物の初期剛性低下

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。

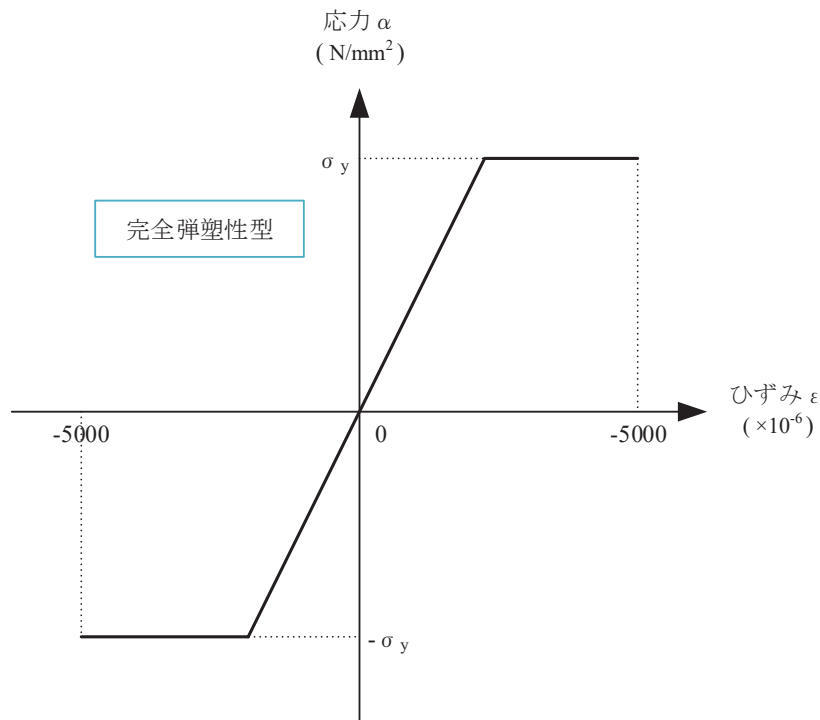
具体的には、以下の解析を実施する。

- ・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、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、質点系モデルの基本ケースにおける耐震壁の初期剛性に整合するよう剛性を補正したものを基本ケースとし、質点

系モデルの不確かさケースにおける耐震壁の初期剛性に整合するよう剛性を補正したものを不確かさケースとして扱う。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、圧縮側も引張側も質点系モデル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質点系モデル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。また，基礎版と耐震壁の剛性の組合せの考え方を添付 2 に示す。



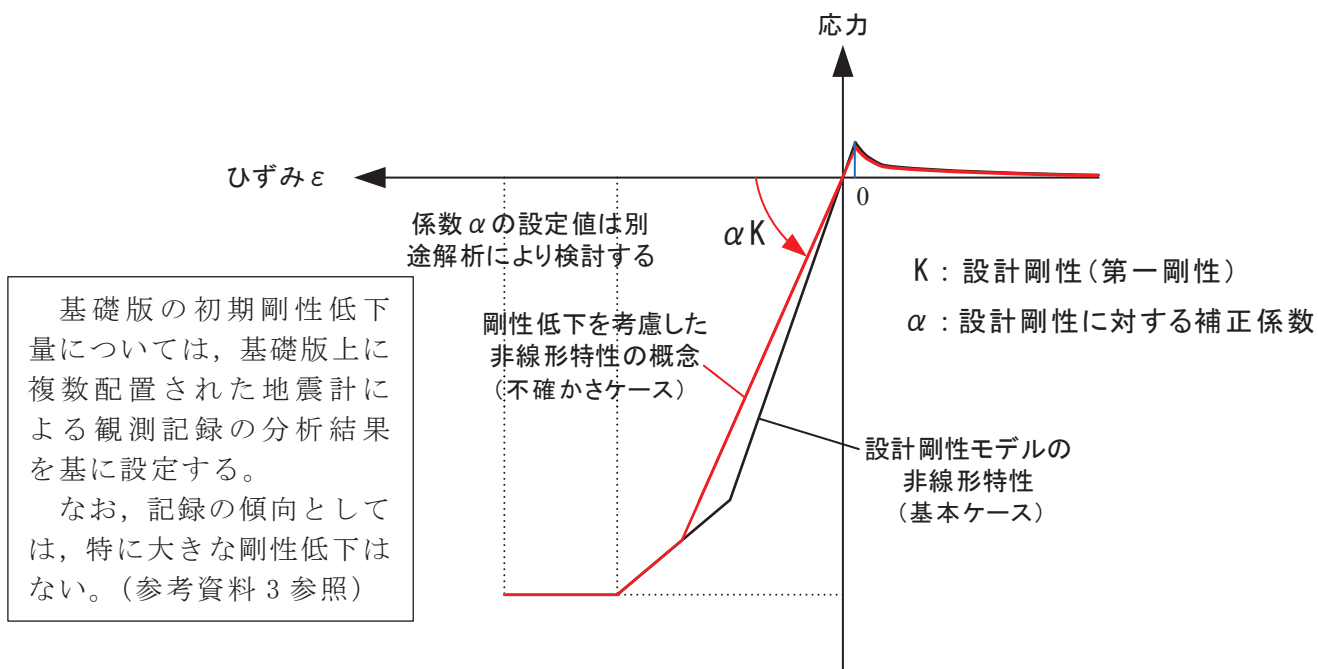
(a) コンクリートの応力-ひずみ関係



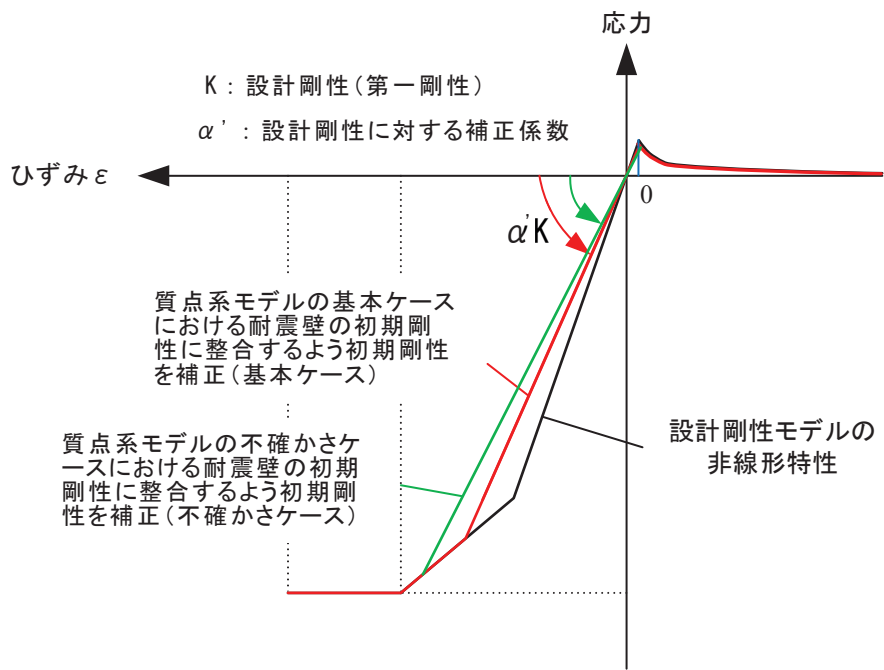
(b) 鉄筋の応力-ひずみ関係

$F_c$ :コンクリートの設計基準強度,  $\sigma_y$ :鉄筋の降伏強度

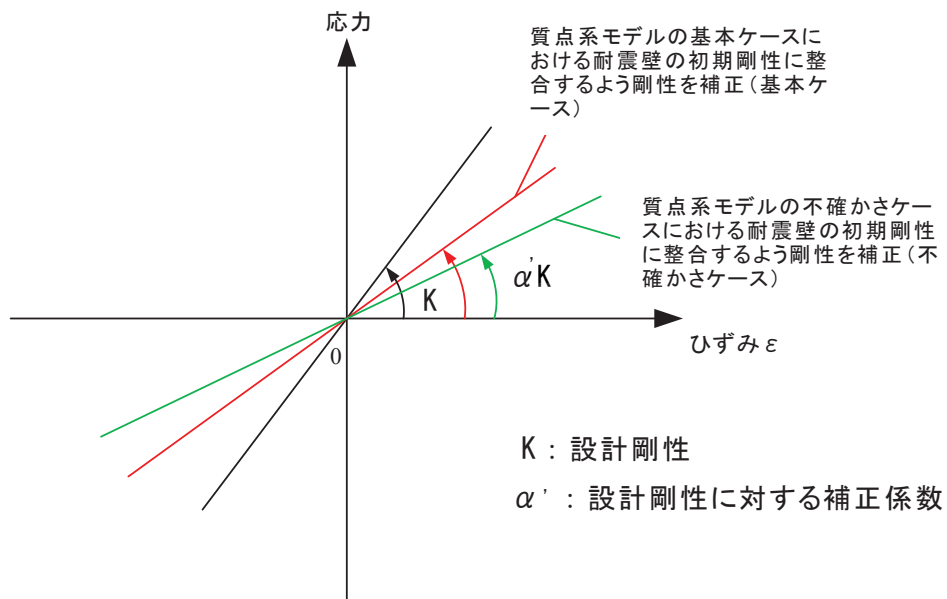
第 4-2 図 採用予定の材料構成則



第 4-3 図 基礎版の剛性低下の考え方



(a) シェル要素



(b) 梁要素

第 4-4 図 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<sup>[2]</sup>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

$\sigma_B$  : 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<sup>[3]</sup>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<sup>[3]</sup>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。

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

$\sigma_t$  : 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

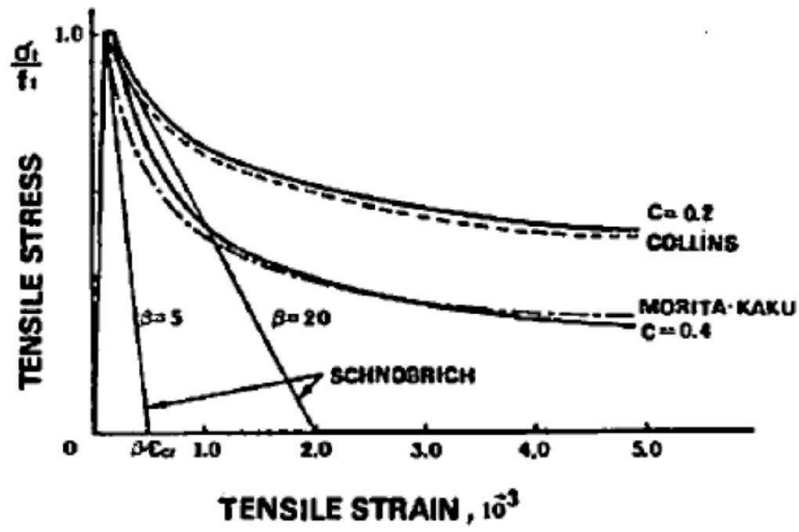
$\varepsilon_{cr}$  : ひび割れ発生時の平均引張ひずみ

$\varepsilon_t$  : ひび割れと直角方向の平均引張ひずみ

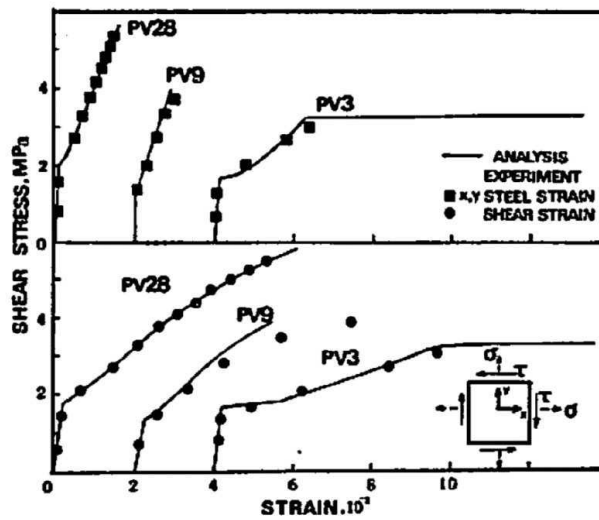
$c$  : 付着性状を表すパラメータ

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<sup>[4]</sup>、森田・角の実験<sup>[5]</sup>) 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<sup>[4]</sup>では  $c=0.2$ 、異形鉄筋を用いた森田・角の実験<sup>[5]</sup>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<sup>[4]</sup>及び青柳・山田の実験<sup>[6]</sup>) 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」<sup>[7]</sup>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<sup>[8]</sup>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<sup>[9]</sup>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<sup>[10][11]</sup>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）。

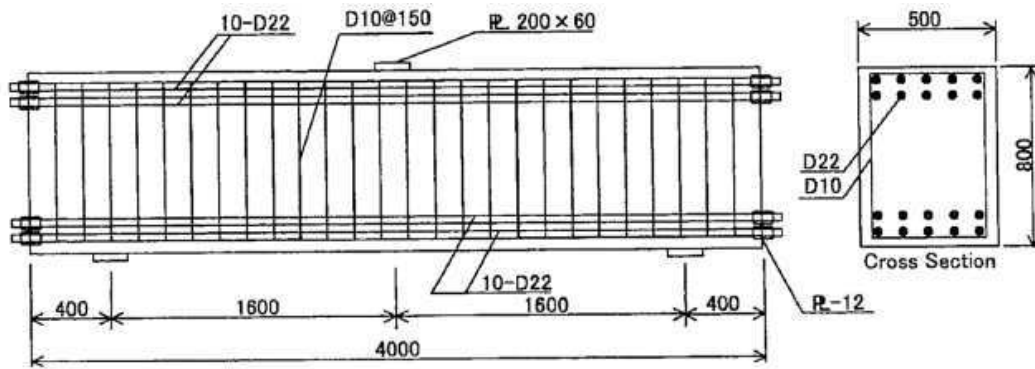


図-4.3.9 試験体諸元 (単位: mm)

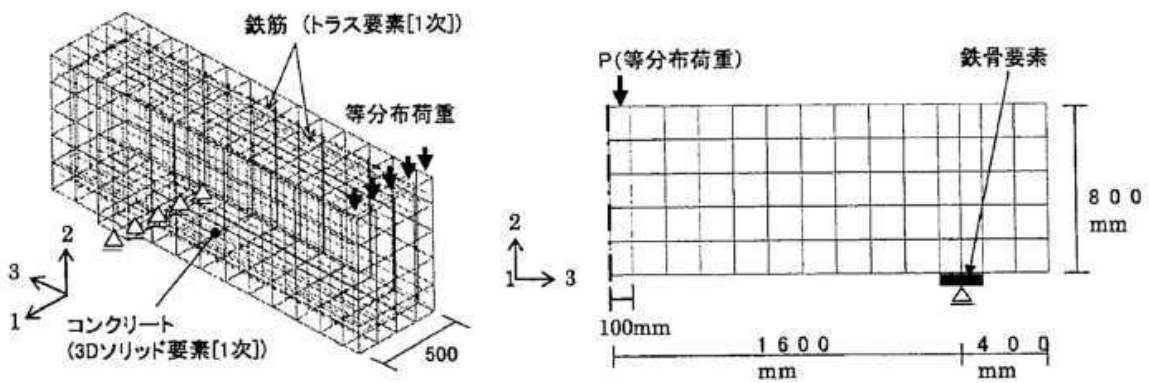


図-4.3.10 解析モデル

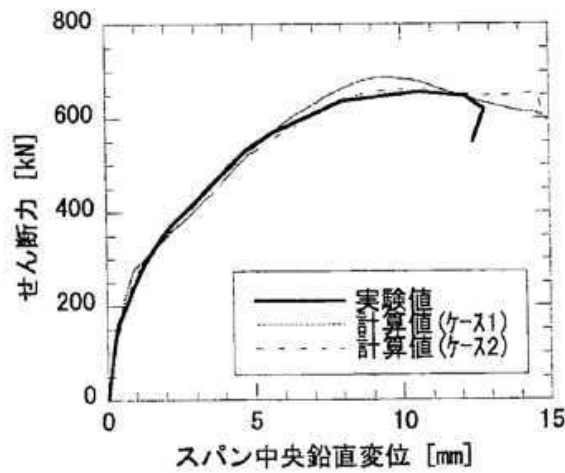


図-4.3.11 せん断力-スパン中央鉛直変位関係

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)

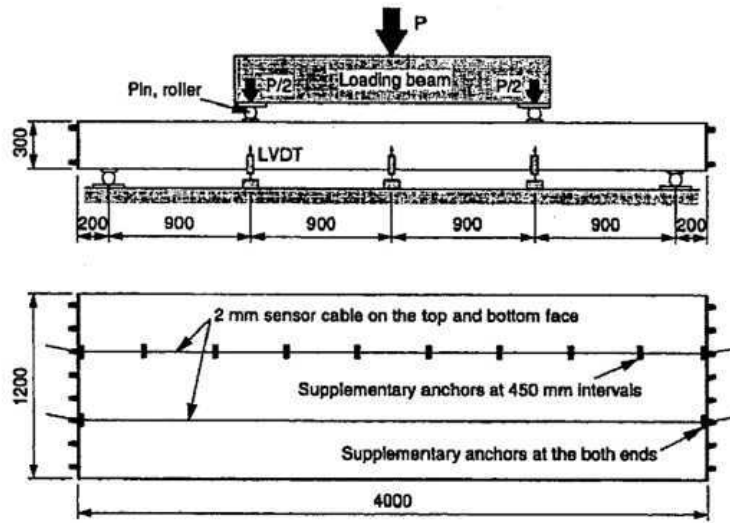


図-4.3.12 試験体諸元

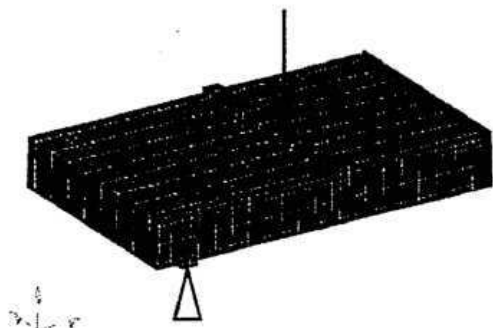


図-4.3.13 解析モデル

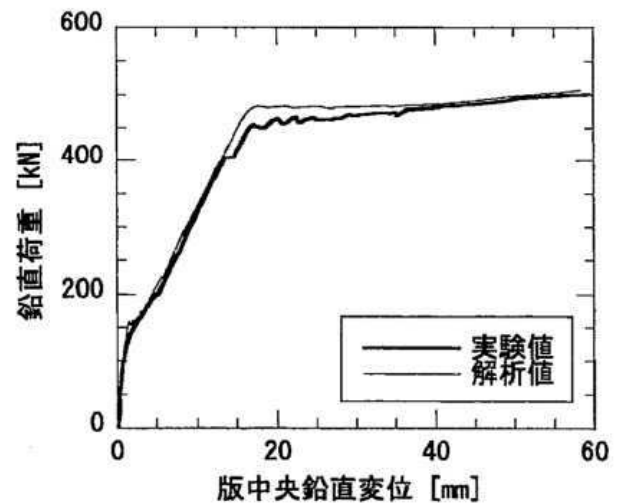


図-4.3.14 鉛直荷重—版中央鉛直変位関係

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)

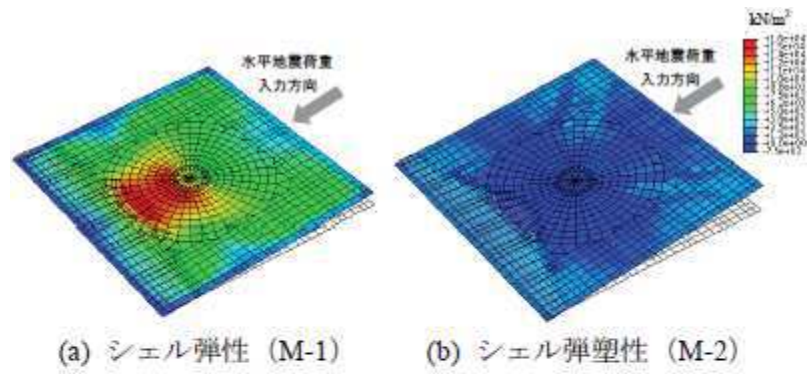


図-5 基礎スラブコンクリート部の最大主応力分布

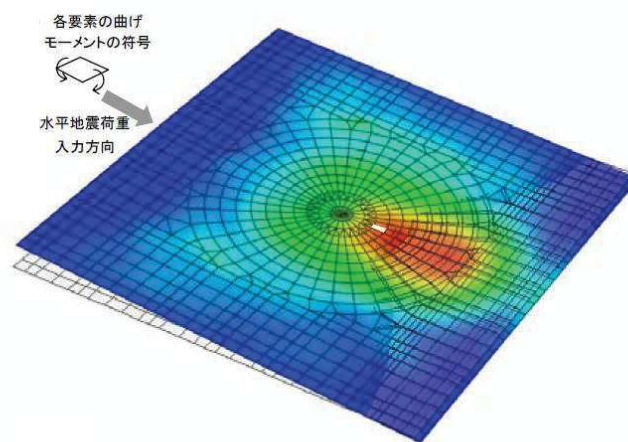


図-3 弾塑性解析 (M-2) による曲げモーメント分布

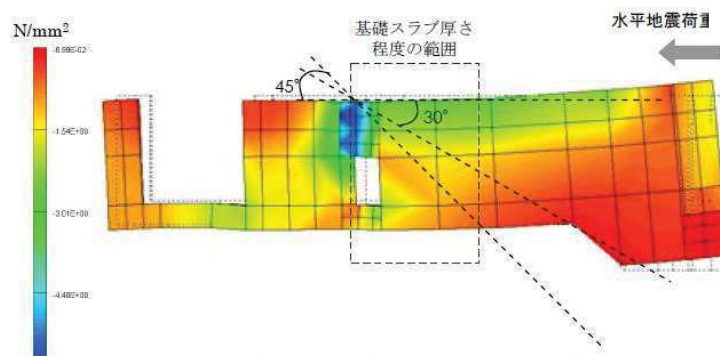


図-6 最小主応力分布 (弾性解析、Q-1)

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<sup>[1]</sup>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/mm<sup>2</sup>)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  $\varepsilon_{cl} = 0.002$

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

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

$\sigma_{cd}$  : コンクリートの応力

$\varepsilon_c$  : コンクリートのひずみ

$\varepsilon_{cu}$  : 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)

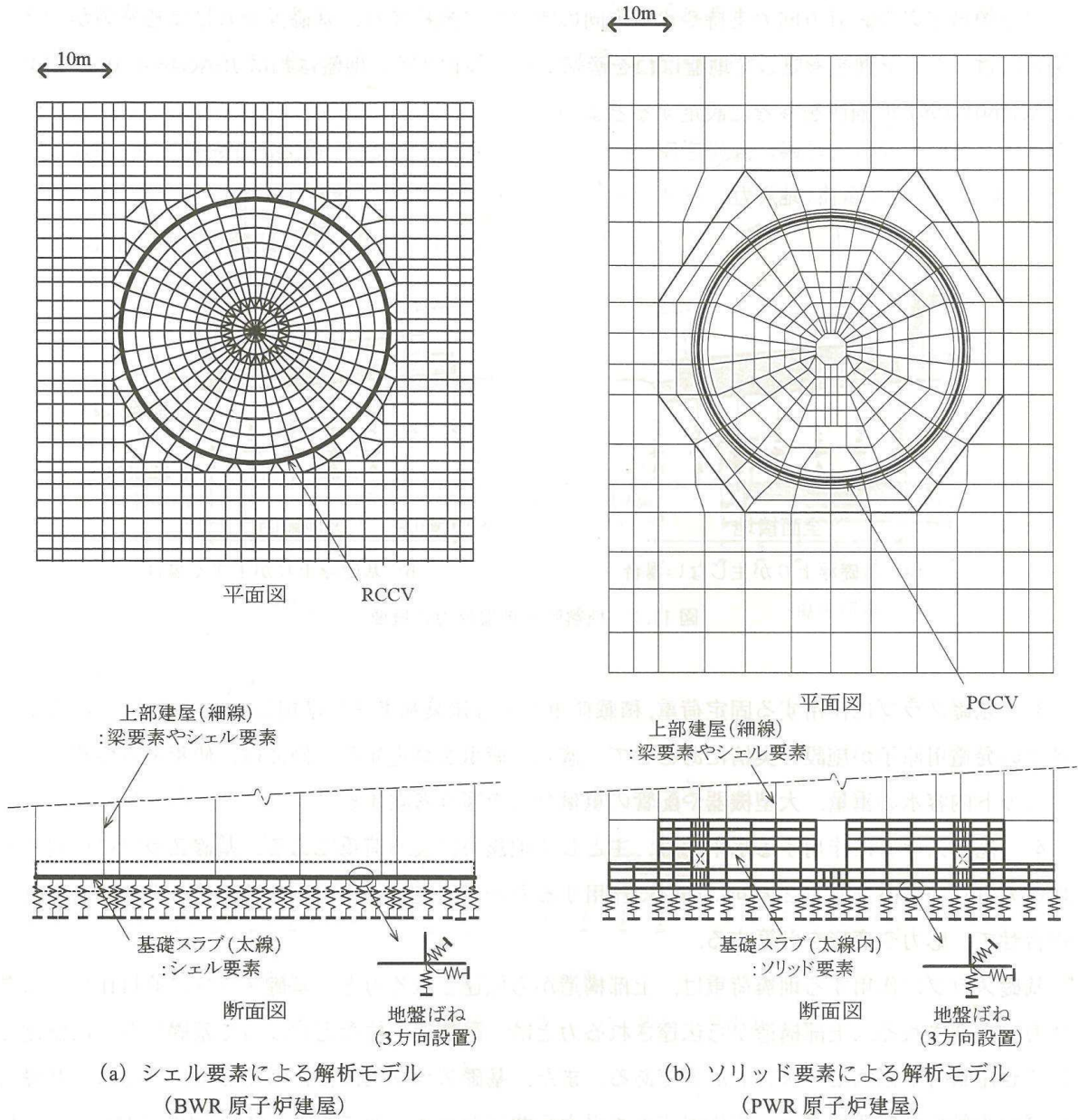
鉄筋の非線形特性については、CCV規格(CVE-3511.2の記載)に基づき完全弾塑性型として設定している。このことから、第4-2図(b)に示した鉄筋の非線形特性を採用することは妥当であると考えられる。

## 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」<sup>[10] [11]</sup>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。

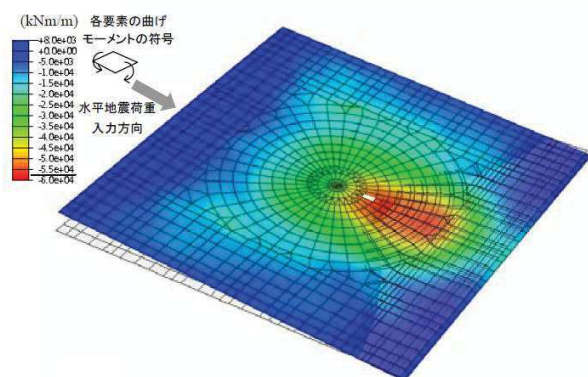


図-3 弾塑性解析 (M-2) による曲げモーメント分布

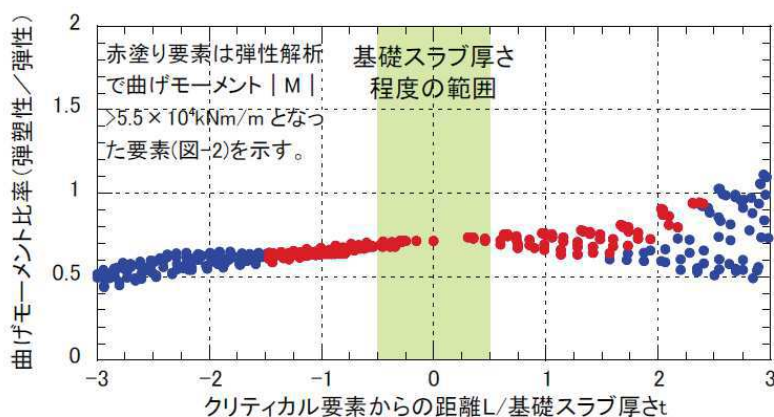


図-4 白塗り要素中心からの距離と曲げモーメント比率

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)

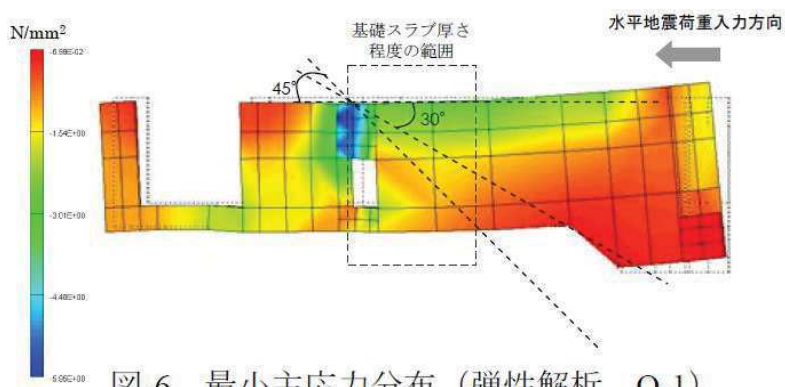


図-6 最小主応力分布 (弾性解析、Q-1)

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—」<sup>[13]</sup>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

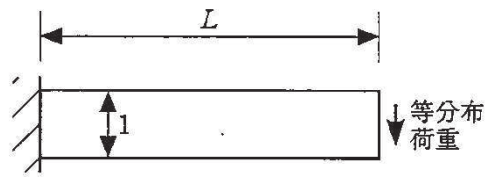


図7 一定断面片持ちはりの問題

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 1<sup>st</sup> 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  $3000\mu$  に達した状態は、最大圧縮強度時のひずみ ( $2000\mu$  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  $5000\mu$  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  $5000\mu$  に達した状態は、降伏ひずみの  $2\sim 3$  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、 $5000\mu$  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。

## 基礎版と耐震壁の剛性の組合せの考え方について

基礎版の評価を主体として考えた場合、定性的には基礎版の剛性が低くかつ耐震壁の剛性が低い場合が基礎版の変形が大きく評価される。従って基礎版の評価を主体とする検討においては、基礎版の剛性低下を考慮する不確かさケースと組み合わせる耐震壁の剛性は、質点系モデルの不確かさケースに合わせ低下させた値を採用する。

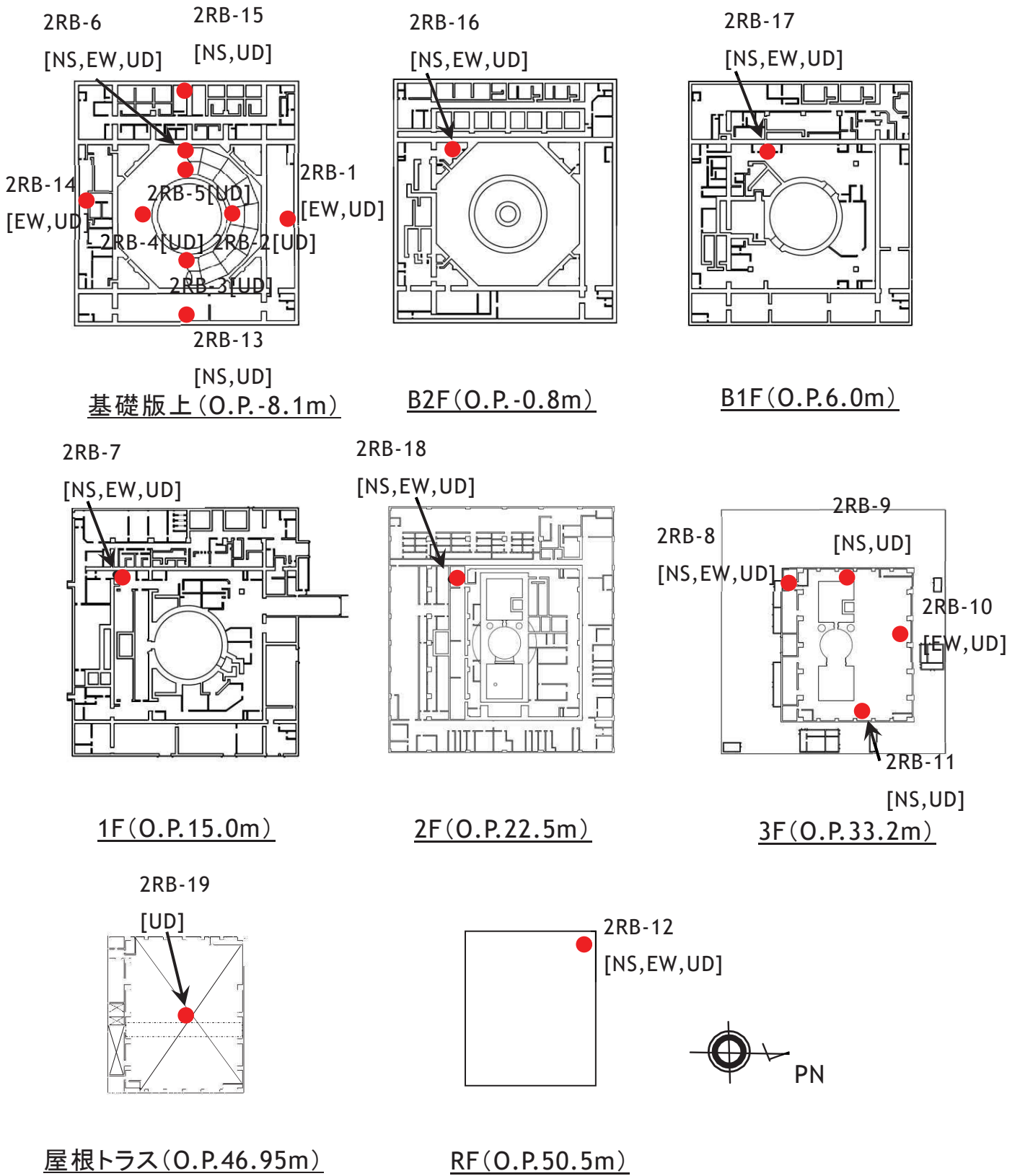
耐震壁の評価を主体として考えた場合、定性的には基礎版の剛性が低くかつ耐震壁の剛性が高い方が、耐震壁が負担する応力は大きく評価される。しかし、剛性低下の傾向は耐震壁は顕著であるものの基礎版は小さいもしくは認めにくいこと、また、もともと耐震壁の設計は保守性を有していることから、耐震壁の評価を主体とする検討においては、基礎版の剛性としては設計剛性を採用する基本ケースを用い、それと組み合わせる耐震壁の剛性は、質点系モデルの基本ケースに合わせ低下させた値を採用する。検討の結果、耐震壁の拘束効果が耐震壁の評価に及ぼす影響が大きい場合は、基礎版の剛性を低下させたケースとの組み合わせについても検討する。

添付 2-1 表 基礎版と耐震壁の剛性の組合せの考え方

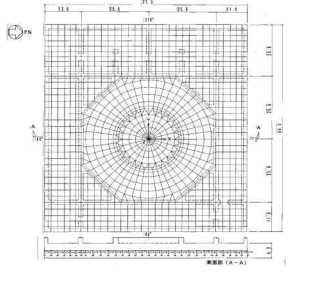
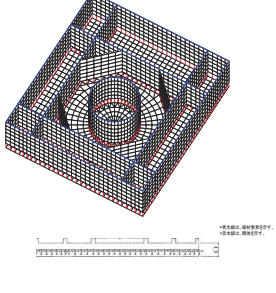
		耐震壁	
		【基本ケース】 質点系モデルの基本 ケースにおける耐震 壁の初期剛性に整合	【不確かさケース】 質点系モデルの不確かさ ケースにおける耐震壁の 初期剛性に整合
基 礎 版	【基本ケース】 設計基準強度による剛性	○	—
	【不確かさケース】 地震観測記録の分析等を 踏まえ初期剛性を低下	—※1	○

※1：検討の結果、耐震壁の拘束効果が耐震壁の評価に及ぼす影響が大きい場合は、基礎版の剛性を低下させたケースとの組み合わせについても検討する。

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。 シェル要素:シェル部, トップスラブ部 ROD要素, BAR(梁)要素:境界条件の設定に使用
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。

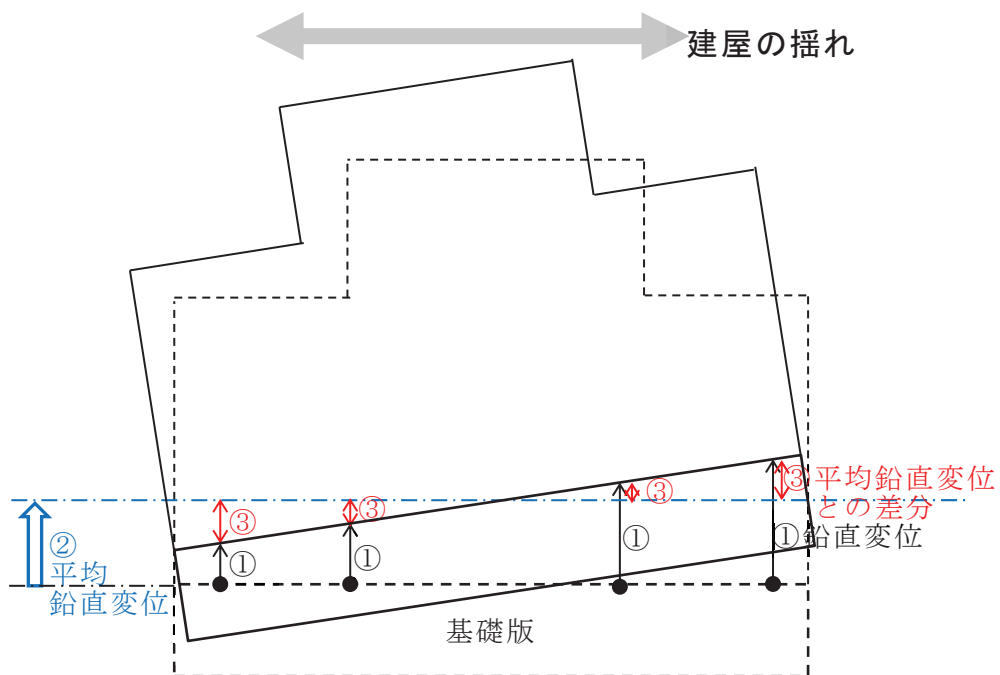
## 2. 検討方法

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，鉛直方向の平均変位に対する相対変位量と，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。

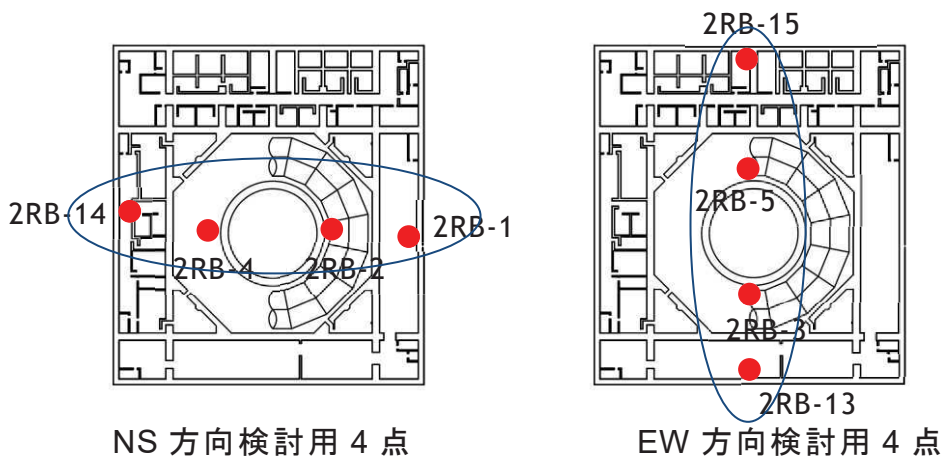
検討方法の概念図を参考第 2-1 図に，地震観測位置を参考第 2-2 図に示す。

- ① 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。

（おおむね比例関係であれば，特に大きな剛性低下はないと考えられる）



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)



### 3. 検討結果

参考第 3-1 表に示す過去の代表地震について、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を参考第 3-1 図～参考第 3-4 図に示す。また、3.11 地震前後の中小地震に対する検討結果を参考第 3-5 図～参考第 3-8 図に示す。

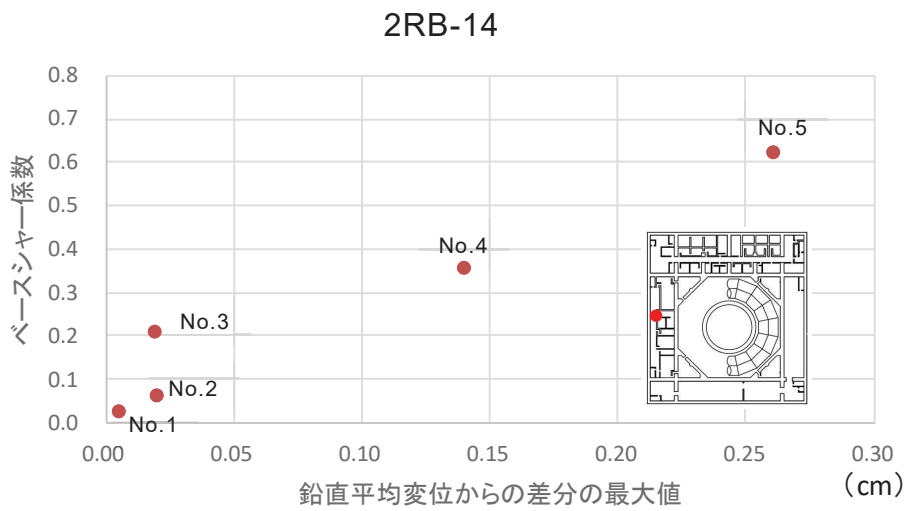
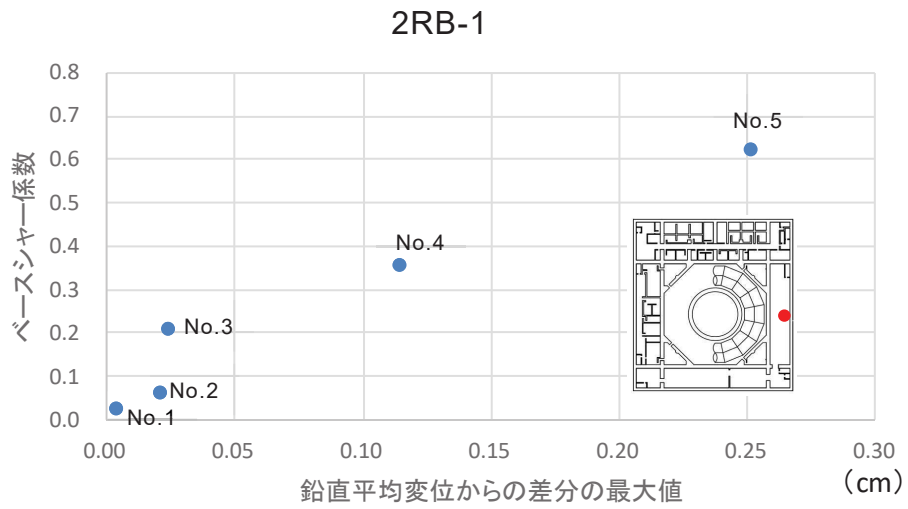
ここで、過去の代表地震は、比較的大きな地震観測記録として、基礎版上の最大加速度を更新した地震を選定した。3.11 地震前後の検討においては、M5 以上かつ基礎版上で  $20\text{cm/s}^2$  以上の観測記録を条件に、3.11 地震前については 2005 年 8 月 16 日宮城県沖の地震以降の 7 地震を選定し、3.11 地震後については、4.7 地震以降の発生順に 7 地震を選定した。

検討の結果、代表地震の比較では鉛直変位とベースシャー係数の関係が比例関係となっており、3.11 地震前後の比較でも大きな傾向の違いは認められなかった。

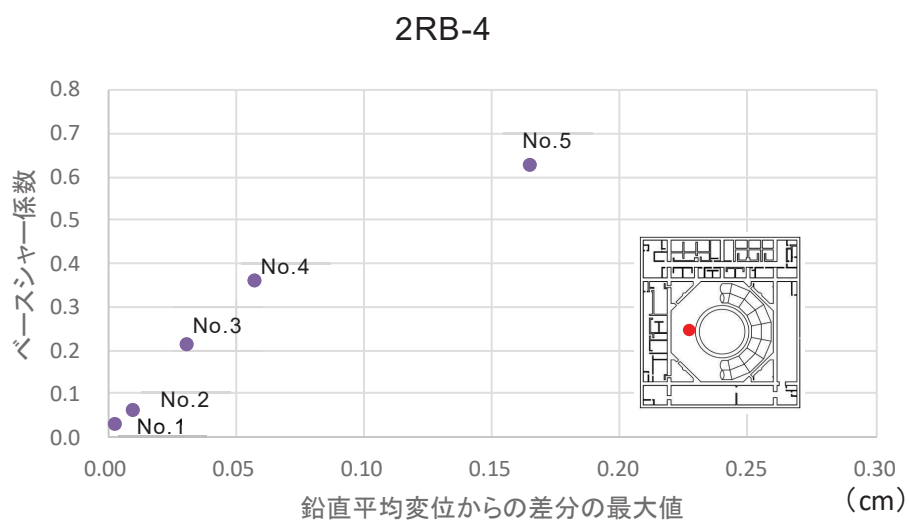
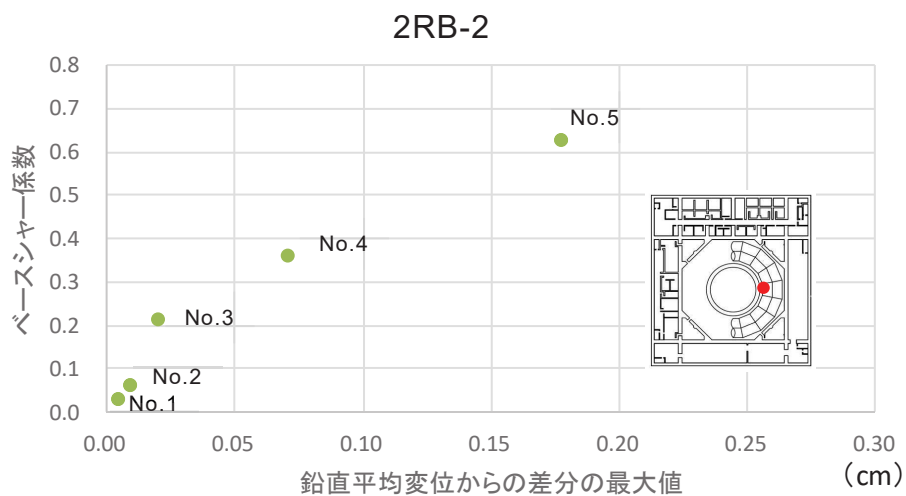
なお、他の地震記録を含めた影響等については、詳細設計段階において検討する。

参考第 3-1 表 過去の代表地震

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

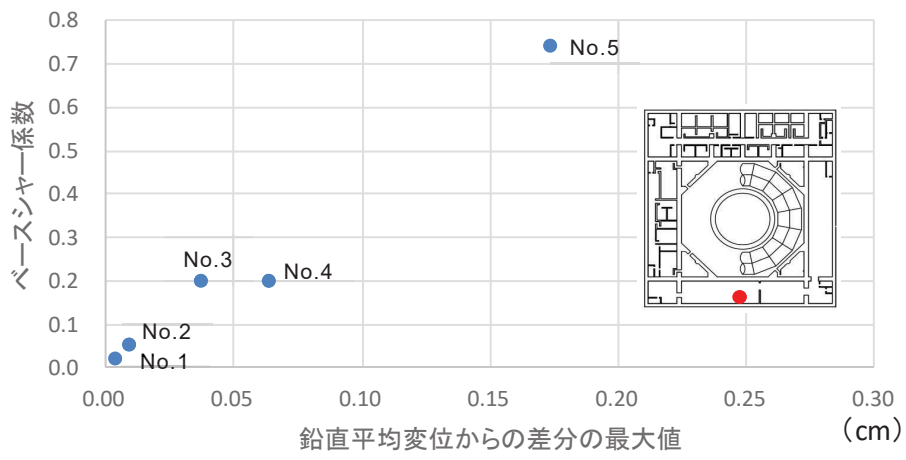


参考第 3-1 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (NS 方向)  
(代表地震) (1/2)

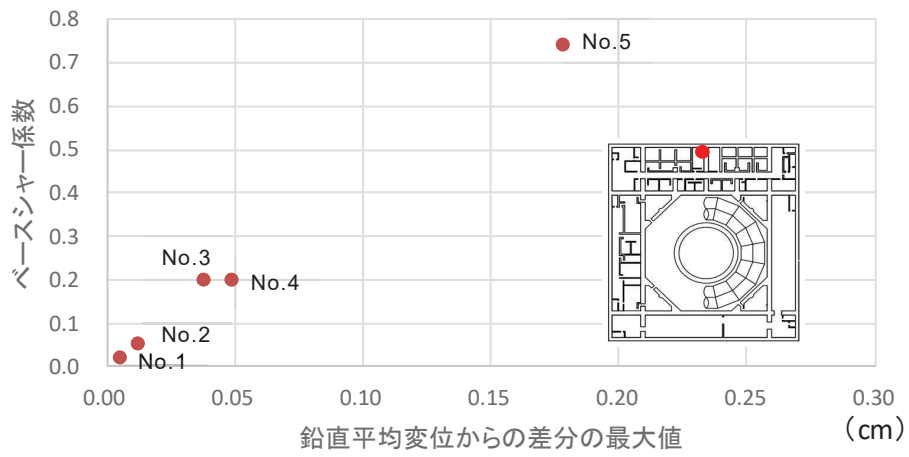


参考第 3-2 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (NS 方向)  
(代表地震) (2/2)

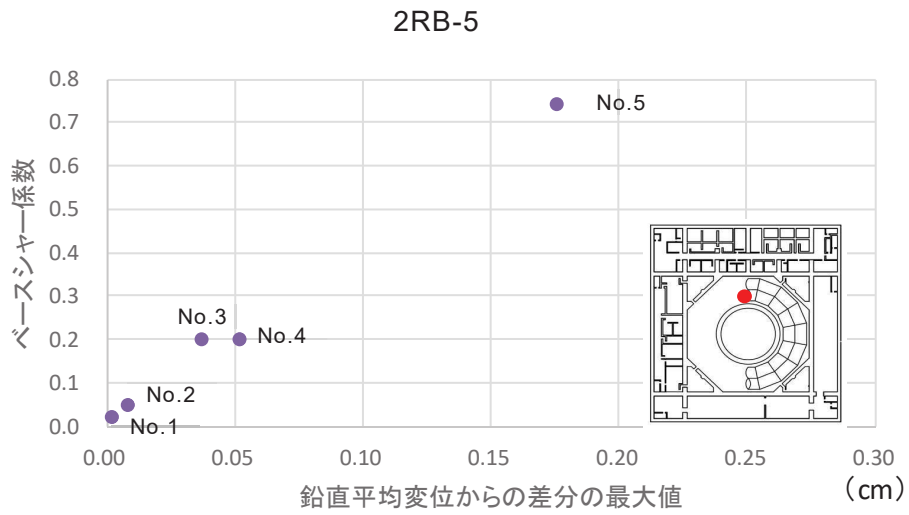
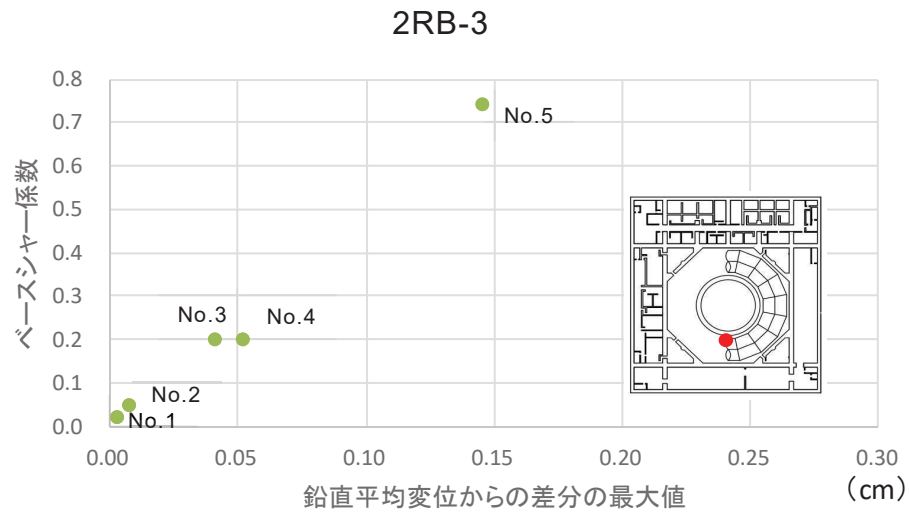
### 2RB-13



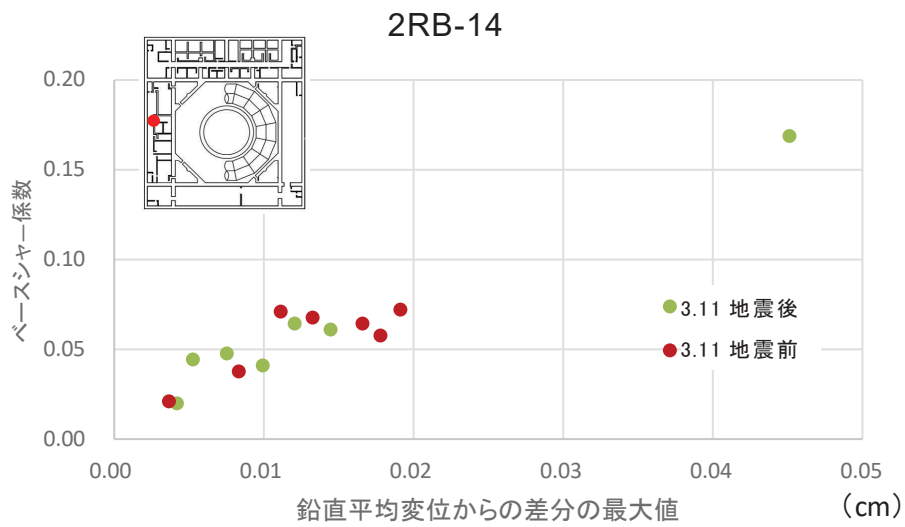
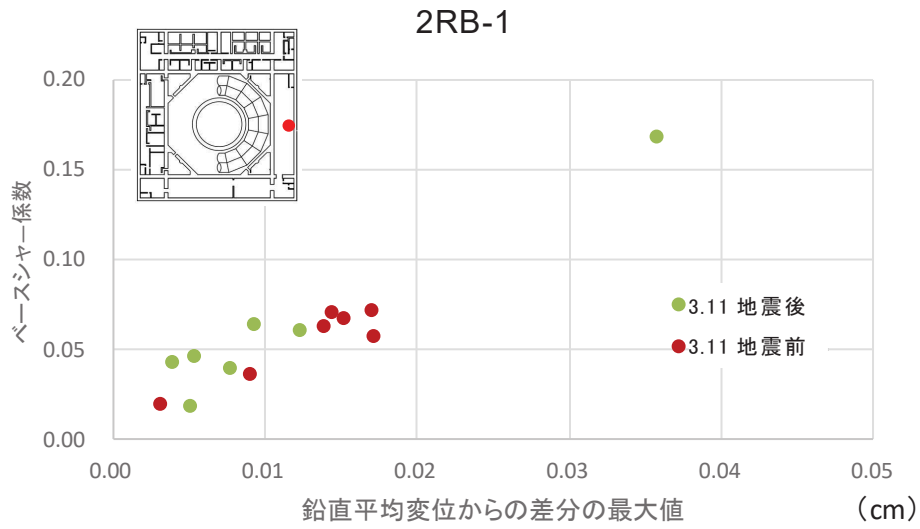
### 2RB-15



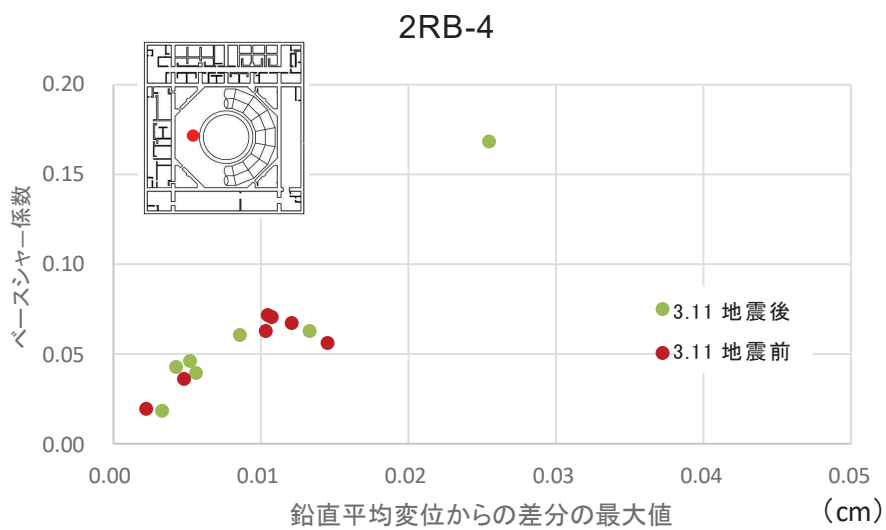
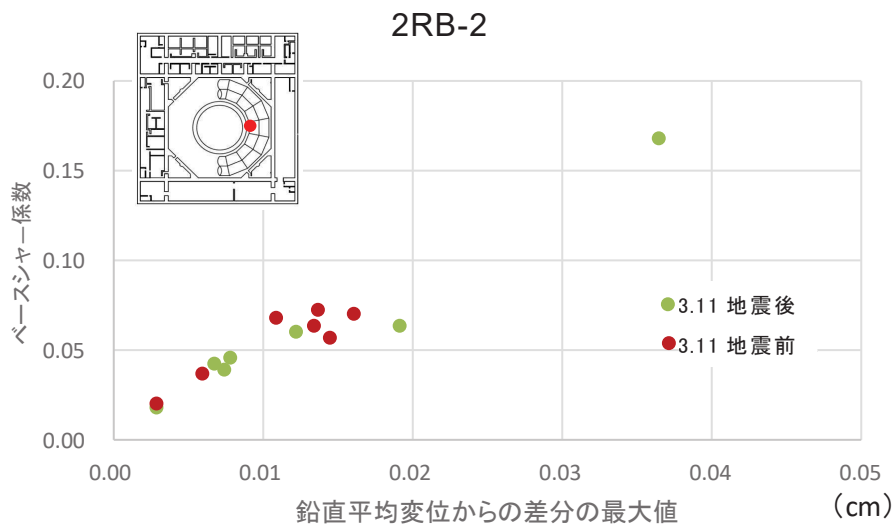
参考第 3-3 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (EW 方向)  
(代表地震) (1/2)



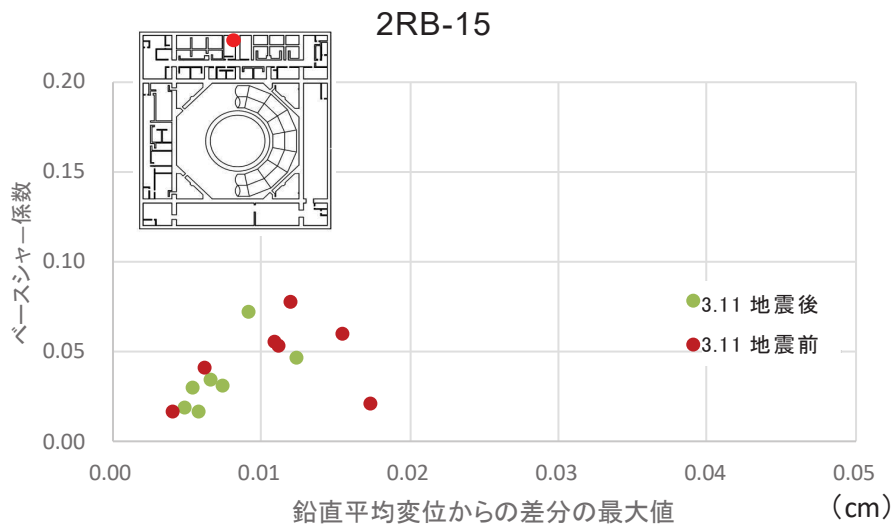
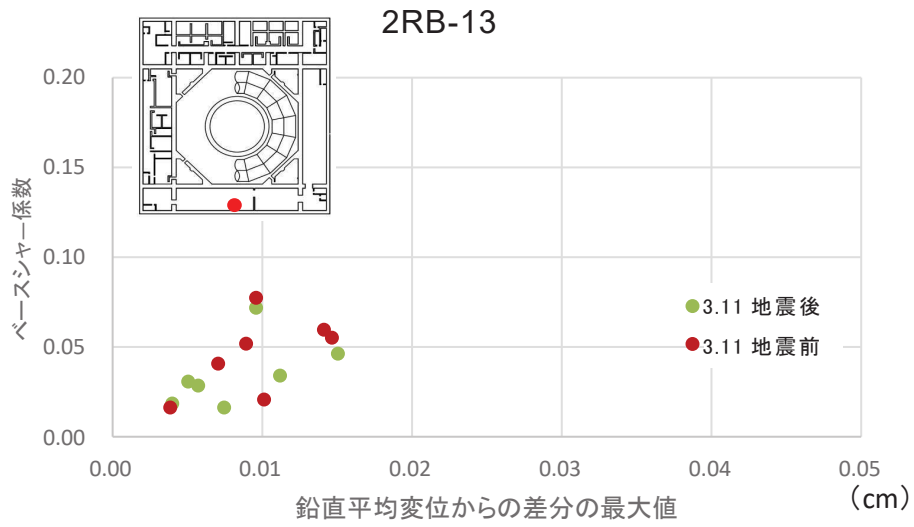
参考第 3-4 図 ベースシヤ-係数と鉛直変位の比較 (EW 方向)  
(代表地震) (2/2)



参考第 3-5 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (NS 方向)  
 (3.11 地震前後の中小地震) (1/2)

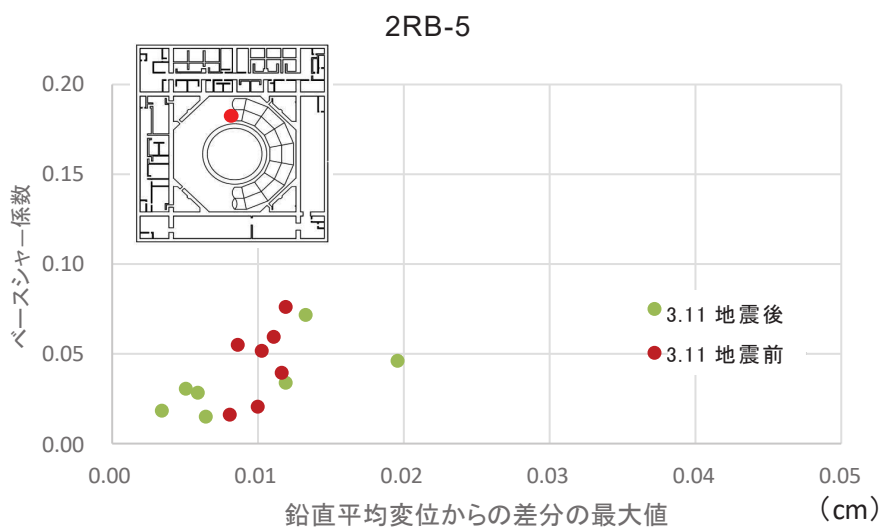
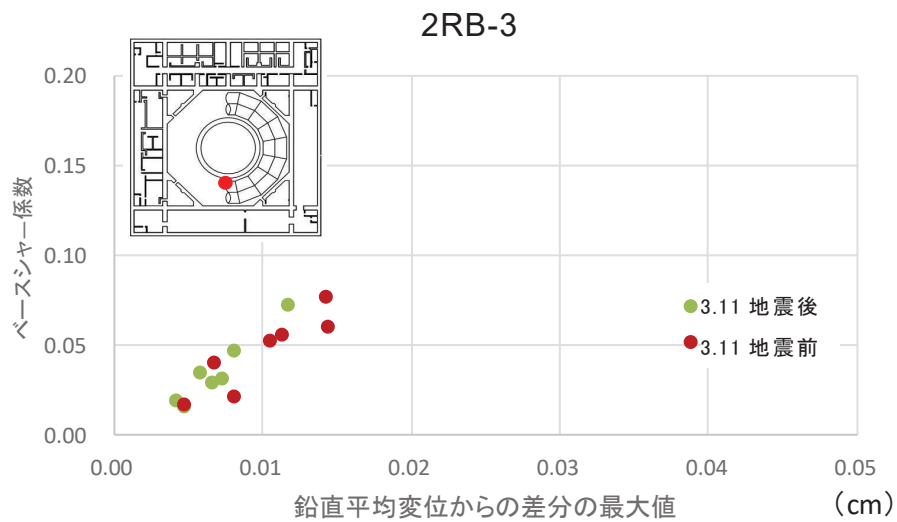


参考第 3-6 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (NS 方向)  
(3.11 地震前後の中小地震) (2/2)



参考第 3-7 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (EW 方向)  
(3.11 地震前後の中小地震) (1/2)





参考第 3-8 図 ベースシャー係数と鉛直変位の比較 (EW 方向)  
(3.11 地震前後の中小地震) (2/2)