

女川原子力発電所2号炉 耐震設計の論点に係る整理

平成29年 6月15日
東北電力株式会社

I. 耐震設計に係る主な論点

| 分類 | 番号 | 項目 | 概略工程 | |
|----|----|--|------------|--|
| 共通 | 1 | 評価対象の網羅性 | [Redacted] | |
| | 2 | 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 | [Redacted] | |
| | 3 | 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 (影響検討対象施設の抽出プロセス・抽出結果) | [Redacted] | |
| | 4 | 重大事故等による荷重と地震動の組合せの設定の考え方 | [Redacted] | |

II. 既工認からの主な解析評価条件の変更点

| 分類 | 番号 | 変更項目 | | 概略工程 | |
|-----------|--------------------|------------------------|----------------------------|------------|--|
| 建物・構築物 | 5 | 建屋の地震応答解析モデル(女川2号) | 東北地方太平洋沖地震による建屋の応答状態の反映 | [Redacted] | |
| | | | 入力地震動の算定 | [Redacted] | |
| 建物・構築物 | 6 | 弾塑性解析の適用 | 応力解析モデルへの弾塑性解析の適用 | [Redacted] | |
| | | | 原子炉建屋屋根トラスの解析モデルへの弾塑性解析の採用 | [Redacted] | |
| 屋外重要土木構築物 | 7 | 解析手法の精緻化 | 時刻歴応答解析 | [Redacted] | |
| | | | 減衰定数の変更 | [Redacted] | |
| 屋外重要土木構築物 | 8 | 解析モデルの精緻化 | 構造解析における三次元モデルの適用 | [Redacted] | |
| | | | 隣接建造物のモデル化 | [Redacted] | |
| 屋外重要土木構築物 | 9 | 後施工せん断補強筋による耐震補強 | | [Redacted] | |
| 機器・配管系 | 10 | サプレッションチェンバ内部水質量の考え方変更 | 内部水質量の考え方 | [Redacted] | |
| | | | 原子炉本体基礎の復元力特性の考慮 | [Redacted] | |
| | 12 | クレーン類のギャップ非線形モデルの採用 | 燃料交換機 | [Redacted] | |
| | | | 原子炉建屋クレーン | [Redacted] | |
| 13 | 燃料ラックの減衰定数の変更 | 角管並列型 | [Redacted] | | |
| 14 | ポンプ等の応答解析モデルの精緻化 | | [Redacted] | | |
| | クレーン類, 配管系の減衰定数の変更 | | [Redacted] | | |
| 共通 | 15 | 鉛直方向の動的地震力の適用 | 地震応答解析モデルの追加及び鉛直方向の減衰定数の考慮 | [Redacted] | |
| | | | 水平方向及び鉛直方向地震力の組合せ方法の変更 | [Redacted] | |

III. その他

| 分類 | 番号 | 項目 | 概略工程 | |
|----|----|-------------------|------------|--|
| 共通 | 16 | 地盤の液状化 | [Redacted] | |
| | 17 | 保管場所・アクセスルート(斜面他) | [Redacted] | |
| | 18 | 耐津波設計 | [Redacted] | |

東北地方太平洋沖地震等の施設への影響を踏まえた耐震性評価に反映すべき事項の検討

| 分類 | コメント概要 | コメント回答内容 | 資料1-1 コメント番号 | 概略工程 | | | |
|--------------------------|---|--|---|--|---|--|--|
| ①地震による建屋の状態 (構造的影響評価) | <ul style="list-style-type: none"> 点検調査が網羅的に行われていることを示すこと 3D-FEMによるシミュレーション解析と点検結果の整合性を検討した上で、目視不能箇所や局部的に応力が大きい箇所などの健全性を示す事 | <ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋の構造的特徴及び3D-FEMの解析結果から必要十分な点検が行われていることを示す。なお、3D-FEMの解析解析については、観測記録、ひび割れ調査結果との整合を示す 3D-FEMの解析結果から、局部的に大きな応力となる箇所の点検調査結果を示す 質点系シミュレーションモデル及び3D-FEMにより、建屋が「概ね弾性範囲」であったこと（鉄筋が損傷を受けていないこと）を示す 屋根トラスの健全性についても示す | No.7, 8, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 21, 25 | <ul style="list-style-type: none"> 質点系モデルを用いたシミュレーション解析の詳細結果(水平・鉛直) 点検結果の網羅性、代表性の考え方、点検方法 3D-FEMモデルを用いたシミュレーション解析 3D-FEMによる照査を含めた点検の網羅性、代表性(柱、梁の点検例を含む) 3D-FEMによる応力集中箇所と点検結果の照査 オペフロ上部3D-FEM非線形解析 屋根トラスの点検結果、シミュレーション解析結果 | <p style="color: red; font-size: 24px; font-weight: bold;">} 今回のご説明範囲</p> | | |
| ②初期剛性低下 (乾燥収縮の影響) | <ul style="list-style-type: none"> 剛性低下の要因の一つとしている乾燥収縮について、乾燥収縮と剛性低下の関係について定量的に示すこと 検討に当たっては、建屋の乾燥収縮ひび割れの発生状況についても説明すること | <ul style="list-style-type: none"> 剛性低下の要因の一つとして乾燥収縮が影響していることを、他の建屋の剛性低下の状況、鉛直方向の剛性との関係などから示す 女川の建屋に乾燥収縮ひび割れが比較的多いことを、他プラント（東通）との比較から示す。また、東通の剛性低下の状況についても説明する 乾燥収縮ひび割れが初期の剛性低下に影響することを耐震実験や解析的検討から示す | No.3, 9, 13, 19, 23, 26 | <ul style="list-style-type: none"> 各建屋の剛性低下の傾向 | | <ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮の状況と初期剛性低下への影響 | |
| ③耐震補強 | <ul style="list-style-type: none"> オペフロ上部改造工事について、剛性復元、耐力向上を定量的に説明すること | <ul style="list-style-type: none"> 工事施工前に実施した耐震実験や耐震補強工事後に得られた地震観測記録から、耐震補強工事の有効性について示す。 | No.6, 24 | <ul style="list-style-type: none"> 耐震補強の考え方とその効果 | | | |
| ④設計体系 | <ul style="list-style-type: none"> 乾燥収縮が剛性低下に影響を与える場合、従来の設計体系における考え方、今回の設計体系における扱いを検討すること | <ul style="list-style-type: none"> 耐震壁の初期剛性の低下は、最終耐力（主に鉄筋が負担）には影響を与えないことを耐震実験や解析的検討から示す 弾性範囲の応答では初期剛性の影響が支配的であることから弾性設計用地震動Sdに対する設計上の配慮について整理する 女川における乾燥収縮の進行程度や乾燥収縮に対するコンクリートの特徴について整理する | No.1, 2, 4, 5, 10, 17, 18, 20 | <ul style="list-style-type: none"> 今回工認モデルの妥当性および不確実性への配慮 耐震壁のJEAGへの適用性 | | | |
| ⑤入力地震動 | <ul style="list-style-type: none"> 一次元波動論により算出した地中波（E+F）を入力地震動に用いることの妥当性を説明すること | <ul style="list-style-type: none"> 東北地方太平洋沖地震などにおいて、自由地盤で得られた観測記録と建屋内で得られた観測記録を用いた検討から、入力地震動算定方法の妥当性を示す | No.22 | <ul style="list-style-type: none"> 観測記録を踏まえた地盤モデルの設定 | | | |
| ⑥設備への影響 | <ul style="list-style-type: none"> 剛性低下により既設設備の健全性にどれだけ影響があるのか、課題を抽出し説明すること 不確実性の設計への配慮（保守的なスペクトルの拡幅等）について整理して説明すること | <ul style="list-style-type: none"> 建屋剛性の変化による機器への影響がどの程度であるのか整理して示す | No.5, 17, 18 | <ul style="list-style-type: none"> 設備(シヤラグ、炉内構造物等)の剛性変化影響検討 | | | |

女川2号炉 耐震論点における今回ご説明する内容の位置づけ

東北地方太平洋沖地震等 (3.11/4.7)

A. 新規制基準への適合性審査での耐震設計, 評価

B. 東北地方太平洋沖地震等 (3.11/4.7) による施設への影響検討

基準地震動の策定

建屋観測記録,
点検結果

3.11/4.7のシミュレーション
(建屋揺れの再現) 解析

機器・配管点検

・建屋観測記録, 点検結果とシミュレーション
解析結果の比較により整合性を確認
・シミュレーション解析結果と点検結果並びに
その相互補完により, 建屋状況の把握

比較・検証

チューニング
⇒ 初期剛性低下

初期剛性低下の要因検討

整合

入力地震動の評価

影響検討 (現状の建屋の状況, 振動性状の把握, 評価)

今回ご説明する範囲

機器・配管の解析, 評価

論点の共通項目【I. 1, 2, 3, 4, II. 15】

- 評価対象の網羅性
- 水平2方向及び鉛直の組合せ
- 下位クラス施設の波及的影響 他

土木構築物における論点【II. 7, 8, 9】

- 解析手法の精緻化
- 解析モデルの精緻化
- 後施工せん断補強筋

建物・構築物における論点【II. 5, 6】

- 地震応答解析モデル
- 弾塑性解析の適用

機器・配管系における論点【II. 10, 11, 12, 13, 14】

- 基礎の復元力特性
- 解析モデルの精緻化
- 減衰定数の変更 他

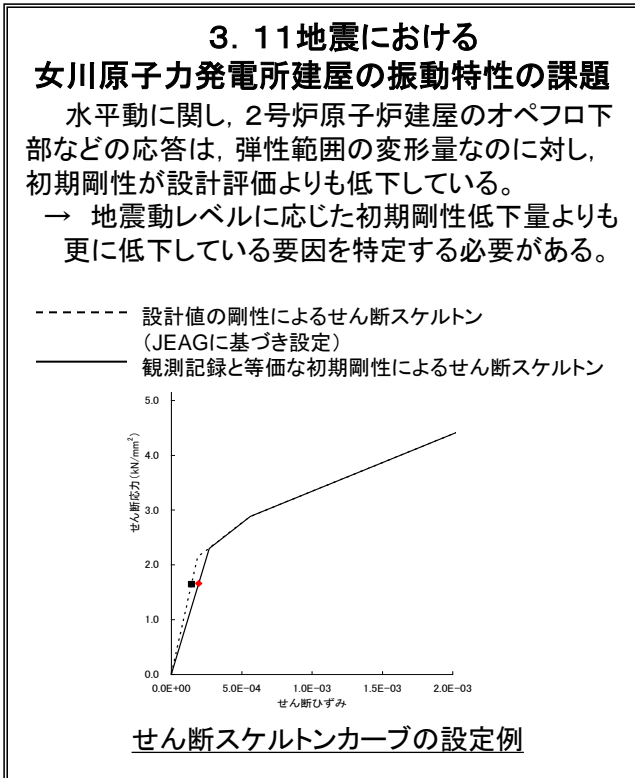
土木構築物の地震応答解析

建物・構築物の地震応答解析

機器・配管の解析, 評価
⇒ 工認耐震計算書

女川原子力発電所2号炉 東北地方太平洋沖地震後の影響評価の概要

1. 女川原子力発電所2号炉原子炉建屋の初期剛性低下の要因分析



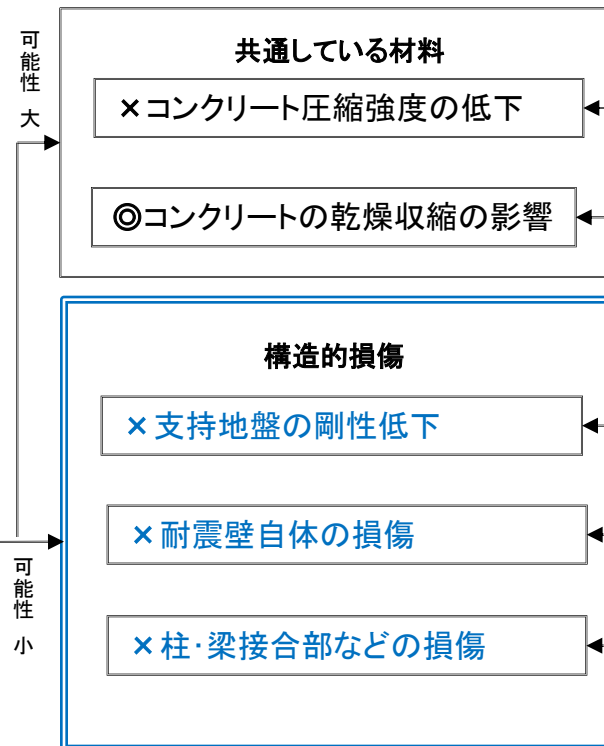
振動特性の主な特徴

- ①3.11地震においては、耐震クラスに係らず、全ての建屋で同様の水平動の初期剛性低下が認められる。
- ②3.11地震に対して、鉛直動については顕著な初期剛性低下は認められない。
- ③3.11地震前の中小地震においても、全ての建屋で設計評価を下回らないものの、水平動の初期剛性の低下傾向が認められる。

低下要因検討上のポイント

- ①全建屋に共通した要因で、中小地震における初期剛性低下とも関連した要因が有力(例えば共通して使用している材料の問題)。
- ②一方で、耐震クラスに係らず3.11地震に対し全て同様の初期剛性低下を来たしている事、鉛直動に対しては顕著な剛性低下はみられないことから、建屋個別の構造的損傷などが主要因とは考えにくい。但し、3.11地震に対しては個別建屋の複合的的要因となっている可能性はある。

【地震動以外の初期剛性低下の要因(候補)】

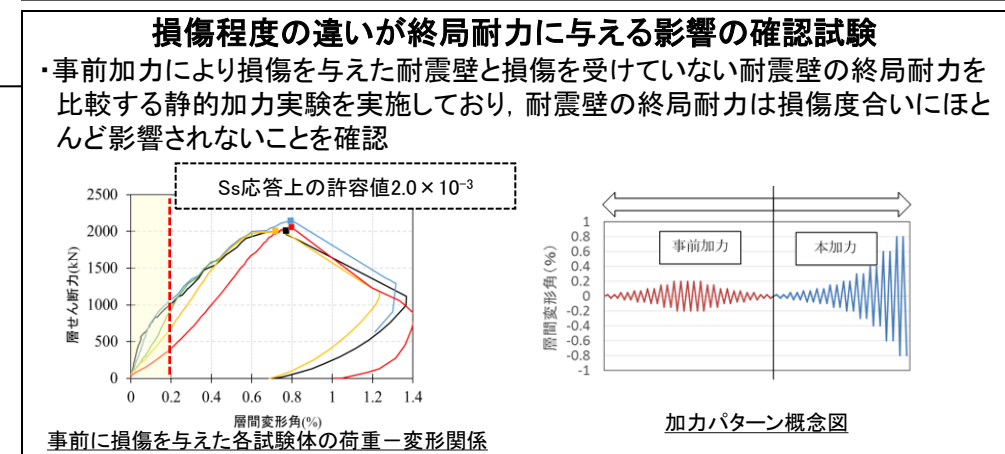
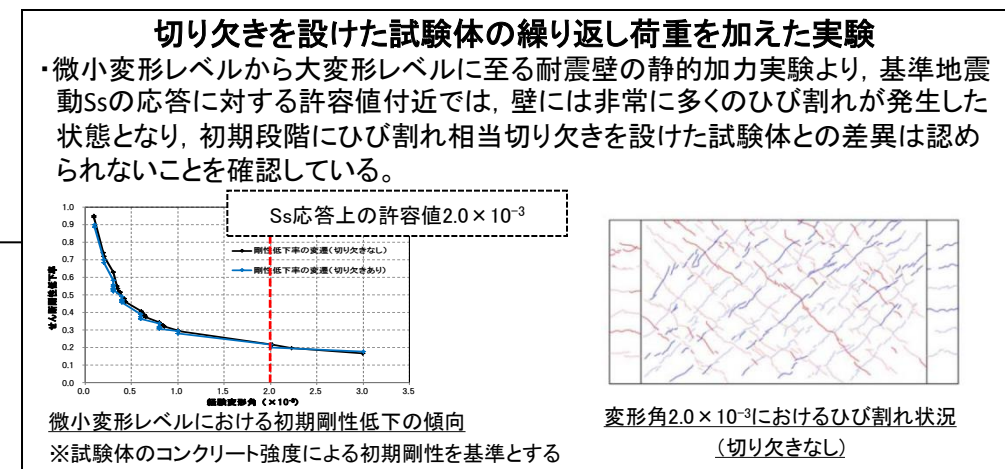
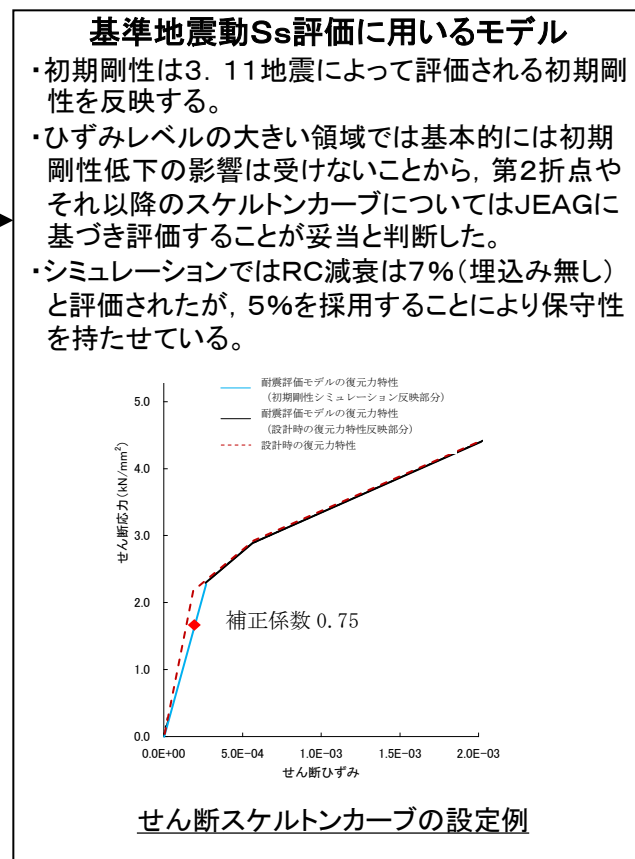
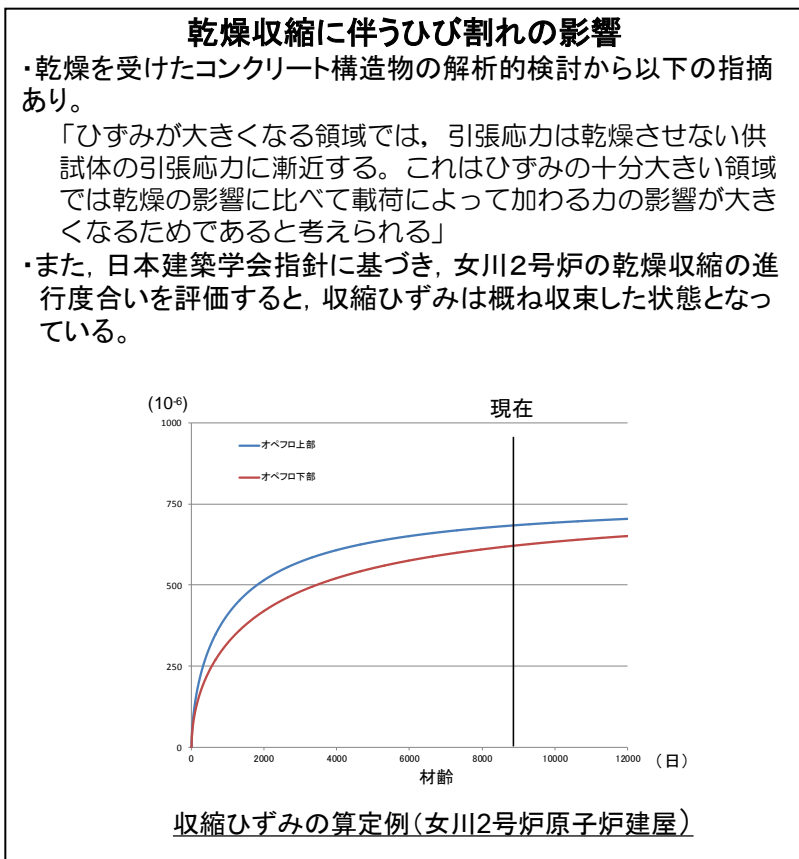


【各候補に対する検討】

- ・2号炉原子炉建屋他からコアを抜き取り圧縮強度を確認した結果、強度の低下は認められない。
- ・乾燥収縮に伴い発生するひび割れはヤング係数の低下に寄与すること、また乾燥収縮ひび割れは地震によるひび割れ発生への進展に影響を与える等の指摘がある。
- ・女川の支持地盤は硬質(2号炉原子炉建屋の等価Vsは1820m/s)であり、剛性低下は考え難い。なお、固有振動数の低下を地盤バネで再現するには、Vsを計算上半分程度まで落とす必要がある。
- ・耐震壁に耐震上有害となるひび割れ(1.0mm以上のひび割れ)は現地点検の結果、確認されなかった。
- ・水平力は全て耐震壁で負担しており、フレーム部材(変形追従部材)は建屋剛性に寄与しない。また、壁と床などの交差部が全面的に損傷することは非現実的であるが、念のため現地で健全性の確認を行う。

今回説明事項

2. 女川原子力発電所2号炉原子炉建屋 基準地震動Ss評価に用いるモデル



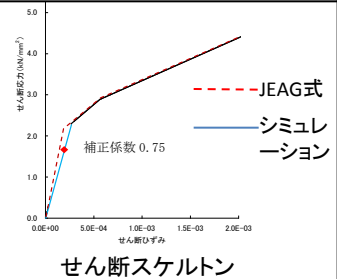
女川2号炉 東北地方太平洋沖地震等の施設への影響を踏まえた耐震性評価に反映すべき事項の検討

【建屋の初期剛性低下の要因分析とその結果を踏まえた耐震設計への反映】

【課題】東北地方太平洋沖地震における 女川原子力発電所建屋の振動特性

水平動に関し、2号炉原子炉建屋のオペフロ下部などの応答は、弾性範囲の変形量なのに対し、初期剛性が設計評価よりも低下している。

→ 設計で想定している地震動レベルに応じた初期剛性低下よりも更に低下している原因を特定し、その要因を踏まえて基準地震動 S_s に対する地震応答解析モデルを構築する必要がある。



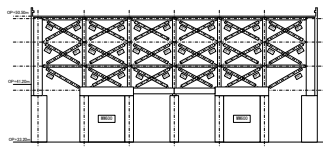
要因の検討(主な検討項目)

(候補) 支持地盤の剛性低下

- ・3.11地震時の接地圧と許容支持力の比較(解析的検討)

耐震補強工事の有効性確認

- ・耐震実験や地震観測記録等からオペフロ上部補強工事の有効性について示す。



(候補) 構造的損傷

建屋の状態が、弾性設計用地震動である基準地震動 S_1 に対する設計(許容応力度設計)範囲内であるかどうかを解析及び点検から検討する。

- ・全ての水平地震力を負担する鉄筋(耐震壁の鉄筋)が損傷していないかどうかの検討。
- ・地震力を負担しない他の部材についても同様の検討。

今回説明事項

(候補) 材料の特性

コンクリートの圧縮強度

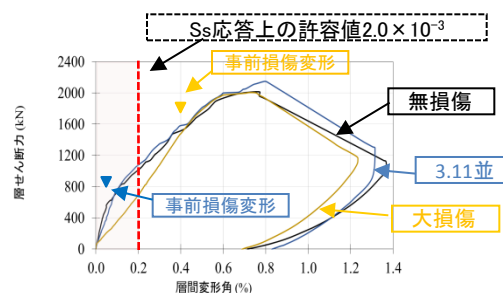
コンクリートの圧縮強度の低下の有無を、建屋から採取したコアにより確認。

乾燥収縮ひび割れの影響

- ・女川建屋の乾燥収縮ひび割れ量の多寡の確認。
- ・女川の他の建屋の剛性低下の傾向を確認。また、鉛直動に対する傾向も確認。
- ・乾燥収縮が耐震壁の初期の剛性低下に与える影響の確認(文献レビュー、解析的検討等)。

要因を踏まえた地震応答解析モデルの策定

- ・初期剛性低下の原因を踏まえ、基準地震動 S_s , S_d に適用する地震応答解析モデルを策定する。策定に当たっては、3.11地震、基準地震動 S_s , S_d それぞれの地震動レベルの違いを考慮する。
- ・剛性低下の要因として乾燥収縮ひび割れの影響が考えられる場合は、耐震壁のひび割れの多寡を含めた損傷程度の違いが最終耐力にどのような影響を与えるかを確認した耐震実験結果等を踏まえ、モデルを設定する。
- ・また、女川の乾燥収縮の進行程度や乾燥収縮に対するコンクリートの特徴等についても整理する。



事前に損傷を与えた各試験体の荷重-変形関係

設計体系に反映すべき事項の整理

- ・策定した地震応答解析モデルに対し、初期剛性低下の要因の不確かさとしてのばらつき評価の考慮方法について、既往知見、各種解析、耐震壁の実験等から設定する。
- ・また、初期剛性低下の要因が断面設計や機器・配管設計に与える影響の有無についても検討する。

耐震性評価手法「極限解析による評価」及び「簡易弾塑性解析」について

1. はじめに

耐震安全性及び裕度を示すため、適用の可能性がある評価手法（「極限解析による評価」及び「簡易弾塑性解析」）について以下に示す。

2. 評価手法の適用実績

「極限解析による評価」及び「簡易弾塑性解析」の適用実績は下表のとおり。

「極限解析による評価」及び「簡易弾塑性解析」の適用実績

| No | 評価手法 | 適用実績 |
|----|-----------|---|
| 1 | 極限解析による評価 | 設計建設規格にてエンドースされた手法であり、先行機の設計・審査において適用実績がある |
| 2 | 簡易弾塑性解析 | 設計建設規格にてエンドースされた手法であり、これまでもクラス1容器などへ適用実績がある |

3. 「極限解析による評価」及び「簡易弾塑性解析」について

(1) 極限解析による評価

極限解析による評価は『発電用原子力設備規格 設計・建設規格 (2005年版/2007年追補版)』(以下「設計・建設規格」という。)の「第9章 炉心支持構造物 CSS-3160 極限解析による評価」に規定されている。

なお、女川2号炉の既工認においては、設計・建設規格の「CSS-3100 材料の応力強さ限界および許容応力 (告示 第96条)」等に従い評価している。

これまで当社ではCSS-3160による評価の既工認実績はないが、CSS-3160による評価、CSS-3110による評価共に、炉心支持構造物に適用可能な設計手法として規定されており、先行機の至近の工認において、炉心支持構造部に対しCSS-3160による評価の実績がある。

(2) 簡易弾塑性解析

簡易弾塑性解析は設計・建設規格の「第4章 容器 PVE クラス MC 容器 PVE-3130 簡易弾塑性解析 (PVB-3300の規定に準ずる)」に規定されている。

なお、女川2号炉の既工認においては、設計・建設規格の「PVE-3100 PVE-3010に規定されない荷重により著しい応力が生じる部分の取扱い (告示 第21条)」等

に従い評価している。

これまで当社では PVE-3130 (PVB-3300) による評価の既工認実績はないが、PVE-3130 (PVB-3300) による評価、PVE-3100 による評価共に、クラス MC 容器に適用可能な設計手法として規定されている。

なお、クラス 1 容器の既工認において PVB-3300 (告示 第 14 条) による評価の実績がある。

以 上