

本資料のうち、枠囲みの内容は機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所 6号及び7号炉

既工認で採用実績のない
耐震評価手法について
(主要な検討事項)

平成28年3月

東京電力株式会社



東京電力

本資料の位置づけ

- プラントの耐震成立性を確認する上で重要な論点を抽出することを目的とし、今後申請する柏崎刈羽原子力発電所6号及び7号炉の補正工認で採用する予定の耐震評価手法のうち、既工認の手法と相違があるもの*を網羅的に整理した。
- 上記のうち、他社プラントの既工認においても採用実績のない耐震評価手法（主要な検討事項）について次頁以降に概要を示す。

*：重大事故等対処施設・浸水防護施設等、既工認が存在しない新設設備においても既往の耐震評価手法を用いた設計とする。

建屋解析モデルへの新潟県中越沖地震による知見の反映

- 新潟県中越沖地震時に取得された観測記録を用いたシミュレーション解析結果から得られた知見（以下の4項目）を反映した解析モデルを採用する。
 - 設計時にはコンクリートの設計基準強度を基に算定していた鉄筋コンクリート部の剛性評価を、コンクリートの実際の平均的な強度※を基に算定して見直す
 - ※コンクリート剛性見直し時に使用するコンクリート強度は、設計基準強度を上回る値となるが、あくまで建屋剛性のために用いる強度であり、建物・構築物等の強度評価に用いるコンクリート強度は、設計基準強度を用いる方針である
 - 設計時には耐震要素として考慮していなかった補助壁について、上下階に応力伝達が可能と考えられる壁を再評価して、新たに耐震要素に取り入れる
 - 建屋の側面地盤ばねとして、Novakの水平ばねに加えて回転ばねを考慮する
 - 地盤表層部については、地盤—建屋相互作用効果が見込めないと判断し、ばね評価を行わない



採用予定の解析モデル図（7号炉原子炉建屋の例）

応力解析における弾塑性解析の採用

- 既工認では、原子炉格納容器コンクリート部（RCCV）の3次元FEMモデルを用いた静的弾性解析による評価を実施していたが、今回工認では、入力地震力の増大に伴い、荷重状態Ⅳの検討で基本的に弾塑性解析を採用する。
- また、既工認時は、申請当時の計算機速度等を考慮して半割モデル（180°モデル）であったが、今回工認では、ドライウェル上部の開口部周辺の評価を正確に行うために、全周モデル（360°モデル）に見直す。



採用予定の解析モデル図



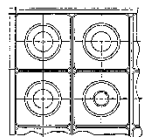
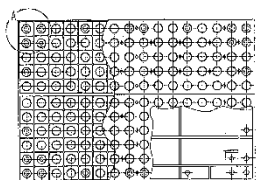
コンクリートの応力ひずみ関係

鉄筋の応力ひずみ関係

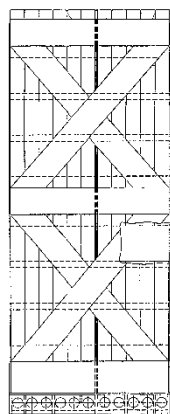
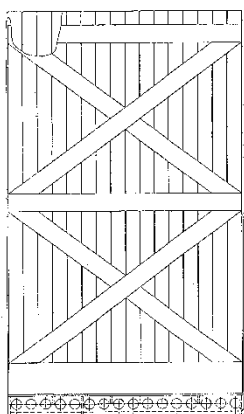
採用予定の材料構成則

使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数について

- 使用済燃料貯蔵ラックは水中（使用済燃料貯蔵プール）に設置されているものだが、従来の設計用減衰定数は、気中の溶接構造物の減衰定数を採用していた。水中では気中以上の減衰効果が期待できると考え、加振試験より得られた減衰定数に余裕を持たせた値（7%）を採用する。



A詳細



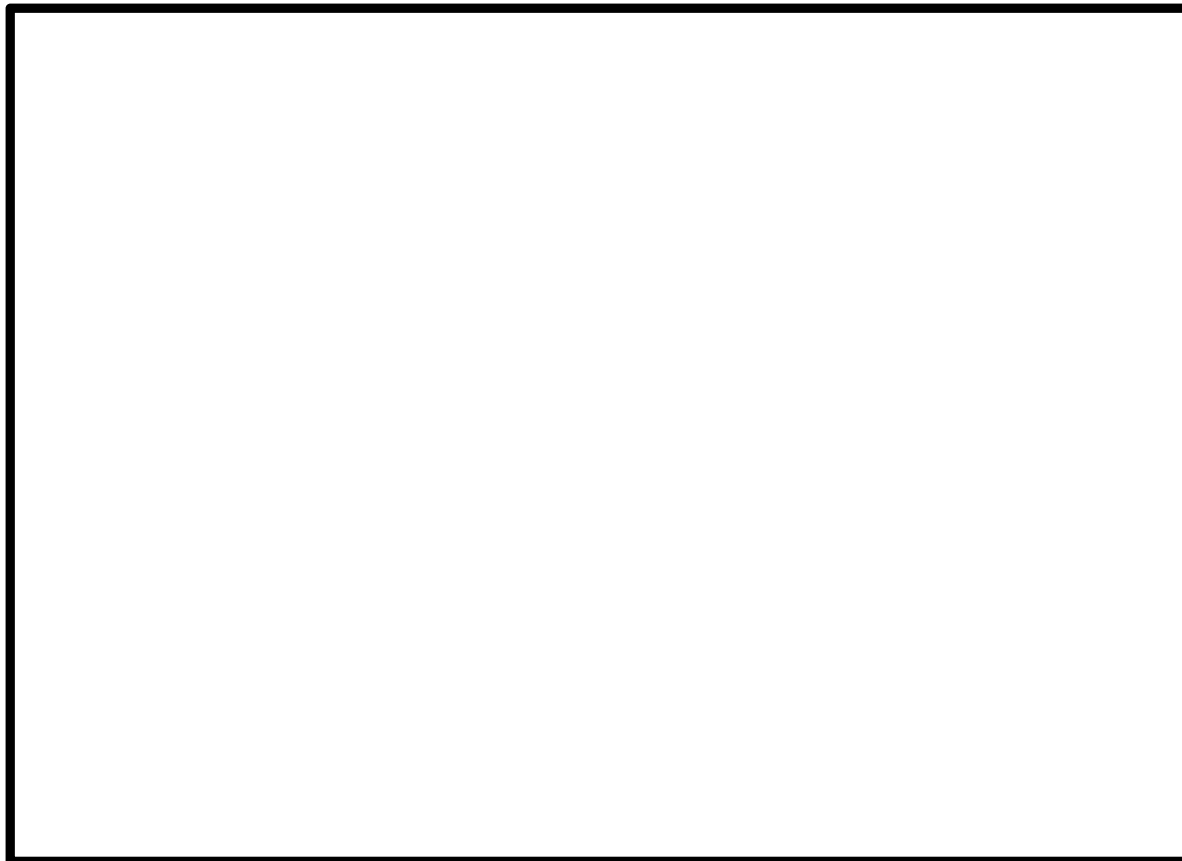
使用済燃料貯蔵ラック構造概略例



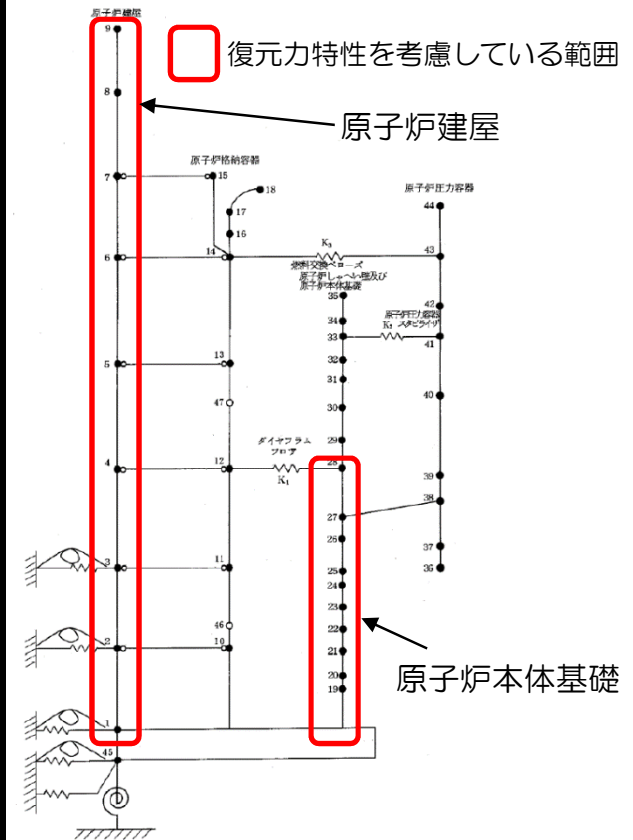
使用済燃料貯蔵プール概要図

原子炉本体基礎の復元力特性について

- 鋼板コンクリート構造である原子炉本体基礎の構造上の特徴を踏まえ、鋼板コンクリート構造耐震設計技術指針 建物・構築物編 (JEAG4618-2005) における評価式を基本に復元力特性を設定し、その妥当性を1/10縮尺試験体を用いた既往の試験との比較により確認した。



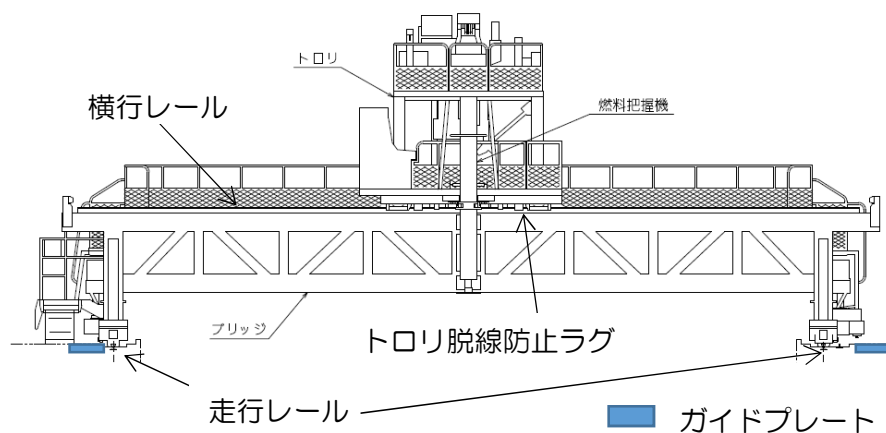
原子炉本体基礎概要図 (6号炉の例)



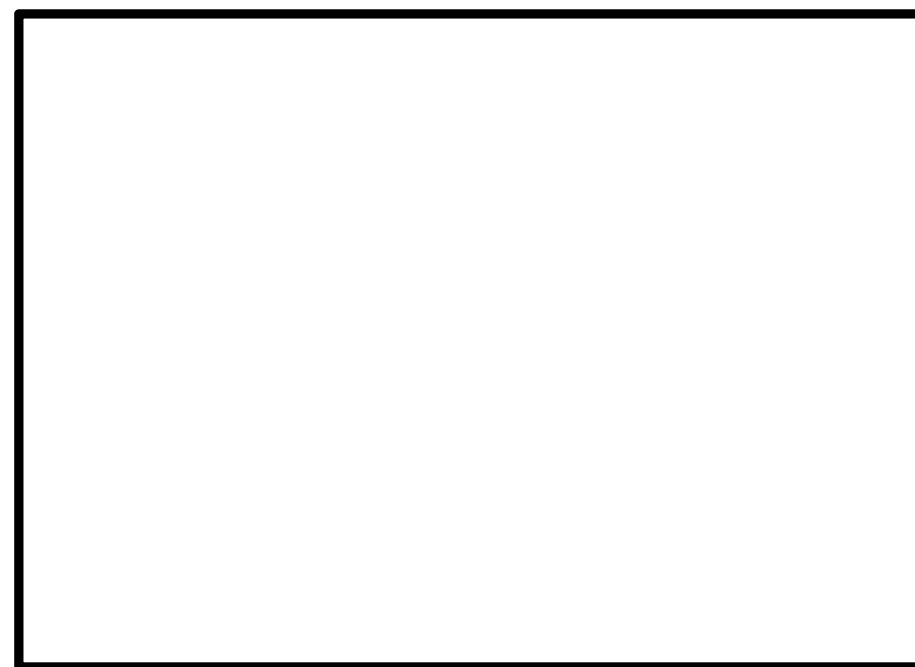
原子炉本体基礎の地震応答解析モデル (6号炉の例)

燃料取替機のギャップ非線形モデルについて

- 6号炉では，耐震強化工事にてレールの外側に補助構造物（ガイドプレート）を追設し，既設のレール等に期待せず落下を防止する構造とした。
- 構造上の特徴を忠実に設計へ反映するために，ガイドプレートと燃料取替機脚部との接触を考慮した解析モデルによる非線形時刻歴応答解析を採用する。



燃料取替機 構造図



燃料取替機 耐震解析モデル

【参考】建屋解析モデルへの新潟県中越沖地震による知見の反映

■ シミュレーション解析の概要

- 基礎版上で取得された観測記録を用いた地震応答解析を実施し、建屋の中間階で得られた観測記録が再現できるかを確認する。
- 実現象に近い応答を再現するという観点から、設計時の解析モデルから修正を行い、より精度良く観測記録を再現できるシミュレーション解析モデルを構築する。



解析フロー図

【参考】建屋解析モデルへの新潟県中越沖地震による知見の反映

- シミュレーション解析では、下表に示すケースでの地震応答解析を実施。③で考慮した4項目を設計モデルから変更することにより、観測記録との整合性が向上することを確認している。
- なお、今回工認で採用予定としているモデルでは、下表の③のモデルと同じ4項目を設計モデルから見直している。
- 次ページ以降に7号炉原子炉建屋のシミュレーション解析結果を示す。

表-シミュレーション解析での解析モデルの変更手順

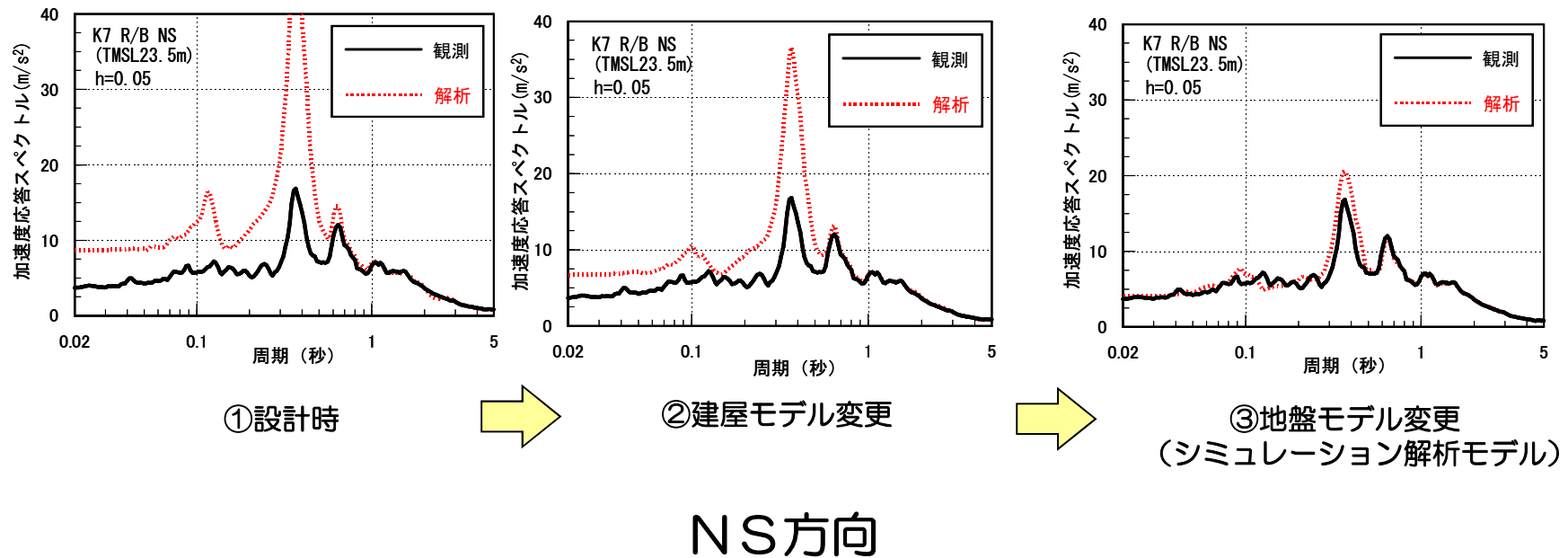
		① 設計時	② 建屋モデル変更	③ 地盤モデル変更 (シミュレーション解析モデル)
建屋	コンクリートのヤング係数	設計基準強度に基づく	実剛性	実剛性
	剛性を考慮する部位	耐震壁	耐震壁+補助壁	耐震壁+補助壁
地盤	埋込み効果	周辺地盤全層を考慮	周辺地盤全層を考慮	周辺地盤 (埋戻し土を除く)
	側面ばね	水平	水平	水平・回転

. . . 設計時と同一の条件

. . . 設計時から変更した条件

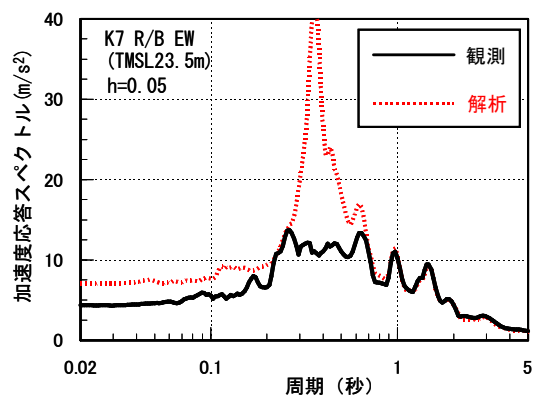
【参考】建屋解析モデルへの新潟県中越沖地震による知見の反映

- 7号炉原子炉建屋のシミュレーション解析結果
加速度応答スペクトルの比較（NS方向）

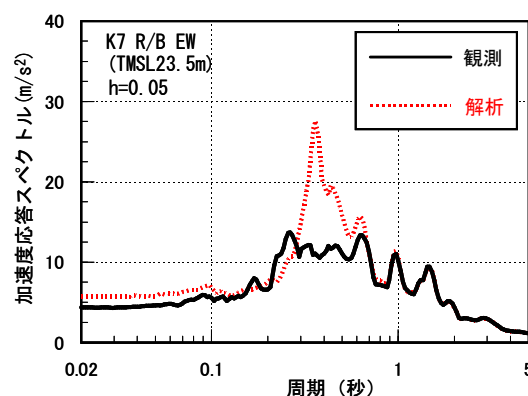


【参考】 建屋解析モデルへの新潟県中越沖地震による知見の反映

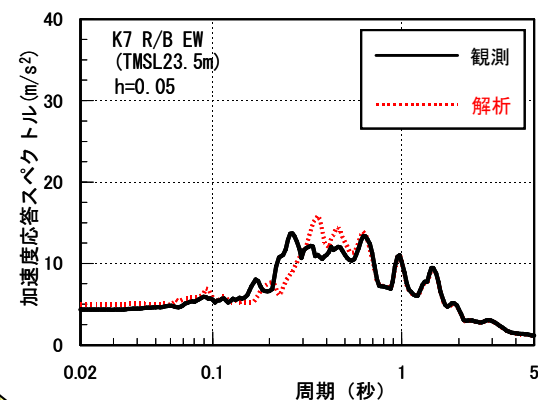
- 7号炉原子炉建屋のシミュレーション解析結果
加速度応答スペクトルの比較（EW方向）



①設計時



②建屋モデル変更

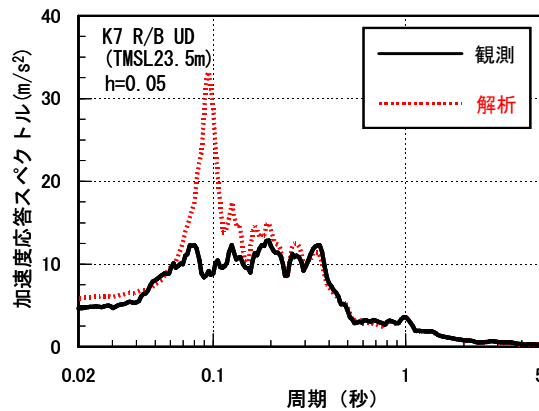


③地盤モデル変更
(シミュレーション解析モデル)

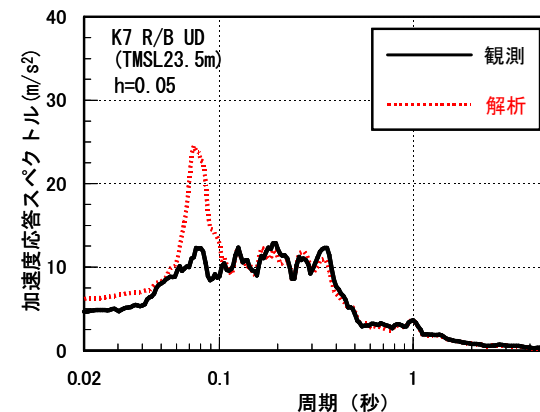
EW方向

【参考】 建屋解析モデルへの新潟県中越沖地震による知見の反映

- 7号炉原子炉建屋のシミュレーション解析結果
加速度応答スペクトルの比較（UD方向）



①設計時



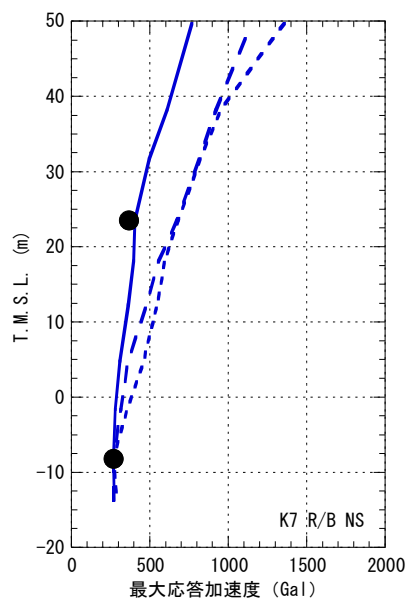
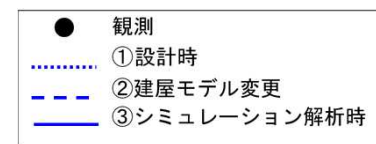
②建屋モデル変更

UD方向

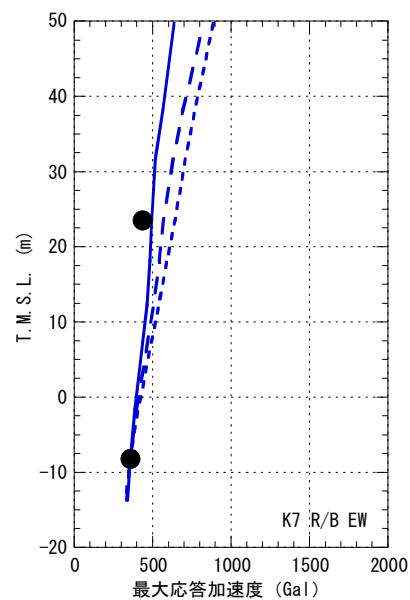
鉛直方向の解析モデルでは、側面地盤の効果は考慮していないことから、建屋モデルの変更による影響のみを評価している。

【参考】 建屋解析モデルへの新潟県中越沖地震による知見の反映

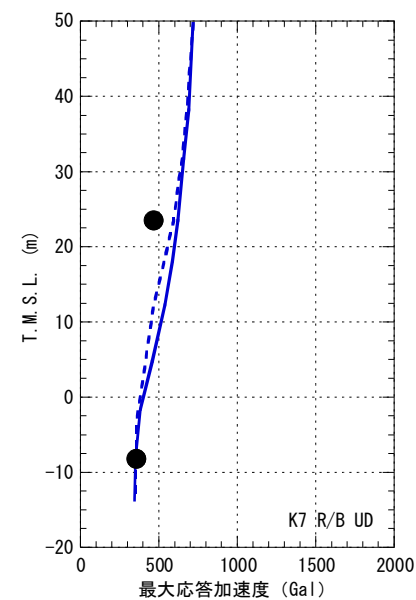
■ 7号炉原子炉建屋のシミュレーション解析結果 最大応答加速度の比較



NS方向



EW方向



UD方向

【参考】 応力解析における弾塑性解析の採用

■ 採用予定の材料構成則



コンクリートの応力ひずみ関係
圧縮側：CEB-FIPモデル
引張側：岡村・出雲による式

鉄筋の応力ひずみ関係
圧縮・引張：完全弾塑性

採用予定の材料構成則

【参考】 応力解析における弾塑性解析の採用

材料	採用モデル	採用根拠等
コンクリート（圧縮側）	CEB-FIPモデル ^[1]	CCV規格 ^[2] （CVE3511.2-1）を参考にパラボラ型の応力ひずみ曲線を想定する際に一般的なモデルを採用。
コンクリート（引張側）	岡村・出雲による式 ^[3]	使用解析コード（ABAQUS）において、各種実験結果との対応が良いことが確認されている例えば ^[4] ^[5] ^[6] 。
鉄筋（圧縮・引張）	完全弾塑性	CCV規格（CVE-3511.2の記載）に基づく。

[1]Comite Euro-International du Beton：CEB-FIP MODEL CODE 1990 (DESIGN CODE),1993年

[2]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JSME S NE1-2003

[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]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

[5]財団法人 原子力発電技術機構：重要構造物の安全評価(原子炉格納容器信頼性実証事業)に関する総括報告書，平成15年3月

[6]美原義徳：「ABAQUS V6.3における塑性損傷論に基づくコンクリートモデルについて」，ABAQUS国内ユーザズミーティング2002講演論文集，pp.59-68，2002

【参考】 応力解析における弾塑性解析の採用

- 既工認モデルでは、計算機速度等を考慮して、東西軸に対して北半分のみをモデル化していたが、今回工認では、既工認モデルで表現できていなかったドライウェル上部の開口部周辺の評価を正確に行うために、南半分についてもモデル化することとした。

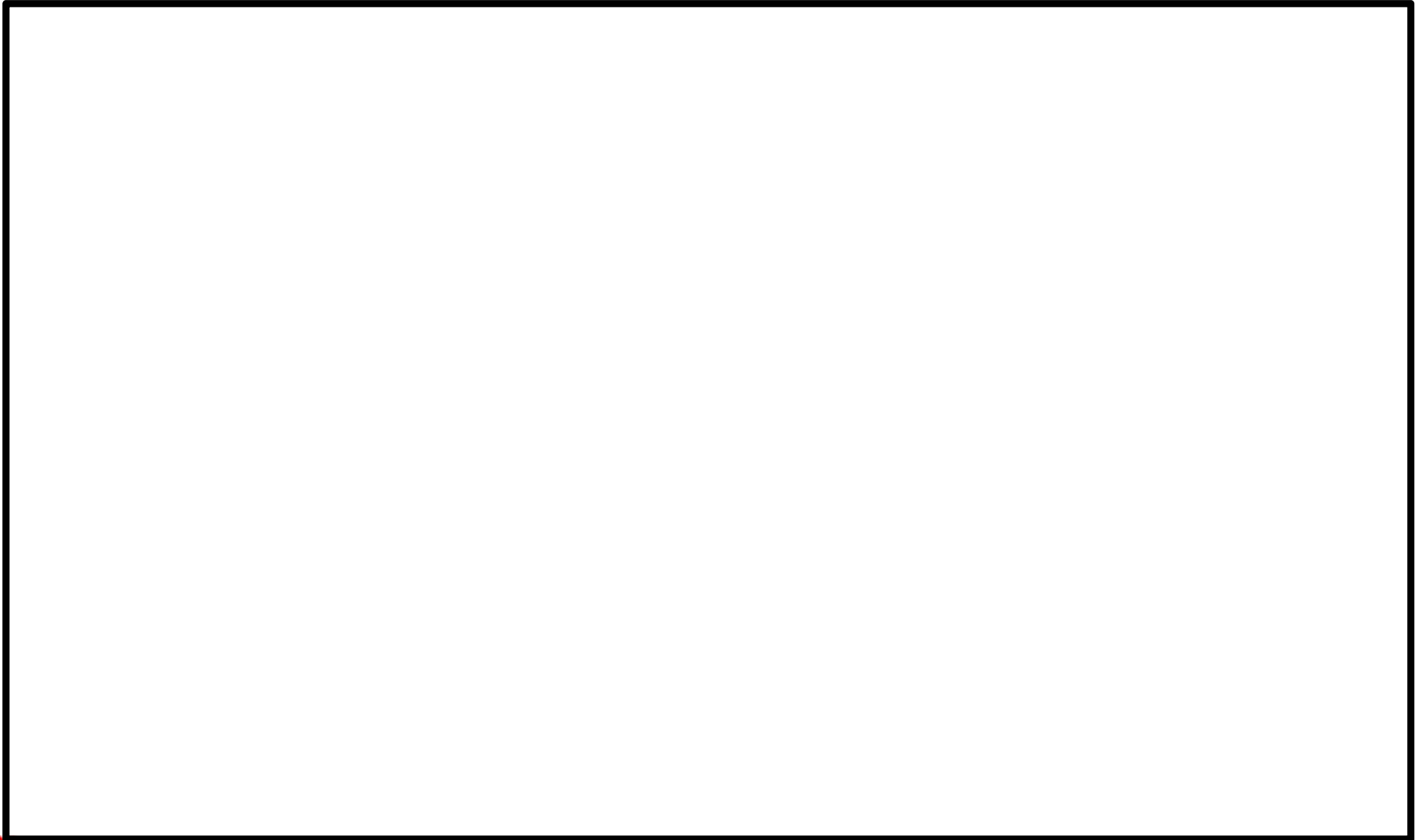


既工認モデル
(180° モデル)

採用予定のモデル
(360° モデル)

【参考】使用済燃料貯蔵ラックの加振試験の例について

- 振動試験における加振方法概要



【参考】使用済燃料貯蔵ラックの加振試験の例について

● 試験結果



ラックの減衰のメカニズムとして、下記のような影響が考えられる。

- ✓ ラック取付・固定用の基礎ボルト締結部の摩擦の影響
- ✓ 燃料と角管間の衝突によるエネルギー消散の影響

ラックの体数が増えた場合、上記の影響は大きくなる。

以上から、実機の使用済燃料ラックにおいても、

減衰定数7.0%以上が期待できると判断した。

【参考】原子炉本体基礎1/10縮尺試験体による試験について

- 改良型沸騰水型原子炉の原子炉本体基礎は、ベント管が埋め込まれているという構造上の特徴を有している。改良型沸騰水型原子炉の開発にあたり、原子炉本体基礎の荷重－変位特性を把握するために、1/10縮小試験体を用いて静加力試験を行い、荷重－変形特性を取得した。



RPVペDESTALの1/10縮尺試験体と加力装置の概要

【参考】原子炉本体基礎1/10縮尺試験体による試験について

- 6号炉で検討した復元力特性評価の考え方をを用いて、1/10試験体のスケルトンカーブを設定し、試験で得られた荷重－変位特性と比較した結果、よい一致を見た。



試験結果とスケルトンカーブの比較