

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画認可申請に係る論点整理について

TEPCO

2020年6月16日
東京電力ホールディングス株式会社

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。

【説明内容】

- 下記の工事計画認可申請に係る論点及び第830回審査会合における指摘事項に対する回答について説明する。

■ 耐震評価に関する論点整理・指摘事項への回答

分類	No.	説明項目（論点/指摘事項への回答）	関連する 主な説明事項
耐震	1	建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点 (1) 原子炉建屋の地震応答解析に影響を与える要因の確認 【指摘事項に対する回答】 (2) 廃棄物処理建屋で用いる地震応答解析手法/応力解析手法の妥当性確認	[3]－4
	2	ECCSストレナナの耐震・強度評価への流動解析の適用 【案件取下げ】	[3]－14

【論点1】

建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点

- (1) 原子炉建屋の地震応答解析に影響を与える要因の確認
【指摘事項に対する回答】

本日のご説明内容

▶ 原子力発電所の新規制基準適合性に係る審査会合の指摘事項に対する回答

No.	実施日	指摘事項
1-1	令和2年2月4日 第830回 審査会合	補助壁を解析モデルに考慮すること並びに側面地盤ばねに回転入力进行考慮しないこと及び表層地盤ばねを考慮しないことについて、建屋及び機器の耐震性に与える影響を検討し説明すること。
1-2	令和2年2月4日 第830回 審査会合	コンクリート製原子炉格納容器（RCCV）については、構造性能確認試験がRCCVの剛性に与える影響並びに建屋及び機器の耐震性に与える影響を検討し説明すること。
1-3	令和2年2月4日 第830回 審査会合	建屋及び機器の耐震性に影響を与える他の要因についても網羅的に抽出して整理すること。また、それらについて、設計上の不確かさ要因として考慮の要否又は影響評価の要否を検討した上で、設計上の取扱いについて詳細に説明すること。

第830回 審査会合（令和2年2月4日）における説明

- 前回の審査会合では、地震応答解析モデルの既工認からの変更点として、コンクリート実剛性の採用、補助壁の考慮、側面地盤回転ばねの考慮、表層地盤ばねの非考慮の4点を説明した。

【論点5】建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点(1/6) **TEPCO**

1. 概要

(1) 主要な変更項目

基準地震動のレベルの増大に伴い、より現実に近い地震応答を算出することを目的として、下記を変更した地震応答解析モデルを採用する。

項目	既工認モデル	今回工認の動解モデル	主な目的
コンクリート実剛性の採用	コンクリート剛性に設計基準強度に基づく剛性を使用	コンクリート剛性にコンクリート強度データに基づく剛性を使用	建屋全体の剛性を設計時の条件に基づくものから現実のデータに基づくものに変更することで、建屋の振動性状や変形をより実状に近い応答に適正化
補助壁の考慮	耐震要素として外壁などの主要な壁のみモデル化	設計時には耐震要素として考慮していなかったが耐震要素として考慮可能な壁（補助壁）を追加でモデル化	建屋全体の剛性を、より実態に近い条件に基づくものに変更することで、建屋の振動性状や変形をより実状に近い応答に適正化
側面地盤回転ばねの考慮	地盤が建屋の回転を抑制する効果を考慮せず	地盤が建屋の回転を抑える効果をモデル化	建屋地下躯体部分と地盤間の接触部に生じる摩擦による拘束効果を回転ばねとして考慮することにより、建屋の接地率を改善するとともに、建屋の振動性状をより実状に近い応答に適正化
表層地盤ばねの非考慮	表層部の地盤ばねを考慮	表層部の地盤ばねを非考慮	地盤表層部については、地震動の増大に伴い、地盤—建屋相互作用効果が見込めないと考えられる事から、ばね評価を行わない

審査会合での指摘事項（指摘事項No.1-1～1-3）

- 前回の審査会合では、原子炉建屋の地震応答解析に影響を与える要因に関連し、以下の3つの指摘を受けた。

■ 指摘事項No.1-1

補助壁を解析モデルに考慮すること並びに側面地盤ばねに回転入力を考慮しないこと及び表層地盤ばねを考慮しないことについて、建屋及び機器の耐震性に与える影響を検討し説明すること。

■ 指摘事項No.1-2

コンクリート製原子炉格納容器（RCCV）については、構造性能確認試験がRCCVの剛性に与える影響並びに建屋及び機器の耐震性に与える影響を検討し説明すること。

■ 指摘事項No.1-3

建屋及び機器の耐震性に影響を与える他の要因についても網羅的に抽出して整理すること。また、それらについて、設計上の不確かさ要因として考慮の要否又は影響評価の要否を検討した上で、設計上の取扱いについて詳細に説明すること。

指摘事項に対する課題の整理 (指摘事項No.1-1)

■ 指摘事項No.1-1

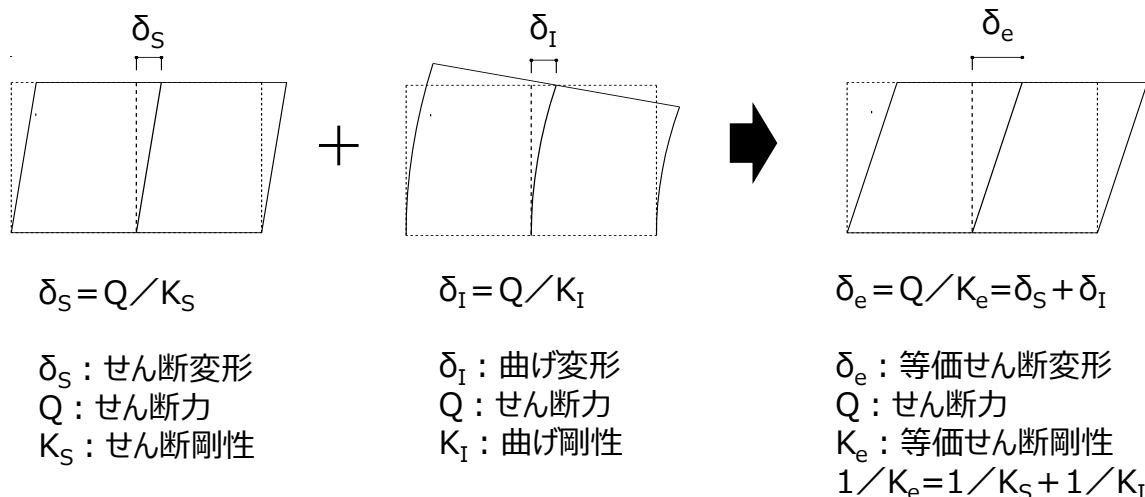
補助壁を解析モデルに考慮すること並びに側面地盤ばねに回転入力进行考慮しないこと及び表層地盤ばねを考慮しないことについて、建屋及び機器の耐震性に与える影響を検討し説明すること。



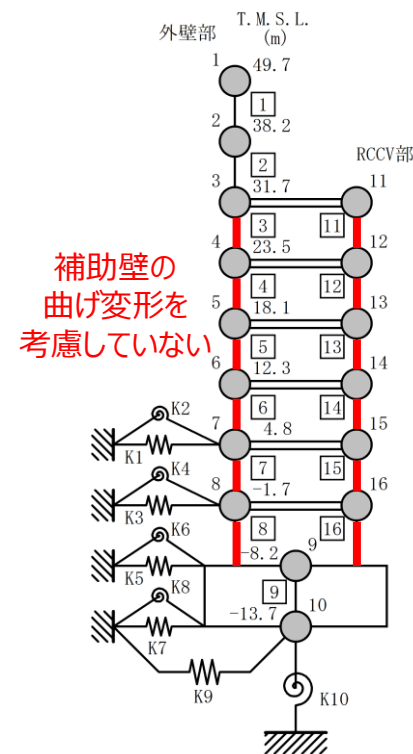
■ 課題

①既工認からの変更点「補助壁の考慮」について、補助壁のせん断剛性を考慮しているが、補助壁の曲げ変形を考慮していない。

⇒補助壁の曲げ変形を考慮することで、補助壁の等価せん断剛性が小さくなり、応答に影響を与える可能性がある。



補助壁の曲げ変形の考慮による等価せん断剛性算出のイメージ



課題のイメージ

指摘事項に対する課題の整理 (指摘事項No.1-1)

■ 指摘事項No.1-1

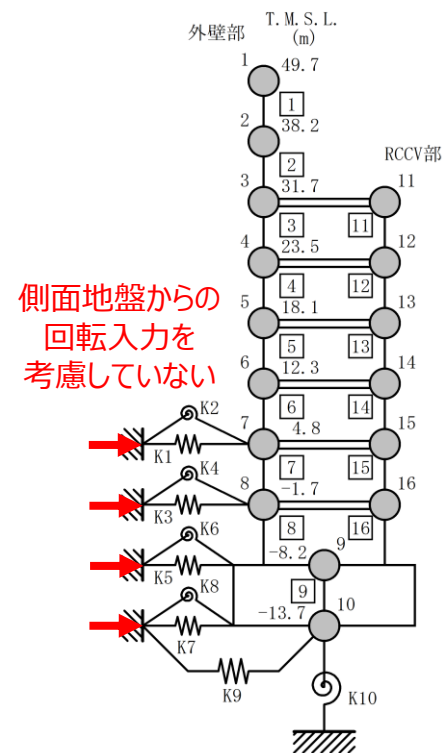
補助壁を解析モデルに考慮すること並びに側面地盤ばねに回転入力进行考慮しないこと及び表層地盤ばねを考慮しないことについて、建屋及び機器の耐震性に与える影響を検討し説明すること。



■ 課題

②既工認からの変更点「側面地盤回転ばねの考慮」について、側面地盤回転ばねを考慮しているが、側面地盤からの回転入力进行考慮していない。

⇒側面地盤からの回転入力进行考慮することで、応答に影響を与える可能性がある。



課題のイメージ

指摘事項に対する課題の整理 (指摘事項No.1-1)

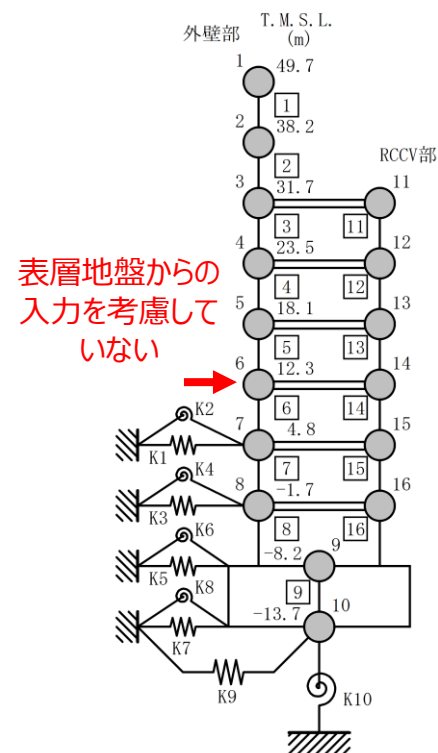
■ 指摘事項No.1-1

補助壁を解析モデルに考慮すること並びに側面地盤ばねに回転入力を考慮しないこと及び表層地盤ばねを考慮しないことについて、建屋及び機器の耐震性に与える影響を検討し説明すること。

■ 課題

③既工認からの変更点「表層地盤ばねの非考慮」について、表層地盤ばねを非考慮としており、表層地盤からの入力を考慮していない。

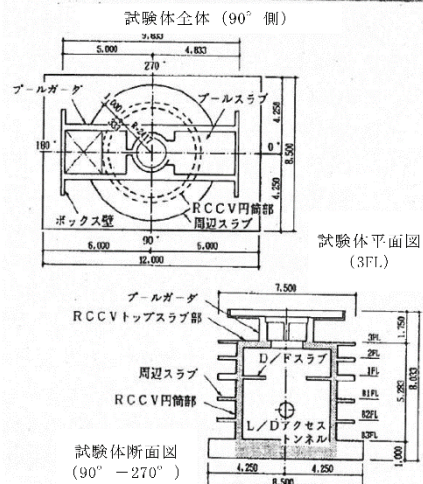
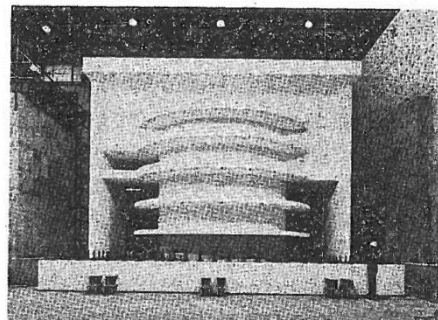
⇒表層地盤からの入力を考慮することで、応答に影響を与える可能性がある。



課題のイメージ

指摘事項の背景 (指摘事項No.1-2)

- 構造性能確認試験 (SIT) は、鉄筋コンクリート製原子炉格納容器 (RCCV) について、内圧に対する挙動を把握し、その健全性を確認することを目的に、建設時に実機で実施した試験である。
- 一方、実機での試験より以前に実施された大型全体モデルによる実験 (既往実験) の結果 (引用文献(1)参照) では、実機とは条件が異なるものの、RCCV部の剛性が約70%に低減する結果が得られている。



既往実験の試験体形状

既往実験と実機との差異

条件	既往実験	実機	備考
軸力	4kg/cm ² 【0.39N/mm ² 】	15kg/cm ² 【1.47N/mm ² 】 (平均値)	圧縮軸力が大きい方が、内圧によるひび割れ発生が少ない。
コンクリート 圧縮強度	299kg/cm ² 【29.3N/mm ² 】 (実測値)	330kg/cm ² 【32.3N/mm ² 】 (設計基準強度) 440kg/cm ² 【43.1N/mm ² 】 (実強度)	コンクリート圧縮強度が大きい方が内圧によるひび割れ発生が少ない。*
円筒部周辺 スラブ	円筒部壁面から 1mの範囲のみ 試験体を作成	各階の床スラブが 壁と接合し 建屋と一体化	建屋と一体化している方が拘束効果が高く、内圧によるひび割れ発生が少ない。

注記 * : ひび割れの発生に直接関係するのはコンクリートの引張強度であるが、一般的にコンクリートの引張強度は圧縮強度のおよそ1/10となる関係があることから、圧縮強度で比較している。

引用文献(1) : 齋藤ほか : 「鉄筋コンクリート製格納容器 (RCCV) の開発」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1241-1250, 1988年10月

指摘事項に対する課題の整理 (指摘事項No.1-2)

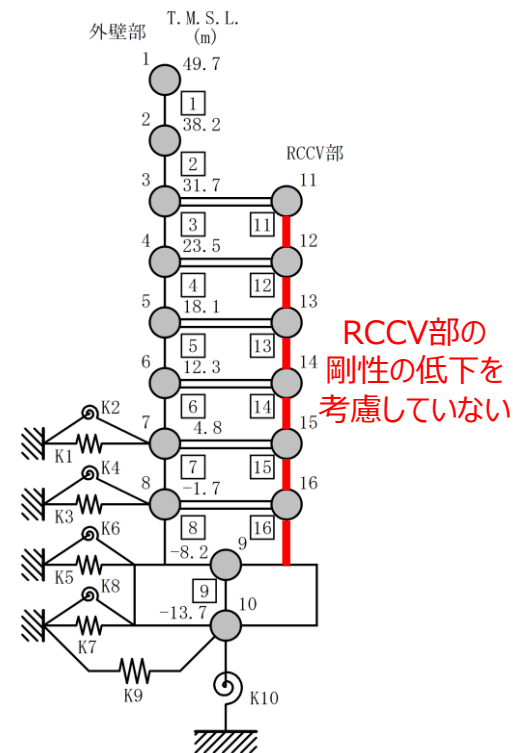
■ 指摘事項No.1-2

コンクリート製原子炉格納容器 (RCCV) については、構造性能確認試験がRCCVの剛性に与える影響並びに建屋及び機器の耐震性に与える影響を検討し説明すること。

■ 課題

- 既工認からの変更点「コンクリート実剛性の採用」について、既工認よりコンクリートの剛性を大きくしているが、SITによるRCCV部の剛性の低下を考慮していない。

⇒SITによる剛性の低下を考慮することで、応答に影響を与える可能性がある。



RCCV部の剛性の低下を考慮していない

課題のイメージ

指摘事項に対する課題の整理 (指摘事項No.1-3)

■ 指摘事項No.1-3

建屋及び機器の耐震性に影響を与える他の要因についても網羅的に抽出して整理すること。また、それらについて、設計上の不確かさ要因として考慮の要否又は影響評価の要否を検討した上で、設計上の取扱いについて詳細に説明すること。



■ 課題

- ・ 指摘事項No.1-1, 指摘事項No.1-2の他にも応答に影響を与える要因がある可能性がある。
⇒応答に影響を与える他の要因とそれらの設計上の取扱いが整理されていない。

指摘事項に対する回答（指摘事項No.1-1～1-3）

■ 指摘事項No.1-1

補助壁を解析モデルに考慮すること並びに側面地盤ばねに回転入力を考慮しないこと及び表層地盤ばねを考慮しないことについて、建屋及び機器の耐震性に与える影響を検討し説明すること。

■ 指摘事項No.1-2

コンクリート製原子炉格納容器（RCCV）については、構造性能確認試験がRCCVの剛性に与える影響並びに建屋及び機器の耐震性に与える影響を検討し説明すること。

■ 指摘事項No.1-3

建屋及び機器の耐震性に影響を与える他の要因についても網羅的に抽出して整理すること。また、それらについて、設計上の不確かさ要因として考慮の要否又は影響評価の要否を検討した上で、設計上の取扱いについて詳細に説明すること。



■ 回答

- 2007年新潟県中越沖地震のシミュレーション解析結果、建屋質点系・地盤2次元FEMモデルとの比較、地盤の等価線形解析結果、実機におけるSITの結果から、今回工認モデルが基本モデルとして妥当であることを確認した。
- その上で、仮に補助壁の曲げ変形、側面地盤からの回転入力、表層地盤からの入力、SITによる剛性低下を考慮した場合の地震応答解析を実施し、それぞれの影響を確認した。
- その結果、それぞれの地震応答解析結果は今回工認モデルと同等であり、耐震評価に与える影響がないことを確認した。
- また、耐震性に影響を与える他の要因について検討を実施し、設計上の考え方を整理した。

2007年新潟県中越沖地震のシミュレーション解析（指摘事項No.1-1, 1-2）

- 以下のケースについて2007年新潟県中越沖地震のシミュレーション解析を実施している。既工認からの変更点に対応するケースは1, 2, 3, 4であり、それらをすべて反映したシミュレーション解析モデル（今回工認モデル相当）の結果を確認した。

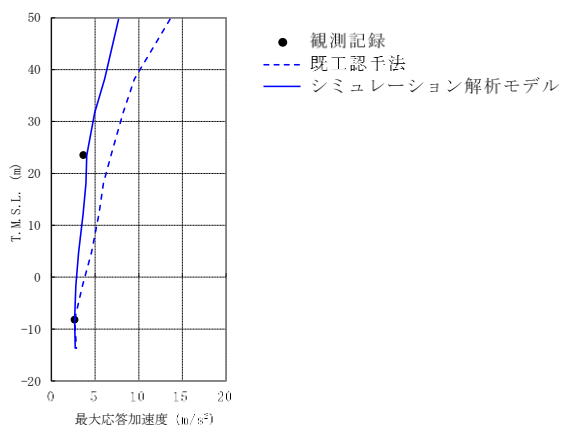
ケース名	建屋モデル		地盤モデル		備考
	コンクリートのヤング係数	剛性を考慮する部位	側面ばね	表層部での建屋-地盤相互作用	
既工認手法に基づく解析モデル	設計基準強度に基づく	耐震壁	水平	考慮	-
ケース1 実剛性考慮	実剛性*	耐震壁	水平	考慮	SITによる剛性低下は考慮していない
ケース2 補助壁考慮	設計基準強度に基づく	耐震壁+補助壁	水平	考慮	補助壁の曲げ変形は考慮していない
ケース3 側面回転ばね	設計基準強度に基づく	耐震壁	水平・回転	考慮	側面地盤からの回転入力は考慮していない
ケース4 表層非考慮	設計基準強度に基づく	耐震壁	水平	非考慮	表層地盤からの入力は考慮していない
シミュレーション解析モデル (ケース1~4の項目を全て反映したモデル)	実剛性*	耐震壁+補助壁	水平・回転 (表層無視)	非考慮	-

今回確認したケース

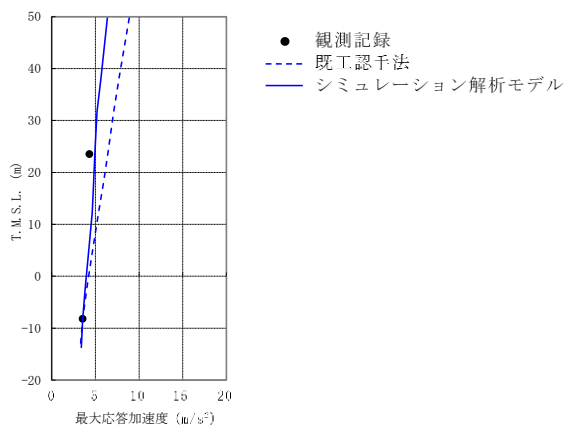
注記*：本シミュレーション解析においては、建設時の取得データを基に文献調査等を踏まえて経年による強度増進効果を加味して設定した推定実強度（49.0N/mm²（500kgf/cm²））に基づく剛性を使用する。なお、今回工認では、妥当性、信頼性の観点から、建設時の91日強度の平均値に相当する値（43.1N/mm²（440kgf/cm²））をコンクリート実強度として剛性を算定する。

2007年新潟県中越沖地震のシミュレーション解析 (指摘事項No.1-1, 1-2)

- シミュレーション解析モデル (今回工認モデル相当) について, 既工認手法と比べ観測記録との整合性が向上し, 補助壁の曲げ変形, 側面地盤からの回転入力, 表層地盤からの入力, SITによる剛性低下を考慮していない状態でも, 地震時の挙動をより実応答に近い形で評価できることを確認した。

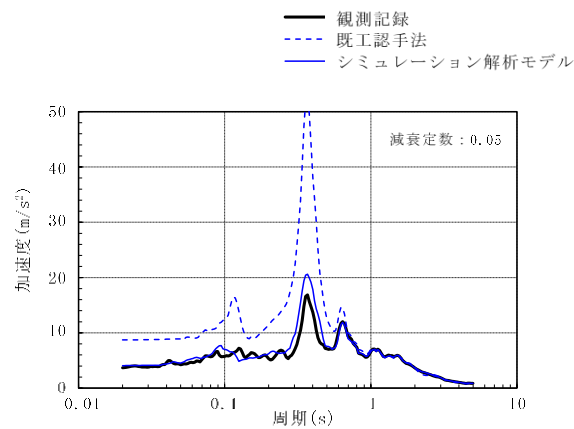


NS方向

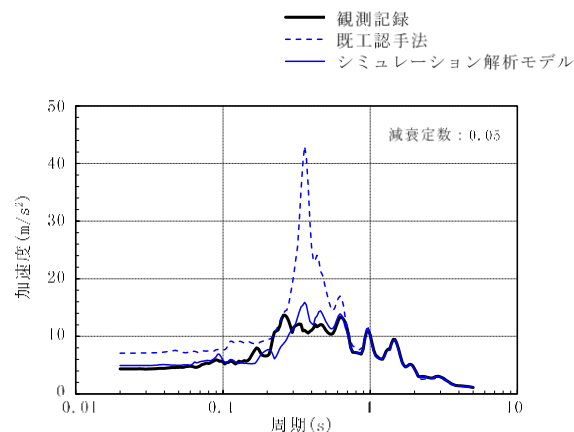


EW方向

最大応答加速加速度



NS方向

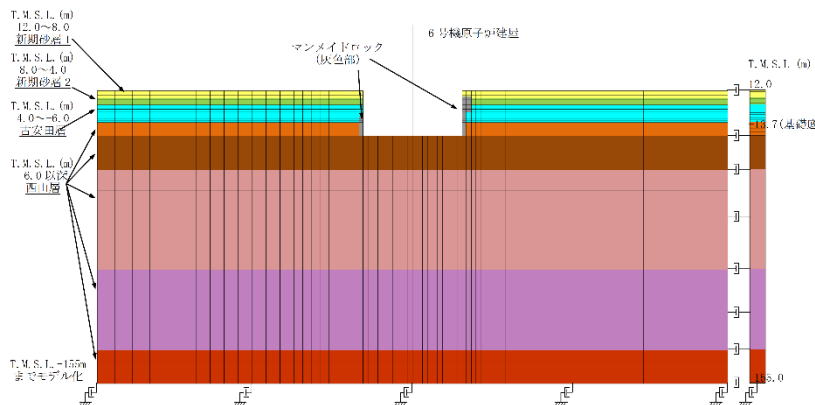


EW方向

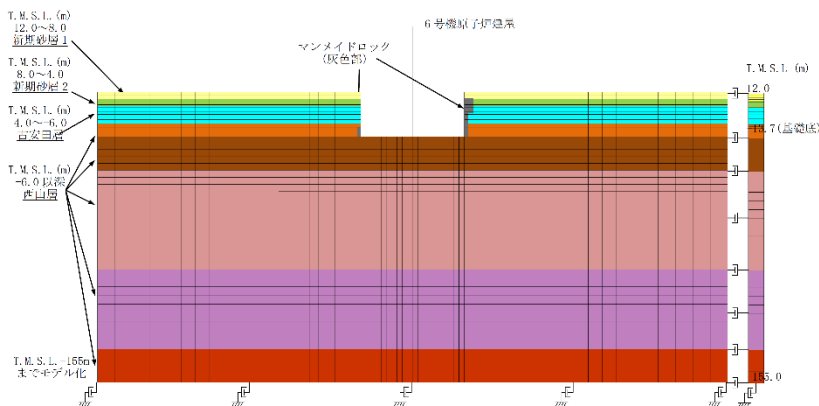
床応答スペクトル(T.M.S.L. 23.5m)

建屋質点系・地盤2次元FEMモデルとの比較 (指摘事項No.1-1)

- 建屋を質点系、地盤を2次元FEMとした詳細なモデル（建屋質点系・地盤2次元FEMモデル）を用いて基準地震動Ss-1による地震応答解析を実施し、今回工認モデルである埋込みSRモデルと比較した。建屋質点系・地盤2次元FEMモデルにおいては、側面地盤からの回転入力 が考慮される。

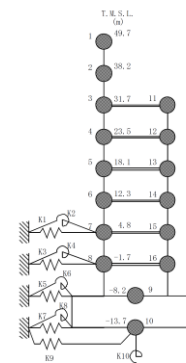


NS方向

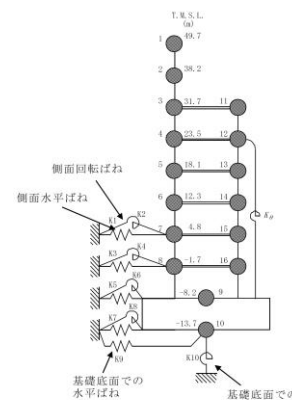


EW方向

建屋質点系・地盤2次元FEMモデル



NS方向

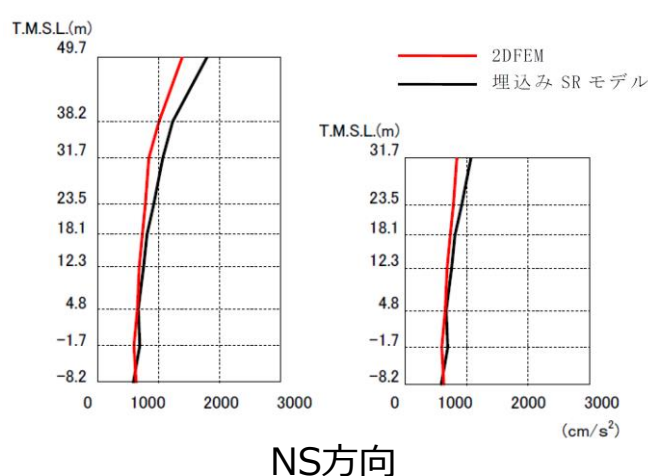


EW方向

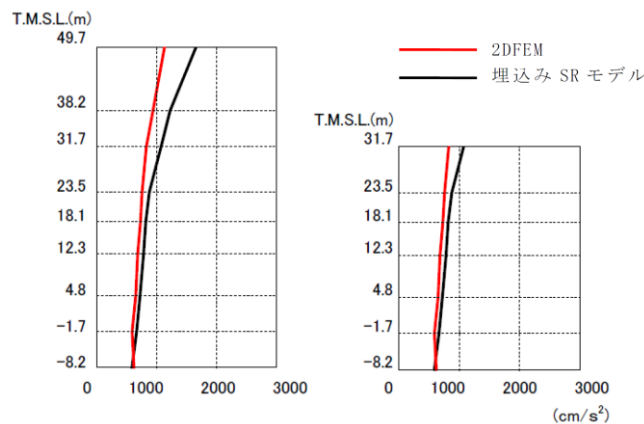
埋込みSRモデル

建屋質点系・地盤2次元FEMモデルとの比較 (指摘事項No.1-1)

- 建屋質点系・地盤2次元FEMモデルと今回工認モデルである埋込みSRモデルを比較すると、応答は概ね同等ではあるが若干埋込みSRモデルの方が大きくなる傾向にあり、今回工認モデルは保守的な設定となっていることを確認した。

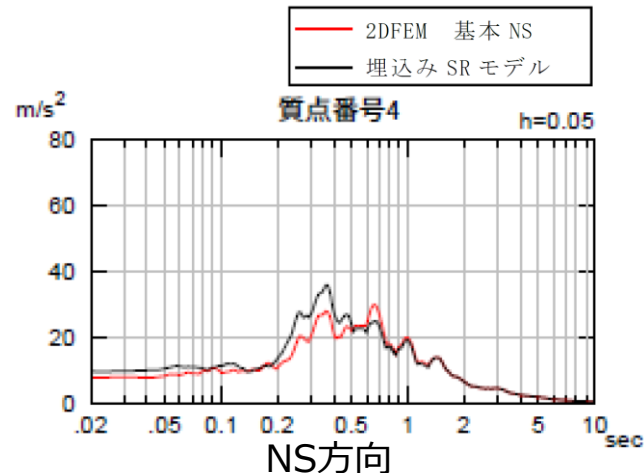


NS方向

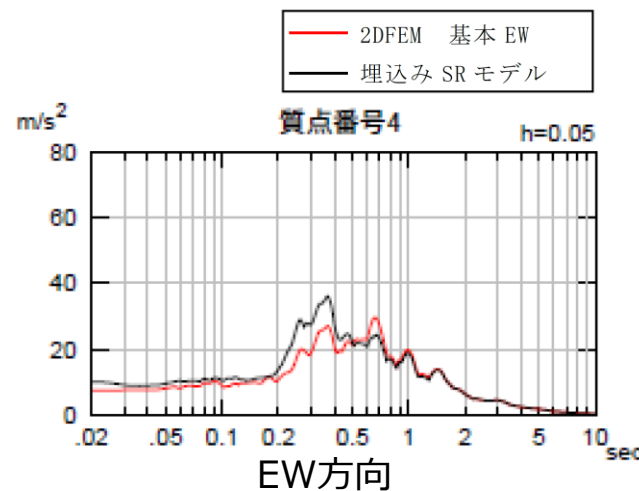


EW方向

最大応答加速加速度



NS方向

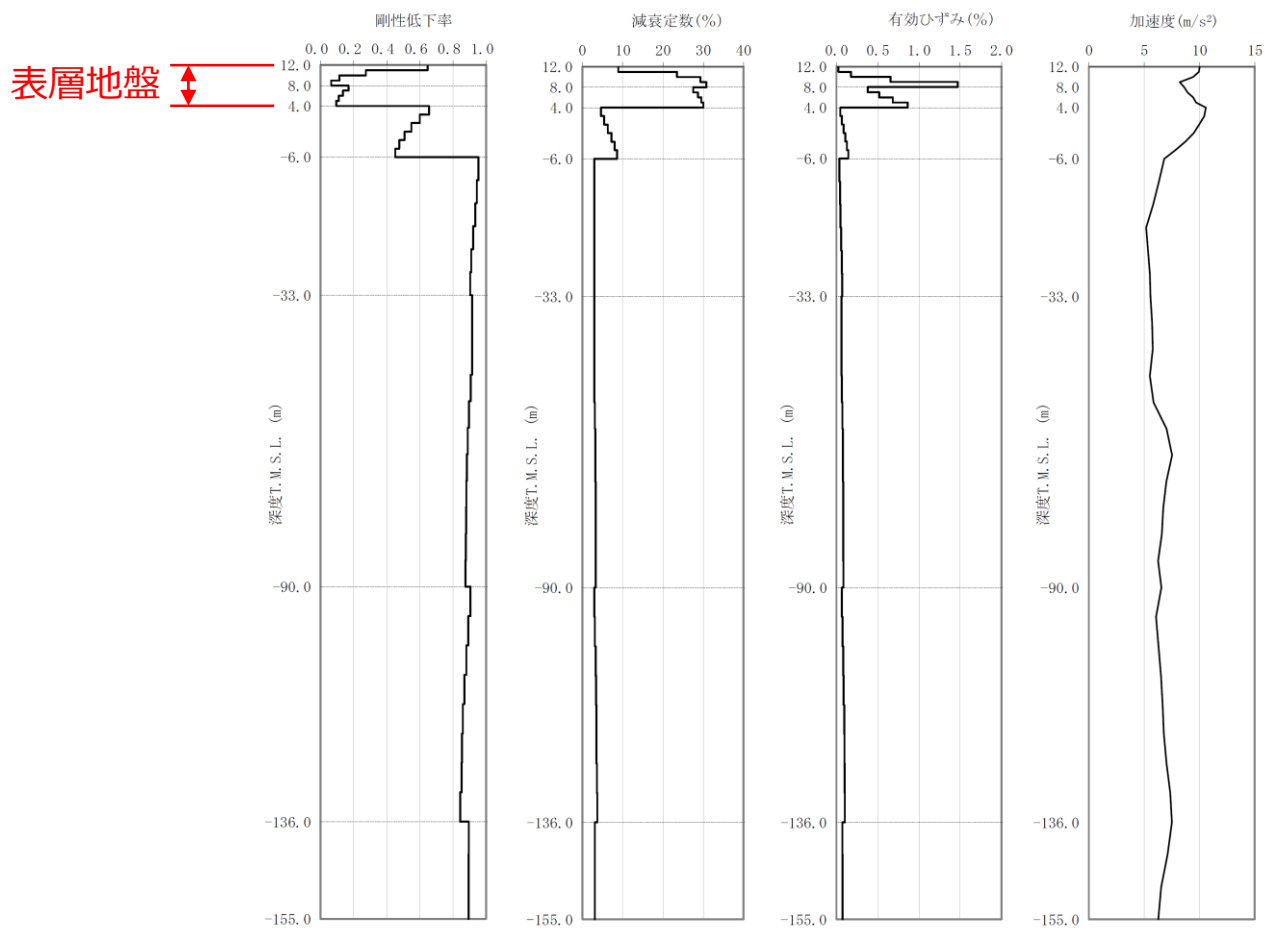


EW方向

床応答スペクトル(T.M.S.L. 23.5m)

地盤の等価線形解析 (指摘事項No.1-1)

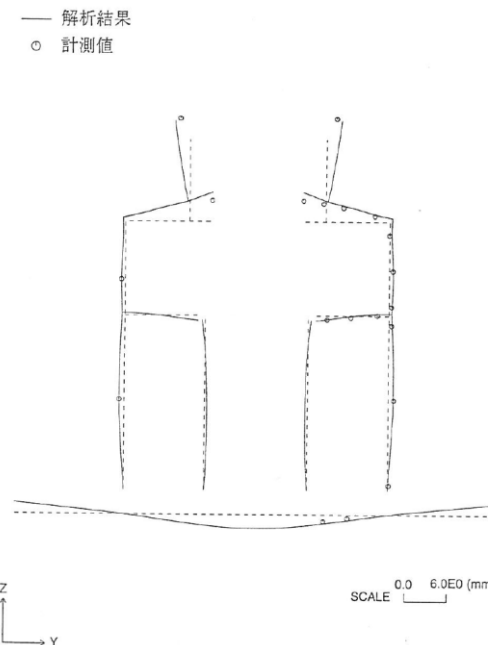
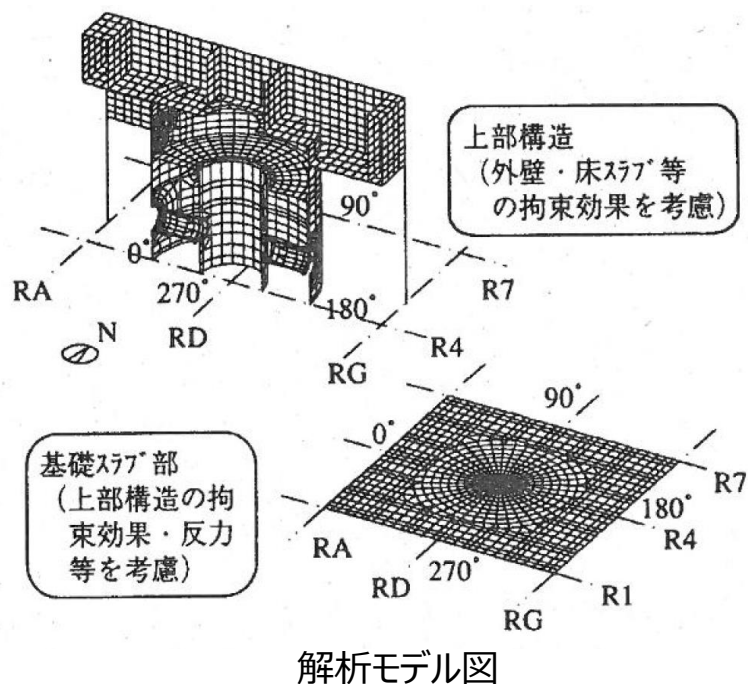
- 基準地震動Ss-1による地盤の等価線形解析を実施し、表層地盤において剛性が急激に低下しており、有効ひずみが大きくなっていることから、表層地盤では建屋－地盤連成効果は見込めず、表層部での建屋－地盤相互作用を考慮しない今回工認モデルは妥当であることを確認した。



地盤の等価線形解析結果

実機におけるSITの結果 (指摘事項No.1-2)

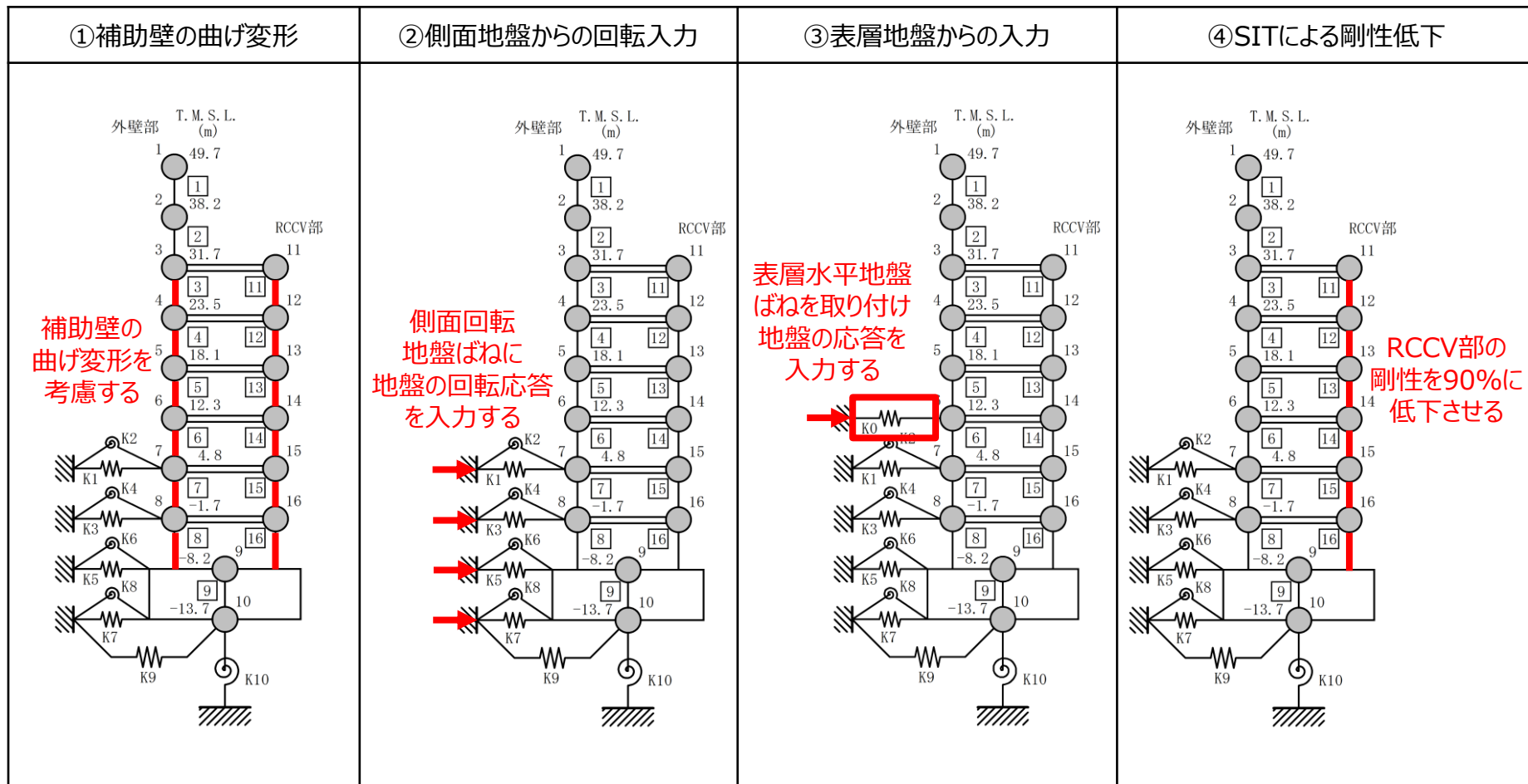
- 実機におけるSITの結果 (引用文献(2)参照) では、試験及び解析の結果より、以下のことが確認できたとしている。
 - 外観についてはひび割れの進展はほとんどなく構造上の問題となる損傷は認められなかったこと。
 - 内圧-変位関係は線形関係を保ち、残留変位も少なく、試験圧力に対して弾性的挙動と認められること。
 - SIT直後の全体漏洩率試験による内圧の繰り返しに対して剛性の低下は認められないこと。
 - 3次元FEMモデルによる弾性解析によりRCCVのSIT時構造挙動を良く把握出来ること。
- 以上を踏まえるとSITにおけるRCCVの挙動は概ね弾性範囲であったと考えられ、SITの実施によるRCCV部の剛性低下はなかったものと判断できる。



引用文献(2)：笹沼ほか：「鉄筋コンクリート製原子炉格納容器の構造性能確認試験 (K7号機)」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1019-1022, 1997年9月

影響検討 (指摘事項No.1-1, 1-2)

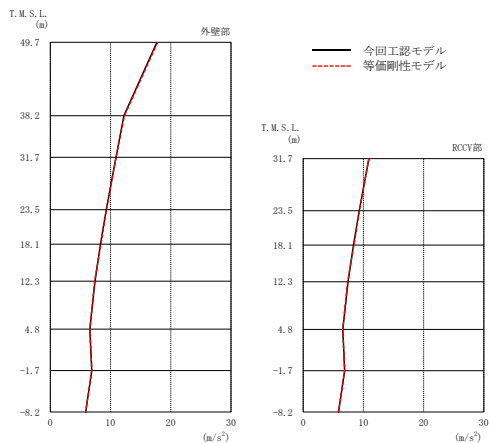
- 以上より、今回工認モデルが基本モデルとして妥当であることを確認した。
- その上で、仮に以下を考慮を考慮した場合の基準地震動Ss-1による地震応答解析を実施し、それぞれの影響を確認した。



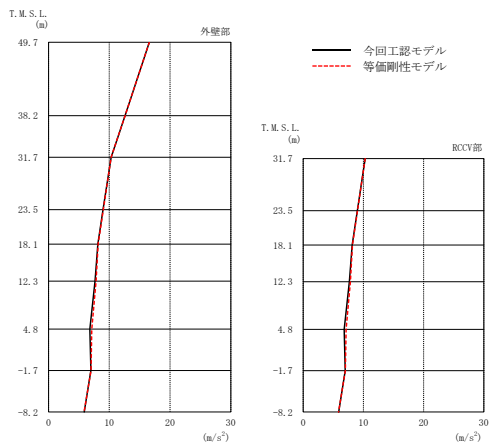
影響検討のイメージ

影響検討 ①補助壁の曲げ変形 (指摘事項No.1-1)

- 補助壁の曲げ変形を等価せん断剛性として考慮したモデル (等価剛性モデル) の応答は、今回工認モデルと同等であり、耐震評価に与える影響がないことを確認した。

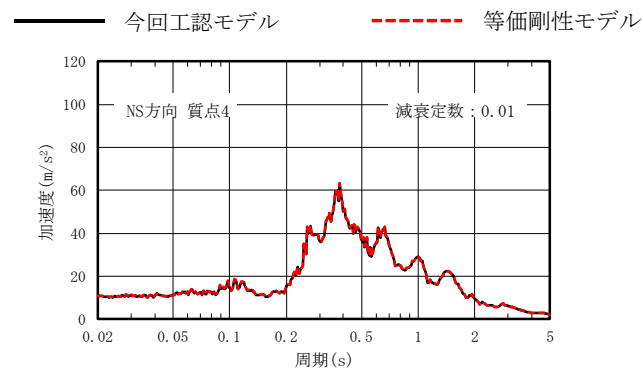


NS方向

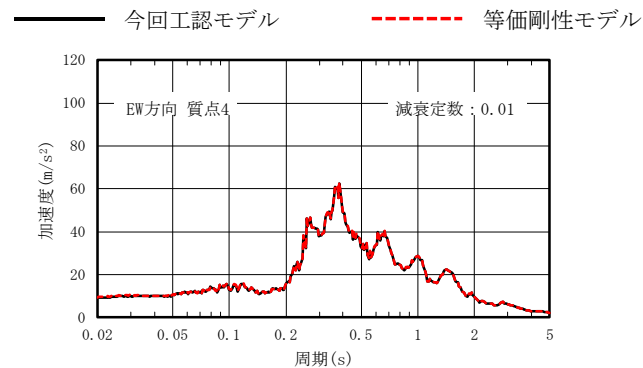


EW方向

最大応答加速加速度



NS方向

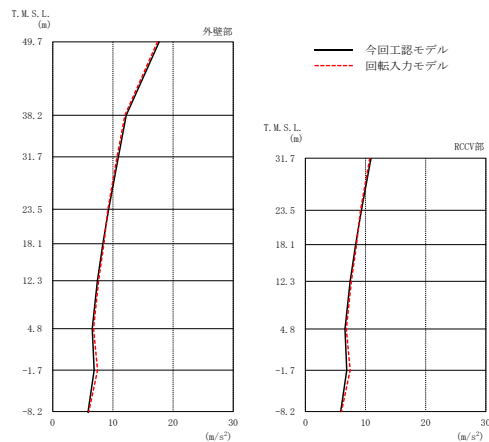


EW方向

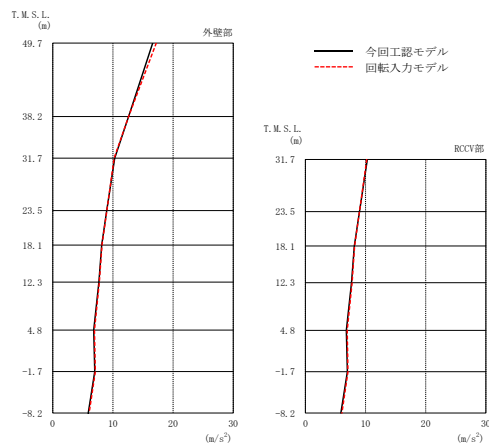
床応答スペクトル(T.M.S.L. 23.5m)

影響検討 ②側面地盤からの回転入力 (指摘事項No.1-1)

- 側面地盤からの回転入力を考慮したモデル (回転入力モデル) の応答は、今回工認モデルと同等であり、耐震評価に与える影響がないことを確認した。

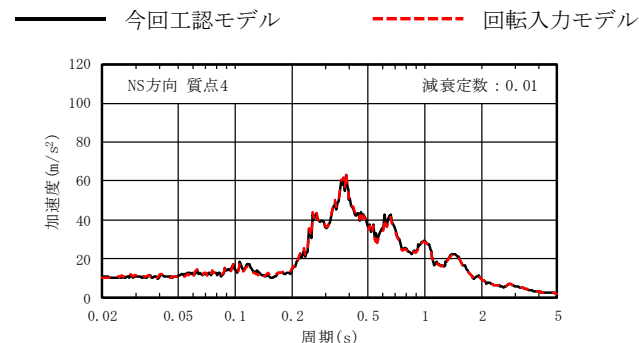


NS方向

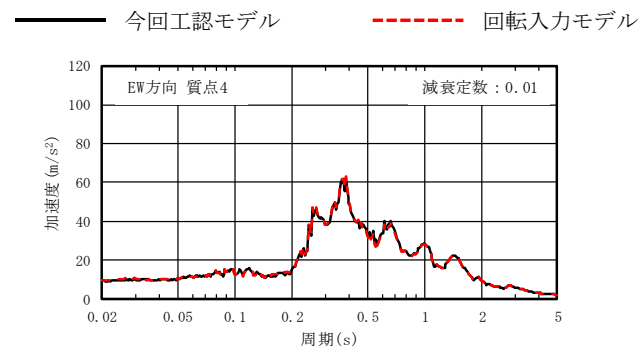


EW方向

最大応答加速加速度



NS方向

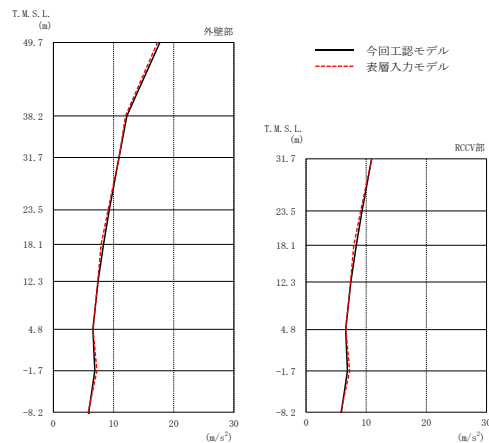


EW方向

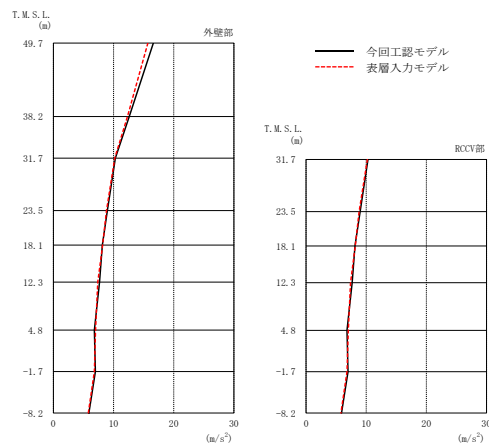
床応答スペクトル(T.M.S.L. 23.5m)

影響検討 ③表層地盤からの入力 (指摘事項No.1-1)

- 表層地盤からの入力を考慮したモデル（表層入力モデル）の応答は、今回工認モデルと同等であり、耐震評価に与える影響がないことを確認した。

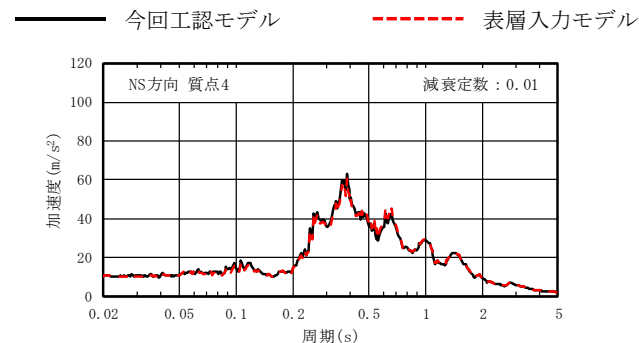


NS方向

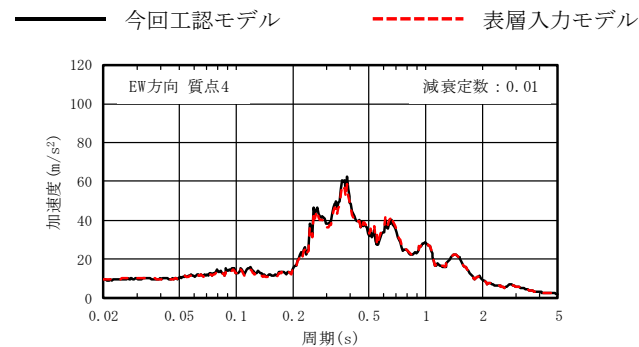


EW方向

最大応答加速加速度



NS方向

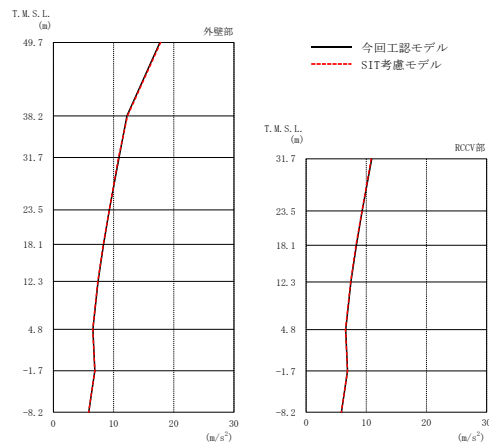


EW方向

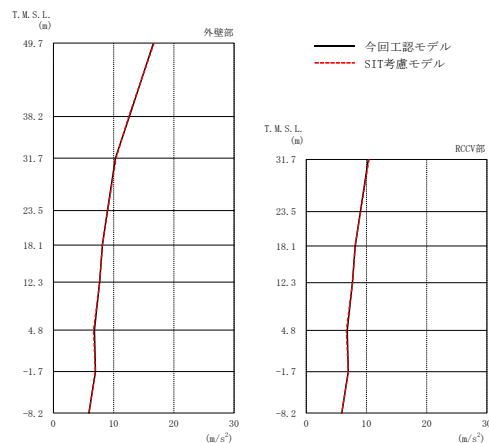
床応答スペクトル(T.M.S.L. 23.5m)

影響検討 ④SITによる剛性低下 (指摘事項No.1-2)

- SITによる剛性低下を考慮したモデル (SIT考慮モデル) の応答は、今回工認モデルと同等であり、耐震評価に与える影響がないことを確認した。

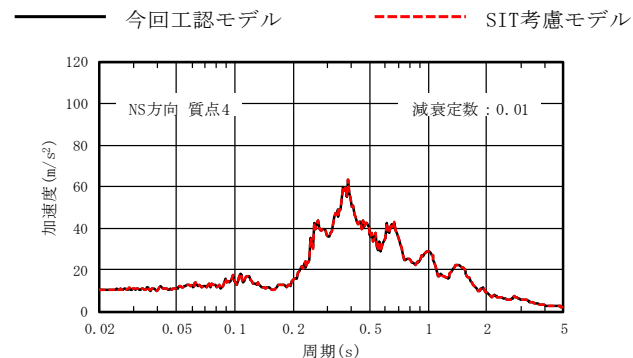


NS方向

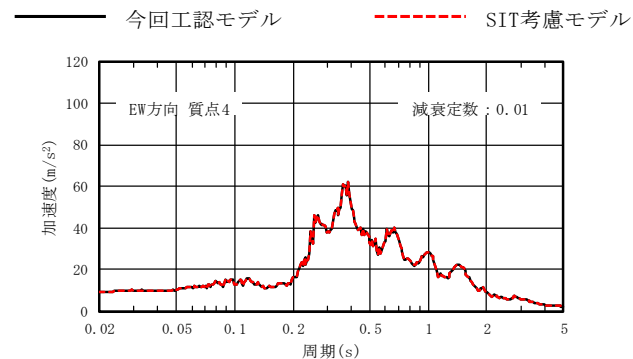


EW方向

最大応答加速加速度



NS方向



EW方向

床応答スペクトル(T.M.S.L. 23.5m)

耐震性に影響を与える他の要因（1 / 2）（指摘事項No.1-3）

- 耐震性に影響を与える他の要因について、以下のとおり検討を実施し、設計上の考え方を整理した。

耐震性に影響を与える要因	検討内容	設計上の考え方 (建物・構築物及び機器・配管系)
材料物性の不確かさ	基本モデルの妥当性を確認した上で、物性値の不確かさを考慮した地震応答解析を実施し、影響を確認した。	設計上の保守性を担保するため、設計用地震力に考慮する。
改造工事に伴う重量の増加	応答性状に影響を与える重量の増加は基本モデルに取り入れた上で、その他の重量の増加を考慮した地震応答解析を実施し、影響を確認した。	設計上の保守性を担保するため、耐震評価における材料物性の不確かさを考慮した応答値に応答比率を乗じて許容値以下であることを確認する方法により考慮する。
補助壁の曲げ変形	以下の検討・考察により、基本モデルの妥当性を確認した。 ・地震観測記録による検討 ・不確かさを考慮した地震応答解析	基本モデルと応答値が同等であることから基本モデルの妥当性を確認できるため、設計上考慮しない。
側面地盤からの回転入力	以下の検討・考察により、基本モデルの妥当性を確認した。 ・地震観測記録による検討 ・建屋質点系・地盤2次元FEMモデルとの比較 ・不確かさを考慮した地震応答解析	基本モデルと応答値が同等であることから基本モデルの妥当性を確認できるため、設計上考慮しない。
表層地盤からの入力	以下の検討・考察により、基本モデルの妥当性を確認した。 ・地震観測記録による検討 ・地盤の等価線形解析 ・不確かさを考慮した地震応答解析	基本モデルと応答値が同等であることから基本モデルの妥当性を確認できるため、設計上考慮しない。

耐震性に影響を与える他の要因（2 / 2）（指摘事項No.1-3）

耐震性に影響を与える要因	検討内容	設計上の考え方 (建物・構築物及び機器・配管系)
SITによる剛性低下	以下の検討・考察により、基本モデルの妥当性を確認した。 ・既往の知見による検討 ・地震観測記録による検討 ・RCCV部の剛性の感度解析	基本モデルの妥当性を確認できるため、設計上考慮しない。
鉄筋コンクリート造部の減衰定数の減衰定数	以下の検討・考察により、基本モデルの妥当性を確認した。 ・既往の知見による検討 ・地震観測記録による検討 ・減衰定数の感度解析 ・入力地震動及び建物・構築物の構造と形状を踏まえた考察	基本モデルの妥当性を確認できるため、設計上考慮しない。
重大事故時の高温による剛性低下	既往の知見による検討・考察により、基本モデルの妥当性を確認できるものの、基本モデルに対する現象の不確かさとして影響検討することとした。	基本モデルに対する現象の不確かさとして、耐震評価における基本モデルの応答値*に応答比率を乗じた場合にも許容値以下であり、耐震評価に与える影響がないことを確認する。
3次元動的挙動	以下の検討・考察により、基本モデルの妥当性を確認できるものの、基本モデルに対する現象の不確かさとして影響検討することとした。 ・基礎のロッキング ・建屋のねじれ ・床柔性 ・水平2方向及び鉛直方向地震力の組合せ	基本モデルに対する現象の不確かさとして、耐震評価における基本モデルの応答値*に応答比率を乗じた場合にも許容値以下であり、耐震評価に与える影響がないことを確認する。
隣接建屋の影響	既往の知見による検討・考察により、基本モデルの妥当性を確認できるものの、基本モデルに対する現象の不確かさとして影響検討することとした。	基本モデルに対する現象の不確かさとして、耐震評価における基本モデルの応答値*に応答比率を乗じた場合にも許容値以下であり、耐震評価に与える影響がないことを確認する。

注記*：影響評価の簡便化のため、材料物性の不確かさを考慮した応答値を用いる場合がある。

まとめ

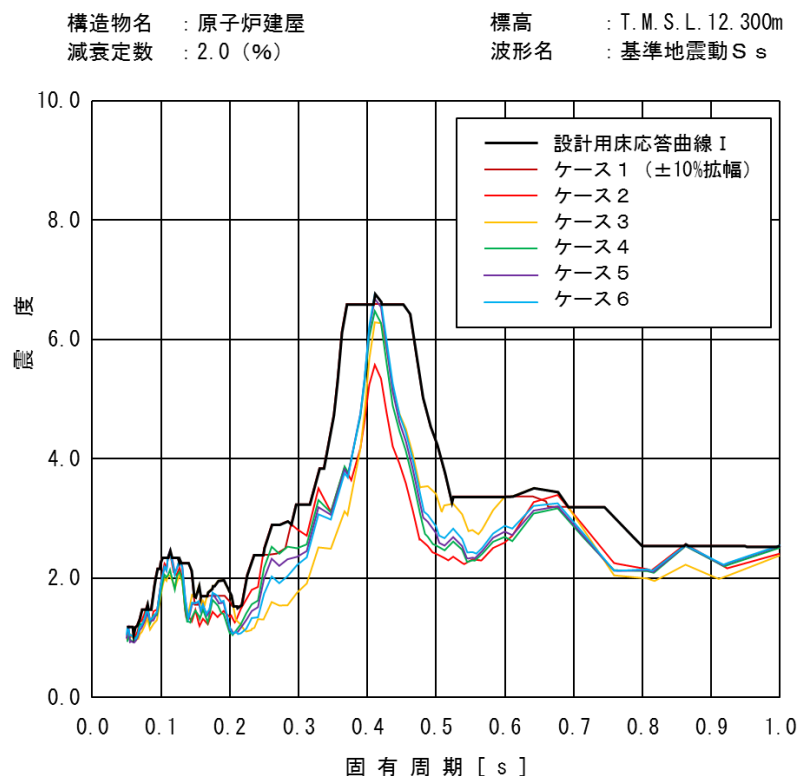
- 以下より、今回工認モデルが基本モデルとして妥当であることを確認した。
 - 2007年新潟県中越沖地震のシミュレーション解析結果
 - 建屋質点系・地盤2次元FEMモデルとの比較
 - 地盤の等価線形解析結果
 - 実機におけるSITの結果
- その上で、仮に以下を考慮した場合の地震応答解析を実施し、それぞれの影響を確認した。
 - 補助壁の曲げ変形
 - 側面地盤からの回転入力
 - 表層地盤からの入力
 - SITによる剛性低下
- その結果、それぞれの地震応答解析結果は今回工認モデルと同等であり、耐震評価に与える影響がないことを確認した。
- また、耐震性に影響を与える他の要因について検討を実施し、設計上の考え方を整理した。

【参考】機器・配管系の設計用地震力

- 今回工認における機器・配管系の設計用地震力は、基本ケースの地震応答解析モデルによる地震応答解析結果と材料物性の不確かさを考慮した各ケースの地震応答解析結果を全て包絡した条件※を用いている。

※包絡した条件を上回るよう設定した保守的な条件を用いる場合もある。

設計用地震力	設計用地震力の設定方法
地震応答解析から得られる荷重 (せん断力, モーメント等)	基本ケースの荷重と各ケースの荷重を全て包絡した荷重を用いる。
建屋床面の最大加速度	基本ケースの最大加速度と各ケースの最大加速度を全て包絡した加速度を用いる。
設計用床応答曲線	基本ケース（ケース1）の床応答スペクトルを周期方向に±10%拡幅したものと、各ケースの床応答スペクトル（拡幅無し）を全て包絡した設計用床応答曲線を用いる。



設計用床応答曲線（原子炉建屋の例）

【論点1】

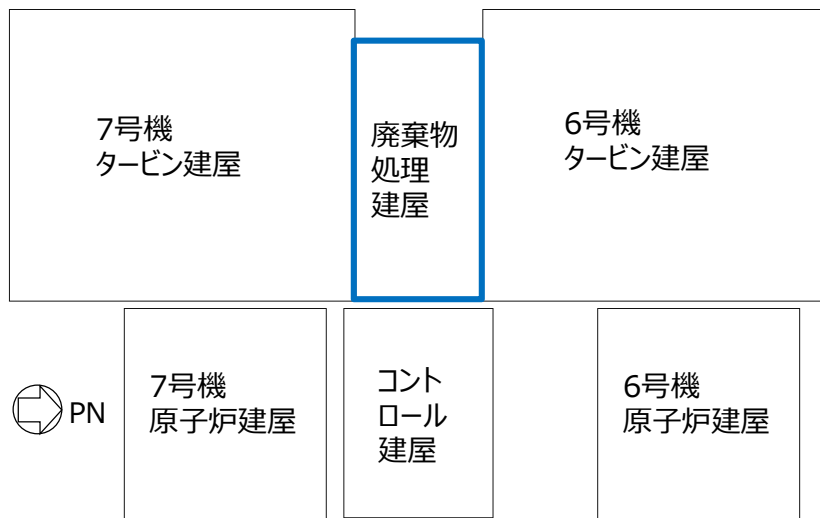
建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点

- (2) 廃棄物処理建屋で用いる地震応答解析手法/応力解析手法の妥当性確認

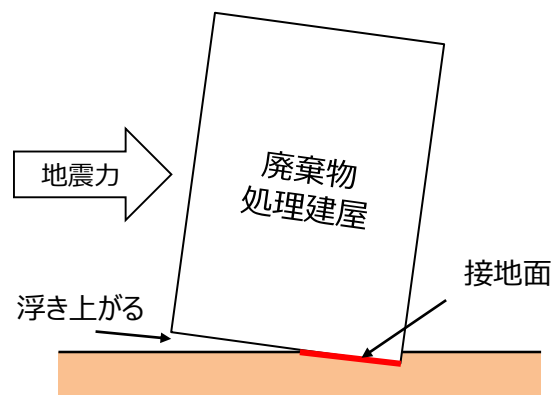
背景（廃棄物処理建屋で用いている地震応答解析手法及び応力解析手法の課題）

(1) 廃棄物処理建屋の状況

廃棄物処理建屋は、下記の配置図に示すように西側以外の3面に周辺建屋が存在するため、周辺地盤による拘束効果が期待できない。このため、短辺方向(NS方向)の地震応答解析では、力の釣り合いから計算される建屋の浮上りが大きくなり、見かけ上の接地率が非常に小さくなる。



配置図



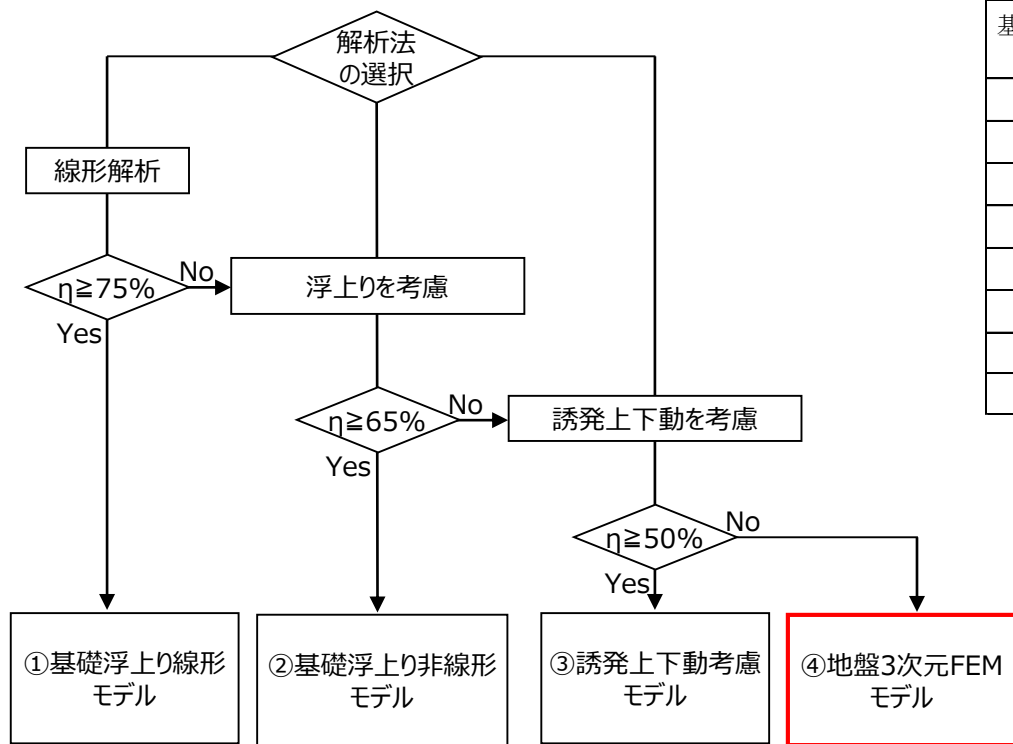
※接地率
基礎底面積に対する接地面積の比率

地震時の接地状況イメージ

背景（廃棄物処理建屋で用いている地震応答解析手法及び応力解析手法の課題）

(2) 接地率が小さい場合の地震応答解析手法

JEAC4601-2008では、誘発上下動が水平応答に与える影響の観点から、接地率の大きさに応じた解析モデル選定のフローが下記のとおり考えられている。このフローを参考に廃棄物処理建屋の接地率50%未満となる地震応答解析では、地盤3次元FEMモデルを採用している。

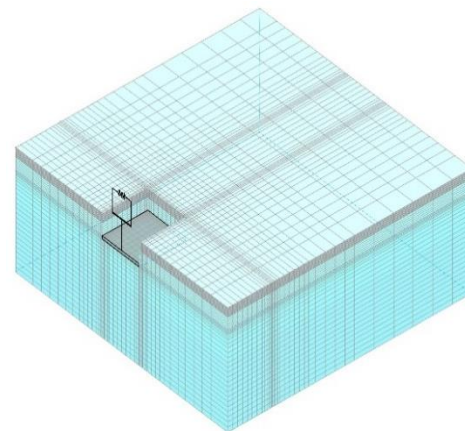


η：接地率

接地率の大きさに応じた解析モデル選定のフロー

基準地震動 S_s による地震応答解析結果に基づく接地率

基準地震動 S _s	NS方向		EW方向	
	最小接地率 (%)	解析モデル	最小接地率 (%)	解析モデル
S _s -1	30.7	④	93.6	②
S _s -2	62.7	③	72.1	②
S _s -3	27.2	④	96.1	②
S _s -4	96.5	②	100.0	②
S _s -5	77.0	②	95.2	②
S _s -6	93.9	②	100.0	②
S _s -7	87.8	②	89.7	②
S _s -8	20.3	④	89.7	②



廃棄物処理建屋の地盤3次元FEMモデル

背景（廃棄物処理建屋で用いている地震応答解析手法及び応力解析手法の課題）

(3) 課題

廃棄物処理建屋のNS方向は、接地率が50%未満となるケースがあることから、図3のフローに従い、地盤3次元FEM解析を行うことになるが、地盤3次元FEM解析を実施した結果、一部のケースで接地率が20%程度になった。このため、下記のような課題が生じている。

- ①20%程度となる低接地率時の地震応答解析手法は妥当であるか。
- ②基礎スラブの応力解析において、このような低接地率時に、さらに上向きの鉛直地震力が作用した場合には、転倒モーメント（ $Q \cdot H$ ）と地盤反力（ $N \cdot e$ ）との力のつり合いが取れなくなり、基礎スラブの応力解析が解けない。

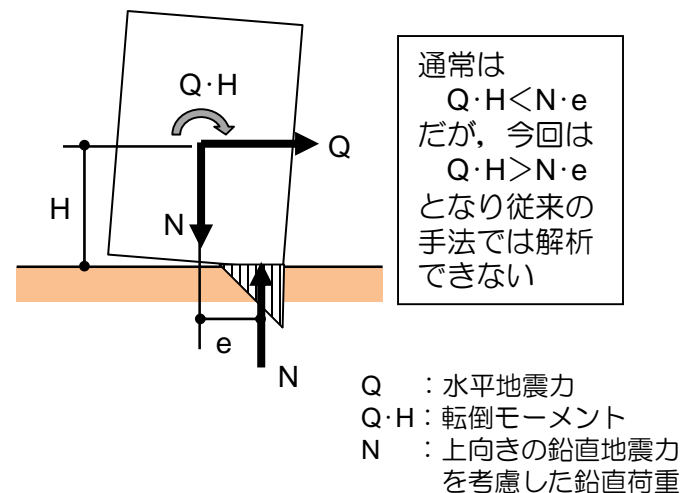
(4) 課題に対する対応

①の課題：低接地率時の地震応答解析手法の妥当性確認

既往文献と廃棄物処理建屋で用いている解析手法の比較検討を行い、妥当性確認を行う。

②の課題：分離した応力解析手法の妥当性確認

水平方向の応力解析と鉛直方向の応力解析を個別に行い、求めた応力を足し合わせるため、分離した応力解析手法の妥当性確認を行う。



転倒モーメントと地盤反力の関係

低接地率時の地震応答解析手法の妥当性確認（検討概要）

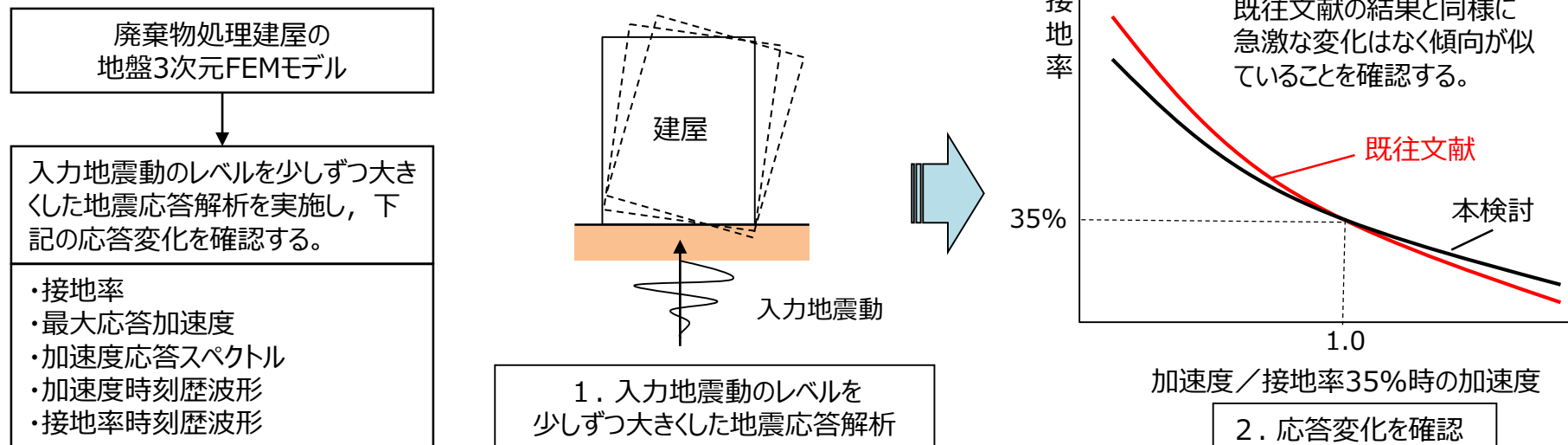
◆検討目的

地震応答解析結果より一部ケースでは低接地率となるため、低接地率時の地盤3次元FEM解析の妥当性を確認する。

◆検討方針

JEAC4601-2008において引用されている「Nakamura et al.(2005) *¹」では、地盤3次元FEMモデルの適用範囲として接地率 $\geq 35\%$ が提案されており、また、JEAC4601-2015において引用されている「中村他(2014) *²」(以下「既往文献」という。)では、地盤3次元FEM解析の適用性について、完全に剥離する0%を除き35%以下の低接地率に対しても適用性があることを確認している。

そのため、廃棄物処理建屋に対しても既往文献と同様な検討を行い結果を比較検討する。なお、廃棄物処理建屋と既往文献では解析条件が異なるため応答値を規準化して比較を行う。ここでは「Nakamura et al.(2005) *¹」を参考に、各応答値を接地率35%時の応答値で規準化する。

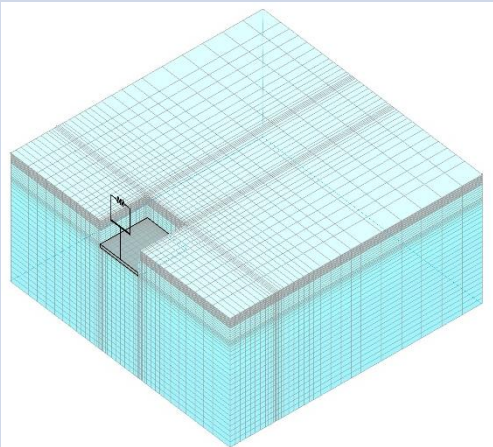


* 1 : Nakamura, N. et al. : An Estimation Method for Basemat Uplift Behavior of NPP Buildings, SMIRT18, K04/8, pp. 3105-3115, 2005

* 2 : 中村尚弘他 : Green関数法と地盤FEMモデルによる大地震時の建物の浮上り挙動の評価, 第63回理論 応用力学講演会, GS04-02-01, 2014年9月

低接地率時の地震応答解析手法の妥当性確認（解析条件）

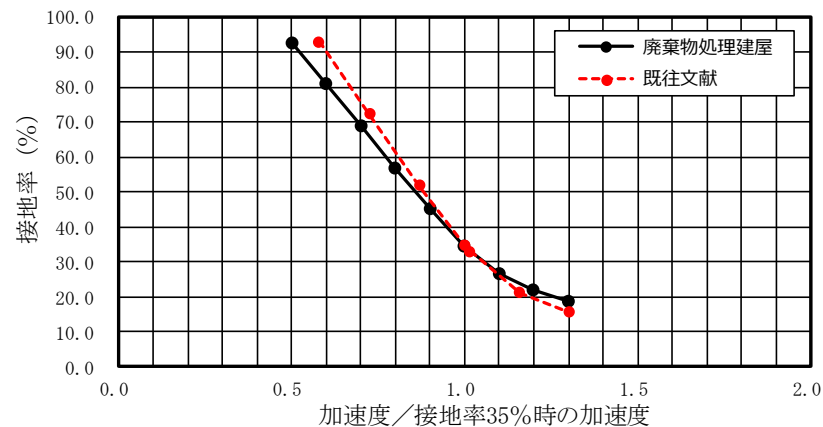
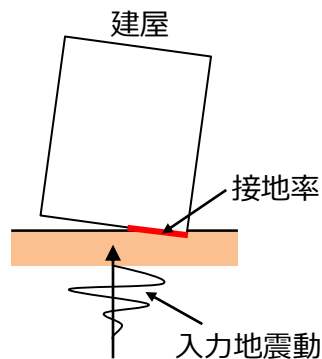
◆ 廃棄物処理建屋と既往文献の建屋の主な諸元比較

項目	廃棄物処理建屋	既往文献
基礎スラブ寸法	35.8m×73.0m	50.0m×50.0m
基礎スラブ下からの建屋高さ	52.9m	40.0m
建屋総重量	1,012,180kN	1,961,330kN
支持地盤のせん断波速度Vs	481m/s	2,000m/s
解析モデル	多質点系モデル	1質点系モデル
入力地震動	基準地震動Ss-3 (主要周期帯の応答スペクトル形状がほぼフラット)	模擬地震波 (主要周期帯の応答スペクトル形状がほぼフラット)
解析モデル	 <p>建屋：質点系モデル 地盤：3次元FEMモデル</p>	 <p>建屋：質点系モデル 地盤：3次元FEMモデル</p>

低接地率時の地震応答解析手法の妥当性確認（検討結果 1 / 3）

① 入力地震動と接地率の関係

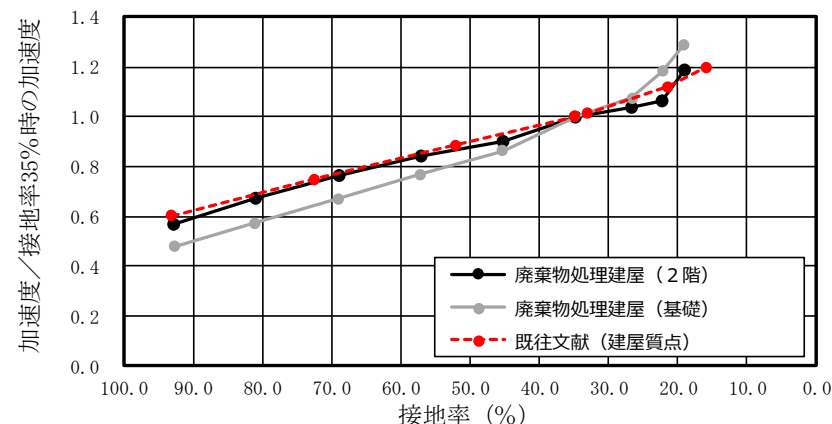
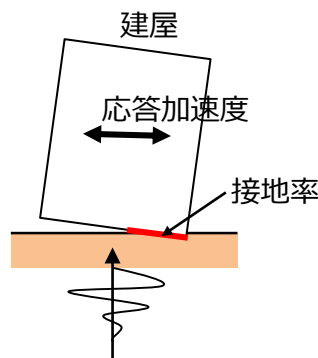
既往文献と同様に，入力地震動の大きさに応じて，接地率が連続的に変化し，低接地率になっても特異な応答が生じないことを確認した。



入力地震動と接地率の関係

② 水平方向の最大応答加速度と接地率の関係

既往文献と同様に，接地率に応じて，最大応答加速度が連続的に変化し，低接地率になっても特異な応答が生じないことを確認した。

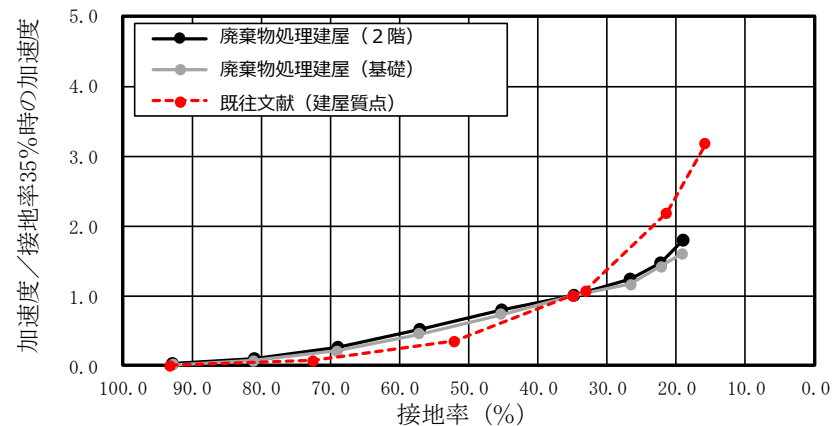
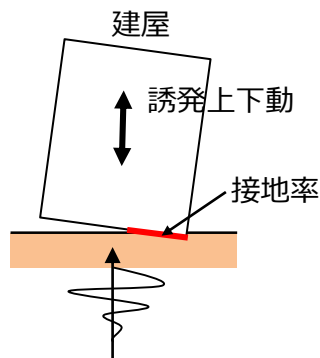


水平方向の最大応答加速度と接地率の関係

低接地率時の地震応答解析手法の妥当性確認 (検討結果 2 / 3)

③ 誘発上下動による鉛直方向の最大応答加速度と接地率の関係

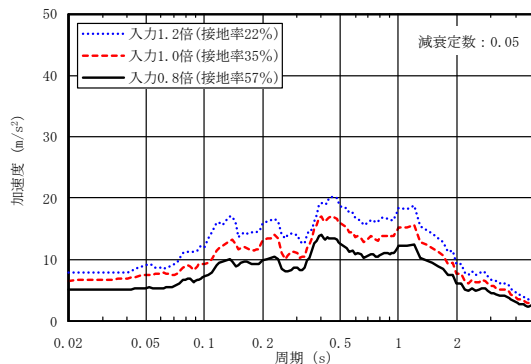
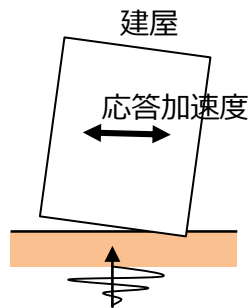
既往文献と同様に、接地率の低下に伴い誘発上下動による鉛直方向加速度が緩やかに増えており、極端な応答変化は認められないことを確認した。



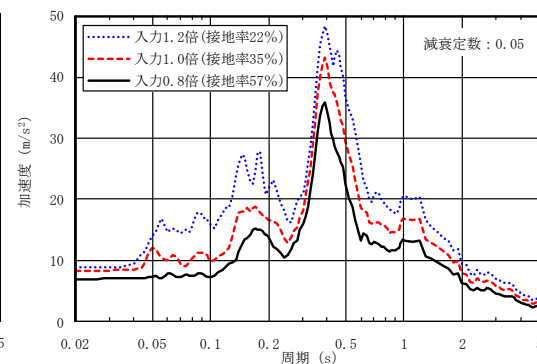
誘発上下動による鉛直方向の最大応答加速度と接地率の関係

④ 入力地震動と加速度応答スペクトルの関係

ほぼ全周期帯で入力地震動の倍率が大きくなるのに伴い、応答スペクトル振幅は徐々に大きくなっている。なお、2階の短周期側での増幅割合がやや大きくみえるが、これは基礎浮上りに伴う応答増幅と考えられる。



基礎



2階

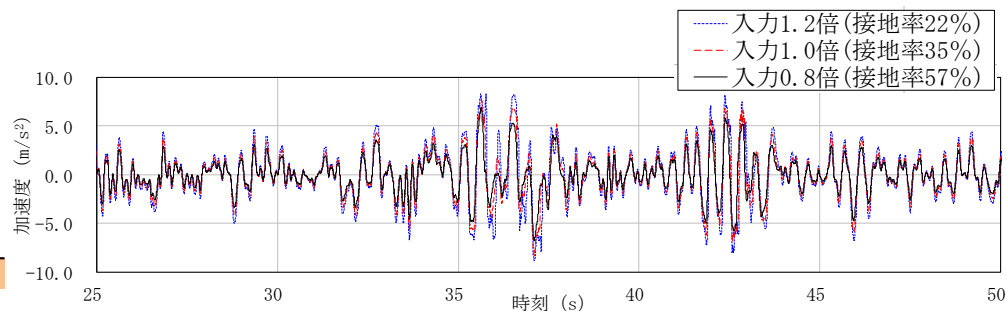
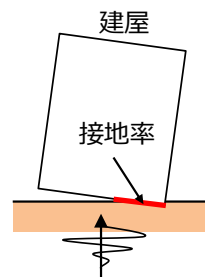
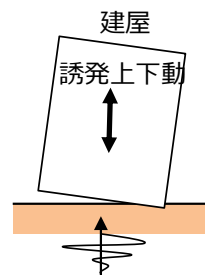
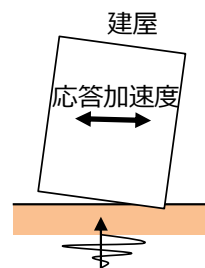
廃棄物処理建屋の水平方向の加速度応答スペクトル

低接地率時の地震応答解析手法の妥当性確認（検討結果 3 / 3）

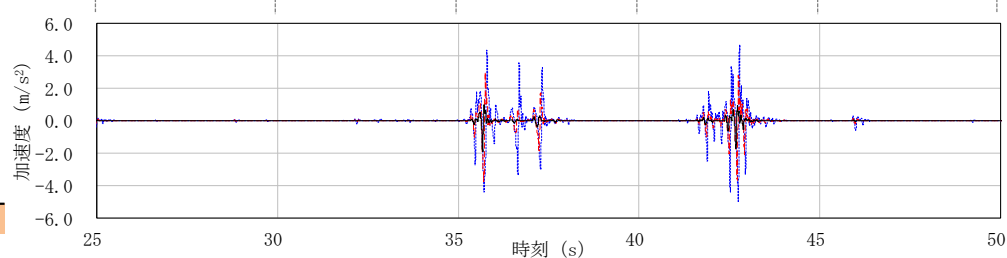
⑤ 入力地震動と応答時刻歴波形の関係

入力地震動の倍率が大きくなるのに伴い、水平応答加速度及び誘発上下動応答加速度は徐々に大きくなっている。

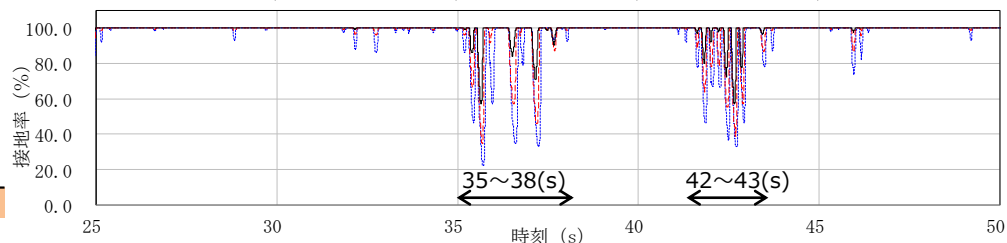
また、水平応答加速度及び誘発上下動応答加速度の中でも特に振幅の大きいのは、35～38(s)付近と42～43(s)付近であるが、この時間帯は浮上りが生じて接地率が小さくなっている時刻に一致している。



水平応答加速度時刻歴波形（2階）



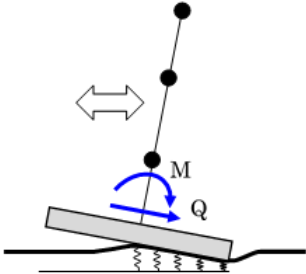
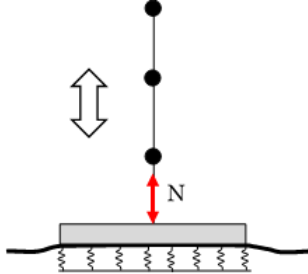
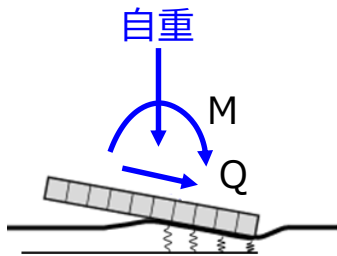
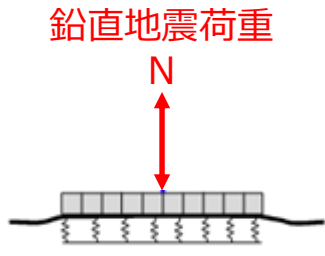
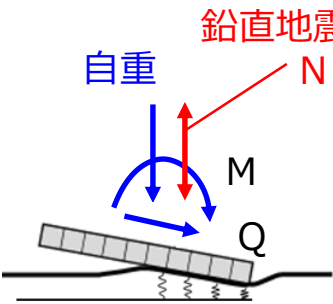
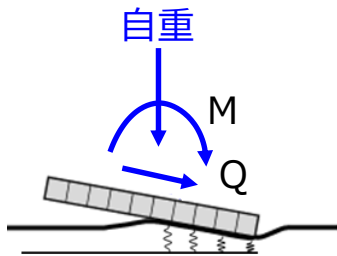
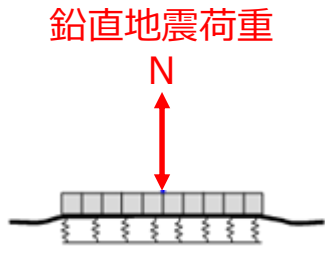
誘発上下動応答加速度時刻歴波形（2階）



接地率時刻歴波形

分離した応力解析手法の妥当性確認（従来の解析手法及び廃棄物処理建屋の解析手法）

- 廃棄物処理建屋は地震時の接地率が小さく、従来の解析手法では解析できないため、水平方向と鉛直方向を分離した解析を行うこととした。

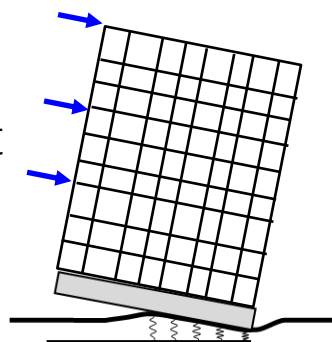
	従来の解析手法	廃棄物処理建屋の解析手法
地震応答解析	<p>水平方向</p>  <p>鉛直方向</p>  <p>水平方向と鉛直方向は個別に解析する。</p>	<p>鉛直地震荷重</p>  <p>自重</p>  <p>鉛直地震荷重</p> <p>水平方向</p> <p>鉛直方向</p> <p>水平方向と鉛直方向は個別に解析し、得られた応力の組合せを行う。</p>
基礎スラブの応力解析	<p>自重</p> <p>鉛直地震荷重</p>  <p>N</p> <p>M</p> <p>Q</p> <p>水平と鉛直を同時に解析する。</p>	<p>自重</p>  <p>M</p> <p>Q</p> <p>鉛直地震荷重</p>  <p>N</p> <p>水平方向</p> <p>鉛直方向</p> <p>水平方向と鉛直方向は個別に解析し、得られた応力の組合せを行う。</p>
課題	地震時の接地率が小さい場合、上向き鉛直地震荷重が大きいと解析できないことがある。	水平・鉛直同時入力による動的解析結果と比較し、分離した解析の妥当性を確認する必要がある。

分離した応力解析手法の妥当性確認（接地率による検討）

◆検討概要

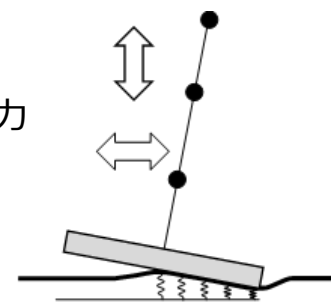
- 水平方向地震荷重のみによる静的応力解析による接地率 η_1 は、水平・鉛直同時入力による動的解析で得られた時刻歴最小接地率 η_2 と同等又は保守的な評価となることを確認する。
- 静的解析では水平地震荷重と鉛直地震荷重を同時に作用させると解析できないものが、水平・鉛直同時入力による動的解析では解析できることを確認する。
- 検討は、基準地震動 S_s に対する地震応答解析(基本ケース)により算定した接地率が最小となる S_s-8 による検討を実施する。

水平方向地震荷重のみによる静的応力解析



応力解析用モデル

水平・鉛直同時入力による動的解析



地震応答解析用モデル

接地率： η_1

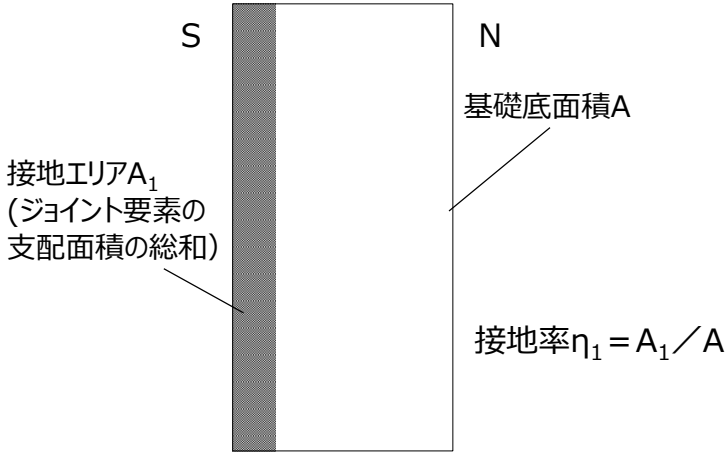
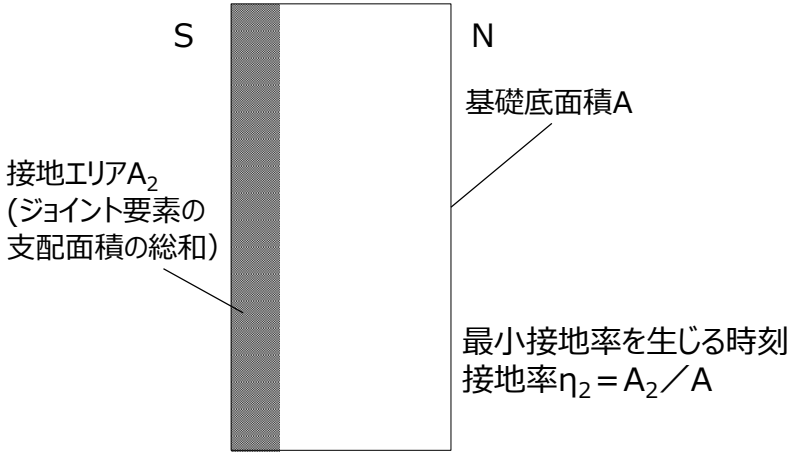


時刻歴最小接地率： η_2

分離した応力解析手法の妥当性確認（接地率による検討）

◆検討結果

- 「 $\eta_1 = 19.1\%$ 」 \leq 「 $\eta_2 = 22.2\%$ 」となり、応力解析用モデルに水平地震力のみを与えて求めた接地率 η_1 は保守的な評価となることを確認した。
- また、静的解析では水平地震荷重と鉛直地震荷重を同時に作用させると解析できないものが、水平・鉛直同時入力による動的解析では解析できることを確認した。

建屋3次元FEMモデル 水平荷重のみによる静的応力解析	地盤3次元FEMモデル 水平・鉛直同時入力による動的解析
 <p>接地率$\eta_1 = A_1 / A$</p>	 <p>最小接地率を生じる時刻 接地率$\eta_2 = A_2 / A$</p>
<p>加振方向：S←N ・接地率 $\eta_1 : 19.1\%$</p>	<p>最小接地率を生じる時刻：8.08 s ・接地率 $\eta_2 : 22.2\%$</p>

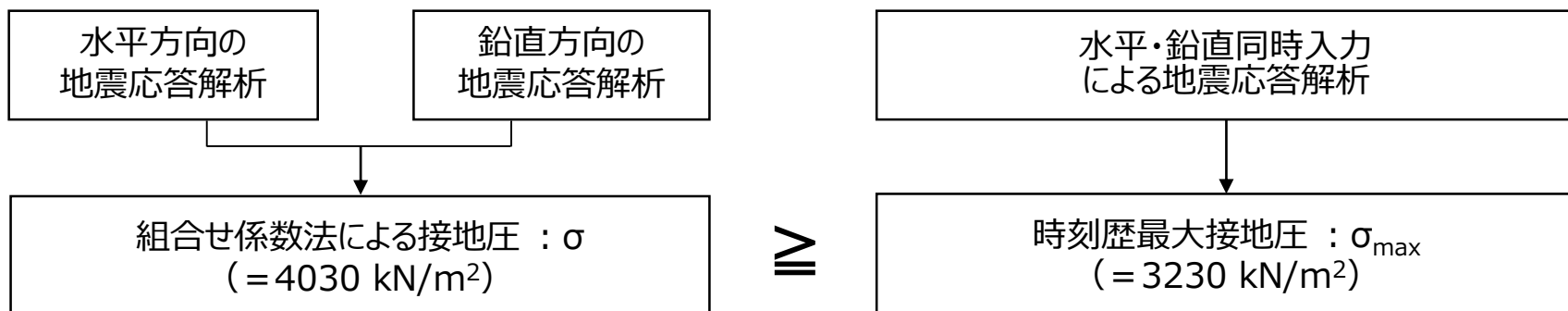
分離した応力解析手法の妥当性確認（接地圧による検討）

◆検討概要

- 接地圧は基礎スラブに加わる地震力に対する反力に相当するため、接地圧による検討により応力評価の妥当性を確認する。
- 具体的には、組合せ係数法による接地圧 σ は、水平・鉛直同時入力による動的解析で得られた時刻歴最大接地圧 σ_{\max} と同等又は保守的な評価となることを確認する。
- 検討は、基準地震動 S_s に対する地震応答解析(基本ケース)により算定した接地率が最小となる S_s -8による検討を実施する。

◆検討結果

- 「 $\sigma = 4030 \text{ kN/m}^2$ 」 \geq 「 $\sigma_{\max} = 3230 \text{ kN/m}^2$ 」となり、組合せ係数法により求めた接地圧 σ は、水平・鉛直同時入力による地震応答解析より得られた時刻歴最大接地圧 σ_{\max} よりも大きな値を与えることから、基礎スラブの応力解析を個別に解析し組合せ係数法を用いて評価することは妥当である。



まとめ

① 低接地率時の地震応答解析手法の妥当性確認

- 廃棄物処理建屋の地盤3次元FEMモデルを用いて、基準地震動を係数倍して入力した接地率20%程度までの地震応答解析結果とJEAC4601-2015において引用されている既往文献の結果を比較した。
- 廃棄物処理建屋と既往文献の結果の比較について、入力地震動の増加に伴って接地率が低下しており、その低下割合は両者ともよく整合していたこと、接地率の低下に伴って応答加速度は緩やかに増えており、極端な応答変化は認められないことを確認した。
- 以上により、今回の解析範囲である接地率20%程度までについて、廃棄物処理建屋の地盤3次元FEM解析の妥当性を確認した。

② 分離した応力解析手法の妥当性確認

- 基礎スラブの応力解析手法について、従来の解析手法と廃棄物処理建屋の解析手法（個別に解析し組合せ係数法を用いて評価する手法）を比較し、課題を整理した。
- 廃棄物処理建屋の応力解析手法の妥当性について、水平・鉛直同時入力による地震応答解析結果を用いて接地率及び接地圧に関して検討を行い、分離解析の妥当性を確認した。

以上より、廃棄物処理建屋で用いている地震応答解析手法及び応力解析手法は妥当であることを確認した。

【論点2】

ECCSストレナの耐震・強度評価への流動解析の適用
【案件取下げ】

1. 概要

ECCSストレーナの耐震強度評価において考慮する異物量のうち、事故時環境により剥離する塗装について、基準地震動のレベル増大に伴い、流動解析による移行率を適用する方針としていたが、全量移行を考慮した異物量にて評価を行い、十分な構造強度を有していることを確認したため、適用を見送る。

2. 経緯

・申請当初の段階では、耐震強度評価において異物量は比較的大きい因子であることから、以下の観点より、計算機プログラムを用いて格納容器内の三次元流動解析を行い、移行率（異物がストレーナへ到達する割合）を考慮して異物量を設定することを検討していた。

流動解析による移行率適用の対象とした非DBA塗装片は、LOCA後の格納容器の温度・圧力の上昇により剥離して発生するものであり、LOCAブローダウンによる攪拌が静定した後にサブプレッションプールへ移行するものである。比較的高い比重を有する非DBA塗装片が、ベント管からサブプレッションプールへ流入し、その全量がストレーナへ到達するという想定は保守的な想定となっている。

※非DBA塗装片…設計基準事故時の原子炉格納容器内環境に対する健全性を確認できていない塗装で、設計基準事故後に剥離して発生するもの

・その後、詳細設計において全量移行を考慮した異物量*にて評価を行い、十分な構造強度を有していることを確認したため、流動解析の適用を見送ることとした。

注記*：評価においては全量を系統ごとに流量比で分配し、異物の重量をストレーナの自重と同様に死荷重として考慮している。

(参考) 第769回審査会合での説明内容

【3-14】ECCSストレナの耐震・強度評価への流動解析の適用



1. 概要

- ECCSストレナの耐震強度評価において考慮する異物量のうち事故時環境により剥離する塗装について、既工認では全量がECCSストレナに到達するものとして評価していたが、基準地震動のレベル増大に伴い、今回工認では流動解析による移行率を適用して評価する。

(1)流動解析の評価方針

- ドライウェルで発生した異物が、ベント管からサプレッションチェンバに流入しECCSストレナへ到達する割合を三次元流動解析で評価する。



解析モデル (立体図)



ベント管からの異物の流入イメージ



解析モデル (平面図)

【参考】

主な説明事項		
[1] 詳細設計段階における設置変更 許可審査時からの設計変更	1	中央制御室待避室の遮蔽設計の見直し
	2	5号機原子炉建屋内緊急時対策所の遮蔽設計の見直し
	3	5号機原子炉建屋内緊急時対策所可搬型電源設備の保管方法の変更
	4	復水移送ポンプ周りの手動弁の電動弁化及び屋内アクセスルートの見直し
[2] 設計方針に関する説明事項	1	使用済燃料貯蔵プール水位の監視
	2	重大事故等時の格納容器評価における評価条件
	3	火災感知器の配置
	4	地下水に対する浸水防護対策
	5	竜巻設計飛来物の感度解析
	6	ブローアウトパネル及びブローアウトパネル閉止装置
[3] 耐震・強度評価に関する説明事項	1	津波漂流物の衝撃荷重（海水貯留堰）
	2	地盤物性の設定
	3	基礎地盤傾斜による建物・構築物及び機器の耐震性への影響
	4	建物・構築物における地震応答解析モデルの既工認からの変更点
	5	原子炉本体基礎の復元力特性
	6	建物・構築物の応力解析における弾塑性解析の採用
	7	格納容器圧力逃がし装置基礎の地震応答解析モデルのモデル化方針
	8	屋外重要土木建造物のモデル化方針
	9	耐震評価における等価繰返し回数
	10	加振試験に基づく使用済燃料貯蔵ラックの減衰定数の設定
	11	弁の動的機能維持評価（一定の余裕の確保）
	12	燃料集合体の耐震性
	13	制御棒・破損燃料貯蔵ラックにおける排除水体積質量減算の適用
	14	ECCSストレナの耐震・強度評価への流動解析の適用