

再処理施設 廃棄物管理施設 MOX燃料加工施設

設工認申請に係る対応状況

令和3年11月15日



1. 第1回申請における耐震設計に係る説明状況 基本的な考え方と本日の説明事項

【基本的な考え方】

技術的検討をしっかりと行い、根拠をもって説明する。

■ 燃料加工建屋の入力地震動の算定方法

- 等価線形解析を一般的な適用の目安を超える範囲に対して適用していたが、この超える範囲では物性値の変動がほぼ生じず、更に表層の一部の層に限られていたことを踏まえ、入力地震動の算定結果への影響はないとの定性的な判断に留まっていたことから、定量的な判断根拠の確認を行った結果を説明する。

■ 飛来物防護ネットの安全冷却水B冷却塔に対する波及的影響評価

- 液状化の評価は影響評価との位置付けに囚われて、液状化の応答が非液状化を上回ることを確認したにも関わらず、設計へのフィードバックを行わなかった（全波での評価を行わなかった）ことから、全波で非液状化時及び液状化時の双方における評価を行うこととする。
- 本日は、波及的影響評価に用いる解析モデルの考え方について説明する。

2. 燃料加工建屋の耐震評価（入力地震動の算定方法） 課題及び確認方法

燃料加工建屋の入力地震動の算定方法については、以下の課題がある。

- **課題①：表層地盤の一部の層において、せん断ひずみが等価線形解析の一般的な適用の目安（1%程度）を大きく上回る。**
- **課題②：造成盛土において発生するせん断ひずみが試験データに対して外挿範囲にある。**

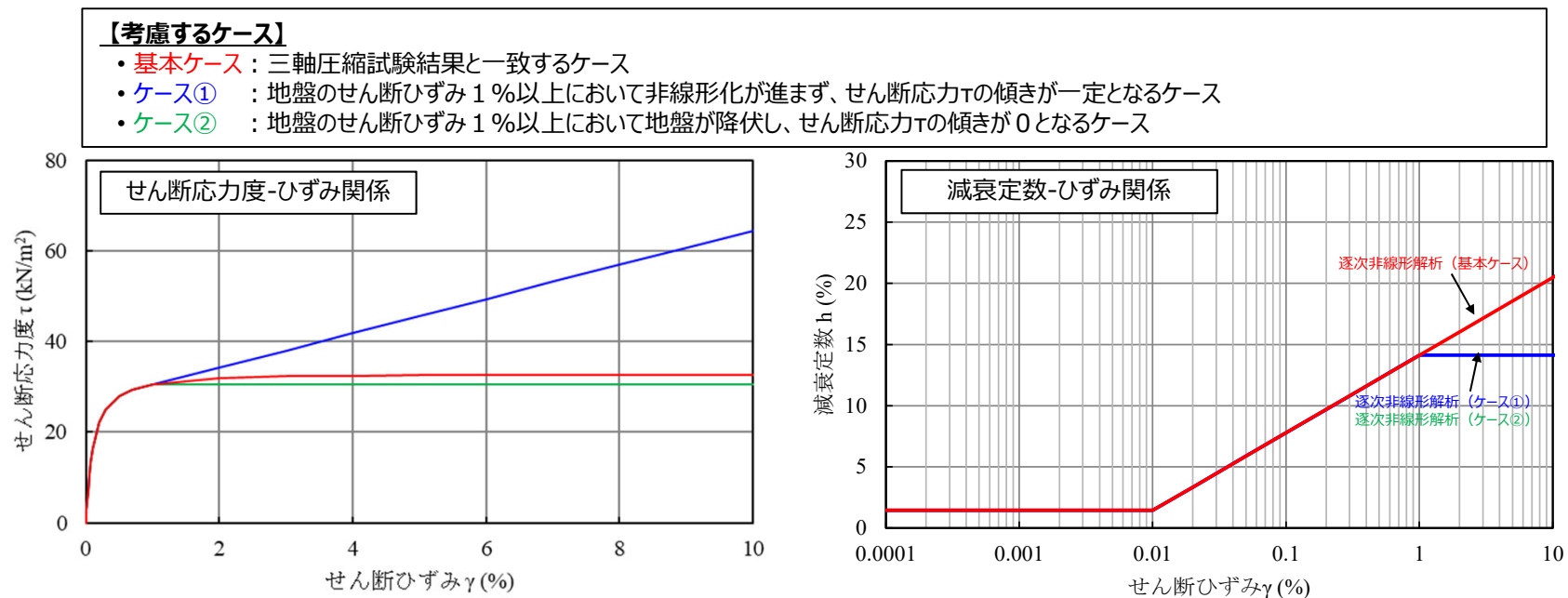
上記課題に対し、以下の方法により、入力地震動の算定結果への影響を定量的に確認した。

➤ **確認①：逐次非線形解析による確認**

- 地盤の非線形性を時々刻々と考慮可能な逐次非線形解析による地盤応答を比較。
- 非線形モデルについては、吉田ら¹⁾の手法に基づき、試験結果と整合する骨格曲線を設定。

➤ **確認②：外挿部分のパラメータスタディによる確認**

- 等価線形解析及び逐次非線形解析において、外挿範囲を極端に仮定した、下図ケースによる地盤応答を比較。



逐次非線形解析に用いる非線形モデル及び考慮するケース（造成盛土）

1): 吉田望他: 地盤の1次元非線形解析に用いる土のせん断応力-せん断ひずみ関係のモデル化 (日本建築学会大会学術講演梗概集、1990年10月)

2. 燃料加工建屋の耐震評価（入力地震動の算定方法） 確認結果

■ 確認結果

地盤のせん断ひずみが最大となる、Ss-C1（地盤物性ばらつきケース（-σ））における確認結果を示す。

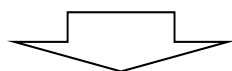
なお、 $1.2 \times Ss-C1$ においても、結果の傾向は同じであることを確認している。

確認① 逐次非線形解析による確認

- 燃料加工建屋基礎下レベルにおける入力地震動は、手法の違いによる有意な差は無い。

確認② 外挿部分のパラメータスタディによる確認

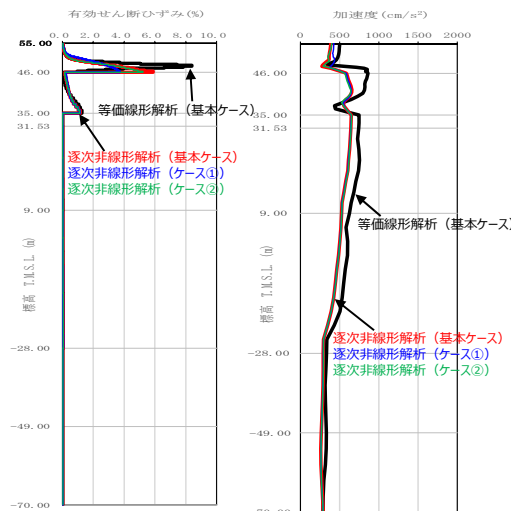
- 燃料加工建屋基礎下レベルにおける入力地震動は、外挿範囲の設定による有意な差は無い。



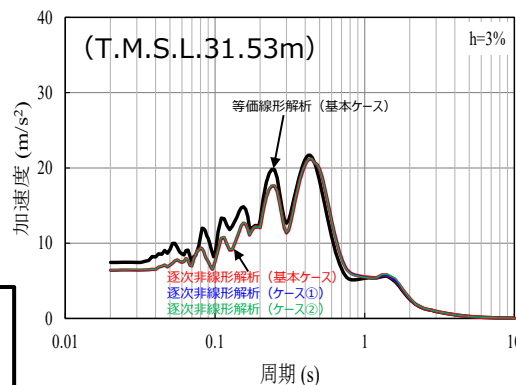
燃料加工建屋の地震応答解析においては、前頁に示した課題が入力地震動の算定結果に与える影響は無い。

確認①+確認②（逐次非線形解析）

- 等価線形解析（基本ケース）
- 逐次非線形解析（基本ケース）
- 逐次非線形解析（ケース①）
- 逐次非線形解析（ケース②）



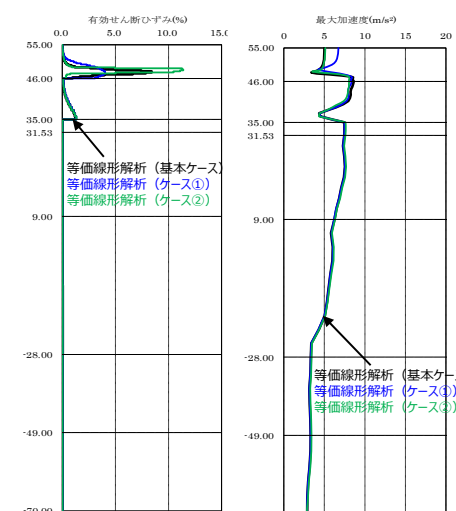
地盤応答分布



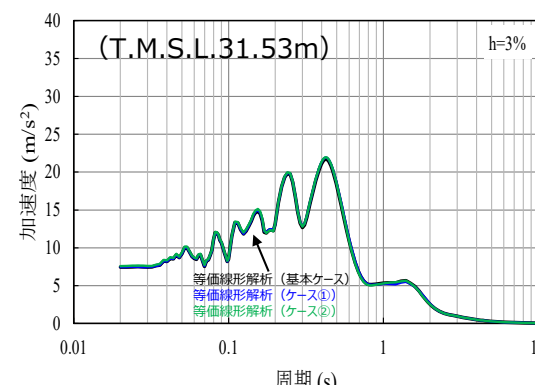
入力地震動（基礎下地盤応答）の
応答スペクトル

確認②（等価線形解析）

- 等価線形解析（基本ケース）
- 等価線形解析（ケース①）
- 等価線形解析（ケース②）



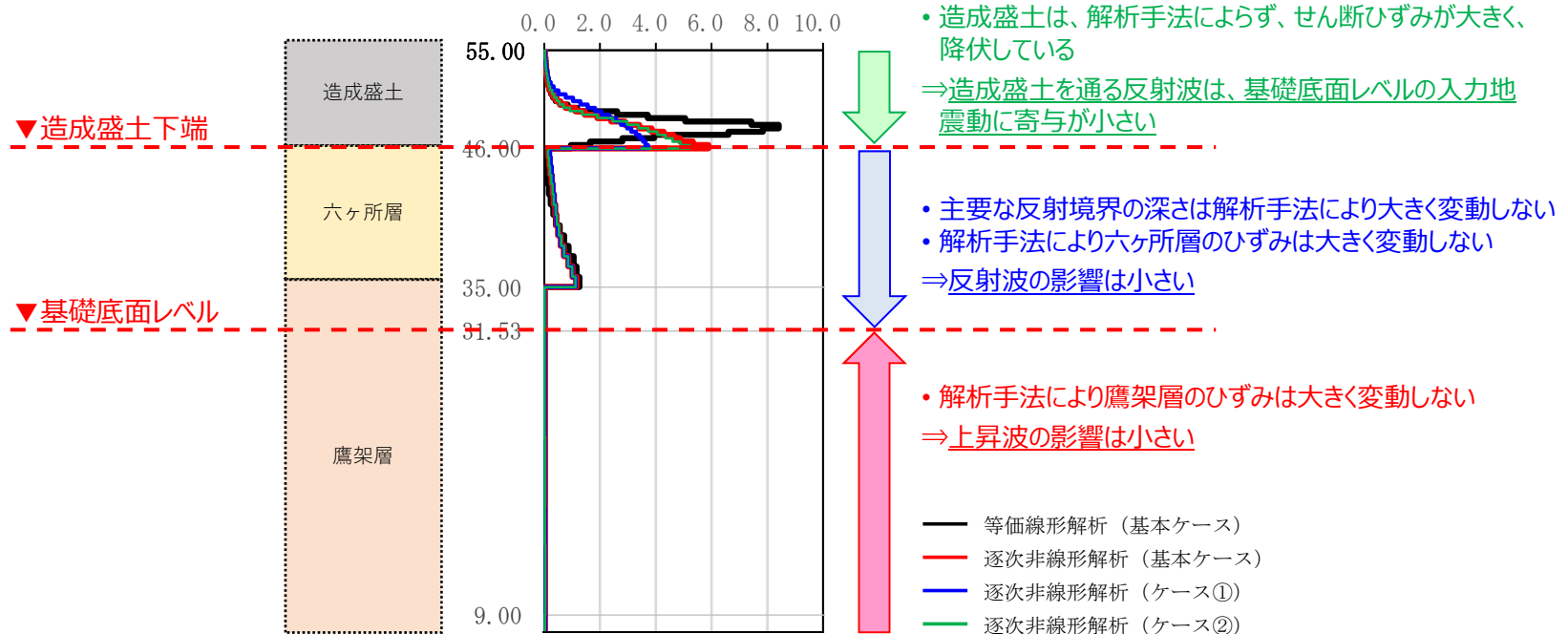
地盤応答分布



入力地震動（基礎下地盤応答）の
応答スペクトル

2. 燃料加工建屋の耐震評価（入力地震動の算定方法） 結果に対する考察

- 燃料加工建屋の入力地震動の算定においては、せん断ひずみが一般的な等価線形解析の適用の目安を大きく上回るが、以下のとおり、燃料加工建屋の地盤モデルの特徴に起因して、入力地震動の算定結果に影響を与えない結果となった。
 - いずれの手法・ケースにおいても、せん断ひずみが大きくなる深さ（＝主要な反射境界）が大きく変わらず、反射波が基礎底面レベルの地盤応答に対して有意な差を与えなかった。
 - いずれの手法・ケースにおいても、造成盛土はせん断ひずみ 1 % を超えており降伏状態となっていることから、基礎底面レベルの地盤応答に与える寄与が小さかった。
- これらの傾向は、燃料加工建屋の地盤モデルにおける以下の特徴に起因すると考えられる。
 - 建屋近傍に地山である六ヶ所層及び造成盛土が分布しており、表層地盤中で速度構造のコントラストが大きいこと。
 - ひずみが大きくなる造成盛土の厚さが側面地盤全体に対して薄く、ひずみの卓越する層も限定的であること。



基礎底面レベルの入力地震動に対しての影響に係る考察

3. 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震評価（波及的影響評価） 波及的影響評価に係る基本方針

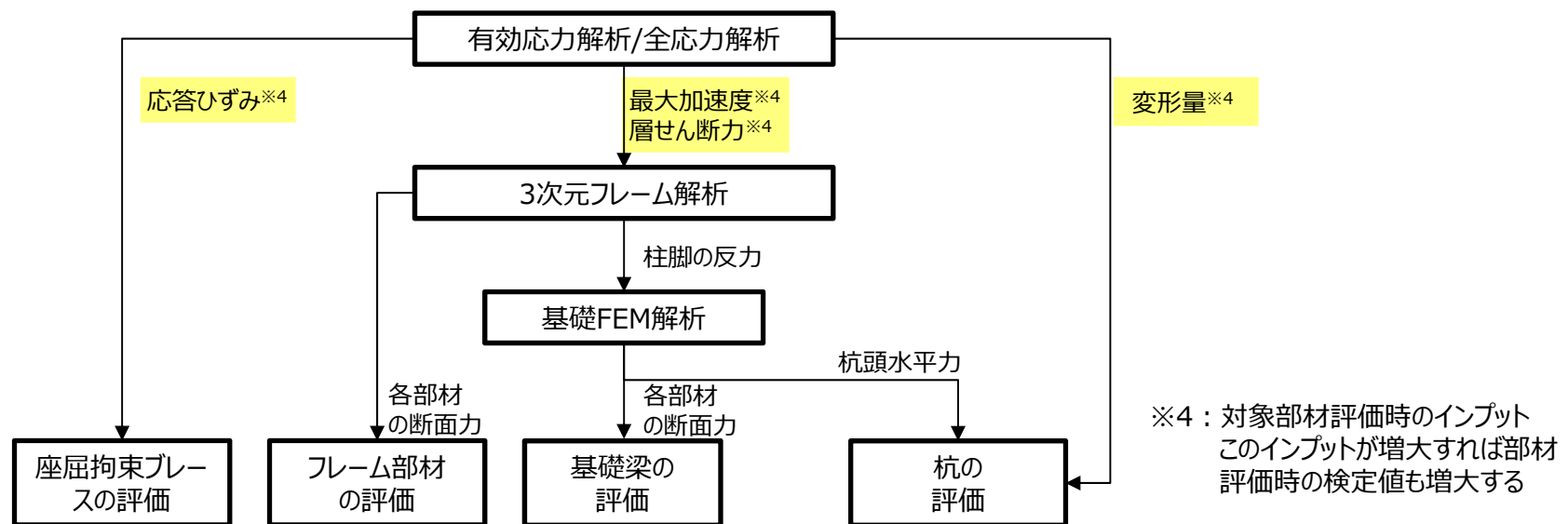
■ 飛来物防護ネット架構の安全冷却水B冷却塔に対する波及的影響評価に係る基本方針

- 飛来物防護ネットが冷却塔への波及的影響※1を与えないことを確認するため座屈拘束ブレース、フレーム部材、基礎梁、杭の部材評価を実施する。
- 部材評価は合理化モデル※2の応答結果（応答ひずみ、最大加速度、層せん断力、変形量）を用いる。
- 部材評価に合理化モデルを用いることの妥当性は、合理化モデルが詳細なモデル※3に比べ保守的であることを、応答結果の比較により確認する。

※1 波及的影響：架構の崩壊、架構の冷却塔への接触、部材の脱落、基礎の支持性能の喪失

※2 合理化モデル：上部架構の評価に必要な周期帯を踏まえ、メッシュサイズを大ききした計算負荷の小さい合理的な解析モデルを構築した。

※3 詳細モデル：実現象に近い応答結果が得られるよう周辺構造物を実態に合わせて取り込んだ解析モデルとして構築



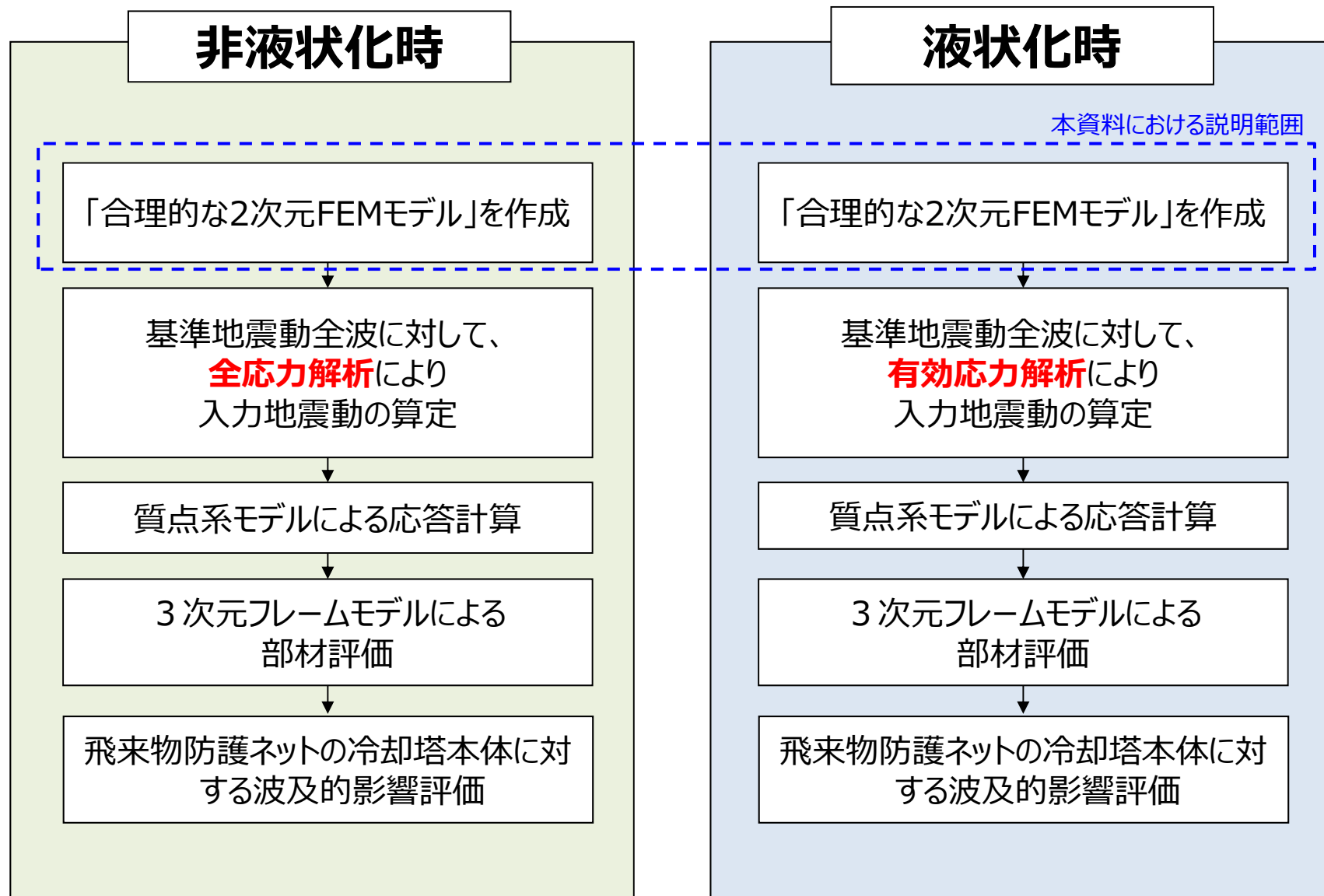
有効応力解析/全応力解析に関する評価フロー

3. 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震評価（波及的影響評価） 波及的影響評価に係る基本方針

■ 波及的影響評価に係る具体的な方針は以下の通り

- 当該敷地の直下、または、近傍の地盤物性を用いる。
- 非液状化時と液状化時の評価を基準地震動全波に対して行う。
- 非液状化時に全応力解析を用い、液状化時には有効応力解析を用いる。
- 非液状化と液状化の解析モデルは基本的に同一のモデルを用いる。

3. 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震評価（波及的影響評価） 非液状化時及び液状化時の検討フロー



※ **赤字**は「非液状化時」と「液状化時」の評価方法の差異を示す

※「合理的な2次元FEMモデル」：詳細な2次元FEMモデルと比べて、比較的簡便なモデル

3. 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震評価（波及的影響評価） 合理的な2次元FEMモデルの概要

詳細モデルと合理化モデルの差異及び確認内容を以下に示す。

内容	詳細モデル	合理化モデル	確認内容
解析モデル			—
近傍の構造物等	考慮する	考慮しない	1-1
メッシュ数	約10,000	約500	1-2
保証する周波数	20Hz以下	13Hz以下	1-2
上部構造	考慮する（1軸モデル、門型モデル）	考慮する（1軸モデルのみ）	1-3
検討断面	4断面 (NS断面(中央、端部)、EW断面(中央、端部))	2断面 (NS断面、EW断面)	1-3
杭	考慮する	考慮しない	1-3
接触剥離	考慮する	考慮しない	1-3
モデル寸法	<ul style="list-style-type: none"> 改良地盤Bの幅は実際の幅 周辺地盤のうち粗粒砂岩（厚さ0.37m）を考慮する 基礎高さは実際の高さ（T.M.S.L.55.3m） 	<ul style="list-style-type: none"> 改良地盤Bの幅は基礎幅に合わせる 周辺地盤のうち粗粒砂岩（厚さ0.37m）を考慮しない 基礎高さは地盤高さに合わせる(T.M.S.L.55.0m)* 	1-3

※上部構造のモデル化の際に、T.M.S.L.55.0～55.3mに剛梁をモデル化することで詳細モデルと整合させている

3. 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震評価（波及的影響評価） 合理的な2次元FEMモデルの妥当性の確認について

合理化モデルの保守性・妥当性は、以下の項目・内容により確認する。

項目	確認内容	実施状況
(1) モデル化の妥当性の確認	1-1 施設周辺の構造物のモデル化	実施済
	1-2 モデルのメッシュサイズ	実施済
	1-3 上記以外の差分の影響確認	実施中
(2) 液状化現象の確認	2-1 液状化状態の違いに対する確認 Step1：中間的な液状化状態の応答が、非液状化時と液状化時の応答を上回らないことを確認 Step2：地盤の剛性を変化させた場合でも、Step1が成り立つことを確認	実施中
(3) 保守性確保の確認	3-1 合理化モデルが詳細モデルよりも保守性があることの確認	実施中

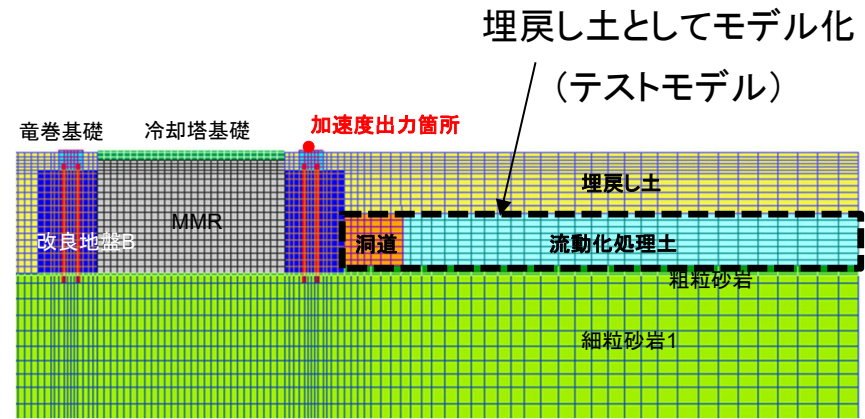
※Ss-Aについては全周期帯にわたって大きな加速度を有し、継続時間が長いことからより液状化を促進すると考えられ、Ss-C1については大きな加速度がパルス的に生じることから施設へ与える影響が大きいものと考え、暫定的に用いる。

暫定的にSs-A・Ss-C1に対して実施するが、これ以外に影響の大きい基準地震動が確認された場合、その基準地震動で再確認する。

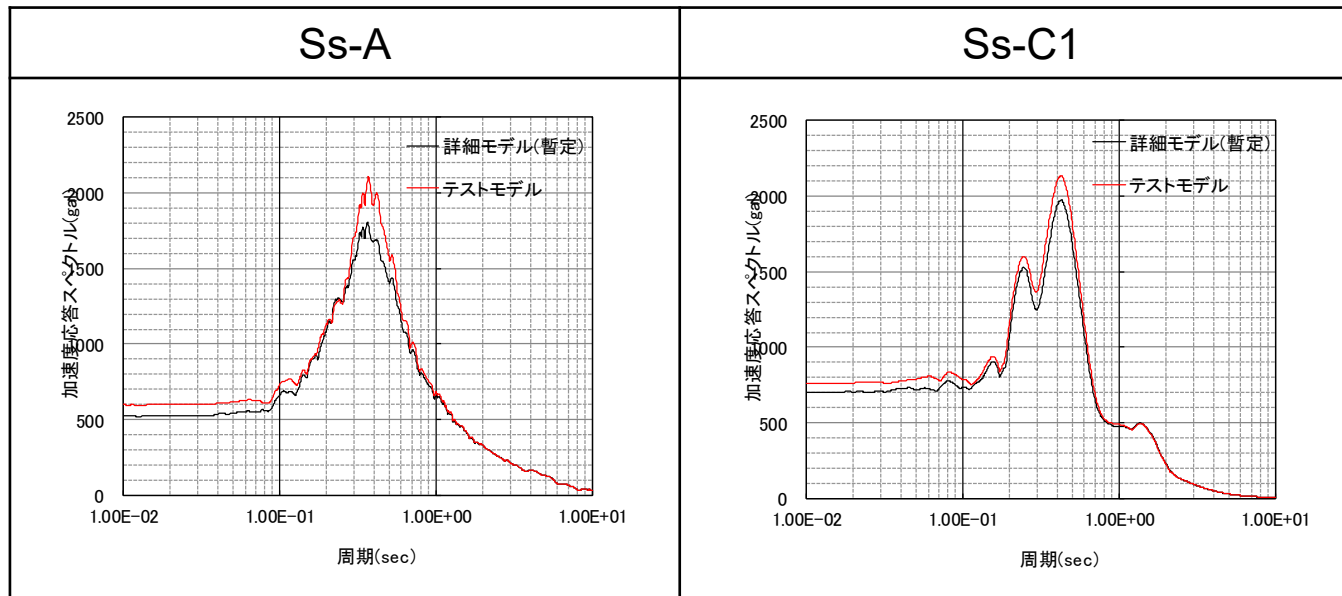
3. 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震評価（波及的影響評価） 合理的な2次元FEMモデルの妥当性の確認について

■ 1-1 施設周辺の構造物のモデル化（実施済）

- 合理化モデルは、モデル化の簡便化を目的とし、施設の周辺の構造物等をモデル化せずに全て埋戻し土と見なした。
- 上記設定では施設の周辺が全て液状化することから改良体を含む構造物の拘束が小さくなり、振動が励起される（保守的な評価になる）と想定している。
- 今回、試解析（テストモデル）により保守性が確認できた。



詳細モデル(NS断面中央部)



基礎上端における加速度応答スペクトル（減衰定数5%）

※試解析時の結果のため、詳細モデルにおいても次ページ以降の結果と異なる。

3. 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震評価（波及的影響評価） 合理的な2次元FEMモデルの妥当性の確認について

■ 1-2 モデルのメッシュサイズ（実施済み）

- 合理化モデルは、解析処理の短時間化を目的とし、地盤のメッシュサイズをできるだけ大きくし、要素数を減らすように考慮した。
- メッシュサイズは上部架構の振動特性を踏まえ、必要な周期帯（13Hz※¹以下）が評価できる設定とした。

- ① 地盤の最小せん断波速度: $V_s = 150 \text{ m/s}$ ※²(埋戻し土)
- ② 評価対象施設の振動数: $f = 13 \text{ Hz}$

- 上記①②より、下式により最小メッシュを算定

$$\text{mesh size} \leq \frac{1}{5} \frac{V_s}{f_{max}} \quad V_s \text{ と } f_{max} \text{ は地盤のせん断波速度と数値解析の精度を保證する周波数}$$

- $V_s = 150 \text{ m/s}$ の地盤において、13Hzの地震動が表現できるように1メッシュの大きさを $2.3 \text{ [m]} (= 150 \text{ [m/s]} / 5 / 13 \text{ [Hz]})$ 以下と設定していることから、メッシュのサイズは適切であり、上部架構の振動特性を評価可能と考える。

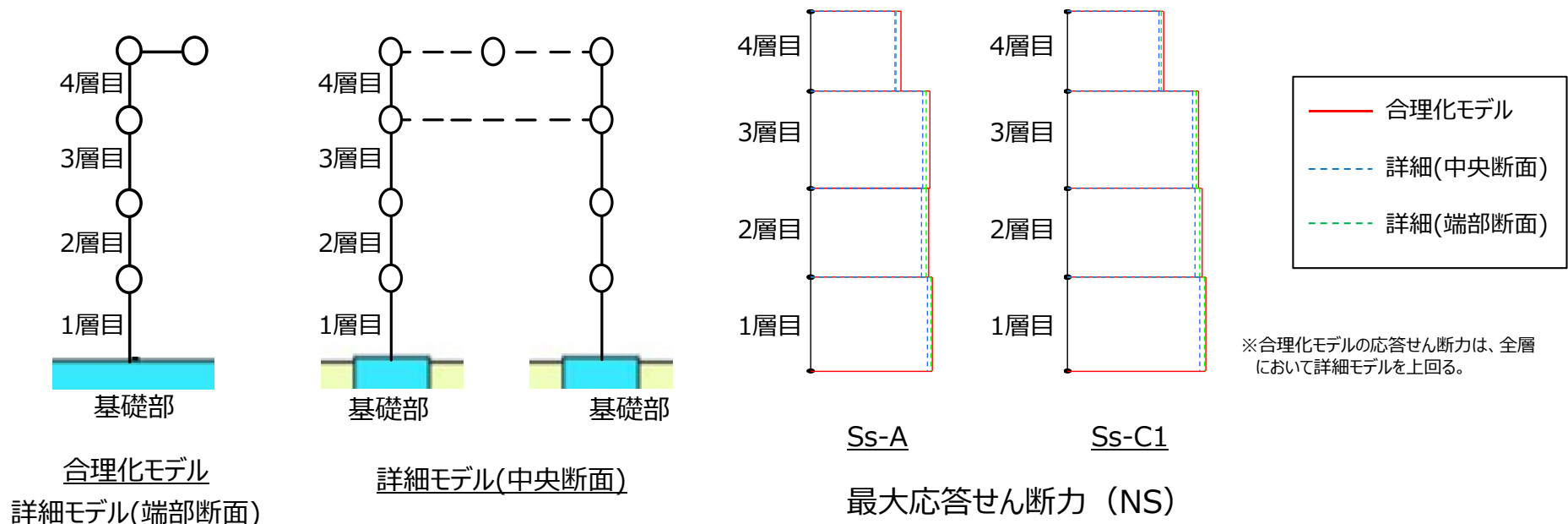
※1：有効質量の約99%を占める3次振動数(NS:12.36Hz,EW:12.53Hz)以上の数値として、13Hzを採用。

※2：地盤安定性評価での埋戻し土の V_s の最低値

3. 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震評価（波及的影響評価） 合理的な2次元FEMモデルの妥当性の確認について

1-3 1-1,1-2以外の差分の影響確認（実施中）

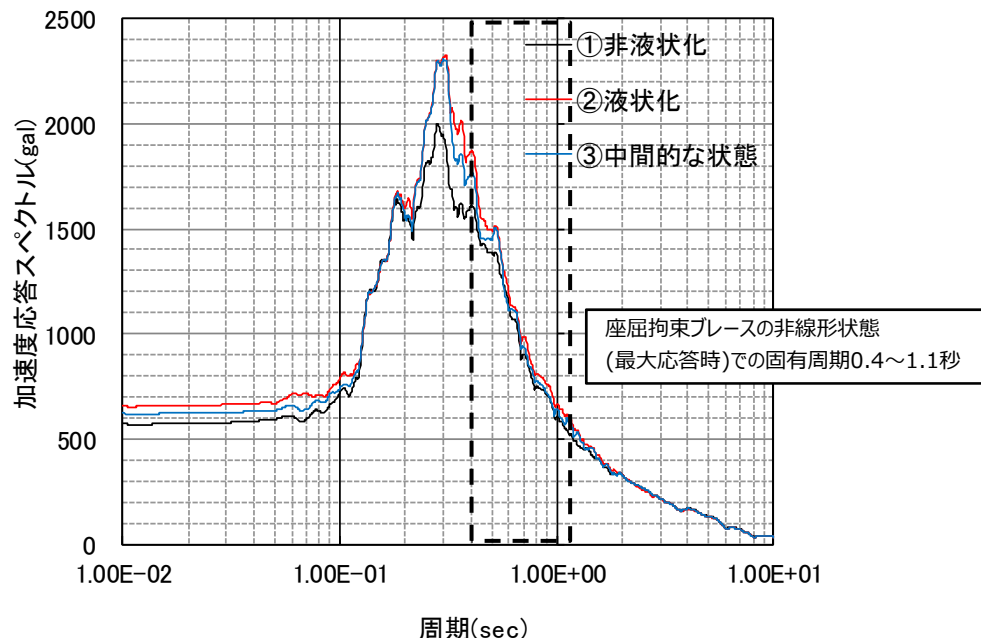
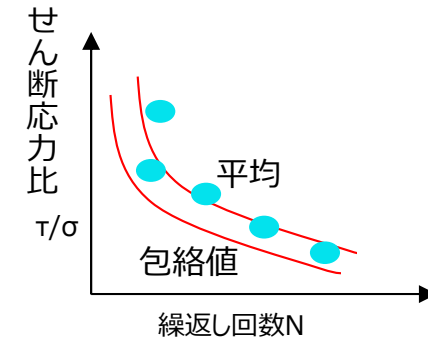
- 合理化モデルと詳細モデルには、以下の違いがあるが、応答結果に対する影響が1-1の保守性に包含されることを確認する（下図の最大応答せん断力参照）。（次回以降説明）
 - A) 詳細モデルは、端部/中央部をモデル化したが、断面の違いによる応答の差異は小さいことから、合理化モデルでは1断面とした。
 - B) 合理化モデルは、杭・接触剥離要素をモデル化していない。
(杭をモデル化すると、杭ピッチがメッシュサイズに影響し、メッシュ数が増となる)
 - C) メッシュの合理化を目的として、P9の「モデル寸法」の項目の通り設定した。



3. 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震評価（波及的影響評価） 合理的な2次元FEMモデルの妥当性の確認について

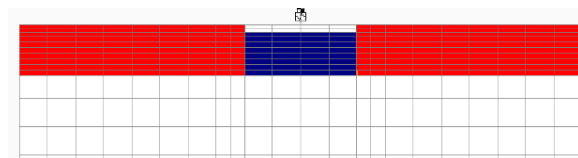
■ 2-1 液状化状態に対する確認（STEP1）

- ①非液状化と②液状化の評価とは別に、一部で液状化が生じない③中間的な状態の応答が、①か②に包含されない場合には③を設計ケースとする必要性が生ずることから、③の評価を実施する。
- ③では改良地盤B近傍の過剰間隙水圧の上昇が抑制され、拘束効果により加速度が低減すると考えられ、座屈拘束ブレースの非線形状態(最大応答時)での固有周期帯で③が②に包含される結果となった。
- 以上から、③における評価は、②の評価を実施することで、包含出来る見通しを得た。

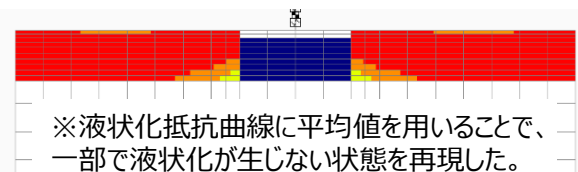


Ss-A加振時の基礎上端における加速度応答スペクトル(減衰定数5%)

②液状化(液状化抵抗曲線は包絡値)

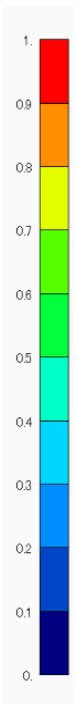


③中間的な状態(液状化抵抗曲線は平均値)



※液状化抵抗曲線に平均値を用いることで、一部で液状化が生じない状態を再現した。

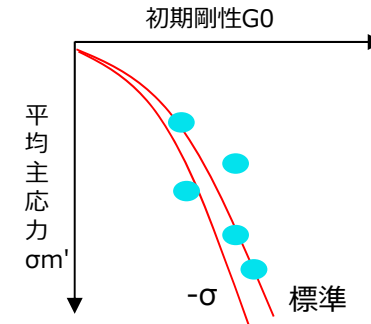
最終時刻の過剰間隙水圧比分布 (Ss-A加振時)



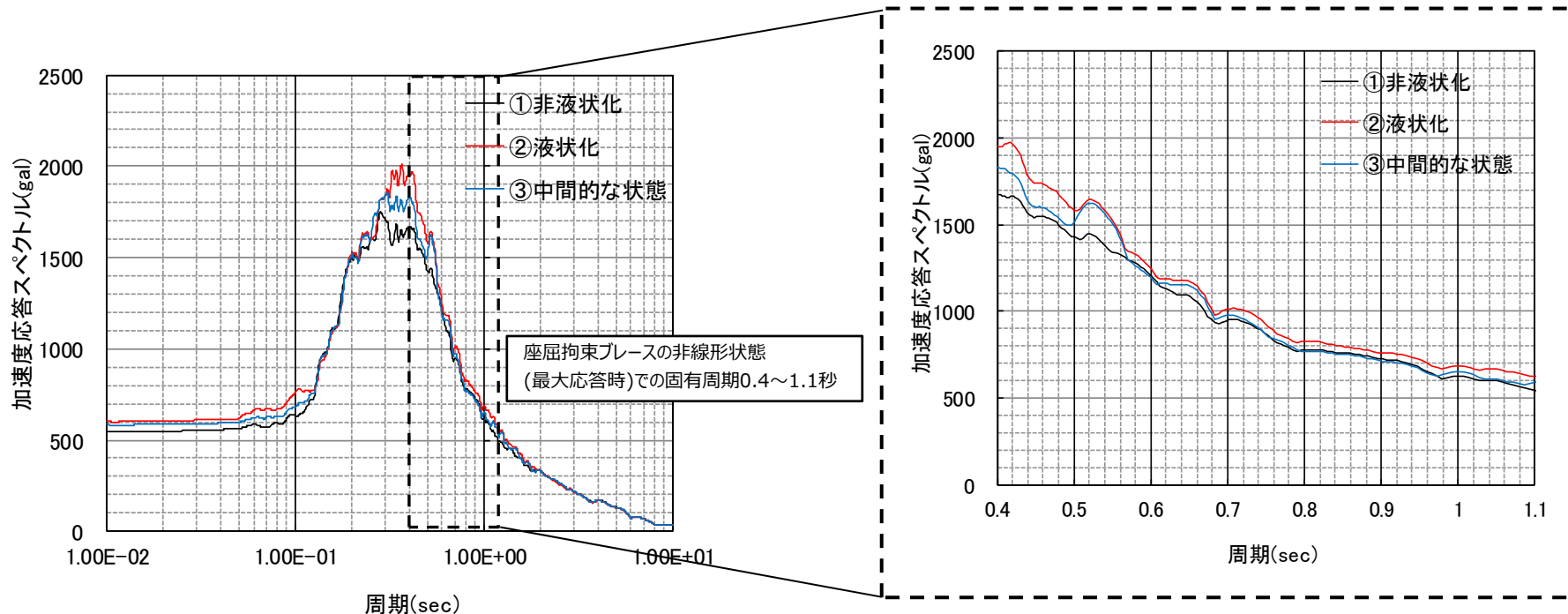
3. 安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット架構の耐震評価（波及的影響評価） 合理的な2次元FEMモデルの妥当性の確認について

■ 2-1 液状化状態に対する確認（STEP2）

- 地盤の初期剛性をSTEP1よりも小さくしたケース（ -1σ ）においてSTEP1と同様の傾向となることを確認する。
- 初期剛性を小さくしたケースにおいても、一部で液状化が生じない③中間的な状態の応答が、座屈拘束ブレースの非線形状態(最大応答時)での固有周期帯において、③が②に包含される結果となった。



※今後、 $+1\sigma$ の場合についても確認する。



Ss-A加振時の基礎上端における加速度応答スペクトル(減衰定数5%)