

# 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について

令和4年1月14日

## 1. はじめに

---

### ■ 本日の説明事項

- 飛来物防護ネット架構の耐震評価に関し、前回の審査会合（2021年12月23日実施）における議論・指摘事項を踏まえ、今回の審査会合においては、以下の事項について説明する。
  1. 基本方針
  2. 地震応答解析
  3. 波及的影響評価
- 前回審査会合では、「1.基本方針」および「2.地震応答解析」のうち設計モデルの妥当性・保守性の検証に係る考え方・方針について説明した。
- 本審査会合では、設計モデルの妥当性・保守性の検証結果について説明する。
- その上で、この設計モデルを用いた「波及的影響評価」について説明する。

## 1. はじめに

### ■ 2021/12/23審査会合における指摘事項と対応

No.	指摘事項	対応結果	対応箇所
1	弾性範囲を超えた際の変形の評価において、施設全体を総合的に勘案して波及的影響を及ぼさないことの確認方法、全体モードの抑え方、どのポイントを抑えるのかを明確化すること。	弾性範囲を超えて変形が大きくなる場合には、上部架構の層間変形を算定し、冷却塔へ接触しないことを確認する。なお、評価結果から上部架構（フレーム）は弾性範囲であった。	P 5,24
2	検証モデルにおける杭の評価において、応答結果を確認し、非線形領域に入るようであれば、その影響を適切に評価すること。	一部の杭については、ひび割れが発生している可能性があるが、基礎梁は弾性範囲であることから、一部の杭の非線形化による影響はない。	P24
3	設計モデルの説明に際し、合理化した範囲だけではなく、合理化しなかった範囲についてもその考え方・設定プロセスを根拠とともに整理し、妥当性検証につながる一連の設計の中で検討していることがわかるよう説明すること。	設計モデルについて合理化した範囲、しなかった範囲について考え方・設定プロセスを示した。	P8,9
4	検証用モデルについて、先行炉の審査実績と比較して六ヶ所に適用できる根拠を整理し、その内容について説明すること。	検証用モデルについて、構築のプロセスが先行する発電炉と同様であることから、検証用モデルとして使用することは妥当である。	P9
5	鉛直応答に対する保守性については、設計モデルと異なるモデルで実施することとなると思うが、この目的を果たすうえで、適切なモデル、条件が設定され、適切に評価できるということについて、根拠をもって説明すること。	鉛直応答に対する保守性について、設計モデルと異なるモデルを用いる際に保守性を適切に持たせるための条件について根拠をもって示した。	P21,22
6	地盤の剛性変化に係る検討において、中間的なケースを想定し、2ケースのみでよいかどうか、追加が必要か結果を踏まえケース選定が妥当であることを技術的に説明すること。	地盤の剛性変化に係る検討について中間的な状態に用いたケースが妥当であることを技術的に示す。	P20

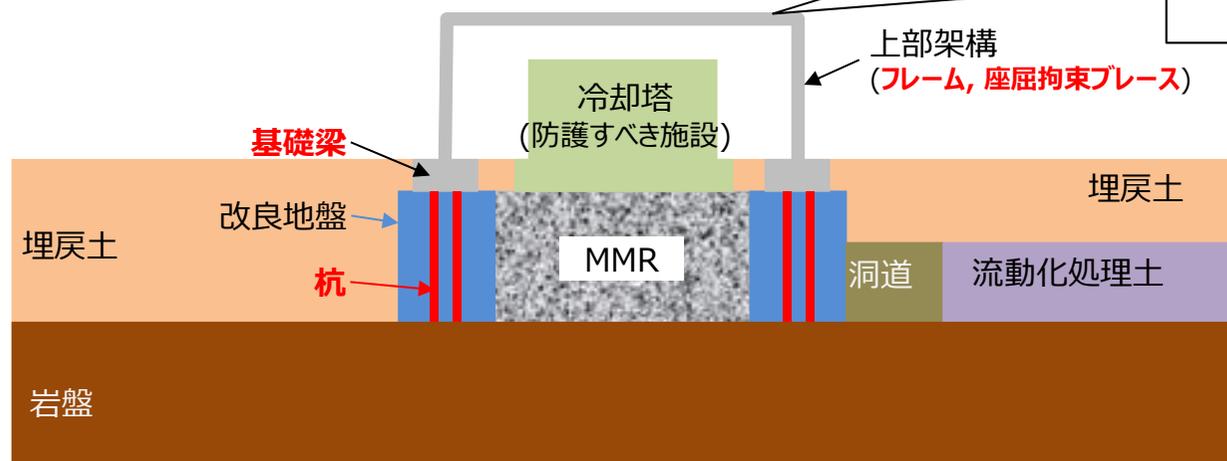
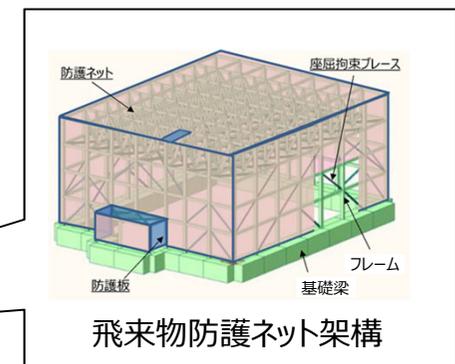
## 2. 基本方針

### 2.1 施設の「目的」と「要求性能」

- 防護ネット架構は、防護すべき施設(安全冷却水B冷却塔)に対し、竜巻による飛来物衝突の防止のために設置する。
- 防護ネット架構は、竜巻および地震による荷重に対し、防護すべき施設へ波及的影響を及ぼさないように設計する。

### 2.2 構造形式（耐震評価上の設計対象）

- 防護ネット架構は、鉄骨造の**フレーム**(柱・梁)と**座屈拘束ブレース**の外側に防護ネットが取り付けられている構造であり、**基礎梁**を介して**杭**で岩盤より支持される。
- 波及的影響評価では、上記構造形式を踏まえ「**杭・基礎梁・フレーム・座屈拘束ブレース**」を**設計対象**とする。  
(図中の赤字)



## 2. 基本方針

### 2.3 設計方針

竜巻に対する設計方針： 竜巻時（風速100m/s）風圧力や飛来物の衝突により生じるひずみ等が、許容限界内に収まることを確認する。衝突時の荷重に対して塑性化を考慮した設計を行う。（審査会合（2021/6/28）にて説明済。補足説明資料について別途提出予定）

地震に対する設計方針： 地震荷重※1、風荷重※2、自重※3及び積雪荷重※4によって生じる応力を解析する。  
上記荷重によってフレーム・杭・基礎梁の各部材に生じる応力については許容限界内※5に収まるよう設計する。このとき、解析結果が弾性範囲を超えた場合には、変形※6について評価し冷却塔に波及的影響を与えないことを確認する。  
なお、座屈拘束ブレースは塑性化を考慮した設計を行う。

※1：基準地震動 $S_s$ による荷重

※2：建築基準法における基準風速（34m/s）から算定される風荷重。なお、地震荷重と組み合わせる場合、平均的な風荷重とするため、ガスト影響係数 $G_f$ は1とする。

※3：固定荷重及び積載荷重

※4：観測記録上の極値である積雪190cm（六ヶ所村統計書）から算定される積雪荷重。なお、地震荷重と組み合わせる場合、建築基準法における平均的な積雪荷重を与える係数0.35を乗じる。

※5：許容限界の考え方を2.4「地震時の部材設計」に示す。

※6：弾性範囲を超えた場合についての変形への配慮を【参考1，2】に示す。

## 2. 基本方針

### 2.4 地震時の部材設計

- 杭 : **上部架構の応答による反力**※<sup>1</sup>、杭周辺の**地盤の変形**によって杭に生じる**軸力・曲げ・せん断力**に対し、支持機能を失わない状態(**基礎指針による耐力**※<sup>2</sup>以下)であることを確認する。また、杭に生じる**軸力**が、地盤の**鉛直支持力**※<sup>2</sup>または**引抜抵抗力**※<sup>2</sup>以下であることを確認する。
- 基礎梁 : **上部架構の応答による反力**※<sup>1</sup>によって基礎梁に生じる**軸力・曲げ・せん断力**に対し、支持機能を失わない状態(**鉄筋コンクリート柱及び梁の強度**※<sup>2</sup>以下)であることを確認する。(別途、鉄骨柱の埋込柱脚部・杭と基礎梁の接合部で局所破壊が生じないことを確認)
- フレーム : **上部架構が応答**し、各層で発生する加速度による外力によってフレームに生じる**軸力・曲げ・せん断力**に対し、**鉄骨の強度**※<sup>2</sup>(=**基準強度×1.1**)以下であることを確認する。
- 座屈拘束ブレース : **上部架構の応答**で座屈拘束ブレースに生じる**ひずみ**の最大値および疲労係数が、メーカーの日本建築センター評価書の**評定記載値**※<sup>2</sup>以下であることを確認する。(座屈拘束ブレースを除く部材は線形として計算をするが、塑性化による影響がある場合は、適宜ひずみに影響を考慮する)



各部材の応力（軸力・曲げ・せん断力）・ひずみに影響する  
「**上部架構の応答**※<sup>1</sup>」、「**地盤の変形**」  
に着目し設計に必要な**荷重を算定**するための解析モデルを構築する。

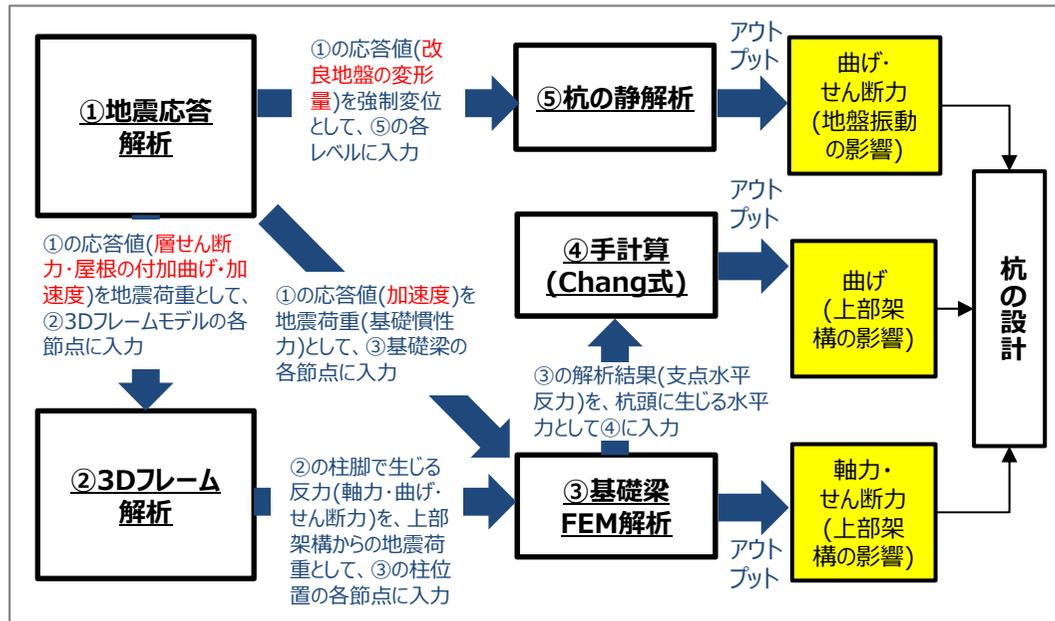
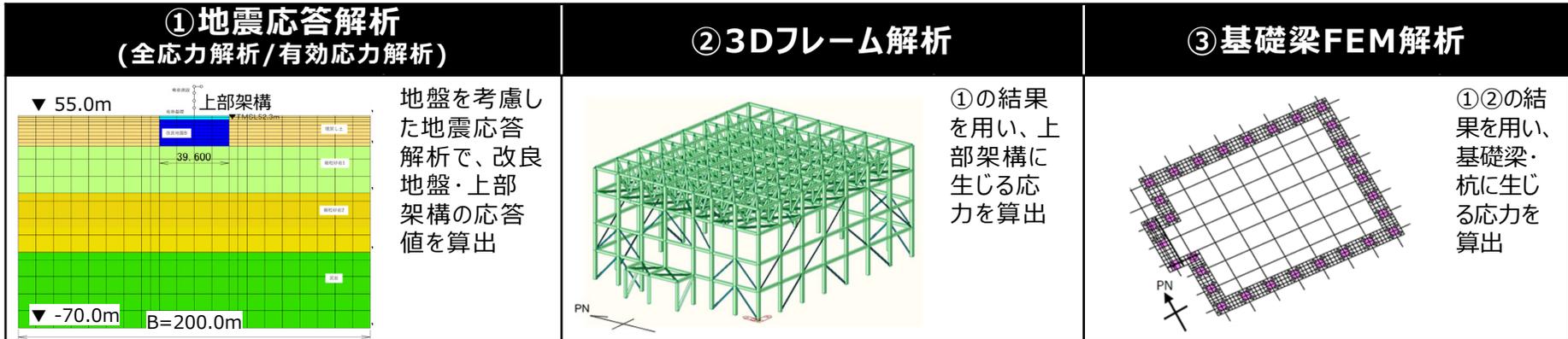
※1 上部架構の柱脚の反力と基礎梁の慣性力

※2 各部材のクライテリアの詳細については【参考3】に示す。

## 2. 基本方針

### 2.5 部材設計に用いる応力の算定

- 部材の設計に用いる応力・ひずみの値は、下記の①～③の解析により算定する。



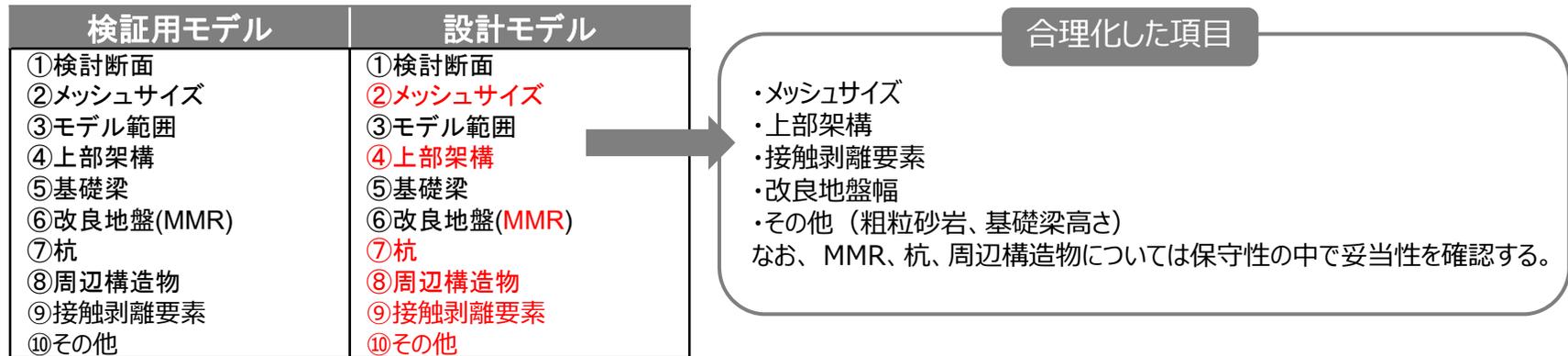
- 杭の設計を例とすると、部材の設計に用いるインプットは、①地震応答解析より算定される以下の項目である。(図中の赤字)
  - ・上部架構の各層の層せん断力
  - ・上部架構の屋根部の付加曲げ
  - ・上部架構の屋根部の鉛直加速度
  - ・基礎梁部の加速度(水平・鉛直)
  - ・改良地盤の変形量
- 他の設計においても杭と考え方は同じ。座屈拘束ブレースの設計に用いるインプットは、①地震応答解析より算定される「応答ひずみ」の項目が追加となる。
- 全ての評価のベースとなる地震応答解析については、次ページ以降に記載する。

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.1.1 方針

- ◆ 部材設計を行うにあたり、地震荷重(インプット)が適切に算定される必要があることから、至近の発電炉で用いられているモデルと同様のプロセスで構築したモデル(検証用モデル)の妥当性を確認の上、本評価で用いるモデル(設計モデル)にて検証用モデルから解析負荷を軽減するため合理化した項目の妥当性を確認する。(【参考5】参照)。
- ◆ また、設計モデルは科学的合理性を有し、波及的影響が過小評価とならないよう以下の項目を踏まえて解析モデルを構築する。
  - モデルの構築に際して設定する項目(メッシュ、形状等)が**妥当性を有していること**
  - 波及的影響評価が過小とならない地震荷重を算定可能な**保守性を有していること**（水平方向に着目）
- ◆ 保守性を確保する項目は**上部架構の応答**や**地盤の変形**が大きくなる項目に着目して選定する。(【参考7】参照)  
 なお、鉛直方向については、別途適切に評価出来るモデルを構築し、その解析結果を設計に反映する。

#### 1) モデルの妥当性の確認項目



#### 2) 設計モデルの保守性の確認項目

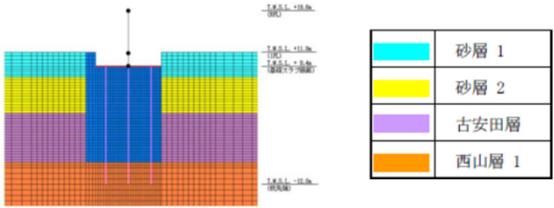
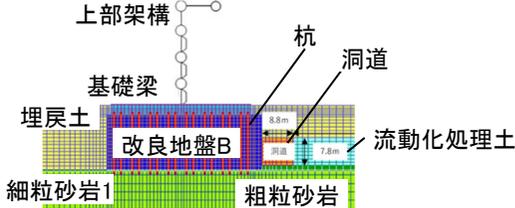
- ・拘束効果
- ・地盤の剛性変化
- ・鉛直応答

左記を踏まえて、保守性の最終的な確認を設計モデルと検証用モデルの比較にて行う

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.2 検証用モデルの妥当性

- 検証用モデルの妥当性については、先行する発電炉とのモデル化の比較によって確認する。
- 先行する発電炉においては、以下に示す①～③の構築プロセスに沿いモデルの設定を行っており、かつ、地震観測波を用いたシミュレーション解析等により解析モデルの妥当性について検証している。
- 一方、本施設においては十分な地震観測波が無く、同様のシミュレーションによる検証は困難な状況にあるものの、解析モデル（検証用モデル）の構築のプロセス（解析用地盤物性の設定方法、解析対象施設の形状他）が先行する発電炉と同様であることから、検証用モデルとして使用することは妥当である。

項目	柏崎刈羽7号機(大物搬入建屋)	六ヶ所(飛来物防護ネット架構)
モデル (施設周辺拡大)		
①モデル諸元	<ul style="list-style-type: none"> <li>・解析対象施設は対称・整形</li> <li>・JEAG等に基づくFEM構築(メッシュサイズ、モデル範囲)</li> <li>・地盤改良等を実態に即しモデル化</li> </ul>	同左
②地盤及び材料の物性	<ul style="list-style-type: none"> <li>・地盤の物性値は試験結果等から設定する。</li> <li>・試験結果または指針類等から設定する。</li> <li>・地下水位は観測記録等に基づき設定</li> </ul>	同左※
③地震時荷重	<ul style="list-style-type: none"> <li>・解放基盤に基準地震動を入力する</li> <li>・地震荷重、自重及び積雪荷重を設定する。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・同左</li> <li>・2.3の地震に対する設計方針に倣い設定する。</li> </ul>

※詳細を【参考4】に示す。

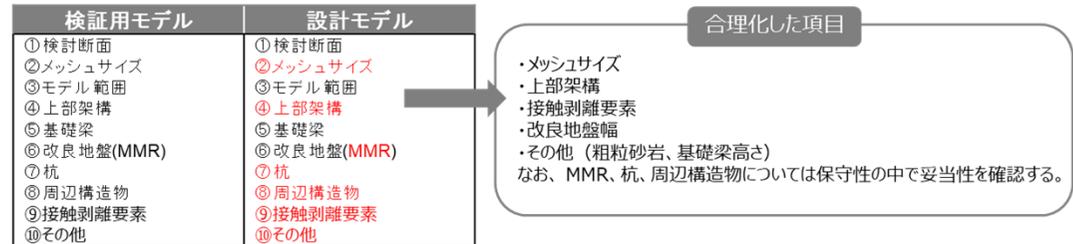
### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.4 地震応答解析に用いる設計モデルの妥当性

##### 3.4.1 設計モデルの妥当性の確認項目

- 右図の妥当性確認項目に対して合理化した項目について以下に設定の考え方を示す。

1) モデルの妥当性の確認項目



項目	設定の考え方
メッシュサイズ	地中を伝搬する波はメッシュ分割に影響を受けるため、深さ方向のメッシュ分割は、上部構造の固有振動数とメッシュサイズの関係から施設の振動特性に対応した入力波を適切に評価できるように、表層地盤では最大2.0mとする。
上部架構	施設の振動特性を適切に考慮するため、上部架構をモデル化し上部架構-基礎-地盤を一体で評価する。 また、架構は一体的に挙動しすると考え、設計モデルでは、振動特性を合わせることで同等の応答となると考え一軸とする。
接触剥離要素	埋戻土が液状化した場合には剛性がほぼゼロとなること、基礎梁と埋戻土との接触面が基礎梁横の一部のみに限定されることから、接触剥離の影響は小さいという考えから、構造物と地盤の境界面に対し、接触剥離は考慮しない。
改良地盤幅	改良地盤の「高さ/幅」が大きくなることでロッキング挙動が起きやすくなり、地震荷重が大きくなると予想し、改良地盤幅は基礎梁幅に合わせる。
その他	<ul style="list-style-type: none"> <li>・粗粒砂岩：支持地盤の厚さ107m（解放基盤表面～支持地盤上端）に対し、粗粒砂岩の厚さはごくわずか（0.37m）であり、地震応答に与える影響は小さいと考え、モデル化しない。</li> <li>・基礎梁高さ：上部架構の振動特性が等価となるような設定とする。</li> </ul>

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.4.3 設計モデルの妥当性の検証

➤ **メッシュサイズ**

- ① 地盤の最小せん断波速度:Vs=150m/s (埋戻土)
- ② 上部架構の振動数:f=13Hz※

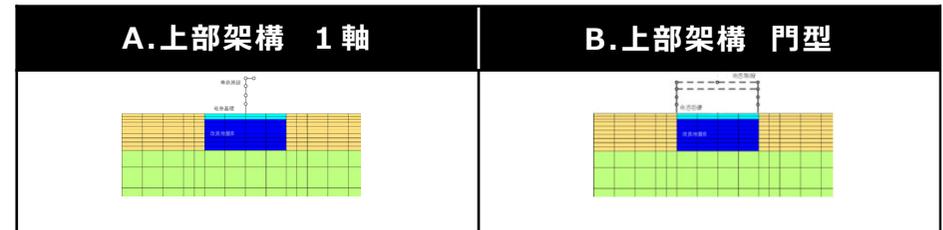
$$\text{mesh size} \leq \frac{1}{5} \frac{V_s}{f_{max}}$$

※: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。

- Vs=150m/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[m](=150[m/s] / 5 / 13[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。

➤ **上部架構**

- 設計モデルをもとに、1軸と門型の結果が同等であることを確認する
- 確認項目は、上部架構の影響を確認することが目的であるため、三次元フレーム解析で地震荷重として用いる以下の応答値とする
  - (1) 上部架構各層の層せん断力
  - (2) 屋根部の付加曲げ
  - (3) 屋根部の鉛直加速度
- それぞれの応答が同等であることから、妥当だと判断する。



階層	Ss-A (NS方向)									Ss-C1 (NS方向)								
	(1) 層せん断力(kN)			(2) 屋根部の付加曲げ(kNm)			(3) 屋根部の鉛直加速度(gal)			(1) 層せん断力(kN)			(2) 屋根部の付加曲げ(kNm)			(3) 屋根部の鉛直加速度(gal)		
	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A
4層目	解析結果のチェック・考察中（1/17の週に提示予定）																	
3層目																		
2層目																		
1層目																		

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

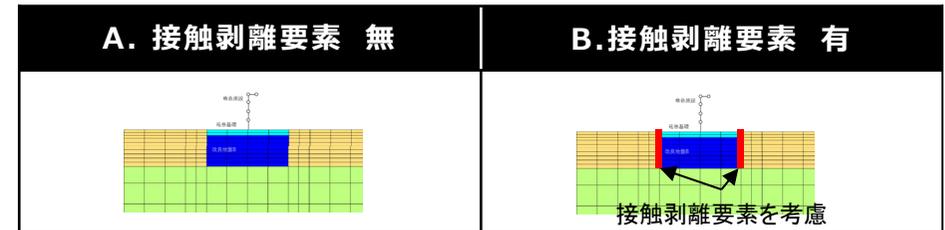
#### 3.4.3 設計モデルの妥当性の検証

➤ 接触剥離要素

- 設計モデルをもとに、試解析により埋戻土と改良地盤間※の接触剥離要素の有無の影響を比較し、双方の結果が同等であることを確認する

※埋戻土と基礎梁の接触面は基礎梁横のみであるが影響確認のためより範囲を広く改良地盤側面にも接触剥離要素を設定した。

- 確認項目は、接触剥離要素が直接作用する基礎・改良地盤の挙動に着目し、最大値のみでは周期における影響確認ができないため、以下の応答加速度スペクトルとする。
  - 基礎梁部の水平加速度
  - 基礎梁部の鉛直加速度
- それぞれの応答加速度スペクトルが同等であることから、妥当だと判断する。



解析結果のチェック・考察中（1/17の週に提示予定）

a) Ss-A

b) Ss-C1

基礎梁部（EL+55.3m）の水平加速度応答スペクトル

a) Ss-A

b) Ss-C1

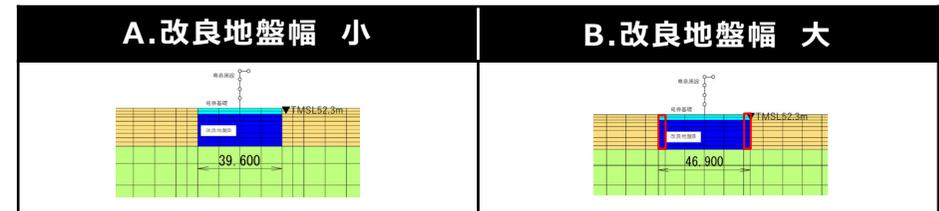
基礎梁部（EL+55.3m）の鉛直加速度応答スペクトル

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.4.3 設計モデルの妥当性の検証

➤ 改良地盤幅

- 改良地盤幅の異なる解析により地震荷重への影響を確認する。
- 確認項目は、改良地盤幅が直接作用する基礎・改良地盤の挙動に着目し、最大値のみでは周期における影響確認ができないため、以下の応答加速度スペクトルとする。
  - (1) 基礎梁部の水平加速度
  - (2) 基礎梁部の鉛直加速度
- それぞれの応答加速度スペクトルが同等であることから、妥当だと判断する。 ※両モデルの幅はNS方向とEW方向の幅を想定



解析結果のチェック・考察中（1/17の週に提示予定）

a) Ss-A

b) Ss-C1

基礎梁部（EL+55.3m）の水平加速度応答スペクトル

a) Ss-A

b) Ss-C1

基礎梁部（EL+55.3m）の鉛直加速度応答スペクトル

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.4.3 設計モデルの妥当性の検証

➤ その他

- ①粗粒砂岩（厚さ0.37m）については、確認のために、1次元土柱モデル（直下地盤と埋戻土）を用いて、粗粒砂岩の考慮の有無による応答の比較を行う。
- ①の確認項目は、基礎上端レベルでの応答加速度スペクトルとし、ほぼ同一であることから妥当であると判断する。（厚さ0.37mの異なる物性値の影響を判断する必要があるため、スペクトルで評価）

解析結果のチェック・考察中（1/17の週に提示予定）

a) Ss-A

b) Ss-C1

埋戻し土上端（地表面）の水平加速度応答スペクトル

a) Ss-A

b) Ss-C1

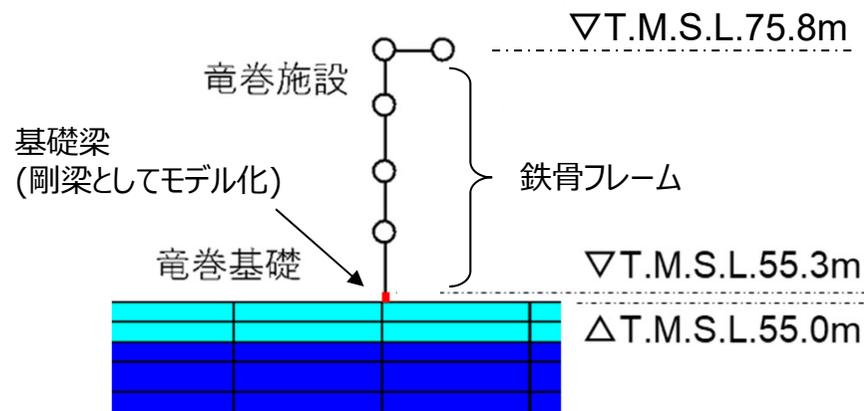
埋戻し土上端（地表面）の鉛直加速度応答スペクトル

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.4.3 設計モデルの妥当性の検証

➤ その他（②基礎梁高さ）

- 基礎梁（T.M.S.L.55~55.3m）を剛梁としてモデル化したことの妥当性を、せん断剛性の比率を比較することで確認する。
- 質点系でモデル化するT.M.S.L.55~75.8mのうち、下層0.3mは基礎梁、上層20.5mは鉄骨フレームである。
- ここで、基礎梁と鉄骨フレームの剛性差は約600倍であることから、質点系モデルの下層0.3mは剛梁としてモデル化することは妥当と判断する。



項目		せん断弾性係数 G (N/mm <sup>2</sup> )	せん断断面積 As (m <sup>2</sup> )	高さ H (m)	せん断剛性 G·As/H (kN/m)
鉄骨	NS方向 【A】				
	EW方向 【B】				
RC	NS&EW方向 【C】				

チェック中  
(1/17の週に提示予定)

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.5 地震応答解析に用いる設計モデルの保守性

##### 3.5.1 設計モデルの保守性の考え方

項目		設定の考え方
拘束効果 (水平方向)	周辺構造物	周辺構造物をモデル化対象としないことで、地震挙動を拘束する効果が低下し、水平方向の地震荷重は大きくなると考え、洞道等の <b>周辺構造物を非考慮</b> とし、埋戻土の地盤物性を用いる。
	杭	杭をモデル化対象としないことで、杭の剛性/根入れを無視することとなり、改良地盤の剛性は低く評価され、地震挙動を拘束する効果が低下し、地震荷重は大きくなると考え、 <b>杭を非考慮</b> とする。
	MMR	地中についてMMRを含まない断面の方がモデル全体の剛性が低く評価され、地震挙動を拘束する効果が低下し、地震荷重は大きくなると考え、 <b>MMRを非考慮</b> とし、改良地盤の物性値を用いる。
地盤の剛性変化		埋戻土の剛性変化に伴い拘束効果が変わり、地震荷重は非液状化で最小、液状化で最大となると考え、地盤物性については、 <b>非液状化、液状化及び中間状態</b> での解析条件を設定し、地震荷重の差異を確認する。
鉛直応答		水平方向地震力に起因したロッキングによる <b>鉛直応答の影響</b> について配慮する。

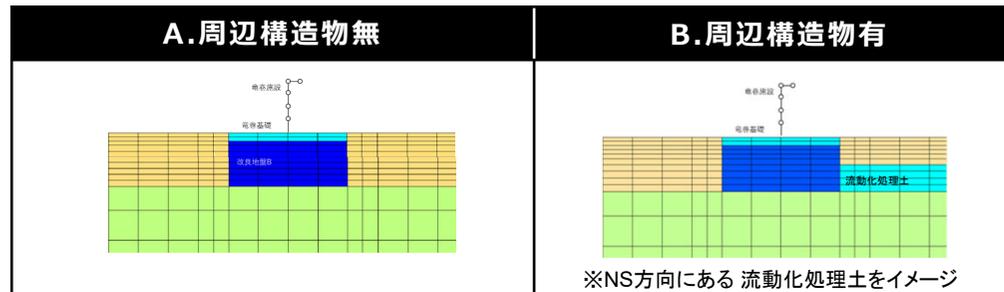
### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.5.2 設計モデルの保守性の検証方法

##### ■拘束効果

##### ➤周辺構造物

- 周辺構造物の代替として流動化処理土※の有無による地震荷重への影響を設計モデルの解析により確認する。（詳細は【参考8】に示す。）
- 確認項目は、上部架構の挙動を大きくする(保守性確保)ことが目的であるため、三次元フレーム解析で地震荷重として用いる以下の応答値とする。  
※洞道等のうち比較的軟らかい流動化処理土に置き換えることで周辺構造物の拘束効果の小さい場合に保守性を与えるか確認する。
  - 上部架構各層の層せん断力
  - 屋根部の付加曲げ
  - 屋根部の鉛直加速度
- それぞれに対し、A>Bの関係であることから妥当だと判断する。



階層	Ss-A (NS方向)									Ss-C1 (NS方向)								
	(1) 層せん断力(kN)			(2) 屋根部の付加曲げ (kNm)			(3) 屋根部の鉛直加速度 (gal)			(1) 層せん断力(kN)			(2) 屋根部の付加曲げ (kNm)			(3) 屋根部の鉛直加速度 (gal)		
	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A
4層目	解析結果のチェック・考察中（1/17の週に提示予定）																	
3層目																		
2層目																		
1層目																		

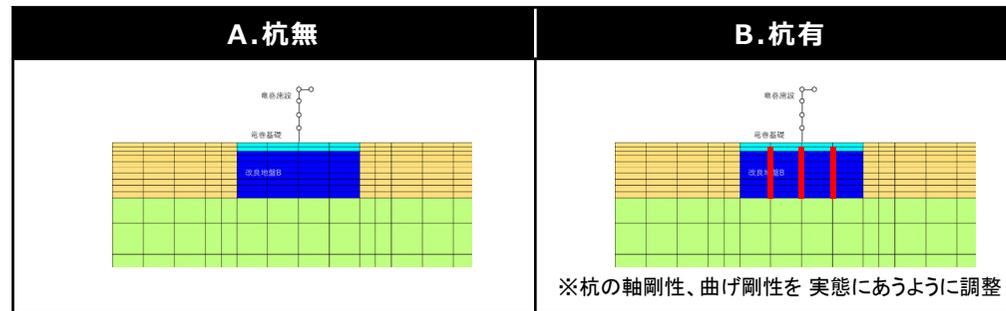
### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.5.2 設計モデルの保守性の検証方法

##### ■ 拘束効果

###### ➢ 杭の影響

- 杭の有無による地震荷重への影響を設計モデルの解析により確認する。
- 確認項目は、杭の有無が直接作用する改良地盤の変形量とする
- 改良地盤の各深さレベルにおける最大相対変位(支持地盤との境界面を基準)で比較し、 $A > B$ の関係であり保守的と判断する。



解析結果のチェック・考察中（1/17の週に提示予定）

Ss-A

Ss-C1

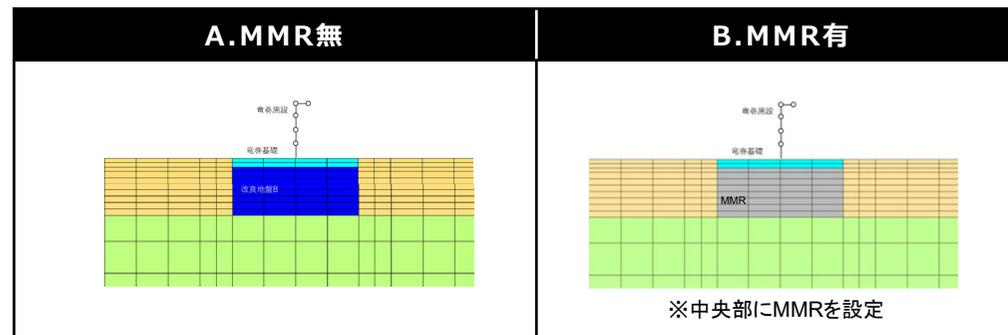
### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.5.2 設計モデルの保守性の検証方法

##### ■拘束効果

###### ➤MMRの影響

- MMRの有無による地震荷重への影響を設計モデルの解析により確認する。
- 確認項目は、MMRの有無が直接作用する基礎・改良地盤の挙動に着目し、以下の応答値とする。
  - (1) 基礎梁部の水平加速度
  - (2) 基礎梁部の鉛直加速度
- それぞれに対し、 $A > B$ の関係であり保守的と判断する。



解析結果のチェック・考察中（1/17の週に提示予定）

a) Ss-A

b) Ss-C1

a) Ss-A

b) Ss-C1

基礎梁部（EL+55.3m）の水平加速度応答スペクトル

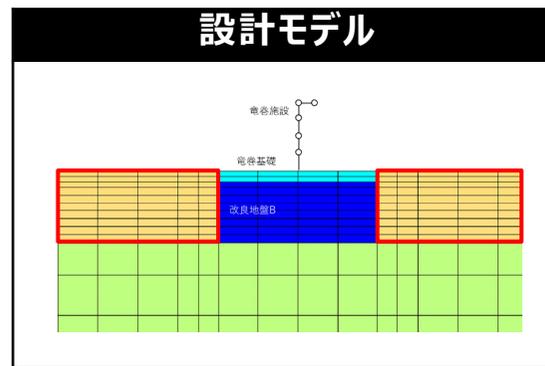
基礎梁部（EL+55.3m）の鉛直加速度応答スペクトル

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.5.2 設計モデルの保守性の検証方法

##### ■ 地盤の剛性変化

- 埋戻土の剛性変化に伴い埋戻土による拘束効果が変わり、地震荷重は非液状化で最小、液状化で最大となると考えられる。このことを確認するため、非液状化/液状化の中間状態において地震荷重が最大とならないことを確認することとし、検討ケースにおける埋戻土の物性値設定の妥当性を説明する。また、地震荷重として着目する応答値の妥当性を説明する。
- 液状化の状態から埋戻土の液状化状態を抑制した場合、非液状化状態から埋戻土の剛性を下げた場合の2つの場合の中間状態を設定し、その地震荷重が液状化、非液状化の間に収まっていることを確認した。（詳細は【参考9】に示す。）



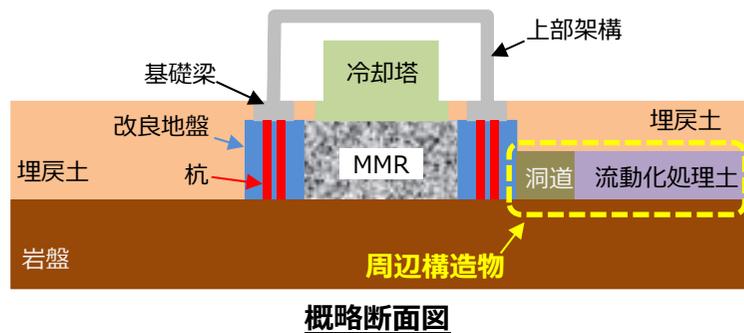
応答値比較表（Ss-A\_NS方向）

検討ケース	モデル	A)層せん断力 (上部架構)	B)付加曲げ (上部架構)	C)最大水平加速度 (基礎梁)	D)最大鉛直加速度 (基礎梁)	E)変形 (改良地盤)	F)応答 ひずみ
液状化	設計モデル	解析結果のチェック・考察中（1/17の週に提示予定）					
状態 b1	設計モデル						
状態 b2	設計モデル						
非液状化	設計モデル						

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

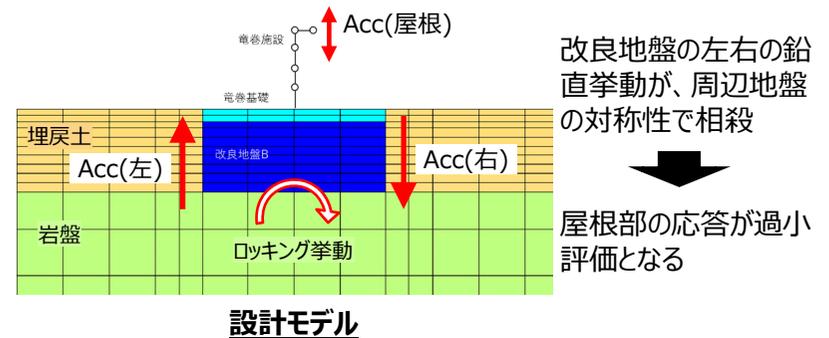
#### 3.6 鉛直応答に係る考慮

- 設計モデルは、水平方向の地震応答を保守的に評価するため、周辺構造物を考慮しない(埋戻土として評価)モデルとした。
- 周辺構造物を考慮しないことで、一部の鉛直応答(屋根面の鉛直加速度)に対しては、非保守的となる条件であることが判明した。
- 鉛直方法の応答が適切に評価出来るモデル(鉛直確認モデル)を構築し、そのモデルによる解析結果を設計に反映する。



概略断面図

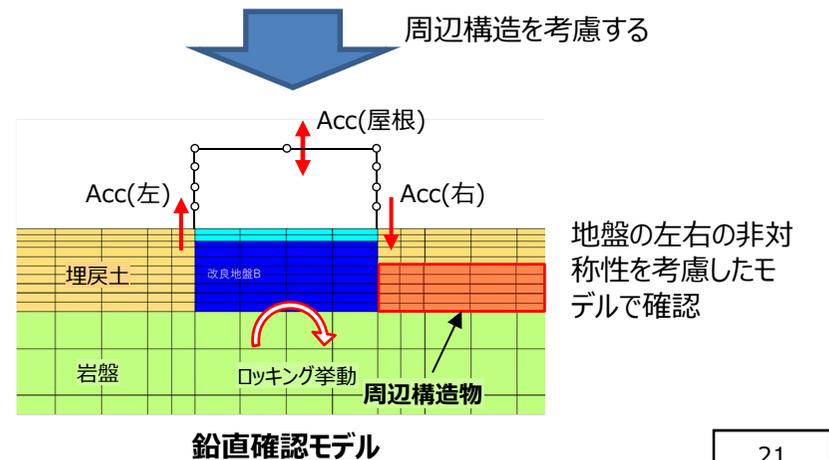
周辺構造物を考慮しない



設計モデル

改良地盤の左右の鉛直挙動が、周辺地盤の対称性で相殺  
↓  
屋根部の応答が過小評価となる

- 前項までの検討より、鉛直確認モデルは、改良地盤の左右の鉛直挙動の相違が影響するため、周辺構造物を考慮し、上部架構のモデルに門型タイプを採用する。
- 鉛直確認モデルは、周辺構造物の状況が異なるため、NS・EW各々の断面を対象とする。



鉛直確認モデル

周辺構造物を考慮する

地盤の左右の非対称性を考慮したモデルで確認

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.6 鉛直応答に係る考慮

- 部材設計時に採用する鉛直地震荷重(屋根部の鉛直加速度)は、地震13波のうち、Ss-A・Ss-C1と残11波の包絡(Ss-C2)の値である。
- この3波に対し、鉛直確認モデルと設計モデルの結果と比較し、影響(加速度の相違の比率)を確認する。→ 最大で1.31倍
- 部材設計時は、鉛直確認モデルによる鉛直荷重を考慮して、設計モデルにおける屋根部の鉛直加速度を1.5倍した値を用いる。

#### 屋根部の鉛直加速度の比較

No	地震波	屋根部の鉛直加速度 (cm/s <sup>2</sup> )				比率 (②/①)
		① 設計モデル		② 鉛直確認モデル		
		NS	EW	NS	EW	注) NS,EW の大きい方
I	Ss-A	1008	1018	1067	1080	<u>1.06</u>
II	Ss-C1	614	586	697	767	<u>1.31</u>
III	残11波の包絡 (Ss-C2)	1202	1152	1297	1351	<u>1.17</u>

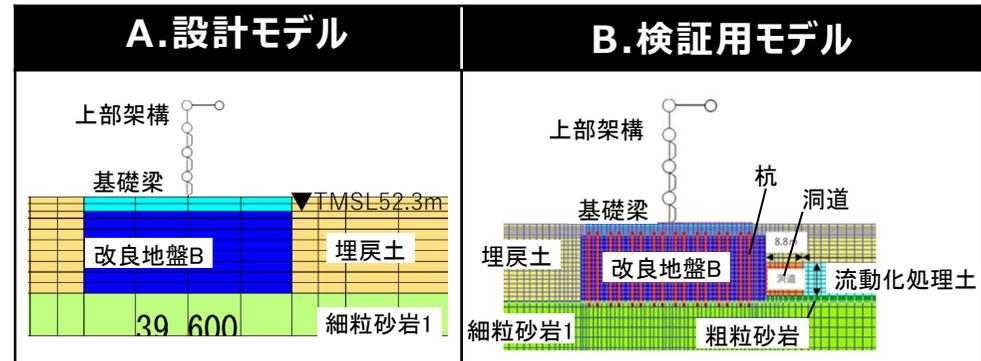
 設計に用いる鉛直荷重

- なお、上記補正による評価が保守性を持った結果であることを、検証用モデルの結果と比較して確認する。

### 3. 地震応答解析に用いる解析モデルの検証

#### 3.7 設計モデルの保守性の確認

- 設計モデルが、実際の挙動に対し、保守性を有していることを、施設周辺の状況をより細かくモデル化した検証用モデルと比較し、設計モデルにおける地震荷重が検証用モデルの地震荷重に対し保守的な値となっていることをもって**再確認**する。



階層	Ss-A (NS方向)									Ss-C1 (NS方向)								
	(1) 層せん断力(kN)			(2) 屋根部の付加曲げ(kNm)			(3) 屋根部の鉛直加速度(gal)			(1) 層せん断力(kN)			(2) 屋根部の付加曲げ(kNm)			(3) 屋根部の鉛直加速度(gal)		
	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A	A	B	B/A
4層目	解析結果チェック中（1/17の週に提示予定）																	
3層目																		
2層目																		
1層目																		

## 4. 飛来物防護ネット架構に係る波及的影響の評価

### 4. 波及的影響の評価結果

▶ 設計モデルを用いた飛来物防護ネット架構に係る波及的影響の評価結果は以下の通り。

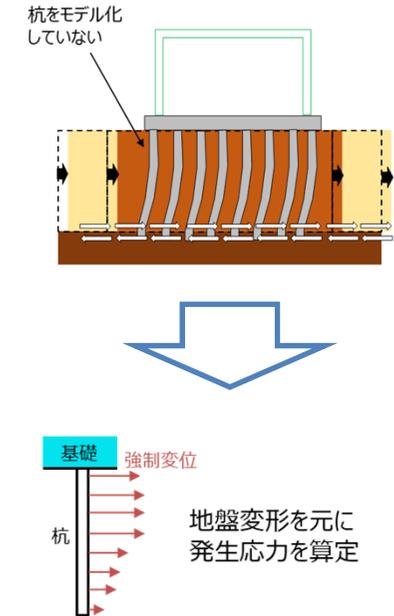
飛来物防護ネットの 検討対象部位		検討対象 地震動	評価指標	クライテリア	検定比
基礎	杭	Ss	杭応力（軸力+曲げ）	終局強度	解析結果チェック中（1/17の週に提示予定）
			杭応力（面外せん断力）	終局強度	
			支持力	地盤の 終局鉛直支持力	
			引抜力	地盤の 終局引抜抵抗力	
	基礎梁	Ss	基礎梁応力（軸力+曲げ）	終局強度	
			基礎梁応力（面外せん断力）	終局強度	
	杭と改良地盤	Ss	せん断力	杭と改良地盤の せん断抵抗力	
上部 架構	架構全体	Ss	相対変位	離隔距離	
	フレーム（柱・梁）	Ss	フレーム応力（軸力+曲げ）	終局強度	
	座屈拘束ブレース	Ss	最大軸ひずみ	メーカー推奨値	
			疲労係数総和	メーカー推奨値	

※ 解析結果が弾性範囲を超える場合には、変形評価の妥当性を確認する。

## 【参考1】

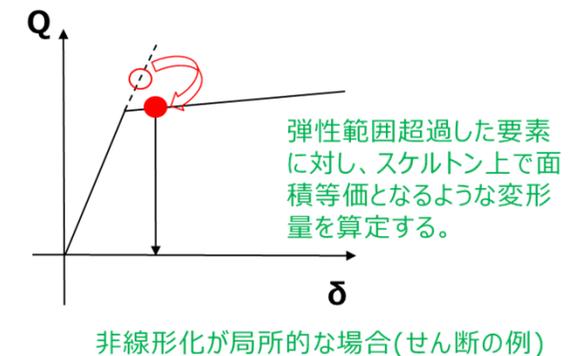
### 【杭の変形に対する対応】

- 杭は、地震応答解析の改良地盤と同一変形すると仮定して設計する。
- 設計モデルでは、杭はモデル化していない。
- 弾性範囲を超えた場合に剛性は低下するが、現時点でモデル化していないため剛性は考慮されていない。  
(杭が非線形となった場合でも、現状の変形量を上回ることはない)
- 別途算定する部材評価時の杭の発生応力は、地盤変形×杭の初期剛性とするため、線形で応力計算することは、保守的な評価となる。
- よって、本施設の評価においては、杭の非線形時の変形は考慮不要と考える。



### 【基礎梁の変形に対する対応】

- 基礎梁は、線形部材として計算する(剛性を低減させない)ことで発生応力は大きくなり、保守的な評価となる。
- 基礎梁には変形に対する制限はないため、基礎梁の評価に対しては、非線形時の変形の影響はない。
- ただし、基礎梁が弾性範囲を超えた場合、変形による上部架構への影響は考慮する必要がある。
- 非線形化が局所的な場合、弾性範囲を超過した要素に対し個別に変形影響を右図のように計算する。
- 上部架構の三次元モデルに、基礎梁の非線形時の変形量を強制変位として入力し、フレームに与える影響を確認する。



## 【参考2】

### 【上部架構の変形に対する対応】

- 上部架構のうちフレーム部材は、線形部材(剛性=大)として計算することで発生応力は大きくなり、保守的な評価となる。
- 非線形部材の座屈拘束ブレースは、ひずみで評価するため、線形で計算することは過小評価となる。
- フレーム部材は、終局強度(基準強度×1.1)としているため、終局強度以下であればおおむね弾性範囲と考えられる。(一部の部材が基準強度を超過しても、施設全体に与える非線形としての影響は軽微)
- よって、フレーム部材の非線形化の影響は、追加考慮はしない。
- なお、フレームの評価判定のひとつに「変形により冷却塔と接触しない」ことがあり、下式で算定する。

$$\text{フレームの最大変形量} < \text{冷却塔との離隔距離} - \text{冷却塔の最大変形量}$$

- ここで、フレーム及び冷却塔の変形量は、同時性を無視し最大値で評価することより保守性を有する。よって、非線形時の影響は軽微とし、保守性の中に包絡させるものとして対応する。

### 【参考3】各部材のクライテリアについて

➤ Ss地震荷重の状態における各部材の判定値(クライテリア)をSクラス施設の設計に用いられるJEAC4616-2009を参照し、以下表の通り設定する。

部材	状態	部材の発生値	判定値	備考
杭	支持機能を失わない	軸力・曲げ	建築基礎構造設計指針による終局耐力	コンクリートがひび割れを生じているが、圧縮が基準強度に達しておらず、鉄筋は破断していない状態
		せん断		
		軸力	建築基礎構造設計指針による終局鉛直支持力、終局引抜き抵抗力	杭の沈下や引抜きが生じていない状態
基礎梁	支持機能を失わない	軸力・曲げ	建築物の構造関係技術基準解説書によるRC柱の終局強度	コンクリートがひび割れを生じているが、圧縮応力が基準強度に達しておらず、鉄筋は破断していない状態
		せん断	建築物の構造関係技術基準解説書によるRC梁の終局強度	
フレーム	倒壊、落下しない	軸力・曲げ	鋼構造設計規準による短期許容応力度に基準強度を1.1倍とした終局強度	鉄骨断面は局所的に降伏しているが、座屈・破断はしていない状態
		せん断		
		変形	冷却塔の地震時挙動を考慮した離隔距離	上部架構に変形により、冷却塔と接触しない状態
座屈拘束ブレース	破断して落下しないこと	最大ひずみ	メーカーの日本建築センター評価書記載値	破断しない状態
		疲労係数		

荷重状態	長期荷重	短期荷重	Ss地震時荷重
上部構造	要求性能 建物の機能や使用性に支障が生じない。	建物の機能や使用性に支障が生じない。	金属キヤスクの基本的安全機能に影響を与えない。
	許容限界 長期許容応力度	短期許容応力度	終局強度に基づく検討
杭基礎	要求性能 有害な沈下、傾斜などを起こさない。	短期荷重に対する支持機能を保持する。	Ss地震時荷重に対する支持機能を保持する。
	許容限界 基礎 杭を用いる材料の長期許容応力度	杭を用いる材料の短期許容応力度	終局強度に基づく検討
	地盤 杭の長期許容支持力	杭の短期許容支持力、杭の短期許容引抜き抵抗力	杭の終局鉛直支持力、杭の終局引抜き抵抗力

杭基礎及び上部構造の要求性能と許容限界(JEAC4616-2009抜粋)

## 【参考4】有効応力解析に用いる主なパラメータ

- 有効応力解析を実施する際に、動的変形特性を規定するパラメータと、過剰間隙水圧の発生を規定するパラメータを設定する必要がある。液状化パラメータは、要素シミュレーションを実施し、これにより得られる解析上の液状化抵抗曲線が、液状化強度試験結果に対して、包絡値と同等になるように下表のように設定した。

### ■ 地盤のパラメータ

パラメータ		埋戻土	改良地盤	流動化処理土	
物理特性	密度 $\rho$ ※D:深度(m)	g/cm <sup>3</sup>	1.82+0.0028D	1.72	1.63
	間隙率n	-	0.46	0.55	0.62
変形特性	動せん断弾性係数G	kN/m <sup>2</sup>	$1.257 \times 10^5$	$1.100 \times 10^6$	$3.800 \times 10^5$
	基準平均有効拘束圧	kN/m <sup>2</sup>	52.3	1.0	1.0
	ポアソン比 $\nu$	-	0.33	0.33	0.33
	履歴減衰における減衰定数の上限値h	-	0.171	0.167	0.140
強度特性	粘着力 $c'$ ※p:上載圧(N/mm <sup>2</sup> )	N/mm <sup>2</sup>	0	$3.000 \times 10^3$	$0.347+0.242p$
	内部摩擦角	°	39.7	0.001	0.001
液状化特性	変相角	°	34.0	—	—
	S1(終局状態を規定)		0.005	—	—
	w1(強度特性全体を規定)		10.30	—	—
	p1(強度特性の前半を規定)		0.50	—	—
	p2(強度特性の後半を規定)		1.00	—	—
	c1(強度発生の下限値を規定)		1.81	—	—

### ■ 上部鉄骨架構のパラメータ

パラメータ		上部鉄骨 (質点系)
せん断弾性係数G	MPa	$7.90 \times 10^4$
ポアソン比 $\nu$	-	0.3
減衰定数h	-	0.02

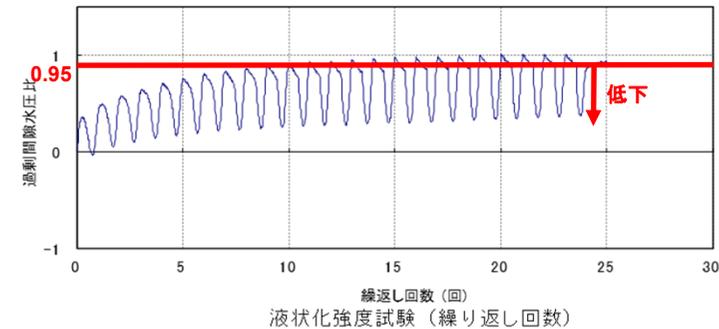
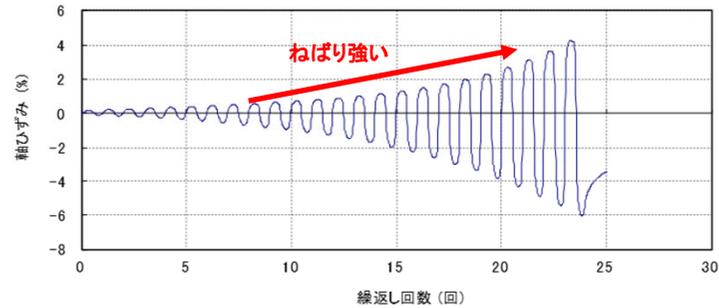
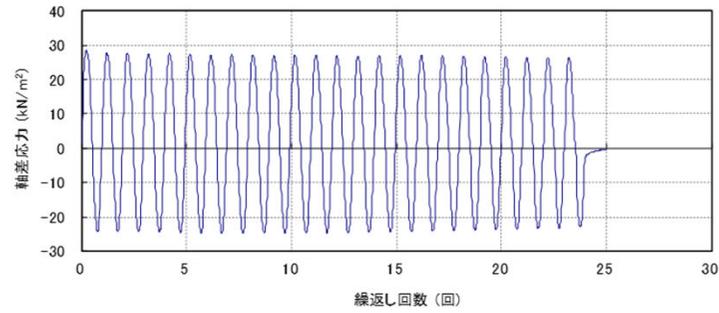
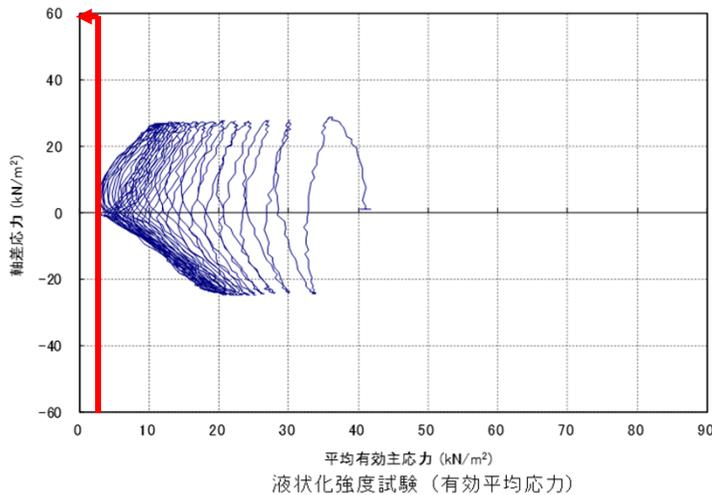
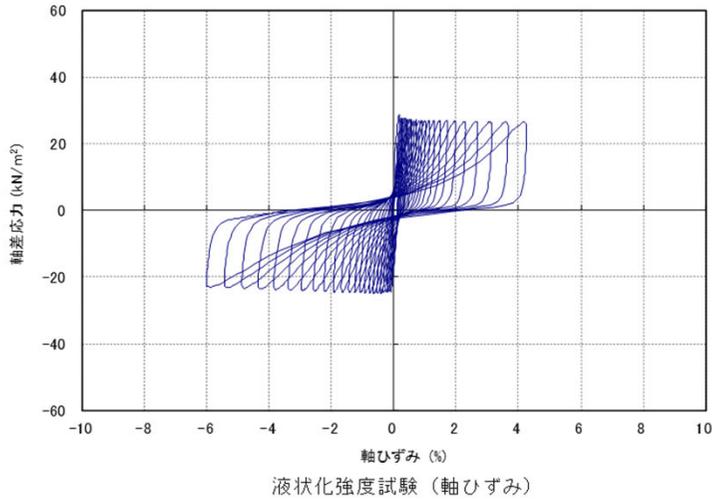
### ■ 杭基礎のパラメータ

パラメータ	杭	基礎梁	
せん断弾性係数G	MPa	$9.825 \times 10^3$	$9.446 \times 10^3$
ポアソン比 $\nu$	-	0.200	0.200
減衰定数h	-	0.05	0.05

※改良地盤と流動化処理土については一軸圧縮強度が $0.5\text{kgf/cm}^2 \sim 1.0\text{kgf/cm}^2$ 以上あることから、液状化しないと判断している。

## 【参考4】有効応力解析に用いる主なパラメータ

埋戻し土の液状化強度試験の結果は、有効応力がゼロになるケースと完全にはゼロにはならないケースが確認された。また、過剰間隙水圧比は、すべてのケースで間隙水圧が95%を超過するものの、せん断応力作用時には正のダイレイタンスの効果により、過剰間隙水圧は低下する傾向が確認されるとともに、急激な軸ひずみの変化はみられず、ねばり強い傾向が確認された。



試験後の供試体

## 【参考5-1】

### ■ 検証用モデルと設計モデルの妥当性の確認項目

検証用モデルの妥当性については、類似のモデルが先行する発電炉において様々な形で検証されている。

検証用モデルを構築する過程で、地震観測波を用いたシミュレーション解析等によりモデルの妥当性についても検証されている。

一方、今回の検証用モデルを構築するプロセスは、以下に示すとおり基本的には先行する発電炉と同様であるが、十分な地震観測波が無く、同様のシミュレーションによる検証は困難な状況にあるものの、以下のことから、発電炉と同様のプロセスにより構築した検証用モデルが使用できると考えている。

飛来物防護ネット架構の応答解析に用いる解析モデルの構築プロセスは次頁に示す①～⑮の手順で行う。

本施設の設置状況、施設に要求される事項が先行炉の施設と比べ、「地盤の傾斜（水平成層）」、「地盤物性（Vs等）」において特異な差異がないことや、解析対象の施設についても「対称性」、「整形性」がみられることから同様の手順でモデル構築を行う。

検証用モデルについては、FEMモデルの基本となるモデル化領域、メッシュサイズについてJEAG4601-1991に基づき設定するとともに、「施設の構造」や「周辺状況」を踏まえ実態に即し、周辺構造物である洞道や地盤改良範囲を適切にモデル化を行っている。

また、先行炉の施設で構築しているモデル化方法についても参照し詳細なモデル化を行っており、設定すべき各項目を科学的合理性をもって設定していることからモデルの妥当性は確保されている。

一方、本評価で用いる設計モデルは、多数のケースの検討が必要なことから、解析負荷の軽減のため検証用モデルの設定項目の内、合理化が可能な項目について設定の変更を行った項目がある。

そのため、設計モデルの活用にあたっては、検証用モデルから設定の変更を行った項目について、改めてその妥当性を確認する。

検証用モデルと設計モデルの差異を【参考6】に示す。

【参考5-2】

■ 検証用モデルと設計モデルの妥当性の確認項目

（1）モデル諸元

項目		設定の考え方	検証用モデル	設計モデル
FEMモデルの構築	① 検討断面	防護ネット架構の構造からNS・EW各々2断面（中央、端部）が考えられる。	4断面	2断面
	② メッシュサイズ	評価施設の振動特性に対応した入力波を適切に評価できるように設定する。	20Hz以下	13Hz以下
	③ モデル範囲	モデル幅は、モデル境界からの影響を低減するため施設の5倍以上とする。モデル高さは、解放基盤面～地表面を対象とする。	左記のとおり設定	
対象構造物の選定	④ 上部架構	施設の振動特性を適切に考慮するため、上部架構-基礎-地盤を一体で評価し、上部架構をモデル化することが考えられる。	1軸と門型でモデル化	1軸でモデル化
	⑤ 基礎梁	基礎梁をモデル化することが考えられる。	左記のとおり設定	
	⑥ 改良地盤(MMR)	改良地盤(MMR)をモデル化することが考えられる。	考慮	考慮 (ただし改良地盤幅を基礎に合わせる)
	⑦ 杭	RC杭をモデル化することが考えられる。	考慮	非考慮
	⑧ 周辺構造物	洞道等の周辺構造物をモデル化することが考えられる。	考慮	非考慮
詳細条件	⑨ 接触剥離要素	構造物と地盤の境界面に対し、接触剥離を考慮することが考えられる。	考慮	非考慮
	⑩ その他	実際の形状を正確に再現することが考えられる。	考慮	非考慮

## 【参考5-3】

### ■ 検証用モデルと設計モデルの妥当性の確認項目

#### （2）地盤及び材料の物性

これらの項目については合理化が困難と考え、設計モデルと検証用モデルは同一の値を用いる。

項目	設定の考え方	検証用モデル	設計モデル
⑪ 地盤の物性	試験結果等から設定する。		左記のとおり設定
⑫ 対象構造物等の物性	試験結果または指針類等から設定する。		左記のとおり設定
⑬ 地下水位	地表面とする。		左記のとおり設定

#### （3）地震時荷重

これらの項目については合理化が困難と考え、設計モデルと検証用モデルは同一の値を用いる。

項目	設定の考え方	検証用モデル	設計モデル
⑭ 入力地震動	解放基盤に基準地震動を入力する。		左記のとおり設定
⑮ その他荷重	地震に対する設計方針に倣い設定する。(自重、積載荷重、積雪荷重※)		左記のとおり設定

※地震応答解析においては風荷重は作用させない。

**【参考6】**

内容		設計モデル	検証用モデル	
解析モデル				
モデル範囲		モデル幅：施設の5倍以上、モデル高さ：解放基盤面～地表面		
上部架構		1軸でモデル化	端部は1軸でモデル化、中央部は門型でモデル化	
(妥当性確認項目) 合理化項目	メッシュサイズ (保証する周波数)	13Hz以下 (メッシュ数：約500)	20Hz以下 (メッシュ数：約10,000)	
	接触剥離要素	考慮しない	考慮する	
	改良地盤幅	基礎梁と同幅でモデル化 (実寸より小さい)	実寸でモデル化	
	その他	・周辺地盤のうち粗粒砂岩 (厚さ0.37m) を考慮しない ・基礎梁高さは地盤高さに合わせる(T.M.S.L.55.0m)	・周辺地盤のうち粗粒砂岩 (厚さ0.37m) を考慮する ・基礎梁高さは実際の高さ (T.M.S.L.55.3m)	
保守性を付与	拘束効果	周辺構造物	洞道、流動化処理土を考慮しない	洞道・流動化処理土を考慮する
		杭	モデル化しない	モデルに考慮
		MMR	考慮しない	実情に合わせて考慮

## 【参考7】

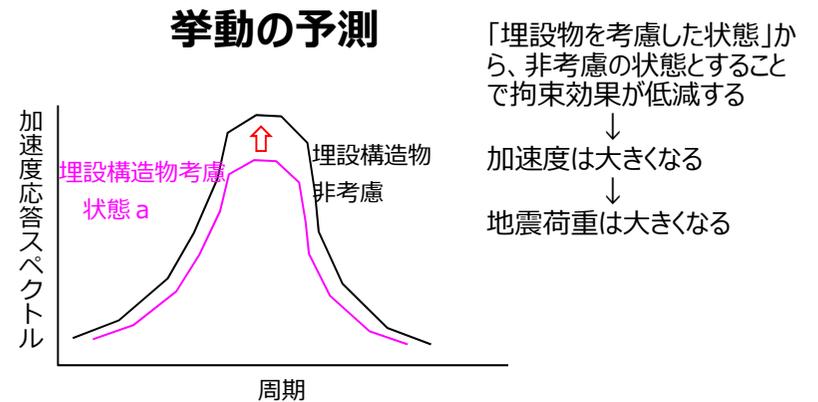
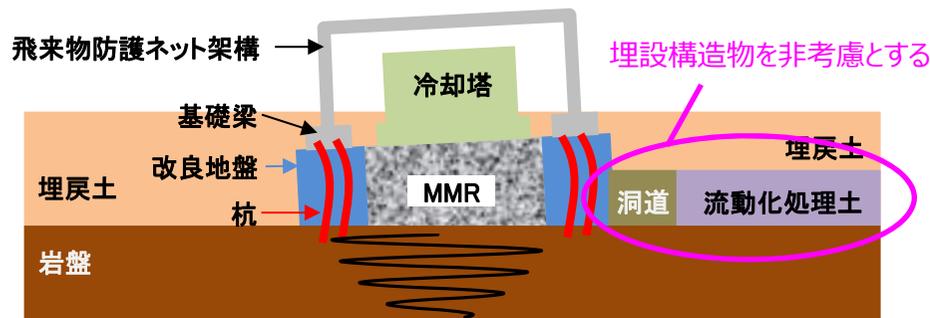
### ■ 設計モデルの保守性の確認項目

- 設計における応答・反力→地震荷重の伝達の流れを踏まえ、**改良地盤への拘束効果が低下**すると、**上部架構の応答**や、**地盤の変形**が大きくなり、杭に伝達される地震荷重が大きくなることから、**拘束効果の低下による保守性**に着目する。
- 周辺構造物による拘束効果が水平方向の地震荷重を小さくすると考えられることから、設計モデルでは埋設構造物をモデルに組み込まないことで、応答値に保守性を与えると想定。
  - ⇒ **(a) 埋設構造物による拘束効果**
  - 当該施設における特徴として、埋戻土が【非液状化】する状態が最も拘束効果が大きく、【液状化】が最も低くなり、上部架構の応答が大きくなると予想され、埋戻土が【液状化】する状態（改良地盤の側面拘束が減少）が最も判定指標の応答値が大きくなると考える。
    - ⇒ **(b) 埋戻土（地盤）の剛性変化**
  - 上記は、水平方向の拘束効果に係る保守性の確保に係る事項であるため、**鉛直方向の応答**についても適切に保守性に配慮する必要がある。

【参考8】

■ 目的

- 周辺構造物による**拘束効果**が水平方向の**地震荷重**を小さくすると考えられることから、設計モデルでは埋設構造物をモデルに組み込まないことで、応答値に**保守性**を与えると想定。
- **上記の影響は、**設計モデルを用いて非液状化/液状化時の状態で確認する。



応答値比較表（イメージ）

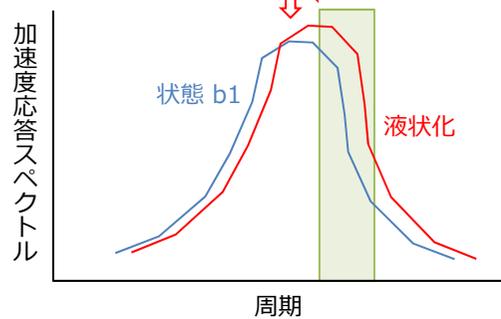
検討ケース	モデル	A)層せん断力 (上部架構)	B)曲げ (上部架構)	C)最大加速度 (基礎梁・上部架構)	D)変形 (改良地盤)	E)応答値 (改良地盤)	F)応答 ひずみ
埋設構造物を非考慮	設計モデル(拘束無)	大	大	大	大	大	大
状態 a	設計モデル(拘束有)	小	小	小	小	小	小

【参考9】

■ 目的

この施設では埋戻土の**剛性変化**に伴い埋戻土による拘束効果に変化し、**地震荷重は【非液状化】で最小、【液状化】で最大**となると考えられる。非液状化/液状化の**【中間状態】**において、地震荷重が最大とならないことを確認し、解析条件を設定する。

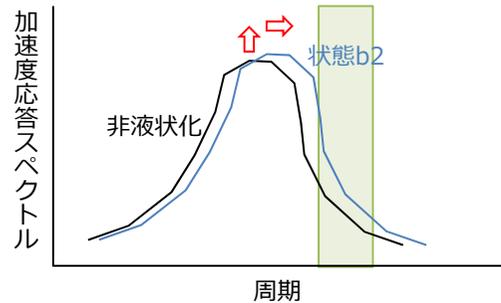
挙動の予測



**埋戻土の液状化発生を抑制する（剛性低下を抑制）**

【状態 b1】

↓  
 加速度は小さくなり、かつ短周期側にシフト  
 ↓  
 上部架構の固有周期帯では、加速度が小さくなる  
 ↓  
 地震荷重は小さくなる

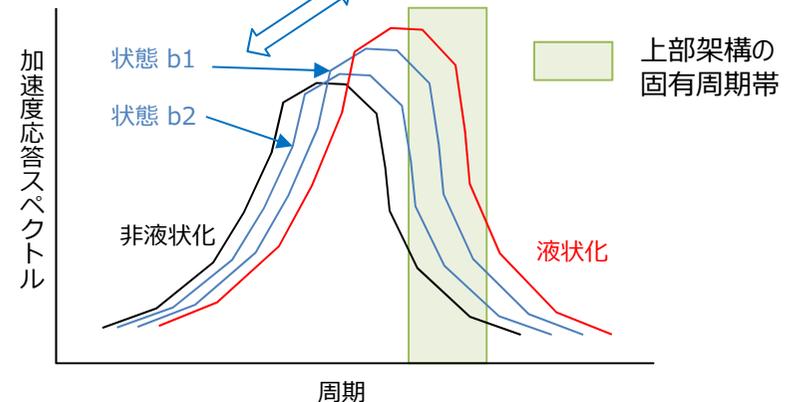


**埋戻土の剛性を下げる**

【状態 b2】

↓  
 加速度は大きくなり、かつ長周期側にシフト  
 ↓  
 上部架構の固有周期帯では、加速度が大きくなる  
 ↓  
 地震荷重は大きくなる

【非液状化】～【液状化】の間で、**加速度は連続的に変化し**  
 【状態 b1、b2】が大きくなることはない想定



※ 上部架構の応答値は、基礎梁など他の設計においても支配的な応答値と考える。そのため、上部架構の固有周期帯の加速度応答で挙動を予測。

検討ケース	モデル	A)層せん断力 (上部架構)	B)曲げ (上部架構)	C)最大加速度 (基礎梁・上部架構)	D)変形 (改良地盤)	E)応答値 (改良地盤)	F)応答 ひずみ	
液状化	設計モデル	大	大	大	大	大	大	
状態 b1	設計モデル	中に収まることを確認						
状態 b2	設計モデル	中に収まることを確認						
非液状化	設計モデル	小	小	小	小	小	小	

## 【参考10】

---

### ■ 弾性範囲を超えた場合の変形評価の考え方

- 解析結果が弾性範囲を超えた場合の変形評価の考え方を説明する。
- 実際の解析結果が弾性範囲を超えていた場合には、変形評価の妥当性を説明する。

解析結果の考察を踏まえた対応方針について検討中