

女川原子力発電所2号炉  
土木構造物の解析手法及び解析モデルの精緻化について  
(コメント回答)

---

設計基準対象施設について(第4条 地震による損傷の防止)

平成30年11月20日  
東北電力株式会社

## 前回審査会合からの主な方針変更点①

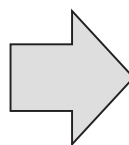
- 第611回審査会合(平成30年8月7日)を踏まえ、大きな方針変更として通水機能に対する許容限界を工認実績のない終局ひずみから、より保守的で工認実績のある許容限界へ変更することとし、関連する耐震安全性評価及び安全係数についても変更した。
- その他の要求機能についても面外せん断の照査を追加する等の変更を行った。

項目	変更概要	変更理由
許容限界	<ul style="list-style-type: none"> <li>通水機能に対する許容限界を終局ひずみ(最大引張ひずみ3%, 最大圧縮ひずみ1%, 最大せん断ひずみ1.5%)から、曲げに対しては層間変形角1/100, 面内せん断に対しては層間変形角2/1000, 面外せん断に対しては一般的な設計式で求められるせん断耐力に変更。</li> <li>支持機能, 貯水機能及び止水機能について, 面外せん断の照査を先行プラントの新規制下の工認で実績のあるせん断耐力に対し行うことに変更。また, 貯水機能及び止水機能の面内せん断に対する許容限界をひび割れ幅から, JEAGに記載のせん断ひずみに変更。</li> </ul>	<p>終局ひずみは, 材料の損傷という観点で見れば軟化域に至るものであるため, 鉄筋コンクリート部材の最大耐荷力点を超えた状態に至っている可能性があることから, より保守的に, 先行プラントの新規制下の工認でも実績のある許容限界に変更。</p>

### 【変更前】

### 【変更後】

要求機能	通水機能	支持機能	貯水機能	止水機能
機能概要	冷却用水の通水断面確保	Sクラス機器の支持	津波引き波時の冷却用水確保	津波・溢水時の浸水に対するSクラス機器防護
評価指標	①引張ひずみ ②圧縮ひずみ ③せん断ひずみ ④面内せん断ひずみ	①圧縮ひずみ ②引張ひずみ ③面内せん断ひずみ*	①圧縮ひずみ ②引張ひずみ ③ひび割れ幅	①圧縮ひずみ ②引張ひずみ ③ひび割れ幅
許容限界	①3% ②1% ③1.5% ④4000μ	①2000μ ②1725μ ③2000μ*	①2000μ ②1725μ ③0.2mm	①2000μ ②1725μ ③0.2mm



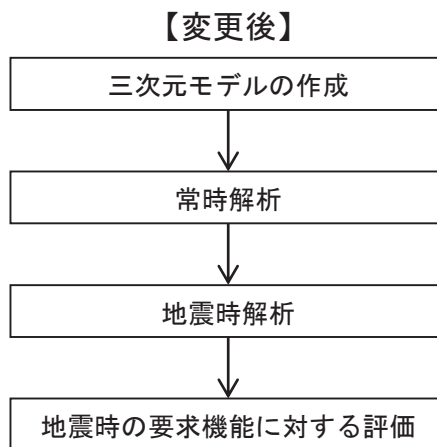
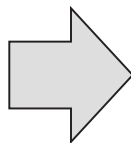
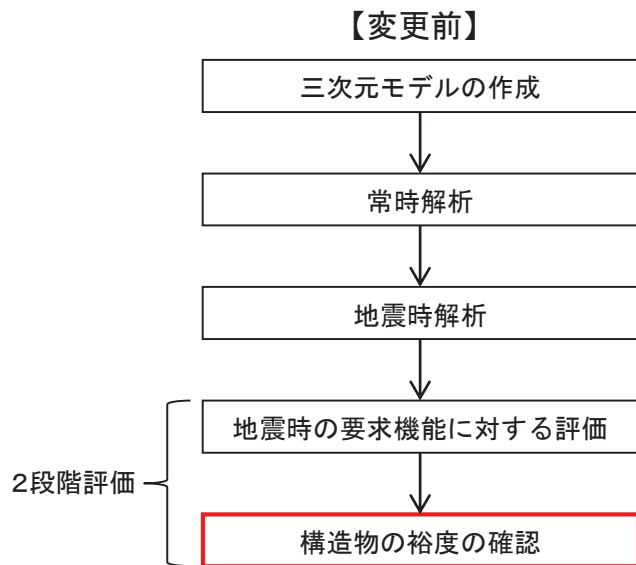
要求機能	通水機能	支持機能	貯水機能	止水機能
機能概要	冷却用水の通水断面確保	Sクラス機器の支持	津波引き波時の冷却用水確保	津波・溢水時の浸水に対するSクラス機器防護
評価指標	①層間変形角(面外) ②層間変形角(面内) ③せん断力(面外)	①圧縮ひずみ ②引張ひずみ ③せん断力(面外) ④層間変形角(面内)*	①圧縮ひずみ ②引張ひずみ ③せん断力(面外) ④層間変形角(面内)	①圧縮ひずみ ②引張ひずみ ③せん断力(面外) ④層間変形角(面内)
許容限界	①1/100 ②2/1000 ③せん断耐力	①2000μ ②1725μ ③せん断耐力 ④2/1000*	①2000μ ②1725μ ③せん断耐力 ④第1折点(γ <sub>1</sub> )	①2000μ ②1725μ ③せん断耐力 ④第1折点(γ <sub>1</sub> )

※: 面内せん断ひずみは, 変更後の層間変形角(面内)と同義であり, 許容限界の2000μと2/1000も同値である。

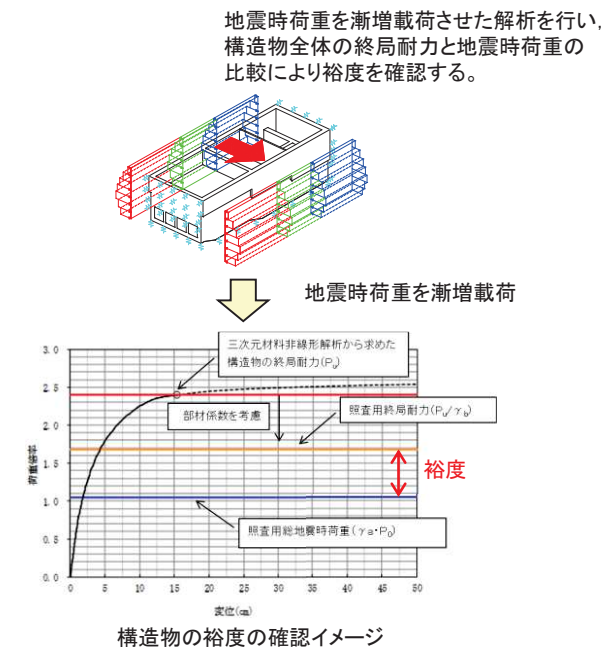
## 前回審査会合からの主な方針変更点②

- 建造物の終局耐力に対する許容限界をより保守的な許容限界へ見直したことに伴い、安全裕度が十分にあると考えられることから、「建造物の裕度の確認」を取り止めた。それに伴い、安全係数(部材係数)をキャリブレーション解析により設定することが不要となった。

項目	変更概要	変更理由
耐震安全性評価	「地震時の要求機能に対する評価」と「建造物の裕度の確認」の2段階評価を取り止め、「地震時の要求機能に対する評価」のみの評価に変更。	通水機能の面外せん断に対する許容限界をせん断耐力で評価することにより、鉄筋コンクリート部材は最大耐荷力に至らないため、建造物の終局耐力には余裕があると考えられることから、「建造物の裕度の確認」を取り止めたことによる変更。
安全係数	「建造物の裕度の確認」に用いる安全係数(部材係数)をはり部材及び壁部材に対するキャリブレーション解析により設定していたが、キャリブレーション解析を取り止める。	せん断耐力評価への変更に伴い、「建造物の裕度の確認」を取り止め、材料非線形解析により限界値を設定することが無くなったことから、キャリブレーション解析による安全係数(部材係数)を設定する必要が無くなったことによる変更。



耐震性評価フロー(三次元モデル作成～耐震安全性評価)



## 目次

---

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

## 目次

---

### 1. はじめに

- (1) 三次元静的材料非線形解析を適用する目的
- (2) 対象構造物
- (3) 三次元静的材料非線形解析の照査体系
- (4) 耐震性の評価フローと新規性

### 2. 既工認からの変更点

### 3. 評価方針

### 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

### 5. 解析コードの適用性

### 6. 許容限界

### 7. 安全係数

### 8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

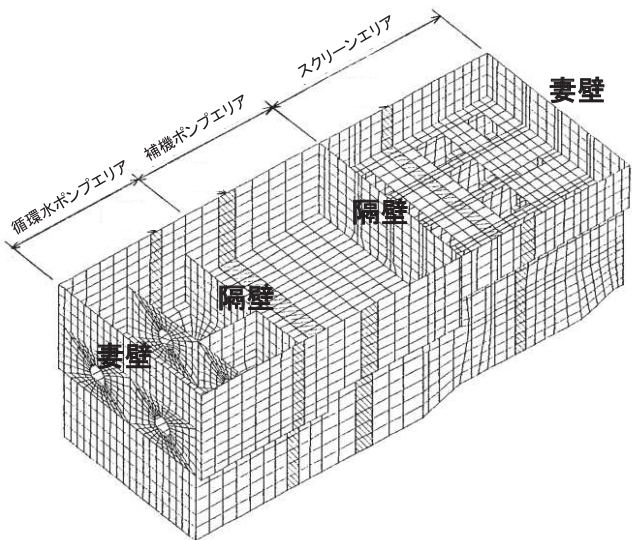
補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

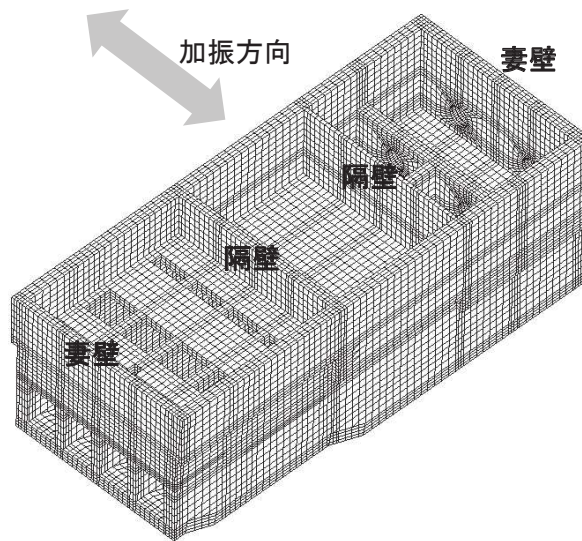
# 1. はじめに

## (1) 三次元静的材料非線形解析を適用する目的①

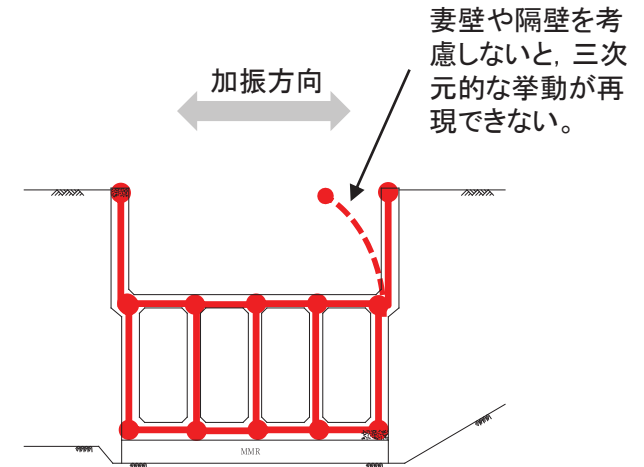
- 女川原子力発電所2号炉の土木構造物のうち、海水ポンプ室、取水口及び復水貯蔵タンク基礎については、既工認時より**加振方向に配置される妻壁や隔壁等の面部材が耐震部材として機能する効果**、つまり、構造の三次元性が地震時の応答に与える影響を考慮するため、**線形シェル要素による三次元モデルを採用し、許容応力度法により設計**していた。軽油タンク室については、新規制対応として、地下式に構造を変更しているが、旧規制では耐震Cクラスであり、工認対象外であった。



海水ポンプ室の既工認モデル  
(線形シェル要素)



海水ポンプ室の今回工認モデル  
(非線形ソリッド要素)



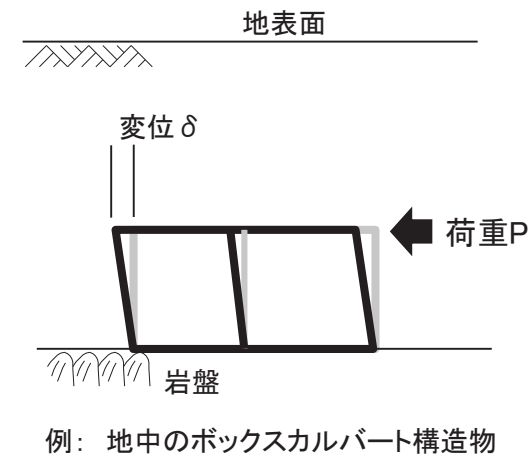
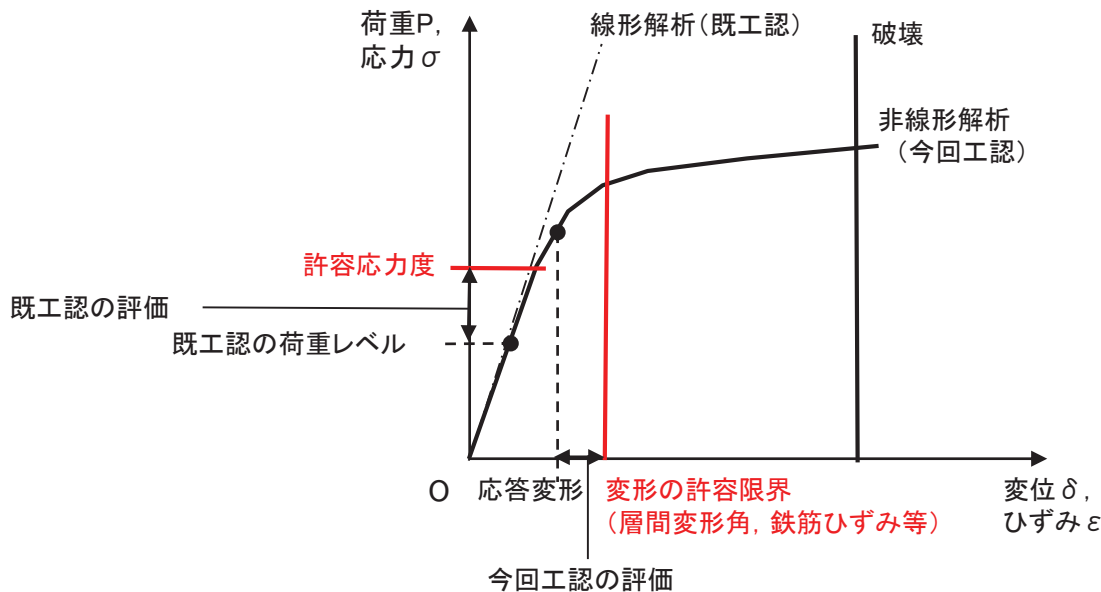
2次元でのモデル化イメージ

注)モデルの向きは今回工認モデルと逆

# 1. はじめに

## (1) 三次元静的材料非線形解析を適用する目的②

- 今回工認では、基準地震動 $S_s$ が大加速度化したことにより、構造物の挙動が非線形性を示すレベルとなったことから、構造物の地震時挙動を精緻に評価するため、新規に**非線形性を考慮できる解析モデル**を取り入れ、三次元静的有限要素法による材料非線形解析(以下、**三次元静的材料非線形解析**という)により耐震安全性を評価している。
- 三次元静的材料非線形解析は既工認で審査実績はないが、特に非線形ソリッド要素を用いると構造物の形状を詳細にモデル化でき、複雑な構造の鉄筋コンクリート構造物の非線形挙動を考慮した変形や断面力を評価することができるため、鉄筋やコンクリートのひずみ、せん断力を用いた精緻な評価が可能である。なお、許容限界は新規制下の工認において実績のある許容限界、またはそれと同等の許容限界(概ね弾性に相当するコンクリートの圧縮ひずみ及び鉄筋の引張ひずみ)を、その妥当性を説明した上で採用することとしている。
- 本資料では、女川原子力発電所2号炉の既工認及び先行プラントにおいて審査実績のない、三次元静的材料非線形解析による耐震性評価方法について説明する。



大加速度による非線形性の考慮(曲げ・軸力系の破壊について)

# 1. はじめに

## (2) 対象構造物

- 三次元静的材料非線形解析により耐震安全性を評価する海水ポンプ室、取水口、軽油タンク室および復水貯蔵タンク基礎の概要を示す。
- 各構造物の構造図を「補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図」に示す。
- 本資料では、形状が複雑で規模が大きく、要求機能が多岐にわたる海水ポンプ室を代表として評価方法について説明する。

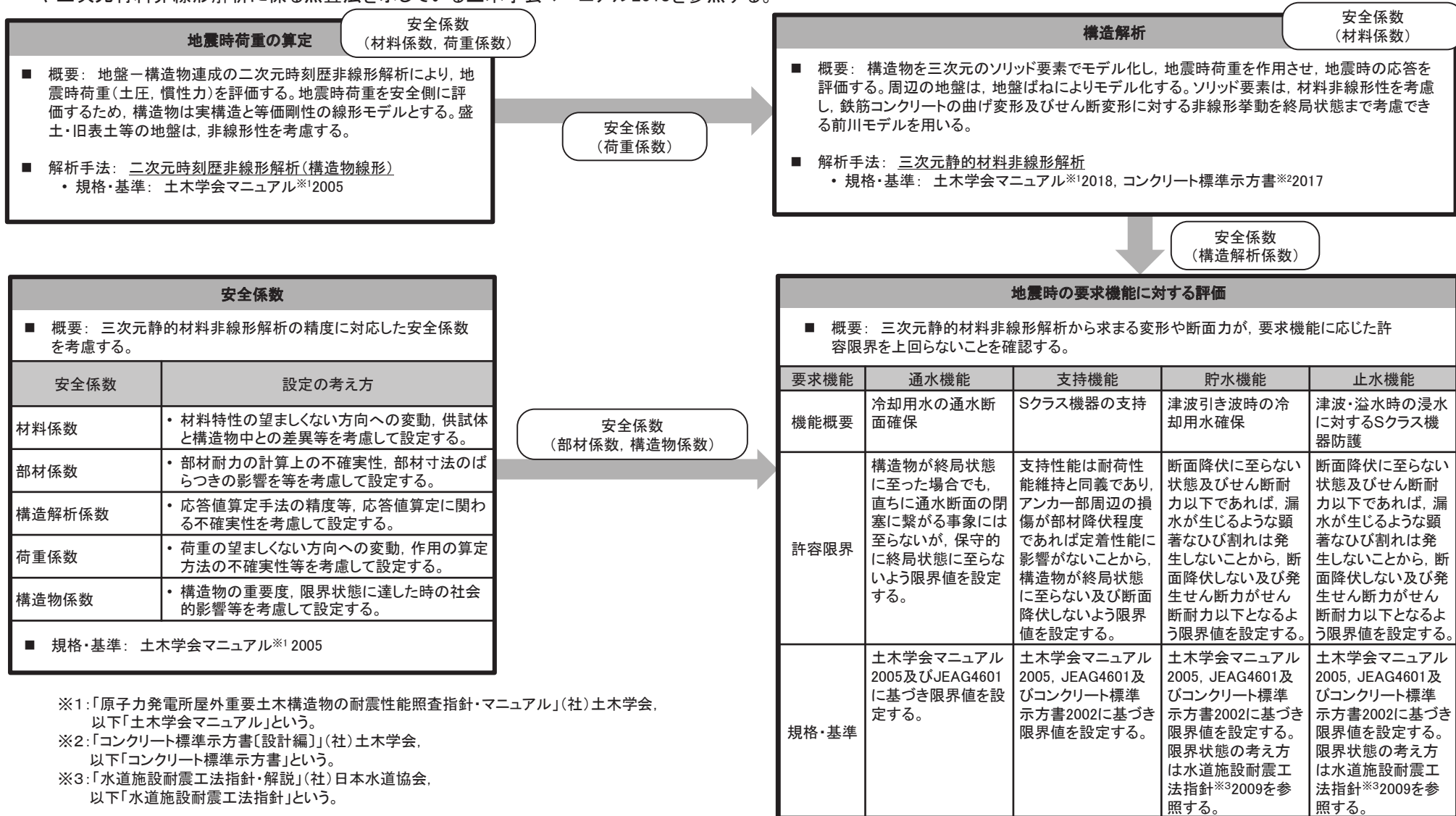
	海水ポンプ室	取水口	軽油タンク室	復水貯蔵タンク基礎
構造物の特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 幅32.5m, 延長77m, 高さ約28mと大規模。</li> <li>• 地下2階構造で上部は開放された3部屋, 下部は延長方向に4連又は2連のカルバート構造の複雑な形状。</li> <li>• 地震時に揺れやすい弱軸は横断方向。</li> <li>• <u>横断方向加振に対し耐震壁として機能する壁部材は, 上部に4枚, 下部に2枚と多く, 複雑。</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 幅33m, 延長11.5m, 高さ12mの標準部(6連カルバート)の背面に幅32.4m~13.4m, 延長28.3m, 高さ5.5mの地中カルバート構造である漸縮部(6連又は2連)が接続しており, 高さの異なる構造が一体化された複雑な形状。</li> <li>• 地震時に揺れやすい弱軸は横断方向。</li> <li>• 横断方向に設置される壁は, 標準部の背面の1枚。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 南北16.70m~20.70m, 東西27.00m~32.40m, 高さ6.80mの箱型構造物であり, 軽油タンク室と燃料移送ポンプ室からなる比較的単純な形状。</li> <li>• 地震時に揺れやすい弱軸は南北方向。</li> <li>• 東西方向と南北方向で耐震壁として機能する部材数に大きな差異はないが, 部材寸法の違いから南北方向のせん断剛性が小さい。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• タンクを支持する基礎版及び基礎版上に固定された遮蔽壁他から構成されている。</li> <li>• 基礎版は, 南北32.45m, 東西26.75m, 厚さ5.00m。遮蔽壁は内径23.10mの円筒形で, 壁厚1.00m(地上部は0.50m)であり, 複雑な形状。</li> <li>• 遮蔽壁は円筒形で, 明確な弱軸方向及び強軸方向を有しない。</li> </ul>
耐震クラス	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 屋外重要土木構造物(Ss機能維持)</li> <li>• Sクラス機器の間接支持(原子炉補機冷却海水系, 高圧炉心スプレイ補機冷却海水系, 浸水防止蓋)</li> <li>• 波及的影響評価対象設備の間接支持(竜巻防護ネット)</li> <li>• 非常用取水設備</li> <li>• 重大事故等対処施設(Ss機能維持)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 屋外重要土木構造物(Ss機能維持)</li> <li>• 非常用取水設備</li> <li>• 重大事故等対処施設(Ss機能維持)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 屋外重要土木構造物(Ss機能維持)</li> <li>• Sクラス機器の間接支持(非常用ディーゼル発電設備燃料油系)</li> <li>• 重大事故等対処施設の間接支持(Ss機能維持)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 重大事故等対処施設の間接支持(Ss機能維持)</li> </ul>
要求機能	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 通水機能</li> <li>• 支持機能</li> <li>• 貯水機能</li> <li>• 止水機能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 通水機能</li> <li>• 貯水機能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 支持機能</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 支持機能</li> </ul>



# 1. はじめに

## (3) 三次元静的材料非線形解析の照査体系

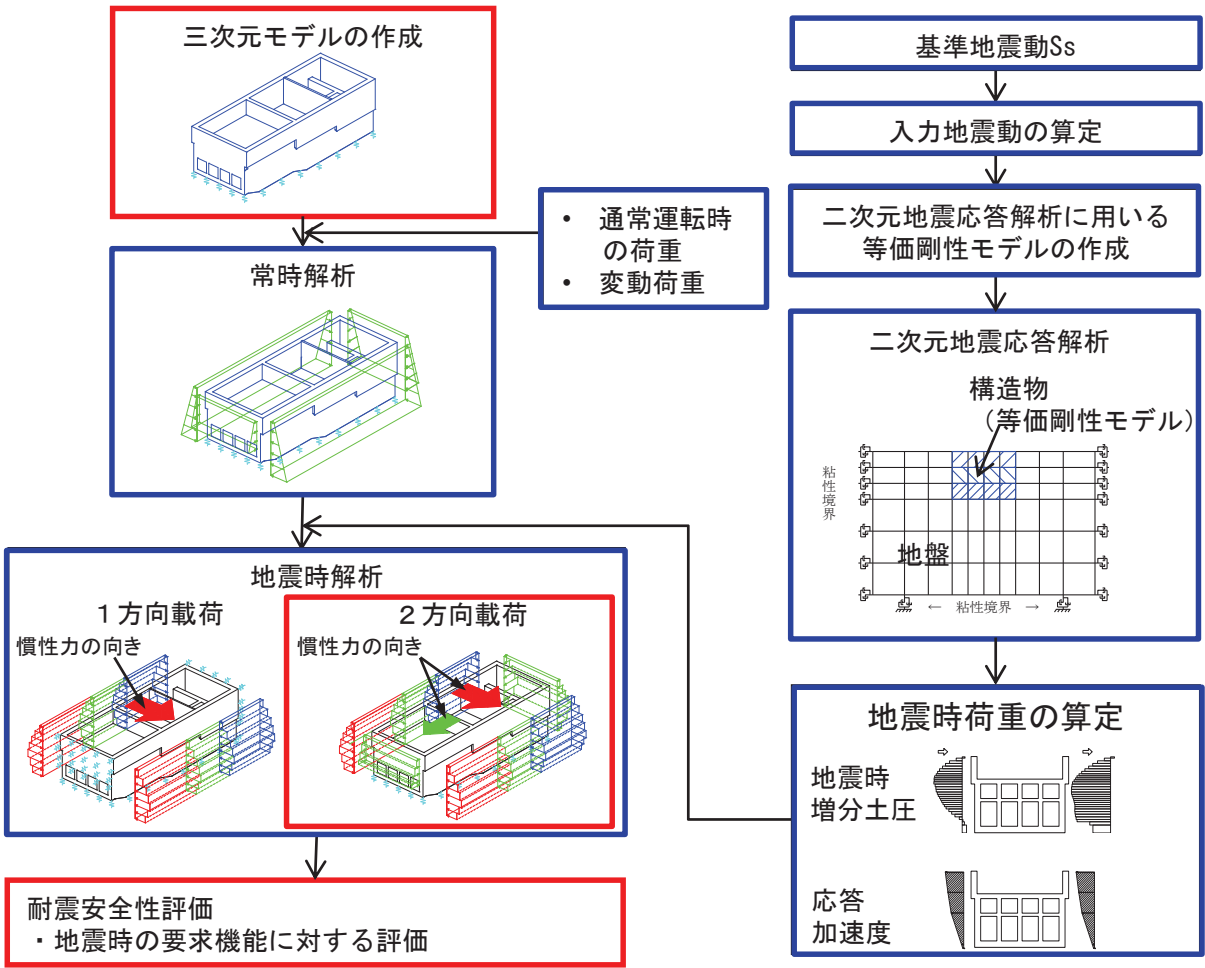
- 女川2号炉海水ポンプ室で採用する三次元静的材料非線形解析を用いた耐震性評価方法の評価体系と各評価の概要を以下に示す。
- 安全係数の設定等にあたり準拠する規格・基準については、新規制下の工認で実績のある土木学会マニュアル2005を適用することを基本とし、コンクリート標準示方書2017や三次元材料非線形解析に係る照査法を示している土木学会マニュアル2018を参照する。



# 1. はじめに

## (4) 耐震性の評価フローと新規性

- 三次元静的材料非線形解析による耐震性の評価フローは、女川2号炉における既工認の評価手法と同様に、基準地震動Ssによる二次元地震応答解析により評価される地震時荷重(土圧, 加速度)を三次元モデルへ作用させて、耐震安全性評価を行う。
- 女川2号炉の既工認及び先行プラント実績のない手法として、三次元モデルを用いた非線形解析がある。なお、水平2方向の地震力の組合せに対する検討は、新規基準で新たに追加された評価項目である。



: 既工認及び先行プラント実績なし  
 : 既工認及び先行プラント実績あり

既工認及び先行プラント実績との比較

	今回工認	既工認	先行プラント
三次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 三次元非線形ソリッド要素</li> <li>• 三次元非線形シェル要素</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 三次元線形シェル要素</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• なし (バックチェック時に浜岡4号の海水ポンプ室で審議実績あり)</li> </ul>
地震時解析 (2方向荷重)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 水平2方向の地震時荷重を載荷</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• なし</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• なし</li> </ul>
耐震安全性評価	限界状態設計法照査指標 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 層間変形角</li> <li>• せん断力</li> <li>• ひずみ (概ね弾性)</li> </ul>	許容応力度法照査指標 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 許容応力度</li> </ul>	限界状態設計法照査指標 <ul style="list-style-type: none"> <li>• 層間変形角</li> <li>• せん断力</li> </ul>

※: 赤字が実績のない手法

耐震性の評価フロー

# 目次

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
  - (1) 照査体系の既工認からの変更点
  - (2) 耐震性の評価フローと既工認からの変更点
  - (3) 既工認の耐震性評価手法
  - (4) 今回工認の耐震性評価手法
  - (5) 耐震性評価手法の変更点
  - (6) 新規採用手法の概要
  - (7) 三次元静的材料非線形解析のメリット・デメリット
  - (8) 精緻化による効果
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

## 2. 既工認からの変更点

### (1) 照査体系の既工認からの変更点

- ・ 二次元地震応答解析により算定した地震時荷重を三次元モデルへ作用させて生じる変形や断面力と許容限界を比較する照査体系は、今回工認と既工認で変わりはない。
- ・ 既工認では、三次元静的線形解析を用いた許容応力度法により照査していたが、今回工認は、三次元静的材料非線形解析を用いた限界状態設計法により、要求性能に応じた許容限界に対して照査する。

**地震時荷重の算定**

今回工認

- 概要： 地盤-構造物連成の二次元時刻歴非線形解析により、地震時荷重(土圧、慣性力)を評価する。地震時荷重を安全側に評価するため、構造物は実構造と等価剛性の線形モデルとする。盛土・旧表土等の地盤は、非線形性を考慮する。
- 解析手法： 二次元時刻歴非線形解析(構造物線形)

安全係数  
(材料係数, 荷重係数)

---

既工認

- 概要： 地盤-構造物連成の二次元等価線形解析により、地震時荷重(土圧、慣性力)を評価する。地震時荷重を安全側に評価するため、構造物は実構造と等価剛性の線形モデルとする。盛土・旧表土等の地盤は、等価線形化法により非線形性を考慮する。
- 解析手法： 二次元等価線形解析

**構造解析**

今回工認

- 概要： 構造物を三次元のソリッド要素でモデル化し、地震時荷重を作用させ、地震時の応答を評価する。周辺の地盤は、地盤ばねによりモデル化する。ソリッド要素は、材料非線形性を考慮し、鉄筋コンクリートの曲げ変形及びせん断変形に対する非線形挙動を終局状態まで考慮できる前川モデルを用いる。
- 解析手法： 三次元静的材料非線形解析

安全係数  
(材料係数)

---

既工認

- 概要： 構造物を三次元の線形シェル要素でモデル化し、地震時荷重を作用させ、地震時の応答を評価する。周辺の地盤は、地盤ばねによりモデル化する。
- 解析手法： 三次元静的線形解析

**安全係数**

今回工認

- 概要： 三次元静的材料非線形解析の精度に対応した安全係数を考慮する。  
①材料係数②部材係数③構造解析係数④荷重係数⑤構造物係数

安全係数  
(部材係数, 構造物係数)

---

既工認

- 概要： 許容限界(許容応力度)に各種の不確かさ(ばらつき)が含まれる。

**地震時の要求機能に対する評価**

今回工認

- 概要： 三次元静的材料非線形解析から求まる変形や断面力が、要求機能に応じた許容限界を上回らないことを確認する。

要求機能	通水機能	支持機能	貯水機能	止水機能
評価指標	①層間変形角(面外) ②層間変形角(面内) ③せん断力(面外)	①圧縮ひずみ ②引張ひずみ ③せん断力(面外) ④層間変形角(面内)	①圧縮ひずみ ②引張ひずみ ③せん断力(面外) ④層間変形角(面内)	①圧縮ひずみ ②引張ひずみ ③せん断力(面外) ④層間変形角(面内)
許容限界	既工認実績のある基準に基づき、終局状態の限界値を設定	既工認実績のある限界値(③、④)及び概ね弾性範囲の限界値(①、②)を設定	既工認実績のある限界値(③、④)及び概ね弾性範囲の限界値(①、②)を設定	既工認実績のある限界値(③、④)及び概ね弾性範囲の限界値(①、②)を設定

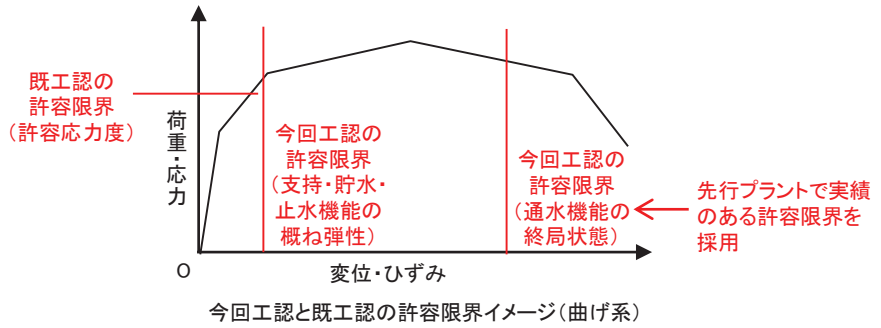
安全係数  
(構造解析係数)

---

既工認

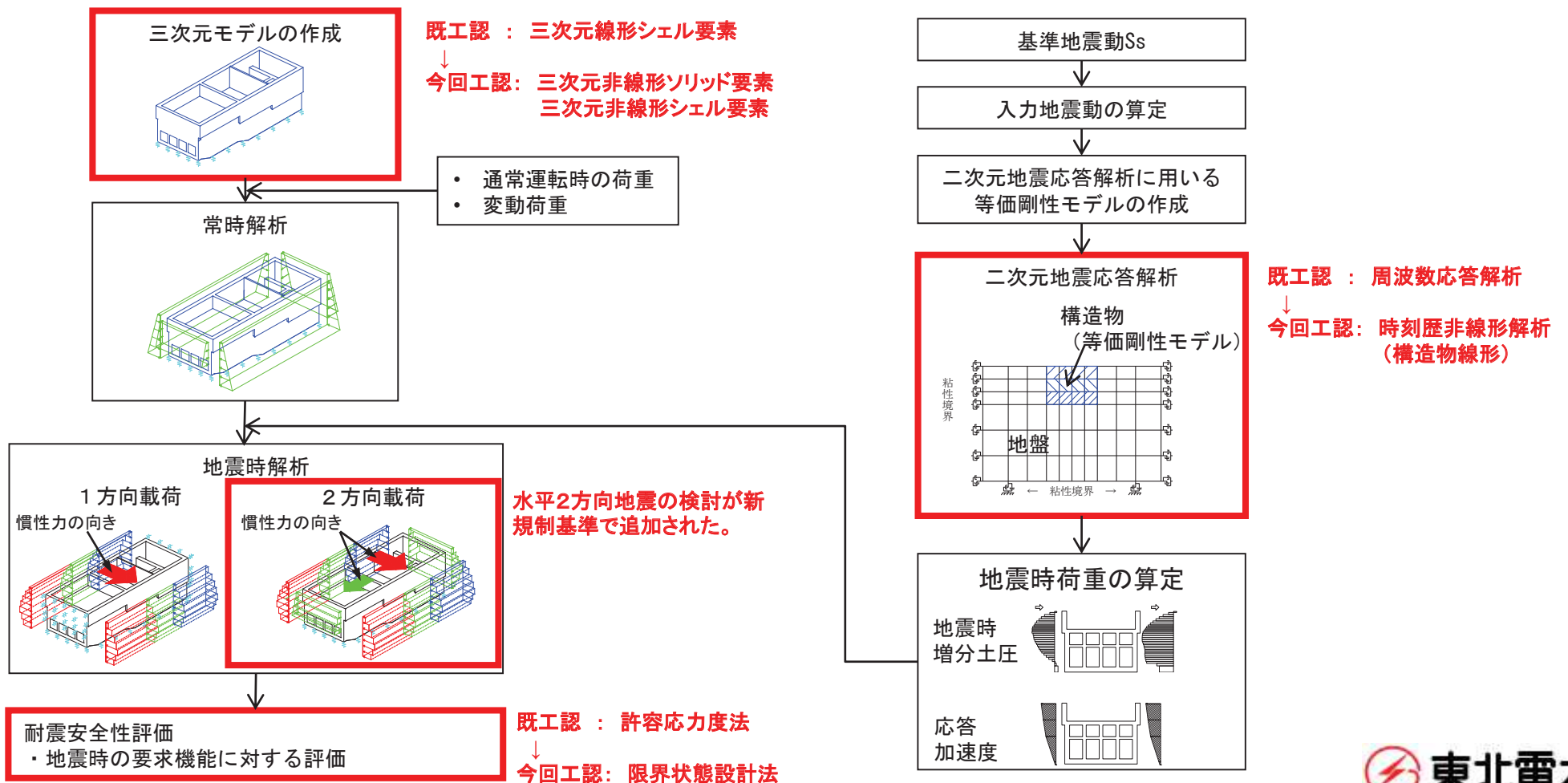
- 概要： 三次元静的線形解析から求まる応力が、許容応力度を上回らないことを確認する。

要求機能	通水機能	支持機能	貯水機能
評価指標	①コンクリートの圧縮応力、②鉄筋の引張応力 ③鉄筋コンクリートのせん断応力		
許容限界	①許容曲げ圧縮応力度、②許容引張応力度 ②許容せん断応力度		



## 2. 既工認からの変更点 (2) 耐震性の評価フローと既工認からの変更点

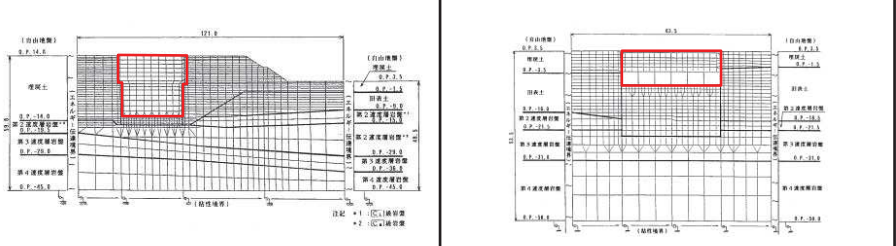
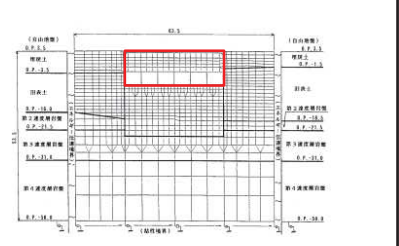
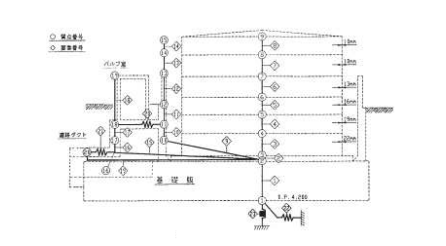
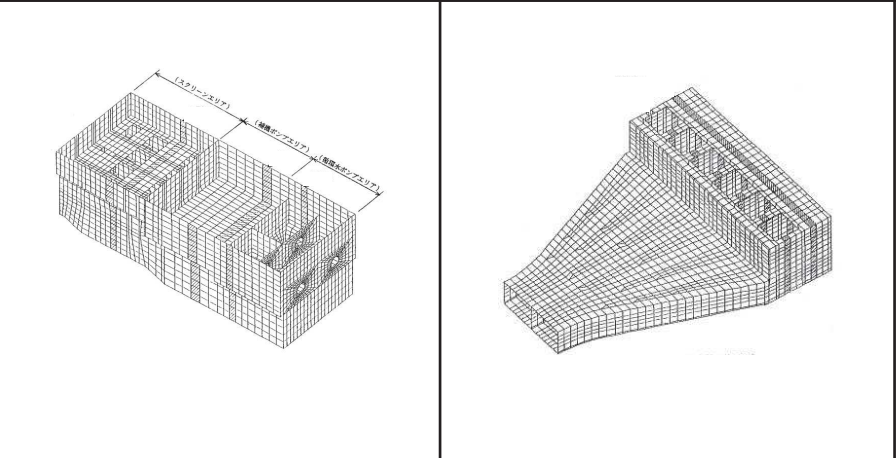
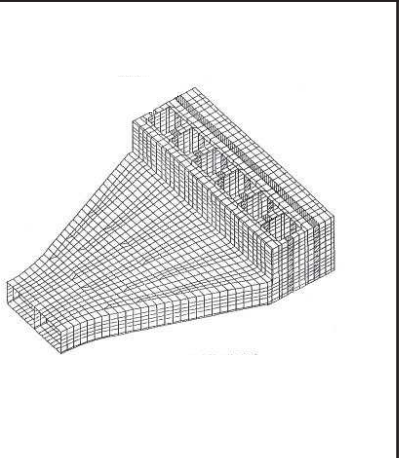
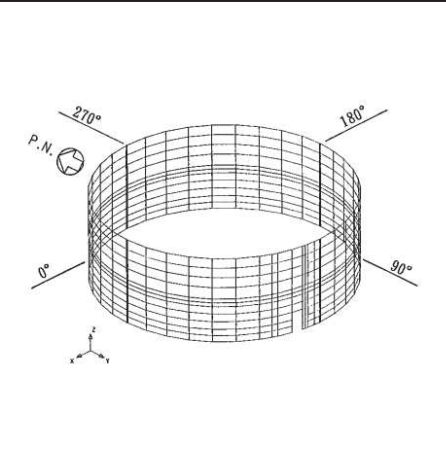
- 三次元静的材料非線形解析による耐震性の評価フローは、既工認と同様に、基準地震動 $S_s$ による二次元地震応答解析により評価される地震時荷重(土圧, 加速度)を三次元モデルへ作用させて、耐震安全性評価を行う。
- **既工認からの変更点**は解析手法の変更であり、二次元地震応答解析を線形解析である周波数応答解析から時刻歴非線形解析へ変更した点と、三次元モデルを線形シェル要素から非線形ソリッド要素又は非線形シェル要素へ変更し、耐震安全性評価を許容応力度法から限界状態設計法に変更した点である。
- 水平2方向の地震力の組合せに対する検討は、新規制基準で新たに追加された評価項目である。



## 2. 既工認からの変更点

### (3) 既工認の耐震性評価手法

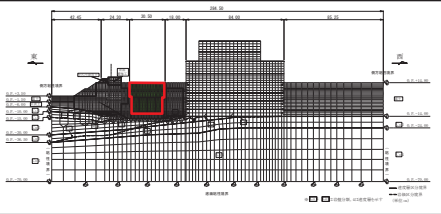
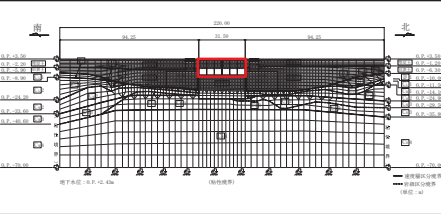
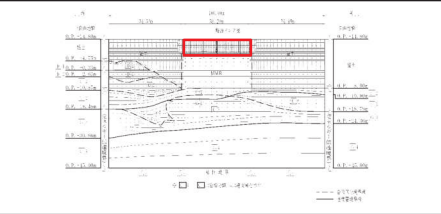
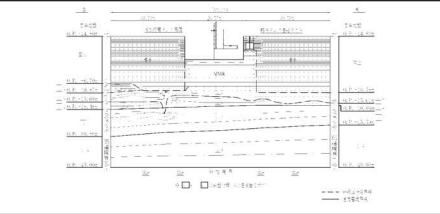
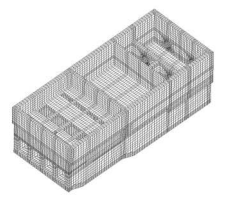
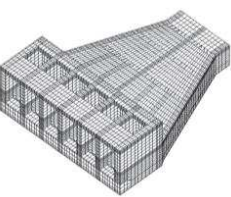
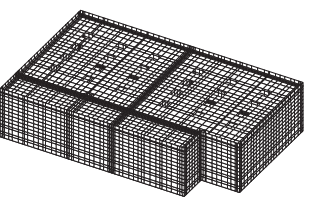
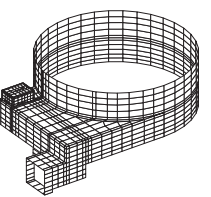
- 既工認における耐震性評価は、妻壁や隔壁の耐震機能を設計で考慮できるよう、**線形シェル要素による三次元モデルで構造解析**を行っている。
- 二次元地震応答解析は、構造物を実構造と等価な剛性とした線形モデルとして、地盤－構造物連成の周波数応答解析(線形解析)により評価している。

評価方法	海水ポンプ室	取水口	軽油タンク室	復水貯蔵タンク基礎
二次元地震応答解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>延長方向による断面変化を平均化し、実構造物と等価な剛性とした二次元等価剛性モデルを作成。</li> <li>構造物を等価剛性モデル(線形)とし、地盤－構造物連成(地盤は等価線形)の<b>周波数応答解析(線形解析)</b>により評価。</li> </ul> 		既工認対象外	
三次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造物を<b>線形シェル要素</b>でモデル化</li> </ul> 		既工認対象外	
主要な損傷モード	<ul style="list-style-type: none"> <li>横断方向加振に対し、上部の側壁と下部のカルバート部が面外せん断変形し損傷する。(面外変形)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>横断方向加振に対し、標準部の6連のカルバートが面外せん断変形し損傷する。(面外変形)</li> </ul>	既工認対象外	<ul style="list-style-type: none"> <li>加振方向に直交する壁部材がせん断変形し損傷する。(面外変形)</li> </ul>
耐震安全性評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>発生断面力に対して、<b>許容応力度</b>により照査</li> </ul>			

## 2. 既工認からの変更点

### (4) 今回工認の耐震性評価手法

- 今回工認における耐震安全性評価は、妻壁や隔壁の耐震機能に加え非線形性も設計で考慮できるよう、**非線形要素による三次元モデルで構造解析を行う。**
- 二次元地震応答解析は、構造物を実構造と等価な剛性とした線形モデルとし、地盤-構造物連成の二次元動的解析により評価しており、地盤の非線形性に応じて、時刻歴非線形解析(構造物線形)により評価している構造物(海水ポンプ室、取水口)と、周波数応答解析により評価している構造物(軽油タンク室、復水貯蔵タンク基礎)がある。
- なお、三次元解析を採用する予定の全ての構造物について、地震応答解析手法は地下水位等の地盤の状況や、解析手法の適用範囲を勘案して適切に選定することとしている。

	海水ポンプ室	取水口	軽油タンク室	復水貯蔵タンク基礎
二次元地震応答解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 延長方向のエリア毎に3分割し、実構造と等価な剛性とした二次元等価剛性モデルを作成し、エリア毎の荷重を評価。</li> <li>• 構造物を等価剛性モデル(線形)とし、地盤-構造物連成(地盤は非線形)の<b>時刻歴非線形解析(構造物線形)</b>により評価。</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 延長方向に2分割し、実構造と等価な剛性とした二次元等価剛性モデルを作成。</li> <li>• 同左</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 加振方向に平行に配置される壁部材を奥行き方向で平均化し、実構造物と等価な剛性とした二次元等価剛性モデルを作成。</li> <li>• 構造物を等価剛性モデル(線形)とし、地盤-構造物連成(地盤は等価線形)の<b>周波数応答解析</b>により評価。</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 復水貯蔵タンク、バルブ室及び連絡トレンチ等を質点系モデルとした、地盤-構造物連成(地盤は等価線形)の<b>周波数応答解析</b>により評価。</li> </ul> 
三次元モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 海水ポンプ室を<b>非線形ソリッド要素</b>でモデル化(要素数:約8.5万, 節点数:約6.9万)。</li> <li>• 鉄筋コンクリートの非線形性を評価可能な前川モデルを用いた材料非線形モデル。</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 取水口を<b>非線形ソリッド要素</b>でモデル化(要素数:約4.4万, 節点数:約3.7万)。</li> <li>• 同左</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 軽油タンク室を<b>非線形シェル要素</b>でモデル化(要素数:約8千, 節点数:約8千)。</li> <li>• 非線形シェル要素の構成則は、鉄筋コンクリートの非線形性を考慮した応力ひずみ関係を用いており、ファイバー要素と同様である。</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 復水貯蔵タンク基礎の遮蔽壁他を<b>非線形シェル要素</b>でモデル化(要素数:約1千, 節点数:約1千)。</li> <li>• 同左</li> </ul> 
耐震安全性評価	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 地震時の安全性評価として、曲げ系の破壊は部材の要求機能に応じた許容限界(層間変形角, 鉄筋・コンクリートのひずみ)に対して照査。</li> <li>• せん断破壊に対する照査は、せん断耐力評価式により照査。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 同左</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 同左</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 同左</li> </ul>

## 2. 既工認からの変更点

### (5) 耐震性評価手法の変更点

- ・ 今回工認で採用した手法は、基準地震動Ssの大加速度化に対応し、構造物や地盤の非線形性を考慮する目的で採用しており、二次元地震応答解析の時刻歴非線形解析と、三次元モデルによる構造解析の三次元静的材料非線形解析(ソリッド要素及びシェル要素)である。
- ・ 二次元地震応答解析は地下水位や周辺地盤等の非線形の影響に応じて使い分ける。三次元モデル(ソリッド要素及びシェル要素)は、厳しくなる破壊モードに対し精緻化を行い、せん断が厳しくなる構造物はソリッド要素を採用し、曲げが厳しくなる構造物はシェル要素を採用する。
- ・ 本資料で説明する海水ポンプ室は、時刻歴非線形解析とソリッド要素を採用しており、新規に採用する方法を網羅している。
- ・ なお、三次元解析を採用する予定の全ての構造物について、地震応答解析手法は地下水位等の地盤の状況や、解析手法の適用範囲を勘案して適切に選定することとしている。

	既工認 (海水ポンプ室, 取水口, 復水貯蔵タンク基礎)	今回工認 (海水ポンプ室, 取水口)	今回工認 (軽油タンク室, 復水貯蔵タンク基礎)
二次元地震応答解析	二次元有限要素法による地震応答解析 「周波数応答解析」 ↓ 地震時増分荷重(土圧, 加速度)を抽出	<b>精緻化</b> 二次元有限要素法による地震応答解析 「時刻歴非線形解析(構造物線形)」 ↓ 地震時増分荷重(土圧, 加速度)を抽出	二次元有限要素法による地震応答解析 「周波数応答解析」 ↓ 地震時増分荷重(土圧, 加速度)を抽出
三次元モデル	三次元有限要素法による構造解析 「線形シェルモデル」 ↓ 応答値(断面力)を算出	<b>精緻化</b> 三次元有限要素法による構造解析 「三次元静的材料非線形解析」 (ソリッド要素) ↓ 応答値(変形, 断面力)を算出	<b>精緻化</b> 三次元有限要素法による構造解析 「三次元静的材料非線形解析」 (シェル要素) ↓ 応答値(変形, 断面力)を算出
耐震安全性評価	照査 「許容応力度法」 【曲げ系の破壊】 ・ 許容応力度 【せん断破壊】 ・ 許容応力度	<b>精緻化</b> 照査 「限界状態設計法」 【曲げ系の破壊】 ・ 層間変形角(面内, 面外), 圧縮ひずみ/引張ひずみ(概ね弾性) 【せん断破壊】 ・ せん断耐力(せん断耐力評価式)	<b>精緻化</b> 照査 「限界状態設計法」 【曲げ系の破壊】 ・ 層間変形角(面内, 面外), 圧縮ひずみ/引張ひずみ(概ね弾性) 【せん断破壊】 ・ せん断耐力(せん断耐力評価式)

**精緻化** は、既工認と比較して、精緻化している項目を示す。



## 2. 既工認からの変更点

### (6) 新規採用手法の概要①

- 地震時荷重の算定のために実施する、二次元時刻歴非線形解析(構造物線形)の概要について以下に示す。
- 二次元時刻歴非線形解析は、構造物モデルを実構造と等価な剛性の線形としているが、非線形とした手法について新規制工認で他プラントにより実績が多数ある。**

	二次元時刻歴非線形解析(構造物線形)
解析の概要	<p>解析モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>地盤－構造物連成の<b>二次元FEM解析において、地盤の非線形性を考慮</b>した地震応答解析を行う。</li> <li>構造物は、地震時荷重(地震時土圧、慣性力)を安全側に評価するため、線形モデルとする。</li> <li><b>地盤の材料特性</b>として、H-DモデルやR-Oモデル等に基づく骨格曲線とメイシング則に基づく履歴曲線により、<b>非線形挙動を表現</b>する。</li> <li>地盤－構造物間の剥離、再接触を考慮する。</li> <li>妻壁等の剛性を考慮した平面応力要素を用いることで、地盤と構造物の動的相互作用を正しく評価する。</li> </ul> <p>照査(利用)方法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>三次元静的材料非線形解析で作用させる地震時土圧や慣性力を、地震時荷重として算出する。</li> </ul>
工認実績	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造物も非線形とした手法について、新規制工認として、川内1号の取水ピット、玄海3・4号の取水ピット、高浜3・4号の海水ポンプ室、美浜3号の海水ポンプ室等の地中構造物などで<b>実績が多数ある</b>。</li> </ul>
規格・基準	<ul style="list-style-type: none"> <li>土木学会マニュアル2005 地盤－構造物連成系の時刻歴地震応答解析において、地盤および構造物の非線形性を考慮した解析手法が規定されている。</li> <li>コンクリート標準示方書2017 部材および地盤の非線形性を考慮した、構造物と地盤の連成解析手法が規定されている。</li> </ul>

## 2. 既工認からの変更点

### (6) 新規採用手法の概要②

- 今回新規に採用する三次元静的材料非線形解析の概要について以下に示す。
- **静的材料非線形解析は、土木学会マニュアル2005に、部材を対象とした二次元モデルにより、せん断耐力(限界値)を評価する方法が記載されており、新規制工認で他プラントによる実績が多数ある。構造物全体を対象とした三次元モデルにより、層間変形角やひずみ(応答値)を評価する方法は、コンクリート標準示方書2017や土木学会マニュアル2018で規定されているものの、他プラントでも新規制工認の実績がない手法である。**

	三次元静的材料非線形解析
解析の概要	<p>解析モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 三次元の構造モデルに、慣性力や土圧等の地震時荷重を静的に載荷し、構造解析を行う。</li> <li>• 地盤は、地震時の解析では、底面と妻壁にばねとしてモデル化する。側壁への土圧等の作用は、構造物に直接作用させるため、地盤ばねは用いない。</li> <li>• 構造物の材料特性として、材料非線形性を有するシェル要素やソリッド要素により非線形挙動を表現する。</li> <li>• ソリッド要素は、<u>曲げ変形に加えてせん断に対する非線形挙動</u>を表現可能であり、要素のせん断破壊に伴う非線形挙動も精緻に表現できる。</li> <li>• シェル要素は、曲げ変形に対する非線形挙動を表現可能であり、部材非線形性を有する梁モデルを二次元平面に拡張した要素である。</li> </ul> <p>照査方法</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 材料非線形を考慮した要素に発生する<u>断面力や変形に対して照査</u>を行う。</li> </ul>
工認実績	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 新規制工認として、川内1号の取水路、玄海3・4号の海水管ダクト堅坑などで、<u>部材のせん断耐力を二次元材料非線形解析により評価している実績はあるが、構造物全体を対象とした実績はなく、曲げ系の破壊の照査において、非線形解析から得られる鉄筋やコンクリートのひずみを用いた実績はない。</u></li> </ul>
規格・基準	<ul style="list-style-type: none"> <li>• コンクリート標準示方書2017 三次元の構造モデルに対する材料非線形解析による評価方法が規定されている。</li> <li>• 土木学会マニュアル2018 構造物全体を三次元ソリッド要素でモデル化し、耐震性評価を行う方法が規定されている。</li> </ul>

## 2. 既工認からの変更点

### (7) 三次元静的材料非線形解析のメリット・デメリット

- 新規手法を採用することによる影響を確認するため、新規制の適合性審査において実績のある二次元地震応答解析(部材非線形)と三次元静的材料非線形解析のメリット・デメリットを以下の通り整理した。
- 二次元地震応答解析は線状構造物に適した解析手法で、加振方向に設置される部材の評価ができないのに対し、**三次元静的材料非線形解析は箱型構造物に適した解析手法で、三次元的な挙動、隅角部等における応力伝達が実態に近く再現できる。**
- 海水ポンプ室のように複雑な部材から構成される構造物の評価は、解析モデルの作成に労力を要するものの、要素レベルの詳細な耐震安全性評価が可能であるソリッド要素を用いた三次元静的材料非線形解析が適している。

	二次元地震応答解析 (部材非線形解析: 取水路 他)	三次元静的材料非線形解析 (ソリッド要素: 海水ポンプ室 他)	三次元静的材料非線形解析 (シェル要素: 軽油タンク室 他)
解析モデル作成	<ul style="list-style-type: none"> <li>○: 奥行き方向に変化しない梁・柱から構成される構造物の解析に適する。</li> <li>○: 構造物を梁でモデル化するため、モデル化が容易。</li> <li>×: 上部が開放された地中ピット構造に対し、輪切りの二次元モデルを用いると妻壁の効果が見込めず、三次元的な挙動を再現できない。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○: 複雑な形状や構造を有する構造物の解析に適する。</li> <li>○: 構造物をソリッド要素によりモデル化することで、<b>隅角部等における応力伝達が実態に近く再現できる。</b></li> <li>×: 構造物をソリッド要素に分割してモデル化するため、要素毎に鉄筋量等を設定する必要があり、モデル化に手間がかかる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○: 面部材(壁やスラブ)から構成される構造物の解析に適する。</li> <li>○: 構造物をシェル要素でモデル化するため、モデル化は比較的容易。</li> </ul>
構成モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>○: M-φモデルやファイバーモデルなど、実績が豊富で信頼性のある構成モデルがある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>△: 構成モデルは、COM3の前川モデル、FINALの長沼モデル等に限られ、適用事例が少ない。</li> <li>○: 前川モデルの構成モデルはコンクリート標準示方書2017に規定されている。</li> <li>○: 前川モデルは、新規制基準適合性審査で工認実績のある二次元材料非線形解析コード(WCOMD)と同一のモデルであり、二次元モデルを拡張して三次元に対応している。</li> <li>○: 曲げ変形に加え、せん断に対する非線形性を考慮できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○: 一つの壁でも部分的な配筋の違いをモデル化できる。</li> <li>○: 実績が豊富なファイバーモデルの二次元拡張版を用いており、信頼性がある。</li> <li>○: 曲げ変形に対する非線形性を考慮できる。</li> </ul>
解析	<ul style="list-style-type: none"> <li>○: 計算負荷が比較的小さく、時刻歴の地震応答解析が可能。</li> <li>○: 梁要素毎に平均的な断面力が算定できる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>△: 計算負荷が大きく、大規模構造物に対しては、静的解析が限界。</li> <li>○: <b>要素毎にひずみを算定でき、局所的なひずみの集中も評価することができる。</b></li> <li>○: 要素の非線形性は、構成モデルで考慮されているため、せん断破壊の発生・進展過程が自動的に評価される。</li> <li>○: 奥行き方向に断面変化がある場合、ねじり等の三次元的変形を考慮することができる。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>△: 計算負荷が大きく、大規模構造物に対しては、静的解析が限界。</li> <li>○: 要素毎に断面力とひずみを評価することができる。</li> <li>○: 奥行き方向に断面変化がある場合、ねじり等の三次元的変形を考慮することができる。</li> </ul>
照査	<ul style="list-style-type: none"> <li>○: 曲げやせん断に対する終局状態の耐力評価式は、既工認実績がある。</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>△: 断面力の算定に労力を要する。</li> <li>○: <b>曲げに対しては、コンクリートの主圧縮ひずみ及び鉄筋のひずみにより弾性限界を規定できる。</b></li> <li>○: <b>要素の破壊をひずみにより規定できる。</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○: <b>曲げに対しては、コンクリートの最大圧縮ひずみ及び鉄筋のひずみにより弾性限界を規定できる。</b></li> <li>○: せん断に対しては、既工認実績のある耐力評価式を適用できる。</li> </ul>

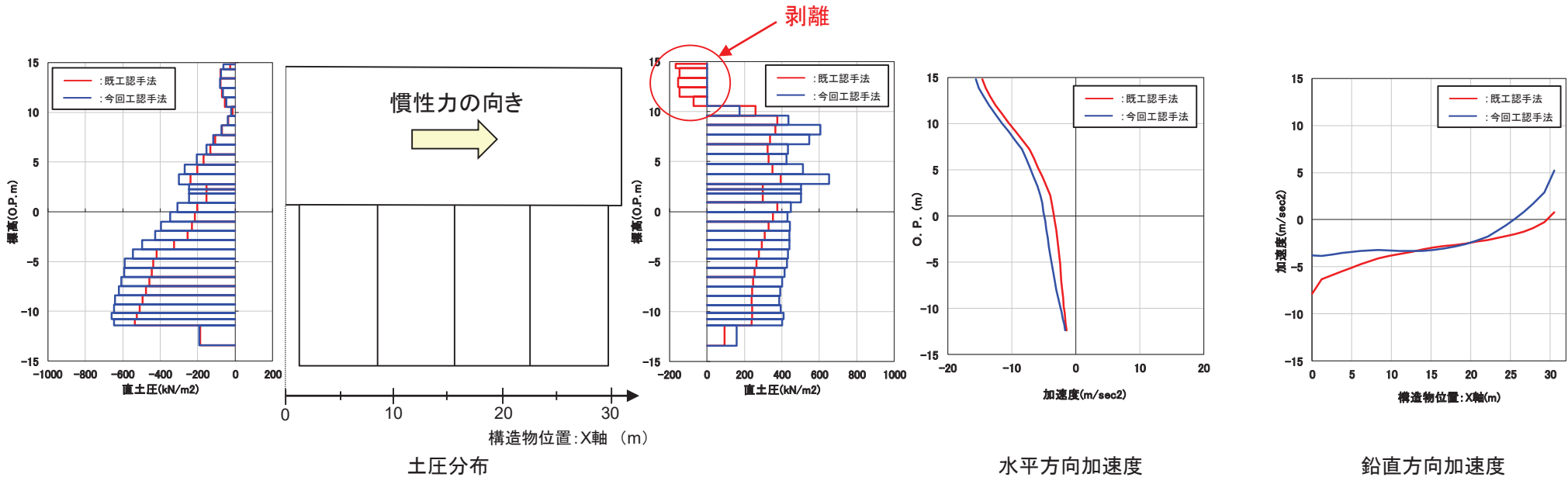
## 2. 既工認からの変更点

### (8) 精緻化による効果(①地震応答解析の精緻化)

- 二次元地震応答解析について、既工認では周波数応答解析(線形解析)を行っているが、今回工認では、基準地震動Ssが大加速度化することにより、周辺地盤の非線形性を考慮する必要があることから、時刻歴非線形解析(構造物線形)を採用している。
- 今回工認手法を採用する効果を確認するため、既工認手法と今回工認手法における地震時荷重を比較する。
- 地震時荷重は、基準地震動Ss7波のうち、海水ポンプ室への応答が厳しくなる基準地震動Ss-D2において海水ポンプ室全体の層間変位が最大となる時刻の、補機ポンプエリアの地震時荷重で代表する。

#### 比較結果

- 周辺地盤の非線形性を考慮した結果、海水ポンプ室に作用する土圧は、今回工認の方が全体的に大きくなっている。
- 地盤と構造物間の剥離-再接触を考慮しているため、側壁を地盤が引張る荷重は、今回工認では剥離として考慮されている。
- 加速度は、水平方向加速度は、今回工認の方が大きい反面、鉛直方向加速度は、小さくなっている。
- 鉛直方向加速度分布に差異が出ている要因として、今回工認では底面の剥離-再接触が考慮されていること等が要因として考えられる。



※：土圧の向きは図の右から左への土圧が正側、  
図の左から右への土圧が負側を示す

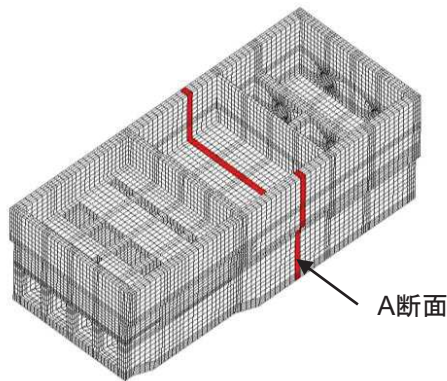
※：加速度の向きは右向き及び上向きが正側、  
左向き及び下向きが負側を示す

既工認手法と今回工認手法の比較

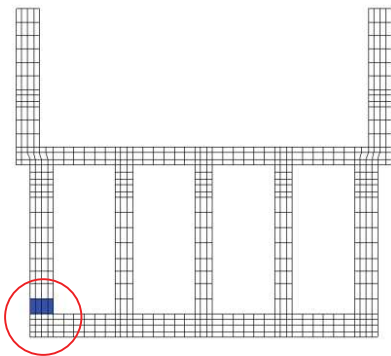
## 2. 既工認からの変更点

### (8) 精緻化による効果(②三次元モデルの精緻化)

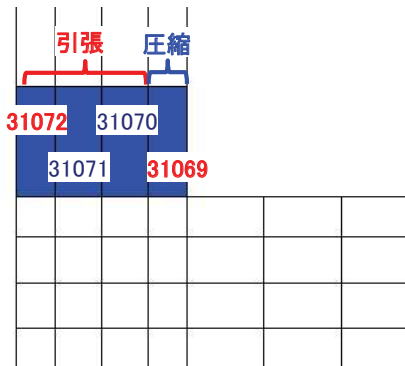
- 三次元モデルについて、既工認では線形シェルモデルを採用し、許容応力度法により照査を行っているが、今回工認では非線形ソリッド要素によりモデル化し、限界状態設計法により照査を行っている。
- 今回工認で採用した方法では、曲げ系の破壊をひずみで評価することで、より精緻に部材の損傷状況を把握することができる。
- 例として、p19の今回工認手法の地震時荷重を非線形ソリッド要素による三次元モデルに載荷させた場合における要素の応力-ひずみ関係を示す。
- 図中の線形解析応答値及び非線形解析応答値は、同一の荷重を既工認の三次元モデル(線形シェル要素)及び今回工認の三次元モデル(非線形ソリッド要素)に載荷させた応答値である。
- 曲げ系の破壊に対して、コンクリートの圧縮ひずみは概ね弾性範囲内で用いることとし、鉄筋の引張についてはコンクリートと鉄筋が一体となった挙動をするRC要素としてひずみを取り扱い、図のように鉄筋のひずみを精緻かつ合理的に算定することが可能である。



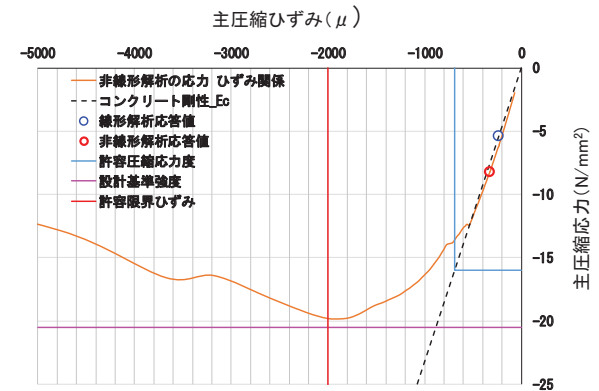
A断面



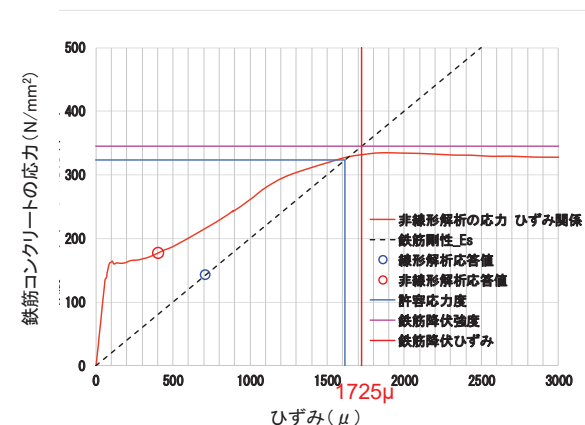
断面図(A断面)



側壁基部拡大図



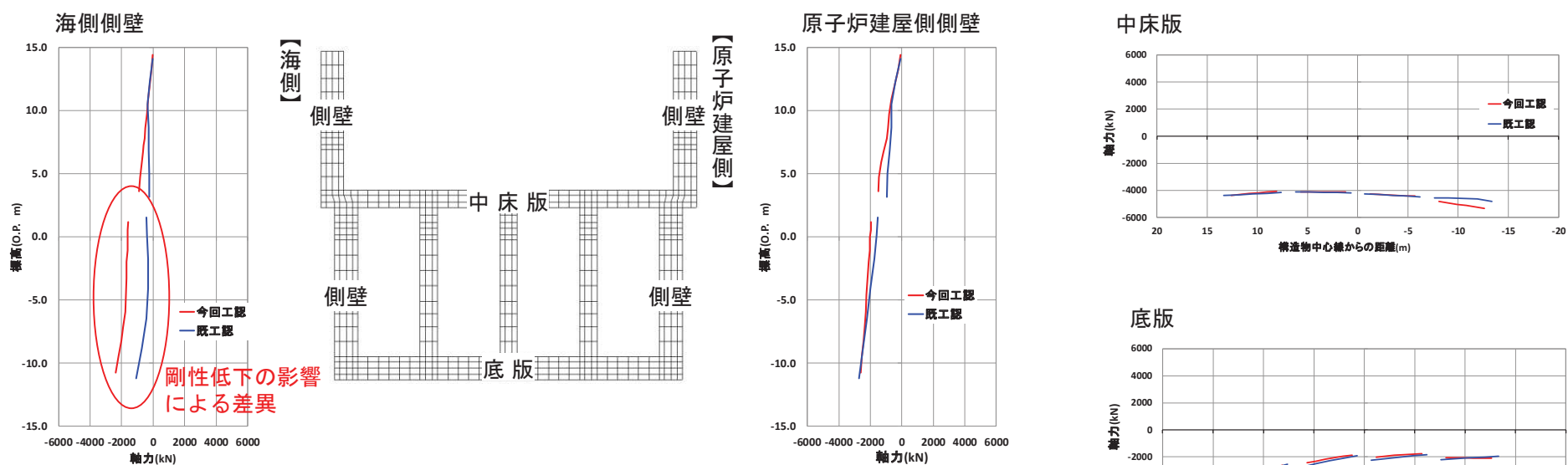
主圧縮応力-主圧縮ひずみ関係(圧縮側要素31069)



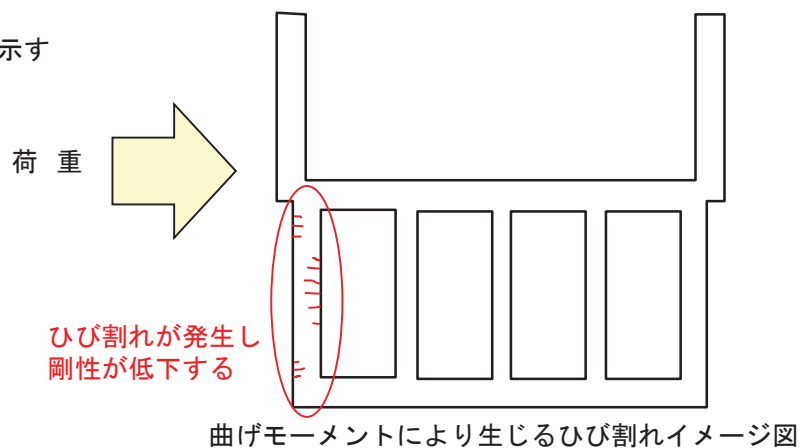
鉄筋コンクリートの応力-ひずみ関係(引張側要素31072)

## 2. 既工認からの変更点 (8) 精緻化による効果(③軸力比較)

- ・ 今回工認の三次元モデル(非線形ソリッド要素)及び既工認の三次元モデル(線形シェル要素)にp19に示す今回工認手法における地震時荷重を載荷させた場合における軸力図を以下に示す。
- ・ 今回工認と既工認の軸力は概ね同等となっているが、海側側壁で差異が出ている。差異が出ている箇所は、後に示す曲げモーメントによりひび割れが発生し剛性低下が生じている箇所である。
- ・ 今回工認では非線形性を考慮しており、剛性低下の影響により、地震時の引張軸力が負担できなくなることから、常時の圧縮軸力が多く残留することが、差異が出ている原因であると考えられる。

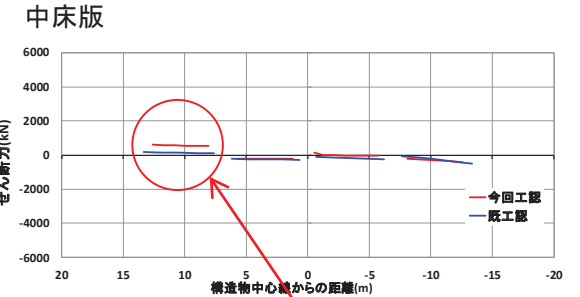
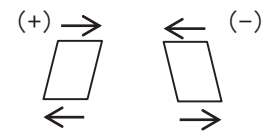
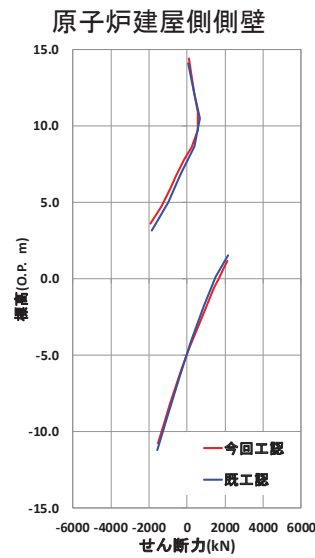
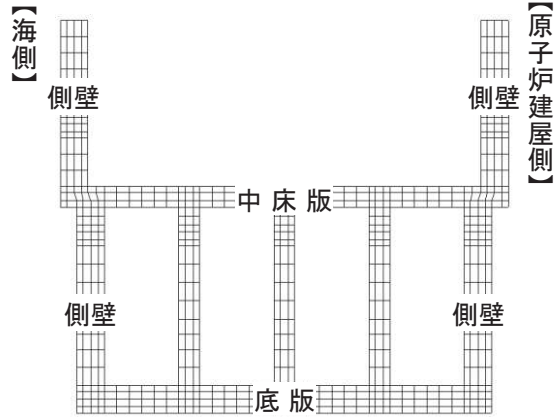
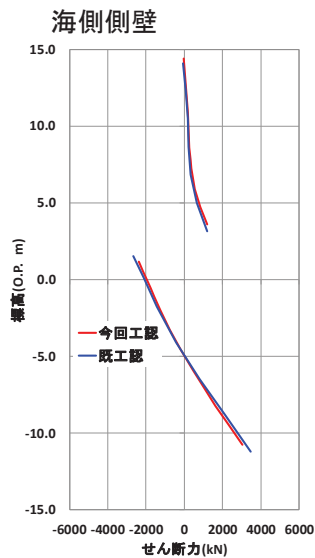


※：軸力は正側が引張、負側が圧縮を示す

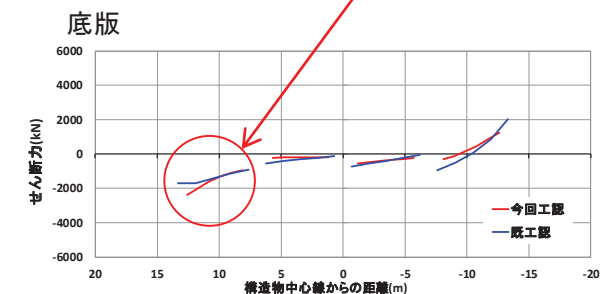


## 2. 既工認からの変更点 (8) 精緻化による効果(④せん断力比較)

- ・ 今回工認の三次元モデル(非線形ソリッド要素)及び既工認の三次元モデル(線形シェル要素)にp19に示す今回工認手法における地震時荷重を載荷させた場合におけるせん断力図を以下に示す。
- ・ 今回工認と既工認のせん断力は概ね同等となっているが、中床版及び底版の海側で差異が出ている。
- ・ 前頁で示した通り海側側壁に剛性低下の影響により軸力の差異が出ており、直交部材の軸力とせん断力の関係から、海側側壁と直交する中床版及び底版のせん断力に差異が出たものと考えられる。



直交する海側側壁の軸力が影響している

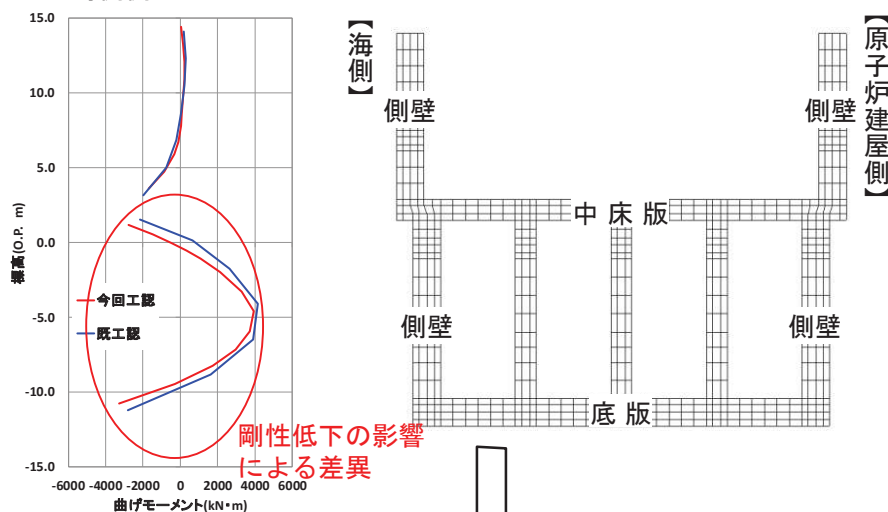


## 2. 既工認からの変更点

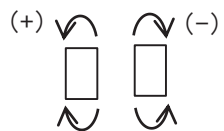
### (8) 精緻化による効果(⑤曲げモーメント比較)

- ・ 今回工認の三次元モデル(非線形ソリッド要素)及び既工認の三次元モデル(線形シェル要素)にp19に示す今回工認手法における地震時荷重を載荷させた場合における曲げモーメント図を以下に示す。
- ・ 今回工認と既工認の曲げモーメントについても、海側側壁や中床版の海側で差異が出ている。
- ・ 前頁までに示した通り、海側側壁下部における曲げモーメントによる曲げひび割れの発生により剛性が低下し、海側側壁下部の軸力や、中床版及び底版のせん断力に差異が出ている。
- ・ また、部材端部の曲げモーメントの差異は、既工認は剛域なしの線形シェルモデルであるが、今回工認はソリッド要素でモデル化したことにより接合部の剛域が考慮され、断面力算定スパンに差異が生じていることが原因と考えられる。
- ・ 以上のように、一部の要素が非線形化するような大加速度下においては、材料非線形による解析により部材の剛性低下に伴う力の配分の変化を表現することができ、精緻な評価が可能となる。

海側側壁



剛性低下の影響による差異

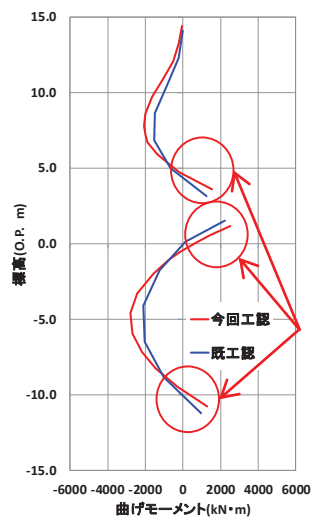


荷重

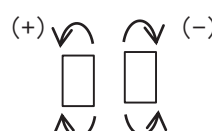
ひび割れが発生し剛性が低下する

曲げモーメントにより生じるひび割れイメージ図

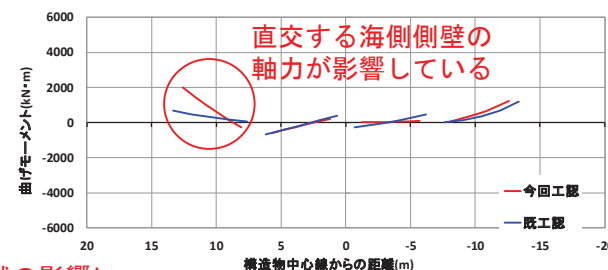
原子炉建屋側側壁



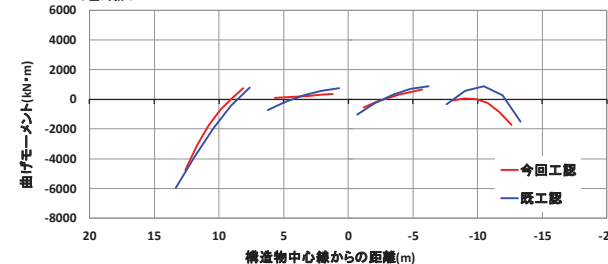
剛域の影響による差異



中床版



底版





## 目次

---

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
- 3. 評価方針**
  - (1) 評価方法に係る課題**
  - (2) 損傷モードの想定**
  - (3) 要求機能の設定**
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

### 3. 評価方針

#### (1) 評価方法に係る課題①

- 三次元静的材料非線形解析を採用するにあたり、二次元地震応答解析との評価方法の違いや非線形性の考慮に着目し、主な課題として、下表に示す項目を抽出し、検討を行った。検討の概要及び該当する説明箇所を合わせて表中に示す。

	主な課題	検討の概要	該当箇所
二次元地震応答解析	<b>【課題1】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>二次元地震応答解析により算定した地震時荷重は、海水ポンプ室の三次元構造を考慮した評価ができているか？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海水ポンプ室の周辺地盤は地盤改良することとしており、海水ポンプ室延長方向に周辺地盤の変化は無い。</li> <li>海水ポンプ室は、3エリアに分かれており、エリア毎に等価剛性モデルを作成して土圧と加速度を算定している。</li> <li>各エリア毎に延長方向に一樣の荷重として作用させることは、構造物の変形に伴う応力再配分を考慮した荷重よりも保守的であることを確認している。</li> </ul>	p33-35 補足検討1
	<b>【課題2】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>地震時荷重の選定時刻は、評価部材や照査項目に応じて適切に選定されているか？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>海水ポンプ室は、要求機能に応じて、部材毎に照査項目が異なることから、部材毎かつ損傷モード毎に評価が厳しくなる時刻を複数選定している。</li> <li>損傷モードとして、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊を想定し、それぞれの損傷モードに応じた時刻を選定している。</li> </ul>	p37-40
三次元静的材料非線形解析	<b>【課題3】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>三次元静的材料非線形解析に用いる解析コードは、三次元構造の応答を適切に評価することが可能か？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>解析コードCOM3は、東京大学コンクリート研究室で開発され、平面部材に対して十分検証された構成則を、三次元モデルに拡張したコードであり、三次元構造物の終局状態まで解析可能なコードである。</li> <li>構成則はコンクリート標準示方書2017の非線形有限要素解析による性能照査に規定されている。</li> <li>三次元構造物の載荷実験を再現解析した事例により、終局状態まで精度良く実験結果を再現できていることを確認した。</li> <li>再現解析のモデル化方法や解析条件が同様であることから、海水ポンプ室の評価においても、同様の精度が見込めることを確認した。</li> </ul>	5. 解析コードの適用性

### 3. 評価方針

#### (1) 評価方法に係る課題②

- 三次元静的材料非線形解析を採用するにあたり、二次元地震応答解析との評価方法の違いに着目し、主な課題として、下表に示す項目を抽出し、検討を行った。検討の概要及び該当する説明箇所を合わせて表中に示す。

	主な課題	検討の概要	該当箇所
耐震安全性 評価	<b>【課題4】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>許容限界は、要求機能に応じて適切に設定されているか？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材の要求機能に応じて、曲げ・軸力系の破壊及びせん断破壊に対し、既往の文献や一般的に許容されている値として、許容限界を設定している。</li> <li>面外変形時の曲げ・軸力系の破壊に対しては、新規制工認で実績のある層間変形角1/100(圧縮縁コンクリートひずみ1%に相当)、または鉄筋・コンクリートの概ね弾性のひずみ(主筋ひずみ1725<math>\mu</math>、コンクリートの圧縮ひずみ2000<math>\mu</math>)を許容限界として設定している。</li> <li>妻壁等の部材の面内せん断に伴う破壊に対しては、新規制工認で実績のある層間変形角(2/1000)を許容限界として設定している。</li> <li>面外せん断に対しては、新規制工認で実績のあるせん断耐力(棒部材式)を許容限界として設定している。</li> </ul>	6. 許容限界
	<b>【課題5】</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>耐震安全性評価に用いる安全係数は三次元静的材料非線形解析に見合う設定がされているか？</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全係数は、材料非線形解析による評価に対する各プロセス毎に評価手法に適する安全係数を設定するとともに、適用性の高いと考えられる基準類を参照して設定していることを確認した。</li> </ul>	7. 安全係数

### 3. 評価方針

#### (2) 損傷モードの想定

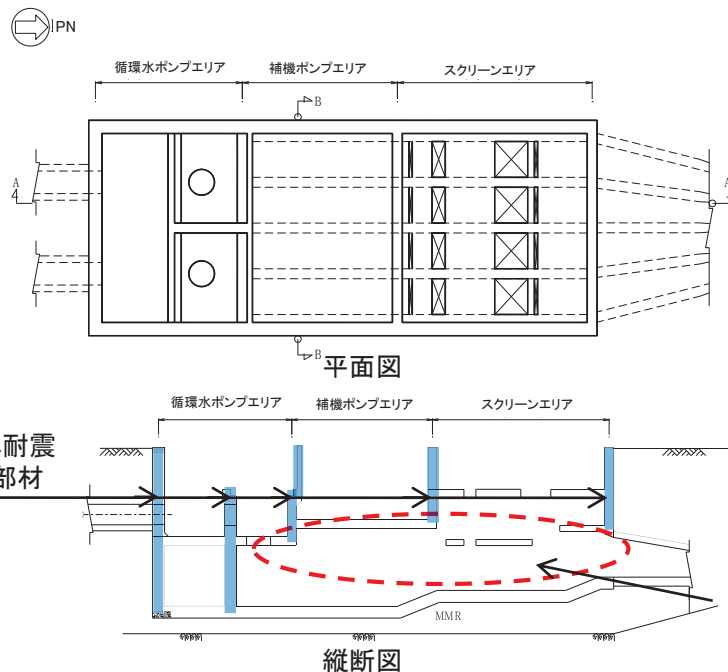
- 海水ポンプ室の構造的特徴及び想定される損傷モードを以下に示す。

##### 構造的特徴

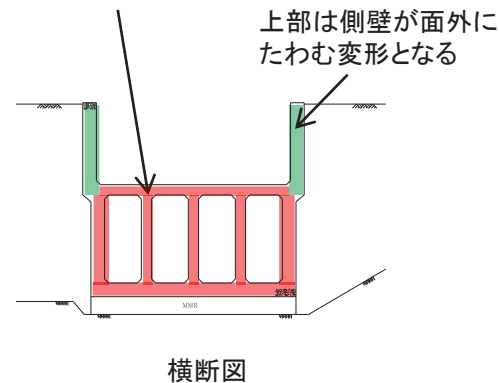
- 海水ポンプ室は、地下2階構造となっており、上部はスクリーンエリア、補機ポンプエリア、循環水ポンプエリアに分かれている。下部は水路となっており、スクリーンエリア及び補機ポンプエリアの下部は4連の、循環水ポンプエリアの下部は2連又は1連のカルバート構造となっている。
- 加振方向に平行に配置される面部材は耐震要素として機能するため、延長方向加振に対しては、側壁に加え、水路部の隔壁が耐震要素として機能する。一方、横断方向加振に対しては、妻壁と上部の隔壁等しか耐震要素として機能する面部材はないことから、**横断方向が弱軸方向となる。**
- 横断方向加振に対し、側壁や隔壁などの構造物延長方向に配置された部材は、部材の面外変形により抵抗する。一方、妻壁や隔壁などの構造物横断方向に配置された部材は、部材の面内変形により抵抗する。**海水ポンプ室の部材は、地震力に対し、面外変形により抵抗する部材と面内変形により抵抗する部材より構成される。**

##### 損傷モード

- 横断方向に地震時荷重が作用した場合、耐震要素として機能する面部材は、スクリーンエリアと補機ポンプエリアの下部には存在しない。したがって、横断方向加振の際、**海水ポンプ室の下部についてはカルバート構造のせん断変形が支配的な変形モードとなる。**また、**上部については、各エリアの側壁の-span中央部分が面外にたわむ変形となり、下部同様に面外荷重に対する変形が支配的となる。**

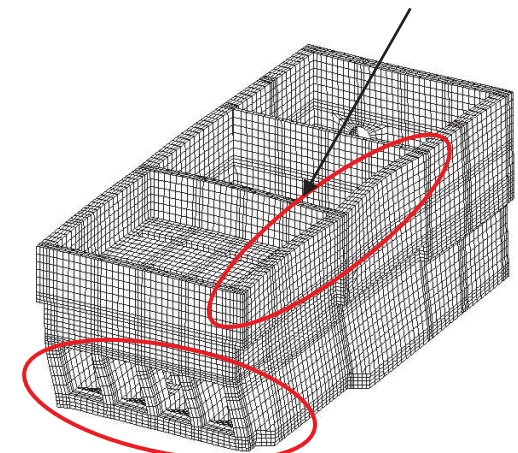


下部はカルバート構造のせん断変形が支配的となる



横断方向加振に対し耐震要素として機能する部材がないエリア

側壁の面外たわみ変形



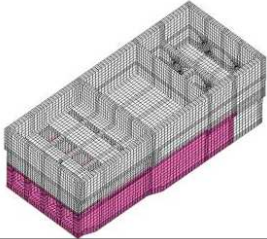
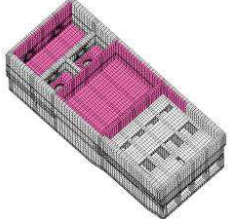
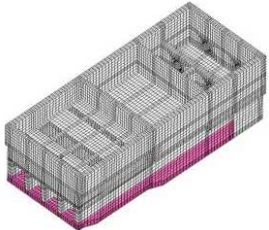
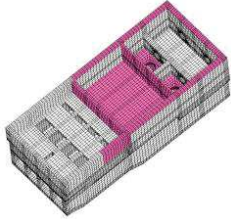
カルバート構造のせん断変形

変形図(イメージ)

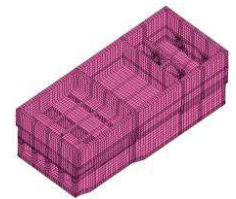
### 3. 評価方針

#### (3) 要求機能の設定

- 海水ポンプ室では部材ごとに要求機能が異なることから、それぞれの要求機能に着目し、耐震安全性評価を行う。
- 海水ポンプ室は、Sクラスの機器・配管等の間接支持構造物及び非常用取水設備であること等を考慮し、その要求機能については以下の通り設定する。

要求機能	要求機能の説明	対象部材（精査中）
①通水機能	非常用取水設備のうち、通水断面を構成する部材について、その崩壊により <u>通水断面を閉塞しない</u> こと。	海水の通水部分 (下部カルバート部) 
②支持機能	Sクラスの機器及び配管等を <u>安全に支持できる</u> こと。	Sクラス機器及び配管等の支持部分 (補機ポンプエリア隔壁, 側壁, 中床版, 循環水ポンプエリア中床版, 妻壁, スクリーンエリア側壁) 
③貯水機能	津波の引波時に、部材の損傷により著しい漏水がなく、海水を取水できない時間に <u>必要となる冷却用水を安全に貯留できる</u> こと。	津波引波時の海水貯水部分で、取水口敷高以下の部分 (下部カルバートのうちO.P.-5.3m以下の部分) 
④止水機能	以下の3つの観点に対し、部材からの漏水により、Sクラスの機器及び配管等の <u>安全機能を損なうことがないよう止水できる</u> こと。 (観点1) 津波の押波時における外郭防護 (観点2) 屋外タンク損傷時における内郭防護 (観点3) 循環水管単一破損時における内部溢水	(補機ポンプエリア隔壁, 地上部側壁, 中床版, 循環水ポンプエリア地上部側壁, 地上部妻壁, 中床版, 下部カルバート部妻壁, スクリーンエリア側壁) 

支持機能、貯水機能および止水機能が要求される部材についても、構造部材が終局状態に至らないことが前提となるため、通水機能に対する要求機能は構造物全体の要求機能でもある。



## 目次

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
  - (1) 三次元モデルの作成
  - (2) 常時解析
  - (3) 二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデルの作成
  - (4) 二次元地震応答解析
  - (5) 地震時荷重の算定
  - (6) 地震時荷重の抽出時刻
  - (7) 地震時解析(1方向載荷)
  - (8) 地震時解析(水平2方向載荷)
  - (9) 耐震安全性評価
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

### (1) 三次元モデルの作成①

- ・ 構造物を非線形ソリッド要素、地盤をばね要素でモデル化し、三次元モデルを作成する。

#### 構造物のモデル

8節点6面体と6節点5面体のソリッド要素を用いて立体的にモデル化する。モデル化にあたり大きな開口部は考慮する。

#### 材料非線形のモデル

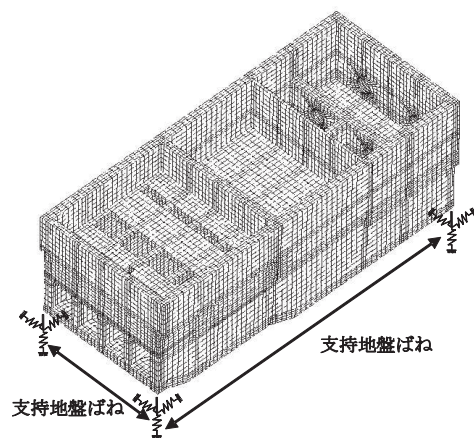
材料の物性値は、「コンクリート標準示方書2017 5章材料の設計値」に準拠する。コンクリートの圧縮領域および引張領域の構成則には、前川モデルを用いる。

#### 支持地盤のモデル

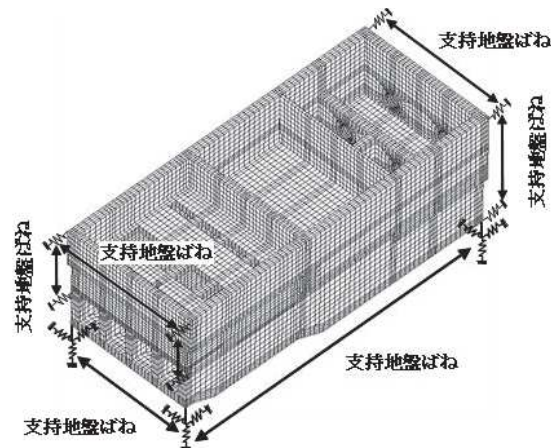
支持地盤は、弾性ばねでモデル化し、底面の水平2方向及び鉛直方向の線形ばねでモデル化する。

#### 妻壁の側方地盤のモデル

側方地盤は、弾性ばねでモデル化し、妻壁の法線方向に取り付ける。このばねは、1方向载荷の地震時解析の際に考慮し、2方向载荷の際は土圧を直接作用させる。

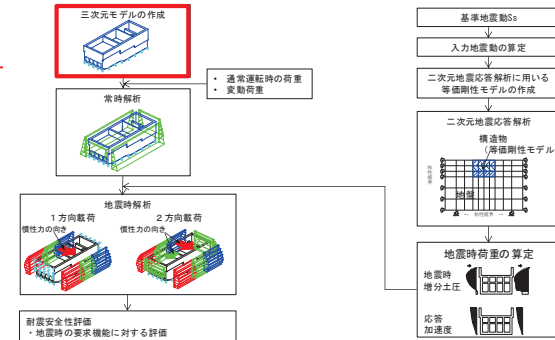


常時解析



地震時解析

### 耐震安全性評価フロー



## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

### (1) 三次元モデルの作成②

- 構造物のモデル化について、土木学会マニュアル2005に準拠し、部材厚方向に対し鉄筋付着有効領域 (RCゾーン)と無筋領域 (PLゾーン)に分割する。
- 要素分割の考え方の詳細については「補足説明3. モデル化方針」に示す。

#### 部材のモデル化

鉄筋が配置される要素をRCゾーンとし、そのRCゾーンに鉄筋比を与えることで鉄筋をモデル化する。鉄筋の影響が及ばない要素をPLゾーンでモデル化する。

#### 部材厚方向の分割

RCゾーンとPLゾーンに分割する。RCゾーンについては、主鉄筋のかぶりの2倍の厚さの範囲とする。PLゾーンは、RCゾーン以外の範囲とする。ただし、PLゾーンがRCゾーンと比較して広い場合は、適宜PLゾーンの分割を増やす。部材厚方向の分割方針の概略図を下图に示す。

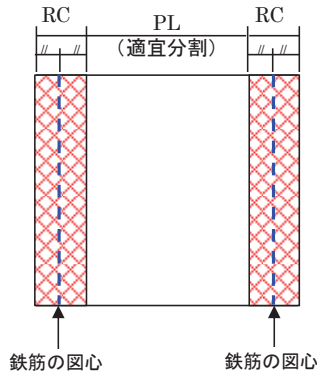


図 部材厚方向分割の概略図

$$l_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D_b \sqrt{\frac{f_y}{f_t}}$$

ここに、 $l_{max}$  : 鉄筋一本当たりの付着有効面積を正方形で考えた場合の一辺の長さ

$D_b$  : 鉄筋の直径

$f_y$  : 鉄筋の降伏強度

$f_t$  : コンクリートの引張強度

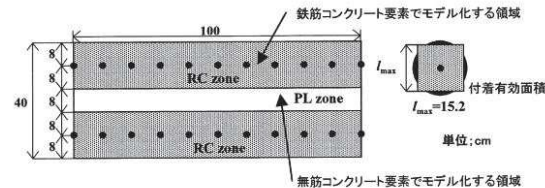
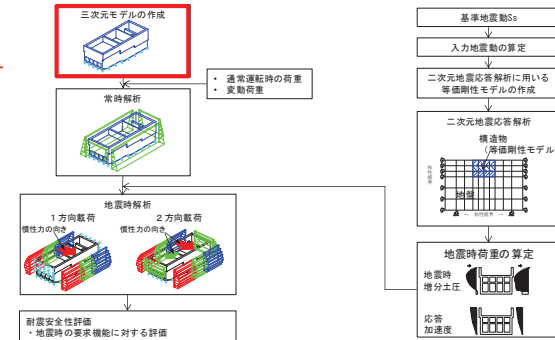


図 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の例  
(土木学会マニュアル2005より抜粋)

#### 耐震安全性評価フロー



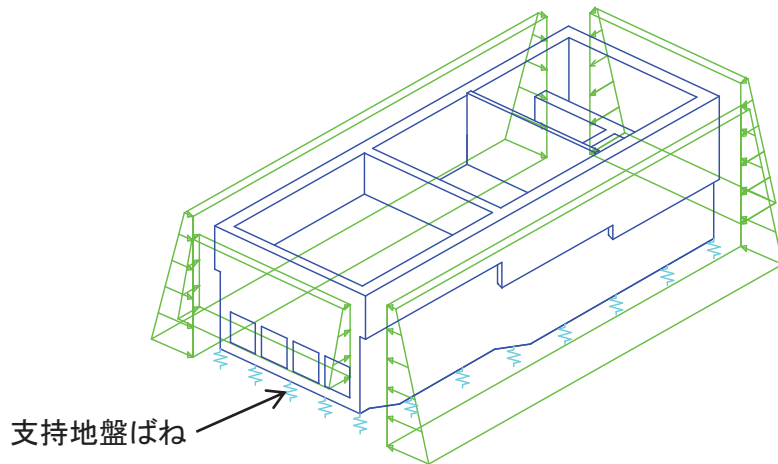


## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (2) 常時解析

- 三次元モデルに通常運転時の荷重及び変動荷重を载荷して常時の応力状態を再現する。
- 静止土圧は二次元地震応答解析における常時応力解析により設定し、分布荷重として側壁及び妻壁に载荷する。

### (1) 解析モデル

- 構造物を非線形ソリッド要素でモデル化し、支持地盤を地盤ばねでモデル化する。
- 底面の支持地盤ばねは、「道路橋示方書・同解説IV下部構造編」に基づきばねを設定する。



静止土圧载荷イメージ図

### (2) 荷重

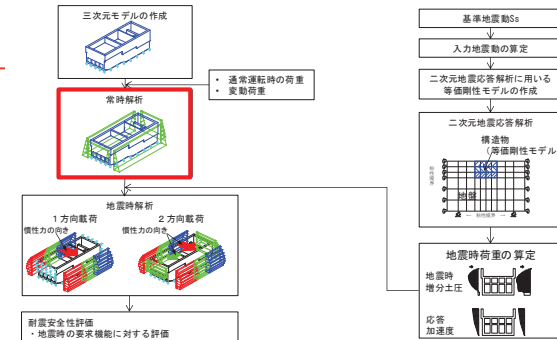
#### 通常運転時の荷重

- 躯体の自重、機器・配管荷重、静止土圧、外水圧及び内水圧を節点に与える。
- 静止土圧は二次元地震応答解析における常時応力解析により設定し、分布荷重として側壁及び妻壁に载荷する。
- 外水圧は地下水位に応じた静水圧として設定。
- 内水圧は水路部の海水の静水圧として設定。

#### 変動荷重

- 積雪荷重を考慮する。

### 耐震安全性評価フロー



# 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

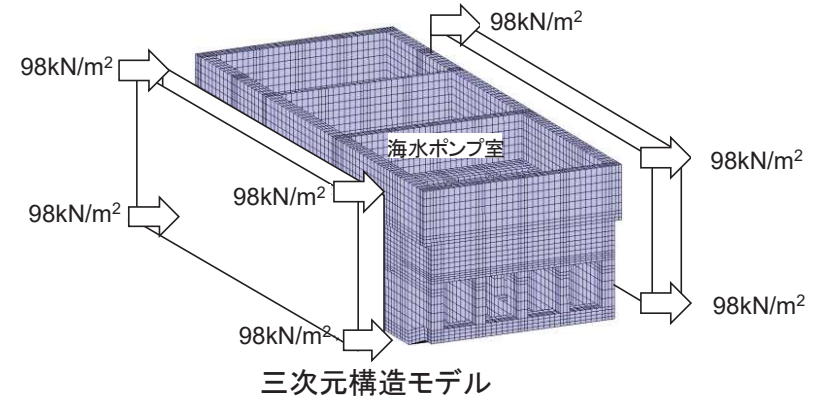
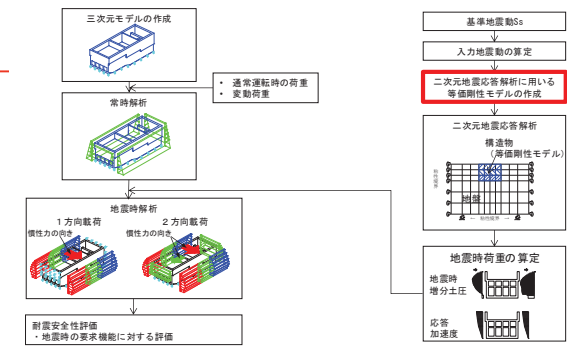
## (3) 二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデルの作成

### 【課題1】

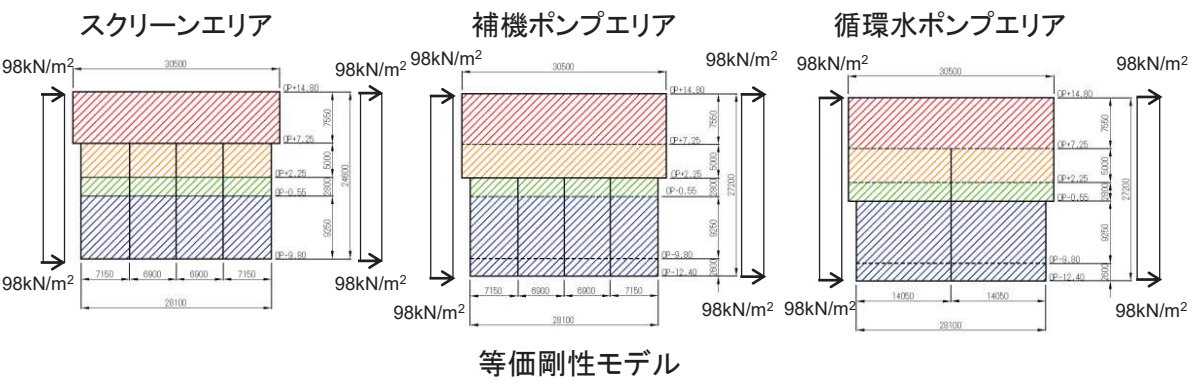
二次元地震応答解析により算定した地震時荷重は、海水ポンプ室の三次元構造を考慮した評価ができていますか？

- 地震時荷重の算定に用いる二次元地震応答解析の構造物モデルは、構造物と地盤の相互作用により発生する土圧を正しく評価するため、妻壁や隔壁の剛性を考慮し、実構造と等価な剛性を持つ二次元等価剛性モデルとする。
- 各エリアの構造の相違に起因する地震時荷重を正しく算定するため、エリアごとに等価剛性モデルを作成する。
- 三次元構造モデルに単位荷重 (98kN/m<sup>2</sup>) を作用させた際のエリアごとの奥行き方向の平均的な変位と、等価剛性モデルに同じ単位荷重を作用させた際の変位が等しくなるように剛性を設定する。
- 等価剛性モデルは、地震時荷重を保守的に評価するよう線形のモデルとする。

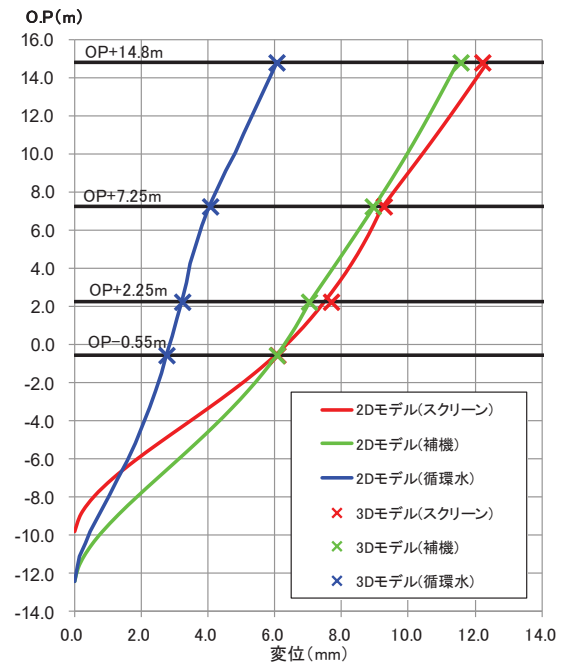
### 耐震安全性評価フロー



剛性調整



※: 等価剛性モデルの色分けは、材料物性の違いを示している。



### 剛性の調整方法

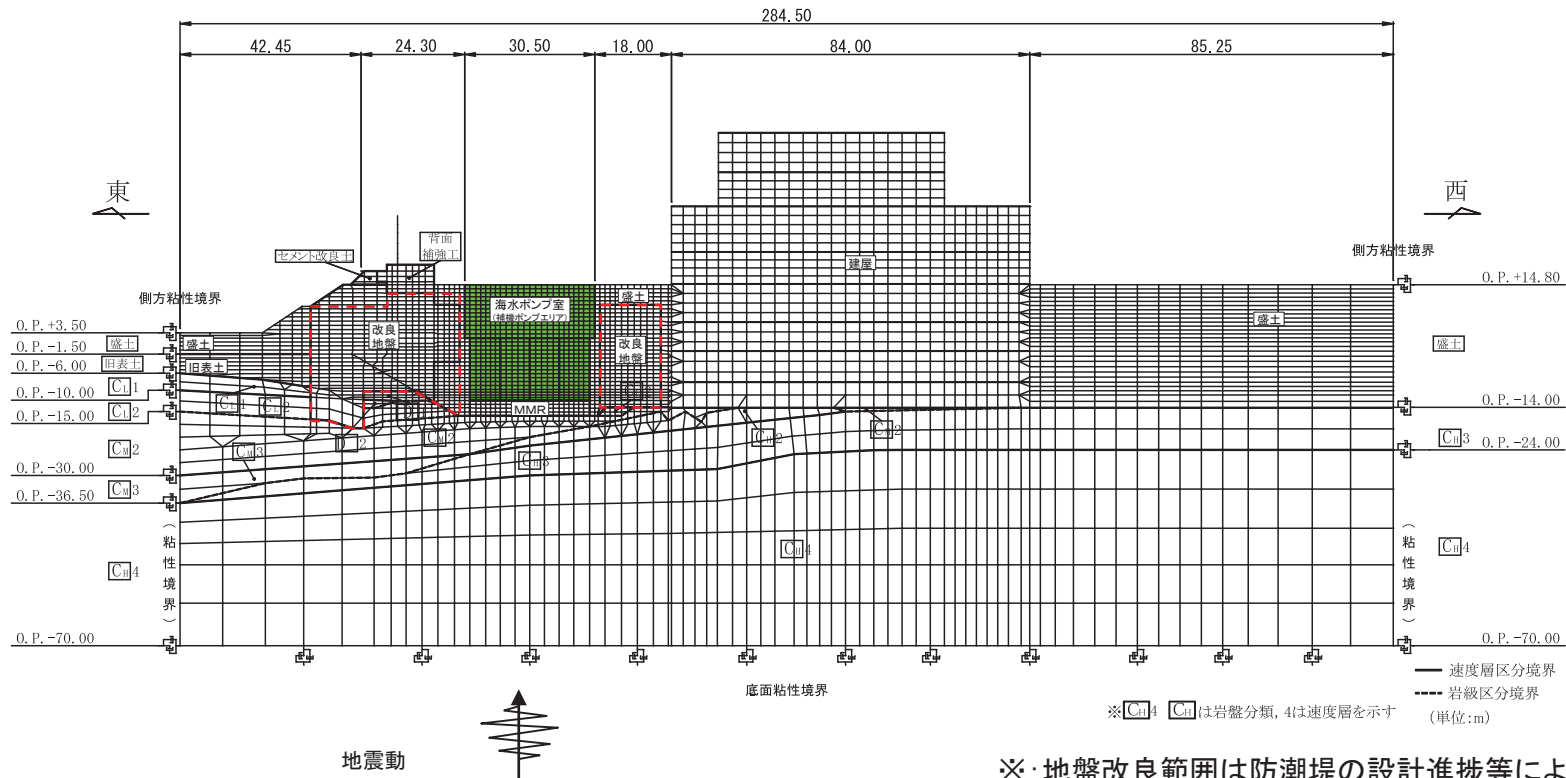
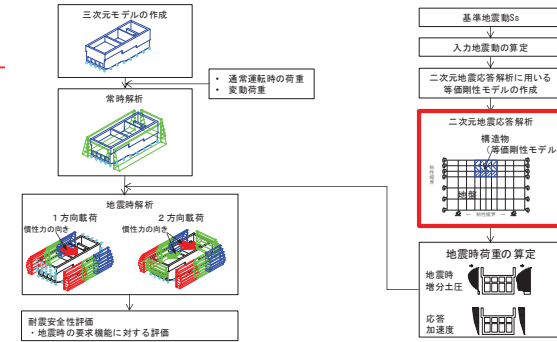
$$E = E_c \times \alpha \times \beta$$

- E: 等価剛性モデルの弾性係数
- E<sub>c</sub>: コンクリートの弾性係数
- α: 海水ポンプ室の奥行き長さに対する部材の奥行き長さの比率 = L<sub>e</sub>/L
- L<sub>e</sub>: 部材の奥行き長さ
- L: 海水ポンプ室の奥行き長さ
- β: 変位を合わせるための弾性係数の補正係数

## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (4) 二次元地震応答解析

- 二次元地震応答解析は、地盤の非線形性を考慮した地盤-構造物連成の時刻歴非線形解析により行う。
- 等価剛性の構造物モデルは、線形モデルとしている。
- 盛土、旧表土、D級岩盤、セメント改良土及び改良地盤については、非線形性を考慮する。
- 防潮堤下部、海水ポンプ室東側及び西側は地盤改良する予定であり、延長方向で地盤条件は変わらない。
- 海水ポンプ室と原子炉建屋の間には剛性の大きい地盤改良体が存在しており、地盤改良の効果を適切に評価するため、原子炉建屋を線形でモデル化する。原子炉建屋のFEMモデルは、「原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術<技術資料>」(土木学会原子力土木委員会, 2009)を参考に作成する。
- 機器・配管荷重は、はり要素や節点の付加重量として考慮しており、機器・配管の設計に用いる床応答は、当該節点の応答を用いる。床応答への影響検討について、「補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討」に示す。

### 耐震安全性評価フロー

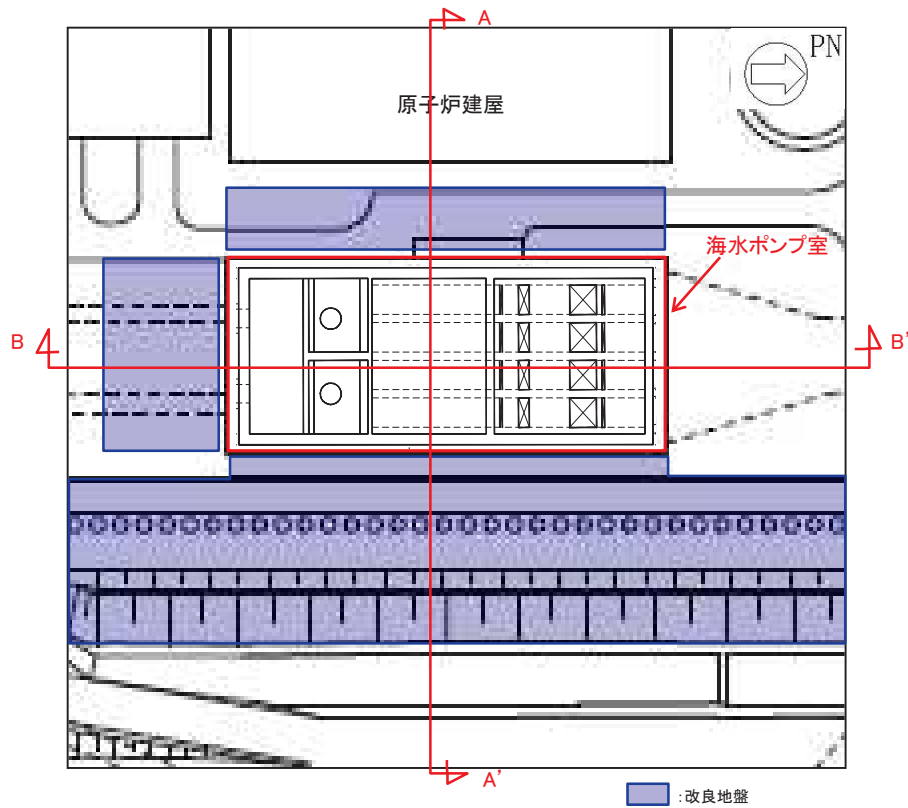


※: 地盤改良範囲は防潮堤の設計進捗等により変更する可能性がある。

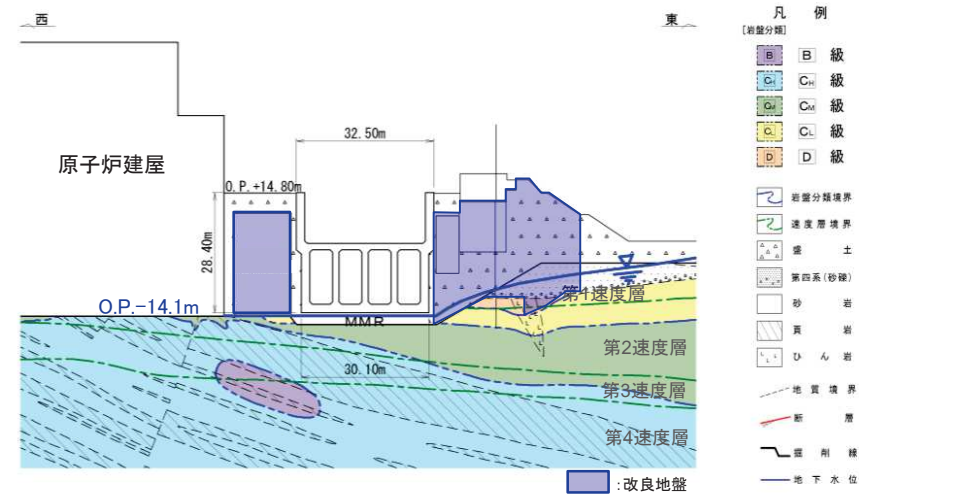
二次元地震応答解析(解析モデル図:補機ポンプエリア)

## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (参考) 海水ポンプ室の地盤改良範囲

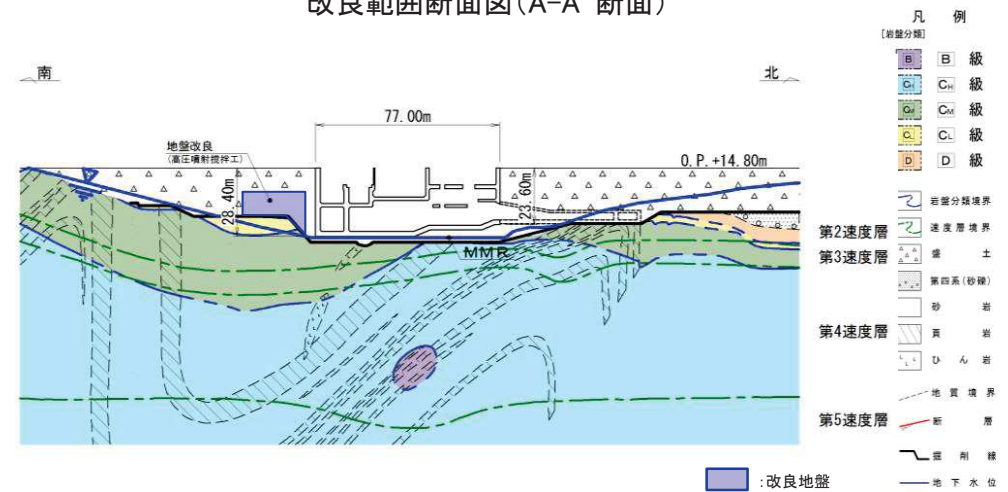
- 海水ポンプ室周辺の地盤改良範囲を以下に示す。



改良範囲平面図



改良範囲断面図(A-A' 断面)



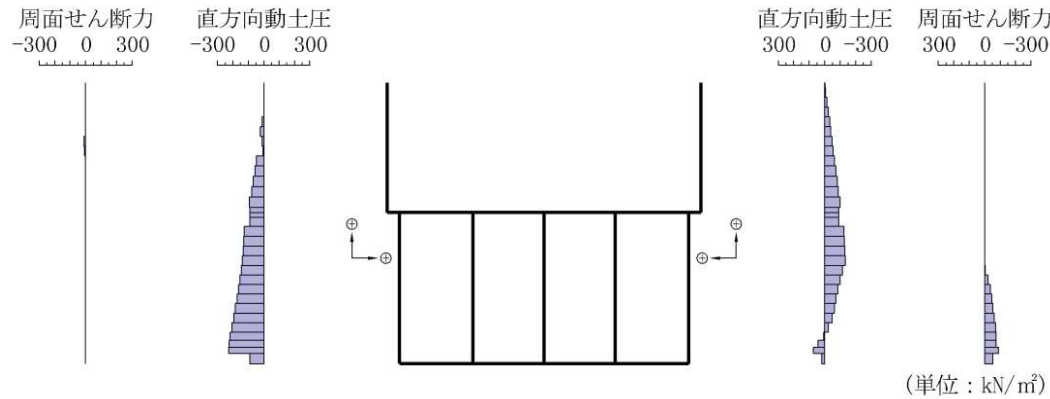
改良範囲断面図(B-B' 断面)

※: 地盤改良範囲は設計進捗により変更する可能性がある。

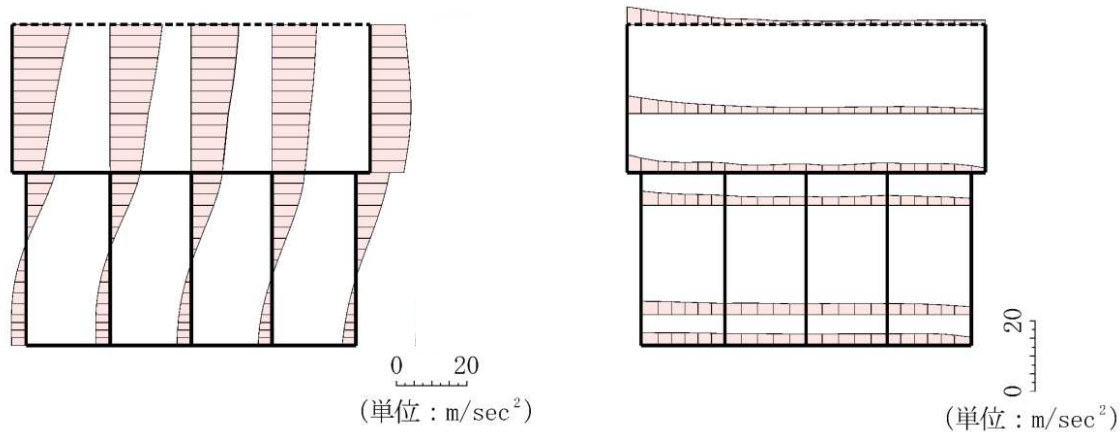
## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

### (5) 地震時荷重の算定

- 二次元地震応答解析において要求機能に対応する着目部位の変位や断面力が大きくなり、照査上厳しくなる時刻を選定し、地震時増分土圧と応答加速度を算定する。
- 慣性力は、応答加速度を基に応答震度を算定する。

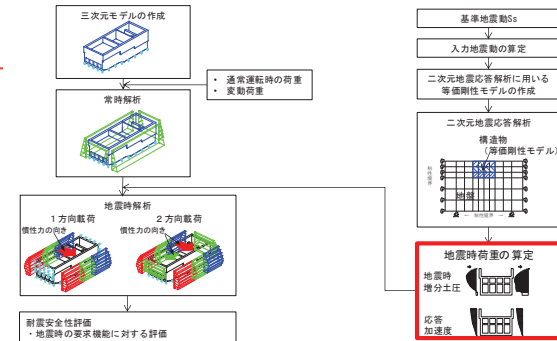


地震時増分土圧分布(例)



応答加速度分布(例)

### 耐震安全性評価フロー



## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (6) 地震時荷重の抽出時刻①

### 【課題2】

地震時荷重の選定時刻は、評価部材や照査項目に応じて適切に選定されているか？

- 地震時荷重の抽出は、要求機能を有する各部位の想定される損傷モード(曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊)に応じた時刻の荷重を抽出する。
- 要求機能を有する部位は、「3. (3)要求機能の設定」に示す通り、各エリアの下部カルバート部、側壁、隔壁・妻壁がある。
- 下部カルバート部については、曲げ・軸力系の破壊に対する荷重として、下部カルバート部の層間変位が最大となる時刻の荷重を抽出する。せん断破壊に対する荷重として、総水平荷重が最大となる時刻の荷重を抽出する。

### 耐震安全性評価フロー

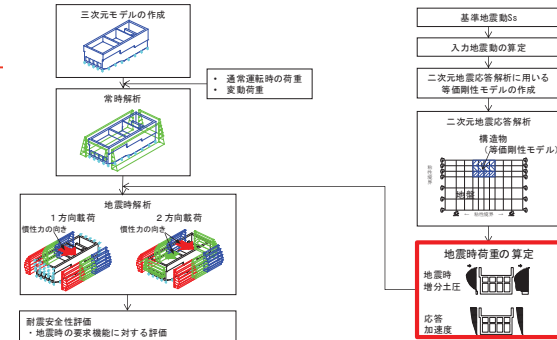
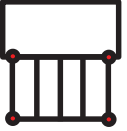
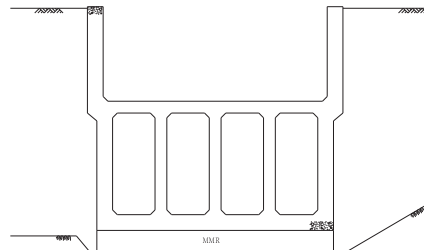


表 下部カルバート部に対する地震時荷重抽出時刻

着目部位	損傷モード	荷重抽出時刻	スクリーン エリア	補機ポンプ エリア	循環水ポンプ エリア
 下部カルバート部	曲げ・軸力系の破壊	下部カルバートの頂版・底版間の層間変位が最大となる時刻	t <sub>1</sub>	※1	※1
			※2	t <sub>2</sub>	※2
			※3	※3	t <sub>3</sub>
	せん断破壊	総水平荷重が最大となる時刻	t <sub>4</sub>	※1	※1
			※2	t <sub>5</sub>	※2
			※3	※3	t <sub>6</sub>



海水ポンプ室横断面図

※1:スクリーンエリアと同時刻  
 ※2:補機ポンプエリアと同時刻  
 ※3:循環水ポンプエリアと同時刻

## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (6) 地震時荷重の抽出時刻②

- 側壁については、曲げ・軸力系の破壊に対する荷重として、側壁の転倒モーメントが最大となる時刻の荷重を抽出する。変位を指標としないのは、耐震壁として考慮される隔壁等の影響を除くためである。
- せん断破壊に対する荷重として、側壁の水平荷重が最大となる時刻の荷重を抽出する。
- また、「3. (2) 損傷モードの想定」で示した側壁の面外たわみ変形に対する時刻として、拘束の小さい側壁上部の荷重が最大となる時刻の荷重を抽出する。

### 耐震安全性評価フロー

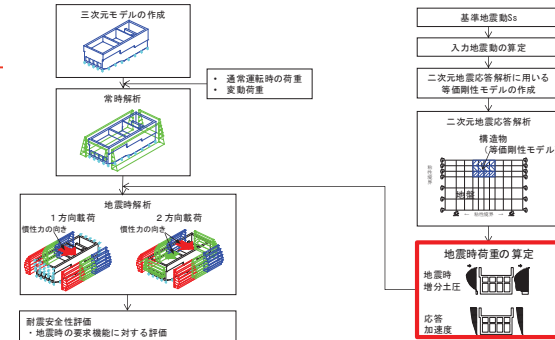


表 側壁に対する地震時荷重抽出時刻

着目部位	損傷モード	荷重抽出時刻	スクリーン エリア	補機ポンプ エリア	循環水ポンプ エリア
	曲げ・軸力系の 破壊	側壁部材の転倒モーメントが最大となる時刻	左壁: t <sub>7</sub> 右壁: t <sub>8</sub>	※1	※1
			※2	左壁: t <sub>9</sub> 右壁: t <sub>10</sub>	※2
			※3	※3	左壁: t <sub>11</sub> 右壁: t <sub>12</sub>
	せん断破壊	側壁の水平荷重が最大となる時刻	左壁: t <sub>13</sub> 右壁: t <sub>14</sub>	※1	※1
			※2	左壁: t <sub>15</sub> 右壁: t <sub>16</sub>	※2
			※3	※3	左壁: t <sub>17</sub> 右壁: t <sub>18</sub>
	側壁の面外たわみ 変形が支配的な挙 動による破壊	拘束の小さい側壁上部の荷重が最大となる時刻	左壁: t <sub>19</sub> 右壁: t <sub>20</sub>	※1	※1
			※2	左壁: t <sub>21</sub> 右壁: t <sub>22</sub>	※2
			※3	※3	左壁: t <sub>23</sub> 右壁: t <sub>24</sub>

※1: スクリーンエリアと同時刻 ※2: 補機ポンプエリアと同時刻 ※3: 循環水ポンプエリアと同時刻

## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (6) 地震時荷重の抽出時刻③

- 隔壁・妻壁については、主として面内せん断破壊が想定されることから、面内せん断変形が最大となる時刻として、面部材の層間変位が最大となる時刻の荷重を抽出する。

### 耐震安全性評価フロー

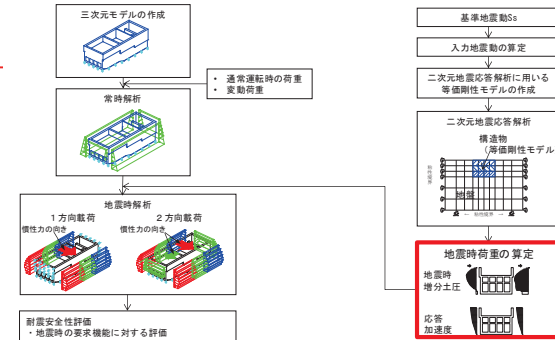
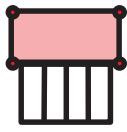


表 隔壁・妻壁に対する地震時荷重抽出時刻

着目部位	損傷モード	荷重抽出時刻	スクリーン エリア	補機ポンプ エリア	循環水ポンプ エリア
隔壁・妻壁 	せん断破壊 (面内)	面部材の層間変位が最大となる時刻	t <sub>25</sub>	※1	※1
			※2	t <sub>26</sub>	※2
			※3	※3	t <sub>27</sub>

- ※1: スクリーンエリアと同時刻
- ※2: 補機ポンプエリアと同時刻
- ※3: 循環水ポンプエリアと同時刻



## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (6) 地震時荷重の抽出時刻④

- 地震時荷重は、要求機能を有する部位の損傷モードに応じて、各エリアごとに時刻を選定し抽出することとしているが、各エリアの選定時刻の差がほぼ同時刻(前後0.1秒以内)の場合については、各エリアで選定された時刻の荷重分布を確認し、分布形状が大きく変わらないことを確認した上で、各エリアの荷重を組み合わせることにより、各時刻に対する個別評価を代表させることとする。
- 荷重の組み合わせ方を、下部カルバート部の曲げ・軸力系の破壊に対する荷重抽出時刻を例に示す。
- スクリーンエリアの時刻 $t_1$ 、補機ポンプエリアの時刻 $t_2$ 及び循環水ポンプエリアの時刻 $t_3$ の差が前後0.1秒以内である場合は、スクリーンエリアには $t_1$ の荷重を、補機ポンプエリアには $t_2$ の荷重を、循環水ポンプエリアには $t_3$ の荷重をそれぞれ載荷させ評価を行う。
- また、荷重が類似している場合などは、時刻が大きく異なる場合でも包絡させた荷重を用いる場合がある。

### 耐震安全性評価フロー

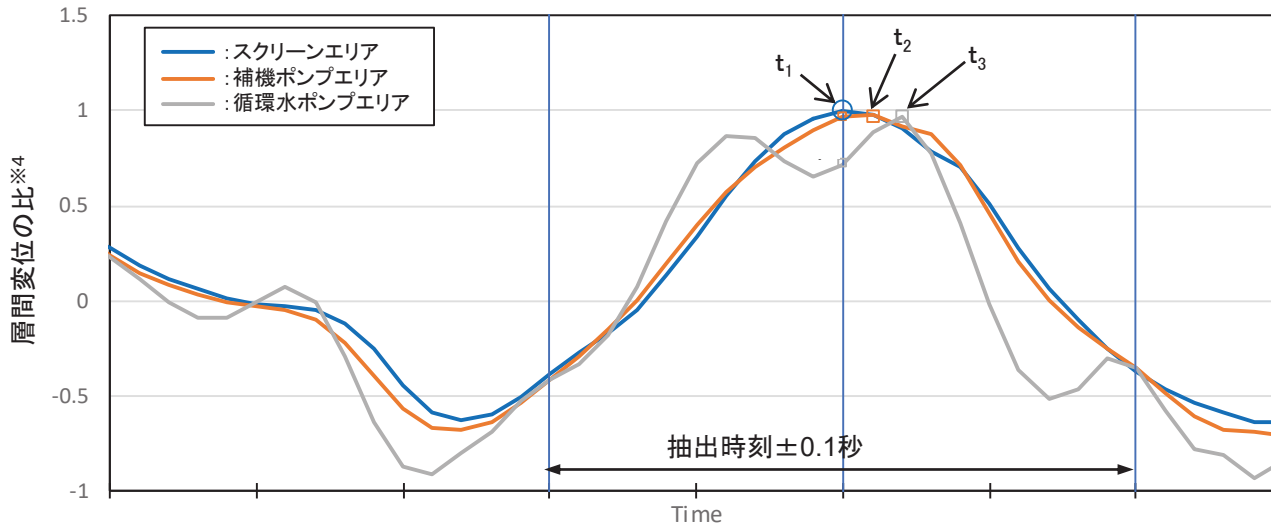
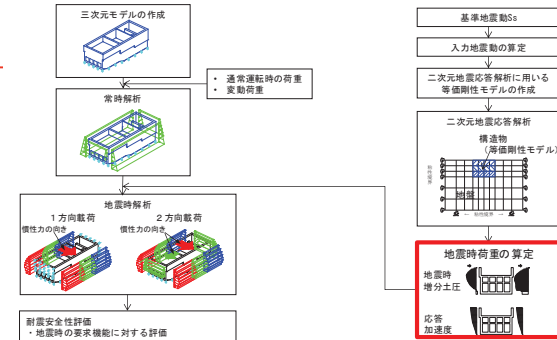


図 組み合わせ荷重となる時刻のイメージ(スクリーンエリア $t_1$ に着目した場合)

着目部位	荷重抽出時刻		
	スクリーン エリア	補機ポンプ エリア	循環水ポンプ エリア
下部カルバート部 (曲げ・軸力系の破壊)	$t_1$	※1	※1
	※2	$t_2$	※2
	※3	※3	$t_3$



$t_1$ ,  $t_2$ 及び $t_3$ がほぼ同時刻の場合、組み合わせて代表させる。

着目部位	荷重抽出時刻		
	スクリーン エリア	補機ポンプ エリア	循環水ポンプ エリア
下部カルバート部 (曲げ・軸力系の破壊)	$t_1$	$t_2$	$t_3$

- ※1:スクリーンエリアと同時刻
- ※2:補機ポンプエリアと同時刻
- ※3:循環水ポンプエリアと同時刻

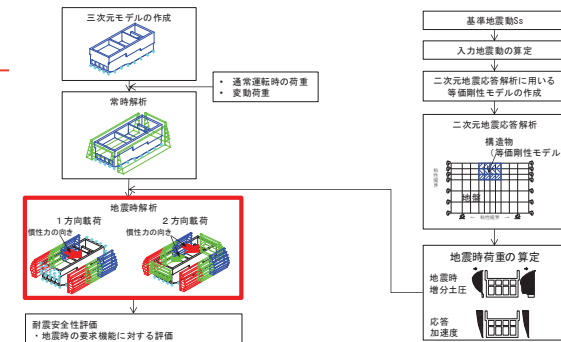
※4:最大層間変位と各時刻の層間変位の比(最大層間変位のとき1となる)。

## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

### (7) 地震時解析(1方向载荷)①

- 二次元地震応答解析において「4. (6)地震時荷重の抽出時刻」で選定した時刻の慣性力及び地震時増分土圧等を地震時荷重として三次元静的材料非線形モデルに载荷する。
- 慣性力及び地震時増分土圧は、エリアごとに奥行き方向に一様な荷重として作用させる。荷重载荷方法については、補足検討1. 参照。
- 底面の支持地盤ばねは「田治見のアドミッタンス理論」に基づき設定し、妻壁の法線方向に取り付ける側方地盤ばねは「道路橋示方書・同解説V耐震設計編」に基づき設定する。
- 照査値が最も厳しくなる地震動に対しては、地盤剛性等の不確かさを考慮した、設計用荷重を载荷し、評価を行う。

#### 耐震安全性評価フロー



#### 地震時荷重

##### 慣性力

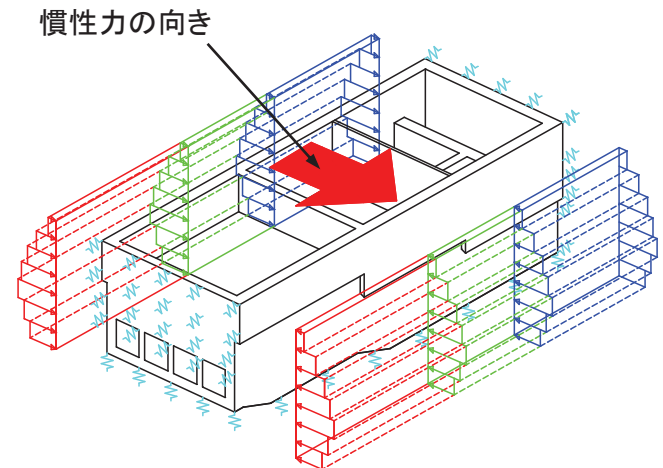
躯体及び機器・配管類等の慣性力を考慮する。二次元地震応答解析により求めた応答震度(水平震度、鉛直震度)より慣性力を算定する。竜巻防護ネットの荷重は接続部の反力として作用させる。周辺地盤等の物性のばらつきを考慮した海水ポンプ室の床応答に対し、竜巻防護ネットの地震応答解析を行い、算定された最大反力を海水ポンプ室の設計用荷重としている。

##### 地震時増分土圧及び動水圧

二次元地震応答解析により求めた地震時増分土圧(直土圧、周面せん断力)を作用させる。海水ポンプ室には地下水位低下設備が配置されており、構造物に水圧は作用しない。周囲の地下水の影響は地震時増分土圧に含めて考慮する。

##### 内水圧

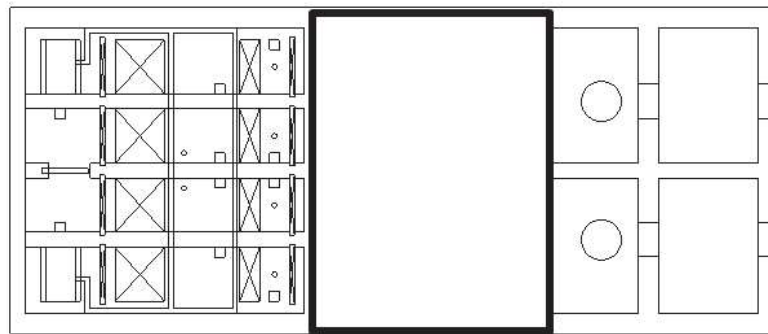
内水の動水圧は、自由水面の無い閉水路部分については水の重量に応答震度を乗じた付加荷重として考慮し、自由水面のある開水路部分については応答震度をを用いてWestergaard式から算定する。



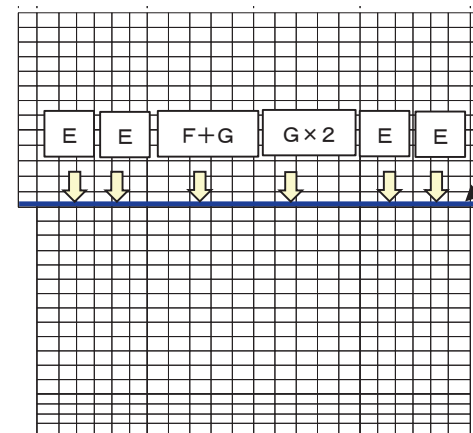
地震時荷重(1方向)载荷イメージ

## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (7) 地震時解析(1方向载荷)②

- 既設の機器・配管等の考慮方法を示す。
- 機器・配管の質量を地震応答解析モデルにはり要素の付加質量として反映し、地震応答解析を行う。
- 地震応答解析により算定した応答震度(水平震度, 鉛直震度)に機器の質量を乗じたものを、機器の慣性力とし、三次元構造解析モデルに節点荷重として作用させる。
- 配管荷重については、各エリアのスラブに一様に分布荷重として作用させており、実際の配管質量に対し十分に余裕を持った設計としている。

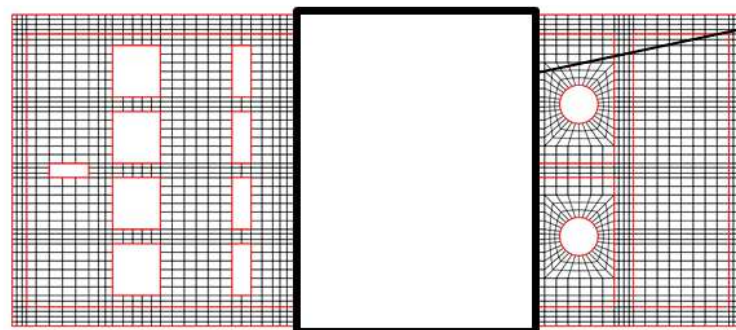


機器配置図

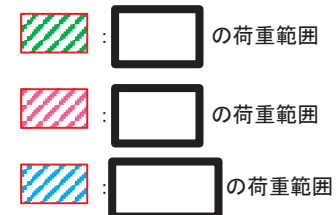


機器の質量をはり要素の付加質量として考慮

地震応答解析モデル  
(補機ポンプエリアの躯体はり要素図)



慣性力を三次元構造解析モデルの荷重範囲の節点に作用



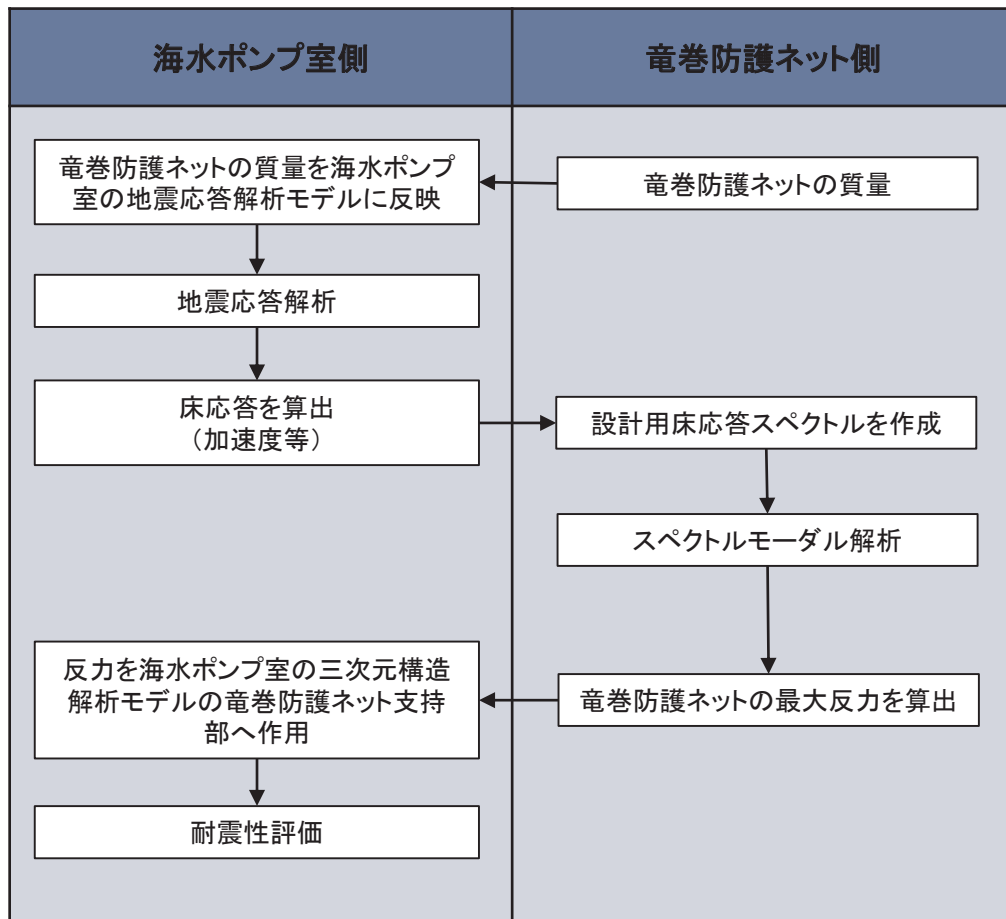
三次元構造解析モデル図

例 補機ポンプエリアに設置された機器の考慮方法

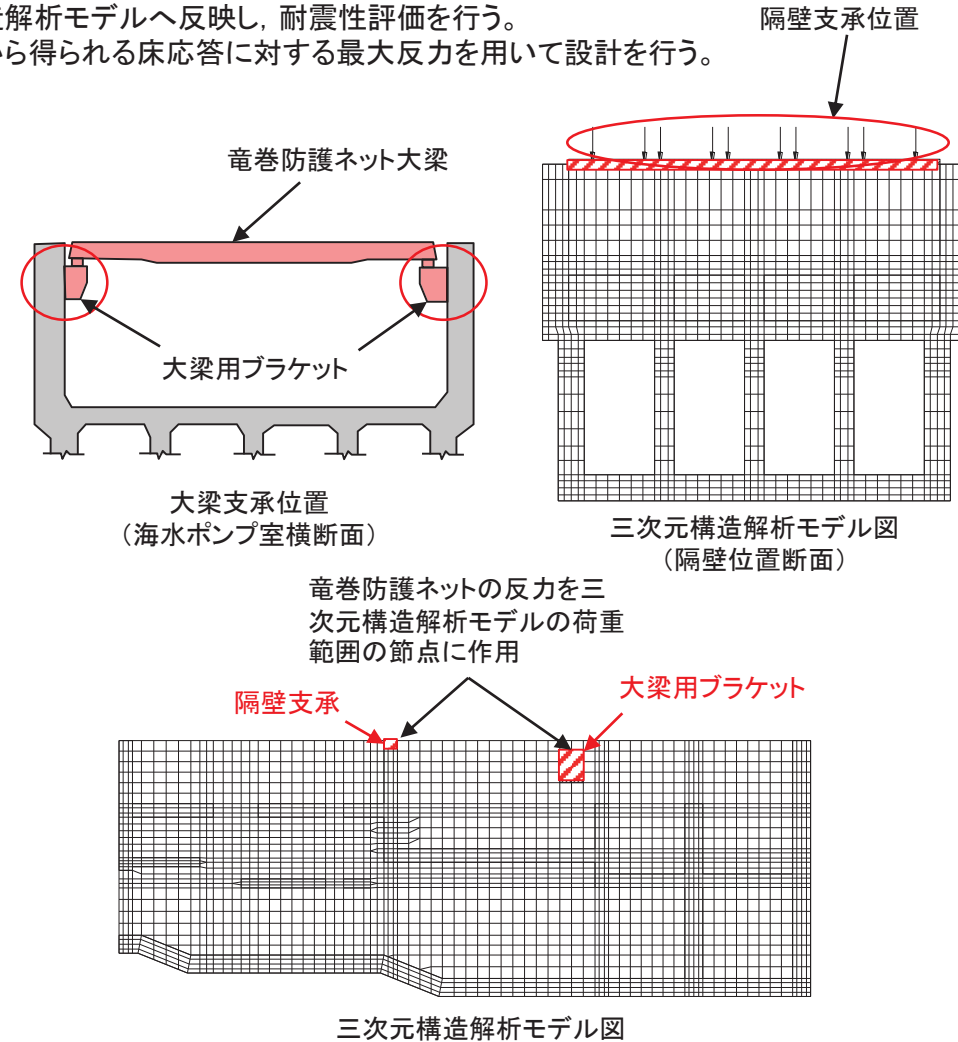
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (7) 地震時解析(1方向载荷)③

- 新たに設置する竜巻防護ネットの評価手順を示す。
- 竜巻防護ネットの質量は、節点の付加質量として地震応答解析モデルに反映させる。
- 地震応答解析により算出された床応答により、設計用床応答スペクトルを作成し竜巻防護ネットの設計を行う。
- 竜巻防護ネットの設計により算出された最大反力を海水ポンプ室の三次元構造解析モデルへ反映し、耐震性評価を行う。
- 竜巻防護ネットの荷重は、地盤の剛性等のばらつきを考慮した地震応答解析から得られる床応答に対する最大反力を用いて設計を行う。
- 竜巻防護ネットの反力を入力した照査結果は、工認段階で示す。



竜巻防護ネットの荷重を考慮した耐震性評価フロー

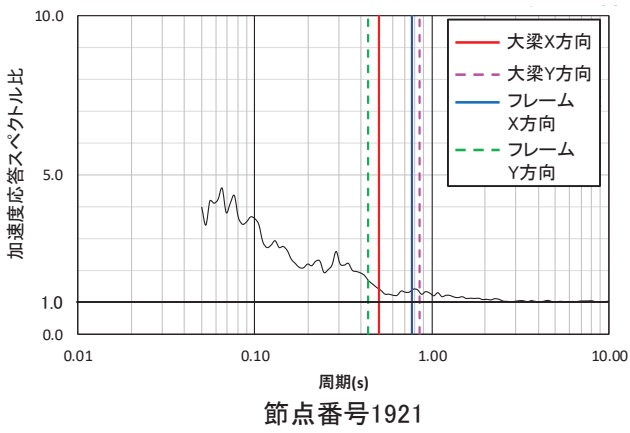
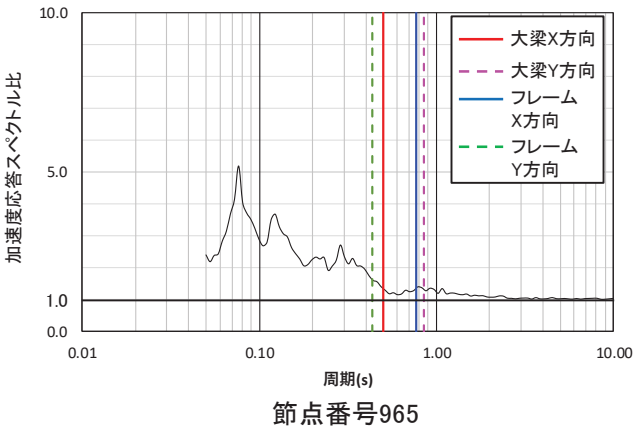


※: 竜巻防護ネットの形状、場所は概略図であり、工認段階で変わる可能性がある。

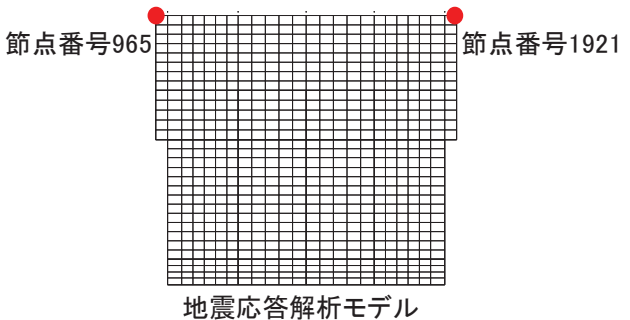
## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (7) 地震時解析(1方向载荷)④

### 動的相互作用の影響の確認

- 竜巻防護ネットは補機ポンプエリア南側の東西側壁に大梁用ブラケットをそれぞれ設け、その間を渡す形で大梁を設置する。その上部にネット付きのフレームを設置し、大梁と補機ポンプエリア北側隔壁で支持する構造となっている。
- 動的相互作用の影響を確認するため、海水ポンプ室の入力地震動に対する加速度応答スペクトル比と竜巻防護ネットの主要部材である大梁及びフレームの固有周期(X方向及びY方向の1次周期)を以下に示す。大梁用ブラケットが設置される、側壁上部の節点のスペクトル比を代表として示す。
- 海水ポンプ室の増幅周期と竜巻防護ネットの主要部材である大梁及びフレームの固有周期は異なっており、双方の応答が互いに影響を与えるような共振等は考えられない。
- また、竜巻防護ネットの重量は海水ポンプ室の1%未満であり、竜巻防護ネットの振動が海水ポンプ室の振動へ及ぼす影響は小さい。
- 以上のことから、海水ポンプ室と竜巻防護ネットの連成を考慮する必要はなく、海水ポンプ室から得られる床応答に対する竜巻防護ネットの最大反力を用いた設計は適切である。

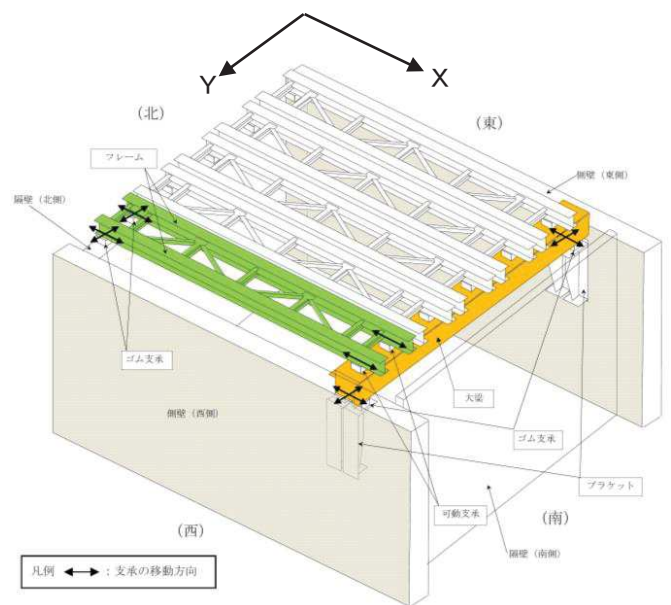


海水ポンプ室の加速度応答スペクトル比  
(大梁及びフレームの1次周期との比較)



海水ポンプ室及び竜巻防護ネットの重量

	重量(t)
海水ポンプ室	約80,000
竜巻防護ネット	約500



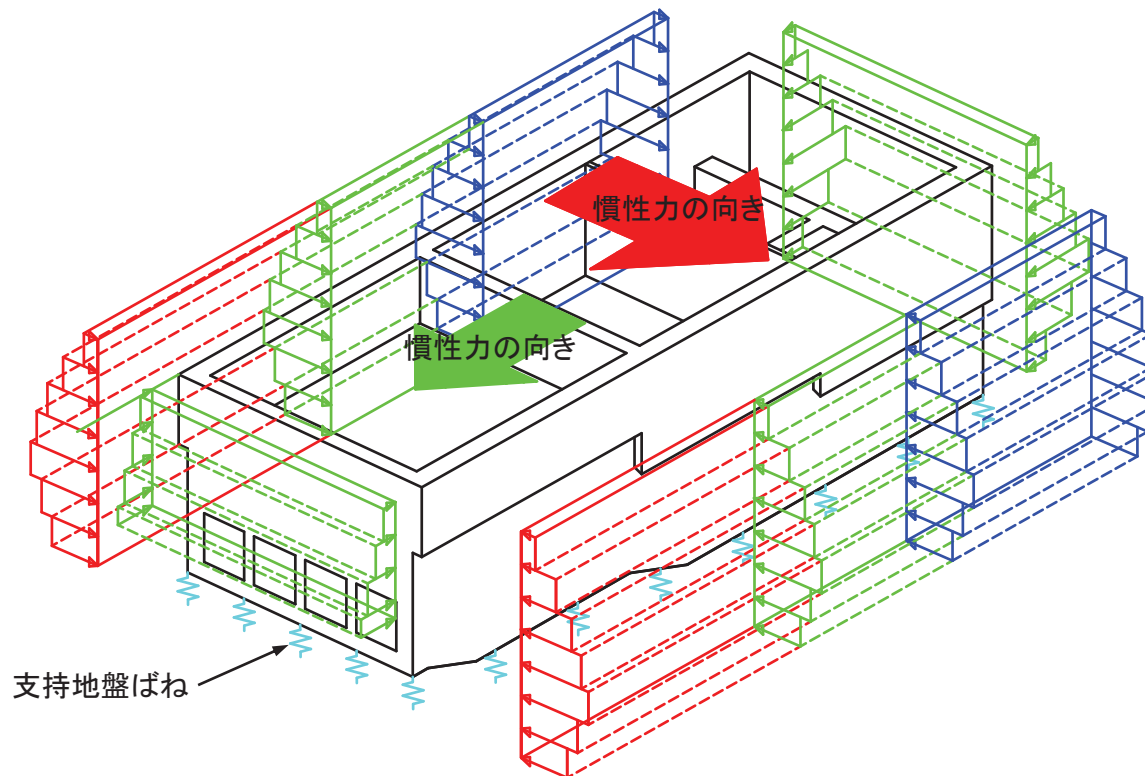
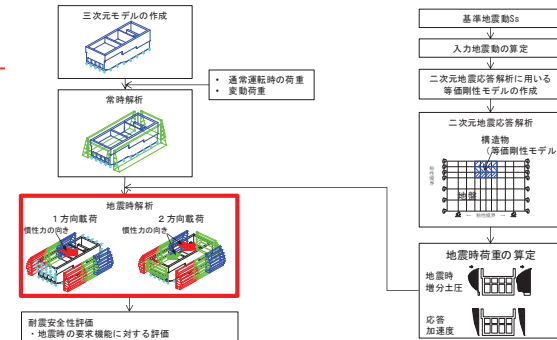
竜巻防護ネットの概要図

## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

### (8) 地震時解析(水平2方向载荷)

- 水平2方向载荷に対する検討として、地震時解析(1方向载荷)に、縦断方向の地震時荷重を同時に载荷する。
- 縦断方向の土圧は妻壁と地盤の相互作用により発生するが、妻壁の挙動は構造物全体の挙動とは異なり、部材としての応答となるため、等価剛性とはせず鉄筋コンクリート部材の剛性を考慮する。
- 縦断方向の地震時荷重は、水平2方向载荷の影響が大きい部材のうち、1方向载荷時の照査値が最も厳しい部材・時刻に対し、同時刻の縦断方向の地震時荷重を、位相を変えた地震動により算出して用いる。
- 地盤ばねは、底面の支持地盤ばねのみ設定し、設定方法は、「4. (7)地震時解析(1方向载荷)」と同様である。

#### 耐震安全性評価フロー



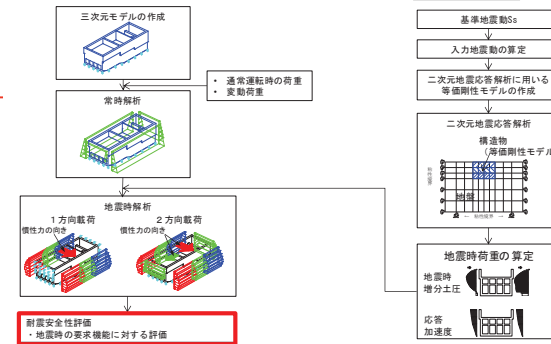
地震時荷重(2方向)载荷イメージ

## 4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

### (9) 耐震安全性評価

- 三次元静的材料非線形解析で既工認に比べ新規性の高い点は、変形に基づく指標を用いて耐震安全性を評価する点であり、地震時荷重に対し、既工認で実績のある層間変形角、せん断力の他、概ね弾性の許容限界としてコンクリートの圧縮ひずみと主筋のひずみが許容限界に収まっていることを確認する。
- 地震時荷重を載荷した構造物の変形が、部材ごとに要求される機能に応じた許容限界を上回らないことを確認する。
- 各要求機能における許容限界を以下に示す。許容限界の詳細を「6. 許容限界」に示す。

耐震安全性評価フロー



要求機能	要求機能の評価方針	許容限界
① 通水機能	構造物が終局状態に至った場合でも、直ちに通水断面の閉塞に繋がる事象には至らないが、保守的に、 <b>終局状態に至らないこと</b> を目標性能とし、部材の層間変形角及びせん断力が許容限界に至らないことで確認する。	【面外変形】 層間変形角: 1/100 せん断力: せん断耐力以下 【面内変形】 層間変形角: 2/1000
② 支持機能	Sクラス機器及び配管等を安全に支持することは、耐荷性能を維持することと同義であり、 <b>構造物が終局状態に至らないこと</b> を目標性能とする。この目標性能は、①の確認を、構造物全体に対し行うことで確認できる。 加えて、Sクラス機器及び配管等のアンカー一定着部周辺の損傷が部材降伏程度であれば、定着性能に影響を及ぼさないことから、 <b>アンカー一定着部周辺においては、鉄筋が降伏しないこと</b> を目標性能とし、コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋のひずみが許容限界に至らないことで確認する。また、面内変形に対しては、部材の層間変形角がJEAC4601-2015で規定されている支持性能の許容限界に至らないことで確認する。	【面外変形】 圧縮ひずみ: 圧縮強度に対応するひずみ $\epsilon'_{peak} \cdot 2000 \mu$ 主筋ひずみ: 降伏強度に対応するひずみ $\epsilon_y \cdot 1725 \mu$ せん断力: せん断耐力以下 【面内変形】 層間変形角: 2/1000
③ 貯水機能	断面が降伏に至らない状態及びせん断耐力以下であれば、漏水が生じるような顕著な(部材を貫通するような)ひび割れは発生しないことから、 <b>鉄筋が降伏しないこと及び発生せん断力がせん断耐力以下であること</b> を目標性能とし、コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋ひずみが許容限界に至らないことと、せん断力がせん断耐力以下であることで確認する。仮にひび割れが発生したとしても、底面はMMRと接しているため顕著な漏水は無く、盛土と接している側壁からの漏水量は貯留量と比べて微量であることから、引き波時に必要となる冷却用水を安全に貯留できる。確認結果を「6. (4) 貯水機能に対する許容限界」に示す。 また、面内変形に対しては、層間変形角がJEAG4601-1991で規定されているスケルトンカーブの第1折点( $\gamma_1$ )以下であれば面内せん断ひび割れは発生せず水密性はあると考えられ、 $\gamma_1$ を超過する場合については、漏水量を算定し、安全機能を損なうおそれがないことを評価する。	【面外変形】 圧縮ひずみ: 圧縮強度に対応するひずみ $\epsilon'_{peak} \cdot 2000 \mu$ 主筋ひずみ: 降伏強度に対応するひずみ $\epsilon_y \cdot 1725 \mu$ せん断力: せん断耐力以下 【面内変形】 層間変形角: 第1折点( $\gamma_1$ )以下 ただし、 $\gamma_1$ を超過する場合は、漏水量を算定し、安全機能へ影響しないことを確認
④ 止水機能	断面が降伏に至らない状態及びせん断耐力以下であれば、漏水が生じるような顕著な(部材を貫通するような)ひび割れは発生しないことから、 <b>鉄筋が降伏しないこと及び発生せん断力がせん断耐力以下であること</b> を目標性能とし、コンクリートの圧縮ひずみ及び主筋ひずみが許容限界に至らないことと、せん断力がせん断耐力以下であることで確認する。そのうえで、顕著なひび割れが発生していないことを解析等により確認又は妥当な裕度を持たせることとする。 また、面内変形に対しては、層間変形角がJEAG4601-1991で規定されているスケルトンカーブの第1折点( $\gamma_1$ )以下であれば面内せん断ひび割れは発生せず水密性はあると考えられ、 $\gamma_1$ を超過する場合については、漏水量を算定し、安全機能を損なうおそれがないことを評価する。	【面外変形】 圧縮ひずみ: 圧縮強度に対応するひずみ $\epsilon'_{peak} \cdot 2000 \mu$ 主筋ひずみ: 降伏強度に対応するひずみ $\epsilon_y \cdot 1725 \mu$ せん断力: せん断耐力以下 【面内変形】 層間変形角: 第1折点( $\gamma_1$ )以下 ただし、 $\gamma_1$ を超過する場合は、漏水量を算定し、安全機能へ影響しないことを確認

通水機能の要求機能(部材が崩壊しない)は、構造全体に対して適用

## 目次

---

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
- 5. 解析コードの適用性**
  - (1) 解析コードの概要
  - (2) 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討



## 5. 解析コードの適用性

### (1) 解析コードの概要①

#### 【課題3】

三次元静的材料非線形解析に用いる解析コードは、三次元構造の応答を適切に評価することが可能か？

- 解析コードは、東京大学コンクリート研究室で開発され、実績の多いCOM3を用いる。構成式は、三次元まで拡張された前川モデルを採用しており、三次元構造物の終局状態を再現する解析が可能である。
- 前川モデルの構成式は、非線形解析の代表モデルとして、コンクリート標準示方書2017に記載されている。
- 前川モデルは、鉄筋コンクリート部材の中で有限要素解析に適用するのに最も適しているのは壁であるとし、壁構造の正負交番载荷における力学的性状を表現できる非線形解析モデルとして開発された経緯があり、海水ポンプ室など壁(スラブ)で構成されている構造物に対する適用性は高いと言える。

#### 【解析コードCOM3の概要】

COM3は、東京大学コンクリート研究室で開発された、有限要素法(FEM)による鉄筋コンクリート構造物の動的/静的非線形解析プログラムである。非線形材料に関する構成則には、全て実験結果を忠実に再現した経路依存型の履歴モデルである前川モデルを採用している。

右図に示すとおり、最大耐力、部材の変形角、ひび割れの角度及び各サイクルにおける履歴ループの面積を精度よく再現している。

本解析で用いるCOM3は、平面部材の挙動を精度よく追跡できる構成則を、投影型モデルにより三次元に拡張したものである。

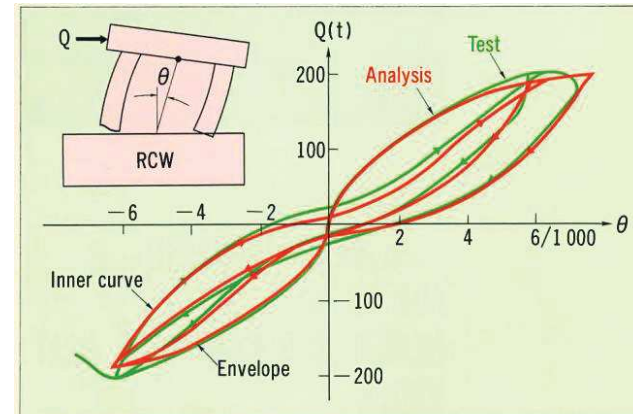


Fig.1.1a Rotational angles of specimen RCW - analysis and test

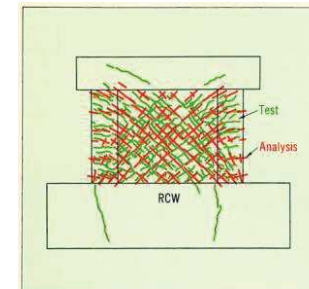


Fig.1.1b Cracks appeared - analysis and test (RCW)

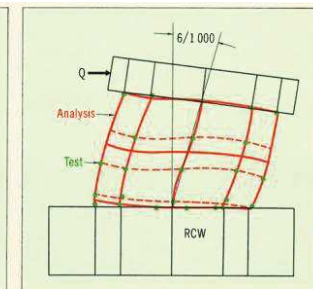


Fig.1.1c Shape of total deformation - analysis and test (RCW)

壁部材の繰返しせん断実験に対する検証解析

【出典】岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 1991

## 5. 解析コードの適用性

### (1) 解析コードの概要②

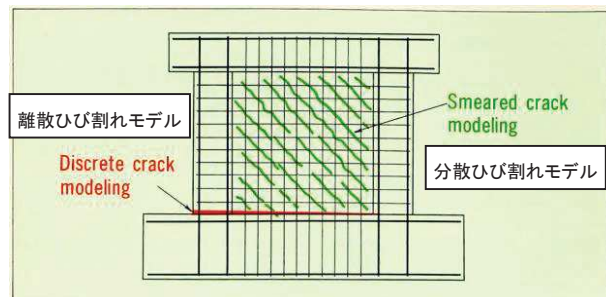
本解析コードは、下図に示すように、鉄筋が水平・鉛直に分散して配置されている鉄筋コンクリート要素には分散ひび割れモデルを、異なる部材の境界面などに用いる接合要素には離散ひび割れモデルを採用している。

**分散ひび割れモデル**とは、ある有限の領域の鉄筋コンクリート板における挙動を、「平均応力-平均ひずみ」の関係で与える**平均化構成モデル**である。ひび割れの発生や進展が、有限要素内で平均的に考慮され、部材の全体的な挙動を総合的に把握するのに適している。このため、鉄筋が分散して配置されている壁やシェル構造等に適した方法である。

**離散ひび割れモデル**とは、鉄筋コンクリートに発生した個々のひび割れをモデル化する方法であり、鉄筋とコンクリートの付着、ひび割れ界面での力の伝達など、鉄筋コンクリート特有の現象を、本質的にとらえる有効な方法である。本解析コードでは、異なる部材の境界面などで生じる鉄筋の引き抜け、接合面のズレ、めり込みなどのような局所的な不連続な変形が生じる部位には接合要素を用いることが可能で、接合要素に離散ひび割れモデルを採用している。

これらのモデルの妥当性については、開発者は、前出の**検証用壁試験体及び日本コンクリート工学協会の「鉄筋コンクリート構造のせん断強度研究委員会」**によって選定された**解析モデル検証用試験体(1983)**を用いて十分に検証を行っている。

荷重-変位曲線における包絡線及び内部曲線、破壊モード、最大耐力時のひび割れ状況などの力学的特性すべてにおいて実験結果とよく対応していると評価できる。



【出典】岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 1991

本解析で用いるCOM3の構成則は、十分な検証がおこなわれた構成則を、投影型モデルにより三次元に拡張したものである。

投影型モデルの概要は、下記のとおりである。

- ・コンクリートと鉄筋の応力はそれぞれ別に算定して足し合わせる。
- ・コンクリートについては、固定したひび割れ座標系(1-2-3)上で算定する。
- ・1-2面, 2-3面, 1-3面の各面上で二次元のひび割れたコンクリートモデルを適用する。
- ・各面で算定されたコンクリート応力を重ね合わせる。その際、 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{33}$ については、それぞれ2つの面上で算定された値を平均する。
- ・1方向は最初のひび割れ面直角方向に設定する。1,2,3軸は最初に設定されたものが固定されその後変更はされない。

COM3の三次元構造物に対する適用事例を次頁に示すが、水平荷重-水平変位関係、損傷の状況や損傷部位などにおいて解析は実験と整合しており、COM3は立体構造物の終局状態まで解析が可能な解析コードである。

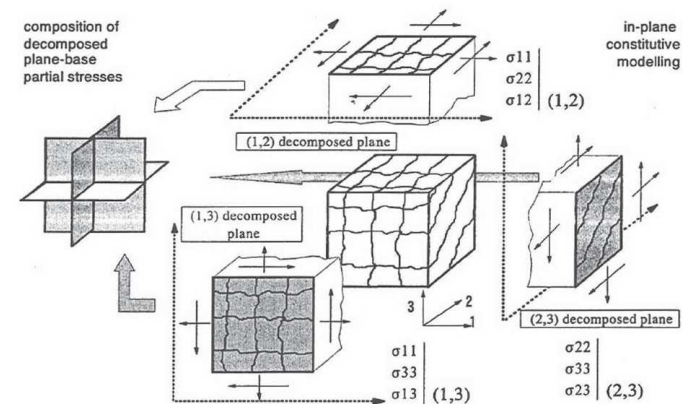


Fig.3 Re-composition of load carrying mechanism of 3D cracked solids of concrete with multi-directional cracking

図 平面構成則の三次元拡張に用いる投影型モデルの概念図

## 5. 解析コードの適用性

### (2) 解析コードの適用性①

- 三次元静的材料非線形解析に用いる解析コードCOM3が、女川2号炉の海水ポンプ室同様に、壁部材から構成される三次元構造物の地震時荷重に対し、終局状態まで再現可能であることを、三次元模型による載荷実験に対する再現解析事例により確認した。
- 三次元構造物の終局状態に対する載荷実験を再現解析した適用例を以下に示す。いずれも終局状態まで良く再現できている。

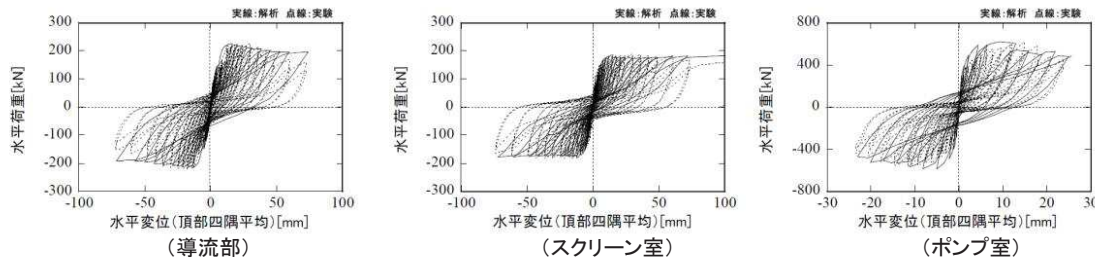
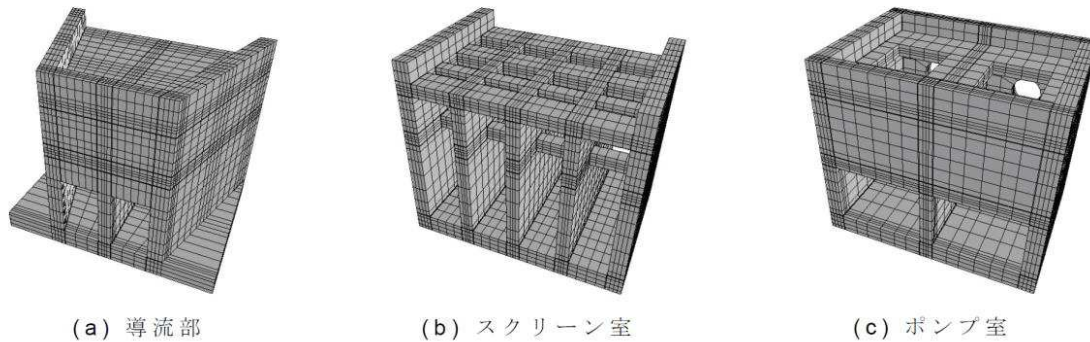


図 水平変位－水平荷重関係

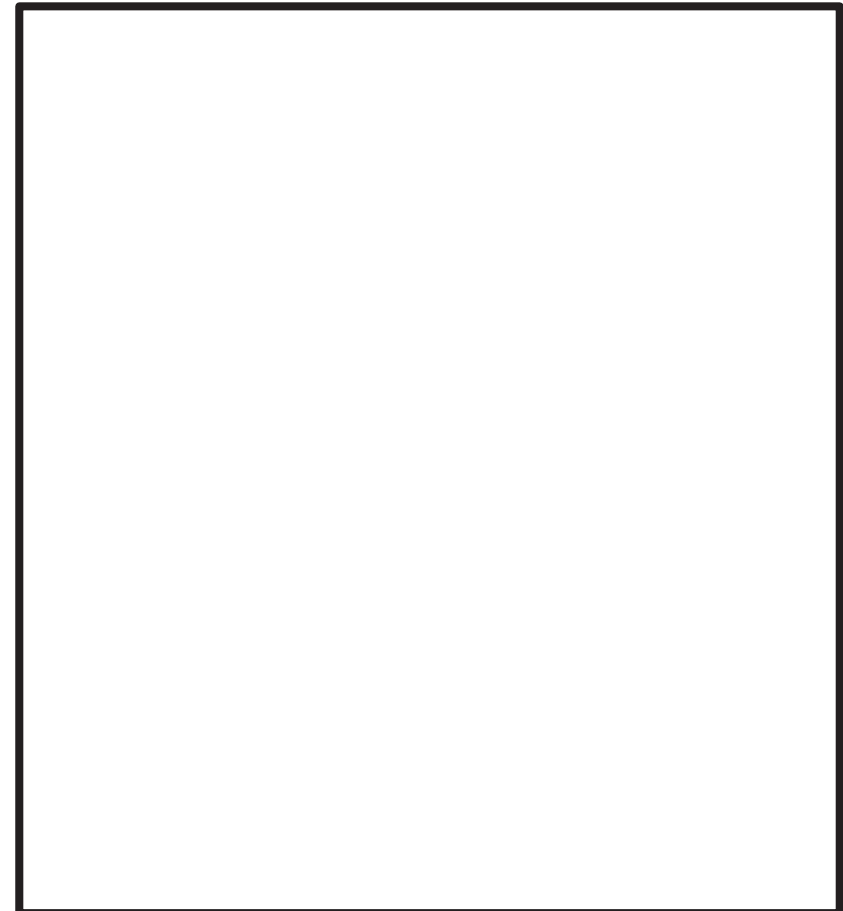


図 層間変形角－水平荷重関係

## 5. 解析コードの適用性

### (2) 解析コードの適用性②

- ケースU1を代表に層間変形角－水平荷重関係を見ると、海水ポンプ室の設計で用いる層間変形角1/100の範囲は良く再現されている。
- 変形により照査する概ね弾性に相当する範囲は、初期勾配がとても良く再現されている。
- なお、再現解析における要素分割等の考え方は、海水ポンプ室と同様であることを確認している。

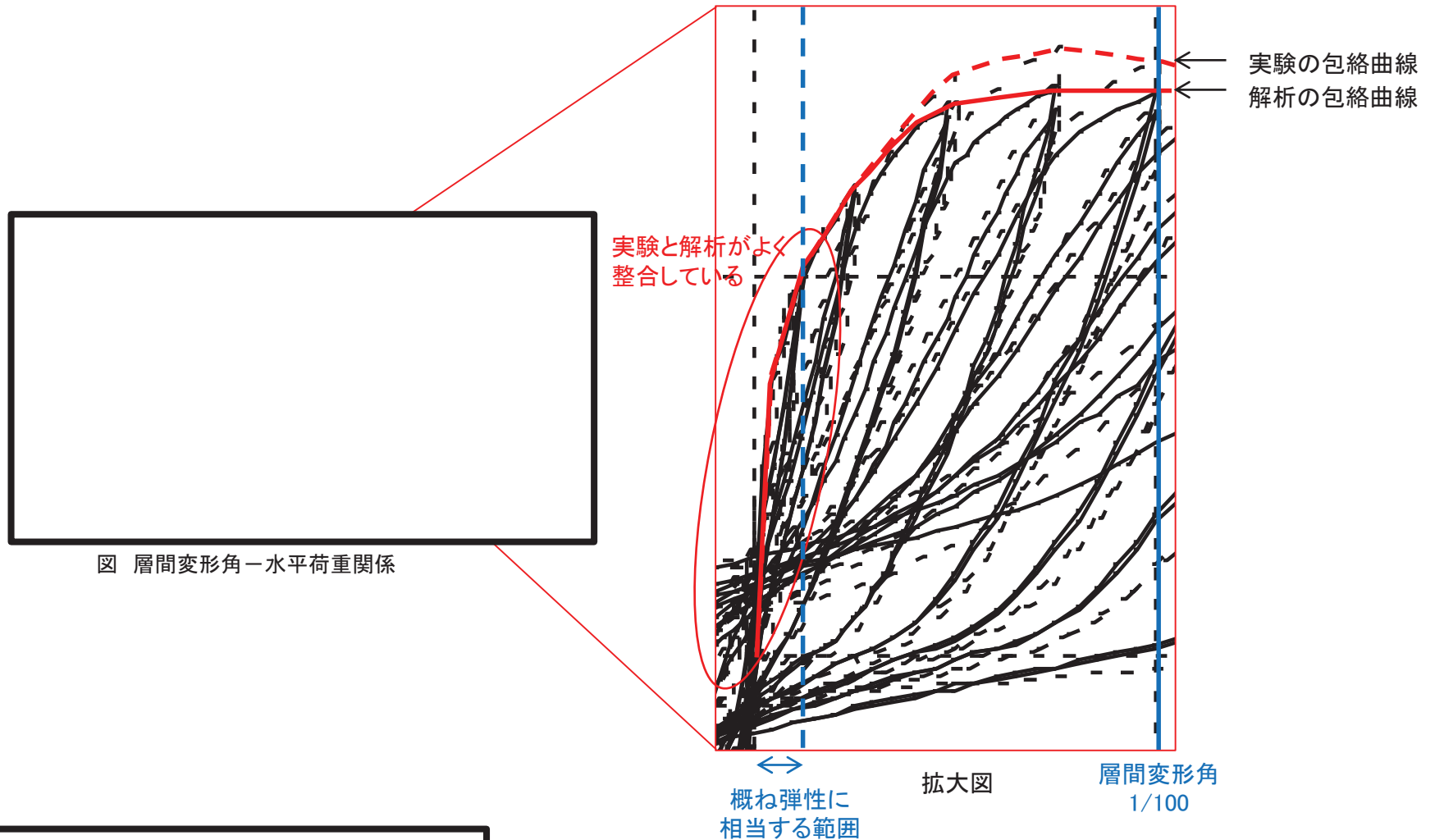


図 層間変形角－水平荷重関係

枠囲みの内容は知的財産に係ることから公開できません。

## 目次

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
- 6. 許容限界**
  - (1) 許容限界
  - (2) 通水機能に対する許容限界
  - (3) 支持機能に対する許容限界
  - (4) 貯水機能に対する許容限界
  - (5) 止水機能に対する許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

## 6. 許容限界 (1) 許容限界

		土木構造物に求められる機能			
		①通水機能	②支持機能※	③貯水機能※	④止水機能※
要求機能		海水の通水断面を閉塞しない	Sクラスの機器及び配管等を安全に支持できる	津波引波時に必要となる冷却用水を安全に貯留できる	Sクラスの機器及び配管等の安全機能を損なうことがないよう止水できる
目標性能		・構造物が終局状態に至らない	・構造物が終局状態に至らない ・アンカ一定着部周辺において鉄筋が降伏しない	・鉄筋が降伏しない ・発生せん断力がせん断耐力以下	・鉄筋が降伏しない ・発生せん断力がせん断耐力以下
設定理由		構造物が終局状態に至った場合でも、直ちに通水断面の閉塞に繋がる事象には至らないが、保守的に終局状態に至らないことを目標性能とする。	機器・配管の支持性能は、耐荷性能を維持することと同義であり、構造物が終局状態に至らないことを目標性能とする。 アンカ一定着部周辺においては、損傷が部材降伏程度であれば定着性能に影響を及ぼさないことから、鉄筋が降伏しないことを目標性能とする。	断面が降伏に至らない状態及びせん断耐力以下であれば、漏水が生じるような顕著な(部材を貫通するような)ひび割れは発生しないことから、鉄筋が降伏しないこと及び発生せん断力がせん断耐力以下であることを目標性能とする。 また、構造物周囲の盛土の透水係数は十分に小さく、部材を貫通するようなひび割れが生じたとしても、漏れ量は貯水機能に影響を及ぼさない。	断面が降伏に至らない状態及びせん断耐力以下であれば、漏水が生じるような顕著な(部材を貫通するような)ひび割れは発生しないことから、鉄筋が降伏しないこと及び発生せん断力がせん断耐力以下であることを目標性能とする。
限界状態		終局耐力以下	終局耐力以下 アンカ一定着部周辺においては降伏耐力以下	降伏耐力以下	降伏耐力以下
主な照査指標・許容限界	曲げ	層間変形角<層間変形角1/100	圧縮ひずみ<圧縮強度に対応するひずみ 主筋ひずみ<降伏強度に対応するひずみ	圧縮ひずみ<圧縮強度に対応するひずみ 主筋ひずみ<降伏強度に対応するひずみ	圧縮ひずみ<圧縮強度に対応するひずみ 主筋ひずみ<降伏強度に対応するひずみ
	せん断	発生せん断力<せん断耐力	発生せん断力<せん断耐力	発生せん断力<せん断耐力	発生せん断力<せん断耐力
	面内	層間変形角<層間変形角2/1000	層間変形角<層間変形角2/1000	層間変形角<第1折点( $\gamma_1$ ) または漏水量評価	層間変形角<第1折点( $\gamma_1$ ) または漏水量評価

※:支持・貯水・止水機能においても構造物全体が終局状態に至らないことが前提であることから、終局耐力以下であることを確認する。

## 6. 許容限界

### (2) 通水機能に対する許容限界①

**【課題4】**

許容限界は、要求機能に応じて適切に設定されているか？

- 通水機能は、部材が破壊し通水断面を閉塞しないことにより満足され、許容限界は、面外変形に対する層間変形角は1/100(圧縮縁コンクリートひずみ1%に相当)、面内変形に対する層間変形角は2/1000とし、せん断破壊に対してはせん断耐力とする。
- 層間変形角(面外)、層間変形角(面内)及びせん断耐力は、新規制下の工認で実績のある許容限界である。

#### 通水機能

要求機能	非常用取水設備のうち、通水断面を構成する部材について、その崩壊により通水断面を閉塞しないこと。
目標性能	構造物が終局状態に至らない。
設定理由	構造物が終局状態に至った場合でも、直ちに通水断面の閉塞に繋がる事象には至らないが、保守的に終局状態に至らないことを目標性能とする。

#### 許容限界

変形モード	許容限界		既工認実績
	指標	許容値	
曲げ	層間変形角(面外)	1/100	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 土木学会マニュアル2005に規定されており、新規制下の工認において、屋外重要土木構造物の通水性能・支持性能の許容限界として多数実績あり。</li> </ul>
せん断	層間変形角(面内)	2/1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>• JEAG4601-1991において、耐震壁の支持機能に対する許容限界として規定されており、工認実績は多数ある。</li> </ul>
	発生せん断力	せん断耐力	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 土木学会マニュアル2005に規定されており、新規制下の工認において、屋外重要土木構造物の通水機能・支持機能・貯水機能の許容限界として多数実績あり。</li> </ul>

## 6. 許容限界

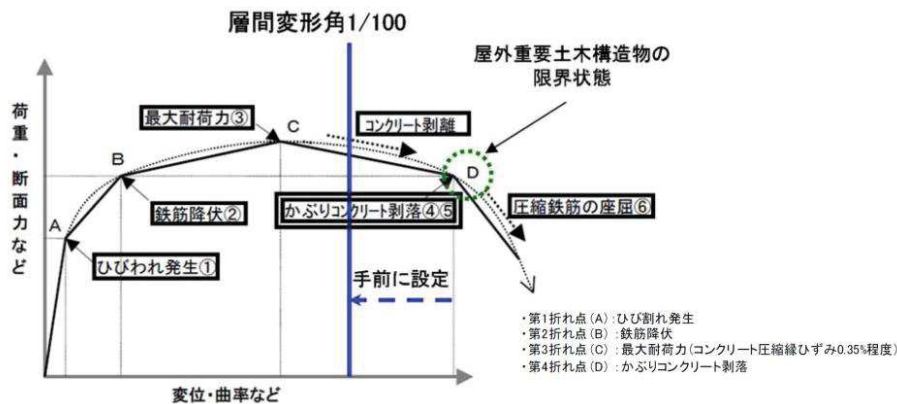
### (2) 通水機能に対する許容限界②(曲げ系の破壊・面内せん断による破壊)

#### 曲げ系の破壊

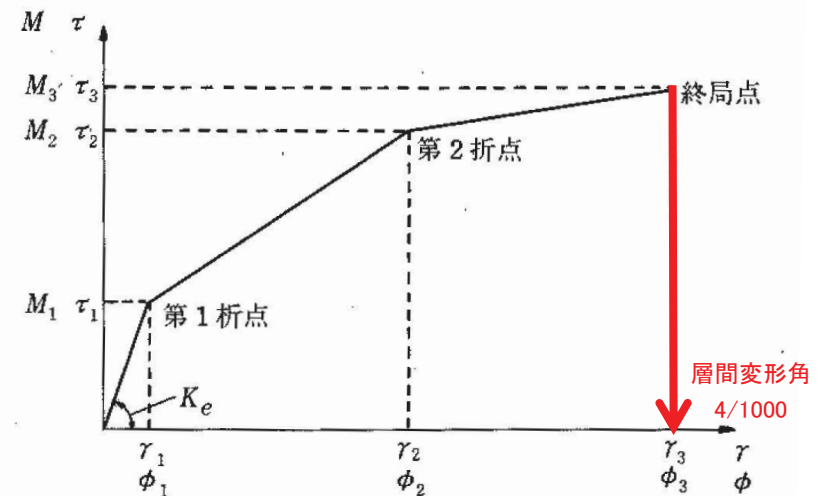
- 曲げ系の破壊に対する許容限界として、層間変形角1/100を設定する。
- 圧縮縁コンクリートひずみ1%の状態及び層間変形角1/100に至る状態は、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態であることが、屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験及び数値シミュレーション等の結果より確認されている。これらの状態を限界値とすることで構造物全体としての安定性が確保できるとして設定されたものである。
- 当該限界値は、土木学会マニュアル2005に規定されており、新規制下の工認においても、通水性能や支持性能の許容限界として実績がある限界値である。

#### 面内せん断による破壊

- 面内せん断に対する許容限界として、層間変形角2/1000を設定する。
- JEAG4601において、耐震壁の終局時の変形として層間変形角4/1000と規定されている。
- 許容限界として、終局状態の層間変形角4/1000に安全率2を有するように層間変形角2/1000と設定している。
- 当該限界値は、新規制下の工認においても実績がある限界値である。



鉄筋コンクリートはり部材の荷重変位関係と損傷状態に対する概念図



トリリニア・スケルトンカーブ



## 6. 許容限界

### (2) 通水機能に対する許容限界③(面外せん断による破壊)

#### 面外せん断による破壊

- 面外せん断に対する照査は、照査用せん断力がせん断耐力を下回るにより確認する。
- せん断耐力式には、複数の安全係数が見込まれていることから、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価となっている。
- 当該限界値は、土木学会マニュアル2005に規定されており、新規制下の工認においても、実績がある限界値である。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$$

ここに、 $V_{yd}$ :せん断耐力

$V_{cd}$ :コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{sd}$ :せん断補強鉄筋が分担するせん断耐力

$$V_{sd} = \{A_w f_{wyd} (\sin\alpha + \cos\alpha) / s\} z / \gamma_{bs}$$

$A_w$ :区間sにおけるせん断補強鉄筋の総断面積

$f_{wyd}$ :せん断補強鉄筋の降伏強度を $\gamma_{ms}$ で除したもので、400N/mm<sup>2</sup>以下とする。ただし、コンクリート圧縮強度の特性値 $f'_{ck}$ が60N/mm<sup>2</sup>以上のときは800N/mm<sup>2</sup>以下とする。

$\alpha$ :せん断補強鉄筋と部材軸のなす角度

s:せん断補強鉄筋の配置間隔

z:圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離でd/1.15とする。

$\gamma_{bs}$ :部材係数

$\gamma_{ms}$ :材料係数

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \beta_a \cdot f_{vcd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{bc}$$

$$f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}}$$

ただし、 $f_{vcd} > 0.72$ (N/mm<sup>2</sup>)となる場合は $f_{vcd} = 0.72$ (N/mm<sup>2</sup>)

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad \text{ただし、}\beta_d > 1.5\text{となる場合は}\beta_d = 1.5$$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100p_v} \quad \text{ただし、}\beta_p > 1.5\text{となる場合は}\beta_p = 1.5$$

$$\beta_n = 1 + M_0/M_d (N'_d \geq 0) \quad \text{ただし、}\beta_n > 2.0\text{となる場合は}\beta_n = 2.0$$

$$\beta_n = 1 + 2 M_0/M_d (N'_d < 0) \quad \text{ただし、}\beta_n < 0\text{となる場合は}\beta_n = 0$$

$$\beta_a = 0.75 + \frac{1.4}{a/d} \quad \text{ただし、}\beta_a < 1.0\text{となる場合は}\beta_a = 1.0$$

$f'_{cd}$ :コンクリートの圧縮強度の設計用値(N/mm<sup>2</sup>)で設計基準強度 $f'_{ck}$ を材料係数 $\gamma_{mc}$ で除したもの

$p_v = A_s / (b_w \cdot d)$ :引張鉄筋比

$A_s$ :引張側鋼材の断面積

$b_w$ :部材の有効幅

d:部材の有効高さ

$N'_d$ :設計軸圧縮力

$M_d$ :設計曲げモーメント

$M_0 = N'_d \cdot D / 6$ : $M_d$ に対する引張縁において、軸方向力によって発生する応力を打ち消すのに必要なモーメント(デコンプレッションモーメント)

D:断面高さ

a/d:せん断スパン比

$\gamma_{bc}$ :部材係数

$\gamma_{mc}$ :材料係数

せん断耐力評価式(棒部材式)

## 6. 許容限界

### (3) 支持機能に対する許容限界①

- 支持機能は、部材が耐荷性能を維持するために終局状態に至らないうえで、アンカー一定着部周辺の鉄筋が降伏しないことにより満足され、許容限界は、通水機能で設定した終局状態に対する許容限界に加え、主鉄筋のひずみが降伏強度に対応するひずみ以下等の許容限界を追加する。
- アンカー一定着部周辺に対する許容限界である鉄筋が降伏しないことは、先行プラントの新規制下の工認でも実績のある許容限界であるが、補足として実験による検証事例を「補足説明2. 支持機能に関する実験結果」に示す。

#### 支持機能

要求機能	Sクラスの機器及び配管等を安全に支持できる。
目標性能	構造物が終局状態に至らない。また、アンカー一定着部周辺において鉄筋が降伏しない。
設定理由	機器・配管の支持性能は、耐荷性能を維持することと同義であり、構造物が終局状態に至らないことを目標性能とする。アンカー一定着部周辺においては、損傷が部材降伏程度であれば定着性能に影響を及ぼさないことから、鉄筋が降伏しないことを目標性能とする。

#### 許容限界

変形モード	許容限界		既工認実績
	指標	許容値	
曲げ	圧縮ひずみ	コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ, 2000 $\mu$	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート標準示方書2002において、応力-ひずみ関係として示されている。</li> <li>本許容限界における状態は、新規制下の工認で実績のある概ね弾性と同等である。</li> </ul>
	主筋ひずみ	鉄筋の降伏強度に対応するひずみ, 1725 $\mu$ (SD345相当)	
せん断	層間変形角(面内)	2/1000	<ul style="list-style-type: none"> <li>JEAG4601-1991において、耐震壁の支持機能に対する許容限界として規定されており、工認実績は多数ある。</li> <li>土木学会マニュアル2005に規定されており、新規制下の工認において、屋外重要土木構造物の通水機能・支持機能・貯水機能の許容限界として多数実績あり。</li> </ul>
	発生せん断力	せん断耐力	

## 6. 許容限界

### (3) 支持機能に対する許容限界②(曲げ系の破壊)

#### 曲げ系の破壊

- 支持機能は、部材が断面降伏しないことにより満足され、許容限界は、コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ $2,000\mu$ と、鉄筋の降伏に対応するひずみ $1,725\mu$ としている。
- 許容限界として設定した値をコンクリートの応力-ひずみ曲線、鉄筋および構造用鋼材の応力-ひずみ曲線で示すと以下のとおりとなる。

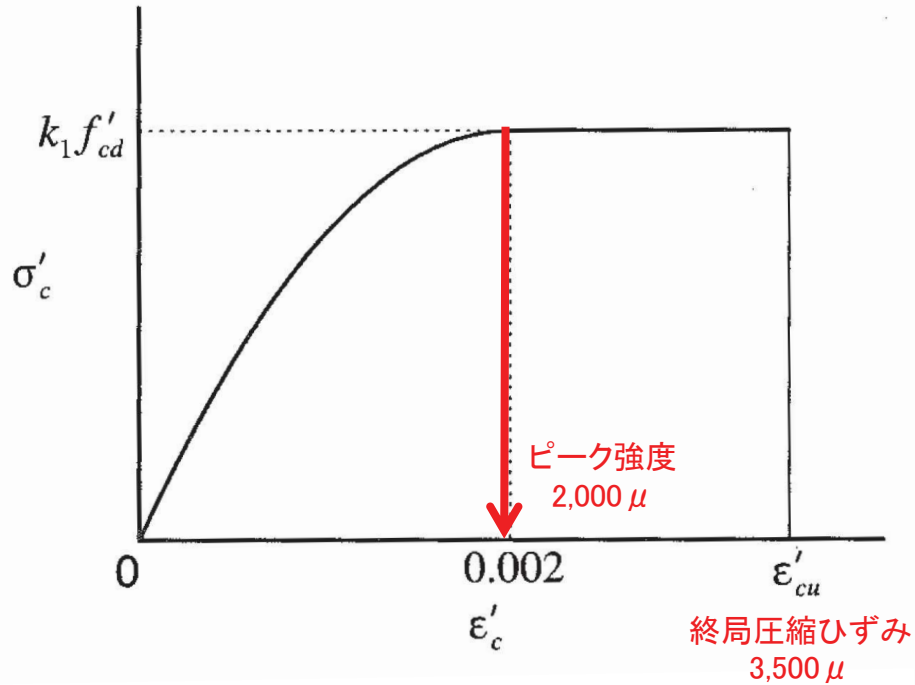


図 コンクリートの応力-ひずみ曲線  
(コンクリート標準示方書2002)

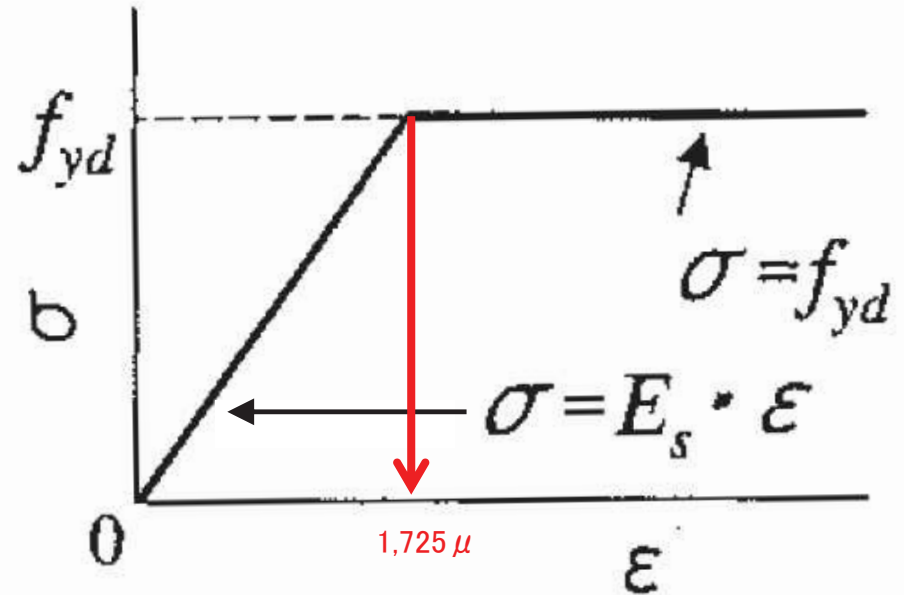


図 鉄筋および構造用鋼材の応力-ひずみ曲線  
(コンクリート標準示方書2002)

SD345の場合

$E_s$ : 200kN/mm <sup>2</sup>
$f_{yd}$ : 345N/mm <sup>2</sup>
$\epsilon_{sy}$ : 1,725 $\mu$

## 6. 許容限界

### (4) 貯水機能に対する許容限界①

- 貯水機能は、津波の引き波時に必要となる冷却用水を安全に貯留するため、漏水が生じるような顕著なひび割れが発生しないことにより満足され、許容限界は、断面降伏及びせん断耐力とする。
- この許容限界は、「水道施設耐震工法指針・解説2009」に規定されている照査基準と同じレベルの許容値である。

#### 貯水機能

要求機能	津波の引波時に、部材の損傷により著しい漏水がなく、海水を取水できない時間に必要となる冷却用水を安全に貯留できること。
目標性能	鉄筋が降伏しない。また、発生せん断力がせん断耐力以下である。
設定理由	断面が降伏に至らない状態及びせん断耐力以下であれば、漏水が生じるような顕著な(部材を貫通するような)ひび割れは発生しないことから、鉄筋が降伏しないこと及び発生せん断力がせん断耐力以下であることを目標性能とする。 また、構造物周囲の盛土の透水係数は十分に小さく、部材を貫通するようなひび割れが生じたとしても、漏えい量は貯水機能に影響を及ぼさない。

#### 許容限界

変形モード	許容限界		既工認実績
	指標	許容値	
曲げ	圧縮ひずみ	コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ, 2000 $\mu$	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート標準示方書2002において、応力-ひずみ関係として示されている。</li> <li>本許容限界における状態は、新規制下の工認で実績のある概ね弾性と同等である。</li> </ul>
	主筋ひずみ	鉄筋の降伏強度に対応するひずみ, 1725 $\mu$ (SD345相当)	
せん断	層間変形角(面内)	第1折点( $\gamma_1$ )以下 ただし、第1折点( $\gamma_1$ )を超過する場合は、漏水量を算定し、安全機能へ影響しないことを確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>JEAG4601-1991に規定されており、新規制下の工認で実績のある許容限界と同等以下の限界状態を想定している。</li> </ul>
	発生せん断力	せん断耐力	<ul style="list-style-type: none"> <li>土木学会マニュアル2005に規定されており、新規制下の工認において、屋外重要土木構造物の通水機能・支持機能・貯水機能の許容限界として多数実績あり。</li> </ul>

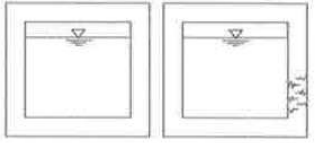
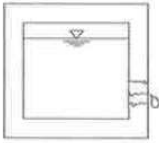
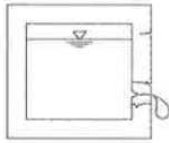
## 6. 許容限界

### (4) 貯水機能に対する許容限界②(曲げ系の破壊)

#### 曲げ系の破壊

- 曲げ系の破壊に対する許容限界として、コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ $2000\mu$ ，鉄筋の降伏強度に対応するひずみ $1725\mu$ を設定する。
- 断面が降伏に至らない状態であれば、漏水が生じるような顕著なひび割れは発生せず、貯水機能が保持できることから、本許容値を設定している。
- 限界状態として、断面降伏以下を想定しており、「水道施設耐震工法指針・解説2009」と同じレベルの許容値となっている。

池状構造物(RC構造物)の耐震性能と照査基準

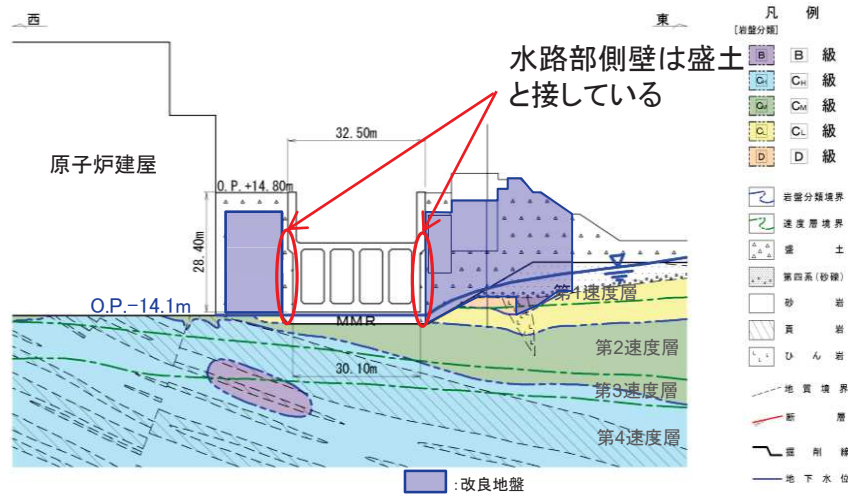
耐震性能	耐震性能 1	耐震性能 2	耐震性能 3
限界状態 <sup>※1</sup>	限界状態 1 ( <u>降伏耐力以下</u> )	限界状態 2 (最大耐荷力以下)	限界状態 3 (終局変位以下、せん断耐力以下)
損傷状態	 <p>無被害又はひび割れは生じるが漏水は生じない。<u>修復の必要ない。</u></p>	 <p>軽微なひび割れから漏水は生じるが地震後に早期に修復可能である。</p>	 <p>ひび割れ幅が拡大し、漏水が生じるが施設全体が崩壊しない。修復可能。</p>
照査項目例 <sup>※2</sup>	断面力(曲げ、せん断)、応力度	断面力(曲げ、せん断)、塑性率	変位量、曲率、断面力(せん断)
照査用限界値例 <sup>※3</sup>	断面力(曲げ) $\leq$ 降伏曲げ耐力 断面力(せん断) $\leq$ <u>せん断耐力</u> 応力度 $\leq$ <u>許容応力度</u>	断面力(曲げ) $\leq$ 最大曲げ耐力 断面力(せん断) $\leq$ せん断耐力 塑性率 $\leq$ 許容塑性率	変位量 $\leq$ 終局変位量 曲率 $\leq$ 終局曲率 断面力(せん断) $\leq$ せん断耐力

## 6. 許容限界

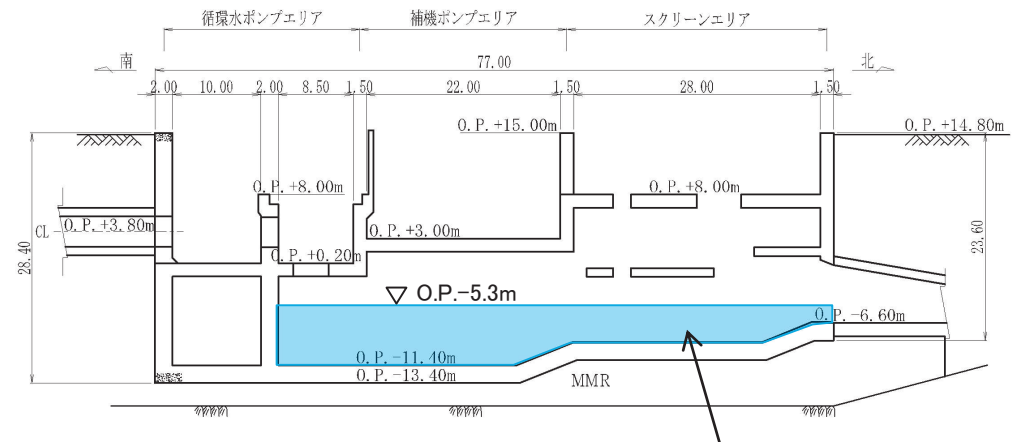
### (4) 貯水機能に対する許容限界③(面外せん断による破壊)

#### 面外せん断による破壊

- 面外せん断に対する照査は、照査用せん断力がせん断耐力を下回ることにより確認する。
- せん断耐力に至るまでは部材を貫通するような顕著なひび割れは発生しないと判断し、本許容値を設定している。
- 仮に、部材を貫通するようなひび割れが発生したとしても、底面はMMRと接しているため顕著な漏水は無く、津波の引き波時に取水口敷高を下回る時間183秒間の間に、盛土と接している側壁から漏えいする水量を考慮しても、引き波時に必要となる冷却用水を十分に確保できることから、貯水機能に影響は無い。



補機ポンプエリア断面図



貯留水と接している側壁の面積: 287.6㎡ (片側)

取水口敷高	O.P.-5.3m
引き波時に取水口敷高を下回る時間	183秒間
盛土の透水係数	$3.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$
動水勾配	$\Delta h/L=7.5^{\ast 1}$
貯水機能が要求される側壁の面積	287.6㎡ (片側)
海水ポンプ室貯留量	約3,324m <sup>3</sup>

•  $183 \text{秒間における側壁から盛土への漏水量} : 3.0 \times 10^{-5} \times 7.5 \times 183 \times 287.6 \times 2 = 23.7 \text{m}^3$

⇒ 漏水量は貯留量の1%未満であり、漏水しても貯水機能に影響はない。

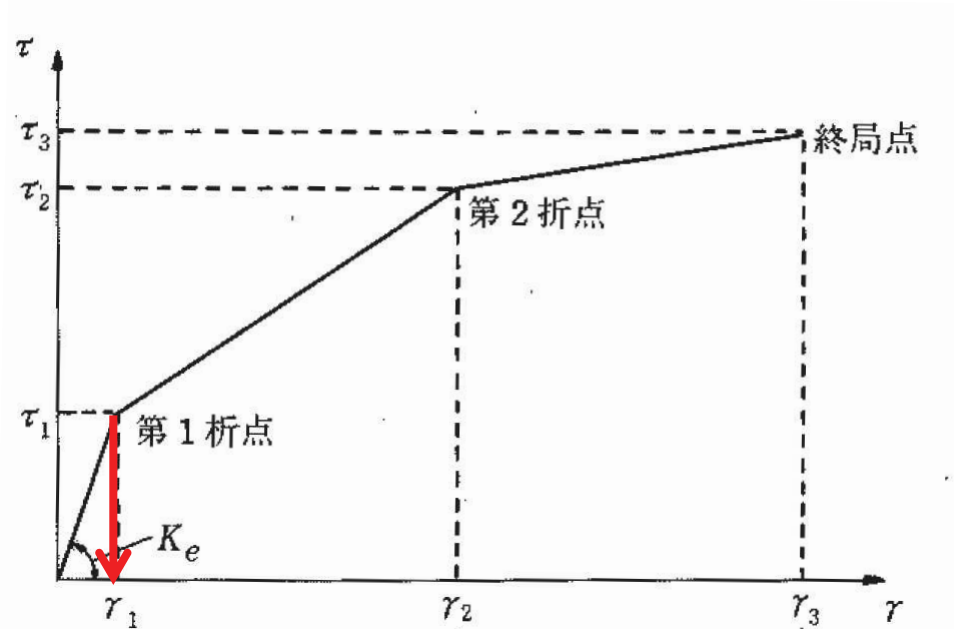
※1: hは貯留水位(O.P.-5.3m)とドレーン(O.P.-14.2m)の水頭差  
Lはドレーンまでの水平距離(1.2m)

## 6. 許容限界

### (4) 貯水機能に対する許容限界④(面内せん断による破壊)

#### 面内せん断による破壊(スケルトンカーブの第1折点)

- 面内変形に対し、層間変形角がJEAG4601-1991に規定されているスケルトンカーブの第1折点( $\gamma_1$ )以下であることを許容限界と設定している。
- 第1折点( $\gamma_1$ )の評価式は、壁板の面内せん断実験における中央斜めひび割れ発生時の平均せん断応力度に対応するよう定められていることから、せん断変形が第1折点( $\gamma_1$ )以下の場合、水密性に影響のあるせん断ひび割れは生じないと考えられる。
- 第1折点( $\gamma_1$ )を超過する場合には、漏水量を算定し、安全機能を損なうおそれがないことを評価する。



$$\tau_1 = \sqrt{\sqrt{F_c}(\sqrt{F_c} + \sigma_v)}$$

$$\gamma_1 = \tau_1 / G$$

$F_c$  : コンクリートの圧縮強度  
 $\sigma_v$  : 縦軸応力度  
 $G$  : コンクリートのせん断弾性係数

トリリニア・スケルトンカーブ

## 6. 許容限界

### (5) 止水機能に対する許容限界

- 止水機能は、部材からの漏水によりSクラスの機器及び配管等の安全機能を損なうことがないように止水するため、顕著なひび割れが発生しないことにより満足され、許容限界は、断面降伏及びせん断耐力とする。そのうえで、地震終了後の除荷時において顕著なひび割れが発生していないことを解析等により確認又は妥当な裕度を持たせることとする。
- また、面内変形に対し、JEAG4601-1991に規定されているスケルトンカーブの第1折点( $\gamma_1$ )以下であれば面内せん断ひび割れは発生せず水密性はあると考えられ、第1折点( $\gamma_1$ )を超過する場合は漏水量を算定し、Sクラスの機器及び配管等の安全機能を損なうおそれがないことを評価する。

#### 止水機能

要求機能	以下の3つの観点に対し、部材からの漏水により、Sクラスの機器及び配管等の安全機能を損なうことがないように止水できること。 (観点1) 津波の押波時における外郭防護 (観点2) 屋外タンク損傷時における内郭防護 (観点3) 循環水管単一破損時における内部溢水
目標性能	鉄筋が降伏しない。また、発生せん断力がせん断耐力以下である。
設定理由	断面が降伏に至らない状態及びせん断耐力以下であれば、漏水が生じるような顕著な(部材を貫通するような)ひび割れは発生しないことから、鉄筋が降伏しないこと及び発生せん断力がせん断耐力以下であることを目標性能とする。 また、面内変形に対しては、JEAG4601に規定されているスケルトンカーブの第1折点( $\gamma_1$ )以下であれば面内せん断ひび割れは発生せず水密性はあると考えられ、第1折点( $\gamma_1$ )を超過する場合については、漏水量を算定し、安全機能を損なうおそれがないことを評価する。

#### 許容限界

変形モード	許容限界		既工認実績
	指標	許容値	
曲げ	圧縮ひずみ	コンクリートの圧縮強度に対応するひずみ, 2000 $\mu$	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート標準示方書2002において、応力-ひずみ関係として示されている。</li> <li>本許容限界における状態は、新規制下の工認で実績のある概ね弾性と同等である。</li> </ul>
	主筋ひずみ	鉄筋の降伏強度に対応するひずみ, 1725 $\mu$ (SD345相当)	
せん断	面内せん断ひずみ	第1折点( $\gamma_1$ )以下 ただし、第1折点( $\gamma_1$ )を超過する場合は、漏水量を算定し、安全機能へ影響しないことを確認	<ul style="list-style-type: none"> <li>JEAG4601-1991に規定されており、新規制下の工認で実績のある許容限界と同等以下の限界状態を想定している。</li> </ul>
	発生せん断力	せん断耐力	<ul style="list-style-type: none"> <li>土木学会マニュアル2005に規定されており、新規制下の工認において、屋外重要土木構造物の通水機能・支持機能・貯水機能の許容限界として多数実績あり。</li> </ul>



## 目次

---

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. **安全係数**
  - (1) **安全係数の考え方**
  - (2) **規格・基準類との比較**
  - (3) **照査体系と安全係数の関係**
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

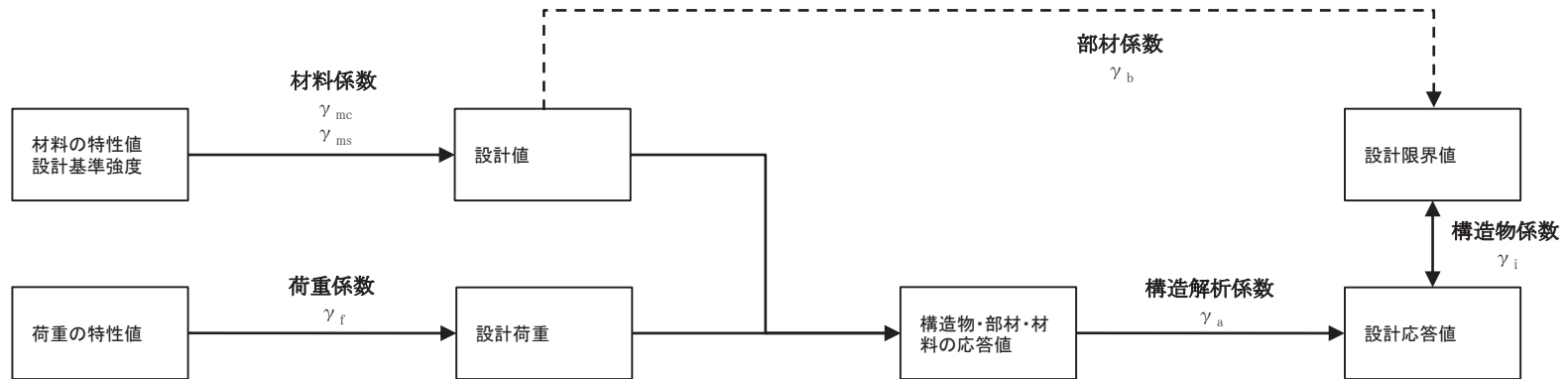
補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討



## 7. 安全係数

### (1) 安全係数の考え方②

- 各安全係数の基本的な考え方を以下に示す。



#### ■安全係数の考え方

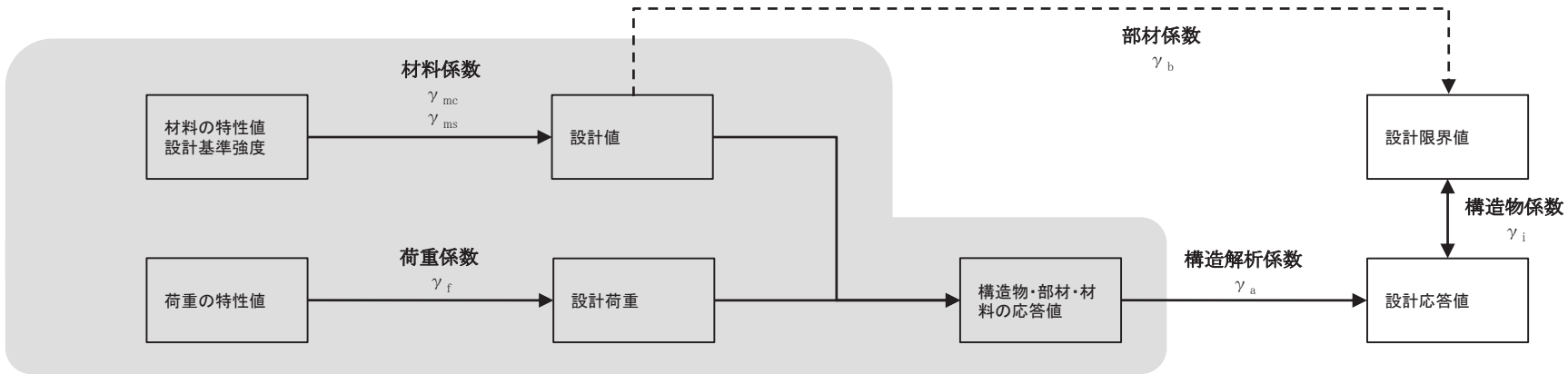
安全係数	基本的な考え方
材料係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>材料特性の望ましくない方向への変動, 供試体と構造物中との差異, 限界状態に及ぼす影響, 経時変化等を考慮して定めるものとする。</li> </ul>
部材係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材耐力の計算上の不確実性, 部材寸法のばらつきの影響, 部材の重要度, すなわち対象とする部材がある限界状態に達したときに, 構造物全体に与える影響等を考慮して定めるものとする。</li> </ul>
構造解析係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>応答値算定手法の精度や, 実物と解析モデルとの差異ほか, 応答値算定に関わる不確実性を考慮して定めるものとする。</li> </ul>
荷重係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>荷重の望ましくない方向への変動, 荷重の算定方法の不確実性, 設計耐用期間中の荷重の変化, 荷重特性が限界状態に及ぼす影響, 環境作用の変動を考慮して定めるものとする。</li> </ul>
構造物係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造物の重要度, 限界状態に達したときの社会的影響等を考慮して定めるものとする。</li> </ul>

## 7. 安全係数

### (1) 安全係数の考え方③(地震応答解析における安全係数)

#### (2) 地震応答解析における安全係数

- 地震応答解析は、三次元材料非線形解析における「作用の特性値」を算定するために実施することを勘案し、以下の安全係数を考慮する。



#### ■安全係数の考え方

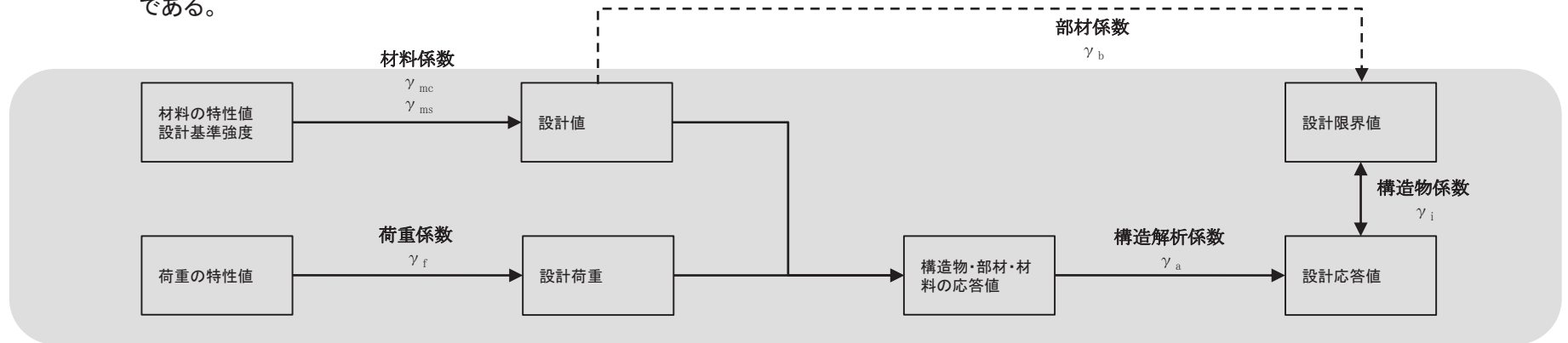
安全係数	考え方
材料係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>応答値算定時に適用する材料係数は、コンクリートと鉄筋の物性値が断面力の算定精度に与える影響は小さいこと、材料物性の特性値の設定において照査における応答値算定が安全側となるように配慮が行われることを踏まえ1.0とする。</li> <li>地盤物性値のばらつきは別途ばらつきを考慮したパラメータスタディを実施する。</li> </ul>
部材係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震応答解析の結果は、三次元静的材料非線形解析の作用の特性値として扱うことから、部材係数は考慮しない。</li> </ul>
構造解析係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震応答解析の結果は、三次元静的材料非線形解析の作用の特性値として扱うことから、構造解析係数は考慮しない。</li> </ul>
荷重係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震の影響以外の荷重の評価精度は高いと考えられ、地震の影響については入力地震動が最新の研究成果に基づいて合理性をもって設定されており、十分に不確かさやばらつきを考慮されていることから荷重係数は1.0とする。</li> </ul>
構造物係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震応答解析の結果は、三次元静的材料非線形解析の作用の特性値として扱うことから、構造物係数は考慮しない。</li> </ul>

## 7. 安全係数

### (1) 安全係数の考え方④(変形による照査における安全係数)

#### (3) 変形による照査における安全係数

- 変形による照査を行う限界値は、層間変形角(面外:1/100, 面内:2/1000, 第1折点)とひずみ(圧縮ひずみ:2,000 $\mu$ , 主筋ひずみ:1725 $\mu$ )である。



#### ■安全係数の考え方

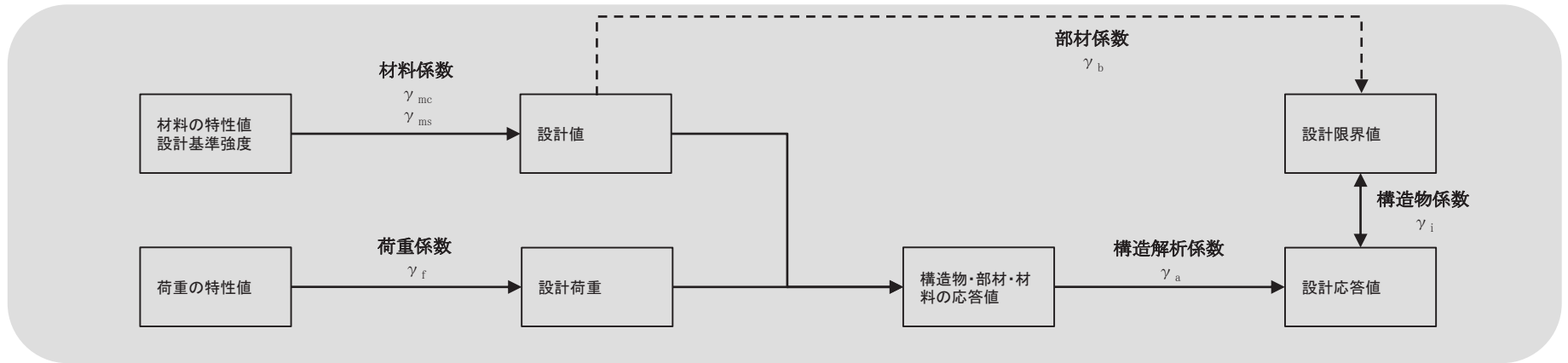
安全係数	考え方
材料係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート強度の特性値及び鉄筋の機械的性質の特性値は、実強度に対して小さい値を設定している。</li> <li>コンクリートの圧縮強度が小さくなれば、構造物の応答変位は大きくなると考えられることから、応答値は1.0とする。</li> <li>鉄筋降伏強度を小さく設定したとき、構造物の応答変位は少なくとも小さくならないと考えられることから、応答値は1.0とする。</li> </ul>
部材係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全側に考慮された限界値が別途定められていることから、1.0とする。</li> </ul>
構造解析係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>二次元解析において、地盤パラメータの設定(拘束圧依存性、地盤の剛性-ひずみ関係や履歴減衰-ひずみ関係のモデル化精度、地盤と構造物の境界部の特性)が応答解析結果に及ぼす影響を考え併せ、一般的に1.2とされている。</li> <li>三次元特有の面内変形による挙動は、面外変形よりも評価精度がよく、面外変形による挙動については、三次元も二次元も大差はないと考えられる。</li> <li>「5. (2)解析コードの適用性」に示す再現解析により、今回の評価対象範囲においては、構造物の変形を精度よく評価できている。また、地震時荷重は若干非線形領域に入るものの、大部分の部材は概ね弾性範囲である。</li> <li>以上より、構造解析係数は1.2とする。</li> </ul>
荷重係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震応答解析による荷重の算定において構造物を線形として荷重を保守的に評価していること、荷重の載荷方法を奥行き一様として保守的に作用させていること、地震時増分荷重は部材の三次元的変形を踏まえ適切に複数の代表時刻を選定すること等から、1.0とする。</li> </ul>
構造物係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子力施設の場合、別途重要度分類がなされ、それに基づいて入力地震動の選定が行われているので、1.0とする。</li> </ul>

## 7. 安全係数

### (1) 安全係数の考え方⑤(断面力による照査における安全係数)

#### (4) 断面力による照査における安全係数

- 断面力による照査を行う限界値は、せん断耐力である。



#### ■安全係数の考え方

安全係数	考え方
材料係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリート強度の特性値及び鉄筋の機械的性質の特性値は、実強度に対して小さい値を設定している。</li> <li>応答値算定時に適用する材料係数は、コンクリートと鉄筋の物性値が断面力の算定精度に与える影響は小さいこと、材料物性の特性値の設定において照査における応答値算定が安全側となるように配慮されていることを踏まえて1.0とする。</li> <li>限界値算定時に適用する材料係数は、既設構造物において、強度等の材料特性のばらつきを考慮して特性値が設定されていることを実測値により確認し、1.0とする。詳細についてはp73に示す。</li> </ul>
部材係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>せん断耐力評価式に基づいてせん断耐力を求める場合、コンクリート寄与分に対して1.3、鉄筋寄与分に対して1.1とする。</li> </ul>
構造解析係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>変形に関する応答値の評価精度に比較して、断面力に関する応答値の評価精度は高いと考えられることから、変形照査の場合より低減させて1.05とする。</li> </ul>
荷重係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>地震応答解析による荷重の算定において構造物を線形として荷重を保守的に評価していること、荷重の載荷方法を奥行き一様として保守的に作用させていること、地震時増分荷重は部材の三次元的変形を踏まえ適切に代表時刻を選定すること等から、1.0とする。</li> </ul>
構造物係数	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子力施設の場合、別途重要度分類がなされ、それに基づいて入力地震動の選定が行われているので、1.0とする。</li> </ul>

## 7. 安全係数

### (2) 規格・基準類との比較①

- 安全係数が適切に設定されていることを新規制下の工認で実績があり、変形照査や断面力による照査手法について規定されている土木学会マニュアル2005との比較により確認する。
- また、土木学会マニュアル2005同様二次元部材非線形解析による照査手法が規定されている鉄道構造物等設計標準2012、本評価手法と同様の三次元材料非線形解析による照査手法が規定されている土木学会マニュアル2018及びコンクリート標準示方書2017を参照し、妥当性を確認する。

表 比較に用いる規格・基準類とその適用性

解析手法	参考とした規格・基準	規格・基準の適用範囲・対象構造物	適用性
二次元部材非線形解析	①土木学会マニュアル2005	原子力発電所屋外重要土木構造物 (Sクラスの機器・配管を支持する鉄筋コンクリート構造物または、同等の耐震安全性が要求される鉄筋コンクリート構造物)	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子力発電所屋外重要土木構造物に特化した規格・基準であり、屋外重要土木構造物の特徴(埋設されたRC構造)を十分に考慮されたものであり、適用性がある。</li> <li>部材に対する照査方法として二次元材料非線形解析を用いた限界値の算定方法が規定されている。</li> </ul>
	②鉄道構造物等設計標準※2012	鉄道の橋梁、高架橋、橋台、擁壁、特殊な条件下のトンネル等の鉄道構造物	<ul style="list-style-type: none"> <li>対象とする構造物には地下構造物があり、土圧が直接作用する構造物であるなど、構造上の特徴が、屋外重要土木構造物と比較的類似しており適用性がある。</li> </ul>
三次元材料非線形解析	③土木学会マニュアル2018	原子力発電所屋外重要土木構造物および同等の耐震安全性が要求される鉄筋コンクリート構造物 (Sクラスの機器・配管の間接支持機能が求められる鉄筋コンクリート構造物及び、非常時における海水の通水機能が求められる鉄筋コンクリート構造物) 「第3章 材料非線形解析を用いた耐震性能照査」及び「第4章 プッシュオーバー解析を用いた耐震性能照査」がある。	<ul style="list-style-type: none"> <li>原子力発電所屋外重要土木構造物に特化した規格・基準であり、屋外重要土木構造物の特徴(埋設されたRC構造)を十分に考慮されたものであり、適用性がある。</li> <li>面部材で構成された三次元構造物の載荷実験を踏まえ、三次元材料非線形解析を用いた照査方法が規定されている。</li> <li>土圧等の荷重を想定した静的地震力を設定し、構造物単体のプッシュオーバー解析に基づき構造物全体系の挙動に対する照査方法が規定されている。</li> </ul>
	④コンクリート標準示方書2017	一般の鉄筋コンクリート構造及びプレストレストコンクリート構造で構成される構造物(圧縮強度の特性値80N/mm <sup>2</sup> 以下) 「設計編 標準10編」に非線形有限要素解析による性能照査がある。	<ul style="list-style-type: none"> <li>土木系コンクリート構造物の設計から維持管理に至るまで幅広く活用されており、適用性がある。</li> <li>非線形有限要素解析による性能照査として、三次元材料非線形有限要素解析を用いた性能照査が示されている。</li> </ul>

※:「鉄道構造物等設計標準・同解説」鉄道総合研究所、以下「鉄道構造物等設計標準」という。

## 7. 安全係数

### (2) 規格・基準類との比較②

- 地震時の要求機能確保に対する評価のうち、層間変形角やひずみなど変形による照査については、規格・基準類の変形に対する照査の際に考慮する安全係数と比較し、妥当性を確認した。

表 地震時の要求機能確保に対する評価において考慮する安全係数(変形による照査)

安全係数	係数の概要・設定に至る経緯	考慮の方法	各種規格・基準に基づく標準的な値				三次元静的材料非線形解析による耐震評価で採用した値及び設定の妥当性		
			①※1	②※1	③※1	④※1			
材料係数	$\gamma_m$	<ul style="list-style-type: none"> <li>変形評価に用いる材料の設計用値の評価</li> <li>物性のばらつきや供試体と構造物中との材料特性の差異、材料特性の経時的変化を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリートの設計圧縮強度を当該値で除する</li> </ul>	1.0	1.3	1.3※2	1.0	③においても既設構造物に対して実測値による確認を踏まえて1.0としてよいとされている。 文献に基づく標準的な値を設定している。	
			<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄筋の降伏強度を当該値で除する</li> </ul>	1.0	1.0	1.0	1.0		
部材係数	$\gamma_b$	<ul style="list-style-type: none"> <li>限界値計算上の不確実性、部材寸法のばらつきの影響、部材の重要度を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>変形に対する限界値を当該値で除する</li> </ul>	1.0	1.0~1.15	1.0	併せて1.1~1.5	1.0	安全側に考慮された限界値が別途定められていることから1.0としている。
構造解析係数	$\gamma_a$	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造解析手法自体の精度や不確実性を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発生主ひずみに当該値を乗じる</li> </ul>	1.2	1.0	1.2		1.2	解析精度は高いと考えられることから1.2としている。
荷重係数	$\gamma_f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計荷重評価</li> <li>荷重の変動、荷重の算定方法の不確実性、設計耐用期間中の荷重の変化、荷重特性が限界状態に及ぼす影響、環境作用の変動等を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>永久荷重、変動荷重、偶発荷重(地震荷重)の特性値に当該荷重を乗じる</li> </ul>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	文献に基づく標準的な値を設定している。
構造物係数	$\gamma_i$	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造物の総合的な安全性評価</li> <li>構造物の重要度、限界状態に達した時の社会的影響を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>応答値と限界値の比に当該値を乗じる</li> </ul>	1.0	1.0	1.0	1.0~1.2	1.0	構造物の重要度及び限界状態に達した時の社会的影響については、屋外重要土木構造物として基準地震動Ssによる地震力を適用することで十分に考慮されているとして1.0としている。

※1:①は土木学会マニュアル2005, ②は鉄道構造物等設計標準2012 ③は土木学会マニュアル2018, ④はコンクリート標準示方書2017に記載の値。

※2:既設構造物において、材料特性のばらつきを考慮して特性値が設定されていることを確認した場合は1.0として良い。



## 7. 安全係数

### (2) 規格・基準類との比較③

- 地震時の要求機能確保に対する評価のうち、断面力による照査については、規格・基準類のせん断に対する照査の際に考慮する安全係数と比較し、妥当性を確認した。

表 地震時の要求機能確保に対する評価において考慮する安全係数(断面力による照査)

安全係数	係数の概要・設定に至る経緯	考慮の方法	各種規格・基準に基づく標準的な値				三次元静的材料非線形解析による耐震評価で採用した値及び設定の妥当性		
			①※1	②※1	③※1	④※1			
材料係数	$\gamma_m$	<ul style="list-style-type: none"> <li>断面力評価に用いる材料の設計用値の評価</li> <li>物性のばらつきや供試体と構造物中との材料特性の差異、材料特性の経時的変化を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリートの設計圧縮強度を当該値で除する</li> </ul>	1.3※2	1.3	1.3※2, 3	1.0	1.0	応答値算定用は、文献に基づく標準的な値を設定している。 限界値算定用は、p73に示す考え方により1.0としている。
			<ul style="list-style-type: none"> <li>鉄筋の降伏強度を当該値で除する</li> </ul>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	文献に基づく標準的な値を設定している。
部材係数	$\gamma_b^{※4}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>部材耐力の計算上の不確実性、部材寸法のばらつきの影響、部材の重要度を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>コンクリートが分担するせん断耐力を当該値で除する</li> </ul>	1.3	1.1~ 1.3	1.3又は キャリブレーションより設定	1.1~ 1.3	1.3	せん断耐力評価式に用いる標準的な値を設定している
			<ul style="list-style-type: none"> <li>せん断補強筋が分担するせん断耐力を当該値で除する</li> </ul>	1.1				1.1	
構造解析係数	$\gamma_a$	<ul style="list-style-type: none"> <li>断面力の評価</li> <li>断面力算定時の構造解析の不確実性等を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発生断面力に当該値を乗じる</li> </ul>	1.05	1.0	1.05※5	1.0	1.05	文献に基づく標準的な値を設定している。
荷重係数	$\gamma_f$	<ul style="list-style-type: none"> <li>設計荷重評価</li> <li>荷重の変動、荷重の算定方法の不確実性、設計耐用期間中の荷重の変化、荷重特性が限界状態に及ぼす影響、環境作用の変動等を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>永久荷重、変動荷重、偶発荷重(地震荷重)の特性値に当該荷重を乗じる</li> </ul>	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	文献に基づく標準的な値を設定している。
構造物係数	$\gamma_i$	<ul style="list-style-type: none"> <li>構造物の総合的な安全性評価</li> <li>構造物の重要度、限界状態に達した時の社会的影響を考慮</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>発生断面力に当該値を乗じる</li> </ul>	1.0	1.0	1.0	1.0~ 1.2	1.0	構造物の重要度及び限界状態に達した時の社会的影響については、屋外重要土木構造物として基準地震動Ssによる地震力を適用することで十分に考慮されているとして1.0としている。

※1:①は土木学会マニュアル2005, ②は鉄道構造物等設計標準2012, ③は土木学会マニュアル2018, ④はコンクリート標準示方書2017に記載の値。

※2:応答値算定用の材料係数は1.0を設定。

※3:既設構造物において、材料特性のばらつきを考慮して特性値が設定されていることを確認した場合は1.0として良い。

※4: $\gamma_b = \gamma_{b1} \times \gamma_{b2}$  表中の値は $\gamma_{b1}$ の値であり、 $\gamma_{b2}$ は層間変形角が1/100以下であることを確認のうえ1.0を設定。

※5:地震時荷重を適切に設定することを前提に1.0として良い。

## 7. 安全係数

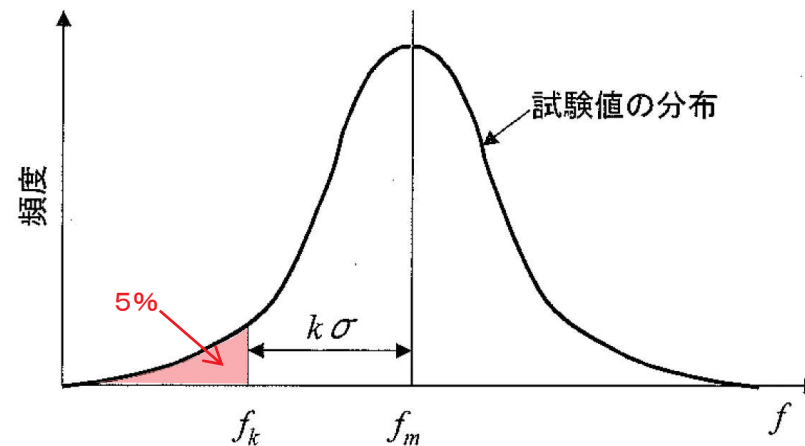
### (2) 規格・基準類との比較③(材料係数の考え方)

- コンクリートの強度に関する特性値は、一般的に以下に示す式により算定され、特性値 $f_k$ を下回る確率は5%を目途に設定されている。
- 女川2号炉において、圧縮強度試験の結果から算定した特性値 $f_k$ が、設計基準強度 $20.5\text{N/mm}^2$ を上回っていることを確認した上で、コンクリートの材料係数を1.0とする。
- 対象構造物は全て既設構造物であり、建設時に実施している28日強度の圧縮強度試験結果が設計基準強度を上回っていることについて確認することとする。なお、コンクリートの固結作用により、現在の強度は28日強度よりも上がっていると考えられる。
- 加えて、現在までに実構造物を対象に複数個所でコア採取した圧縮強度試験を含めることで、経年劣化や施工に起因する材料特性のばらつきも十分考慮できる。

$$f_k = f_m - k\sigma = f_m(1 - k\delta)$$

ここに、  
 $f_m$  : 試験値の平均値  
 $\sigma$  : 試験値の標準偏差  
 $\delta$  : 試験値の変動係数  
 $k$  : 係数 (1.65)

特性値の算定式

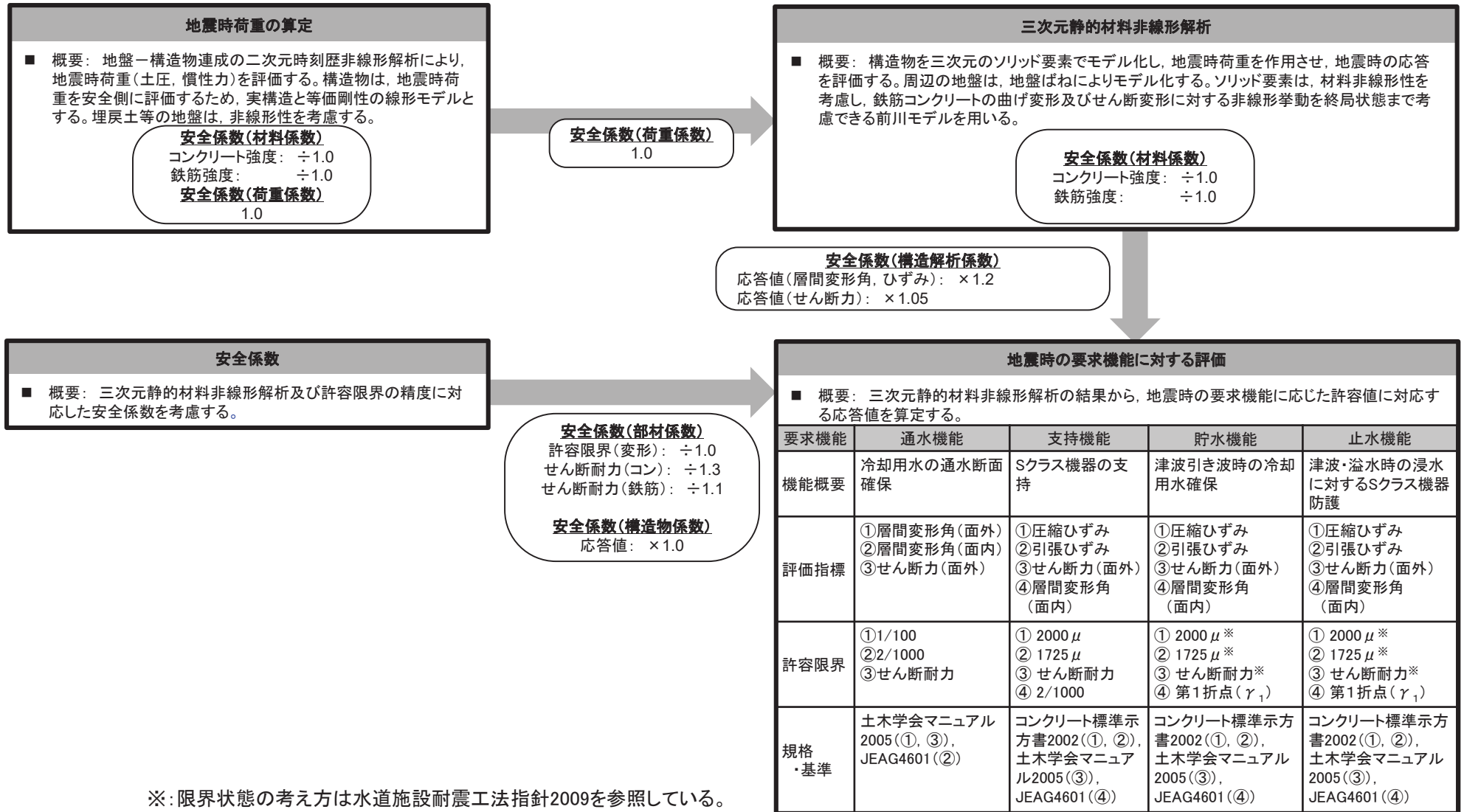


特性値の考え方

## 7. 安全係数

### (3) 照査体系と安全係数の関係

- 女川2号炉で採用する三次元静的材料非線形解析を用いた耐震性評価方法の評価体系と各評価の概要を以下に示す。



## 目次

---

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
- 8. まとめ**

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

## 8. まとめ

- 海水ポンプ室, 取水口, 軽油タンク室, 復水貯蔵タンク基礎は三次元静的材料非線形解析により耐震安全性評価を行うこととしており, 構造が複雑で, 要求機能が多岐にわたり, 新規性の高い評価方法を網羅している海水ポンプ室を代表構造物として, 評価方法の妥当性を検討した。
- 二次元地震応答解析により地震時荷重を算定し, 別途, 三次元モデルへ载荷して耐震安全性評価を行っていることから, 地震時荷重の妥当性として, 以下の2項目について検討し, 適切に地震時荷重が算定できていることを確認した。
  - 地震時荷重は, 海水ポンプ室の延長方向の構造の変化を考慮して, 適切に評価できている。
  - 地震時荷重の選定時刻は, 要求機能を有する部材毎に損傷モードに応じて適切に選定されている。
- 既工認及び新規制における先行プラントにおいても, 三次元材料非線形解析は実績がないことから, 採用する解析コードCOM3が, 三次元構造物の終局状態まで適用可能であることを, 三次元構造物の载荷実験に対する再現解析の事例により確認した。
- 許容限界については, 曲げ系の破壊及びせん断破壊(面内・面外)に対して, 既往の基準類や一般的に用いられる文献等を基に, 新規制工認下で実績のある要求機能に応じた許容限界(層間変形角, ひずみ及びせん断耐力)として設定している。
- 耐震安全性評価において, 安全係数は三次元材料非線形解析による評価に対するプロセス毎に適切な安全係数を設定しており, 規格・基準類と比較しても同等の安全係数であることを確認している。
- 以上の検討により, 三次元静的非線形解析による評価手法は, 構造物の耐震安全性を安全側に評価できることを確認した。

## 目次

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

### 補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

- (1) 海水ポンプ室
- (2) 取水口
- (3) 軽油タンク室・復水貯蔵タンク基礎

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

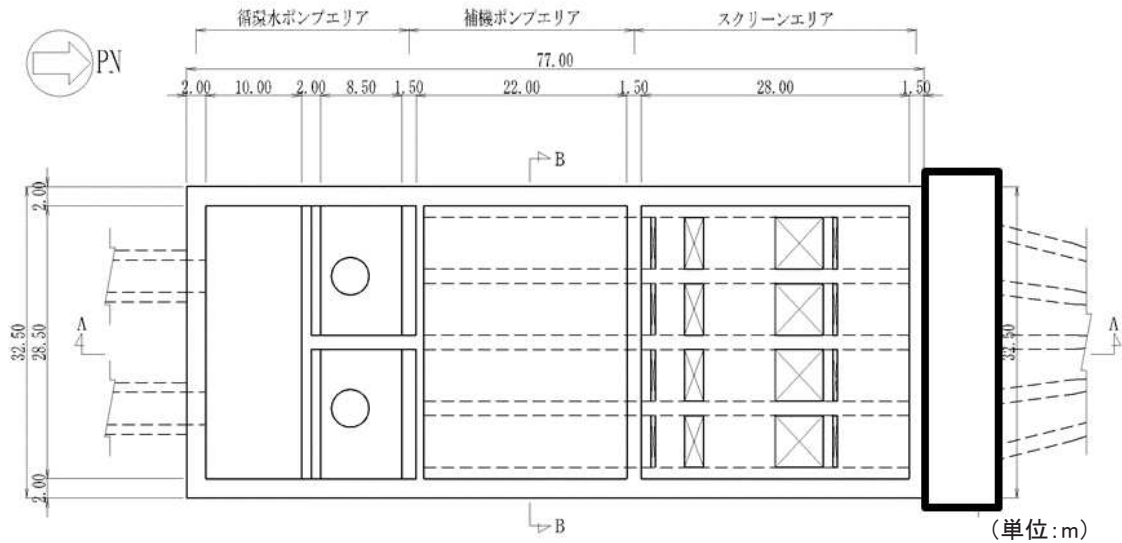
補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

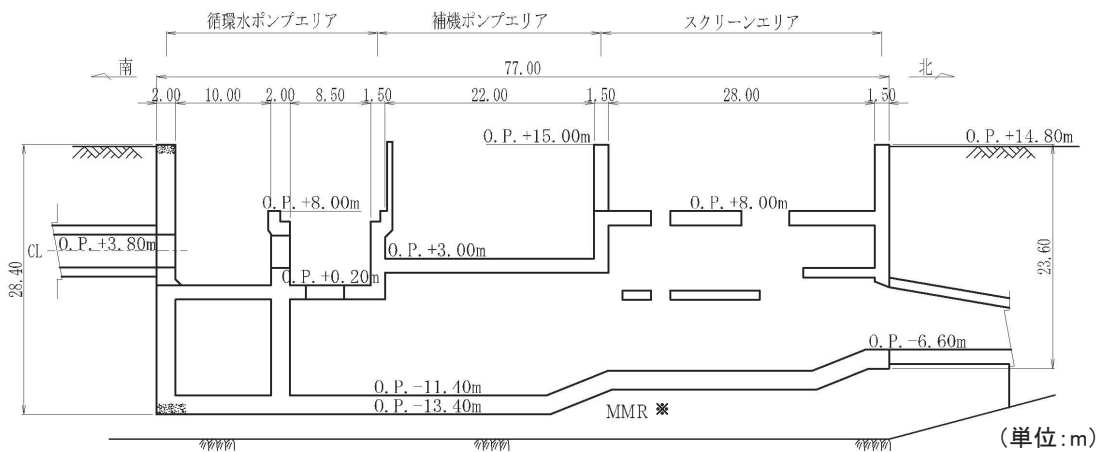
補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

# 補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

## (1) 海水ポンプ室

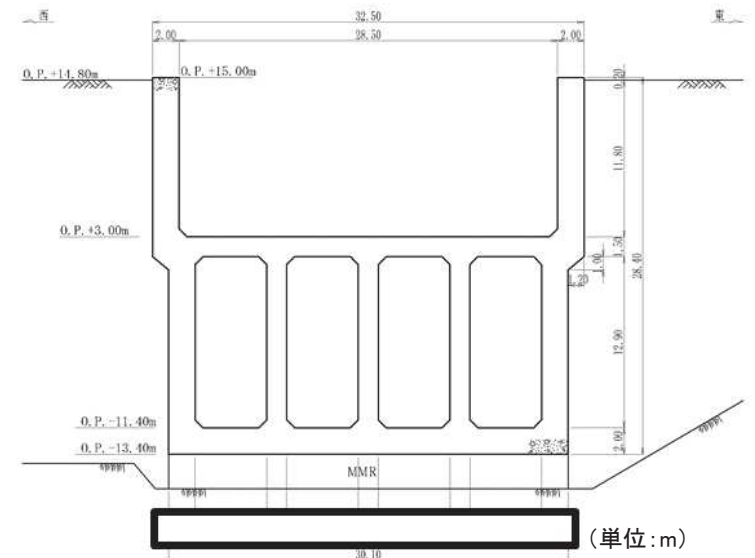


海水ポンプ室平面図



海水ポンプ室断面図(A-A断面)

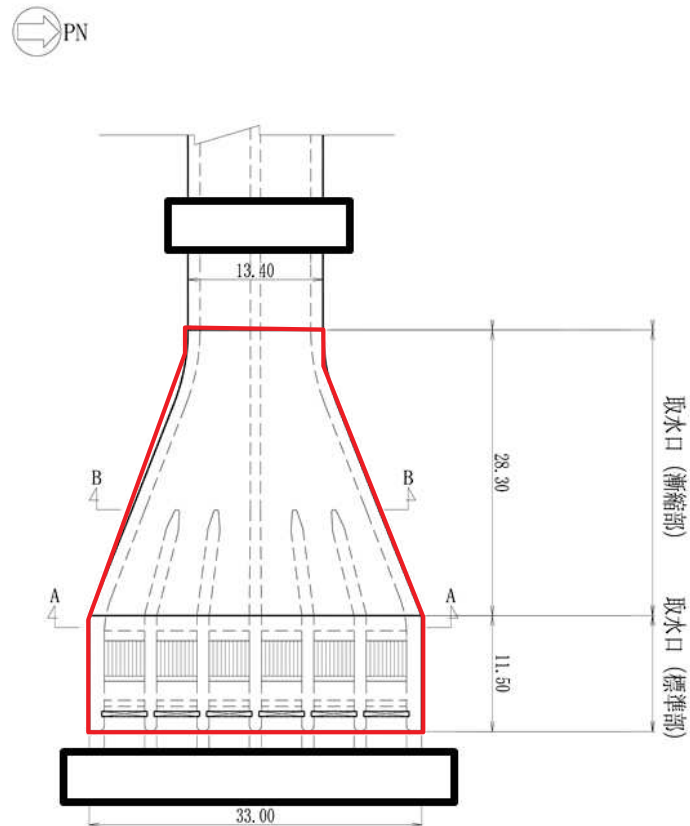
※MMR:置換コンクリート



海水ポンプ室断面図(B-B断面)

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

# 補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図 (2) 取水口①



(単位:m)

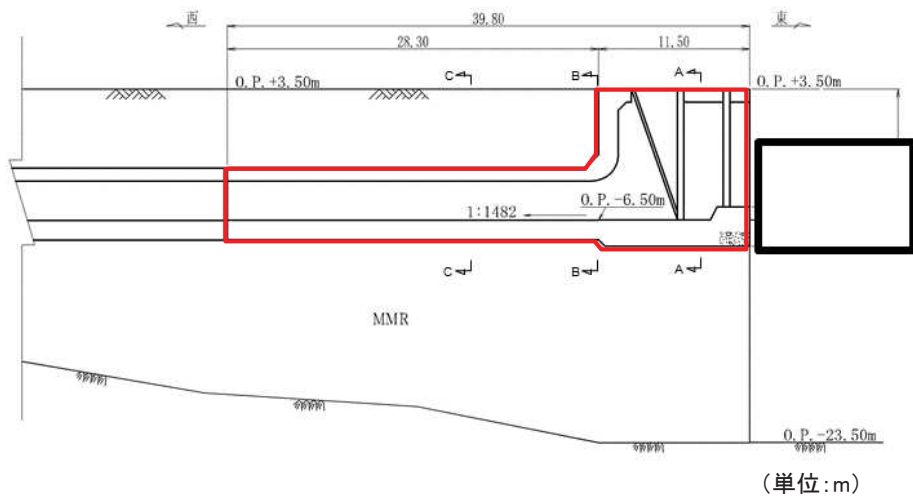
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

取水口平面図

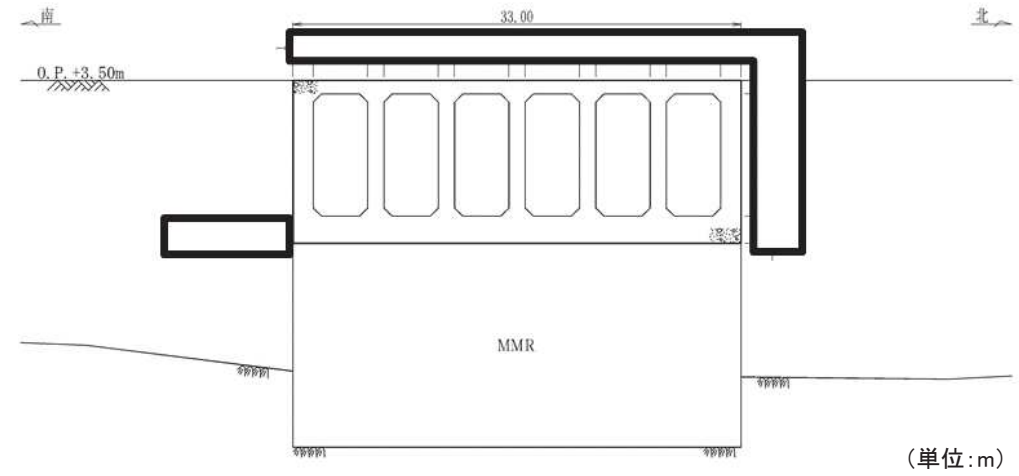


# 補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

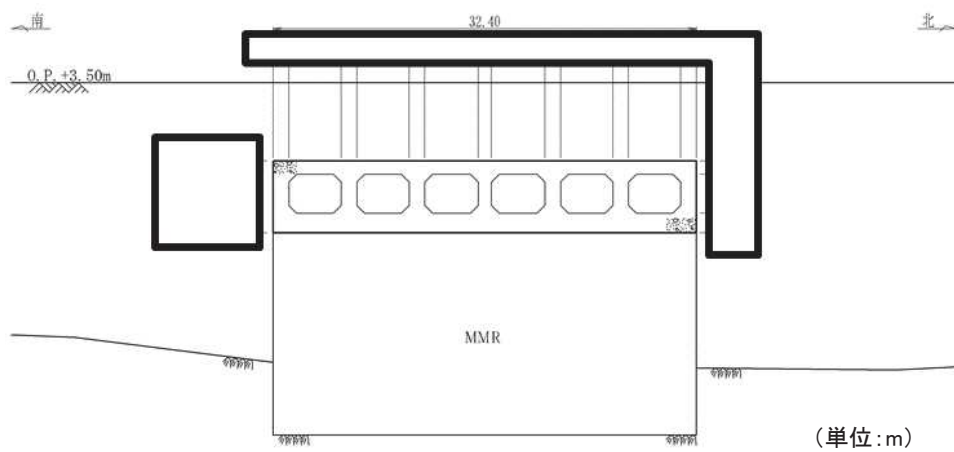
## (2) 取水口②



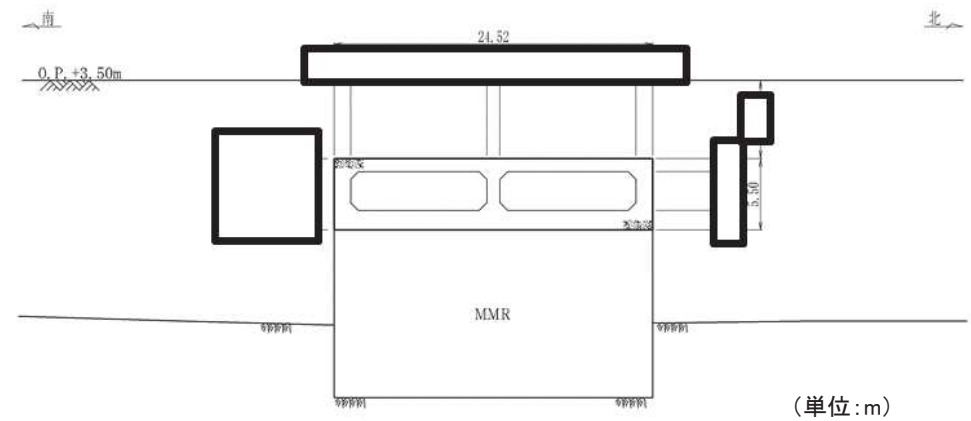
取水口縦断面図



取水口(標準部)断面図(A-A断面)



取水口(漸縮部)断面図(B-B断面)

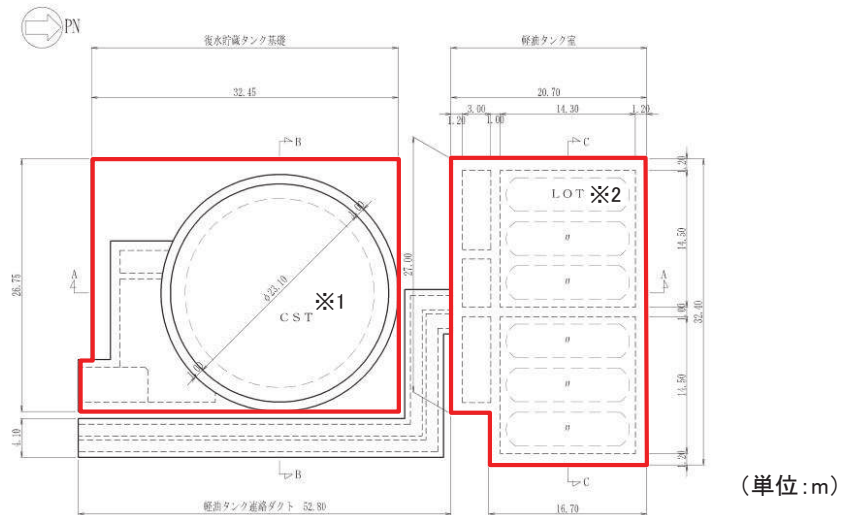


取水口(漸縮部)断面図(C-C断面)

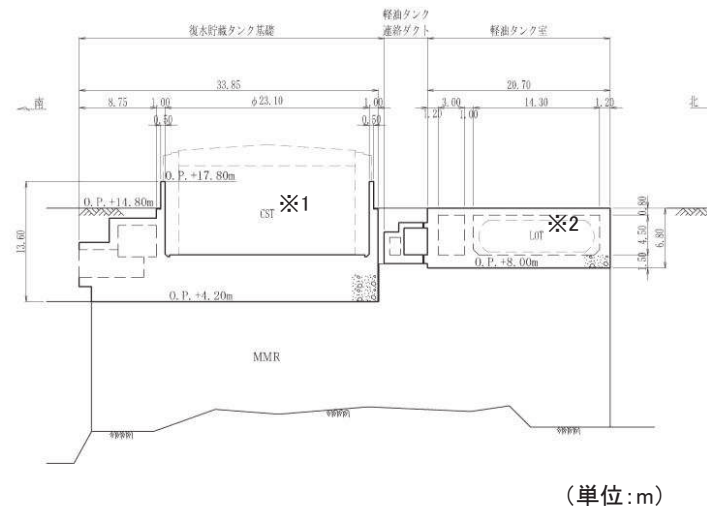
枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

# 補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

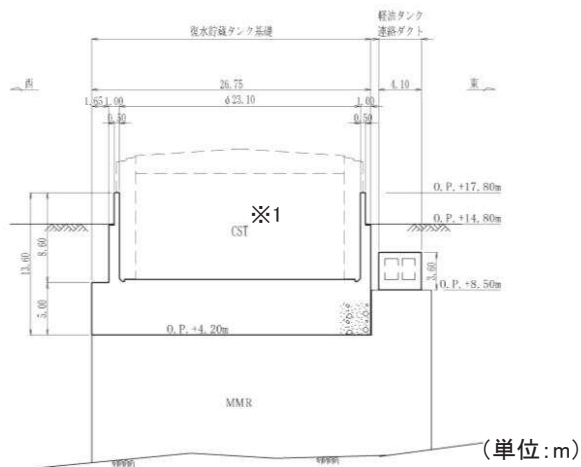
## (3) 軽油タンク室・復水貯蔵タンク基礎



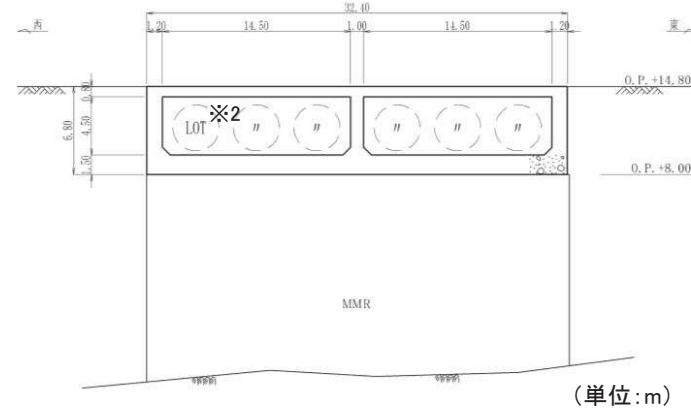
軽油タンク室・復水貯蔵タンク基礎  
平面図



軽油タンク室・復水貯蔵タンク基礎  
断面図(A-A断面)



復水貯蔵タンク基礎断面図(B-B断面)



軽油タンク室断面図(C-C断面)

※1 CST: 復水貯蔵タンク  
※2 LOT: 軽油タンク

## 目次

---

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

### **補足説明2. 支持機能に関する実験結果**

- (1) **実験概要**
- (2) **実験結果**

補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

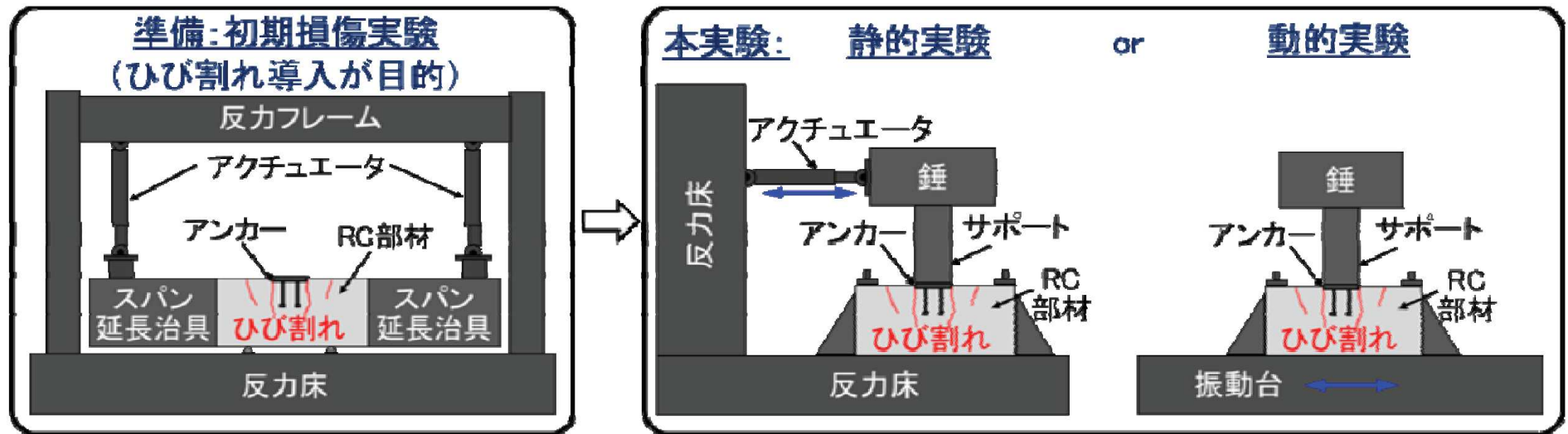
## 補足説明2. 支持機能に関する実験結果

### (1) 実験概要①

- 支持機能に対する許容限界として、鉄筋が降伏しないこと(鉄筋の降伏強度に対応するひずみ:  $1725\mu$ )としており、本許容限界は先行プラントの新規制下の工認でも実績のある許容限界であり、参考として部材を曲げ降伏させた状態でアンカーの耐力を評価する実験を行っている事例\*を示す。
- アンカーを埋め込んだRC製はり部材を曲げ降伏させた試験体に対し、水平荷重(静的及び動的)による方法でアンカーの耐力を評価する実験を行っている。
- 実験の結果、アンカー定着部周辺におけるRC部材の損傷が曲げ降伏程度であれば、アンカーは本来の定着性能を保持できることが確認されている。

#### 実験概要

- アンカーの定着部付近に2点支持2点荷重の曲げ実験(以下、初期損傷実験という)によって初期損傷(曲げ降伏)を与えた後、アンカープレート上の鋼製サポートを模擬した片持ちばりと配管を模擬した錘を設置し、静的な繰返し荷重実験(以下、静的実験という)、及び振動台実験(以下、動的実験という)を行い、結果に基づいてアンカーの耐力評価を行った。



構造物の損傷を考慮したアンカーの定着性能評価のための実験概要

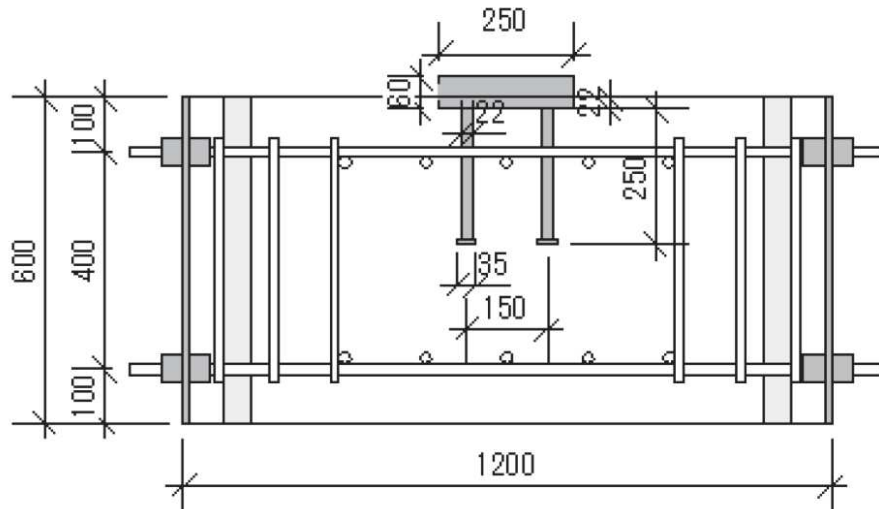
\*: 出典: 土木学会マニュアル2018(技術資料)

## 補足説明2. 支持機能に関する実験結果

### (1) 実験概要②

#### 試験体および実験ケース

- 試験体は、アンカーを定着させたRC部材であり、構造物と機器の境界部を模擬している。
- アンカーは4本の頭付きアンカーボルト(JIS B 1198, 軸部直径22mm, 頭部直径35mm)と、幅250mm×奥行き250mm×厚さ60mmのアンカープレート(材質はSS400)で構成されている。
- アンカー長はSクラスの配管等のアンカーを想定して250mmとなっている。なお、女川2号炉における海水ポンプ室に設置されているSクラスの配管等のアンカー長は300~160mmがほとんどであり、250mmである本実験結果を一例として示している。
- 試験体外形は、幅1.2m, 奥行き0.9m, 高さ0.6mである。
- 主筋は、D19(SD345)のネジ鉄筋とし、5本×2列で計10本配置している。
- 同一仕様の試験体4体に対して、初期損傷が無い場合と有る場合の静的実験(S-0, S-1)および動的实验(D-0, D-1)を実施する。



試験体の形状と寸法

実験ケース

実験ケース	初期損傷	実験方法
S-0	無し	静的実験
S-1	有り	
D-0	無し	動的实验
D-1	有り	

## 補足説明2. 支持機能に関する実験結果

### (1) 実験概要③

#### アンカーの許容耐力

- アンカー系の設計指針※に基づき算定した、許容引張力、許容せん断力及び水平力作用位置における許容耐力を表に示す。
- 本試験体における許容引張力及び許容せん断力はアンカーの降伏で決まっており、許容引張力及び許容せん断力を用いて水平力作用位置における許容耐力を算定している。
- なお、アンカー系の設計指針とJEAG4601の許容耐力の算定式は基本的に同一で、一部係数のみ異なっており、JEAG4601が安全側(許容耐力が小さい)となっている。アンカー系の設計指針により算定した本許容耐力は、JEAG4601に基づき算定した許容耐力よりも大きくなるが、後述するとおり最大耐力は本許容耐力を上回っており、実験結果に影響を及ぼすことはない。

#### 材料試験の結果

##### アンカー(JIS 1198)

	設計基準	材料試験
降伏強度(MPa)	235	330.2
引張強度(MPa)	400	464.1

##### コンクリート(24MPa)

	設計基準	材料試験
圧縮強度(MPa)	24	40.9
引張強度(MPa)	-	3.2

##### 主筋(D19 SD345)

	設計基準	材料試験
降伏強度(MPa)	345	401.9
引張強度(MPa)	490	582.9

#### 許容耐力算定結果

項目	単位	許容耐力 (材料試験値ベース)
許容引張力(コンクリートの破壊)	kN	142.0
許容引張力(アンカーの降伏)	kN	125.5
許容引張力(上記のうち小さい方)	kN	125.5
許容せん断力(コンクリートの破壊)	kN	136.3
許容せん断力(アンカーの降伏)	kN	87.9
許容せん断力(上記のうち小さい方)	kN	87.9
水平力作用位置における許容耐力	kN	43.0

※: 日本建築学会編: 各種合成構造設計指針・同解説, 第4編 各種アンカーボルト設計指針・同解説, 2010

## 補足説明2. 支持機能に関する実験結果

### (1) 実験概要④

#### 実験の条件

##### (1) 初期損傷の導入

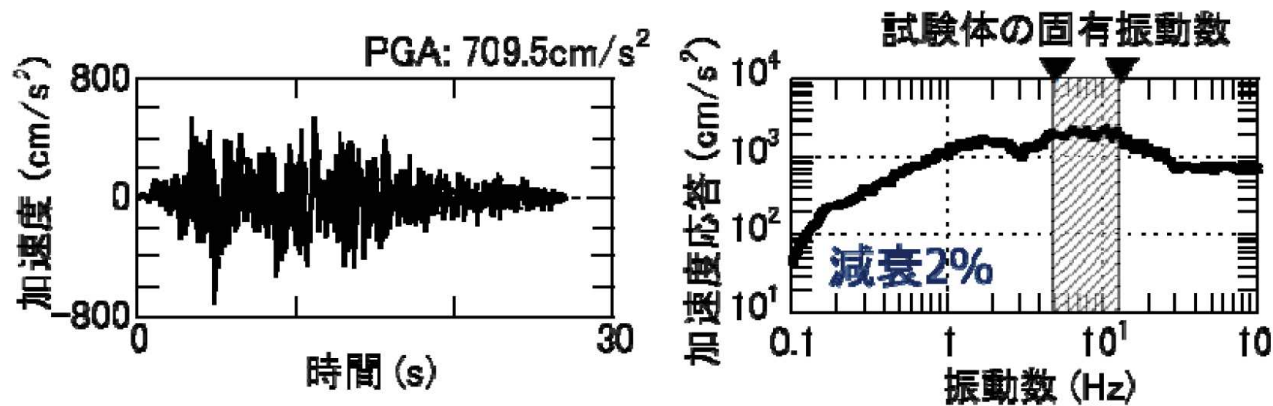
- RC製部材の両端にスパン延長治具を設置し、鉛直方向の500kNアクチュエータを2本取り付けて、2点支持2載荷によって、試験体中央のアンカー定着部付近にRC部材が曲げ降伏に達するまで曲げひび割れを与える。

##### (2) 静的実験の条件

- アンカープレート上に片持ちはり形式の鋼製サポートと錘(重量20kN)を取り付け、水平力を錘重心位置に変位制御で与える。
- 水平力作用位置における変位を、サポート基部からの高さ(1,000mm)で除した値をサポートの変形角と定義し、変形角を0.5%刻みで3.0%まで漸増させ、それ以降は1.0%刻みで漸増させる。

##### (3) 動的実験の条件

- 静的実験と同様の鋼製サポートと錘(質量2ton)をアンカープレート上に取り付けた状態で水平一軸の振動台実験を行う。
- 加振に際しては、入力倍率20%を初期値として、40%、60%、80%と、20%ずつ増加させていき、振動台の加振限界(入力倍率200%)まで加振を行う。入力倍率200%まで上げて損傷が顕著でない場合には、入力倍率100%と200%の加振を再度行った。



動的実験における入力地震動

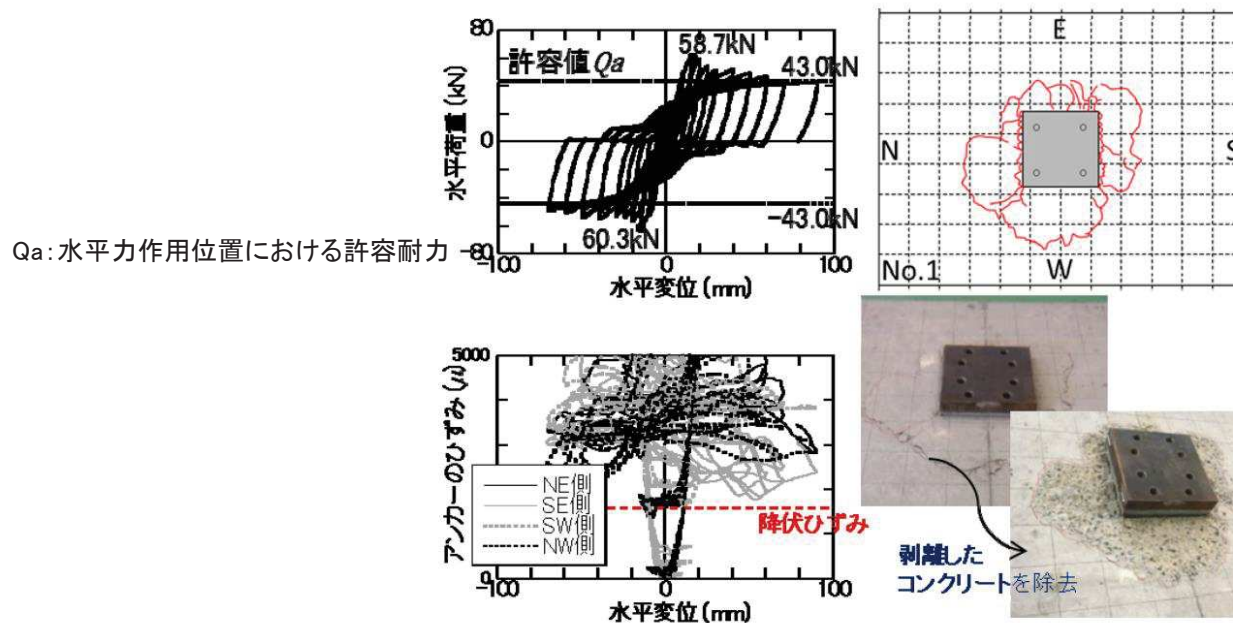
## 補足説明2. 支持機能に関する実験結果

### (2) 実験結果①

#### 静的実験の結果

##### (1) 初期損傷無しの場合

- アンカーの降伏が先行する履歴特性や損傷状況を示している。
- 履歴曲線によると、アンカーの降伏で決まる許容耐力を上回る最大耐力を発揮しており、ポストピークにおいても安定したねばり強い履歴特性が得られている。
- アンカーのひずみの結果を見ると、载荷に伴っていずれのアンカーも引張側に降伏し、その後も载荷変位の増大に伴ってひずみのレベルは著しく進展している。
- 損傷はアンカープレート周辺のみに残っており、これらはアンカープレートの支圧などによるコンクリート表面の剥離と考えられる。



静的実験の主な結果(初期損傷無し)

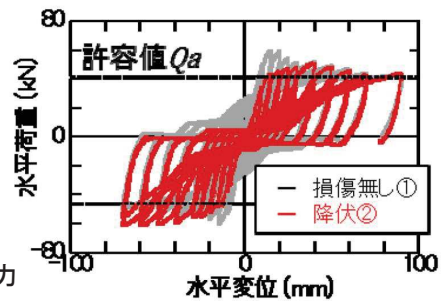


## 補足説明2. 支持機能に関する実験結果 (2) 実験結果②

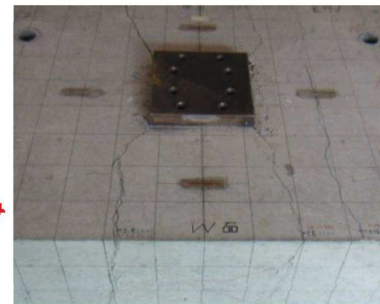
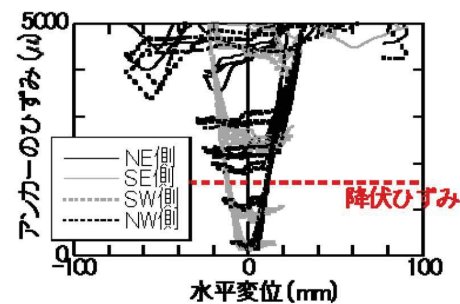
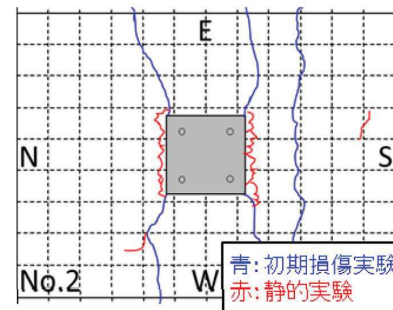
### 静的実験の結果

#### (2) 初期損傷有りの場合

- 履歴曲線によると、実験による最大耐力はアンカーの降伏で決まる許容値を上回っており、初期損傷が無い場合と比較しても遜色ない耐力やねばり強さを発揮する結果となっている。
- アンカーのひずみを見ると、初期損傷が無い場合と同様に、アンカーは降伏し、その後も载荷変位の増大に伴ってひずみレベルは著しく進展している。
- 外観上の損傷状況として、アンカープレート周辺にコンクリート表面の剥離が多少あるものの、それ以外の顕著なひび割れの進展は認められなかった。
- 以上より、初期損傷の有無によらず、アンカー本来の定着性能は保持していると言える。



$Q_a$ : 水平力作用位置における許容耐力

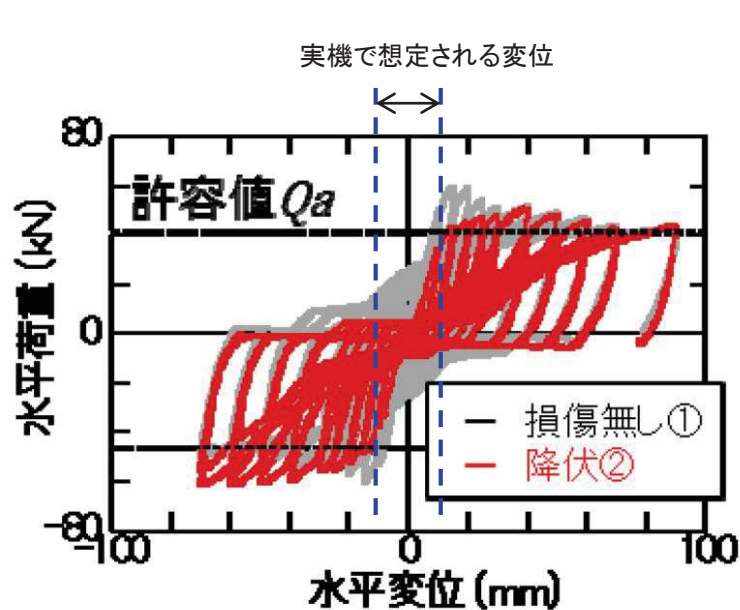


静的実験の主な結果 (初期損傷有り)

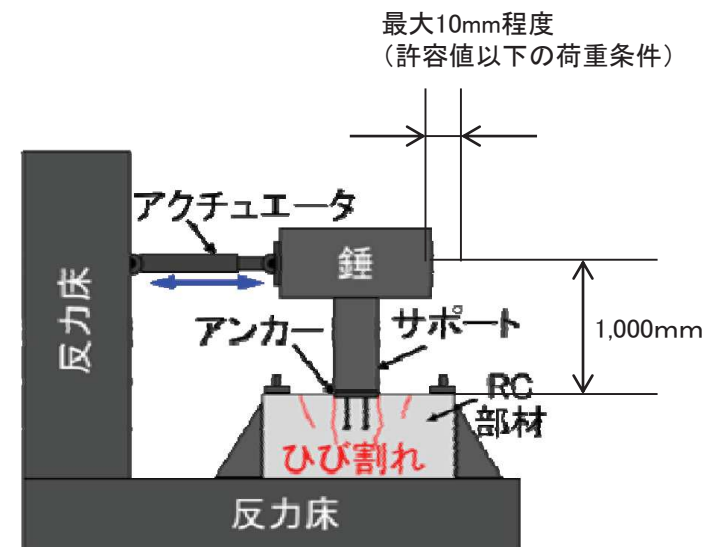
## 補足説明2. 支持機能に関する実験結果 (2) 実験結果③

### 剛性低下の実機への影響

- 本試験は、アンカーの耐力試験として、耐力の低下が確認されるまで荷重を増加させているが、実機で想定される機器の荷重条件は、試験初期の数サイクルに該当し、この範囲においては、剛性低下は極僅かであり、耐力の低下も認められない。また、水平力作用位置(アンカー一部から上方に1mの位置)における水平変位は、最大10mm程度と微小である。
- 実機のアンカーは、壁又は床に設置し、鋼材を介して配管を支持しており、鋼材と配管の間には適切なクリアランスを設けていることから、変位による影響は小さく、機器側の設計に反映する事項はないと考えられる。



静的実験の主な結果(初期損傷有り)



試験装置の概略図

## 補足説明2. 支持機能に関する実験結果

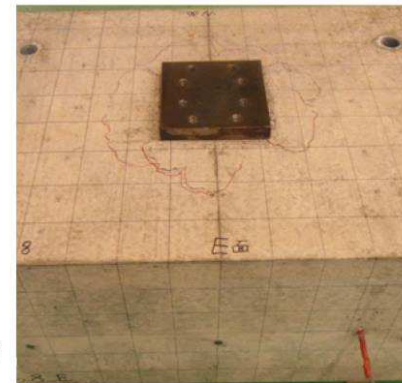
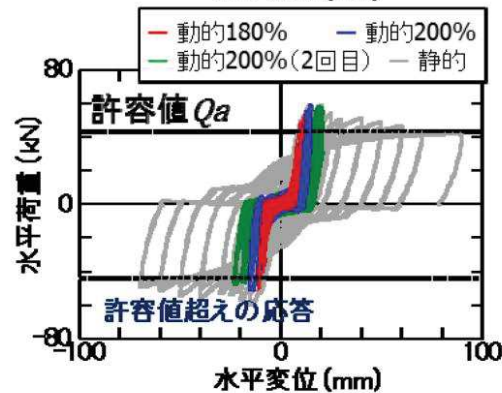
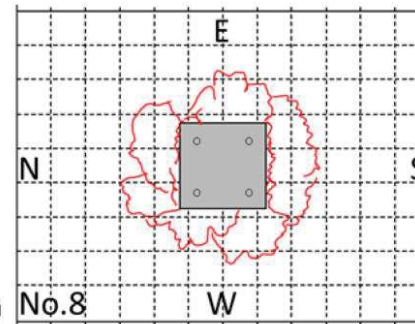
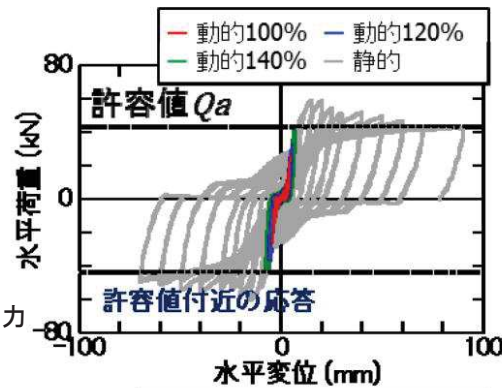
### (2) 実験結果④

#### 動的実験の結果

##### (1) 初期損傷無しの場合

- 履歴曲線によると、動的実験による最大耐力はアンカーの降伏で決まる許容耐力を満足しており、許容耐力を超過する応答が生じても、安定した履歴特性を呈している。また、静的実験の履歴特性と全体的によく対応している。
- 損傷状態は、静的実験と同様に、アンカープレートの支圧などによるコンクリートの剥離のみに留まっている。

Qa: 水平力作用位置における許容耐力



動的実験の主な結果 (初期損傷無し)

## 補足説明2. 支持機能に関する実験結果

### (2) 実験結果⑤

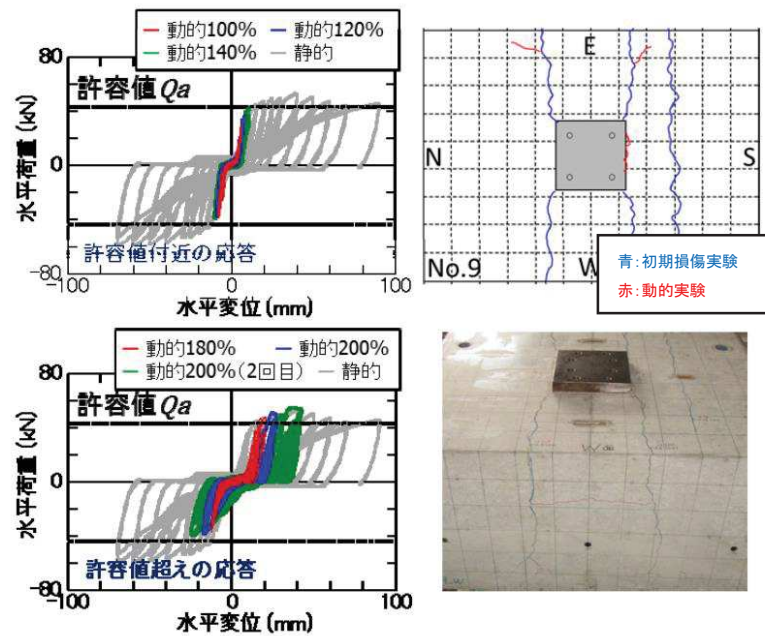
#### 動の実験の結果

##### (2) 初期損傷有りの場合

- 履歴曲線によると、初期損傷無しの場合と比べて遜色ない最大耐力と粘り強さを発揮している。また、静的実験の履歴特性と比較しても、全体的によく対応している。
- 損傷状態は、初期損傷実験によるひび割れの更なる進展は認められず、新たな損傷はアンカープレート周辺のコンクリート表面の剥離のみに留まっている。
- 以上より、静的実験と同様に、初期損傷の有無によらず、アンカー本来の定着性能は保持していると言える。

#### まとめ

- 静的実験及び動の実験において、初期損傷が無い場合と降伏の場合で遜色ない耐力や履歴特性が発揮されたことから、アンカー一定着部周辺における構造物の損傷が**曲げ降伏程度であれば、アンカー本来の定着性能を保持できる**と言える。
- アンカー一定着部周辺の支持機能に対する許容限界を鉄筋の降伏強度に対応するひずみ $1725\mu$ に設定することは保守的であると言える。



$Q_a$ : 水平力作用位置における許容耐力

動の実験の主な結果(初期損傷有り)

## 目次

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

### 補足説明3. モデル化方針

- (1) モデル化方針
- (2) 分割数の検討方針
- (3) 板厚方向の分割数の検討結果
- (4) モデル寸法の影響検討

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

## 補足説明3. モデル化方針

### (1) モデル化方針

- 三次元静的材料非線形解析を行う場合のモデル化は、以下に示すモデル化方針に基づき実施している。

#### モデル化方針

- ① 部材厚方向の分割は、上端筋と下端筋をRCゾーンとし、部材厚に応じてPLゾーンを分割し、3分割以上とする。
- ② 高さ方向のスパンの分割は、解析コードの節点数に対する制限を考慮し、最低分割数を6分割とする。
- ③ 延長方向のスパンの分割は、要素のアスペクト比を考慮し、分割する。

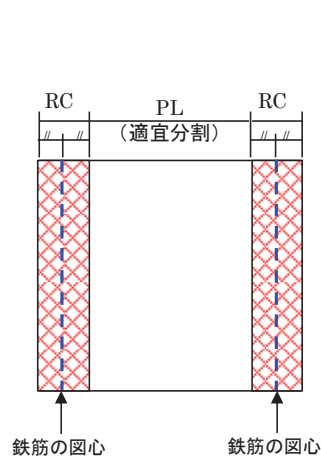


図 部材厚方向分割の概略図

$$l_{max} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} D_b \sqrt{\frac{f_y}{f_t}}$$

ここに、 $l_{max}$  : 鉄筋一本当たりの付着有効面積を正方形で考えた場合の一辺の長さ  
 $D_b$  : 鉄筋の直径  
 $f_y$  : 鉄筋の降伏強度  
 $f_t$  : コンクリートの引張強度

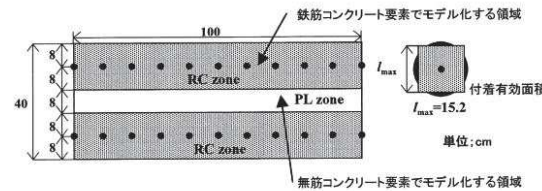


図 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の例  
 (土木学会マニュアル2005より抜粋)

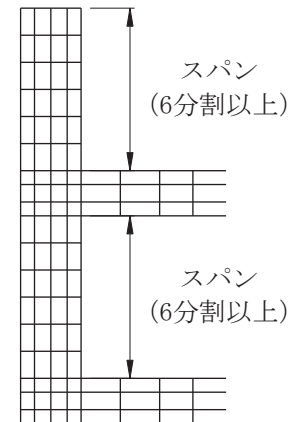


図 スパンの分割の概略図

## 補足説明3. モデル化方針 (2) 分割数の検討方針

- 解析モデルの要素分割数を決定するため、要素分割をパラメータとした感度解析を実施した。検討概要を以下に示す。
- 感度解析に用いる解析モデルは、床版と隔壁に拘束された海水ポンプ室の側壁を想定しており、側壁と同等規模のスパン長や部材厚とした。
- 側壁にかかる主たる荷重は面外荷重であることから、荷重は面外に等分布荷重を漸増载荷する。
- また、「5. (2)解析コードの適用性」に示す再現解析と同等の要素寸法とした場合の影響を確認するため、モデル寸法を縮小したケースについても検討を行った。

### 検討概要

解析モデル	<ul style="list-style-type: none"> <li>海水ポンプ室でスパンが大きな部材となる側壁を想定した規模のモデルで検討を行う。</li> <li>側壁や隔壁を想定し、頂部以外の3辺を弾性要素としてモデル化する。 (境界条件) <ul style="list-style-type: none"> <li>底面及び側面を固定条件。</li> <li>荷重は面外に等分布荷重を漸増载荷する。</li> </ul> </li> </ul>
板厚方向の分割数検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>PLゾーンを2分割、3分割としてパラスタを行う。</li> <li>PLゾーン1分割は、RCゾーンとの割合が極端に異なるため、除外する。</li> <li>スパン方向の分割は6分割で固定する。</li> </ul>
スパン方向の分割数検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>土木学会マニュアル2005において、モデルの要素分割は断面厚さまたは有効高さの1.0倍程度とするのがよいとされている。</li> <li>また、要素分割を過度に細かくすることは、解析結果が力学的に意味を持たなかったり、計算時間が長くなるなど問題点が多いとされている。</li> <li>部材厚さの1.0倍だと3分割となるが、地震応答挙動をより適切に評価するため、アスペクト比等も勘案し、更に細かく6分割とした。</li> </ul>
モデル寸法の影響検討	<ul style="list-style-type: none"> <li>板厚方向及びスパン方向の分割数検討の結果を踏まえた分割数に対し、モデルの寸法を要素寸法が载荷実験の再現解析と同等となるよう、1/5に縮小して影響を確認する。</li> </ul>

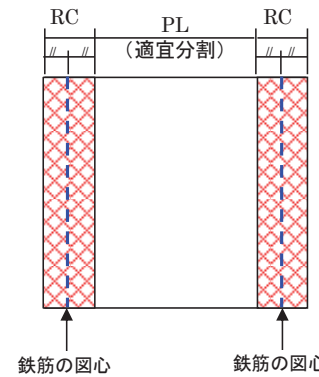


図 部材厚方向分割の概略図

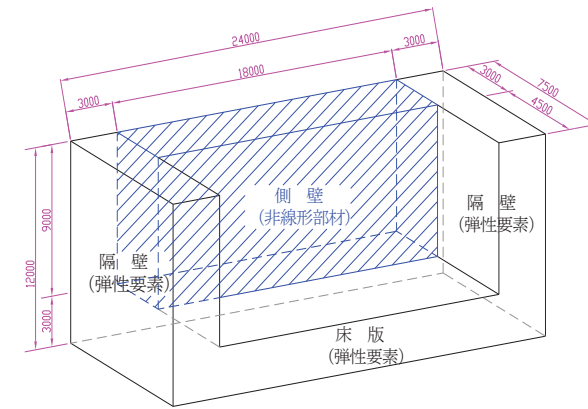


図 解析モデル

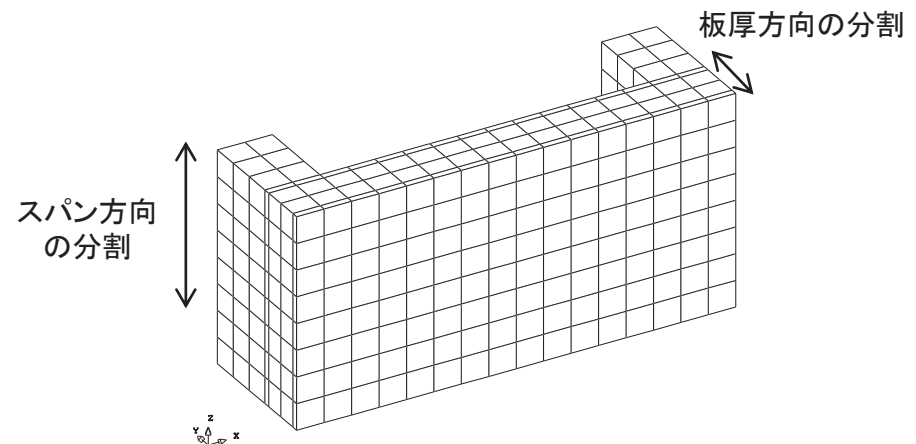


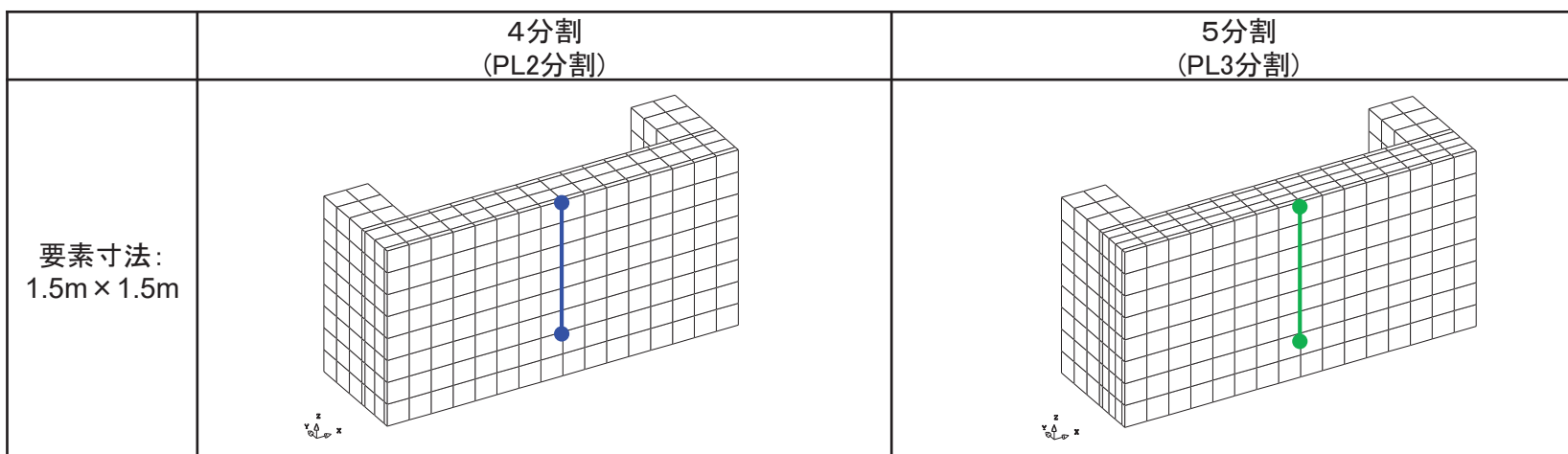
図 要素分割例(板厚方向4分割, スパン方向6分割)

## 補足説明3. モデル化方針

### (3) 板厚方向の分割数の検討結果

#### 感度解析結果

- 下図に、PLゾーンを2分割、3分割した場合の荷重漸増解析における荷重－変位関係を示す。
- PLゾーン2分割（板厚方向に4分割）とPLゾーン3分割（板厚方向に5分割）で、荷重－変位関係に終局状態の変形まで大きな差はなく、設計に用いる範囲においてよく一致していることから、解析コードの節点数の制限を考慮し、板厚方向の分割数を4分割とすることとした。



設計で用いる範囲(耐力点以下)  
においてよく一致している

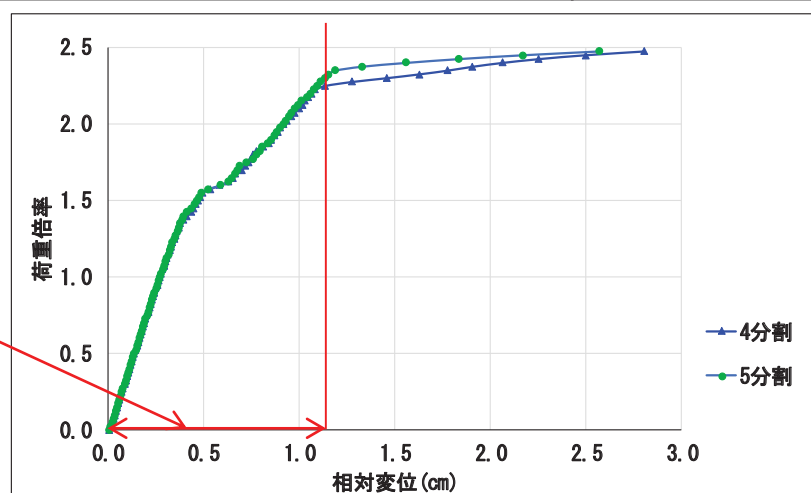


図 荷重－変位関係



### 補足説明3. モデル化方針 (4) モデル寸法の影響検討

#### 感度解析結果

- 下図に、板厚方向4分割、スパン方向6分割とし、モデルの寸法を「5. (2)解析コードの適用性」に示す再現解析の要素寸法と同等となるよう、1/5に縮小(要素寸法0.3m×0.3m)した場合の荷重漸増解析における荷重ステップー変位関係を示す。
- 縮小前の解析モデルと1/5に縮小した解析モデルを比較すると、終局状態まで大きな差は無く、設計に用いる範囲においてよく一致しており、ほぼ同等の荷重ステップで耐力点となっている。
- 以上より、荷重漸増解析において算出される荷重ー変位関係は、要素分割の考え方が同じであれば、モデル寸法(要素寸法)による影響は無いことを確認した。

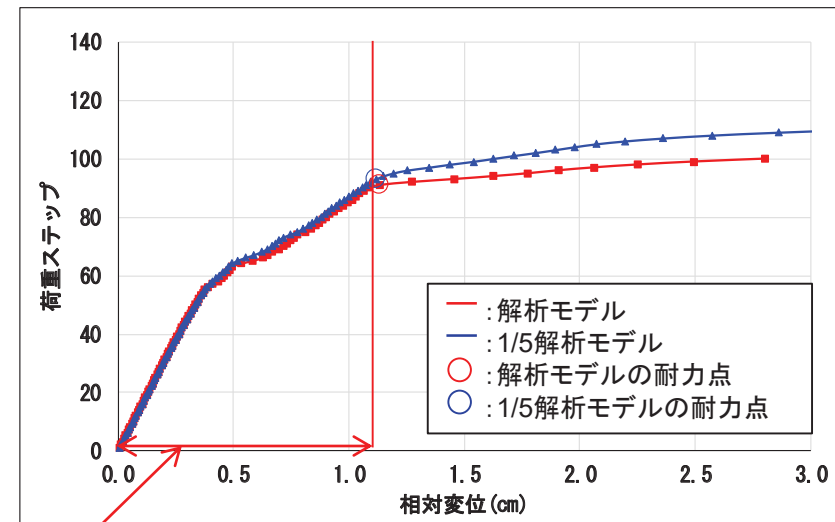
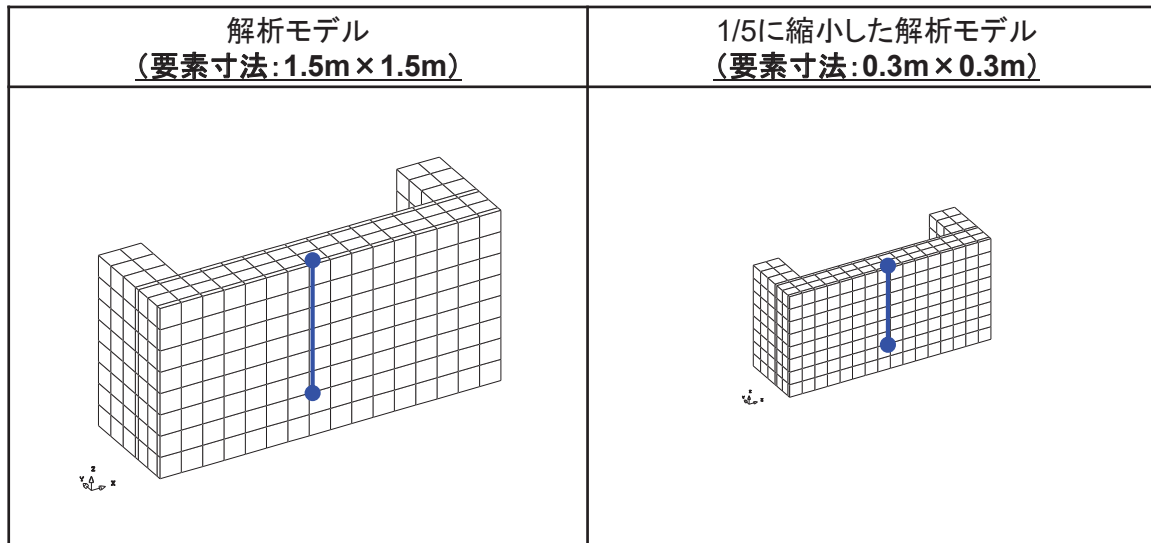


図 荷重ステップー変位関係

設計で用いる範囲(耐力点以下)  
においてよく一致している

## 目次

---

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

**補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討**

- (1) 検討方法
- (2) 検討結果

補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

## 補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

### (1) 検討方法

#### ■ 検討目的

地震時荷重は、エリア毎に二次元地震応答解析で評価した荷重を、延長方向に一様に作用させているが、実際には、側壁の中央が面外にたわむことにより、延長方向の土圧分布は、耐震壁として機能する妻壁や隔壁部分が大きくなることから、一様に作用させることの妥当性について検討する。

#### ■ 検討方法

海水ポンプ室の三次元モデル側面へ地盤ばねを設置し、周辺地盤が一様に変形した場合の、地盤ばね反力の分布形状を算定し、算定した地盤反力を土圧として三次元モデルへ作用させることにより、延長方向に一様な土圧と比較検討する。

#### 検討フロー

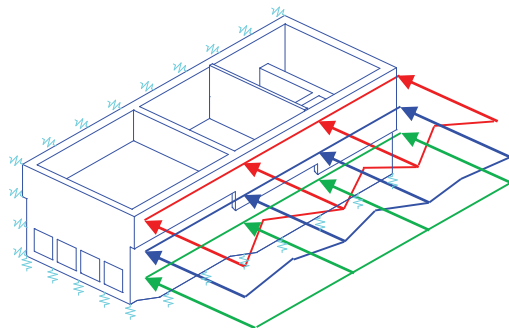
##### 【STEP1】 側壁のたわみを考慮した土圧分布の評価

- 海水ポンプ室周囲の地盤は一様に地盤改良されており、延長方向において、周辺地盤の挙動はほぼ一様である。
- 海水ポンプ室側壁に、等間隔に地盤ばねを設置し、周辺地盤の変位として一様な強制変位  $\delta$  を作用させる。
- 得られる地盤ばね反力の分布形状により、側壁の土圧分布として評価する。(荷重分布1)
- 工認で採用する予定のエリア毎に延長方向に一様に作用させる土圧分布(荷重分布2)との比較を行う。

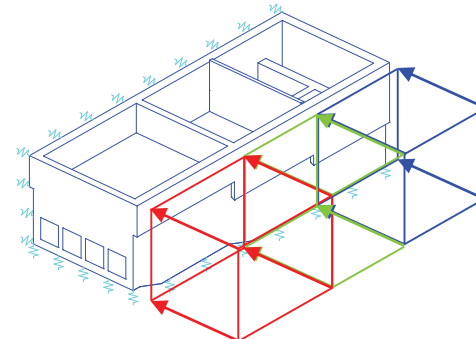


##### 【STEP2】 三次元材料非線形解析による土圧分布の違いに対する影響評価

- ばね反力により評価した土圧分布(荷重分布1)と工認で採用する予定の土圧分布(荷重分布2)を用いて、三次元材料非線形解析を実施し、照査値の比較を行い、土圧分布の違いによる影響評価を行う。
- 土圧分布の算定にあたっては、荷重分布1と荷重分布2において、総荷重が概ね基準地震動  $S_s$  の荷重と同レベルで、等しくなるよう算定した。



荷重分布1イメージ図

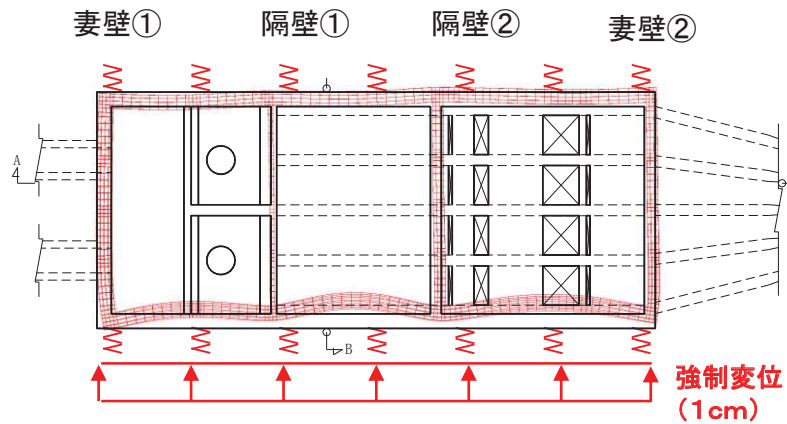


荷重分布2イメージ図

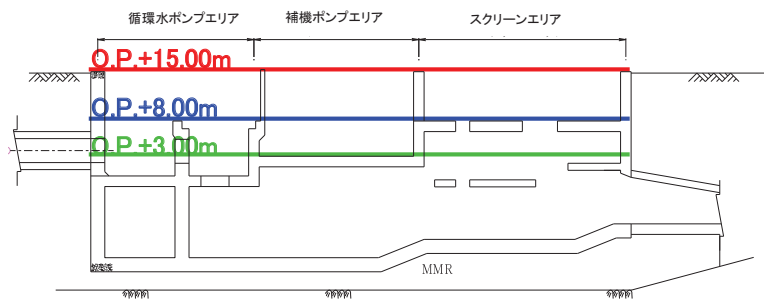
## 補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討 (2) 検討結果①

### 【STEP1】 側壁のたわみを考慮した土圧分布の評価

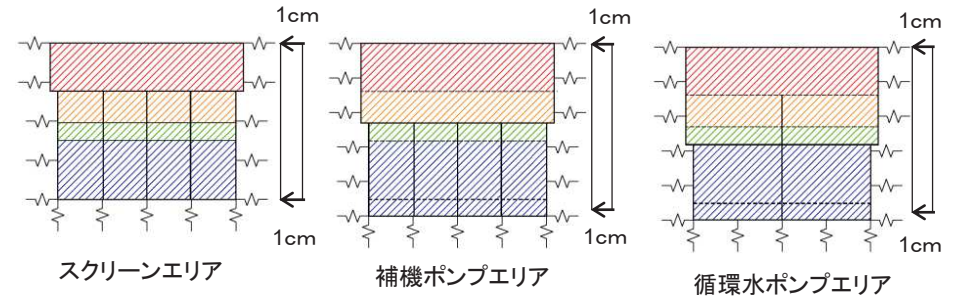
- 構造物の側壁へ等分布に地盤ばねを設置し、その地盤ばねに一律な強制変位を入力し、土圧分布を算定した。
- 高さ方向における分布の違いを確認するため、中床版があるO.P.+3m, +8m, 及び中床版がない構造物天端のO.P.+15mの位置で土圧分布を算定した。
- 土圧分布の妥当性を確認するため、各エリアの二次元等価剛性モデルに地盤ばねを介して一律な強制変位を与えた場合の土圧を算定した。



構造物天端 (O.P.+15.00m) の変形図



縦断面図



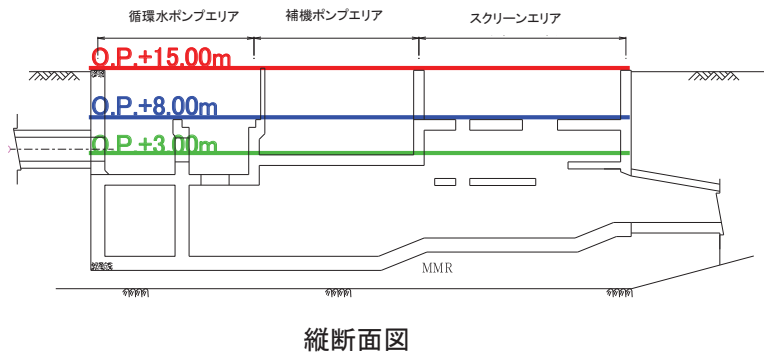
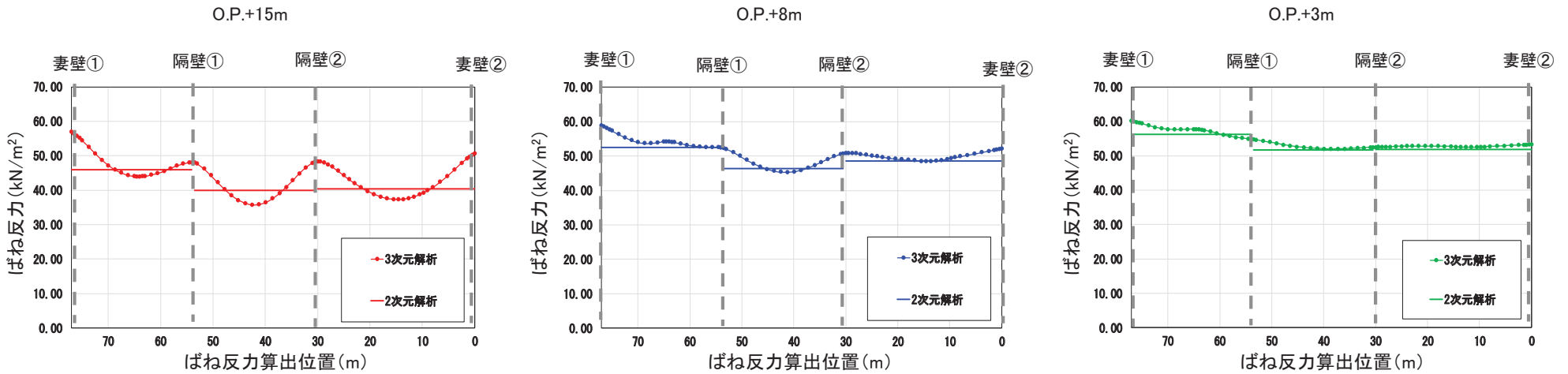
二次元等価剛性モデル

※: 等価剛性モデルの色分けは、材料物性の違いを示している。

## 補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討 (2) 検討結果②

【STEP1】 側壁のたわみを考慮した土圧分布の評価

### 土圧分布の評価結果



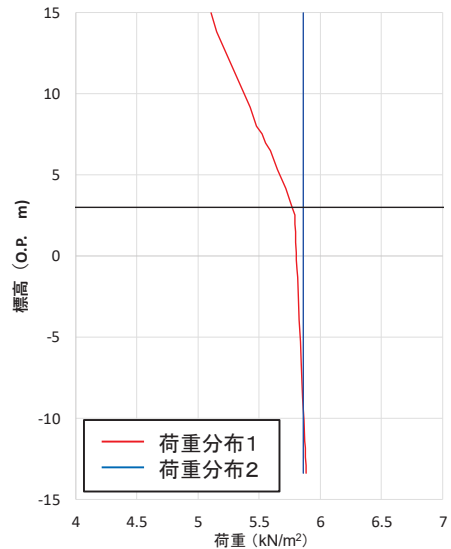
縦断面図

- O.P.+3mの深さでは、中床版に近く、延長方向の挙動がほぼ同一となるため、土圧分布はほぼ一様であるが、循環水ポンプエリア内にある隔壁の影響により、他のエリアより剛性が大きく、土圧も大きくなっている。
- O.P.+15mの深さでは、側壁のたわみの影響により、隔壁間中央や隔壁と側壁間の中央において土圧が低減されており、平均土圧より小さくなっている。(延長方向一様土圧を載荷することは、安全側の評価となっている。)
- 一方、妻壁や隔壁付近においては、土圧が大きくなっており、一様土圧は過少評価となっている。
- 二次元等価剛性モデルにより算定した土圧は、三次元モデルにより算定した土圧分布の概ね平均となっている。

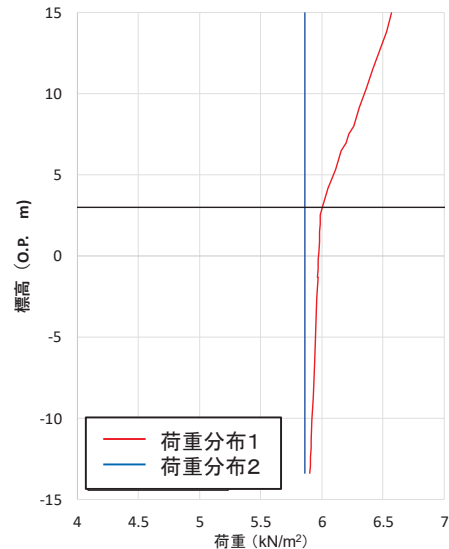
## 補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討 (2) 検討結果③

### 【STEP1】 側壁のたわみを考慮した土圧分布の評価

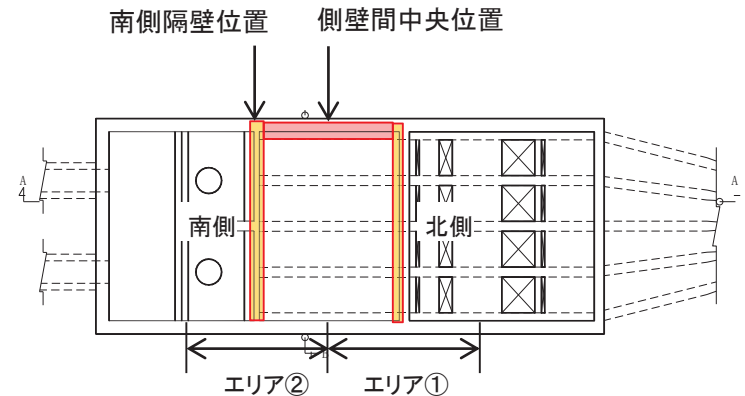
- 補機ポンプエリアの隔壁間中央位置と、隔壁位置における土圧の鉛直分布を比較して以下に示す。
- 地盤ばね反力で評価した荷重分布1では、隔壁間中央位置では側壁の面外方向へのたわみにより、O.P.+3m以浅の荷重は大きく低減されている。
- 一方、隔壁位置では、隔壁が耐震機能を発揮し、荷重を支持するため、荷重分布1の荷重が大きくなっている。
- 隔壁間中央位置で、側壁が面外方向へたわむことにより低減された土圧は、隔壁位置へ再配分され、結局、隔壁が耐震壁として機能し、荷重を支持することから、隔壁が荷重を分担する領域(エリア①とエリア②)の荷重の合計値について、荷重分布1と2で比較した。
- 荷重合計は、いずれの隔壁においても、荷重分布1と2でほぼ同等となっている。**



補機ポンプエリア隔壁間中央位置  
に作用する土圧の鉛直分布



補機ポンプエリア南側隔壁  
に作用する土圧の鉛直分布



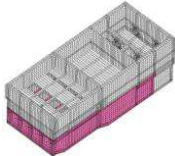
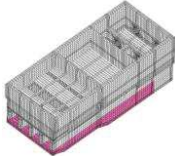

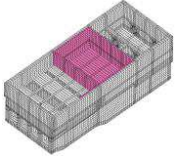
隔壁位置	荷重合計(kN)	
	荷重分布1	荷重分布2
北側(エリア①)	90430	91274
南側(エリア②)	75982	76930

## 補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討 (2) 検討結果④

【STEP2】 三次元材料非線形解析による土圧分布の違いに対する影響評価

- 荷重分布1(地盤ばね反力分布)と荷重分布2(一様分布)の解析結果を以下に示す。
- 側壁に発生するひずみは、側壁への荷重が大きい荷重分布2のほうが大きくなっている。
- 隔壁に発生する面内せん断ひずみは、荷重の大きさが荷重分布1と荷重分布2で同等であるため、ひずみも同等となっている。
- 荷重分布1と荷重分布2において、解析結果に大きな差はなく、エリアごとに延長方向一様な土圧を載荷しても、耐震壁として機能する妻壁や隔壁の耐震性を過大評価することはない。**

表 荷重分布1及び荷重分布2の解析結果

要求性能	ひずみ抽出位置	評価指標	照査用ひずみ		(参考)許容値
			荷重分布1	荷重分布2	
通水機能 (O.P. +1.43m以下)		引張ひずみ	4012 $\mu$	4082 $\mu$	30000 $\mu$
		圧縮ひずみ	687 $\mu$	690 $\mu$	10000 $\mu$
		せん断ひずみ	4070 $\mu$	4140 $\mu$	15000 $\mu$
貯水機能 (O.P. -5.3m以下)		圧縮ひずみ	596 $\mu$	599 $\mu$	2000 $\mu$
		主筋ひずみ	669 $\mu$	660 $\mu$	1725 $\mu$
		せん断ひずみ	1524 $\mu$	1546 $\mu$	15000 $\mu$
止水機能 (補機ポンプエリア) (循環水ポンプエリア)		圧縮ひずみ	734 $\mu$	802 $\mu$	2000 $\mu$
		主筋ひずみ	603 $\mu$	616 $\mu$	1725 $\mu$
		せん断ひずみ	6258 $\mu$	4140 $\mu$	15000 $\mu$
支持機能 (補機ポンプエリア)		圧縮ひずみ	876 $\mu$	999 $\mu$	2000 $\mu$
		主筋ひずみ	1019 $\mu$	1262 $\mu$	1725 $\mu$
		面内せん断ひずみ	176 $\mu$	185 $\mu$	2000 $\mu$

※せん断ひずみは壁全体を対象

※: 止水性能, 支持性能の対象範囲は精査中。

## 目次

---

1. はじめに
2. 既工認からの変更点
3. 評価方針
4. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
5. 解析コードの適用性
6. 許容限界
7. 安全係数
8. まとめ

補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

補足説明3. モデル化方針

補足検討1. 荷重載荷方法に関する検討

**補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討**  
**(1) 鉛直剛性の違いによる鉛直方向床応答の検討**



## 補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討

### (1) 鉛直剛性の違いによる鉛直方向床応答の検討①

#### ■ 検討目的

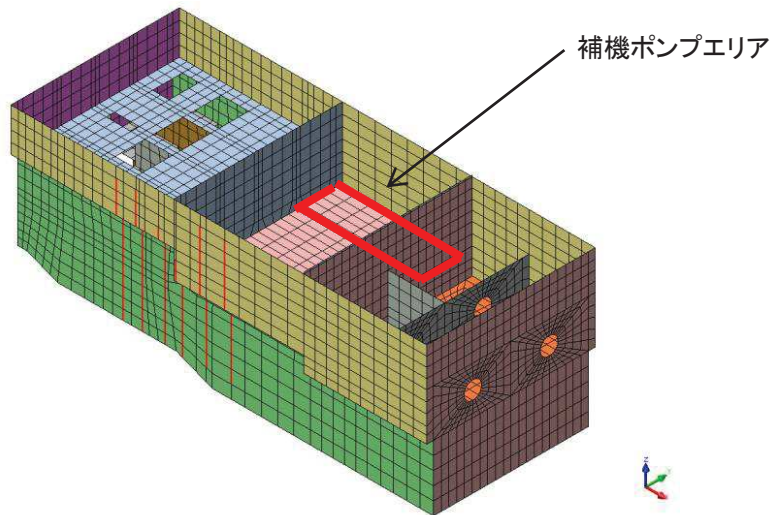
機器・配管の耐震安全性評価に用いる床応答を算定する二次元地震応答解析における海水ポンプ室のモデルは、地震による影響の大きい水平方向の剛性を等価としているが、鉛直方向の床応答の妥当性を検討する。

#### ■ 検討方法

- (1) 機器が設置される4辺固定の中床版の固有振動数を算定し、中床版の位置により増幅の影響がないことを確認する。
- (2) 水平方向の剛性を等価としない場合の鉛直方向の床応答を算定し、剛性調整の影響を検討する。

#### (1) 固有振動数の確認

- ・ 三次元FEMモデルを用いた固有値解析を行い、補機ポンプエリアの中床版の固有振動数を確認した。
- ・ 固有値解析の結果、補機ポンプエリアの1次固有振動数は30Hzを上回っており、機器・配管類の耐震設計においては、十分に剛であると扱え、中床版の鉛直方向の応答増幅の影響はない。



中床版の下部は4連のボックスカルバートになっており、中床版の-spanは区切られている。

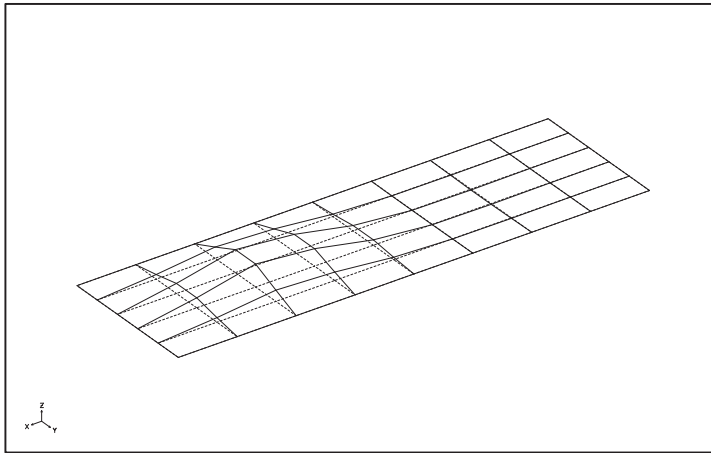
表 補機ポンプエリア中床版の固有振動数

部位	固有振動数(Hz)	刺激係数	備考
補機ポンプエリア 中床版	61.1	17.0	1次
	71.3	12.1	2次
	75.6	9.5	3次

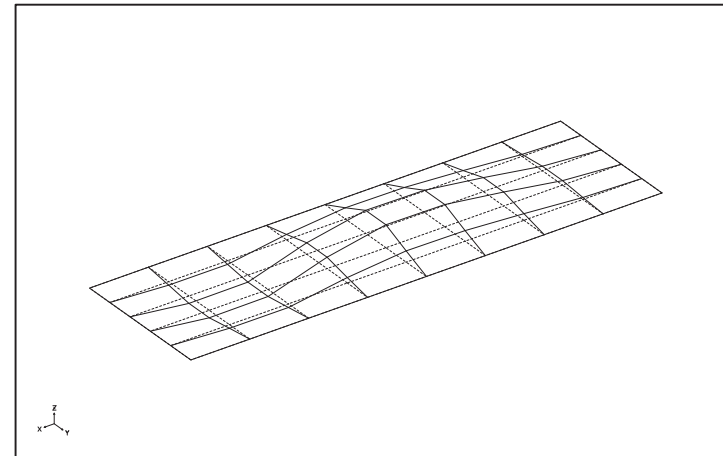
## 補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討 (1) 鉛直剛性の違いによる鉛直方向床応答の検討①

### 補機ポンプエリア モード図

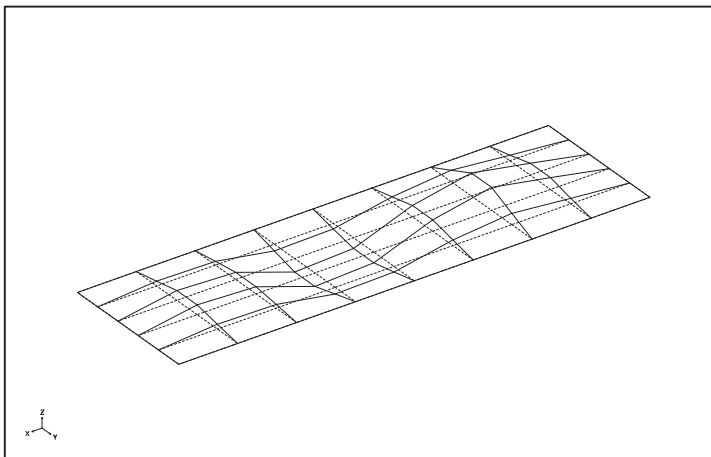
- 補機ポンプエリアのモード図を以下に示す。



1次モード



2次モード



3次モード

表 補機ポンプエリア中床版の固有振動数

部位	固有振動数(Hz)	刺激係数	備考
補機ポンプエリア 中床版	61.1	17.0	1次
	71.3	12.1	2次
	75.6	9.5	3次

## 補足検討2. 二次元地震応答解析モデルに関する検討 (1) 鉛直剛性の違いによる鉛直方向床応答の検討②

### (2)剛性調整しない場合の床応答の影響検討

- ・ 地中構造物の耐震性に対する影響が大きい地震時土圧は、構造物と地盤の相互作用によって発生することから、エリアごとの地震時荷重を算定する二次元地震応答解析の構造物モデルは、水平方向に対して、三次元構造モデルと等価な剛性モデル(線形)としている。
- ・ 二次元等価剛性モデルの平面応力要素は、水平・鉛直方向で等方のため、方向に応じて剛性を変更することはできない。
- ・ 機器の耐震性評価では、鉛直方向床応答も設計で用いることから、剛性の違いによる鉛直床応答への影響を検討した。

### 床応答の確認

- ・ 現状の地盤改良(案)をモデル化した二次元地震応答解析により、水平方向の剛性を合わせた場合( $\beta$ 調整)と、合わせない場合( $\beta=1$ )の床応答について比較した。
- ・ 加速度応答スペクトルで比較すると、概ね同等のスペクトルとなっているが、主な機器の固有周期で見ると、 $\beta$ 調整の応答が小さい周期帯もあることから、 $\beta=1$ とした場合についても機器への影響を確認する。

床応答算出位置

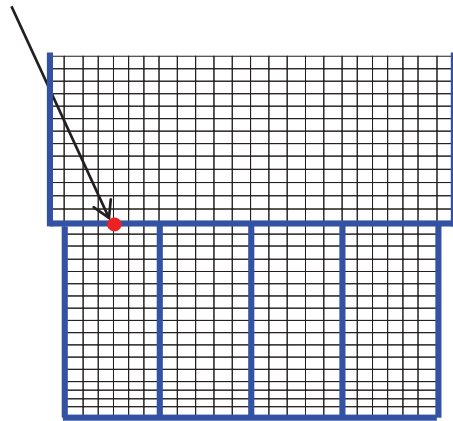


図 補機ポンプエリアモデル図



図 鉛直方向加速度応答スペクトルの比較

主な機器の固有周期

機器名	1次固有周期(s)
RSW系配管	
HPSW系配管	

※: 応答スペクトルは現状の地盤改良範囲をモデル化して算定したものであり、改良範囲等が確定後清算予定。

### 剛性の調整方法

$$E = E_c \times \alpha \times \beta$$

E : 等価剛性モデルの弾性係数

$\alpha$  : 海水ポンプ室の奥行き長さに対する部材の奥行き長さの比率 =  $L_e/L$

$L_e$  : 部材の奥行き長さ

$\beta$  : 変位を合わせるための弾性係数の補正係数

$E_c$  : コンクリートの弾性係数

L : 海水ポンプ室の奥行き長さ

枠囲みの内容は機密事項に属するため公開できません。