

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31年 2月 7日
東北電力株式会社

枠囲みの内容は防護上の観点、機密事項に属すること及び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. 建設工認からの変更点
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
4. 評価方法に係る課題の抽出
5. 地震応答解析に係る課題
6. 構造解析に係る課題
7. 許容限界に係る課題
8. 安全係数に係る課題
9. 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

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

2. 建設工認からの変更点
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
4. 評価方法に係る課題の抽出
5. 地震応答解析に係る課題
6. 構造解析に係る課題
7. 許容限界に係る課題
8. 安全係数に係る課題
9. 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. 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、女川原子力発電所2号炉の建設工認（以下、建設工認という）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。

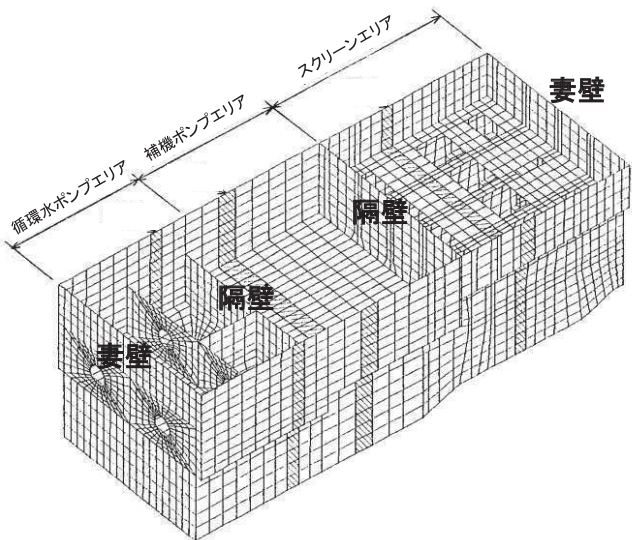


図 海水ポンプ室の既工認モデル
(線形シェル要素)

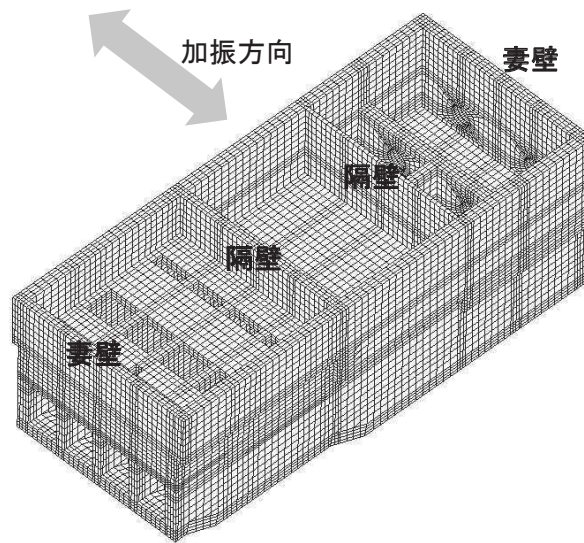


図 海水ポンプ室の今回工認モデル
(非線形ソリッド要素)

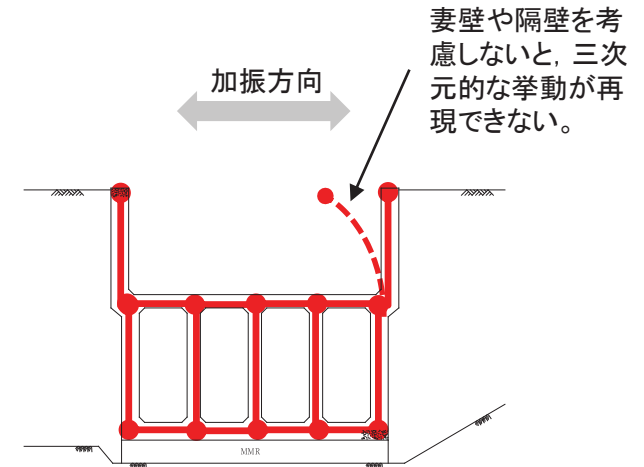


図 2次元でのモデル化イメージ

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建設工認、並びに先行プラントも含めた旧規制及び新規制下における工認実績(以下、既工認実績という)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、許容限界は既工認実績のある許容限界、またはそれと同等の許容限界(概ね弾性範囲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、既工認実績のない、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。

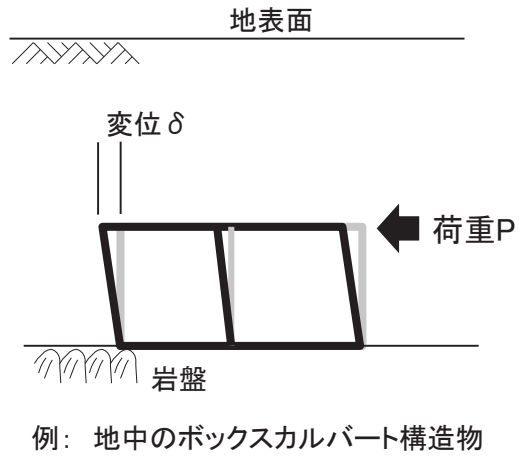
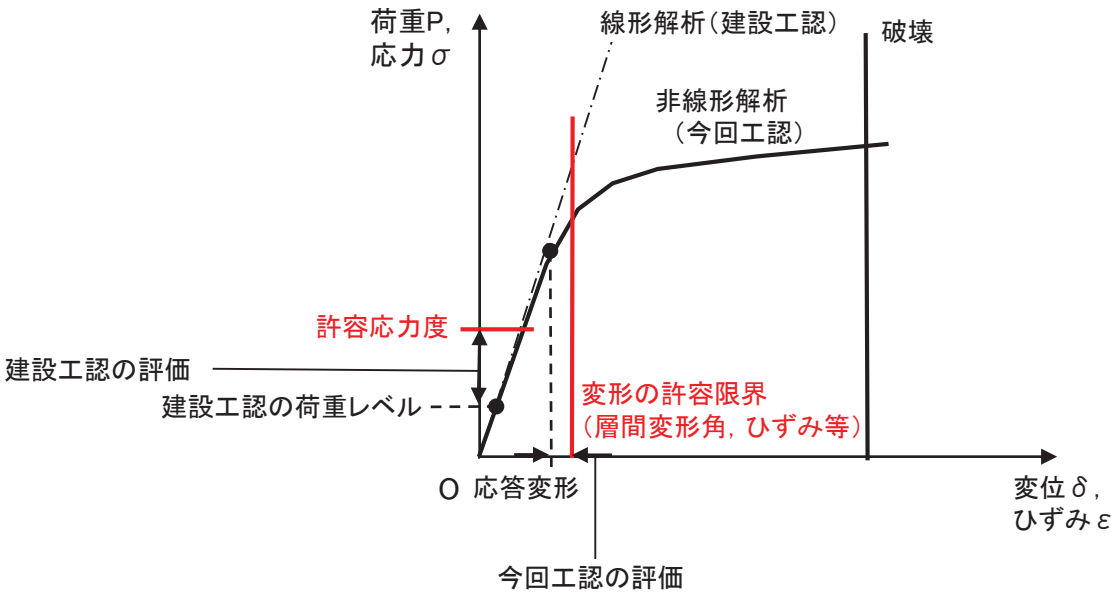


図 大加速度による非線形性の考慮(曲げ・軸力系の破壊について)

1. はじめに

(2) 対象構造物

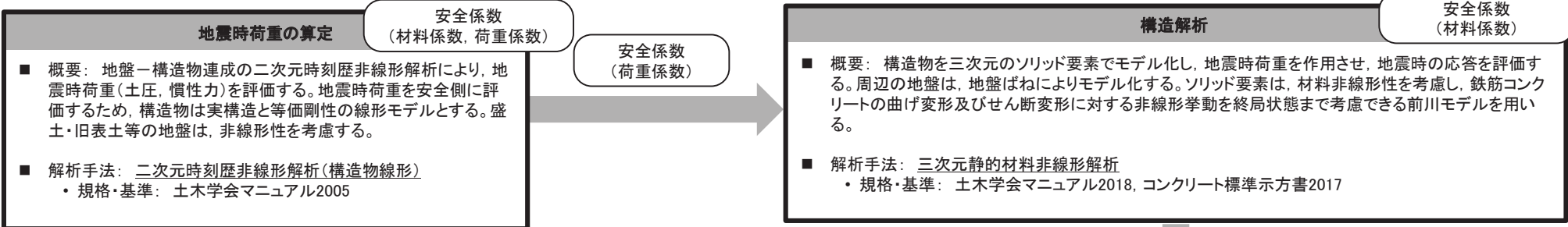
- ・ 三次元静的材料非線形解析により耐震安全性を評価する海水ポンプ室、取水口、軽油タンク室及び復水貯蔵タンク基礎の概要を示す。
- ・ 各構造物の構造図を「補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図」に示す。
- ・ 本資料では、形状が複雑で規模が大きく、要求機能が多岐にわたる海水ポンプ室を代表として評価方法について説明する。

| | 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"> ・ 幅32.5m, 延長77m, 高さ約28mと大規模。 ・ 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。 ・ 地震時に揺れやすい弱軸は横断方向。 ・ <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> | <ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 地震時に揺れやすい弱軸は横断方向。 ・ 横断方向に設置される壁は, 標準部の背面の1枚。 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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く, 明確な弱軸方向及び強軸方向を有しない。 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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。 ・ 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。 |
| 耐震クラス | <ul style="list-style-type: none"> ・ 屋外重要土木構造物(Ss機能維持) ・ 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) ・ 波及的影響評価対象設備の間接支持(竜巻防護ネット) ・ 非常用取水設備 ・ 重大事故等対処施設(Ss機能維持) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 屋外重要土木構造物(Ss機能維持) ・ 非常用取水設備 ・ 重大事故等対処施設(Ss機能維持) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 屋外重要土木構造物(Ss機能維持) ・ 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) ・ 重大事故等対処施設の間接支持(Ss機能維持) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 重大事故等対処施設の間接支持(Ss機能維持) |
| 要求機能 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 通水機能 ・ 支持機能 ・ 貯水機能 ・ 止水機能 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 通水機能 ・ 貯水機能 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 支持機能 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 支持機能 |

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、既工認実績のある土木学会マニュアル^{※1}2005を適用することを基本とし、三次元材料非線形解析に係る照査法を示しているコンクリート標準示方書^{※2}2017や土木学会マニュアル2018を参照する。



| 安全係数 | |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> 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。 | |
| 安全係数 | 設定の考え方 |
| 材料係数 | 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等を考慮して設定する。 |
| 部材係数 | 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等を考慮して設定する。 |
| 構造解析係数 | 応答値算定手法の精度等、応答値算定に関わる不確実性を考慮して設定する。 |
| 荷重係数 | 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等を考慮して設定する。 |
| 構造物係数 | 構造物の重要度、限界状態に達した時の社会的影響等を考慮して設定する。 |
| <ul style="list-style-type: none"> 規格・基準：土木学会マニュアル2005 | |

安全係数 (部材係数, 構造物係数)

| 地震時の要求機能に対する評価 | | | | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> 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 |
| 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 |
| 許容限界 | 一つの部材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よう限界値を設定する。 | 支持性能は部材が終局状態に至らず、かつアンカー一部周辺の損傷が部材降伏程度であれば定着性能に影響がないことから、部材が終局状態に至らない及び断面降伏しないよう限界値を設定する。 | 周囲の盛土は透水性が小さく、漏水が生じても貯水機能に影響無いが、躯体のみで貯水機能を満足できるよう、漏水が生じるような顕著なひび割れが発生しないと考えられる、断面降伏以下及びせん断耐力以下となる限界値を設定する。 | 断面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ひび割れは発生しないことから、断面降伏しない及び発生せん断耐力がせん断耐力以下となる限界値を設定する。 |
| 規格・基準 | 土木学会マニュアル2005及びJEAG4601に基づき限界値を設定する。 | 土木学会マニュアル2005、JEAG4601及びコンクリート標準示方書2002に基づき限界値を設定する。 | 土木学会マニュアル2005、JEAG4601及びコンクリート標準示方書2002に基づき限界値を設定する。限界状態の考え方は水道施設耐震工法指針 ^{※3} 2009を参照する。 | 土木学会マニュアル2005、JEAG4601及びコンクリート標準示方書2002に基づき限界値を設定する。限界状態の考え方は水道施設耐震工法指針2009を参照する。 |

※1:「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル」(社)土木学会、以下「土木学会マニュアル」という。
 ※2:「コンクリート標準示方書[設計編]」(社)土木学会、以下「コンクリート標準示方書」という。
 ※3:「水道施設耐震工法指針・解説」(社)日本水道協会、以下「水道施設耐震工法指針」という。

目次

1. はじめに
2. 建設工認からの変更点
 - (1) 照査体系の建設工認からの変更点
 - (2) 建設工認の耐震性評価手法
 - (3) 今回工認の耐震性評価手法
 - (4) 耐震性評価手法の変更点
 - (5) 新規採用手法の概要
 - (6) 三次元静的材料非線形解析のメリット・デメリット
 - (7) 二次元地震応答解析手法の変更による影響
 - (8) 三次元モデルの変更による影響
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
4. 評価方法に係る課題の抽出
5. 地震応答解析に係る課題
6. 構造解析に係る課題
7. 許容限界に係る課題
8. 安全係数に係る課題
9. 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

2. 建設工認からの変更点

(1) 照査体系の建設工認からの変更点

- 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、今回工認と建設工認で変わりはない。
- 建設工認では、構造物の応答が線形レベルだったことから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、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。

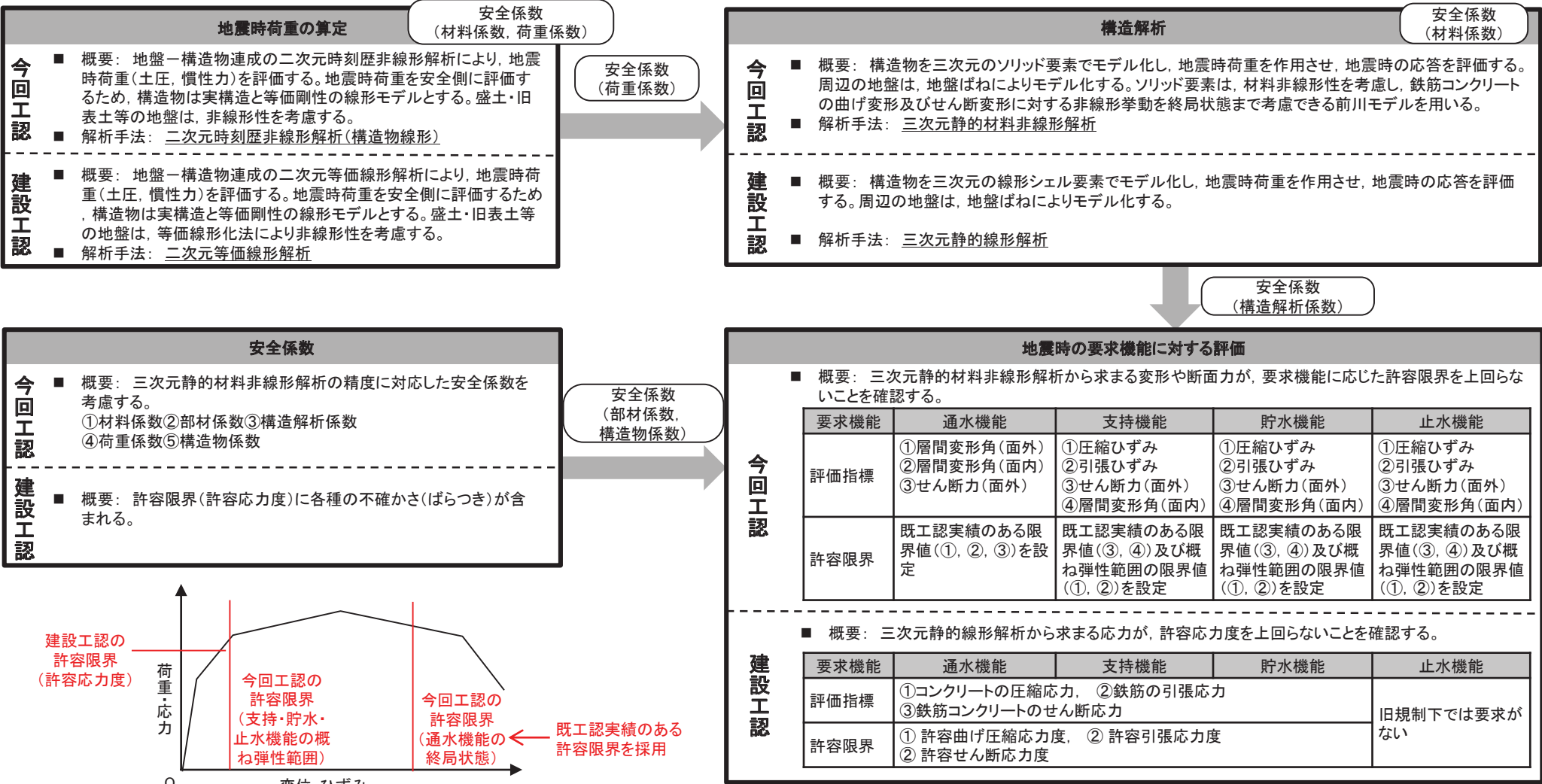
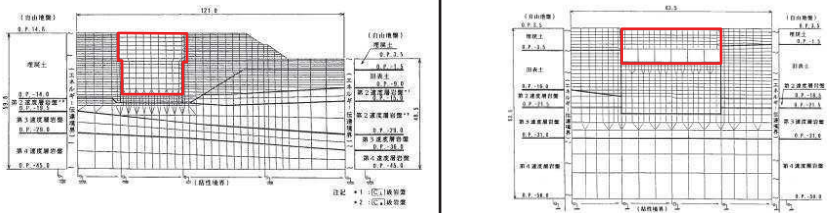
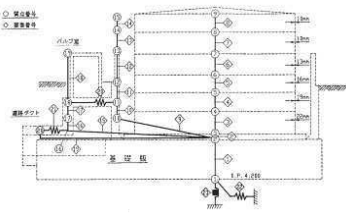
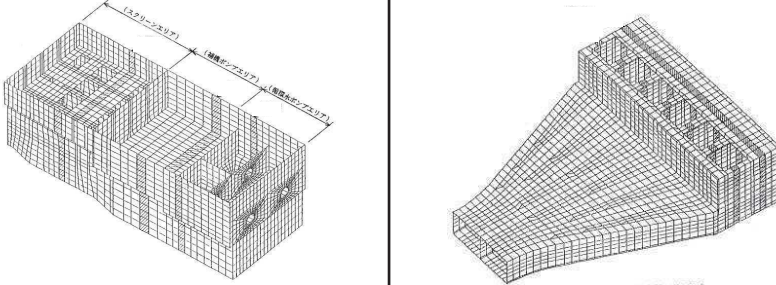
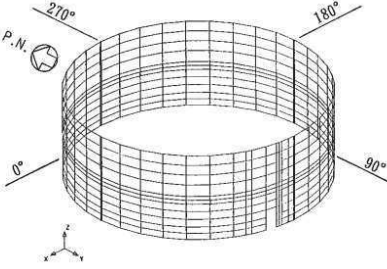


図 今回工認と建設工認の許容限界イメージ(曲げ系)

2. 建設工認からの変更点

(2) 建設工認の耐震性評価手法


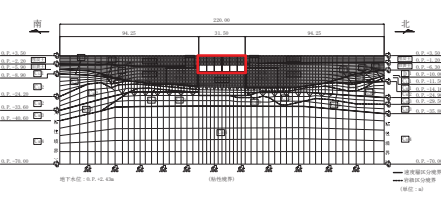
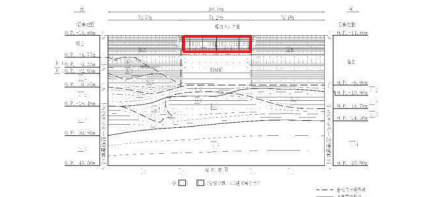
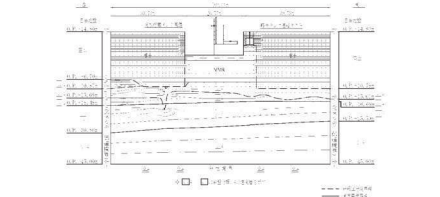
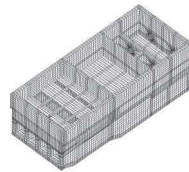

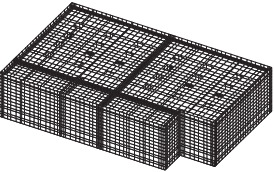
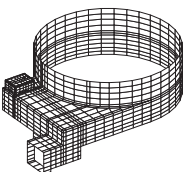
- 建設工認における耐震性評価は、妻壁や隔壁の耐震機能を設計で考慮できるよう、**線形シェル要素による三次元モデルで構造解析**を行っている。
- 二次元地震応答解析は、構造物を実構造と等価な剛性とした線形モデルとして、地盤-構造物連成の周波数応答解析(線形解析)により評価している。

| 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 |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <p>二次元地震応答解析</p> | <ul style="list-style-type: none"> 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。 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)の周波数応答解析(線形解析)により評価。  | <p>建設工認対象外</p> |  | <p>建設工認対象外</p> |
| <p>三次元モデル</p> | <ul style="list-style-type: none"> 構造物を線形シェル要素でモデル化  | <p>建設工認対象外</p> |  | <p>建設工認対象外</p> |
| <p>主要な損傷モード</p> | <ul style="list-style-type: none"> 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変形し損傷する。(面外変形) | <ul style="list-style-type: none"> 横断方向加振に対し、標準部の6連のカルバートが面外変形し損傷する。(面外変形) | <p>建設工認対象外</p> | <ul style="list-style-type: none"> 加振方向に直交する壁部材が面外変形し損傷する。(面外変形) |
| <p>耐震安全性評価</p> | <ul style="list-style-type: none"> 発生断面力に対して、許容応力度により照査 | | | |

2. 建設工認からの変更点

(3) 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、二次元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"> • 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。 • 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)の二次元時刻歴非線形解析(構造物線形)により評価。 | <ul style="list-style-type: none"> • 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し、エリア毎の荷重を評価。 • 同左 | <ul style="list-style-type: none"> • 延長方向に適切に分割し、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。 • 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)の周波数応答解析により評価。 | <ul style="list-style-type: none"> • 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)の周波数応答解析により評価。 |
| |  |  |  |  |
| 三次元モデル | <ul style="list-style-type: none"> • 海水ポンプ室を非線形ソリッド要素でモデル化(要素数:約8.5万, 節点数:約6.9万)。 • 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。 | <ul style="list-style-type: none"> • 取水口を非線形ソリッド要素でモデル化(要素数:約4.4万, 節点数:約3.7万)。 • 同左 | <ul style="list-style-type: none"> • 軽油タンク室を非線形シェル要素でモデル化(要素数:約8千, 節点数:約8千)。 • 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。 | <ul style="list-style-type: none"> • 復水貯蔵タンク基礎の遮蔽壁等を非線形シェル要素でモデル化(要素数:約1千, 節点数:約1千)。 • 同左 |
| |  |  |  |  |
| 耐震安全性評価 | <ul style="list-style-type: none"> • 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。 • 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。 | <ul style="list-style-type: none"> • 同左 | <ul style="list-style-type: none"> • 同左 | <ul style="list-style-type: none"> • 同左 |

2. 建設工認からの変更点

(4) 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。三次元モデルは、貯水機能や止水機能が要求される構造物については、部材のひび割れ状況を評価できるソリッド要素を採用し、支持機能のみ要求される構造物についてはシェル要素を採用する。
- ・ 今回工認のうち、既工認実績のない手法は、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)と、限界状態設計法のうち圧縮ひずみ/引張ひずみである。
- ・ 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。

| | 建設工認 (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 | 精緻化 二次元有限要素法による地震応答解析 「二次元時刻歴非線形解析(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 | 精緻化 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 | 精緻化 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 | 精緻化 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(概ね弾性範囲) 【せん断破壊】 ・ せん断耐力(せん断耐力評価式) | 精緻化 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(概ね弾性範囲) 【せん断破壊】 ・ せん断耐力(せん断耐力評価式) |

精緻化 は、建設工認と比較して、精緻化している項目を示す。 は、既工認実績のない項目を示す。

2. 建設工認からの変更点

(5) 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既工認実績が多数ある。

| | 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"> 地盤－構造物連成の<u>二次元FEM解析において、地盤の非線形性を考慮</u>した地震応答解析を行う。 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。 <u>地盤の材料特性</u>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ISING則に基づく履歴曲線により、<u>非線形挙動を表現</u>する。 地盤－構造物間の剥離、再接触を考慮する。 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。 <p>照査(利用)方法</p> <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 工認実績 | <ul style="list-style-type: none"> 構造物も非線形とした手法について、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<u>既工認実績が多数ある</u>。 |
| 規格・基準 | <ul style="list-style-type: none"> 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、地盤及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。 コンクリート標準示方書2017 部材及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。 |

2. 建設工認からの変更点

(5) 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)を評価する方法が規定されており、既工認実績が多数ある。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、**既工認実績がない手法である。**

| | 三次元静的材料非線形解析／限界状態設計法 |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 解析の概要 | <p>解析モデル</p> <ul style="list-style-type: none"> • 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。 • 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。 • 構造物の材料特性として、材料非線形性を有するソリッド要素やシェル要素により非線形挙動を表現する。 • ソリッド要素は、曲げ変形に加えてせん断に対する非線形挙動を表現可能であり、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。 • 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。 <p>照査方法</p> <ul style="list-style-type: none"> • 材料非線形を考慮した要素に発生する断面力や変形に対して照査を行う。 • 概ね弾性範囲に対し、コンクリートの圧縮ひずみと鉄筋の引張ひずみを限界値としている。 |
| 工認実績 | <ul style="list-style-type: none"> • 既工認実績として、川内1号の取水路、玄海3・4号の海水管ダクト縦坑などで、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。 |
| 規格・基準 | <ul style="list-style-type: none"> • 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。 • 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。 |

2. 建設工認からの変更点

(6) 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、ひび割れの発生状態から貯水・止水機能の評価が必要な構造物は、解析モデルの作成に労力を要するものの、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"> ○: 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。 ○: 構造物を梁でモデル化するため、モデル化が容易。 ×: 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。 | <ul style="list-style-type: none"> ○: 複雑な形状や構造を有する構造物の解析に適する。 ○: 構造物をソリッド要素によりモデル化することで、隅角部等における応力伝達が実態に近く再現できる。 ×: 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。 | <ul style="list-style-type: none"> ○: 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。 ○: 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。 |
| 構成モデル | <ul style="list-style-type: none"> ○: 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。 | <ul style="list-style-type: none"> △: 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。 ○: 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。 ○: 前川モデルは、既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。 ○: 曲げ変形に加え、せん断に対する非線形性を考慮できる。 | <ul style="list-style-type: none"> ○: 一つの壁でも部分的な配筋の違いをモデル化できる。 ○: 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。 ○: 曲げ変形に対する非線形性を考慮できる。 |
| 解析 | <ul style="list-style-type: none"> ○: 計算負荷が比較的小さく、時刻歴の地震応答解析が可能。 ○: 梁要素毎に平均的な断面力が算定できる。 | <ul style="list-style-type: none"> △: 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。 ○: 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。 ○: 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。 ○: 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。 | <ul style="list-style-type: none"> △: 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。 ○: 要素毎に断面力とひずみを評価することができる。 ○: 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。 |
| 照査 | <ul style="list-style-type: none"> ○: 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。 | <ul style="list-style-type: none"> △: 断面力の算定に労力を要する。 ○: 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。 ○: 要素の破壊をひずみにより規定できる。 ○: 要素のひずみから、部材厚方向のひび割れ状況を評価することができる。 | <ul style="list-style-type: none"> ○: 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。 ○: 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。 |

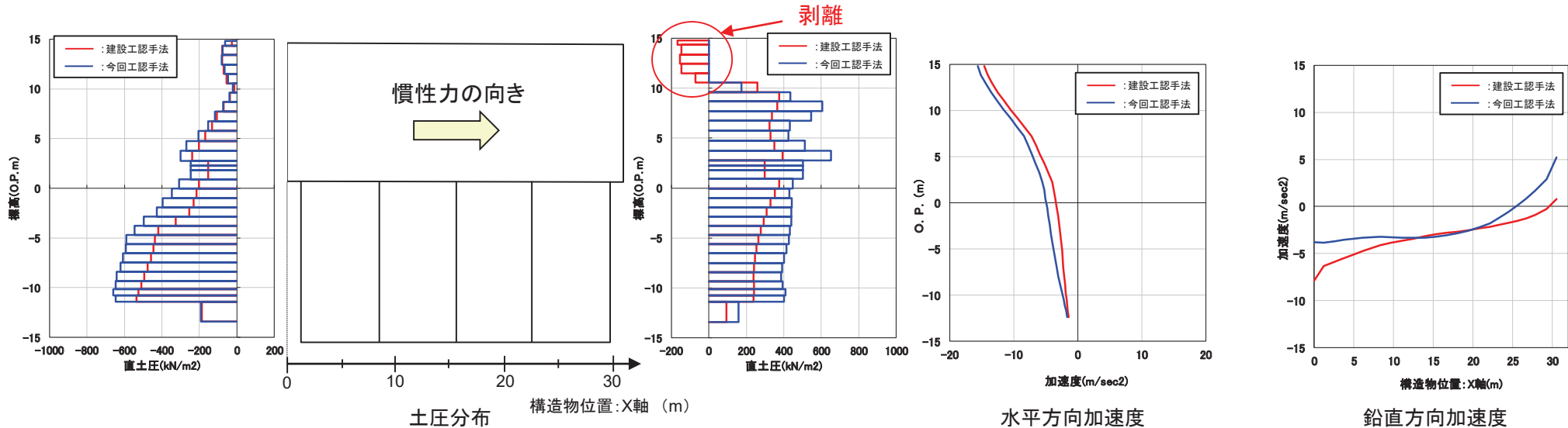
2. 建設工認からの変更点

(7) 二次元地震応答解析手法の変更による影響

- ・ 二次元地震応答解析について、建設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影響を確認するため、建設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。

比較結果及び考察

- ・ 今回工認では周辺地盤の非線形性を考慮し、時刻歴で解析した結果、地盤のひずみレベルが大きくなり、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。
- ・ 今回工認では地盤と構造物間のジョイント要素により、剥離-再接触を考慮しているため、建設工認において解析上側壁を地盤が引張るような荷重は、剥離として考慮されている。
- ・ また、底面のジョイント要素の影響により、構造物が地盤から離れ、回転変形するような挙動が再現され、鉛直加速度に差異が生じている。
- ・ このように土圧及び加速度のいずれについても、今回工認は建設工認と比較して、地盤と構造物の相互作用が実現象に近い結果となっている。
- ・ 今回工認と建設工認の差異が構造物に与える影響として、今回工認の土圧が大きいことから、土圧が直接作用する側壁等において、一部の要素が非線形領域となることが考えられる。また、回転変形により、底版のせん断力や右側壁の軸力に影響が出ると考えられる。
- ・ 一部の要素が非線形化した結果、荷重の負担が部材間で配分され、断面力や床応答が実現象に近い応答となる。詳細をP17~19に示す。



※：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

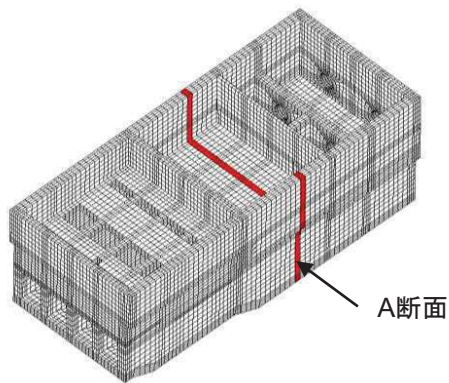
※：加速度の向きは右向き及び上向きが正側、
左向き及び下向きが負側を示す

図 建設工認手法と今回工認手法の比較

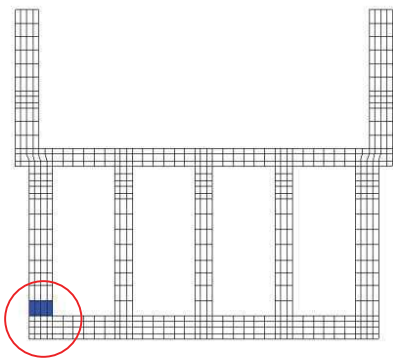
2. 建設工認からの変更点

(8) 三次元モデルの変更による影響①

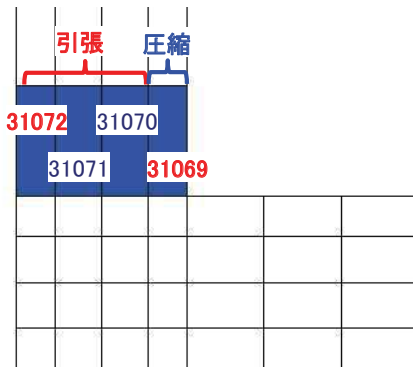
- 三次元モデルについて、建設工認では線形シェルモデルを採用し、許容応力度法により照査を行っているが、今回工認では非線形ソリッド要素によりモデル化し、限界状態設計法により照査を行っている。
- 今回工認で採用した方法では、曲げ系の破壊をひずみで評価することで、より精緻に部材の応答を把握することができる。
- 例として、P15の今回工認手法の地震時荷重を非線形ソリッド要素による三次元モデルに载荷させた場合における要素の応力-ひずみ関係を示す。
- 図中の線形解析応答値及び非線形解析応答値は、同一の荷重を建設工認の三次元モデル(線形シェル要素)及び今回工認の三次元モデル(非線形ソリッド要素)に载荷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の付着性能を考慮した鉄筋コンクリート要素としてひずみを取り扱い、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

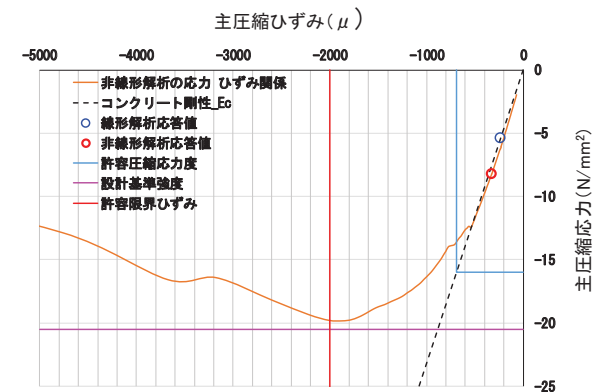


図 主圧縮応力-主圧縮ひずみ関係(圧縮側要素31069)

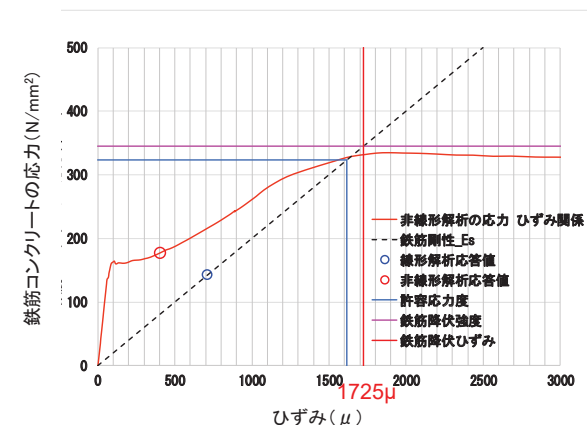


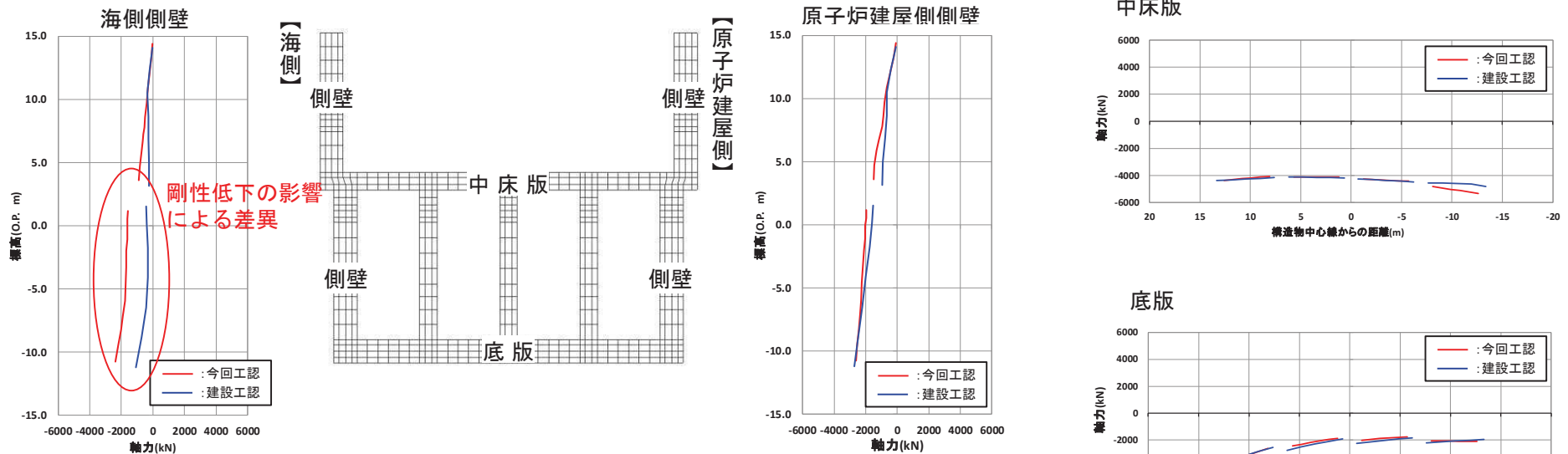
図 鉄筋コンクリートの応力-ひずみ関係(引張側要素31072)

2. 建設工認からの変更点

(8) 三次元モデルの変更による影響②

軸力比較

- 今回工認の三次元モデル(非線形ソリッド要素)及び建設工認の三次元モデル(線形シェル要素)にP15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。
- 今回工認と建設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

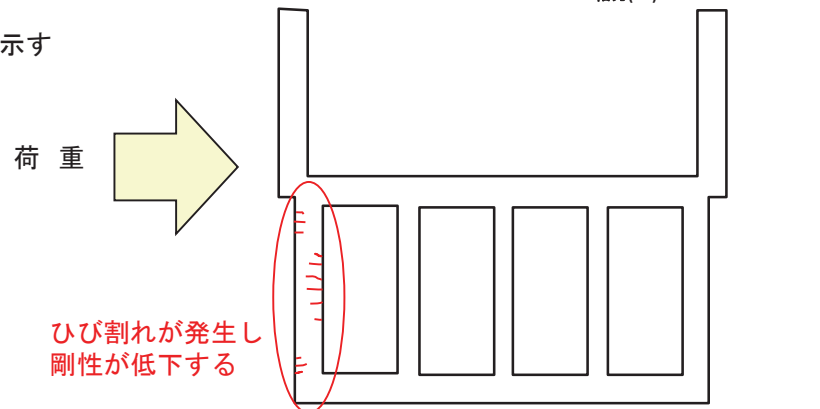


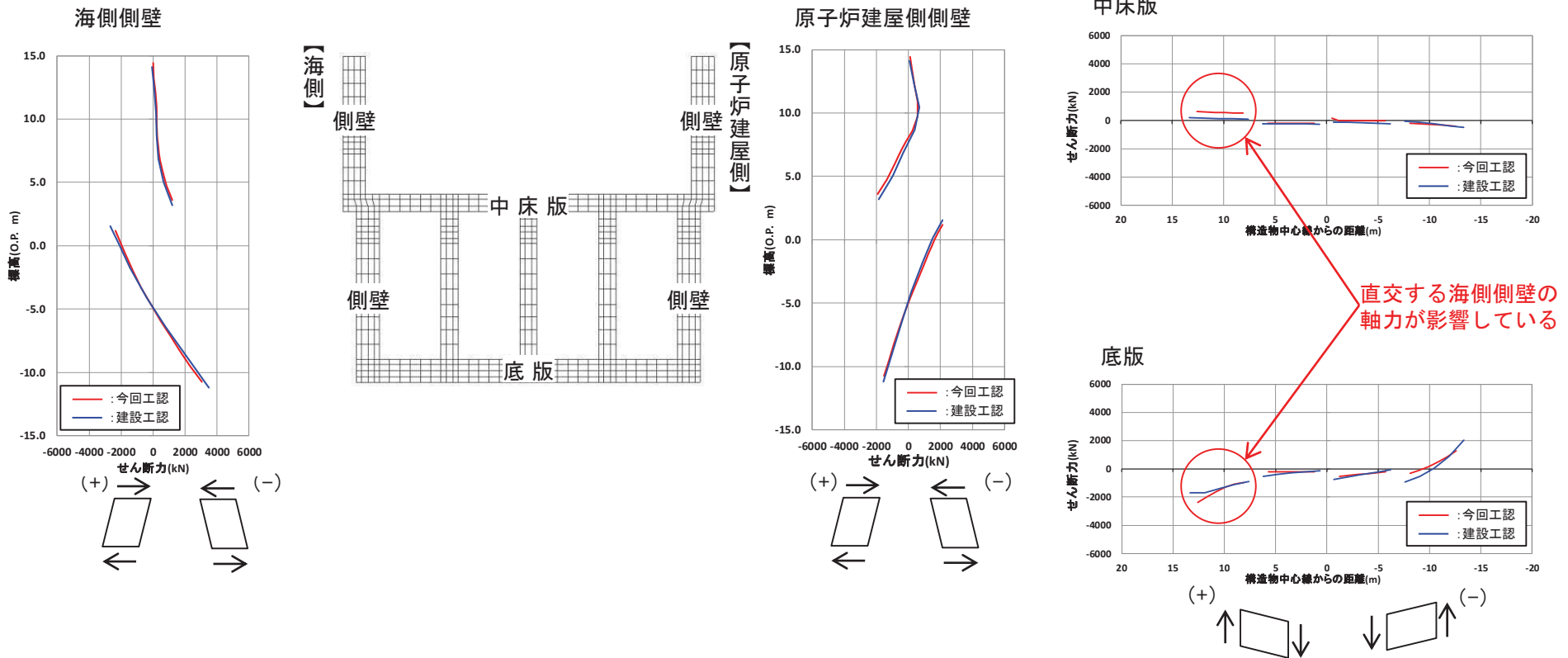
図 曲げモーメントにより生じるひび割れイメージ図

2. 建設工認からの変更点

(8) 三次元モデルの変更による影響③

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)及び建設工認の三次元モデル(線形シェル要素)にP15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。
- 今回工認と建設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。

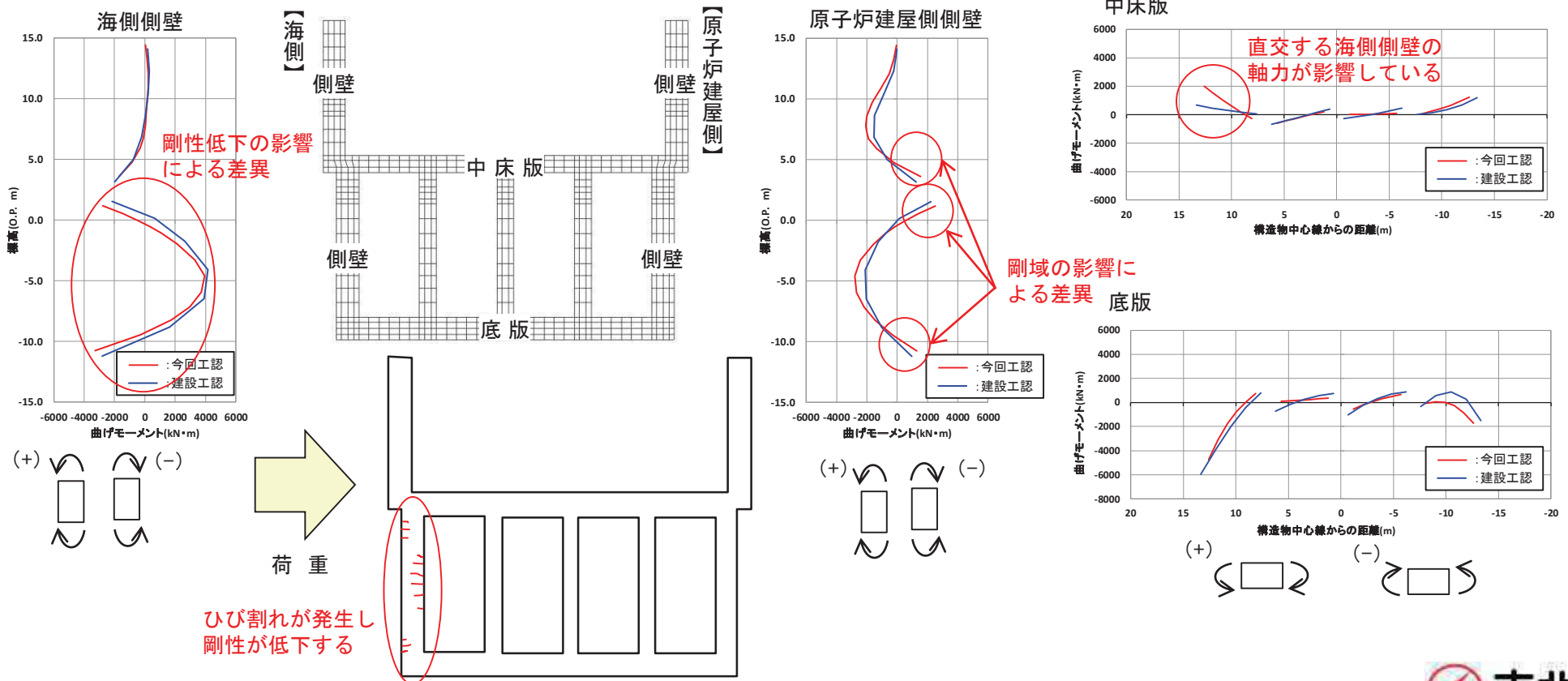


2. 建設工認からの変更点

(8) 三次元モデルの変更による影響④

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)及び建設工認の三次元モデル(線形シェル要素)にP15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。
- 今回工認と建設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、建設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。



目次

1. はじめに
2. 建設工認からの変更点
3. **三次元静的材料非線形解析の評価手順**
 - (1) **耐震性の評価フロー**
 - (2) **三次元モデルの作成**
 - (3) **常時解析**
 - (4) **二次元地震応答解析**
 - (5) **地震時荷重の算定**
 - (6) **地震時解析**
 - (7) **耐震安全性評価**
4. 評価方法に係る課題の抽出
5. 地震応答解析に係る課題
6. 構造解析に係る課題
7. 許容限界に係る課題
8. 安全係数に係る課題
9. まとめ

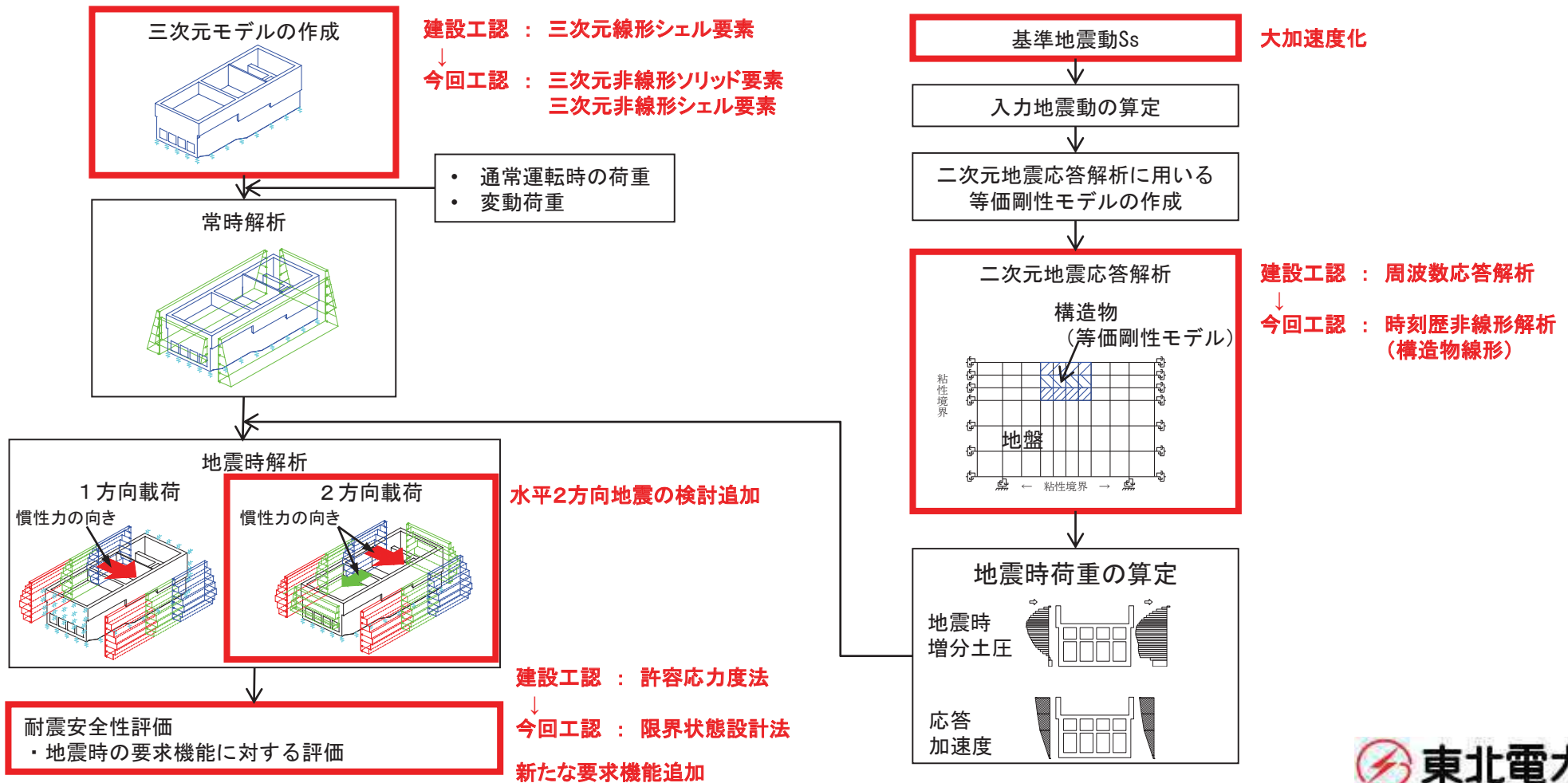
補足説明1. 三次元静的材料非線形解析を用いる構造物の構造図

補足説明2. 支持機能に関する実験結果

3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

(1) 耐震性の評価フロー

- 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、建設工認と同様に、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。
- 新規制基準により、基準地震動の大加速度化、新たな要求機能(津波に対する止水機能)の追加、水平2方向地震の検討の追加などが変更となっている。
- 上記の変更に伴い解析手法を変更しており、解析手法の建設工認からの主な変更点は、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。



3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (2) 三次元モデルの作成

- ・ 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。

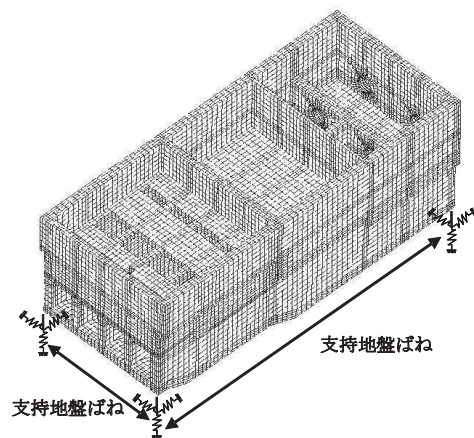


図 常時解析

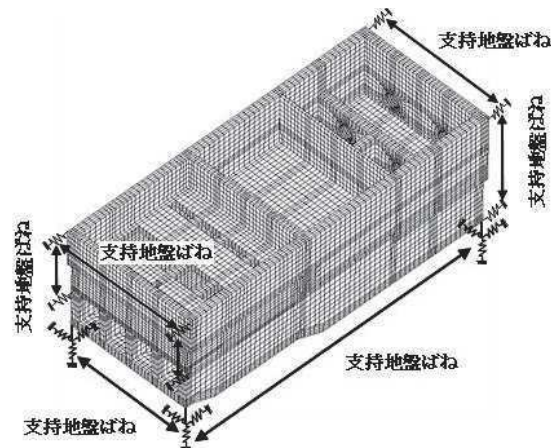
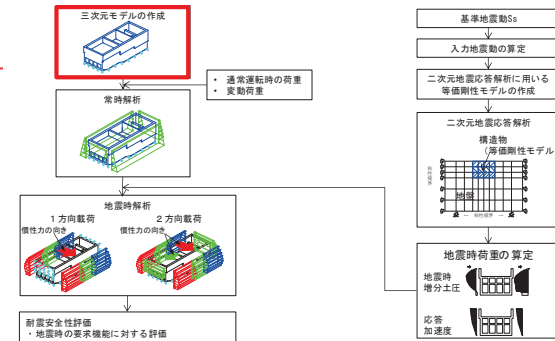


図 地震時解析

耐震安全性評価フロー



3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (3) 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。

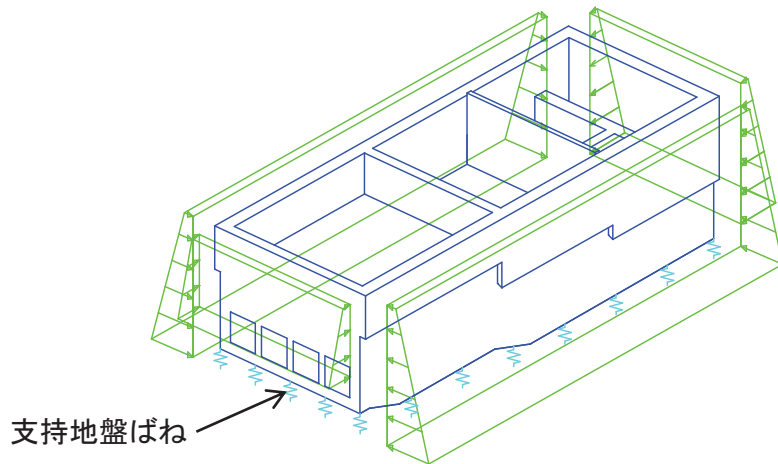


図 静止土圧载荷イメージ図

(2) 荷重

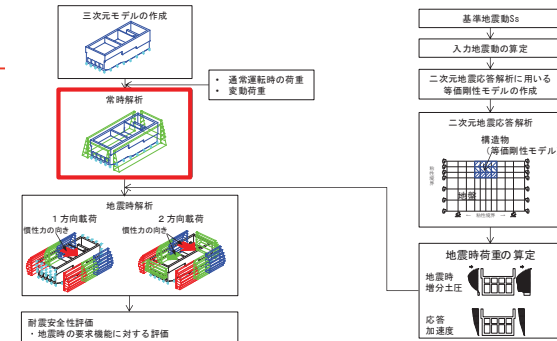
通常運転時の荷重

- 躯体の自重、機器・配管荷重、静止土圧、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。
- 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。

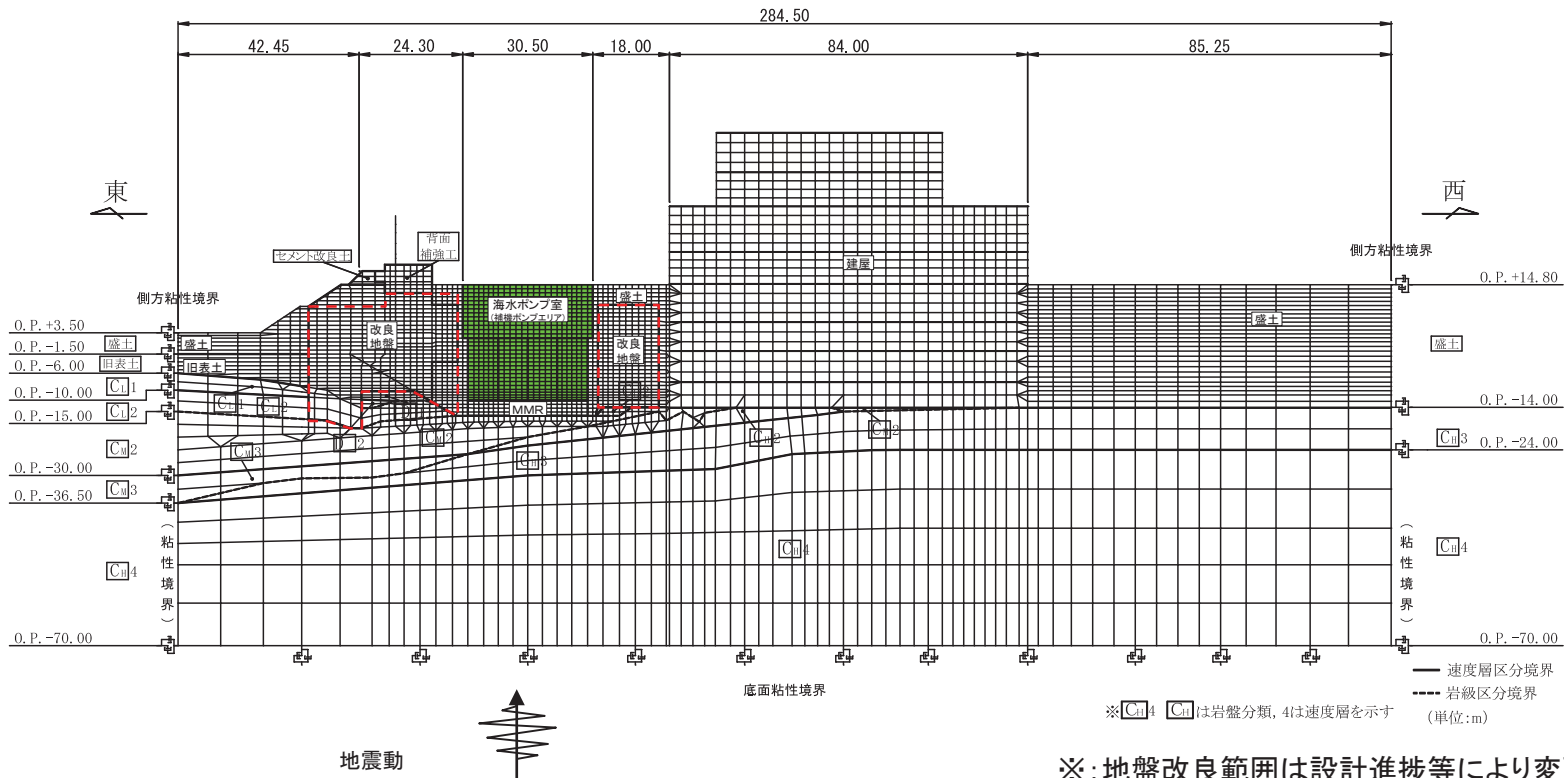
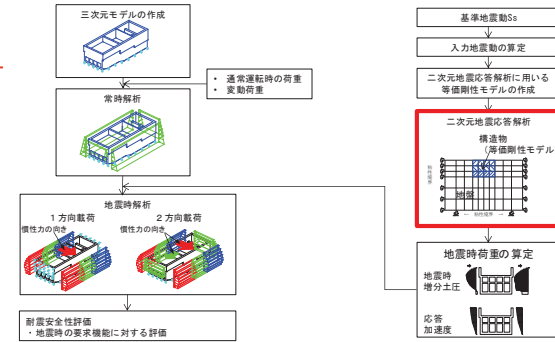
耐震安全性評価フロー



3. 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。

耐震安全性評価フロー



※: 地盤改良範囲は設計進捗等により変更する可能性がある。

図 二次元地震応答解析(解析モデル図: 補機ポンプエリア)

3. 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。

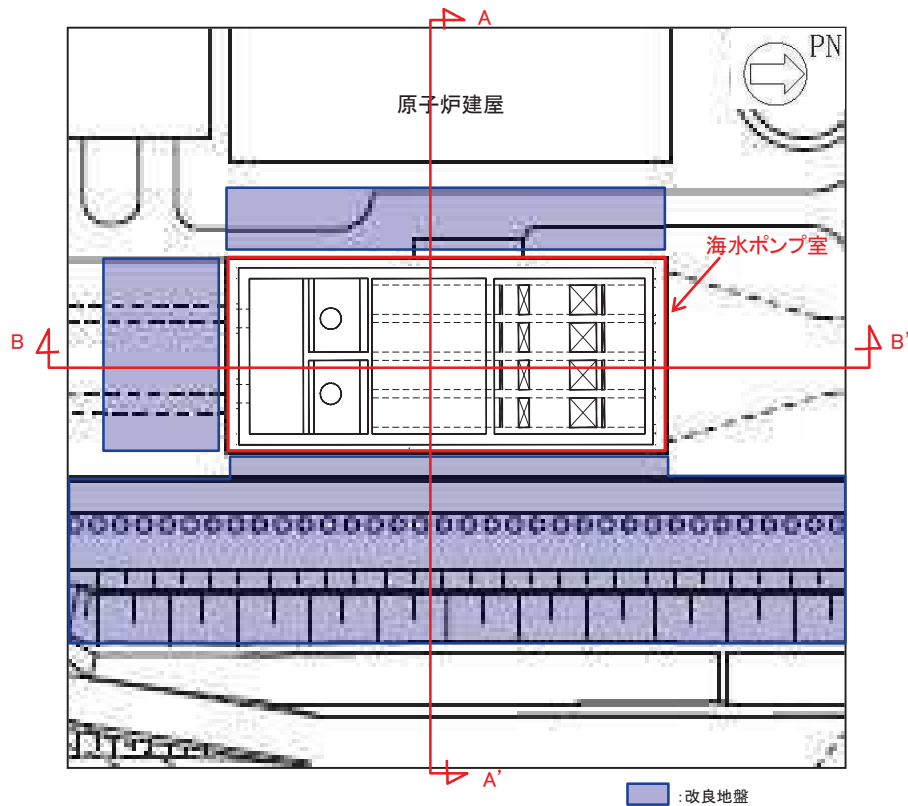


図 改良範囲平面図

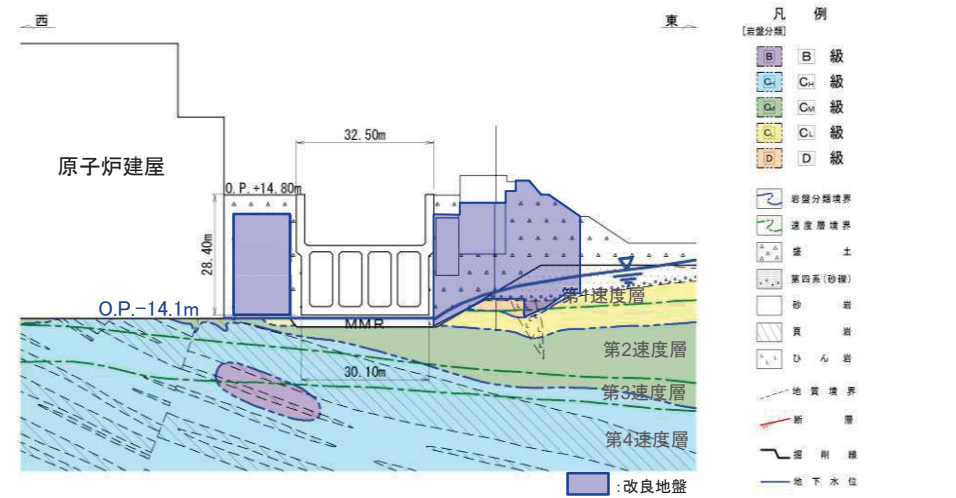


図 改良範囲断面図(A-A'断面)

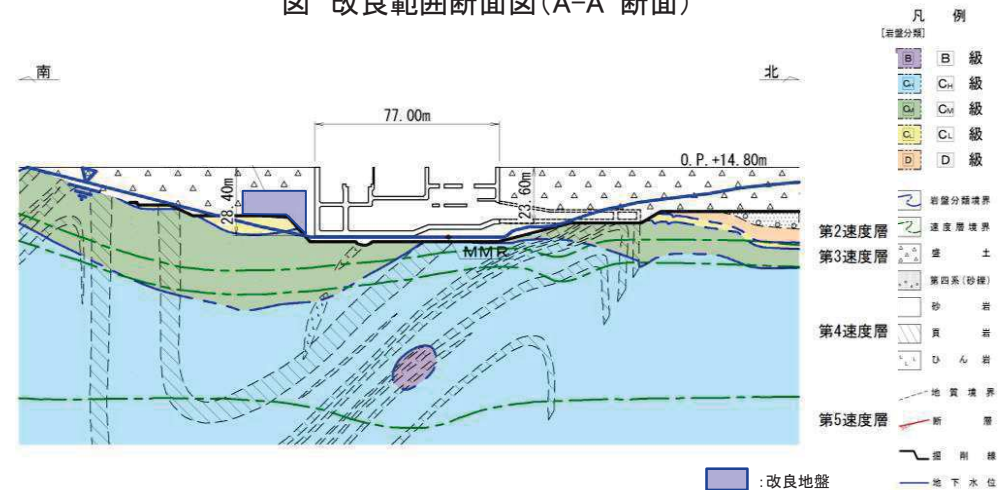


図 改良範囲断面図(B-B'断面)

※:地盤改良範囲は設計進捗により変更する可能性がある。

3. 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。

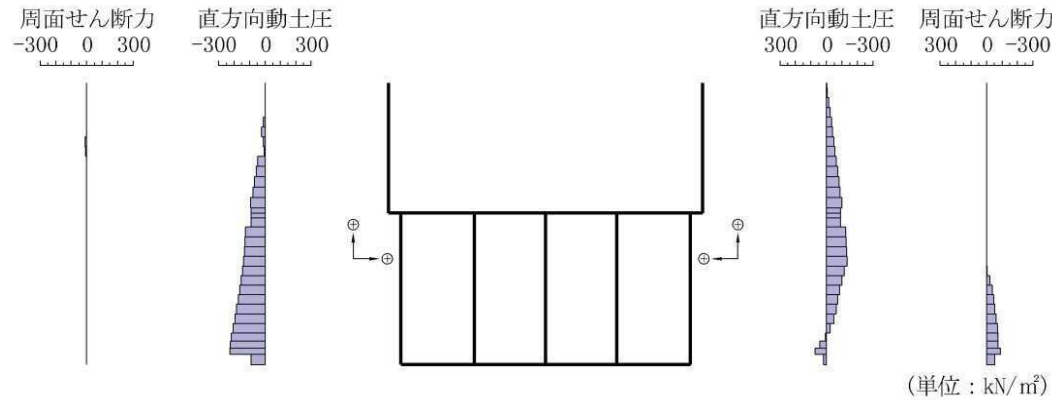


図 地震時増分土圧分布(例)

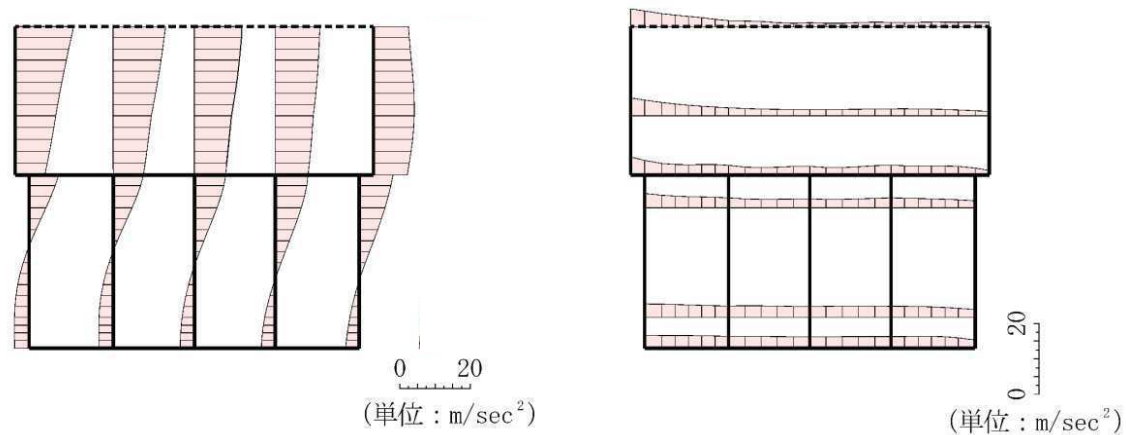
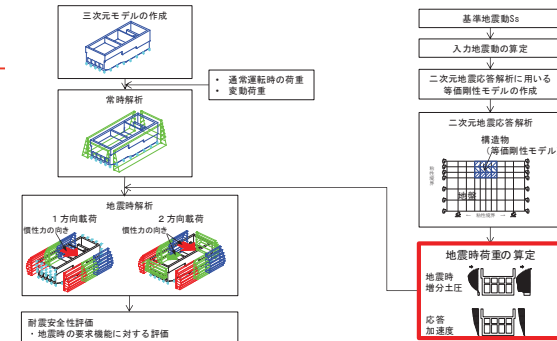


図 応答加速度分布(例)

耐震安全性評価フロー



3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (6) 地震時解析①

1方向載荷

- 二次元地震応答解析において「3. (5)地震時荷重の算定」で算定した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載荷する。
- 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。
- 底面の支持地盤ばねは「田治見のアドミタンス理論」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、設計用荷重を載荷し、評価を行う。

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、構造物近傍は地下水位が低下しているため水圧は直接作用しない。構造物より離れた位置における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用いてWestergaard式から算定する。

耐震安全性評価フロー

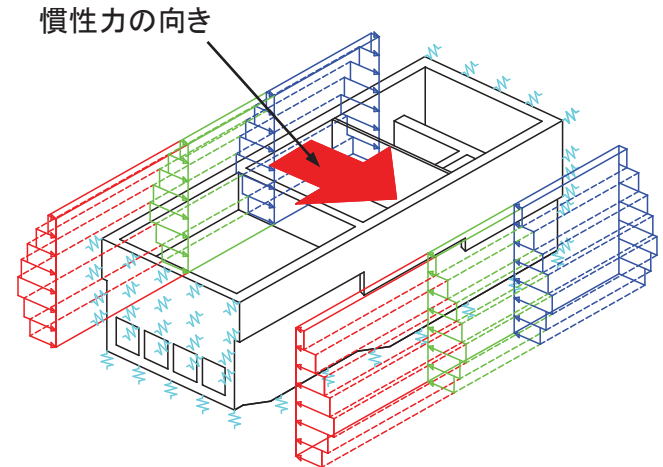
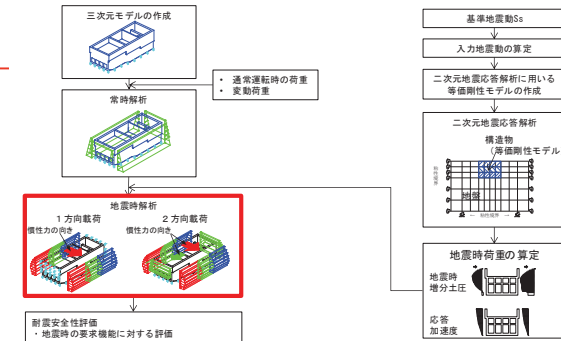


図 地震時荷重(1方向)載荷イメージ

3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順 (6) 地震時解析②

水平2方向載荷

- 水平2方向載荷に対する検討として、1方向載荷に、縦断方向の地震時荷重を同時に載荷する。
- 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、横断方向と異なり妻壁は構造物全体の挙動ではなく、1部材として応答するため、縦断方向の地震時荷重を算定するための二次元モデルは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方向載荷の影響が大きい部材のうち、1方向載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、位相が異なる地震動により算出して用いる。
- 1方向載荷時において、耐震要素として考慮される横断方向に平行な壁部材が非線形化する可能性があるため、評価時刻に至るまでの荷重により受ける影響を考慮して、水平2方向同時入力の影響を評価する。
- 地盤ばねは、底面の支持地盤ばねのみ設定し、設定方法は、1方向載荷時と同様である。

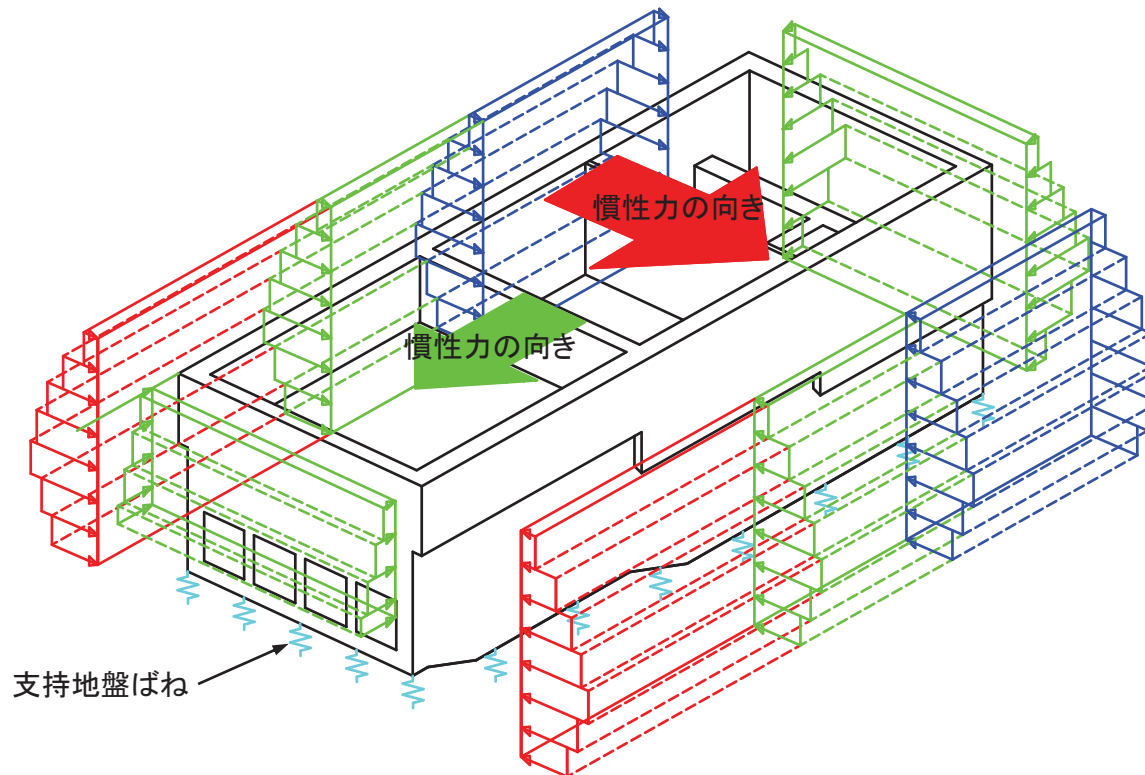
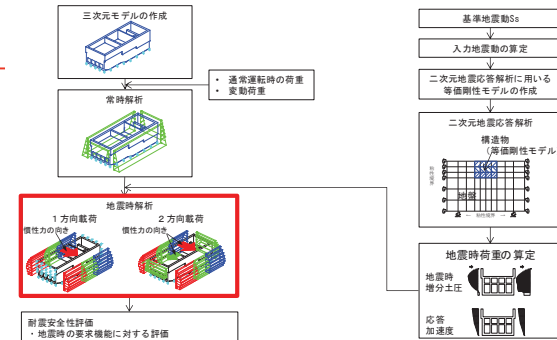
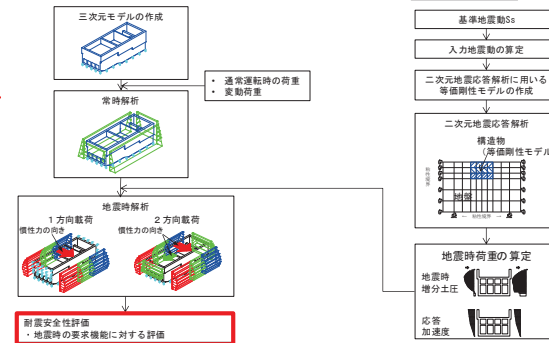


図 地震時荷重(2方向)載荷イメージ

耐震安全性評価フロー



耐震安全性評価フロー



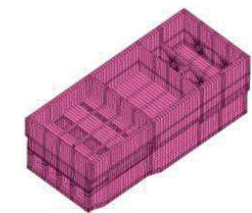
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

(7) 耐震安全性評価①

- 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 通水断面を閉塞しない 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 安全に支持できる 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 必要となる冷却用水を安全に貯留できる 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 安全機能を損なうことがないよう止水できる 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 | (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。



3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順

(7) 耐震安全性評価②

- 三次元静的材料非線形解析で建設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、既工認実績のある層間変形角、せん断力の他、既工認実績のない指標として概ね弾性の許容限界につい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。

| 要求機能 | 要求機能の評価方針 | 許容限界 | 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 |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|
| ①通水機能 | 一つの部材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、 部材が終局状態に至らないこと 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、 アンカ一定着部周辺においては、鉄筋が降伏しないこと 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 ε'_{peak} 2000 μ 主筋ひずみ: 降伏強度に対応するひずみ ε_y 1725 μ 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 | 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、側面の盛土は透水性が小さく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「7. (4)貯水機能に対する許容限界」に示す。 一方、盛土の止水性に全てを期待し、ひび割れに伴う漏水を許容したうえで貯水機能を適切に評価することは困難であることから、保守的に躯体の評価により貯水機能を満足できるよう、漏水が生じるような顕著な(部材を貫通するような)ひび割れが発生しないと考えられる、 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を確認する。 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(γ_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、 γ_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 ε'_{peak} : 2000 μ 主筋ひずみ: 降伏強度に対応するひずみ ε_y : 1725 μ せん断力: せん断耐力以下 【面内変形】 層間変形角: 第1折点(γ_1)以下 ただし、 γ_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、 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を確認する。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(γ_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、 γ_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 ε'_{peak} : 2000 μ 主筋ひずみ: 降伏強度に対応するひずみ ε_y : 1725 μ せん断力: せん断耐力以下 【面内変形】 層間変形角: 第1折点(γ_1)以下 ただし、 γ_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 | |

目次

1. はじめに
2. 建設工認からの変更点
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
4. 評価方法に係る課題の抽出
 - (1) 評価手順の変更点に係る設計体系への影響及び課題の抽出
 - (2) 評価方法に係る課題
5. 地震応答解析に係る課題
6. 構造解析に係る課題
7. 許容限界に係る課題
8. 安全係数に係る課題
9. 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

4. 評価方法に係る課題の抽出

(1) 評価手順の変更点に係る設計体系への影響及び課題の抽出①

- ・ 評価手順における建設工認からの変更点及び変更することによる設計体系への影響の有無を確認する。
- ・ また、今回工認手法における既工認実績の有無を確認し、各評価手順に対する課題を抽出する。

| 評価手順 | 建設工認からの変更点 | 設計体系への影響の有無 | 既工認実績・課題 |
|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 基準地震動 S_s | <ul style="list-style-type: none"> ・ 基準地震動S_sが建設工認(基準地震動S_2)から大加速度化している。 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 解析において、非線形性を考慮した適切な手法を選定する必要がある。 ・ 部材が非線形化する可能性があるため、部材の剛性低下に伴う力の配分の変化を表現できる、精緻な評価が必要となる。 | <p>【既工認実績】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ あり <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ なし |
| 入力地震動の算定 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 建設工認、今回工認いずれも一次元波動論により算定しており変更点はない。 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 二次元地震応答解析の入力地震動は、線形の岩盤中の上昇波Eであり、非線形化の影響は小さい。 | <p>【既工認実績】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ あり <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ なし |
| 二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデルの作成 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 建設工認では、構造物全体(耐震壁を含む)を対象に、単位奥行きあたりの等価剛性モデルを作成している。 ・ 今回工認において、新たに津波に対する止水機能が追加となり、部材毎に要求機能が異なることから、部材毎の評価が必要となったため、縦断方向を3エリアに分割し、各エリアを対象に、単位奥行きあたりの等価剛性モデルを作成している。 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 二次元地震応答解析において、三次元構造を考慮した応答を算定するために、適切に等価剛性モデルを作成する必要がある。 | <p>【既工認実績】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ あり <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデルは、海水ポンプ室の三次元構造が適切に考慮されているか？ ・ 二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデルは、水平方向の剛性を等価としているが、鉛直方向の床応答に影響はないか？ |
| 二次元地震応答解析 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 建設工認では、周波数応答解析(線形解析)を採用し、盛土・旧表土等は等価線形化法により非線形性を考慮している。 ・ 今回工認では、時刻歴非線形解析(構造物線形)を採用し、盛土・旧表土の非線形性を時刻歴で考慮している。また、構造物-地盤間の剥離・再接触を考慮している。 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 地盤の非線形性を考慮することやジョイント要素の影響等により、建設工認と比較すると土圧分布や加速度分布に差異が出るため、差異による構造物への影響を考慮する必要がある。 | <p>【既工認実績】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ あり <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 構造物への影響として、一部の要素が非線形化する可能性があるが、非線形解析により、精緻な評価が可能である(P15~19参照) |
| 地震時荷重の算定 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 建設工認では、全時刻の最大荷重を包絡させた荷重としている。 ・ 今回工認では、部材毎に要求機能が異なり、部材毎の評価が必要であるため、各部位の想定される損傷モードに応じた代表時刻における荷重を抽出している。 | <ul style="list-style-type: none"> ・ 評価部材や照査項目に応じた代表時刻を適切に選定する必要がある。 | <p>【既工認実績】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ なし <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 地震時荷重の選定時刻は、評価部材や照査項目(損傷モード)に応じて適切に選定されているか？ |

4. 評価方法に係る課題の抽出

(1) 評価手順の変更点に係る設計体系への影響及び課題の抽出②

| 評価手順 | 建設工認からの変更点 | 設計体系への影響の有無 | 既工認実績・課題 |
|-----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 三次元モデルの作成 | <ul style="list-style-type: none"> 建設工認では、構造物を三次元の線形シェル要素でモデル化している。 今回工認では、基準地震動の大加速度化により、部材が非線形化する可能性があることから、構造物全体の挙動を精緻に評価するため、構造物を三次元の非線形ソリッド要素又は非線形シェル要素でモデル化している。 止水機能や貯水機能が要求される構造物は、要素のひずみから部材厚方向のひび割れを評価できるソリッド要素でモデル化し、それ以外の構造物はシェル要素でモデル化している。 | <ul style="list-style-type: none"> 解析コードCOM3が耐震安全性評価に用いる応答を適切に評価できることを確認する必要がある。 非線形性を考慮した応答を適切に評価できる要素分割とする必要がある。 | <p>【既工認実績】</p> <ul style="list-style-type: none"> なし <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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？ 構造物の応答レベルは、弱非線形レベルに収まるか？ 三次元モデルにおける要素分割は適切か？ |
| 常時解析 | <ul style="list-style-type: none"> 建設工認、今回工認いずれも三次元モデルに通常運転時の荷重及び変動荷重を載荷しており変更点はない。 | <ul style="list-style-type: none"> なし | <p>【既工認実績】</p> <ul style="list-style-type: none"> あり <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> なし |
| 地震時解析 | <ul style="list-style-type: none"> 建設工認では、横断方向の地震時荷重を奥行き一様に載荷させ、地震時の応答を評価している。 今回工認では、横断方向の地震時荷重をエリア毎に奥行き一様に載荷させ、地震時の応答を評価している。 新規基準により、水平2方向載荷の検討が追加されている。 新たに竜巻防護ネットが設置される。 | <ul style="list-style-type: none"> 水平2方向載荷による耐震安全性評価において、部材が非線形化することを考慮した評価が必要となる。 竜巻防護ネットの影響を適切に考慮する必要がある。 | <p>【既工認実績】</p> <ul style="list-style-type: none"> あり <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> 水平2方向載荷において、部材が非線形化することを考慮して荷重を載荷することとしている(P28参照) 荷重をエリア毎に奥行き方向一様に載荷させることは適切か？ 機器・配管及び竜巻防護ネットの影響が適切に考慮されているか？ |
| 耐震安全性評価 | <ul style="list-style-type: none"> 止水機能が要求機能として追加されている。 建設工認では、許容応力度法により評価しており、鉄筋及びコンクリートの応力を照査指標としている。 今回工認では、限界状態設計法により評価しており、層間変形角、せん断力及びひずみを照査指標としている。 | <ul style="list-style-type: none"> 止水機能を含む各要求機能に対する許容限界を適切に設定する必要がある。 建設工認では許容限界に不確かさが含まれていたが、今回工認では各プロセスにおいて不確かさを安全係数として考慮していることから、安全係数の適切な設定が必要となる。 | <p>【既工認実績】</p> <ul style="list-style-type: none"> ひずみを照査指標とした既工認実績はない <p>【課題】</p> <ul style="list-style-type: none"> 許容限界は、要求機能に応じて適切に設定されているか？ 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？ |

4. 評価方法に係る課題の抽出

(2) 評価方法に係る課題①

- 「4. (1)評価手順の変更点に係る設計体系への影響及び課題の抽出」で抽出した課題を整理し、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 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1. 地震応答解析に係る課題 | | |
| <p>【課題1-1】</p> <ul style="list-style-type: none"> 二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデルは、海水ポンプ室の三次元構造が適切に考慮されているか？ | <ul style="list-style-type: none"> 海水ポンプ室は、3エリアに分かれており、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、エリア毎に等価剛性モデルを作成している。 初期剛性に対する等価剛性モデルを作成して土圧と加速度を保守的に算定している。 等価剛性モデルは線形モデルとしており、土圧と加速度を保守的に算定している。 | <p>5. (1)二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデル(P38)</p> |
| <p>【課題1-2】</p> <ul style="list-style-type: none"> 二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデルは、水平方向の剛性を等価としているが、鉛直方向の床応答に影響はないか？ | <ul style="list-style-type: none"> 三次元FEMモデルを用いた固有値解析により、機器が設置される補機ポンプエリアの中床版の固有振動数を確認した結果、1次固有振動数が20Hzを上回っているため、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がないことを確認している。 水平方向の剛性を等価剛性とした場合と、しない場合の加速度応答スペクトルを比較し、剛性の違いによる鉛直床応答への影響を確認している。 | <p>5. (2)鉛直方向床応答に対する検討(P39～41)</p> |
| <p>【課題1-3】</p> <ul style="list-style-type: none"> 地震時荷重の選定時刻は、評価部材や照査項目(損傷モード)に応じて適切に選定されているか？ | <ul style="list-style-type: none"> 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、最大27時刻における地震時荷重に対して照査を行うこととしている。 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。 | <p>5. (3)地震時荷重の抽出時刻(P42～46)</p> |

4. 評価方法に係る課題の抽出

(2) 評価方法に係る課題②

| 主な課題 | 検討の概要 | 該当箇所 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| 2. 構造解析に係る課題 | | |
| <p>【課題2-1】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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？ | <ul style="list-style-type: none"> 今回用いる解析コード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ことが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。 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。 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による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ている。 上記再現解析におけるモデル化方法や解析条件が、海水ポンプ室の評価におけるモデル化方法や解析条件と同様であることから、海水ポンプ室の評価においても、再現解析と同様の精度が見込めることを確認している。 | <p>6. (1)解析コードの適用性(P48～51)</p> |
| <p>【課題2-2】</p> <ul style="list-style-type: none"> 構造物の応答レベルは、弱非線形レベルに収まるか？ | <ul style="list-style-type: none"> 海水ポンプ室以外の取水口、軽油タンク室及び復水貯蔵タンク基礎について、層間変位が最大となる基準地震動に対する鉄筋及びコンクリートひずみを確認し、弱非線形レベルに収まっていることを確認している。 | <p>6. (2)海水ポンプ室以外の構造物における非線形レベルの見通し(P52～55)</p> |
| <p>【課題2-3】</p> <ul style="list-style-type: none"> 三次元モデルにおける要素分割は適切か？ | <ul style="list-style-type: none"> 要素分割は土木学会マニュアル2005に準拠し分割している。 要素分割をパラメータとした感度解析を実施し、要素分割の違いによる影響を確認した上で分割数を決定している。 | <p>6. (3)要素分割数の検討(P56～59)</p> |
| <p>【課題2-4】</p> <ul style="list-style-type: none"> 機器・配管及び竜巻防護ネットの影響が適切に考慮されているか？ | <ul style="list-style-type: none"> 機器については、地震応答解析により算定した応答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ている。 配管については、各エリアのスラブに一樣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。 竜巻防護ネットについては、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っている。 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、海水ポンプ室の重量と竜巻防護ネットの重量を比較し、海水ポンプ室と竜巻防護ネットの連成を考慮する必要がないことを確認している。 | <p>6. (4)機器・配管及び竜巻防護ネットの考慮方法(P60～62)</p> |
| <p>【課題2-5】</p> <ul style="list-style-type: none"> 荷重をエリア毎に奥行き一樣に載荷させることは適切か？ | <ul style="list-style-type: none"> 各エリア毎に奥行き一樣の荷重を載荷させた場合と、構造物の変形に伴う応力再配分を考慮した荷重を載荷させた場合の解析を行っている。 解析の結果、隔壁に発生するひずみ(面内)は同等であり、側壁に発生するひずみ(面外)は奥行き一樣の荷重を載荷させた方が大きくなり、保守的な載荷方法であることを確認している。 | <p>6. (5)荷重載荷方法に関する検討(P63～67)</p> |

4. 評価方法に係る課題の抽出

(2) 評価方法に係る課題②

| 主な課題 | 検討の概要 | 該当箇所 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| 3. 許容限界に係る課題 | | |
| <p>【課題3】</p> <ul style="list-style-type: none"> 許容限界は、要求機能に応じて適切に設定されているか？ | <ul style="list-style-type: none"> 要求機能に応じて、部材の曲げ・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。 面外変形時の曲げ・軸力系の破壊に対しては、通水機能においては終局状態に対する許容限界として既工認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)、支持機能、貯水機能及び止水機能においては鉄筋・コンクリートの概ね弾性範囲のひずみ(主筋ひずみ1725μ、コンクリートの圧縮ひずみ2000μ)を許容限界として設定している。 面内せん断に対しては、通水機能及び支持機能においては耐震壁の終局耐力として規定されている層間変形角4/1000に安全率2の余裕を見込み、耐震壁の終局耐力に対する許容限界としての既工認実績と、支持機能に対する許容限界としても既工認実績のある層間変形角(2/1000)、貯水機能及び止水機能においてはJEAG4601-1991に規定されているスケルトンカーブの第1折点以下を許容限界として設定している。 面外せん断に対しては、通水機能・支持機能・貯水機能に対する許容限界として既工認実績のあるせん断耐力を許容限界として設定している。 | 7. 許容限界に係る課題 (P69～79) |
| 4. 安全係数に係る課題 | | |
| <p>【課題4】</p> <ul style="list-style-type: none"> 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？ | <ul style="list-style-type: none"> 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している。 既工認実績のある土木学会マニュアル2005や、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等を参照して、妥当性を確認している。 | 8. 安全係数に係る課題 (P81～91) |

※：規格・基準類に許容値そのものは規定されていないが、コンクリート標準示方書2017等に概ね弾性範囲のひずみとしてコンクリートのピーク強度に対応するひずみ2000 μ 、鉄筋の降伏に対応するひずみ1725 μ (SD345の場合)が示されており、この値を採用している。

目次

1. はじめに
 2. 建設工認からの変更点
 3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
 4. 評価方法に係る課題の抽出
 5. **地震応答解析に係る課題**
 - (1) **二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデル**
 - (2) **鉛直方向床応答に対する検討**
 - (3) **地震時荷重の抽出時刻**
 6. 構造解析に係る課題
 7. 許容限界に係る課題
 8. 安全係数に係る課題
 9. 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

5. 地震応答解析に係る課題

(1) 二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデル

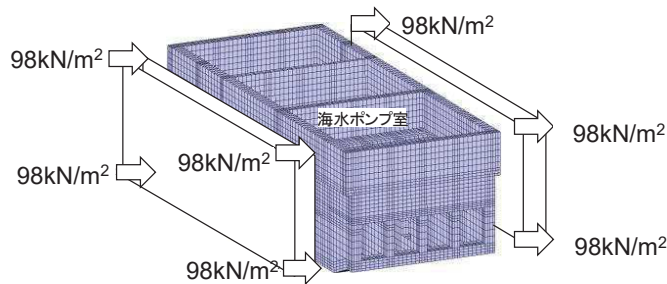
【課題1-1】

二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデルは、海水ポンプ室の三次元構造が適切に考慮されているか？

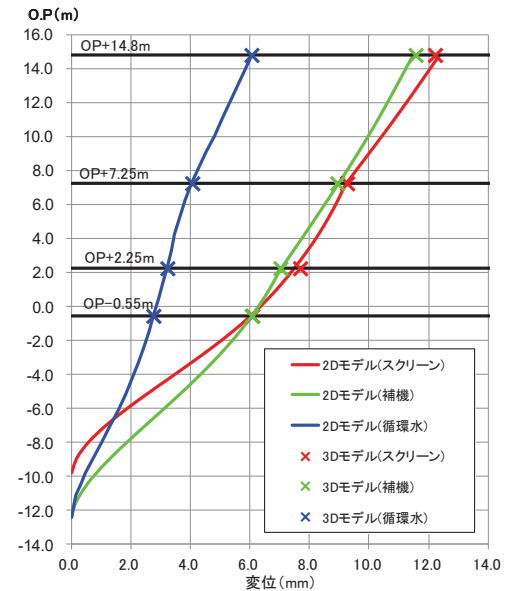
【検討概要】

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、エリア毎に等価剛性モデルを作成している。また、初期剛性に対する等価剛性モデルを作成して、土圧と加速度を保守的に算定している。

- 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、初期剛性の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。
- 初期剛性の三次元構造モデルに単位荷重(98kN/m²)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モデルとする。



剛性調整



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

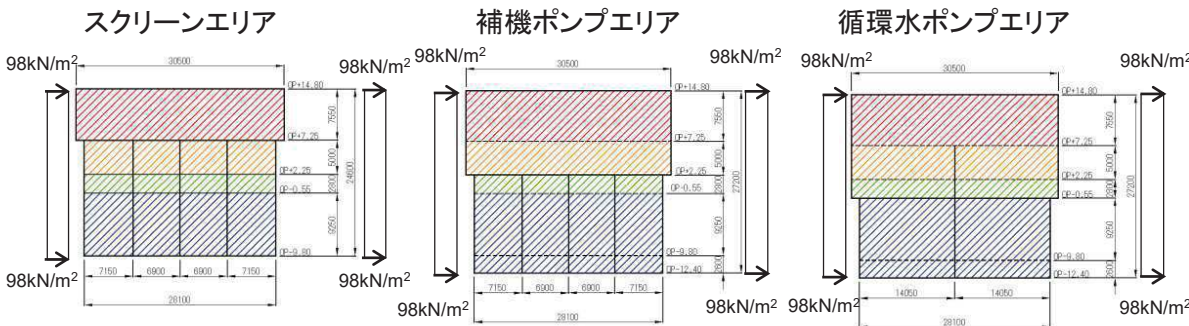
E_c : コンクリートの弾性係数

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_e/L

L_e : 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



※ : 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。

5. 地震応答解析に係る課題

(2) 鉛直方向床応答に対する検討①

【課題1-2】

二次元地震応答解析に用いる等価剛性モデルは、水平方向の剛性を等価としているが、鉛直方向の床応答に影響はないか？

【検討概要】

- (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20Hz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。

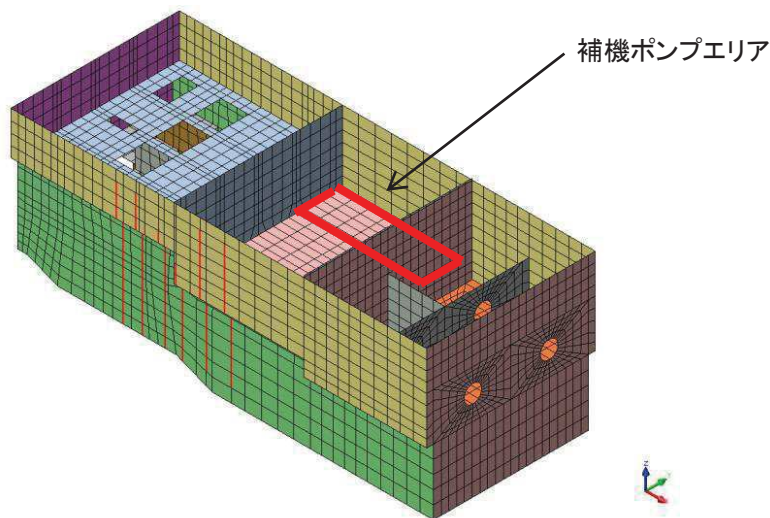


表 補機ポンプエリア中床版の固有振動数

| 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 |

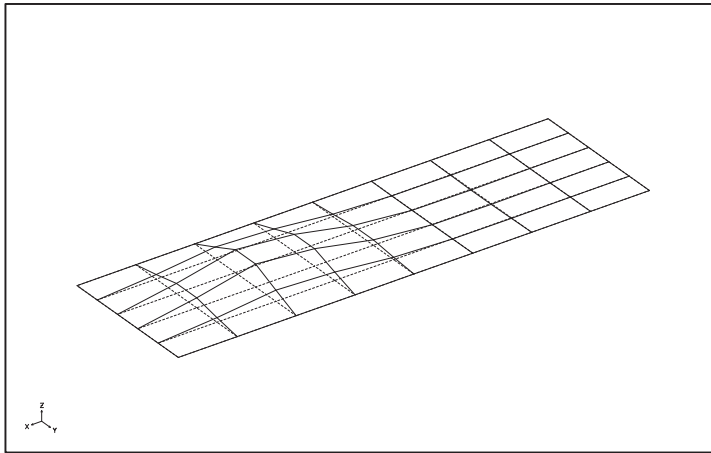
中床版の下部は4連のボックスカルバートになっており、中床版のスパンは区切られている。

5. 地震応答解析に係る課題

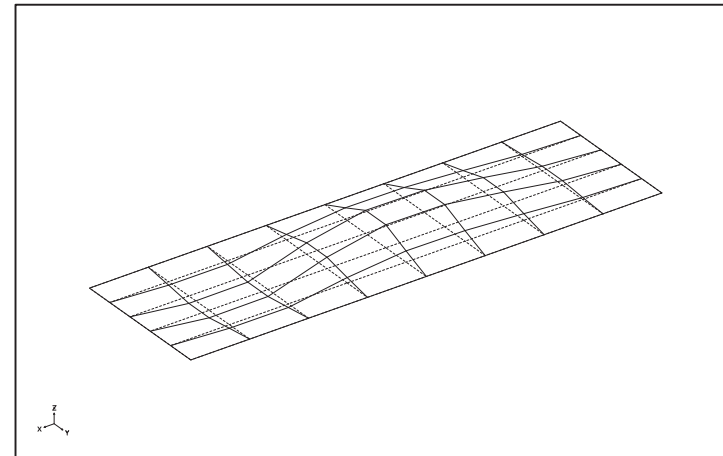
(2) 鉛直方向床応答に対する検討②

補機ポンプエリア モード図

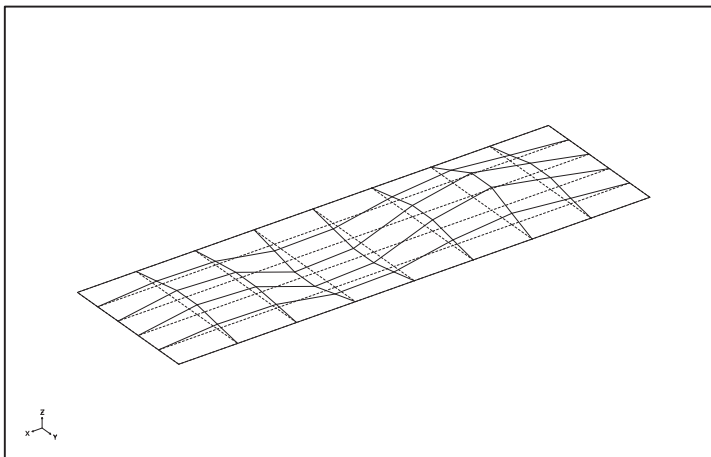
- 補機ポンプエリアのモード図を以下に示す。



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(再掲)

| 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 |

5. 地震応答解析に係る課題

(2) 鉛直方向床応答に対する検討③

(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方向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(β 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、 β 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

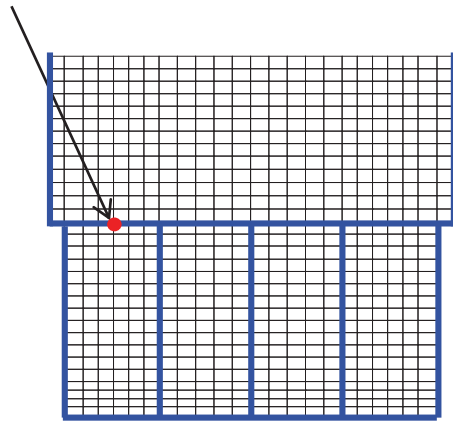


図 補機ポンプエリアモデル図



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

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_e/L

L_e : 部材の奥行き長さ

β : 変位を合わせるための弾性係数の補正係数

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。

5. 地震応答解析に係る課題

(3) 地震時荷重の抽出時刻①

【課題1-3】

地震時荷重の選定時刻は、評価部材や照査項目（損傷モード）に応じて適切に選定されているか？

【検討概要】

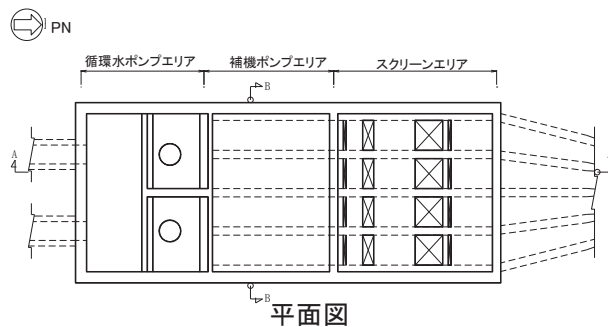
要求機能に応じて、部材毎に照査項目が異なることから、部材毎かつ損傷モード毎に評価が厳しくなる時刻を複数選定し、最大27時刻における地震時荷重に対して照査を行う。

海水ポンプ室の構造的特徴

- 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。**

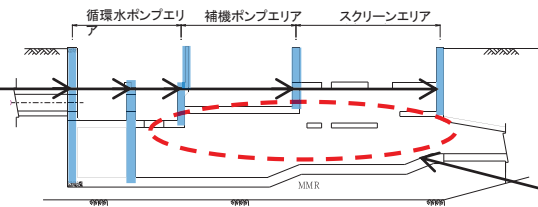
損傷モード

- 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、各エリアの側壁のスパン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。**



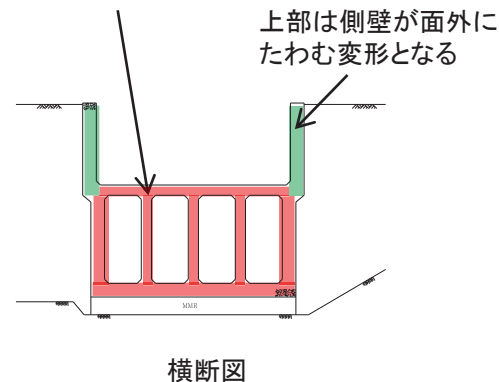
平面図

横断方向加振に対し耐震要素として機能する部材



縦断面図

下部はカルバート構造のせん断変形が支配的となる



横断面図

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

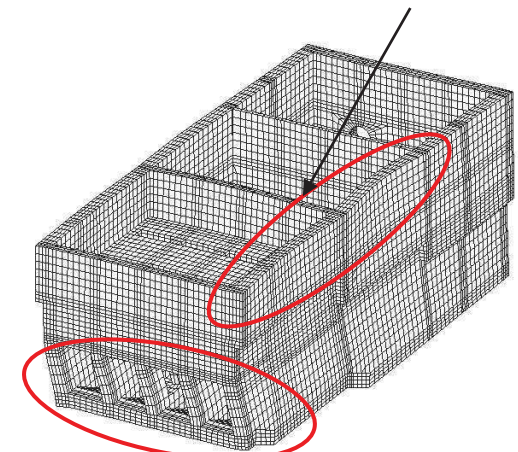



図 カルバート構造のせん断変形変形図(イメージ)

5. 地震応答解析に係る課題

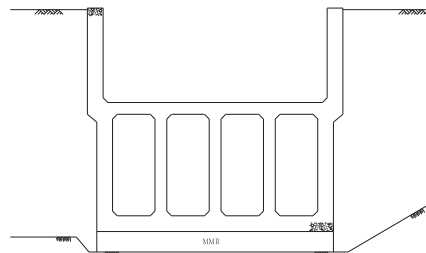
(3) 地震時荷重の抽出時刻②

- 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. (7)耐震安全性評価」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。

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_1 | ※1 | ※1 |
| | | | ※2 | t_2 | ※2 |
| | | | ※3 | ※3 | t_3 |
| | せん断破壊 | 総水平荷重が最大となる時刻 | t_4 | ※1 | ※1 |
| | | | ※2 | t_5 | ※2 |
| | | | ※3 | ※3 | t_6 |

- ※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



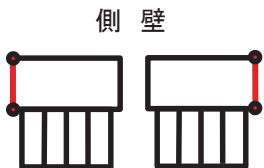
海水ポンプ室横断面図

5. 地震応答解析に係る課題

(3) 地震時荷重の抽出時刻③

- 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、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。

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 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
|  <p>側壁</p> | 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_7 右壁: t_8 | ※1 | ※1 |
| | | | ※2 | 左壁: t_9 右壁: t_{10} | ※2 |
| | | | ※3 | ※3 | 左壁: t_{11} 右壁: t_{12} |
| | せん断破壊 | 側壁の水平荷重が最大となる時刻 | 左壁: t_{13} 右壁: t_{14} | ※1 | ※1 |
| | | | ※2 | 左壁: t_{15} 右壁: t_{16} | ※2 |
| | | | ※3 | ※3 | 左壁: t_{17} 右壁: t_{18} |
| | 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_{19} 右壁: t_{20} | ※1 | ※1 |
| | | | ※2 | 左壁: t_{21} 右壁: t_{22} | ※2 |
| | | | ※3 | ※3 | 左壁: t_{23} 右壁: t_{24} |

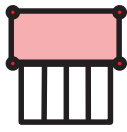
※1: スクリーンエリアと同時刻 ※2: 補機ポンプエリアと同時刻 ※3: 循環水ポンプエリアと同時刻

5. 地震応答解析に係る課題

(3) 地震時荷重の抽出時刻④

- 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。

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_{25} | ※1 | ※1 |
| | | | ※2 | t_{26} | ※2 |
| | | | ※3 | ※3 | t_{27} |

- ※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

5. 地震応答解析に係る課題

(3) 地震時荷重の抽出時刻⑤

- 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。

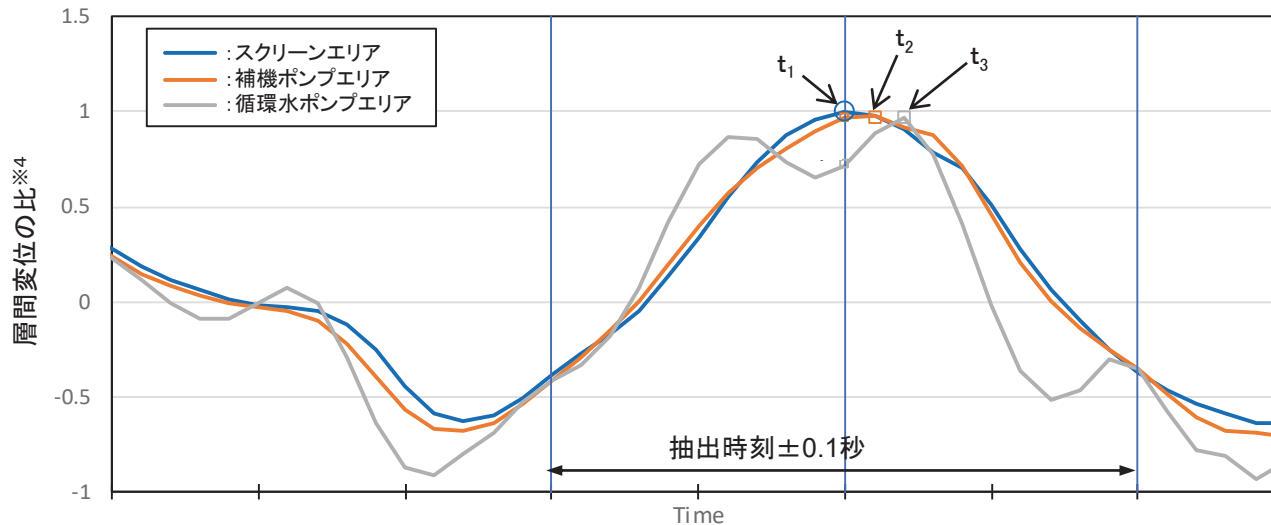


図 組み合わせ荷重となる時刻のイメージ(スクリーンエリア t_1 に着目した場合)

| 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)。

目次

1. はじめに
2. 建設工認からの変更点
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
4. 評価方法に係る課題の抽出
5. 地震応答解析に係る課題
6. **構造解析に係る課題**
 - (1) **解析コードの適用性**
 - (2) **海水ポンプ室以外の構造物における非線形レベルの見通し**
 - (3) **要素分割の検討**
 - (4) **機器・配管及び竜巻防護ネットの考慮方法**
 - (5) **荷重載荷方法に関する検討**
7. 許容限界に係る課題
8. 安全係数に係る課題
9. 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

6. 構造解析に係る課題

(1) 解析コードの適用性①

【課題2-1】

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？

【検討概要】

今回用いる解析コードCOM3は、三次元構造物の終局状態まで解析可能なコードである。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による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する。

- 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、壁構造の正負交番載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。

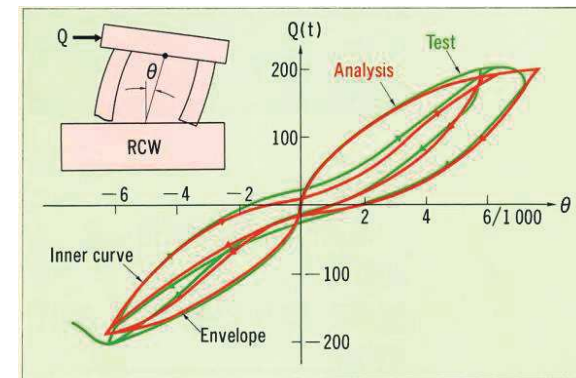


Fig.1.1a. Rotational angles of specimen RCW - analysis and test

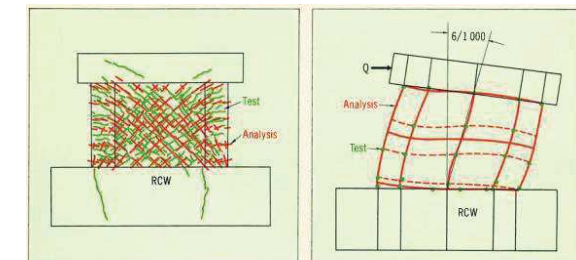


Fig.1.1b Cracks appeared - analysis and test (RCW)

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

図 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

6. 構造解析に係る課題

(1) 解析コードの適用性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。

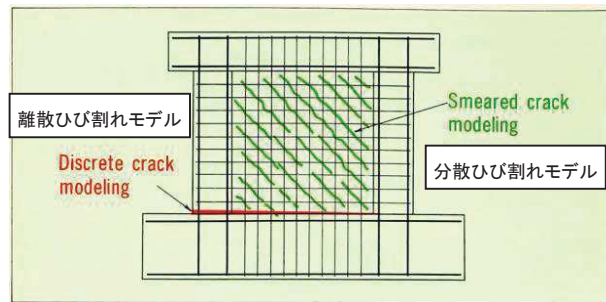


図 分散ひび割れモデル及び離散ひび割れモデル※1

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、 σ_{11} , σ_{22} , σ_{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。

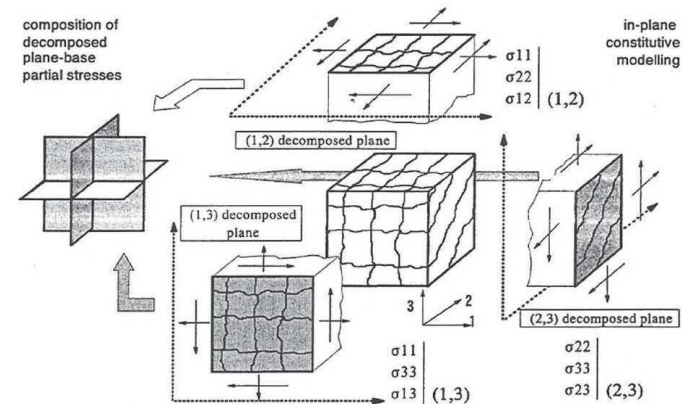


Fig.3 Re-composition of load carrying mechanism of 3D cracked solids of concrete with multi-directional cracking

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※2

※1:【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

※2:【出典】Hauke, B. and Maekawa, K.:Three dimensional modeling of reinforced concrete with multi-directional cracking, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, V-45, No.634, pp.349-368, 1999.11.

6. 構造解析に係る課題

(1) 解析コードの適用性③

- 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。

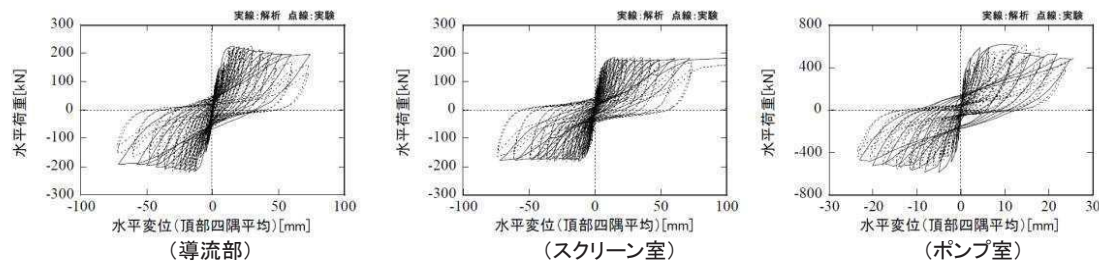
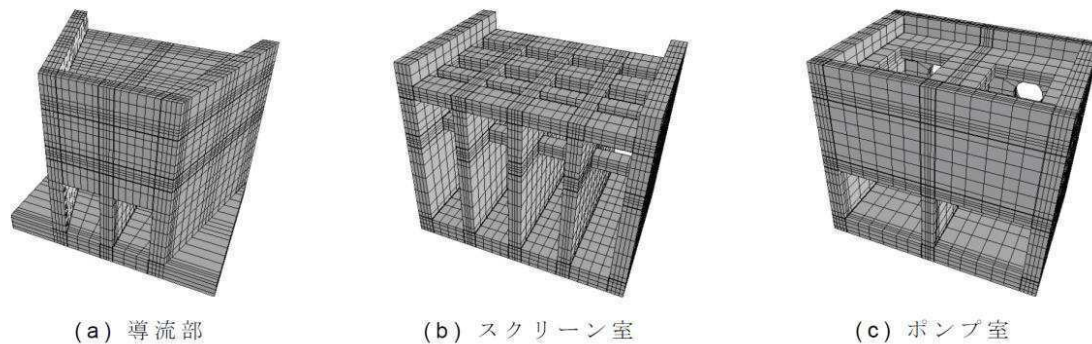


図 水平変位—水平荷重関係※¹

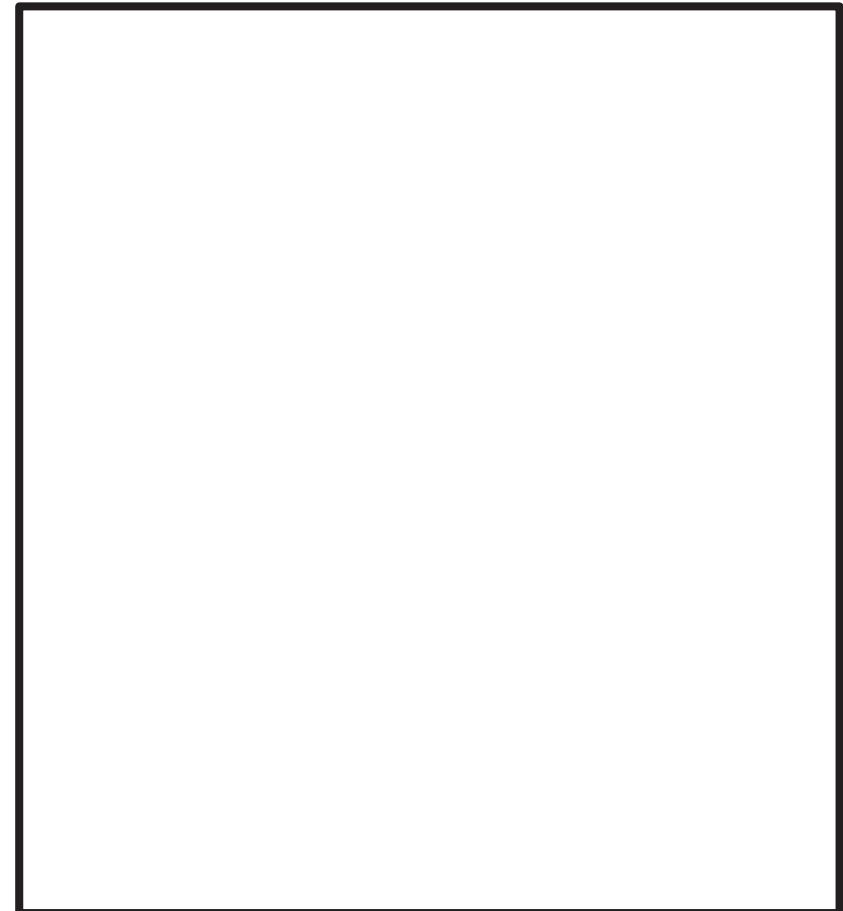


図 層間変形角—水平荷重関係※²

※1:【出典】宮川義範:頂部の沈下と部材の厚さ方向の膨張に着目した鉄筋コンクリート製地中構造物の耐震性評価, 2015, 東京大学学位論文

※2:【出典】原子力リスク研究センター共通研究「屋外重要土木構造物の耐震性能照査手法の高度化に関する研究」(平成27年度～平成29年度)。

6. 構造解析に係る課題

(1) 解析コードの適用性④

- 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。

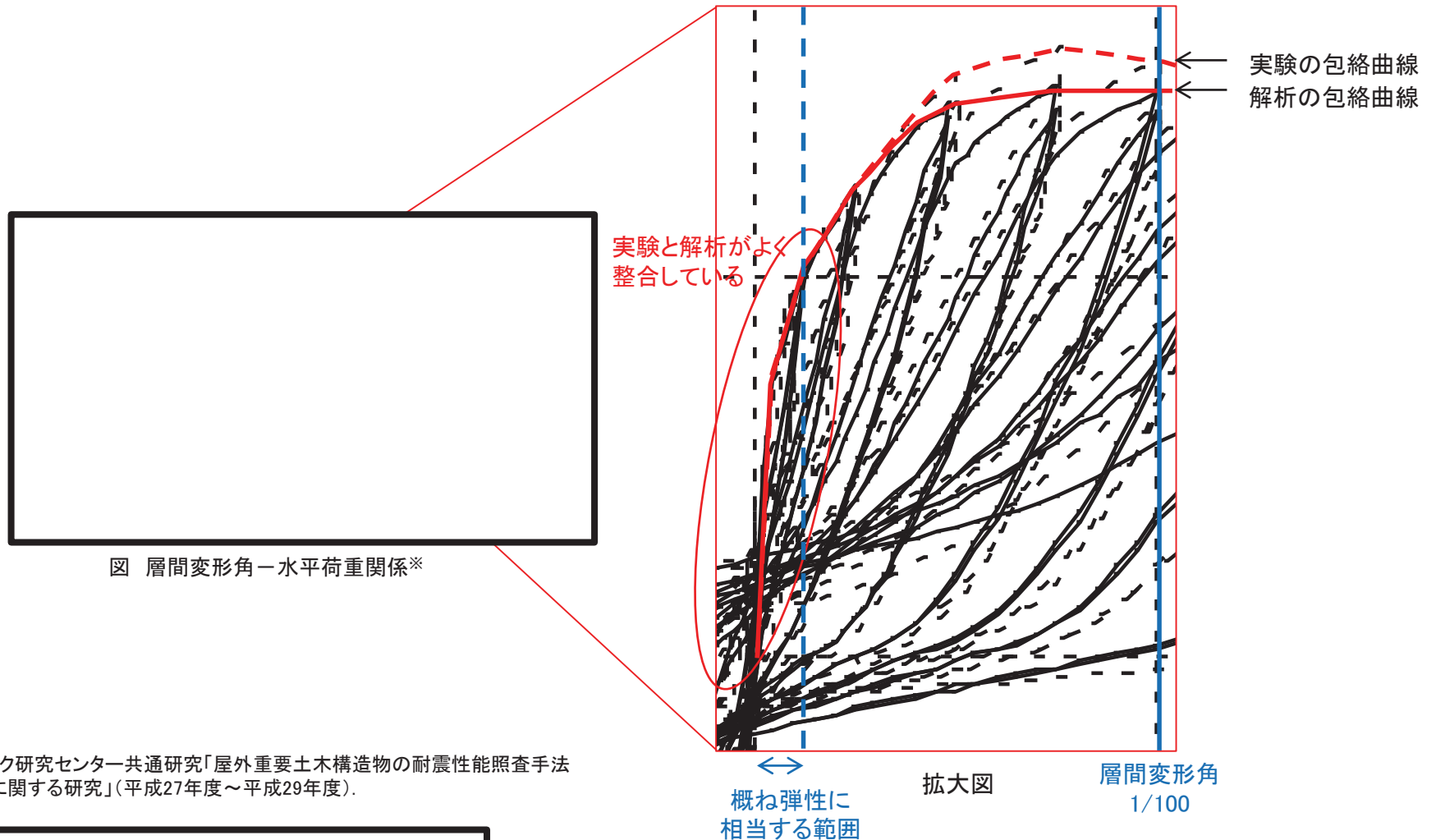


図 層間変形角－水平荷重関係※

※：【出典】原子力リスク研究センター共通研究「屋外重要土木構造物の耐震性能照査手法の高度化に関する研究」(平成27年度～平成29年度)。

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。

6. 構造解析に係る課題

(2) 海水ポンプ室以外の構造物における非線形レベルの見通し①

【課題2-2】

構造物の応答レベルは、弱非線形レベルに収まるか？

【検討概要】

三次元静的材料非線形解析の適用範囲を明確化するため、海水ポンプ室以外の構造物について、層間変位が最大となる基準地震動に対する鉄筋及びコンクリートひずみを確認し、弱非線形レベルに収まることを確認する。

- ・ 三次元静的材料非線形解析の適用範囲を明確化するため、海水ポンプ室以外の構造物についても、非線形レベルの見通しを示す。
- ・ 代表例として、層間変位が最大となる基準地震動に対する各構造物の鉄筋及びコンクリートひずみを示す。
- ・ なお、ここに示す結果は、二次元地震応答解析に時刻歴非線形解析(取水口)及び周波数応答解析(軽油タンク室、復水貯蔵タンク基礎)を採用した結果であり、非線形レベルを示すための暫定的な結果である。今後、地震応答解析等の手法の変更により、工認段階で変更となる可能性がある。

取水口

- ・ 取水口は、標準部(高さ12m)の背面に漸縮部(高さ5.5m)が接続された、高さの異なる構造が一体となっている箱型構造物であり、横断方向が弱軸方向となる。
- ・ 取水口の周辺地盤は、後に示すように地盤改良することにより変形を抑制する計画としている。
- ・ 標準部の部材高さは漸縮部の2倍程度と大きく、構造物の全体変形へ与える影響が大きいと考えられることから、標準部に着目し、標準部の層間変位が最大となる基準地震動について見通しを示す。
- ・ 表に示すとおり、コンクリートの主圧縮ひずみ及び鉄筋の引張ひずみは、概ね弾性範囲として整理する許容値と比較して十分に小さい値であり、弱非線形領域の範囲内となっていることが確認できる。

表 層間変位最大時刻に対する評価

| 確認項目 | 確認結果 | 許容値 |
|----------------|------------|------------|
| 基準地震動 | Ss-D2 | — |
| 主圧縮ひずみ(コンクリート) | 748 μ | 2000 μ |
| 引張ひずみ(鉄筋) | 1594 μ | 1725 μ |

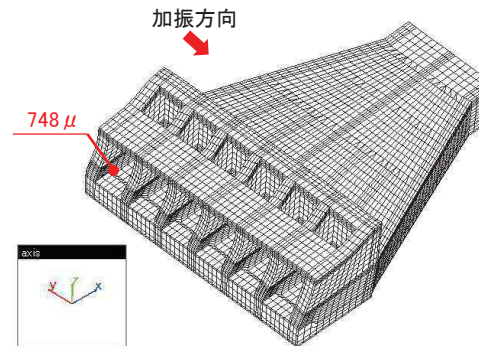


図 主圧縮ひずみ(コンクリート)

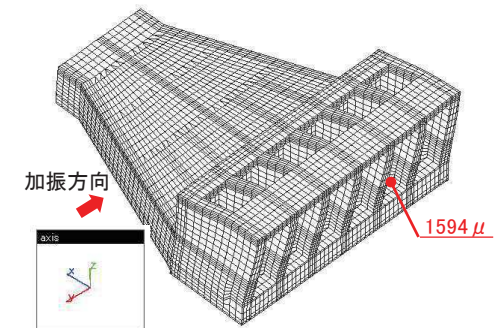


図 引張ひずみ(鉄筋)

6. 構造解析に係る課題

(2) 海水ポンプ室以外の構造物における非線形レベルの見通し②

取水口

- 取水口においては、標準部と漸縮部で形状が異なることによるねじれの影響が生じるが、標準部と漸縮部の層間変位差が最大となる時刻においても概ね弾性範囲に収まっており、ねじれの変形モードは厳しい時刻ではないことが確認できる。

表 ねじり変形最大時に対する評価

| 確認項目 | 確認結果 | 許容値 |
|----------------|-----------|------------|
| 基準地震動 | Ss-D2 | — |
| 主圧縮ひずみ(コンクリート) | 260 μ | 2000 μ |
| 引張ひずみ(鉄筋) | 149 μ | 1725 μ |

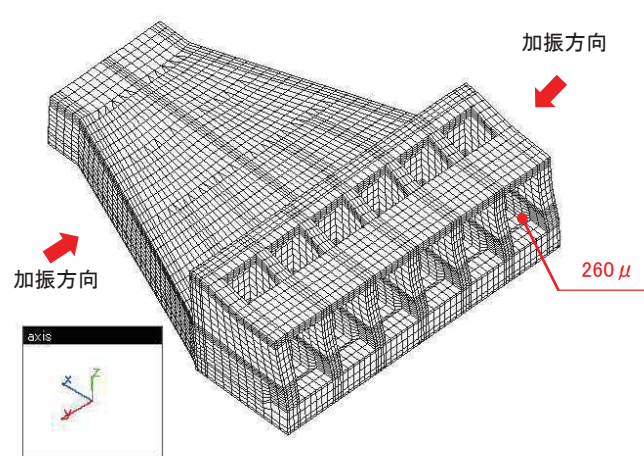


図 主圧縮ひずみ(コンクリート)

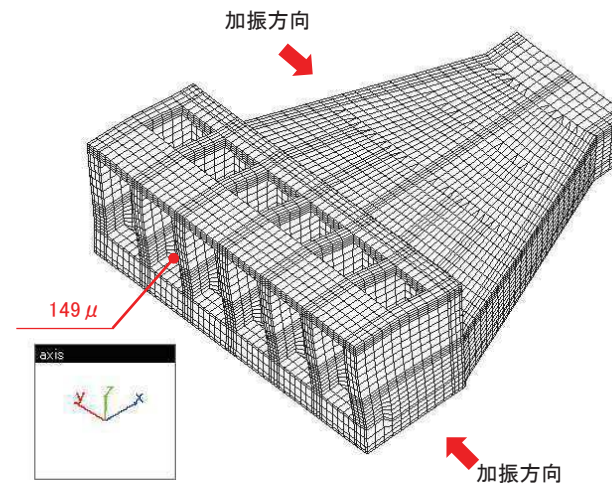


図 引張ひずみ(鉄筋)

6. 構造解析に係る課題 (参考) 取水口の地盤改良範囲

- 取水口周辺の地盤改良範囲を以下に示す。

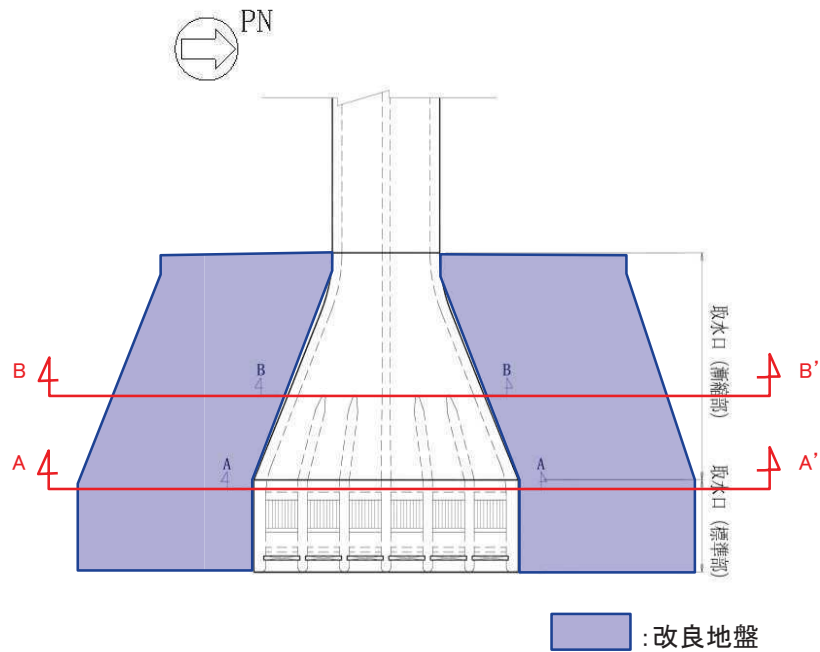


図 改良範囲平面図

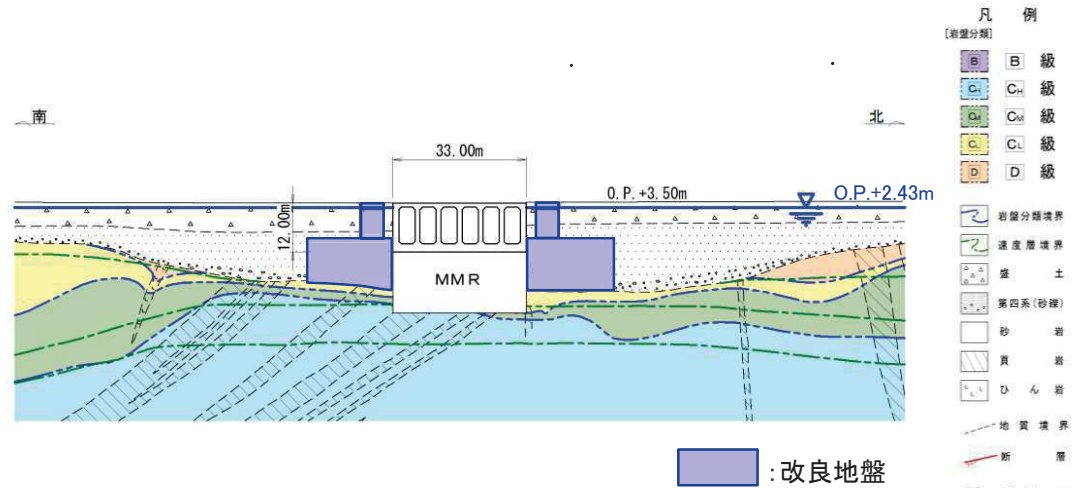


図 改良範囲断面図(標準部A-A'断面)

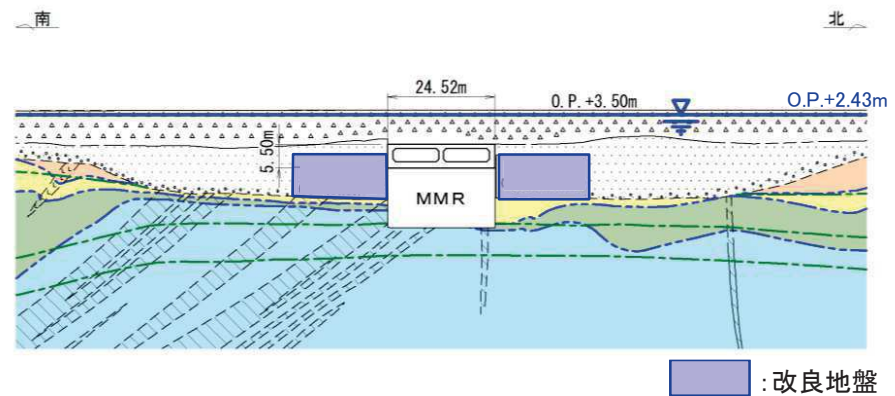


図 改良範囲断面図(漸縮部B-B'断面)

6. 構造解析に係る課題

(2) 海水ポンプ室以外の構造物における非線形レベルの見通し③

軽油タンク室

- 軽油タンク室は、隔壁にて仕切られた複数の部屋からなる箱型構造物であり、耐震設計上見込むことができる側壁や隔壁の部材寸法に大きな差異は無く、弱軸・強軸の方向が明確ではないが、応答ひずみが大きい東西方向加振の結果について見通しを示す。
- 東西方向の二次元地震応答解析より得られる層間変位が最大となる基準地震動について見通しを示す。
- 表に示すとおり、コンクリートの主圧縮ひずみ及び鉄筋の引張ひずみは、概ね弾性範囲として整理する許容値と比較して十分に小さい値であり、弱非線形領域の範囲内となっていることが確認できる。

表 層間変位最大時刻に対する評価

| 確認項目 | 確認結果 | 許容値 |
|----------------|-----------|------------|
| 基準地震動 | Ss-F2 | — |
| 主圧縮ひずみ(コンクリート) | 173 μ | 2000 μ |
| 引張ひずみ(鉄筋) | 111 μ | 1725 μ |

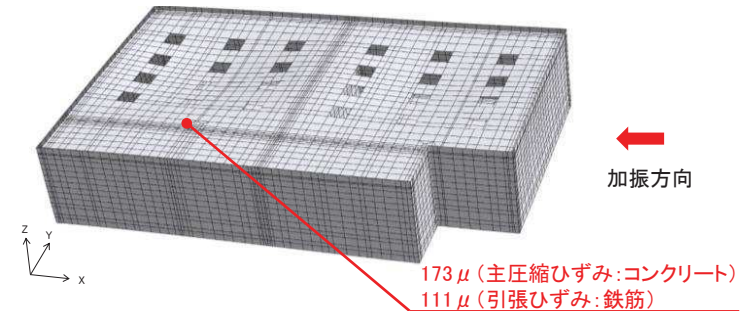


図 主圧縮ひずみ(コンクリート)・引張ひずみ(鉄筋)

復水貯蔵タンク基礎

- 復水貯蔵タンク基礎は、遮蔽壁、バルブ室及び連絡トレンチからなる箱型構造物であり、円筒形の遮蔽壁を有するという構造的な特徴から弱軸・強軸の方向が明確ではないが、応答ひずみが大きい東西方向加振の結果について見通しを示す。
- 部材高さ及び重量が大きく、構造物の全体変形へ与える影響が大きい遮蔽壁の層間変位が最大となる基準地震動について見通しを示す。
- 表に示すとおり、コンクリートの主圧縮ひずみ及び鉄筋の引張ひずみは、概ね弾性範囲として整理する許容値と比較して十分に小さい値であり、弱非線形領域の範囲内となっていることが確認できる。

表 層間変位最大時刻に対する評価

| 確認項目 | 確認結果 | 許容値 |
|----------------|-----------|------------|
| 基準地震動 | Ss-D2 | — |
| 主圧縮ひずみ(コンクリート) | 205 μ | 2000 μ |
| 引張ひずみ(鉄筋) | 177 μ | 1725 μ |

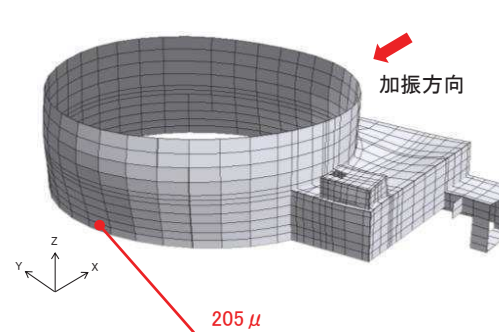


図 主圧縮ひずみ(コンクリート)

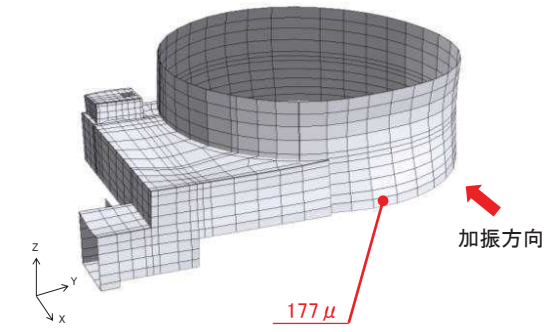


図 引張ひずみ(鉄筋)

6. 構造解析に係る課題

(3) 要素分割数の検討①

【課題2-3】

三次元モデルにおける要素分割は適切か？

【検討概要】

要素分割は土木学会マニュアル2005に準拠し分割している。要素分割をパラメータとした感度解析を実施し、要素分割の違いによる影響を確認する。

- ・ 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、6分割以上とする。
- 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。

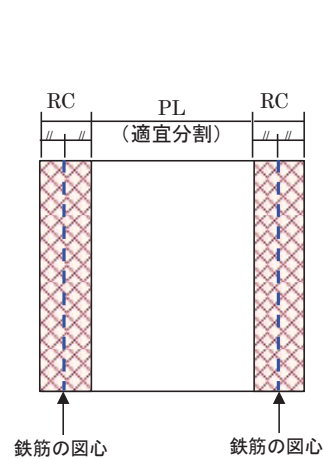


図 部材厚方向分割の概略図

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

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

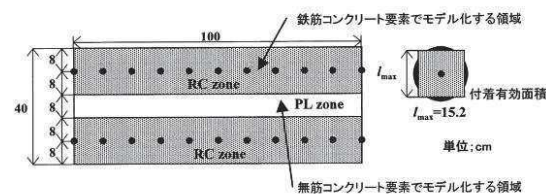


図 鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の例※

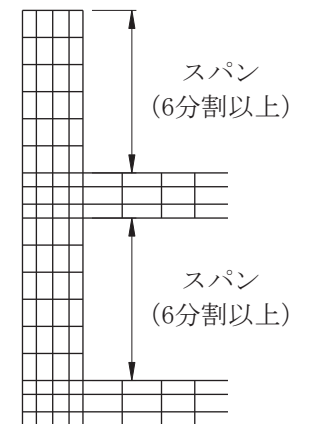


図 スパンの分割の概略図

6. 構造解析に係る課題

(3) 要素分割数の検討②

- 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、「6. (1)解析コードの適用性」(P50)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"> 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。 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"> 底面及び側面を固定条件。 荷重は面外に等分布荷重を漸増载荷する。 |
| 板厚方向の分割数検討 | <ul style="list-style-type: none"> PLゾーンを2分割、3分割としてパラスタを行う。 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。 スパン方向の分割は6分割で固定する。 |
| スパン方向の分割数検討 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 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。 |
| モデル寸法の影響検討 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |

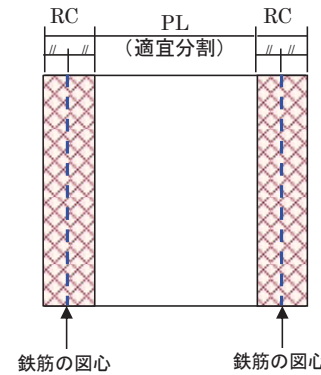


図 部材厚方向分割の概略図

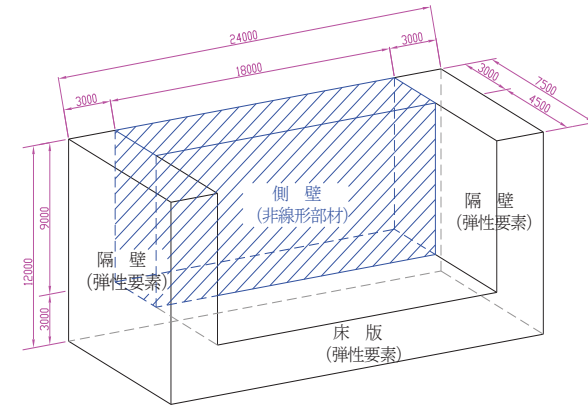


図 解析モデル

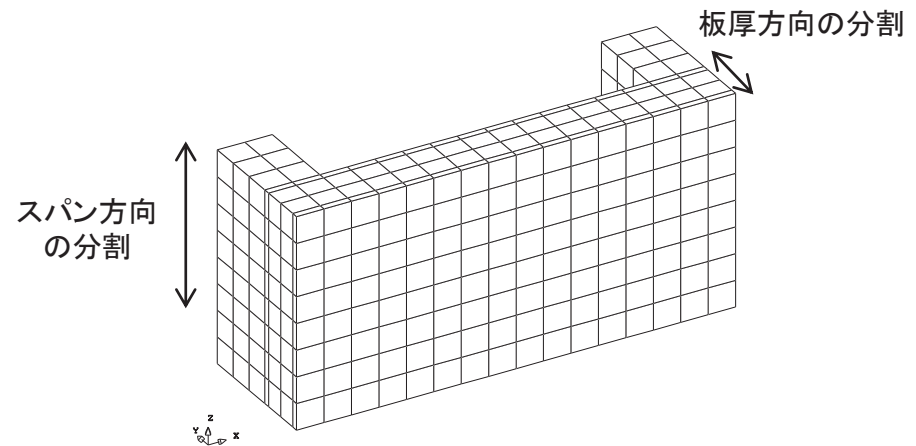


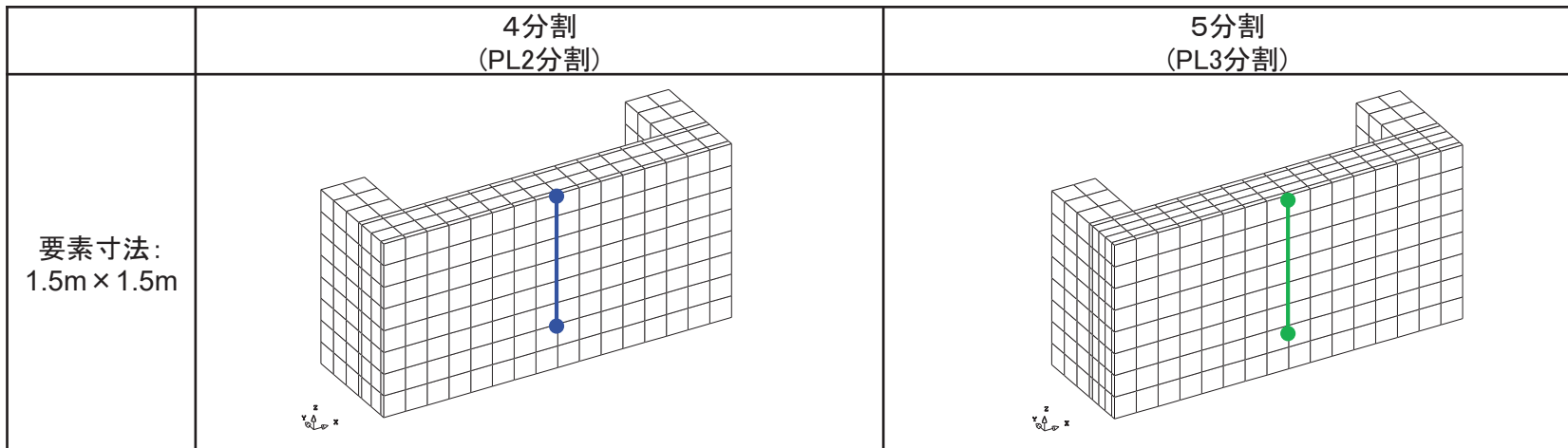
図 要素分割例(板厚方向4分割, スパン方向6分割)

6. 構造解析に係る課題

(3) 要素分割数の検討③

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

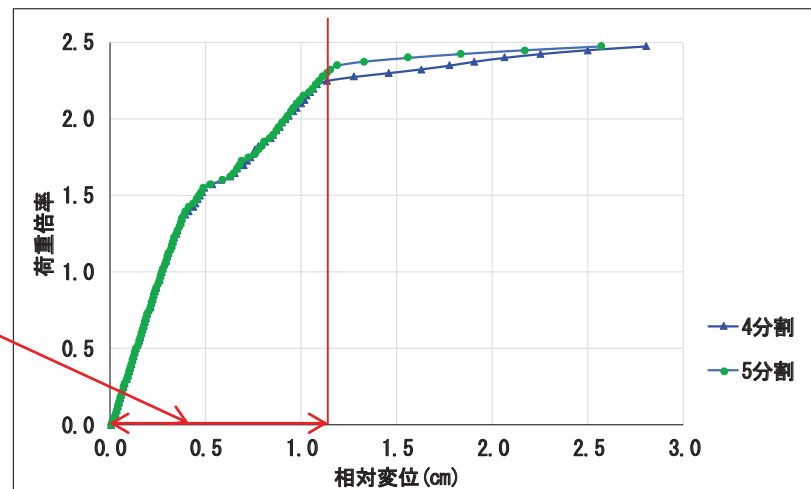


図 荷重－変位関係

6. 構造解析に係る課題

(3) 要素分割数の検討④

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「6. (1)解析コードの適用性」(P50)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。

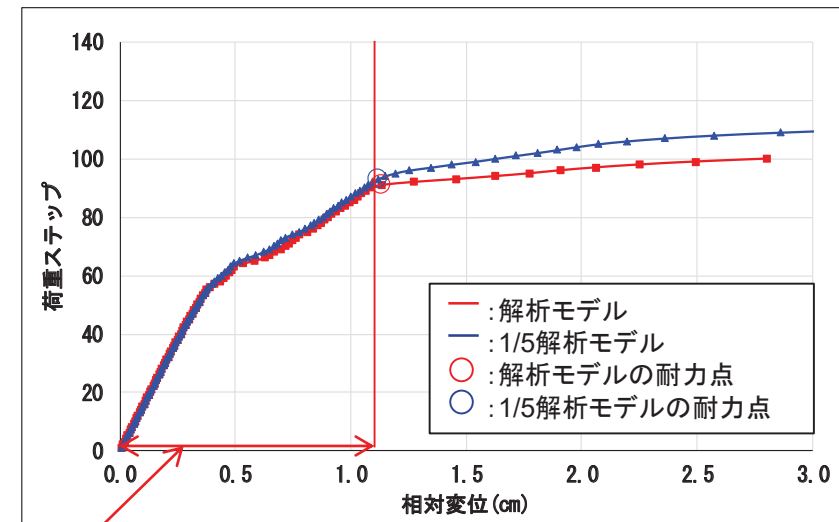
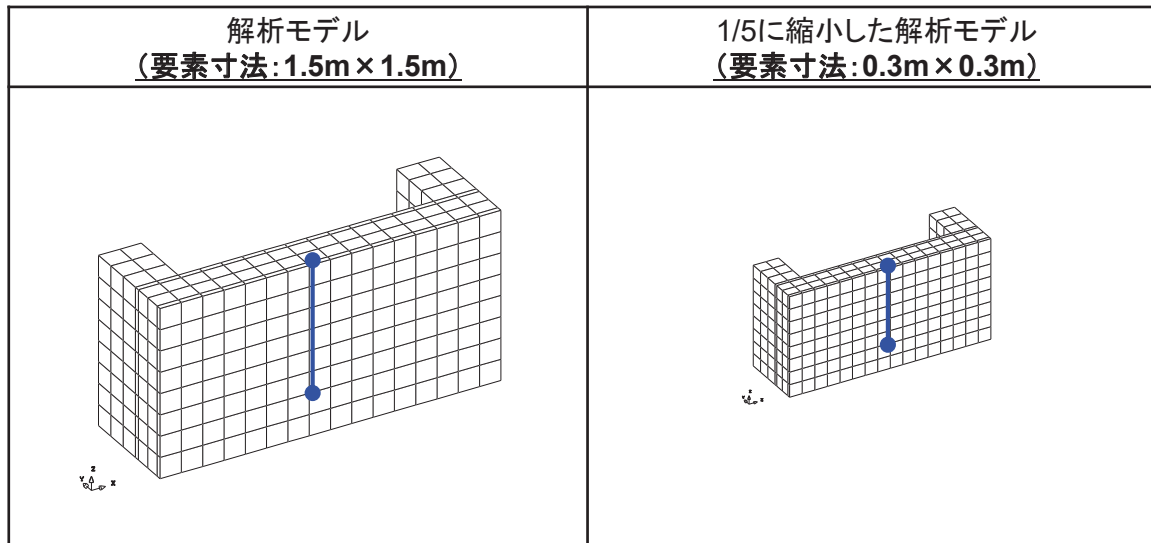


図 荷重ステップー変位関係

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

6. 構造解析に係る課題

(4) 機器・配管及び竜巻防護ネットの考慮方法①

【課題2-4】

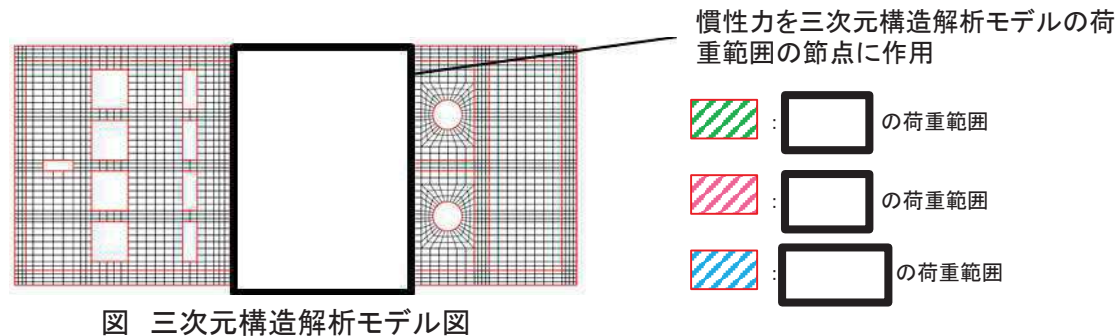
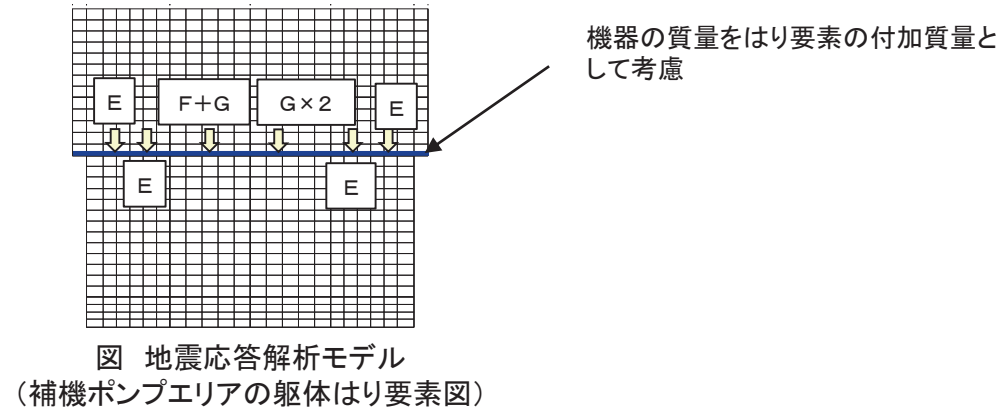
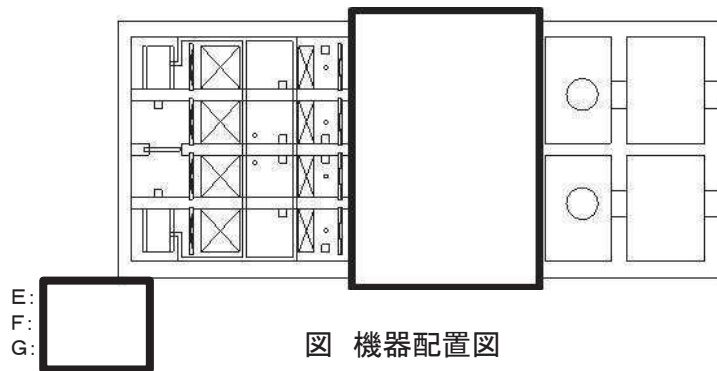
機器・配管及び竜巻防護ネットの影響が適切に考慮されているか？

【検討概要】

機器荷重については、機器の慣性力を三次元構造解析モデルに節点荷重として作用させ、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いる。竜巻防護ネットは海水ポンプ室の床応答に対する最大反力を用いて設計しており、連成を考慮する必要がないことを確認する。

既設の機器・配管等の考慮方法

- 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。



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。

6. 構造解析に係る課題

(4) 機器・配管及び竜巻防護ネットの考慮方法②

竜巻防護ネットの評価手順

- 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。

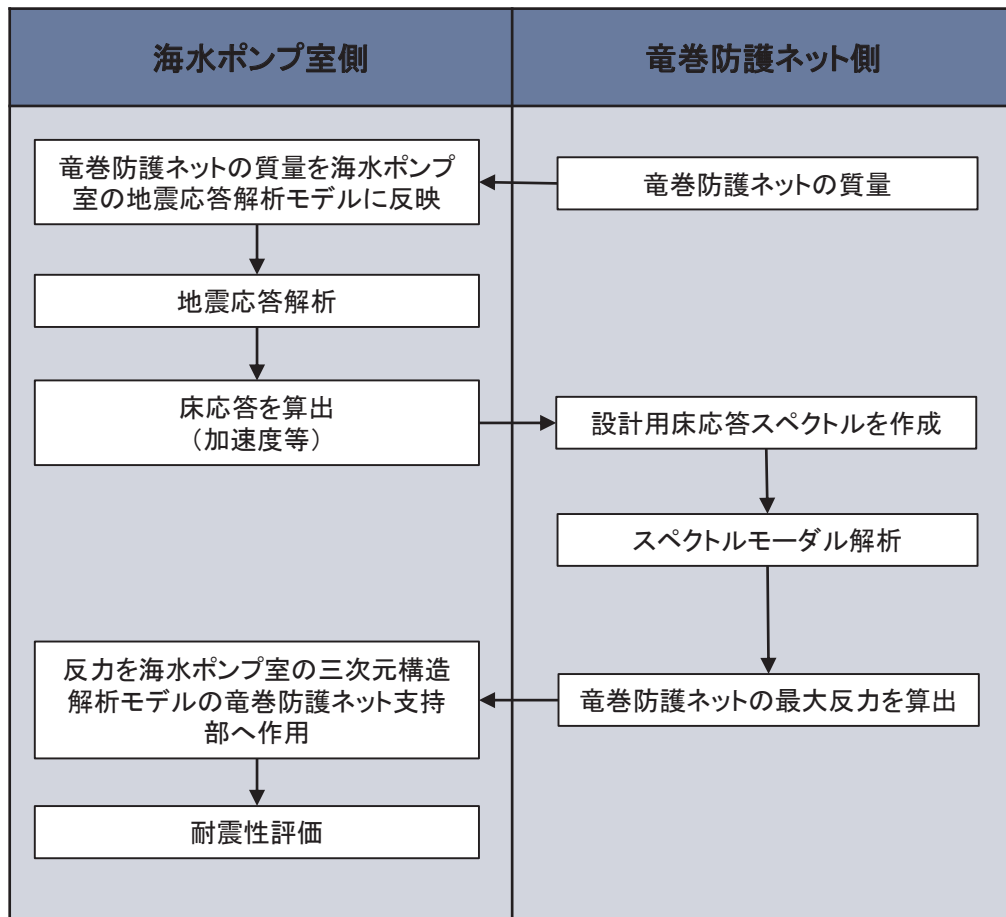


図 竜巻防護ネットの荷重を考慮した耐震性評価フロー

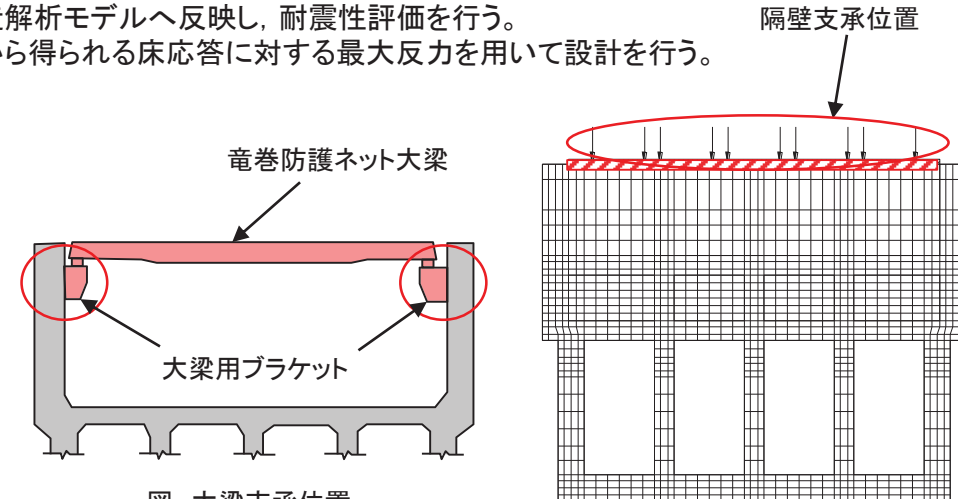


図 大梁支承位置
(海水ポンプ室横断面)

図 三次元構造解析モデル図
(隔壁位置断面)

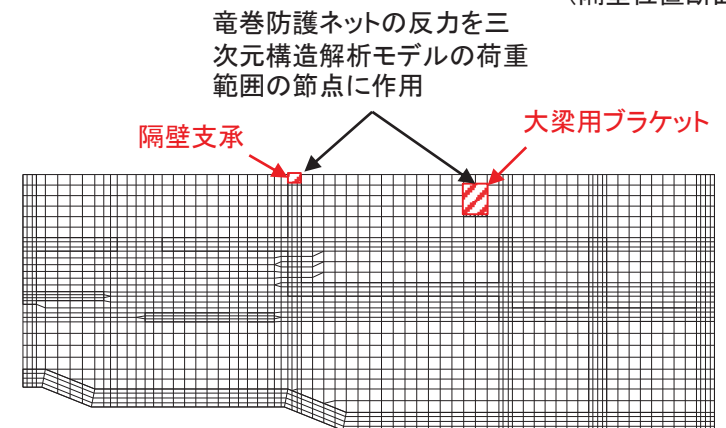


図 三次元構造解析モデル図

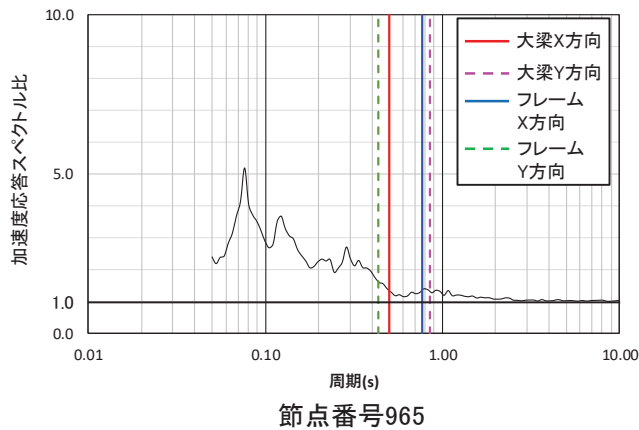
※: 竜巻防護ネットの形状、場所は概略図であり、工認段階で変わる可能性がある。

6. 構造解析に係る課題

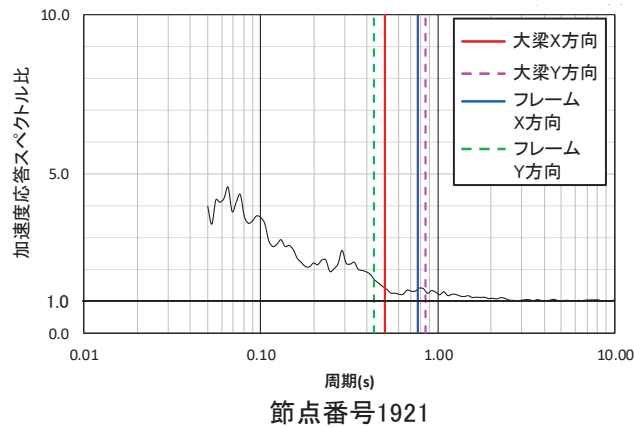
(4) 機器・配管及び竜巻防護ネットの考慮方法③

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。



節点番号965



節点番号1921

図 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)

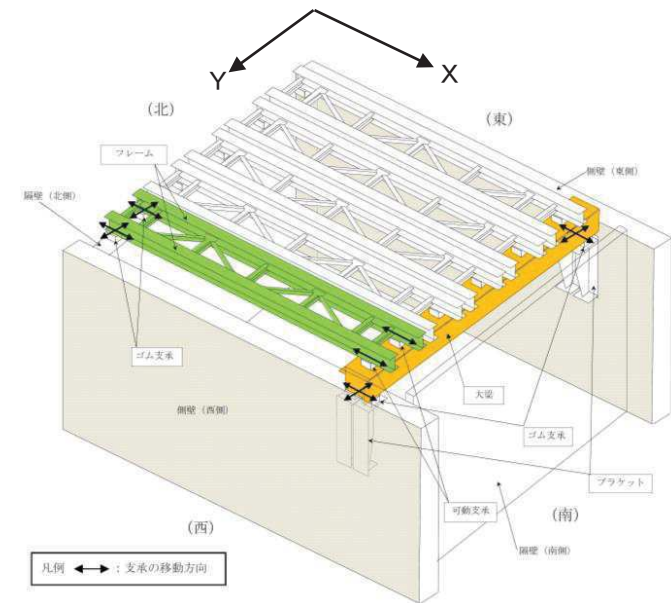


図 竜巻防護ネットの概要図

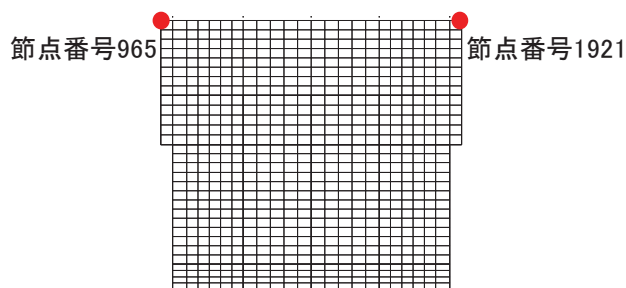


図 地震応答解析モデル

表 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 |

6. 構造解析に係る課題

(5) 荷重載荷方法に関する検討①

【課題2-5】

荷重をエリア毎に奥行き一様に載荷させることは適切か？

【検討概要】

各エリア毎に奥行き一様の荷重を載荷させた場合と、構造物の変形に伴う応力再配分を考慮した荷重を載荷させた場合の解析結果を比較し、奥行き一様の荷重を載荷させることが保守的であることを確認する。

■ 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、周辺地盤が一様に变形した場合の、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 δ 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。

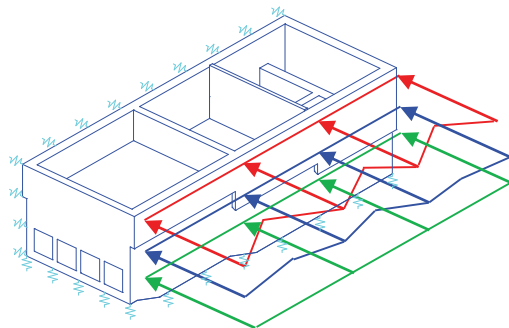


図 荷重分布1イメージ図

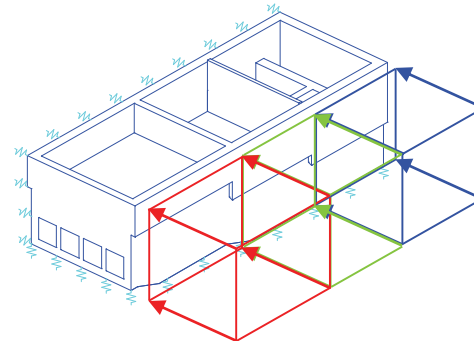


図 荷重分布2イメージ図

6. 構造解析に係る課題

(5) 荷重載荷方法に関する検討②

【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。

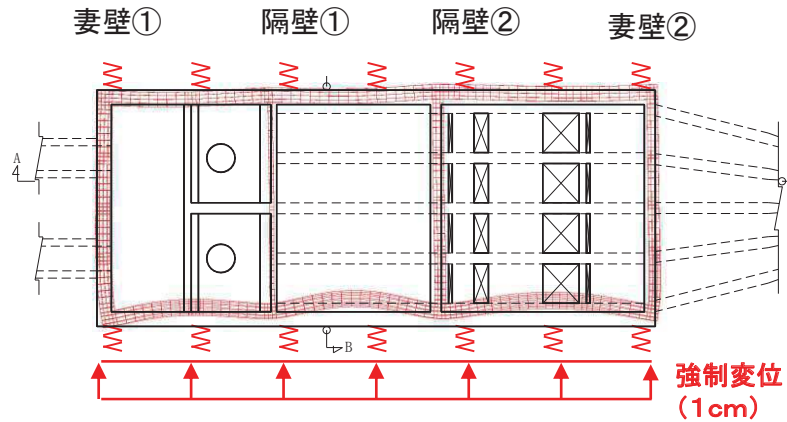


図 構造物天端(O.P.+15.00m)の変形図

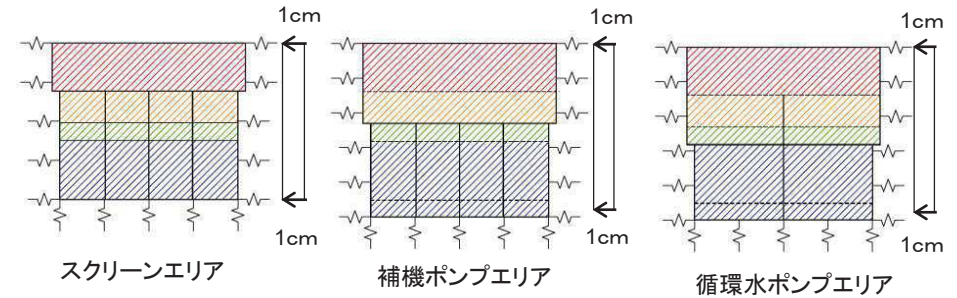


図 二次元等価剛性モデル

※: 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。

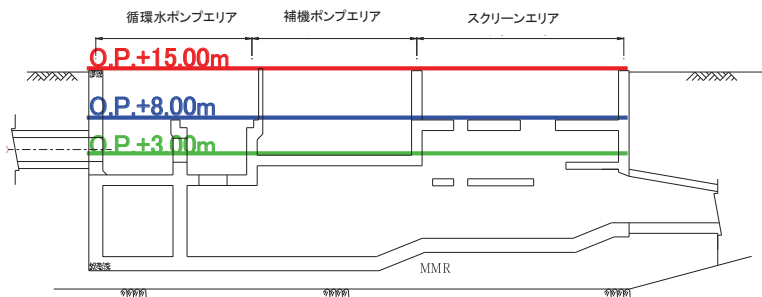


図 縦断面図

6. 構造解析に係る課題

(5) 荷重載荷方法に関する検討③

【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

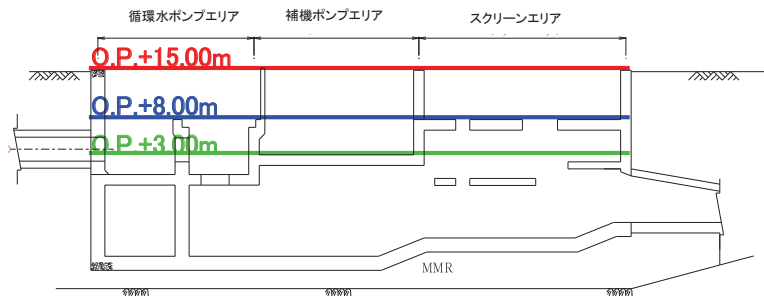
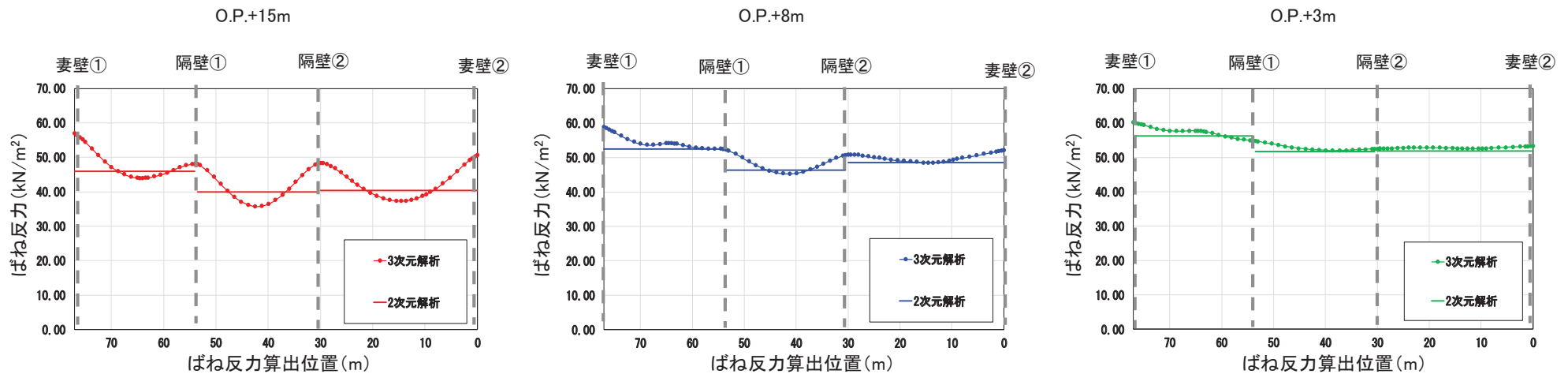


図 縦断面図

- 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。

6. 構造解析に係る課題

(5) 荷重載荷方法に関する検討④

【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。**

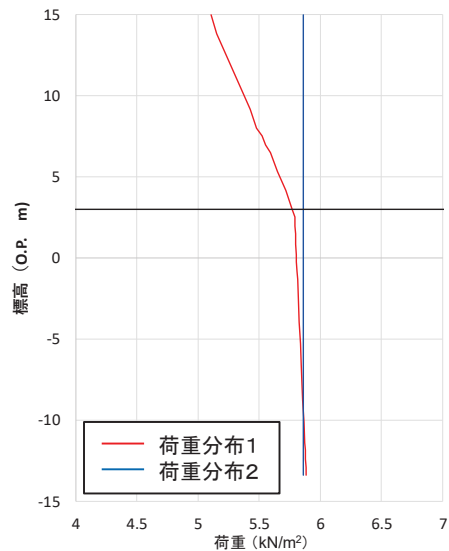


図 補機ポンプエリア隔壁間中央位置に作用する土圧の鉛直分布

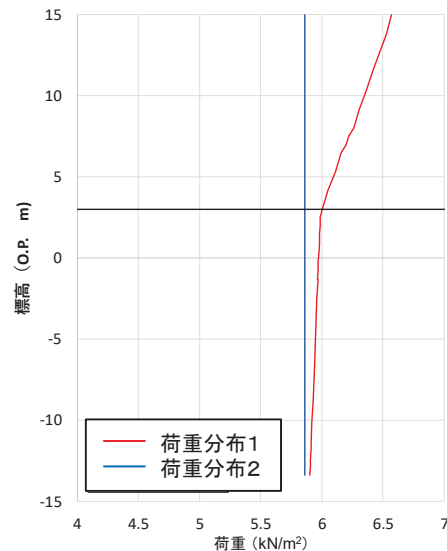
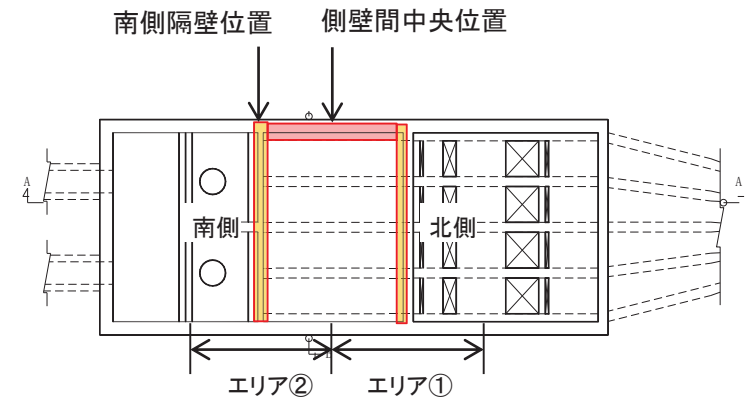


図 補機ポンプエリア南側隔壁に作用する土圧の鉛直分布



| 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 |

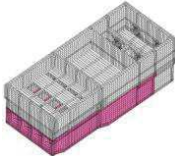
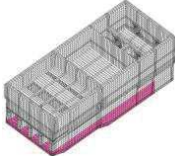
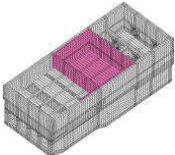
6. 構造解析に係る課題

(5) 荷重載荷方法に関する検討⑤

【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 | |
|-----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------|------------|------------|
| | | | 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 μ | 4082 μ |
| | | 圧縮ひずみ | 687 μ | 690 μ |
| | | せん断ひずみ | 4070 μ | 4140 μ |
| 貯水機能 (O.P. -5.3m以下) |  | 圧縮ひずみ | 596 μ | 599 μ |
| | | 主筋ひずみ | 669 μ | 660 μ |
| | | せん断ひずみ | 1524 μ | 1546 μ |
| 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 μ | 802 μ |
| | | 主筋ひずみ | 603 μ | 616 μ |
| | | せん断ひずみ | 6258 μ | 4140 μ |
| 支持機能 (補機ポンプエリア) |  | 圧縮ひずみ | 876 μ | 999 μ |
| | | 主筋ひずみ | 1019 μ | 1262 μ |
| | | 面内せん断ひずみ | 176 μ | 185 μ |

※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. 建設工認からの変更点
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
4. 評価方法に係る課題の抽出
5. 地震応答解析に係る課題
6. 構造解析に係る課題
7. 許容限界に係る課題
 - (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
8. 安全係数に係る課題
9. 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

7. 許容限界に係る課題

(1) 許容限界

【課題3】

許容限界は、要求機能に応じて適切に設定されているか？

【検討概要】

要求機能に応じて、部材の曲げ・軸力系の破壊及びせん断破壊に対し、既工認実績のある許容限界を設定している。一部既工認実績のない許容限界については、既工認実績がある限界状態を想定し、許容限界を設定していることを確認する。

| | | 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に止水できる |
| 目標性能 | | ・部材が終局状態に至らない | ・部材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 | 構造物は高次の不静定構造であり、一つの部材が終局状態に至ったとしても、直ちに通水断面の閉塞に繋がる事象には至らないが、保守的に部材が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、部材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。 | 構造物の周辺環境を考慮すると、周囲の盛土の透水性は十分に小さく、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が、躯体のみで貯水機能を満足できるよう、漏水が生じるような顕著な(部材を貫通するような)ひび割れが発生しないと考えられる、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。 | 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(γ_1) または漏水量評価 | 層間変形角<第1折点(γ_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。

7. 許容限界に係る課題

(2) 通水機能に対する許容限界①

- 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、終局状態に至らない部材状態を想定している。
- 部材状態に応じた許容限界として、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、既工認実績のある許容限界である。
- 通水機能が要求される箱型構造物は、海水ポンプ室以外に取水口があるが、取水口についても同様の部材状態を想定し、本許容限界を適用する。

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 | 部材が終局状態に至らない。 |
| 設定理由 | 構造物は高次の不静定構造であり、一つの部材が終局状態に至ったとしても、直ちに通水断面の閉塞に繋がる事象には至らないが、保守的に部材が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"> 土木学会マニュアル2005に規定されており、屋外重要土木構造物の通水機能の許容限界として既工認実績がある。(P71参照) |
| せん断 | 層間変形角(面内) | 2/1000 | <ul style="list-style-type: none"> JEAG4601-1991において、耐震壁の終局耐力に相当する層間変形角4/1000に余裕を見込んだ許容限界として規定されており、耐震壁の終局耐力に対する許容限界として既工認実績がある。(P71参照) |
| | 発生せん断力 | せん断耐力 | <ul style="list-style-type: none"> 土木学会マニュアル2005に規定されており、屋外重要土木構造物の通水機能の許容限界として既工認実績がある。(P72参照) |

7. 許容限界に係る課題

(2) 通水機能に対する許容限界②

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、屋外重要土木構造物の通水機能の許容限界として既工認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、耐震壁の支持機能の許容限界として既工認実績がある限界値である。

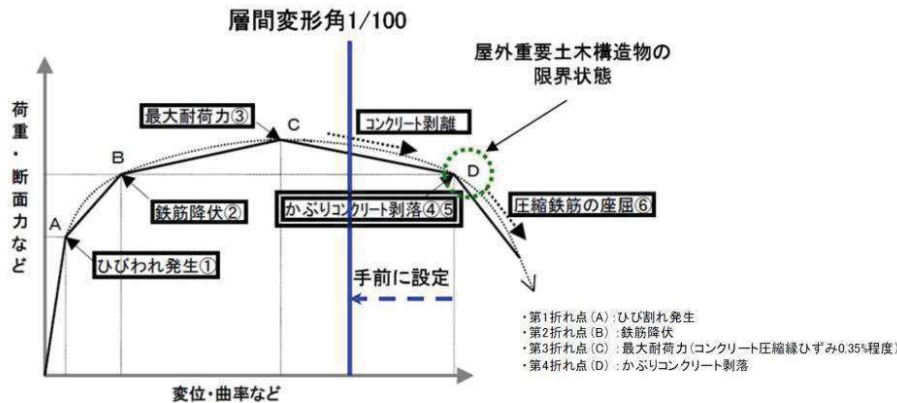


図 鉄筋コンクリートはり部材の荷重変位関係と損傷状態に対する概念図(一部加筆)※1

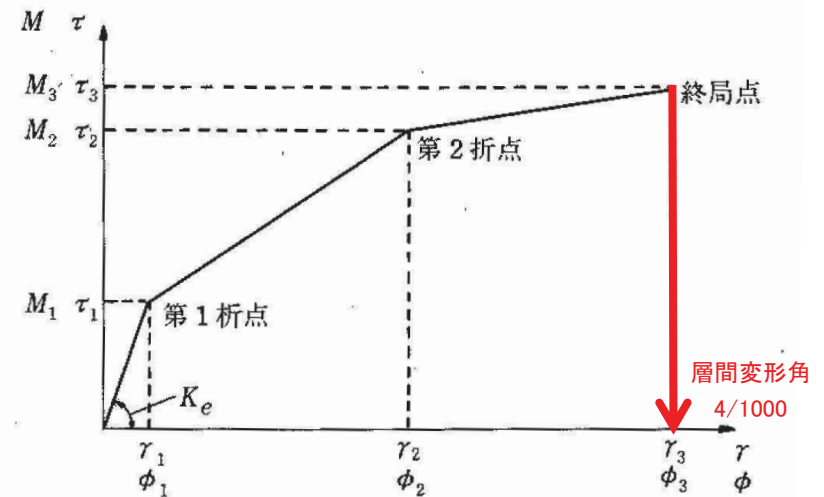


図 トリリニア・スケルトンカーブ(一部加筆)※2

※1:【出典】土木学会マニュアル2005

※2:【出典】JEAG4601-1991.

7. 許容限界に係る課題

(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、屋外重要土木構造物の通水機能、支持機能及び貯水機能の許容限界として既工認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 γ_{ms} で除したもので、 400N/mm^2 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^2 以上のときは 800N/mm^2 以下とする。

α :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。

γ_{bs} :部材係数

γ_{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、 $f_{vcd} > 0.72(\text{N/mm}^2)$ となる場合は $f_{vcd} = 0.72(\text{N/mm}^2)$

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

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

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

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

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

f'_{cd} :コンクリートの圧縮強度の設計用値(N/mm^2)で設計基準強度 f'_{ck} を材料係数 γ_{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

γ_{bc} :部材係数

γ_{mc} :材料係数

せん断耐力評価式(棒部材式)※

7. 許容限界に係る課題

(3) 支持機能に対する許容限界①

- 支持機能は、部材が終局状態に至らない状態を想定している。
- また、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、断面降伏以下の部材状態を想定している。
- 部材状態に応じた許容限界として、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。
- 支持機能が要求される箱型構造物は、海水ポンプ室以外に軽油タンク室及び復水貯蔵タンク基礎があるが、いずれも同様の部材状態を想定し、本許容限界を適用する。
- アンカ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(概ね弾性範囲)は、既工認実績のある許容限界であるが、最新の知見として、女川2号炉への適用性が高いと考えられる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 | 部材が終局状態に至らない。また、アンカ一定着部周辺において鉄筋が降伏しない。 |
| 設定理由 | 機器・配管の支持機能は、部材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。 |

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 μ | <ul style="list-style-type: none"> 本許容値を許容限界とした既工認実績は無い。 本許容値は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。(P74参照) 本許容限界における状態は概ね弾性範囲であり、概ね弾性範囲の状態は浸水防護施設の支持機能に対する許容限界として既工認実績がある。 |
| | 主筋ひずみ | 鉄筋の降伏強度に対応するひずみ, 1725 μ (SD345相当) | |
| せん断 | 層間変形角(面内) | 2/1000 | <ul style="list-style-type: none"> 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、耐震壁の支持機能の許容限界として既工認実績がある。(P71参照) 土木学会マニュアル2005に規定されており、屋外重要土木構造物の支持機能の許容限界として既工認実績がある。(P72参照) |
| | 発生せん断力 | せん断耐力 | |

7. 許容限界に係る課題

(3) 支持機能に対する許容限界②

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。
- 本許容限界における状態は、既工認実績のある概ね弾性範囲と同等の状態である。

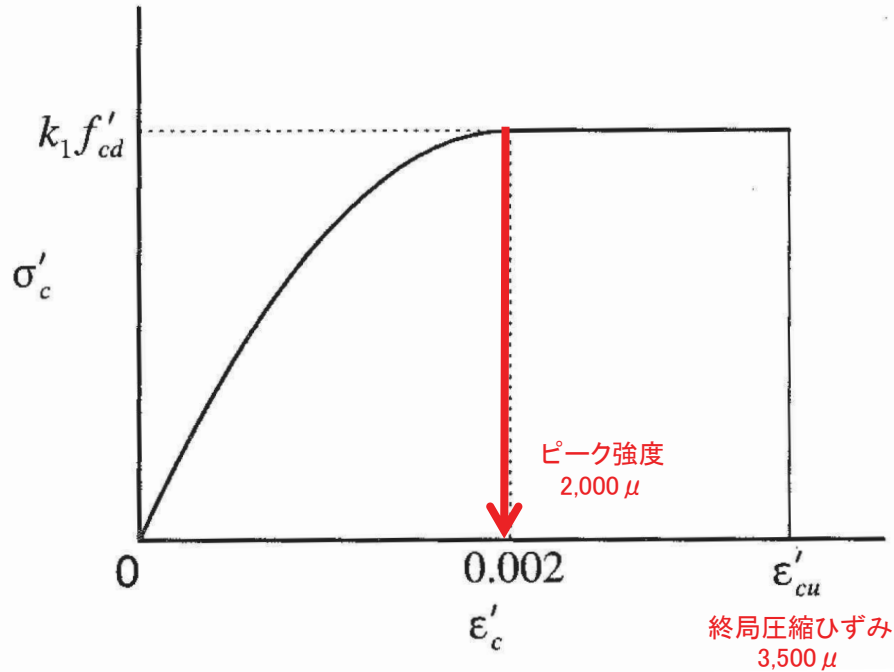


図 コンクリートの応力-ひずみ曲線(一部加筆)※

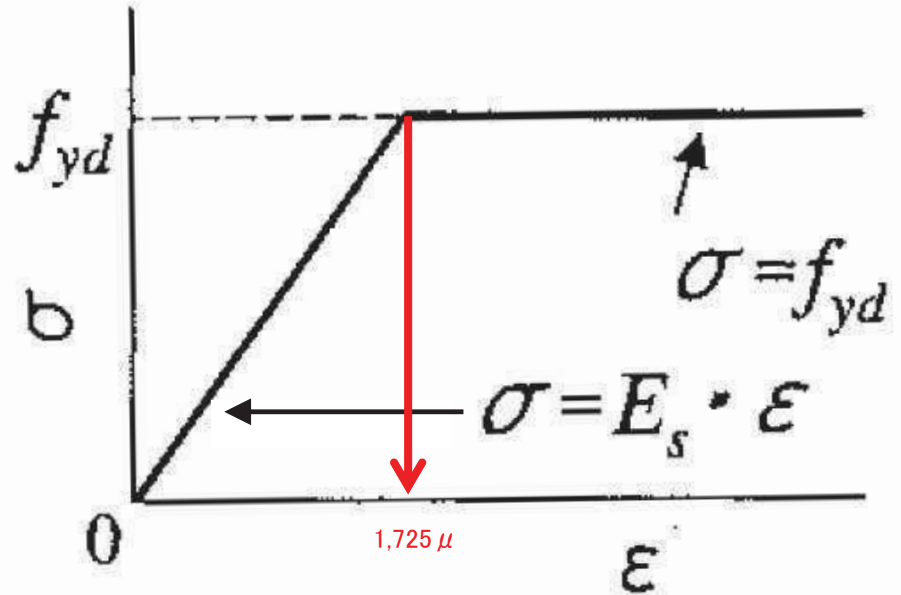


図 鉄筋および構造用鋼材の応力-ひずみ曲線(一部加筆)※

SD345の場合

| |
|-----------------------------|
| $E_s : 200\text{kN/mm}^2$ |
| $f_{yd} : 345\text{N/mm}^2$ |
| $\epsilon_{sy} : 1,725\mu$ |

※:【出典】コンクリート標準示方書2002.

7. 許容限界に係る課題

(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できることが要求機能である。
- 海水ポンプ室の周辺環境を考慮すると、構造物底面はMMRと、側面は透水性の小さい盛土と接しており、部材を貫通するようなひび割れが生じて、ひび割れからの漏れ量は少なく、貯水機能は満足されることを確認している。(P77参照)
- しかし、盛土の止水性に全てを期待し、ひび割れに伴う漏水を許容したうえで貯水機能を適切に評価することは困難であることから、保守的に部材を貫通するようなひび割れが発生しない状態を想定し、許容限界を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。(P76参照)
- 貯水機能が要求される箱型構造物は、海水ポンプ室以外に取水口(貯留堰を含む)があり、取水口についてもP54に示す通り、構造物底面はMMR、側面は透水性の小さい盛土や改良地盤となっており、海水ポンプ室と同じ周辺環境にあるが、同様の部材状態を想定し、本許容限界を適用する。

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 | 構造物の周辺環境を考慮すると、周囲の盛土の透水性は十分に小さく、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が、躯体のみで貯水機能を満足できるよう、漏水が生じるような顕著な(部材を貫通するような)ひび割れが発生しないと考えられる、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。 |

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 μ | <ul style="list-style-type: none"> 本許容値を許容限界とした既工認実績は無い。 本許容値は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。(P74参照) 本許容限界における状態は概ね弾性範囲であり、概ね弾性範囲の状態は止水機能に対する許容限界として既工認実績がある。 |
| | 主筋ひずみ | 鉄筋の降伏強度に対応するひずみ, 1725 μ (SD345相当) | |
| せん断 | 層間変形角(面内) | 第1折点(γ_1)以下 ただし、第1折点(γ_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"> JEAG4601-1991に規定されており、耐震壁のせん断変形に対する水密性評価の許容限界として既工認実績がある。(P78参照) |
| | 発生せん断力 | せん断耐力 | <ul style="list-style-type: none"> 土木学会マニュアル2005に規定されており、屋外重要土木構造物の貯水機能の許容限界として既工認実績がある。(P72参照) |

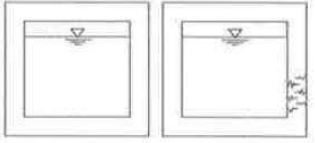
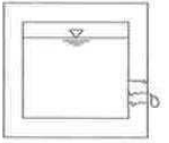
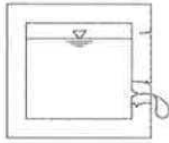
7. 許容限界に係る課題

(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 2000μ ，鉄筋の降伏強度に対応するひずみ 1725μ 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。

表 池状構造物(RC構造物)の耐震性能と照査基準(一部加筆)※

| 耐震性能 | 耐震性能 1 | 耐震性能 2 | 耐震性能 3 |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 限界状態 ^{※1} | 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 |  |  |  |
| | <u>無被害又はひび割れは生じるが漏水は生じない。修復の必要ない。</u> | 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。 | 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。 |
| 照査項目例 ^{※2} | 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 ^{※3} | <u>断面力(曲げ) ≤ 降伏曲げ耐力</u> <u>断面力(せん断) ≤ せん断耐力</u> <u>応力度 ≤ 許容応力度</u> | 断面力(曲げ) ≤ 最大曲げ耐力 断面力(せん断) ≤ せん断耐力 塑性率 ≤ 許容塑性率 | 変位量 ≤ 終局変位量 曲率 ≤ 終局曲率 断面力(せん断) ≤ せん断耐力 |

※:【出典】水道施設耐震工法指針・解説2009

7. 許容限界に係る課題

(4) 貯水機能に対する許容限界③

面外せん断による破壊(周辺環境を考慮した漏水量の確認)

- 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ことを確認している。

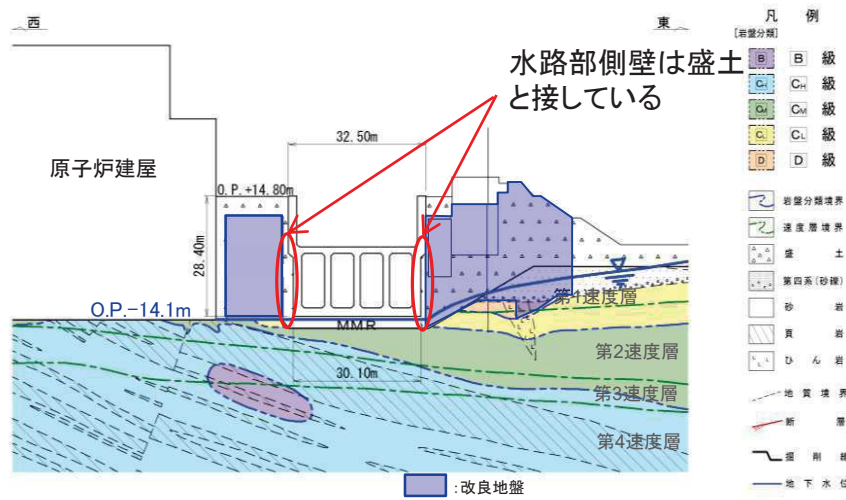
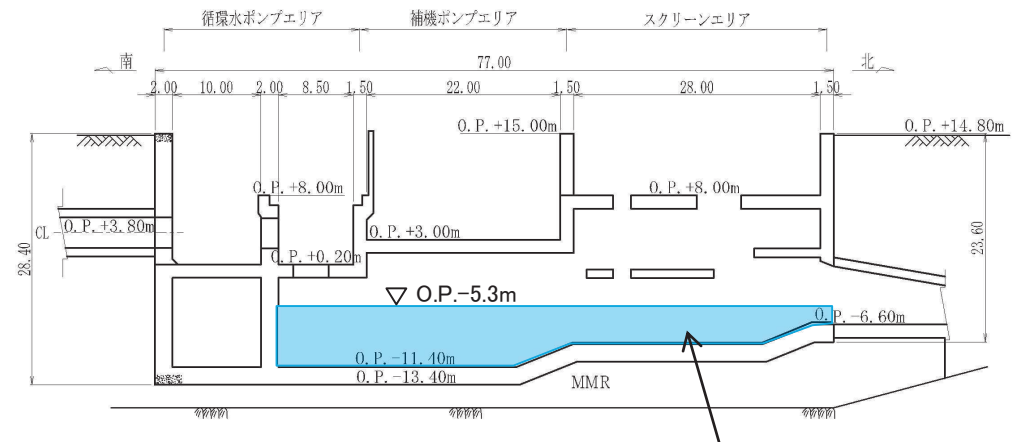


図 補機ポンプエリア断面図



貯留水と接している
側壁の面積: 287.6² (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 × 10 ⁻⁵ m/s |
| 動水勾配 | Δh/L=7.5※ |
| 貯水機能が要求される側壁の面積 | 287.6 ² (片側) |
| 海水ポンプ室貯留量 | 約3,324m ³ |

- 183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。

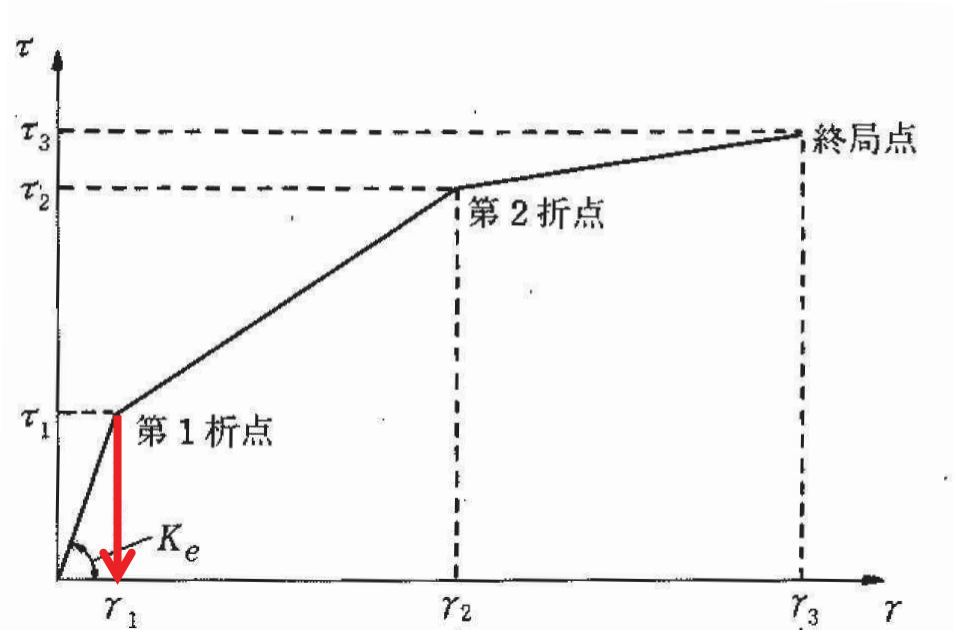
※: hは貯留水位(O.P.-5.3m)とドレーン(O.P.-14.2m)の水頭差
Lはドレーンまでの水平距離(1.2m)

7. 許容限界に係る課題

(4) 貯水機能に対する許容限界④

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(γ_1)以下であることを許容限界と設定している。
- 第1折点(γ_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(γ_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。
- 本許容限界は、耐震壁の水密性に対する許容限界として既工認実績がある。
- 第1折点(γ_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
 σ_v : 縦軸応力度
 G : コンクリートのせん断弾性係数

図 トリリニア・スケルトンカーブ(一部加筆)※

※:【出典】JEAG4601-1991

7. 許容限界に係る課題

(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、漏水が生じるような顕著な(部材を貫通するような)ひび割れが発生しない状態を想定している。
- 部材状態に応じた許容限界として、断面降伏及びせん断耐力とし、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(γ_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(γ_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(γ_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(γ_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。 |

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 μ | <ul style="list-style-type: none"> 本許容値を許容限界とした既工認実績は無い。 本許容値は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。(P74参照) 本許容限界における状態は概ね弾性範囲であり、概ね弾性範囲の状態は止水機能に対する許容限界として既工認実績がある。 |
| | 主筋ひずみ | 鉄筋の降伏強度に対応するひずみ, 1725 μ (SD345相当) | |
| せん断 | 層間変形角(面内) | 第1折点(γ_1)以下 ただし、第1折点(γ_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"> JEAG4601-1991に規定されており、耐震壁のせん断変形に対する水密性評価の許容限界として既工認実績がある。(P78参照) 土木学会マニュアル2005に規定されており、屋外重要土木構造物の貯水機能の許容限界として既工認実績がある。(P72参照) |
| | 発生せん断力 | せん断耐力 | |

目次

1. はじめに
2. 建設工認からの変更点
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
4. 評価方法に係る課題の抽出
5. 地震応答解析に係る課題
6. 構造解析に係る課題
7. 許容限界に係る課題
- 8. 安全係数に係る課題**
 - (1)安全係数の考え方
 - (2)規格・基準類との比較
 - (3)コンクリートの材料係数
 - (4)照査体系と安全係数の関係
9. 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

8. 安全係数に係る課題

(1) 安全係数の考え方①

【課題4】

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？

【検討概要】

安全係数は、プロセス毎に評価方法に適する安全係数を設定している。既工認実績のある土木学会マニュアル2005や、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等を参照して、妥当性を確認する。

(1) 一般的な事項

- 安全係数は、評価に係る要因の不確かさを5つの安全係数(材料係数, 部材係数, 荷重係数, 構造解析係数, 構造物係数)で考慮する。
- 耐震性照査の基本的な考え方を式で表すと以下となる(土木学会マニュアル2005)。

$$\gamma_i \cdot S_d / R_d \leq 1.0$$

ここに、 S_d : 照査用応答値 $S_d = S(\gamma_f, \gamma_m) \cdot \gamma_a$ γ_i : 構造物係数
 R_d : 照査用限界値 $R_d = R(\gamma_m) / \gamma_b$ γ_m : 材料係数
 S : 応答値の特性値 γ_f : 荷重係数
 R : 限界値の特性値 γ_a : 構造解析係数
 γ_b : 部材係数

- コンクリート標準示方書2017では、「非線形有限要素解析を用いた照査では、解析結果の精度に関する安全係数を設定する。(中略) 安全側に考慮された限界値が別途定められている場合には、限界値に対する解析係数を1.0としてよい。」とされている。なお、この考え方はコンクリート標準示方書2002でも同様である。
- 女川2号炉では、応答値に係る不確か性は応答値側で構造解析係数として考慮し、限界値に係る不確か性は限界値側で部材係数として考慮することを基本とする。一方、材料非線形解析により得られたひずみ等に基づいて照査を行う場合には、限界値に係る不確か性は限界値を安全側に設定することで考慮する。
- また、変形指標で表された応答値は、係数1.2で割り増す。これは、主として地盤や地盤と構造物の境界に関する不確か性に配慮するためのものである。

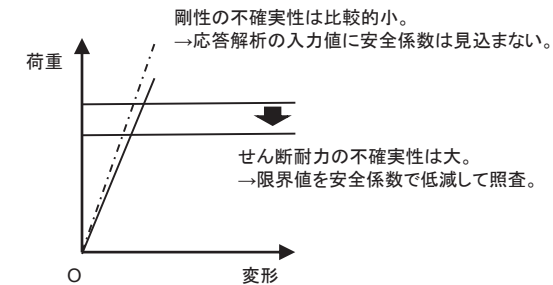
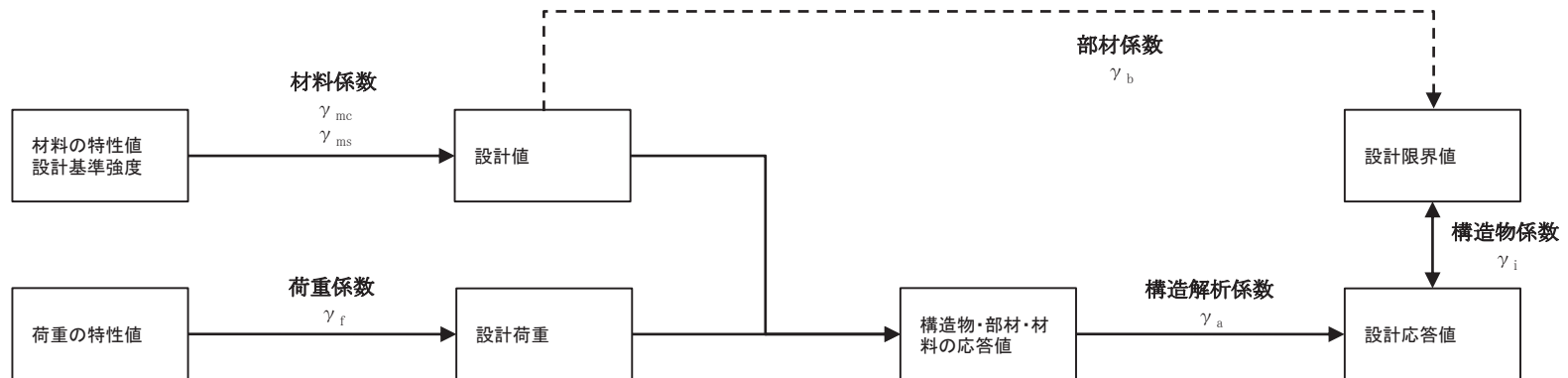


図 せん断照査における材料係数, 部材係数の役割

8. 安全係数に係る課題

(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

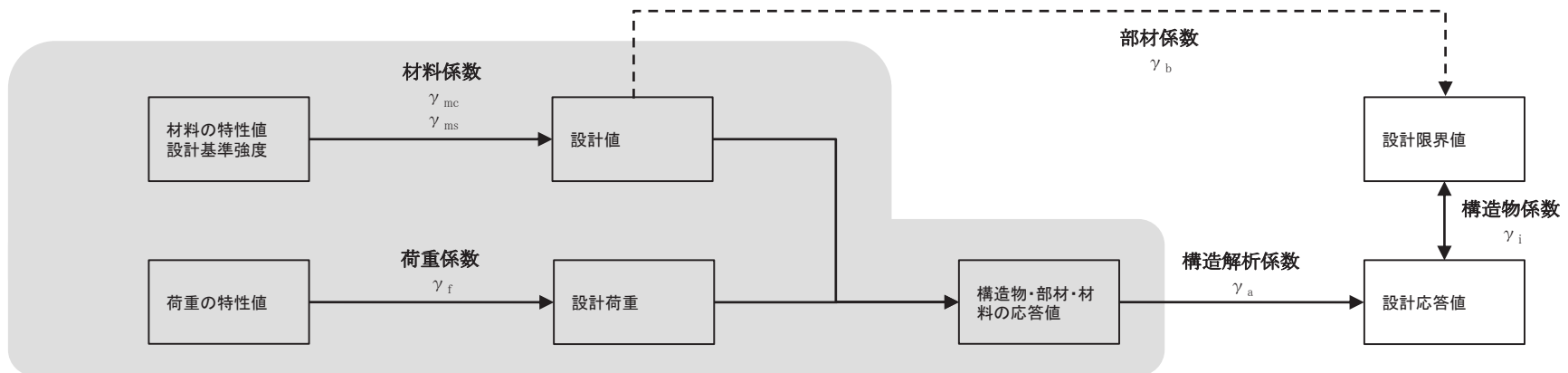
| 安全係数 | 基本的な考え方 |
|--------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 材料係数 | <ul style="list-style-type: none"> 材料特性の望ましくない方向への変動, 供試体と構造物中との差異, 限界状態に及ぼす影響, 経時変化等を考慮して定めるものとする。 |
| 部材係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 構造解析係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 荷重係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 構造物係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |

8. 安全係数に係る課題

(1) 安全係数の考え方③

(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「荷重の特性値」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。
- 物性のばらつきに対しては、対象構造物が地中構造物であり、支配的な地震時荷重が土圧であることから、土圧に影響を及ぼす地盤及び鉄筋コンクリートの物性のばらつきとして、剛性のばらつきを考慮する。
- 三次元構造のねじれの影響については、損傷モードに応じて複数時刻の荷重を抽出することで、影響を考慮する。
- 乾燥収縮による剛性低下については、剛性低下すると土圧が小さくなることから、初期剛性とすることで荷重を保守的に評価している。



■安全係数の考え方

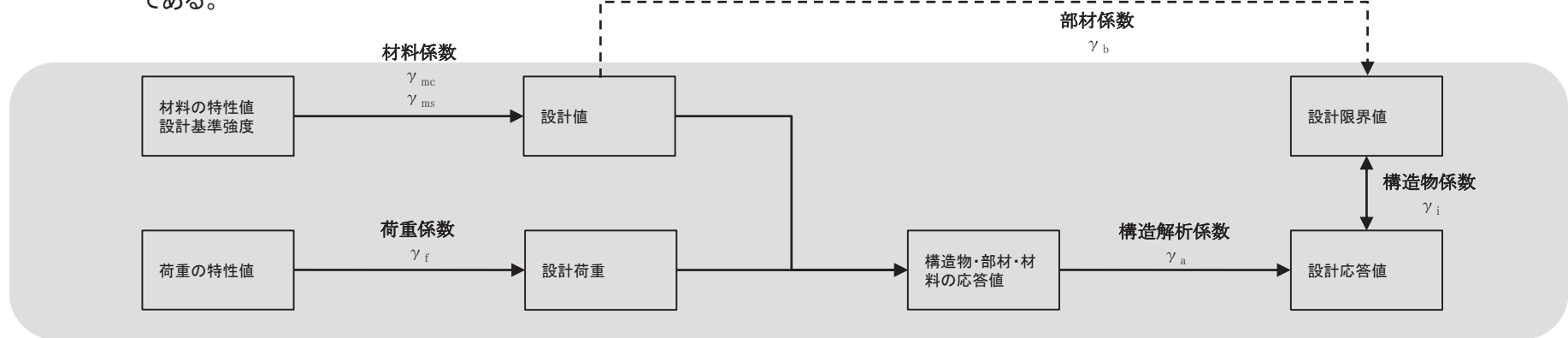
| 安全係数 | 考え方 |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 材料係数 | <ul style="list-style-type: none"> 応答値算定時に適用する材料係数は、コンクリー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。 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。 |
| 部材係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 構造解析係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 荷重係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 構造物係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |

8. 安全係数に係る課題

(1) 安全係数の考え方④

(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 μ , 主筋ひずみ:1725 μ)である。



■安全係数の考え方

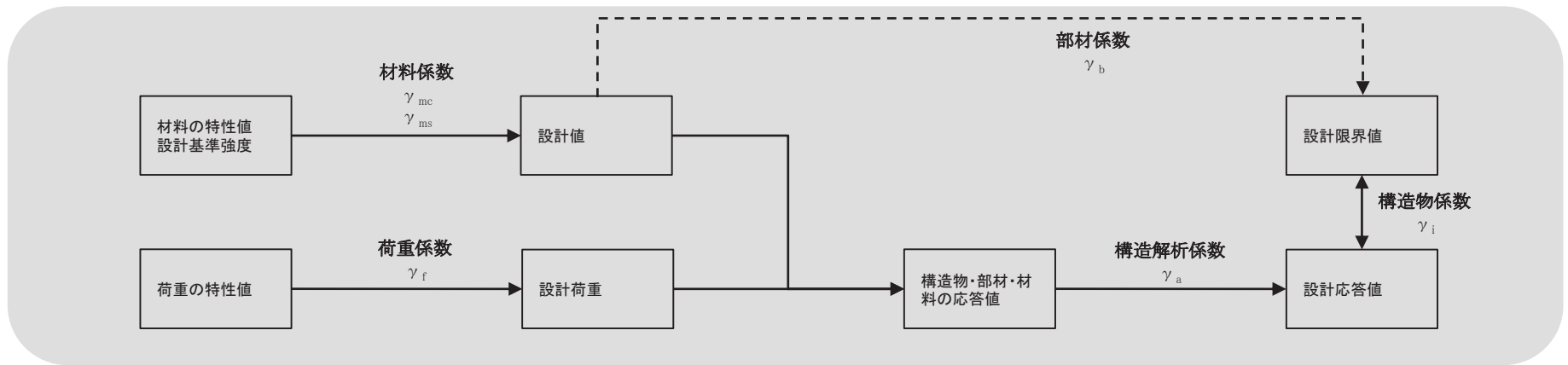
| 安全係数 | 考え方 |
|--------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 材料係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 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、応答値の算定は1.0とする。 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、応答値の算定は1.0とする。 |
| 部材係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 構造解析係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 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。 「6. (1)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。 以上より、構造解析係数は1.2とする。 |
| 荷重係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 構造物係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |

8. 安全係数に係る課題

(1) 安全係数の考え方⑤

(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"> 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。 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。 限界値算定時に適用する材料係数は1.3を標準とするが、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た場合は材料係数を1.0~1.3の間で低減する。詳細についてはP89に示す。 |
| 部材係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 構造解析係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 荷重係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |
| 構造物係数 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |

8. 安全係数に係る課題

(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既工認実績があり、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"> 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(埋設された鉄筋コンクリート構造)を十分に考慮されたものであり、適用性がある。 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。 |
| | 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"> 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。 |
| 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"> 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(埋設された鉄筋コンクリート構造)を十分に考慮されたものであり、適用性がある。 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。 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。 |
| | 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 ² 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"> 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。 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。 |

※:「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。

8. 安全係数に係る課題

(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 | γ_m | 変形評価に用いる材料の設計用値の評価 | 1.0 | 1.3 | 1.3※2 | 1.0 | 1.0 | 文献に基づく標準的な値を設定している。 |
| | | 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 | 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 | γ_b | 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 | 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 | γ_a | 構造解析手法自体の精度や不確実性を考慮 | 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 | γ_f | 設計荷重評価 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 | 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 | γ_i | 構造物の総合的な安全性評価 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 | 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。 |

既工認実績あり

※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。

8. 安全係数に係る課題

(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 | γ_m | <ul style="list-style-type: none"> 断面力評価に用いる材料の設計用値の評価 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 | <ul style="list-style-type: none"> コンクリートの設計圧縮強度を当該値で除する | 1.3※2 | 1.3 | 1.3※2, 3 | 1.0 | 1.0~1.3 | <ul style="list-style-type: none"> 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、P89に示す考え方により1.3から低減する場合がある。 |
| | | | <ul style="list-style-type: none"> 鉄筋の降伏強度を当該値で除する | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | <ul style="list-style-type: none"> 文献に基づく標準的な値を設定している。 |
| 部材係数 | γ_b ※4 | <ul style="list-style-type: none"> 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 | <ul style="list-style-type: none"> コンクリートが分担するせん断耐力を当該値で除する | 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 | <ul style="list-style-type: none"> 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"> せん断補強筋が分担するせん断耐力を当該値で除する | 1.1 | | | | 1.1 | |
| 構造解析係数 | γ_a | <ul style="list-style-type: none"> 断面力の評価 断面力算定時の構造解析の不確実性等を考慮 | <ul style="list-style-type: none"> 発生断面力に当該値を乗じる | 1.05 | 1.0 | 1.05※5 | 1.0 | 1.05 | <ul style="list-style-type: none"> 文献に基づく標準的な値を設定している。 |
| 荷重係数 | γ_f | <ul style="list-style-type: none"> 設計荷重評価 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 | <ul style="list-style-type: none"> 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 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0 | <ul style="list-style-type: none"> 文献に基づく標準的な値を設定している。 |
| 構造物係数 | γ_i | <ul style="list-style-type: none"> 構造物の総合的な安全性評価 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 | <ul style="list-style-type: none"> 発生断面力に当該値を乗じる | 1.0 | 1.0 | 1.0 | 1.0~1.2 | 1.0 | <ul style="list-style-type: none"> 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。 |

既工認実績あり

※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 γ_{b1} の値であり、 γ_{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。

8. 安全係数に係る課題

(3) コンクリートの材料係数

- コンクリートの材料係数は、既工認実績がある1.3を標準とするが、対象構造物は既設であることを鑑みて、コンクリート標準示方書2002等に記載されている安全係数の主旨を確認のうえ、表中に示す事項を全て確認できる場合は、材料強度の特性値を設計基準強度(20.5N/mm²)とし、材料係数を低減する。
- 低減する場合は、一軸圧縮試験結果から算定される5%超過特性値を既工認実績がある材料係数1.3で除した値が、設計基準強度(20.5N/mm²)を低減した材料係数で除した値を上回るように材料係数を1.0～1.3の間で低減する。

| 考慮すべき要因 | | 要因の概要 | 確認事項 |
|---------|-------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 材料強度の特性値からの望ましくない方向への変動 | 材料実験データの不足や偏り、品質管理の程度等の原因により、強度が特性値を下回る可能性 | <ul style="list-style-type: none"> • コンクリート打設時に、社内基準に基づき150m³に1回の頻度で供試体を作成し、28日強度を計測している。 • 一軸圧縮試験により以下のことが確認できれば、材料強度が特性値を下回る可能性は小さいと考えられるため材料係数を低減する。 <ul style="list-style-type: none"> • 建設時の一軸圧縮試験における最低値が、材料強度の特性値である20.5N/mm²を上回る。 • 建設時の一軸圧縮試験結果から算定される試験値の平均値、標準偏差に基づく、5%超過特性値が、材料強度の特性値である20.5N/mm²を上回る。 |
| 2 | 供試体と構造物中との材料特性の差異 | 施工時の品質管理、供試体と構造物の温度や養生状態の差異により、強度が特性値を下回る可能性 | <ul style="list-style-type: none"> • 構造物構築後、社内基準に基づき、定期的にコンクリートの品質確認を実施しており、一軸圧縮試験を実施している。 • 一軸圧縮試験により以下のことが確認できれば、構造物中においても材料特性が異なる可能性は小さいと考えられるため材料係数を低減する。 <ul style="list-style-type: none"> • 構造物構築後の一軸圧縮試験における最低値が、材料強度の特性値である20.5N/mm²を上回る。 |
| 3 | 材料特性が限界状態に及ぼす影響 | 材料強度の変動により、不利な影響を受ける可能性(せん断破壊に対する配慮) | <ul style="list-style-type: none"> • せん断耐力における材料係数γ_cは、高強度コンクリートではコンクリートのせん断耐力寄与分(f'_{vcd})が頭打ちになることに配慮されて設定されているものであり、f'_{vcd}に上限値0.72N/mm²を設けたうえでγ_cを考慮することによりせん断耐力を過大評価しないことにより定められている(コンクリート標準示方書2002)。 • 女川2号炉の屋外重要土木構造物で用いるコンクリートは高強度コンクリートではなく、一軸圧縮試験により以下のことが確認できれば、終局状態に対して危険側の評価とならないため、材料係数を低減する。 <ul style="list-style-type: none"> • 女川2号炉で定める設計基準強度20.5N/mm²に低減したγ_cを考慮したf'_{vcd}が0.72N/mm²を下回る。 |
| 4 | 材料特性の経時変化 | コンクリートが経年変化により、強度が低下する可能性 | <ul style="list-style-type: none"> • 構造物構築後、社内基準に基づき、定期的にコンクリートの品質管理を実施しており、一軸圧縮試験を実施している。 • 一軸圧縮試験により以下のことが確認できれば、経年劣化により強度が低下する可能性は小さいと考えられるため材料係数を低減する。 <ul style="list-style-type: none"> • 構造物構築後の直近の一軸圧縮試験において、試験値の最低値が材料の特性値である20.5 N/mm²を上回る。 |

8. 安全係数に係る課題 (参考) 海水ポンプ室におけるコンクリートの材料係数

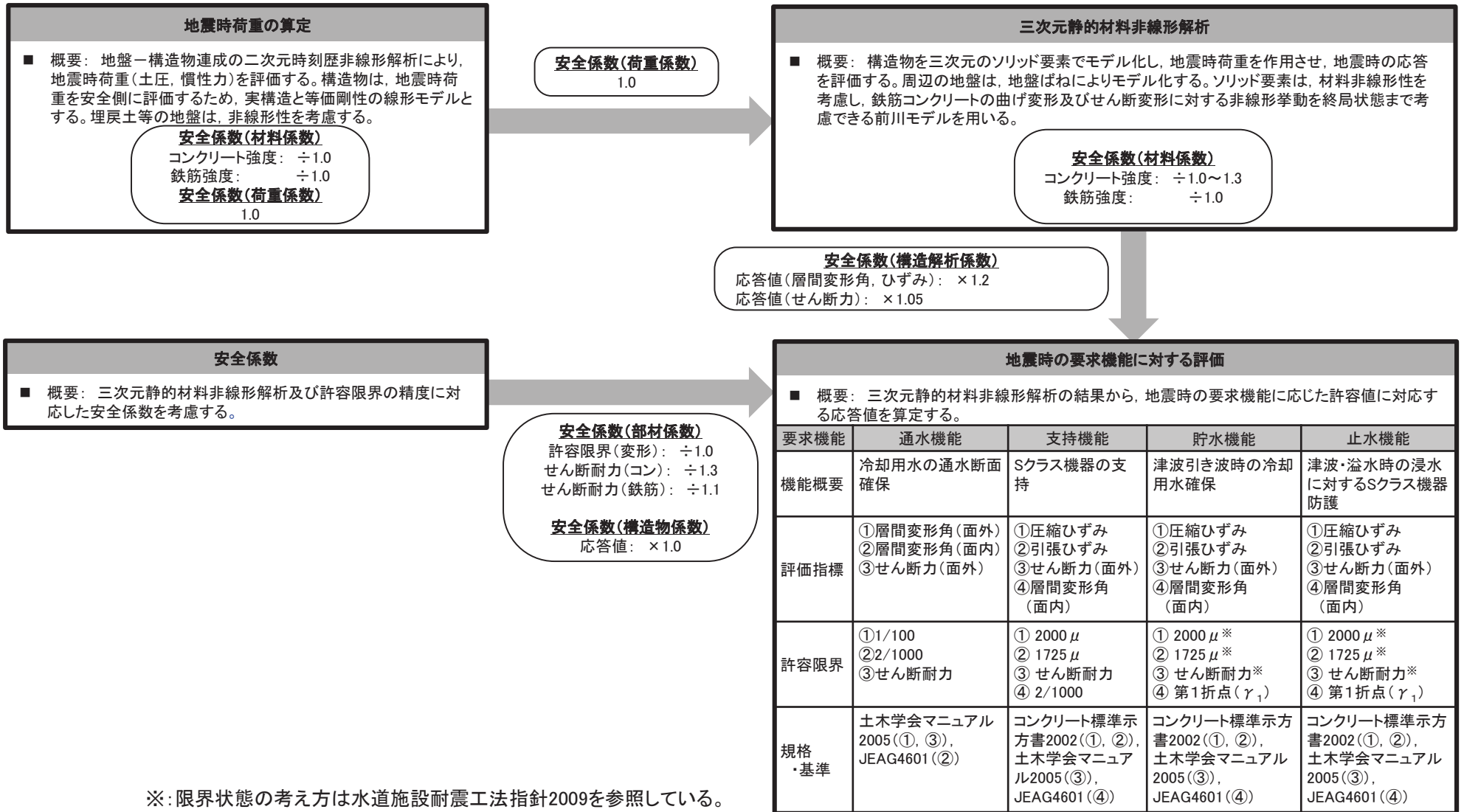
- 例として、海水ポンプ室におけるコンクリートの材料係数の考え方を示す。
- 表中に示す確認事項を全て満足することから、材料係数 γ_c を低減する。
- 海水ポンプ室の場合、一軸圧縮試験結果から算定される5%超過特性値が23.4N/mm²であり、材料係数 γ_c が1.2であれば、5%超過特性値を既工認実績がある材料係数1.3で除した値が、設計基準強度(20.5N/mm²)を材料係数(1.2)で除した値を上回ることから、 $\gamma_c=1.2$ とする。

| 考慮すべき要因 | | 確認事項 | 確認事項 |
|---------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | 材料強度の特性値からの望ましくない方向への変動 | <ul style="list-style-type: none"> • 建設時の一軸圧縮試験における最低値が、材料強度の特性値である20.5N/mm²を上回る。 • 建設時の一軸圧縮試験試験結果から算定される試験値の平均値、標準偏差に基づく、5%超過特性値が、材料強度の特性値である20.5N/mm²を上回る。 | 建設時の一軸圧縮試験結果(28日強度) <ul style="list-style-type: none"> • 試験数:558本 • 平均値:29.0N/mm² • 最低値:21.4N/mm² > 20.5N/mm² • 5%超過特性値:23.4N/mm² > 20.5N/mm² |
| 2 | 供試体と構造物中との材料特性の差異 | <ul style="list-style-type: none"> • 構造物構築後の一軸圧縮試験における最低値が、材料強度の特性値である20.5N/mm²を上回る。 | 構造物構築後に構造物より採取したコアによる一軸圧縮試験結果 <ul style="list-style-type: none"> • 試験数:9本 • 平均値:39.1N/mm² • 最低値:27.4N/mm² > 20.5N/mm² |
| 3 | 材料特性が限界状態に及ぼす影響 | <ul style="list-style-type: none"> • 女川2号炉で定める設計基準強度20.5N/mm²に低減した γ_c を考慮した f'_{vcd} が0.72N/mm²を下回る。 | $\gamma_c=1.0$ と仮定した場合の f'_{vcd} <ul style="list-style-type: none"> • f'_{vcd}:0.55N/mm² < 0.72N/mm² |
| 4 | 材料特性の経時変化 | <ul style="list-style-type: none"> • 構造物構築後の直近の一軸圧縮試験において、試験値の最低値が材料の特性値である20.5 N/mm²を上回る。 | 構造物構築後の直近の一軸圧縮試験結果(平成29年度) <ul style="list-style-type: none"> • 試験数:3本 • 平均値:31.7N/mm² • 最低値:27.4N/mm² > 20.5N/mm² |

8. 安全係数に係る課題

(4) 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. 建設工認からの変更点
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
4. 評価方法に係る課題の抽出
5. 地震応答解析に係る課題
6. 構造解析に係る課題
7. 許容限界に係る課題
8. 安全係数に係る課題
- 9. 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

9. 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る海水ポンプ室を代表として, 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算定した地震時荷重を, 三次元モデルへ載荷して耐震安全性評価を行っていること, 二次元地震応答解析により算定した床応答を用いて機器・配管類の耐震設計を行っていることから, 地震応答解析に係る課題として, 以下の3項目について検討し, 適切に評価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。
 - 水平方向の剛性を等価とした等価剛性モデルが鉛直方向の床応答に及ぼす影響はない。
- 既工認実績のない三次元静的材料非線形解析により構造解析を行っていることから, 構造解析に係る課題として以下の5項目について検討し, 適切に応答を評価できることを確認した。
 - 三次元静的材料非線形解析に用いる解析コードCOM3は, 三次元構造物の終局状態まで評価可能であり, 海水ポンプ室と同様のモデル化方法や解析条件で精度よく再現解析が可能である。
 - 三次元静的材料非線形解析を適用する構造物の非線形レベルは, 概ね弾性範囲に収まる状態で適用する。
 - 三次元モデルは要素分割を適切にモデル化し, 応答を評価できる。
 - 機器・配管及び竜巻防護ネットの影響を適切に評価できている。
 - 荷重の載荷方法は, 奥行き一様に載荷させており, 保守的な載荷方法である。
- 材料非線形解析を用いた限界状態設計法で照査を行うことから, 許容限界及び安全係数について検討し, 許容限界及び安全係数を適切に設定できていることを確認した。
 - 既工認実績のある許容限界を採用することを基本としており, 一部概ね弾性範囲に対する許容限界は既工認実績が無いひずみを採用しているが, 既工認実績のある限界状態と同様の許容限界である。
 - 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。
- 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. 建設工認からの変更点
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
4. 評価方法に係る課題の抽出
5. 地震応答解析に係る課題
6. 構造解析に係る課題
7. 許容限界に係る課題
8. 安全係数に係る課題
9. 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

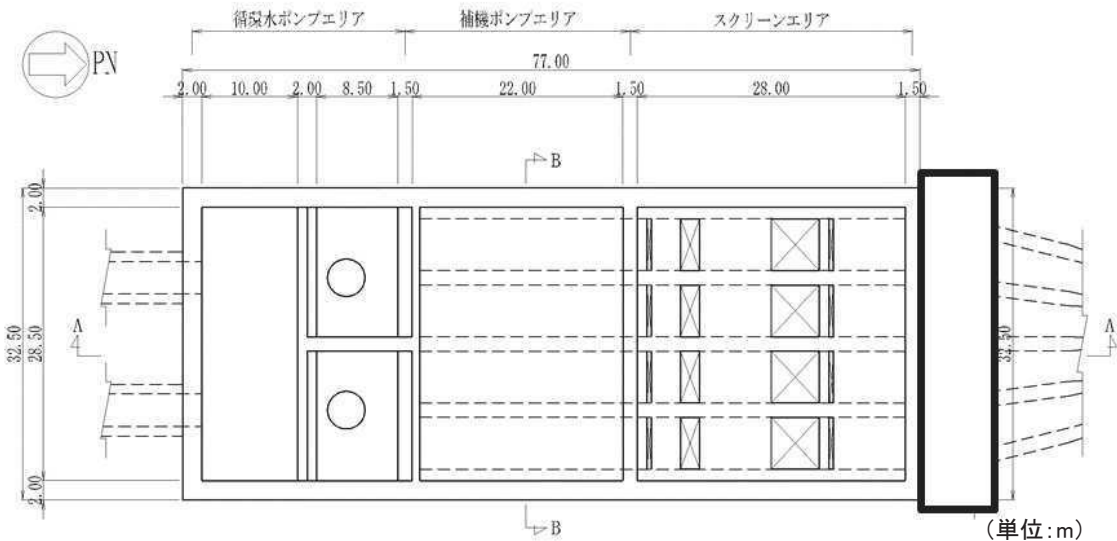


図 海水ポンプ室平面図

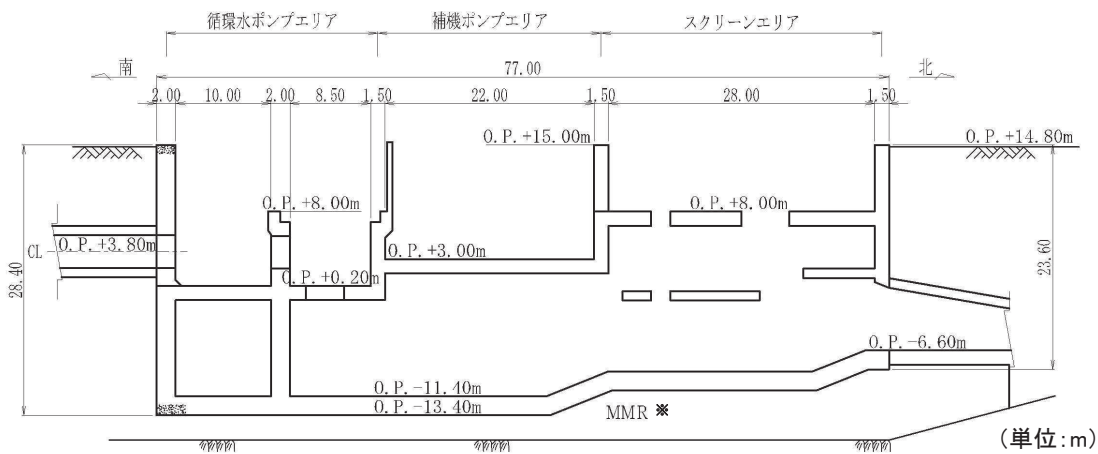


図 海水ポンプ室断面図(A-A断面)

※MMR:置換コンクリート

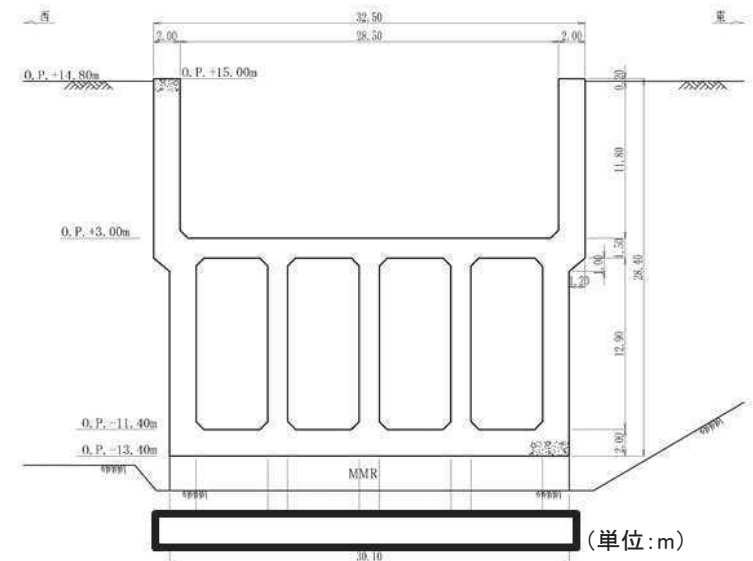
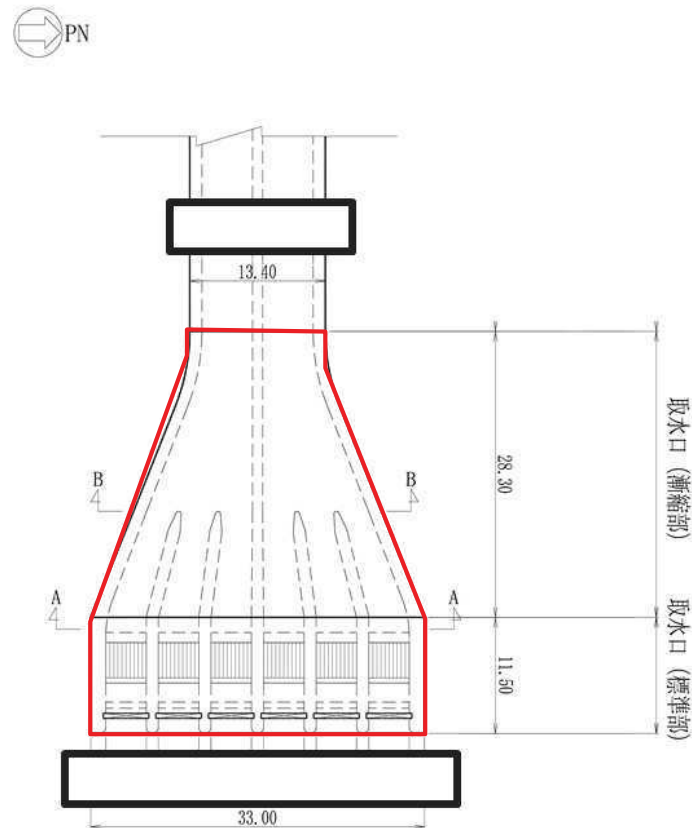


図 海水ポンプ室断面図(B-B断面)

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。

図 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

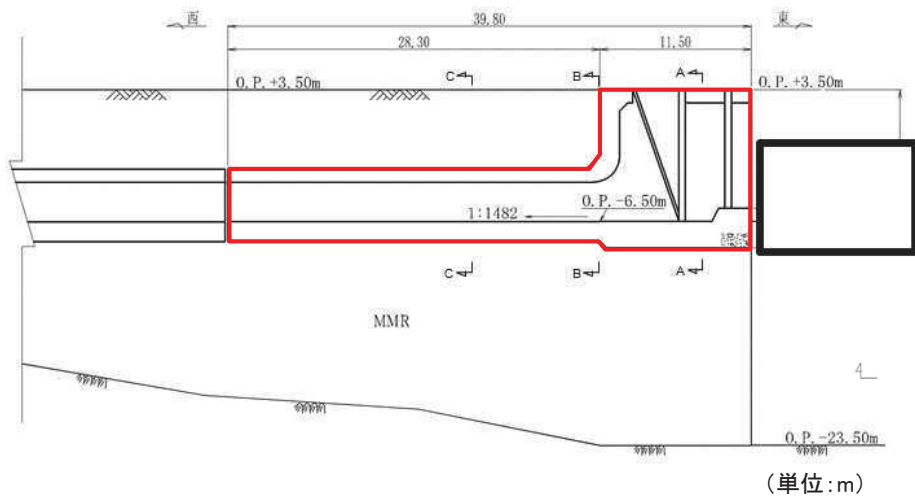


図 取水口縦断面図

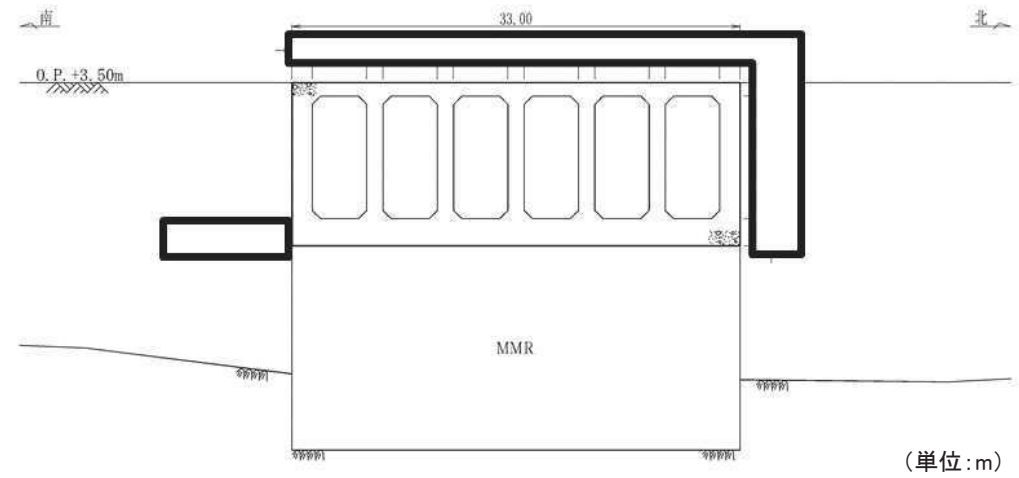


図 取水口(標準部)断面図(A-A断面)

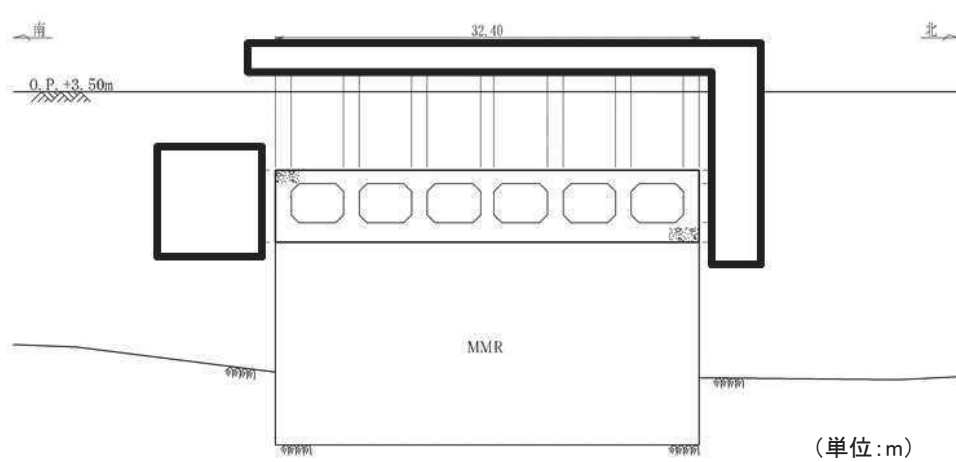


図 取水口(漸縮部)断面図(B-B断面)

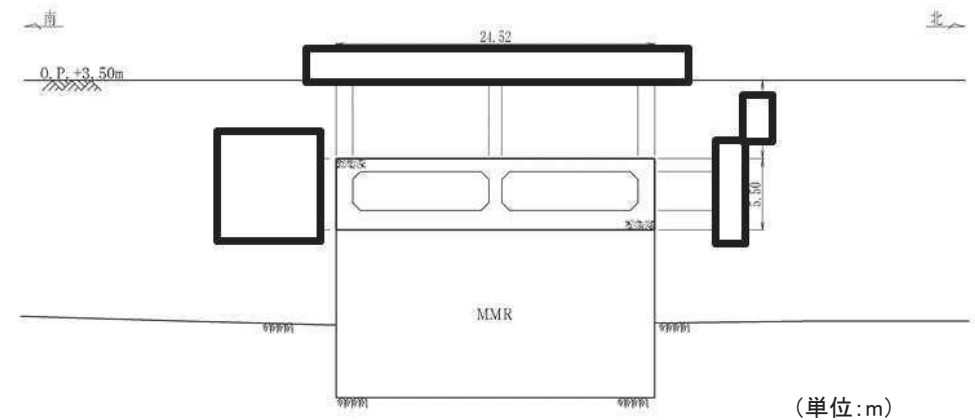


図 取水口(漸縮部)断面図(C-C断面)

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

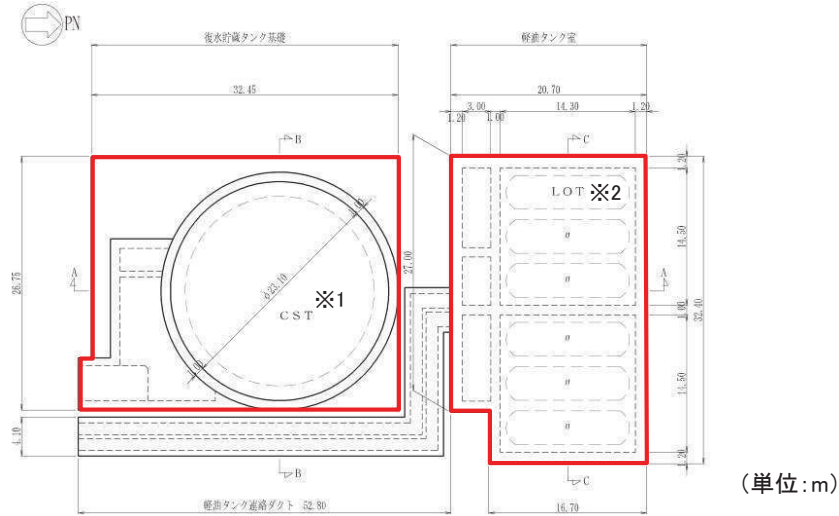


図 軽油タンク室・復水貯蔵タンク基礎
平面図

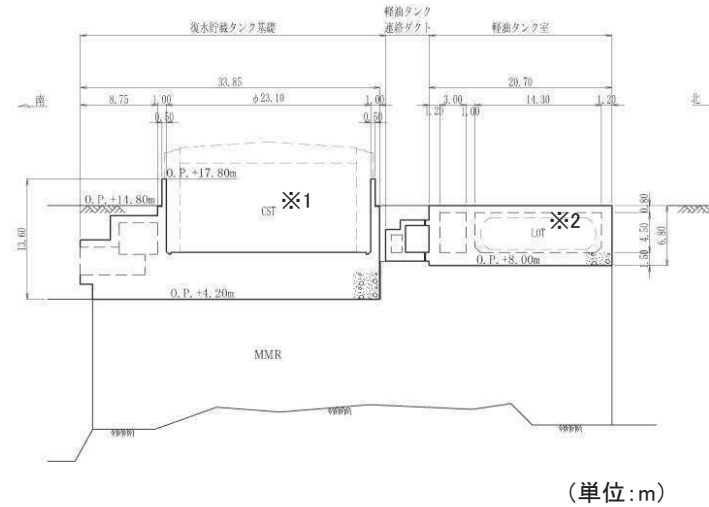


図 軽油タンク室・復水貯蔵タンク基礎
断面図(A-A断面)

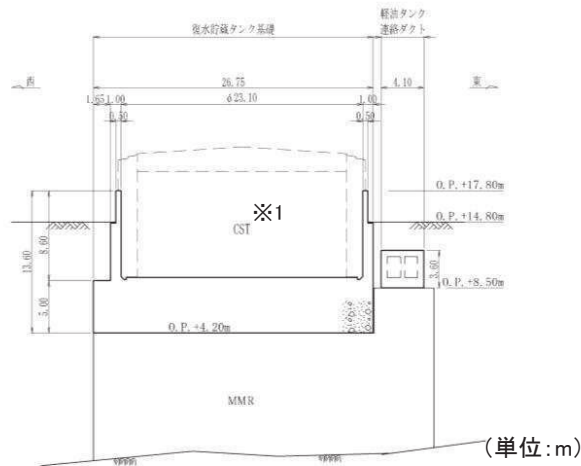


図 復水貯蔵タンク基礎断面図(B-B断面)

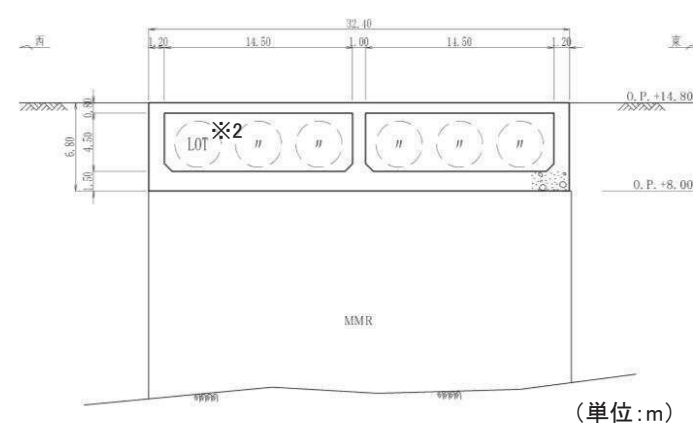


図 軽油タンク室断面図(C-C断面)

※1 CST:復水貯蔵タンク
※2 LOT:軽油タンク

目次

1. はじめに
2. 建設工認からの変更点
3. 三次元静的材料非線形解析の評価手順
4. 評価方法に係る課題の抽出
5. 地震応答解析に係る課題
6. 構造解析に係る課題
7. 許容限界に係る課題
8. 安全係数に係る課題
9. 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 μ)としており、本許容限界は既工認実績のある許容限界であるが、最新の知見として、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。
- 本実験は、新たな知見取得のために、土木構造物の面外曲げひび割れがアンカー耐力に及ぼす影響を確認する目的で行われた実験であり、JEAG4601に記載されている面内せん断に対する引張荷重载荷による既往の実験とは異なるものである。
- 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。
- 実験の概要及び結果は次頁以降に詳述するが、以下に記載のとおり女川2号炉への適用性が高いと考えられる。

女川2号炉への適用性

- 実験に用いる試験体は、アンカーを定着させた鉄筋コンクリート部材であり、アンカーは主筋よりも深い位置で定着しており、女川2号炉のアンカーと主筋の位置関係と同様である。
- 実験の条件として、鉄筋コンクリート部材が曲げ降伏に達するまで曲げひび割れを与えているのに対し、女川2号炉では鉄筋が降伏しないことを許容限界としており、実験よりも部材が健全な状態を想定している。
- 実験の結果、アンカー降伏が先行する破壊モードであるのに対し、女川2号炉におけるアンカー設計は、基本的にアンカー降伏が先行するように設計されていることから、破壊モードが整合している。

表 既往検討におけるアンカーの耐力評価のための代表的な実験方法と主な特徴※

| 実験方法 | (a) 引張荷重载荷による方法 | (b) 水平荷重载荷による方法 |
|--------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 実験イメージ | | |
| 主な特徴 | <ul style="list-style-type: none"> • 単純化した荷重作用下での耐力評価が可能であり、基礎データの取得に適している。 • 荷重条件としては厳しく、評価結果が保守的な傾向となる。 | <ul style="list-style-type: none"> • 引張とせん断が作用することで、より実態に近い荷重条件下での耐力評価が可能である。 • 同様な形式で振動台実験などを行うことで動的応答と併せて評価できる。 |

※:【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

実験概要

- Sクラスの機器・配管は、基本的に構造物隅角部を避けて設置され、アンカーの長さはコンクリートのかぶりよりも十分深く設定されている。
- 本実験では、上記の条件を満たす海水管を想定し、アンカー定着部周辺で発生し得る構造物の地震時損傷として、構造物の部材降伏程度のひび割れを想定している。
- 主な流れとして、アンカーの定着部付近に2点支持2点载荷の曲げ実験（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、静的な繰返し载荷実験（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う。

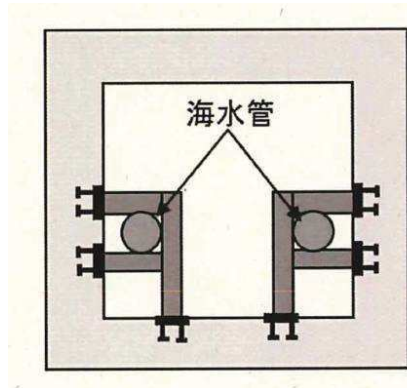


図 機器・配管設置イメージ※

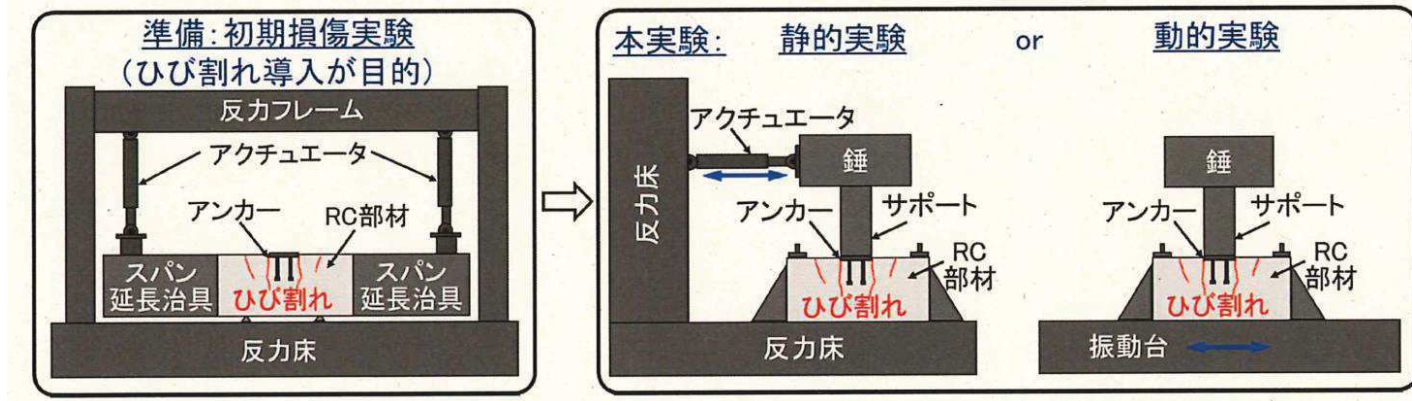


図 構造物の損傷を考慮したアンカーの定着性能評価のための実験概要※

※:【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③

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。女川2号炉においては、厚さ12~36mmのアンカープレートを使用しているが、本実験においては、実験時にプレートに塑性変形が生じてアンカーや周辺コンクリートに荷重が伝達できず、評価できなくなることを避けるために厚さ60mmと実機より厚いアンカープレートを使用している。
- アンカー長は一般的な配管等のアンカー長を想定して250mmとなっている。女川2号炉においては、アンカー長が130~300mmのアンカーを使用しており、250mmは平均的な長さとなっている。また、試験体と女川2号炉のアンカーはいずれも主筋位置より十分深い位置で定着しており、類似している。
- 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。

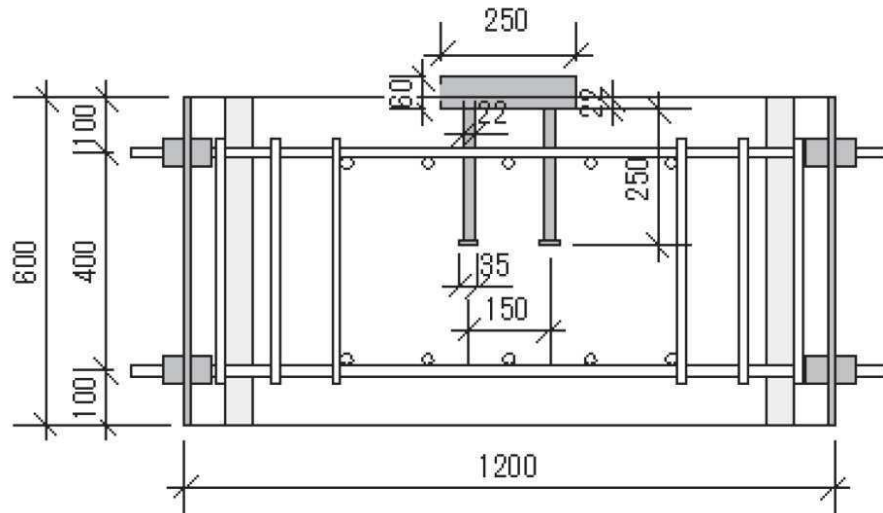


図 試験体の形状と寸法※

表 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 | |

※:【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④

アンカーの許容耐力

- アンカー系の設計指針※1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の許容引張力及び許容せん断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に基づき算定する許容耐力が安全側(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。

表 材料試験の結果※2

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 |

表 許容耐力算定結果※2

| 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 |

※1: 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

※2: 【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⑤

実験の条件

(1) 初期損傷の導入

- 鉄筋コンクリート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载荷によって、試験体中央のアンカー定着部付近に鉄筋コンクリート部材が**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%の加振を再度行う。

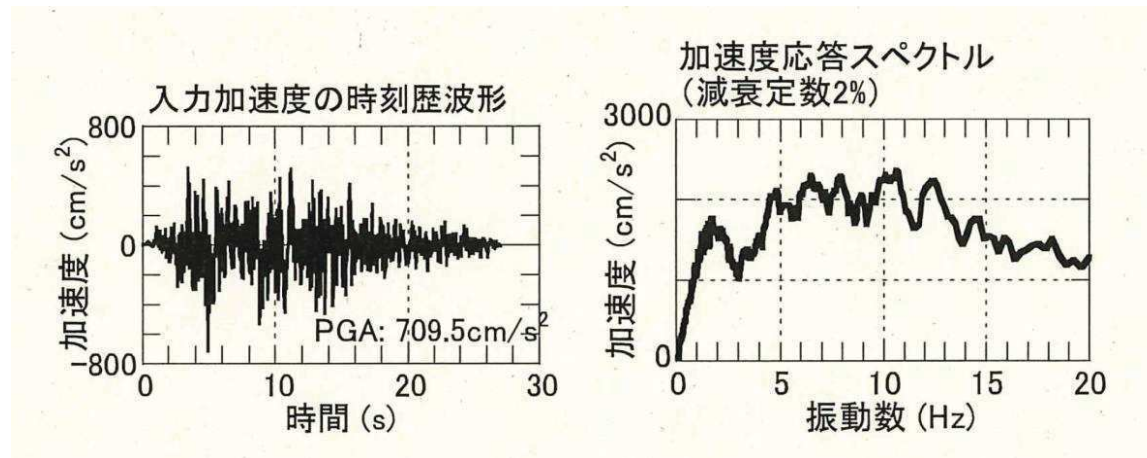


図 動的実験における入力地震動※

※:【出典】土木学会マニュアル2018(技術資料)

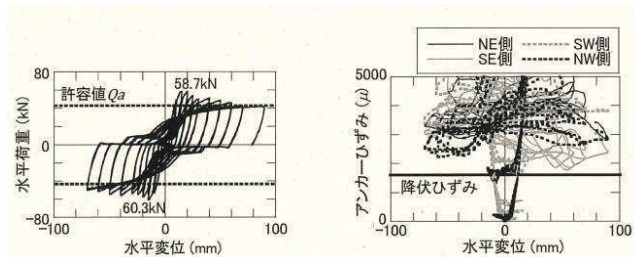
補足説明2. 支持機能に関する実験結果

(2) 実験結果①

静的実験の結果

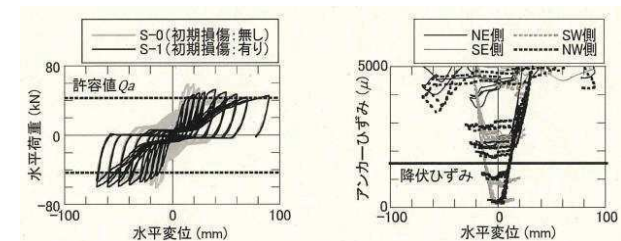
- ・ 静的実験の結果を以下に示す。
- ・ 初期損傷の有無による結果の違いは見られず、いずれもアンカーの定着性能は保持されていると言える。

| 実験ケース | 実験結果 |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 初期損傷無し(S-0) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 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。 ・ 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。 ・ 鉄筋コンクリート部材の損傷は、アンカープレート周辺のみに残っており、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。 |
| 初期損傷有り(S-1) | <ul style="list-style-type: none"> ・ 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、初期損傷が無い場合と遜色ない耐力やねばり強さを発揮している。 ・ 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。 ・ 鉄筋コンクリート部材の損傷は、初期損傷実験によるひび割れの進展は認められず、新たな損傷はアンカープレートの周辺のコンクリート表面の剥離のみに留まっている。 |



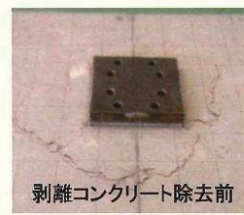
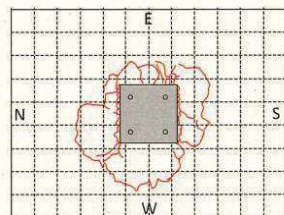
実験S-0の荷重-変位関係

実験S-0のアンカーひずみ

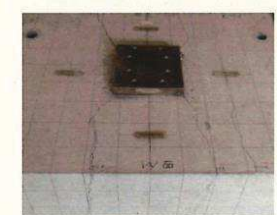
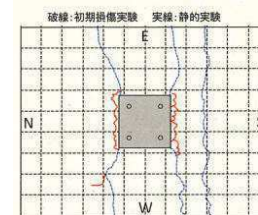


実験S-1の荷重-変位関係

実験S-1のアンカーひずみ



実験S-0の損傷状況



実験S-1の損傷状況

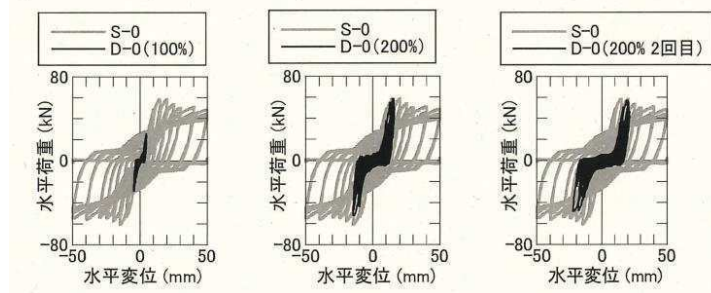
図 静的実験の主な結果※

補足説明2. 支持機能に関する実験結果 (2) 実験結果②

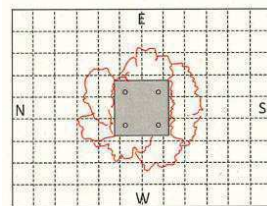
動的实验の結果

- 動的实验の結果を以下に示す。
- 静的实验と同様に、初期損傷の有無による結果の違いは見られず、いずれもアンカーの定着性能は保持されていると言える。
- 静的实验及び動的实验の結果から、アンカーが主筋位置より深い位置で定着しており、かつ、アンカー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、初期損傷の有無はアンカーの定着性能に影響を及ぼさないと考えられる。

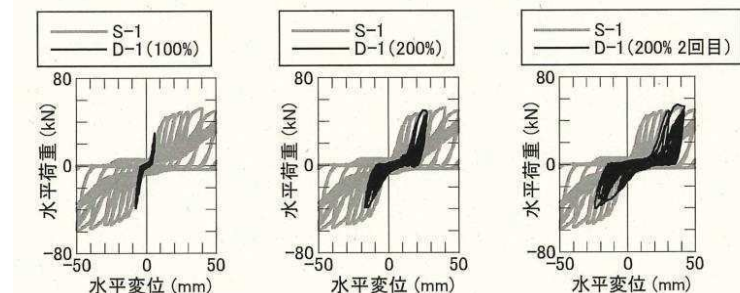
| 実験ケース | 実験結果 |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 初期損傷無し(D-0) | <ul style="list-style-type: none"> • 耐力や履歴特性は、静的实验(S-0)の結果と全体的によく対応している。 • 損傷入力地震動の増大と加振の繰返しによって応答変位が増大しても粘り強さを発揮している。 • 鉄筋コンクリート部材の損傷は、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のみに留まっている。 |
| 初期損傷有り(D-1) | <ul style="list-style-type: none"> • 耐力や履歴特性は、静的实验(S-1)の結果と全体的によく対応している。 • 損傷入力地震動の増大と加振の繰返しによって応答変位が増大しても粘り強さを発揮している。 • 鉄筋コンクリート部材の損傷は、初期損傷实验によるひび割れの進展は認められず、新たな損傷はアンカープレートの周辺のコンクリート表面の剥離のみに留まっている。 |



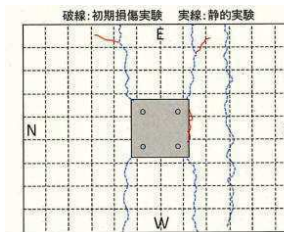
実験D-0の荷重-変位関係



実験D-0の損傷状況



実験D-1の荷重-変位関係



実験D-1の損傷状況

※:【出典】土木学会マニュアル2018(技術資料)

図 動的实验の主な結果※

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。

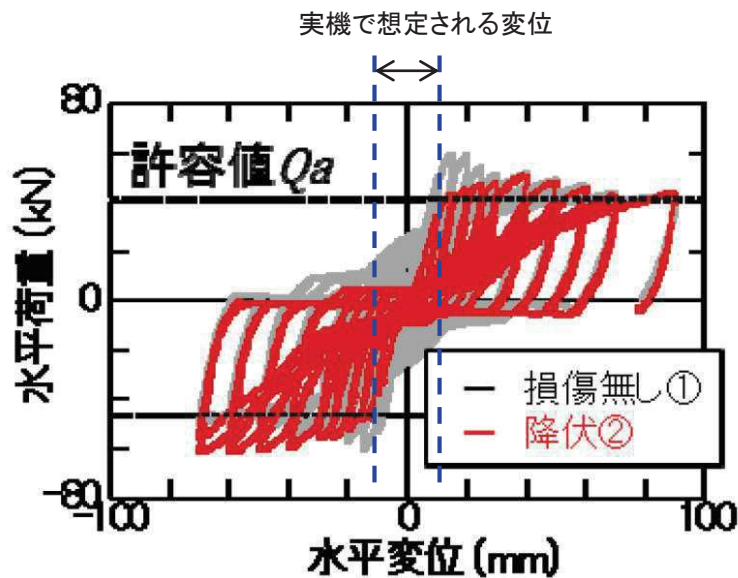


図 静的実験の主な結果(初期損傷有り)※

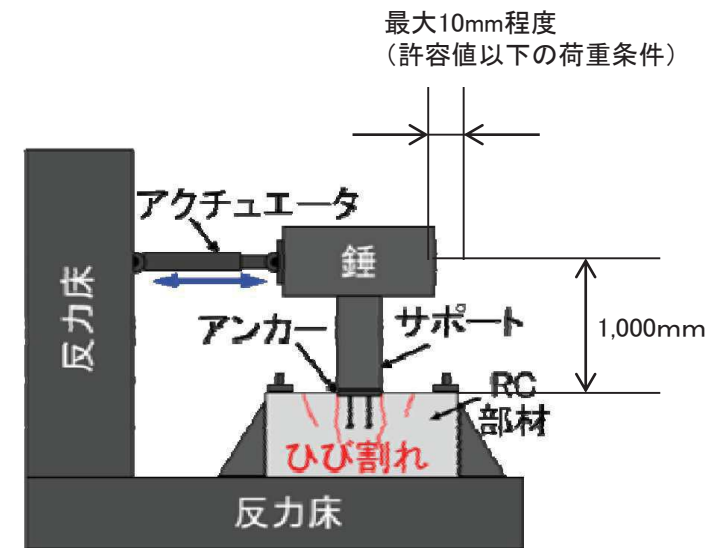


図 試験装置の概略図※