

柏崎刈羽原子力発電所第7号機 工事計画審査資料	
資料番号	KK7 補足-027-5 改11
提出年月日	2020年8月5日

資料5 スクリーン室，取水路，補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価

2020年8月

東京電力ホールディングス株式会社

目 次

: 今回説明範囲

1. スクリーン室の耐震評価	1-1
2. スクリーン室(6号機設備)の耐震評価	2-1
3. 取水路の耐震評価	3-1
4. 取水路(6号機設備)の耐震評価	4-1
5. 補機冷却用海水取水路の耐震評価	5-1

参考資料

(参考資料1) 浮上り評価について	参考 1-1
(参考資料2) 耐震ジョイントの健全性評価について	参考 2-1
(参考資料3) 軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響について	参考 3-1
(参考資料4) 材料非線形解析の部材係数について	参考 4-1
(参考資料5) 液状化検討対象層を踏まえた支持性能評価について	参考 5-1
(参考資料6) 静的地震力に対する耐震評価	参考 6-1
(参考資料7) 3次元構造解析における照査時刻の選定について	参考 7-1
(参考資料8) タービン建屋接合部の健全性について	参考 8-1
(参考資料9) 3次元構造解析におけるモデル化の妥当性について	参考 9-1
(参考資料10) 取水路立坑の健全性評価について	参考 10-1

3. 取水路の耐震評価

3.5.2 評価対象部材

部材非線形解析のせん断力に対する評価結果を図 3-91 に示す。

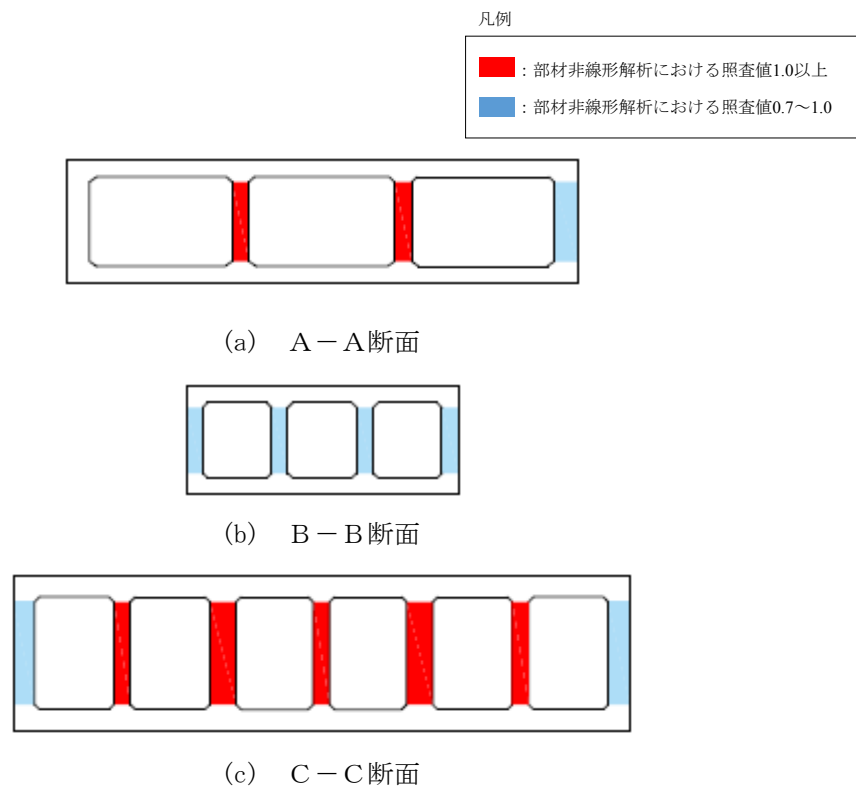
材料非線形解析は、図中の部材非線形解析において照査値 1.0 以上の結果が得られた隔壁を対象として実施する。

A-A断面及びB-B断面については、複数有る隔壁の形状及び配筋条件が同一であること、及び作用する断面力もほぼ同様であることから、材料非線形解析における評価対象部材は、部材非線形解析において最も照査値が厳しい部材とする。

C-C断面については、幅 1.0m と幅 1.6m の部材幅が異なる隔壁が存在する。隔壁は、せん断スパン比(a/d)が大きく、破壊モードは棒部材式で想定されるせん断引張破壊となることから、材料非線形解析においては、幅 1.6m の隔壁についても幅 1.0m の隔壁として解析モデルを作成し保守的な評価を行う。このため、材料非線形解析における評価対象部材は、全ての隔壁を幅 1.0m としてモデル化した部材非線形解析において、最も照査値が厳しい部材とする。

材料非線形解析における評価対象部材を図 3-92 に示す。

また、部材非線形解析では、照査値 1.0 以下であるものの、耐震評価の裕度が小さい部材も存在する。そのため、本評価では耐震評価の裕度が小さい部材（ここでは、照査値 0.7 より大きく 1.0 未満の部材を選定の目安とする）についても、材料非線形解析を実施する。



注： 図中の色区分は、せん断力に対する評価における全解析ケースの最大照査値を示している。

図 3-91 部材非線形解析のせん断力に対する評価結果

4. 取水路（6号機設備）の耐震評価

4.5.2 評価対象部材

部材非線形解析のせん断力に対する評価結果を図 4-89 に示す。

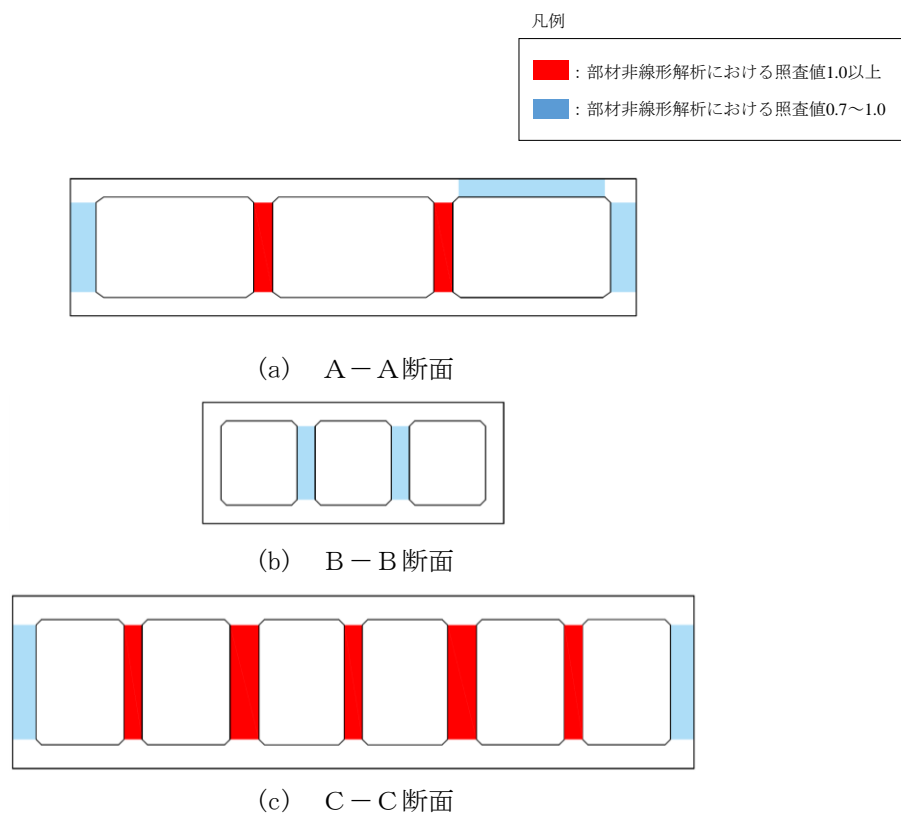
材料非線形解析は、図中の部材非線形解析において照査値 1.0 以上の結果が得られた隔壁を対象として実施する。

A-A断面及びB-B断面については、複数有る隔壁の形状及び配筋条件が同一であること、及び作用する断面力もほぼ同様であることから、材料非線形解析における評価対象部材は、部材非線形解析において最も照査値が厳しい部材とする。

C-C断面については、幅 1.0m と幅 1.6m の部材幅が異なる隔壁が存在する。隔壁は、せん断スパン比(a/d)が大きく、破壊モードは棒部材式で想定されるせん断引張破壊となることから、材料非線形解析においては、幅 1.6m の隔壁についても幅 1.0m の隔壁として解析モデルを作成し保守的な評価を行う。このため、材料非線形解析における評価対象部材は、全ての隔壁を幅 1.0m としてモデル化した部材非線形解析において、最も照査値が厳しい部材とする。

材料非線形解析における評価対象部材を図 4-90 に示す。

また、部材非線形解析では、照査値 1.0 以下であるものの、耐震評価の裕度が小さい部材も存在する。そのため、本評価では耐震評価の裕度が小さい部材（ここでは、照査値 0.7 より大きく 1.0 未満の部材を選定の目安とする)についても、材料非線形解析を実施する。



注： 図中の色区分は、せん断力に対する評価における全解析ケースの最大照査値を示している。

図 4-89 部材非線形解析のせん断力に対する評価結果

5. 補機冷却用海水取水路の耐震評価

(3) 構造物のモデル化

a. 横断方向 (NS 断面)

補機冷却用海水取水路の横断方向のA-A断面では、構造部材として考慮する側壁、隔壁、底版、頂版、柱を非線形はり要素でモデル化する。補機冷却用海水取水路の妻壁部については、線形平面ひずみ要素でモデル化する。なお、妻壁部を線形としてモデル化することは、地震時に躯体に作用する土圧を、非線形性を考慮した場合と比較して大きく評価することになるため、耐震評価の観点から保守的な設定となる。

構造部材 (側壁、隔壁、底版、頂版、柱) は、断面諸元 (鉄筋量・配筋) 及び部材奥行幅が解析奥行幅に占める割合に応じた非線形性を設定する。このうち、柱は、構造物の全奥行幅に対する部材の奥行幅が相対的に小さいことから、部材の奥行幅に応じた等価剛性を設定する。線形平面ひずみ要素でモデル化する妻壁部は、断面諸元 (鉄筋量・配筋) 及び部材奥行幅が解析奥行幅に占める割合に応じた等価剛性を設定する。等価剛性の算定の概念図を図 5-25 に、補機冷却用海水取水路の柱及び妻壁部の奥行幅を示した拡大図を、図 5-28~図 5-29 に示す。

それぞれの非線形はり要素の交点には、コンクリート標準示方書に基づき剛域を設ける。また、妻壁部は頂版、側壁及び底版の接続面と節点を共有する。柱部は、頂版及び底版との交点のみ節点を共有する。補機冷却用海水取水路の解析モデルの詳細を、図 5-28~図 5-29 に示す。

なお、図 5-30 に示す補機冷却用海水取水路の東側及び西側の底版の勾配部は、補機冷却用海水取水槽への接続を円滑にするために設けられた非構造部材であることから、非線形はり要素としてモデル化する底版は、勾配部の配筋・剛性を考慮せず、部材厚 1.0m としてモデル化する。また、地中埋設構造物である補機冷却用海水取水路では、作用力として土圧による影響が支配的であることを踏まえ、勾配部に作用する慣性力については考慮しない。

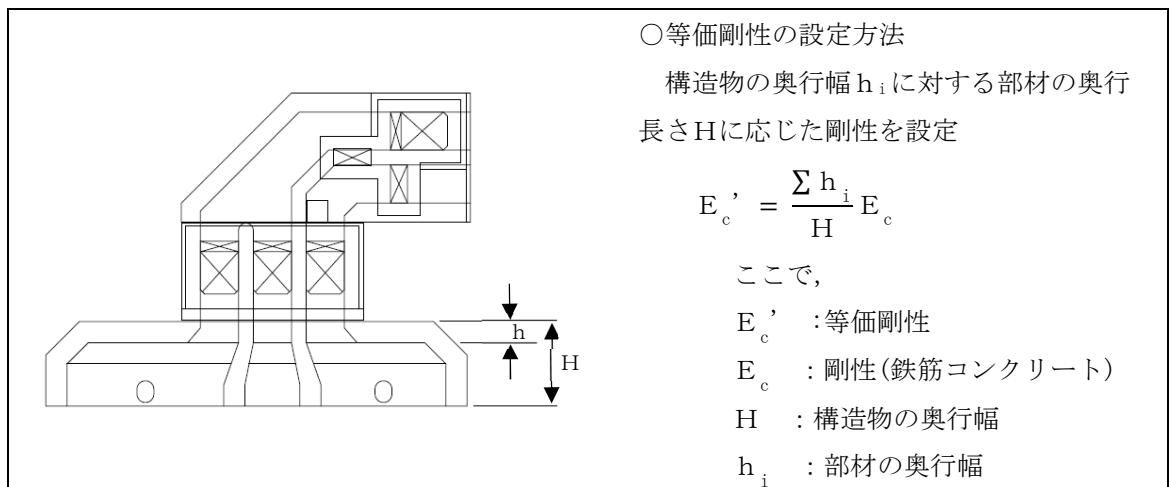


図 5-25 等価剛性の算定の概念図 (妻壁の例)

スクリーン室，取水路，補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価
に関する参考資料

目 次

: 今回説明範囲

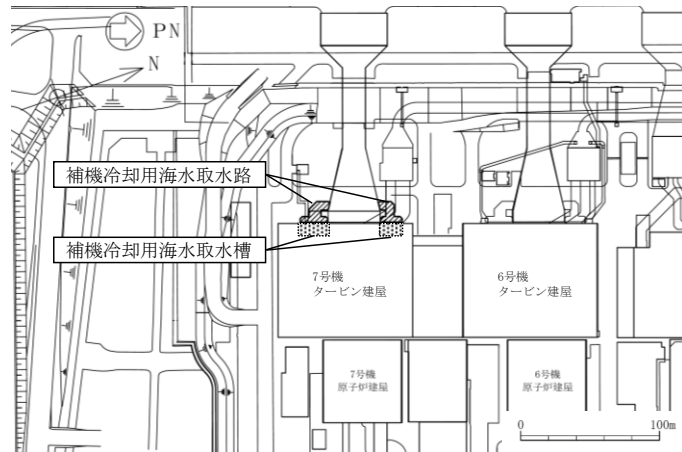
(参考資料 1) 浮上り評価について	参考 1-1
(参考資料 2) 耐震ジョイントの健全性評価について	参考 2-1
(参考資料 3) 軸力の変動が部材の非線形特性に与える影響について	参考 3-1
(参考資料 4) 材料非線形解析の部材係数について	参考 4-1
(参考資料 5) 液状化検討対象層を踏まえた支持性能評価について	参考 5-1
(参考資料 6) 静的地震力に対する耐震評価	参考 6-1
(参考資料 7) 3次元構造解析における照査時刻の選定について	参考 7-1
(参考資料 8) タービン建屋接合部の健全性について	参考 8-1
(参考資料 9) 3次元構造解析におけるモデル化の妥当性について	参考 9-1
(参考資料 10) 取水路立坑の健全性評価について	参考 10-1

(参考資料 8) タービン建屋接合部の健全性について

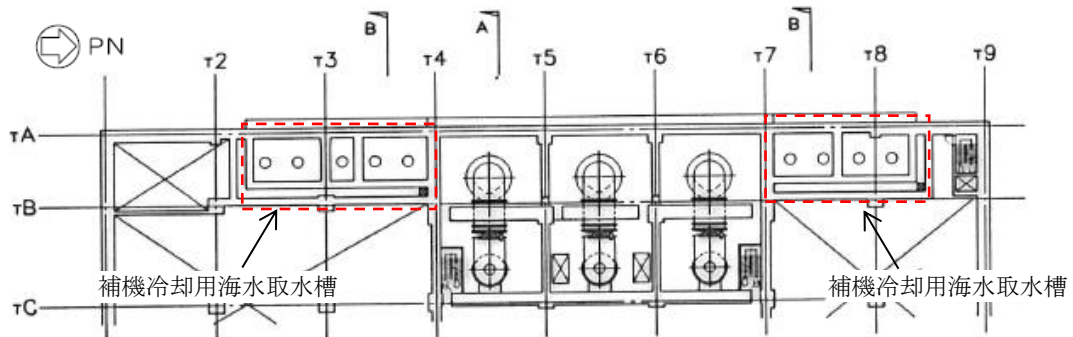
1. はじめに

図 1-1 に示すとおり，補機冷却用海水取水路は，タービン建屋内の補機冷却用海水取水槽と耐震ジョイントを介して接続している。

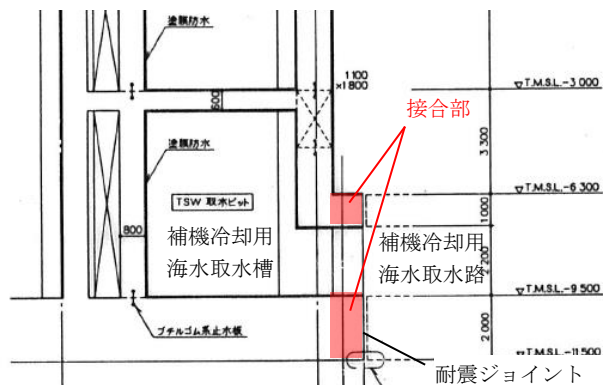
本検討では，地震時における補機冷却用海水取水路と補機冷却用海水取水槽との接合部の健全性について検討する。



(a) 平面配置図



(b) 補機冷却用海水取水槽の平面図



(c) 補機冷却用海水取水槽の断面図 (B断面)

図 1-1 補機冷却用海水取水路と補機冷却用海水取水槽との接合部 概要図

2. 検討内容

2.1 検討方針

地震時においては、補機冷却用海水取水路の妻壁に作用する土水圧により、耐震ジョイントを介して、補機冷却用海水取水路と補機冷却用海水取水槽との接合部において、支圧破壊が発生することが想定される。

本検討では、3次元構造解析モデルを用いて、地震時における補機冷却用海水取水路と補機冷却用海水取水槽の接合部における境界反力を抽出し、補機冷却用海水取水路と補機冷却用海水取水槽の接合部における発生応力とコンクリートの許容支圧応力を比較し、補機冷却用海水取水路と補機冷却用海水取水槽の接合部の健全性を確認する。

2.2 評価方法

3次元構造解析における補機冷却用海水取水路の解析モデルを、図 2-1 に示す。本モデルでは、補機冷却用海水取水路と補機冷却用海水取水槽との接合部はローラー境界としており、NS方向及び鉛直方向は可動とし、EW方向には固定としている。

補機冷却用海水取水路と補機冷却用海水取水槽の接合部に作用する応力は、本モデルの接合部における境界反力を抽出し、接合部の面積で除すことにより算定する。

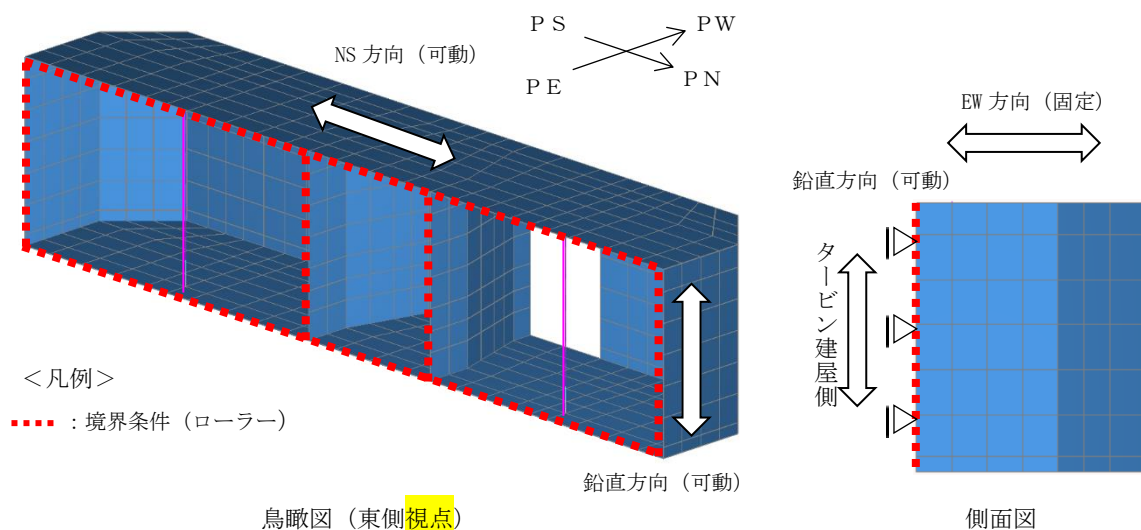


図 2-1 補機冷却用海水取水路 (南側) の 3次元構造解析モデル

2.3 許容限界

支圧破壊の照査は、コンクリート標準示方書の鉄筋コンクリートの許容応力度に基づき、評価を実施する。コンクリートの設計基準強度は、補機冷却用海水取水路は 23.5 (N/mm²)、補機冷却用海水取水槽は 29.4 (N/mm²) であることから、小さい方の 23.5 (N/mm²) を接合部の設計基準強度とする。

コンクリートの許容支圧応力度は、以下に示す式(1)に基づき、7.0 (N/mm²) とする。なお、許容支圧応力度の算定式は、図 1-1 に示したとおり、補機冷却用海水取水路と補機冷却用海水取水槽の接合部が全面突合せで接合されていることから、全面載荷条件とする。

$$\sigma'_{ca} \leq 0.3f'_{ck} \quad \text{式(1)}$$

ここで、

σ'_{ca} : 許容支圧応力度

f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (=23.5 (N/mm²))

3. 評価結果

検討ケースは、補機冷却用海水取水路の 3次元構造解析の地震動及び解析ケースのうち、EW 方向の土圧が最も大きい S s-1-+, 解析ケース①とする。

支圧破壊の評価結果を、表 3-1 に示す。

表 3-1 支圧破壊の評価結果

	接合部位	最大発生応力* σ (N/mm ²)	許容支圧応力度 σ_{ca} (N/mm ²)	照査値 σ / σ_{ca}
補機冷却用海水取水路 (南側)	頂版	1.00	7.0	0.15
	隔壁	0.22	7.0	0.05
	側壁	1.13	7.0	0.20
	底版	0.48	7.0	0.17
補機冷却用海水取水路 (北側)	頂版	0.93	7.0	0.19
	隔壁	0.33	7.0	0.05
	側壁	0.99	7.0	0.21
	底版	0.47	7.0	0.17

注記* : 最大発生応力 σ は、接合部の各部位のうち、境界反力が最大となる要素における境界反力 P_{max} 及び同要素の載荷面積 A により算定。($\sigma = P_{max}/A$)

4. まとめ

本検討では、地震における補機冷却用海水取水路と補機冷却用海水取水槽との接合部の健全性について検討するため、補機冷却用海水取水路の 3次元構造解析モデルの境界反力に基づき、接合部の支圧破壊に対する評価を実施した。

検討の結果、地震時に接合部に発生する支圧応力は、許容支圧応力度を下回ることから、地震時における補機冷却用海水取水路の接合部の健全性を確認した。

(参考資料 9) 3次元構造解析におけるモデル化の妥当性について

1. はじめに

補機冷却用海水取水路については、構造物の3次元的な形状の影響を考慮するため、地震応答解析(2次元動的有限要素法解析)による応答値を用いて、3次元構造解析(3次元静的有限要素法解析)により構造部材の耐震評価を実施している。

本検討では、補機冷却用海水取水路の地震応答解析と3次元構造解析の断面力及び変形を比較し、3次元構造解析モデルの妥当性について確認する。

2. 検討内容

2.1 解析モデルの概要

地震応答解析では、側壁、隔壁、底版、頂版及び柱を非線形はり要素で、妻壁部については線形平面ひずみ要素でモデル化している。3次元構造解析では、補機冷却用海水取水路の側壁、隔壁、底版、頂版及び妻壁を非線形積層シェル要素で、柱を非線形はり要素でモデル化している。

補機冷却用海水取水路の地震応答解析の解析モデルの概要を図 2-1 に、3次元構造解析の解析モデルの概要を図 2-2 に示す。

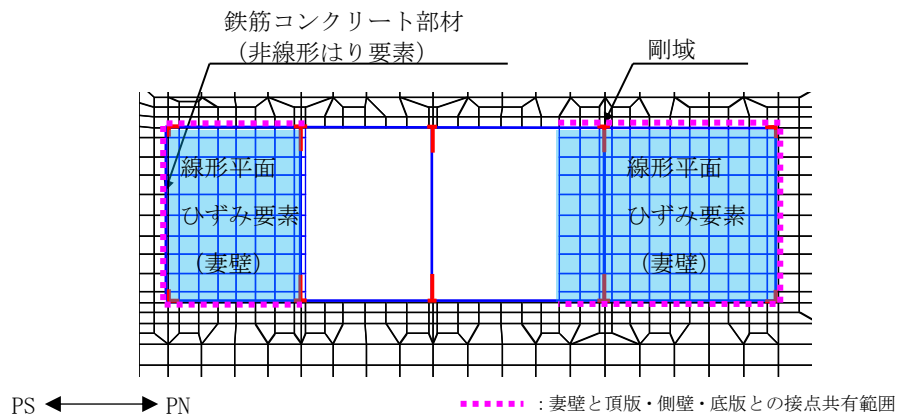


図 2-1 地震応答解析の解析モデルの概要 (補機冷却用海水取水路 (北側))

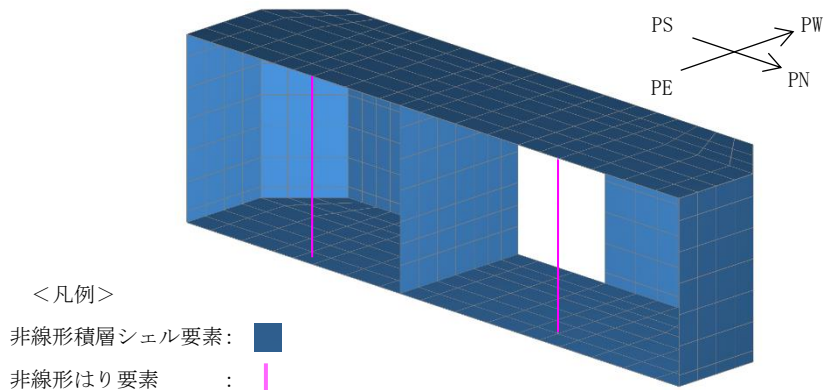


図 2-2 3次元構造解析の解析モデルの概要 (補機冷却用海水取水路 (北側))

2.2 比較条件

2.2.1 検討ケース

検討ケースは、補機冷却用海水取水路における3次元構造解析の照査値が最大となる解析ケース及び地震動とする。対象は、補機冷却用海水取水路（南側）よりも照査値が大きい補機冷却用海水取水路（北側）とする。

本検討は、3次元構造解析におけるモデル化の妥当性を確認する観点から、一方向加振による外力に対して検討を行うものとする。具体的には、A-A断面における地震応答解析の応答とNS方向及び鉛直方向の外力に対する3次元構造解析の応答を比較する。

表 2-1 検討ケース

対象	解析ケース	地震動	照査時刻(s)
補機冷却用海水取水路（北側）	解析ケース④	Ss-1+-	4.76

2.2.2 比較項目

地震応答解析と3次元構造解析との比較項目を表 2-2 に示す。各項目の比較結果から、補機冷却用海水取水路の3次元構造解析におけるモデル化の妥当性を確認する。補機冷却用海水取水路（北側）の部材構成を図 2-3 に示す。

表 2-2 比較項目

比較項目		着目箇所
変形	変形図	構造物全体
	層間変位	側壁，隔壁
発生断面力	曲げモーメント	地震応答解析における各部材の最大曲げモーメント発生位置
	せん断力	地震応答解析における各部材の最大せん断力発生位置

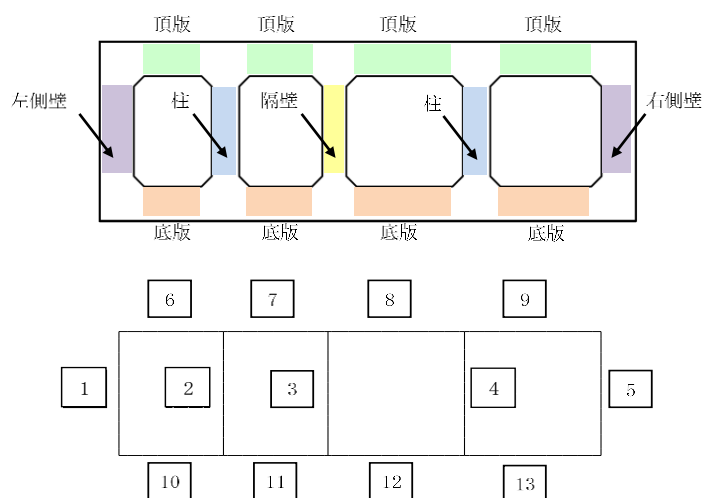


図 2-3 補機冷却用海水取水路（北側）の部材構成

2.3 比較結果

2.3.1 構造部材の変形

地震応答解析の変形図を図 2-4、3次元構造解析の変形図を図 2-5、側壁及び隔壁の層間変位の算定結果を表 2-3 に示す。

地震応答解析と3次元構造解析を比較すると、地震応答解析では開口部における変形が大きくなる傾向にあり、3次元構造解析では側壁（南側）や頂版などにおいて局部的なたわみが生じる傾向にある。また、表 2-3 に示す層間変位に着目すると、側壁では地震応答解析と3次元構造解析は同程度であるが、隔壁では地震応答解析の方が層間変位が大きくなっている。

これは、前述 2.1 に示した解析モデルにおける妻壁のモデル化方法の違いに起因していると考えられる。例として、側壁に着目すると、3次元構造解析においては、土圧により部材中央部が大きく変形しているのに対し、地震応答解析においては、解析奥行き方向に対して等価な剛性として線形平面ひずみ要素でモデル化しているため、妻壁により変形が拘束されており、両者の側壁の変形モードが異なっている。

以上のことから、3次元構造解析においては、構造物を精緻にモデル化することにより、構造物の形状に則した3次元的な変形が現れていると判断できる。

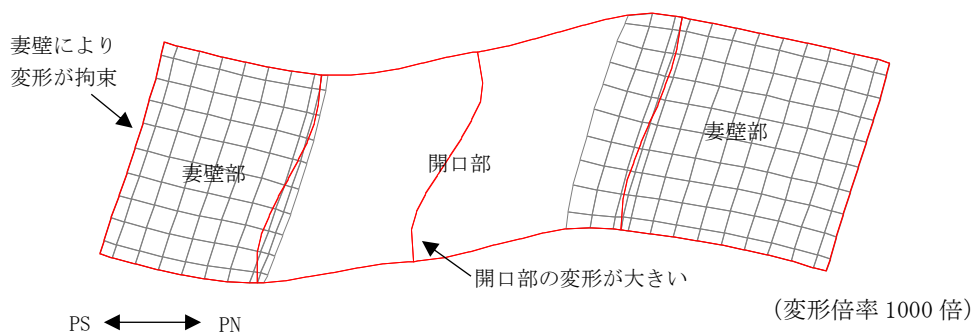


図 2-4 地震応答解析の変形図（補機冷却用海水取水路（北側））

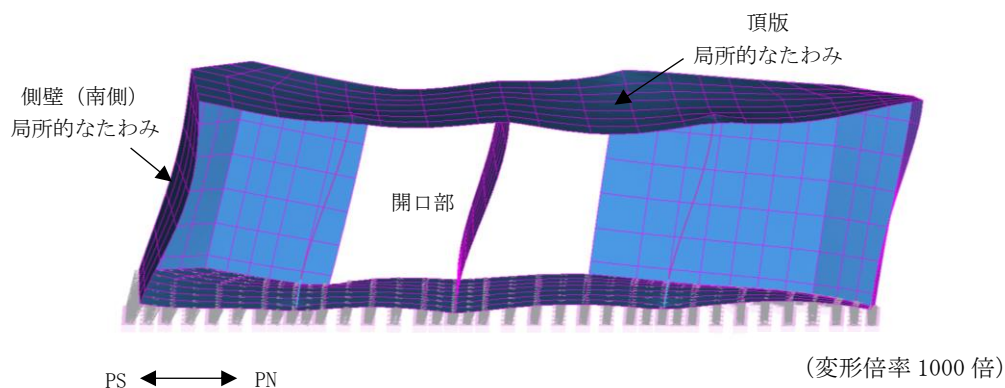


図 2-5 3次元構造解析の変形図（補機冷却用海水取水路（北側））

表 2-3 層間変位の算定結果 (単位: mm)

算定位置	地震応答解析	3次元構造解析
側壁(南側)下端～側壁(南側)上端	0.55	0.68 ^{*1}
隔壁下端～隔壁上端	2.02	1.05 ^{*2}
側壁(北側)下端～側壁(北側)上端	0.60	0.51 ^{*3}

注記*1 : 底版(水路側開口部の範囲)の回転角を考慮した値

*2 : 側壁(南側)の奥行方向の平均値(西側: 0.33 mm, 中央: 0.65 mm, 東側: 1.06 mm)

*3 : 隔壁の奥行方向の平均値(西側: 1.02 mm, 中央: 0.98 mm, 東側: 1.15 mm)

*4 : 側壁(北側)の奥行方向の平均値(西側: 0.14 mm, 中央: 0.44 mm, 東側: 0.96 mm)

2.3.2 構造部材の発生断面力

(1) 発生曲げモーメント

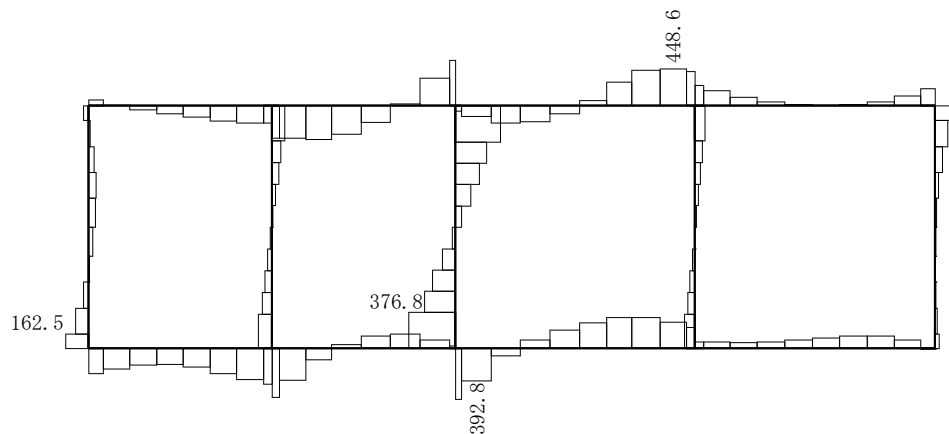
地震応答解析における発生曲げモーメントの断面力分布図を図 2-6, 3次元構造解析における発生曲げモーメントの断面力コンター図を図 2-7, 各部材の最大発生曲げモーメントの比較結果を表 2-4 に示す。

地震応答解析と3次元構造解析を比較した結果, 地震応答解析の方が隔壁, 頂版, 底版の応答が大きい結果となった。

この要因として, 前述 2.3.1 に示したように妻壁のモデル化方法に起因する変形モードの違いが考えられ, 地震応答解析では開口部に変形が大きく現れるため, 隔壁, 頂版, 底版の曲げモーメントが3次元構造解析と比べて大きくなったものと考えられる。

一方, 3次元構造解析では, 側壁, 底版, 頂版の東側で局部的な断面力が生じている。これは, 構造上, 妻壁がない東側の方が曲げ変形が発生しやすいためと考えられる。

以上のことから, 3次元構造解析においては, 構造物を精緻にモデル化することにより, 構造物の形状に則した3次元的な応答を示していると判断できる。



(単位: kN・m/m)

注: 記載の数値は各部材の発生曲げモーメントの最大値を示しており, 当該箇所について, 地震応答解析と3次元構造解析の発生曲げモーメントを表 2-4 で比較する。

図 2-6 地震応答解析における発生曲げモーメントの断面力分布図

(補機冷却用海水取水路(北側), Ss-1+-, t=4.76(s))

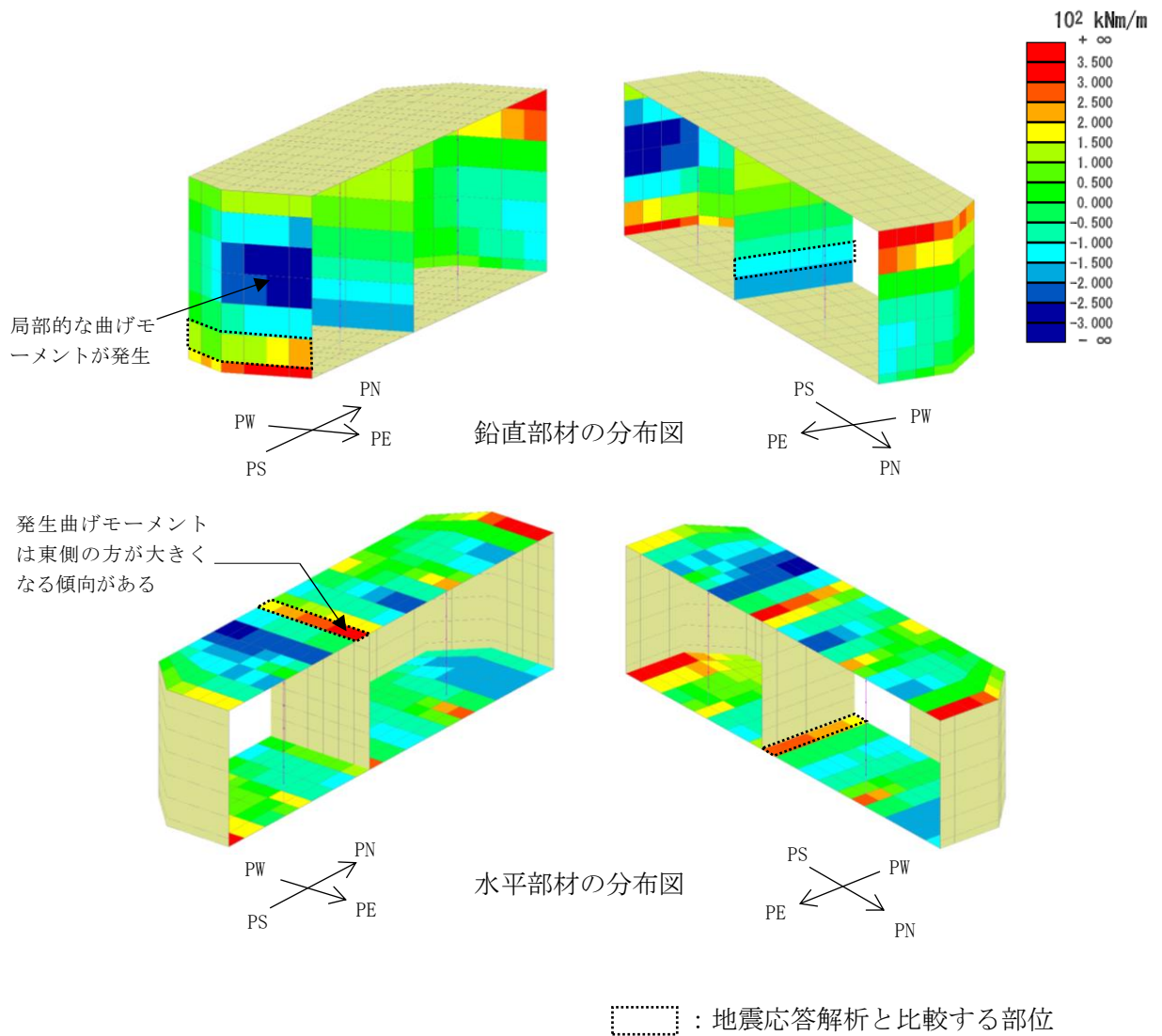


図 2-7 3次元構造解析における発生曲げモーメントの断面力コンター図

表 2-4 各部材の最大発生曲げモーメントの比較結果 (単位: kN・m/m)

部材	地震応答解析	3次元構造解析 ^{*1}	評価位置 ^{*2}
隔壁	376.8	113.6	3
側壁	162.5	137.9	1
頂版	448.6	258.4	8 (地震応答解析) ^{*3} 7 (3次元構造解析) ^{*3}
底版	392.8	245.9	12

注記*1 : 奥行方向の各要素の応答値を平均化し、曲げモーメントを算定。

*2 : 評価位置は図 2-3 に示す。

*3 : 地震応答解析と3次元構造解析で、応答がそれぞれ卓越する箇所と比較。

(2) 発生せん断力

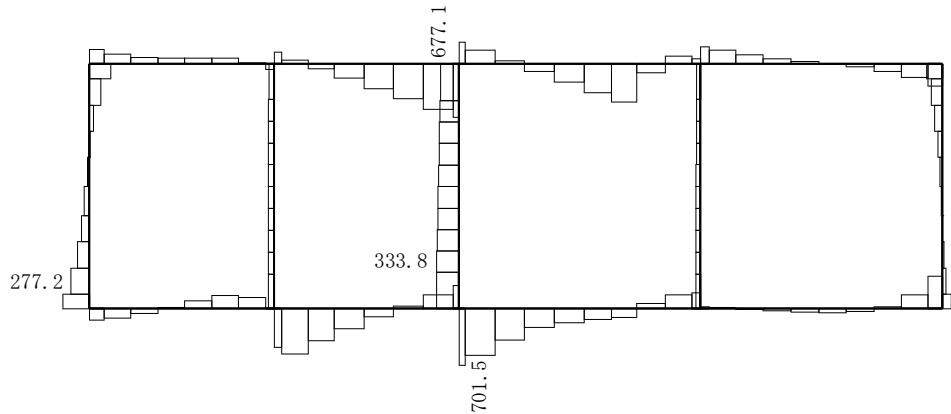
地震応答解析における発生せん断力の断面力分布図を図 2-8, 3次元構造解析における発生せん断力の断面力コンター図を図 2-9, 各部材の発生せん断力の比較結果を表 2-5 に示す。

発生せん断力は、隔壁、頂版、底版については地震応答解析の方が大きく、側壁については3次元構造解析の方が大きい結果となった。

この要因は、地震応答解析では開口部に変形が大きく現れるため、隔壁、頂版、底版の発生せん断力が3次元構造解析と比べて大きくなったものと考えられる。

一方、3次元構造解析では、妻壁のない東側の発生せん断力が大きくなっており、前述した発生曲げモーメントの応答と同様に、構造物の形状に応じた応答を示している。

以上のことから、3次元構造解析においては、構造物を精緻にモデル化することにより、構造物の形状に則した3次元的な応答を示していると判断できる。



(単位 : kN/m)

注 : 記載の数値は各部材の発生せん断力の最大値を示しており、当該箇所について、地震応答解析と3次元構造解析の発生せん断力を表 2-5 で比較する。

図 2-8 地震応答解析における発生せん断力の断面力分布図
(補機冷却用海水取水路 (北側), Ss-1+-, t = 4.76(s))

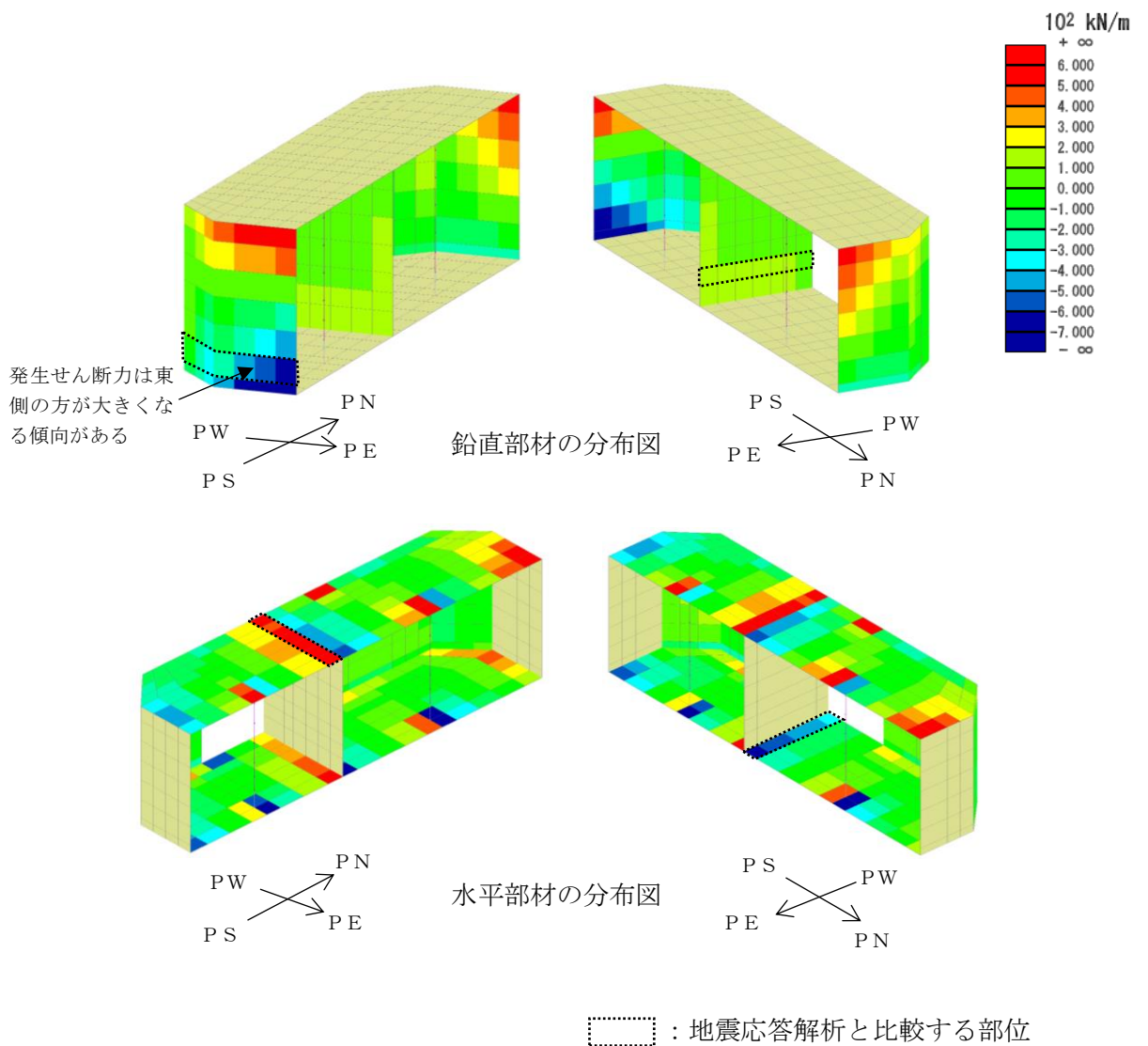


図 2-9 3次元構造解析における発生せん断力の断面力コンター図
(補機冷却用海水取水路 (北側), Ss-1+-, t = 4.76 (s))

表 2-5 各部材の発生せん断力の比較結果 (単位: kN/m)

部材	地震応答解析	3次元構造解析* ¹	評価位置* ²
隔壁	333.8	109.3	3
側壁	277.2	385.1	1
頂版	677.1	528.9	7
底版	701.5	495.9	12

注記*1 : 奥行方向の各要素の応答値を平均化し, せん断力を算定。

*2 : 評価位置は, 図 2-3 に示す。

3. まとめ

本検討では、補機冷却用海水取水路について、地震応答解析と3次元構造解析の変形及び断面力を比較し、補機冷却用海水取水路の3次元構造解析モデルの妥当性について確認した。

変形を比較した結果、妻壁のモデル化方法の違いに起因して、地震応答解析と3次元構造解析で変形モードが異なり、3次元構造解析では構造物の形状に則した3次元的な変形を示すことを確認した。

また、発生断面力を比較した結果、3次元構造解析は、妻壁のない東側で断面力が大きく現れており、構造物の形状に則した3次元的な応答を示していることを確認した。

以上のことから、水路軸方向に形状が変化する補機冷却用海水取水路に3次元構造解析を適用することは妥当であると判断できる。

(参考資料 10) 取水路立坑の健全性評価について

1. 概要

本資料は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、取水路立坑（水路部）（以下「水路部」という。）が基準地震動 S_s に対して十分な構造強度を有していること及び取水路立坑（立坑部）（以下「立坑部」という。）が、下部に設置された水路部に対して、地震時に波及的影響を及ぼさないことを確認するものである。

水路部及び立坑部に要求される機能の維持を確認するにあたっては、地震応答解析に基づく構造部材の健全性評価により行う。

2. 基本方針

2.1 位置

取水路立坑の位置図を図 2-1 に示す。

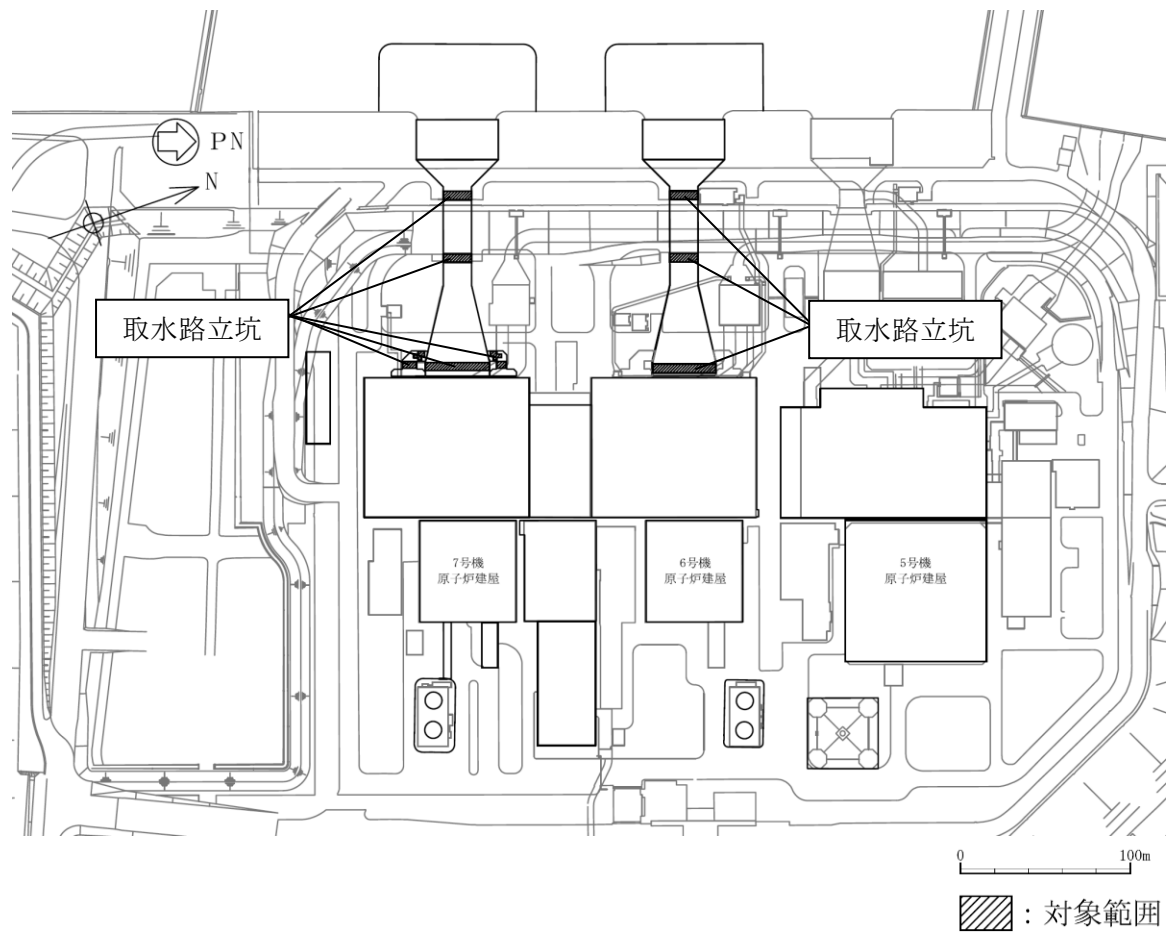
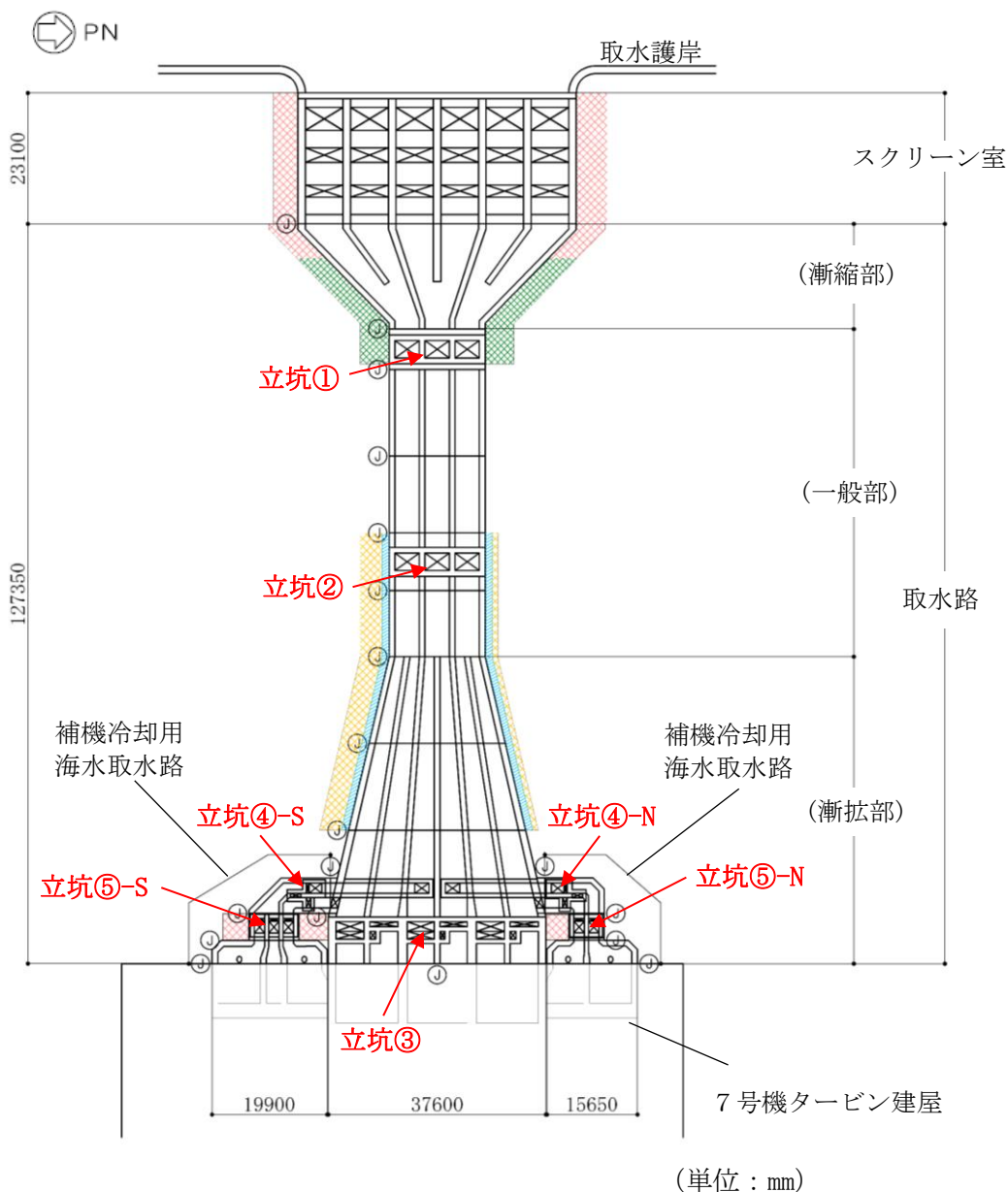


図 2-1 取水路立坑の位置図 (全体平面図)

2.2 構造概要

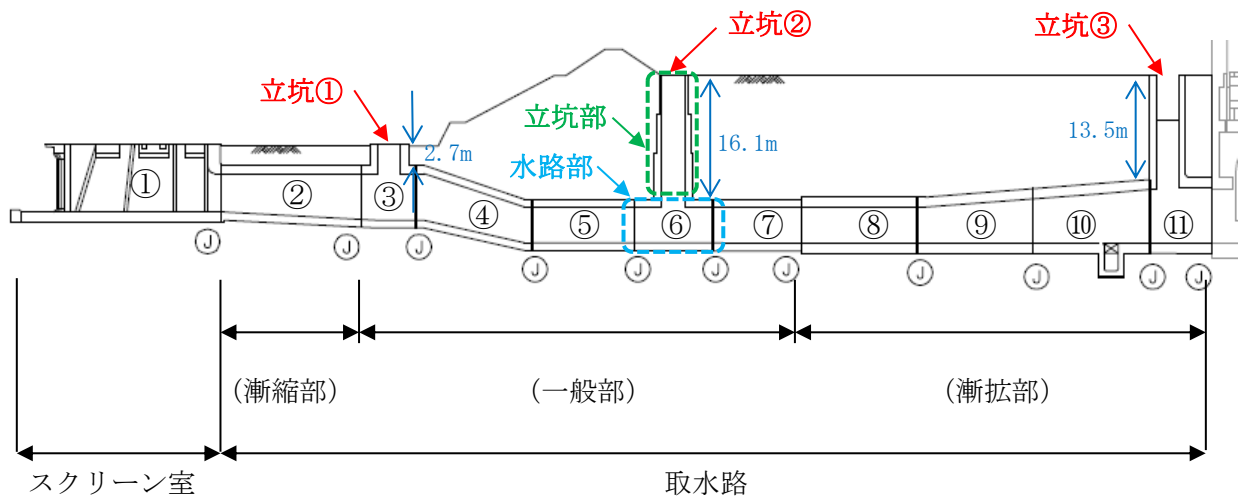
取水路立坑の構造は、7号機と6号機で大きな差異が無いことから、一例として7号機の平面図を図2-2、縦断図を図2-3に示す。

取水路立坑は、取水路及び補機冷却用海水取水路と一体構造の鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、水路部と立坑部から構成される。水路部は、屋外重要土木構造物として非常時における海水の通水機能を求められる構造部位であり、立坑部は、取水路及び補機冷却用海水取水路の点検用に設置された構造部位である。



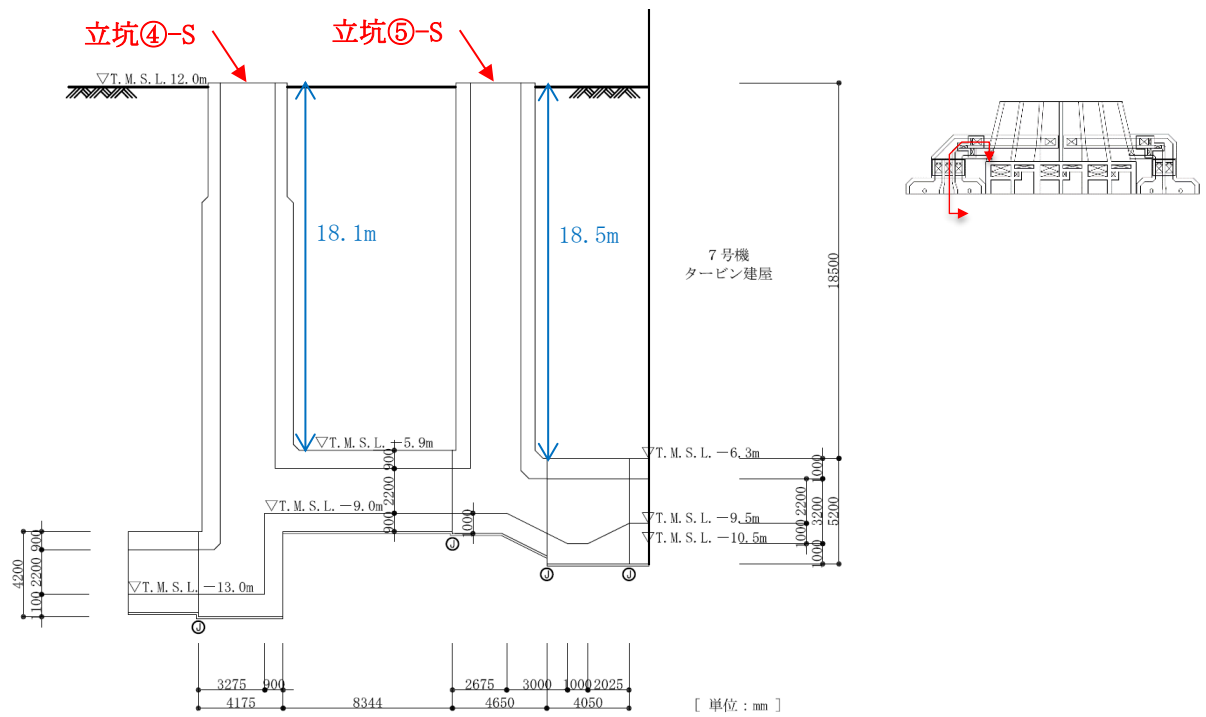
既設/新設	凡例	地盤改良工法
新設地盤改良体		高圧噴射
		無筋コンクリート
		置換(地中連続壁)
		機械攪拌

図 2-2 7号機取水路立坑の平面図

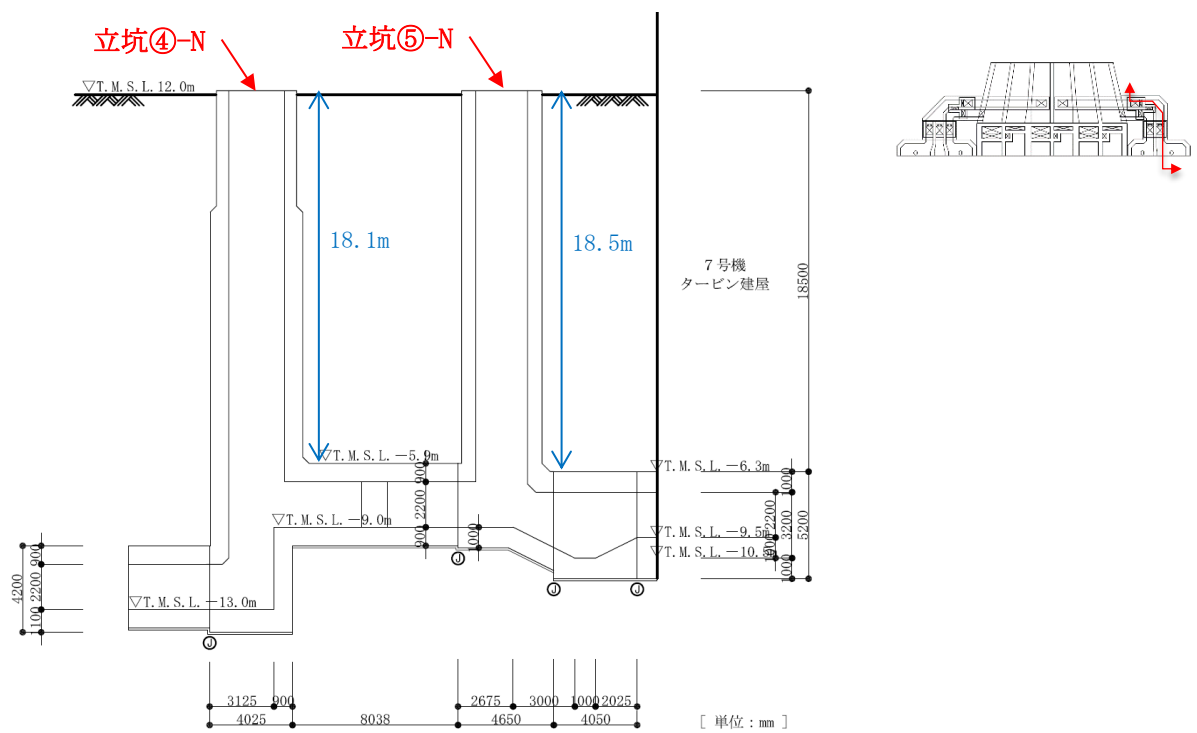


注： ①は耐震ジョイント

図 2-3 (1) 7号機取水路立坑の縦断図 (取水路部)



(a) 補機冷却用海水取水路（南側）



(b) 補機冷却用海水取水路（北側）

図 2-3 (2) 7号機取水路立坑の縦断図（補機冷却用海水取水路部）

2.3 評価方針

取水路立坑のうち水路部は、屋外重要土木構造物として非常時における海水の通水機能を求められる構造部位である。一方、立坑部は、取水路及び補機冷却用海水取水路の点検用に設置された構造部位であり、屋外重要土木構造物としての機能を要求される部位では無いが、立坑部の崩壊による土砂の流入等により水路部の必要な機能を損なわないことを確認するために、波及的影響の観点から屋外重要土木構造物と同等の評価を行う。

取水路立坑の耐震評価は、表 2-1 に示すとおり、水路部及び立坑部に分けて構造部材の曲げ、せん断評価を行う。水路部の耐震評価については、構造部材の層間変形角及びせん断力が許容限界以下であることを確認する。立坑部の耐震評価については、構造部材のコンクリートひずみ及びせん断力が許容限界以下であることを確認する。

取水路立坑の耐震評価フローを図 2-4 に示す。

ここで、取水路立坑は、運転時、設計基準事故時及び重大事故時の状態における圧力、温度等について、耐震評価における手法及び条件に有意な差異はなく、評価は設計基準対象施設の評価結果に包括されることから、設計基準対象施設の評価結果を用いた重大事故等対処施設の評価を行う。

表 2-1 取水路立坑の評価項目

評価方針	評価項目	部位	評価方法	許容限界	
構造強度を有すること	構造部材の健全性	水路部（鉄筋コンクリート部材）	層間変形角及びせん断力が許容限界以下であることを確認	曲げ軸力	限界層間変形角*2
				せん断力	せん断耐力*2
		立坑部（鉄筋コンクリート部材）*1	コンクリートひずみ及びせん断力が許容限界以下であることを確認	曲げ軸力	限界ひずみ*2
				せん断力	せん断耐力*2
				面内せん断力	限界せん断ひずみ*2

注記*1：波及的影響の観点から屋外重要土木構造物と同等の評価を行う。

*2：妥当な安全余裕を考慮する。

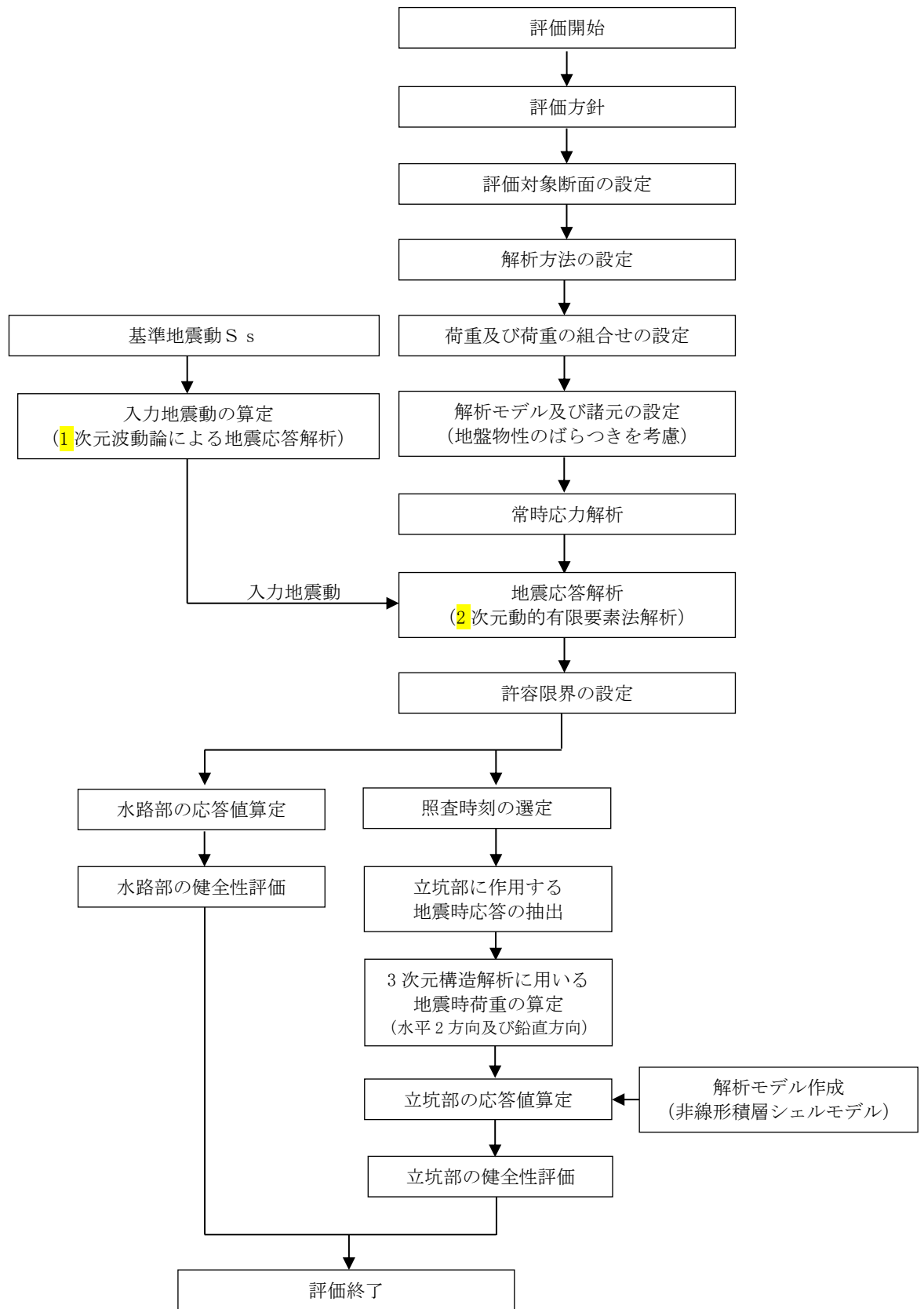


図 2-4 取水路立坑の耐震評価フロー

2.4 適用基準

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会，2002年制定）
- ・コンクリート標準示方書〔設計編〕（土木学会，2012年制定）
- ・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（土木学会，2005年）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987（日本電気協会）

3. 代表構造物の選定

立坑構造物を有する取水路については、図 3-1 に示すとおり、7号機と6号機で構造に大きな差異が無く、立坑の耐震評価への影響が大きいと考えられる埋戻土層の全体範囲も、7号機と6号機で大きな差異は無い。また、立坑①と立坑②の間の地盤改良範囲を比較すると、7号機と比較し6号機の方が地盤改良の範囲が広く、立坑の変形抑制効果が大きいと考えられる。以上のことから、7号機を代表として取水路立坑の代表構造物の選定を行う。

図 2-2 及び図 2-3 の7号機取水路立坑の平面図及び縦断図に示すとおり、取水路立坑は、水路上部に複数箇所存在（立坑①～⑤）する。このうち、取水路立坑に支配的な動土圧及び動水圧を受ける立坑の高さ（土被り厚さ）に着目すると、表 3-1 に示すとおり、立坑②～⑤と比較し、立坑①は高さが高い。また、表 3-1 及び表 3-2 に示すとおり、立坑②～⑤は、立坑の高さ（土被り厚さ）及び鉄筋比に大きな差がないことから、動土圧の主要因である地盤変位に着目し、立坑の水路接続位置と地表面間の地盤の最大相対水平変位を比較する。

表 3-1 各立坑の高さ

立坑	高さ (m)
①	2.7
②	16.1
③	13.5
④-S, N	18.1
⑤-S, N	18.5

表 3-2 立坑②～⑤の鉄筋比

立坑	鉄筋比 (%)
②	0.70
③	0.90
④-S	1.62
④-N	1.60
⑤-S	0.83
⑤-N	0.85

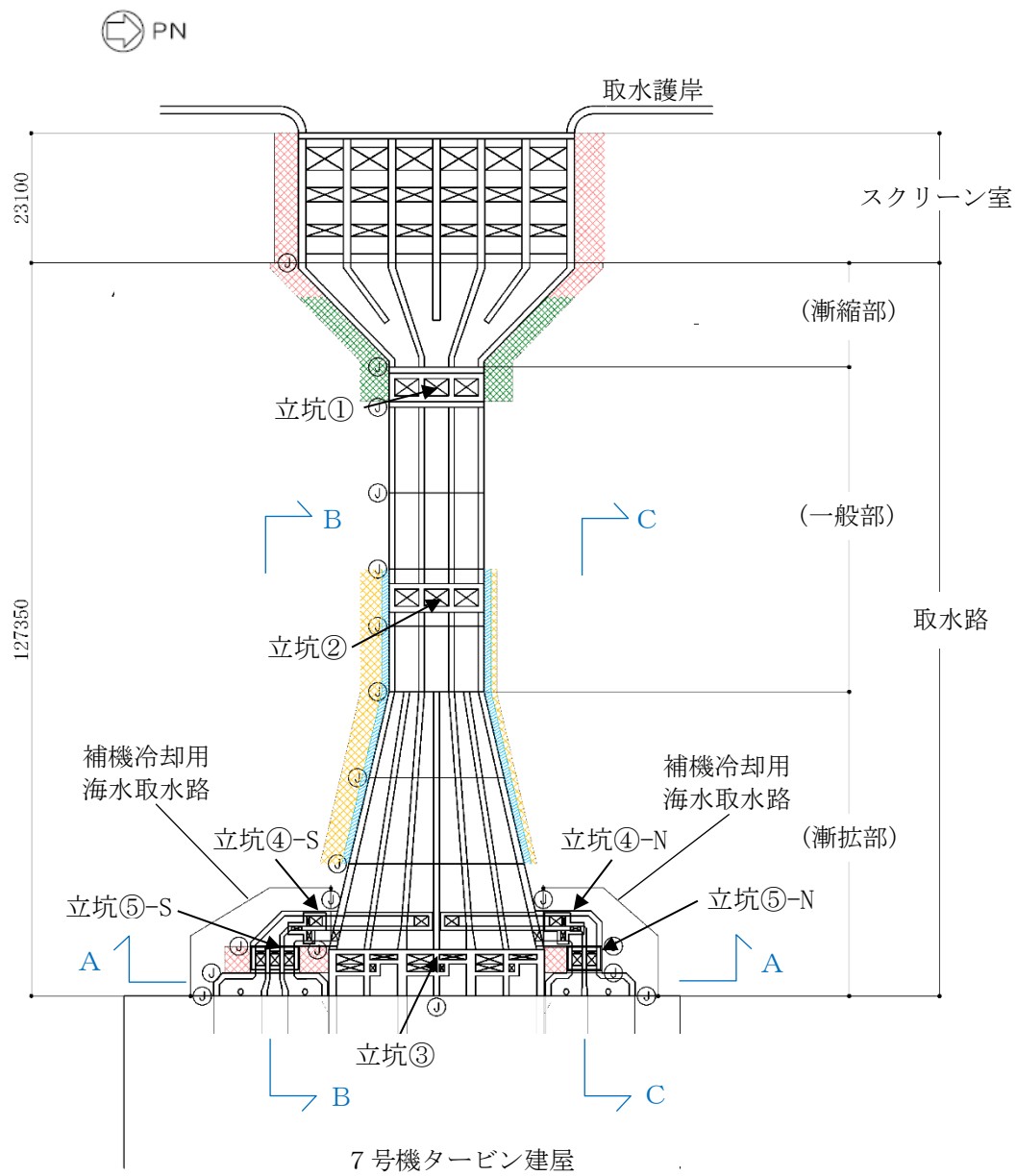
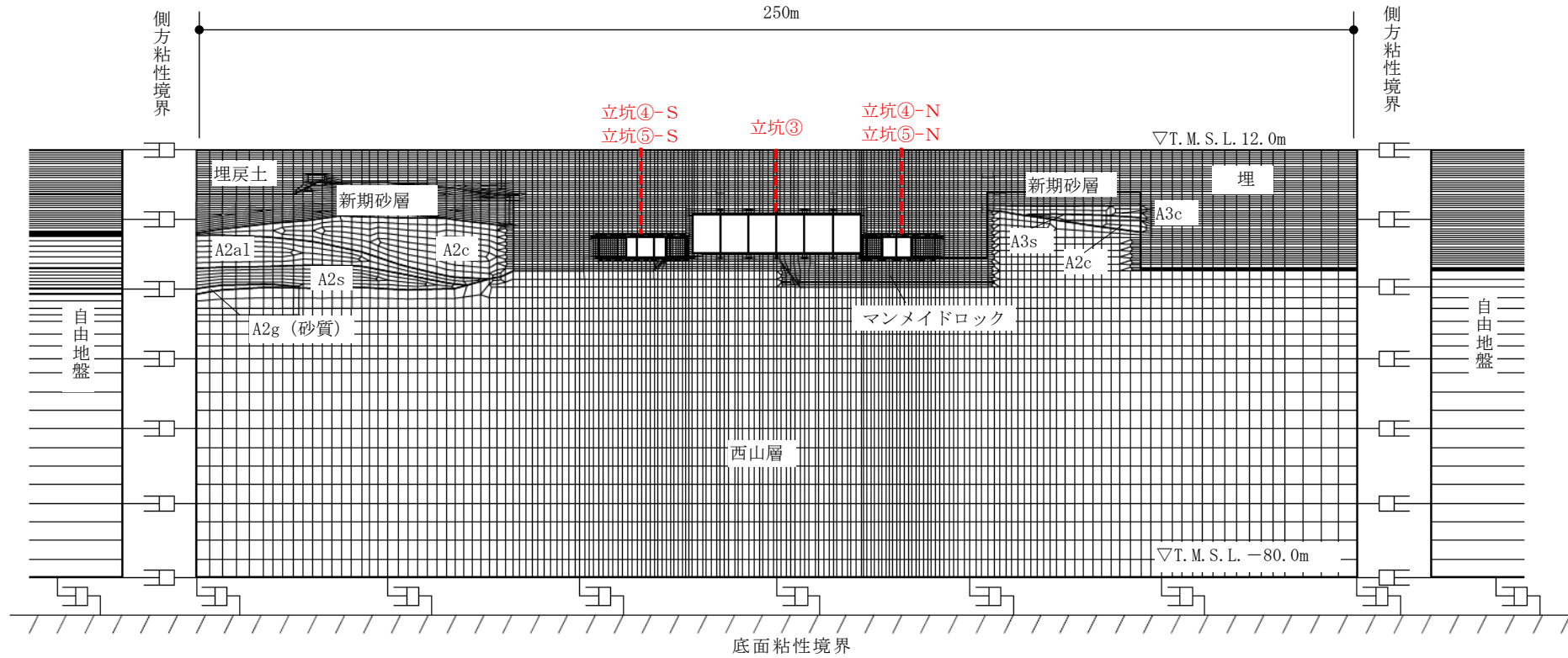


図 3-2 解析断面位置図

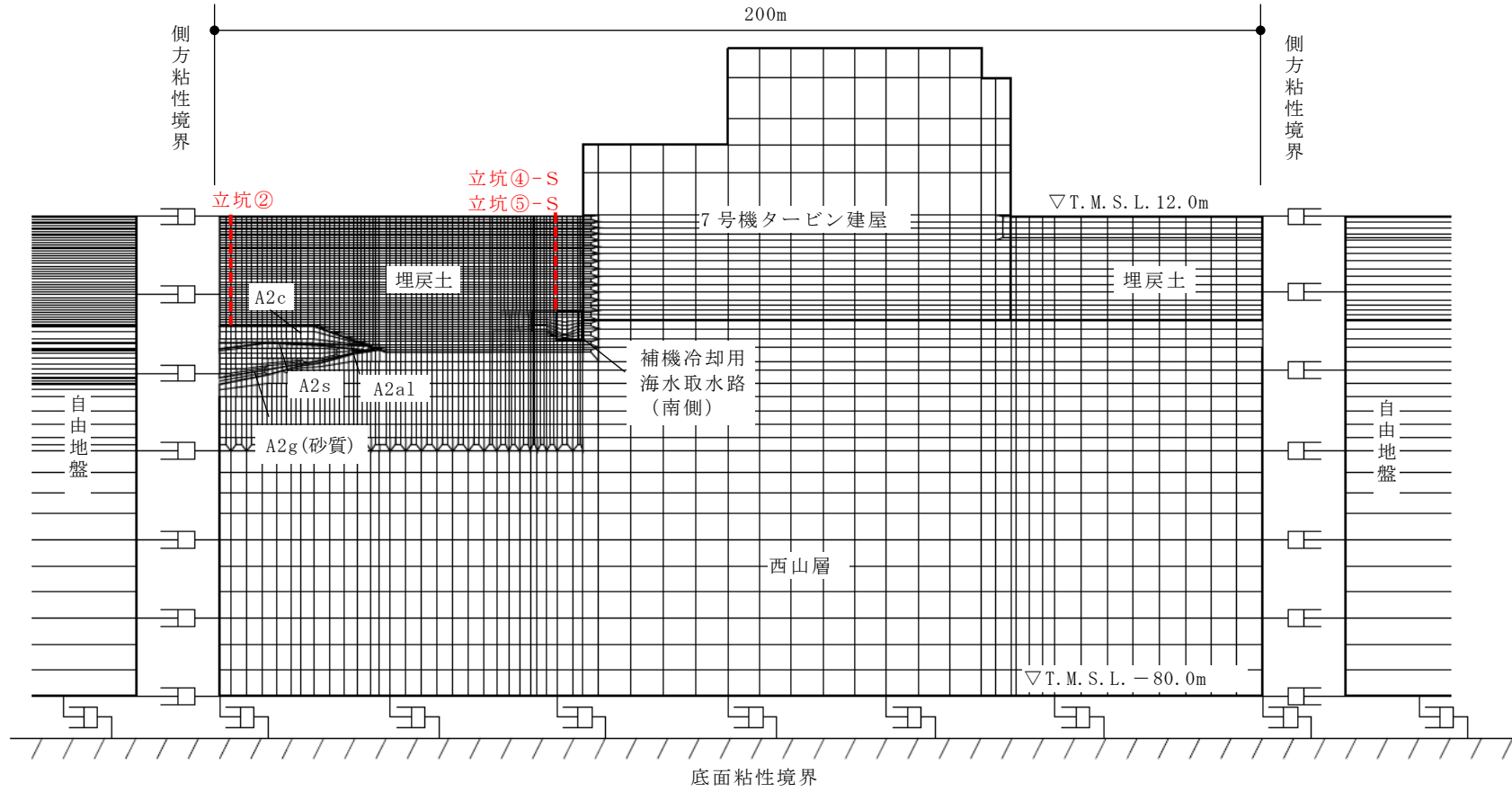
(参考) 10-13



(A-A断面)

図 3-3 解析モデル図 (1/3)

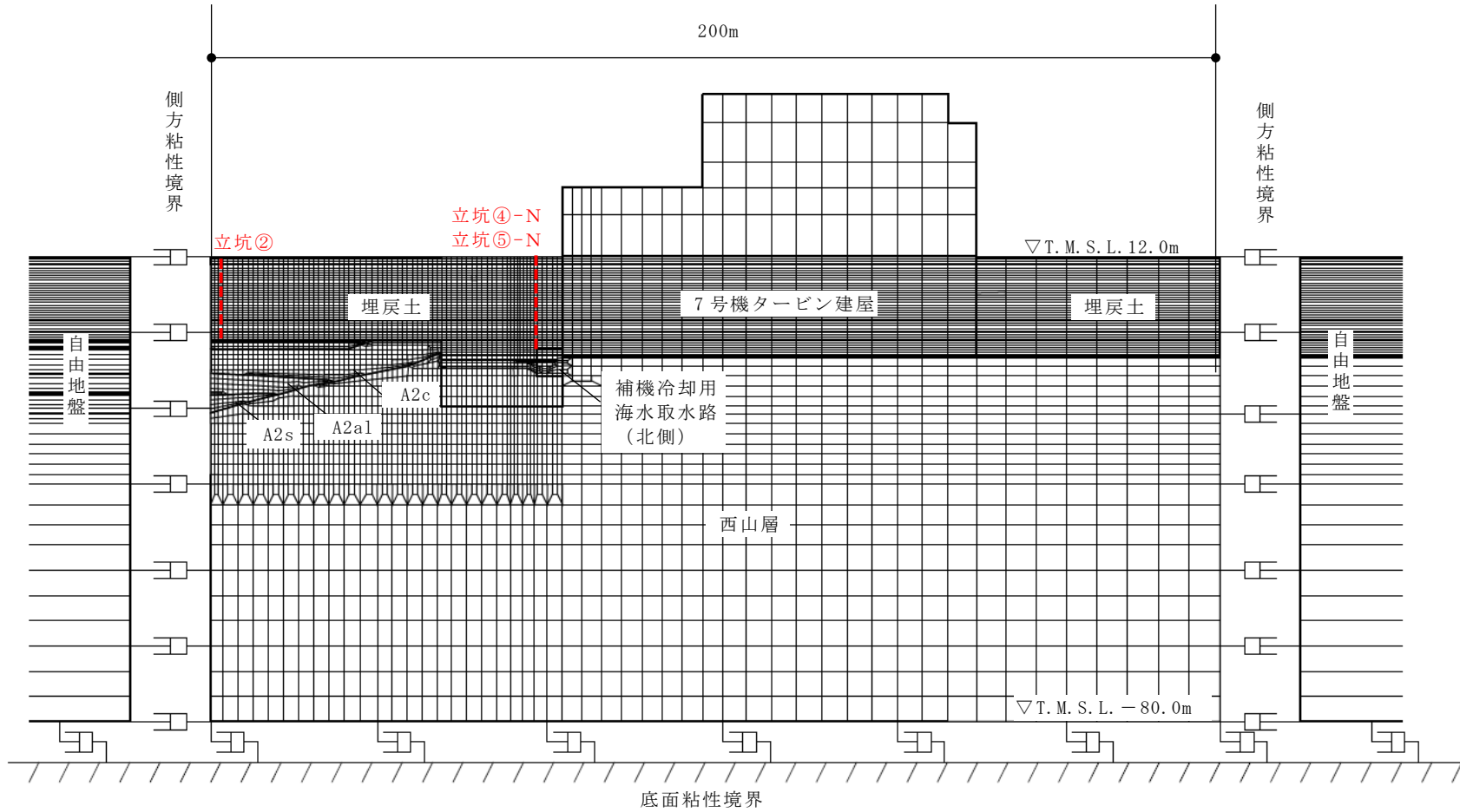
(参考) 10-14



(B-B断面)

図 3-3 解析モデル図 (2/3)

(参考) 10-15



(C-C断面)

図 3-3 解析モデル図 (3/3)

表 3-3 に立坑②～⑤位置における地盤の最大相対水平変位の算定結果を示す。表 3-3 に示すとおり、NS 断面、EW 断面ともに立坑③～⑤と比較し、立坑②の方が地盤の最大相対水平変位が大きい。また、表 3-2 に示すとおり、立坑②～⑤のうち立坑②が最も鉄筋比が小さい。以上のことから、立坑②を取水路立坑の耐震評価を実施する代表構造物として選定する。

表 3-3 地盤の最大相対水平変位の算定結果

立坑位置	最大相対水平変位 (cm) *1		
	NS 断面	EW 断面	
		北側	南側
②	59.6 (S _s -7)	173 (S _s -7) *2	187 (S _s -7) *2
③	40.1 (S _s -7)	35.3 (S _s -7)	71.6 (S _s -7)
④-S	42.7 (S _s -7)	—	71.6 (S _s -7)
④-N	37.6 (S _s -7)	35.3 (S _s -7)	—
⑤-S	42.7 (S _s -7)	—	71.6 (S _s -7)
⑤-N	37.6 (S _s -7)	35.3 (S _s -7)	—

注記*1 : () 内は、相対水平変位が最大となる地震動を示す。

*2 : 立坑②中央位置に最も近い位置で相対変位を算出。

4. 地震応答解析

4.1 解析方法

取水路立坑の地震応答解析は、V-2-1-6「地震応答解析の基本方針」のうち、「2.3 屋外重要土木構造物」に示す解析方法及び解析モデルを踏まえ、NS方向及びEW方向の2断面について実施する。

地震応答解析は、構造物と地盤の相互作用を考慮できる2次元動的有限要素法解析を用いて、基準地震動 S_s に基づき設定した水平地震動と鉛直地震動の同時加振による逐次時間積分の時刻歴応答解析にて行う。

地盤については、有効応力の変化に応じた地震時挙動を適切に考慮できるようにモデル化する。地震応答解析については、解析コード「FLIP Ver. 7.4.1」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

4.2 入力地震動

入力地震動は、KK7補足-027-5「資料5 スクリーン室，取水路，補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価 3.3.1 入力地震動の設定」に示す方法と同様に、V-2-1-6「地震応答解析の基本方針」のうち「2.3 屋外重要土木構造物」に示す入力地震動の設定方針を踏まえて設定する。

4.3 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表4-1、材料の物性値を表4-2に示す。

表 4-1 使用材料

材料	諸元
コンクリート	設計基準強度 23.5 N/mm ²
鉄筋	SD35 (SD345 相当)

表 4-2 材料の物性値

材料	単位体積重量 (kN/m ³)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比
鉄筋コンクリート	23.5*	2.45×10 ⁴ *	0.2*

注記* : 建設時の設計値に基づく

4.4 地盤、マンメイドロック及び地盤改良体の物性値

地盤、マンメイドロック及び地盤改良体については、KK7 補足-027-5「資料5 スクリーン室、取水路、補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価 3.5.3 地盤、マンメイドロック及び地盤改良体の物性値」にて設定している物性値を用いる。

4.5 地下水位

地下水位は、V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、NS断面の地震応答解析では、T.M.S.L. 5.0mに、EW断面の地震応答解析では、スクリーン室はT.M.S.L. 3.0m、取水路はT.M.S.L. 5.0～8.0mに設定する。

4.6 地震応答解析モデル（NS断面）

NS断面の地震応答解析モデルの設定のうち解析モデル領域、境界条件、地盤のモデル化、地盤改良体のモデル化、ジョイント要素の設定方法は、KK7 補足-027-5「資料5 スクリーン室、取水路、補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価 3.2.10 地震応答解析モデルの設定」に示す方法と同様とする。図4-1に地震応答解析モデルを示す。

図4-2に構造物のモデル化方法を示す。構造物（取水路立坑）は、水路部の側壁、隔壁、底版及び頂版を非線形はり要素でモデル化し、立坑部を線形平面ひずみ要素及び線形はり要素でモデル化する。非線形はり要素の非線形特性は、KK7 補足-027-5「資料5 スクリーン室、取水路、補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価 3.2.10 地震応答解析モデルの設定 (7) 材料特性の設定」に示す設定と同様とする。

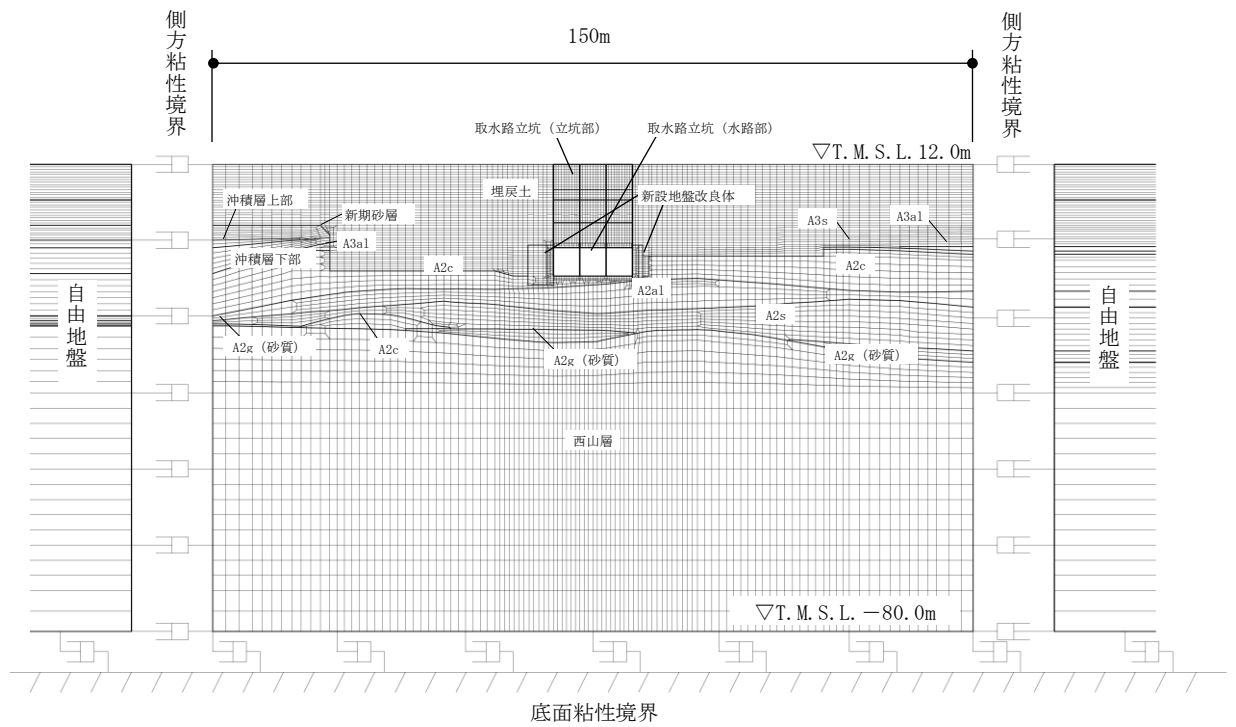


図 4-1 NS 断面の地震応答解析モデル

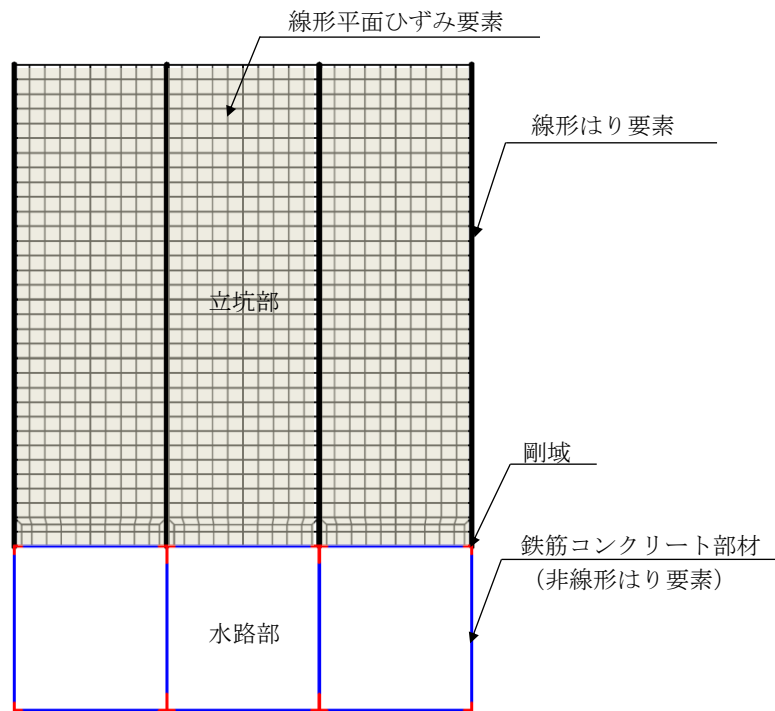


図 4-2 NS 断面における構造物のモデル化方法

4.7 地震応答解析モデル（EW 断面）

EW 断面の地震応答解析モデルの設定は、KK7 補足-027-5「資料 5 スクリーン室，取水路，補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価（参考資料 2）耐震ジョイントの健全性評価について」に示す EW 断面の解析モデルと同様とする。図 4-3 に地震応答解析モデルを示す。

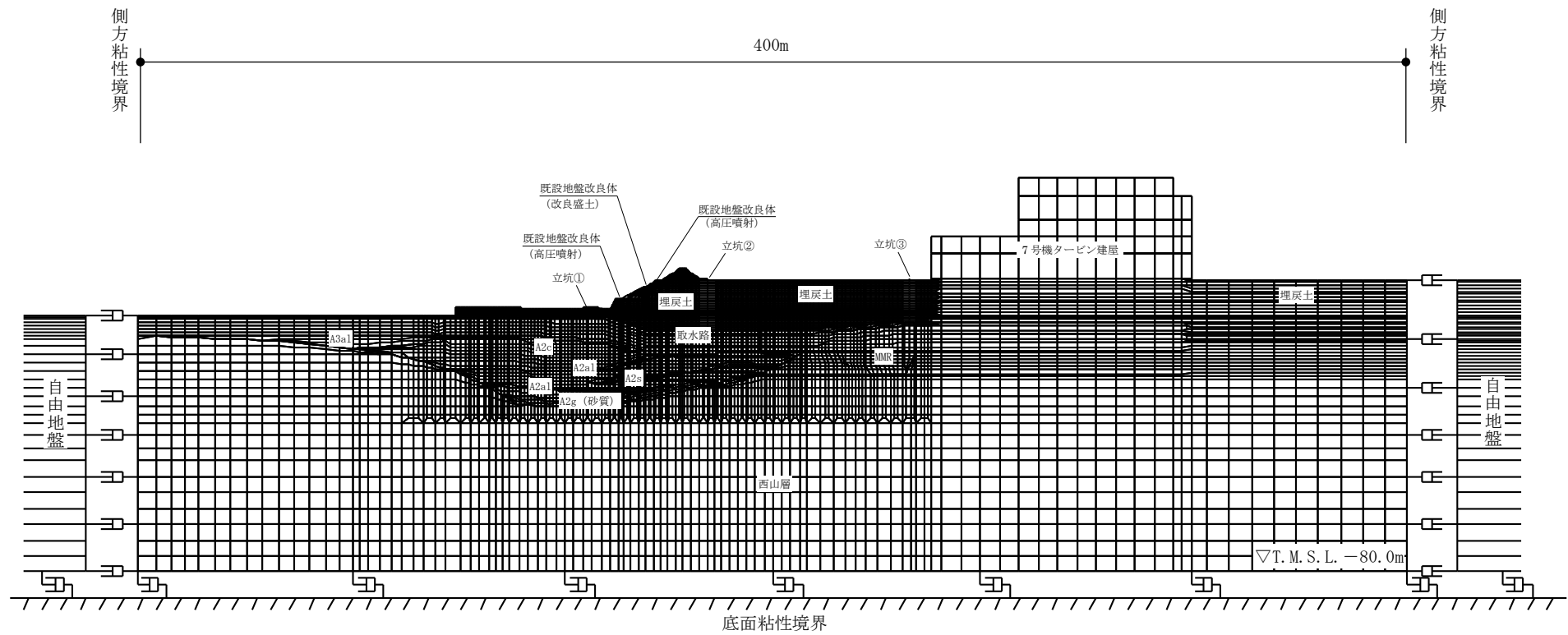


図 4-3 EW 断面の地震応答解析モデル

4.8 減衰定数

減衰定数は、KK7 補足-027-5「資料5 スクリーン室、取水路、補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価 3.2.11 減衰定数」に示す設定と同様とする。

4.9 荷重の組合せ

耐震評価にて考慮する荷重は、通常運転時の荷重（永久荷重）及び地震荷重を抽出し、それぞれを組み合わせ設定する。地震荷重には、地震時土圧及び動水圧の反力による荷重が含まれるものとする。なお、取水路立坑には荷重として考慮すべき機器・配管は存在しない。

積雪荷重については、取水路立坑が地中に埋設された構造物であることを考慮すると、構造物に与える影響は軽微であると判断し、地震力を組合せる荷重としては除外した。

なお、取水路立坑は地中に埋設された構造物であることから、運転時の異常な過度変化時の状態及び設計基準事故時の状態の影響を受けないため、当該状態についての組合せは考慮しないものとする。また、重大事故等対処時においても、地中で設計基準事故時の条件を上回るような事象は発生しないため、設計基準事故時の条件を上回る荷重はない。

荷重の組合せを表 4-3 に示す。

表 4-3 荷重の組合せ

種別		荷重		算定方法の概要
永久荷重	固定荷重	躯体自重	○	・設計図書に基づき、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定する
		機器・配管自重	—	・機器・配管はないことから、考慮しない
		土被り荷重	○	・常時応力解析により設定する
		永久上載荷重	—	・地盤表面に恒常的に置かれる設備等はないことから、考慮しない
		静止土圧	○	・常時応力解析により算定する
		外水圧	○	・地下水位に応じた静水圧を設定する ・地下水の密度を考慮する
		内水圧	○	・T. M. S. L. 1.0m*に応じた静水圧を設定する ・海水の密度を考慮する
		雪荷重	—	・埋設構造物であるため、積雪を考慮しない
偶発荷重 (地震荷重)	水平地震動	○	・基準地震動 S_s による水平・鉛直同時加振を考慮する ・躯体、動土圧を考慮する	
	鉛直地震動	○		
	動水圧	○	・水位条件及び密度は、永久荷重のうち内水圧と同様とする ・地震時動水圧を付加質量により考慮する	

注記*：内水圧の水位は、朔望平均満潮位 T. M. S. L. 0.49m に対し、保守性を考慮し T. M. S. L. 1.0m とする。（共通条件：スクリーン室、取水路、補機冷却用海水取水路、取水路立坑）

4.9.1 外水圧

外水圧は、地下水位に応じた静水圧を設定する。地下水位は、V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、NS断面の地震応答解析では、T.M.S.L. 5.0mに、EW断面の地震応答解析では、スクリーン室はT.M.S.L. 3.0m、取水路はT.M.S.L. 5.0～8.0mに設定する。設定の際は、地下水の密度として、 $1.00\text{g}/\text{cm}^3$ を考慮する。

4.9.2 内水圧

NS断面の地震応答解析では、取水路立坑の内部には、朔望平均満潮位 T.M.S.L. 0.49mに對して保守的に設定した T.M.S.L. 1.0mを静水面とした静水圧を内水圧として設定する。設定の際は、海水の密度として、 $1.03\text{g}/\text{cm}^3$ を考慮する。NS断面における内水圧図を図4-4に示す。

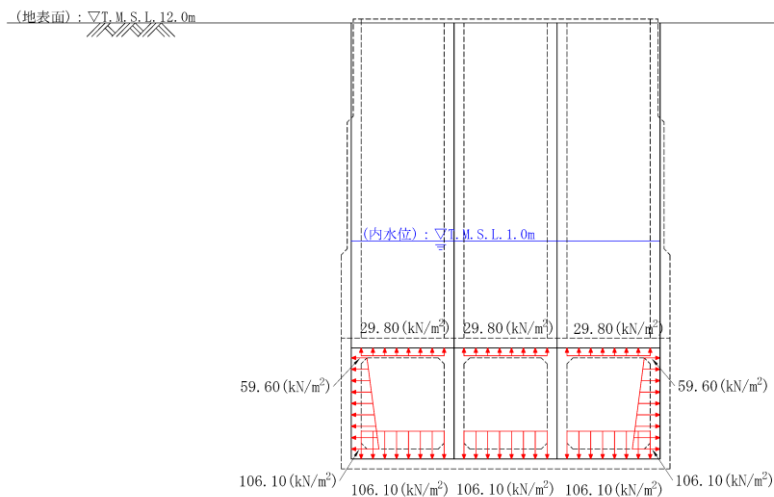


図 4-4 内水圧図 (NS 断面)

4.9.3 動水圧

NS断面の地震応答解析では、取水路立坑の内部には、朔望平均満潮位 T.M.S.L. 0.49m に対して保守的に設定した T.M.S.L. 1.0m を水面とした動水圧を付加質量として設定し、地震時の影響を考慮する。設定の際は、海水の密度として $1.03\text{g}/\text{cm}^3$ を考慮する。NS断面における動水圧図を図 4-5 に示す。

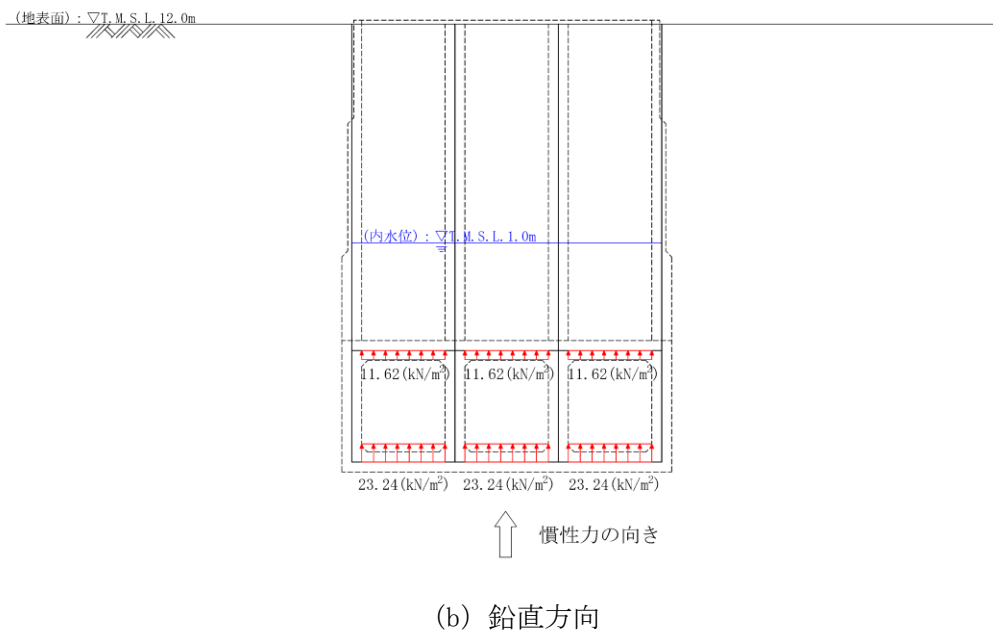
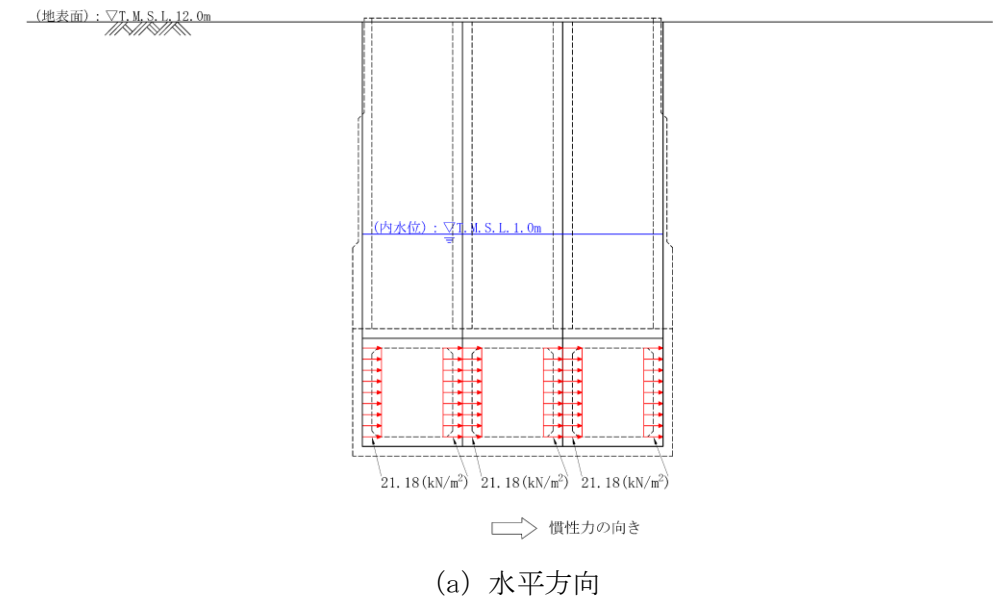


図 4-5 動水圧図 (NS断面)

4.10 解析ケース

解析ケース及び地震動は、解析ケース①（基本ケース）の基準地震動 S_s 全波（8波）及びこれらの位相反転を考慮した地震動（7波）を加えた全15波とする。屋外重要土木構造物としての機能を要求される水路部については、上記解析ケース及び地震動に加え、KK7補足-027-5「資料5 スクリーン室，取水路，補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価」に示す取水路（一般部）で実施している解析ケース②～⑤の S_s-1 を追加する。

4.11 地震応答解析結果 (水路部)

NS断面の地震応答解析結果のうち、水路部の曲げ軸力照査値が最大となる解析ケース及び地震動の地震応答解析により算定した層間変形角の時刻歴波形を図4-6、水路部のせん断力照査値が最大となる解析ケース及び地震動の評価時刻での断面力分布を図4-7に示す。

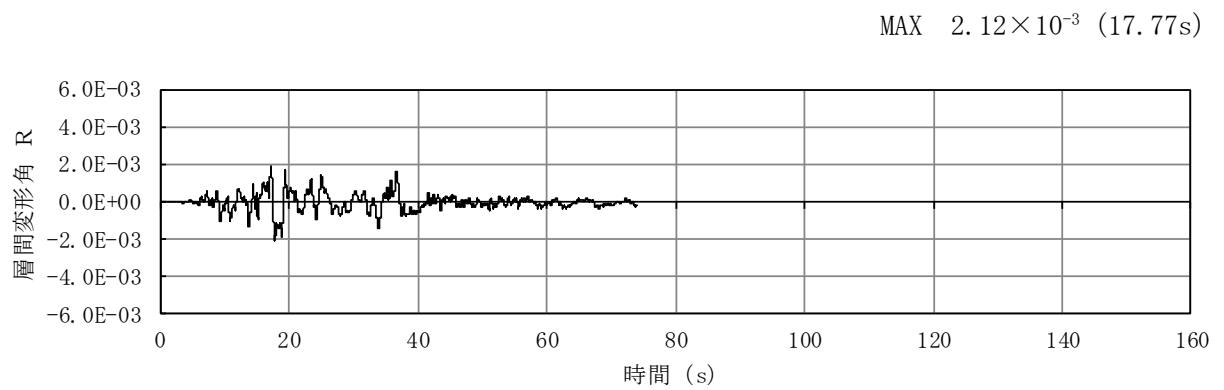
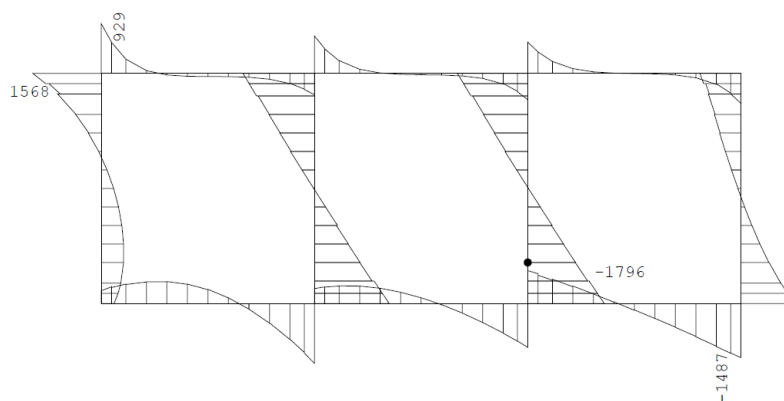


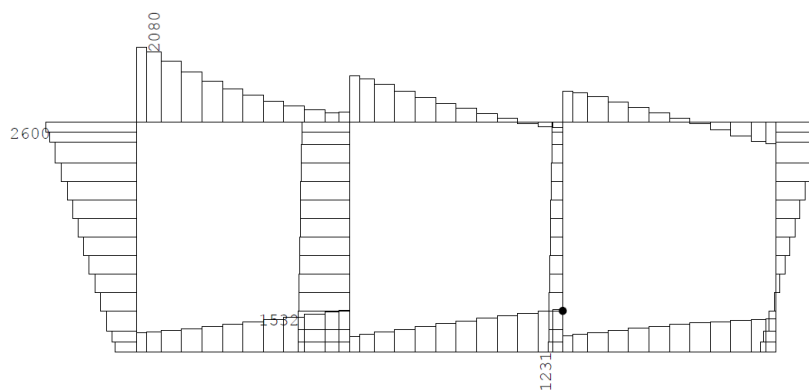
図4-6 層間変形角の時刻歴波形
(NS断面, 解析ケース①, S_S-3--)



数値：各部材の最大断面力

●：せん断照査最大位置 = -1430 (kN・m)

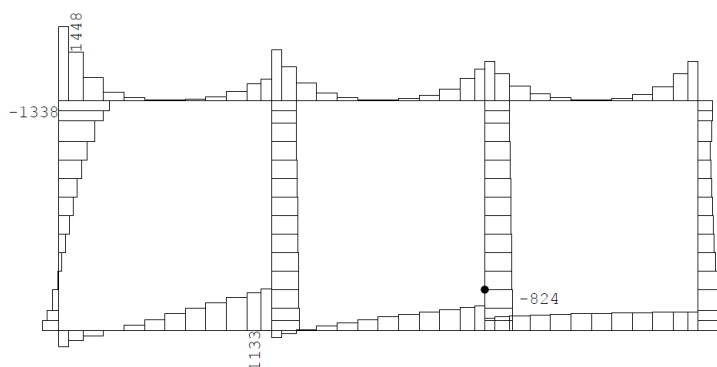
(a) 曲げモーメント (kN・m)



数値：各部材の最大断面力

●：せん断照査最大位置 = 411 (kN)

(b) 軸力 (kN)



数値：各部材の最大断面力

●：せん断照査最大位置 = -820 (kN)

(c) せん断力 (kN)

図 4-7 水路部のせん断力照査における最大照査値の評価時刻での断面力分布図
(NS 断面, 解析ケース①, S_s-3- -, t=17.75s)

4.12 地震応答解析結果（立坑部）

NS 断面の地震応答解析結果のうち、地震時の立坑部の水路接続位置と頂部間の最大相対水平変位の算定結果を表 4-4 に、表 4-4 において最大相対水平変位が最も大きくなる地震動における変位最大時刻での相対水平変位分布図を図 4-8 に示す。また、地震時に立坑部に作用する最大土水圧の算定結果を表 4-5 に、表 4-5 において最大土水圧が最も大きくなる地震動における土水圧最大時刻での土水圧分布図を図 4-9 に示す。

EW 断面の地震応答解析結果のうち、地震時の立坑部の水路接続位置と頂部間の最大相対水平変位の算定結果を表 4-6 に、表 4-6 において最大相対水平変位が最も大きくなる地震動における変位最大時刻での相対水平変位分布図を図 4-10 に示す。また、地震時に立坑部に作用する最大土水圧の算定結果を表 4-7 に、表 4-7 において最大土水圧が最も大きくなる地震動における土水圧最大時刻での土水圧分布図を図 4-11 に示す。

表 4-4 最大相対水平変位の算定結果 (NS 断面)

地震動		最大相対水平変位 (cm)
Ss-1	++	0.194
	-+	0.205
	+ -	0.193
	--	0.203
Ss-2		0.129
Ss-3	++	0.196
	-+	0.202
	+ -	0.202
	--	0.198
Ss-4		0.160
Ss-5		0.169
Ss-6		0.184
Ss-7		0.186
Ss-8	++	0.175
	-+	0.186

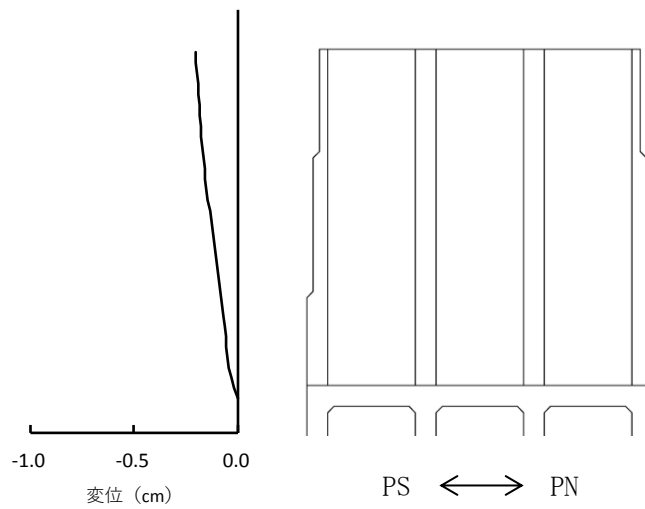


図 4-8 相対水平変位分布図 (NS 断面)

(解析ケース①, Ss-1-+, t=10.58s)

表 4-5 最大土水圧の算定結果 (NS 断面)

地震動		最大土水圧 (kN)
Ss-1	++	12303
	-+	11746
	+ -	11918
	--	11871
Ss-2		8115
Ss-3	++	11289
	-+	10995
	+ -	11962
	--	12252
Ss-4		9869
Ss-5		10897
Ss-6		11860
Ss-7		11735
Ss-8	++	10800
	-+	10488

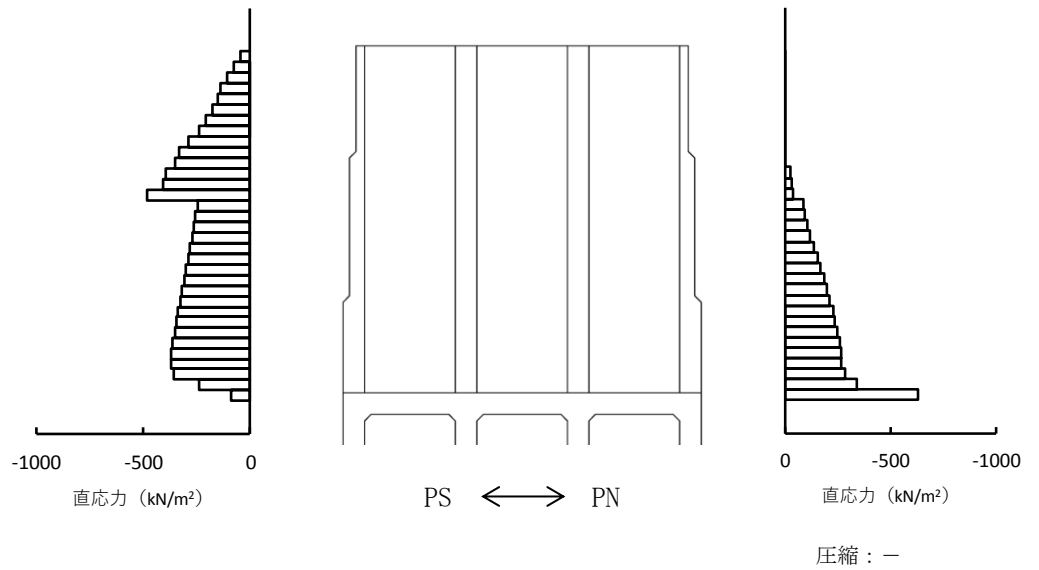


図 4-9 土水圧分布図 (NS 断面)

(解析ケース①, Ss-1++, t=10.64s)

表 4-6 最大相対水平変位の算定結果 (EW 断面)

地震動		最大相対水平変位 (cm)
Ss-1	++	3.87
	-+	7.93
	+ -	3.63
	--	8.19
Ss-2		2.36
Ss-3	++	6.97
	-+	8.21
	+ -	6.41
	--	7.12
Ss-4		4.53
Ss-5		18.26
Ss-6		13.70
Ss-7		26.85
Ss-8	++	2.73
	-+	2.33

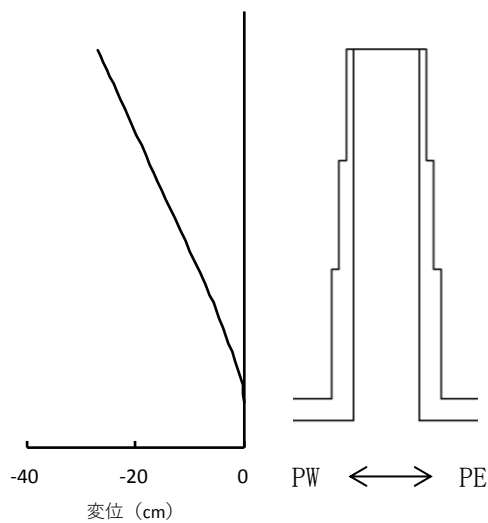


図 4-10 相対水平変位分布図 (EW 断面)
(解析ケース①, Ss-7, t=58.47s)

表 4-7 最大土水圧の算定結果 (EW 断面)

地震動		最大土水圧 (kN)
Ss-1	++	22485
	-+	24161
	+ -	23454
	--	24251
Ss-2		18602
Ss-3	++	23959
	-+	21841
	+ -	23223
	--	23333
Ss-4		22699
Ss-5		26940
Ss-6		24870
Ss-7		26749
Ss-8	++	22456
	-+	17800

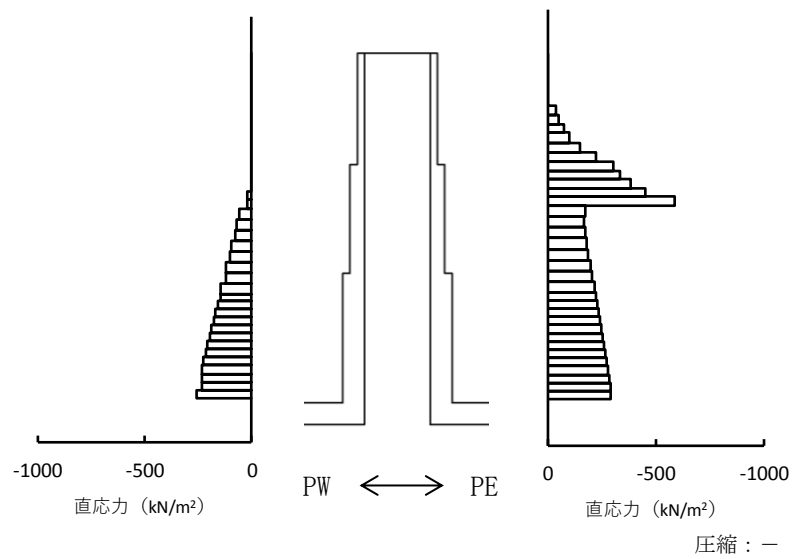


図 4-11 土水圧分布図 (EW 断面)

(解析ケース①, Ss-5, t=60.42s)

5. 耐震評価

5.1 水路部

5.1.1 評価対象断面の選定

水路部の縦断方向（通水方向，EW 方向）は，加振方向と平行に配置される側壁又は隔壁を耐震設計上見込むことができることから，強軸断面方向となる。一方，水路部の横断方向（通水方向に対し直交する方向，NS 方向）は，通水機能を確保するため，加振方向と平行に配置される構造部材が少ないことから，弱軸断面方向となる。

以上のことから，水路部の耐震評価では，構造の安定性に支配的な弱軸断面方向である横断方向（通水方向に対し直交する方向，NS 方向）を評価対象断面とする。

5.1.2 許容限界

曲げ軸力に対する照査は，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（土木学会，2005 年）（以下「土木学会マニュアル」という。）に基づき限界層間変形角（層間変形角 1/100）を許容限界とする。曲げ軸力照査に用いる照査用層間変形角は，発生層間変形角に安全係数（構造解析係数）1.2 を乗じることにより，曲げ破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施する。

せん断力に対する照査は，土木学会マニュアルに基づき，棒部材式及びディープビーム式で求まるせん断耐力のうち，いずれか大きい方を許容限界とし，照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認する。また，発生するせん断力が，上記せん断耐力式により算定するせん断耐力を上回る場合は，材料非線形解析を実施し，より精緻なせん断耐力を評価した上で，当該部材に対するせん断力照査を実施する。せん断力照査に用いる照査用せん断力は，地震応答解析により得られたせん断力に安全係数（構造解析係数）1.05 を乗じることにより，せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施する。

貯水機能を要求する鉄筋コンクリート部材については，鉄筋の降伏を許容限界とする。なお，部材の片側の鉄筋が降伏に至った場合でも，部材を貫通するひび割れが発生するまでは著しい漏水が生じる可能性は低いものと考えられる。そのため，部材を貫通するひび割れが発生する状態（＝部材の両側ともに鉄筋降伏に至った状態）を貯水機能を要求する鉄筋コンクリート部材の許容限界とする。

5.2 立坑部

5.2.1 評価方法

立坑部の評価は、取水路立坑の NS 断面及び EW 断面それぞれについて、2次元の地震応答解析を実施し、それぞれの地震応答解析により得られた応答値を用いて、3次元非線形シェル要素による3次元静的有限要素法解析（以下「3次元構造解析」という。）による耐震評価を実施する。

5.2.2 3次元構造解析の解析手法

立坑部の評価は、構造物の3次元的な形状の影響を考慮するため、非線形積層シェル要素でモデル化し、水平2方向及び鉛直方向の荷重に対する評価を、3次元構造解析を用いて行う。

立坑部に作用する荷重は、2次元の地震応答解析において構造物の評価に支配的な荷重が作用する時刻を選定し、当該時刻における地震時応答から設定する。3次元構造解析には、解析コード「**Engineer's Studio** Ver.8.0.1」を用いる。

本検討で扱う非線形積層シェル要素は、断面高さ方向に分割された鉄筋コンクリート部材の各層に対し、前川モデルに基づく非線形性を考慮しており、これを断面高さ方向に積分することで、面内変形だけではなく面外変形の非線形挙動も考慮しているものである。

なお、前川モデルは新規制基準適合性審査において使用実績のある解析コード「WCOMD」に適用されている構成則であり、「コンクリート標準示方書〔設計編〕（土木学会，2012年）」にも規定されている。

解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、V-2別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

5.2.3 構造物のモデル化

図 5-1 に立坑部の 3 次元構造解析モデルを示す。立坑部は、材料の非線形特性を考慮した非線形積層シェル要素でモデル化する。非線形積層シェル要素は、立坑下部（部材厚さ 1.0m）は 8 層、立坑上部（部材厚 0.4~0.7m）は 6 層とし、主鉄筋の位置が層の中心となるよう、主鉄筋位置に鉄筋コンクリート要素を設定する。鉄筋コンクリート要素を除く範囲は、無筋コンクリート要素としてモデル化する。また、立坑部と水路部の接合部については、土木学会マニュアルに基づく剛域を設定する。

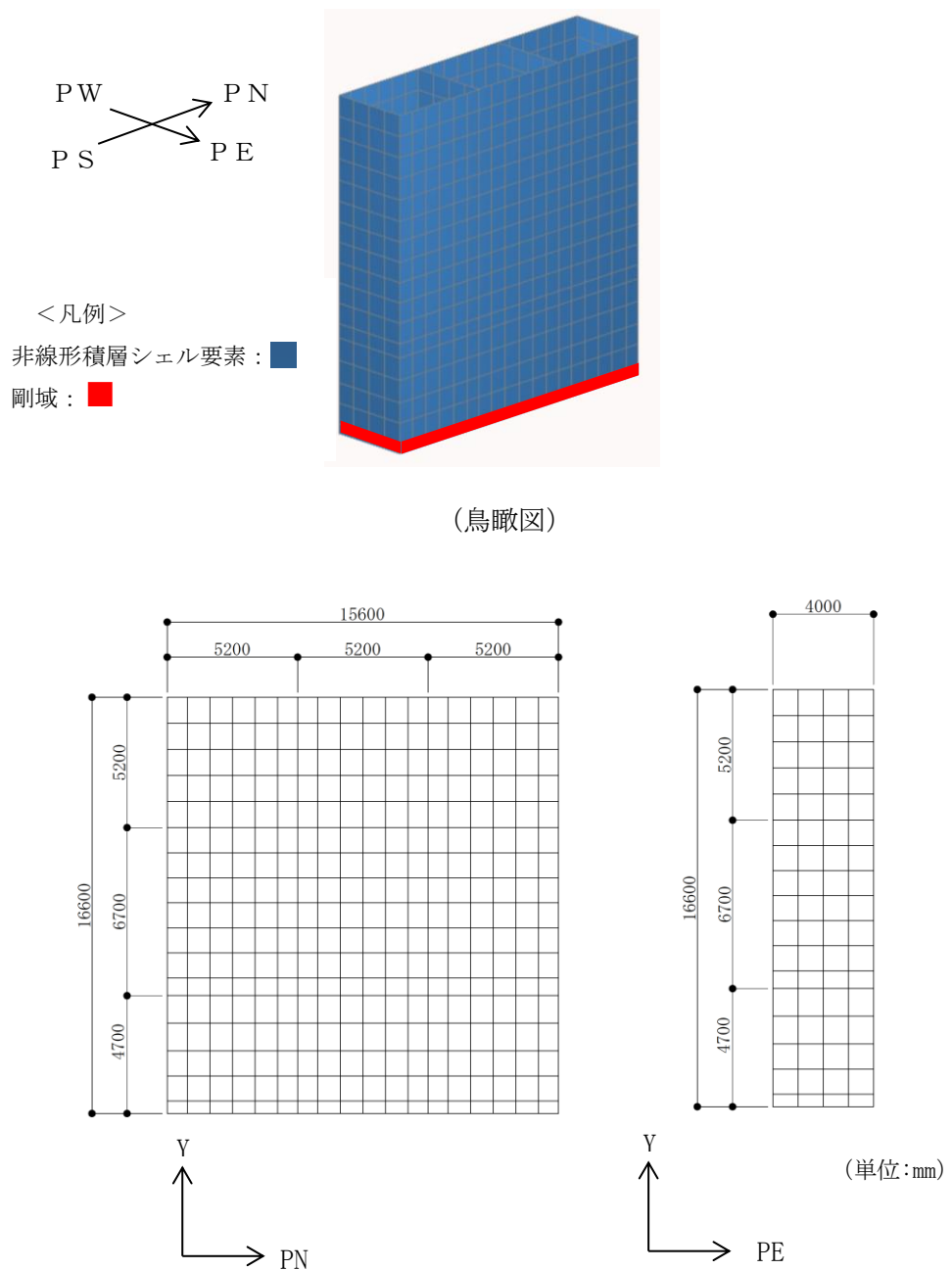


図 5-1 立坑部の 3 次元構造解析モデル

5.2.4 材料の非線形特性

材料の非線形特性は、KK7 補足-027-5「資料5 スクリーン室，取水路，補機冷却用海水取水路の耐震安全性評価 5.4.2 解析モデルの設定 (5)材料の非線形特性」に示す設定と同様とする。

5.2.5 入力荷重

立坑部の耐震評価では、表 5-1 に示すとおり、評価に支配的な荷重が発生する時刻として、NS 断面及び EW 断面それぞれの地震応答解析において立坑の水路接続位置と頂部間の相対水平変位が最大となる時刻及び立坑に作用する土水圧が最大となる時刻を照査時刻として選定する。3次元構造解析の入力荷重は、上記照査時刻における水平2方向及び鉛直方向の応答値をNS断面及びEW断面それぞれの地震応答解析から抽出し算定する。なお、立坑部の面内方向のせん断に対する照査は、NS断面における立坑部の面内せん断応力及び最大相対水平変位最大時を照査時刻とする。

入力荷重の一覧を表 5-2 に示す。「慣性力」及び「土圧及び水圧」については、抽出した地震時応答を用いて入力荷重を算定する。立坑部の慣性力については、地震応答解析モデルにおける鉄筋コンクリート部材に位置する各節点の照査時刻における応答加速度の平均値から算定する。内水圧については、朔望平均満潮位 T.M.S.L. 0.49m に対して保守的に設定した T.M.S.L. 1.0m を静水面とした静水圧として設定する。動水圧については、T.M.S.L. 1.0m を水面とし、各方向の慣性力に応じた荷重を作用させる。土圧及び水圧については、立坑部の側面に接する地盤のマルチスプリング要素及び間隙水要素の照査時刻における要素応力から算定する。

表 5-1 立坑部の照査時刻

施設	加振方向	事象	照査時刻
立坑部	NS	立坑の水路接続位置と頂部間の相対水平変位最大時	時刻 1
		立坑に作用する土水圧最大時	時刻 2
	EW	立坑の水路接続位置と頂部間の相対水平変位最大時	時刻 3
		立坑に作用する土水圧最大時	時刻 4

表 5-2 入力荷重一覧

入力荷重		地震応答解析から 抽出する地震時応答	载荷位置
慣性力	躯体 (NS 断面方向)	応答加速度	躯体全体
	躯体 (EW 断面方向)	応答加速度	躯体全体
内水圧・動水圧	躯体 (NS 断面方向)	—*	作用位置
	躯体 (EW 断面方向)	—*	作用位置
土圧及び水圧	躯体 (NS 断面方向)	土圧・水圧	作用位置
	躯体 (EW 断面方向)	土圧・水圧	作用位置

注記* : 動水圧は、地震応答解析から抽出した応答加速度に基づき算定する。

5.2.6 許容限界

曲げ軸力に対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、限界ひずみ（圧縮縁コンクリートひずみ1%）を許容限界とする。曲げ軸力照査に用いる照査用コンクリートひずみは、3次元構造解析により得られたコンクリートひずみに安全係数（構造解析係数）1.2を乗じることにより、曲げ破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施する。

面外方向のせん断に対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、棒部材式及びディープビーム式で求まるせん断耐力のうち、いずれか大きい方を許容限界とし、照査用せん断力がせん断耐力を下回ることを確認する。また、発生するせん断力が、上記せん断耐力式により算定するせん断耐力を上回る場合は、材料非線形解析を実施し、より精緻なせん断耐力を評価した上で、当該部材に対するせん断力照査を実施する。せん断力照査に用いる照査用せん断力は、地震応答解析により得られたせん断力に安全係数（構造解析係数）1.05を乗じることにより、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施する。なお、解析結果から鉄筋コンクリート部材に降伏が認められる場合は、コンクリート標準示方書を参考とし、部材係数の割増しを考慮する。

面内方向のせん断に対する照査は、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 - 1987（日本電気協会）に基づき、下式で求まるせん断ひずみ度に関する許容限界の目安値とする。壁部材の面内せん断照査に用いる照査用せん断ひずみは、3次元構造解析により得られた面内せん断ひずみに安全係数（構造解析係数）1.2を乗じることにより、せん断破壊に対して安全余裕を見込んだ評価を実施する。

$$\gamma_i \frac{\gamma_d}{\gamma_A} < 1.0$$

ここで、 γ_i : 構造物係数 (=1.0)

$$\gamma_d = \gamma_a \cdot \gamma$$

γ_a : 構造解析係数 (=1.2)

γ : 応答計算による面内せん断ひずみ

γ_A : せん断ひずみ度に関する許容限界の目安値

$$\gamma_A = \gamma_u / 2.0$$

γ_u : 終局せん断ひずみ度で 4.0×10^{-3}

6. 耐震評価結果

6.1 水路部の評価結果

水路部の曲げ軸力に対する照査結果を表 6-1 に、せん断力に対する照査結果を表 6-2 に、水路部の各部材において、せん断力に対する照査値が最も大きくなる解析ケース及び地震動の照査結果（照査値の裕度が小さい場合は材料非線形解析を実施）を表 6-3 に示す。表 6-1 及び表 6-3 より、照査用層間変形角及び照査用せん断力が許容限界以下であることを確認した。

表 6-1 曲げ軸力に対する照査結果（水路部）

解析 ケース	地震動	曲げ軸力照査		
		照査用 層間変形角 R_d^*	限界層間変形角 R_u	照査値 R_d/R_u
①	Ss-1++	2.41×10^{-3}	1.0×10^{-2}	0.25
	Ss-1-+	2.43×10^{-3}		0.25
	Ss-1+-	2.33×10^{-3}		0.24
	Ss-1--	2.50×10^{-3}		0.25
	Ss-2	1.28×10^{-3}		0.13
	Ss-3++	2.46×10^{-3}		0.25
	Ss-3-+	2.53×10^{-3}		0.26
	Ss-3+-	2.45×10^{-3}		0.25
	Ss-3--	2.54×10^{-3}		0.26
	Ss-4	1.43×10^{-3}		0.15
	Ss-5	1.69×10^{-3}		0.17
	Ss-6	1.75×10^{-3}		0.18
	Ss-7	1.99×10^{-3}		0.20
	Ss-8++	2.33×10^{-3}		0.24
Ss-8-+	2.42×10^{-3}	0.25		
②	Ss-1--	2.46×10^{-3}		0.25
③	Ss-1--	2.30×10^{-3}		0.23
④	Ss-1--	2.03×10^{-3}		0.21
⑤	Ss-1--	2.00×10^{-3}		0.20

注記* : 照査用層間変形角 $R_d = \text{最大層間変形角 } R \times \text{構造解析係数 } \gamma_a$

表 6-2 せん断力に対する照査結果（水路部）（1/2）

解析ケース	地震動	評価位置		照査用せん断力	せん断耐力	照査値
				V_d^{*1} (kN)	V_{yd} (kN)	V_d / V_{yd}
①	Ss-1++	頂版	5	658	1676	0.40
		側壁	1	1193	1701	0.71
		隔壁	3	845	896	0.95
		底版	8	1271	2391	0.54
	Ss-1-+	頂版	7	645	1652	0.40
		側壁	4	1245	1662	0.75
		隔壁	3	836	863	0.97
		底版	10	1276	2403	0.54
	Ss-1+-	頂版	7	601	1649	0.37
		側壁	4	1139	1663	0.69
		隔壁	2	828	878	0.95
		底版	8	1274	2508	0.51
	Ss-1--	頂版	5	598	1649	0.37
		側壁	1	963	1483	0.65
		隔壁	3	852	866	0.99
		底版	10	1354	2539	0.54
	Ss-2	頂版	7	441	1623	0.28
		側壁	4	895	1765	0.51
		隔壁	2	594	897	0.67
		底版	10	988	2502	0.40
	Ss-3++	頂版	7	598	1640	0.37
		側壁	4	1096	1592	0.69
		隔壁	2	854	880	0.98
		底版	10	1139	2341	0.49
	Ss-3-+	頂版	5	602	1667	0.37
		側壁	1	958	1597	0.60
		隔壁	3	860	866	1.00
		底版	8	1175	2322	0.51
	Ss-3+-	頂版	5	615	1685	0.37
		側壁	4	980	1530	0.65
		隔壁	2	856	875	0.98
		底版	8	1320	2377	0.56
Ss-3--	頂版	7	628	1658	0.38	
	側壁	4	1232	1697	0.73	
	隔壁	3	862	859	1.01	
	底版	10	1341	2429	0.56	
Ss-4	頂版	5	459	1655	0.28	
	側壁	4	822	1742	0.48	
	隔壁	3	610	867	0.71	
	底版	8	1114	2405	0.47	

注記* : 照査用せん断力 $V_d =$ 発生せん断力 $V \times$ 構造解析係数 γ_a

表 6-2 せん断力に対する照査結果（水路部）（2/2）

解析ケース	地震動	評価位置		照査用せん断力	せん断耐力	照査値
				V_d^* (kN)	V_{yd} (kN)	V_d/V_{yd}
①	Ss-5	頂版	7	469	1624	0.29
		側壁	4	881	1671	0.53
		隔壁	2	678	859	0.79
		底版	8	1176	2399	0.50
	Ss-6	頂版	7	566	1668	0.34
		側壁	4	1122	1784	0.63
		隔壁	2	702	877	0.81
		底版	10	1295	2517	0.52
	Ss-7	頂版	7	570	1653	0.35
		側壁	4	1090	1699	0.65
		隔壁	3	724	831	0.88
		底版	10	1222	2441	0.51
	Ss-8++	頂版	7	546	1626	0.34
		側壁	4	1009	1576	0.65
		隔壁	2	820	883	0.93
		底版	10	1112	2323	0.48
Ss-8-+	頂版	5	575	1642	0.36	
	側壁	1	945	1607	0.59	
	隔壁	3	829	873	0.95	
	底版	8	1083	2302	0.48	
②	Ss-1--	頂版	5	598	1644	0.37
		側壁	4	1203	1869	0.65
		隔壁	3	842	865	0.98
		底版	10	1364	2527	0.54
③	Ss-1--	頂版	5	591	1642	0.36
		側壁	4	1226	1805	0.68
		隔壁	3	806	882	0.92
		底版	10	1253	2511	0.50
④	Ss-1--	頂版	7	526	1622	0.33
		側壁	1	992	1413	0.71
		隔壁	3	742	882	0.85
		底版	10	1180	2359	0.51
⑤	Ss-1--	頂版	7	510	1629	0.32
		側壁	1	955	1417	0.68
		隔壁	2	750	886	0.85
		底版	10	1172	2348	0.50

注記* : 照査用せん断力 $V_d =$ 発生せん断力 $V \times$ 構造解析係数 γ_a

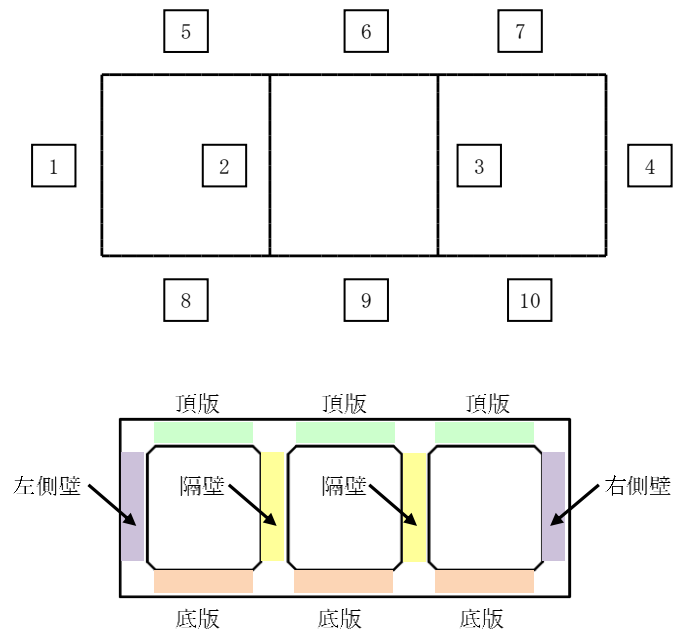
表 6-3 せん断力照査値が最大となる解析ケースの照査結果 (水路部)

評価位置		解析 ケース	地震動	照査用せん断力 V_d^{*1} (kN)	せん断耐力 V_{yd} (kN)	照査値 V_d/V_{yd}
頂版	5	①	Ss-1++	658	1676	0.40
側壁	4	①	Ss-1-+	1536 ^{*2}	3232 ^{*2}	0.48 ^{*2}
隔壁	3	①	Ss-3--	868 ^{*2}	1866 ^{*2}	0.47 ^{*2}
底版	8	①	Ss-3+-	1320	2377	0.56

注記*1 : 照査用せん断力 $V_d = \text{発生せん断力} \times \text{構造解析係数 } \gamma_a$

*2 : 材料非線形解析を用いた方法による数値

*3 : 評価位置は下図に示す。



6.2 水路部の貯水機能の確認

曲げ軸力に対する照査値が最も厳しい解析ケースにおいて、貯水機能が要求される側壁のM- ϕ 曲線の応答を図6-1に示す。なお、同図は側壁および頂版の貯水機能が要求される部位の中で最も第2折れ点（鉄筋の降伏）に対する裕度が厳しい応答を示す位置の結果を示している。

鉄筋は、部材の片側の最大応答は第2折れ点（鉄筋の降伏）に至っているが、両側で鉄筋の降伏には至っておらず、漏水を生じるひび割れは発生しないことから、貯水機能は損なわれないことを確認した。

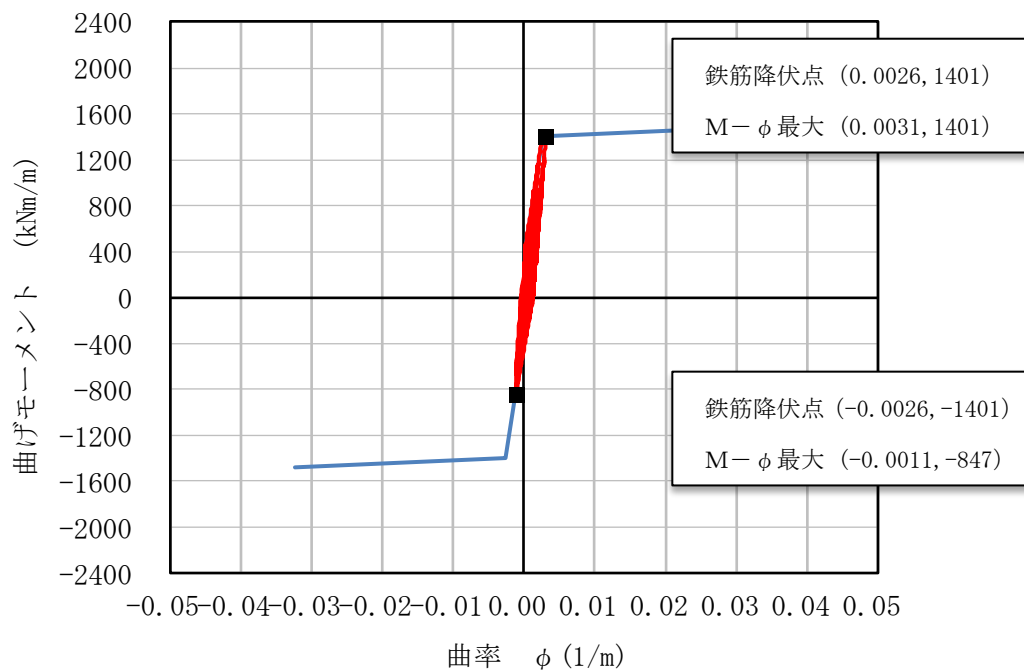


図6-1 水路部のM- ϕ 曲線を用いた貯水機能の確認

(左側壁上部, 解析ケース①, S_s-3---) *

注記* : 曲げ軸力照査で照査値が最も厳しい解析ケース

6.3 立坑部の評価結果

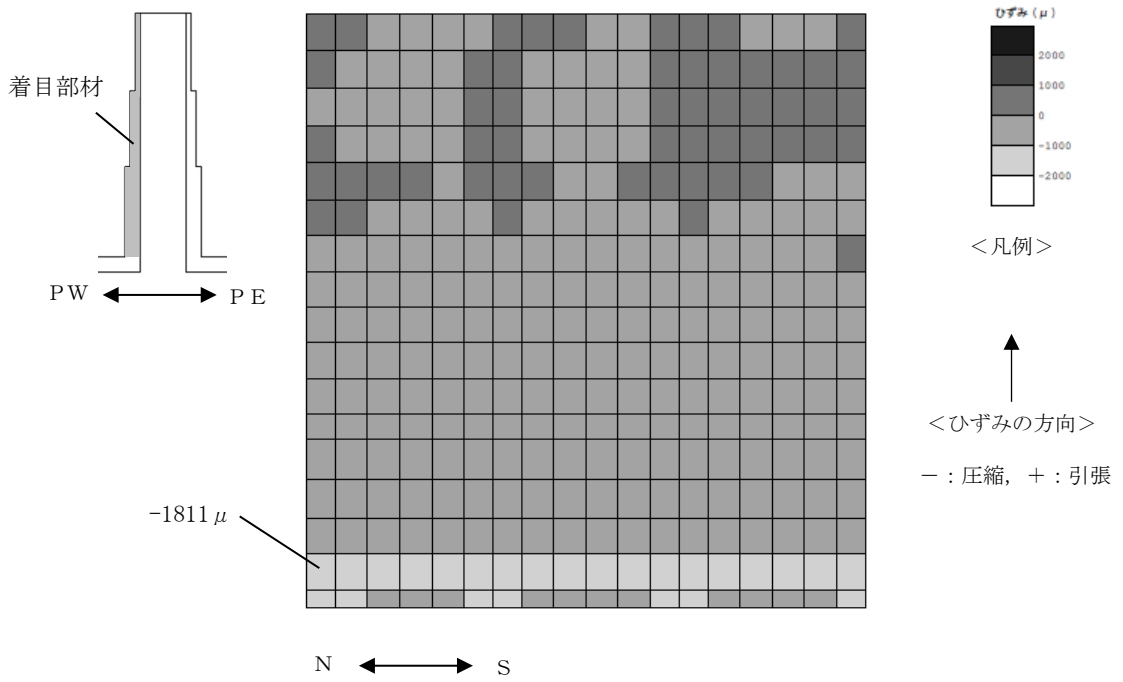
立坑部の曲げ軸力に対する照査結果を表 6-4、せん断力に対する照査結果を表 6-5、面内せん断力に対する照査結果を表 6-6 に示す。せん断力に対する照査については、許容限界に対する余裕が小さいことから、表 5-1 に示す照査時刻 1~4（解析ケース①）の結果に加え、最も照査値が大きい照査時刻 4（EW 方向、立坑に作用する土水圧最大時）について、さらに照査値が大きくなる可能性がある解析ケース③、Ss-5 の地震応答解析を実施し、EW 方向の立坑に作用する土水圧最大時刻（時刻 4'）における照査を追加で実施する。

表 6-4、表 6-5 及び表 6-6 より、取水路の点検用に設置された構造部位である立坑部について屋外重要土木構造物と同等に各種安全係数を考慮することで安全余裕を見込んだ評価を実施した場合においても、照査用ひずみ、照査用せん断力及び照査用面内せん断ひずみが許容限界以下であることを確認した。なお、せん断力に対する照査については、許容限界に対する余裕が小さいものの、図 6-3(c)に示すとおり、発生せん断力は立坑部全体のうち局所的な範囲で大きくなっていることから、立坑部の崩壊に伴う水路部への波及的影響の観点からは、十分な安全性を有していると考えられる。

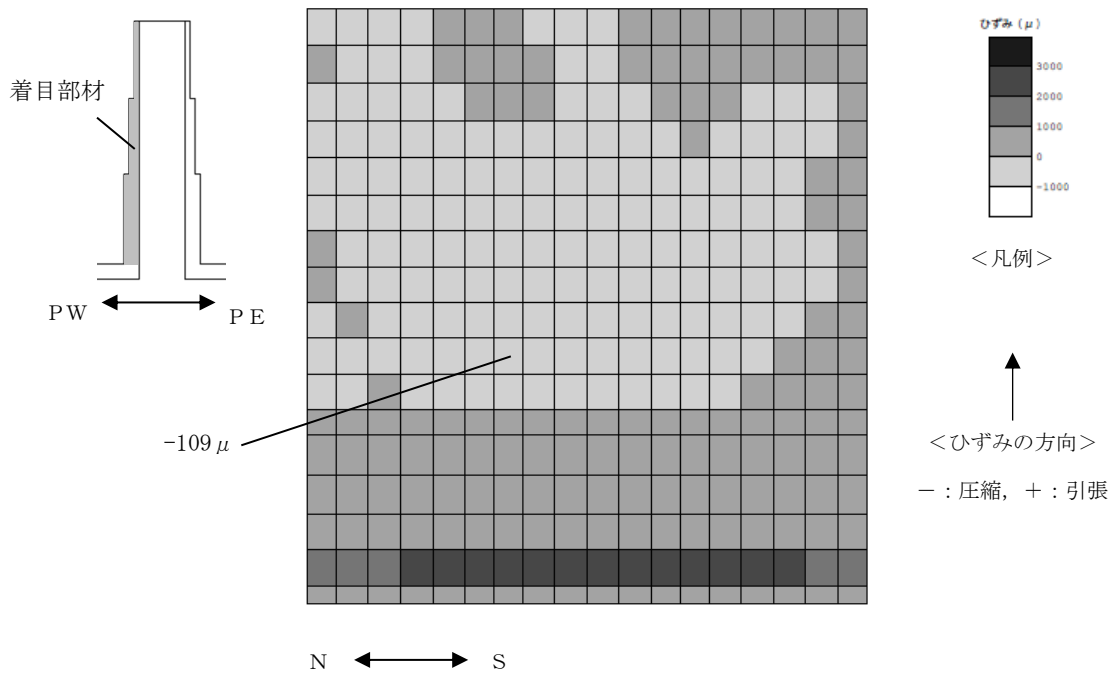
表 6-4 曲げ軸力に対する照査結果（立坑部）

照査時刻	解析 ケース	地震動	評価位置	照査用ひずみ* (μ)	限界ひずみ (μ)	照査値
時刻 1	①	Ss-1-+	部材厚 1.0m	1874	10000	0.19
時刻 2	①	Ss-1++	部材厚 0.4m	1169	10000	0.12
時刻 3	①	Ss-7EW Ss-7NS	部材厚 1.0m	2129	10000	0.22
時刻 4	①	Ss-5EW Ss-5NS	部材厚 1.0m	2174	10000	0.22

注記* : 照査用ひずみ = 発生ひずみ × 構造解析係数 γ_a



(a) 最外縁（西側）のひずみ分布



(b) 最外縁（東側）のひずみ分布

図 6-2 曲げ軸力照査値が最も厳しくなるケースでのひずみ分布図（立坑部）
 （部材：側壁西側，解析ケース①，Ss-5，t=60.42s）

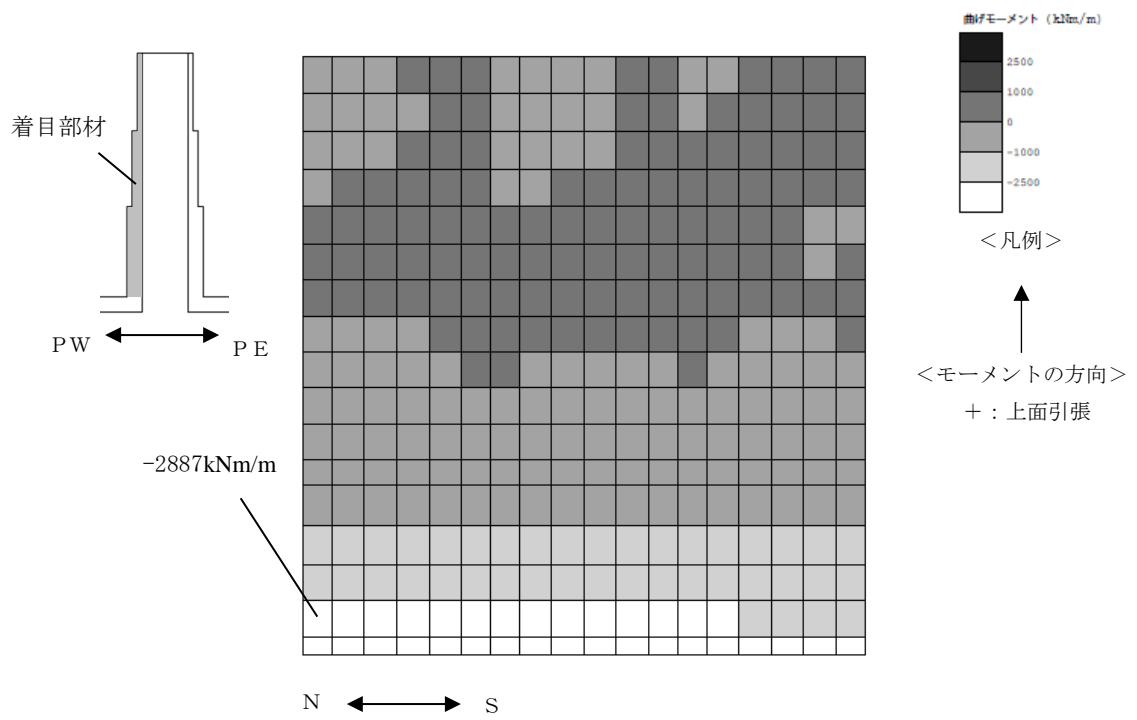
表 6-5 せん断力に対する照査結果 (立坑部)

照査時刻	解析 ケース	地震動	評価位置	照査用せん断力 V_d^{*1} (kN)	せん断耐力 V_{yd} (kN)	照査値 V_d/V_{yd}
時刻 1	①	Ss-1-+	部材厚 1.0m	2083 ^{*2}	2185 ^{*2*3}	0.96 ^{*2}
時刻 2	①	Ss-1++	部材厚 0.4m	370	424 ^{*3}	0.88
時刻 3	①	Ss-7EW Ss-7NS	部材厚 1.0m	2044 ^{*2}	2197 ^{*2*3}	0.94 ^{*2}
時刻 4	①	Ss-5EW Ss-5NS	部材厚 1.0m	2308 ^{*2}	2362 ^{*2*3}	0.98 ^{*2}
時刻 4'	③	Ss-5EW Ss-5NS	部材厚 1.0m	2629 ^{*2}	2691 ^{*2*3}	0.98 ^{*2}

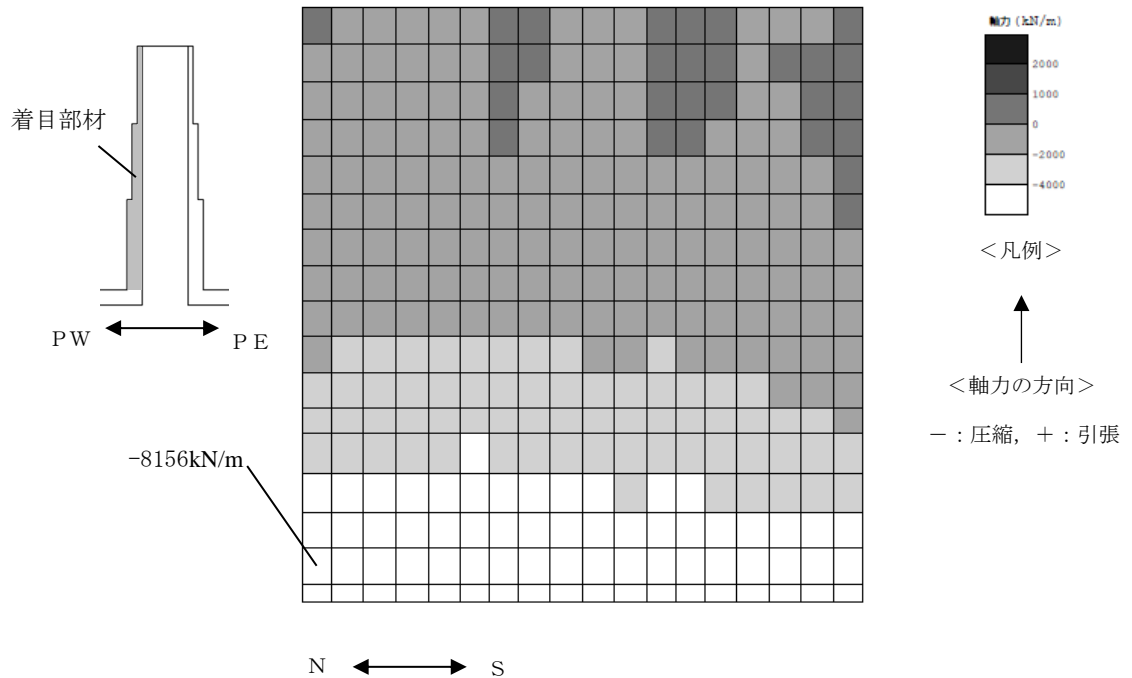
注記*1 : 照査用せん断力 $V_d = \text{発生せん断力 } V \times \text{構造解析係数 } \gamma_a$

*2 : 材料非線形解析を用いた方法による数値

*3 : 部材係数 γ_{b2} を考慮



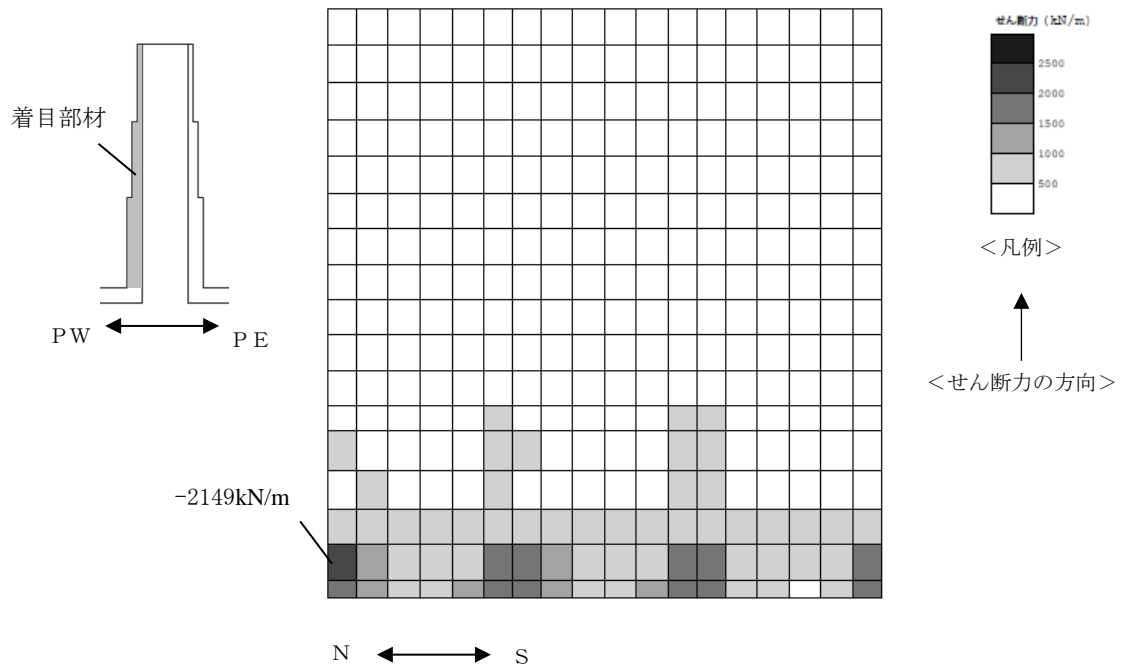
(a) 曲げモーメント分布



(b) 軸力分布

図 6-3 セン断力照査が最も厳しくなるケースでの断面力分布図 (立坑部) (1/2)

(部材 : 側壁西側, 解析ケース①, $S_s=5$, $t=60.42s$)



(c) せん断力分布

図 6-3 せん断力照査が最も厳しくなるケースでの断面力分布図 (立坑部) (2/2)
 (立坑部, 部材: 側壁西側, 解析ケース①, Ss-5, t=60.42s)

表 6-6 面内せん断力に対する照査結果 (立坑部)

評価位置	解析 ケース	地震動	照査用面内 せん断ひずみ* γ_d	限界せん断 ひずみ γ_A	照査値 γ_d / γ_A
立坑部	②	Ss-1--	4.14×10^{-4}	2.0×10^{-3}	0.21

注記* : 照査用面内せん断ひずみ γ_d = 発生面内せん断ひずみ \times 構造解析係数 γ_a