

柏崎刈羽原子力発電所5号機

新潟県中越沖地震後の設備健全性に係る
屋外重要土木構造物の点検・評価状況について

平成21年10月13日



東京電力

本日も報告する内容

1 . 5号機屋外重要土木構造物の概要

2 . 点検

3 . 耐震健全性評価

4 . 総合評価

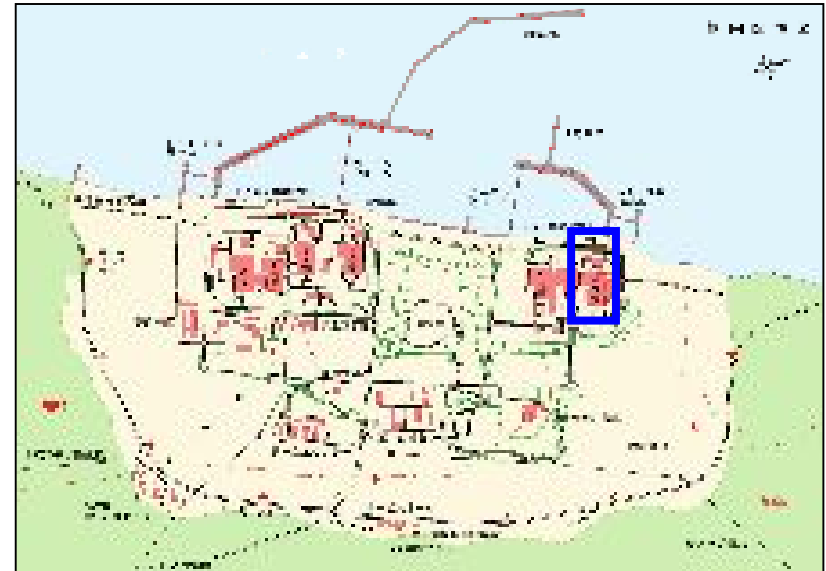
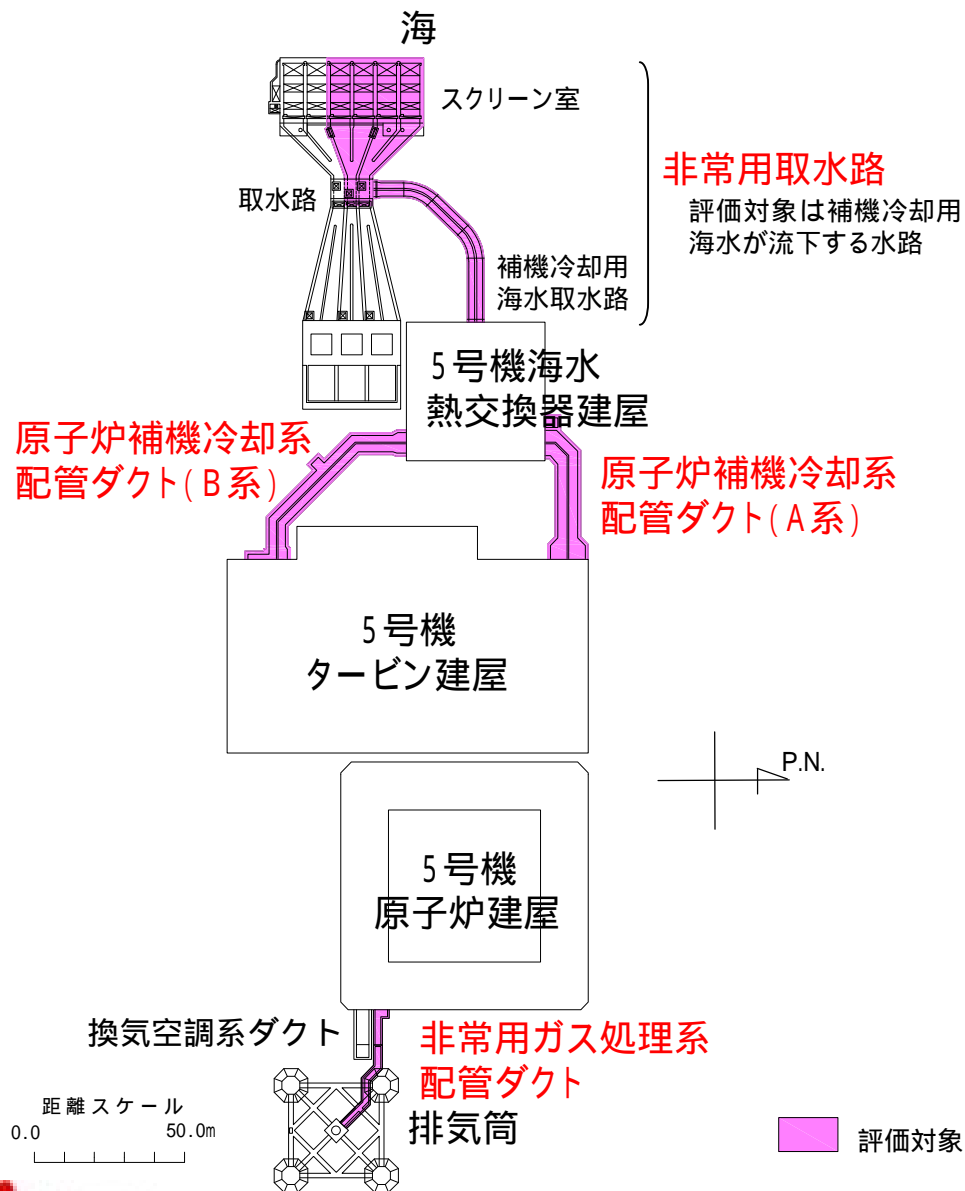
5 . (参考) 「解放基盤波」を用いた評価

6 . (参考) 非常用取水路の軸方向の評価

1.1 対象設備（1）

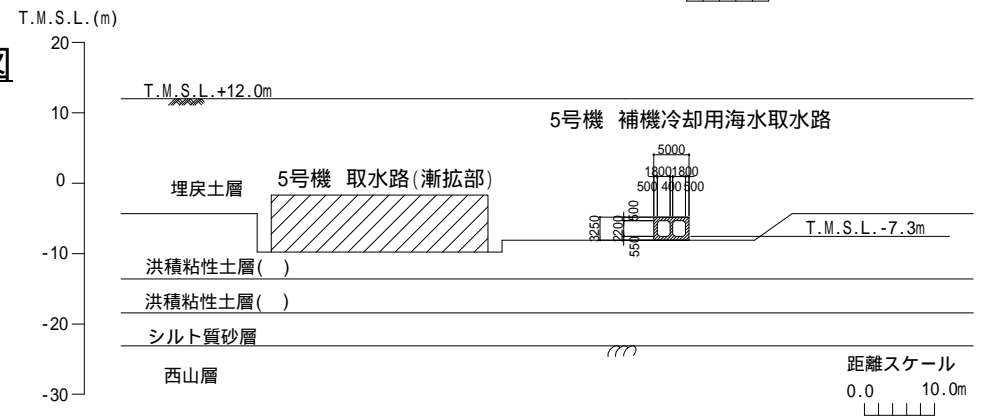
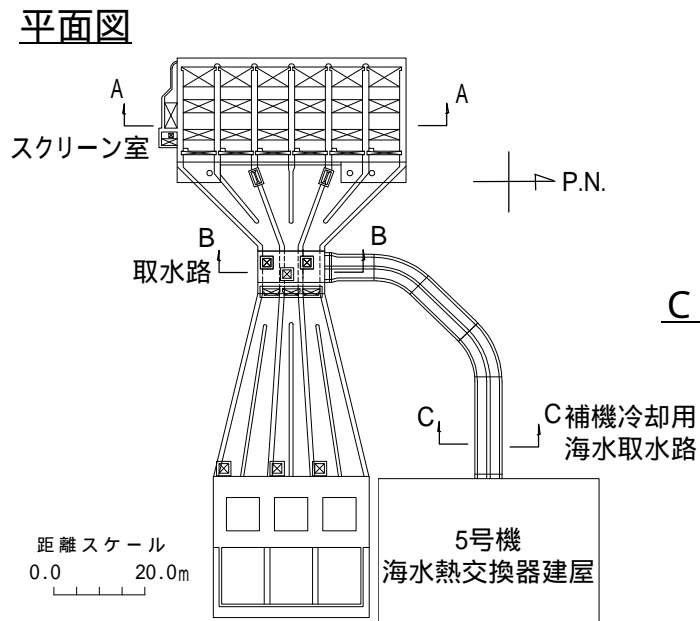
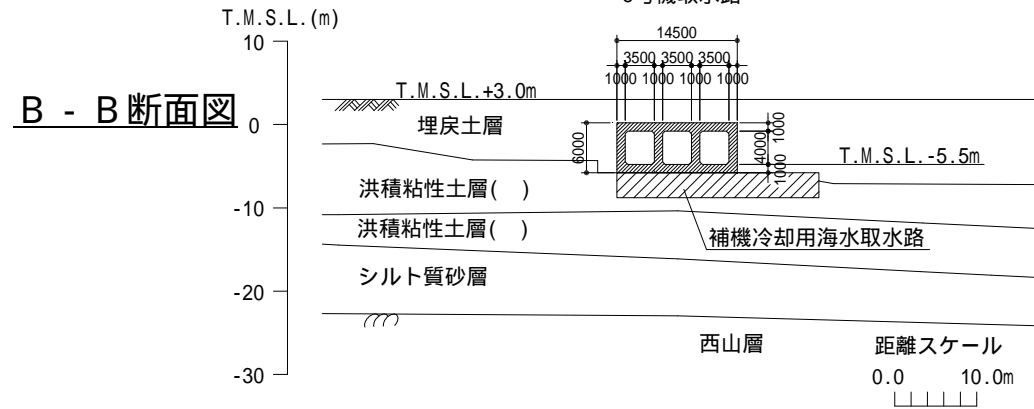
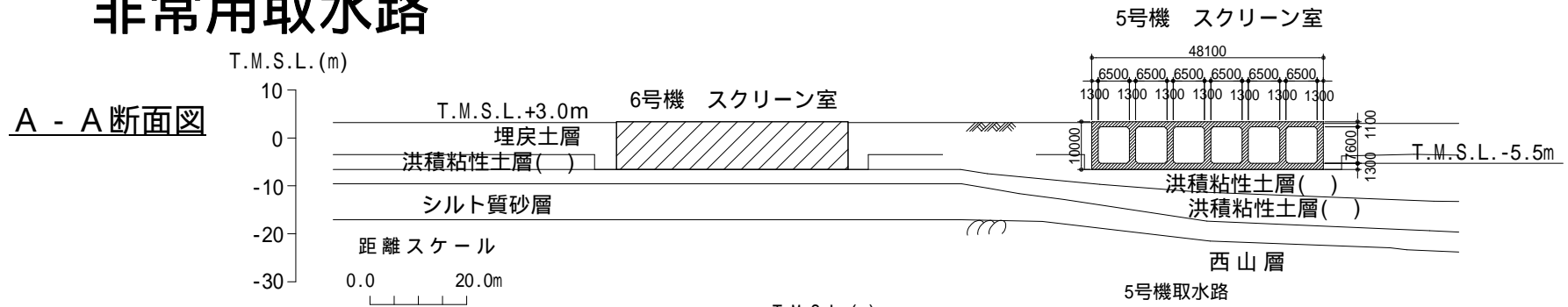
設備名称	選定理由	内在物	備考
非常用取水路	安全上の重要度分類クラス1に該当	・ 補機冷却用海水	-
原子炉補機冷却系配管ダクト	耐震上重要な機器の間接支持構造物に該当	・ 原子炉補機冷却水系配管 ・ 高圧炉心スプレイディージェル補機冷却水系配管	配管および配管サポートの健全性評価は別途実施
非常用ガス処理系配管ダクト		・ 非常用ガス処理系配管	

1.1 対象設備(2)



1.2 屋外重要土木構造物の概要 (1)

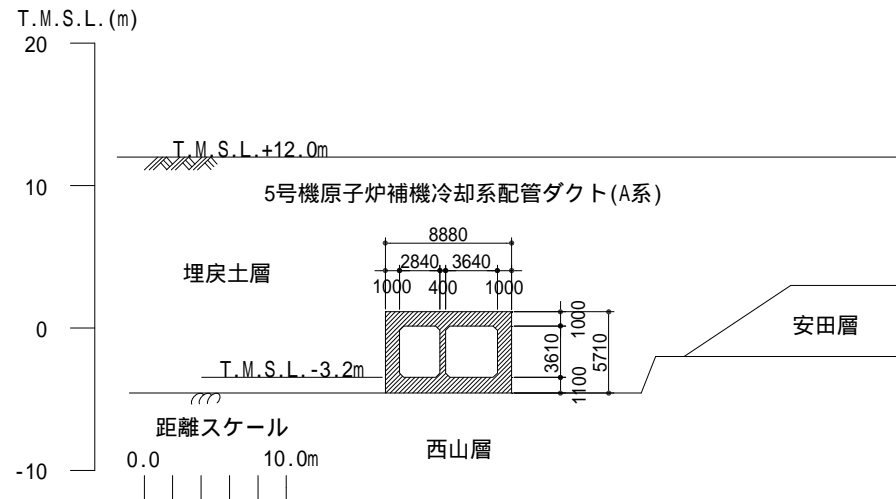
非常用取水路



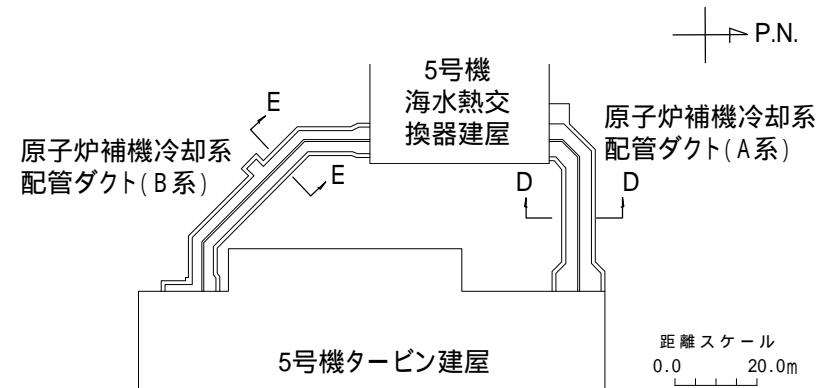
1.2 屋外重要土木構造物の概要 (2)

原子炉補機冷却系配管ダクト

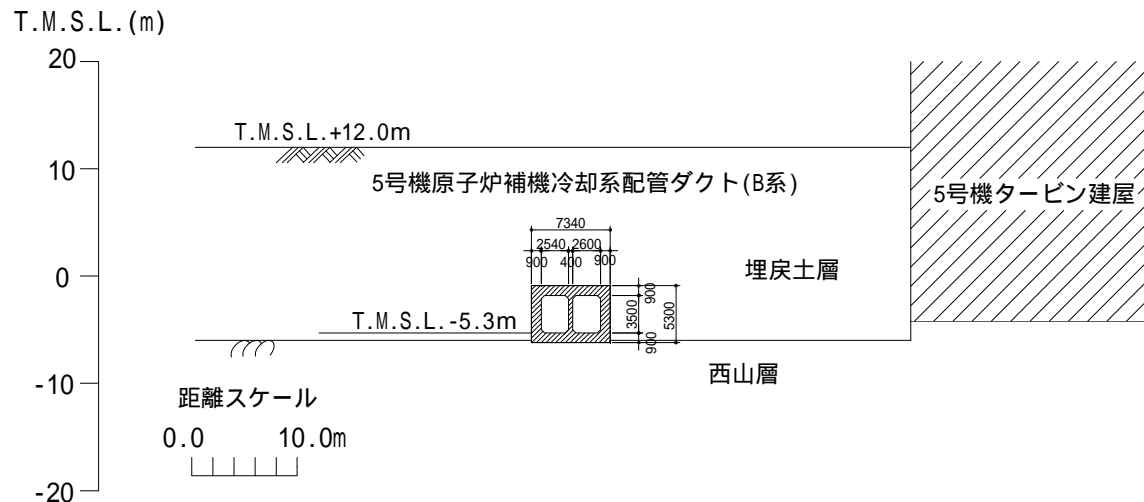
D - D断面図



平面図



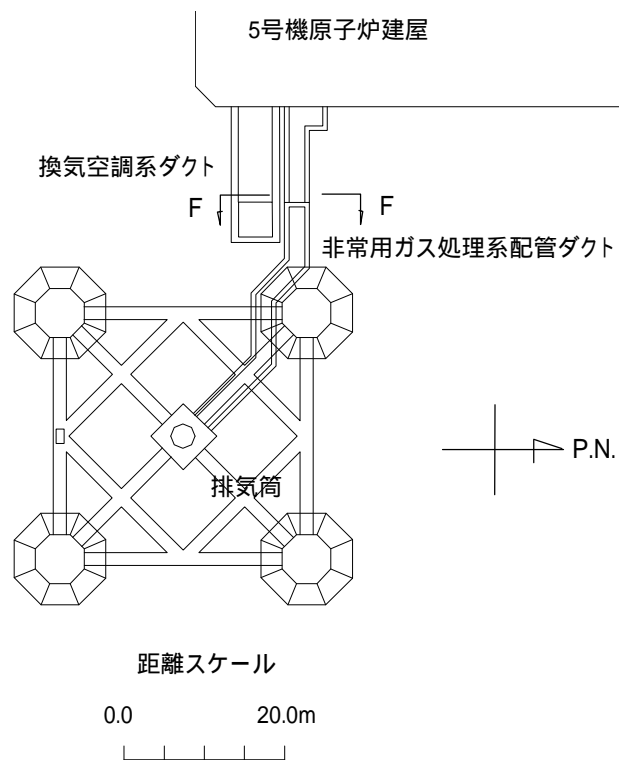
E - E断面図



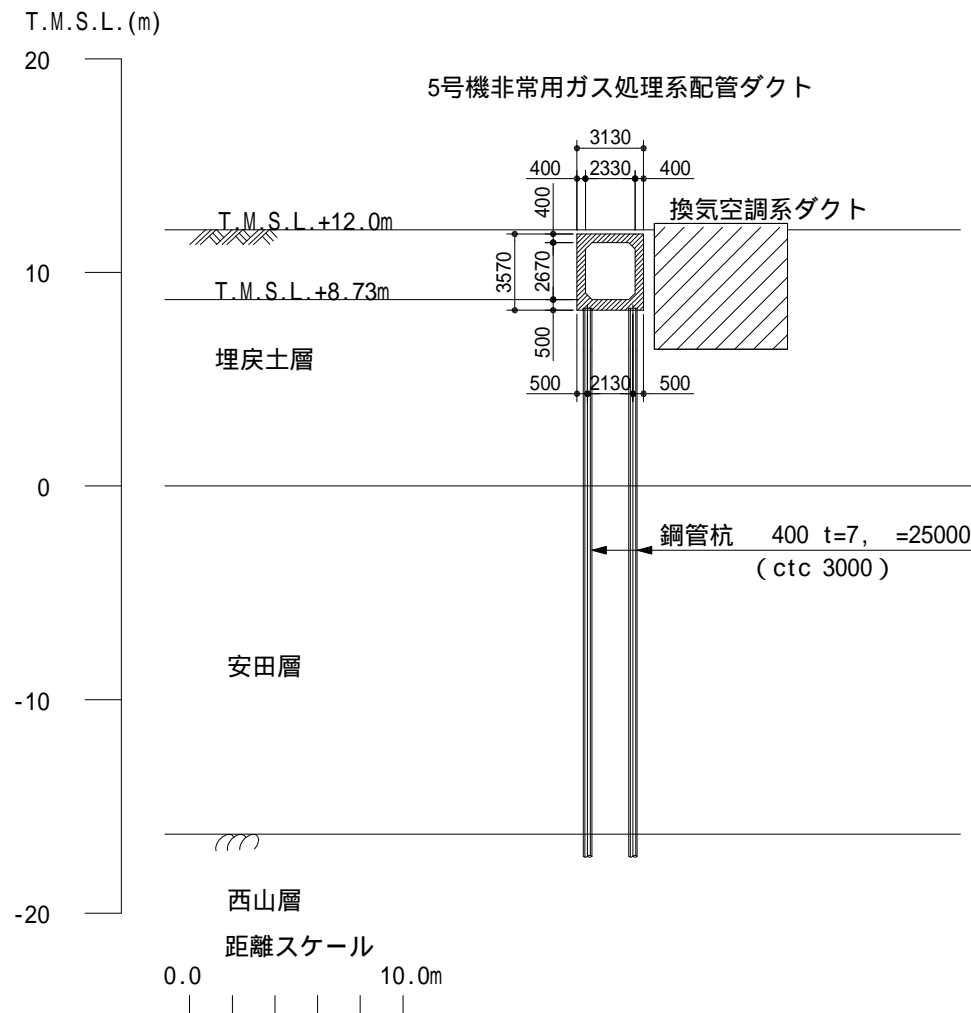
1.2 屋外重要土木構造物の概要 (3)

非常用ガス処理系配管ダクト

平面図



F - F 断面図



本日も報告する内容

1 . 5号機屋外重要土木構造物の概要

2 . 点検

3 . 耐震健全性評価

4 . 総合評価

5 . (参考) 「解放基盤波」を用いた評価

6 . (参考) 非常用取水路の軸方向の評価

2.1 点検方法（1）

判定基準

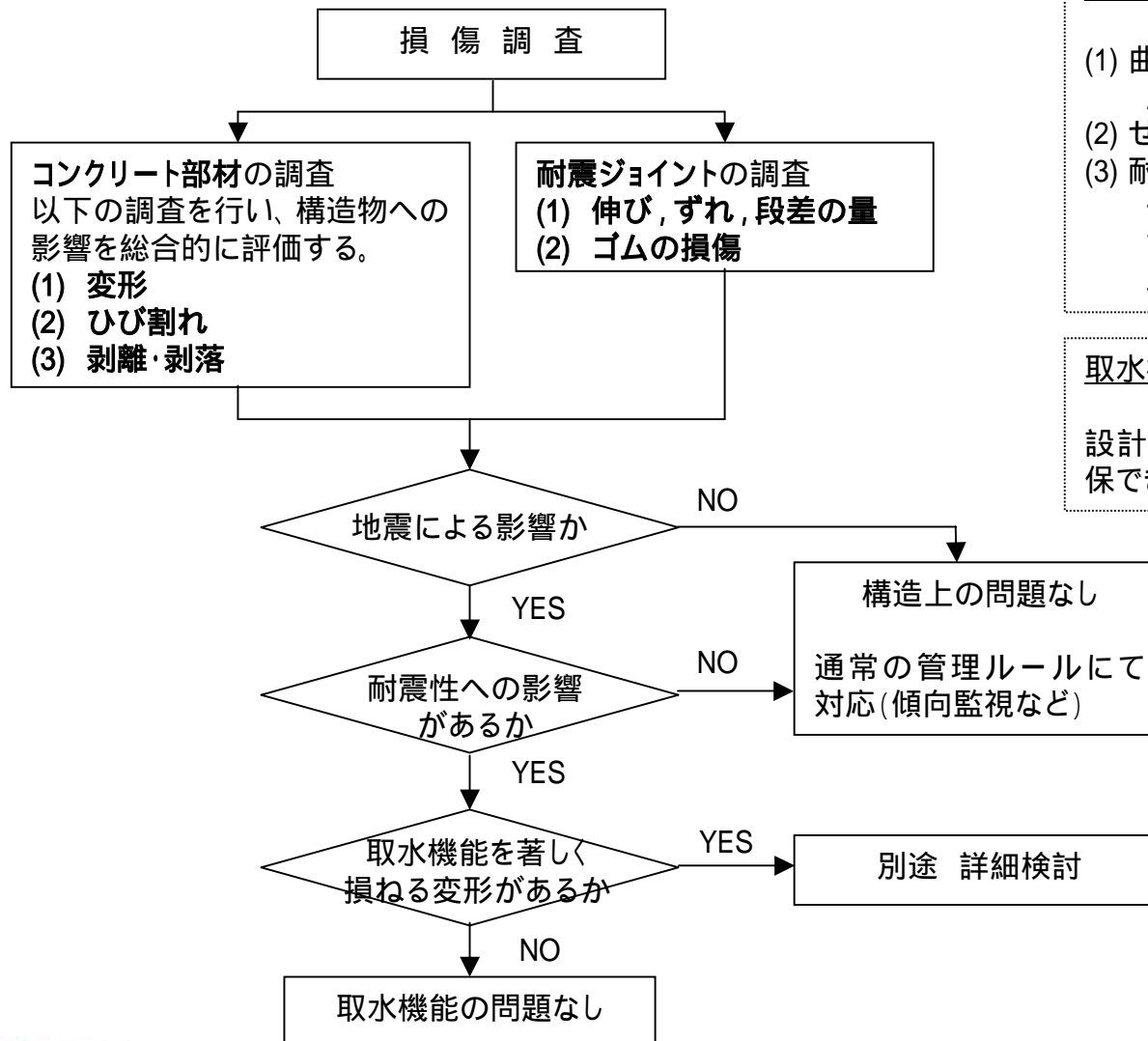
非常用取水路	原子炉補機冷却系配管ダクト 非常用ガス処理系配管ダクト
取水機能に影響を及ぼす破損等がないこと	配管支持機能に影響を及ぼす破損等がないこと

点検項目：目視点検を主体とした点検を実施

非常用取水路	原子炉補機冷却系配管ダクト 非常用ガス処理系配管ダクト
(1) コンクリート部材の調査 変形 ひび割れ 剥離・剥落 (2) 耐震ジョイントの調査 変位量（伸び、ずれ、段差） ゴムの損傷	(1) コンクリート部材の調査 変形 ひび割れ 剥離・剥落

2.1 点検方法(2)

点検のフロー(非常用取水路)



耐震性への影響の判断基準

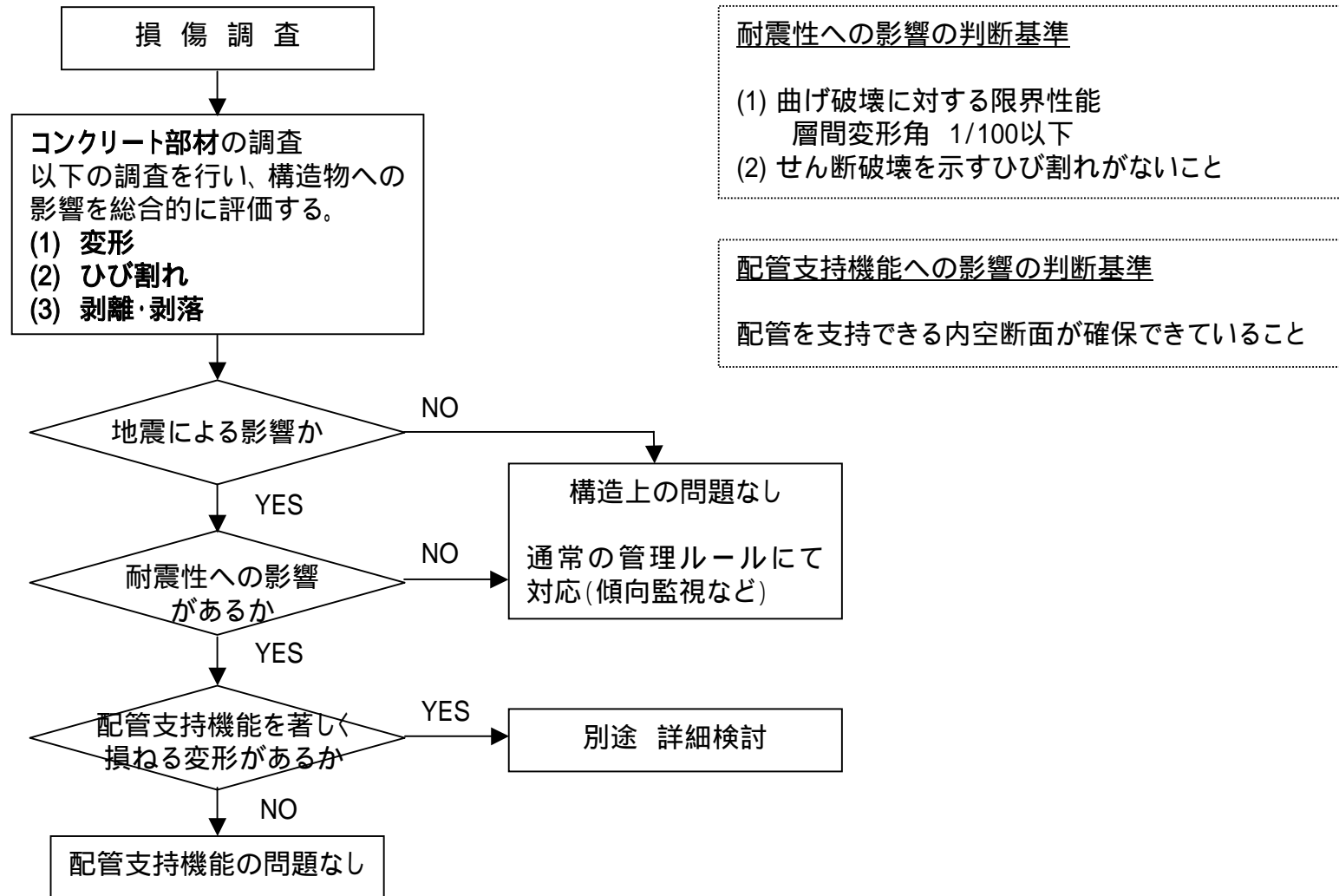
- (1) 曲げ破壊に対する限界性能
層間変形角 1/100以下
- (2) せん断破壊を示すひび割れがないこと
- (3) 耐震ジョイントの限界性能(ゴムの破断)
伸び 300mm以下
ずれ 400mm以下
段差 400mm以下

取水機能への影響の判断基準

設計上必要な取水量を流下させる通水断面が確保できていること

2.1 点検方法(3)

点検のフロー(配管ダクト)



2.2 非常用取水路 点検結果

確認状況

対象	項目	状況
コンクリート部材	変形	・ 層間変形角1/100を上回る残留変形は認められない
	ひび割れ	・ 補機冷却用海水取水路の底版・側壁・隔壁・頂版 ：最大幅0.5mm
	剥離・剥落	・ スクリーン室地上部：最大面積0.36m ²
耐震ジョイント	変位量	・ 最大伸び45mm、最大段差40mm、 最大ずれ40mm
	ゴムの損傷	・ 認められない

取水機能に影響を及ぼす損傷がないことを確認した。

(参考) 指摘事項に対する回答 (1)

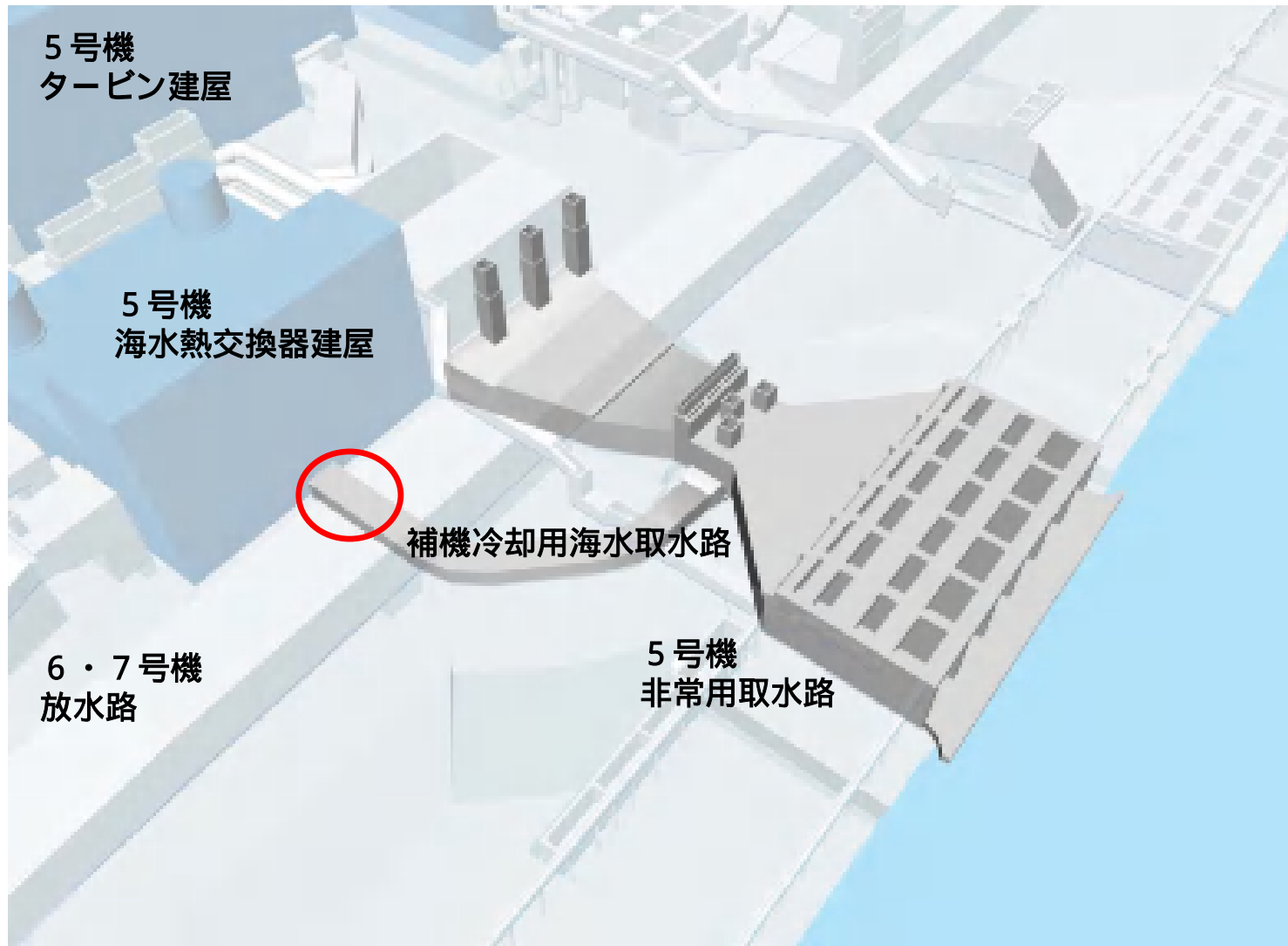
屋外重要土木構造物に対する立入検査・現地調査 (5号機第1回、平成20年12月13日) における指摘事項

構造上問題となる顕著な損傷は認められなかったが、非常用取水路のうち7号および6号の放水路横断部に、最大ひび割れ幅0.5mmの軸直交方向のひび割れが認められたことから、**ひび割れの要因について検討**すること。

(構造W27-1)

(参考) 指摘事項に対する回答 (2)

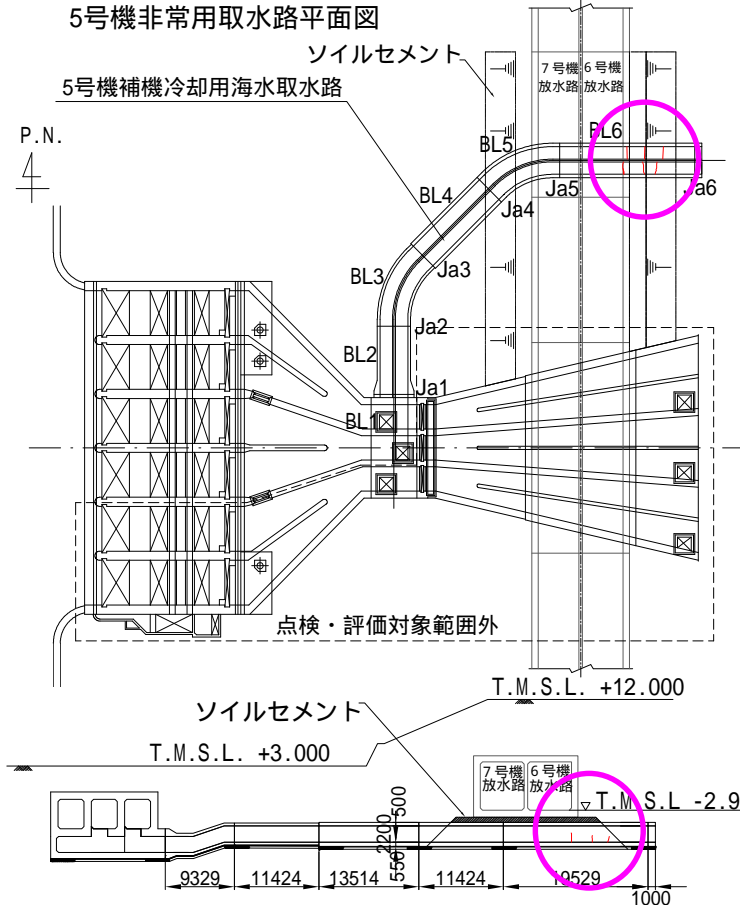
ひび割れ発生位置



(参考) 指摘事項に対する回答 (3)

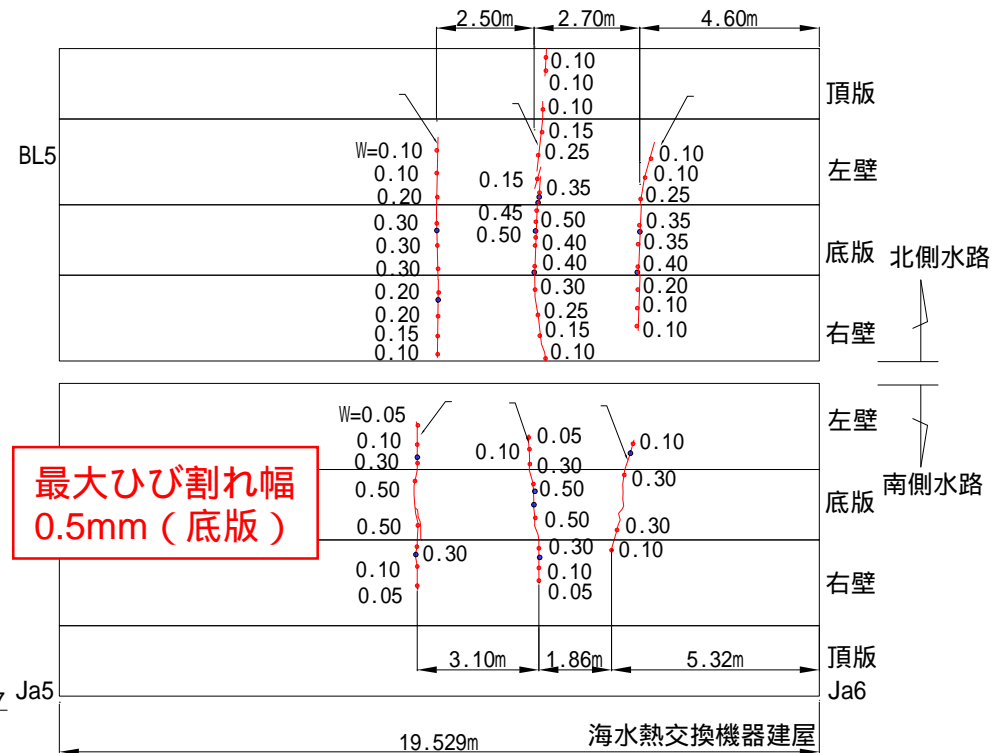
補機冷却用海水取水路のひび割れ

5号機非常用取水路平面図



補機冷却用海水取水路 (北側, 南側水路)

B L 6 損傷展開図

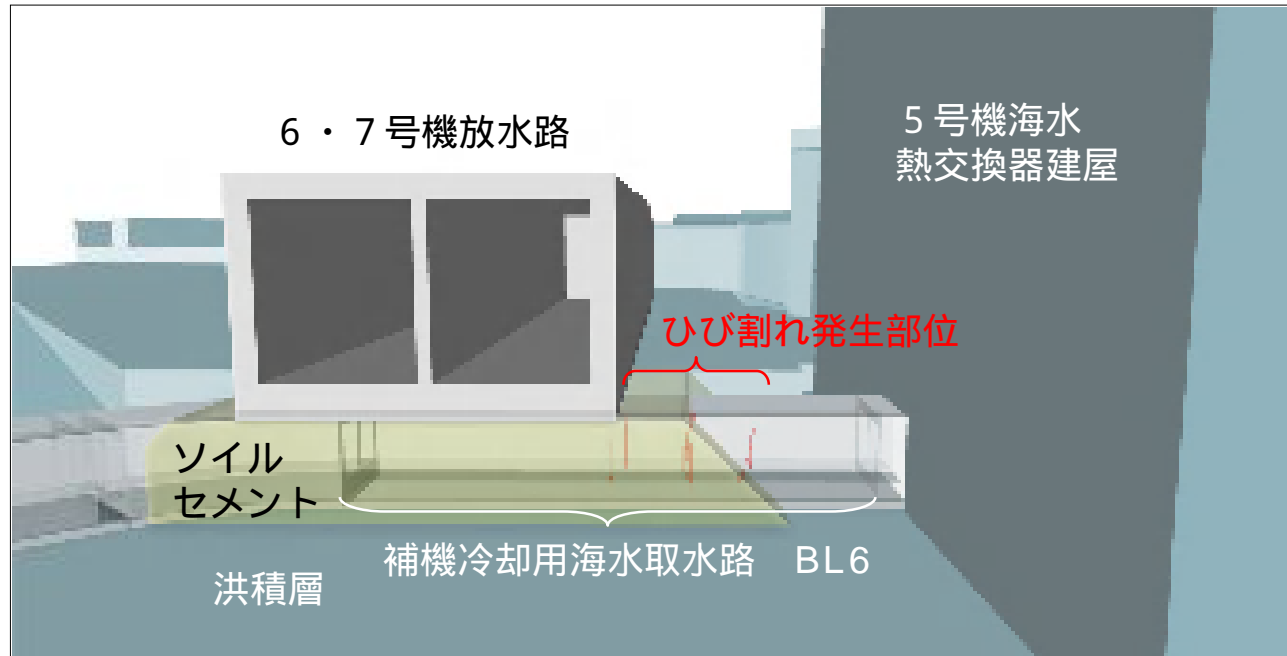


最大ひび割れ幅
0.5mm (底版)

局所的な損傷が認められるものの、設計上必要な取水量を流下させる通水断面が確保できていることから、取水機能に影響を及ぼすものではないことを確認した。

(参考) 指摘事項に対する回答 (4)

補機冷却用海水取水路の損傷原因

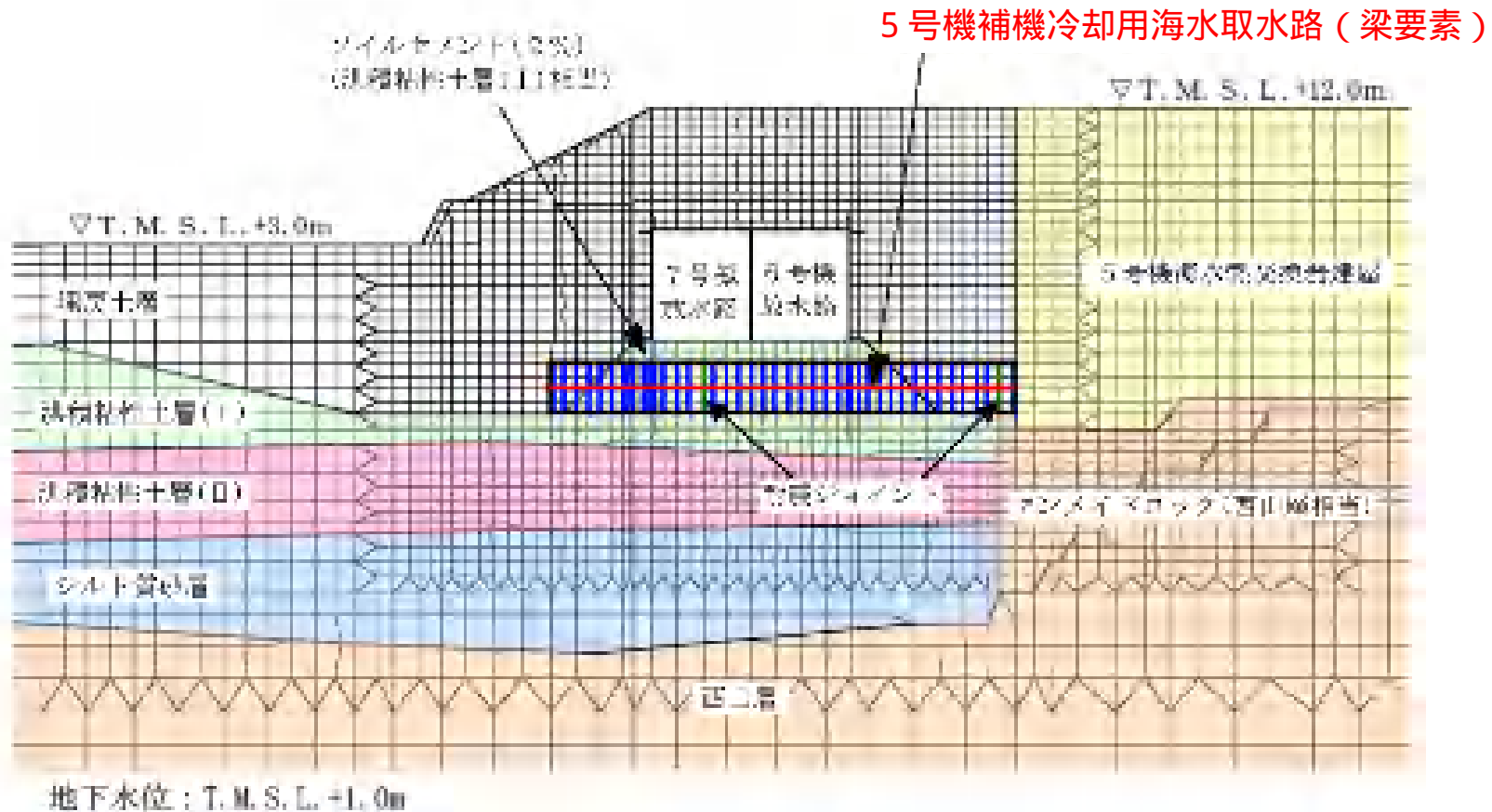


ひび割れ発生パターン（軸直交方向のひび割れであり、底版でひび割れ幅が大きく頂版に向けてひび割れ幅が小さくなること）から、**地震時に、長手方向にみて下方にたわむような曲げが作用**して発生したものと推定される。

ひび割れ発生箇所の上部には、ソイルセメントを介して**6・7号機放水路**が直交して配置されており、これによる**地震時荷重が影響を与えた可能性**があることから、これらを考慮した解析を実施し、ひび割れ発生原因について検討した。

(参考) 指摘事項に対する回答 (5)

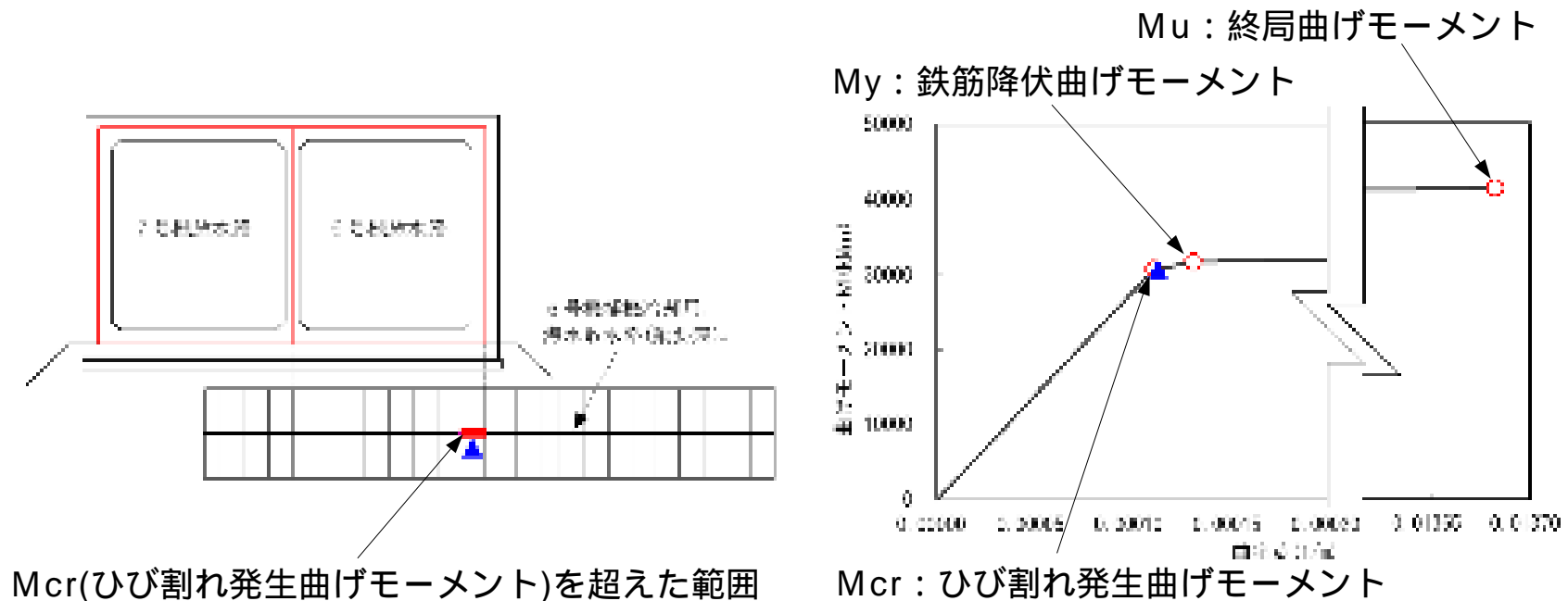
FEMによる補機冷却用海水取水路の損傷原因の推定



6・7号機放水路1ブロック分の奥行き(21m)を等価な剛性に換算してモデル化

(参考) 指摘事項に対する回答 (6)

FEMによる補機冷却用海水取水路の損傷原因の推定



6・7号機放水路右側壁の下部付近において、5号機補機冷却用海水取水路の底版側にひび割れ発生曲げモーメントMcrを超える曲げモーメントが発生している。

2.3 配管ダクト 点検結果

原子炉補機冷却系配管ダクト 確認状況

対象	項目	状況
コンクリート部材	変形	・層間変形角1/100を上回る残留変形は認められない
	ひび割れ	・認められない
	剥離・剥落	・側壁：最大面積0.14m ²

非常用ガス処理系配管ダクト 確認状況

対象	項目	状況
コンクリート部材	変形	・層間変形角1/100を上回る残留変形は認められない
	ひび割れ	・頂版（ハンチ端部）：最大幅0.1mm
	剥離・剥落	・認められない

配管支持機能に影響を及ぼす損傷がないことを確認した。

2.4 まとめ

点検結果のまとめ

非常用取水路の一部に局所的な損傷は認められたものの、非常用取水路、原子炉補機冷却系配管ダクトおよび非常用ガス処理系配管ダクトの各部位において要求性能を損なうような事象は確認されなかった。

第三者機関による確認

屋外重要土木構造物の点検の計画および点検結果の妥当性について、第三者機関の確認を受けた。

第三者機関：（社）土木学会

本日も報告する内容

1 . 5号機屋外重要土木構造物の概要

2 . 点検

3 . 耐震健全性評価

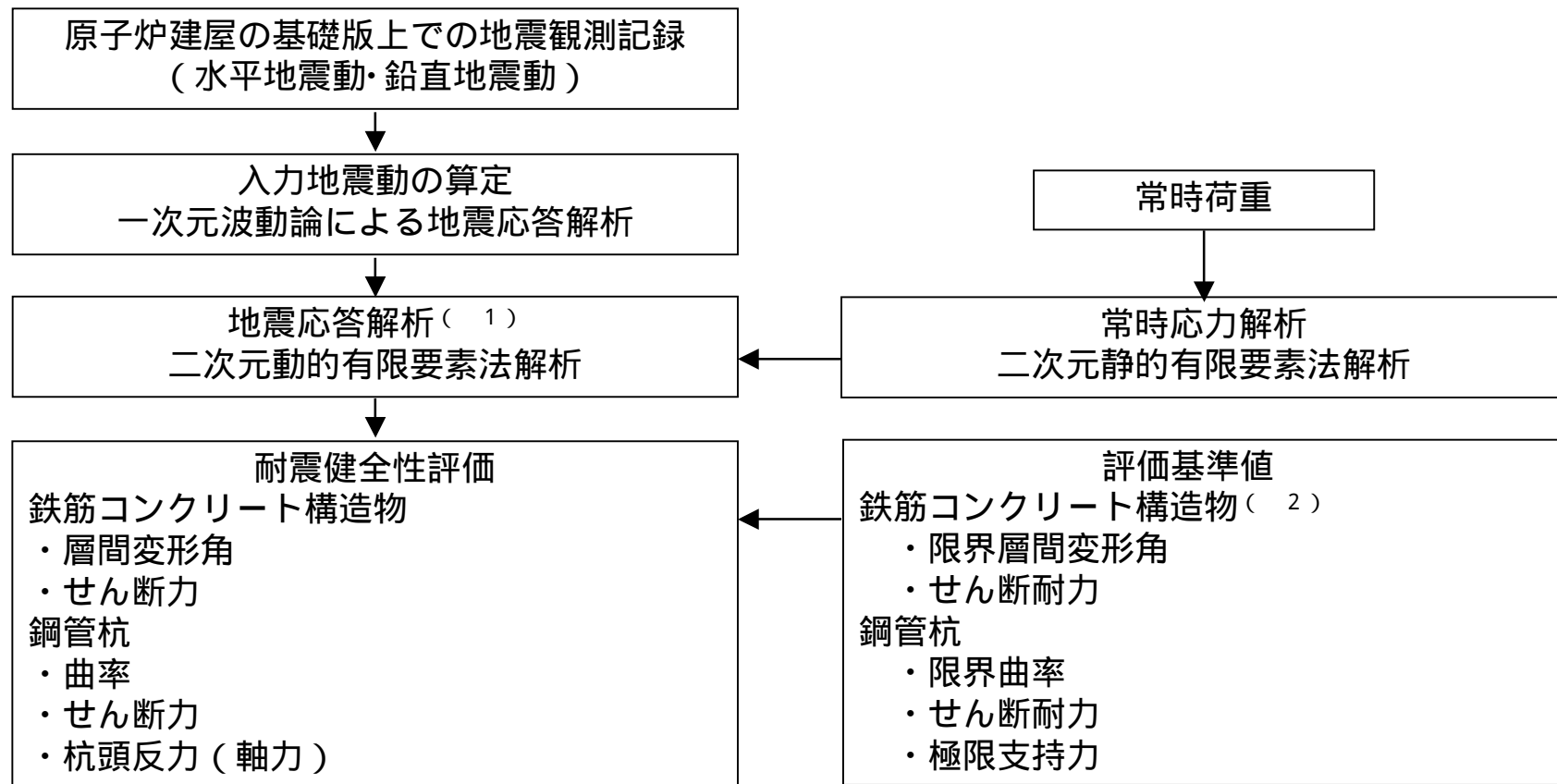
4 . 総合評価

5 . (参考) 「解放基盤波」を用いた評価

6 . (参考) 非常用取水路の軸方向の評価

3.1 耐震健全性評価の手順

屋外重要土木構造物の場合には地震観測を行っていないことから、耐震健全性評価にあたっては、原子炉建屋の基礎版上での地震観測記録から地盤 - 構造物連成系の解析モデル下端における地震動を算定し、これを入力地震動として、**地盤および鉄筋コンクリート部材の非線形性を考慮した地盤 - 構造物連成系の時刻歴地震応答解析**（¹）を実施した。



(²) 「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」(土木学会原子力土木委員会、2005年6月)による

耐震健全性評価フロー

3.1 耐震健全性評価の手順

鋼管杭の評価基準値

乾式キャスク貯蔵建屋基礎構造の設計に関する技術指針
JEAG4616-2003，日本電気協会原子力規格委員会，2003年9月

限界曲率：局部座屈が発生する縁ひずみ $\max=0.22t/r$ に対応する曲率
であり，軸力 N の影響を考慮して算定

$$\phi_u(N) = \varepsilon_{\max} / [r \cdot \{1 + \sin(\pi N / 2N_y)\}]$$

せん断耐力：鋼管杭を線形として評価し，鋼材の短期許容せん断応力度
 f_s に基づいて算定

$$Q_u = A_e \cdot f_s / \kappa$$

道路橋示方書・同解説 下部構造編，日本道路協会，平成14年3月

極限支持力：杭先端の極限支持力と最大周面摩擦力の合計として算定

$$R_u = q_d A + U \sum L_i f_i$$

3.2 解析用物性値（1）

コンクリートおよび鉄筋の材料定数は、構造物の現実的な地震時挙動を適切に評価するために**実強度**を用いる。鋼管杭の材料定数は、設計時の値を用いる。

材料物性値（鉄筋コンクリート）

解析対象断面	コンクリート				鉄筋 SD345相当（SD35）		
	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数* ¹⁾ (kN/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量* ²⁾ (kN/m ³)	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比
非常用取水路	48.0	32.6	0.2	24	390	200	0.3
原子炉補機冷却系配管ダクト 非常用ガス処理系配管ダクト	46.0	32.2					

*1) 「コンクリート標準示方書（設計編）、土木学会、2007」に示された圧縮強度とヤング係数の関係を用いて算定

*2) 鉄筋コンクリートとしての単位体積重量

材料物性値（鋼管杭）

解析対象断面	鋼管杭 SKK400相当（SKK41）			
	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
非常用ガス処理系配管ダクト	235	200	0.3	77

3.2 解析用物性値（2）

地盤物性値は地盤調査等の結果をもとに設定された設計時の値を用いる。

地盤物性値（非常用取水路）

地層区分	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	ポアソン比	初期せん断弾性係数 G_0 (kN/m ²)	せん断弾性係数G、 減衰定数h
埋戻土層	19.6 (18.6) ^{*1)}	0.33	$1980 \times \nu^{0.667}$ ^{*2)}	ひずみ依存性を考慮
洪積粘性土層（ ）	17.7	0.49	9.90×10^4	
洪積粘性土層（ ）	17.7	0.48	1.41×10^5	
シルト質砂層	18.1	0.48	1.95×10^5	
西山層	16.7	0.45	4.09×10^5	

地盤物性値（原子炉補機冷却系配管ダクト、非常用ガス処理系配管ダクト）

地層区分	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	ポアソン比	初期せん断弾性係数 G_0 (kN/m ²)	せん断弾性係数G、 減衰定数h
埋戻土層	19.6 (18.6) ^{*1)}	0.33	$1980 \times \nu^{0.667}$ ^{*2)}	ひずみ依存性を考慮
安田層	17.5	0.48	1.72×10^5	
西山層	16.7	0.45	4.09×10^5	

*1) () は湿潤単位体積重量

*2) ν : 有効上載圧 (kN/m²)

3.3 近接構造物（1）

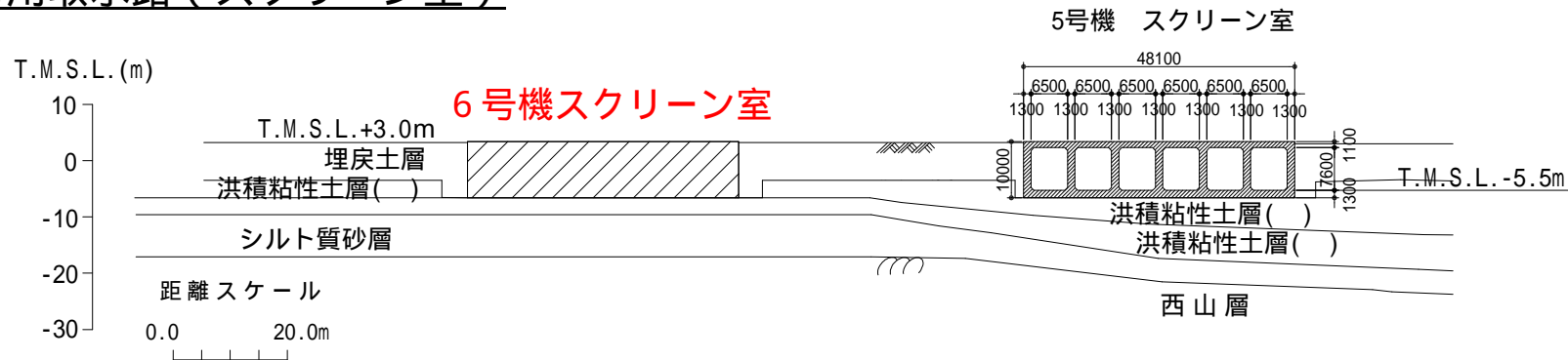
構造物の現実的な地震時挙動を適切に評価するために、対象設備の地震時挙動に影響を及ぼす可能性がある**近接構造物**を解析モデルに反映する。

解析対象断面	考慮した近接構造物
スクリーン室	6号機スクリーン室
取水路	5号機補機冷却用海水取水路
補機冷却用海水取水路	5号機取水路（漸拡部）
原子炉補機冷却系配管ダクト（B系）	5号機タービン建屋
非常用ガス処理系配管ダクト	5号機換気空調系ダクト

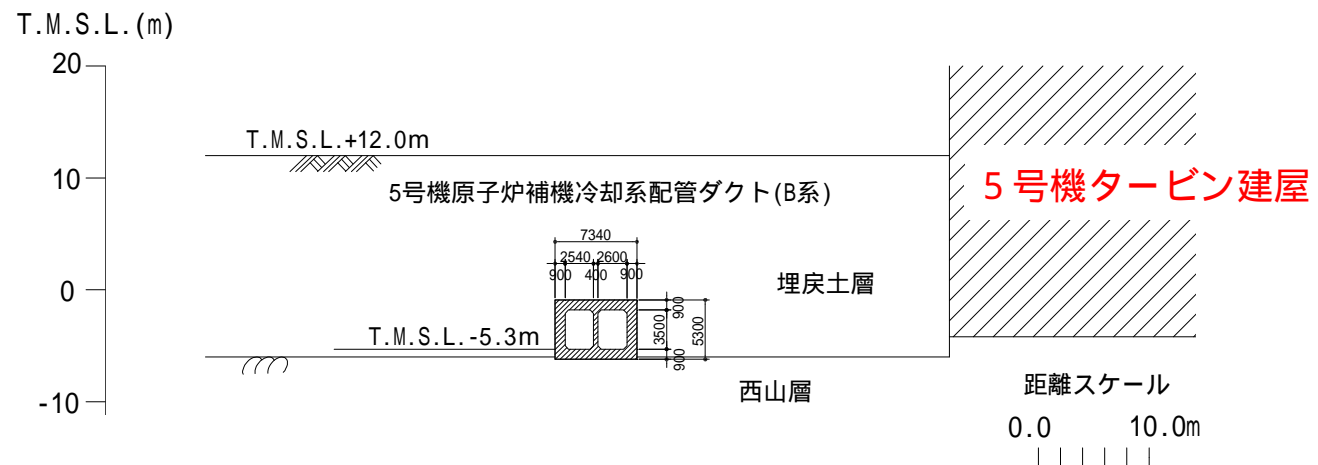
3.3 近接構造物(2)

解析モデルに反映する近接構造物の例

非常用取水路(スクリーン室)

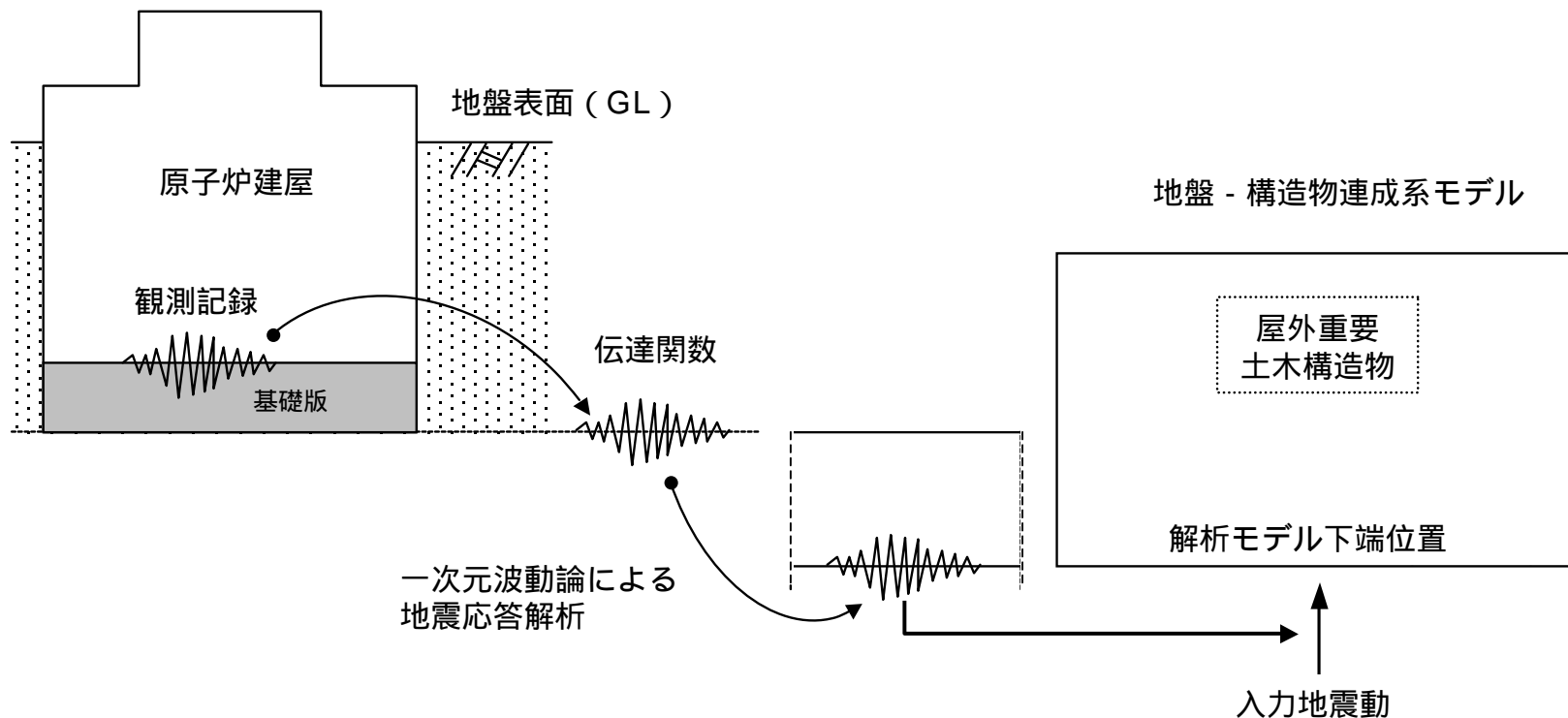


原子炉補機冷却系配管ダクト(B系)



3.4 入力地震動

新潟県中越沖地震における5号機原子炉建屋の基礎版上での観測記録を用いて一次元波動論による地震応答解析を行い、地盤 - 構造物連成系の地震応答解析モデル下端位置で評価したものを入力地震動とする。

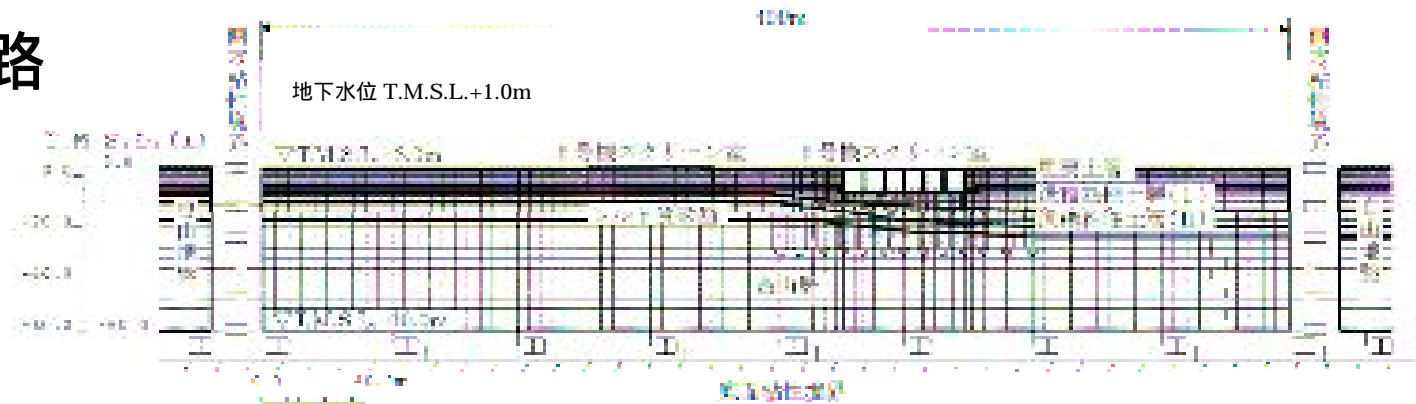


入力地震動の作成方法の概念図

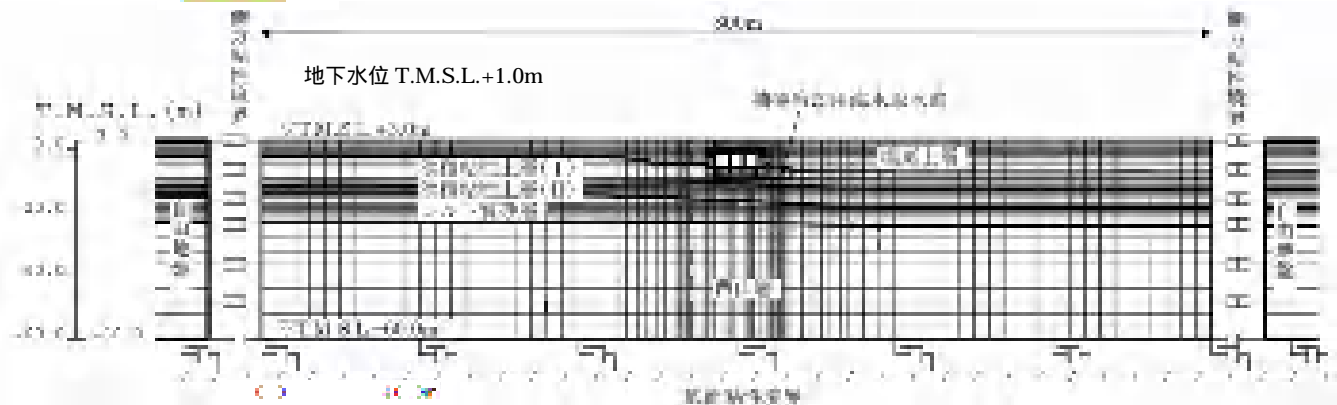
3.5 解析モデル(1)

非常用取水路

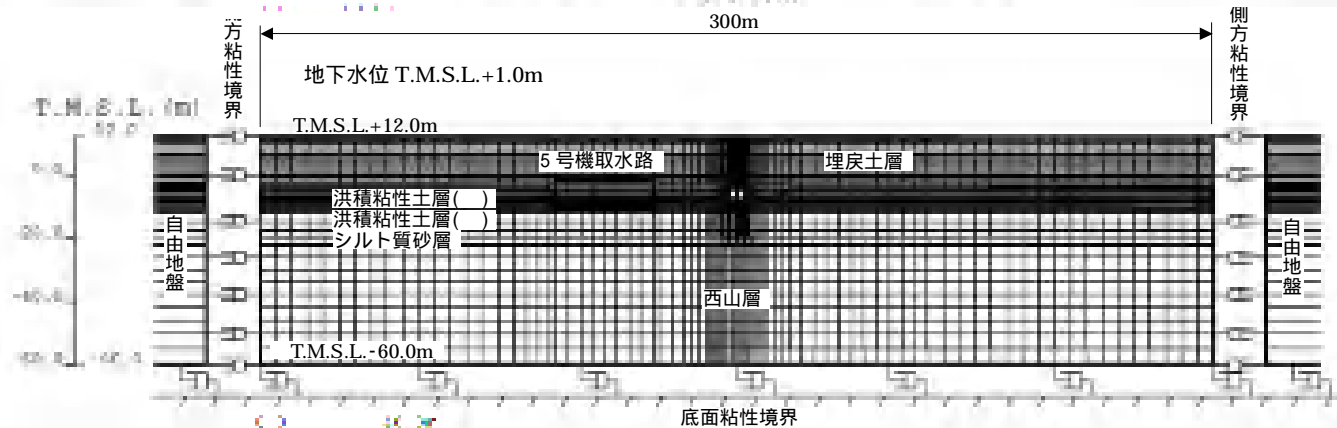
スクリーン室
地震応答解析モデル



取水路
地震応答解析モデル



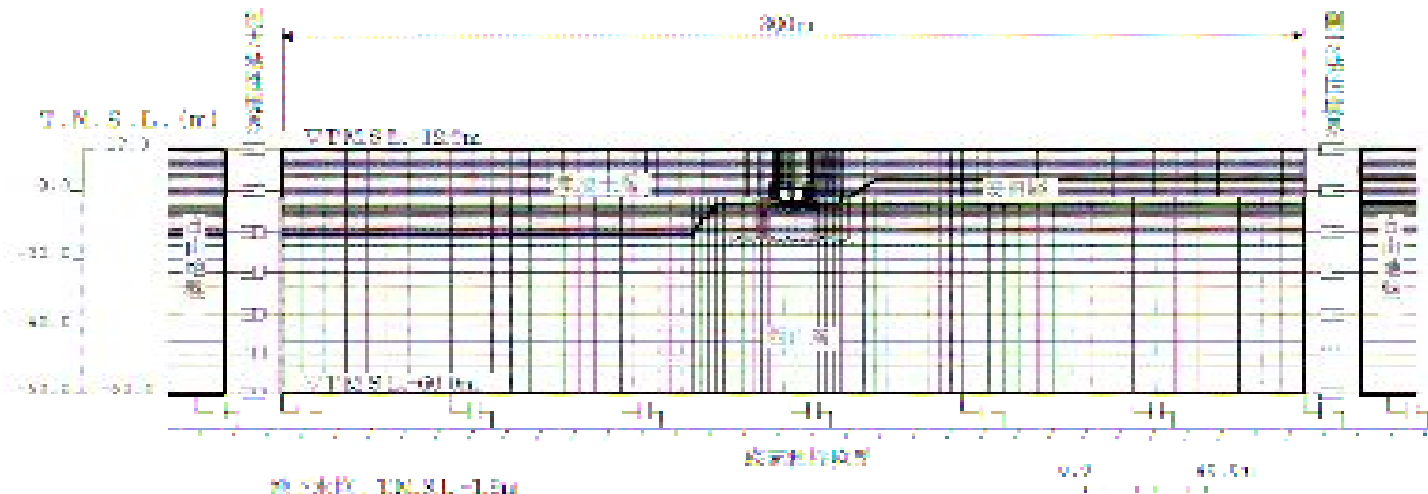
補機冷却用海水取水路
地震応答解析モデル



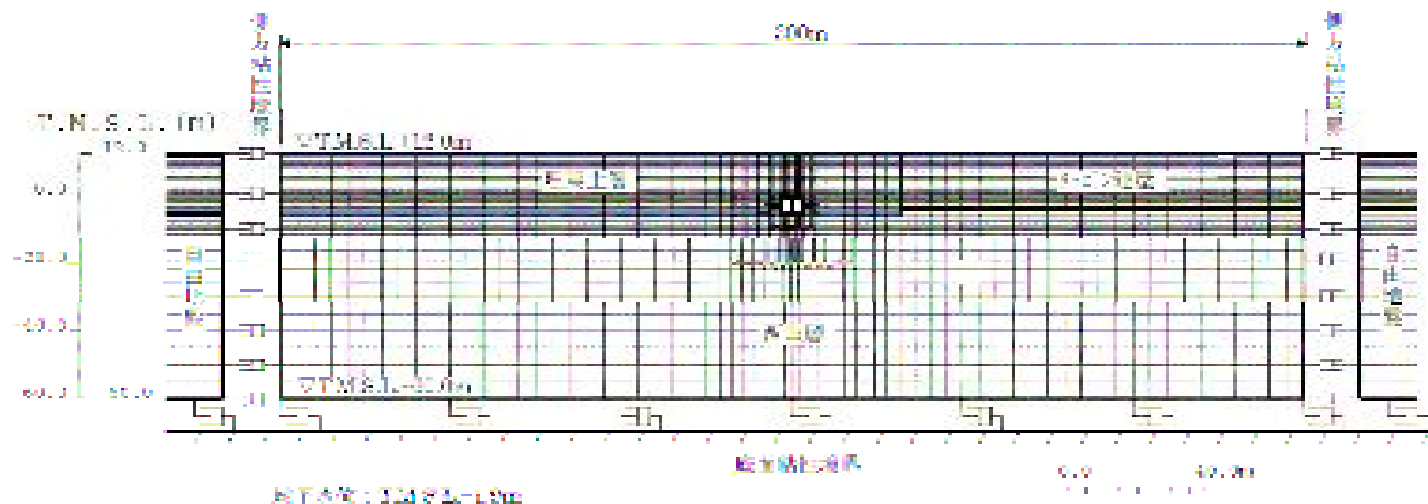
3.5 解析モデル(2)

原子炉補機冷却系配管ダクト

原子炉補機冷却系
配管ダクト(A系)
地震応答解析モデル



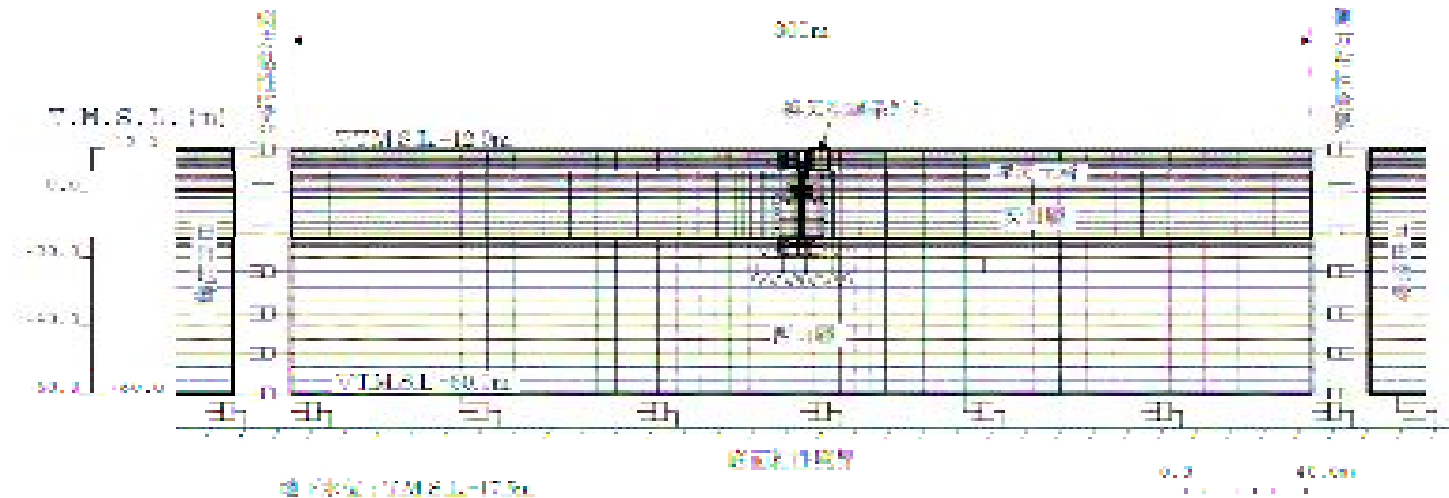
原子炉補機冷却系
配管ダクト(B系)
地震応答解析モデル



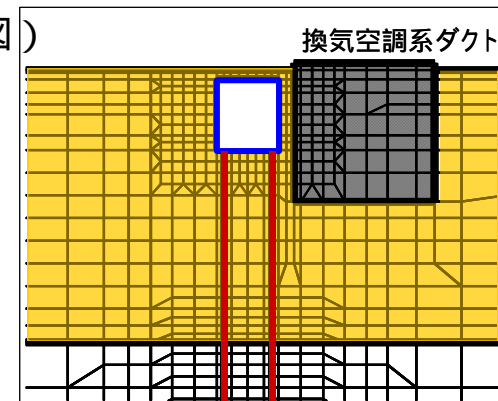
3.5 解析モデル(3)

非常用ガス処理系配管ダクト

非常用ガス処理系
配管ダクト
地震応答解析モデル



(拡大図)



3.6 耐震健全性評価結果（1）

層間変形角による照査結果（鉄筋コンクリート構造物）

解析対象断面	評価位置	照査用応答値 R_d	評価基準値 (限界層間変形角) R_u	R_d/R_u
非常用取水路 (スクリーン室)	頂版～底版	0.0453/100	1/100	0.045
非常用取水路 (取水路)	頂版～底版	0.107/100	1/100	0.11
非常用取水路 (補機冷却用海水取水路)	頂版～底版	0.237/100	1/100	0.24
原子炉補機冷却系 配管ダクト(A系)	頂版～底版	0.133/100	1/100	0.13
原子炉補機冷却系 配管ダクト(B系)	頂版～底版	0.244/100	1/100	0.24
非常用ガス処理系 配管ダクト	頂版～底版	0.146/100	1/100	0.15

3.6 耐震健全性評価結果（2）

せん断力による照査結果（鉄筋コンクリート構造物）

解析対象断面	評価位置	照査用応答値 V_d (kN)	評価基準値 (せん断耐力) V_{yd} (kN)	V_d/V_{yd}
非常用取水路 (スクリーン室)	隔壁	396	1454	0.27
非常用取水路 (取水路)	隔壁	419	1232	0.34
非常用取水路 (補機冷却用海水取水路)	隔壁	288	482	0.60
原子炉補機冷却系 配管ダクト(A系)	側壁	616	1750	0.35
原子炉補機冷却系 配管ダクト(B系)	側壁	574	1376	0.42
非常用ガス処理系 配管ダクト	底版	94	593	0.16

本表には、 V_d/V_{yd} の値が最も大きい評価位置の評価結果のみ表記

3.6 耐震健全性評価結果 (3)

曲率による照査結果 (鋼管杭)

解析対象断面	評価位置	照査用応答値 d (1/m)	評価基準値 (限界曲率) u (1/m)	d/u
非常用ガス処理系 配管ダクト	杭頭部	0.00348	0.0308	0.11
	地中部	0.00306	0.0238	0.13

せん断力による照査結果 (鋼管杭)

解析対象断面	評価位置	照査用応答値 V_d (kN)	評価基準値 (せん断耐力) V_{yd} (kN)	V_d/V_{yd}
非常用ガス処理系 配管ダクト	杭頭部	133	587	0.23
	地中部	206	587	0.35

支持力の評価結果 (鋼管杭)

解析対象断面	評価位置	照査用応答値 N'_d (kN)	評価基準値 (極限支持力) R_u (kN)	N'_d/R_u
非常用ガス処理系 配管ダクト	杭頭部	609	2351	0.24

3.7 まとめ

耐震健全性評価結果のまとめ

評価基準値を満足するとともに裕度を有していることを確認したことから、設備健全性が確保されているものと判断した。

本日も報告する内容

- 1 . 1号機屋外重要土木構造物の概要
- 2 . 点検
- 3 . 耐震健全性評価
- 4 . 総合評価**

-
- 5 . (参考) 「解放基盤波」を用いた評価
 - 6 . (参考) 三次元地震応答解析による原子炉補機冷却系配管ダクトの評価
 - 7 . (参考) 非常用取水路の軸方向の評価

4 . 総合評価

総合評価結果

点検

非常用取水路の一部に局所的な損傷は認められたものの、非常用取水路、原子炉補機冷却系配管ダクトおよび非常用ガス処理系配管ダクトの各部位において要求性能を損なうような事象は確認されなかった。

耐震健全性評価（地震応答解析）

評価基準値を満足するとともに裕度を有していることを確認したことから、設備健全性が確保されているものと判断した。

点検と地震応答解析の両面から評価を行った結果、5号機屋外重要土木構造物についての健全性が確保されているものと評価した。

本日も報告する内容

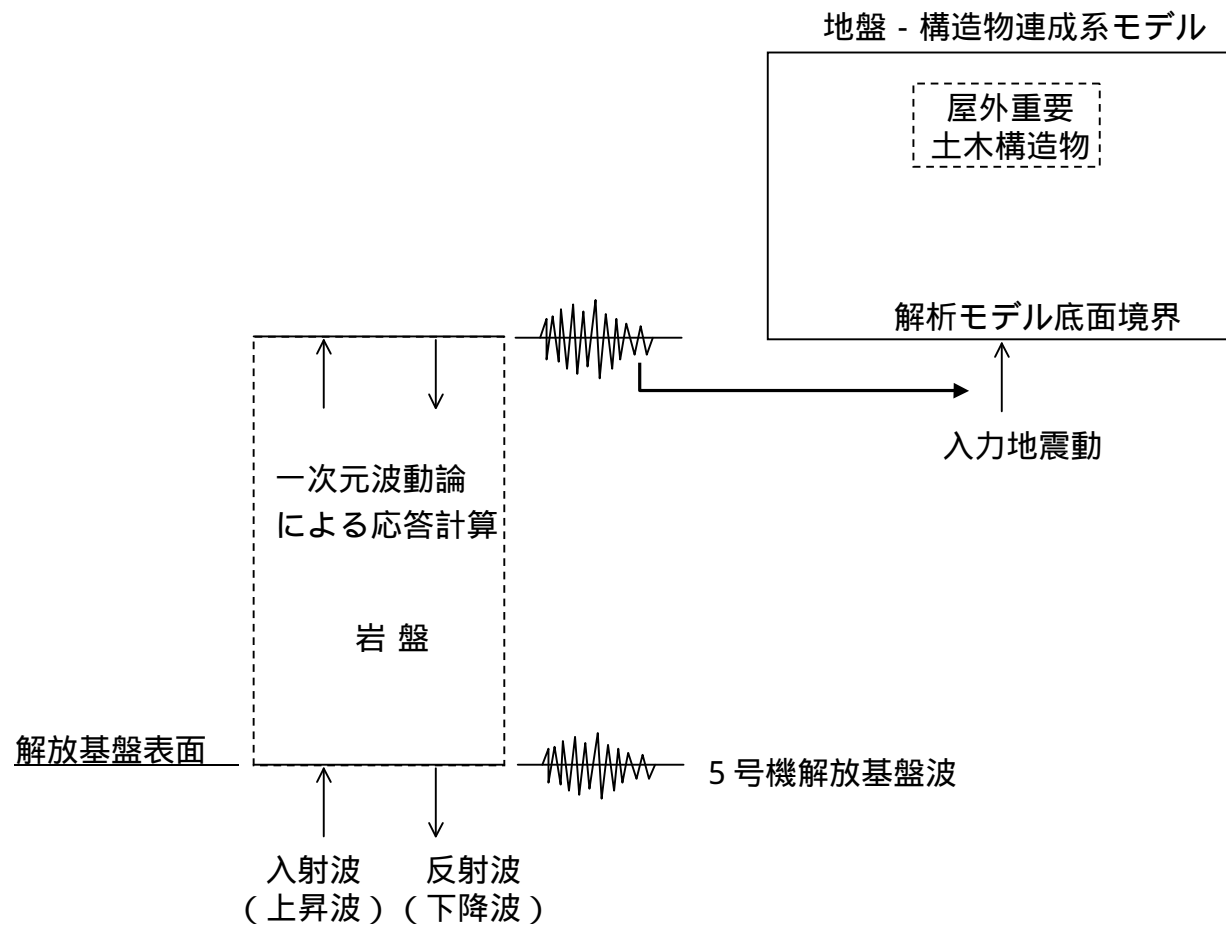
- 1 . 5号機屋外重要土木構造物の概要
- 2 . 点検
- 3 . 耐震健全性評価
- 4 . 総合評価

5 . (参考) 「解放基盤波」を用いた評価

6 . (参考) 非常用取水路の軸方向の評価

5.1 入力地震動

5号機原子炉建屋基礎版上の記録を用いて推定された**解放基盤表面の地震動**（「解放基盤波」）を用いて5号機屋外重要土木構造物の耐震健全性評価を行う。入力地震動以外の検討条件は、「基礎版観測波」による評価と同一である。



入力地震動の作成方法の概念図

5.2 耐震健全性評価結果（1）

層間変形角による照査結果（鉄筋コンクリート構造物）

解析対象断面	評価位置	照査用応答値 R_d	評価基準値 (限界層間変形角) R_u	R_d/R_u	(参考) 基礎版観測波 による R_d/R_u
非常用取水路 (スクリーン室)	頂版 ~ 底版	0.0393/100	1/100	0.039	0.045
非常用取水路 (取水路)	頂版 ~ 底版	0.0913/100	1/100	0.091	0.11
非常用取水路 (補機冷却用海水取水路)	頂版 ~ 底版	0.193/100	1/100	0.19	0.24
原子炉補機冷却系 配管ダクト(A系)	頂版 ~ 底版	0.111/100	1/100	0.11	0.13
原子炉補機冷却系 配管ダクト(B系)	頂版 ~ 底版	0.185/100	1/100	0.18	0.24
非常用ガス処理系 配管ダクト	頂版 ~ 底版	0.121/100	1/100	0.12	0.15

5.2 耐震健全性評価結果（2）

せん断力による照査結果（鉄筋コンクリート構造物）

解析対象断面	評価位置	照査用応答値 V_d (kN)	評価基準値 (せん断耐力) V_{yd} (kN)	V_d/V_{yd}	(参考) 基礎版観測波 による V_d/V_{yd}
非常用取水路 (スクリーン室)	隔壁	357	1483	0.24	0.27
非常用取水路 (取水路)	隔壁	453	1233	0.37	0.34
非常用取水路 (補機冷却用海水取水路)	隔壁	268	483	0.55	0.60
原子炉補機冷却系 配管ダクト(A系)	側壁	577	1753	0.33	0.35
原子炉補機冷却系 配管ダクト(B系)	側壁	528	1394	0.38	0.42
非常用ガス処理系 配管ダクト	底版	102	618	0.17	0.16

本表には、 V_d/V_{yd} の値が最も大きい評価位置の評価結果のみ表記

5.2 耐震健全性評価結果（3）

曲率による照査結果（鋼管杭）

解析対象断面	評価位置	照査用応答値 d (1/m)	評価基準値 (限界曲率) u (1/m)	d/u	(参考) 基礎版観測波 による d/u
非常用ガス処理系 配管ダクト	杭頭部	0.00366	0.0314	0.12	0.11
	地中部	0.00478	0.0276	0.17	0.13

せん断力による照査結果（鋼管杭）

解析対象断面	評価位置	照査用応答値 V_d (kN)	評価基準値 (せん断耐力) V_{yd} (kN)	V_d/V_{yd}	(参考) 基礎版観測波 による V_d/V_{yd}
非常用ガス処理系 配管ダクト	杭頭部	152	587	0.26	0.23
	地中部	309	587	0.53	0.35

支持力の評価結果（鋼管杭）

解析対象断面	評価位置	照査用応答値 N'_d (kN)	評価基準値 (極限支持力) R_u (kN)	N'_d/R_u	(参考) 基礎版観測波 による N'_d/R_u
非常用ガス処理系 配管ダクト	杭頭部	498	2531	0.20	0.24

本日も報告する内容

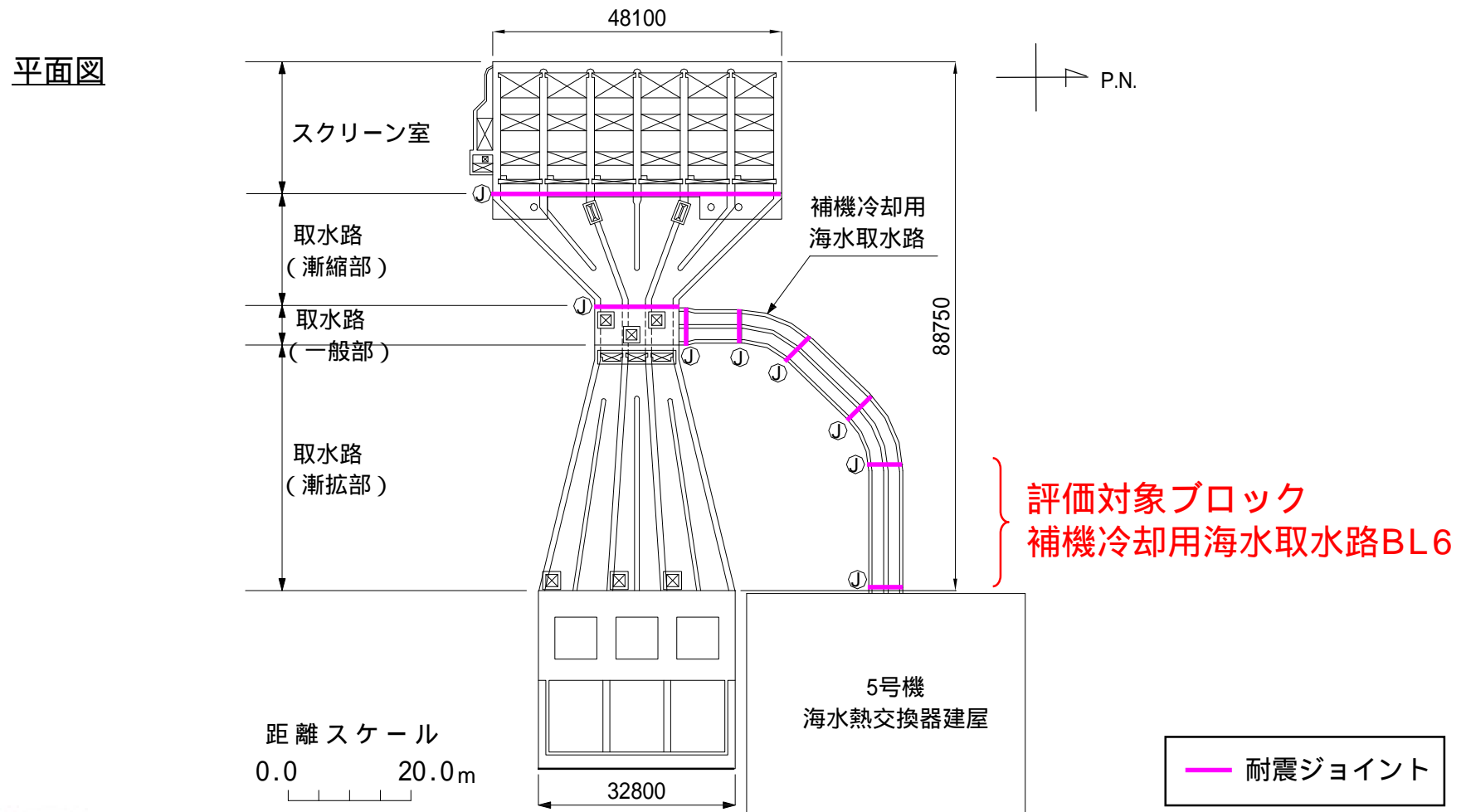
- 1 . 1号機屋外重要土木構造物の概要
- 2 . 点検
- 3 . 耐震健全性評価
- 4 . 総合評価

5 . (参考) 「解放基盤波」を用いた評価

6 . (参考) 非常用取水路の軸方向の評価

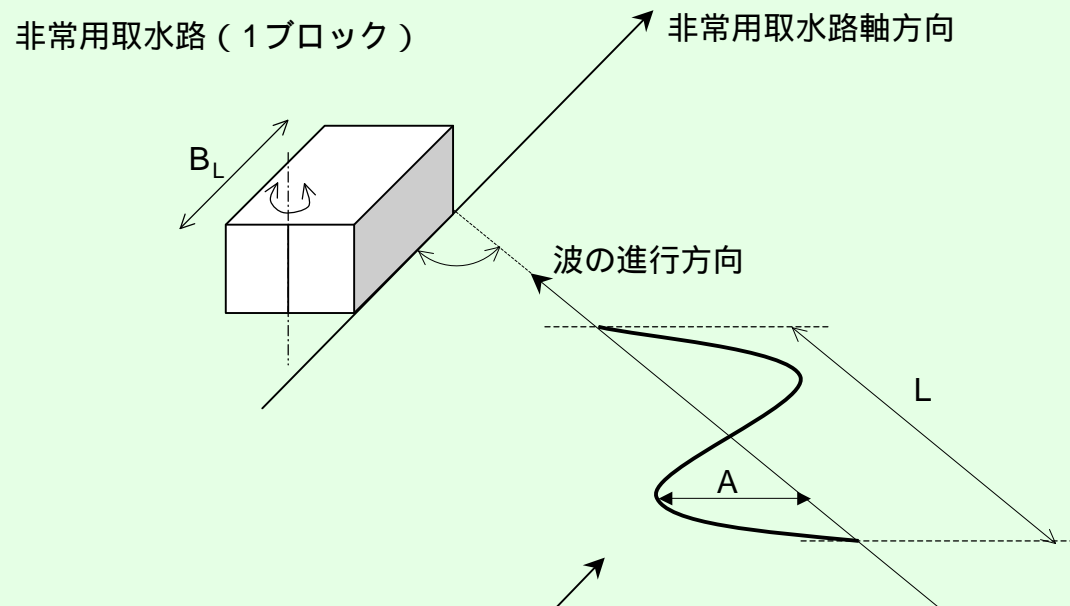
6.1 ブロック分割

非常用取水路は、取水路軸方向について構造的に問題となるような応力が生じないように、軸方向における構造の変化等を考慮してブロック分割し（最大ブロック長：約20m）、その間に耐震ジョイントを設置している。

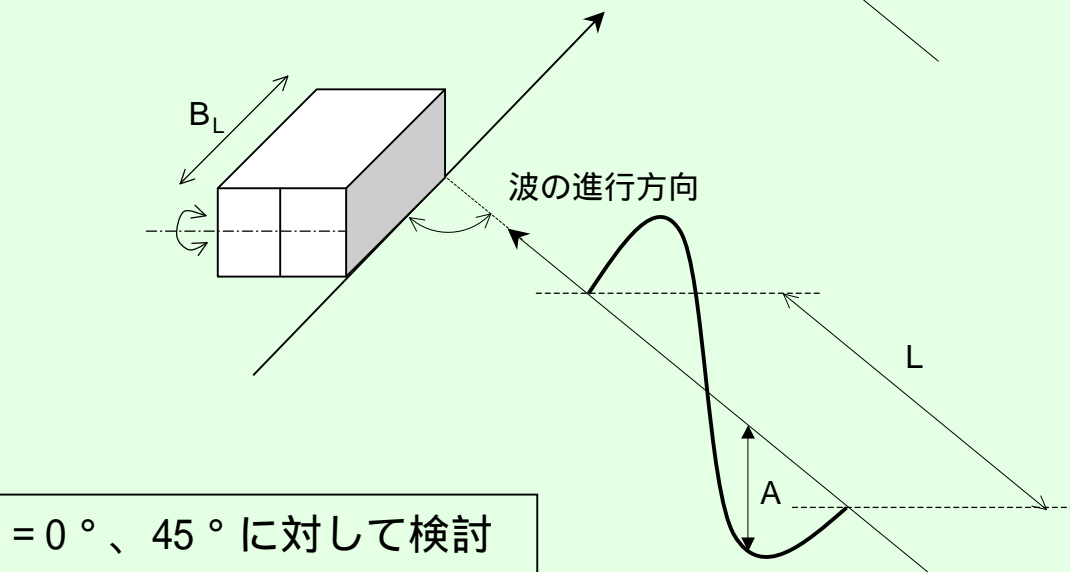


6.2 応力度評価方法(1)

水平方向変位に関する検討

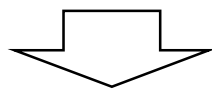
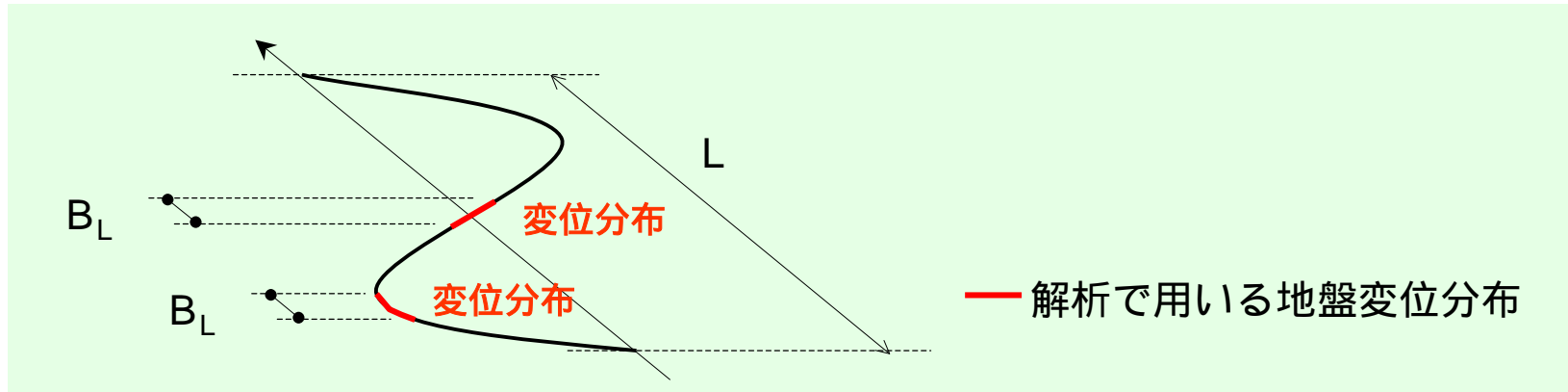


鉛直方向変位に関する検討

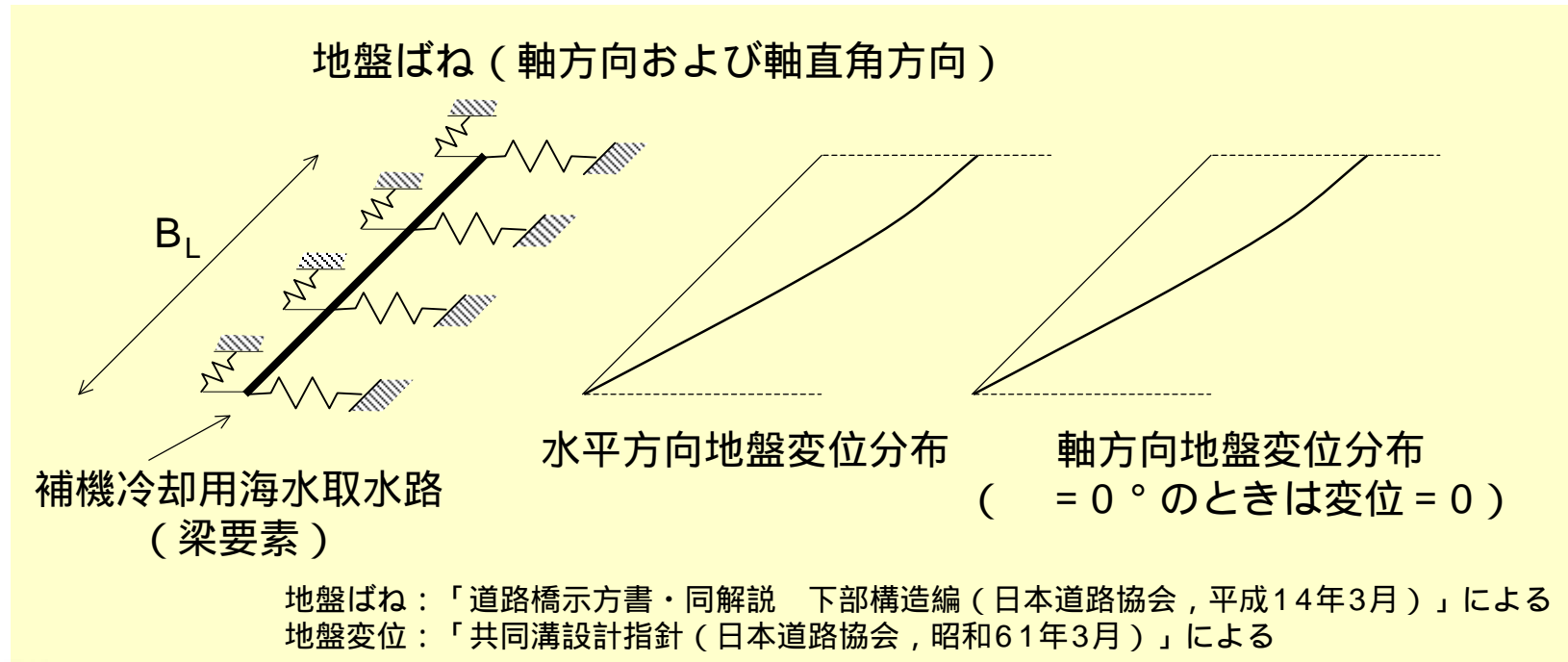


= 0°、45° に対して検討

6.2 応力度評価方法(2)



梁要素と地盤ばねからなる補機冷却用海水取水路1ブロックの解析モデルに、静的に地盤変位分布を与えて断面力を算出し、応力度を照査



6.3 応力度評価結果

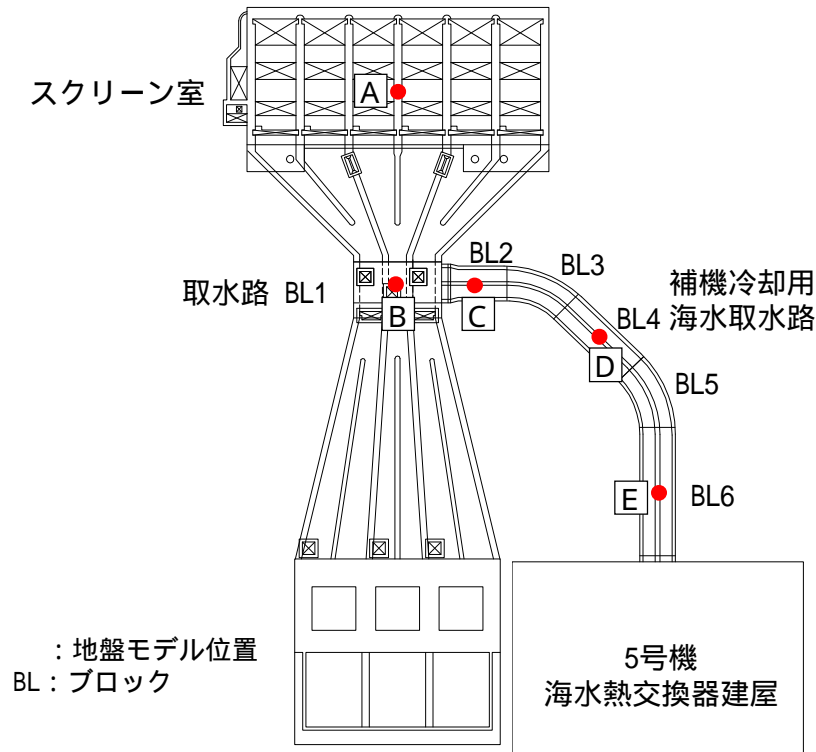
曲げ・軸力	構造物と地震波進行方向の なす角度 (°)	変位分布	発生応力度 σ_d (N/mm ²)	コンクリート引張強度 f_t (N/mm ²)	σ_d / f_t
水平方向変位	0		0.395	3.04	0.13
			0.00694	3.04	0.0023
	45		0.143	3.04	0.047
			0.746	3.04	0.25
鉛直方向変位	0		0.0193	3.04	0.0063
			0.000345	3.04	0.00011
	45		0.00696	3.04	0.0023
			0.0247	3.04	0.0081

せん断	構造物と地震波進行方向の なす角度 (°)	変位分布	照査用せん断力 V_d (kN)	せん断耐力 V_{yd} (kN)	V_d / V_{yd}
水平方向変位	0		543	12700	0.043
			21.1	12700	0.0017
	45		192	12100	0.016
			5.28	11400	0.00046
鉛直方向変位	0		20.2	9770	0.0021
			0.790	9770	0.000081
	45		7.16	9410	0.00076
			0.0800	8230	0.0000097

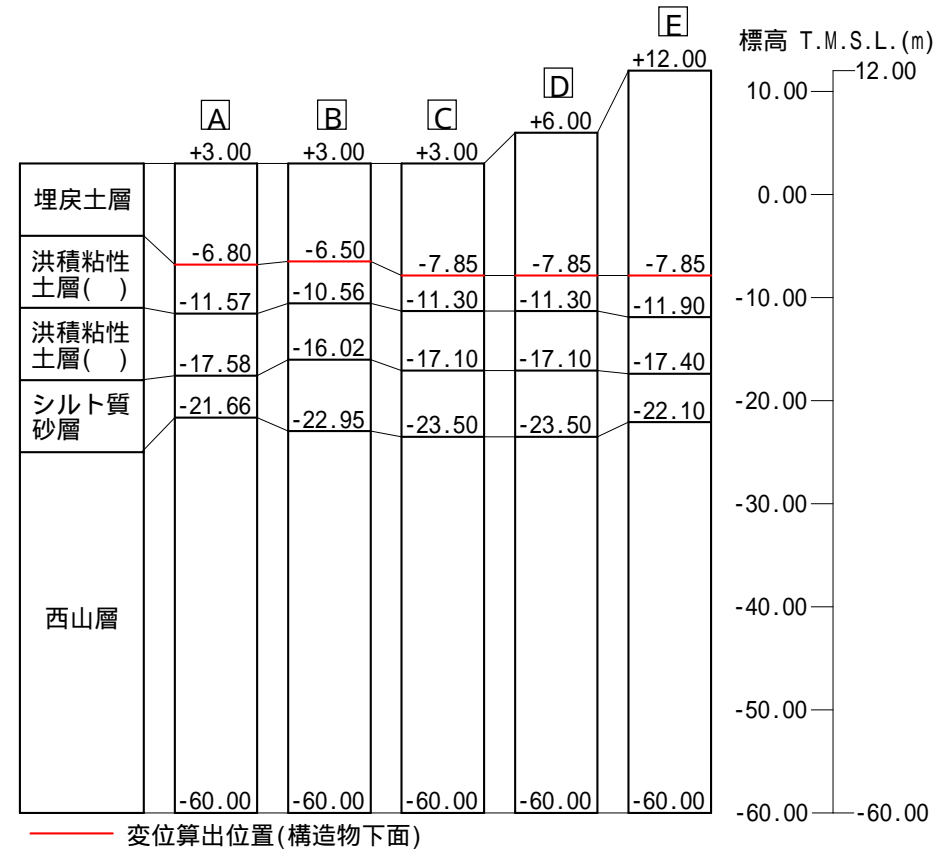
軸方向に発生する応力は、コンクリート引張強度に対して十分に小さく、発生せん断力もせん断耐力に比べて十分に小さいことを確認。

6.4 ブロック間相対変位量評価方法

評価位置



一次元地盤応答解析に用いた地層構成



各ブロックが剛体移動するものと仮定し、ブロック中心位置の一次元地震応答解析（地盤の非線形性を考慮）による変位時刻歴を求め、隣接ブロックの変位時刻歴との差分を相対変位量として算出。

6.5 ブロック間相対変位量評価結果

ブロック間最大相対変位量

単位 (mm)

区間	軸方向		軸直交方向	
	最大水平相対変位	最大鉛直相対変位	最大水平相対変位	最大鉛直相対変位
[スクリーン室] -[BL-1]	8.20	0.0470	4.30	0.0380
[BL-1]-[BL-2]	5.70	0.390	10.8	0.550
[BL-2]-[BL-3]	12.1	0.407	17.1	0.370
[BL-3]-[BL-4]	11.4	0.380	19.8	0.393
[BL-4]-[BL-5]	25.1	0.842	35.6	0.730
[BL-5]-[BL-6]	27.4	0.596	31.4	0.717

いずれのブロック間の最大相対変位量も、耐震ジョイントの限界性能（伸び300mm、ずれ400mm）を上回らないことを確認。