

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4
提出年月日	2020年 5月 21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5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	追而
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	追而
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の影響検討について	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

5. 補機冷却用海水取水路の耐震評価

5. 補機冷却用海水取水路の耐震評価

目次

1. 補機冷却用海水取水路の耐震評価	5-1
1.1 評価方法	5-1
1.2 評価条件	5-1
1.2.1 適用規格	5-1
1.2.2 耐震評価フロー	5-3
1.2.3 評価対象断面の選定	5-5
1.2.4 使用材料及び材料定数	5-12
1.2.5 地盤, マンメイドロックの解析用物性値	5-12
1.2.6 評価構造物諸元	5-16
1.2.7 地下水位	5-20
1.3 地震応答解析	5-20
1.3.1 地震応答解析手法	5-20
1.3.2 地震応答解析モデルの設定	5-21
1.3.3 減衰定数	5-41
1.3.4 荷重の組合せ	5-41
1.3.5 耐震評価における解析ケース	5-45
1.4 3次元構造解析	5-48
1.4.1 解析手法	5-48
1.4.2 解析モデルの設定	5-49
1.4.3 照査時刻の選定	5-63
1.4.4 入力荷重	5-63
1.5 評価内容	5-74
1.5.1 入力地震動の設定	5-74
1.5.2 許容限界の設定	5-101
1.6 評価結果	5-110
1.6.1 地震応答解析結果	5-110
1.6.2 3次元構造解析結果	5-110
1.6.3 構造部材の健全性に対する評価結果	5-110
1.6.4 基礎地盤の支持性能に対する評価結果	5-110
1.7 まとめ	5-110

5. 補機冷却用海水取水路の耐震評価

5.1 評価方法

補機冷却用海水取水路は非常時における海水の通水機能及び貯水機能が求められる土木構造物である。補機冷却用海水取水路について、基準地震動 S_s による耐震評価として、構造部材の曲げ、せん断評価及び基礎地盤の支持性能評価を実施する。

補機冷却用海水取水路の地震応答解析においては、地震時の地盤の有効応力の変化に応じた影響を考慮できる有効応力解析を実施する。

有効応力解析に用いる液状化強度特性は、代表性及び網羅性を踏まえた上で、保守性を考慮して設定する。

構造物の**応答**加速度に対する保守的な配慮として、地盤の非液状化の影響を考慮した解析ケースを設定する。

構造部材の健全性評価については、構造部材の層間変形角及びせん断力が要求機能に応じた許容限界以下であることを確認する。基礎地盤の支持性能評価については、基礎地盤に作用する鉛直力が極限支持力に基づく許容限界以下であることを確認する。

5.2 評価条件

5.2.1 適用規格

補機冷却用海水取水路の耐震評価に当たっては、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会，2002年）（以下「コンクリート標準示方書」という。），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）を適用するが、鉄筋コンクリート部材の曲げ及びせん断の許容限界については、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。）を適用する。また、基礎地盤の支持性能の許容限界は、道路橋示方書・同解説（I 共通編・IV 下部構造編）（日本道路協会，平成14年3月）（以下「道路橋示方書」という。）を適用する。

表 5-1 に適用する規格，基準類を示す。

表 5-1 適用する規格, 基準類

項目	適用する規格, 基準類	備考
使用材料及び材料定数	・コンクリート標準示方書〔構造的 性能照査編〕 (2002 年)	—
荷重及び荷重の組合せ	・コンクリート標準示方書〔構造的 性能照査編〕 (2002 年)	・永久荷重+偶発荷重+従たる変動荷 重の適切な組合せを検討
許容限界	【鉄筋コンクリート部材】 ・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 (2005 年)	・曲げに対する照査は, 限界ひずみを 設定した上で, 発生ひずみが限界ひ ずみを下回ることを確認* ・せん断に対する照査は, 発生せん断 力がせん断耐力を下回ることを確 認*
	【基礎地盤の支持性能】 ・道路橋示方書・同解説 (I 共通編・ IV 下部構造編) (平成 14 年 3 月)	・基礎地盤の支持性能に対する照査 は, 基礎に発生する鉛直力が極限支 持力を下回ることを確認*
地震応答解析	・原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987	・有限要素法による 2 次元モデルを用 いた時刻歴非線形解析

注記* : 妥当な安全余裕を考慮する。

5.2.2 耐震評価フロー

図 5-1 に補機冷却用海水取水路の地震応答解析フローを、図 5-2 に耐震評価フローを示す。

補機冷却用海水取水路については、通水方向の水路の形状を踏まえて、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。3次元構造解析にあたっては、2次元動的有限要素法解析により得られた応答値から、3次元構造解析モデルへ入力する荷重を算定する。

補機冷却用海水取水路の基礎地盤の支持性能については、2次元動的有限要素法解析より得られた応答値を用いて耐震評価を行う。

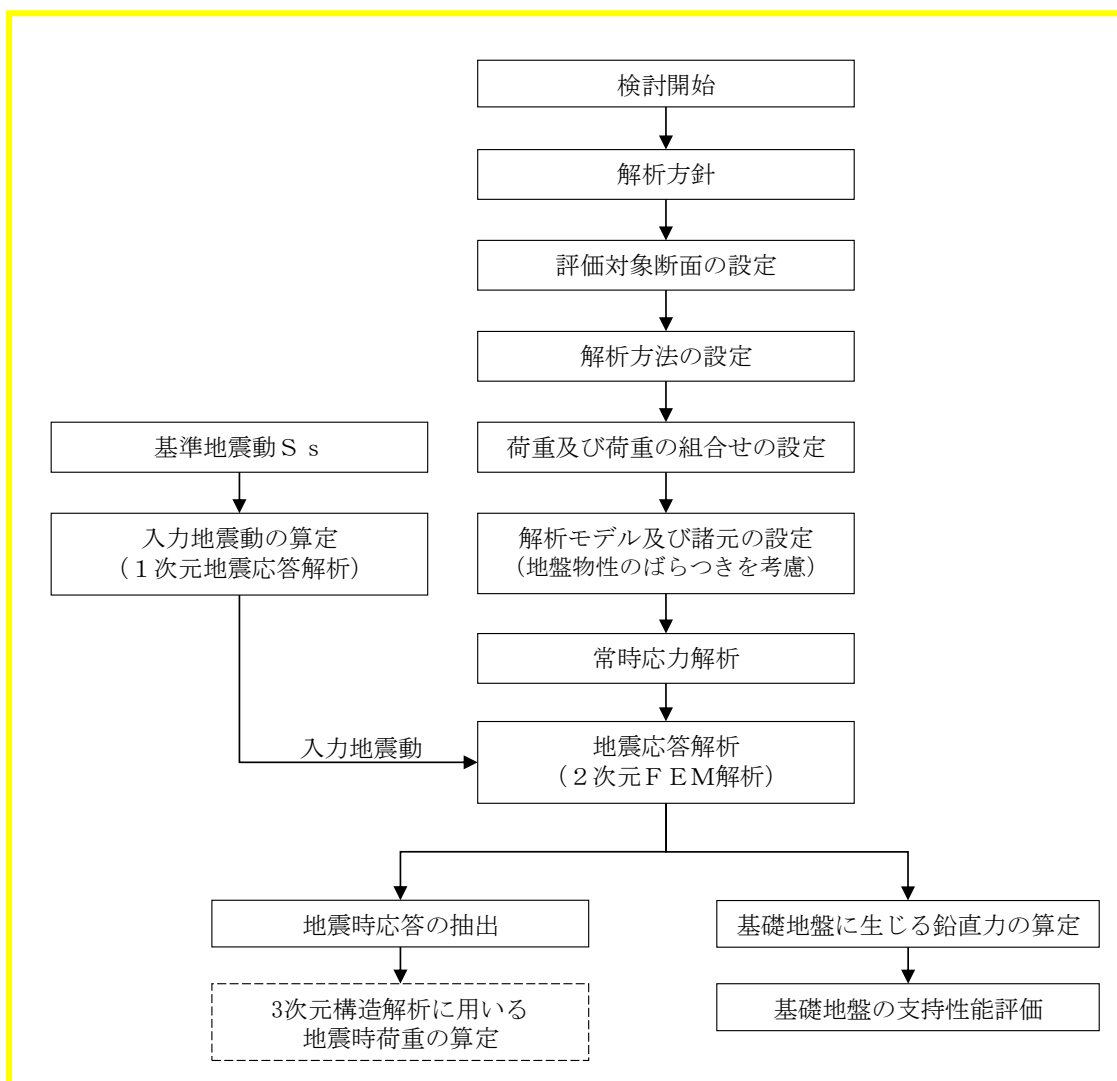


図 5-1 補機冷却用海水取水路の地震応答解析フロー

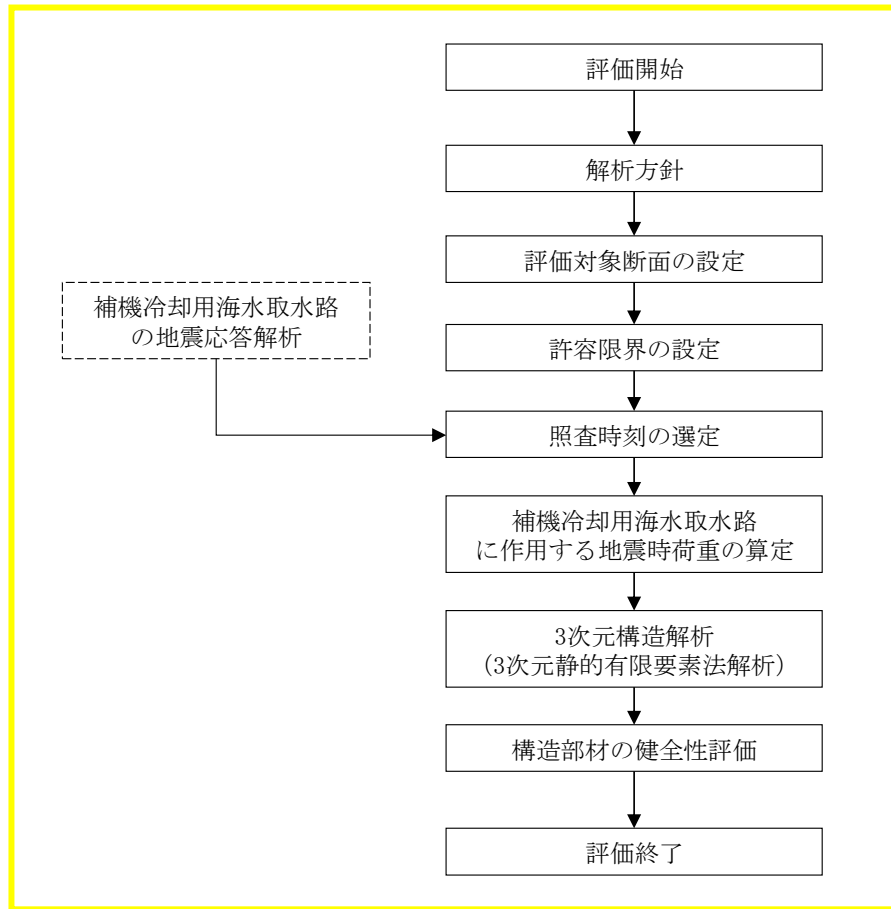


図 5-2 補機冷却用海水取水路の耐震評価フロー

5.2.3 評価対象断面の選定

補機冷却用海水取水路の位置を図 5-3 に、平面図を図 5-4 に、断面図を図 5-5～図 5-7 に、概略配筋図を図 5-9 に示す。

補機冷却用海水取水路は鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、取水路漸拡部からそれぞれ北側及び南側に分岐し、取水方向に複数の断面形状を示し、マンメイドロックを介して西山層に支持される。また、補機冷却用海水取水路の側方地盤の一部には、地震時における浮上り対策として、地盤改良を実施している。

評価対象断面は、工事計画に係る説明資料（屋外重要土木構造物の耐震性についての計算書）資料 1 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」の「4.4 取水路の断面選定の考え方」で記載したとおり、構造的特徴を踏まえ、構造物の幅に対する鉛直部材の割合が最も少なく耐震上厳しいと判断されるタービン建屋接続位置のブロックとして、北側 4 連（柱部 2 本）ボックスカルバート部及び南側 5 連（柱部 2 本）ボックスカルバート部を代表として耐震評価を実施する。

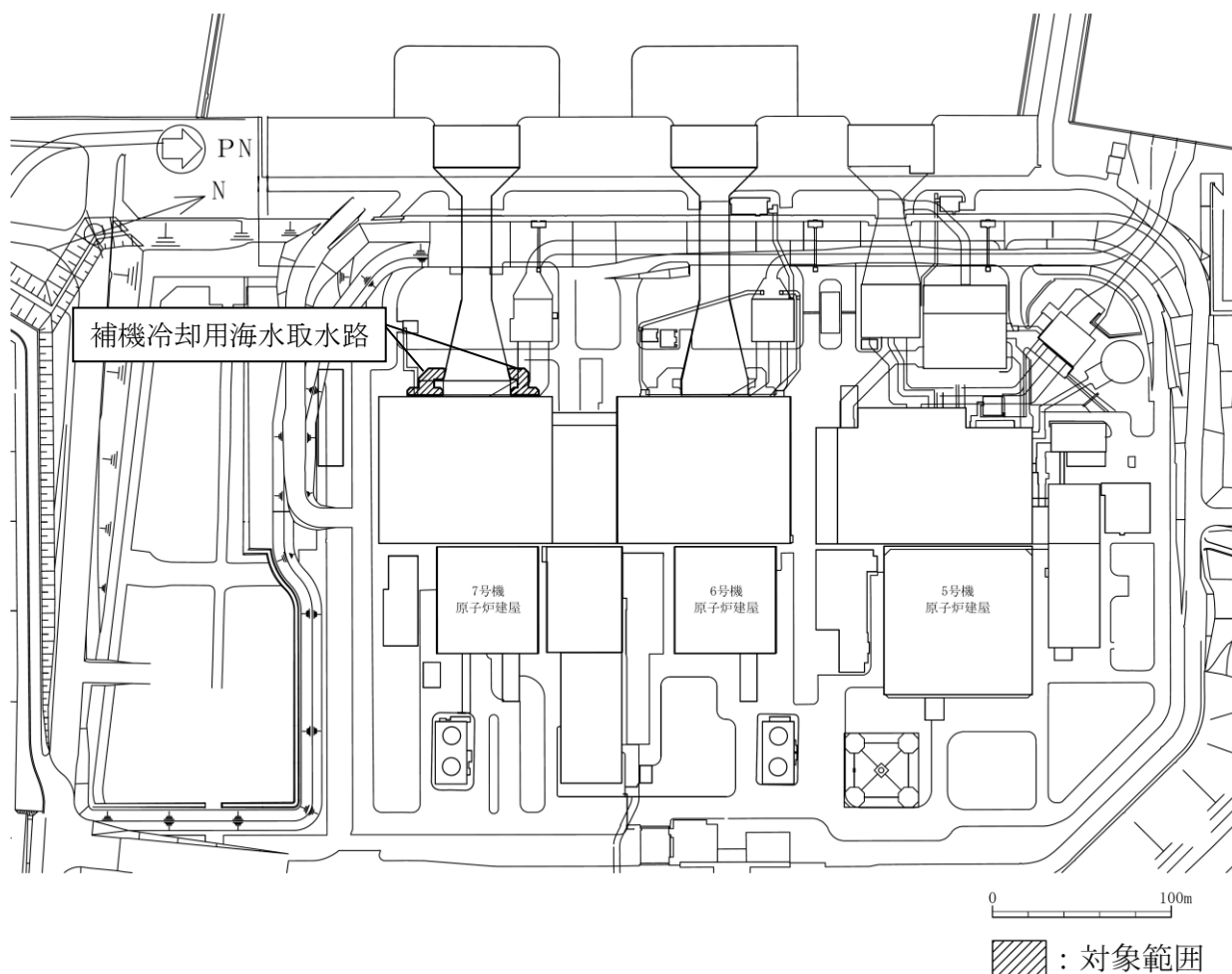


図 5-3 補機冷却用海水取水路の平面配置図（平面図）

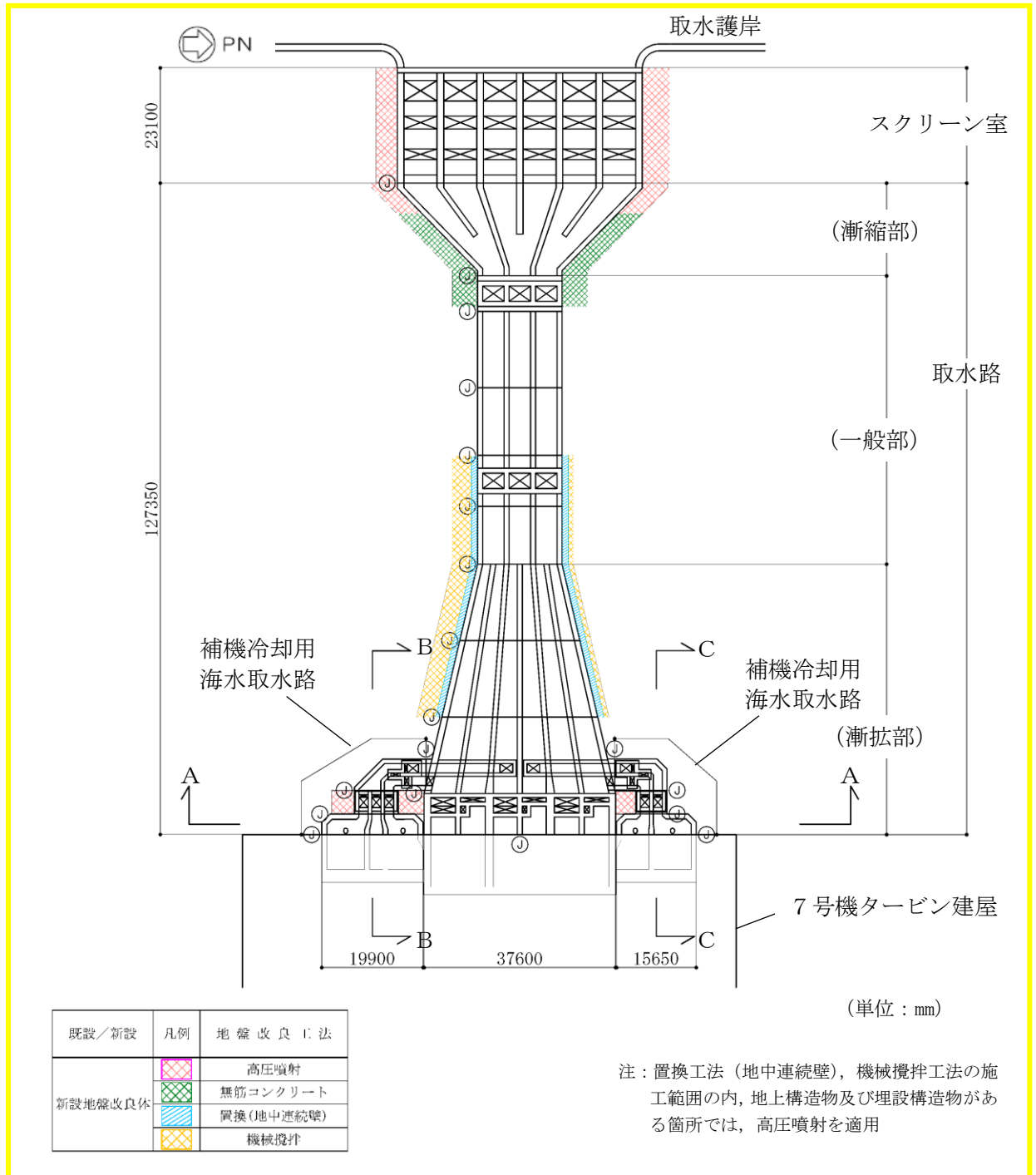
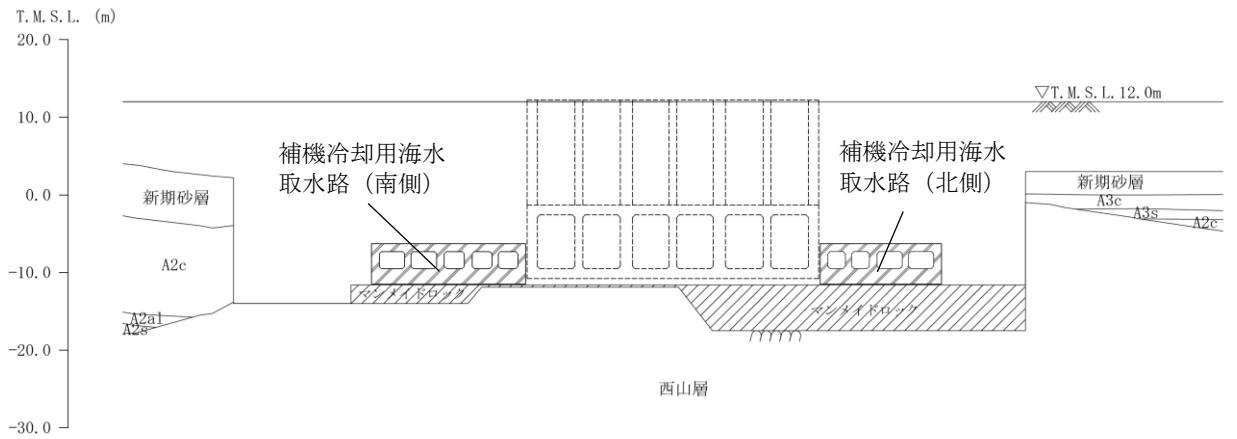
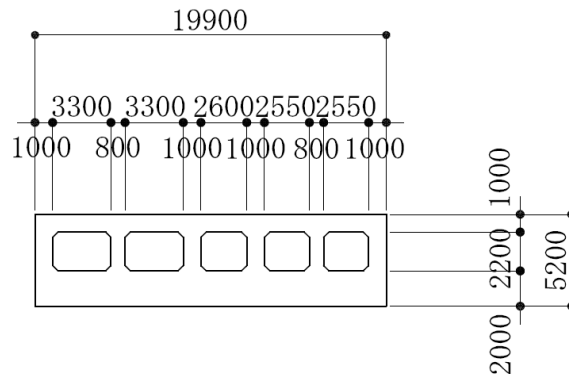


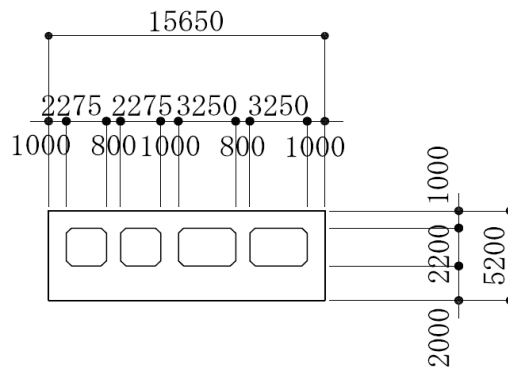
図 5-4 補機冷却用海水取水路の平面図



(a) 補機冷却用海水取水路 (全体)



(b) 補機冷却用海水取水路 (南側)



(c) 補機冷却用海水取水路 (北側)

(単位 : mm)

注 : 東京湾平均海面 (以下, 「T.M.S.L.」 という。)

図 5-5 補機冷却用海水取水路の断面図 (A-A断面)

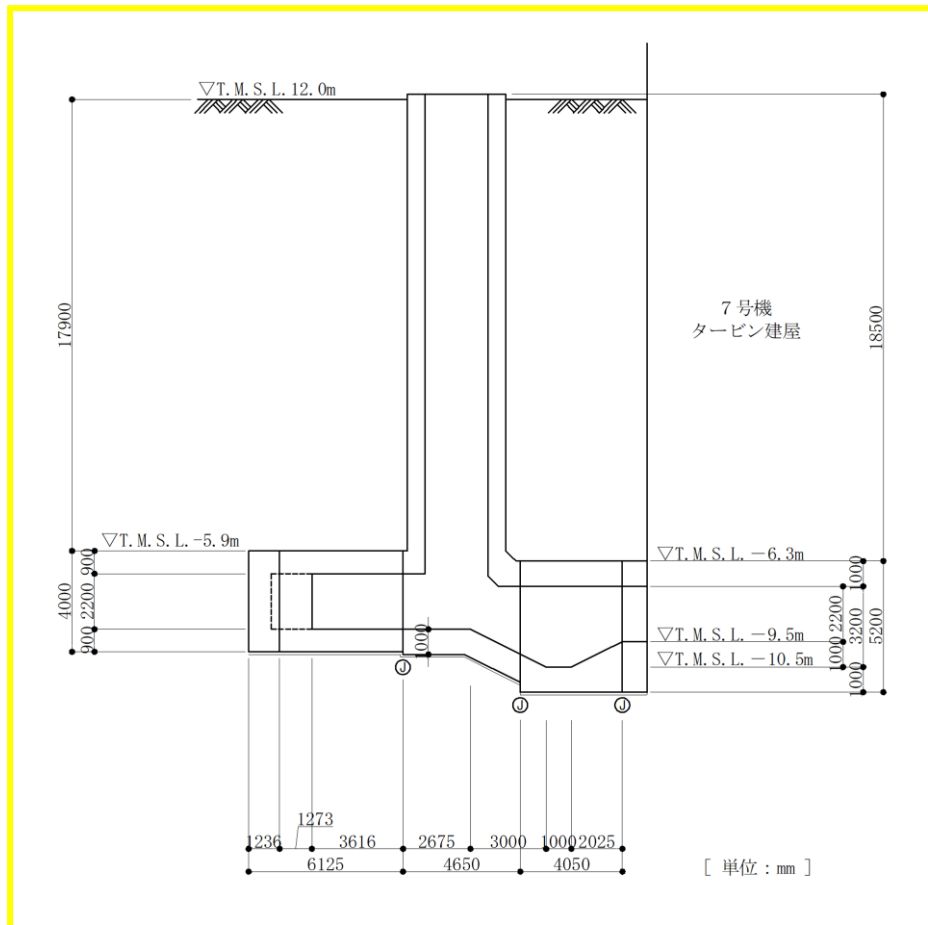


図 5-6 補機冷却用海水取水路（南側）の断面図（B-B断面）

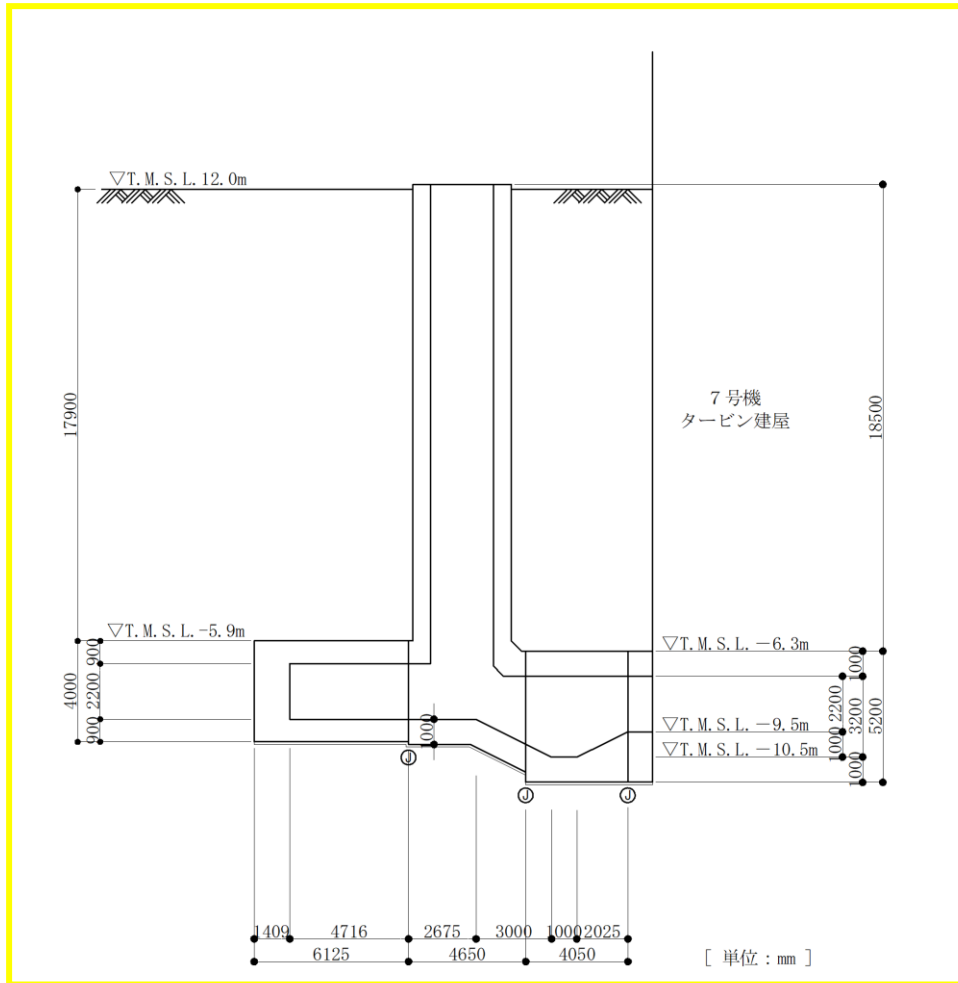
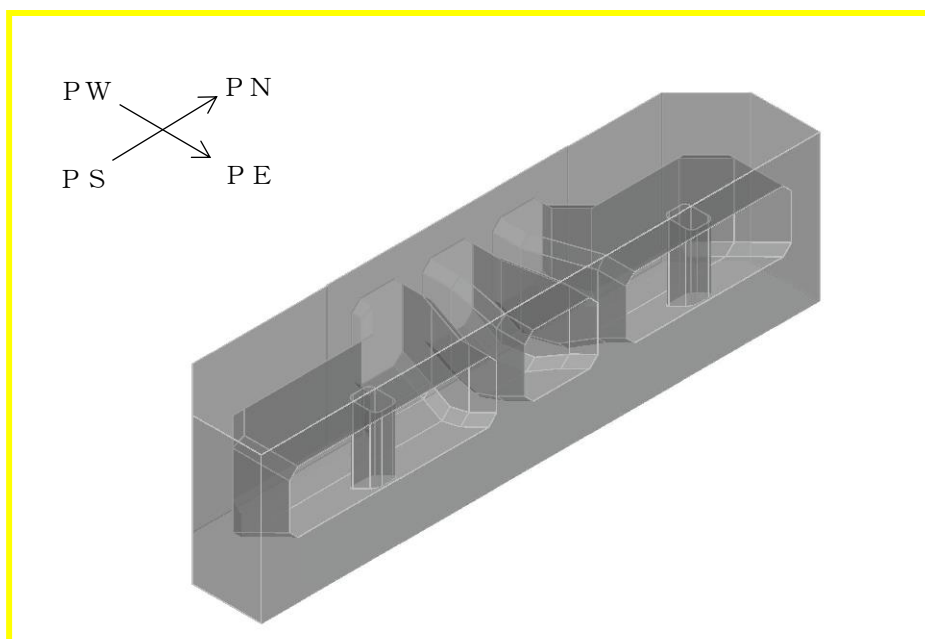
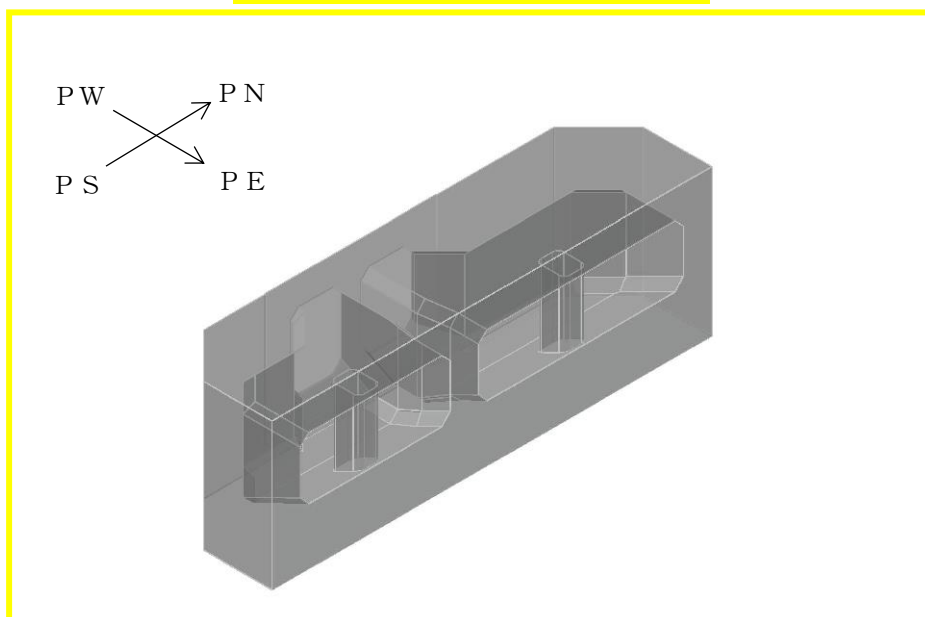


図 5-7 補機冷却用海水取水路（北側）の断面図（C-C 断面）

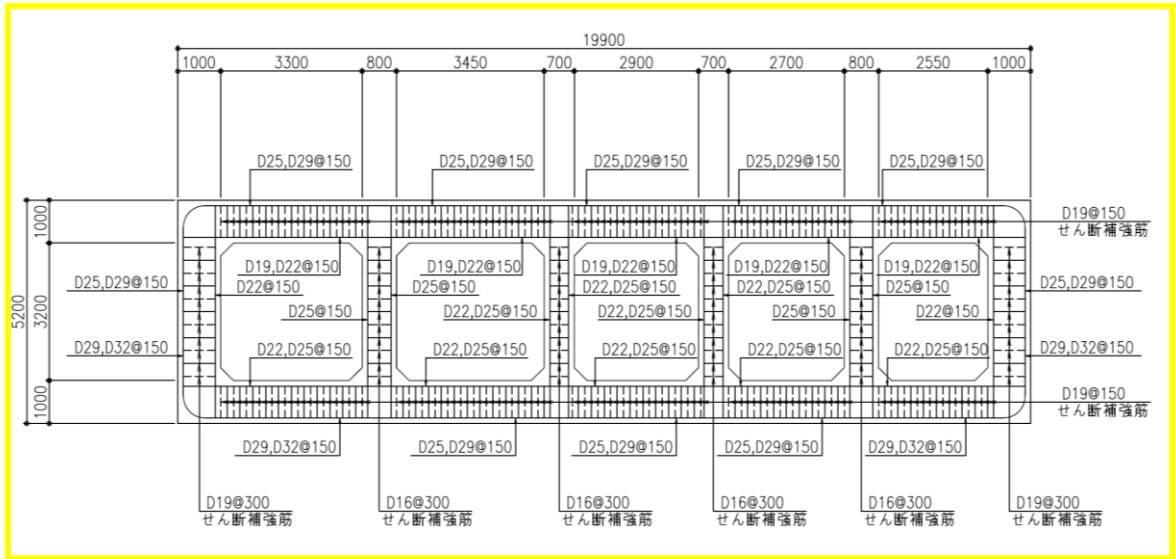


(a) 補機冷却用海水取水路（南側）

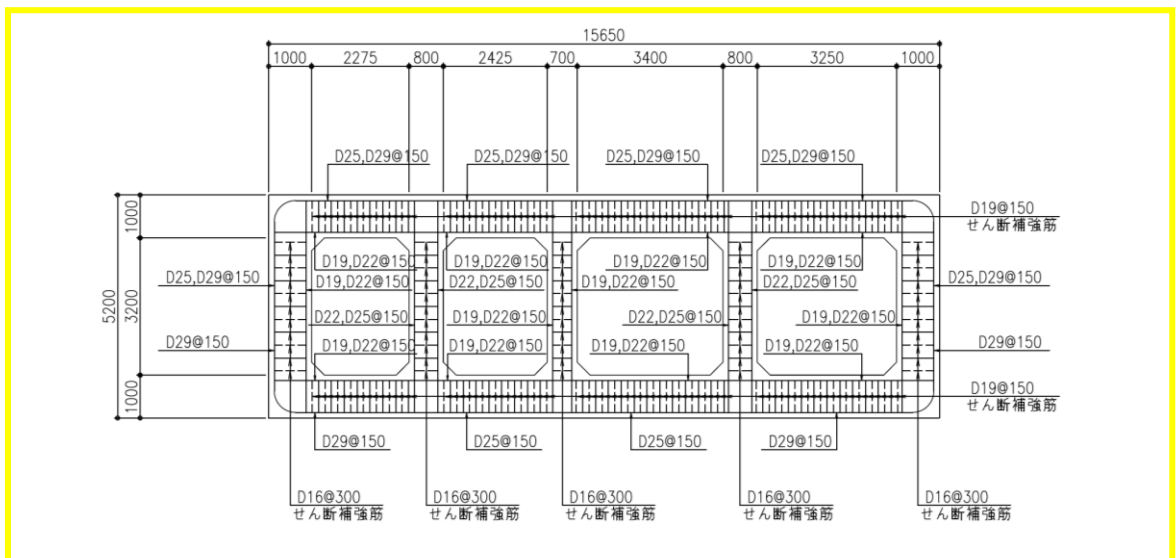


(b) 補機冷却用海水取水路（北側）

図 5-8 補機冷却用海水取水路の鳥瞰図



(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 5-9 補機冷却用海水取水路の概略配筋図

5.2.4 使用材料及び材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、建設時の設計値に基づき設定する。構造物の使用材料を表 5-2 に、材料物性値を表 5-3 に示す。

表 5-2 構造物の使用材料

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 5-3 構造物の材料物性値

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

5.2.5 地盤、地盤改良体及びマンメイドロックの解析用物性値

地盤、地盤改良体及びマンメイドロックの諸定数は、V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を用いる。地盤の物性値を表 5-4～表 5-6 に、地盤改良体の物性値を表 5-8 に、マンメイドロックの物性値を表 5-7 に示す。

表 5-4 地盤の解析用物性値一覧（液状化検討対象層）

パラメータ		埋戻土	新期砂層・沖積層	古安田層			
			新期砂層	A2s 層	A3s 層	A2g 層 (砂質)	
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	1.94 (1.79)*	2.05 (2.00)*	1.91	1.91	1.91	
	間隙率 n	0.45	0.44	0.45	0.45	0.45	
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ms} (kN/m ²)	1.04×10^5	1.26×10^5	2.14×10^5	2.14×10^5	2.14×10^5	
	基準平均有効拘束圧 σ_{ms}' (kN/m ²)	98.0	98.0	200.0	200.0	200.0	
	ポアソン比 ν	0.33 (0.42)*	0.33 (0.44)*	0.33	0.33	0.33	
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.225	0.234	0.157	0.157	0.157	
強度特性	粘着力 c' (kN/m ²)	0.0 (9.6)*	0.0 (94.4)*	0.0	0.0	0.0	
	内部摩擦角 ϕ' (°)	35.9 (34.8)*	34.6 (27.6)*	36.6	36.6	36.6	
液状化特性	変相角 ϕ_p (°)	32.0	31.0	32.0	32.0	32.0	
	液状化パラメータ	S_1	0.005	0.005	0.005	0.005	0.005
		w_1	5.50	7.90	25.0	25.0	25.0
		p_1	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
		p_2	1.00	0.70	0.80	0.80	0.80
		c_1	1.69	2.13	8.75	8.75	8.75

注記* : 括弧内の数字は、地下水位以浅の数値を表す。

表 5-5 地盤の解析用物性値一覧（非液状化層）

パラメータ		古安田層			
		A3c 層	A3a1 層	A2c 層	A2a1 層
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	1.70	1.81	1.80	1.88
	間隙率 n	0.57	0.52	0.52	0.48
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ms} (kN/m ²)	1.09×10^5	9.57×10^4	1.39×10^5	1.61×10^5
	基準平均有効拘束圧 σ_{ms}' (kN/m ²)	60.0	94.0	140.0	170.0
	ポアソン比 ν	0.33	0.33	0.33	0.33
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.114	0.162	0.110	0.147
強度特性	粘着力 c' (kN/m ²)	99.6	29.2	113.0	82.8
	内部摩擦角 ϕ' (°)	26.8	34.2	27.9	28.7

表 5-6 地盤の解析用物性値一覧（西山層）

パラメータ		西山層	
		T. M. S. L. -33.0m 以浅	T. M. S. L. -33.0m~-90.0m
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	1.73	1.69
	間隙率 n	0.56	0.56
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m ²)	4.16×10^5	4.75×10^5
	基準平均有効拘束圧 σ_{ma}' (kN/m ²)	98.0	98.0
	ポアソン比 ν	0.33	0.33
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.257	0.257
強度特性	粘着力 c (kN/m ²)	$1370 - 5.04 \cdot Z^*$	$1370 - 5.04 \cdot Z^*$
	内部摩擦角 ϕ (°)	0	0

注記* : Zは、標高 (m) を示す。

表 5-7 地盤の解析用物性値一覧（マンメイドロック）

パラメータ		マンメイドロック
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	1.75
	間隙率 n	0.56
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ma} (kN/m ²)	1.91×10^6
	基準平均有効拘束圧 σ_{ma}' (kN/m ²)	98.0
	ポアソン比 ν	0.36
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.190
強度特性	粘着力 c (kN/m ²)	1840
	内部摩擦角 ϕ °	0.0

表 5-8 地盤の解析用物性値一覧 (地盤改良体 (高圧噴射))

パラメータ		新設地盤改良体	
		高圧噴射	
物理特性	密度	ρ (g/cm ³)	1.94
	間隙率	n	0.49
変形特性	動せん断弾性係数	G_{ms} (kN/m ²)	2.51×10^5
	基準平均有効拘束圧	σ_{ms}' (kN/m ²)	98
	ポアソン比	ν	0.33
	減衰定数の上限値	h_{max}	0.05
強度特性	粘着力	c' (kN/m ²)	500

5.2.6 評価構造物諸元

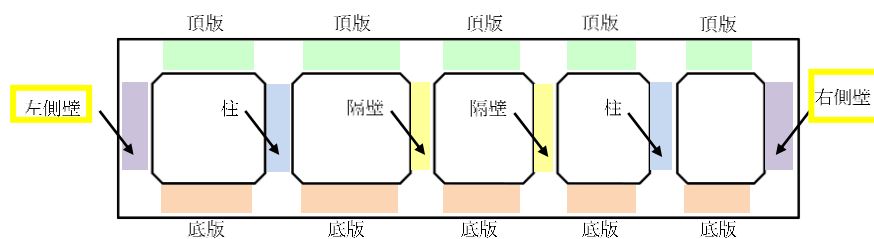
(1) 評価構造物諸元と評価部位

照査を行う補機冷却用海水取水路の評価構造物諸元を表 5-9 及び表 5-10 に、評価部位を図 5-10 及び図 5-11 に示す。

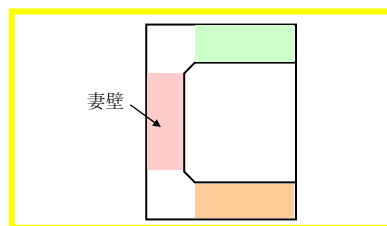
表 5-9 構造物の評価部位とその仕様 (南側)

部位	仕様		材料		機能要求
	部材幅 (m)	部材高 (m)	コンクリート f'_{ck} (N/mm ²)	鉄筋	
頂版	1.000	1.000	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水, 貯水*
右側壁	1.000	1.000	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水, 貯水*
右柱	0.256	0.800	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水
右隔壁	1.000	0.700	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水
左隔壁	1.000	0.700	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水
左柱	0.256	0.800	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水
左側壁	1.000	1.000	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水, 貯水*
底版	1.000	1.000	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水
妻壁	0.250	1.000	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水, 貯水*

注記* : 海水貯留堰天端標高 (T. M. S. L. -3.5m) 以下の範囲



(a) A-A 断面



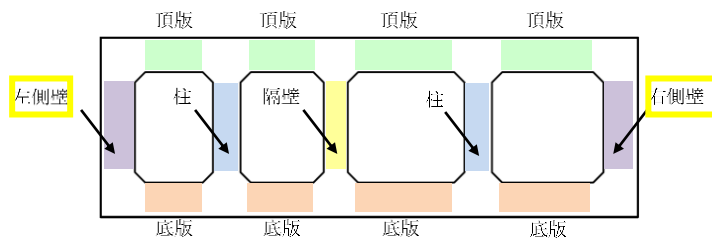
(b) B-B 断面

図 5-10 評価部位 (南側)

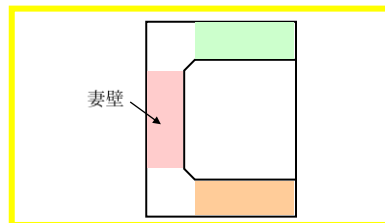
表 5-10 構造物の評価部位とその仕様（北側）

部位	仕様		材料		機能要求
	部材幅 (m)	部材高 (m)	コンクリート f'_{ck} (N/mm ²)	鉄筋	
頂版	1.000	1.000	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水, 貯水*
右側壁	1.000	1.000	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水, 貯水*
右柱	0.256	0.800	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水
隔壁	1.000	0.700	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水
左柱	0.256	0.800	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水
左側壁	1.000	1.000	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水, 貯水*
底版	1.000	1.000	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水
妻壁	1.000	1.000	23.5	SD35 (SD345 相当)	通水, 貯水*

注記* : 海水貯留堰天端標高 (T. M. S. L. -3.5m) 以下の範囲



(a) A-A断面



(b) C-C断面

図 5-11 評価部位（北側）

(2) 補機冷却用海水取水路の RC 部材における機能要求の考え方

「(1) 評価構造物諸元と評価部位」の各表に記載した補機冷却用海水取水路の機能要求について、その考え方を以下に記載する。なお、補機冷却用海水取水路には、間接支持する S クラス施設はない。

a. 通水機能

補機冷却用海水取水路の通水断面を構成する各部材について、通水機能を要求するものとする。図 5-12 に通水機能を要求する部材の範囲を図示する。

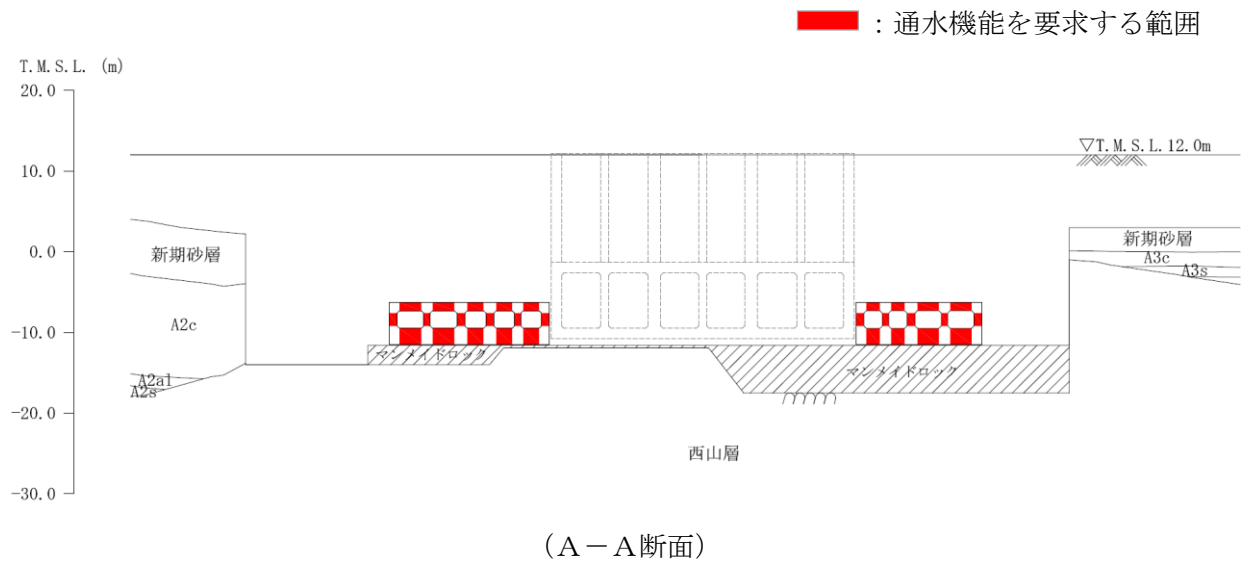


図 5-12 通水機能を要求する範囲

b. 貯水機能

補機冷却用海水取水路における貯水機能は、津波時の引き波を想定した要求機能であるため、海水貯留堰天端標高 (T. M. S. L. -3.5m) 以下の頂版及び側壁を対象とする。

ここで、補機冷却用海水取水路の周辺地盤の地下水位は常時は海水面付近にあると想定され、津波時の引き波による海水面低下が起きても、引き波の継続時間は最大約16分と短時間の現象と評価されているため、補機冷却用海水取水路の内水位よりも周辺地盤の地下水位の方が高い状態にあることから、補機冷却用海水取水路内の貯留水は地盤へ流出する可能性は低いものと考えられるが、当検討では側壁及び頂版の健全性により貯水機能を担保することとする。

なお、底板については、補機冷却用海水取水路全区間で透水係数の小さいマンメイドロック若しくは西山層に接しており、かつ地下水位面 (海水面) よりも低い位置に設置されることから、貯水機能の要求する範囲の対象外とする。

また、鉄筋コンクリート部材以外に貯水性能が要求される部材としては、ブロック間に設置している耐震ジョイントが挙げられる。耐震ジョイントの地震前後の健全性については、(参考資料2) に示す。

図 5-13 に貯水機能を要求する部材の範囲を示す。

引き波の継続時間の詳細は、V-1-1-3-2「津波への配慮に関する説明書」に示す。

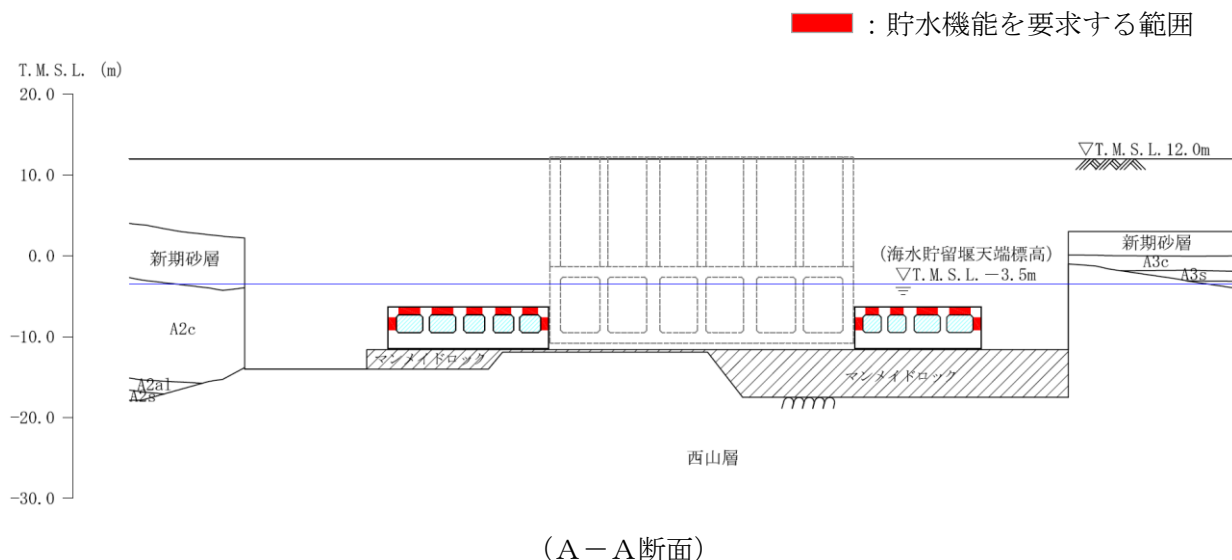


図 5-13 貯水機能を要求する範囲

5.2.7 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、T.M.S.L. 8.0mに設定する。

5.3 地震応答解析

5.3.1 地震応答解析手法

補機冷却用海水取水路の地震応答解析は、地盤と構造物の相互作用を考慮できる2次元有限要素法を用いて、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。構造部材については、はり要素を用いることとし、非線形特性についてはコンクリートの $M-\phi$ 関係を適切にモデル化する。また、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。

地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線の構成則を有効応力解析へ適用する際は、地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線に関するせん断ひずみ及び有効応力の変化に応じた特徴を適切に表現できるモデルを用いる必要がある。一般に、地盤は荷重を与えることによりせん断ひずみを増加させていくと、地盤のせん断応力は上限値に達し、それ以上はせん断応力が増加しなくなる特徴がある。また、地盤のせん断応力の上限値は有効応力に応じて変化する特徴がある。

よって、耐震評価における有効応力解析では、地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線の構成則として、地盤の繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線に関するせん断ひずみ及び有効応力の変化に応じたこれら2つの特徴を表現できる双曲線モデル（H-Dモデル）を選定する。

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。地震応答解析手法の選定フローを図5-14に示す。

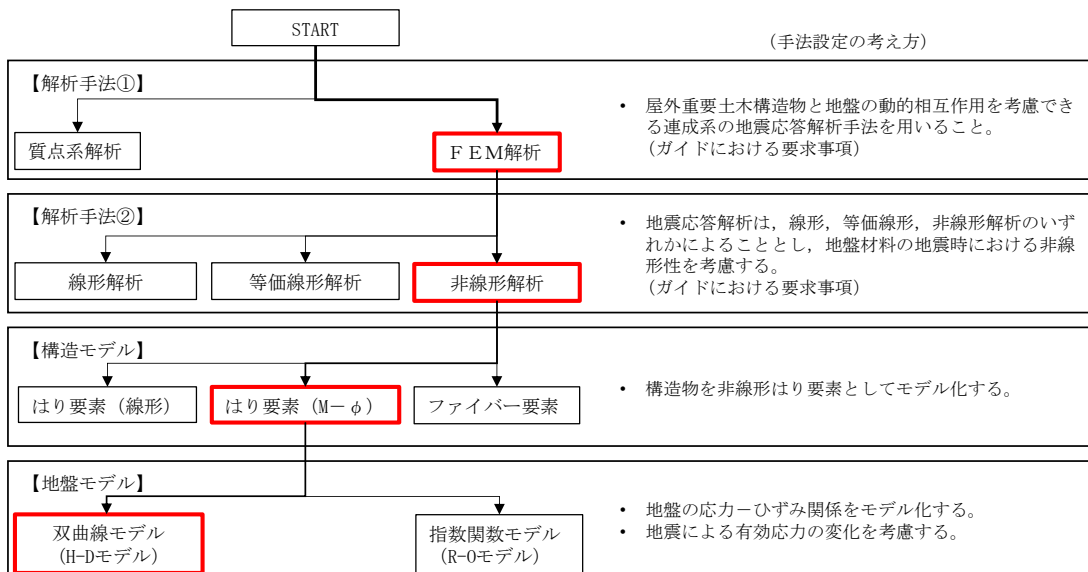


図 5-14 地震応答解析手法の選定フロー

5.3.2 地震応答解析モデルの設定

(1) 解析モデル領域

地震応答解析モデルは、境界条件の影響が地盤及び構造物の応力状態に影響を及ぼさないよう、十分広い領域とする。具体的には、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 を参考に、図 5-15 に示すとおりモデル幅を構造物基礎幅の 5 倍程度、モデル高さを構造物幅の 2 倍程度とする。

なお、解析モデルの境界条件は、側面及び底面ともに粘性境界とする。

地盤の要素分割については、地盤の波動をなめらかに表現するために、最大周波数 20 Hz 及びせん断波速度 V_s で算定される波長の 5 又は 4 分割、すなわち $V_s/100$ 又は $V_s/80$ を考慮し、要素高さを 0.5~1m 程度まで細分割して設定する。

構造物の要素分割については、土木学会マニュアルに、線材モデルの要素分割については、要素長さを部材の断面厚さ又は有効高さの 2.0 倍以下とし、1.0 倍程度とするのが良い旨が示されていることを考慮し、部材の断面厚さ又は有効高さの 1.0 倍程度まで細分割して設定する。

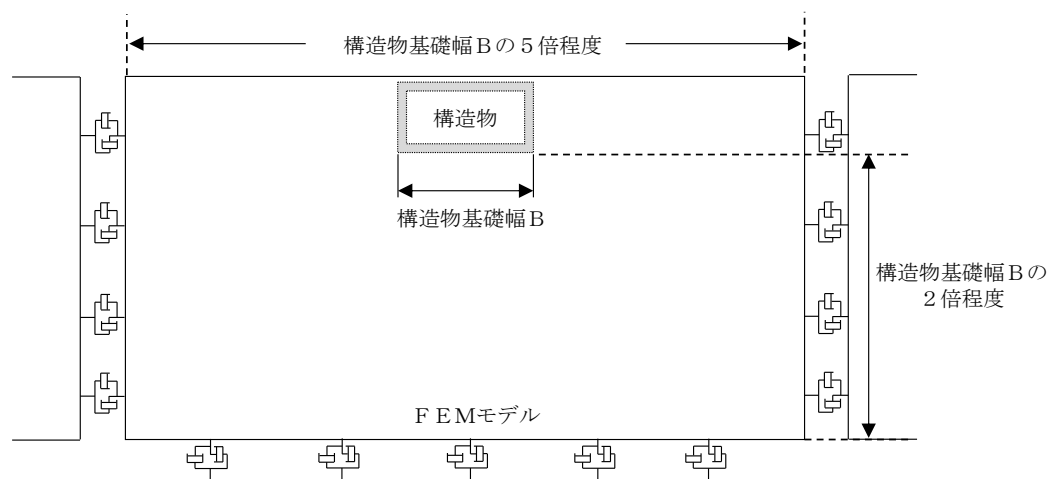


図 5-15 モデル範囲の考え方

2次元有効応力解析モデルは、検討対象構造物とその周辺地盤をモデル化した不整形地盤に加え、この不整形地盤の左右に広がる地盤をモデル化した自由地盤で構成される。この自由地盤は、不整形地盤の左右端と同じ地層構成を有する1次元地盤モデルである。2次元有効応力解析における自由地盤の初期応力解析から不整形地盤の地震応答解析までのフローを図5-16に示す。また、補機冷却用海水取水路周辺の地質断面図を図5-17～図5-19に示す。

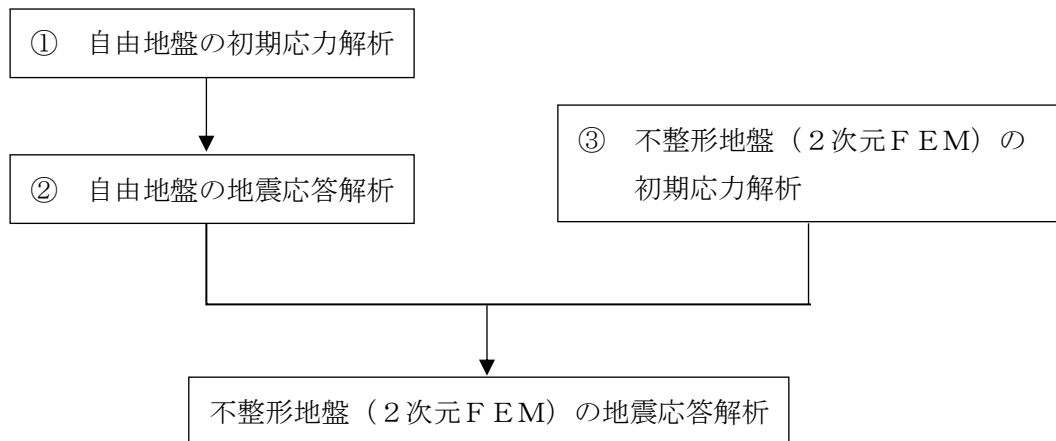
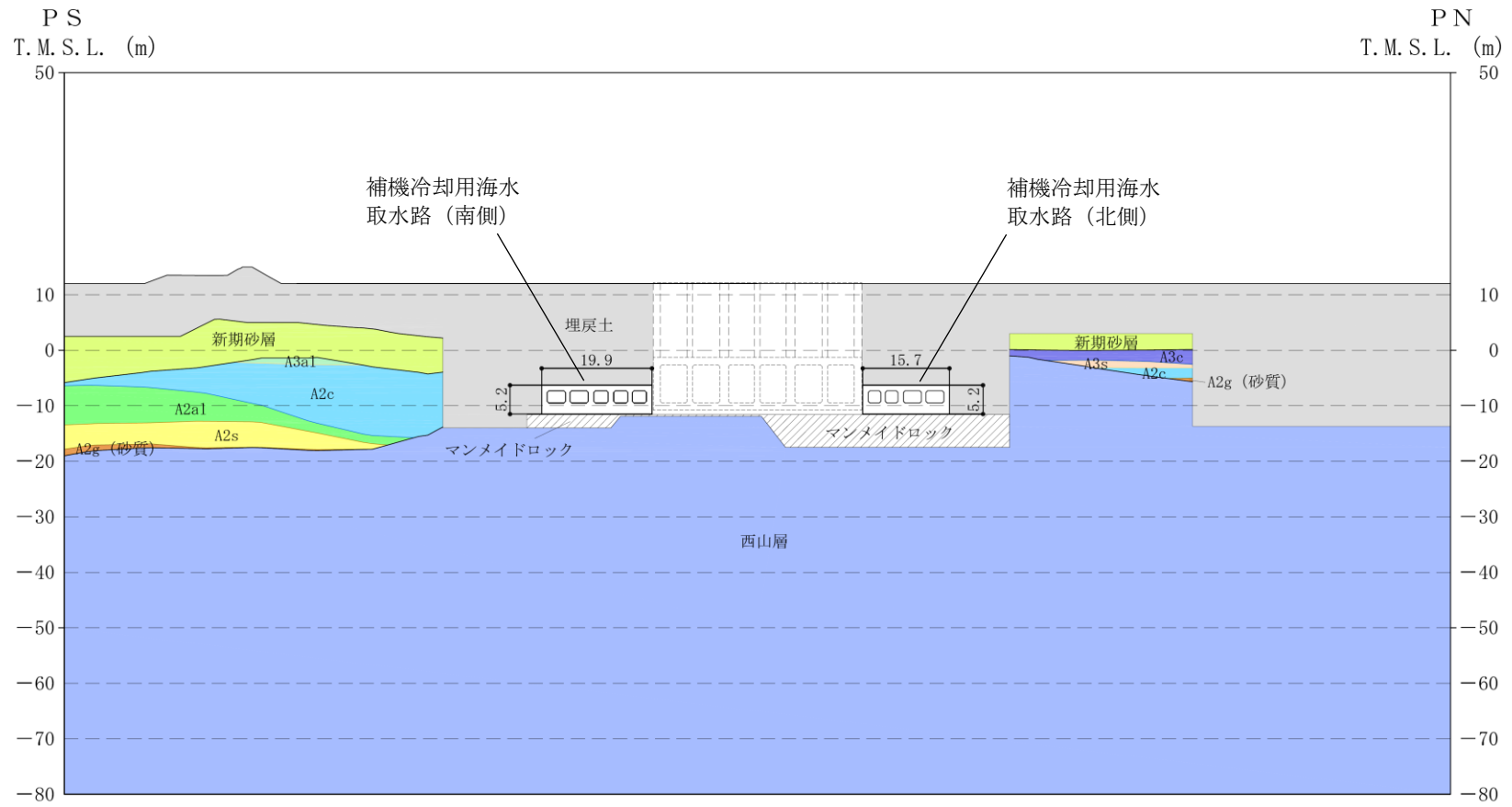
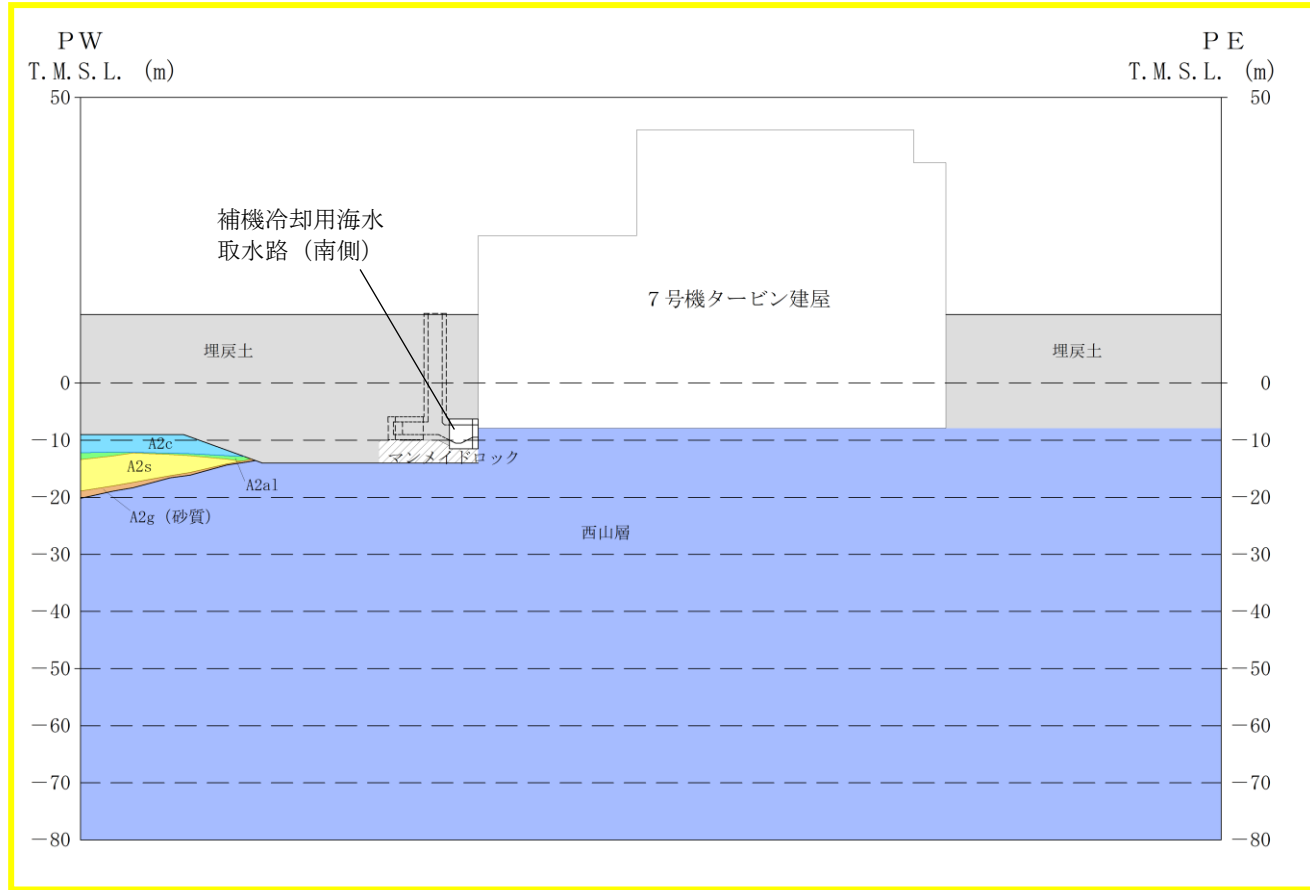


図5-16 自由地盤の初期応力解析から不整形地盤（2次元FEM）の地震応答解析までのフロー



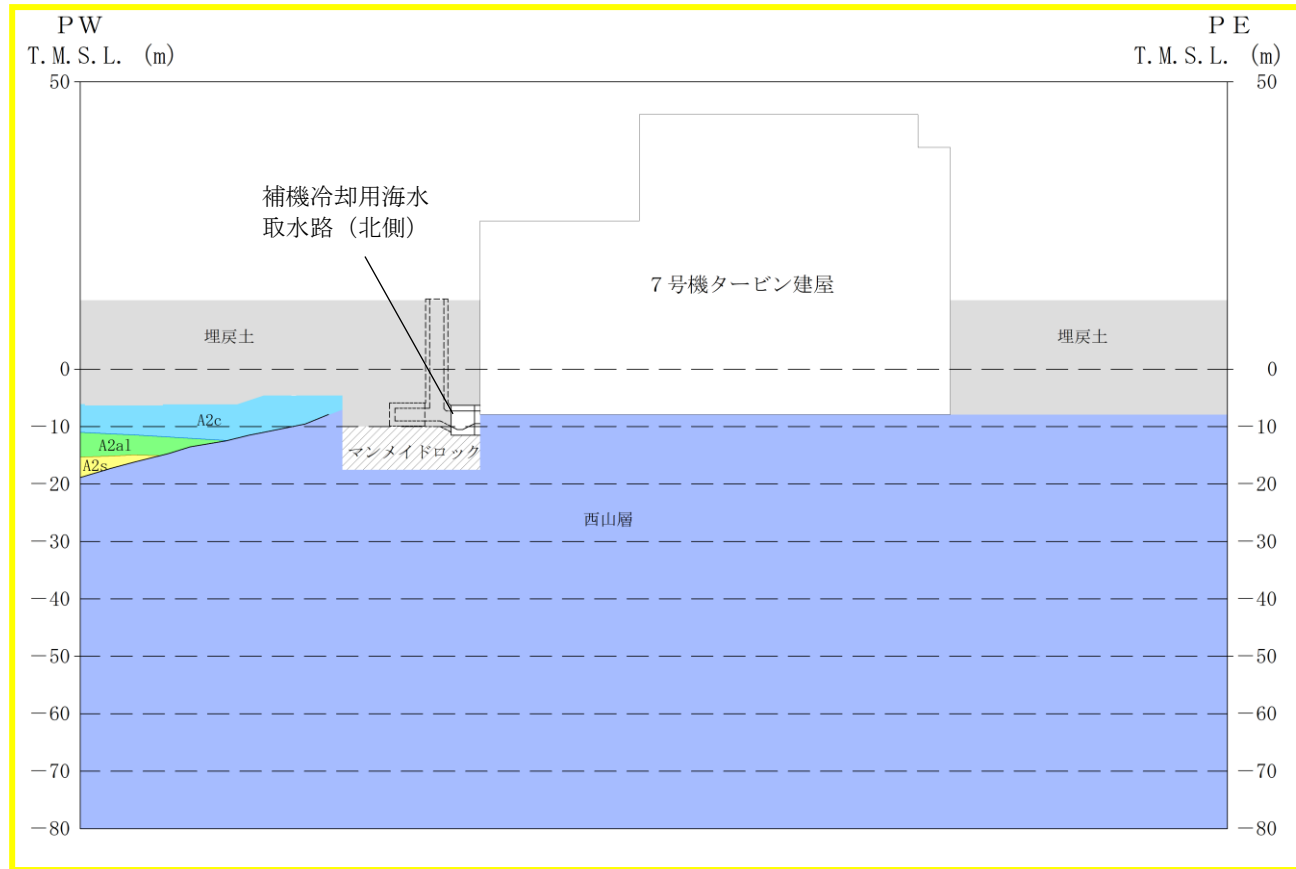
(単位：m)

図 5-17 補機冷却用海水取水路 (横断方向) の周辺地質断面図 (A-A 断面)



(単位：m)

図 5-18 補機冷却用海水取水路 (南側) の縦断方向周辺地質断面図 (B-B 断面)



(単位：m)

図 5-19 補機冷却用海水取水路 (北側) の縦断方向周辺地質断面図 (C-C断面)

(2) 境界条件

a. 初期応力解析時

初期応力解析は、地盤や構造物の自重等の静的な荷重を載荷することによる常時の初期応力を算定するために行う。そこで、初期応力解析時の境界条件は底面固定とし、側方は自重等による地盤の鉛直方向の変形を拘束しないよう鉛直ローラーとする。境界条件の概念図を図 5-20 に示す。

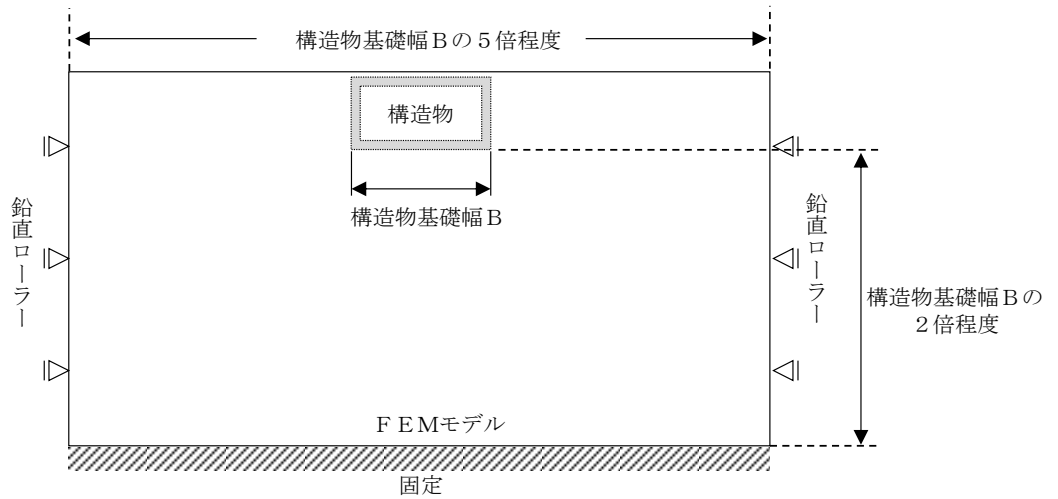


図 5-20 初期応力解析における境界条件の概念図

b. 地震応答解析時

地震応答解析時の境界条件については、有限要素解析における半無限地盤を模擬するため、粘性境界を設ける。底面の粘性境界については、地震動の下降波がモデル底面境界から半無限地盤へ通過していく状態を模擬するため、ダッシュポットを設定する。側方の粘性境界については、自由地盤の地盤振動と不整形地盤側方の地盤振動の差分が側方を通過していく状態を模擬するため、自由地盤の側方にダッシュポットを設定する。補機冷却用海水取水路の地震応答解析モデルを図 5-21～図 5-23 に示す。

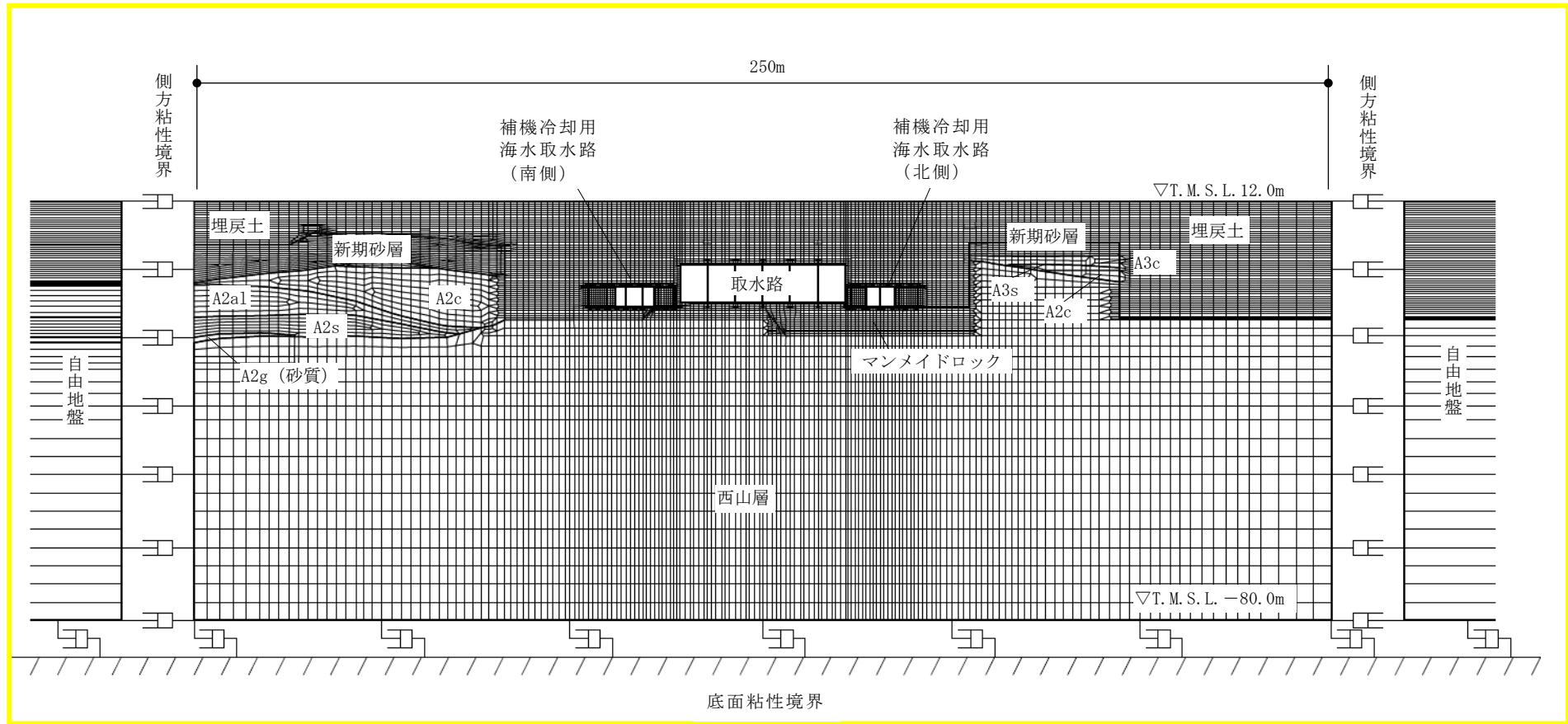


図 5-21 補機冷却用海水取水路の地震応答解析モデル (A-A断面)

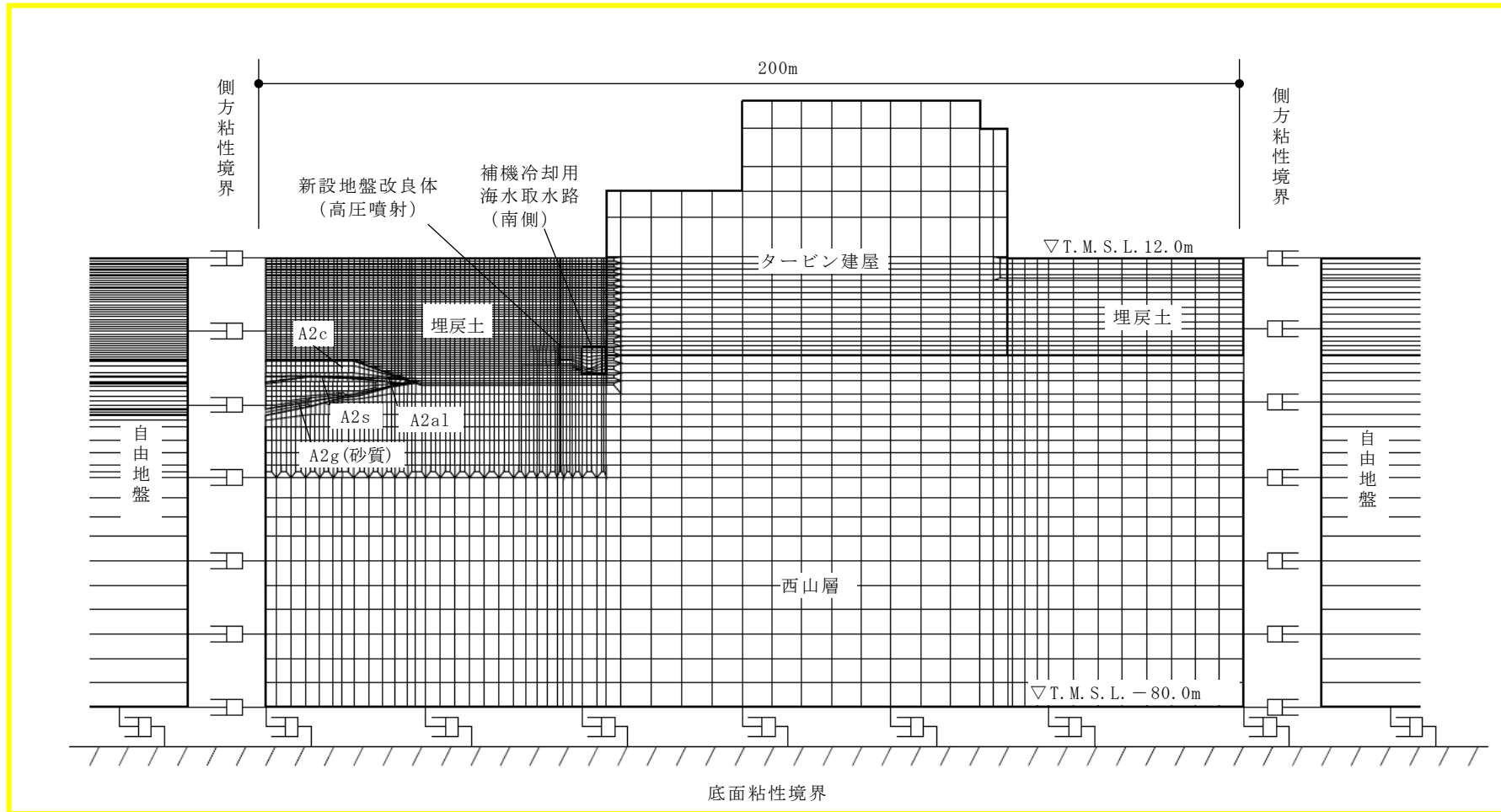
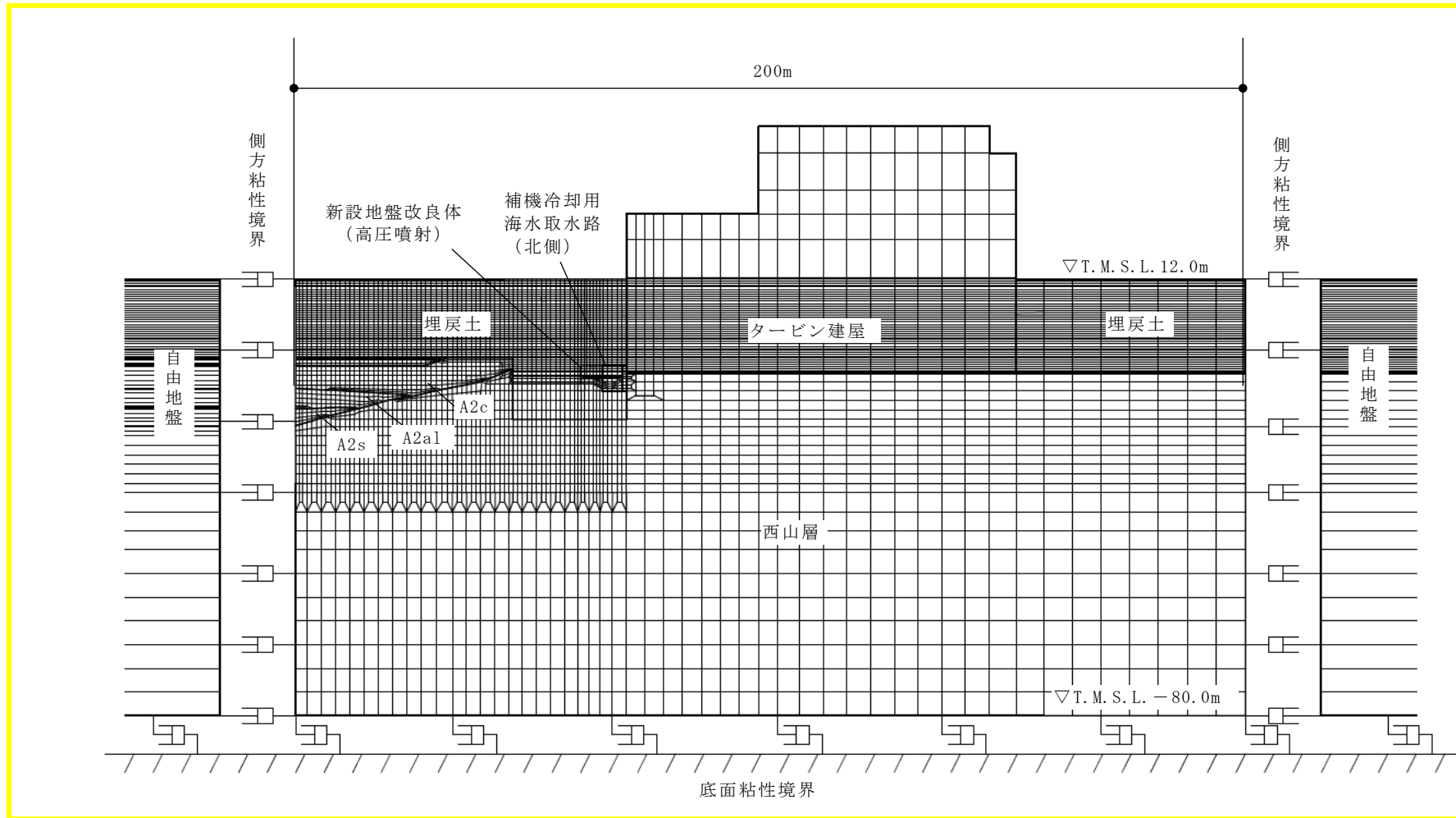


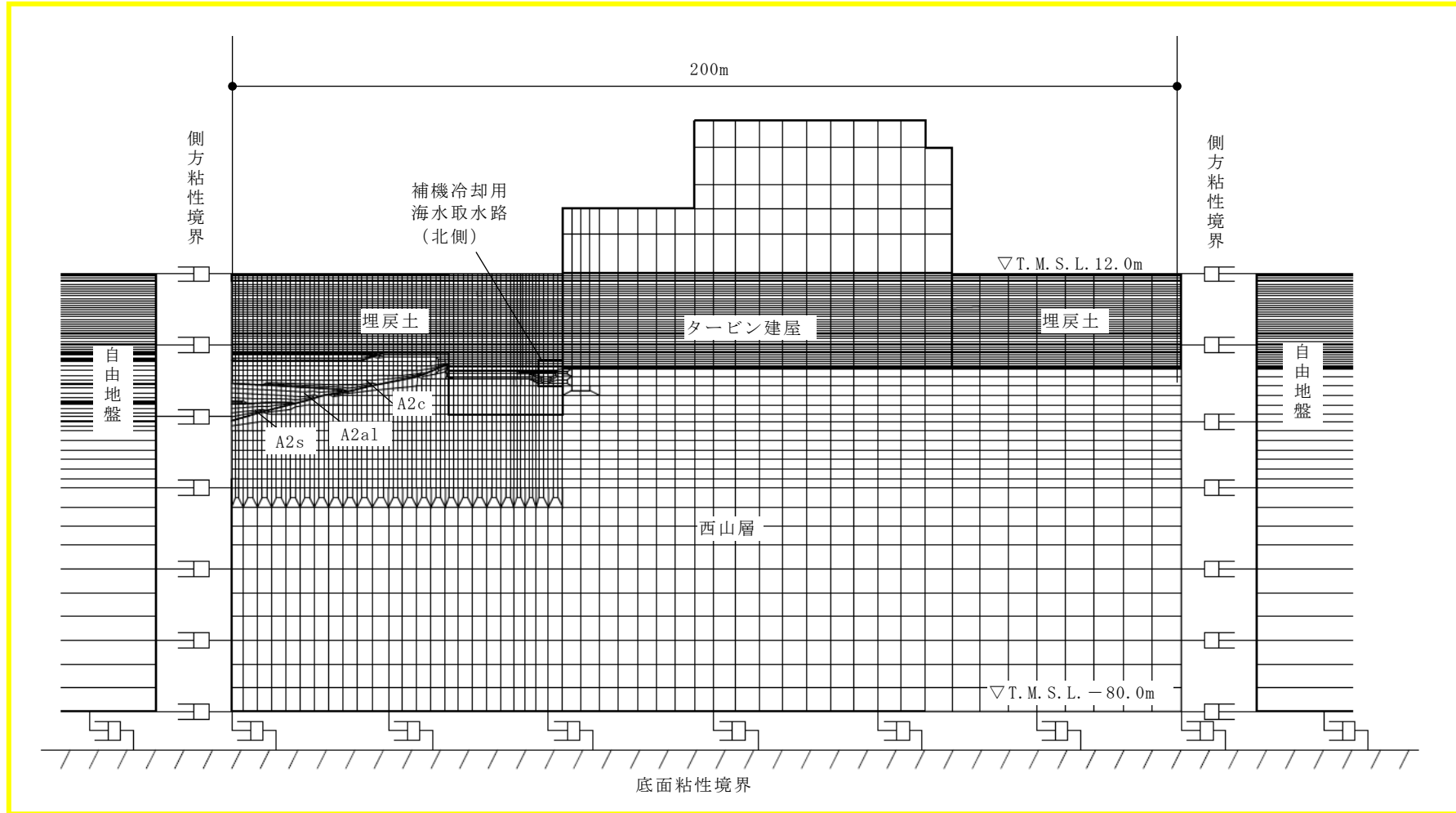
図 5-22 補機冷却用海水取水路（南側）の地震応答解析モデル（B-B断面）



注： 補機冷却用海水取水路（北側）については、左右の妻壁で地盤改良体の有無が異なるため、それぞれの地盤条件に応じた地震応答解析モデルを設定する。

(a) 南妻壁側

図 5-23 補機冷却用海水取水路（北側）の地震応答解析モデル（C-C断面）(1/2)



注： 補機冷却用海水取水路（北側）については、左右の妻壁で地盤改良体の有無が異なるため、それぞれの地盤条件に応じた地震応答解析モデルを設定する。

(b) 北妻壁側

図 5-23 補機冷却用海水取水路（北側）の地震応答解析モデル（C-C断面）(2/2)

(3) 構造物のモデル化

補機冷却用海水取水路の各断面では、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。また、図 5-24 および図 5-25 に示すように、補機冷却用海水取水路は妻壁部を有することから、妻壁部は解析奥行幅に占める割合に応じた等価剛性を設定し、線形平面ひずみ要素でモデル化する。

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。

補機冷却用海水取水路の各断面の解析モデルにおける構造物部分の拡大図を、図 5-26～図 5-27 に示す。

■ : 妻壁

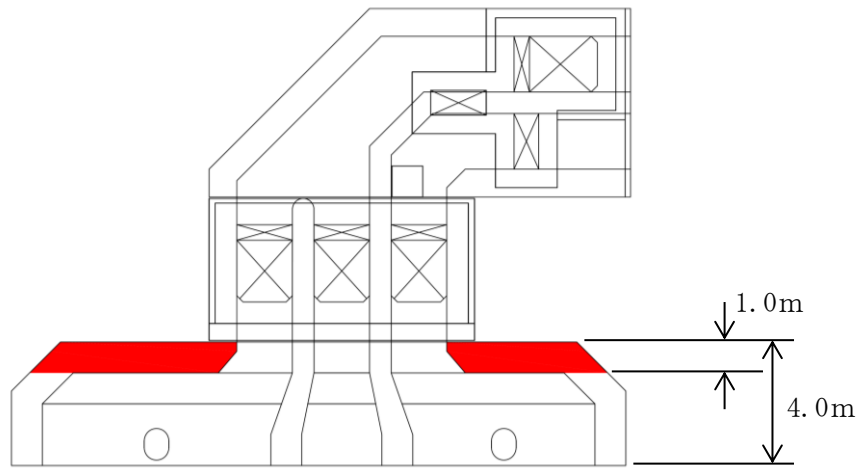


図 5-24 補機冷却用海水取水路の平面図 (A-A断面, 南側構造物拡大)

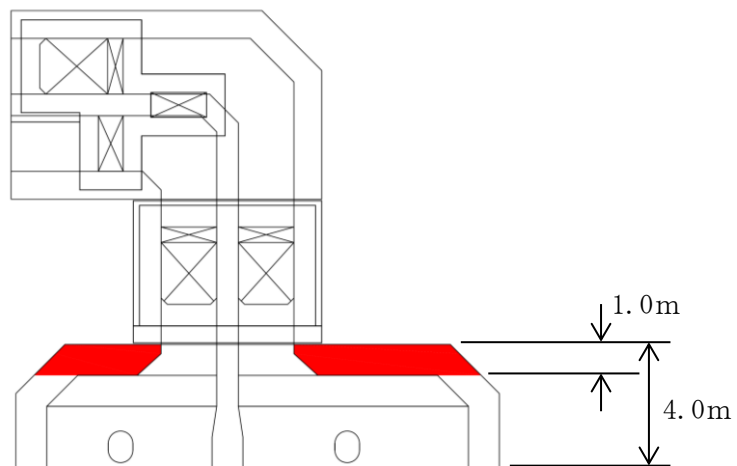


図 5-25 補機冷却用海水取水路の平面図 (A-A断面, 北側構造物拡大)

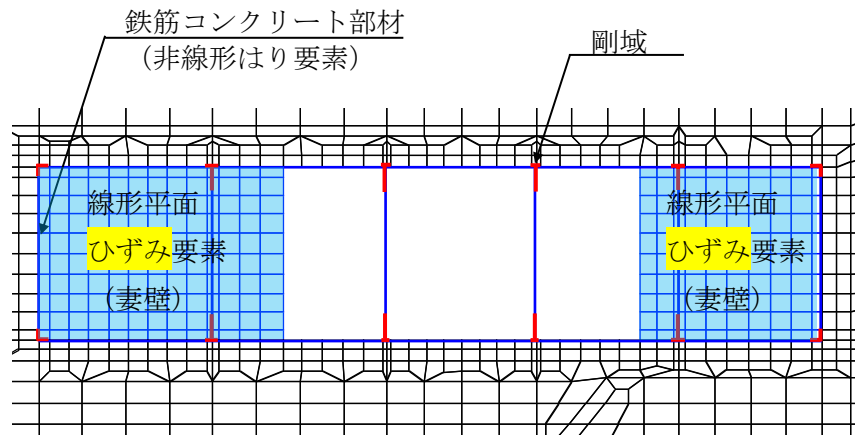


図 5-26 補機冷却用海水取水路の解析モデル (A-A断面, 南側構造物拡大)

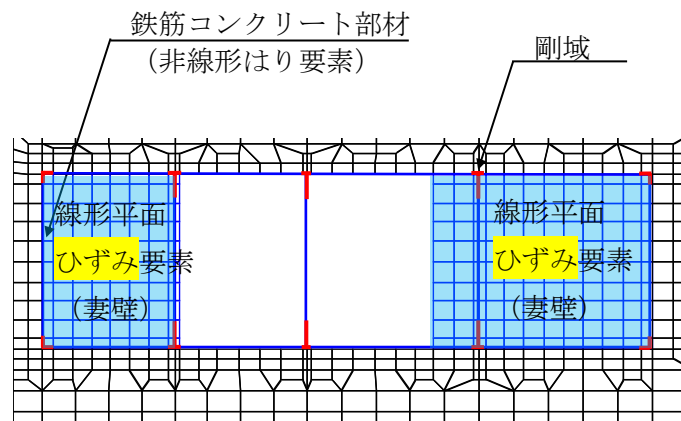


図 5-27 補機冷却用海水取水路の解析モデル (A-A断面, 北側構造物拡大)

(4) 隣接構造物のモデル化

補機冷却用海水取水路の隣接構造物である取水路は、構造部材として考慮する側壁、隔壁、底版、頂版を非線形はり要素でモデル化する。

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。隣接構造物の拡大図を、図 5-28 に示す。

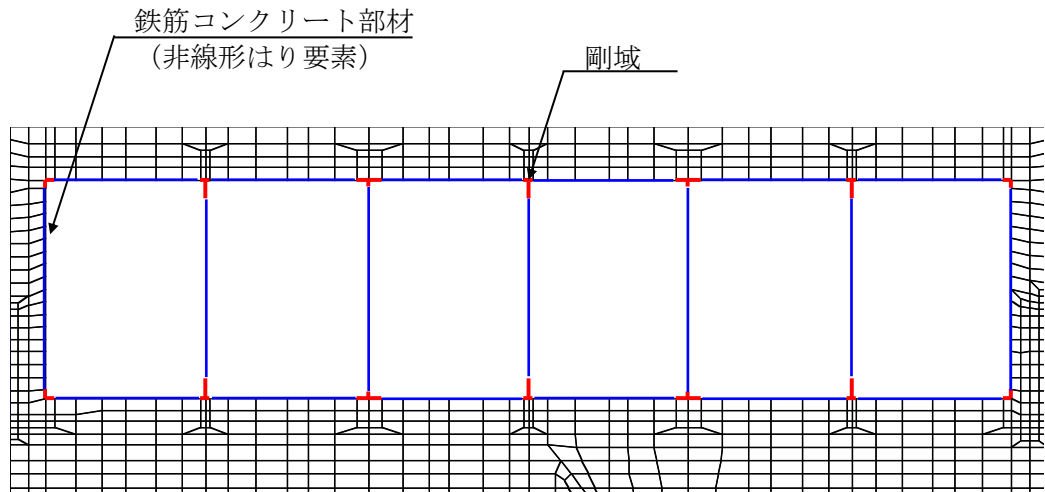


図 5-28 隣接構造物の解析モデル (A-A断面, 取水路拡大)

(5) ジョイント要素の設定

「地盤と構造物」「地盤改良体と構造物」、「マンメイドロックと構造物」及び「マンメイドロックと地盤改良体」との接合面にジョイント要素を設けることにより、地震時の接合面における剥離及びすべりを考慮する。

ジョイント要素は、隣接する要素との接合面で法線方向及びせん断方向に対して設定する。法線方向については、常時の圧縮荷重以上の引張荷重が生じた場合、剛性及び応力を零とし、剥離を考慮する。せん断方向については、各要素間の接合面におけるせん断抵抗力以上のせん断荷重が生じた場合、せん断剛性を零とし、すべりを考慮する。

なお、せん断強度 τ_f は、次式により規定される。

$$\tau_f = c_B + \sigma' \tan \phi_B$$

ここで、

σ' : 要素間の直応力

c_B : 付着力

ϕ_B : 摩擦角

要素間の付着力 c_B 、摩擦角 ϕ_B は、表 5-11 に示す道路橋示方書の設定を参考に、表 5-12 のとおりに設定する。周辺地盤の粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ より、V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、表 5-13 のとおりに設定する。

表 5-11 道路橋示方書における摩擦角 ϕ_B と付着力 c_B

条 件	摩擦角 ϕ_B (摩擦係数 $\tan \phi_B$)	付着力 c_B
土とコンクリート	$\phi_B = \frac{2}{3} \phi$	$c_B = 0$
土とコンクリートの間に栗石を敷く場合	$\left. \begin{array}{l} \tan \phi_B = 0.6 \\ \phi_B = \phi \end{array} \right\}$ の小さい方	$c_B = 0$
岩とコンクリート	$\tan \phi_B = 0.6$	$c_B = 0$
土と土又は岩と岩	$\phi_B = \phi$	$c_B = c$

ただし、 ϕ : 支持地盤のせん断抵抗角 (°) c : 支持地盤の粘着力 (kN/m²)

(道路橋示方書より引用)

表 5-12 要素間の付着力 c_B と摩擦角 ϕ_B

条 件	付着力 c_B (kN/m ²)	摩擦角 ϕ_B (°)
地盤と構造物	0	$\frac{2}{3} \phi$
地盤改良体と構造物	0	31
マンメイドロック*と構造物	0	31
マンメイドロック*と地盤改良体	0	31

注記* : マンメイドロックは、その性状から道路橋示方書における岩とみなす。

表 5-13 周辺地盤の粘着力 c と内部摩擦角 ϕ

地質区分	粘着力 c (kN/m ²)	内部摩擦角 ϕ (°)
埋戻土	0.0 (9.6) *1	35.9 (34.8) *1
マンメイドロック	1840.0	0.0

注記* : 括弧内の数字は、地下水位浅の数值を表す。

ジョイント要素のばね定数は、数値解析上不安定な挙動を起こさない程度に十分大きい値として、港湾構造物設計事例集（上巻）（沿岸技術研究センター，平成 19 年 3 月）に従い、表 5-14 の通り設定する。ジョイント要素の力学特性を図 5-29 に、ジョイント要素の配置を図 5-30 に示す。

表 5-14 ジョイント要素のばね定数

対象	せん断剛性 k_s (kN/m ³)	圧縮剛性 k_n (kN/m ³)
側方及び底面	1.0×10^6	1.0×10^6

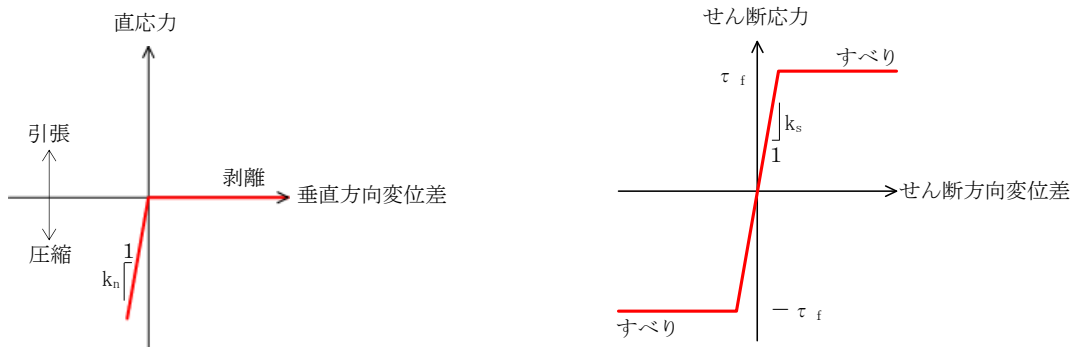
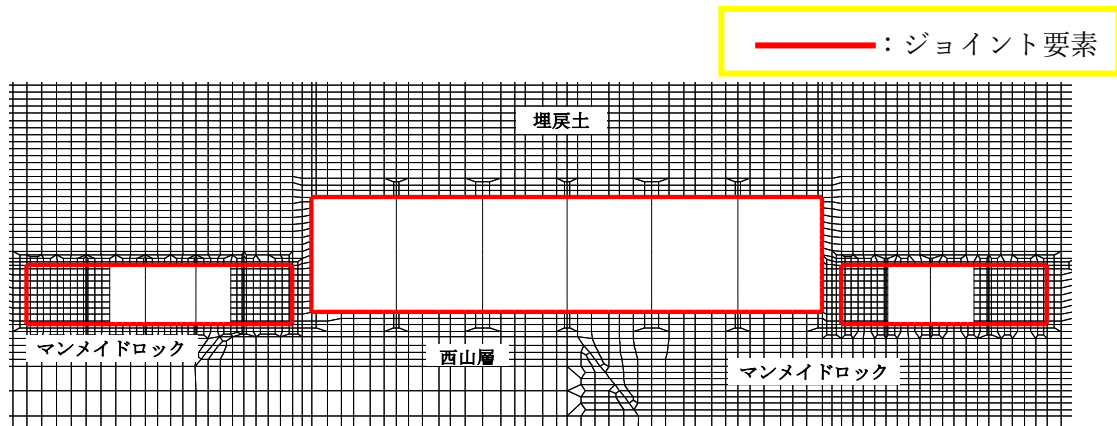
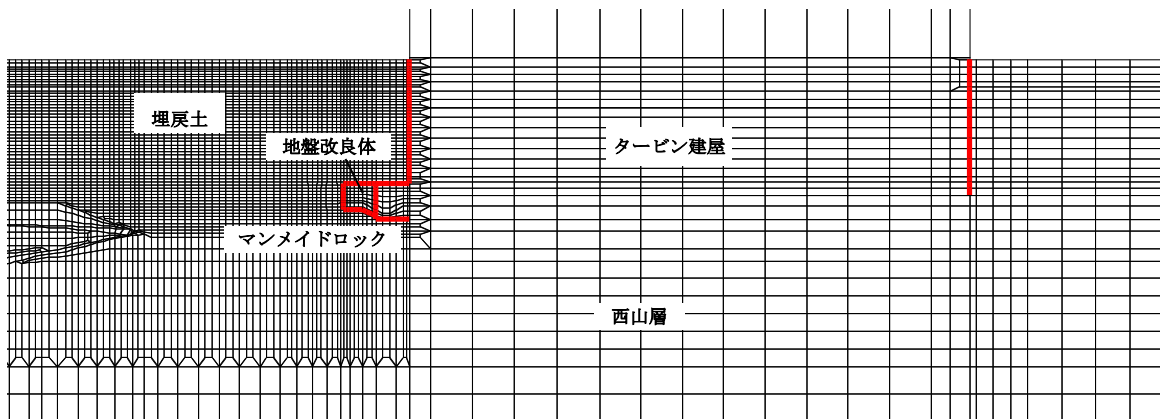


図 5-29 ジョイント要素の力学特性



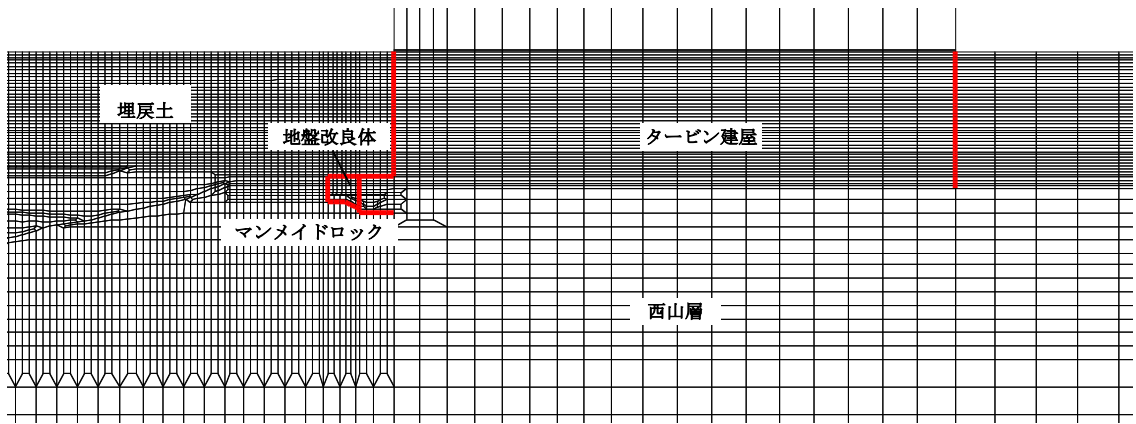
(a) 補機冷却用海水取水路 横断方向 (A-A断面)



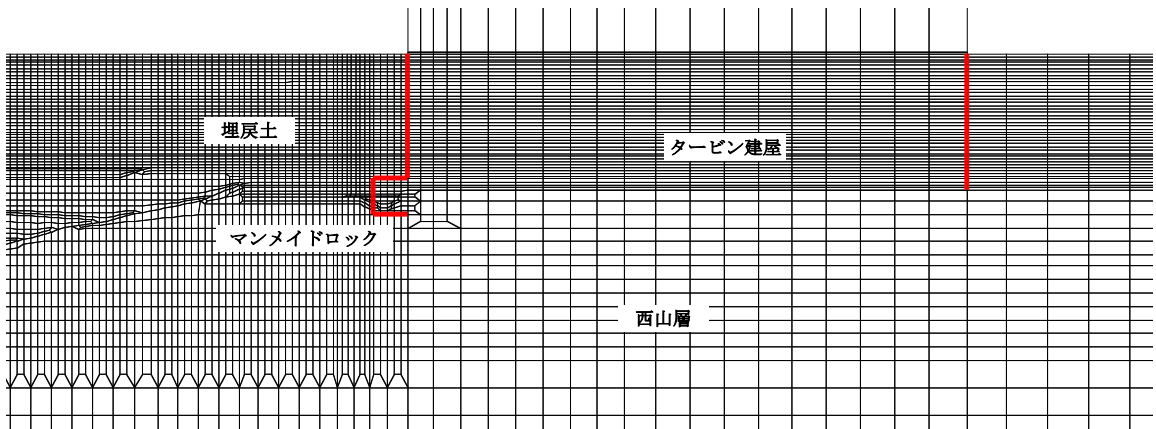
(北妻壁側, 南妻壁側)

(b) 補機冷却用海水取水路 (南側) 縦断方向 (B-B断面)

図 5-30 ジョイント要素の配置(1/2)



(南妻壁側)



(北妻壁側)

(b) 補機冷却用海水取水路 (北側) 縦断方向 (C-C断面)

図 5-30 ジョイント要素の配置 (2/2)

(6) 材料特性の設定

鉄筋コンクリート部材は非線形はり要素を用いてモデル化する。非線形特性の設定においては、コンクリート及び鉄筋について、それぞれの非線形性を考慮する。材料の非線形特性はコンクリート標準示方書に準拠し設定する。

部材の非線形特性は以下のとおりである。

図 5-31 に、鉄筋コンクリート部材におけるM- ϕ 関係のトリリニアモデルを示す。また、コンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ曲線を図 5-32 及び図 5-33 に示す。なお、復元力特性は、図 5-34 に示す修正武田モデルを適用する。

有効応力解析コード「FLIP Ver. 7.4.1」における当該非線形特性では、地震時における部材の軸力は一定とされることから、常時応力解析により各部材に発生する軸力にて当該非線形特性を設定する。軸力変動が部材の非線形特性に及ぼす影響については、(参考資料 3) に示す。

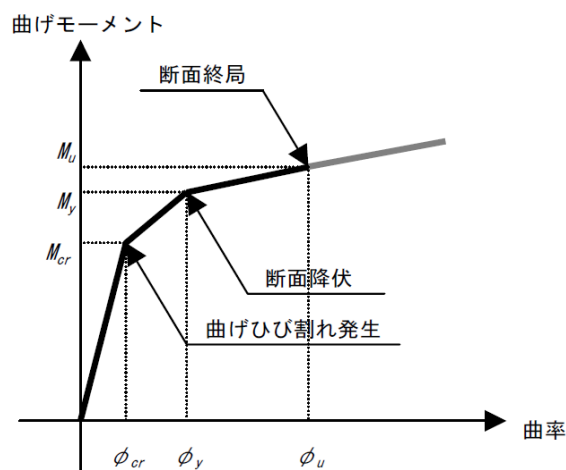


図 5-31 M- ϕ 関係のトリリニアモデル (鉄筋コンクリート部材)

(土木学会マニュアルより引用)

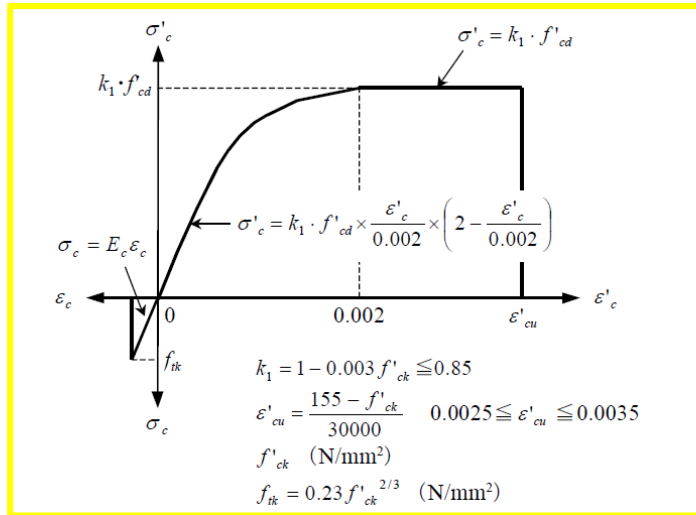


図 5-32 コンクリートの応力-ひずみ曲線
(土木学会マニュアルより引用)

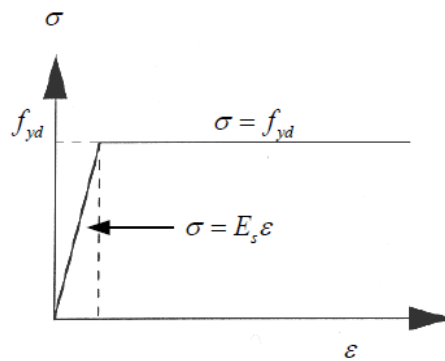


図 5-33 鉄筋の応力-ひずみ曲線
(土木学会マニュアルより引用)

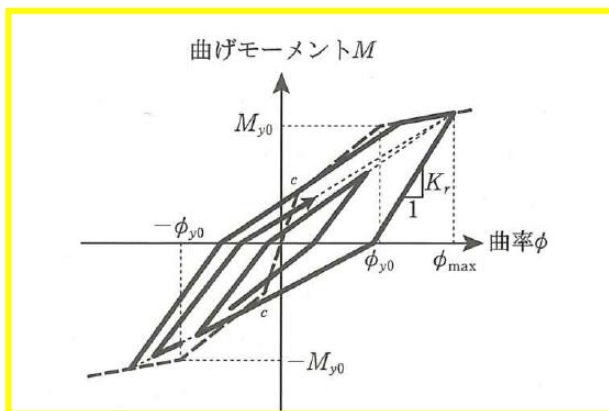


図 5-34 鉄筋コンクリート部材の履歴特性 (修正武田モデル)

(道路橋示方書 (V耐震設計編)・同解説 (平成 14 年 3 月) より引用)

5.3.3 減衰定数

減衰定数は、KK7 補足-027-1「資料1 屋外重要土木構造物の耐震安全性評価について」に基づき設定する。

5.3.4 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て設定する。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、補機冷却用海水取水路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、補機冷却用海水取水路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、補機冷却用海水取水路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 5-15 に示す。

表 5-15 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（T.M.S.L. 5.0m）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
	鉛直地震動		○ ・躯体、動土圧を考慮する
	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：スクリーン室，取水路，補機冷却用海水取水路）

(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、T.M.S.L. 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。

(2) 内水圧

補機冷却用海水取水路の内部には、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。

A-A断面（南側）における内水圧図を図 5-35 に、A-A断面（北側）における内水圧図を図 5-36 に示す。

(内水位) : ∇ T.M.S.L. 1.0m

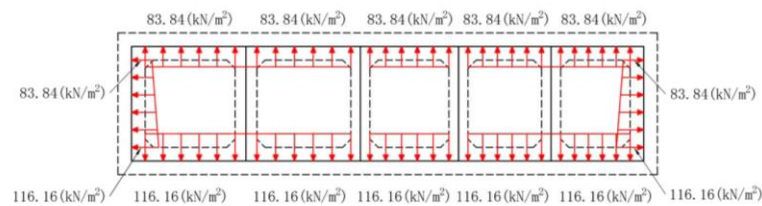


図 5-35 内水圧図 A-A断面（南側）

(内水位) : ∇ T.M.S.L. 1.0m

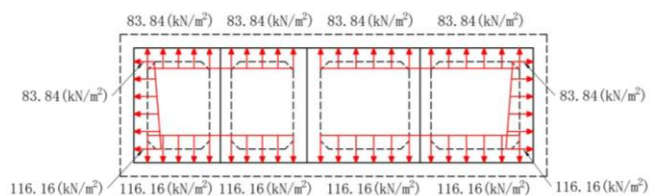


図 5-36 内水圧図 A-A断面（北側）

(3) 動水圧

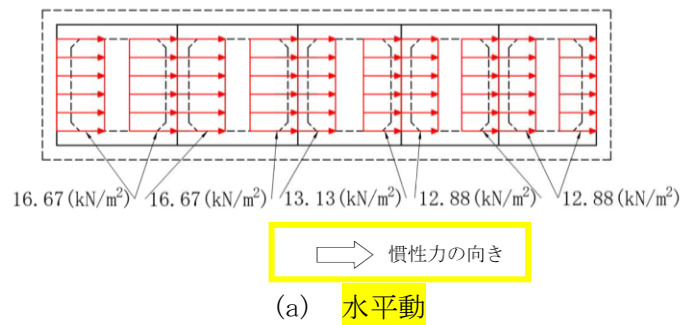
補機冷却海水取水路の内部には、朔望平均満潮位 T. M. S. L. 0.49m に対して保守的に設定した T. M. S. L. 1.0m を水面とした動水圧を付加質量として設定し、地震時の影響を考慮する。設定の際は、海水の密度として、 $1.03\text{g}/\text{cm}^3$ を考慮する。

a. A-A断面（南側）

A-A断面（南側）における動水圧図を図 5-37 に示す。

A-A断面（南側）は満水状態で自由水面が存在しないため、付加質量を設定する際は、水平動による動水圧は左右の壁に半分ずつ等しく作用させ、鉛直動による動水圧は上下スラブに半分ずつ作用させるものとする。

(内水位) : ∇ T. M. S. L. 1.0m



(内水位) : ∇ T. M. S. L. 1.0m

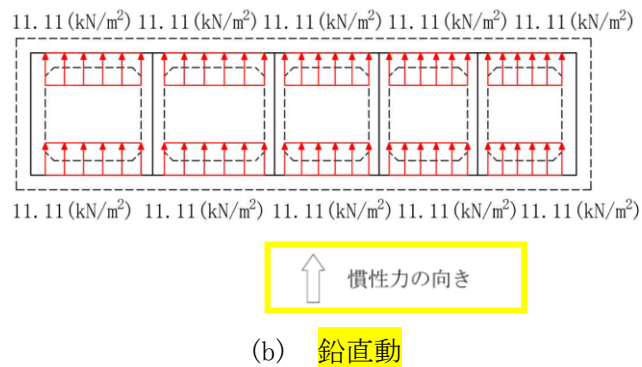


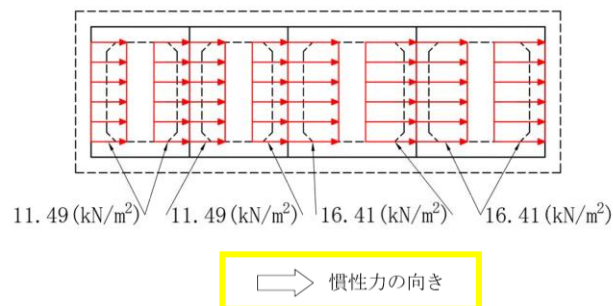
図 5-37 動水圧図 A-A断面（南側）

b. A-A断面（北側）

A-A断面（北側）における動水圧図を図 5-38 に示す。

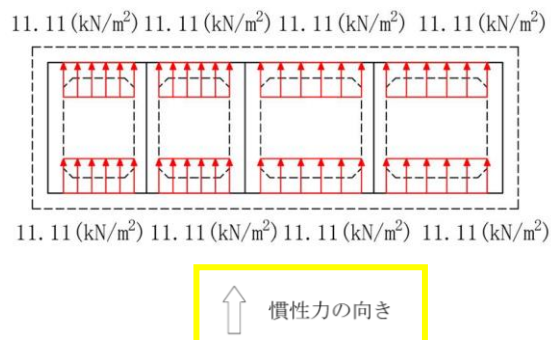
A-A断面（北側）は満水状態で自由水面が存在しないため、付加質量を設定する際は、水平動による動水圧は左右の壁に半分ずつ等しく作用させ、鉛直動による動水圧は上下スラブに半分ずつ作用させるものとする。

(内水位) : ∇ T. M. S. L. 1. 0m



(a) 水平動

(内水位) : ∇ T. M. S. L. 1. 0m



(b) 鉛直動

図 5-38 動水圧図 A-A断面（北側）

5.3.5 耐震評価における解析ケース

補機冷却用海水取水路は地中埋設構造物であるため、地震時の応答は地盤の応答に大きく影響される。また、構造物の地震時の変形は、主に上載地盤から地盤構造物間の摩擦を介して作用する頂版せん断力及び側方地盤から作用する土圧によって生じ、これらの作用力は地盤のせん断弾性係数に大きく依存する。したがって、補機冷却用海水取水路の耐震評価においてばらつきを考慮する物性値は、地盤の初期せん断弾性係数 G_0 とする。

耐震評価における解析ケースを表 5-16 に示す。

地盤剛性のばらつきの影響を考慮するため、地表付近で地下水面をまたぐ地層（埋戻土及び新期砂層）のばらつきは、初期せん断弾性係数と有効拘束圧の関係から初期せん断弾性係数の標準偏差 σ を用いて、せん断波速度のばらつきとして設定する。地下水以深の飽和土層（沖積層及び古安田層）のばらつきは、各地層のPS 検層の結果からせん断波速度の標準偏差 σ を求め、せん断波速度のばらつきとして設定する（解析ケース②，③，⑤）。

地盤の液状化強度特性は、代表性及び網羅性を踏まえた上で保守性を考慮し、液状化強度試験データの最小二乗法による回帰曲線と、その回帰係数の自由度を考慮した不偏分散に基づく標準偏差 σ を用いて、液状化強度特性を (-1σ) にて設定する（解析ケース①，②，③）。

また、構造物への応答加速度に対する保守的な配慮として、地盤の非液状化の条件を仮定した解析ケースを設定する（解析ケース④，⑤）。

上記の地盤剛性及び液状化強度特性の設定を組み合わせた解析ケース（①～⑤）を実施することにより、地盤物性のばらつきの影響を網羅的に考慮する。

耐震評価においては、全ての基準地震動 S_s に対して解析ケース①（基本ケース）を実施する。また、解析ケース①において、曲げ軸力照査及びせん断力照査をはじめとした全ての評価項目について、各照査値が最も厳しい（許容限界に対する余裕が最も小さい）地震動を用い、追加解析ケースとして解析ケース②～⑤を実施する。最も厳しい地震動の選定は、照査値 1.0 に対して 2 倍の余裕となる照査値 0.5 以上を相対的に厳しい地震動の選定の目安として実施する。また、上記解析ケースの結果を踏まえ、さらに照査値が大きくなる可能性がある場合は、追加解析を実施する。

追加解析ケースを実施する地震動の選定フローを図 5-39 に示す。

表 5-16 耐震評価における解析ケース

解析ケース		①		②		③		④		⑤	
		基本ケース		地盤物性のばらつき (+1σ) を考慮した解析ケース		地盤物性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース		非液化化の条件を仮定した解析ケース		地盤物性のばらつき (+1σ) を考慮して非液化化の条件を仮定した解析ケース	
地盤剛性の設定		地盤剛性 (平均値)		地盤剛性 (+1σ)		地盤剛性 (-1σ)		地盤剛性 (-1σ)		地盤剛性 (+1σ)	
液化化強度特性の設定		液化化強度特性 (-1σ)		液化化強度特性 (-1σ)		液化化強度特性 (-1σ)		液化化パラメータを非適用		液化化パラメータを非適用	
地震波 (位相)	Ss-1	++	実施								
		+ -	実施								
		- +	実施								
		--	実施								
	Ss-2		実施								
	Ss-3	++	実施								
		+ -	実施								
		- +	実施								
		--	実施								
	Ss-4		実施								
	Ss-5		実施								
	Ss-6		実施								
	Ss-7		実施								
	Ss-8	++	実施								
		- +	実施								

全ての基準地震動S_sに対して実施する①の解析ケース(基本ケース)において、せん断力照査及び曲げ軸力照査をはじめとした全ての照査項目について、各照査値が最も厳しい(許容限界に対する余裕が最も小さい)地震動を用い、②～⑤より追加解析ケースを実施する。

また、上記解析ケースの結果を踏まえ、さらに照査値が大きくなる可能性がある場合は、追加解析を実施する。

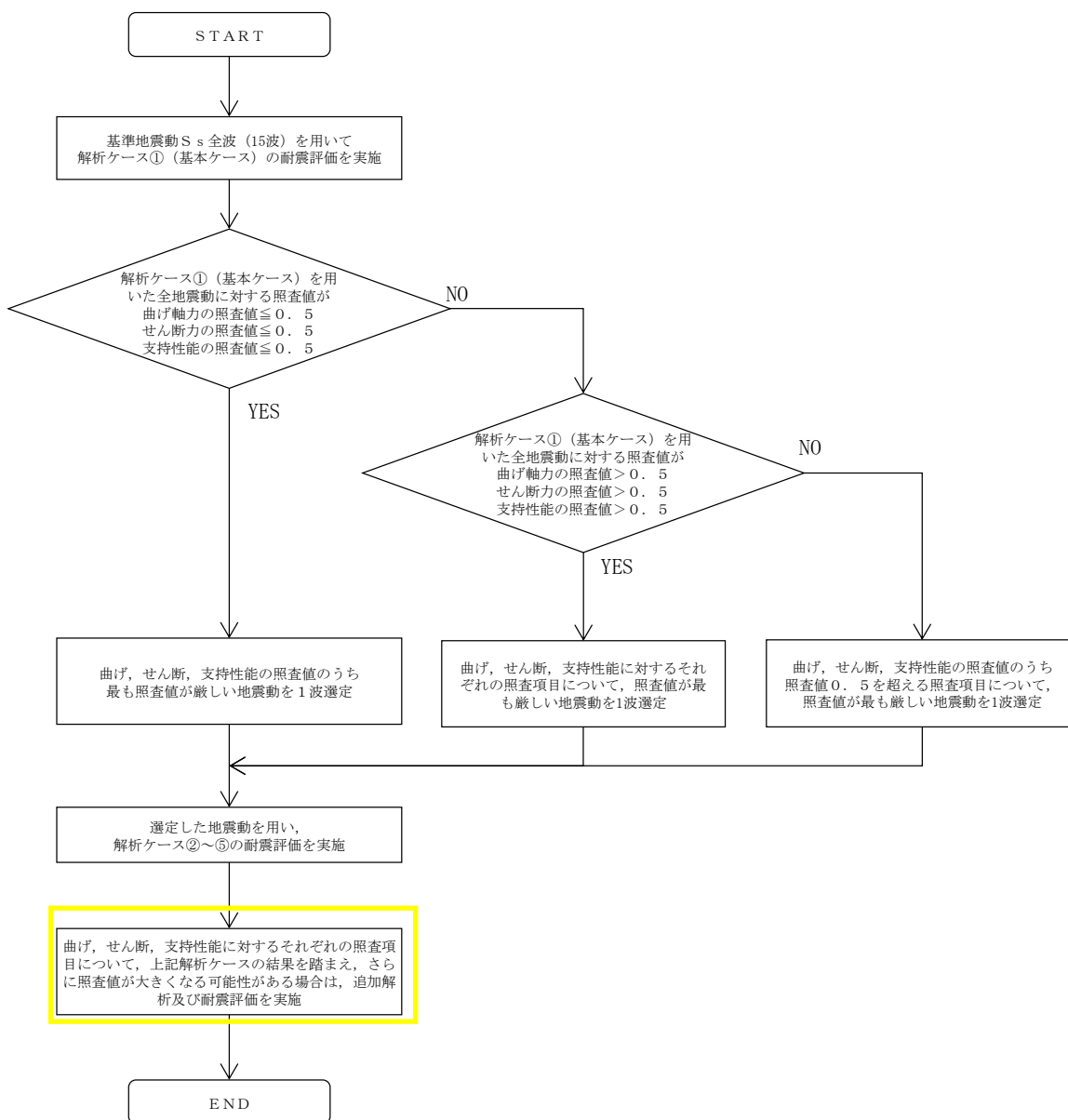


図 5-39 解析ケース②~⑤より追加解析ケースを実施する地震動の選定フロー

5.4 3次元構造解析

5.4.1 解析手法

補機冷却用海水取水路の評価は、構造物の三次元的な形状の影響を考慮するため、積層シェル要素及び非線形梁要素でモデル化し、水平二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。

補機冷却用海水取水路に作用する荷重は、地震応答解析（2次元動的有限要素法解析）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する。

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。

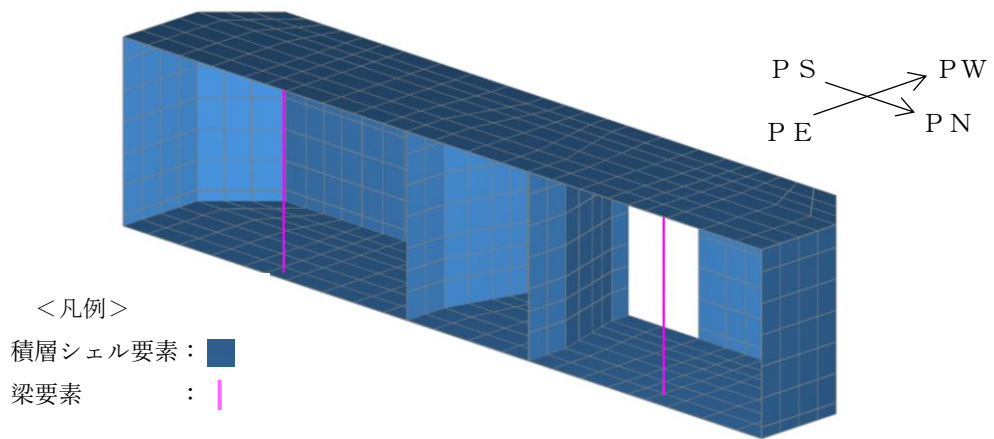
5.4.2 解析モデルの設定

(1) 構造物のモデル化及び境界条件

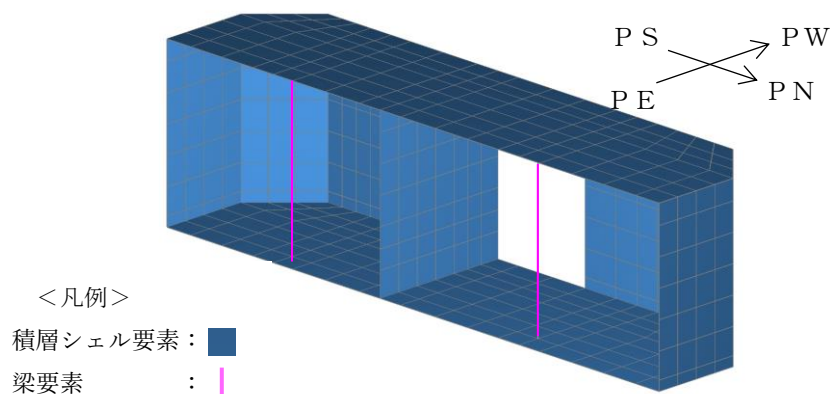
補機冷却用海水取水路のうち、柱部材以外については材料の非線形特性を考慮した非線形積層シェル要素でモデル化する。積層シェル要素は隔壁（部材厚さ 0.7m）は 6 層、それ以外（部材厚 1.0m）は 8 層とし、主鉄筋の位置が層の中心となるよう、主鉄筋位置に鉄筋コンクリート要素を設定する。鉄筋コンクリート要素を除く範囲は、無筋コンクリート要素としてモデル化する。柱部材については、積層シェル要素の面外方向と同様の非線形特性を有する非線形梁要素でモデル化する。

底面に地盤ばね要素を配置する。タービン建屋との接続面は、鉛直ローラーの境界条件とする。

モデル概念図を図 5-40 に、要素分割図を図 5-41 及び図 5-42 に示す。

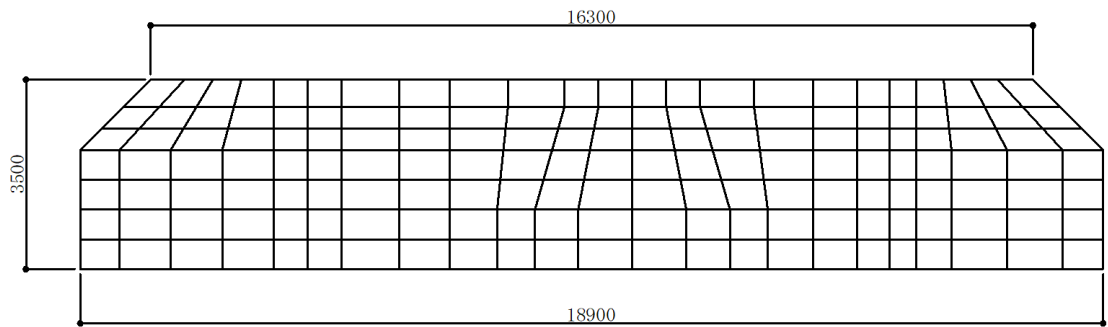
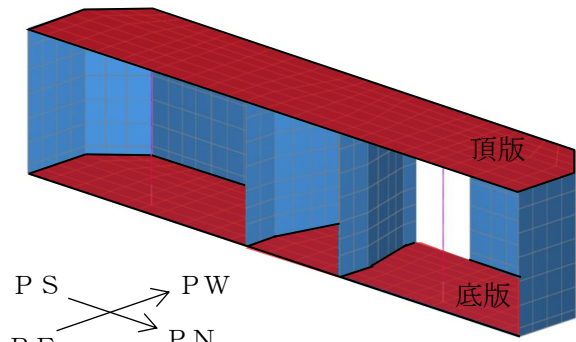


(a) 補機冷却用海水取水路（南側）



(b) 補機冷却用海水取水路（北側）

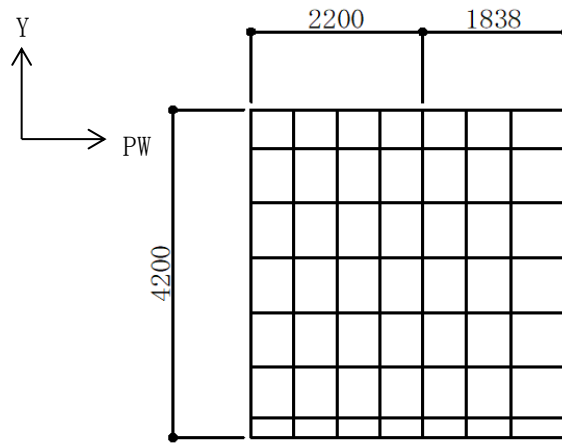
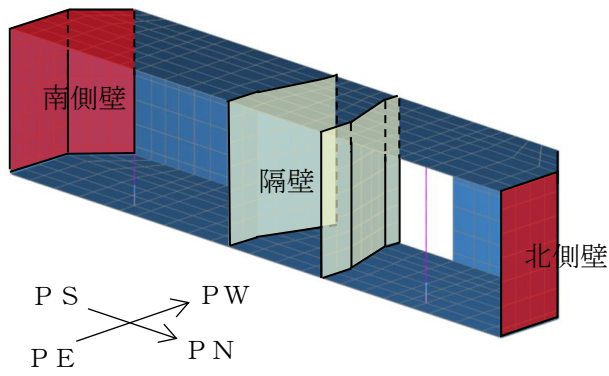
図 5-40 3次元構造解析モデルの概念図



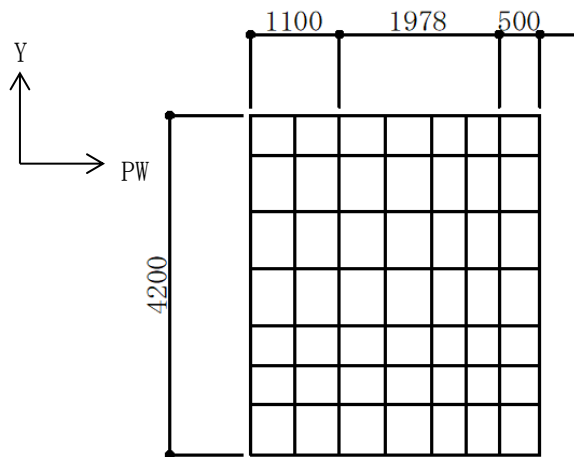
(a) 頂版及び底版

(単位：mm)

図 5-41 要素分割図 (補機冷却用海水取水路 (南側)) (1/3)



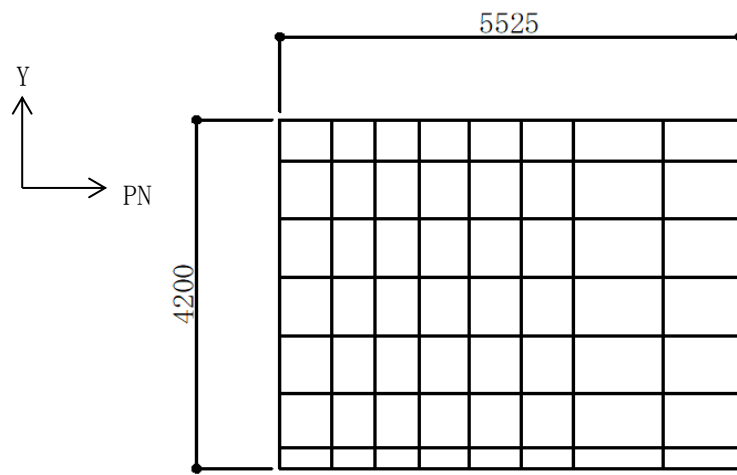
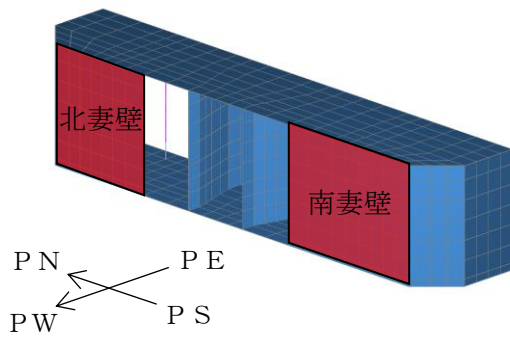
(b) 南及び北側壁



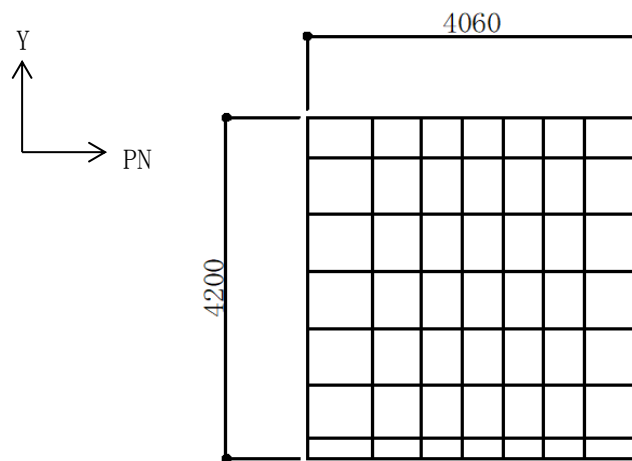
(c) 隔壁

(単位 : mm)

図 5-41 要素分割図 (補機冷却用海水取水路 (南側)) (2/3)



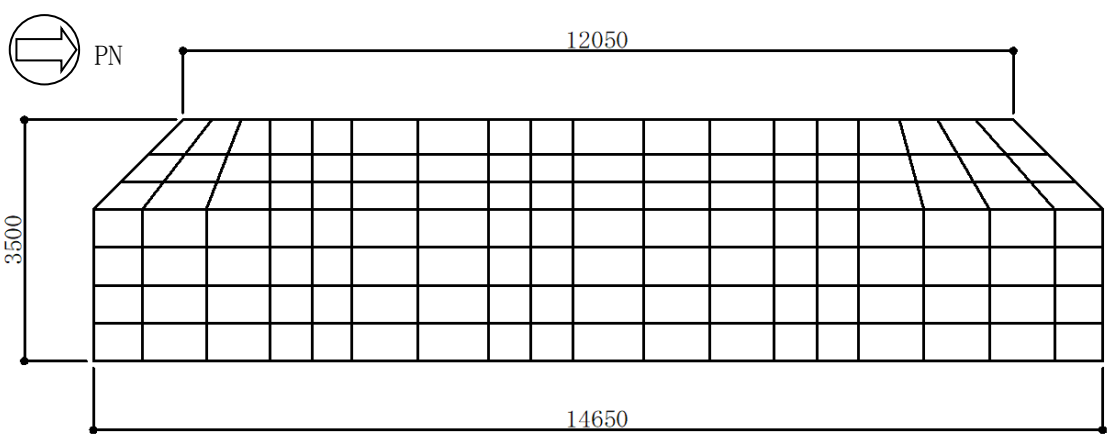
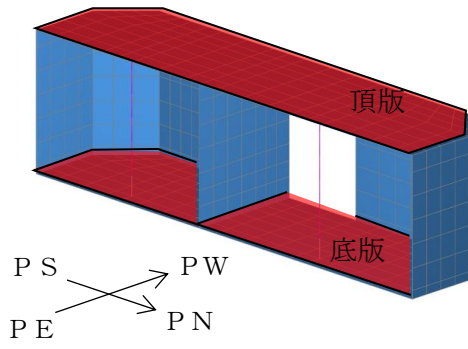
(d) 南妻壁



(e) 北妻壁

(単位：mm)

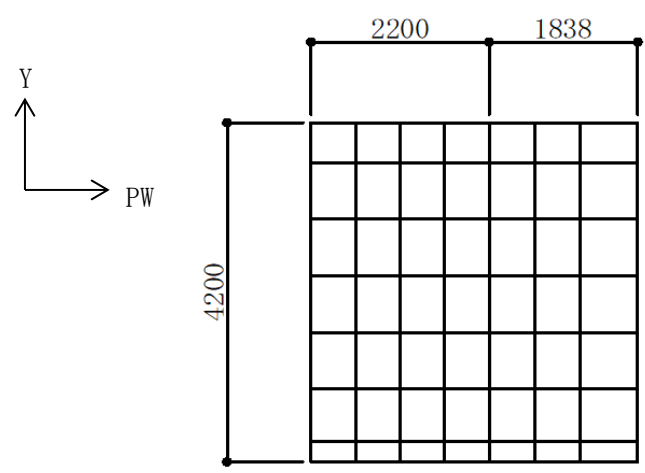
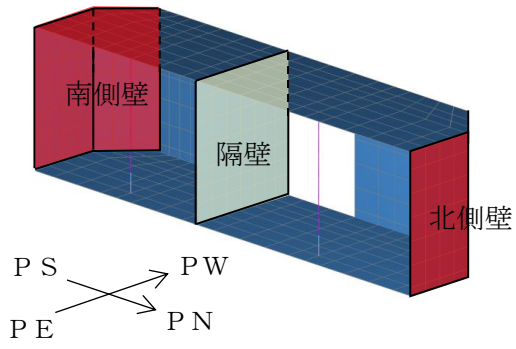
図 5-41 要素分割図 (補機冷却用海水取水路 (南側)) (3/3)



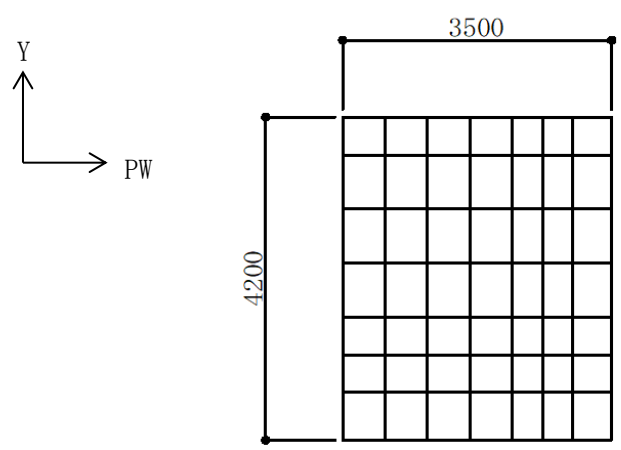
(a) 頂版及び底版

(単位：mm)

図 5-42 要素分割図 (補機冷却用海水取水路 (北側)) (1/3)



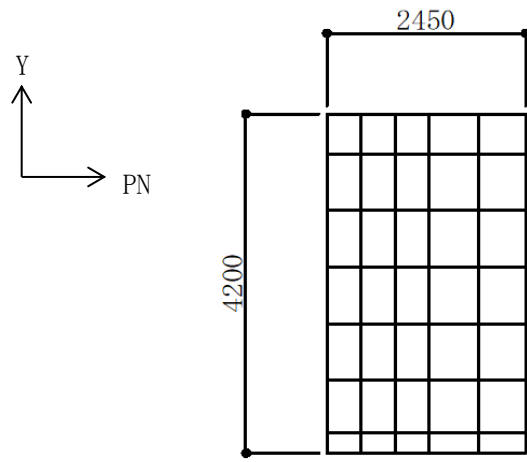
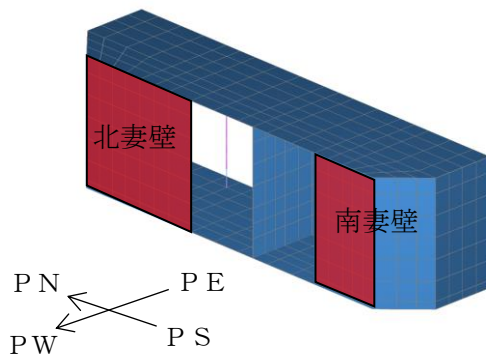
(b) 南及び北側壁



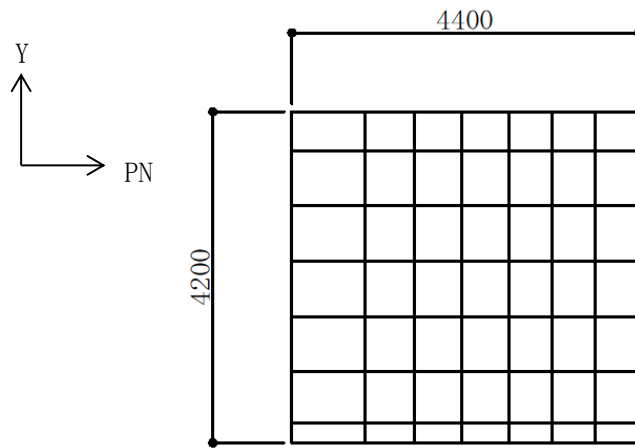
(c) 隔壁

(単位：mm)

図 5-42 要素分割図 (補機冷却用海水取水路 (北側)) (2/3)



(d) 南妻壁

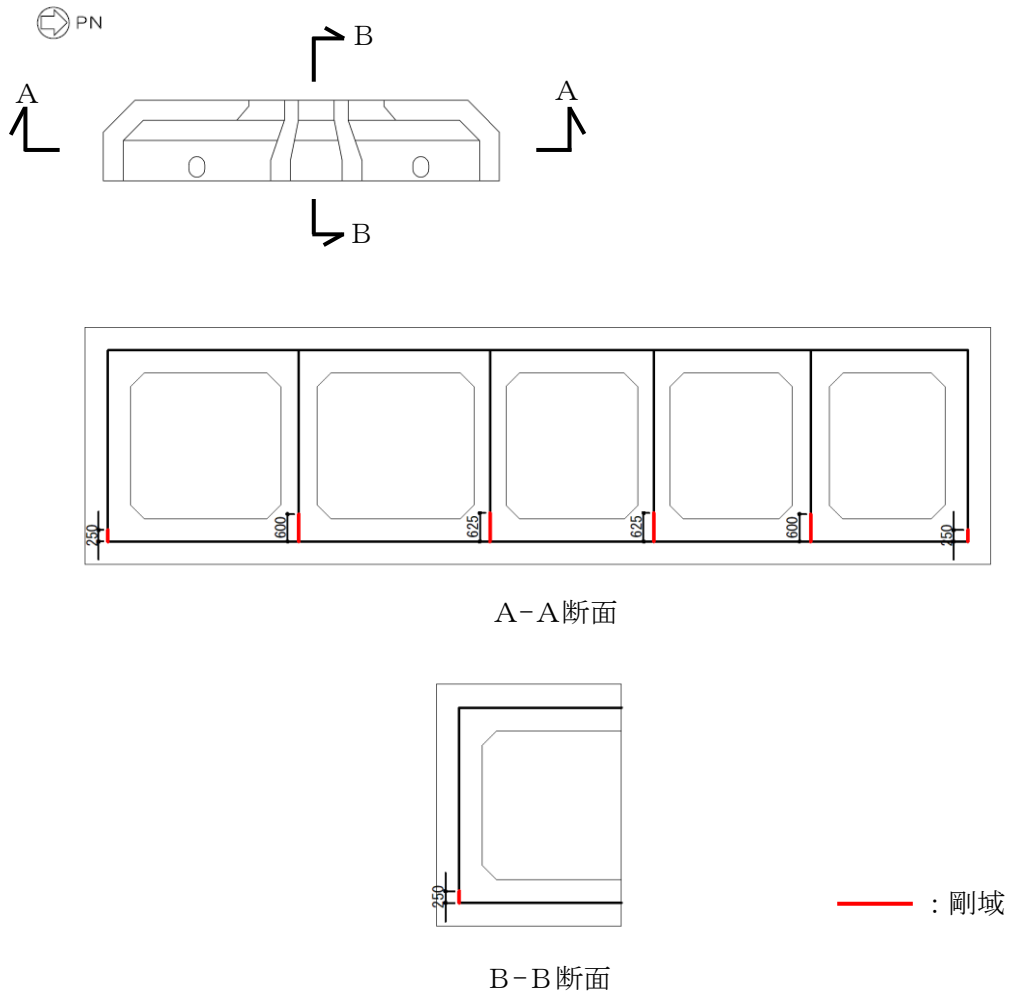


(e) 北妻壁

(单位: mm)

图 5-42 要素分割图 (補機冷却用海水取水路 (北側)) (3/3)

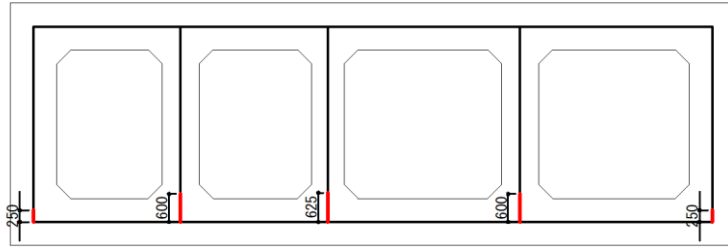
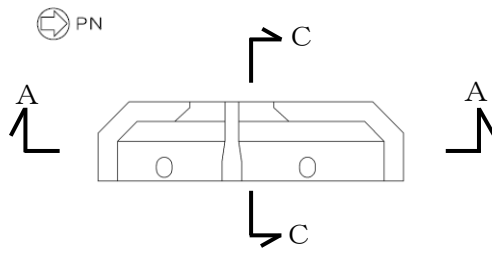
補機冷却用海水取水路の3次元構造解析モデルでは、柱は非線形線形梁要素、側壁及び隔壁は非線形シェル要素でモデル化する。ここで、図5-43に示す範囲については、底版の部材厚（実形状）は他の部材と比較して相対的に厚いことを踏まえ、土木学会マニュアルに基づく剛域を設定する。



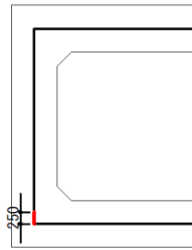
(a) 補機冷却用海水取水路（南側）

(単位：mm)

図5-43 補機冷却用海水取水路 剛域設定範囲(1/2)



A-A断面



C-C断面

— : 剛域

(b) 補機冷却用海水取水路 (北側)

(単位: mm)

図 5-43 補機冷却用海水取水路 剛域設定範囲 (2/2)

(2) 地盤ばね要素

構造物底面に設ける地盤ばね要素の剛性は、道路橋示方書に基づき設定する。

鉛直方向の地盤反力係数 k_v は、道路橋示方書の直接基礎の地盤反力係数算定方法にある下式により算出する。水平方向せん断地盤反力係数は、鉛直方向地盤反力係数の $1/3$ とする。

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{B_v}{0.3} \right)^{-3/4}$$

ここで、

k_{v0} : 直径 0.3m の剛体円板による平板載荷試験の値に相当する鉛直方向地盤反力係数 (kN/m³)

$$k_{v0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0$$

E_0 : 変形係数 (kN/m²)

B_v : 基礎の換算載荷幅 (m)

$$B_v = \sqrt{A_v}$$

A_v : 鉛直方向の載荷面積 (m²)

α : 地盤反力係数の推定に用いる係数

(3) 材料の非線形特性

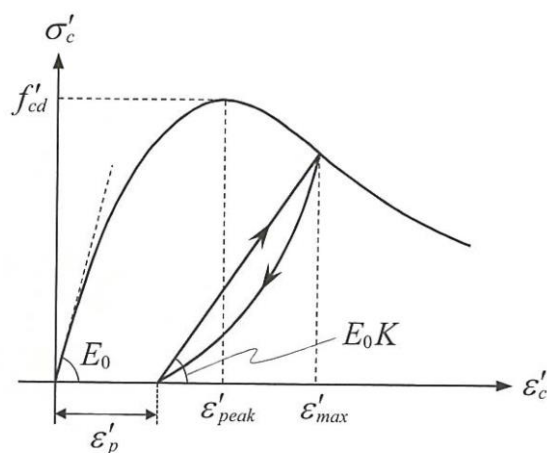
a. コンクリート

(a) 圧縮応力下における応力-ひずみ関係

図 5-44 に一軸圧縮応力下における応力-ひずみ関係を示す。

圧縮応力下の応力-ひずみの骨格曲線は、最大応力点までの硬化域と、最大応力点を
を超えた軟化域で表され、残留塑性ひずみと除荷再載荷時の剛性低下を考慮している。

また、ひび割れ発生後のコンクリートの圧縮強度については、図 5-45 に示す低
減係数を破壊パラメータに乗じることで、ひび割れ発生後の圧縮強度の低下を考慮す
る。



$$\sigma'_c = E_0K(\varepsilon'_c - \varepsilon'_p) \geq 0$$

$$E_0 = \frac{2 \cdot f'_{cd}}{\varepsilon'_{peak}}$$

$$K = \exp \left\{ -0.73 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \left(1 - \exp \left(-1.25 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right) \right\}$$

$$\varepsilon'_p = \varepsilon'_{max} - 2.86 \cdot \varepsilon'_{peak} \left\{ 1 - \exp \left(-0.35 \frac{\varepsilon'_{max}}{\varepsilon'_{peak}} \right) \right\}$$

ここに、 $f'_{cd} = f'_{ck}/\gamma_c$

ε'_{peak} : 圧縮強度に対応するひずみ (一般に、0.002 としてもよい)

ε'_{max} : 過去に受けた圧縮ひずみの最大値

ε'_p : 塑性ひずみ

K : 弾性剛性残存率

図 5-44 圧縮応力下におけるコンクリートの非線形特性
(コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会, 2012 年) より引用)

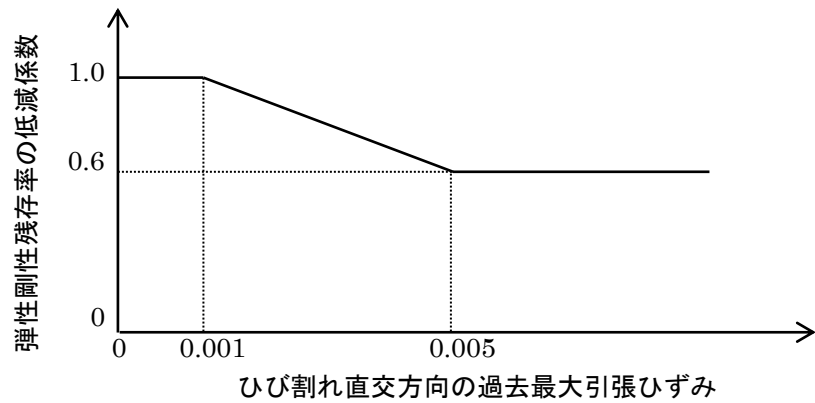


図 5-45 弾性剛性残存率の低減係数

(コンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会, 2012年)より引用)

(b) 引張応力下における応力-ひずみ関係

引張応力下における応力-ひずみ関係は、ひび割れ発生までは線形弾性とし、ひび割れ強度以降は、鉄筋とコンクリートの付着の影響等を考慮し、図 5-46 に示す骨格曲線を用いて、ひび割れ間のコンクリートに引張応力分担を考慮する。

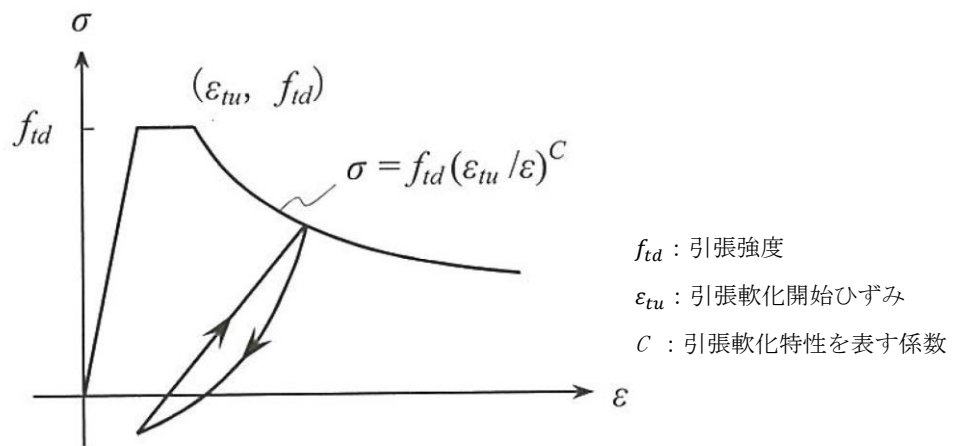
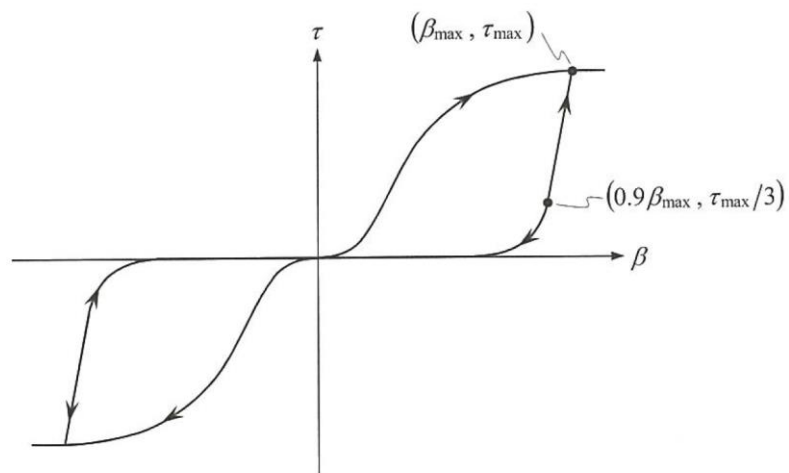


図 5-46 引張応力下における応力-ひずみ関係

(コンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会, 2012年)より引用)

(c) ひび割れ面でのせん断伝達関係
 コンクリートのひび割れ発生後にひび割れ角度を固定する固定ひび割れモデルでは、ひび割れ面のずれによるせん断応力伝達特性を考慮する必要がある。

ひび割れ面でのせん断伝達挙動は、斜めひび割れの発生に伴う剛性低下や破壊を評価するため、図 5-47 に示すとおり、ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比をパラメータとし、コンクリートの剛性低下を考慮するモデルを用いる。



- β : ひび割れ面におけるせん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比 (γ / ε)
- τ : ひび割れ面でのせん断応力
- τ_{max} : 除荷開始時せん断応力
- β_{max} : 除荷開始時せん断ひずみ γ とひび割れ開口ひずみ ε の比

図 5-47 ひび割れ面でのせん断伝達モデル
 (コンクリート標準示方書 [設計編] (土木学会, 2012 年) より引用)

b. 鉄筋

ひび割れを複数含む領域におけるコンクリート中の鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係は、単体鉄筋の応力-ひずみ関係と異なり、図 5-48 に示すひずみ硬化特性を考慮する。

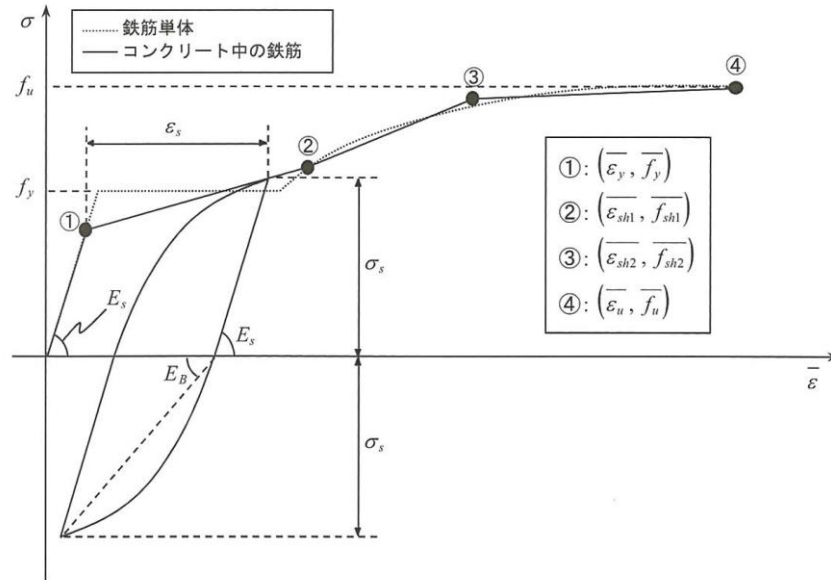


図 5-48 ひずみ硬化域までモデル化した鉄筋の平均応力-平均ひずみ関係
(コンクリート標準示方書〔設計編〕(土木学会, 2012年)より引用)

c. 鉄筋コンクリートとしてのモデル化

コンクリートと鉄筋の界面の付着特性をテンションスティフニング効果(引張特性が硬化する現象)として、鉄筋コンクリート要素の中に取り込むことにより、鉄筋コンクリートの構成則を直接与える。

鉄筋コンクリートの引張応力下の平均応力は、以下の式*で表される。

注記* : 土木学会マニュアルより引用

$$\bar{\sigma}_{RC} = \frac{A_s}{A_{RC}} \bar{\sigma}_s + \frac{A_c}{A_{RC}} \bar{\sigma}_c$$

ここに、

$\bar{\sigma}_s, \bar{\sigma}_c$: それぞれ鉄筋とコンクリートの平均応力

A_s, A_c : それぞれ鉄筋とコンクリートの断面積, $A_{RC} = A_s + A_c$

5.4.3 照査時刻の選定
(追而)

5.4.4 入力荷重

3次元構造解析の入力荷重は、照査時刻における地震応答解析の応答値を用いて算定する。入力荷重の一覧を表 5-17 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。

表 5-17 入力荷重一覧

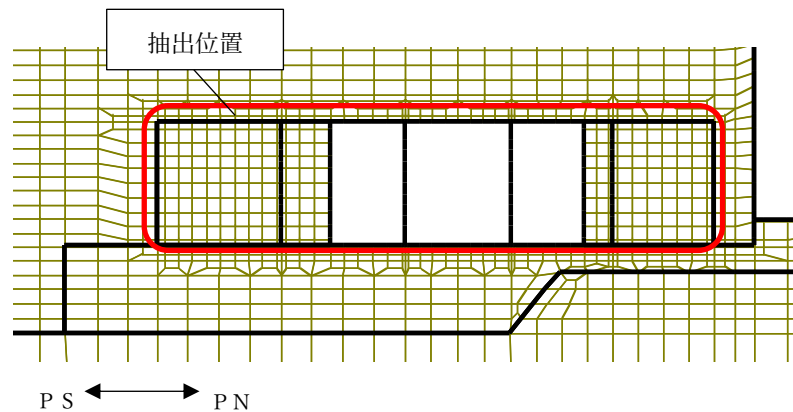
入力荷重		地震応答解析から抽出する地震時応答	載荷位置
慣性力	躯体（横断方向）	応答加速度	躯体全体
	躯体（縦断方向）	応答加速度	躯体全体
土圧及び水圧	躯体（横断方向）	土圧・水圧	作用位置
	躯体（縦断方向）	土圧・水圧	作用位置

(1) 補機冷却用海水取水路の慣性力

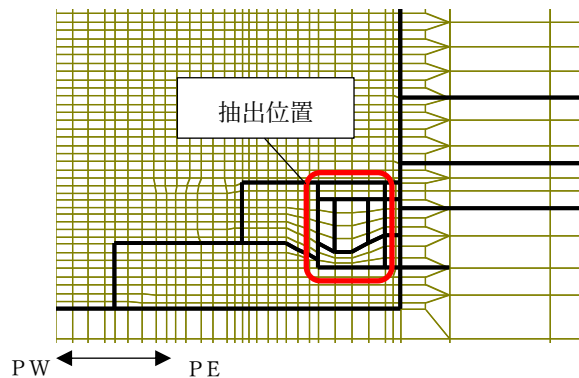
補機冷却用海水取水路の慣性力は、地震応答解析モデルにおける鉄筋コンクリート部材及び妻壁に位置する各節点の、照査時刻における応答加速度の平均値から算定する。応答加速度抽出位置を図 5-49 に示す。

補機冷却用海水取水路の慣性力については、各方向において応答加速度が最大となる断面での慣性力を躯体に作用させる。

算定した慣性力は図 5-50 及び図 5-51 の概略図に示すとおり、補機冷却用海水取水路の 3 次元構造モデルに入力する。



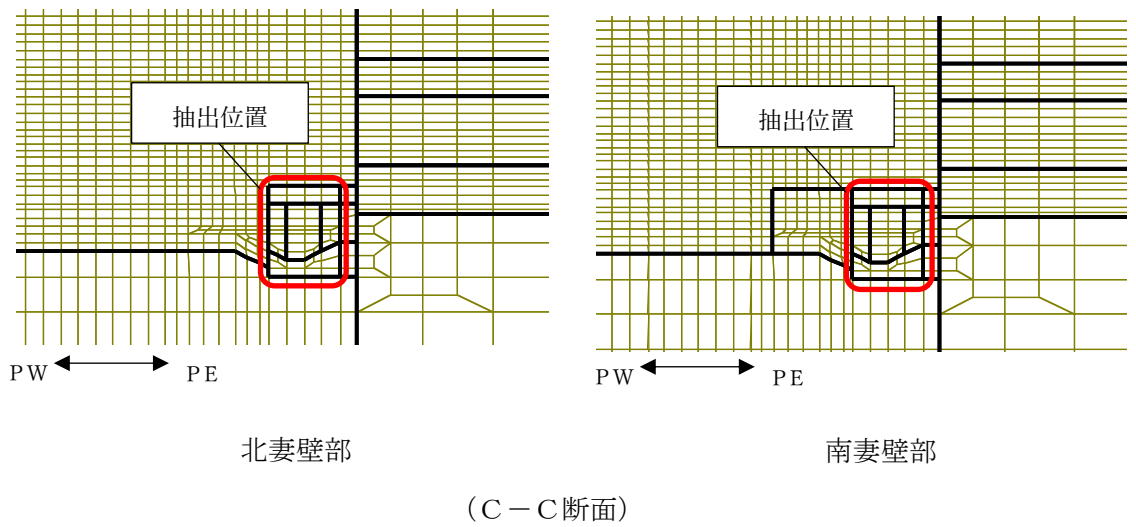
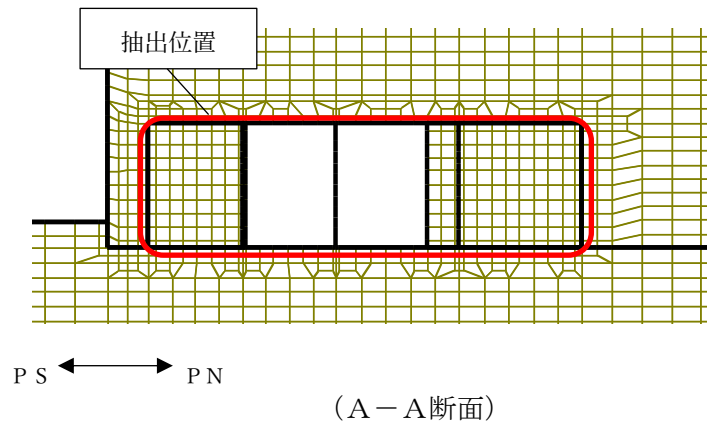
(A-A断面)



(B-B断面)

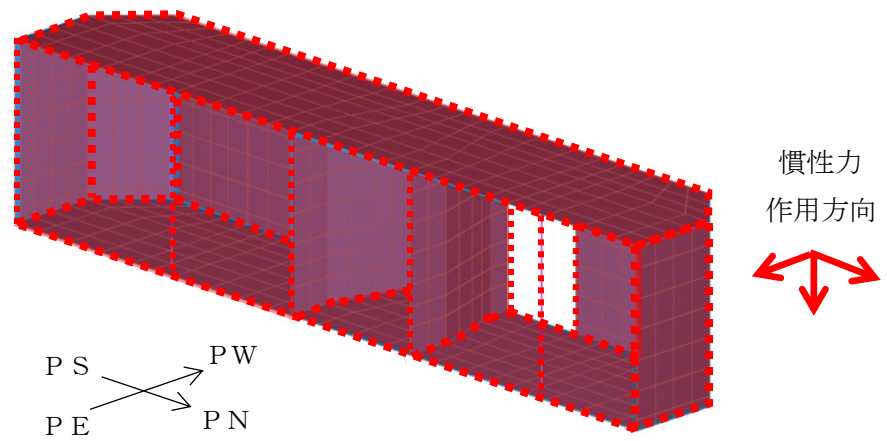
(a) 補機冷却用海水取水路 (南側)

図 5-49 補機冷却用海水取水路の応答加速度抽出位置(1/2)

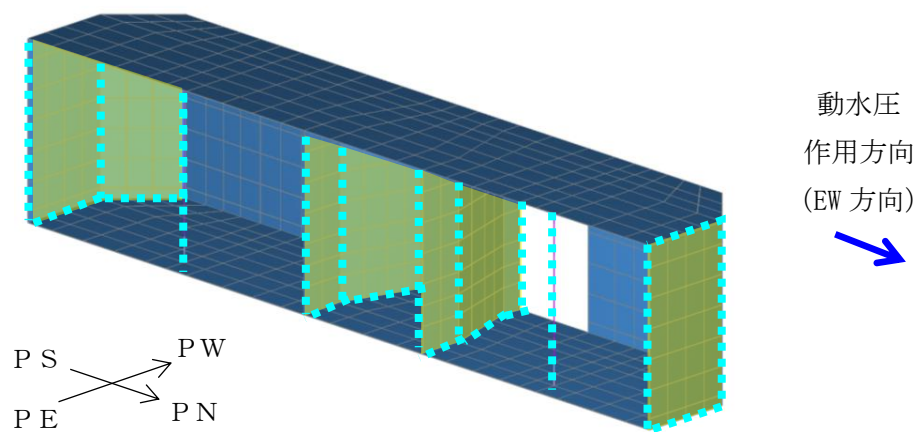
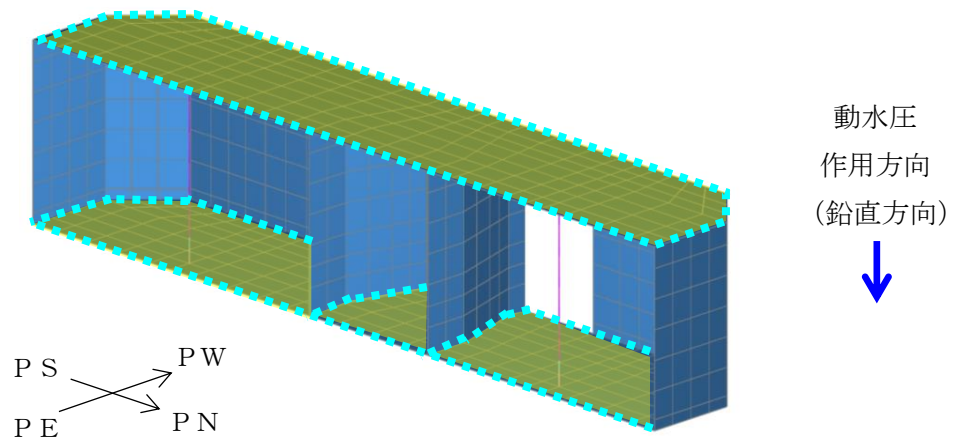


(b) 補機冷却用海水取水路（北側）

図 5-49 補機冷却用海水取水路の応答加速度抽出位置 (2/2)

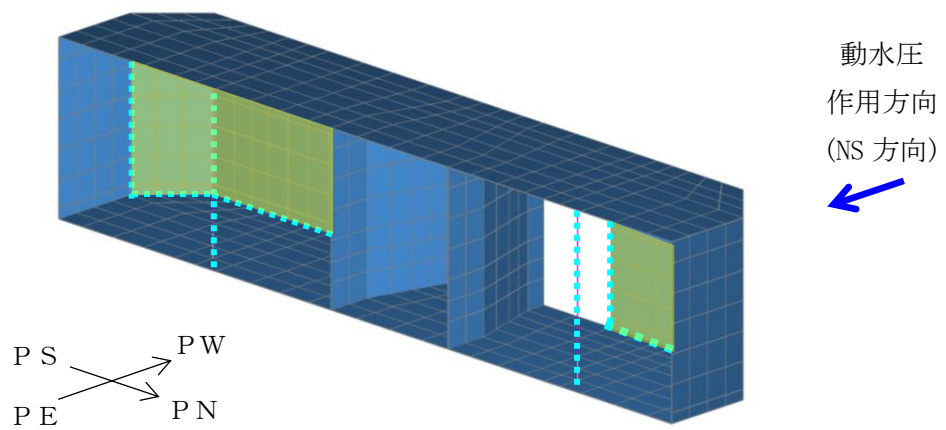


(a) 躯体慣性力



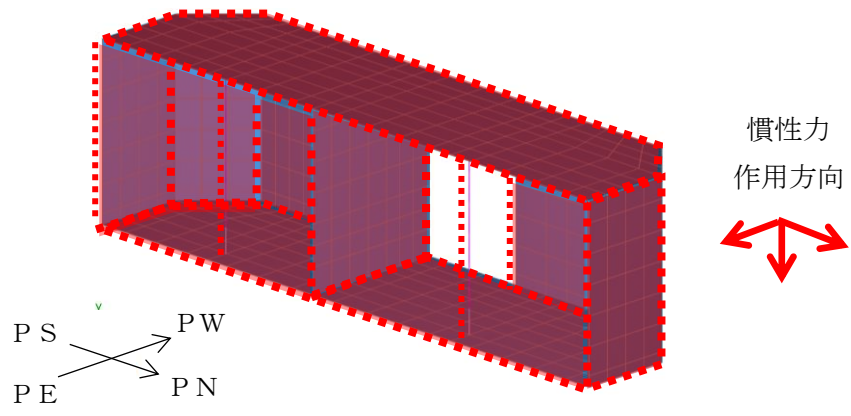
(b) 動水圧

図 5-50 補機冷却用海水取水路 (南側) の慣性力概略図 (1/2)

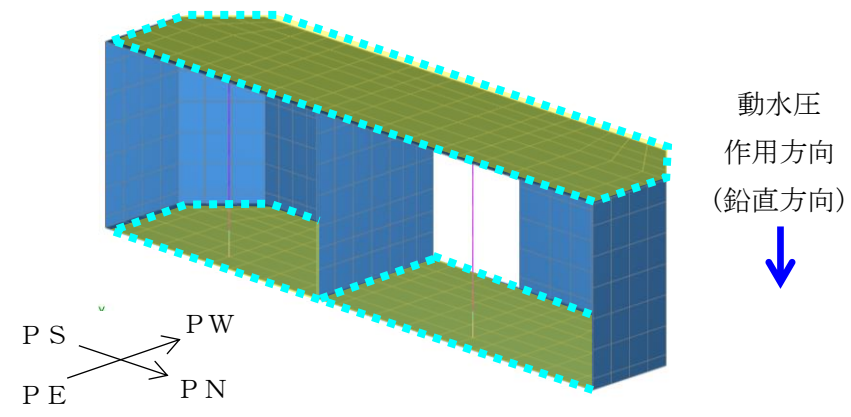


(b) 動水圧

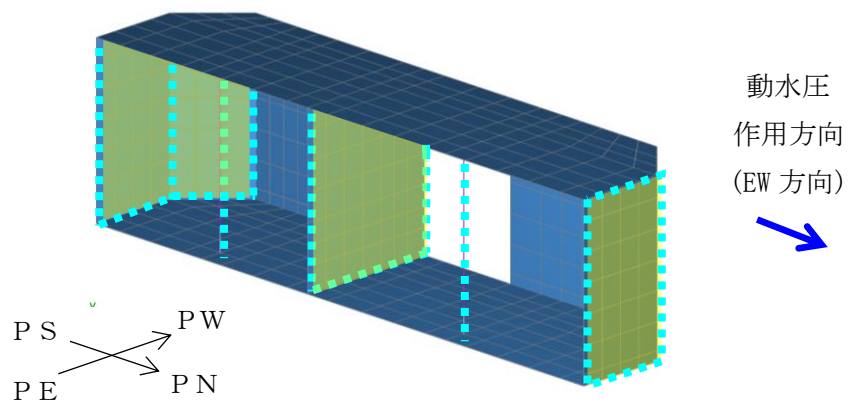
図 5-50 補機冷却用海水取水路 (南側) の慣性力概略図 (2/2)



(a) 躯体慣性力

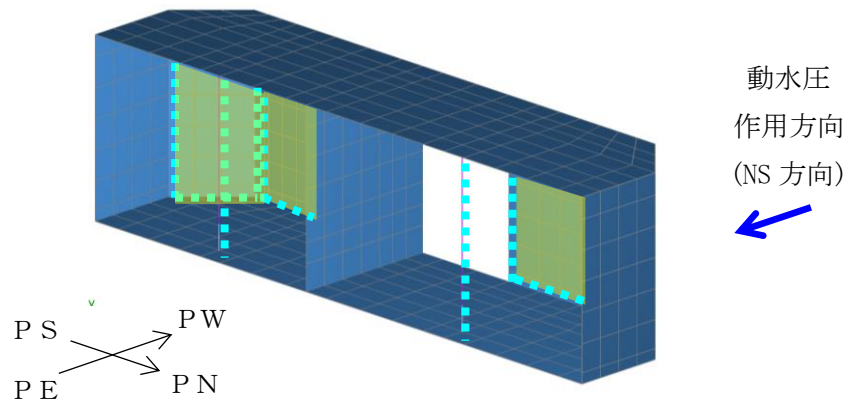


(b) 動水圧



(c) 動水圧

図 5-51 補機冷却用海水取水路 (北側) の慣性力概略図 (1/2)

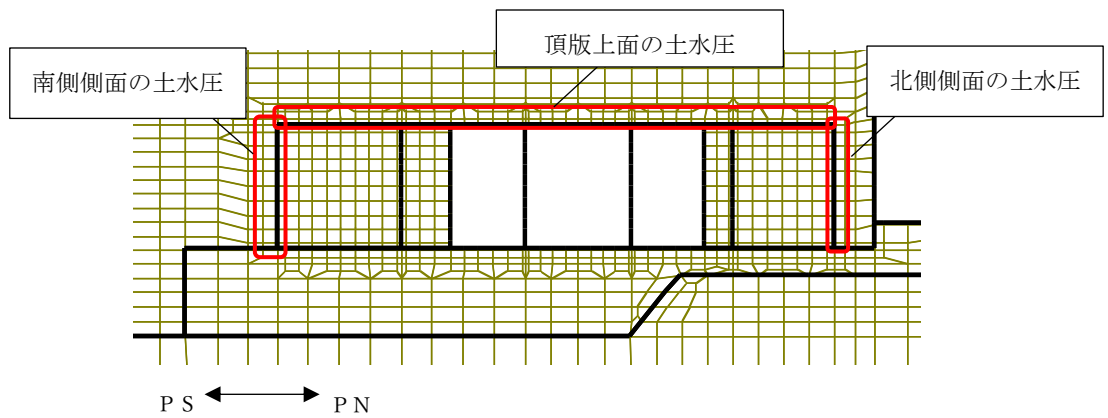


(d) 動水圧

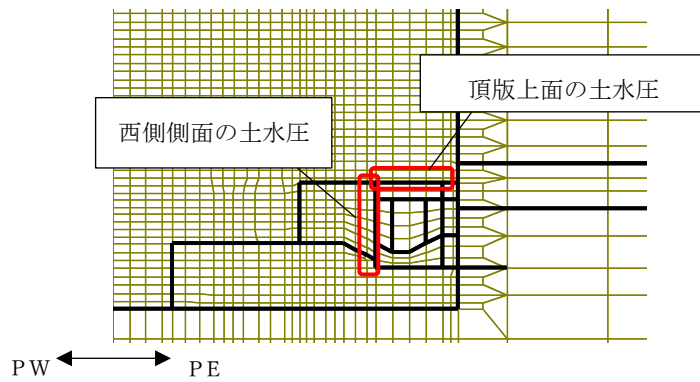
図 5-51 補機冷却用海水取水路（北側）の慣性力概略図(2/2)

(2) 土圧及び水圧

補機冷却用海水取水路の側面及び頂版に作用する土圧及び水圧は、地震応答解析モデルにおける補機冷却用海水取水路の側面及び頂版上面に接する地盤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。土圧及び水圧の抽出位置を図 5-52 に示す。算定した土圧及び水圧は図 5-53 及び図 5-54 の概略図に示すとおり入力する。



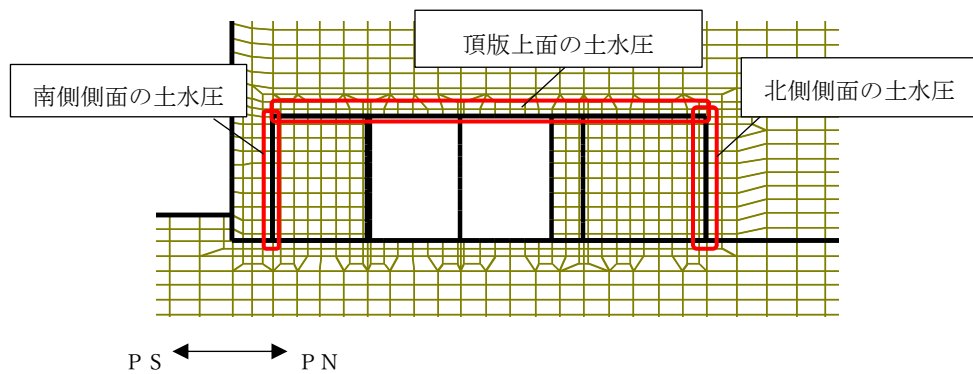
(A-A断面)



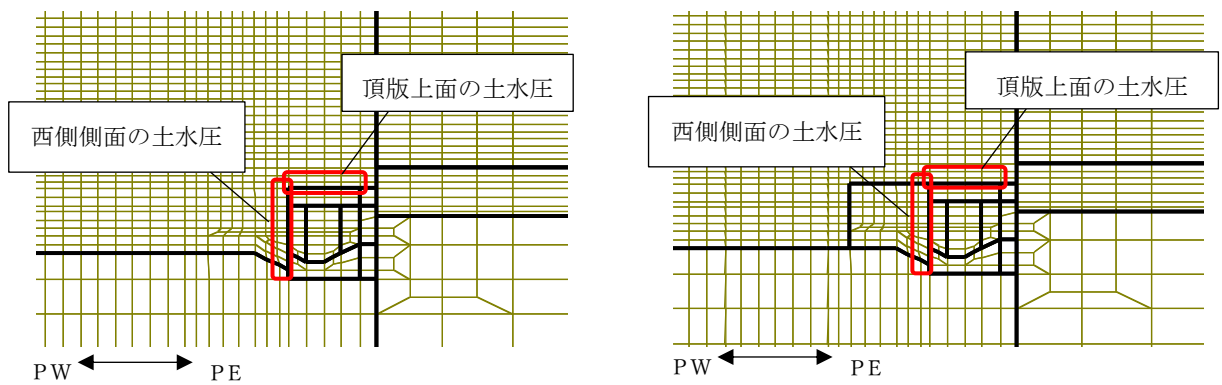
(B-B断面)

(a) 補機冷却用海水取水路 (南側)

図 5-52 土圧及び水圧の抽出位置(1/2)



(A-A断面)



(C-C断面)

(b) 補機冷却用海水取水路 (北側)

図 5-52 土圧及び水圧の抽出位置 (2/2)

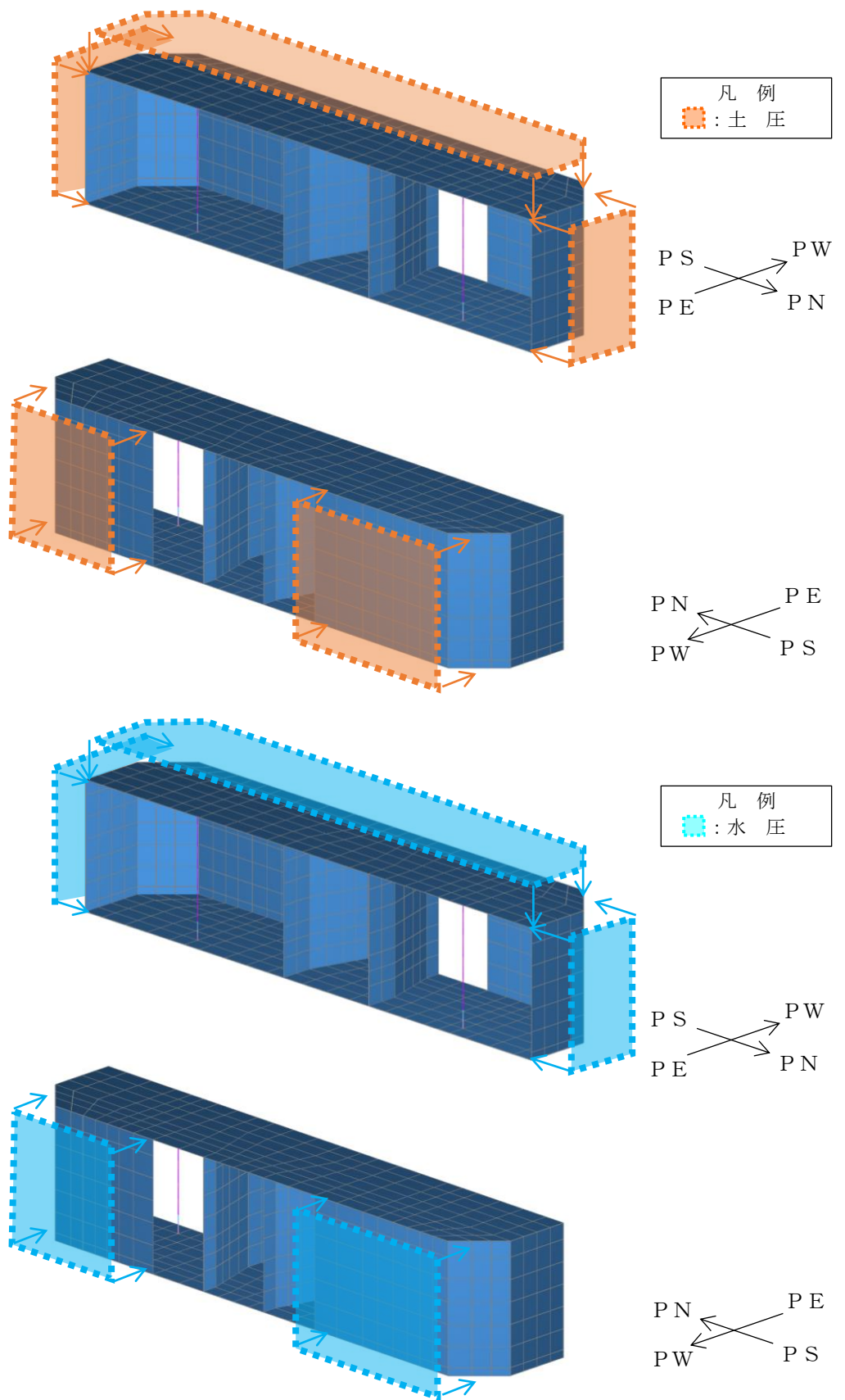


図 5-53 補機冷却用海水取水路（南側）の土圧及び水圧の概略図

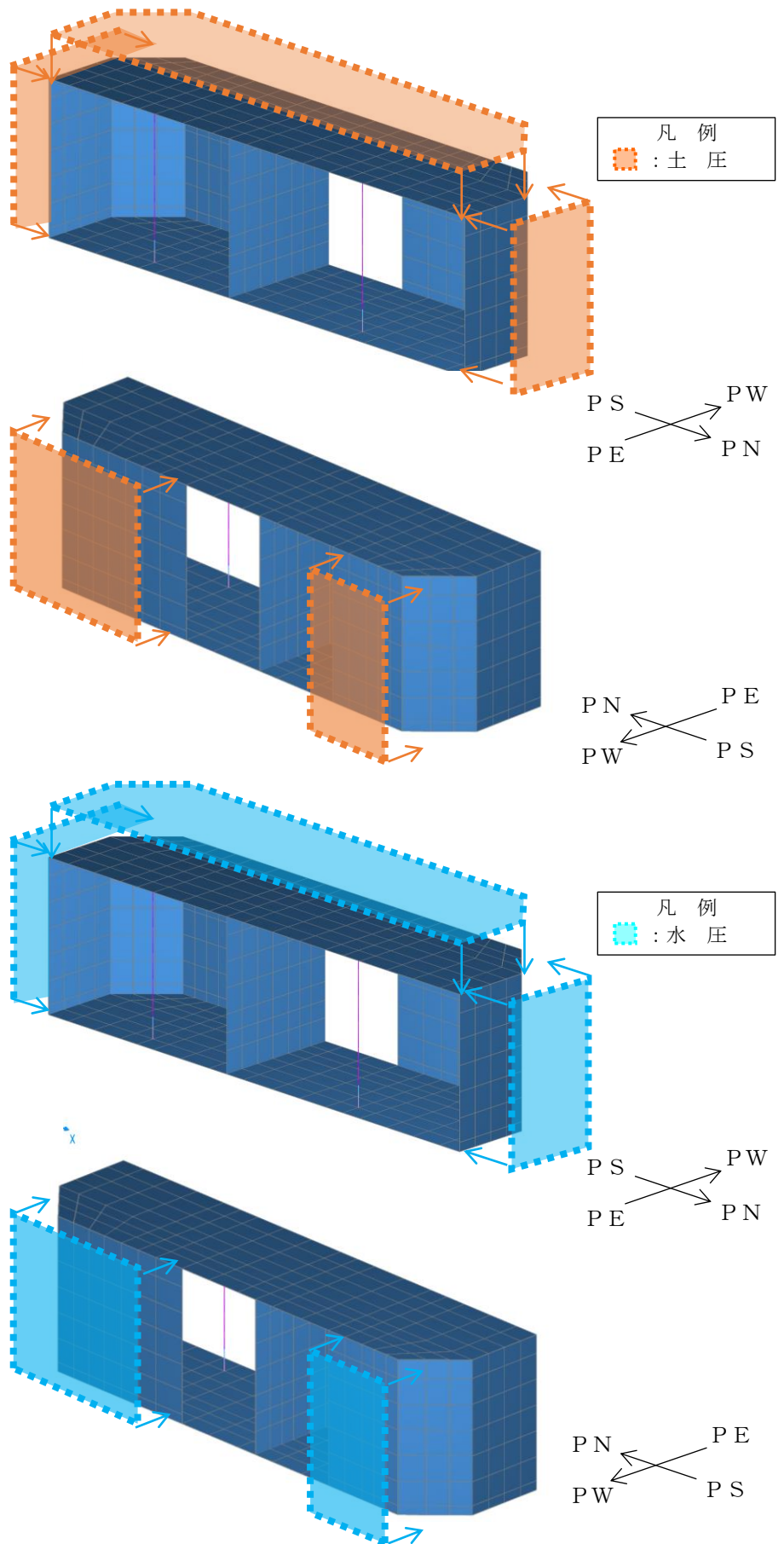


図 5-54 補機冷却用海水取水路（北側）の土圧及び水圧の概略図

5.5 評価内容

5.5.1 入力地震動の設定

地震応答解析に用いる入力地震動は、解放基盤表面で定義される基準地震動 S_s を1次元波動論により地震応答解析モデルの底面位置で評価したものをを用いる。入力地震動の設定においては、V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に示す地下構造モデルとし、原子炉建屋と同様のものをを用いる。

入力地震動算定の概念図を図 5-55 に、入力地震動の加速度時刻歴波形と加速度応答スペクトルを図 5-56～図 5-81 に示す。入力地震動の算定には解析コード「S L O K Ver. 2.0」を使用する。

なお、基準地震動 S_s のうち特定の方向性を有しない地震動については、位相を反転させた場合の影響も確認する。

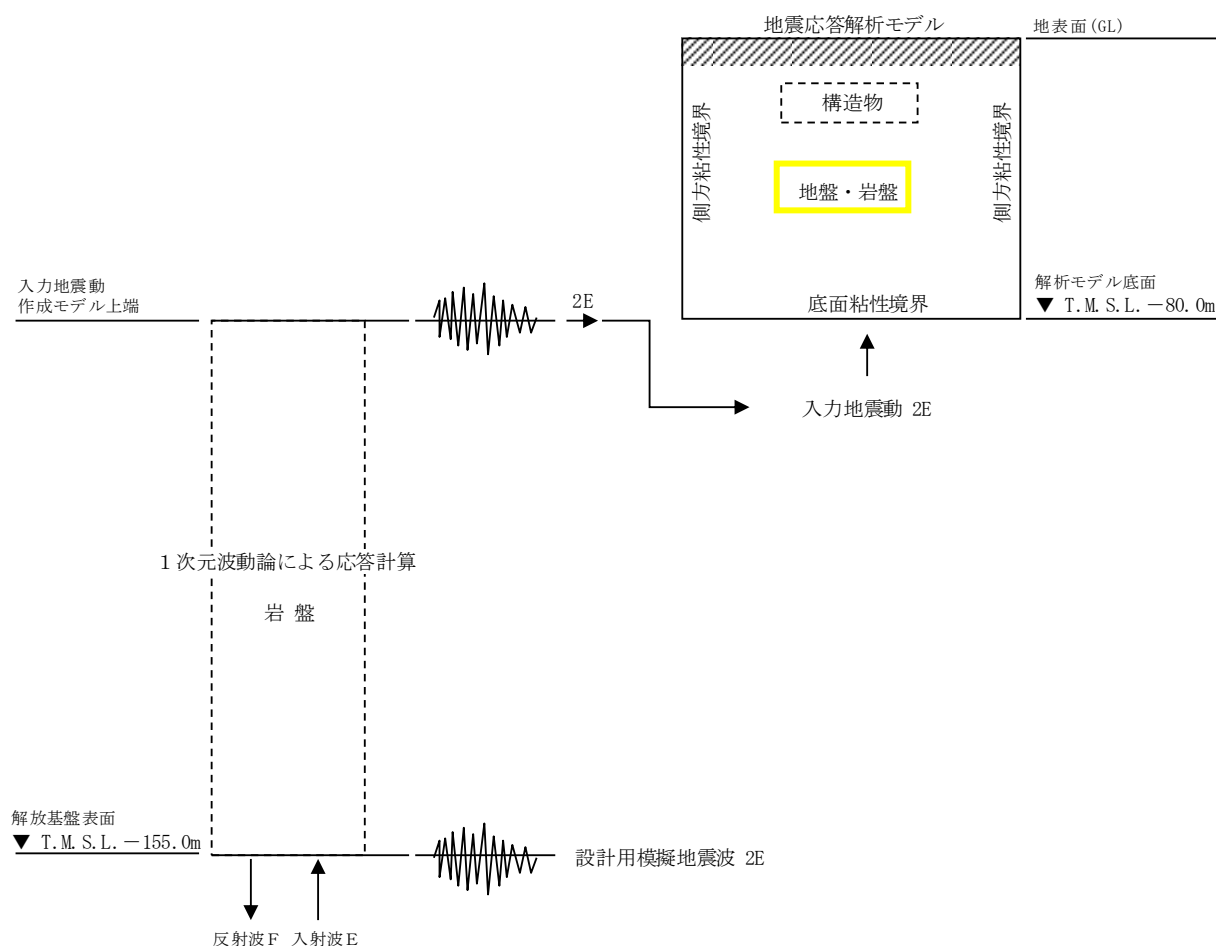
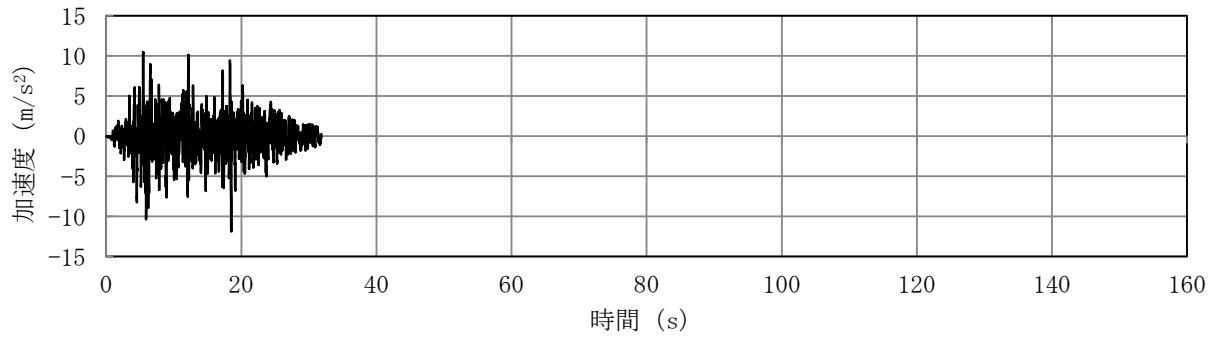
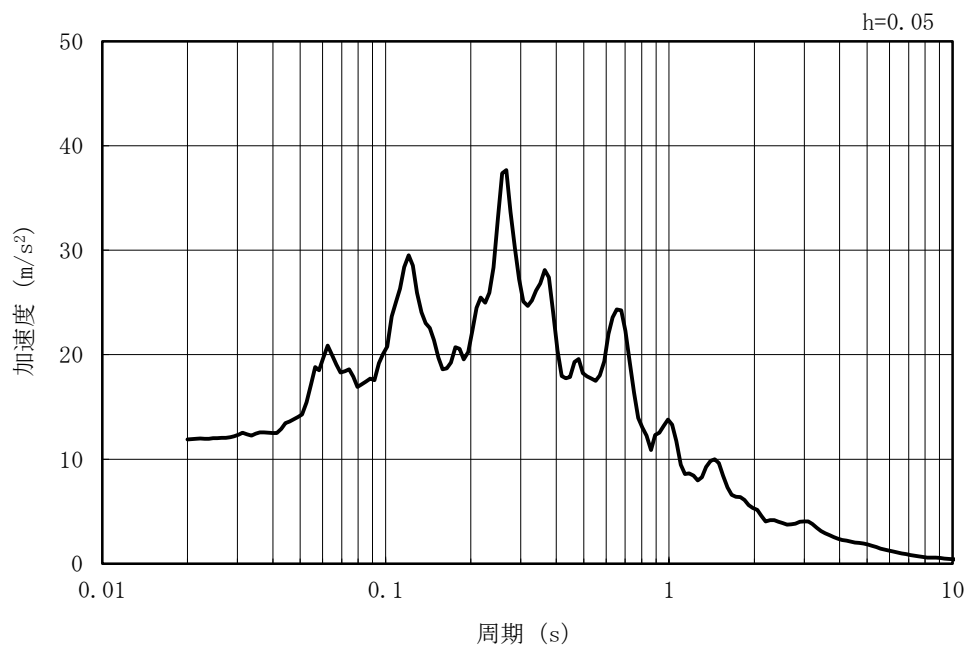


図 5-55 入力地震動算定の概念図

MAX 11.88m/s² (18.51s)



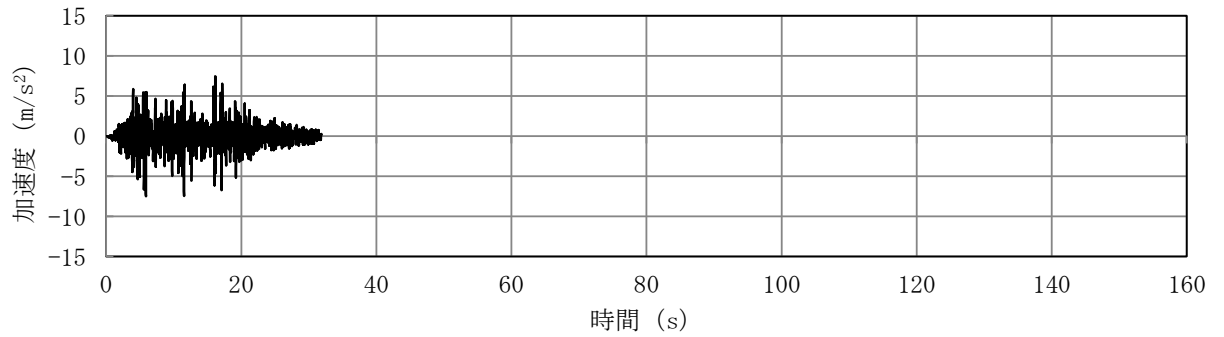
(a) 加速度時刻歴波形



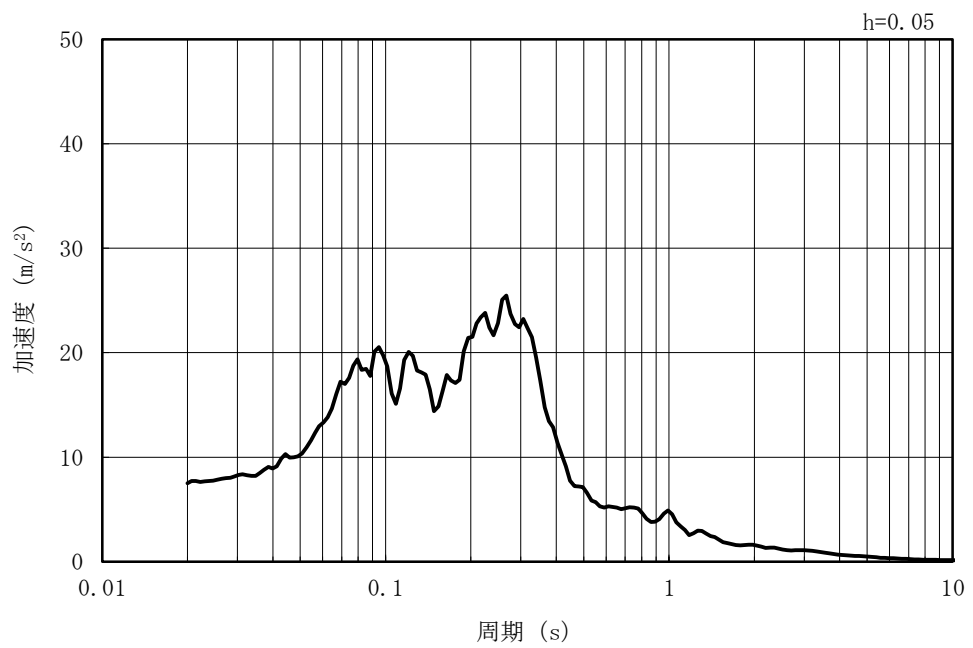
(b) 加速度応答スペクトル

図 5-56 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-1)

MAX 7.49m/s² (5.88s)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 5-57 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向：Ss-1)

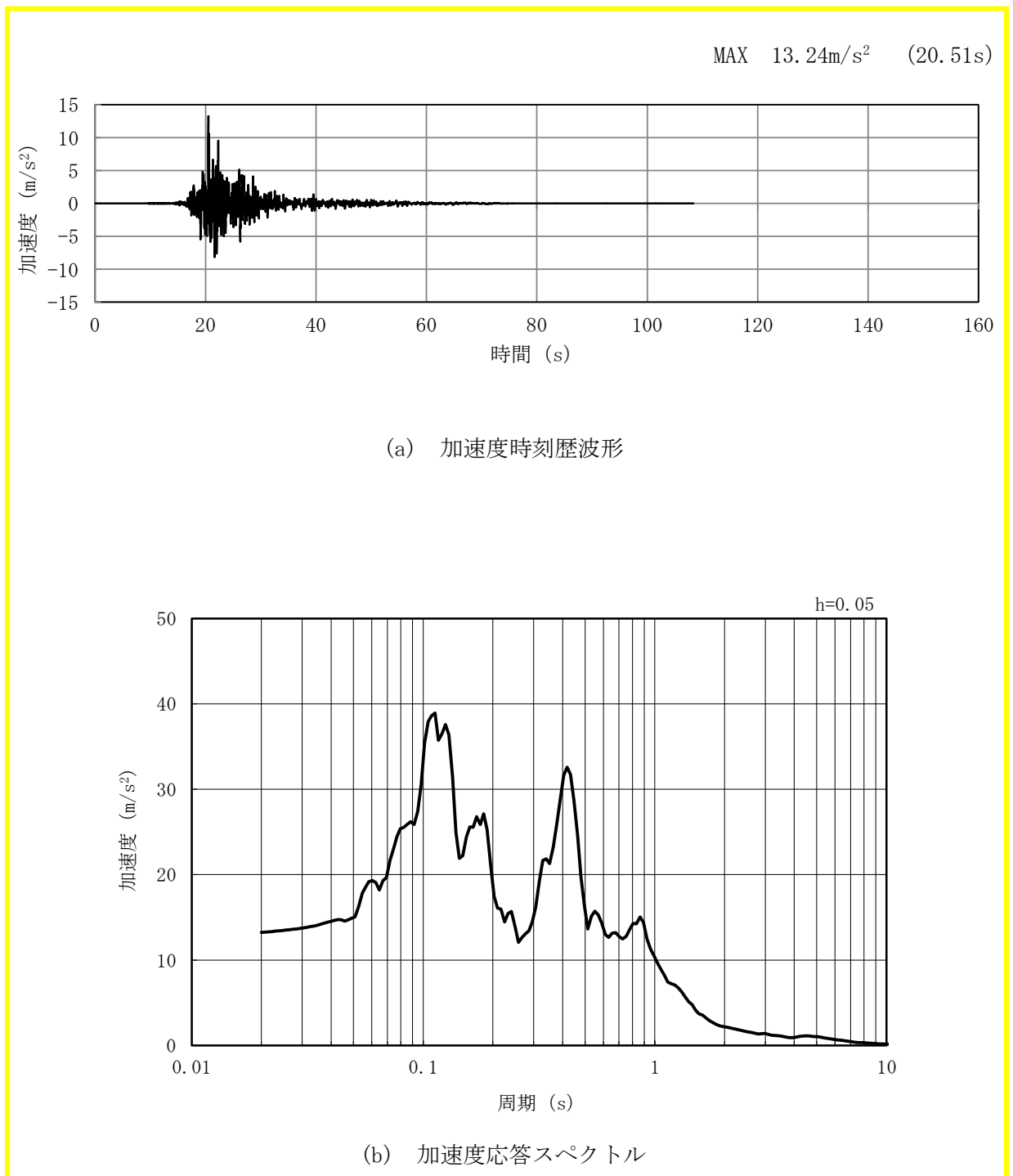


図 5-58 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-2EW)

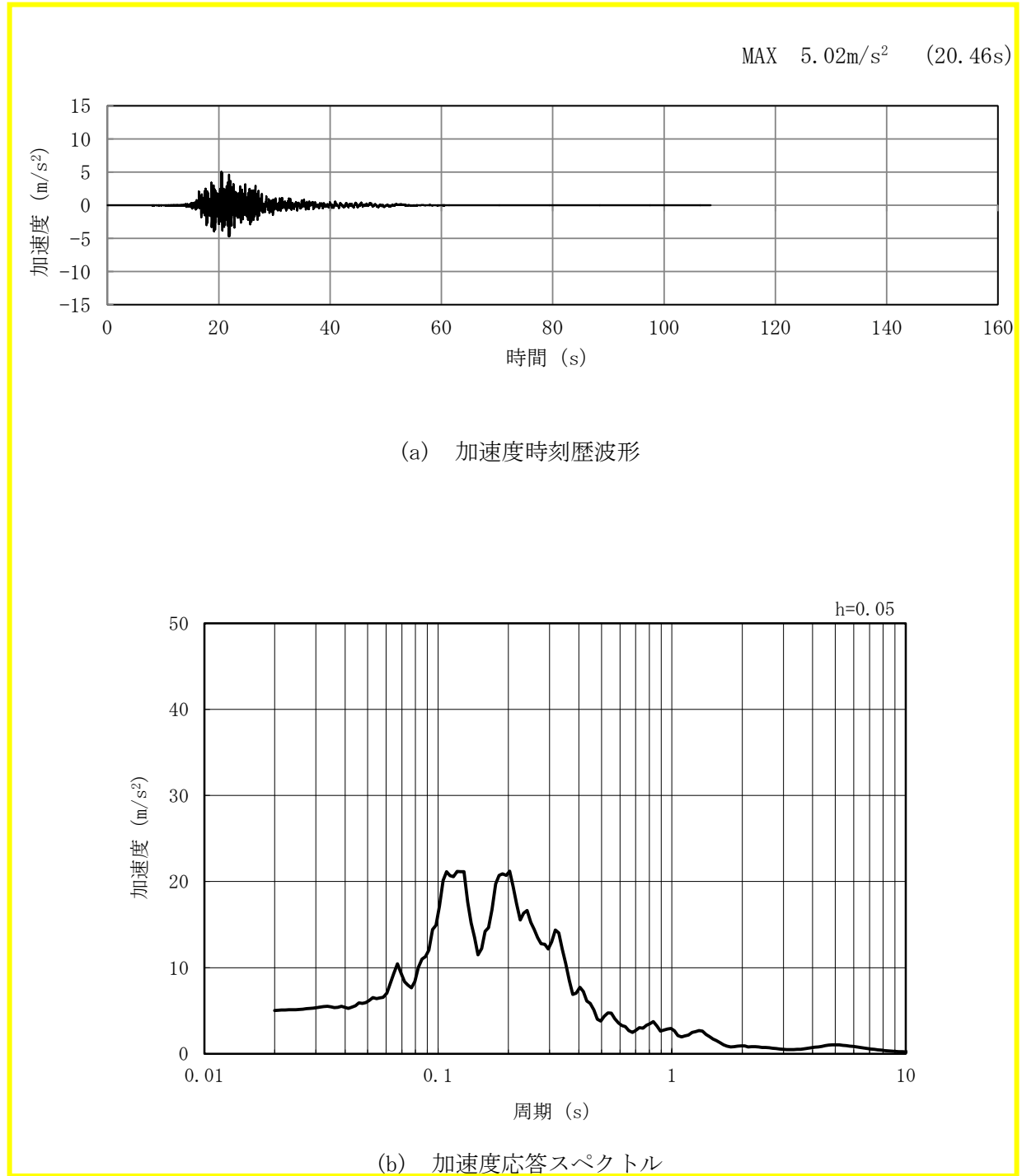
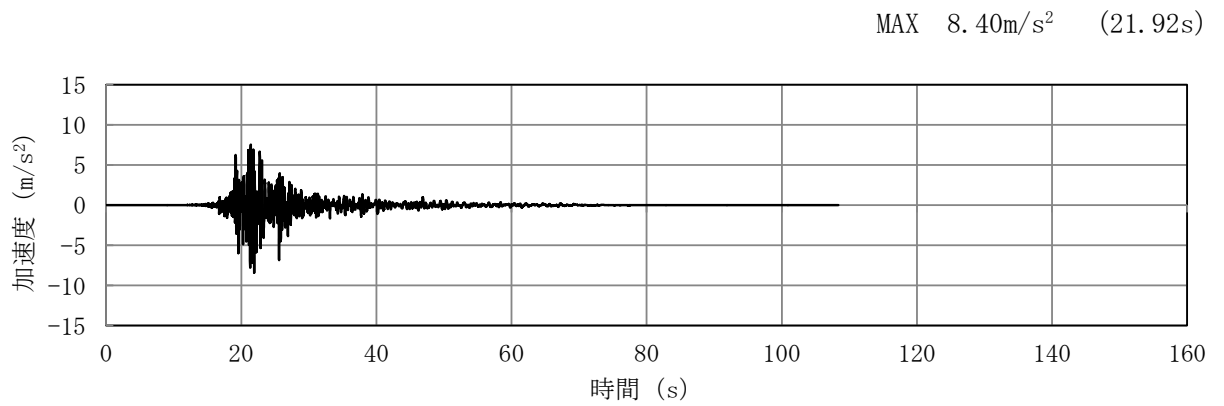
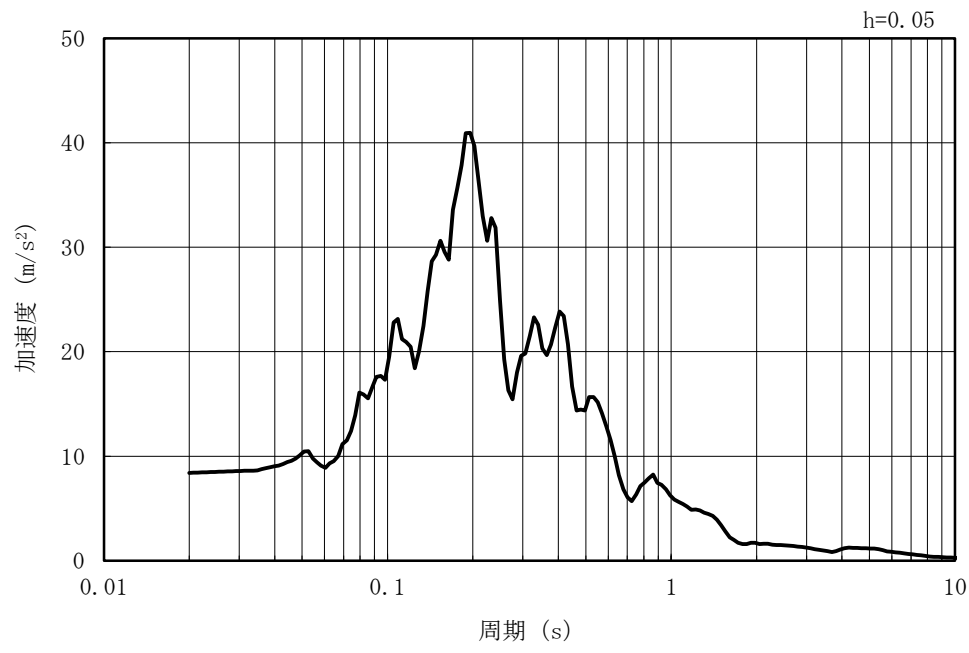


図 5-59 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向：Ss-2EW)

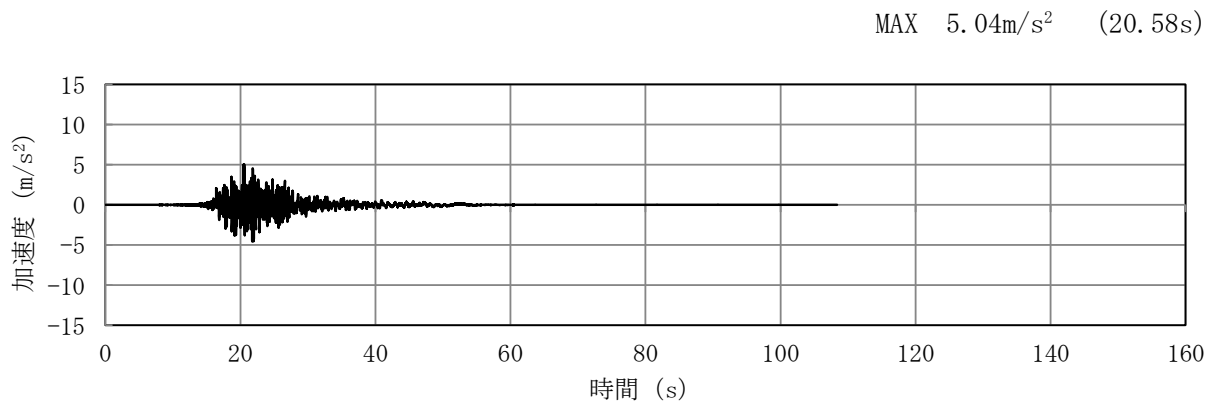


(a) 加速度時刻歴波形

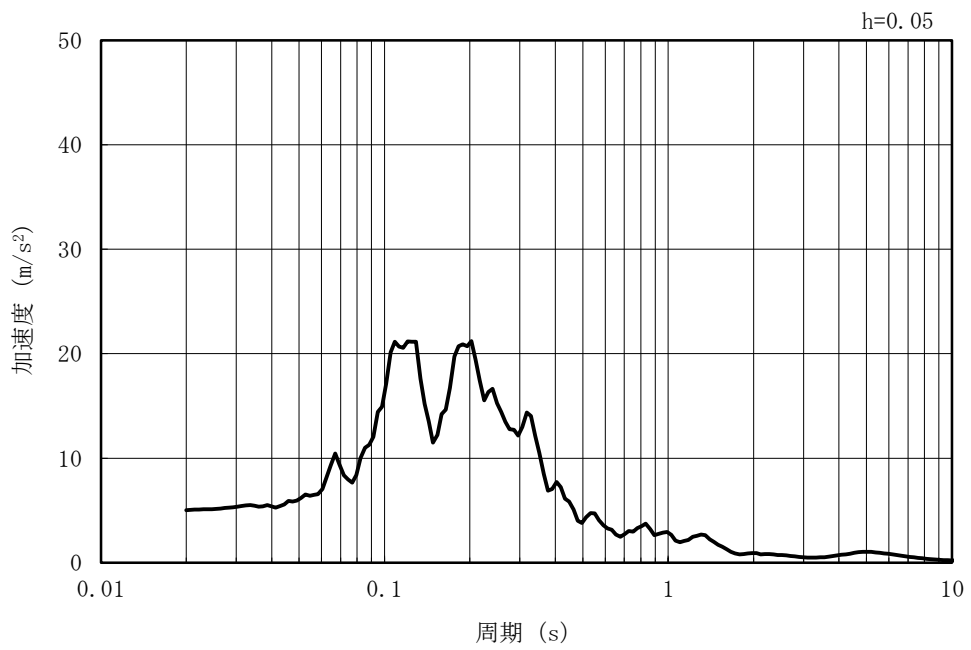


(b) 加速度応答スペクトル

図 5-60 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-2NS)



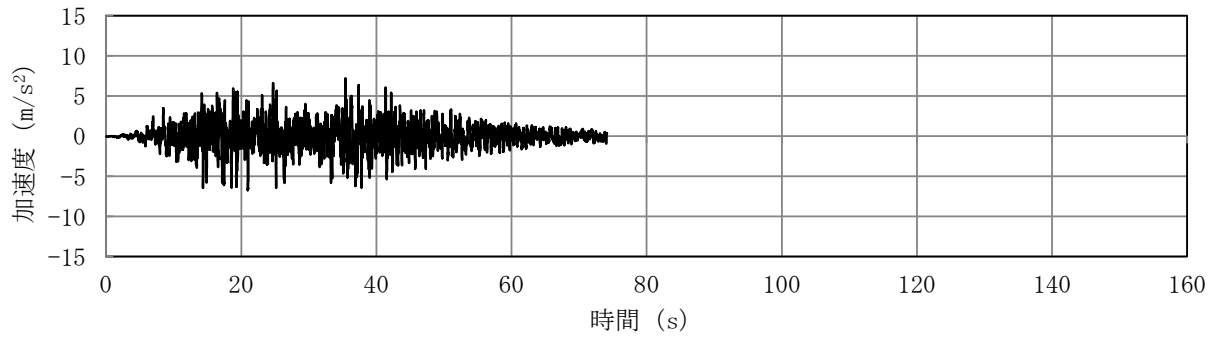
(a) 加速度時刻歴波形



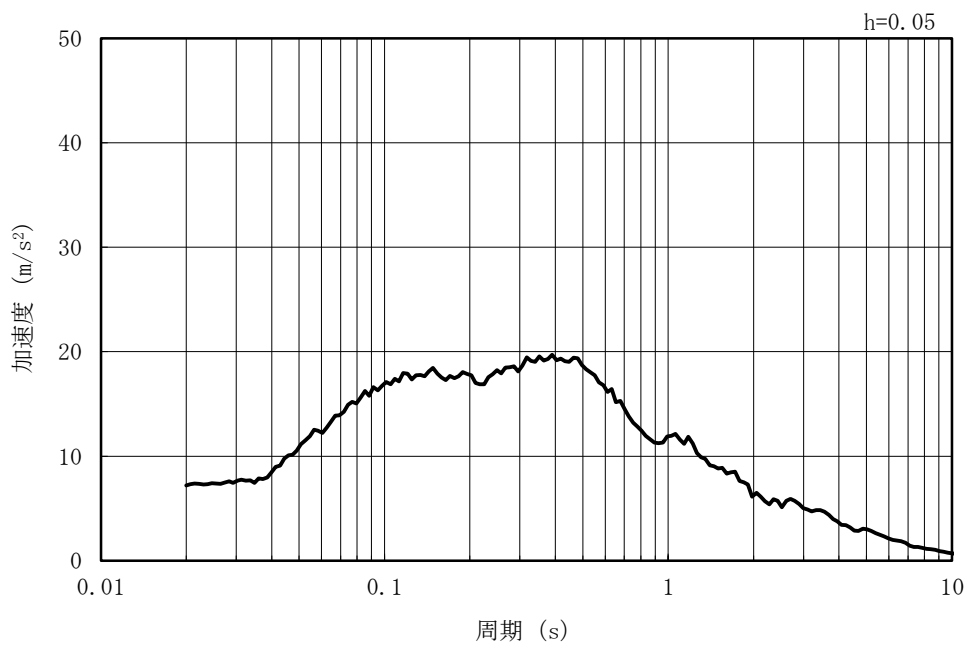
(b) 加速度応答スペクトル

図 5-61 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-2NS)

MAX 7.18m/s² (35.43s)



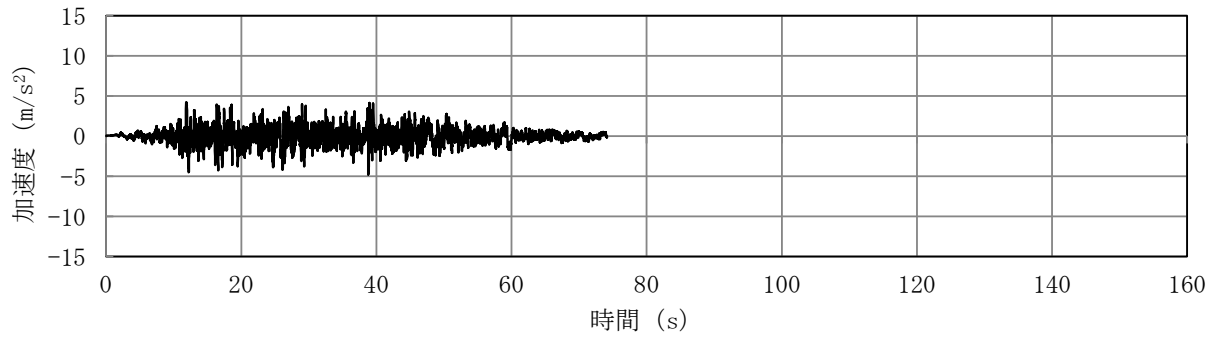
(a) 加速度時刻歴波形



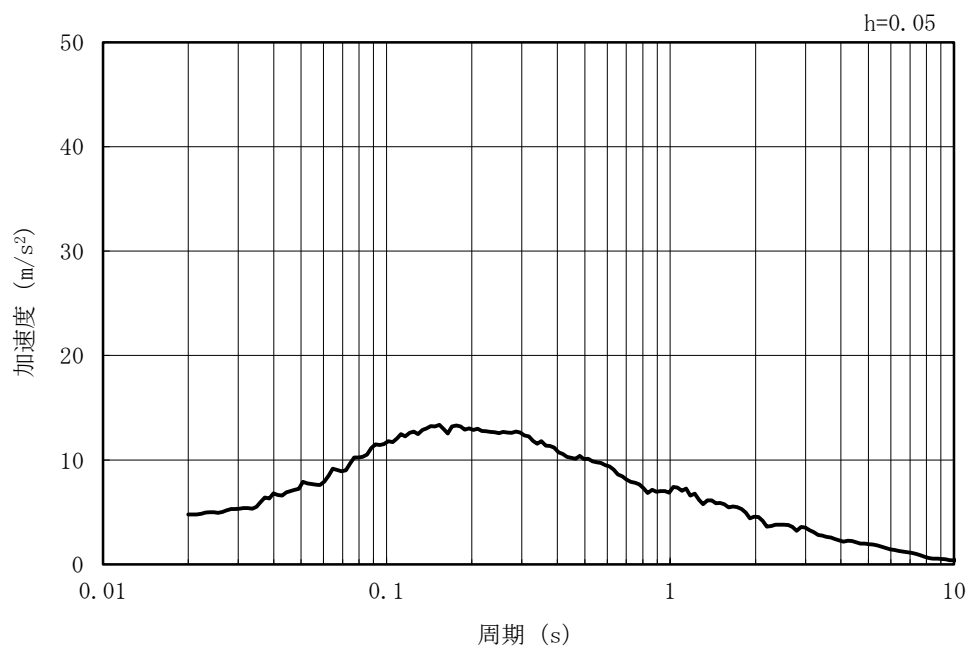
(b) 加速度応答スペクトル

図 5-62 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-3)

MAX 4.78m/s² (38.80s)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 5-63 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向：Ss-3)

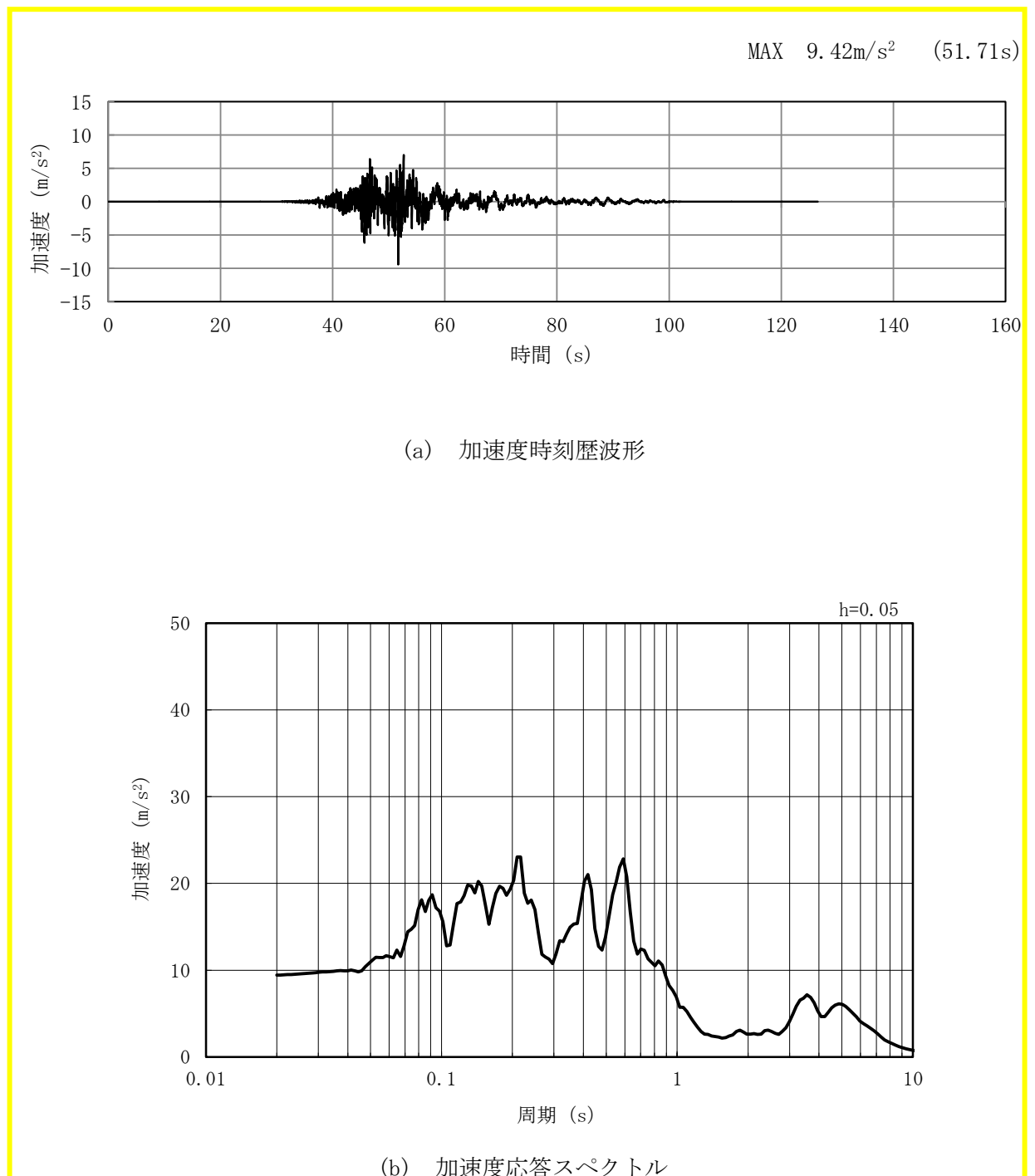


図 5-64 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向：Ss-4EW)

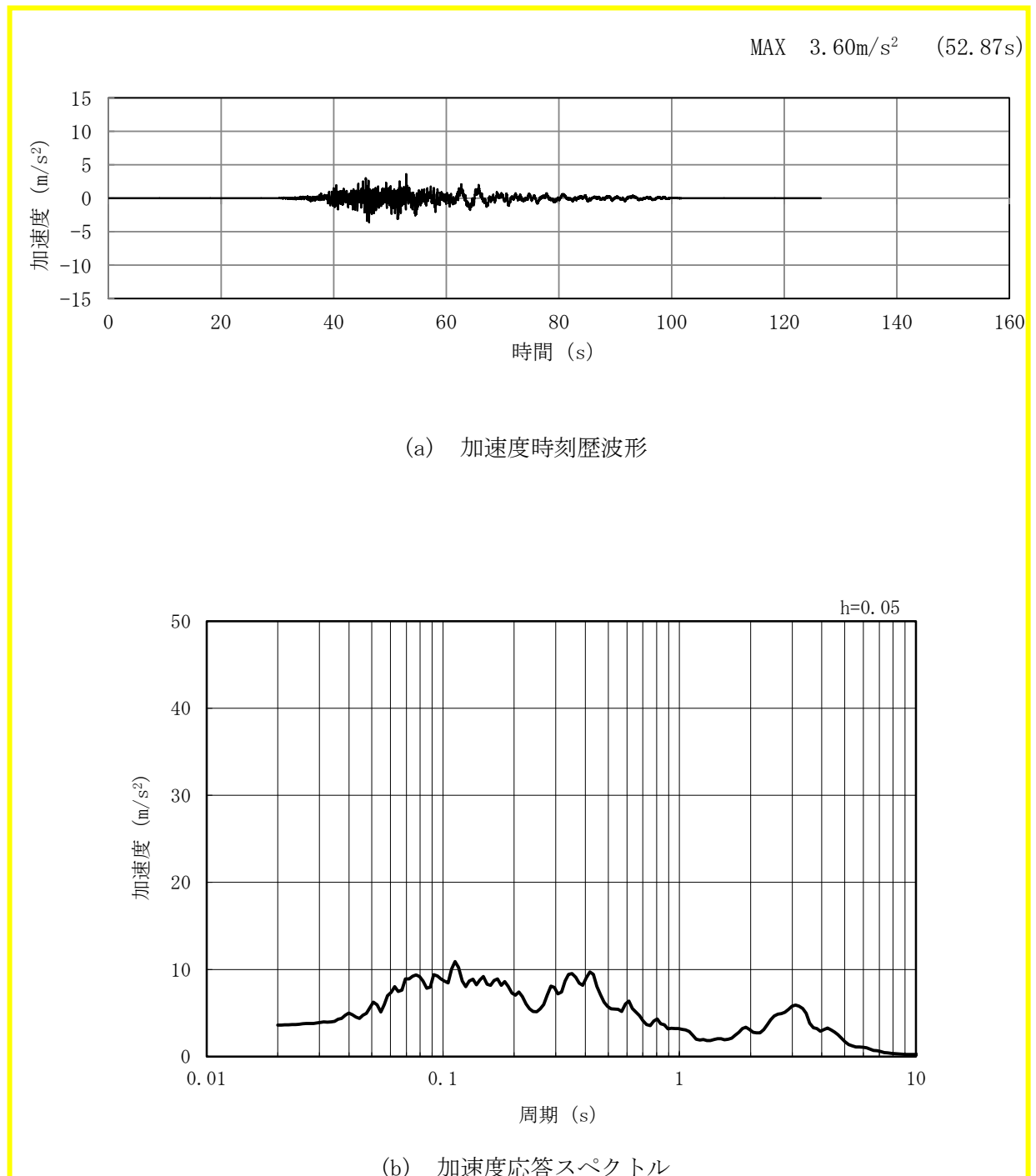
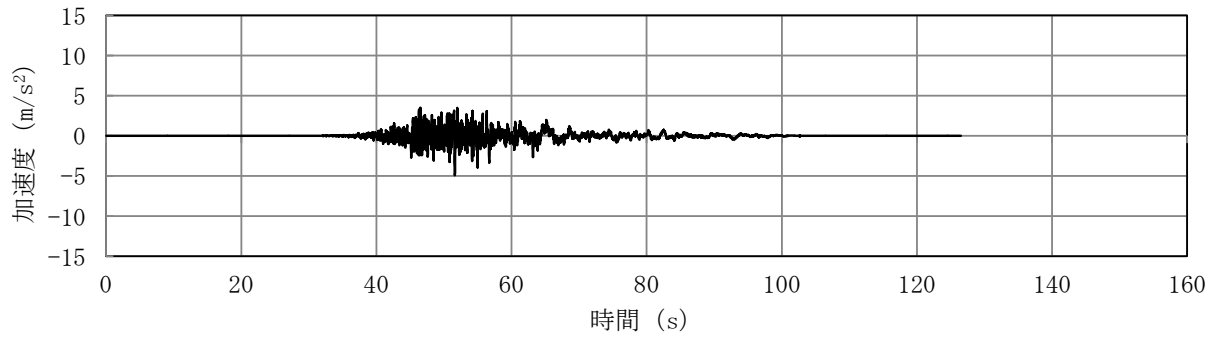
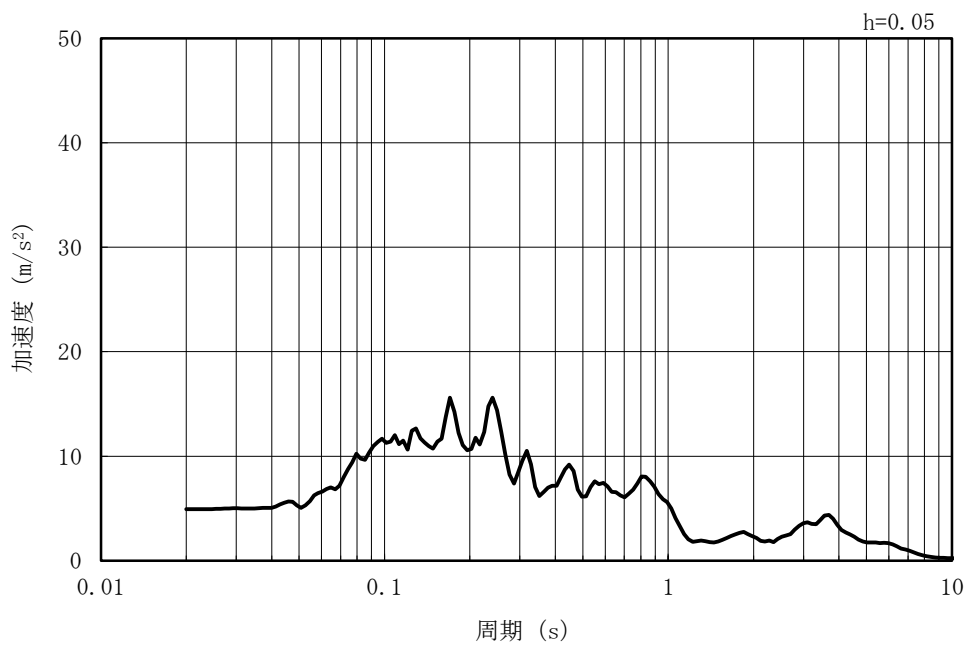


図 5-65 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向：Ss-4EW)

MAX 4.92m/s² (51.62s)



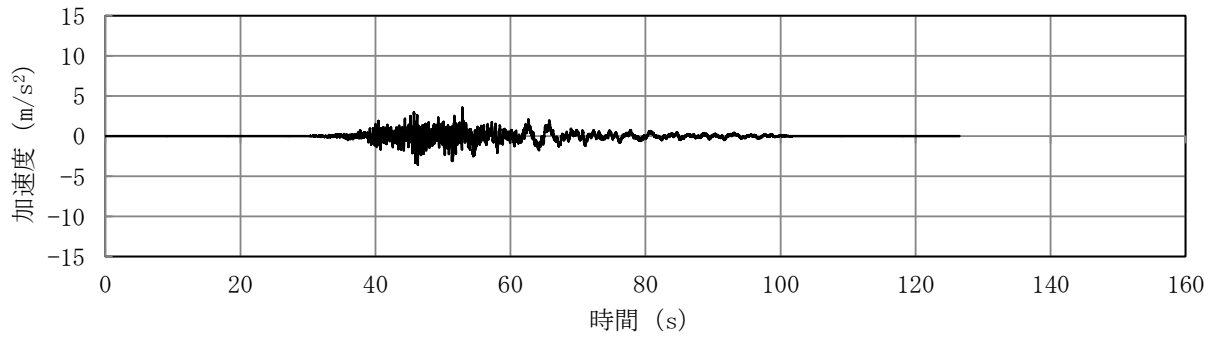
(a) 加速度時刻歴波形



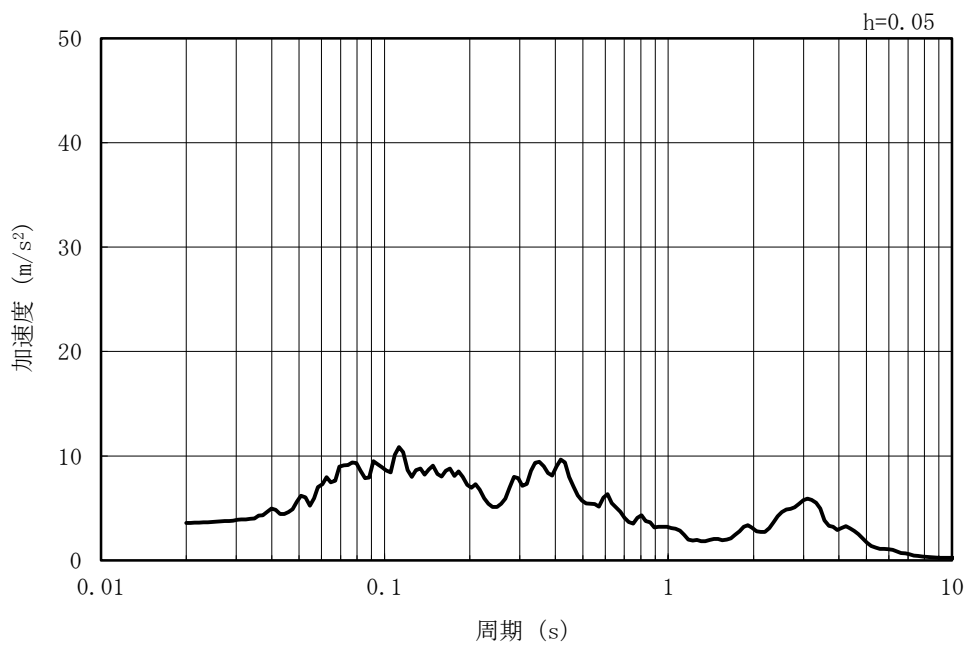
(b) 加速度応答スペクトル

図 5-66 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-4NS)

MAX 3.57m/s² (46.29s)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 5-67 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-4NS)

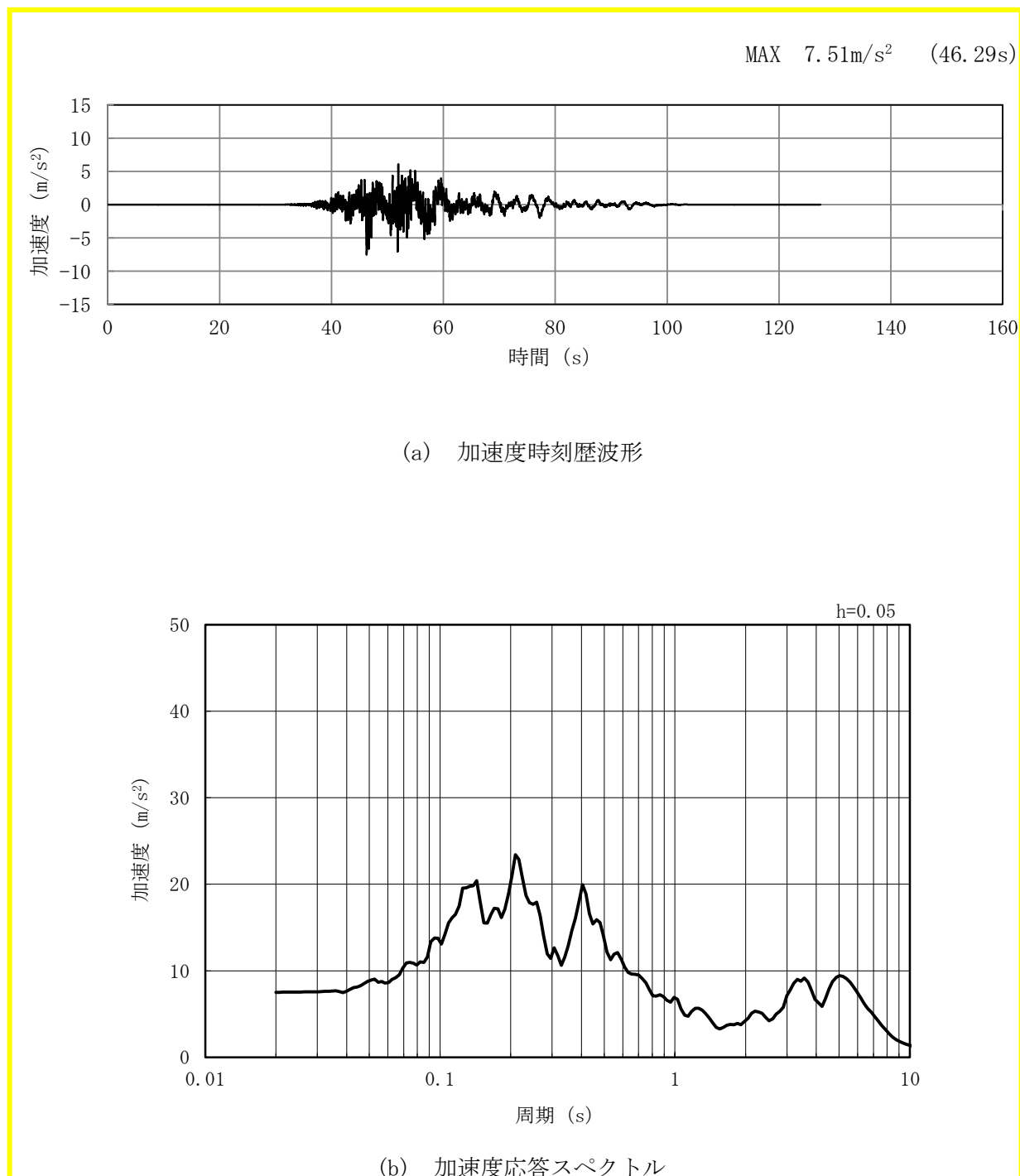


図 5-68 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-5EW)

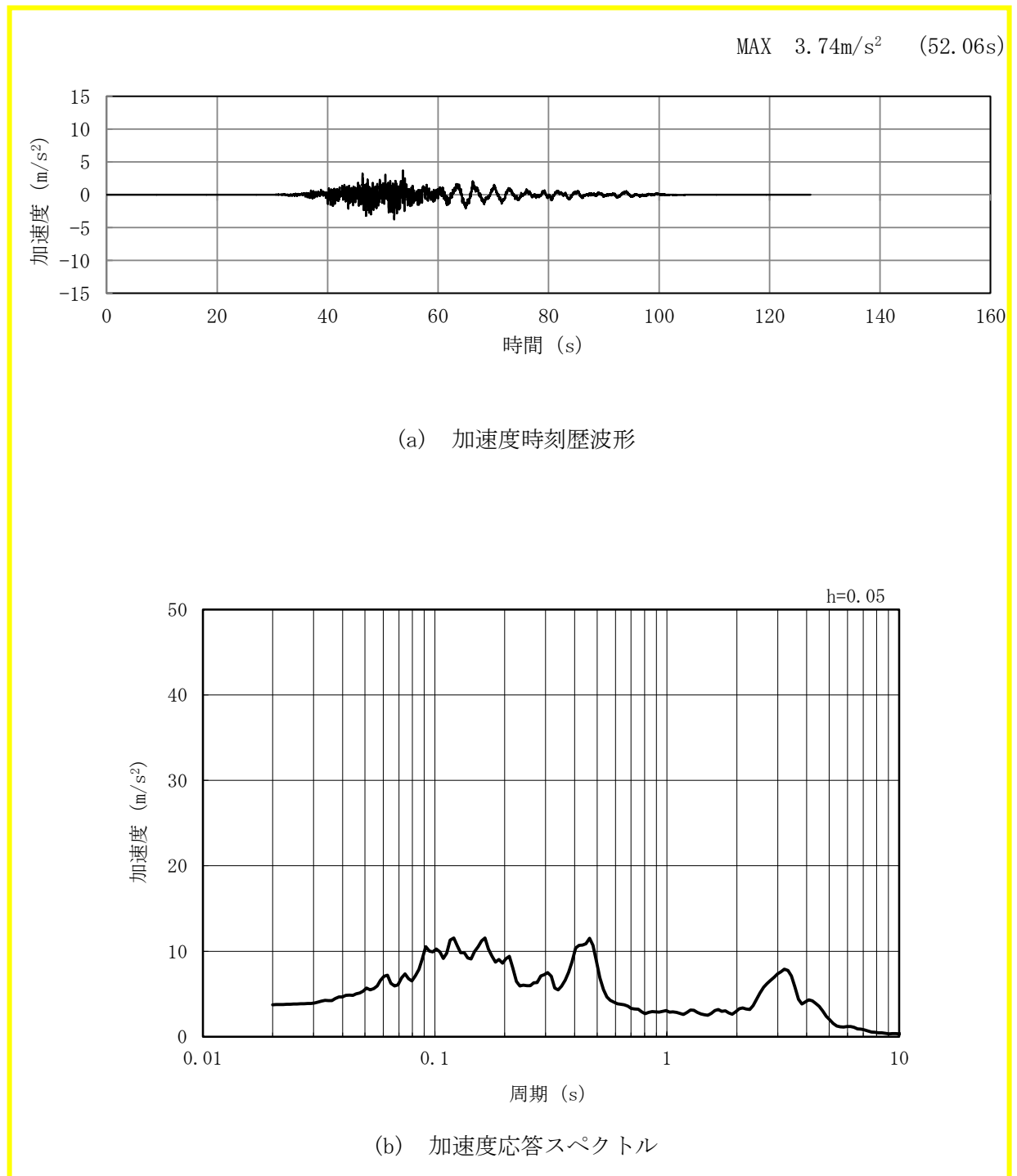
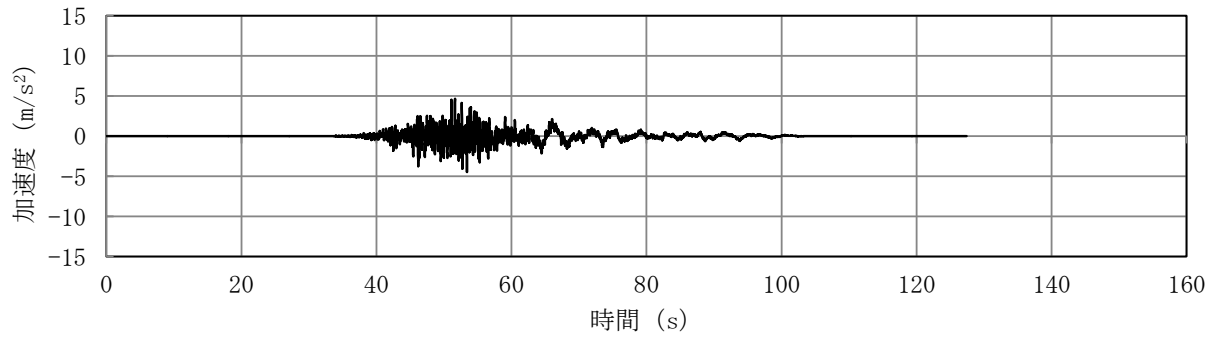
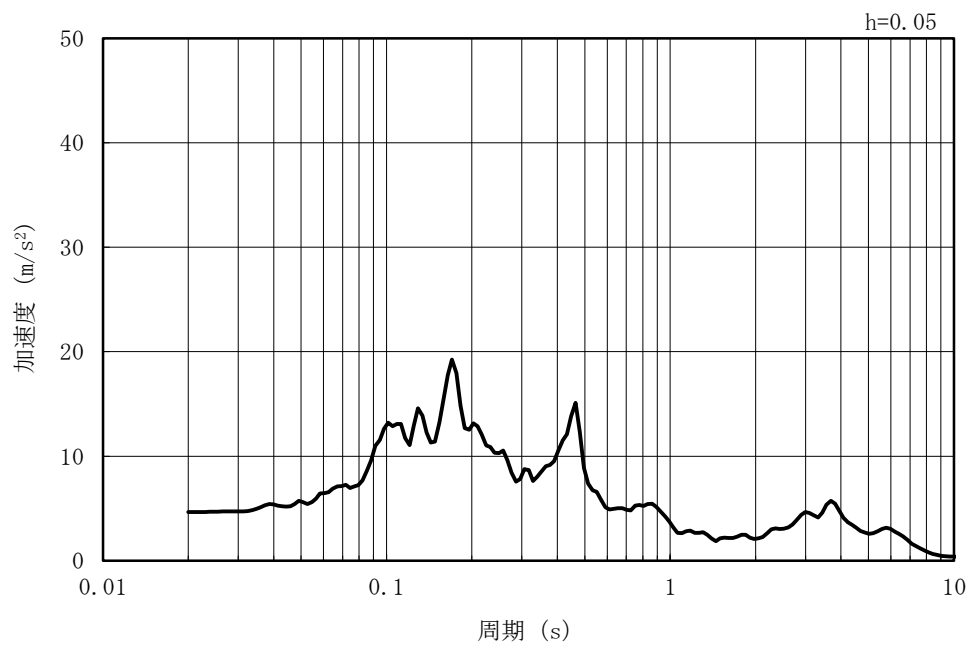


図 5-69 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向：Ss-5EW)

MAX 4.64m/s² (51.64s)



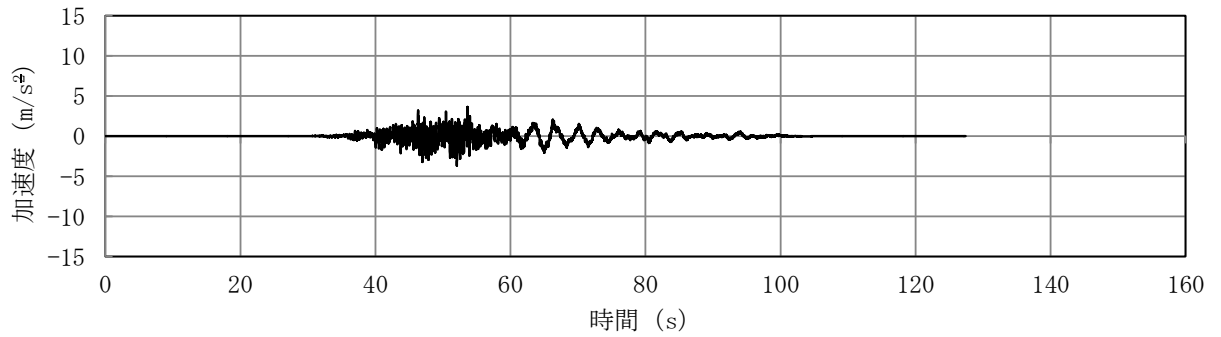
(a) 加速度時刻歴波形



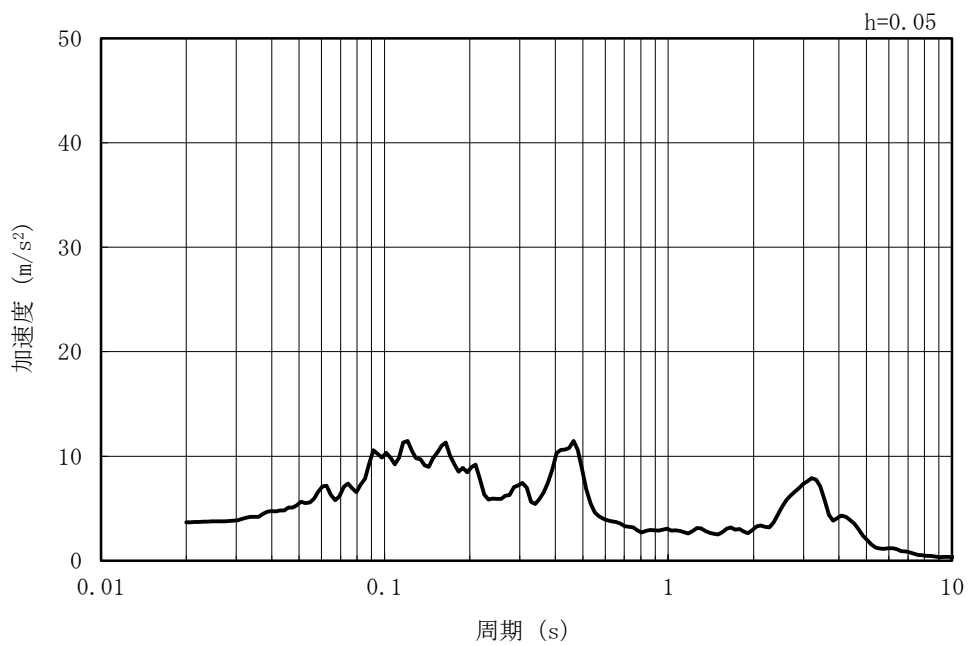
(b) 加速度応答スペクトル

図 5-70 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-5NS)

MAX 3.68m/s² (52.06s)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 5-71 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-5NS)

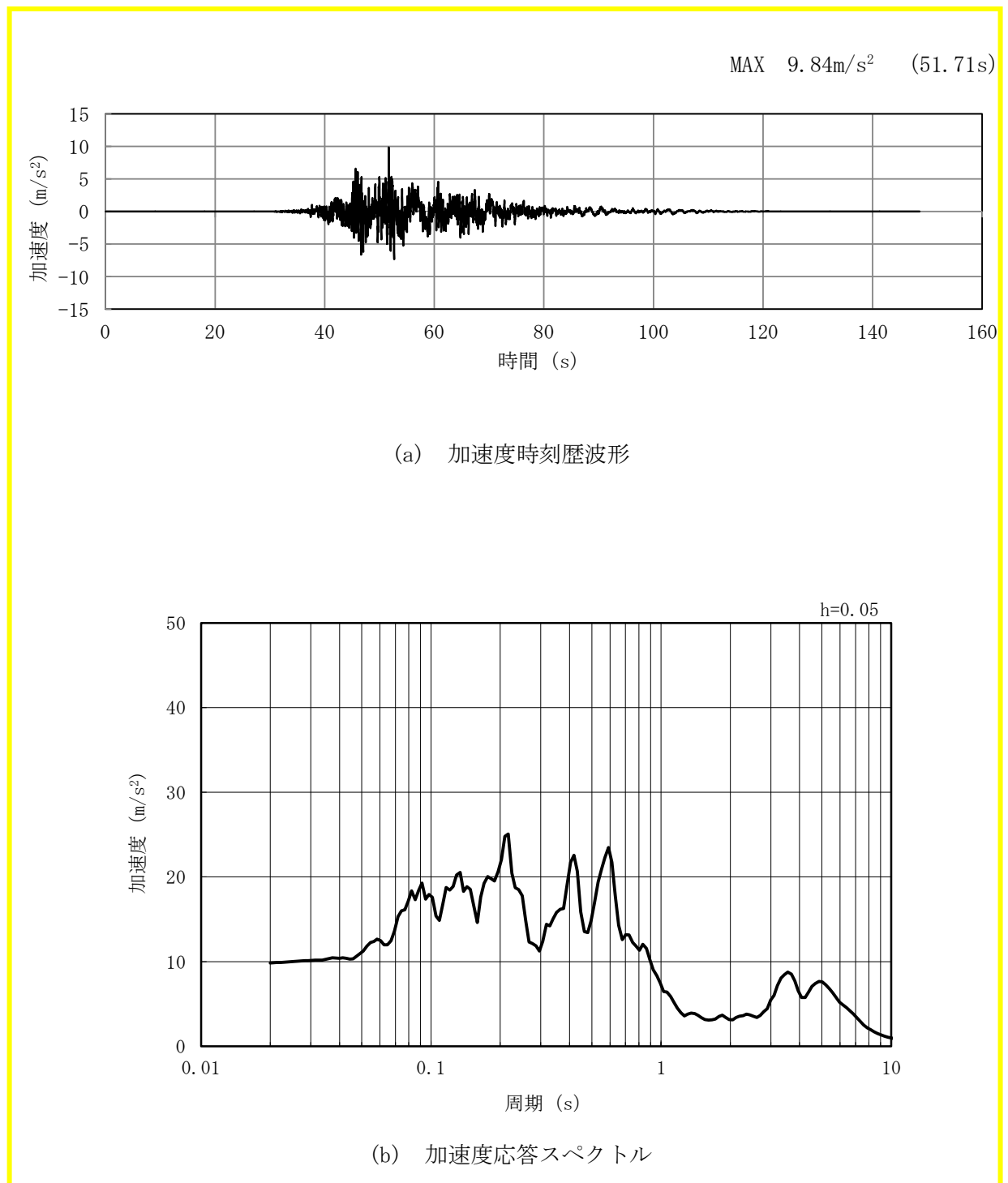


図 5-72 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-6EW)

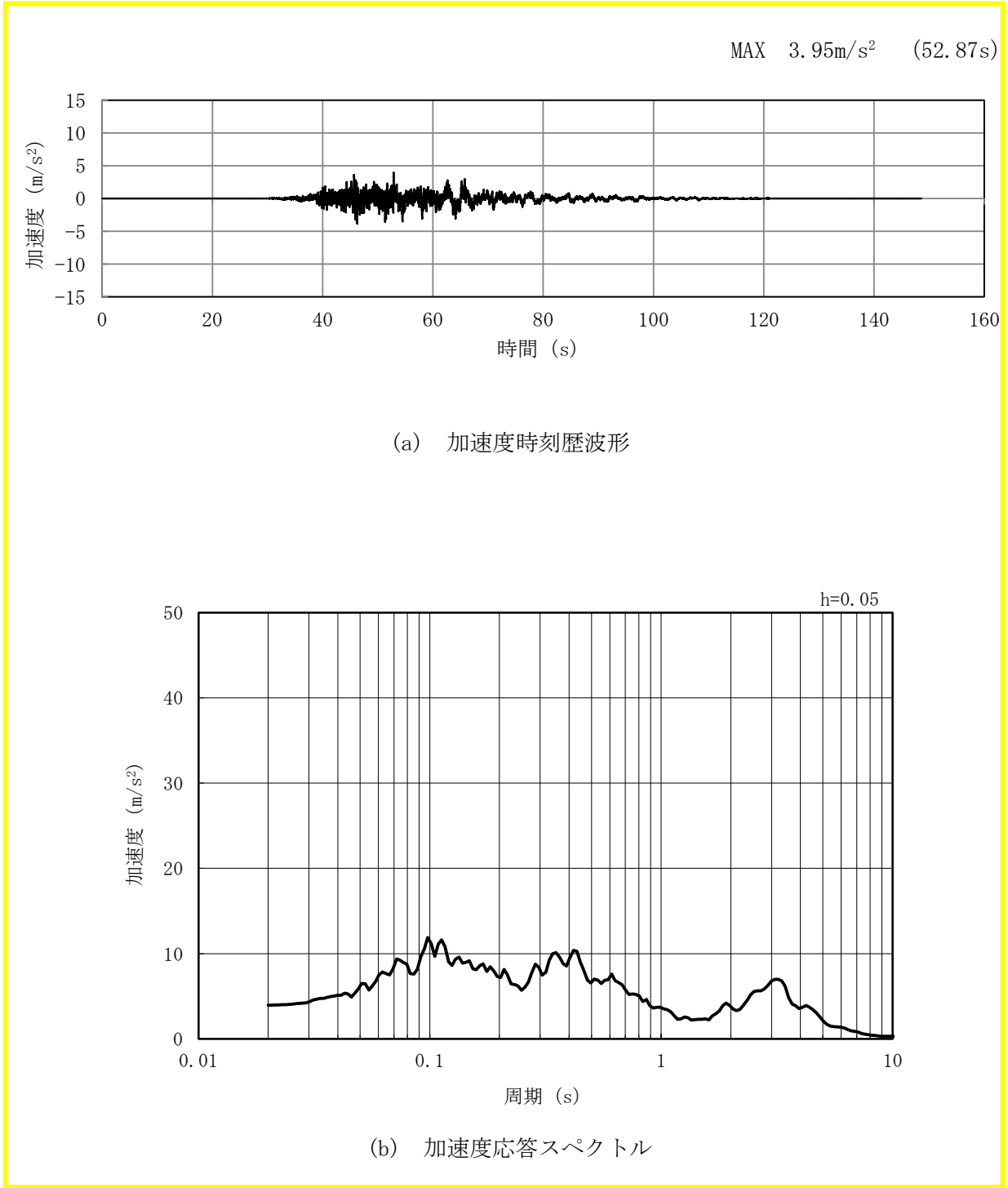
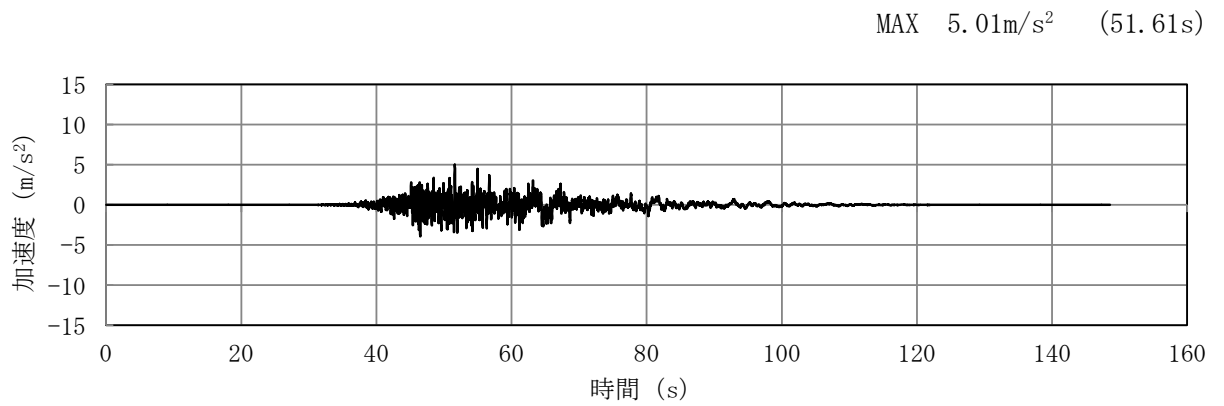
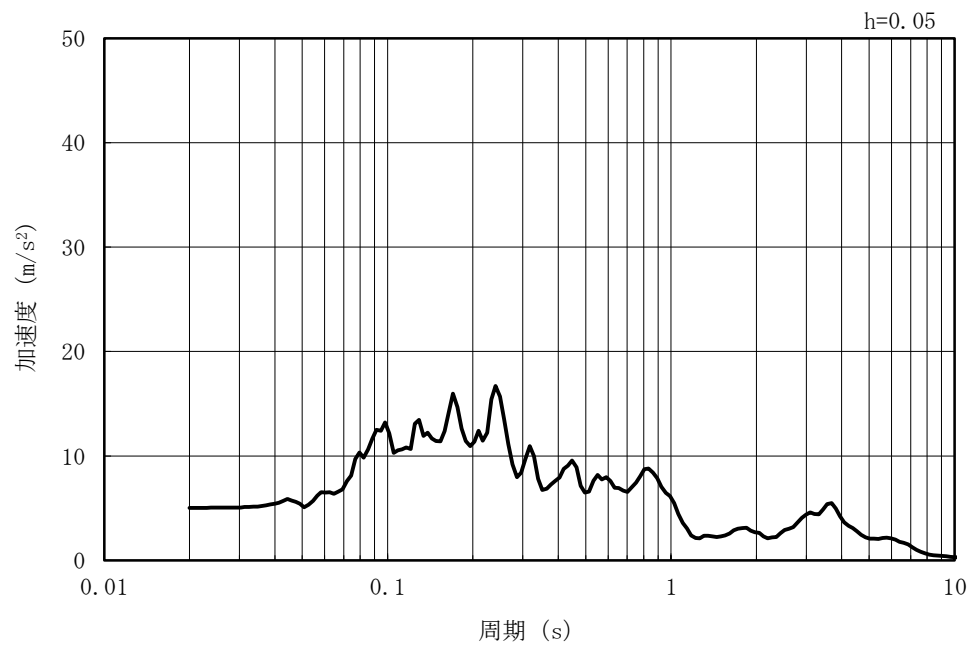


図 5-73 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向：Ss-6EW)



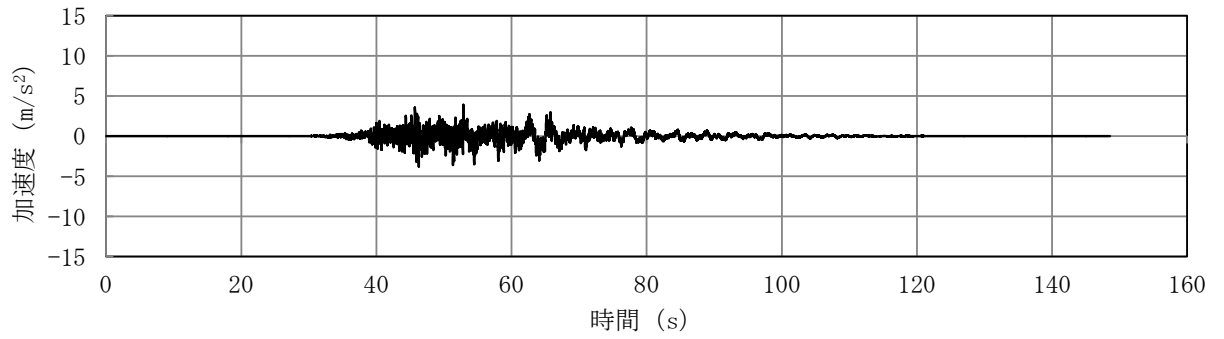
(a) 加速度時刻歴波形



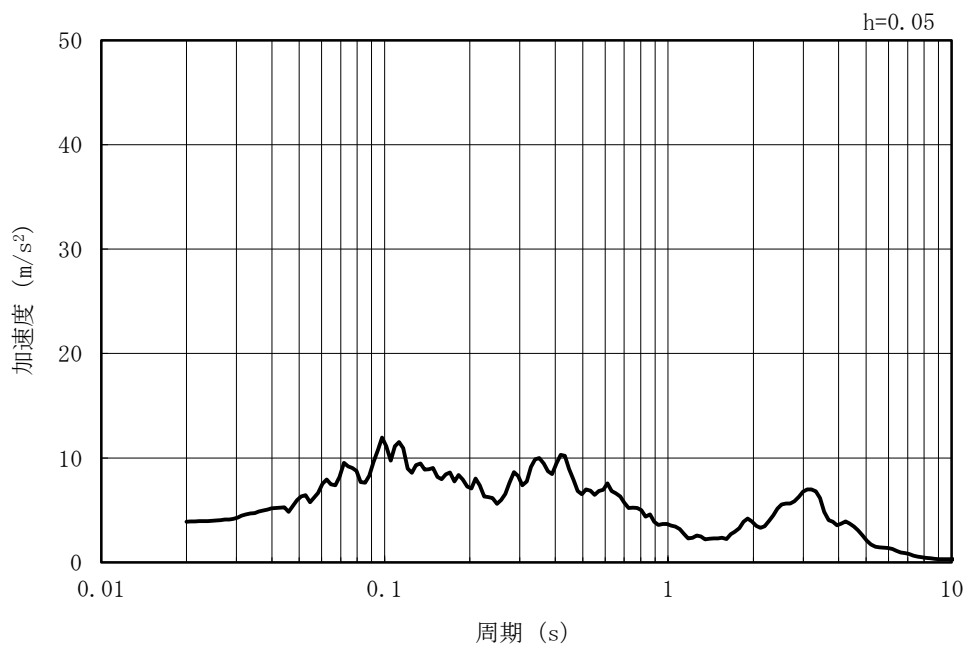
(b) 加速度応答スペクトル

図 5-74 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-6NS)

MAX 3.89m/s² (52.87s)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 5-75 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-6NS)

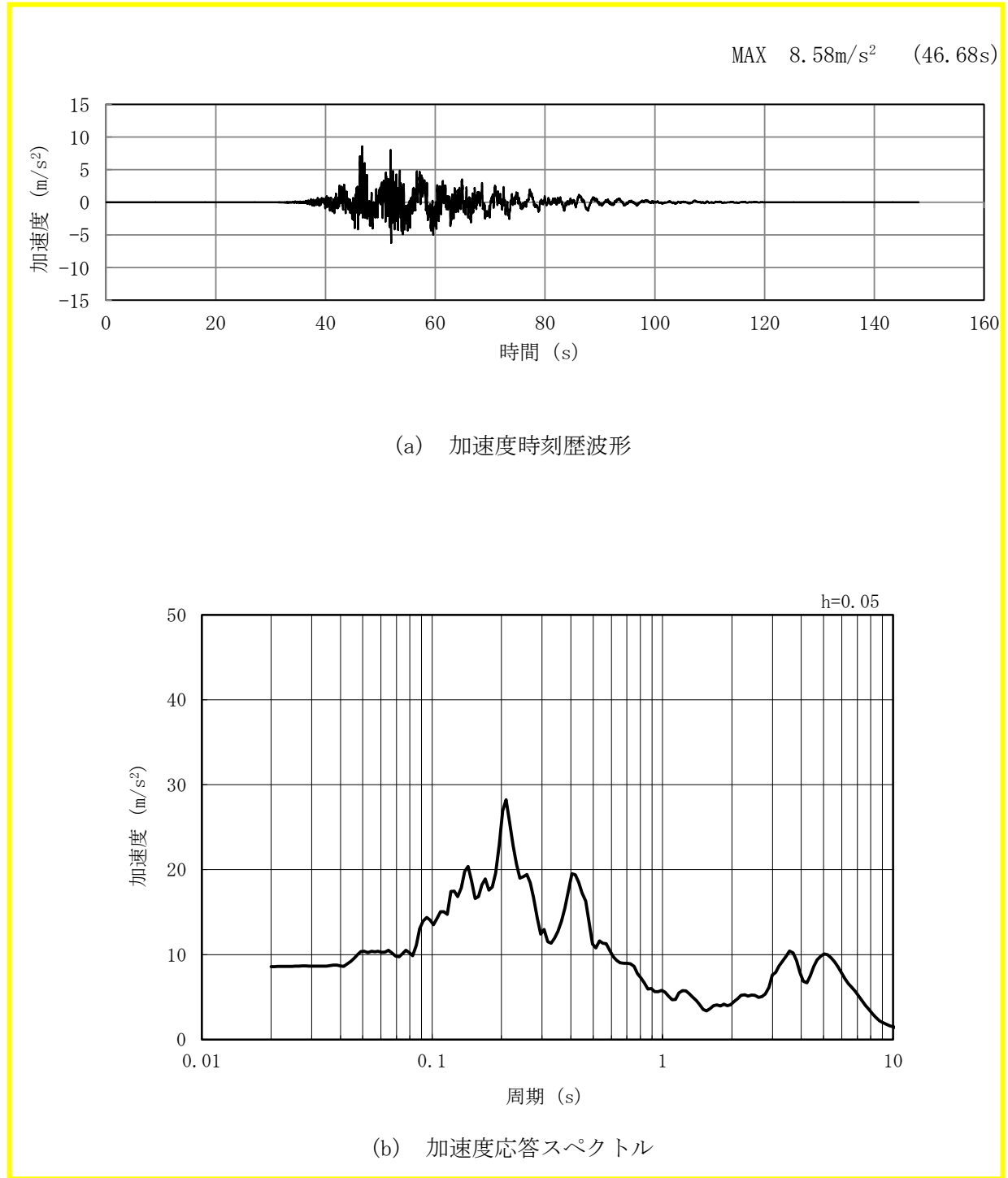


図 5-76 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向：Ss-7EW)

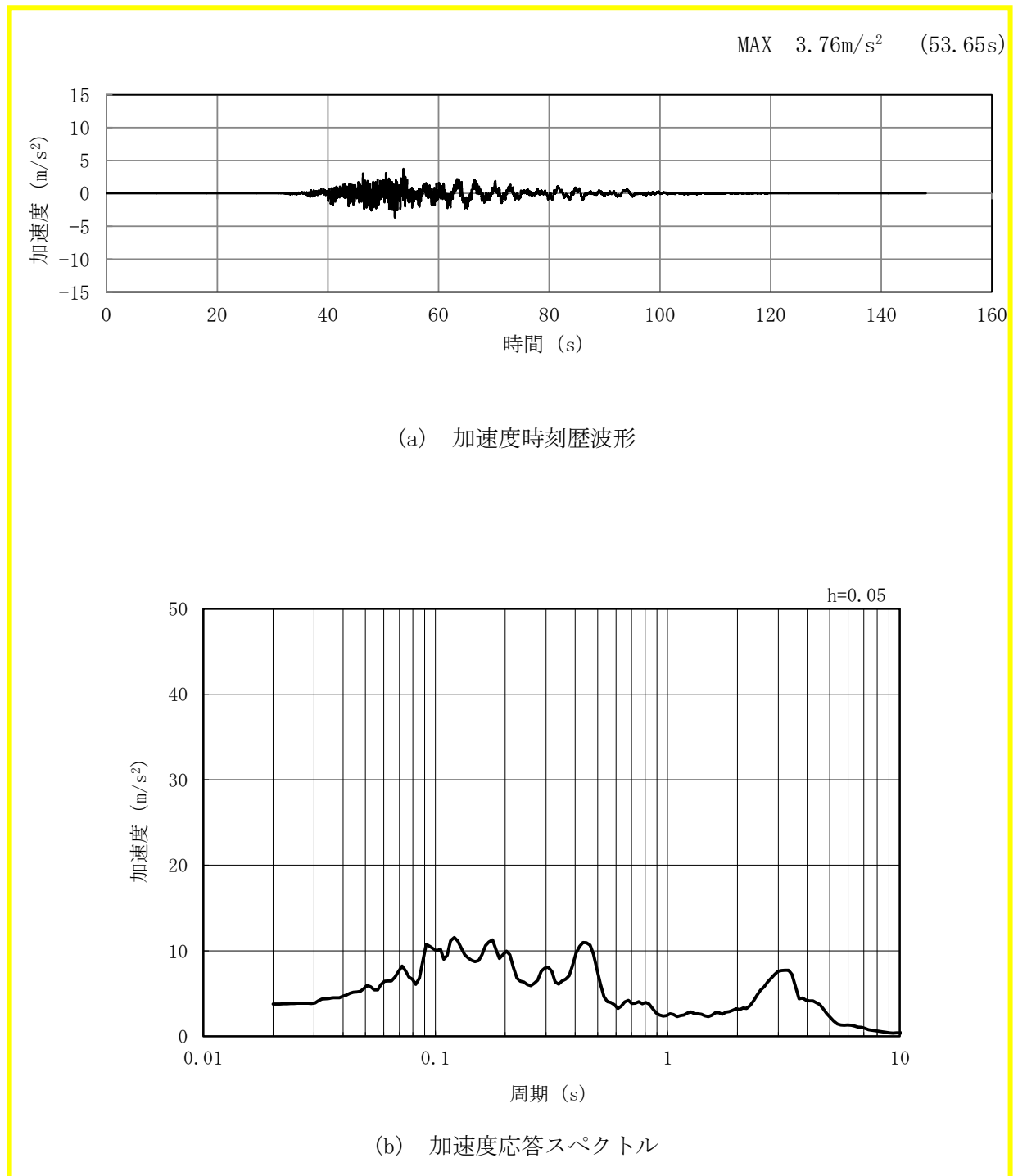
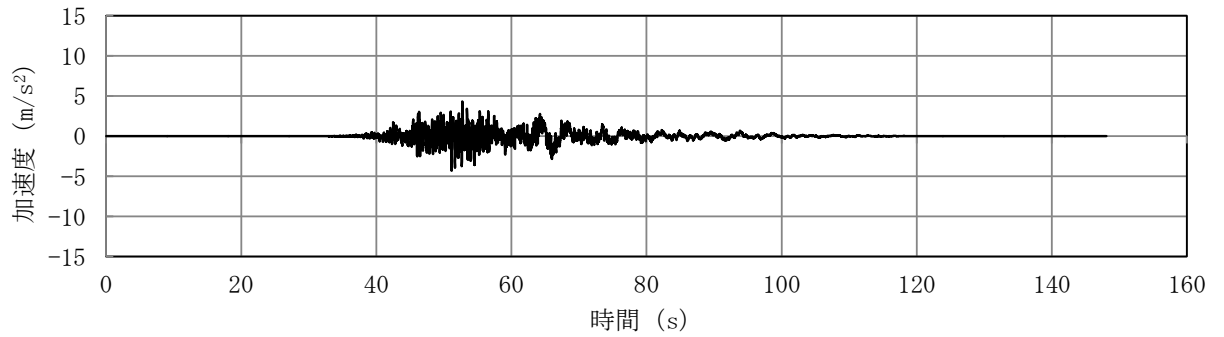
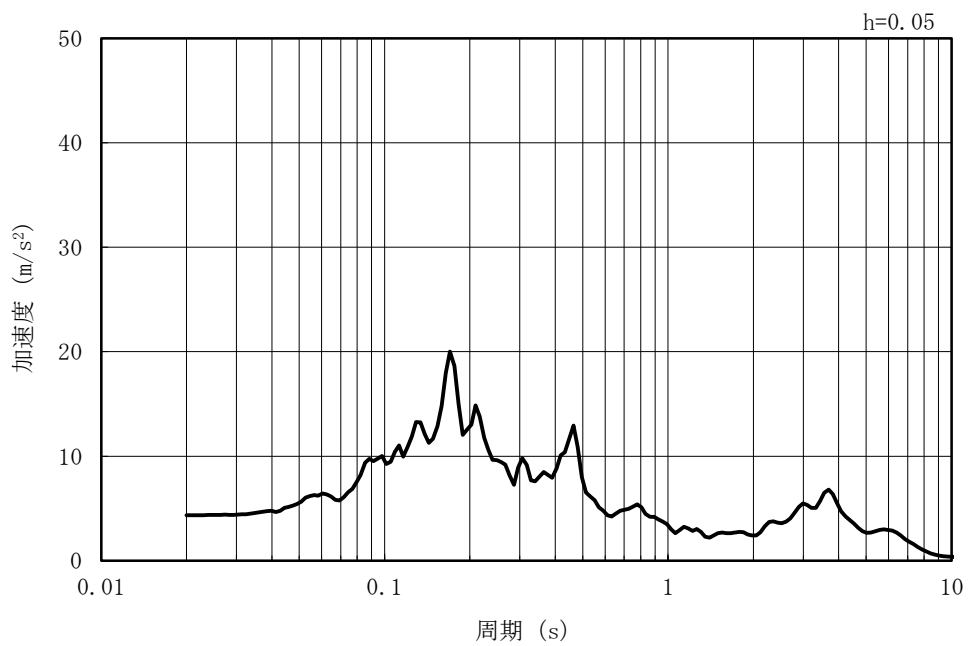


図 5-77 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向：Ss-7EW)

MAX 4.33m/s² (52.75s)



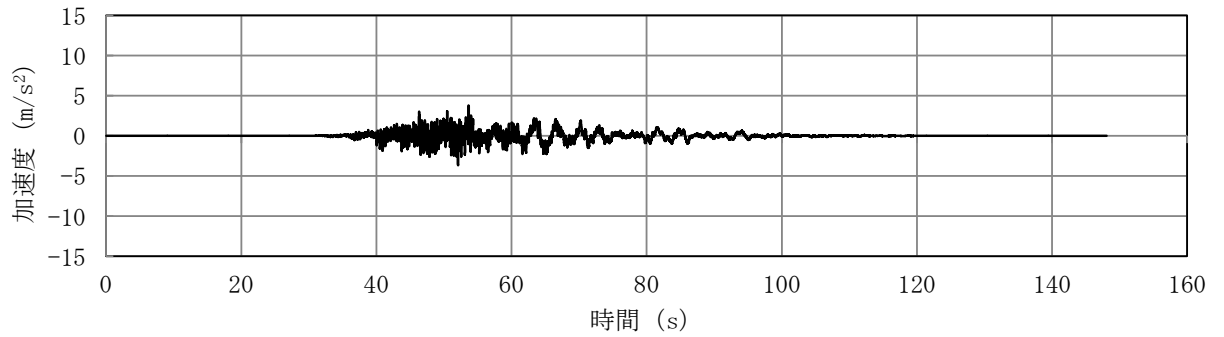
(a) 加速度時刻歴波形



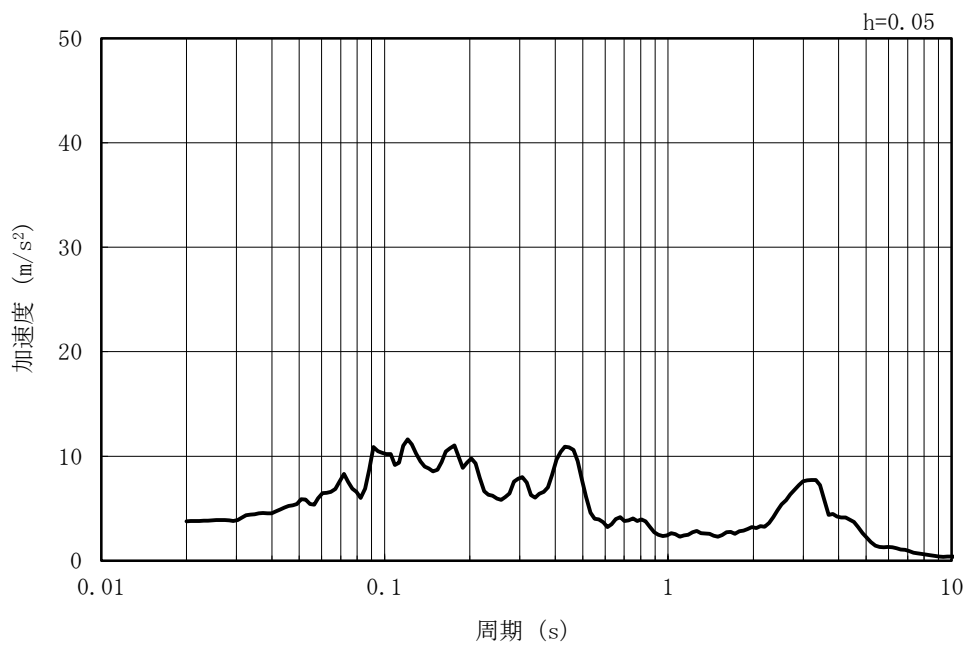
(b) 加速度応答スペクトル

図 5-78 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-7NS)

MAX 3.77m/s² (53.65s)



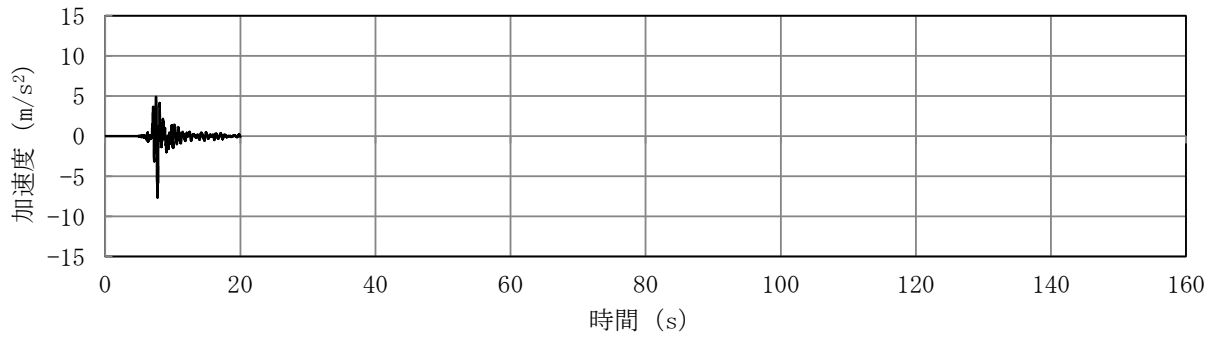
(a) 加速度時刻歴波形



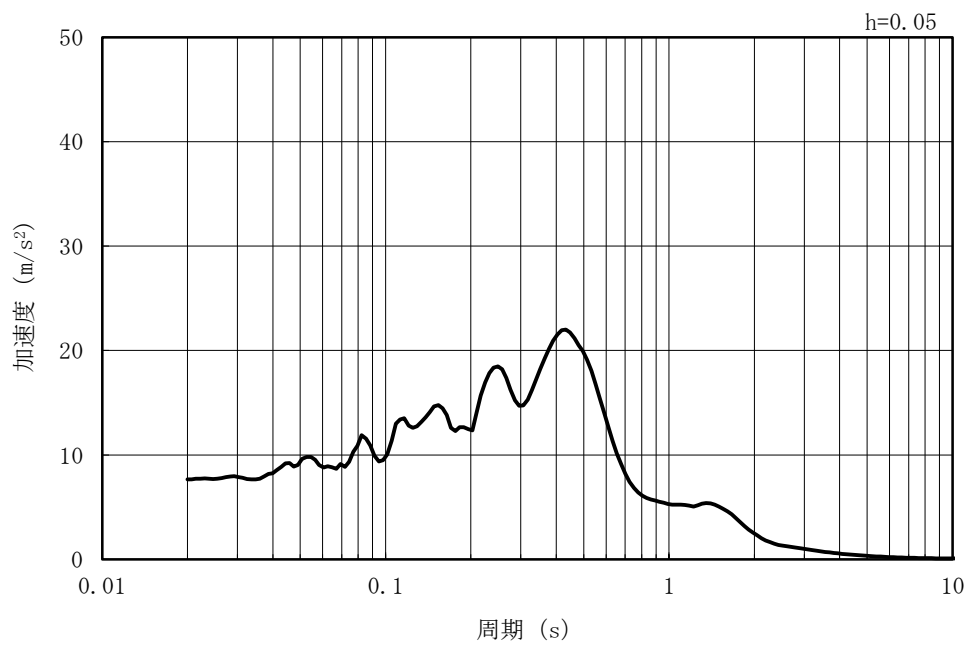
(b) 加速度応答スペクトル

図 5-79 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向 : Ss-7NS)

MAX 7.65m/s² (7.74s)



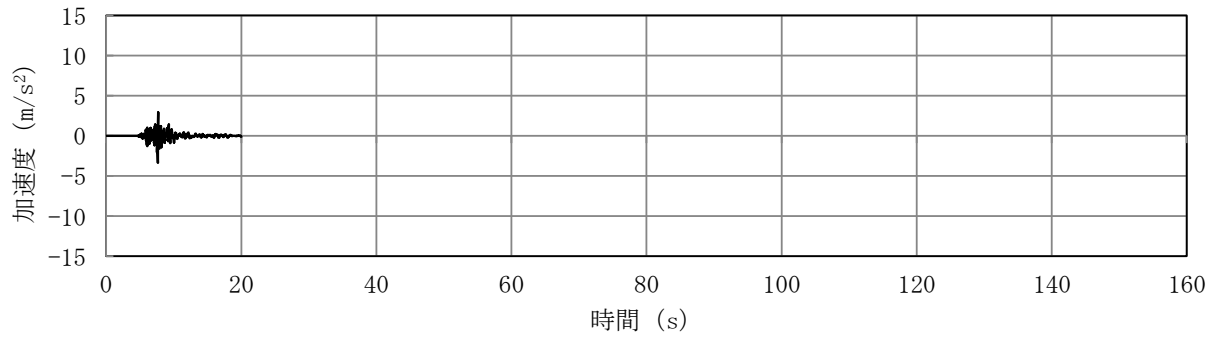
(a) 加速度時刻歴波形



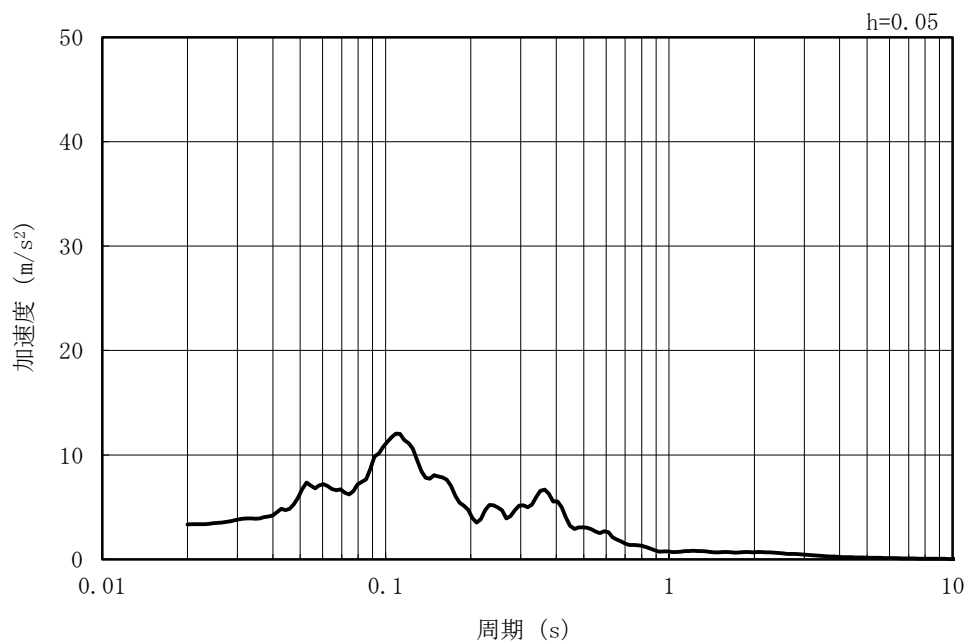
(b) 加速度応答スペクトル

図 5-80 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-8)

MAX 3.35m/s² (7.64s)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 5-81 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(鉛直方向：Ss-8)

5.5.2 許容限界の設定

(1) 通水機能を要求する部材の許容限界

a. 曲げに対する許容限界

鉄筋コンクリート部材の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%）を許容限界とし、照査用コンクリートひずみが限界ひずみを下回ることを確認する。

鉄筋コンクリート部材の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。

b. せん断に対する許容限界

鉄筋コンクリート部材のせん断に対する照査は、土木学会マニュアルに基づき、(a)棒部材式及び(b)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。

鉄筋コンクリート部材のせん断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。

$$\gamma_i \frac{V_d}{V_{yd}} < 1.0$$

ここで、

γ_i : 構造物係数 ($\gamma_i = 1.0$)

V_{yd} : せん断耐力

V_d : 照査用せん断力 ($V_d = \gamma_a \cdot V$)

γ_a : 構造解析係数 ($\gamma_a = 1.05$)

V : 応答計算によるせん断力値

構造部材のせん断に対する許容限界は、土木学会マニュアルに基づき、(a)棒部材式及び(b)ディープビーム式で求まるせん断耐力のうち、いずれか大きい方とする。

(a) 棒部材式

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

ここで、

V_{cd} : コンクリートが分担するせん断耐力

V_{sd} : せん断補強筋が分担するせん断耐力

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

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

ただし、 $f_{vcd} > 0.72$ (N/mm²) となる場合は $f_{vcd} = 0.72$ (N/mm²)

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

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

$$\beta_n = 1 + 2 M_0 / M_u \quad (N'_d \geq 0) \quad \text{ただし、} \beta_n > 2.0 \text{ となる場合は } \beta_n = 2.0$$

$$= 1 + 4 M_0 / M_u \quad (N'_d < 0) \quad \text{ただし、} \beta_n < 0 \text{ となる場合は } \beta_n = 0$$

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

f_{cd} : コンクリート圧縮強度の設計用値 (N/mm²) で設計基準強度 f_{ck} を材料係数 γ_{mc} (=1.3) 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_u : 曲げモーメント耐力

$M_0 = N'_d \cdot D / 6$: 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 (=1.3)

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

ここで、

A_w : 区間 s におけるせん断補強筋の総断面積

f_{wyd} : せん断補強筋の降伏強度を材料係数 γ_{ms} (1.0) で除したもので、 $400\text{N}/\text{mm}^2$ 以下とする。ただし、コンクリートの圧縮強度の特性値 f'_{ck} が $60\text{N}/\text{mm}^2$ 以上の時は、 $800\text{N}/\text{mm}^2$ 以下とする。

α : せん断補強筋と部材軸のなす角

s : せん断補強筋の配置間隔

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 (=1.1)

(b) ディープビーム式

$$V_{ydd} = V_{cdd} + V_{sdd}$$

ここで、

V_{cdd} : コンクリートが分担するせん断耐力

V_{sdd} : せん断補強筋が分担するせん断耐力

$$V_{cdd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_{bc}$$

$$f_{dd} = 0.19 \sqrt{f_{cd}}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad (d \text{ [m]})$$

ただし、 $\beta_d > 1.5$ となる場合は $\beta_d = 1.5$

$$\beta_p = \sqrt[3]{100 p_v}$$

ただし、 $\beta_p > 1.5$ となる場合は $\beta_p = 1.5$

$$\beta_a = \frac{5}{1 + (a/d)^2}$$

γ_{bc} : 部材係数 (=1.3)

$$V_{sdd} = \phi \cdot V_{sd}$$

$$\phi = -0.17 + 0.3 a/d + 0.33/p_{wb} \quad \text{ただし、} 0 \leq \phi \leq 1$$

p_{wb} : せん断補強鉄筋比 (%)

また、分布荷重を受ける部材のせん断耐力については、図 5-82 に示す等価せん断スパンの考え方に基づき、せん断耐力を算定する。

(c) 等価せん断スパンの設定

時刻歴地震応答解析で得られる断面力分布に基づいて、支承前面あるいははり・柱前面から**最大曲げモーメントが発生する位置**（あるいはせん断力が零となる点）までを照査対象区間と考える。この区間において、等価せん断スパンを以下のように設定する。

- ① 区間に曲げモーメントの反曲点（曲げモーメントが零）が存在する場合は、以下の2種類の等価せん断スパンを設定する。

第1等価せん断スパン(a1)：支承前面あるいははり・柱前面から反曲点までの距離

第2等価せん断スパン(a2)：反曲点から最大曲げモーメント点までの距離

- ② 区間に曲げモーメントの反曲点（曲げモーメントが零）が無い場合は、以下のように等価せん断スパンを設定する。

等価せん断スパン(a)：支承前面あるいははり・柱前面から最大曲げモーメント点までの距離

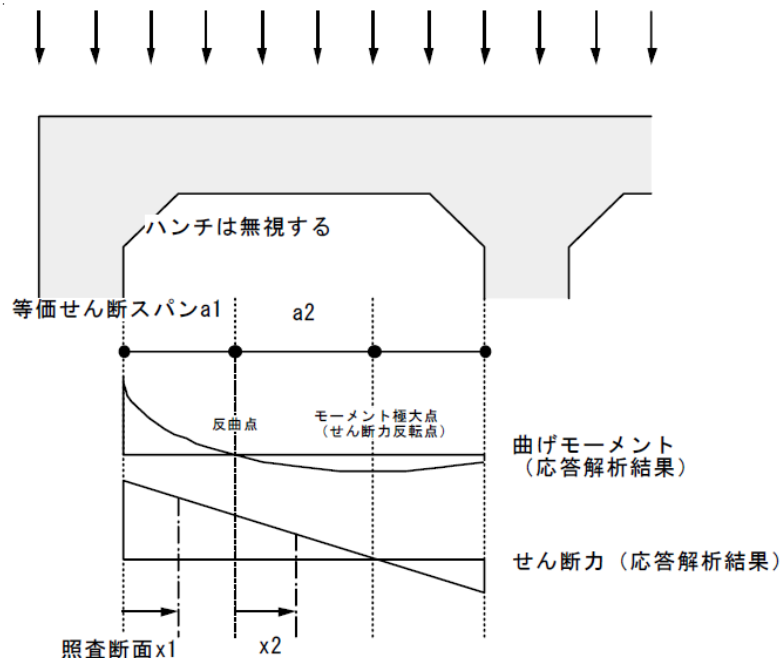


図 5-82 等価せん断スパンの設定方法

(土木学会マニュアルより引用)

土木学会マニュアルでは、コンクリート標準示方書におけるせん断耐力式のうち棒部材式において等価せん断スパンにより設定可能な係数 β_a を考慮している。これは、地中に埋設されたラーメン構造で、分布荷重が卓越、スパン内に曲げモーメントの反曲点が存在する等の载荷形態にある条件下では、せん断耐力が増大するという実験的知見を踏まえ、より合理的なせん断耐力を与えるよう、コンクリート標準示方書のせん断耐力式を精緻化したものである。

また、土木学会マニュアルにおけるせん断耐力式による評価においては、表 5-18 に示すとおり、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を実施することが可能である。

なお、部材係数 γ_b のうち、繰返し作用を受けても曲げせん断破壊しないことを保証するための裕度分 γ_{b2} については、部材降伏に至らない応答解析結果であることから、 $\gamma_{b2}=1.0$ とする。

表 5-18 せん断耐力式において考慮している安全係数

安全係数			値	内容
材料係数	コンクリート	γ_{mc}	1.30	コンクリートの特性値（圧縮強度）を低減
部材係数	コンクリート	γ_{bc}	1.30	コンクリートが負担するせん断力を低減
	鉄筋	γ_{bs}	1.10	せん断補強筋が負担するせん断力を低減
構造解析係数		γ_a	1.05	応答値（断面力）を割り増し

(2) 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

A-A断面の支持地盤はマンメイドロックであり、マンメイドロックについては、西山層と同等以上の力学特性を有することから、西山層の極限支持力を適用することとし、表 5-19 のとおりに設定する。

表 5-19 マンメイドロック（西山層）の極限支持力

項 目			許容限界 (kN)		備 考
			A-A断面 (南側)	A-A断面 (北側)	
極限支持力	Q_u	(kN)	122900	96600	$Q_u = q_u \cdot A_e$
岩盤支持力試験	q_u	(kN/m ²)	6178	6178	西山層岩盤試験値
有効載荷面積	A_e	(m ²)	19.90	15.65	
基礎幅	B	(m)	19.90	15.65	

(3) 貯水機能を要求する鉄筋コンクリート部材の許容限界

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（図 5-83）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（＝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。

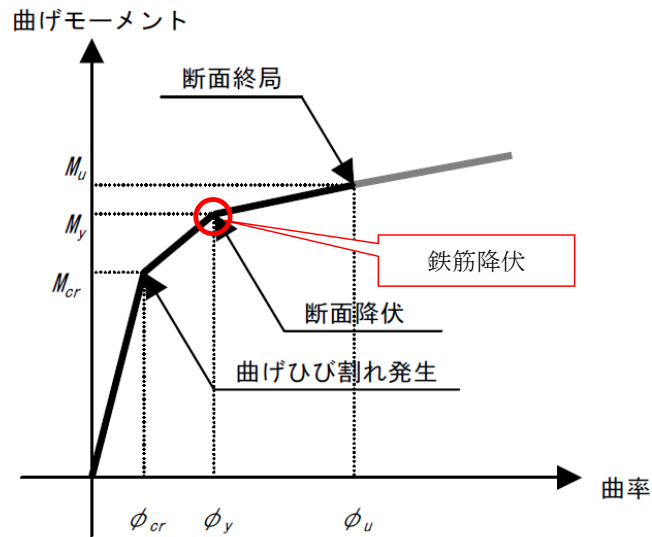


図 5-83 貯水機能を要求する鉄筋コンクリート部材の許容限界

5.6 評価結果

5.6.1 地震応答解析結果

(1) 解析ケースと照査値

(追而)

(2) 最大せん断ひずみ分布

(追而)

(3) 過剰間隙水圧比分布

(追而)

5.6.2 3次元構造解析結果

(1) 構造部材のひずみ分布図

(追而)

(2) 構造部材の断面力分布図

(追而)

5.6.3 構造部材の健全性に対する評価結果

(1) 曲げ軸力に対する評価結果

a. 通水機能

(追而)

b. 貯水機能

(追而)

(2) せん断力に対する評価結果

(追而)

5.6.4 基礎地盤の支持性能に対する評価結果

(追而)

5.7 まとめ

(追而)