

本資料の記載については、補足説明資料の説明に合わせて今後適正化する。

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-0%6 S+
提出年月日	2022年11月14日

VI-2-10-2-3-3 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の
耐震性についての計算書

S2 補 VI-2-10-2-3-3 R0

2022年11月

中国電力株式会社

目 次

1.	概要	1
2.	基本方針	2
2.1	位置	2
2.2	構造概要	3
2.3	評価方針	7
2.4	適用規格・基準等	12
3.	評価対象断面	13
4.	耐震評価	19
4.1	2次元動的有限要素法	19
4.1.1	解析方法	19
4.1.2	荷重及び荷重の組合せ	21
4.1.3	入力地震動	21
4.1.4	解析モデル及び諸元	23
4.1.5	評価対象部位	25
4.1.6	許容限界	26
4.1.7	評価方法	29
4.2.	3次元構造解析	32
4.2.1	解析方法	32
4.2.2	荷重及び荷重の組合せ	32
4.2.3	解析モデル及び諸元	32
4.2.4	評価対象部位	35
4.2.5	許容限界	35
4.2.6	評価方法	35
5.	耐震評価結果	36
5.1	鋼管杭	36
5.1.1	曲げ照査	36
5.1.2	せん断力照査	38
5.2	被覆コンクリート壁	41
5.2.1	曲げ照査	43
5.2.2	せん断力照査	47
5.4	改良地盤④	49
5.5	止水目地	50
5.6	基礎地盤	51

1. 概要

本資料は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に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、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）が基準地震動 S_s に対して十分な構造強度及び止水機能を有していることを確認するものである。

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）に要求される機能の維持を確認するに当たっては、構造部材の健全性評価では、地震応答解析又は3次元構造解析に基づく施設・地盤の健全性評価、施設の変形性評価を行う。基礎地盤の支持性能評価では、基礎地盤に発生した接地圧を確認する。

2. 基本方針

2.1 位置

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の位置図を図 2-1 に示す。

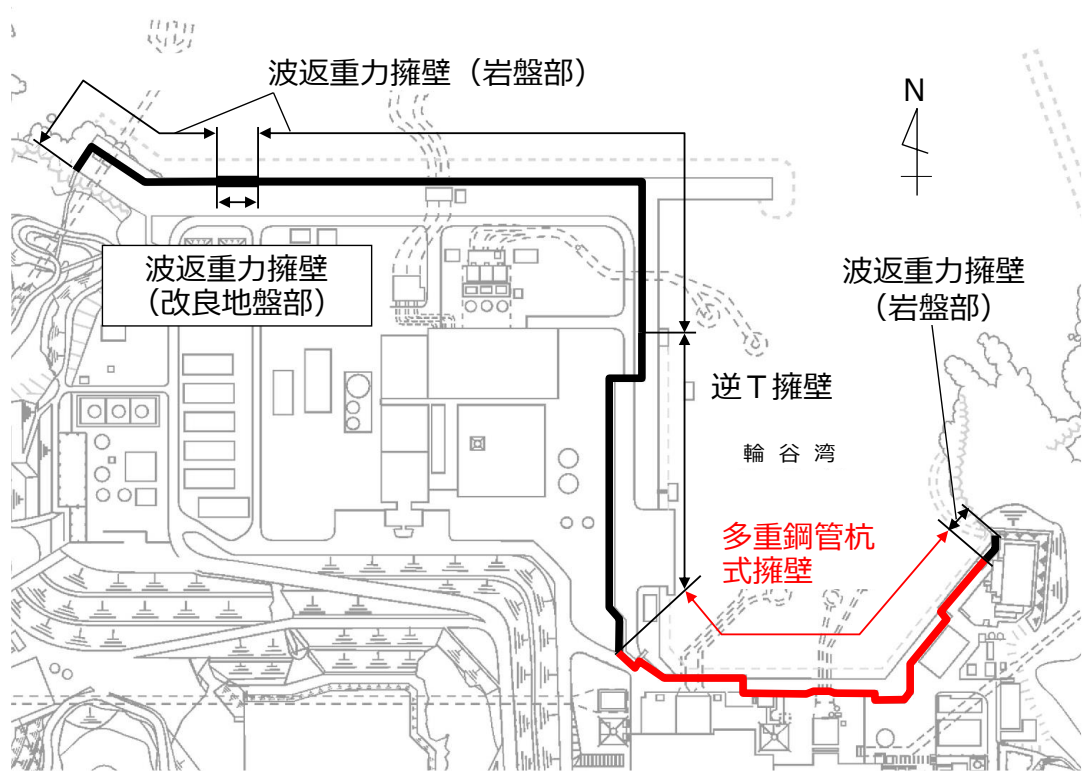


図 2-1 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の位置図

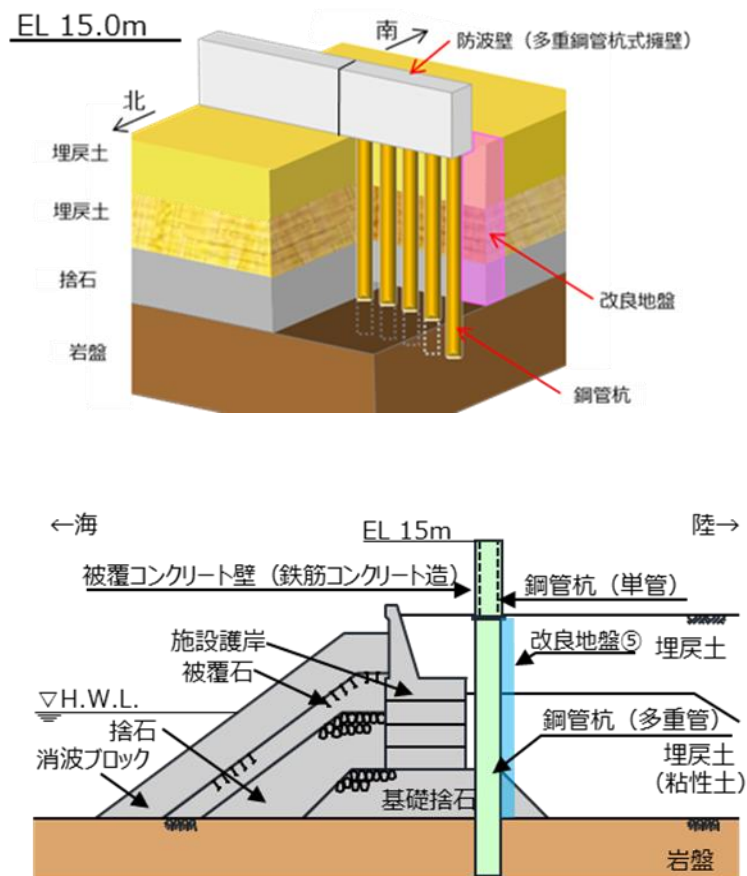
2.2 構造概要

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造概要図を図 2-2 に、構造図を図 2-3 及び図 2-4 に、概略配筋図を図 2-5 に、止水目地の概念図及び配置位置図を図 2-6 及び図 2-7 に示す。

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）は、入力津波高さ（EL 12.6m）に対して余裕を考慮した天端高さ（EL 15.0m）とする。

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）は、鋼管を多重化して鋼管内をコンクリート又はモルタルで充填した多重鋼管による杭基礎構造及び、鋼管杭と鉄筋コンクリート造の被覆コンクリート壁による上部構造から構成される。鋼管杭は、岩盤に支持させる構造とし、岩盤部では隣り合う多重鋼管杭間をセメントミルクで間詰めする。被覆コンクリート壁の、ブロック間の境界には、止水性を保持するための止水目地を設置する。

また、津波の地盤中からの回り込みに対し、防波壁の背後に地盤改良を実施する。



（正面図及び断面図）

図 2-2 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造概要図

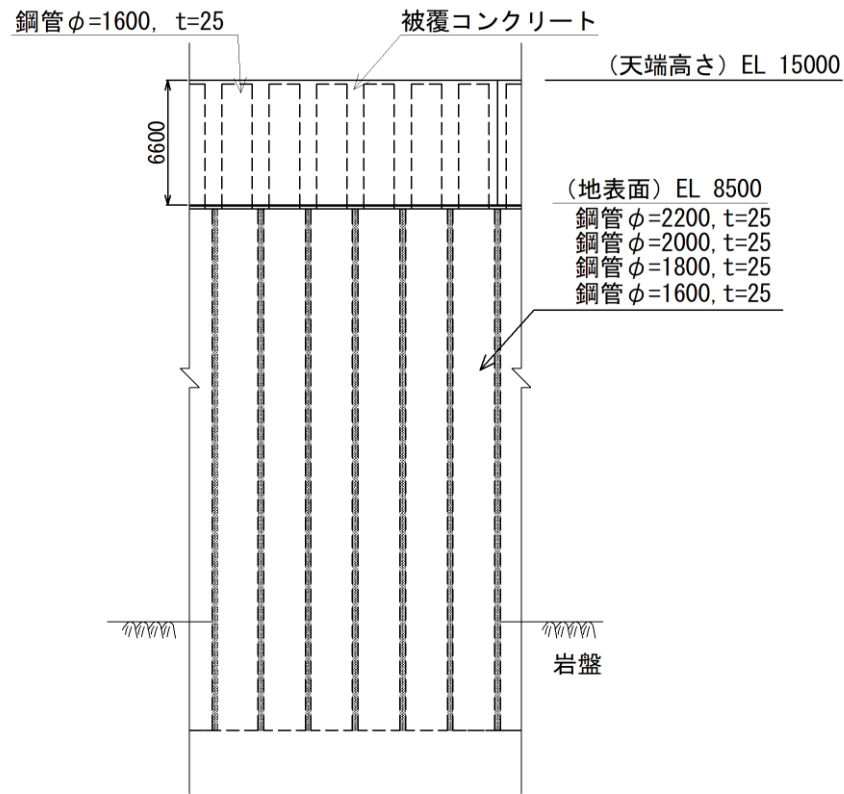


図 2-3 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造図（正面図）

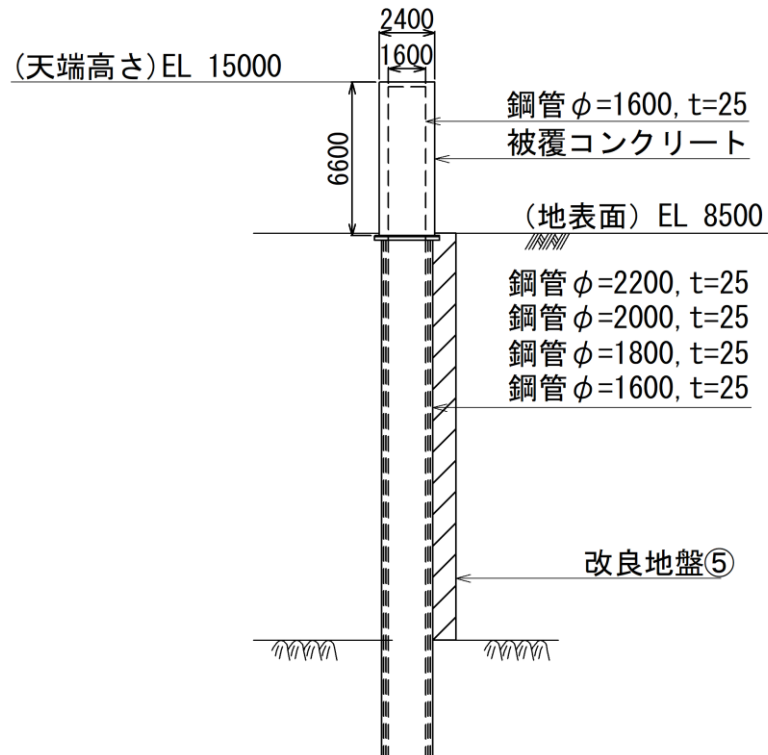


図 2-4 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造図（断面図）

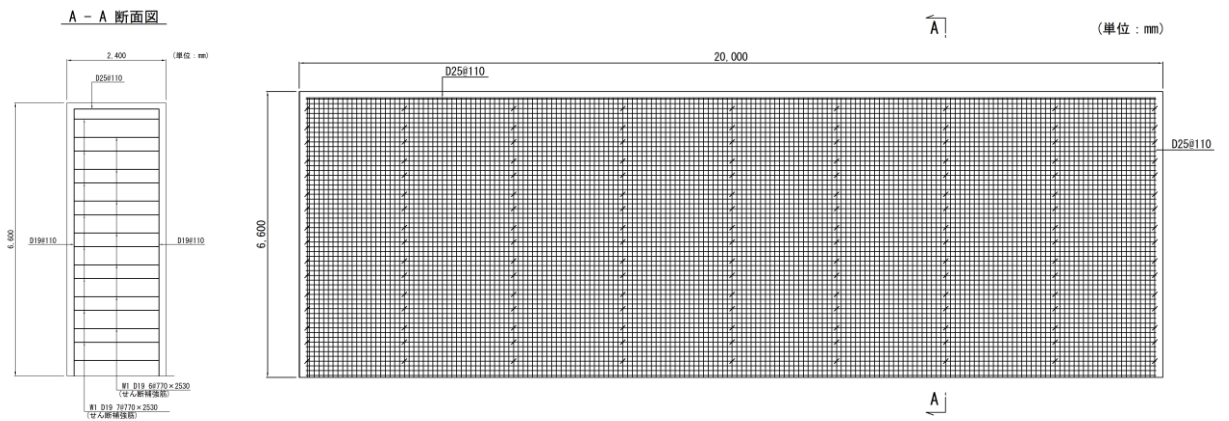


図 2-5 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の概略配筋図

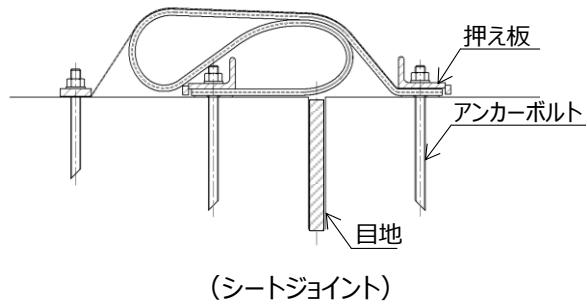


図 2-6 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の止水目地の概念図

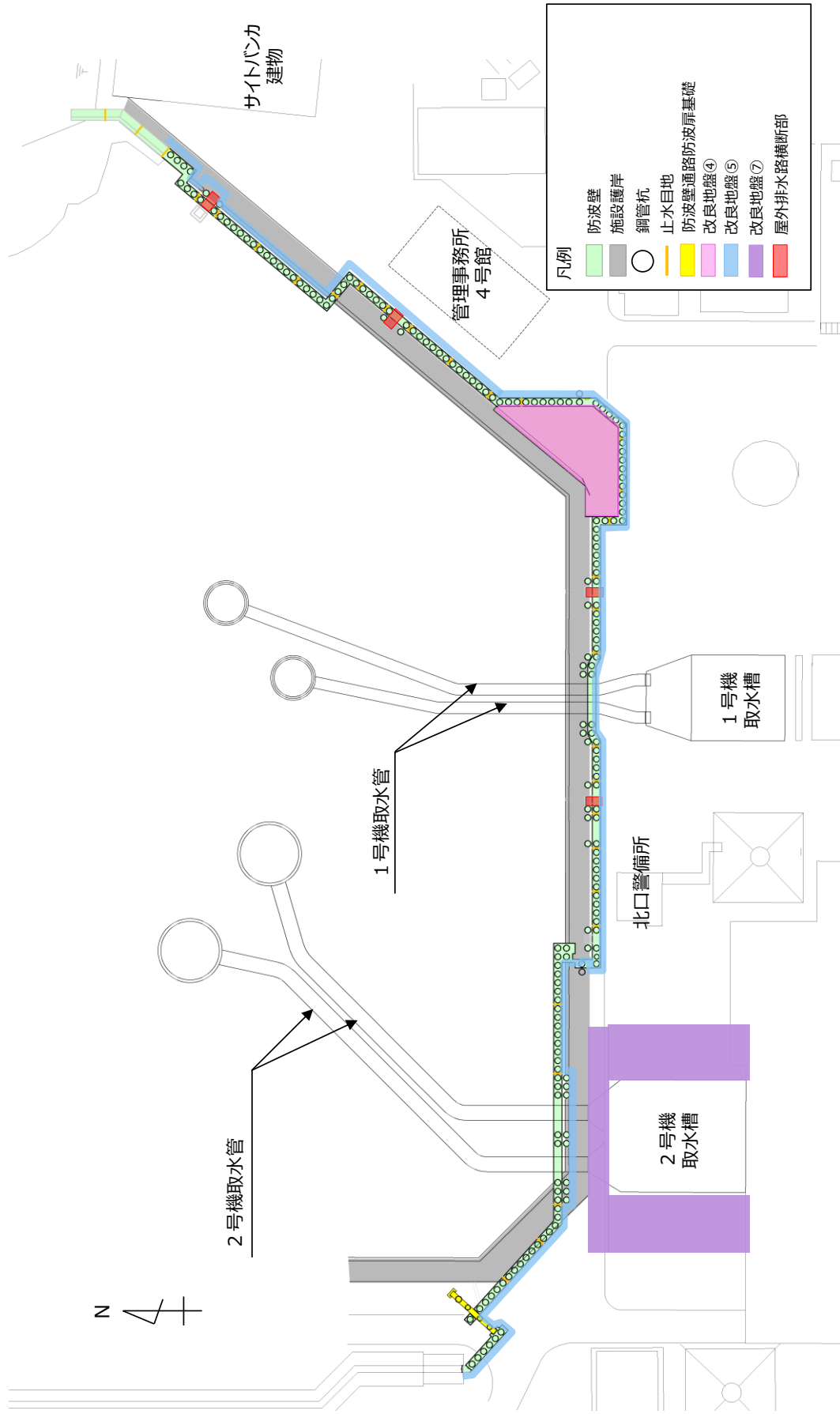


図 2-7 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の止水目地の配置位置図

2.3 評価方針

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）は，Sクラス施設である津波防護施設に分類される。

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の各部位の役割及び性能目標を表2-1及び表2-2に示す。

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の耐震評価は，地震応答解析及び3次元構造解析の結果に基づき，設計基準対象施設として，表2-3に示すとおり，施設・地盤の健全性評価，基礎地盤の支持性能評価及び施設の変形性評価を行う。

施設・地盤の健全性評価，基礎地盤の支持性能評価及び施設の変形性評価を実施することで，構造強度を有すること及び止水性を損なわないことを確認する。

施設・地盤の健全性評価については，施設・地盤ごとに定める照査項目（発生応力，すべり安全率）が許容限界を満足することを確認する。

基礎地盤の支持性能評価においては，基礎地盤の接地圧が許容限界以下であることを確認する。

施設の変形性評価については，止水目地の変形量を算定し，有意な漏えいが生じないことを確認した許容限界を下回ることを確認する。

防波壁（多重鋼管杭式）の耐震評価フローを図2-8に示す。

表 2-1 防波壁(多重鋼管杭式)の各部位の役割

	部位の名称	地震時の役割	津波時の役割
施設	鋼管杭	・被覆コンクリート壁を支持する。	・被覆コンクリート壁を支持する。
	被覆コンクリート壁	・止水目地を支持する。	・止水目地を支持するとともに、遮水性を保持する。
	止水目地	・被覆コンクリート壁間の変形に追従する。	・被覆コンクリート壁間変形に追従し、遮水性を保持する。
地盤	改良地盤④	・鋼管杭の変形を抑制する。	・難透水性を保持する。
	改良地盤⑤	・役割に期待しない(解析モデルに反映し、防波壁への相互作用を考慮する)。	・難透水性を保持する。
	改良地盤⑦	・役割に期待しない(解析モデルに反映し、防波壁への相互作用を考慮する)。	・役割に期待しない。
	岩盤*	・鋼管杭及び被覆コンクリート壁を支持する。 ・基礎地盤のすべり安定性に寄与する。 ・鋼管杭の変形を抑制する。	・鋼管杭及び被覆コンクリート壁を支持する。 ・鋼管杭の変形を抑制する。
	埋戻土, 埋戻土(粘性土), 砂礫層	・役割に期待しない(解析モデルに取り込み、防波壁への相互作用を考慮する)。	・防波壁より陸側については、津波荷重に対して地盤反力として寄与する。
	施設護岸, 基礎捨石, 捨石, 被覆石	・役割に期待しない(解析モデルに取り込み、防波壁への波及的影響を考慮する)。	・役割に期待しない。
	消波ブロック	・役割に期待しない。	・役割に期待しない。
	グラウト材(埋戻土部 杭間部充填)	・役割に期待しない。	・難透水性の地盤ではあるが、役割に期待しない。

注記* : 岩盤部と鋼管杭間に充填するセメントミルクは、岩盤に含む。

表 2-2 防波壁(多重鋼管杭式)の各部位の性能目標

部位		性能目標			
		鉛直支持	すべり安定性	耐震性	耐津波性 (透水性、難透水性)
施設	鋼管杭	—	—	構造部材の健全性を保持するために、鋼管杭がおおむね弾性状態にとどまること。	構造部材の健全性を保持するために、鋼管杭がおおむね弾性状態にとどまること。
	被覆コンクリート壁			構造部材の健全性を保持するために、被覆コンクリート壁がおおむね弾性状態にとどまること。	止水目地の支持機能を喪失して被覆コンクリート間から優位な漏えいを生じないために、被覆コンクリート壁がおおむね弾性状態にとどまること。
	止水目地			被覆コンクリート壁間から有意な漏えいを生じないために、止水目地の変形性能を保持すること。	被覆コンクリート壁間から有意な漏えいを生じないために、止水目地の変形・遮水性能を保持すること。
地盤	改良地盤④	—	—	鋼管杭の変形を抑制するため、改良地盤がすべり破壊しないこと。(内部安定を保持)	地盤中からの回り込みによる流入を防止(難透水性を保持)するため改良地盤がすべり破壊しないこと。(内的安定を保持)
	改良地盤⑤	—	—	—	地盤中からの回り込みによる流入を防止(難透水性を保持)するため改良地盤がすべり破壊しないこと。(内的安定を保持)
	岩盤*	鋼管杭を鉛直支持するため、十分な支持力を保持すること。	基礎地盤のすべり安定性を確保するため、十分なすべり安全性を保持すること。	鋼管杭の変形を抑制するため、岩盤がすべり破壊しないこと。(内的安定を保持)	—

注記*：岩盤部と鋼管杭間に充填するセメントミルクは、岩盤に含む。

表 2-3 防波壁(多重鋼管杭式擁壁)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	施設・地盤の健全性	鋼管杭	発生する応力(曲げ, 軸力及びせん断力)が許容限界以下であることを確認	降伏モーメント(曲げ)及びせん断応力度(せん断)
		被覆コンクリート壁	発生する応力(曲げ, 軸力及びせん断力)が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		改良地盤④	すべり破壊しないこと(内的安定を保持)を確認	すべり安全率 1.2 以上
		改良地盤⑤		
	基礎地盤の支持性能	基礎地盤	発生する応力(接地圧)が許容限界以下であることを確認	極限支持力*
止水性を損なわないこと	施設・地盤の健全性	鋼管杭	発生する応力(曲げ, 軸力及びせん断力)が許容限界以下であることを確認	降伏モーメント(曲げ)及びせん断応力度(せん断)
		被覆コンクリート壁	発生する応力(曲げ, 軸力及びせん断力)が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		改良地盤④	すべり破壊しないこと(内的安定を保持)を確認	すべり安全率 1.2 以上
		改良地盤⑤		
	基礎地盤の支持性能	岩盤	発生する応力(接地圧)が許容限界以下であることを確認	極限支持力*
	施設の変形性	止水目地	発生変形量が許容限界以下であることを確認	有意な漏えいが生じないことを確認した変形量

注記* : 妥当な安全余裕を考慮する。

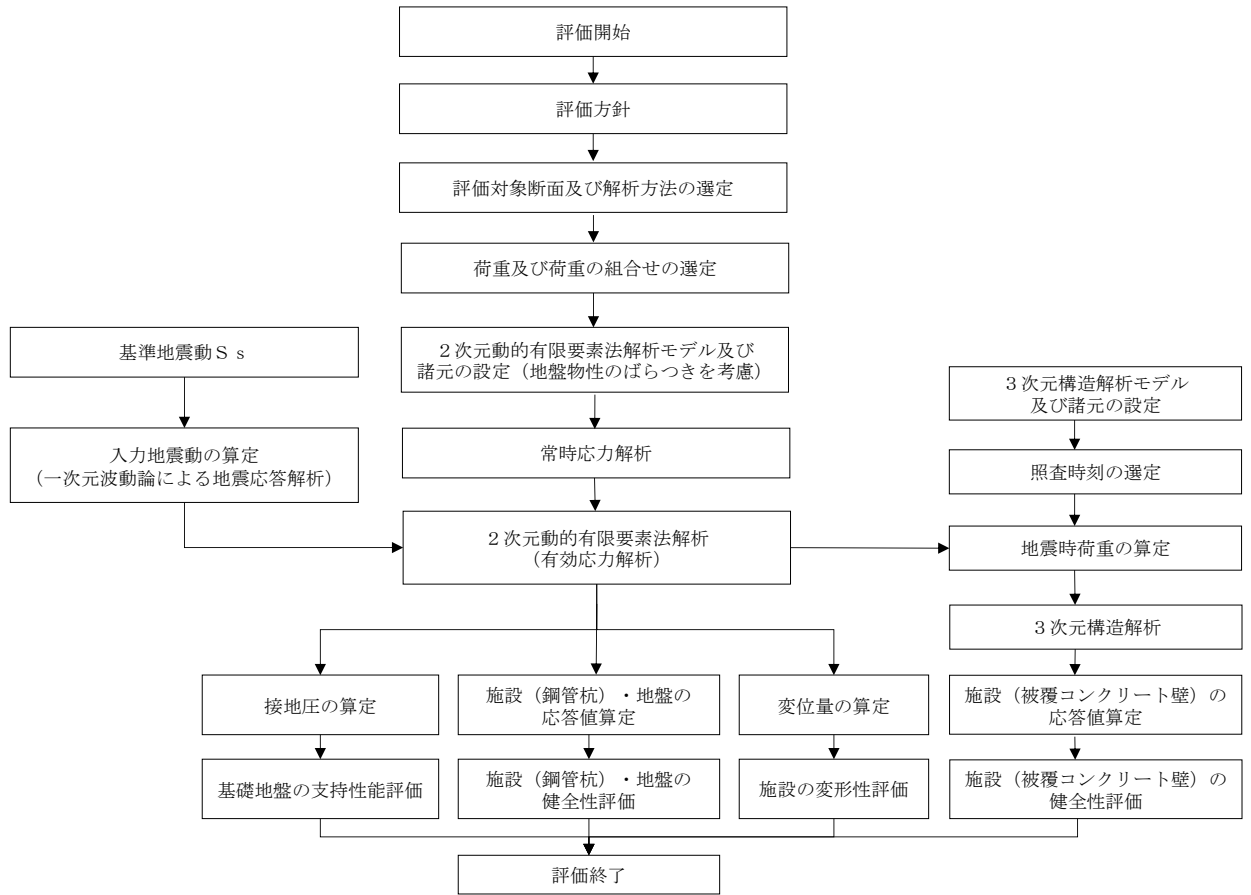


図 2-8 防波壁(多重鋼管杭式擁壁)の耐震評価フロー

2.4 適用規格・基準等

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）
- ・耐津波設計に係る工認審査ガイド（平成25年6月19日原管地発第1306196号）
- ・道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説（日本道路協会，平成14年3月）
- ・防波堤の耐津波設計ガイドライン（国土交通省港湾局，平成27年12月）
- ・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）
- ・松江市建築基準法施行細則（平成17年3月31日松江市規則第234号）
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解析（（社）日本港湾協会，H19年版）
- ・港湾構造物設計事例集（沿岸技術研究センター，平成19年3月）

3. 評価対象断面

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の評価対象断面は、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造上の特徴や周辺地盤状況を踏まえて設定する。防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の評価対象断面位置図を図3-1に、縦断面図を図3-2に、防波壁（多重鋼管式擁壁）の各区分における横断面図を図3-3～図3-8に示す。以下の理由から、②-②断面、③-③断面、④-④断面、及び⑦-⑦断面を評価対象断面として選定する。

- ・②-②断面は、防波壁が施設護岸の背面に設置されている断面のうち、岩盤上面深さが最も深く、改良地盤④が設置されていることから評価対象断面に選定した。
- ・③-③断面は、防波壁が施設護岸の前面に設置されている断面のうち、岩盤上面の深さが最も深いことから、選定した。
- ・④-④断面は、取水管を横断するため、多重鋼管杭の杭間隔が広いことから、選定した。
- ・⑦-⑦断面は②-②断面に直交する縦断方向の断面である。②-②断面位置における縦断方向の止水目地の変形量を求めるため、変形性評価の評価対象断面に選定した。

本資料では、防波壁が施設護岸の背面に設置されている断面である②-②断面と、防波壁が施設護岸の前面に設置されている断面である③-③断面の耐震評価を実施する。また、止水目地の評価において、②-②断面と⑦-⑦断面を選定する。

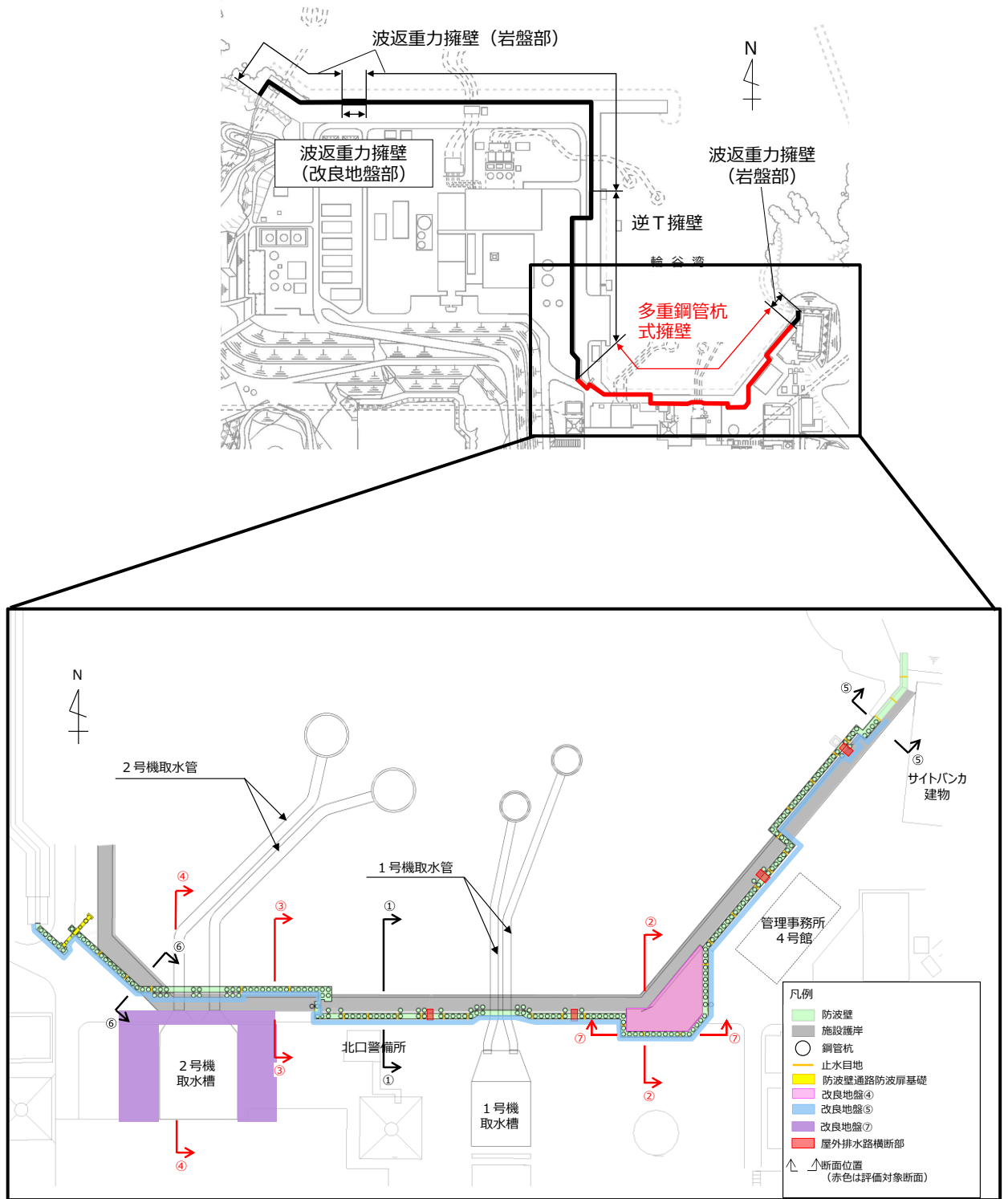


図 3-1 防波壁 (多重鋼管杭式擁壁) の評価対象断面位置図

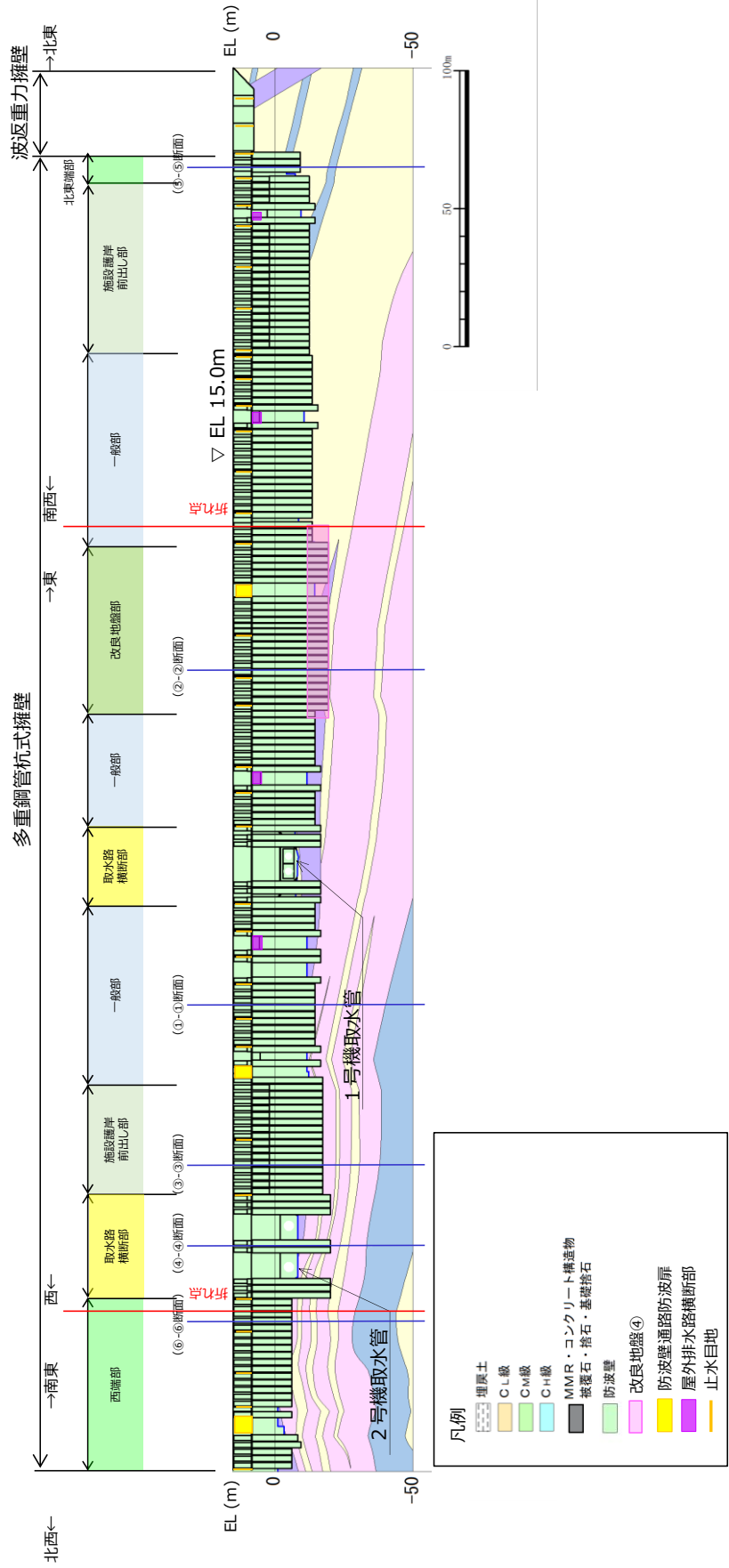


図 3-2 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の縦断面図

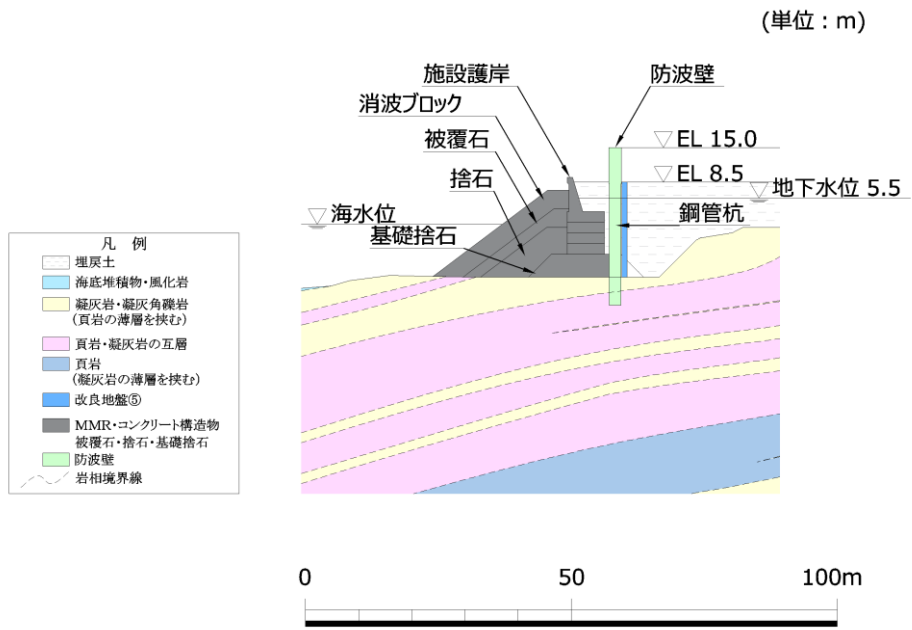


図 3-3 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の横断面図（①-①断面）

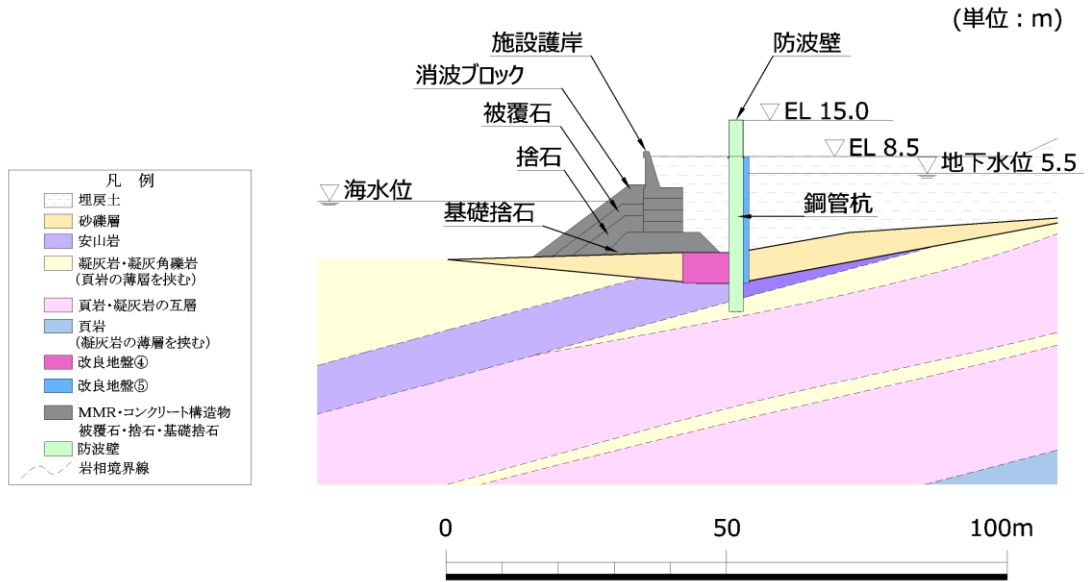


図 3-4 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の横断面図（②-②断面）

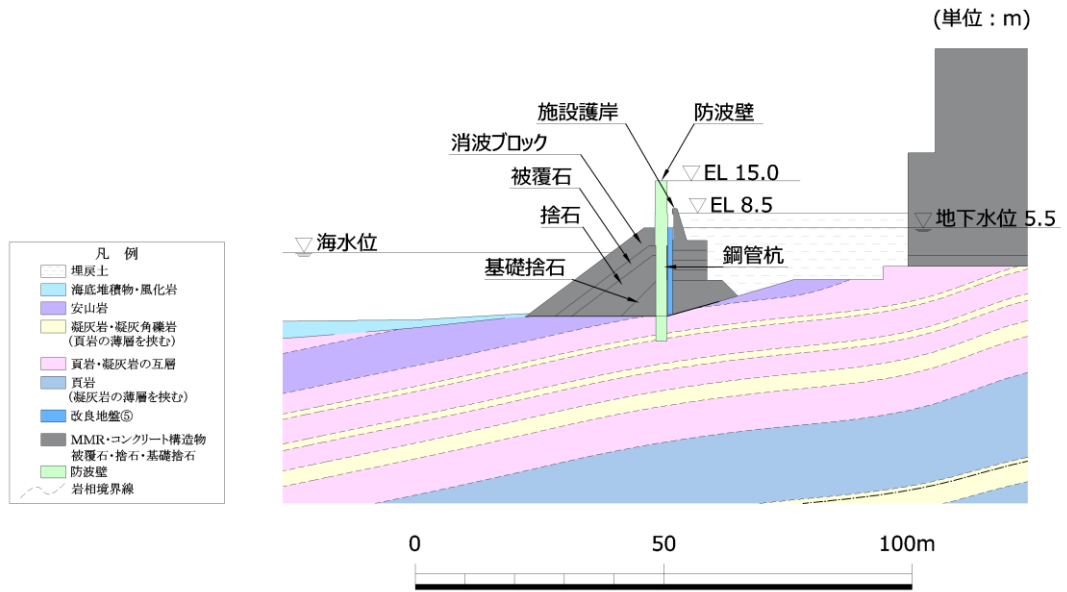


図 3-5 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の横断面図（③-③断面）

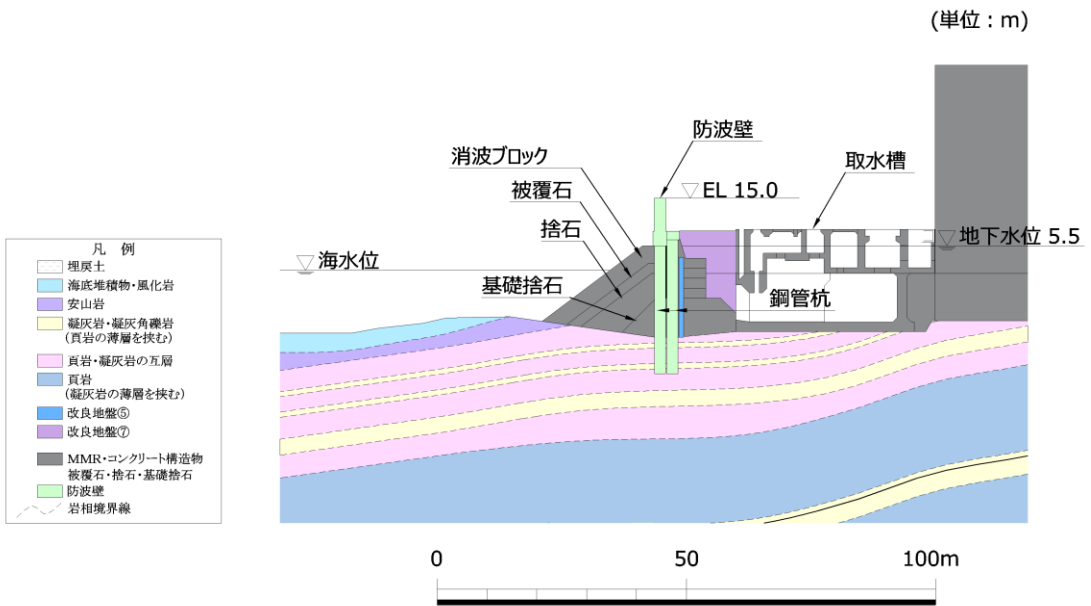


図 3-6 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の横断面図（④-④断面）

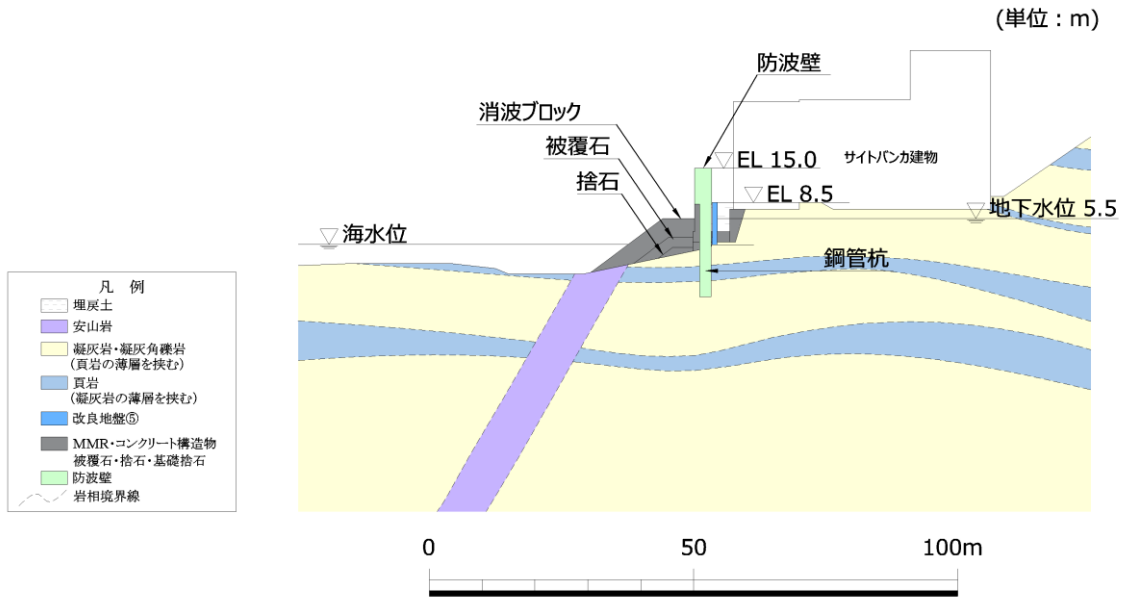


図 3-7 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の横断面図（⑤-⑤断面）

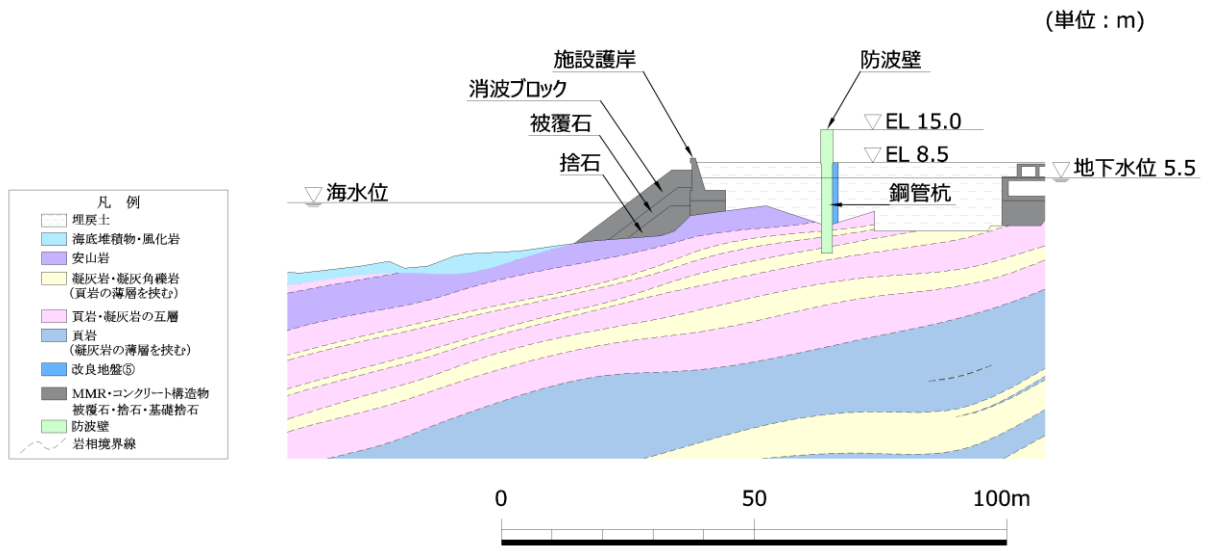


図 3-8 防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の横断面図（⑥-⑥断面）

4. 耐震評価

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の各部位のうち，鋼管杭及び改良地盤の健全性評価，基礎地盤の支持性能評価，並びに止水目地の変形性評価については2次元動的有限要素法（有効応力解析）による耐震評価を行い，被覆コンクリート壁については，3次元構造解析により健全性評価を行う。

4.1 2次元動的有限要素法

4.1.1 解析方法

解析方法はVI-2-10-2-2-3「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震応答計算書」と同様とする。

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震時の応答は，周辺地盤との相互作用によることから，地盤物性のばらつきの影響を考慮する。地盤物性のばらつきについては，表4-1に示す解析ケースにおいて考慮する。

図3-2～図3-8に示すとおり，動的変形特性にひずみ依存性がある地盤が分布しており，これらの地盤のせん断変形が地震時に防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の応答に与える影響が大きいと考えられる。このうち，広範囲に分布しており，応答に与える影響が大きいと考えられる埋戻土の物性（初期せん断弾性係数）のばらつきについて影響を確認する。

表4-1 有効応力解析における解析ケース

解析ケース	地盤物性	
	埋戻土 (G_0 : 初期せん断弾性係数)	岩盤 (G_d : 動せん断弾性係数)
ケース① (基本ケース)	平均値	平均値
ケース②	平均値 + 1 σ	平均値
ケース③	平均値 - 1 σ	平均値

耐震評価における解析ケースを表4-2に示す。耐震評価においては，全ての基準地震動 S_s に対し，解析ケース①（基本ケース）を実施する。全ての基準地震動 S_s に対して実施したケース①の解析において，各照査値が最も厳しい地震動を用い，解析ケース②及び③を実施する。

表 4-2 耐震評価における解析ケース

解析ケース		ケース①		ケース②		ケース③	
		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	
地盤物性		平均値		平均値+1σ		平均値-1σ	
地震動 (位相)	S _s -D	++*	○	基準地震動 S _s (6波) に位相反転を考慮した地震動 (6波) を加えた全 12 波に対し、ケース① (基本ケース) を実施し、曲げ・軸力系の破壊、せん断破壊及び基礎地盤の支持力照査の各照査項目ごとに照査値が 0.5 を超える照査項目に対して、最も厳しい (許容限界に対する裕度が最も小さい) 地震動を用いてケース②及び③を実施する。 すべての照査項目の照査値がいずれも 0.5 以下の場合、照査値が最も厳しくなる地震動を用いてケース②及び③を実施する。			
		-+*	○				
		+ -*	○				
		--*	○				
	S _s -F 1	++*	○				
	S _s -F 2	++*	○				
	S _s -N 1	++*	○				
		-+*	○				
	S _s -N 2 (NS)	++*	○				
		-+*	○				
	S _s -N 2 (EW)	++*	○				
		-+*	○				

注記* : 地震動の位相について、(++) の左側は水平動、右側は鉛直動を表し、「-」は位相を反転させたケースを示す。

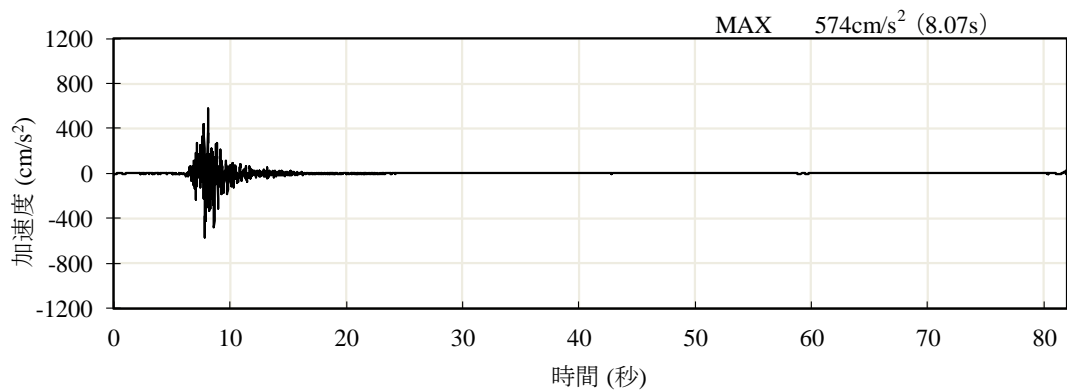
4.1.2 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは，VI-2-10-2-2-3「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震応答計算書」に示した荷重を考慮する。

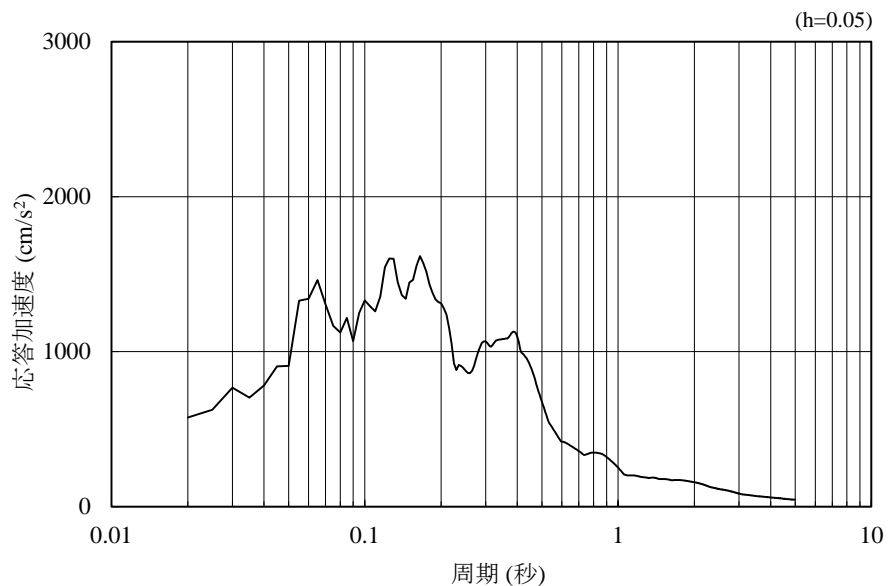
4.1.3 入力地震動

地震応答解析には，VI-2-10-2-2-3「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震応答計算書」に示した入力地震動を用いる。

⑦-⑦断面に用いる $S_s - F1$ 及び $S_s - F2$ について，図 4-1 及び図 4-2 に示す。



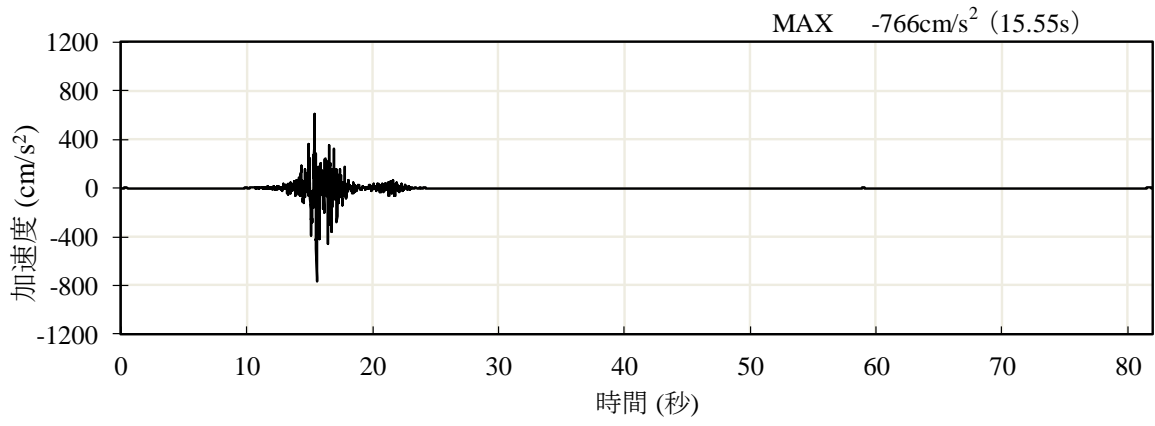
(a) 加速度時刻歴波形



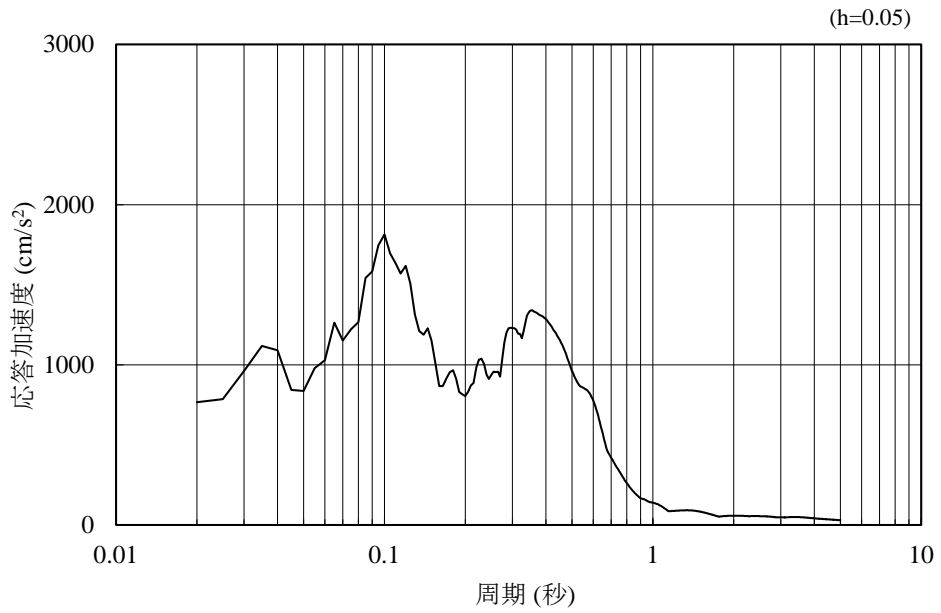
(b) 加速度応答スペクトル

図 4-1 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

(水平成分： $S_s - F1$ (EW))



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 4-2 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
(水平成分：S s - F 2 (E W))

4.1.4 解析モデル及び諸元

使用材料及び材料の物性値並びに地下水位については、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」で設定したものをを用いる。解析モデル及び地盤の物性値について、以下に示す。

(1) 解析モデル

評価対象断面のうち②-②断面及び③-③断面の地震応答解析モデルは、VI-2-10-2-2-3「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震応答計算書」に示した解析モデルを用いる。

評価対象断面のうち⑦-⑦断面の地震応答解析モデルを図 4-3 に示す。解析領域、境界条件等の考え方は、②-②断面及び③-③断面と同様である。

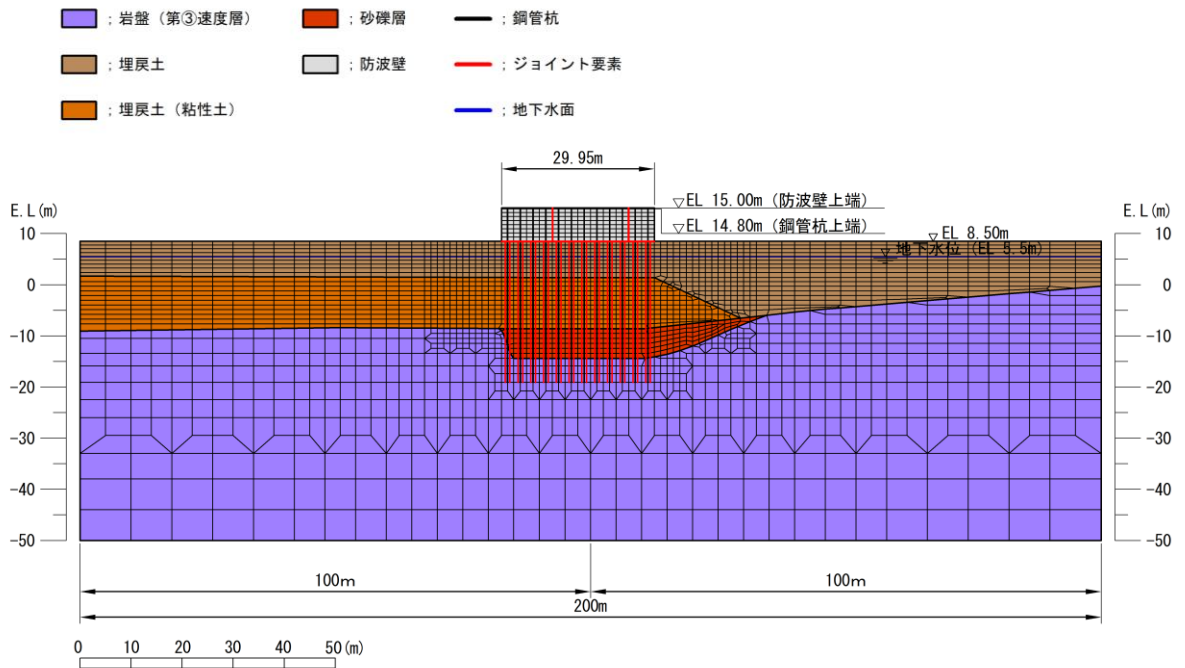


図 4-3 地震応答解析モデル（⑦-⑦断面）

(2) 使用材料及び材料の物性値

耐震評価に用いる材料定数は、VI-2-10-2-2-3「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震応答計算書」に示したものをを用いる。

(3) 鋼管杭の断面諸元

断面計算に用いた断面諸元を表 4-3 に示す。

表 4-3 鋼管杭断面諸元

断面	杭種	杭位置	杭径	杭板厚	鋼種	断面積 (mm ²)	断面係数 (mm ³)
②-②断面	地下部 (4重管)	最内管	φ 1.6m	25mm	SKK490	1.24×10 ⁵	4.80×10 ⁷
		最内管から 2番目の管	φ 1.8m	25mm	SKK490	1.39×10 ⁵	6.10×10 ⁷
		最内管から 3番目の管	φ 2.0m	25mm	SKK490	1.55×10 ⁵	7.56×10 ⁷
		最内管から 4番目の管	φ 2.2m	25mm*	SM490Y	1.64×10 ⁵	8.81×10 ⁷
③-③断面		最内管	φ 1.6m	25mm	SKK490	1.24×10 ⁵	4.80×10 ⁷
		最内管から 2番目の管	φ 1.8m	25mm	SKK490	1.39×10 ⁵	6.10×10 ⁷
		最内管から 3番目の管	φ 2.0m	25mm	SKK490	1.55×10 ⁵	7.56×10 ⁷
		最内管から 4番目の管	φ 2.2m	25mm*	SM490Y	1.64×10 ⁵	8.81×10 ⁷

注記*：道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説（日本道路協会，平成 14 年 3 月）に基づき，腐食代 1mm を考慮する。

(4) 地盤の物性値

地盤の物性値は，VI-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。

地盤のうち改良地盤④の残留強度及び引張強度を表 4-4 のとおり設定する。

表 4-4 改良地盤④の残留強度及び引張強度

地盤	残留強度		引張強度 σ _t (N/mm ²)
	c' (N/mm ²)	φ' (°)	
改良地盤④	0.0	43.03	0.11

4.1.5 評価対象部位

評価対象部位は、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の構造上の特徴を踏まえ設定する。

(1) 施設・地盤の健全性評価

2次元有限要素法による施設・地盤の健全性評価に係る評価対象部位は、鋼管杭及び改良地盤④とする。

(2) 施設の変形性評価

2次元有限要素法による施設の変形性評価に係る評価対象部位は、構造物間に設置する止水目地とする。

(3) 基礎地盤の支持性能評価

2次元有限要素法による基礎地盤の支持性能評価に係る評価対象部位は、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）を支持する基礎地盤（岩盤）とする。

4.1.6 許容限界

許容限界は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき設定する。

(1) 鋼管杭

鋼管杭の許容限界は「道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解析（日本道路協会，平成14年3月）」を基に算出した降伏モーメント及び短期許容せん断力とする。表4-5に鋼管杭の許容限界を示す。

降伏モーメントは次式により算定する。

$$M_y = \sum_i (f_{yi} - \frac{|N_i|}{A_i}) Z_{ei}$$

ここで、

M_y ：多重鋼管杭の降伏モーメント（kN・m）

f_{yi} ：多重鋼管杭を構成する各鋼管の降伏基準点（N/mm²）

Z_{ei} ：多重鋼管杭を構成する各鋼管の断面係数（mm³）

N_i ：多重鋼管杭を構成する各鋼管に発生する軸力（kN）

A_i ：多重鋼管杭を構成する各鋼管の断面積（mm²）

許容せん断力は次式により算定する。

$$Q_a = \sum_i \tau_{ai} A_i$$

ここで、

Q_a ：多重鋼管杭を構成する各鋼管の短期許容せん断力（kN）

τ_a ：多重鋼管杭を構成する各鋼管の短期許容応力度（N/mm²）

A_i ：多重鋼管杭を構成する各鋼管の断面積（mm²）

表 4-5 鋼管杭の許容限界

断面	杭種	杭位置	杭径	杭板厚	鋼種	降伏モーメント*2 (kN・m)	許容せん断力 (kN)
②-②断面	地下部 (4重管)	最内管	φ 1.6m	25mm	SKK490	89015	95166
		最内管から 2番目の管	φ 1.8m	25mm	SKK490		
		最内管から 3番目の管	φ 2.0m	25mm	SKK490		
		最内管から 4番目の管	φ 2.2m	25mm*1	SM490Y		
③-③断面		最内管	φ 1.6m	25mm	SKK490	88888	95166
		最内管から 2番目の管	φ 1.8m	25mm	SKK490		
		最内管から 3番目の管	φ 2.0m	25mm	SKK490		
		最内管から 4番目の管	φ 2.2m	25mm*1	SM490Y		

注記*1: 道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編)・同解説 (日本道路協会, 平成14年3月) に基づき, 腐食代1mmを考慮する。

*2: 降伏モーメントは, 鋼管杭に発生する軸力を考慮する。

(2) 改良地盤

改良地盤の許容限界は, 「耐津波設計に係る工認審査ガイド」を準用し, 表 4-6 にすべり安全率を示す。

表 4-6 改良地盤の許容限界

評価項目	許容限界
すべり安全率	1.2 以上

(3) 止水目地

止水目地の許容限界は、メーカー規格、漏水試験及び変形試験により、有意な漏えいが生じないことを確認した変形量とする。評価対象断面である②-②断面及び⑦-⑦断面位置における止水目地の変位量に対する許容限界を表 4-7 に示す。

表 4-7 止水目地の許容限界

評価項目	許容限界 (mm)
変位量	1580

(4) 基礎地盤

基礎地盤に発生する接地圧に対する許容限界は、VI-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」に基づき、支持力試験により設定する。基礎地盤の許容限界を表 4-8 に示す。

表 4-8 基礎地盤の許容限界

評価項目	基礎地盤	許容限界 (kN/mm ²)	
極限支持力	岩盤	C _H 級	9.8
		C _M 級	
		C _L 級	3.9

4.1.7 評価方法

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の耐震評価は，地震応答解析に基づいて算定した発生応力が「4.1.6 許容限界」で設定した許容限界を満足することを確認する。

(1) 鋼管杭

a. 曲げ照査

杭体の発生曲げモーメントが降伏モーメント以下であることを確認する。

b. せん断力照査

杭体の発生せん断力が許容せん断力以下であることを確認する。

(2) 改良地盤

改良地盤の評価は，改良地盤を通るすべり線上のすべり安全率が 1.2 以上であることを確認する。すべり安全率は，想定したすべり線上の応力状態を基に，すべり線上のせん断抵抗力の和をせん断力の和で除した値を時々刻々求め，最小すべり安全率を算定する。

(3) 止水目地

止水目地の地震時の評価について、法線直交方向及び法線方向ともに、地震荷重による最大変位が許容限界以下であることを確認する。

x 方向（法線直交方向）及び z 方向（深度方向）の変位は、図 4-4 に示すとおり、多重鋼管杭式擁壁における地震時の変位量とし、保守的に各ブロックの位相が逆になったことを考慮し、時刻歴最大の変位量を 2 倍したものを算定する。

y 方向（法線方向）の変位は、隣接する多重鋼管杭式擁壁の天端間の相対変位とする。

x 方向（法線直交方向）の変位 δ_x : $\delta_x = |\delta_x(T)| \times 2$

y 方向（法線方向）の変位 δ_y : $\delta_y = |\delta_y(T)|$

z 方向（深度方向）の変位 δ_z : $\delta_z = |\delta_z(T)| \times 2$

ここで、

$\delta_x(T)$: x 方向の最大変位

$\delta_y(T)$: y 方向の最大相対変位

$\delta_z(T)$: z 方向の最大変位

法線直交方向、法線方向及び深度方向の変位量を用い、下式のとおり合成方向（3 方向合成）の変位量を求め、止水目地の地震荷重による最大変位とする。

$$\text{最大変位 } \delta : \delta = \sqrt{\delta_x^2 + \delta_y^2 + \delta_z^2}$$

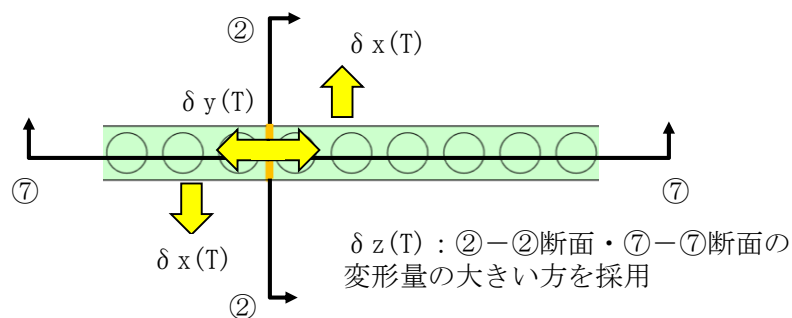


図 4-4 地震時の変位の概念図

(4) 基礎地盤

基礎地盤の支持性能評価においては、「道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解析（日本道路協会，平成 14 年 3 月）」に従い，杭先端部の軸力を用いて次式により算定される軸応力が基礎地盤の極限支持力以下であることを確認する。

$$R_d = \frac{N_{max}}{A}$$

ここで，

R_d ：鋼管杭先端の軸力より算定される軸応力度（N/mm²）*

N_{max} ：鋼管杭に発生する軸力（kN）*

A ：鋼管杭先端の断面積（mm²）*

注記*：最外の鋼管杭の外側 1 mm を腐食代として考慮する。

4.2. 3次元構造解析

4.2.1 解析方法

3次元構造解析には、解析コード「FINAS/STAR」を用いる。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、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3次元構造解析への入力荷重は、VI-2-10-2-2-3「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震応答計算書」の地震応答解析において、防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の耐震評価に支配的な荷重が最大となる時刻を選定し、当該時刻における地震時応答から地震時土圧及び慣性力を設定する。

構造部材の健全性評価において、照査時刻は構造的特徴を踏まえ、部材の評価が厳しくなる時刻を地震応答解析の結果から選定する。

4.2.2 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、VI-2-10-2-2-3「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震応答計算書」に示した荷重を考慮する。

4.2.3 解析モデル及び諸元

(1) 解析モデル

a. 構造物のモデル化

3次元構造解析モデルにおいて、鋼管杭はシェル要素でモデル化し、被覆コンクリート壁はソリッド要素でモデル化する。3次元構造解析モデルを図4-5及び図4-6に示す。

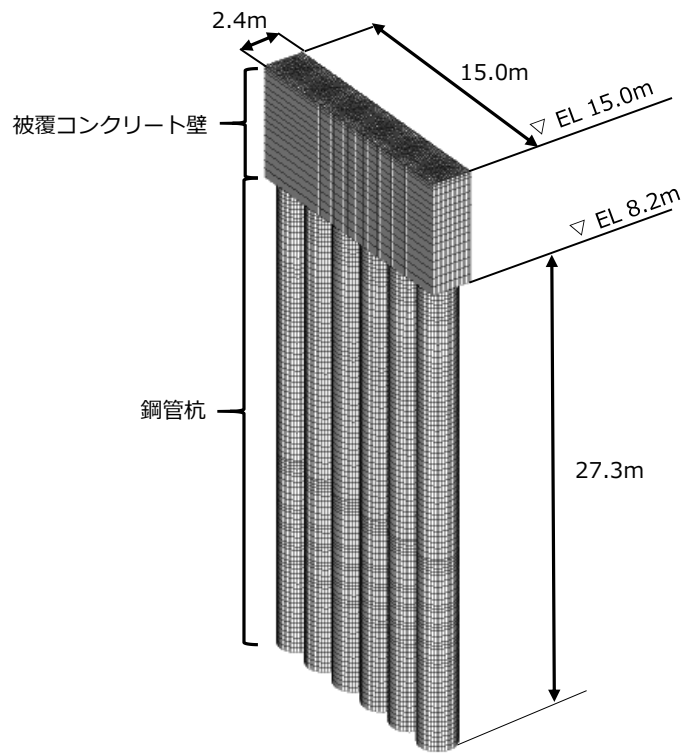


図 4-5 3次元構造解析モデル (②—②断面)

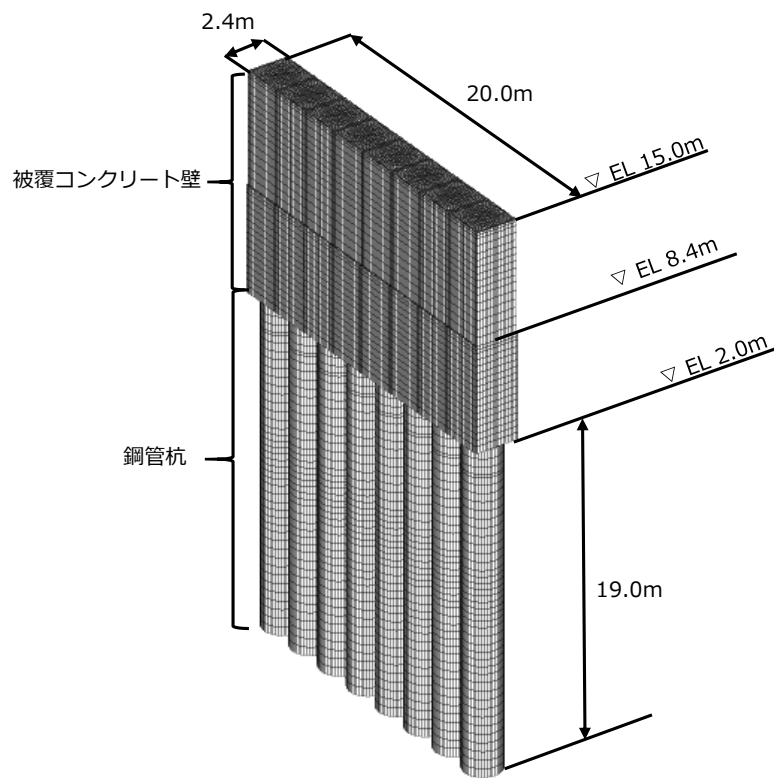


図 4-6 3次元構造解析モデル (③—③断面)

b. 地盤バネ

3次元構造解析モデルのうち地中部の杭には、地盤抵抗を表現するため、地盤バネを設置する。地盤バネは、「4.2.1 解析方法」で選定した照査時刻における応答値を用いて算定する。

(2) 使用材料及び材料の物性値

耐震評価に用いる材料定数は、適用基準類を基に設定する。

a. 被覆コンクリート壁

被覆コンクリート壁の使用材料を表 4-9 に、材料の物性値を表 4-10 に示す。鋼管杭の使用材料は、VI-2-10-2-2-3「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震応答計算書」に示したものをを用いる。

表 4-9 使用材料

材料		諸元
被覆コンクリート壁	鉄筋	SD345
	コンクリート	設計基準強度：24N/mm ²

表 4-10 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
被覆コンクリート壁	24.0*	2.5×10 ⁴ *	0.2*

注記*：コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（土木学会，2002年）

(3) 設計地下水位

設計地下水位は、VI-2-10-2-2-3「防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の地震応答計算書」に示したものをを用いる。

4.2.4 評価対象部位

3次元構造解析による施設・地盤の健全性評価に係る評価対象部位は、被覆コンクリート壁とする。

4.2.5 許容限界

許容限界は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき設定する。

(1) 被覆コンクリート壁

被覆コンクリート壁の許容限界は「コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] (土木学会, 2002年制定)」に基づき、表4-11に示す短期許容応力度とする。

表4-11 被覆コンクリート壁の許容限界

種別	許容応力度 (N/mm ²)		短期許容応力度* (N/mm ²)
	コンクリート (f'ck=24N/mm ²)	許容曲げ圧縮応力度 σ_{ca}	9
許容せん断応力度 τ_{ca}		0.45	0.67
鉄筋 (SD345)	許容曲げ引張応力度 σ_{sa}	196	294

注記*：短期許容応力度は、コンクリート標準示方書より許容応力度に対して1.5倍の割増を考慮する。

4.2.6 評価方法

3次元構造解析に基づいて算定した曲げモーメント及び軸力より算定される曲げ応力及びせん断力より算定されるせん断応力が「4.2.5 許容限界」で設定した許容限界以下であることを確認する。

応力度算定には、解析コード「EMR G I N G」を使用する。なお、解析コードの検証、妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム (解析コード) の概要」に示す。

5. 耐震評価結果

5.1 鋼管杭

5.1.1 曲げ照査

鋼管杭の曲げ破壊に対する照査における最大照査値の評価時刻での断面力図を図5-1に、曲げに対する照査結果を表5-1に示す。

この結果から鋼管杭の発生断面力が許容限界以下であることを確認した。

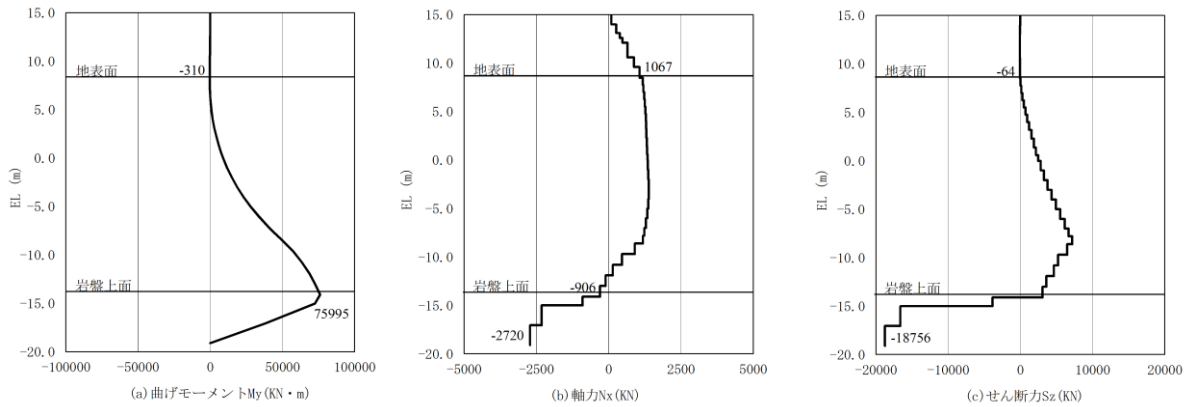


図5-1(1) 鋼管杭の曲げ破壊に対する照査における最大照査値の評価時刻での断面力
 (②-②断面, $S_s - D(-+)$, $t=15.04s$)

解析ケース②：地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース (平均値+1 σ)

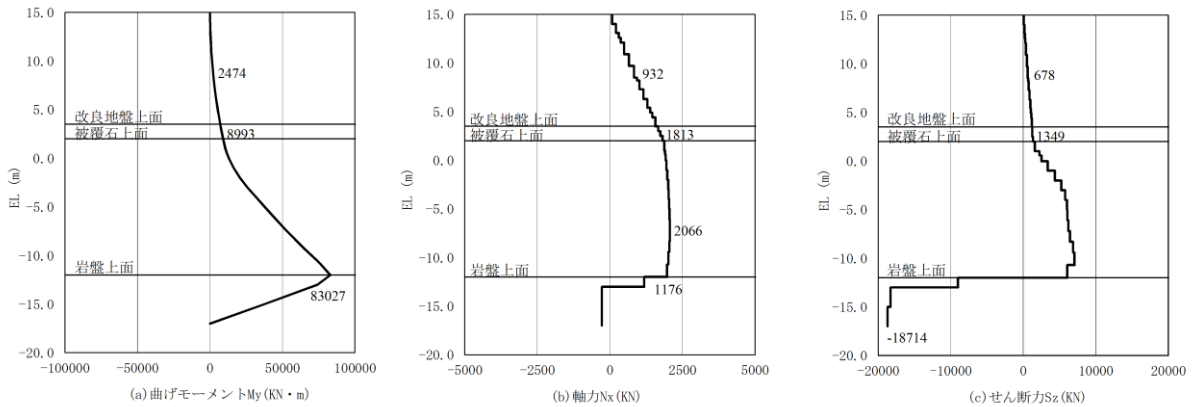


図5-1(2) 鋼管杭の曲げ破壊に対する照査における最大照査値の評価時刻での断面力
 (③-③断面, $S_s - D(-+)$, $t=13.21s$)

解析ケース②：地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース (平均値+1 σ)

表 5-1(1) 鋼管杭の曲げ破壊に対する照査における最大照査値 (②-②断面)

地震動	解析 ケース	発生断面力		降伏 モーメント M_y (N/mm ²)	照査値 M_{max}/M_y
		曲げモーメント M_{max} (kN・m)	軸力 N (kN)		
S s - D (-+)	②	75995	906	89015	0.86

表 5-1(2) 鋼管杭の曲げ破壊に対する照査における最大照査値 (③-③断面)

地震動	解析 ケース	発生断面力		降伏 モーメント M_y (N/mm ²)	照査値 M_{max}/M_y
		曲げモーメント M_{max} (kN・m)	軸力 N (kN)		
S s - D (-+)	②	83027	1176	88888	0.94

5.1.2 せん断力照査

鋼管杭のせん断破壊に対する照査における最大照査値の評価時刻での断面力図を図 5-2 に、せん断力に対する照査結果を表 5-2 に示す。鋼管杭の発生断面力が許容限界以下であることを確認した。

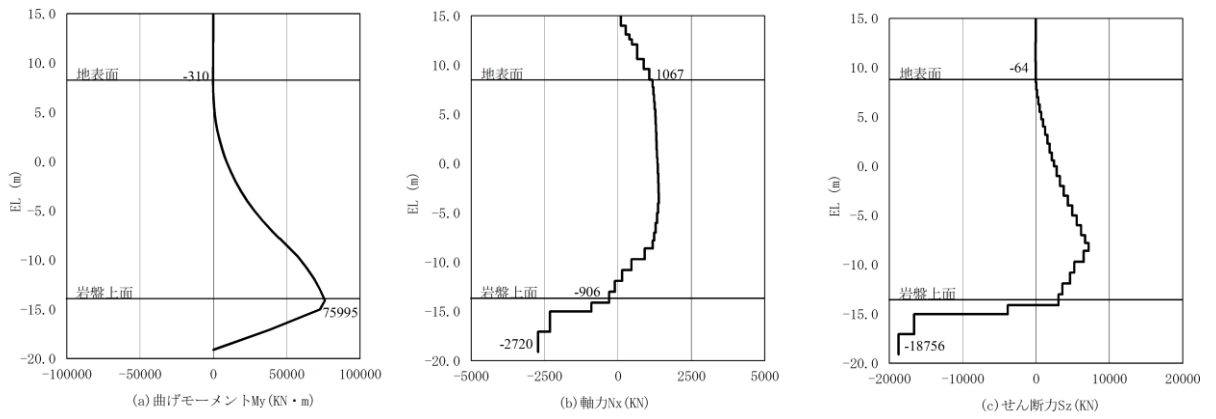


図 5-2(1) 鋼管杭のせん断破壊に対する照査における最大照査値の評価時刻での断面力
 (②-②断面, $S_s - D(-+)$, $t = 15.04s$)

解析ケース②：地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース (平均値 + 1 σ)

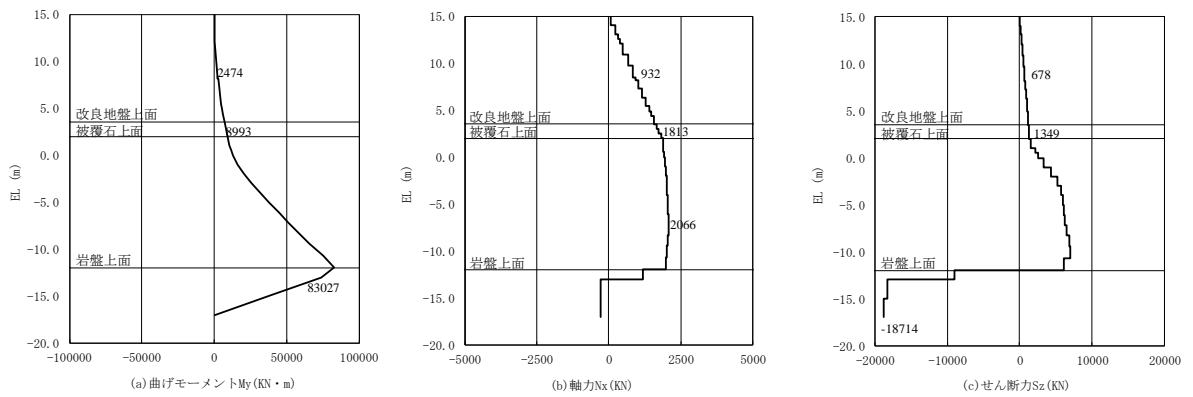


図 5-2(2) 鋼管杭のせん断破壊に対する照査における最大照査値の評価時刻での断面力
 (③-③断面, $S_s - D(-+)$, $t = 13.21s$)

解析ケース②：地盤物性のばらつきを考慮した解析ケース (平均値 + 1 σ)

表 5-2(1) 鋼管杭のせん断破壊に対する照査における最大照査値 (②-②断面)

地震動	解析 ケース	発生断面力	許容せん断力 Q_a (kN)	照査値 Q_{max}/Q_a
		せん断力 Q_{max} (kN)		
S s - D (-+)	②	18756	95166	0.20

表 5-2(2) 鋼管杭のせん断破壊に対する照査における最大照査値 (③-③断面)

地震動	解析 ケース	発生断面力	許容せん断力 Q_a (kN)	照査値 Q_{max}/Q_a
		せん断力 Q_{max} (kN)		
S s - D (-+)	②	18714	95166	0.20

5.2 被覆コンクリート壁

3次元構造解析に基づく、被覆コンクリート壁の照査結果を示す。評価対象位置は、評価の厳しくなる杭間とした。評価対象位置図を図5-3に示す。評価対象位置は、②-②断面においては①～⑤で番号付けた各々の赤枠の範囲とし、③-③断面においては①～⑦で番号付けた各々の赤枠の範囲とする。

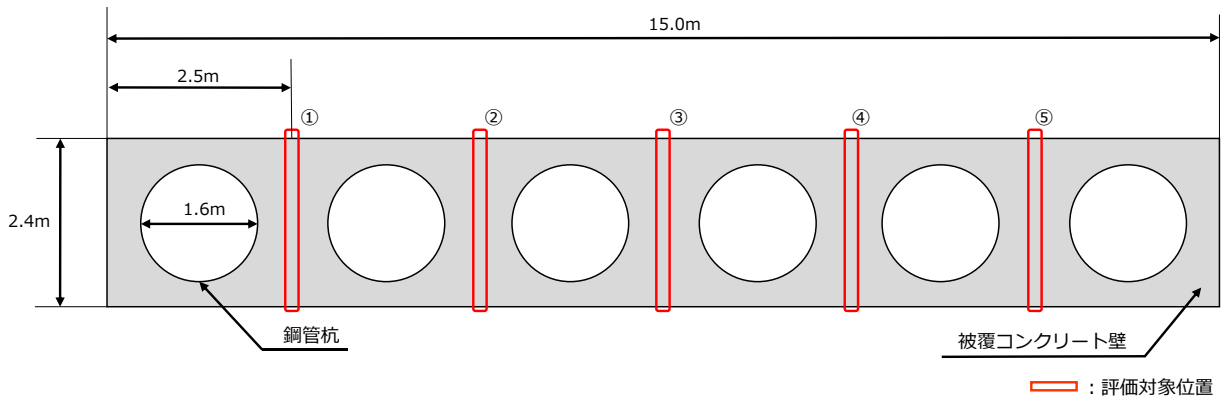


図5-3(1) 評価対象位置図 (②-②断面 平面図)

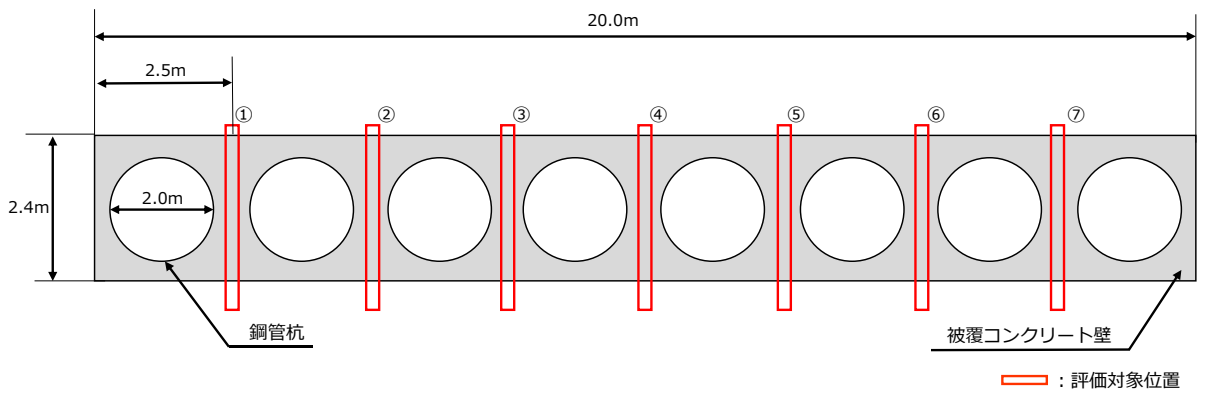


図5-3(2) 評価対象位置図 (③-③断面 平面図)

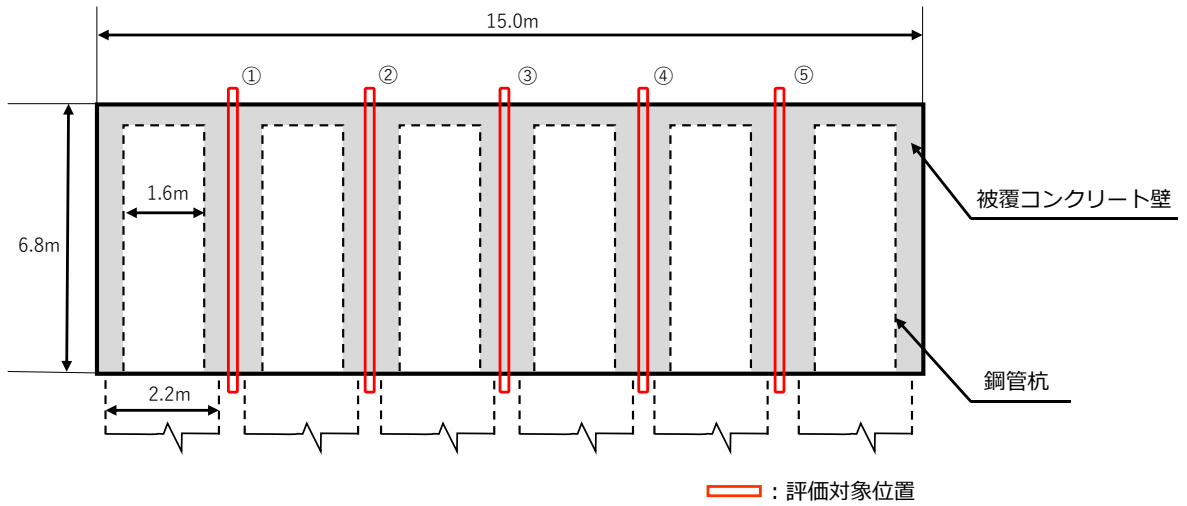


図 5-3(3) 評価対象位置図 (②-②断面 正面図)

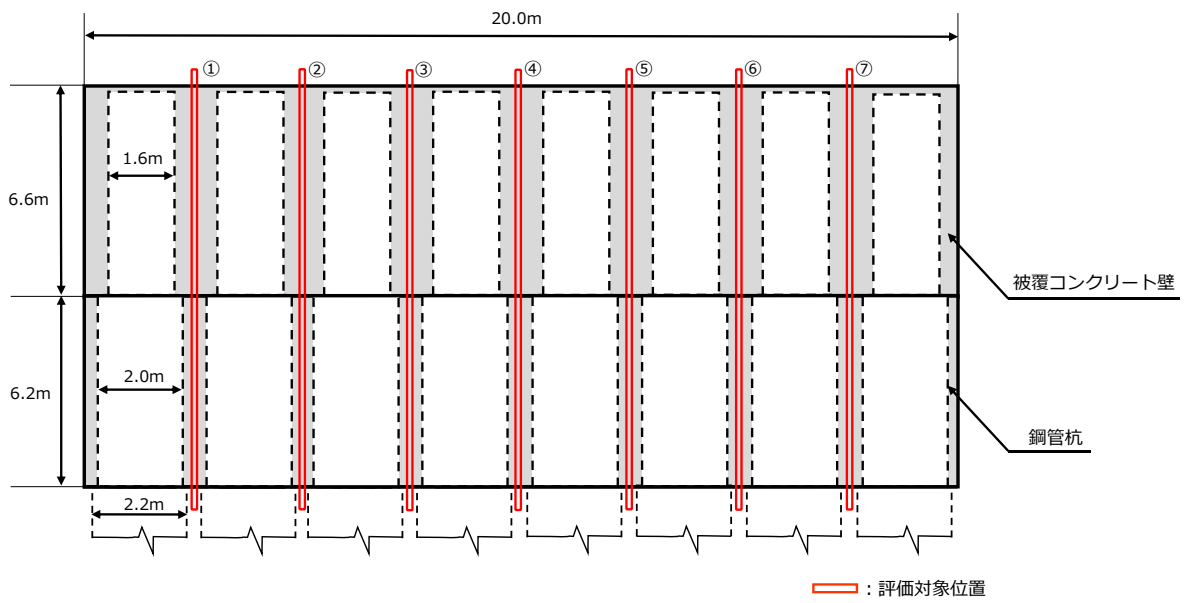


図 5-3(4) 評価対象位置図 (③-③断面 正面図)

5.2.1 曲げ照査

今後、記載を適正化する。

コンクリートの曲げ照査の最大照査値が発生している評価対象位置での断面力を図5-4に、曲げ圧縮応力に対する照査結果を表5-3に、鉄筋の曲げ照査の最大照査値が発生している評価対象位置での断面力を図5-5に、曲げ引張応力に対する照査結果を表5-4に示す。

この結果から被覆コンクリート壁の発生応力が許容限界以下であることを確認した。

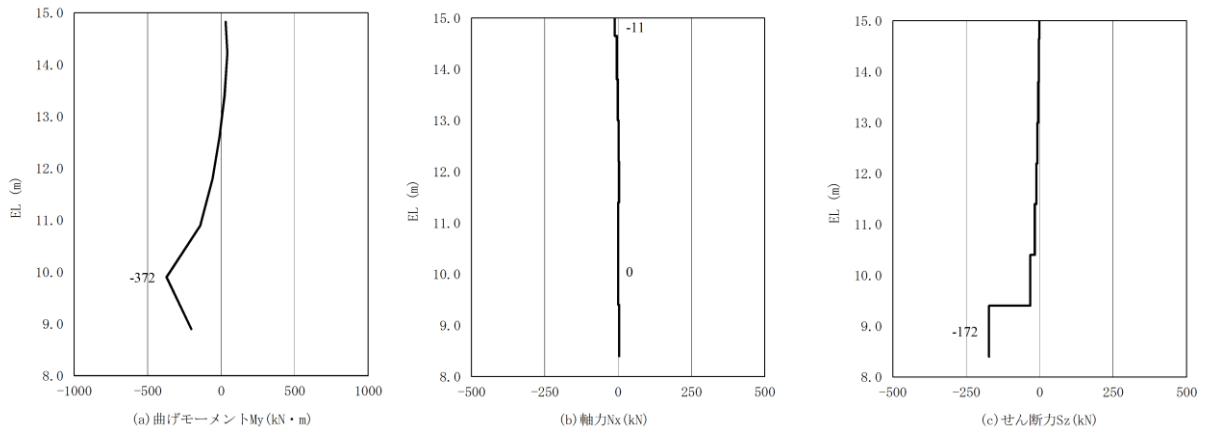


図5-4(1) コンクリートの曲げ圧縮応力に対する照査において用いる断面力 (②-②断面, $S_s - D(-+)$, $t=9.15s$, 評価対象位置③)

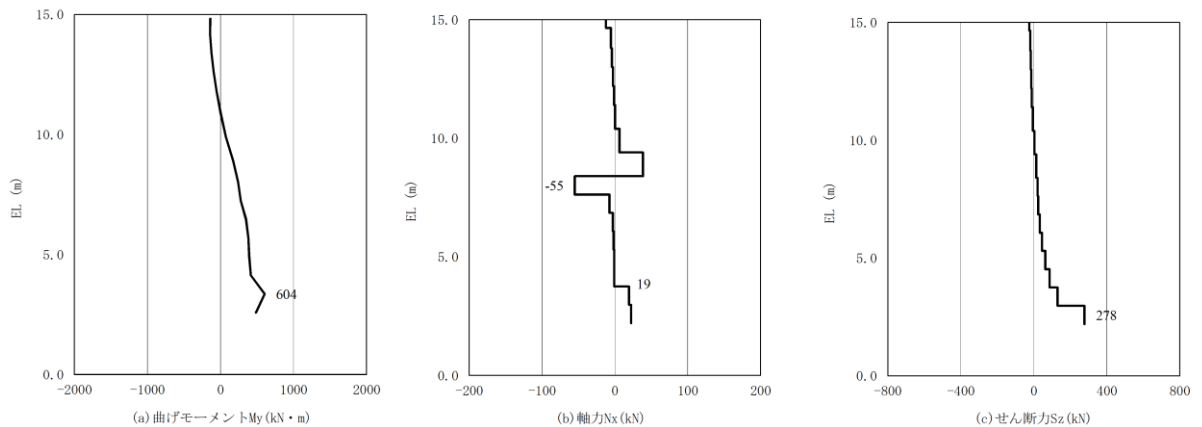


図5-4(2) コンクリートの曲げ圧縮応力に対する照査において用いる断面力 (③-③断面, $S_s - D(-+)$, $t=9.56s$, 評価対象位置③)

表 5-3(1) コンクリートの曲げ・軸力系の破壊に対する照査における最大照査値
 (②-②断面, S s - D (-+), t=9.15s, 評価対象位置③)

評価対象位置	発生断面力		曲げ圧縮 応力度 σ_c (N/mm ²)	短期許容 応力度 σ_{ca} (N/mm ²)	照査値 σ_c / σ_{ca}
	曲げモーメント M (kN・m)	軸力 N (kN)			
③	-372	0	0.9	13.5	0.07

表 5-3(2) コンクリートの曲げ・軸力系の破壊に対する照査における最大照査値
 (③-③断面, S s - D (-+), t=9.56s, 評価対象位置③)

評価対象位置	発生断面力		曲げ圧縮 応力度 σ_c (N/mm ²)	短期許容 応力度 σ_{ca} (N/mm ²)	照査値 σ_c / σ_{ca}
	曲げモーメント M (kN・m)	軸力 N (kN)			
③	604	19	1.2	13.5	0.10

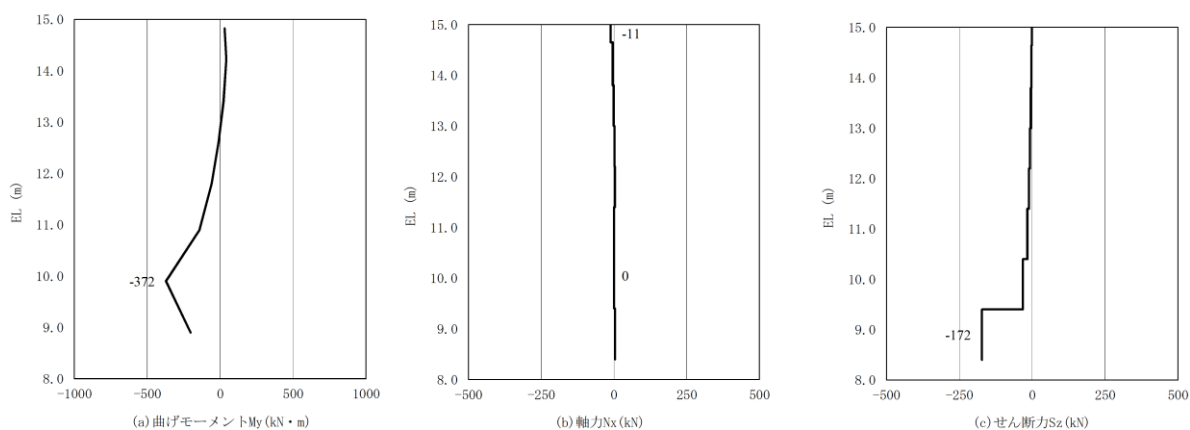


図 5-5(1) 鉄筋の曲げ引張応力に対する照査において用いる断面力
 (②-②断面, S s - D (-+), t=9.15s, 評価対象位置③)

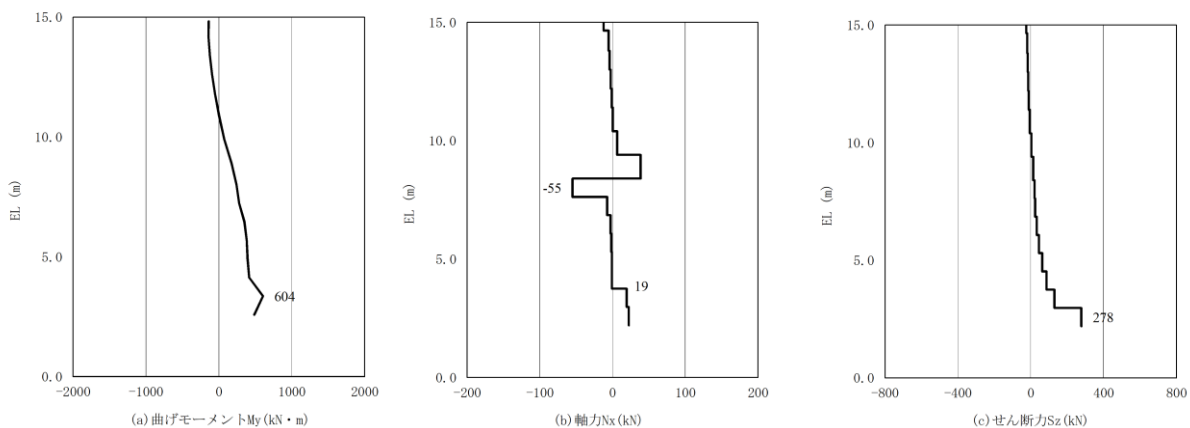


図 5-5(2) 鉄筋の曲げ引張応力に対する照査において用いる断面力
 (③-③断面, S s - D (-+), t=9.56s, 評価対象位置③)

表 5-4(1) 鉄筋に対する照査における最大照査値
 (②-②断面, S s - D (-+), t=9.15s, 評価対象位置③)

評価対象位置	発生断面力		曲げ引張 応力度 σ_s (N/mm ²)	短期許容 応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	照査値 σ_s / σ_{sa}
	曲げモーメント M (kN・m)	軸力 N (kN)			
③	-372	0	67.2	294	0.23

表 5-4(2) 鉄筋に対する照査における最大照査値
 (③-③断面, S s - D (-+), t=9.56s, 評価対象位置③)

評価対象位置	発生断面力		曲げ引張 応力度 σ_s (N/mm ²)	短期許容 応力度 σ_{sa} (N/mm ²)	照査値 σ_s / σ_{sa}
	曲げモーメント M (kN・m)	軸力 N (kN)			
③	604	19	99.0	294	0.34

5.2.2 せん断力照査

今後、記載を適正化する。

せん断力照査の最大照査値が発生している評価対象位置での断面力図 5-6 に、コンクリートのせん断力に対する照査結果を表 5-5 に示す。

この結果から被覆コンクリート壁の発生応力が許容限界以下であることを確認した。

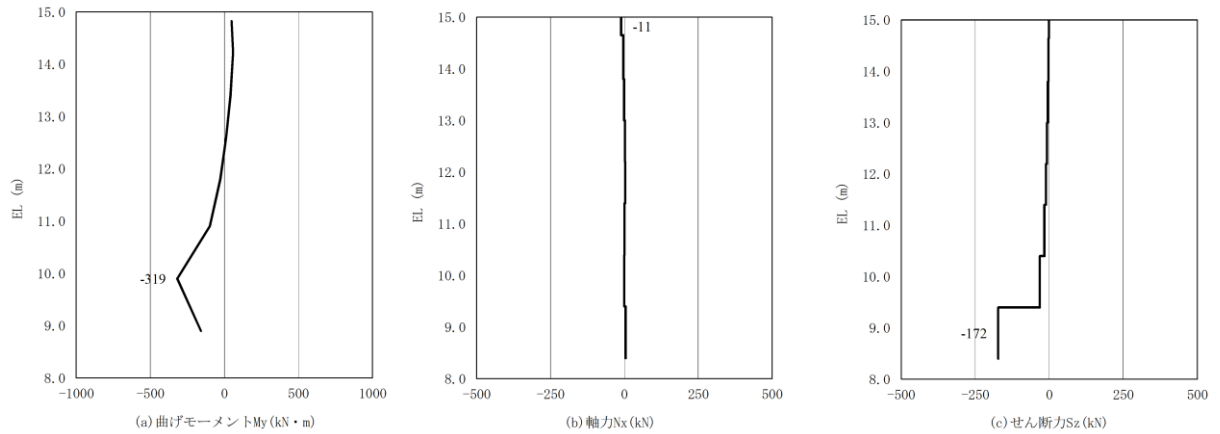


図 5-6(1) コンクリートのせん断破壊に対する照査において用いる断面力
(②-②断面, $S_s - D(-+)$, $t=9.15s$, 評価対象位置②)

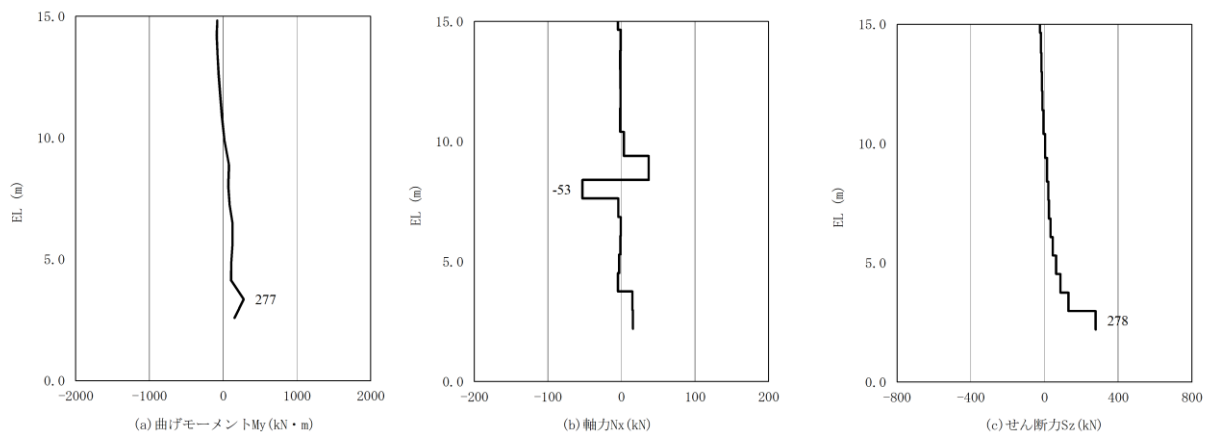


図 5-6(2) コンクリートのせん断破壊に対する照査において用いる断面力
(③-③断面, $S_s - D(-+)$, $t=9.56s$, 評価対象位置①)

表 5-5(1) コンクリートのせん断破壊に対する照査における最大照査値
 (②-②断面, S s - D (-+), t=9.15s, 評価対象位置②)

評価対象位置	発生断面力	せん断 応力度 τ_c (N/mm ²)	短期許容 応力度 τ_{ca} (N/mm ²)	照査値 τ_c / τ_{ca}
	せん断力 Q (kN)			
②	-172	0.09	0.67	0.14

表 5-5(2) コンクリートのせん断破壊に対する照査における最大照査値
 (③-③断面, S s - D (-+), t=9.56s, 評価対象位置①)

評価対象位置	発生断面力	せん断 応力度 τ_c (N/mm ²)	短期許容 応力度 τ_{ca} (N/mm ²)	照査値 τ_c / τ_{ca}
	せん断力 Q (kN)			
①	278	0.13	0.67	0.20

5.4 改良地盤④

改良地盤④のすべり安全率による評価結果を表 5-6 に、最小すべり安全率となる時刻におけるすべり線及び局所安全係数分布を図 5-7 に示す。これらの結果から、改良地盤④のすべり安全率が 1.2 以上あることを確認した。

表 5-6 改良地盤④のすべり安全率評価結果 (②-②断面)

地震動	解析ケース	発生時刻 (s)	最小すべり安全率
S s - D (--)	①	14.97	1.73

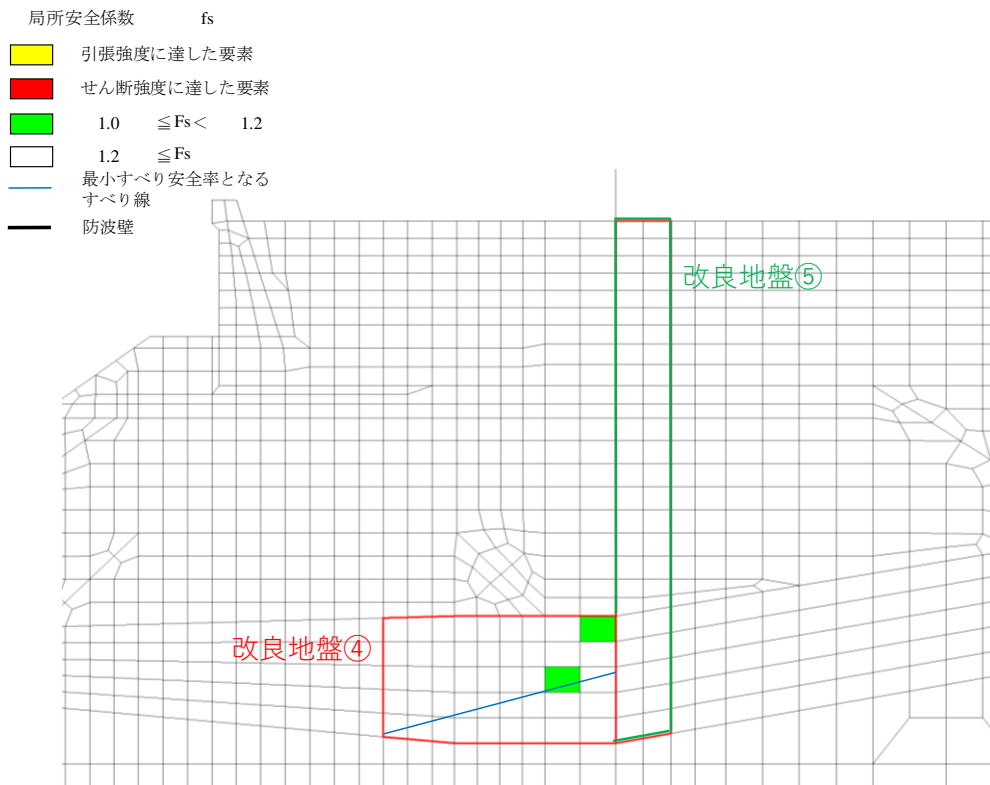


図 5-7 改良地盤④の最小すべり安全率時刻におけるすべり線及び局所安全係数分布

(②-②断面, S s - D (--), $t=14.97s$)

解析ケース①: 基本ケース (平均値)

5.5 止水目地

地震時の止水目地の相対変位量に対する照査結果を表 5-7 に示す。

地震時の止水目地の相対変位量に対する照査を行った結果、変位量が許容限界以下であることを確認した。

表 5-7 ジョイント設置箇所地震時相対変位量

方向	地震動	解析 ケース	地震時相対変位量 (mm)	許容限界 (mm)
δx : ②-②断面 (横断方向)	S s - D (- +)	②	988.14	-
δy : ⑦-⑦断面 (縦断方向)	S s - D (+ +)	①	10.52	-
δz : ⑦-⑦断面 (縦断方向)	S s - D (+ -)	①	14.04	-
合成方向 (3方向合成)	-	-	988.30	1580

5.6 基礎地盤

基礎地盤の支持性能評価結果を表 5-8 に示す。

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）の杭先端部に生じる最大軸力が極限支持力以下であることを確認した。

表 5-8(1) 基礎地盤の支持性能評価結果（②-②断面）

地震動	解析 ケース	発生断面力	軸心力度 R_d (kN/mm ²)	極限支持力 R_u (kN/mm ²)	照査値 R_d/R_u
		軸力 N_{max} (kN)			
S s - D (-+)	②	5783	1.5	9.8	0.16

表 5-8(2) 基礎地盤の支持性能評価結果（③-③断面）

地震動	解析 ケース	発生断面力	軸心力度 R_d (kN/mm ²)	極限支持力 R_u (kN/mm ²)	照査値 R_d/R_u
		軸力 N_{max} (kN)			
S s - D (-+)	③	5832	1.5	9.8	0.16