

本資料のうち、枠囲みの内容は防
護上の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-19-0173_改1
提出年月日	2021年10月8日

VI-2-11-2-16 前面護岸の耐震性についての計算書

2021年10月

東北電力株式会社

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	5
2.4 適用基準	7
3. 耐震評価	8
3.1 評価対象断面	8
3.2 解析方法	10
3.2.1 地盤物性のばらつき	10
3.2.2 減衰定数	11
3.2.3 地震応答解析の解析ケースの選定	12
3.3 荷重及び荷重の組合せ	13
3.3.1 耐震評価上考慮する状態	13
3.3.2 荷重	13
3.3.3 荷重の組合せ	14
3.4 入力地震動	15
3.5 解析モデル及び諸元	30
3.5.1 解析モデル	30
3.5.2 使用材料及び材料の物性値	32
3.5.3 地盤の物性値	32
3.5.4 地下水位	32
3.6 許容限界	34
3.6.1 改良地盤	34
3.6.2 置換工	34
3.7 評価方法	35
3.7.1 改良地盤の健全性評価	35
3.7.2 置換工の健全性評価	35
4. 耐震評価結果	36
4.1 改良地盤	36
4.2 置換工	37

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-2-11-1 波及的影響を及ぼすおそれのある下位クラス施設の耐震評価方針」に基づき、前面護岸が、上位クラス施設である取水口及び貯留堰（以下「取水口」という。）の近傍に位置していることから、上位クラス施設が有する原子炉補機冷却海水系の通水機能に対して波及的影響を及ぼさないことを説明するものである。

波及的影響の評価は、上位クラス施設の機能が保持されることを確認するために、前面護岸の背面に位置する改良地盤及びコンクリート置換工（以下「置換工」という。）を対象に、取水口の設計に適用する基準地震動 S_s に対する耐震評価として地盤のすべり安全率により健全性を確認する。

2. 基本方針

2.1 位置

前面護岸の位置を図 2-1 に示す。

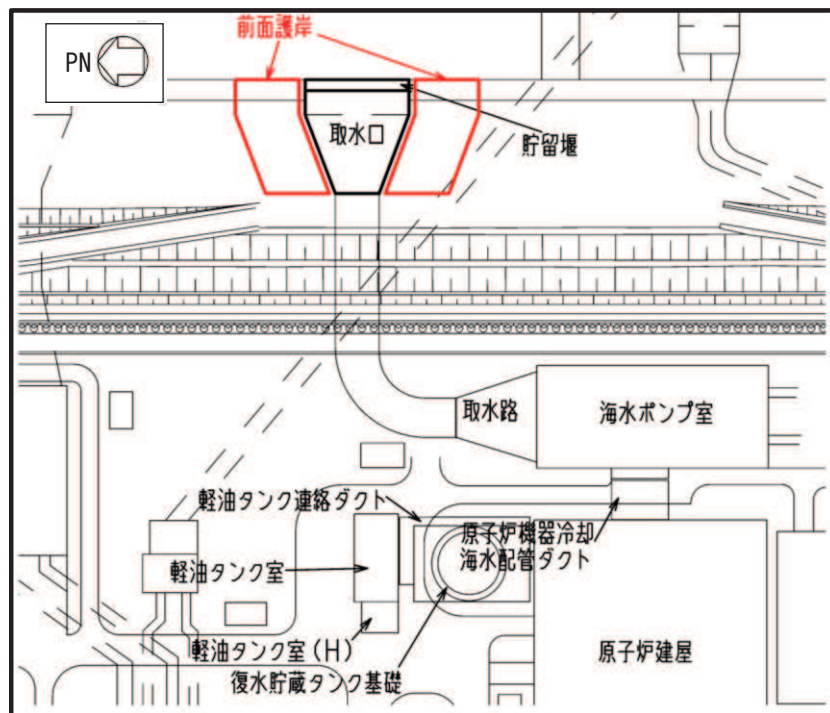


図 2-1 前面護岸の位置図

2.2 構造概要

前面護岸の平面図を図 2-2 に、縦断図を図 2-3 に、断面図を図 2-4 及び図 2-5 に示す。

前面護岸はタイロッド式矢板護岸であり、取水口の側面（護岸背面）に改良地盤及び置換工が配置されている。改良地盤は、延長 37.80m（東西）、幅 21.00m（南北）、高さ 12.08m～14.55m であり、置換工は、延長 11.50m（東西）、幅 18.00m（南北）、高さ 7.16m（取水口北側）、7.47m（取水口南側）である。改良地盤は十分な支持性能を有する岩盤に支持され、置換工は改良地盤を介して岩盤に支持されている。

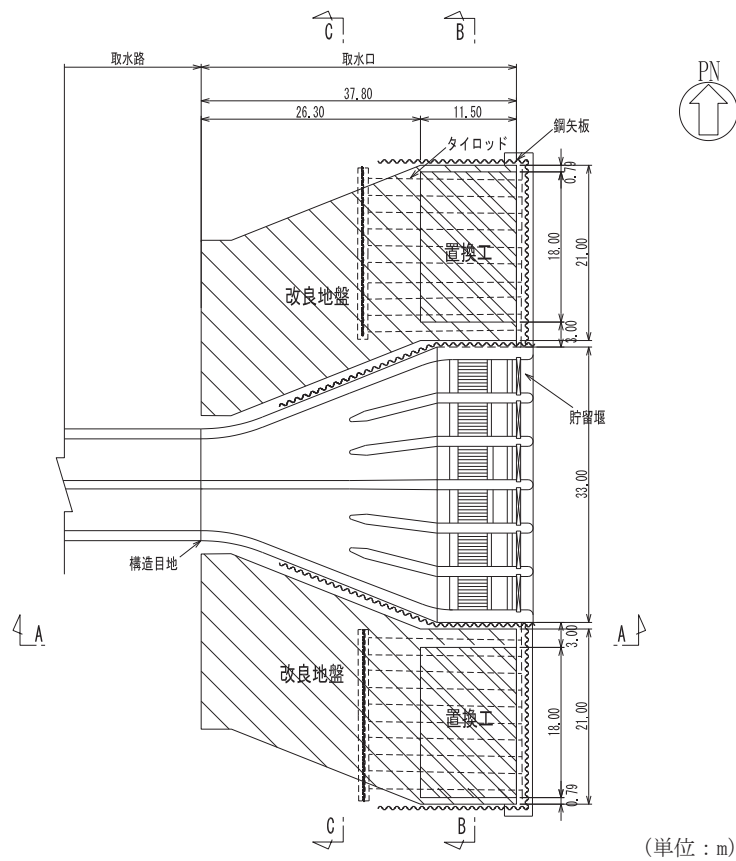


図 2-2 前面護岸平面図

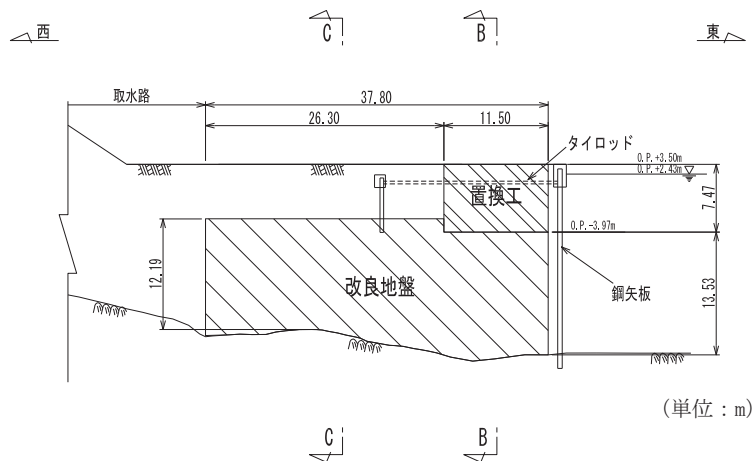


図 2-3 前面護岸縦断図 (A-A 断面)

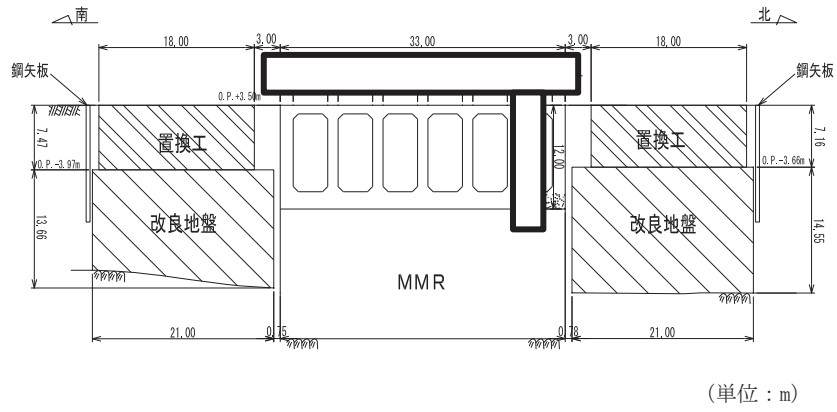


図 2-4 前面護岸断面図 (B-B 断面)

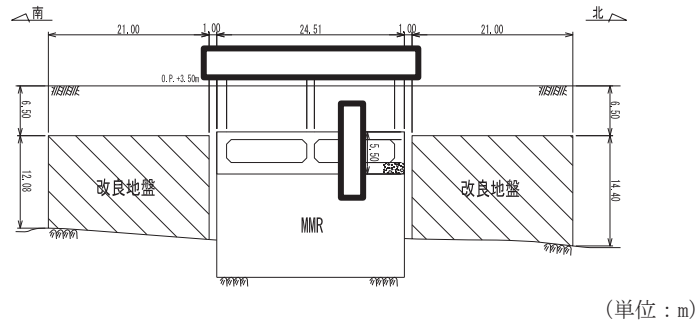


図 2-5 前面護岸断面図 (C-C 断面)

枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

2.3 評価方針

前面護岸は、取水口と同じ運転状態を想定することから、設計基準対象施設及び重大事故等対処施設に対する波及的影響評価を行う。

前面護岸の波及的影響評価は、地震応答解析により得られた解析結果に基づき、表 2-1 の前面護岸の評価項目に示すとおり、前面護岸背面に位置する改良地盤及び置換工の健全性評価を行う。

前面護岸の耐震評価フローを図 2-6 に示す。

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

表 2-1 前面護岸の評価項目

評価方針	評価項目	部位	評価方法	許容限界
地盤の安定性を有すること	地盤の健全性	改良地盤	すべり破壊しないことを確認	すべり安全率 1.2
		置換工	すべり破壊しないことを確認	すべり安全率 1.2

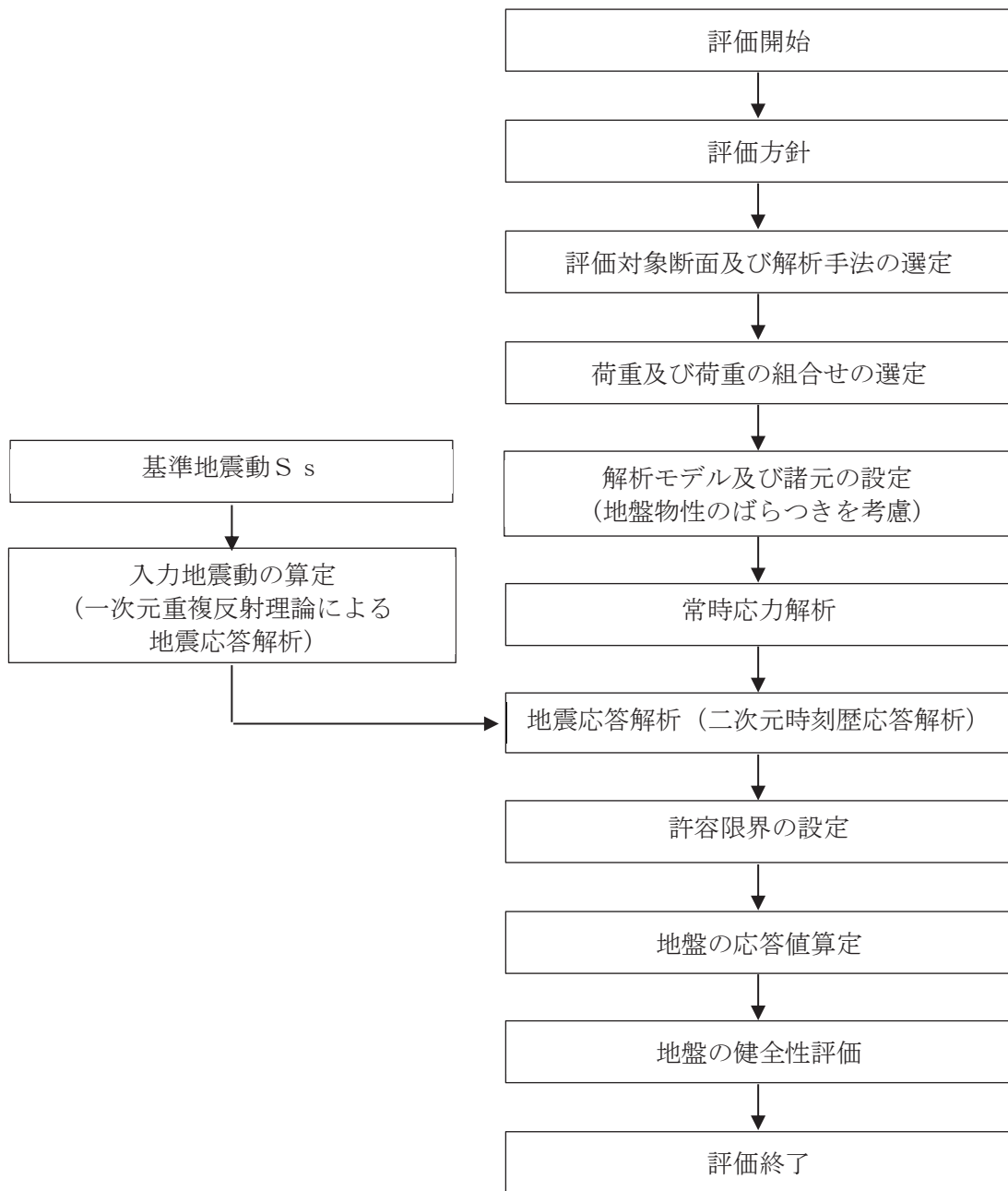


図 2-6 前面護岸の耐震評価フロー

2.4 適用基準

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・土木学会 2002年 コンクリート標準示方書[構造性能照査編]
- ・土木学会 2005年 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
- ・基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド（平成25年6月19日原管地発第1306194号）
- ・原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 -1987）

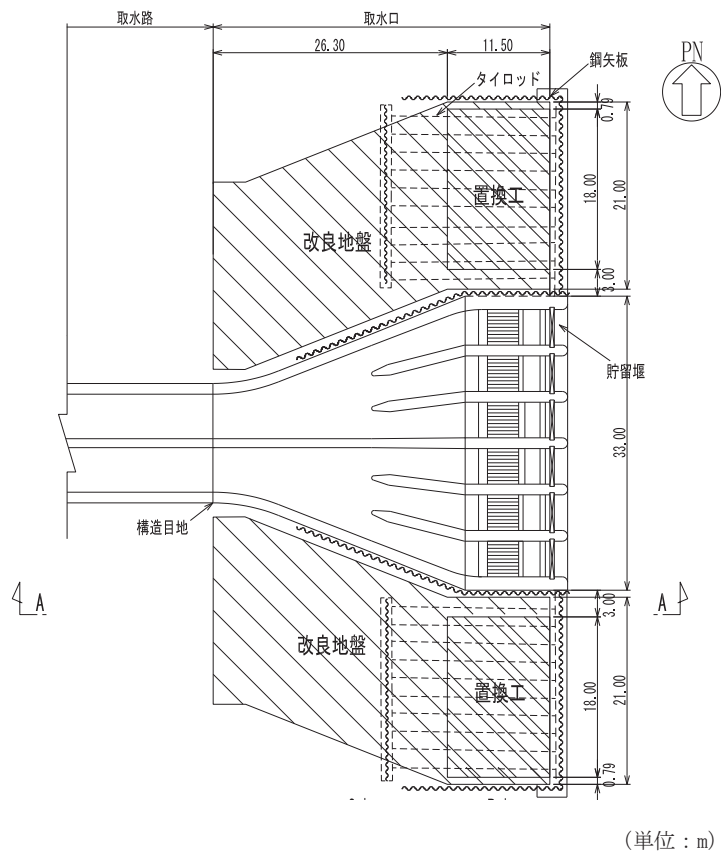
3. 耐震評価

3.1 評価対象断面

改良地盤及び置換工のすべり破壊に伴う取水口の取水機能に対する波及的影響を検討する観点から、評価対象断面は前面護岸の汀線直交方向である東西方向から選定する。

取水口の北側と南側では改良地盤及び置換工の延長（東西）、幅（南北）は同等であるが、高さに若干違いがある。置換工の高さは、取水口の北側が7.16mで南側が7.47mであり、南側の方が高い。また、南側の改良地盤の高さは、取水口に近い側が高くなっており、高い方がすべり安定性に対し厳しくなることから、評価対象断面は図3-1に示すA-A断面とする。

評価対象地質断面図を図3-2に示す。



(単位：m)

図3-1 前面護岸の評価対象断面位置図

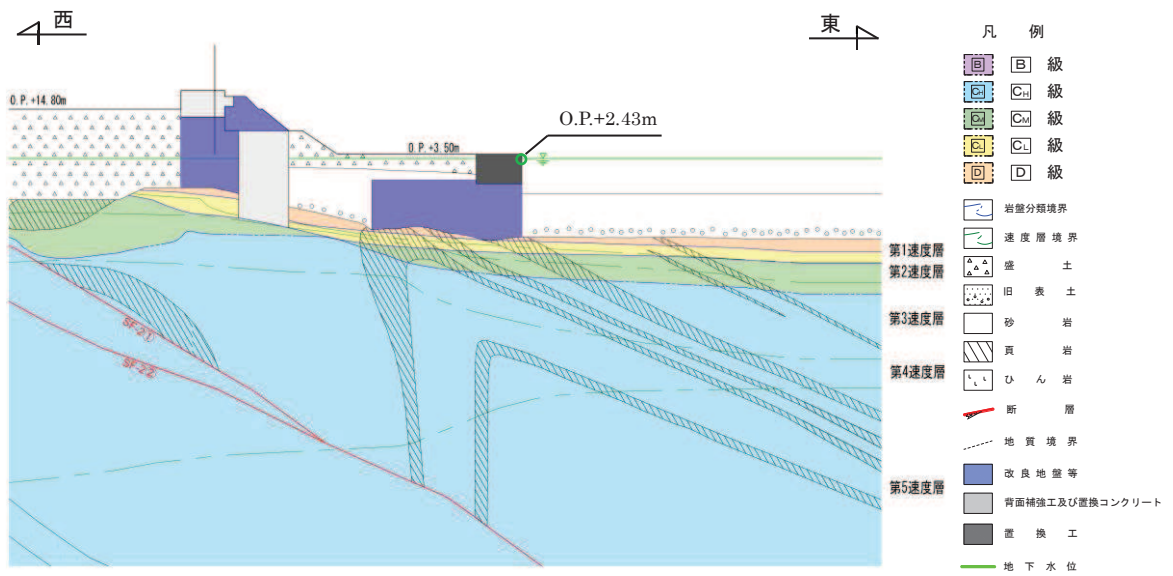


図 3-2 前面護岸 評価対象地質断面図 (A-A 断面)

3.2 解析方法

地震応答解析は、添付書類「VI-2-1-6 地震応答解析の基本方針」のうち「2.3 屋外重要土木構造物」に示す解析手法及び解析モデルを踏まえて設定する。

地震応答解析は、構造物と地盤の相互作用を考慮できる二次元有限要素法により、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より行う。前面護岸には、地下水位以深の盛土・旧表土が分布し、液状化による側方流動の影響を受ける可能性があることから、有効応力解析により評価を行う。

地盤については、ひずみ依存性を適切に考慮できるようモデル化する。地震応答解析については、解析コード「FLIP Ver. 7.3.0_2」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3.2.1 地盤物性のばらつき

地盤物性のばらつきの影響を考慮するため、表 3-1 に示す解析ケースを設定する。

図 3-2 に示すとおり前面護岸には、旧表土、盛土、D級岩盤及び改良地盤といった、動的変形特性にひずみ依存性がある地盤が分布している。これらの地盤のせん断変形が地震時に前面護岸の健全性に影響を与えると判断されることから、これらの地盤の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 3-1 解析ケース

解析ケース	地盤物性	
	旧表土、盛土、D級岩盤、セメント改良土、改良地盤 (G_0 : 初期せん断弾性係数)	C ₁ 級岩盤、C _M 級岩盤、C _H 級岩盤 (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

3.2.2 減衰定数

減衰定数は、質量マトリックス及び剛性マトリックスの線形結合で表される以下の Rayleigh 減衰を解析モデル全体に与えることとし、剛性比例型減衰 ($\alpha=0$, $\beta=0.002$) とする。なお、係数 β の設定については、「FLIP 研究会 14 年間の検討成果のまとめ「理論編」による。

設定した α , β の値を表 3-2 に示す。

$$[c] = \alpha [m] + \beta [k]$$

[c] : 減衰係数マトリックス

[m] : 質量マトリックス

[k] : 剛性マトリックス

α , β : 係数

表 3-2 Rayleigh 減衰における係数 α , β の設定結果

評価対象断面	α	β
東西方向	0.000	2.000×10^{-3}

3.2.3 地震応答解析の解析ケースの選定

耐震評価においては、すべての基準地震動 S_s に対し、解析ケース①（基本ケース）を実施する。解析ケース①において、すべり安全率に対して、最も厳しい地震動を用いて、表 3-1 に示す解析ケース②及び③を実施する。耐震評価における解析ケースを表 3-3 に示す。

表 3-3 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 (+1 σ) を考慮した解析ケース		地盤物性のばらつき (-1 σ) を考慮した解析ケース	
地盤物性		平均値		平均値+1 σ		平均値-1 σ	
地震動 (位相)	$S_s - D 1$	++*	○	基準地震動 S_s (7 波) に水平動の位相反転を考慮した地震動 (7 波), 鉛直動の位相反転を考慮した地震動 (3 波) 及び水平動・鉛直動の位相反転を考慮した地震動 (3 波) を加えた全 20 波より照査を行ったケース① (基本ケース) の結果から、すべり安全率に対して、最も厳しい地震動を用いてケース②~③を実施する。			
		-+*	○				
		+ -*	○				
		--*	○				
	$S_s - D 2$	++*	○				
		-+*	○				
		+ -*	○				
		--*	○				
	$S_s - D 3$	++*	○				
		-+*	○				
		+ -*	○				
		--*	○				
	$S_s - F 1$	++*	○				
		-+*	○				
	$S_s - F 2$	++*	○				
		-+*	○				
	$S_s - F 3$	++*	○				
		-+*	○				
	$S_s - N 1$	++*	○				
		-+*	○				

注記 * : 耐震評価にあたっては、「土木学会 2005 年 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」に従い、水平方向の位相反転を考慮する。また、評価対象が地盤であることから、スペクトル適合波である $S_s - D 1$, $S_s - D 2$ 及び $S_s - D 3$ について鉛直動の位相反転を考慮する。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。

3.3 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき設定する。

3.3.1 耐震評価上考慮する状態

前面護岸の地震応答解析において、地震以外に考慮する状態を以下に示す。

(1) 運転時の状態

発電用原子炉が運転状態にあり、通常の条件下におかれている状態。ただし、運転時の異常な過渡変化時の影響を受けないことから考慮しない。

(2) 設計基準事故時の状態

設計基準事故時の影響を受けないことから考慮しない。

(3) 設計用自然条件

積雪を考慮する。改良地盤及び置換工は埋設されているため風の影響は考慮しない。なお、防潮堤（鋼管式鉛直壁）は、添付書類「VI-2-10-2-2-1 防潮堤（鋼管式鉛直壁）の耐震性について」に基づき、風の影響を考慮する。

(4) 重大事故等時の状態

重大事故等時の影響を受けないことから考慮しない。

3.3.2 荷重

前面護岸の地震応答解析において、考慮する荷重を以下に示す。

(1) 固定荷重（G）

固定荷重として、前面護岸（改良地盤及び置換工）の自重を考慮する。

(2) 積載荷重（P）

積載荷重として、積雪荷重 P_s を含めて地表面に 4.9kN/m^2 を考慮する。

(3) 積雪荷重（ P_s ）

積雪荷重として、発電所の最寄りの気象官署である石巻特別地域気象観測所で観測された月最深積雪の最大値である 43cm に平均的な積雪荷重を与えるための係数 0.35 を考慮した値を設定する。また、建築基準法施行令第86条第2項により、積雪量 1cm ごとに 20N/m^2 の積雪荷重が作用することを考慮する。

(4) 地震荷重（ S_s ）

基準地震動 S_s による荷重を考慮する。

3.3.3 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-4 に示す。

表 3-4 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時 (S _s)	G + P + S _s

G : 固定荷重

P : 積載荷重 (積雪荷重 P_sを含めて 4.9kN/m²を地表面に考慮)

S_s : 地震荷重 (基準地震動 S_s)

3.4 入力地震動

入力地震動は、添付書類「VI-2-1-6 地震応答解析の基本方針」のうち、「2.3 屋外重要土木構造物」に示す入力地震動の設定方針を踏まえて設定する。

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 を一次元重複反射理論により地震応答解析モデル底面位置で評価したものをを用いる。なお、入力地震動の設定に用いる地下構造モデルは、添付書類「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」のうち「7.1 入力地震動の設定に用いる地下構造モデル」を用いる。

図 3-3 に入力地震動算定の概念図を、図 3-4～図 3-17 に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を示す。入力地震動の算定には、解析コード「Ark Quake Ver. 3.10」を使用する。

解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

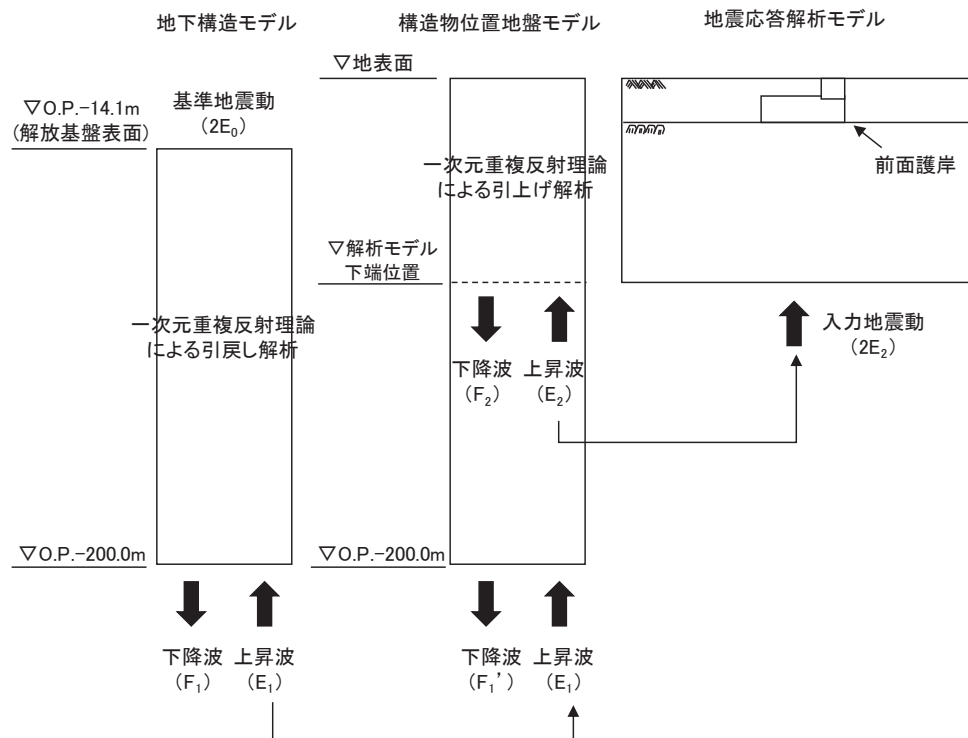
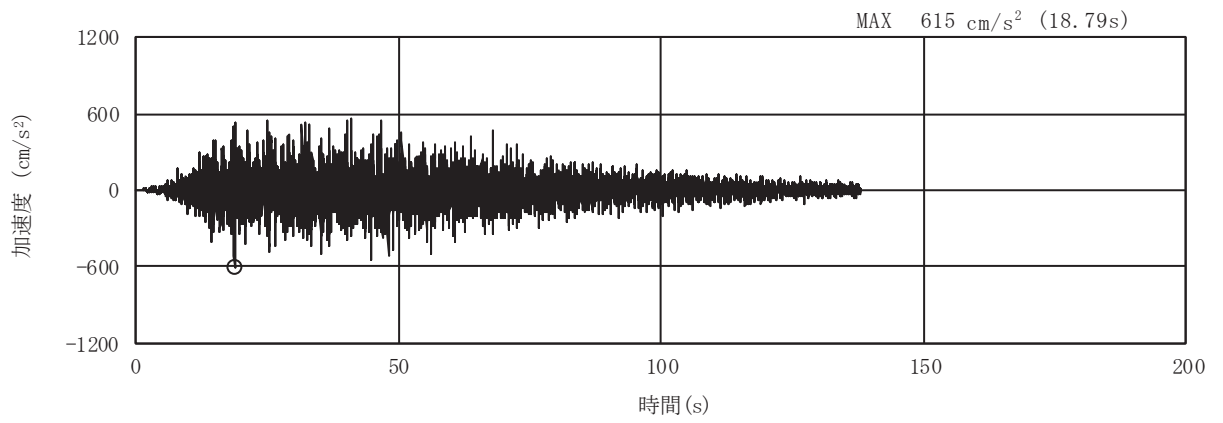
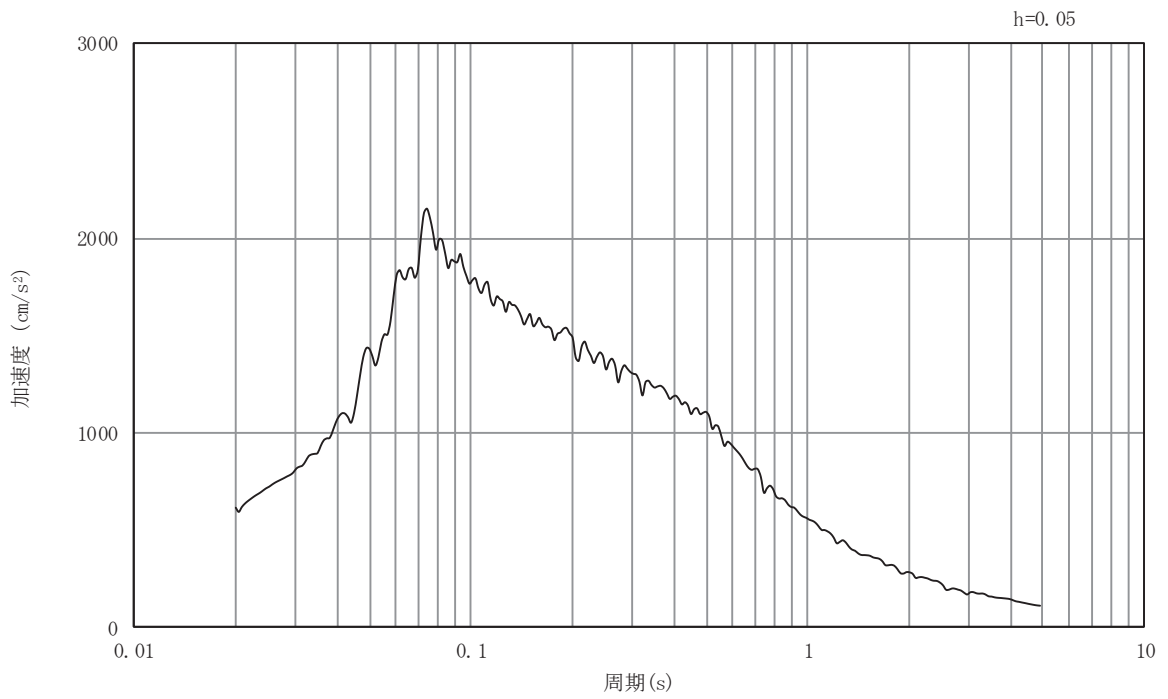


図 3-3 入力地震動算定の概念図

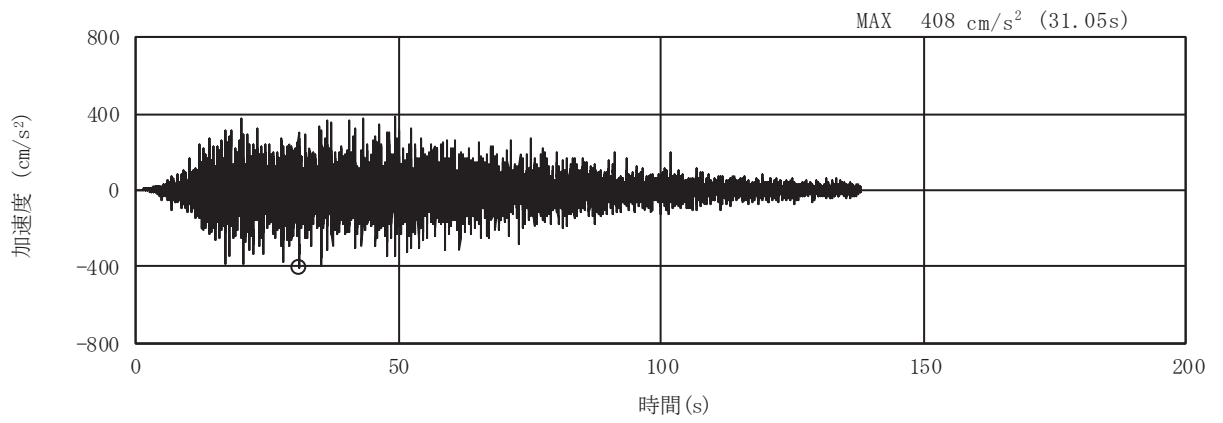


(a) 加速度時刻歴波形

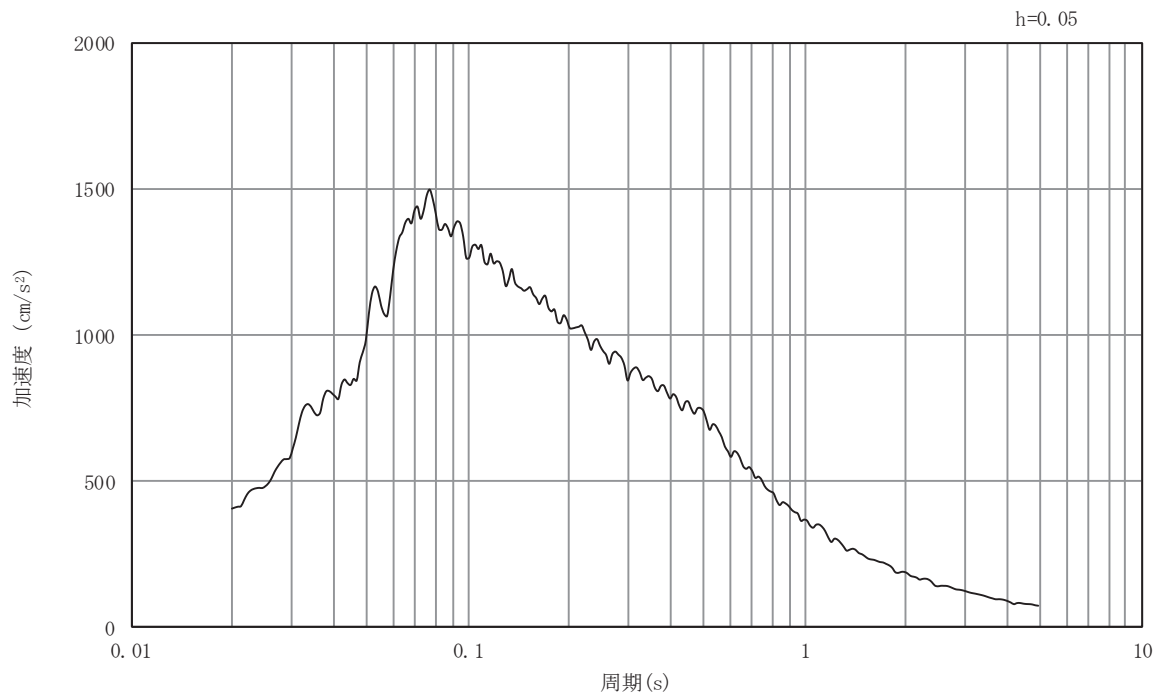


(b) 加速度応答スペクトル

図3-4 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 -D 1)

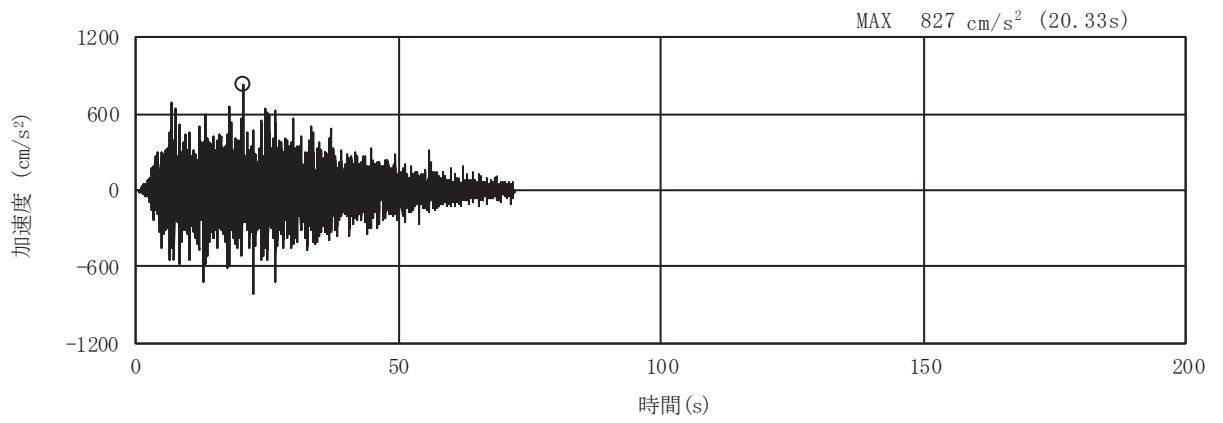


(a) 加速度時刻歴波形

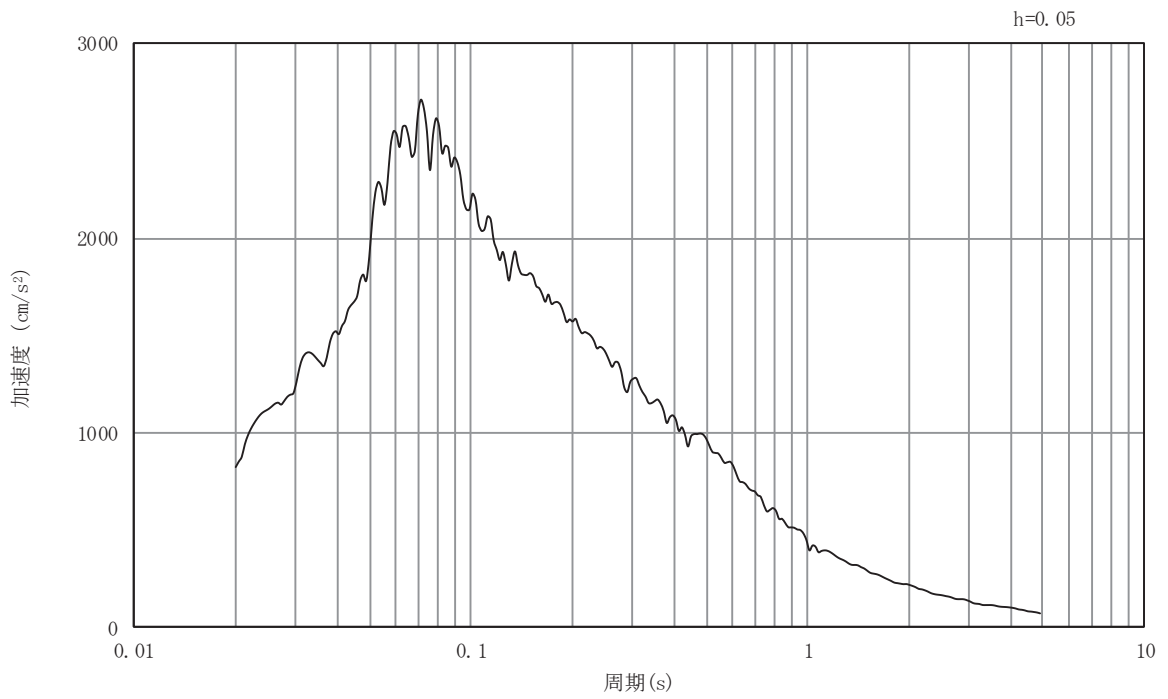


(b) 加速度応答スペクトル

図3-5 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
(鉛直成分：S s - D 1)

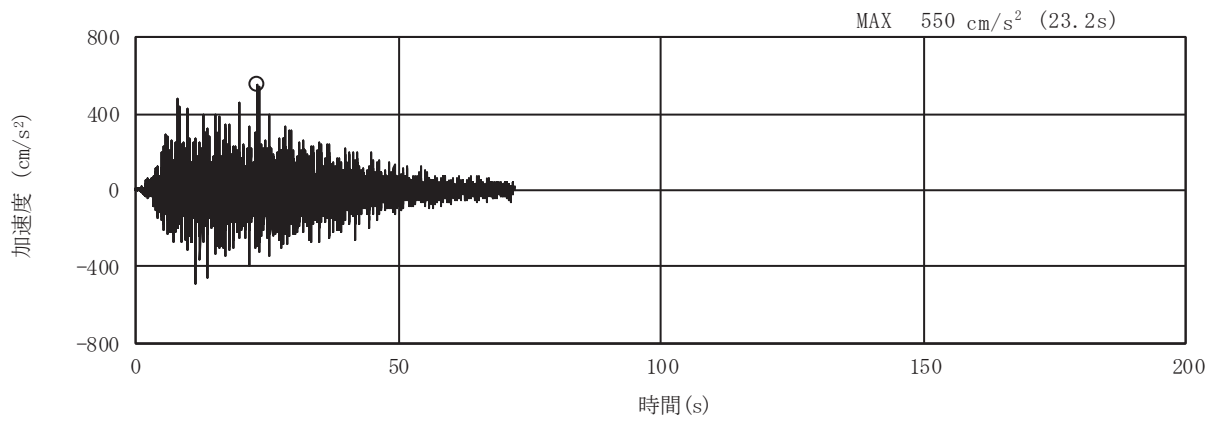


(a) 加速度時刻歴波形

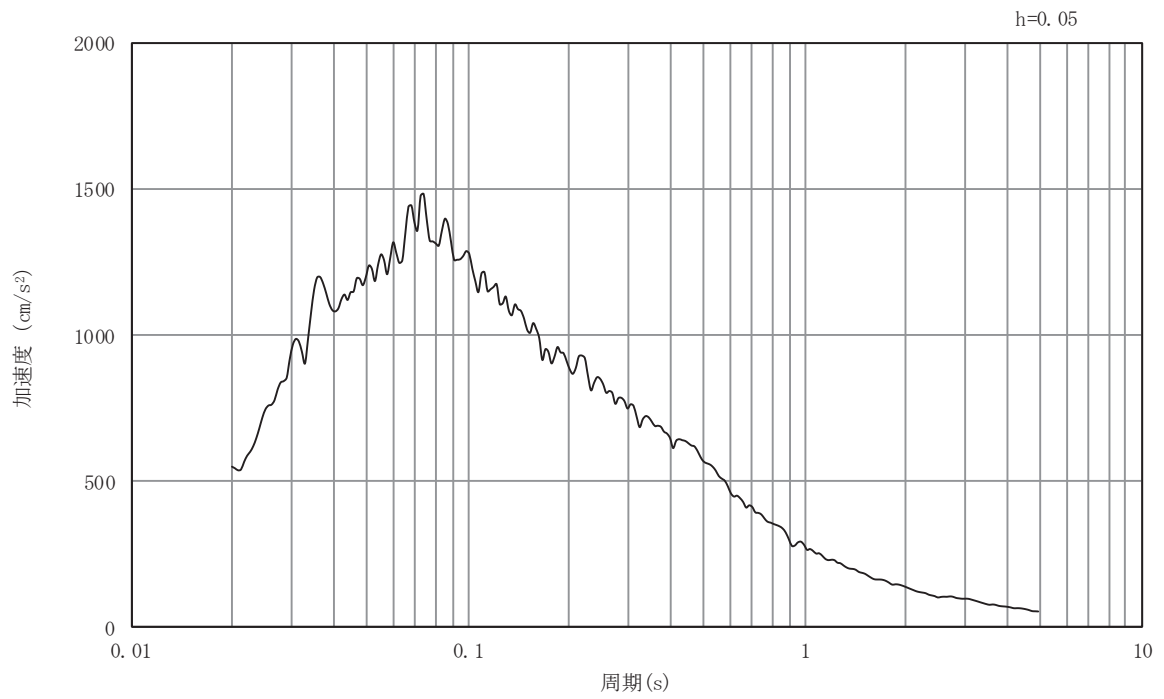


(b) 加速度応答スペクトル

図3-6 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 - D 2)

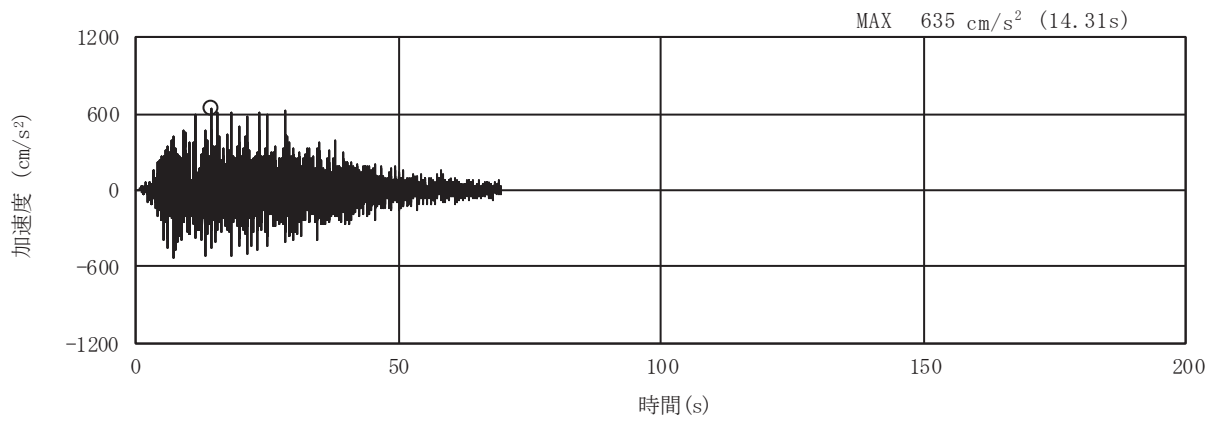


(a) 加速度時刻歴波形

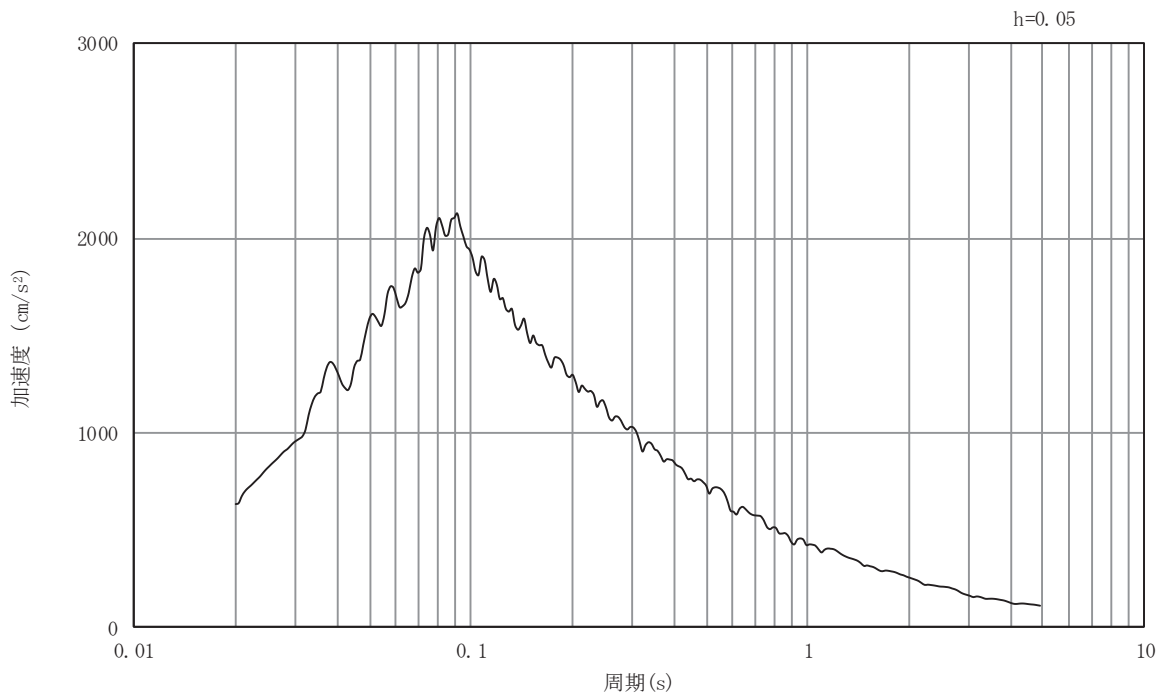


(b) 加速度応答スペクトル

図3-7 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
(鉛直成分：S s - D 2)

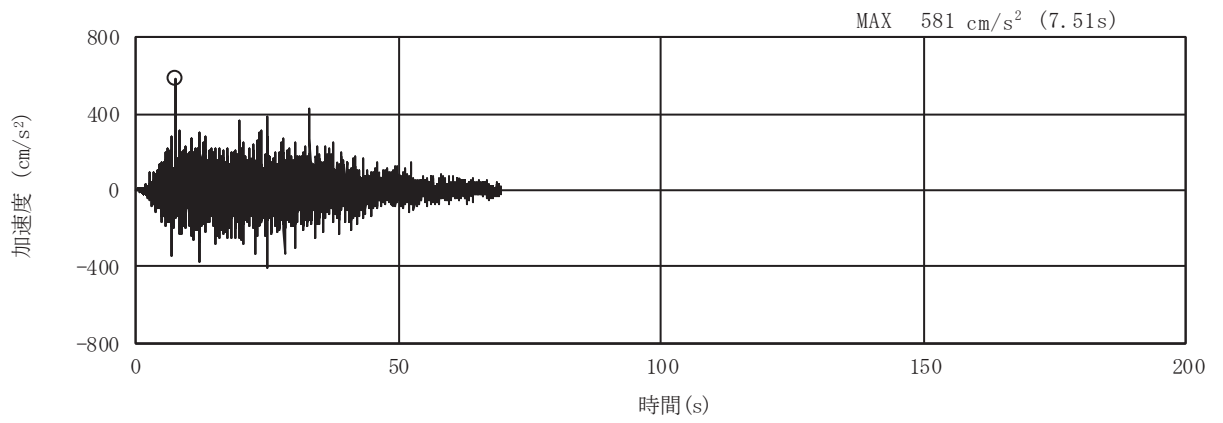


(a) 加速度時刻歴波形

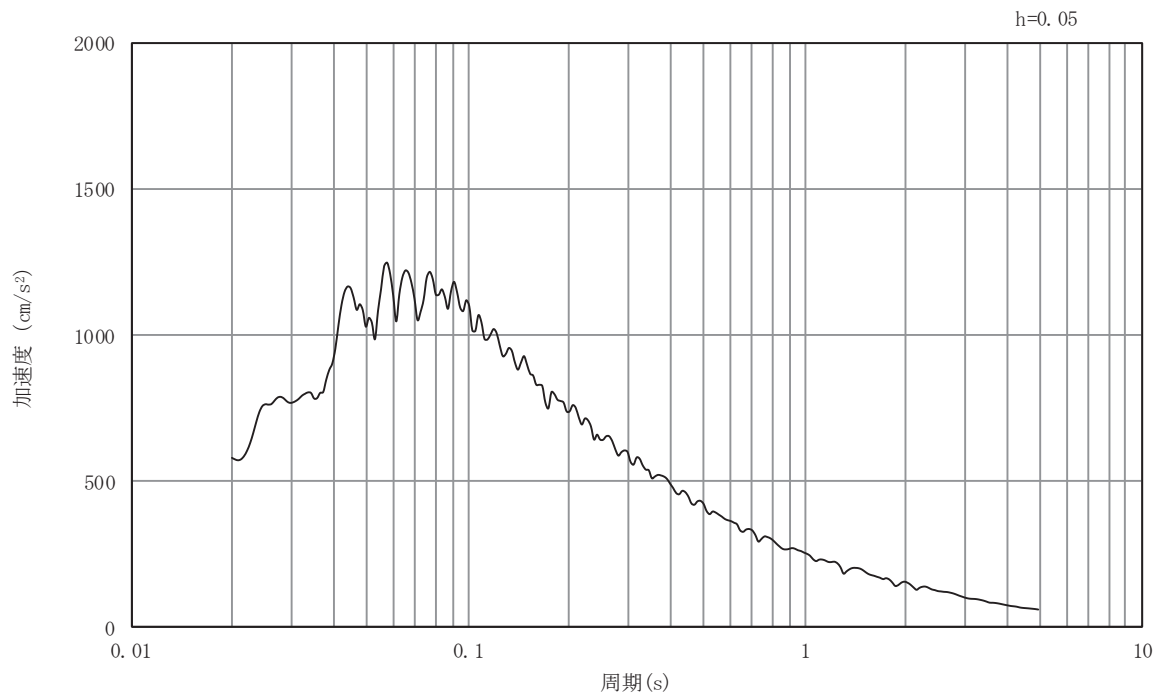


(b) 加速度応答スペクトル

図3-8 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 - D 3)

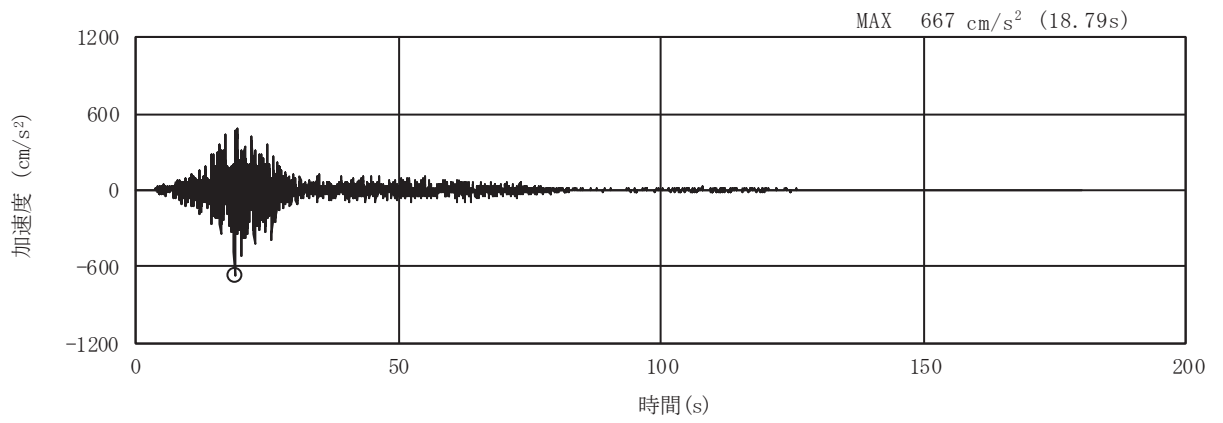


(a) 加速度時刻歴波形

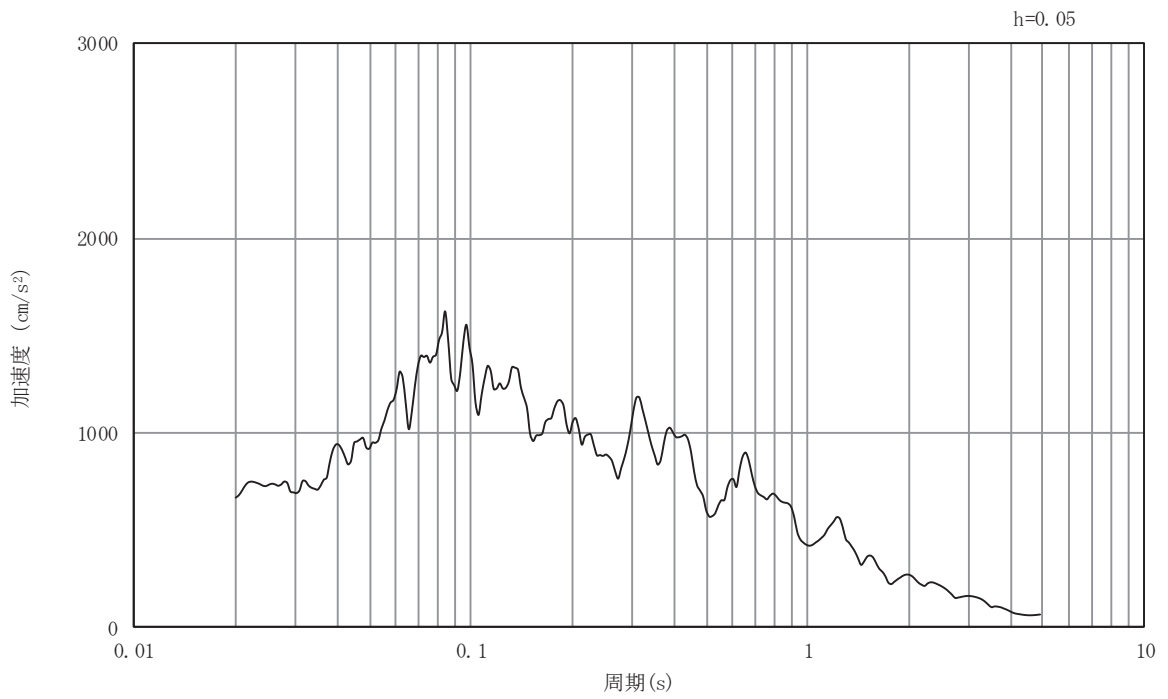


(b) 加速度応答スペクトル

図3-9 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
(鉛直成分：S s - D 3)

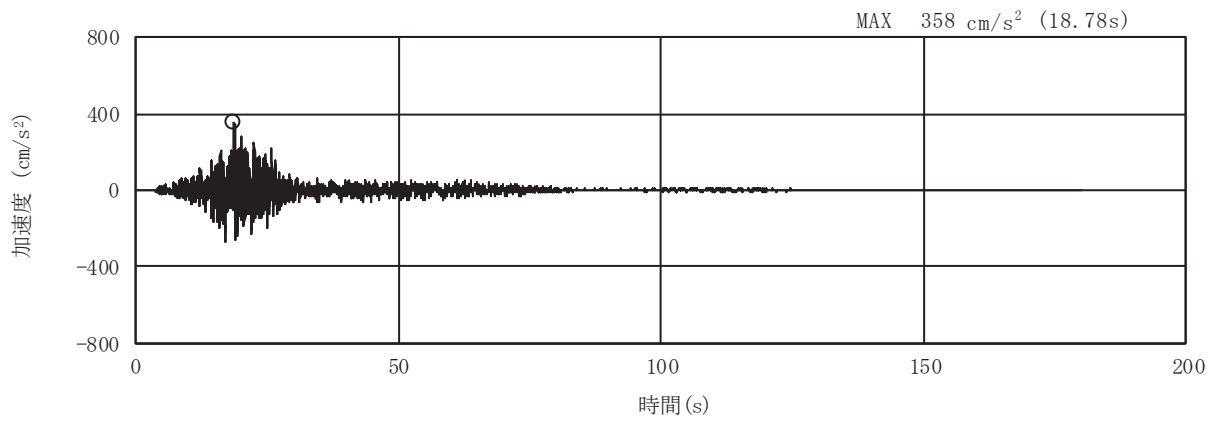


(a) 加速度時刻歴波形

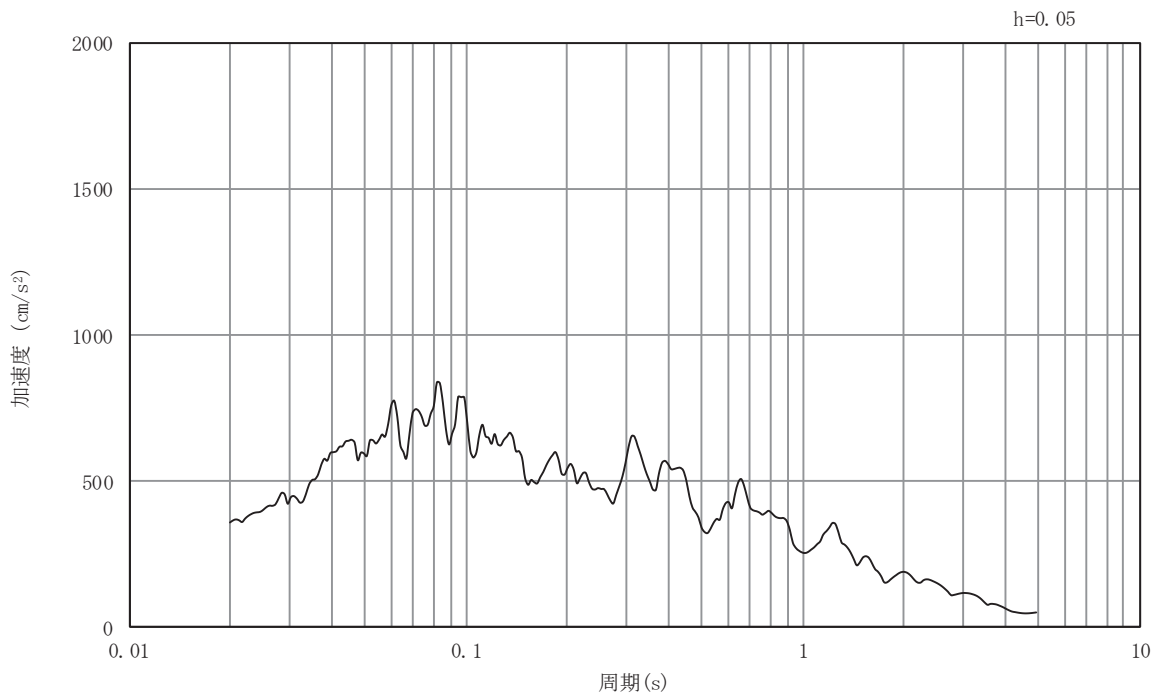


(b) 加速度応答スペクトル

図3-10 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 1)

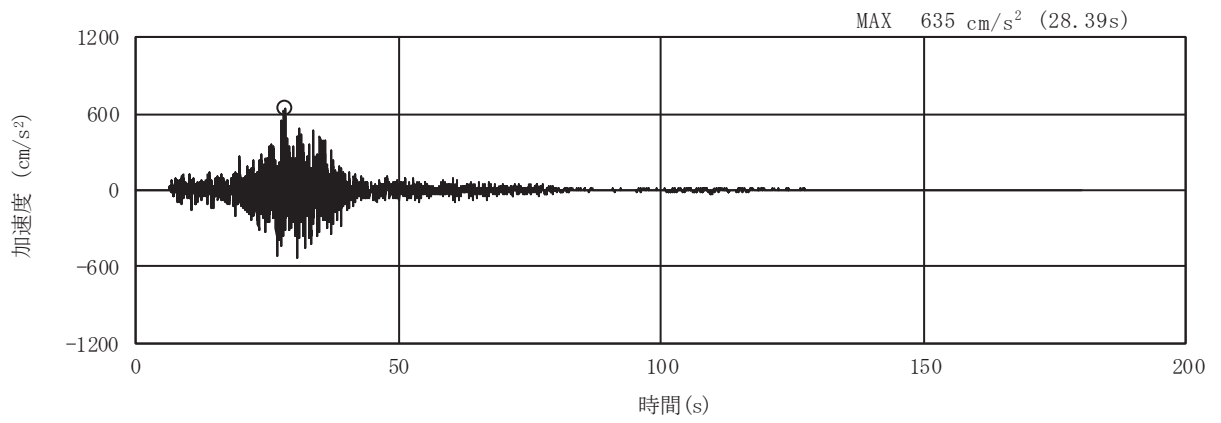


(a) 加速度時刻歴波形

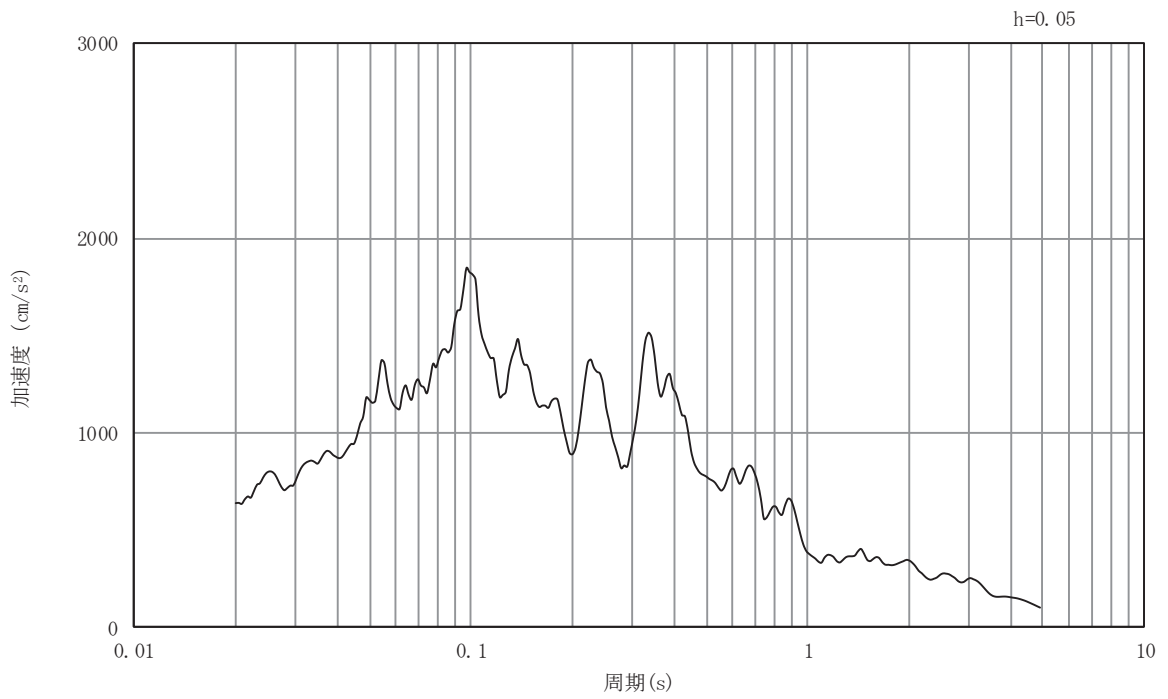


(b) 加速度応答スペクトル

図3-11 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
(鉛直成分：S s - F 1)

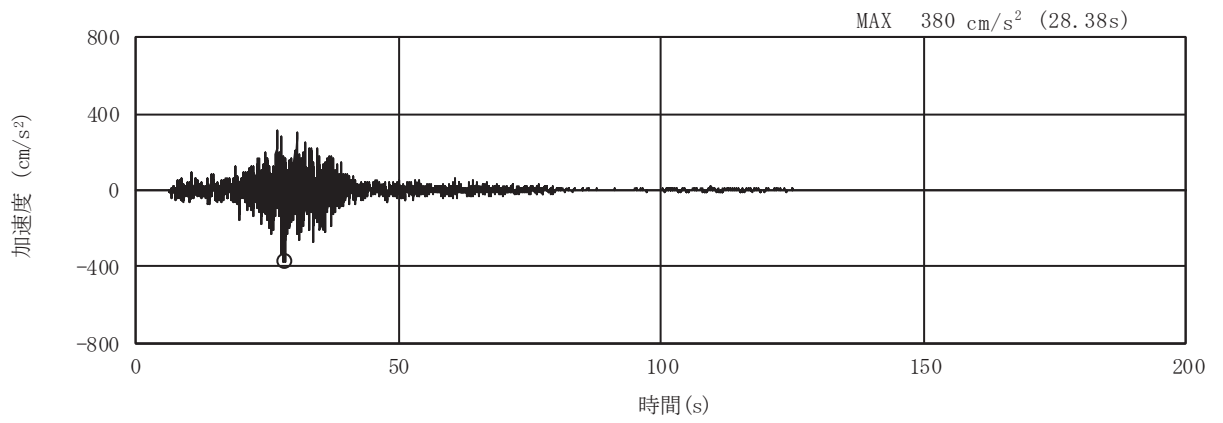


(a) 加速度時刻歴波形

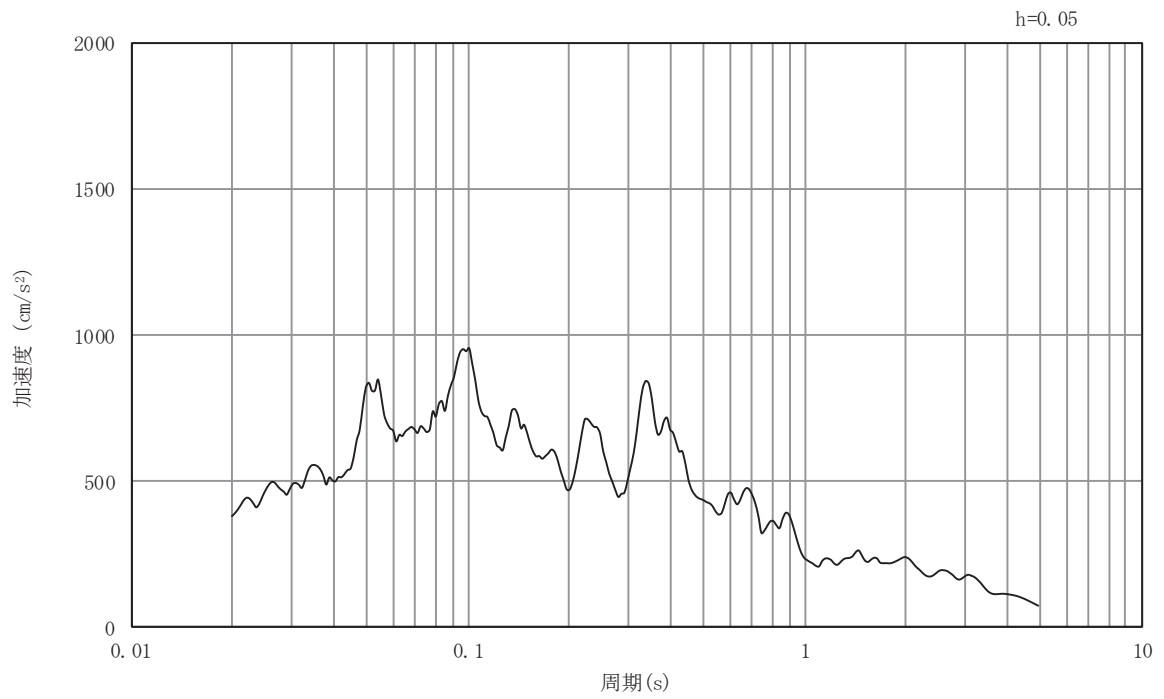


(b) 加速度応答スペクトル

図3-12 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)

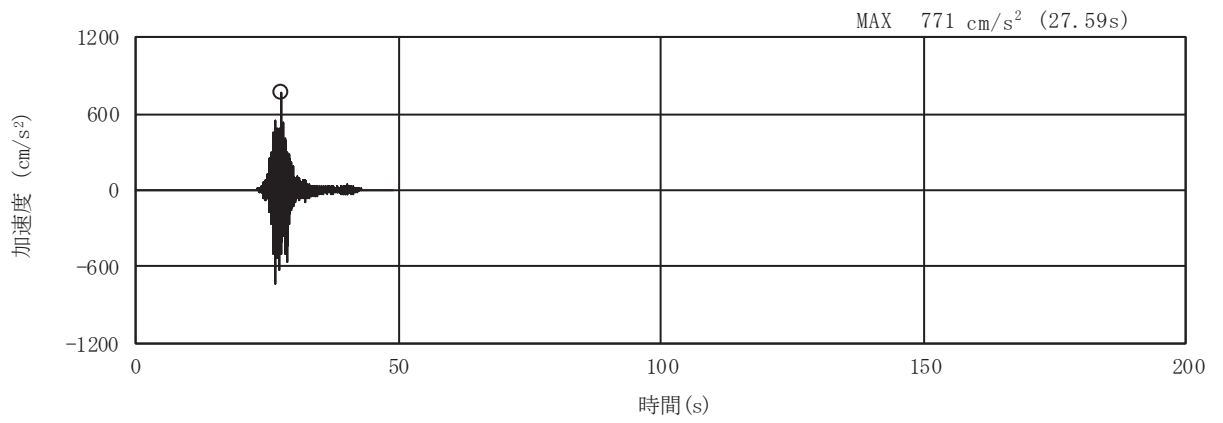


(a) 加速度時刻歴波形

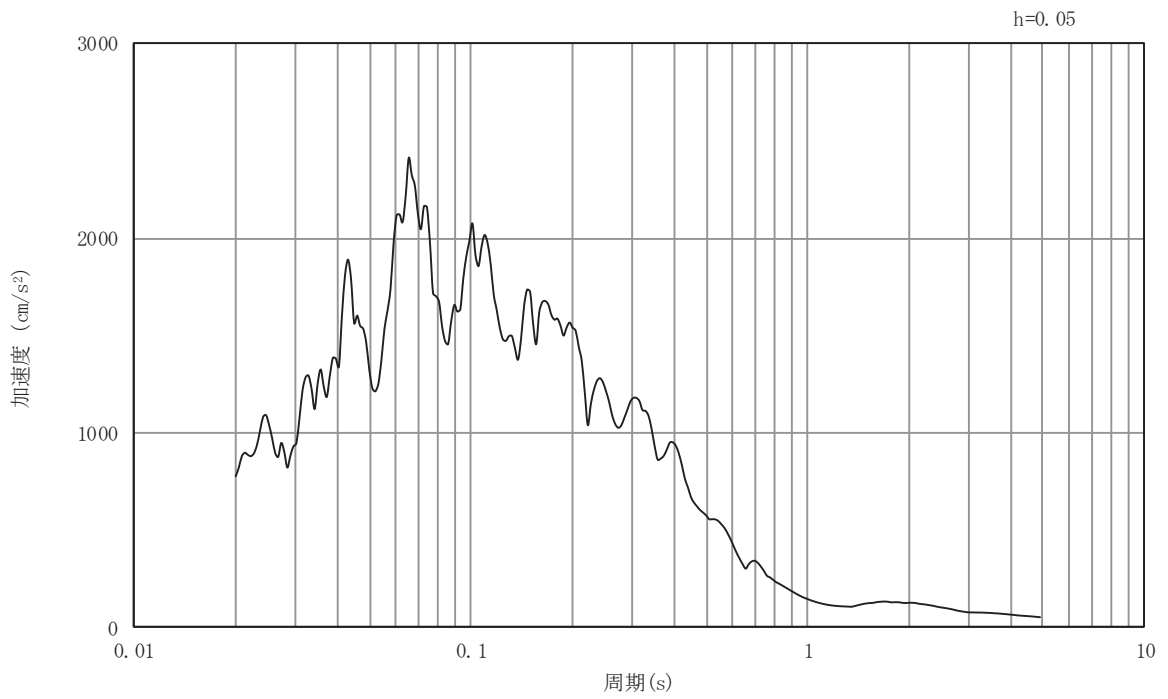


(b) 加速度応答スペクトル

図3-13 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
(鉛直成分：S s - F 2)

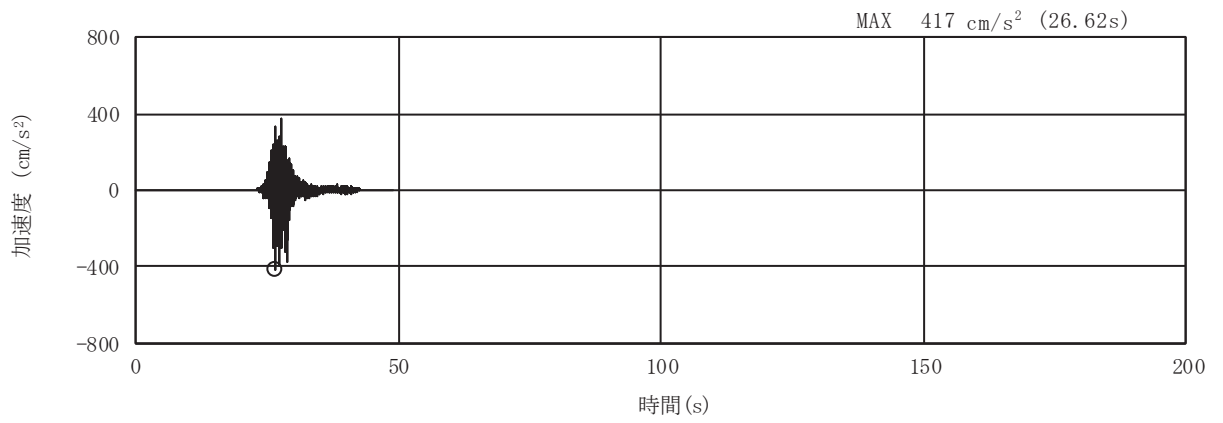


(a) 加速度時刻歴波形

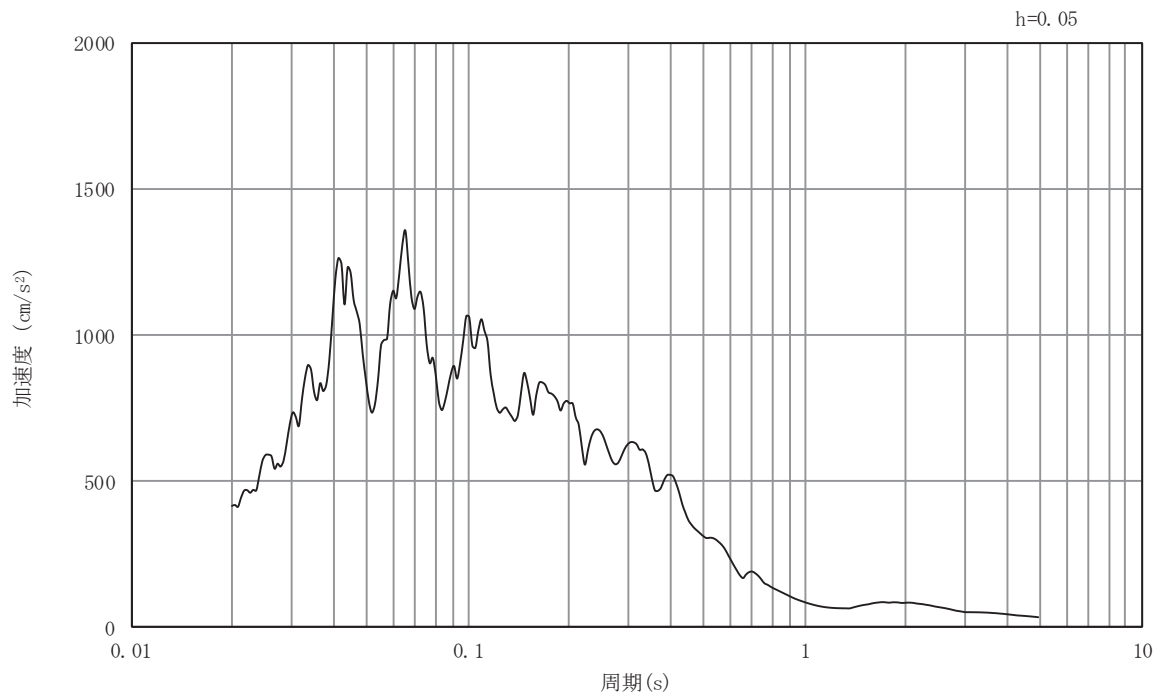


(b) 加速度応答スペクトル

図3-14 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 3)

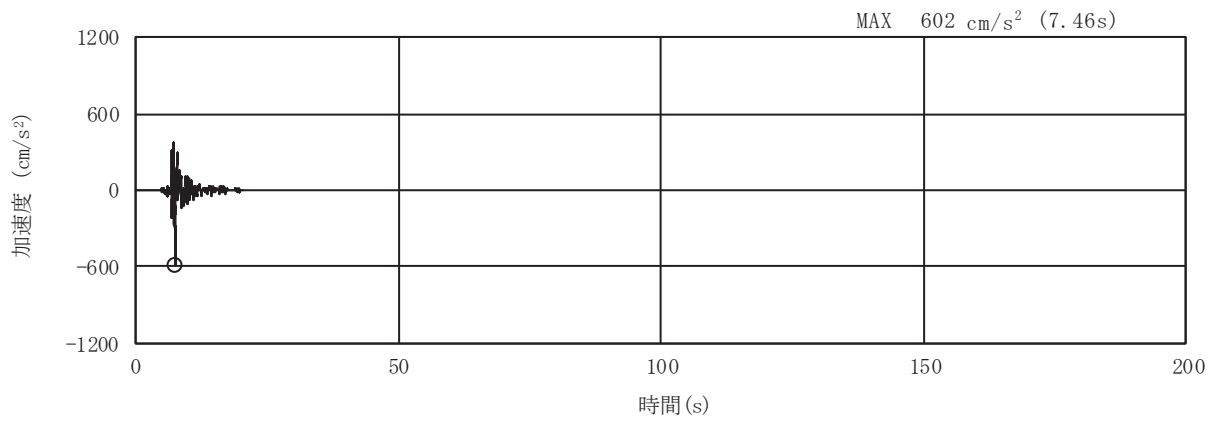


(a) 加速度時刻歴波形

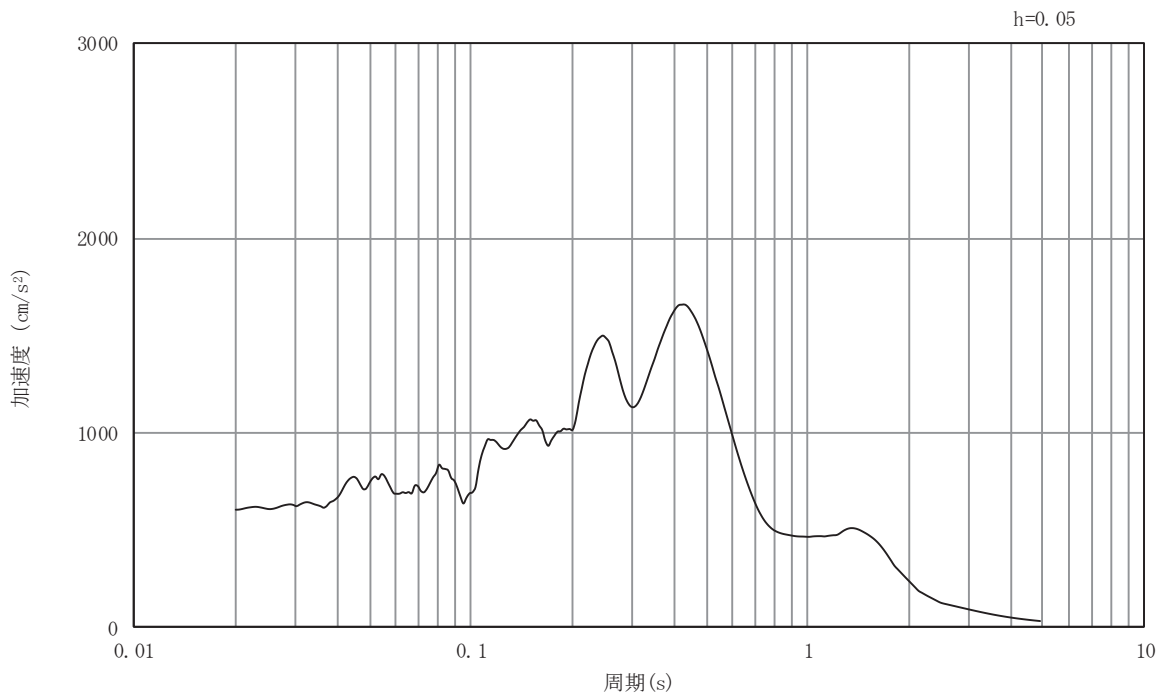


(b) 加速度応答スペクトル

図3-15 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
(鉛直成分：S s - F 3)

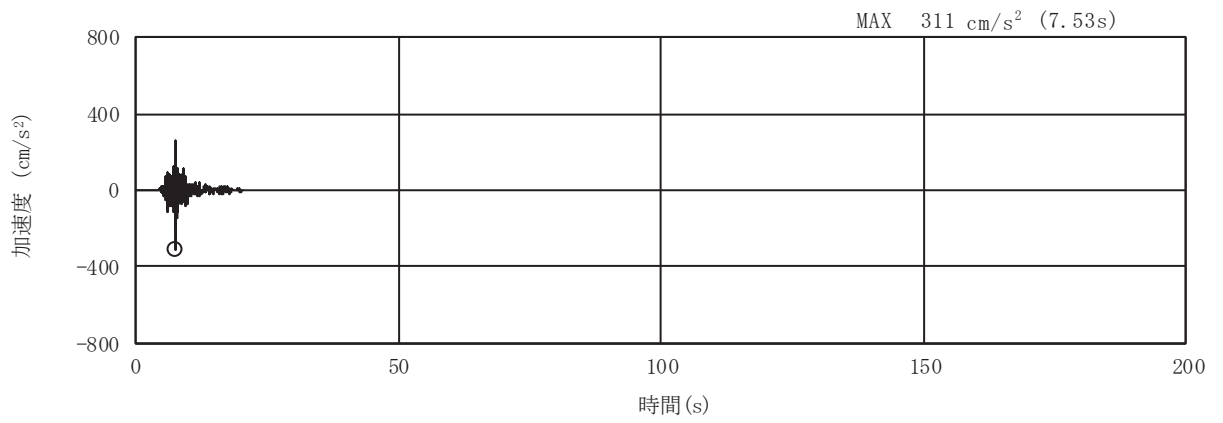


(a) 加速度時刻歴波形

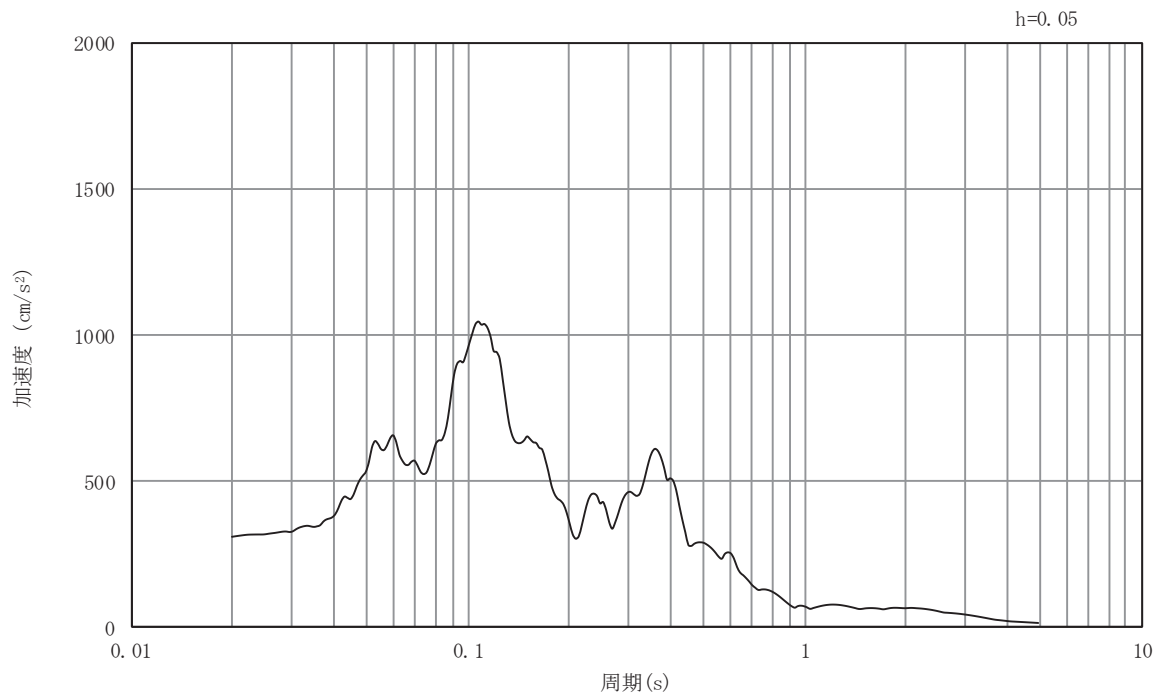


(b) 加速度応答スペクトル

図3-16 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 - N 1)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図3-17 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
(鉛直成分：S s - N 1)

3.5 解析モデル及び諸元

3.5.1 解析モデル

前面護岸の地震応答解析モデルを図 3-18 に示す。

(1) 解析領域

二次元有限要素法による時刻歴応答解析の解析モデルの解析領域は、境界条件の影響が地盤の応力状態に及ばないよう、斜面や防潮堤を含む十分に広い領域とする。

(2) 境界条件

二次元有限要素法による時刻歴応答解析の解析モデル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。

(3) 構造物のモデル化

防潮堤（鋼管式鉛直壁）は、添付書類「VI-2-10-2-2-1 防潮堤（鋼管式鉛直壁）の耐震性について」に基づき、鋼管杭は、線形はり要素（ビーム要素）でモデル化する。背面補強工及び置換コンクリート（一般部のみ）は線形の平面ひずみ要素（ソリッド要素）でモデル化する。

前面護岸のうち、タイロッド式矢板護岸の鋼矢板及びタイロッドは、すべり安定性に対し安全側の評価となるようモデル化しない。

(4) 地盤のモデル化

D級を除く岩盤は、線形の平面ひずみ要素でモデル化する。また、盛土及びD級岩盤は、地盤の非線形性をマルチスプリング要素で考慮した平面ひずみ要素でモデル化する。

(5) ジョイント要素の設定

地震時の「旧表土及び岩盤と改良地盤」及び「旧表土、盛土及び改良地盤と置換工」との接合面における剥離及びすべりを考慮するため、これらの接合面にジョイント要素を設定する。なお、防潮堤（鋼管式鉛直壁）は、添付書類「VI-2-10-2-2-1 防潮堤（鋼管式鉛直壁）の耐震性について」に基づき、ジョイント要素を設定する。

(6) 海水のモデル化

海水は、海底面への付加質量として考慮する。

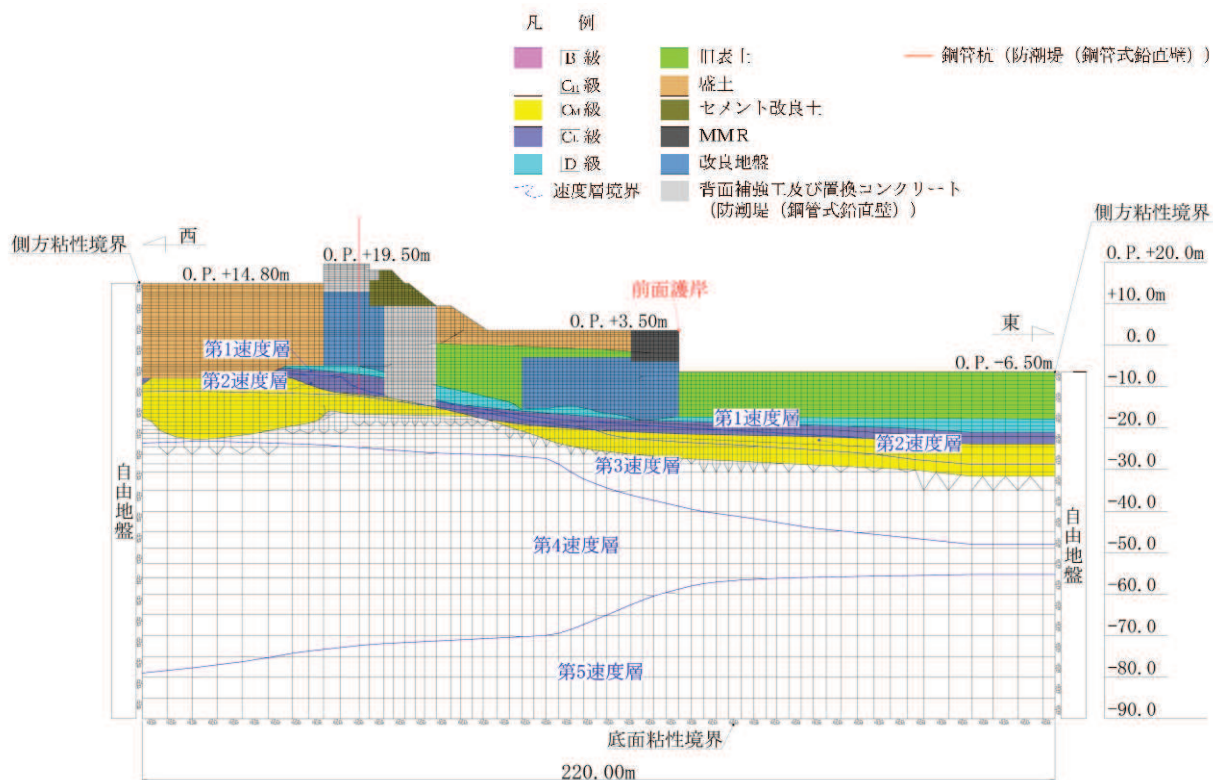


図 3-18 前面護岸の地震応答解析モデル図 (A-A 断面)

3.5.2 使用材料及び材料の物性値

置換工の使用材料を表 3-5 に、材料の物性値を表 3-6 に示す。なお、防潮堤（鋼管式鉛直壁）の材料の物性値は、添付書類「VI-2-10-2-2-1 防潮堤（鋼管式鉛直壁）の耐震性について」にて設定している物性値を用いる。

表 3-5 使用材料

材料	仕様
置換工（コンクリート）	設計基準強度 24.0N/mm ²

表 3-6 材料の物性値

材料	項目	材料諸元
置換工 （コンクリート）	ヤング係数 (N/mm ²)	2.50×10 ⁴
	ポアソン比	0.2

3.5.3 地盤の物性値

地盤については、添付書類「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。

3.5.4 地下水位

地下水位については、添付書類「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」に従い設定する。設計用地下水位を表 3-7 及び図 3-19 に示す。

表 3-7 設計用地下水位

評価対象	設計用地下水位
前面護岸	0. P. +2. 43m ^{*1, 2}

注記*1：朔望平均満潮位

*2：東北地方太平洋沖地震による約 1m の沈降を、敷地高さ（0. P. +14. 8m）を固定とした朔望平均満潮位を 0. P. +1. 43m から 0. P. +2. 43m とすることにより考慮する。

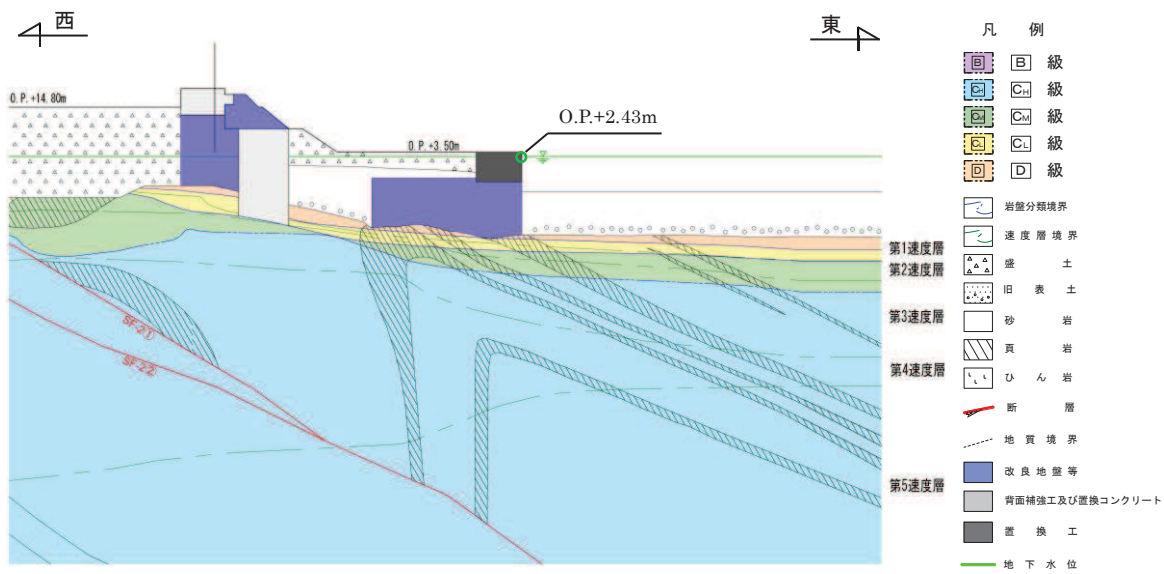


図 3-19 設計用地下水位

0 2 ③ VI-2-11-2-16 R 1

3.6 許容限界

許容限界は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき設定する。

3.6.1 改良地盤

改良地盤の健全性に対する許容限界は、「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」に基づき、表3-8に示すすべり安全率とする。

表3-8 改良地盤の健全性に対する許容限界

確認項目	許容限界	
地盤の安定性を有すること	すべり安全率	1.2

3.6.2 置換工

置換工の健全性に対する許容限界は、「基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価に係る審査ガイド」に基づき、表3-9に示すすべり安全率とする。

表3-9 置換工の健全性に対する許容限界

確認項目	許容限界	
地盤の安定性を有すること	すべり安全率	1.2

3.7 評価方法

前面護岸の耐震評価は、地震応答解析に基づき算定した最小すべり安全率が「3.6 許容限界」で設定した許容限界以上であることを確認する。

3.7.1 改良地盤の健全性評価

改良地盤の健全性評価は、改良地盤を通るすべり線のすべり安全率が許容限界以上であることを確認する。

また、改良地盤の強度特性のばらつきを考慮した評価（平均値-1 σ 強度）についても実施する。その際の解析ケースはケース①（基本ケース）とする。

3.7.2 置換工の健全性評価

置換工の健全性評価は、置換工を通るすべり線のすべり安全率が許容限界以上であることを確認する。

4. 耐震評価結果

4.1 改良地盤

改良地盤の最小すべり安全率を表 4-1 に、最小すべり安全率となる時刻における局所安全係数分布を図 4-1 に示す。

また、強度特性のばらつきを考慮した評価として、ケース①（基本ケース）において、地盤強度を -1σ 低減させたケースの最小すべり安全率を表 4-1 に示す。

これらの結果から、改良地盤の最小すべり安全率が、改良地盤の健全性に対する許容限界以上であることを確認した。

表 4-1 改良地盤の最小すべり安全率

地震動	解析ケース	最小すべり安全率
S s -N 1 (++)	③	3.9
S s -N 1 (++)	① (平均値 - 1 σ 強度)	3.6

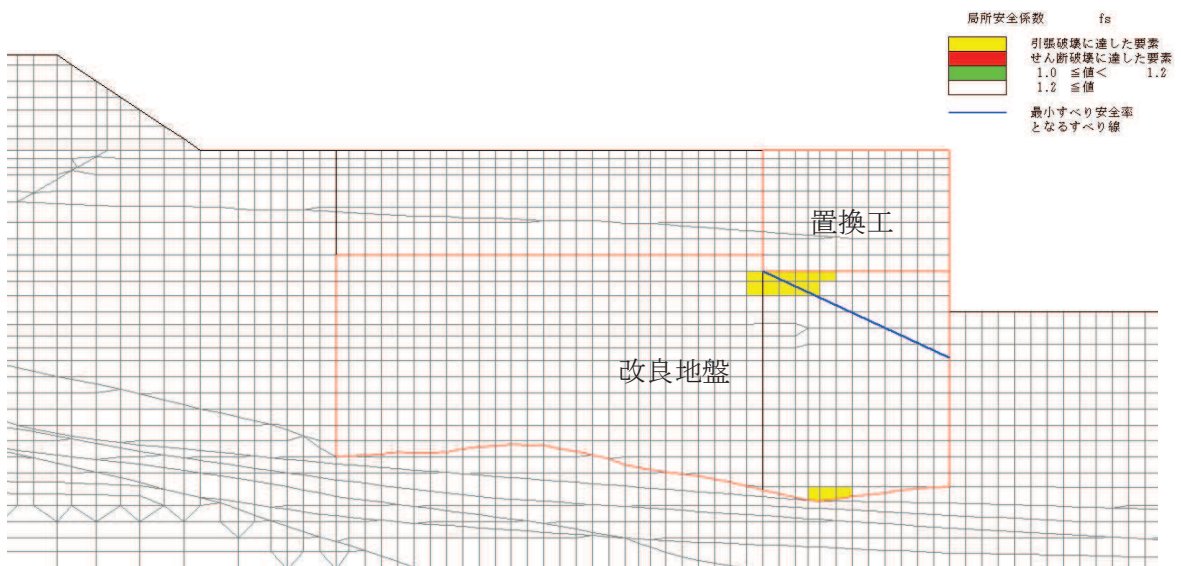


図 4-1 改良地盤の最小すべり安全率発生時刻における局所安全係数分布

(解析ケース③, S s -N 1 (++))

4.2 置換工

置換工の最小すべり安全率を表 4-2 に、最小すべり安全率となる時刻における局所安全係数分布を図 4-2 に示す。

これらの結果から、置換工の最小すべり安全率が、置換工の健全性に対する許容限界以上であることを確認した。

表 4-2 置換工の最小すべり安全率

地震動	解析ケース	最小すべり安全率
S _s -N1 (++)	③	17.6

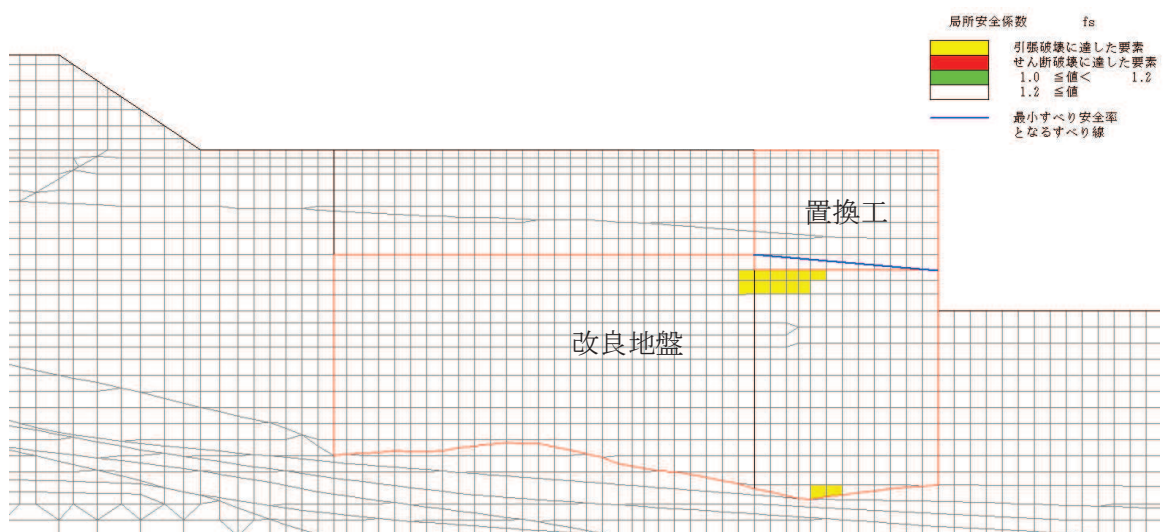


図 4-2 置換工の最小すべり安全率発生時刻における局所安全係数分布
(解析ケース③, S_s-N1 (++))