

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添-2-043-3 改2
提出年月日	2020年8月31日

V-2-10-3-1-2-2 取水護岸の耐震性についての計算書

K7 ① V-2-10-3-1-2-2 R1

2020年8月

東京電力ホールディングス株式会社

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 構造部材	10
3.2.2 地盤	11
3.2.3 減衰定数	12
3.2.4 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	13
3.4 入力地震動	14
3.5 解析モデル及び諸元	31
3.5.1 解析モデル	31
3.5.2 使用材料及び材料の物性値	33
3.5.3 地盤及び地盤改良体の物性値	33
3.5.4 地下水位	34
3.6 評価対象部位	34
3.6.1 構造部材の健全性評価	34
3.6.2 構造物の変形性評価	34
3.7 許容限界	34
3.7.1 構造部材の健全性に対する許容限界	34
3.7.2 構造物の変形性に対する許容限界	34
3.8 評価方法	35
3.8.1 構造部材の健全性評価	35
3.8.2 構造物の変形性評価	37
4. 耐震評価結果	38
4.1 構造部材の健全性に対する評価結果	38
4.2 構造物の変形性に対する評価結果	38

1. 概要

本資料は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度及び機能維持の設計方針に基づき、取水護岸が基準地震動 S_s に対して十分な構造強度及び止水性を有していることを確認するものである。

取水護岸に要求される機能の維持を確認するにあたっては、地震応答解析に基づく構造部材の健全性評価及び構造物の変形評価により行う。

2. 基本方針

2.1 位置

取水護岸の位置図を図2-1に示す。

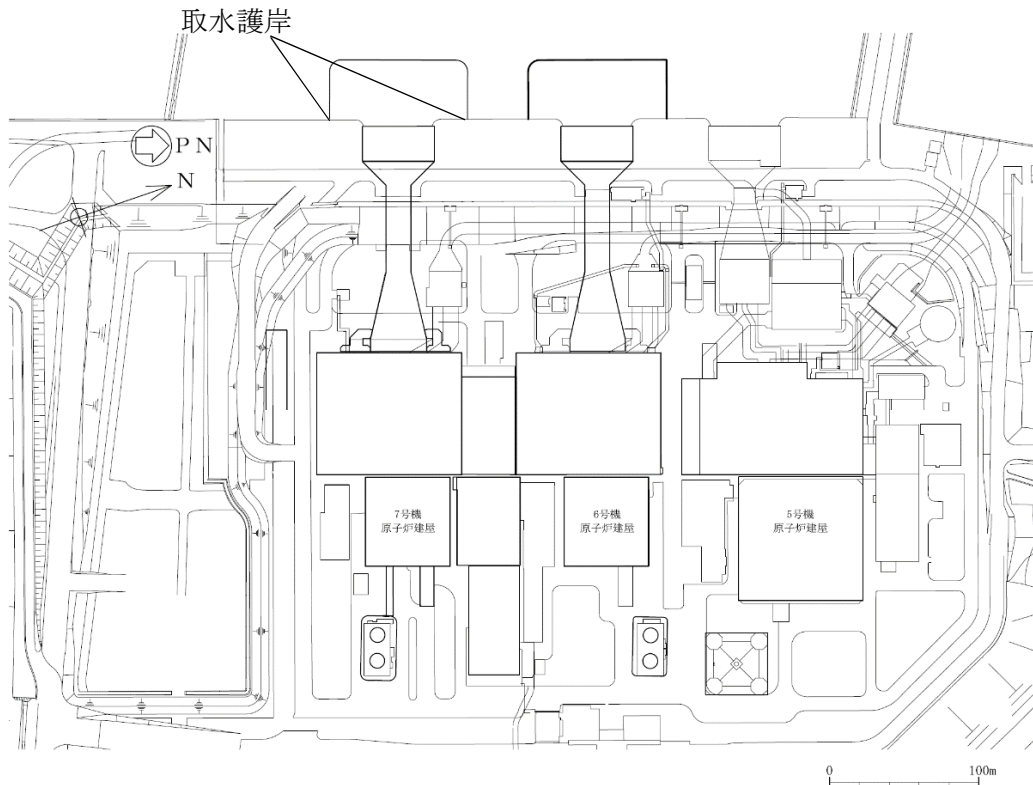


図2-1 (1) 取水護岸の位置図 (全体平面図)

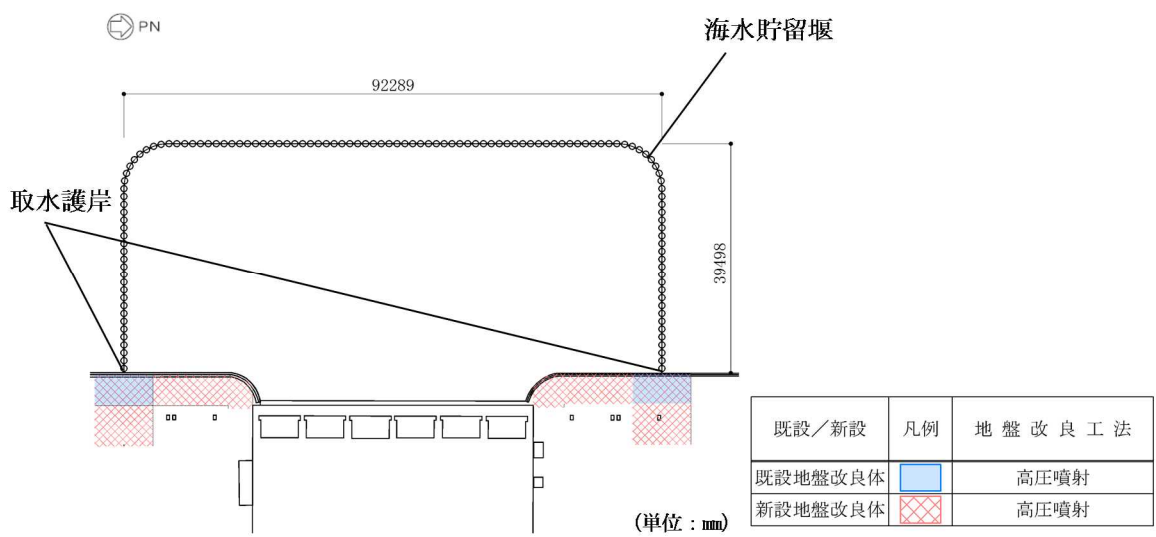


図2-1 (2) 取水護岸の位置図 (拡大図)

2.2 構造概要

取水護岸は、海水貯留堰の構成部材である取水護岸接続部のうち、止水ゴム取付部鋼材と接続する前面鋼矢板で構成される。前面鋼矢板には、海水による腐食防止のため、電気防食が施されている。

取水護岸の平面図を図 2-2 に、標準断面図を図 2-3 にそれぞれ示す。

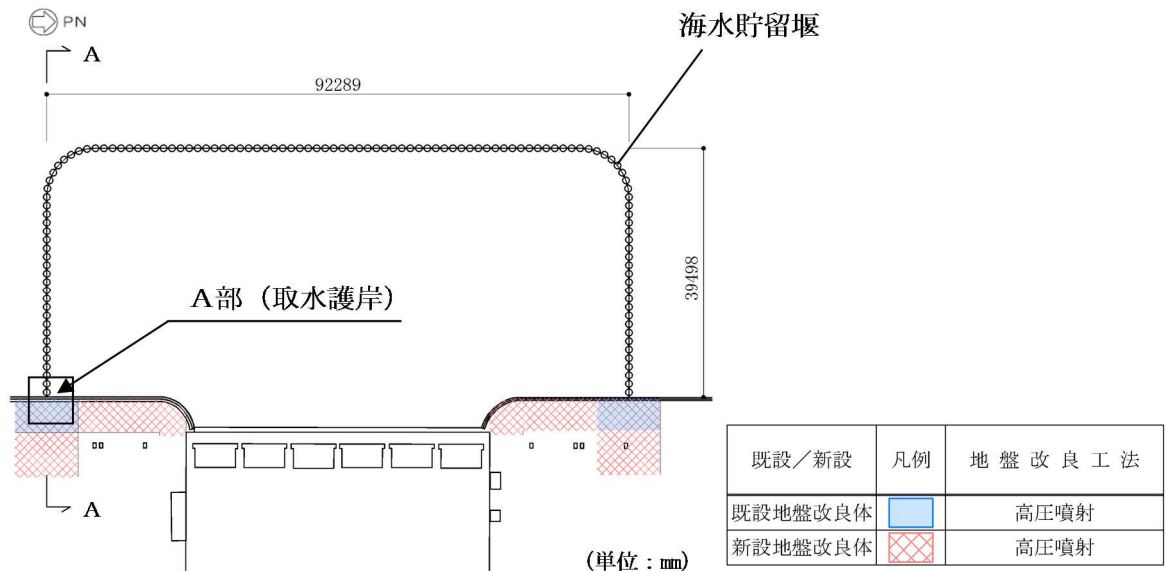


図 2-2 (1) 取水護岸の平面図

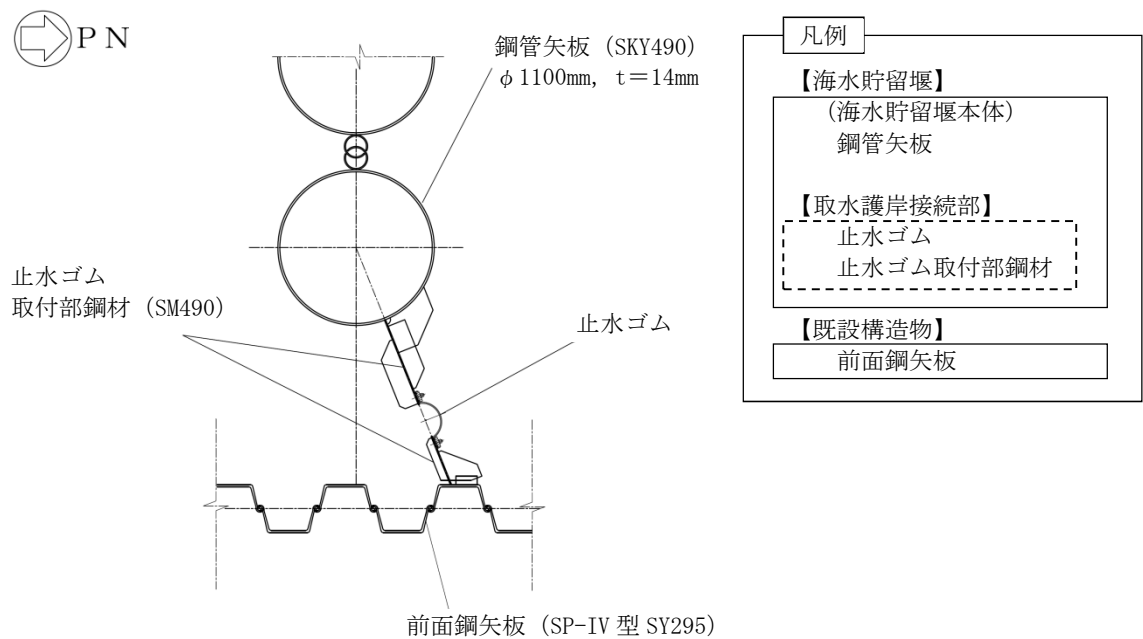


図 2-2 (2) 取水護岸の平面図 (A部拡大)

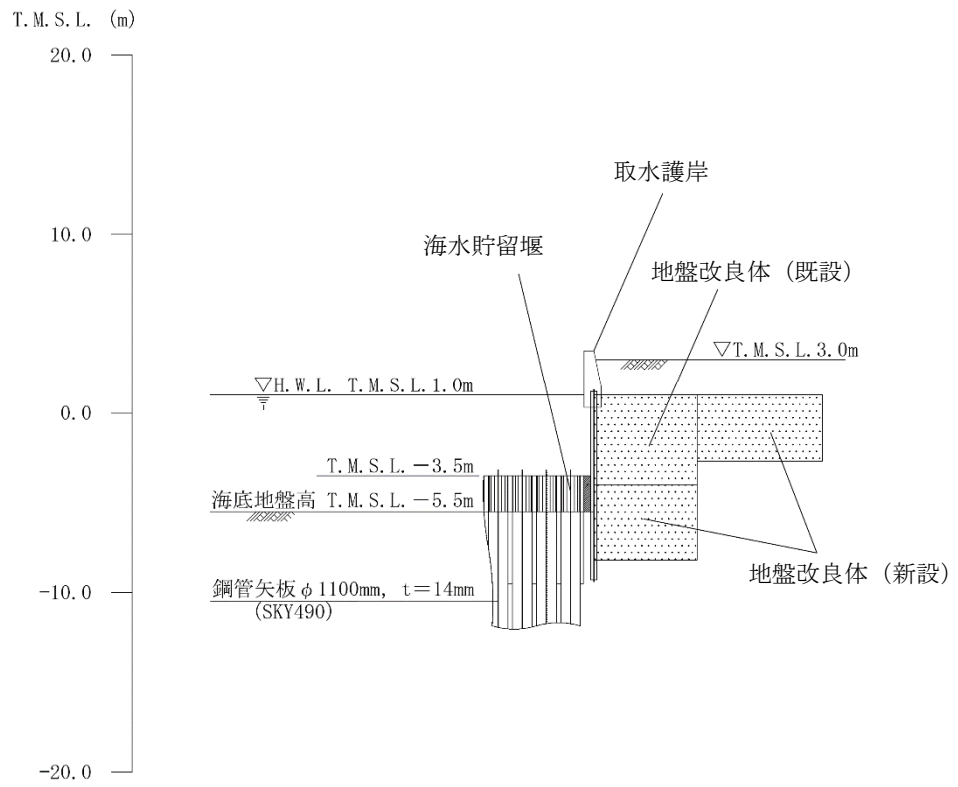


図 2-3 取水護岸の標準断面図 (A-A 断面)

2.3 評価方針

取水護岸は、設計基準対象施設においては、Sクラス施設である浸水防護施設及び非常用取水設備である屋外重要土木構造物の間接指示構造物に、重大事故等対処施設においては、常設重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備の間接支持構造物に分類される。

取水護岸の耐震評価は、地震応答解析の結果に基づき、表 2-1 に示すとおり、構造部材の健全性評価及び構造物の変形性評価を行う。

取水護岸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地盤剛性及び液状化強度特性は、地盤の代表性及び網羅性を踏まえた上で、ばらつき等を考慮して設定する。

構造部材の健全性評価及び構造物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。

構造部材の健全性評価については、前面鋼矢板に発生する曲げモーメントが許容限界以下であることを確認する。許容限界については、取水護岸がSクラス施設の間接支持構造物に分類されることから、全塑性モーメントによる確認が基本であるが、設計上の配慮として、降伏モーメントとする。

構造物の変形性評価については、前面鋼矢板及び海水貯留堰の変形量を算定し、海水貯留堰との離隔が確保されることを確認した許容限界以下であることを確認する。なお、海水貯留堰の変形量を考慮した止水ゴムの変形量についての照査は、V-2-10-3-1-2-1「海水貯留堰の耐震性についての計算書」及び、V-3-別添 3-1-2「海水貯留堰の強度計算書」において実施する。

取水護岸の耐震評価フローを図 2-4 に示す。

なお、取水護岸は、断面変化が無く直線状に設置される矢板構造物であり、強軸断面方向の曲げの影響はほとんど受けないことから、従来設計手法における評価対象断面以外の 3 次元的な応答特性が想定される箇所が無いことを確認した。

表 2-1 取水護岸の評価項目

評価方針	評価項目	部位	評価方法	許容限界
構造強度を有すること	構造部材の健全性	前面鋼矢板	発生応力が許容限界以下であることを確認	降伏モーメント
止水性を損なわないこと	構造物の変形性	前面鋼矢板	発生変形量が許容限界以下であることを確認	海水貯留堰との離隔が確保されることを確認した変形量

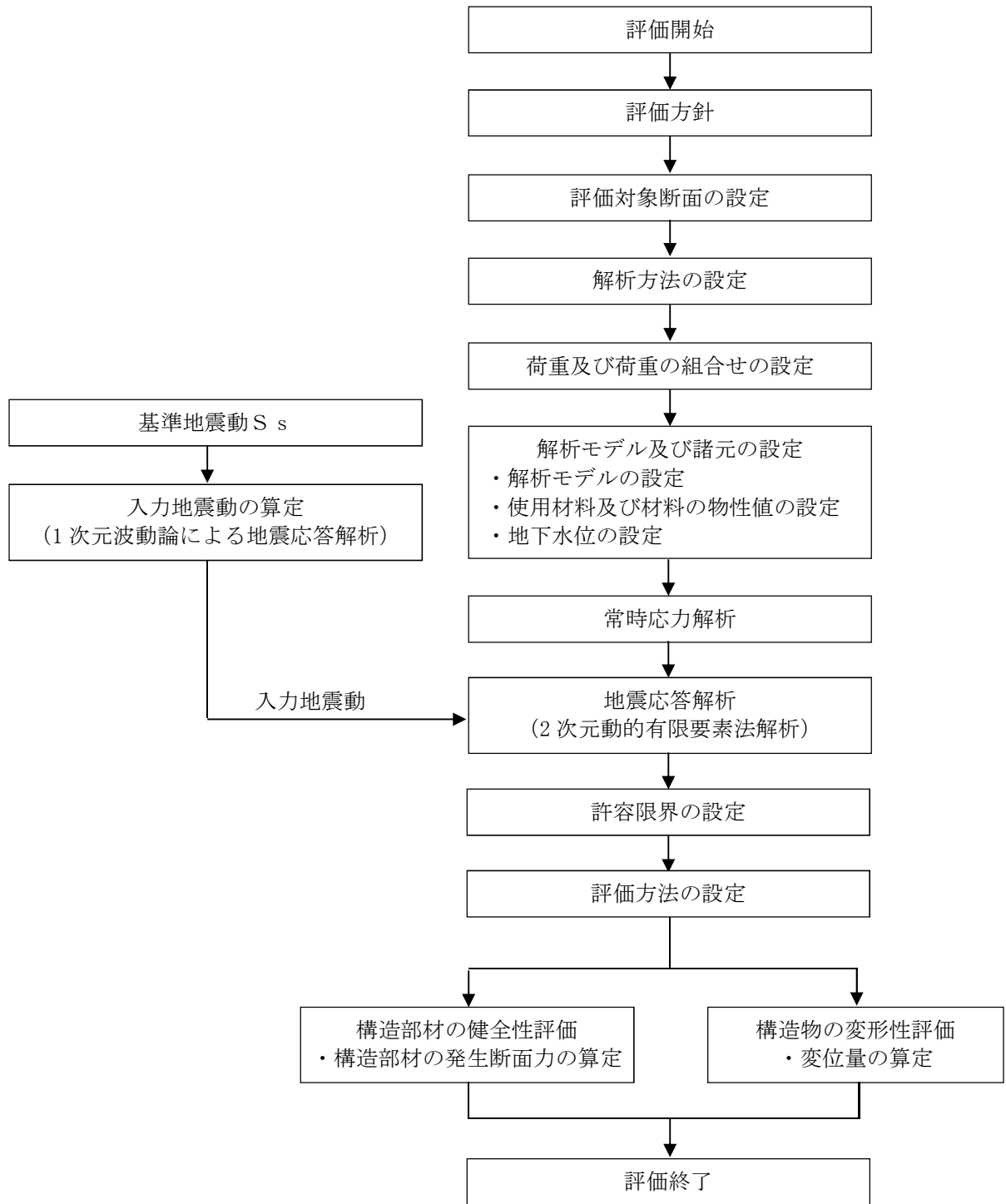


図 2-4 取水護岸の耐震評価フロー

2.4 適用基準

適用する規格，基準類を以下に示す。

- ・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)
- ・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)
- ・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)
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説 (国土交通省港湾局, 2007 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)
- ・鋼矢板 Q & A (鋼管杭・鋼矢板技術協会 平成 29 年 3 月)
- ・鋼矢板 設計から施工まで (鋼管杭協会, 平成 12 年 3 月)

3. 耐震評価

3.1 評価対象断面

評価対象断面は、取水護岸が海水貯留堰の間接支持構造物であることから、V-2-10-3-1-2-1「海水貯留堰の耐震性についての計算書」と同様とし、海水貯留堰との接続部を通る断面であるA-A断面を選定し、基準地震動 S_s による耐震評価を実施する。

取水護岸の評価対象断面位置図を図3-1に示す。構造物の耐震設計における評価対象断面は図3-1のA-A断面とする。評価対象断面図を図3-2に示す。

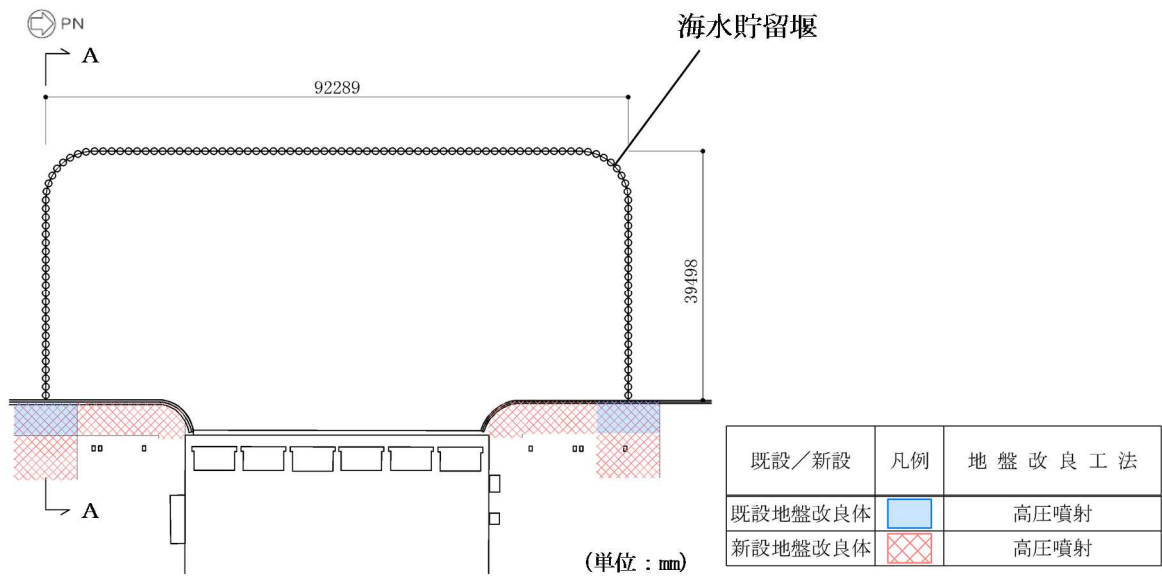


図3-1 取水護岸の評価対象断面位置図

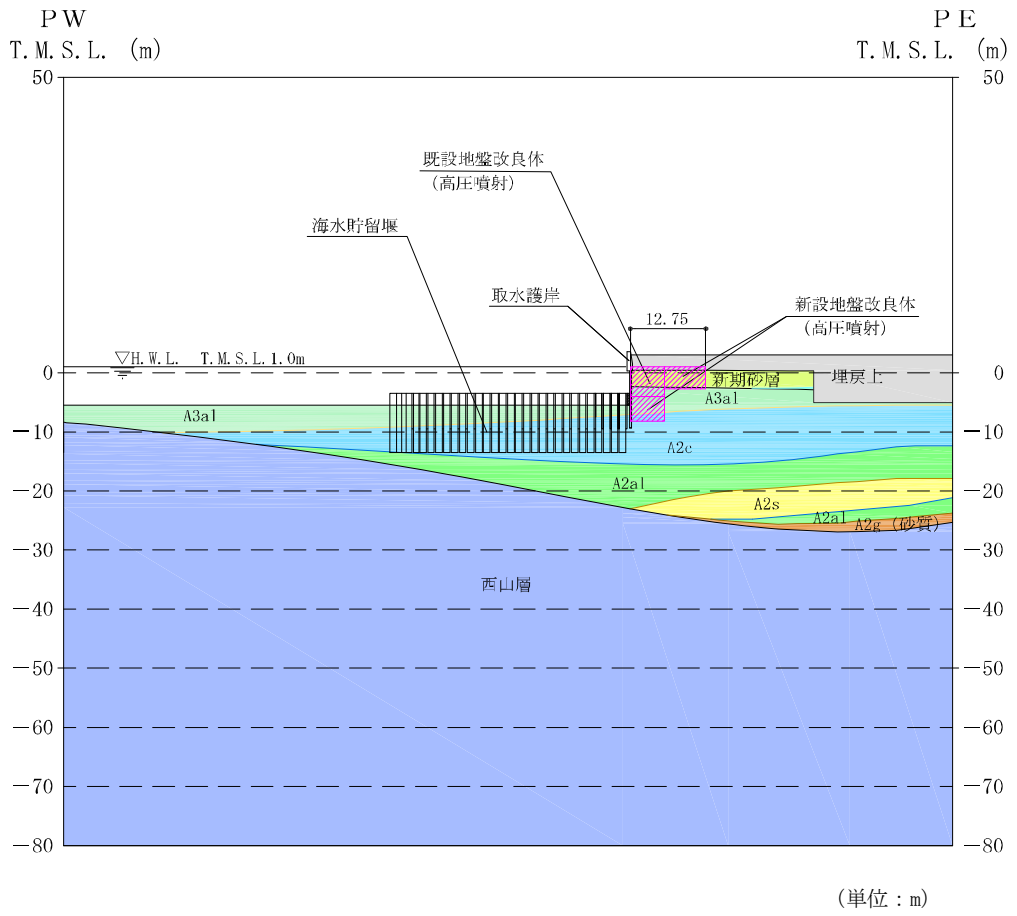


図 3-2 取水護岸の評価対象断面図 (A-A断面)

3.2 解析方法

取水護岸の地震応答解析は、V-2-1-6「地震応答解析の基本方針 2.3 屋外重要土木構造物」に示す解析方法及び解析モデルを踏まえて実施する。

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

地震応答解析については、解析コード「FLIP」を使用する。なお、解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3.2.1 構造部材

構造部材は、線形はり要素によりモデル化する。

3.2.2 地盤

地盤については、地盤の繰り返しせん断応力～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双曲線モデル（H-Dモデル）を用いる。

また、地盤剛性のばらつき及び地盤の液状化強度特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（①～⑤）を設定する。

表 3-1 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（+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	非液状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（+1 σ ）	地盤剛性（-1 σ ）	地盤剛性（平均値）	地盤剛性（+1 σ ）
液状化強度特性の設定	液状化強度特性（-1 σ ）	液状化強度特性（-1 σ ）	液状化強度特性（-1 σ ）	液状化パラメータを非適用	液状化パラメータを非適用

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検層の結果から得られる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（-1 σ ）にて設定する（解析ケース①、②、③）。

また、構造物への加速度応答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。

3.2.3 減衰定数

減衰特性は、柏崎刈羽原子力発電所における新潟県中越沖地震の地震記録を入力波とした再現解析等を踏まえ、Rayleigh 減衰として、 $\alpha = 0$ 、 $\beta = 0.005$ を設定する。

3.2.4 地震応答解析の解析ケースの選定

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。また、解析ケース①において、曲げモーメントに対する照査について、各照査値が最も厳しい地震動を用い、解析ケース②～⑤を実施する。最も厳しい照査値の選定は、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。なお、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。

3.3 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、V-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

取水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

発電用原子炉施設が運転状態にあり、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

積雪及び風による影響は考慮しない。

(4) 重大事故等時の状態

重大事故等時の状態の影響を受けないことから考慮しない。

3.3.2 荷重

取水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、躯体自重を考慮する。

(2) 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3-2に示す。

表3-2 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時 (S _s)	G + S _s

G : 固定荷重

S_s : 地震荷重

3.4 入力地震動

入力地震動は、V-2-1-6「地震応答解析の基本方針 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 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。

入力地震動算定の概念図を図 3-3 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図 3-4 に示す。入力地震動の算定には解析コード「S L O K」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、別紙「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

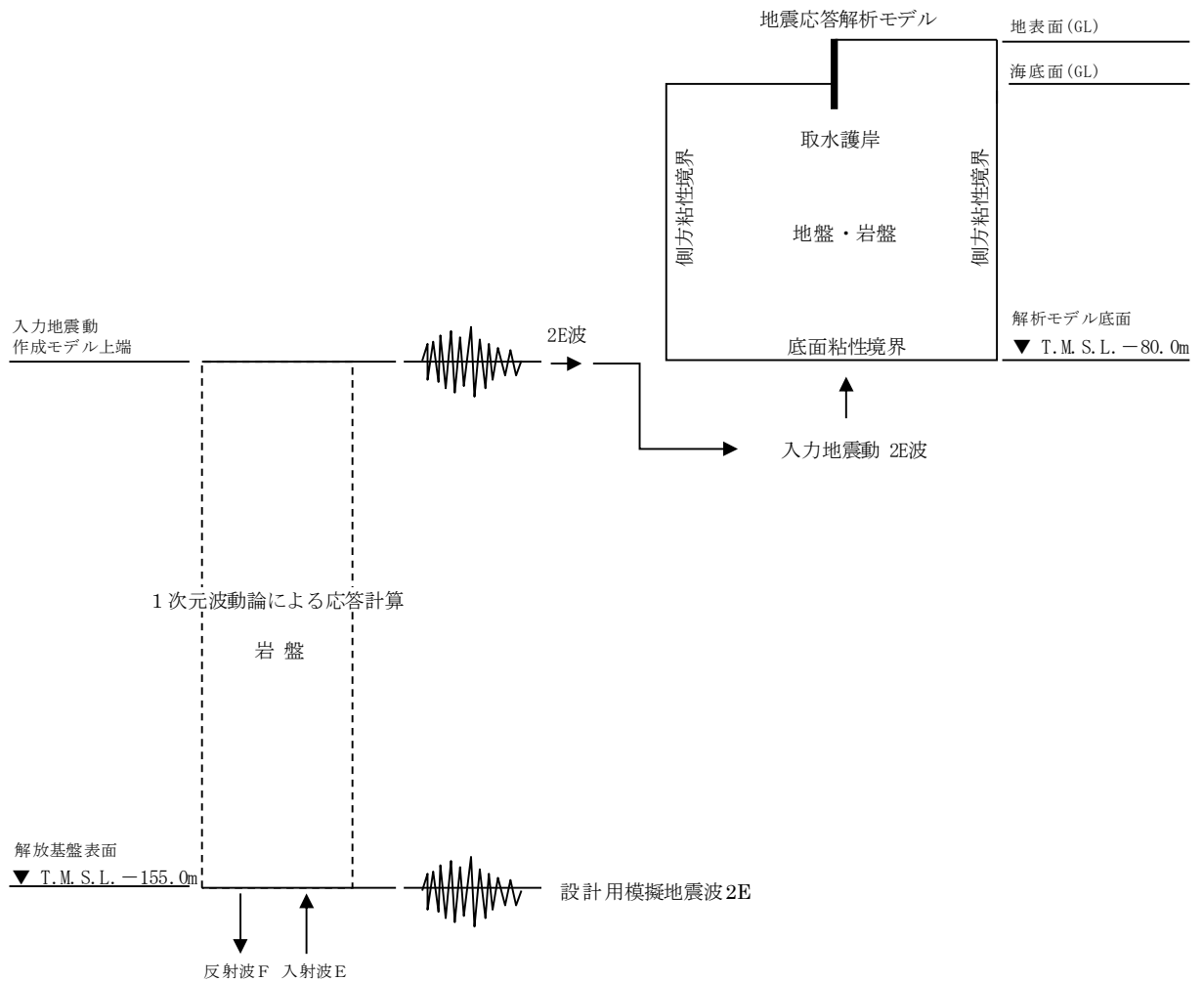
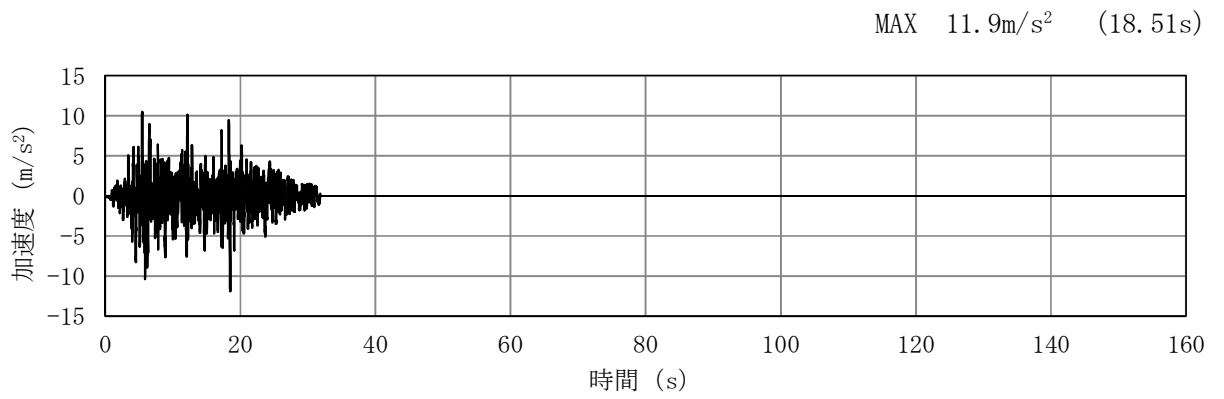
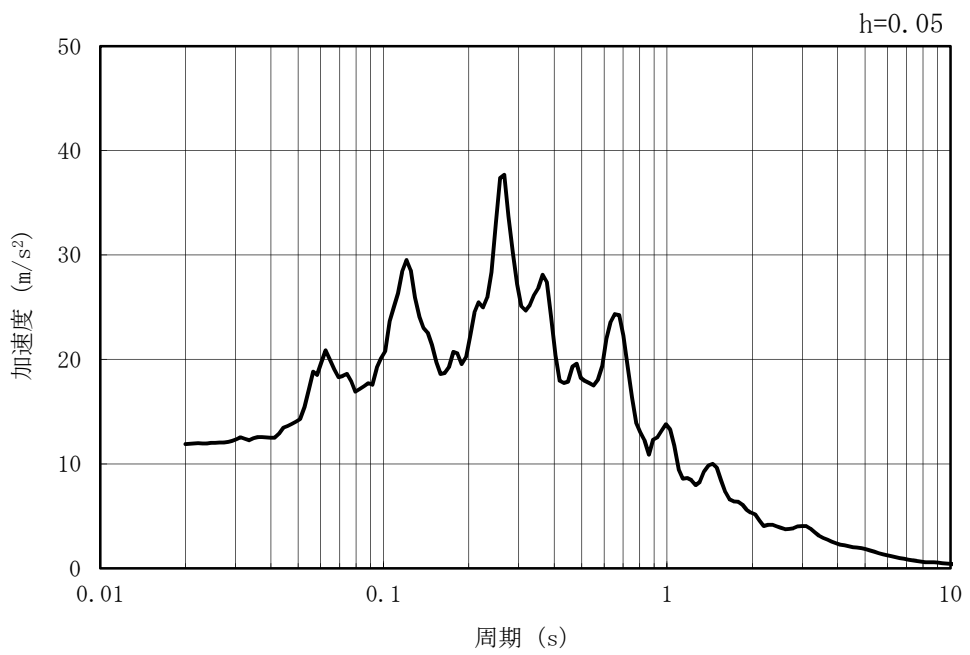


図 3-3 入力地震動算定の概念図

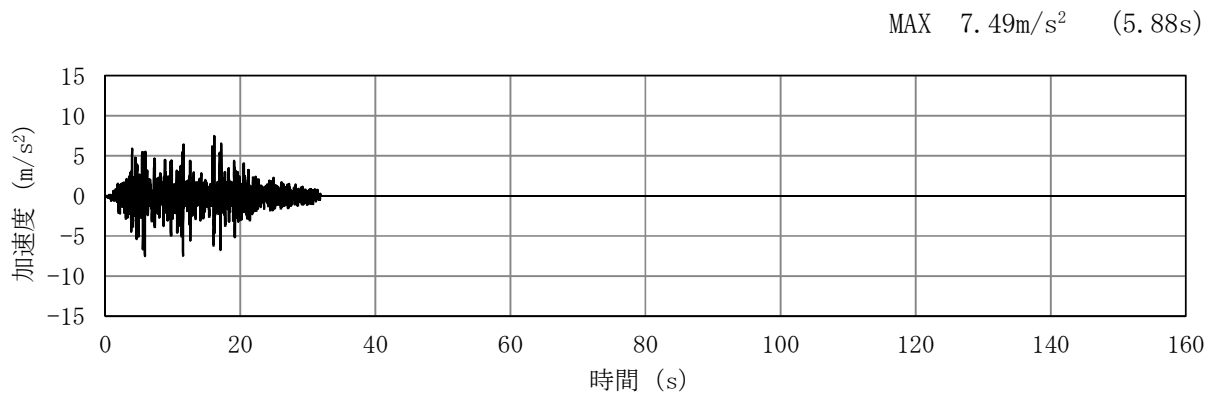


(a) 加速度時刻歴波形

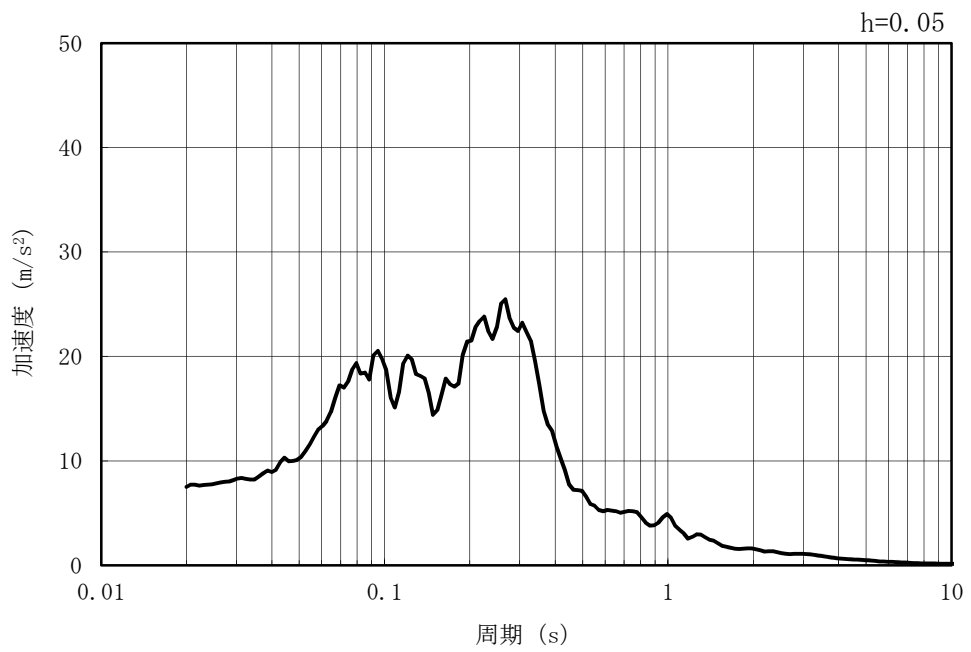


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(水平方向 : Ss-1)

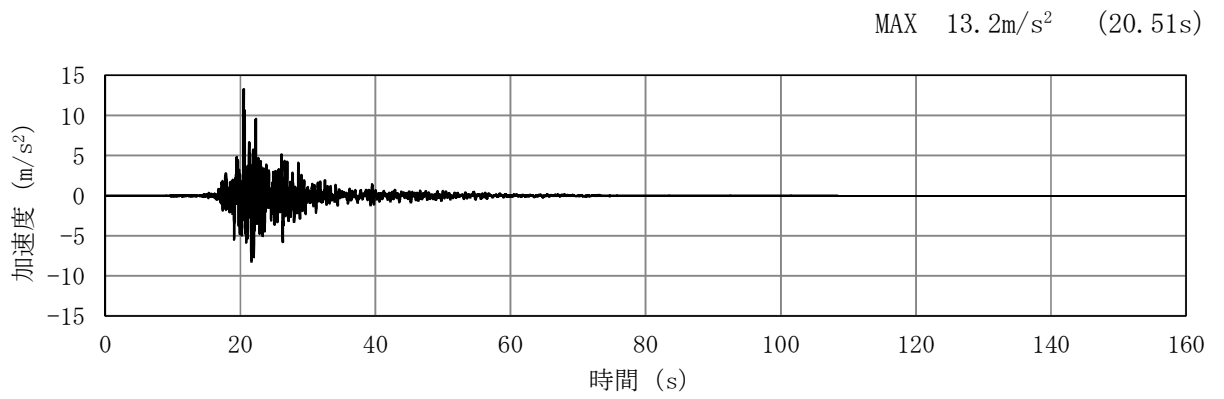


(a) 加速度時刻歴波形

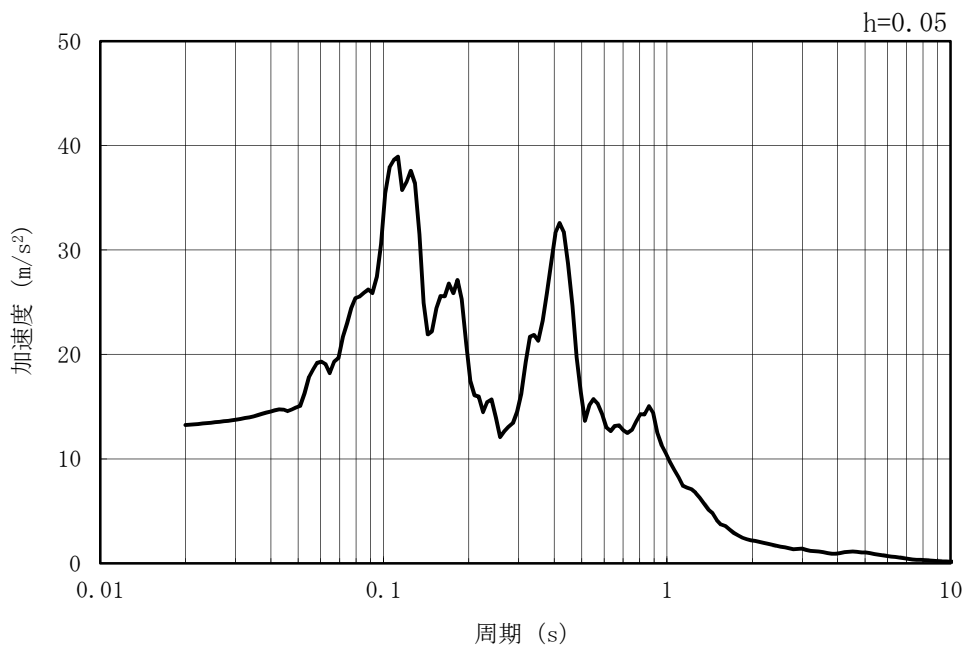


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(鉛直方向 : Ss-1)

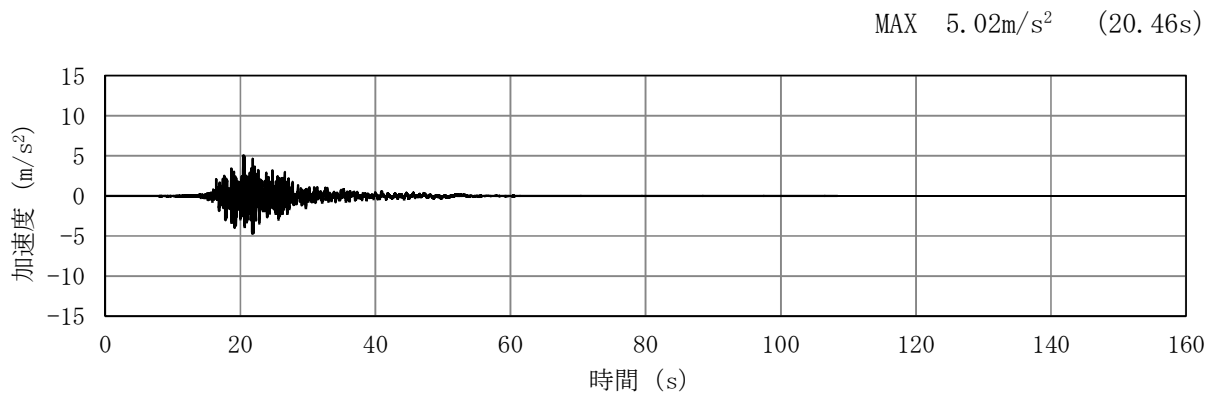


(a) 加速度時刻歴波形

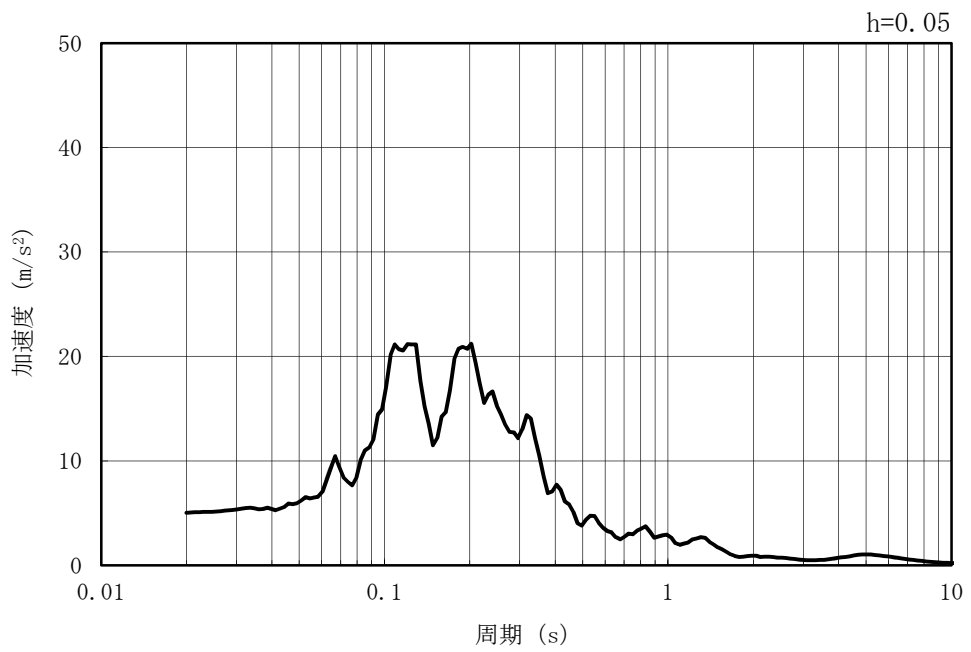


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (3) 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)

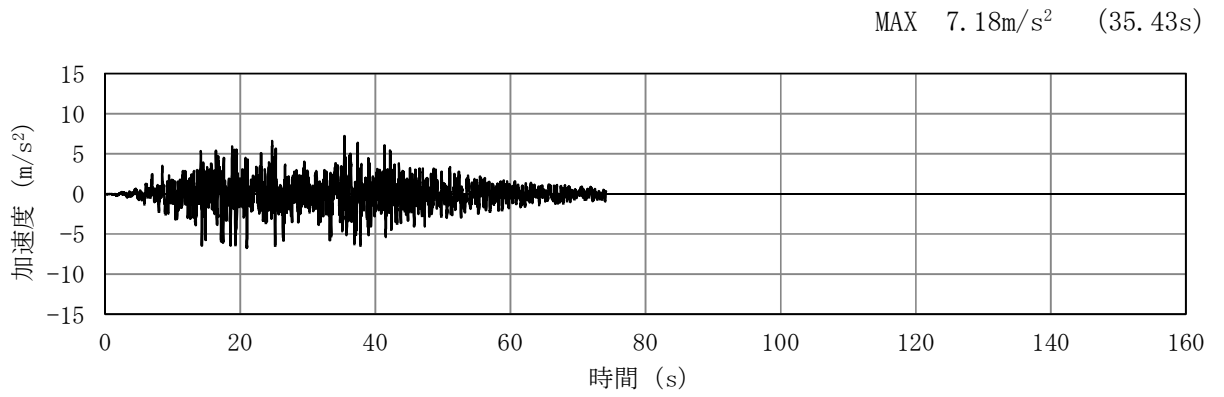


(a) 加速度時刻歴波形

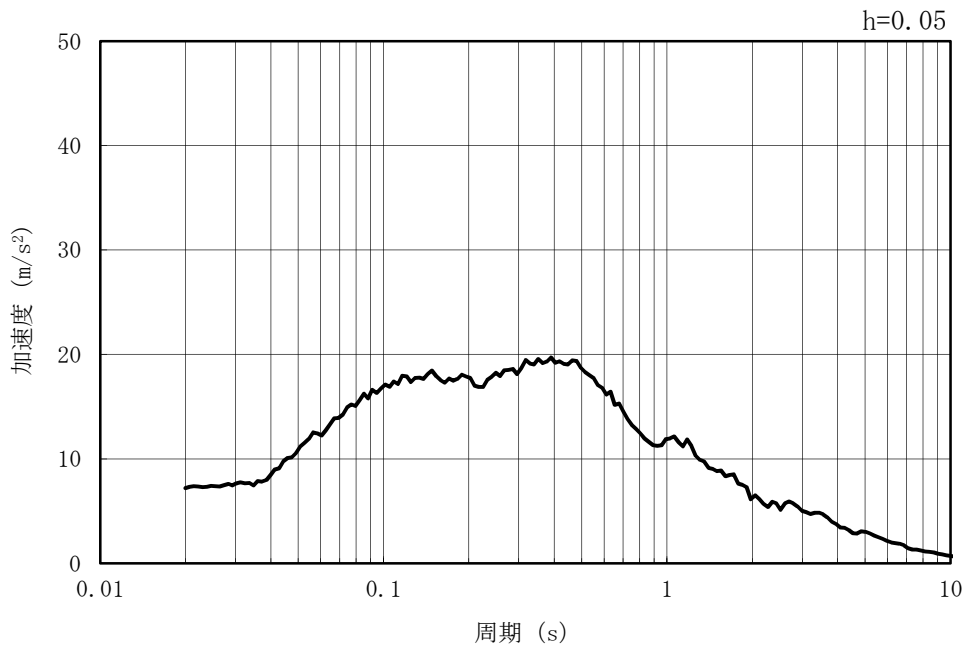


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(鉛直方向：Ss-2EW)

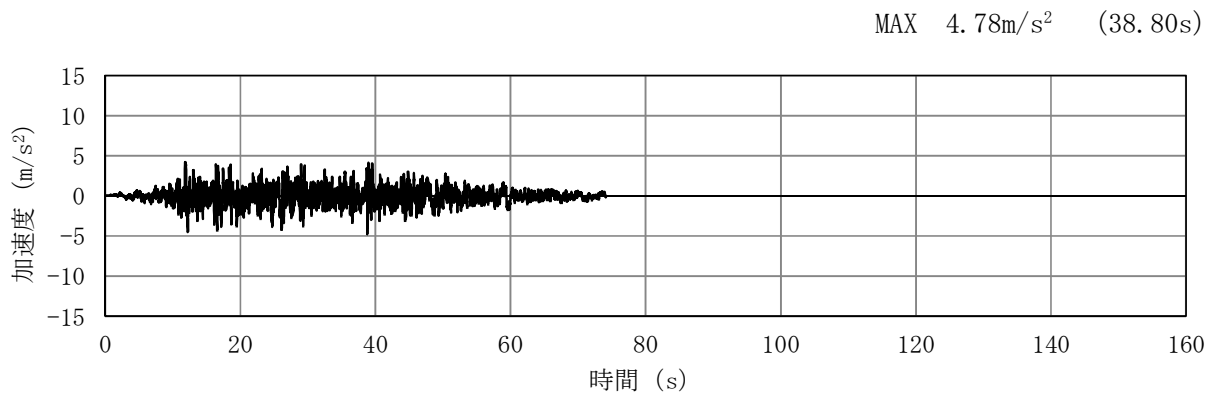


(a) 加速度時刻歴波形

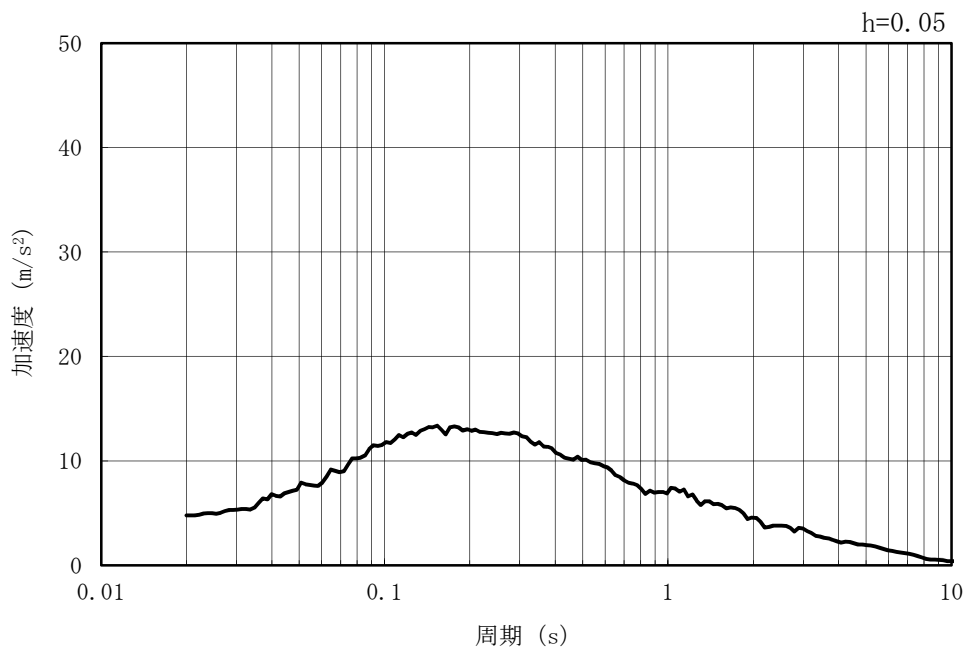


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(水平方向 : Ss-3)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(鉛直方向 : Ss-3)

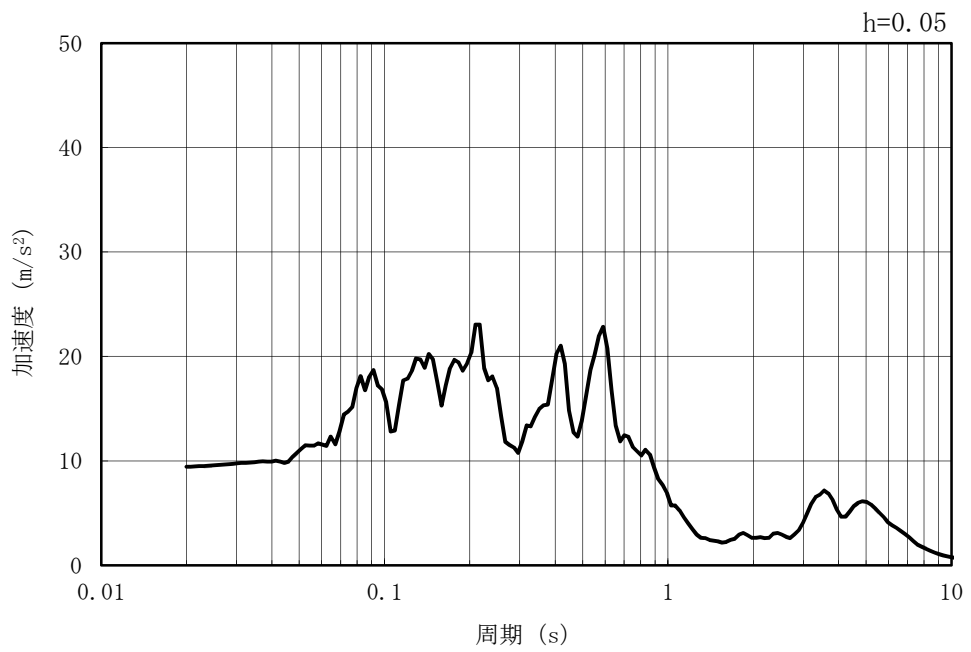
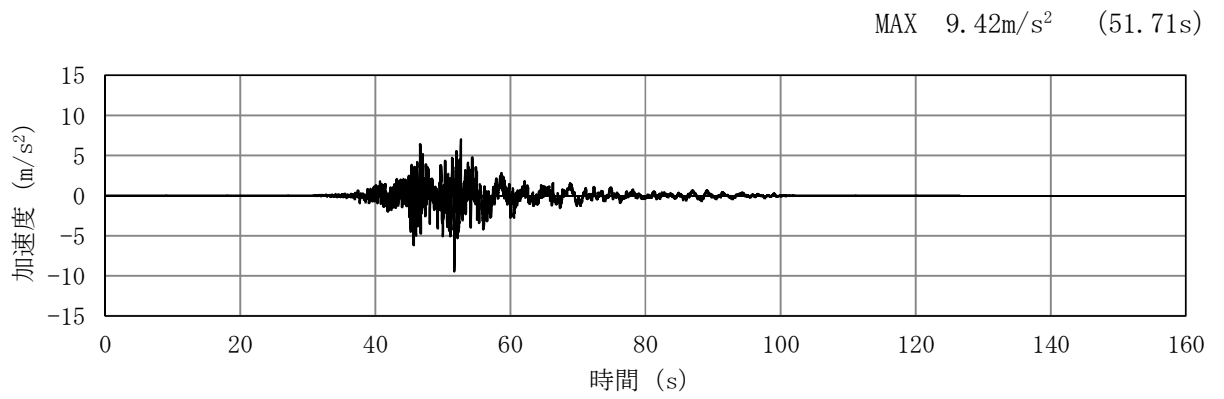
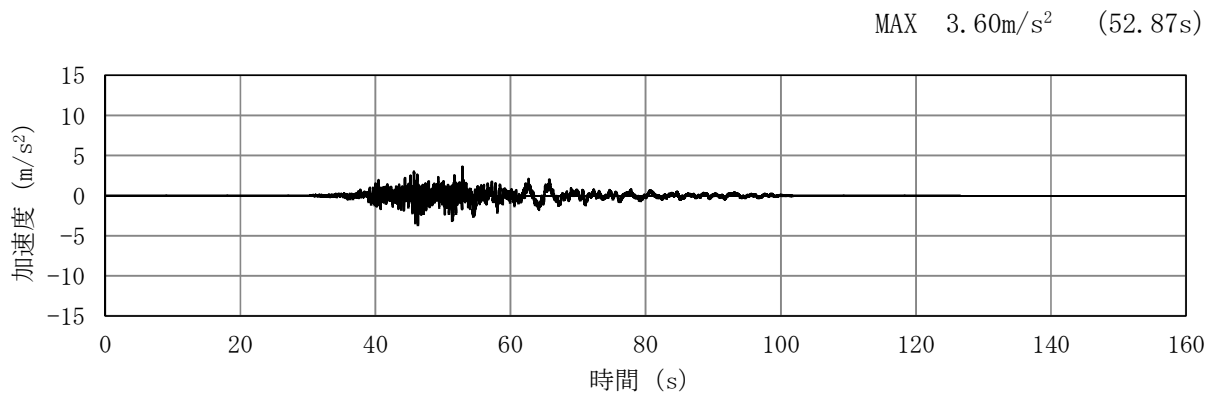
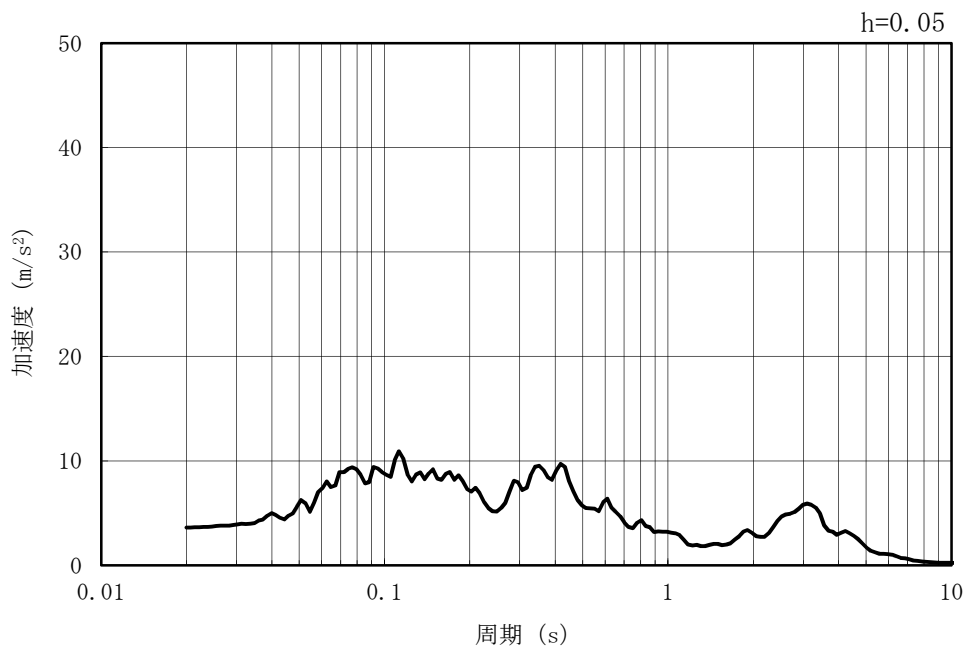


図 3-4 (7) 入力地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(水平方向 : Ss-4EW)

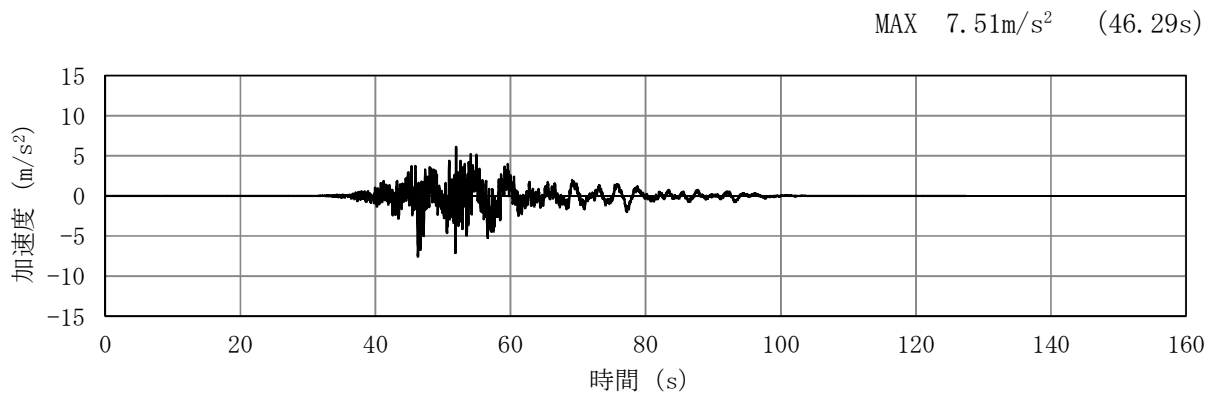


(a) 加速度時刻歴波形

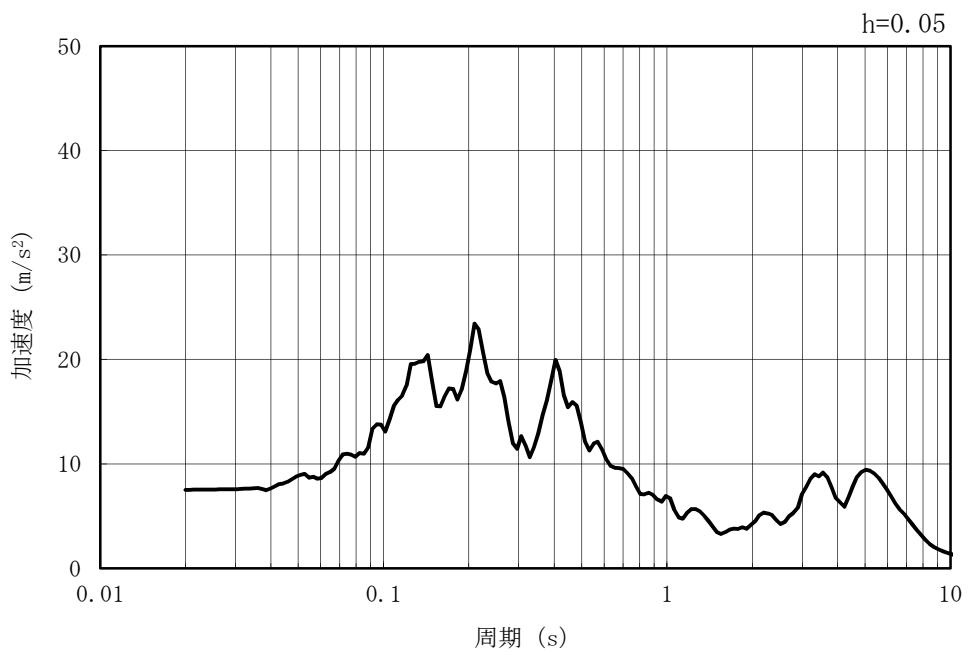


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(鉛直方向：Ss-4EW)

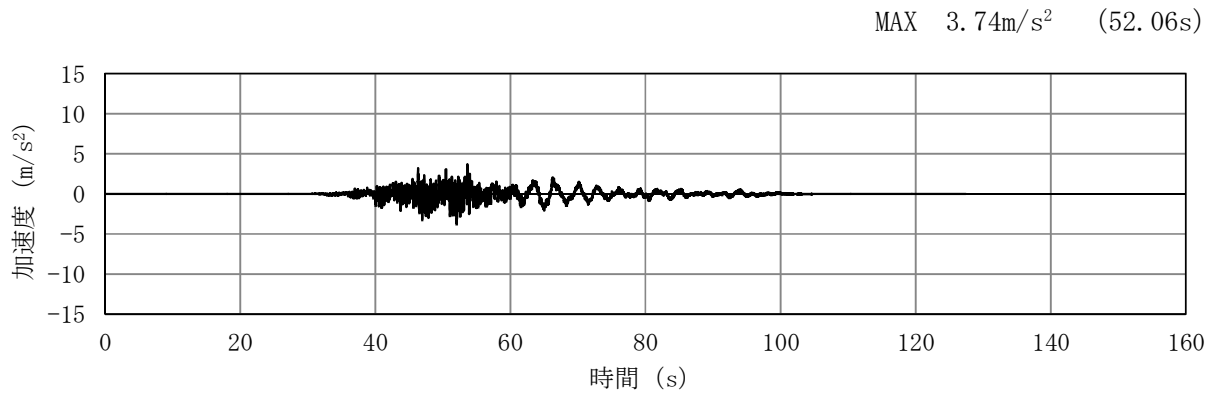


(a) 加速度時刻歴波形

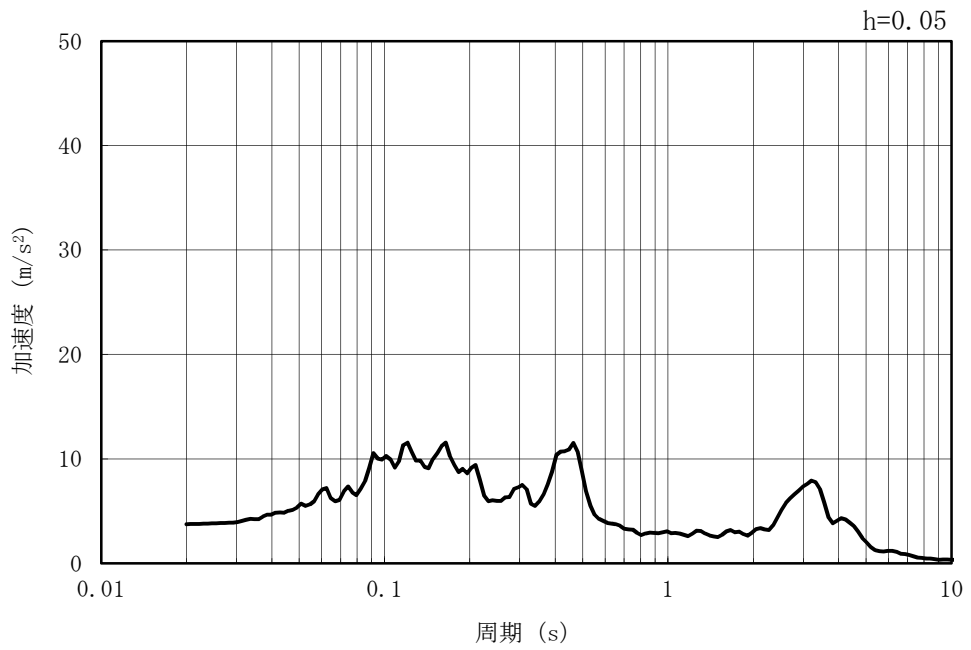


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(水平方向 : Ss-5EW)

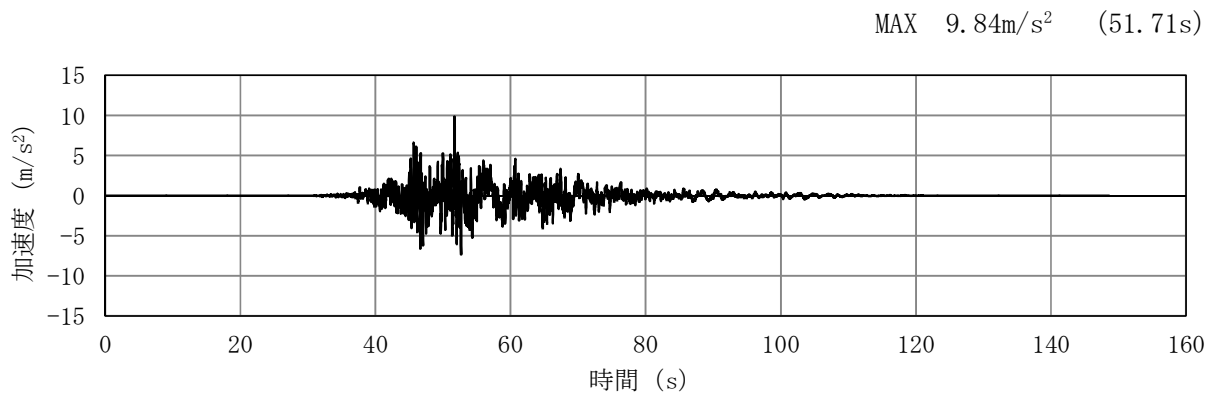


(a) 加速度時刻歴波形

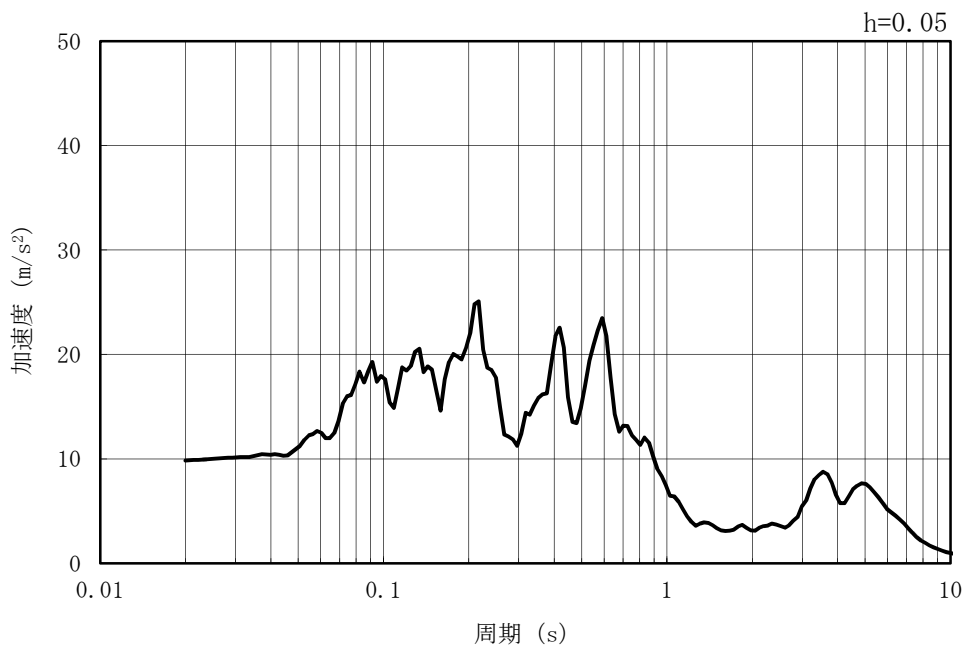


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(鉛直方向 : Ss-5EW)

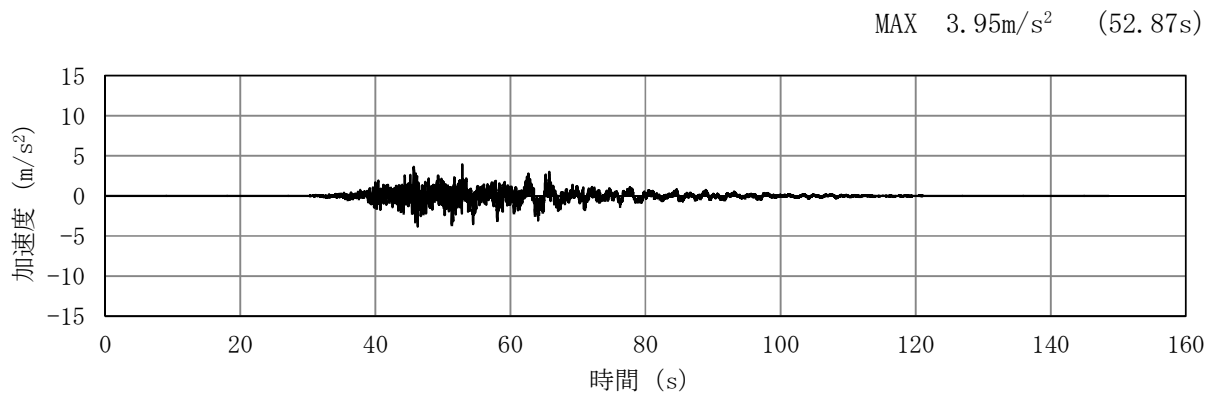


(a) 加速度時刻歴波形

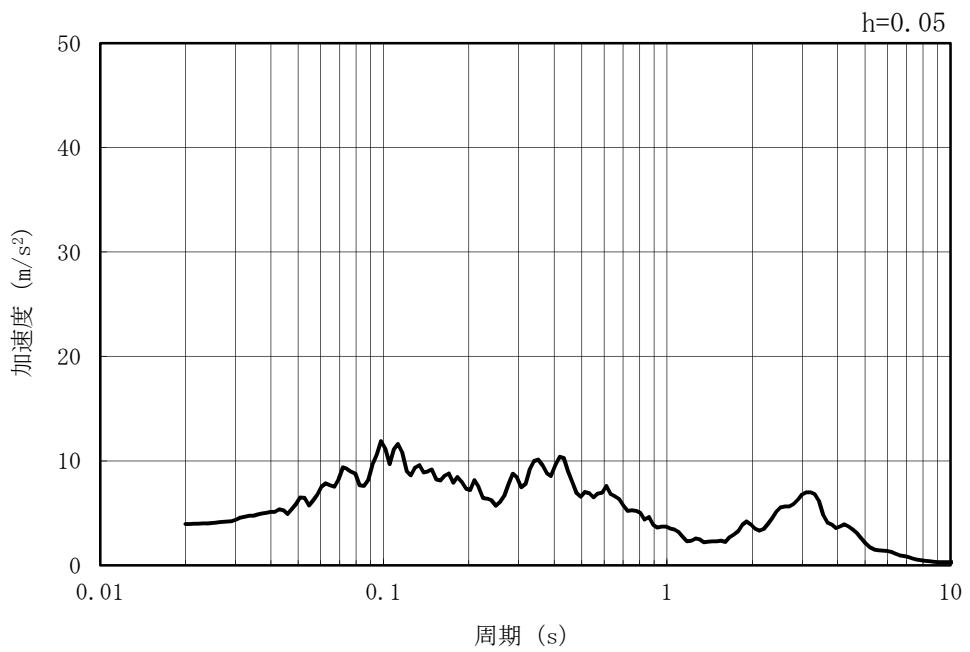


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(水平方向 : Ss-6EW)

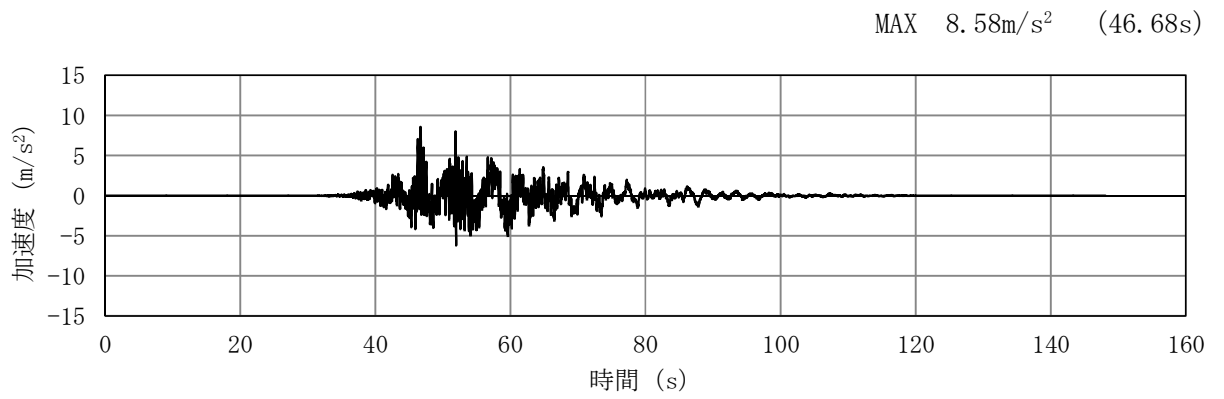


(a) 加速度時刻歴波形

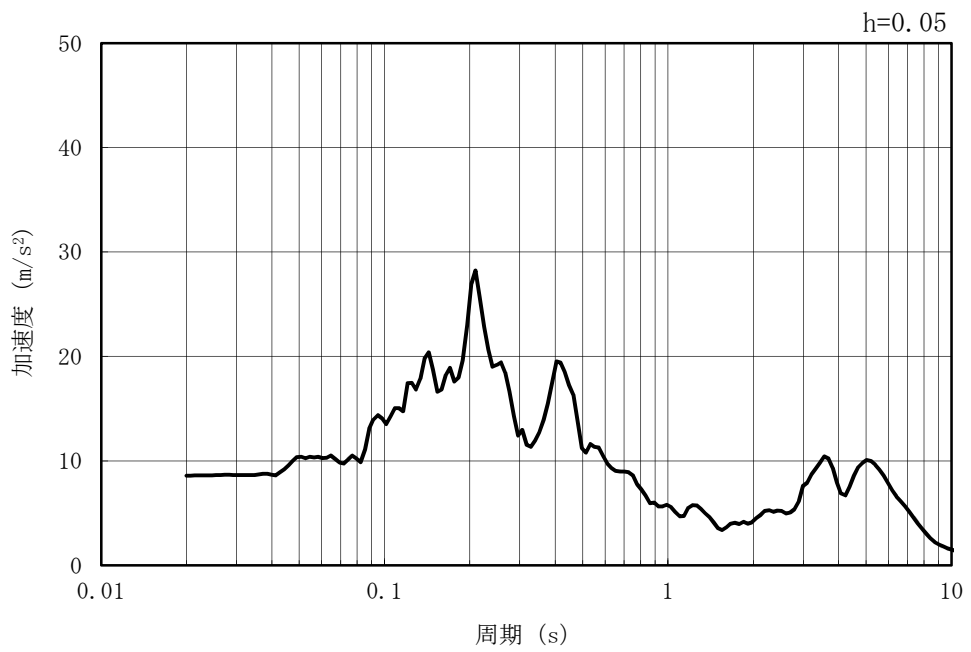


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(鉛直方向：Ss-6EW)

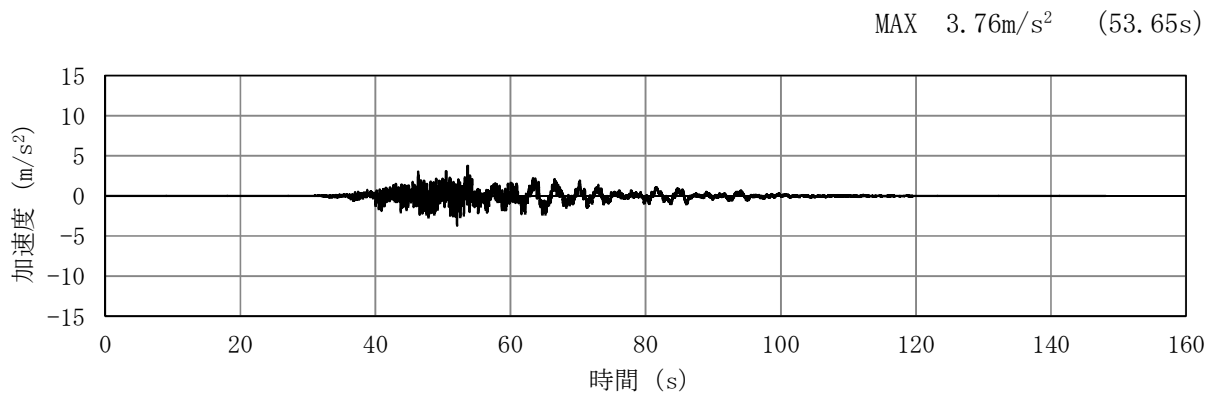


(a) 加速度時刻歴波形

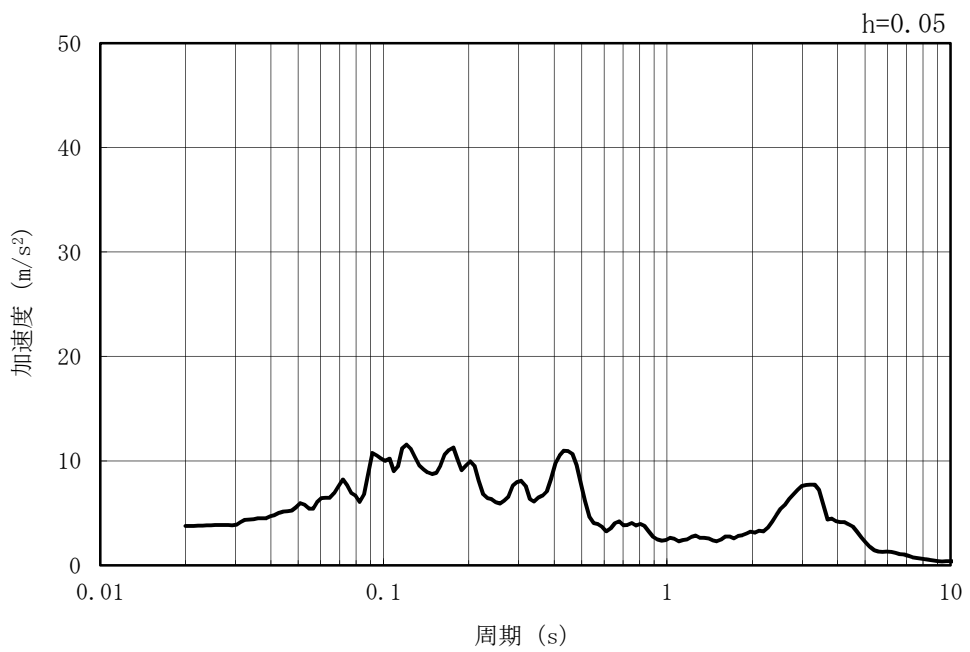


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(水平方向 : Ss-7EW)

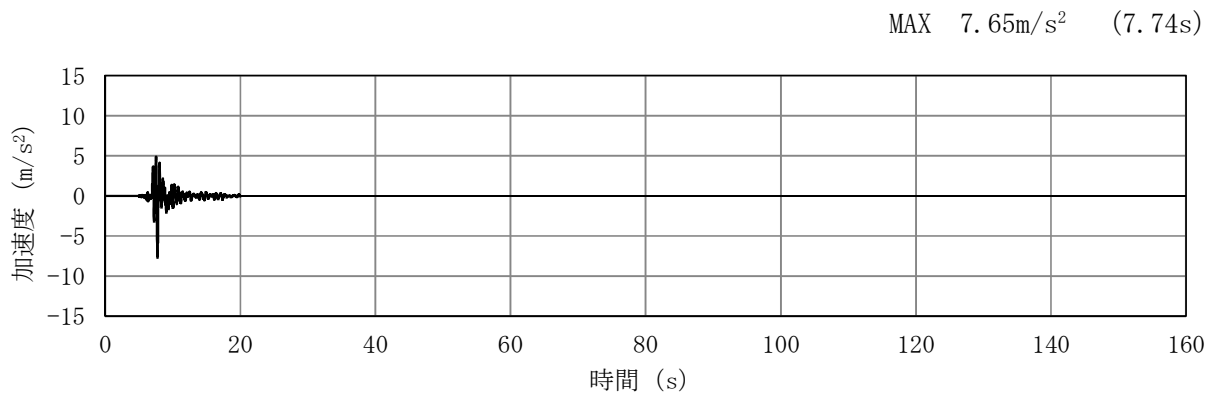


(a) 加速度時刻歴波形

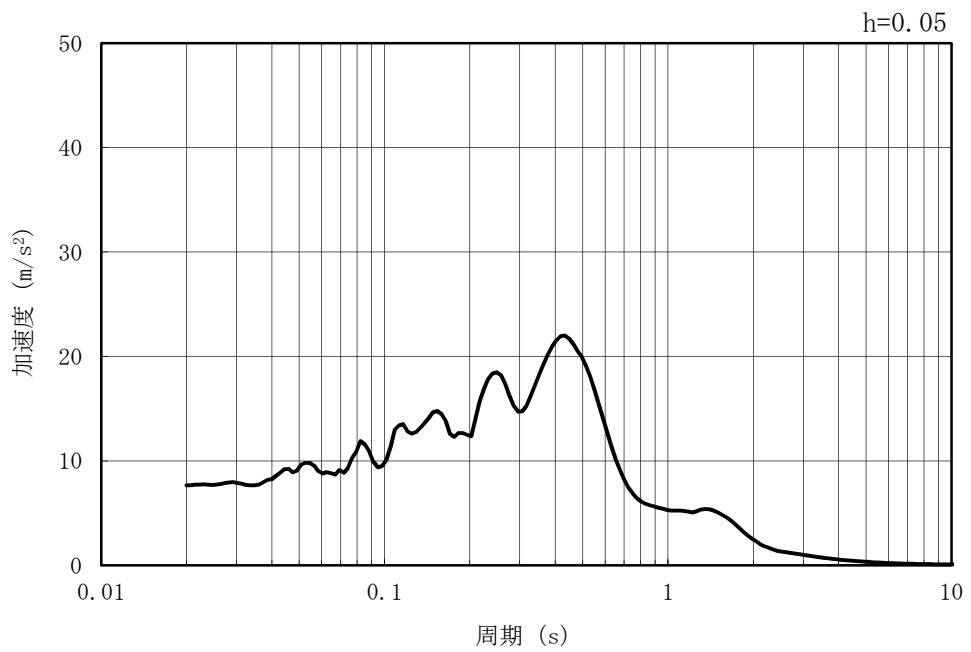


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(鉛直方向 : Ss-7EW)

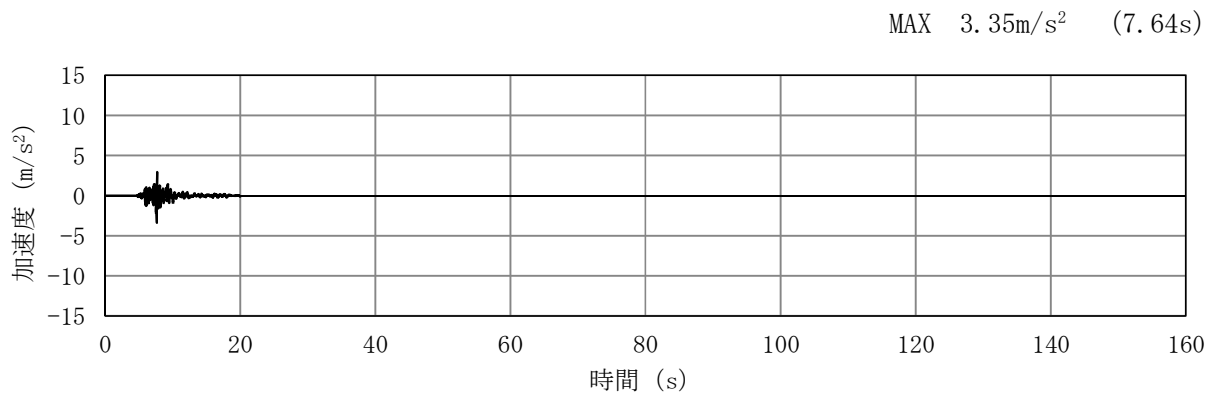


(a) 加速度時刻歴波形

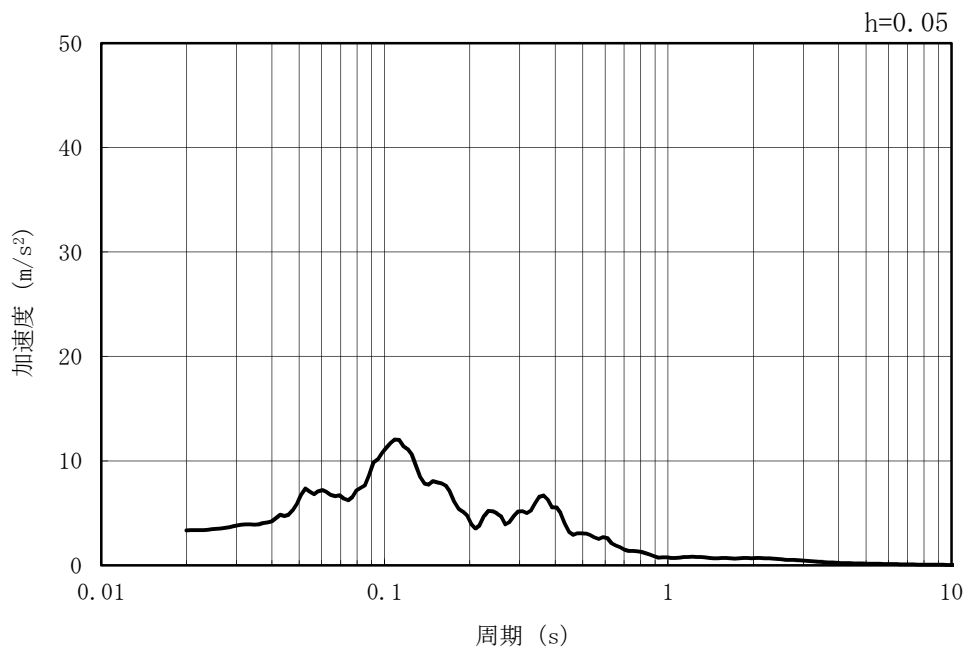


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(水平方向 : Ss-8)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 3-4 (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
(鉛直方向 : Ss-8)

3.5 解析モデル及び諸元

3.5.1 解析モデル

取水護岸の地震応答解析モデルを図 3-5 に示す。

(1) 解析領域

解析領域は、側方境界及び底面境界が、構造物の応答に影響しないよう、構造物と側方境界及び底面境界との距離を十分に大きく設定する。

(2) 境界条件

解析領域の側方及び底面には、エネルギーの逸散効果を考慮するため、粘性境界を設ける。

(3) 構造物のモデル化

構造部材は、線形はり要素によりモデル化する。

(4) 地盤のモデル化

地盤は、マルチスプリング要素及び間隙水要素によりモデル化し、地震時の有効応力の変化に応じた非線形せん断応力～せん断ひずみ関係を考慮する。

(5) 地盤改良体のモデル化

構造物周辺の地盤改良体は、マルチスプリング要素及び間隙水要素によりモデル化する。

(6) ジョイント要素の設定

地震時の「地盤と構造物」及び「地盤と地盤改良体」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。

(7) 杭-地盤相互作用ばねの設定

地震時の地盤と杭の接合面における相互作用の 3 次元効果を 2 次元モデルで考慮するため、地盤と杭の接合面に杭-地盤相互作用ばねを設定する。

(8) 杭先端ばねの設定

地震時の杭先端における地盤と杭の相互作用を考慮するため、杭先端と地盤間に杭先端ばねを設定する。

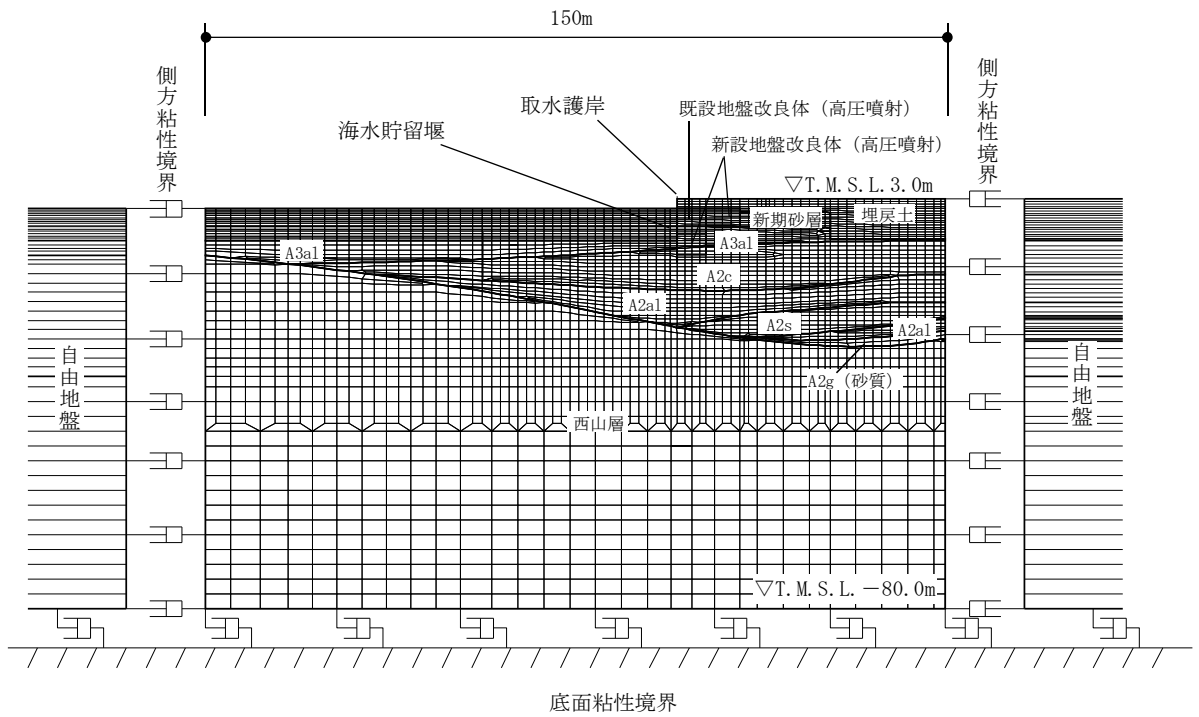


図 3-5 取水護岸の地震応答解析モデル (A-A断面)

3.5.2 使用材料及び材料の物性値

耐震評価に用いる使用材料を表 3-3 に、材料の物性値を表 3-4 に示す。

表 3-3 使用材料

材料	諸元	腐食代	
		海側（海底面以浅）	2.0mm
前面鋼矢板	S P -IV型 (SY295), t=15.5mm	海側（海底面以深）	0.2mm
		陸側	0.2mm
		1.0mm	
鋼管矢板	φ 1100mm (SKY490), t=14mm		

表 3-4 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
前面鋼矢板	77.0	2.0×10 ⁵	0.3
鋼管矢板	77.0	2.0×10 ⁵	0.3

3.5.3 地盤及び地盤改良体の物性値

地盤の解析用物性値は、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。地盤改良体については、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に基づき、地盤改良体の配置を考慮した物性値を設定する。地盤改良体の配置を考慮した物性値を表 3-5 に示す。

表 3-5 地盤改良体の配置を考慮した物性値

既設/新設		既設 地盤改良体	新設地盤改良体	
種別 (地盤種別)		高圧噴射 (砂質土)	高圧噴射 (砂質土)	高圧噴射 (粘性土)
物理特性	密度 ρ (g/cm ³)	1.77	1.94~1.96*	1.81
	間隙率 n	0.49	0.49	0.64
変形特性	動せん断弾性係数 G_{ms} (kN/m ²)	1.78×10 ⁶	5.54×10 ⁵	5.18×10 ⁵
	基準平均有効拘束圧 σ_{ms}' (kN/m ²)	98.0	98.0	98.0
	ポアソン比 ν	0.33	0.33	0.33
	減衰定数の上限値 h_{max}	0.05	0.05	0.05
強度特性	粘着力 c (kN/m ²)	815	397	397

注記*：地盤改良体の配置に応じて設定。

3.5.4 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、地表面(T. M. S. L. 3.0m)として設定する。

3.6 評価対象部位

評価対象部位は、取水護岸の構造上の特徴を踏まえて設定する。

3.6.1 構造部材の健全性評価

構造部材の健全性評価に係る評価対象部位は、前面鋼矢板とする。

3.6.2 構造物の変形性評価

構造物の変形性評価に係る評価対象部位は、前面鋼矢板とする。

3.7 許容限界

許容限界は、V-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき設定する。

3.7.1 構造部材の健全性に対する許容限界

前面鋼矢板の許容限界は、「鋼矢板Q&A（鋼管杭・鋼矢板技術協会 平成29年3月）」及び「鋼矢板 設計から施工まで（鋼管杭協会 平成12年3月）」に基づき設定する。許容限界を表3-6に示す。

表3-6 前面鋼矢板の許容限界

項目	対象	許容限界 (kN・m)
降伏モーメント M_y	海底面以浅	555
	海底面以深	649

3.7.2 構造物の変形性に対する許容限界

変形量の許容限界は、取水護岸と海水貯留堰との離隔が確保されることを確認した変形量とする。前面鋼矢板の変形量の許容限界を表3-7に示す。

表3-7 前面鋼矢板の変形量の許容限界

項目	許容限界 (cm)
変形量（海水貯留堰との離隔を確保できる相対変位量）	24.0

3.8 評価方法

取水護岸の耐震評価は、地震応答解析により算定した全時刻歴の照査用応答値が、「3.7 許容限界」において設定した許容限界以下であることを確認する。

3.8.1 構造部材の健全性評価

前面鋼矢板の曲げモーメントに対する照査については、地震応答解析により算定した曲げモーメントが許容限界以下であることを確認する。

曲げモーメント照査における最大照査値の評価時刻での断面力を図3-6に示す。

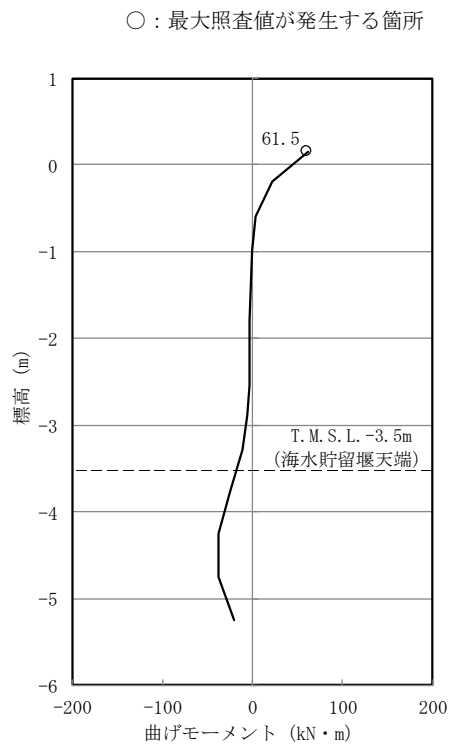


図3-6 (1) 前面鋼矢板(海底面以浅)の曲げモーメント照査における
最大照査値の評価時刻での断面力

(Ss-1+-, t=5.38s)

(検討ケース③：地盤物性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース)

○ : 最大照査値が発生する箇所

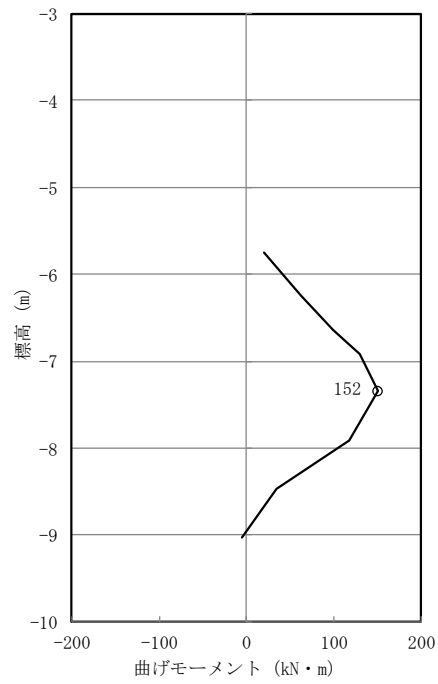


図 3-6 (2) 前面鋼矢板(海底面以深)の曲げモーメント照査における
最大照査値の評価時刻での断面力

(Ss-1+-, t=5.43s)

(検討ケース③: 地盤物性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース)

3.8.2 構造物の変形性評価

(1) 相対変位の考え方

構造物の変形性評価に用いる相対変位は、地震時における相対変位の最大値とする。

(2) 評価方法

変位方向の定義を示した図 3-7 のうち、取水護岸と海水貯留堰の水平方向の相対変位量 $\delta_x (+)$ が許容限界以下であることを確認する。

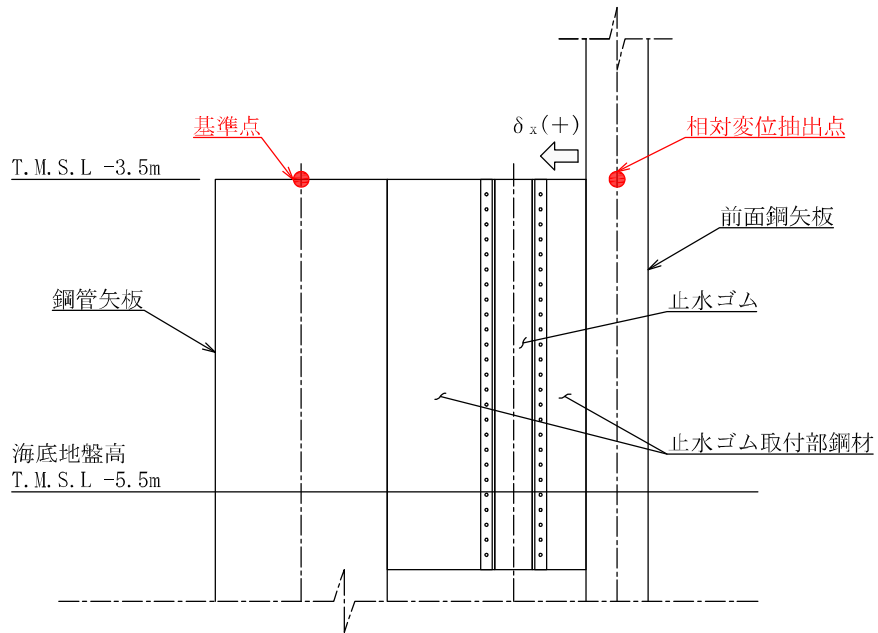


図 3-7 変位方向の定義

4. 耐震評価結果

4.1 構造部材の健全性に対する評価結果

前面鋼矢板の曲げモーメント照査における最大照査値を表 4-1 に示す。前面鋼矢板に発生する曲げモーメントは許容限界以下であり、照査値に大きく余裕があることを確認した。

表 4-1 前面鋼矢板の曲げモーメント照査における最大照査値

対象	解析 ケース	地震動	曲げモーメント (kN・m)	降伏モーメント (kN・m)	照査値
海底面以浅	③	Ss-1+-	61.5	555	0.12
海底面以深	③	Ss-1+-	152	649	0.24

4.2 構造物の変形性に対する評価結果

構造物の変形性評価結果を表 4-2 に示す。取水護岸と海水貯留堰との最大水平相対変位が許容限界以下であることを確認した。

表 4-2 変形性評価結果

解析 ケース	地震動	最大水平相対変位 (cm)	許容限界値 (cm)
①	Ss-7	3.6	24.0