

2. 取水構造物の耐震安全性評価

2.1 評価方法

取水構造物は、Sクラス設備である非常用海水ポンプ、取水路点検用開口部浸水防止蓋、海水ポンプグラウンド dren 排出口逆止弁、取水ピット空気抜き配管逆止弁、潮位計、取水ピット水位計等を間接支持する機能を求められる土木構造物である。また、取水構造物は非常用取水設備であり、通水性能及び貯水性能が要求される。取水構造物について基準地震動 S_s による耐震安全性評価として、構造部材の曲げ、せん断評価及び地盤の支持性能評価を実施する。

構造部材の曲げ、せん断評価については地震応答解析に基づく発生応力又は発生せん断力が許容限界を超えないことを確認する。基礎地盤の支持性能評価については、地震応答解析に基づく最大接地圧が許容限界以下であることを確認する。

2.2 評価条件

2.2.1 適用基準

取水構造物の耐震評価にあたっては、原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1 -1987 ((社) 日本電気協会)、コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] ((社) 土木学会、2002 年制定) 等に準拠するが、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 ((社) 土木学会、2005 年) (以下、「土木学会マニュアル」という。) を参考とする。また、鋼管杭の曲げ及びせん断の許容限界については、乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規定 J E A G 4 6 1 6 -2009 ((社) 日本電気協会)、鋼・合成構造標準示方書 [耐震設計編] ((社) 土木学会、2008 年制定) を参考とする。

表 2.2-1 に参考とする主な基準を示す。

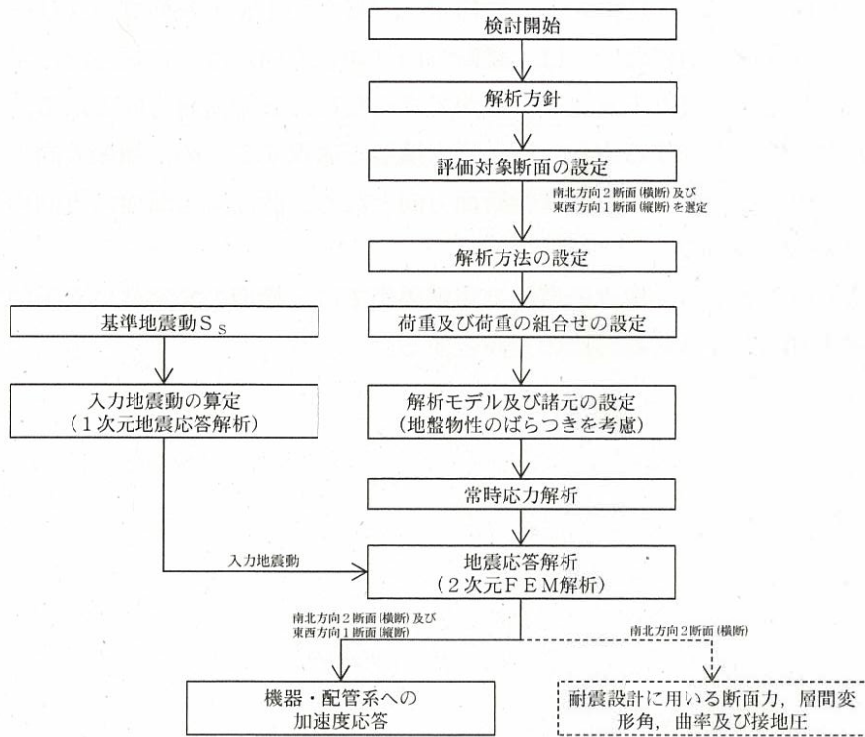
表 2.2-1 参考とする主な基準等

項目	参考とする主な基準	備考
使用材料及び材料定数	・コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] (2002 年制定)	—
荷重及び荷重の組合せ	・コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] (2002 年制定)	・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	・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) ・ J E A G 4 6 1 6 -2009 ・鋼・合成構造標準示方書 [耐震設計編] (2008 年制定)	・曲げに対する照査は、全塑性モーメントに相当する限界曲率を設定した上で、発生曲率が限界曲率*を下回ることを確認する。 ・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する。
地震応答解析	・ 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

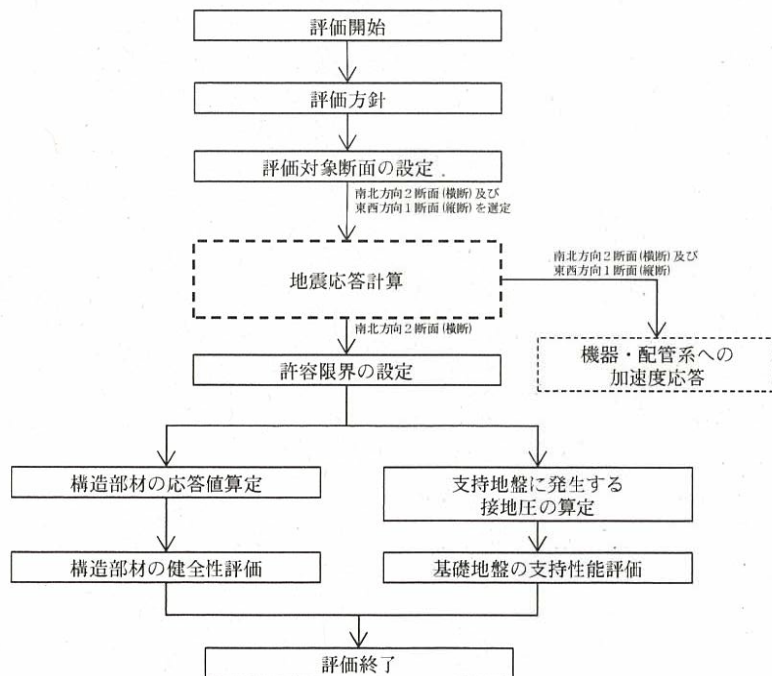
注記 * : 妥当な安全余裕を考慮する。

2.2.2 耐震安全性評価フロー

図 2.2-1 に取水構造物の耐震安全性評価フローを示す。



<地震応答計算>



<耐震性評価>

図 2.2-1 取水構造物の耐震安全性評価フロー

2.2.3 評価対象断面の方向

取水構造物の位置を図 2.2-2 に示す。

取水構造物は、延長約 57 m、幅約 43 m、高さ約 12m の鉄筋コンクリート造の地中構造物である。取水構造物においては、縦断方向（通水方向）は、加振方向と平行に配置される側壁又は隔壁を耐震設計上見込むことができるため、強軸断面方向となる。一方、横断方向（通水方向に対し直交する方向）は、通水機能を確保するため、加振方向と平行に配置される構造部材が少ないことから、弱軸断面方向となる。評価対象断面の方向の選定に係る考え方を表 2.2-2 に示す。

以上のことから、取水構造物の耐震評価では、構造の安定性に支配的な弱軸断面方向である横断方向を評価対象断面の方向とする。

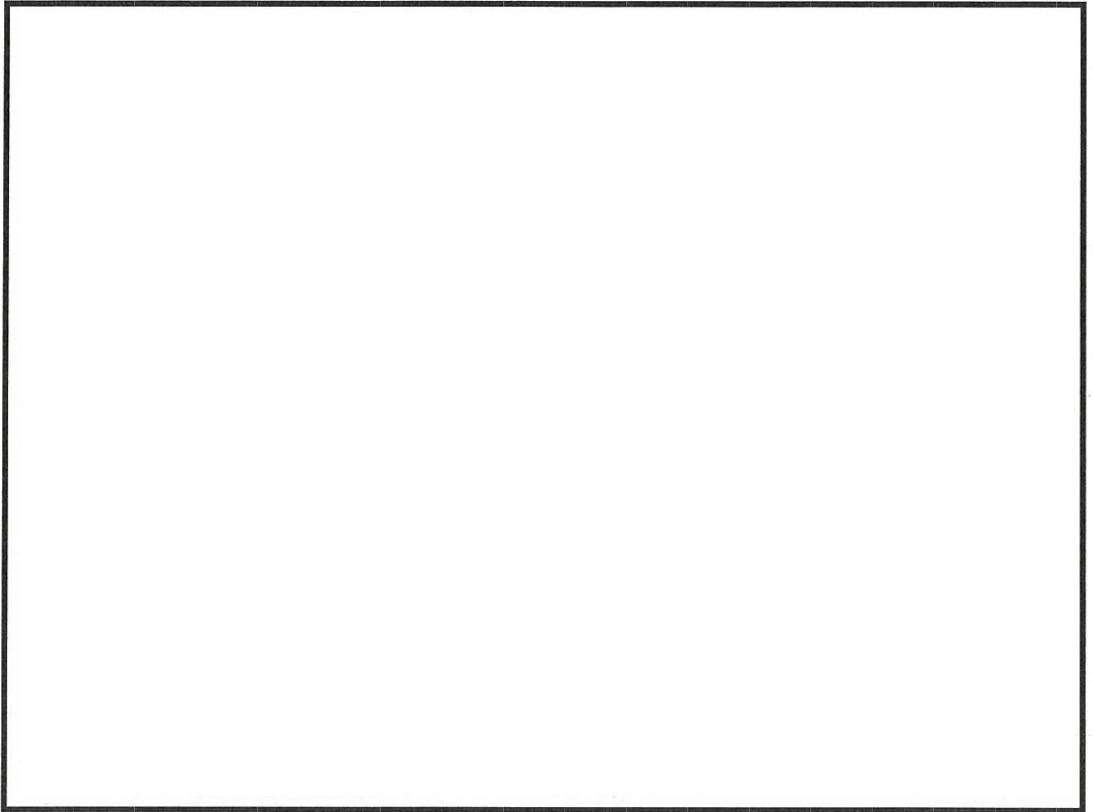


図 2.2-2 (1) 取水構造物の平面配置図 (全体平面図)

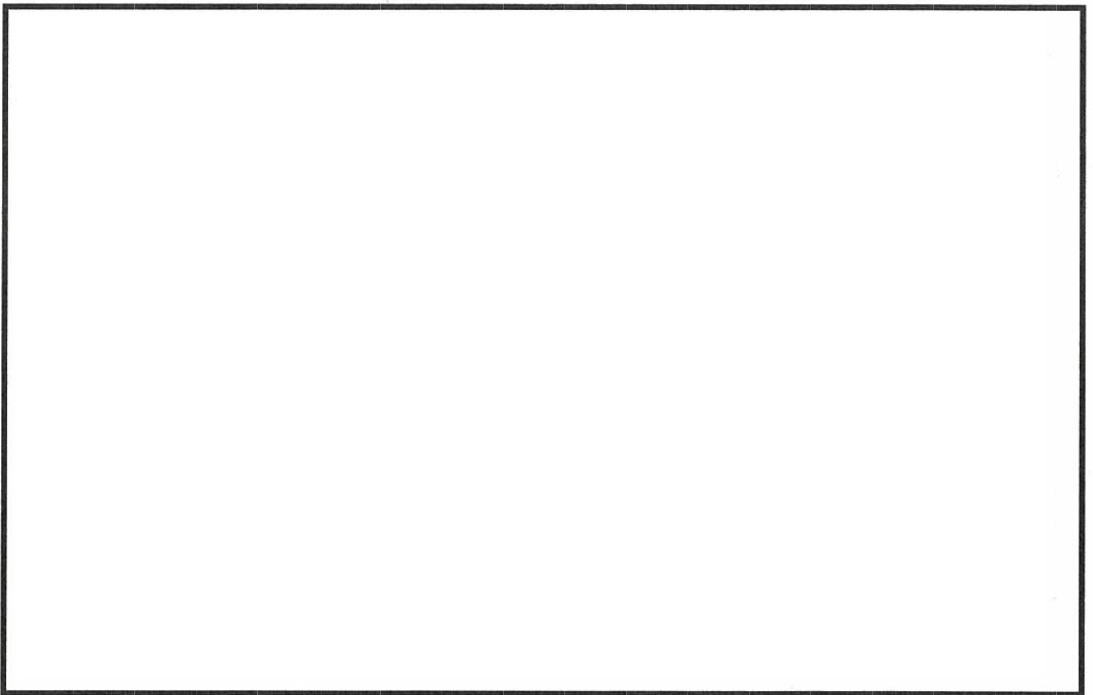
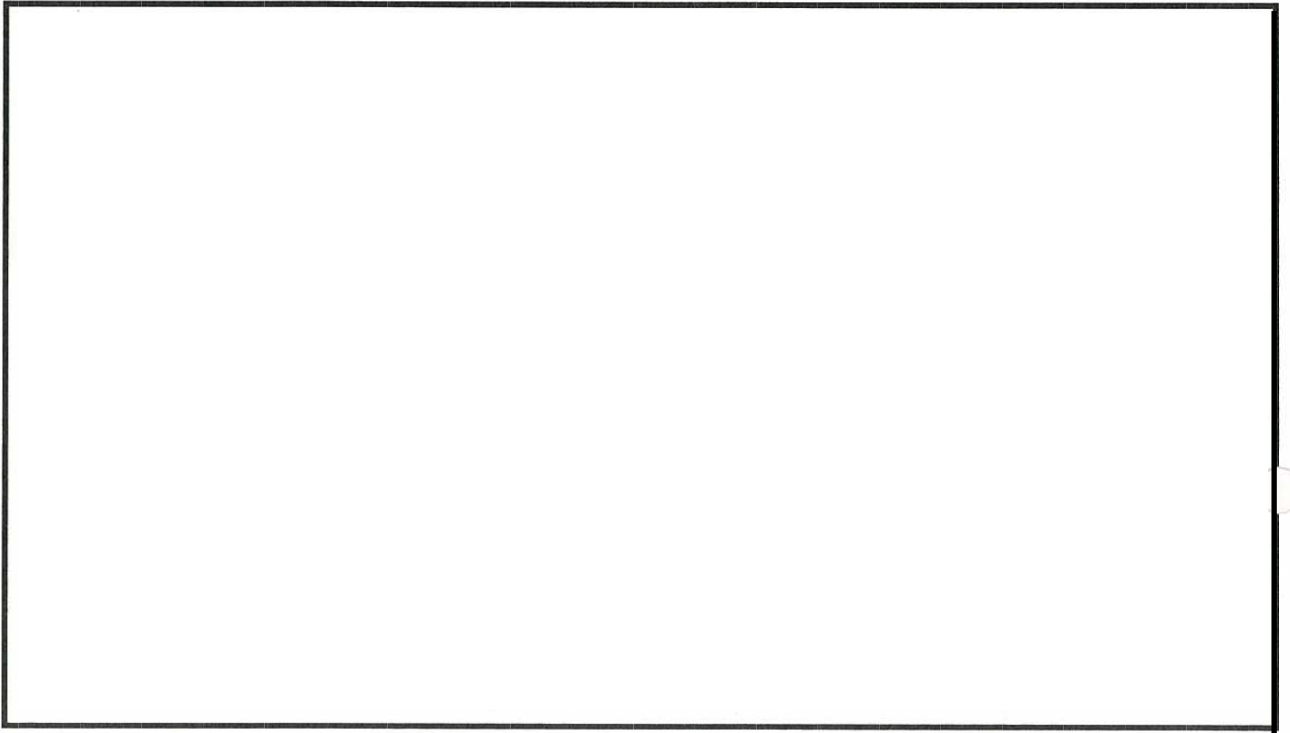


図 2.2-2 (2) 取水構造物の平面配置図 (拡大図)

表 2.2-2 取水構造物の評価対象断面の方向の選定



2.2.4 評価対象断面の選定

図 2.2-3 に取水構造物の平面図及び縦断図を、図 2.2-4 に取水構造物の断面図を示す。

取水構造物は、延長約 57 m、幅約 43 m、高さ約 12m の鉄筋コンクリート造の地中構造物であり、杭を介して十分な支持性能を有する岩盤に設置する。取水方向に対して複数の断面形状を示すが、構造的には多連ボックスカルバート状のラーメン構造である。

評価対象断面は、「1.4.2 取水構造物の断面選定の考え方」で記載したとおり、構造物の内空寸法や上載荷重等の観点で比較的耐震裕度が小さく、構造的にも弱軸断面方向となる①-①断面及び④-④断面を代表として耐震評価を実施する。

なお、構造的に強軸断面方向である⑥-⑥断面についても、設備の床応答算定の観点から地震応答解析を実施する。

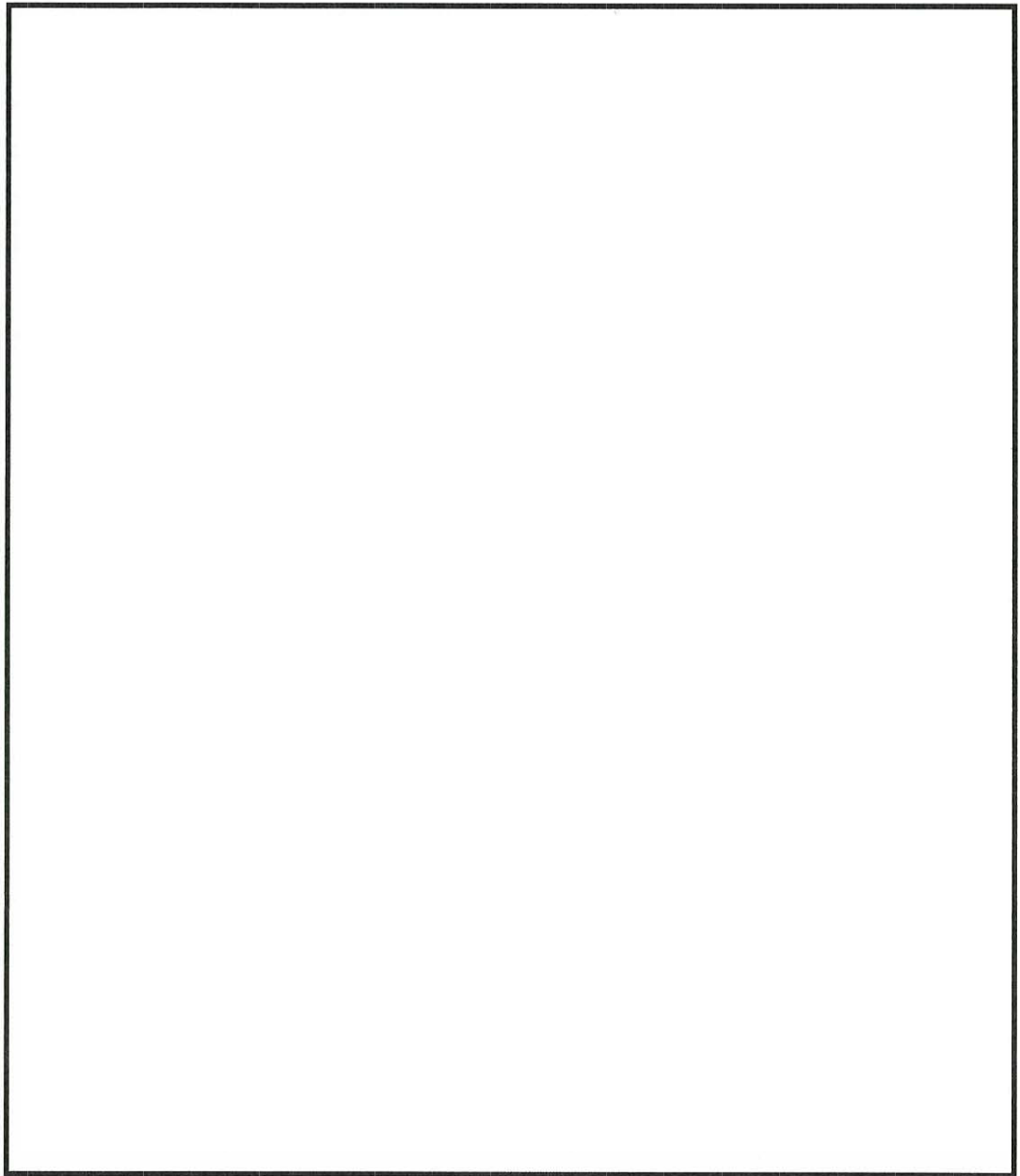


図 2.2-3 取水構造物の平面図及び縦断図

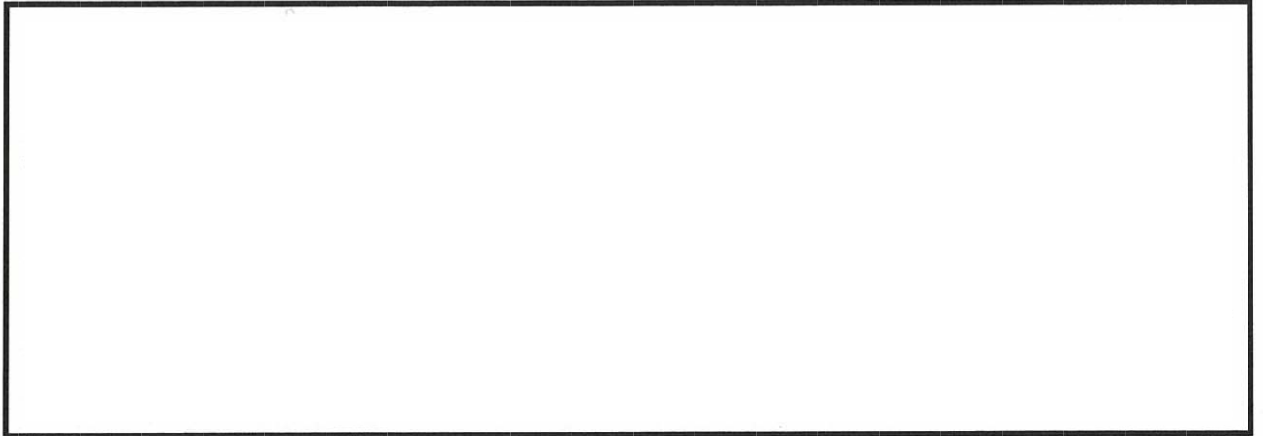


図 2.2-4 (1) 取水構造物の断面図 (①-①断面)

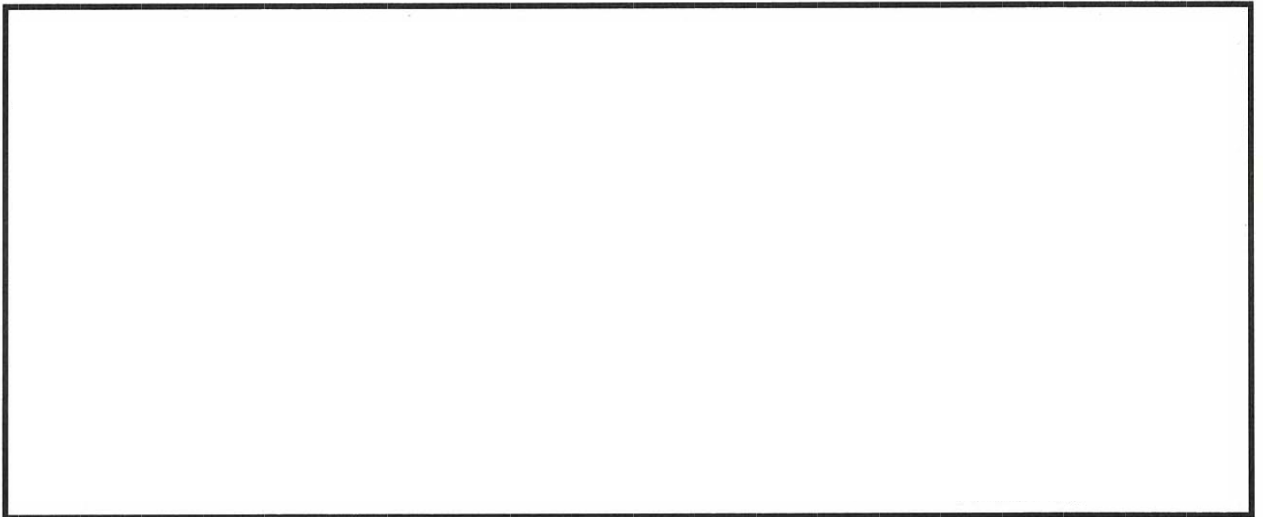


図 2.2-4 (2) 取水構造物の断面図 (④-④断面)

2.2.5 使用材料及び材料定数

耐震評価に用いる材料定数は、設計図書及び文献等を基に設定する。構造物の使用材料を表 2.2-3 に、材料物性値を表 2.2-4 に示す。

地盤の諸定数は、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。なお、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モデル化する。地盤の物性値を表 2.2-5 に示す。

表 2.2-3 使用材料

諸元	
鉄筋	SD30 (SD295 相当)
コンクリート	設計基準強度 20.6 N/mm ²
鋼管杭	STK41 (STK400 相当)

表 2.2-4 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
鉄筋コンクリート	24	2.59×10^4	0.2
鋼管杭	77	2.00×10^5	0.3

表 2.2-5 (1) 地盤の解析用物性値一覧 (液状化検討対象層)

パラメータ				原地盤								豊浦標準砂
				埋戻土		第四系 (液状化検討対象層)						
				f1	du	Ag2	As	Ag1	D2s-3	D2g-3	D1g-1	
物理特性	密度 () は地下水位以浅	ρ	g/cm ³	1.98 (1.82)	1.98 (1.82)	2.01 (1.89)	1.74	2.01 (1.89)	1.92	2.15 (2.11)	2.01 (1.89)	1.958
	間隙比	e	-	0.75	0.75	0.67	1.2	0.67	0.79	0.43	0.67	0.702
変形特性	ポアソン比	ν_{CD}	-	0.26	0.26	0.25	0.26	0.25	0.19	0.26	0.25	0.333
	基準平均有効主応力 () は地下水位以浅	σ'_{na}	kN/m ²	358 (312)	358 (312)	497 (299)	378	814 (814)	966	1167 (1167)	1695 (1710)	12.6
	基準初期せん断剛性 () は地下水位以浅	G_{na}	kN/m ²	253529 (220739)	253529 (220739)	278087 (167137)	143284	392073 (392073)	650611	1362035 (1362035)	947946 (956776)	18975
	最大履歴減衰率	h_{max}	-	0.220	0.220	0.233	0.216	0.221	0.192	0.130	0.233	0.287
強度特性	粘着力	C_{CD}	N/mm ²	0	0	0	0.012	0	0.01	0	0	0
	内部摩擦角	ϕ_{CD}	度	37.3	37.3	37.4	41	37.4	35.8	44.4	37.4	30
液状化特性	液状化パラメータ	ϕ_p	-	34.8	34.8	34.9	38.3	34.9	33.4	41.4	34.9	28
	液状化パラメータ	S_1	-	0.047	0.047	0.028	0.046	0.029	0.048	0.030	0.020	0.005
	液状化パラメータ	W_1	-	6.5	6.5	56.5	6.9	51.6	17.6	45.2	10.5	5.06
	液状化パラメータ	P_1	-	1.26	1.26	9.00	1.00	12.00	4.80	8.00	7.00	0.57
	液状化パラメータ	P_2	-	0.80	0.80	0.60	0.75	0.60	0.96	0.60	0.50	0.80
液状化パラメータ	C_1	-	2.00	2.00	3.40	2.27	3.35	3.15	3.82	2.83	1.44	

表 2.2-5 (2) 地盤の解析用物性値一覧 (非液状化層)

パラメータ				原地盤				
				第四系 (非液状化層)				新第三系
				Ac	D2c-3	Im	D1c-1	Km
物理特性	密度 () は地下水位以浅	ρ	g/cm ³	1.65	1.77	1.47 (1.43)	1.77	$1.72-1.03 \times 10^{-4} \cdot z$
	間隙比	e	-	1.59	1.09	2.8	1.09	1.16
変形特性	ポアソン比	ν_{CD}	-	0.10	0.22	0.14	0.22	$0.16+0.00025 \cdot z$
	基準平均有効主応力 () は地下水位以浅	σ'_{na}	kN/m ²	480	696	249 (223)	696	動の変形特性に基づき z (標高) 毎に物性値を 設定
	基準初期せん断剛性 () は地下水位以浅	G_{na}	kN/m ²	121829	285223	38926 (35783)	285223	
	最大履歴減衰率	h_{max}	-	0.200	0.186	0.151	0.186	
強度特性	粘着力	C_{CD}	N/mm ²	0.025	0.026	0.042	0.026	$0.358-0.00603 \cdot z$
	内部摩擦角	ϕ_{CD}	度	29.1	35.6	27.3	35.6	$23.2+0.0990 \cdot z$

z : 標高 (m)

2.2.6 地下水位

地下水位は地表面として設定する。

2.2.7 地震応答解析手法

取水構造物の地震応答解析は、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。部材については、はり要素及び平面ひずみ要素を用いることとするが、非線形特性についてはコンクリートのM- ϕ 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、付録24「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

地震応答解析手法の選定フローを図2.2-5に示す。

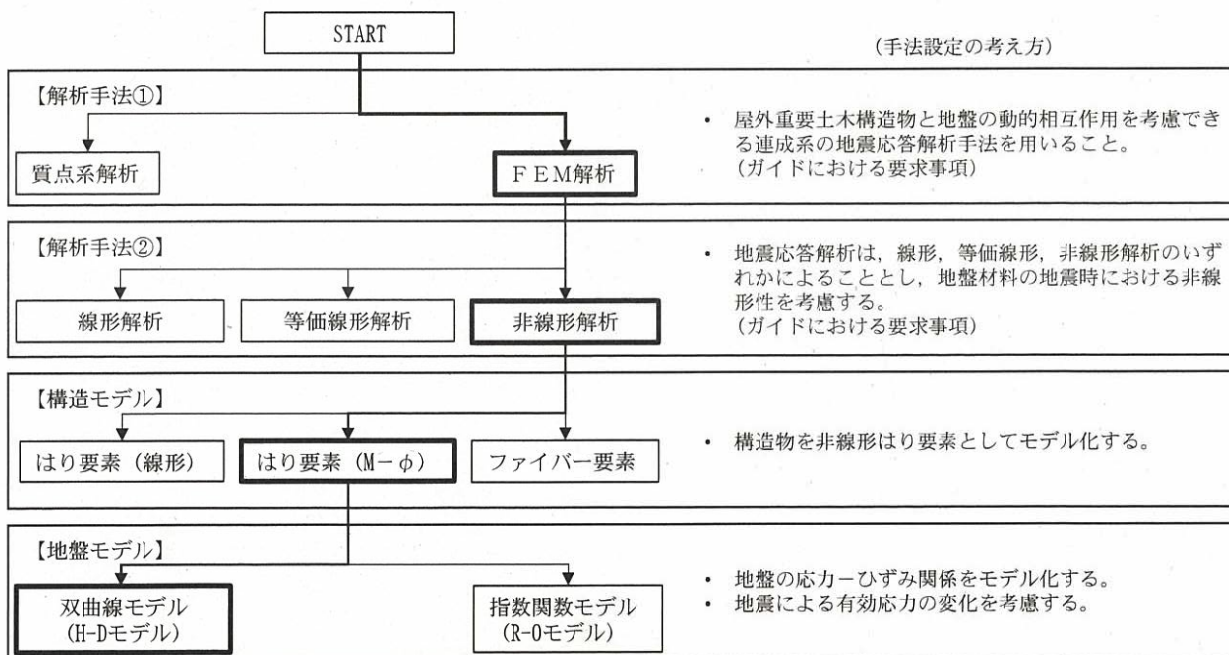


図 2.2-5 地震応答解析手法の選定フロー

(1) 双曲線モデル (H-D モデル) の選定について

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、地盤のせん断応力上限値は有効応力に応じて変化する特徴がある。有効応力解析に適用する繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線の構成則には、これら2つの特徴を表現できるモデル

を採用する方針とする。

繰返しせん断応力～せん断ひずみ関係の骨格曲線を表現する代表的な構成則には、双曲線モデル（H-D モデル）と指数関数モデル（R-0 モデル）がある。双曲線モデル（H-D モデル）は、せん断ひずみの増加に対して、せん断応力が漸近していくせん断応力の上限値をパラメータとして有していることから、上記の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上限値に係る特徴を表現でき、かつ、上限値を有効応力の関数とすることができる。一方、指数関数モデル（R-0 モデル）は、せん断ひずみの増加に対して、せん断応力の上限値をパラメータとして有していないことから、上記の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上限値に係る特徴を表現するためにモデルの改良を行う必要がある。

以上のことから、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上記の2つの特徴を適切に表現できる双曲線モデル（H-D モデル）を選定する。

2.2.8 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、J E A G 4 6 0 1 - 1 9 8 7 を参考に、図 2.2-6 に示すとおりモデル幅を構造物基礎幅の 5 倍以上、モデル高さを構造物幅の 2 倍以上確保する。

取水構造物周辺の地質断面図を図 2.2-7 に示す。

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、波動をなめらかに表現するために、対象とする波長に対して 4 または 5 分割以上になるように要素高さを設定している（ただし、要素高さが 1m 以下となる場合は 1m としている。）。構造物の要素分割は、過度に粗くすると、地震応答挙動を適切に評価できなくなり解析精度の低下を招くため、要素長さを部材の断面厚さの 2.0 倍以下になるように設定するよう土木学会マニュアルには記載しているが、構造物のモデル化については 1 倍程度以下になるように設定している。

取水構造物の地震応答解析モデルを図 2.2-8 に示す。

なお、①-①断面と④-④断面は近接しており、周辺地質構造も概ね同じであることから、これらの地震応答解析モデルにおいては、④-④断面の地層構成を共通で使用する。

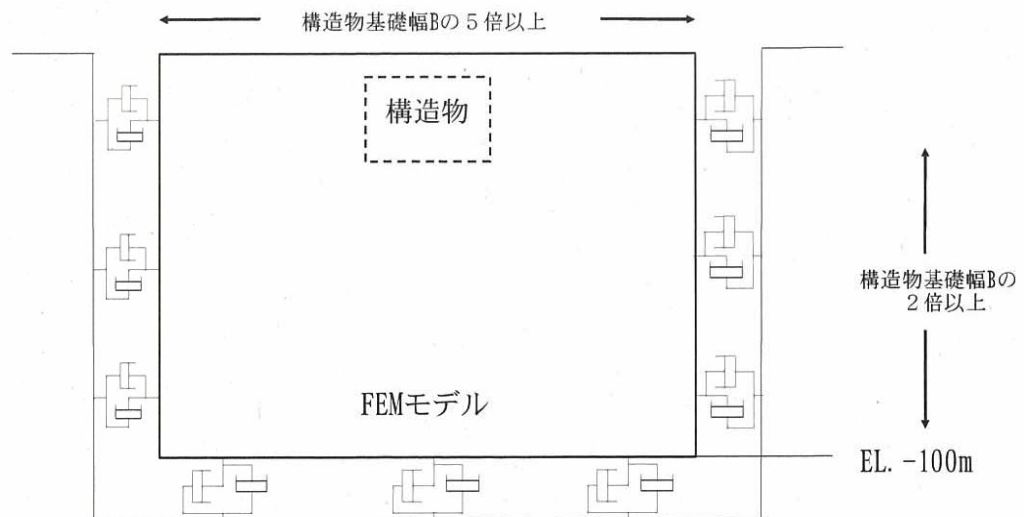


図 2.2-6 モデル範囲の考え方

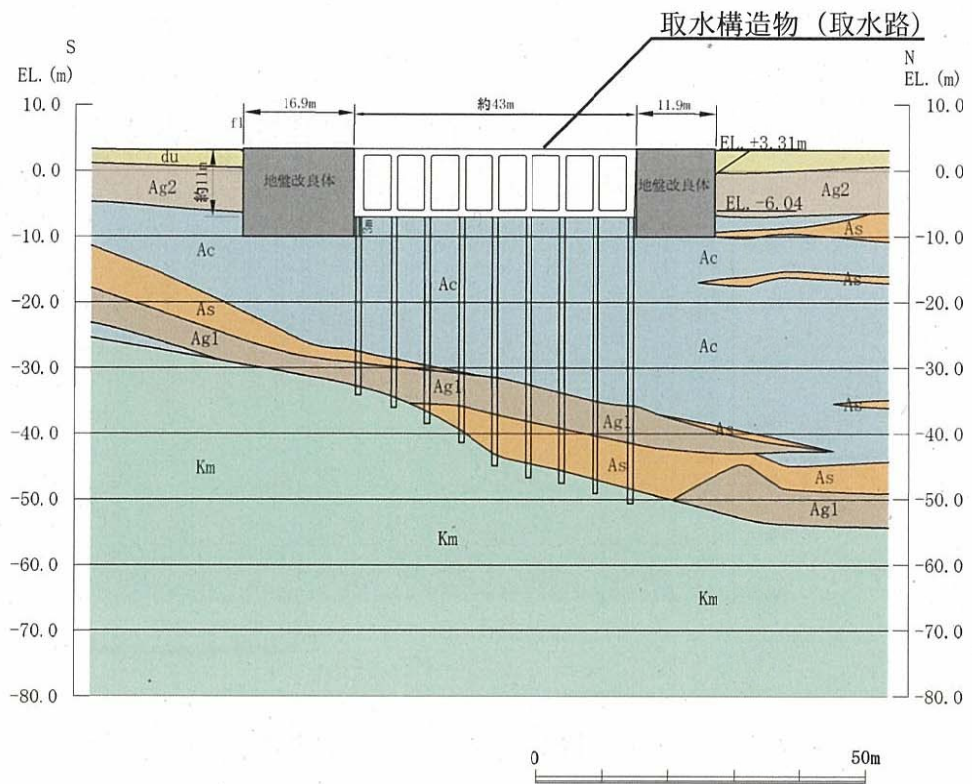


図 2.2-7 (1) 地質断面図 (①-①断面)

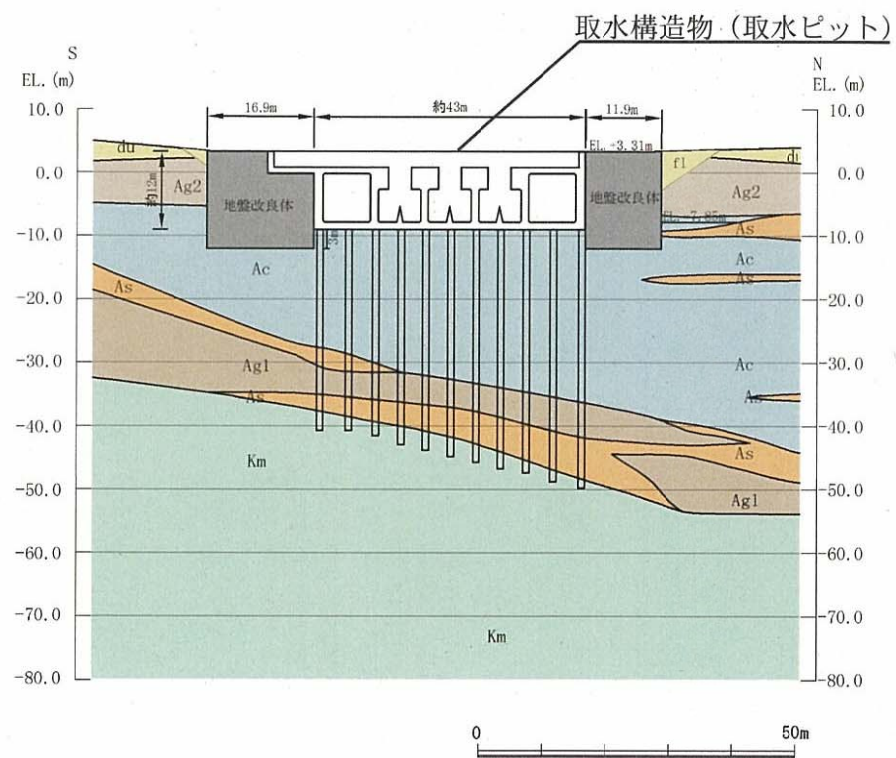


図 2.2-7 (2) 地質断面図 (④-④断面)

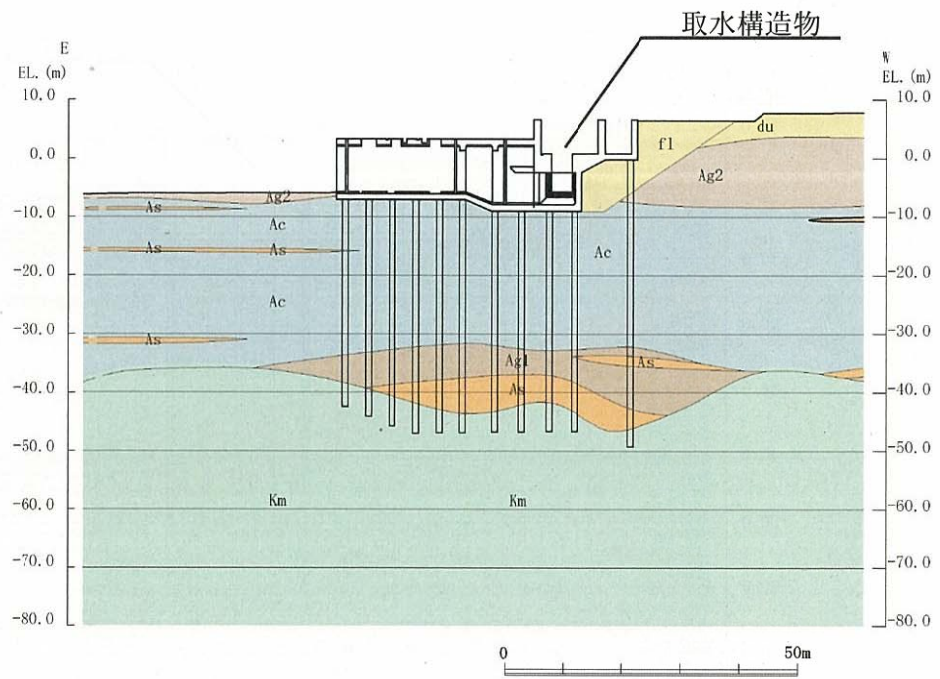


图 2.2-7 (3) 地質断面图 (⑥-⑥断面)

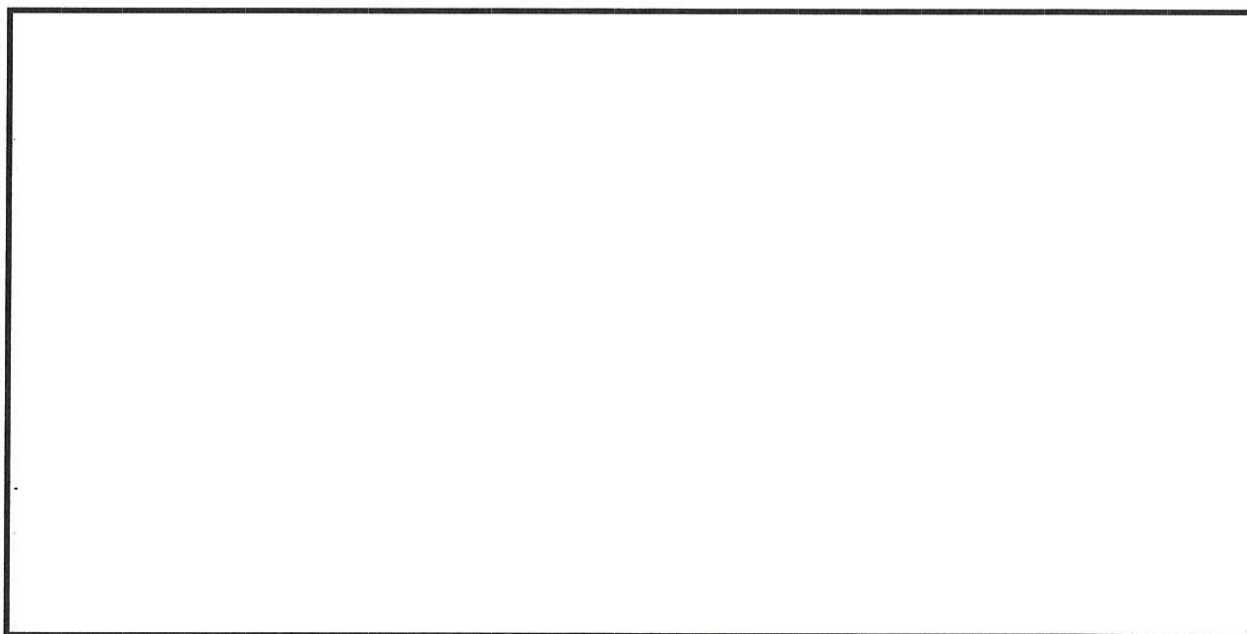


図 2.2-8 (1) 取水構造物の地震応答解析モデル (①-①断面)

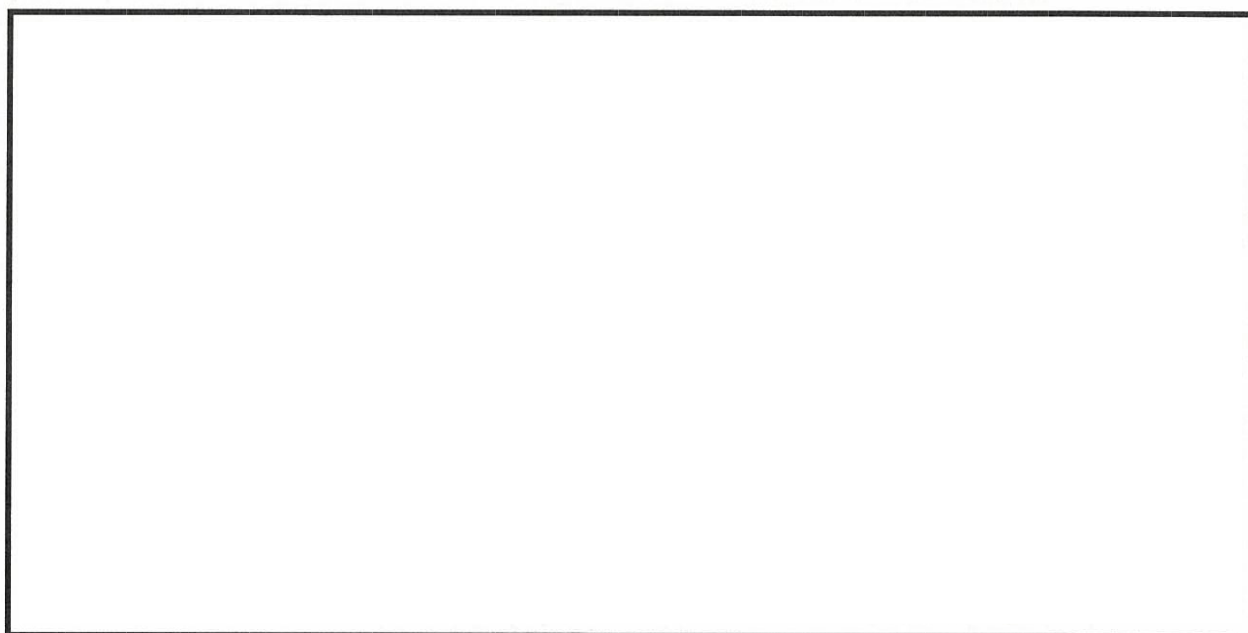


図 2.2-8 (2) 取水構造物の地震応答解析モデル (④-④断面)

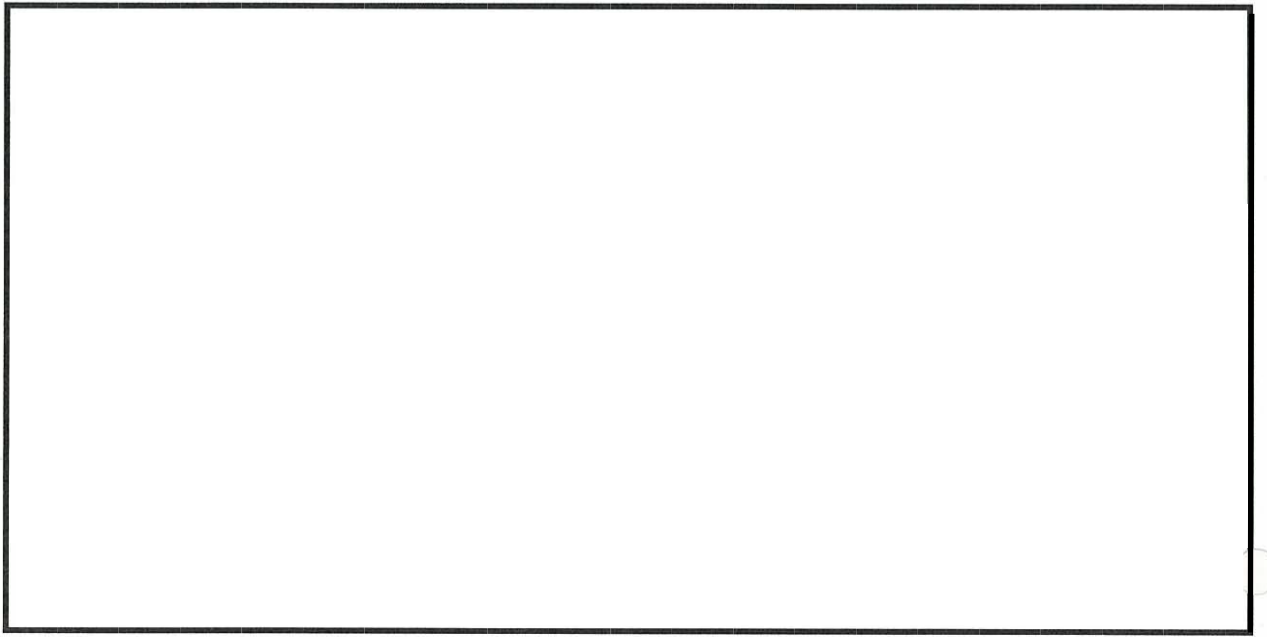


図 2. 2-8 (3) 取水構造物の地震応答解析モデル (⑥-⑥断面)

(2) ジョイント要素の設定

地盤と構造物の境界部にジョイント要素を設けることにより、地盤と構造物の剥離・すべりを考慮する。

ジョイント要素は法線方向、接線方向に分けて二重節点として設定する。法線方向では、常時状態以上の引張が生じた場合、剛性及び応力をゼロとし、剥離を考慮する。接線方向では、地盤と構造物のせん断抵抗力以上のせん断応力が発生した場合、剛性をゼロとし、すべりを考慮する。せん断強度 τ_f は次式の Mohr-Coulomb 式により規定される。c、 ϕ は周辺地盤の c、 ϕ とする。(表 2.2-6 参照)

$$\tau_f = c + \sigma' \tan \phi$$

ここで、

- τ_f : せん断強度
- c : 粘着力
- ϕ : 内部摩擦角

表 2.2-6 周辺地盤及び隣接構造物との境界に用いる強度特性

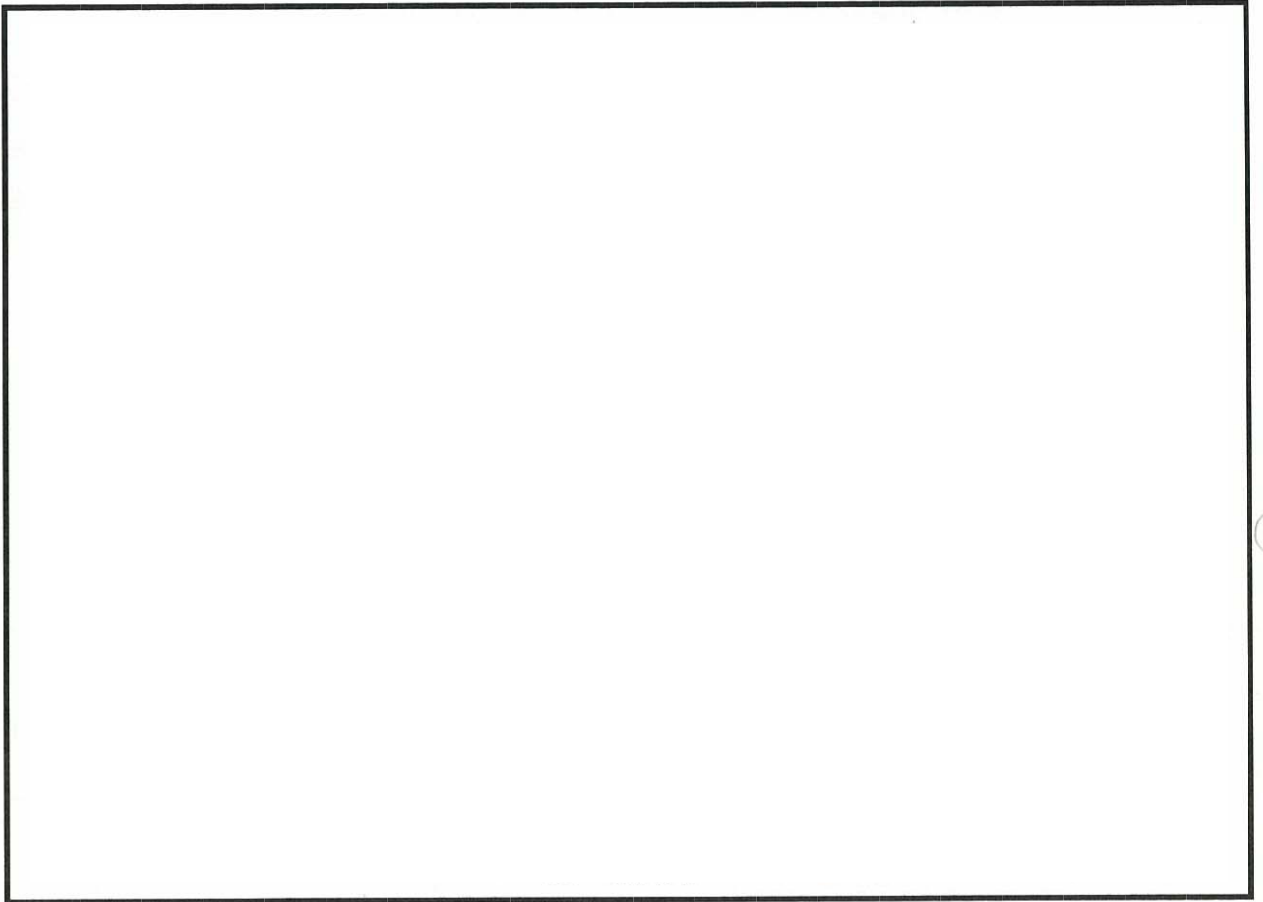
周辺の状況		粘着力 c (N/mm ²)	内部摩擦角 (度)	備考
第四紀層	f1 層	0	37.3	—
	du 層	0	37.3	—
	Ag2 層	0	37.4	—
	As 層	0.012	41.0	—
	Ac 層	0.025	29.1	—
	Ag1 層	0	37.4	—
新第三系	Km 層	$c = 0.358 - 0.00603 \cdot z$	$\phi = 23.2 + 0.0990 \cdot z$	—

z : 標高 (m)

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な値として、港湾構造物設計事例集 (沿岸開発技術センター) に従い、表 2.2-7 の通り設定する。図 2.2-9 にジョイント要素設定の考え方を示す。

表 2.2-7 ジョイント要素のばね定数

	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



— : ジョイント要素

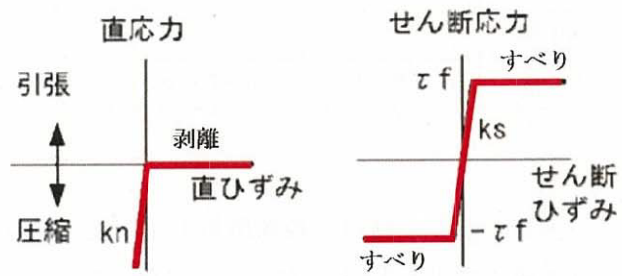


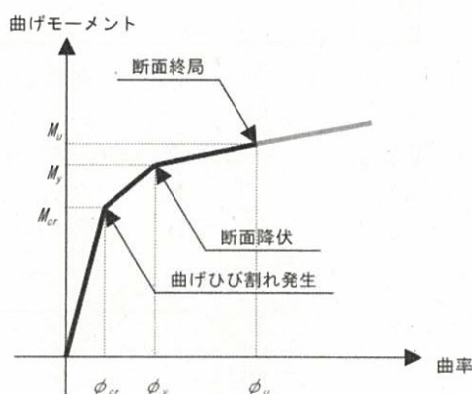
図 2.2-9 ジョイント要素設定の考え方

(4) 材料特性の設定

①-①断面及び④-④断面について、鉄筋コンクリート部材及び鋼管杭は非線形はり要素を用いてモデル化する。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。

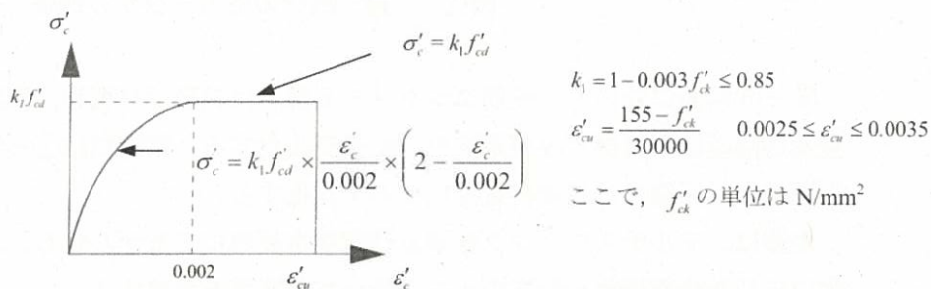
部材の非線形特性は以下のとおりである。

図 2.2-10 (土木学会マニュアル) 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非線形特性を図 2.2-11 及び図 2.2-12 に示す。



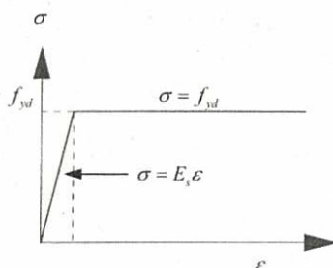
(原子力発電所屋外重要構造物の耐震性能照査指針・マニュアル (社) 土木学会 2005 年) より引用

図 2.2-10 M-φ 関係のトリリニアモデル (鉄筋コンクリート部材)



(コンクリート標準示方書 [設計編] (社) 土木学会 2007 年制定) より引用

図 2.2-11 コンクリートの応力-ひずみ曲線



(コンクリート標準示方書 [設計編] (社) 土木学会 2007 年制定) より引用

図 2.2-12 鉄筋の応力-ひずみ曲線

図 2.2-13 に、鋼管杭における M- ϕ 関係のバイリニアモデルを示す。また、鋼材の非線形特性を図 2.2-14 に示す。

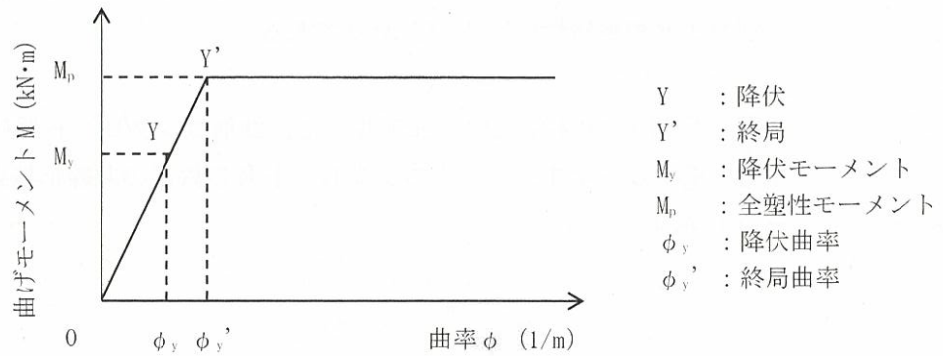


図 2.2-13 M- ϕ 関係のバイリニアモデル (鋼管杭)

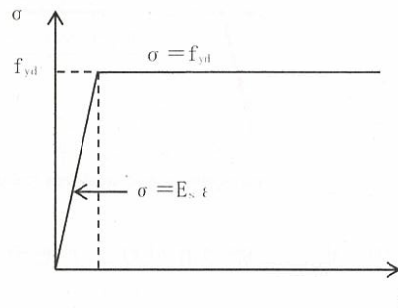


図 2.2-14 鋼材の応力-ひずみ関係

⑥-⑥断面について、鉄筋コンクリート部材は線形はり要素、耐震壁の効果を見込む側壁及び隔壁は平面ひずみ要素を用いてモデル化する。鋼管杭は①-①断面及び④-④断面と同様に、非線形はり要素を用いてモデル化する。

地盤は、マルチスプリング要素及び間隙水要素にてモデル化し、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。

2.2.9 減衰定数

動的解析における地盤及び構造物の減衰については、固有値解析にて求まる固有周期及び減衰比に基づき、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減衰にて与える。なお、Rayleigh減衰を $\alpha=0$ となる剛性比例型減衰とする。材料ごとに減衰を設定するために要素剛性比例型としている。

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K]$$

ここで、

[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

係数 α, β は以下のように求めている。

$$\alpha = 0$$

$$\beta = \frac{h}{\pi f}$$

ここで、

f : 固有値解析により求められた1次固有振動数

h : 各材料の減衰定数

減衰定数について、非線形特性を考慮するコンクリート及び鋼材、ひずみ依存特性を考慮する地盤は1%（解析における減衰は、ひずみが大きい領域では履歴減衰が支配的となる。このため、解析上の安定のためになるべく小さい値として1%を採用している。）とする。また、線形材料としてモデル化するコンクリートは5%（J E A G 4 6 0 1 - 1987 記載）とする。

図 2.2-15 に Rayleigh 減衰の設定フローを、表 2.2-8 に固有値解析結果を示す。

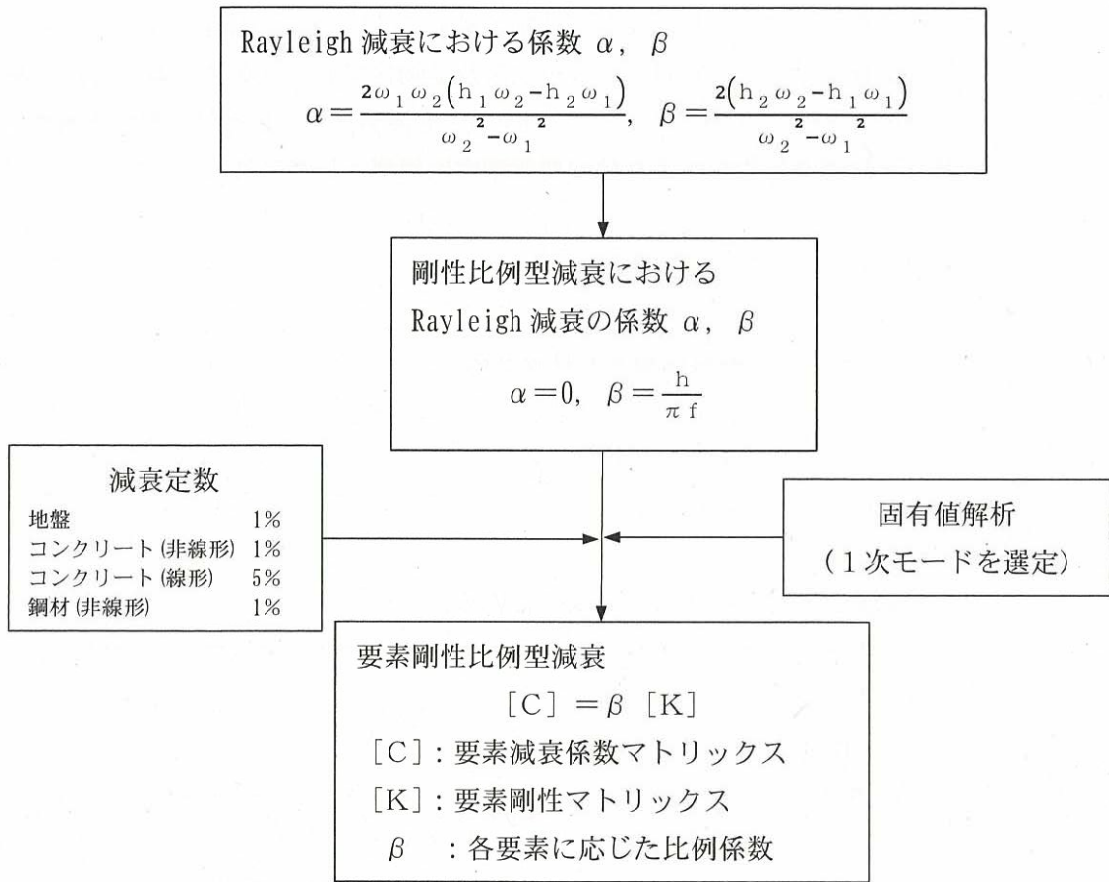


図 2.2-15 Rayleigh 減衰の設定フロー

表 2.2-8 固有値解析結果 (追而)

2.2.10 荷重の組合せ

耐震性能照査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、それぞれを組合せて設定する。地震荷重には、地震時土圧、動水圧、機器・配管系からの反力による荷重が含まれるものとする。

風荷重及び風荷重以外の変動荷重(温度荷重)については、発電所の立地特性や取水構造物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、地震力と組合せる荷重としては除外した。

なお、取水構造物は、地盤内に埋設されている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と考えられる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、地盤内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 2.2-9 に示す。

地震時に取水構造物に作用する機器・配管系からの反力については、機器・配管系を、解析モデルに付加質量として与えることで考慮する。

表 2.2-9 荷重の組合せ

種別		荷重	算定方法
永久荷重	常時考慮荷重	躯体自重	○ ・設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定
		機器・配管自重	○ ・機器・配管の重さに基づいて設定
		土被り荷重	○ ・常時応力解析により設定
		永久上載荷重	○ ・竜巻及びPP防護設備の荷重を考慮
	静止土圧	○ ・常時応力解析により算定	
	外水圧	○ ・地下水水位に応じた静水圧として設定 ・地下水の密度を考慮	
	内水圧	○ ・海水面に応じた静水圧として設定 ・海水の密度を考慮	
	雪荷重	○ ・雪荷重を考慮	
変動荷重	風荷重以外	— ・風荷重以外には発電所の立地特性及び構造物の配置状況を踏まえると、偶発荷重(地震荷重)と組合せるべき変動荷重はない	
	風荷重	— ・地中に埋設された構造物であるため、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	
	鉛直地震動	○ ・躯体、機器・配管の慣性力、動土圧を考慮	
	動水圧	○ ・水位条件、密度は、永久荷重と同様 ・地震時動水圧を付加質量により考慮	

(1) 機器・配管荷重

a. ①-①断面（取水路）

図 2.2-16 に①-①断面における機器・配管荷重図を示す。

機器・配管荷重は解析単位奥行き（1 m）あたりの荷重および付加質量として考慮する。

左右の側壁には潮位計を、頂版には3つのスクリーン（固定スクリーン、トラベリングスクリーン、回転バースクリーン）のうち、最も重い回転バースクリーンを考慮する。

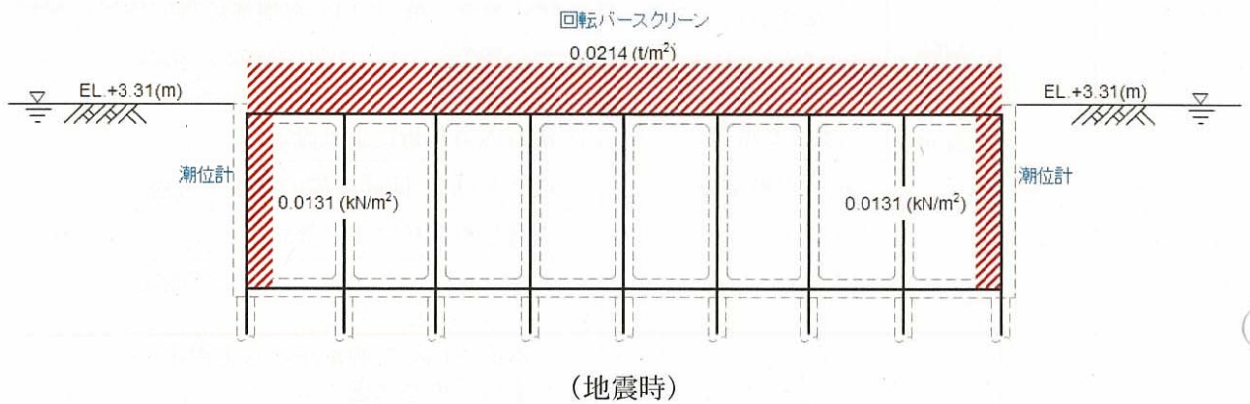
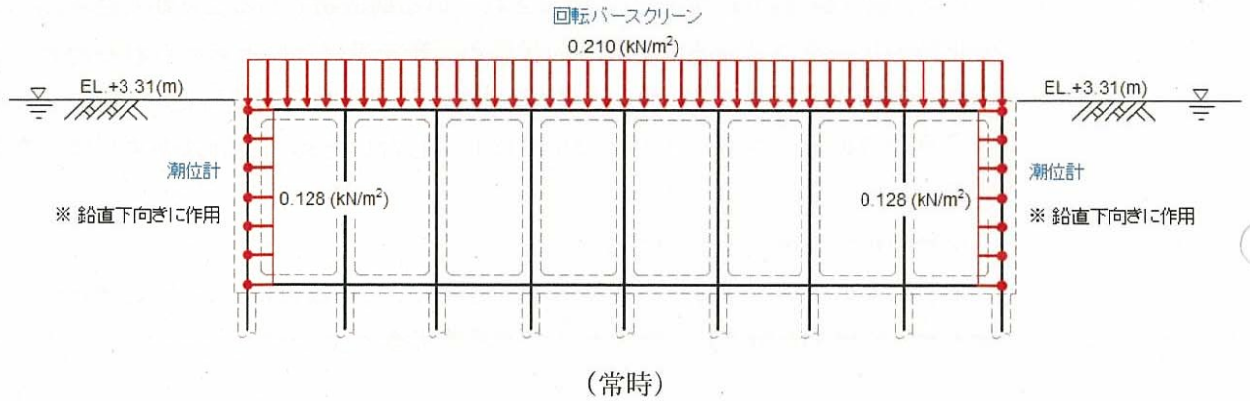


図 2.2-16 機器・配管荷重図（①-①断面）

b. ④-④断面 (取水ピット)

図 2.2-17 に④-④断面における機器・配管荷重図を示す。

機器・配管荷重は解析単位奥行き (1 m) あたりの荷重および付加質量として考慮する。

頂版には非常用海水ポンプ及びCWポンプを考慮する。

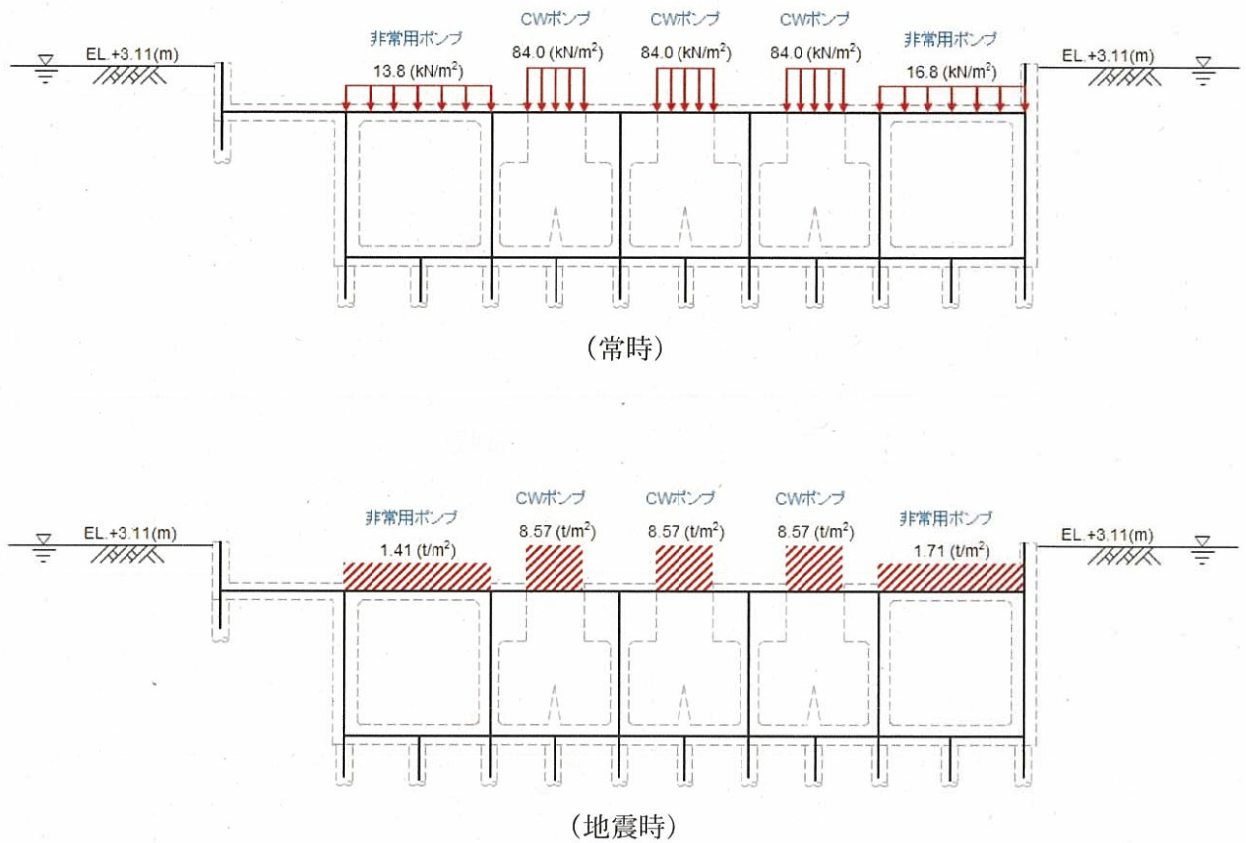


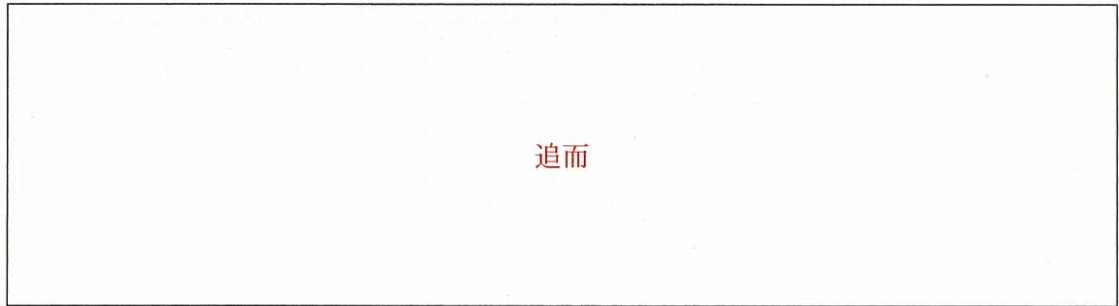
図 2.2-17 機器・配管荷重図 (④-④断面)

c. ⑥-⑥断面（縦断図）

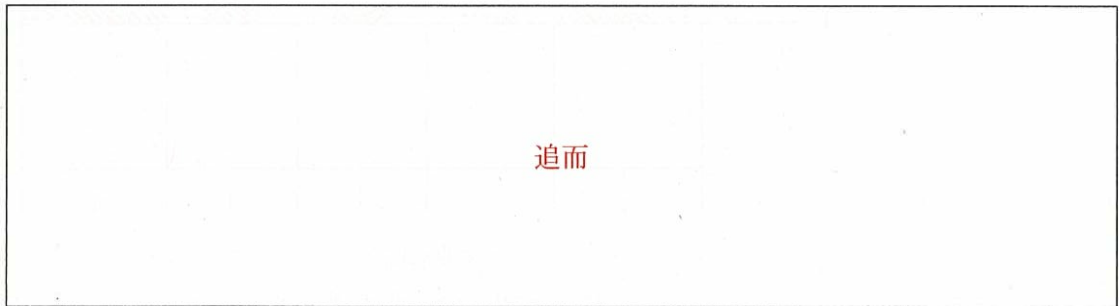
図 2.2-18 に⑥-⑥断面における機器・配管荷重図を示す。

機器・配管荷重は解析単位奥行き（1 m）あたりの荷重および付加質量として考慮する。

頂版には、比較的大きな荷重となる設備として、非常用海水ポンプ、止水機構、スクリーン（回転バースクリーン、トラベリングスクリーン）を考慮する。



（常時）



（地震時）

図 2.2-18 機器・配管荷重図（⑥-⑥断面）

(2) 外水圧

地下水位は地表面として設定する。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。

(3) 内水圧

取水構造物の内部には朔望平均満潮位である E. L. +0.61 m 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、 1.03g/cm^3 を考慮する。

a. ①-①断面 (取水路)

図 2.2-19 に、①-①断面における内水圧図を示す。

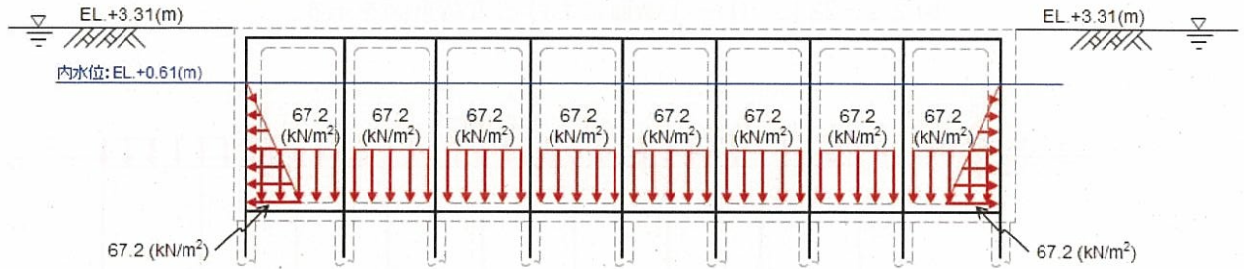


図 2.2-19 内水圧図 (①-①断面)

b. ④-④断面 (取水ピット)

図 2.2-20 に、④-④断面における内水圧図を示す。

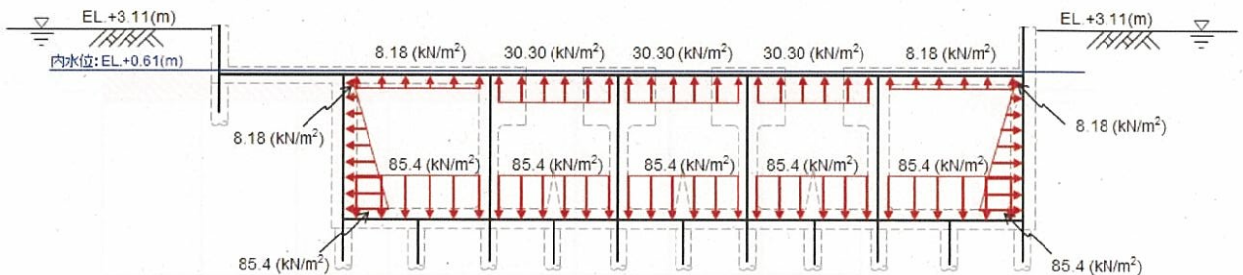


図 2.2-20 内水圧図 (④-④断面)

c. ⑥-⑥断面 (縦断面)

図 2.2-21 に、⑥-⑥断面における内水圧図を示す。

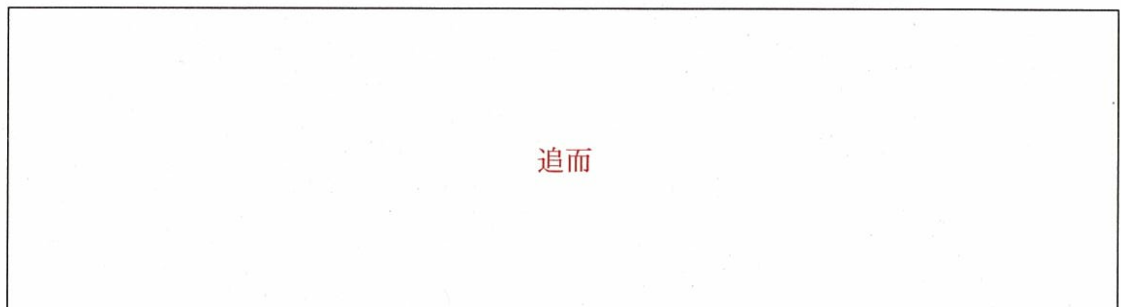


図 2.2-21 内水圧図 (⑥-⑥断面)

(4) 雪荷重

雪荷重については、「建築基準法施行令第 86 条」及び「茨城県建築基準法施行細則 第 16 条の 4」に従って設定する。積雪の厚さ 1cm あたりの荷重を $20\text{N/m}^2/\text{cm}$ として、積雪量は 30cm としていることから、積雪荷重は 600N/m^2 であるが、地震時短期荷重として積雪荷重の 0.35 倍である 0.21kN/m^2 を考慮する。

a. ①-①断面 (取水路)

図 2.2-22 に、①-①断面における雪荷重図を示す。

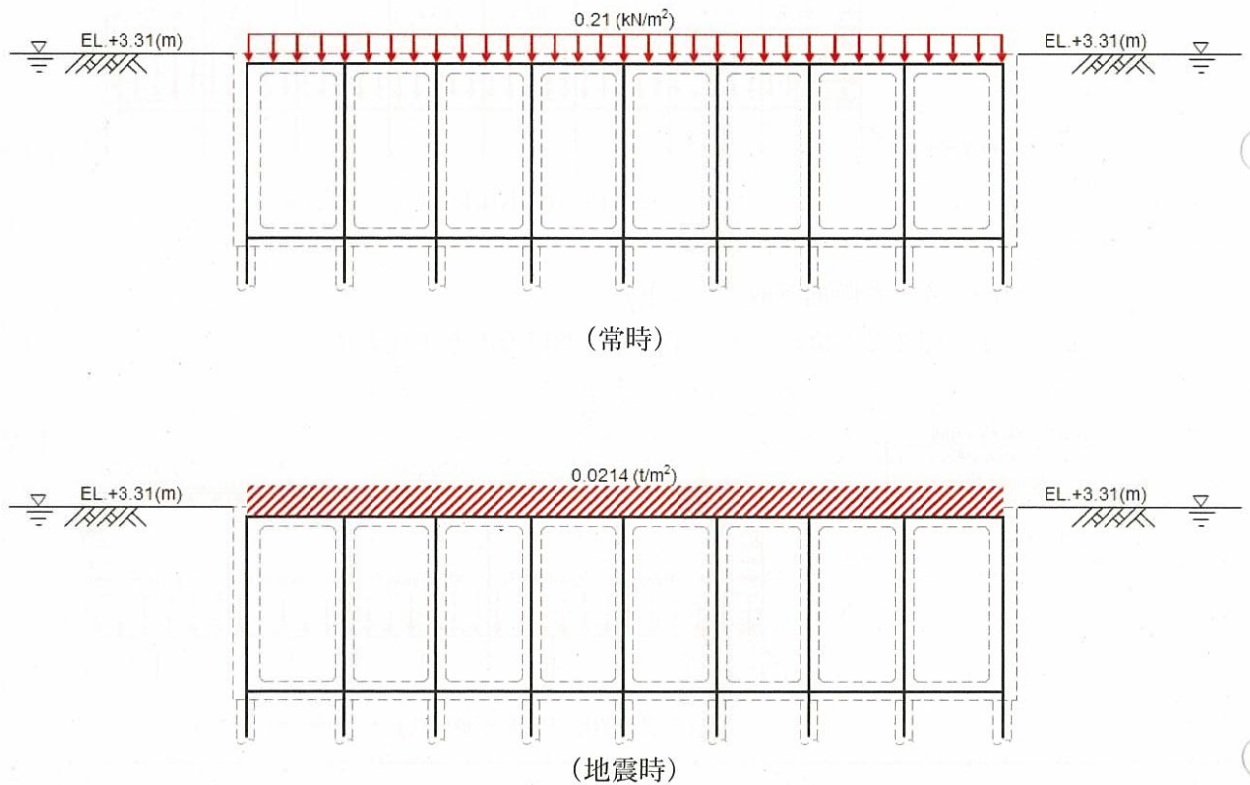


図 2.2-22 雪荷重図 (①-①断面)

b. ④-④断面 (取水ピット)

図 2.2-23 に、④-④断面における雪荷重図を示す。

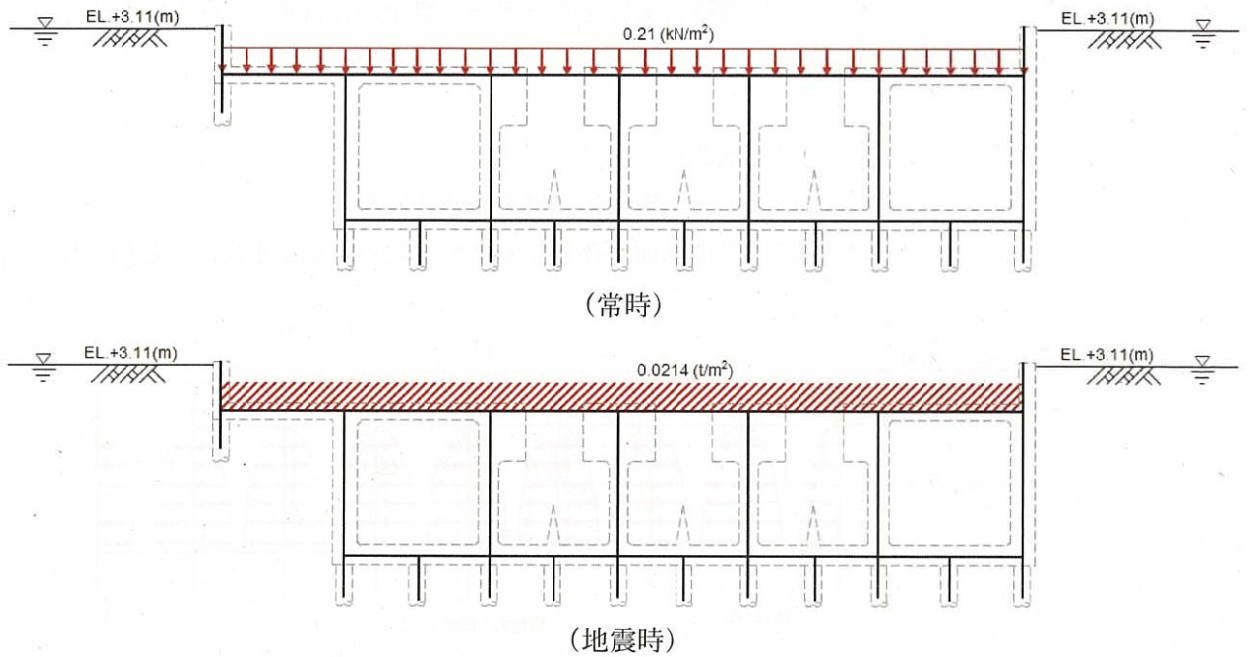


図 2.2-23 雪荷重図 (④-④断面)

b. ④-④断面 (取水ピット)

図 2.2-24 に、⑥-⑥断面における雪荷重図を示す。

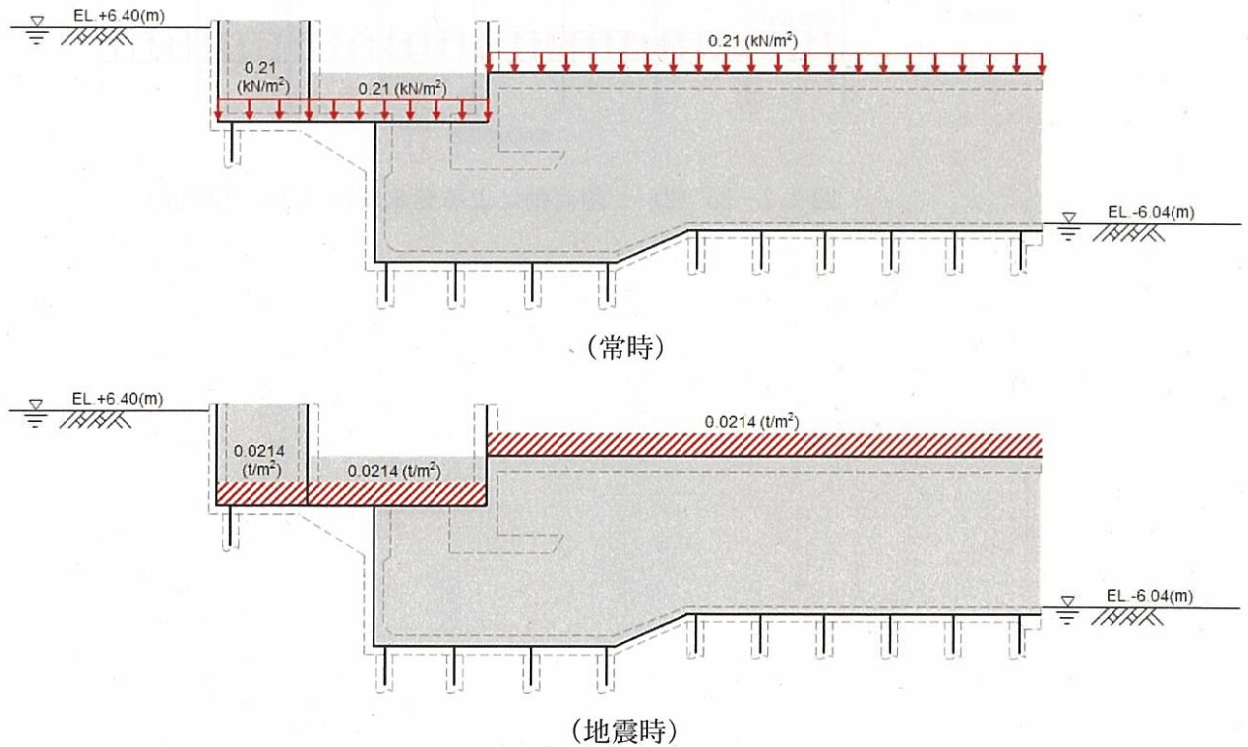


図 2.2-24 雪荷重図 (⑥-⑥断面)

(5) 動水圧

取水構造物の内部には朔望平均満潮位である E.L. +0.61 m 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. ①-①断面（取水路）

図 2.2-25 に、①-①断面における動水圧図を示す。

①-①断面には自由水面が存在するため、Westergaard 式による動水圧を設定する。

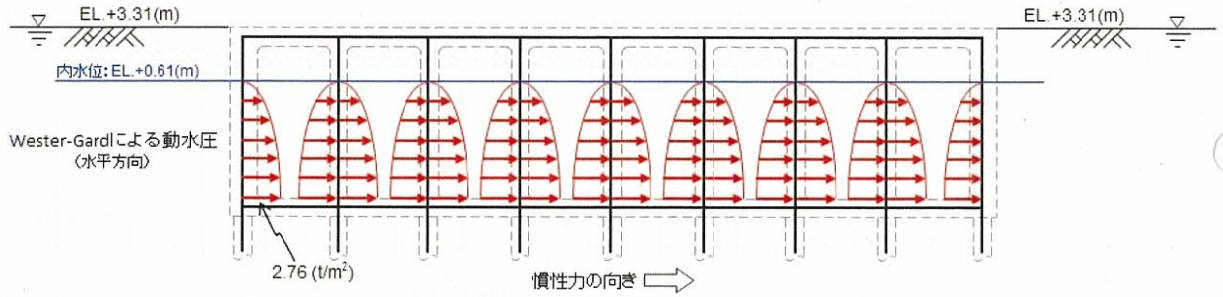


図 2.2-25 (1) 水平動による動水圧図 (①-①断面)

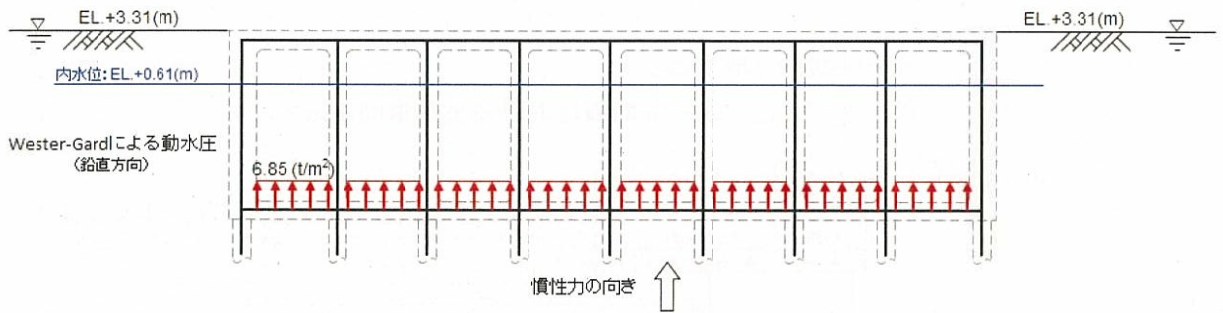


図 2.2-25 (2) 鉛直動による動水圧図 (①-①断面)

b. ④-④断面 (取水ピット)

図 2.2-26 に、④-④断面における動水圧図を示す。

④-④断面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。

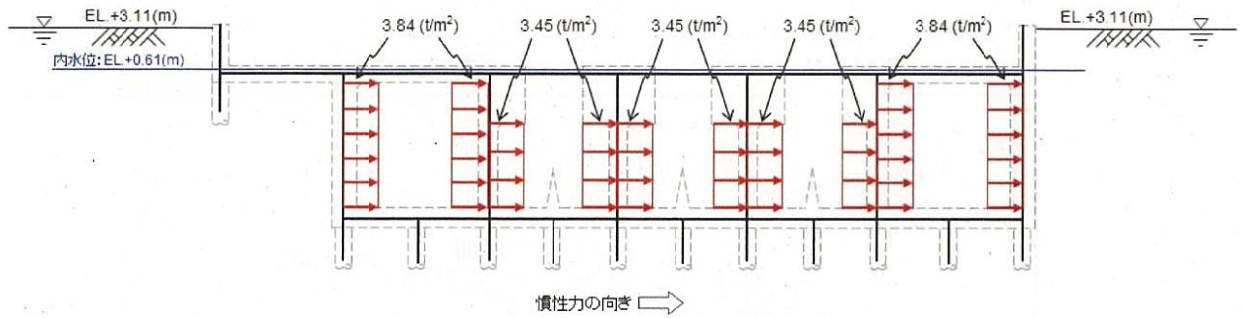


図 2.2-26 (1) 水平動による動水圧図 (④-④断面)

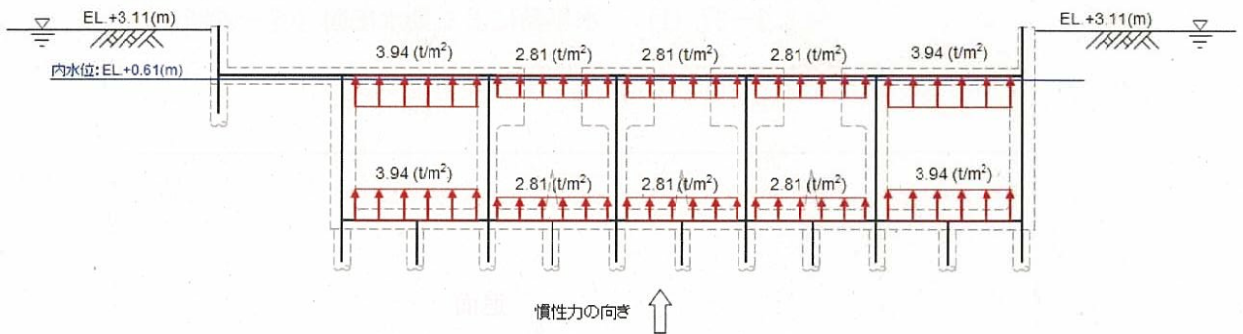


図 2.2-26 (2) 鉛直動による動水圧図 (④-④断面)

c. ⑥-⑥断面（縦断面）

図 2.2-27 に、⑥-⑥断面における動水圧図を示す。

⑥-⑥断面は取水ピットと取水路にまたがる縦断面であるが、取水路については、海に開放されており、かつ自由水面が存在する区間であることから動水圧は考慮しない。一方で、取水ピットは満水状態であり、かつ側壁には水平動による動水圧が作用すると考えられるため、これを考慮する。



図 2.2-27 (1) 水平動による動水圧図（⑥-⑥断面）

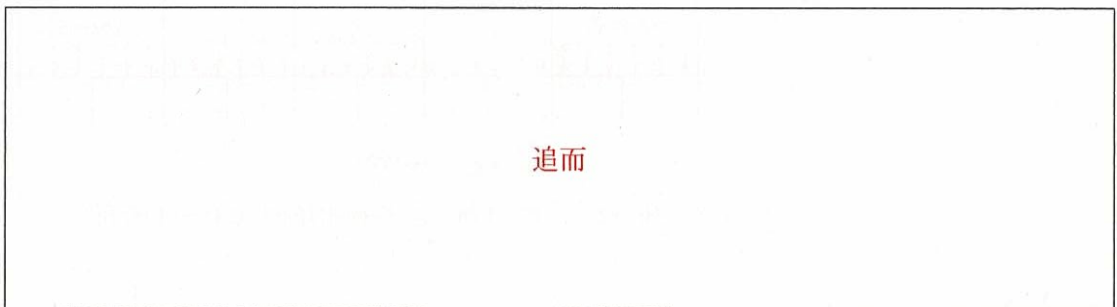


図 2.2-27 (2) 鉛直動による動水圧図（⑥-⑥断面）

(6) 竜巻及びPP防護設備

竜巻及びPP防護設備の荷重は解析の単位奥行き(1m)あたりの荷重および付加質量として考慮する。

a. ④-④断面(取水ピット)

図2.2-28に、④-④断面における竜巻及びPP防護設備の荷重図を示す。

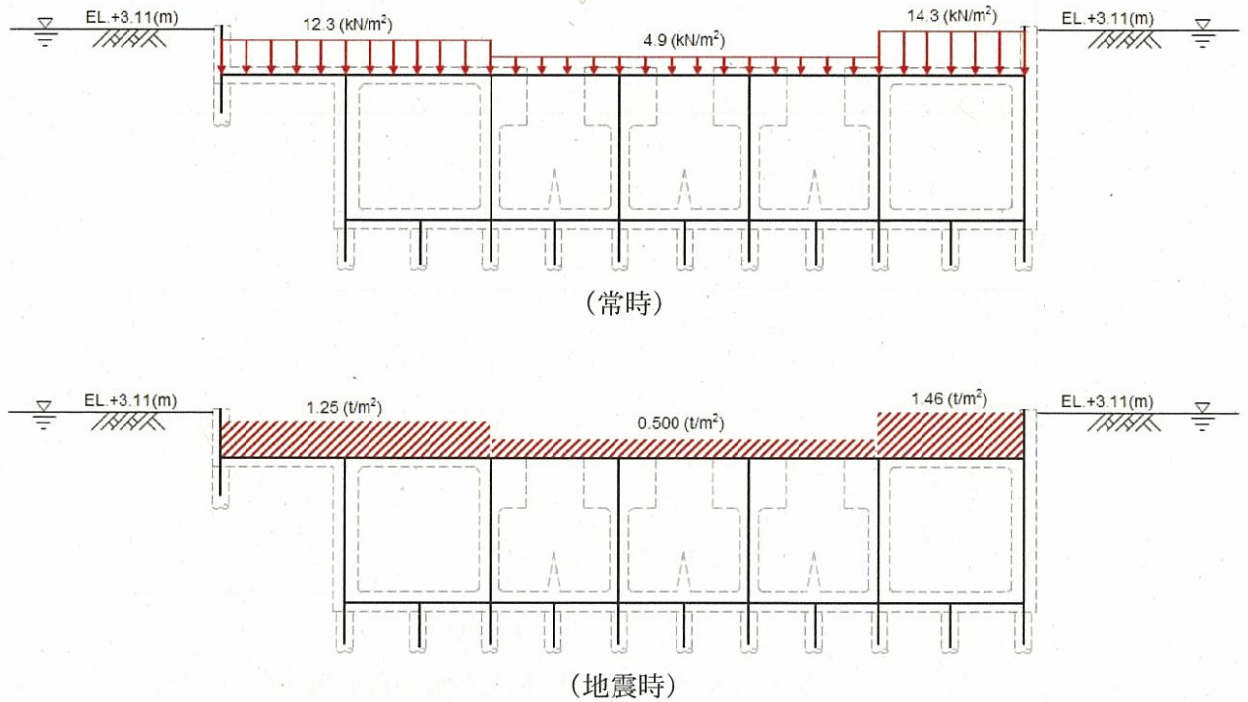
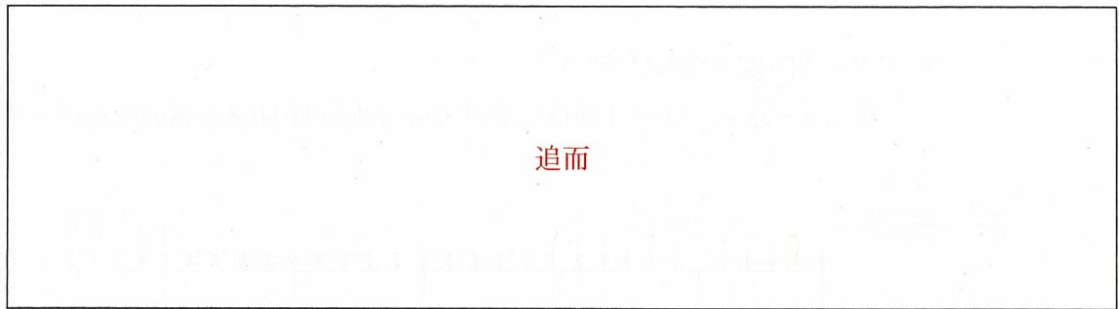


図2.2-28 竜巻及びPP防護設備の荷重図(④-④断面)

b. ⑥-⑥断面 (縦断図)

図 2.2-29 に、⑥-⑥断面における竜巻及び PP 防護設備の荷重図を示す。



(常時)



(地震時)

図 2.2-29 竜巻及び PP 防護設備の荷重図 (⑥-⑥断面)

2.2.11 地震応答解析の検討ケース

(1) 耐震設計における検討ケース

取水構造物の耐震設計における検討ケースを表 2.2-10 に示す。

表 2.2-10 取水構造物の耐震設計における検討ケース

検討ケース			① 原地盤に基づき液状化強度特性を用いた解析ケース(基本ケース)	② 地盤物性のばらつきを考慮(+1σ)した解析ケース	③ 地盤物性のばらつきを考慮(-1σ)した解析ケース	④ 地盤を強制的に液状化させることを仮定した解析ケース	⑤ 原地盤において非液状化の条件を仮定した解析ケース	⑥ 地盤物性のばらつきを考慮(+1σ)して非液状化の条件を仮定した解析ケース
液状化強度特性の設定			原地盤に基づき液状化強度特性(標準偏差を考慮)	原地盤に基づき液状化強度特性(標準偏差を考慮)	原地盤に基づき液状化強度特性(標準偏差を考慮)	敷地に存在しない豊浦標準砂に基づく液状化強度特性	液状化パラメータを非適用	液状化パラメータを非適用
地震波(位相)	S _s -D1	(++)	1	1	1	1	1	1
		(+-)	1					
		(-+)	1					
		(--)	1					
	S _s -11	(++)	1					
	S _s -12	(++)	1					
	S _s -13	(++)	1					
	S _s -14	(++)	1					
	S _s -21	(++)	1					
	S _s -22	(++)	1					
	S _s -31	(++)	1					
		(-+)	1					
計			12	1	1	1	1	1

①の検討において、最も厳しい(許容限界に対する余裕が最も小さい)地震動を用いて実施

(2) 機器・配管系に対する加速度応答抽出のための検討ケース

機器・配管系に対する加速度応答の抽出における検討ケースを表 2.2-11 に示す。

表 2.2-11 機器・配管系への加速度応答の抽出における検討ケース

検討ケース			④ 地盤を強制的に液状化させることを仮定した解析ケース	⑤ 原地盤において非液状化の条件を仮定した解析ケース	⑥ 地盤物性のばらつきを考慮 (+1σ) して非液状化の条件を仮定した解析ケース
液状化強度特性の設定			敷地に存在しない豊浦標準砂に基づく液状化強度特性	液状化パラメータを非適用	液状化パラメータを非適用
地震波 (位相)	S _s -D1	(++)	⑤において機器の周期帯で加速度応答が最も大きい地震波1波と変位量が最も大きくなる地震波1波の計2波分で実施 <input type="checkbox"/>	1	⑤において機器の周期帯で加速度応答が最も大きい地震波1波と変位量が最も大きくなる地震波1波の計2波分で実施 <input type="checkbox"/>
		(+-)		1	
		(-+)		1	
		(--)		1	
	S _s -11	(++)		1	
	S _s -12	(++)		1	
	S _s -13	(++)		1	
	S _s -14	(++)		1	
	S _s -21	(++)		1	
	S _s -22	(++)		1	
	S _s -31	(++)		1	
		(-+)		1	
計			2	12	2

2.3 評価内容

2.3.1 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 次元波動論によって、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。

図 2.3-1 に入力地震動算定の概念図を、図 2.3-2 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示す。入力地震動の算定には解析コード「k-SHAKE Ver. 6.2.0」を使用する。

なお、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。断層モデル波である $S_s-11 \sim S_s-22$ については、特定の方向性を有することから、構造物の評価対象断面方向を考慮し、方位補正を行う。具体的には NS 方向及び EW 方向の地震動について構造物の評価断面方向の成分を求め、各々を足し合わせることで方位補正した地震動を設定する。

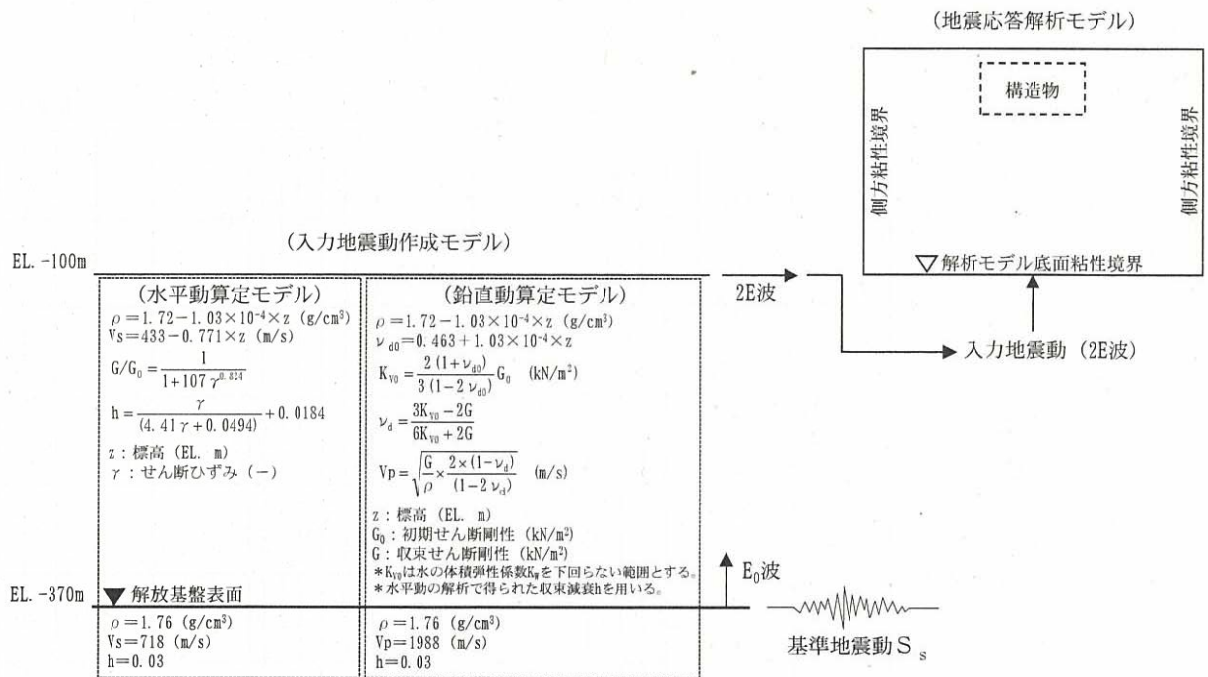
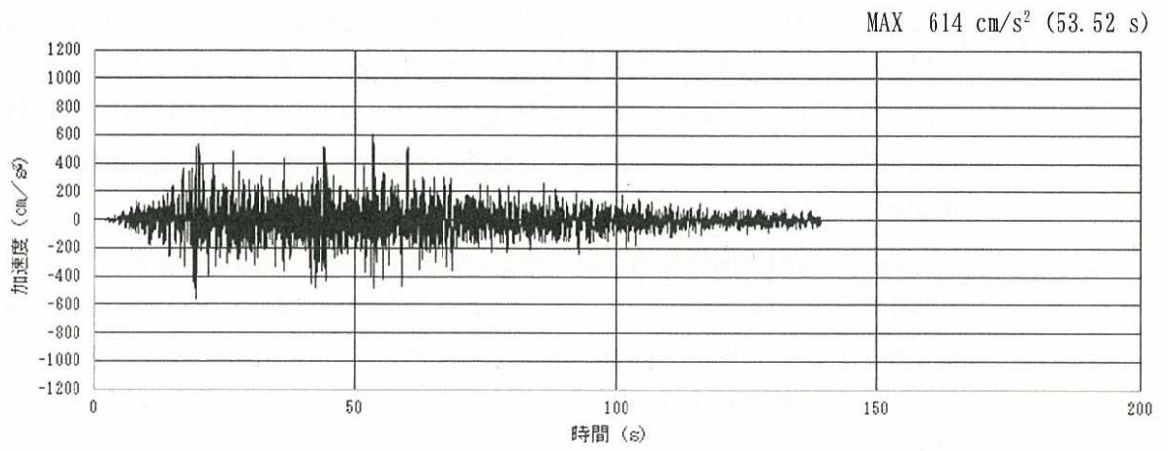
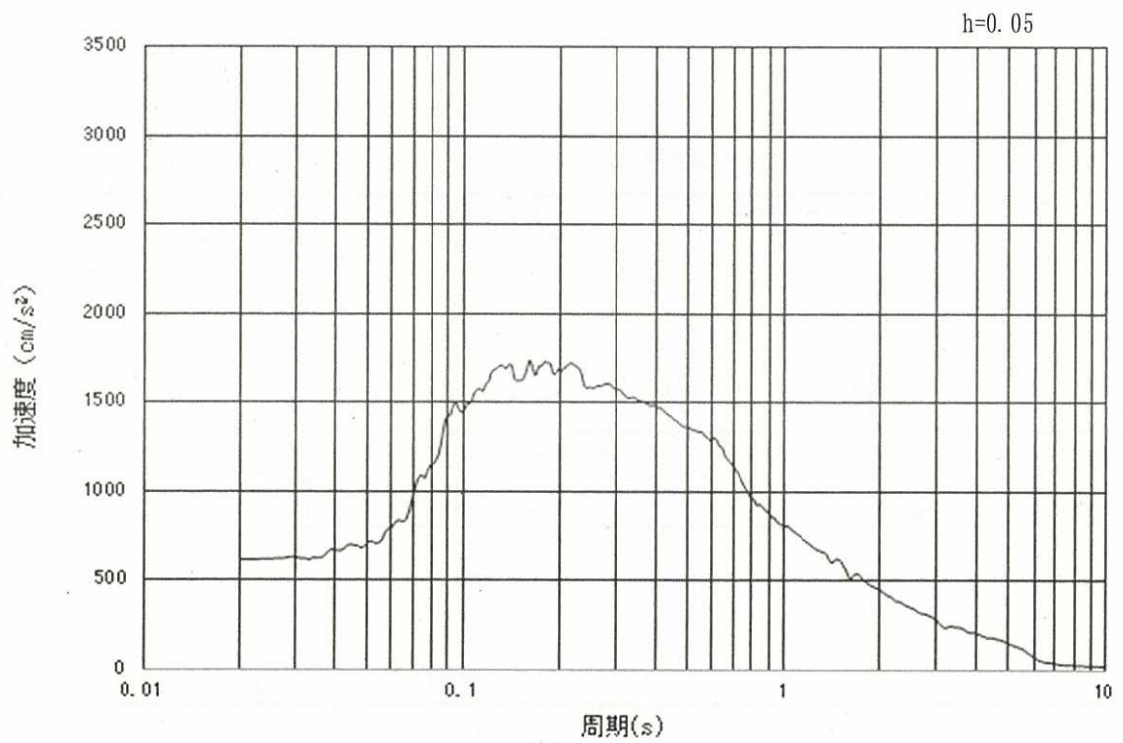


図 2.3-1 入力地震動算出の概念図

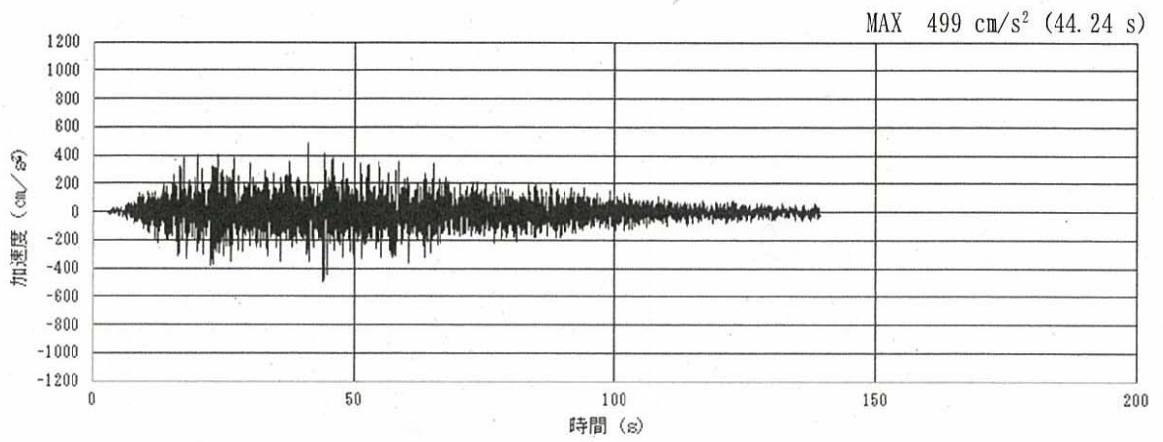


(a) 加速度時刻歴波形

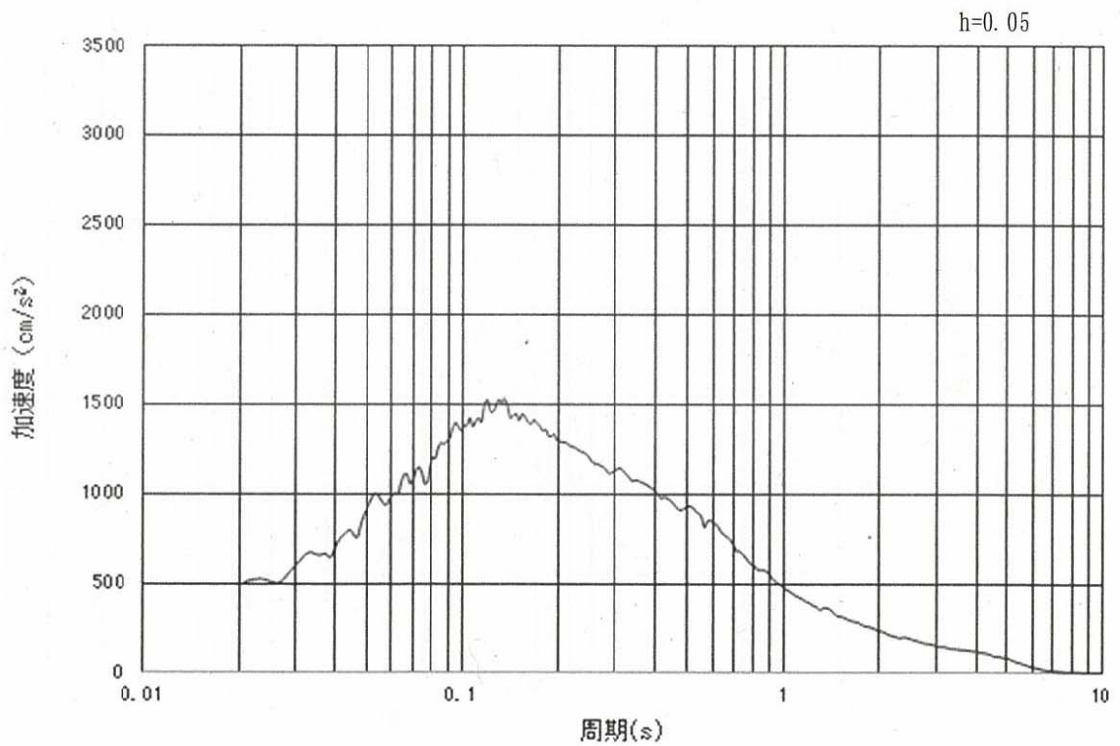


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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: S_s-D1)

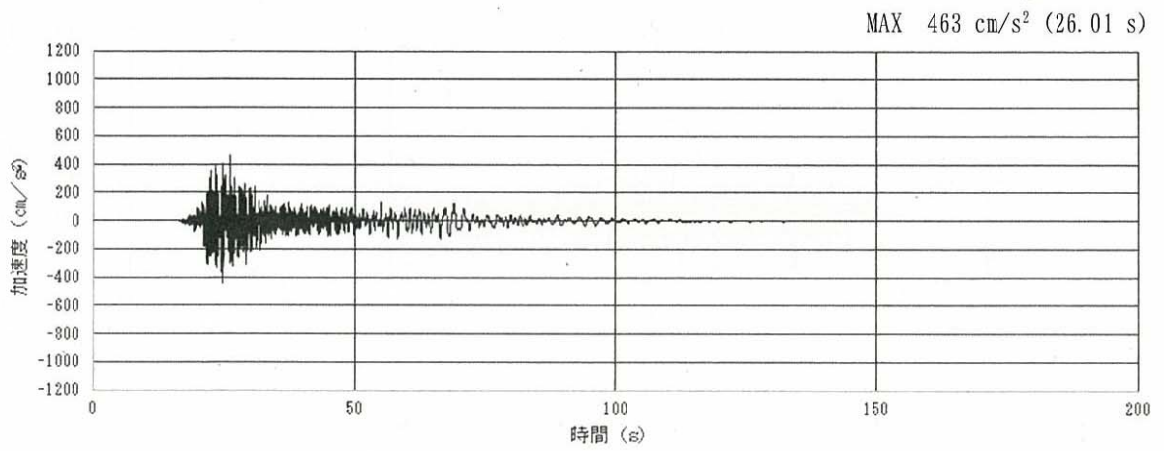


(a) 加速度時刻歴波形

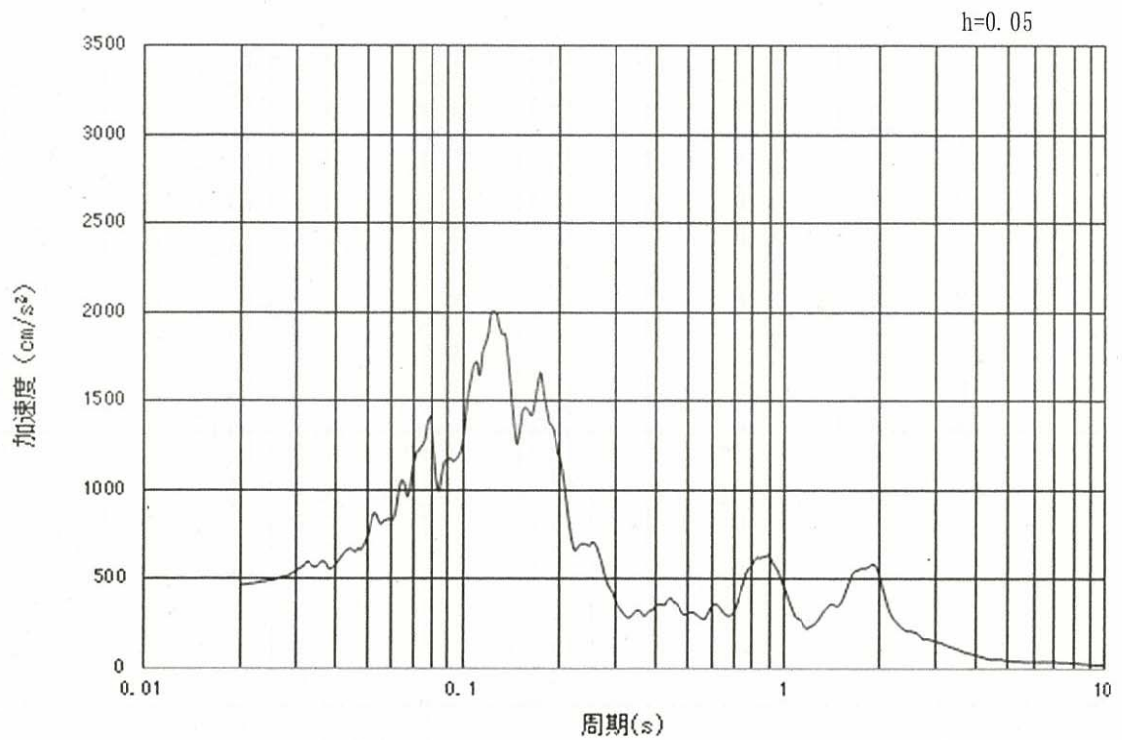


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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: S_s-D1)

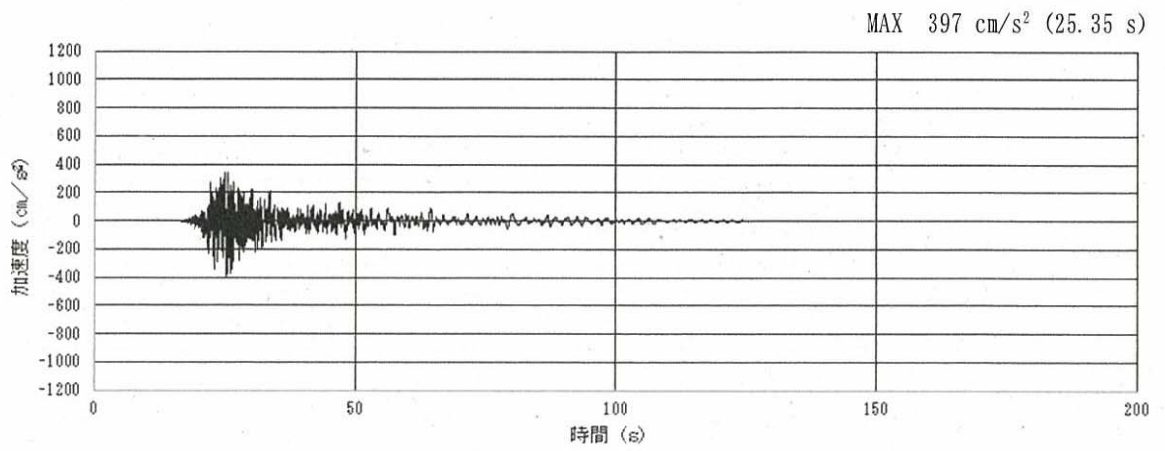


(a) 加速度時刻歴波形

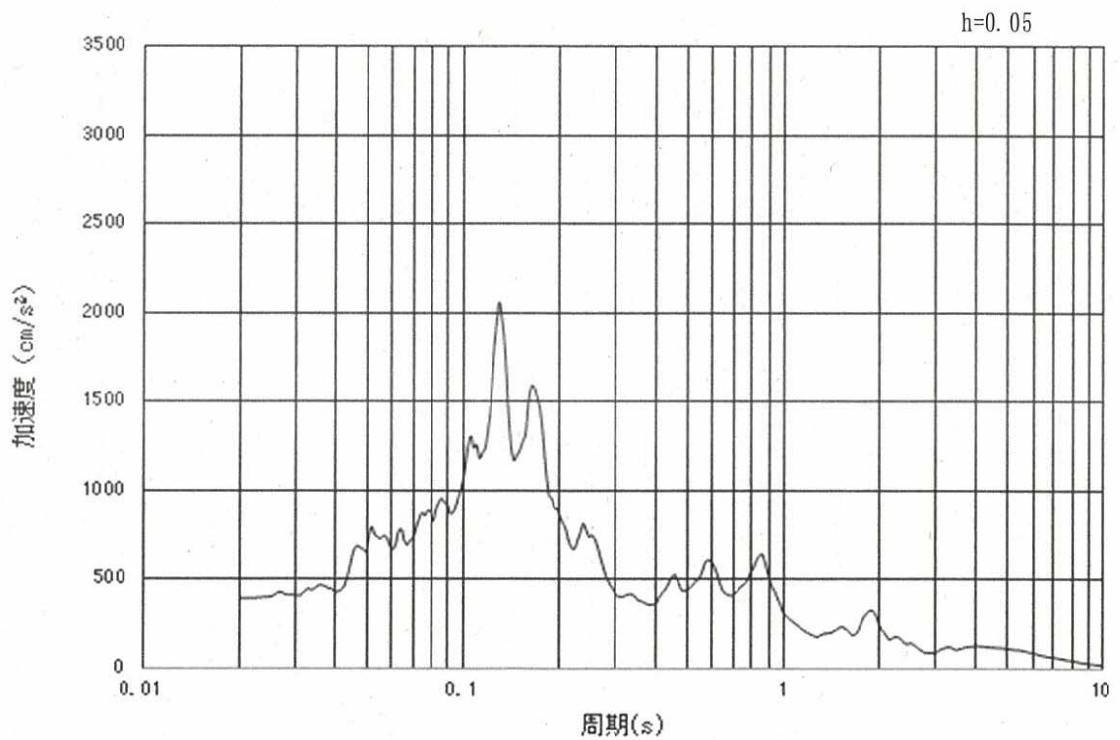


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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: S_s-11 NS 成分)

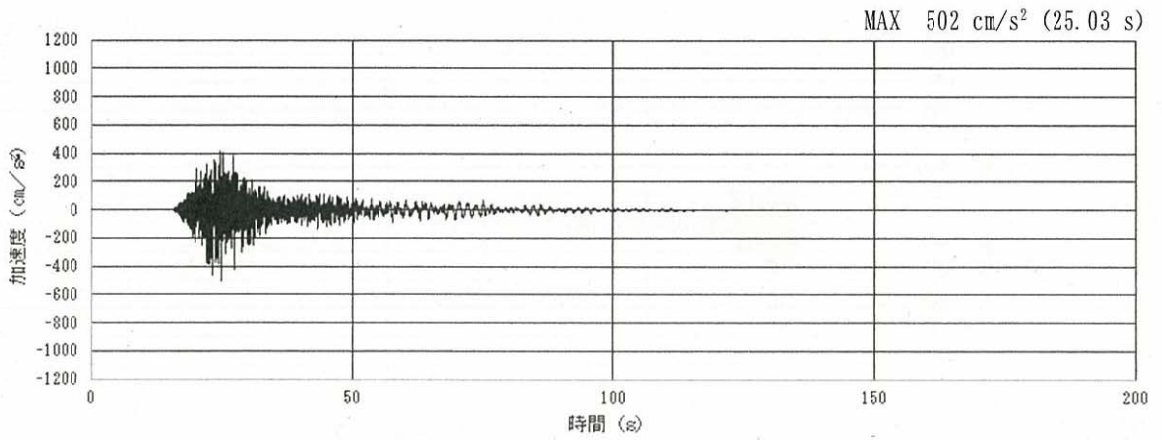


(a) 加速度時刻歴波形

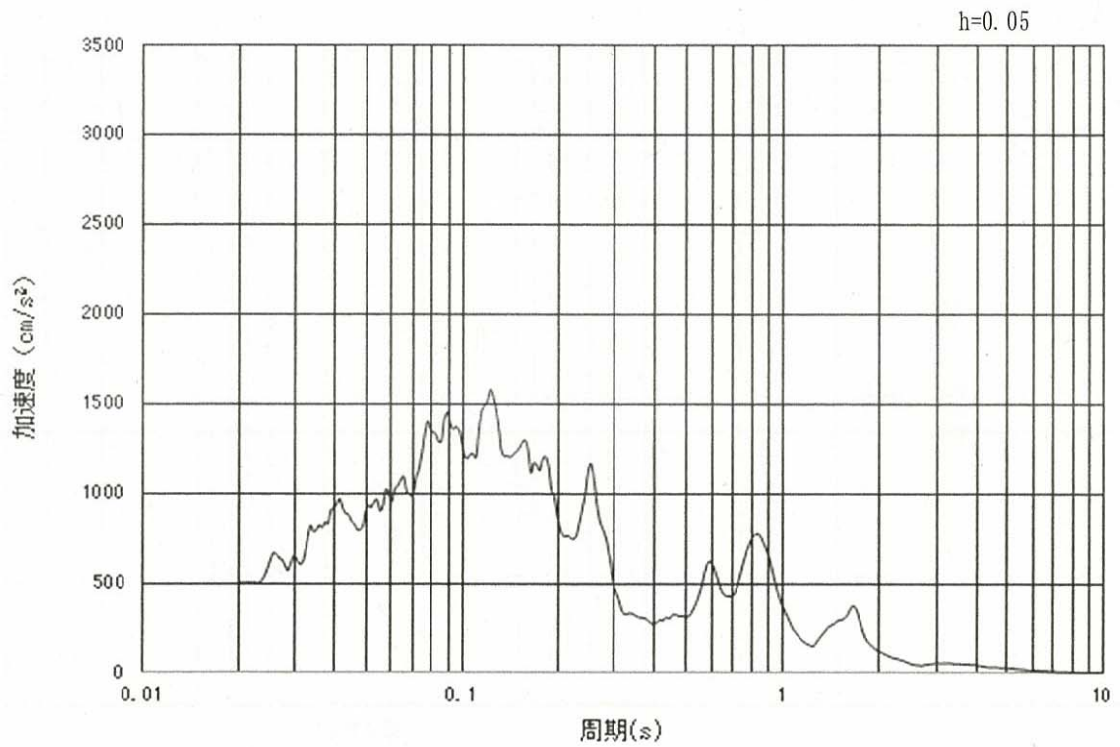


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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
(水平方向: S_s-11 EW 成分)

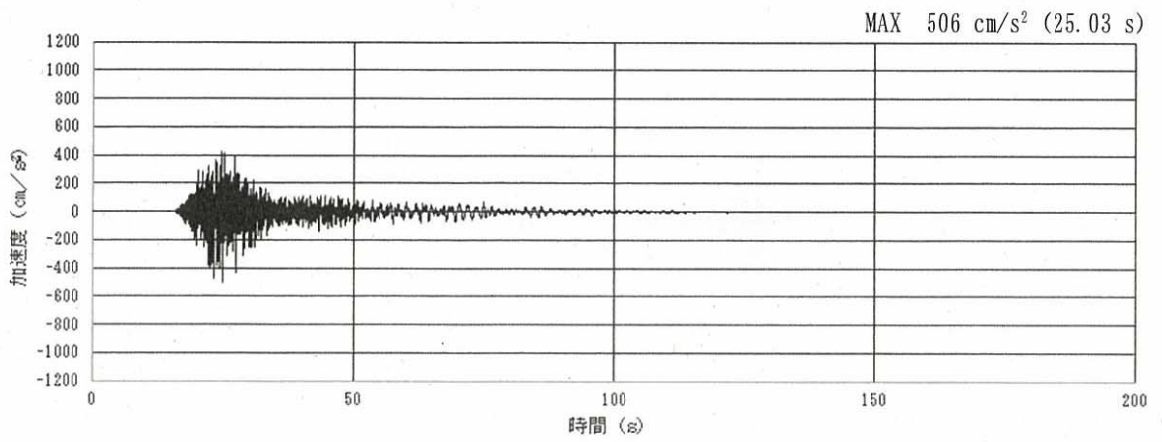


(a) 加速度時刻歴波形

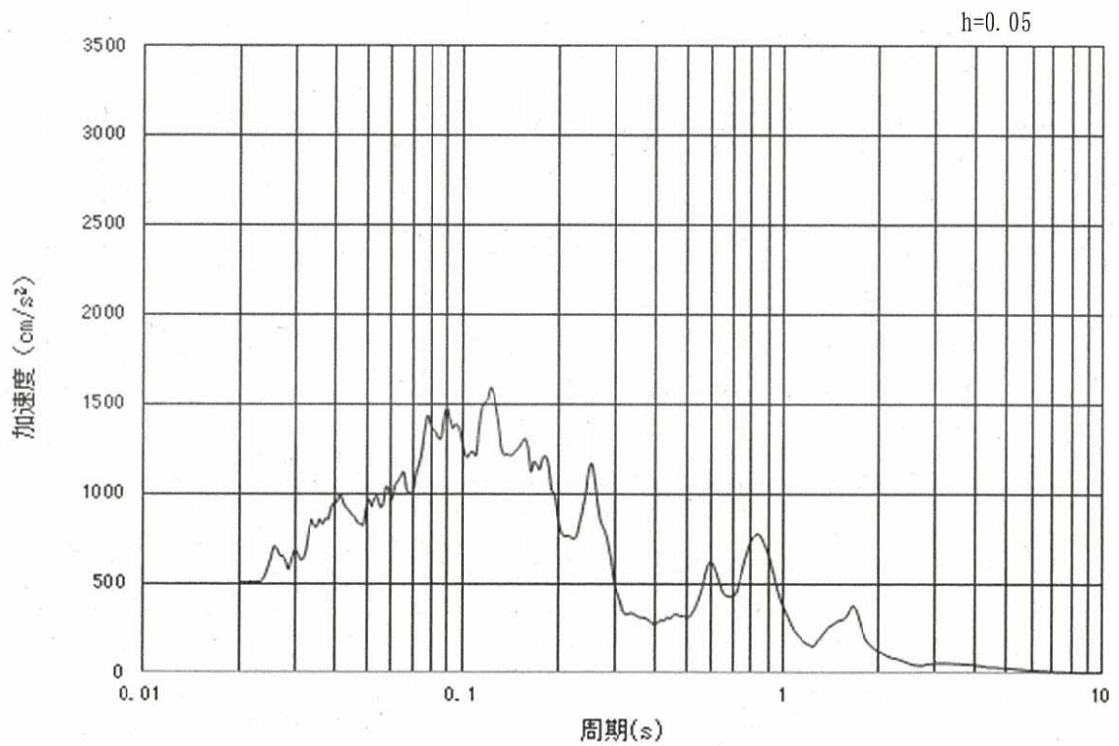


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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
(鉛直方向: S_s-11 UD 成分 (NS 方向))

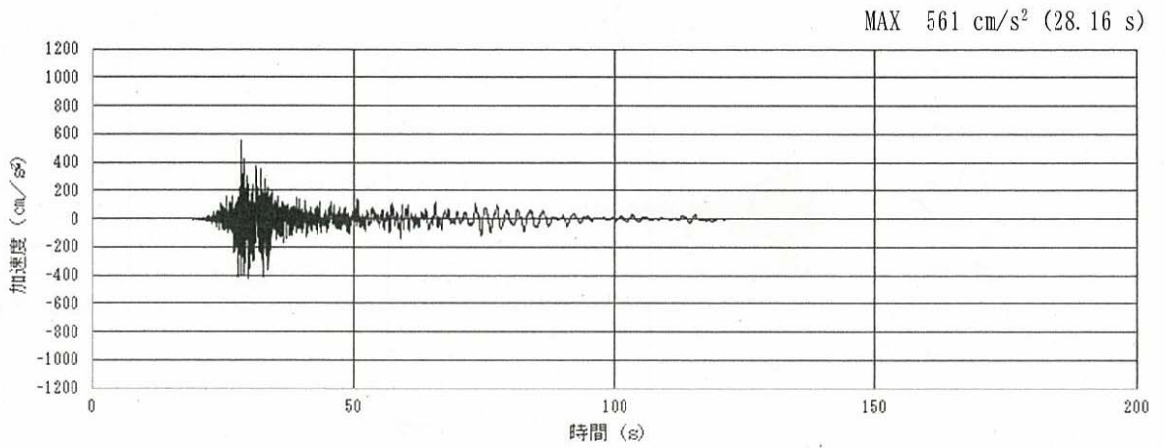


(a) 加速度時刻歴波形

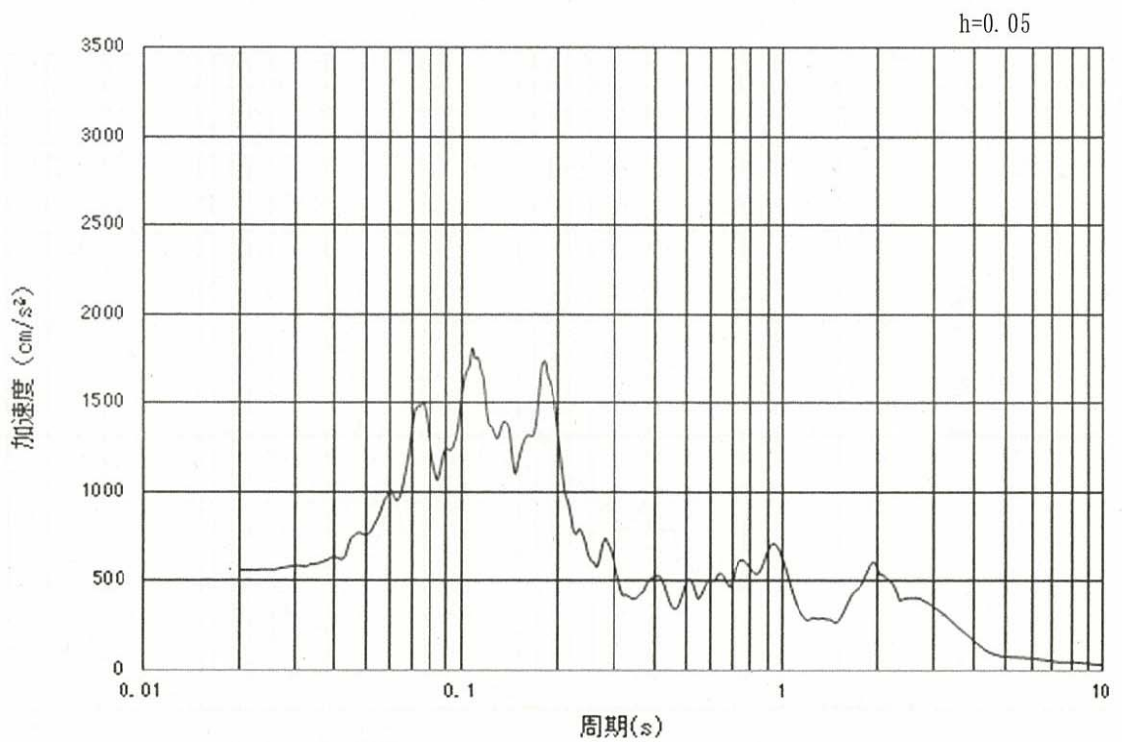


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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: S_s-11 UD 成分 (EW 方向))

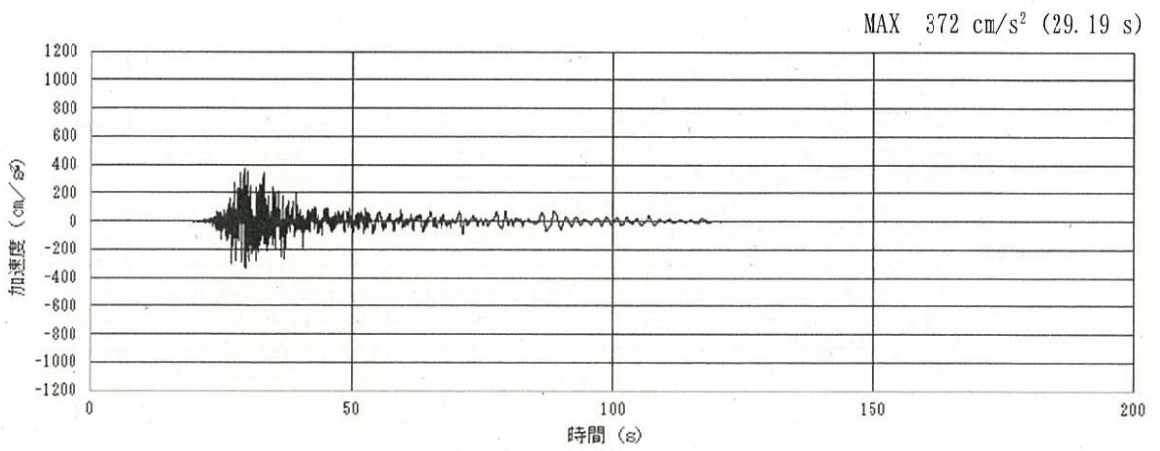


(a) 加速度時刻歴波形

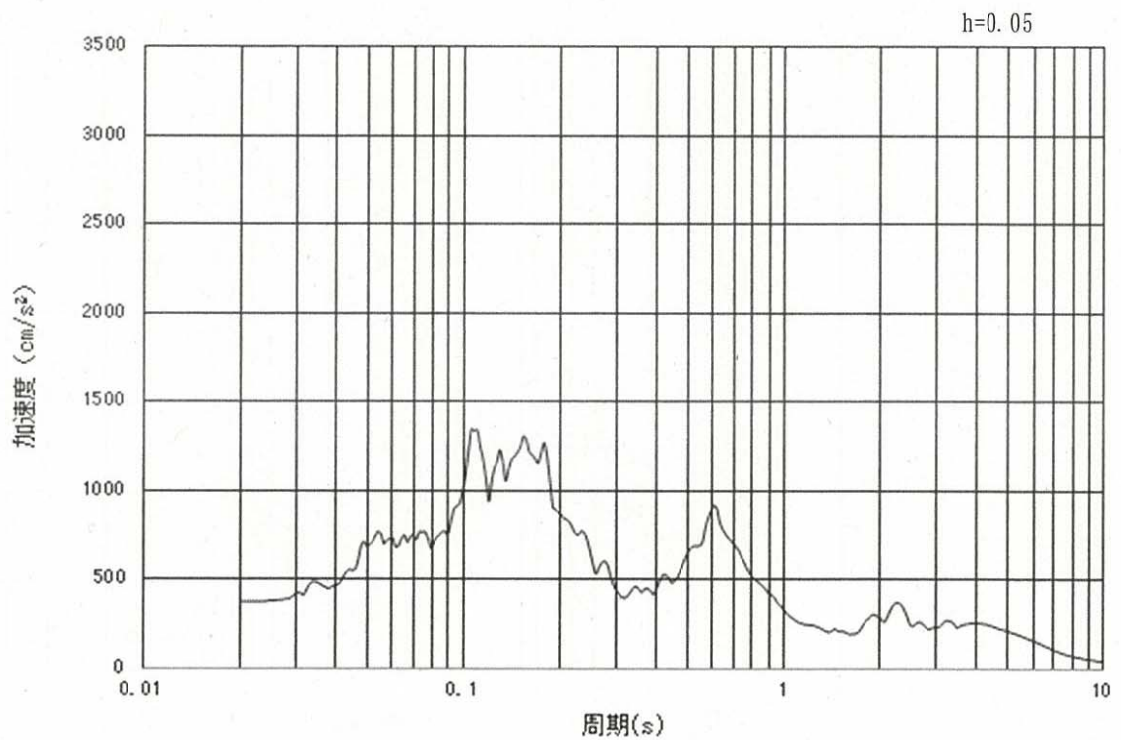


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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: S_s-12 NS 成分)

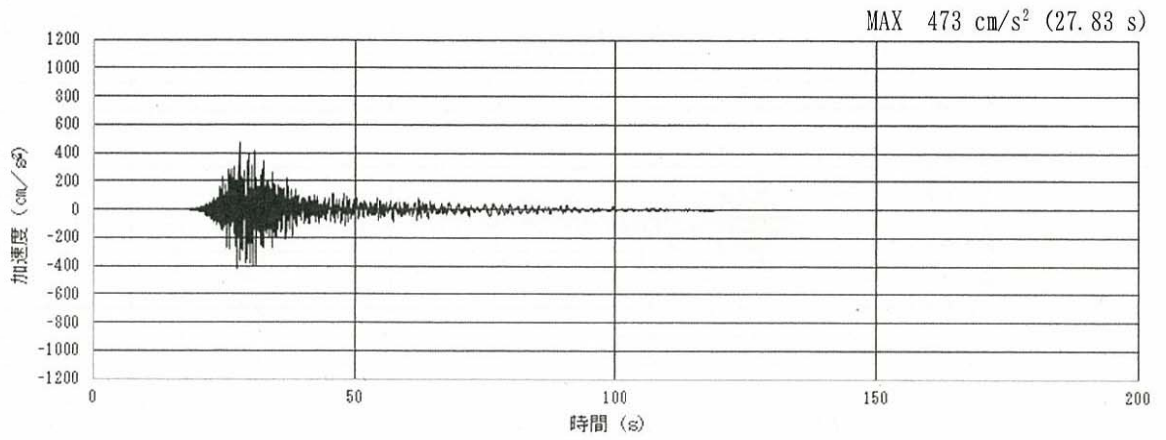


(a) 加速度時刻歴波形

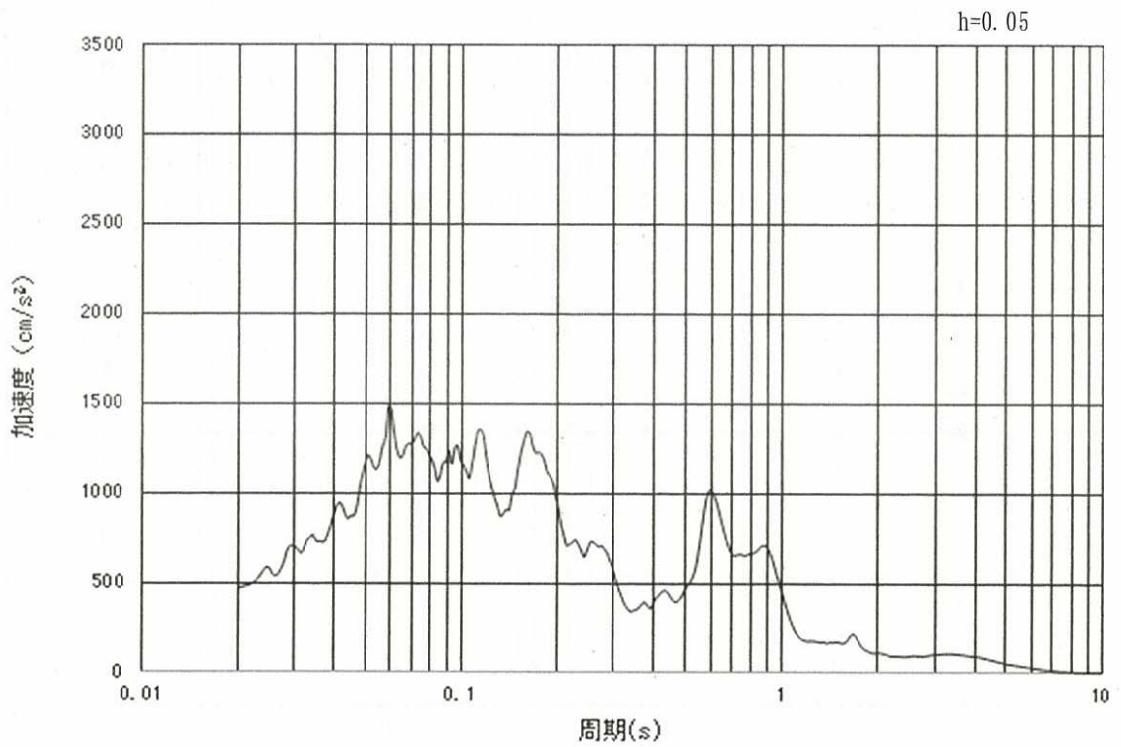


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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
(水平方向：S_s-12 EW 成分)

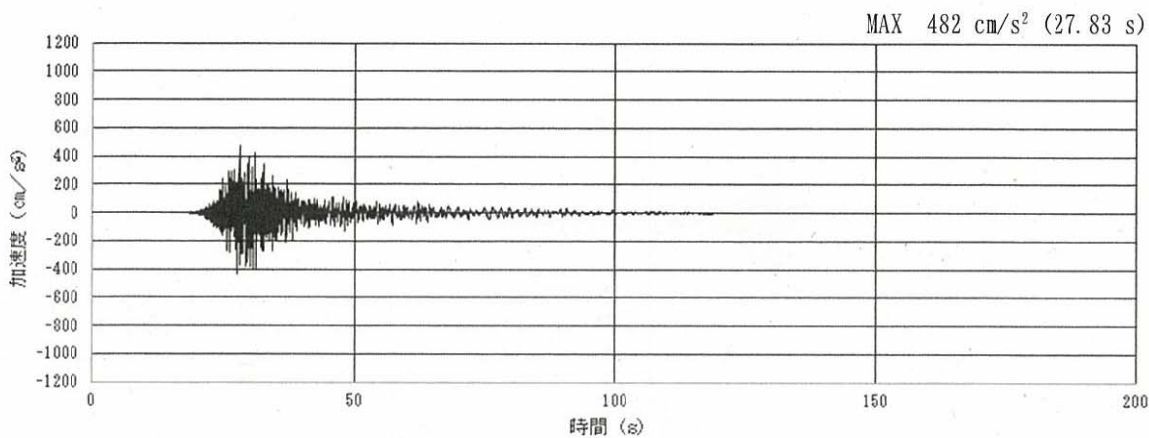


(a) 加速度時刻歴波形

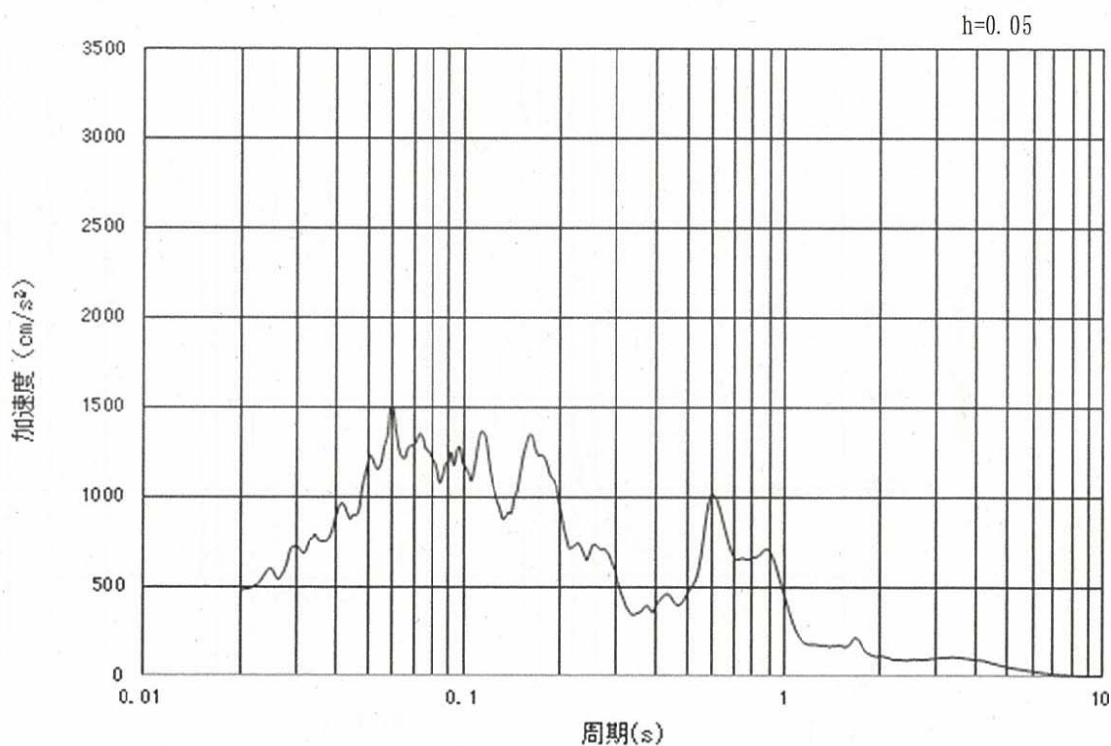


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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
(鉛直方向: S_s-12 UD 成分 (NS 方向))

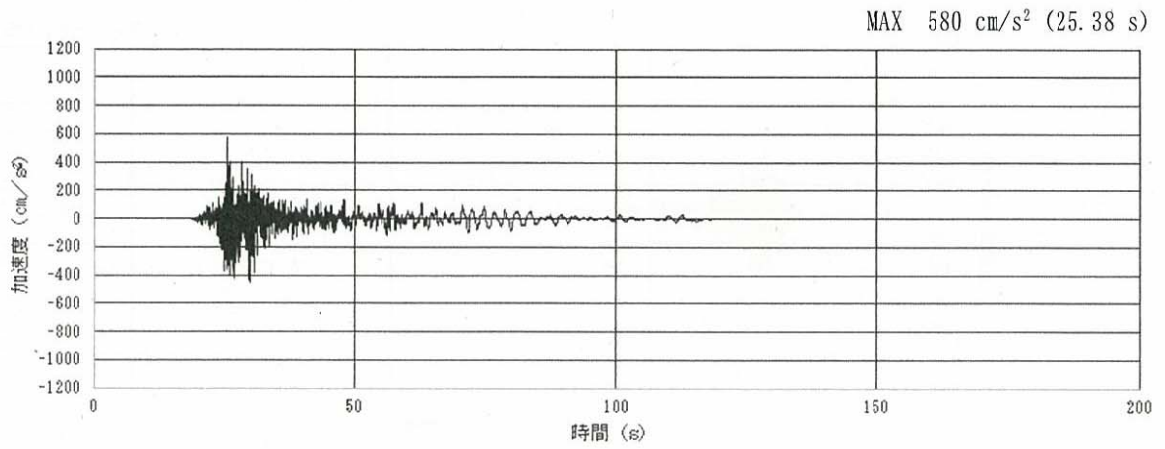


(a) 加速度時刻歴波形

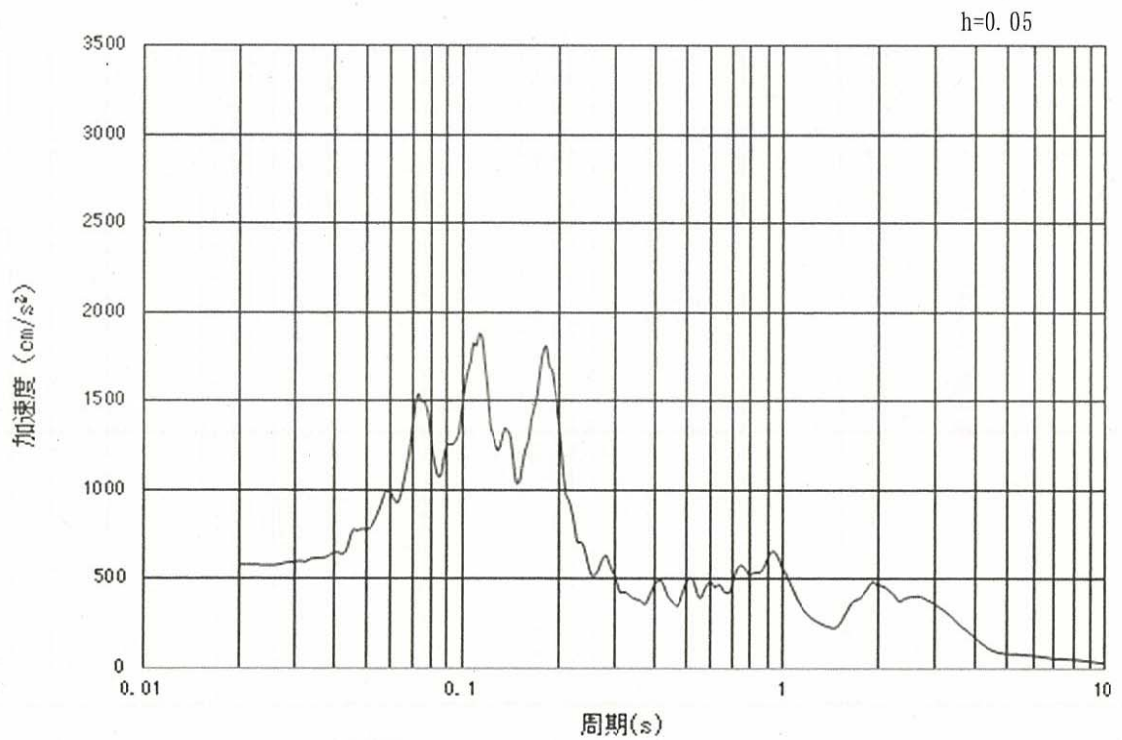


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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: S_s-12 UD 成分 (EW 方向))

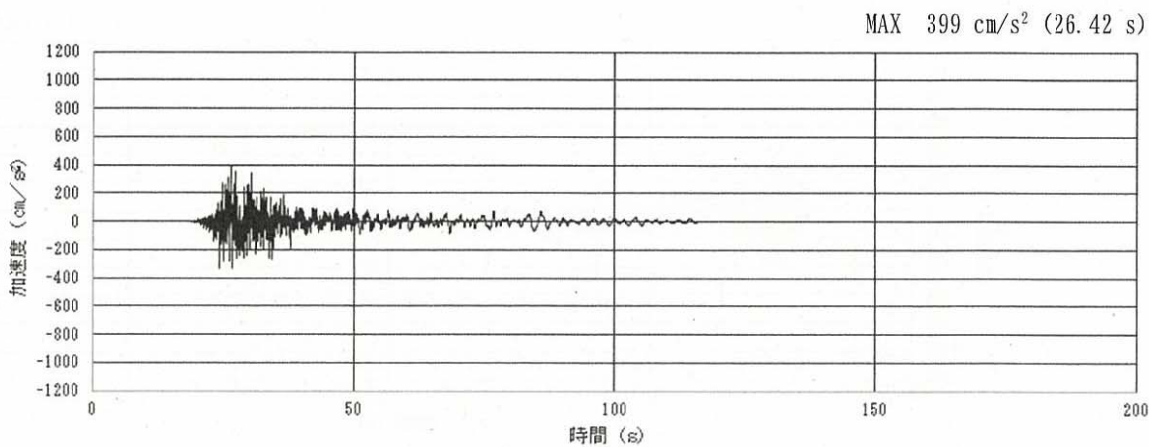


(a) 加速度時刻歴波形

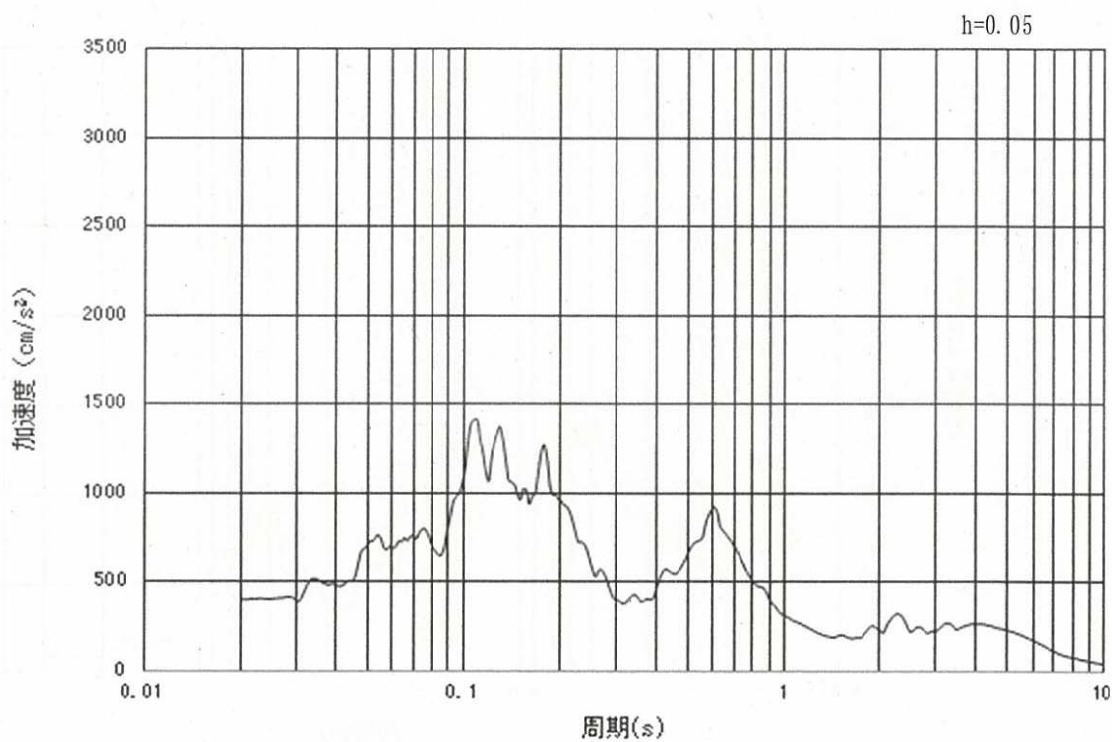


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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: S_s-13 NS 成分)

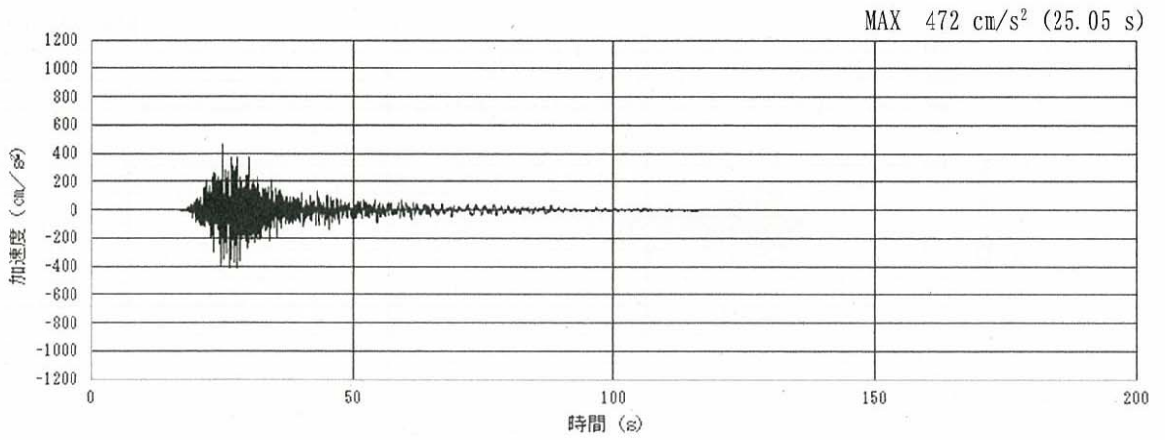


(a) 加速度時刻歴波形

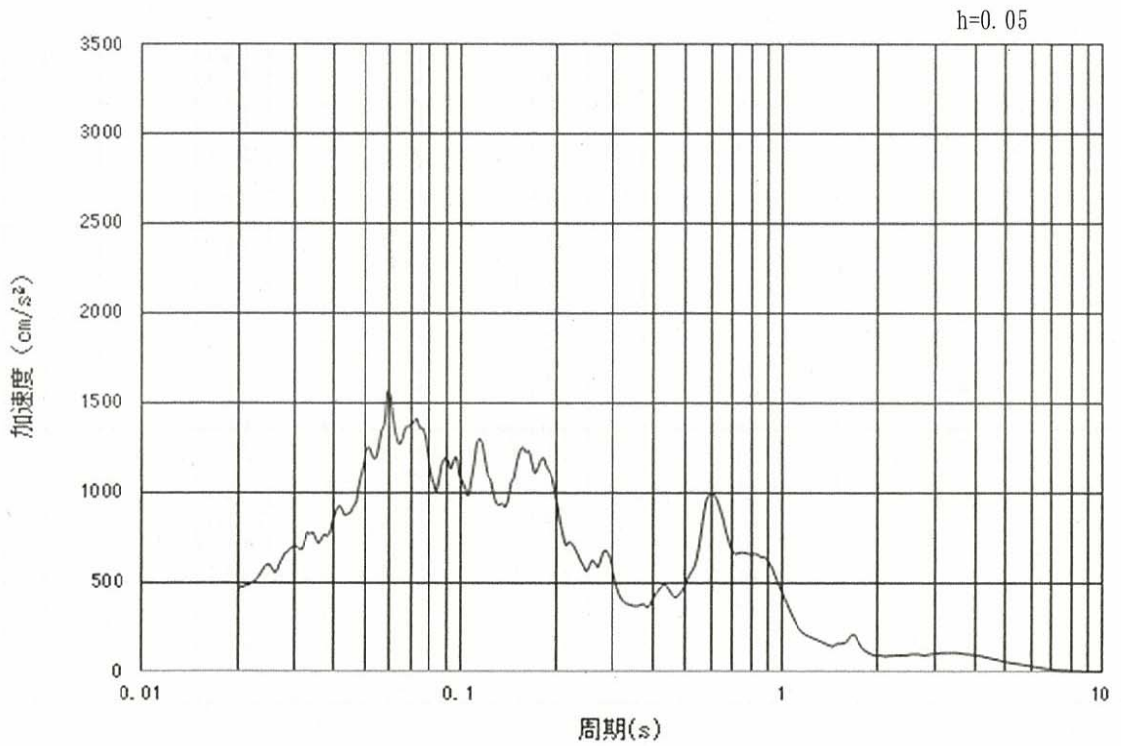


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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
(水平方向: S_s-13 EW 成分)

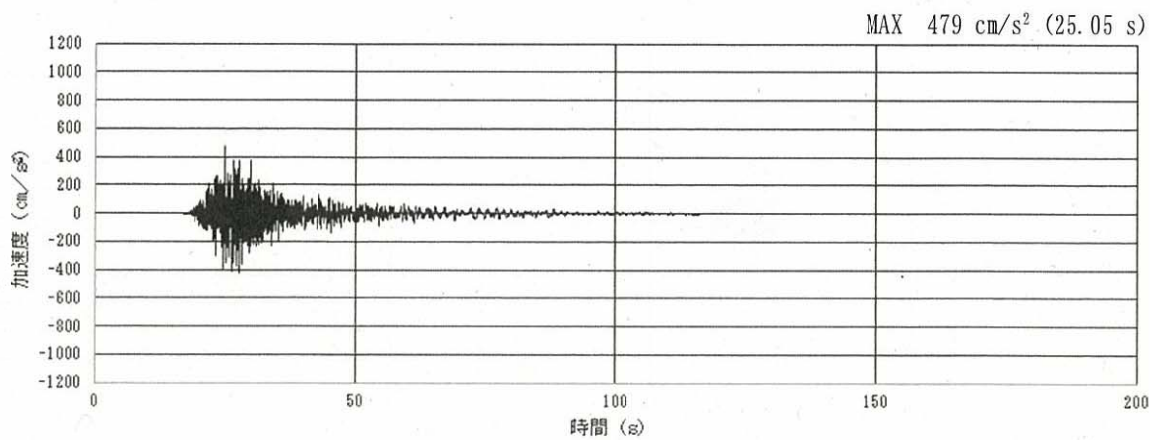


(a) 加速度時刻歴波形

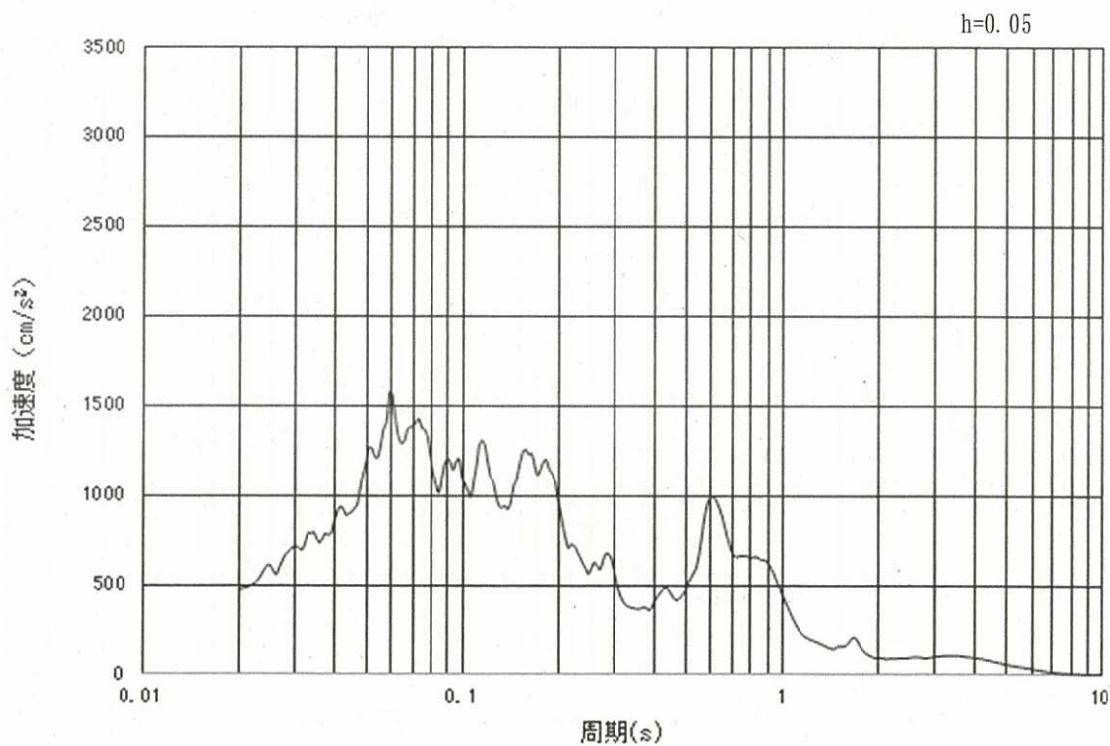


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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
(鉛直方向: S_s-13 UD 成分 (NS 方向))

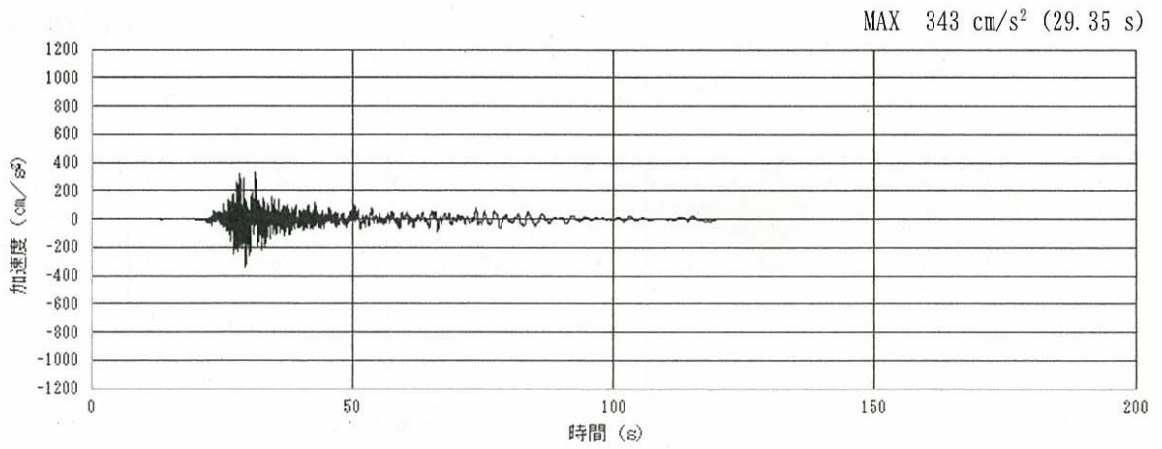


(a) 加速度時刻歴波形

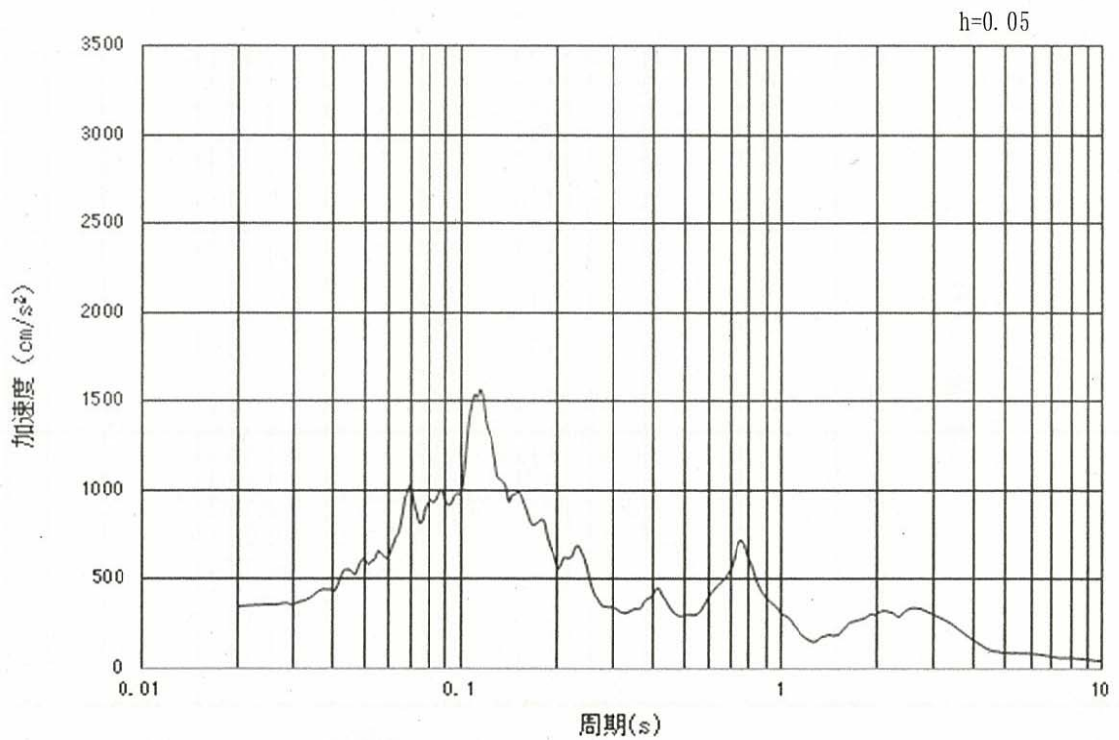


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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: S_s-13 UD 成分 (EW 方向))

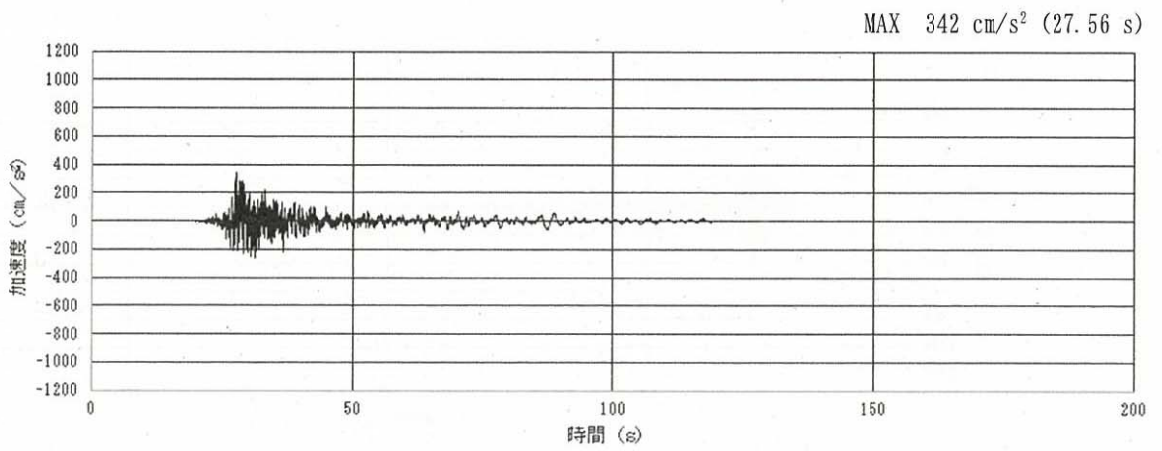


(a) 加速度時刻歴波形

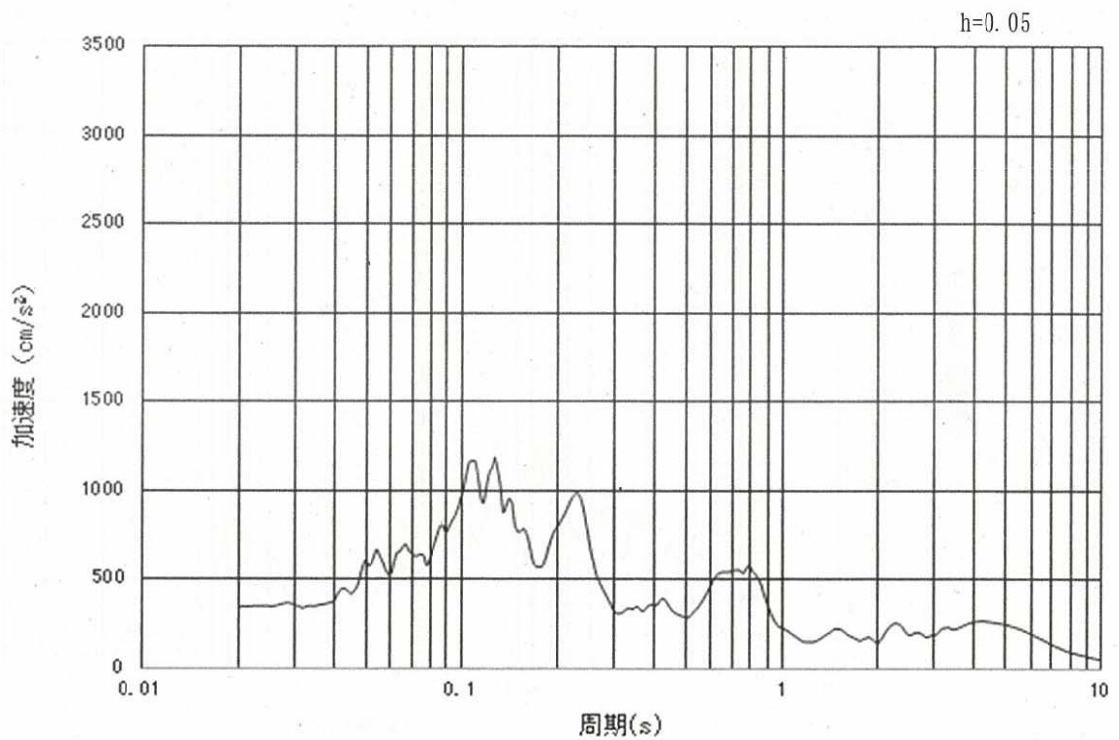


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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: S_s-14 NS 成分)

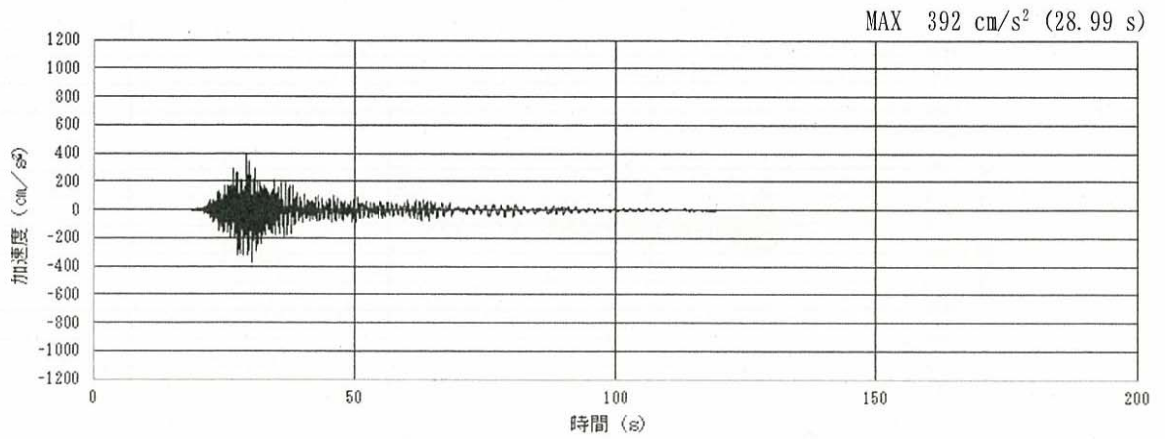


(a) 加速度時刻歴波形

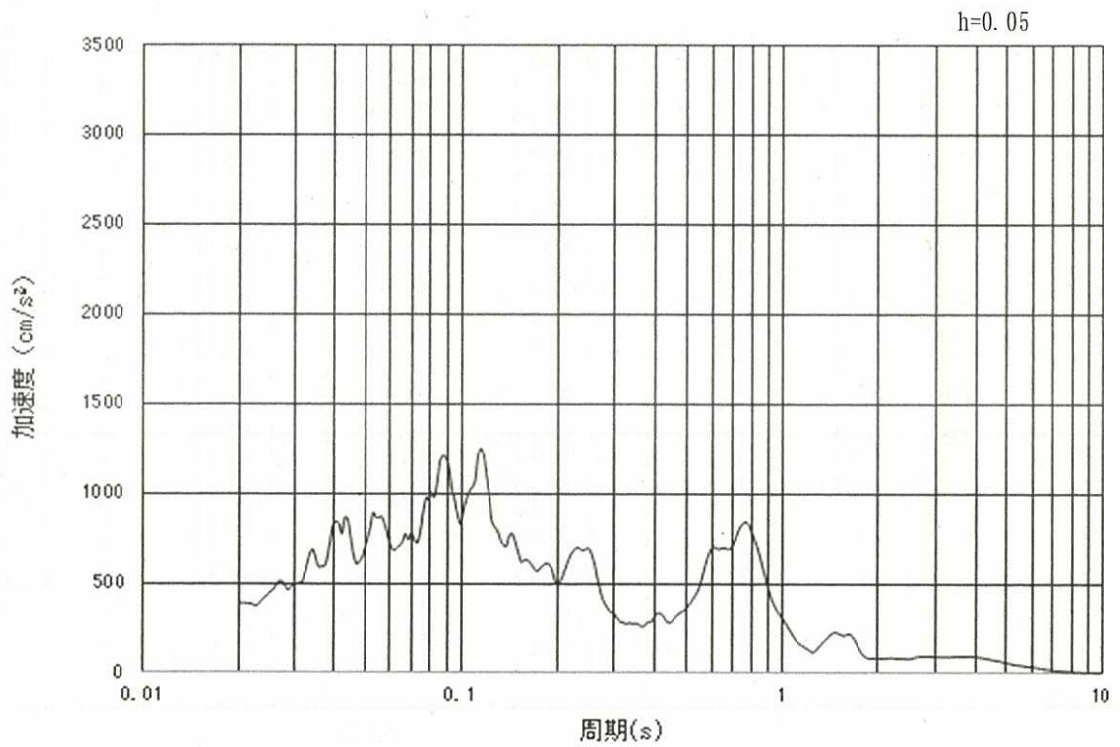


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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
(水平方向: S_s-14 EW 成分)

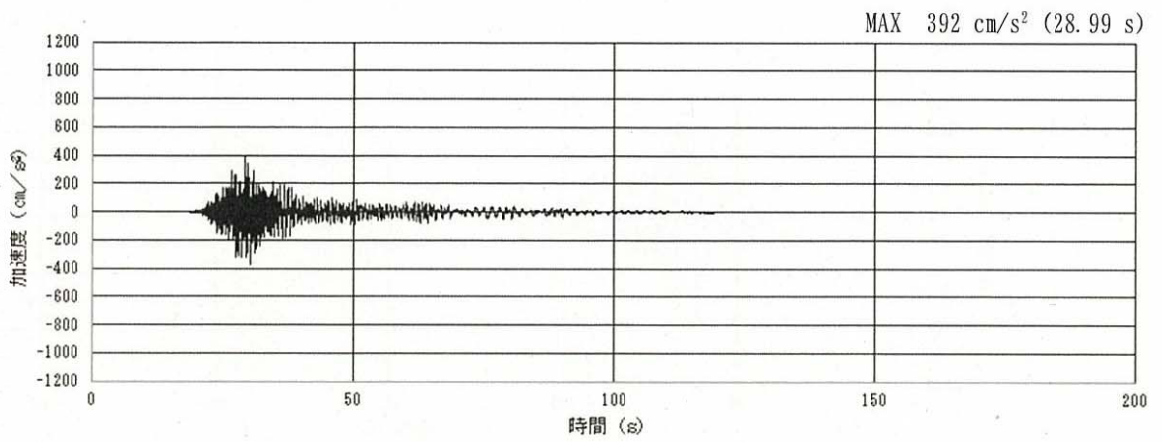


(a) 加速度時刻歴波形

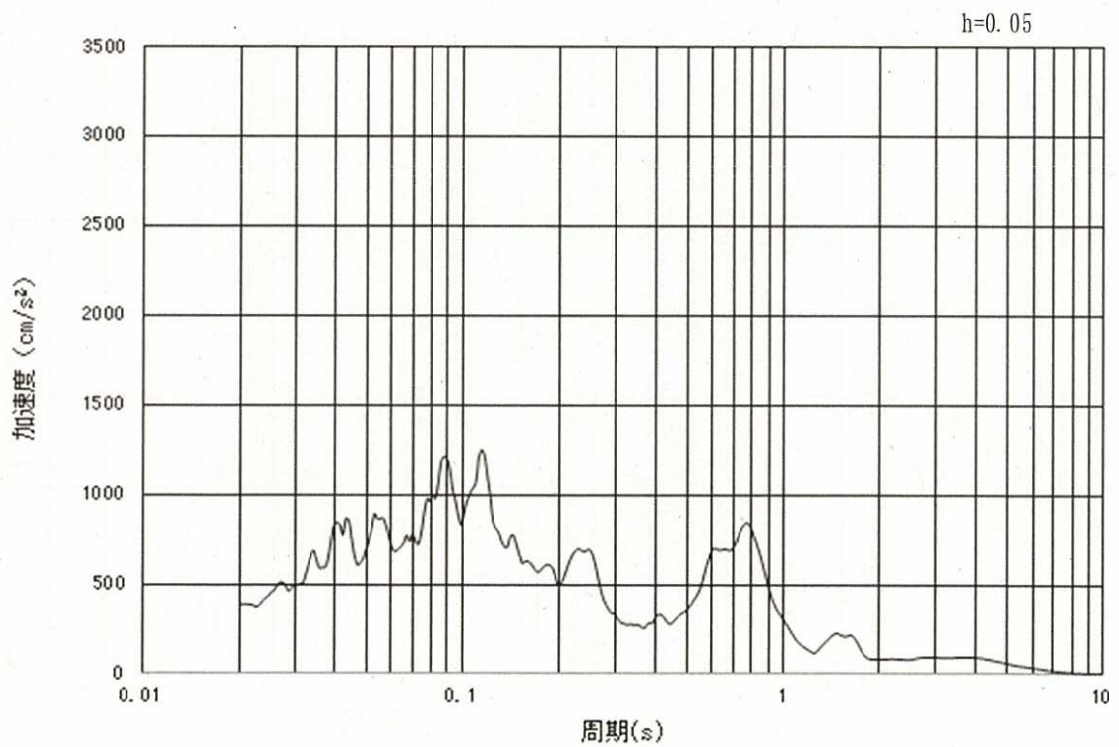


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (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
(鉛直方向: S_s-14 UD 成分 (NS 方向))

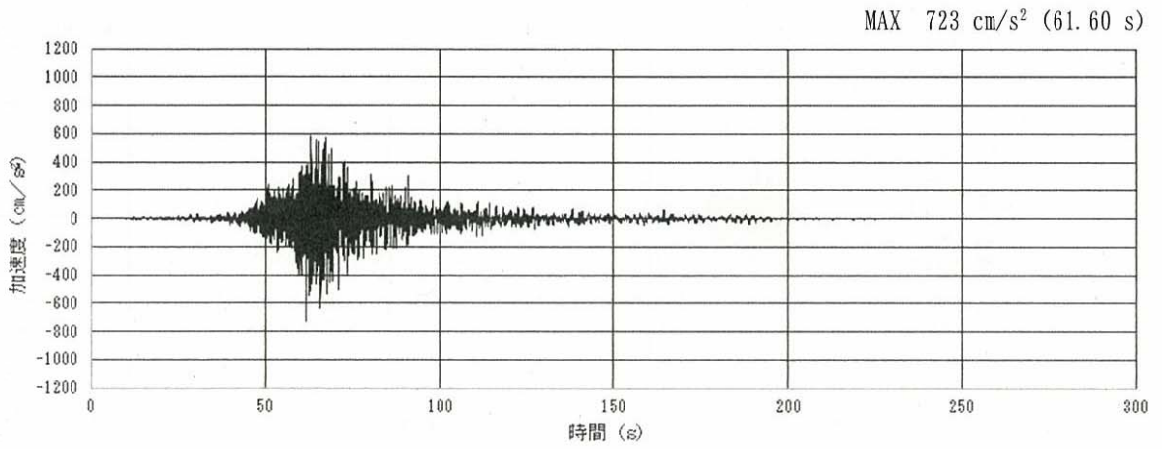


(a) 加速度時刻歴波形

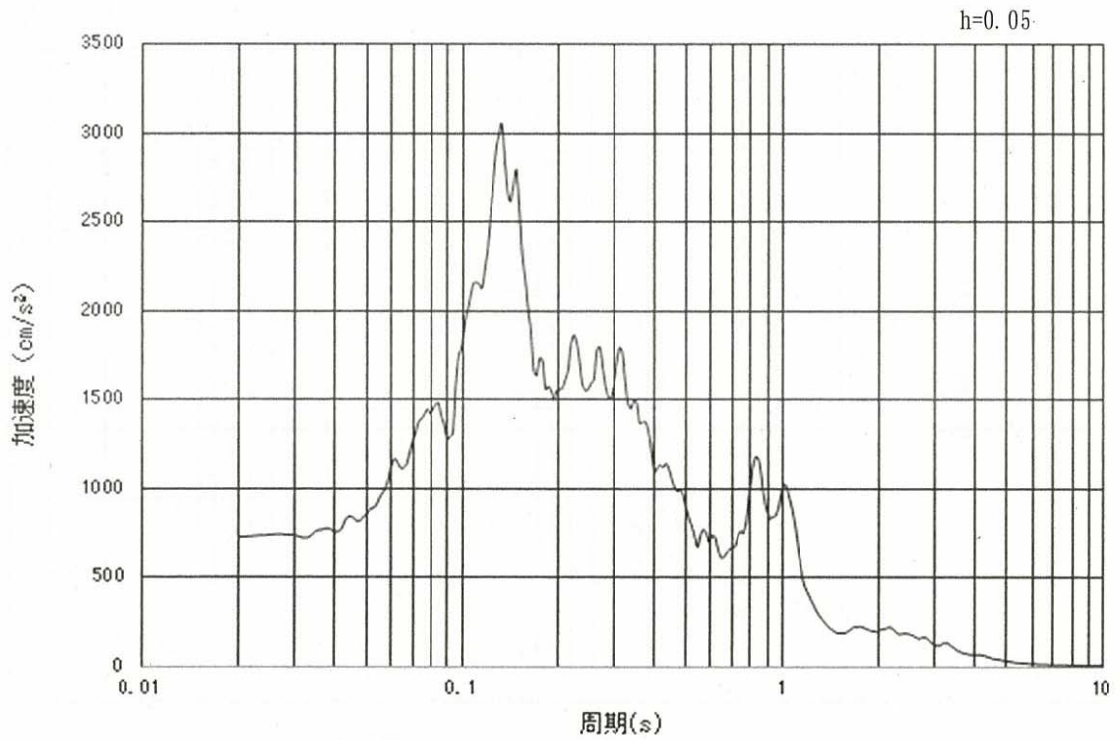


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (18) 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: S_s-14 UD 成分 (EW 方向))

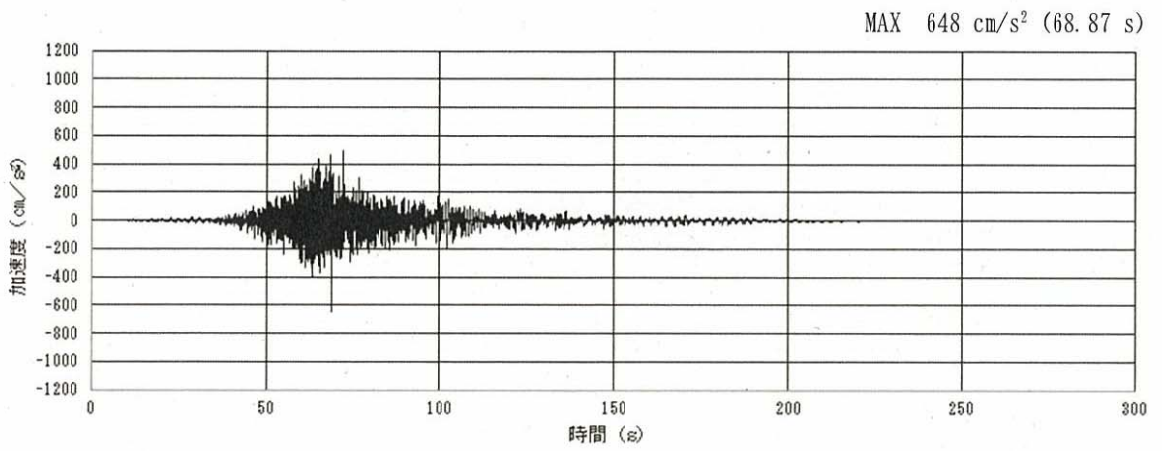


(a) 加速度時刻歴波形

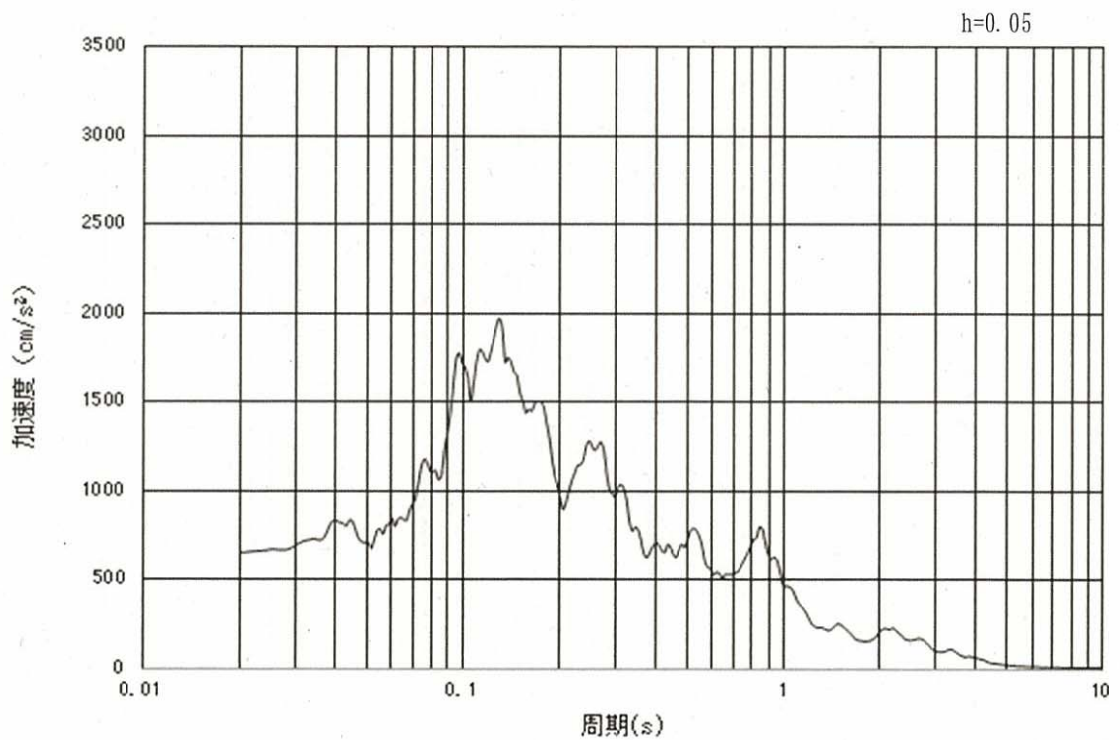


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (19) 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: S_s-21 NS 成分)

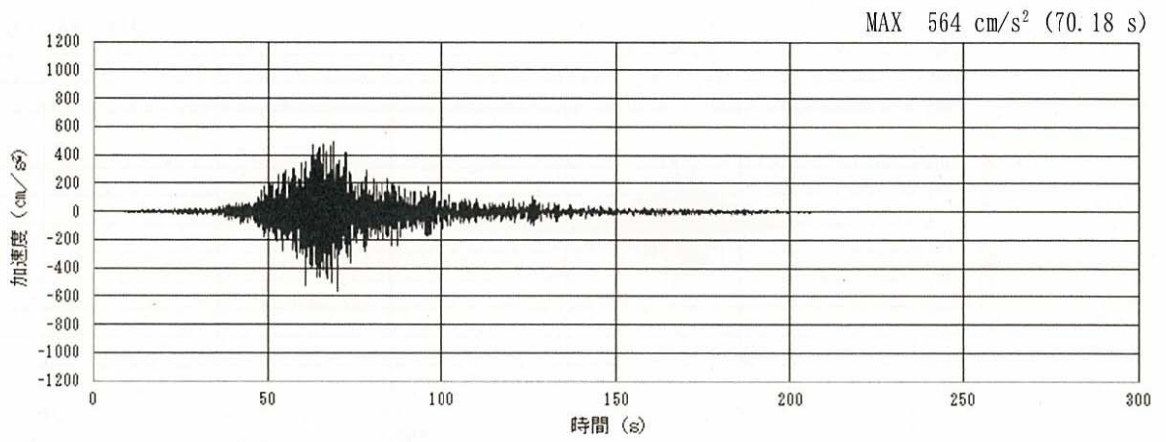


(a) 加速度時刻歴波形

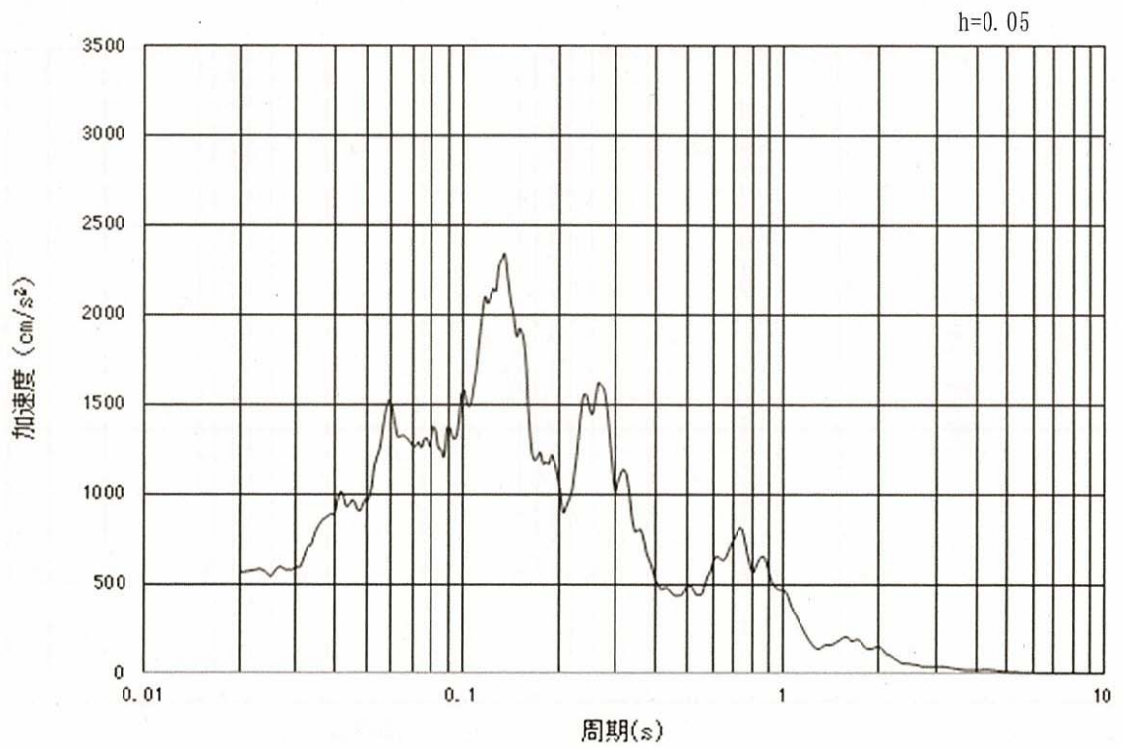


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (20) 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: S_s-21 EW 成分)

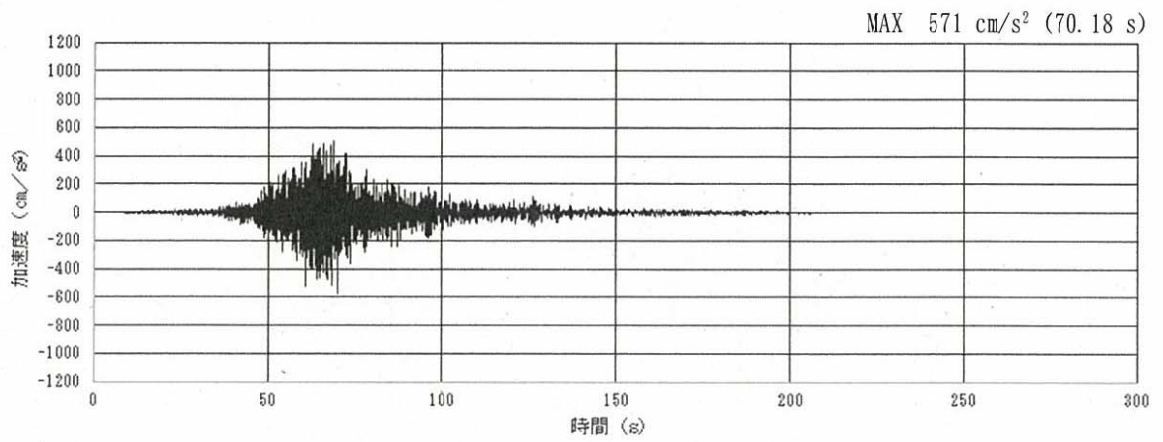


(a) 加速度時刻歴波形

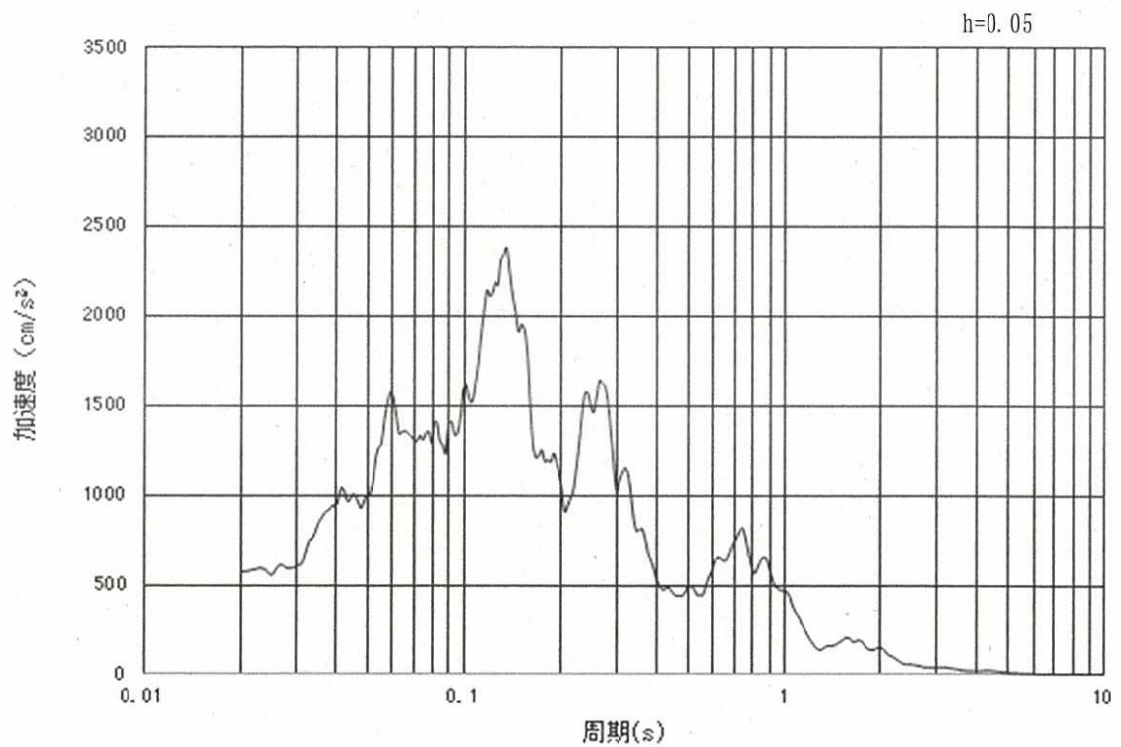


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (21) 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: S_s-21 UD 成分 (NS 方向))

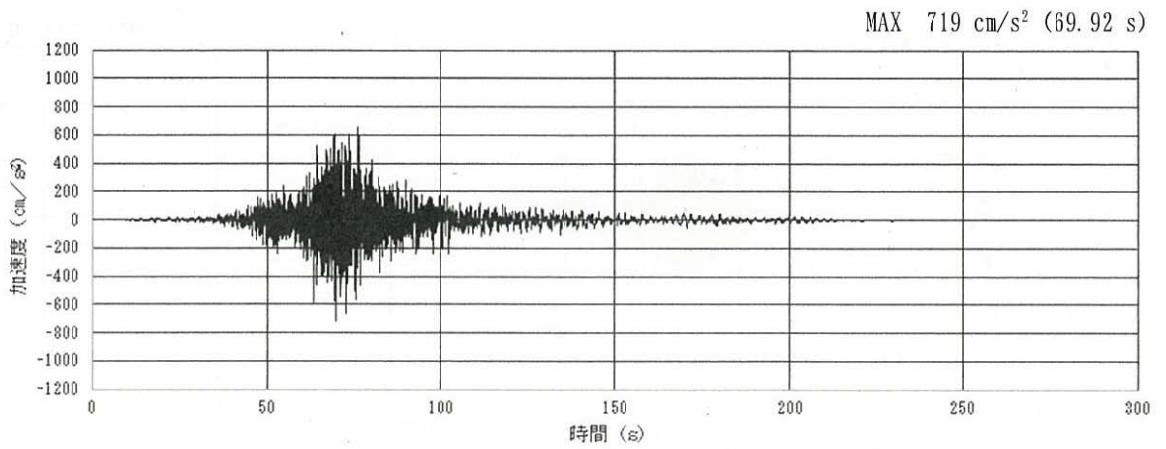


(a) 加速度時刻歴波形

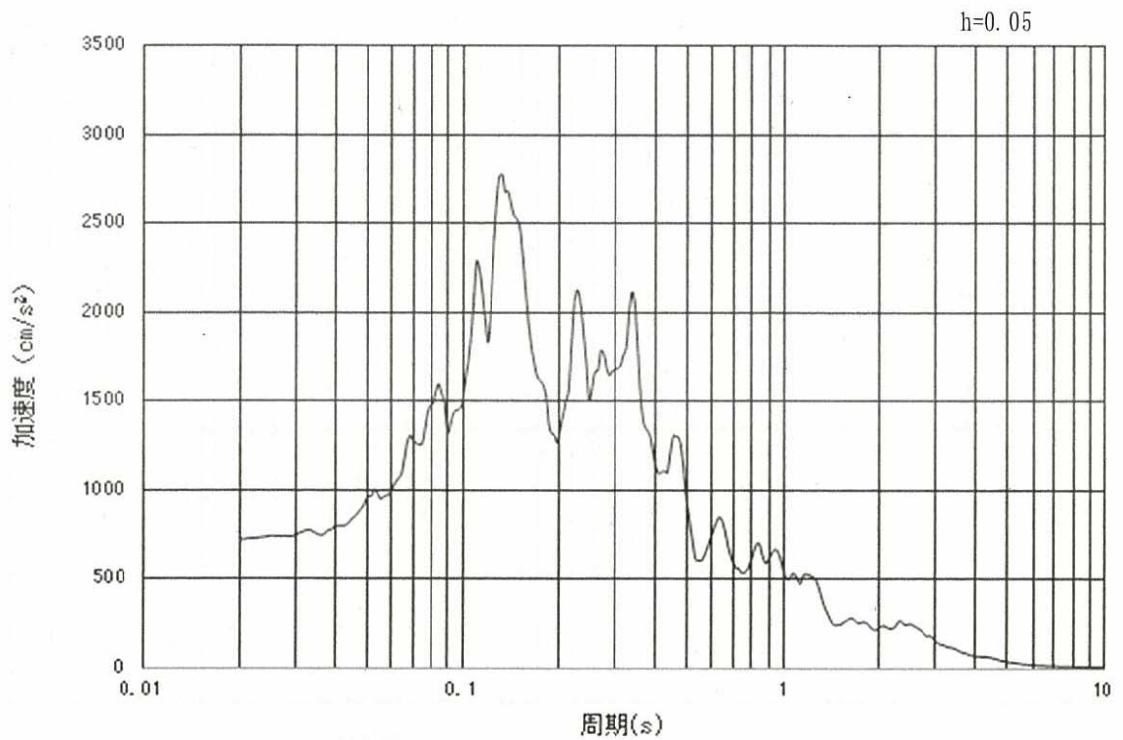


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (22) 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: S_s-21 UD 成分 (EW 方向))

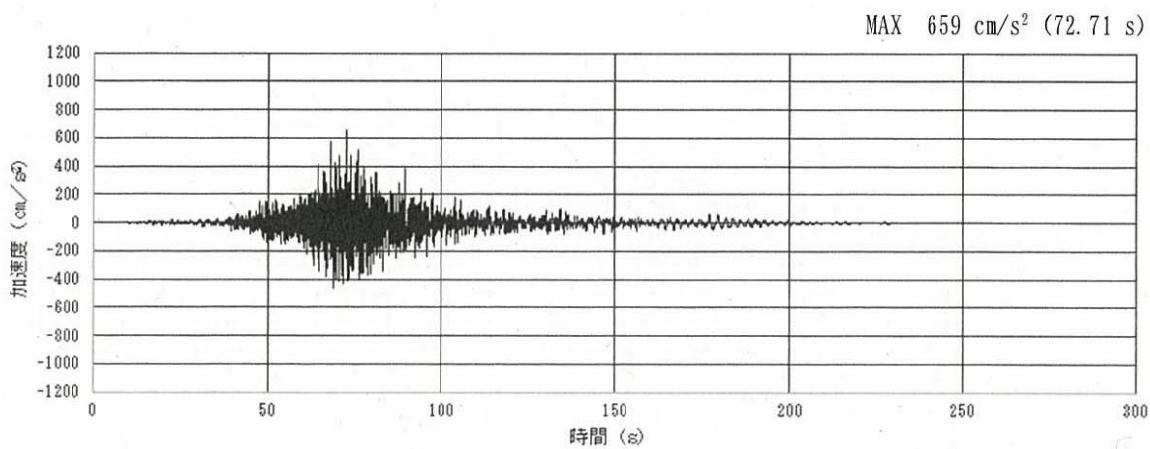


(a) 加速度時刻歴波形

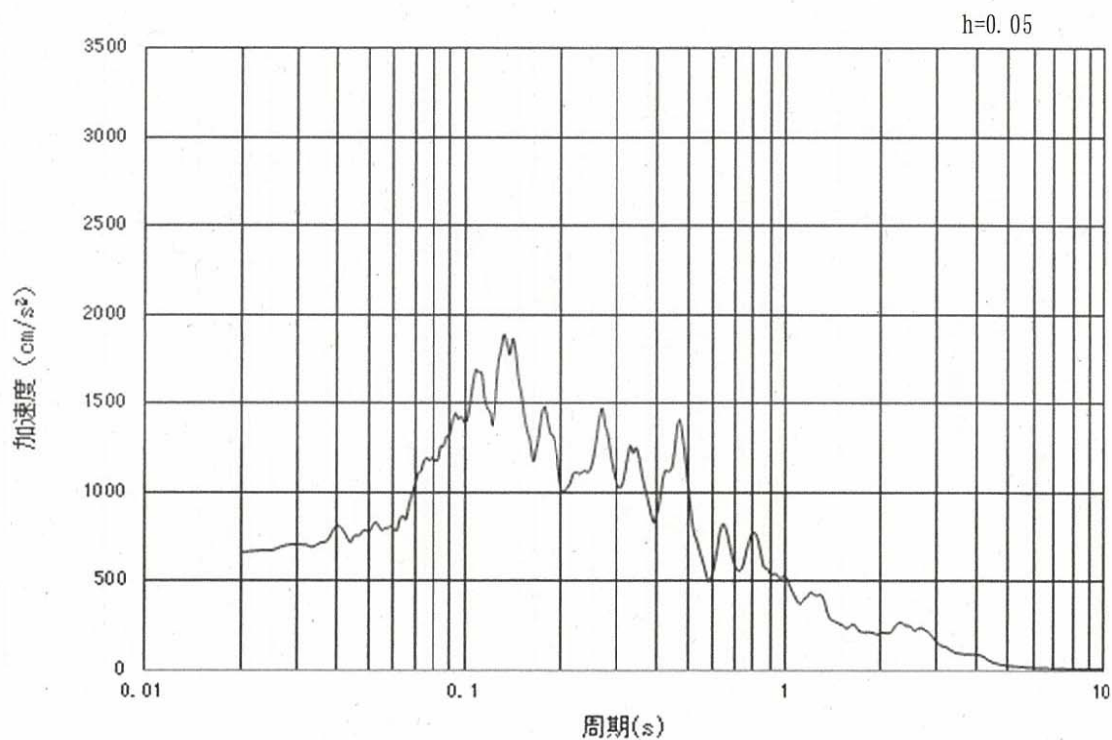


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (23) 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: S_s-22 NS 成分)

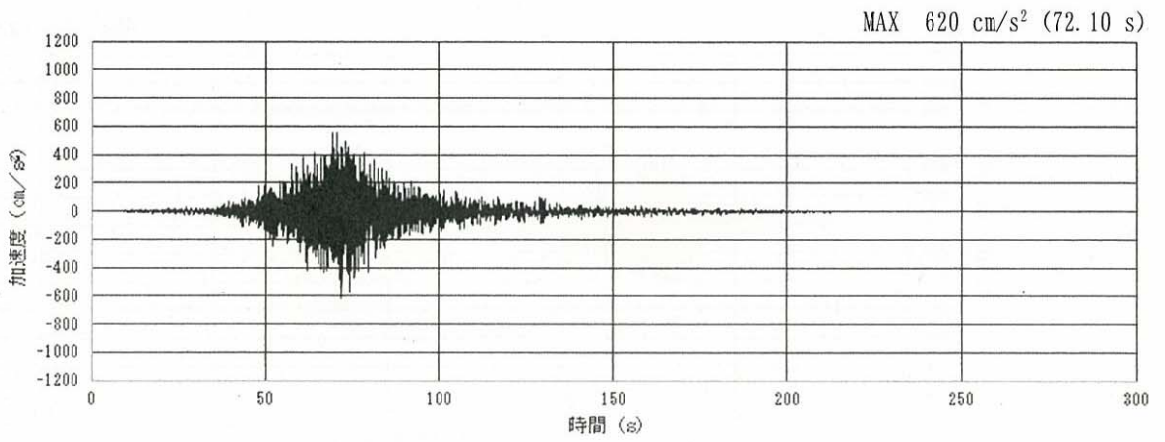


(a) 加速度時刻歴波形

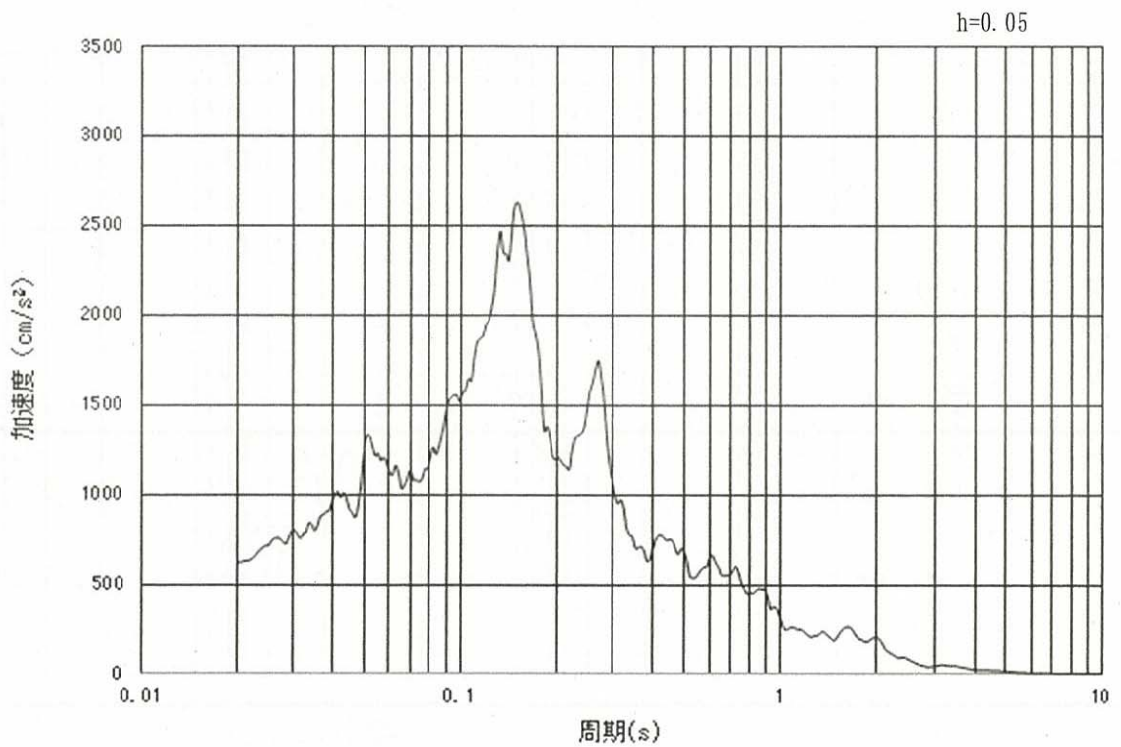


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (24) 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: S_s-22 EW 成分)

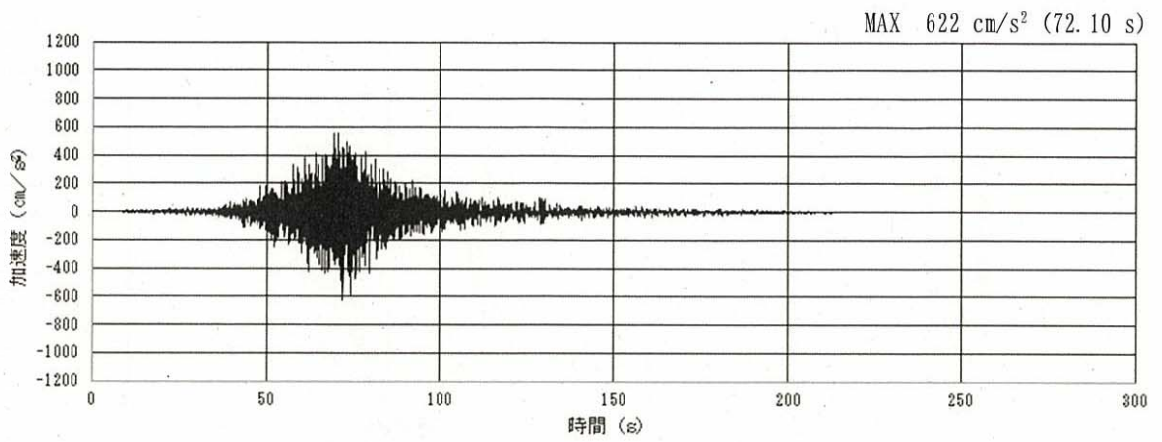


(a) 加速度時刻歴波形

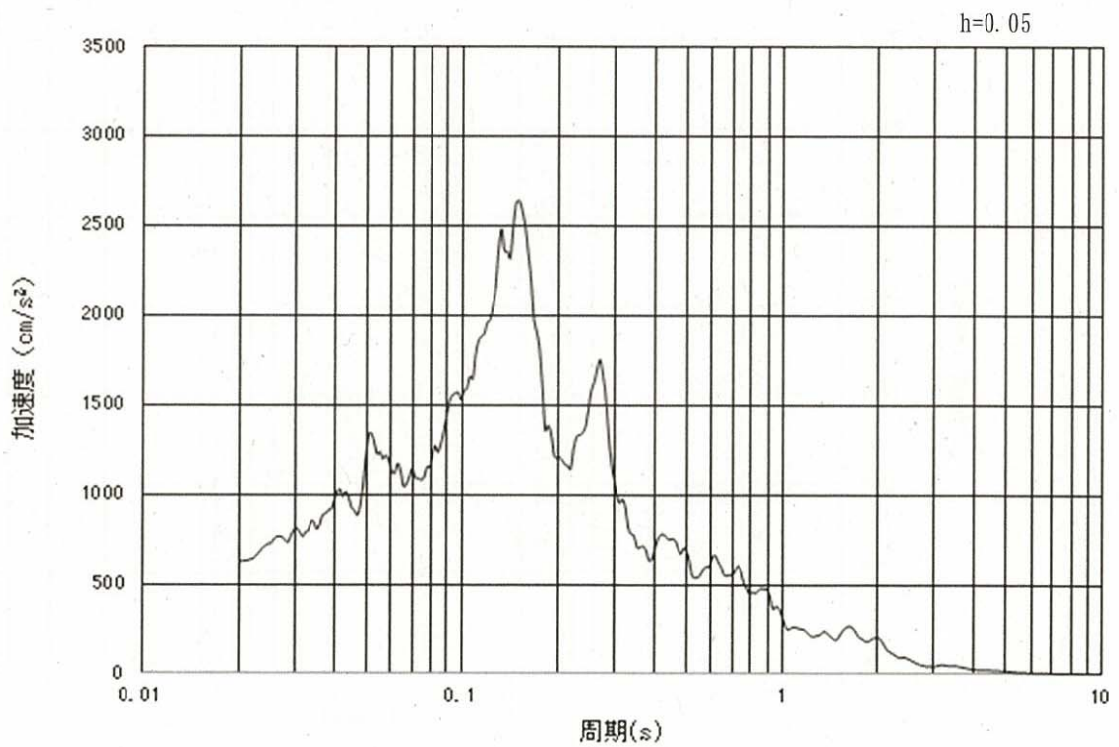


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (25) 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: S_s-22 UD 成分 (NS 方向))

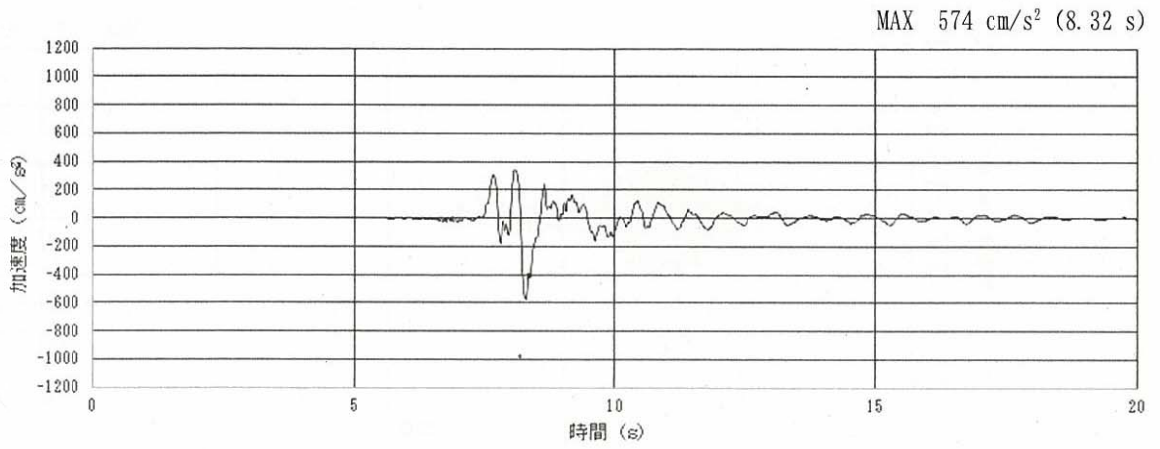


(a) 加速度時刻歴波形

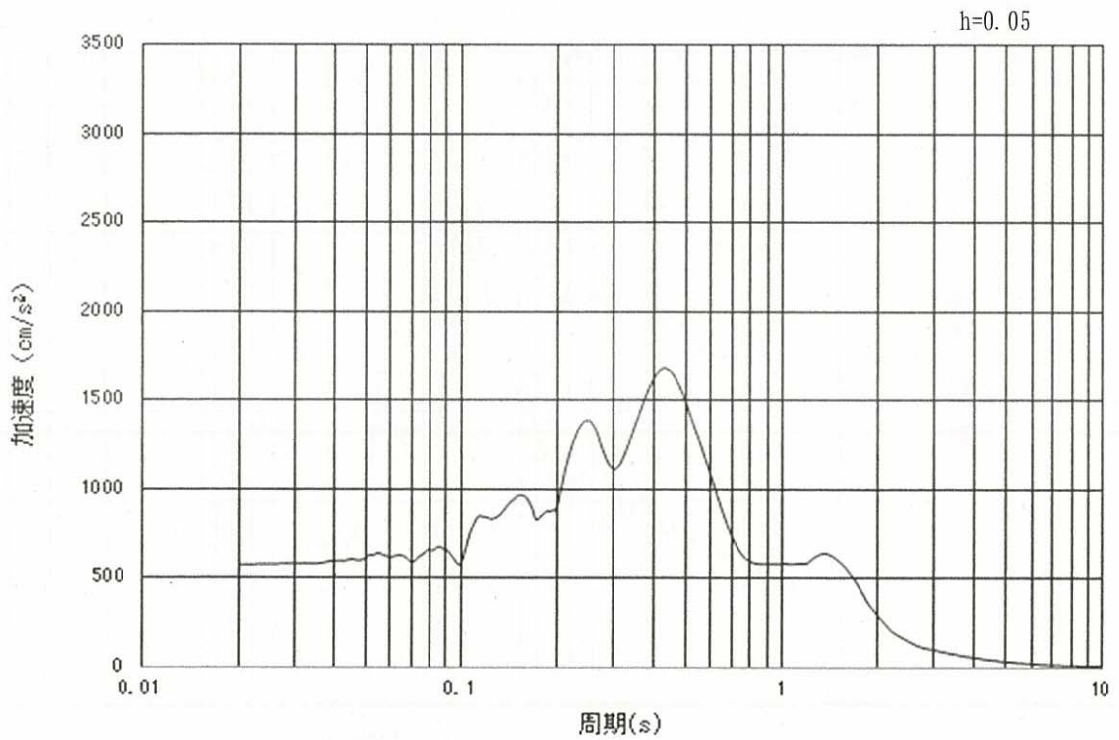


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (26) 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: S_s-22 UD 成分 (EW 方向))

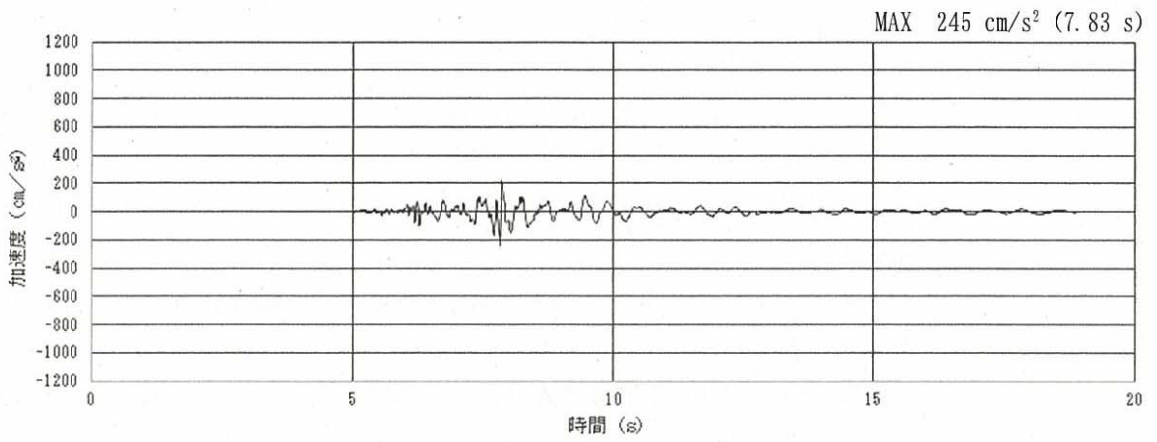


(a) 加速度時刻歴波形

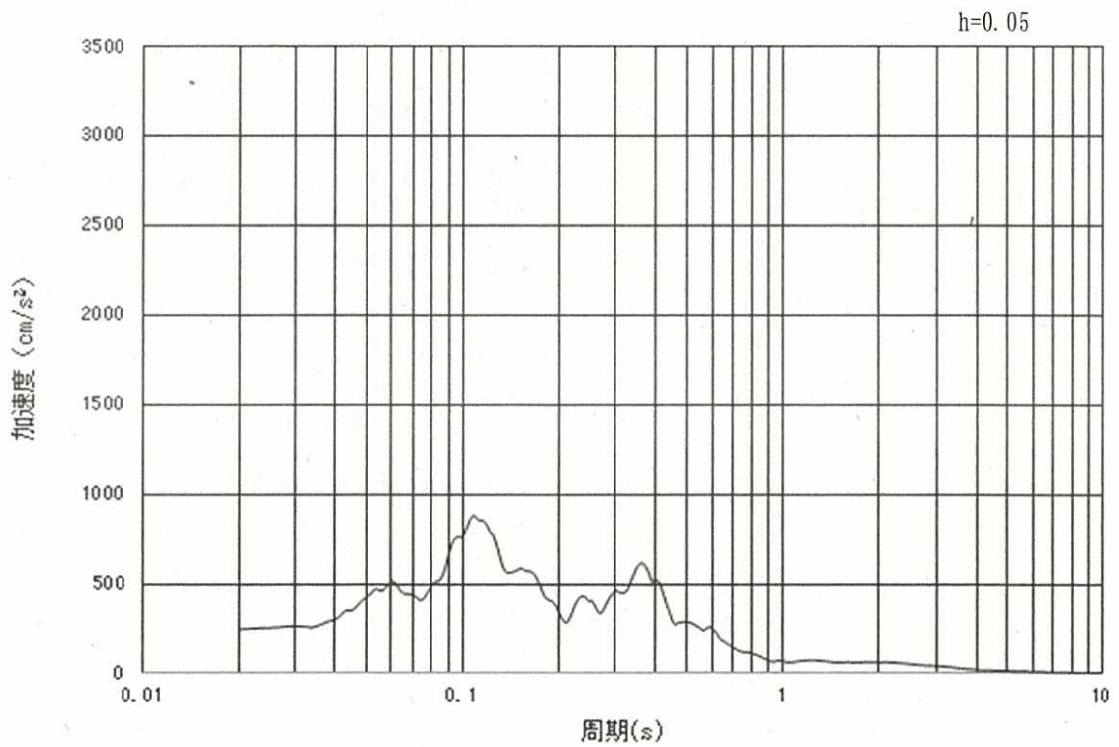


(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (27) 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: S_s-31)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 2.3-2 (28) 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: S_s-31)

2.3.2 許容限界の設定

(1) 曲げに対する許容限界

a. 鉄筋コンクリート部材

鉄筋コンクリート部材の曲げに対する照査は、全塑性モーメントを許容限界とする。具体的には、全塑性モーメント相当として、土木学会マニュアルに基づき、圧縮縁コンクリートひずみ 1.0% に対応する曲率（以下、「限界曲率」という。）を許容限界とし、照査用曲率が限界曲率を下回ることを確認する。図 2.3-3 に限界曲率と全塑性モーメントの関係を示す。

土木学会マニュアルでは、曲げ系の破壊に対する限界状態は、コンクリートの圧縮縁のかぶりが剥落しないこととされている。

圧縮縁コンクリートひずみが 1% の状態は、かぶりコンクリートの剥落が発生する前の状態であることが、屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験及び数値シミュレーション等の結果より確認されている。この状態を限界値とすることで構造全体としての安定性が確保できるとして設定されたものである。

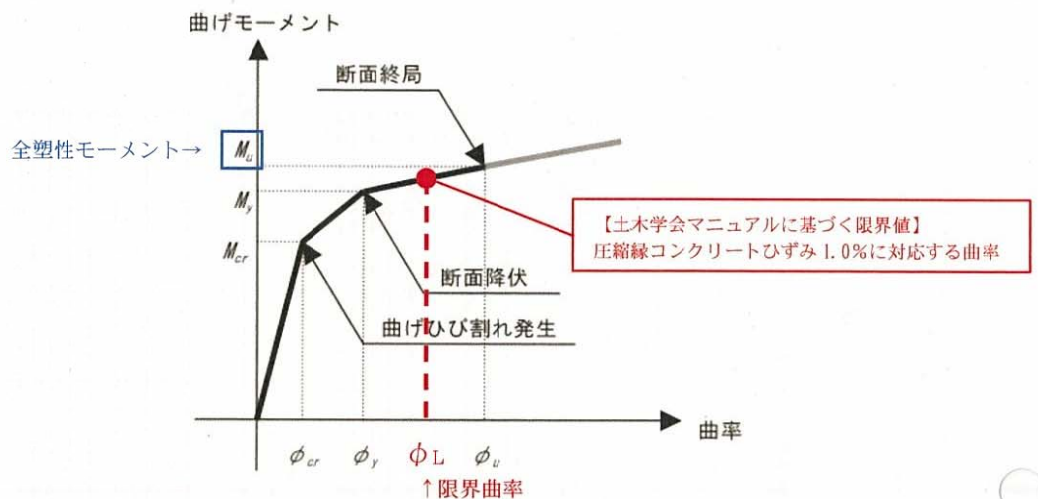


図 2.3-3 限界曲率と全塑性モーメントの関係

鉄筋コンクリート部材の曲げ照査に用いる照査用曲率は、地震応答解析により得られた曲率に安全係数（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。

$$\gamma_i \frac{\phi_d}{\phi_L} \leq 1.0$$

γ_i = 構造物係数 (=1.0)

ϕ_L = 鉄筋コンクリート部材の限界曲率（圧縮縁コンクリートひずみ 1.0% に対応）

$$\phi_d = \gamma_a \cdot \phi$$

γ_a = 構造解析係数 (=1.2)

ϕ = 応答計算による最大曲率

b. 鋼管杭

鋼管杭の曲げに対する照査は、全塑性モーメントを許容限界とする。具体的には、全塑性モーメント相当として、乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規定 J E A G 4 6 1 6 - 2009 ((社) 日本電気協会) 及び鋼・合成構造標準示方書 [耐震設計編] ((社) 土木学会, 2008 年制定) に基づき、鋼管杭の終局曲率を許容限界とし、照査用曲率が終局曲率を下回ることを確認する。

鋼管杭の曲げ照査に用いる照査用曲率は、地震応答解析により得られた曲率に安全係数 (構造解析係数) 1.05 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。

$$\gamma_i \frac{\phi_d}{\phi_u} \leq 1.0$$

γ_i = 構造物係数 (=1.0)

$$\phi_d = \gamma_a \cdot \phi$$

γ_a = 構造解析係数 (=1.05)

ϕ = 応答計算による最大曲率

杭体の終局曲率 ϕ_u は下記式より算出する。

$$\phi_u(N) = \varepsilon_{\max} / [r \cdot \{1 + \sin(\pi N / 2N_y)\}] / \gamma_b \quad (N < 0 : \text{引張}, N > 0 : \text{圧縮})$$

ここに、

ε_{\max} : 局部座屈発生時ひずみ

$$\varepsilon_{\max} = 0.22t/r$$

ここに、 t : 腐食しろを除いた鋼材の厚さ

r : 杭の半径

N : 発生軸力

N_y : 鋼材降伏時の軸力

$$N_y = 2\pi r t \sigma_y$$

ここに、 σ_y : 鋼材の降伏点応力

γ_b : 部材係数 (=1.1)

(2) せん断に対する許容限界

a. 鉄筋コンクリート部材

鉄筋コンクリート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

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

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

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

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

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

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

$$= 1 + 2M_0/M_d \quad (N_d' < 0) \quad \text{ただし、} \beta_n > 0 \text{ となる場合は } \beta_n = 0$$

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

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

$p_v = A_s (b_w/d)$: 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_d : 設計曲げモーメント

$M_0 = N_d' \cdot D/6$: 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)

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

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、
400N/mm² 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 60N/mm² 以上の時は、800N/mm² 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

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

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

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d}$$

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)

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

$$\phi = -0.17 + 0.3a/d + 0.33/p_{wb}$$

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 2.3-4 に示す等価せん断スパンの考え方にに基づき、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、支承全面あるいははり・柱前面から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。

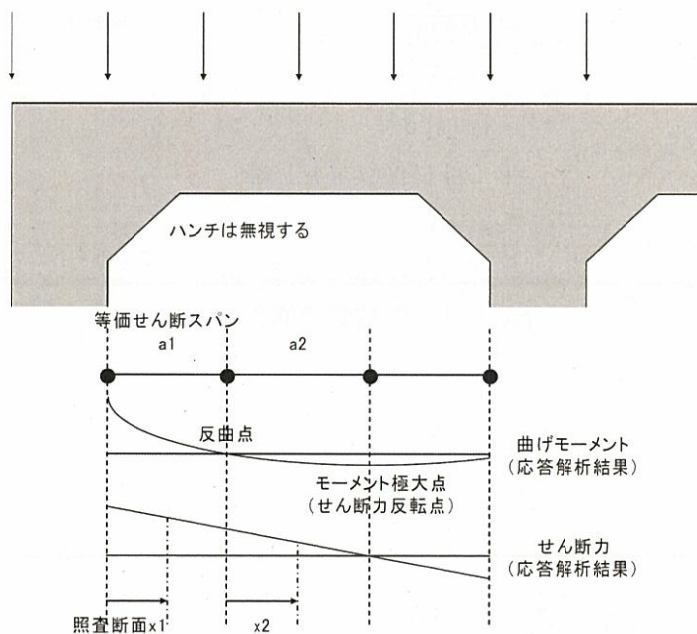
イ. 区間内に曲げモーメントの反曲点（曲げモーメントがゼロ）が存在する場合は、以下の 2 種類の等価せん断スパンを設定する。

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

ロ. 区間内に曲げモーメントの反曲点（曲げモーメントがゼロ）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



(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 ((社) 土木学会, 2005 年) より引用)

図 2.3-4 等価せん断スパンの設定方法

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 2.3-1 に示すとおり、複数の安全係数（部材係数、構造解析係数）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。

図 2.3-1 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
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

b. 鋼管杭

鋼管杭のせん断に対する許容限界は、乾式キャスクを用いる使用済燃料中間貯蔵建屋の基礎構造の設計に関する技術規定 J E A G 4 6 1 6 - 2009 ((社) 日本電気協会) 及び鋼・合成構造標準示方書 [耐震設計編] ((社) 土木学会, 2008 年制定) に基づき、以下の式で求まるせん断耐力とする。

鋼管杭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。

$$\gamma_i \frac{Q_d}{Q_u} \leq 1.0$$

γ_i = 構造物係数 (=1.0)

$$Q_d = \gamma_a \cdot Q$$

γ_a = 構造解析係数 (=1.05)

Q = 応答計算による最大せん断力

杭体のせん断耐力 Q_u は下記式より算定する。

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

ここに、 A_e : 腐食代を除いた杭の断面積

f_s : 鋼材の短期許容せん断応力度

κ : せん断応力度の分布係数で 2.0 とする。

γ_b : 部材係数 (=1.1)

(3) 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

基礎地盤に作用する接地圧に対する許容限界は、V-2-1-3「地盤の支持性能に係る基本方針」を考慮し、極限支持力に基づき設定する。

取水構造物の基礎形式は、打込み工法による杭基礎であることから、極限支持力については、道路橋示方書（I 共通編・IV 下部構造編）・同解説（（社）日本道路協会、平成 24 年 3 月）の杭基礎（打ち込み工法）の設計に基づき、以下の通り設定する。

$$R_u = P_u + U \sum L_i f_i$$

R_u : 地盤から決まる杭の極限支持力 (kN)

P_u : 杭先端における極限支持力 (kN)

$$P_u = 440 \cdot q_u^{1/2} \cdot A_t^{2/5} \cdot A_i^{1/3}$$

q_u : 支持岩盤の一軸圧縮強度 (kN/m²)

A_t : 鋼管杭の先端純断面積 (m²)

A_i : 鋼管杭の先端閉塞面積 (m²)

A : 鋼管杭の先端面積 (m²)

U : 杭の周長 (m)

L_i : 周面摩擦力を考慮する層の層厚 (m)

f_i : 周面摩擦力を考慮する層の最大周面摩擦力度 (kN/m²)

2.4 評価結果 (追而)

2.5 まとめ (追而)