

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-021-02改01
提出年月日	2023年4月7日

VI-2-別添 6-2 漂流防止装置の耐震性についての計算書

2023年4月

中国電力株式会社

## 漂流防止装置の耐震性についての計算書

1. 漂流防止装置（係船柱）の耐震性についての計算書
2. 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の耐震性についての計算書
3. 漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の耐震性についての計算書

1. 漂流防止装置（係船柱）の耐震性についての計算書

## 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	適用規格・基準等	9
2.5	記号の説明	10
3.	耐震評価	12
3.1	評価対象部位	12
3.2	荷重及び荷重の組合せ	13
3.2.1	荷重	13
3.2.2	荷重の組合せ	13
3.3	許容限界	14
3.3.1	使用材料	14
3.3.2	許容限界	14
3.4	設計用地震力	16
3.5	評価方法	18
3.5.1	係船柱	18
3.5.2	アンカーボルト	21
3.5.3	アンカー板	23
4.	評価条件	26
5.	評価結果	27

## 1. 概要

本資料は、VI-2-別添 6-1「漂流防止装置の耐震計算の方針」に設定している構造強度及び機能保持の設計方針に基づき、漂流防止装置（係船柱）が基準地震動  $S_s$  に対して十分な構造強度を有していることを確認するものである。

漂流防止装置（係船柱）に要求される機能の維持を確認するにあたっては、応力評価に基づく、施設の健全性評価を行う。

## 2. 基本方針

### 2.1 位置

漂流防止装置（係船柱）の位置図を図 2-1 に示す。

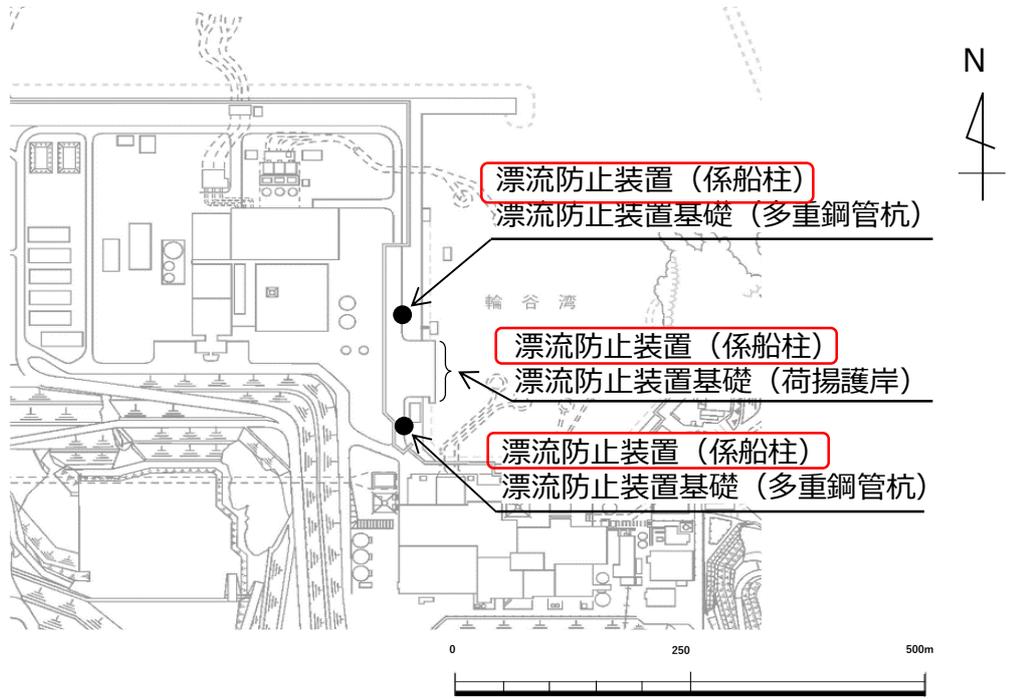


図 2-1 漂流防止装置（係船柱）の位置図

## 2.2 構造概要

漂流防止装置（係船柱）は、漂流防止装置基礎（荷揚護岸，多重鋼管杭）に、係船柱をアンカーボルト及びアンカー板により固定する構造である。

よって、漂流防止装置（係船柱）は係船柱，アンカーボルト及びアンカー板から構成され、係船柱は燃料等輸送船の係留索と接続する。

漂流防止装置（係船柱）の概要図を図 2-2 に、構造図を図 2-3 に示す。

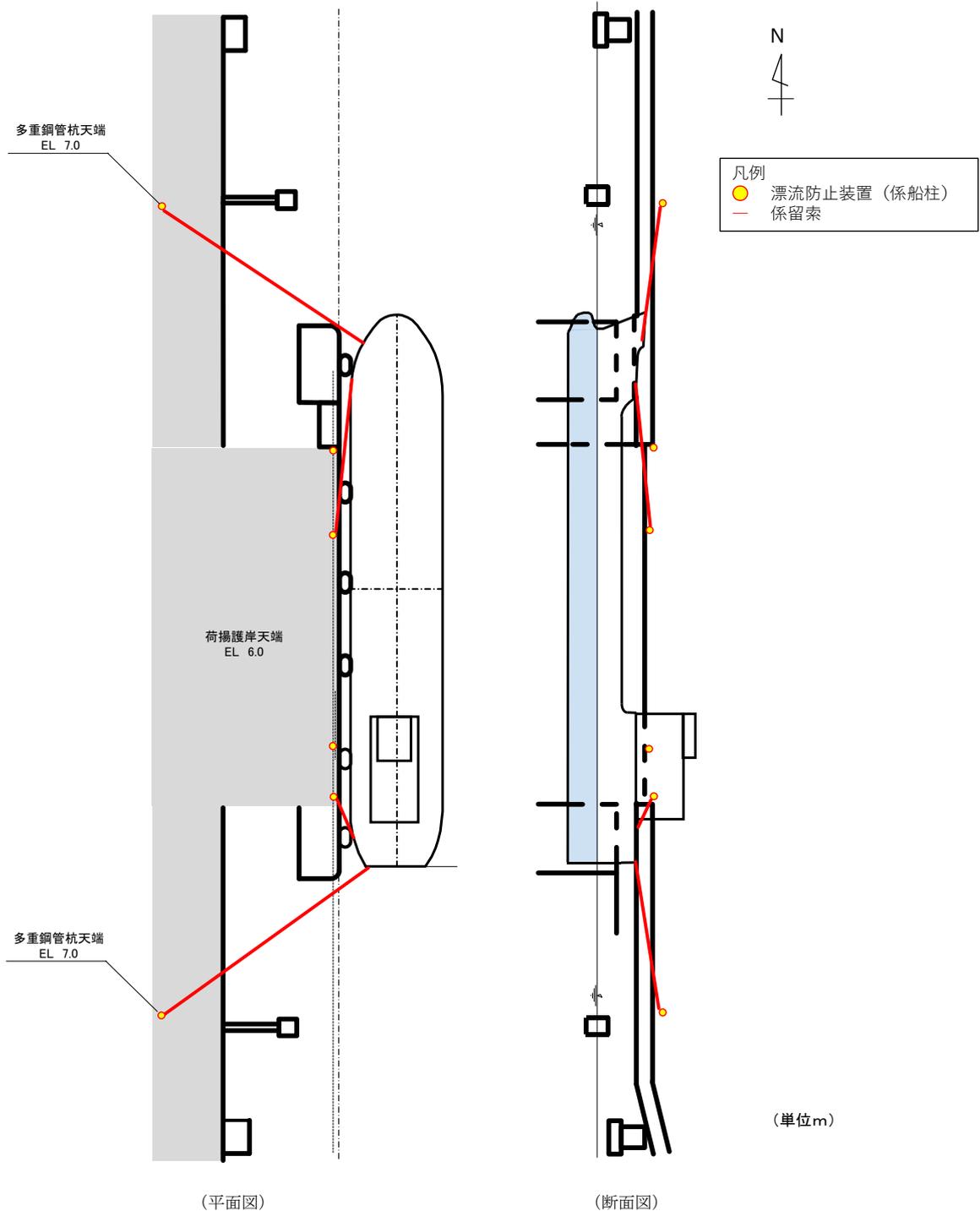
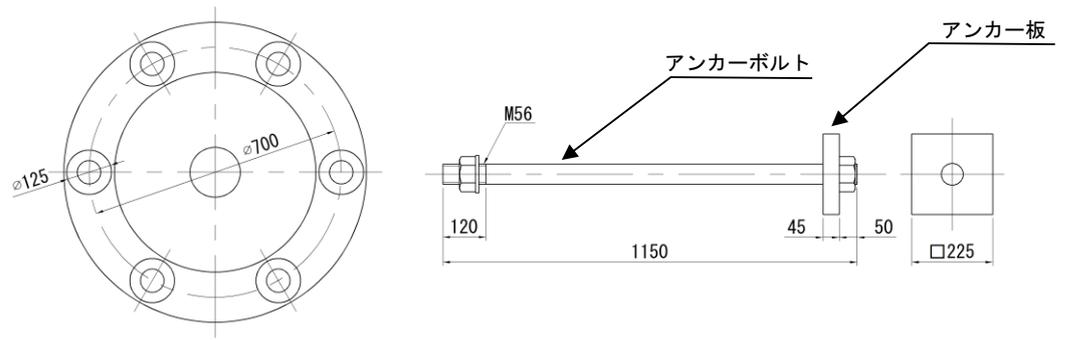
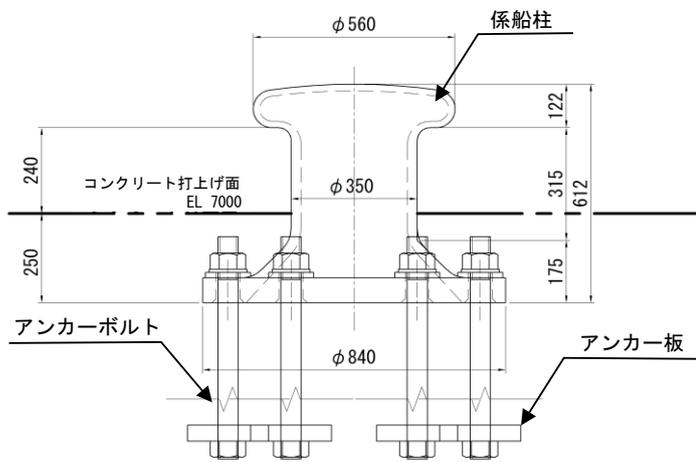


図 2-2 漂流防止装置（係船柱）の概要図



(平面図)

(アンカー図)



(正面図)

(単位mm)

図 2-3 漂流防止装置 (係船柱) の構造図

### 2.3 評価方針

漂流防止装置（係船柱）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。

漂流防止装置（係船柱）の耐震評価は、表 2-3 に示すとおり、施設の健全性評価を行い、構造強度を有することを確認する。

漂流防止装置（係船柱）の耐震評価フローを図 2-4 に示す。

表 2-1 漂流防止装置（係船柱）の各部位の役割

部位の名称	地震時の役割	津波時の役割
係船柱	—	・燃料等輸送船を係留する。
アンカーボルト	・係船柱を支持する。	・係船柱を支持する。
アンカー板	・係船柱を支持する。	・係船柱を支持する。

表 2-2 漂流防止装置基礎（係船柱）の各部位の性能目標

部位の名称	性能目標	
	耐震性	耐津波性
係船柱	構造部材の健全性を保持するために、係船柱がおおむね弾性状態にとどまること。	燃料等輸送船を係留するために、係船柱がおおむね弾性状態にとどまること。
アンカーボルト	構造部材の健全性を保持するために、アンカーボルト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、アンカーボルトがおおむね弾性状態にとどまること。
アンカー板	構造部材の健全性を保持するために、アンカー板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、アンカー板がおおむね弾性状態にとどまること。

表 2-3 漂流防止装置（係船柱）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	施設の健全性	係船柱	発生する応力（曲げ応力及びコンクリートの支圧応力）が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		アンカーボルト	発生する応力（引張応力、せん断応力）が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		アンカー板	発生する応力（曲げ応力及びコンクリートの支圧応力）が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度

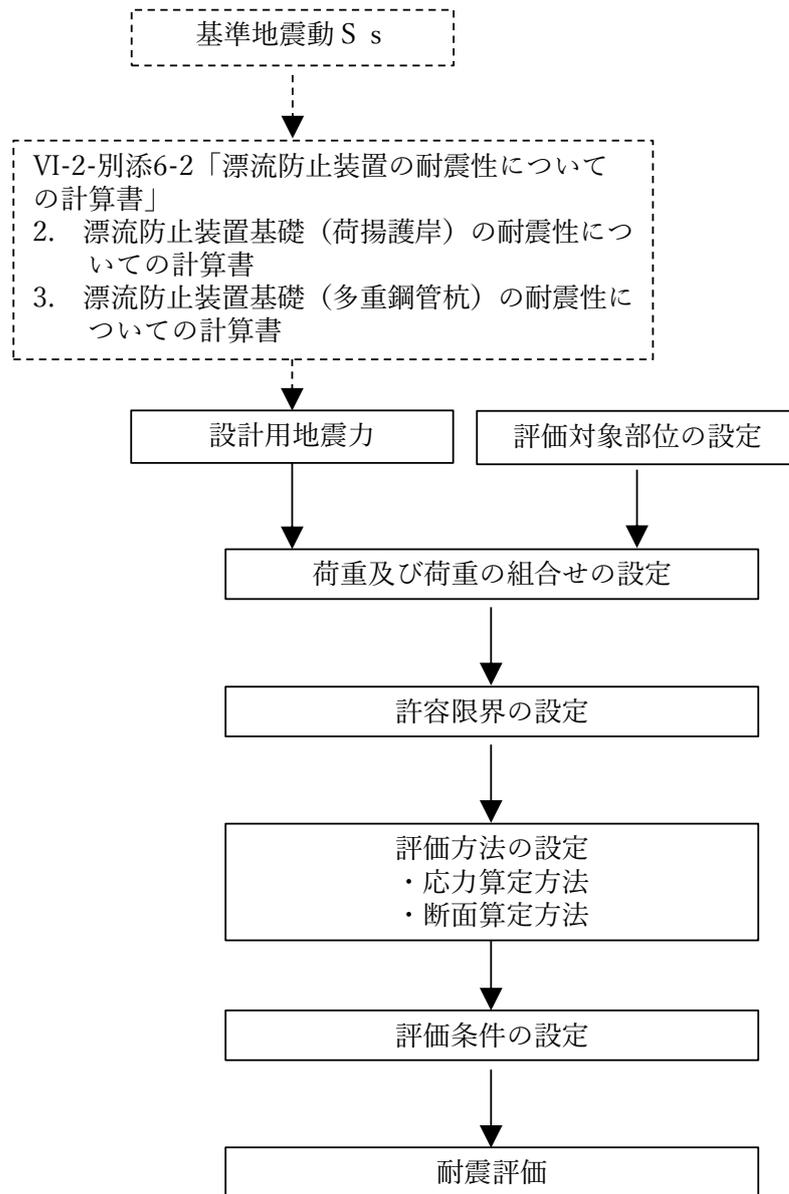


図 2-4 漂流防止装置（係船柱）の耐震評価フロー

## 2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・港湾技研資料 No. 102 けい船柱の標準設計（案）（運輸省港湾技術研究所，1970年）
- ・鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（（社）日本建築学会，2005年改定）
- ・各種合成構造設計指針・同解説（（社）日本建築学会，2010年改訂）
- ・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）
- ・日本産業規格（J I S）
- ・機械工学便覧 改訂第6版（（社）日本機械学会編，1977年）

## 2.5 記号の説明

漂流防止装置（係船柱）の耐震評価に用いる記号を表 2—4 に示す。

表 2—4 (1) 漂流防止装置（係船柱）の耐震評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
$\sigma_s$	N/mm <sup>2</sup>	係船柱の直胴部縁応力度
$M_{sa}$	N・mm	係船柱の直胴部転倒モーメント
$P_H$	N	基準地震動 $S_s$ による慣性力の水平成分
$D$	mm	係船柱の直胴部径
$Z_{sa}$	mm <sup>3</sup>	係船柱の断面係数
$P_v$	N	基準地震動 $S_s$ による慣性力の鉛直成分
$A_{sa}$	mm <sup>2</sup>	係船柱の断面積
$\sigma_{c1}$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリート（係船柱底板）の支圧応力度
$R_1$	mm	中心軸から係船柱底板端までの距離
$y$	mm	中心軸と中立軸の距離
$n$	—	アンカーボルトとコンクリートの弾性係数比
$G_s$	mm <sup>3</sup>	アンカーボルトの中立軸のまわりの断面 1 次モーメント
$G_c$	mm <sup>3</sup>	コンクリートの中立軸のまわりの断面 1 次モーメント
$\sigma_{c2}$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリート（係船柱前面）の支圧応力度
$P_H$	N	基準地震動 $S_s$ による慣性力の水平成分
$\mu$	—	係船柱とコンクリートの摩擦係数
$P_{vc}$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリートの支圧力 ( $\cong 0.7 \times P_H$ )
$H_1$	mm	係船柱底板厚さ
$\sigma_{s2}$	N/mm <sup>2</sup>	アンカーボルトに生じる引張応力度
$R_1'$	mm	中心軸からアンカーボルト位置までの距離
$\tau_s$	N/mm <sup>2</sup>	アンカーボルトに生じるせん断応力度
$N$	本	アンカーボルトの本数
$\phi_b$	mm	アンカーボルトの谷径
$p$	N/mm <sup>2</sup>	等分布荷重
$\phi_a$	mm	アンカーボルトの呼び径

表 2-4 (2) 漂流防止装置 (係船柱) の耐震評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
$\sigma_{st}$	N/mm <sup>2</sup>	アンカー板に生じる曲げ応力度
b	mm	ナット二面幅
a	mm	アンカー板幅
t	mm	アンカー板厚
$\sigma_c$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリート (アンカー板上面) の支圧応力度
$\tau_c$	N/mm <sup>2</sup>	コンクリート (アンカーボルト側面) のせん断応力度
L	mm	アンカーボルトの埋込み長さ



### 3.2 荷重及び荷重の組合せ

#### 3.2.1 荷重

耐震評価に用いる荷重を以下に示す。

##### (1) 固定荷重 (G)

固定荷重として、漂流防止装置（係船柱）の自重を考慮する。

##### (2) 地震荷重 (S<sub>s</sub>)

基準地震動 S<sub>s</sub> による荷重を考慮する。「3.4 設計用地震力」で設定する設計震度を用いて次式により算出する。

$$S_s = G \cdot k$$

ここで、

S<sub>s</sub> : 地震荷重 (kN)

G : 固定荷重 (kN)

k : 設計震度

#### 3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-1 に示す。

表 3-1 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時 (S <sub>s</sub> )	G + S <sub>s</sub>

G : 固定荷重

S<sub>s</sub> : 地震荷重 (基準地震動 S<sub>s</sub>)

### 3.3 許容限界

漂流防止装置（係船柱）の許容限界は、「3.1 評価対象部位」にて設定した部位に対し、VI-2-別添 6-1「漂流防止装置の耐震計算の方針」にて設定している許容限界を踏まえて設定する。

#### 3.3.1 使用材料

漂流防止措置（係船柱）を構成する各部材の使用材料を表 3-2 に示す。

表 3-2 使用材料

材料	諸元
係船柱	SC450, $\phi$ 350
アンカーボルト	SS400, M56 $\times$ 1150
アンカー板	SS400, 225 $\times$ t45
コンクリート	設計基準強度 24N/mm <sup>2</sup>

#### 3.3.2 許容限界

許容限界は、VI-2-別添 6-1「漂流防止装置の耐震計算の方針」に基づき設定する。

##### a. 係船柱

係船柱の許容限界は、「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—（（社）日本建築学会，2005年改訂）」及び「J I S G 5 1 0 1 炭素鋼鋳鋼品」を踏まえて表 3-3 のとおり設定する。

表 3-3 係船柱の許容限界

材質	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	
	曲げ	せん断
SC450	205	—

b. アンカーボルト及びアンカー板

アンカーボルト及びアンカー板の許容限界は、「各種合成構造設計指針・同解説（（社）日本建築学会，2010年改定）」に基づき算定した，表3-4のとおり設定する。

表3-4 アンカーボルト及びアンカー板の許容限界

材質		許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	
		曲げ	せん断
SS400	$t \leq 40$	234	136
	$40 < t \leq 100$	215	124

c. コンクリート

コンクリートの許容限界は、「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）」に基づき，表3-5に示すとおり設定する。

表3-5 コンクリートの許容限界

材質	許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	
	支圧	せん断
コンクリート (設計基準強度 24N/mm <sup>2</sup> )	17.5	0.67

### 3.4 設計用地震力

漂流防止装置（係船柱）の耐震計算に用いる設計震度は、VI-2-別添 6-2「漂流防止装置の耐震性についての計算書」の「2. 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の耐震性についての計算書」及び「3. 漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の耐震性についての計算書」に示す地震応答解析を用いて、漂流防止装置（係船柱）設置位置の最大応答加速度に基づき設定する。漂流防止装置（係船柱）の耐震評価に用いる設計用地震力を表 3-6 に、漂流防止装置基礎（多重鋼管杭、荷揚護岸）の評価対象断面位置図及び地震応答解析モデルを図 3-2 及び図 3-3 に示す。

表 3-6 漂流防止装置（係船柱）の耐震評価に用いる設計用地震力

名称	設計震度	
	水平方向： $k_H$	鉛直方向： $k_{UD}$
漂流防止装置（係船柱）	2.3	1.8

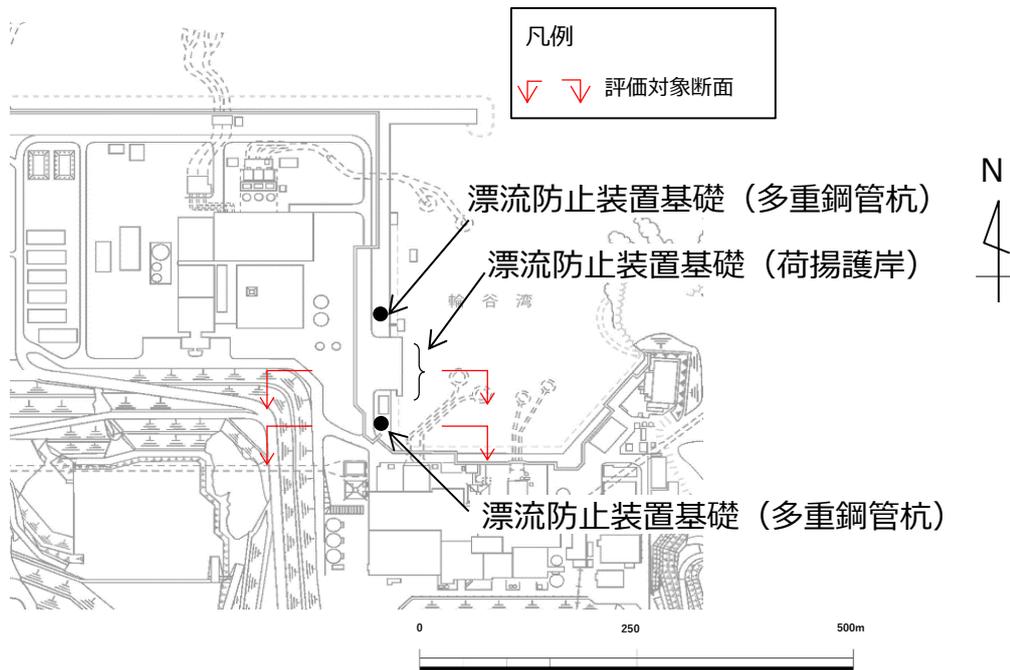


図 3-2 漂流防止装置基礎（多重鋼管杭、荷揚護岸）の評価対象断面位置図

- |            |                  |                                   |           |          |
|------------|------------------|-----------------------------------|-----------|----------|
| 岩盤 (第3速度層) | 埋戻土              | R C床版 ( $\sigma_{ck}=21N/mm^2$ )  | 防波壁       | グラウンドアンカ |
| 岩盤 (第4速度層) | 基礎コンクリート         | 施設護岸<br>(パラペット、上部コンクリート、セルラーブロック) | ジョイント要素   | L型擁壁     |
| 岩盤 (第5速度層) | 改良地盤①② (美液注入、浅層) | 埋戻土 (施設護岸背面)                      | 地下水面及び海水面 |          |
| 海底堆積物      | 改良地盤③ (美液注入、深層)  | 海水                                |           |          |

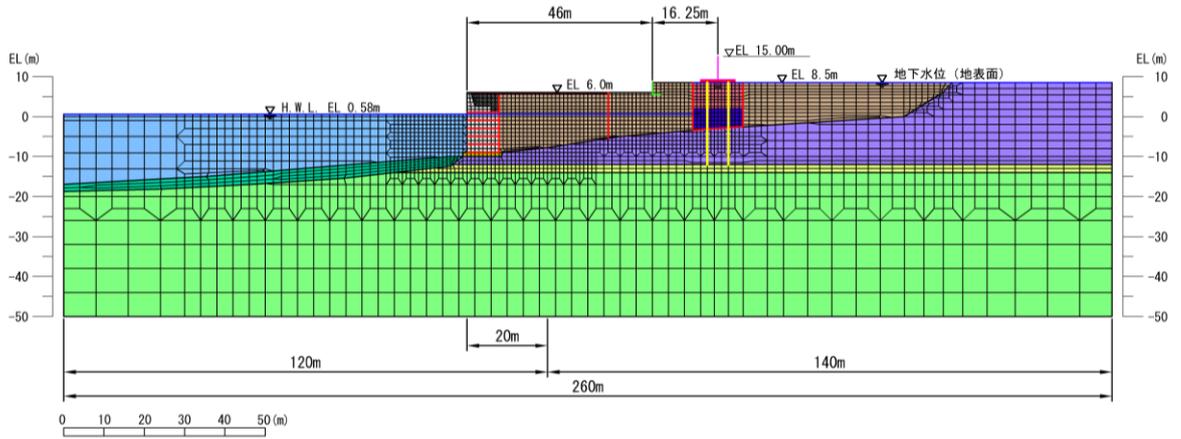


図 3-3(1) 地震応答解析モデル (漂流防止装置基礎 (荷揚護岸))

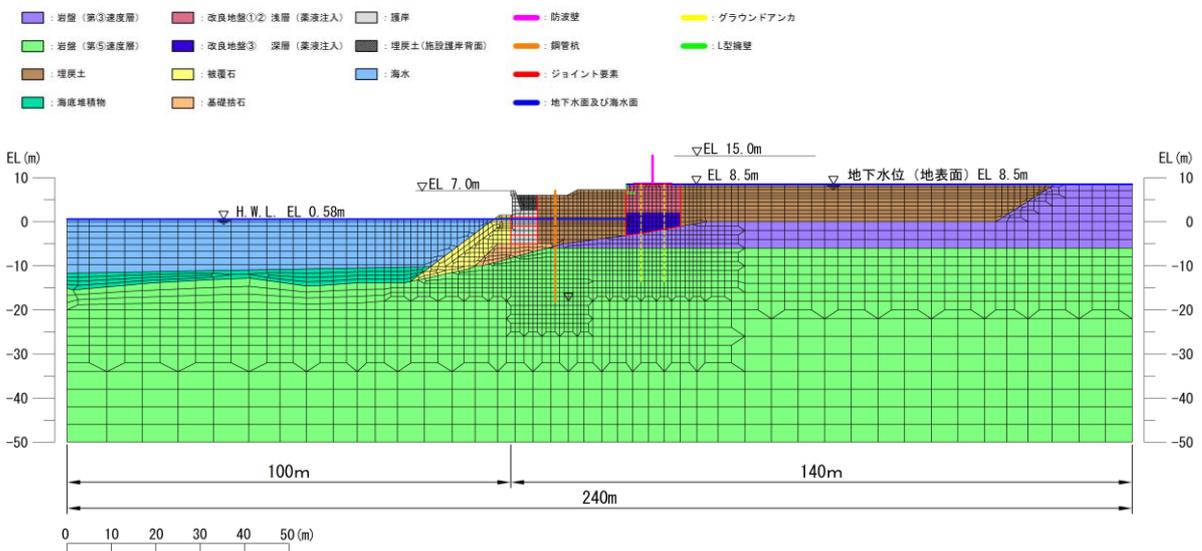


図 3-3(2) 地震応答解析モデル (漂流防止装置基礎 (多重鋼管杭))

### 3.5 評価方法

漂流防止装置（係船柱）を構成する各部材に生じる応力度が、許容限界以下であることを確認する。

#### 3.5.1 係船柱

##### a. 係船柱の曲げ応力度

係船柱に生じる曲げ応力度は、係船柱を片持ち梁として次式により算出し、係船柱の許容限界以下であることを確認する。なお、慣性力の作用点は係船柱の直胴部の上端とする。

係船柱のモデル図を図 3-4 に示す。

$$\sigma_s = M_{s a} / Z_{s a} + P_v / A_{s a}$$

ここで、

$\sigma_s$  : 係船柱の直胴部縁応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$M_{s a}$  : 係船柱の直胴部転倒モーメント (N・mm)

$$(M_{s a} = P_H \cdot 0.9D)$$

$P_H$  : 基準地震動  $S_s$  による慣性力の水平成分 (N)

$D$  : 係船柱の直胴部径

$Z_{s a}$  : 係船柱の断面係数 (mm<sup>3</sup>)

$P_v$  : 基準地震動  $S_s$  による慣性力の鉛直成分 (N)

$A_{s a}$  : 係船柱の断面積 (mm<sup>2</sup>)

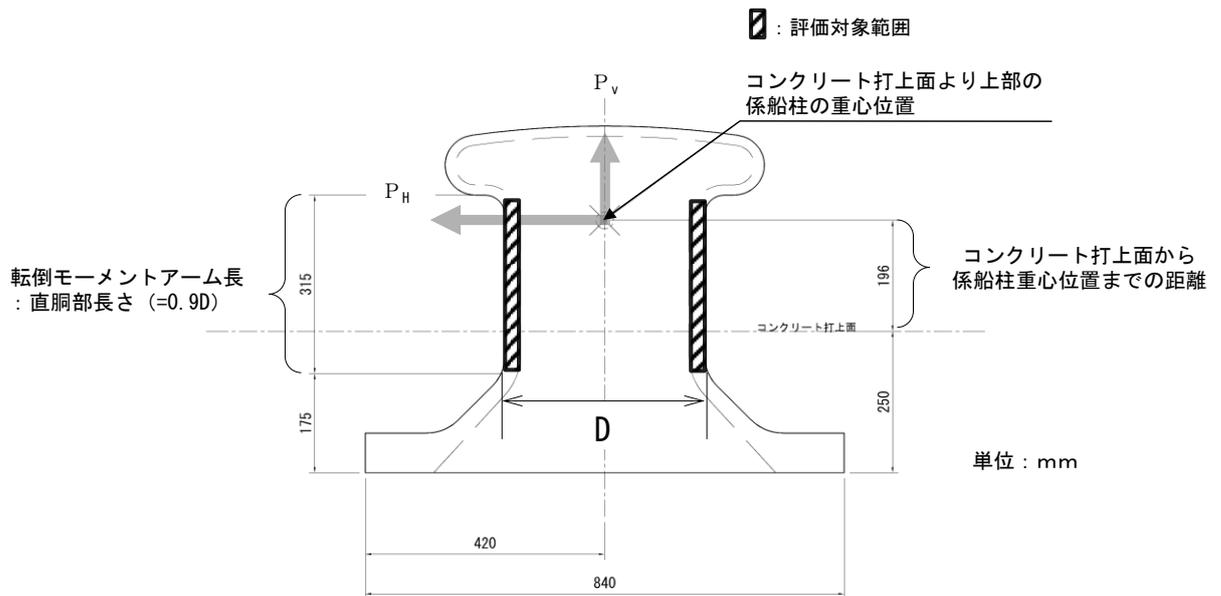


図 3-4 係船柱のモデル図

b. コンクリート（係船柱底板）の支圧応力度

コンクリート（係船柱底板）に生じる支圧応力度は、「港湾技研資料 No. 102 けい船柱の標準設計（案）（運輸省港湾技術研究所，1970年）」に基づき，コンクリートの偏心荷重を心外に受ける円形梁として次式により算出し，コンクリートの許容限界以下であることを確認する。

コンクリート（係船柱底板）のモデル図を図3-5に示す。

$$\sigma_{c1} = P_v \cdot (R_1 - y) / (n \cdot G_s - G_c)$$

ここで，

- $\sigma_{c1}$  : コンクリート（係船柱底板）の支圧応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $P_v$  : 基準地震動  $S_s$  による慣性力の鉛直成分 (N)
- $R_1$  : 中心軸から係船柱底板端までの距離 (mm)
- $y$  : 中心軸と中立軸の距離 (mm)
- $n$  : アンカーボルトとコンクリートの弾性係数比
- $G_s$  : アンカーボルトの中立軸のまわりの断面1次モーメント (mm<sup>3</sup>)
- $G_c$  : コンクリートの中立軸のまわりの断面1次モーメント (mm<sup>3</sup>)

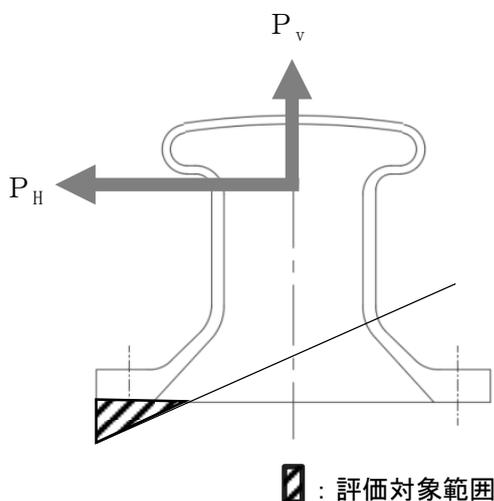


図3-5 コンクリート（係船柱底板）のモデル図

- c. コンクリート（係船柱前面）の支圧応力度  
 コンクリート（係船柱前面）に生じる支圧応力度は、次式より算出し、コンクリートの許容限界以下であることを確認する。

コンクリート（係船柱前面）のモデル図を図3-6に示す。

$$\sigma_{c2} = (P_H - \mu \cdot P_{vc}) / (H_1 \cdot 2R_1)$$

ここで、

- $\sigma_{c2}$  : コンクリート（係船柱前面）の支圧応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $P_H$  : 基準地震動  $S_s$  による慣性力の水平成分 (N)
- $\mu$  : 係船柱とコンクリートの摩擦係数
- $P_{vc}$  : コンクリートの支圧力 ( $\approx 0.7 \times P_H$ ) (N)
- $H_1$  : 係船柱底板厚さ (mm)
- $R_1$  : 中心軸から係船柱底板端までの距離 (mm)

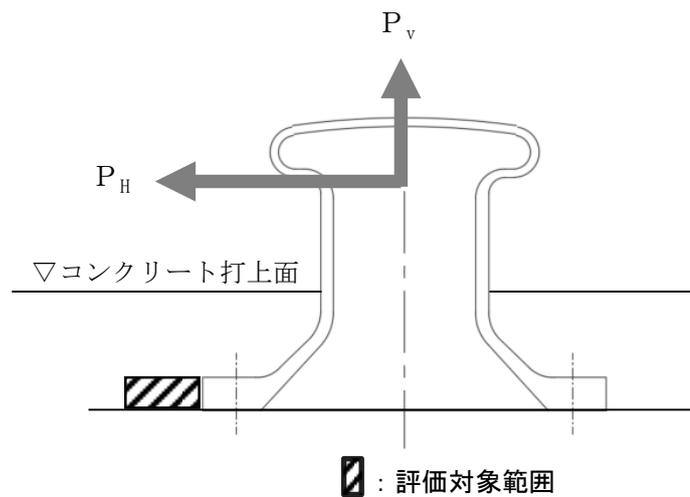


図3-6 コンクリート（係船柱前面）のモデル図

### 3.5.2 アンカーボルト

#### a. アンカーボルトの引張応力度

アンカーボルトに生じる引張応力度は、「港湾技研資料 No. 102 けい船柱の標準設計（案）（運輸省港湾技術研究所，1970年）」に基づき，コンクリートの偏心荷重を心外に受ける円形梁として次式により算出し，アンカーボルトの許容限界以下であることを確認する。

アンカーボルトのモデル図を図 3-7 に示す。

$$\sigma_{s2} = P_v \cdot (R_1' + y) / (G_s - G_c / n)$$

ここで，

- $\sigma_{s2}$  : アンカーボルトに生じる引張応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $P_v$  : 基準地震動  $S_s$  による慣性力の鉛直成分 (N)
- $R_1'$  : 中心軸からアンカーボルトまでの距離 (mm)
- $y$  : 中心軸と中立軸の距離 (mm)
- $G_s$  : アンカーボルトの中立軸のまわりの断面 1 次モーメント (mm<sup>3</sup>)
- $G_c$  : コンクリートの中立軸のまわりの断面 1 次モーメント (mm<sup>3</sup>)
- $n$  : アンカーボルトとコンクリートの弾性係数比

#### b. アンカーボルトのせん断応力度

アンカーボルトに生じるせん断応力度は，次式より算出し，アンカーボルトの許容限界以下であることを確認する。

$$\tau_s = (P_H / N) / (\pi / 4 \cdot \phi_b^2)$$

ここで，

- $\tau_s$  : アンカーボルトに生じるせん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)
- $P_H$  : 基準地震動  $S_s$  による慣性力の水平成分 (N)
- $N$  : アンカーボルトの本数 (本)
- $\phi_b$  : アンカーボルトの谷径 (mm)

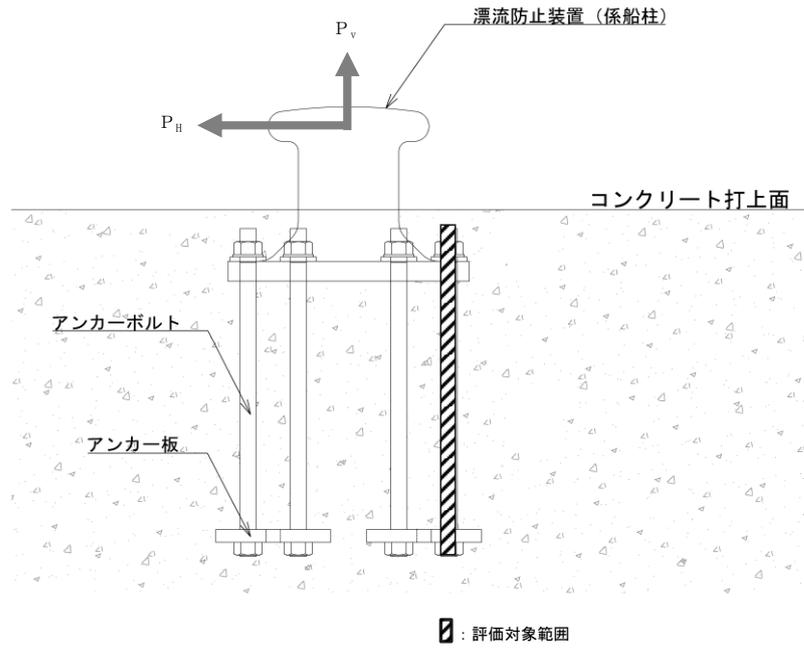


図 3-7 アンカーボルトのモデル図

### 3.5.3 アンカー板

#### a. アンカー板の曲げ応力度

アンカー板に生じる曲げ応力度は、「港湾技研資料 No. 102 けい船柱の標準設計 (案) (運輸省港湾技術研究所, 1970 年)」及び「機械工学便覧 改訂第 6 版 (社) 日本機械学会編, 1977 年)」に基づき、アンカー板に等分布荷重が作用するとして次式により算出し、アンカー板の許容限界以下であることを確認する。

アンカー板のモデル図を図 3-8 に示す。

$$p = P_v / \{ \pi / 4 \cdot (4 \cdot \phi_a)^2 - (\pi / 4 \times \phi_a^2) \}$$

$$\sigma_{s t} = \beta \cdot p \cdot (a / 2)^2 / t^2$$

ここで、

$p$  : 等分布荷重 ( $N/mm^2$ )

$P_v$  : 基準地震動  $S_s$  による慣性力の鉛直成分 (N)

$\phi_a$  : アンカーボルトの呼び径 (mm)

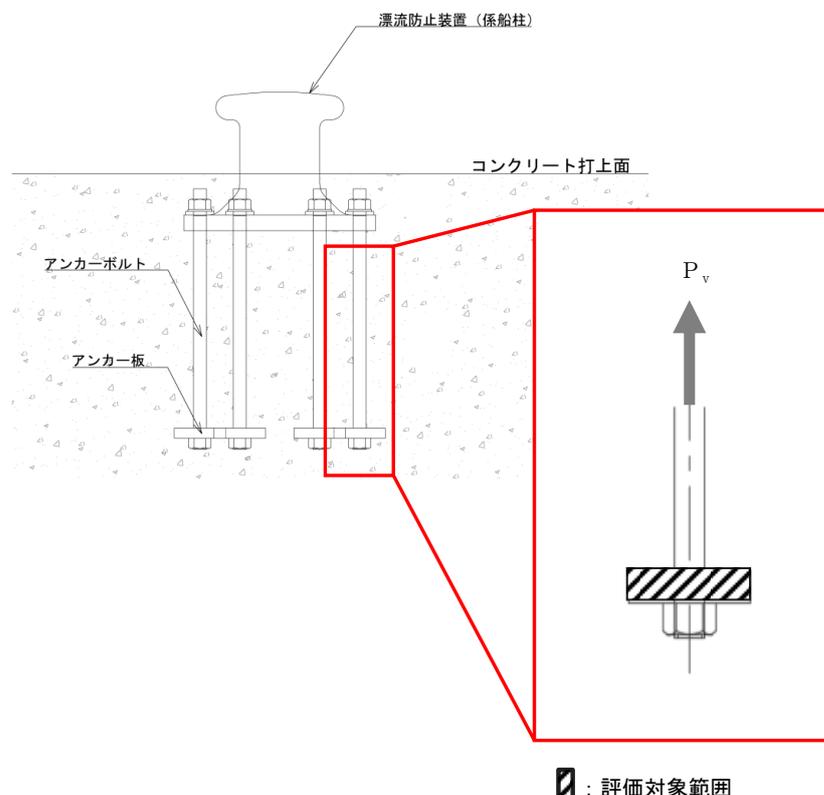
$\sigma_{s t}$  : アンカー板に生じる曲げ応力度 ( $N/mm^2$ )

$\beta$  : 最大応力係数 ( $= b / a$ )

$b$  : ナット二面幅 (mm)

$a$  : アンカー板幅 (mm)

$t$  : アンカー板厚 (mm)



▨ : 評価対象範囲

図 3-8 アンカー板のモデル図

b. コンクリート（アンカー板上面）の支圧応力度

コンクリート（アンカー板上面）に生じる支圧応力度は、「港湾技研資料 No. 102 けい船柱の標準設計（案）（運輸省港湾技術研究所，1970年）」に基づき次式により算出し、コンクリートの許容限界以下であることを確認する。

コンクリート（アンカー板上面）のモデル図を図3-9に示す。

$$\sigma_c = P_v / \{ (\pi / 4) \cdot a^2 \}$$

ここで、

$\sigma_c$  : コンクリート（アンカー板上面）の支圧応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$P_v$  : 基準地震動  $S_s$  による慣性力の鉛直成分 (N)

$a$  : アンカー板幅 (mm)

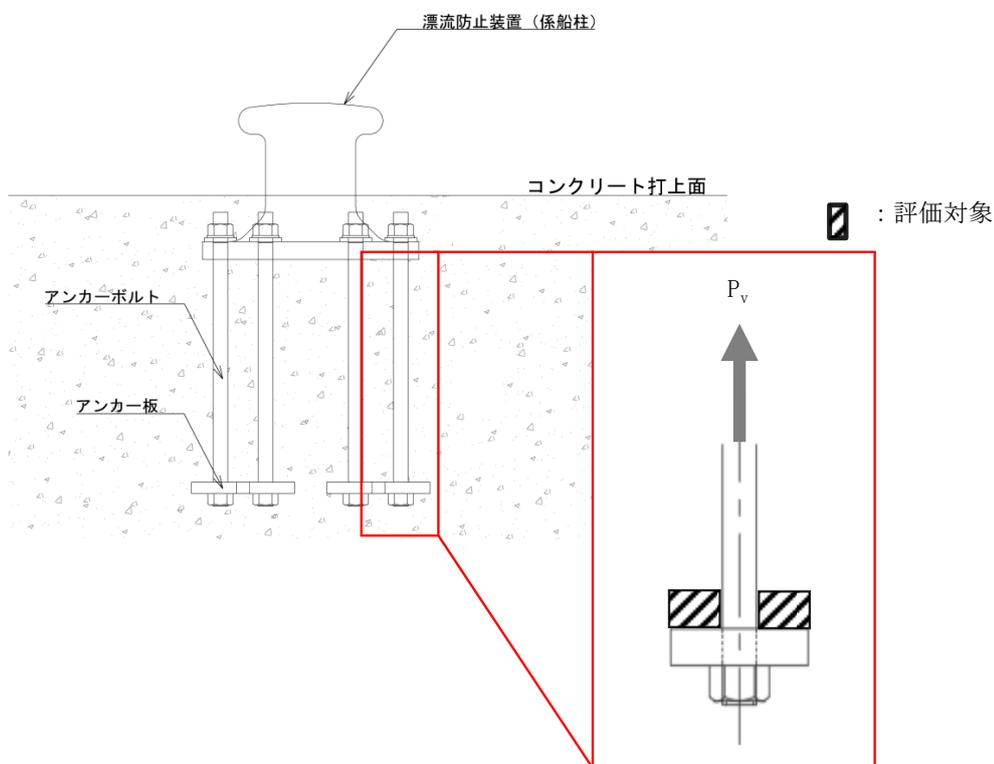


図3-9 コンクリート（アンカー板上面）のモデル図

c. コンクリート（アンカーボルト側面）のせん断応力度

コンクリート（アンカーボルト側面）のせん断応力度は次式により算出し、コンクリートの許容限界以下であることを確認する。コンクリート（アンカーボルト側面）のモデル図を図3-10に示す。

$$\tau_c = P_v / (L \cdot \pi \cdot a)$$

ここで、

$\tau_c$  : コンクリート（アンカーボルト側面）のせん断応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$P_v$  : 基準地震動  $S_s$  による慣性力の鉛直成分 (N)

$L$  : アンカーボルトの埋込み長さ (mm)

$a$  : アンカー板幅 (mm)

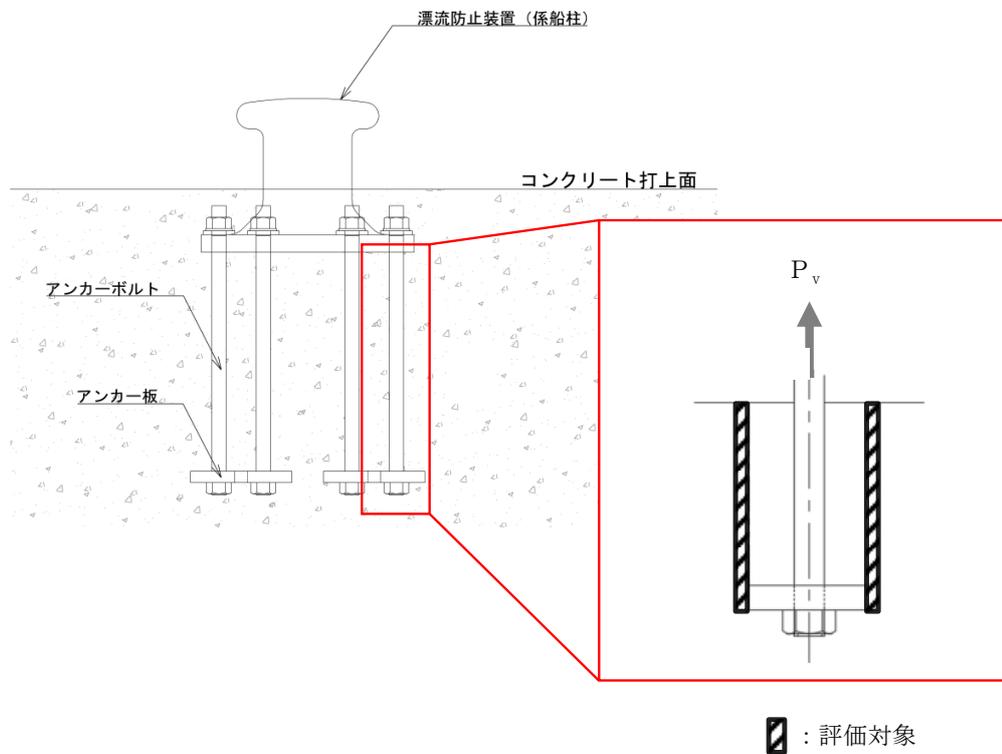


図3-10 コンクリート（アンカーボルト側面）のモデル図

4. 評価条件

「3. 耐震評価」に用いる入力値を表 4-1 に示す。

表 4-1 耐震評価に用いる入力値

対象部位	記号	単位	定義	入力値
係船柱	$M_{sa}$	N・mm	係船柱の直胴部転倒モーメント	2524410
	$P_v$	N	基準地震動 $S_s$ による慣性力の鉛直成分	6250
	D	mm	係船柱の胴部径	350
	$Z_{sa}$	mm <sup>3</sup>	係船柱の断面係数	2055972.3
	$A_{sa}$	mm <sup>2</sup>	係船柱の断面積	27397.8
	y	mm	中心軸と中立軸の距離	115.9
	$R_1$	mm	中心軸から係船柱底板端までの距離	420.0
	n	—	アンカーボルトとコンクリートの弾性係数比	15
	$G_c$	mm <sup>3</sup>	コンクリートの中立軸のまわりの断面 1 次モーメント	17289181.7
	$G_s$	mm <sup>3</sup>	アンカーボルトの中立軸のまわりの断面 1 次モーメント	2108687.8
	$P_H$	N	基準地震動 $S_s$ による慣性力の水平成分	8014
	$\mu$	—	係船柱とコンクリートの摩擦係数	0.3
	$H_1$	mm	係船柱底板厚さ	70
	$R_1'$	mm	中心軸からアンカーボルト位置までの距離	350.0
アンカーボルト	N	本	アンカーボルトの本数	6
	$\phi_b$	mm	アンカーボルトの谷径	50.0
	$\phi_a$	mm	アンカーボルトの呼び径	56.0
	$\beta$	—	最大応力係数	3
アンカー板	b	mm	ナット二面幅	85.0
	t	mm	アンカー板厚	45.0
	p	N/mm <sup>2</sup>	等分布荷重	0.17
	a	mm	アンカー板幅	225.0
	L	mm	アンカーボルトの埋込み長さ	850

5. 評価結果

漂流防止装置（係船柱）の耐震評価結果を表 5-1 に示す。漂流防止装置（係船柱）の各部材の発生応力度は許容限界以下であることから、漂流防止装置（係船柱）は構造健全性を有することを確認した。

表 5-1 漂流防止装置（係船柱）の照査結果

評価対象部位		発生応力度		許容限界		照査値
係船柱	曲げ応力度	1.46	N/mm <sup>2</sup>	205	N/mm <sup>2</sup>	0.01
	コンクリート（係船柱底板） 支圧応力度	0.13	N/mm <sup>2</sup>	17.5	N/mm <sup>2</sup>	0.01
	コンクリート（係船柱前面） 支圧応力度	0.11	N/mm <sup>2</sup>	17.5	N/mm <sup>2</sup>	0.01
アンカー ボルト	引張応力度	3.05	N/mm <sup>2</sup>	215	N/mm <sup>2</sup>	0.02
	せん断応力度	0.68	N/mm <sup>2</sup>	124	N/mm <sup>2</sup>	0.01
アンカー 板	アンカー板 曲げ応力度	3.17	N/mm <sup>2</sup>	215	N/mm <sup>2</sup>	0.02
	コンクリート（アンカー板上面） 支圧応力度	0.16	N/mm <sup>2</sup>	17.5	N/mm <sup>2</sup>	0.01
	コンクリート（アンカーボルト側面） せん断応力度	0.01	N/mm <sup>2</sup>	0.67	N/mm <sup>2</sup>	0.02

2. 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の耐震性についての計算書

## 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	4
2.4 適用規格・基準等	6
3. 耐震評価	7
3.1 評価対象断面	7
3.2 解析方法	8
3.2.1 施設	8
3.2.2 地盤物性のばらつき	9
3.2.3 減衰定数	9
3.2.4 解析ケース	10
3.3 荷重及び荷重の組合せ	11
3.3.1 耐震評価上考慮する状態	11
3.3.2 荷重	11
3.3.3 荷重の組合せ	12
3.4 入力地震動	13
3.5 解析モデル及び諸元	26
3.5.1 解析モデル	26
3.5.2 使用材料及び材料の物性値	27
3.5.3 地盤の物性値	29
3.5.4 地下水位	29
3.6 評価対象部位	30
3.6.1 施設の变形性評価	30
3.7 許容限界	30
3.8 評価方法	30
4. 耐震評価結果	31

## 1. 概要

本資料は、VI-2-別添 6-1「漂流防止装置の耐震計算の方針」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、漂流防止装置（係船柱）を設置する漂流防止装置基礎（荷揚護岸）が基準地震動  $S_s$  に対して十分な構造強度を有していることを確認するものである。

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）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施設の変形性評価を行う。

## 2. 基本方針

### 2.1 位置

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の位置図を図2-1に示す。

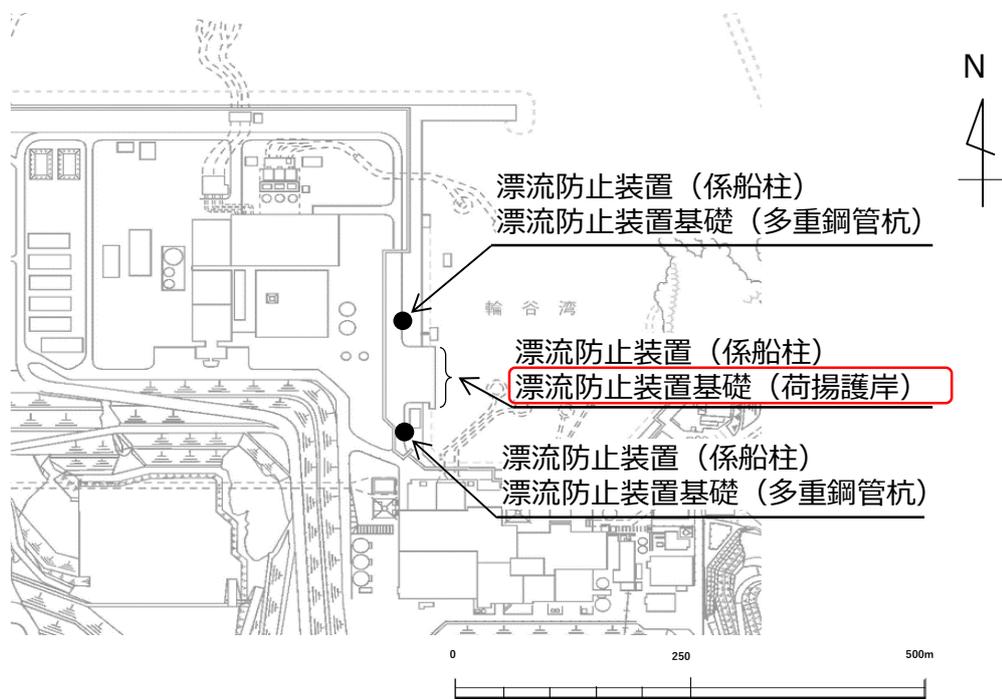


図2-1 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の位置図

## 2.2 構造概要

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の概要図を図 2-2 に示す。

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）は岩盤上に支持され、基礎コンクリート、セルラーブロック（コンクリート詰）及び上部工（無筋・有筋）から構成する。

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の上部に漂流防止装置（係船柱）を設置する。

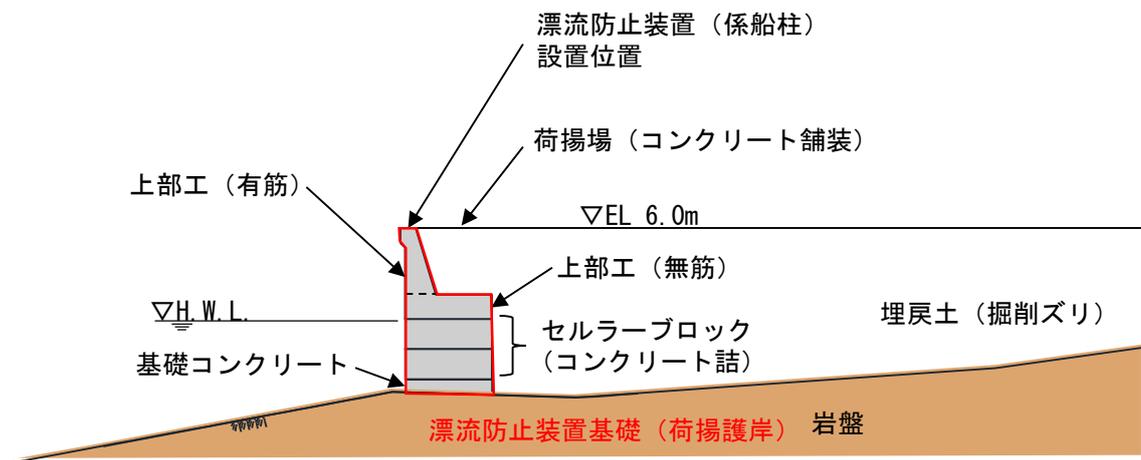


図 2-2 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の概要図

### 2.3 評価方針

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）は、漂流防止装置（係船柱）を支持する。

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）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。

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の耐震評価は、地震応答解析の結果に基づき、表 2-3 に示すとおり、施設の変形性評価を行い、構造強度を有することを確認する。

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の耐震評価フローを図 2-3 に示す。

表 2-1 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の各部位の役割

部位の名称	地震時の役割	津波時の役割
漂流防止装置基礎 （荷揚護岸）	漂流防止装置（係船柱）を支持する。	漂流防止装置（係船柱）を支持する。

表 2-2 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の各部位の性能目標

部位の名称	性能目標	
	耐震性	耐津波性
漂流防止装置基礎 （荷揚護岸）	漂流防止装置（係船柱）の漂流防止機能を保持すること。	—

表 2-3 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）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	施設の変形性	漂流防止装置基礎 （荷揚護岸）	発生する残留変形量が許容限界以下であることを確認	許容残留変形量

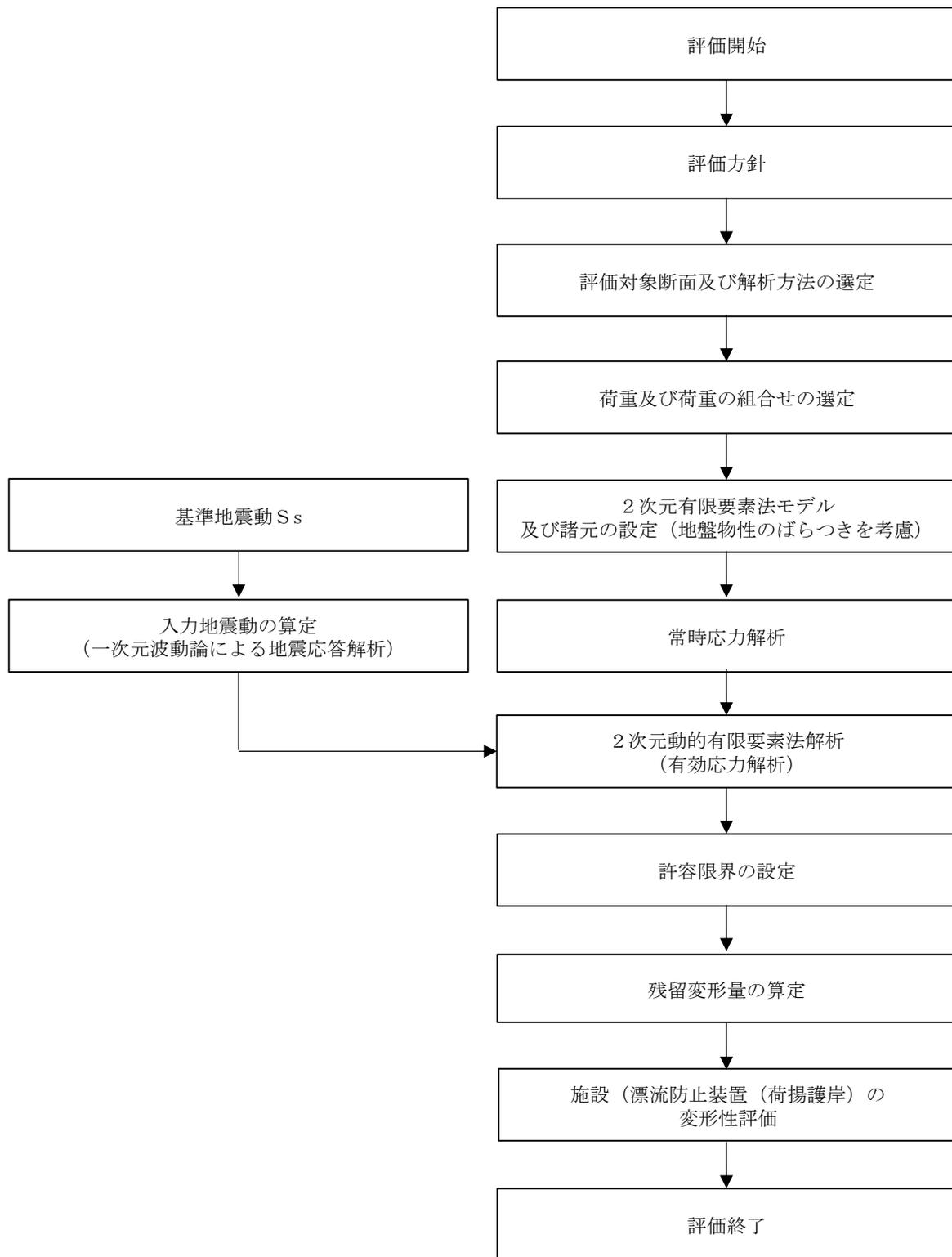


図 2-3 漂流防止装置基礎 (荷揚護岸) の耐震評価フロー

## 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〕（（社）土木学会，2002年制定）
- ・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）
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説（国土交通省港湾局，2007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. 耐震評価

#### 3.1 評価対象断面

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の評価対象断面は、漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の構造上の特徴や周辺地盤状況を踏まえて設定する。図 3-1 に漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の評価対象断面位置図を、図 3-2 に⑥-⑥断面の横断面図を示す。

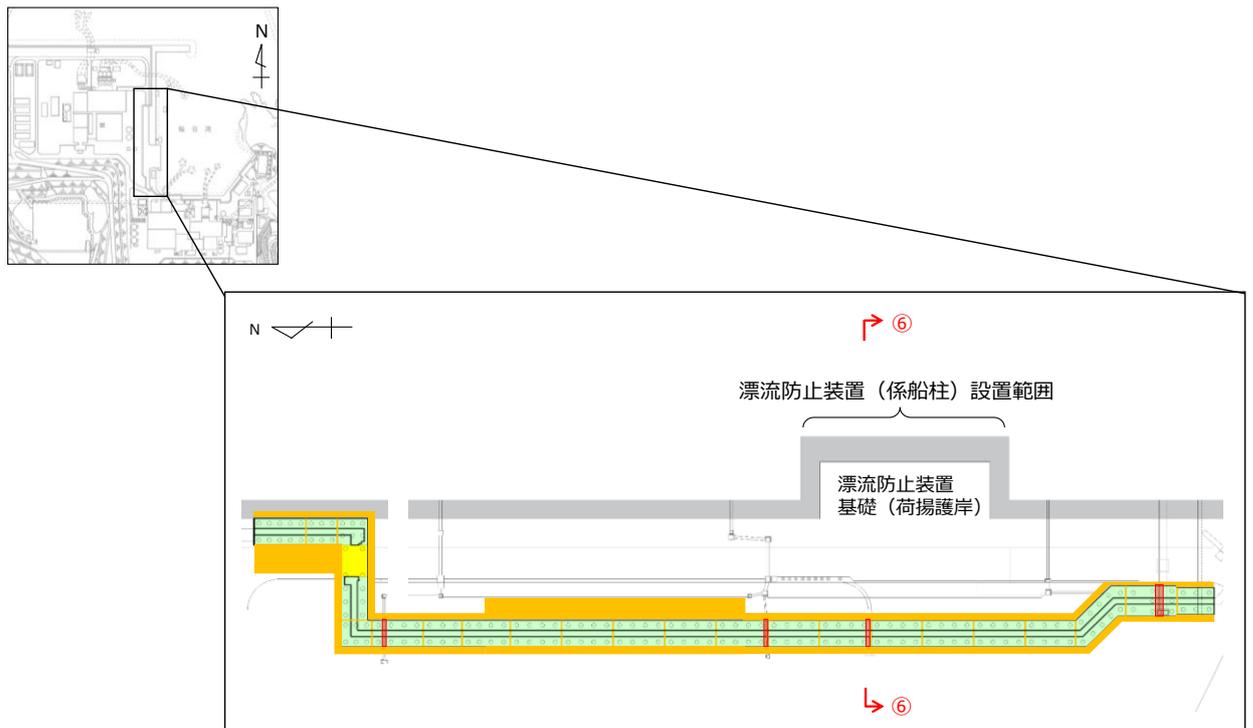


図 3-1 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の評価対象断面位置図

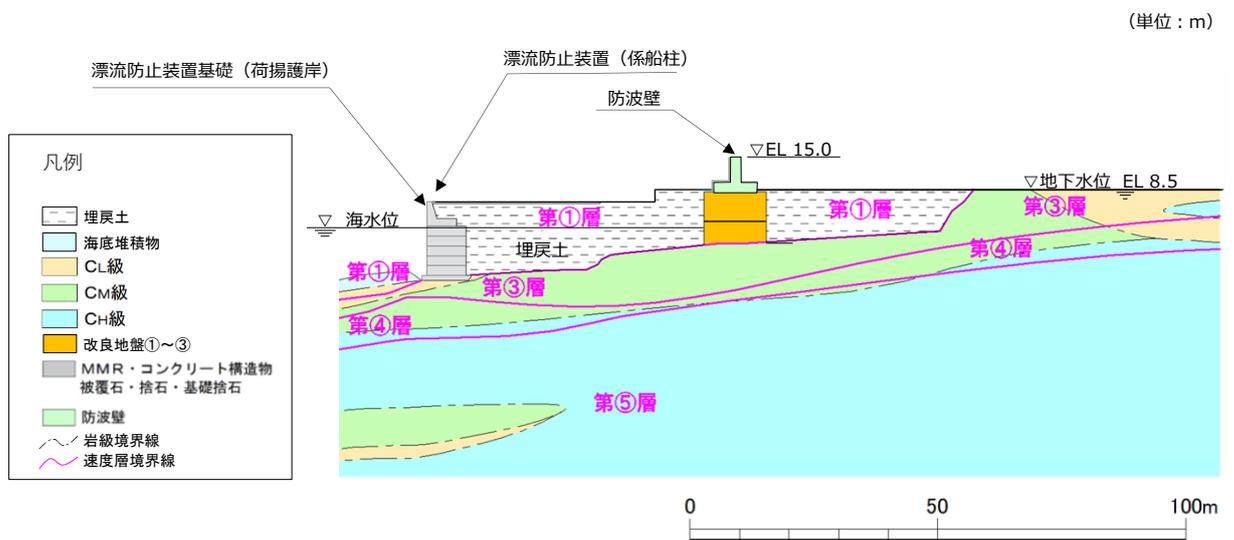


図 3-2 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の横断面図（⑥-⑥断面）

### 3.2 解析方法

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の地震応答解析は、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次元有限要素法を用いて、基準地震動  $S_s$  に基づき設定した水平地震動と鉛直地震動の同時加振による逐次時間積分の時刻歴応答解析により行うこととする。地震時における地盤の有効応力の変化に伴う影響を考慮するため、解析方法は有効応力解析とする。

構造部材については、線形の平面ひずみ要素でモデル化する。また、地盤については地盤の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」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、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

#### 3.2.1 施設

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）は、線形の平面ひずみ要素としてモデル化する。

### 3.2.2 地盤物性のばらつき

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）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 3-1 に示す解析ケースにおいて考慮する。

図 3-2 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、地震時に漂流防止装置基礎（荷揚護岸）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。

詳細な解析ケースの考え方は、「3.2.4 解析ケース」に示す。

表 3-1 有解析ケース

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 $\sigma$	平均値
ケース③	平均値 - 1 $\sigma$	平均値

### 3.2.3 減衰定数

Rayleigh 減衰を考慮することとし、剛性比例型減衰を設定する。

### 3.2.4 解析ケース

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。すべての基準地震動  $S_s$  に対して実施したケース①（基本ケース）の解析において、各照査値が最も厳しい地震動を用いて、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 3-2 に示す。

表 3-2 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 (+1 $\sigma$ ) を考慮した解析ケース	地盤物性のばらつき (-1 $\sigma$ ) を考慮した解析ケース
地盤物性		平均値	平均値+1 $\sigma$	平均値-1 $\sigma$
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。

### 3.3 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、VI-2-別添 6-1「漂流防止装置の耐震計算の方針」に基づき設定する。

#### 3.3.1 耐震評価上考慮する状態

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）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

積雪荷重を考慮する。

##### (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

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）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、漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の自重を考慮する。

##### (2) 積雪荷重（P<sub>s</sub>）

積雪荷重として、発電所最寄りの気象官署である松江地方気象台（松江市）での観測記録（1941～2018年）より、観測史上1位の月最深積雪100cm（1971年2月4日）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35.0cmとする。積雪荷重については、「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）」により、積雪量1cmごとに20N/m<sup>2</sup>の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

##### (3) 地震荷重（S<sub>s</sub>）

基準地震動S<sub>s</sub>の荷重を考慮する。

### 3.3.3 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-3 に示す。

表 3-3 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時 (S <sub>s</sub> )	G + S <sub>s</sub> + P <sub>s</sub>

G : 固定荷重

S<sub>s</sub> : 地震荷重 (基準地震動 S<sub>s</sub>)

P<sub>s</sub> : 積雪荷重

### 3.4 入力地震動

入力地震動は、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、一次元波動論により地震応答解析モデル下端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、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3-15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「SHAKE」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、VI-5「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

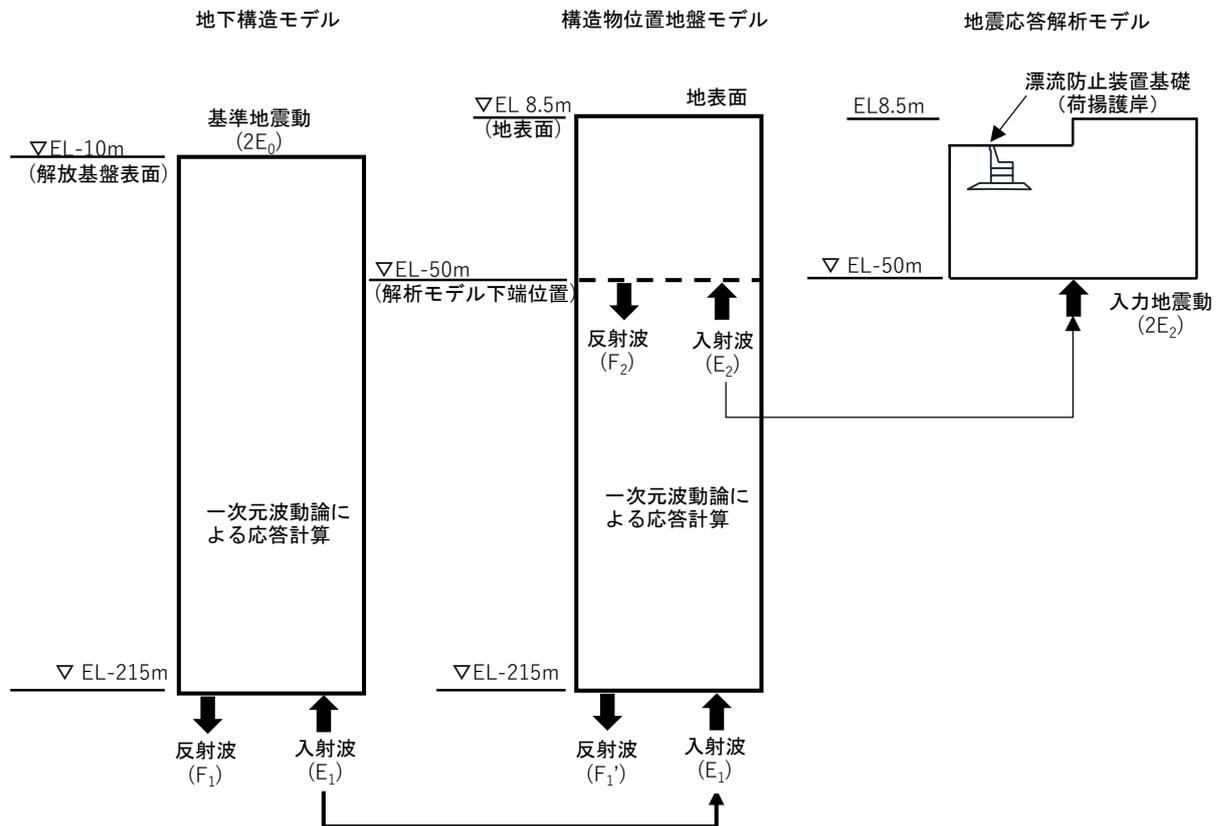
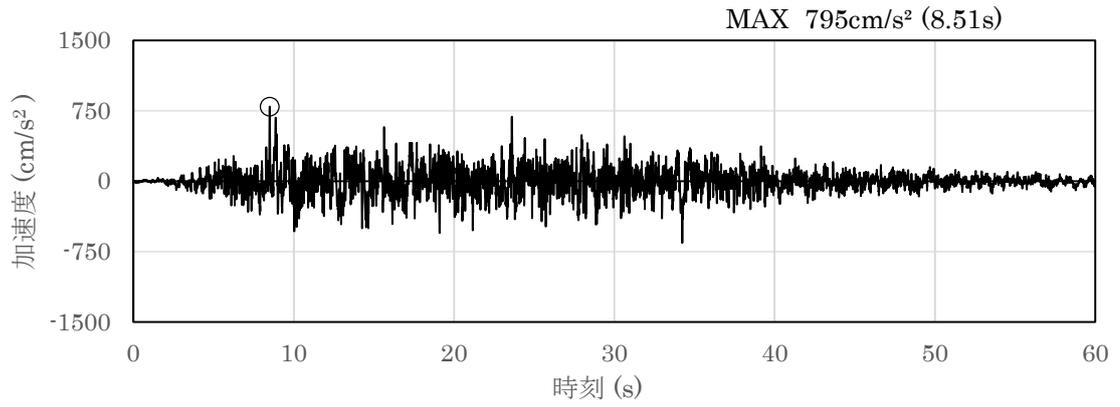
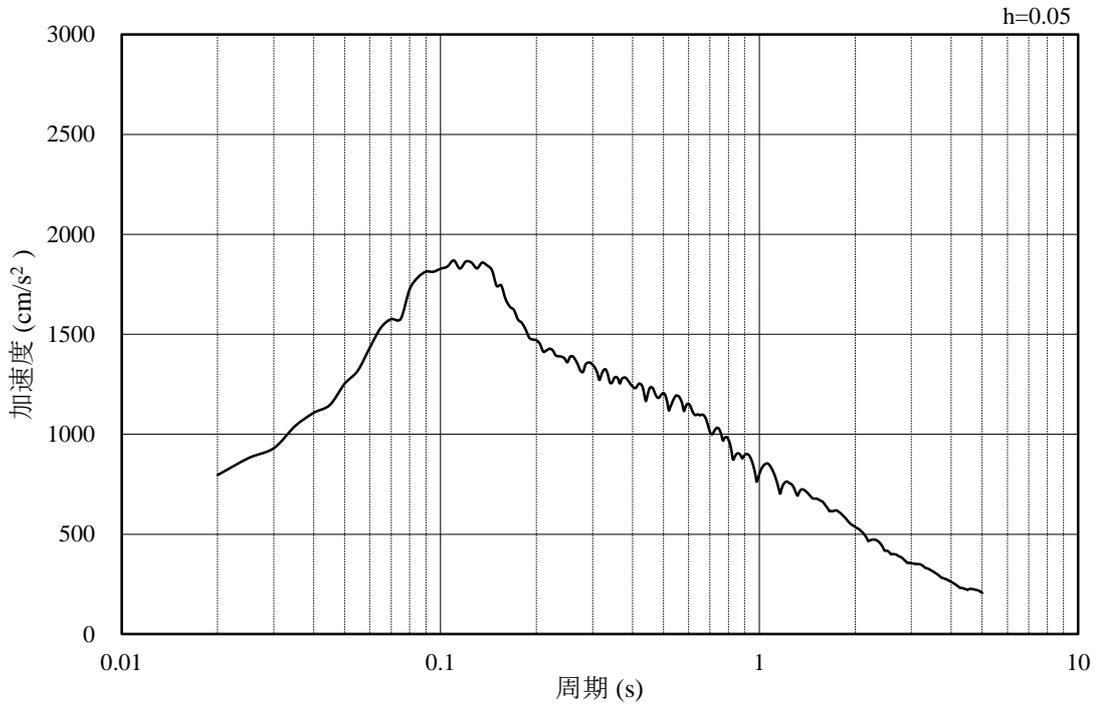


図3-3 入力地震動算定の概念図

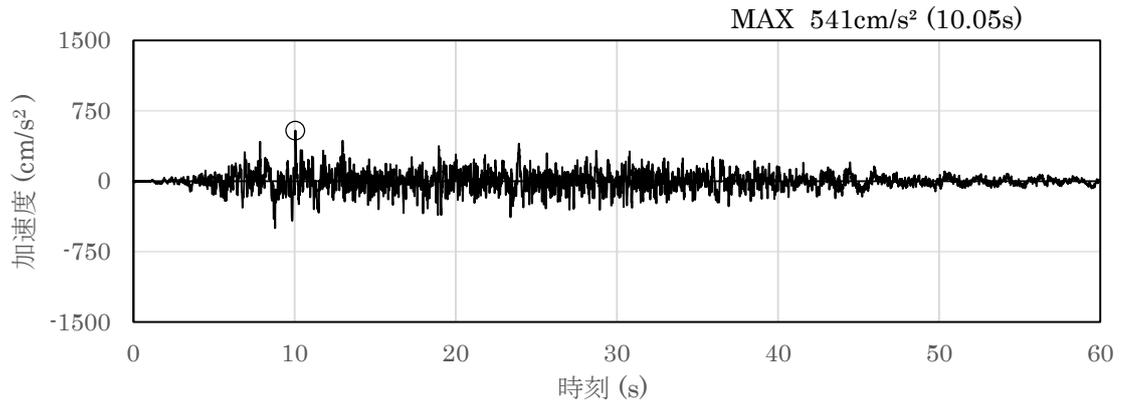


(a) 加速度時刻歴波形

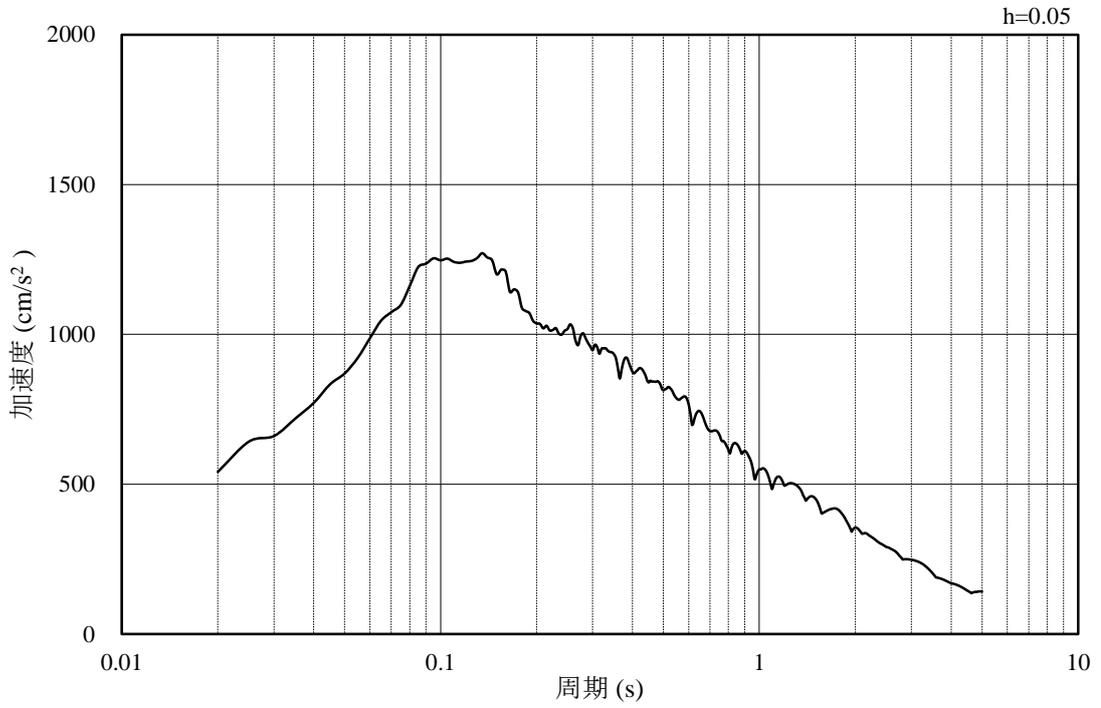


(b) 加速度応答スペクトル

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)

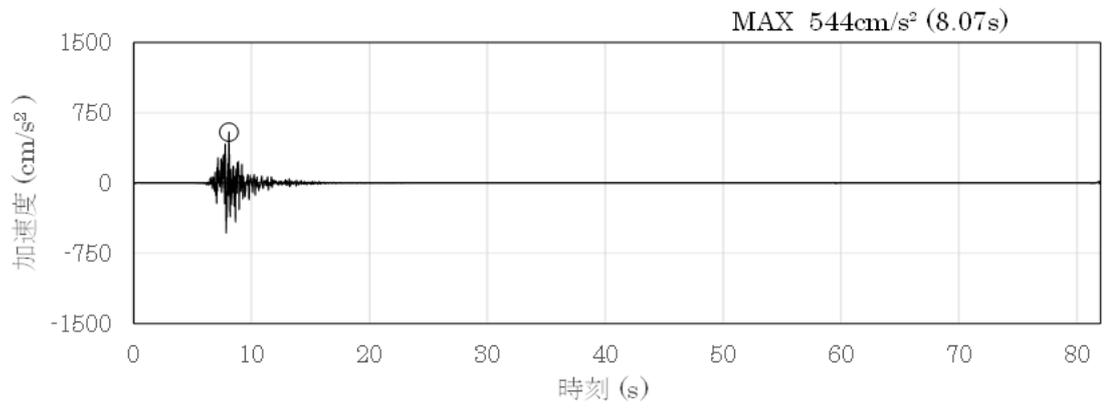


(a) 加速度時刻歴波形

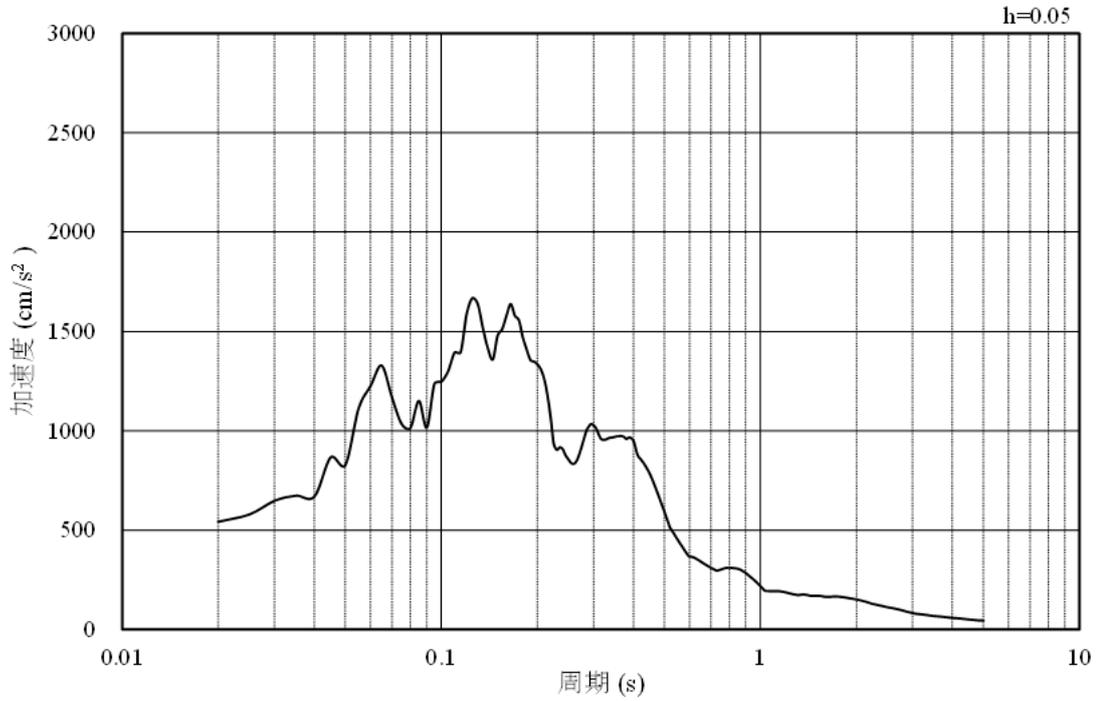


(b) 加速度応答スペクトル

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)

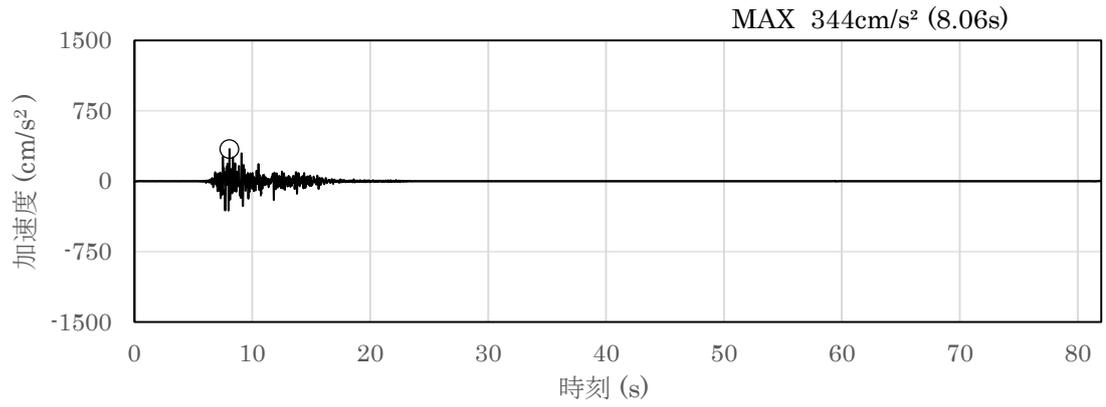


(a) 加速度時刻歴波形

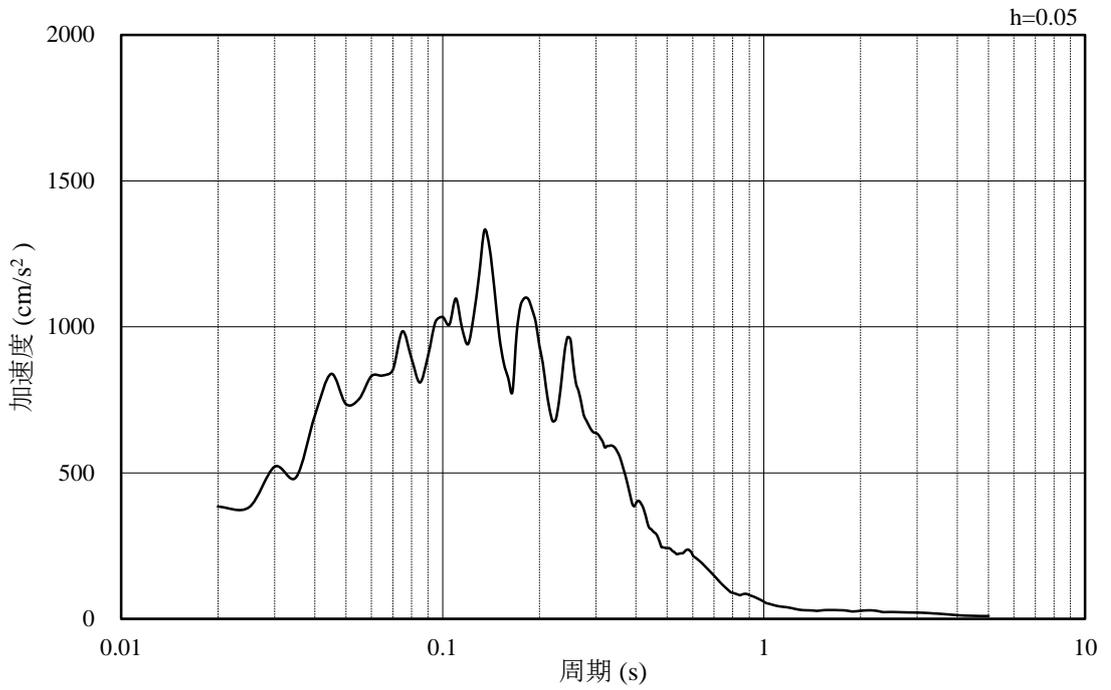


(b) 加速度応答スペクトル

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 - F 1)

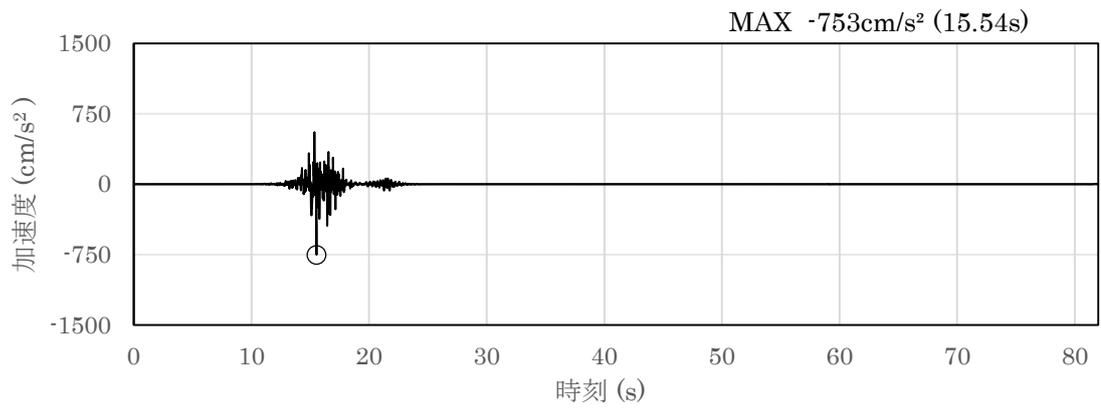


(a) 加速度時刻歴波形

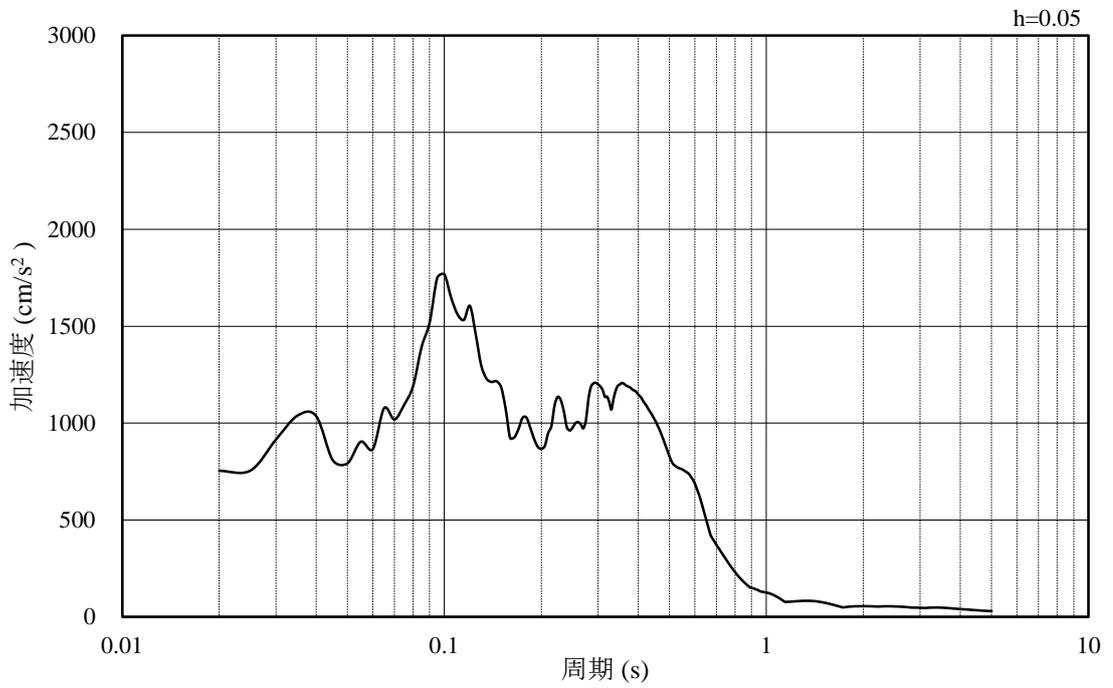


(b) 加速度応答スペクトル

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 - F 1)

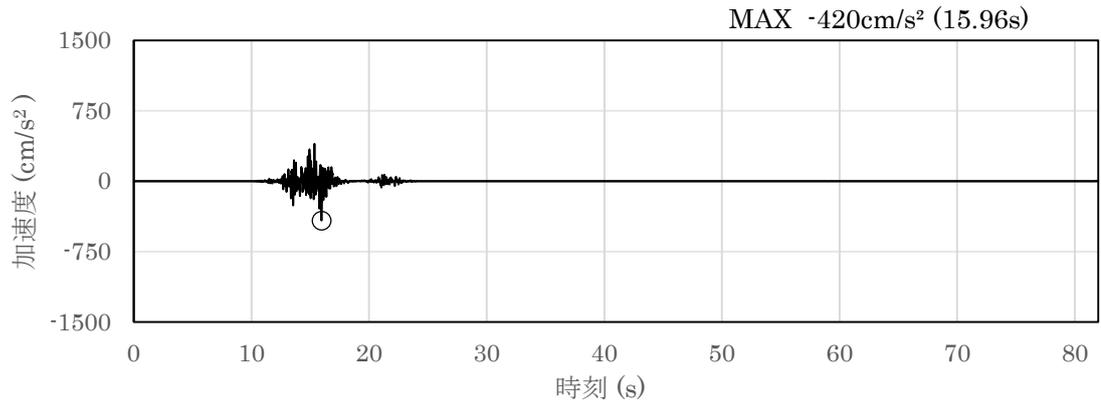


(a) 加速度時刻歴波形

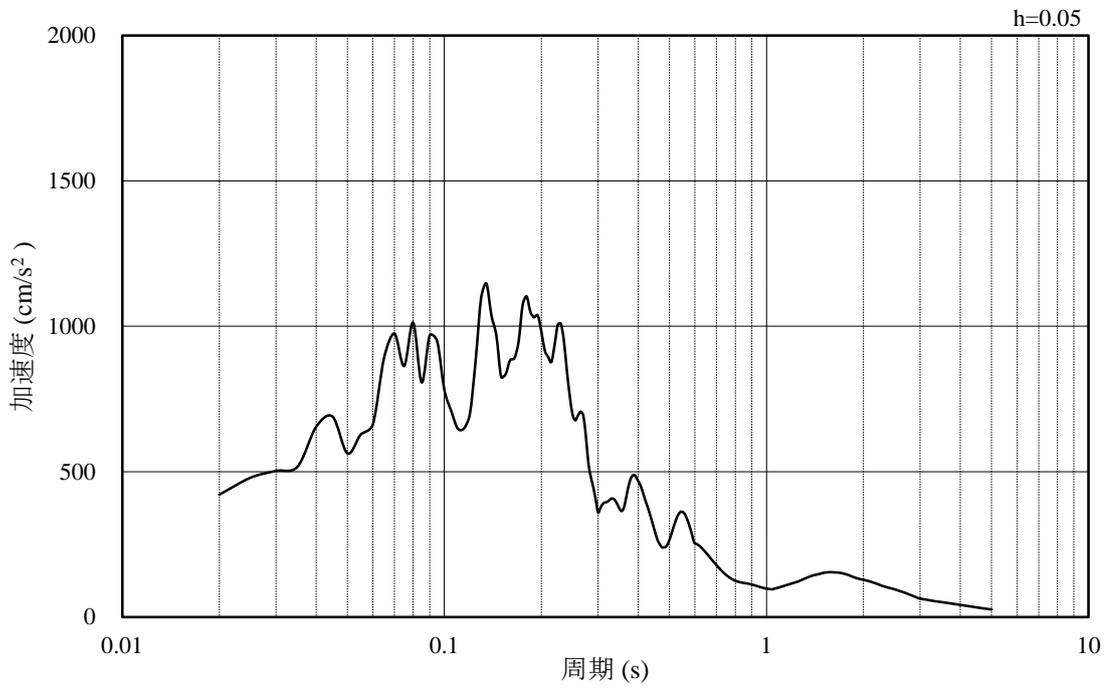


(b) 加速度応答スペクトル

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 - F 2)

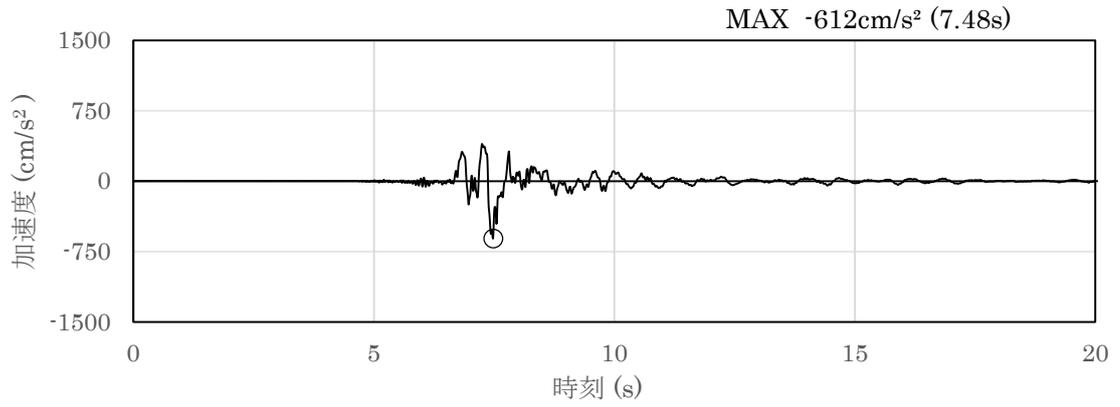


(a) 加速度時刻歴波形

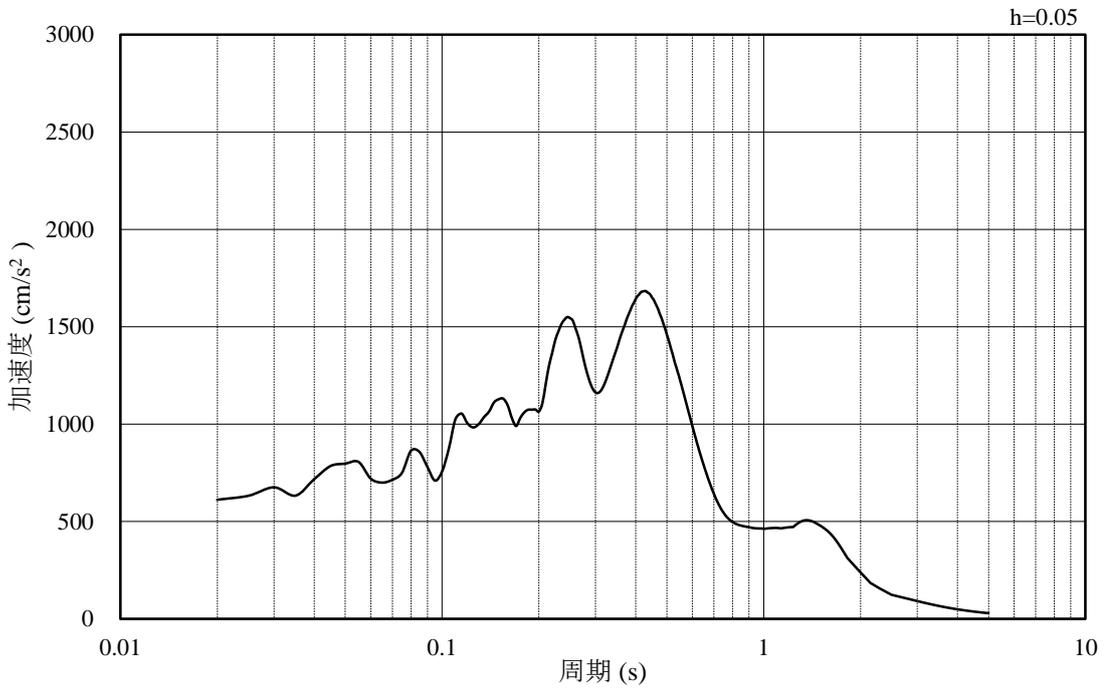


(b) 加速度応答スペクトル

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 - F 2)

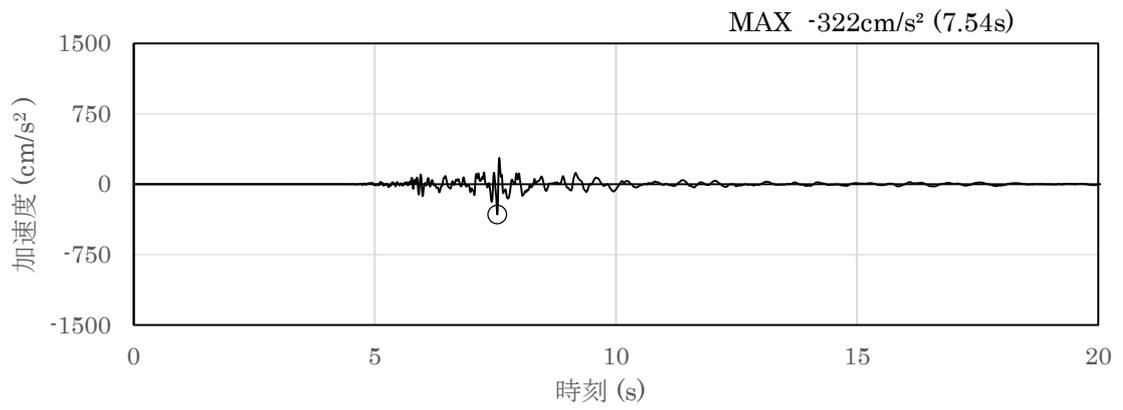


(a) 加速度時刻歴波形

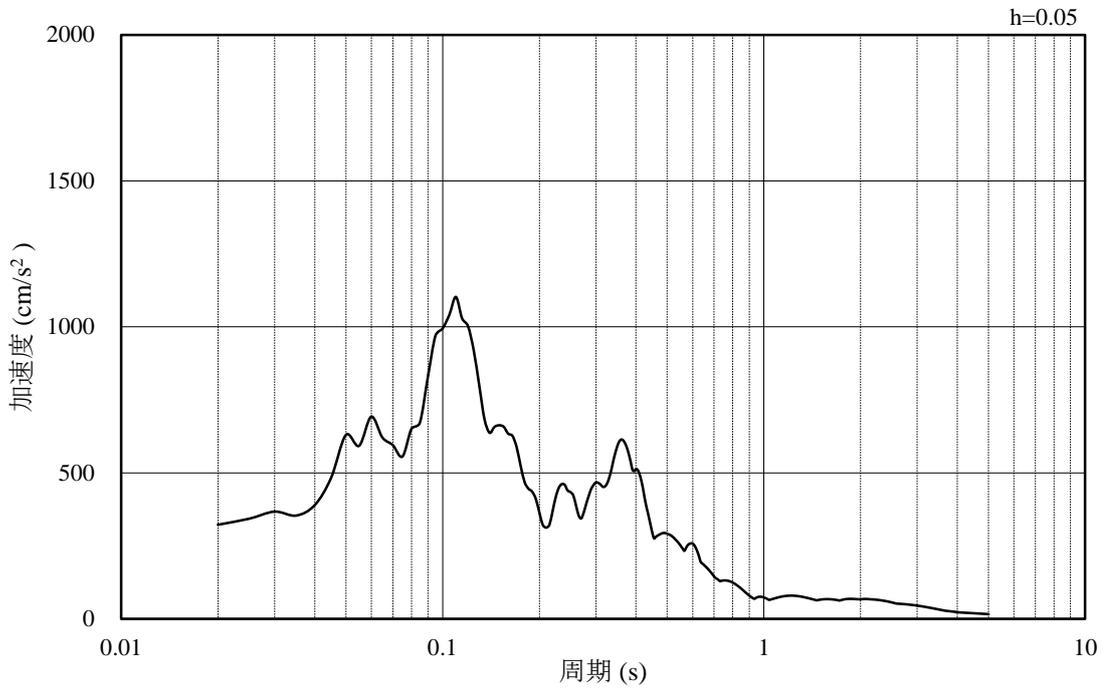


(b) 加速度応答スペクトル

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 - N 1)

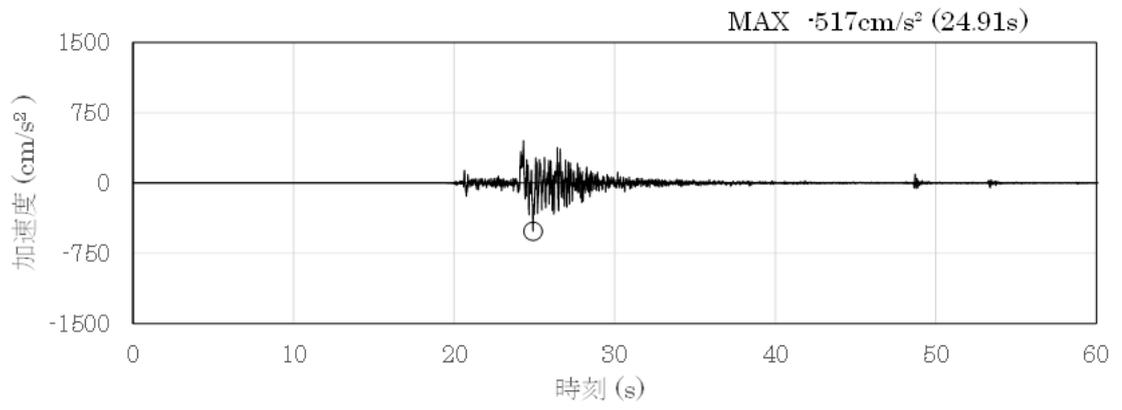


(a) 加速度時刻歴波形

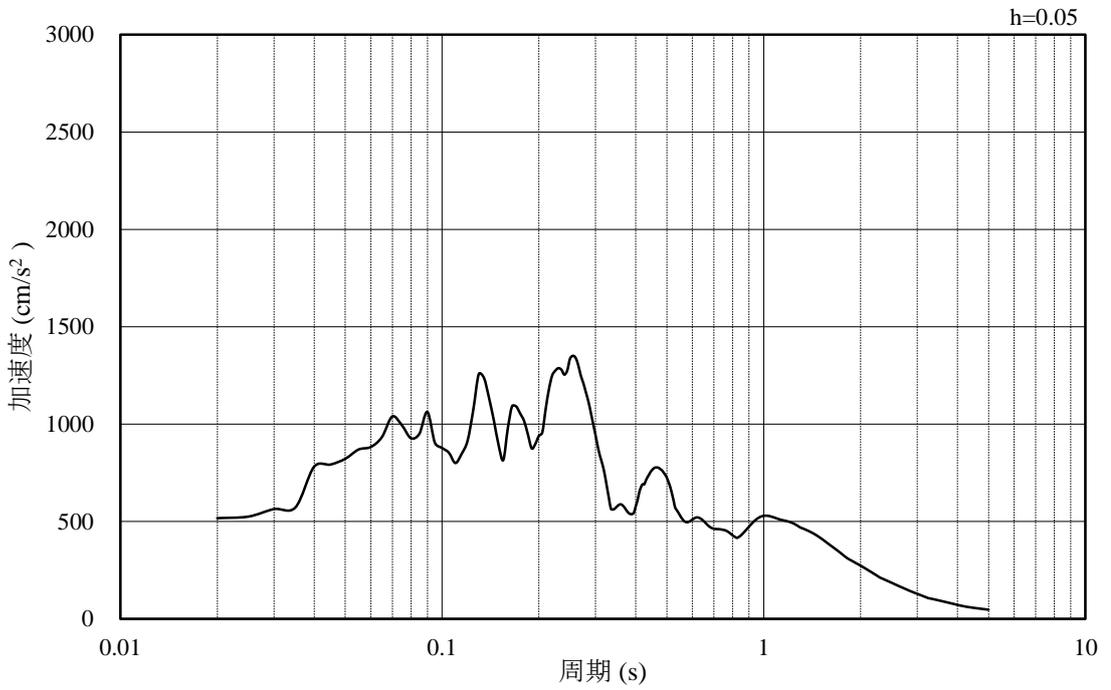


(b) 加速度応答スペクトル

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 - N 1)

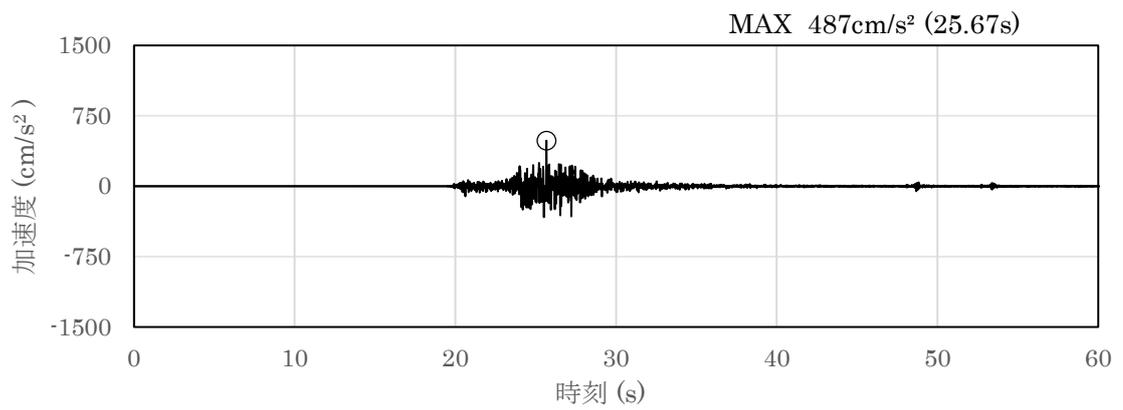


(a) 加速度時刻歴波形

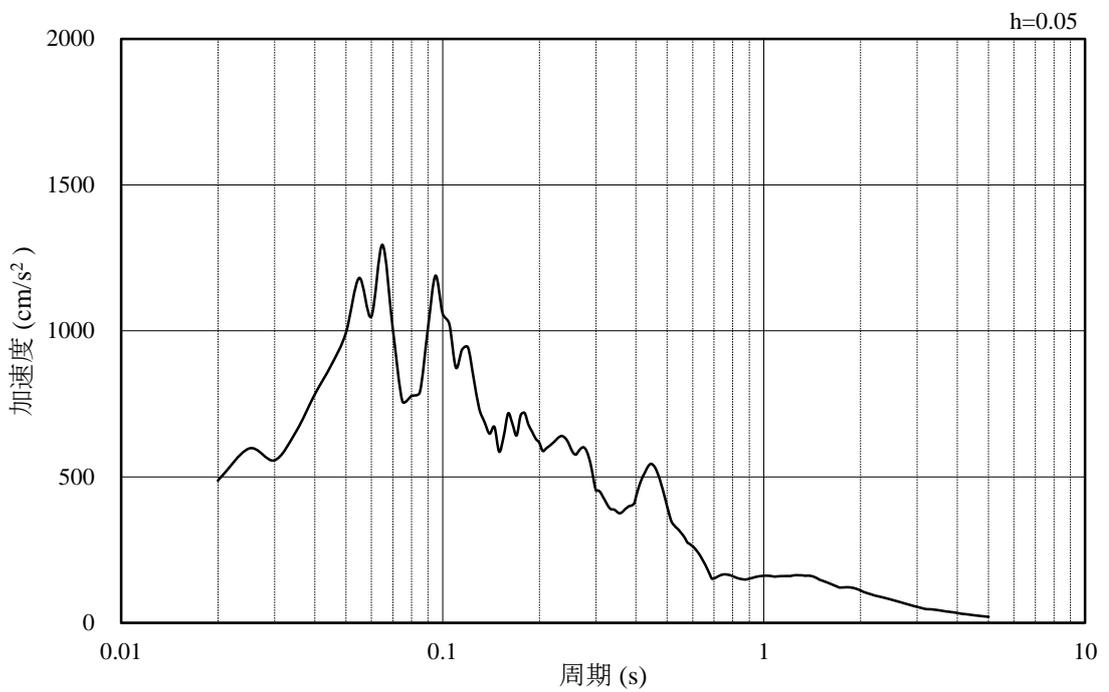


(b) 加速度応答スペクトル

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 - N 2 (N S))

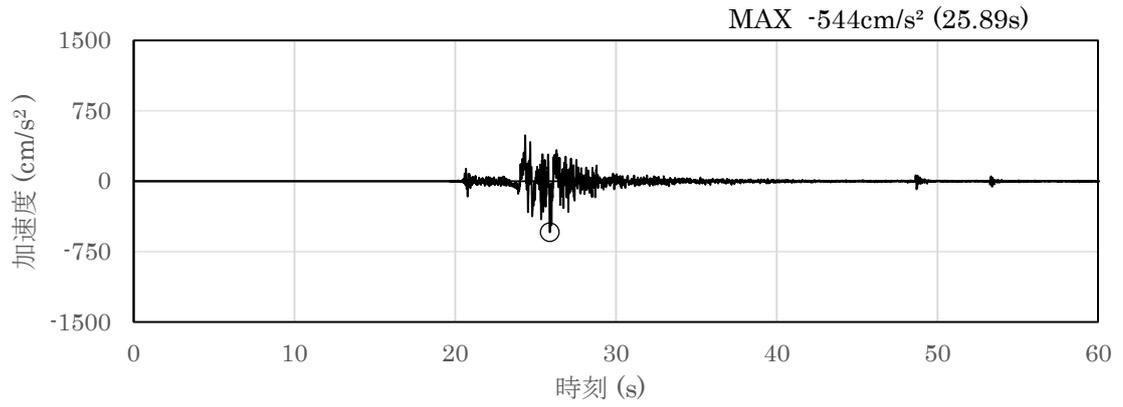


(a) 加速度時刻歴波形

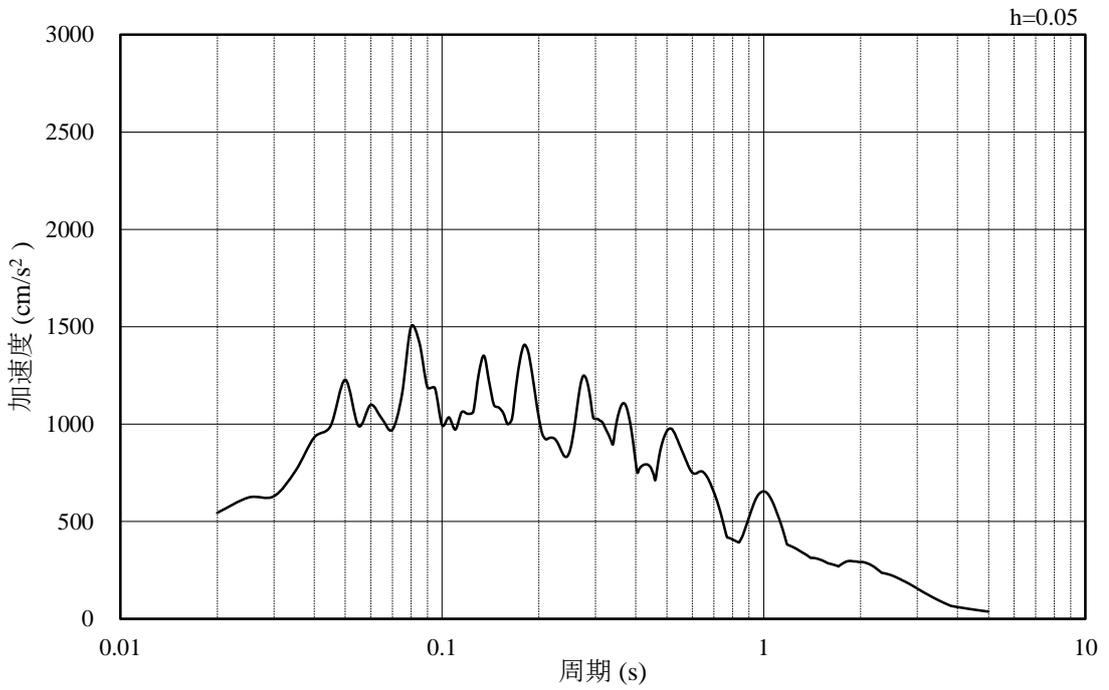


(b) 加速度応答スペクトル

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 - N 2 (N S))

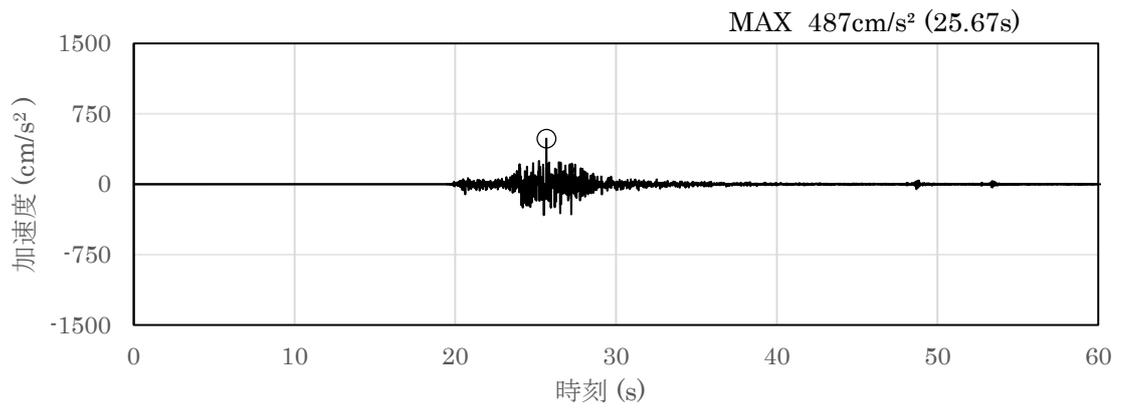


(a) 加速度時刻歴波形

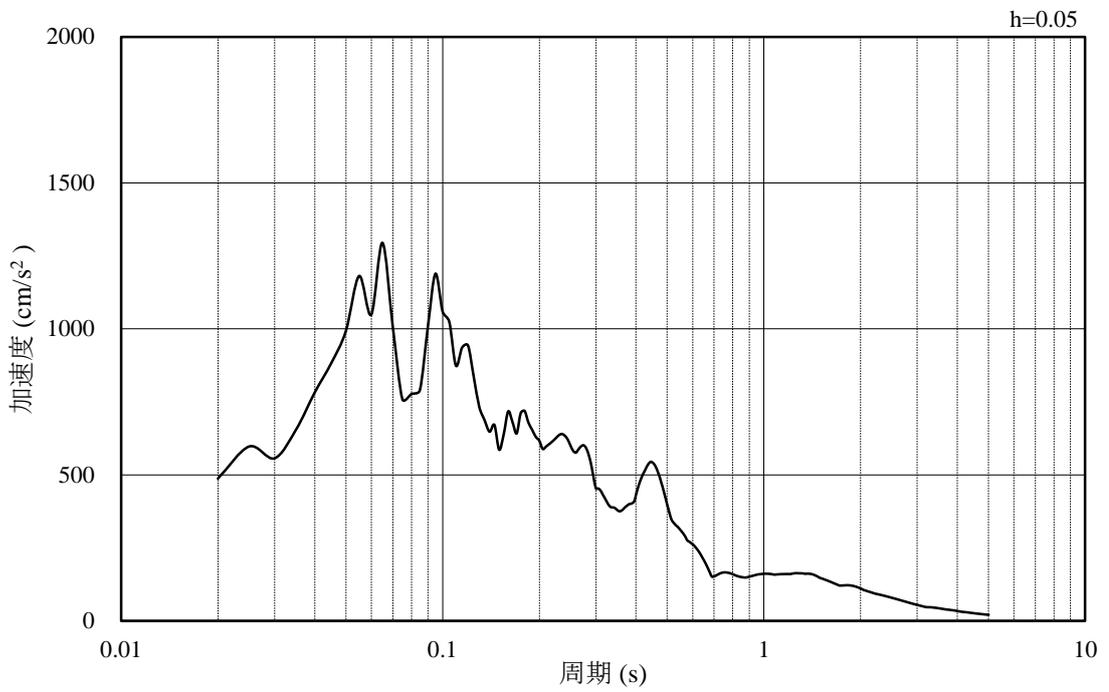


(b) 加速度応答スペクトル

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 - N 2 (E W))



(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 - N 2 (E W))

### 3.5 解析モデル及び諸元

#### 3.5.1 解析モデル

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の地震応答解析モデルを図 3-16 に示す。

##### (1) 解析領域

地震応答解析モデルは、「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）」を参考に、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。

##### (2) 境界条件

地震応答解析時の境界条件については、有限要素解析における半無限地盤を模擬するため、粘性境界を設ける。

##### (3) 構造物のモデル化

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）は線形の平面ひずみ要素でモデル化する。漂流防止装置（係船柱）は、漂流防止装置基礎（荷揚護岸）と比較して十分に重量が小さいことからモデル化しない。

##### (4) 地盤のモデル化

岩盤は、線形の平面ひずみ要素でモデル化する。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。

##### (5) ジョイント要素の設定

地震時の施設及び地盤の接合面における剥離及びすべりを考慮するため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（国土交通省港湾局，2007年版）」及び「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）」に準拠して、これらの接合面にジョイント要素を設定する。

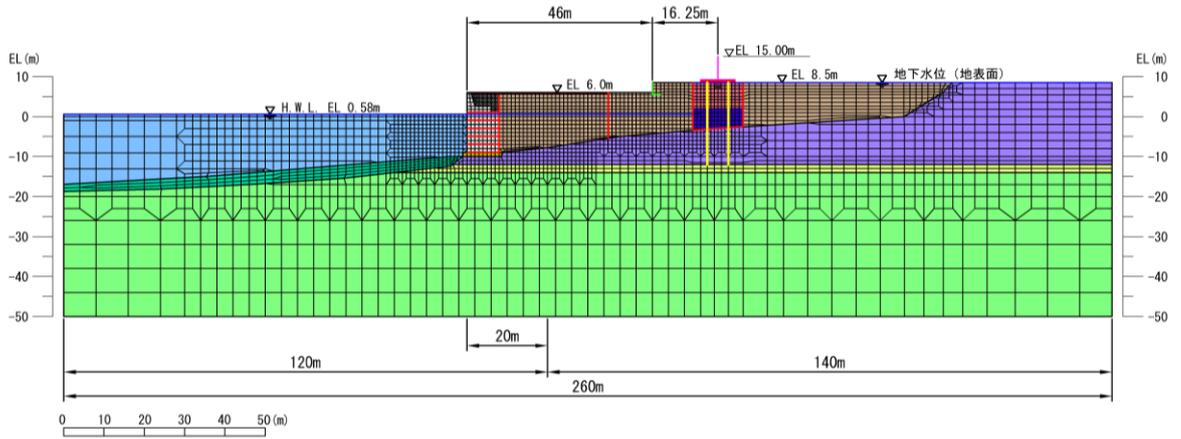
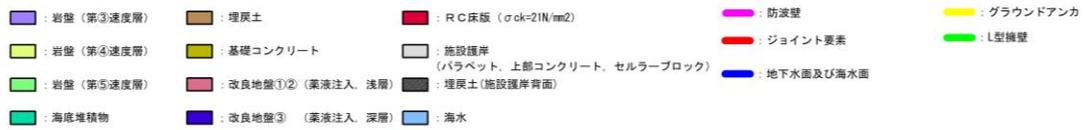


図 3-16 地震応答解析モデル (⑥-⑥断面)

### 3.5.2 使用材料及び材料の物性値

耐震評価に用いる材料定数は、適用基準類を基に設定する。使用材料を表 3-4 に、材料の物性値を表 3-5 に示す。

表 3-4 使用材料

材料	部位	諸元
コンクリート	上部工 (有筋)	設計基準強度 : 20.6N/mm <sup>2</sup>
	上部工 (無筋)	設計基準強度 : 14.7N/mm <sup>2</sup>
	セルラーブロック (コンクリート詰)	設計基準強度 : 20.6N/mm <sup>2</sup>
	基礎コンクリート	設計基準強度 : 14.7N/mm <sup>2</sup>

表 3-5 材料の物性値

材料	部位	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )		ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	ポアソン 比
		飽和, 湿潤	水中		
コンクリート	上部工 (有筋)	24.0 <sup>*1</sup>	-	23.3 <sup>*1</sup>	0.2 <sup>*1</sup>
	上部工 (無筋)	22.6 <sup>*2</sup>	-	20.4 <sup>*1</sup>	0.2 <sup>*1</sup>
	セルラーブロック <sup>*3</sup> (コンクリート詰)	23.0 <sup>*2</sup>	12.9	23.3 <sup>*1</sup>	0.2 <sup>*1</sup>
	基礎コンクリート	22.6 <sup>*2</sup>	12.5	20.4 <sup>*1</sup>	0.2 <sup>*1</sup>

注記\*1: 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)

\*2: 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (国土交通省港湾局, 2007 年版)

\*3: セルラーブロック及び中詰材の単位体積重量は, 「港湾の施設の技術上の基準・同解説 (国土交通省港湾局, 2007 年版)」より設定する。また, 剛性は中詰材が護岸と一体の挙動を示すことから, 護岸材料と同様の物性とする。

### 3.5.3 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。

### 3.5.4 地下水位

設計地下水位は，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。設計地下水位を表3-6に示す。

表3-6 設計地下水位

施設名称	設計地下水位
漂流防止装置基礎 (荷揚護岸)	防波壁より陸側：EL 8.5m* 防波壁より海側：EL 0.58m

注記\*：地表面がEL 8.5mよりも低い地点については，地下水位を地表面とする。

### 3.6 評価対象部位

評価対象部位は、漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の構造上の特徴を踏まえ設定する。

#### 3.6.1 施設の变形性評価

施設の变形性評価に係る評価対象部位は、漂流防止装置基礎（荷揚護岸）とする。

### 3.7 許容限界

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の許容限界は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（国土交通省港湾局，2007年版）」に基づき、表3-7のとおり設定する

表3-7 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の許容限界

断面	許容残留変形量 (m)
⑥-⑥断面	0.3

### 3.8 評価方法

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の耐震評価では、地震応答解析に基づいて算定した残留変形量が「3.7 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。

#### 4. 耐震評価結果

漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の残留変形量に対する照査結果を表 4-1 に示す。

この結果から、漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の残留変形量が許容限界以下であることを確認した。

表 4-1 漂流防止装置基礎（荷揚護岸）の残留変形量に対する照査結果

地震動	解析 ケース	残留変形量 $\delta$ (m)	許容 残留変形量 $\delta_a$ (m)	照査値 $\delta / \delta_a$
S <sub>s</sub> -D (--)	③	0.04	0.3	0.14

### 3. 漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の耐震性についての計算書

## 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	適用規格・基準等	8
3.	耐震評価	9
3.1	評価対象断面	9
3.2	解析方法	11
3.2.1	施設	11
3.2.2	地盤物性のばらつき	12
3.2.3	減衰定数	12
3.2.4	解析ケース	12
3.3	荷重及び荷重の組合せ	14
3.4	入力地震動	16
3.5	解析モデル及び諸元	29
3.5.1	解析モデル	29
3.5.2	使用材料及び材料の物性値	31
3.5.3	地盤の物性値	31
3.5.4	地下水位	31
3.6	評価対象部位	32
3.6.1	施設の <sup>変形性</sup> 評価	32
3.6.2	基礎地盤の支持性能評価	32
3.7	許容限界	33
3.7.1	鋼管杭	33
3.7.2	基礎地盤	34
3.8	評価方法	35
3.8.1	鋼管杭	35
3.8.2	基礎地盤	35
4.	耐震評価結果	36
4.1	鋼管杭	36
4.1.1	曲げ照査	36
4.1.2	せん断照査	37
4.2	基礎地盤	38

## 1. 概要

本資料は、VI-2-別添 6-1「漂流防止装置の耐震計算の方針」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、漂流防止装置（係船柱）を設置する漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）が基準地震動  $S_s$  に対して十分な構造強度を有していることを確認するものである。

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）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施設の変形性評価を行う。

## 2. 基本方針

### 2.1 位置

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の位置図を図 2-1 に示す。

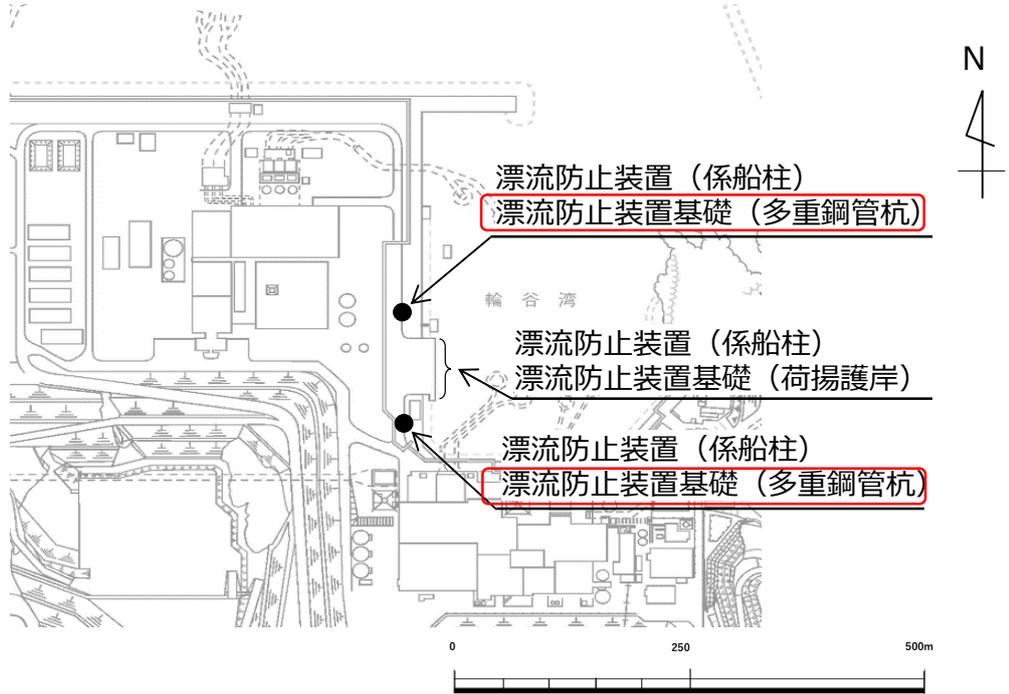
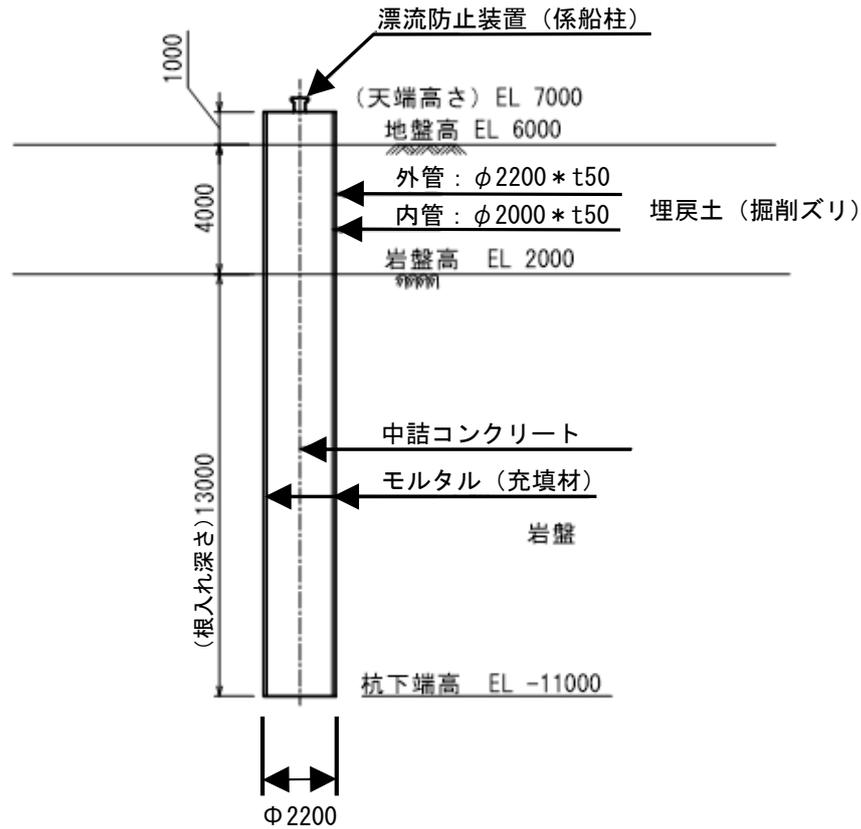


図 2-1 漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の位置図

## 2.2 構造概要

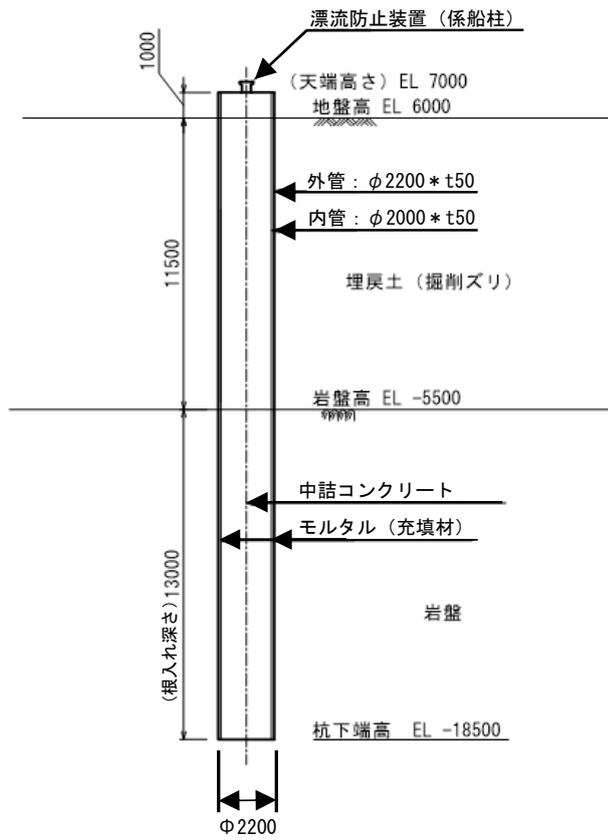
漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の構造図を図 2-2 及び図 2-3 に、漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）への漂流防止装置（係船柱）設置図を図 2-4 に示す。

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）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構造とする。鋼管杭は岩盤に支持させる構造（根入れ深さ：13000mm）とし、上部に漂流防止装置（係船柱）を設置する。



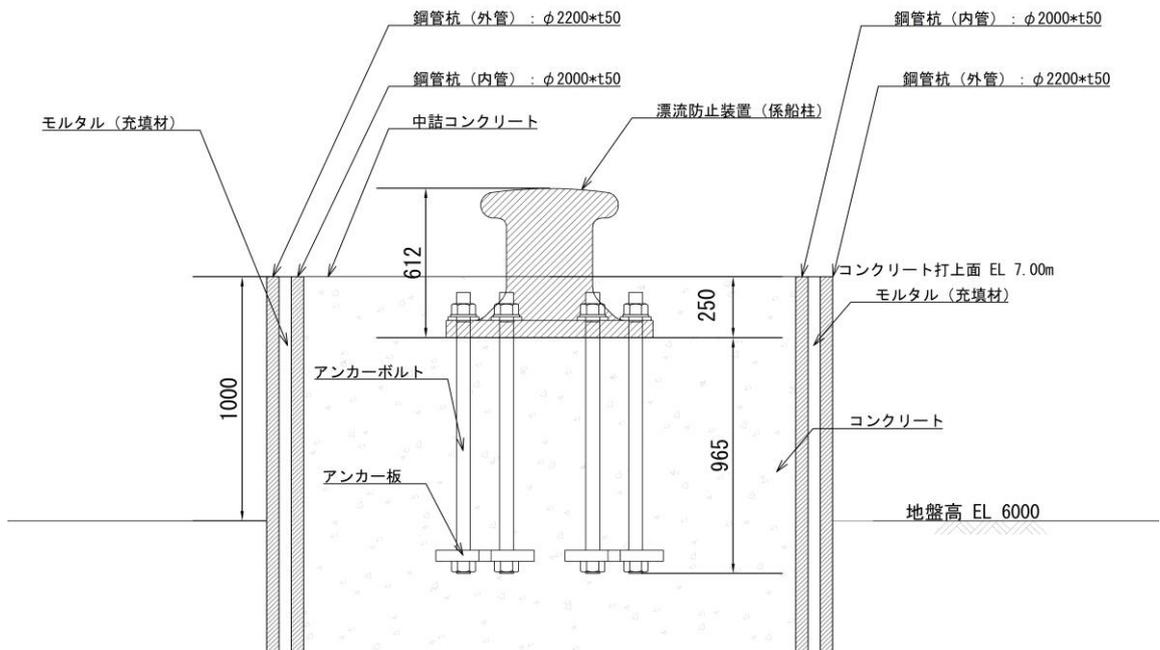
(単位：mm)

図 2-2 漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の構造図（南側）



(単位 : mm)

図 2-3 漂流防止装置基礎 (多重鋼管杭) の構造図 (北側)



(単位 : mm)

図 2-4 漂流防止装置基礎 (多重鋼管杭) への漂流防止装置 (係船柱) 設置図

### 2.3 評価方針

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）は、漂流防止装置（係船柱）を支持する。

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）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。

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の耐震評価は、地震応答解析の結果に基づき、表 2-3 に示すとおり、施設の変形性評価及び基礎地盤の支持性能評価を行い、構造強度を有することを確認する。なお、施設の変形性評価にあたっては、保守的に施設がおおむね弾性状態にとどまることを確認する。

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の耐震評価フローを図 2-5 に示す。

表 2-1 漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の各部位の役割

部位の名称	地震時の役割	津波時の役割
鋼管杭	漂流防止装置（係船柱）を支持する。	漂流防止装置（係船柱）を支持する。
岩盤	鋼管杭を鉛直支持する。 鋼管杭の変形を抑制する。	鋼管杭を鉛直支持する。 鋼管杭の変形を抑制する。

表 2-2 漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の各部位の性能目標

部位の名称	性能目標		
	鉛直支持	耐震性	耐津波性
鋼管杭	—	漂流防止装置（係船柱）の漂流防止機能の保持のために、鋼管杭がおおむね弾性状態にとどまること。	—
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。	—	—

表 2-3 流防止装置基礎（多重鋼管杭）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	施設の变形性	鋼管杭	発生する断面力（曲げ・軸力）及び応力（せん断応力）が許容限界以下であることを確認	降伏モーメント 短期許容応力度
	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	極限支持力度*

注記\*： 妥当な安全余裕を考慮する。

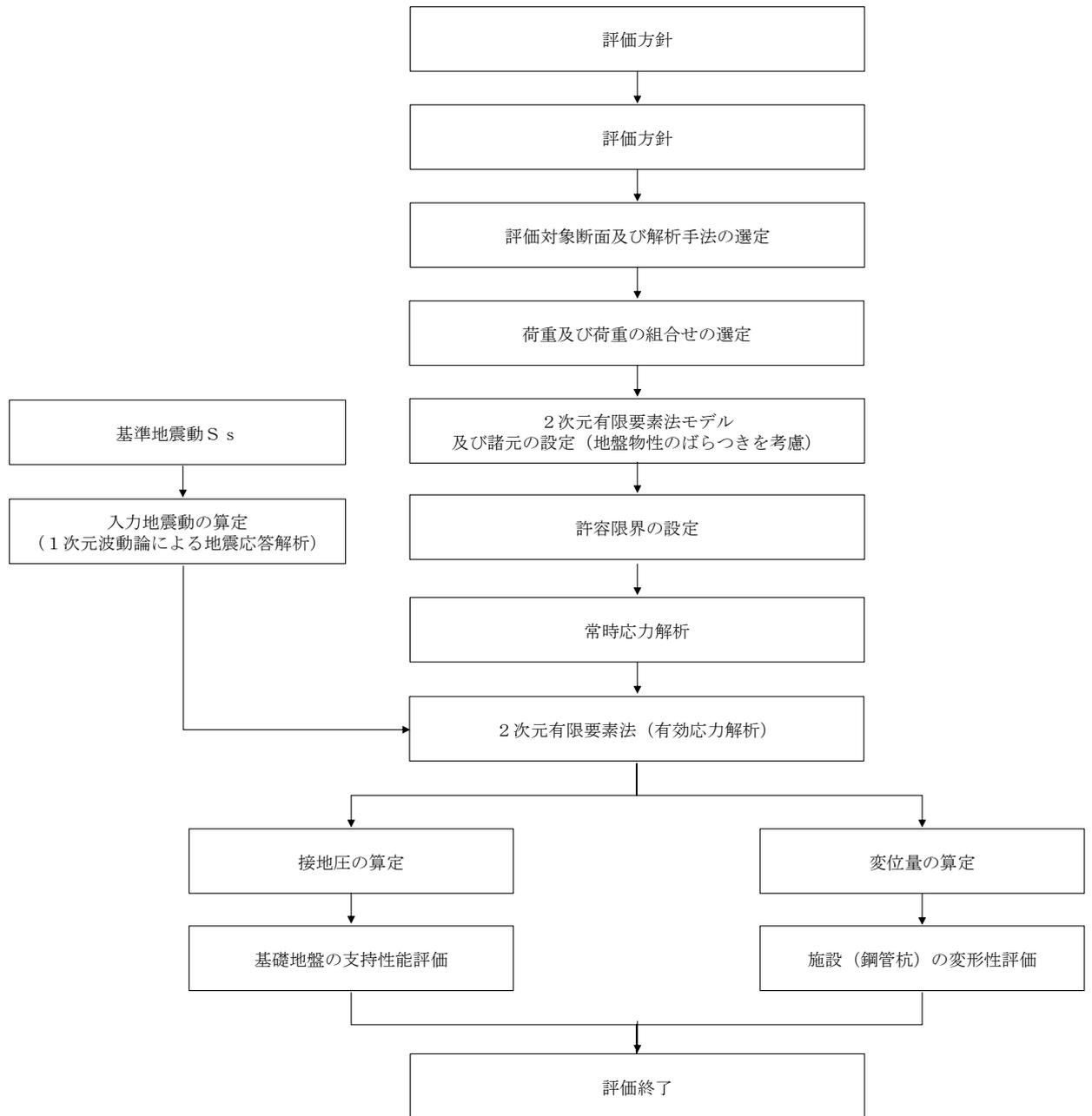


図 2-5 漂流防止装置基礎 (多重鋼管杭) の耐震評価フロー

## 2.4 適用規格・基準等

適用する規格・基準等を以下に示す。

- ・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)
- ・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 14 年 3 月)
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説 (国土交通省港湾局, 2007 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)
- ・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)

### 3. 耐震評価

#### 3.1 評価対象断面

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の評価対象断面は、漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の構造上の特徴や周辺地盤状況を踏まえて設定する。漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の評価対象断面位置図を図 3-1 に、断面図を図 3-2 及び図 3-3 に示す。以下の理由から、①-①断面を評価対象断面として選定する。

- ・ ①-①断面、②-②断面の漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）において、岩盤の根入れ深さに差異はない。
- ・ ①-①断面は②-②断面と比べ岩盤上面深さが深いため、漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）に作用する土圧が大きくなると考えられる。

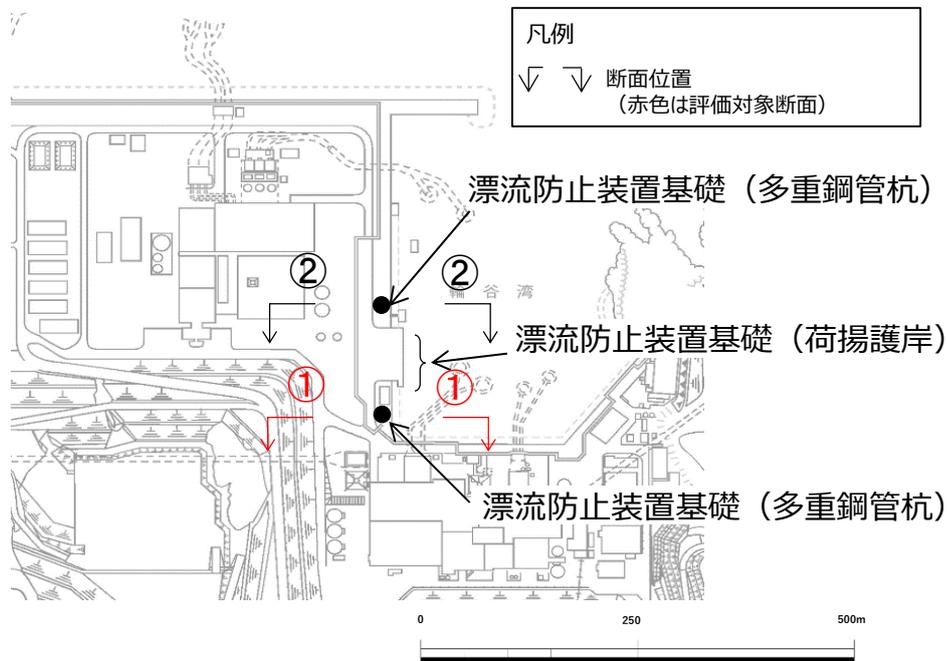


図 3-1 漂流防止装置の基礎（多重鋼管杭）の評価対象断面位置図

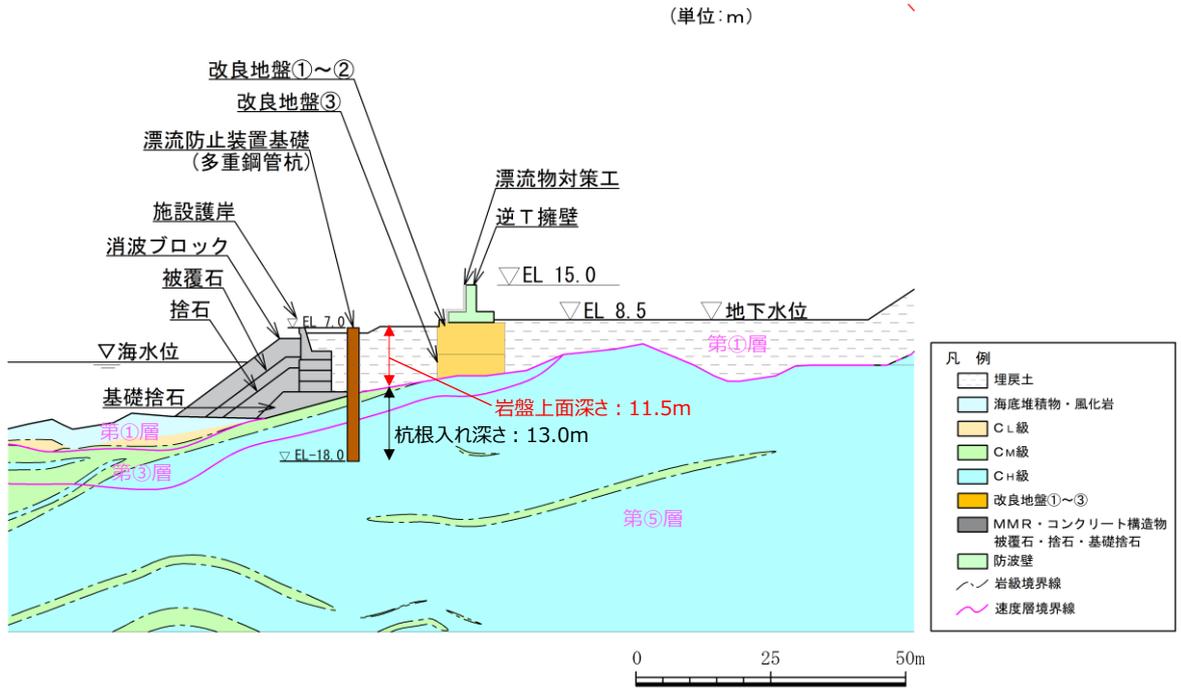


図 3-2 漂流防止装置基礎 (多重鋼管杭) の横断面図 (①-①断面)

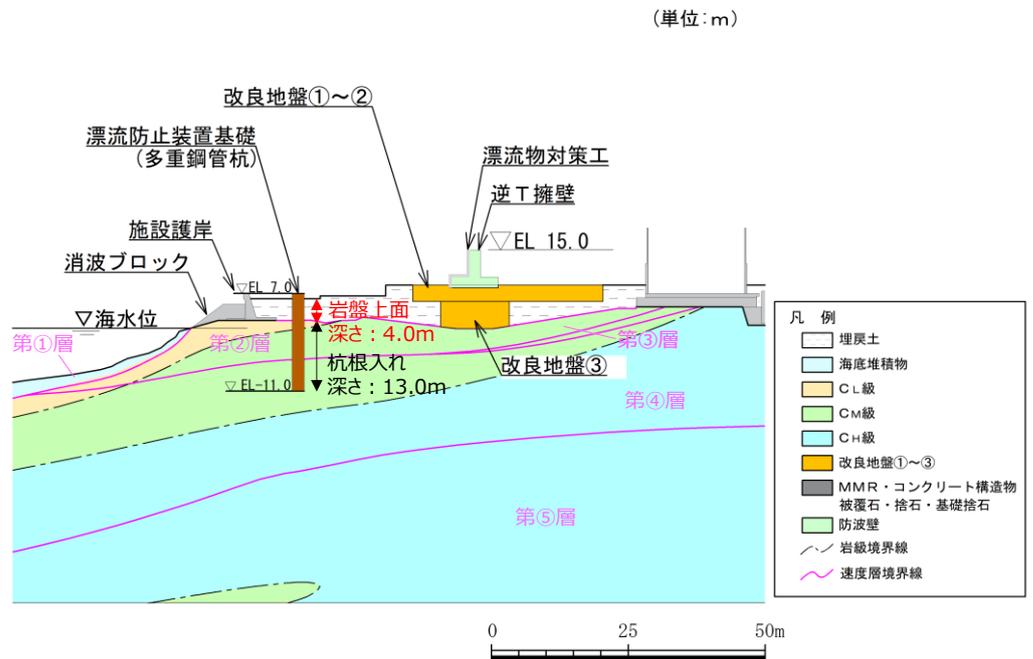


図 3-3 漂流防止装置基礎 (多重鋼管杭) の横断面図 (②-②断面)

### 3.2 解析方法

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の地震応答解析は、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次元有限要素法を用いて、基準地震動  $S_s$  に基づき設定した水平地震動と鉛直地震動の同時加振による逐次時間積分の時刻歴応答解析により行うこととする。地震時における地盤の有効応力の変化に伴う影響を考慮するため、解析方法は有効応力解析とする。

構造部材については、線形はり要素（ビーム要素）でモデル化する。また、地盤については地盤の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」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、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

#### 3.2.1 施設

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）は、線形はり要素（ビーム要素）としてモデル化する。

### 3.2.2 地盤物性のばらつき

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）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 3-1 に示す解析ケースにおいて考慮する。

図 3-2 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、地震時に漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）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。

詳細な解析ケースの考え方は、「3.2.4 解析ケース」に示す。

表 3-1 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 $\sigma$	平均値
ケース③	平均値 - 1 $\sigma$	平均値

### 3.2.3 減衰定数

Rayleigh 減衰を考慮することとし、剛性比例型減衰を設定する。

### 3.2.4 解析ケース

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。すべての基準地震動  $S_s$  に対して実施したケース①（基本ケース）の解析において、各照査値が最も厳しい地震動を用いて、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 3-2 に示す。

表 3-2 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 <sub>s</sub> -D	(++)*	○	基準地震動S <sub>s</sub> (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 <sub>s</sub> -F 1	(++)*	○	
	S <sub>s</sub> -F 2	(++)*	○	
	S <sub>s</sub> -N 1	(++)*	○	
		(-+)*	○	
	S <sub>s</sub> -N 2	(++)*	○	
	(NS)	(-+)*	○	
S <sub>s</sub> -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。

### 3.3 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは、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

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）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

積雪荷重を考慮する。

##### (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

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）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、躯体の自重を考慮する。

##### (2) 積雪荷重（P<sub>s</sub>）

積雪荷重として、発電所最寄りの気象官署である松江地方気象台（松江市）での観測記録（1941～2018年）より、観測史上1位の月最深積雪100cm（1971年2月4日）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35.0cmとする。積雪荷重については、「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）」により、積雪量1cmごとに20N/m<sup>2</sup>の積雪荷重が作用することを考慮し設定する。

##### (3) 地震荷重（S<sub>s</sub>）

基準地震動S<sub>s</sub>の荷重を考慮する。

### 3.3.3 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-3 に示す。

表 3-3 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時 (S <sub>s</sub> )	G + S <sub>s</sub> + P <sub>s</sub>

G : 固定荷重

S<sub>s</sub> : 地震荷重 (基準地震動 S<sub>s</sub>)

P<sub>s</sub> : 積雪荷重

### 3.4 入力地震動

入力地震動は、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、一次元波動論により地震応答解析モデル下端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、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 3-4 に入力地震動算定の概念図を、図 3-5～図 3-16 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「SHAKE」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、VI-5「計算機プログラム(解析コード)の概要」に示す。

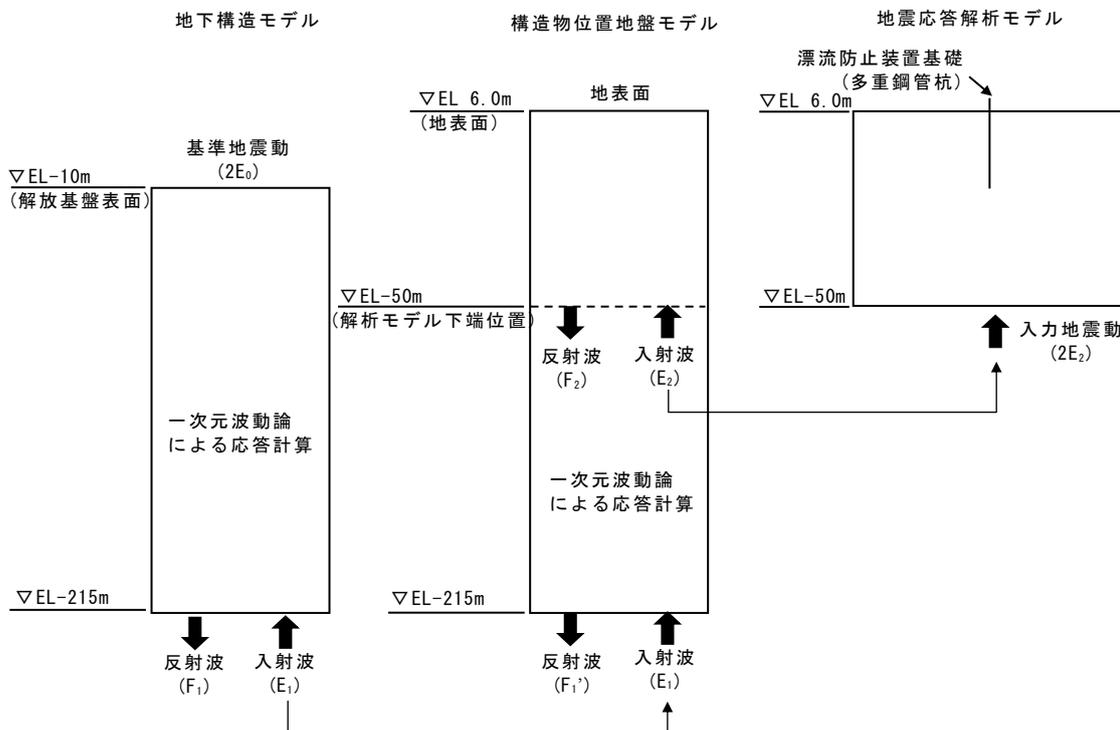
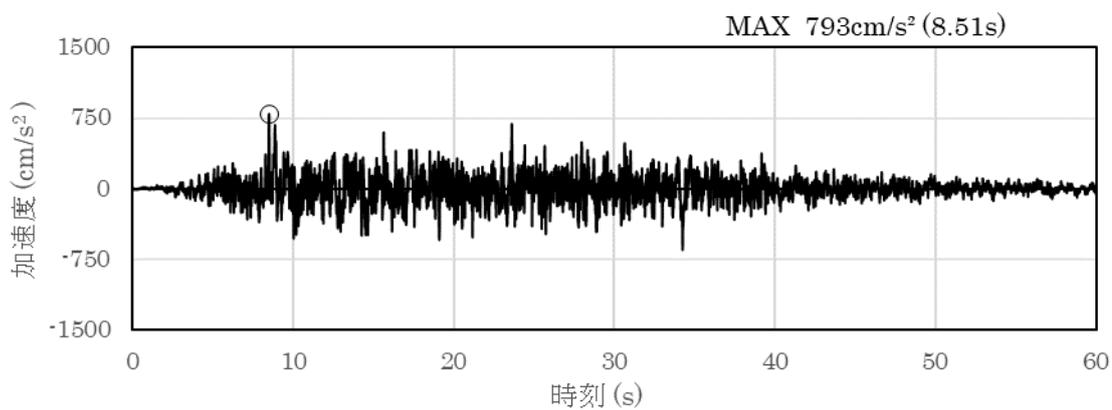
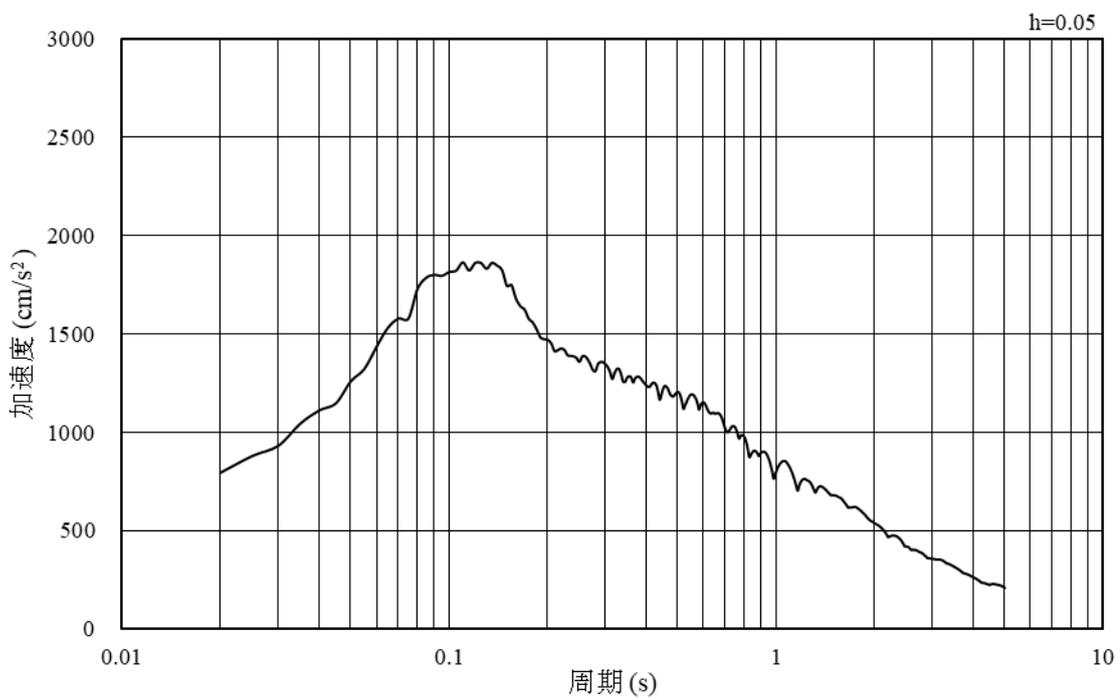


図 3-4 入力地震動算定の概念図

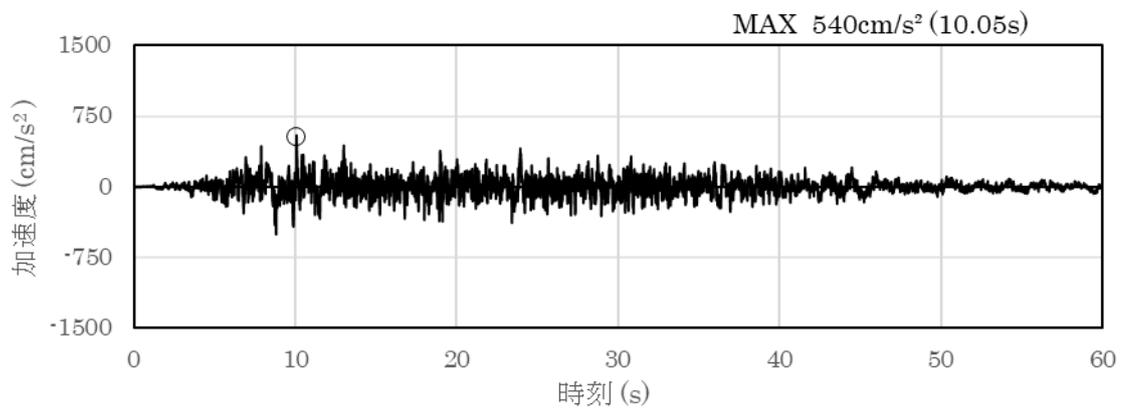


(a) 加速度時刻歴波形

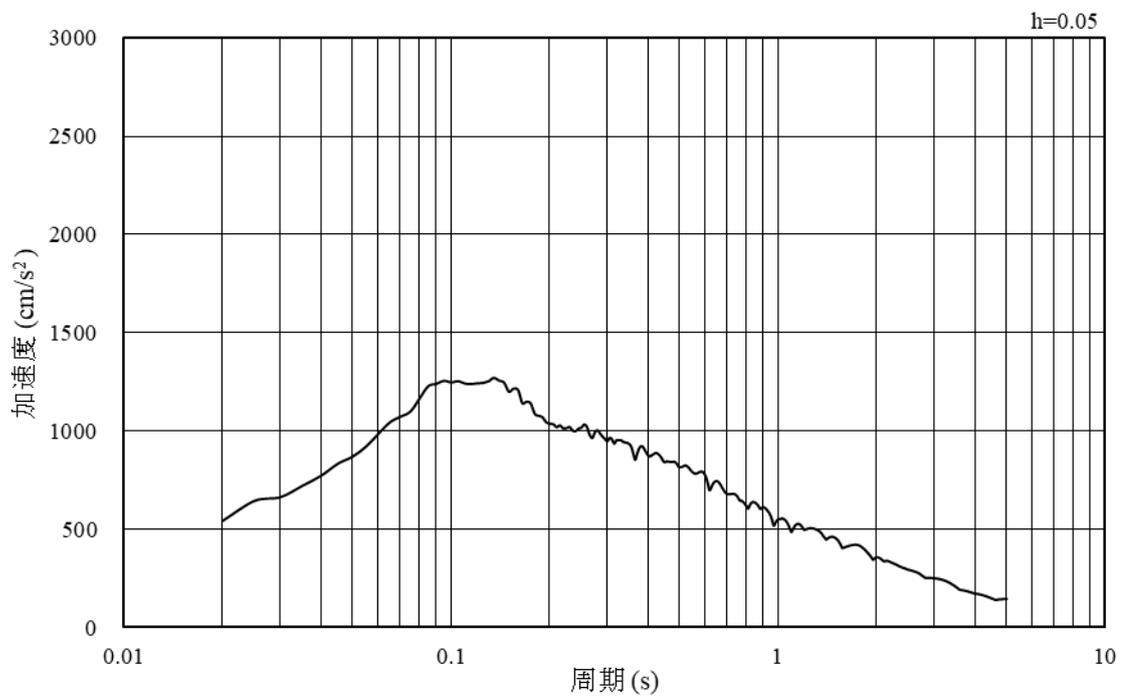


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-5 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  
(水平成分 : S s - D)

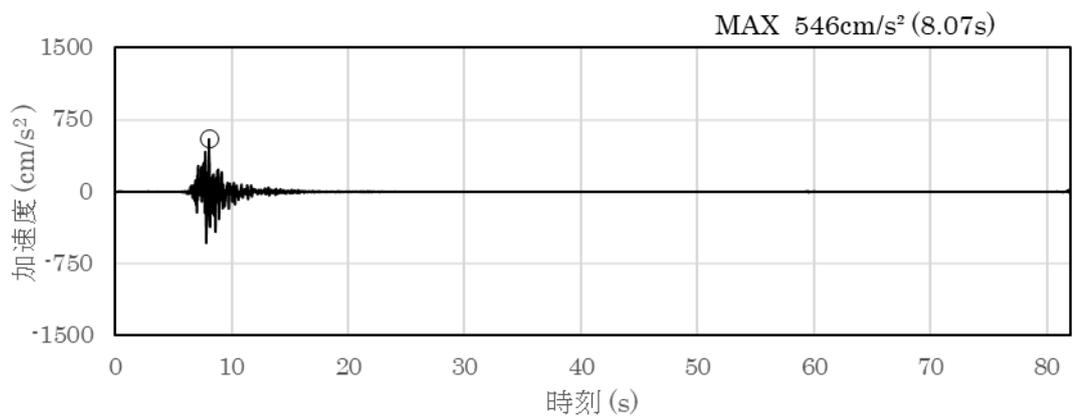


(a) 加速度時刻歴波形

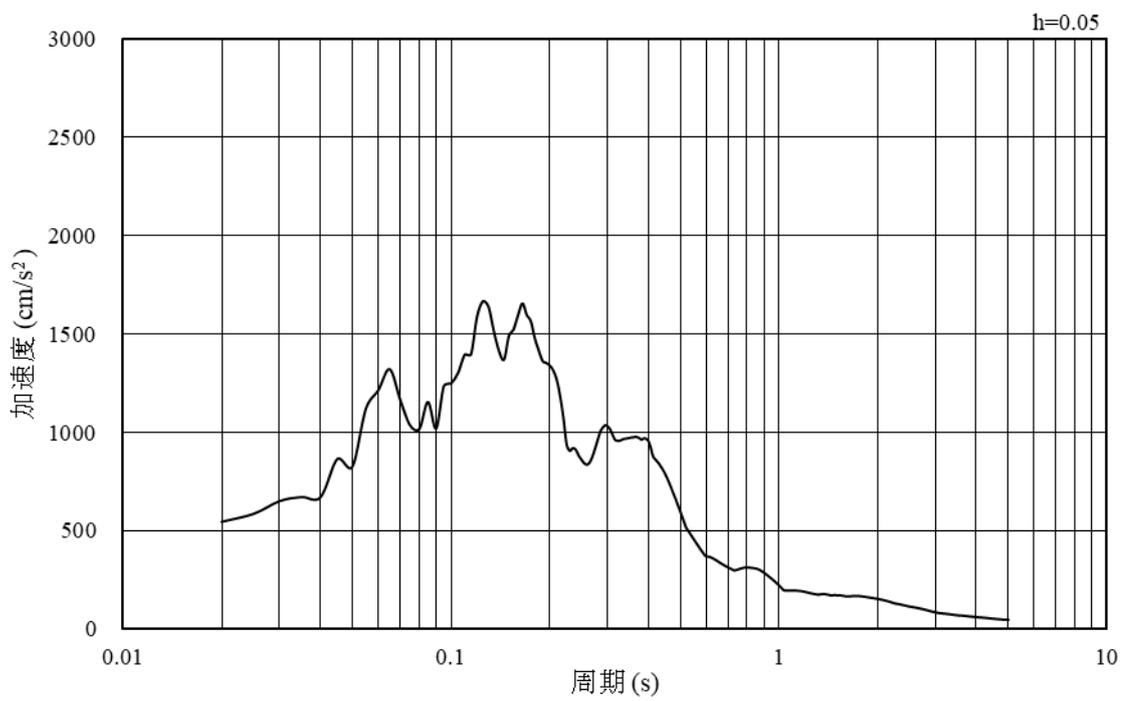


(b) 加速度応答スペクトル

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  
(鉛直成分：S s - D)

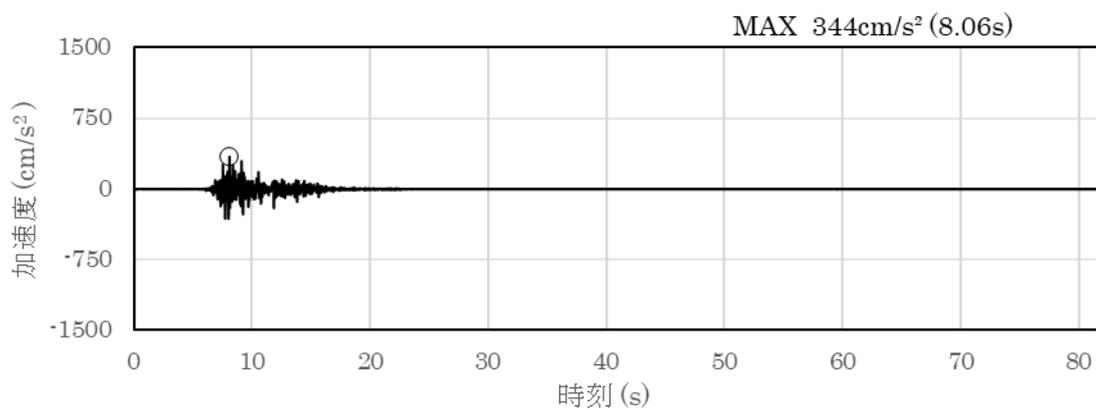


(a) 加速度時刻歴波形

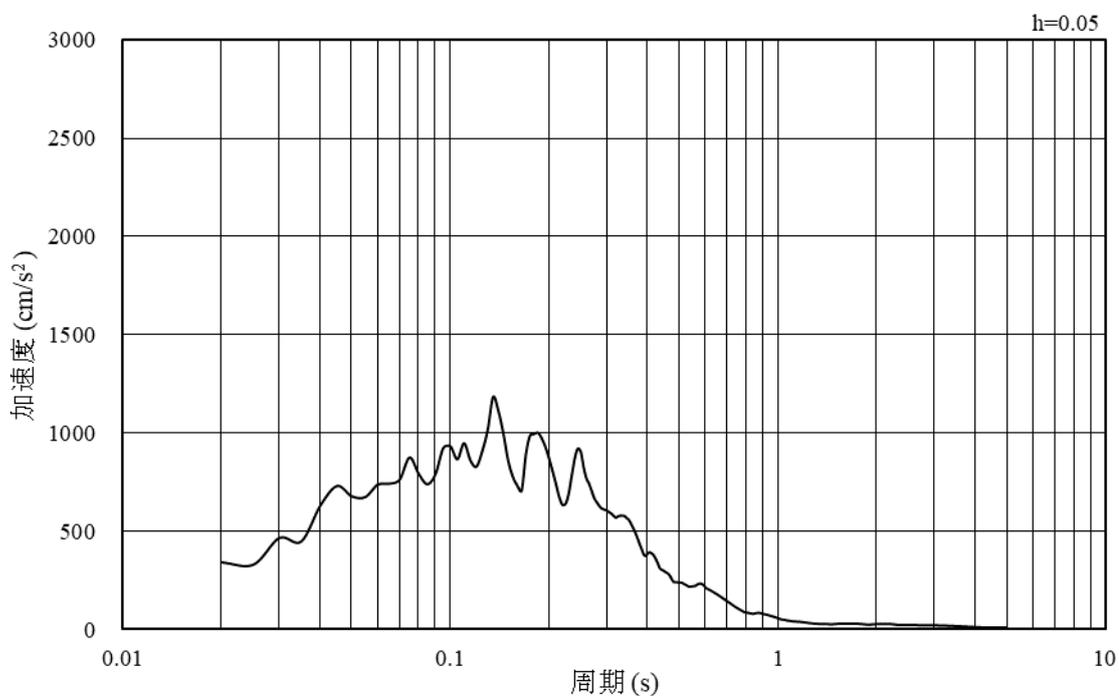


(b) 加速度応答スペクトル

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  
(水平成分：S s - F 1)

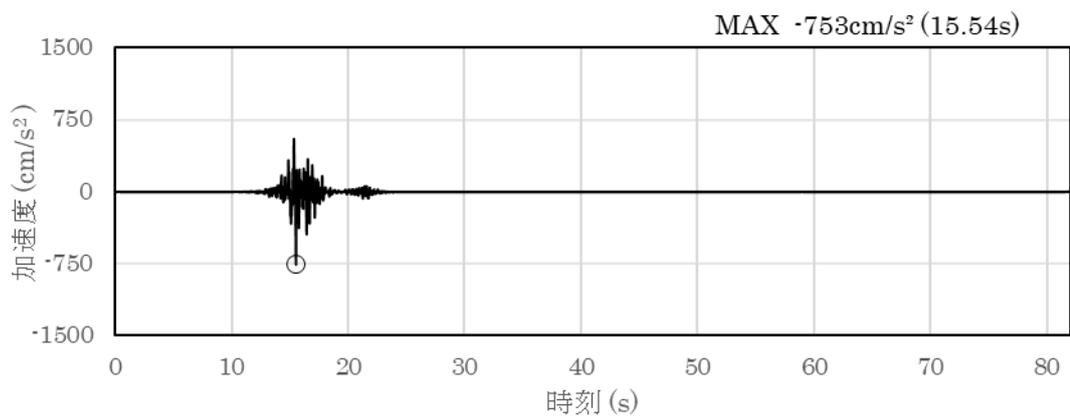


(a) 加速度時刻歴波形

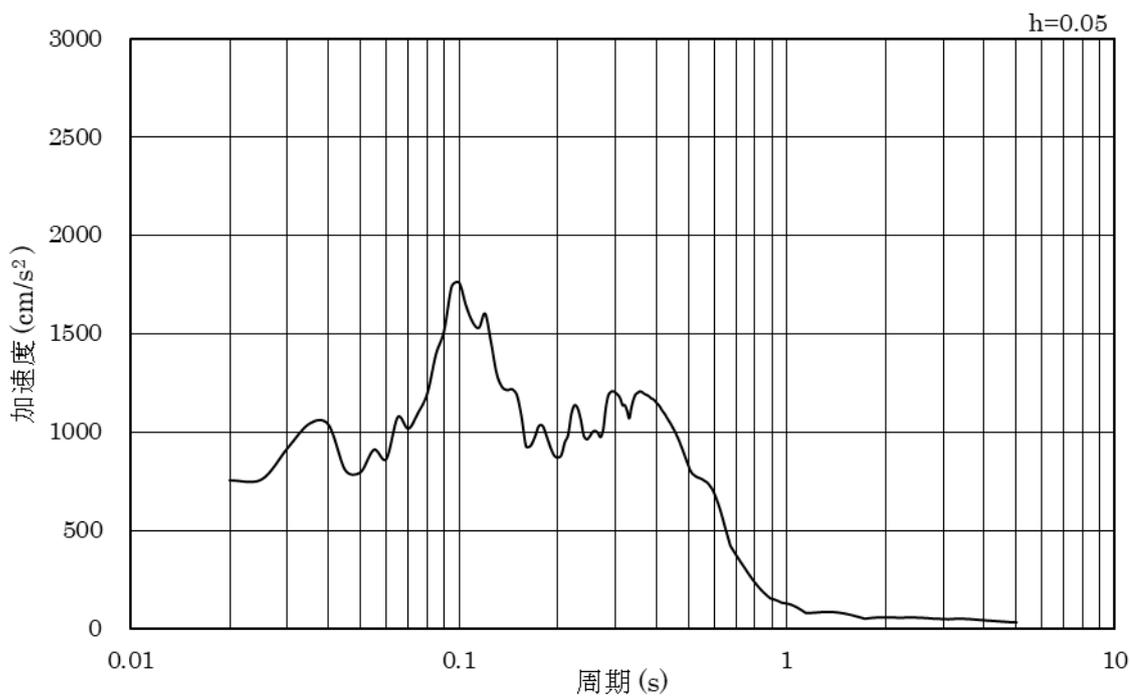


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-8 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)

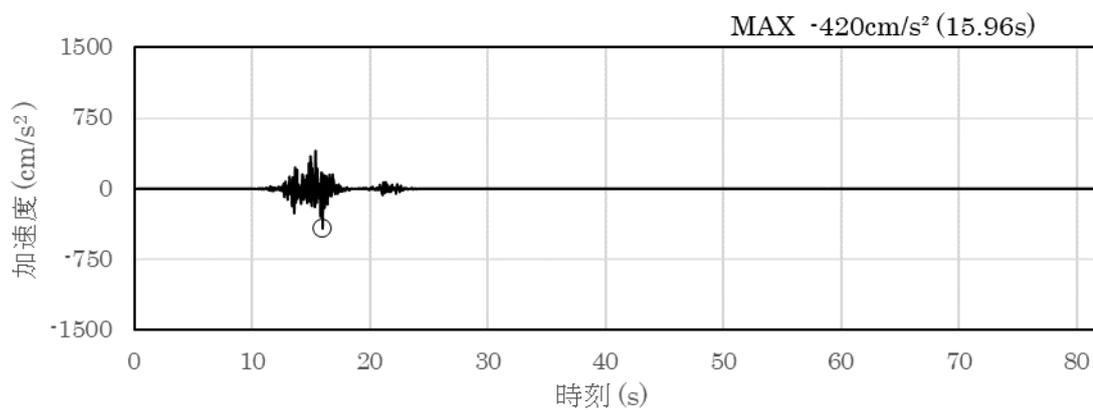


(a) 加速度時刻歴波形

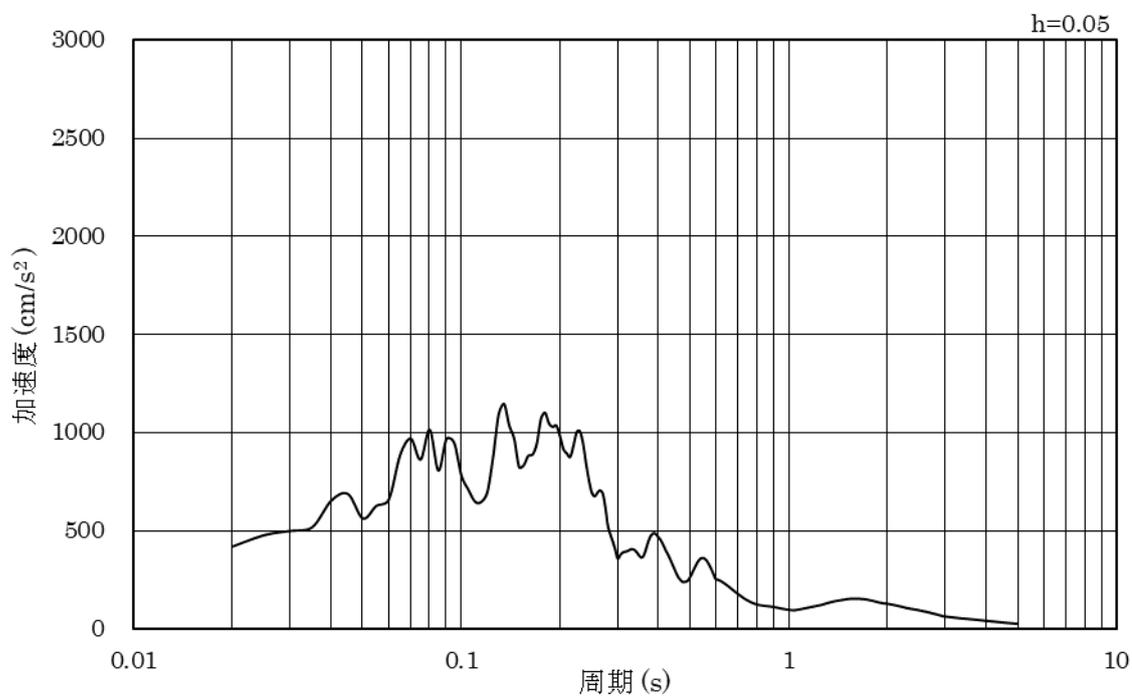


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-9 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)

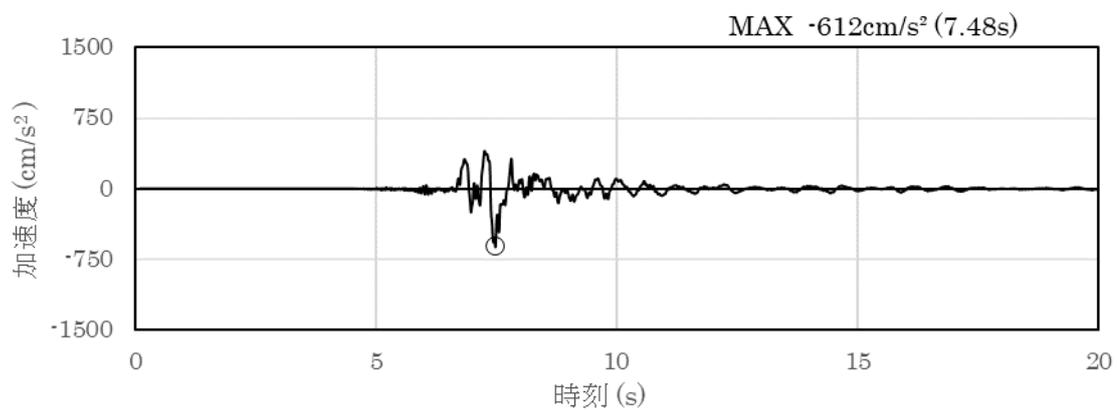


(a) 加速度時刻歴波形

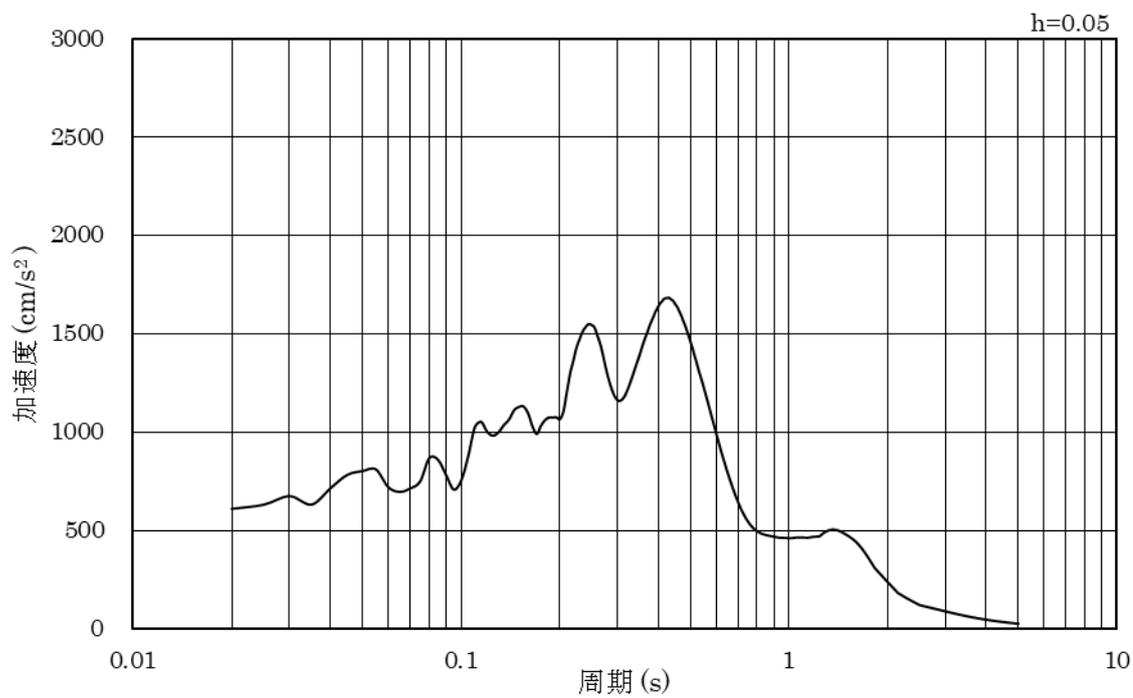


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-10 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)

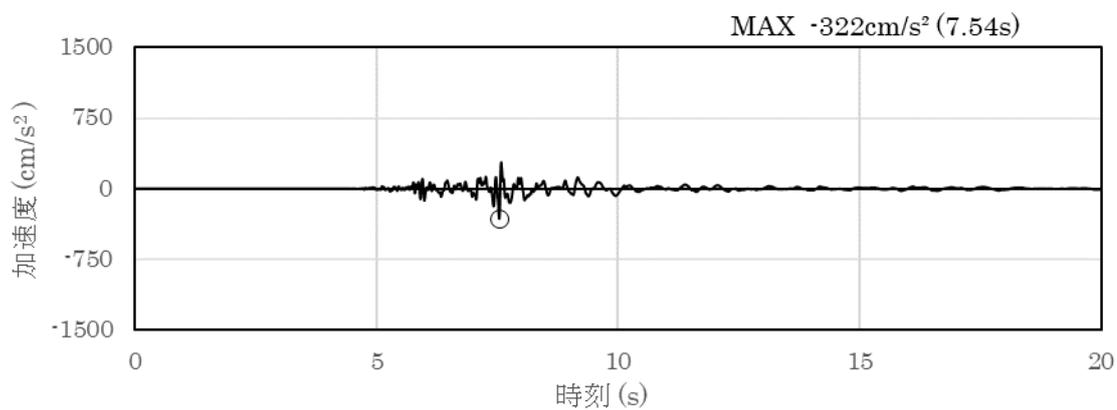


(a) 加速度時刻歴波形

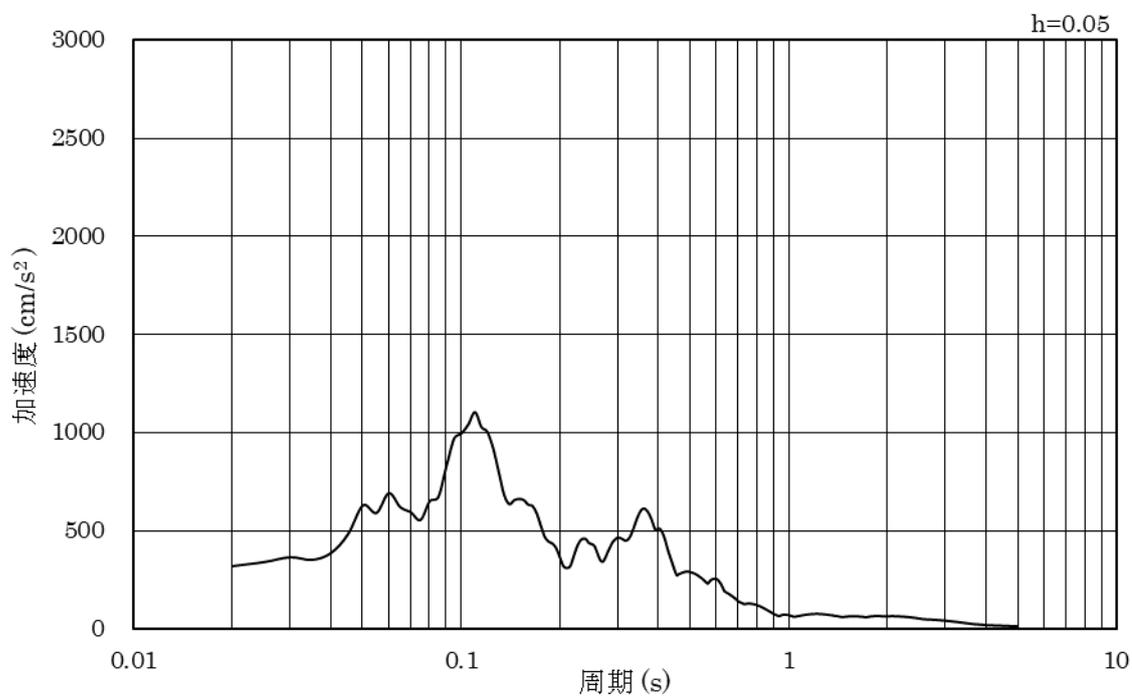


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-11 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)

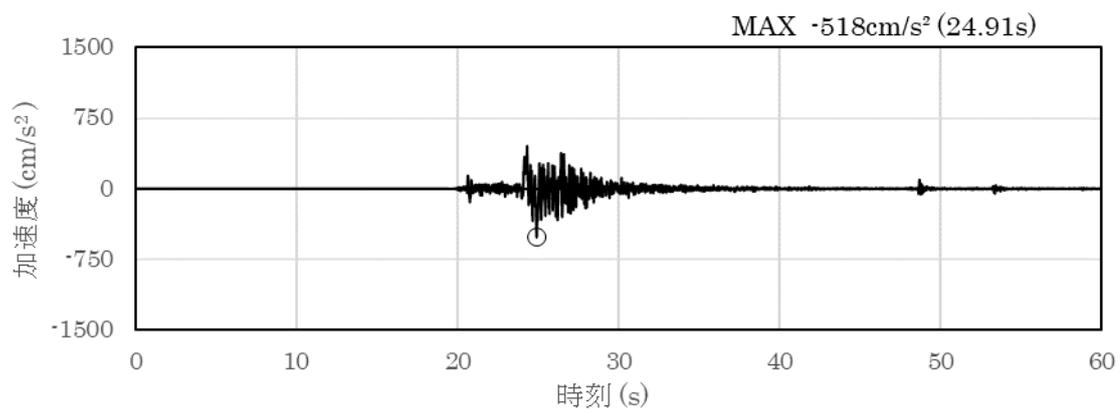


(a) 加速度時刻歴波形

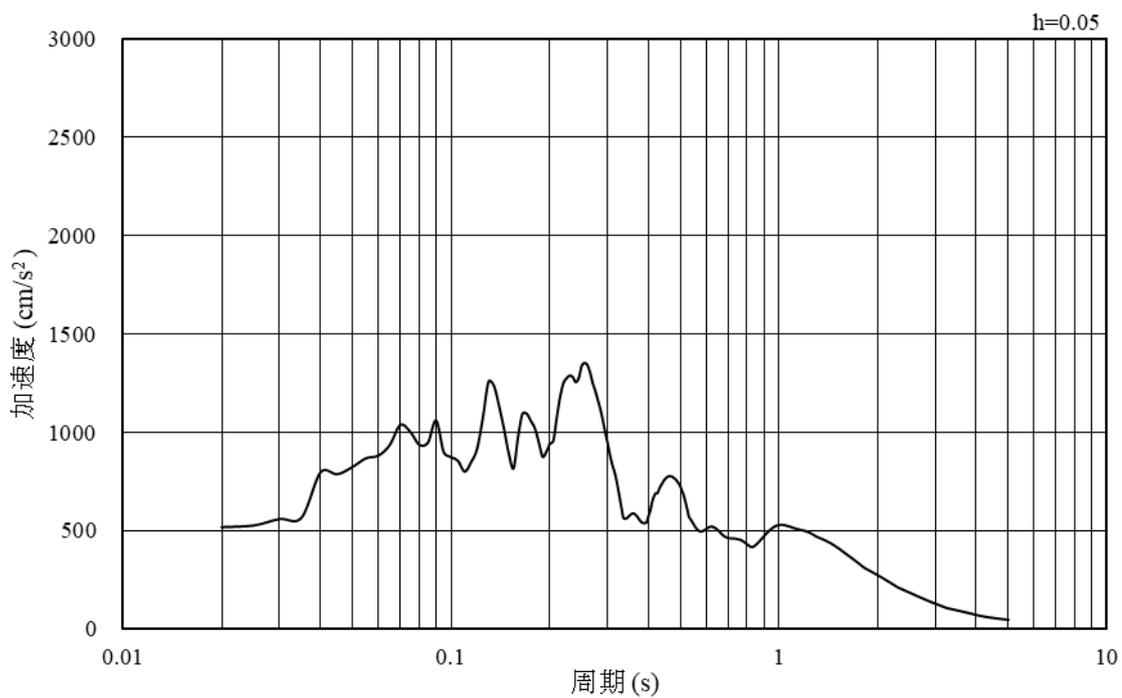


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-12 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)

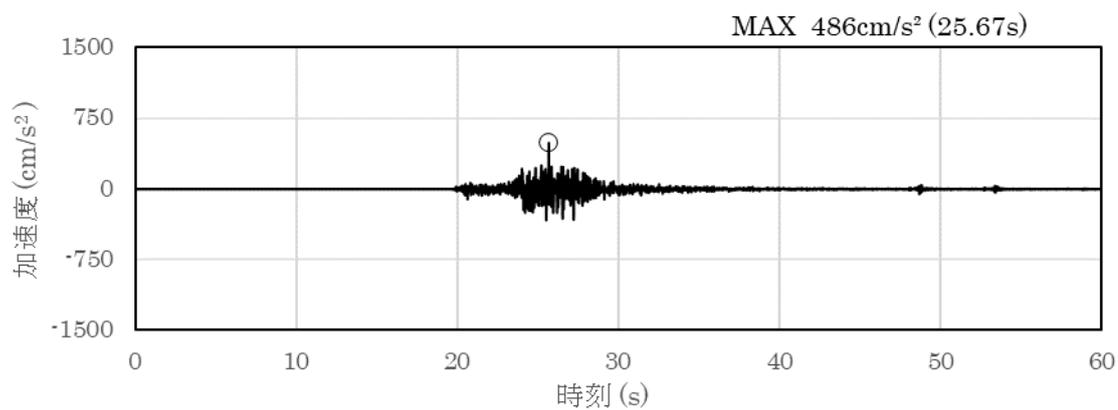


(a) 加速度時刻歴波形

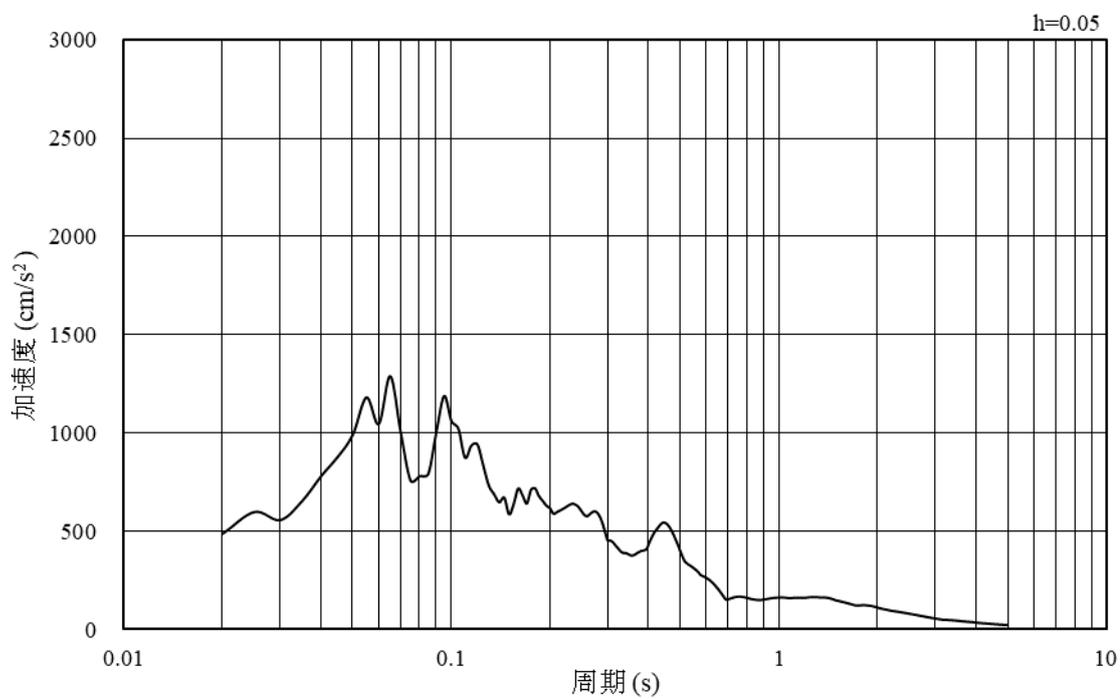


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-13 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  
(水平成分 : S s - N 2 ( N S ))

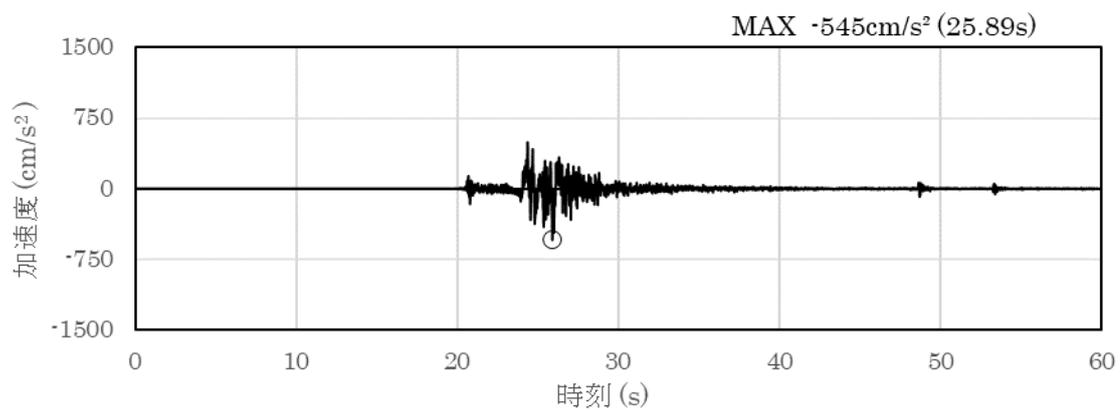


(a) 加速度時刻歴波形

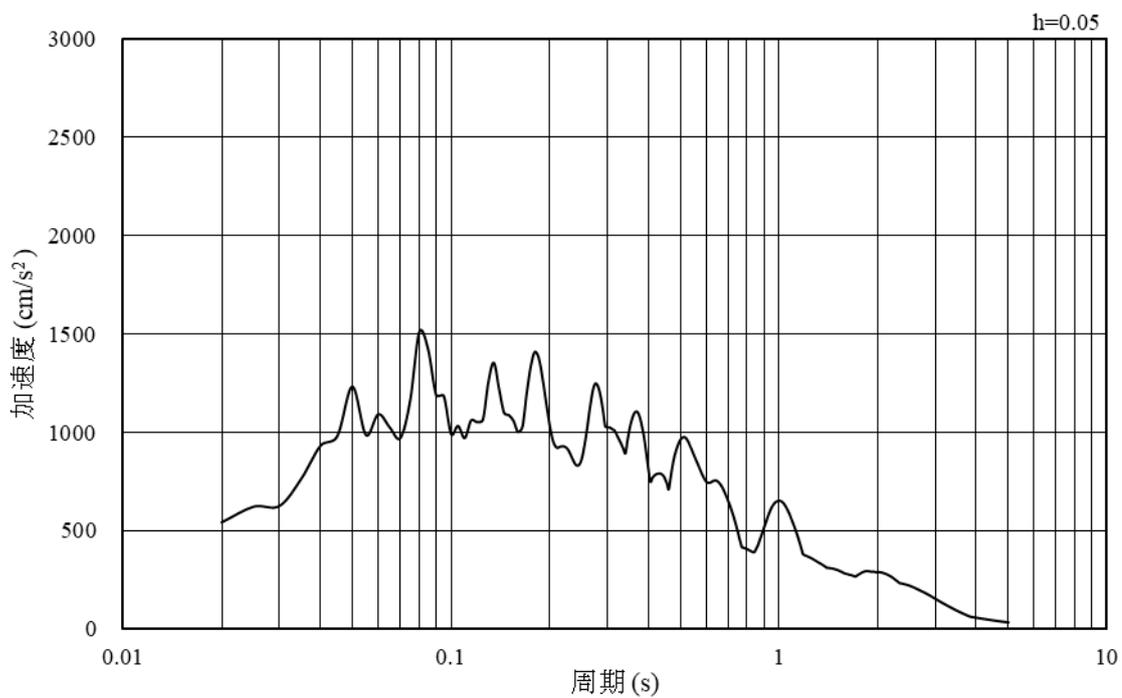


(b) 加速度応答スペクトル

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  
(鉛直成分 : S s - N 2 ( N S ) )

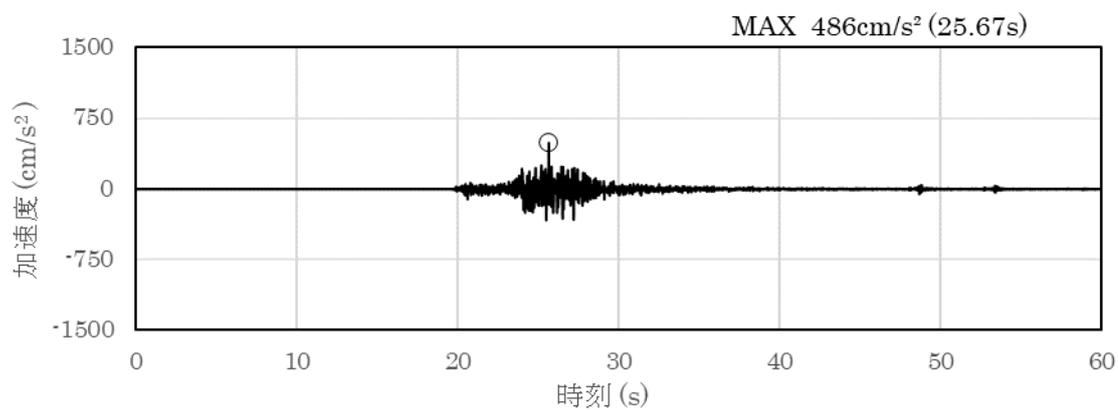


(a) 加速度時刻歴波形

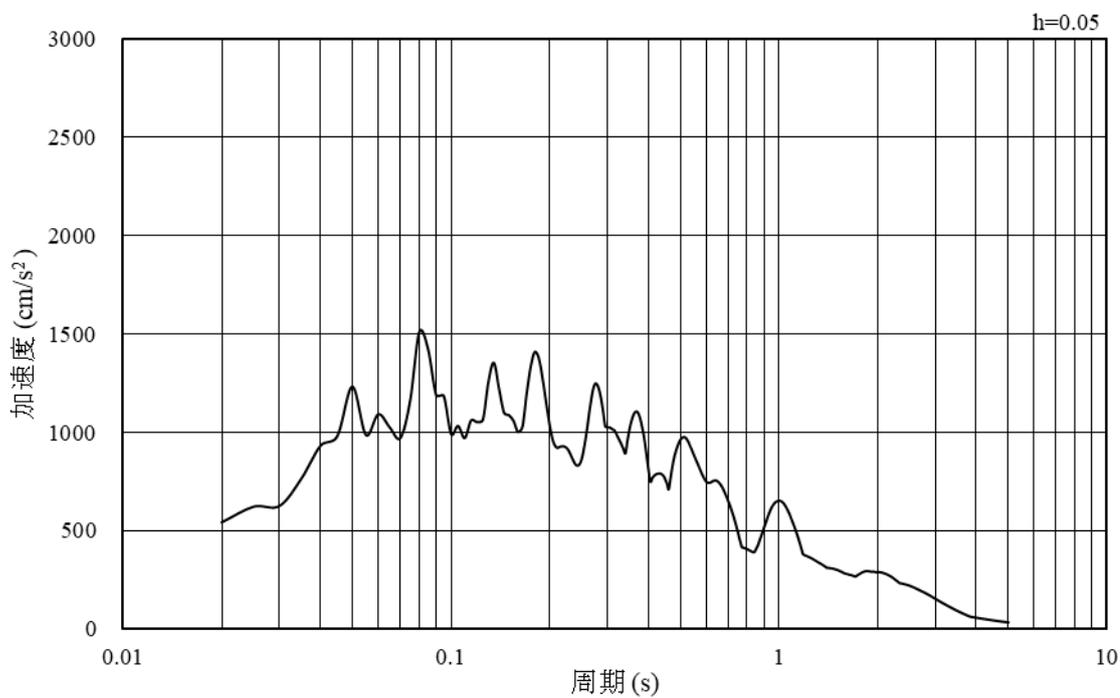


(b) 加速度応答スペクトル

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  
(水平成分 : S s - N 2 (E W))



(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  
(鉛直成分：S s - N 2 (E W))

### 3.5 解析モデル及び諸元

#### 3.5.1 解析モデル

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の地震応答解析モデルを図3-17に示す。

##### (1) 解析領域

地震応答解析モデルは、「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）」を参考に、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。

##### (2) 境界条件

地震応答解析時の境界条件については、有限要素解析における半無限地盤を模擬するため、粘性境界を設ける。

##### (3) 構造物のモデル化

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）は、線形はり要素（ビーム要素）でモデル化する。漂流防止装置（係船柱）は、付加重量として考慮する。

##### (4) 地盤のモデル化

岩盤は、線形の平面ひずみ要素でモデル化する。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。

##### (5) ジョイント要素の設定

地震時の施設及び地盤の接合面における剥離及びすべりを考慮するため、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（国土交通省港湾局，2007年版）」及び「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）」に準拠して、これらの接合面にジョイント要素を設定する。

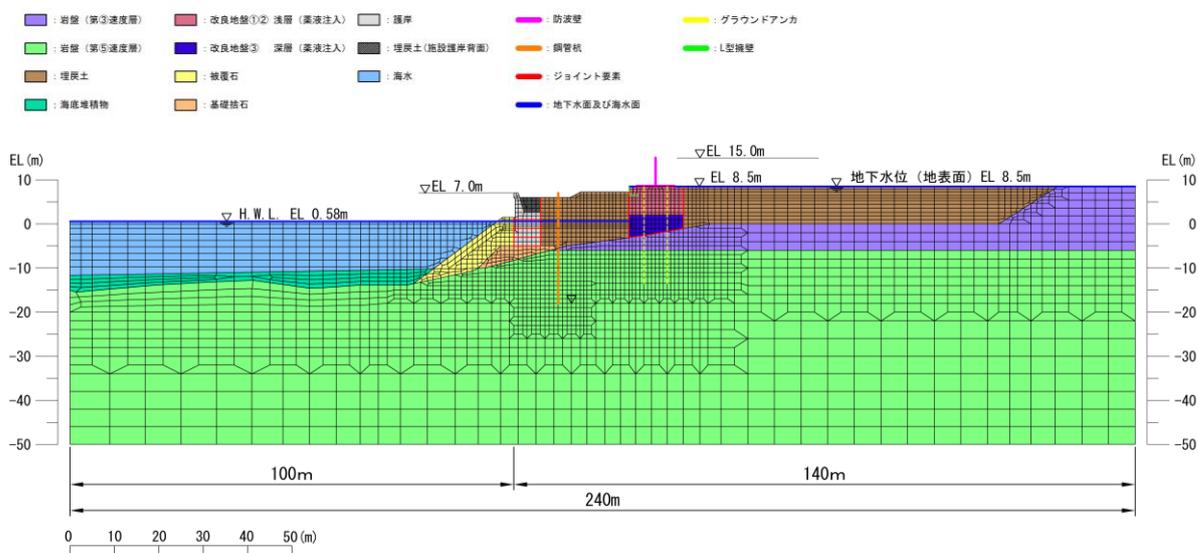


図 3-17 地震応答解析モデル (①-①断面)

### 3.5.2 使用材料及び材料の物性値

耐震評価に用いる材料定数は、適用基準類を基に設定する。使用材料を表 3-4 に、材料の物性値を表 3-5 に示す。

表 3-4 使用材料

材料	諸元
鋼管杭	φ 2200mm (SM570) t=50mm*
	φ 2000mm (SM570) t=50mm

注記\*：「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 14 年 3 月）」に基づき，腐食代 1mm を考慮する。

表 3-5 材料の物性値\*

材料	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	ポアソン比
鋼管杭	77.0	2.0×10 <sup>5</sup>	0.3

注記\*：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）

### 3.5.3 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。

### 3.5.4 地下水位

設計地下水位は，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。設計地下水位を表 3-6 に示す。

表 3-6 設計地下水位

施設名称	設計地下水位
漂流防止装置基礎 (多重鋼管杭)	防波壁より陸側：EL 8.5m* 防波壁より海側：EL 0.58m

注記\*：地表面が EL 8.5m よりも低い地点については，地下水位を地表面とする。

### 3.6 評価対象部位

評価対象部位は、漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の構造上の特徴を踏まえ設定する。

#### 3.6.1 施設の变形性評価

施設の变形性評価に係る評価対象部位は、鋼管杭とする。

#### 3.6.2 基礎地盤の支持性能評価

基礎地盤の支持性能評価に係る評価対象部位は、漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）を支持する基礎地盤（岩盤）とする。

### 3.7 許容限界

許容限界は、VI-2-別添 6-1「漂流防止装置の耐震計算の方針」に基づき設定する。

#### 3.7.1 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）・同解説（（社）日本道路協会，平成 14 年 3 月）」及び「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 14 年 3 月）」を基に算定した降伏モーメント及び短期許容せん断応力度とする。表 3-7 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。

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

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/mm<sup>2</sup>)

$Z_{ei}$  : 多重鋼管杭を構成する各鋼管の断面係数 (mm<sup>3</sup>)

$N_i$  : 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 (mm<sup>2</sup>)

表 3-7 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)	短期許容応力度 (せん断) (N/mm <sup>2</sup> )
①-①断面	地下部 (2重管)	外管	φ 2.2m*1	50mm	SM570	134667	210
		内管	φ 2.0m	50mm	SM570		

注記\*1: 「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 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。

### 3.7.2 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3-8に示す。

表 3-8 基礎地盤の許容限界

評価項目	基礎地盤		許容限界 (N/mm <sup>2</sup> )
極限支持力度	岩盤	C <sub>H</sub> 級	9.8
		C <sub>M</sub> 級	

### 3.8 評価方法

漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の耐震評価は、地震応答解析に基づいて算定した発生断面力又は発生応力度が「3.7 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。

#### 3.8.1 鋼管杭

##### (1) 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。

##### (2) せん断照査

杭体の発生せん断応力度が許容せん断応力度以下であることを確認する。

#### 3.8.2 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）・同解説（（社）日本道路協会，平成 14 年 3 月）」に従い、杭下端部の軸力を用いて次式により算定される軸応力度が、基礎地盤の極限支持力度以下であることを確認する。

$$R_d = \frac{N}{A'}$$

ここで、

$R_d$  : 鋼管杭下端の軸力より算定される軸応力度 (N/mm<sup>2</sup>)

$N$  : 鋼管杭下端に発生する軸力 (N)

$A'$  : 鋼管杭下端の断面積 (mm<sup>2</sup>)

#### 4. 耐震評価結果

##### 4.1 鋼管杭

##### 4.1.1 曲げ照査

鋼管杭の曲げ・軸力系の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 4-1 に、鋼管杭の曲げ・軸力系の破壊に対する照査結果を表 4-1 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。

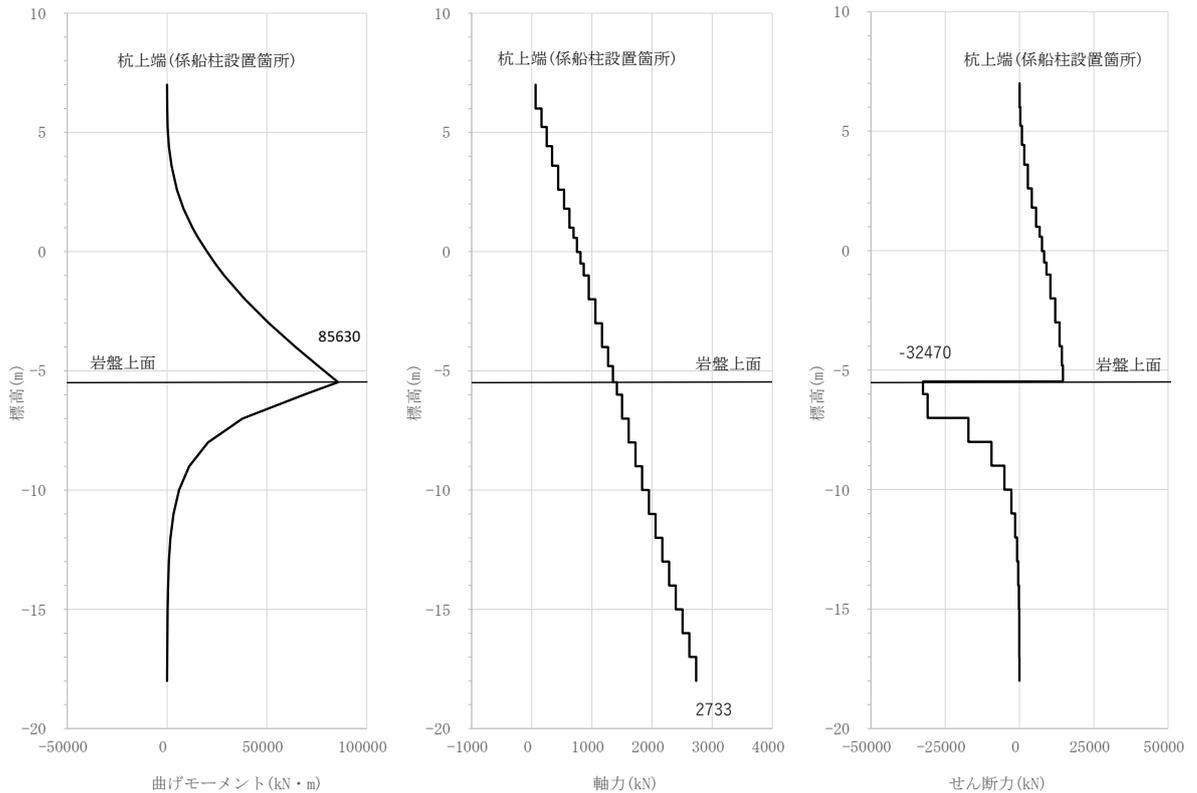


図 4-1 鋼管杭の曲げ・軸力系の破壊に対する照査における最大照査値の評価時刻での断面力

(①-①断面,  $S_s - N_1 (-+)$ ,  $t=7.68s$ )

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 $\sigma$ )

表 4-1 鋼管杭の曲げ・軸力系の破壊に対する照査における最大照査値 (①-①断面)

地震動	解析ケース	発生断面力		降伏モーメント $M_y$ (kN・m)	照査値 $M/M_y$
		曲げモーメント $M$ (kN・m)	軸力 $N$ (kN)		
$S_s - N_1 (-+)$	②	85630	2733	134667	0.64

#### 4. 1. 2 せん断照査

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 4-2 に、鋼管杭のせん断破壊に対する照査結果を表 4-2 に示す。

この結果から、鋼管杭の発生応力度が許容限界以下であることを確認した。

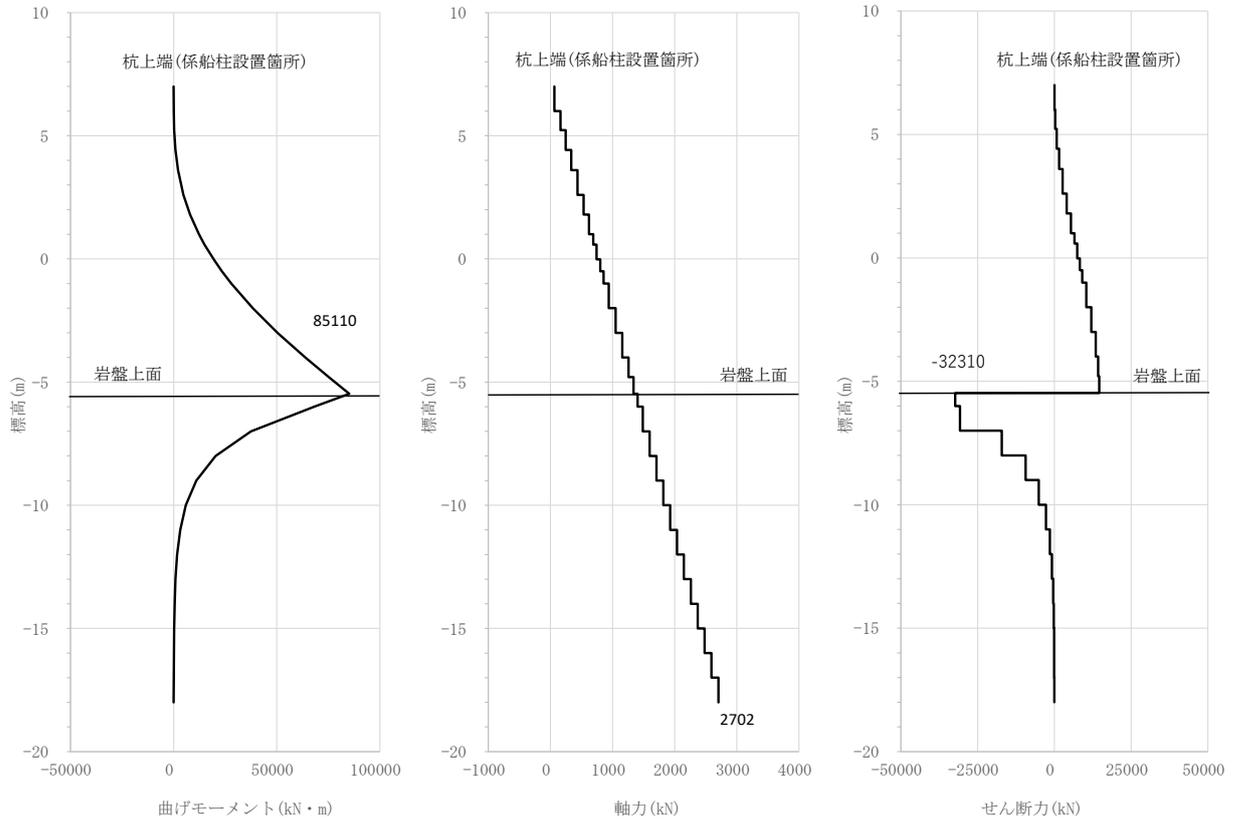


図 4-2 鋼管杭のせん断破壊に対する照査における最大照査値の評価時刻での断面力  
 (①-①断面, S<sub>s</sub>-N1 (-+), t=7.69s)

解析ケース①：地盤物性のばらつきを考慮しない解析ケース (平均値)

表 4-2 鋼管杭のせん断破壊に対する照査における最大照査値 (①-①断面)

地震動	解析 ケース	発生断面力		せん断 応力度 $\tau$ (N/mm <sup>2</sup> )	短期許容 応力度 $\tau_a$ (N/mm <sup>2</sup> )	照査値 $\tau / \tau_a$
		せん断力 (kN)				
S <sub>s</sub> -N1 (-+)	①	32310		51	210	0.25

#### 4.2 基礎地盤

基礎地盤の支持性能評価結果を表 4-3 に示す。

この結果から、漂流防止装置基礎（多重鋼管杭）の杭下端部に生じる軸応力度が、極限支持力度以下であることを確認した。

表 4-3 基礎地盤の支持性能評価結果（①-①断面）

地震動	解析 ケース	発生断面力	軸応力度 $R_d$ (N/mm <sup>2</sup> )	極限支持力度 $R_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	照査値 $R_d/R_u$
		軸力 N (kN)			
S <sub>s</sub> -D (++)	①	4425	1.2	9.8	0.12