

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-19-0024_改3
提出年月日	2021年10月13日

VI-2-10-2-2 防潮堤の耐震性についての計算書

2021年10月

東北電力株式会社

目 次

VI-2-10-2-2-1 防潮堤（鋼管式鉛直壁）の耐震性についての計算書

VI-2-10-2-2-2 防潮堤（盛土堤防）の耐震性についての計算書



: 本日の提出範囲

VI-2-10-2-2-1 防潮堤（鋼管式鉛直壁）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	11
2.4	適用基準	17
3.	耐震評価	18
3.1	評価対象断面	18
3.1.1	一般部	18
3.1.2	岩盤部	21
3.2	解析方法	24
3.2.1	施設	24
3.2.2	材料物性及び地盤物性のばらつき	24
3.2.3	減衰定数	25
3.2.4	解析ケース	26
3.3	荷重及び荷重の組合せ	27
3.3.1	耐震評価上考慮する状態	27
3.3.2	荷重	27
3.3.3	荷重の組合せ	28
3.4	入力地震動	29
3.4.1	一般部	31
3.4.2	岩盤部	87
3.5	解析モデル及び諸元	129
3.5.1	解析モデル	129
3.5.2	使用材料及び材料の物性値	135
3.5.3	地盤の物性値	137
3.5.4	地下水位	137
3.6	評価対象部位	138
3.6.1	施設・地盤の健全性評価	138
3.6.2	施設の変形性評価	138
3.6.3	基礎地盤の支持性能評価	138
3.7	許容限界	139
3.7.1	鋼管杭	139
3.7.2	鋼製遮水壁及び漂流物防護工	144
3.7.3	RC 遮水壁	145
3.7.4	背面補強工	145

3.7.5	置換コンクリート	145
3.7.6	改良地盤	145
3.7.7	セメント改良土	146
3.7.8	止水ジョイント部材	146
3.7.9	基礎地盤	147
3.8	評価方法	148
3.8.1	鋼管杭	148
3.8.2	鋼製遮水壁及び漂流物防護工	152
3.8.3	RC 遮水壁	164
3.8.4	背面補強工	164
3.8.5	置換コンクリート	164
3.8.6	改良地盤	164
3.8.7	セメント改良土	164
3.8.8	止水ジョイント部材	165
3.8.9	基礎地盤	170
4.	耐震評価結果	171
4.1	鋼管杭	171
4.1.1	曲げ軸力照査	171
4.1.2	せん断力照査	182
4.1.3	漂流物防護工の偏心荷重	191
4.2	鋼製遮水壁及び漂流物防護工	192
4.3	RC 遮水壁	194
4.4	背面補強工	198
4.5	置換コンクリート	201
4.6	改良地盤	204
4.7	セメント改良土	207
4.8	止水ジョイント部材の評価結果	210
4.9	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	214

: 本日の提出範囲

3.3 荷重及び荷重の組合せ

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

3.3.1 耐震評価上考慮する状態

防潮堤（鋼管式鉛直壁）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

積雪及び風の影響を考慮する。

(4) 重大事故等時の状態

重大事故等時の状態の影響を受けないことから考慮しない。

3.3.2 荷重

防潮堤（鋼管式鉛直壁）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（防護設備（防潮堤（鋼管式鉛直壁））を含む）を考慮する。

(2) 積載荷重(P)

積載荷重として、積雪荷重を含めて地表面に 4.9kN/m^2 を考慮する。

(3) 積雪荷重(P_s)

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

(4) 風荷重(P_k)

風荷重については、設計基準風速を 30m/s とし、建築基準法に基づき算定する。

(5) 地震荷重(S_s)

基準地震動 S_s による荷重を考慮する。

3.3.3 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-4 に示す。

表 3-4 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
地震時 (S_s)	$G + P + P_k + S_s$

G : 固定荷重 (防護設備 (防潮堤 (鋼管式鉛直壁)) を含む)

P : 積載荷重 (積雪荷重 P_s を含めて 4.9kN/m^2)

P_k : 風荷重

S_s : 地震荷重

3.5 解析モデル及び諸元

3.5.1 解析モデル

防潮堤（鋼管式鉛直壁）の地震応答解析モデルを図 3-20～図 3-26 に示す。

(1) 解析領域

2次元有限要素法による時刻歴応答解析の解析モデルの解析領域は、境界条件の影響が地盤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

2次元有限要素法による時刻歴応答解析の解析モデルの境界条件については、有限要素解析における半無限地盤を模擬するため、粘性境界を設ける。

(3) 構造物のモデル化

鋼管杭は、線形はり要素（ビーム要素）でモデル化する。背面補強工及び置換コンクリート（一般部のみ）は線形の平面ひずみ要素（ソリッド要素）でモデル化する。

また、岩盤部のうち RC 壁部は、鋼管杭及び RC 遮水壁を質点及び線形はり要素（ビーム要素）でモデル化する。

(4) 地盤のモデル化

2次元有限要素法解析においては D₁級を除く岩盤は線形の平面ひずみ要素（ソリッド要素）でモデル化する。D₂級岩盤、改良地盤、セメント改良土及び盛土・旧表土は、非線形性を考慮した平面ひずみ要素（マルチスプリング要素）でモデル化する。また、地下水位以深の盛土・旧表土は、液状化パラメータを設定することで、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。なお、鋼管杭下方の MMR は線形はり要素（ビーム要素）でモデル化する。

岩盤部のうち RC 壁部における質点系モデルによる時刻歴応答解析では、周辺地盤を地盤ばねとダッシュポットでモデル化し、地盤と杭の相互作用を考慮する。地盤ばね及びダッシュポットを介して入力する地盤応答作成モデル（1次元）については、C_L級以上の岩盤のみが分布することから、線形でモデル化する。

地盤ばねのモデル化イメージ及び地盤応答作成モデルを図 3-27 に示す。

(5) 海水のモデル化

海水は液体要素でモデル化する。

(5) 防護工取付けボルト

防護工取付けボルトの照査方法を図 3-37 に示す。防護工取付けボルトは、引張力及びせん断力よりそれぞれ算定される応力が許容限界以下であることを確認する。

なお、照査箇所については、評価条件が同一であるため、図 3-37 に示す中央付近の箇所とした。

引張力照査

$$\sigma_7 = \frac{N_7}{A_e} \dots \dots \dots (3.25)$$

$$N_7 = P_{h7} \cdot b'' \cdot \ell \cdot \frac{1}{n} \dots \dots \dots (3.26)$$

せん断力照査

$$\tau_7 = \frac{S_7}{A_e} \dots \dots \dots (3.27)$$

$$S_7 = P_{v7} \cdot b'' \cdot \ell \cdot \frac{1}{n} \dots \dots \dots (3.28)$$

ここで、

- σ_7 : 引張力による防護工取付けボルト 1 本あたりの発生応力度 (N/mm²)
- N_7 : 防護工取付けボルト 1 本あたりに発生する引張力 (kN)
- A_e : 防護工取付けボルトの断面積 (mm²) *
- P_{h7} : 防護工取付けボルトに作用する水平地震慣性力 (kN/m²)
- b'' : 防護工の幅 (m)
- ℓ : 架台間隔 (mm)
- n : 防護工取付けボルト 1 箇所あたりの本数 (本)
- τ_7 : せん断力による防護工取付けボルト 1 本あたりの発生応力度 (N/mm²)
- S_7 : 防護工取付けボルト 1 本あたりに発生するせん断力 (kN)
- P_{v7} : 防護工取付けボルトに作用する鉛直地震慣性力 (kN/m²)

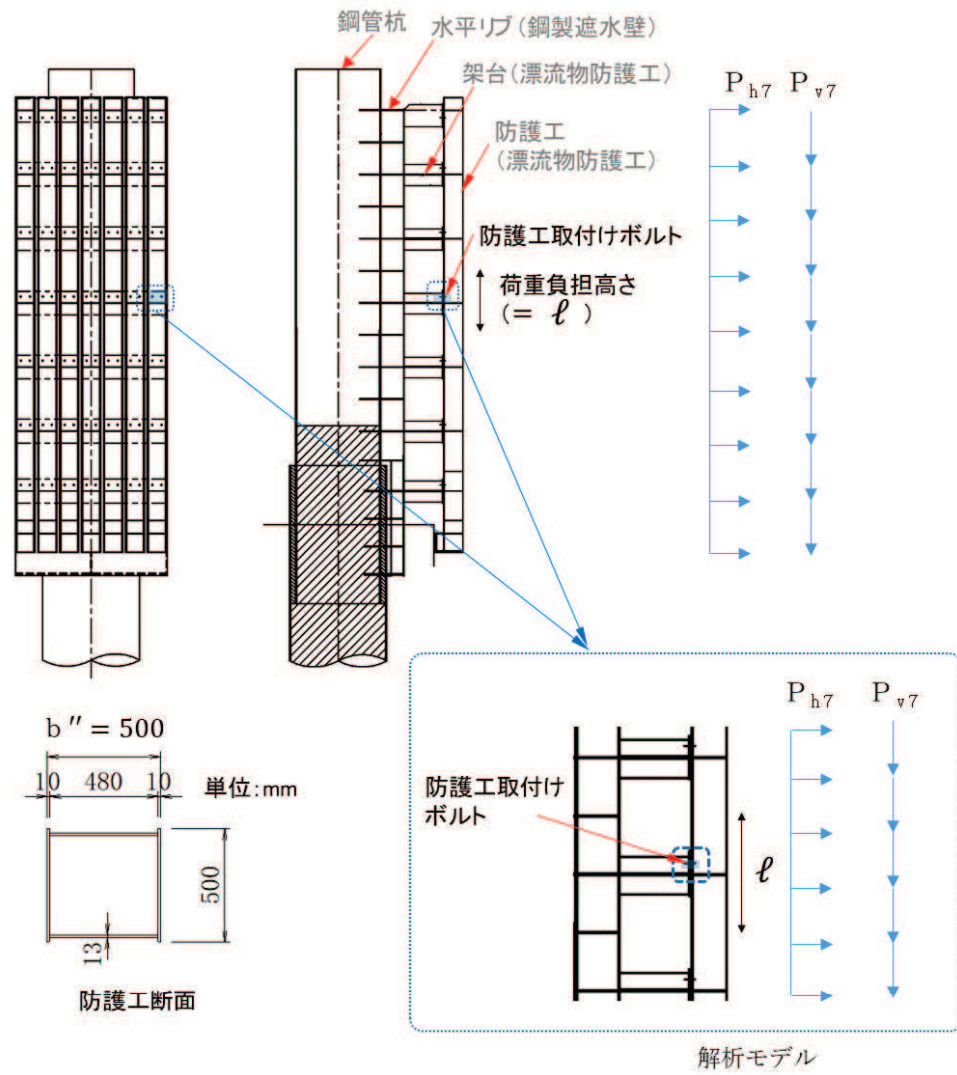


図 3-37 防護工取付けボルトの照査概念図

3.8.8 止水ジョイント部材

止水ジョイント部材の地震時の評価について、軸直交方向及び軸方向ともに、地震荷重による最大相対変位が許容限界以下であることを確認する。

漂流物防護工の下部にある止水ジョイント前面の保護部材の地震時の評価について、発生応力が許容限界以下であることを確認する。

また、軸直交方向の相対変位算出に当たっては、漂流物防護工が鋼管杭（鋼製遮水壁）からの張り出し構造となっていることを踏まえ、防潮堤縦断方向（強軸方向）加振により生じるねじり変位についても考慮する。

(1) 地震時（水平部）における保護部材の照査

地震時には基準地震動 S_s による地震力を考慮し、保護部材（水平部）のグレーチング固定ボルトに生じる引張力及びせん断力よりそれぞれ算定される応力が許容限界以下であることを確認する。グレーチング固定ボルトの照査概念図を図 3-37 に示す。

引張力の照査

$$N_s = (KV_s - 1) \times W_s / n_s \quad \dots \dots \dots (3.25)$$

$$\sigma_s = N_s / A_s \quad \dots \dots \dots (3.26)$$

せん断力の照査

$$S_s = KH_s \times W_s / n_s \quad \dots \dots \dots (3.27)$$

$$\tau_s = S_s / A_s \quad \dots \dots \dots (3.28)$$

ここで、

- N_s : グレーチング固定ボルトに発生する引張力 (N)
- S_s : グレーチング固定ボルトに発生するせん断力 (N/本)
- σ_s : 引張力によるグレーチング固定ボルトの発生応力度 (N/mm²)
- τ_s : せん断力によるグレーチング固定ボルトの発生応力度 (N/mm²)
- W_s : グレーチング重量 (N/m)
- n_s : ボルト本数 (本)
- A_s : ボルト有効断面積 (mm²)
- KH_s : 設計水平震度
- KV_s : 設計鉛直震度

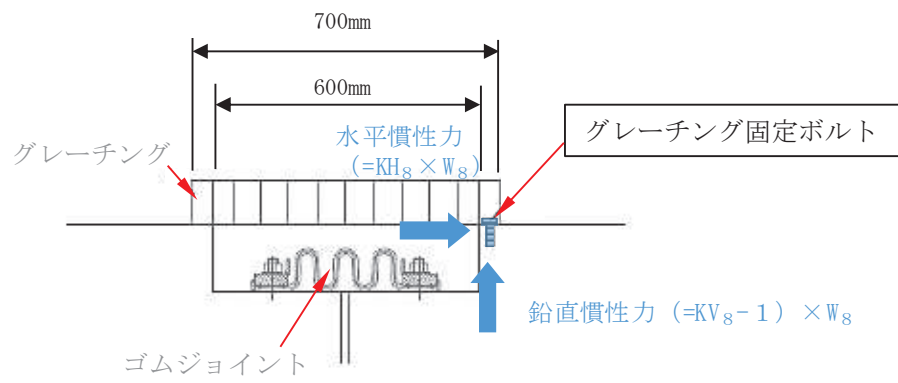


図 3-38 グレーチング固定ボルトの照査概念図

(2) 地震時（鉛直部）における保護部材の照査

地震時には基準地震動 S_s による地震力を考慮し、梁部材に生じる曲げモーメント及びせん断力、アンカーボルトに生じる引張力及びせん断力よりそれぞれ算定される応力が許容限界以下であることを確認する。

a. 梁部材

保護部材（鉛直部）の梁部材の評価に用いる設計水平震度及び設計鉛直震度は、保護部材（水平部）の固定ボルトの評価と同様に、設計水平震度を 2，設計鉛直震度を 2 とし て評価を行った。梁部材の照査概念図を図 3-38 に示す。

(a) 水平方向

$$M_g = L_g^2 / 2 \cdot p_g \quad \dots \dots \dots (3.29)$$

$$S_g = L_g \cdot p_g \quad \dots \dots \dots (3.30)$$

曲げ応力度の照査

$$\sigma_g = M_g / Z_g \quad \dots \dots \dots (3.31)$$

せん断応力度の照査

$$\tau_g = S_g / A_g \quad \dots \dots \dots (3.32)$$

ここで、

- M_g : 梁部材に作用する水平方向の曲げモーメント (kN・m)
- S_g : 梁部材に作用する水平方向のせん断力 (N/mm²)
- σ_g : 水平方向の曲げモーメントによる梁部材の発生応力度 (N/mm²)
- τ_g : 水平方向のせん断力による梁部材の発生応力度 (N/mm²)
- L_g : 梁部材の張出長 (mm²)
- p_g : 梁部材の水平方向の慣性力 (kN/m)
- Z_g : 梁部材（水平方向）の断面係数 (mm³)
- A_g : 梁部材（水平方向）のせん断抵抗断面積 (mm²)

(b) 鉛直方向

$$M_{10} = L_9^2/2 \cdot (p_{10} + w_{10}) \quad \dots \dots \dots (3.33)$$

$$S_{10} = L_9 \cdot (p_{10} + w_{10}) \quad \dots \dots \dots (3.34)$$

曲げ応力度の照査

$$\sigma_{10} = M_{10} / Z_{10} \quad \dots \dots \dots (3.35)$$

せん断応力度の照査

$$\tau_{10} = S_{10} / A_{10} \quad \dots \dots \dots (3.36)$$

ここで,

- M_{10} : 梁部材に作用する鉛直方向の曲げモーメント (kN・m)
- S_{10} : 梁部材に作用する鉛直方向のせん断力 (N/mm²)
- σ_{10} : 鉛直方向の曲げモーメントによる梁部材の発生応力度 (N/mm²)
- τ_{10} : 鉛直方向のせん断力による梁部材の発生応力度 (N/mm²)
- p_{10} : 梁部材の鉛直方向の慣性力 (kN/m)
- w_{10} : 梁部材の重量 (kN)
- Z_{10} : 梁部材 (鉛直方向) の断面係数 (mm³)
- A_{10} : 梁部材 (鉛直方向) のせん断抵抗断面積 (mm²)

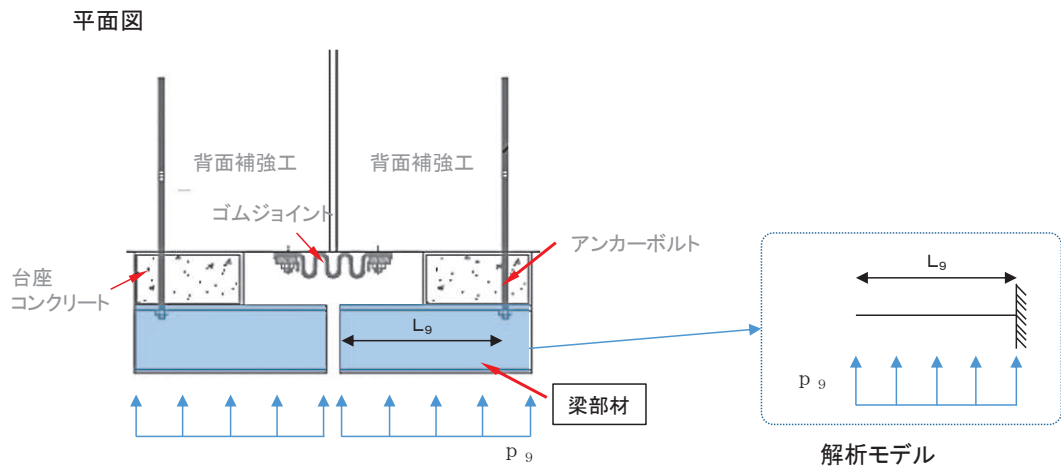


図 3-39 (1) 梁部材の照査概念図 (水平方向)

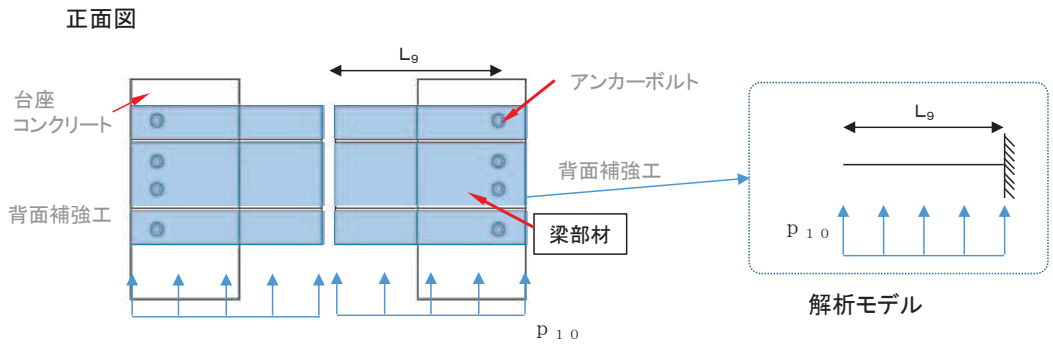


図 3-39 (2) 梁部材の照査概念図 (鉛直方向)

b. アンカーボルト

保護部材（鉛直部）のアンカーボルトの評価に用いる設計水平震度及び設計鉛直震度は、保護部材（水平部）の固定ボルトの評価と同様に、設計水平震度を 2，設計鉛直震度を 2 として評価を行った。アンカーボルトの照査概念図を図 3-40 に示す。

(a) 水平方向

$$P_{11} = N_{11} / n_{11} \quad \dots \dots \dots (3.37)$$

(b) 鉛直方向

$$Q_{11} = (S_{11} + W_{11}) / n_{11} \quad \dots \dots \dots (3.38)$$

ここで、

- N_{11} : アンカーボルトに作用する水平慣性力 (kN)
- S_{11} : アンカーボルトに作用する鉛直慣性力 (kN)
- W_{11} : 保護部材鉛直部の自重 (kN)
- Q_{11} : アンカーボルトに発生するせん断力 (kN)
- P_{11} : アンカーボルトに発生する引張力 (kN)
- n_{11} : アンカーボルトの本数 (本)

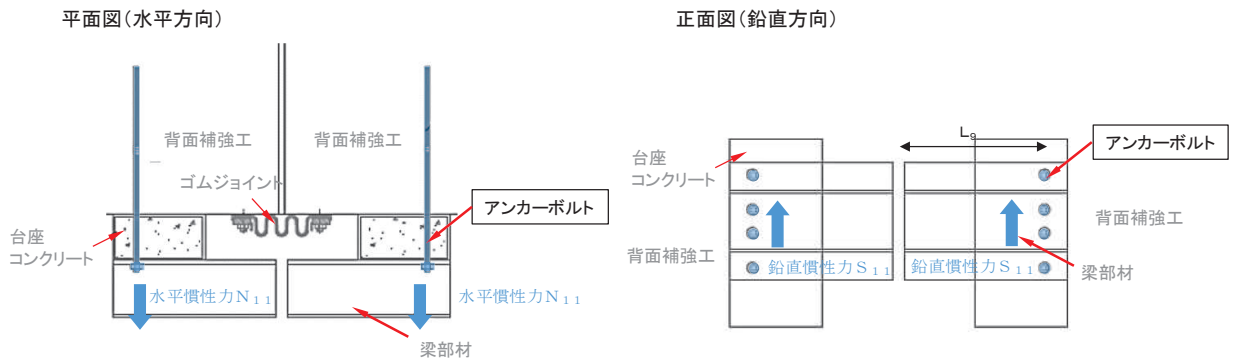


図 3-40 アンカーボルトの照査概念図

3.8.9 基礎地盤

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

4.2 鋼製遮水壁及び漂流物防護工

鋼管杭に発生する最大水平加速度から算出される最大水平震度 k_h は表 4-18 のとおりである。そのため、保守的に評価に用いる設計水平震度は 9 とし、鋼製遮水壁及び漂流物防護工の高さ方向に一様に作用するものとし、風荷重については 1kN/m^2 を考慮して評価を行った。

鋼製遮水壁及び漂流物防護工の主部材の照査結果を表 4-19 に示す。この結果から、鋼製遮水壁及び漂流物防護工の主部材の発生応力が許容限界以下であることを確認した。

表 4-18 (1) 各評価断面における最大水平震度及び設計水平震度

断面	最大加速度 となる標高	最大水平震度 k_h	設計水平震度
断面①	O. P. +29. 0m	7. 0	9
断面②	O. P. +29. 0m	8. 6	
断面③	O. P. +29. 0m	7. 8	
断面⑤	O. P. +29. 0m	3. 8	
断面⑥	O. P. +29. 0m	5. 6	

表 4-18 (2) 各評価断面における最大鉛直震度及び設計鉛直震度

断面	最大加速度 となる標高	最大鉛直震度 k_v	設計鉛直震度
断面①	O. P. +29. 0m	1. 6	2
断面②	O. P. +29. 0m	1. 6	
断面③	O. P. +29. 0m	1. 0	
断面⑤	O. P. +29. 0m	0. 7	
断面⑥	O. P. +29. 0m	0. 9	

表 4-19 鋼製遮水壁及び漂流物防護工の主要部材の照査結果

部材		材質	応力成分	応力度 (a)	許容限界 (b)	照査値 (a/b)
鋼製遮水壁	スキンプレート	SM490Y	曲げ応力度 (N/mm ²)	24	315	0.08
	垂直リブ	SM490Y	圧縮応力度 (N/mm ²)	6	190	0.04
	水平リブ	SM490Y	曲げ応力度 (N/mm ²)	27	315	0.09
			せん断応力度 (N/mm ²)	13	180	0.08
			合成応力度*	0.02	1.20	0.02
漂流物防護工	架台	SM490Y	曲げ応力度 (N/mm ²)	21	315	0.08
			せん断応力度 (N/mm ²)	13	180	0.08
			合成応力度*	0.01	1.20	0.01
	防護工	SM570	曲げ応力度 (N/mm ²)	3	382	0.01
			せん断応力度 (N/mm ²)	2	217	0.01
			合成応力度*	0.01	1.20	0.01
	防護工取付け ボルト	強度区分 8.8	引張応力度 (N/mm ²)	52	540	0.10
			せん断応力度 (N/mm ²)	18	300	0.06

注記 * : 同じ荷重条件の曲げ応力度及びせん断応力度から算出する。