

本資料のうち、枠囲みの内容は防護上の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-20-0119_改1
提出年月日	2021年9月15日

VI-3-別添 3-2-3 取放水路流路縮小工の強度計算書

2021年9月

東北電力株式会社

目 次

VI-3-別添 3-2-3-1 取放水路流路縮小工（第 1 号機取水路）の強度計算書

VI-3-別添 3-2-3-2 取放水路流路縮小工（第 1 号機放水路）の強度計算書

VI-3-別添 3-2-3-1 取放水路流路縮小工（第 1 号機取水路）の
強度計算書

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 適用基準	6
3. 強度評価方法	7
3.1 評価対象断面及び部位	7
3.1.1 評価対象断面	7
3.1.2 評価対象部位	8
3.2 荷重及び荷重の組合せ	9
3.2.1 荷重	9
3.2.2 荷重の組合せ	11
3.3 評価方法	12
3.3.1 解析方法	12
3.3.2 設計水平震度の算定	12
3.3.3 評価方法	16
3.3.4 使用材料及び材料の物性値	19
4. 強度評価	20
4.1 荷重算出	20
4.1.1 浸水津波荷重の算出	20
4.1.2 余震荷重の算出	21
4.2 強度評価	22
4.2.1 せん断に対する安定性から算出する幅	22
4.2.2 滑動に対する安定性から算出する幅	22
4.2.3 曲げに対する安定性から算出する幅 (L3)	23
5. 強度評価結果	25

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき、取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)が地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重及び余震荷重に対し、構造部材の構造健全性を保持することを確認するものである。

なお、取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の強度評価においては、平成 23 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い、牡鹿半島全体で約 1mの地盤沈下が発生したことを考慮し、地盤沈下量を考慮した敷地高さや施設高さ等を記載する。

2. 基本方針

2.1 位置

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の位置図を図2-1に示す。

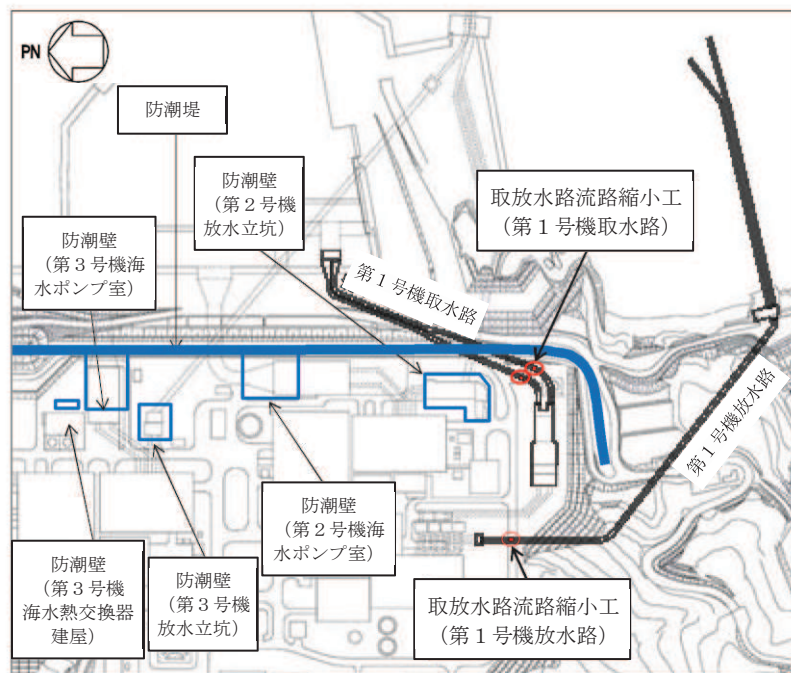



図2-1 取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の位置図（全体平面図）

2.2 構造概要

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の平面図及び断面図を図2-2に示す。

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)は、第1号機取水路からの津波の流入を抑制し、第1号機取水路から敷地への津波の流入を防止するため、第1号機取水路内に無筋のコンクリートを充填する。よって、取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)は、既設の第1号機取水路の覆工部（鉄筋コンクリート）と充填部（無筋コンクリート）から構成される。

第1号機の補機冷却海水ポンプに必要な海水を取水するため、貫通部（×2条）を設ける。

なお、本強度計算書では、充填部のB-B（C-C）断面の幅を流路縮小工の幅とする。

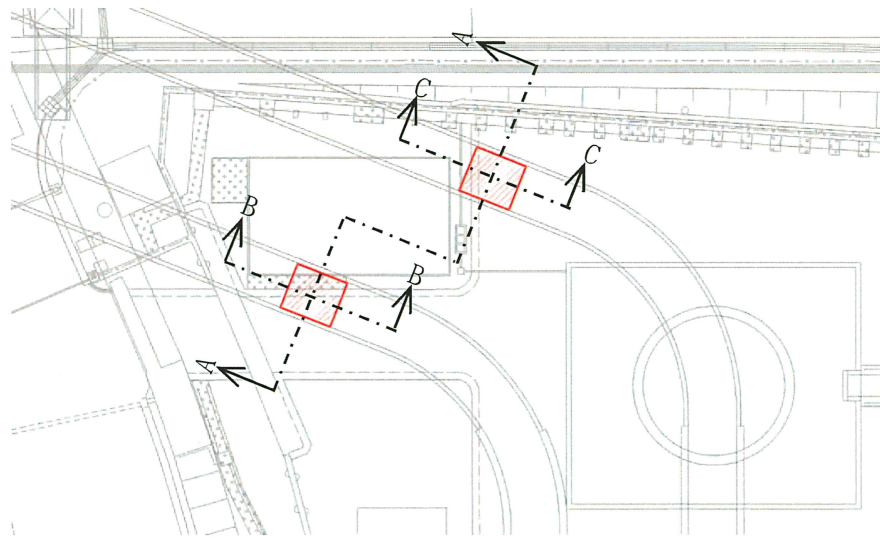


図2-2(1) 取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2) 平面図

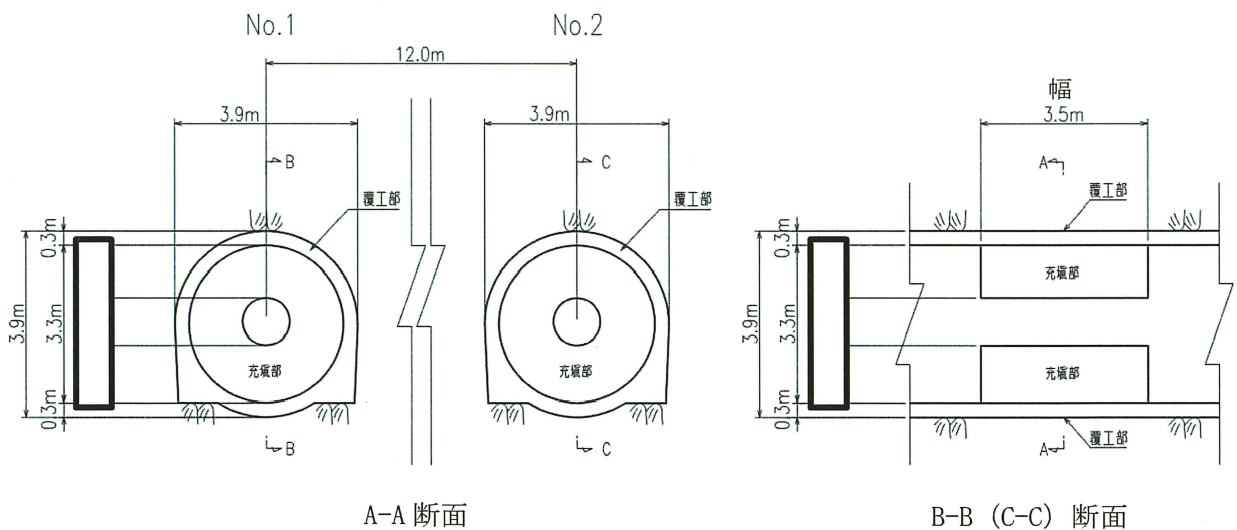


図2-2(2) 取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2) 断面図

2.3 評価方針

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)は、Sクラス施設である津波防護施設に分類される。

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の強度評価においては、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定している方法を用いて、強度計算を実施する。なお、覆工部については、鉄筋コンクリート構造であるものの、充填部に対する覆工部の断面厚さ等が小さいことを踏まえ、強度評価においては、保守的に鉄筋に期待しないこととして、無筋コンクリートとして構造強度を評価する。また、強度評価においては、その構造を踏まえ、津波及び余震荷重の伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、津波に伴う荷重作用時（以下「津波時」という。）及び津波に伴う荷重と余震に伴う荷重作用時（以下「重畳時」という。）について行う。ただし、「重畳時」の津波荷重は「津波時」の津波荷重を用いていることから、「重畳時」が保守的な評価となることは明白であるため、「津波時」の検討は省略する。

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の強度評価は、縦断方向に作用する津波荷重及び余震荷重について、表 2-1 に示すとおり、せん断、滑動及び曲げに対する必要幅（必要閉塞長）が流路縮小工の幅以下であることを確認することにより、安定性を損なわないことを評価する。

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の強度評価フローを図 2-3 に示す。

表 2-1 取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の評価項目

評価方針	評価項目	部位	評価方法	流路縮小工の幅
安定性を損なわないこと	構造部材の安定性	流路縮小工	せん断、滑動及び曲げに対する必要幅が流路縮小工幅以下であることを確認	3.5m

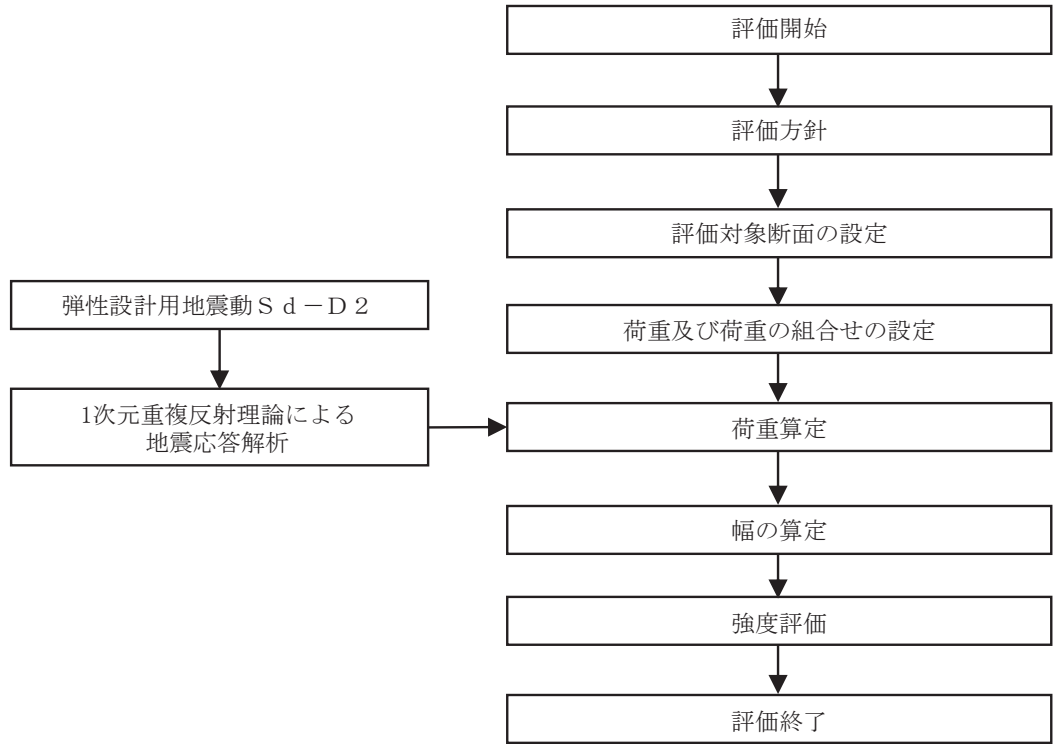


図 2-3 取放水路流路縮小工（第 1 号機取水路）(No. 1), (No. 2) の強度評価フロー

2.4 適用基準

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」 技術書〔コンクリートダム編〕（農林水産省 農村振興局，平成 15 年 4 月）
- ・コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会，2002 年制定）
- ・コンクリート標準示方書〔設計編〕（土木学会，2017 年制定）
- ・コンクリート標準示方書〔ダムコンクリート編〕（土木学会，2013 年制定）
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会，平成 19 年 7 月）
- ・水門鉄管技術基準（水圧鉄管・鉄鋼構造物編）（水門鉄管技術協会，平成 29 年版）
- ・水理公式集（土木学会，2018 年版）

3. 強度評価方法

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の強度評価は、「2.3 評価方針」及び「3.2 荷重及び荷重の組合せ」において設定している荷重及び荷重の組合せ，並びに流路縮小工幅を踏まえて実施する。強度評価では，本章に示す方法により，「4. 強度評価」に示す評価条件を用いて評価し，「5. 強度評価結果」より，せん断，滑動及び曲げに対する必要幅が流路縮小工幅以下であることを確認する。

3.1 評価対象断面及び部位

3.1.1 評価対象断面

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の評価対象断面位置図を図3-1に示す。評価対象断面の地質図を図3-2に示す。

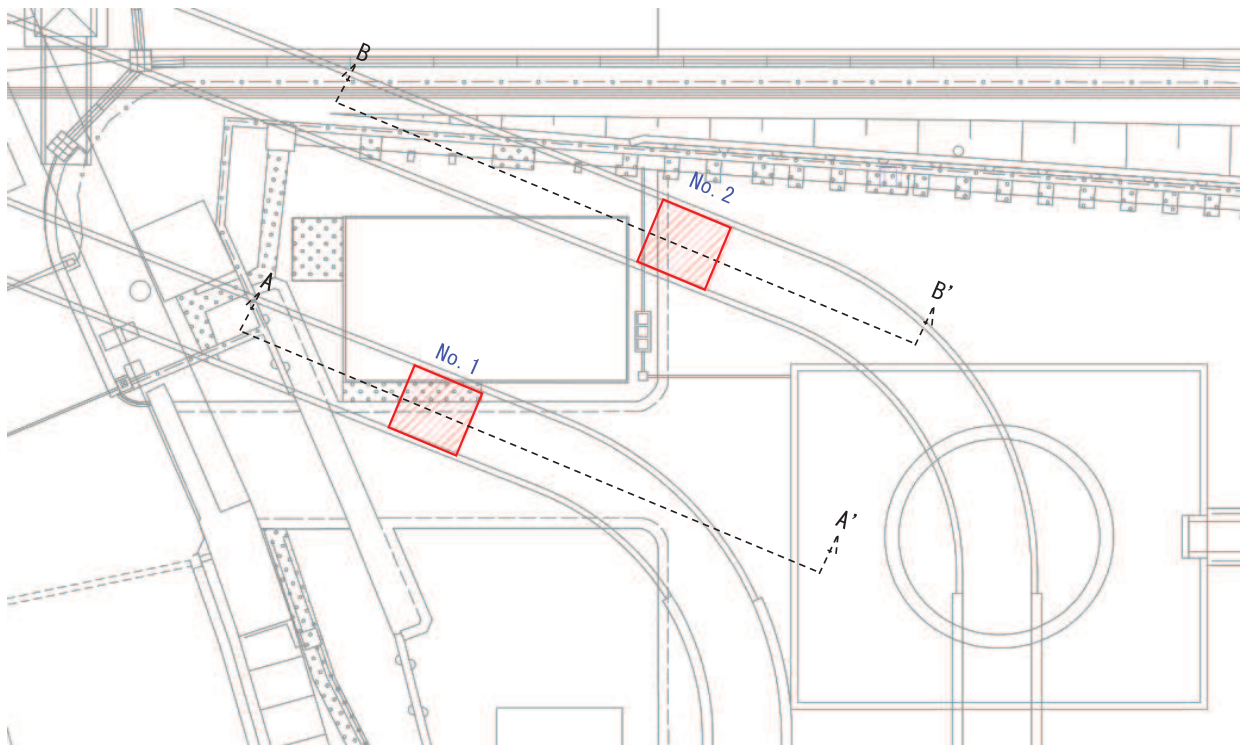


図 3-1 取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の評価対象断面位置図

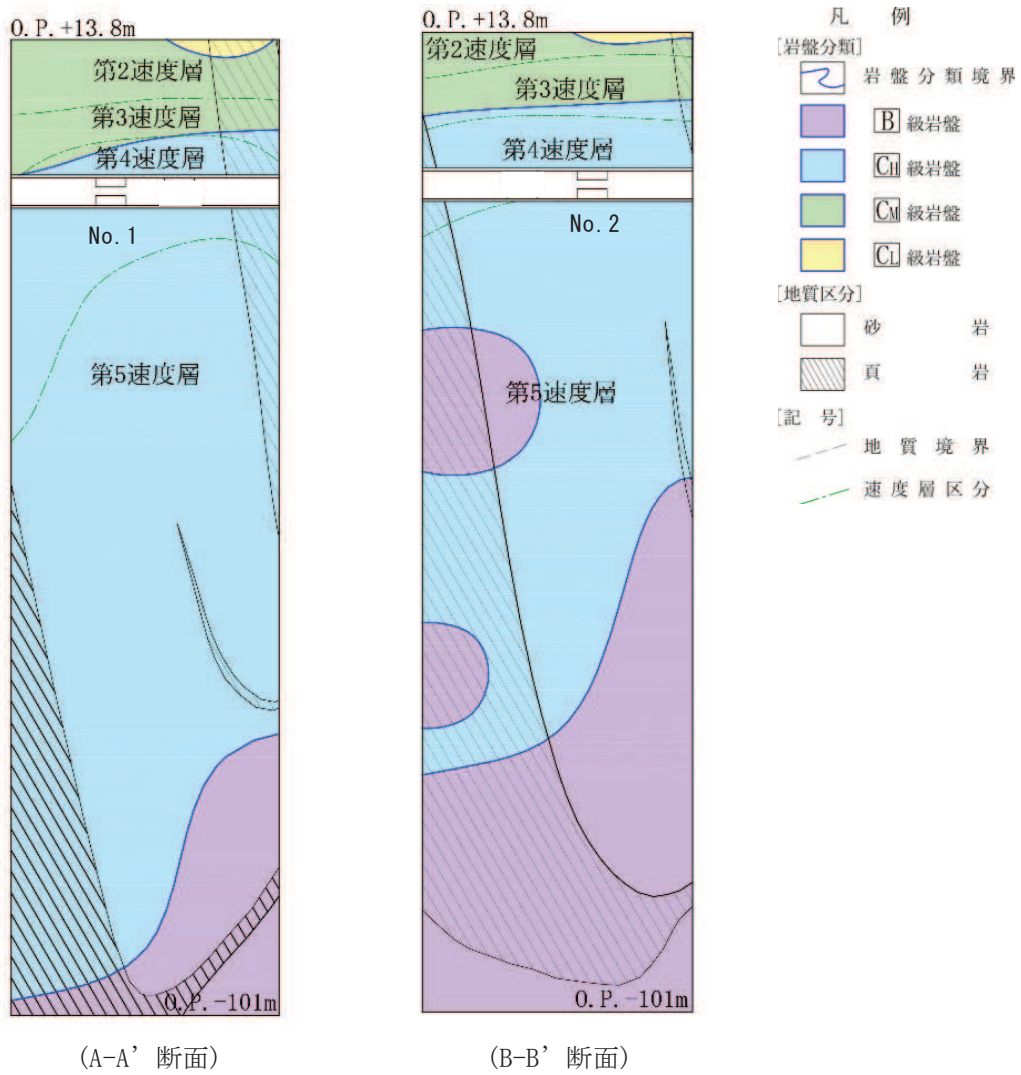


図 3-2 取放水路流路縮小工（第 1 号機取水路）(No. 1), (No. 2) の評価対象地質断面図

3.1.2 評価対象部位

評価対象部位は、構造部材の安定性が要求される流路縮小工とする。

3.2 荷重及び荷重の組合せ

強度計算に用いる荷重及び荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて示している荷重及び荷重の組合せを踏まえて設定する。

3.2.1 荷重

取放水路流路縮小工（第 1 号機取水路）(No. 1), (No. 2) の強度評価において、考慮する荷重を以下に示す。

(1) 固定荷重 (G)

固定荷重として、躯体自重を考慮する。

(2) 積載荷重 (P)

地表面に積載荷重 4.9 (kN/m²) を考慮する。

(3) 余震荷重 (K s d)

余震荷重は、弾性設計用地震動 S d - D 2 による慣性力及び動水圧を考慮する。

動水圧については、Westergaard の式により設定する。

(4) 浸水津波荷重 (P h)

a. 津波荷重 (静水圧) (P h s)

津波荷重については、設計用津波水位 (入力津波による浸水高さ (0. P. +24. 4m) に+0. 5m の余裕を考慮した水位) に基づく静水圧を考慮する。

b. 流水圧 (P h f)

「港湾の施設の技術上の基準・同解説 (日本港湾協会, 平成 19 年 7 月)」に基づき以下の式により算定する。

$$Phf = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho_0 \times A \times U^2$$

ここに, Phf : 流水圧 (kN)

C_D : 抗力係数 =2. 01 (保守的に最大値とする)

ρ_0 : 水の密度 =1. 03 (t/m³)

A : 流れの方向の物体の投影面積 (m²)

U : 流速 (m/s) *流路縮小工前面及び背面の最大流速を考慮して(10m/s)と設定

c. 推力 (Pht)

推力は「水門鉄管技術基準（水圧鉄管・鉄鋼構造物編）（水門鉄管技術協会，平成 29 年版）」に基づき以下の式により算定する。

$$Pht = \frac{2fQ^2}{g\pi D^3} \times L$$

ここに，Pht : 流水の摩擦による推力 (kN)

f : 流水の摩擦抵抗係数 (tf/m³)

$$f = 8gn^2 / \left(\frac{D_3}{4}\right)^{\frac{1}{3}}$$

D : 貫通部内径 (m)

L : 貫通部長さ (m)

Q : 流量 = v × A (m³/s)

A : 貫通部内断面積 (m²)

v : 貫通部内流速 (m/s) *流路縮小工貫通部の最大流速を考慮して(20m/s)と設定

n : 粗度係数 (コンクリート) 0.015 (m^{-1/3}s)

3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-1 に、荷重の作用図を図 3-3 に示す。

表 3-1 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
重畳時	$G + P + K_{s d} + P_h$

- G : 固定荷重
- P : 積載荷重 (4.9kN/m² を地表面に考慮)
- $K_{s d}$: 余震荷重
- P_h : 浸水津波荷重

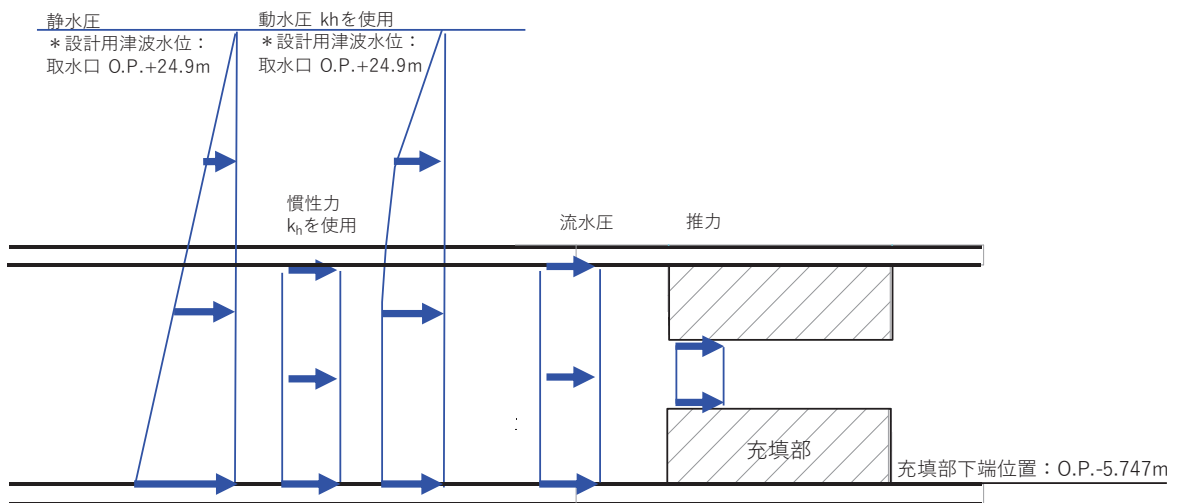


図 3-3 取放水路流路縮小工 (第 1 号機取水路) (No. 1), (No. 2) の荷重作用図

3.3 評価方法

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の強度評価は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に基づき実施する。
 なお、強度評価は「2.3 評価方針」に示すとおり、「重畳時」について実施する。

3.3.1 解析方法

取放水路流路縮小工（第1号機取水路）(No. 1), (No. 2)の強度評価は、「土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」 技術書〔コンクリートダム編〕（農林水産省農村振興局，平成15年4月）」に基づき、評価を行う。

「3.2.2 荷重の組合せ」に基づく荷重を用いて、打設面のせん断強さからの必要閉塞長さ(L1)、滑動に対する必要閉塞長さ(L2)、周辺が固定の円板としての必要閉塞長さ(L3)をそれぞれ算定し、これらのすべてで満足する必要幅を算定して評価する。

なお、余震荷重算定に用いる設計水平震度は、一次元地震応答解析により算定する。

一次元地震応答解析は、解析コード「ArkQuake Ver. 3.10.01」を使用する。解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3.3.2 設計水平震度の算定

(1) 地盤物性及び材料物性のばらつき

地盤は、添付書類「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を使用する。

また、地盤物性のばらつきの影響を考慮するため、表3-2に示す解析ケースを設定する。

表 3-2 強度評価における解析ケース

解析ケース	材料物性 (コンクリート) (E_0 : ヤング係数)	地盤物性
		C_L 級岩盤, C_M 級岩盤, C_H 級岩盤, B 級岩盤 (G_d : 動せん断弾性係数)
ケース① (基本ケース)	設計基準強度	平均値
ケース②	設計基準強度	平均値 + 1 σ
ケース③	設計基準強度	平均値 - 1 σ

(2) 一次元地震応答解析

一次元地震応答解析は、添付書類「VI-2-1-1 耐震設計の基本方針」のうち「4.1(2) 動的地震力」及び添付書類「VI-2-1-6 地震応答解析の基本方針」のうち「2.3 屋外重要土木構造物」に示す入力地震動の設定方針を踏まえて設定する。

設計水平震度の設定に用いる地震動は、解放基盤表面で定義される弾性設計用地震動 $S_d - D 2$ を一次元重複反射理論により流路縮小工の中心位置で評価したものをを用いる。なお、設計水平震度の設定に用いる地下構造モデルは、添付書類「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」のうち「6.1 入力地震動の設定に用いる地下構造モデル」を用いる。

なお、取放水路流路縮小工（第1号機取水路）はNo.1及びNo.2の2系統であるため、それぞれの位置で一次元地震応答解析を実施する。

一次元地震応答解析の概念図を図3-4に、設計水平震度の設定に用いる弾性設計用地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを図3-5に示す。

入力地震動の算定には、解析コード「ArkQuake Ver. 3.10.01」を使用する。解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

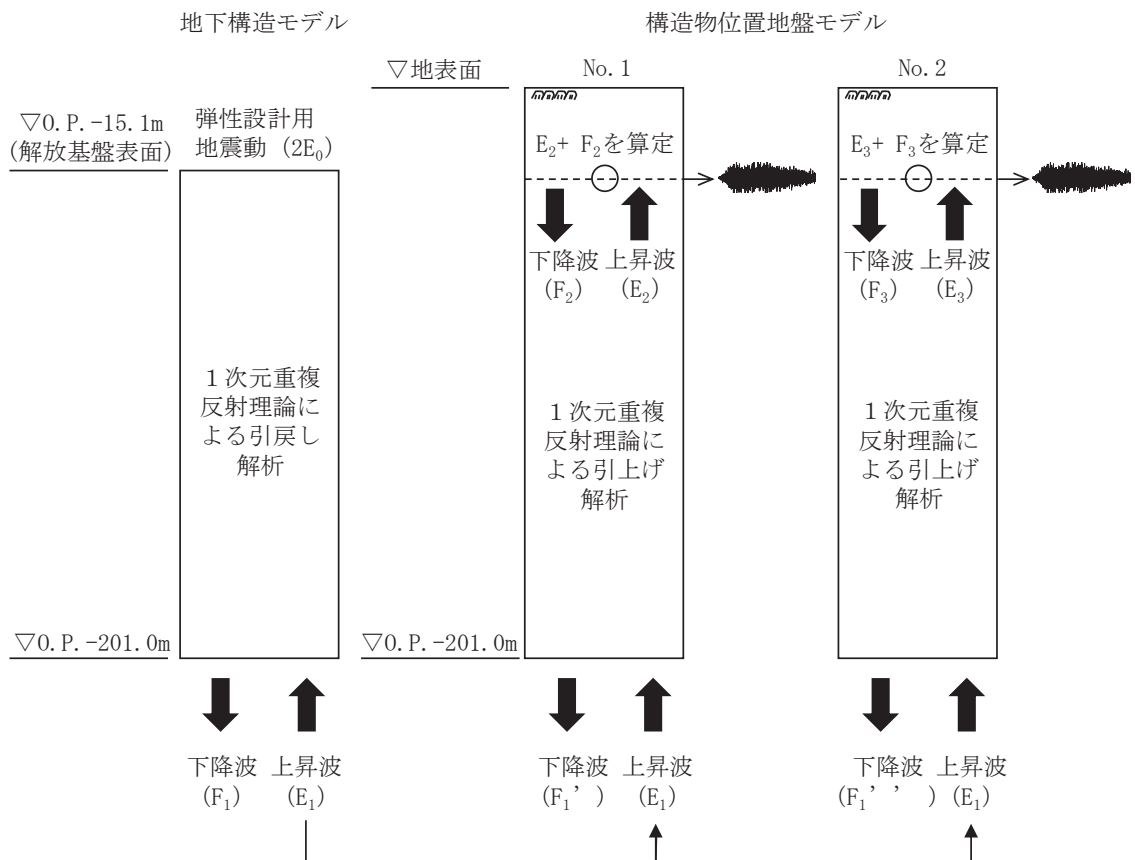
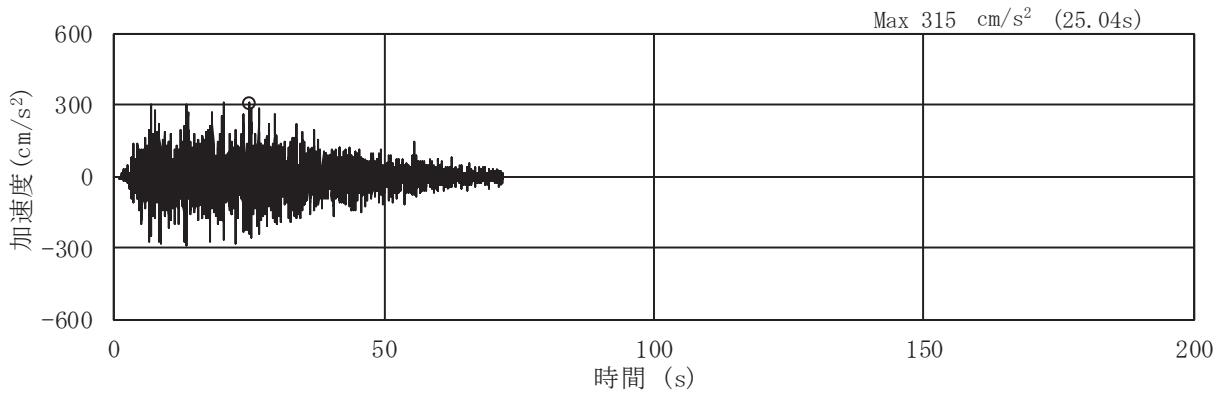
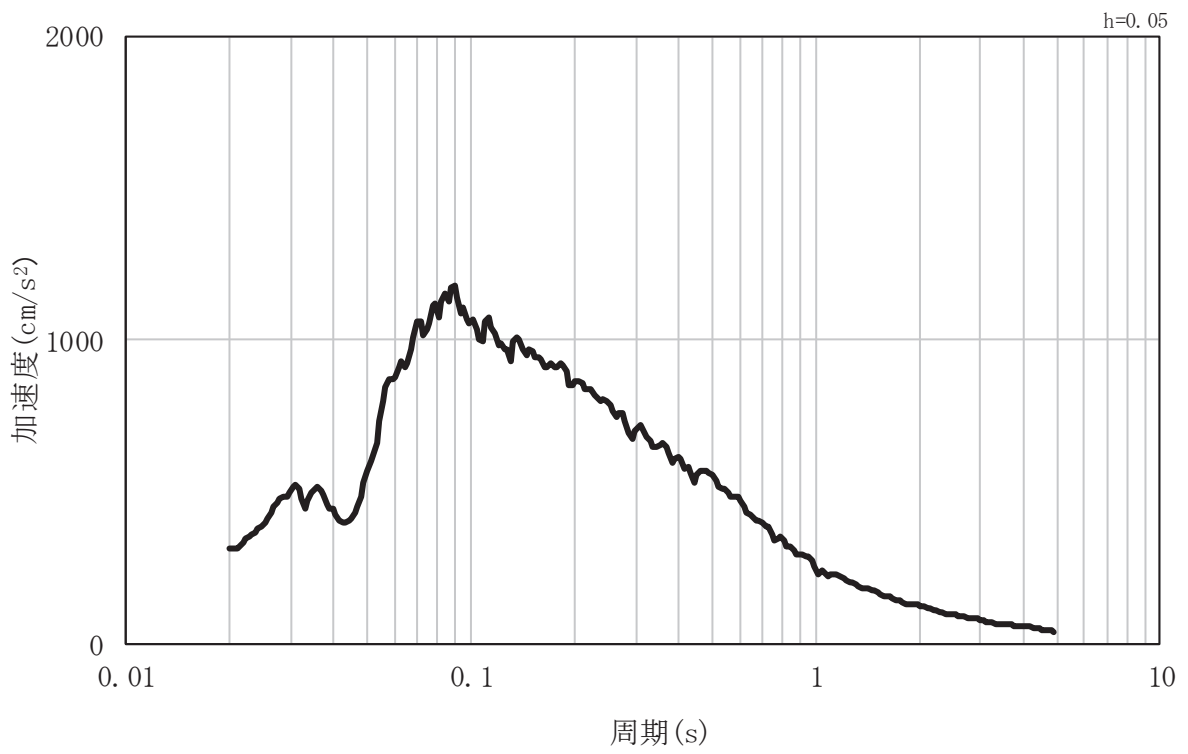


図 3-4 一次元地震応答解析の概念図

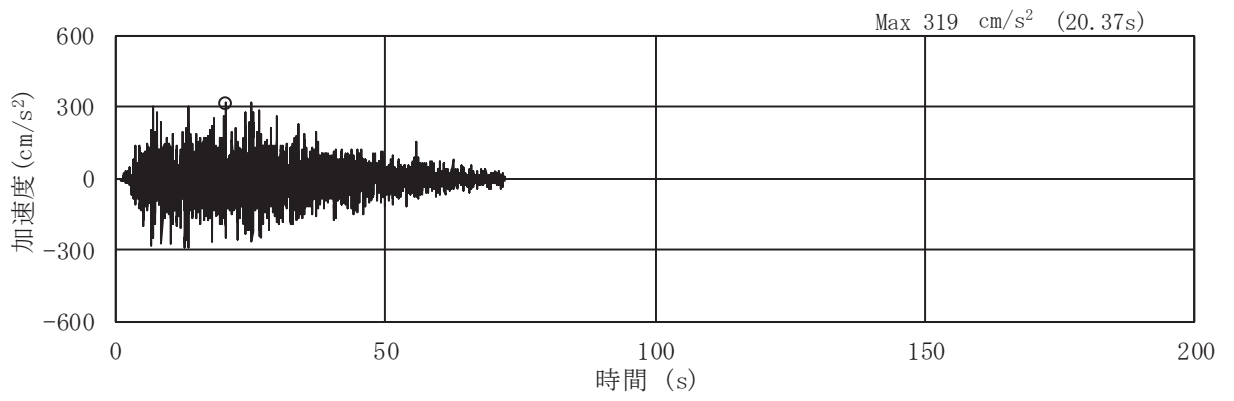


(a) 加速度時刻歴波形

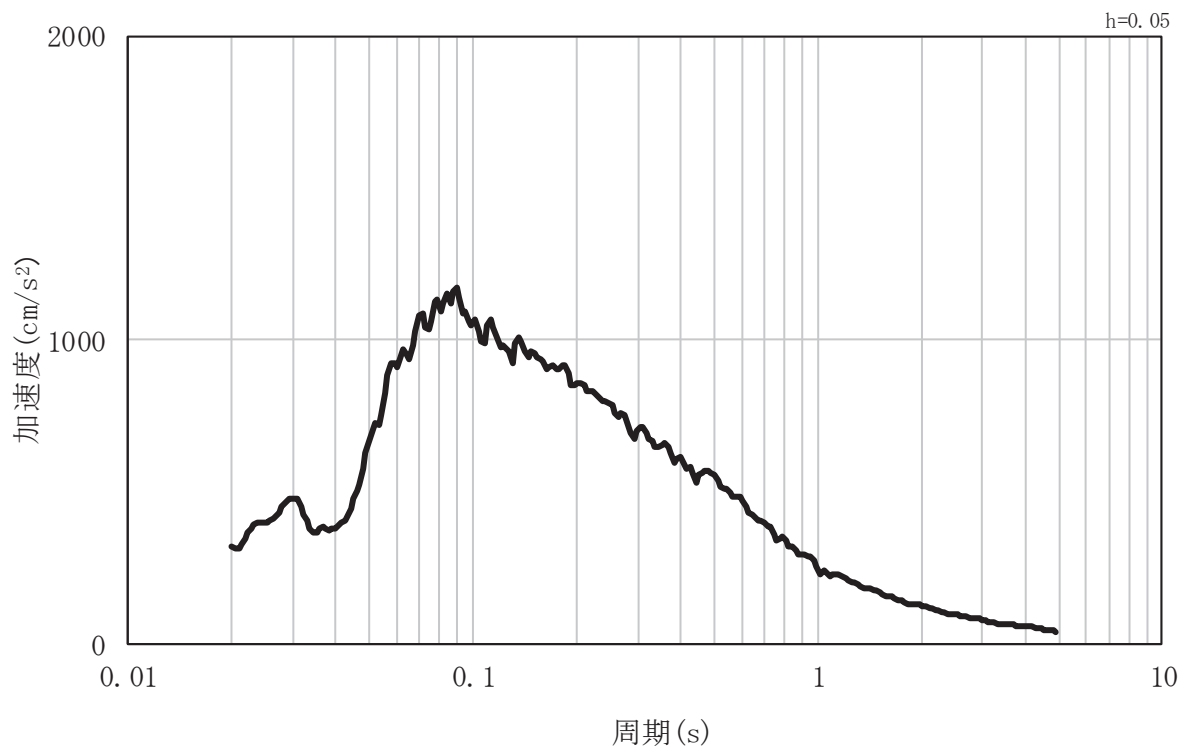


(b) 加速度応答スペクトル

図 3-5(1) 設計水平震度の設定に用いる地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(No. 1)



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 3-5(2) 設計水平震度の設定に用いる地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル
(No. 2)

(4) 設計水平震度の算定

一次元地震応答解析結果から流路縮小工の中心位置での最大加速度を表 3-3 に示す。

取放水路流路縮小工（第 1 号機取水路）(No. 2) のケース②が最も加速度が大きいため、この加速度を重力加速度で除して設計水平震度とする。

$$\text{設計水平震度 (kh)} = 336(\text{cm/s}^2) / 980.665(\text{cm/s}^2) = 0.343$$

表 3-3 一次元地震応答解析結果

解析ケース		①	②	③
		基本ケース	地盤剛性のばらつき (+1σ) を考慮した解析ケース	地盤剛性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース
No. 1	最大加速度 (cm/s ²)	315	335	316
No. 2	最大加速度 (cm/s ²)	319	<u>336</u>	316

3.3.3 評価方法

強度評価は、「土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」 技術書〔コンクリートダム編〕（農林水産省農村振興局，平成 15 年 4 月）」に基づき，以下の 3 項目について算定した幅が「2.3 評価方針」で設定した流路縮小工幅以下であることを確認する。なお，せん断に対する安定性から算出する幅及び滑動に対する安定性から算出する幅の算定にあたっては，覆工部と充填部間でのせん断を想定した場合 L1(L2) と，覆工部と周辺岩盤間のせん断を想定した場合 L1'(L2') の 2 ケースで算定する。

(1) せん断に対する安定性から算出する幅

a. 覆工部と充填部間でのせん断を想定した場合 (L1)

$$L1 = \alpha \frac{P \cdot A}{\tau_c \cdot L_0}$$

ここに，L1 : せん断に対する安定性から算出する幅 (m)

α : 安全率 = 4

P : 作用荷重 (kN/m²)

A : 水路断面積 (m²)

τ_c : コンクリートのせん断強さ (kN/m²)

L₀ : 付着面の周長 (m)

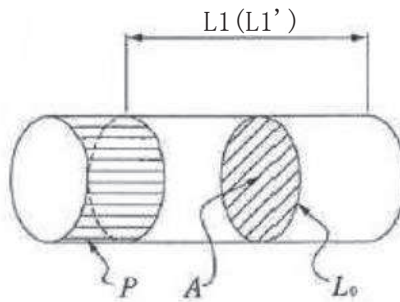


図 3-6 覆工部または充填部のせん断強さ

b. 覆工部と周辺岩盤間でのせん断を想定した場合 (L1')

$$L1' = \alpha \frac{P \cdot A}{\tau_r \cdot L_0}$$

ここに, L1' : せん断に対する安定性から算出する幅 (m)

α : 安全率 = 4

P : 作用荷重 (kN/m²)

A : 水路断面積 (m²)

τ_r : 岩盤のせん断強さ (kN/m²)

L₀ : 付着面の周長 (m)

(2) 滑動に対する安定性から算出する幅

a. 覆工部と充填部間での滑動を想定した場合 (L2)

$$L2 = n \frac{P \cdot A}{C_c A' + f_c N}$$

ここに, L2 : 滑動に対する安定性から算出する幅 (m)

n : せん断摩擦安全率 = 4

P : 作用荷重 (kN/m²)

A : 水路断面積 (m²)

C_c : コンクリートの付着力 (kN/m²) (せん断強度)

A' : 付着面の単位長さ当たりの面積 (m²/m)

f_c : コンクリートのせん断抵抗係数 (= tan φ)

N : コンクリート自重による単位長さ当たりの垂直荷重 (kN/m)

$$N = \pi W / (2D)$$

W : 単位長さ当たりの充填部の重量 (kN/m)

D : 充填部の直径 (m)

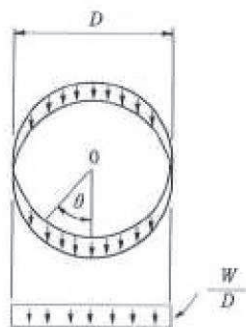


図 3-7 覆工部または充填部の周辺の全抵抗力

b. 覆工部と周辺岩盤間での滑動を想定した場合 (L2')

$$L2' = n \frac{P \cdot A}{C_r A' + f_r N'}$$

ここに, L2' : 滑動に対する安定性から算出する幅 (m)

n : せん断摩擦安全率 = 4

P : 作用荷重 (kN/m²)

A : 水路断面積 (m²)

C_r : 岩盤の付着力 (kN/m²) (せん断強度)

A' : 付着面の単位長さ当たりの面積 (m²/m)

f_r : 岩盤のせん断抵抗係数 (= tan φ)

N' : コンクリート自重による単位長さ当たりの垂直荷重 (kN/m)

$$N' = \pi W' / (2D')$$

W' : 単位長さ当たりの充填部の重量 (kN/m)

D' : 覆工部の直径 (m)

(3) 曲げに対する安定性から算出する幅 (L3)

$$L3 = \alpha \left(\frac{a}{2}\right) \sqrt{\frac{3P}{\sigma'}}$$

ここに, L3 : 曲げに対する安定性から算出する幅 (m)

α : 安全率 = 1.5

a : 縮小工半径 (m)

P : 作用荷重 (kN/m²)

σ' : コンクリートの許容曲げ引張応力度 (kN/m²)

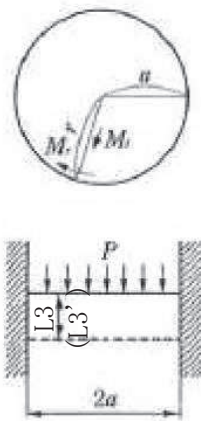


図 3-8 充填部を周辺固定円盤と仮定した場合の必要閉塞長

3.3.4 使用材料及び材料の物性値

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

表 3-4 構造物の使用材料

部位	材料	諸元
覆工部	コンクリート	設計基準強度： $f'_{ck}=20.5\text{N/mm}^2$
充填部	コンクリート	設計基準強度： $f'_{ck}=50.0\text{N/mm}^2$

表 3-5 材料の物性値

分類	せん断強度 (τ_0, C)	内部摩擦角 (ϕ)	許容曲げ引張応力度 (σ')
岩盤 (C _H 級)	1.72N/mm^2 *1	43° *1	—
覆工部	4.10N/mm^2 *2	0° *3	0.28N/mm^2 *4
充填部	10.0N/mm^2 *2	0° *3	0.43N/mm^2 *4

注記 *1：解析用物性値（狐崎部層の C_H級岩盤の値を採用）

*2：コンクリート標準示方書 [ダムコンクリート編]（土木学会，2013 年制定）に基づき設定

*3：保守的に考慮しないこととする

*4：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]（土木学会，2002 年制定），コンクリート標準示方書 [設計編]（土木学会，2017 年制定）に基づき設定

4. 強度評価

4.1 荷重算出

浸水津波荷重として静水圧、流水圧及び推力を、余震荷重として慣性力及び動水圧を算出する。

4.1.1 浸水津波荷重の算出

静水圧 P1 の算出

$$P 1 = \rho_0 g h = 1.03 \times 9.80665 \times (24.9 - (-5.747)) = 309.6 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

ここに、 ρ_0 : 海水の密度 = 1.03 (t/m³)

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

h : 充填部下端における水深 = $h_1 - h_2$ (m)

h_1 : 設計用津波水位 (O.P.) = 24.9 (m)

h_2 : 充填部下端位置 (O.P.) = -5.747 (m)

流水圧 P2 の算出

流水圧は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会，平成 19 年 7 月）」に基づき算定する。

$$P 2 = \frac{1}{2} \times C_d \times \rho_0 \times A_1 \times U^2 = \frac{1}{2} \times 2.01 \times 1.03 \times 8.6 \times 10^2 = 890.3 \text{ (kN)}$$

ここに、 C_d : 抗力係数 = 2.01（保守的に最大値とする）

ρ_0 : 海水の密度 = 1.03 (t/m³)

$$A_1 : \text{充填部の断面積 (m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{\pi \times 3.3^2}{4} = 8.6 \text{ (m}^2\text{)}$$

D_1 : 充填部直径 = 3.3 (m)

U : 流速 = 10 (m/s)

（流路縮小工前面及び背面の最大流速を考慮して設定）

推力 P5 の算出

推力は、「水門鉄管技術基準（水圧鉄管・鉄鋼構造物編）（水門鉄管技術協会，平成 29 年版）」に基づき算定する。なお，推力算定に用いる流水の摩擦抵抗係数 (f) は、「水理公式集（土木学会，2018 年版）」に基づき算定する。

$$P 5 = \frac{2 f Q^2}{g \pi D_3} \times L = \frac{2 \times 8 g n^2 / \left(\frac{D_3}{4} \right)^{\frac{1}{3}} \times (v \times A_3)^2}{g \pi D_3} \times L$$

$$= \frac{2 \times 8 \times 9.80665 \times 0.015^2}{9.80665 \times \boxed{}} \times (20 \times \boxed{})^2 \times 3.50 = \boxed{}$$

ここに、 f : 流水の摩擦抵抗係数 ($t f / m^3$)

$$f = 8 g n^2 / \left(\frac{D_3}{4} \right)^{\frac{1}{3}}$$

g : 重力加速度 = $9.80665 (m/s^2)$

n : 充填部の粗度係数 = $0.015 (m^{-1/3}s)$

D_3 : 貫通部直径 = $\boxed{}$

Q : 流量 = $v \times A_3 (m^3/s)$

v : 流速 = $20 (m/s)$

(流路縮小工貫通部の最大流速を考慮して設定)

$$A_3 : \text{充填部貫通部の断面積}(m^2) = \frac{\pi \times D_3^2}{4} = \boxed{}$$

4.1.2 余震荷重の算出

慣性力 P3 の算出

$$P_3 = k_h W = k_h \times \gamma \times A_1 \times L = 0.343 \times 23.0 \times 8.6 \times 3.5 = 237.5 (kN)$$

ここに、 k_h : 設計水平震度

γ : 充填部の単位体積重量 = $23.0 (kN/m^3)$

$$A_1 : \text{充填部の断面積}(m^2) = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{\pi \times 3.3^2}{4} = 8.6 (m^2)$$

L : 充填部幅 = $3.5 (m)$

D_1 : 充填部直径 = $3.3 (m)$

動水圧 P4 の算出

$$P_4 = \frac{7}{8} \times k_h \times \rho_0 \times g \times \sqrt{h^2} = \frac{7}{8} \times 0.343 \times 1.03 \times 9.80665 \times \sqrt{\{24.9 - (-5.747)\}^2}$$

$$= 93.0 (kN/m^2)$$

ここに、 k_h : 設計水平震度

ρ_0 : 海水の密度 = $1.03 (t/m^3)$

g : 重力加速度 = $9.80665 (m/s^2)$

h : 充填部下端における水深 = $h_1 - h_2 (m)$

h_1 : 設計用津波水位 (O.P.) = $24.9 (m)$

h_2 : 充填部下端位置 (O.P.) = $-5.757 (m)$

4.2 強度評価

4.2.1 せん断に対する安定性から算出する幅

(1) 充填部と覆工部でのせん断を想定した場合 (L1)

$$L1 = \alpha \frac{P \cdot A}{\tau_c \cdot L_0} = \alpha \frac{(P1 \times A_1 + P2 + P3 + P4 \times A_1 + P5)}{\tau_c \cdot L_0}$$

$$= 4 \times \frac{(309.6 \times 8.6 + 890.3 + 237.5 + 93.0 \times 8.6 + \boxed{})}{4100 \times 10.37} = \boxed{}$$

ここに、 α : 安全率=4

$$A_1 : \text{充填部の断面積}(\text{m}^2) = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{\pi \times 3.3^2}{4} = 8.6(\text{m}^2)$$

$$D_1 : \text{充填部直径} = 3.3(\text{m})$$

$$\tau_c : \text{覆工部せん断強度} = 4100(\text{kN/m}^2)$$

$$L_0 : \text{充填部周長} = \pi \times D_1 = \pi \times 3.3 = 10.37(\text{m})$$

(2) 覆工部と周辺岩盤間でのせん断を想定した場合 (L1')

$$L1' = \alpha \frac{P \cdot A}{\tau_r \cdot L_0'} = \alpha \frac{(P1 \times A_1 + P2 + P3 + P4 \times A_1 + P5)}{\tau_r \cdot L_0'}$$

$$= 4 \times \frac{(309.6 \times 8.6 + 890.3 + 237.5 + 93.0 \times 8.6 + \boxed{})}{1720 \times 12.25} = \boxed{}$$

ここに、 α : 安全率=4

$$A_1 : \text{充填部の断面積}(\text{m}^2) = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{\pi \times 3.3^2}{4} = 8.6(\text{m}^2)$$

$$D_1 : \text{充填部直径} = 3.3(\text{m})$$

$$\tau_r : \text{岩盤のせん断強度} = 1720(\text{kN/m}^2)$$

$$L_0' : \text{流路縮小工全体の周長} = \pi \times D_2 = \pi \times 3.9 = 12.25(\text{m})$$

$$D_2 : \text{流路縮小工全体の直径} = 3.9(\text{m})$$

4.2.2 滑動に対する安定性から算出する幅

(1) 充填部と覆工部間での滑動を想定した場合 (L2)

$$L2 = n \frac{P \cdot A}{C_c A + f_c N} = n \frac{(P1 \times A_1 + P2 + P3 + P4 \times A_1 + P5)}{C_c \times \pi \times D_1 + \tan \phi \times (\pi \times \frac{\gamma \times A_1}{D_1})}$$

$$=4 \times \frac{(309.6 \times 8.6 + 890.3 + 237.5 + 93.0 \times 8.6 + \boxed{})}{4100 \times \pi \times 3.3 + 0 \times (\pi \times \frac{23.0 \times 8.6}{3.3})} = \boxed{}$$

ここに、n：安全率=4

C_c ：充填部の付着力=4100(kN/m²)

D_1 ：充填部直径=3.3(m)

ϕ ：充填部内部摩擦角=0(°)

γ ：充填部の単位体積重量=23.0(kN/m³)

$$A_1：充填部の断面積(m^2) = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{\pi \times 3.3^2}{4} = 8.6(m^2)$$

(2) 覆工部と周辺岩盤間での滑動を想定した場合 (L2')

$$L2' = n \frac{P \cdot A}{C_r A + f_r N} = n \frac{(P1 \times A_1 + P2 + P3 + P4 \times A_1 + P5)}{C_r \times \pi \times D_2 + \tan \phi \times (\pi \times \frac{\gamma \times A_2}{D_2})}$$

$$= 4 \times \frac{(309.6 \times 8.6 + 890.3 + 237.5 + 93.0 \times 8.6 + 16.0)}{1720 \times \pi \times 3.9 + 0.93 \times (\pi \times \frac{23.0 \times 11.9}{3.9})} = 0.87(m)$$

ここに、n：安全率=4

C_r ：岩盤の付着力=1720(kN/m²)

D_2 ：流路縮小工全体直径=3.9(m)

ϕ' ：岩盤の内部摩擦角=43(°)

γ ：充填部及び覆工部の単位体積重量=23.0(kN/m³)

$$A_2：流路縮小工全体の断面積(m^2) = \frac{\pi \times D_2^2}{4} = \frac{\pi \times 3.9^2}{4} = 11.9(m^2)$$

4.2.3 曲げに対する安定性から算出する幅 (L3)

$$L3 = \alpha \left(\frac{a}{2}\right) \sqrt{\frac{3P}{\sigma}} = \alpha \left(\frac{a}{2}\right) \sqrt{\frac{3 \times \left(P1 + \frac{P2}{A_1} + \frac{P3}{A_1} + P4 + \frac{P5}{A_3}\right)}{\sigma}}$$

$$= 1.5 \times \left(\frac{1.65}{2}\right) \times \sqrt{\frac{3 \times (309.6 + \frac{890.3}{8.6} + \frac{237.5}{8.6} + 93.0 + \frac{16.0}{0.8})}{430}} = 2.44(m)$$

ここに、 α ：安全率=1.5 (保守的に1.5とする)

$$a : \frac{D_1}{2} = \frac{3.3}{2} = 1.65 \text{ (m)}$$

D_1 : 充填部直径 = 3.3 (m)

σ_c : コンクリートの許容曲げ引張応力度 = 430 (kN/m²)

$$A_3 : \text{充填部貫通部の断面積 (m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_3^2}{4} = \boxed{}$$

D_3 : 貫通部直径 = $\boxed{}$

5. 強度評価結果

算出した必要幅が、流路縮小工幅以下であることを確認した。

照査結果を表 5-1 に示す。

表 5-1 照査結果

項 目	必要幅 (m) (a)	流路縮小工幅 (m) (b)	照査値 (a / b)
せん断に対する安定性から算出する幅 覆工部と充填部間でのせん断を想定した 場合 (L 1)		3.50	
せん断に対する安定性から算出する幅 覆工部と周辺岩盤間でのせん断を想定 した場合 (L 1')		3.50	
滑動に対する安定性から算出する幅 覆工部と充填部間での滑動を想定した 場合 (L 2)		3.50	
滑動に対する安定性から算出する幅 覆工部と周辺岩盤間での滑動を想定し た場合 (L 2')		3.50	
曲げに対する安定性から算出する幅 (L 3)		3.50	

VI-3-別添 3-2-3-2 取放水路流路縮小工（第 1 号機放水路）の
強度計算書

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	適用基準	6
3.	強度評価方法	7
3.1	評価対象断面及び部位	7
3.1.1	評価対象断面	7
3.1.2	評価対象部位	8
3.2	荷重及び荷重の組合せ	9
3.2.1	荷重	9
3.2.2	荷重の組合せ	11
3.3	評価方法	12
3.3.1	解析方法	12
3.3.2	設計水平震度の算定	12
3.3.3	評価方法	15
3.3.4	使用材料及び材料の物性値	18
4.	強度評価	19
4.1	荷重算出	19
4.1.1	浸水津波荷重の算出	19
4.1.2	余震荷重の算出	20
4.2	強度評価	20
4.2.1	せん断に対する安定性から算出する幅	21
4.2.2	滑動に対する安定性から算出する幅	21
4.2.3	曲げに対する安定性から算出する幅 (L3)	22
5.	強度評価結果	24

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定している構造強度の設計方針に基づき、取放水路流路縮小工（第1号機放水路）が地震後の繰返しの襲来を想定した津波荷重及び余震荷重に対し、構造部材の構造健全性を保持することを確認するものである。

なお、取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の強度評価においては、平成23年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による地殻変動に伴い、牡鹿半島全体で約1mの地盤沈下が発生したことを考慮し、地盤沈下量を考慮した敷地高さや施設高さ等を記載する。

2. 基本方針

2.1 位置

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の位置図を図2-1に示す。

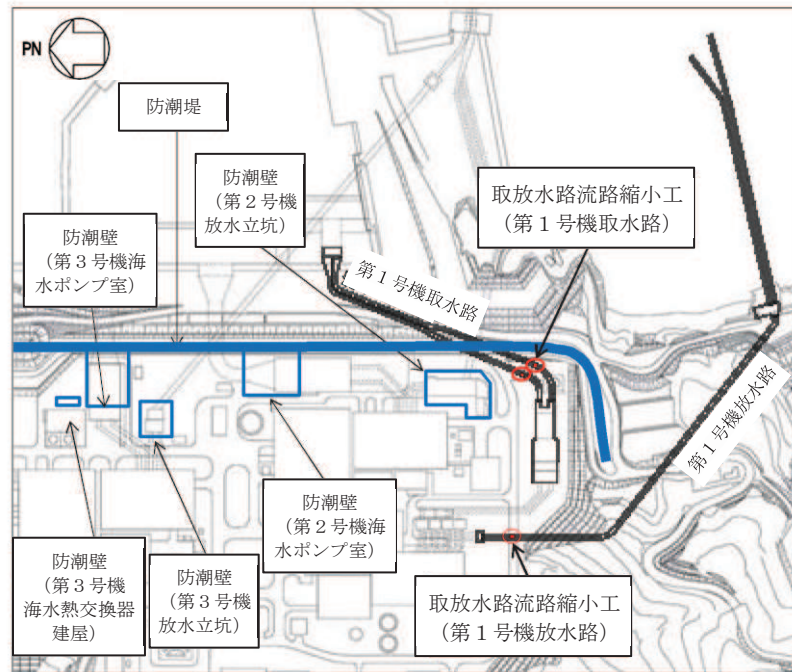



図2-1 取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の位置図（全体平面図）

2.2 構造概要

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の平面図及び断面図を図2-2に示す。

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）は、第1号機放水路からの津波の流入を抑制し、第1号機放水路から敷地への津波の流入を防止するため、第1号機放水路内に無筋のコンクリートを充填する。よって、取放水路流路縮小工（第1号機放水路）は、既設の第1号機放水路の覆工部（鉄筋コンクリート）と充填部（無筋コンクリート）から構成される。

第1号機の補機冷却海水を放水するため、貫通部（×1条）を設ける。

なお、本強度計算書では、充填部のB-B断面の幅を流路縮小工の幅とする。

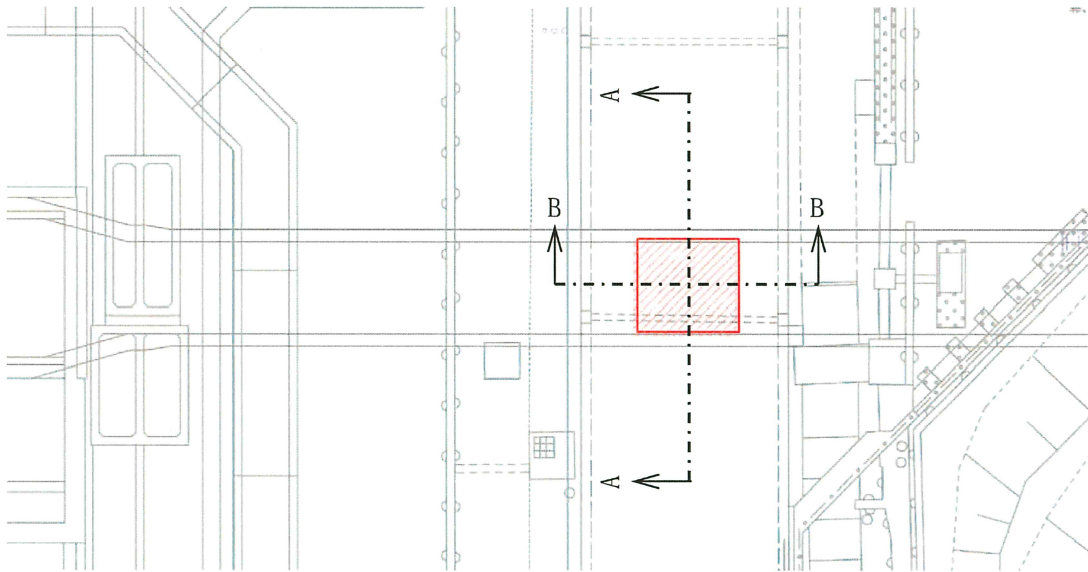


図2-2(1) 取放水路流路縮小工（第1号機放水路） 平面図

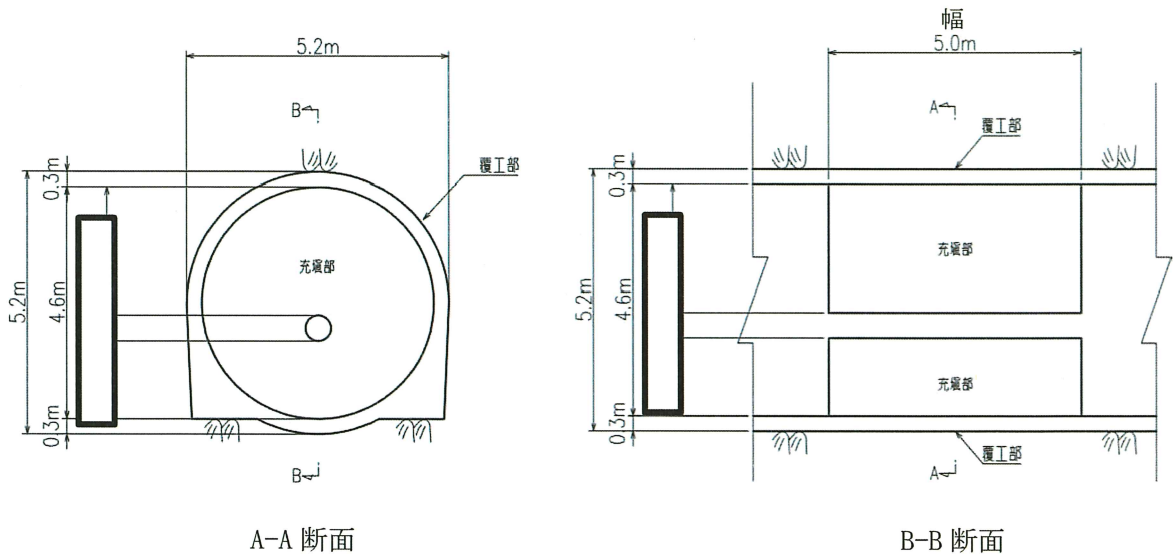


図2-2(2) 取放水路流路縮小工（第1号機放水路） 断面図

2.3 評価方針

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）は、Sクラス施設である津波防護施設に分類される。

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の強度評価においては、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定している方法を用いて、強度計算を実施する。なお、覆工部については、鉄筋コンクリート構造であるものの、充填部に対する覆工部の断面厚さ等が小さいことを踏まえ、強度評価においては、保守的に鉄筋に期待しないこととして、無筋コンクリートとして構造強度を評価する。また、強度評価においては、その構造を踏まえ、津波及び余震荷重の伝達過程を考慮し、評価対象部位を設定する。強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、津波に伴う荷重作用時（以下「津波時」という。）及び津波に伴う荷重と余震に伴う荷重作用時（以下「重畳時」という。）について行う。ただし、「重畳時」の津波荷重は「津波時」の津波荷重を用いていることから、「重畳時」が保守的な評価となることは明白であるため、「津波時」の検討は省略する。

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の強度評価は、縦断方向に作用する津波荷重及び余震荷重について、表 2-1 に示すとおり、せん断、滑動及び曲げに対する必要幅（必要閉塞長）が流路縮小工の幅以下であることを確認することにより、安定性を損なわないことを評価する。

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の強度評価フローを図 2-3 に示す。

表 2-1 取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の評価項目

評価方針	評価項目	部位	評価方法	流路縮小工の幅
安定性を損なわないこと	構造部材の安定性	流路縮小工	せん断、滑動及び曲げに対する必要幅が流路縮小工幅以下であることを確認	5.0m

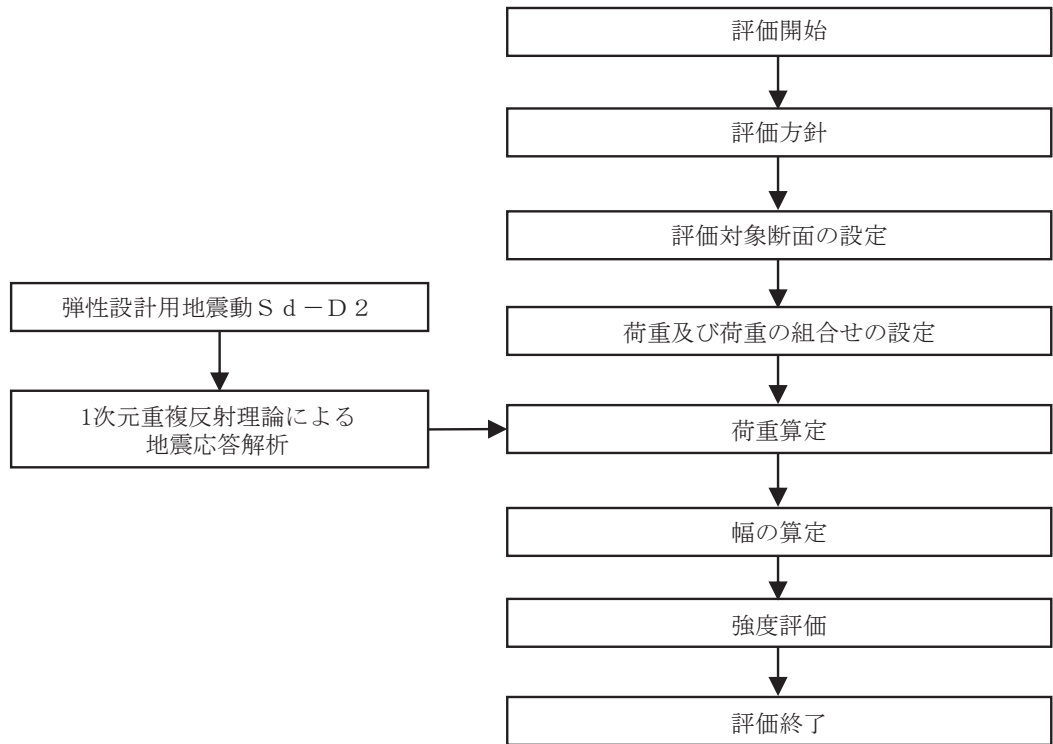


図 2-3 取放水路流路縮小工（第 1 号機放水路）の強度評価フロー

2.4 適用基準

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」 技術書〔コンクリートダム編〕（農林水産省 農村振興局，平成 15 年 4 月）
- ・コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕（土木学会，2002 年制定）
- ・コンクリート標準示方書〔設計編〕（土木学会，2017 年制定）
- ・コンクリート標準示方書〔ダムコンクリート編〕（土木学会，2013 年制定）
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会，平成 19 年 7 月）
- ・水門鉄管技術基準（水圧鉄管・鉄鋼構造物編）（水門鉄管技術協会，平成 29 年版）
- ・水理公式集（土木学会，2018 年版）

3. 強度評価方法

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の強度評価は、「2.3 評価方針」及び「3.2 荷重及び荷重の組合せ」において設定している荷重及び荷重の組合せ，並びに流路縮小工幅を踏まえて実施する。強度評価では，本章に示す方法により，「4. 強度評価」に示す評価条件を用いて評価し，「5. 強度評価結果」より，せん断，滑動及び曲げに対する必要幅が流路縮小工幅以下であることを確認する。

3.1 評価対象断面及び部位

3.1.1 評価対象断面

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の評価対象断面位置図を図3-1に示す。評価対象断面の地質図を図3-2に示す。

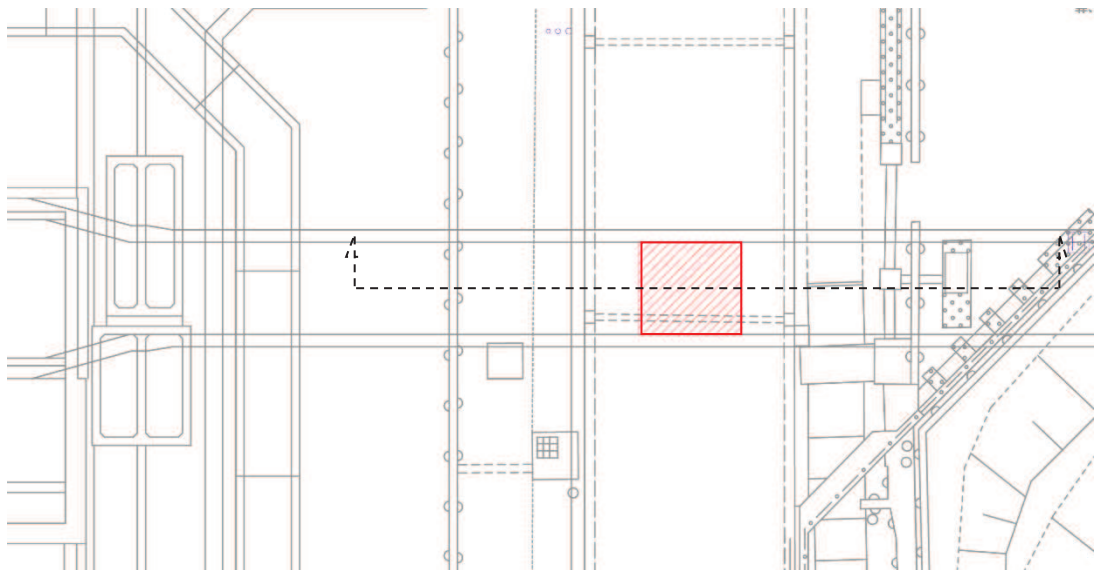


図3-1 取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の評価対象断面位置図

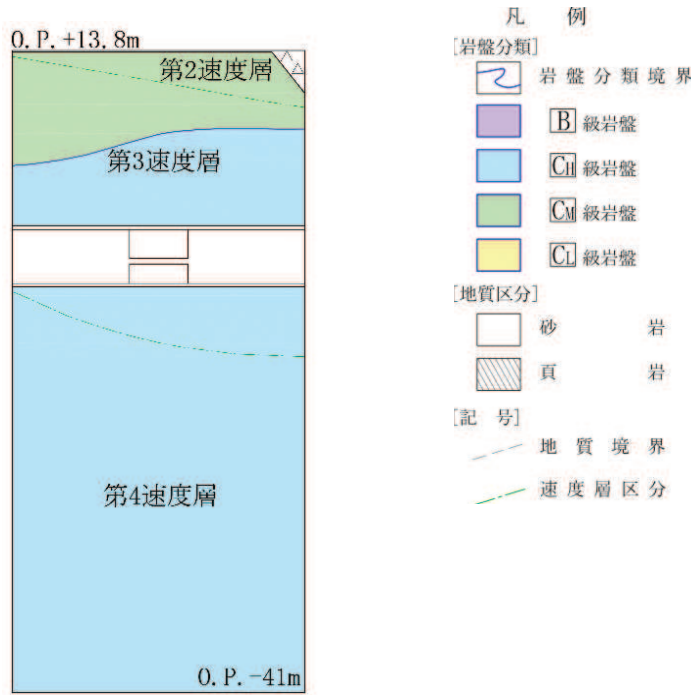


図 3-2 取放水路流路縮小工（第 1 号機放水路）の評価対象地質断面図

3.1.2 評価対象部位

評価対象部位は、構造部材の安定性が要求される流路縮小工とする。

3.2 荷重及び荷重の組合せ

強度計算に用いる荷重及び荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」にて示している荷重及び荷重の組合せを踏まえて設定する。

3.2.1 荷重

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の強度評価において、考慮する荷重を以下に示す。

(1) 固定荷重 (G)

固定荷重として、躯体自重を考慮する。

(2) 積載荷重 (P)

地表面に積載荷重 4.9 (kN/m²) を考慮する。

(3) 余震荷重 (K s d)

余震荷重は、弾性設計用地震動 S d - D 2 による慣性力及び動水圧を考慮する。

動水圧については、Westergaard の式により設定する。

(4) 浸水津波荷重 (P h)

a. 津波荷重 (静水圧) (P h s)

津波荷重については、設計用津波水位(入力津波による浸水高さ (O. P. +24.4m) に+0.5m の余裕を考慮した水位) に基づく静水圧を考慮する。

b. 流水圧 (P h f)

「港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会，平成 19 年 7 月）」に基づき以下の式により算定する。

$$Phf = \frac{1}{2} \times C_D \times \rho_0 \times A \times U^2$$

ここに、Phf : 流水圧 (kN)

C_D : 抗力係数 =2.01 (保守的に最大値とする)

ρ₀ : 水の密度 =1.03 (t/m³)

A : 流れの方向の物体の投影面積 (m²)

U : 流速 (m/s) *流路縮小工前面及び背面の最大流速を考慮して(10m/s)と設定

c. 推力 (P_{ht})

推力は「水門鉄管技術基準 (水圧鉄管・鉄鋼構造物編) (水門鉄管技術協会, 平成 29 年版)」に基づき以下の式により算定する。

$$P_{ht} = \frac{2fQ^2}{g\pi D^3} \times L$$

ここに, P_{ht} : 流水の摩擦による推力 (kN)

f : 流水の摩擦抵抗係数 (tf/m³)

$$f = 8gn^2 / \left(\frac{D_3}{4}\right)^{\frac{1}{3}}$$

D : 貫通部内径 (m)

L : 貫通部長さ (m)

Q : 流量 = v × A (m³/s)

A : 貫通部内断面積 (m²)

v : 貫通部内流速 (m/s) *流路縮小工貫通部の最大流速を考慮して(20m/s)と設定

n : 粗度係数 (コンクリート) 0.015 (m^{-1/3}s)

3.2.2 荷重の組合せ

荷重の組合せを表 3-1 に、荷重の作用図を図 3-3 に示す。

表 3-1 荷重の組合せ

外力の状態	荷重の組合せ
重畳時	$G + P + K_{sd} + P_h$

G : 固定荷重

P : 積載荷重 (4.9kN/m² を地表面に考慮)

K_{sd} : 余震荷重

P_h : 浸水津波荷重

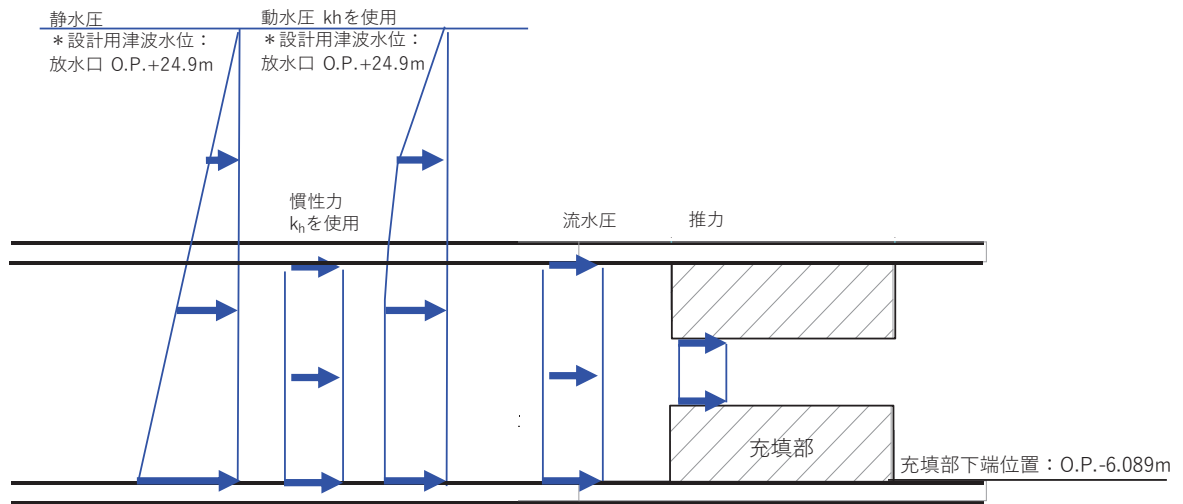


図 3-3 取放水路流路縮小工 (第 1 号機放水路) の荷重作用図

3.3 評価方法

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の強度評価は、添付書類「VI-3-別添 3-1 津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5.強度評価方法」に基づき実施する。

なお、強度評価は「2.3 評価方針」に示すとおり、「重畳時」について実施する。

3.3.1 解析方法

取放水路流路縮小工（第1号機放水路）の強度評価は、「土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」 技術書〔コンクリートダム編〕（農林水産省農村振興局，平成15年4月）」に基づき、評価を行う。

「3.2.2 荷重の組合せ」に基づく荷重を用いて、打設面のせん断強さからの必要閉塞長さ(L1)、滑動に対する必要閉塞長さ(L2)、周辺が固定の円板としての必要閉塞長さ(L3)をそれぞれ算定し、これらのすべてで満足する必要幅を算定して評価する。

なお、余震荷重算定に用いる設計水平震度は、1次元地震応答解析により算定する。

1次元地震応答解析は、解析コード「ArkQuake Ver. 3.10.01」を使用する。解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

3.3.2 設計水平震度の算定

(1) 地盤物性及び材料物性のばらつき

地盤は、添付書類「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」にて設定している物性値を使用する。

また、地盤物性のばらつきの影響を考慮するため、表3-2に示す解析ケースを設定する。

表 3-2 強度評価における解析ケース

解析ケース	材料物性 (コンクリート) (E_0 : ヤング係数)	地盤物性
		C_L 級岩盤, C_M 級岩盤, C_H 級岩盤, B 級岩盤 (G_d : 動せん断弾性係数)
ケース① (基本ケース)	設計基準強度	平均値
ケース②	設計基準強度	平均値 + 1 σ
ケース③	設計基準強度	平均値 - 1 σ

(2) 1次元地震応答解析

添付書類「VI-2-1-1 耐震設計の基本方針」のうち「4.1(2) 動的地震力」及び添付書類「VI-2-1-6 地震応答解析の基本方針」のうち「2.3 屋外重要土木構造物」に示す入力地震動の設定方針を踏まえて設定する。

設計水平震度の設定に用いる地震動は、解放基盤表面で定義される弾性設計用地震動 $S_d - D 2$ を1次元重複反射理論により流路縮小工の中心位置で評価したものをを用いる。なお、設計水平震度の設定に用いる地下構造モデルは、添付書類「VI-2-1-3 地盤の支持性能に係る基本方針」のうち「6.1 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1次元地震応答解析の概念図を、設計水平震度の設定に用いる弾性設計用地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトルを図 3-5 に示す。

入力地震動の算定には、解析コード「ArkQuake Ver. 3.10.01」を使用する。解析コードの検証及び妥当性確認の概要については、添付書類「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

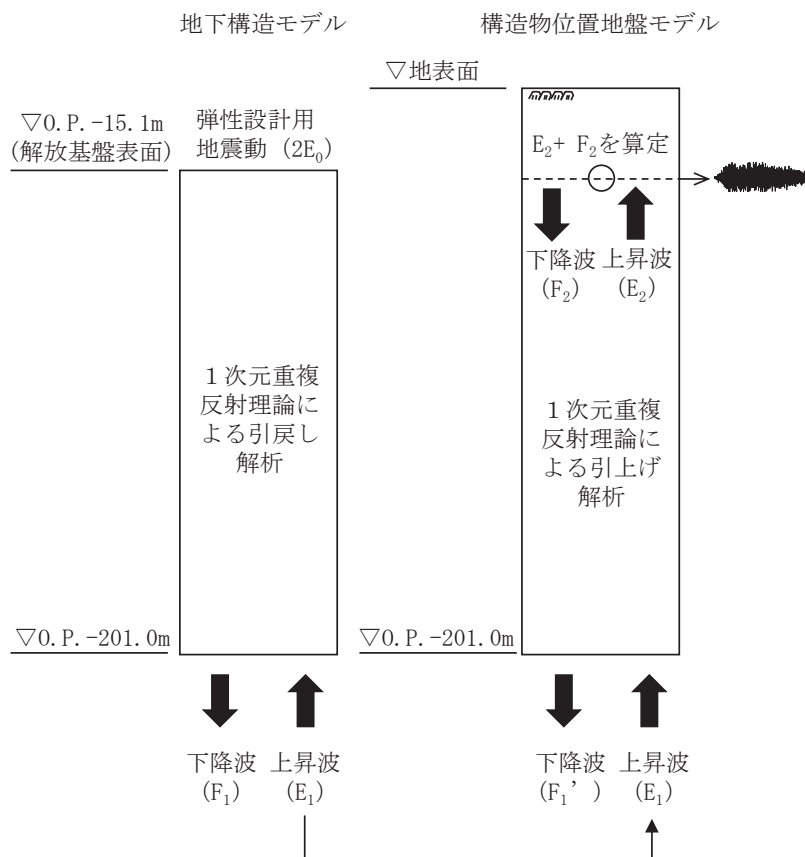
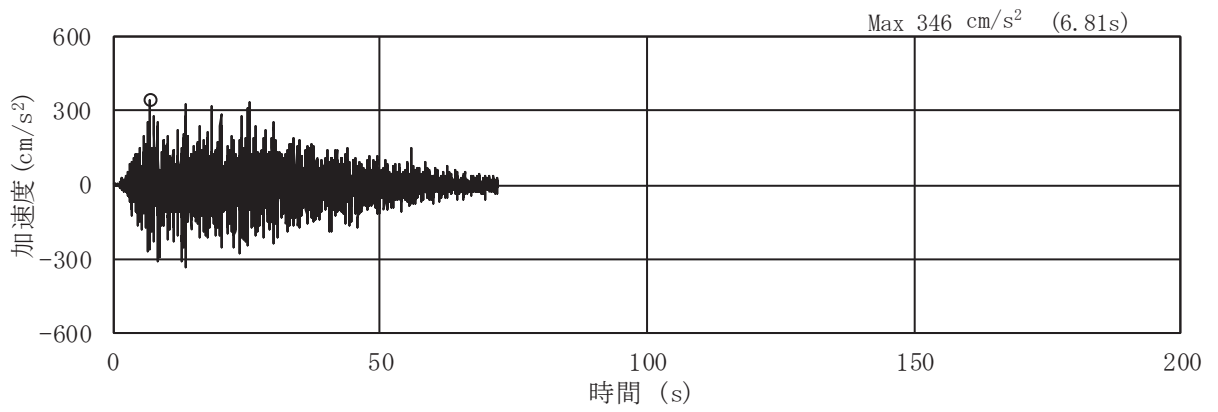
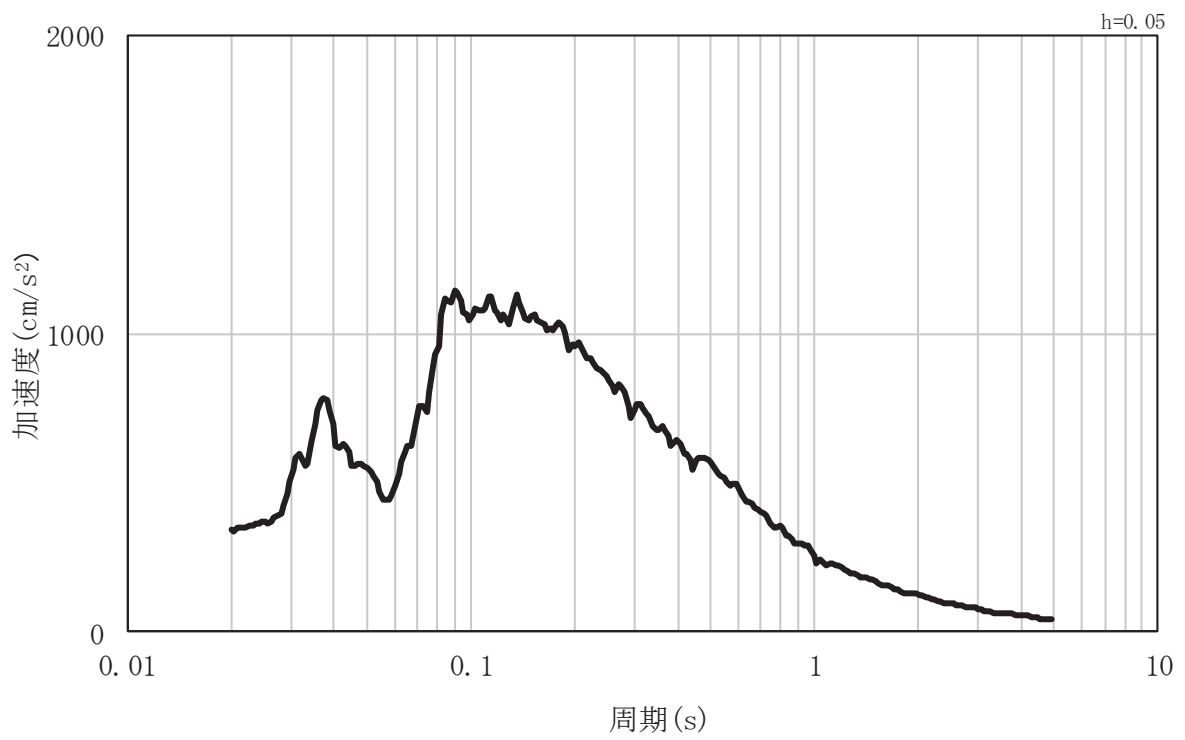


図 3-4 1次元地震応答解析の概念図



(a) 加速度時刻歴波形



(b) 加速度応答スペクトル

図 3-5 設計水平震度の設定に用いる地震動の加速度時刻歴波形及び加速度応答スペクトル

(3) 設計水平震度の算定

1次元地震応答解析結果から流路縮小工の中心位置での最大加速度を表 3-3 に示す。

ケース①が最も加速度が大きいため、この加速度を重力加速度で除して設計水平震度とする。

$$\text{設計水平震度 (kh)} = 346(\text{cm/s}^2) / 980.665(\text{cm/s}^2) = 0.353$$

表 3-3 1次元地震応答解析結果

	①	②	③
解析ケース	基本ケース	地盤剛性のばらつき (+1σ) を考慮した解析ケース	地盤剛性のばらつき (-1σ) を考慮した解析ケース
最大加速度 (cm/s ²)	346	339	339

3.3.3 評価方法

強度評価は、「土地改良事業計画設計基準 設計「ダム」 技術書〔コンクリートダム編〕（農林水産省農村振興局，平成 15 年 4 月）」に基づき，以下の 3 項目について算定した幅が「2.3 評価方針」で設定した流路縮小工幅以下であることを確認する。なお，せん断に対する安定性から算出する幅及び滑動に対する安定性から算出する幅の算定にあたっては，覆工部と充填部間でのせん断を想定した場合 L1(L2) と，覆工部と周辺岩盤間のせん断を想定した場合 L1'(L2') の 2 ケースで算定する。

(1) せん断に対する安定性から算出する幅

a. 覆工部と充填部間でのせん断を想定した場合 (L1)

$$L1 = \alpha \frac{P \cdot A}{\tau_c \cdot L_0}$$

ここに，L1 : せん断に対する安定性から算出する幅 (m)

α : 安全率 = 4

P : 作用荷重 (kN/m²)

A : 水路断面積 (m²)

τ_c : コンクリートのせん断強さ (kN/m²)

L₀ : 付着面の周長 (m)

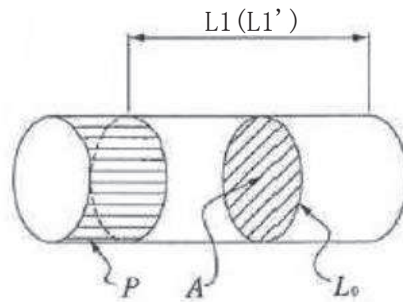


図 3-6 覆工部または充填部のせん断強さ

b. 覆工部と周辺岩盤間でのせん断を想定した場合 (L1')

$$L1' = \alpha \frac{P \cdot A}{\tau_r \cdot L_0}$$

ここに, L1' : せん断に対する安定性から算出する幅 (m)

α : 安全率 = 4

P : 作用荷重 (kN/m²)

A : 水路断面積 (m²)

τ_r : 岩盤のせん断強さ (kN/m²)

L₀ : 付着面の周長 (m)

(2) 滑動に対する安定性から算出する幅

a. 覆工部と充填部間での滑動を想定した場合 (L2)

$$L2 = n \frac{P \cdot A}{C_c A' + f_c N}$$

ここに, L2 : 滑動に対する安定性から算出する幅 (m)

n : せん断摩擦安全率 = 4

P : 作用荷重 (kN/m²)

A : 水路断面積 (m²)

C_c : コンクリートの付着力 (kN/m²) (せん断強度)

A' : 付着面の単位長さ当たりの面積 (m²/m)

f_c : コンクリートのせん断抵抗係数 (= tan φ)

N : コンクリート自重による単位長さ当たりの垂直荷重 (kN/m)

$$N = \pi W / (2D)$$

W : 単位長さ当たりの充填部の重量 (kN/m)

D : 充填部の直径 (m)

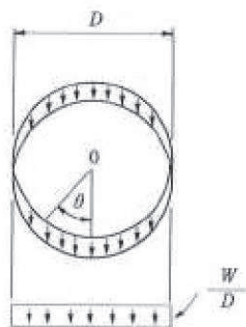


図 3-7 覆工部または充填部の周辺の全抵抗力

b. 覆工部と周辺岩盤間での滑動を想定した場合 (L2')

$$L2' = n \frac{P \cdot A}{C_r A' + f_r N'}$$

ここに, L2' : 滑動に対する安定性から算出する幅(m)

n : せん断摩擦安全率 = 4

P : 作用荷重 (kN/m²)

A : 水路断面積 (m²)

C_r : 岩盤の付着力 (kN/m²) (せん断強度)

A' : 付着面の単位長さ当たりの面積 (m²/m)

f_r : 岩盤のせん断抵抗係数 (= tan φ)

N' : コンクリート自重による単位長さ当たりの垂直荷重 (kN/m)

$$N' = \pi W' / (2D')$$

W' : 単位長さ当たりの充填部の重量 (kN/m)

D' : 覆工部の直径 (m)

(3) 曲げに対する安定性から算出する幅 (L3)

$$L_3 = \alpha \left(\frac{a}{2}\right) \sqrt{\frac{3P}{\sigma'}}$$

ここに, L3 : 曲げに対する安定性から算出する幅(m)

α : 安全率 = 1.5

a : 縮小工半径 (m)

P : 作用荷重 (kN/m²)

σ' : コンクリートの許容曲げ引張応力度 (kN/m²)

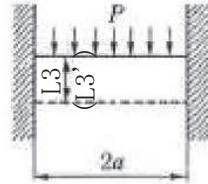
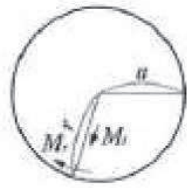


図 3-8 充填部を周辺固定円盤と仮定した場合の必要閉塞長

3.3.4 使用材料及び材料の物性値

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

表 3-4 構造物の使用材料

部位	材料	諸元
覆工部	コンクリート	設計基準強度： $f'_{ck}=20.5\text{N/mm}^2$
充填部	コンクリート	設計基準強度： $f'_{ck}=50.0\text{N/mm}^2$

表 3-5 材料の物性値

分類	せん断強度 (τ_0, C)	内部摩擦角 (ϕ)	許容曲げ引張応力度 (σ')
岩盤 (C _H 級)	1.72N/mm^2 *1	43° *1	—
覆工部	4.10N/mm^2 *2	0° *3	0.28N/mm^2 *4
充填部	10.0N/mm^2 *2	0° *3	0.43N/mm^2 *4

注記 *1：解析用物性値（狐崎部層の C_H級岩盤の値を採用）

*2：コンクリート標準示方書 [ダムコンクリート編]（土木学会，2013 年制定）に基づき設定

*3：保守的に考慮しないこととする

*4：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]（土木学会，2002 年制定），コンクリート標準示方書 [設計編]（土木学会，2017 年制定）に基づき設定

4. 強度評価

4.1 荷重算出

浸水津波荷重として静水圧、流水圧及び推力を、余震荷重として慣性力及び動水圧を算出する。

4.1.1 浸水津波荷重の算出

静水圧 P1 の算出

$$P 1 = \rho_0 g h = 1.03 \times 9.80665 \times (24.9 - (-6.089)) = 313.1 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

ここに、 ρ_0 : 海水の密度 = 1.03 (t/m³)

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

h : 充填部下端における水深 = $h_1 - h_2$ (m)

h_1 : 設計用津波水位 (O. P.) = 24.9 (m)

h_2 : 充填部下端位置 (O. P.) = -6.089 (m)

流水圧 P2 の算出

流水圧は、「港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会，平成 19 年 7 月）」に基づき算定する。

$$P 2 = \frac{1}{2} \times C_d \times \rho_0 \times A_1 \times U^2 = \frac{1}{2} \times 2.01 \times 1.03 \times 16.6 \times 10^2 = 1718.4 \text{ (kN)}$$

ここに、 C_d : 抗力係数 = 2.01 (保守的に最大値とする)

ρ_0 : 海水の密度 = 1.03 (t/m³)

$$A_1 : \text{充填部の断面積 (m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{\pi \times 4.6^2}{4} = 16.6 \text{ (m}^2\text{)}$$

D_1 : 充填部直径 = 4.6 (m)

U : 流速 = 10 (m/s)

(流路縮小工前面及び背面の最大流速を考慮して設定)

推力 P5 の算出

推力は、「水門鉄管技術基準（水圧鉄管・鉄鋼構造物編）（水門鉄管技術協会，平成 29 年版）」に基づき算定する。なお，推力算定に用いる流水の摩擦抵抗係数 (f) は、「水理公式集（土木学会，2018 年版）」に基づき算定する。

$$P 5 = \frac{2 f Q^2}{g \pi D_3} \times L = \frac{2 \times 8 g n^2 / \left(\frac{D_3}{4} \right)^{\frac{1}{3}} \times (v \times A_3)^2}{g \pi D_3} \times L$$

$$= \frac{2 \times 8 \times 9.80665 \times 0.015^2 / \square}{9.80665 \times \pi \square} \times (20 \times \square)^2 \times 5.0 \square$$

ここに、 f : 流水の摩擦抵抗係数 (tf/m³)

$$f = 8 g n^2 / \left(\frac{D_3}{4} \right)^{\frac{1}{3}}$$

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

n : 充填部の粗度係数 = 0.015 (m^{-1/3}s)

D_3 : 貫通部直径 \square

Q : 流量 = $v \times A_3$ (m³/s)

v : 流速 = 20 (m/s)

(流路縮小工貫通部の最大流速を考慮して設定)

$$A_3 : \text{充填部貫通部の断面積 (m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_3^2}{4} = \square$$

4.1.2 余震荷重の算出

慣性力 P3 の算出

$$P_3 = k_h W = k_h \times \gamma \times A_1 \times L = 0.353 \times 23.0 \times 16.6 \times 5.0 = 673.9 \text{ (kN)}$$

ここに、 k_h : 設計水平震度

γ : 充填部の単位体積重量 = 23.0 (kN/m³)

$$A_1 : \text{充填部の断面積 (m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{\pi \times 4.6^2}{4} = 16.6 \text{ (m}^2\text{)}$$

L : 充填部幅 = 5.0 (m)

D_1 : 充填部直径 = 4.6 (m)

動水圧 P4 の算出

$$P_4 = \frac{7}{8} \times k_h \times \rho_0 \times g \times \sqrt{h^2} = \frac{7}{8} \times 0.353 \times 1.03 \times 9.80665 \times \sqrt{\{24.9 - (-6.089)\}^2}$$

$$= 96.7 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

ここに、 k_h : 設計水平震度

ρ_0 : 海水の密度 = 1.03 (t/m³)

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

h : 充填部下端における水深 = $h_1 - h_2$ (m)

h_1 : 設計用津波水位 (O.P.) = 24.9 (m)

h_2 : 充填部下端位置 (O.P.) = -6.089 (m)

4.2 強度評価

4.2.1 せん断に対する安定性から算出する幅

(1) 充填部と覆工部でのせん断を想定した場合 (L1)

$$L1 = \alpha \frac{P \cdot A}{\tau_c \cdot L_0} = \alpha \frac{(P1 \times A_1 + P2 + P3 + P4 \times A_1 + P5)}{\tau_c \cdot L_0}$$

$$= 4 \times \frac{(313.1 \times 16.6 + 1718.4 + 673.9 + 96.7 \times 16.6 + \boxed{})}{4100 \times 14.45} = \boxed{}$$

ここに、 α : 安全率=4

$$A_1 : \text{充填部の断面積(m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{\pi \times 4.6^2}{4} = 16.6 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$D_1 : \text{充填部直径} = 4.6 \text{ (m)}$$

$$\tau_c : \text{覆工部せん断強度} = 4100 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$L_0 : \text{充填部周長} = \pi \times D_1 = \pi \times 4.6 = 14.45 \text{ (m)}$$

(2) 覆工部と周辺岩盤間でのせん断を想定した場合 (L1')

$$L1' = \alpha \frac{P \cdot A}{\tau_r \cdot L_0'} = \alpha \frac{(P1 \times A_1 + P2 + P3 + P4 \times A_1 + P5)}{\tau_r \cdot L_0'}$$

$$= 4 \times \frac{(313.1 \times 16.6 + 1718.4 + 673.9 + 96.7 \times 16.6 + \boxed{})}{1720 \times 16.34} = \boxed{}$$

ここに、 α : 安全率=4

$$A_1 : \text{充填部の断面積(m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_1^2}{4} = \frac{\pi \times 4.6^2}{4} = 16.6 \text{ (m}^2\text{)}$$

$$D_1 : \text{充填部直径} = 4.6 \text{ (m)}$$

$$\tau_r : \text{岩盤のせん断強度} = 1720 \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$L_0' : \text{流路縮小工全体の周長} = \pi \times D_2 = \pi \times 5.2 = 16.34 \text{ (m)}$$

$$D_2 : \text{流路縮小工全体の直径} = 5.2 \text{ (m)}$$

4.2.2 滑動に対する安定性から算出する幅

(1) 充填部と覆工部間での滑動を想定した場合 (L2)

$$L2 = n \frac{P \cdot A}{C_c A + f_c N} = n \frac{(P1 \times A_1 + P2 + P3 + P4 \times A_1 + P5)}{C_c \times \pi \times D_1 + \tan \phi \times (\pi \times \frac{\gamma \times A_1}{D_1})}$$

$$=4 \times \frac{(313.1 \times 16.6 + 1718.4 + 673.9 + 96.7 \times 16.6 + \boxed{})}{4100 \times \pi \times 4.6 + 0 \times (\pi \times \frac{23.0 \times 16.6}{4.6})} = \boxed{}$$

ここに、n : 安全率=4

C_c : 充填部の付着力=4100 (kN/m²)

D_1 : 充填部直径=4.6 (m)

ϕ : 充填部内部摩擦角=0(°)

γ : 充填部の単位体積重量=23.0 (kN/m³)

$$A_1 : \text{充填部の断面積(m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_1^2}{4} \boxed{}$$

(2) 覆工部と周辺岩盤間での滑動を想定した場合 (L2')

$$L2' = n \frac{P \cdot A}{C_r A + f_r N} = n \frac{(P1 \times A_1 + P2 + P3 + P4 \times A_1 + P5)}{C_r \times \pi \times D_2 + \tan \phi' \times (\pi \times \frac{\gamma \times A_2}{D_2})}$$

$$=4 \times \frac{(313.1 \times 16.6 + 1718.4 + 673.9 + 96.7 \times 16.6 + \boxed{})}{1720 \times \pi \times 5.2 + 0.93 \times (\pi \times \frac{23.0 \times 21.2}{5.2})} = \boxed{}$$

ここに、n : 安全率=4

C_r : 岩盤の付着力=1720 (kN/m²)

D_2 : 流路縮小工全体直径=5.2 (m)

ϕ' : 岩盤の内部摩擦角=43(°)

γ : 充填部及び覆工部の単位体積重量=23.0 (kN/m³)

$$A_2 : \text{流路縮小工全体の断面積(m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_2^2}{4} = \frac{\pi \times 5.2^2}{4} = 21.2 \text{ (m}^2\text{)}$$

4.2.3 曲げに対する安定性から算出する幅 (L3)

$$L3 = \alpha \left(\frac{a}{2} \right) \sqrt{\frac{3P}{\sigma}} = \alpha \left(\frac{a}{2} \right) \sqrt{\frac{3 \times \left(P1 + \frac{P2}{A_1} + \frac{P3}{A_1} + P4 + \frac{P5}{A_3} \right)}{\sigma}}$$

$$= 1.5 \times \left(\frac{2.30}{2} \right) \times \sqrt{\frac{3 \times \left(313.1 + \frac{1718.4}{16.6} + \frac{673.9}{16.6} + 96.7 + \boxed{} \right)}{430}} = \boxed{}$$

ここに、 α : 安全率=1.5 (保守的に 1.5 とする)

$$a : \frac{D_1}{2} = \frac{4.6}{2} = 2.30 \text{ (m)}$$

D_1 : 充填部直径=4.6 (m)

σ' : コンクリートの許容曲げ引張応力度 430 (kN/m²)

$$A_3 : \text{充填部貫通部の断面積(m}^2\text{)} = \frac{\pi \times D_3^2}{4} = \boxed{}$$

D_3 : 貫通部直径=

5. 強度評価結果

算出した必要幅が，流路縮小工幅以下であることを確認した。

照査結果を表 5-1 に示す。

表 5-1 照査結果

項 目	必要幅 (m) (a)	流路縮小工幅 (m) (b)	照査値 (a / b)
せん断に対する安定性から算出する幅 覆工部と充填部間でのせん断を想定した 場合 (L 1)		5.00	
せん断に対する安定性から算出する幅 覆工部と周辺岩盤間でのせん断を想定 した場合 (L 1')		5.00	
滑動に対する安定性から算出する幅 覆工部と充填部間での滑動を想定した 場合 (L 2)		5.00	
滑動に対する安定性から算出する幅 覆工部と周辺岩盤間での滑動を想定し た場合 (L 2')		5.00	
曲げに対する安定性から算出する幅 (L 3)		5.00	