

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添3-015-06
提出年月日	2022年12月7日

VI-3-別添 3-2-3 1号機取水槽流路縮小工の強度計算書

2022年12月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

## 目 次

1. 概要	1
2. 一般事項	2
2.1 配置概要	2
2.2 構造計画	4
2.3 評価方針	5
2.4 適用規格・基準等	6
2.5 記号の説明	7
3. 評価対象部位	10
4. 構造強度評価	11
4.1 構造強度評価方法	11
4.2 荷重及び荷重の組合せ	11
4.2.1 荷重の組合せ	11
4.2.2 荷重の設定	12
4.2.3 荷重の算定	15
4.2.4 荷重の選定	18
4.3 許容限界	19
4.3.1 使用材料	19
4.3.2 許容限界	19
4.4 評価方法	20
4.4.1 縮小板	20
4.4.2 固定ボルト	23
4.4.3 取水管（フランジ部）	24
4.5 評価条件	26
5. 評価結果	27
5.1 流路縮小工の評価結果	27

## 1. 概要

本資料は、VI-3-別添 3-1-1「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、1号機取水槽流路縮小工（以下「流路縮小工」という。）が地震後の繰返しの来襲を想定した経路からの津波の流入に伴う津波荷重及び余震による荷重に対し、鋼製部材で構成し、地震後、津波後の再使用性を考慮し、主要な構造部材が構造健全性を保持することを確認するものである。

## 2. 一般事項

### 2.1 配置概要

流路縮小工は、1号機取水槽と1号機取水管の境界部に設置し、1号機取水槽北側壁に間接支持される構造とする。

流路縮小工の設置位置図を図2-1に、流路縮小工の詳細位置図を図2-2に示す。

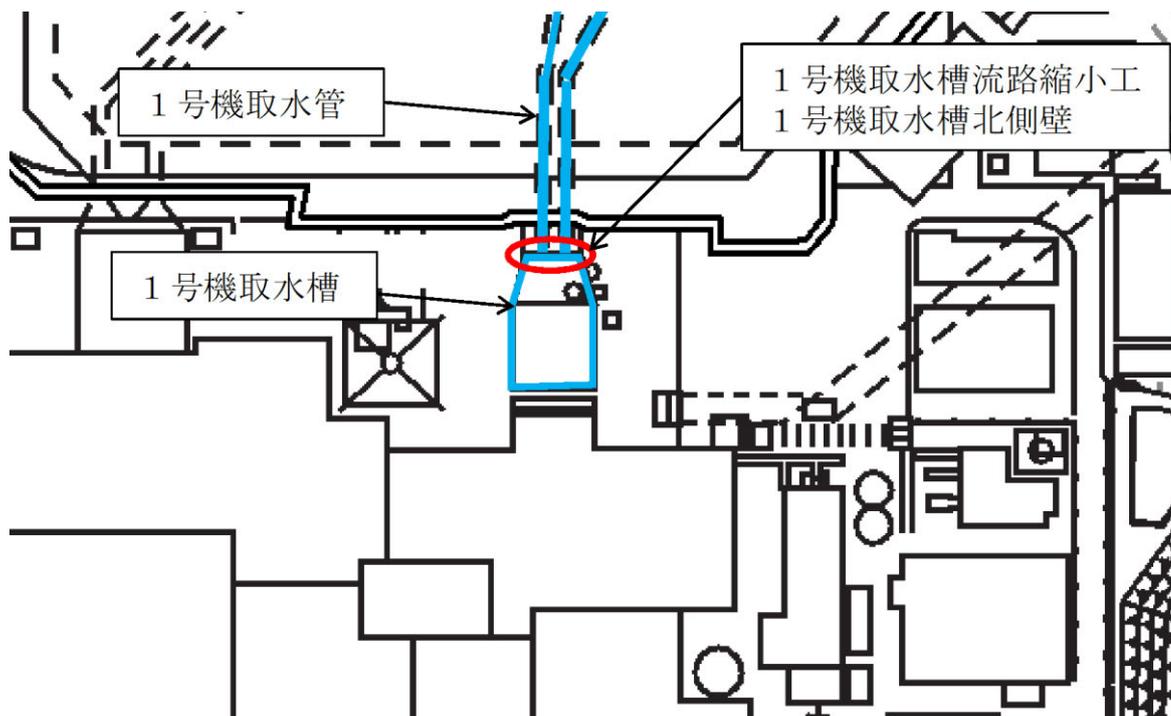
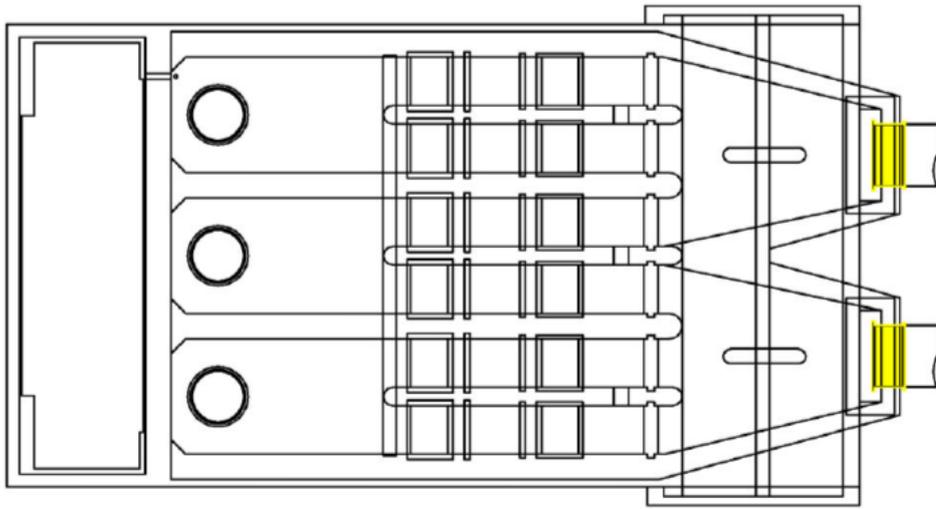
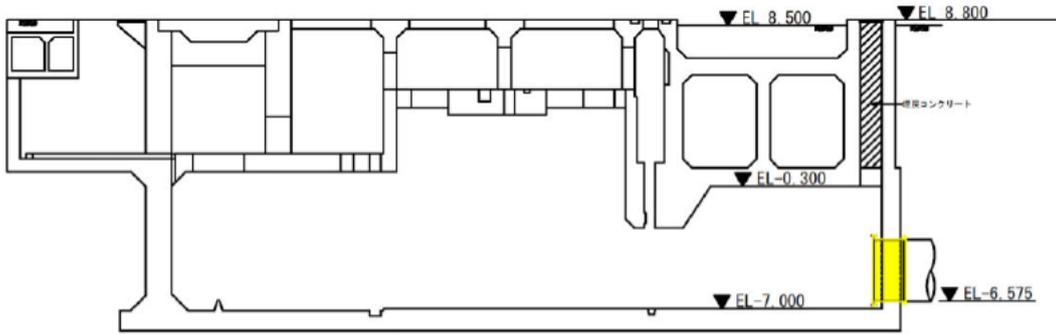


図2-1 流路縮小工設置位置図



平面図



縦断面図

(単位：m)



図 2-2 流路縮小工の詳細位置図

## 2.2 構造計画

流路縮小工は、1号機取水管の終端部のフランジに、鋼製の縮小板を取付板及び固定ボルトにより固定する構造とする。なお、1号機の原子炉補機海水ポンプに必要な海水を取水するため、縮小板に直径□mの開口部を設ける。

流路縮小工の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 流路縮小工の構造計画

計画の概要		構造概略図
基礎・支持構造	主体構造	
1号機取水管の終端部のフランジに、鋼製の縮小板を取付板及び固定ボルトにより固定する。	1号機取水管の終端部並びに縮小板、取付板及び固定ボルトにより構成する。	<p style="text-align: center;"><b>組立図</b></p> <p style="text-align: center;"><b>縮小板</b></p> <p style="text-align: right;">(単位：m)</p>

### 2.3 評価方針

流路縮小工の強度評価は、VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定した荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「2.2 構造計画」に示す流路縮小工の構造を踏まえ、「3. 評価対象部位」にて設定する評価部位において、「4.4 評価方法」で算出した応力が許容限界内に収まることを、「4. 構造強度評価」に示す方法にて確認する。強度評価の結果を「5. 評価結果」にて確認する。

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、地震後の繰返しの来襲を想定した経路からの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。）を考慮し、評価される最大荷重を設定する。

強度評価フローを図 2-3 に示す。

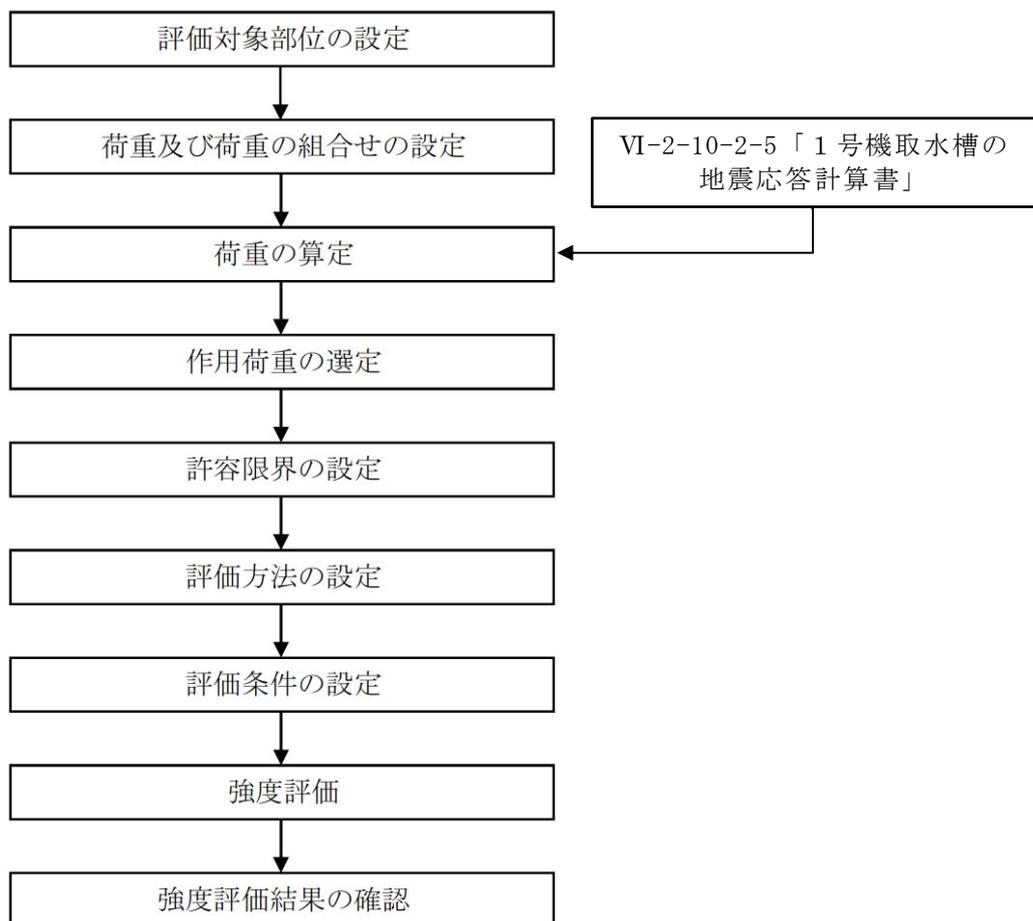


図 2-3 強度評価フロー

## 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 (日本電気協会)
- ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル (土木学会, 2005 年)
- ・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)
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説 ( (社) 日本港湾協会, H19 年版)
- ・鋼構造設計規準—許容応力度設計法— (日本建築学会, 2005 年改訂)
- ・構造力学公式集 (土木学会, 1986 年)
- ・水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編 (水門鉄管協会, 2007 年)

## 2.5 記号の説明

流路縮小工の強度評価に用いる記号を表 2-2～表 2-5 にそれぞれ示す。

表 2-2 流路縮小工の荷重の計算に用いる記号

記号	単位	定義
G	kN	固定荷重
P	kN	浸水津波荷重
$K_{sd}$	kN	余震荷重
$F_h$	kN	静水圧
$\gamma_w$	kN/m <sup>3</sup>	海水の単位体積重量
$\Delta h$	m	上下流の水位差
A	m <sup>2</sup>	縮小板の面積
$F_d$	kN	抗力
$\rho_0$	kN/m <sup>3</sup>	密度
$C_D$	—	抗力係数
v	m/s	流速
$P_{ht}$	kN	摩擦による推力
f	—	流水の摩擦抵抗係数
D	m	貫通部直径
L	m	貫通部長さ
Q	m <sup>3</sup> /s	流量
A'	m <sup>2</sup>	貫通部内空断面積
g	m/s <sup>2</sup>	重力加速度
$P_h$	kN	慣性力
W	kN	重量
$K_h$	—	弾性設計用地震動 S d-D による水平方向の余震震度
$P_{dw}$	kN	動水圧
C	—	補助係数
$Z_{dw}$	m	水深
$z_{dw}$	m	水面から動水圧を求める点までの深さ

表 2-3 流路縮小工の縮小板の強度計算に用いる記号

記号	単位	定義
$p_0$	kN/mm <sup>2</sup>	縮小板に作用する単位面積当たりの等分布荷重
$P_J$	kN	縮小板に作用する重畳時荷重
$A_{11}$	mm <sup>2</sup>	縮小板の荷重作用面積
$a_1$	mm	縮小板の外半径
$b_1$	mm	縮小板の内半径
$M_{r1}$	kN・mm/mm	縮小板に作用する半径方向の曲げモーメント
$M_{\theta 1}$	kN・mm/mm	縮小板に作用する周方向の曲げモーメント
$\nu$	—	ポアソン比
$\kappa_1$	—	係数 ( $=\beta_1^2\{(1-\nu)\beta_1^2+(1+\nu)(1+4\beta_1^2\ln\beta_1)\}/\{1-\nu+(1+\nu)\beta_1^2\}$ )
$\beta_1$	—	係数 ( $=b_1/a_1$ )
$\rho_1$	—	係数 ( $=r_1/a_1$ )
$r_1$	mm	縮小板の中心から半径方向の距離
$\sigma_1$	kN/mm <sup>2</sup>	縮小板に作用する最大曲げ応力度
$Z_1$	mm <sup>3</sup>	縮小板の断面係数
$t_1$	mm	縮小板の板厚
$\tau_1$	kN/mm <sup>2</sup>	縮小板に作用する最大せん断応力度
$S_1$	kN	縮小板に作用するせん断力
$A_{12}$	mm <sup>2</sup>	縮小板の有効せん断面積

表 2-4 流路縮小工の固定ボルトの強度計算に用いる記号

記号	単位	定義
$\sigma_2$	kN/mm <sup>2</sup>	固定ボルトに作用する最大応力度
$T$	kN	固定ボルトに作用する引張力
$P_J$	kN	固定ボルトに作用する重畳時荷重
$A_{21}$	mm <sup>2</sup>	固定ボルトの有効断面積の合計
$n$	本	固定ボルトの本数
$A_{22}$	mm <sup>2</sup>	固定ボルト 1 本の有効断面積

表 2-5 流路縮小工の取水管（フランジ部）の強度計算に用いる記号

記号	単位	定義
$P'$	kN/mm	取水管（フランジ部）に作用する単位長さ当たりの等分布荷重
$P_J$	kN	取水管（フランジ部）に作用する重畳時荷重
$L_f$	mm	取水管（フランジ部）の外周長
$b_f$	mm	取水管（フランジ部）の外半径
$M_{rf}$	kN・mm/mm	取水管（フランジ部）に作用する半径方向の曲げモーメント
$M_{\theta f}$	kN・mm/mm	取水管（フランジ部）に作用する周方向の曲げモーメント
$a_f$	mm	取水管（フランジ部）の内半径
$\nu$	—	ポアソン比
$\kappa_f$	—	係数 ( $=\beta_f^2 \{1+(1+\nu) \ln \beta_f\} / \{1-\nu+(1+\nu) \beta_f^2\}$ )
$\beta_f$	—	係数 ( $=b_f/a_f$ )
$\rho_f$	—	係数 ( $=r_f/a_f$ )
$r_f$	mm	取水管（フランジ部）の中心から半径方向の距離
$\sigma_f$	kN/mm <sup>2</sup>	取水管（フランジ部）に作用する最大曲げ応力度
$Z_f$	mm <sup>3</sup>	取水管（フランジ部）の断面係数
$t_f$	mm	取水管（フランジ部）の板厚
$\tau_f$	kN/mm <sup>2</sup>	取水管（フランジ部）に作用する最大せん断応力度
$S_f$	kN	取水管（フランジ部）に作用するせん断力
$A_3$	mm <sup>2</sup>	取水管（フランジ部）付け根の断面積
$D_i$	mm	取水管（フランジ部）の管内径
$t_p$	mm	取水管（管胴部）の管厚
$l_f$	mm	取水管（フランジ部）付け根の周長

3. 評価対象部位

流路縮小工の評価対象部位は、「2.2 構造計画」に設定している構造を踏まえて、津波時荷重又は重畳時荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定する。

評価対象部位を図 3-1 に示す。

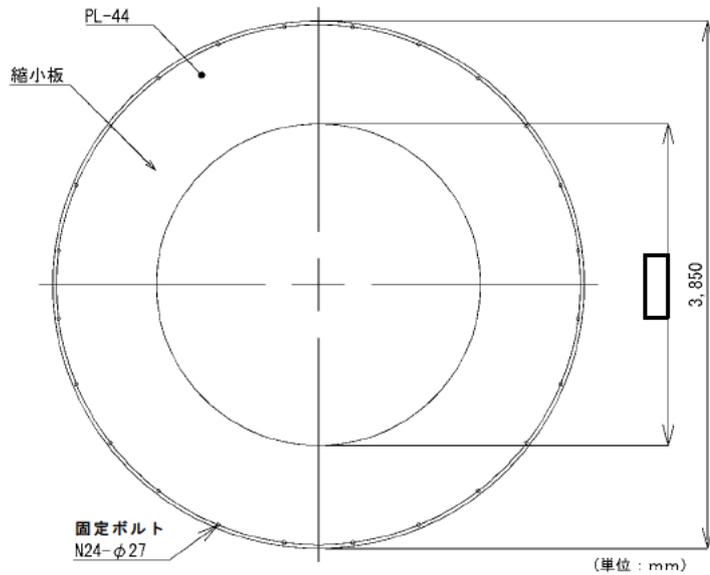


図 3-1(1) 評価対象部位 (縮小板)

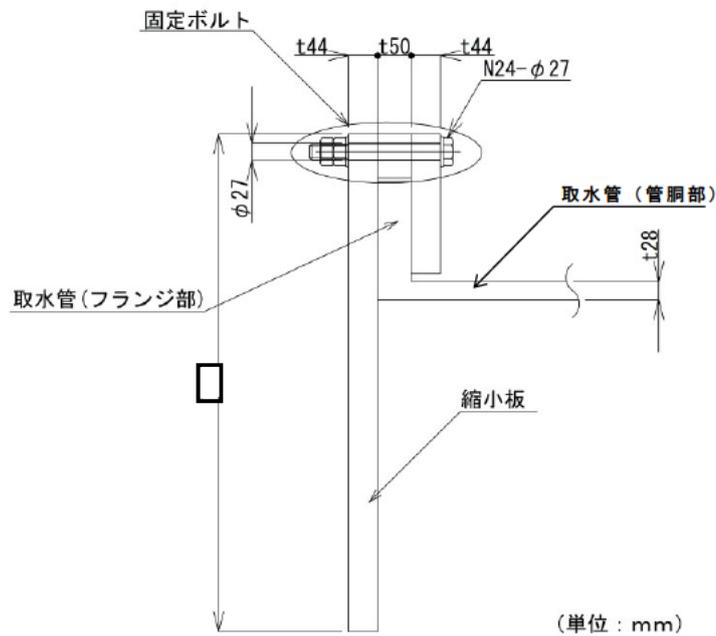


図 3-1(2) 評価対象部位 (縮小板, 固定ボルト及び取水管 (フランジ部))

## 4. 構造強度評価

### 4.1 構造強度評価方法

流路縮小工の強度評価は、VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、「3. 評価対象部位」にて設定する評価対象部位に作用する応力が「4.3 許容限界」にて示す許容限界以下であることを確認する。

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、地震後の繰返しの来襲を想定した経路からの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。）を考慮し、評価される最大荷重を設定する。

### 4.2 荷重及び荷重の組合せ

#### 4.2.1 荷重の組合せ

流路縮小工の評価に用いる荷重の組合せを選定するため、津波時及び重畳時の荷重の組合せを下記に示す。

##### (1) 津波時

$$G + P$$

ここで、G：固定荷重 (kN)

P：浸水津波荷重 (kN)

##### (2) 重畳時

$$G + P + K_{sd}$$

ここで、G：固定荷重 (kN)

P：浸水津波荷重 (kN)

$K_{sd}$ ：余震荷重 (kN)

#### 4.2.2 荷重の設定

強度評価に用いる荷重は以下のとおりとする。

##### (1) 固定荷重 (G)

固定荷重として、流路縮小工を構成する部材の自重を考慮する。

##### (2) 浸水津波荷重 (P)

浸水津波荷重はVI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、静水圧、抗力及び推力を考慮する。

###### a. 静水圧 ( $F_h$ )

流路縮小工の上下流の水位差を考慮した静水圧を考慮することとし、以下の式により算定する。上下流の水位差は、2条の取水管毎の取水口と取水槽の水位差の内、水位差が大きい方を設定する。

$$F_h = \gamma_w \times \Delta h \times A$$

ここで、 $F_h$  : 静水圧 (kN)

$\gamma_w$  : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m<sup>3</sup>)

$\Delta h$  : 上下流の水位差 (m)

A : 縮小板の面積 (m<sup>2</sup>)

###### b. 抗力 ( $F_d$ )

抗力は「港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会，2007年）」に基づき、以下の式により算定する。

$$F_d = \frac{1}{2} \times \rho_0 \times C_D \times A \times v^2$$

ここで、 $F_d$  : 抗力 (kN)

$\rho_0$  : 密度 (=1.03t/m<sup>3</sup>)

$C_D$  : 抗力係数 (=2.01)

A : 縮小板の面積 (m<sup>2</sup>)

v : 流速 (m/s)

c. 摩擦による推力 ( $P_{ht}$ )

摩擦による推力は「水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編（水門鉄管協会，2007年）」に基づき，以下の式により算定する。

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

ここで， $P_{ht}$ ：摩擦による推力（kN）

$f$ ：流水の摩擦抵抗係数（ $=0.2 \cdot D^{-1/3}$ ）

$D$ ：貫通部直径（m）

$L$ ：貫通部長さ（m）

$Q$ ：流量（ $=v \times A'$ ）（ $m^3/s$ ）

$A'$ ：貫通部内空断面積（ $=\pi \times D^2/4$ ）（ $m^2$ ）

$v$ ：流速（m/s）

$g$ ：重力加速度（ $=9.80665m/s^2$ ）

(3) 余震荷重 ( $K_{sd}$ )

余震荷重として，VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり，弾性設計用地震動 S d-D に伴う慣性力及び動水圧荷重を考慮するものとする。

なお，荷重の算定に用いる余震震度は，VI-2-10-2-5「1号機取水槽の地震応答計算書」の地震応答解析結果を用いる。

a. 慣性力 ( $P_h$ )

慣性力は，流路縮小工の重量に余震震度を乗じた次式により算出する。

$$P_h = W \times K_h$$

ここで， $P_h$ ：慣性力（kN）

$W$ ：重量（kN）

$K_h$ ：弾性設計用地震動 S d-D による水平方向の余震震度

b. 動水圧 (P<sub>dw</sub>)

動水圧は、以下の Westergaard の式により算定する。

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} \times C \times K_h \times \gamma_w \times \sqrt{Z_{dw} \times z_{dw}}$$

ここで、P<sub>dw</sub> : 動水圧 (kN)

C : 補助係数 (=1.0)

K<sub>h</sub> : 弾性設計用地震動 S<sub>d</sub>-D による水平方向の余震震度

γ<sub>w</sub> : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m<sup>3</sup>)

Z<sub>dw</sub> : 水深 (m)

z<sub>dw</sub> : 水面から動水圧を求める点までの深さ (m)

4.2.3 荷重の算定

(1) 静水圧 (F<sub>h</sub>)

$$F_h = \gamma_w \times \Delta h \times A$$

ここで, F<sub>h</sub> : 静水圧 (kN)

γ<sub>w</sub> : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m<sup>3</sup>)

Δh : 上下流の水位差 (m)

A : 縮小板の面積 (m<sup>2</sup>)

表 4-1 静水圧による荷重

項 目		単 位	津波時	重畳時
取水槽水位	—	m	EL 0.03	EL -1.32
取水口水位	—	m	EL 8.49	EL 1.03
上下流の水位差	Δh	m	8.46	2.35
縮小板の面積	A	m <sup>2</sup>	7.304	7.304
静水圧による荷重	F <sub>h</sub>	kN	624	173

(2) 抗力 (F<sub>d</sub>)

$$F_d = \frac{1}{2} \times \rho_0 \times C_D \times A \times v^2$$

ここで, F<sub>d</sub> : 抗力 (kN)

ρ<sub>0</sub> : 密度 (=1.03t/m<sup>3</sup>)

C<sub>D</sub> : 抗力係数 (=2.01)

A : 縮小板の面積 (m<sup>2</sup>)

v : 流速 (m/s)

表 4-2 抗力による荷重

項 目		単 位	津波時	重畳時
縮小板の面積	A	m <sup>2</sup>	7.304	7.304
流速	v	m/s	10.0	6.0
抗力による荷重	F <sub>d</sub>	kN	756	272

(3) 摩擦による推力 ( $P_{ht}$ )

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

ここで、 $P_{ht}$  : 摩擦による推力 (kN)

$f$  : 流水の摩擦抵抗係数 ( $=0.2 \cdot D^{-1/3}$ )

$D$  : 貫通部直径 (=  m)

$L$  : 貫通部長さ ( $=0.044\text{m}$ )

$Q$  : 流量 ( $=v \times A'$ ) ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$A'$  : 貫通部内空断面積 ( $=\pi \times D^2/4$ )

$v$  : 流速 ( $\text{m}/\text{s}$ )

$g$  : 重力加速度 ( $=9.80665\text{m}/\text{s}^2$ )

表 4-3 摩擦による推力

項 目		単 位	津波時	重畳時
流速	$v$	m/s	10.0	6.0
流量	$Q$	$\text{m}^3/\text{s}$	43.37	26.02
摩擦による推力	$P_{ht}$	kN	0.07*	0.03*

注記\* : 十分に小さい値となるため考慮しない。

(4) 慣性力 ( $P_h$ )

$$P_h = W \times K_h$$

ここで、 $P_h$  : 慣性力 (kN)

$W$  : 重量 (kN)

$K_h$  : 弾性設計用地震動  $S_d-D$  による水平方向の余震震度

表 4-4(1) 縮小板及び固定ボルトに作用する慣性力

項 目		単 位	重畳時
重量	$W$	kN	25
水平余震震度	$K_h$	—	0.7
慣性力	$P_h$	kN	18

表 4-4(2) 取水管(フランジ部)に作用する慣性力

項 目		単 位	重畳時
重量	$W$	kN	46
水平余震震度	$K_h$	—	0.7
慣性力	$P_h$	kN	33

(5) 動水圧 ( $P_{dw}$ )

$$P_{dw} = \pm \frac{7}{8} \times C \times K_h \times \gamma_w \times \sqrt{Z_{dw} \times z_{dw}}$$

ここで、 $P_{dw}$  : 動水圧 (kN)

$C$  : 補助係数 (=1.0)

$K_h$  : 弾性設計用地震動  $S_d - D$  による水平方向の余震震度

$\gamma_w$  : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m<sup>3</sup>)

$Z_{dw}$  : 水深 (m)

$z_{dw}$  : 水面から動水圧を求める点までの深さ (m)

表 4-5 動水圧による荷重

項 目		単 位	重畳時
水平設計震度	$K_h$		0.7
取水槽水位	—	m	EL 3.360
取水槽底標高	—	m	EL-7.000
縮小板下端標高	—	m	EL-6.825
水深	$Z_{dw}$	m	10.360
縮小板下端水深	$z_{dw}$	m	10.185
動水圧	$P_{dw}$	kN/m <sup>2</sup>	127.1
縮小板の面積	$A$	m <sup>2</sup>	7.304
動水圧による荷重	$P_{dw}$	kN	928

#### 4.2.4 荷重の選定

津波時及び重畳時の作用荷重を表 4-6 に示す。表 4-6 より、重畳時荷重が津波時荷重よりも大きくなることから、強度評価に用いる荷重の組合せは、重畳時を対象とする。

表 4-6(1) 縮小板及び固定ボルトの作用荷重

項 目		単位	津波時	重畳時
慣性力	$P_h$	kN	—	18
動水圧	$P_{dw}$	kN	—	928
抗力	$F_d$	kN	756	272
静水圧	$F_h$	kN	624	173
摩擦による推力	$P_{ht}$	kN	0	0
合計値	$P_J$	kN	1,380	1,391

表 4-6(2) 取水管(フランジ部)の作用荷重

項 目		単位	津波時	重畳時
慣性力	$P_h$	kN	—	33
動水圧	$P_{dw}$	kN	—	928
抗力	$F_d$	kN	756	272
静水圧	$F_h$	kN	624	173
摩擦による推力	$P_{ht}$	kN	0	0
合計値	$P_J$	kN	1,380	1,406

### 4.3 許容限界

流路縮小工の許容限界は、「3. 評価対象部位」にて設定した部位に対し、VI-3-別添 3-1-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の方針」にて設定している許容限界を踏まえて設定する。

#### 4.3.1 使用材料

##### (1) 流路縮小工

流路縮小工を構成する各部材の使用材料を表 4-7 に示す。

表 4-7 使用材料

評価対象部位	材質	仕様
縮小板	SS400	t=40(mm)*
固定ボルト	SS400	M24
取水管（フランジ部）	SS400	t=46(mm)

注記\*：鋼材の腐食代を両面で 4mm としして考慮し、板厚を  $44-4=40$  (mm) と設定する。

#### 4.3.2 許容限界

許容限界は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」に基づき設定する。

##### (1) 流路縮小工

流路縮小工を構成する各部材の許容応力度は「鋼構造設計規準－許容応力度設計法－（日本建築学会，2005年改訂）」に基づき表 4-8 の値とする。

表 4-8 流路縮小工を構成する各部材の許容限界

評価対象部位	材質	短期許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> )		
		曲げ	せん断	引張
縮小板	SS400	235	135	—
固定ボルト	SS400	—	—	235
取水管（フランジ部）	SS400	215	124	—

#### 4.4 評価方法

流路縮小工を構成する各部材に発生する応力により算定する応力度が、許容限界以下であることを確認する。

##### 4.4.1 縮小板

縮小板の管軸方向（水平方向）に対する強度評価を実施する。外径を固定とする有孔円板に等分布荷重が作用するものとして検討する。

- (1) 縮小板に作用する単位面積当たりの等分布荷重 ( $p_0$ )

$$p_0 = \frac{P_J}{A_{11}}$$

$$A_{11} = (a_1^2 - b_1^2) \times \pi$$

ここで、 $p_0$  : 縮小板に作用する単位面積当たりの等分布荷重 ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )

$P_J$  : 縮小板に作用する重畳時荷重 ( $\text{kN}$ )

$A_{11}$  : 縮小板の荷重作用面積 ( $\text{mm}^2$ )

$a_1$  : 縮小板の外半径 ( $\text{mm}$ )

$b_1$  : 縮小板の内半径 ( $\text{mm}$ )

(2) 縮小板に作用する曲げモーメント ( $M_{r1}$ ,  $M_{\theta1}$ )

縮小板に作用する曲げモーメント ( $M_{r1}$ ,  $M_{\theta1}$ ) について, 「構造力学公式集 (土木学会, 1986 年)」に基づき, 以下の式より算出する。

$$M_{r1} = \frac{p_0 a_1^2}{16} \left[ (1 + \nu)(1 - \kappa_1) + 4\beta_1^2 - (3 + \nu)\rho_1^2 - \frac{(1 - \nu)\kappa_1}{\rho_1^2} + 4\beta_1^2(1 + \nu) \ln \rho_1 \right]$$

$$M_{\theta1} = \frac{p_0 a_1^2}{16} \left[ (1 + \nu)(1 - \kappa_1) + 4\nu\beta_1^2 - (1 + 3\nu)\rho_1^2 + \frac{(1 - \nu)\kappa_1}{\rho_1^2} + 4\beta_1^2(1 + \nu) \ln \rho_1 \right]$$

$$\kappa_1 = \beta_1^2 \frac{(1 - \nu)\beta_1^2 + (1 + \nu)(1 + 4\beta_1^2 \ln \beta_1)}{1 - \nu + (1 + \nu)\beta_1^2}$$

$$\beta_1 = \frac{b_1}{a_1}$$

$$\rho_1 = \frac{r_1}{a_1}$$

ここで,

$M_{r1}$  : 縮小板に作用する半径方向の曲げモーメント ( $\text{kN} \cdot \text{mm}/\text{mm}$ )

$M_{\theta1}$  : 縮小板に作用する周方向の曲げモーメント ( $\text{kN} \cdot \text{mm}/\text{mm}$ )

$p_0$  : 縮小板に作用する単位面積当たりの等分布荷重 ( $\text{kN}/\text{mm}^2$ )

$a_1$  : 縮小板の外半径 (mm)

$b_1$  : 縮小板の内半径 (mm)

$\nu$  : ポアソン比

$r_1$  : 縮小板の中心から半径方向の距離 (mm)

$\kappa_1, \beta_1, \rho_1$  : 係数

(3) 縮小板に作用する最大曲げ応力度 ( $\sigma_1$ )

縮小板に作用する最大曲げ応力度 ( $\sigma_1$ ) について、「構造力学公式集 (土木学会, 1986 年)」に基づき、以下の式より算出する。

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{M_{r1}^2 + M_{\theta 1}^2}}{Z_1}$$

$$Z_1 = \frac{t_1^2}{6}$$

ここで、 $\sigma_1$  : 縮小板に作用する最大曲げ応力度 (kN/mm<sup>2</sup>)

$M_{r1}$  : 縮小板に作用する半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

$M_{\theta 1}$  : 縮小板に作用する周方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

$Z_1$  : 縮小板の断面係数 (mm<sup>3</sup>)

$t_1$  : 縮小板の板厚 (mm)

(4) 縮小板に作用する最大せん断応力度 ( $\tau_1$ )

$$\tau_1 = \frac{S_1}{A_{12}}$$

$$A_{12} = 2\pi \cdot a_1 \cdot t_1$$

ここで、 $\tau_1$  : 縮小板に作用する最大せん断応力度 (kN/mm<sup>2</sup>)

$S_1$  : 縮小板に作用するせん断力 (=  $P_J$ ) (kN)

$P_J$  : 縮小板に作用する重畳時荷重 (kN)

$A_{12}$  : 縮小板の有効せん断面積 (mm<sup>2</sup>)

$a_1$  : 縮小板の外半径 (mm)

$t_1$  : 縮小板の板厚 (mm)

#### 4.4.2 固定ボルト

固定ボルトの管軸方向（水平方向）に対する強度評価を実施する。作用荷重の合計値を有効断面積で割ることで求めた応力に対して検討する。

##### (1) 固定ボルトに作用する最大応力度（ $\sigma_2$ ）

$$\sigma_2 = \frac{T}{A_{21}}$$

$$A_{21} = n \cdot A_{22}$$

ここで、 $\sigma_2$  : 固定ボルトに作用する最大応力度 (kN/mm<sup>2</sup>)

T : 固定ボルトに作用する引張力 (= P<sub>J</sub>) (kN)

P<sub>J</sub> : 固定ボルトに作用する重畳時荷重 (kN)

A<sub>21</sub> : 固定ボルトの有効断面積の合計 (mm<sup>2</sup>)

n : 固定ボルトの本数 (本)

A<sub>22</sub> : 固定ボルト 1 本の有効断面積 (mm<sup>2</sup>)

#### 4.4.3 取水管（フランジ部）

取水管（フランジ部）の管軸方向（水平方向）に対する強度評価を実施する。  
フランジ部の外縁に線荷重が作用するものとして内径を固定とする有孔円板として検討する。

- (1) 取水管（フランジ部）に作用する単位長さ当たりの等分布荷重（ $P'$ ）

$$P' = \frac{P_J}{L_f}$$

$$L_f = 2\pi \times b_f$$

ここで、 $P'$ ：取水管（フランジ部）に作用する単位長さ当たりの等分布荷重  
(kN/mm)

$P_J$ ：取水管（フランジ部）に作用する重畳時荷重 (kN)

$L_f$ ：取水管（フランジ部）の外周長 (mm)

$b_f$ ：取水管（フランジ部）の外半径 (mm)

- (2) 取水管（フランジ部）に作用する曲げモーメント（ $M_{rf}$ ,  $M_{\theta f}$ ）

取水管（フランジ部）に作用する曲げモーメント（ $M_{r1}$ ,  $M_{\theta 1}$ ）について、「構造力学公式集（土木学会，1986年）」に基づき、以下の式より算出する。

$$M_{rf} = \frac{P' a_f \beta_f}{2} \left[ -1 + (1 + \nu) \kappa_f + (1 - \nu) \frac{\kappa_f}{\rho_f^2} - (1 + \nu) \ln \rho_f \right]$$

$$M_{\theta f} = \frac{P' a_f \beta_f}{2} \left[ -\nu + (1 + \nu) \kappa_f - (1 - \nu) \frac{\kappa_f}{\rho_f^2} - (1 + \nu) \ln \rho_f \right]$$

$$\kappa_f = \beta_f^2 \frac{1 + (1 + \nu) \ln \beta_f}{1 - \nu + (1 + \nu) \beta_f^2}$$

$$\beta_f = \frac{b_f}{a_f}$$

$$\rho_f = \frac{r_f}{a_f}$$

ここで、 $M_{rf}$ ：取水管（フランジ部）に作用する半径方向の曲げモーメント  
(kN・mm/mm)

$M_{\theta f}$ ：取水管（フランジ部）に作用する周方向の曲げモーメント  
(kN・mm/mm)

$P'$ ：取水管（フランジ部）に作用する単位長さ当たりの等分布荷重  
(kN/mm)

$a_f$  : 取水管 (フランジ部) の内半径 (mm)

$\nu$  : ポアソン比

$r_f$  : 取水管 (フランジ部) の中心から半径方向の距離 (mm)

$\kappa_f, \beta_f, \rho_f$  : 係数

(3) 取水管 (フランジ部) に作用する最大曲げ応力度 ( $\sigma_f$ )

取水管 (フランジ部) に作用する最大曲げ応力度 ( $\sigma_1$ ) について, 「構造力学公式集 (土木学会)」に基づき以下の式より算出する。

$$\sigma_f = \frac{\sqrt{M_{rf}^2 + M_{\theta f}^2}}{Z_f}$$

$$Z_f = \frac{t_f^2}{6}$$

ここで,  $\sigma_f$  : 取水管 (フランジ部) に作用する最大曲げ応力度 (kN/mm<sup>2</sup>)

$M_{rf}$  : 取水管 (フランジ部) の半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

$M_{\theta f}$  : 取水管 (フランジ部) の周方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

$Z_f$  : 取水管 (フランジ部) の断面係数 (mm<sup>3</sup>)

$t_f$  : 取水管 (フランジ部) の板厚 (mm)

(4) 取水管 (フランジ部) に作用する最大せん断応力度 ( $\tau_f$ )

$$\tau_f = \frac{S_f}{A_3}$$

$$A_3 = t_f \cdot l_f$$

$$l_f = \pi (D_i + 2 t_p)$$

ここで,  $\tau_f$  : 取水管 (フランジ部) に作用する最大せん断応力度 (kN/mm<sup>2</sup>)

$S_f$  : 取水管 (フランジ部) に作用するせん断力 (=  $P_j$ ) (kN)

$P_j$  : 取水管 (フランジ部) に作用する重畳時荷重 (kN)

$A_3$  : 取水管 (フランジ部) 付け根の断面積 (mm<sup>2</sup>)

$D_i$  : 取水管 (フランジ部) の管内径 (mm)

$t_p$  : 取水管 (管胴部) の管厚 (mm)

$t_f$  : 取水管 (フランジ部) の板厚 (mm)

$l_f$  : 取水管 (フランジ部) 付け根の周長 (mm)

#### 4.5 評価条件

流路縮小工の強度評価に用いる入力値を表 4-9 に示す。

表 4-9(1) 流路縮小工の縮小板の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
$P_J$	kN	縮小板に作用する重畳時荷重	1,391
$a_1$	mm	縮小板の外半径	1,925
$b_1$	mm	縮小板の内半径	<input type="text"/>
$r_1$	mm	縮小板の中心から半径方向の距離	1,925~ <input type="text"/>
$\nu$	—	ポアソン比	0.3
$t_1$	mm	縮小板の板厚	40

表 4-9(2) 流路縮小工の固定ボルトの計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
$T$	kN	固定ボルトに作用する重畳時荷重	1,391
$n$	本	固定ボルトの本数	24
$A_{22}$	mm <sup>2</sup>	固定ボルト 1 本の有効断面積	353

表 4-9(3) 流路縮小工の取水管（フランジ部）の計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
$P_J$	kN	取水管（フランジ部）に作用する重畳時荷重	1,406
$b_f$	mm	取水管（フランジ部）の外半径	1,853
$a_f$	mm	取水管（フランジ部）の内半径	1,675
$r_f$	mm	取水管（フランジ部）の中心から半径方向の距離	1,675
$\nu$	—	ポアソン比	0.3
$t_f$	mm	取水管（フランジ部）の板厚	46
$D_i$	mm	取水管（フランジ部）の管内径	3,350
$t_p$	mm	取水管（管胴部）の管厚	28

## 5. 評価結果

### 5.1 流路縮小工の評価結果

流路縮小工の強度評価結果を表 5-1 に示す。各部材の断面照査を行った結果、すべての部材において応力度が許容限界以下であることを確認した。

表 5-1 流路縮小工の強度評価結果（重畳時）

評価対象部位		発生値（応力度）		許容荷重		照査値
縮小板	曲げ	154	N/mm <sup>2</sup>	235	N/mm <sup>2</sup>	0.66
	せん断	3	N/mm <sup>2</sup>	135	N/mm <sup>2</sup>	0.03
固定ボルト	引張	164	N/mm <sup>2</sup>	235	N/mm <sup>2</sup>	0.70
取水管 (フランジ部)	曲げ	69	N/mm <sup>2</sup>	215	N/mm <sup>2</sup>	0.33
	せん断	3	N/mm <sup>2</sup>	124	N/mm <sup>2</sup>	0.03