

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改01
提出年月日	2023年6月2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

S2 補 VI-3-別添 3-2-3 R1

2023年6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. 位置	2
3. 流路縮小工の強度評価	4
3.1 構造計画	4
3.2 評価方針	6
3.3 適用規格・基準等	8
3.4 記号の説明	9
3.5 評価対象部位	12
3.6 荷重及び荷重の組合せ	13
3.6.1 荷重	13
3.6.2 荷重の組合せ	16
3.6.3 荷重の選定	17
3.7 許容限界	18
3.7.1 使用材料	18
3.7.2 許容限界	18
3.8 評価方法	19
3.8.1 縮小板	19
3.8.2 固定ボルト	22
3.8.3 取水管（フランジ部）	23
3.9 評価条件	26
3.10 評価結果	27

1. 概要

本資料は、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」に示すとおり、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、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. 位置

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。

流路縮小工及び1号機取水槽北側壁の設置位置図を図2-1に、流路縮小工及び1号機取水槽北側壁の詳細位置図を図2-2に示す。

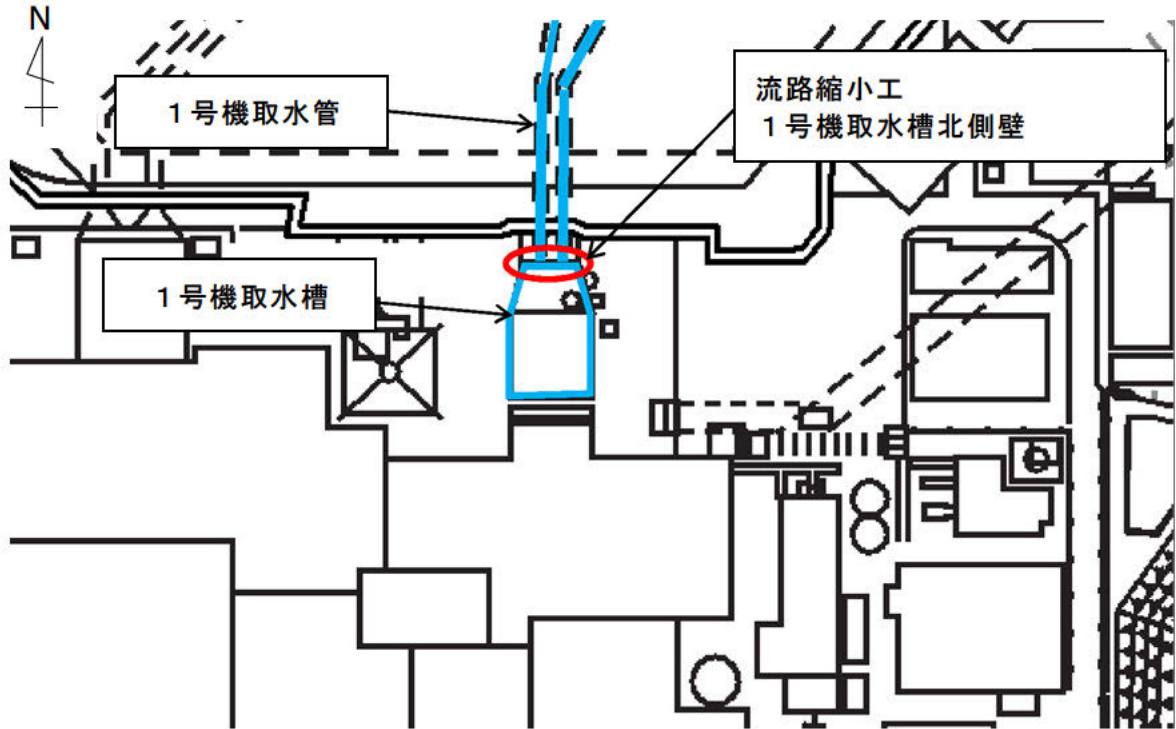


図2-1 流路縮小工及び1号機取水槽北側壁の設置位置図

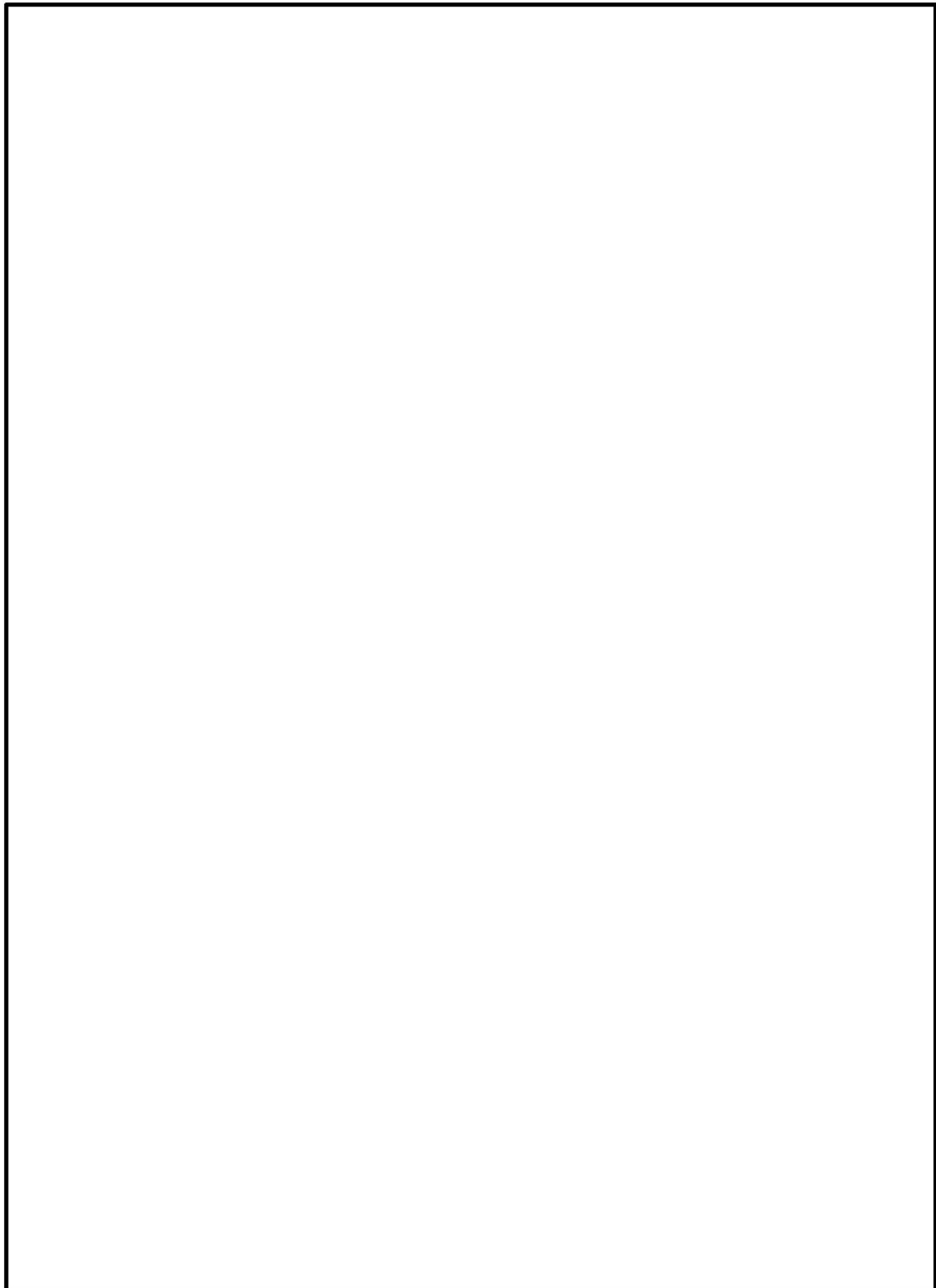


図 2-2 流路縮小工及び 1 号機取水槽北側壁の詳細位置図

3. 流路縮小工の強度評価

3.1 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（以下「取水管（フランジ部）」という。）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。よって、流路縮小工は、1号機取水管の管胴部（以下「取水管（管胴部）」という。）、取水管（フランジ部）、縮小板、取付板及び固定ボルトから構成される。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 の貫通部を設ける。

流路縮小工の構造計画を表 3-1 に示す。

表 3-1 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	
<p>取水管（フランジ部）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。</p>	<p>縮小板，取付板及び固定ボルトにより構成する。</p>	<p>組立図（A-A断面）</p> <p>（単位：m）</p> <p>【凡例】 流路縮小工</p> <p>正面図</p>

3.2 評価方針

1号機取水槽は、設計当時からの基準地震動 S_s の増大により、1号機取水槽の耐震性を確保するため、流路縮小工と同等の開口を設けたうえで漸拡ダクト部にコンクリートを充填する。これにより、流路縮小工の大部分は充填コンクリートに拘束されるため、剛構造であると考えられるが、保守的に充填コンクリートによる拘束は期待しない方針とする。

流路縮小工の強度評価は、VI-3-別添 3-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の基本方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」及び「4.2 許容限界」において設定している荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界に基づき、「3.1 構造計画」に示す流路縮小工の構造を踏まえ、「3.5 評価対象部位」にて設定する評価部位において算出した応力度が許容限界内に収まることを、「3.8 評価方法」及び「3.9 評価条件」に示す方法にて確認する。強度評価の結果を「3.10 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。

流路縮小工の評価項目を表 3-2 に、強度評価フローを図 3-1 に、1号機取水槽の耐震補強に伴うコンクリート充填範囲図を図 3-2 示す。

なお、1号機流路縮小工を構成する部材のうち取付板については、材質及び厚さが縮小板と同等であることから、取付板の評価は縮小板の評価に包含されるものとする。また、取水管（管胴部）は、重畳時において、弾性設計用地震動 S_d-D による慣性力が作用するが、地震時における基準地震動 S_s による慣性力が大きいことから、VI-2-10-2-6「1号機取水槽流路縮小工の耐震性についての計算書」にて説明する。

表 3-2 流路縮小工の評価項目

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	構造部材の健全性	縮小板	発生する応力（曲げ応力、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
		固定ボルト	発生する応力（引張応力）が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度
		取水管（フランジ部）	発生する応力（曲げ応力、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

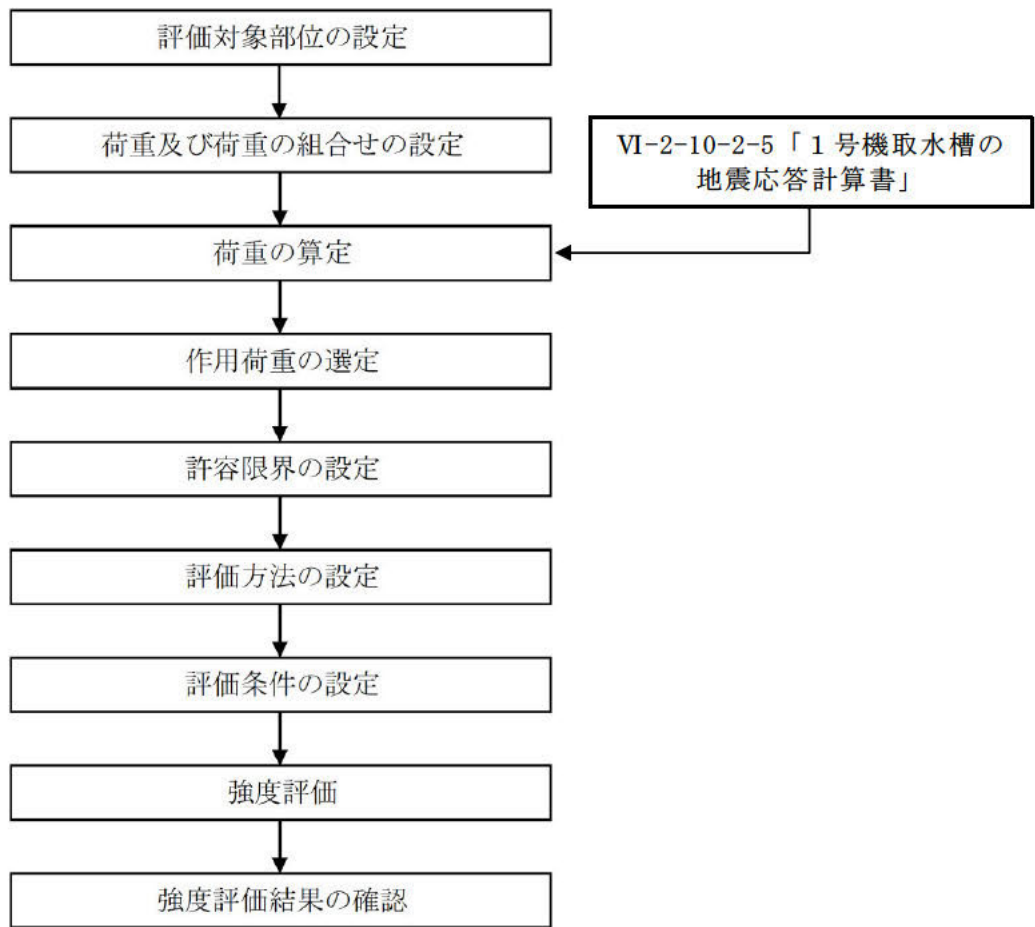


図 3-1 強度評価フロー

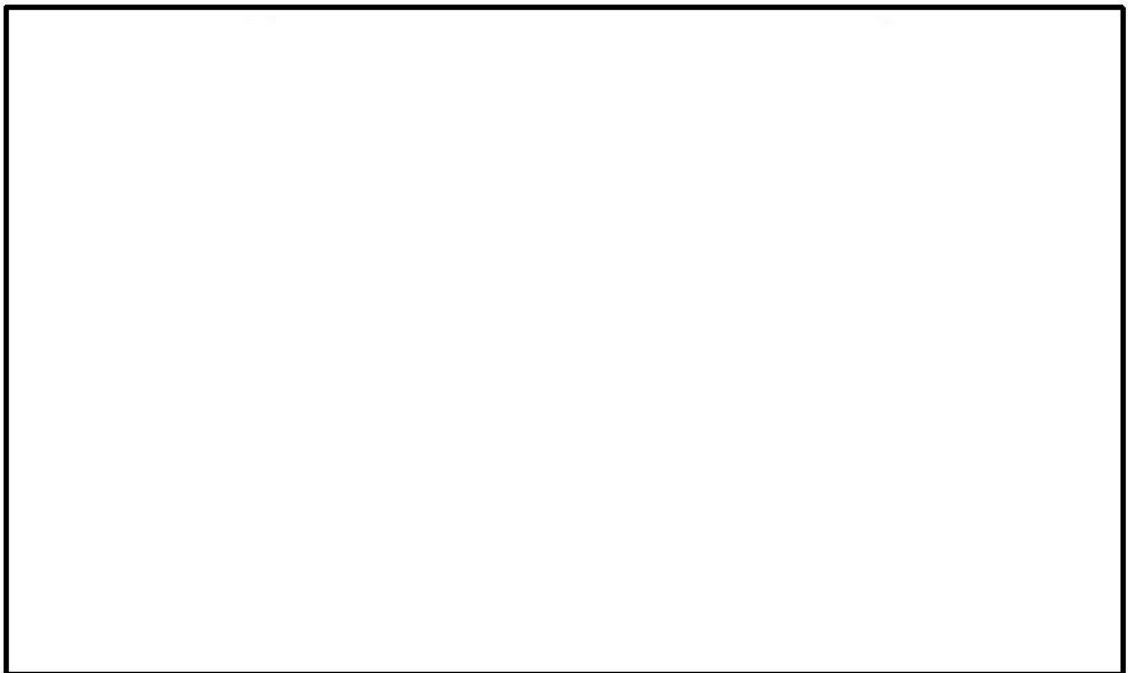


図 3-2 1号機取水槽の耐震補強に伴うコンクリート充填範囲図

3.3 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)
- ・原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル ((社) 土木学会, 2005 年)
- ・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)
- ・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)
- ・鋼構造許容応力度設計規準 ((社) 日本建築学会, 2019 年制定)
- ・日本産業規格 (J I S)
- ・構造力学公式集 ((社) 土木学会, 1986 年)
- ・水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編 ((社) 水門鉄管協会, 2007 年)

3.4 記号の説明

流路縮小工の強度評価に用いる記号を表 3-3～表 3-5 にそれぞれ示す。

表 3-3 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^2	縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重
A_{11}	mm^2	縮小板の作用面積
P	kN	縮小板に作用する津波時荷重
a_1	mm	縮小板の外半径
b_1	mm	縮小板の内半径
M_{r1}	$\text{kN}\cdot\text{mm}/\text{mm}$	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント
$M_{\theta 1}$	$\text{kN}\cdot\text{mm}/\text{mm}$	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント
ν	—	ポアソン比
r_1	mm	縮小板の中心から半径方向の距離
κ_1	—	係数
β_1	—	係数
ρ_1	—	係数
σ_1	kN/mm^2	縮小板に生じる最大曲げ応力度
Z_1	mm^3	縮小板の断面係数
t_1	mm	縮小板の板厚
τ_1	kN/mm^2	縮小板に生じる最大せん断応力度
A_{12}	mm^2	縮小板の有効せん断面積
S_1	kN	縮小板に作用するせん断力

表 3-4 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
T	kN/本	内側固定ボルトに作用する引張力
T ₁	kN/本	縮小板に作用する荷重により内側固定ボルトに作用する引張力
T ₂	kN/本	縮小板に生じる曲げモーメントにより内側固定ボルトに作用する引張力
M	kN・mm/mm	縮小板に生じる曲げモーメント合力
σ _b	kN/mm ²	内側固定ボルトに生じる最大応力度
P	kN	内側固定ボルトに作用する津波時荷重
n	本	内側固定ボルトの本数
D ₁	mm	フランジ外径
l ₁	mm	支点間距離
M _{r1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント
M _{θ1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント
A	mm ²	内側固定ボルト 1 本の有効断面積

表 3-5 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あたりの等分布荷重
L_f	mm	取水管（フランジ部）の外周長
P	kN	取水管（フランジ部）に作用する津波時荷重
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）に生じ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）に生じ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
ν	—	ポアソン比
r_f	mm	取水管（フランジ部）の中心から半径方向の距離
κ_f	—	係数
β_f	—	係数
ρ_f	—	係数
σ_f	kN/mm ²	取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度
Z_f	mm ³	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
τ_f	kN/mm ²	取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度
A_3	mm ²	取水管（フランジ部）付け根の断面積
l_f	mm	取水管（フランジ部）付け根の周長
S_f	kN	取水管（フランジ部）に作用するせん断力
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

3.5 評価対象部位

流路縮小工の評価対象部位は、「3.1 構造計画」に設定している構造を踏まえて、津波時又は重畳時荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、縮小板、固定ボルト及び取水管（フランジ部）とする。

固定ボルトは内側固定ボルト及び外側固定ボルトにより構成されるが、内側固定ボルトのみにより引張力を負担するものとして、保守的に強度評価を実施する。

評価対象部位を図 3-3 に示す。

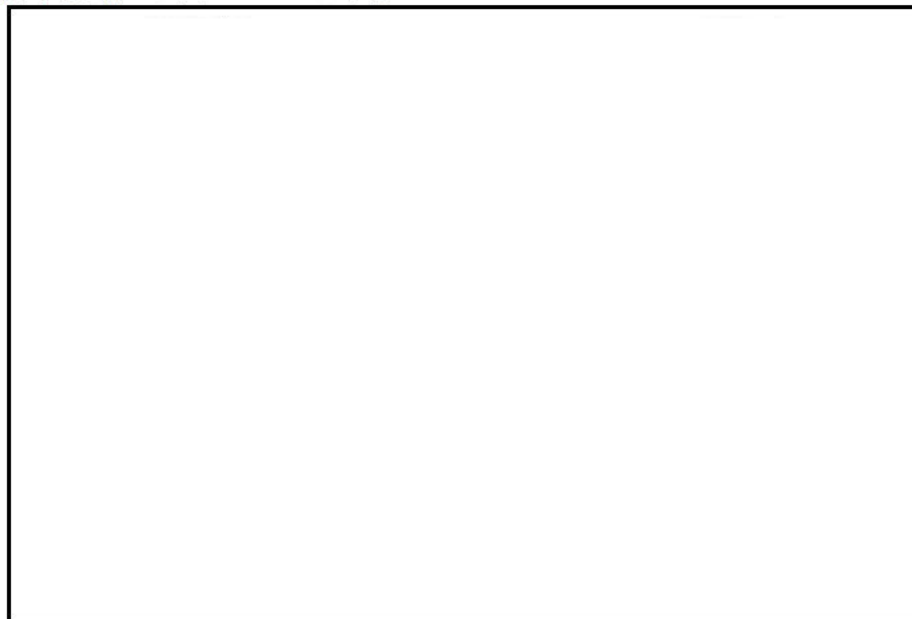


図 3-3(1) 評価対象部位（縮小板）

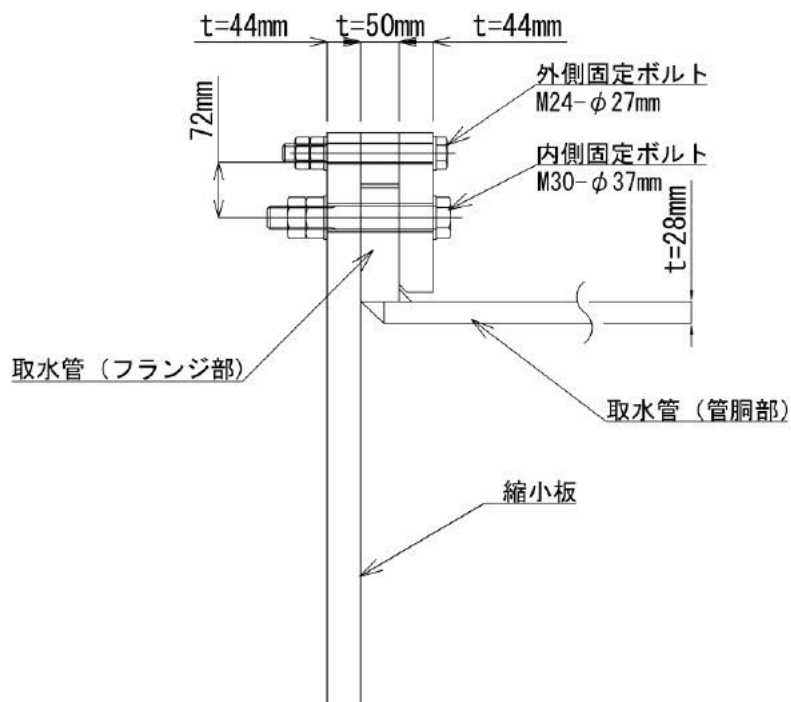


図 3-3(2) 評価対象部位

(内側固定ボルト及び取水管（フランジ部）)

3.6 荷重及び荷重の組合せ

3.6.1 荷重

強度評価には、以下の荷重を用いる。

(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) 静水圧荷重 (Ph)

静水圧荷重は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」に示すとおり、静水圧、抗力及び推力を考慮する。

a. 静水圧

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。

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

ここで、

F_h : 静水圧 (kN)

γ_w : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m³)

Δh : 1号機取水口と1号機取水槽の水位差 (m)

A : 縮小板の面積 (m²)

b. 抗力

抗力は「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、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)

ρ_0 : 密度 (=1.03t/m³)

C_D : 抗力係数 (=2.01)

A : 縮小板の面積 (m²)

v : 流速 (m/s)

c. 摩擦による推力

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（（社）水門鉄管協会，2007年）」に基づき，以下の式により算定する。

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

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 S d)

余震荷重として，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を考慮する。

なお，余震荷重の算定に用いる設計震度は，1号機取水槽付近の地盤物性のばらつきを考慮したものとして，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から余裕を考慮した震度を用いる。

a. 慣性力

慣性力は，流路縮小工の重量に弾性設計用地震動 S d - D による設計水平震度を乗じた次式により算出する。

$$P_{ih} = W \times K_h$$

ここで，

P_{ih} : 水平慣性力 (kN)

W : 重量 (kN)

K_h : 弾性設計用地震動 S d - D による設計水平震度

b. 動水圧

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_{dw} : 動水圧 (kN/m²)

C : 補助係数 (=1.0)

K_h : 弾性設計用地震動 S d - D による設計水平震度

γ_w : 海水の単位体積重量 (=10.1kN/m³)

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)

VI-2-10-2-6「1号機取水槽流路縮小工の耐震性についての計算書」のうち「3.6 固有値解析」に示すとおり、流路縮小工の固有振動数は 20Hz 以上であることを確認している。流路縮小工の強度評価に用いる設計震度は、流路縮小工を剛構造として考慮した 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より、地盤物性のばらつきを含めた結果を踏まえた余裕を考慮した震度を用いる。強度評価に用いる設計震度を表 3-6 に示す。

表 3-6 強度評価に用いる設計震度

設置場所	弾性設計用地震動 S d - D による設計震度
	水平方向 k_h
1号機取水槽北側壁	0.7

3.6.2 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以下に示す。荷重の組合せを表 3-7 に、荷重の作用図を図 3-4 に示す。

(1) 津波時

$$G + P h$$

ここで、

G : 固定荷重

P h : 静水圧荷重

(2) 重畳時

$$G + P + K S d$$

ここで、

G : 固定荷重

P h : 静水圧荷重

K S d : 余震荷重 (弾性設計用地震動 S d - D)

表 3-7 荷重の組合せ

種別	荷重	記号	算定方法
固定荷重	躯体自重	G	設計図書に基づいて、対象構造物の体積に材料の密度を乗じて設定する。
静水圧荷重	静水圧	P h	管路解析より 1 号機取水口と 1 号機取水槽との水位差による静水圧を考慮する。
	抗力		津波流速により縮小板に作用する荷重を考慮する。
	推力		津波流速により縮小板に作用する荷重を考慮する。
余震荷重	慣性力	K S d	弾性設計用地震動 S d - D による躯体の慣性力を考慮する。
	動水圧		管路解析より 1 号機取水槽の水位が最大となる水位での動水圧を考慮する。

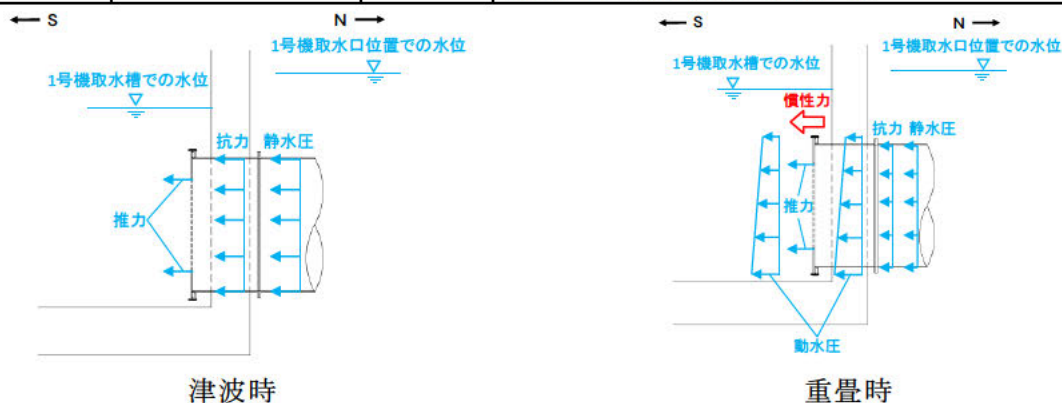


図 3-4 流路縮小工の荷重作用図

3.6.3 荷重の選定

津波時及び重畳時の作用荷重を表 3-8 に示す。表 3-8 より、津波時荷重が重畳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、津波時を対象とする。

表 3-8(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_{ih}	kN	—	18
動水圧	P_{dw}	kN	—	893
抗力	F_d	kN	756	272
静水圧	F_h	kN	617	171
摩擦による推力	P_{ht}	kN	0	0
合計値	P	kN	1373	1354

表 3-8(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_{ih}	kN	—	32
動水圧	P_{dw}	kN	—	893
抗力	F_d	kN	756	272
静水圧	F_h	kN	617	171
摩擦による推力	P_{ht}	kN	0	0
合計値	P	kN	1373	1368

3.7 許容限界

流路縮小工の許容限界は、「3.5 評価対象部位」にて設定した部位に対し、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」にて設定している許容限界を踏まえて設定する。

3.7.1 使用材料

流路縮小工を構成する各部材の使用材料を表 3-9 に示す。

表 3-9 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	SCM435	内側 : M30, 外側 : M24
取水管 (フランジ部)	SS400	t = 46 (mm) *

注記* : エロージョン摩耗に対する設計・施工上の配慮として、縮小板の余裕厚を 4mm としして考慮し、板厚を $44 - 4 = 40$ (mm) と設定する。また、取水管 (フランジ部) についても、余裕厚を 4mm としして考慮し、取水管 (フランジ部) の板厚を $50 - 4 = 46$ (mm) と設定する。

3.7.2 許容限界

許容限界は、VI-3-別添 3-1「津波への配慮が必要な施設の強度計算の基本方針」に基づき設定する。

流路縮小工を構成する各部材の許容限界のうち、縮小板及び取水管 (フランジ部) は「鋼構造設計規準—許容応力度設計法— ((社) 日本建築学会, 2005 年改定) 」に基づき、固定ボルトは、「鋼構造許容応力度設計規準 ((社) 日本建築学会, 2019 年制定) 」及び「J I S B 1 0 5 1 炭素鋼及び合金鋼製締結用部品の機械的性質—強度区分を規定したボルト, 小ねじ及び植込みボルト—並目ねじ及び細目ねじ」に基づき設定した短期許容応力度とする。流路縮小工を構成する各部材の許容限界を表 3-10 に示す。

表 3-10 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 ²)		
		曲げ	せん断	引張
縮小板	SS400	235	135	—
固定ボルト	SCM435	—	—	560
取水管 (フランジ部)	SS400	215	124	—

3.8 評価方法

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

3.8.1 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ことで縮小板に生じる応力度が許容限界以下であることを確認する。

(1) 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重

縮小板に作用する単位長さあたりの等分布荷重は、以下の式より算出する。

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

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

ここで、

p_0 : 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重 (kN/mm²)

A_{11} : 縮小板の作用面積 (mm²)

P : 縮小板に作用する津波時荷重 (kN)

a_1 : 縮小板の外半径 (mm)

b_1 : 縮小板の内半径 (mm)

(2) 縮小板に生じる曲げモーメント

縮小板に生じる曲げモーメントについて、「構造力学公式集（（社）土木学会，1986年）」に基づき以下の式より算出する。

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

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

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

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

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

ここで、

M_{r1} : 縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

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

p_0 : 縮小板に作用する単位面積あたりの等分布荷重 (kN/mm²)

a_1 : 縮小板の外半径 (mm)

ν : ポアソン比

b_1 : 縮小板の内半径 (mm)

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) 縮小板に生じる最大曲げ応力度

縮小板に生じる最大曲げ応力度について、「構造力学公式集（（社）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，

σ_1 : 縮小板に生じる最大曲げ応力度 (kN/mm²)

Z_1 : 縮小板の断面係数 (mm³)

M_{r1} : 縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

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

t_1 : 縮小板の板厚 (mm)

(4) 縮小板に生じる最大せん断応力度

縮小板に生じる最大せん断応力度は，以下の式より算出する。

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

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

ここで，

τ_1 : 縮小板に生じる最大せん断応力度 (kN/mm²)

A_{12} : 縮小板の有効せん断面積 (mm²)

S_1 : 縮小板に作用するせん断力 (=P) (kN)

P : 縮小板に作用する津波時荷重 (kN)

a_1 : 縮小板の外半径 (mm)

t_1 : 縮小板の板厚 (mm)

3.8.2 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。固定ボルトには、縮小板に作用する水平力により固定ボルトに作用する引張力に加え、縮小板外縁に生じる曲げモーメントに伴い固定ボルトに作用する引張力を有効断面積で除することで求めた応力度が許容限界以下であることを確認する。

(1) 固定ボルトに生じる最大応力度

固定ボルトに生じる最大応力度は、以下の式より算出する。

$$T = T_1 + T_2$$

$$T_1 = \frac{P}{n}$$

$$T_2 = M \cdot \pi \cdot D_1 \cdot \frac{1}{n \cdot l_1}$$

$$M = \sqrt{M_{r1}^2 + M_{\theta 1}^2}$$

$$\sigma_b = \frac{T}{A}$$

ここで、

T : 内側固定ボルトに作用する引張力 (kN/本)

T_1 : 縮小板に作用する荷重により内側固定ボルトに作用する引張力 (kN/本)

T_2 : 縮小板に生じる曲げモーメントにより内側固定ボルトに作用する
引張力 (kN/本)

M : 縮小板に生じる曲げモーメント合力 (kN・mm/mm)

σ_b : 内側固定ボルトに生じる最大応力度 (kN/mm²)

P : 内側固定ボルトに作用する津波時荷重 (kN)

n : 内側固定ボルトの本数 (本)

D_1 : フランジ外径 (mm)

l_1 : 支点間距離 (mm)

M_{r1} : 縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント (kN・mm/mm)

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

A : 内側固定ボルト 1 本の有効断面積 (mm²)

3.8.3 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。取水管（フランジ部）は内側固定ボルトを介して荷重が作用するものとして、内径を固定とする有孔円板に等分布荷重が作用することで取水管（フランジ部）に生じる応力度が許容限界以下であることを確認する。

(1) 取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重

取水管（フランジ部）に作用する単位長さあたりの等分布荷重は、以下の式より算出する。

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

$$L_f = 2 \cdot \pi \cdot b_f$$

ここで、

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

L_f : 取水管（フランジ部）の外周長（mm）

P : 取水管（フランジ部）に作用する津波時荷重（kN）

b_f : 取水管（フランジ部）の外半径（mm）

(2) 取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメント

取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントについて、「構造力学公式集（（社）土木学会，1986年）」に基づき，以下の式より算出する。

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

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

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

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

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

ここで，

M_{rf} : 取水管（フランジ部）に生じ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）に生じ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あたりの等分布荷重（kN/mm）

a_f : 取水管（フランジ部）の内半径（mm）

v : ポアソン比

b_f : 取水管（フランジ部）の外半径（mm）

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）に生じる最大曲げ応力度

取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度について、「構造力学公式集（（社）土木学会，1986年）」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、

σ_f : 取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度（kN/mm²）

Z_f : 取水管（フランジ部）の断面係数（mm³）

M_{rf} : 取水管（フランジ部）に生じ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）に生じる周方向の曲げモーメント（kN・mm/mm）

t_f : 取水管（フランジ部）の板厚（mm）

(4) 取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度

取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度は、以下の式より算出する。

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

$$A_3 = t_f \cdot l_f$$

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

ここで、

τ_f : 取水管（フランジ部）に生じる最大せん断応力度（kN/mm²）

A_3 : 取水管（フランジ部）付け根の断面積（mm²）

l_f : 取水管（フランジ部）付け根の周長（mm）

S_f : 取水管（フランジ部）に作用するせん断力（=P）（kN）

P : 取水管（フランジ部）に作用する津波時荷重（kN）

t_f : 取水管（フランジ部）の板厚（mm）

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）

3.9 評価条件

「3. 流路縮小工の強度評価」に用いる入力値を表 3-11～表 3-13 に示す。

表 3-11 流路縮小工の縮小板の強度評価に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
P	kN	縮小板に作用する津波時荷重	1373
a_1	mm	縮小板の外半径	1925
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	1925
ν	—	ポアソン比	0.3
t_1	mm	縮小板の板厚	40

表 3-12 流路縮小工の固定ボルトの強度評価に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
D_1	mm	フランジ外径	3850
l_1	mm	支点間距離	111
P	kN	内側固定ボルトに作用する津波時荷重	1373
n	本	内側固定ボルトの本数	40
A	mm ²	内側固定ボルト 1 本の有効断面積	561

表 3-13 流路縮小工の取水管（フランジ部）の強度評価に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
P	kN	取水管（フランジ部）に作用する津波時荷重	1373
b_f	mm	取水管（フランジ部）の外半径	1814
ν	—	ポアソン比	0.3
a_f	mm	取水管（フランジ部）の内半径	1675
r_f	mm	取水管（フランジ部）の中心から半径方向の距離	1675
t_f	mm	取水管（フランジ部）の板厚	46
S_f	kN	取水管（フランジ部）に作用するせん断力	1373
D_i	mm	取水管（フランジ部）の管内径	3350
t_p	mm	取水管（管胴部）の管厚	24

3.10 評価結果

流路縮小工の強度評価結果を表 3-14 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発生応力度が許容限界以下であることを確認した。

表 3-14 流路縮小工の強度評価結果

評価対象部位		発生応力度		短期許容応力度		照査値
縮小板	曲げ	152	N/mm ²	235	N/mm ²	0.65
	せん断	3	N/mm ²	135	N/mm ²	0.03
固定ボルト	引張	258	N/mm ²	560	N/mm ²	0.46
取水管 (フランジ部)	曲げ	53	N/mm ²	215	N/mm ²	0.25
	せん断	3	N/mm ²	124	N/mm ²	0.03