

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-011-10
提出年月日	2023年2月14日

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

S2 補 VI-2-10-2-6 R0

2023年2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.	流路縮小工の耐震評価	4
3.1	構造計画	4
3.2	評価方針	6
3.3	適用規格・基準等	7
3.4	記号の説明	8
3.5	評価対象部位	12
3.6	固有値解析	13
3.7	荷重及び荷重の組合せ	14
3.8	許容限界	16
3.9	評価方法	17
3.10	評価条件	26
3.11	評価結果	28
4.	1号機取水槽北側壁の耐震評価	29
4.1	構造及び補強の概要	29
4.2	評価方針	32
4.3	評価対象断面	35
4.4	使用材料及び材料の物性値	37
4.5	許容限界	38
4.5.1	構造部材の健全性に対する許容限界	38
4.5.2	基礎地盤の支持性能に対する許容限界	41
4.6	評価方法	42
4.6.1	構造部材の健全性評価	42
4.6.2	基礎地盤の支持性能評価	45
5.	耐震評価結果	46
5.1	構造部材の健全性に対する評価結果	46
5.2	基礎地盤の支持性能に対する評価結果	48

1. 概要

本資料は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて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、津波防護施設のうち1号機取水槽流路縮小工（以下、「流路縮小工」という。）及びその間接支持構造物である1号機取水槽北側壁が設計用地震力に対して、主要な構造部材が十分な構造強度を有することを確認するものである。

流路縮小工及び1号機取水槽北側壁に要求される機能維持の確認は、地震応答解析に基づく構造部材の健全性評価により行う。

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。

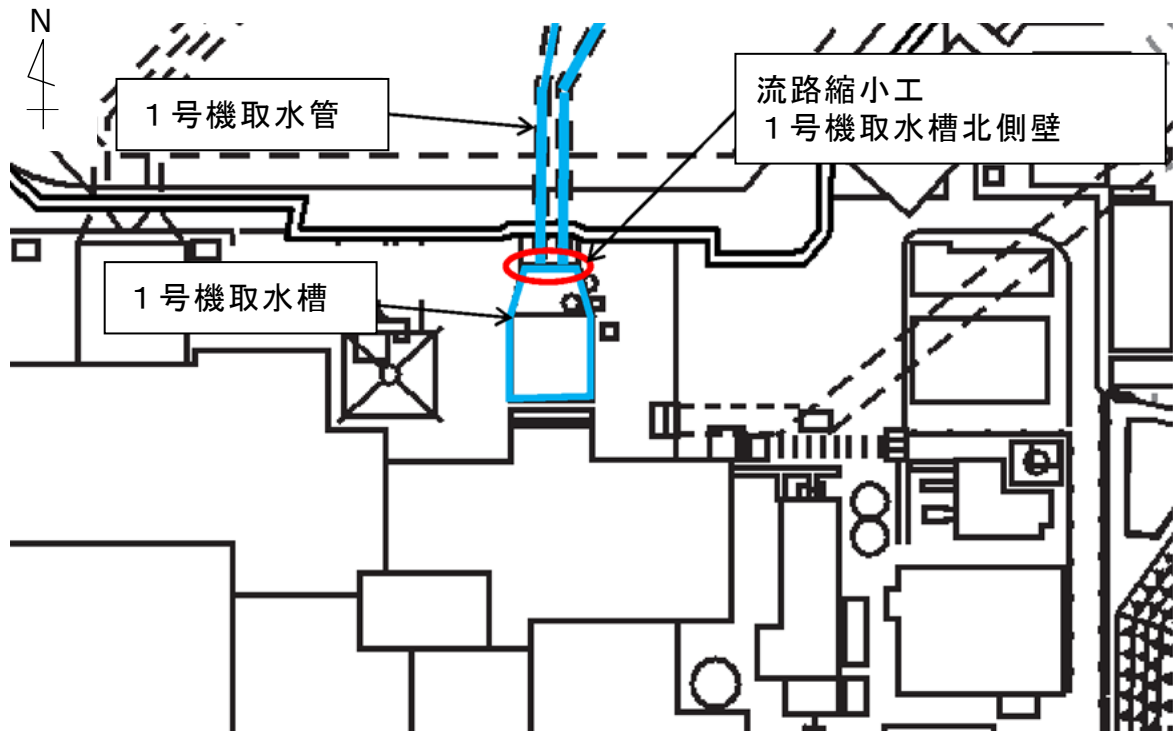
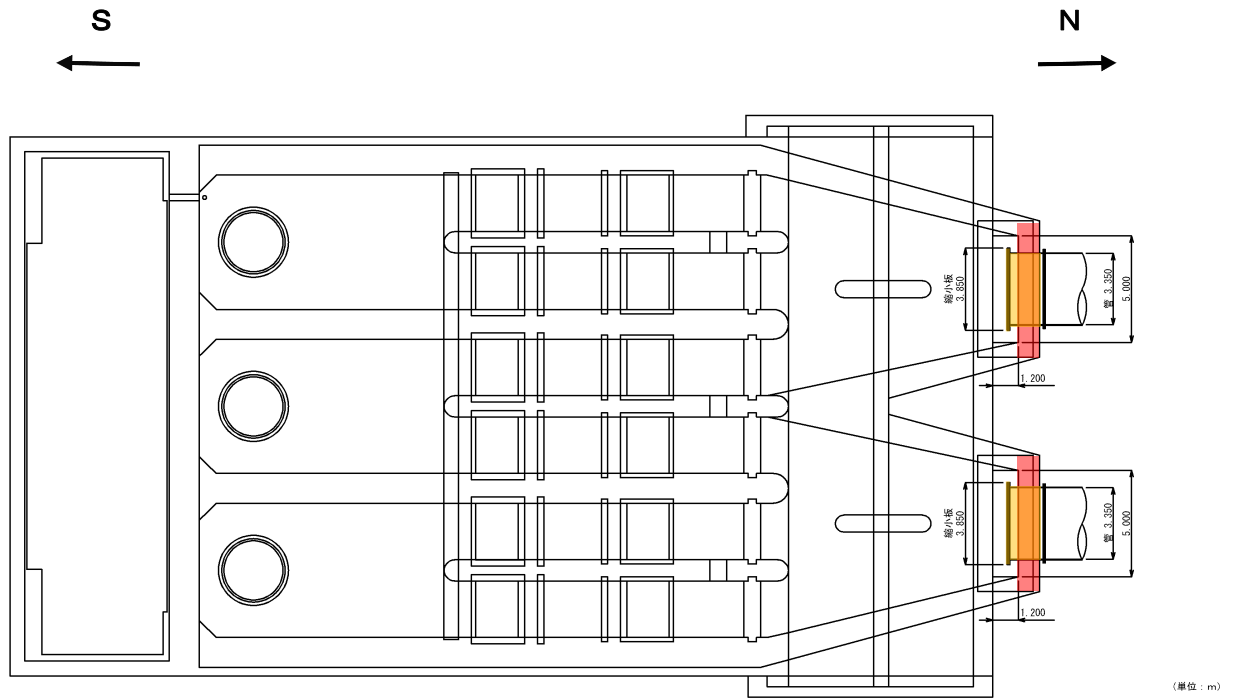
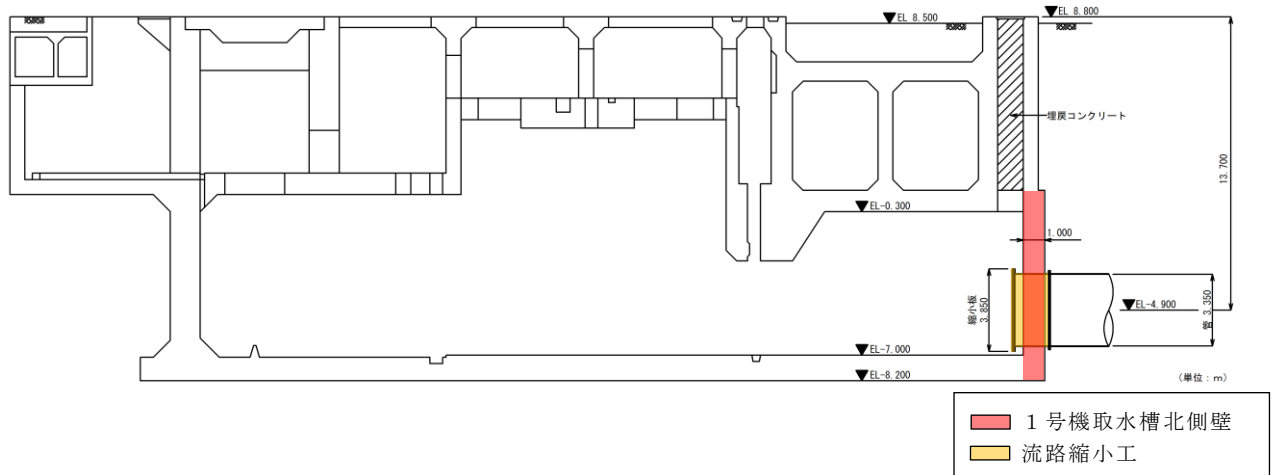


図 2-1 流路縮小工及び1号機取水槽北側壁の設置位置図



平面図



縦断図

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. 流路縮小工の耐震評価

3.1 構造計画

流路縮小工は、既設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 の開口部を設ける。

流路縮小工の構造計画を表 3.1-1 に示す。

表 3.1-1 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>正面図</p>

S2 補 VI-2-10-2-6 R0

3.2 評価方針

流路縮小工の耐震評価は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」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、「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、「3.6 固有値解析」で算出した固有振動数に基づく設計用地震力により算出した応力等が許容限界内に収まることを、「3.9 評価方法」に示す方法にて確認する。応力評価の確認結果を「3.10 評価結果」にて確認する。

流路縮小工の評価項目を表 3.2-1 に、耐震評価フローを図 3.2-1 に示す。

表 3.2-1 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	曲げ軸力, せん断力に対する発生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	引張力に対する発生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)	曲げ軸力, せん断力に対する発生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 (管胴部)	曲げ軸力, せん断力に対する発生応力が許容限界以下であることを確認	短期許容応力度

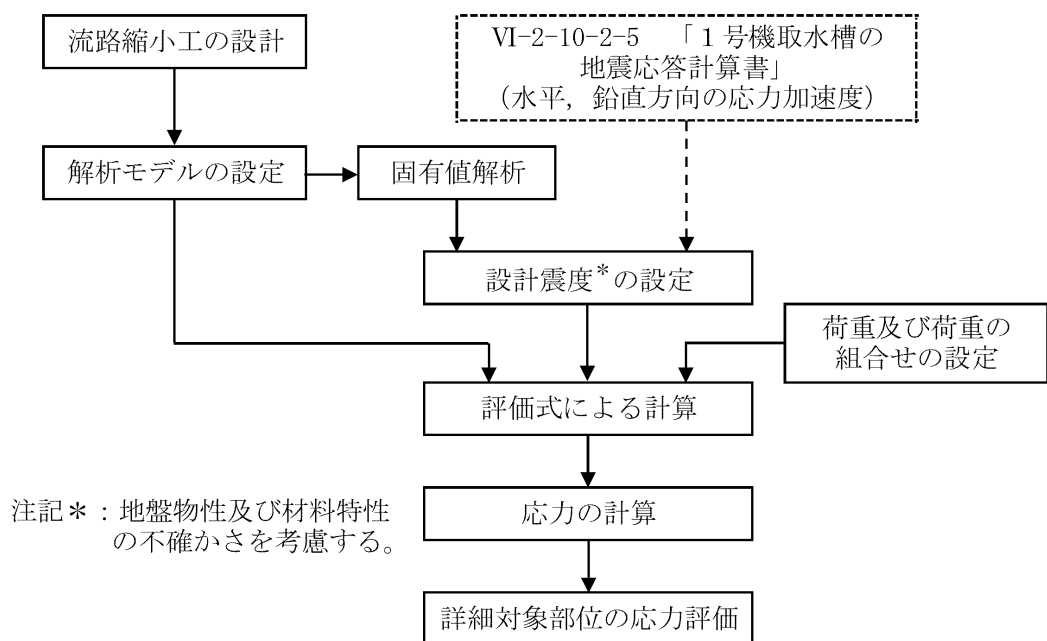


図 3.2-1 耐震評価フロー

3.3 適用規格・基準等

適用する規格・基準類を以下に示す。また、各項目で適用する規格，基準類を表 3.3-1 に示す。

- ・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）（以下「土木学会マニュアル」という）
- ・コンクリート標準示方書[構造性能照査編]（土木学会，2002 年）
- ・港湾の施設の技術上の基準・同解説（日本港湾協会，2007 年）
- ・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）
- ・鋼構造許容応力度設計規準（日本建築学会，2019 年制定）
- ・構造力学公式集（土木学会，1986 年）
- ・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）

3.4 記号の説明

流路縮小工の耐震評価に用いる記号を表 3.4-1~5 にそれぞれ示す。

表 3.4-1 流路縮小工の固有振動数の計算に用いる記号

記号	単位	定義
f	Hz	固有振動数
L	mm	はりの長さ
E	N/mm ²	ヤング係数
I	mm ⁴	断面 2 次モーメント
m	kg/mm	質量分布

表 3.4-2 流路縮小工の縮小板の耐震計算に用いる記号

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
P	kN	縮小板に作用する地震時荷重
A_{11}	mm ²	縮小板の作用面積
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
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(= $\beta_1^2 \{ (1-\nu) \beta_1^2 + (1+\nu) (1+4\beta_1^2 \ln \beta_1) \} / \{ 1-\nu + (1+\nu) \beta_1^2 \}$)
β_1	—	係数(= b_1/a_1)
ρ_1	—	係数(= r_1/a_1)
σ_1	N/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	N/mm ²	縮小板に生じ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 ²	縮小板の有効せん断面積

表 3.4-3 流路縮小工の固定ボルトの耐震計算に用いる記号

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	縮小板に発生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	縮小板に発生す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
P	kN	内側固定ボルトに作用する地震時荷重
n	本	内側固定ボルトの本数
M	kN・mm/mm	縮小板に作用する曲げモーメント合力
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
A	mm ²	内側固定ボルト 1 本の有効断面積
σ_b	N/mm ²	内側固定ボルトに生じる最大応力度

表 3.4-4 流路縮小工の取水管（フランジ部）の耐震計算に用いる記号

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
P	kN	取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重
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
ν	—	ポアソン比
κ_f	—	係数(= $\beta_f^2 \{1+(1+\nu) \ln \beta_f\} / \{1-\nu+(1+\nu) \beta_f^2\}$)
β_f	—	係数(= b_f/a_f)
ρ_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
σ_f	N/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	N/mm ²	取水管（フランジ部）に生じ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 ²	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

表 3.4-5 流路縮小工の取水管（管胴部）の耐震計算に用いる記号

記号	単位	定義
σ_d	N/mm ²	取水管（管胴部）に生じる最大曲げ応力度
σ_{dh}	N/mm ²	取水管（管胴部）に生じる水平方向の地震時荷重により生じる曲げ最大応力度
σ_{dv}	N/mm ²	取水管（管胴部）に生じる鉛直方向の地震時荷重により生じる曲げ最大応力度
σ_t	N/mm ²	縮小板に作用する地震時荷重により取水管（管胴部）に生じる最大引張応力度
σ_{df}	N/mm ²	取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントにより取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度
M_{dh}	kN・mm/mm	取水管（管胴部）に作用する水平方向の地震時荷重により生じる曲げモーメント
M_{dv}	kN・mm/mm	取水管（管胴部）に作用する鉛直方向の地震時荷重により生じる曲げモーメント
W_1	kN	取水管（管胴部）の自重（管内部の水を含む）
P_1	kN	取水管（管胴部）に作用する地震時荷重
L_d	mm	取水管（管胴部）の張り出し長さ
P_2	kN	取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重
L_f	N	取水管（フランジ部）の外周長
Z_d	mm ⁴	取水管（管胴部）の断面係数
a_1	mm	1号機取水管の外径
b_1	mm	1号機取水管の内径
P_3	kN	縮小板に作用する地震時荷重
A	mm ²	取水管（管胴部）の作用面積

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、地震に伴う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、取水管（フランジ部）及び取水管（管胴部）とする。

評価対象部位を図 3.5-1 に示す。

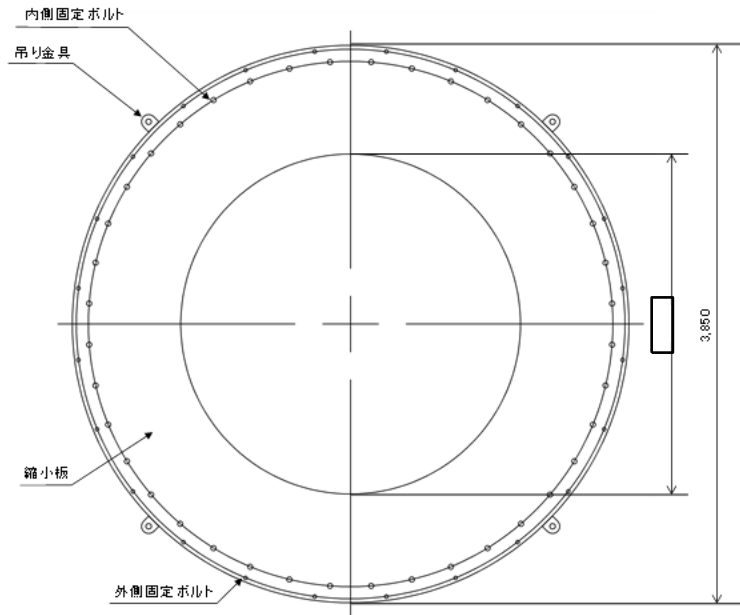


図 3.5-1(1) 評価対象部位（縮小板）

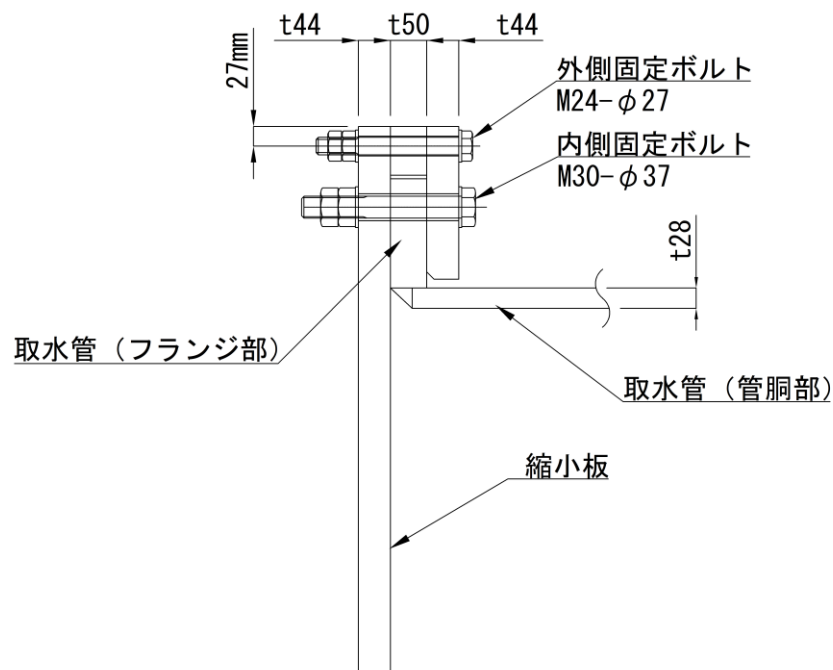


図 3.5-1(2) 評価対象部位

(固定ボルト、取水管（フランジ部）及び取水管（管胴部）)

3.6 固有値解析

3.6.1 固有振動数の計算方法

(1) 解析モデルの設定

流路縮小工は、取水管（フランジ部）に、鋼製の縮小板を固定ボルトにより固定する構造であることから、片持ち梁に単純化したモデルとする。図 3.6.1-1 に解析モデルを示す。

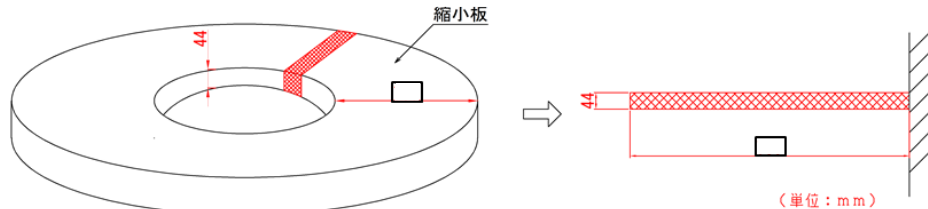


図 3.6.1-1 流路縮小工の固有値解析モデル

(2) 固有振動数の算出方法

固有振動数について、「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。

$$f = \frac{1.8751^2}{L^2} \sqrt{\frac{E \cdot I}{m}} \cdot 10^3$$

ここで、 f ：固有振動数（Hz）

L ：はりの長さ（mm）

E ：ヤング係数（N/mm²）

I ：断面2次モーメント（mm⁴）

m ：質量分布（kg/mm）

(3) 固有振動数の計算条件

固有振動数の計算条件を表 3.6.1-1 に示す。

表 3.6.1-1 固有振動数の計算条件

はりの長さ L (mm)	ヤング係数 E (N/mm ²)	断面2次モーメント I (mm ⁴)	質量分布 m (kg/mm)
□	2.0×10^5	7099	3.4569×10^{-4}

(4) 固有振動数の計算結果

固有振動数の計算結果を表 3.6.1-2 に示す。固有振動数は 20Hz 以上であることから、流路縮小工は剛構造である。

表 3.6.1-2 固有振動数の計算結果

固有振動数 (Hz)	150.35
------------	--------

3.7 荷重及び荷重の組合せ

3.7.1 荷重の組合せ

管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 3.7.1-1 に、地震時の荷重作用図を図 3.7.1-1 に示す。

管路縮小工は水中に設置する構造物であるため

$$G + F_h + S_s$$

ここで、 G : 固定荷重 (kN)

F_h : 静水圧 (kN)

S_s : 基準地震動 S_s による地震荷重 (kN)

表 3.7.1-1 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	F_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。
基準地震動 S_s による地震荷重	水平地震動	S_s	基準地震動 S_s による躯体の慣性力を考慮する。
	鉛直地震動		縮小板、固定ボルト及び取水管（フランジ部）は、主たる荷重が水平方向荷重のため考慮しない。取水管（管胴部）は基準地震動 S_s 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。

(南)

(北)

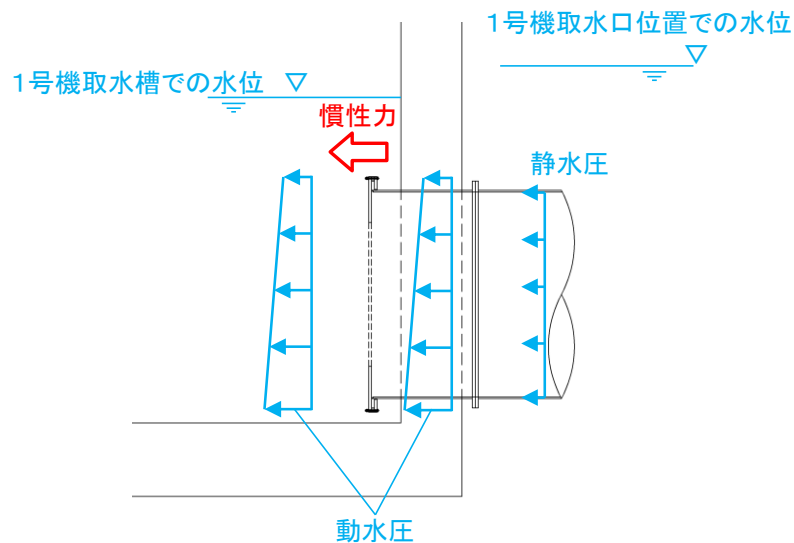


図 3.7.1-1 地震時の荷重作用図

3.7.2 荷重の設定

耐震評価に用いる荷重は以下のとおりとする。なお、荷重の設定に用いる水位及び流速の詳細については、「2.3.1 1号機取水槽流路縮小工に関する補足説明 参考資料1 1号機取水槽流路縮小工の強度計算に用いる水位及び流速について」に示す。

(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 (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。

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

ここで、F_h：静水圧 (kN)

γ_w：海水の単位体積重量 (=10.1kN/m³)

Δh：取水口と取水槽の水位差 (m)

A：縮小板の面積 (m²)

(3) 基準地震動 S_s による地震荷重 (S_s)

地震荷重として、基準地震動 S_s に伴う慣性力を考慮する。地震荷重は流路縮小工の重量に設計震度を乗じた次式により算出する。

$$S_s = W \cdot k$$

ここで、S_s：基準地震動 S_s による地震荷重 (kN)

W：重量 (kN)

k：基準地震動 S_s の設計震度

「3.6 固有値解析」に示したとおり、流路縮小工の固有振動数は 20Hz 以上であることを確認したため、流路縮小工の耐震評価に用いる設計震度は、1号機取水槽付近の地盤物性及び材料物性の不確かさ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裕度を考慮した震度を用いる。

耐震評価に用いる設計震度を表 5-3 に示す。

表 3.7.2-1 設計震度

設置場所	基準地震動 S _s の設計震度	
	水平方向 k _H	鉛直方向 k _V
1号機取水槽北側壁	1.50	1.50

3.8 許容限界

許容限界は、VI-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している許容限界を踏まえて設定する。

3.8.1 使用材料

流路縮小工を構成する各部材の使用材料を表 3.8.1-1 に示す。

表 3.8.1-1 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	SNB7	M30
取水管 (フランジ部)	SS400	t = 46 (mm) *
取水管 (管胴部)	SS400	t = 24 (mm) *

注記* : 「2.3.1 1号機取水槽流路縮小工に関する補足説明 参考資料2 1号機取水槽流路縮小工における要求機能を喪失しうる事象について」に示す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) 及び取水管 (管胴部) についても、余裕厚を4mmとして考慮し、取水管 (フランジ部) の板厚を $50 - 4 = 46$ (mm), 取水管 (管胴部) の板厚を $28 - 4 = 24$ (mm)と設定する。

3.8.2 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。

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)」及び「鋼構造許容応力設計規準 (日本建築学会, 2019年制定)」に基づき表 3.8.2-1 の値とする。

表 3.8.2-1 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	SNB7	—	—	560
取水管 (フランジ部)	SS400	215	124	—
取水管 (管胴部)	SS400	235	135	—

3.9 評価方法

3.9.1 縮小板

縮小板の管軸方向（水平方向）に対する耐震評価を実施する。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あたりの等分布荷重

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

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

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)

P : 縮小板に作用する地震時荷重 (kN)

A_{11} : 作用面積 (mm²)

a_1 : 縮小板の外半径 (mm)

b_1 : 縮小板の内半径 (mm)

(2) 縮小板に作用する曲げモーメント

縮小板に作用する曲げモーメントについて、「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。

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

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

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

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

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

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)

b_1 : 縮小板の内半径 (mm)

ν : 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

縮小板に作用する最大曲げ応力度について、「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， σ_1 ：縮小板に作用する最大曲げ応力度（kN/mm²）

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）

Z_1 ：縮小板の断面係数（mm²/mm）

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

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

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

ここで， τ_1 ：縮小板に生じる最大せん断応力度（kN/mm²）

S_1 ：縮小板に生じるせん断力（=P）（kN）

P：縮小板に作用する地震時荷重（kN）

A_{12} ：縮小板の有効せん断面積（mm²）

a_1 ：縮小板の外半径（mm）

t_1 ：縮小板の板厚（mm）

3.9.2 固定ボルト

固定ボルトについては、管軸方向（水平方向）に対する耐震評価を実施する。固定ボルトには、縮小板に作用する水平力により生じる固定ボルトの引張力に加え、縮小板端部に作用する曲げモーメントに伴い生じる固定ボルトの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応力度以下であることを確認する。

(1) 固定ボルトに作用する最大応力度

$$T = T_1 + T_2$$

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

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

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

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

ここで、 T ：内側固定ボルトに作用する引張力（kN/本）

T_1 ：縮小板に発生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 ：縮小板に発生す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）

P ：内側固定ボルトに作用する地震時荷重（kN）

n ：内側固定ボルトの本数（本）

M ：縮小板に生じる曲げモーメント合力（kN・mm/mm）

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）

σ_b ：内側固定ボルトに生じる最大応力度（kN/mm²）

3.9.3 取水管（フランジ部）

取水管（フランジ部）については、管軸方向（水平方向）荷重に対する耐震評価を実施する。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。また、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の計算に用いる入力値を表 3.9.3-1 に示す。

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

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

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）

P ：取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重（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

取水管（フランジ部）に作用する曲げモーメントについて、「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）に生じる半径方向の
曲げモーメント（kN・mm/m）

$M_{\theta f}$ ：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/m）

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）

ν ：ポアソン比

κ_f , β_f , ρ_f ：係数

a_f ：取水管（フランジ部）の内半径（mm）

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）

(3) 取水管（フランジ部）に作用する最大曲げ応力度

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（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/mm^2 ）

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

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

Z_f ：取水管（フランジ部）の断面係数（ mm^3/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

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

$$A_3 = t_f \cdot l_f$$

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

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/mm^2 ）

S_f ：取水管（フランジ部）に生じるせん断力（ $= P$ ）（ kN ）

P ：取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重（ kN ）

A_3 ：取水管（フランジ部）付け根の断面積（ mm^2 ）

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 ）

3.9.4 取水管（管胴部）

取水管（管胴部）の検討では、取水槽北側壁を固定端とした片持ち梁として、管軸方向（水平方向）に対する耐震評価を実施する。

(1) 取水管（管胴部）に作用する曲げ応力度

取水管（管胴部）に生じる曲げ応力度は、以下の式より算出する。

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_{dh}^2 + \sigma_{dv}^2} + \sigma_t + \sigma_f$$

$$\sigma_{dv} = \frac{M_{dv}}{Z_d}$$

$$\sigma_{dh} = \frac{M_{dh}}{Z_d}$$

$$M_{dv} = \frac{(W_1 + P_1) \cdot L_d}{2} + P_2 \cdot \left(L_d + \frac{L_f}{2}\right)$$

$$M_{dh} = \frac{P_1 \cdot L_d}{2} + P_2 \cdot \left(L_d + \frac{L_f}{2}\right)$$

$$Z_d = \frac{\pi}{32 \cdot a_1} \cdot (a_1^4 - b_1^4)$$

$$\sigma_t = \frac{P_3}{A}$$

$$A = (a_1^2 - b_1^2) \times \frac{\pi}{4}$$

ここで、 σ_d : 取水管（管胴部）に生じる曲げ応力度（N/mm²）

σ_{dh} : 取水管（管胴部）に生じる水平方向の地震時荷重により生じる曲げ最大応力度（N/mm²）

σ_{dv} : 取水管（管胴部）に生じる鉛直方向の地震時荷重により生じる曲げ最大応力度（N/mm²）

σ_t : 縮小板に作用する地震時荷重により取水管（管胴部）に生じる最大引張応力度（N/mm²）

σ_f : 取水管（フランジ部）に生じる曲げモーメントにより取水管（フランジ部）に生じる最大曲げ応力度（N/mm²）

M_{dh} : 取水管（管胴部）に作用する水平方向の地震時荷重により生じる曲げモーメント（kN・mm/mm）

M_{dv} : 取水管（管胴部）に作用する鉛直方向の地震時荷重により生じる曲げモーメント（kN・mm/mm）

W_1 : 取水管 (管胴部) の自重 (管内部の水を含む) (kN)

P_1 : 取水管 (管胴部) に作用する地震時荷重 (kN)

L_d : 取水管 (管胴部) の張り出し長さ (mm)

P_2 : 取水管 (フランジ部) に作用する地震時荷重 (kN)

L_f : 取水管 (フランジ部) の外周長 (mm)

Z_d : 取水管 (管胴部) の断面係数 (mm^3)

a_1 : 1号機取水管の外径 (mm)

b_1 : 1号機取水管の内径 (mm)

P_3 : 縮小板に作用する地震時荷重 (kN)

A : 取水管 (管胴部) の作用面積 (mm^2)

(2) 取水管（管胴部）に生じる最大せん断応力度

取水管（管胴部）に生じる最大せん断応力度は、以下の式より算出する。

$$\tau_d = \sqrt{\tau_{dv}^2 + \tau_{dh}^2}$$

$$\tau_{dv} = \frac{S_{dv} + W_1}{A_5}$$

$$\tau_{dh} = \frac{S_{dh}}{A_5}$$

$$S_{dv} = S_{dh} = P$$

$$A_5 = \frac{\left\{ \left(\frac{D_i}{2} + t_p \right)^2 \cdot \pi - \left(\frac{D_i}{2} \right)^2 \cdot \pi \right\}}{2}$$

ここで、 τ_d : 取水管（管胴部）に生じる最大せん断応力度（N/mm²）

S_{dv} : 取水管（管胴部）に作用する鉛直方向の地震時荷重により生じるせん断力（kN）

S_{dh} : 取水管（管胴部）に作用する水平方向の地震時荷重により生じるせん断力（kN）

W_1 : 取水管（管胴部）に作用する地震時（kN）

A_5 : 取水管（管胴部）の有効せん断面積（mm²）

D_i : 取水管（管胴部）の管内径（mm）

t_p : 取水管（管胴部）の管厚（mm）

3.10 評価条件

流路縮小工の耐震評価に用いる入力値を表 3.10-1~4 に示す。

表 3.10-1 流路縮小工の縮小板の耐震計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
P	kN	縮小板に作用する地震時荷重	1,420
a_1	mm	縮小板の外半径	1,925
b_1	mm	縮小板の内半径	
r_1	mm	縮小板の中心から半径方向の距離	1,925
ν	—	ポアソン比	0.3
t_1	mm	縮小板の板厚	40

表 3.10-2 流路縮小工の固定ボルトの耐震計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
D_1	mm	フランジ外径	3,850
l_1	mm	支点間距離	0.111
M_{r1}	kN・mm/mm	縮小板に生じる半径方向の曲げモーメント	40.07
$M_{\theta 1}$	kN・mm/mm	縮小板に生じる周方向の曲げモーメント	12.02
P	kN	内側固定ボルトに作用する地震時荷重	1,420
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 3.10-3 流路縮小工の取水管（フランジ部）の耐震計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
P	kN	取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重	1,452
b_f	mm	取水管（フランジ部）の外半径	1,853
ν	—	ポアソン比	0.3
a_f	mm	取水管（フランジ部）の内半径	1,675
b_f	mm	取水管（フランジ部）の外半径	1,853
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
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）に生じるせん断力	1,452
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	24

表 3.10-4 流路縮小工の取水管（管胴部）の耐震計算に用いる入力値

記号	単位	定義	入力値
W_1	kN	取水管（管胴部）の自重（管内部の水を含む）	9
P_1	kN	取水管（管胴部）に作用する地震時荷重	352
L_d	mm	取水管（管胴部）の張り出し長さ	450
P_2	kN	取水管（フランジ部）に作用する地震時荷重	70
P_3	kN	縮小板に作用する地震時荷重（kN）	1,420
a_1	mm	1号機取水管の外径	3,398
b_1	mm	1号機取水管の内径	3,350
D_i	mm	取水管（管胴部）の管内径	3,350
t_p	mm	取水管（管胴部）の管厚	24

3.11 評価結果

流路縮小工の耐震評価結果を表 3.11-1 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 3.11-1 流路縮小工の耐震評価結果

評価対象部位		発生値 (応力度)		許容応力度		照査値
縮小板	曲げ	157	N/mm ²	235	N/mm ²	0.67
	せん断	3	N/mm ²	135	N/mm ²	0.03
固定ボルト	引張	267	N/mm ²	560	N/mm ²	0.48
取水管 (フランジ部)	曲げ	72	N/mm ²	215	N/mm ²	0.34
	せん断	3	N/mm ²	124	N/mm ²	0.03
取水管 (管胴部)	曲げ	205	N/mm ²	235	N/mm ²	0.90
	せん断	5	N/mm ²	135	N/mm ²	0.04

4. 1号機取水槽北側壁の耐震評価

4.1 構造及び補強の概要

取水槽北側壁は、1号機取水槽流路縮小工を間接支持する間接支持構造物であり、十分な支持性能を有するC_M級以上の岩盤に支持された鉄筋コンクリート造の地中構造物である。1号機取水槽の平面図を図4-1に、断面図を図4-2に、概略配筋図を図4-3に示す。

1号機取水槽は、地下2階構造となっており、上部は除じん機エリア、海水ポンプエリア、ストレーナエリアの3エリアに分かれている。下部は水路となっており、除じん機エリアの下部は6連のボックスカルバート構造、海水ポンプエリアの下部は3連のボックスカルバート構造となっている。

1号機取水槽の北側壁は、流路縮小工の間接支持構造物である。北側壁及び流路縮小工の位置図を図4-4に示す。

1号機取水槽の耐震性を確保するために耐震補強を実施する。せん断破壊に対する補強として、後施工せん断補強工法（ポストヘッドバー工法）（以下「PHb工法」という。）によるせん断補強を実施する。取水槽北側壁の補強箇所を図4-5に示す。

なお、1号機取水槽ピット部については下部に閉塞版を設置したのちに、コンクリート充填を行う。

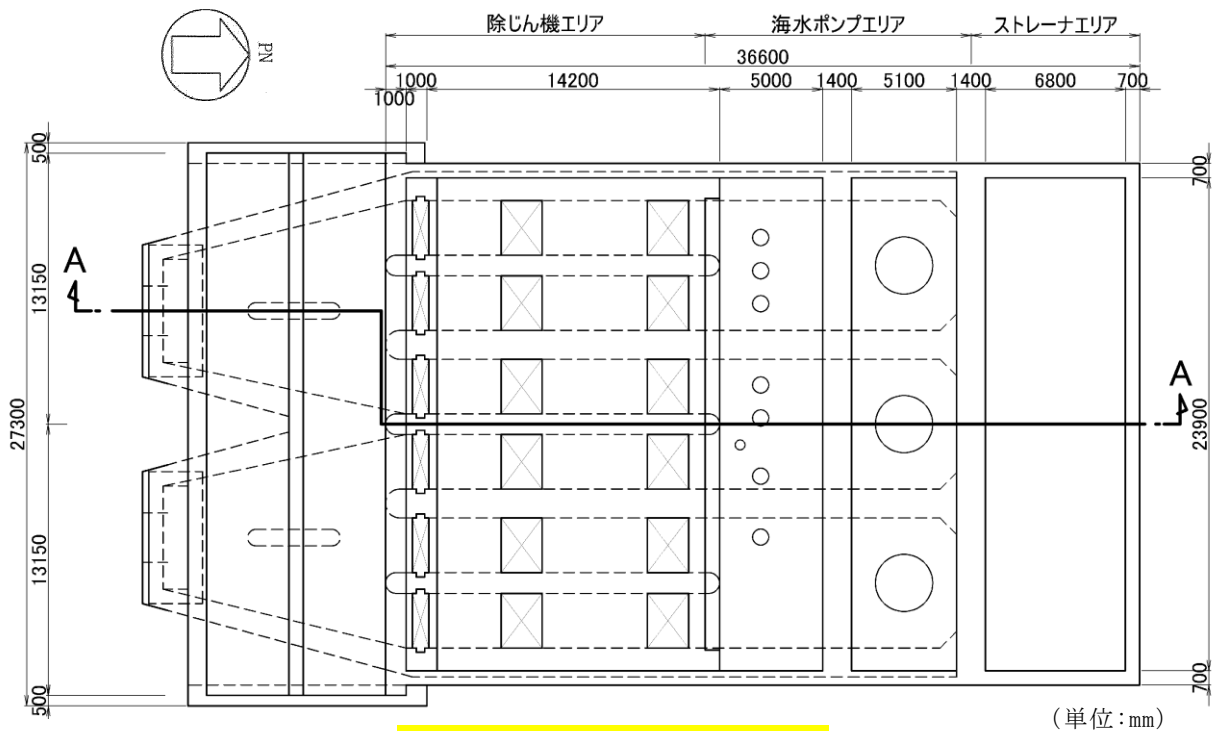


図 4-1 1号機取水槽 平面図

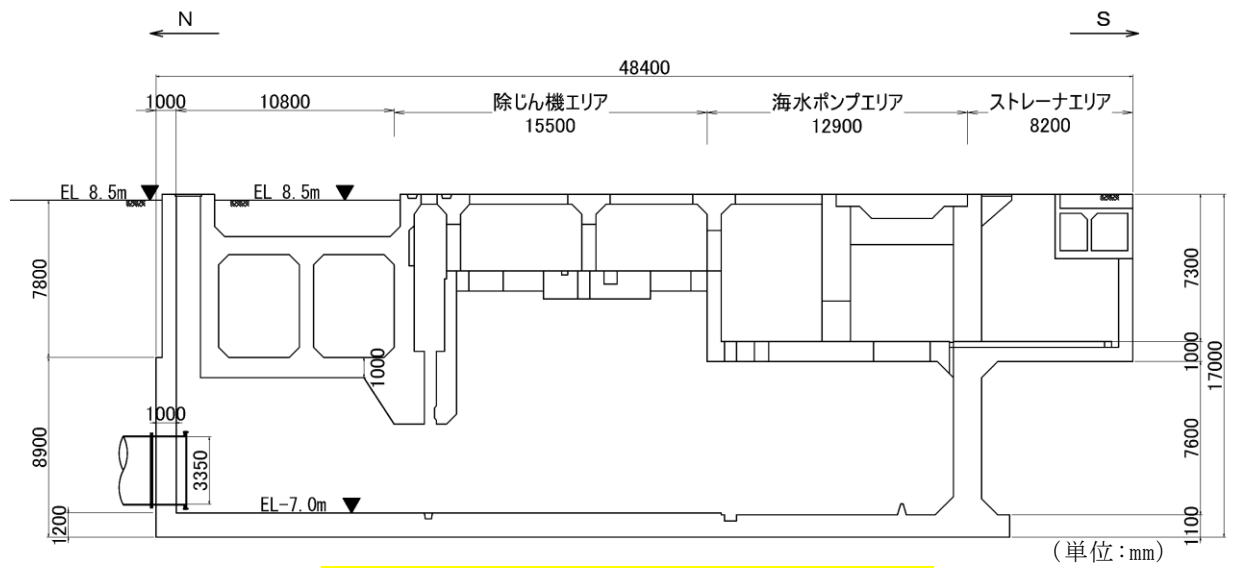


図 4-2 1号機取水槽 断面図(A-A断面)

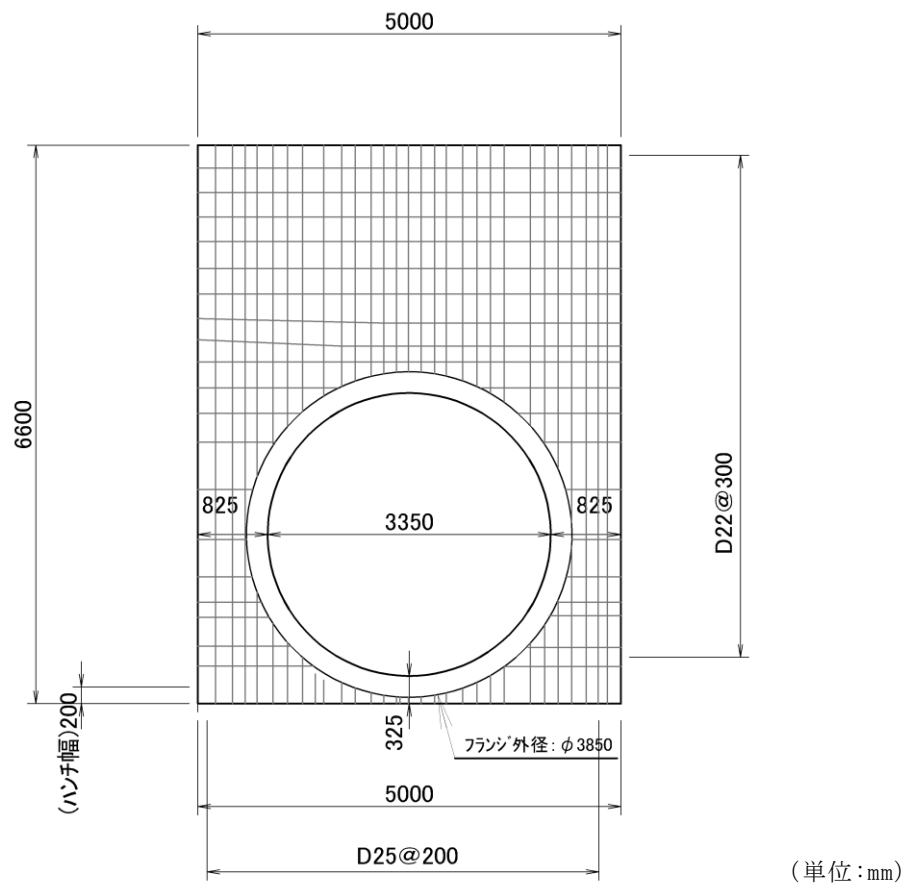


図 4-3 1号機取水槽概略配筋図(北側壁)

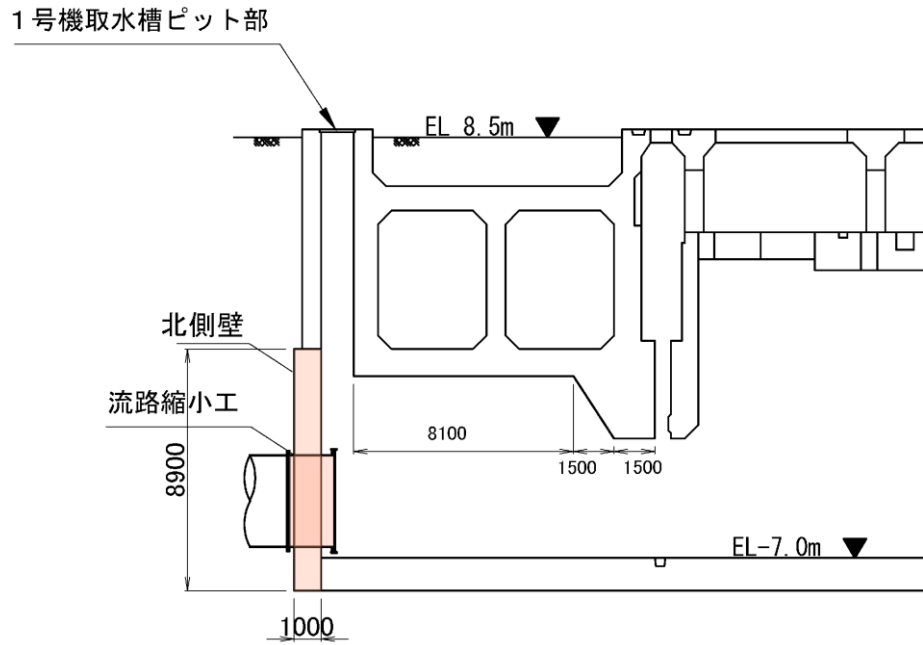
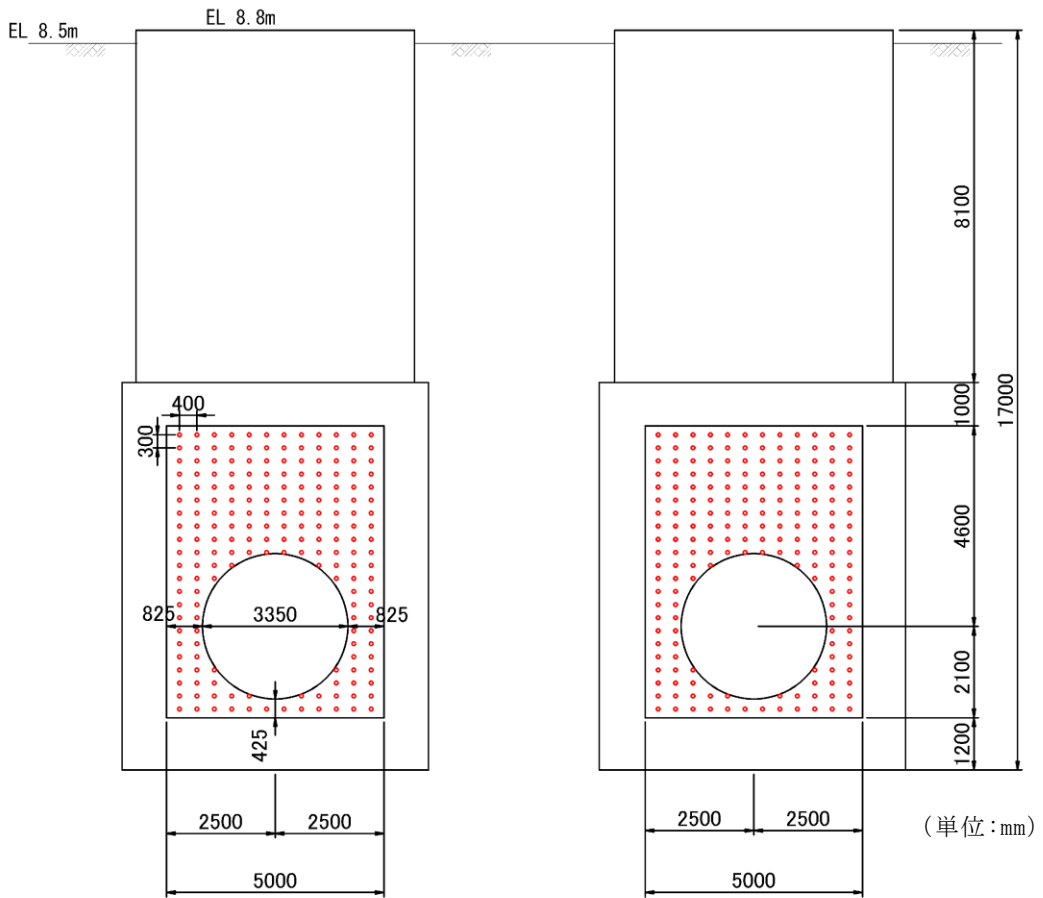


図 4-4 1号機取水槽流路縮小工及び北側壁の範囲



○ : PHb 工法 : D19@400×300, SD345
 図 4-5 PHb 工法適用箇所(北側壁)

4.2 評価方針

取水槽北側壁は、1号機取水槽流路縮小工の間接支持構造物である。

取水槽北側壁の耐震評価フローを図4-6に示す。

取水槽北側壁は、VI-2-10-2-5「1号機取水槽の地震応答計算書」より得られた地震応答解析の結果に基づき、津波防護施設の間接支持構造物として、表4-1に示すとおり、構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価を行う。

構造部材の健全性評価及び基礎地盤の支持性能評価を実施することで、構造強度を有すること及び津波防護施設を支持する機能を損なわないことを確認する。

構造部材の健全性評価については、VI-2-10-2-5「1号機取水槽の地震応答計算書」より得られた地震応答解析の結果に基づき、曲げ・軸力系の破壊に対しては構造部材の照査用層間変形角が許容限界を下回ることを確認する。せん断破壊に対しては照査用せん断力が許容限界を下回ることを確認する。

なお、せん断破壊に対する補強としてPHb工法を用いる場合には、構造部材に対してPHb工法の適用条件を満たしていることを確認し、PHb工法を採用する。

基礎地盤の支持性能評価については、VI-2-10-2-5「1号機取水槽の地震応答計算書」より得られた地震応答解析の結果に基づき、基礎地盤に発生する接地圧が許容限界を下回ることを確認する。

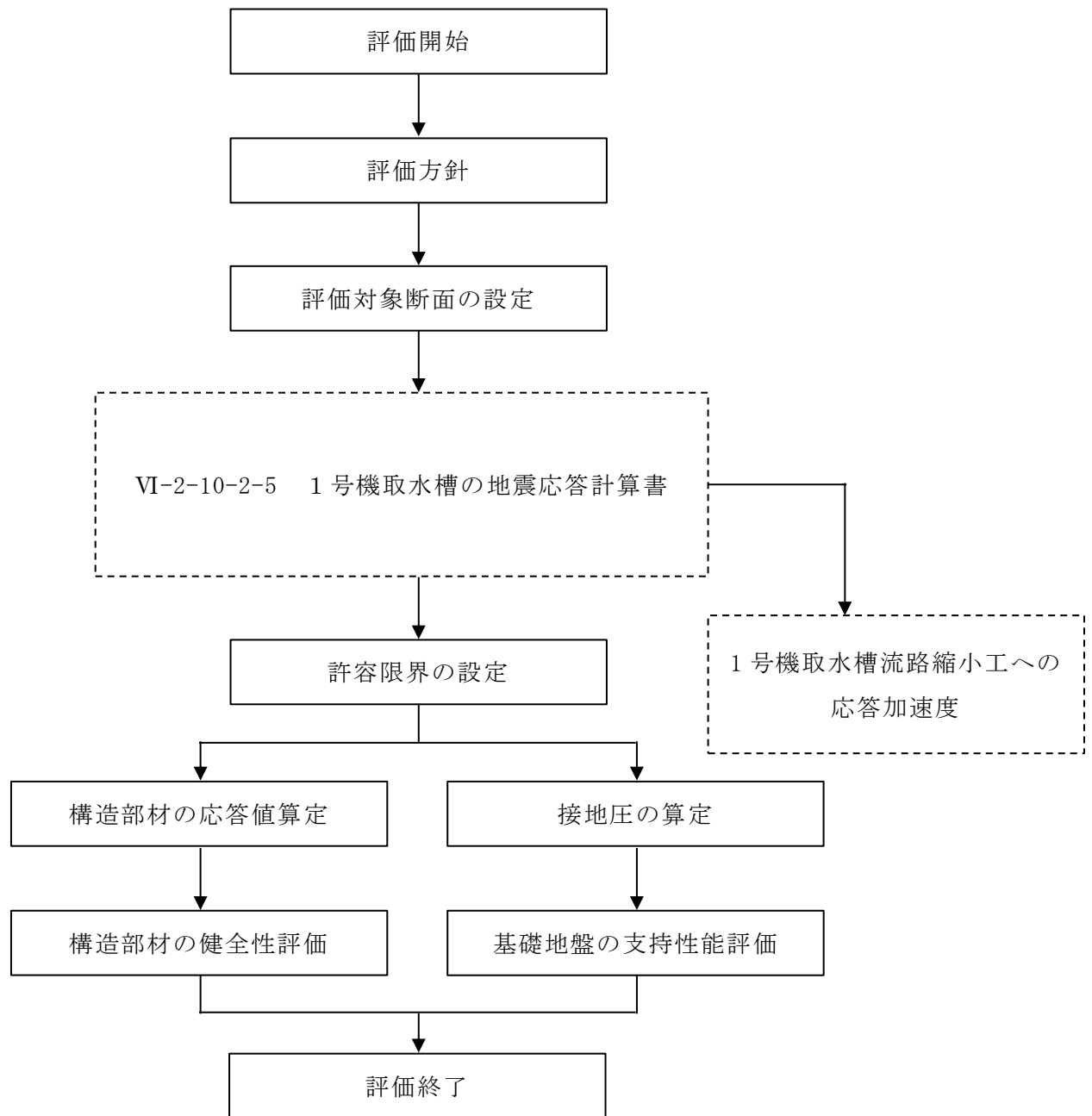


図 4-6 1号機取水槽 耐震評価フロー

表 4-1 取水槽北側壁 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	鉄筋コンクリート部材	照査用層間変形角及びせん断力が許容限界を下回ることを確認	曲げ・軸力	限界層間変形角*
				せん断力	せん断耐力*
	基礎地盤の支持性能	基礎地盤	発生する接地圧が許容限界を下回ることを確認	岩盤の極限支持力度	

注記*： 妥当な安全余裕を考慮する。

4.3 評価対象断面

1号機取水槽北側壁の評価対象断面位置図を図4-7に示す。構造物の耐震設計における評価対象断面は、図4-7のA-A断面とする。

評価対象地質断面図を図4-8に示す。

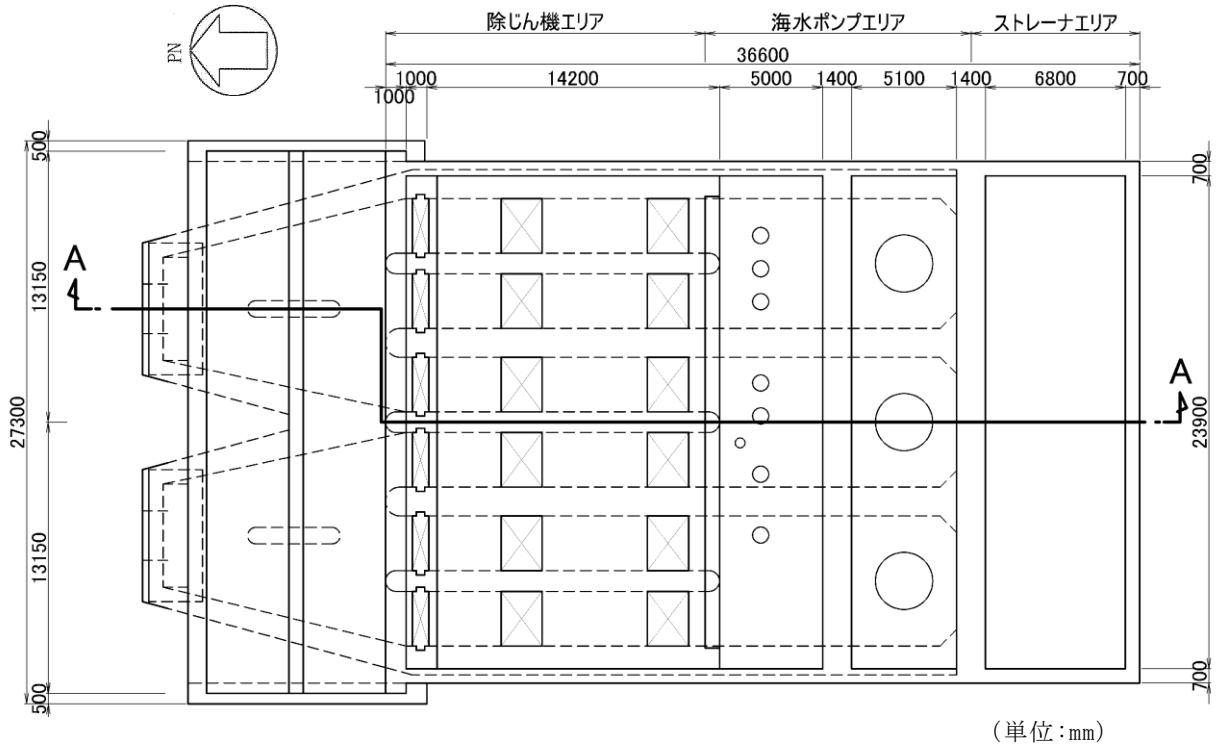


図4-7 1号機取水槽 評価対象断面位置図

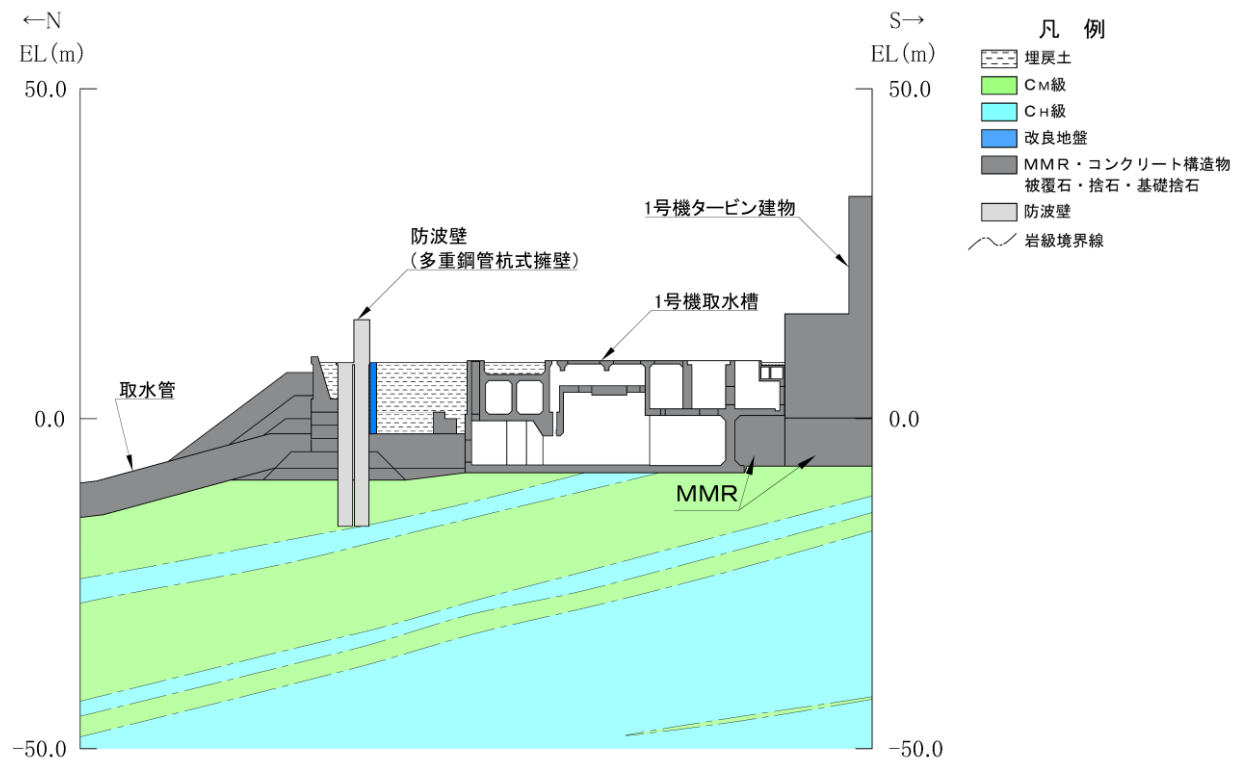


図 4-8 1号機取水槽 評価対象地質断面図 (A-A断面)

4.4 使用材料及び材料の物性値

構造物の使用材料を表 4-2, 材料の物性値を表 4-3 に示す。

表 4-2 使用材料

材料		仕様
構造物	コンクリート	設計基準強度 20.6N/mm ²
	鉄筋	SD345
MMR		設計基準強度 18.0N/mm ²

表 4-3 材料の物性値

材料	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)	ポアソン比
構造物 (鉄筋コンクリート 構造物)	2.33×10 ⁴	24.0* ¹	0.2
MMR	2.20×10 ⁴	22.6* ²	

注記*¹: 鉄筋コンクリートの単位体積重量を示す。

*²: 無筋コンクリートの単位体積重量を示す。

4.5 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。

4.5.1 構造部材の健全性に対する許容限界

(1) 曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界は、土木学会マニュアル 2005 に基づき、限界層間変形角（層間変形角 1/100）とする。

土木学会マニュアル 2005 では、曲げ・軸力系の破壊に対する限界状態は、コンクリートの圧縮縁のかぶりが剥落しないこととされており、層間変形角 1/100 又は圧縮縁コンクリートひずみ 1.0%の状態は、かぶりコンクリートが剥落する前の状態であることが、屋外重要土木構造物を模したラーメン構造の破壊実験及び数値シミュレーション等の結果より確認されている。この状態を限界値とすることで構造全体としての安定性が確保できるとして設定されたものである。

1号機取水槽北側壁の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界を表 4-4 に示す。

表 4-4 取水槽北側壁の曲げ・軸力系の破壊に対する許容限界

要求機能	許容限界	
構造強度を有すること	限界層間変形角	1/100

(2) せん断破壊に対する許容限界

構造部材のせん断破壊に対する許容限界は、PHb 工法を用いる構造部材について、PHb によりせん断補強された部材のせん断耐力式を用いる。

PHbによりせん断補強された部材のせん断耐力式

1号機取水槽北側壁において後施工せん断補強（ポストヘッドバー（PHb））を配置した構造部材のせん断耐力については、「建設技術審査証明報告書 技術名称後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」，一般財団法人土木研究センター」（以下「建設技術証明書」という。）に示されている以下の設計式により求める。

$$V_{pyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{phb}$$

$$V_{phb} = \beta_{aw} \cdot V_{awd} = \beta_{aw} \{ A_{aw} f_{awy} (\sin \alpha_{aw} + \cos \alpha_{aw}) / S_{aw} \} Z / \gamma_b$$

$$\beta_{aw} = 1 - I_y / \{ 2 \cdot (d - d') \} \quad \text{ただし,} \quad \beta_{aw} \leq 0.9$$

ここで、

- V_{cd} : せん断補強鋼材を用いない RC 部材の単位長さ当たりのせん断耐力
- V_{sd} : 既存のせん断補強鋼材により受け持たれる壁部材の単位幅当たりのせん断耐力
- V_{phb} : PHbにより受け持たれる RC 部材の単位長さ当たりのせん断耐力
- V_{awd} : PHbを通常のスターラップと見なして求められる単位長さ当たりのせん断耐力
- β_{aw} : PHbのせん断耐力の向上への有効性を示す係数
- A_{aw} : 単位長さ当たりの区間 S_{aw} における PHb の総断面積
- f_{awy} : PHb の設計降伏強度で 400N/mm^2 以下とする。
- α_{aw} : PHb が部材軸となす角度
- S_{aw} : PHb の配置間隔
- z : 圧縮応力の合力の作用位置から引張鋼材図心までの距離で一般に $d/1.15$ としてよい。
- γ_b : 部材係数（一般に 1.10 としてよい）
- I_y : PHb の埋込側に必要な定着長
- $d-d'$: 補強対象部材の圧縮鉄筋と引張鉄筋の間隔（ $d-d' \geq I_y$ ）

PHb が負担するせん断耐力は，先端型定着体の定着長が 3.5D～5.5D であることから，通常のせん断鉄筋に比べ補強効率が低下する。PHb が負担するせん断耐力は同定着長と補強対象部材の主鉄筋間隔から算出される有効率 β_{aw} を通常のせん断補強鉄筋の負担分に乗じることにより考慮されている。図 4-9 に有効率算定における概念図を示す。

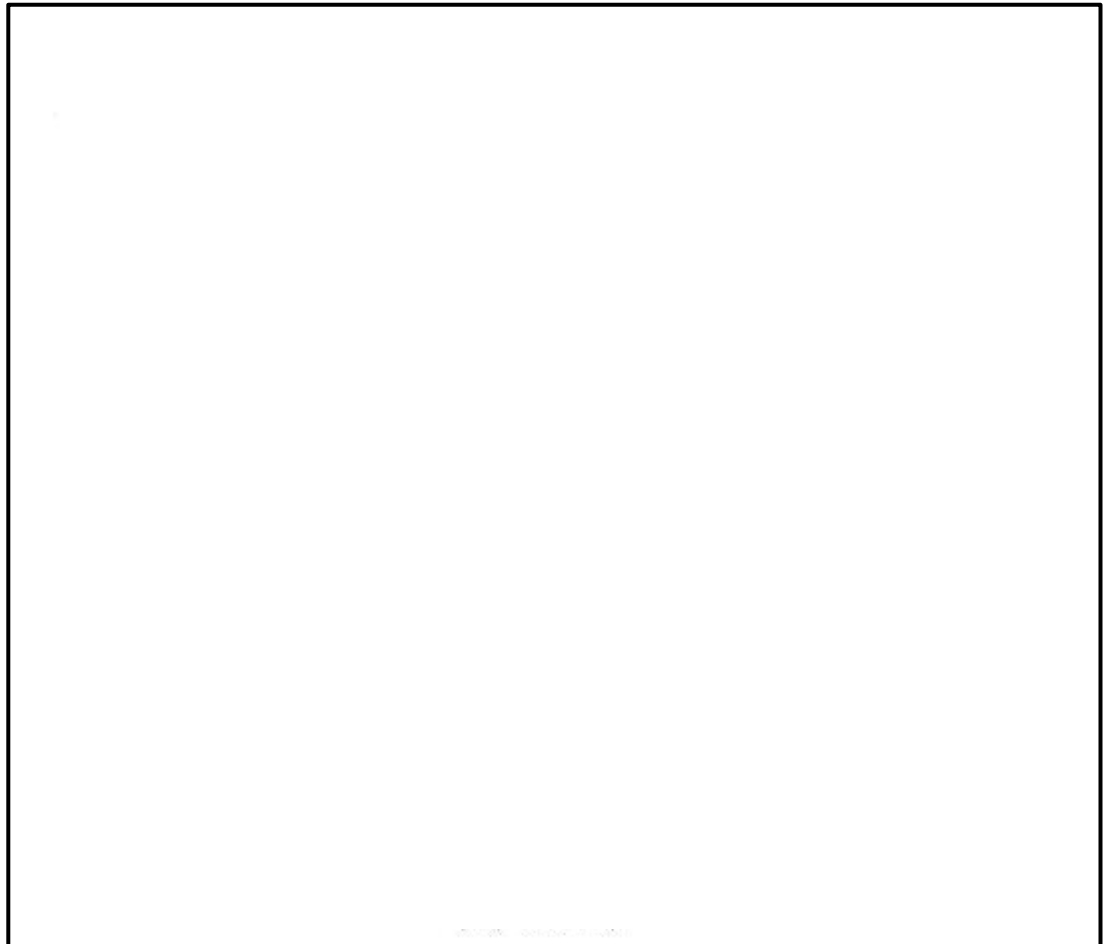


図 4-9 ポストヘッドバー (PHb) の有効率算定の概念図

4.5.2 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

(1) 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、岩盤の極限支持力度とする。

基礎地盤の支持性能に対する許容限界を表4-5に示す。

表4-5 基礎地盤の支持性能に対する許容限界

評価項目	基礎地盤	許容限界 (N/mm ²)
極限支持力度	C _M 級	9.8

4.6 評価方法

1号機取水槽北側壁の耐震評価は、地震応答解析により算定した照査用応答値が、「4.5 許容限界」に示す許容限界以下であることを確認する。

なお、解析ケース④及び⑤の結果については、追而とする。

4.6.1 構造部材の健全性評価

構造部材の曲げ・軸力系及びせん断破壊に対する照査に対して、地震応答解析により算定した照査用層間変形角及び照査用せん断力が許容限界以下であることを確認する。

曲げ・軸力系の破壊に対して照査値が最大となる地震動及び解析ケースでの層間変形角の時刻歴波形を図4-10に、せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図を図4-11に示す。

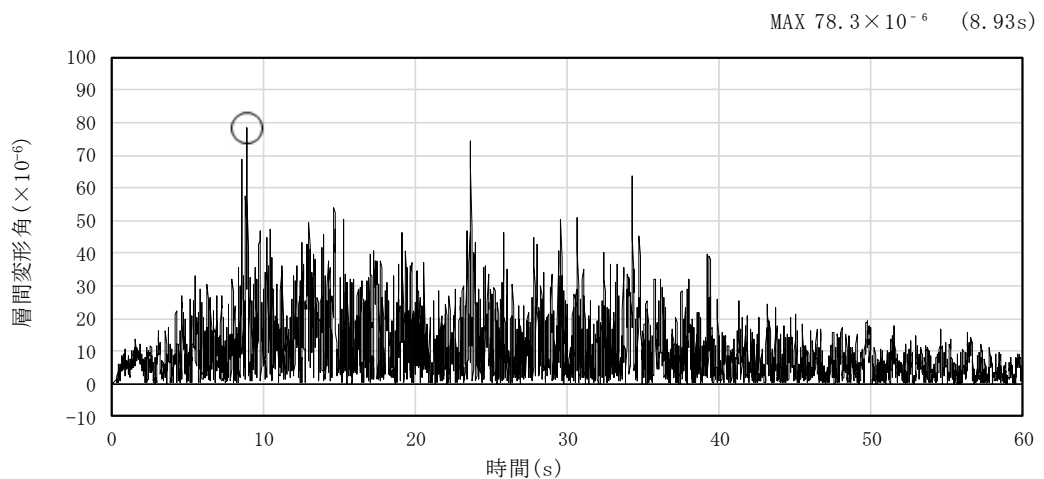
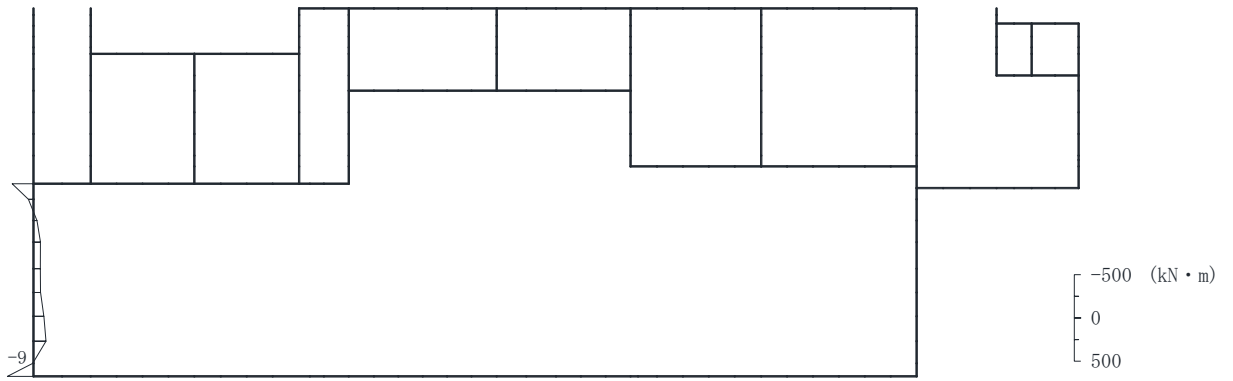
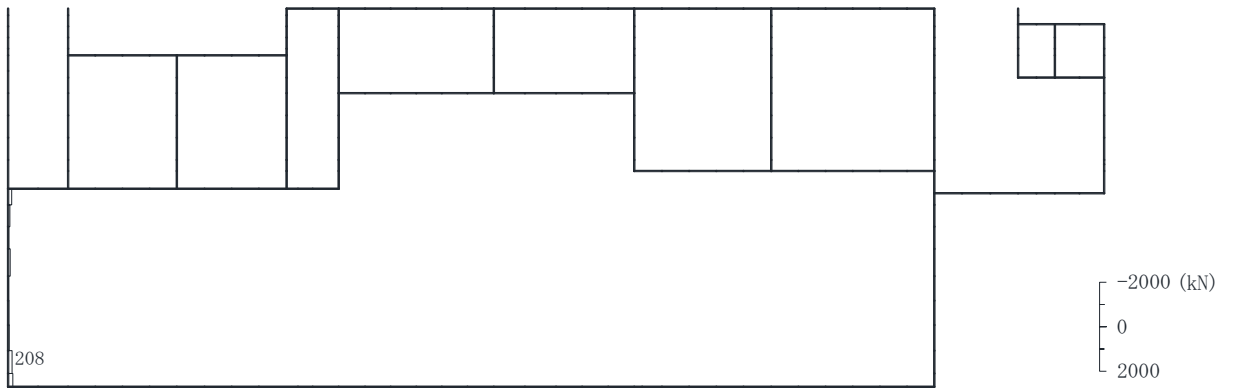


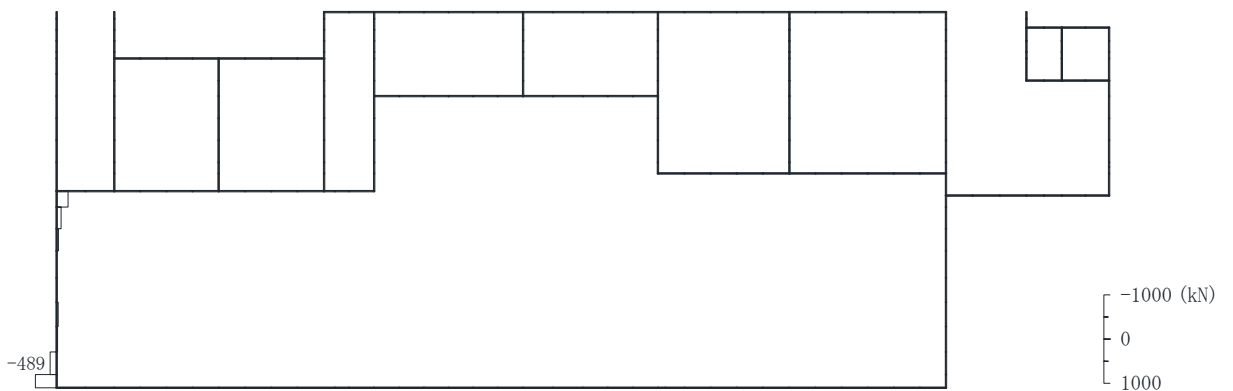
図4-10 曲げ・軸力系の破壊に対する照査における層間変形角の時刻歴波形
(A-A断面, 解析ケース①, S_s-D (—))



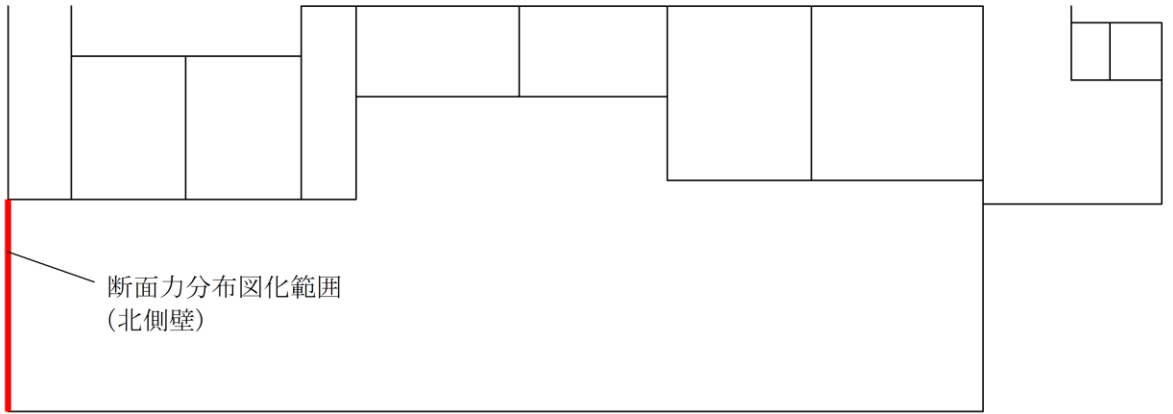
数値：評価位置における断面力
 (a) 曲げモーメント (kN・m)



数値：評価位置における断面力
 (b) 軸力 (kN) (+ : 引張, - : 圧縮)



数値：評価位置における断面力
 (c) せん断力 (kN)



(d) 断面力分布図化範囲

図 4-11 せん断破壊に対する照査値最大時の断面力図

(A-A断面, 解析ケース③, S s - D (- -))

4.6.2 基礎地盤の支持性能評価

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

5. 耐震評価結果

5.1 構造部材の健全性に対する評価結果

構造部材の曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値を表 5-1 に、せん断破壊に対する各評価位置での最大照査値を表 5-2 に示す。

1号機取水槽北側壁の照査用層間変形角及び照査用せん断力が許容限界以下であることを確認した。

表 5-1 曲げ・軸力系の破壊に対する最大照査値

解析 ケース	地震動	照査用 層間変形角 R_d^*	限界 層間変形角 R_u	照査値 R_d/R_u
①	S s - D (--)	9.40×10^{-5}	1.0×10^{-2}	0.01

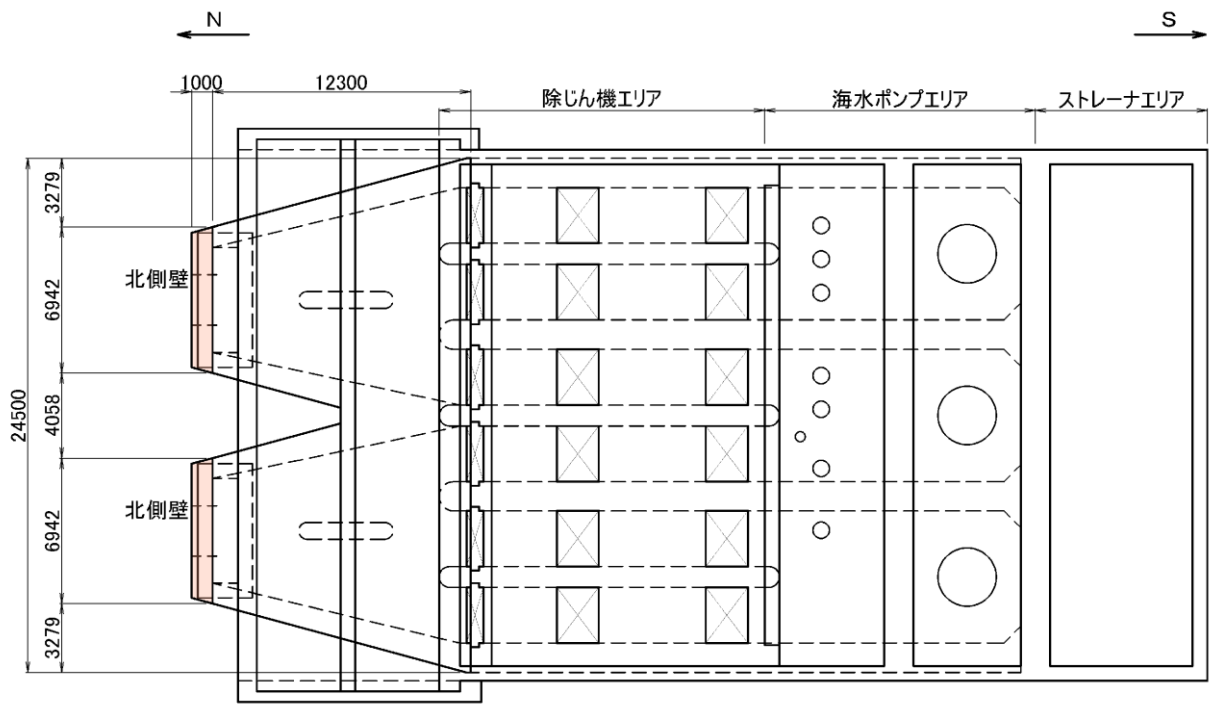
注記*：照査用層間変形角 $R_d =$ 最大層間変形角 $R \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (=1.2)$

表 5-2 せん断破壊に対する最大照査値 (北側壁)

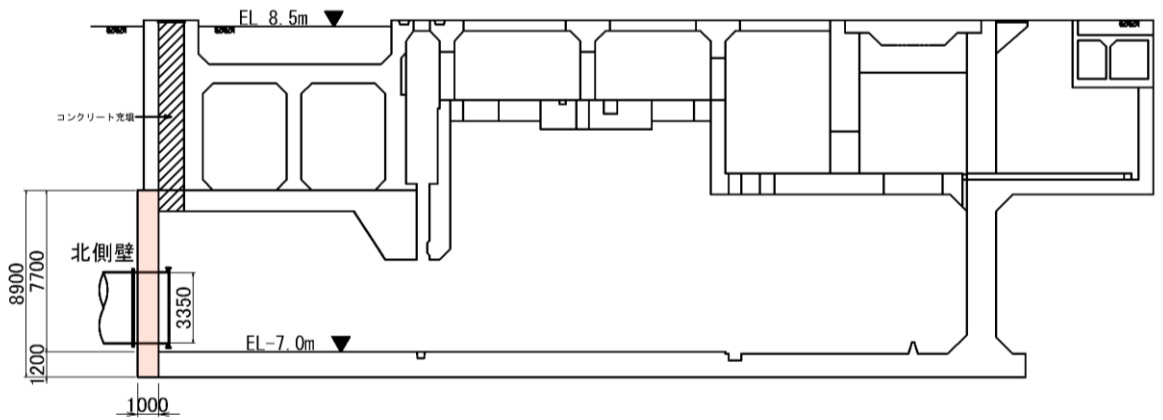
評価位置*1	解析 ケース	地震動	照査用 せん断力*2 V_d (kN)	せん断耐力 $V_{y d}$ (kN)	照査値 $V_d/V_{y d}$	
北側壁	①	③	S s - D (--)	514	730	0.71

注記*1：評価位置は図 5-1 に示す。

*2：照査用せん断力 $V_d =$ 発生せん断力 $V \times$ 構造解析係数 $\gamma_a (=1.05)$



(平面図)



(断面図)

(単位:mm)

図 5-1 評価位置

5.2 基礎地盤の支持性能に対する評価結果

基礎地盤の支持性能に対する照査結果を表 5-3 に示す。

表 5-3 基礎地盤の支持性能に対する照査結果

解析 ケース	地震動	最大接地圧 R_d (N/mm ²)	極限支持力度 R_u (N/mm ²)	照査値 R_d/R_u
①	S s - D (+ -)	1.77	9.8	0.19