

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-254 改2
提出年月日	平成30年7月17日

V-2-10-2-6-2 取水ピット空気抜き配管逆止弁の
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	4
3. 耐震評価部位	6
4. 固有値解析	7
4.1 基本方針	7
4.2 固有振動数の計算方法	7
4.2.1 記号の説明	7
4.2.2 モデル	7
4.2.3 固有振動数の算出方法	8
4.2.4 固有振動数の計算条件	9
4.3 固有値解析結果	9
5. 応力評価	10
5.1 基本方針	10
5.2 荷重の組合せ及び許容応力	10
5.2.1 荷重の組合せ	10
5.2.2 許容応力	11
5.3 設計用地震力	13
5.4 応力評価方法	13
5.4.1 記号の説明	13
5.4.2 応力計算	14
5.5 応力評価条件	19
6. 構造健全性評価	20
6.1 構造健全性評価方法	20
7. 耐震評価結果	21

1. 概要

本資料は、添付資料V-2-1-9「機能維持の基本方針」にて設定している構造強度に基づき、浸水防護施設のうち取水ピット空気抜き配管逆止弁が設計用地震力に対して、主要な構造部材が十分な構造健全性を有することを説明するものである。その耐震評価は、逆止弁の固有値解析、応力評価及び逆止弁の機能維持評価結果に基づく構造健全性評価により行う。

2. 基本方針

2.1 位置

取水ピット空気抜き配管逆止弁は、循環水ポンプ室の取水ピット空気抜き配管に設置する。
 取水ピット空気抜き配管逆止弁の設置位置を図 2-1 に示す。

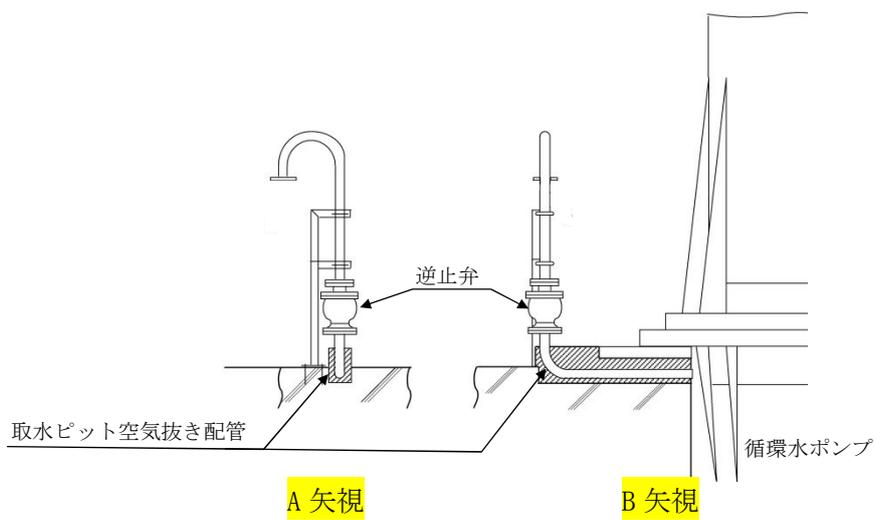
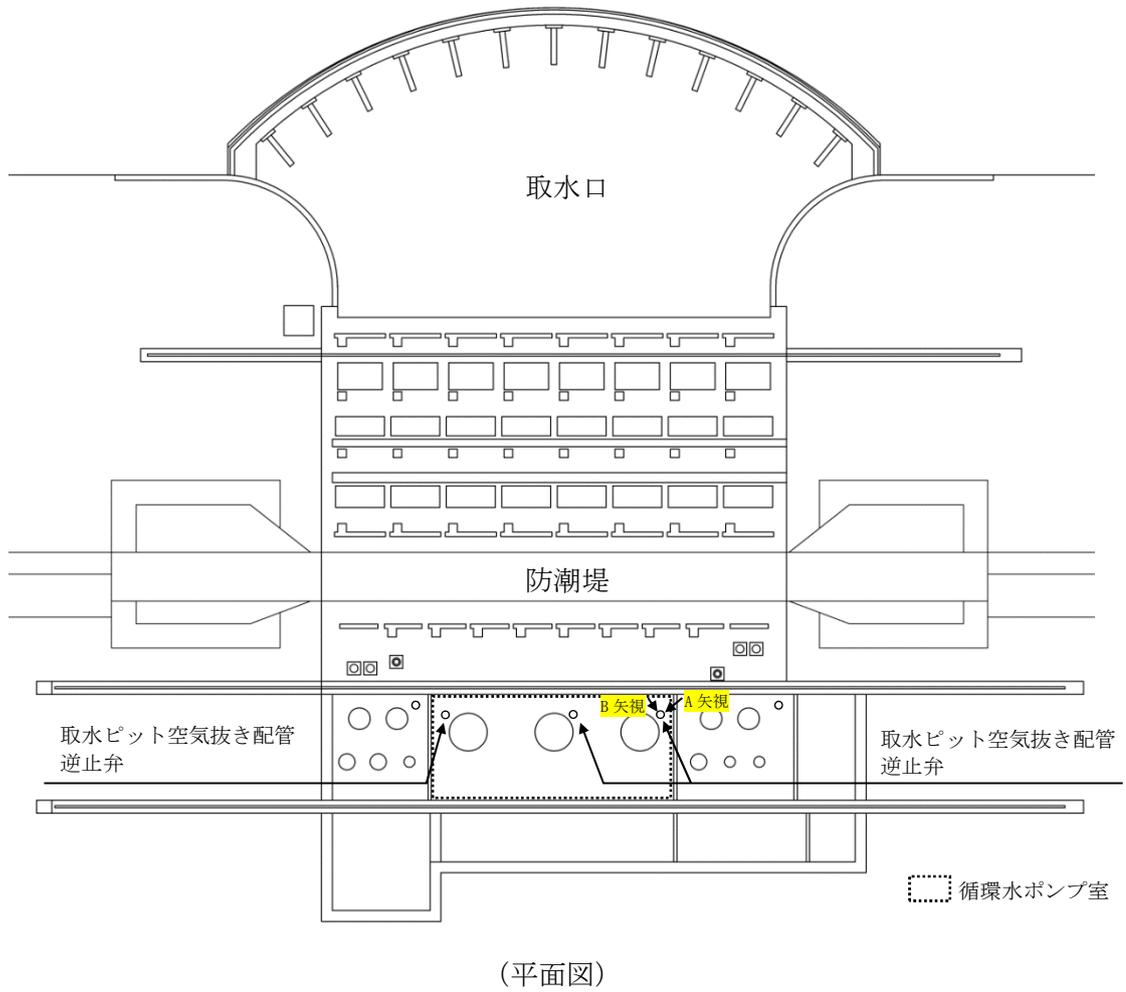


図 2-1 取水ピット空気抜き配管逆止弁の設置位置図

2.2 構造概要

取水ピット空気抜き配管逆止弁は、フロート式の逆止弁であり、津波の流入によりフロートが押し上げられ、弁座に密着することで止水する。取水ピット空気抜き配管逆止弁の構造概要を表 2-1 に示す。

表 2-1 取水ピット空気抜き配管逆止弁の構造概要

設備名称	構造概要		説明図
	主体構造	支持構造	
取水ピット 空気抜き配 管 逆 止 弁 1, 2, 3	弁本体, 弁座を含む弁蓋, 弁体であるフロート及びフロートを弁座へ導くフロートガイドで構成する。	弁本体及び弁蓋のフランジ部を循環水ポンプ室に設置されている取水ピット空気抜き配管のフランジ面にボルトで固定する。また, 配管系への支持構造物の取付けにより固定する。	

2.3 評価方針

取水ピット空気抜き配管逆止弁の耐震評価は、添付資料V-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、「2.2 構造概要」に示す取水ピット空気抜き配管逆止弁の構造を踏まえ、「3. 耐震評価部位」にて設定する評価対象部位において、「4. 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、「5. 応力評価」に示す方法にて確認する。また、取水ピット空気抜き配管逆止弁の機能維持評価は、取水ピット空気抜き配管逆止弁の固有振動数から応答加速度を求め、機能確認済加速度以下であることを「6. 機能維持評価」に示す方法にて確認する。応力評価及び機能維持評価の確認結果を「7. 耐震評価結果」にて確認する。

ここで、機能確認済加速度には、正弦波加振試験において、止水性の機能の健全性を確認した加振波の最大加速度を適用する。

耐震評価フローを図 2-2 に示す。

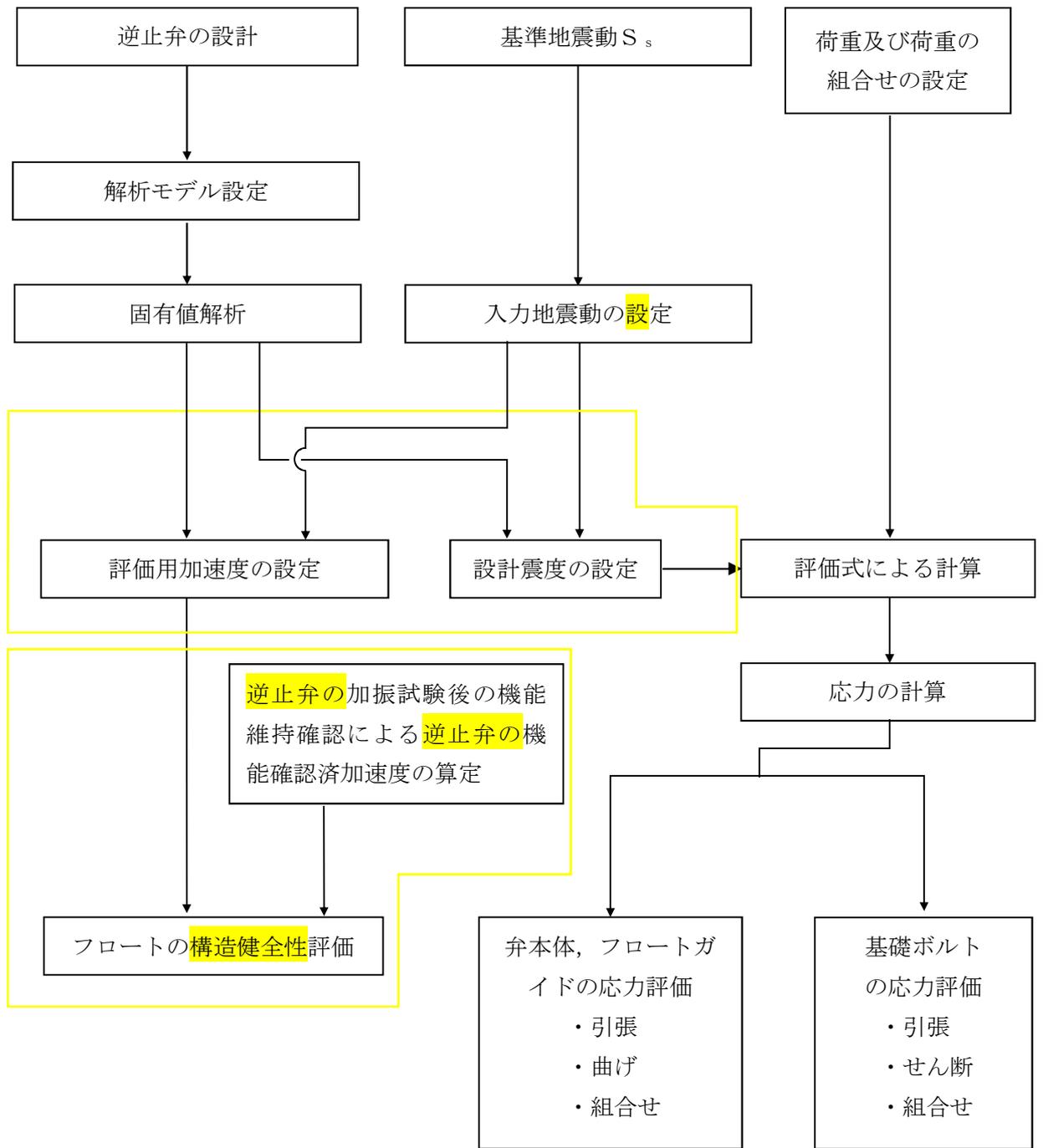
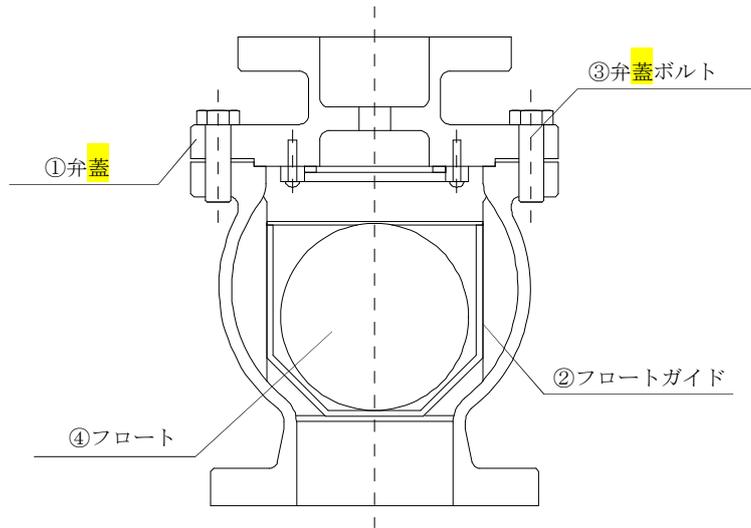


図 2-2 耐震評価フロー

3. 耐震評価部位

取水ピット空気抜き配管逆止弁は、弁蓋、フロートガイド、フロート、弁蓋ボルト及び接続配管等で構成されている。耐震評価においては、そのうち主要部材である弁蓋、フロートガイド及び弁蓋ボルトを評価対象部位とする。取水ピット空気抜き配管逆止弁の評価対象部位について、図 3-1 に示す。



図中の①～③は応力評価箇所を、④は構造健全性評価箇所を示す。

図 3-1 取水ピット空気抜き配管逆止弁の評価対象部位

4. 固有値解析

4.1 基本方針

- (1) 固有振動数計算モデルは1質点系モデルとして、重量の不均一性を考慮し、自由端に弁の集中質量を付加する。
- (2) 固有振動数の計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

4.2 固有振動数の計算方法

4.2.1 記号の説明

取水ピット空気抜き配管逆止弁の固有振動数算出に用いる記号を表 4-1 に示す。

表 4-1 取水ピット空気抜き配管逆止弁の固有振動数算出に用いる記号

記号	記号の説明	単位
d_1	モデル化に用いる弁蓋の内径	mm
D_1	モデル化に用いる弁蓋の外径	mm
E	モデル化に用いる部位の縦弾性係数	MPa
f	逆止弁の一次固有振動数	Hz
I_m	モデルの断面二次モーメント	mm^4
I_{m1}	モデル化に用いる弁蓋の断面二次モーメント	mm^4
L_1	モデル化に用いる弁全体の長さ	mm
m	モデル化に用いる弁の全質量	kg

4.2.2 モデル

取水ピット空気抜き配管逆止弁の構造に応じて、保守的に固有振動数が低く算出されるよう、より柔となるようにモデル化し、一次固有振動数を算出する。また、その場合においても固有振動数が 20 Hz 以上であることを確認する。また、当該逆止弁は配管を介して支持されているが、剛構造となる支持間隔で支持していることから、固有値解析のモデル化に当たっては弁のみをモデル化する。重量の不均一性を考慮し、一方の端を固定端、他方の端を自由端の1質点系モデルとして、自由端に弁の全質量 m が集中したモデルを組む。モデル化は、各部位の寸法や形状を踏まえ、弁蓋の最小断面が最も低い固有振動数を有するものとし、これを弁全体に一樣断面をもつ片持ちはりに単純化したモデルとする。モデル化の概略を図 4-1 に示す。

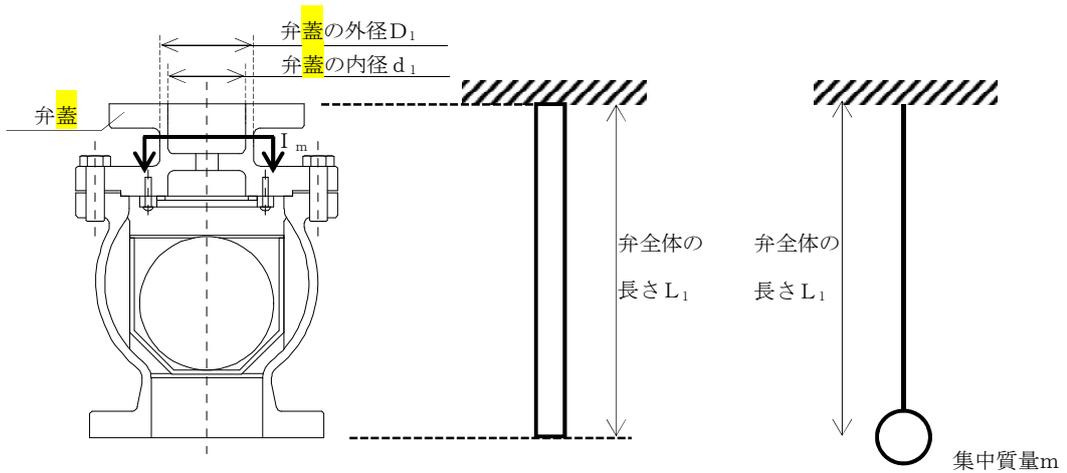


図 4-1 モデル化の概略

4.2.3 固有振動数の算出方法

一次固有振動数 f を以下の式より算出する。

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot E \cdot I_m}{m \cdot L_1^3}}$$

モデルの断面二次モーメント I_m には、弁蓋の断面二次モーメント I_1 を適用する。 I_1 の算出に用いる内径及び外径は、弁蓋の内径及び外径を用いる。弁蓋の断面二次モーメント I_1 は、以下の式より算出する。

$$I_1 = (D_1^4 - d_1^4) \cdot \frac{\pi}{64}$$

以下のとおり弁蓋の断面二次モーメント I_1 をモデルの断面二次モーメント I_m に適用する。

$$I_m = I_1$$

4.2.4 固有振動数の計算条件

第 4-2 表に固有振動数の計算条件を示す。

表 4-2 固有振動数の計算条件

フロートガイドの 材質	モデル化に用いる 弁の全質量m (kg)	モデル化に用いる 弁蓋の外径 D_1 (mm)
SUS316L	31	88

モデル化に用いる 弁蓋の内径 d_1 (mm)	モデル化に用いる 弁全体の長さ L_1 (mm)	モデル化に用いる フロートガイドの 縦弾性係数E (MPa)
70	292	194000

4.3 固有値解析結果

固有振動数算出により、取水ピット空気抜き配管逆止弁の固有振動数が 20 Hz 以上であることを確認した。なお、フロートガイド内を自由に動くフロートについては、全重量に対して、重量が小さく、固有振動数への影響は軽微であるため、考慮しないものとして評価した。表 4-3 に固有振動数の算出結果を示す。

表 4-3 固有振動数の算出結果

固有振動数 (Hz)
183

5. 応力評価

5.1 基本方針

- (1) 取水ピット空気抜き配管逆止弁の評価対象部位の応力評価を実施し、発生応力を算出する。
- (2) 評価対象部位の発生応力と許容応力を比較し、発生応力が許容応力以下であることを確認する。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

5.2.1 荷重の組合せ

取水ピット空気抜き配管逆止弁の設計にて考慮する荷重の組合せ及び許容応力状態を表5-1に示す。

表 5-1 取水ピット空気抜き配管逆止弁の設計にて考慮する荷重の組合せ及び許容応力

施設区分	機器名称	荷重の組合せ*1
浸水防護施設 (浸水防止設備)	取水ピット空気抜き配管逆止弁	D + S _s

注記 *1: Dは固定荷重, S_sは基準地震動 S_sによる地震荷重を示す。

5.2.2 許容応力

取水ピット空気抜き配管逆止弁の弁蓋、フロートガイド及び弁蓋ボルトの許容限界を表 5-2 に、許容応力評価条件を表 5-3 にそれぞれに示す。また、弁蓋、フロートガイド及び弁蓋ボルトの許容応力算出結果を表 5-4 に示す。

表 5-2 弁本体、弁蓋、フロートガイド及び弁蓋ボルトの許容限界

供用状態 (許容応力状態)	許容限界*1 (ボルト以外)			許容限界*2 (ボルト)		
	一次応力			一次応力		
C (Ⅲ _{AS}) *5	引張	曲げ	組合せ*3	引張	せん断	組合せ*4
	1.2・S	1.2・S	1.2・S	1.5・f _t	1.5・f _s	1.5・f _{ts}

注記 *1：引張及び曲げは、J E A G 4 6 0 1・補-1984 を準用し、「管」の許容限界のうちクラス 2，3 配管に対する許容限界に準じて設定する。

*2：引張及びせん断は、J E A G 4 6 0 1・補-1984 を準用し、「その他の支持構造物」の許容限界を適用する。組合せは、J S M E N C 1-2005/2007 による。

*3：引張と曲げの組合せである。

*4：せん断応力と引張応力の組合せ応力

せん断応力と引張応力を同時に受けるボルトの許容引張応力 f_{ts} は、次のいずれか小さい方の値

$$f_{ts} = 1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau$$

$$f_{ts} = f_{to}$$

f_{ts}：せん断力を同時に受けるボルトの許容引張応力

f_{to}：*2 にて示したボルトの許容引張応力

τ：ボルトに作用するせん断応力

*5：地震後、津波後の再使用性や津波の繰返し作用を想定し、当該構造物全体の変形能力に対して浸水防護機能として十分な余裕を有するよう、設備を構成する材料が弾性域内に収まることを基本とする。

表 5-3 弁蓋、フロートガイド及び弁蓋ボルトの許容応力評価条件

評価対象部位	材 料	温度条件 (°C)	S *1 (MPa)	S _y *1 (MPa)	S _u *1 (MPa)	F *1*2 (MPa)
弁蓋	SCS16A	40	120	—	—	—
フロートガイド	SUS316L		111	—	—	—
弁蓋ボルト	SUS316L		—	175	480	175

注記 *1：S：鉄鋼材料（ボルト材を除く）の許容引張応力，S_y：設計降伏点，S_u：設計引張強さ，F：許容応力算定用基準値を示す。

*2：F = Min[S_y, 0.7・S_u] とする。

表 5-4 弁蓋, フロートガイド及び弁蓋ボルトの許容応力算出結果

供用状態 (許容応力 状態)	評価対象部 位	許容限界 (ボルト以外)			許容限界 (ボルト)	
		一次応力			一次応力	
		引 張	曲 げ	組 合 せ	引 張	せん断
C (Ⅲ _{AS})	弁蓋	144	144	144	—	—
	フロートガ イド	133	133	133	—	—
	弁蓋 ボルト	—	—	—	153*	117

注記 * : $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau, f_{to}]$ より算出

5.3 設計用地震力

「4.3 固有値解析結果」に示したとおり取水ピット空気抜き配管逆止弁の固有振動数が20Hz以上であることを確認したため、取水ピット空気抜き配管逆止弁の耐震計算に用いる設計震度は、添付資料V-2-1-7「設計用床応答曲線の作成方針」に示す循環水ポンプ室における最大床応答加速度の1.2倍を考慮して設定する。取水ピット空気抜き配管逆止弁の耐震計算に用いる設計震度を表5-4に示す。

表5-4 設計用地震力

地震動	設置場所 及び 床面高さ (EL. m)	建屋 及び高さ (EL. m)	地震による設計震度*	
			水平方向 C_H	
基準地震動 S_s	循環水 ポンプ室 0.8	取水構造物 (海水ポンプ 室断面) 0.3	水平方向 C_H	1.10
			鉛直方向 C_V	1.03

注記 *：固有値解析結果より、取水ピット空気抜き配管逆止弁の固有振動数が20Hz以上であることを確認したため、最大床応答加速度の1.2倍を考慮した設計震度を設定した。

5.4 応力評価方法

5.4.1 記号の説明

取水ピット空気抜き配管逆止弁の応力評価に用いる記号を表5-5に示す。

表5-5 取水ピット空気抜き配管逆止弁の応力評価に用いる記号 (1/2)

記号	記号の説明	単位
C_H	基準地震動 S_s による水平方向の設計震度	-
C_V	基準地震動 S_s による鉛直方向の設計震度	-
A_1	弁蓋の断面積	mm^2
A_2	フロートガイドの断面積	mm^2
A_3	弁蓋ボルトのねじ部の断面積	mm^2
d_1	弁蓋の内径	mm
D_1	弁蓋の外径	mm
d_2	フロートガイドの内径	mm
D_2	フロートガイドの外径	mm
D_P	弁蓋ボルトのピッチサークル	mm

表 5-5 取水ピット空気抜き配管逆止弁の応力評価に用いる記号 (2/2)

記号	記号の説明	単位
F_{H1}	弁全体の最下端に加わる水平方向地震荷重	N
F_{H2}	フロートガイドの最下端に加わる水平方向地震荷重	N
F_{V1}	弁蓋に加わる鉛直方向地震荷重	N
F_{V2}	フロートガイドに加わる鉛直方向地震荷重	N
g	重力加速度	m/s^2
I_1	弁蓋の断面二次モーメント	mm^4
I_2	フロートガイドの断面二次モーメント	mm^4
L_1	弁全体の長さ	mm
L_2	フロートガイドの長さ	mm
m_1	弁の全質量	kg
m_2	フロートガイドの質量	kg
M_1	弁蓋に発生する曲げモーメント	$N \cdot mm$
M_2	フロートガイドに発生する曲げモーメント	$N \cdot mm$
n	弁蓋ボルトの本数	本
W_{d1}	弁全体の常時荷重	N
W_{d2}	フロートガイドに作用する常時荷重	N
σ_{bH}	水平方向地震荷重によるモーメントにより弁蓋ボルト 1 本当たりに加わる引張応力	MPa
σ_{bV}	鉛直方向地震荷重により弁蓋ボルト 1 本当たりに加わる引張応力	MPa
σ_{H1}	弁蓋に加わる曲げ応力	MPa
σ_{H2}	フロートガイドに加わる曲げ応力	MPa
σ_{V1}	弁蓋に加わる引張応力	MPa
σ_{V2}	フロートガイドに加わる引張応力	MPa
τ_1	弁蓋ボルトに加わるせん断応力	MPa

5.4.2 応力計算

(1) 弁本体

弁本体の発生応力を算出する。弁蓋の応力評価に用いる断面積 A_1 は図 5-1 に示す弁蓋の外径 D_1 及び弁蓋の内径 d_1 から求める。

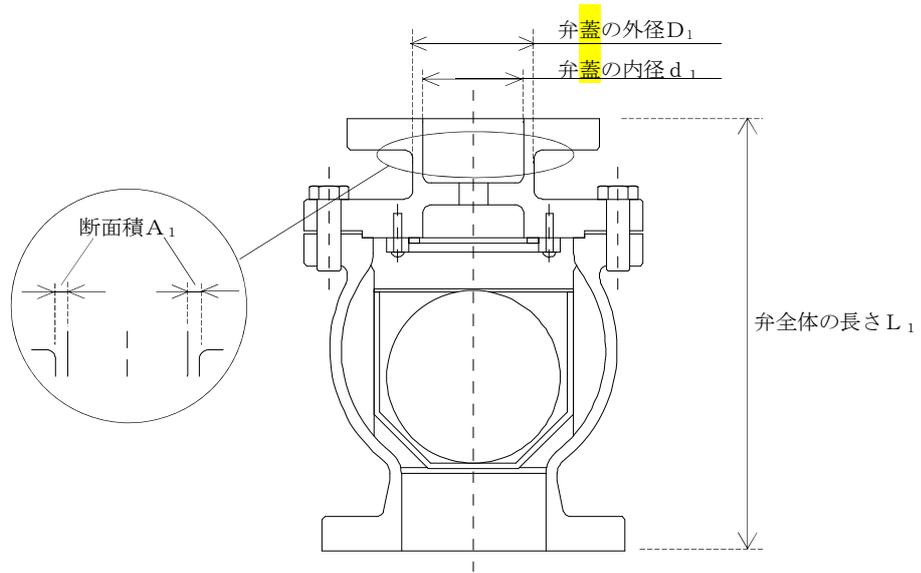


図 5-1 逆止弁本体の構造図

a. 鉛直加速度負荷時

鉛直加速度により、弁本体に加わる引張応力 σ_{V1} を以下の式より算出する。

$$W_{d1} = m_1 \cdot g$$

$$F_{V1} = m_1 \cdot C_V \cdot g$$

$$\sigma_{V1} = \frac{W_{d1} + F_{V1}}{A_1}$$

b. 水平加速度負荷時

評価用水平加速度により弁蓋に発生する応力については、弁本体の最下端に集中荷重が負荷された片持ち梁として、水平加速度により、弁本体に加わる曲げ応力 σ_{H1} を以下の式より算出する。

$$F_{H1} = m_1 \cdot C_H \cdot g$$

$$M_1 = F_{H1} \cdot L_1$$

$$I_1 = (D_1^4 - d_1^4) \cdot \frac{\pi}{64}$$

$$\sigma_{H1} = \frac{M_1 \cdot \left(\frac{D_1}{2}\right)}{I_1}$$

(2) フロートガイド

フロートガイドの応力評価に用いるフロートガイドの最小断面積 A_2 は、以下の図 5-2 に示すフロートガイドの最小直径 D_2 から求める。フロートガイドの最小断面積 A_2 はフロートガイドのうち最も肉厚が薄い断面を適用する。

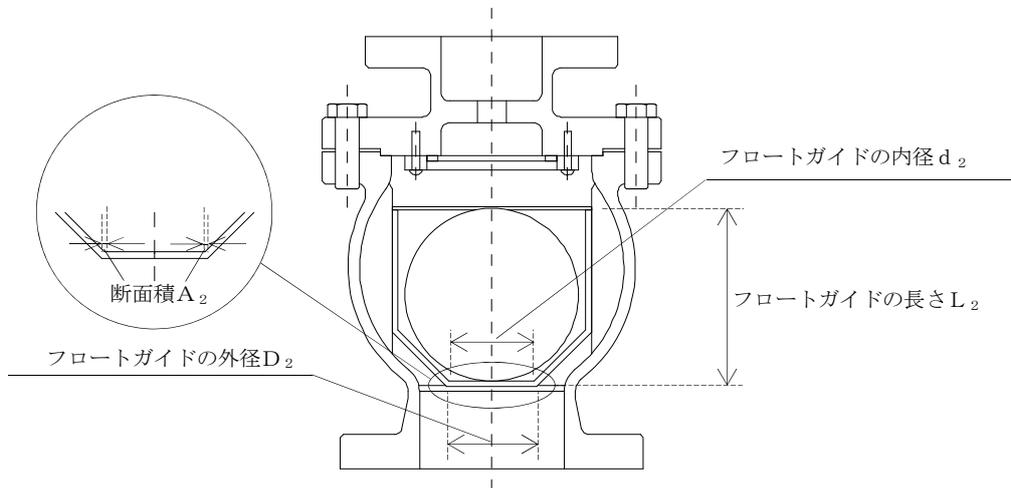


図 5-2 フロートガイドの応力評価に用いる断面積

a. 鉛直加速度負荷時

鉛直加速度により、フロートガイドの最小断面積に加わる引張応力 σ_{V2} を以下の式より算出する。

$$W_{d2} = m_2 \cdot g$$

$$F_{V2} = m_2 \cdot C_v \cdot g$$

$$\sigma_{V2} = \frac{W_{d2} + F_{V2}}{A_2}$$

b. 水平加速度負荷時

フロートガイドの最下端に集中荷重が負荷された片持ち梁として、水平加速度により、フロートガイドの最小断面積に加わる曲げ応力 σ_{H2} を以下の式より算出する。

$$F_{H2} = m_2 \cdot C_H \cdot g$$

$$M_2 = F_{H2} \cdot L_2$$

$$I_2 = (D_2^4 - D_2'^4) \cdot \frac{\pi}{64}$$

$$\sigma_{H2} = \frac{M_2 \cdot \left(\frac{D_2}{2}\right)}{I_2}$$

(3) 弁蓋ボルト

弁蓋ボルトの応力評価に用いる弁蓋ボルトの断面積 A_3 は、図 5-3 に示すとおり、最も肉厚が薄い断面を適用する。

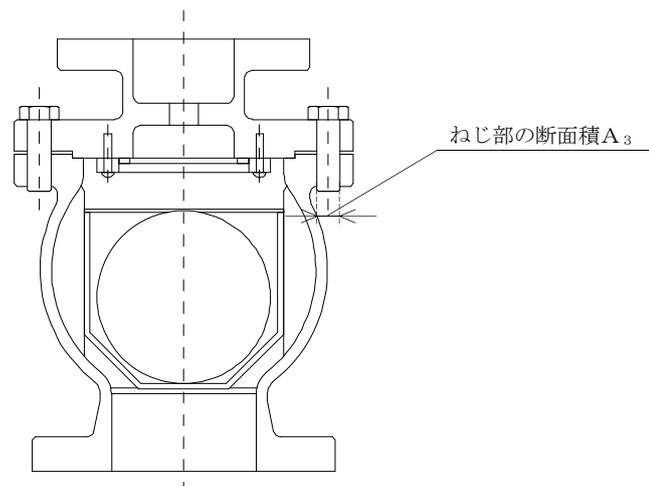


図 5-3 弁蓋ボルトの応力評価に用いる断面積

a. 鉛直加速度負荷時

鉛直加速度により、弁蓋ボルト 1 本あたりに加わる引張応力 σ_{bV} を以下の式より算出する。

$$\sigma_{bV} = \frac{W_{d1} + F_{v1}}{A_3 \cdot n}$$

b. 水平加速度負荷時

(a) せん断応力

水平加速度により、基礎ボルトに加わるせん断応力 τ_1 を以下の式より算出する。

$$\tau_1 = \frac{F_{H1}}{A_3 \cdot n}$$

(b) モーメントによる引張応力

水平加速度により対角線上の弁蓋ボルト 2 本支持したと仮定し、弁全体の最下端に集中荷重が作用した場合において、水平方向地震荷重によるモーメントにより弁蓋ボルト 1 本あたりに加わる引張応力 σ_{bH} を以下の式より算出する。図 5-4 にモーメントによる引張応力の作用イメージを示す。

$$\sigma_{bH} = \frac{F_{H1} \cdot L_1}{D_P \cdot A_3}$$

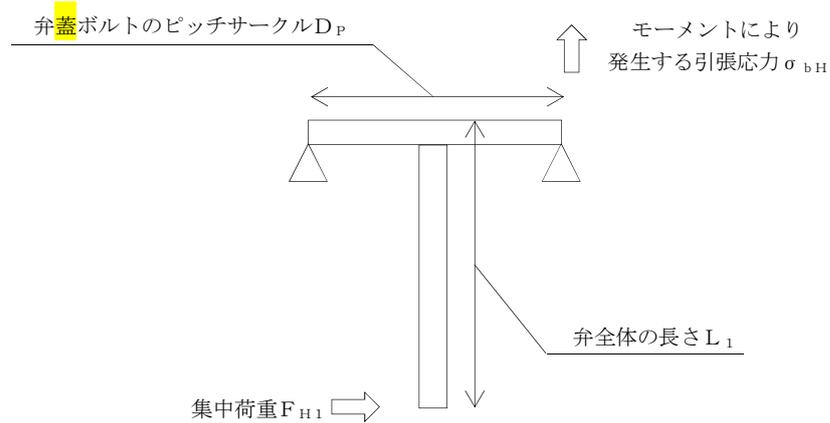


図 5-4 モーメントによる引張力の作用イメージ

5.5 応力評価条件

表 5-6 に応力評価条件を示す。

表 5-6 応力評価条件

弁蓋の材質	弁蓋の 断面積 A_1 (mm^2)	弁の全質量 m_1 (kg)	弁全体の長さ L_1 (mm)	弁蓋の 外径 D_1 (mm)
SCS16A	2.234×10^3	31	292	88

弁蓋の 内径 d_1 (mm)	フロートガイド の材質	フロートガイド の最小断面積 A_2 (mm^2)	フロートガイド の質量 m_2 (kg)	フロートガイド の長さ L_2 (mm)
70	SUS316L	556.1	1.8	123

フロートガイド の外径 D_2 (mm)	フロートガイド の内径 d_2 (mm)	弁蓋ボルトの 材質	弁蓋ボルトの ねじ部の 断面積 A_3 (mm^2)	弁蓋ボルトの 本数 n
62	56	SUS316L	2.011×10^4	8

弁蓋ボルトの ピッチサークル D_P (mm)	重力加速度 g (m/s^2)	基準地震動 S_s による鉛直方向の 設計震度 C_V	基準地震動 S_s による水平方向の 設計震度 C_H
200	9.80665	2.66 ^{*1}	0.69 ^{*1}

注記 *1: 固有値解析結果より、取水ピット空気抜き配管逆止弁の固有振動数が 20 Hz 以上であることを確認したため、評価用加速度には最大床加速度の 1.2 倍を使用する。

6. 構造健全性評価

逆止弁の加振試験後漏えい試験を実施し、逆止弁の機能維持を確認する。この確認によって、逆止弁を構成する部品のひとつであるフロートの構造健全性が確認できる。このため、取水ピット空気抜き配管逆止弁の評価用加速度が機能確認済加速度以下であることを確認することによって、「3. 耐震評価部位」にて評価対象部位として設定したフロートの地震時及び地震後の構造健全性を確認する。

6.1 構造健全性評価方法

取水ピット空気抜き配管逆止弁の固有振動数を考慮して、地震時における取水ピット空気抜き配管逆止弁の評価用加速度を求め、機能確認済加速度以下であることを確認する。機能確認済加速度には、正弦波加振試験において、止水性の機能の健全性を確認した加振波の最大加速度を適用する。機能確認済加速度を表 6-1 に示す。

具体的な機能維持確認は、取水ピット空気抜き配管逆止弁に対して、正弦波により水平方向及び鉛直方向の加振試験を実施後、V-1-1-2「耐震設計上重要な設備を設置する施設に関する説明書（自然現象への配慮に関する説明を含む。）」のうちV-1-1-2-2-3「入力津波の設定」に示す入力津波を踏まえ、それらの津波荷重水位を上回る圧力として 0.3 MPa 以上の水圧にて漏えい試験を実施し、漏えい量が許容漏えい量以下であることを確認した。本漏えい試験の結果により、逆止弁の機能維持を確認した。また、逆止弁の機能維持を確認したことにより、逆止弁を構成する部品のひとつであるフロートの地震時及び地震後の構造健全性を確認した。取水ピット空気抜き配管逆止弁の固有振動数に基づく評価用加速度が、以上に示した逆止弁の機能確認済加速度以下となることを確認することによって、評価対象部位であるフロートが構造健全性を有することを確認する。

なお、固有値解析結果より、取水ピット空気抜き配管逆止弁の固有振動数が 20 Hz 以上であることを確認したため、評価用加速度には最大床加速度を使用する。

表 6-1 逆止弁の機能確認済加速度

対 象	機能確認済加速度 (×9.8m/s ²)	
	水平方向	鉛直方向
逆止弁	6.0	6.0

7. 耐震評価結果

取水ピット空気抜き配管逆止弁の耐震評価結果を以下に示す。発生値は評価基準値を満足しており、耐震性を有することを確認した。

(1) 基準地震動 S_s に対する評価対象部位の応力評価

基準地震動 S_s に対する評価対象部位の応力評価結果を表 7-1 に示す。

表 7-1 基準地震動 S_s による評価結果

評価対象部位	評価応力	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
弁蓋	引張	1	144
	曲げ	3	144
	組合せ*1	4	144
フロートガイド	引張	1	133
	曲げ	1	133
	組合せ*1	2	133
弁蓋ボルト	引張*2	4	130*3
	せん断	1	100

注記 *1: 引張 (σ_t) + 曲げ (σ_b) は, $\sigma_t + \sigma_b \leq f_t$ で評価

*2: 弁蓋ボルトの引張応力は, $\sigma_{bH} + \sigma_{bV}$ の和

*3: 引張とせん断の組合せの許容応力である。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau, f_{to}] \text{より算出}$$

(2) 基準地震動 S_s に対するフロートの構造健全性評価

取水ピット空気抜き配管逆止弁の機能維持について、機能維持確認結果を表 7-2 に示す。表 7-2 に示すとおり逆止弁の機能維持を確認したことにより、評価対象部位であるフロートが構造健全性を有することを確認した。

表 7-2 逆止弁の機能維持評価結果

対象	機能確認済加速度との比較			
	水平加速度 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)		鉛直加速度 ($\times 9.8 \text{ m/s}^2$)	
	評価用加速度	機能確認済加速度	評価用加速度	機能確認済加速度
逆止弁	0.91	6.0	0.86	6.0