

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-補-027-10-16
提出年月日	2022年10月20日

原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネル閉止装置の
耐震性について

2022年10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.	BOP閉止装置の全体構造図	1
3.	BOP閉止装置の構造	3
4.	評価部位	5
4.1	考慮する荷重	5
4.2	評価部位	5
5.	評価条件	6
5.1	荷重の組合せ及び許容応力	6
5.2	設計条件	7
5.3	各評価部位の許容応力	9
6.	評価	10
6.1	BOP閉止装置の固有周期の計算方法	10
6.2	応力計算方法	14
7.	評価結果	24
添付 1 加振試験により得られた加速度による評価用加速度の評価結果		26
別紙 1 振動台及び支持架台での増幅の影響に関する値の算出		36

1. 概要

本資料は、ブローアウトパネル関連設備のうち、ブローアウトパネル閉止装置（以下「BOP閉止装置」という。）の耐震評価手法について説明するものである。

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・ VI-2-9-4-5-1-4 ブローアウトパネル閉止装置の耐震性についての計算書

2. BOP閉止装置の全体構造図

BOP閉止装置は、原子炉建物原子炉棟に装置取付架台を介して、原子炉建物燃料取替階ブローアウトパネル（以下「オペフロBOP」という。）の開口部1つに対し24台（2連ユニット6台、3連ユニット4台）設置しており、BOP閉止装置のケーシングは取付ボルトにより装置取付架台に固定される。BOP閉止装置の全体構造を図2-1に示す。BOP閉止装置と装置取付架台から構成される全体構造の固有周期は0.05s以下であり、全体構造が剛構造であることを確認している。そのため、全体構造におけるBOP閉止装置の振動特性とBOP閉止装置1台の振動特性に差異はないため、以下ではBOP閉止装置1台に対する評価結果を代表として記載する。

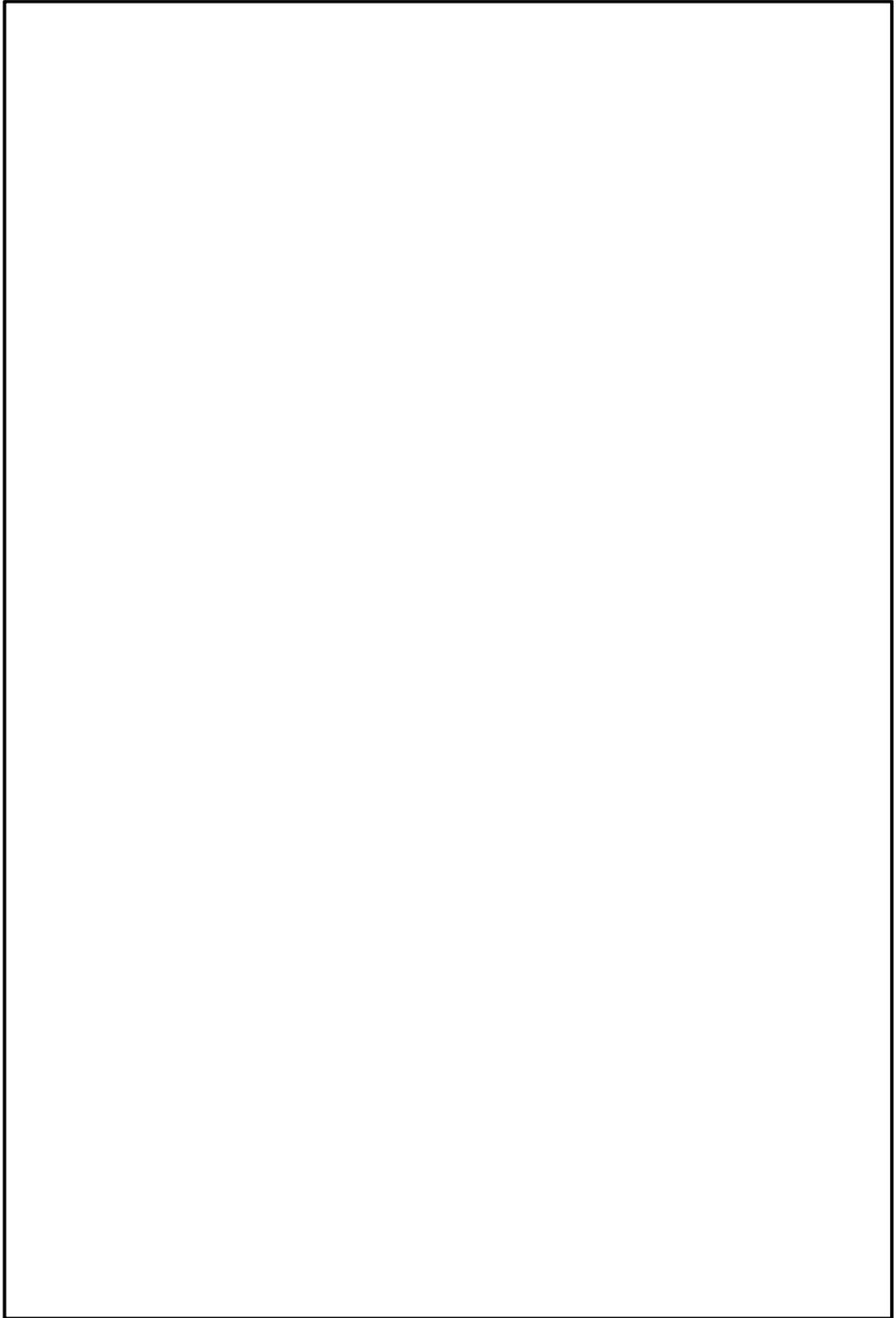
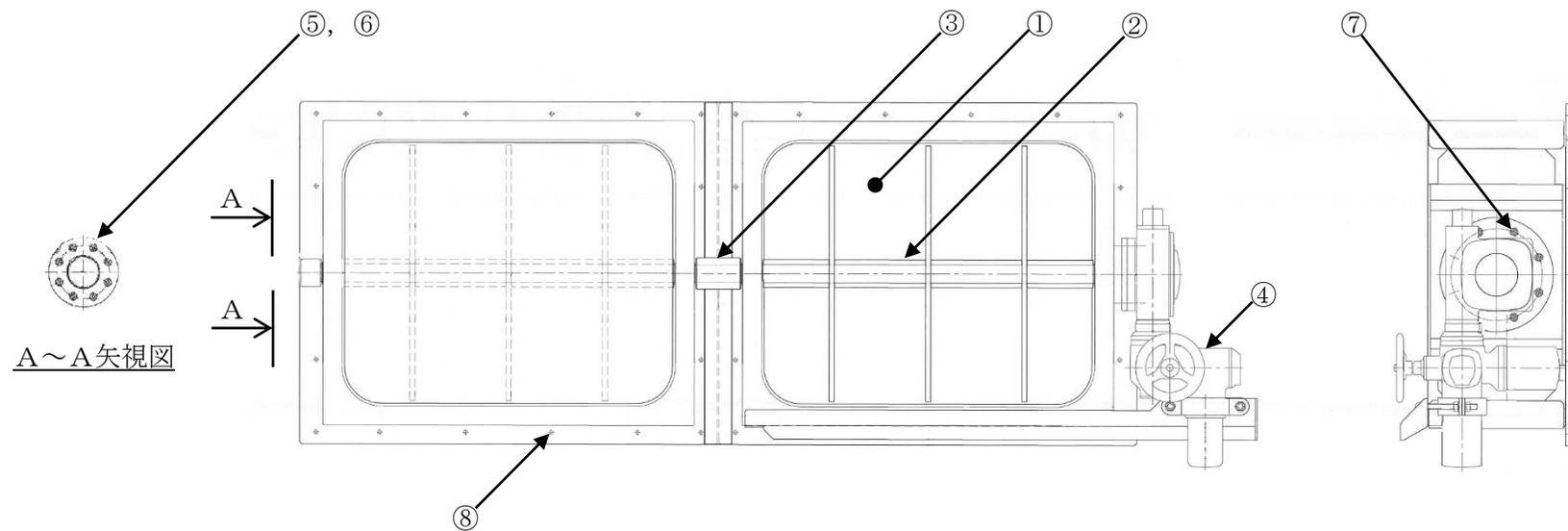


図2-1 BOP閉止装置の全体構造

3. BOP閉止装置の構造

BOP閉止装置は、オペフロBOPが開放された状態で炉心損傷した場合において、羽根を電動機又は手動により動作させ、オペフロBOP開口部を閉止する装置である。図3-1にBOP閉止装置の構造を示す。



- ①羽根 ②シャフト ③コネクタ ④駆動部 ⑤軸受
 ⑥軸受取付ボルト ⑦駆動部取付ボルト ⑧取付ボルト

図3-1 BOP閉止装置構造 (2連ユニットを示す)

4. 評価部位

評価部位は、耐震評価上厳しくなる箇所を選定する。評価部位の選定に当たっては、BOP閉止装置の構造が空調ダンパと同等であることから、J E A C 4 6 0 1-2008における空調ダンパの評価部位を参考として選定する。

以下に考慮する荷重及び評価部位を示す。

4.1 考慮する荷重

BOP閉止装置は、VI-1-1-3-1-1 「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」及び VI-1-1-6-別添4 「ブローアウトパネル関連設備の設計方針」に基づき、表4-1に示す荷重を考慮する。

表4-1 BOP閉止装置に考慮する荷重

状態	死荷重	差圧	地震	台風	竜巻		津波	火山の影響	積雪
				風 (30 m/s)	風 (92 m/s)	飛来物			
開	○	—	○	—	—	—	—	—	—
閉	○	○	○	○	—	—	—	—	—

4.2 評価部位

4.2.1 応力評価部位

耐震評価上厳しくなる箇所について実施する。評価部位は、BOP閉止装置の構造が空調ダンパと同等であることから J E A C 4 6 0 1-2008の空調ダンパの評価部位のうちBOP閉止装置において相当する部位を評価部位とする。加えて耐震評価上厳しくなるボルト類についても評価部位とする。

5. 評価条件

5.1 荷重の組合せ及び許容応力

各部位の許容応力の考え方を以下に示す。BOP閉止装置に作用する荷重は、死荷重、地震荷重、圧力荷重及び風荷重による機械的荷重が主であることから、一次応力について評価を実施する。

5.1.1 シャフト及びコネクタ

BOP閉止装置のうち、シャフト及びコネクタは、重大事故等対処施設（耐震クラス：－）としてその他の支持構造物の許容応力を適用する。耐震評価のための荷重の組合せ及び許容応力は、VI-2-1-9 「機能維持の基本方針」に基づき、表5-1に示すとおりとする。

5.1.2 ボルト等

BOP閉止装置のうち、ボルト等は、重大事故等対処施設（耐震クラス：－）としてその他の支持構造物の許容応力を適用する。耐震評価のための荷重の組合せ及び許容応力は、VI-2-1-9 「機能維持の基本方針」に基づき、表5-1に示すとおりとする。

表5-1 BOP閉止装置の荷重の組合せ及び許容応力

状態	荷重の組合せ	許容応力状態	許容応力 (ボルト等以外)			許容応力 (ボルト等)	
			引張	せん断	組合せ	引張*2	せん断
開	$D + P_D + M_D + S_s$	$IV_A S$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$
閉	$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$	$V_A S^{*1}$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$

注：

D : 死荷重

P_D : 地震と組み合わせべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲ及び地震従属事象として運転状態Ⅳに包絡する状態がある場合はこれを含む。）又は当該設備に設計上定められた最高使用圧力による荷重（BOP閉止装置では開状態において圧力荷重は作用しないため考慮しない）

M_D : 地震と組み合わせべきプラントの運転状態Ⅰ及びⅡ（運転状態Ⅲ及び地震従属事象として運転状態Ⅳに包絡する状態がある場合はこれを含む。）又は当該設備に設計上定められた機械荷重（BOP閉止装置では風荷重を考慮する）

S_s : 基準地震動 S_s により定まる地震力

- P_{SAD} : 重大事故等時の状態（運転状態V）における運転状態を考慮して当該設備に設計上定められた設計圧力による荷重（BOP閉止装置では内外差圧とする）
- M_{SAD} : 重大事故等時の状態（運転状態V）における運転状態等を考慮して当該設備に設計上定められた機械的荷重（BOP閉止装置では風荷重を考慮する）
- IV_{AS} : 発電用原子力設備規格（設計・建設規格（2005年版（2007年追補版含む。）））J S M E S N C 1 - 2005/2007（日本機械学会 2007年9月）の供用状態D相当の許容応力を基準として、それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態
- V_{AS} : 運転状態V相当の応力評価を行う許容応力状態を基本として、それに地震により生じる応力に対する特別な応力の制限を加えた許容応力状態
- f_t^* : 許容応力状態 IV_{AS} 及び V_{AS} での許容引張応力
- f_s^* : 許容応力状態 IV_{AS} 及び V_{AS} での許容せん断応力

注記*1 : V_{AS} として IV_{AS} の許容限界を用いる。

*2 : 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、以下から算出する。

$$f_{ts} = \min(1.4 \cdot f_t - 1.6 \cdot \tau, f_t)$$

ここで、

τ : せん断応力

5.2 設計条件

5.2.1 温度条件

評価する際の温度条件（許容値算出条件）は以下とする。

開状態 : 100°C

閉状態 : 100°C

5.2.2 死荷重

死荷重（D）として考慮するシャフトの単位質量は kg/m である、駆動部を含めたダンプユニット単体の質量は kg である。

5.2.3 圧力荷重

閉状態において、非常用ガス処理系による原子炉建物内外差圧である63Pa（負圧）を圧力荷重（ P_{SAD} ）として考慮する。

5.2.4 機械的荷重

機械的荷重 (M_D 及び M_{SAD}) として、風荷重を考慮する。風荷重は、VI-1-1-3-1-1 「発電用原子炉施設に対する自然現象等による損傷の防止に関する基本方針」に基づき 30m/sとする。

5.2.5 地震荷重

地震荷重 (基準地震動 S_s) は、VI-2-1-9 「機能維持の基本方針」のうち「2. 機能維持の確認に用いる設計用地震力」に基づく設計用地震力によりBOP閉止装置に作用する震度を用いて算定する。地震荷重の算出の際に考慮する質量は「5.2.2 死荷重」で示す数値と同一のものを使用する。

(1) 固有周期

取付架台を含めた固有周期の計算結果を表5-3に示す。固有周期の計算方法は「6.1 BOP閉止装置の固有周期の計算方法」に示す。

表5-3 固有周期 (単位: s)

固有周期	水平方向	鉛直方向
	0.019	0.008

注: 加振試験によりBOP閉止装置自体が剛構造であることを確認している。固有周期は取付架台を含めた値である。

(2) 評価用震度

評価用震度を表5-4に示す。

表5-4 評価用震度 (設計震度)

機器名称	据付場所及び床面高さ (m)	地震動	水平方向*2	鉛直方向*2
BOP閉止装置	原子炉建物 EL42.800 (EL63.500*1)	S_s	4.97	2.66

注記*1: 基準床レベルを示す。

*2: 設計用震度II (基準地震動 S_s)

5.3 各評価部位の許容応力

各評価部位の許容応力は、各部位の材質及び設計・建設規格 付録図表 Part5に規定される各温度の設計降伏点 (S_y) 及び設計引張強さ (S_u) から設定する。材料及び許容応力を表5-5 に示す。

表5-5 許容応力

評価部位	材料	温度 (°C)	許容 応力 状態	S_y (MPa)	S_u (MPa)	S_y (RT) (MPa)	許容限界	
							$1.5 f_t^*$	$1.5 f_s^*$
シャフト	<input type="text"/> *1	100	IV _A S	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	—	<input type="checkbox"/>	—
コネクタ	<input type="text"/> *1	100	IV _A S	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	—	—	<input type="checkbox"/>
軸受取付 ボルト	<input type="text"/> *2	100	IV _A S	<input type="checkbox"/>				
駆動部取付 ボルト	<input type="text"/> *3	100	IV _A S	<input type="checkbox"/>				
取付ボルト	<input type="text"/> *3	100	IV _A S	<input type="checkbox"/>				

注記*1: 相当

*2: 相当

*3: 相当

6. 評価

6.1 BOP閉止装置の固有周期の計算方法

6.1.1 解析モデル

固有周期は、解析コード「NX Nastran」を使用し、有限要素法（FEM）解析により図6-1に示す解析モデルにて算出する。解析モデルの概要を以下に示す。

- (1) BOP閉止装置の取付架台をはり要素で、BOP閉止装置自体は取付架台への付加質量として質点でモデル化した有限要素法モデルによって固有周期を求める。
- (2) 2連及び3連の各ユニットの質量は、重心位置に集中するものとする。
- (3) 2連及び3連ユニットの重心位置は、公称位置とする。
- (4) 拘束条件は、BOP閉止装置取付ボルト部をピン拘束とする。なお、基礎ボルト部は完全拘束として評価する。
- (5) 2連ユニット及び3連ユニット自体は、加振試験により剛構造であることを確認している。
- (6) 解析に使用した機器諸元を表6-1に示す。

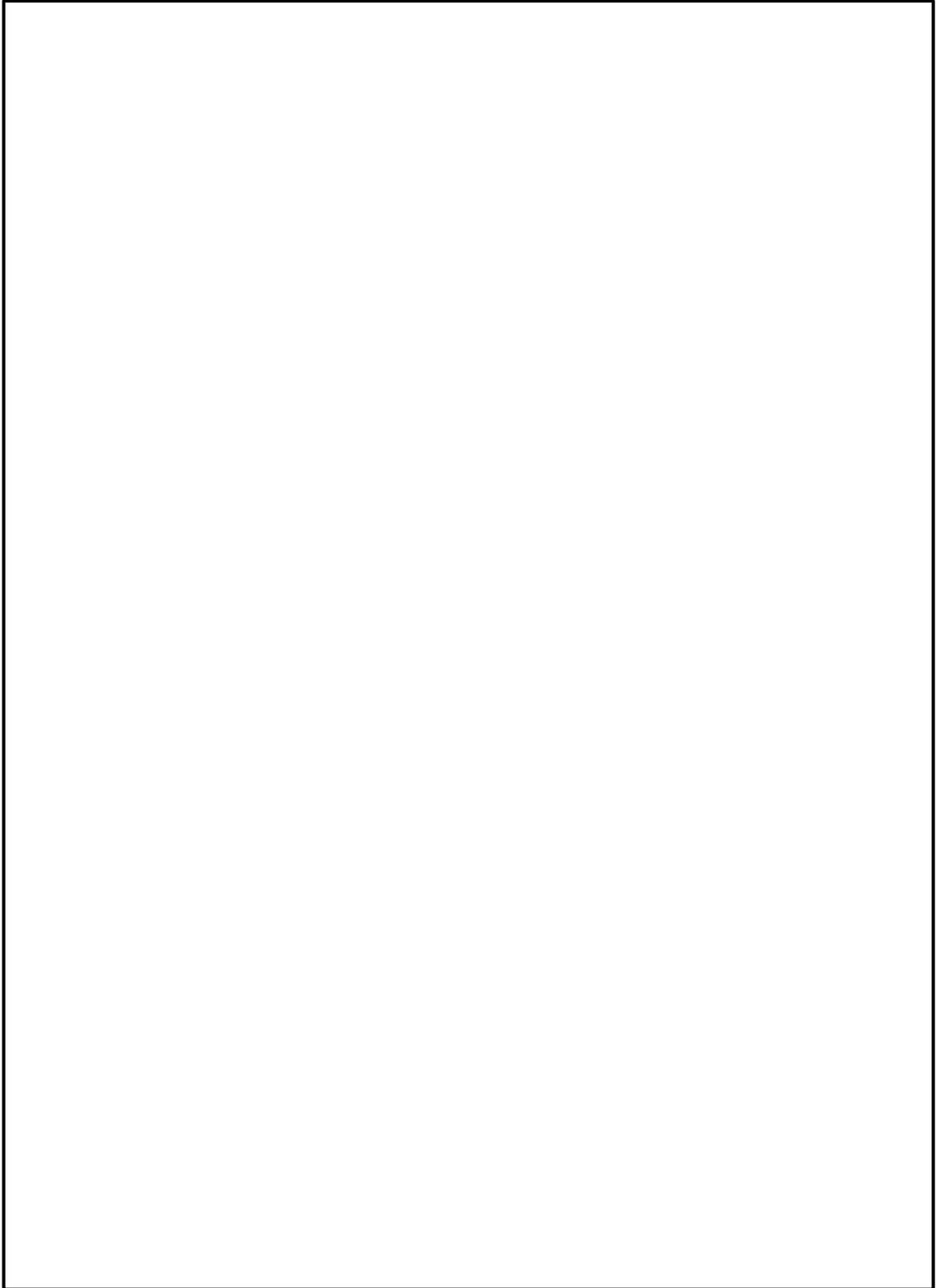


図6-1 解析モデル

表6-1 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材料	—	—	<input type="text"/>
質量 (2連ユニット)	m_{BOS2}	kg	<input type="text"/>
質量 (3連ユニット)	m_{BOS3}	kg	<input type="text"/>
質量 (取付架台)	m_{SP}	kg	<input type="text"/>
温度条件 (周囲環境温度)	T	°C	100
縦弾性係数	E	MPa	198000
ポアソン比	ν	—	0.3
要素数	—	個	<input type="text"/>
節点数	—	個	<input type="text"/>

6.1.2 固有周期の算出結果

固有周期の解析結果を表6-2に示す。

表6-2 固有周期

モード	固有周期 (s)	卓越方向
1次	0.019	—

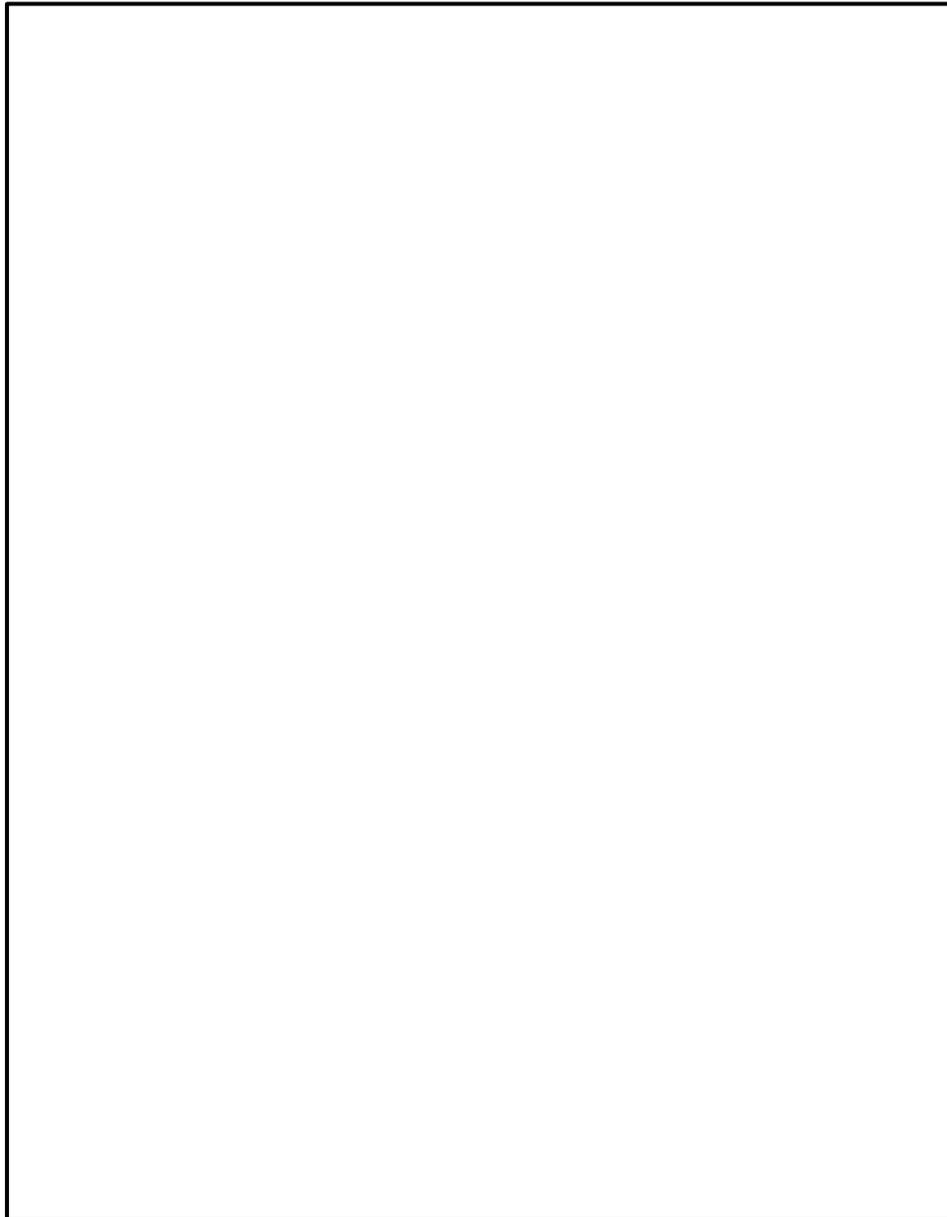


図6-2 振動モード図 (1次)

6.2 応力計算方法

4.2項で述べた評価部位に対し、それぞれの荷重条件における応力を算出する。ここで、後述する応力計算の詳細においては、開状態と閉状態で条件が同じものについては統一することとし、開状態もしくは閉状態のみで用いる条件については、その旨をのべることとする。

6.2.1 シャフトの応力計算

a. 計算モデル

シャフトに作用する荷重によるせん断力及び曲げモーメントを算出し、シャフトに生じる応力を計算する。計算モデルは図6-3に示すとおり、等分布荷重がシャフト全体に作用する両端支持梁モデルとする。

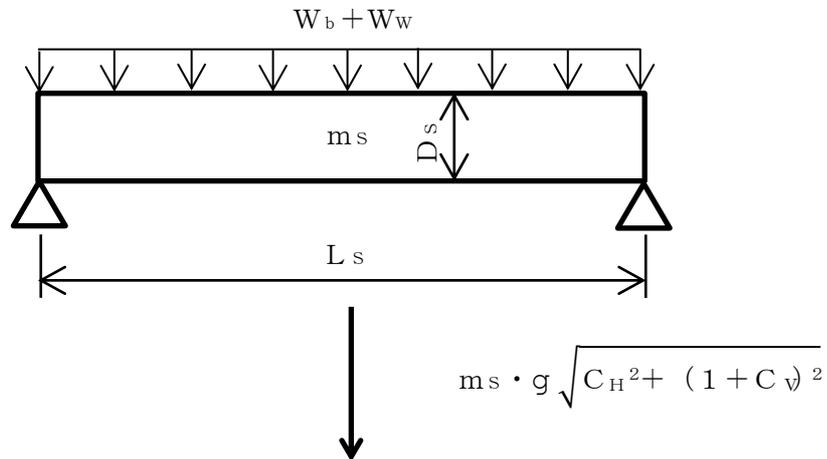


図6-3 シャフトの計算モデル

b. 応力計算

(a) せん断応力

設計震度により作用するせん断力は次式により求める。

$$Q_s = (m_s \cdot \sqrt{C_H^2 + (1 + C_V)^2} \cdot g + F_b + F_w) / 2 \quad \dots (6.2.1.1)$$

ここで、

m_s : シャフト及び羽根の質量

C_H : 水平方向の設計震度

C_V : 鉛直方向の設計震度

F_b : 差圧による荷重 = B_b (羽根の幅) \cdot H_b (羽根の高さ) \cdot P (差圧による圧力)

F_w : 風による荷重 = B_b (羽根の幅) \cdot H_b (羽根の高さ) \cdot P_w (風圧力)

設計震度により生じるせん断応力は次式により求める。

$$\tau_s = Q_s / A_s \quad \dots \dots \dots (6.2.1.2)$$

ここで、

$$A_s : \text{シャフトの断面積} = D_s^2 \cdot \pi / 4$$

$$D_s : \text{シャフトの外径}$$

(b) 曲げ応力

設計震度により作用するモーメントは次式により求める。

$$M_s = (W_s \cdot L_s^2 \cdot \sqrt{C_H^2 + (1 + C_V)^2} \cdot g + W_b \cdot L_s^2 + W_w \cdot L_s^2) / 8 \quad \dots \dots \dots (6.2.1.3)$$

ここで、

$$W_s : \text{シャフト及び羽根の単位質量} = m_s / L_s$$

$$W_b : \text{差圧による単位荷重} = (B_b \cdot H_b \cdot P) / (L_s)$$

$$W_w : \text{風圧力による単位荷重} = (B_b \cdot H_b \cdot P_w) / (L_s)$$

$$L_s : \text{シャフトの長さ}$$

設計震度により作用する曲げ応力は次式により求める。

$$\sigma_s = M_s / Z_s$$

ここで、

$$Z_s : \text{シャフトの断面係数} = D_s^3 \cdot \pi / 32$$

$$D_s : \text{シャフトの径}$$

(c) 組合せ応力

$$\sigma_{sc} = \sqrt{\sigma_s^2 + 3 \cdot \tau_s^2} \quad \dots \dots \dots (6.2.1.4)$$

6.2.2 コネクタの応力計算

a. 計算モデル

コネクタに作用する荷重によるせん断力を算出し、コネクタに生じる応力を計算する。計算モデルは図6-4 に示すとおりとする。

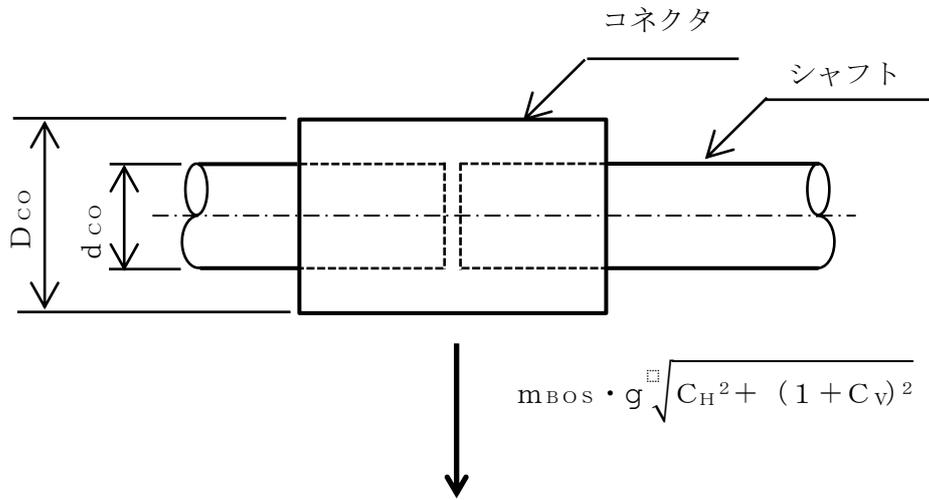


図6-4 コネクタの計算モデル

b. 応力計算

(a) せん断応力

設計震度により作用するせん断力は次式により求める。

$$Q_{CO} = m_{BOS} \cdot \sqrt{C_H^2 + (1 + C_V)^2} \cdot g \quad \dots \dots \dots (6.2.2.1)$$

ここで、

m_{BOS} : BOP閉止装置の質量

C_H : 水平方向の設計震度

C_V : 鉛直方向の設計震度

設計震度によるせん断応力は次式により求める。

$$\tau_{CO} = Q_{CO} / A_{CO} \quad \dots \dots \dots (6.2.2.2)$$

ここで、

A_{CO} : コネクタの断面積 = $(D_{CO}^2 - d_{CO}^2) \cdot \pi / 4$

D_{CO} : コネクタの外径

d_{CO} : コネクタの内径

6.2.3 軸受取付ボルトの応力計算

a. 計算モデル

軸受取付ボルトに作用する荷重による引張力とせん断力を算出し、軸受取付ボルトに生じる応力を計算する。計算モデルは図6-5 に示すとおりとする。

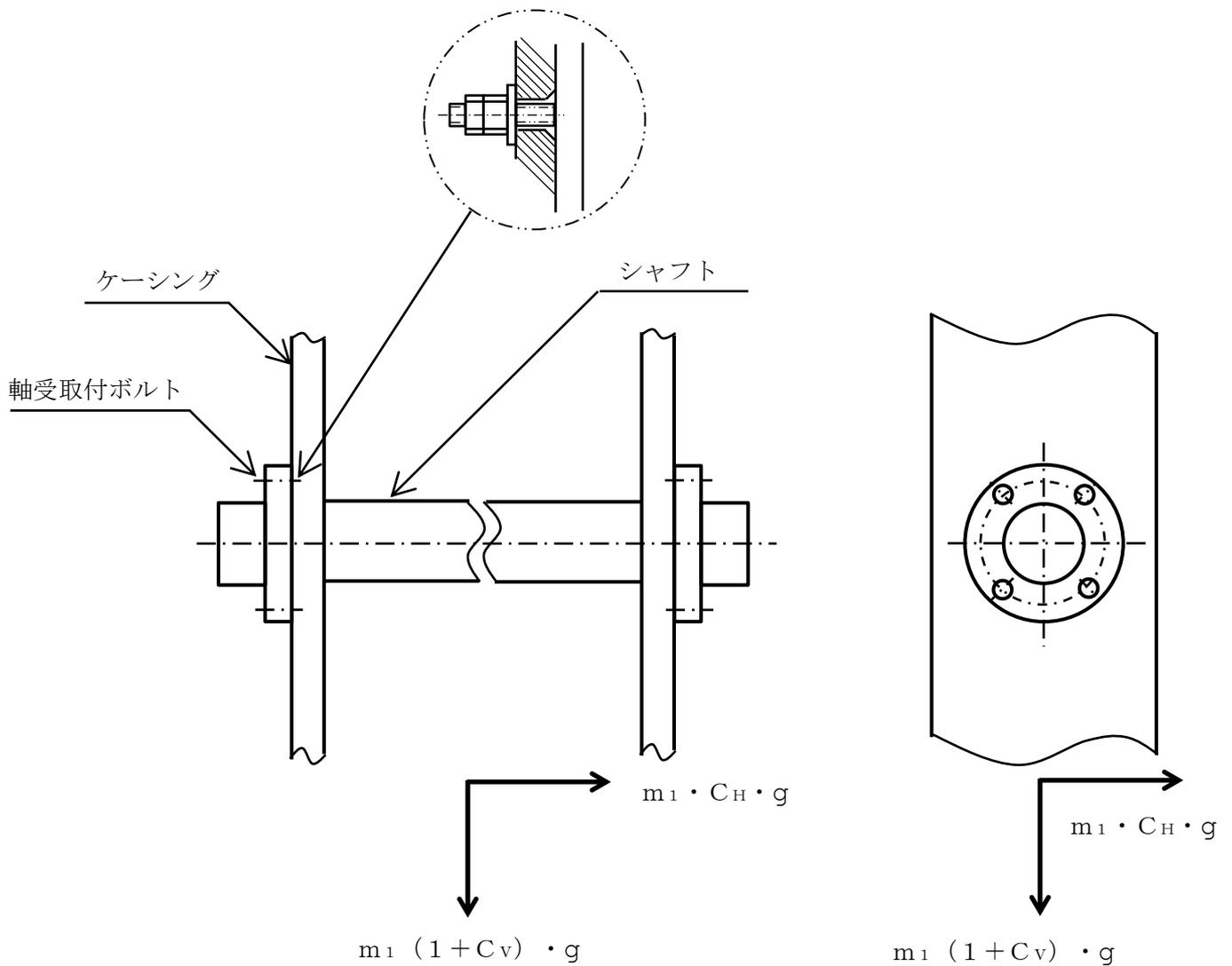


図6-5 軸受取付ボルトの計算モデル

b. 応力計算

(a) 引張応力

軸受取付ボルトに対する引張力は、シャフト片端の軸受取付ボルト全本数で受けるものとして計算する。

設計震度により作用する引張力は次式により求める。

$$F_{b1} = m_1 \cdot C_H \cdot g / n_1 \quad \dots \dots \dots (6.2.3.1)$$

ここで、

m_1 : 軸受取付ボルトに加わる質量

C_H : 水平方向の設計震度

C_V : 鉛直方向の設計震度

n_1 : 軸受取付ボルトの本数

設計震度による引張応力は次式により求める。

$$\sigma_{b1} = F_{b1} / A_{b1} \quad \dots \dots \dots (6.2.3.2)$$

ここで、

A_{b1} : 軸受取付ボルトの断面積 = $d_1^2 \cdot \pi / 4$

d_1 : 軸受取付ボルトの呼び径

(b) せん断応力

軸受取付ボルトに対するせん断力は、シャフト両端の軸受取付ボルト全本数で受けるものとして計算する。

設計震度により作用するせん断力は次式により求める。

$$Q_{b1} = \frac{(m_1 \cdot \sqrt{C_H^2 + (1 + C_V)^2} \cdot g + F_b + F_w)}{(2 \cdot n_1)} \quad \dots \dots \dots (6.2.3.3)$$

ここで、

m_1 : 軸受取付ボルトに加わる質量

F_b : 差圧による荷重 = $B_b \cdot H_b \cdot P$

F_w : 風による荷重 = $B_b \cdot H_b \cdot P_w$

C_H : 水平方向の設計震度

C_V : 鉛直方向の設計震度

n_1 : 軸受取付ボルトの本数

設計震度によるせん断応力は次式により求める。

$$\tau_{b1} = Q_{b1} / A_{b1} \quad \dots \dots \dots (6.2.3.4)$$

ここで、

A_{b1} : 軸受取付ボルトの断面積 = $d_1^2 \cdot \pi / 4$

d_1 : 軸受取付ボルトの呼び径

6.2.4 駆動部取付ボルトの応力計算

a. 計算モデル

駆動部取付ボルトに作用する荷重による引張力とせん断力を算出し、駆動部取付ボルトに生じる応力を計算する。計算モデルは図6-6 に示すとおりとする。

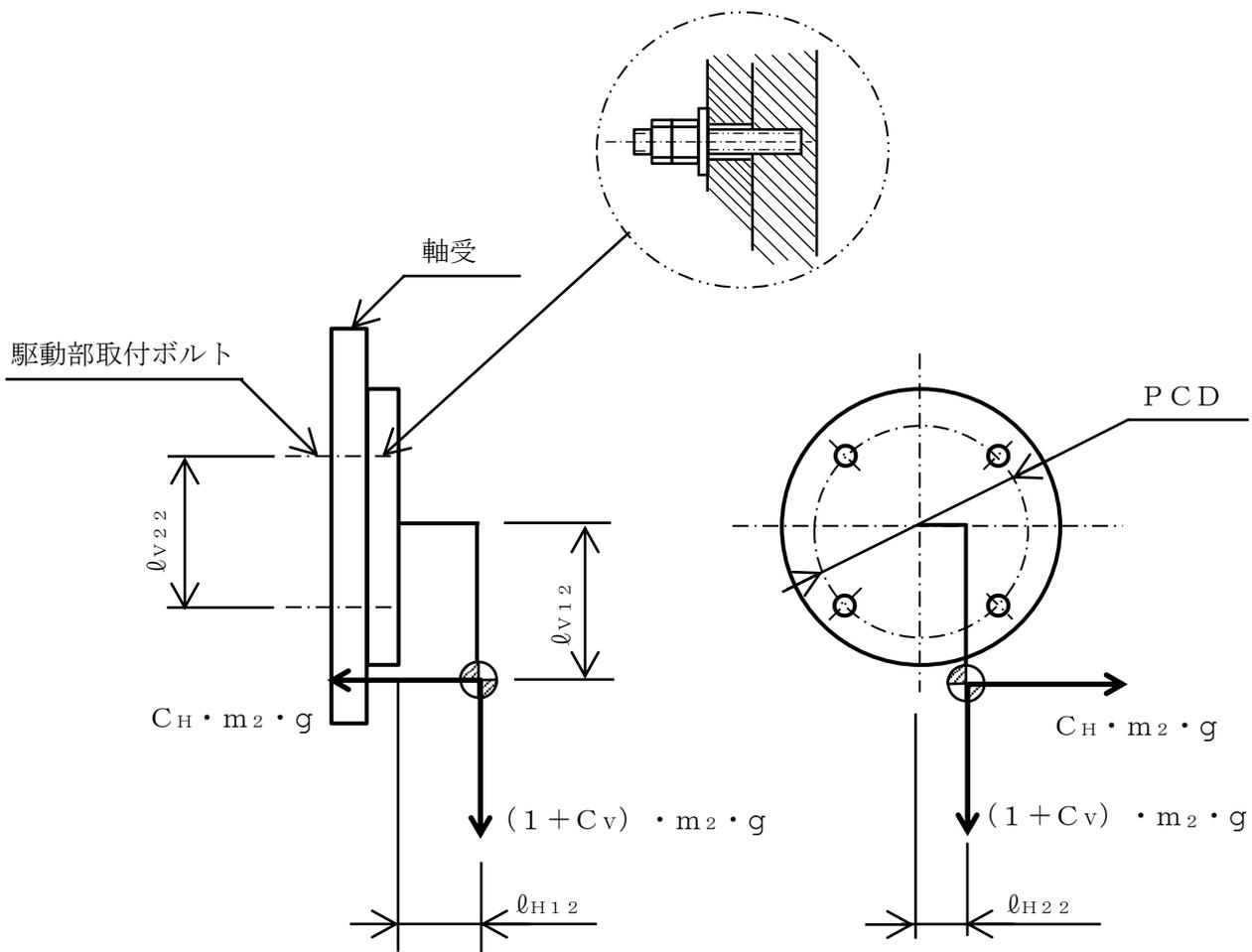


図6-6 駆動部取付ボルトの計算モデル

b. 応力計算

(a) 引張応力

駆動部取付ボルトに対する引張力は、転倒支点から正比例した力が作用するものとし、最も厳しい条件として転倒支点から最も離れたボルトについて計算する。

設計震度により作用する引張力は次式により求める。

$$F_{b12} = (8 \cdot m_2 \cdot g) / (3 \cdot n_{t2} \cdot \ell_{V22}) \cdot (C_H \cdot (\ell_{V22} / 2 - \ell_{H22}) + C_H \cdot \ell_{H12}) \dots \dots \dots (6.2.4.1)$$

$$F_{b22} = (8 \cdot m_2 \cdot g) / (3 \cdot n_{t2} \cdot \ell_{V22}) \cdot (C_H \cdot (\ell_{V22} / 2 + \ell_{H22}) + C_H \cdot \ell_{H12}) \dots \dots \dots (6.2.4.2)$$

$$F_{b32} = (8 \cdot m_2 \cdot g) / (3 \cdot n_{t2} \cdot \ell_{V22}) \cdot ((1 + C_V) \cdot \ell_{H12} + C_H \cdot (\ell_{V12} - \ell_{V22} / 2)) \dots \dots \dots (6.2.4.3)$$

$$F_{b42} = (8 \cdot m_2 \cdot g) / (3 \cdot n_{t2} \cdot \ell_{V22}) \cdot ((C_V - 1) \cdot \ell_{H12} + C_H \cdot (\ell_{V12} + \ell_{V22} / 2)) \dots \dots \dots (6.2.4.4)$$

$$F_{b2} = \text{Max} (F_{b12}, F_{b22}, F_{b32}, F_{b42}) \dots \dots \dots (6.2.4.5)$$

ここで、

m_2 : 駆動部取付ボルトに加わる質量

C_H : 水平方向の設計震度

C_V : 鉛直方向の設計震度

PCD : 軸受取付ボルトのピッチ直径

n_{t2} : 評価上引張力を受けるとして期待するボルトの本数

ℓ_{H12}, ℓ_{H22} : 重心と駆動部取付ボルトの水平方向距離

ℓ_{V12} : 重心と駆動部取付ボルトの鉛直方向距離

$$\ell_{V22} = \cos(\pi / 4) \cdot \text{PCD}$$

: 駆動部取付ボルトのボルトピッチ

設計震度により作用する引張応力は次式により求める。

$$\sigma_{b2} = F_{b2} / A_{b2} \dots \dots \dots (6.2.4.6)$$

ここで、

A_{b2} : 駆動部取付ボルトの断面積 = $d_2^2 \cdot \pi / 4$

d_2 : 駆動部取付ボルトの呼び径

(b) せん断応力

駆動部取付ボルトに対するせん断力は、駆動部取付ボルト全本数で受けるものとして計算する。

設計震度により作用するせん断力は次式により求める。

$$Q_{b2} = (m_2 \cdot \sqrt{C_H^2 + (1 + C_V)^2} \cdot g) / n_2 \quad \dots \dots \dots (6.2.4.7)$$

ここで、

m_2 : 駆動部取付ボルトに加わる質量

C_H : 水平方向の設計震度

C_V : 鉛直方向の設計震度

n_2 : 軸受取付ボルトの本数

設計震度によるせん断応力

設計震度により作用するせん断力は次式により求める。

$$\tau_{b2} = Q_{b2} / A_{b2} \quad \dots \dots \dots (6.2.4.8)$$

ここで、

A_{b2} : 駆動部取付ボルトの断面積 = $d_2^2 \cdot \pi / 4$

d_2 : 駆動部取付ボルトの呼び径

6.2.5 取付ボルトの応力計算

a. 計算モデル

取付ボルトに作用する荷重による引張力とせん断力を算出し、取付ボルトに生じる応力を計算する。計算モデルは図6-7 及び図6-8 に示すとおりとする。

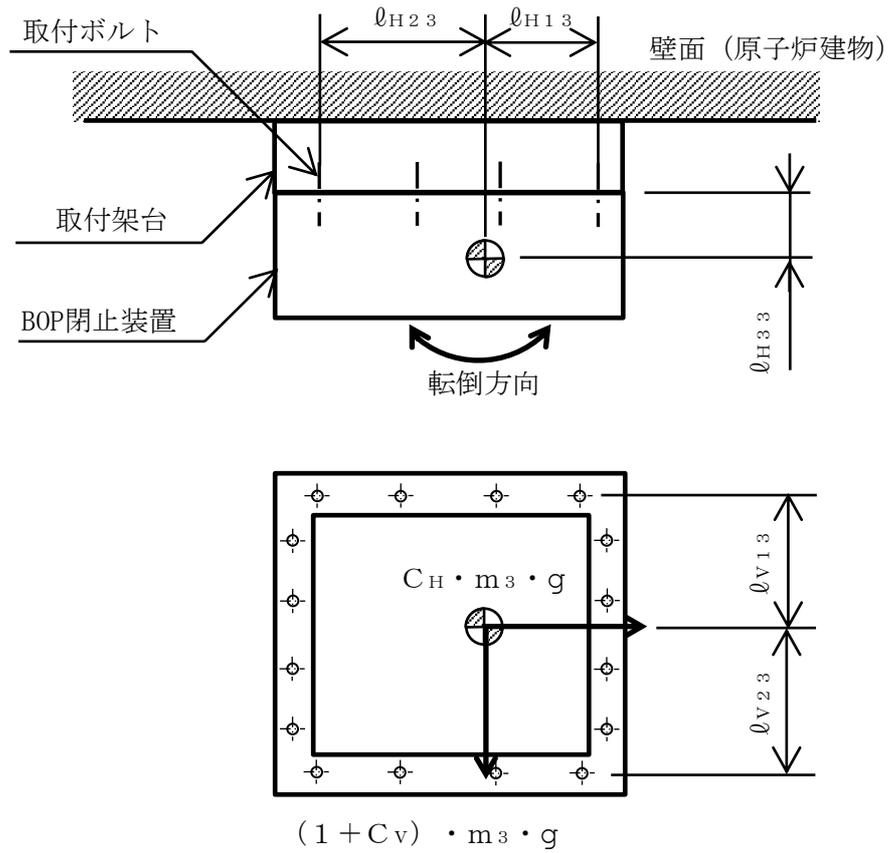


図6-7 取付ボルトの計算モデル（水平方向）

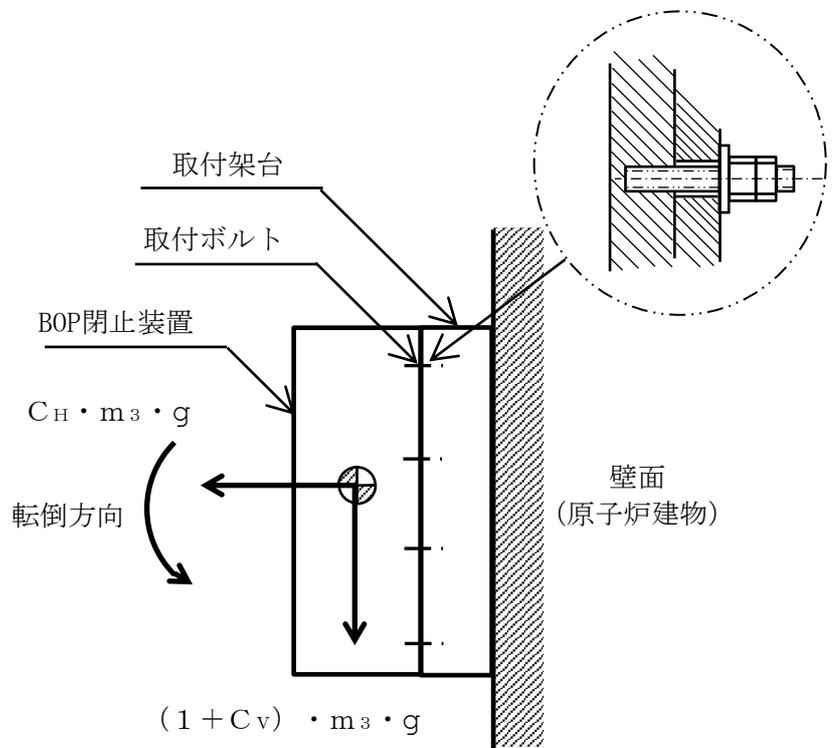


図6-8 取付ボルトの計算モデル（鉛直方向）

b. 応力計算

(a) 引張応力

取付ボルトに対する引張力は、片側のボルト列を支点とする転倒を考え、これを逆側の最外列の取付ボルトで受けるものとして計算する。

設計震度により作用する引張力は次式により求める。

$$F_{b13} = (m_3 \cdot (1 + C_V) \cdot \ell_{H33} \cdot g) / (n_{V3} \cdot (\ell_{V13} + \ell_{V23})) + (m_3 \cdot C_H \cdot \ell_{H13} \cdot g) / (n_{H3} \cdot (\ell_{H13} + \ell_{H23})) + (F_b + F_w) / n_3 \quad \dots \dots \dots (6.2.5.1)$$

$$F_{b23} = (m_3 \cdot (1 + C_V) \cdot \ell_{H33} \cdot g) / (n_{V3} \cdot (\ell_{V13} + \ell_{V23})) + (m_3 \cdot C_H \cdot \ell_{H23} \cdot g) / (n_{H3} \cdot (\ell_{H13} + \ell_{H23})) + (F_b + F_w) / n_3 \quad \dots \dots \dots (6.2.5.2)$$

$$F_{b33} = (m_3 \cdot (1 + C_V) \cdot \ell_{H33} \cdot g + m_3 \cdot C_H \cdot \ell_{V23} \cdot g) / (n_{V3} \cdot (\ell_{V13} + \ell_{V23})) + (F_b + F_w) / n_3 \quad \dots \dots \dots (6.2.5.3)$$

$$F_{b3} = \text{Max} (F_{b13}, F_{b23}, F_{b33}) \quad \dots \dots \dots (6.2.5.4)$$

ここで、

m_3 : 取付ボルトに加わる質量

F_b : 差圧による荷重 = $B_b \cdot H_b \cdot P$

F_w : 風による荷重 = $B_b \cdot H_b \cdot P_w$

C_H : 水平方向の設計震度

C_V : 鉛直方向の設計震度

n_{H3} : 水平方向の引張力を受ける取付ボルトの本数

n_{V3} : 鉛直方向の引張力を受ける取付ボルトの本数

$\ell_{H13}, \ell_{H23}, \ell_{H33}$: 重心と取付ボルトの水平方向距離

ℓ_{V13}, ℓ_{V23} : 重心と取付ボルトの鉛直方向距離

設計震度により作用する引張応力は次式により求める。

$$\sigma_{b3} = F_{b3} / A_{b3} \quad \dots \dots \dots (6.2.5.5)$$

ここで、

A_{b3} : 取付ボルトの断面積 = $d_3^2 \cdot \pi / 4$

d_3 : 取付ボルトの呼び径

設計震度により作用するせん断力は次式により求める。

$$Q_{b3} = (m_3 \cdot \sqrt{C_H^2 + (1 + C_V)^2} \cdot g) / n_3 \quad \dots \dots (6.2.5.6)$$

ここで、

m_3 : 取付ボルトに加わる質量

C_H : 水平方向の設計震度

C_V : 鉛直方向の設計震度

n_3 : 取付ボルトの本数

設計震度により作用するせん断応力は次式により求める。

$$\tau_{b3} = Q_{b3} / A_{b3} \quad \dots \dots (6.2.5.7)$$

ここで、

A_{b3} : 取付ボルトの断面積 = $d_3^2 \cdot \pi / 4$

d_3 : 取付ボルトの呼び径

7. 評価結果

BOP閉止装置の強度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。

基準地震動 S_s による応力評価結果を表7-1に示す。

表 7-1 応力評価結果（基準地震動 S s）

評価対象設備	評価部位	開閉状態	応力	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度*
BOP閉止装置	シャフト	羽根開	組合せ	75	305	4.06
		羽根閉	組合せ	89	305	3.42
	コネクタ	—	せん断	5	176	35.20
	軸受取付ボルト	羽根開	引張	7	153	21.85
			せん断	5	118	23.60
		羽根閉	引張	7	153	21.85
			せん断	5	118	23.60
	駆動部取付ボルト	—	引張	30	153	5.10
			せん断	4	118	29.50
	取付ボルト	羽根開	引張	23	153	6.65
			せん断	11	118	10.72
		羽根閉	引張	23	153	6.65
			せん断	11	118	10.72

注記*：裕度 = (許容応力) / (応力値)

加振試験により得られた加速度による評価用加速度の評価結果

1. 概要

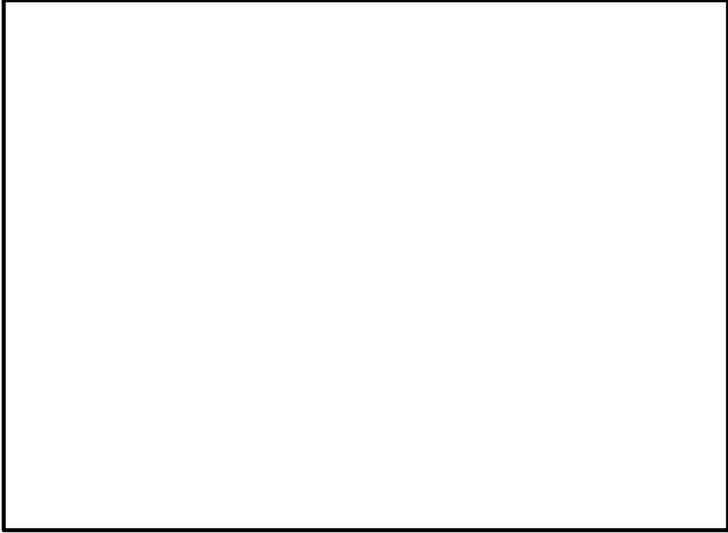
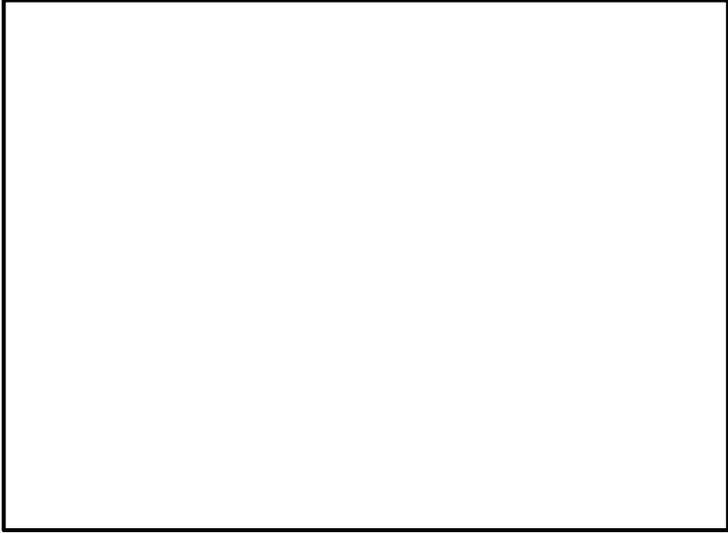
本資料は、BOP閉止装置の加振試験の結果から得られた荷重に対する強度評価結果について纏めたものである。

加振試験による荷重の算出については、BOP閉止装置の羽根に取り付けた加速度計の計測値から算出した荷重をBOP閉止装置の慣性力として設定する方法を採用した。

2. 加速度計設置位置

羽根に設置する加速度計は、BOP閉止装置の羽根各部に配置した。各加速度計の設置位置について以下に示す。

表2-1 加速度計設置位置

試験体	羽根慣性力	加速度計設置位置
2連 ユニット	<p>羽根の慣性力は以下の式により震度に換算する。</p> <p>水平：Max [(A13X + A21X + A18X + A24X + A19X) /5/g, (A13Y + A21Y + A18Y + A24Y + A19Y) /5/g]</p> <p>鉛直： (A13Z + A21Z + A18Z + A24Z + A19Z) /5/g</p>	
3連 ユニット	<p>羽根の慣性力は以下の式により震度に換算する。</p> <p>水平 = Max [(A13X + A21X + A18X + A24X + A19X + A27X + A20X) /7/g, (A13Y + A21Y + A18Y + A24Y + A19Y + A27Y + A20Y) /7/g]</p> <p>鉛直 = (A13Z + A21Z + A18Z + A24Z + A19Z + A27Z + A20Z) /7/g</p>	

3. 羽根の慣性力の算出

加振試験において、羽根に取付けた加速度計による計測結果（最大加速度）から、羽根に作用した慣性力を算出する。

3.1 計測データによる最大加速度

加振試験で計測された羽根各部の最大加速度を表3-1及び3-2に示す。

表3-1 羽根の最大加速度一覧（2連ユニット） （単位：m/s²）

試験体	方向	計測位置	記号	1.0×S s 加振	
				羽根開	羽根閉
2連ユニット	水平X (NS)	ギアボックス	A13X		
		Aダンパパネル中央	A21X		
		パネル軸継手 (A-B)	A18X		
		Bダンパパネル中央	A24X		
		パネル回転軸端	A19X		
	水平Y (EW)	ギアボックス	A13Y		
		Aダンパパネル中央	A21Y		
		パネル軸継手 (A-B)	A18Y		
		Bダンパパネル中央	A24Y		
		パネル回転軸端	A19Y		
	鉛直Z (UD)	ギアボックス	A13Z		
		Aダンパパネル中央	A21Z		
		パネル軸継手 (A-B)	A18Z		
		Bダンパパネル中央	A24Z		
		パネル回転軸端	A19Z		

表3-2 羽根の最大加速度一覧 (3連ユニット)

(単位: m/s²)

試験体	方向	計測位置	記号	1.0×S s 加振	
				羽根開	羽根閉
3連ユニット	水平X (NS)	ギアボックス	A13X		
		Aダンパパネル中央	A21X		
		パネル軸継手 (A-C)	A18X		
		Cダンパパネル中央	A24X		
		パネル軸継手 (C-B)	A19X		
		Bダンパパネル中央	A27X		
		パネル回転軸端	A20X		
	水平Y (EW)	ギアボックス	A13Y		
		Aダンパパネル中央	A21Y		
		パネル軸継手 (A-C)	A18Y		
		Cダンパパネル中央	A24Y		
		パネル軸継手 (C-B)	A19Y		
		Bダンパパネル中央	A27Y		
		パネル回転軸端	A20Y		
	鉛直Z (UD)	ギアボックス	A13Z		
		Aダンパパネル中央	A21Z		
		パネル軸継手 (A-C)	A18Z		
		Cダンパパネル中央	A24Z		
		パネル軸継手 (C-B)	A19Z		
		Bダンパパネル中央	A27Z		
		パネル回転軸端	A20Z		

3.2 振動台及び支持架台での増幅の影響を除いた補正加速度

加振試験では試験体を設置している振動台及び支持架台での増幅の影響により、設計用震度 I (基準地震動 S s) から求まる目標震度以上に、支持架台での計測加速度が増加している。試験体には、この増加した加速度が入力されており、閉止装置の計測加速度もそれに応じて大きくなっている。強度評価に、羽根の計測加速度を直接適用することは実機の想定と異なることが想定される。そのため、振動台及び支持架台での増幅の影響を除いた補正加速度を求め、

強度評価に適用する。補正加速度は以下の式に示すように、羽根の最大加速度に対する補正值から算出する。別紙1にて、振動台及び支持架台での増幅分を除くための補正值を算出する。なお、支持架台の加速度としては支持架台下部中央加速度と上部加速度を、BOP閉止装置標高（2連ユニット：EL 58.391m, 3連ユニット：EL 62.477m）で線形補間した値を用いた。算出結果を表3-3に示す。

$$\alpha' = a_0 / a_2 \times \alpha$$

ここで、

α' : 補正加速度 (m/s²)

α : BOP閉止装置の最大加速度 (m/s²)

a_0 : 設計用震度 I (基準地震動 S_s) から求まる目標加速度 (m/s²)

a_2 : 支持架台での計測加速度 (m/s²)

(補正值 a_0 / a_2 の比率は別紙1による)

表3-3 補正加速度 (2連ユニット)

(単位 : m/s²)

試験体	方向	計測位置	記号	1.0×S s 加振	
				扉開	扉閉
2連ユニット	水平X (NS)	ギアボックス	A13X		
		Aダンパパネル中央	A21X		
		パネル軸継手 (A-B)	A18X		
		Bダンパパネル中央	A24X		
		パネル回転軸端	A19X		
	水平Y (EW)	ギアボックス	A13Y		
		Aダンパパネル中央	A21Y		
		パネル軸継手 (A-B)	A18Y		
		Bダンパパネル中央	A24Y		
		パネル回転軸端	A19Y		
	鉛直Z (UD)	ギアボックス	A13Z		
		Aダンパパネル中央	A21Z		
		パネル軸継手 (A-B)	A18Z		
		Bダンパパネル中央	A24Z		
		パネル回転軸端	A19Z		

表3-4 補正加速度 (3連ユニット)

(単位 : m/s²)

試験体	方向	計測位置	記号	1.0×S s 加振	
				扉開	扉閉
3連ユニット	水平X (NS)	ギアボックス	A13X		
		Aダンパパネル中央	A21X		
		パネル軸継手 (A-C)	A18X		
		Cダンパパネル中央	A24X		
		パネル軸継手 (C-B)	A19X		
		Bダンパパネル中央	A27X		
		パネル回転軸端	A20X		
	水平Y (EW)	ギアボックス	A13Y		
		Aダンパパネル中央	A21Y		
		パネル軸継手 (A-C)	A18Y		
		Cダンパパネル中央	A24Y		
		パネル軸継手 (C-B)	A19Y		
		Bダンパパネル中央	A27Y		
		パネル回転軸端	A20Y		
	鉛直Z (UD)	ギアボックス	A13Z		
		Aダンパパネル中央	A21Z		
		パネル軸継手 (A-C)	A18Z		
		Cダンパパネル中央	A24Z		
		パネル軸継手 (C-B)	A19Z		
		Bダンパパネル中央	A27Z		
		パネル回転軸端	A20Z		

3.3 羽根の相当震度

羽根の慣性力は以下のように、羽根全体応答として平均的な応答加速度を求め、震度に換算する。

以下の式により、羽根両端軸受部、コネクタ部及び羽根中央部の補正加速度から平均的な加速度（震度）を求める。水平方向については、X方向、Y方向のうち大きい方を選定する。

①2連ユニット

水平方向

$$a = \text{Max} [(A13X + A21X + A18X + A24X + A19X) / 5/g, (A13Y + A21Y + A18Y + A24Y + A19Y) / 5/g]$$

鉛直方向

$$a = (A13Z + A21Z + A18Z + A24Z + A19Z) / 5/g$$

②3連ユニット

水平方向

$$a = \text{Max} [(A13X + A21X + A18X + A24X + A19X + A27X + A20X) / 7/g, (A13Y + A21Y + A18Y + A24Y + A19Y + A27Y + A20Y) / 7/g]$$

鉛直方向

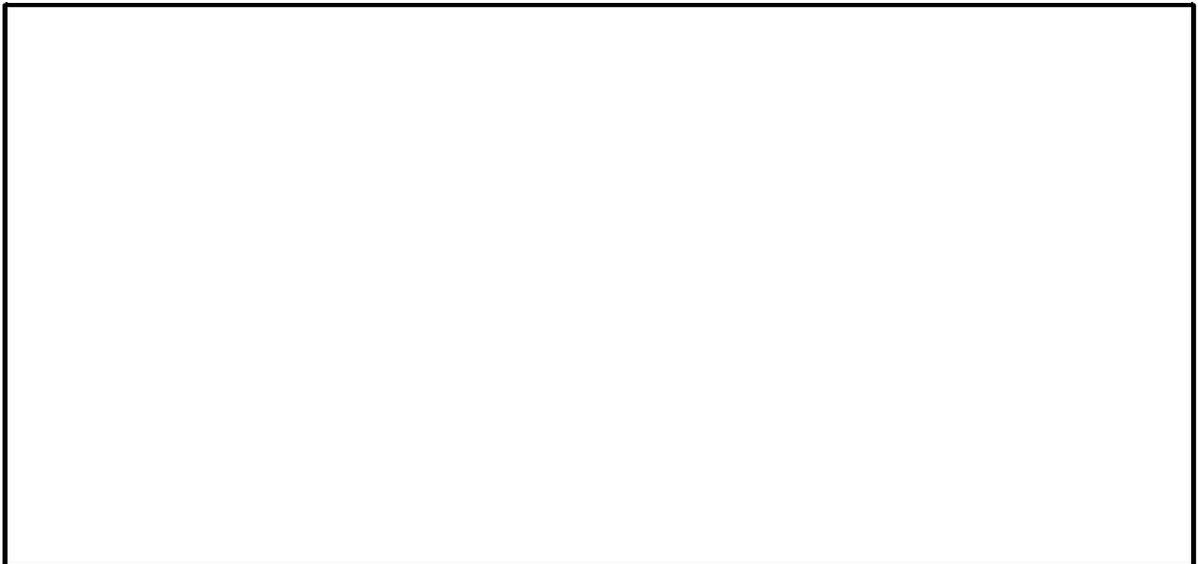
$$a = (A13Z + A21Z + A18Z + A24Z + A19Z + A27Z + A20Z) / 7/g$$

ここで,

a : 羽根の相当震度 (-)

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)

なお, 式中の記号には, 表3-3及び表3-4の補正加速度を用いる。



注：図は3連ユニットを示す。(A20及びA27は3連ユニットのみ)

図3-1 加速度計設置位置

算出結果を表3-5 に示す。

表3-5 羽根の相当震度 (単位：-)

試験体	方向	1.0×S _s 加振	
		羽根開	羽根閉
2連ユニット	水平		
	鉛直		
3連ユニット	水平		
	鉛直		

注：小数点以下第3位を切上げ

4. 結果

3項で算出した羽根の相当震度を用いて強度評価を実施した。結果は表4-1に示す通りで、算出応力は許容応力を満足しており、加振試験による羽根の相当震度に対して構造強度を有していることを確認した。

表4-1 応力評価結果

試験体	評価部位	開閉状態	応力	算出応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	裕度*
2連ユニット	シャフト	羽根開	組合せ	68	305	4.48
		羽根閉	組合せ	81	305	3.76
	コネクタ	—	せん断	16	176	11.00
	軸受取付ボルト	羽根開	引張	6	135	22.50
			せん断	4	124	31.00
		羽根閉	引張	6	135	22.50
			せん断	5	119	23.80
	駆動部取付ボルト	—	引張	23	135	5.86
			せん断	3	118	39.33
	取付ボルト	羽根開	引張	21	135	6.42
			せん断	10	118	11.80
		羽根閉	引張	21	135	6.42
			せん断	10	118	11.80
	3連ユニット	シャフト	羽根開	組合せ	68	305
羽根閉			組合せ	82	305	3.71
コネクタ		—	せん断	16	176	11.00
軸受取付ボルト		羽根開	引張	6	135	22.50
			せん断	4	119	29.75
		羽根閉	引張	7	135	19.28
			せん断	5	119	23.80
駆動部取付ボルト		—	引張	23	135	5.86
			せん断	3	118	39.33
取付ボルト		羽根開	引張	21	135	6.42
			せん断	10	118	11.80
		羽根閉	引張	22	135	6.13
			せん断	10	118	11.80

注記* : 裕度 = (許容応力) / (算出応力)

振動台及び支持架台での増幅の影響に関する値の算出

本資料は、加振試験より得られた羽根の加速度から振動台への入力による増幅及び支持架台による応答増幅分の影響を除くために、目標加速度と加振試験結果の最大加速度の比率（最終補正值）を算定したものである。

1. 比率算定の考え方

今回得られたBOP閉止装置の加振試験結果では、以下の2点で実機条件と乖離している。そのため、これらの乖離を補正するための比率を算出し、得られた試験結果を補正する。ここでは、試験結果のうち羽根の応答加速度を補正する比率を算出する。

1.1 振動台への入力による増幅

振動台への入力として、目標加速度を満足するように模擬地震波（ $1.0 \times S s$ ）を作成し、加振試験を実施した。模擬地震波は確実に目標加速度を上回る様に作成していることから、結果として目標加速度を超過した加速度が振動台へ入力される事となる。よって、以下の通り補正を行う。

$$\text{振動台への増幅補正值 (A)} = a_0 / a_1$$

ここで、

a_0 : 設計用震度 I（基準地震動 $S s$ ）から求まる目標加速度

a_1 : 振動台上の加速度計（計測点A1）の計測結果

1.2 支持架台による応答増幅

試験体は、支持架台による応答増幅があるため、支持架台上部（計測点A9）、下部（計測点A5）の計測結果に差異が生じている。これは実機条件と試験条件に差異がある事を示している。よって以下の通り補正を行う。

$$\text{支持架台による応答増幅補正值 (B)} = a_1 / a_2$$

ここで、

a_1 : 振動台上の加速度計（計測点A1）の計測結果

a_2 : 支持架台上下位置の加速度計（計測点A5とA9）の計測結果をBOP閉止装置重心位置標高（2連ユニット：EL 58.391m、3連ユニット：EL 62.477m）で線形補間した値

表2-1 比率算定結果 (2連ユニット) (1/2)

試験体	① a ₀ (目標震度) * ¹ [×9.8m/s ²]	記号	計器 番号	a ₁ 及びa ₂ (加振試験結果) [×9.8m/s ²]				a ₀ /a ₂ (最終補正值) * ³	
				②羽根開		③羽根閉		羽根開 ①/②	羽根閉 ①/③
				方向	加振試験結果	方向	加振試験結果		
2連 ユニット	□	a ₁	A1	X	□	X	□	□	□
		—	A5	X	□	X	□		
		—	A9	X	□	X	□		
		—	A13	X	□	X	□		
		—	A19	X	□	X	□		
		a ₂	補正* ²	X	□	X	□		
	□	a ₁	A1	Y	□	Y	□	□	□
		—	A5	Y	□	Y	□		
		—	A9	Y	□	Y	□		
		—	A13	Y	□	Y	□		
		—	A19	Y	□	Y	□		
		a ₂	補正* ²	Y	□	Y	□		

表2-1 比率算定結果 (2連ユニット) (2/2)

試験体	① a ₀ (目標震度) * ¹ [×9.8m/s ²]	記号	計器 番号	a ₁ 及びa ₂ (加振試験結果) [×9.8m/s ²]				a ₀ /a ₂ (最終補正值) * ³	
				②羽根開		③羽根閉		羽根開 ①/②	羽根閉 ①/③
				方向	加振試験結果	方向	加振試験結果		
2連 ユニット	□	a ₁	A1	Z	□	Z	□	□	□
		—	A5	Z	□	Z	□		
		—	A9	Z	□	Z	□		
		—	A13	Z	□	Z	□		
		—	A19	Z	□	Z	□		
		a ₂	補正* ²	Z	□	Z	□		

注記*1: NS2 1.0×S s相当の模擬地震波の目標を用いる。

*2: 計測結果 (A5及びA9) を2連ユニットの重心位置標高 (EL 58.391m) で補正した値を用いる。

*3: 小数点4桁目を切上げ

表2-2 比率算定結果 (3連ユニット) (1/2)

試験体	① a ₀ (目標震度) * ¹ [×9.8m/s ²]	記号	計器 番号	a ₁ 及びa ₂ (加振試験結果) [×9.8m/s ²]				a ₀ /a ₂ (最終補正值) * ³	
				②羽根開		③羽根閉		羽根開 ①/②	羽根閉 ①/③
				方向	加振試験結果	方向	加振試験結果		
3連 ユニット	□	a ₁	A1	X	□	X	□	□	□
		—	A5	X	□	X	□		
		—	A9	X	□	X	□		
		—	A13	X	□	X	□		
		—	A20	X	□	X	□		
		a ₂	補正* ²	X	□	X	□		
	□	a ₁	A1	Y	□	Y	□	□	□
		—	A5	Y	□	Y	□		
		—	A9	Y	□	Y	□		
		—	A13	Y	□	Y	□		
		—	A20	Y	□	Y	□		
		a ₂	補正* ²	Y	□	Y	□		

表2-2 比率算定結果 (3連ユニット) (2/2)

試験体	① a ₀ (目標震度) ^{*1} [×9.8m/s ²]	記号	計器 番号	a ₁ 及びa ₂ (加振試験結果) [×9.8m/s ²]				a ₀ /a ₂ (最終補正值) ^{*3}	
				②羽根開		③羽根閉		羽根開 ①/②	羽根閉 ①/③
				方向	加振試験結果	方向	加振試験結果		
3連 ユニット	□	a ₁	A1	Z	□	Z	□	□	□
		—	A5	Z	□	Z	□		
		—	A9	Z	□	Z	□		
		—	A13	Z	□	Z	□		
		—	A20	Z	□	Z	□		
		a ₂	補正 ^{*2}	Z	□	Z	□		

注記*1: NS2 1.0×S s相当の模擬地震波の目標を用いる。

*2: 計測結果 (A5及びA9) を3連ユニットの重心位置標高 (EL 62.477m) で補正した値を用いる。

*3: 小数点4桁目を切上げ