

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改01
提出年月日	2023年1月12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

2023年1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	30
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.....	31
添付 2	ボルトの応力算出過程について.....	38

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。

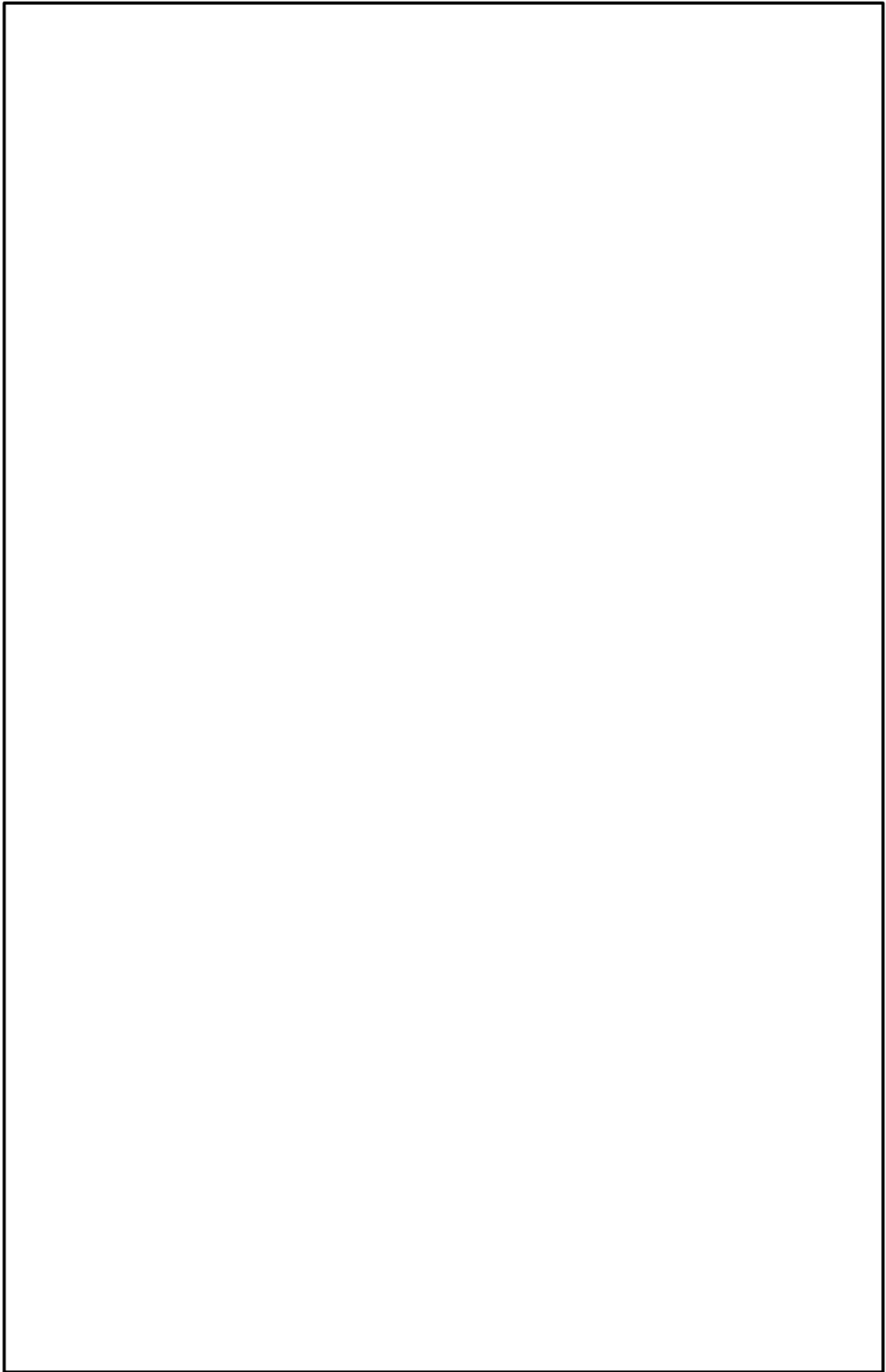
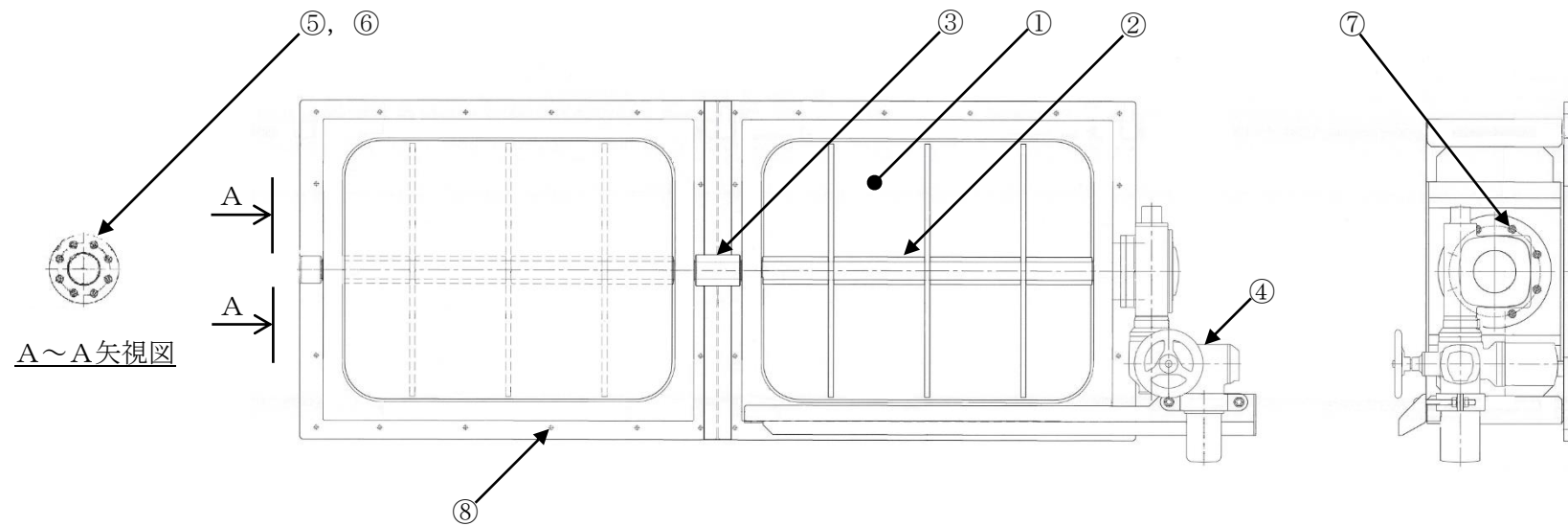


図2-1 BOP閉止装置の全体構造

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。）））JSMESNC1-2005/2007（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℃

閉状態：100℃

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"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
駆動部取付 ボルト	<input type="text"/> *3	100	IV _A S	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
取付ボルト	<input type="text"/> *3	100	IV _A S	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
基礎ボルト	<input type="text"/>	100	IV _A S	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	—	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

注記*1：DIN規格材料。JSME規格材料では 相当

*2：DIN規格材料。JSME規格材料では 相当

*3：DIN規格材料。JSME規格材料では 相当

6. 評価

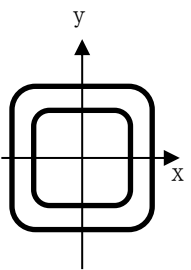
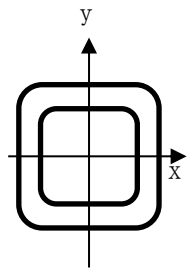
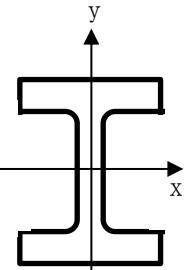
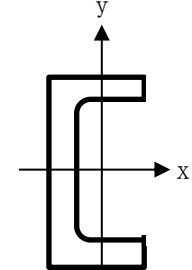
6.1 BOP閉止装置の固有周期の計算方法

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。取付架台の部材要素を表6-1に示し、解析モデルの概要は以下に示す。

- (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。また、取付架台の質量は、梁要素の密度として模擬する。
- (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固定として評価する。
- (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6-2に示す。

表6-1 解析モデル図 部材要素

部材	サポート1	サポート2	フレーム1	フレーム2
部材名	B200×200×12	B175×175×6	H200×200×8	C200×90×8
材料	SS400/ STKR400	SS400/ STKR400	SS400	SS400
断面積 (cm ²)	86.53	39.63	63.53	38.65
断面二次モーメント x軸 (cm ⁴)	4980	1860	4720	2490
断面二次モーメント y軸 (cm ⁴)	4980	1860	1600	277
断面係数 x軸 (cm ³)	498	213	472	249
断面係数 y軸 (cm ³)	498	213	160	44.2
断面形状	 200×200×12	 175×175×6	 200×200×8	 200×90×8

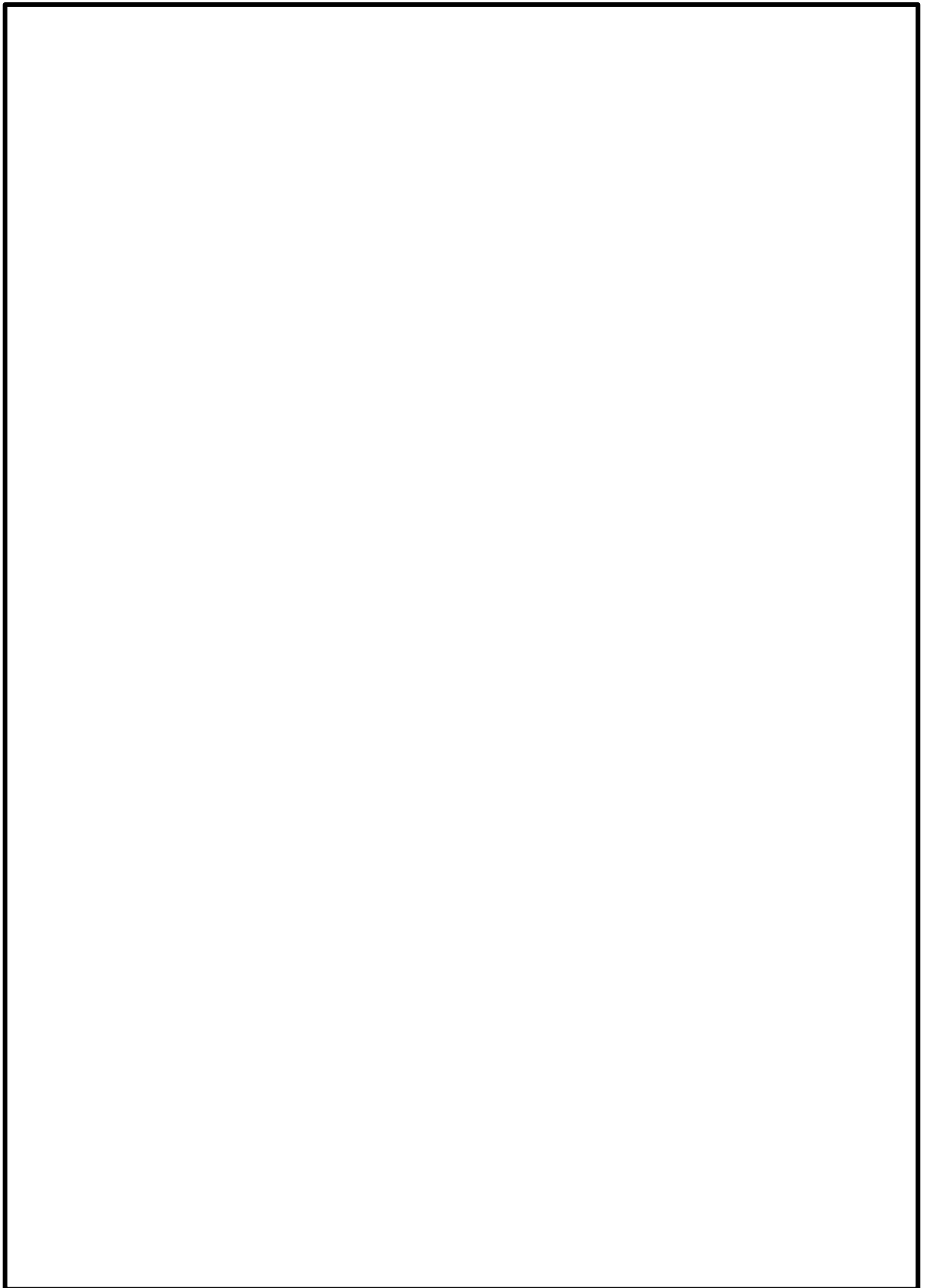


図6-1 解析モデル

表6-2 機器諸元

項目	記号	単位	入力値
材料 (取付架台)	—	—	
質量 (2連ユニット)	m_{BOS2}	kg	
質量 (3連ユニット)	m_{BOS3}	kg	
質量 (取付架台)	m_{SP}	kg	
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	
節点数	—	個	

6.1.2 固有周期の算出結果

固有周期の解析結果を表6-3, 振動モード図を図6-2に示す。

表6-3 固有周期

モード	固有周期 (s)	卓越方向
1次	0.019	—

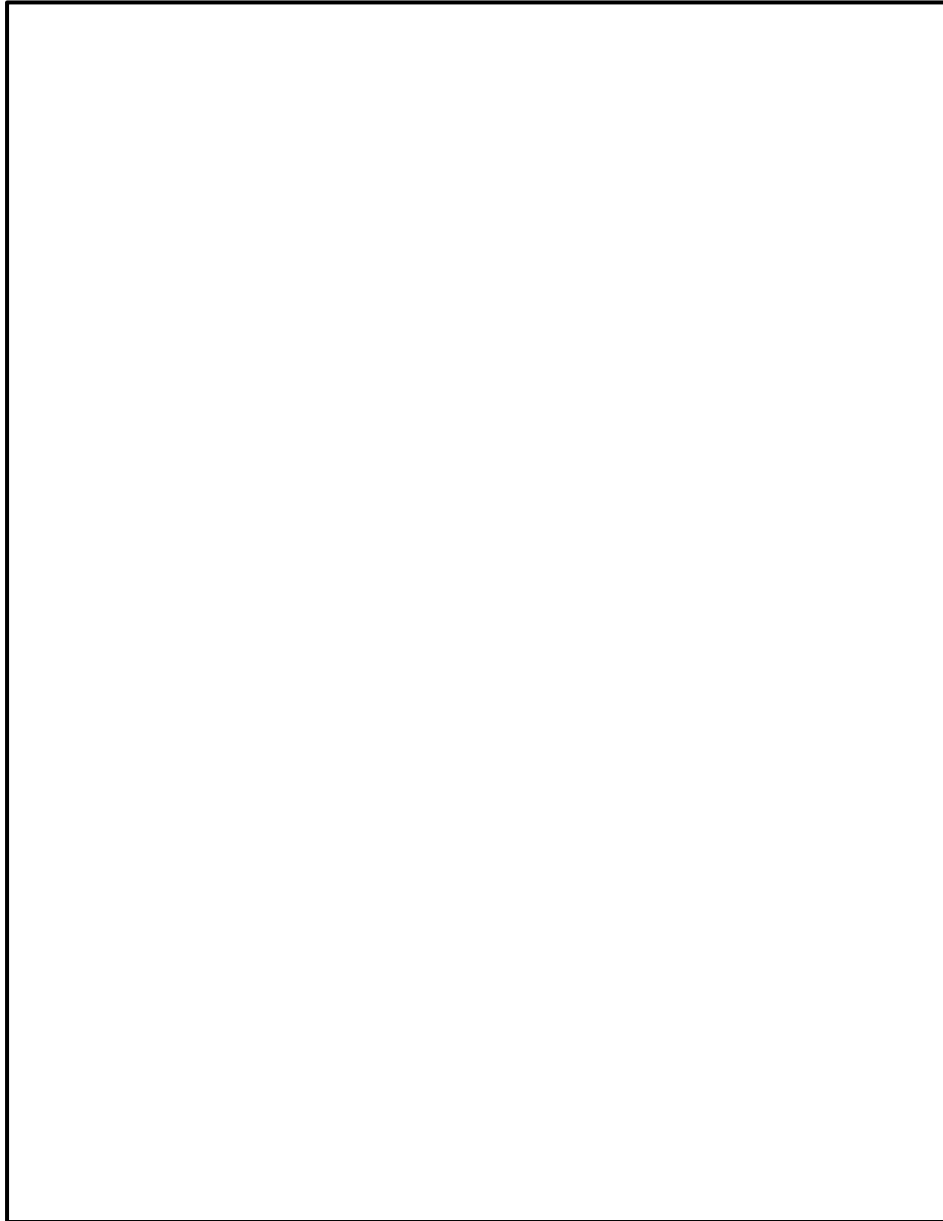


図6-2 振動モード図 (1次)

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にする。

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。

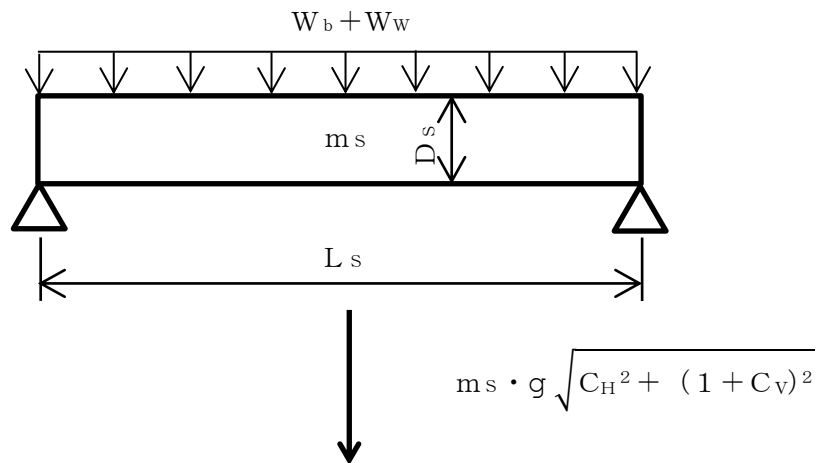


図6-3 シャフトの計算モデル

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。

$$Q_s = (m_s \cdot \sqrt{C_H^2 + (1 + C_V)^2} \cdot g + F_{b\text{BOS}} + F_{w\text{BOS}}) / 2 \quad \dots (6.2.1.1)$$

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

$F_{b\text{BOS}}$: 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)

$$F_{w_{BOS}} : \text{風による荷重} = B_b (\text{羽根の幅}) \cdot H_b (\text{羽根の高さ}) \\ \cdot P_w (\text{風圧力})$$

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。

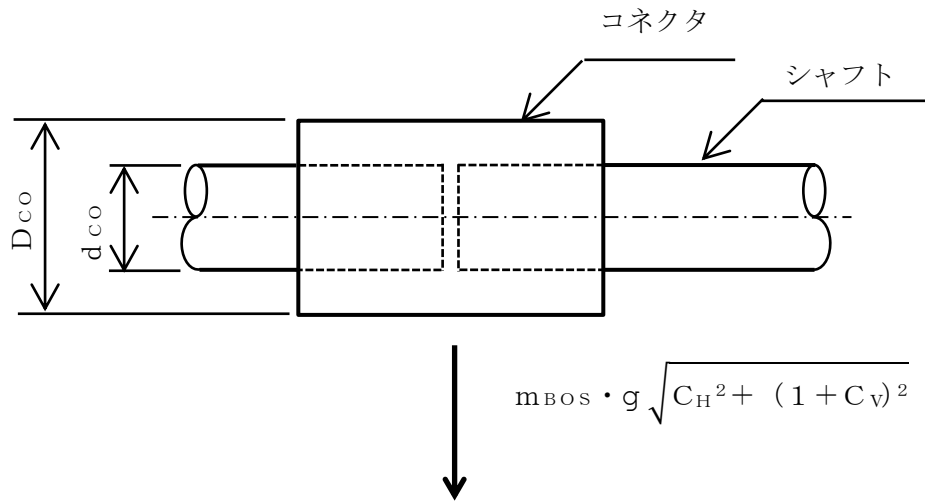


図6-4 コネクタの計算モデル

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。

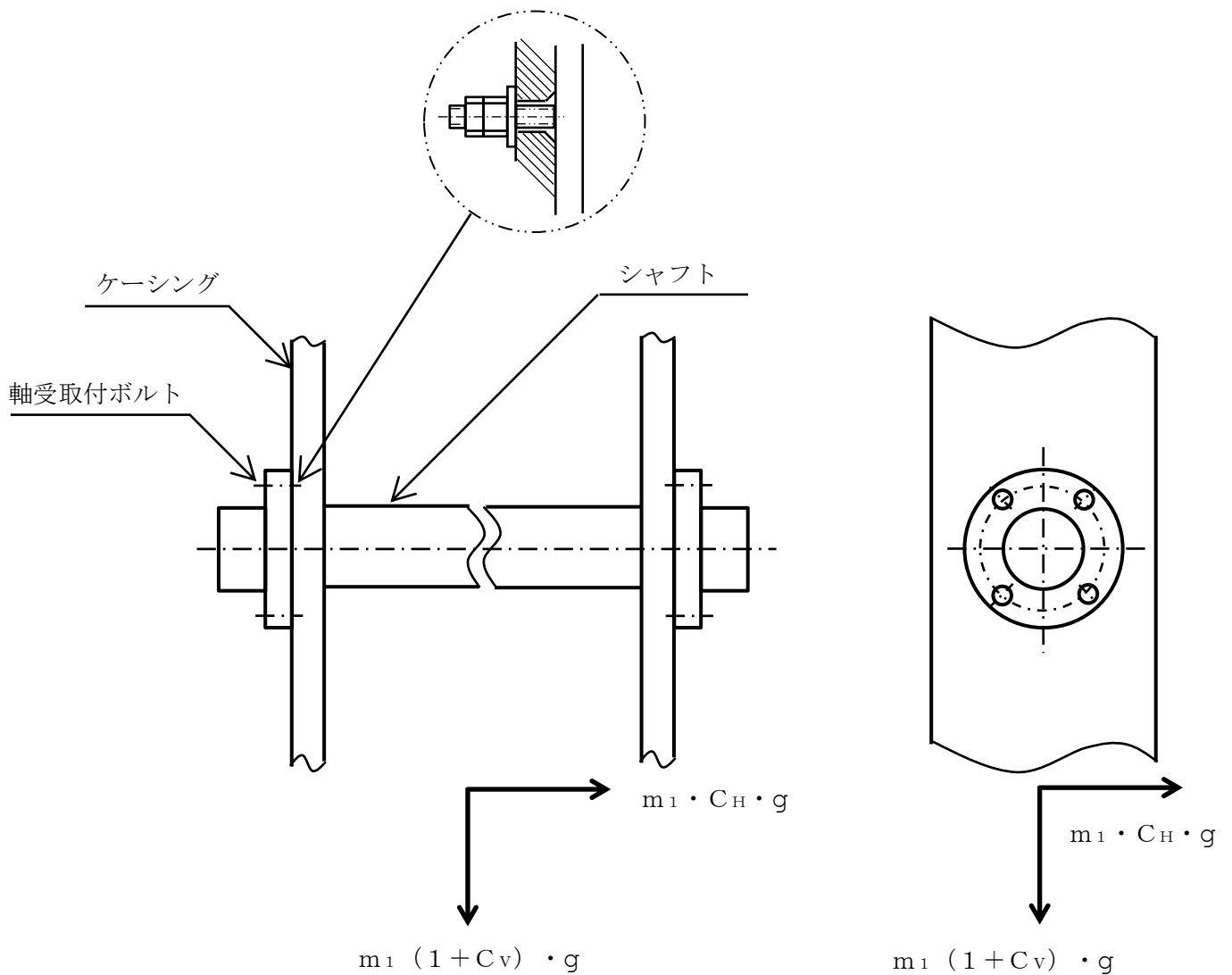


図6-5 軸受取付ボルトの計算モデル

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。

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

ここで、

m_1 : 軸受取付ボルトに加わる質量

F_{bBOS} : 差圧による荷重 = $B_b \cdot H_b \cdot P$

F_{wBOS} : 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及び図6-7に示すとおりとする。

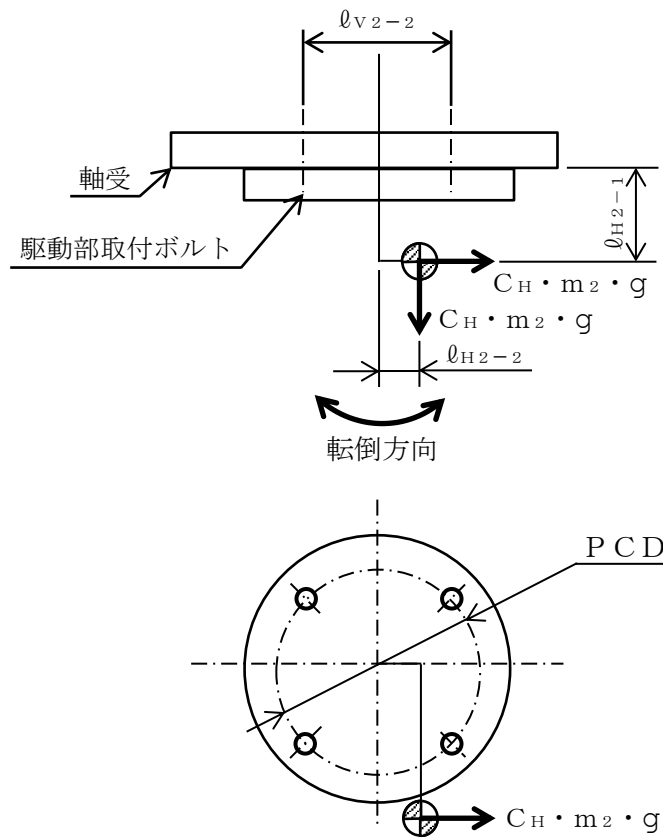


図6-6 駆動部取付ボルトの計算モデル (正面方向転倒)

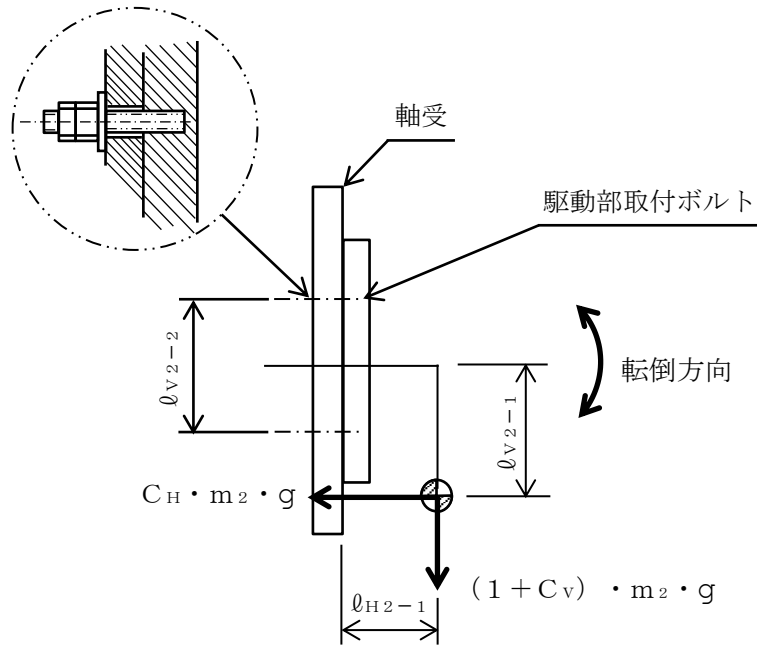


図6-7 駆動部取付ボルトの計算モデル（側面方向転倒）

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。

$$F_{b2-1} = (8 \cdot m_2 \cdot g) / (3 \cdot n_{t2} \cdot l_{V2-2}) \cdot (C_H \cdot (l_{V2-2} / 2 - l_{H2-1}) + C_H \cdot l_{H2-1}) \dots (6.2.4.1)$$

$$F_{b2-2} = (8 \cdot m_2 \cdot g) / (3 \cdot n_{t2} \cdot l_{V2-2}) \cdot (C_H \cdot (l_{V2-2} / 2 + l_{H2-1}) + C_H \cdot l_{H2-1}) \dots (6.2.4.2)$$

$$F_{b2-3} = (8 \cdot m_2 \cdot g) / (3 \cdot n_{t2} \cdot l_{V2-2}) \cdot ((1 + C_V) \cdot l_{H2-1} + C_H \cdot (l_{V2-1} - l_{V2-2} / 2)) \dots (6.2.4.3)$$

$$F_{b2-4} = (8 \cdot m_2 \cdot g) / (3 \cdot n_{t2} \cdot l_{V2-2}) \cdot ((C_V - 1) \cdot l_{H2-1} + C_H \cdot (l_{V2-1} + l_{V2-2} / 2)) \dots (6.2.4.4)$$

$$F_{b2} = \text{Max} (F_{b2-1}, F_{b2-2}, F_{b2-3}, F_{b2-4}) \dots \dots \dots (6.2.4.5)$$

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_{H2-1}, ℓ_{H2-2} : 重心と駆動部取付ボルトの水平方向距離

ℓ_{V2-1} : 重心と駆動部取付ボルトの鉛直方向距離

$$\ell_{V2-2} = \cos(\pi/4) \cdot PCD$$

: 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、

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

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。

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

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応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6-8及び図6-9に示すとおりとする。

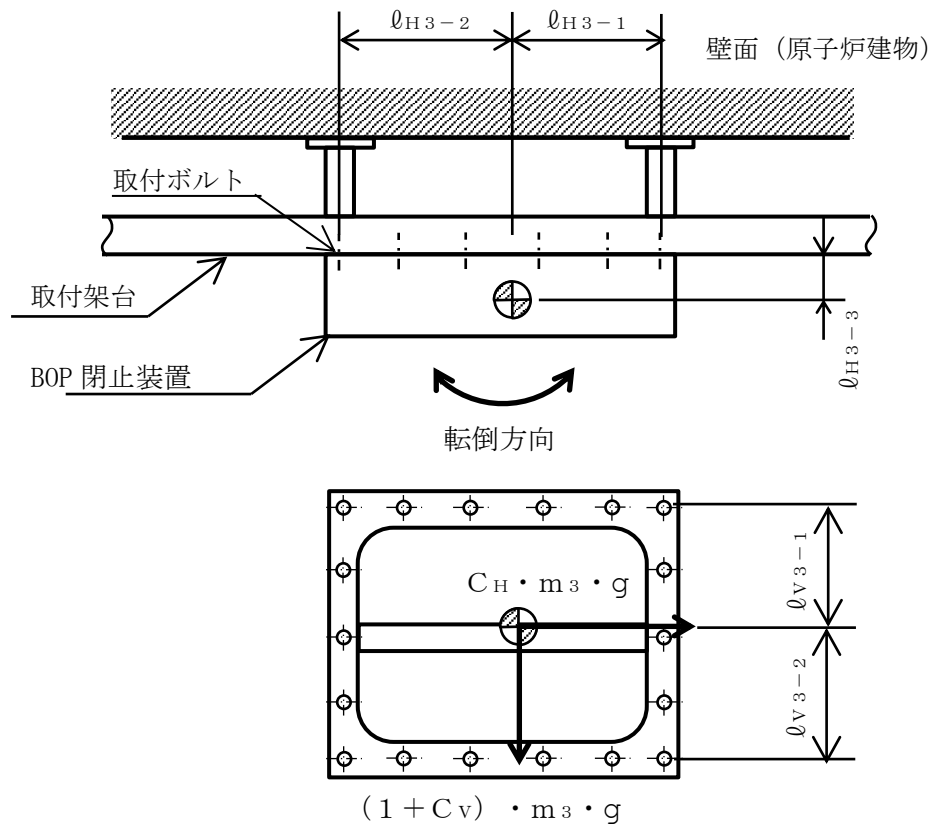


図6-8 取付ボルトの計算モデル (正面方向転倒)

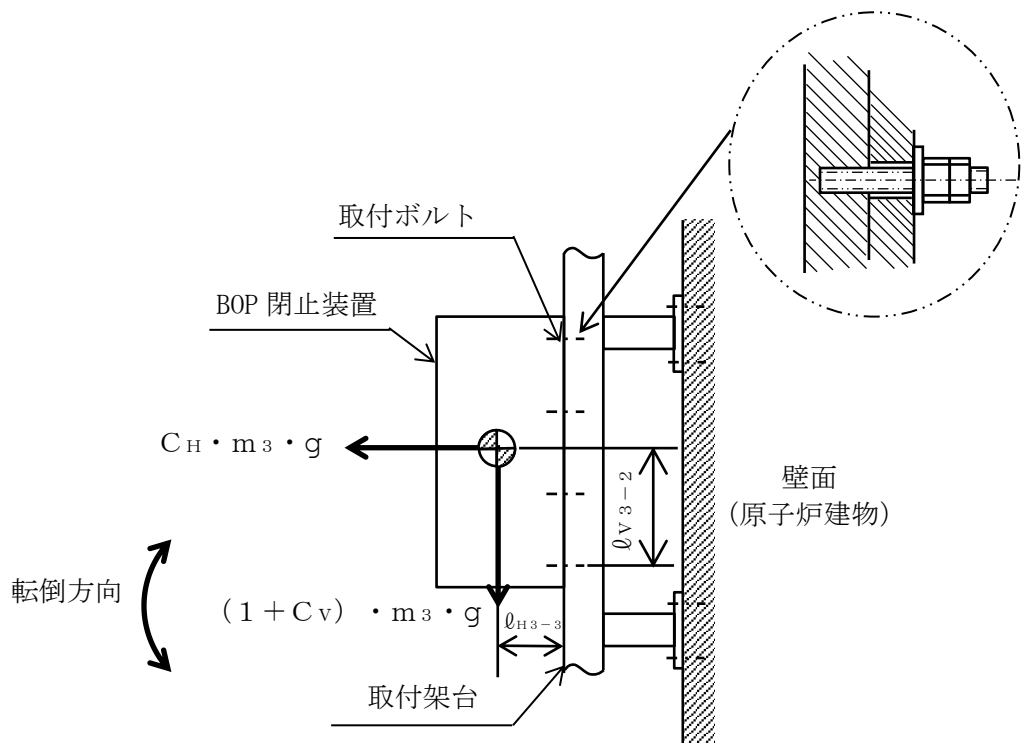


図6-9 取付ボルトの計算モデル（側面方向転倒）

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。

$$F_{b3-1} = (m_3 \cdot (1 + C_v) \cdot l_{H3-3} \cdot g) / (n_{v3} \cdot (l_{v3-1} + l_{v3-2})) + (m_3 \cdot C_H \cdot l_{H3-3} \cdot g) / (n_{H3} \cdot (l_{H3-1} + l_{H3-2})) + (F_{bBOS} + F_{wBOS}) / n_3 \quad \dots \dots \dots (6.2.5.1)$$

$$F_{b3-2} = (m_3 \cdot (1 + C_v) \cdot l_{H3-3} \cdot g + m_3 \cdot C_H \cdot l_{v3-2} \cdot g) / (n_{v3} \cdot (l_{v3-1} + l_{v3-2})) + (F_{bBOS} + F_{wBOS}) / n_3 \quad \dots \dots \dots (6.2.5.3)$$

$$F_{b3} = \text{Max} (F_{b3-1}, F_{b3-2}) \quad \dots \dots \dots (6.2.5.4)$$

ここで、

m_3 : 取付ボルトに加わる質量

F_{bBOS} : 差圧による荷重 = $B_b \cdot H_b \cdot P$

F_{wBOS} : 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

ℓ_{H3-1} , ℓ_{H3-2} , ℓ_{H3-3} : 重心と取付ボルトの水平方向距離

ℓ_{V3-1} , ℓ_{V3-2} : 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。

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

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。

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

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

6.2.6 基礎ボルトの応力計算

a. 計算モデル

基礎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，基礎ボルトに生じる応力を計算する。計算モデルは図6-10及び図6-11に示すとおりとする。

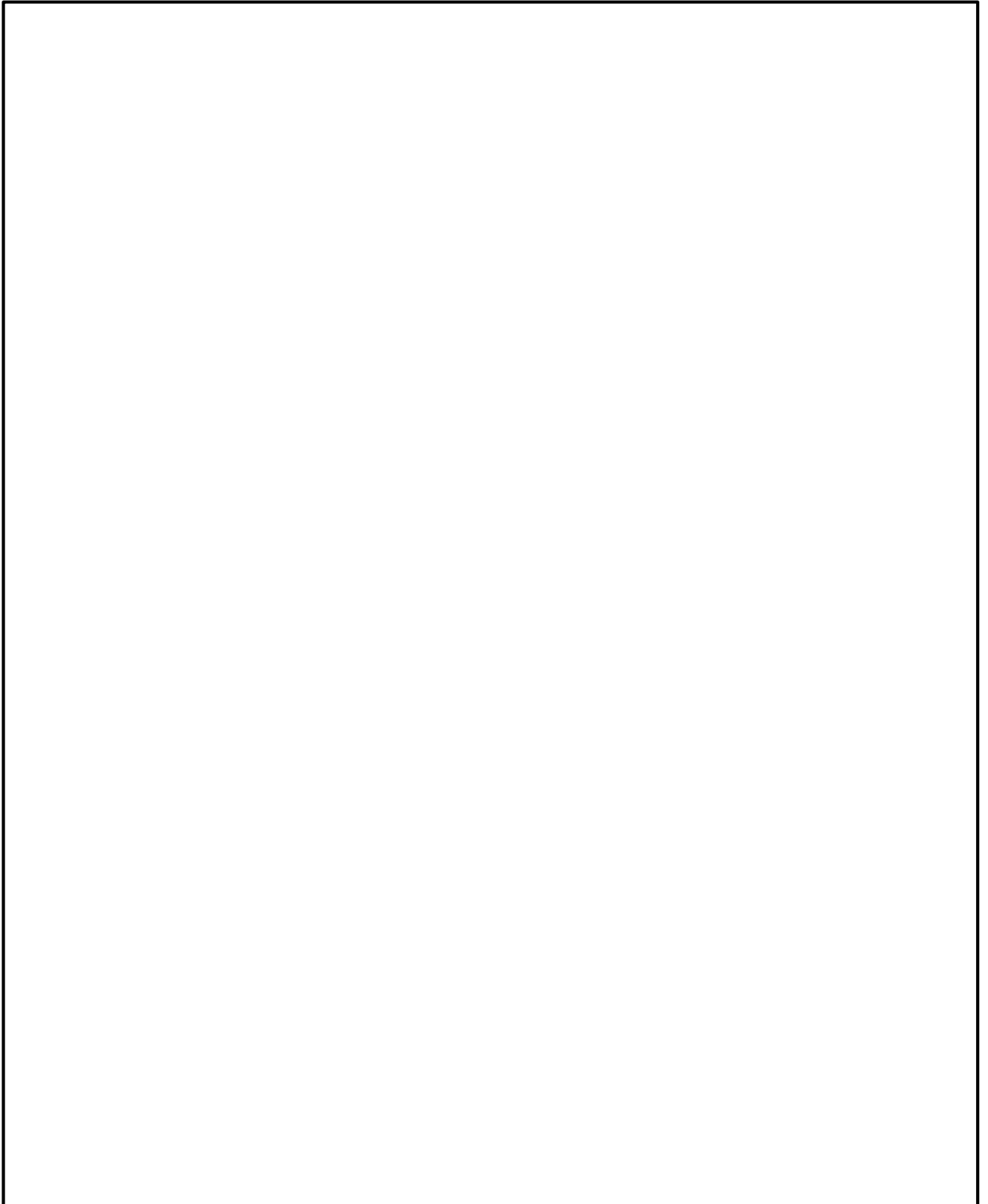


図6-10 基礎ボルトの計算モデル（側面方向転倒）

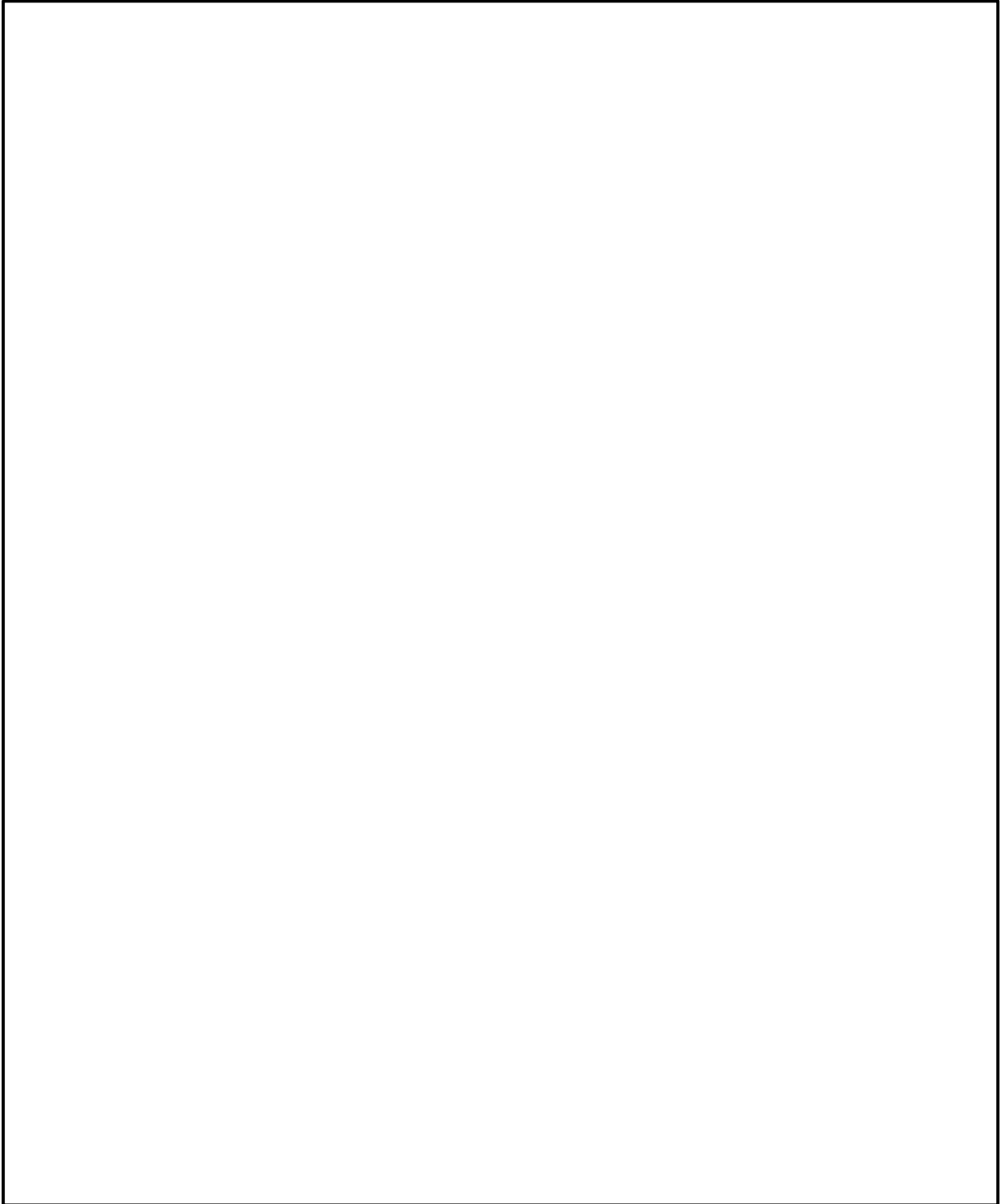


図6-11 基礎ボルトの計算モデル（側面方向転倒）

b. 応力計算

基礎ボルトに作用する荷重によるせん断力及び引張力を算出し、基礎ボルトに生じる応力を計算する。重心は、前後方向はフレームの中心に、左右方向はフレームの中心にまた鉛直方向は下端から5900mmとする。

荷重には差圧及び風による荷重も考慮する。差圧及び風による圧力荷重は、方向を考慮して引張荷重として地震荷重と組み合わせる。荷重は転倒支点からの距離に比例して配分し、計算結果は最も厳しいものを記載する。

また、ボルトに作用する荷重を考慮する際に、架台の側面転倒時に引張力を受けるボルトを正面ボルト、せん断力を受けるボルトを側面ボルトと分けて考えた場合、それぞれのボルトが受ける応力は以下の通りになる。ボルトごとに各応力を合計し評価する。

正面ボルト：側面方向の転倒モーメントによる引張応力 σ_{b4-1} 、水平方向の地震力によるせん断応力 τ_{b4-2} 、自重によるせん断応力 τ_{b4-3}

側面ボルト：水平方向の地震力による引張応力 σ_{b4-2} 、側面方向の転倒モーメントによるせん断応力 τ_{b4-1} 、自重によるせん断応力 τ_{b4-3}

(1) 引張応力

正面ボルトにかかる引張応力

鉛直方向の転倒モーメントが働いた場合に、転倒支点を除く k 段目の正面の基礎ボルト1本あたりの引張力と支点からの距離には次の関係が成り立つ。

$$F_{b4-k} = \frac{\ell_{V4-k}}{\ell_{V4-1}} \cdot F_{b4-1} \quad \dots (6.2.6.1)$$

$$M = \sum (n_{bt4-k} \cdot F_{b4-k} \cdot \ell_{V4-k}) = \sum (n_{bt4-k} \cdot \frac{\ell_{V4-k}^2}{\ell_{V4-1}} \cdot F_{b4-1}) \quad \dots (6.2.6.2)$$

$$F_{b4-1} = \frac{M}{\sum (n_{bt4-k} \cdot \frac{\ell_{V4-k}^2}{\ell_{V4-1}})} \quad \dots (6.2.6.3)$$

ここで、鉛直方向の転倒モーメントは

$$M = m_4 \cdot (1+C_V) \cdot g \cdot \ell_{H4} + m_4 \cdot C_H \cdot g \cdot \ell_{V4} + (F_{bSP} + F_{wSP}) \cdot \ell_{VSP} \quad \dots (6.2.6.4)$$

また、差圧及び風圧による荷重は次式により求める。

$$F_{bSP} = A_{SP} \cdot P \quad \dots (6.2.6.5)$$

$$F_{wSP} = A_{SP} \cdot P_w \quad \dots \dots \dots (6.2.6.6)$$

よって、引張応力は

$$\sigma_{b4-1} = \frac{F_{b4-1}}{A_{b4}} \quad \dots \dots \dots (6.2.6.7)$$

側面ボルトにかかる引張応力

水平方向の地震力が働いた場合の、側面ボルトにかかる引張応力は

$$\sigma_{b24} = \frac{m_4 \cdot C_H \cdot g}{\sum n_{bt4-k} \cdot A_{b4}} \quad \dots \dots (6.2.6.8)$$

以上より

$$\sigma_{b4} = \text{Max}(\sigma_{b4-1}, \sigma_{b4-2}) \quad \dots \dots (6.2.6.9)$$

(2)せん断応力

側面ボルトにかかるせん断応力

鉛直方向の転倒モーメントが働いた場合に、転倒支点を除く k 段目の側面の基礎ボルト1本あたりの引張力と支点からの距離には次の関係が成り立つ。

また、基礎ボルトの配置上、側面ボルトの最上段は2段目となる。

$$Q_{b4-k} = \frac{\ell_{V4-k}}{\ell_{V4-2}} \cdot Q_{b14-2} \quad \dots \dots (6.2.6.10)$$

$$M = \sum (n_{bs4-k} \cdot Q_{b4-k} \cdot \ell_{V4-k}) = \sum (n_{bs4-k} \cdot \frac{\ell_{V4-k}^2}{\ell_{V4-2}} \cdot Q_{b4-2}) \quad \dots \dots (6.2.6.11)$$

$$Q_{b4-2} = \frac{M}{\sum (n_{bs4-k} \cdot \frac{\ell_{V4-k}^2}{\ell_{V4-2}})} \quad \dots \dots (6.2.6.12)$$

ここで、鉛直方向の転倒モーメントは

$$M = m_4 \cdot (1+C_V) \cdot g \cdot \ell_{H4} + m_4 \cdot C_H \cdot g \cdot \ell_{V4} + (F_{bSP} + F_{wSP}) \cdot \ell_{VSP} \quad \dots \dots (6.2.6.13)$$

また、差圧及び風圧による荷重は

$$F_{bSP} = A_{SP} \cdot P \quad \dots \dots \dots (6.2.6.14)$$

$$F_{wSP} = A_{SP} \cdot P_w \quad \dots \dots \dots (6.2.6.15)$$

よって、せん断応力は

$$\tau_{b4-1} = \frac{Q_{b4-2}}{A_{b4}} \quad \dots \dots \dots (6.2.6.16)$$

正面ボルトにかかるせん断応力

水平方向の地震力が働いた場合の、正面ボルトにかかるせん断応力は

$$\tau_{b4-2} = \frac{m_4 \cdot C_H \cdot g}{\sum n_{bs4-k} \cdot A_{b4}} \quad \dots \dots (6.2.6.17)$$

全ボルトにかかる自重及び鉛直方向の地震力によるせん断応力

ボルト全本数により荷重を受けるものとし、自重及び鉛直方向の地震力によるせん断応力は

$$\tau_{b4-4} = \frac{m_4 \cdot (1 + C_v) \cdot g}{n_4 \cdot A_{b4}} \quad \dots \dots (6.2.6.18)$$

以上より

$$\tau_{b4} = \text{Max} (\tau_{b4-1} + \tau_{b4-3}, \tau_{b4-2} + \tau_{b4-3}) \quad \dots \dots (6.2.6.19)$$

7. 評価結果

BOP閉止装置の基準地震動 S_s による応力評価結果を表7-1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。

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	18	153	8.50
			せん断	11	118	10.72
		羽根閉	引張	19	153	8.05
			せん断	11	118	10.72
	基礎ボルト	羽根開	引張	46	116	2.52
			せん断	61	117	1.91
		羽根閉	引張	46	104	2.26
せん断			69	117	1.69	

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

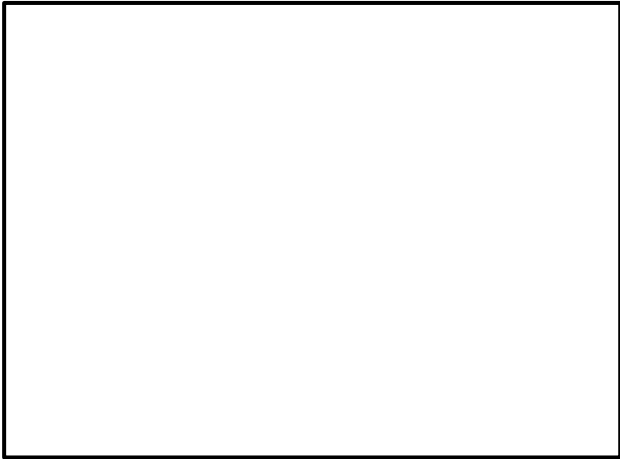
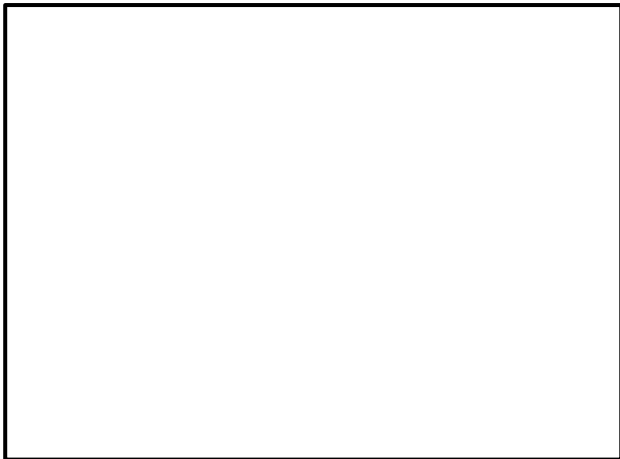
本資料は、BOP閉止装置の加振試験の結果から得られた荷重に対する強度評価結果について纏めたものである。

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。なお、加振試験方法及び結果については「VI-1-1-7-別添4 ブローアウトパネル関連設備の設計方針」の補足説明資料「補足4-18 ブローアウトパネル閉止装置の機能確認試験要領について」及び「補足4-19 ブローアウトパネル閉止装置の機能確認試験結果について」に示す。

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表2-1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 ツ 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：</p> $\text{Max} \left[\frac{A13X+A21X+A18X+A24X+A19X}{5 \cdot g}, \frac{A13Y+A21Y+A18Y+A24Y+A19Y}{5 \cdot g} \right]$ <p>鉛直：$\frac{A13Z+A21Z+A18Z+A24Z+A19Z}{5 \cdot g}$</p>	
3 連 ユ ニ ツ 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：</p> $\text{Max} \left[\frac{A13X+A21X+A18X+A24X+A19X+A27X+A20X}{7 \cdot g}, \frac{A13Y+A21Y+A18Y+A24Y+A19Y+A27Y+A20Y}{7 \cdot g} \right]$ <p>鉛直：$\frac{A13Z+A21Z+A18Z+A24Z+A19Z+A27Z+A20Z}{7 \cdot g}$</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及び表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	$\alpha \times S_s$ 加振	
				羽根開	羽根閉
2連 ユニット	水平X (NS) (1.15倍加振)	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) (1.20倍加振)	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) (1.25倍加振)	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	$\alpha \times S_s$ 加振	
				羽根開	羽根閉
3連 ユニット	水平X (NS) (1.15倍加振)	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) (1.20倍加振)	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) (1.25倍加振)	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 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

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

鉛直方向

$$a = \frac{(A13Z + A21Z + A18Z + A24Z + A19Z)}{5/g}$$

②3連ユニット

水平方向

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

鉛直方向

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

ここで，

a : 羽根の相当震度（－）

g : 重力加速度 = 9.80665 (m/s²)



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3-3に示す。

表3-3 羽根の相当震度 (単位：-)

試験体	方向	$\alpha \times S_s$ 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	79	305	3.86
		羽根閉	組合せ	92	305	3.32
	コネクタ	—	せん断	19	176	9.26
	軸受取付ボルト	羽根開	引張	7	153	21.86
			せん断	5	118	23.60
		羽根閉	引張	7	153	21.86
			せん断	6	118	19.67
	駆動部取付ボルト	—	引張	27	153	5.67
			せん断	4	118	29.50
	取付ボルト	羽根開	引張	10	153	15.30
			せん断	12	118	9.83
		羽根閉	引張	11	153	13.91
			せん断	12	118	9.83
	3連ユニット	シャフト	羽根開	組合せ	79	305
羽根閉			組合せ	92	305	3.32
コネクタ		—	せん断	19	176	9.26
軸受取付ボルト		羽根開	引張	7	153	21.86
			せん断	5	118	23.60
		羽根閉	引張	7	153	21.86
			せん断	6	118	19.67
駆動部取付ボルト		—	引張	27	153	5.67
			せん断	4	118	29.50
取付ボルト		羽根開	引張	10	153	15.30
			せん断	12	118	9.83
		羽根閉	引張	11	153	13.91
			せん断	12	118	9.83

注記* : 裕度 = (許容応力) / (算出応力)

ボルトの応力の算出過程に関する補足説明資料

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。）の耐震評価における、ボルトの応力計算手法のうち、比較的計算式が複雑となる駆動部取付ボルト及び取付ボルトの引張応力及び基礎ボルトの引張応力及びせん断応力の算出過程について説明するものである。

2. 駆動部取付ボルトの引張応力

駆動部取付ボルトは円形配列であるため、「VI-2-1-14 機器・配管系の計算書作成の方法」の「添付資料-2 立形ポンプの耐震性についての計算書作成の基本方針」を準用し評価する。

計算式で使用する記号は表2-1のとおり。

表2-1 駆動部取付ボルトの計算式で使用する記号

記号	記号の説明	単位
A_{b2}	駆動部取付ボルトの断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
D	円形配列のボルトのピッチ径	mm
F_{b2}	駆動部取付ボルトに作用する引張力（1本当たり）	N
F_k	転倒支点からk番目のボルトに生じる引張力	N
F_{kmax}	転倒支点から最も離れたボルトに生じる引張力	N
g	重力加速度（=9.80665）	m/s^2
l_{H2-1}, l_{H2-2}	重心と駆動部取付ボルトの水平方向距離	mm
l_k	転倒支点からk番目のボルトまでの距離	mm
l_{V2-1}, l_{V2-2}	重心と駆動部取付ボルトの鉛直方向距離	mm
M	転倒モーメント	$\text{N} \cdot \text{mm}$
m_2	駆動部取付ボルトに加わる質量	kg
n	円形配列のボルトの本数	—
n_{t2}	評価上引張力を受けるとして期待する駆動部取付ボルトの本数	—
σ_{b2}	駆動部取付ボルトに生じる引張応力	MPa
θ_k	転倒支点からk番目のボルトまでの回転角	°

円形配列のボルトに作用する引張力の概要を図2-1に示す。

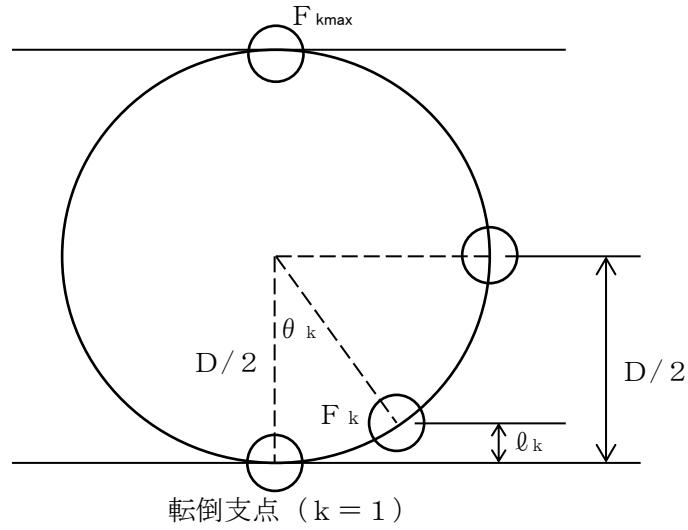


図2-1 円形配列のボルトに作用する引張力の概要

円形配列されたボルトに対する引張力は一点のボルトを支点とする転倒を考え、k番目のボルト(k=1を転倒支点とする)に作用する引張力 F_k は転倒支点からの距離に比例するとし、転倒支点から最も離れたボルトに作用する引張力を F_{kmax} とする。

$$F_k = \frac{l_k}{D} \cdot F_{kmax} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$l_k = \frac{D}{2} - \frac{D}{2} \cos \theta_k = \frac{D}{2} (1 - \cos \theta_k) \dots\dots\dots (2.2)$$

転倒モーメントをMとすると

$$\begin{aligned} M &= \Sigma (F_k \cdot l_k) = \Sigma \left(\frac{l_k^2}{D} \cdot F_{kmax} \right) = \frac{F_{kmax}}{D} \Sigma \frac{D^2}{4} (1 - \cos \theta_k)^2 \\ &= \frac{F_{kmax} \cdot D}{4} \Sigma (1 - 2 \cos \theta_k + \cos^2 \theta_k) \dots\dots\dots (2.3) \end{aligned}$$

ここで $\cos^2 \theta_k = (1 + \cos (2 \theta_k)) / 2$ より

$$M = \frac{F_{kmax} \cdot D}{4} \Sigma \left(\frac{3}{2} - 2 \cos \theta_k + \frac{1}{2} \cos (2 \theta_k) \right) \dots\dots\dots (2.4)$$

ここで $\Sigma \cos \theta_k = 0, \Sigma \cos (2 \theta_k) = 0$ より

$$M = \frac{3}{8} \cdot F_{kmax} \cdot D \cdot n \dots\dots\dots (2.5)$$

よって

$$F_{kmax} = \frac{8}{3 \cdot D \cdot n} \cdot M \dots\dots\dots (2.6)$$

(2.6) 式を用い、円形配列された駆動部取付ボルトの引張応力を算出する。

計算モデルを図2-2、図2-3に示すとおりとし、それぞれ①～④の転倒軸による転倒を考え、転倒モーメントによりボルトに生じる引張力を算出する。

なお、(2.6) 式におけるD及びnは保守的に ℓ_{V2-2} 及び n_{t2} を適用して評価を実施する。評価条件の保守性の整理は表2-2のとおり。

表2-2 評価条件の保守性の整理結果

	円形配列のボルト	駆動部取付ボルト	備考
転倒支点からの距離	D : PCD	$\ell_{V2-2} : PCD/\sqrt{2}$	ℓ_{V2-2} はDより小さく荷重を大きく算出するため保守的
ボルト本数	n : 4本	$n_{t2} : 2$ 本	n_{t2} はnより小さく荷重を大きく算出するため保守的

(1) ①列を転倒軸とした場合に②列に生じる引張力

$$F_{b2-1} = \frac{8 \cdot m_2 \cdot g}{3 \cdot n_{t2} \cdot \ell_{V2-2}} \cdot \left(C_H \cdot \left(\frac{\ell_{V2-2}}{2} - \ell_{H2-2} \right) + C_H \cdot \ell_{H2-1} \right) \dots\dots\dots (2.7)$$

(2) ②列を転倒軸とした場合に①列に生じる引張力

$$F_{b2-2} = \frac{8 \cdot m_2 \cdot g}{3 \cdot n_{t2} \cdot \ell_{V2-2}} \cdot \left(C_H \cdot \left(\frac{\ell_{V2-2}}{2} + \ell_{H2-2} \right) + C_H \cdot \ell_{H2-1} \right) \dots\dots\dots (2.8)$$

(3) ③列を転倒軸とした場合に④列に生じる引張力

$$F_{b2-3} = \frac{8 \cdot m_2 \cdot g}{3 \cdot n_{t2} \cdot \ell_{V2-2}} \cdot \left((1 + C_V) \cdot \ell_{H2-1} + C_H \cdot \left(\ell_{V2-1} - \frac{\ell_{V2-2}}{2} \right) \right) \dots\dots\dots (2.9)$$

(4) ④列を転倒軸とした場合に③列に生じる引張力

$$F_{b2-4} = \frac{8 \cdot m_2 \cdot g}{3 \cdot n_{t2} \cdot \ell_{V2-2}} \cdot \left((C_V - 1) \cdot \ell_{H2-1} + C_H \cdot \left(\ell_{V2-1} + \frac{\ell_{V2-2}}{2} \right) \right) \dots\dots\dots (2.10)$$

$$F_{b2} = \text{Max} (F_{b2-1}, F_{b2-2}, F_{b2-3}, F_{b2-4}) \dots\dots\dots (2.11)$$

よって、引張応力は

$$\sigma_{b2} = \frac{F_{b2}}{A_{b2}} \dots\dots\dots (2.12)$$

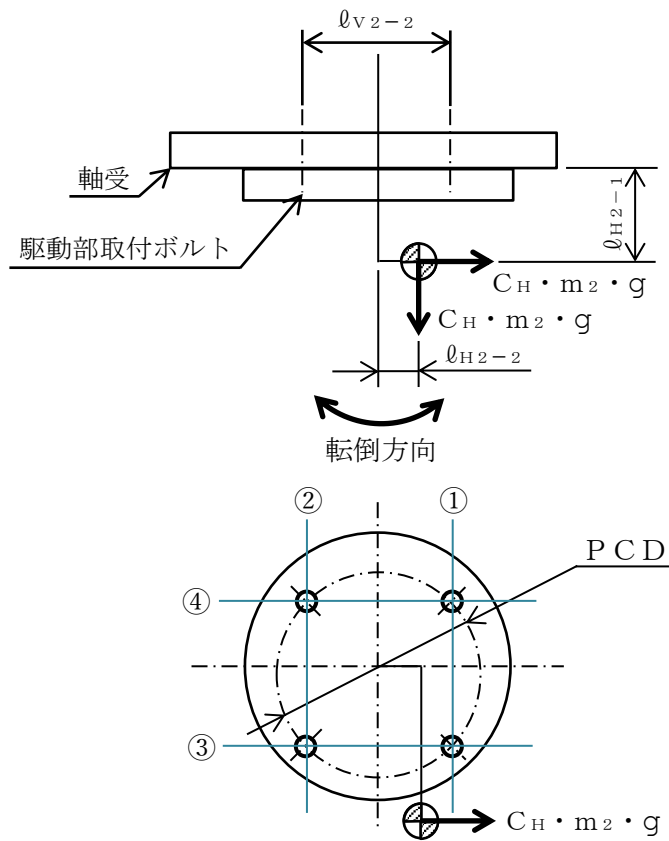


図2-2 駆動部取付ボルトの計算モデル（正面方向転倒）

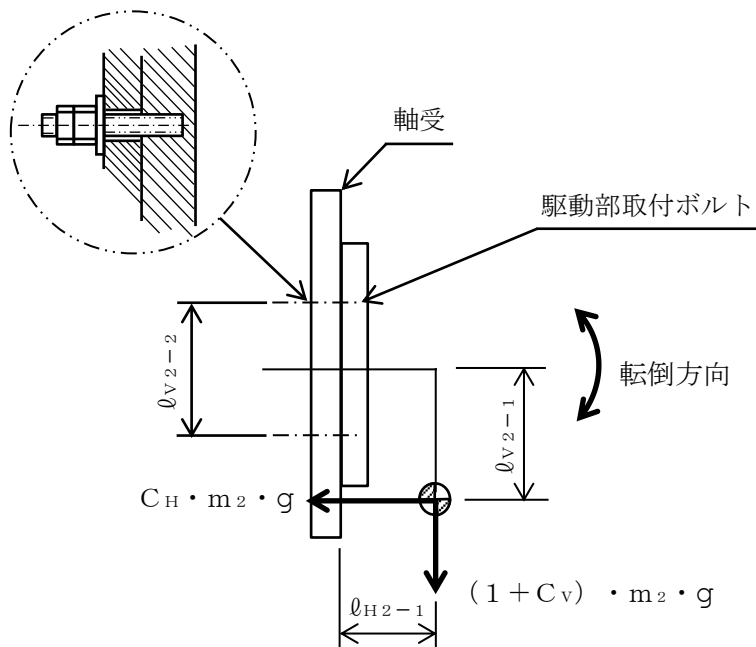


図2-3 駆動部取付ボルトの計算モデル（側面方向転倒）

3. 取付ボルトの引張応力

取付ボルトは矩形配列であるため、「VI-2-1-14 機器・配管系の計算書作成の方法」の「添付資料-9 盤の耐震性についての計算書作成の基本方針」を準用し評価する。

取付ボルト（1本あたり）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する。正面方向転倒と側面方向転倒のそれぞれについて評価する。

計算式で使用する記号は表3-1のとおり。

表3-1 取付ボルトの計算式で使用する記号

記号	記号の説明	単位
A_{b3}	取付ボルトの断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
F_{bBOS}	差圧によってBOP閉止装置に生じる荷重	N
F_{b3}	取付ボルトに作用する引張力（1本当たり）	N
F_{WBOS}	風によってBOP閉止装置に生じる荷重	N
g	重力加速度（=9.80665）	m/s^2
$\ell_{H3-1}, \ell_{H3-2}, \ell_{H3-3}$	重心と取付ボルトの水平方向距離	mm
ℓ_{V3-1}, ℓ_{V3-2}	重心と取付ボルトの鉛直方向距離	mm
m_3	取付ボルトに加わる質量	kg
n_{H3}	水平方向の引張力を受ける取付ボルトの本数	—
n_3	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	—
P	差圧による圧力	Pa
P_w	風圧力	Pa
σ_{b3}	取付ボルトに生じる引張応力	MPa

3.1 正面方向転倒

正面方向転倒では図3-1のとおり自重及び地震力によって取付ボルトに作用する引張力を算出する。

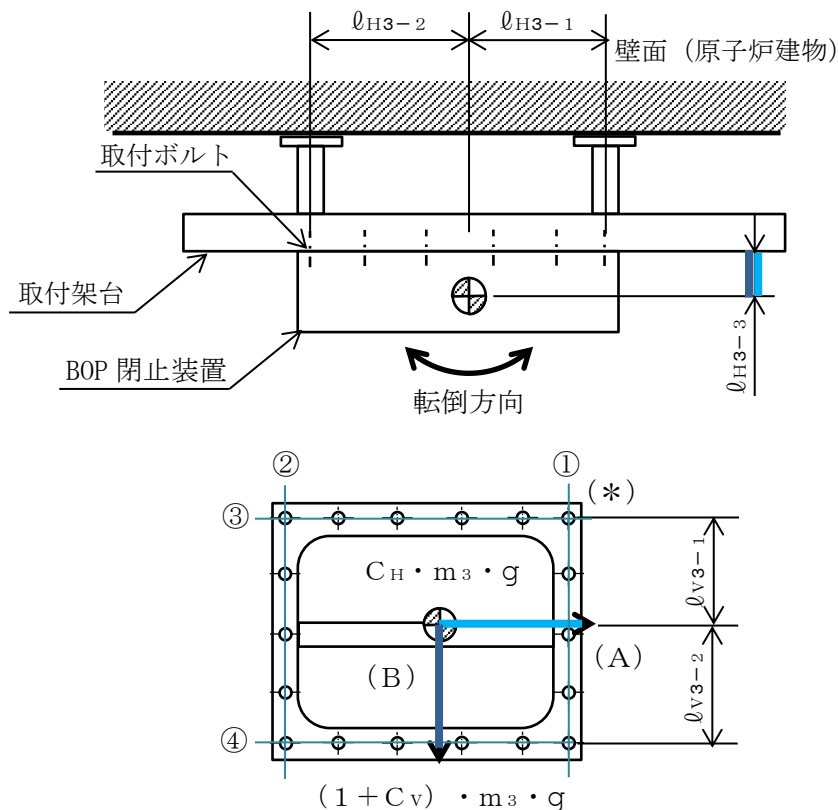


図3-1 取付ボルトの計算モデル（正面方向転倒）

自重及び地震力により取付ボルトに生じる引張力として、以下を算出する。

- (A) 自重及び鉛直方向の地震力により発生するモーメントについて、④を転倒軸とした場合に③列に生じる引張力
- (B) 水平方向の地震力により発生するモーメントについて、②を転倒軸とした場合に①列に生じる引張力

(A) について取付ボルトにかかる引張力 $F_{b3-1(B)}$ は次式により求める。

$$F_{b3-1(A)} = (m_3 \cdot (1 + C_V) \cdot l_{H3-3} \cdot g) / (n_{V3} \cdot (l_{V3-1} + l_{V3-2})) \cdots (3.1)$$

(B) について取付ボルトにかかる引張力 $F_{b3-1(A)}$ は次式により求める。

$$F_{b3-1(B)} = (m_3 \cdot C_H \cdot l_{H3-3} \cdot g) / (n_{H3} \cdot (l_{H3-1} + l_{H3-2})) \cdots (3.2)$$

上記の自重及び地震力による引張力に加えて，差圧及び風によって取付ボルト全体に対して引張力が発生するため，差圧及び風による荷重をボルト全数で除した取付ボルト1本あたりの引張力 $F_{b3-1(C)}$ を算出する。

$$F_{b3-1(C)} = (F_{bBOS} + F_{wBOS}) / n_3 \cdots \cdots \cdots (3.3)$$

ここで，差圧による荷重 F_b は次式により求める。

$$F_{bBOS} = B_b \cdot H_b \cdot P \cdots \cdots \cdots (3.4)$$

ここで，風による荷重 F_w は次式により求める。

$$F_{wBOS} = B_b \cdot H_b \cdot P_w \cdots \cdots \cdots (3.5)$$

よって，取付ボルト1本に対する正面方向転倒による引張力は次式により求める。

$$\begin{aligned} F_{b3-1} &= F_{b3-1(A)} + F_{b3-1(B)} + F_{b3-1(C)} \\ &= (m_3 \cdot (1 + C_v) \cdot \ell_{H3-3} \cdot g) / (n_{v3} \cdot (\ell_{v3-1} + \ell_{v3-2})) \\ &\quad + (m_3 \cdot C_H \cdot \ell_{H3-3} \cdot g) / (n_{H3} \cdot (\ell_{H3-1} + \ell_{H3-2})) \\ &\quad + (F_b + F_w) / n_3 \cdots \cdots \cdots (3.6) \end{aligned}$$

3.2 側面方向転倒

側面方向転倒では図3-2のとおり自重及び地震力によって取付ボルトに作用する引張力を算出する。

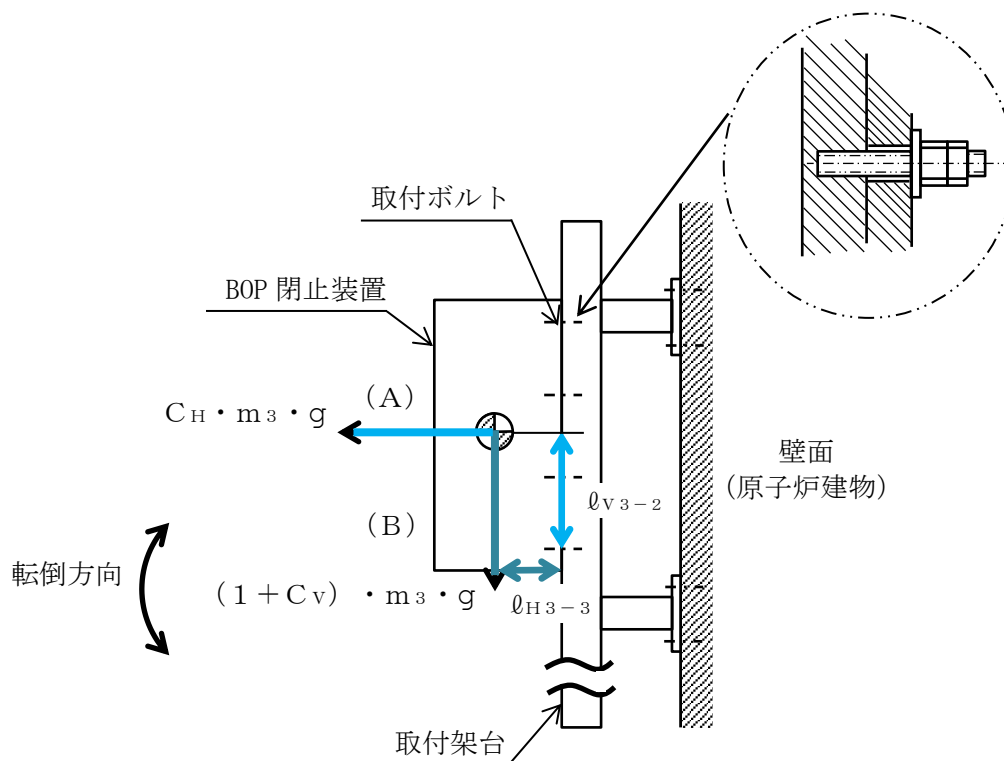


図3-2 取付ボルトの計算モデル（側面方向転倒）

自重及び地震力により取付ボルトに生じる引張力として、以下を算出する。

- (A) 自重及び鉛直方向の地震力により発生するモーメントについて、④を転倒軸とした場合に③列に生じる引張力
- (B) 水平方向の地震力により発生するモーメントについて、④を転倒軸とした場合に③列に生じる引張力

(A) について取付ボルトにかかる引張力 $F_{b3-1(B)}$ は次式により求める。

$$F_{b3-2(A)} = (m_3 \cdot (1 + C_V) \cdot l_{H3-3} \cdot g) / (n_{V3} \cdot (l_{V3-1} + l_{V3-2})) \cdots (3.7)$$

(B) について取付ボルトにかかる引張力 $F_{b13(A)}$ は次式により求める。

$$F_{b3-2(B)} = (m_3 \cdot C_H \cdot l_{V3-2} \cdot g) / (n_{V3} \cdot (l_{V3-1} + l_{V3-2})) \cdots (3.8)$$

上記の自重及び地震力による引張力に加えて，差圧及び風によって取付ボルト全体に対して引張力が発生するため，差圧及び風による荷重をボルト全数で除した取付ボルト1本あたりの引張力 $F_{b3-2(C)}$ を算出する。

$$F_{b3-2(C)} = (F_{bBOS} + F_{wBOS}) / n_3 \dots\dots\dots (3.9)$$

ここで，差圧による荷重 F_b は次式により求める。

$$F_{bBOS} = B_b \cdot H_b \cdot P \dots\dots\dots (3.10)$$

ここで，風による荷重 F_w は次式により求める。

$$F_{wBOS} = B_b \cdot H_b \cdot P_w \dots\dots\dots (3.11)$$

よって，取付ボルト1本に対する正面方向転倒による引張力は次式により求める。

$$\begin{aligned} F_{b3-2} &= F_{b3-2(A)} + F_{b3-2(B)} + F_{b3-2(C)} \\ &= (m_3 \cdot (1 + C_v) \cdot \ell_{H3-3} \cdot g + m_3 \cdot C_H \cdot \ell_{V3-2} \cdot g) \\ &\quad / (n_{V3} \cdot (\ell_{V3-1} + \ell_{V3-2})) + (F_b + F_w) / n_3 \dots\dots\dots (3.12) \end{aligned}$$

3.3 引張応力

引張応力算出に用いる引張力は3.1項及び3.2項でそれぞれ求めた側面方向転倒及び正面方向転倒による引張力の最大値とする。

$$F_{b3} = \text{M a x} (F_{b3-1}, F_{b3-2}) \dots\dots\dots (3.13)$$

よって，引張応力は

$$\sigma_{b3} = \frac{F_{b3}}{A_{b3}} \dots\dots\dots (3.14)$$

4. 基礎ボルトの引張応力及びせん断応力

基礎ボルトに作用するせん断力及び引張力を算出し、それらにより生じる応力を算出する。

なお、転倒による基礎ボルトへの引張力は駆動部取付ボルトでの評価と同様に転倒支点から距離に比例して配分する。

計算式で使用する記号は表4-1のとおり。

表4-1 基礎ボルトの計算式で使用する記号

記号	記号の説明	単位
A_{b4}	基礎ボルトの断面積	mm^2
A_{SP}	取付架台の受圧面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
F_{bSP}	差圧によって取付架台に生じる荷重	N
F_{b4-k}	k段目の基礎ボルトに作用する引張力（1本当たり）	N
F_{WSP}	風によって取付架台に生じる荷重	N
g	重力加速度（=9.80665）	m/s^2
l_{H4}	重心と基礎ボルトの水平方向距離	mm
l_{V4}	重心と基礎ボルトの鉛直方向距離	mm
l_{V4-k}	転倒支点からk段目の基礎ボルトの鉛直方向距離	mm
l_{VSP}	取付架台の鉛直方向距離	mm
m_4	取付架台の質量	kg
n_{H4}	水平方向の引張力を受けるボルトの本数	—
n_4	基礎ボルトの総本数	—
n_{bt4-k}	取付架台正面のk段目の基礎ボルトの本数	—
n_{bs4-k}	取付架台側面のk段目の基礎ボルトの本数	—
P	差圧による圧力	Pa
P_w	風圧力	Pa
Q_{b4-k}	k段目の基礎ボルトに作用するせん断力（1本当たり）	N
σ_{b4}	基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
τ_{b4}	基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa

また、ボルトに作用する荷重を考慮する際に、架台の側面転倒時に引張力を受けるボルトを正面ボルト、せん断力を受けるボルトを側面ボルトと分けて考えた場合、それぞれのボルトが受ける応力は以下のとおりになる。

正面ボルト：側面方向の転倒モーメントによる引張応力 σ_{b4-1} ，水平方向の地震力によるせん断応力 τ_{b4-2} ，自重によるせん断応力 τ_{b4-3}

側面ボルト：水平方向の地震力による引張応力 σ_{b4-2} ，側面方向の転倒モーメントによるせん断応力 τ_{b4-1} ，自重によるせん断応力 τ_{b4-3}

また、k段目における正面ボルトの本数を n_{bt4-k} ，側面ボルトの本数を n_{bs4-k} ，基礎ボルト全数を n_4 とする。計算モデルを図4-1及び図4-2に示す。

4.1 引張応力

(1) 正面ボルトにかかる側面方向の転倒モーメントによる引張応力

側面方向の転倒モーメントが働いた場合に、転倒支点を除く k 段目の正面の基礎ボルト 1 本あたりの引張力 F_{b4-k} と支点からの距離 l_{V4-k} には次の関係が成り立つ。

$$F_{b4-k} = \frac{l_{V4-k}}{l_{V4-1}} \cdot F_{b4-1} \dots \dots \dots (4.1)$$

$$M = \Sigma (n_{bt4-k} \cdot F_{b4-k} \cdot l_{V4-k}) = \Sigma (n_{bt4-k} \cdot \frac{l_{V4-k}^2}{l_{V4-1}} \cdot F_{b4-1}) \dots \dots (4.2)$$

$$F_{b4-1} = \frac{M}{\Sigma (n_{bt4-k} \cdot \frac{l_{V4-k}^2}{l_{V4-1}})} \dots \dots \dots (4.3)$$

ここで、側面方向の転倒モーメントは

$$M = m_4 \cdot (1 + C_V) \cdot g \cdot l_{H4} + m_4 \cdot C_H \cdot g \cdot l_{V4} + (F_{bSP} + F_{wSP}) \cdot l_{VSP} \dots (4.4)$$

また、差圧による荷重 F_b は次式により求める。

$$F_{bSP} = A_{SP} \cdot P \dots \dots \dots (4.5)$$

また、風による荷重 F_w は次式により求める。

$$F_{wSP} = A_{SP} \cdot P_w \dots \dots \dots (4.6)$$

よって、引張応力は

$$\sigma_{b4-1} = \frac{F_{b4-1}}{A_{b4}} \dots \dots \dots (4.7)$$

(2) 側面ボルトにかかる水平方向の地震力による引張応力

水平方向の地震力が働いた場合の、側面ボルトにかかる引張応力は

$$\sigma_{b4-2} = \frac{m_4 \cdot C_H \cdot g}{\Sigma n_{bt4-k} \cdot A_{b4}} \dots \dots \dots (4.8)$$

以上より、

$$\sigma_{b4} = \text{Max} (\sigma_{b4-1}, \sigma_{b4-2}) \dots \dots \dots (4.9)$$

4.2 せん断応力

(1) 側面ボルトにかかる側面方向の転倒モーメントによるせん断応力

側面方向の転倒モーメントが働いた場合に、転倒支点を除く k 段目の側面の基礎ボルト1本あたりのせん断力 Q_{b4-k} と支点からの距離 l_{V4-k} には次の関係が成り立つ。

また、基礎ボルトの配置上、側面ボルトの最上段は2段目である。

$$Q_{b4-k} = \frac{l_{V4-k}}{l_{V4-2}} \cdot Q_{b4-2} \cdots \cdots (4.10)$$

$$M = \sum (n_{bs4-k} \cdot Q_{b4-k} \cdot l_{V4-k}) = \sum (n_{bs4-k} \cdot \frac{l_{V4-k}^2}{l_{V4-2}} \cdot Q_{b4-2}) \cdots \cdots (4.11)$$

$$Q_{b4-2} = \frac{M}{\sum (n_{bs4-k} \cdot \frac{l_{V4-k}^2}{l_{V4-2}})} \cdots \cdots (4.12)$$

ここで、側面方向の転倒モーメントは

$$M = m_4 \cdot (1+C_V) \cdot g \cdot l_{H4} + m_4 \cdot C_H \cdot g \cdot l_{V4} + (F_{bSP} + F_{wSP}) \cdot l_{VSP} \quad (4.13)$$

また、差圧による荷重 F_b は次式により求める。

$$F_{bSP} = A_s \cdot P \cdots \cdots (4.14)$$

また、風による荷重 F_w は次式により求める。

$$F_{wSP} = A_s \cdot P_w \cdots \cdots (4.15)$$

よって、せん断応力は

$$\tau_{b4-1} = \frac{Q_{b4-2}}{A_{b4}} \cdots \cdots (4.16)$$

(2) 正面ボルトにかかるせん断応力

水平方向の地震力が働いた場合の、正面ボルトにかかるせん断応力は

$$\tau_{b4-2} = \frac{m_4 \cdot C_H \cdot g}{\sum n_{bs4-k} \cdot A_{b4}} \cdots \cdots (4.17)$$

(3) 自重及び鉛直方向の地震力によるせん断応力

ボルト全本数により荷重を受けるものとし、自重及び鉛直方向の地震力によるせん断応力は

$$\tau_{b4-3} = \frac{m_4 \cdot (1 + C_v) \cdot g}{n_4 \cdot A_{b4}} \dots\dots\dots (4.18)$$

以上より、

$$\tau_{b4} = \text{M a x} (\tau_{b4-1} + \tau_{b4-3}, \tau_{b4-2} + \tau_{b4-3}) \dots\dots\dots (4.19)$$

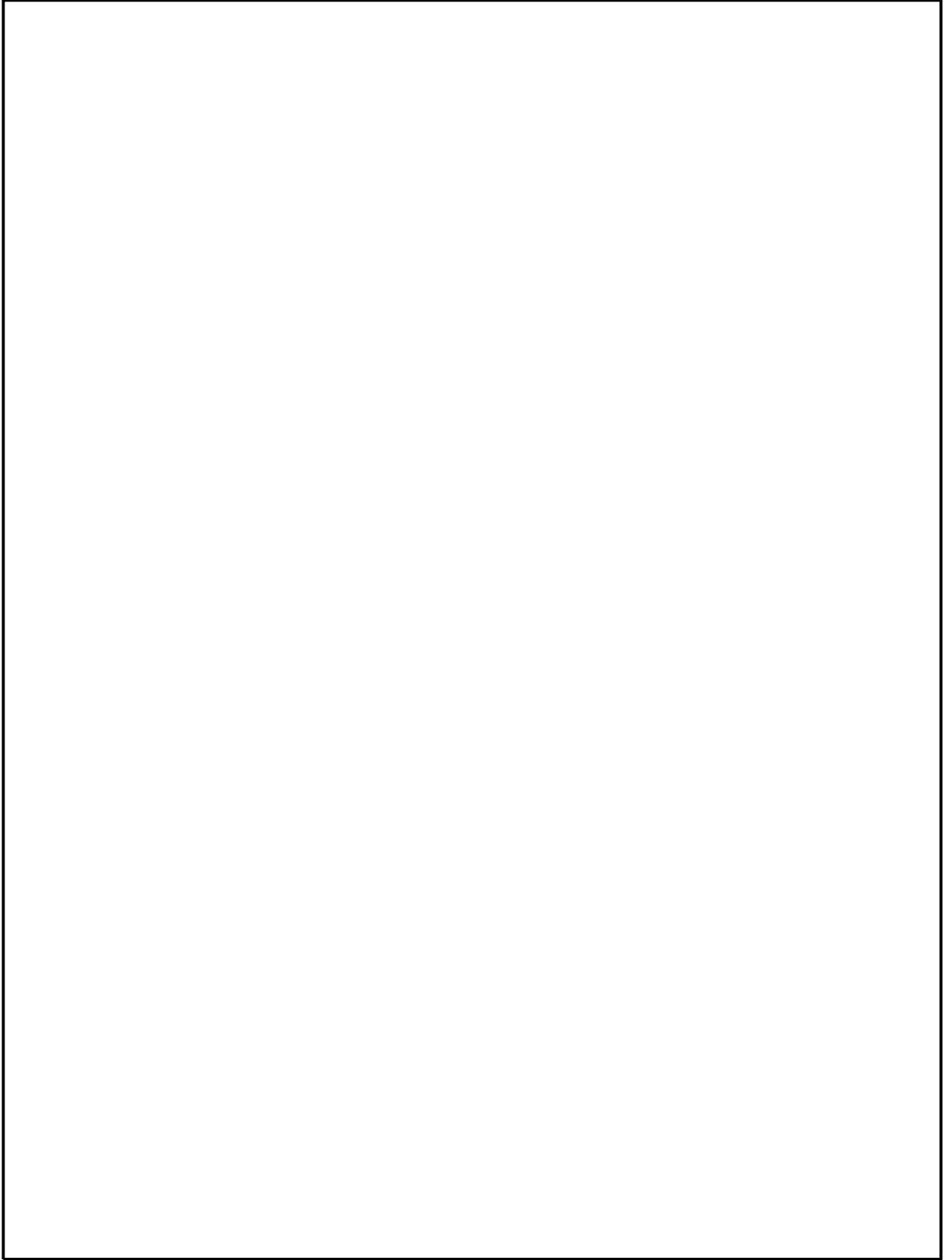


図 4-1 基礎ボルト部の計算モデル

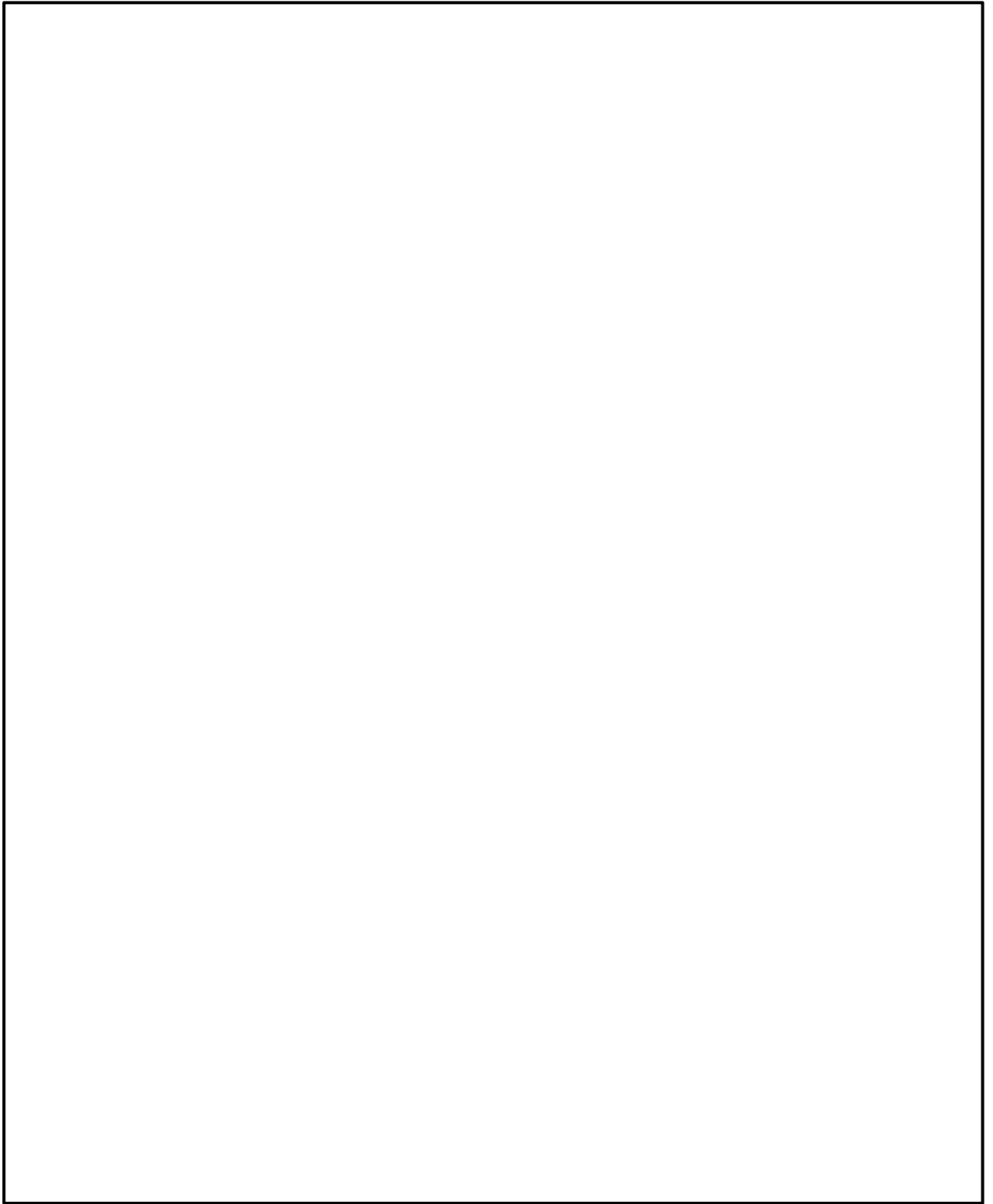


図4-2 基礎ボルト部の計算モデル（側面方向転倒）