

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 2-019-05
提出年月日	2023年1月20日

VI-2-別添 4-3-3 地下水位低下設備水位計の耐震性についての計算書

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. 一般事項	1
2.1 構造計画	1
2.2 評価方針	3
2.3 適用規格・基準等	4
2.4 記号の説明	5
2.5 計算精度と数値の丸め方	6
3. 評価部位	6
4. 固有周期	7
4.1 固有周期の計算方法	7
4.2 固有周期の計算条件	9
4.3 固有周期の計算結果	9
5. 構造強度評価	10
5.1 構造強度評価方法	10
5.2 荷重の組合せ及び許容応力	10
5.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態	10
5.2.2 許容応力	10
5.2.3 使用材料の許容応力評価条件	10
5.3 設計用地震力	13
5.4 計算方法	14
5.4.1 応力の計算方法	14
5.5 計算条件	17
5.5.1 基礎ボルトの応力計算条件	17
5.6 応力の評価	17
5.6.1 基礎ボルトの応力評価	17
6. 機能維持評価	18
6.1 電氣的機能維持評価方法	18
7. 評価結果	19
7.1 設計基準対象施設としての評価結果	19

1. 概要

本計算書は、VI-2-別添 4-1「地下水位低下設備の耐震計算の方針」にて設定している耐震評価方針に基づき、地下水位低下設備水位計（Cクラス施設）が基準地震動 S_s による地震力に対して十分な構造強度を有し、電氣的機能を維持できることを説明するものである。

2. 一般事項

2.1 構造計画

地下水位低下設備水位計の構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
基礎・支持構造	主体構造	
<p>水位計は、取付ボルトにて水位計架台に固定する。</p> <p>水位計架台は、壁面の後打ち金物に溶接にて設置する。</p> <p>後打ち金物は基礎ボルトにて壁面に固定する。</p>	<p>圧力式水位検出器 (壁に設置された水位計架台に、水位計を取付ボルトにて固定する構造)</p>	<p>【水位計】</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>正面 (左右方向)</p> <p>取付ボルト</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>側面 (前後方向)</p> <p>水位計架台</p> <p>溶接</p> <p>後打ち金物</p> <p>壁</p> <p>水位計</p> <p>基礎ボルト (ケミカルアンカ)</p> </div> </div> <p style="text-align: right;">(単位: mm)</p>

2.2 評価方針

地下水位低下設備水位計の応力評価は、VI-2-別添 4-1「地下水位低下設備の耐震計算の方針」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、「2.1 構造計画」にて示す地下水位低下設備水位計の部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4. 固有周期」で算出した固有周期に基づく設計用地震力による応力等が許容限界内に収まることを、「5. 構造強度評価」にて示す方法にて確認することで実施する。また、地下水位低下設備水位計の機能維持評価は、VI-2-別添 4-1「地下水位低下設備の耐震計算の方針」にて設定した電氣的機能維持の方針に基づき、機能維持評価用加速度が機能確認済加速度以下であることを、「6. 機能維持評価」にて示す方法にて確認することで実施する。確認結果を「7. 評価結果」に示す。

地下水位低下設備水位計の耐震評価フローを図 2-1 に示す。

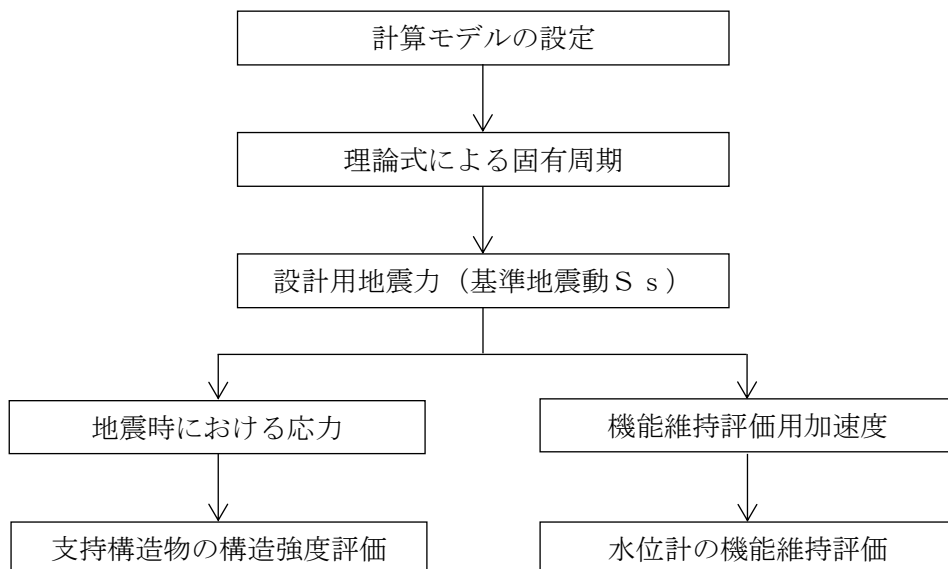


図 2-1 地下水位低下設備水位計の耐震評価フロー

2.3 適用規格・基準等

本評価において適用する規格・基準等を以下に示す。

- (1) 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 (J E A G 4 6 0 1・補—1984)
- (2) 原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1—1987)
- (3) 原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1—1991 追補版)
- (4) J S M E S N C 1 —2005/2007 発電用原子力設備規格 設計・建設規格
(以下「設計・建設規格」という。)

2.4 記号の説明

記号	記号の説明	単位
A_b	ボルトの軸断面積	mm^2
A_s	水位計架台の最小有効せん断断面積	mm^2
C_H	水平方向設計震度	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
E	縦弾性係数	MPa
d	ボルトの呼び径	mm
F	設計・建設規格 SSB-3121.1(1) に定める値	MPa
F^*	設計・建設規格 SSB-3121.3 に定める値	MPa
G	せん断弾性係数	MPa
F_b	ボルトに作用する引張力（1本当たり）	N
F_{b1}	鉛直方向地震及び壁掛取付面に対し左右方向の水平方向地震によりボルトに作用する引張力（1本当たり）	N
F_{b2}	鉛直方向地震及び壁掛取付面に対し前後方向の水平方向地震によりボルトに作用する引張力（1本当たり）	N
f_{sb}	せん断力のみを受けるボルトの許容せん断応力	MPa
f_{to}	引張力のみを受けるボルトの許容引張応力	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力同時に受けるボルトの許容引張応力（許容組合せ応力）	MPa
g	重力加速度（=9.80665）	m/s^2
h	後打ち金物の取付面から重心までの距離	mm
I_y	水位計架台の水平方向軸（左右方向）に対する断面二次モーメント	mm^4
I_z	水位計架台の鉛直方向軸に対する断面二次モーメント	mm^4
K_H	水平方向（左右方向）に対する曲げ及びせん断変形によるばね定数	N/m
K_V	鉛直方向に対する曲げ及びせん断変形によるばね定数	N/m
l_a	水位計架台の幅	mm
l_1	重心と下側ボルト間の鉛直方向距離	mm
l_2	上側ボルトと下側ボルト間の鉛直方向距離	mm
l_3	左側ボルトと右側ボルト間の水平方向距離	mm
m	水位計，水位計架台及び後打ち金物の質量	kg
n	ボルトの本数	—
n_{fV}	評価上引張力を受けるとして期待するボルトの本数（前後方向）	—
n_{fH}	評価上引張力を受けるとして期待するボルトの本数（左右方向）	—
Q_b	ボルトに作用するせん断力	N
Q_{b1}	水平方向地震によりボルトに作用するせん断力	N
Q_{b2}	鉛直方向地震によりボルトに作用するせん断力	N
S_u	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表9 に定める値	MPa
S_y	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8 に定める値	MPa
$S_y(RT)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表8 に定める材料の40°Cにおける値	MPa
T_H	水平方向固有周期	s

記号	記号の説明	単位
T_v	鉛直方向固有周期	s
t	水位計架台の板厚	mm
π	円周率	—
σ_b	ボルトに生じる引張応力	MPa
τ_b	ボルトに生じるせん断応力	MPa

2.5 計算精度と数値の丸め方

計算精度は、有効数字 6 桁以上を確保する。

表示する数値の丸め方は表 2-2 に示すとおりである。

表 2-2 表示する数値の丸め方

数値の種類	単位	処理桁	処理方法	表示桁
固有周期	s	小数点以下第 4 位	四捨五入	小数点以下第 3 位
震度	—	小数点以下第 3 位	切上げ	小数点以下第 2 位
温度	°C	—	—	整数位
質量	kg	—	—	整数位
長さ	mm	—	—	整数位 ^{*1}
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
断面二次モーメント	mm ⁴	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
力	N	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
算出応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位 ^{*3}

注記*1：設計上定める値が小数点以下第 1 位の場合は、小数点以下第 1 位表示とする。

*2：絶対値が 1000 以上のときは、べき数表示とする。

*3：設計・建設規格 付録材料図表に記載された温度の中間における引張強さ及び降伏点は、比例法により補間した値の小数点以下第 1 位を切り捨て、整数位までの値とする。

3. 評価部位

地下水位低下設備水位計の耐震評価は、「5.1 構造強度評価方法」に示す条件に基づき、耐震評価上厳しくなる基礎ボルトについて実施する。地下水位低下設備水位計の耐震評価部位については、表 2-1 の構造計画に示す。

4. 固有周期

4.1 固有周期の計算方法

地下水位低下設備水位計が設置される、水位計架台の固有周期の計算方法を以下に示す。

(1) 計算モデル

- a. 水位計架台の質量は、重心に集中するものとする。
- b. 水位計架台は溶接で壁面の後打ち金物に固定されており、固定端とする。
- c. 水位計架台をはりと考え、変形モードは曲げ及びびせん断変形を考慮する。
- d. 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。
- e. 水位計架台を図4-1に示す壁固定の1質点系振動モデルとし、その断面形状は、水位計架台の質量を負担する前後方向に位置する2枚の板を合わせたものとして考える。
- f. 水の付加質量*を考慮する。

注記*：機器が流体中で加速度を受けた場合に質量が増加したような効果を模擬した質量

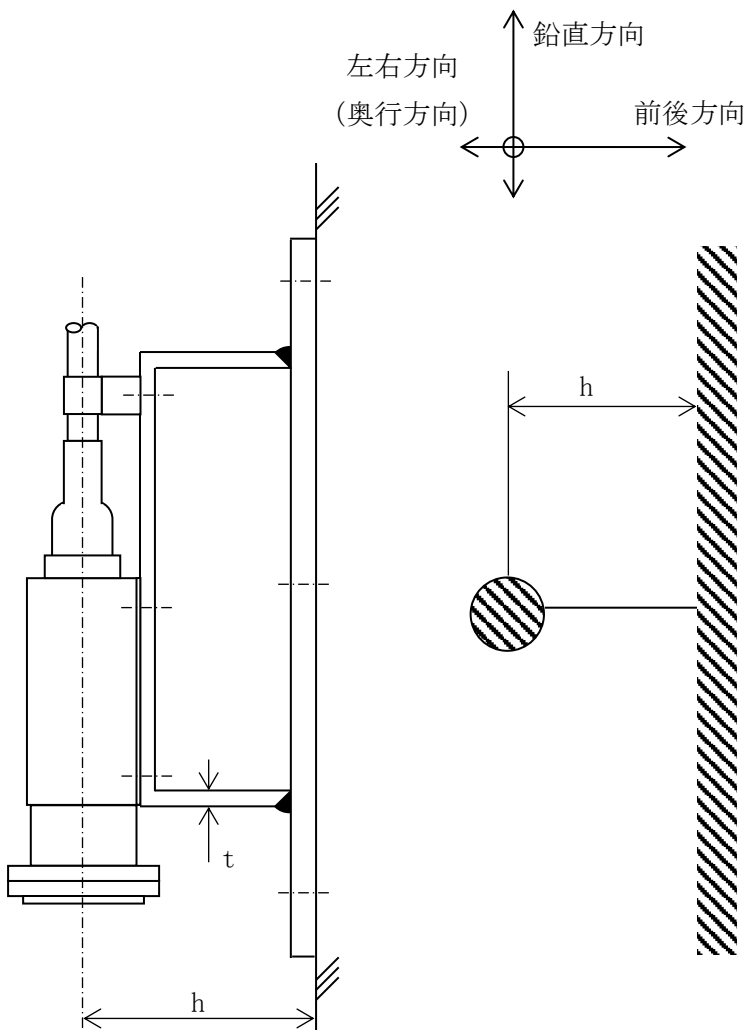


図4-1 固有周期の計算モデル

(2) 水平方向固有周期（前後方向，左右方向）

- a. 前後方向は十分な剛性を有していることから，固有周期の計算を省略する。
- b. 左右方向に対する曲げ及びせん断変形によるばね定数 K_H は次式で求める。

$$K_H = \frac{1000}{\frac{h^3}{3 \cdot E \cdot I_z} + \frac{h}{A_s \cdot G}} \quad \dots (4.1.1)$$

したがって，左右方向に対する固有周期 T_H は次式で求める。

$$T_H = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{K_H}} \quad \dots (4.1.2)$$

(3) 鉛直方向固有周期

鉛直方向に対する曲げ及びせん断変形によるばね定数 K_V は次式で求める。

$$K_V = \frac{1000}{\frac{h^3}{3 \cdot E \cdot I_y} + \frac{h}{A_s \cdot G}} \quad \dots (4.1.3)$$

したがって，鉛直方向に対する固有周期 T_V は次式で求める。

$$T_V = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m}{K_V}} \quad \dots (4.1.4)$$

4.2 固有周期の計算条件

固有周期の計算に用いる計算条件は、本計算書の【地下水位低下設備水位計の耐震性についての計算結果】の機器要目に示す。

4.3 固有周期の計算結果

固有周期の計算結果を表 4-1 に示す。計算の結果、固有周期は 0.05 秒以下であり、剛構造であることを確認した。

表 4-1 固有周期 (単位 : s)

水平方向	鉛直方向
<input type="text"/>	<input type="text"/>

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

4.1 項(1)a.～f.のほか、次の条件で計算する。

- (1) 地震力は地下水位低下設備水位計に対して、水平方向及び鉛直方向から個別に作用させる。
また、水平方向及び鉛直方向の動的地震力による荷重の組み合わせには、絶対値和を適用する。
- (2) 設計用地震力（基準地震動 S_s ）は、VI-2-別添 4-2「地下水位低下設備の地震応答計算書」に示す地震応答から、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき設定する。
- (3) 転倒方向は、表 2-1 構造計画における左右方向及び前後方向について検討し、計算書には計算結果の厳しい方（許容値／発生値の小さい方をいう。）を記載する。
- (4) 水位計架台の重心位置については、転倒方向を考慮して、計算条件が厳しくなる位置に重心位置を設定して耐震性の計算を行う。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

5.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

地下水位低下設備水位計の荷重の組合せ及び許容応力状態のうち評価に用いるものを表 5-1 に示す。

5.2.2 許容応力

地下水位低下設備水位計の許容応力は、VI-2-別添 4-1「地下水位低下設備の耐震計算の方針」に基づき表 5-2 のとおりとする。

5.2.3 使用材料の許容応力評価条件

地下水位低下設備水位計の使用材料の許容応力評価条件のうち評価に用いるものを表 5-3 に示す。

表 5-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（設計基準対象施設）

設備名称	機器名称	耐震重要度分類	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
地下水位低下設備	地下水位低下設備水位計	C	—*	$D + P_D + M_D + S_s$	$IV_A S$

注記*：その他の支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力を適用する。

表 5-2 許容応力（その他の支持構造物）

許容応力状態	許容限界*1, *2 (ボルト等)	
	一次応力	
	引張	せん断
IV _A S	$1.5 \cdot f_t^*$	$1.5 \cdot f_s^*$

注記*1：応力の組合せが考えられる場合には，組合せ応力に対しても評価を行う。

*2：当該の応力が生じない場合，規格基準で省略可能とされている場合及び他の応力で代表可能である場合は評価を省略する。

表 5-3 使用材料の許容応力評価条件

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)
		基礎ボルト	SUS304	周囲環境温度	40	205

5.3 設計用地震力

評価に用いる設計用地震力を表 5-4 に示す。

「基準地震動 S_s 」による地震力は、VI-2-別添 4-2「地下水位低下設備の地震応答計算書」に示す地震応答から、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき設定する。

なお、水平方向及び鉛直方向それぞれ、各揚水井戸における設計震度が大きい方を設定する。

表 5-4 設計用地震力 (設計基準対象施設)

据付場所 及び 床面高さ(m)	固有周期(s)		弾性設計用地震動 S_d 又は静的震度		基準地震動 S_s	
	水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度
地下水位低下設備 揚水井戸 EL -21.700* ¹			-	-	$C_H=2.60^{*2}$	$C_V=1.51^{*2}$

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) を上回る設計震度

5.4 計算方法

5.4.1 応力の計算方法

5.4.1.1 基礎ボルトの計算方法

基礎ボルトの応力は、地震による震度により作用するモーメントによって生じる引張力とせん断力について計算する。図5-1に計算モデルを示す。

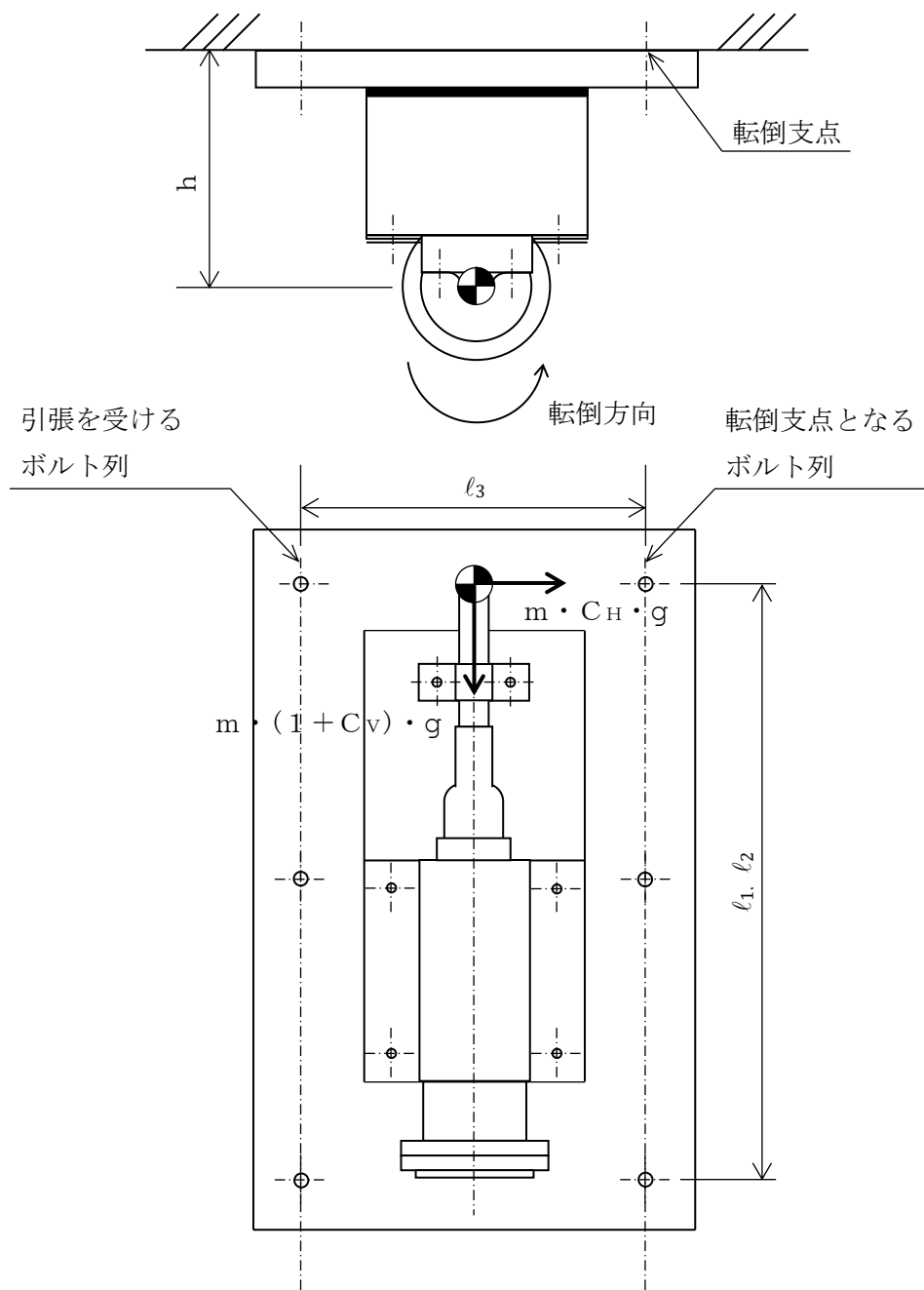


図5-1(1) 計算モデル (左右方向転倒の場合)

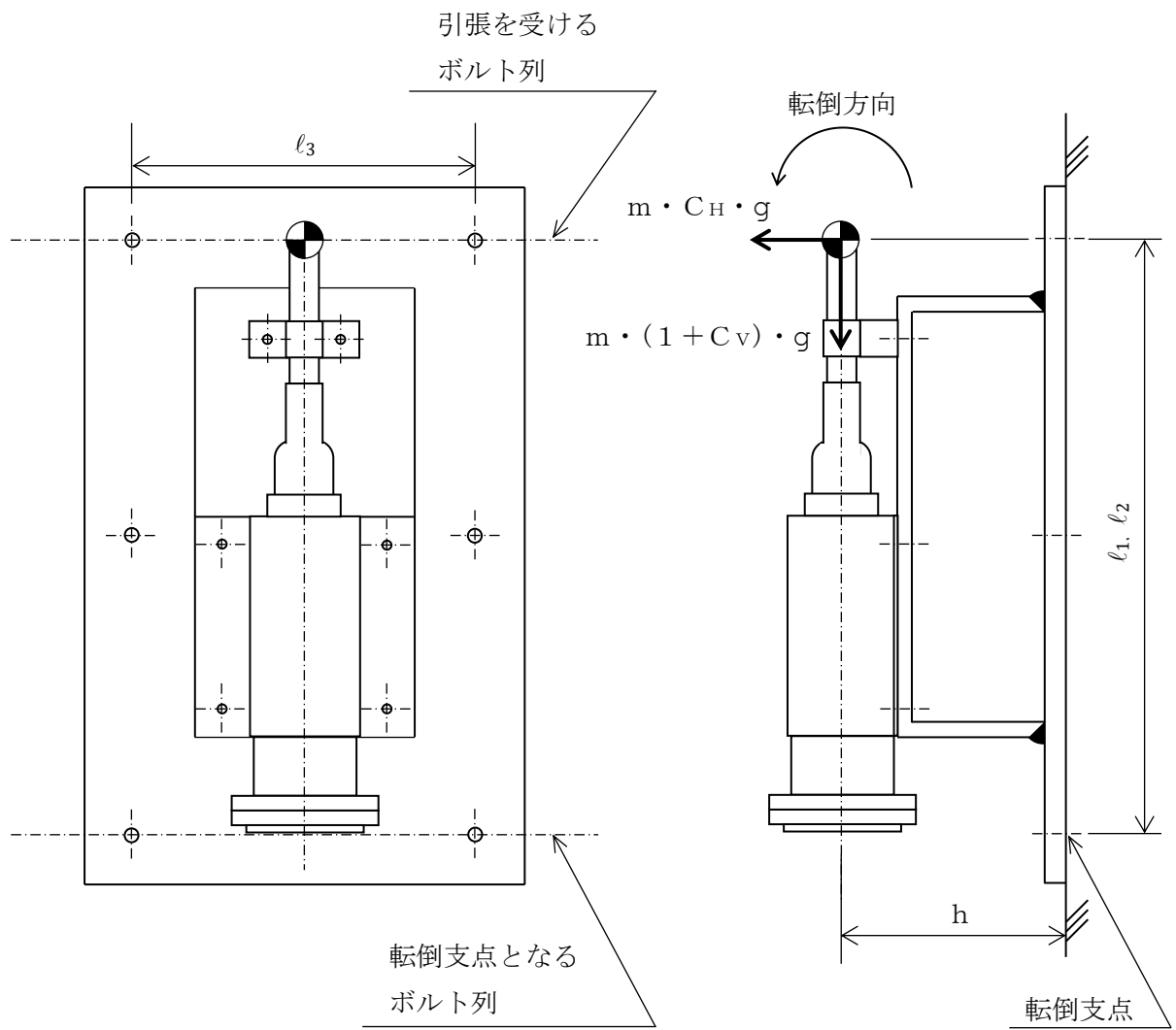


図 5-1(2) 計算モデル (前後方向転倒の場合)

(1) 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は、最も厳しい条件として、図 5-1 で最外列のボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の最外列のボルトで受けるものとして計算する。

引張力

計算モデル図 5-1(1)の場合の引張力

$$F_{b1} = m \cdot g \cdot \left(\frac{C_H \cdot h}{n_{fH} \cdot l_3} + \frac{(1 + C_V) \cdot h}{n_{fV} \cdot l_2} \right) \dots \dots \dots (5.4.1.1.1)$$

計算モデル図 5-1(2)の場合の引張力

$$F_{b2} = m \cdot g \cdot \left(\frac{C_H \cdot l_1 + (1 + C_V) \cdot h}{n_{fV} \cdot l_2} \right) \dots \dots \dots (5.4.1.1.2)$$

$$F_b = \text{Max}(F_{b1}, F_{b2}) \dots \dots \dots (5.4.1.1.3)$$

引張応力

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b} \dots \dots \dots (5.4.1.1.4)$$

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は次式により求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \dots \dots \dots (5.4.1.1.5)$$

ただし、 F_b が負のとき基礎ボルトには引張力が生じないので、引張応力の計算は行わない。

(2) せん断応力

基礎ボルトに対するせん断力は、基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

せん断力

$$Q_{b1} = m \cdot g \cdot C_H \dots \dots \dots (5.4.1.1.6)$$

$$Q_{b2} = m \cdot g \cdot (1 + C_V) \dots \dots \dots (5.4.1.1.7)$$

$$Q_b = \sqrt{(Q_{b1})^2 + (Q_{b2})^2} \dots \dots \dots (5.4.1.1.8)$$

せん断応力

$$\tau_b = \frac{Q_b}{n \cdot A_b} \dots \dots \dots (5.4.1.1.9)$$

5.5 計算条件

5.5.1 基礎ボルトの応力計算条件

基礎ボルトの応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【水位計の耐震性についての計算結果】の設計条件及び機器要目に示す。

5.6 応力の評価

5.6.1 基礎ボルトの応力評価

5.4 項で求めた基礎ボルトの引張り応力 σ_b は次式より求めた許容組合せ応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \dots \dots \dots (5.4.1.1.10)$$

せん断応力 τ_b は、せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力 f_{sb} 以下であること。ただし、 f_{sb} は下表による。

	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度による 荷重との組合せの場合	基準地震動 S s による 荷重との組合せの場合
許容引張応力 f_{to}	$\frac{F}{2} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

6. 機能維持評価

6.1 電氣的機能維持評価方法

地下水位低下設備水位計の電氣的機能維持評価について以下に示す。

なお、機能維持評価用加速度は、VI-2-別添 4-2「地下水位低下設備の地震応答計算書」に示す地震応答から、VI-2-1-7「設計用床応答スペクトルの作成方針」に基づき、基準地震動 S_s により定まる応答加速度を設定する。

地下水位低下設備水位計の機能確認済加速度は、VI-2-別添 4-1「地下水位低下設備の耐震計算の方針」に基づき、実機の据付け状態を水位計架台を含めて加振台上で模擬したうえで、正弦波による加振試験において電氣的機能の健全性を確認した評価部位の加速度を適用する。

機能確認済加速度を表 6-1 に示す。

表 6-1 機能確認済加速度 (×9.8m/s²)

機器名称	方向	機能確認済加速度
地下水位低下設備水位計	水平方向	<input type="text"/>
	鉛直方向	<input type="text"/>

7. 評価結果

7.1 設計基準対象施設としての評価結果

地下水位低下設備水位計の設計基準対象施設としての耐震評価結果を以下に示す。発生値は許容限界を満足しており、設計用地震力に対して十分な構造強度及び電気的機能を有していることを確認した。

(1) 構造強度評価結果

構造強度評価の結果を次頁以降の表に示す。

(2) 機能維持評価結果

電気的機能維持評価の結果を次頁以降の表に示す。

【地下水位低下設備水位計の耐震性についての計算結果】

1. 設計基準対象施設

1.1 設計条件

機器名称	耐震重要度分類	据付場所及び床面高さ (m)	固有周期 (s)		弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s		周囲環境 温度 (°C)
			水平方向	鉛直方向	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	水平方向 設計震度	鉛直方向 設計震度	
地下水位低下設備 水位計 (LX282-101A)	C	地下水位低下設備 揚水井戸 EL -21.700* ¹	<input type="text"/>	<input type="text"/>	—	—	C _H =2.60* ²	C _V =1.51* ²	40

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) を上回る設計震度

1.2 機器要目

部 材	m (kg)	h (mm)	t (mm)	d (mm)	l _a (mm)	l ₁ (mm)	l ₂ (mm)	l ₃ (mm)	n (-)	n _{fH} (-)	n _{fV} (-)	A _b (mm ²)
基礎ボルト	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

部 材	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	F* (MPa)	転倒方向		ME (N・mm)
					弾性設計用 地震動 S _d 又 は静的震度	基準地震動 S _s	
基礎ボルト	<input type="text"/>	<input type="text"/>	—	<input type="text"/>	—	前後方向	—

E (MPa)	G (MPa)	I _y (mm ⁴)	I _z (mm ⁴)	A _S (mm ²)
1.937×10 ⁵	7.449×10 ⁴	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>

1.3 計算数値

1.3.1 ボルトに作用する力

(単位：N)

部材	F _b		Q _b	
	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度	基準地震動 S _s
基礎ボルト	—	<input type="text"/>	—	<input type="text"/>

1.4 結論

1.4.1 固有周期 (単位：s)

方向	固有周期
水平方向	<input type="text"/>
鉛直方向	<input type="text"/>

1.4.2 ボルトの応力

(単位：MPa)

部 材	材 料	応 力	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地震動 S _s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
基礎ボルト	SUS304	引張	—	—	<input type="text"/>	<input type="text"/>
		せん断	—	—	<input type="text"/>	<input type="text"/>

すべて許容応力以下である。

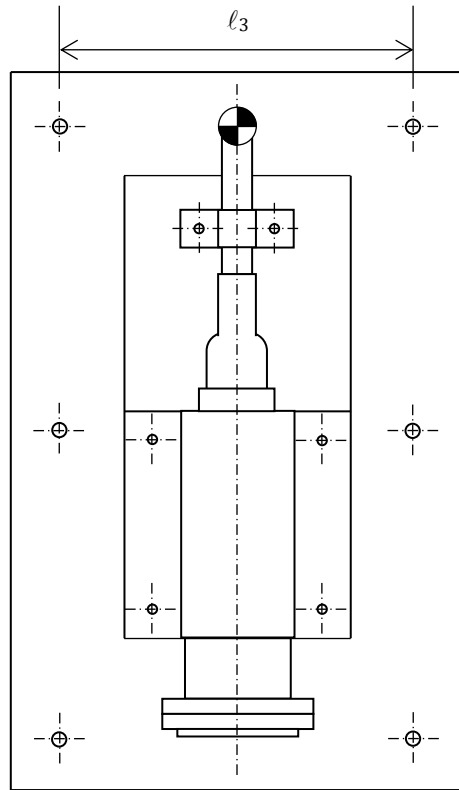
注記* : $f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}]$

1.3.3 電氣的機能維持の評価結果

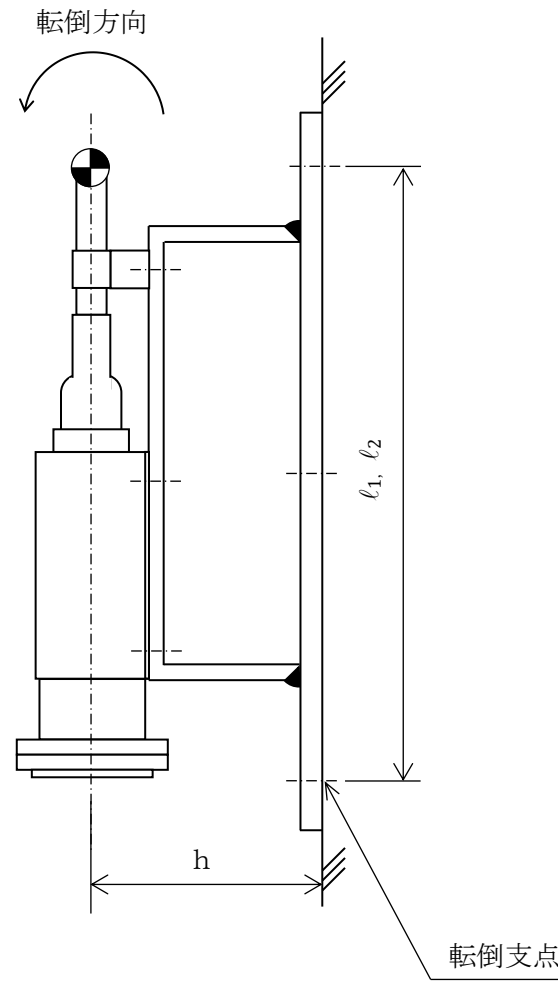
(×9.8m/s²)

		機能維持評価用加速度*	機能確認済加速度
水位計	水平方向	1.00	<input type="text"/>
	鉛直方向	0.73	<input type="text"/>

注記* : 設計用震度Ⅱ (基準地震動 S_s) により定まる加速度
機能維持評価用加速度は、すべて機能確認済加速度以下である。



正面



側面