

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-工-B-19-0447_改0
提出年月日	2021年7月15日

VI-2-10-1-2-3-3 ガスタービン発電設備 軽油タンクの耐震性についての計算書

02 ③ VI-2-10-1-2-3-3 R1

2021年7月
東北電力株式会社

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	11
3.	評価部位	12
4.	固有周期	13
4.1	固有周期の計算方法	13
4.2	固有周期の計算条件	14
4.3	固有周期の計算結果	14
5.	構造強度評価	15
5.1	構造強度評価方法	15
5.2	荷重の組合せ及び許容応力	15
5.2.1	荷重の組合せ及び許容応力状態	15
5.2.2	許容応力	15
5.2.3	使用材料の許容応力評価条件	15
5.3	設計用地震力	20
5.4	計算方法	21
5.4.1	応力の計算方法	21
5.5	計算条件	36
5.5.1	胴板の応力計算条件	36
5.5.2	脚の応力計算条件	36
5.5.3	基礎ボルトの応力計算条件	36
5.6	応力の評価	37
5.6.1	胴の応力評価	37
5.6.2	脚の応力評価	37
5.6.3	基礎ボルトの応力評価	38
6.	評価結果	39
6.1	重大事故等対処設備としての評価結果	39
7.	引用文献	39

1. 概要

本計算書は、添付書類「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、ガスタービン発電設備軽油タンクが設計用地震力に対して十分な構造強度を有していることを説明するものである。その耐震評価は、応力評価により行う。

ガスタービン発電設備軽油タンクは、重大事故等対処設備においては常設耐震重要重大事故防止設備及び常設重大事故緩和設備に分類される。以下、重大事故等対処設備としての構造強度評価を示す。

2. 一般事項

2.1 構造計画

ガスタービン発電設備軽油タンクの構造計画を表 2-1 に示す。

表 2-1 構造計画

計画の概要		概略構造図
<p>基礎・支持構造</p> <p>胴を脚で支持し、脚を基礎ボルトで基礎に据え付ける。</p>	<p>主体構造</p> <p>横置円筒形容器</p>	<p>(単位：mm)</p>

2.2 評価方針

ガスタービン発電設備軽油タンクの応力評価は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」のうち「3.1 構造強度上の制限」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」にて示すガスタービン発電設備軽油タンクの部位を踏まえ「3. 評価部位」にて設定する箇所において、「4. 固有周期」にて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。確認結果を「6. 評価結果」に示す。

ガスタービン発電設備軽油タンクの耐震評価フローを図 2-1 に示す。

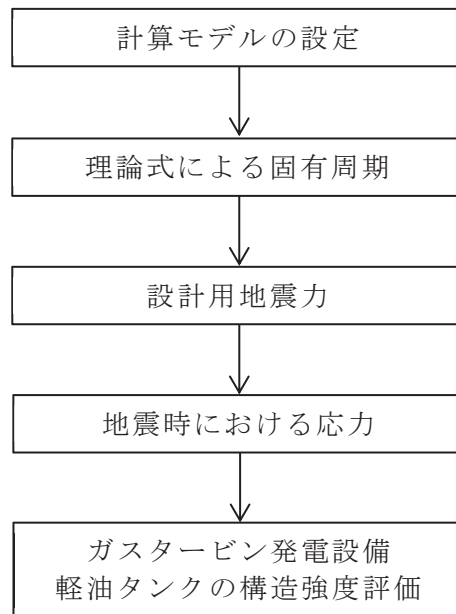


図 2-1 ガスタービン発電設備軽油タンクの耐震評価フロー

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	基礎ボルトの軸断面積	mm^2
A_s	脚の断面積	mm^2
A_{s1}	脚の長手方向に対する有効せん断断面積	mm^2
A_{s2}	脚の横方向に対する有効せん断断面積	mm^2
A_{s3}	脚の長手方向に対するせん断断面積	mm^2
A_{s4}	脚の横手方向に対するせん断断面積	mm^2
a	脚底板の長手方向幅	mm
b	脚底板の横方向幅	mm
C_1	脚の胴つけ根部のアタッチメントの幅の2分の1 (胴の横方向)	mm
C_2	脚の胴つけ根部のアタッチメントの幅の2分の1 (胴の長手方向)	mm
C_{cj}	周方向モーメントによる応力の補正係数 (引用文献(2)より得られる値) ($j=1$: 周方向応力, $j=2$: 軸方向応力)	—
C_H	水平方向設計震度	—
$C_{\ell j}$	軸方向モーメントによる応力の補正係数 (引用文献(2)より得られる値) ($j=1$: 周方向応力, $j=2$: 軸方向応力)	—
C_V	鉛直方向設計震度	—
D_i	胴の内径	mm
d	ボルトの呼び径	mm
d_1	脚底板端面から基礎ボルト中心までの長手方向の距離	mm
d_2	脚底板端面から基礎ボルト (外側) 中心までの横方向の距離	mm
d_3	脚底板端面から基礎ボルト (内側) 中心までの横方向の距離	mm
E_s	脚の縦弾性係数	MPa
e	脚中心から偏心荷重作用点までの距離	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 又は SSB-3133 に定める値	MPa
F_b	基礎ボルトに作用する引張力	N
f_{sb}	せん断力のみを受ける基礎ボルトの許容せん断応力	MPa
f_t	脚の許容引張応力	MPa
f_{to}	引張力のみを受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
f_{ts}	引張力とせん断力を同時に受ける基礎ボルトの許容引張応力	MPa
G_s	脚のせん断弾性係数	MPa

記号	記号の説明	単位
g	重力加速度 (=9.80665)	m/s^2
H	水頭	mm
h_1	基礎から脚の胴つけ根部までの高さ	mm
h_2	基礎から胴の中心までの高さ	mm
I_{sx}	脚の長手方向軸に対する断面二次モーメント	mm^4
I_{sy}	脚の横方向軸に対する断面二次モーメント	mm^4
K_{1j}, K_{2j}	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータの補正係数 ($j=1$: 周方向応力, $j=2$: 軸方向応力)	—
K_c	脚のばね定数 (胴の横方向に水平力が作用する場合)	N/mm
K_ℓ	脚のばね定数 (胴の長手方向に水平力が作用する場合)	N/mm
K_v	脚のばね定数 (胴に鉛直力が作用する場合)	N/mm
$K_{cj}, K_{\ell j}$	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータの補正係数 ($j=1$: 周方向応力, $j=2$: 軸方向応力)	—
ℓ	胴の横方向から見て, 両端の脚の中心から鏡板重心までの距離	mm
ℓ_H	鏡板の端から鏡板の丸みの始まる箇所までの長さ	mm
ℓ_L	鏡板の丸みの始まる箇所間の長さ	mm
ℓ_0	脚中心間距離	mm
ℓ_1	脚中心間距離 ($\ell_1 \neq \ell_0$)	mm
ℓ_w	当板における脚の取り付かない部分の長手方向長さ	mm
M	脚底板に作用するモーメント	$N \cdot mm$
M_{si}	脚に作用する荷重及び脚つけ根の部分における曲げモーメント ($i=1 \sim 4$)	$N \cdot mm$
M_1	脚つけ根部における胴の運転時質量によるモーメント	$N \cdot mm$
M_c	横方向地震により胴の脚つけ根部に作用するモーメント	$N \cdot mm$
M_{c1}	横方向地震により脚底面に作用するモーメント	$N \cdot mm$
M_ℓ	長手方向地震による胴の脚つけ根部のモーメント	$N \cdot mm$
$M_{\ell 1}$	長手方向地震により脚底面に働くモーメント	$N \cdot mm$
M_x	胴に生じる軸方向の曲げモーメント	$N \cdot mm/mm$
M_ϕ	胴に生じる周方向の曲げモーメント	$N \cdot mm/mm$
m_0	容器の運転時質量	kg
m_s	脚 1 本当たりの質量	kg
N_x	胴に生じる軸方向の膜力	N/mm
N_ϕ	胴に生じる周方向の膜力	N/mm
n	脚 1 個当たりの基礎ボルトの本数	—

記号	記号の説明	単位
n_1	長手方向及び鉛直方向地震時に引張りを受ける基礎ボルトの本数	—
n_2	横方向及び鉛直方向地震時に引張りを受ける基礎ボルトの本数	—
P	運転時質量により胴の脚つけ根部に作用する反力	N
P_e	鉛直方向地震により胴の脚つけ根部に作用する反力	N
P_ℓ	長手方向地震により胴の脚つけ根部に作用する鉛直荷重	N
P_s	長手方向及び鉛直方向地震により脚底部に作用する鉛直荷重	N
P_{s1}	横方向及び鉛直方向地震により脚底部に作用する鉛直荷重	N
R_1	脚に作用する荷重	N
R_{si}	各脚に作用する荷重 ($i = 1 \sim 4$)	N
r_m	脚つけ根部における胴の平均半径	mm
r_o	脚つけ根部における胴の外半径	mm
S	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 5 に定める値	MPa
S_a	胴の許容応力	MPa
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
$S_y(R T)$	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 表 8 に定める材料の 40℃における値	MPa
s	基礎ボルトと基礎の縦弾性係数比	—
T_1	長手方向固有周期	s
T_2	横方向固有周期	s
T_3	鉛直方向固有周期	s
t	脚側胴板の厚さ	mm
t_e	脚つけ根部における胴の有効板厚	mm
w	胴部自重による等分布荷重	N/mm
X_n	基礎が圧縮力を受ける幅	mm
Z	引用文献(1)による胴の断面係数	mm ³
Z_{sx}	脚の長手方向軸に対する断面係数	mm ³
Z_{sy}	脚の横方向軸に対する断面係数	mm ³
β, β_1, β_2	引用文献(2)によるアタッチメントパラメータ	—
γ	引用文献(2)によるシェルパラメータ	—
θ	引用文献(1)による胴の有効範囲角の 2 分の 1	rad
θ_0	胴の脚端部より鉛直軸までの角度	rad

記号	記号の説明	単位
θ_w	胴の脚端部より当板端部までの角度	rad
π	円周率	—
ρ'	液体の密度 (= 比重 $\times 10^{-6}$)	kg/mm ³
σ_0	胴の組合せ一次一般膜応力の最大値	MPa
σ_{0c}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次一般膜応力	MPa
σ_{0cx}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次一般膜応力の和	MPa
$\sigma_{0c\phi}$	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次一般膜応力の和	MPa
σ_{0l}	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次一般膜応力	MPa
σ_{0lx}	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次一般膜応力の和	MPa
$\sigma_{0l\phi}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次一般膜応力の和	MPa
σ_1	胴の組合せ一次応力の最大値	MPa
σ_{1c}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次応力	MPa
σ_{1cx}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{1c\phi}$	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次応力の和	MPa
σ_{1l}	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の組合せ一次応力	MPa
σ_{1lx}	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和	MPa
$\sigma_{1l\phi}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の胴の周方向一次応力の和	MPa
σ_2	地震動のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和の変動値の最大値	MPa
σ_{2c}	横方向及び鉛直方向地震のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和	MPa
σ_{2cx}	横方向及び鉛直方向地震のみによる胴の軸方向一次応力と二次応力の和	MPa

記号	記号の説明	単位
$\sigma_{2c\phi}$	横方向及び鉛直方向地震のみによる胴の周方向一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2\ell}$	長手方向及び鉛直方向地震のみによる胴の組合せ一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2\ell x}$	長手方向及び鉛直方向地震のみによる胴の軸方向一次応力と二次応力の和	MPa
$\sigma_{2\ell\phi}$	長手方向及び鉛直方向地震のみによる胴の周方向一次応力と二次応力の和	MPa
σ_b	基礎ボルトに生じる引張応力の最大値	MPa
σ_{b1}	長手方向及び鉛直方向地震により基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_{b2}	横方向及び鉛直方向地震により基礎ボルトに生じる引張応力	MPa
σ_s	脚の組合せ応力の最大値	MPa
σ_{sc}	横方向及び鉛直方向地震が作用した場合の脚の組合せ応力	MPa
$\sigma_{s\ell}$	長手方向及び鉛直方向地震が作用した場合の脚の組合せ応力	MPa
σ_{s1}	運転時質量により脚に生じる圧縮応力	MPa
σ_{s2}	長手方向地震により脚に生じる曲げ及び圧縮応力の和	MPa
σ_{s3}	横方向地震により脚に生じる曲げ応力	MPa
σ_{s4}	鉛直方向地震により脚に生じる圧縮応力	MPa
σ_{x1}	静水頭により胴に生じる軸方向一次応力	MPa
σ_{x2}	運転時質量による長手方向曲げモーメントにより胴の脚つけ根部に生じる軸方向一次応力	MPa
σ_{x3}	運転時質量により胴の脚つけ根部に生じる軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{x41}, \sigma_{x42}$	長手方向地震により胴の脚つけ根部に生じる軸方向一次応力の和及び二次応力の和	MPa
$\sigma_{x411}, \sigma_{x421}$	長手方向地震による曲げモーメントにより胴の脚つけ根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{x412}, \sigma_{x422}$	長手方向地震による鉛直荷重により胴の脚つけ根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
σ_{x413}	長手方向地震による水平方向荷重により胴に生じる軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{x51}, \sigma_{x52}$	横方向地震による曲げモーメントにより胴の脚つけ根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa

記号	記号の説明	単位
σ_{x6}	鉛直方向地震による長手方向曲げモーメントにより胴の脚つけ根部に生じる軸方向一次応力	MPa
$\sigma_{x71}, \sigma_{x72}$	鉛直方向地震により胴の脚つけ根部に生じる軸方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi1}$	静水頭により胴に生じる周方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi2}$	静水頭に鉛直地震力が加わり胴に生じる周方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi3}$	運転時質量により胴の脚つけ根部に生じる周方向一次応力	MPa
$\sigma_{\phi41}, \sigma_{\phi42}$	長手方向地震により胴の脚つけ根部に生じる周方向一次応力の和及び二次応力の和	MPa
$\sigma_{\phi411}, \sigma_{\phi421}$	長手方向地震による曲げモーメントにより胴の脚つけ根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi412}, \sigma_{\phi422}$	長手方向地震による鉛直荷重により胴の脚つけ根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi51}, \sigma_{\phi52}$	横方向地震による曲げモーメントにより胴の脚つけ根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
$\sigma_{\phi71}, \sigma_{\phi72}$	鉛直方向地震により胴の脚つけ根部に生じる周方向一次応力及び二次応力	MPa
τ_b	基礎ボルトに生じるせん断応力の最大値	MPa
τ_{b1}	長手方向地震により基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_{b2}	横方向地震により基礎ボルトに生じるせん断応力	MPa
τ_c	横方向地震により胴の脚つけ根部に生じるせん断応力	MPa
τ_{θ}	長手方向地震により胴の脚つけ根部に生じるせん断応力	MPa
τ_{s2}	長手方向地震により脚に生じるせん断応力	MPa
τ_{s3}	横方向地震により脚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
最高使用圧力	MPa	—	—	小数点以下第 2 位
温度	℃	—	—	整数位
比重	—	小数点以下第 3 位	四捨五入	小数点以下第 2 位
質量	kg	—	—	整数位
長さ	下記以外の長さ	mm	—	整数位 ^{*1}
	胴板の厚さ	mm	—	小数点以下第 1 位
面積	mm ²	有効数字 5 桁目	四捨五入	有効数字 4 桁 ^{*2}
モーメント	N・mm	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}
角度	rad	小数点以下第 4 位	四捨五入	小数点以下第 3 位
算出応力	MPa	小数点以下第 1 位	切上げ	整数位
許容応力 ^{*3}	MPa	小数点以下第 1 位	切捨て	整数位

注記*1：設計上定める値が小数点以下の場合は、小数点以下表示とする。

*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状点は、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

ガスタービン発電設備軽油タンクの耐震評価は「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胴、脚及び基礎ボルトについて評価を実施する。

ガスタービン発電設備軽油タンクの耐震評価部位については、表 2-1 の概略構造図に示す。

4. 固有周期

4.1 固有周期の計算方法

(1) 計算モデル

モデル化に当たっては次の条件で行う。

- a. 容器及び内容物の質量は中心軸に集中するものとする。
- b. 容器の胴は4個の脚で支持され、脚はそれぞれ基礎ボルトで基礎に固定されており、固定端とする。
- c. 胴は剛とし、脚をはりと考え、変形モードは脚の曲げ及びせん断変形を考慮する。
- d. 全脚固定とし、力は全脚で受けるものとする。
- e. 耐震計算に用いる寸法は、公称値を使用する。

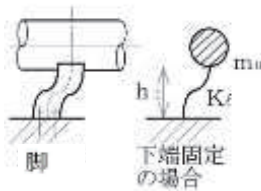


図 4-1 長手方向の固有周期
計算モデル

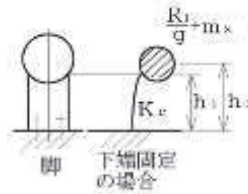


図 4-2 横方向の固有周期
計算モデル

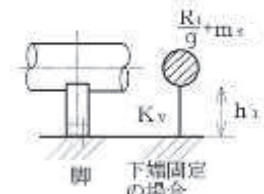


図 4-3 鉛直方向の固有周期
計算モデル

(2) 長手方向の固有周期

図 4-1 におけるばね定数は次式で求める。

$$K_l = \frac{4}{\frac{h_1^3}{12 \cdot E_s \cdot I_{sy}} + \frac{h_1}{G_s \cdot A_{s1}}} \quad \dots \quad (4.1.1)$$

固有周期は次式で求める。

$$T_1 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{m_0}{K_l \cdot 1000}} \quad \dots \quad (4.1.2)$$

(3) 横方向の固有周期

図 4-2 におけるばね定数は次式で求める。

$$K_c = \frac{1}{\frac{h_1^2 \cdot (3 \cdot h_2 - h_1)}{6 \cdot E_s \cdot I_{sx}} + \frac{(h_2 - h_1) \cdot h_1 \cdot (h_2 - h_1 / 2)}{E_s \cdot I_{sx}} + \frac{h_1}{G_s \cdot A_{s2}}} \quad \dots \quad (4.1.3)$$

固有周期は次式で求める。

$$T_2 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\frac{R_1}{g} + m_s}{K_c \cdot 1000}} \dots\dots\dots (4.1.4)$$

(4) 鉛直方向の固有周期

図 4-3 におけるばね定数は次式で求める。

$$K_v = \frac{1}{\frac{h_1}{A_s \cdot E_s}} \dots\dots\dots (4.1.5)$$

固有周期は次式で求める。

$$T_3 = 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{\frac{R_1}{g} + m_s}{K_v \cdot 1000}} \dots\dots\dots (4.1.6)$$

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、【ガスタービン発電設備軽油タンク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、剛であることを確認した。

表 4-1 固有周期 (s)

水平方向		鉛直方向
長手	横	<div style="border: 2px solid black; width: 150px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div>
<div style="border: 2px solid black; width: 150px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div>	<div style="border: 2px solid black; width: 150px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div>	

5. 構造強度評価

5.1 構造強度評価方法

4.1(1)項 a.～e.のほか、次の条件で計算する。概要図は表 2-1 に示す。

- (1) 地震力は容器に対して水平方向及び鉛直方向に作用するものとする。ここで、水平方向地震は胴の長手方向に作用する場合と胴の横方向に作用する場合を考慮する。
- (2) 全脚は同形状であり、受ける荷重が最大の脚についての評価を計算書に記載する。

5.2 荷重の組合せ及び許容応力

5.2.1 荷重の組合せ及び許容応力状態

ガスタービン発電設備軽油タンクの荷重の組合せ及び許容応力状態のうち重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 5-1 に示す。

5.2.2 許容応力

ガスタービン発電設備軽油タンクの許容応力は、添付書類「VI-2-1-9 機能維持の基本方針」に基づき表 5-2 及び表 5-3 のとおりとする。

5.2.3 使用材料の許容応力評価条件

ガスタービン発電設備軽油タンクの使用材料の許容応力評価条件のうち重大事故等対処設備の評価に用いるものを表 5-4 に示す。

表 5-1 荷重の組合せ及び許容応力状態（重大事故等対処設備）

施設区分	機器名称	設備分類*1	機器等の区分	荷重の組合せ	許容応力状態
非常用電源 設備	ガスタービン発電設備 軽油タンク	常設耐震/防止 常設/緩和	—*2	$D + P_D + M_D + S_s$ *3	I_{AS}
				$D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$	V_{AS} (V_{AS} として I_{AS} の許容限 界を用いる。)

注記*1：「常設耐震/防止」は常設耐震重要重大事故防止設備，「常設/緩和」は常設重大事故緩和設備を示す。

*2：重大事故等クラス2容器及び重大事故等クラス2支持構造物の荷重の組合せ及び許容応力状態を適用する。

*3：「 $D + P_{SAD} + M_{SAD} + S_s$ 」の評価に包絡されるため，評価結果の記載を省略する。

表 5-2 許容応力 (重大事故等クラス 2 容器)

許容応力状態	許 容 限 界 ^{*1, *2}		
	一次一般膜応力	一次膜応力 + 一次曲げ応力	一次 + 二次 + ピーク応力
IV _{AS}	0.6 · S _u	左欄の 1.5 倍の値	<p>基準地震動 S_s のみによる疲労解析を行い、疲労累積係数が 1.0 以下であること。</p> <p>ただし、地震動のみによる一次 + 二次応力の変動値が 2 · S_y 以下であれば疲労解析は不要。</p>
V _{AS} (V _{AS} として IV _{AS} の許容限界を用いる。)			

注記 *1 : 座屈による評価は、クラス MC 容器の座屈に対する評価式による。

*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 許容応力 (重大事故等クラス 2 支持構造物)

許容応力状態	許容限界 ^{*1, *2} (ボルト等以外)	許容限界 ^{*1, *2} (ボルト等)
	一次応力	一次応力
IV _{AS} V _{AS} (V _{AS} としてIV _{AS} の許容限界を用いる。)	引張り	引張り
	1.5・f _t *	1.5・f _t *
		せん断
		1.5・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場合で代表可能である場合は評価を省略する。

表 5-4 使用材料の許容応力評価条件（重大事故等対処設備）

評価部材	材料	温度条件 (°C)		S (MPa)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	S _y (RT) (MPa)
		最高使用温度	周囲環境温度				
胴板	SM490C (16 mm < 厚さ ≤ 40 mm)	50		—	309	480	—
脚	SM490C (16 mm < 厚さ ≤ 40 mm)	50	周囲環境温度	—	309	480	—
基礎ボルト	SNB7 (径 ≤ 63 mm)	50	周囲環境温度	—	715	838	—

5.3 設計用地震力

「基準地震動 S_s 」による地震力は、「VI-2-1-7 設計用床応答曲線の作成方針」に基づき設定する。

評価に用いる設計用地震力を表 5-5 に示す。

表 5-5 設計用地震力（重大事故等対処設備）

据付場所 及び 床面高さ (m)	固有周期(s)		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
ガスタービン 発 電 設 備 軽油タンク室 0. P. 56. 70*			$C_H=0.90$	$C_V=0.69$

注記*：基準床レベルを示す。

5.4 計算方法

図 5-1 に荷重状態を示す。

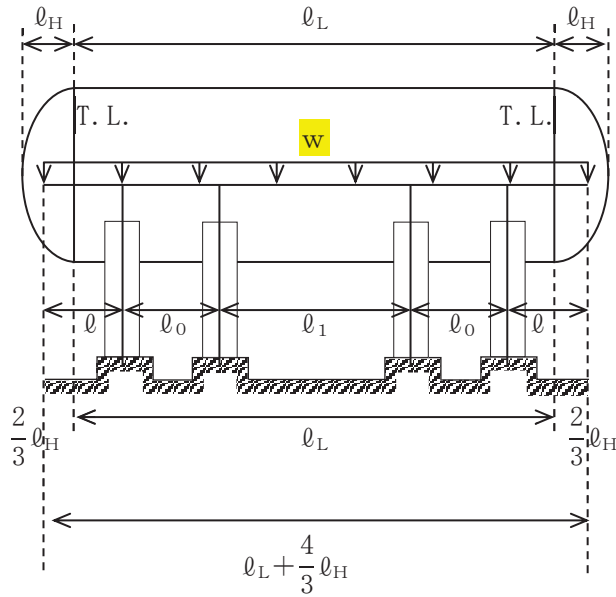


図 5-1 荷重状態

5.4.1 応力の計算方法

応力計算における水平方向と鉛直方向の組合せについて、動的地震力を用いることとし、SRSS法を用いるものとする。

5.4.1.1 胴の計算方法

(1) 脚つけ根の部分における曲げモーメント

$$w = \frac{(m_0 - 4 \cdot m_s) \cdot g}{l_L + \frac{4}{3} \cdot l_H} \quad \dots \dots \dots (5.4.1.1.1)$$

第 1 脚及び第 4 脚に作用する曲げモーメント

$$M_{s1} = M_{s4} = \frac{1}{2} \cdot w \cdot l^2 \quad \dots \dots \dots (5.4.1.1.2)$$

第 2 脚及び第 3 脚に作用する曲げモーメント

$$M_{s2} = M_{s3} = \frac{1}{4} \cdot w \cdot \left\{ \frac{((l_0^3 + l_1^3) - 2 \cdot l^2 \cdot l_0)}{2 \cdot l_0 + 3 \cdot l_1} \right\} \quad \dots \dots \dots (5.4.1.1.3)$$

応力計算に使用する M_1 は、 $M_{s1} \sim M_{s4}$ のうち最大のものとする。

(2) 静水頭による応力（鉛直方向地震時を含む。）

$$\sigma_{\phi 1} = \frac{\rho' \cdot g \cdot H \cdot D_i}{2 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.4)$$

$$\sigma_{\phi 2} = \frac{\rho' \cdot g \cdot H \cdot D_i \cdot C_V}{2 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.5)$$

$$\sigma_{x1} = \frac{\rho' \cdot g \cdot H \cdot D_i}{4 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.6)$$

(3) 運転時質量及び鉛直方向地震により生じる長手方向曲げモーメントによる応力

(1)項で求めた曲げモーメントにより胴の脚つけ根部に生じる応力は次のように求める。

引用文献(1)によれば、この曲げモーメントは胴の断面に対して一様に作用するものではなく、脚つけ根部において円周方向の曲げモーメントに置き換えられ、胴の局部変形を生じさせようとする。

長手方向の曲げモーメントによる胴の応力の影響範囲を脚上 $\theta_0/6$ の点とすると長手方向曲げモーメントに対する胴の有効断面積は図 5-2 に $2 \cdot \theta$ で示される円殻である。

したがって、運転時質量による応力は次式で求める。

$$\sigma_{x2} = \frac{M_1}{Z} \dots\dots\dots (5.4.1.1.7)$$

また、鉛直方向地震による応力は次式で求める。

$$\sigma_{x6} = \frac{M_1}{Z} \cdot C_V \dots\dots\dots (5.4.1.1.8)$$

ここで、

$$r_m = \frac{D_i + t_e}{2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.9)$$

$$Z = r_m^2 \cdot t_e \cdot \left\{ \frac{\theta + \sin \theta \cdot \cos \theta - 2 \cdot \sin^2 \theta / \theta}{(\sin \theta / \theta) - \cos \theta} \right\} \dots\dots\dots (5.4.1.1.10)$$

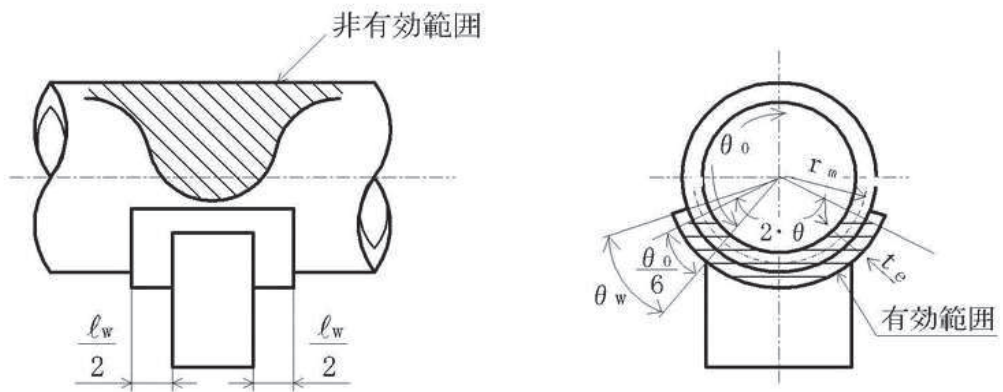


図 5-2 脚つけ根部の有効範囲

胴の脚つけ根部に取り付く当板の大きさが

$$\text{周方向範囲} \quad \theta_w \geq \frac{\theta_0^{*1}}{6} \quad \dots \dots \dots (5.4.1.1.11)$$

$$\text{長手方向範囲} \quad l_w \geq 1.56 \cdot \sqrt{\left(\frac{D_i + t}{2}\right) \cdot t}^{*2} \quad \dots \dots \dots (5.4.1.1.12)$$

である場合、脚つけ根部における胴の有効板厚 t_e は胴板の厚さと当板の厚さの合計とする。また、当板が上記の範囲を満たさない場合、 t_e は胴板の厚さとする。

注記*1：引用文献(1)より引用

*2：引用文献(3)より引用

(4) 脚に作用する荷重

第1脚及び第4脚に作用する荷重

$$R_{s1} = R_{s4} = w \cdot l_0 + \frac{w}{2} \cdot l_0 - \frac{M_{s2} - M_{s1}}{l_0} \quad \dots \dots \dots (5.4.1.1.13)$$

第2脚及び第3脚に作用する荷重

$$\begin{aligned} R_{s2} = R_{s3} &= \frac{w}{2} \cdot l_0 + \frac{w}{2} \cdot l_1 - \frac{M_{s1} - M_{s2}}{l_0} - \frac{M_{s3} - M_{s2}}{l_1} \\ &= \frac{w}{2} \cdot (l_0 + l_1) - \frac{M_{s1} - M_{s2}}{l_0} \quad \dots \dots \dots (5.4.1.1.14) \end{aligned}$$

応力計算に使用する R_1 は、 $R_{s1} \sim R_{s4}$ のうち最大のものとする。

- (5) 運転時質量及び鉛直方向地震による脚つけ根部の応力
 胴の脚つけ根部には脚反力による周方向応力及び軸方向応力が生じる。胴の脚つけ根部に作用する反力は次式で求める。

運転時質量による反力は、

$$P = R_1 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.15)$$

鉛直方向地震による反力は、

$$P_e = C_V \cdot R_1 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.16)$$

この反力P及びP_eにより生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、引用文献(2)により次のように求める。

脚が胴に及ぼす力の関係を図5-3に示す。

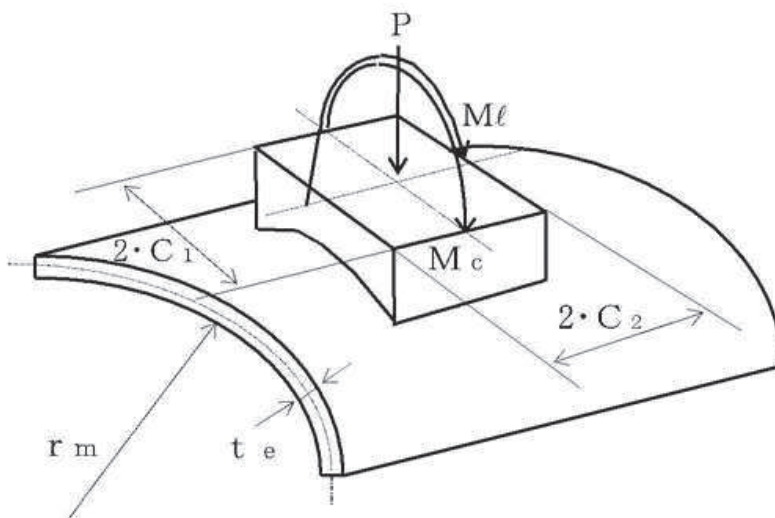


図5-3 脚が胴に及ぼす力の関係

ここで、シェルパラメータγ及びアタッチメントパラメータβは以下のよう
 に定義する。

$$\gamma = r_m / t_e \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.17)$$

$$\beta_1 = C_1 / r_m \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.18)$$

$$\beta_2 = C_2 / r_m \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.19)$$

4 ≥ β₁ / β₂ ≥ 1のとき

$$\beta = \left\{ 1 - \frac{1}{3} \cdot (\beta_1 / \beta_2 - 1) \cdot (1 - K_{1j}) \right\} \cdot \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_2} \quad \dots\dots (5.4.1.1.20)$$

ただし, $\beta \leq 0.5$

$\frac{1}{4} \leq \beta_1 / \beta_2 < 1$ のとき

$$\beta = \left\{ 1 - \frac{4}{3} \cdot (1 - \beta_1 / \beta_2) \cdot (1 - K_{2j}) \right\} \cdot \sqrt{\beta_1 \cdot \beta_2} \quad \dots \quad (5.4.1.1.21)$$

ただし, $\beta \leq 0.5$

シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値(以下*を付記するもの)を求めることにより応力は次式で求める。

反力 P による応力は,

一次応力

$$\sigma_{\phi 3} = \left(\frac{N_{\phi}}{P / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P}{r_m \cdot t_e} \right) \quad \dots \quad (5.4.1.1.22)$$

$$\sigma_{x 3} = \left(\frac{N_x}{P / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P}{r_m \cdot t_e} \right) \quad \dots \quad (5.4.1.1.23)$$

反力 P_e による応力は,

一次応力

$$\sigma_{\phi 71} = \left(\frac{N_{\phi}}{P_e / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_e}{r_m \cdot t_e} \right) \quad \dots \quad (5.4.1.1.24)$$

$$\sigma_{x 71} = \left(\frac{N_x}{P_e / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_e}{r_m \cdot t_e} \right) \quad \dots \quad (5.4.1.1.25)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 72} = \left(\frac{M_{\phi}}{P_e} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_e}{t_e^2} \right) \quad \dots \quad (5.4.1.1.26)$$

$$\sigma_{x 72} = \left(\frac{M_x}{P_e} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_e}{t_e^2} \right) \quad \dots \quad (5.4.1.1.27)$$

(6) 長手方向地震による脚つけ根部の応力

全脚固定であり，脚つけ根部に生じる曲げモーメント及び鉛直荷重は次式で求める。

$$M_{\ell} = \frac{1}{8} \cdot (m_0 - m_s) \cdot C_H \cdot g \cdot h_1 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.28)$$

$$P_{\ell} = (m_0 - m_s) \cdot C_H \cdot g \cdot (h_2 - h_1/2) / (2 \cdot \ell_0 + \ell_1) \quad \dots\dots (5.4.1.1.29)$$

曲げモーメント M_{ℓ} と鉛直荷重 P_{ℓ} により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は，シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図より値(以下*を付記するもの)を求めることより(5.4.1.1.31)式～(5.4.1.1.38)式で求める。

ここで，シェルパラメータ γ 及び P_{ℓ} の場合のアタッチメントパラメータ β は(3)と同じであるが， M_{ℓ} の場合のアタッチメントパラメータ β は次式による。

ただし，二次応力を求める場合は更に $K_{\ell j}$ を乗じた値とする。

$$\beta = \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.30)$$

ただし， $\beta \leq 0.5$

曲げモーメント M_{ℓ} により生じる応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 411} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_{\ell} / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_{\ell}}{r_m \cdot \beta \cdot t_e} \right) \cdot C_{\ell 1} \quad \dots\dots (5.4.1.1.31)$$

$$\sigma_{x 411} = \left\{ \frac{N_x}{M_{\ell} / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_{\ell}}{r_m \cdot \beta \cdot t_e} \right) \cdot C_{\ell 2} \quad \dots\dots (5.4.1.1.32)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 421} = \left\{ \frac{M_{\phi}}{M_{\ell} / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_{\ell}}{r_m \cdot \beta \cdot t_e^2} \right) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.33)$$

$$\sigma_{x 421} = \left\{ \frac{M_x}{M_{\ell} / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_{\ell}}{r_m \cdot \beta \cdot t_e^2} \right) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.34)$$

鉛直荷重 P_{ℓ} により生じる応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 412} = \left(\frac{N_{\phi}}{P_{\ell} / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_{\ell}}{r_m \cdot t_e} \right) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.35)$$

$$\sigma_{x412} = \left(\frac{N_x}{P_\ell / r_m} \right)^* \cdot \left(\frac{P_\ell}{r_m \cdot t_e} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.36)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi422} = \left(\frac{M_\phi}{P_\ell} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_\ell}{t_e^2} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.37)$$

$$\sigma_{x422} = \left(\frac{M_x}{P_\ell} \right)^* \cdot \left(\frac{6 \cdot P_\ell}{t_e^2} \right) \dots\dots\dots (5.4.1.1.38)$$

また、水平方向荷重により胴には、次式で求める引張応力が生じる。

$$\sigma_{x413} = \frac{C_H \cdot (m_0 - m_s) \cdot g}{\pi \cdot (D_i + t) \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.39)$$

したがって、曲げモーメント M_ℓ 、鉛直荷重 P_ℓ 及び水平方向荷重により生じる胴の応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi41} = \sigma_{\phi411} + \sigma_{\phi412} \dots\dots\dots (5.4.1.1.40)$$

$$\sigma_{x41} = \sigma_{x411} + \sigma_{x412} + \sigma_{x413} \dots\dots\dots (5.4.1.1.41)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi42} = \sigma_{\phi421} + \sigma_{\phi422} \dots\dots\dots (5.4.1.1.42)$$

$$\sigma_{x42} = \sigma_{x421} + \sigma_{x422} \dots\dots\dots (5.4.1.1.43)$$

また、長手方向地震が作用した場合、脚つけ根部に生じるせん断応力は次式で求める。

$$\tau_\ell = \frac{(m_0 - m_s) \cdot C_H \cdot g}{16 \cdot C_2 \cdot t} \dots\dots\dots (5.4.1.1.44)$$

(7) 横方向地震による脚つけ根部の応力

横方向地震が作用した場合、脚つけ根部に生じる曲げモーメント M_c は次式で求める。

$$M_c = C_H \cdot R_1 \cdot r_0 \dots\dots\dots (5.4.1.1.45)$$

$$r_0 = \frac{D_i}{2} + t_e \dots\dots\dots (5.4.1.1.46)$$

この曲げモーメント M_c により生じる胴の周方向応力及び軸方向応力は、シェルパラメータ γ 及びアタッチメントパラメータ β によって引用文献(2)の図

より値（以下*を付記するもの）を求めることにより（5.4.1.1.48）式～（5.4.1.1.51）式で求める。

ここで、シェルパラメータ γ は(3)と同じであるが、アタッチメントパラメータ β は次式による。ただし、二次応力を求める場合は更に K_{c_j} を乗じた値とする。

$$\beta = \sqrt[3]{\beta_1^2 \cdot \beta_2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.47)$$

ただし、 $\beta \leq 0.5$

したがって、応力は次式で求める。

一次応力

$$\sigma_{\phi 51} = \left\{ \frac{N_{\phi}}{M_c / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_c}{r_m^2 \cdot \beta \cdot t_e} \right) \cdot C_{c1} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.48)$$

$$\sigma_{x 51} = \left\{ \frac{N_x}{M_c / (r_m^2 \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{M_c}{r_m^2 \cdot \beta \cdot t_e} \right) \cdot C_{c2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.49)$$

二次応力

$$\sigma_{\phi 52} = \left\{ \frac{M_{\phi}}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_c}{r_m \cdot \beta \cdot t_e^2} \right) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.50)$$

$$\sigma_{x 52} = \left\{ \frac{M_x}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right\}^* \cdot \left(\frac{6 \cdot M_c}{r_m \cdot \beta \cdot t_e^2} \right) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.51)$$

また、横方向地震が作用した場合、脚つけ根部に生じるせん断応力は次式で求める。

$$\tau_c = \frac{C_H \cdot R_1}{4 \cdot C_1 \cdot t} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.52)$$

(8) 組合せ応力

(2)～(7)によって求めた脚つけ根部に生じる胴の応力は以下のように組み合わせる。

a. 一次一般膜応力

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

$$\sigma_{0l} = \text{Max}\{\text{周方向応力}(\sigma_{0l\phi}), \text{軸方向応力}(\sigma_{0lx})\} \dots\dots\dots (5.4.1.1.53)$$

ここで,

$$\sigma_{0l\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.54)$$

$$\sigma_{0lx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sqrt{\sigma_{x6}^2 + \sigma_{x413}^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.55)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{0c} = \text{Max}\{\text{周方向応力}(\sigma_{0c\phi}), \text{軸方向応力}(\sigma_{0cx})\} \dots\dots\dots (5.4.1.1.56)$$

ここで

$$\sigma_{0c\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.57)$$

$$\sigma_{0cx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x6} \dots\dots\dots (5.4.1.1.58)$$

したがって、胴に生じる一次一般膜応力の最大値は、

$$\sigma_o = \text{Max}\{\text{長手方向地震時応力}(\sigma_{0l}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{0c})\} \dots\dots\dots (5.4.1.1.59)$$

とする。

b. 一次応力

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

$$\sigma_{1l} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \sigma_{1l\phi} + \sigma_{1lx} + \sqrt{(\sigma_{1l\phi} - \sigma_{1lx})^2 + 4 \cdot \tau_l^2} \right\} \dots\dots\dots (5.4.1.1.60)$$

ここで,

$$\sigma_{1l\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sqrt{\sigma_{\phi 41}^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71})^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.61)$$

$$\sigma_{1lx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sqrt{\sigma_{x41}^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71})^2} \dots\dots\dots (5.4.1.1.62)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{1c} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{1c\phi} + \sigma_{1cx}) + \sqrt{(\sigma_{1c\phi} - \sigma_{1cx})^2 + 4 \cdot \tau_c^2} \right\} \dots\dots\dots (5.4.1.1.63)$$

ここで,

$$\sigma_{1c\phi} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sqrt{\sigma_{\phi 51}^2 + (\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.64)$$

$$\sigma_{1cx} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sqrt{\sigma_{x51}^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.65)$$

したがって、胴に生じる一次応力の最大値は,

$$\sigma_1 = \text{Max}\{\text{長手方向地震時応力}(\sigma_{1\theta}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{1c})\} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.66)$$

とする。

- c. 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値
鉛直方向と長手方向地震が作用した場合の変動値

$$\sigma_{2\theta} = (\sigma_{2\theta\phi} + \sigma_{2\theta x}) + \sqrt{(\sigma_{2\theta\phi} - \sigma_{2\theta x})^2 + 4 \cdot \tau_{\theta}^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.67)$$

ここで,

$$\sigma_{2\theta\phi} = \sqrt{(\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71} + \sigma_{\phi 72})^2 + (\sigma_{\phi 41} + \sigma_{\phi 42})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.68)$$

$$\sigma_{2\theta x} = \sqrt{(\sigma_{x41} + \sigma_{x42})^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71} + \sigma_{x72})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.69)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合の変動値

$$\sigma_{2c} = (\sigma_{2c\phi} + \sigma_{2cx}) + \sqrt{(\sigma_{2c\phi} - \sigma_{2cx})^2 + 4 \cdot \tau_c^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.70)$$

ここで,

$$\sigma_{2c\phi} = \sqrt{(\sigma_{\phi 2} + \sigma_{\phi 71} + \sigma_{\phi 72})^2 + (\sigma_{\phi 51} + \sigma_{\phi 52})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.71)$$

$$\sigma_{2cx} = \sqrt{(\sigma_{x51} + \sigma_{x52})^2 + (\sigma_{x6} + \sigma_{x71} + \sigma_{x72})^2} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.72)$$

したがって、胴に生じる地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値の最大値は,

$$\sigma_2 = \text{Max}\{\text{長手方向地震時応力}(\sigma_{2\theta}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{2c})\} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.1.73)$$

とする。

5.4.1.2 脚の計算方法

(1) 運転時質量による応力

$$\sigma_{s1} = \frac{R_1 + m_s \cdot g}{A_s} \dots\dots\dots (5.4.1.2.1)$$

(2) 鉛直方向地震による応力

$$\sigma_{s4} = \frac{R_1 + m_s \cdot g}{A_s} \cdot C_V \dots\dots\dots (5.4.1.2.2)$$

(3) 長手方向地震による応力

曲げ及び圧縮応力は次式で求める。

$$\sigma_{s2} = \frac{M_{\ell 1}}{Z_{sy}} + \frac{P_{\ell}}{A_s} \dots\dots\dots (5.4.1.2.3)$$

ここで,

$$M_{\ell 1} = \frac{1}{8} \cdot m_0 \cdot C_H \cdot g \cdot h_1 \dots\dots\dots (5.4.1.2.4)$$

せん断応力は次式で求める。

$$\tau_{s2} = \frac{m_0 \cdot C_H \cdot g}{4 \cdot A_{s3}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.5)$$

(4) 横方向地震による応力

曲げ応力は次式で求める。

$$\sigma_{s3} = \frac{C_H \cdot (R_1 + m_s \cdot g) \cdot h_2}{Z_{sx}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.6)$$

せん断応力は次式で求める。

$$\tau_{s3} = \frac{C_H \cdot (R_1 + m_s \cdot g)}{A_{s4}} \dots\dots\dots (5.4.1.2.7)$$

(5) 組合せ応力

鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

$$\sigma_{s\ell} = \sqrt{\left(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s2}^2 + \sigma_{s4}^2}\right)^2 + 3 \cdot \tau_{s2}^2} \dots\dots\dots (5.4.1.2.8)$$

鉛直方向と横方向地震が作用した場合

$$\sigma_{sc} = \sqrt{\left(\sigma_{s1} + \sqrt{\sigma_{s3}^2 + \sigma_{s4}^2}\right)^2 + 3 \cdot \tau_{s3}^2} \dots\dots\dots (5.4.1.2.9)$$

したがって、脚に生じる最大応力は,

$$\sigma_s = \text{Max}\{\text{長手方向地震時応力}(\sigma_{s\ell}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{sc})\} \dots\dots\dots (5.4.1.2.10)$$

とする。

5.4.1.3 基礎ボルトの計算方法

(1) 鉛直方向と長手方向地震が作用した場合

a. 引張応力

長手方向地震が作用した場合に脚底面に作用するモーメントは次式で求める。

$$M = M_{01} \dots\dots\dots (5.4.1.3.1)$$

鉛直荷重は

$$P_s = R_1 + m_s \cdot g - \sqrt{\{C_v \cdot (R_1 + m_s \cdot g)\}^2 + P_\ell^2} \dots\dots\dots (5.4.1.3.2)$$

である。ここで、モーメントと鉛直荷重の比を

$$e = M / P_s \dots\dots\dots (5.4.1.3.3)$$

とする。

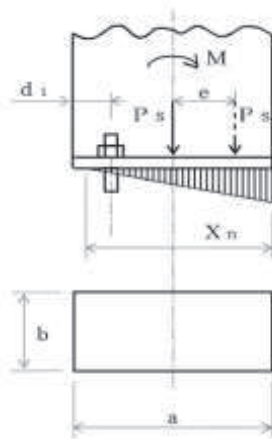


図 5-4 基礎部に作用する外荷重より生じる荷重の関係 (その 1)

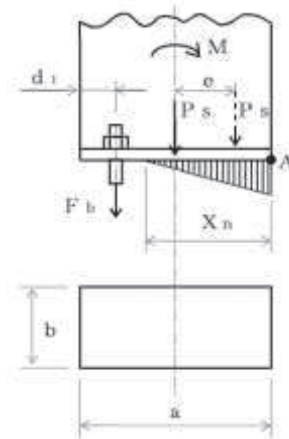


図 5-5 基礎部に作用する外荷重より生じる荷重の関係 (その 2)

図 5-4 のように脚底面においてボルト位置に圧縮荷重がかかる状況では基礎ボルトに引張力は作用しないため、引張力の評価は行わない。

一方、図 5-5 のように、ボルト位置に圧縮荷重がかからない状況に相当する

$$e > \frac{a}{6} + \frac{d_1}{3} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.4)$$

のとき、基礎ボルトに引張力が生じる。

このとき図 5-5 において、鉛直荷重の釣合い、A 点回りのモーメントの釣合い、基礎ボルトの伸びと基礎の縮みの関係から中立軸の位置 X_n は

$$X_n^3 + 3 \cdot \left(e - \frac{a}{2} \right) \cdot X_n^2 - \frac{6 \cdot s \cdot A_b \cdot n_1}{b} \cdot \left(e + \frac{a}{2} - d_1 \right) \cdot (a - d_1 - X_n) = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.5)$$

より求めることができ、基礎ボルトに生じる引張力は

$$F_b = \frac{P_s \cdot \left(e - \frac{a}{2} + \frac{X_n}{3} \right)}{a - d_1 - \frac{X_n}{3}} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.6)$$

となる。

したがって、基礎ボルトに生じる引張応力は次のようになる。

$$\sigma_{b1} = \frac{F_b}{n_1 \cdot A_b} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.7)$$

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は次式により求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.8)$$

b. せん断応力

$$\tau_{b1} = \frac{m_0 \cdot C_H \cdot g}{4 \cdot n \cdot A_b} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.9)$$

(2) 鉛直方向と横方向地震が作用した場合

a. 引張応力

横方向地震が作用した場合に脚底面に作用するモーメントは次式で求める。

$$M = M_{c1} = C_H \cdot (R_1 + m_s \cdot g) \cdot h_2 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.10)$$

鉛直荷重は

$$P_{s1} = (1 - C_v) \cdot (R_1 + m_s \cdot g) \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.11)$$

である。ここで、モーメントと鉛直荷重の比を

$$e = M_{c1} / P_{s1} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.12)$$

とする。

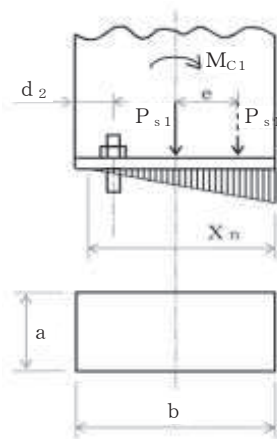


図 5-6 基礎部に作用する外荷
重より生じる荷重の関
係 (その 1)

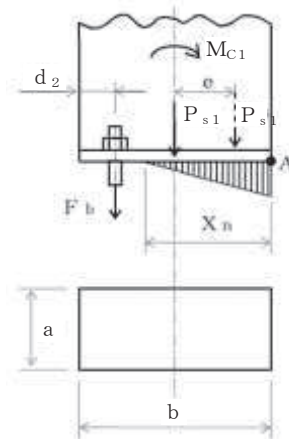


図 5-7 基礎部に作用する外荷
重より生じる荷重の関
係 (その 2)

図 5-6 のように脚底面においてボルト位置に圧縮荷重がかかる状況では基礎ボルトに引張力は作用しないため、引張力の評価は行わない。

一方、図 5-7 のように、ボルト位置に圧縮荷重がかからない状況に相当する

$$e > \frac{b}{6} + \frac{d_2}{3} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.13)$$

のとき、基礎ボルトに引張力が生じる。

このとき図 5-7 において、鉛直荷重の釣合い、A 点回りのモーメントの釣合い、基礎ボルトの伸びと基礎の縮みの関係から中立軸の位置 X_n は

$$X_n^3 + 3 \cdot \left(e - \frac{b}{2} \right) \cdot X_n^2 - \frac{6 \cdot s \cdot A_b \cdot n_2}{a} \cdot \left(e + \frac{b}{2} - d_2 \right) \cdot (b - d_2 - X_n) = 0 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.14)$$

より求めることができ、基礎ボルトに生じる引張力は

$$F_b = \frac{P_{s1} \cdot \left(e - \frac{b}{2} + \frac{X_n}{3} \right)}{b - d_2 - \frac{X_n}{3}} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.15)$$

となる。

したがって、基礎ボルトに生じる引張応力は次のようになる。

$$\sigma_{b2} = \frac{F_b}{n_2 \cdot A_b} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.16)$$

ここで、基礎ボルトの軸断面積 A_b は次式により求める。

$$A_b = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.17)$$

b. せん断応力

$$\tau_{b2} = \frac{C_H \cdot (R_1 + m_s \cdot g)}{n \cdot A_b} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.18)$$

(3) 基礎ボルトに生じる最大応力

(1)及び(2)より求められた基礎ボルトの応力のうち最大のものを σ_b 及び τ_b とする。

a. 基礎ボルトの最大引張応力

$$\sigma_b = \text{Max}\{\text{長手方向地震時応力}(\sigma_{b1}), \text{横方向地震時応力}(\sigma_{b2})\} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.19)$$

b. 基礎ボルトの最大せん断応力

$$\tau_b = \text{Max}\{\text{長手方向地震時応力}(\tau_{b1}), \text{横方向地震時応力}(\tau_{b2})\} \quad \dots\dots\dots (5.4.1.3.20)$$

5.5 計算条件

5.5.1 胴板の応力計算条件

胴板の応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【ガスタービン発電設備軽油タンク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。

5.5.2 脚の応力計算条件

脚の応力計算に用いる計算条件は、本計算書の【ガスタービン発電設備軽油タンク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。

5.5.3 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【ガスタービン発電設備軽油タンク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 胴の応力評価

5.4.1.1 項で求めた組合せ応力が胴の最高使用温度における許容応力 S_a 以下であること。ただし、 S_a は下表による。

応力の種類	許容応力 S_a
	基準地震動 S_s による荷重との組合せの場合
一次一般膜応力	設計引張強さ S_u の 0.6 倍
一次応力	上記の 1.5 倍の値
一次応力と二次応力の和	地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値が設計降伏点 S_y の 2 倍以下であれば、疲労解析は不要とする。

5.6.2 脚の応力評価

5.4.1.2 項で求めた脚の組合せ応力が許容引張応力 f_t 以下であること。ただし、 f_t は下表による。

	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_t	$\frac{F^*}{1.5} \cdot 1.5$

5.6.3 基礎ボルトの応力評価

5.4.1.3 項で求めた基礎ボルトの引張応力 σ_b は次式により求めた許容引張応力 f_{ts} 以下であること。ただし、 f_{to} は下表による。

$$f_{ts} = \text{Min}[1.4 \cdot f_{to} - 1.6 \cdot \tau_b, f_{to}] \quad \dots\dots\dots (5.6.3.1)$$

せん断応力 τ_b はせん断力のみ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。

	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}	$\frac{F^*}{2} \cdot 1.5$
許容せん断応力 f_{sb}	$\frac{F^*}{1.5 \cdot \sqrt{3}} \cdot 1.5$

6. 評価結果

6.1 重大事故等対処設備としての評価結果

ガスタービン発電設備軽油タンクの重大事故等の状態を考慮した場合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。

7. 引用文献

- (1) Stresses in Large Horizontal Cylindrical Pressure Vessels on Two Saddle Supports, Welding Research Supplement, Sep. 1951.
- (2) Wichman, K.R. et al. :Local Stresses in Spherical and Cylindrical Shells due to External Loadings, Welding Research Council bulletin, March 1979
revision of WRC bulletin 107 / August 1965.
- (3) 日本産業規格 J I S B 8 2 7 8 (2003) 「サドル支持の横置圧力容器」

1. 重大事故等対策設備

1.1 設計条件

機器名称	設備分類	据付場所及び末端高さ (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		最高使用圧力 (MPa)	周囲環境温度 (°C)	比重
			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			
ガスタービン 発電設備軽油タンク	常設/地震/防 常設/防振	ガスタービン発電設備 軽油タンク室 0.P. 56.70*	<input type="text"/>	<input type="text"/>	-	-	C _H =0.90	C _V =0.69	静水頭	50	0.86

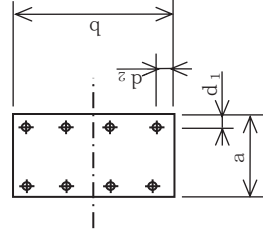
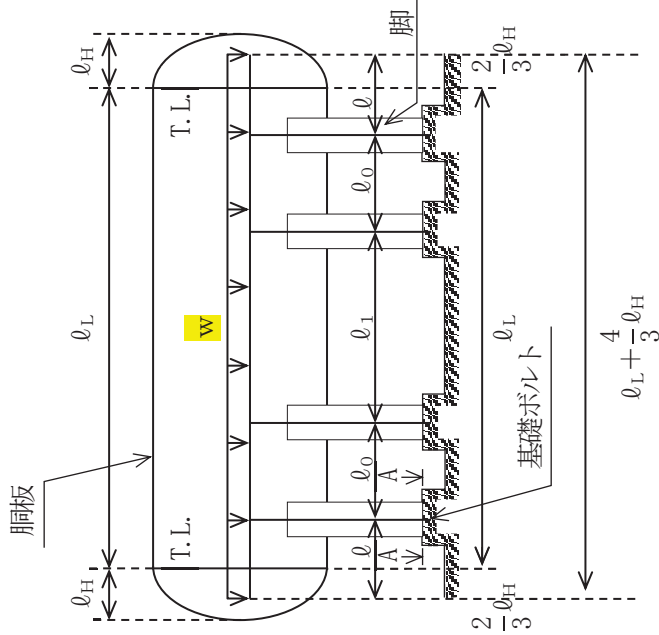
注記*：基準レベルを示す。

1.2 機器要目

θ (mm)	θ_H (mm)	θ_L (mm)	w (N/mm)	M ₁ (N·mm)	R ₁ (N)	H (mm)
2078	807	15240	103.8	2.242×10 ⁸	4.345×10 ⁵	3100

m ₀ (kg)	m _s (kg)	D _i (mm)	t (mm)	t _e (mm)	θ_0 (mm)	θ_1 (mm)	h ₁ (mm)	h ₂ (mm)	θ_w (rad)	θ_w (mm)
<input type="text"/>	<input type="text"/>	3100	32.0	64.0	3800	4560	989	2050	0.491	600

C ₁ (mm)	C ₂ (mm)	I _{sx} (mm ⁴)	I _{sy} (mm ⁴)	Z _{sx} (mm ²)	Z _{sy} (mm ²)	θ_0 (rad)	θ (rad)
1216	700	1.960×10 ¹¹	2.928×10 ¹⁰	1.612×10 ⁸	4.182×10 ⁷	2.288	1.235



A-A 矢視図

枠囲みの内容は商業秘密の観点から公開できません。

A_s (mm ²)	E_s (MPa)	G_s (MPa)	A_{s1} (mm ²)	A_{s2} (mm ²)	A_{s3} (mm ²)	A_{s4} (mm ²)
2.529×10^5	201000	77300	1.557×10^5	7.516×10^4	1.196×10^5	6.121×10^4

K_{i1}^{*2}	K_{i2}^{*2}	K_{o1}^{*2}	K_{o2}^{*2}	K_{c1}	K_{c2}	C_{o1}	C_{o2}	C_{c1}	C_{c2}
0.91	1.68	1.48	1.20	1.06	1.04	0.91	0.78	1.47	1.19
1.76	1.20	0.88	1.25						

s	n	n_1	n_2	a (mm)	b (mm)	d (mm)	A_b (mm ²)	d_1 (mm)	d_2 (mm)
15	8	4	2	1600	2650	48 (W48)	1.810×10^3	200	425

S_y (同板) (MPa)	S_u (同板) (MPa)	S (同板) (MPa)	S_y (脚) (MPa)	S_u (脚) (MPa)	F (脚) (MPa)	F* (脚) (MPa)	S_y (基礎ボルト) (MPa)	S_u (基礎ボルト) (MPa)	F (基礎ボルト) (MPa)	F* (基礎ボルト) (MPa)
309^{*3} (16 mm < 厚さ ≤ 40 mm)	480 ^{*3}	—	309 ^{*4} (16 mm < 厚さ ≤ 40 mm)	480 ^{*4}	—	336	715 ^{*4} (径 ≤ 63 mm)	838 ^{*4}	—	586

注記*1：本計算においては当板を有効とした。

*2：表中で上段は一次応力，下段は二次応力の係数とする。

*3：最高使用温度で算出

*4：周囲環境温度で算出

1.3 計算数値

1.3.1 胴に生じる応力

(1) 一次一般応力

(単位: MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度			基準地震動 S s		
	長手方向		横方向	長手方向		横方向
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	周方向応力	軸方向応力	軸方向応力
静水頭による応力	-	-	-	$\sigma_{\phi 1}=2$	$\sigma_{x 1}=1$	$\sigma_{x 1}=1$
静水頭による応力 (鉛直方向地震時)	-	-	-	$\sigma_{\phi 2}=1$	-	$\sigma_{\phi 2}=1$
連転時質量による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	-	-	-	-	$\sigma_{x 2}=6$	$\sigma_{x 2}=6$
鉛直方向地震による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	-	-	-	-	$\sigma_{x 6}=5$	$\sigma_{x 6}=5$
長手方向地震により脚軸面 全面に生じる引張応力	-	-	-	-	$\sigma_{x 413}=5$	-
組合せ応力	-	-	-	$\sigma_{00}=14$	-	$\sigma_{0c}=11$

(2) 一次応力

(単位: MPa)

地震の種類 地震の方向 応力の方向	弾性設計用地震動 S d 又は静的震度			基準地震動 S s		
	長手方向		横方向	長手方向		横方向
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	周方向応力	軸方向応力	軸方向応力
静水頭による応力	-	-	-	$\sigma_{\phi 1}=2$	$\sigma_{x 1}=1$	$\sigma_{x 1}=1$
静水頭による応力 (鉛直方向地震時)	-	-	-	$\sigma_{\phi 2}=1$	-	$\sigma_{\phi 2}=1$
連転時質量による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	-	-	-	-	$\sigma_{x 2}=6$	$\sigma_{x 2}=6$
鉛直方向地震による長手方向曲げ モーメントにより生じる応力	-	-	-	-	$\sigma_{x 6}=5$	$\sigma_{x 6}=5$
連転時質量による脚反力 により生じる応力	-	-	-	$\sigma_{\phi 3}=10$	$\sigma_{x 3}=10$	$\sigma_{x 3}=10$
鉛直方向地震による脚反力 により生じる応力	-	-	-	$\sigma_{\phi 71}=7$	$\sigma_{x 71}=7$	$\sigma_{x 71}=7$
水平方向地震 による応力	-	-	-	$\sigma_{\phi 411}=3$	$\sigma_{x 411}=2$	$\sigma_{x 51}=19$
	-	-	-	$\sigma_{\phi 412}=5$	$\sigma_{x 412}=5$	
	-	-	-	$\sigma_{\phi 413}=5$	$\sigma_{x 413}=5$	
せん断	-	-	-	$\sigma_{\phi 41}=7$	$\sigma_{x 41}=11$	$\tau_c=3$
	-	-	-	$\tau_{10}=5$	$\sigma_{1c}=33$	
組合せ応力	-	-	-	$\sigma_{10}=33$	-	$\sigma_{1c}=38$

(3) 地震動のみによる一次応力と二次応力の和の変動値 (単位: MPa)

地震の種類	弾性設計用地震動S _d 又は静的震度				基準地震動S _s			
	地震の方向		横方向		長手方向		横方向	
	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力	周方向応力	軸方向応力
静水頭による応力 (鉛直方向地震時)	-	-	-	-	$\sigma_{\phi 2}=1$	-	$\sigma_{\phi 2}=1$	-
	-	-	-	-	-	$\sigma_{x6}=5$	-	$\sigma_{x6}=5$
鉛直方向地震による長手方向 曲げモーメントにより生じる応力	-	-	-	-	$\sigma_{\phi 71}=7$ $\sigma_{\phi 72}=24$	$\sigma_{x71}=7$ $\sigma_{x72}=14$	$\sigma_{\phi 71}=7$ $\sigma_{\phi 72}=24$	$\sigma_{x71}=7$ $\sigma_{x72}=14$
	-	-	-	-	$\sigma_{\phi 41}=7$ $\sigma_{\phi 421}=4$ $\sigma_{\phi 422}=17$	$\sigma_{x41}=11$ $\sigma_{x421}=7$ $\sigma_{x422}=10$	$\sigma_{\phi 41}=7$ $\sigma_{\phi 421}=7$ $\sigma_{\phi 422}=10$	$\sigma_{x41}=11$ $\sigma_{x421}=7$ $\sigma_{x422}=10$
水平方向地震 による応力	-	-	-	-	$\sigma_{\phi 42}=20$	$\sigma_{x42}=17$	$\sigma_{\phi 52}=51$	$\sigma_{x52}=26$
	-	-	-	-	$\tau_{\theta}=5$	$\tau_{c}=3$	$\tau_{c}=3$	$\tau_{c}=3$
組合せ応力	-	-	-	-	$\sigma_{2\theta}=88$	$\sigma_{2\theta}=88$	$\sigma_{2c}=132$	$\sigma_{2c}=132$

1.3.2 脚に生じる応力 (単位: MPa)

地震の種類	弾性設計用地震動S _d 又は静的震度		基準地震動S _s	
	長手方向	横方向	長手方向	横方向
連続質量による応力	-	-	$\sigma_{s1}=2$	$\sigma_{s1}=2$
鉛直方向地震による応力	-	-	$\sigma_{s4}=2$	$\sigma_{s4}=2$
	-	-	$\sigma_{s2}=6$	$\sigma_{s3}=6$
水平方向地震による応力	-	-	$\tau_{s2}=4$	$\tau_{s3}=7$
	-	-	$\sigma_{s0}=10$	$\sigma_{sc}=14$

1.3.3 基礎ボルトに生じる応力 (単位: MPa)

地震の種類	弾性設計用地震動S _d 又は静的震度		基準地震動S _s	
	長手方向	横方向	長手方向	横方向
鉛直方向地震及び 水平方向地震による応力	-	-	$\sigma_{b1}=16$	$\sigma_{b2}=91$
	-	-	$\tau_{b1}=29$	$\tau_{b2}=29$

1.4 結論

1.4.1 固有周期

固有周期 (単位: s)	
方向	固有周期
長手方向	$T_1 =$
横方向	$T_2 =$
鉛直	$T_3 =$

1.4.2 応力

部 材	材 料	応 力	弾性設計用地震動 S _d 又は静的震度		基準地地震動 S _s	
			算出応力	許容応力	算出応力	許容応力
胴板	SM490C	一次-般膜	-	-	$\sigma_0 = 14$	$S_a = 288$
		一次	-	-	$\sigma_1 = 38$	$S_a = 432$
		一次+二次	-	-	$\sigma_2 = 132$	$S_a = 619$
脚	SM490C	組合せ	-	-	$\sigma_s = 14$	$f_t = 336$
		引張り	-	-	$\sigma_b = 91$	$f_{ts} = 440^*$
基礎ボルト	SNB7	せん断	-	-	$\tau_b = 29$	$f_{sb} = 338$

(単位: MPa)

すべて許容応力以下である。

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