

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-17-0040_改0
提出年月日	2021年4月2日

VI-3-別添 2-1-3 復水貯蔵タンクの強度計算書

○ 2 ② VI-3-別添 2-1-3 R 1

2021年4月

東北電力株式会社

目 次

1. 概要	1
2. 基本方針	1
2.1 位置	1
2.2 構造概要	2
2.3 評価方針	2
2.4 適用規格	4
3. 強度評価方法	5
3.1 記号の定義	5
3.2 評価対象部位	8
3.3 荷重及び荷重の組合せ	8
3.4 許容限界	10
3.5 評価方法	12
4. 評価条件	20
5. 強度評価結果	21
5.1 1質点系モデルによる計算結果	21
5.2 FEM解析による計算結果	21

1. 概要

本資料は、添付書類「VI-3-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、復水貯蔵タンクが降下火砕物等堆積時においても、炉心冷却のための水源を保有する機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を維持することを確認するものである。

2. 基本方針

復水貯蔵タンクは、添付書類「VI-3-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえ、復水貯蔵タンクの「2.1 位置」, 「2.2 構造概要」, 「2.3 評価方針」及び「2.4 適用規格」を示す。

2.1 位置

復水貯蔵タンクは、添付書類「VI-3-別添 2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示すとおり、屋外の復水貯蔵タンクエリアに設置する。復水貯蔵タンクエリアの位置図を図 2-1 に示す。

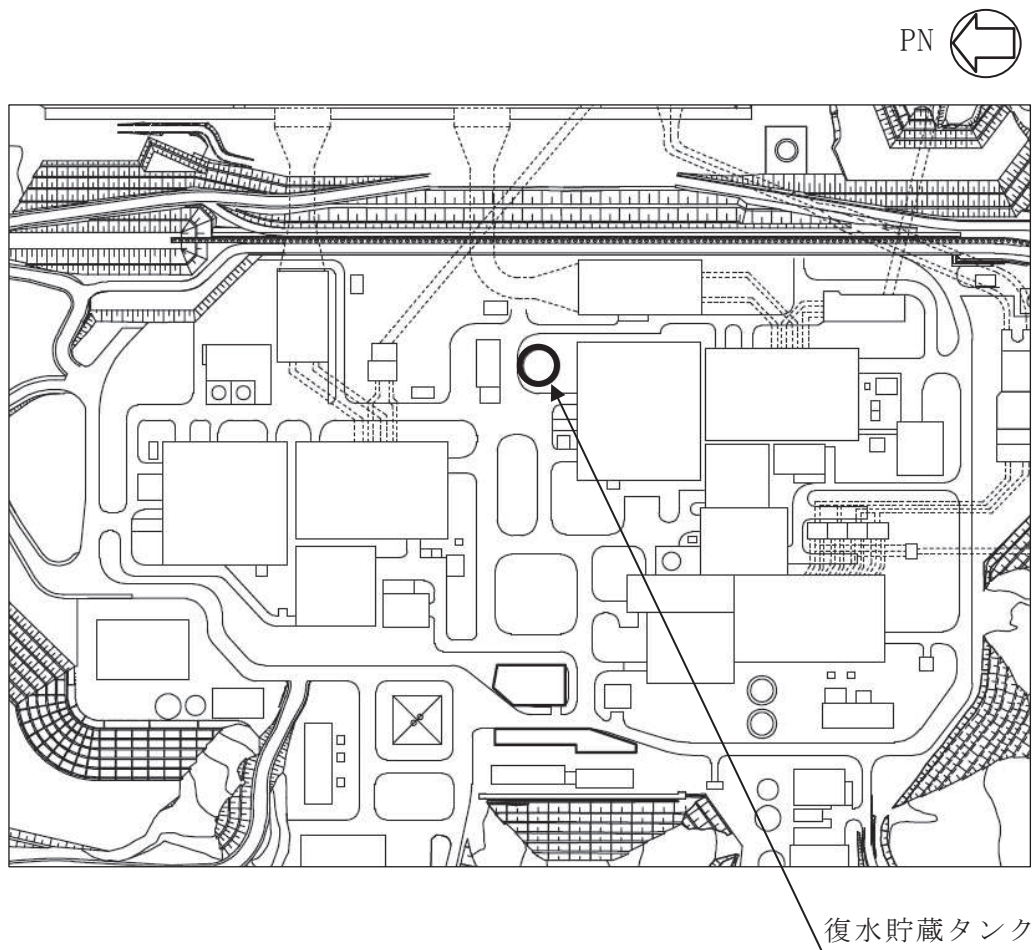


図 2-1 復水貯蔵タンクエリアの位置図

2.2 構造概要

復水貯蔵タンクは、添付書類「VI-3-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「3.2 機能維持の方針」に示す構造計画を踏まえて、構造を設定する。

復水貯蔵タンクは、円筒形の胴板と屋根板より構成され、基礎ボルトにより基礎コンクリートに固定された大気開放型の平底たて置円筒形容器である。復水貯蔵タンクの概要図を図2-2に示す。

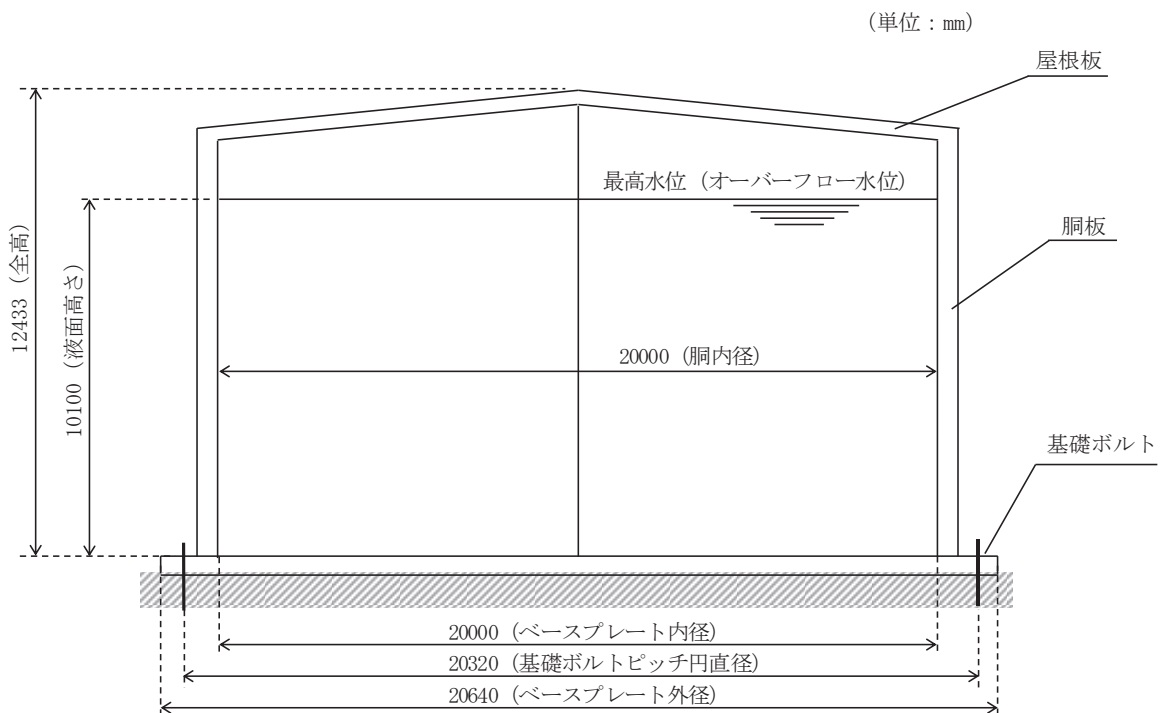


図2-2 復水貯蔵タンクの概要図

2.3 評価方針

復水貯蔵タンクの強度評価は、添付書類「VI-3-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4. 荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界」にて設定している、荷重及び荷重の組合せ並びに許容限界を踏まえて、復水貯蔵タンクの評価対象部位に作用する応力が、許容限界に収まることを「3. 強度評価方法」に示す方法により、「4. 評価条件」に示す評価条件を用いて計算し、「5. 強度評価結果」にて確認する。

復水貯蔵タンクの強度評価フローを図2-3に示す。復水貯蔵タンクの強度評価においては、その構造を踏まえ、降下火砕物等堆積による鉛直荷重とこれに組み合わせる荷重（以下「設計荷重」という。）の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

降下火砕物等堆積による鉛直荷重については、建築基準法施行令第86条に基づき、屋根の水平投影面積に対し降下火砕物の層厚より上載質量を算出し、屋根板表面積で除することにより入力荷重を算出し等分布荷重として保守的に設定する。強度評価においては、屋根板及び屋根板に接続する胴板（上部）に対して、FEMによる応力解析を用いる。また、胴板（下部）及び基礎ボルトに対して、「原子力発電所耐震設計技術指針（J E A G 4 6 0 1 -1987）」、「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）」及び「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）」（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）の平底たて置円筒形容器の評価方法を準用し、添付書類「VI-3-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」に示す平底たて置円筒形容器の評価式を用いる。復水貯蔵タンクの許容限界は、添付書類「VI-3-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」に示す許容限界である、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

「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。）付録材料図表Part5, 6の表にて許容応力を計算する際は、機器本体については最高使用温度、基礎ボルトについては周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度が設計・建設規格 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて計算する。

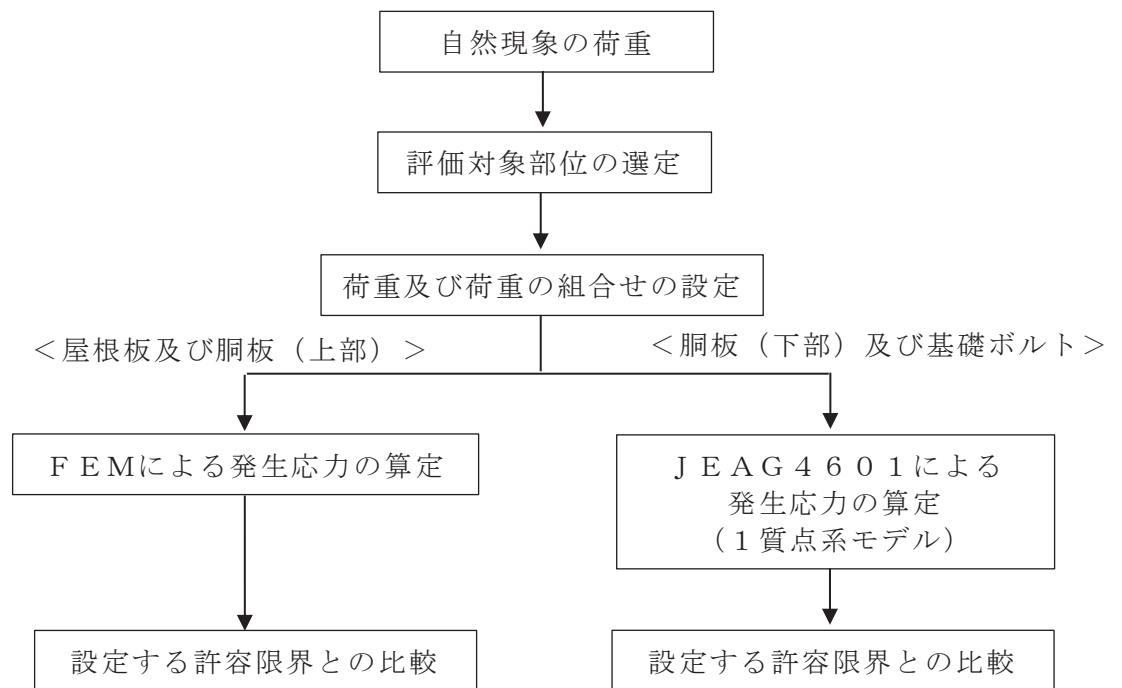


図2-3 強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- (1) 建築基準法 (昭和25年5月24日法律第201号)
- (2) 建築基準法施行令 (昭和25年11月16日政令第338号)
- (3) 宮城県 建築基準法施行細則 (昭和46年3月30日 宮城県規則第21号)
- (4) 日本建築学会 2004年 建築物荷重指針・同解説
- (5) 日本建築学会 2005年 鋼構造設計規準－許容応力度設計法－
- (6) 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 A E G 4 6 0 1 ・ 補-1984)
- (7) 原子力発電所耐震設計技術指針 (J E A G 4 6 0 1 -1987)
- (8) 原子力発電所耐震設計技術指針 (J A E G 4 6 0 1 -1991 追補版)
- (9) 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

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

復水貯蔵タンクの強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表 3-1 復水貯蔵タンクの強度評価に用いる記号 (1/3)

記号	単位	定義
A_1	m^2	風の受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A_b	mm^2	基礎ボルトの呼び径断面積
A_f	m^2	屋根板表面積
C	—	風力係数
C_c	—	基礎ボルト計算における係数
C_t	—	基礎ボルト計算における係数
D_c	mm	基礎ボルトのピッチ円直径
D_i	mm	胴の内径
D_{bi}	mm	ベースプレートの内径
D_{bo}	mm	ベースプレートの外径
E	MPa	胴の縦弾性係数
e	—	基礎ボルト計算における係数
E'	—	建築基準法施行令第 87 条第 2 項に規定する数値
E_r	—	建設省告示第 1454 号の規定によって算出した平均風速の高さ方向の分布を表す係数
F	MPa	設計・建設規格 SSB-3121.1 により規定される値
f_b	MPa	曲げモーメントにより生じる座屈応力
F_c	N	基礎に作用する圧縮力
f_c	MPa	軸圧縮荷重により生じる座屈応力
F_d	N	常時作用する荷重
f_s	MPa	設計・建設規格 SSB-3131.1 により規定される供用状態 A 及び B での基礎ボルトの許容せん断応力
F_t	N	基礎ボルトに作用する引張力
f_t	MPa	設計・建設規格 SSB-3131.1 により規定される供用状態 A 及び B での基礎ボルトの許容引張応力
f_{ts}	MPa	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
F_v	N	降下火砕物等堆積による鉛直荷重
F_v'	N/m^2	単位面積当たりの降下火砕物等堆積による鉛直荷重

表 3-1 復水貯蔵タンクの強度評価に用いる記号 (2/3)

記号	単位	定義
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
H	m	全高
H _h	mm	液面高さ
k	—	基礎ボルト計算における中立軸の荷重係数
ℓ ₁ , ℓ ₂	mm	基礎ボルト計算における中立軸から荷重作用点までの距離
ℓ _g	mm	容器重心までの高さ
M	N・mm	風荷重による曲げモーメント
m _o	kg	容器の有効運転質量
m _e	kg	容器の空質量
m _s	kg	屋根板に加わる降下火砕物等の堆積による質量
n	—	基礎ボルトの本数
q	N/m ²	設計用速度圧
R _B	mm	胴平均半径
S	MPa	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 の表にて規定される許容引張応力
s	—	基礎ボルトと基礎の縦弾性係数比
S ₀	MPa	屋根板又は胴板の一次一般膜応力の許容値
S ₁	MPa	屋根板又は胴板の一次膜応力＋一次曲げ応力の許容値
S _u	MPa	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 の表にて規定される設計引張り強さ
S _y	MPa	設計・建設規格 付録材料図表 Part5 の表にて規定される設計降伏点
t	mm	胴板の厚さ
t ₁	mm	基礎ボルト面積相当板幅
t ₂	mm	圧縮側基礎相当幅
V _D	m/s	基準風速
W	N	風(台風)による水平荷重
z	—	基礎ボルト計算における係数
Z _b	m	地表面粗度区分に応じて建設省告示 1454 号に掲げる数値
Z _G	m	地表面粗度区分に応じて建設省告示 1454 号に掲げる数値
α	—	地表面粗度区分に応じて建設省告示 1454 号に掲げる数値
α ₁	—	座屈応力に対する安全率
α ₂	rad	基礎ボルト計算における中立軸を定める角度

表 3-1 復水貯蔵タンクの強度評価に用いる記号 (3/3)

記号	単位	定義
η	—	R_B / t
η_1	—	$1200 \times g / F$
η_2	—	$8000 \times g / F$
η_3	—	$9600 \times g / F$
ν	—	ポアソン比
π	—	円周率
ρ_w	—	保有水の比重
σ_0	MPa	胴に生じる組合せ一次一般膜応力
σ_{0c}	MPa	胴に生じる組合せ一次一般膜応力 (圧縮)
σ_{0t}	MPa	胴に生じる組合せ一次一般膜応力 (引張)
σ_1	MPa	胴に生じる組合せ一次応力
σ_b	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
σ_c	MPa	基礎に生じる圧縮応力
σ_{x1}	MPa	静水頭により胴に生じる軸方向応力
σ_{x2}	MPa	自重 (空質量) 及び降下火砕物等の堆積による荷重により胴に生じる軸方向応力
σ_{x4}	MPa	風荷重により胴に生じる軸方向応力
σ_{xbs}	MPa	曲げモーメントにより生じる圧縮応力
σ_{xc}	MPa	胴に生じる軸方向応力の和 (圧縮)
σ_{xcs}	MPa	軸圧縮荷重により生じる圧縮応力
σ_{xt}	MPa	胴に生じる軸方向応力の和 (引張)
σ_ϕ	MPa	胴に生じる周方向応力の和
$\sigma_{\phi 1}$	MPa	静水頭により胴に生じる周方向応力
τ	MPa	風荷重により胴に生じるせん断応力
τ_b	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力
ϕ_b (x)	—	座屈応力 f_b を算出する際の関数
ϕ_c (x)	—	座屈応力 f_c を算出する際の関数

3.2 評価対象部位

復水貯蔵タンクの評価対象部位は、添付書類「VI-3-別添 2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて示している評価対象部位に従って、屋根板、胴板（上部）、胴板（下部）及び基礎ボルトとする。

ここで、胴板（上部）はオーバーフロー水位より上部の胴板を指し、胴板（下部）はオーバーフロー水位より下部の胴板を指す。

評価対象部位は、「2.2 構造概要」にて設定している構造に基づき、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し設定している。

降下火砕物等の堆積による鉛直荷重は、降下火砕物等が堆積する屋根板及び屋根板に接続する胴板（上部）に作用する。また、風荷重は、胴板を介して胴板（下部）及び基礎ボルトに作用する。

このことから、屋根板、胴板（上部）、胴板（下部）及び基礎ボルトを評価対象部位として設定している。

復水貯蔵タンクの強度評価における評価対象部位を図 3-1 に示す。

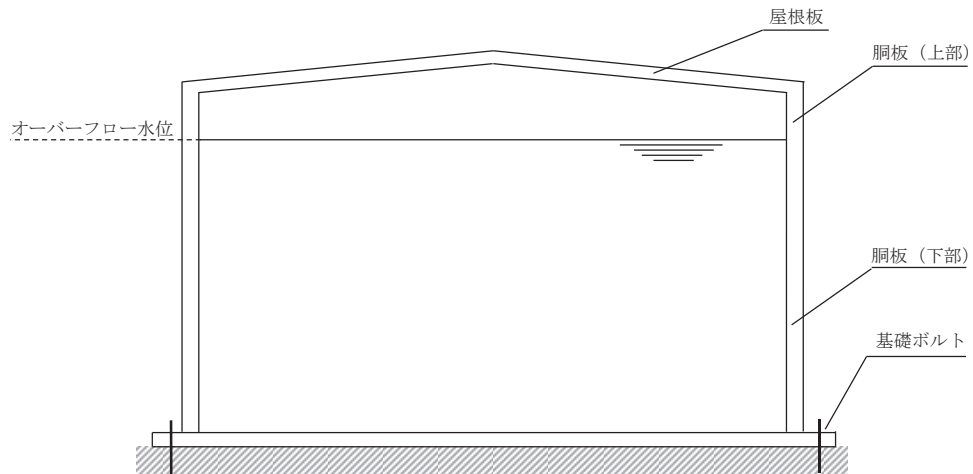


図 3-1 復水貯蔵タンクの評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重及び荷重の組合せは、添付書類「VI-3-別添 2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1 荷重及び荷重の組合せ」に示している荷重及び荷重の組合せを用いる。

(1) 荷重の設定

復水貯蔵タンクの強度評価に用いる荷重を以下に示す。

a. 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重は、自重及び水頭圧を考慮する。

b. 降下火砕物等堆積による鉛直荷重 (F_v')

降下火砕物等の堆積による単位面積当たりの鉛直荷重は、 3067N/m^2 とする。建築基準法施行令第86条では、屋根部の勾配が60度以下の場合においては、その勾配に応じた屋根形状係数を乗じた数値とし、その勾配が60度を超える場合においては、零とすることができるとの記載があるが、保守的に屋根形状係数を1とする。

c. 風（台風）による水平荷重 (W)

風（台風）による水平荷重は、基準風速 30m/s に基づき算定する。

風（台風）による水平荷重は添付書類「VI-3-別添2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(3)c. 水平荷重」に示す方法に従い、算出する。

風（台風）による水平荷重による W は以下のようにして求める。全高 H が 5m 以上であるため、 H が Z_b を超える場合の式を用いる。

$$W = q \cdot C \cdot A_1$$

ここで、

$$q = 0.6 \cdot E' \cdot V_D^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot \left(\frac{H}{Z_G} \right)^\alpha$$

$$A_1 = H \cdot (D_i + 2 \cdot t)$$

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、復水貯蔵タンクの評価対象部位ごとに設定する。

復水貯蔵タンクの屋根板及び胴板（上部）については、水頭圧は作用しないため考慮しない。また、水平方向の風荷重が作用すると、屋根板及び胴板（上部）に対し、鉛直上向きの荷重が働き、鉛直下向き荷重が低減されるため、保守的に風荷重は考慮しない。そのため、復水貯蔵タンクの屋根板及び胴板（上部）には、自重及び降下火砕物等の堆積による鉛直荷重が作用する。

復水貯蔵タンクの胴板（下部）及び基礎ボルトには、自重、水頭圧、降下火砕物等の堆積による鉛直荷重及び風荷重が作用する。

復水貯蔵タンクの評価にて考慮する荷重の組合せを表 3-2 に示す。

表 3-2 荷重の組合せ

施設名称	評価対象部位	応力等の状態
復水貯蔵タンク	屋根板	①自重 ②降下火砕物等の堆積による鉛直荷重
	胴板（上部）	①自重 ②降下火砕物等の堆積による鉛直荷重
	胴板（下部）	①自重，水頭圧 ②降下火砕物等の堆積による鉛直荷重 ③風荷重
	基礎ボルト	①自重，水頭圧 ②降下火砕物等の堆積による鉛直荷重 ③風荷重

3.4 許容限界

復水貯蔵タンクの許容限界は、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、添付書類「VI-3-別添 2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.2 許容限界」にて設定している許容限界及び機能損傷モードを踏まえて、J E A G 4 6 0 1 に基づき許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力を用いる。

復水貯蔵タンクの許容限界は、J E A G 4 6 0 1 を準用し、屋根板及び胴板については「クラス 2, 3 容器」、基礎ボルトについては「クラス 2, 3 支持構造物」の許容限界を適用する。また、座屈については評価式を満足することを確認する。設計荷重に対して、当該施設に要求される安全機能を維持できるように弾性設計とするため、許容応力状態Ⅲ_ASから算出した以下の許容応力を許容限界とする。J E A G 4 6 0 1 に従い、設計・建設規格 付録材料図表 Part5, 6 の表にて許容応力を評価する際は、評価対象部位の最高使用温度及び周囲環境温度に応じた値をとるものとするが、温度が設計・建設規格 付録材料図表記載の中間の値の場合は、比例法を用いて評価する。ただし、設計・建設規格 付録材料図表 Part5, 6 で比例法を用いる場合の端数処理は、小数点第 1 位以下を切り捨てた値を用いるものとする。

復水貯蔵タンクの許容限界について、屋根板及び胴板（上部）の許容限界を表 3-3、胴板（下部）の許容限界を表 3-4、基礎ボルトの許容限界を表 3-5 に示す。

表 3-3 屋根板及び胴板（上部）の許容限界

許容応力 状態	温度条件 (°C)	許容限界	
		一次一般膜応力	一次膜応力+一次曲げ応力
Ⅲ _A S	66*	S _y と0.6S _u の小さい方。 ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については上記値と1.2Sとの大きい方。	左欄の1.5倍の値

注記 *：最高使用温度

表 3-4 胴板（下部）の許容限界

許容応力 状態	温度条件 (°C)	許容限界		
		一次一般膜応力	組合せ一次 応力	座屈
Ⅲ _A S	66*	S _y と0.6S _u の小さい方。 ただし、オーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については上記値と1.2Sとの大きい方。	左欄に同じ	$\frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xcs}}{f_c} + \frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xbs}}{f_b} \leq 1$

注記 *：最高使用温度

表 3-5 基礎ボルトの許容限界

許容応力状態	温度条件 (°C)	許容限界	
		一次応力	
		引張	せん断
Ⅲ _A S	40*	1.5 f _t	1.5 f _s

注記 *：周囲環境温度

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 f_{ts}は以下のとおり。

$$f_{ts} = \text{Min} \left\{ 1.5 f_t, 2.1 f_t - 1.6 \tau_b \right\}$$

3.5 評価方法

1 質点系モデルによる評価と F E M解析による評価を行う。

(1) 1 質点系モデルによる評価

1 質点系モデルによる強度評価は、添付書類「VI-3-別添 2-1 火山への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「5. 強度評価方法」にて設定している平底たて置円筒形容器の評価式を用いる。

a. 計算モデル

降下火砕物等の堆積による鉛直荷重，自重及び水頭圧（鉛直荷重）並びに風荷重（水平荷重）により作用する水平力及びモーメントに対し，厳しい部位である胴板（下部）及び基礎ボルトの構造健全性を 1 質点系モデルとして評価を行う。復水貯蔵タンクの 1 質点系モデルによる計算に用いるモデル図を図 3-2 に示す。

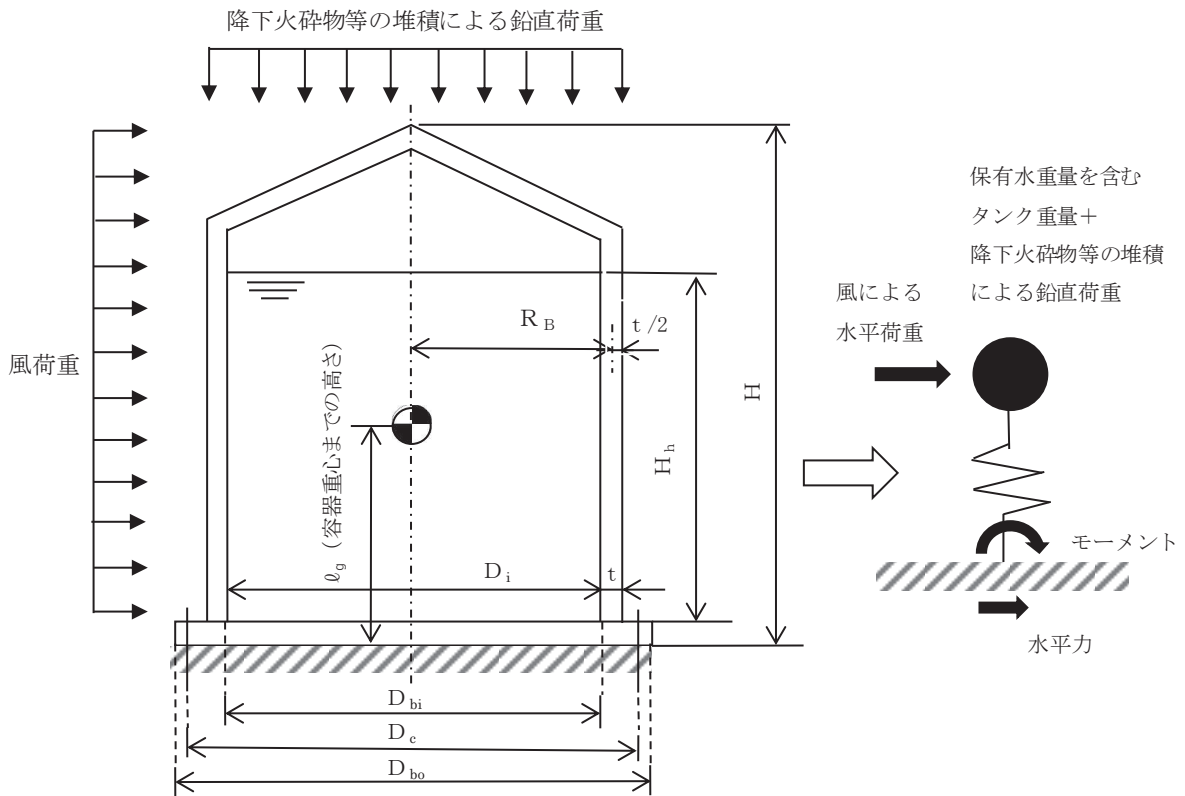


図 3-2 1 質点系モデルによる計算モデル図

b. 1 質点系モデルによる評価における計算方法

保有水量は胴板の応力が大きくなるように **オーバーフロー水位** に設定する。

(a) 鉛直方向荷重

イ. 降下火砕物等堆積による屋根板に作用する鉛直荷重

$$F_v = F_v' \cdot A_f$$

$$A_f = \frac{\pi}{4} \cdot (D_i + 2 \cdot t)^2$$

ロ. 屋根板に加わる降下火砕物等の堆積による質量

$$m_s = \frac{F_v}{g}$$

(b) 水平方向荷重

イ. 受圧面積

$$A_1 = H \cdot (D_i + 2 \cdot t)$$

ロ. 風荷重

$$W = q \cdot C \cdot A_1$$

ここで,

$$q = 0.6 \cdot E' \cdot V_D^2$$

$$E' = E_r^2 \cdot G$$

$$E_r = 1.7 \cdot \left(\frac{H}{Z_G} \right)^\alpha$$

ハ. 風荷重による曲げモーメント

$$M = W \cdot \ell_g$$

このとき, タンク重心高さ ℓ_g はタンク全高 H の半分とする。

(c) 胴に生じる応力

イ. 静水頭により胴に生じる応力

$$\sigma_{\phi 1} = \frac{10^{-6} \cdot \rho_w \cdot g \cdot H_h \cdot D_i}{2 \cdot t}$$

$$\sigma_{x 1} = 0$$

ロ. 自重(空質量)及び降下火砕物等の堆積による荷重により胴に生じる軸方向応力

$$\sigma_{x 2} = \frac{(m_e + m_s) \cdot g}{\pi \cdot (D_i + t) \cdot t}$$

ハ. 風荷重により生じる応力

風荷重の曲げモーメントにより胴に生じる軸方向応力

$$\sigma_{x 4} = \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot (D_i + t)^2 \cdot t}$$

風荷重により胴に生じるせん断応力

$$\tau = \frac{2 \cdot W}{\pi \cdot (D_i + t) \cdot t}$$

ニ. 胴に生じる組合せ一次一般膜応力及び組合せ一次応力

(イ) 組合せ引張応力

胴に生じる周方向応力の和 (引張)

$$\sigma_{\phi} = \sigma_{\phi 1}$$

胴に生じる軸方向応力の和 (引張)

$$\sigma_{x t} = \sigma_{x 1} - \sigma_{x 2} + \sigma_{x 4}$$

胴に生じる組合せ一次一般膜応力 (引張)

$$\sigma_{0 t} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{\phi} + \sigma_{x t}) + \sqrt{(\sigma_{\phi} - \sigma_{x t})^2 + 4 \cdot \tau^2} \right\}$$

(ロ) 組合せ圧縮応力

胴に生じる周方向応力の和 (圧縮)

$$\sigma_{\phi} = -\sigma_{\phi 1}$$

胴に生じる軸方向応力の和 (圧縮)

$$\sigma_{x c} = -\sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 4}$$

$\sigma_{x c}$ が正の値 (圧縮側) のとき, 胴に生じる組合せ一次一般膜応力 (圧縮)

$$\sigma_{0 c} = \frac{1}{2} \cdot \left\{ (\sigma_{\phi} + \sigma_{x c}) + \sqrt{(\sigma_{\phi} - \sigma_{x c})^2 + 4 \cdot \tau^2} \right\}$$

(ハ) 組合せ応力

胴に生じる組合せ一次一般膜応力

$$\sigma_0 = \text{M a x} \left\{ \text{組合せ引張応力} (\sigma_{0 t}), \text{組合せ圧縮応力} (\sigma_{0 c}) \right\}$$

組合せ一次応力は組合せ一次一般膜応力と同じ値になる。

ホ. 軸圧縮荷重及び曲げモーメントにより生じる圧縮応力

軸圧縮荷重により生じる圧縮応力

$$\sigma_{x c s} = \sigma_{x 2}$$

曲げモーメントにより生じる圧縮応力

$$\sigma_{x b s} = \sigma_{x 4}$$

(d) 胴の座屈評価

イ. 軸圧縮荷重により生じる座屈応力 f_c

$$f_c = \begin{cases} F & (\eta \leq \eta_1) \\ F \cdot \left[1 - \frac{1}{6800 \cdot g} \cdot \{F - \phi_c(\eta_2)\} \cdot (\eta - \eta_1) \right] & (\eta_1 < \eta < \eta_2) \\ \phi_c(\eta) & (\eta_2 \leq \eta \leq 800) \end{cases}$$

ここで,

$$\phi_c(\eta) = 0.6 \cdot \frac{E}{\eta} \cdot \left[1 - 0.901 \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \cdot \sqrt{\eta}\right) \right\} \right]$$

ロ. 曲げモーメントにより生じる座屈応力 f_b

$$f_b = \begin{cases} F & (\eta \leq \eta_1) \\ F \cdot \left[1 - \frac{1}{8400 \cdot g} \cdot \{F - \phi_b(\eta_3)\} \cdot (\eta - \eta_1) \right] & (\eta_1 < \eta < \eta_3) \\ \phi_b(\eta) & (\eta_3 \leq \eta \leq 800) \end{cases}$$

ここで,

$$\phi_b(\eta) = 0.6 \cdot \frac{E}{\eta} \cdot \left[1 - 0.731 \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \cdot \sqrt{\eta}\right) \right\} \right]$$

ハ. 安全率 α_1

安全率は、各荷重の組合せに対して

$$\alpha_1 = \begin{cases} 1.0 & (\eta \leq \eta_1) \\ 1.0 + \frac{F}{13600 \cdot g} \cdot (\eta - \eta_1) & (\eta_1 < \eta < \eta_2) \\ 1.5 & (\eta_2 \leq \eta) \end{cases}$$

ここで,

$$\eta = \frac{R_B}{t}, \quad \eta_1 = \frac{1200 \cdot g}{F}, \quad \eta_2 = \frac{8000 \cdot g}{F}, \quad \eta_3 = \frac{9600 \cdot g}{F}$$

ニ. 座屈評価

以下の式により評価を行う。

$$\frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xcs}}{f_c} + \frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xbs}}{f_b} \leq 1$$

(e) 基礎ボルトの計算方法

イ. 基礎ボルトに生じるせん断応力

$$\tau_b = \frac{W}{n \cdot A_b}$$

ロ. 基礎ボルトに生じる引張応力

風荷重により作用する転倒モーメントMが作用した場合に生じる基礎ボルトの引張荷重と基礎部の圧縮荷重については、荷重と変位量の釣合い条件を考慮することにより求める。

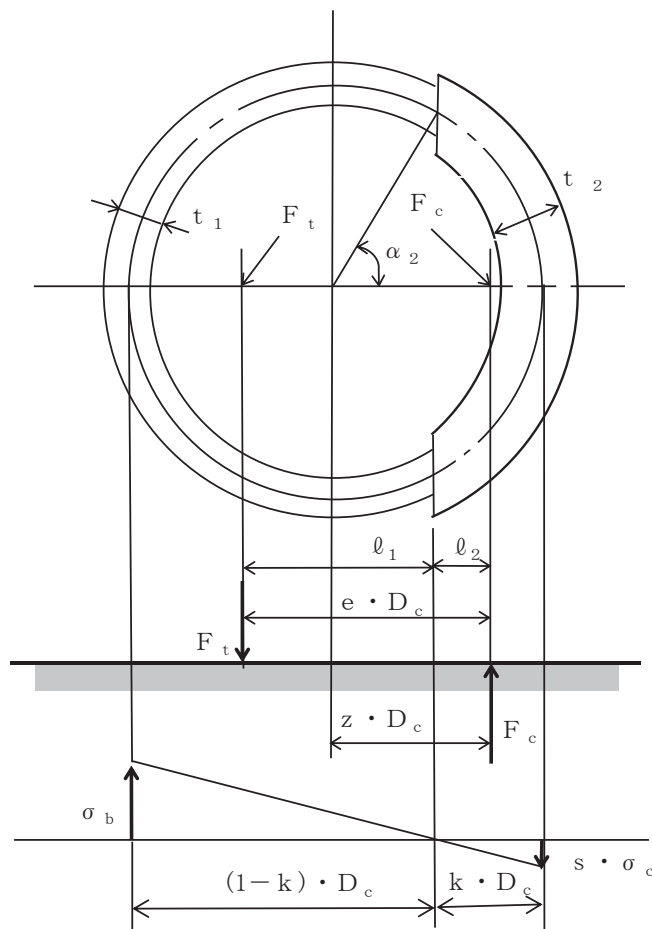


図 3-3 基礎の荷重説明図

(イ) σ_b 及び σ_c を仮定して基礎ボルトの応力計算における中立軸の荷重係数 k を求める。

$$k = \frac{1}{1 + \frac{\sigma_b}{s \cdot \sigma_c}}$$

(ロ) 基礎ボルトの応力計算における中立軸を定める角度 α_2 を求める。

$$\alpha_2 = \cos^{-1}(1 - 2 \cdot k)$$

(ハ) 各定数 e , z , C_t 及び C_c を求める。

$$e = \frac{1}{2} \cdot \left\{ \frac{(\pi - \alpha_2) \cdot \cos^2 \alpha_2 + \frac{1}{2} \cdot (\pi - \alpha_2) + \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2}{(\pi - \alpha_2) \cdot \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2} + \frac{\frac{1}{2} \cdot \alpha_2 - \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \alpha_2 \cdot \cos^2 \alpha_2}{\sin \alpha_2 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2} \right\}$$

$$z = \frac{1}{2} \cdot \left(\cos \alpha_2 + \frac{\frac{1}{2} \cdot \alpha_2 - \frac{3}{2} \cdot \sin \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2 + \alpha_2 \cdot \cos^2 \alpha_2}{\sin \alpha_2 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2} \right)$$

$$C_t = \frac{2 \cdot \{(\pi - \alpha_2) \cdot \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2\}}{1 + \cos \alpha_2}$$

$$C_c = \frac{2 \cdot (\sin \alpha_2 - \alpha_2 \cdot \cos \alpha_2)}{1 - \cos \alpha_2}$$

(ニ) 各定数を用いて F_t 及び F_c を求める。

$$F_t = \frac{M - (m_0 + m_s) \cdot g \cdot z \cdot D_c}{e \cdot D_c}$$

$$F_c = F_t + (m_0 + m_s) \cdot g$$

基礎ボルトに引張力が作用しないのは、 α_2 が π に等しくなったときであり、 α_2 を π に近づけた場合の値 $e = 0.75$ 及び $z = 0.25$ を求める式に代入し、得られる F_t の値によって引張力の有無を次のように判定する。

$F_t \leq 0$ ならば引張力は作用しない。

$F_t > 0$ ならば引張力が作用しているので次の計算を行う。

(ホ) σ_b 及び σ_c を求め、(イ) にて仮定した値を十分に近似していることを確認する。

$$\sigma_b = \frac{2 \cdot F_t}{t_1 \cdot D_c \cdot C_t}$$

$$\sigma_c = \frac{2 \cdot F_c}{(t_2 + s \cdot t_1) \cdot D_c \cdot C_c}$$

ここで,

$$t_1 = \frac{n \cdot A_b}{\pi \cdot D_c}$$

$$t_2 = \frac{1}{2} \cdot (D_{bo} - D_{bi}) - t_1$$

(2) FEM解析による評価

屋根板及び胴板（上部）はFEM解析にて評価を行う。

FEM解析に使用する解析コードは「ABAQUS」である。

なお、評価に用いる解析コードABAQUSの検証及び妥当性確認等の概要については、「VI-5 計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

a. 荷重条件

復水貯蔵タンクの荷重条件を表3-6に示す。

表3-6 復水貯蔵タンクの荷重条件

荷重条件	入力荷重 (N/m ²)
降下火砕物等の堆積による鉛直荷重 F _v '	3067

b. 計算モデル及び諸元

屋根部に作用する鉛直荷重に対し厳しい部位である屋根板及び胴板（上部）について、屋根板及び胴板の板部材を板要素で、内部鉄骨及び支柱を梁要素でモデル化して評価を行う。復水貯蔵タンクのFEM解析に用いているモデル図を図3-4に、諸元を表3-7に示す。

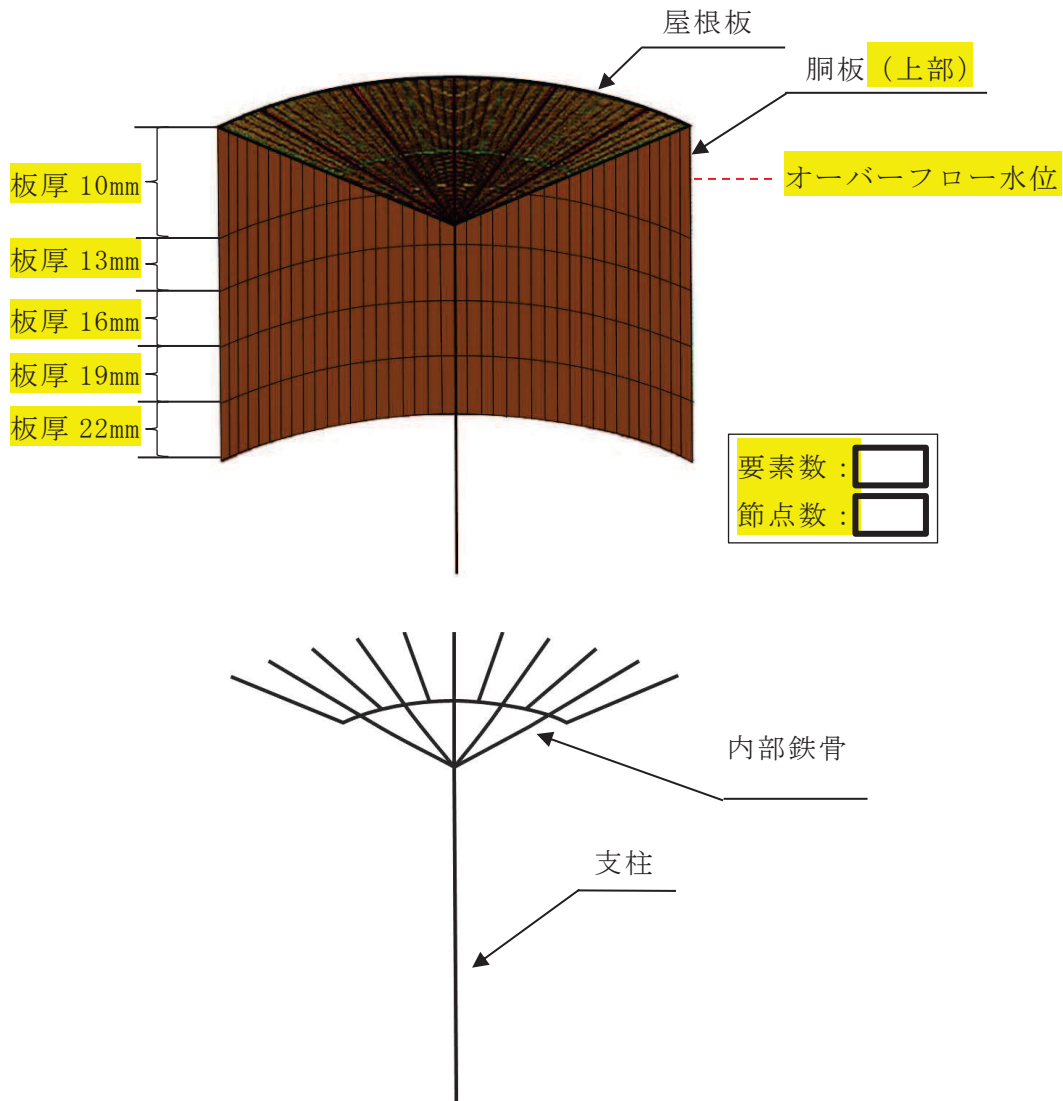


図 3-4 F E M解析に用いるモデル図

表 3-7 復水貯蔵タンクの諸元

部材	材料	最高使用温度 (°C)	縦弾性係数 E (MPa)	ポアソン比 ν (-)
屋根板, 胴板, 内部鉄骨, 支柱	SUS304	66	192000	0.3

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる許容応力評価に用いる条件を表 4-1 及び復水貯蔵タンクの入力条件を表 4-2 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件

材料	温度 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)	$1.5 f_s$ (MPa)
SUS304 (屋根板, 胴板)	66	188	479	205	—	—
SNB7 (基礎ボルト)	40	725	860	602	451	347

表 4-2 復水貯蔵タンクの入力条件

据付場所及び床面 高さ (m) *1	構造概要	最高使用圧力 (MPa)	温度 *2 (°C)	ρ_w (—)	g (m/s ²)
屋外 O.P. 9.50	平底たて置 円筒形	静水頭	①66	1.0	9.80665
			②40		

H (mm)	m_o (kg)	m_e (kg)	m_s (kg)	D_i (mm)
12469	3447700	242500	98686	20000

t (mm)	l_g (mm)	H_h (mm)	R_B (mm)	E (MPa)	s (—)
22	6234.5	10100	10011	192000	15

n (—)	D_c (mm)	D_{b_o} (mm)	D_{b_i} (mm)	ボルト サイズ	A_b (mm ²)
90	20320	20640	20000	M60	2827.4

注記 *1: 基準床レベルを示す。

*2: ①は屋根板及び胴板評価時, ②は基礎ボルト評価時の値

5. 強度評価結果

5.1 1 質点系モデルによる計算結果

降下火砕物等の堆積時の復水貯蔵タンクの1質点系モデルによる評価結果を表5-1に示す。

胴板(下部)及び基礎ボルトに発生する応力は許容応力以下であり,また,座屈の評価の条件式を満足している。

表 5-1 復水貯蔵タンクの1質点系モデルによる評価結果

評価部位	材料	応力	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
胴板 (下部)	SUS304	一次一般膜	$\sigma_0 = 45$	$S_0 = 188$
		組合せ一次	$\sigma_1 = 45$	
		圧縮と曲げの組合せ (座屈の評価)	$\frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xcs}}{f_c} + \frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xbs}}{f_b} \leq 1$	
基礎ボルト	SNB7	引張	$\sigma_b = -^*$	$1.5 f_t = 451$
		せん断	$\tau_b = 2$	$1.5 f_s = 347$
		組合せ	$\sigma_b = -$	$f_{ts} = 451$

注記 * : $F_t \leq 0$ であるため引張応力は発生しない

5.2 FEM解析による計算結果

降下火砕物等の堆積時の復水貯蔵タンクのFEM解析による評価結果を表5-2及び復水貯蔵タンクの応力分布図を図5-1～図5-3に示す。

屋根板及び胴板(上部)に発生する応力は許容応力以下である。

表 5-2 復水貯蔵タンクのFEM解析による評価結果

評価部位	材料	応力	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
屋根板	SUS304	一次一般膜	$\sigma = 25$	$S_0 = 188$
		一次膜+一次曲げ	$\sigma = 73$	$S_1 = 282$
胴板 (上部)	SUS304	一次一般膜	$\sigma = 22$	$S_0 = 188$
		一次膜+一次曲げ	$\sigma = 69$	$S_1 = 282$



図 5-1 復水貯蔵タンクの応力分布図(屋根板及び胴板 (上部) : 一次一般膜)



図 5-2 復水貯蔵タンクの応力分布図 (胴板 (上部) : 一次膜+一次曲げ)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

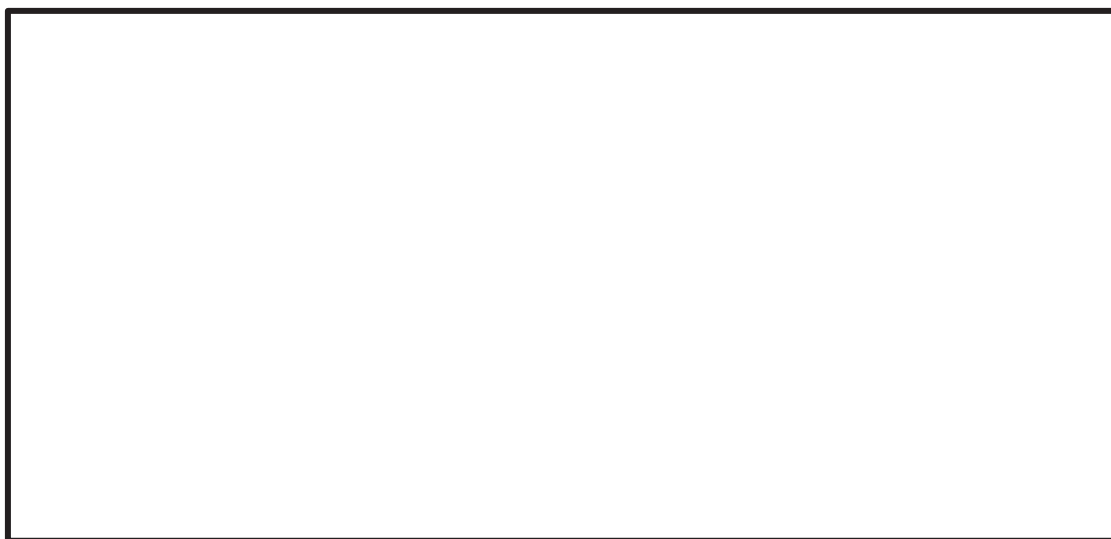


図 5-3 復水貯蔵タンクの応力分布図（屋根板：一次膜＋一次曲げ）

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。