

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6添-3-013-12 改0
提出年月日	2023年11月15日

VI-3-別添 1-6 軽油タンクの強度計算書

2023年11月

東京電力ホールディングス株式会社

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	3
2.4 適用規格	5
3. 強度評価方法	6
3.1 記号の定義	6
3.2 評価対象部位	9
3.3 荷重及び荷重の組合せ	10
3.4 許容限界	13
3.5 評価方法	15
3.5.1 衝突評価	15
3.5.2 構造強度評価	20
4. 評価条件	25
4.1 衝突評価	25
4.2 構造強度評価	26
5. 強度評価結果	27
5.1 衝突評価	27
5.2 構造強度評価	29

1. 概要

本資料は、VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に示すとおり、軽油タンクが竜巻時及び竜巻通過後においても、非常用所内母線へ7日間の電源供給が継続できるよう燃料を保有する機能を維持するために、主要な構造部材が健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

軽油タンクについて、VI-3-別添 1-1「竜巻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、軽油タンクの「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

軽油タンクは、VI-3-別添 1-1「竜巻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、屋外の軽油タンクエリアに設置する。

軽油タンクエリアの位置図を図2-1に示す。

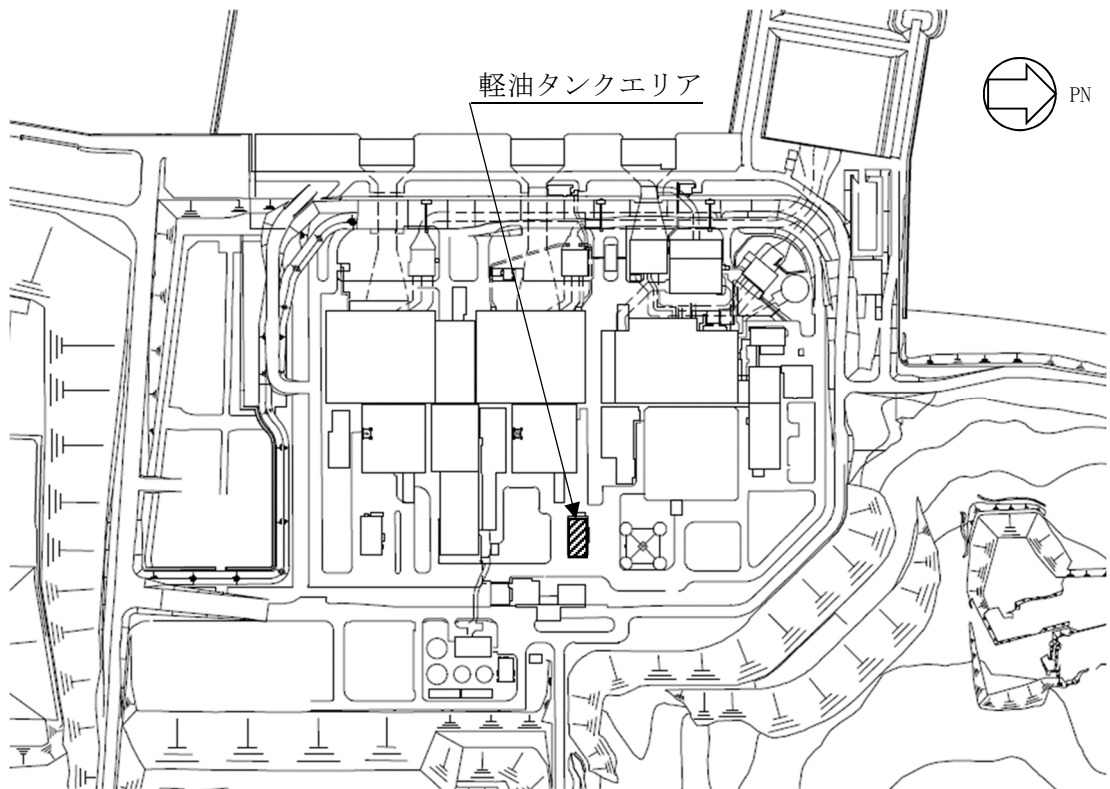


図2-1 軽油タンクエリアの位置図

2.2 構造概要

軽油タンクについて、VI-3-別添 1-1「竜巻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、軽油タンクの構造を示す。

軽油タンクは、円筒形の胴板と屋根板より構成され、基礎ボルトによりコンクリート基礎に固定された平底たて置円筒形容器である。タンクは外気と繋がっているため、タンク内圧は大気圧となっている。軽油タンクの概要図を図 2-2 に示す。

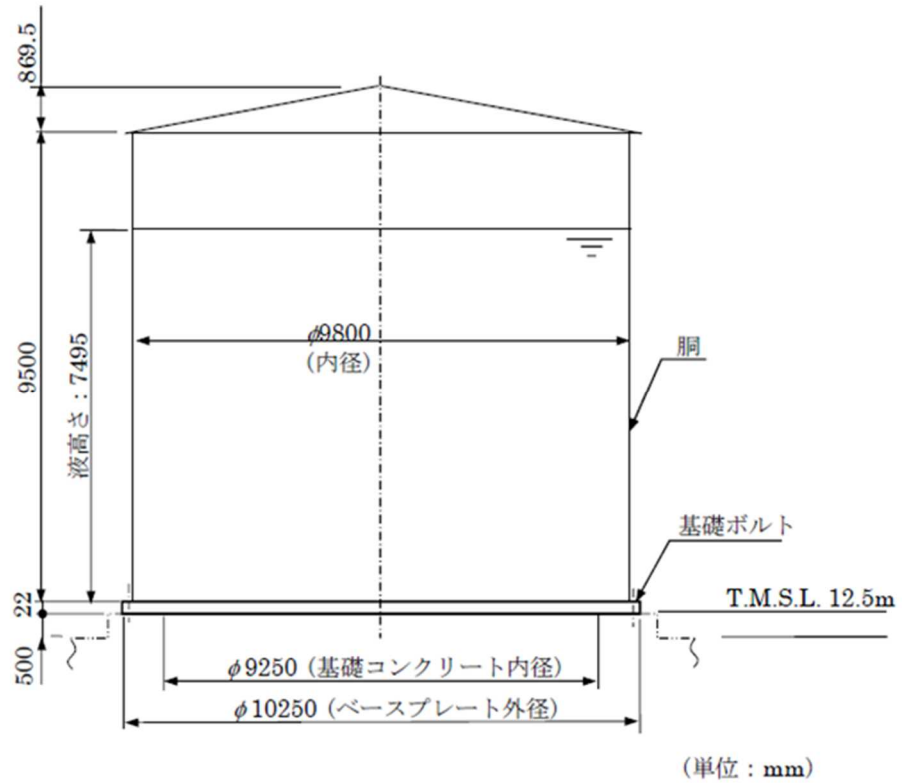


図 2-2 軽油タンクの概要図

2.3 評価方針

軽油タンクの強度評価は、VI-3-別添1-1「竜巻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、軽油タンクの評価対象部位に作用するひずみ、応力等が、許容限界に留まることを「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。

軽油タンクの強度評価フローを図2-3に示す。軽油タンクの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻による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。

強度評価の評価方針は、衝突評価及び構造強度評価に分類でき、軽油タンクはこれらの評価を実施する。

(1) 衝突評価の評価方針

衝突評価は、設計飛来物の衝突に対する直接的な影響の評価として、軽油タンクの外殻を構成する部材が設計飛来物の貫通を生じない最小厚さ以上であること、また、終局状態に至るようなひずみを生じないことを計算及び解析により確認する。

(2) 構造強度評価の評価方針

軽油タンクの構造強度評価については、設計荷重に対し、軽油タンクを構成する胴板及び基礎ボルトに生じる応力が許容応力以下であることを計算により確認する。ただし、座屈評価においては、評価式を満足することを確認する。また、自重については、設計荷重の抗力として作用する場合は質量が小さい方が安全側の評価となることから、満油時及び空油時の質量を考慮した評価を実施する。各部材の構造強度評価には、設計荷重は水平方向より作用する荷重という観点で地震荷重と同様なものと考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984」（日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（日本電気協会）及び「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版」（日本電気協会）（以下「JEAG 4601」という。）の平底たて置円筒形容器の評価方法を準用し、VI-3-別添1-1「竜巻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」に示す軽油タンクの評価式を用いる。軽油タンクの許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻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、JEAG 4601の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC 1-2005/2007」（日本機械学会）（以下「JSME」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、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JSME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。

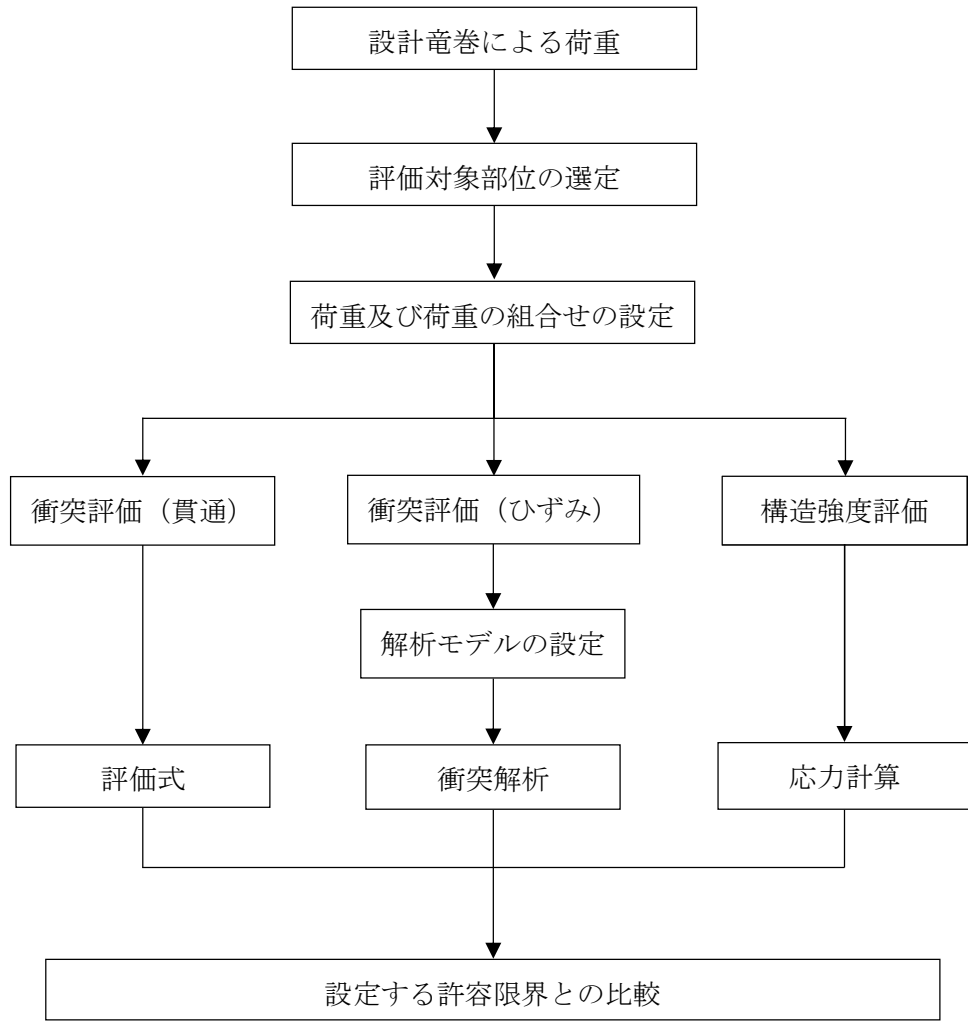


図 2-3 軽油タンクの強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「発電用原子力設備規格 設計・建設規格 J S M E S N C 1-2005/2007」(日本機械学会)
- ・「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」(日本電気協会)
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」(日本電気協会)
- ・「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」(日本電気協会)
- ・日本産業規格 (J I S)
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI07-13))
- ・「建築物荷重指針・同解説」(日本建築学会，2004 改定)
- ・「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」(日本建築学会，2005 改定)
- ・ISE7607-3「軽水炉構造機器の衝撃荷重に関する調査 その3 ミサイルの衝突による構造壁の損傷に関する評価式の比較検討」(昭和 51 年 10 月 高温構造安全技術研究組合)
- ・タービンミサイル評価について (昭和 52 年 7 月 20 日 原子炉安全専門審査会)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

軽油タンクの評価に用いる記号を表 3-1 及び表 3-2 に示す。

表 3-1 BRL 式による貫通限界厚さの算定に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	設計飛来物が衝突する衝突断面の等価直径
K	—	鋼板の材質に関する係数
m	kg	設計飛来物の質量
T	m	貫通限界厚さ
v	m/s	設計飛来物の衝突速度

表 3-2 平底たて置円筒形容器の強度評価に用いる記号 (1/3)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積
A _b	mm ²	基礎ボルト呼び径断面積
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 _{b i}	mm	ベースプレート内径
D _{b o}	mm	ベースプレート外径
D _c	mm	基礎ボルト中心円直径
D _d	mm	コンプレッションリング外径
D _i	mm	胴内径
E	MPa	ヤング率
e	—	基礎ボルト計算における係数
F	MPa	J SME SSB-3121.1(1)により規定される値
F _c	N	基礎に作用する圧縮力
F _t	N	基礎ボルトに作用する引張力
f _b	MPa	曲げモーメントにより生じる座屈応力
f _c	MPa	軸圧縮荷重により生じる座屈応力
f _s	MPa	J SME SSB-3131 により規定される供用状態 A 及び B での許容せん断応力

表 3-2 平底たて置円筒形容器の強度評価に用いる記号 (2/3)

記号	単位	定義
f_t	MPa	J S M E SSB-3131 により規定される供用状態 A 及び B での許容引張応力
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
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
H	mm	容器高さ
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	m	設計飛来物の最も短い辺の全長
l_g	mm	胴板高さの 1/2 + 底板
l_M	mm	胴板最上部の高さ
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
M _{T2}	N・mm	設計竜巻による複合荷重により作用するモーメント
m	kg	設計飛来物質量
m _e	kg	空質量
n	—	基礎ボルト本数
q	N/m ²	設計用速度圧
R _B	mm	胴平均半径
S _u	MPa	J S M E 付録材料図表 part5 の表にて規定される設計引張強さ
S _y	MPa	J S M E 付録材料図表 part5 の表にて規定される設計降伏点
s	—	基礎ボルトと基礎の縦弾性係数比
t	mm	胴板厚
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	m/s	設計飛来物の衝突速度 (水平)
W _M	N	設計飛来物による衝撃荷重
W _w	N	設計竜巻の風圧力による荷重
W _{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 (W _{T2} = W _w + W _M)
z	—	基礎ボルト計算における係数

表 3-2 平底たて置円筒形容器の強度評価に用いる記号 (3/3)

記号	単位	定義
α_1	—	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
Δt	s	設計飛来物の被衝突体の接触時間
η_B	—	R_B / t
η_1	—	$1200 \cdot g / F$
η_2	—	$8000 \cdot g / F$
η_3	—	$9600 \cdot g / F$
π	—	円周率
ρ	—	軽油の比重
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_x	MPa	胴に生じる軸方向応力の和
σ_{x2}	MPa	自重（空質量）により胴に生じる軸方向応力
σ_{x4}	MPa	設計竜巻による胴に生じる軸方向応力
σ_{xb}	MPa	曲げモーメントにより生じる圧縮応力
σ_{xc}	MPa	軸圧縮荷重により生じる圧縮応力
σ_ϕ	MPa	胴に生じる周方向応力の和
$\sigma_{\phi 1}$	MPa	水頭圧により胴に生じる周方向応力
τ	MPa	設計竜巻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	MPa	座屈応力 f_b を算出する際の関数
ϕ_c	MPa	座屈応力 f_c を算出する際の関数

3.2 評価対象部位

軽油タンクの評価対象部位は、VI-3-別添 1-1「竜巻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を踏まえ、「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する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

軽油タンクの胴板及び屋根板への設計飛来物の衝突を考慮し、軽油タンク胴板及び屋根板が貫通を生じないこと、また、終局状態に至るようなひずみが生じないことを確認するため、胴板及び屋根板を評価対象部位として選定する。

設計飛来物の衝突を考慮する場合、被衝突物の寸法が大きいほどたわみ量が大きくなる傾向にある。したがって、ひずみ評価における設計飛来物の衝突位置は、胴板及び屋根板の部材長さ（支持スパン）を踏まえ、胴板中央及び屋根板頂部とし、衝突方向は、胴板は水平方向、屋根板は鉛直方向とする。

(2) 構造強度評価の評価対象部位

設計竜巻の風圧力による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重は、胴板に作用し胴板を介して基礎ボルトに作用する。このことから、胴板及び基礎ボルトを評価対象部位とする。

軽油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。

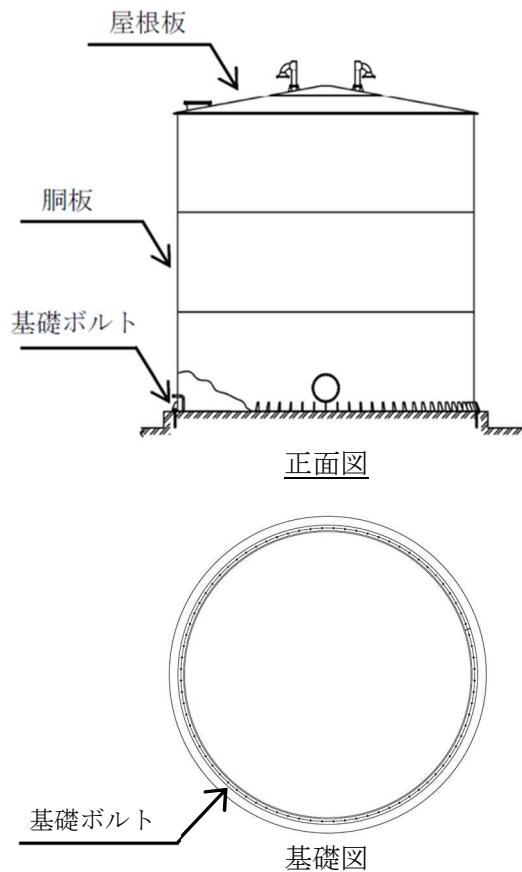


図 3-1 軽油タンクの評価対象部位

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、VI-3-別添1-1「竜巻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) 衝突評価の荷重及び荷重の組合せ

衝突評価においては、設計飛来物である足場パイプ及び鋼製足場板の衝突による影響が大きくなる向きで軽油タンクに衝突した場合の衝撃荷重を考慮する。

衝突評価（貫通）においては、考慮する設計飛来物として衝突断面積あたりの運動エネルギーが最大となる足場パイプを設定し、足場パイプの衝撃荷重を考慮する。また、評価対象部位に足場パイプが衝突した際に跳ね返らず、貫入する物として評価する。

衝突評価（ひずみ）においては、考慮する設計飛来物として運動エネルギーが最大となるように設定し、衝撃荷重を考慮する。運動エネルギーは、水平方向衝突の場合は鋼製足場板が最大であり、鉛直方向衝突の場合は足場パイプが最大となる。

設計飛来物の諸元を表3-3に、衝突評価の荷重の組合せを表3-4に示す。

表3-3 設計飛来物の諸元

設計飛来物の種類		足場パイプ	鋼製足場板
サイズ(m) 長さ×幅×奥行き		4×0.05×0.05	4×0.25×0.04
質量(kg)		11	14
最大水平速度(m/s)		42	55
最大鉛直速度(m/s)		38	18
運動エネルギー(kJ)	水平	10	21
	鉛直	8	3
衝突断面積あたりの 運動エネルギー(kJ/mm ²)	水平	0.0279	0.0021
	鉛直	0.0223	0.0003

表3-4 衝突評価の荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重の組合せ
屋外の外部事象 防護対象施設	軽油タンク	胴板 屋根板	設計飛来物の 衝撃荷重

(2) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の種類

(a) 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重として、持続的に生じる荷重である自重及び水頭圧を考慮する。た

だし，基礎ボルトの構造強度評価時には内溶液（軽油）の荷重は考慮せず，空容器での評価とする。

(b) 設計竜巻による荷重 (W_T)

設計竜巻による荷重として，風圧力による荷重，気圧差による荷重及び設計飛来物による衝撃荷重とする。

イ. 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重は，竜巻の風速による荷重であり，VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(1)b. (a) 風圧力による荷重」に従い，次式により算出する。

$$W_w = q \cdot G \cdot C \cdot A$$

ここで，

$$A = H \cdot D_d$$

ロ. 気圧差による荷重 (W_p)

軽油タンクは大気開放タンクであり気圧差による荷重は発生しないため，気圧差による荷重は考慮しない。

ハ. 設計飛来物による衝撃荷重 (W_M)

構造強度評価においては，次式の設計飛来物による衝撃荷重の算定式によって算出した運動エネルギーが最大となる鋼製足場板の衝撃荷重 $W_M = 1100\text{kN}$ を用いて評価を行う。

$$W_M = m \cdot V / \Delta t = m \cdot V^2 / L_1$$

ニ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_{T2} は，VI-3-別添 1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」の「4.1(2) 荷重の組合せ」に示す式に従い，次式により算出する。

$$W_{T2} = W_w + W_M$$

(c) 運転時に作用する荷重 (F_p)

配管にかかる内圧等の運転時荷重は考慮しない。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは，VI-3-別添 1-1「竜巻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」にて設定している荷重の組合せを踏まえ，軽油タンクの評価対象部位に対して設定する。

軽油タンクの胴板及び基礎ボルトには、自重、水頭圧、風圧力による荷重、及び設計飛来物による衝撃荷重が作用する。

構造強度評価の荷重の組合せを表 3-5 に示す。

表 3-5 構造強度評価の荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重の組合せ
屋外の外部事象 防護対象施設	軽油タンク	胴板	①自重、水頭圧 ②風圧力による荷重 ③設計飛来物による衝撃荷重
		基礎ボルト	①自重 ②風圧力による荷重 ③設計飛来物による衝撃荷重

3.4 許容限界

軽油タンクの許容限界は、VI-3-別添1-1「竜巻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に従って、「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、機能損傷モードを考慮し、評価内容ごとに評価対象部位に応じて設定する。

(1) 衝突評価の許容限界

a. 貫通

貫通評価における許容限界は、評価対象部位の公称板厚から設計上の必要最小板厚を差し引いた厚さとする。

設定した許容限界を表 3-6 に示す。

表 3-6 貫通評価の許容限界

		公称板厚 (mm)	設計上の 必要最小 板厚(mm)	許容限界
				公称板厚から設計上の 必要最小板厚を 差し引いた厚さ(mm)
軽油タンク	胴板	□	□	□
	屋根板		—	

b. ひずみ

ひずみ評価における許容限界は、鋼材の破断ひずみを設定する。破断ひずみについては、「3.5.1(2)d. 材料の非線形特性」に示すとおり、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI07-13」という。)においてTF (多軸性係数) を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF=□を考慮して設定する。

設定した許容限界を表 3-7 に示す。

表 3-7 ひずみ評価の許容限界

評価対象部位	材質	破断ひずみ*
胴板, 屋根板	□	□

注記* : 真ひずみ換算値

(2) 構造強度評価の許容限界

構造強度評価における許容限界は、J E A G 4 6 0 1 を準用し、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」の許容限界を適用し、許容応力状態Ⅲ_AS から算出した許容応力を許容限界とする。また、座屈については評価式を満足することを確認する。J E A G 4 6 0 1 に従い、J S M E 付録材料図表 Part5, 6 の表にて許容応力を算出する際は、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 J S M E 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。ただし、J S M E 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。

軽油タンクの許容限界について、胴板の許容限界を表 3-8 に、基礎ボルトの許容限界を表 3-9 に示す。

表 3-8 胴板の許容限界

許容 応力 状態	温度 条件 (°C)	許容限界		
		一次一般膜	組合せ一次	座屈
Ⅲ _A S	66*	$\text{Min}[S_y, 0.6 S_u]$	左欄に同じ	$\frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xc}}{f_c} + \frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xb}}{f_b} \leq 1$

注記*：最高使用温度

表 3-9 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。

$$f_{ts} = \text{Min} \{ 1.4 (1.5 f_t) - 1.6 \tau, 1.5 f_t \}$$

3.5 評価方法

3.5.1 衝突評価

(1) 貫通

軽油タンクの貫通評価は、VI-3-別添 1-1「竜巻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」にて設定している評価式を用いる。

設計飛来物が軽油タンクに衝突する場合の貫通限界厚さを、「タービンミサイル評価について（昭和 52 年 7 月 20 日原子炉安全専門審査会）」で用いられる BRL 式を用いて算出する。

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot m \cdot v^2}{1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

(2) ひずみ

軽油タンクのひずみ評価は、解析モデル及び材料の非線形特性を用いた衝突解析により評価する。なお、設計飛来物の短辺衝突による評価を実施する。

a. 解析モデル

(a) 設計飛来物

設計飛来物である足場パイプ及び鋼製足場板は、シェル要素でモデル化する。

設計飛来物の解析モデル図を図 3-2 に示す。

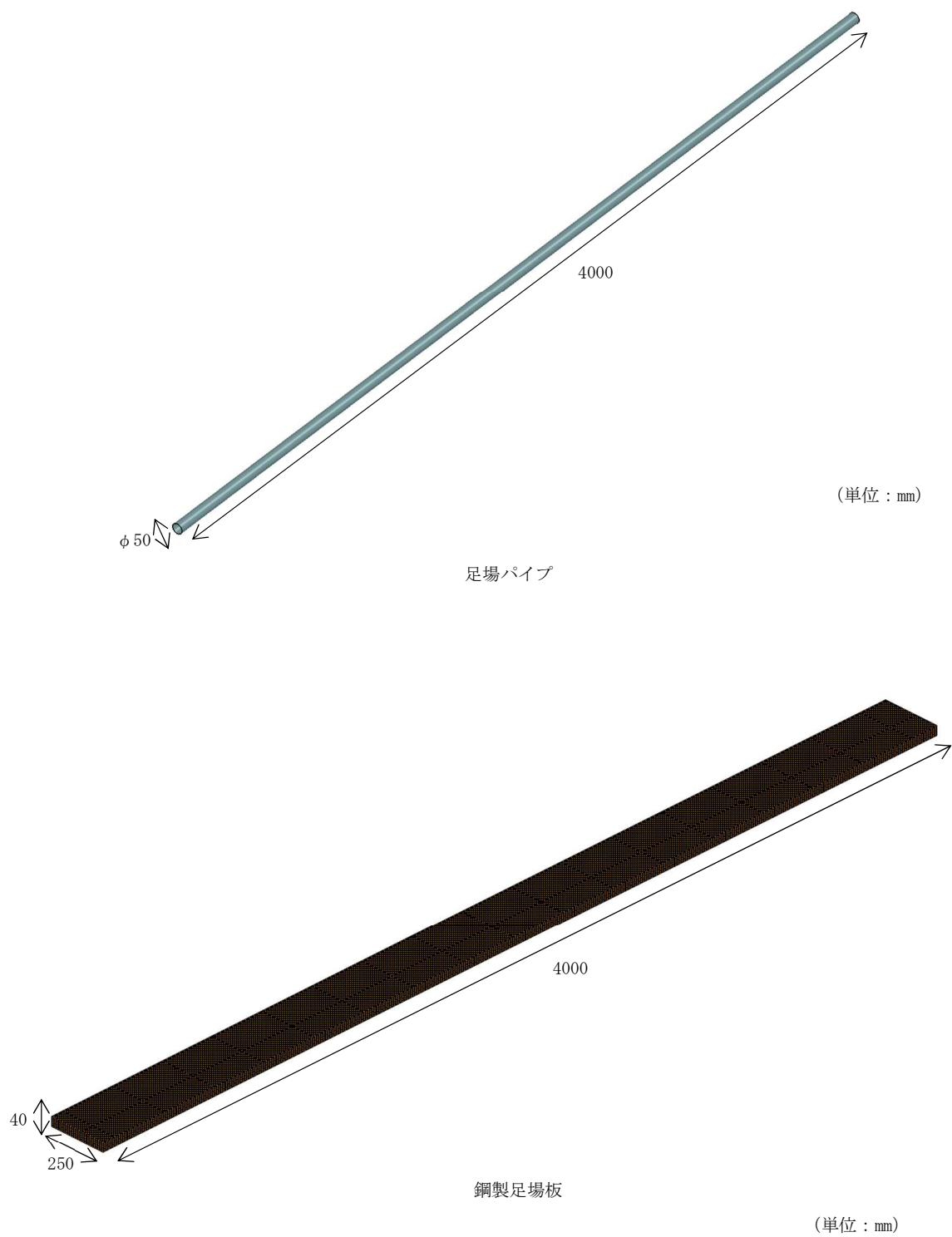


図 3-2 設計飛来物の解析モデル図

(b) 軽油タンク

軽油タンクの解析モデル化の範囲は、軽油タンクを構成する胴板、屋根板、コンプレッションリング、底板、アニュラー板、ラフタ、屋根板補強リング、補強材等をシェル要素でモデル化する。軽油タンクの解析モデルの境界条件を表 3-10 に、軽油タンクの解析モデル図を図 3-3 に示す。

表 3-10 解析モデルの境界条件

項目	境界条件
軽油タンクと軽油タンク基礎	X, Y, Z 方向並進拘束

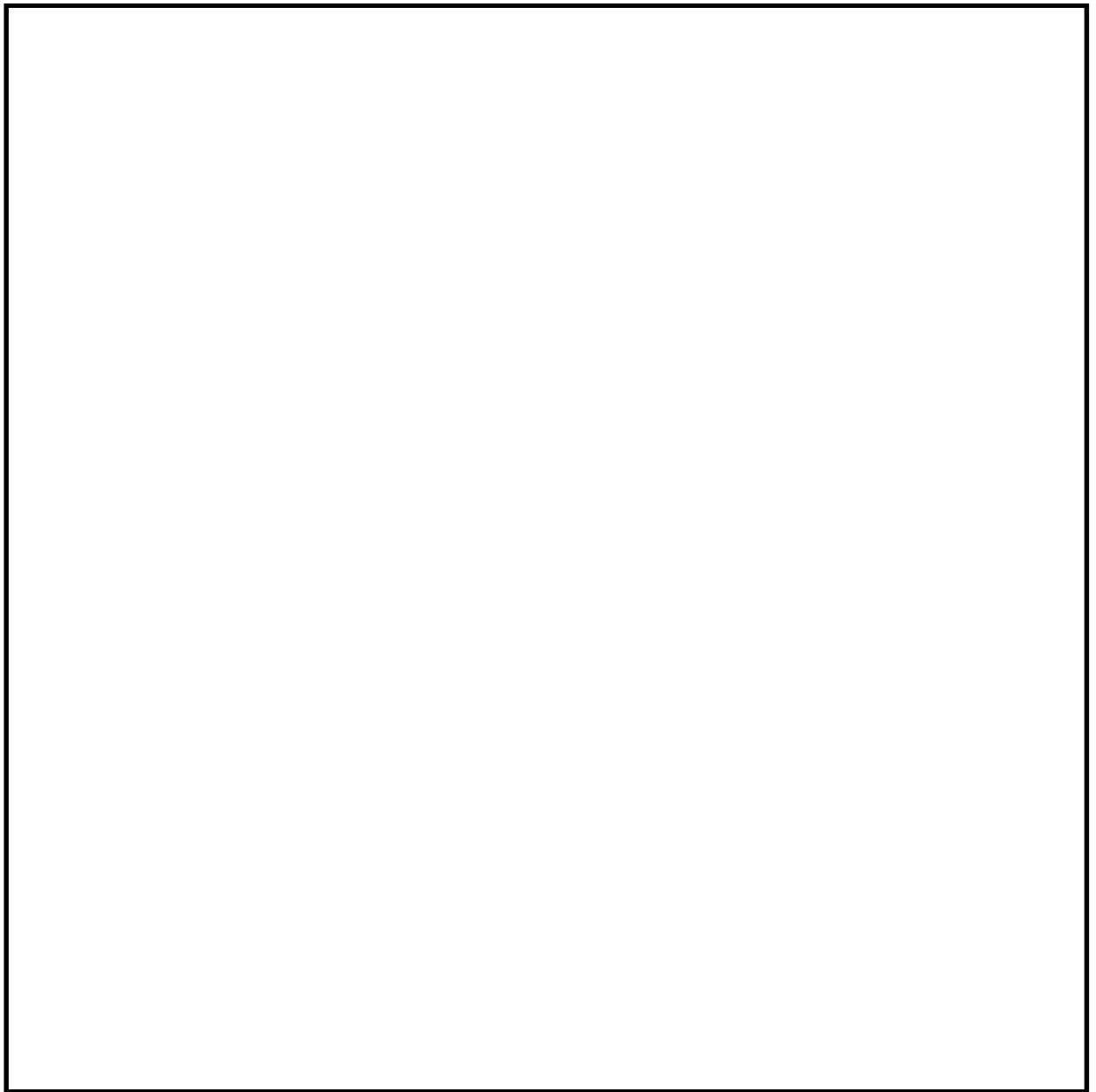


図 3-3 軽油タンクの解析モデル図

b. 解析コード

解析コード「LS-DYNA」を用いる。解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、別紙「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

c. 材料定数

軽油タンクのマテリアル定数を表 3-11 に示す。

表 3-11 軽油タンクのマテリアル定数

		材質	降伏応力 σ_y (MPa)	縦弾性係数 E (MPa)	塑性硬化係数 E' (MPa)	ポアソン 比
軽油 タンク	胴板, 屋根板, コンプレッ ションリング	[Blank area for material constants]				
	底板, 屋根板補 強リング					
	アニュラー板					
	ラフタ					
	補強材					

d. 材料の非線形特性

(a) 材料の応力-ひずみ関係

材料の応力-ひずみ関係は、バイリニア型とする。

材料に適用する応力-ひずみ関係の概念図を図 3-4 に示す。

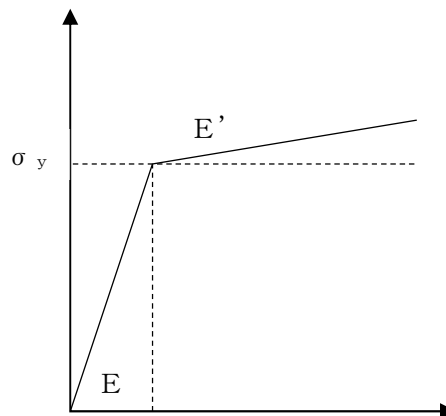


図 3-4 応力-ひずみ関係の概念図

(b) ひずみ速度効果

竜巻による設計飛来物に対する解析は、衝撃問題で変形速度が大きいいため、衝突時のひずみ速度による影響を Cowper-Symonds 式により考慮する。

$$\sigma_D = \sigma_s \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right\}$$

ここで、 σ_D は動的応力、 σ_s は静的応力、 $\dot{\epsilon}$ はひずみ速度、C及びpはひずみ速度依存性のパラメータである。

ひずみ速度依存性パラメータを表3-12に示す。

表3-12 ひずみ速度依存性パラメータ

	足場 パイプ	鋼製 足場板	軽油タンク				
			胴板, 屋根 板, コンブ レッション リング	底板, 屋根 板補強リン グ	アニュラー 板	ラフタ, 補強材	補強材
材質	STK500	SS400 (t ≤ 5)					
C (1/s)							
p							

(c) 破断ひずみ

胴板及び屋根板の破断ひずみは、JISに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、NEI07-13においてTF（多軸性係数）を□とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕としてTF = □を考慮する。

胴板及び屋根板の破断ひずみを表3-13に示す。

表3-13 破断ひずみ

評価対象部位	材質	JIS規格値 (下限値)	TF	破断ひずみ*
胴板, 屋根板				

注記*：真ひずみ換算値

3.5.2 構造強度評価

軽油タンクの構造強度評価は、VI-3-別添1-1「竜巻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」にて設定している評価式を用いる。

(1) 計算モデル

設計竜巻の風圧力による荷重，設計飛来物による衝撃荷重，水頭圧及び自重に対する，胴板及び基礎ボルトの構造強度を1質点系モデルとして計算を行う。ここで，風荷重の作用点は胴板高さの1/2とし，設計飛来物による衝撃荷重に対しては，胴板頂部を作用点として考慮する。軽油タンクのモデル図を図3-5に示す。

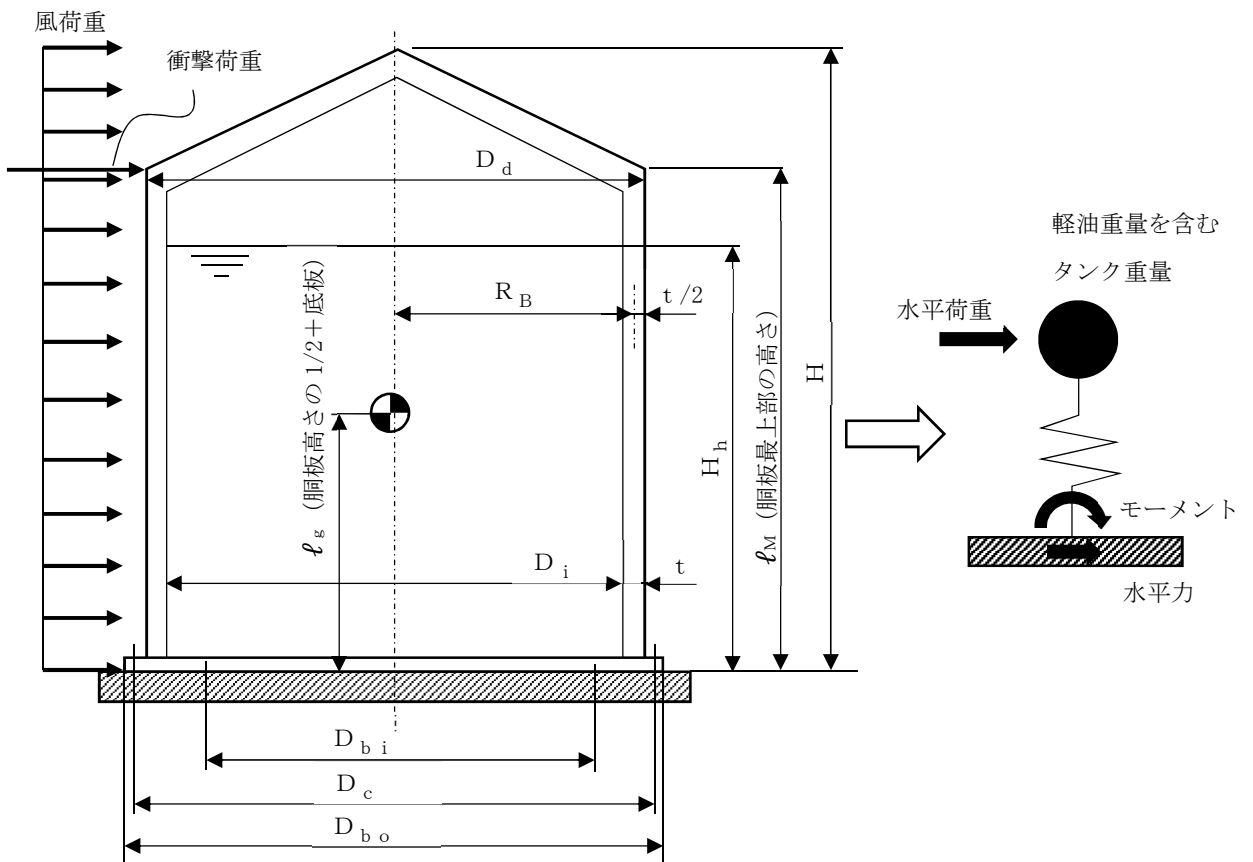


図3-5 軽油タンクモデル図

(2) 計算方法

- a. 設計竜巻により発生するモーメント

設計竜巻により作用するモーメント M_{T2} は以下のようにして計算する。

$$M_{T2} = W_W \cdot \ell_g + W_M \cdot \ell_M$$

- b. 胴に生じる応力

- (a) 水頭圧により胴に生じる周方向応力

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

- (b) 胴の自重（空重量）により胴に生じる軸方向応力

$$\sigma_{x2} = \frac{m_e \cdot g}{\pi (D_i + t) \cdot t}$$

- (c) 設計竜巻により胴に生じる応力

設計竜巻により胴に生じる軸方向応力

$$\sigma_{x4} = \frac{4M_{T2}}{\pi (D_i + t)^2 \cdot t}$$

設計竜巻により胴に生じるせん断応力

$$\tau = \frac{2W_{T2}}{\pi (D_i + t) \cdot t}$$

- (d) 組合せ応力

胴に生じる周方向応力の和

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

胴に生じる軸方向応力の和

$$\sigma_x = \sigma_{x2} + \sigma_{x4}$$

胴に生じる組合せ一次応力

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left\{ (\sigma_x + \sigma_{\phi}) + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_{\phi})^2 + 4\tau^2} \right\}$$

- (e) 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

$$\sigma_{xc} = \sigma_{x2}$$

曲げモーメントにより生じる圧縮応力

$$\sigma_{xb} = \sigma_{x4}$$

- c. 胴板の座屈評価

胴板について、以下の式にて座屈評価を行う。

$$\frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xc}}{f_c} + \frac{\alpha_1 \cdot \sigma_{xb}}{f_b} \leq 1$$

- (a) 軸圧縮荷重により生じる座屈応力 f_c

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

$$\text{ここで、} \phi_c(\eta_B) = 0.6 \frac{E}{\eta_B} \left[1 - 0.901 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\eta_B}\right) \right\} \right]$$

- (b) 曲げモーメントにより生じる座屈応力 f_b

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

$$\text{ここで、} \phi_b(\eta_B) = 0.6 \frac{E}{\eta_B} \left[1 - 0.731 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16} \sqrt{\eta_B}\right) \right\} \right]$$

- (c) 安全率 α_1

安全率は、各荷重の組合せに対して

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

$$\text{ここで、} \eta_B = \frac{R_B}{t}, \quad \eta_1 = 1200 \cdot g / F,$$

$$\eta_2 = 8000 \cdot g / F, \quad \eta_3 = 9600 \cdot g / F$$

d. 基礎ボルト評価

(a) 基礎ボルトに生じるせん断応力

$$\tau_b = \frac{W_{T2}}{n \cdot A_b}$$

(b) 基礎ボルトに生じる引張応力

基礎ボルトに引張力が発生しないのは、 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 F_t 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断する。

- ・ $F_t \leq 0$ ならば、引張力は作用しない。
- ・ $F_t > 0$ ならば、引張力は作用しているので以降の計算を行う。

転倒モーメント M_{T2} 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、荷重と変位量の釣り合い条件を考慮することにより求める。基礎の荷重説明図を図3-6に示す。

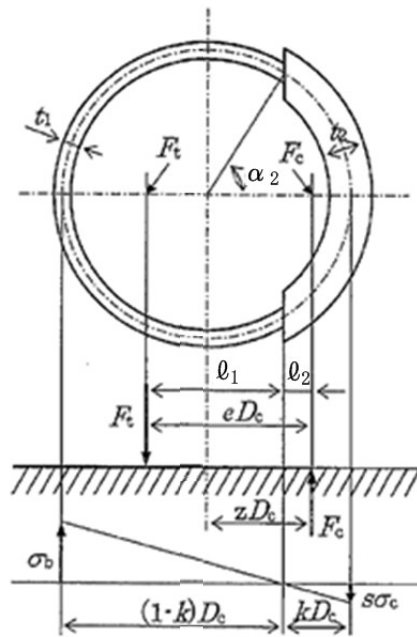


図3-6 基礎の荷重説明図 (J E A G 4 6 0 1-1987 より抜粋)

イ. σ_b , σ_c を仮定して係数 k を求める。

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

ロ. α_2 を求める。

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

ハ. 各定数 e , z , C_t 及び C_c を求める。

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

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

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

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

ニ. 各定数を用いて F_t , F_c を求める。

$$F_t = \frac{M_{T2} - m_e \cdot g \cdot z \cdot D_c}{e \cdot D_c}$$

$$F_c = F_t + m_e \cdot g$$

ホ. σ_b , σ_c を求める。

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

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

ここで,

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

$$t_2 = \frac{1}{2} (D_{b_o} - D_{b_i}) - t_1$$

4. 評価条件

4.1 衝突評価

(1) 貫通

「3. 強度評価方法」のうち，貫通評価に用いる評価条件を表 4-1 に示す。

表 4-1 貫通評価に用いる評価条件

d (m)	K (—)	m (kg)	v (m/s)	
			水平方向	鉛直方向
0.021	1.0	11	42	38

(2) ひずみ

軽油タンクのひずみ評価は，軽油タンクの最大変形が生じると想定される胴板中央，屋根板頂部に衝突するケースを設定する。

解析ケースを表 4-2 及び図 4-1 に示す。

表 4-2 解析ケース

衝突箇所		設計飛来物	衝突方向
軽油タンク	胴板中央	鋼製足場板	水平方向
	屋根板頂部	足場パイプ	鉛直方向

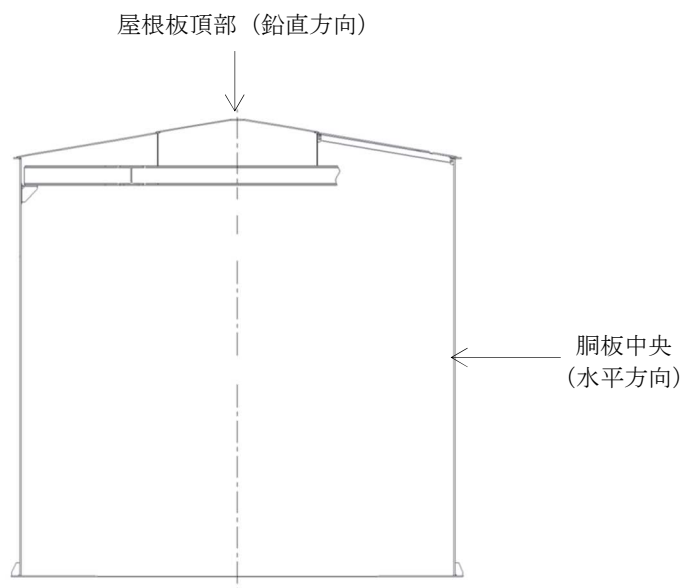


図 4-1 解析ケース

4.2 構造強度評価

「3. 強度評価方法」のうち、構造強度評価に用いる評価条件を表 4-3 及び表 4-4 に示す。

表 4-3 許容応力に用いる評価条件

材料	温度 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	$1.5f_t$ (MPa)	$1.5f_s$ (MPa)
□ (胴板)	66	□	□	□	—	—
□ (基礎ボルト)	40	□	□	□	□	□

表 4-4 評価条件

据付場所及び 床面高さ (m)*	構造概要	最高使用圧力	ρ (—)	g (m/s)
屋外 T. M. S. L. 12.5	平底たて置 円筒形	大気圧	0.86	9.80665

q (N/m ²)	G (—)	C (—)	H (mm)	D _d (mm)
5188.43	1.0	1.2	10391.5	10144

W_w (N)	W_M (N)	W_{T2} (N)
6.56×10^5	1.10×10^6	1.76×10^6

m_e (kg)	D _i (mm)	t (mm)	ℓ_g (mm)	ℓ_M (mm)	H _h (mm)
□	9800	□	4922	9522	7495

α_1 (—)	R _B (mm)	E (N/mm ²)	n (本)	ボルト サイズ	A _b (mm ²)
1.142	4918	□	□	□	□

s (—)	D _c (mm)	D _{bo} (mm)	D _{bi} (mm)
9	10050	10250	9250

注記*：基準床レベルを示す。

5. 強度評価結果

5.1 衝突評価

(1) 貫通

貫通の評価結果を表 5-1 に示す。

胴板及び屋根板の許容限界は、設計飛来物による貫通を生じない貫通限界厚さを上回っており、貫通しない。

表 5-1 貫通評価結果

評価部位	衝突方向	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
胴板	水平	17	
屋根板	鉛直	15	

(2) ひずみ

ひずみの評価結果を表 5-2 及び図 5-1, 図 5-2 に示す。

胴板及び屋根板に発生するひずみは許容限界を超えない。

表 5-2 ひずみ評価結果

評価部位	衝突位置	ひずみ	
		評価結果	許容限界
胴板	胴板中央		
屋根板	屋根板頂部		



図 5-1 軽油タンクのひずみ分布図 (胴板)

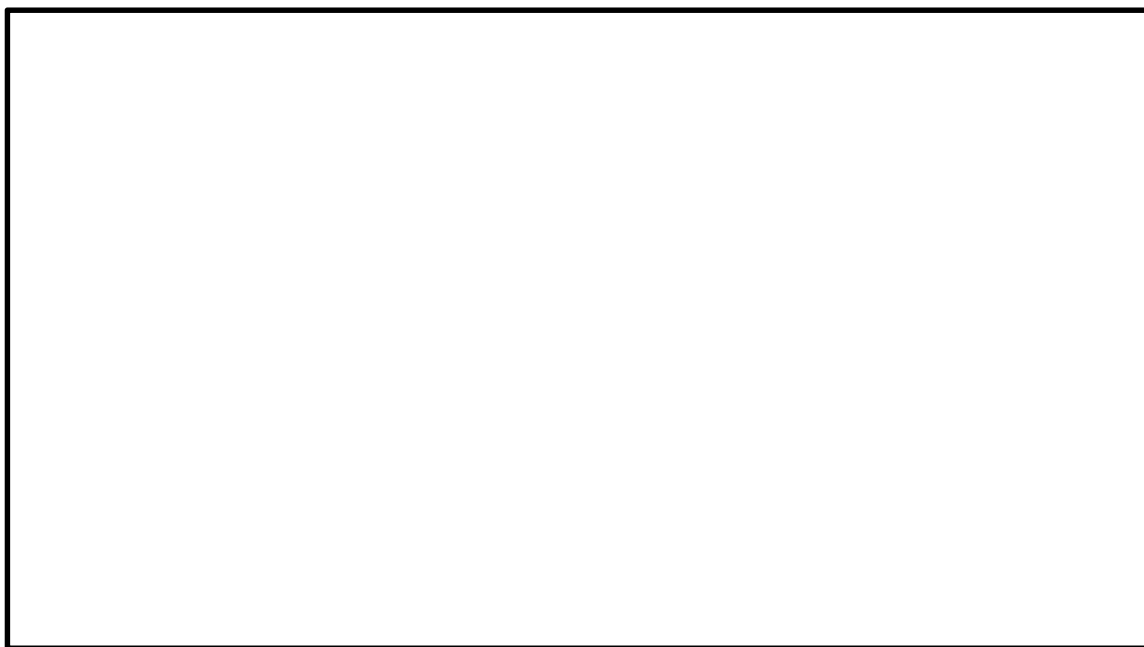


図 5-2 軽油タンクのひずみ分布図 (屋根板)

5.2 構造強度評価

構造強度評価結果を表 5-3 に示す。

胴板、基礎ボルトに発生する応力は許容限界以下であり、また、座屈の評価の条件式を満足している。

表 5-3 構造強度評価結果

評価部材	材料	応力	発生応力	許容限界
胴板	□	一次一般膜	11 MPa	□ MPa
		組合せ一次	11 MPa	□ MPa
		圧縮と曲げの組合せ (座屈の評価)	0.0346	1.0
基礎ボルト	□	引張	14 MPa	□ MPa
		せん断	11 MPa	□ MPa
		組合せ	14 MPa	□ MPa