

本資料のうち、枠囲みの内容は、営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	工認-091 改 24
提出年月日	平成 30 年 6 月 22 日

V-3-別添 1 竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書

目次

V-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

V-3-別添 1-1-1 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算書

V-3-別添 1-1-2 残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書

V-3-別添 1-1-3 残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書

V-3-別添 1-1-4 排気筒の強度計算書

V-3-別添 1-1-5 換気空調設備の強度計算書

V-3-別添 1-1-6 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書

V-3-別添 1-1-7 ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度計算書

V-3-別添 1-1-8 ディーゼル発電機吸気口の強度計算書

V-3-別添 1-1-9 配管及び弁の強度計算書

V-3-別添 1-1-10 波及的影響を及ぼす可能性がある施設の強度計算書

V-3-別添 1-1-10-1 建屋及び構造物の強度計算書

V-3-別添 1-1-10-2 消音器の強度計算書

V-3-別添 1-1-10-3 排気管、放出管及びベント管の強度計算書

V-3-別添 1-2 防護対策施設の強度計算の方針

V-3-別添 1-2-1 防護対策施設の強度計算書

V-3-別添 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書

V-3-別添 1-2-1-2 防護鋼板の強度計算書

V-3-別添 1-2-1-3 架構の強度計算書

V-3-別添 1-3 屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算の方針

V-3-別添 1-3-1 屋外重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算書

：今回ご説明分

V-3-別添 1-1-2 残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書

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.....	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.....	10
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	13
3.4 許容限界.....	15
3.5 評価方法.....	17
4. 評価条件.....	30
5. 強度評価結果.....	34

1. 概要

本資料は、V-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、残留熱除去系海水系ポンプが竜巻時及び竜巻通過後においても、送水機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

残留熱除去系海水系ポンプについて、V-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、残留熱除去系海水系ポンプの「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

残留熱除去系海水系ポンプは、V-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、屋外の海水ポンプ室に設置する。

海水ポンプ室の位置図を図2-1に示す。

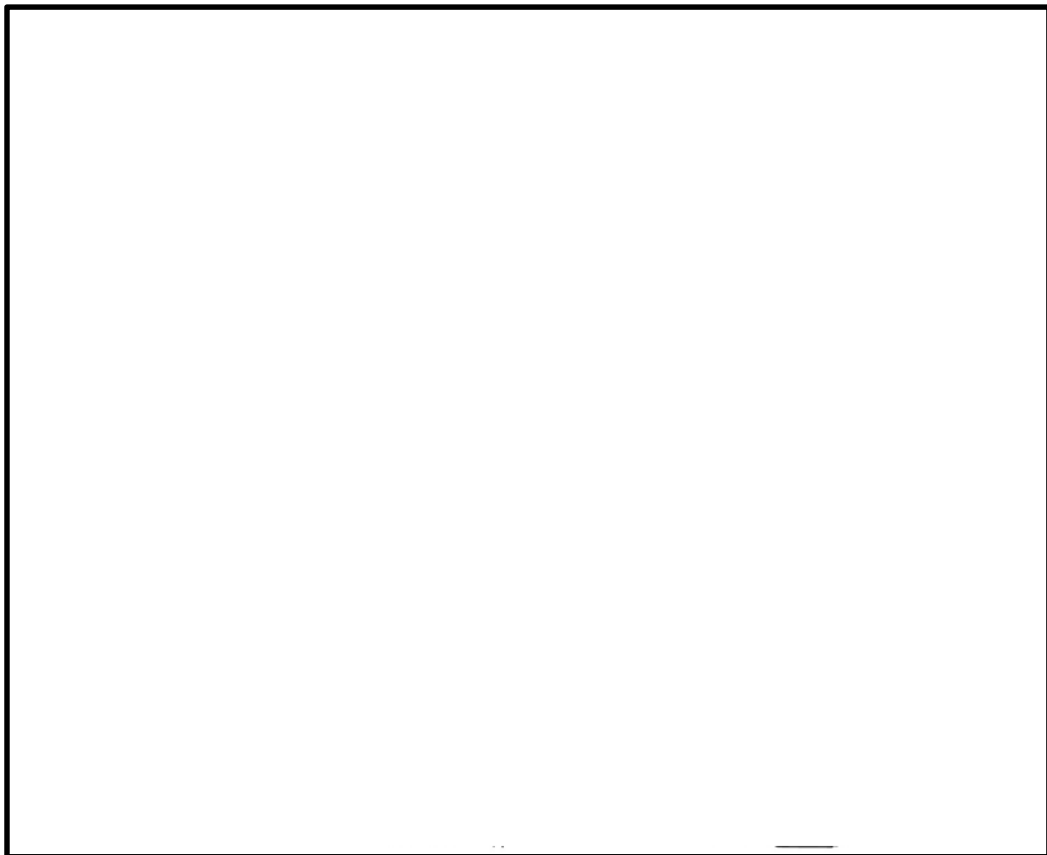


図 2-1 海水ポンプ室の位置図

2.2 構造概要

残留熱除去系海水系ポンプについて、V-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、残留熱除去系海水系ポンプの構造を示す。

残留熱除去系海水系ポンプは、ポンプ据付面から原動機台までのポンプ部と、原動機台より上部の原動機部からなる立形ポンプであり、同一設計の残留熱除去系海水系ポンプを4台設置している。残留熱除去系海水系ポンプの概要図を図2-2に示す。

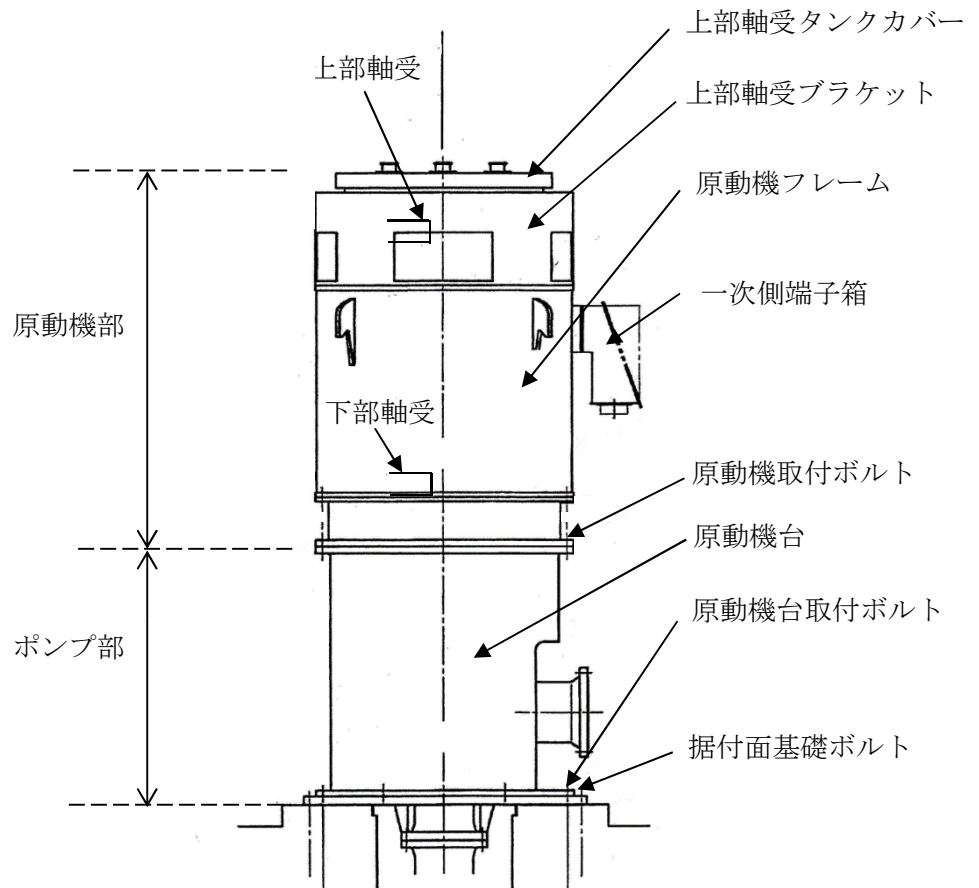


図2-2 残留熱除去系海水系ポンプの概要図

2.3 評価方針

残留熱除去系海水系ポンプの強度評価は、V-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、残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位に作用する貫入及び応力等が、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。

残留熱除去系海水系ポンプ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。

(1) 衝突評価の評価方針

残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価フローを図2-3に示す。衝突評価においては、竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さ未満であることを確認する。衝突評価では、「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）」で用いられている式を準用し、V-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. 強度評価方法」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価における許容限界は、V-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 許容限界」に示す許容限界である、外殻を構成する部材の厚さとする。

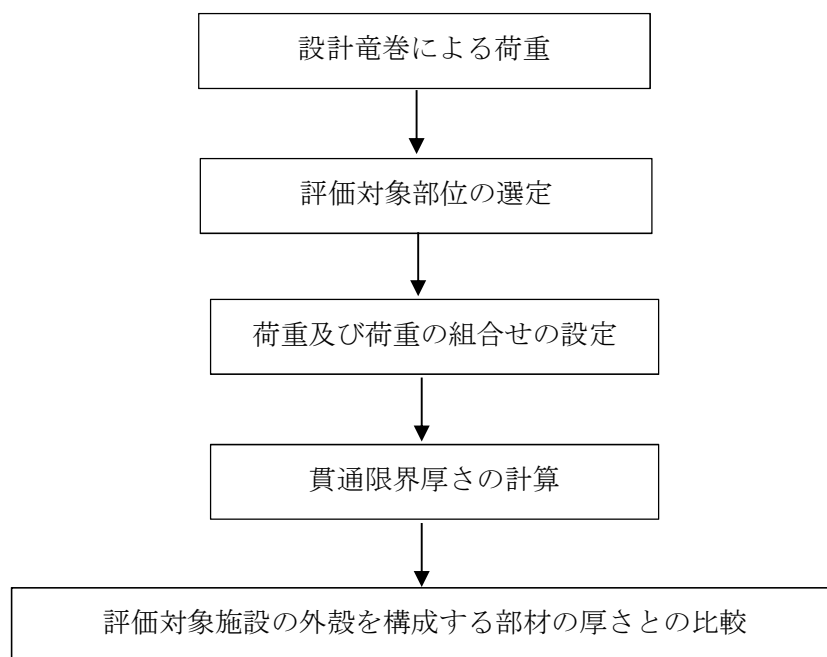


図2-3 残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価フローを図2-4に示す。構造強度評価においては、残留熱除去系海水系ポンプに対して、設計竜巻による荷重に運転時の状態で作用する荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同等なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）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」（（社）日本電気協会）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」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-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」に示す立形ポンプの評価式

を用いる。

残留熱除去系海水系ポンプの**構造**強度評価における許容限界は、V-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、J E A G 4 6 0 1 の許容応力状態Ⅲ_AS とする。

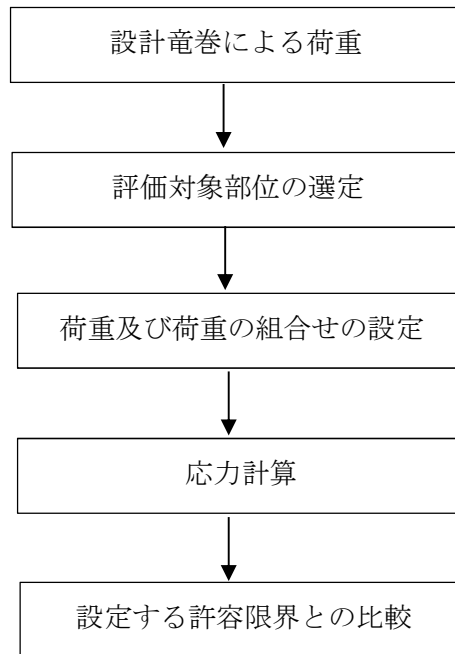


図2-4 残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価フロー

(3) 動的機能維持評価の評価方針

残留熱除去系海水系ポンプの動的機能維持評価フローを図 2-5 に示す。残留熱除去系海水系ポンプは動的機器であるため、構造強度評価に加え、軸受部の動的機能維持評価を行う。動的機能維持評価においては、**残留熱除去系海水系**ポンプ据付面から上部の受圧面積が大きくなる方向から風が当たることを想定し、設計竜巻の風圧力による荷重を受けた際のフレーム変位により生じる軸受荷重が接触面圧の許容荷重以下であることを確認する。動的機能維持評価では、V-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**残留熱除去系海水系**ポンプの評価式を用いる。**残留熱除去系海水系**ポンプの動的機能維持評価における許容限界は、V-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、軸受部の接触面圧の許容荷重とする。

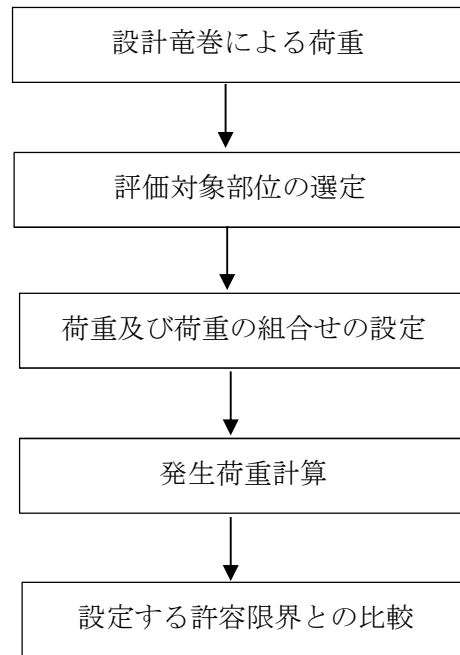


図2-5 残留熱除去系海水系ポンプの動的機能維持評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「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）」
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「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」（社）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」（社）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」（社）日本電気協会
- ・「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」（社）日本機械学会（以下「J S M E」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	評価において考慮する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	評価において考慮する飛来物の質量
T	mm	鋼板の貫通限界厚さ
v	m/s	評価において考慮する飛来物の飛来速度

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の記号の定義

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号を表3-2及び表3-3に示す。

表3-2 構造強度評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A _b	mm ²	ボルトの断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
D	mm	原動機フレーム外径
d	mm	原動機フレーム内径
F	MPa	J SME SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	ボルトに作用する引張力
F _H	N	ボルトに作用するせん断力
F _i	N	各ボルトに作用する引張力
f _s	MPa	J SME SSB-3121.1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
f _t	MPa	J SME SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度
H	N	自重による荷重

表3-2 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
h	mm	基準面からの重心距離
h_u	mm	基準面から上端カバー上端までの高さ
L	mm	重心と支点間の距離
L_H	mm	重心と支点間の距離
L_i	mm	各ボルト間の距離
$L_1 \sim L_8$	mm	支点と評価ボルト間の距離
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
m	kg	質量
N	—	ボルトの本数
q	N/m ²	設計用速度圧
S_y	MPa	J S ME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
S_u	MPa	J S ME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
W_{T1}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T1} = W_P$)
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2} = W_W + 0.5 \cdot W_P + W_M$)
W_M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W_P	N	設計竜巻の気圧差による荷重
W_W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
Z	mm ³	断面係数
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
π	—	円周率
σ	MPa	原動機フレームの曲げ応力
σ_{bt}	MPa	ボルトの引張応力
τ	MPa	せん断応力

表3-3 動的機能維持評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積)
a	mm	部材間の長さ
a ₁	mm	ポンプ据付面から原動機台上端までの長さ
a ₂	mm	原動機台上端から原動機下部軸受までの長さ
a ₃	mm	原動機台上端から荷重作用点までの長さ
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
E	MPa	縦弾性係数
E _m	MPa	原動機フレームの縦弾性係数
E _p	MPa	原動機台の縦弾性係数
E _m '	MPa	回転子の縦弾性係数
G	—	ガスト影響係数
h'	mm	基準点から作用点までの距離
h ₁ '	mm	ポンプ据付面から荷重作用点までの距離
h ₂ '	mm	原動機下部軸受から荷重作用点までの距離
h ₃ '	mm	荷重作用点から荷重作用点までの距離
I	mm ⁴	断面二次モーメント
I _m	mm ⁴	原動機フレームの断面二次モーメント
I _m '	mm ⁴	回転子の断面二次モーメント
I _p	mm ⁴	原動機台の断面二次モーメント
i	rad	傾斜
i ₁	rad	ポンプ据付面から原動機台上端部の傾斜
i ₃	rad	原動機台上端部から荷重作用点の傾斜
i ₄	rad	荷重作用点の傾斜
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _a	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _b	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _c	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
q	N/m ²	設計用速度圧
W _T	N	設計竜巻による複合荷重
W _{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 (W _{T2} = W _w + 0.5・W _p + W _M)
W'	N	たわみ量及び発生荷重計算において設計竜巻による風圧を受ける面それぞれのW _{T2} の合計の複合荷重
W''	N	発生荷重
W _M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重

表3-3 動的機能維持評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
W_P	N	設計竜巻の気圧差による荷重
W_W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
x	mm	荷重作用点から評価対象部位までの距離
x'	mm	評価対象部から支点までの距離
x_a'	mm	ポンプグランド部から原動機下部軸受部までの距離
x_b'	mm	原動機下部軸受部から原動機上部軸受部までの距離
y	mm	たわみ量
y_1	mm	ポンプ据付面から原動機台上端部のたわみ量
y_2	mm	原動機台上端部から原動機下部軸受部のたわみ量
y_3	mm	原動機台上端部から荷重作用点のたわみ量
y_4	mm	荷重作用点のたわみ量
y_5	mm	荷重作用点から原動機上部軸受部のたわみ量
y_a	mm	原動機下部案内軸受部のたわみ量
y_b	mm	原動機上部案内軸受部のたわみ量
δ	mm	フレーム変位量
ΔP	N/m^2	設計竜巻の気圧低下量

3.2 評価対象部位

残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位は、V-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 許容限界」にて示す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選定する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

評価において考慮する飛来物の衝突により、海水ポンプに衝撃荷重が作用し貫入する可能性があるため、貫入によりその施設の機能が喪失する可能性のある箇所を評価対象部位として選定する。

残留熱除去系海水系ポンプ地上部の全方向からの飛来物を考慮し、貫入により施設の機能が喪失する可能性がある箇所として最薄部となる一次側端子箱を選定する。

残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価における評価対象部位を図3-1に示す。

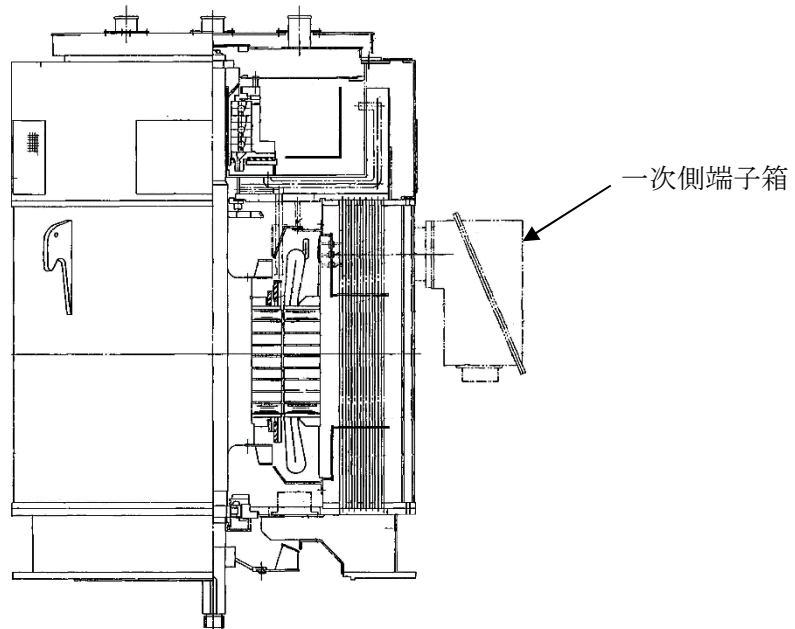


図3-1 残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位（衝突評価）

(2) 構造強度評価の評価対象部位

a. ポンプ部

ポンプ部について、原動機部等に作用する設計竜巻による荷重は、原動機フレーム及び原動機台に作用し、原動機台を介して、基礎面及び原動機部を固定しているボルトに作用する。荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じることになる。

このことから、以下の部位を構造強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機取付ボルト
- ・原動機台取付ボルト
- ・据付面基礎ボルト

b. 原動機部

原動機部について、原動機部等に作用する**設計竜巻**による荷重は、原動機フレーム及び付属品に作用し、原動機フレーム及び付属品を介して、付属品の取付部を固定するボルトに作用する。

このことから、以下の部位を**構造強度評価**の評価対象部位として選定する。

- ・原動機フレーム
- ・一次側端子箱取付ボルト
- ・上部軸受ブラケット取付ボルト
- ・上部軸受タンクカバー取付ボルト

残留熱除去系海水系ポンプの**構造強度評価**における評価対象部位を図3-2、図3-3に示す。

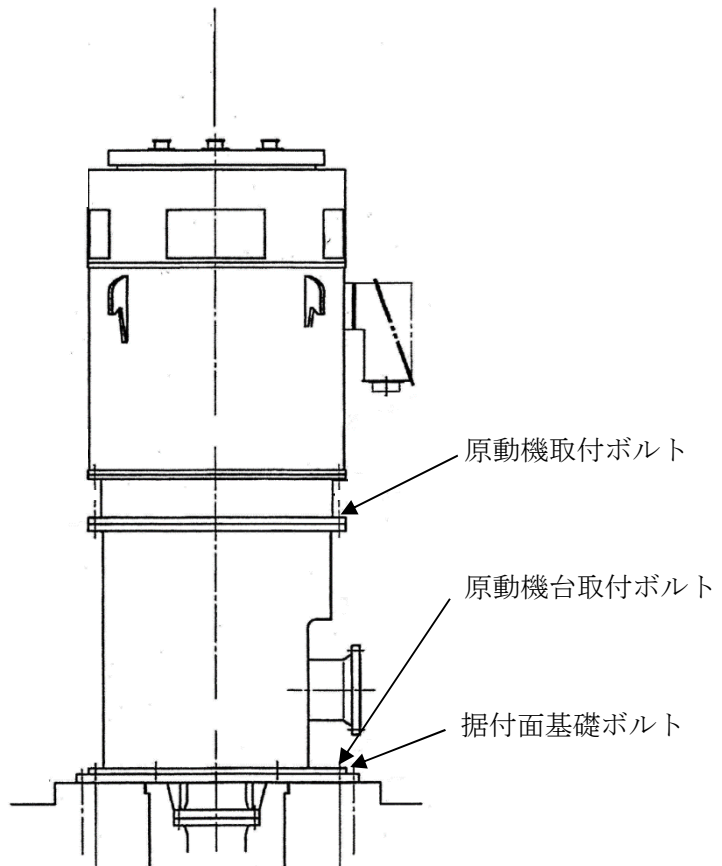


図3-2 残留熱除去系海水系ポンプの**構造強度**評価対象部位図（ポンプ部）

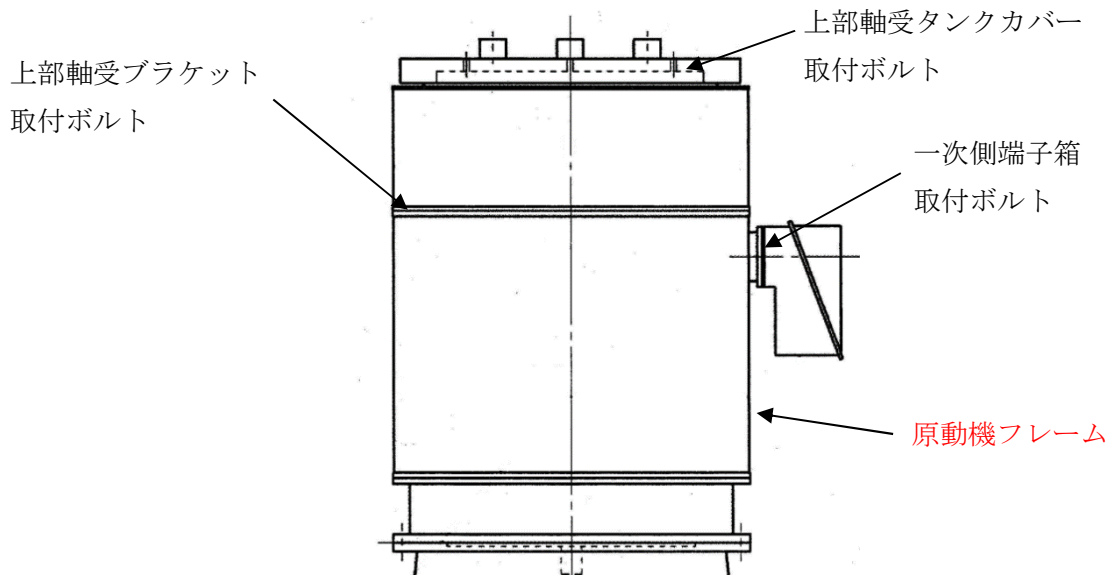


図 3-3 残留熱除去系海水系ポンプの**構造強度**評価対象部位図（原動機部）

(3) 動的機能維持評価の評価対象部位

ポンプ据付面より上部に竜巻により荷重を受けた際に、原動機フレーム等が変位することにより軸と軸受が接触した場合に動的機能維持が困難となるため、以下の部位を動的機能維持評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機下部軸受部
- ・原動機上部軸受部

残留熱除去系海水系ポンプの動的機能維持評価における評価対象部位を図 3-4 に示す。

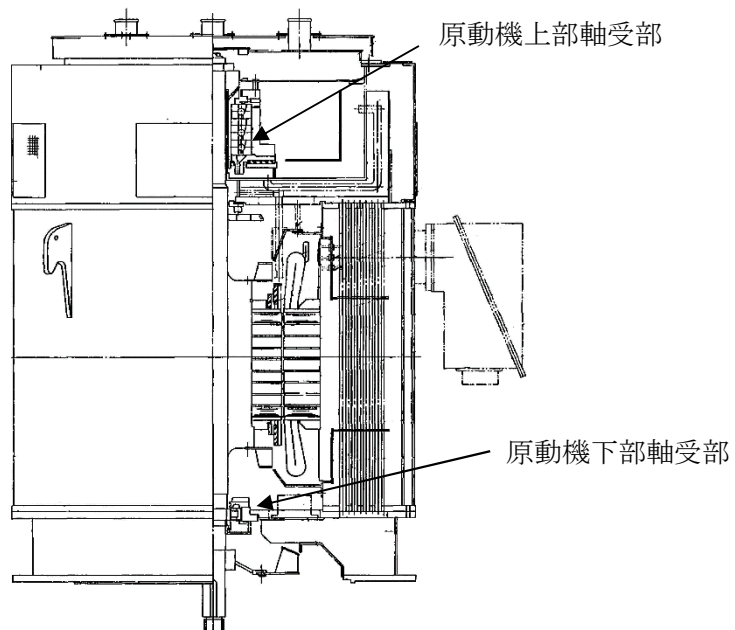


図 3-4 残留熱除去系海水系ポンプ動的機能維持評価対象部位概略図

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、V-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考慮する飛来物として竜巻防護ネット（ネットの網目寸法40(mm)）をすり抜ける砂利を設定し、砂利の衝撃荷重を考慮する。

衝突評価においては、評価対象部位に砂利が衝突した際に跳ね返らず、貫入するものとして評価する。

砂利の諸元を表3-4、残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価に用いる荷重を表3-5に示す。

表3-4 砂利の諸元

飛来物	d (m)	K (-)	M (kg)	v (m/s)	
				水平方向	鉛直方向
砂利	0.04	1.0	0.18	62	42

表3-5 残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価に用いる荷重

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の防護対象施設	残留熱除去系海水系ポンプ	一次側端子箱	飛来物による衝撃荷重

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。

(a) 常時作用する荷重

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を考慮する。

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$H = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重，気圧差による荷重を考慮する。防護ネット及び防護鋼板等による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。また、極小飛来物である砂利による衝撃は瞬間的で、衝突時間が極めて短く、衝突される機器へ伝わる加速度が小さいことから、機器へ作用する荷重は構造強度に影響を与えないので設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

イ. 風圧力による荷重(W_w)

風圧力による荷重 W_w はV-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(3)c.(a) 風圧力による荷重」に示す式に従い、算出する。

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

ロ. 気圧差による荷重(W_P)

気圧差による荷重 W_P はV-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(3)c. (b) 気圧差による荷重」に示す式に従い、算出する。

$$W_P = \Delta P \cdot A$$

ハ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_T (W_{T1} , W_{T2})はV-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、算出する。なお、残留熱除去系海水系ポンプは気圧差が生じ難い構造であるため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5W_P + W_M$$

(c) 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重としては、鉛直下向きに作用するポンプスラスト荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、V-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、残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位ごとに設定する。

ボルト材の**構造**強度評価時に評価対象部位が鉛直方向に取り付けられており、自重が抗力となる場合は保守的に考慮せず、水平方向に取り付けられている場合（一次側端子箱取付ボルト）は、端子箱自重を考慮する。また、運転時荷重が作用する評価対象部位は全て鉛直方向に取り付けられており、運転時荷重は鉛直方向下向きに作用し抗力となるため、それぞれの構造強度評価を行う際の荷重としては保守的に考慮しない。

残留熱除去系海水系ポンプの評価対象部位に作用する荷重及び強度評価にて考慮する荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位		荷重	
屋外の外部事 象防護対象施 設	残留熱除去系 海水系ポンプ	構造 強度 評価	ポンプ部	原動機取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				原動機台取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				据付面基礎ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
			原動機部	原動機フレーム	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				一次側端子箱取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③端子箱自重
				上部軸受ブラケット取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
		上部軸受タンクカバー取付ボルト		①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	
		動的 機能 維持 評価	原動機上部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	
			原動機下部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重	

NT2 補② V-3-別添 1-1-2 R4

3.4 許容限界

残留熱除去系海水系ポンプの許容限界は、V-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」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、外殻を構成する部材の厚さ、J E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力及び軸受の接触面圧の許容荷重を用いる。

(1) 衝突評価における許容限界

衝突評価における許容限界は、評価において考慮する飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認するため、評価式により算定した貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さ未満であることを許容限界とする。残留熱除去系海水系ポンプの外殻を構成する部材の厚さを表3-7に示す。

表3-7 残留熱除去系海水系ポンプの外殻を構成する部材の厚さ

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ
残留熱除去系海水系ポンプ	2.3mm (一次側端子箱)

(2) 構造強度評価における許容限界

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、「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。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計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又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。

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価における許容限界について、表3-8に示す。

表3-8 残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価における許容限界

評価対象部位	許容応力状態	応力の種類		許容限界
ボルト	Ⅲ _A S	一次応力	引張	$1.5 f_t$
			せん断	$1.5 f_s$
			組合せ	$\text{Min} \{1.5 f_t, (2.1 f_t - 1.6 \tau)\}$
原動機フレーム	Ⅲ _A S	一次応力	曲げ	$1.5 f_b$

(3) 動的機能維持評価における許容限界

動的機能維持評価における許容限界は、設計荷重により原動機フレームが変形する場合においても残留熱除去系海水系ポンプの運転継続が可能であるように、軸受の接触面圧の許容荷重を許容限界とする。

軸受の接触面圧の許容荷重を表3-9に示す。

表3-9 軸受の接触面圧の許容荷重

評価対象部位	許容荷重 (N)
原動機上部軸受部	□
原動機下部軸受部	□

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

残留熱除去系海水系ポンプの衝突評価は、V-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. 強度評価方法」にて設定している衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。

飛来物が防護対象施設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）」で用いられている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) 構造強度評価及び動的機能維持評価の評価方法

残留熱除去系海水系ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価は、V-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. 強度評価方法」にて設定している立形ポンプの評価式を用いる。

a. 計算モデル

(a) 構造強度評価

計算モデルは1質点系モデルとし、ポンプ部は全高の1/2の位置に、原動機部は風圧力による荷重の作用中心と同等、あるいはより高い重心作用位置に複合荷重が作用することとする。また、設計竜巻による風荷重はそれぞれの評価対象部位に対して発生応力が大きくなる方向から当たるものとする。ポンプ部及び原動機部の応力の計算モデル図を図3-5及び図3-6に示す。

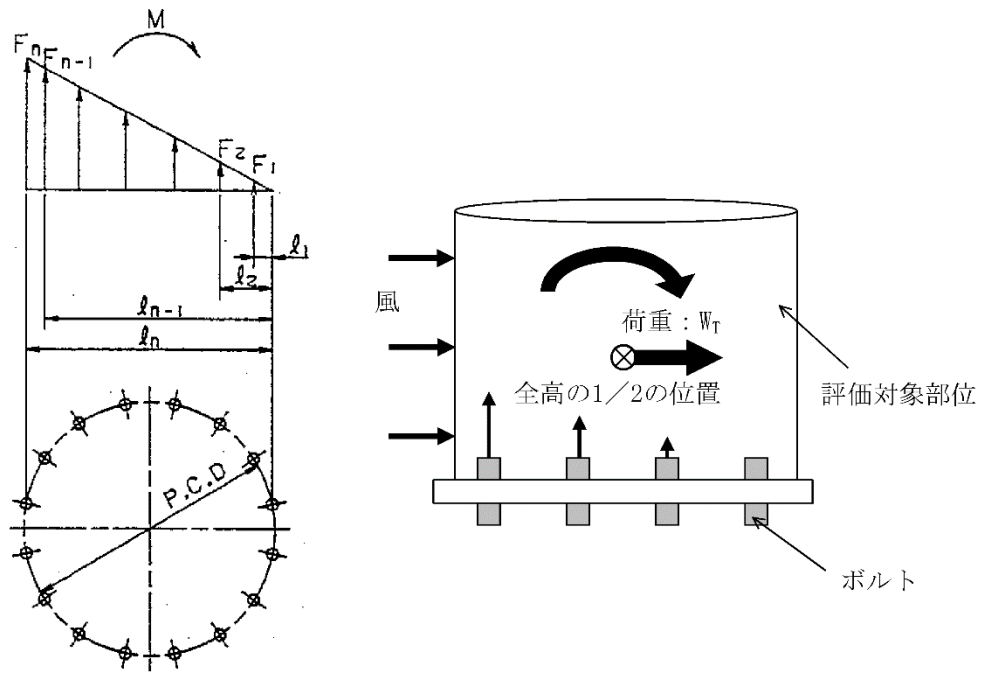


図 3-5 応力の計算モデル図 (ポンプ部)

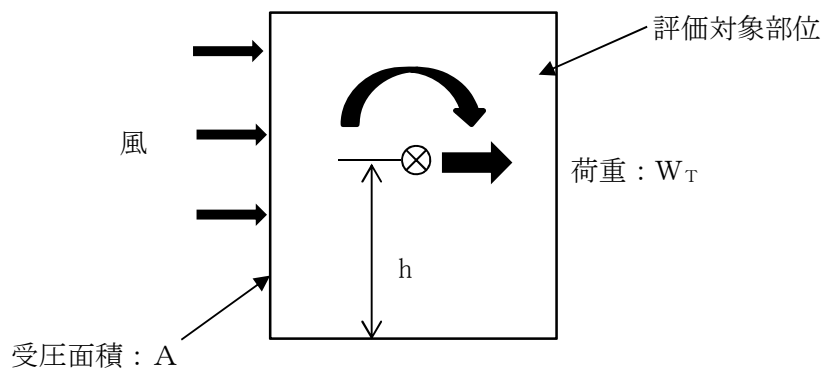


図 3-6 応力の計算モデル図 (原動機部)

(b) 動的機能維持評価

動的機能維持評価の際の原動機フレームのたわみ量計算において、ポンプ据付面から原動機台上端まで（ポンプ部）と、原動機台上端から原動機まで（原動機部）の片持ち梁と考え、違う断面性能の一軸中空形モデルで、荷重が全高の半分の位置に作用することとする。ポンプ部の断面性能は**原動機台**が最も小さいことから、原動機台の断面性能を一様に有する単純円筒形モデルとして評価する。原動機部については原動機フレームの断面性能を用いて評価する。たわみ量計算モデル図を図3-7に示す。

ポンプ据付面より上部の静止体(原動機フレーム等)は、水平方向の複合荷重により、ポンプ据付面を固定端として一方向に変形する。一方、回転体(ポンプ軸及び原動機軸)は、風荷重を受けないため、変形せず、原動機上部から鉛直方向に吊り下げられた状態

を維持する。原動機フレーム等の変形により、軸受反力が許容荷重を超えないことを確認する。

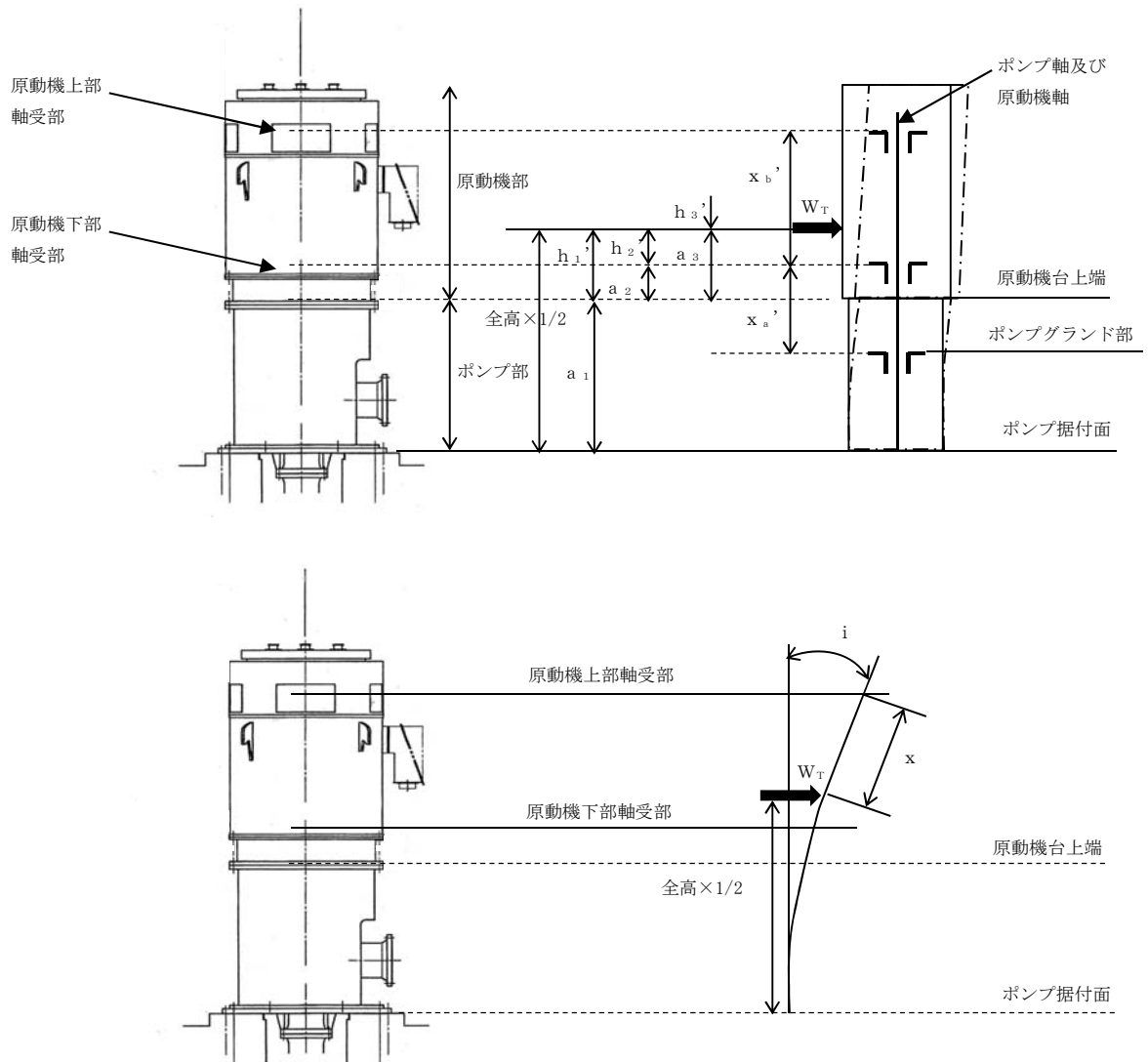


図 3-7 残留熱除去系海水系ポンプのたわみ量計算モデル図

b. 計算方法

(a) 応力の算出

イ. ポンプ部 (ボルト部)

原動機取付ボルト, 原動機台取付ボルト及び据付面基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図を図 3-8~図 3-10 に示す。

(イ) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot \text{全高} / 2$$

(ロ) 引張応力 σ_{bt}

$$M = 2 \sum_{i=1}^n F_i \cdot L_i \cdot \dots (3.1)$$

$$\frac{F_i}{L_i} = \text{一定} \dots (3.2)$$

(3.1) (3.2) 式より,

$$F_n = \frac{M}{2 \sum_{i=1}^n L_i^2} L_n$$

よって,

$$\sigma_{bt} = \frac{F_n}{A_b}$$

(ハ) せん断応力 τ

$$\tau = \frac{W_T}{A_b \cdot N}$$

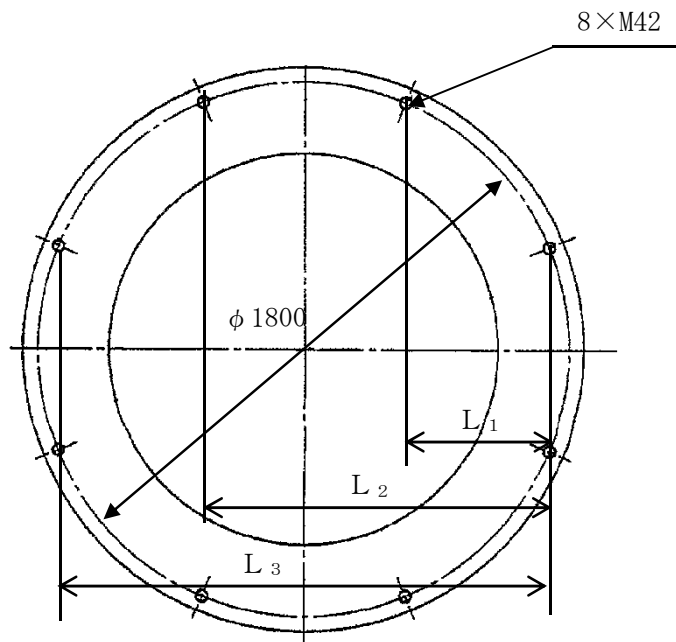


図 3-8 原動機取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

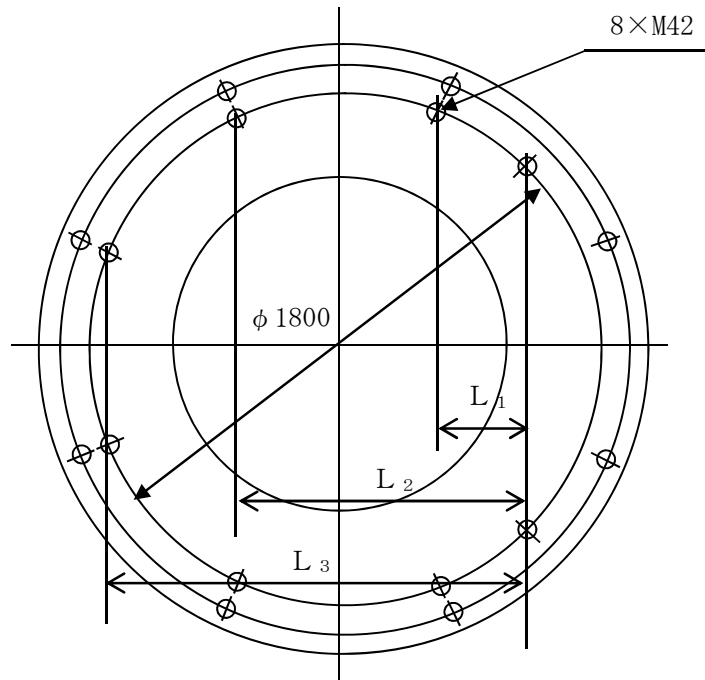


図 3-9 原動機台取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

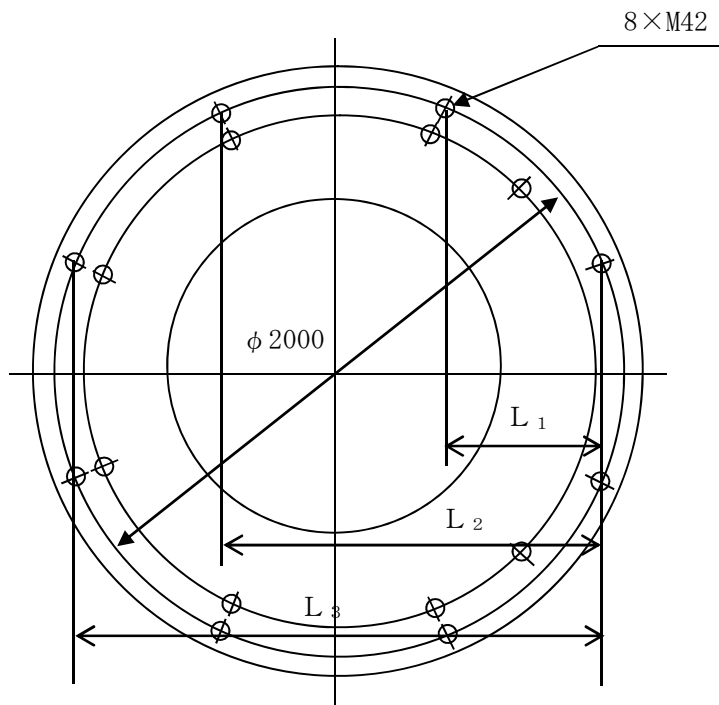


図 3-10 据付面基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図

ロ. 原動機部

原動機フレーム、一次側端子箱ボルト部、上部軸受ブラケット取付ボルト部、上部軸受タンクカバー取付ボルト部の詳細図を図3-11～図3-14に示す。

(イ) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h + H \cdot L_H \quad (\text{ボルト取付方向が水平方向の場合})$$

$$M = W_T \cdot h \quad (\text{ボルト取付方向が鉛直方向の場合})$$

(ロ) 原動機フレーム

原動機フレームの応力算出方法を以下に示す。

・曲げ応力

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

ここで、

$$Z = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{32 \cdot D}$$

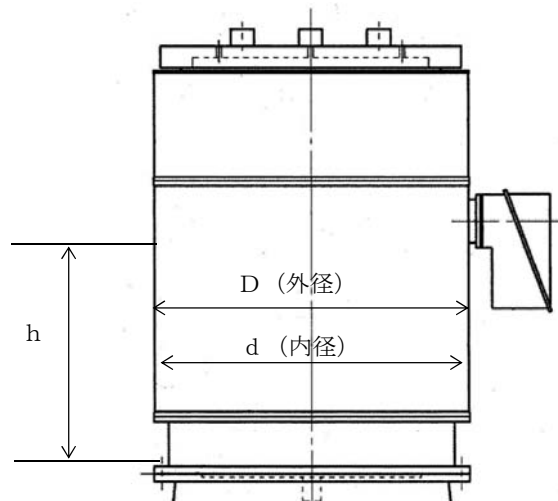


図 3-11 原動機フレーム詳細図

(ハ) 一次側端子箱ボルト部

一次側端子箱ボルト部の応力算出方法を以下に示す。

・引張応力

$$F_b = \frac{M}{L_1 \cdot N}$$

$$\sigma_{bt} = \frac{F_b}{A_b}$$

・せん断応力

$$\tau = \frac{F_H}{A_b \cdot N}$$

ここで,

$$F_H = \sqrt{W_T^2 + H^2}$$

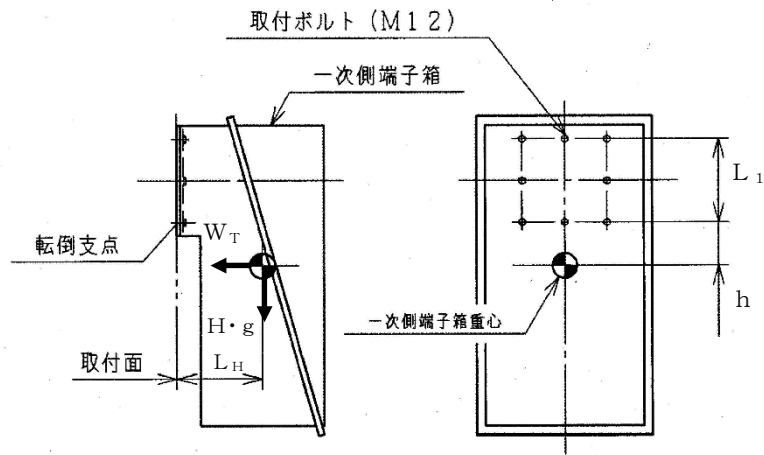


図 3-12 一次側端子箱詳細図

- (二) 上部軸受ブラケット取付ボルト部, 上部軸受タンクカバー取付ボルト部
 上部軸受ブラケット取付ボルト部, 上部軸受タンクカバー取付ボルト部の応力
 算出方法を以下に示す。

・引張応力

竜巻によって生じる転倒荷重が, 上端カバーの上端(評価上厳しい条件)に作用した際の, 上部軸受ブラケット取付ボルトに生じる引張応力を算出し評価する。

- (i) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h_u$$

- (ii) 引張応力 σ_{bt}

$$M = 2 \sum_{i=1}^n F_i \cdot L_i \dots (3.1)$$

$$\frac{F_i}{L_i} = \text{一定} \dots (3.2)$$

(3.1) (3.2) 式より,

$$F_n = \frac{M}{2 \sum_{i=1}^n L_i^2} L_n$$

よって,

$$\sigma_{bt} = \frac{F_n}{A_b}$$

(iii) せん断応力 τ

$$\tau = \frac{W_T}{A_b \cdot N}$$

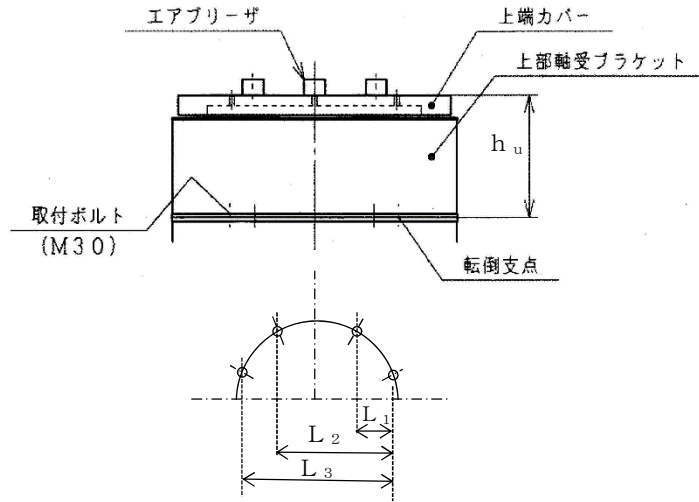


図 3-13 上部軸受ブラケット詳細図

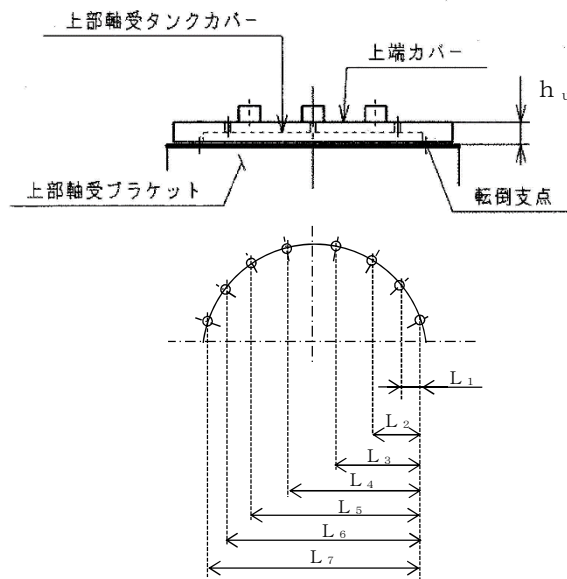


図 3-14 上部軸受タンクカバー詳細図

(b) 発生荷重の計算

イ. たわみ量の計算

たわみ量の算出において、竜巻による風圧力を受ける面（原動機台、原動機フレーム、一次側端子箱、上部軸受ブラケット、上部軸受タンクカバー）のそれぞれの W_{T2} の合計を複合荷重 W' とする。

$$W' = \Sigma W_{T2}$$

各部位の受圧部図を図3-15～図3-19に示す。

(単位：mm)

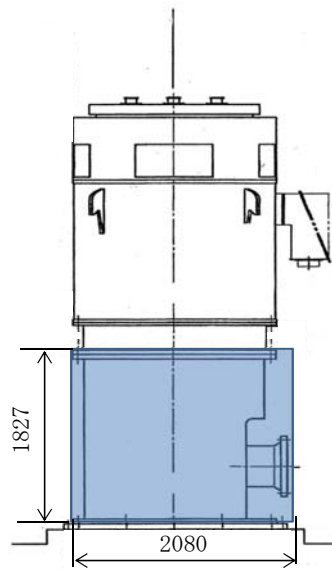


図3-15 原動機台の受圧部図

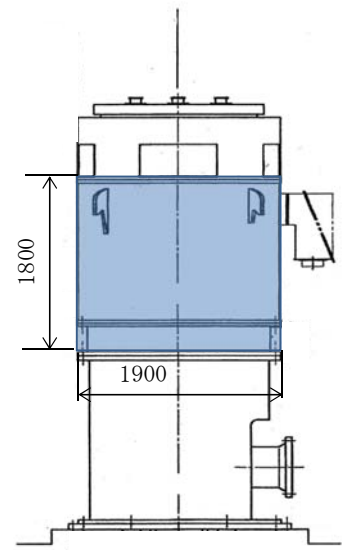


図3-16 原動機フレームの受圧部図

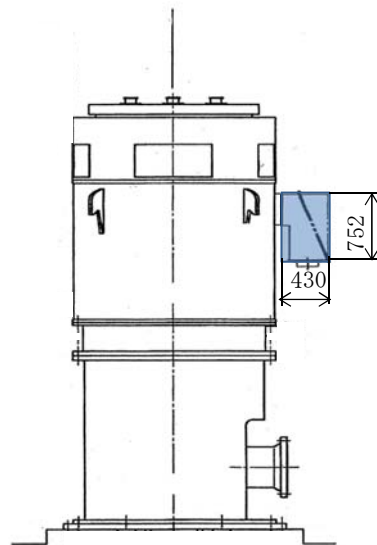


図3-17 一次側端子箱の受圧部図

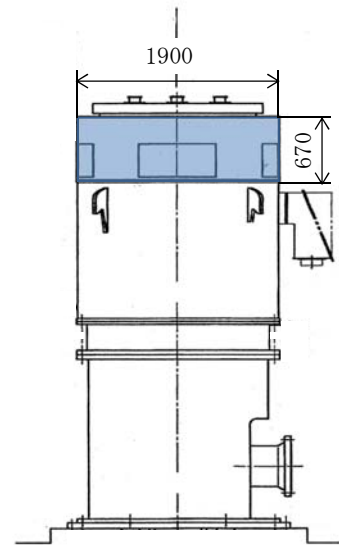


図3-18 上部軸受ブラケットの受圧部図

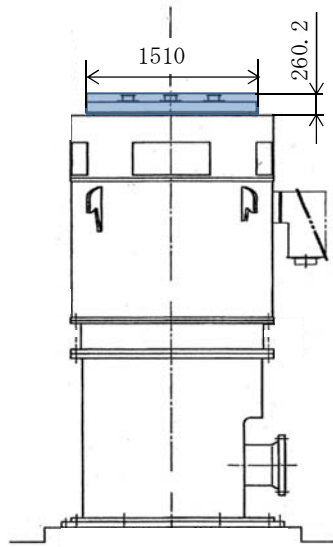


図3-19 上部軸受タンクカバーの受圧部図

以下のミオソテスの方法より各評価対象部位のたわみ量 y と傾斜 i を算出する。なお、荷重は高さの半分の位置に作用することとする。

ミオソテスの方法

$$y = \frac{M \cdot a^2}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{W' \cdot a^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

$$i = \frac{M \cdot a}{E \cdot I} + \frac{W' \cdot a^2}{2 \cdot E \cdot I}$$

$$M = W' \cdot h'$$

(イ) 原動機下部軸受部

- ・ポンプ据付面から原動機台上端部のたわみ量 y_1 ，傾斜 i_1

$$y_1 = \frac{M_a \cdot a_1^2}{2 \cdot E_p \cdot I_p} + \frac{W' \cdot a_1^3}{3 \cdot E_p \cdot I_p}$$

$$i_1 = \frac{M_a \cdot a_1}{E_p \cdot I_p} + \frac{W' \cdot a_1^2}{2 \cdot E_p \cdot I_p}$$

$$M_a = W' \cdot h_1'$$

ここで、原動機台の断面図を図3-20に示す。

(単位：mm)

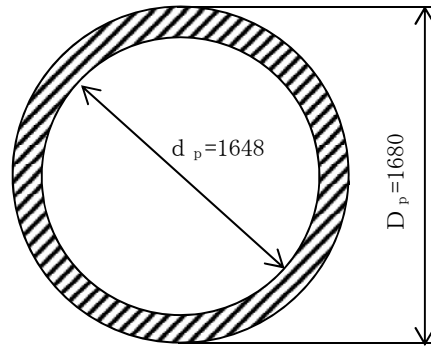


図3-20 原動機台の断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_p = \frac{\pi (D_p^4 - d_p^4)}{64}$$

・原動機台上端部から原動機下部軸受部のたわみ量 y_2

$$y_2 = \frac{M_b \cdot a_2^2}{2 \cdot E_m \cdot I_m} + \frac{W' \cdot a_2^3}{3 \cdot E_m \cdot I_m}$$

$$M_b = W' \cdot h_2'$$

ここで、原動機フレームの断面図を図3-21に示す。

(単位：mm)

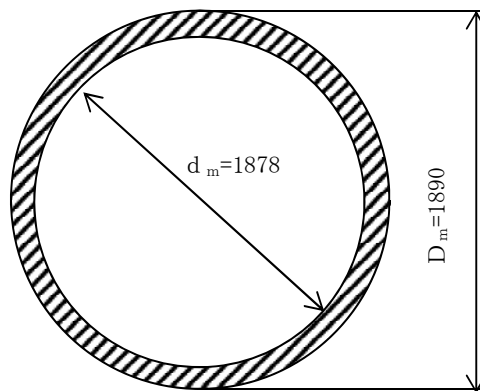


図3-21 原動機フレームの断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_m = \frac{\pi (D_m^4 - d_m^4)}{64}$$

よって、原動機下部軸受部のたわみ量は

$$y_a = y_1 + y_2$$

(ロ) 原動機上部軸受部

・原動機台上端部から荷重作用点のたわみ量 y_3 ，傾斜 i_3

$$y_3 = \frac{M_c \cdot a_3^2}{2 \cdot E_m \cdot I_m} + \frac{W' \cdot a_3^3}{3 \cdot E_m \cdot I_m}$$

$$i_3 = \frac{M_c \cdot a_3}{E_m \cdot I_m} + \frac{W' \cdot a_3^2}{2 \cdot E_m \cdot I_m}$$

$$M_c = W' \cdot h_3'$$

よって、荷重作用点のたわみ量 y_4 ，傾斜 i_4

$$y_4 = y_1 + y_3$$

$$i_4 = i_1 + i_3$$

荷重作用点から原動機上部軸受部のたわみ量 y_5

$$y_5 = x \cdot \sin(i_4)$$

以上より、原動機上部軸受部のたわみ量は

$$y_b = y_4 + y_5$$

ロ. 発生荷重の算出

軸受部において、フレーム変位により作用する軸受反力と軸受許容荷重を比較し、発生荷重が許容荷重より小さいことを確認する。

発生荷重 W'' は次式より計算する。

δ = 評価対象部位の変位量 - 支点の変位量

また、発生荷重は

$$\delta = \frac{W'' \cdot x^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

より

$$W'' = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot \delta}{x^3}$$

(イ) 原動機下部軸受部の発生荷重

$$W''_m = \frac{3 \cdot E_m' \cdot I_m' \cdot \delta_a}{x_a^3}$$

ここで、 $\delta_a = y_a$

回転子（原動機部）の断面図を図3-22に示す。

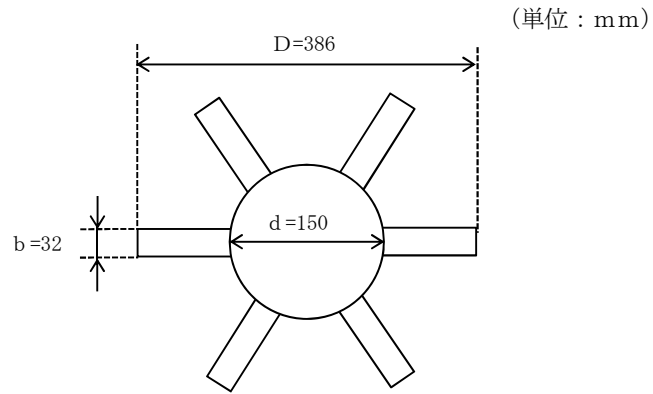


図3-22 回転子（原動機部）の断面図

回転子の断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_m' = \frac{b(D-d) \cdot (D^2 + D \cdot d + d^2 + b^2)}{8} + \frac{\pi d^4}{64}$$

(ロ) 原動機上部軸受部の発生荷重

$$W_m'' = \frac{3 \cdot E_m' \cdot I_m' \cdot \delta_b}{x_b'^3}$$

ここで、 $\delta_b = y_b - y_a$

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-14 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	1.5 f _t (MPa)	1.5 f _s (MPa)	1.5 f _b (MPa)
原動機取付ボルト	SUS304	50* ¹	198	504	205	153	118	—
原動機台取付ボルト	SUS304	50* ¹	198	504	205	153	118	—
据付面基礎ボルト	S22C	50* ¹	260	430	260	195	150	—
原動機フレーム	SS400	60* ²	237	389	237	—	—	273
一次側端子箱取付ボルト	SS400	90* ²	225	376	225	168	129	—
上部軸受ブラケット取付ボルト	SUS304	60* ²	192	489	205	153	118	—
上部軸受タンクカバー取付ボルト	SUS304	90* ²	175	451	205	153	118	—

注記 *1：周囲環境温度

*2：最高使用温度

表 4-2 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	Δ P (N/m ²)	W _M (N)
6.1 × 10 ³	1.0	8.9 × 10 ³	0

表 4-3 評価条件（原動機取付ボルト）

L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	C (-)	全高 (m)	A (m ²)
487.1	1175.9	1663.0	1.2	2.73	8.354

ボルト サイズ	N (-)	A _b (mm ²)
M42	8	1385

表 4-4 評価条件（原動機台取付ボルト）

L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	C (-)	全高 (m)	A (m^2)
324.4	1013.2	1500.3	1.2	4.557	12.15

ボルト サイズ	N (-)	A_b (mm^2)
M42	8	1385

表 4-5 評価条件（据付面基礎ボルト）

L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	C (-)	全高 (m)	A (m^2)
541.2	1306.6	1847.8	1.2	4.557	12.15

ボルト サイズ	N (-)	A_b (mm^2)
M42	8	1385

表 4-6 評価条件（原動機フレーム）

C (-)	h (mm)	A (m^2)	D (mm)	d (mm)
1.2	1365	8.354	1890	1878

表 4-7 評価条件（一次側端子箱取付ボルト）

C (-)	A (m^2)	ボルト サイズ	A_b (mm^2)	m (kg)	g (m/s^2)
2.4	0.3910	M12	113.1	75	9.80665

N^* (-)	h (mm)	L_1 (mm)	L_H (mm)
8(3)	153	250	238

注記 * : () 内の数字は引張応力計算の際に考慮したボルトの本数

表 4-8 評価条件（上部軸受ブラケット取付ボルト）

C (-)	A (m ²)	ボルト サイズ	A _b (mm ²)	N (-)	L ₁ (mm)
1.2	1.666	M30	706.9	8	303.1

L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	h _u (mm)
731.7	1034.7	824

表 4-9 評価条件（上部軸受タンクカバー取付ボルト）

C (-)	A (m ²)	ボルト サイズ	A _b (mm ²)	N (-)	L ₁ (mm)
1.2	0.3929	M12	113.1	16	109.7

L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	L ₅ (mm)	L ₆ (mm)	L ₇ (mm)
312.5	577.5	864.3	1129.2	1332.0	1441.8

h _u (mm)
260.2

(2) 動的機能維持評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-10～表 4-14 に示す。

表 4-10 評価条件（たわみ量の算出）

原動機台の風力 係数 C (-)	原動機フレーム の風力係数 C (-)	一次側端子箱の 風力係数 C (-)	上部軸受ブラケ ットの風力係数 C (-)	上部軸受タンクカ バーの風力係数 C (-)
1.2	1.2	2.4	1.2	1.2

原動機台の受圧 面積 A (m ²)	原動機フレーム の受圧面積 A (m ²)	一次側端子箱の 受圧面積 A (m ²)	上部軸受ブラケ ットの受圧面積 A (m ²)	上部軸受タンクカ バーの受圧面積 A (m ²)
3.800	3.420	0.3234	1.273	0.3929

表 4-11 評価条件（原動機下部軸受部（たわみ量の算出））

変位量計算モデルの材質	温度 (°C)	q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	W _M (N)
SS400	50	6.1×10 ³	1.0	8.9×10 ³	0

h ₁ ' (mm)	h ₂ ' (mm)	a ₁ (mm)	a ₂ (mm)	E _p (MPa)	I _p (mm ⁴)
407	73	1872	334	201000	2.895×10 ¹⁰

E _m (MPa)	I _m (mm ⁴)
201000	1.576×10 ¹⁰

表 4-12 評価条件（原動機下部軸受部（発生荷重の算出））

発生荷重計算モデルの材質	温度 (°C)	E _m ' (MPa)	I _m ' (mm ⁴)	x _a ' (mm)	y _a (mm)
S25C	50	201000	2.424×10 ⁸	1064	0.05579

表 4-13 評価条件（原動機上部軸受部（たわみ量の算出））

変位量計算モデルの材質	温度 (°C)	q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	W _M (N)
SS400	50	6.1×10 ³	1.0	8.9×10 ³	0

x (mm)	h ₃ ' (mm)	a ₃ (mm)	E _m (MPa)	I _m (mm ⁴)
1750	0	407	201000	1.576×10 ¹⁰

表 4-14 評価条件（原動機上部軸受部（発生荷重の算出））

発生荷重計算モデルの材質	温度 (°C)	E _m ' (MPa)	I _m ' (mm ⁴)	x _b ' (mm)	y _b (mm)
S25C	50	201000	2.424×10 ⁸	1823	0.1448

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

飛来物	貫通限界厚さ T (mm)	
	水平方向	鉛直方向
砂利	1.0	1.0

砂利の貫通限界厚さ(1.0mm)と残留熱除去系海水系ポンプの外殻を構成する部材の厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、残留熱除去系海水系ポンプの外殻を構成する部材の厚さ未満である。

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ (mm)	貫通限界厚さ T (mm)	結果
残留熱除去系海水系ポンプ	2.3 (一次側端子箱)	1.0	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

a. 原動機取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-1 に示す。

原動機取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-1 評価結果 (原動機取付ボルト)

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	19	153
せん断	9	118
組合せ	19	153

b. 原動機台取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-2 に示す。

原動機台取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-2 評価結果（原動機台取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	53	153
せん断	13	118
組合せ	53	153

c. 据付面基礎ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-3 に示す。

据付面基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 評価結果（据付面基礎ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	41	195
せん断	13	150
組合せ	41	195

d. 原動機フレーム

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-4 に示す。

原動機フレームに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-4 評価結果（原動機フレーム）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
曲げ	9	273

e. 一次側端子箱取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-5 に示す。

一次側端子箱取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-5 評価結果（一次側端子箱取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	16	168
せん断	9	129
組合せ	16	168

f. 上部軸受ブラケット取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-6 に示す。

上部軸受ブラケット取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-6 評価結果（上部軸受ブラケット取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	7	153
せん断	4	118
組合せ	7	153

g. 上部軸受タンクカバー取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-7 に示す。

上部軸受タンクカバー取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-7 評価結果（上部軸受タンクカバー取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	2	153
せん断	3	118
組合せ	2	153

(3) 動的機能維持評価結果

a. 原動機下部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-8 に示す。

原動機下部軸受部の発生荷重は、許容荷重以下である。

表 5-8 評価結果（原動機下部軸受部）

発生荷重 W'' (N)	許容荷重 (N)
6770	

b. 原動機上部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-9 に示す。

原動機上部軸受部の発生荷重は、許容荷重以下である。

表 5-9 評価結果 (原動機上部軸受部)

発生荷重 W'' (N)	許容荷重 (N)
2148	

V-3-別添 1-1-6 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書

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.....	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.....	10
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	13
3.4 許容限界.....	16
3.5 評価方法.....	17
4. 評価条件.....	29
5. 強度評価結果.....	33

1. 概要

本資料は、V-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、非常用ディーゼル発電機用海水ポンプ及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機用海水ポンプ（以下「ディーゼル発電機用海水ポンプ」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、送水機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

ディーゼル発電機用海水ポンプについて、V-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、ディーゼル発電機用海水ポンプの「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

ディーゼル発電機用海水ポンプは、V-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、屋外の海水ポンプ室に設置する。
海水ポンプ室の位置図を図2-1に示す。

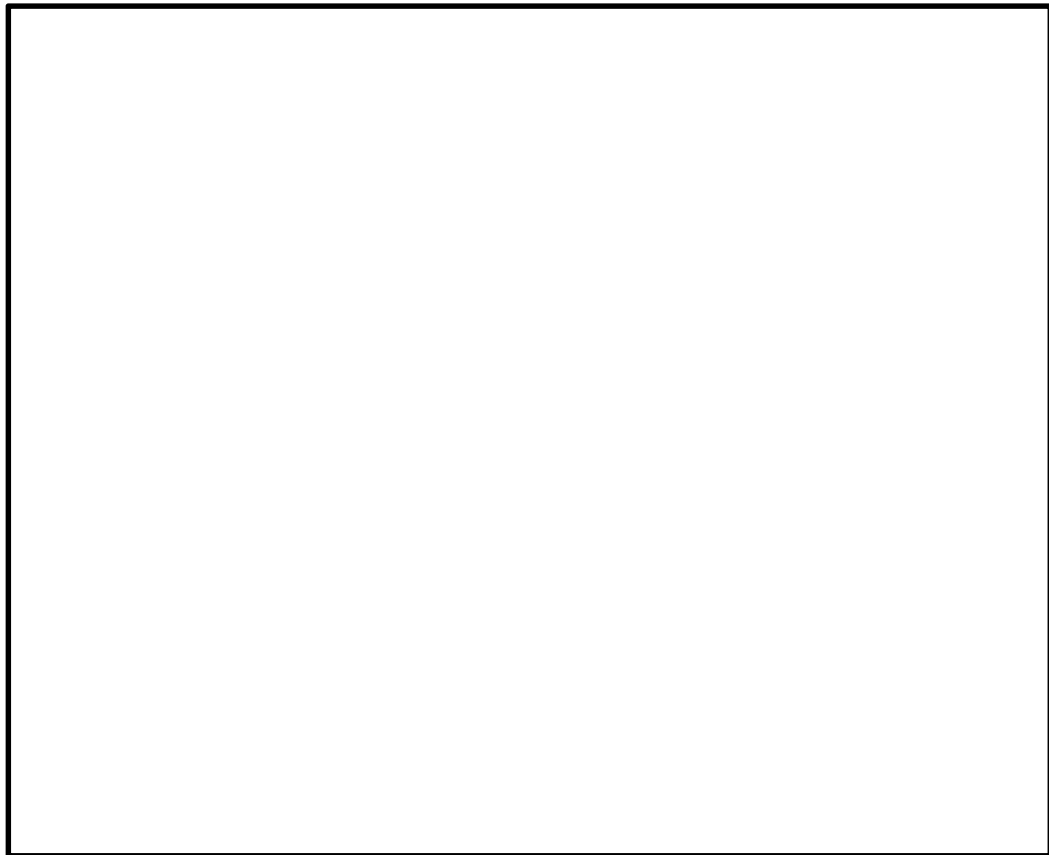


図 2-1 海水ポンプ室の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機用海水ポンプについて、V-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、ディーゼル発電機用海水ポンプの構造を示す。

ディーゼル発電機用海水ポンプは、ポンプ据付面から原動機台までのポンプ部と、原動機台より上部の原動機部からなる立形ポンプであり、同一設計のディーゼル発電機用海水ポンプを3台設置している。ディーゼル発電機用海水ポンプの概要図を図2-2に示す。

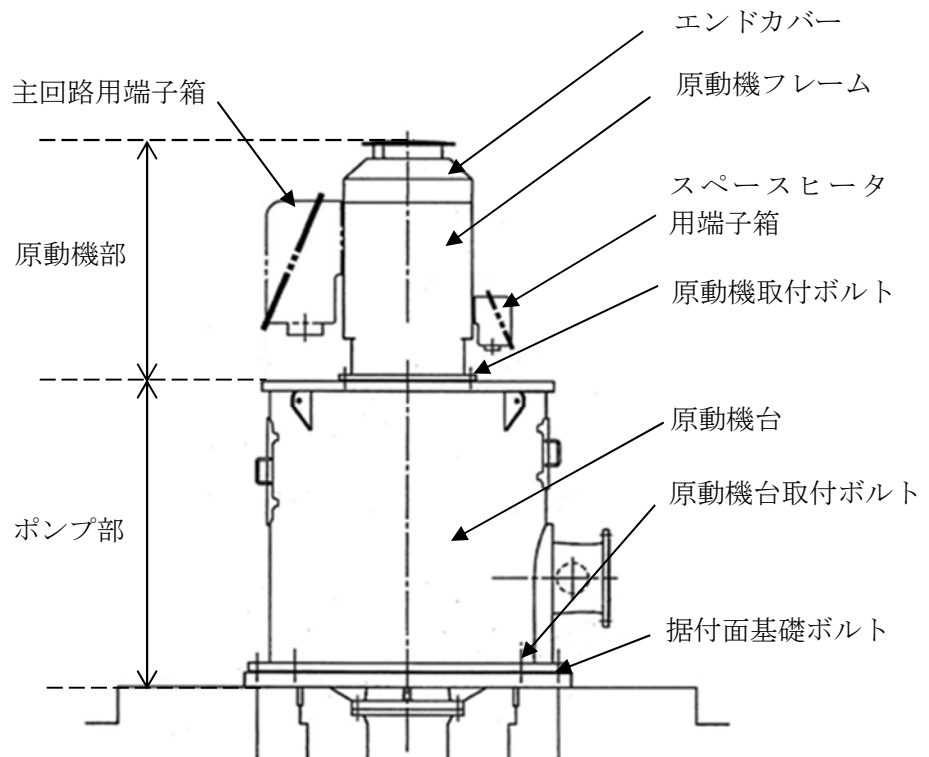


図2-2 ディーゼル発電機用海水ポンプの概要図

2.3 評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの強度評価は、V-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、ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位に作用する貫入及び応力等が、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。

ディーゼル発電機用海水ポンプ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。

(1) 衝突評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価フローを図2-3に示す。衝突評価においては、竜巻防護ネットを設置する場合に考慮する飛来物である砂利の貫通限界厚さが外壳を構成す

る部材の厚さ未満であることを確認する。衝突評価では、「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）」で用いられている式を準用し、V-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. 強度評価方法」に示す衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価における許容限界は、V-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 許容限界」に示す許容限界である、外殻を構成する部材の厚さとする。

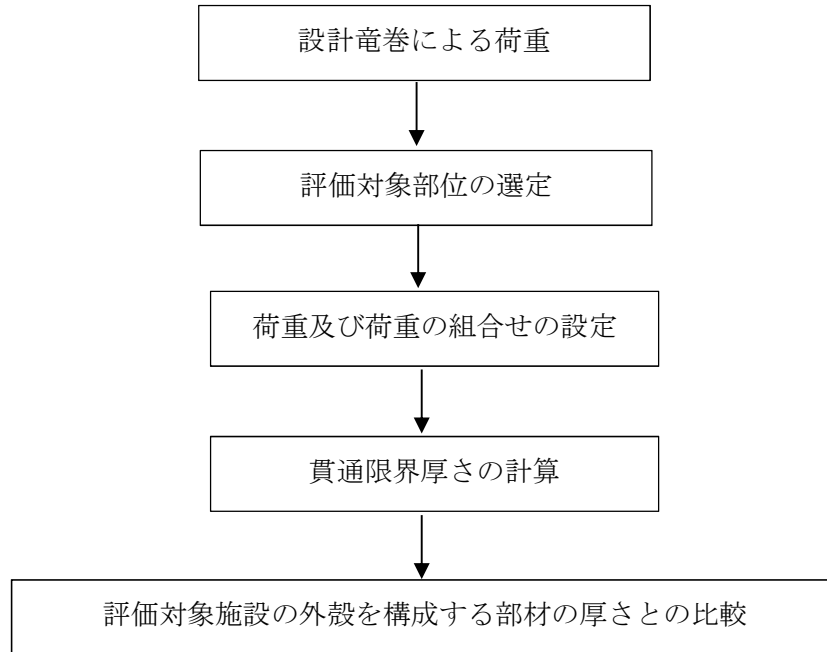


図2-3 ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価フローを図2-4に示す。構造強度評価においては、ディーゼル発電機用海水ポンプに対して、設計竜巻による荷重に運転時の状態で作用する荷重及び自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たることを想定する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同等なものであると考え、「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」（（社）日本電気協会）、「原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1987」（（社）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」（（社）日本電気協会）（以下「JEAG 4601」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-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」に示す立形ポンプの評価式を用いる。

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価における許容限界は、V-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、JE

AG4601の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

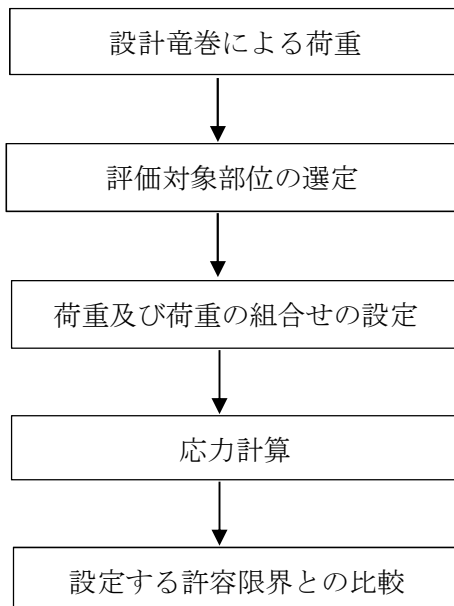


図2-4 ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価フロー

(3) 動的機能維持評価の評価方針

ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価フローを図2-5に示す。残留熱除去系海水系ポンプは動的機器であるため、構造強度評価に加え、軸受部の動的機能維持評価を行う。動的機能維持評価においては、ディーゼル発電機用海水ポンプ据付面から上部の受圧面積が大きくなる方向から風が当たることを想定し、設計竜巻の風圧力による荷重を受けた際のフレーム変位により生じる軸受荷重が接触面圧の許容荷重以下であることを確認する。動的機能維持評価では、V-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」に示すディーゼル発電機用海水ポンプの評価式を用いる。ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価における許容限界は、V-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、軸受部の接触面圧の許容荷重とする。

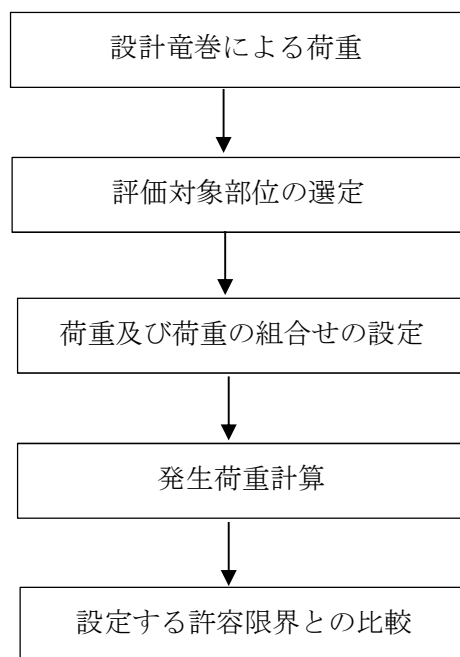


図2-5 ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「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）」
- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「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」（社）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」（社）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」（社）日本電気協会
- ・「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」（社）日本機械学会（以下「J S M E」という。）

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 衝突評価の記号の定義

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 衝突評価に用いる記号

記号	単位	定義
d	m	評価において考慮する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	評価において考慮する飛来物の質量
T	mm	鋼板の貫通限界厚さ
v	m/s	評価において考慮する飛来物の飛来速度

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の記号の定義

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる記号を表3-2及び表3-3に示す。

表3-2 構造強度評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積（風向に垂直な面に投影した面積）
A _b	mm ²	ボルトの断面積
A ₁	m ²	主回路端子箱側面の受圧面積
A ₂	m ²	主回路端子箱上面の受圧面積
A ₃	m ²	原動機フレームの受圧面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
D	mm	原動機フレーム外径
d	mm	原動機フレーム内径
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	ボルトに作用する引張力
F _H	N	ボルトに作用するせん断力
F _i	N	各ボルトに作用する引張力
f _s	MPa	J S M E SSB-3121.1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
f _t	MPa	J S M E SSB-3121.1により規定される供用状態A及びBでの許容引張応力
G	—	ガスト影響係数
g	m/s ²	重力加速度

表3-2 構造強度評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
H	N	自重による荷重
h	mm	基準面からの重心距離
h _u	mm	基準面から上端カバー上端までの高さ
L	mm	重心と支点間の距離
L _H	mm	重心と支点間の距離
L ₁ ～L ₄	mm	支点と評価ボルト間の距離
L _i	mm	各ボルト間の距離
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
m	kg	質量
N	—	ボルトの本数
q	N/m ²	設計用速度圧
S _y	MPa	J SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計降伏点
S _u	MPa	J SME 付録材料図表Part5の表にて規定される設計引張強さ
W _T	N	設計竜巻による複合荷重
W _{T1}	N	設計竜巻による複合荷重 (W _{T1} =W _P)
W _{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 (W _{T2} =W _w +0.5・W _P +W _M)
W _M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W _P	N	設計竜巻の気圧差による荷重
W _w	N	設計竜巻の風圧力による荷重
Z	mm ³	断面係数
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
π	—	円周率
σ	MPa	原動機フレームの曲げ応力
σ _{bt}	MPa	ボルトの引張応力
τ	MPa	せん断応力

表3-3 動的機能維持評価に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積)
a	mm	部材間の長さ
a ₁	mm	ポンプ据付面から荷重作用点までの長さ
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
E	MPa	縦弾性係数
E _p	MPa	原動機台の縦弾性係数
E _m '	MPa	回転子の縦弾性係数
G	—	ガスト影響係数
h'	mm	基準点から作用点までの距離
h ₁ '	mm	荷重作用点から荷重作用点までの距離
I	mm ⁴	断面二次モーメント
I _m '	mm ⁴	回転子の断面二次モーメント
I _p	mm ⁴	原動機台の断面二次モーメント
i	rad	傾斜
i ₁	rad	ポンプ据付面から荷重作用点の傾斜
M	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
M _a	N・mm	設計竜巻により作用するモーメント
q	N/m ²	設計用速度圧
W _T	N	設計竜巻による複合荷重
W _{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 (W _{T2} = W _w + 0.5・W _p + W _M)
W'	N	たわみ量及び発生荷重計算において設計竜巻による風圧を受ける面それぞれのW _{T2} の合計の複合荷重
W''	N	発生荷重
W _M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W _p	N	設計竜巻の気圧差による荷重
W _w	N	設計竜巻の風圧力による荷重
x ₁	mm	荷重作用点から原動機下部軸受部までの距離
x ₂	mm	原動機下部軸受部から原動機上部軸受部までの距離
x'	mm	評価対象部から支点までの距離
x _a '	mm	ポンプグランド部から原動機下部軸受部までの距離
x _b '	mm	原動機下部軸受部から原動機上部軸受部までの距離
y	mm	たわみ量
y ₁	mm	ポンプ据付面から荷重作用点のたわみ量
y ₂	mm	荷重作用点から原動機下部軸受部のたわみ量
y ₃	mm	原動機下部軸受部から原動機上部軸受部のたわみ量

表3-3 動的機能維持評価に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
y_a	mm	原動機下部案内軸受部のたわみ量
y_b	mm	原動機上部案内軸受部のたわみ量
δ	mm	フレーム変位量
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量

3.2 評価対象部位

ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位は、V-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 許容限界」にて示す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選定する。

(1) 衝突評価の評価対象部位

評価において考慮する飛来物の衝突により、海水ポンプに衝撃荷重が作用し貫入する可能性があるため、貫入によりその施設の機能が喪失する可能性のある箇所を評価対象部位として選定する。

ディーゼル発電機用海水ポンプ地上部の全方向からの飛来物を考慮し、貫入により施設の機能が喪失する可能性がある箇所として最薄部となる主回路端子箱、スペースヒーター用端子箱を選定する。

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価における評価対象部位を図3-1に示す。

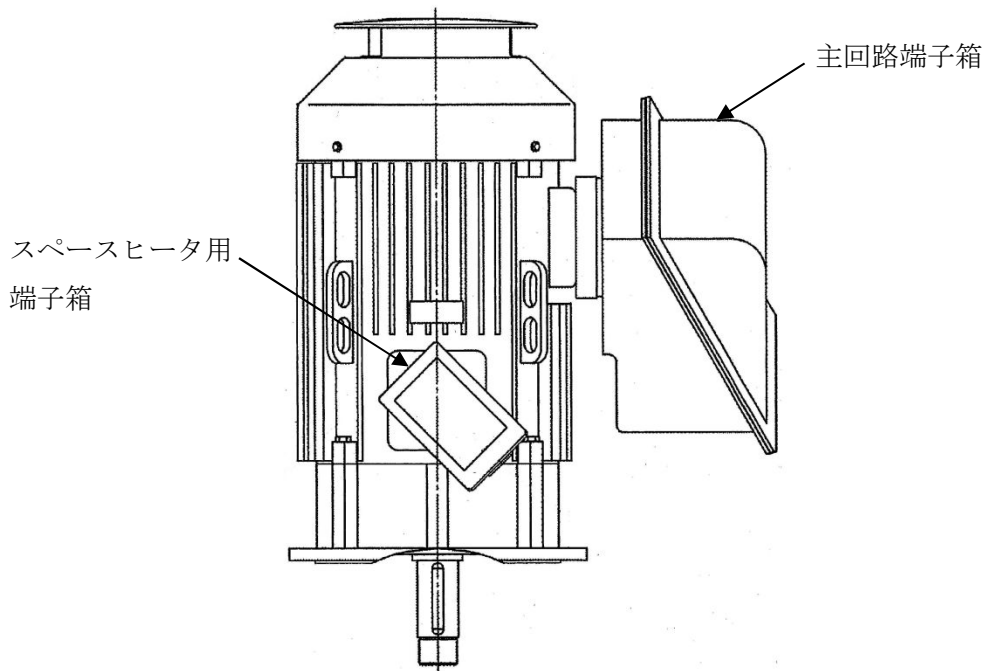


図3-1 ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位（衝突評価）

(2) 構造強度評価の評価対象部位

a. ポンプ部

ポンプ部について、原動機部等に作用する設計竜巻による荷重は、原動機フレーム及び原動機台に作用し、原動機台を介して、基礎面及び原動機部を固定しているボルトに作用する。荷重を受ける各部位のうち、支持断面積の小さな部位に大きな応力が生じることになる。

このことから、以下の部位を構造強度評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機取付ボルト
- ・原動機台取付ボルト
- ・据付面基礎ボルト

b. 原動機部

原動機部について、原動機部等に作用する**設計竜巻**による荷重は、原動機フレーム及び付属品に作用し、原動機フレーム及び付属品を介して、付属品の取付部を固定するボルトに作用する。

このことから、以下の部位を**構造強度評価**の評価対象部位として選定する。

- ・原動機フレーム
- ・主回路端子箱取付ボルト
- ・スペースヒータ用端子箱取付ボルト
- ・エンドカバー取付ボルト

ディーゼル発電機用海水ポンプの**構造強度評価**における評価対象部位を図3-2、図3-3に示す。

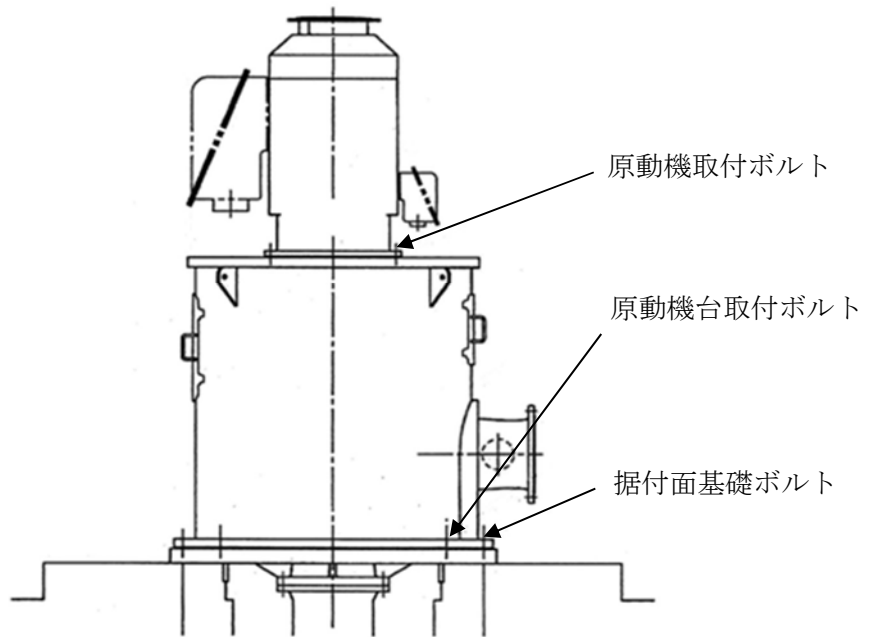


図3-2 ディーゼル発電機用海水ポンプの**構造強度評価**部位図（ポンプ部）

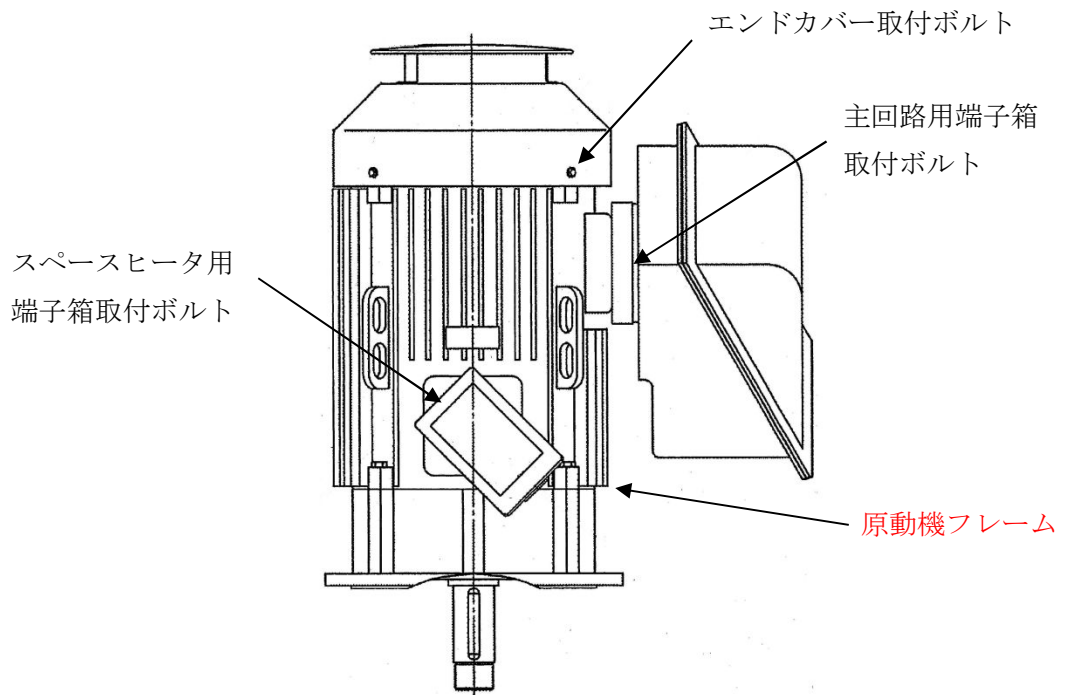


図 3-3 ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価部位図（原動機部）

(3) 動的機能維持評価の評価対象部位

ポンプ据付面より上部に竜巻により荷重を受けた際に、原動機フレーム等が変位することにより軸と軸受が接触した場合に動的機能維持が困難となるため、以下の部位を動的機能維持評価の評価対象部位として選定する。

- ・原動機下部軸受部
- ・原動機上部軸受部

ディーゼル発電機用海水ポンプの動的機能維持評価における評価対象部位を図 3-4 に示す。

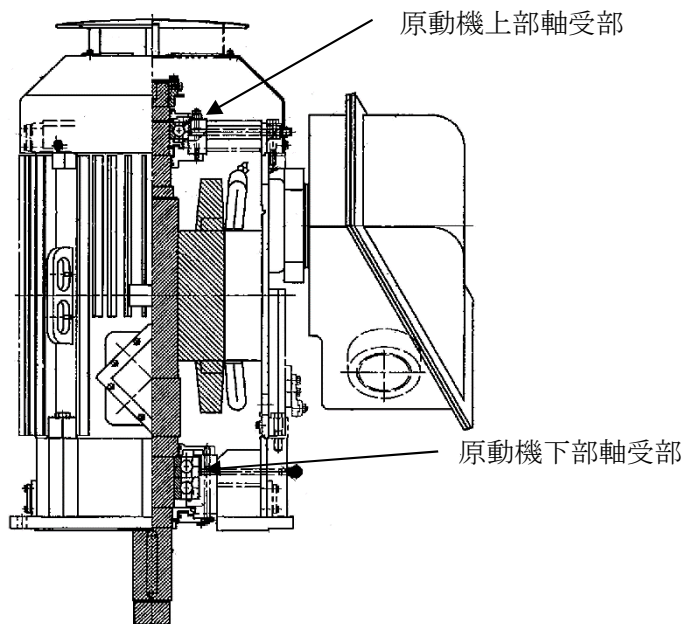


図 3-4 ディーゼル発電機用海水ポンプ動的機能維持評価対象部位概略図

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、V-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考慮する飛来物として竜巻防護ネット（ネットの網目寸法40(mm)）をすり抜ける砂利を設定し、砂利の衝撃荷重を考慮する。

衝突評価においては、評価対象部位に砂利が衝突した際に跳ね返らず、貫入するものとして評価する。

砂利の諸元を表3-4、ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価に用いる荷重を表3-5に示す。

表3-4 砂利の諸元

飛来物	d (m)	K (-)	M (kg)	v (m/s)	
				水平方向	鉛直方向
砂利	0.04	1.0	0.18	62	42

表3-5 ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価に用いる荷重

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の防護対象施設	ディーゼル発電機用 海水ポンプ	・主回路端子箱 ・スペースヒータ用端子箱	飛来物による 衝撃荷重

(2) 構造強度評価及び動的機能維持評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

構造強度評価及び動的機能維持評価に用いる荷重を以下に示す。

(a) 常時作用する荷重

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を考慮する。

自重による荷重は以下のとおり計算する。

$$H = m \cdot g$$

(b) 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重，気圧差による荷重を考慮する。防護ネット及び防護鋼板等による風圧力の低減は無いものとして保守的な評価を行う。また、極小飛来物である砂利による衝撃は瞬間的で、衝突時間が極めて短く、衝突される機器へ伝わる加速度が小さいことから、機器へ作用する荷重は構造強度に影響を与えないので設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

イ. 風圧力による荷重(W_w)

風圧力による荷重 W_w はV-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(3)c. (a) 風圧力による荷重」に示す式に従い、算出する。

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

ロ. 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p はV-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(3)c. (b) 気圧差による荷重」に示す式に従い、算出する。

$$W_p = \Delta P \cdot A$$

ハ. 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_T (W_{T1} , W_{T2})はV-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、算出する。なお、ディーゼル発電機用海水ポンプは気圧差が生じ難い構造であるため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。

$$W_{T1} = W_p$$

$$W_{T2} = W_w + 0.5W_p + W_M$$

(c) 運転時の状態で作用する荷重

運転時の状態で作用する荷重としては、鉛直下向きに作用するポンプスラスト荷重を考慮する。

b. 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、V-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、ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位ごとに設定する。

ボルト材の構造強度評価時に評価対象部位が鉛直方向に取り付けられており、自重が抗力となる場合は保守的に考慮せず、水平方向に取り付けられている場合（主回路用端子箱取付ボルト、スペースヒータ用端子箱取付ボルト）は、端子箱自重を考慮する。また、運転時荷重が作用する評価対象部位は全て鉛直方向に取り付けられており、運転時荷重は鉛直方向下向きに作用し抗力となるため、それぞれの構造強度評価を行う際の荷重としては保守的に考慮しない。

ディーゼル発電機用海水ポンプの評価対象部位に作用する荷重及び強度評価にて考慮する荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表 3-6 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位		荷重	
屋外の外部 事象防護対 象施設	ディーゼル 発電機用海 水ポンプ	構造 強度 評価	ポンプ部	原動機取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				原動機台取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				据付面基礎ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
			原動機部	原動機フレーム	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				主回路用端子箱取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③端子箱自重
				スペースヒータ用端子箱取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重 ③端子箱自重
				エンドカバー取付ボルト	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
			動的 機能 維持 評価	原動機上部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重
				原動機下部軸受部	①風圧力による荷重 ②気圧差による荷重

3.4 許容限界

ディーゼル発電機用海水ポンプの許容限界は、V-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」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力の許容荷重を用いる。

(1) 衝突評価における許容限界

衝突評価における許容限界は、評価において考慮する飛来物による衝撃荷重に対し、外殻を構成する部材が、機能喪失に至る可能性のある変形を生じないことを計算により確認するため、評価式により算定した貫通限界厚さが外殻を構成する部材の厚さ未満であることを許容限界とする。ディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さを表3-7に示す。

表3-7 ディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さ

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ
ディーゼル発電機用海水ポンプ	2.3mm (主回路端子箱, スペースヒータ用端子箱)

(2) 構造強度評価における許容限界

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、「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。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計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又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。

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価における許容限界について、表3-8に示す。

表3-8 ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価における許容限界

評価対象部位	許容応力状態	応力の種類		許容限界
ボルト	Ⅲ _A S	一次応力	引張	$1.5 f_t$
			せん断	$1.5 f_s$
			組合せ	$\text{Min} \{1.5 f_t, (2.1 f_t - 1.6 \tau)\}$
原動機フレーム	Ⅲ _A S	一次応力	曲げ	$1.5 f_b$

(3) 動的機能維持評価における許容限界

動的機能維持評価における許容限界は、設計荷重により原動機フレームが変形する場合においてもディーゼル発電機用海水ポンプの運転継続が可能であるように、軸受の接触面圧の許容荷重を許容限界とする。

軸受の接触面圧の許容荷重を表3-9に示す。

表3-9 軸受の接触面圧の許容荷重

評価対象部位	許容荷重 (N)
原動機上部軸受部	□
原動機下部軸受部	□

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

ディーゼル発電機用海水ポンプの衝突評価は、V-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. 強度評価方法」にて設定している衝突評価が必要な機器の評価式を用いる。

飛来物が防護対象施設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）」で用いられている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) 構造強度評価及び動的機能維持評価の評価方法

ディーゼル発電機用海水ポンプの構造強度評価及び動的機能維持評価は、V-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」にて設定している立形ポンプの評価式を用いる。

a. 計算モデル

(a) 構造強度評価

計算モデルは1質点系モデルとし、ポンプ部は全高の1/2の位置に、原動機部は風圧力による荷重の作用中心と同等、あるいはより高い重心作用位置に複合荷重が作用することとする。また、設計竜巻による風荷重はそれぞれの評価対象部位に対して発生応力が大きくなる方向から当たるものとする。ポンプ部及び原動機部の応力の計算モデル図を図3-5及び図3-6に示す。

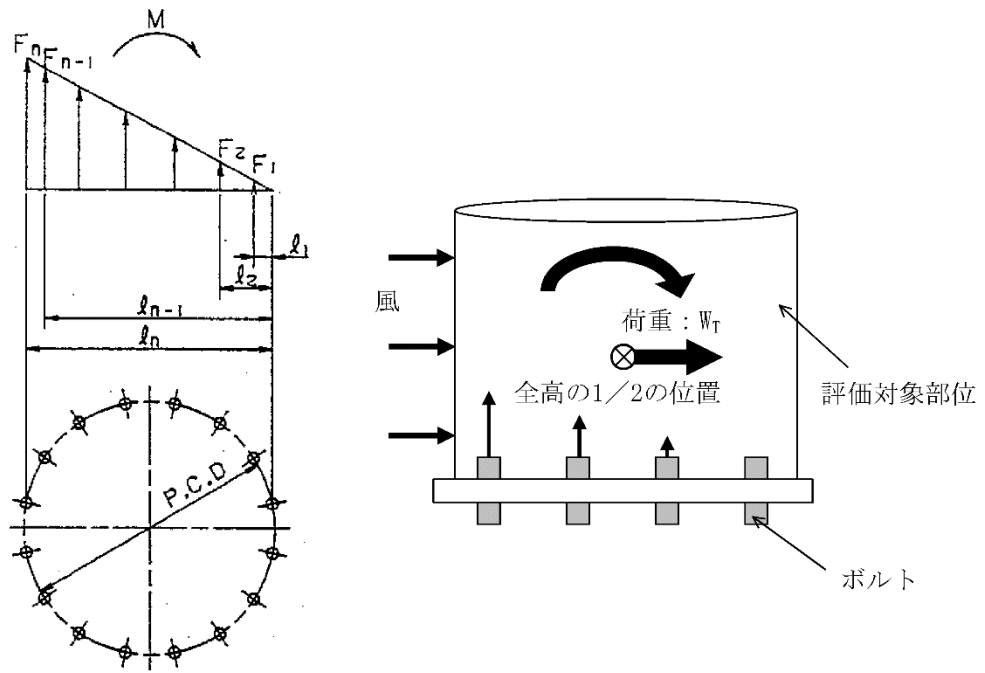


図 3-5 応力の計算モデル図 (ポンプ部)

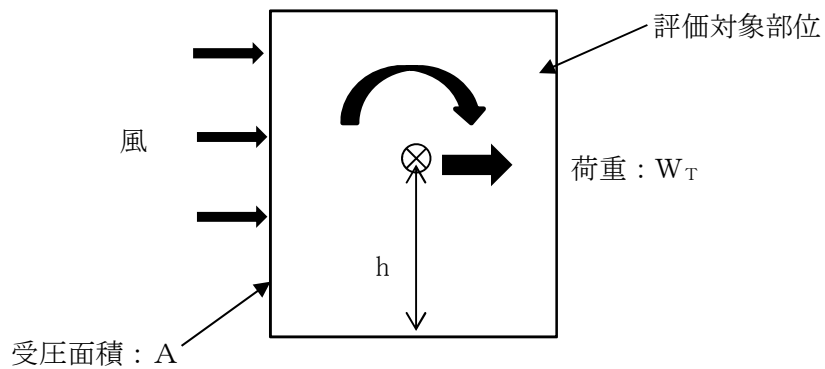


図 3-6 応力の計算モデル図 (原動機部)

(b) 動的機能維持評価

動的機能維持評価の際の原動機フレームのたわみ量計算において、ポンプ据付面から原動機台上端まで（ポンプ部）と、原動機台上端から原動機まで（原動機部）の片持ち梁と考え、違う断面性能の一軸中空形モデルで、荷重が全高の半分の位置に作用することとする。ポンプ部の断面性能は**原動機台**が最も小さいことから、原動機台の断面性能を一様に有する単純円筒形モデルとして評価する。原動機部については原動機フレームの断面性能を用いて評価する。たわみ量計算モデル図を図3-7に示す。

ポンプ据付面より上部の静止体(原動機フレーム等)は、水平方向の複合荷重により、ポンプ据付面を固定端として一方向に変形する。一方、回転体(ポンプ軸及び原動機軸)は、風荷重を受けないため、変形せず、原動機上部から鉛直方向に吊り下げられた状態を維持する。原動機フレーム等の変形により、軸受反力が許容荷重を超えないことを確認する。

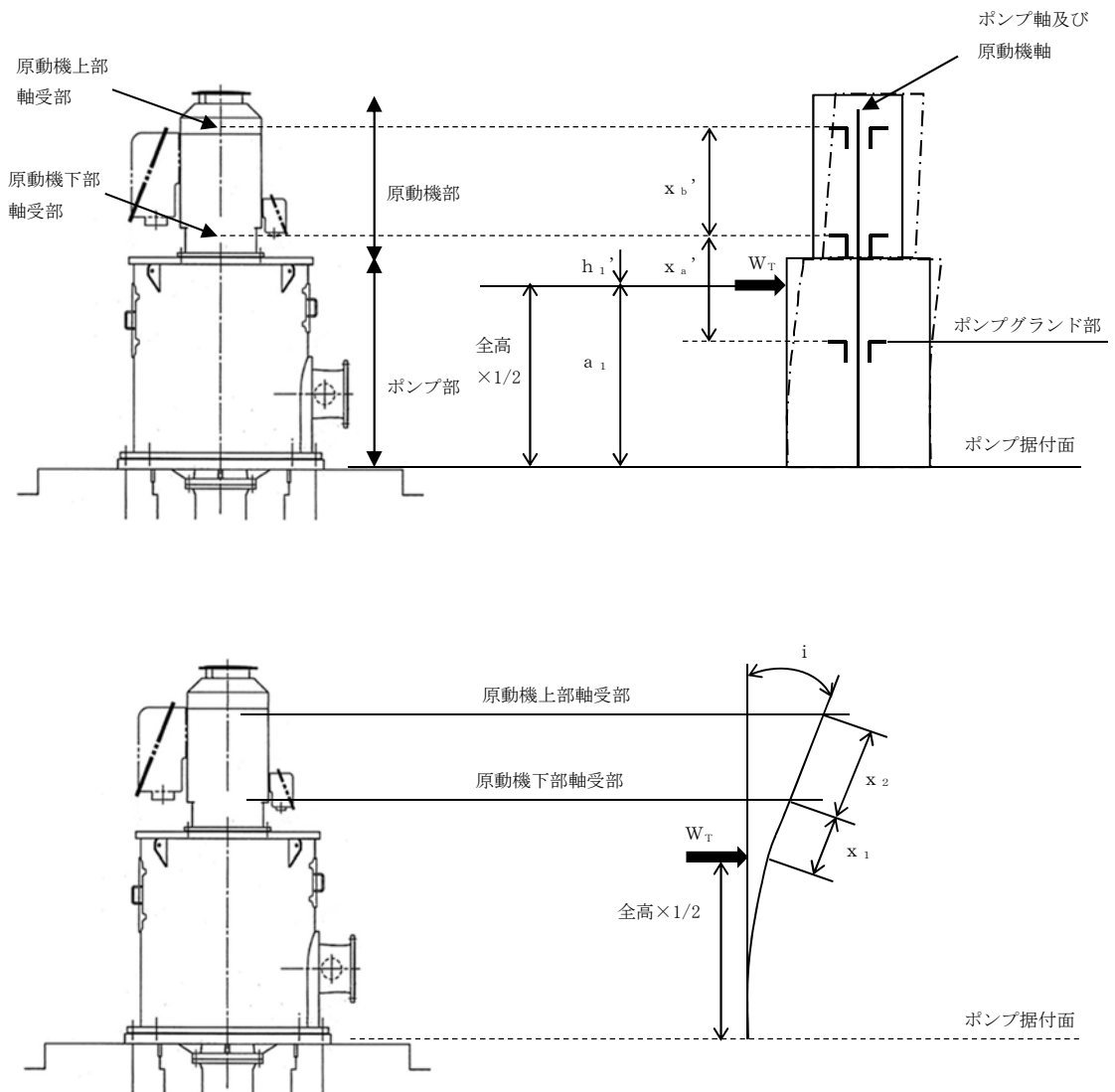


図 3-7 ディーゼル発電機用海水ポンプのたわみ量計算モデル図

b. 計算方法

(a) 応力の算出

イ. ポンプ部 (ボルト部)

原動機取付ボルト, 原動機台取付ボルト及び据付面基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図を図 3-8~図 3-10 に示す。

(イ) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot \text{全高} / 2$$

(ロ) 引張応力 σ_{bt}

$$M = 2 \sum_{i=1}^n F_i \cdot L_i \cdot \dots (3.1)$$

$$\frac{F_i}{L_i} = \text{一定} \dots (3.2)$$

(3.1) (3.2) 式より,

$$F_n = \frac{M}{2 \sum_{i=1}^n L_i^2} L_n$$

よって,

$$\sigma_{bt} = \frac{F_n}{A_b}$$

(ハ) せん断応力 τ

$$\tau = \frac{W_T}{A_b \cdot N}$$

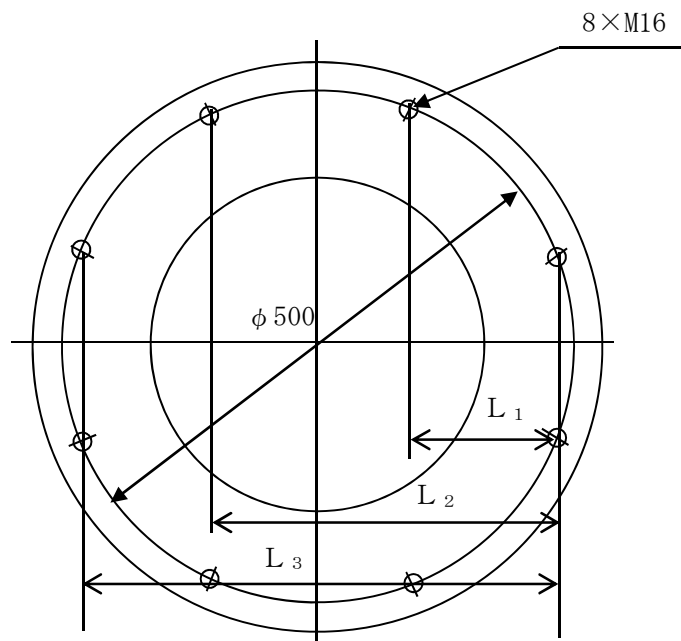


図 3-8 原動機取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

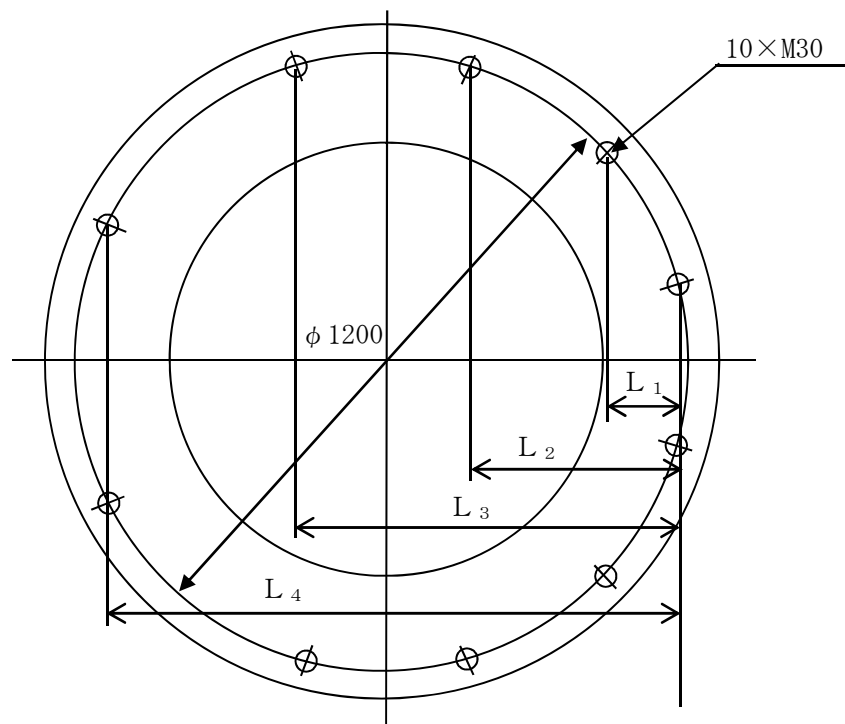


図 3-9 原動機台取付ボルトの各ボルト間寸法の配置図

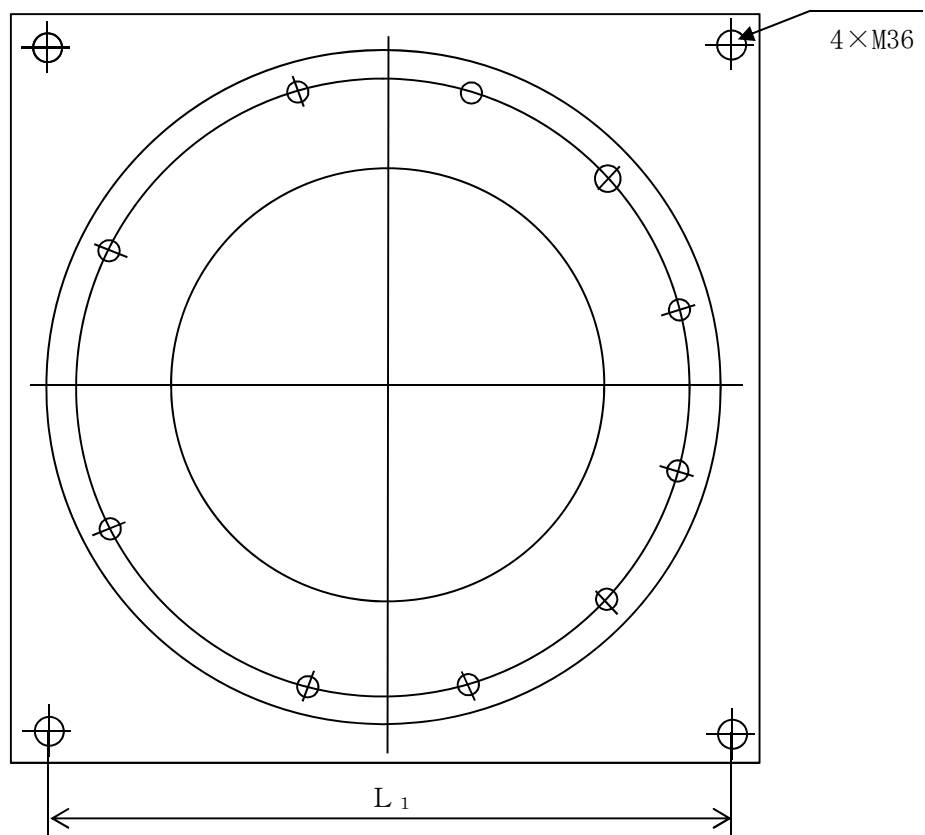


図 3-10 据付面基礎ボルトの各ボルト間寸法の配置図

ロ. 原動機部

原動機フレーム、主回路用端子箱ボルト部、スペースヒータ用端子箱ボルト部、エンドカバー取付ボルト部の詳細図を図3-11～図3-14に示す。

(イ) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h + H \cdot L_H \quad (\text{ボルト取付方向が水平方向の場合})$$

$$M = W_T \cdot h \quad (\text{ボルト取付方向が鉛直方向の場合})$$

(ロ) 原動機フレーム

原動機フレームの応力算出方法を以下に示す。

・曲げ応力

$$\sigma = \frac{M}{Z}$$

ここで、

$$Z = \frac{\pi (D^4 - d^4)}{32 \cdot D}$$

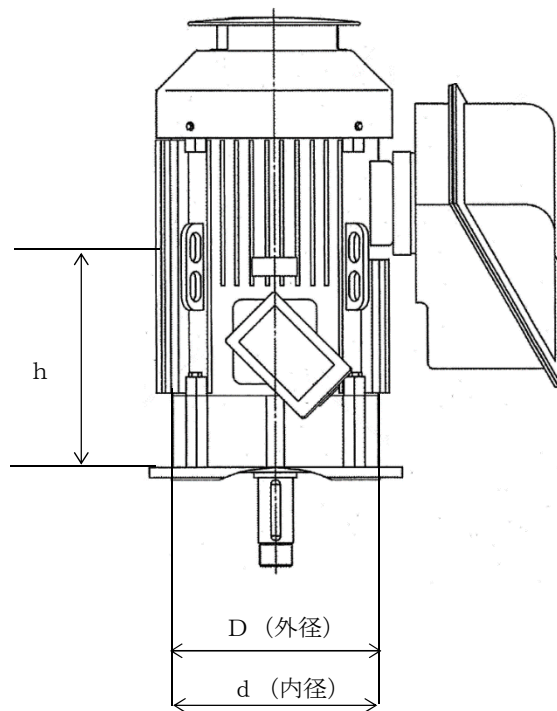


図 3-11 原動機フレーム詳細図

(ハ) 主回路用端子箱ボルト部、スペースヒータ用端子箱ボルト部

主回路用端子箱ボルト部、スペースヒータ用端子箱ボルト部の応力算出方法を以下に示す。

・引張応力

$$F_b = \frac{M}{L_1 \cdot N}$$

$$\sigma_{bt} = \frac{F_b}{A_b}$$

・せん断応力

$$\tau = \frac{F_H}{A_b \cdot N}$$

ここで、

$$F_H = \sqrt{W_T^2 + H^2}$$

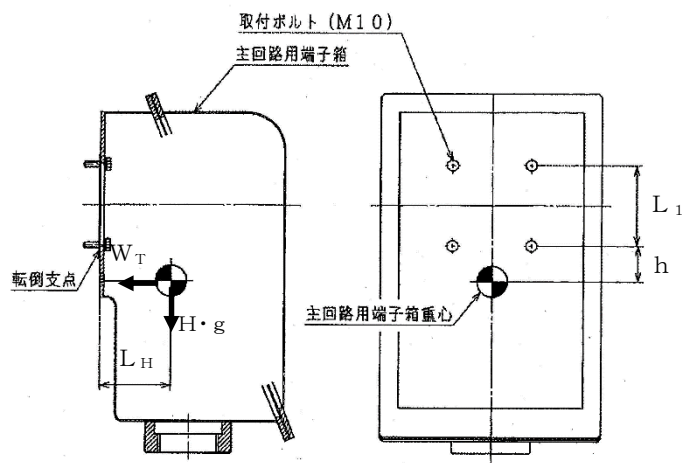


図 3-12 主回路用端子箱ボルト部詳細図

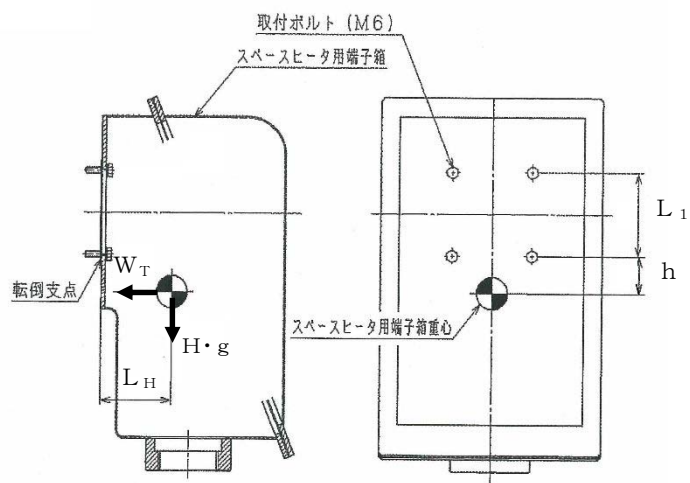


図 3-13 スペースヒータ用端子箱ボルト部詳細図

(二) エンドカバー取付ボルト部

エンドカバー取付ボルト部の応力算出方法を以下に示す。

・引張応力

竜巻によって生じる転倒荷重が、エンドカバーの上端（評価上厳しい条件）に作用した際の、エンドカバー取付ボルトに生じる引張応力を算出し評価する。

(i) 風による転倒モーメントM

$$M = W_T \cdot h_u$$

(ii) 引張応力 σ_{bt}

$$M = 2 \sum_{i=1}^n F_i \cdot L_i \cdots (3.1)$$

$$\frac{F_i}{L_i} = \text{一定} \cdots (3.2)$$

(3.1) (3.2) 式より、

$$F_n = \frac{M}{2 \sum_{i=1}^n L_i^2} L_n$$

よって、

$$\sigma_{bt} = \frac{F_n}{A_b}$$

(iii) せん断応力 τ

$$\tau = \frac{W_T}{A_b \cdot N}$$

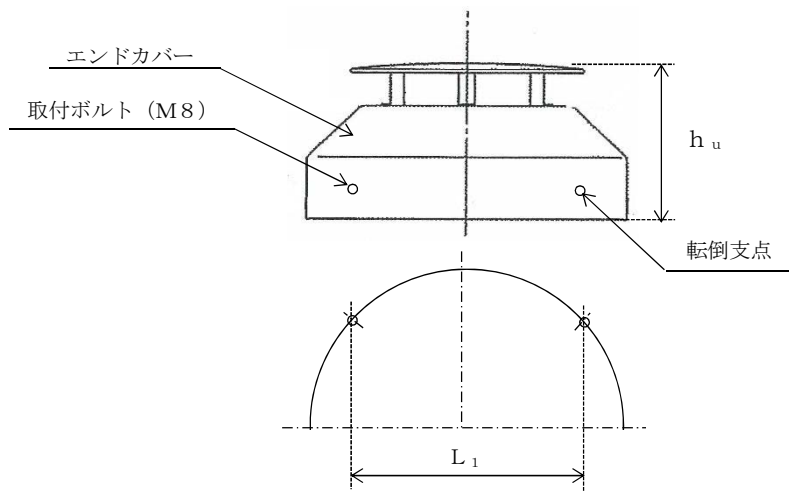


図 3-14 エンドカバー取付ボルト部詳細図

(b) 発生荷重の計算

イ. たわみ量の計算

たわみ量の算出において、竜巻による風圧力を受ける面（原動機台、原動機フレーム、主回路用端子箱、エンドカバー）のそれぞれの W_{T2} の合計を複合荷重 W' とする。

スペースヒータ用端子箱は原動機フレームと受圧面積が重なるため、荷重算出において考慮しない。

$$W' = \Sigma W_{T2}$$

各部位の受圧部図を図3-15～図3-18に示す

(単位：mm)

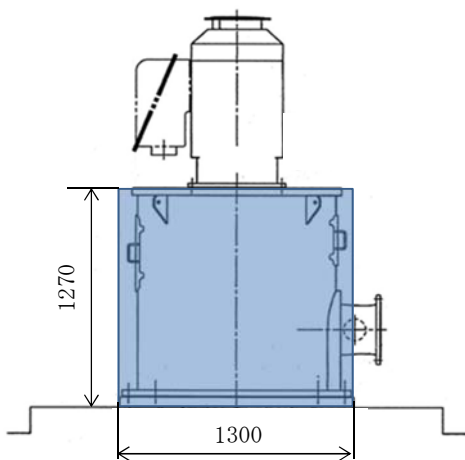


図3-15 原動機台の受圧部図

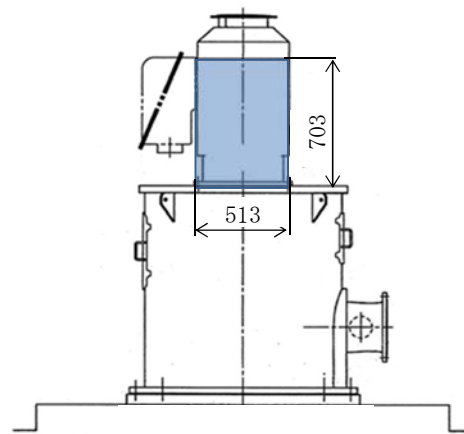


図3-16 原動機フレームの受圧部図

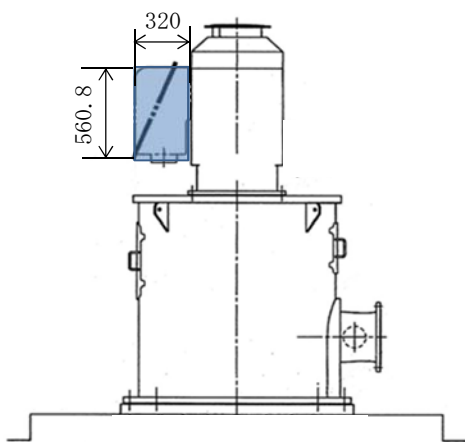


図3-17 主回路用端子箱の受圧部図

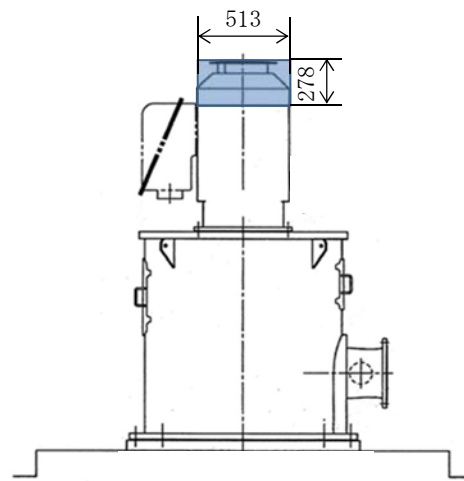


図3-18 エンドカバーの受圧部図

以下のミオソテスの方法より各評価対象部位のたわみ量 y と傾斜 i を算出する。なお、荷重は高さの半分の位置に作用することとする。

ミオソテスの方法

$$y = \frac{M \cdot a^2}{2 \cdot E \cdot I} + \frac{W' \cdot a^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

$$i = \frac{M \cdot a}{E \cdot I} + \frac{W' \cdot a^2}{2 \cdot E \cdot I}$$

$$M = W' \cdot h'$$

(イ) 原動機下部軸受部

・ポンプ据付面から荷重作用点のたわみ量 y_1 、傾斜 i_1

$$y_1 = \frac{M_a \cdot a_1^2}{2 \cdot E_p \cdot I_p} + \frac{W' \cdot a_1^3}{3 \cdot E_p \cdot I_p}$$

$$i_1 = \frac{M_a \cdot a_1}{E_p \cdot I_p} + \frac{W' \cdot a_1^2}{2 \cdot E_p \cdot I_p}$$

$$M_a = W' \cdot h_1'$$

ここで、原動機台の断面図を図3-19に示す。

(単位：mm)

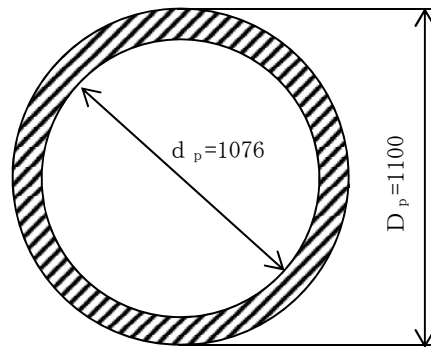


図3-19 原動機台の断面図

円筒形であるため、断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_p = \frac{\pi (D_p^4 - d_p^4)}{64}$$

・荷重作用点から原動機下部軸受部のたわみ量 y_2

$$y_2 = x_1 \cdot \sin(i_1)$$

以上より、原動機下部軸受部のたわみ量は

$$y_a = y_1 + y_2$$

(ロ) 原動機上部軸受部

- ・原動機下部軸受部から原動機上部軸受部のたわみ量 y_3

$$y_3 = x_2 \cdot \sin(i_1)$$

以上より、原動機上部軸受部のたわみ量は

$$y_b = y_a + y_3$$

ロ. 発生荷重の算出

軸受部において、フレーム変位により作用する軸受反力と軸受許容荷重を比較し、発生荷重が許容荷重より小さいことを確認する。

発生荷重 W'' は次式より計算する。

δ = 評価対象部位の変位量 - 支点の変位量

また、発生荷重は

$$\delta = \frac{W'' \cdot x'^3}{3 \cdot E \cdot I}$$

より

$$W'' = \frac{3 \cdot E \cdot I \cdot \delta}{x'^3}$$

(イ) 原動機下部軸受部の発生荷重

$$W''_m = \frac{3 \cdot E_m' \cdot I_m' \cdot \delta_a}{x_a'^3}$$

ここで、 $\delta_a = y_a$

回転子（原動機部）の断面図を図3-20に示す。

(単位：mm)

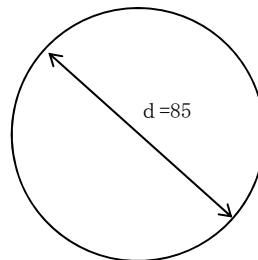


図3-20 回転子（原動機部）の断面図

回転子の断面二次モーメントは以下のとおり算出する。

$$I_m' = \frac{\pi d^4}{64}$$

(ロ) 原動機上部軸受部の発生荷重

$$W''_m = \frac{3 \cdot E_m' \cdot I_m' \cdot \delta_b}{x_b^3}$$

ここで、 $\delta_b = y_b - y_a$

4. 評価条件

(1) 構造強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-9 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)	F (MPa)	1.5 f _t (MPa)	1.5 f _s (MPa)	1.5 f _b (MPa)
原動機取付ボルト	SUS304	50*1	198	504	205	153	118	—
原動機台取付ボルト	SUS304	50*1	198	504	205	153	118	—
据付面基礎ボルト	S20C	50*1	241	391	241	180	139	—
原動機フレーム	SS400	95*2	223	374	223	—	—	257
主回路端子箱取付ボルト	SS400	100*2	221	373	221	165	127	—
スペースヒータ用端子箱取付ボルト	SS400	100*2	221	373	221	165	127	—
エンドカバー取付ボルト	SS400	50*1	241	394	241	180	139	—

注記 *1：周囲環境温度

*2：最高使用温度

表 4-2 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	Δ P (N/m ²)	W _M (N)
6.1 × 10 ³	1.0	8.9 × 10 ³	0

表 4-3 評価条件 (原動機取付ボルト)

L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	C (-)	全高 (m)	A (m ²)
135.3	326.6	461.9	1.2	0.981	1.138

ボルト サイズ	N (-)	A _b (mm ²)
M16	8	201.1

表 4-4 評価条件（原動機台取付ボルト）

L_1 (mm)	L_2 (mm)	L_3 (mm)	L_4 (mm)	C (-)	全高 (m)
155.3	424.3	734.8	1099.2	1.2	2.251

A (m^2)	ボルト サイズ	N (-)	A_b (mm^2)
2.789	M30	10	706.9

表 4-5 評価条件（据付面基礎ボルト）

L_1 (mm)	C (-)	全高 (m)	A (m^2)	ボルト サイズ	N (-)
1200	1.2	2.251	2.789	36	4

A_b (mm^2)
1018

表 4-6 評価条件（原動機フレーム）

C (-)	h (mm)	A (m^2)	D (mm)	d (mm)
1.2	490.5	1.138	449	425

表 4-7 評価条件（主回路端子箱取付ボルト）

C (-)	A (m^2)	ボルト サイズ	A_b (mm^2)	m (kg)	g (m/s^2)
2.4	0.2019	M10	78.54	25	9.80665

N^* (-)	h (mm)	L_H (mm)	L_1 (mm)
4(2)	57.5	109.3	130

注記 * : () 内の数字は引張応力計算の際に考慮したボルトの本数

表 4-8 評価条件（スペースヒータ用端子箱取付ボルト）

C (-)	A (m ²)	ボルト サイズ	A _b (mm ²)	m (kg)	g (m/s ²)
2.4	0.0360	M6	28.27	3.6	9.80665

N*	h (mm)	L _H (mm)	L ₁ (mm)
4(2)	3.8	57.3	80

注記 * : () 内の数字は引張応力計算の際に考慮したボルトの本数

表 4-9 評価条件（エンドカバー取付ボルト）

C (-)	A (m ²)	ボルト サイズ	A _b (mm ²)	N (-)	L ₁ (mm)
1.2	0.1426	M8	50.27	4	362.7

h (mm)
278

(2) 動的機能維持評価の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-10～表 4-14 に示す。

表 4-10 評価条件（たわみ量の算出）

原動機台の 風力係数 C (-)	原動機フレームの 風力係数 C (-)	主回路用端子箱の 風力係数 C (-)	エンドカバーの 風力係数 C (-)
1.2	1.2	2.4	1.2

原動機台の 受圧面積 A (m ²)	原動機フレームの 受圧面積 A (m ²)	主回路用端子箱の 受圧面積 A (m ²)	エンドカバーの 受圧面積 A (m ²)
1.651	0.3606	0.1795	0.1426

表 4-11 評価条件（原動機下部軸受部（たわみ量の算出））

変位量計算モデルの材質	温度 (°C)	q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	W _M (N)
SS400	50	6.1×10 ³	1.0	8.9×10 ³	0

h ₁ ' (mm)	a ₁ (mm)	E _p (MPa)	I _p (mm ⁴)	x ₁ (mm)	y _a (mm)
0	1126	201000	6.070×10 ⁹	242.5	0.01485

表 4-12 評価条件（原動機下部軸受部（発生荷重の算出））

発生荷重計算モデルの材質	温度 (°C)	E _m ' (MPa)	I _m ' (mm ⁴)	x _a ' (mm)
S45C	50	200000	2.562×10 ⁶	640.5

表 4-13 評価条件（原動機上部軸受部（たわみ量の算出））

変位量計算モデルの材質	温度 (°C)	q (N/m ²)	G (-)	ΔP (N/m ²)	W _M (N)
SS400	50	6.1×10 ³	1.0	8.9×10 ³	0

x ₂ (mm)	y _b (mm)
669.5	0.02486

表 4-14 評価条件（原動機上部軸受部（発生荷重の算出））

発生荷重計算モデルの材質	温度 (°C)	E _m ' (MPa)	I _m ' (mm ⁴)	x _b ' (mm)
S45C	50	200000	2.562×10 ⁶	669.5

5. 強度評価結果

(1) 衝突評価結果

竜巻発生時の砂利の貫通限界厚さを表 5-1 に示す。

表 5-1 砂利の貫通限界厚さ

飛来物	貫通限界厚さ T (mm)	
	水平方向	鉛直方向
砂利	1.0	1.0

砂利の貫通限界厚さ(1.0mm)とディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、ディーゼル発電機用海水ポンプの外殻を構成する部材の厚さ未満である。

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さ (mm)	貫通限界厚さ T (mm)	結果
ディーゼル発電機用 海水ポンプ	2.3 (主回路端子箱, スペース ヒータ用端子箱)	1.0	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

a. 原動機取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-1 に示す。

原動機取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-1 評価結果 (原動機取付ボルト)

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	23	153
せん断	9	118
組合せ	23	153

b. 原動機台取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-2 に示す。

原動機台取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-2 評価結果（原動機台取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	15	153
せん断	5	118
組合せ	15	153

c. 据付面基礎ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-3 に示す。

据付面基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-3 評価結果（据付面基礎ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	16	180
せん断	9	139
組合せ	16	180

d. 原動機フレーム

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-4 に示す。

原動機フレームに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-4 評価結果（原動機フレーム）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
曲げ	4	257

e. 主回路端子箱取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-5 に示す。

主回路端子箱取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-5 評価結果（主回路端子箱取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	13	165
せん断	13	127
組合せ	13	165

f. スペースヒータ用端子箱取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-6 に示す。

スペースヒータ用端子箱取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-6 評価結果（スペースヒータ用端子箱取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	2	165
せん断	7	127
組合せ	2	165

g. エンドカバー取付ボルト

竜巻発生時の構造強度評価結果を表 5-7 に示す。

エンドカバー取付ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-7 評価結果（エンドカバー取付ボルト）

応力分類	複合荷重 W_{T2} による応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
引張	13	180
せん断	9	139
組合せ	13	180

(2) 動的機能維持評価結果

a. 原動機下部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-8 に示す。

原動機下部軸受部の発生荷重は，許容荷重以下である。

表 5-8 評価結果（原動機下部軸受部）

発生荷重 W'' (N)	許容荷重 (N)
87	<input type="checkbox"/>

b. 原動機上部軸受部

竜巻発生時の動的機能維持評価結果を表 5-9 に示す。

原動機上部軸受部の発生荷重は，許容荷重以下である。

表 5-9 評価結果（原動機上部軸受部）

発生荷重 W'' (N)	許容荷重 (N)
52	<input type="checkbox"/>

V-3-別添 1-1-8 ディーゼル発電機吸気口の強度計算書

目次

1. 概要.....	3
2. 基本方針.....	3
2.1 位置.....	3
2.2 構造概要.....	4
2.3 評価方針.....	4
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.....	11
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	11
3.4 許容限界.....	12
3.5 評価方法.....	13
4. 評価条件.....	27
5. 強度評価結果.....	28

1. 概要

本資料は、V-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、非常用ディーゼル発電機吸気口及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機吸気口（以下「ディーゼル発電機吸気口」という。）が竜巻時及び竜巻通過後においても、吸気機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

V-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、ディーゼル発電機吸気口の「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

ディーゼル発電機吸気口は、V-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、ディーゼル発電機室屋上面に設置する。

ディーゼル発電機吸気口の位置図を図2-1に示す。

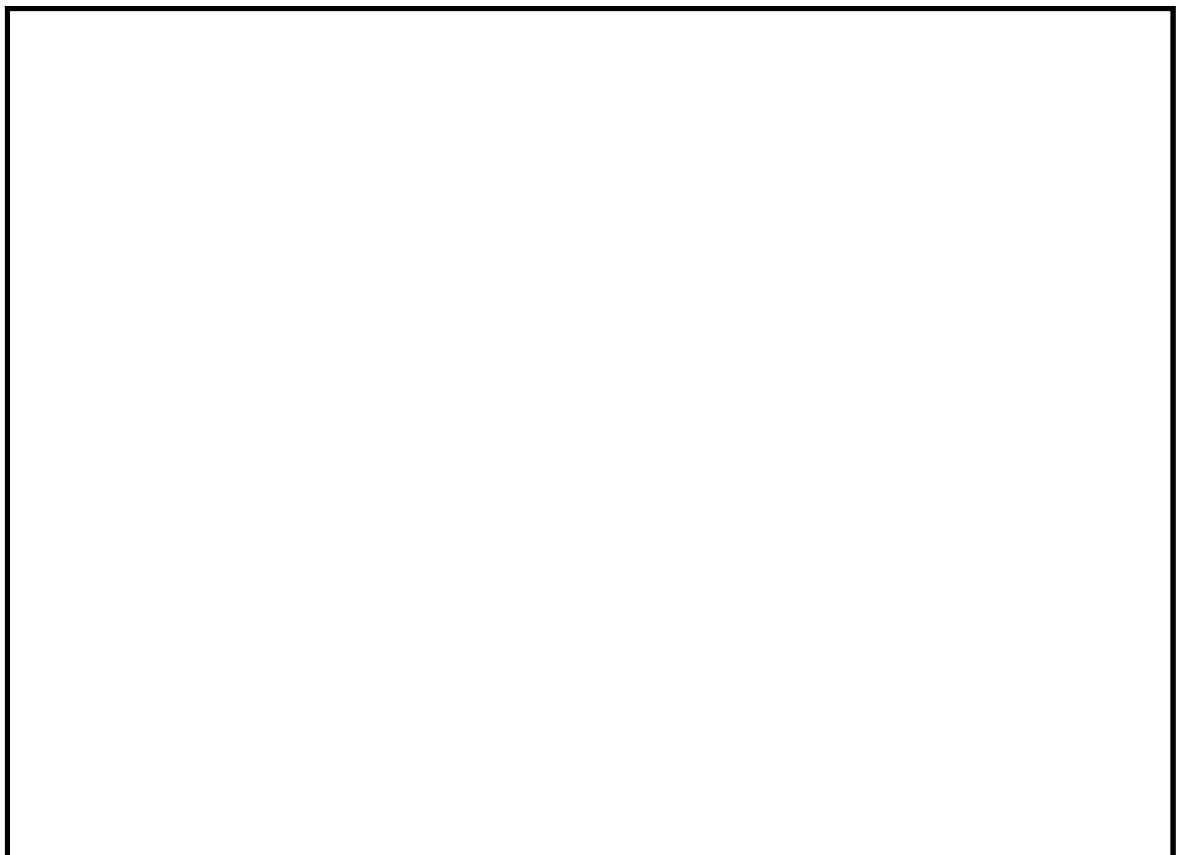


図 2-1 ディーゼル発電機吸気口の位置図

2.2 構造概要

ディーゼル発電機吸気口について、V-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、ディーゼル発電機吸気口の構造を示す。

ディーゼル発電機吸気口は、ディーゼル発電機1基につき2台設置しており、計6台の同一構造の吸気口を設置している。

ディーゼル発電機吸気口の構造は4脚たて置円筒型容器構造であり、**胴板と支持脚は溶接で接合しており**、支持脚は基礎部に溶接により固定している。

ディーゼル発電機吸気口の概要図を図2-2に示す。

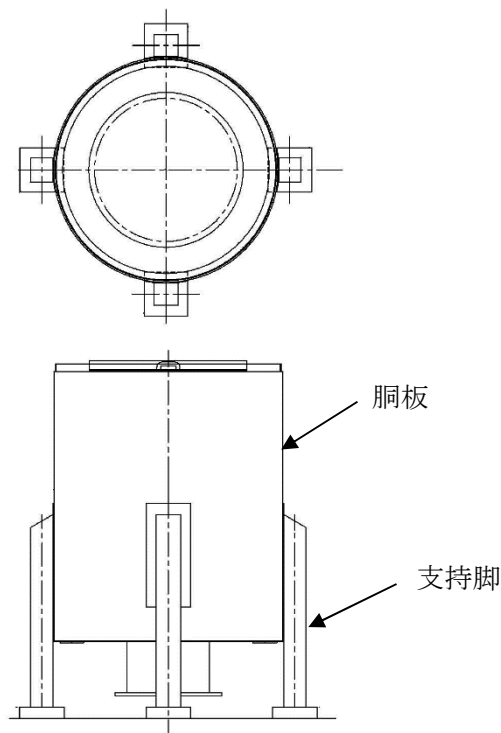


図2-2 ディーゼル発電機吸気口の概要図

2.3 評価方針

ディーゼル発電機吸気口の強度評価は、V-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、「4.1 荷重及び荷重の組合せ」及び「4.2 許容限界を踏まえ、ディーゼル発電機吸気口の評価対象部位に作用する応力等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。

ディーゼル発電機吸気口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、評価対象部位を設定する。

ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価フローを図2-3に示す。ディーゼル発電機吸気口に対して、設計竜巻による荷重に自重を加えた応力が許容応力以下であることを確認する。各部材の構造強度評価において、その部材に対して応力が大きくなる方向から風が当たること

を想定する。各部材の構造強度評価には、設計竜巻による荷重は水平方向より作用する外荷重という観点で地震荷重と同等なものであると考え、「原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 J E A G 4 6 0 1・補-1984」（（社）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」（（社）日本電気協会）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」（（社）日本電気協会）（以下「J E A G 4 6 0 1」という。）における1質点系モデルによる評価方法を準用し、V-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」に示すディーゼル発電機吸気口の評価式を用いる。

ディーゼル発電機吸気口の許容限界は、V-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、J E A G 4 6 0 1の許容応力状態Ⅲ_ASとする。

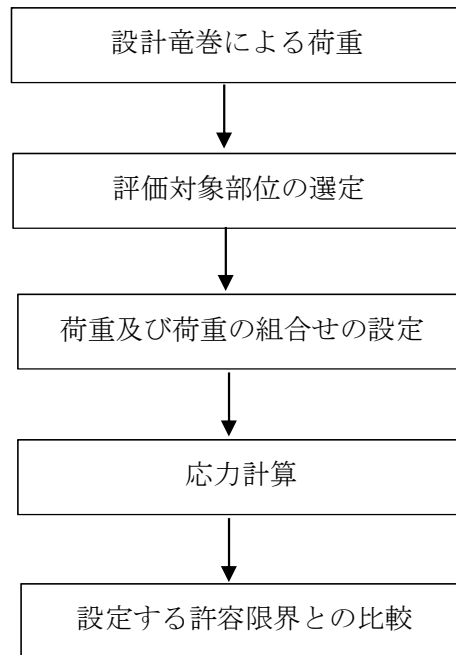


図2-3 ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「建築物荷重指針・同解説」（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・「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」（（社）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」（（社）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」（（社）日本電気協会）
- ・「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」（（社）日本機械学会（以下「J S M E」という。））

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価に用いる記号を表3-1に示す。

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (1/5)

記号	単位	定義
A	m ²	受圧面積 (風向に垂直な面に投影した面積)
A _s	mm ²	脚の断面積
A _{s r}	mm ²	脚の半径方向軸に対する有効せん断断面積
A _{s t}	mm ²	脚の周方向軸に対する有効せん断断面積
A _w	mm ²	支持脚基礎溶接部の有効面積
C	-	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
C ₁	mm	アタッチメントである脚の胴への取付部の幅の1/2(胴の周方向)
C ₂	mm	アタッチメントである脚の胴への取付部の幅の1/2(胴の軸方向)
C _c	-	応力の補正係数 (J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2))より得られる値)
C _l	-	応力の補正係数 (J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2))より得られる値)
D _i	mm	胴の内径
E	MPa	胴の縦弾性係数
E _s	MPa	脚の縦弾性係数
F	MPa	J S M E S S B - 3 1 2 1 . 1 (1) により規定される値
F ₀	N	振動モデル系における水平力
f _c	MPa	脚の許容圧縮応力
f _{b r}	MPa	脚の半径方向軸まわりの許容曲げ応力
f _{b t}	MPa	脚の半径方向に直角な方向の軸まわりの許容曲げ応力
f _t	MPa	脚の許容引張応力
G	-	ガスト影響係数
G _s	MPa	脚のせん断弾性係数
g	m/s ²	重力加速度 (=9.80665)
H	m	ディーゼル発電機吸気口高さ
I	mm ⁴	胴の断面2次モーメント
I _{s r}	mm ⁴	脚の半径方向軸に対する断面2次モーメント
I _{s t}	mm ⁴	脚の周方向軸に対する断面2次モーメント
J _s	mm ⁴	脚のねじりモーメント係数
K ₁ , K ₂	-	J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2)よりの定数
K _c	-	脚の胴つけ根部における周方向曲げモーメントに対する局部ばね定数 (J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-4)より得られる値)

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (2/5)

記号	単位	定義
K_L	-	胴の脚つけ根部における長手方向曲げモーメントに対する局部ばね定数 (J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-4)より得られる値)
K_r	-	胴の脚つけ根部における半径方向荷重に対する局部ばね定数 (J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-4)より得られる値)
k_L	-	J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2)によるアタッチメントパラメータ 軸方向の補正係数
k_c	-	J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2)によるアタッチメントパラメータ 周方向の補正係数
L	mm	脚の長さ
L_1	mm	支持脚間水平距離
L_c	mm	脚の中立軸間の距離
L_g	mm	基礎から容器上部重心までの距離
M_1	N・mm	風荷重(Z方向)による胴の脚つけ根部の鉛直方向モーメント
M_3	N・mm	風荷重(Z方向)による胴の脚つけ根部のねじりモーメント
M_c	N・mm	風荷重(Z方向)による胴の脚つけ根部の周方向モーメント (圧縮側)
M_L	N・mm	運転時質量による胴の脚つけ根部の鉛直方向モーメント (引張側)
M_x	N・mm	胴に生じる軸方向の曲げモーメント
M_ϕ	N・mm	胴に生じる周方向の曲げモーメント
m_0	kg	運転時質量
N_x	N/mm	胴に生じる軸方向の膜力
N_ϕ	N/mm	胴に生じる周方向の膜力
P	N	運転時質量による胴の脚つけ根部の半径方向荷重
P_1	N	風荷重(Z方向)による胴の脚つけ根部の半径方向荷重
Q	N	風荷重(Z方向)による胴の脚つけ根部の周方向荷重
Q_1	N	支持脚に作用するせん断荷重
q	N/m ²	設計用速度圧
R	N	運転時質量による脚の軸力
R_1	N	風荷重(Z方向)により脚に作用する軸力
r_m	mm	胴の平均半径
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
t	mm	胴の板厚
T	N	支持脚に作用する引張荷重
u	mm	脚の中心軸から胴の板厚中心までの距離
W_1	N	風荷重

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (3/5)

記号	単位	定義
W_T	N	設計竜巻による複合荷重
W_{T1}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T1}=W_P$)
W_{T2}	N	設計竜巻による複合荷重 ($W_{T2}=W_W+0.5 \cdot W_P+W_M$)
W_M	N	設計竜巻による飛来物の衝撃荷重
W_P	N	設計竜巻の気圧差による荷重
W_W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
Z_{sr}	mm ³	脚の半径方向軸に対する断面係数
Z_{st}	mm ³	脚の周方向軸に対する断面係数
β, β_1, β_2 β_c, β_L	-	J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2)によるアタッチメントパラメータ
γ	-	J E A G 4 6 0 1 参考文献(6.6.3-2)によるシェルパラメータ
ΔP	N/m ²	気圧差
Δ_r	mm	運転時質量による胴の半径方向局部変位量
Δ_{r1}	mm	水平力 F_0 による胴の半径方向局部変位量
Δ_{x1}	mm	水平力 F_0 による第1脚上端の水平方向変位量
Δ_{x3}	mm	水平力 F_0 による第2脚上端の水平方向変位量
Δ_{y1}	mm	水平力 F_0 による第1脚の鉛直方向変位量
θ	rad	運転時質量による胴の脚つけ根部における局部傾き角
θ_0	rad	水平力 F_0 による胴の中心軸の傾き角
θ_1	rad	水平力 F_0 による第1脚の傾き角 (圧縮側)
θ_2	rad	水平力 F_0 による胴の第1脚つけ根部における局部傾き角
θ_3	rad	水平力 F_0 による第2脚の傾き角
π	-	円周率
ρ	-	比重
σ_0	MPa	胴の一次一般膜応力の最大値
$\sigma_{0\phi}$	MPa	胴の周方向一次一般膜応力
σ_{0x}	MPa	胴の軸方向一次一般膜応力
σ_1	MPa	胴の一次応力の最大値
σ_2	MPa	胴の一次+二次応力の最大値
$\sigma_{11} \sim \sigma_{14}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の組合せ一次応力
σ_{15}, σ_{16}	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の組合せ一次応力
$\sigma_{21} \sim \sigma_{24}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の組合せ一次+二次応力
σ_{25}, σ_{26}	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の組合せ一次+二次応力
σ_s	MPa	脚の組合せ応力の最大値

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (4/5)

記号	単位	定義
σ_t	MPa	支持脚基礎溶接部に生じる引張応力
σ_{s1}, σ_{s2}	MPa	運転時質量による脚の圧縮応力, 曲げ応力
$\sigma_{s5} \sim \sigma_{s7}$	MPa	風荷重 (Z方向) による脚の圧縮応力, 曲げ応力
$\sigma_{s8} \sim \sigma_{s10}$	MPa	風荷重 (X方向) による脚の圧縮応力, 曲げ応力
σ_{sc}	MPa	脚の圧縮応力の和
σ_{sr}	MPa	脚の半径方向軸まわりの圧縮側曲げ応力の和
σ_{st}	MPa	脚の半径方向に直角な軸まわりの圧縮側曲げ応力の和
σ_{sx}	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の脚の組合せ応力
$\sigma_{sz1}, \sigma_{sz2}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の脚の組合せ応力
σ_{x1}	MPa	静水頭又は内圧による胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi1}$	MPa	静水頭又は内圧による胴の周方向応力
σ_{x2}	MPa	運転時質量による胴の軸方向応力
σ_{x3}	MPa	運転時質量により生じる鉛直方向モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi3}$	MPa	運転時質量により生じる鉛直方向モーメントによる胴の周方向応力
σ_{x4}	MPa	運転時質量により生じる半径方向荷重による胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi4}$	MPa	運転時質量により生じる半径方向荷重による胴の周方向応力
σ_{x5}	MPa	応力が作用した場合の転倒モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{x61}, \sigma_{x62}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の半径方向荷重による胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi61}, \sigma_{\phi62}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の半径方向荷重による胴の周方向応力
$\sigma_{x71}, \sigma_{x72}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の鉛直方向モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi71}, \sigma_{\phi72}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の鉛直方向モーメントによる胴の周方向応力
$\sigma_{x81}, \sigma_{x82}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の周方向モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi81}, \sigma_{\phi82}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の周方向モーメントによる胴の周方向応力
$\sigma_{x91}, \sigma_{x92}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の半径方向荷重による胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi91}, \sigma_{\phi92}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の半径方向荷重による胴の周方向応力

表3-1 構造強度評価に用いる記号 (5/5)

記号	単位	定義
$\sigma_{x101}, \sigma_{x102}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の鉛直方向モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi101}, \sigma_{\phi102}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の鉛直方向モーメントによる胴の周方向応力
$\sigma_{x111}, \sigma_{x112}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の周方向モーメントによる胴の軸方向応力
$\sigma_{\phi111}, \sigma_{\phi112}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の周方向モーメントによる胴の周方向応力
$\sigma_{xx1}, \sigma_{xx2}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和
$\sigma_{xx3}, \sigma_{xx4}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の軸方向一次+二次応力の和
$\sigma_{xz1} \sim \sigma_{xz4}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の軸方向一次応力の和
$\sigma_{xz5} \sim \sigma_{xz8}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の軸方向一次+二次応力の和
$\sigma_{\phi x1}, \sigma_{\phi x2}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の周方向一次応力の和
$\sigma_{\phi x3}, \sigma_{\phi x4}$	MPa	風荷重 (X方向) が作用した場合の胴の周方向一次+二次応力の和
$\sigma_{\phi z1} \sim \sigma_{\phi z4}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の周方向一次応力の和
$\sigma_{\phi z5} \sim \sigma_{\phi z8}$	MPa	風荷重 (Z方向) が作用した場合の胴の周方向一次+二次応力の和
τ	MPa	支持脚基礎溶接部に生じるせん断応力
τ_3	MPa	風荷重 (Z方向) により胴の脚つけ根部に生じるねじりモーメントによるせん断応力
τ_6	MPa	風荷重 (X方向) により胴の脚つけ根部に生じるねじりモーメントによるせん断応力
τ_{c1}	MPa	風荷重 (Z方向) により胴の脚つけ根部に生じる周方向せん断応力
τ_{c4}	MPa	風荷重 (X方向) により胴の脚つけ根部に生じる周方向せん断応力
τ_{L1}	MPa	運転時質量により胴の脚つけ根部に生じる軸方向せん断応力
τ_{L2}	MPa	風荷重 (Z方向) により胴の脚つけ根部に生じる軸方向せん断応力
τ_{L5}	MPa	風荷重 (X方向) により胴の脚つけ根部に生じる軸方向せん断応力

3.2 評価対象部位

ディーゼル発電機吸気口の評価対象部位は、V-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に従って、「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。

設計竜巻による荷重は、ディーゼル発電機吸気口の胴板に作用し、支持脚及び支持脚基礎溶接部に伝達される。

このことから、胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接部を評価対象部位として設定する。

ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価における評価対象部位を図3-1に示す。

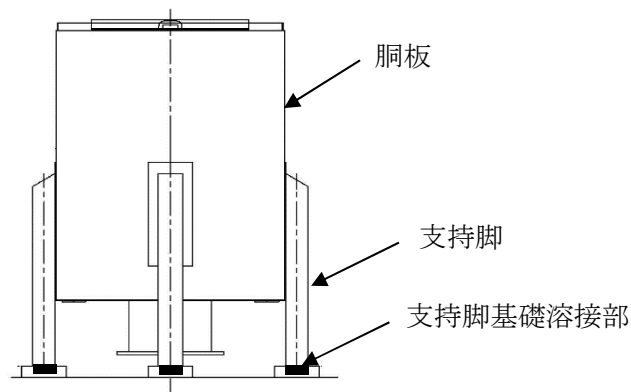


図3-1 ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価の評価対象部位

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、V-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) 荷重の設定

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

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を考慮する。

b. 設計竜巻による荷重

風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物による衝撃荷重を考慮する。

(a) 風圧力による荷重(W_w)

風圧力による荷重 W_w は、V-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(3)c.(a) 風圧力による荷重」に示す式に従い、算出する。

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

(b) 気圧差による荷重(W_p)

気圧差による荷重 W_p は、V-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(3)c.(b) 気圧差による荷重」に示す式に従い、算出する。

$$W_p = \Delta P \cdot A$$

(c) 荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_T (W_{T1} , W_{T2})は、V-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、算出する。なお、ディーゼル発電機吸気口は気圧差が生じ難い構造であるため、複合荷重の選定において、 W_{T2} としては気圧差を考慮するが、 W_{T1} の評価は実施しない。また、ディーゼル発電機吸気口は、設計飛来物が衝突により貫通することを考慮しても、閉塞することがなく、ディーゼル発電機の吸気機能は維持され、且つ速やかに補修する方針とするため、設計竜巻による荷重とこれに組み合わせる荷重に衝撃荷重を考慮しない。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5W_P + W_M$$

(2) 荷重の組合せ

構造強度評価に用いる荷重の組合せは、V-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、ディーゼル発電機吸気口の評価対象部位ごとに設定する。

ディーゼル発電機吸気口の胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接部には、自重及び風圧力、気圧差による荷重が作用する。

構造強度評価の荷重の組合せを表3-2に示す。

表 3-2 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
屋外の外部事象 防護対象施設	ディーゼル発電機 吸気口	<ul style="list-style-type: none"> ・ 胴板 ・ 支持脚 ・ 支持脚基礎溶接部 	<ul style="list-style-type: none"> ① 自重 ② 風圧力による荷重 ③ 気圧差による荷重

3.4 許容限界

ディーゼル発電機吸気口の許容限界は、V-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」にて設定した評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、J E A G 4 6 0 1に基づく許容応力状態Ⅲ_ASの許容応力の許容荷重を用いる。

ディーゼル発電機吸気口の許容限界は、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」、支持脚及び支持脚基礎溶接部については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計算する際は、評価対象部位の最高使用温度又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の表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。

ディーゼル発電機吸気口の許容限界について、表3-3に示す。

表3-3 許容限界

評価対象部位	許容応力状態	応力の種類		許容限界
胴板	Ⅲ _A S	一次一般膜		Min (S _y , 0.6S _u)
		一次		上欄の1.5倍
		一次+二次		2S _y
支持脚	Ⅲ _A S	組合せ		1.5f _t
		座屈		$\sigma_{sr}/f_{br} + \sigma_{st}/f_{bt} + \sigma_{sc}/f_c \leq 1$
支持脚 基礎溶接部	Ⅲ _A S	一次	引張	1.5f _t
			せん断	1.5f _s

支持脚については、圧縮、曲げの組合せ応力の最大値を求め、引張応力の許容値で評価する。

また、溶接部について上記応力の組合せが考えられる場合、J SME SSB-3121.1(6)、SSB-3121.2、SSB-3121.3を準用し、組合せ応力に対しても評価を行う。

以下に組合せ応力の許容応力の評価式を示す。

垂直応力とせん断応力を生じる構造部分の応力は、次の計算式を満足しなければならない。

$$1.5 f_t \geq \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3\tau_{xy}^2}$$

3.5 評価方法

ディーゼル発電機吸気口の構造強度評価は、V-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」にて設定しているディーゼル発電機吸気口の評価式を用いる。

評価式は、J E A G 4 6 0 1 の 4 脚たて置き円筒型容器に準拠するが、J E A G 4 6 0 1 の参考文献の範囲に含まれない箇所については、解析コード「MSC/NASTRAN」を用いて、3次元 FEM モデルによりモデル化し評価を実施する。

(1) 計算モデル

設計竜巻による荷重及び自重に対する、胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接部の構造強度を 1 質点系モデルとして評価を行う。ここで、荷重の作用点はディーゼル発電機吸気口高さの 1/2 より高い重心位置に作用させる。ディーゼル発電機吸気口胴板、支持脚及び支持脚基礎溶接部の評価モデル図を図 3-2 に、ディーゼル発電機吸気口の変形モード図を図 3-3 に示す。

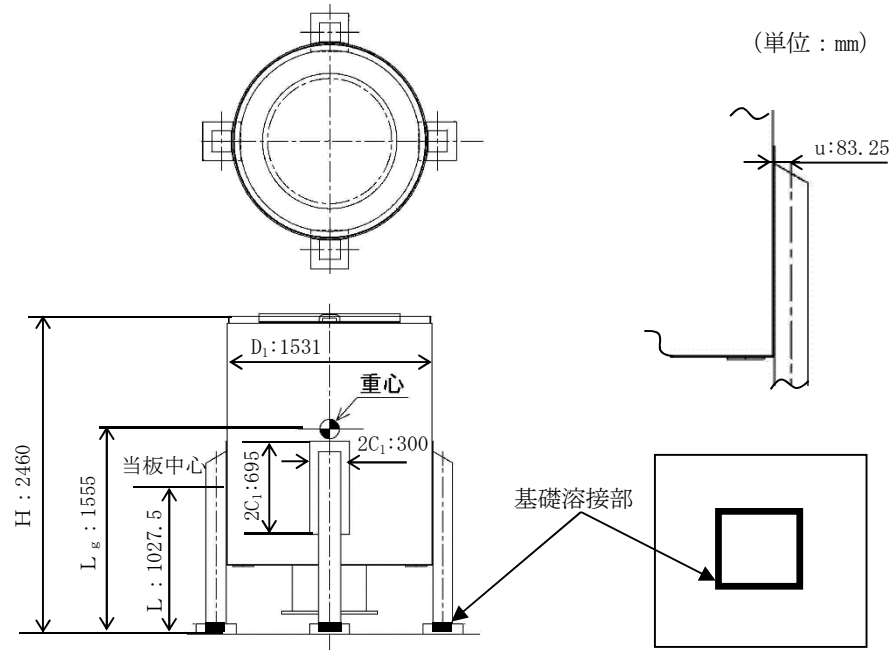


図 3-2 ディーゼル発電機吸気口の評価モデル図

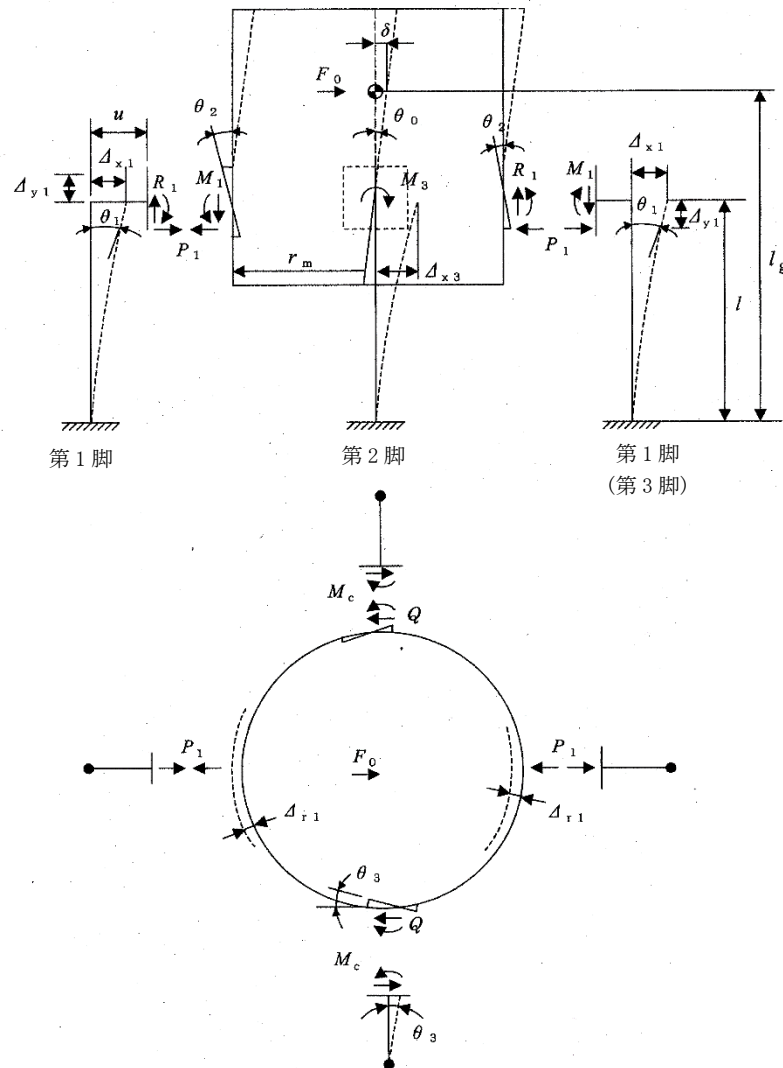


図 3-3 ディーゼル発電機吸気口の変形モード図

(2) 計算方法

a. 荷重の設定

水平力の釣合より

$$2P_1 + 2Q = F_0$$

転倒モーメントの釣合より

$$2M_1 - 2M_3 + 2R_1 \cdot r_m = F_0(L_g - L)$$

ただし,

$$r_m = (D_i + t) / 2$$

第1脚の水平方向変位量 Δ_{x1} , 傾き角 θ_1 , 鉛直方向変位量 Δ_{y1} は次による。

$$\Delta_{x1} = \frac{P_1 \cdot L^3}{3E_s \cdot I_{st}} + \frac{P_1 \cdot L}{G_s \cdot A_{sr}} + \frac{(M_1 - R_1 \cdot u)L^2}{2E_s \cdot I_{st}}$$

ここで,

$$u = \frac{L_c}{2} - r_m$$

$$\theta_1 = \frac{(M_1 - R_1 \cdot u)L}{E_s \cdot I_{st}} + \frac{P_1 \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{st}}$$

$$\Delta_{y1} = \frac{R_1 \cdot L}{A_s \cdot E_s}$$

胴の半径方向局部変位量 Δ_{r1} と局部傾き角 θ_2 は次による。

$$\Delta_{r1} = \frac{K_r \cdot P_1}{r_m \cdot E}$$

$$\theta_2 = \frac{K_L \cdot M_1}{r_m^3 \cdot \beta_L^2 \cdot E}$$

ここで, β_L は次による。

$$\beta_L = k_L \sqrt[3]{\beta_1 \cdot \beta_2^2}$$

$$\beta_1 = \frac{C_1}{r_m}$$

$$\beta_2 = \frac{C_2}{r_m}$$

第2脚の傾き角 θ_0 と水平方向変位量 Δ_{x3} は, 次による。

$$\theta_0 = -\frac{M_3 \cdot L}{E_s \cdot I_{sr}} + \frac{Q \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{sr}}$$

$$\Delta_{x3} = \frac{Q \cdot L^3}{3E_s \cdot I_{sr}} + \frac{Q \cdot L}{G_s \cdot A_{st}} - \frac{M_3 \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{sr}}$$

第1脚と胴の傾き角の釣合より

$$\theta_1 + \theta_2 - \theta_0 = 0$$

第2脚のねじり角と局部傾き角は等しいことから

$$\theta_3 = \frac{(Q \cdot u - M_c)L}{G_s \cdot J_s} = \frac{K_c \cdot M_c}{r_m^3 \cdot \beta_c^2 \cdot E}$$

ここで、 β_c は次による。

$$\beta_c = k_c \sqrt[3]{\beta_1^2 \cdot \beta_2}$$

$$\beta_1 = \frac{C_1}{r_m}$$

$$\beta_2 = \frac{C_2}{r_m}$$

脚と胴の水平方向変位の釣合より

$$\Delta_{x1} + \Delta_{r1} = \Delta_{x3} + u \cdot \theta_3$$

さらに鉛直方向変位の釣合より

$$\Delta_{y1} - u \cdot \theta_1 - r_m \cdot \theta_0 = 0$$

式を代入して、

$$\frac{R_1 \cdot L}{A_s \cdot E_s} - \frac{u(M_1 - R_1 \cdot u)L}{E_s \cdot I_{st}} - \frac{u \cdot P_1 \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{st}} + \frac{r_m \cdot M_3 \cdot L}{E_s \cdot I_{sr}} - \frac{r_m \cdot Q \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{sr}} = 0$$

式を代入して

$$\frac{(M_1 - R_1 \cdot u)L}{E_s \cdot I_{st}} + \frac{P_1 \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{st}} + \frac{K_L \cdot M_1}{r_m^3 \cdot \beta_1^2 \cdot E} + \frac{M_3 \cdot L}{E_s \cdot I_{sr}} - \frac{Q \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{sr}} = 0$$

式を変形して

$$\frac{u \cdot Q \cdot L}{G_s \cdot J_s} - \frac{M_c \cdot L}{G_s \cdot J_s} - \frac{K_c \cdot M_c}{r_m^3 \cdot \beta_c^2 \cdot E} = 0$$

式を代入して

$$\begin{aligned} \frac{P_1 \cdot L^3}{3E_s \cdot I_{st}} + \frac{P_1 \cdot L}{G_s \cdot A_{sr}} + \frac{(M_1 - R_1 \cdot u)L^2}{2E_s \cdot I_{st}} + \frac{K_r \cdot P_1}{r_m \cdot E} \\ - \frac{Q \cdot L^3}{3E_s \cdot I_{sr}} - \frac{Q \cdot L}{G_s \cdot A_{st}} + \frac{M_3 \cdot L^2}{2E_s \cdot I_{sr}} - \frac{u \cdot K_c \cdot M_c}{r_m^3 \cdot \beta_c^2 \cdot E} = 0 \end{aligned}$$

したがって、6 変数 $P_1, Q, R_1, M_1, M_3, M_c$ に対して上記式を連立させることにより方程式ができる。

b. 胴の応力計算

(a) 静水頭又は内圧による応力

ディーゼル発電機吸気口に静水頭、内圧は発生しないため、 $\sigma_{\phi 1}$ 及び $\sigma_{x 1}$ は 0 となる。

(b) 運転時質量による応力

$$\sigma_{x 2} = \frac{m_0 \cdot g}{\pi (D_i + t) t}$$

(c) 運転時質量による胴の脚つけ根部の応力

脚下端が固定の場合、軸力 R は次による。

$$R = \frac{m_0 \cdot g}{4}$$

脚下端が固定の場合の脚及び胴の変形を図 3-3 に示す。

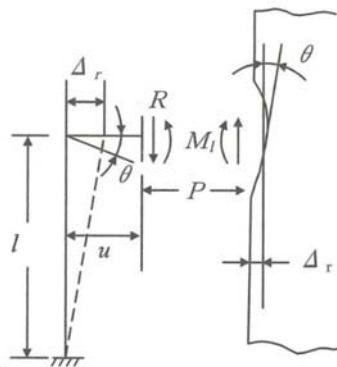


図 3-3 脚下端が固定の場合の脚及び胴の変形

脚の半径方向変位量と胴の半径方向局部変位量は等しいことから

$$\Delta_r = \frac{-P \cdot L^3}{3 \cdot E_s \cdot I_{s t}} + \frac{-P \cdot L}{G_s \cdot A_{s r}} + \frac{(R \cdot u - M_L) L^2}{2 E_s \cdot I_{s t}} = \frac{K_r \cdot P}{r_m \cdot E}$$

また、脚上端の傾き角と胴の局部傾き角は等しいことから

$$\theta = \frac{(R \cdot u - M_L) L}{E_s \cdot I_{s t}} - \frac{P \cdot L^2}{2 E_s \cdot I_{s t}} = \frac{K_L \cdot M_L}{r_m^3 \cdot \beta_L^2 \cdot E}$$

したがって

$$M_L = \frac{\left(\frac{L^3}{12E_s \cdot I_{st}} + \frac{L}{G_s \cdot A_{sr}} + \frac{K_r}{r_m \cdot E} \right) \frac{m_0 \cdot g \cdot u \cdot L}{4E_s \cdot I_{st}}}{\left(\frac{L^3}{3E_s \cdot I_{st}} + \frac{L}{G_s \cdot A_{sr}} + \frac{K_r}{r_m \cdot E} \right) \left(\frac{L}{E_s \cdot I_{st}} + \frac{K_L}{r_m^3 \cdot \beta_L^2 \cdot E} \right) - \left(\frac{L^2}{2E_s \cdot I_{st}} \right)^2}$$

$$P = \frac{\frac{m_0 \cdot g}{4} u - M_L}{2E_s \cdot I_{st}} L^2$$

$$P = \frac{L^3}{3E_s \cdot I_{st}} + \frac{L}{G_s \cdot A_{sr}} + \frac{K_r}{r_m \cdot E}$$

鉛直方向モーメント M_L により生じる胴の局部応力は、**図 3-4 に示す 3 次元 FEM モデル**より求める(以下*を付記する)ことにより算定する。

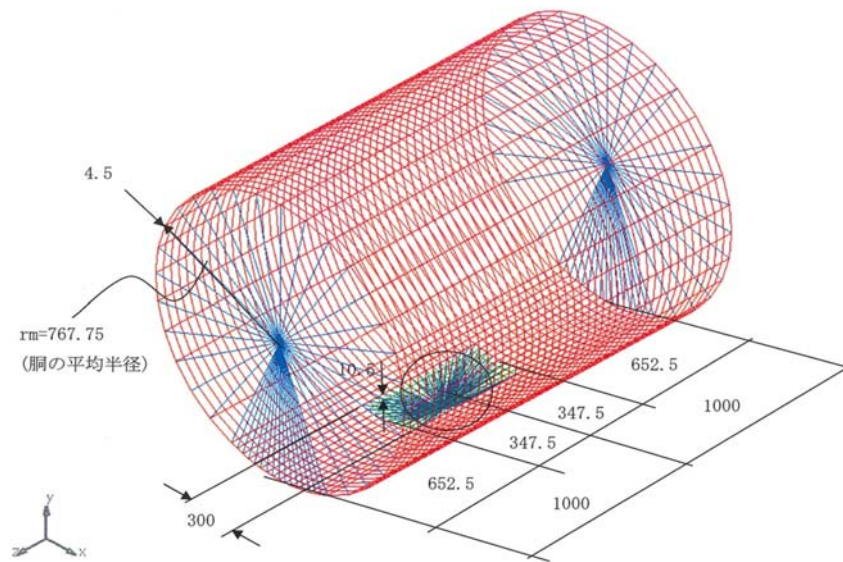


図 3-4 3次元 FEM モデル

$$\sigma_{\phi 3} = \left[\frac{N_{\phi}}{M_L / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_L}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L^*$$

$$\sigma_{x3} = \left[\frac{N_x}{M_L / (r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_L}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L^*$$

半径方向荷重Pにより生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 4} = \left[\frac{N_{\phi}}{P/r_m} \right]^* \left(\frac{P}{r_m \cdot t} \right)$$

$$\sigma_{x 4} = \left[\frac{N_x}{P/r_m} \right]^* \left(\frac{P}{r_m \cdot t} \right)$$

反力Rによるせん断応力は、次による。

$$\tau_{L 1} = \frac{R}{4C_2 \cdot t}$$

(d) 風荷重による胴の曲げ応力

$$\sigma_{x 5} = \frac{W_1(L_g - L)(D_i + 2t)}{2I}$$

(e) Z方向荷重による胴の脚つけ根部の応力

イ. 一次応力

半径方向荷重P₁により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 6 1} = \left[\frac{N_{\phi}}{P_1/r_m} \right]^* \left(\frac{P_1}{r_m \cdot t} \right)$$

$$\sigma_{x 6 1} = \left[\frac{N_x}{P_1/r_m} \right]^* \left(\frac{P_1}{r_m \cdot t} \right)$$

鉛直方向曲げモーメントM₁により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 7 1} = \left[\frac{N_{\phi}}{M_1/(r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_1}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L^*$$

$$\sigma_{x 7 1} = \left[\frac{N_x}{M_1/(r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_1}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_L} \right) C_L^*$$

周方向曲げモーメントM_cにより生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 8 1} = \left[\frac{N_{\phi}}{M_c/(r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_c}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_c} \right) C_c^*$$

$$\sigma_{x 8 1} = \left[\frac{N_x}{M_c/(r_m^2 \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{M_c}{r_m^2 \cdot t \cdot \beta_c} \right) C_c^*$$

ここで、β_cは次による。

$$\beta_c = \sqrt[3]{\beta_1^2 \cdot \beta_2}$$

周方向せん断力 Q によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{c1} = \frac{Q}{4C_1 \cdot t}$$

鉛直方向せん断力 R_1 によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{L2} = \frac{R_1}{4C_2 \cdot t}$$

ねじりモーメント M_3 により生じる胴の局部せん断応力は、次による。

$$\tau_3 = \frac{M_3}{2\pi \cdot C_1^2 \cdot t}$$

ロ. 二次応力

半径方向荷重 P_1 により生じる胴の局部曲げ応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 62} = \left[\frac{M_{\phi}}{P_1} \right]^* \left(\frac{6P_1}{t^2} \right)$$

$$\sigma_{x 62} = \left[\frac{M_x}{P_1} \right]^* \left(\frac{6P_1}{t^2} \right)$$

鉛直方向曲げモーメント M_1 により生じる胴の局部曲げ応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 72} = \left[\frac{M_{\phi}}{M_1 / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_1}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_L} \right)$$

$$\sigma_{x 72} = \left[\frac{M_x}{M_1 / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_1}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_L} \right)$$

周方向曲げモーメント M_c により生じる胴の局部曲げ応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 82} = \left[\frac{M_{\phi}}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_c}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_c} \right)$$

$$\sigma_{x 82} = \left[\frac{M_x}{M_c / (r_m \cdot \beta)} \right]^* \left(\frac{6M_c}{r_m \cdot t^2 \cdot \beta_c} \right)$$

(f) X方向荷重による胴の脚つけ根部の応力

イ. 一次応力

半径方向荷重 P_1 により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 91} = \sigma_{\phi 61} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 91} = \sigma_{x 61} / \sqrt{2}$$

鉛直方向曲げモーメント M_1 により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 101} = \sigma_{\phi 71} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 101} = \sigma_{x 71} / \sqrt{2}$$

周方向曲げモーメント M_c により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 111} = \sigma_{\phi 81} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 111} = \sigma_{x 81} / \sqrt{2}$$

周方向せん断力 Q によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{c4} = \tau_{c1} / \sqrt{2}$$

鉛直方向せん断力 R_1 によるせん断応力は、次による。

$$\tau_{L5} = \tau_{L2} / \sqrt{2}$$

ねじりモーメント M_3 により生じる胴の局部せん断応力は、次による。

$$\tau_6 = \tau_3 / \sqrt{2}$$

ロ. 二次応力

半径方向荷重 P_1 により生じる胴の局部曲げ応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 92} = \sigma_{\phi 62} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 92} = \sigma_{x 62} / \sqrt{2}$$

鉛直方向曲げモーメント M_1 により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 102} = \sigma_{\phi 72} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 102} = \sigma_{x 72} / \sqrt{2}$$

周方向曲げモーメント M_c により生じる胴の局部応力は、次による。

$$\sigma_{\phi 112} = \sigma_{\phi 82} / \sqrt{2}$$

$$\sigma_{x 112} = \sigma_{x 82} / \sqrt{2}$$

(g) 組合せ応力

(a)～(f)項によって算出される脚つけ根部に生じる胴の応力は、次により組み合わせる。

イ. 一次一般膜応力

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

$$\sigma_{0x} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 5}$$

$$\sigma_0 = \max[\sigma_{0\phi}, \sigma_{0x}]$$

ロ. 一次応力 (膜+曲げ)

胴の評価点を図 3-5 に示す。

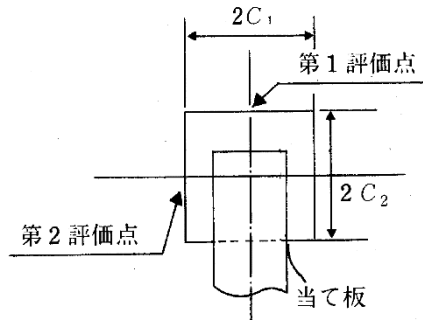


図 3-5 胴の評価点

(イ) Z 方向荷重が作用した場合

・ 第 1 脚つけ根部

(第 1 評価点)

$$\sigma_{\phi z 1} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 6 1} + \sigma_{\phi 7 1}$$

$$\sigma_{x z 1} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sigma_{x 4} + \sigma_{x 5} + \sigma_{x 6 1} + \sigma_{x 7 1}$$

$$\sigma_{1 1} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi z 1} + \sigma_{x z 1} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 1} - \sigma_{x z 1})^2}$$

(第 2 評価点)

$$\sigma_{\phi z 2} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 6 1}$$

$$\sigma_{x z 2} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 4} + \sigma_{x 5} + \sigma_{x 6 1}$$

$$\sigma_{1 2} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi z 2} + \sigma_{x z 2} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 2} - \sigma_{x z 2})^2 + 4(\tau_{L 1} + \tau_{L 2})^2}$$

・ 第 2 脚つけ根部

(第 1 評価点)

$$\sigma_{\phi z 3} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 4}$$

$$\sigma_{x z 3} = \sigma_{x 1} + \sigma_{x 2} + \sigma_{x 3} + \sigma_{x 4}$$

$$\sigma_{1 3} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi z 3} + \sigma_{x z 3} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 3} - \sigma_{x z 3})^2 + 4(\tau_{c 1} + \tau_3)^2}$$

(第 2 評価点)

$$\sigma_{\phi z 4} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 8 1}$$

$$\sigma_{xz4} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x4} + \sigma_{x81}$$

$$\sigma_{14} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi z4} + \sigma_{xz4} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi z4} - \sigma_{xz4})^2 + 4(\tau_{L1} + \tau_3)^2}$$

(ロ) X方向荷重が作用した場合

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi x1} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 3} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 91} + \sigma_{\phi 101}$$

$$\sigma_{xx1} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x3} + \sigma_{x4} + \sigma_{x5} + \sigma_{x91} + \sigma_{x101}$$

$$\sigma_{15} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi x1} + \sigma_{xx1} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi x1} - \sigma_{xx1})^2 + 4(\tau_{c4} + \tau_6)^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi x2} = \sigma_{\phi 1} + \sigma_{\phi 4} + \sigma_{\phi 91} + \sigma_{\phi 111}$$

$$\sigma_{xx2} = \sigma_{x1} + \sigma_{x2} + \sigma_{x4} + \sigma_{x5} + \sigma_{x91} + \sigma_{x111}$$

$$\sigma_{16} = \frac{1}{2} \left\{ \sigma_{\phi x2} + \sigma_{xx2} \right\} + \sqrt{(\sigma_{\phi x2} - \sigma_{xx2})^2 + 4(\tau_{L1} + \tau_{L5} + \tau_6)^2}$$

$$\sigma_1 = \max[\sigma_{11}, \sigma_{12}, \sigma_{13}, \sigma_{14}, \sigma_{15}, \sigma_{16}]$$

ハ. 組合せ一次+二次応力

(イ) Z方向荷重が作用した場合

・第1脚つけ根部

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi z5} = \sigma_{\phi 61} + \sigma_{\phi 62} + \sigma_{\phi 71} + \sigma_{\phi 72}$$

$$\sigma_{xz5} = \sigma_{x5} + \sigma_{x61} + \sigma_{x62} + \sigma_{x71} + \sigma_{x72}$$

$$\sigma_{21} = \sigma_{\phi z5} + \sigma_{xz5} + \sqrt{(\sigma_{\phi z5} - \sigma_{xz5})^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi z6} = \sigma_{\phi 61} + \sigma_{\phi 62}$$

$$\sigma_{xz6} = \sigma_{x5} + \sigma_{x61} + \sigma_{x62}$$

$$\sigma_{22} = \sigma_{\phi z6} + \sigma_{xz6} + \sqrt{(\sigma_{\phi z6} - \sigma_{xz6})^2 + 4\tau_{L2}^2}$$

・第2脚つけ根部

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi z 7} = 0$$

$$\sigma_{x z 7} = 0$$

$$\sigma_{23} = \sigma_{\phi z 7} + \sigma_{x z 7} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 7} - \sigma_{x z 7})^2 + 4(\tau_{c1} + \tau_3)^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi z 8} = \sigma_{\phi 81} + \sigma_{\phi 82}$$

$$\sigma_{x z 8} = \sigma_{x 81} + \sigma_{x 82}$$

$$\sigma_{24} = \sigma_{\phi z 8} + \sigma_{x z 8} + \sqrt{(\sigma_{\phi z 8} - \sigma_{x z 8})^2 + 4\tau_3^2}$$

(ロ) X方向荷重が作用した場合

(第1評価点)

$$\sigma_{\phi x 3} = \sigma_{\phi 91} + \sigma_{\phi 101} + \sigma_{\phi 92} + \sigma_{\phi 102}$$

$$\sigma_{x x 3} = \sigma_{x 5} + \sigma_{x 91} + \sigma_{x 101} + \sigma_{x 92} + \sigma_{x 102}$$

$$\sigma_{25} = \sigma_{\phi x 3} + \sigma_{x x 3} + \sqrt{(\sigma_{\phi x 3} - \sigma_{x x 3})^2 + 4(\tau_{c4} + \tau_6)^2}$$

(第2評価点)

$$\sigma_{\phi x 4} = \sigma_{\phi 11} + \sigma_{\phi 91} + \sigma_{\phi 92} + \sigma_{\phi 111} + \sigma_{\phi 112}$$

$$\sigma_{x x 4} = \sigma_{x 5} + \sigma_{x 91} + \sigma_{x 92} + \sigma_{x 111} + \sigma_{x 112}$$

$$\sigma_{26} = \sigma_{\phi x 4} + \sigma_{x x 4} + \sqrt{(\sigma_{\phi x 4} - \sigma_{x x 4})^2 + 4(\tau_{L5} + \tau_6)^2}$$

$$\sigma_2 = \max[\sigma_{21}, \sigma_{22}, \sigma_{23}, \sigma_{24}, \sigma_{25}, \sigma_{26}]$$

c. 脚の応力計算

(a) 運転時質量による応力

$$\sigma_{s1} = \frac{R}{A_s}$$

$$\sigma_{s2} = \frac{\max[|R \cdot u - M_L - P \cdot L|, |R \cdot u - M_L|]}{Z_{st}}$$

(b) 風荷重 (Z方向) による応力

イ. 第1脚

$$\sigma_{s5} = \frac{R_1}{A_s}$$

$$\sigma_{s6} = \frac{\max[|R_1 \cdot u - M_1 - P_1 \cdot L|, |R_1 \cdot u - M_1|]}{Z_{st}}$$

ロ. 第2脚

$$\sigma_{s7} = \frac{\max\left[|Q \cdot L - M_3|, |M_3|\right]}{Z_{sr}}$$

(c) X方向荷重による応力

$$\sigma_{s8} = \frac{R_1}{\sqrt{2} \cdot A_s}$$

$$\sigma_{s9} = \frac{\max\left[|R_1 \cdot u - M_1 - P_1 \cdot L|, |R_1 \cdot u - M_1|\right]}{\sqrt{2} \cdot Z_{st}}$$

$$\sigma_{s10} = \frac{\max\left[|Q \cdot L - M_3|, |M_3|\right]}{\sqrt{2} \cdot Z_{sr}}$$

(d) 組合せ応力

脚の最大応力は、下記式による。

イ. Z方向荷重が作用した場合

(イ) 第1脚

$$\sigma_{sz1} = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s5} + \sigma_{s6}$$

(ロ) 第2脚

$$\sigma_{sz2} = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s7}$$

ロ. X方向荷重が作用した場合

$$\sigma_{sx} = \sigma_{s1} + \sigma_{s2} + \sigma_{s8} + \sigma_{s9} + \sigma_{s10}$$

$$\sigma_s = \max[\sigma_{sz1}, \sigma_{sz2}, \sigma_{sx}]$$

(e) 組合せ圧縮応力

イ. Z方向荷重が作用した場合

(イ) 第1脚

$$\sigma_{sc} = \sigma_{s1} + \sigma_{s5}$$

$$\sigma_{st} = \sigma_{s2} + \sigma_{s6}$$

$$\sigma_{sr} = 0$$

(ロ) 第2脚

$$\sigma_{sc} = \sigma_{s1}$$

$$\sigma_{st} = \sigma_{s2}$$

$$\sigma_{sr} = \sigma_{s7}$$

ロ. X方向荷重が作用した場合

$$\sigma_{s c} = \sigma_{s 1} + \sigma_{s 8}$$

$$\sigma_{s t} = \sigma_{s 2} + \sigma_{s 9}$$

$$\sigma_{s r} = \sigma_{s 10}$$

圧縮と曲げの組合せについて、座屈評価用の式を次式より求める。

$$\frac{\sigma_{s r}}{f_{b r}} + \frac{\sigma_{s t}}{f_{b t}} + \frac{\sigma_{s c}}{f_c} \leq 1$$

d. 支持脚基礎溶接部の応力計算

(a) 引張応力の算出

風圧力による荷重 W_{T2} によるモーメント M により、2本の支持脚には吸気口の支持脚基礎溶接部に作用する引張荷重 T が作用する。

モーメントの釣り合いを考えると、

$$M = W_{T2} \cdot L_g = 2 \cdot T \cdot L_1$$

よって吸気口の支持脚基礎溶接部に作用する引張荷重 T は以下のようにになる。

$$T = \frac{W_{T2} \cdot L_g}{2L_1}$$

吸気口の支持脚基礎溶接部に生じる引張応力 σ_t は以下のようにになる。

$$\sigma_t = \frac{T}{A_w} = \frac{W_{T2} \cdot L_g}{2L_1 \cdot A_w}$$

(b) せん断応力の算出

吸気口の支持脚基礎溶接部に作用するせん断荷重 Q は以下のようにになる。

$$Q_1 = \frac{W_{T2}}{4}$$

よって、吸気口の支持脚基礎溶接部に生じるせん断応力 τ は以下のようにになる。

$$\tau = \frac{Q_1}{A_w} = \frac{W_{T2}}{4A_w}$$

(c) 組合せ応力の算出

$$\sigma = \sqrt{\sigma_t^2 + 3\tau^2}$$

4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表 4-1～表 4-3 に示す。

表 4-1 許容応力評価に用いる条件 (ディーゼル発電機吸気口)

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S_y (MPa)	S_u (MPa)	F (MPa)	$1.5 f_t$ (MPa)	$1.5 f_s$ (MPa)
胴板	SS400	50	241	394	—	—	—
支持脚	SS400	50	241	394	241	241	—
支持脚基礎溶接部	SS400	50	241	394	241	241	139

表 4-2 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	C (-)	ΔP (N/m ²)	W_M (N)
6.1×10^3	1.0	1.2	8.9×10^3	0

表 4-3 評価条件

A (m ²)	A_s (mm ²)	A_w (mm ²)	A_{sr} (mm ²)	A_{st} (mm ²)	C_1 (mm)
3.79	8550	4455	4336	4728	150.0

C_2 (mm)	D_i (mm)	E (MPa)	E_s (MPa)	F_0 (N)	G_s (MPa)
347.5	1531	201000	201000	1	77300

I (mm ⁴)	I_{sr} (mm ⁴)	I_{st} (mm ⁴)	J_s (mm ⁴)	L (mm)	L_1 (mm)
6.398×10^9	3.155×10^7	2.697×10^7	4.316×10^7	1027.5	1203.5

L_c (mm)	L_g (mm)	m_0 (kg)	r_m (mm)	t (mm)	W_w (N)
1702.0	1555.0	1800	767.8	4.5	27740

W_P (N)	W_{T2} (N)	Z_{sr} (mm ³)	Z_{st} (mm ³)
33730	44610	3.824×10^5	3.569×10^5

5. 強度評価結果

構造強度評価結果を表 5-1 に示す。

ディーゼル発電機吸気口に発生する応力は許容応力以下である。

表 5-1 ディーゼル発電機吸気口の評価結果

評価部位	材料	応力		許容応力 [MPa]	発生応力 [MPa]
胴板	SS400	一次一般膜		236	4
		一次		354	21
		一次+二次		482	55
支持脚	SS400	組合せ		241	26
		座屈 (圧縮+曲げ)		1*	0.11
支持脚基礎溶接部	SS400	一次	引張	241	7
			せん断	139	3
			組合せ	241	9

※：検定比（下式）による。

$$\sigma_{sr}/f_{br} + \sigma_{st}/f_{bt} + \sigma_{sc}/f_c \leq 1$$

(白紙)

V-3-別添 1-1-1 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の
強度計算書

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.....	16
2.4 適用規格.....	18
3. 強度評価方法.....	19
3.1 記号の定義.....	19
3.2 評価対象部位.....	20
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	21
3.4 許容限界.....	24
3.5 評価方法.....	26
4. 評価条件.....	50
4.1 貫通評価.....	61
4.2 裏面剥離評価.....	63
4.3 変形評価.....	65
5. 強度評価結果.....	76
5.1 貫通評価.....	76
5.2 裏面剥離評価.....	78
5.3 変形評価.....	79

1. 概要

本資料は、V-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、竜巻より防護すべき施設を内包する施設である原子炉建屋、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋、緊急時対策所（以下「建屋」という。）及び軽油貯蔵タンクタンク室（以下「構造物」という。）が、設置（変更）許可申請において示す設計飛来物（以下「飛来物」という。）の衝突に加え、風圧力及び気圧差に対し、竜巻時及び竜巻通過後においても、竜巻より防護すべき施設の安全機能を損なわないよう、内包する竜巻より防護すべき施設に飛来物が衝突することを防止する機能を有すること及び竜巻より防護すべき施設に必要な機能を損なわないことを確認するものである。

2. 基本方針

建屋及び構造物について、V-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、建屋及び構造物の「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

建屋及び構造物の配置図を図2-1に示す。



図 2-1 建屋及び構造物の配置図

2.2 構造概要

建屋及び構造物は、V-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」に示す構造計画とする。

建屋は、主体構造が鉄筋コンクリート造で、一部鉄骨造を有する構造である。また、原子炉建屋には、外殻を構成する部材として扉が設置されている。

軽油貯蔵タンクタンク室は、地中に埋設された構造物であり、地上部に露出する頂版を含めた外殻の躯体は鉄筋コンクリート造とし、地上部に露出する開口部の蓋は鋼製である。

建屋及び構造物の概略平面図及び概略断面図を図 2-2～図 2-11 に示す。また原子炉建屋における外殻となる扉の位置図を図 2-12～図 2-15 に示す。

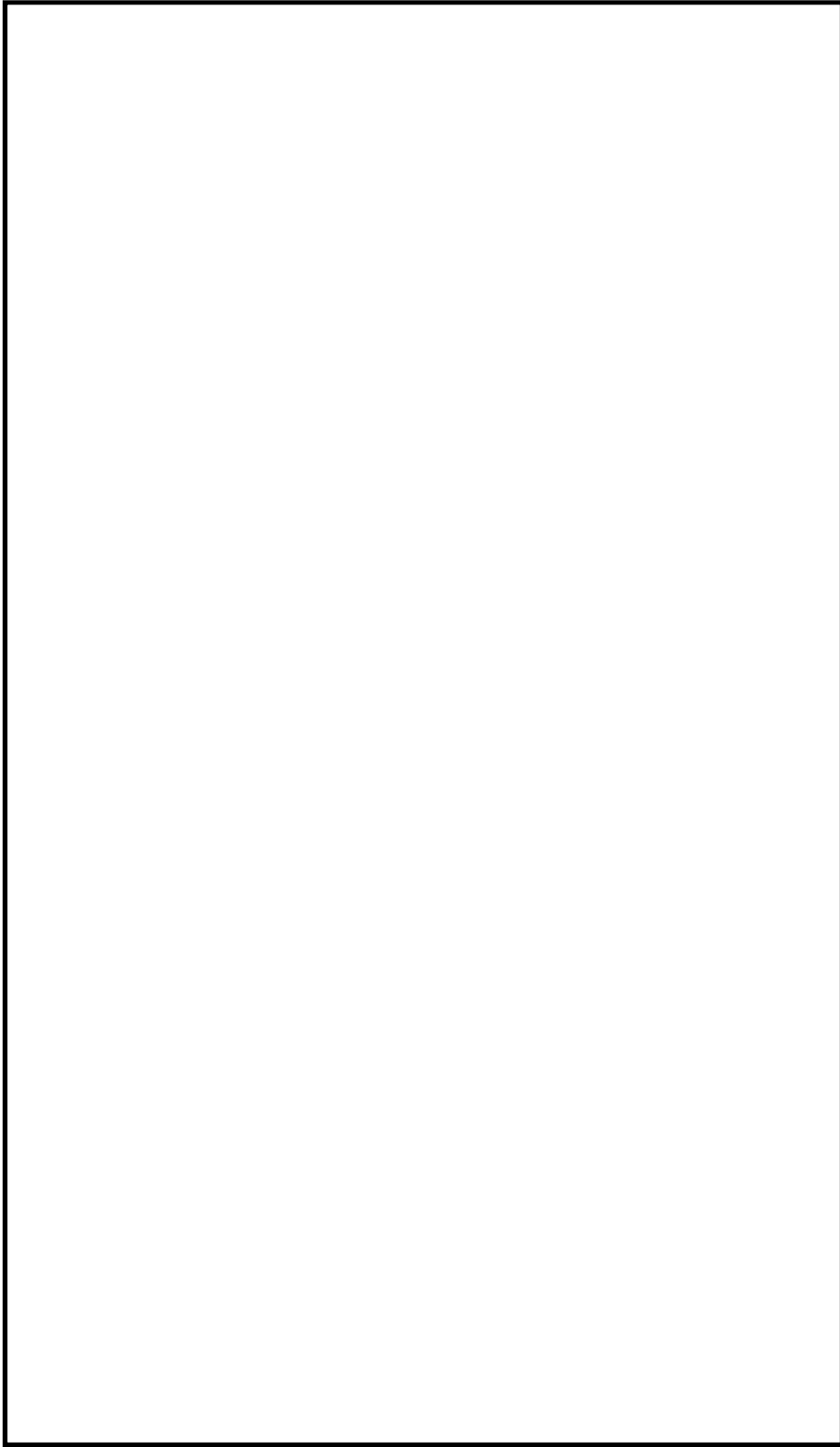


図2-2 原子炉建屋の概略平面図

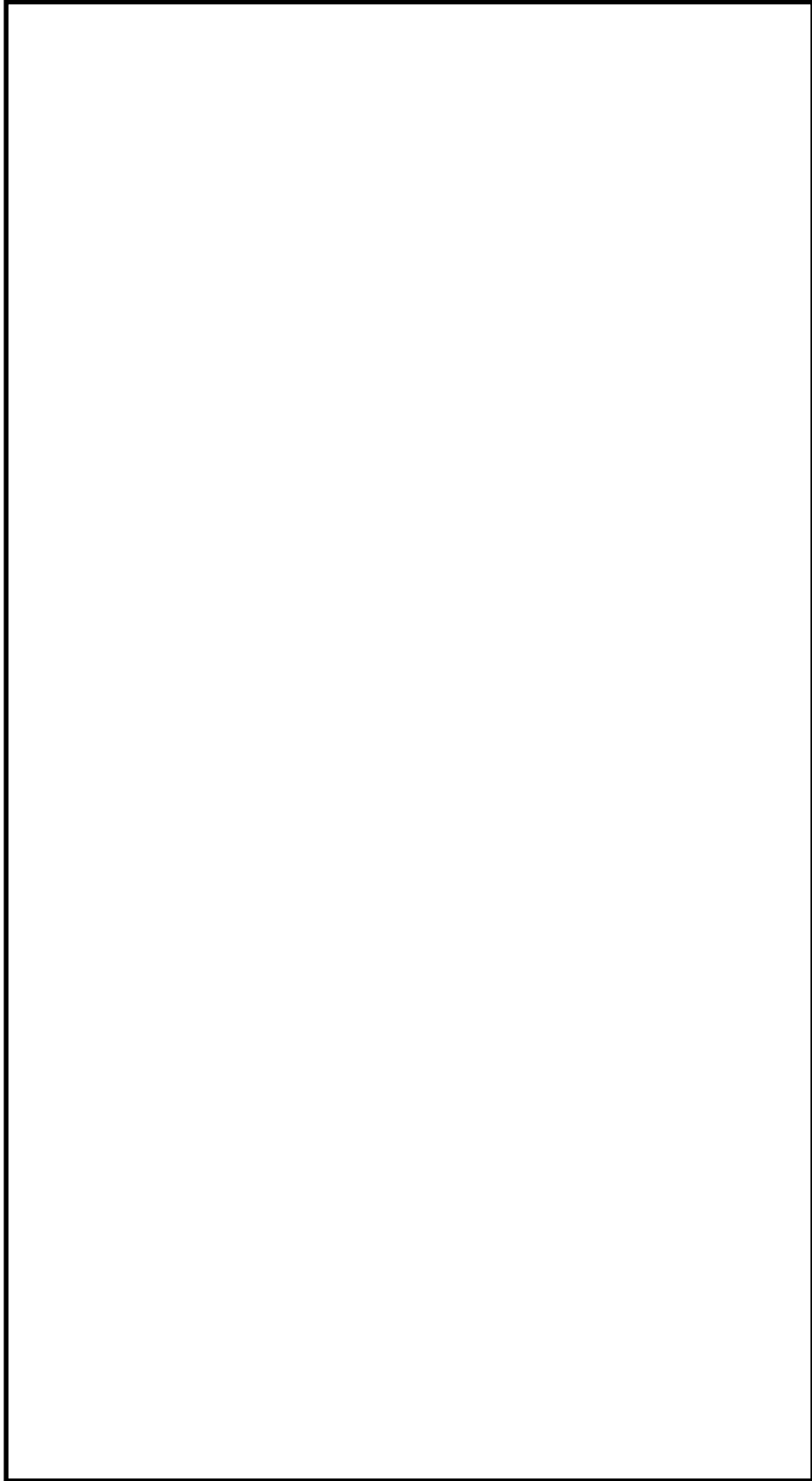


図 2-3 原子炉建屋の概略断面図(1/2)

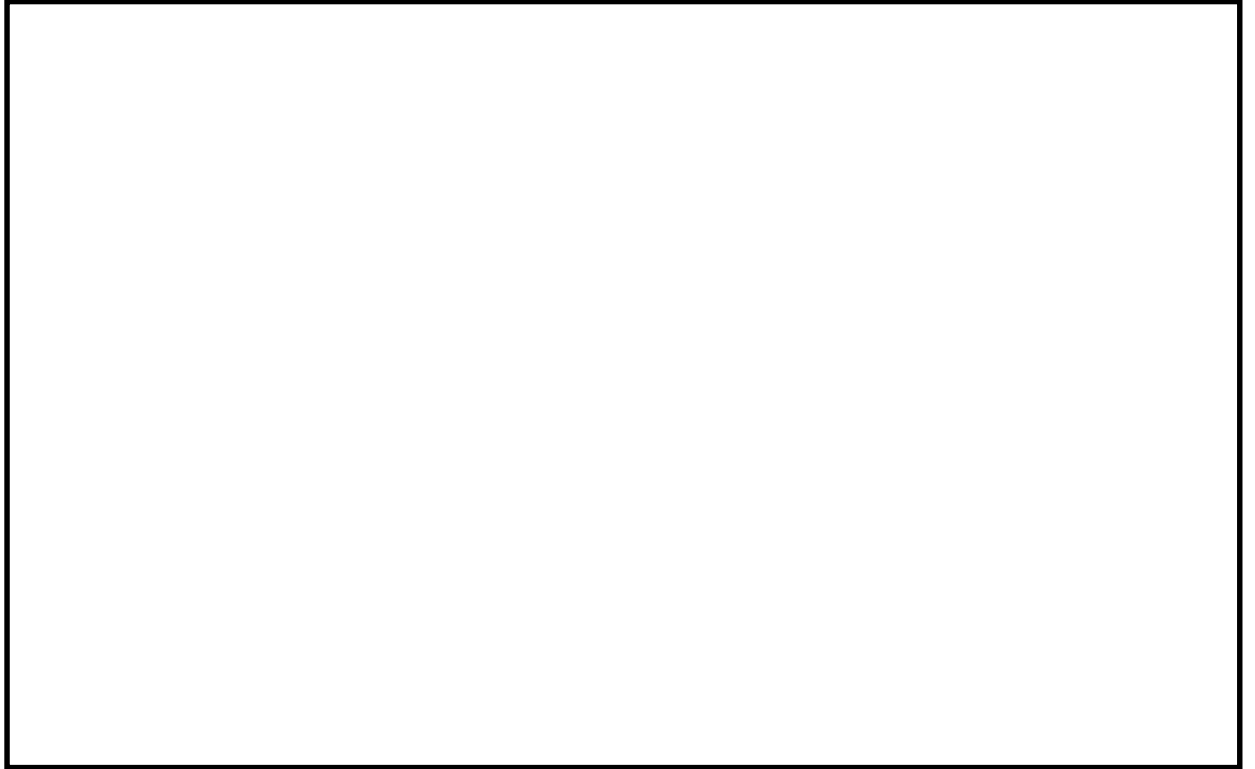


図 2-3 原子炉建屋の概略断面図(2/2：鉄骨構造部)

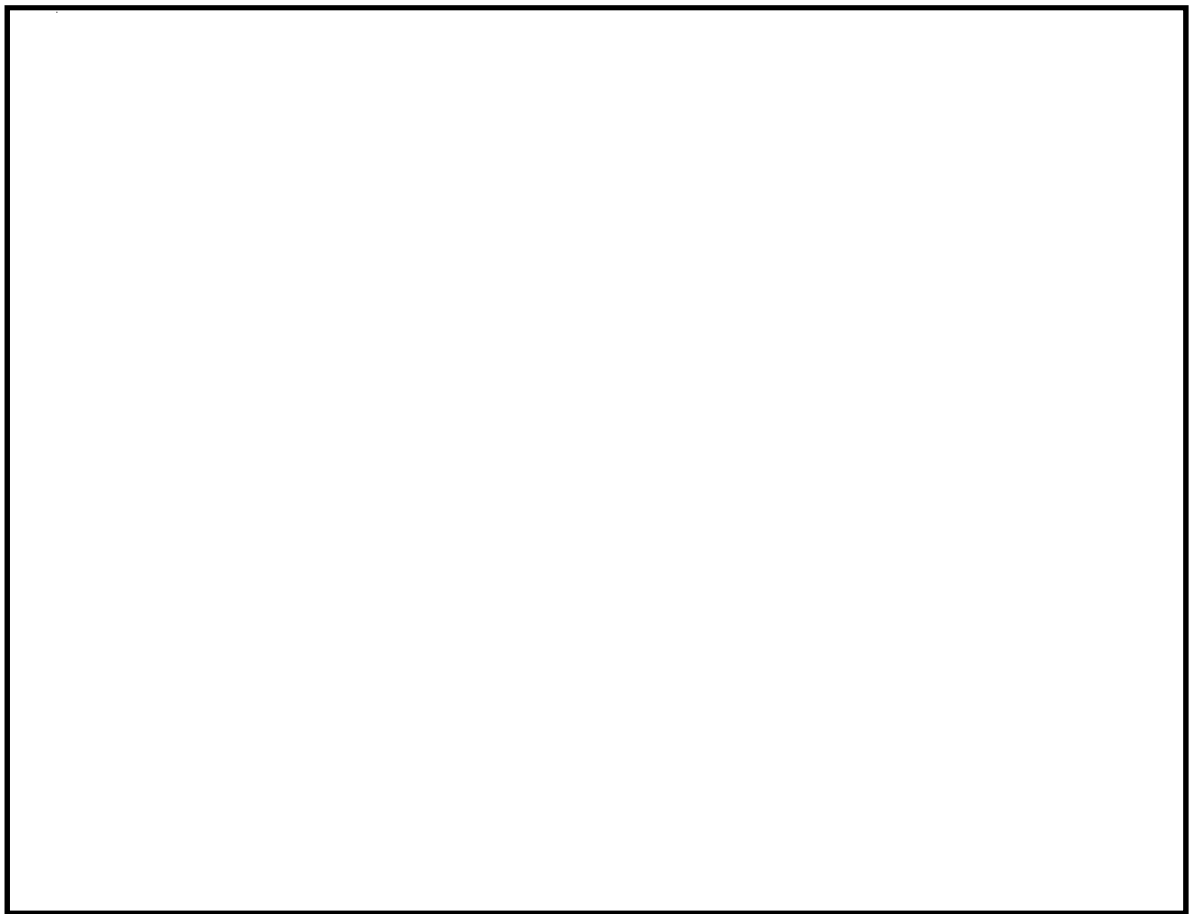


図 2-4 タービン建屋の概略平面図

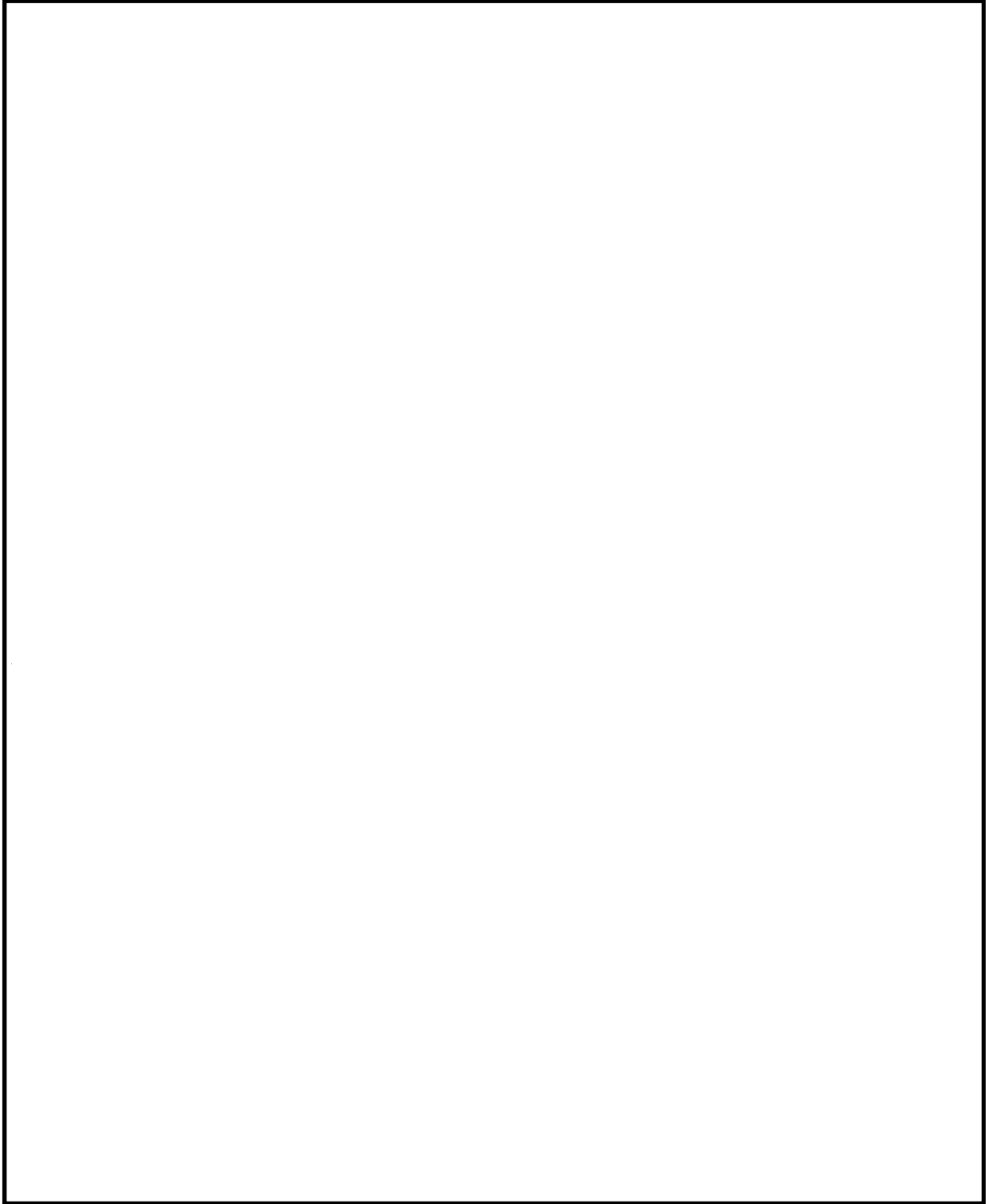


図 2-5 タービン建屋の概略断面図

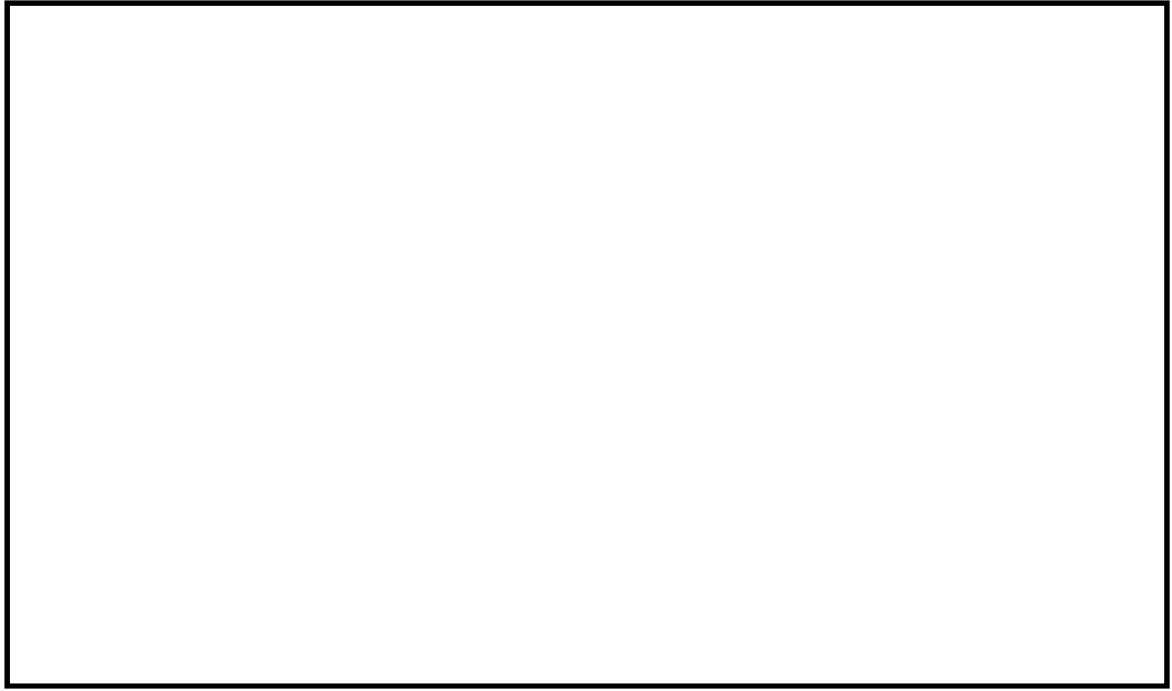


図 2-6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略平面図

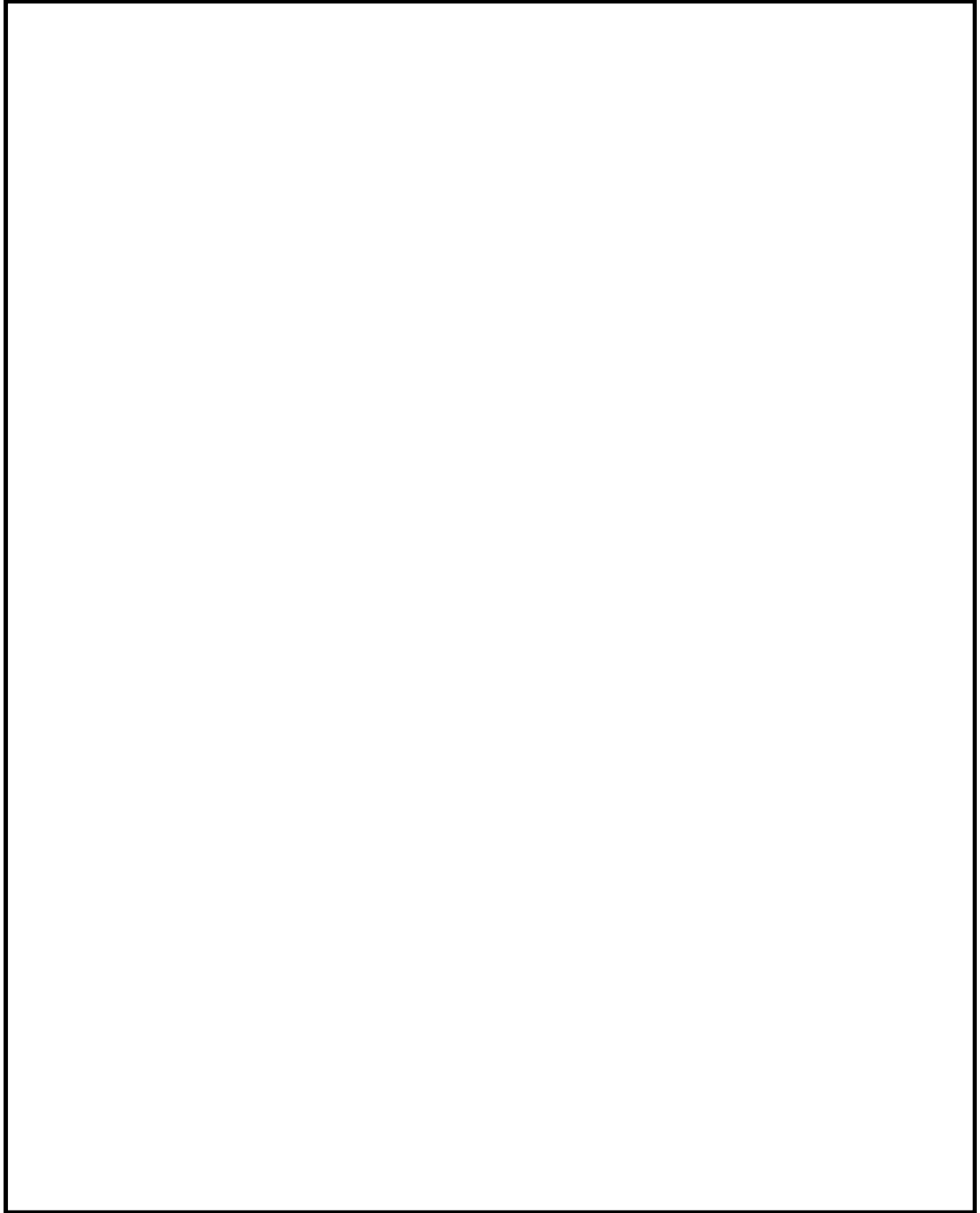


図 2-7 使用済燃料乾式貯蔵建屋の概略断面図



図2-8 軽油貯蔵タンクタンク室の概略平面図

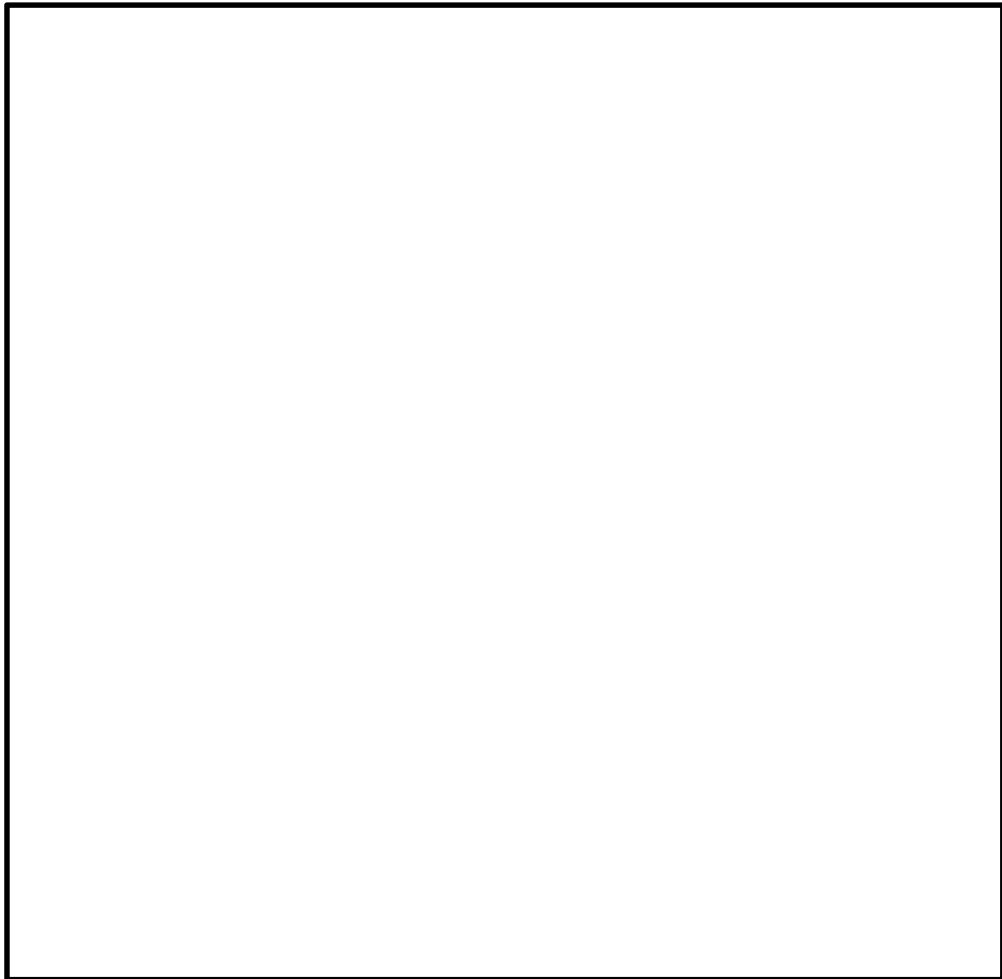


図2-9 軽油貯蔵タンクタンク室の概略断面図

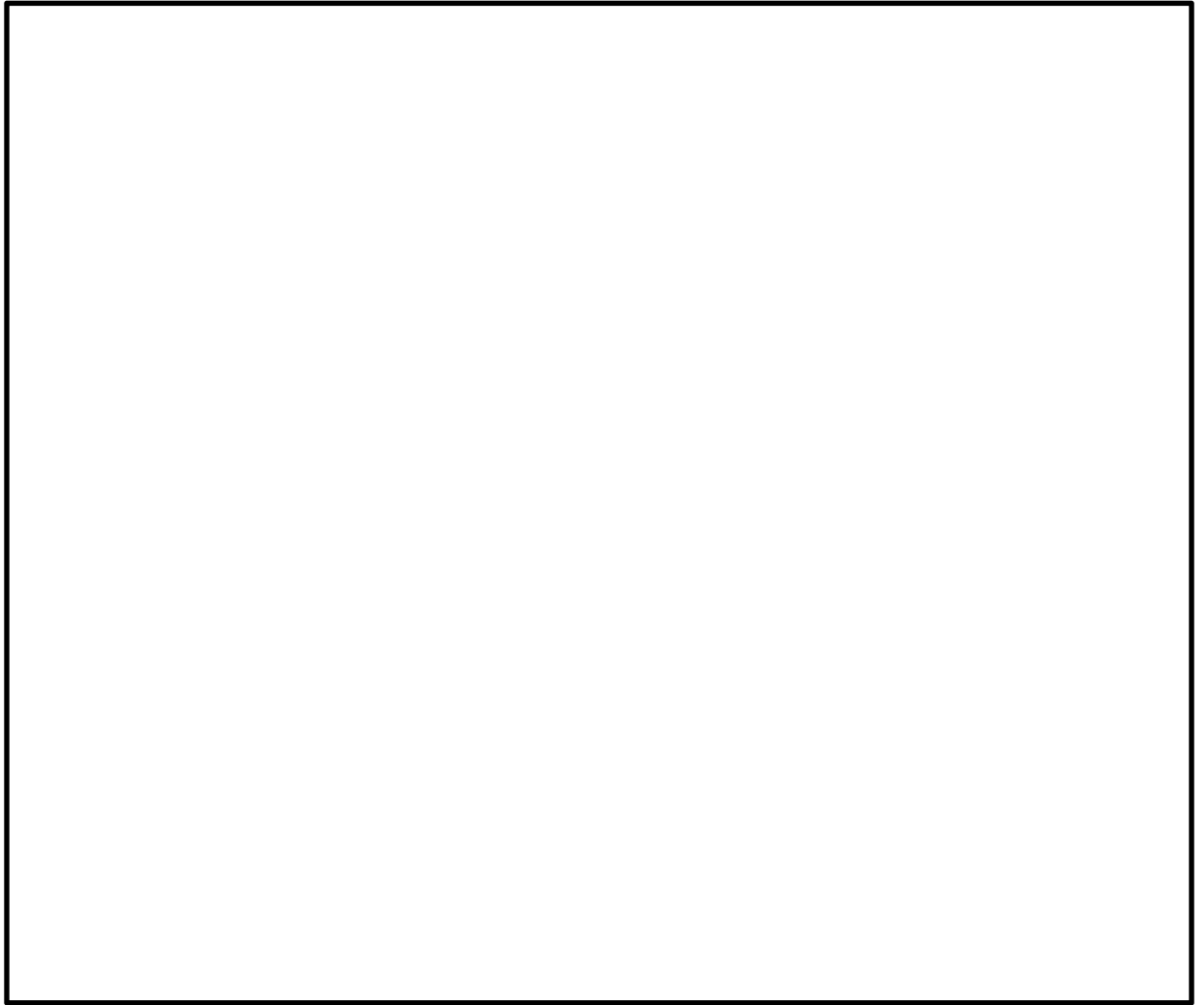


図2-10 緊急時対策所の概略平面図

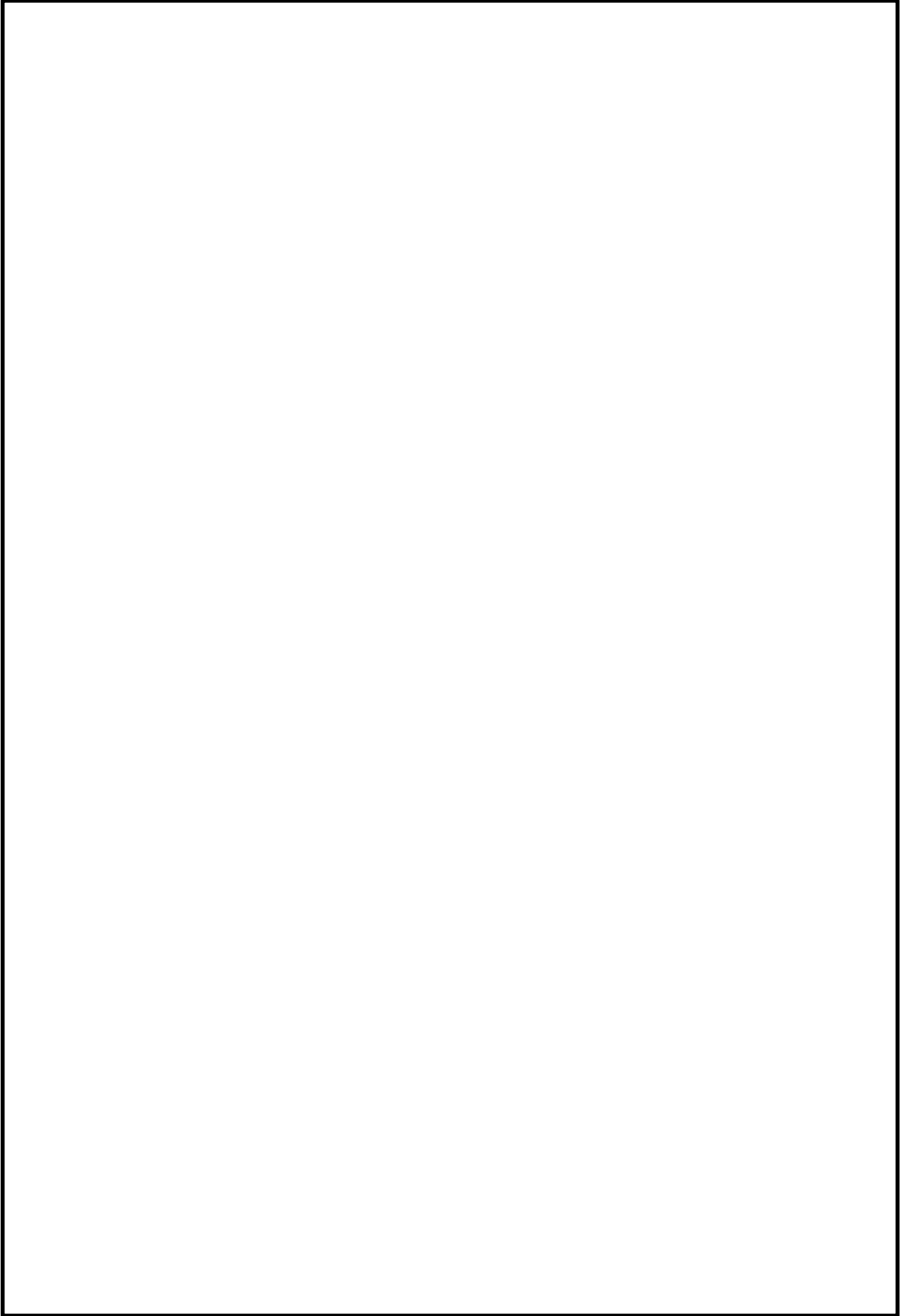


図2-11 緊急時対策所の概略断面図

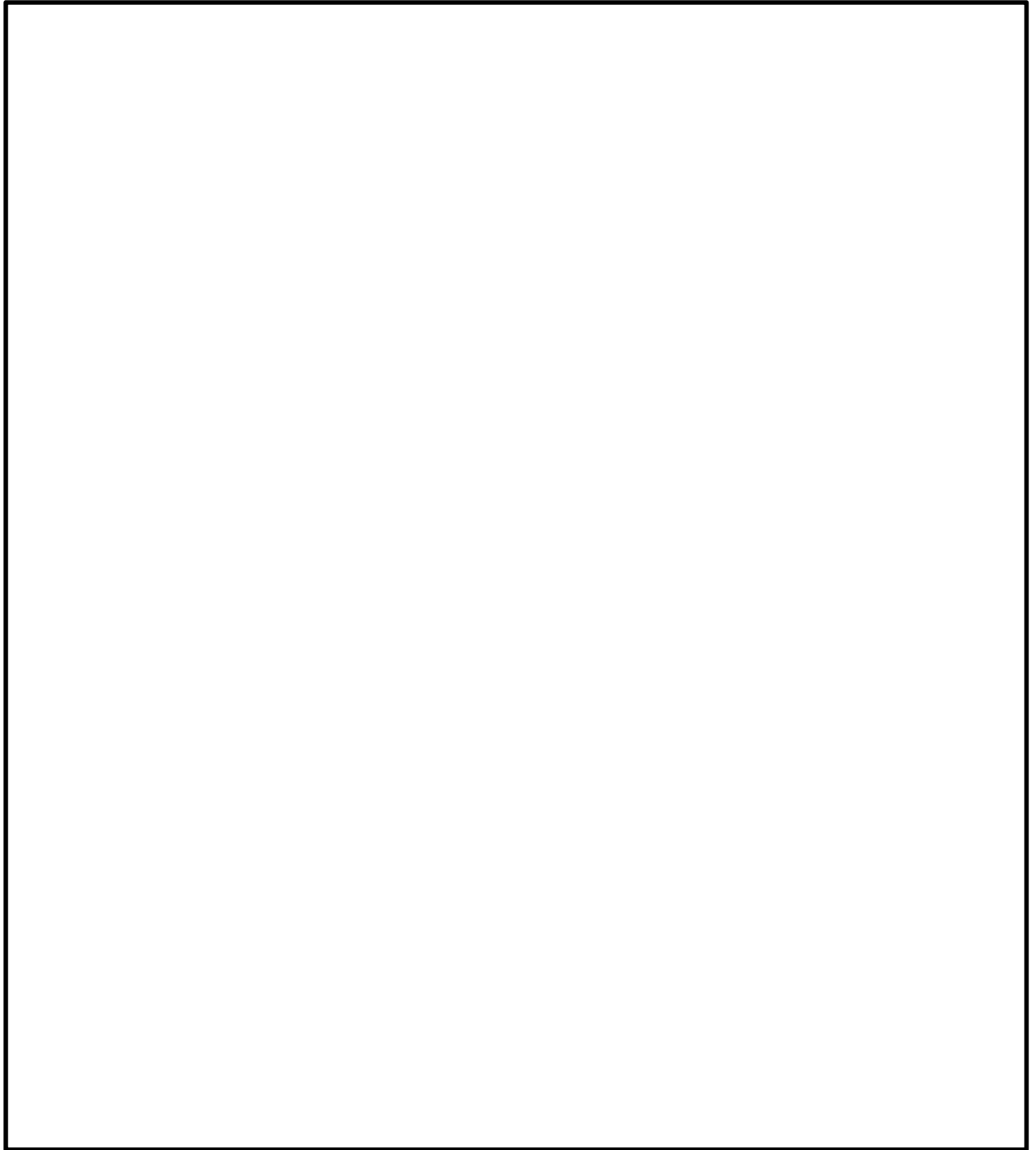


図2-12 原子炉建屋の外殻となる扉の位置図 (EL. +8.2m)

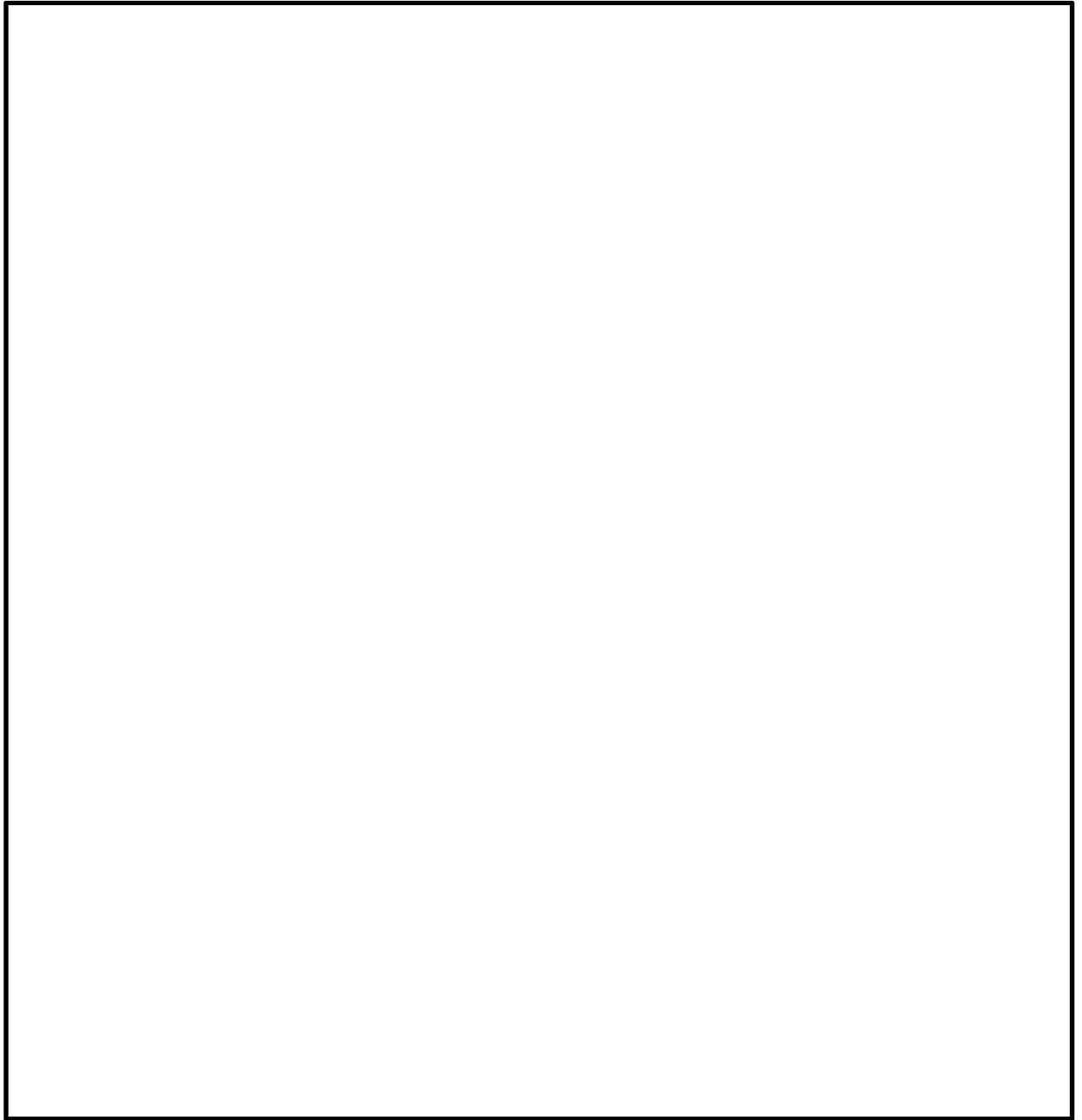


図2-13 原子炉建屋の外殻となる扉の位置図 (EL. +14. 0m)

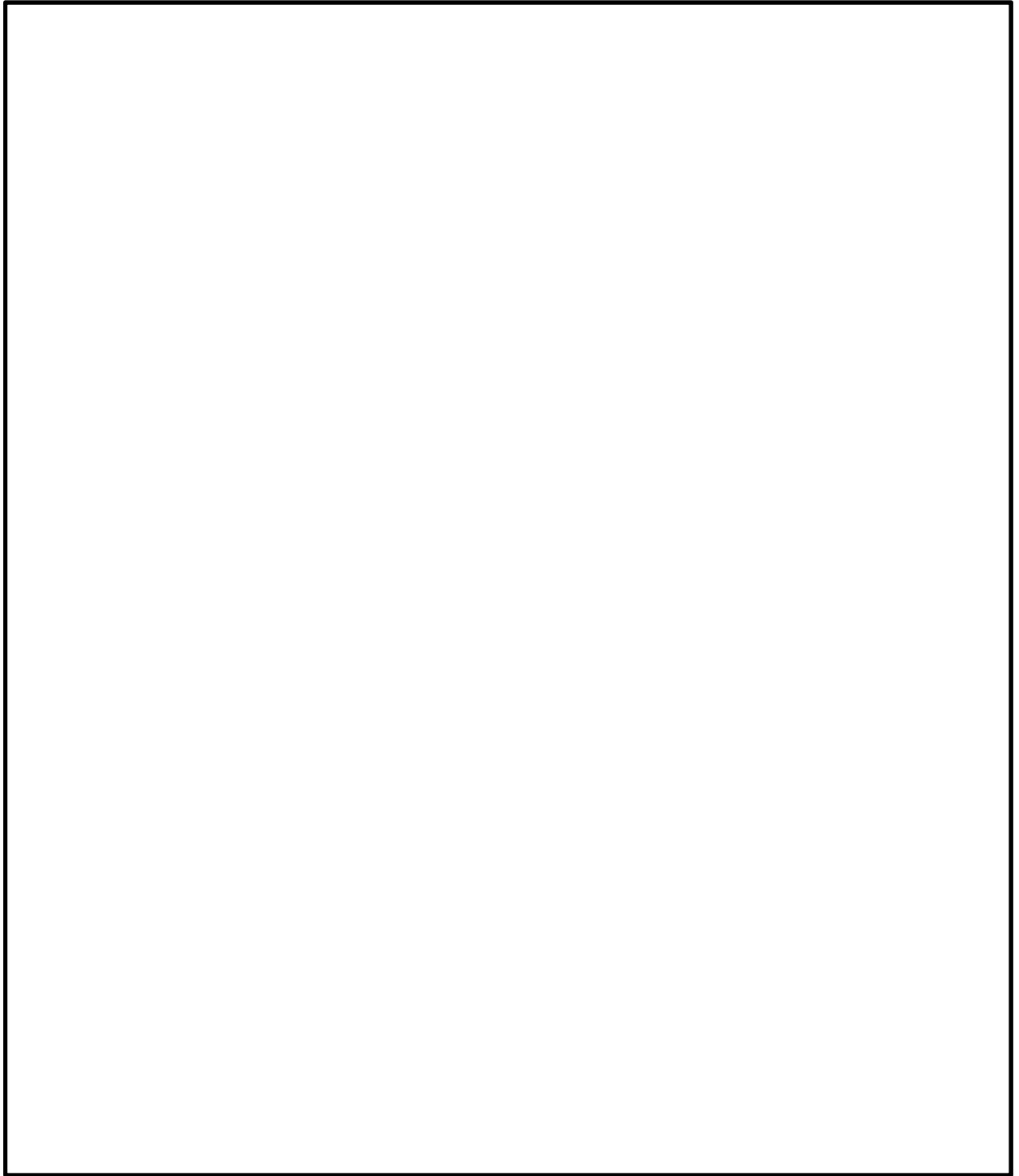


図2-14 原子炉建屋外殻となる扉の位置図 (EL. +20.3m, EL. +23.0m)

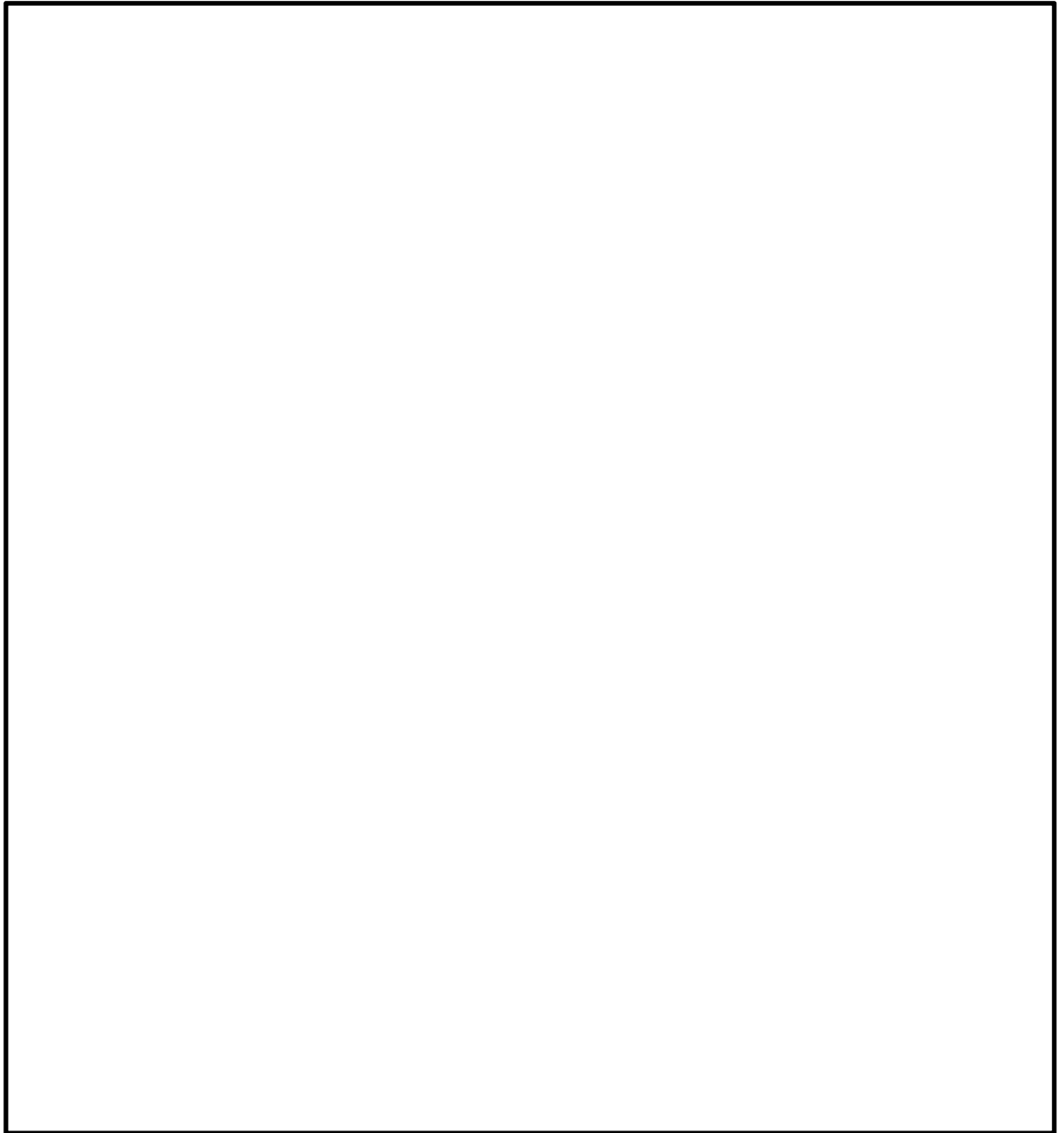


図2-15 原子炉建屋の外殻となる扉の位置図 (EL. +29.0m)

2.3 評価方針

建屋及び構造物の強度評価は、V-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」及び「4.2 許容限界」を踏まえ、竜巻より防護すべき施設が安全機能を損なわないことを、「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。

建屋及び構造物の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計竜巻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、評価対象部位を設定する。

具体的には、飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突する直接的な影響の評価として、建屋及び構造物の外殻を構成する部材に対する「衝突評価」を行う。また飛来物が竜巻より防護すべき施設に衝突・接触する波及的な影響の評価として、建屋及び構造物の外殻を構成する部材の裏面剥離による飛散の影響並びに建屋及び構造物の外殻を構成する部材の転倒・脱落の影響に対する「構造強度評価」を行う。

2.3.1 貫通評価

飛来物が建屋及び構造物の外殻を構成する部材を貫通しない設計とするために、飛来物による衝撃荷重に対し、防護すべき施設の外殻を構成する部材が設計飛来物の貫通を生じないことを計算若しくは解析により確認する。

具体的には、防護すべき施設の外殻となる区画の屋根、外壁及び内壁、並びに開口部建具並びに構造物の地上露出部が、設計飛来物の貫通を生じない厚さを有していることを、計算により確認する。貫通を生じない厚さを有していることの確認が出来ない場合においては、これらに終局状態に至るようなひずみを生じないことを、解析により確認する。

2.3.2 構造強度評価

飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻より防護すべき施設に波及的影響を与えないよう、防護すべき施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、これらについて、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じないことを計算により確認する。

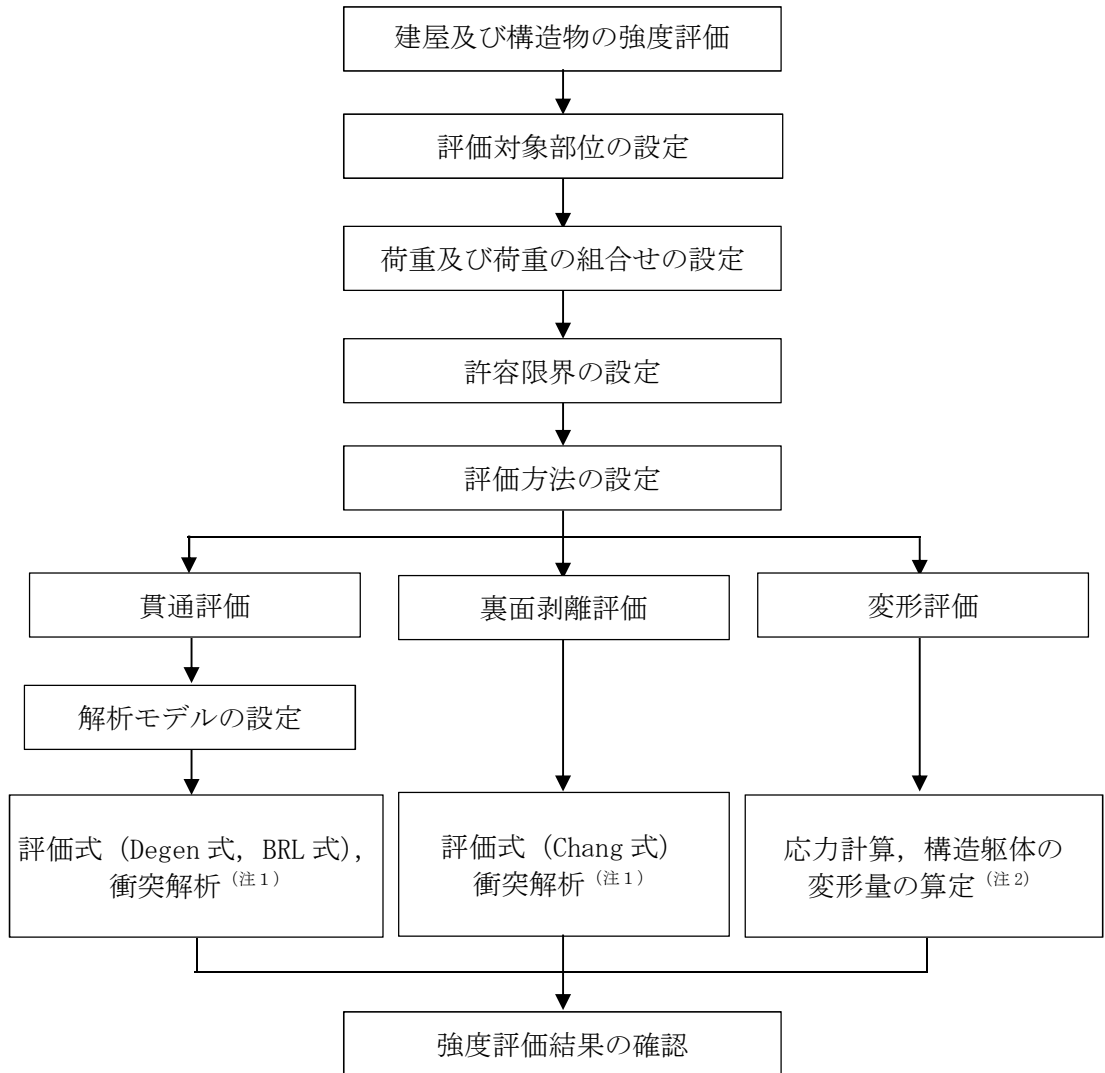
（以下「裏面剥離評価」という。）

具体的には、RC造の建屋及び構造物について、飛来物による衝撃荷重に対し、施設の外殻を構成する部材自体の脱落を生じない設計とするために、外殻となる屋根スラブ、外壁及び内壁並びに構造物の鉄筋コンクリートが、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることを計算により確認する。

外殻を構成する部材で、裏面剥離によるコンクリート片の飛散が生じない最小厚さ以上であることの確認ができない場合は、裏面剥離の影響を受ける防護対象施設が当該部位の近傍にないことを確認するか、裏面剥離が生じない構造であることを解析により確認する。

また、外殻を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とするために、設計荷重に対し、外殻となる屋根スラブ、屋根スラブのスタッドボルト、外壁及び内壁に終局状態に至るようなひずみ又は応力が生じないこと、鉄骨架構に終局状態に至るような変形が生

しないことを計算及び解析により確認する。(以下「変形評価」という。)
 建屋及び構造物の設計荷重作用時の強度評価フローを図2-16に示す。



(注1) 3次元FEMモデルを用いた動的評価を実施する。

(注2) 地震応答解析モデルを用いた静的評価を実施する。

図2-16 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。

- ・鋼構造設計規準 -許容応力度設計法- （（社）日本建築学会，2005改定）
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev 8P(NEI07-13)) (以下「NEI07-13」という。)
- ・建築基準法及び同施行令
- ・建築物荷重指針・同解説（（社）日本建築学会，2004改定）
- ・ISES7607-3「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」（高温構造安全技術研究組合）
- ・鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，2010改定）（以下「RC規準」という。)
- ・「原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987」（（社）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」（（社）日本電気協会）
- ・「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」（社）日本機械学会
- ・日本工業規格（J I S）
- ・「各種合成構造設計指針・同解説」（（社）日本建築学会，2010改定）（以下「各種合成指針」という。)

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

建屋及び構造物の評価に用いる記号を表3-1～表3-4に示す。

表 3-1 貫通評価に用いる記号 (Degen 式)

記号	単位	定義	
D	kgf/cm ³	飛来物直径密度 $D = W / d^3$	
d	cm	飛来物の (等価) 直径	
e	cm	貫通限界厚さ (コンクリート)	
F _c	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度	
N	—	飛来物の形状係数	
V	m/s	外壁	飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根	飛来物の衝突速度 (鉛直)
W	kgf	飛来物重量	
X	cm	貫入深さ	
α _e	—	低減係数	

表 3-2 貫通評価に用いる記号 (BRL 式)

記号	単位	定義
d	cm	飛来物の (等価) 直径
k	—	鋼板の材質に関する係数
M	kg	飛来物の質量
T	m	貫通限界厚さ (鋼製部材)
V	m/s	飛来物の衝突速度 (鉛直)

表 3-3 裏面剥離評価に用いる記号 (Chang 式)

記号	単位	定義	
d	cm	飛来物の (等価) 直径	
f _c '	kgf/cm ²	コンクリートの設計基準強度	
S	cm	裏面剥離限界厚さ	
V	m/s	外壁	飛来物の衝突速度 (水平)
		屋根	飛来物の衝突速度 (鉛直)
V ₀	m/s	飛来物基準速度	
W	kgf	飛来物重量	
α _s	—	低減係数	

表 3-4 変形評価に用いる記号（扉）

記号	単位	定義
A_k	mm^2	カンヌキ断面積
A_p	mm^2	カンヌキ受けピン断面積
A_b	mm^2	カンヌキ受けボルト断面積
A_d	m^2	扉の受圧面積
L_k	mm	カンヌキ支持間距離
L_p	mm	カンヌキ受けピン支持間距離
M_1	kN/mm	カンヌキバーに生じる曲げモーメント
M_k	kN/mm	カンヌキに生じる曲げモーメント
M_p	kN/mm	カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント
n	本	ボルト本数
n_h	箇所	ヒンジ部箇所数
n_k	箇所	カンヌキ部箇所数
Q_k	kN	カンヌキに生じるせん断力
Q_p	kN	カンヌキ受けピンに生じるせん断力
R	kN	気圧差による荷重により荷重負担部に発生する反力
T	kN	引張力
W_p	kN	気圧差による荷重
Z_1	mm^3	カンヌキバーの断面係数
Z_k	mm^3	カンヌキの断面係数
Z_p	mm^3	カンヌキ受けピンの断面係数
ΔP	N/m^2	単位面積当たりの最大気圧低下量
σ_b	N/mm^2	曲げ応力度
σ_t	N/mm^2	引張応力度
σ_x	N/mm^2	組合せ応力度
τ	N/mm^2	せん断応力度

3.2 評価対象部位

建屋及び構造物の評価対象部位は、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」に示す評価対象部位を踏まえて設定する。

3.2.1 貫通評価

(1) 建屋

設計荷重に対して、外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないことの確認において、建屋については、屋根スラブ、外壁並びに防護すべき施設の外殻となる建屋内の部位のうちタービン建屋オペレーティングフロア床版、気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面並びに開口部建具のうち原子炉建屋機器搬入口扉、原子炉建屋附属棟1階

電気室搬入口扉，また，重大事故対処施設の環境条件維持に関与する扉を評価対象部位として選定する。

(2) 構造物

外殻を構成する部材が飛来物を貫通させないことの確認において，軽油貯蔵タンクタンク室については，鋼製蓋及び鉄筋コンクリート造の頂版を評価対象部位として選定する。

3.2.2 裏面剥離評価

(1) RC造建屋

設計荷重に対して，外殻を構成する部材が飛来物による裏面剥離を生じないことの確認において，建屋については，防護すべき施設の外殻となる屋根スラブ，外壁並びに建屋内の部位のうちタービン建屋オペレーティングフロア床版，気体廃棄物処理系隔離弁を内包する区画の壁面を評価対象部位として設定する。

(2) 構造物

設計荷重に対して，外殻を構成する部材が飛来物による裏面剥離を生じないことの確認において，軽油貯蔵タンクタンク室については，鉄筋コンクリート造の頂版を評価対象部位として選定する。

3.2.3 変形評価

(1) 建屋

設計荷重に対して，外殻を構成する部材自体が防護対象施設へ衝突等の影響を与える変形に至らないことの確認において，建屋については，設計荷重が外殻を構成する屋根スラブ及び外壁に作用し，耐震壁を介して直接岩盤に支持する基礎版へ伝達されるため，設計荷重が直接作用する，防護すべき施設の外殻となる屋根スラブ及び外壁のうち，屋根スラブについては，代表として部材厚が最も薄い原子炉建屋原子炉棟の屋根スラブを，並びに外壁については原子炉建屋（RC造部及び鉄骨造部），タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建及び緊急時対策所建屋を評価対象部位として設定する。

(2) 構造物

設計荷重に対して，外殻を構成する部材自体が竜巻により防護すべき施設へ衝突等の影響を与える変形に至らないことの確認において，軽油貯蔵タンクタンク室については，地中に埋設され竜巻の風荷重を受け難い構造であることから，評価は不要とする。

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み合わせは，V-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。

3.3.1 荷重の設定

強度評価に用いる荷重を以下に示す。

(1) 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 W_w は、下式により算定する。

風力係数 C は、「建築基準法及び同施行令」に基づき設定する。

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

(2) 気圧差による荷重 (W_p)

気圧差による荷重 W_p については、気圧差による荷重が最大となる「閉じた施設」を想定し、下式により算定する。

$$W_p = \Delta P \cdot A$$

(3) 飛来物による衝撃荷重 (W_M)

飛来物による衝撃荷重 W_M は、表3-5に示す飛来物の衝突に伴う荷重とするが、この荷重は瞬間的に作用するものであり、またこれら飛来物に対し質量が十分に大きな建物および構造物が評価の対象であるため、これらの施設の全体的な挙動に対する評価（変形評価）においては考慮せず、評価対象施設に対する瞬間的且つ局所的な影響の評価（貫通、裏面剥離）時のみ考慮する。

表3-5 飛来物の諸元

飛来物	寸法 (m)	質量 (kg)	水平方向の 飛来速度 (m/s)	鉛直方向の 飛来速度 (m/s)	衝突対象
鋼製材	4.2×0.2× 0.3	135	51	34	設計飛来物として、全ての 建屋及び構造物を対象
車両	3.6×2.5× 8.6	5000	52	—※	隣接事業所からの飛来物の 代表的なものとして、以下の 施設を対象 ・使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・緊急時対策所

※：種々の車両の飛散解析結果と衝突対象建屋の屋根スラブの高さ及び厚さの関係から、車両が屋根に到達することは考え難く、仮に屋根に到達した場合でも、飛跡頂点から屋根までの落下距離は僅かであり、有意な衝突速度にならないと考えられるため。

(4) 常時作用する荷重 (F_d)

常時作用する荷重 F_d として、自重及び上載荷重を考慮する。

3.3.2 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、V-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」を踏まえ、設計竜巻荷重及び常時作用する荷重を組み合わせる。

荷重の組合せを表 3-6 に示す。

表3-6 荷重の組合せ

評価内容	評価対象部位	荷重の組合せ	
貫通評価	(式による評価) ・屋根スラブ、外壁及び内壁 ・扉（扉板）	W_M	
	(解析による評価) ・原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ	複合荷重 W_{T2}	$W_w + 1/2W_P + W_M + F_d$
裏面剥離評価	(式による評価) ・屋根スラブ、外壁及び内壁	W_M	
	(解析による評価) ・原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ ・原子炉建屋外壁	複合荷重 W_{T2}	$W_w + 1/2W_P + W_M + F_d$
変形評価	(式による評価) ・原子炉建屋 （RC造部及び鉄骨造部） ・タービン建屋 ・使用済燃料乾式貯蔵建屋 ・緊急時対策所建屋	複合荷重 W_{T2}	$W_w + 1/2W_P + F_d$
	(式による評価) ・原子炉建屋（鉄骨造部外装板） ・扉（カンヌキ部）	W_P	

W_M ：風圧力による荷重 W_P ：気圧差による荷重

W_M ：飛来物による衝撃荷重 F_d ：常時作用する荷重

3.4 許容限界

建屋及び構造物の許容限界は、V-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」に示す許容限界を踏まえて、評価対象部位ごとに、評価内容に応じて設定する。

3.4.1 貫通評価

貫通評価の許容限界は、式による評価を行う場合においては表 3-7 に示す最小部材厚さとする。

表3-7 貫通評価の許容限界（式による評価）

評価内容	評価対象部位		貫通限界厚さ (mm) ^{※1}	
			鉛直方向	水平方向
貫通評価 (式による評価)	コンクリート	原子炉建屋		
		タービン建屋		
		使用済燃料乾式貯蔵建屋	鋼製材	
			車両	
		軽油貯蔵タンクタンク室		
	緊急時対策所	鋼製材		
		車両		
扉板（鋼板）				

※1：特記ない場合は、鋼製材に対する値

※2：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）

※3：地中の構造物のため、側壁は露出していない。

※4：複数枚の板が直列の構成となっている、原子炉建屋機器搬入口扉が該当する。

式による評価を満足せず、解析による評価を行う場合における許容限界を、表3-8に示す。

表3-8 貫通評価の許容限界（解析による評価）

評価内容	評価対象部位	許容限界
貫通評価 (解析による評価)	鉄筋 (原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ)	

3.4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価において、式による評価を行う場合においては表 3-9 に示す最小部材厚さとする。

表3-9 裏面剥離評価の許容限界（式による評価）

評価内容	評価対象部位		許容限界	
			裏面剥離限界厚さ(mm) ^{※1}	
			鉛直方向	水平方向
裏面剥離評価 (式による評価)	コンク リート	原子炉建屋		
		タービン建屋		
		使用済燃料乾式貯蔵建屋	鋼製材	
			車両	
		軽油貯蔵タンクタンク室		
		緊急時対策所	鋼製材	
車両				

※1：特記ない場合は，鋼製材に対する値

※2：屋上への車両の衝突は評価対象外（表3-4より）。

※3：地中の構造物のため，側壁は露出していない。

式による評価を満足せず，解析による評価を行う場合における許容限界は，表3-10に示すコンクリート内面のライナ若しくはデッキプレートの破断ひずみとする。

表3-10 裏面剥離評価の許容限界（解析による評価）

評価内容	評価対象部位		許容限界
裏面剥離評価 (解析による評価)	外壁（原子炉建屋原子炉棟 ^{※1} ）	下層の鉄筋	
	屋根スラブ（原子炉建屋原子炉棟 ^{※2} ）	デッキ プレート	
	外壁（使用済燃料乾式貯蔵建屋 ^{※3} ）	ライナ	

※1：鋼製材に対する裏面剥離限界厚さを満たさない部位（内張材無し）のうち，最も厚さの小さいものとして選定

※2：鋼製材に対する裏面剥離限界厚さを満たさない部位（内張材あり）

※3：車両に対する必要最小厚さを満たさない箇所

3.4.3 変形評価

屋根スラブ及びスタッドの変形評価の許容限界は，それぞれ RC 規準及び各種合成指針に基づく強度とし，RC造の建屋全体の変形評価の許容限界は，耐震壁のせん断ひずみ

に関する許容限界に基づく 2.0×10^{-3} とする。

変形評価の許容限界を表 3-11 に示す。

表3-11 変形評価の許容限界

評価内容	評価対象部位	許容限界	
変形評価 (屋根スラブ)	屋根スラブ	「RC規準」に基づく終局強度	
	スタッド (屋根支持部)	「各種合成指針」に基づく許容耐力	
変形評価 (建物全体)	建物の構造躯体	RC造部	せん断ひずみ 2×10^{-3}
		鉄骨造部	「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」に準じた短期許容応力度
変形評価 (鉄骨造部)	外装板	面外	取付ボルトの許容引張荷重
		面内	鉄骨架構の層間変形角 $1/60$ (rad)
変形評価 (扉)	カンヌキ部	「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」に準じた短期許容応力度	

3.5 評価方法

3.5.1 貫通評価

(1) 貫通評価式による評価

a. 鉄筋コンクリート造部分

貫通限界厚さ e を、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、以下に示すDegen式を用いて算出し、外殻となる部位の厚さが許容限界を上回ることを確認する。

$X/d \leq 1.52$ の場合、

$$e = \alpha_e \{2.2(X/d) - 0.3(X/d)^2\} \cdot d$$

ここで、貫入深さ X は、

$X/d \leq 2.0$ の場合、

$$X/d = \{(48580/\sqrt{F_c}) \cdot N \cdot d^{0.2} \cdot D \cdot (V/1000)^{1.8}\}^{0.5}$$

b. 鋼製部

貫通限界厚さ e を、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、以下に示すBRL式を用いて算出し、外殻となる部位の厚さが許容限界を上回ることを確認する。

を確認する。

$$T^{\frac{3}{2}} = \frac{0.5 \cdot M \cdot V^2}{1.439 \cdot 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}}}$$

なお、BRL式による許容限界を1枚では満足しない箇所については、BRL式をエネルギー吸収量の観点により変形した以下の式に基づき、直列する複数枚の鋼製障壁によるエネルギー吸収量の総和が、設計飛来物の運動エネルギーを上回ることを確認する。

複数の鋼板（n枚）を考慮し、i枚目の板厚を t_i とすると、i枚目の板で吸収可能なエネルギー e_i は、

$$e_i = \left(1.4396 \times 10^9 \cdot K^2 \cdot d^{\frac{3}{2}} \right) \cdot t_i^{\frac{3}{2}} \quad \dots \textcircled{3}$$

よって、n枚の板により吸収可能な飛来物の運動エネルギーEは

$$E = \sum_{i=1}^n E_i$$

(2) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに対する衝突解析

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに対する貫通評価については、風圧力による荷重 W_w 、気圧差による荷重 W_p 、飛来物による衝撃荷重 W_M 及び常時作用する荷重 F_d を考慮し、3次元FEMモデルを用いた衝突解析により屋根及び外壁の鉄筋に生じるひずみを算出し、許容限界を超えないことを確認する。

評価対象範囲は、原子炉建屋搭屋部の屋根スラブ及び外壁のうち躯体厚さが最も薄い部分とする。

衝突解析には、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1「計算プログラム（解析コード）の概要」に示す。

a. 解析モデル

(a) 屋根スラブ

屋根スラブのモデル化範囲及び飛来物の衝突位置を図3-1に示す、屋根トラスの主トラス間の長さはほぼ同等であることより、評価上重要な使用済燃料貯蔵プール直上となる部位とし、屋根スラブのコンクリート、鉄筋及びデッキプレートモデル化する。

コンクリートはソリッド要素、鉄筋はビーム要素及びデッキプレートはシェル要素でモデル化する。

屋根スラブの解析モデルを図3-2に示す。

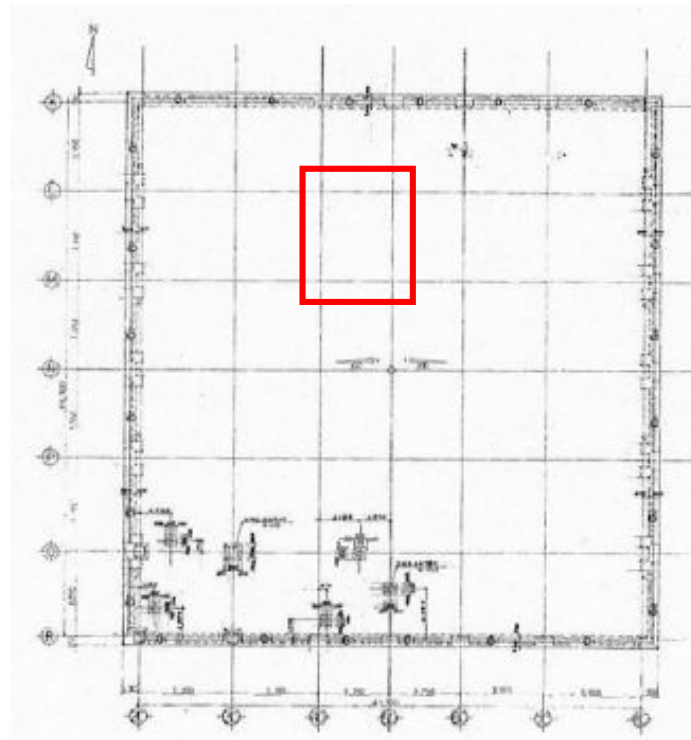


図3-1 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブのモデル化範囲

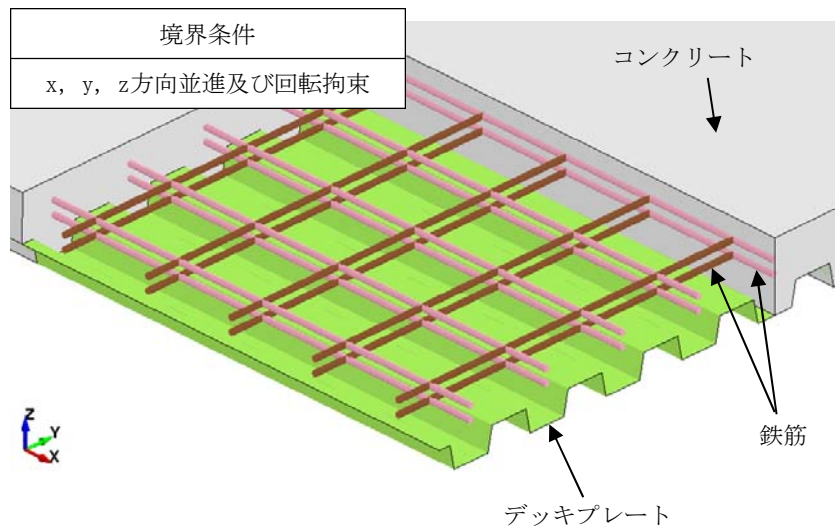


図3-2 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの解析モデル

(b) 飛来物

飛来物は、衝突時の荷重が保守的となるよう接触断面積を小さくするため、鋼製材は先端部（衝突部）を開口としてシェル要素でモデル化し、自重及び竜巻による風圧力による荷重を作用させた状態で衝突させる。

飛来物の解析モデル図を図3-3に示す。

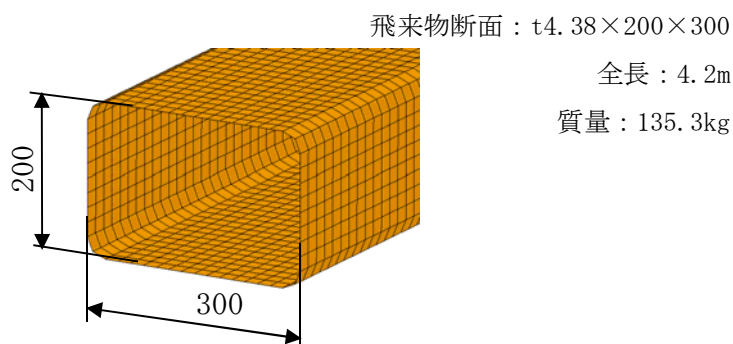


図3-3 飛来物の解析モデル図

b. 材料定数

コンクリート，鉄筋，デッキプレート及び設計飛来物の材料定数をそれぞれ表3-12から表3-15に示す。

表3-12 コンクリートの材料定数

種類	設計基準強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	ポアソン比	単位体積重量 (kN/m ³)
普通 コンクリート	22.1	2.21×10 ⁴	0.2	23.0

表3-13 鉄筋の材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
SD345	345	2.05×10 ⁵	77

表3-14 デッキプレートの材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
SDP1T	205	2.05×10 ⁵	77

表3-15 設計飛来物の材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
SS400	245	2.05×10 ⁵	77

c. 材料の非線形特性

コンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮側が圧縮強度に到達後もその応力を保持するバイリニアとし、引張側は主応力が引張強度に到達後に引張主応力と直交方向にひび割れが生じるものとして、ひずみに応じて保持応力を低下させる引張軟化特性を与える。圧縮強度は、NEI07-13に従い、設計基準強度に対して動的増加率1.25を乗じた値とする。

鋼製部材である鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の応力-ひずみ曲線は、第1折れ点を「降伏応力-降伏ひずみ」、第2折れ点を「破断相当応力-破断相当ひずみ」とするトリリニア型とする。鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の降伏応力は、降伏応力に動的増加率を乗じた値、破断相当応力は、動的増加率を乗じた降伏応力及び引張強さを結ぶ線のうち、規格値の伸びを後述の多軸性係数で除したひずみ（破断相当ひずみ）時に相当する応力とする。。

動的増加率は、NEI07-13に基づく値（鉄筋：1.10（降伏応力）、1.05（引張強度）、デッキプレート・飛来物：1.29（降伏応力）、1.10（引張強度））とする。

金属材料の破断ひずみは、JISに規定されている伸びの下限値を基に設定する。また、NEI 07-13においてTF（多軸性係数）を2.0とすることが推奨されていることを踏まえ、鉄筋及びデッキプレートの破断相当ひずみはTF=2.0を考慮する。なお、設計飛来物の破断相当ひずみは、設計飛来物が破断することなく継続的に荷重が掛かるように配慮し、TF=1.0とする。

コンクリート、鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の圧縮及び引張強度をそれぞれ表3-16及び表3-17に示す。

表3-16 コンクリートの圧縮及び引張強度

種別	設計基準強度 (N/mm ²)	材料モデル	
		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
躯体 コンクリート	22.1	27.6	2.55

表3-17 鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の降伏及び破断強度

種別	材質	規格値（公称応力）		材料モデル（真応力、真ひずみ）		
		降伏応力 (N/mm ²)	破断応力 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	破断相当 応力 (N/mm ²)	破断相当 塑性ひずみ
鉄筋	SD345	345	490	380.2	494.2	0.082
デッキ プレート	SDP1T	205	270	264.8	307.8	0.082
設計飛来物	SS400	245	400	316.6	533.3	0.189

コンクリート、鉄筋、デッキプレート及び設計飛来物の応力-ひずみ関係を、それぞれ図3-4から図3-7に示す。

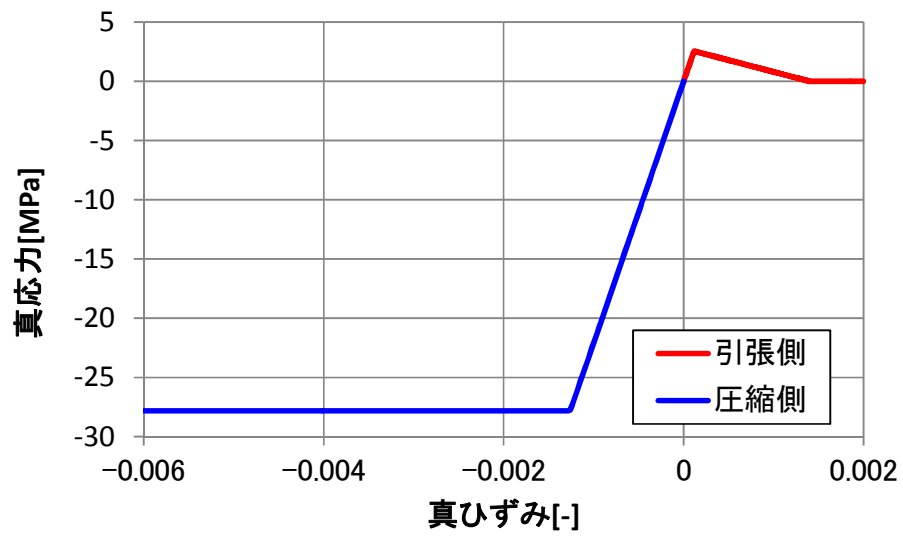


図3-4 真応力-真ひずみ関係 (コンクリート)

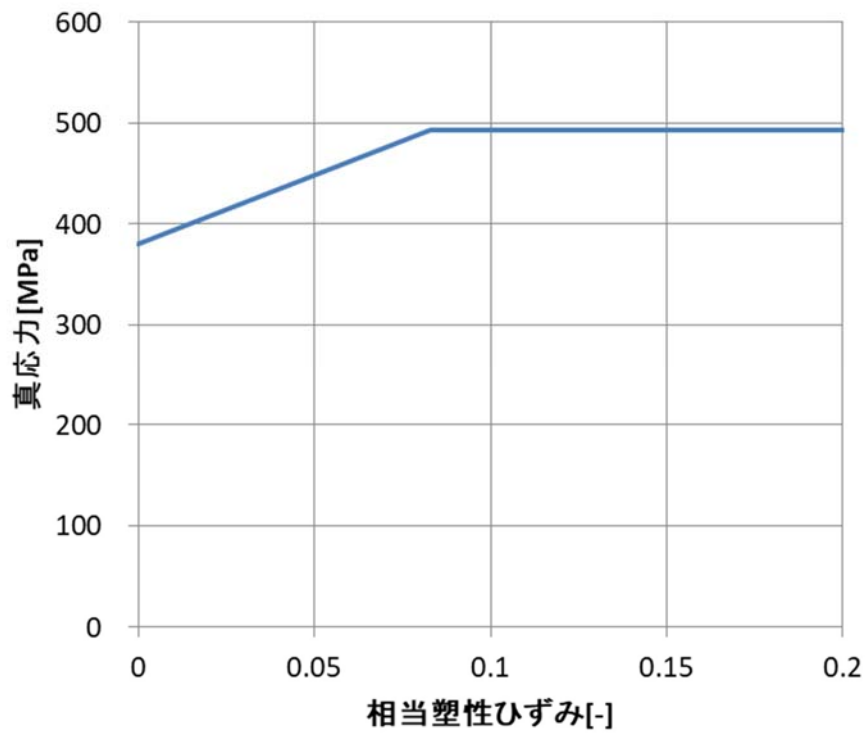


図3-5 真応力-真ひずみ関係 (鉄筋)

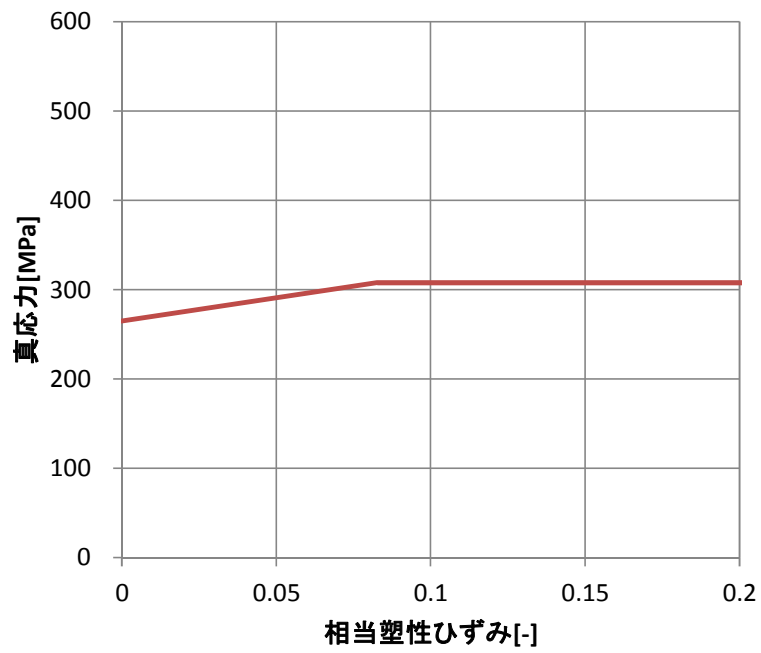


図3-6 真応力-真ひずみ関係 (デッキプレート)

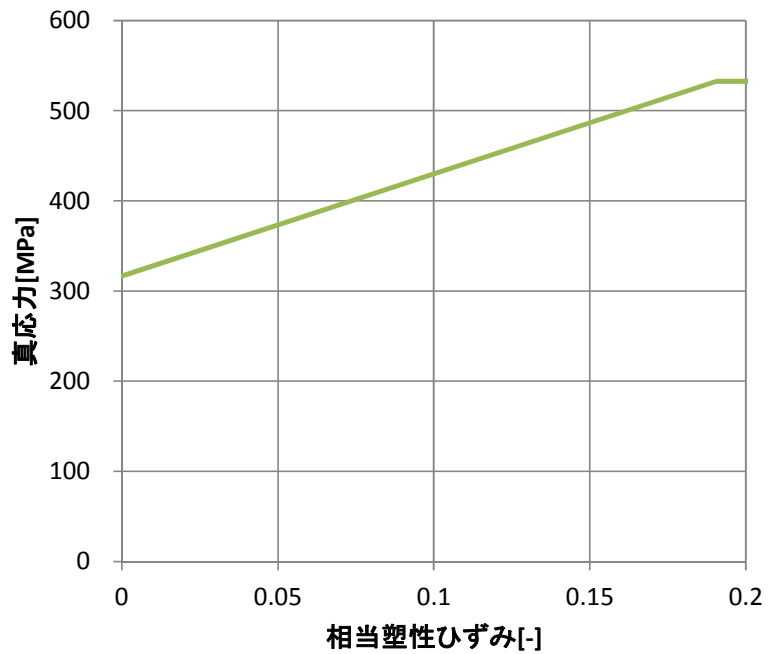


図3-7 真応力-真ひずみ関係 (デッキプレート)

3.5.2 裏面剥離評価

(1) Chang式による評価

裏面剥離限界厚さ S を、別添1-1「竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針」に基づき、以下に示すChang式を用いて算定し、許容限界を超えないことを確認する。

$$S = 1.84 \alpha_s \cdot \left(\frac{V_0}{V} \right)^{0.13} \cdot \frac{\left(\frac{W \cdot V^2}{0.0980} \right)^{0.4}}{d^{0.2} \cdot f_c^{0.4}}$$

(2) 原子炉建屋原子炉棟壁面に対する衝突解析

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブを除く、鋼製材に対してChang式による裏面剥離限界厚さを満足しない箇所のうち、版厚が最も小さい原子炉建屋原子炉棟6階の壁面を代表箇所を選定し、3次元FEMモデルを用いた衝突解析を行い、裏面側の鉄筋に発生するひずみが表3-9に示す許容限界を超えないことを確認する。

a. 解析モデル

(a) 建屋壁面

鋼製材に対しChang式の限界厚さを満足しない箇所について、FEM評価の対象となる箇所（原子炉建屋原子炉棟6階壁面）の構造及び解析モデルを図3-8に示す。コンクリートはソリッド要素、鉄筋はビーム要素でモデル化する。

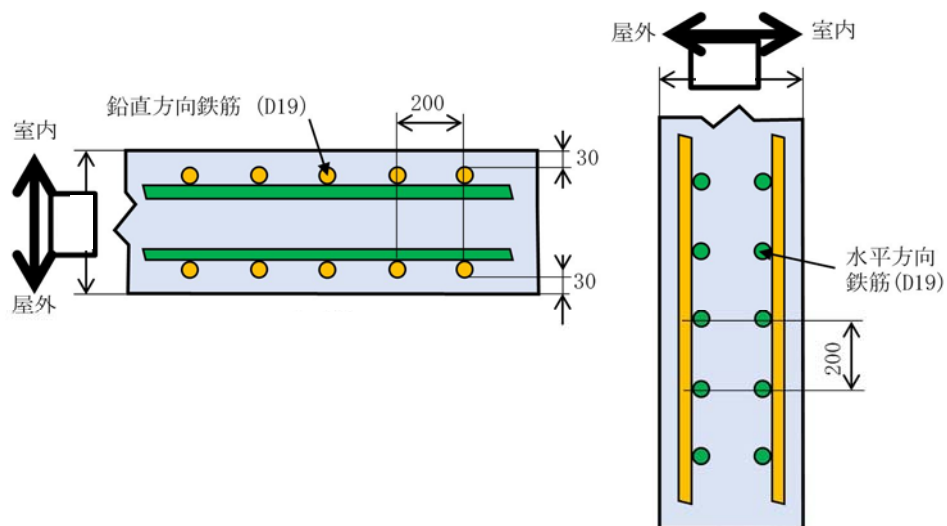


図3-8 鋼製材に対する裏面剥離評価解析対象箇所の構造及び解析モデル

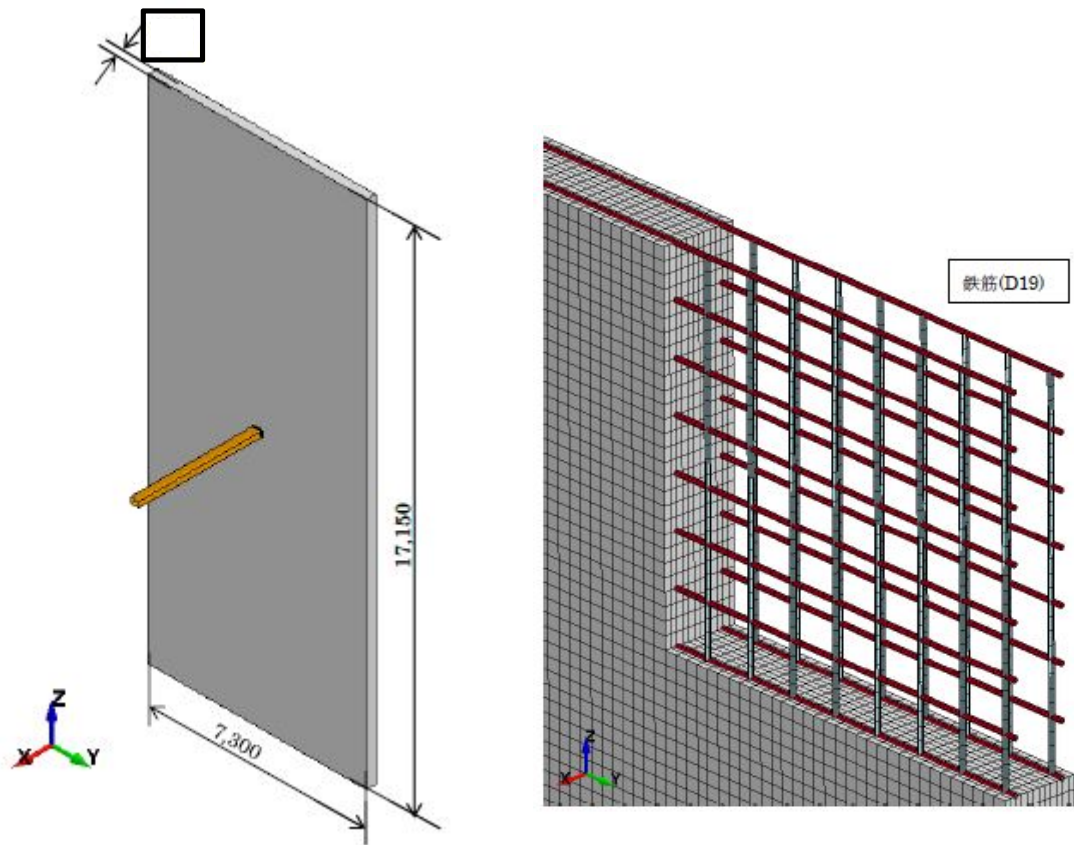


図3-8 鋼製材に対する裏面剥離評価解析対象箇所の構造及び解析モデル（続き）

(b) 飛来物

飛来物は、原子炉建屋屋根スラブの解析モデルと同じ鋼製材を用いる。

b. 材料定数及び材料の非線形特性

コンクリート及び鉄筋の材料物性については、原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの解析に同じ。

(3) 使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面に対する衝突解析

車両に対してChang式による裏面剥離限界厚さを満足しない、使用済燃料乾式貯蔵建屋の壁面に対しては、裏面に鋼製ライナを施工する対策を講ずる。当該補強構造については、3次元FEMモデルを用いた衝突解析を行い、裏面のライナに発生するひずみが表3-9に示す許容限界を超えないことを確認する。

a. 解析モデル

(a) 建屋壁面

屋根スラブのモデル化範囲及び飛来物の衝突位置を図3-1に示す、車両の衝突を想定する建屋東面及び南面の最薄部の版厚と配筋ピッチは同じであることから、鉄筋径が小さい南面を代表箇所として抽出した。

コンクリートはソリッド要素，鉄筋はビーム要素及びライナはシェル要素でモデル化する。

使用済燃料乾式貯蔵建屋の壁面の構造及び解析モデルを図3-9に示す。

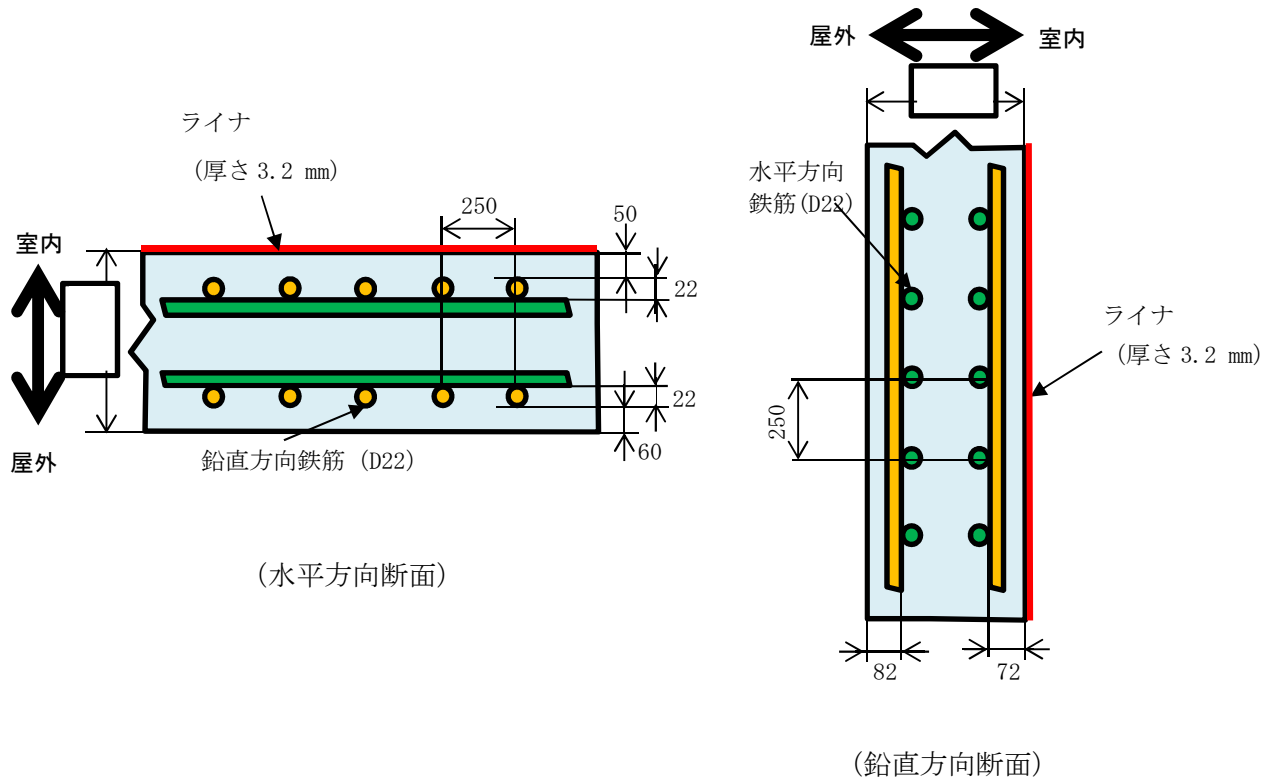


図3-9 車両に対する裏面剥離評価解析対象箇所の構造及び解析モデル

(b) 飛来物

飛来物として想定する車両のモデル及び衝突位置を図3-1に示す。車両は，車両剛性を衝突面の接点数で除した剛性を持つバネを，衝突面の接点ごとに配分した剛体としてモデル化した。また，建屋の柱間のスパンと車両（トラック相当）の長さが上回り，横向き時には柱で衝突荷重を支えることになるため，壁面のみで負荷を受けるよう，車両は正面衝突するモデルとした。また，衝突面の寸法については，衝突想定箇所となるキャビンの寸法を踏まえ設定した。

車両の解析モデルを図3-10に，車両モデルの諸元を表3-18に示す。

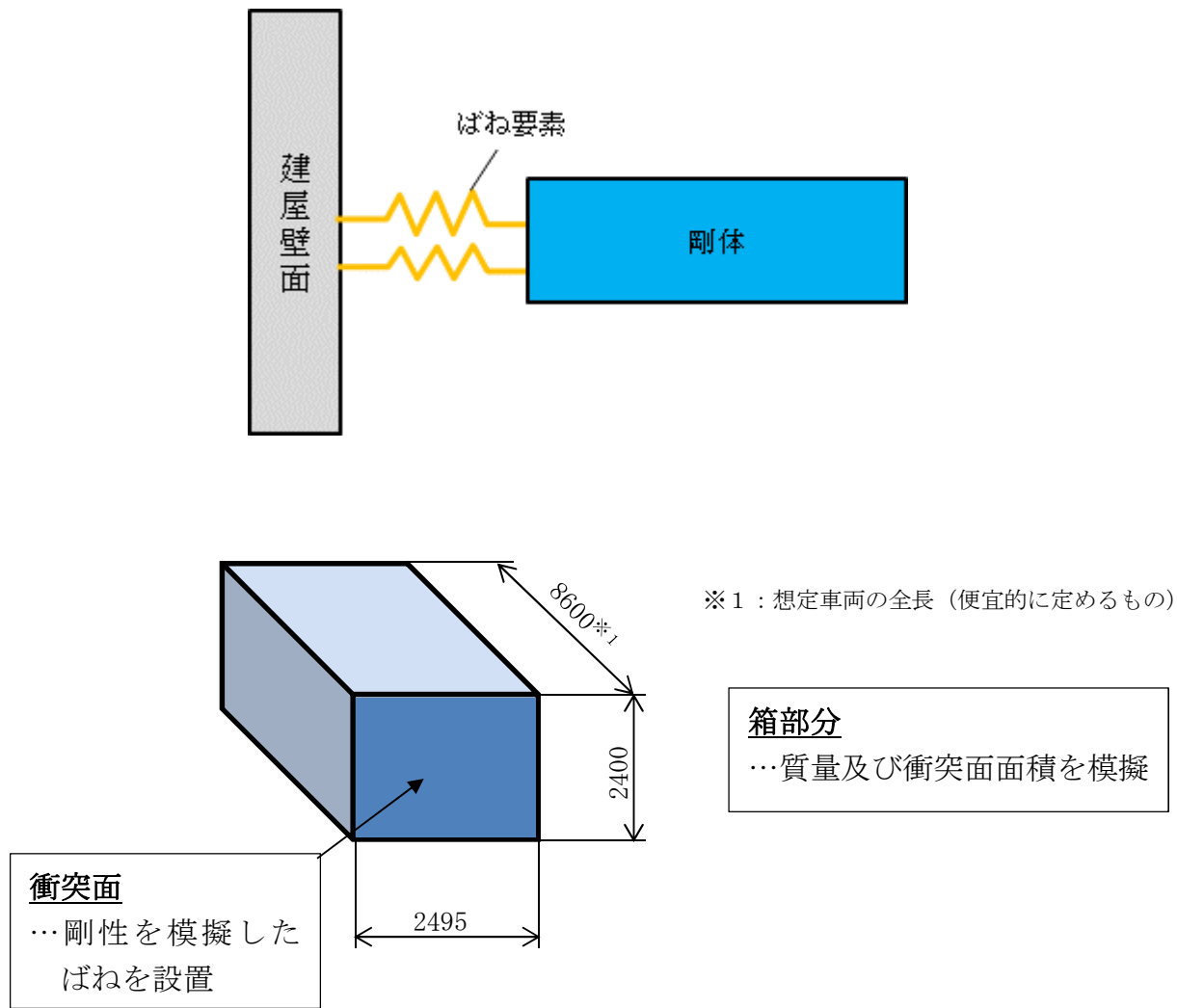


図3-10 車両の解析モデル

表3-18 車両モデル諸元

寸法 ^{※1} (m)	衝突面寸法 ^{※2} (m)	質量 (kg)
3.6×2.5×8.6	幅 2.495 高さ 2.400	5000

※1：簡易式評価

※2：車両諸元のモデルとなったトラック（8tクラス）のキャビン前面寸法をもとに設定

b. 材料定数

コンクリート，鉄筋，ライナの材料定数及び車両モデルの剛性を，それぞれ表3-19から表3-22に示す。

表3-19 コンクリートの材料定数

設計基準強度	ヤング係数	ポアソン比	単位体積重量
--------	-------	-------	--------

(N/mm ²)	(N/mm ²)		(kN/m ³)
23.5	2.25 × 10 ⁴	0.2	24

表3-20 鉄筋の材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
SD390	390	2.05 × 10 ⁵	77

表3-21 ライナの材料定数

種類	降伏応力 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	単位体積重量 (kN/m ³)
SS400	245	2.05 × 10 ⁵	77

表3-22 車両モデルの剛性

剛性※ (N/m)
2.94 × 10 ⁶

※：自動車の衝突安全（名古屋大学出版会）を参照し、以下のとおり算出。

$$588 \text{ (N/m/kg)} \times 5,000 \text{ (kg)} = 2.94 \times 10^6 \text{ (N/m)}$$

c. 材料の非線形特性

材料の非線形特性の考え方は、原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの解析に同じ。

コンクリート、鉄筋及びライナの強度をそれぞれ表3-23及び表3-24に示す。

表3-23 コンクリートの圧縮及び引張強度

種別	設計基準強度 (N/mm ²)	材料モデル	
		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
躯体 コンクリート	23.5	29.4	3.08

表3-24 鉄筋及びライナの降伏及び破断強度

種別	材質	規格値（公称応力）		材料モデル（真応力，真ひずみ）		
		降伏応力 (N/mm ²)	破断応力 (N/mm ²)	降伏応力 (N/mm ²)	破断相当 応力 (N/mm ²)	破断相当 塑性ひずみ
鉄筋	SD390	390	560	429.9	556.9	0.074
ライナ	SS400	245	400	316.6	425.0	0.095

コンクリート、鉄筋及びライナの真応力-真ひずみ関係を、それぞれ図3-11から図3-13に示す。



図3-11 真応力-真ひずみ関係 (コンクリート)

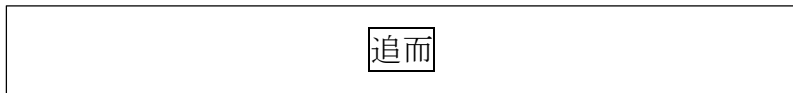


図3-12 真応力-真ひずみ関係 (鉄筋)

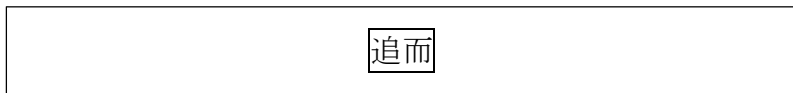


図3-13 真応力-真ひずみ関係 (ライナ)

3.5.3 変形評価

- (1) 原子炉建屋 (RC構造部)、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋

原子炉建屋 (RC構造部)、タービン建屋、使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の変位は、設計荷重による建屋の層せん断力及び各部材のせん断力-せん断ひずみ関係 ($Q-\gamma$) 関係より算定する。

原子炉建屋及び使用済燃料乾式貯蔵建屋の $Q-\gamma$ 関係は、V-2-2-1「原子炉建屋の地震応答計算書」及びV-2-2-4「使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答計算書」に示されるせん断スケルトンカーブ ($\tau-\gamma$ 関係) に基づき算出する。

タービン建屋の $Q-\gamma$ 関係は、地震応答解析モデルが多軸の質点系モデルを用いており各軸に対しせん断スケルトンカーブを算出していることから、層全体の評価を行うため、各軸のせん断スケルトンカーブを層全体の値に集約したせん断スケルトンカーブに基づき算出する。

原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所建屋の地震応答解析モデルを図3-14から図3-17に， $Q - \gamma$ 関係を表3-25から表3-28に示す。

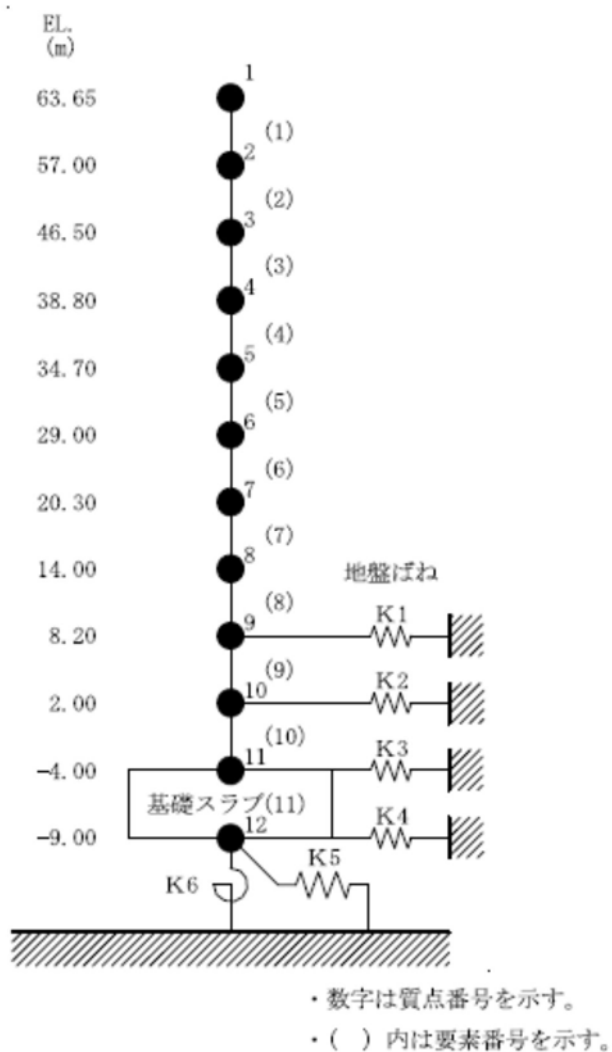


図3-14 原子炉建屋の地震応答解析モデル

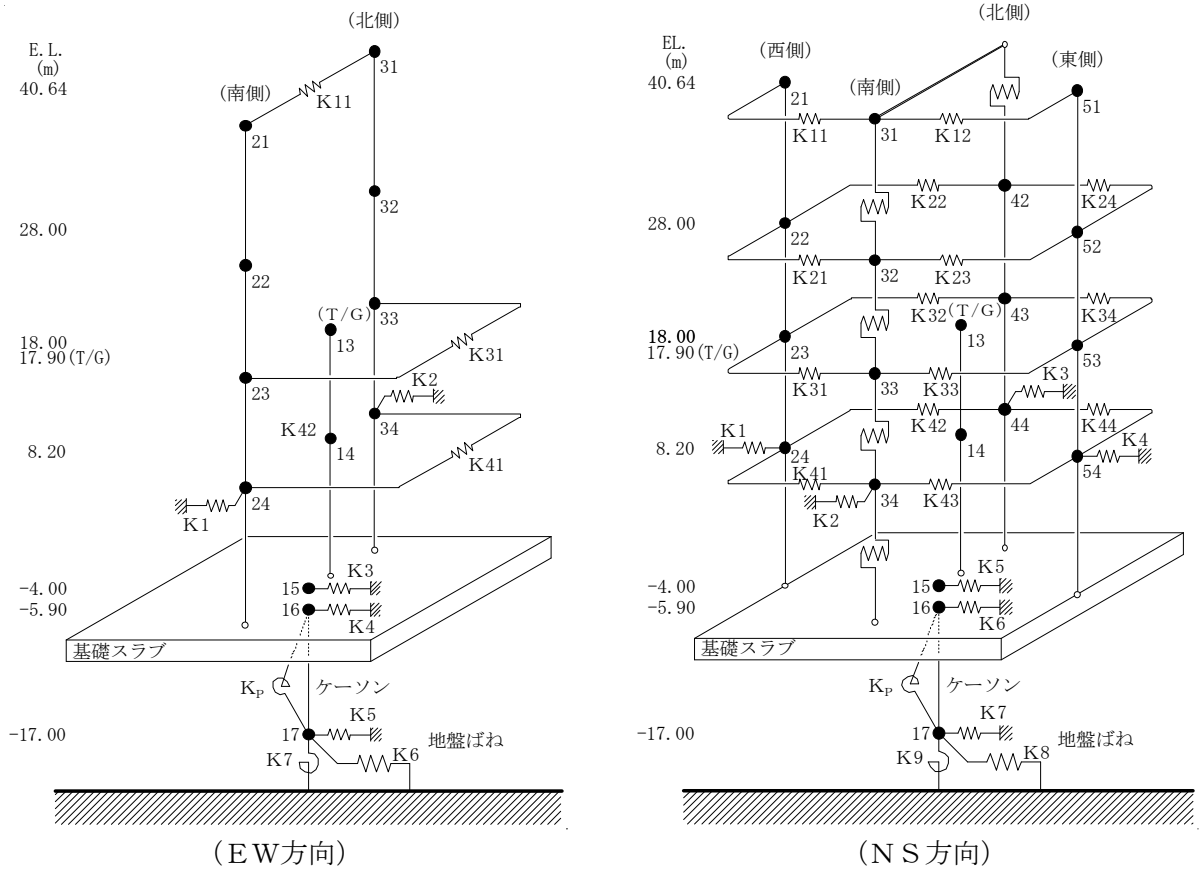


図3-15 タービン建屋の地震応答解析モデル

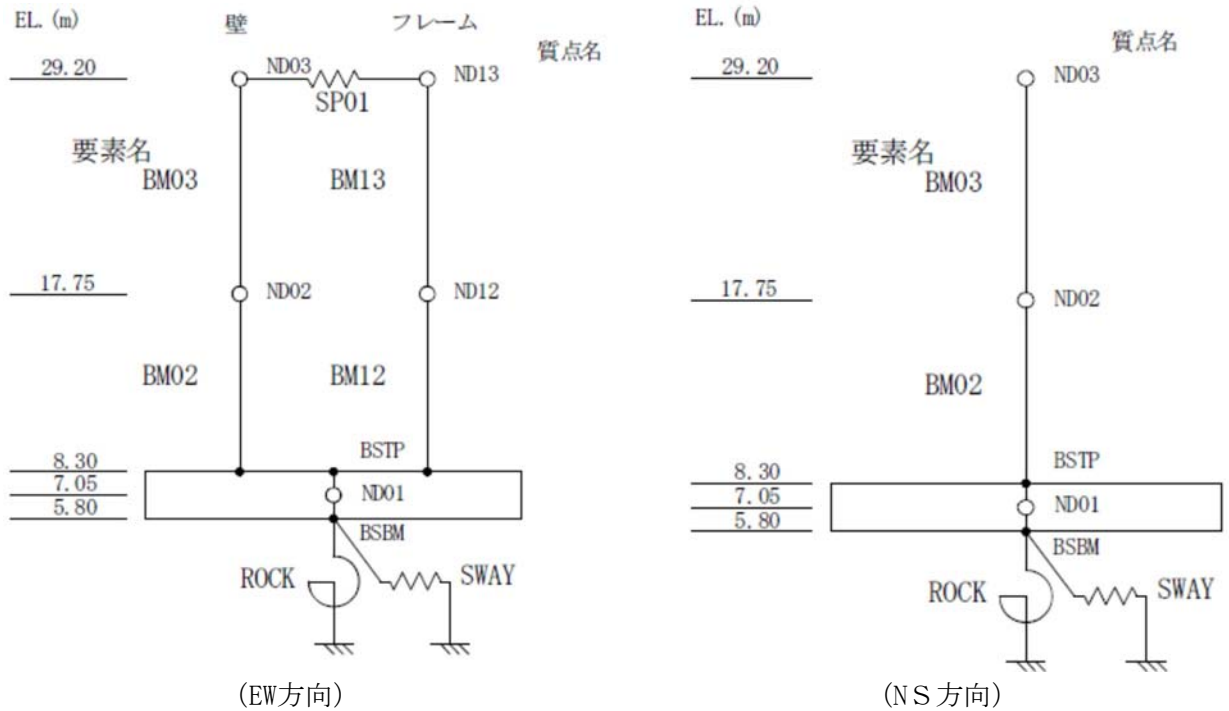


図3-16 使用済燃料乾式貯蔵建屋の地震応答解析モデル

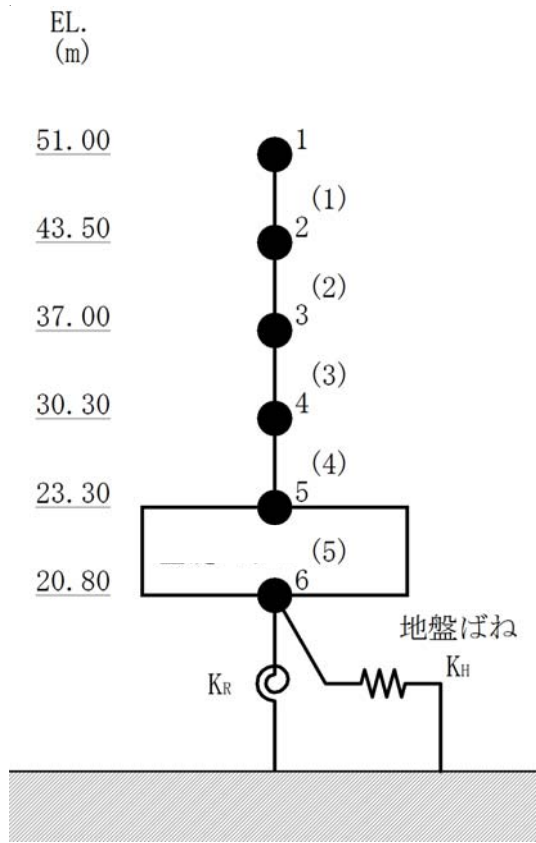


図3-17 緊急時対策所建屋の地震応答解析モデル

表3-25 原子炉建屋のQ-γ関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q ₁	第2折点 Q ₂	終局点 Q ₃	第1折点 γ ₁	第2折点 γ ₂	終局点 γ ₃
(m)	-	(kN)			(×10 ⁻³ (-))		
63.65 ~ 57.00	1	4.37E+04	5.90E+04	1.24E+05	0.174	0.522	4.0
57.00 ~ 46.50	2	4.67E+04	6.31E+04	1.26E+05	0.185	0.555	4.0
46.50 ~ 38.80	3	3.37E+05	4.56E+05	9.29E+05	0.173	0.519	4.0
38.80 ~ 34.70	4	1.78E+05	2.41E+05	5.55E+05	0.145	0.435	4.0
34.70 ~ 29.00	5	1.83E+05	2.47E+05	5.59E+05	0.139	0.417	4.0
29.00 ~ 20.30	6	3.20E+05	4.32E+05	9.29E+05	0.159	0.477	4.0
20.30 ~ 14.00	7	3.90E+05	5.25E+05	1.18E+06	0.174	0.522	4.0
14.00 ~ 8.20	8	6.62E+05	8.94E+05	1.68E+06	0.183	0.549	4.0

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q ₁	第2折点 Q ₂	終局点 Q ₃	第1折点 γ ₁	第2折点 γ ₂	終局点 γ ₃
(m)	-	(kN)			(×10 ⁻³ (-))		
63.65 ~ 57.00	1	4.08E+04	5.51E+04	1.16E+05	0.174	0.522	4.000
57.00 ~ 46.50	2	4.36E+04	5.89E+04	1.18E+05	0.185	0.555	4.000
46.50 ~ 38.80	3	2.46E+05	3.33E+05	7.13E+05	0.173	0.519	4.000
38.80 ~ 34.70	4	2.10E+05	2.83E+05	6.20E+05	0.162	0.486	4.000
34.70 ~ 29.00	5	2.17E+05	2.93E+05	6.26E+05	0.151	0.453	4.000
29.00 ~ 20.30	6	3.10E+05	4.19E+05	8.82E+05	0.143	0.429	4.000
20.30 ~ 14.00	7	3.56E+05	4.82E+05	1.02E+06	0.172	0.516	4.000
14.00 ~ 8.20	8	5.80E+05	7.83E+05	1.56E+06	0.182	0.546	4.000

表3-26 タービン建屋のQ- γ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
40.64 ~ 28.00	1	6.32E+04	8.54E+04	1.18E+05	0.176	0.528	4.000
28.00 ~ 18.00	2	1.84E+05	2.51E+05	3.21E+05	0.228	0.684	4.000
18.00 ~ 8.20	3	4.54E+05	6.26E+05	8.18E+05	0.233	0.699	4.000

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
40.64 ~ 28.00	1	1.03E+05	1.39E+05	2.37E+05	0.176	0.528	4.000
28.00 ~ 18.00	2	2.09E+05	2.91E+05	4.39E+05	0.213	0.639	4.000
18.00 ~ 8.20	3	3.82E+05	5.24E+05	7.58E+05	0.230	0.690	4.000

表3-27 使用済燃料乾式貯蔵建屋のQ- γ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
29.20 ~ 17.75	BM03	4.50E+04	6.07E+04	1.36E+05	0.198	0.594	4.0
17.75 ~ 8.30	BM02	6.05E+04	8.15E+04	1.56E+05	0.214	0.642	4.0

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
29.20 ~ 17.75	BM03	4.19E+04	5.66E+04	1.14E+05	0.191	0.573	4.0
17.75 ~ 8.30	BM02	6.19E+04	8.37E+04	1.62E+05	0.197	0.590	4.0

表3-28 緊急時対策所建屋のQ- γ 関係

(a) NS方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
43.50 ~ 51.00	1	1.18E+05	1.59E+05	2.96E+05	0.177	0.530	4.000
37.00 ~ 43.50	2	3.23E+05	4.35E+05	7.75E+05	0.181	0.542	4.000
30.30 ~ 37.00	3	3.29E+05	4.44E+05	7.56E+05	0.193	0.579	4.000
23.30 ~ 30.30	4	3.77E+05	5.10E+05	8.44E+05	0.205	0.614	4.000

(b) EW方向

高さ EL.	要素 番号	第1折点 Q_1	第2折点 Q_2	終局点 Q_3	第1折点 γ_1	第2折点 γ_2	終局点 γ_3
(m)	-	(kN)			$(\times 10^{-3} (-))$		
43.50 ~ 51.00	1	8.43E+04	1.14E+05	1.89E+05	0.177	0.530	4.000
37.00 ~ 43.50	2	2.57E+05	3.46E+05	6.04E+05	0.179	0.538	4.000
30.30 ~ 37.00	3	2.69E+05	3.62E+05	6.05E+05	0.192	0.577	4.000
23.30 ~ 30.30	4	3.21E+05	4.34E+05	7.11E+05	0.204	0.613	4.000

設計荷重のうち、風圧力による荷重 W_w は、建屋の形状を考慮して算出した風力係数及び受圧面積に基づき算出する。

気圧差による荷重 W_p は、建屋の内部から外部に作用し、建屋層全体の評価においては相殺される荷重であるが、保守的に W_w と同じ方向にのみ作用すると見なす。

飛来物による衝撃荷重 W_M は、瞬間的に作用するものであり、またこれら建屋の質量が飛来物に対し十分に大きなものであることから、建屋の全体的な挙動に対する影響は軽微と考えられるため考慮しない。

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

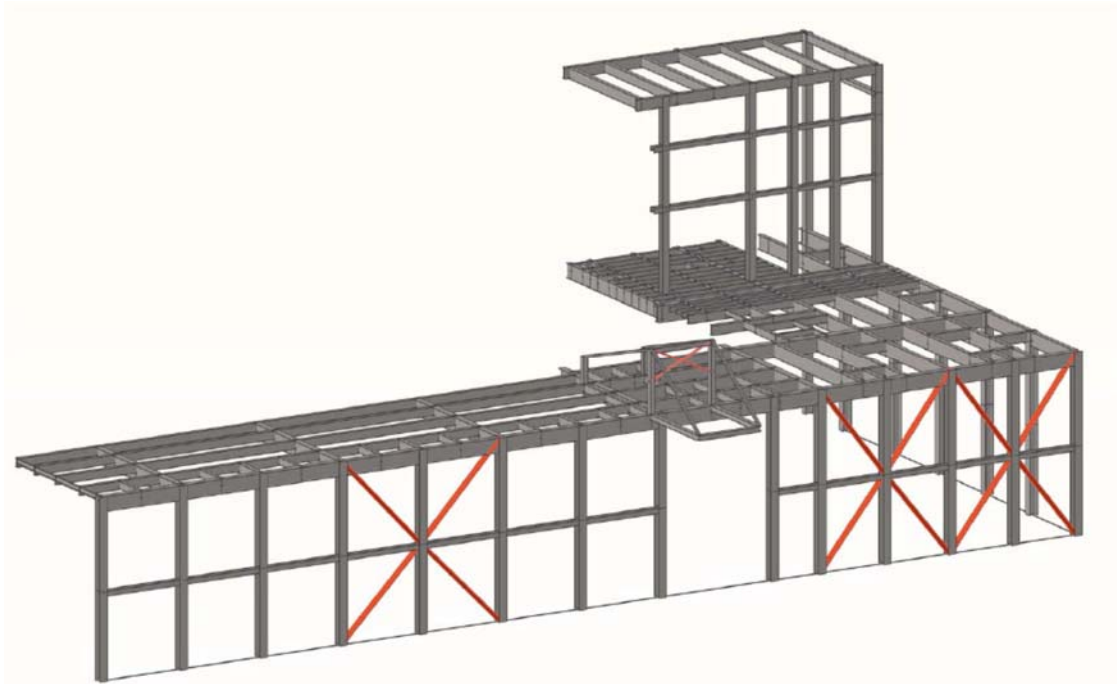
a. 鉄骨架構

原子炉建屋（鉄骨構造部）のうち鉄骨架構については、図3-18に示す付属棟東部のモデルの様に、原子炉建屋原子炉棟との接合部をピン支持とした3次元フレームモデルについて、風圧力による荷重 W_w 、気圧差による荷重 W_p 及び常時作用する荷重 F_d により部材に発生する応力度を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

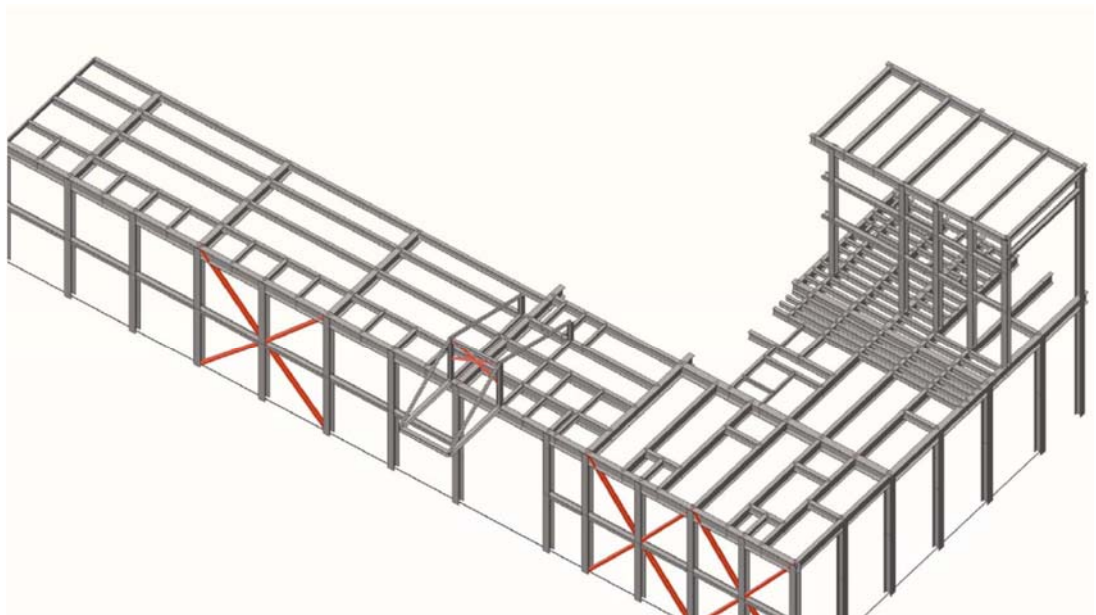
飛来物による衝撃荷重 W_M については、瞬間的に作用するものであり、当該部の質量は飛来物に対し十分に大きなものであること、また当該部は頑健な原子炉建屋（RC造部）に支えられた構造となっていることから、飛来物の衝突荷重で当該部の全体的な倒壊を起こすことは考え難いが、衝突による架構構成部材（鉄骨）の部分的な損傷を生じ

た場合には、その後に作用する自重若しくは風荷重により倒壊しないことが必要となるため、飛来物の衝突荷重は、柱若しくははりの一本を喪失したものと置き換えたモデルとして考慮する。

また、鉄骨造部分に対する地震荷重については、建屋の変位が加わらない方向については、各区画に作用する原子炉建屋の応答加速度を入力する。建屋からの変位を受ける方向については、その変位を入力し、発生する荷重を算出する。

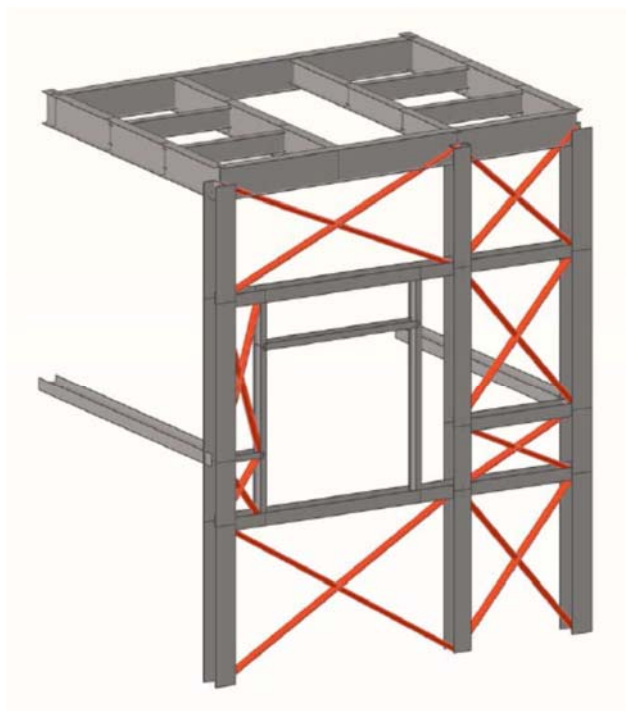
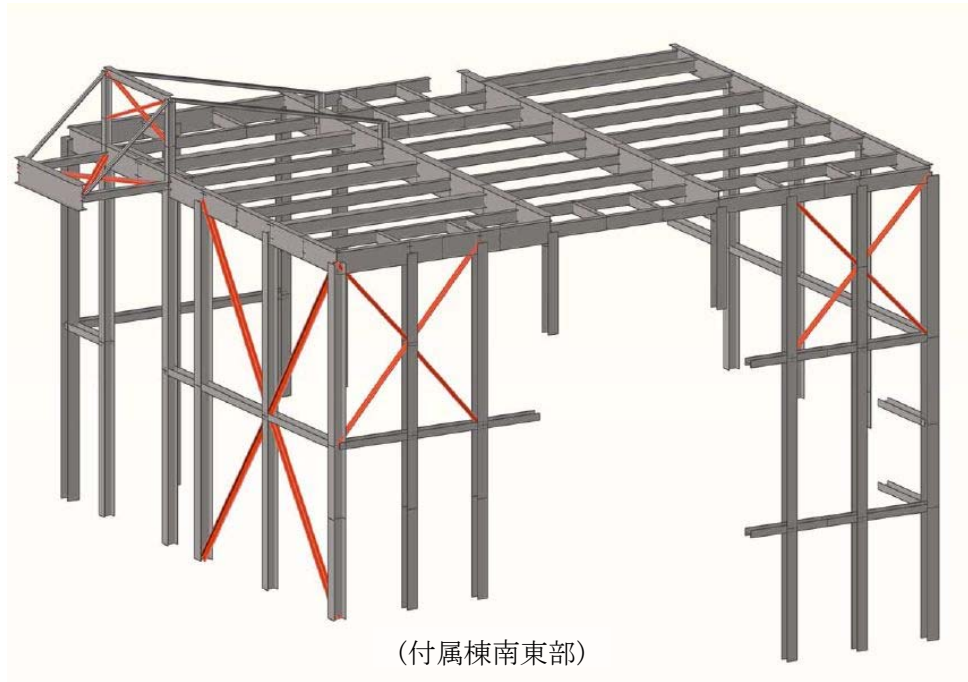


(付属棟東部及び隔離弁室②)



(付属棟東部及び隔離弁室②)

図3-18 原子炉建屋（鉄骨構造部）の解析モデル（1/2）



(隔離弁室①)

図3-18 原子炉建屋（鉄骨構造部）の解析モデル（2/2）

a. 外装板

原子炉建屋（鉄骨構造部）のうち外装板については、図3-19に示すように、鉄骨架構にボルト止めしたパネルを嵌め合わせた構造となっている。これについて、風圧力による荷重 W_w 、気圧差による荷重 W_p 及び常時作用する荷重 F_d により発生する曲げモーメント及びせん断力を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

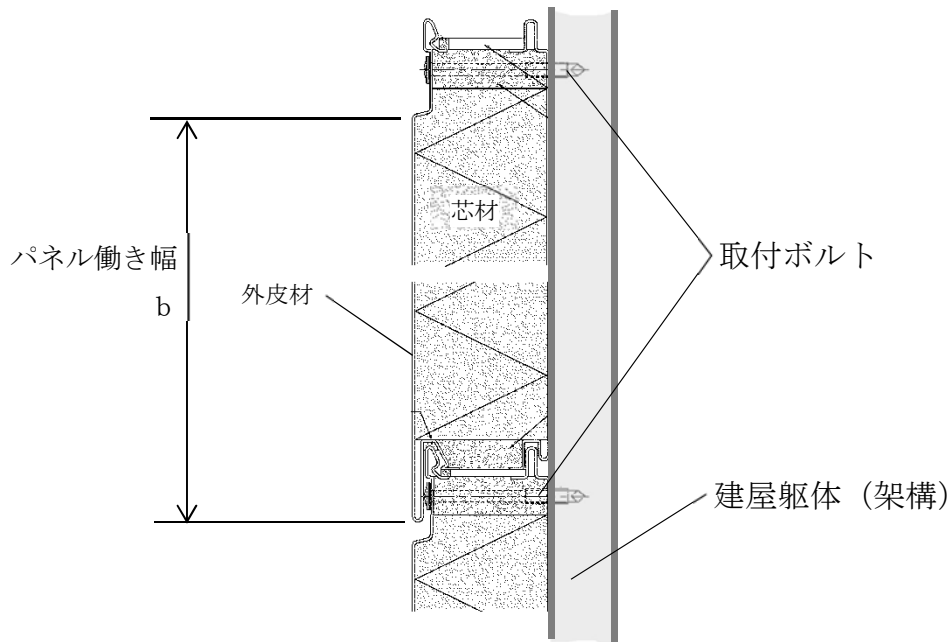


図3-19 原子炉建屋（鉄骨構造部）のうち外装板の取付構造

竜巻荷重に対する外装板の脱落防止の観点からは、図3-20に示すような、気圧差による荷重 W_p により発生する、外装板の曲げ及び取付ボルトの引張が支配的であるため、下式にて曲げ応力及び取付ボルトに作用する荷重を算定する。

取付幅 l の外装板における最大曲げ応力

$$M = \frac{\Delta P \cdot l^2}{8 \cdot Z}$$

ΔP : 気圧差による荷重

Z : 外装材の断面係数

外装板 1 枚当たりの、気圧差による面外方向荷重

$$F = l \cdot b \cdot \Delta P$$

b : 外装材の働き幅

取付ボルト 1 本あたりに生じる引張荷重

$$T = \frac{F}{2}$$

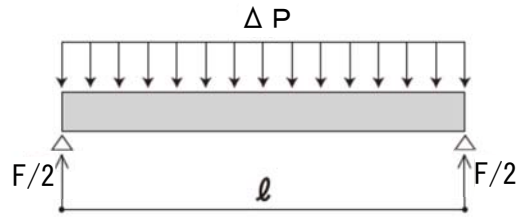


図 3-20 気圧差により外装板に作用する荷重

また、外装板については、地震時における脱落防止も求められるため、下式にて発生荷重を算定する。

外装板一枚当たりの、地震力による荷重

$$\text{水平方向： } F_H = C_H \cdot m$$

$$\text{鉛直方向： } F_V = C_V \cdot m$$

ボルト 1 本あたりの、地震力による発生荷重

引張：

$$T = \frac{F_H}{2}$$

せん断：

$$Q = \frac{F_V}{2}$$

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブについて、風圧力による荷重 W_w 、気圧差による荷重 W_p 及び常時作用する荷重 F_d により発生する曲げモーメント及びせん断力を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブは、鉄骨はりにスタッドを介して接続しているため、はり位置を支持点とした一方向版とし、両端固定はりとして評価する。スタッドに作用する引張力は、単位幅の屋根スラブに生じるせん断力を当該範囲のスタッドが均等に負担するものとして評価する。

屋根スラブの発生曲げモーメント M 及び発生せん断力 Q 並びにスタッドの発生引張力 T の算定式を以下に示す。また、屋根スラブに作用する荷重の概要を図3-21に示す。

単位幅の屋根スラブにおける発生モーメント

$$M = \frac{(\omega_T - \omega_d) \cdot L^2}{12}$$

単位幅の屋根スラブにおける発生せん断力

$$Q = \frac{(\omega_T - \omega_d) \cdot L}{2}$$

スタッド 1 本あたりの発生引張力

$$T = Q \cdot \frac{P}{1000}$$

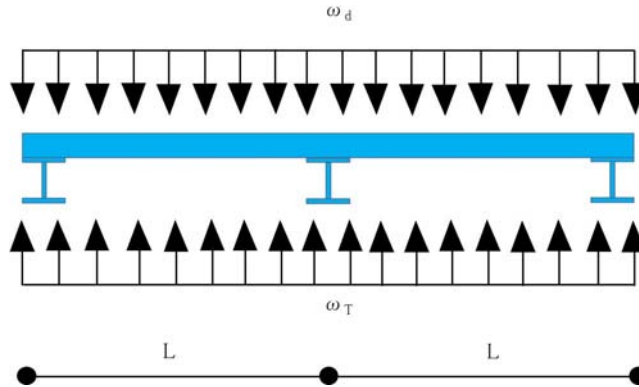


図3-21 屋根スラブに作用する荷重の概要

許容限界である終局強度については、「RC規準」に基づき算定する。

スタッドの許容引張力は、「各種合成指針」に準拠し、スタッドの降伏により定まる許容引張力 P_{a1} 、コンクリート部のコーン状破壊により定まる許容引張力 P_{a2} 及びコンクリート部の支圧破壊により定まる許容引張力 P_{a3} のうち、最も小さい値とする。

屋根スラブの許容曲げモーメント M_a 及び許容せん断力 Q_a 並びにスタッドの許容引張力 P_a の算定式を以下に示す。

$$M_a = a_t \cdot f_t \cdot j$$

$$Q_a = b \cdot j \cdot \alpha \cdot f_s$$

$$P_a = \min(P_{a1}, P_{a2}, P_{a3})$$

(4) 扉

扉の閉状態を維持する部材について、気圧差による荷重 W_p により発生する応力を算出し、許容限界を超えないことを確認する。

下記の扉を評価対象とする。

- ・原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉
- ・原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉
- ・原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)
- ・原子炉建屋付属棟1階東側水密扉
- ・原子炉建屋付属棟1階南側水密扉
- ・原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉
- ・原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉
- ・原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉
- ・原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉
- ・原子炉建屋付属棟3階西側非常用階段連絡口扉
- ・空調機械室搬入口扉
- ・空調機械室搬入口扉 (潜戸)
- ・原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉

- a. 原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉，原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉，原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)及び原子炉建屋付属棟1階東側水密扉に関する評価

(a) 応力評価

原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉，原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉及び原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)及び原子炉建屋付属棟1階東側水密扉について、カンヌキ部（カンヌキ，カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト）に掛かる曲げ，せん断及び引張荷重をモデル化し，評価を行う。カンヌキ部に作用する荷重，発生曲げモーメント M ，発生せん断力 Q 及び発生引張力 T の算定式を以下に示す。

イ. カンヌキ部に生じる荷重

カンヌキ部に生じる荷重は気圧差による荷重 W_p をカンヌキ部で負担した場合に発生する反力 R_p から算定する。カンヌキ部に生じる荷重を図3-22に示す。

$$W_p = \Delta P \cdot A_d$$

$$R = \frac{W_p}{n_k}$$

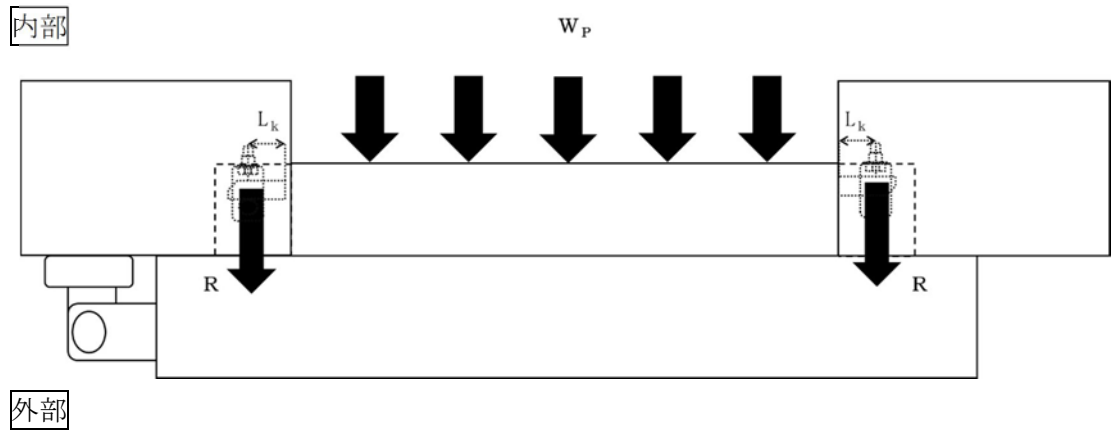


図3-22 カンヌキ部に生じる荷重

イ. カンヌキ

カンヌキ部の詳細図を図3-23に示す。カンヌキに生じる曲げモーメント M_k 及びせん断力 Q_k は次式により算定する。

$$M_k = R \cdot L_k$$

$$Q_k = R$$

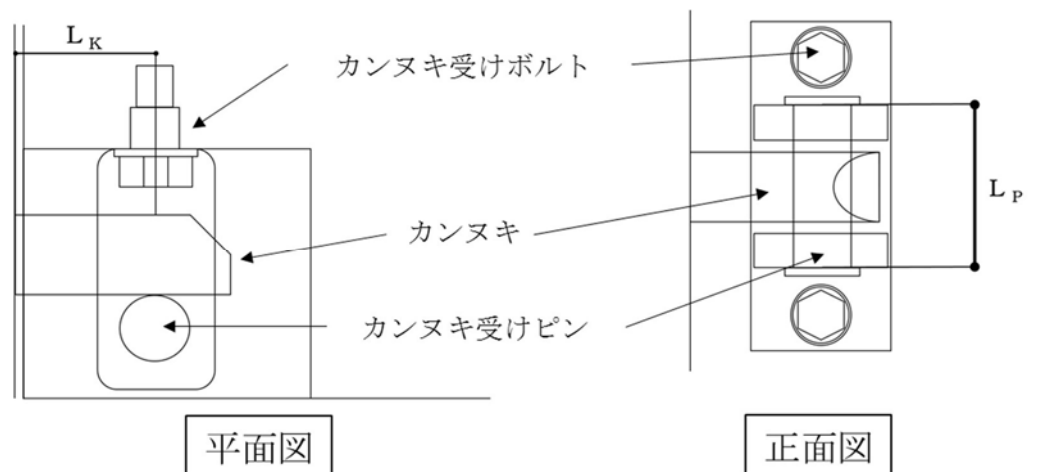


図3-23 カンヌキ部詳細図

ロ. カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント M_p とせん断力 Q_p は次式により算定する。

$$M_p = \frac{R \cdot L_p}{4}$$

$$Q_p = R$$

ハ. カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張力 T は次式により算定する。

$$T = R$$

(b) 断面検定

各部材に生じる応力より算定する応力度が許容限界以下であることを確認する。なお、異なる荷重が同時に作用する部材については、組合せを考慮する。評価対象部位の許容限界を表3-29に示す。

イ. カンヌキ

カンヌキに生じる生じる曲げ応力度及びせん断応力度から組合せ応力度を算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{M_k}{Z_k}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{Q_k}{A_k}\right)^2}$$

ロ. カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる曲げ応力度及びせん断応力度を算定し、評価結果が厳しい方の値が短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_b = M_p / Z_p$$

$$\tau = Q_p / 2 \cdot A_p$$

ハ. カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張応力度を算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_t = T / (n \cdot A_b)$$

表3-29 評価対象部位の許容限界

評価対象部材		材質	許容限界値 (kN/mm ²)	
			曲げ・引張	せん断
カンヌキ部	カンヌキ	SUS304	205	—
	カンヌキ受けピン	SCM440	686	396
		S45C	345	199
	カンヌキ受けボルト	SCM435	651	—

- b. 原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉、空調機械室搬入口扉及び空調機械室搬入口扉（潜戸）についての評価

(a) 応力評価

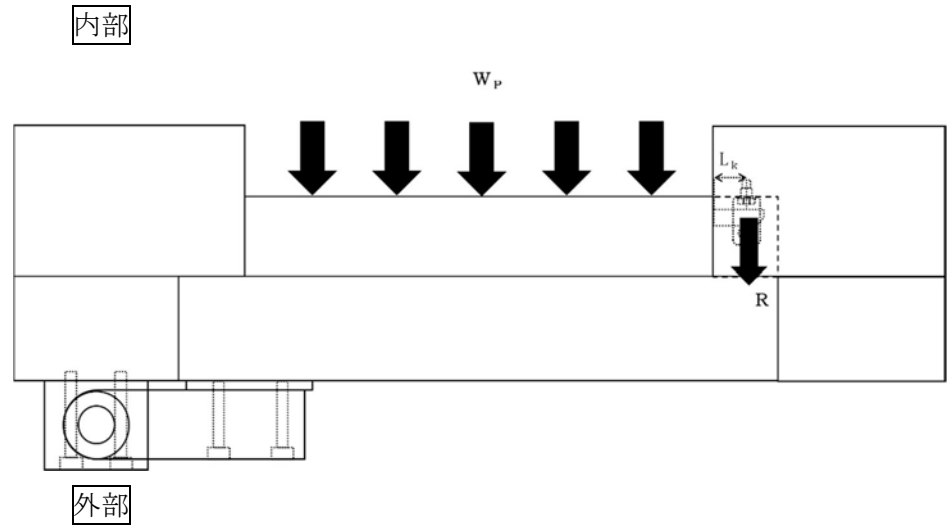
評価対象扉について、カンヌキ部（カンヌキ、カンヌキ受けピン及びカンヌキ受けボルト）に掛かる曲げ，せん断及び引張荷重をモデル化し，評価を行う。ヒンジ部及びカンヌキ部に作用する荷重，発生曲げモーメントM，発生せん断力Q及び発生引張力Tの算定式を以下に示す。

イ. カンヌキ部に生じる荷重

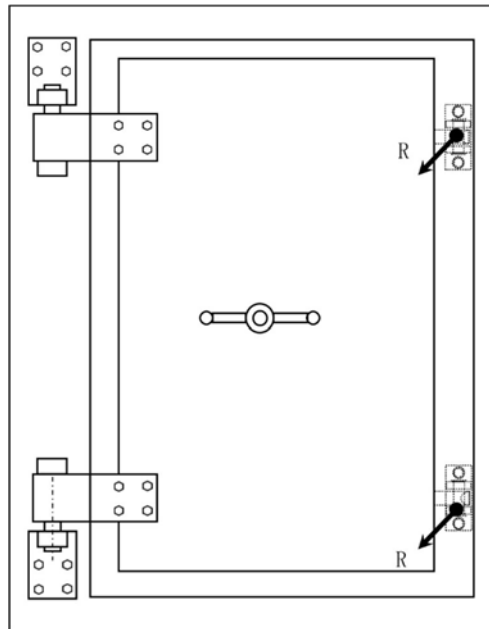
カンヌキ部に生じる荷重は，気圧差による荷重をカンヌキ部で負担した場合に発生する反力Rから算定する。

$$W_p = \Delta P \cdot A_d$$

$$R = \frac{W_p}{n_k + n_h}$$



<扉平面図>



<扉立面図>

図3-24 カンヌキ部に生じる荷重

ロ. カンヌキ

カンヌキ部の詳細図を図3-25に示す。カンヌキに生じる曲げモーメント M_k 及びせん断力 Q_k は次式により算定する。

$$M_k = R \cdot L_k$$

$$Q_k = R$$

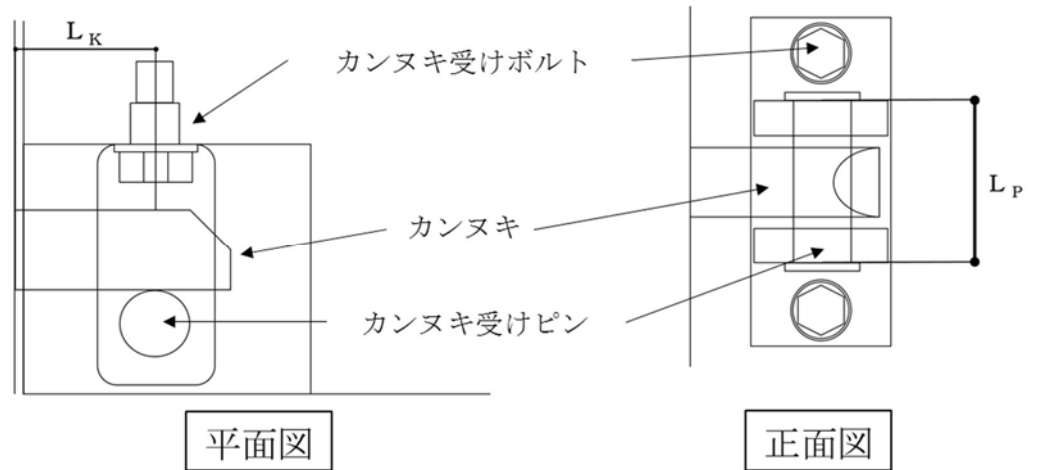


図3-25 カンヌキ部詳細図

へ. カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる曲げモーメント M_p とせん断力 Q_p は次式により算定する。

$$M_p = \frac{R \cdot L_p}{4}$$

$$Q_p = R$$

ト. カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張力 T は次式により算定する。

$$T = R$$

(b) 断面検定

各部材に生じる応力より算定する応力度が許容限界以下であることを確認する。なお、異なる荷重が同時に作用する部材については、組合せを考慮する。評価対象部位の許容限界を表3-30に示す。

イ. カンヌキ

カンヌキに生じる生じる曲げ応力度及びせん断応力度から組合せ応力度を算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_x = \sqrt{\left(\frac{M_k}{Z_k}\right)^2 + 3 \cdot \left(\frac{Q_k}{A_k}\right)^2}$$

ロ. カンヌキ受けピン

カンヌキ受けピンに生じる曲げ応力度及びせん断応力度を算定し、評価結果が厳しい方の値が短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_b = M_p / Z_p$$

$$\tau = Q_p / 2 \cdot A_p$$

ハ. カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張応力度を算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_t = T / (n \cdot A_b)$$

表3-30 評価対象部位の許容限界

評価対象部材		材質	許容限界値(kN/mm ²)	
			曲げ・引張	せん断
カンヌキ部	カンヌキ	SUS304	205	—
	カンヌキ受けピン	S45C	345	199
	カンヌキ受けボルト	SCM435	651	—

c. 原子炉建屋付属棟南側水密扉及び原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉についての評価

(a) 応力評価

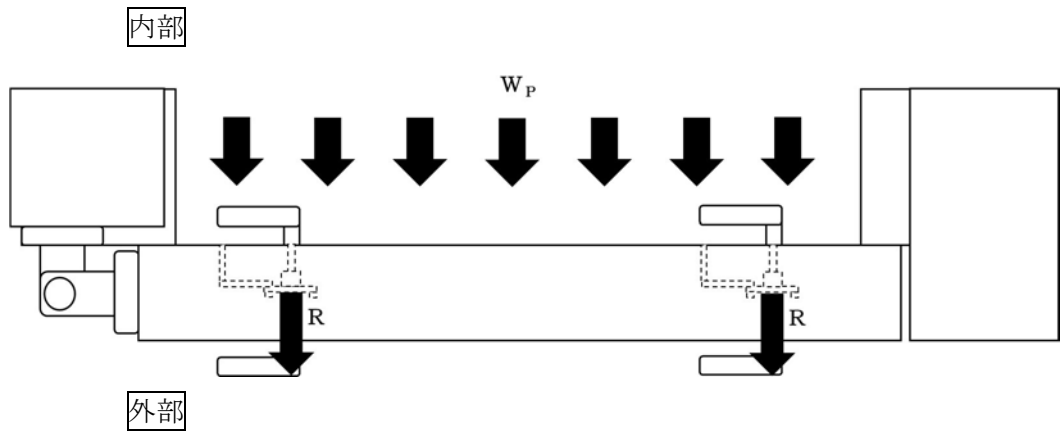
評価対象扉について、カンヌキ部（カンヌキバー及びカンヌキ受けボルト）に掛かる曲げ、せん断及び引張荷重をモデル化し、評価を行う。カンヌキ部に作用する荷重、発生曲げモーメントM、発生せん断力Q及び発生引張力Tの算定式を以下に示す。

イ. ヒンジ部及びカンヌキ部に生じる荷重

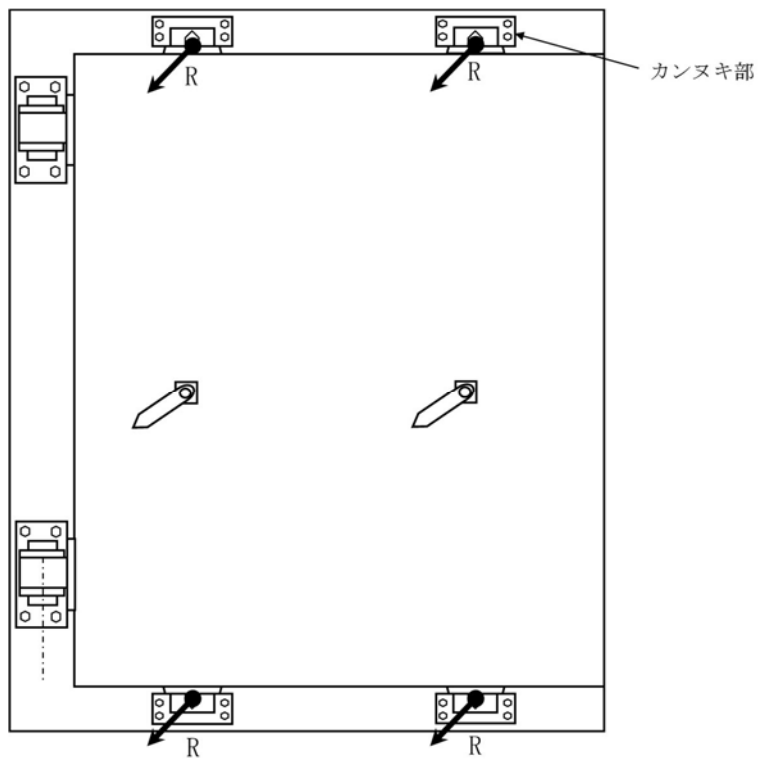
ヒンジ部及びカンヌキ部に生じる荷重は、自重による反力 R_G 及び気圧差による荷重をヒンジ部及びカンヌキ部で負担した場合に発生する反力Rから算定する。

$$W_P = \Delta P \cdot A_d$$

$$R = \frac{W_P}{n_k + n_h}$$



<扉平面図>



<扉立面図>

図3-31 ヒンジ部及びカンヌキ部に生じる荷重

イ. カンヌキバー

カンヌキ部の詳細図を図3-32に示す。カンヌキバーに生じる曲げモーメント M_1 は次式により算定する。

$$M_1 = R \cdot L_k$$

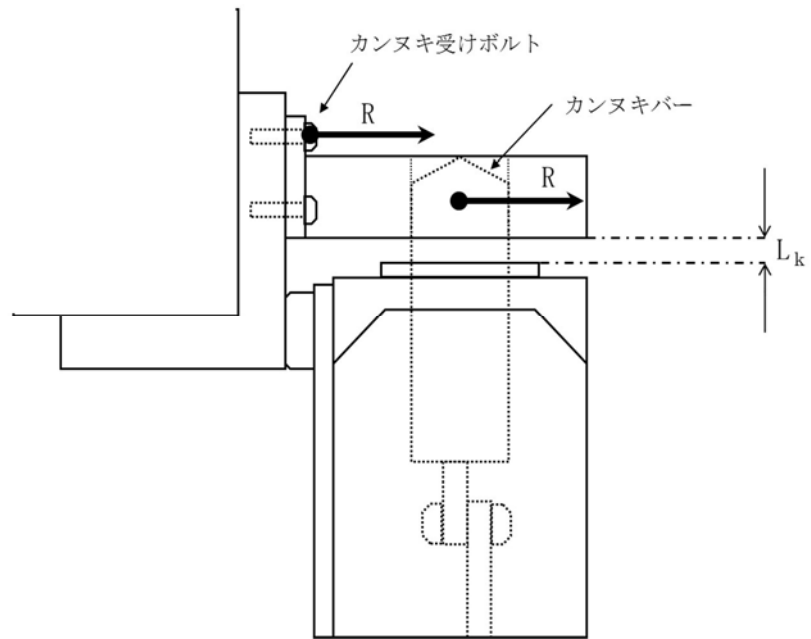


図3-32 カンヌキ部詳細図

ロ. カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張力 T は次式により算定する。

$$T = R$$

(b) 断面検定

各部材に生じる応力より算定する応力度が許容限界以下であることを確認する。なお、異なる荷重が同時に作用する部材については、組合せを考慮する。評価対象部位の許容限界を表3-31に示す。

イ. カンヌキバー

カンヌキバーに生じる曲げ応力度を算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

$$\sigma_b = M_1 / Z_1$$

ロ. カンヌキ受けボルト

カンヌキ受けボルトに生じる引張応力度 T_1 を次式により算定し、短期許容応力度以下であることを確認する。

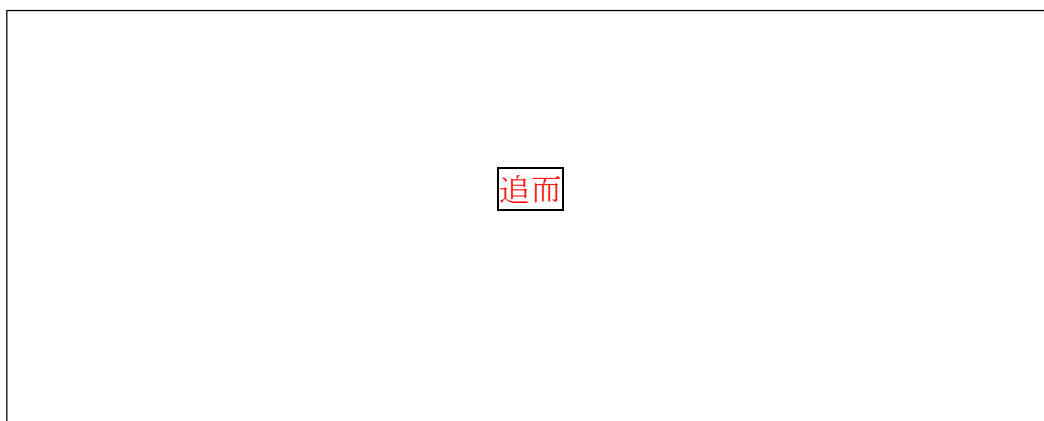
$$\sigma_t = T / (n \cdot A_b)$$

表3-31 評価対象部位の許容限界

評価対象部材		材質	許容限界値 (kN/mm ²)	
			曲げ・引張	せん断
カンヌキ部	カンヌキバー	SUS304N2	345	199
	カンヌキ受けボルト	SUS304	205	118

d. 原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉及び原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉についての評価

(a) 応力評価



4. 評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を、以下に示す。

4.1 貫通評価

4.1.1 鉄筋コンクリート造部

鉄筋コンクリート造部の貫通評価に用いる条件を表4-1に示す。

表4-1 貫通評価に用いる入力値（鉄筋コンクリート造部）

記号	記号の説明		数値		単位
α_e	低減係数	鋼製材	1.0		—
		車両	0.60		—
d	飛来物直径	鋼製材	27.6		cm
		車両	338.5		cm
F_c	コンクリートの設計基準強度	原子炉建屋	225	kgf/cm ²	
		タービン建屋	225		
		使用済燃料 乾式貯蔵建屋	240		
		緊急時対策所建屋	306		
		軽油貯蔵タンクタンク室	408		
N	飛来物の形状係数	鋼製材	1.14		—
		車両	0.72		—
D	飛来物直径密度 W/d^3	鋼製材	6.42×10^{-3}		kgf/cm ³
		車両	1.29×10^{-4}		kgf/cm ³
W	飛来物重量	鋼製材	135		kgf
		車両	5000		kgf
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
		車両	水平	52	m/s
			鉛直	—*	

※：表3-4を参照

4.1.2 鋼製部

鋼製部の貫通評価に用いる条件を表4-2に示す。

表4-2 貫通評価に用いる入力値（鋼製部）

記号	記号の説明		数値		単位
d	飛来物直径	鋼製材	7.90		cm
k	鋼板の材質に関する係数		1		—
M	飛来物重量	鋼製材	135		kg
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
t ₁	原子炉建屋原子炉棟水密扉の板厚 (大扉外側カバープレート)		0.0032		m
t ₂	原子炉建屋原子炉棟水密扉の板厚 (大扉スキンプレート)		0.0280		m
t ₃	原子炉建屋原子炉棟水密扉の板厚 (大扉内側カバープレート)		0.0032		m
t ₄	機器搬入口内側扉の板厚 (フェースプレート※)		0.0060		m
—	設計飛来物の運動エネルギー		175.6		kJ

4.1.3 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの貫通評価における、「3. 強度評価方法」に用いる「LS-DYNA」によるFEM解析の解析ケースを以下に示す。

飛来物の衝突位置は、衝突時間が長く、被衝突部材に伝達するエネルギーが大きくなるように部材長さ（支持スパン）が最大となる位置（中央部）とする。飛来物の衝突方向は鉛直とし、衝突位置のスパンに合わせて、屋根に対して最小断面積で衝突する場合（縦衝突）とする。

解析ケースを表4-3に、解析ケース図を図4-1に示す。

表4-3 解析ケース（原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ貫通評価）

評価対象	飛来物	衝突箇所	飛来物の衝突方向	対象部材
原子炉建屋 原子炉棟 屋根スラブ	鋼製材	中央部	鉛直：縦	躯体コンクリート(最小部： <input style="width: 20px; height: 15px; border: 1px solid black;" type="text"/> mm) 鉄筋(D13@180, 200)

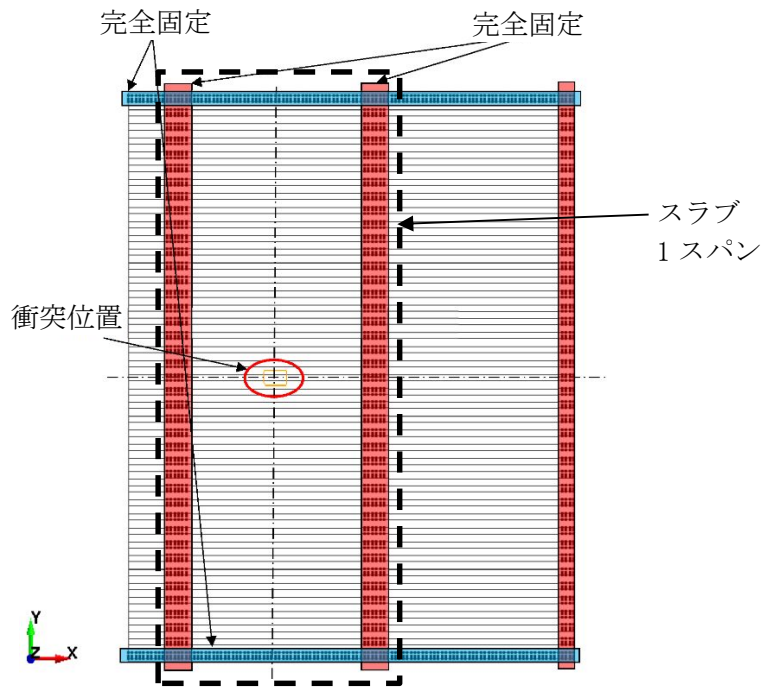


図4-1 解析ケース図

4.2 裏面剥離評価

裏面剥離評価に用いる条件を表 4-4 に示す。

表4-4 屋根スラブの裏面剥離評価式に用いる入力値

記号	記号の説明		数値		単位
α_s	低減係数	鋼製材	1.0		—
		車両	0.55		
V_0	飛来物基準速度	鋼製材	60.96		m/s
		車両	60.96		
d	飛来物直径	鋼製材	27.6		cm
		車両	338.5		
f_c'	コンクリートの設計基準強度	原子炉建屋	225		kgf/cm ²
		タービン建屋	225		
		使用済燃料 乾式貯蔵建屋	240		
		緊急時対策所建屋	306		
		軽油貯蔵タンクタンク室	408		
W	飛来物重量	鋼製材	135		kgf
		車両	5000		
V	飛来物の衝突速度	鋼製材	水平	51	m/s
			鉛直	34	
		車両	水平	52	
			鉛直	—*	

※：表3-4を参照

4.2.3 原子炉建屋壁面

原子炉建屋壁面の裏面剥離評価における、「3. 強度評価方法」に用いる「LS-DYNA」によるFEM解析の解析ケースを以下に示す。

飛来物の衝突位置は、衝突時間が長く、被衝突部材に伝達するエネルギーが大きくなるように部材長さ（支持スパン）が最大となる位置（中央部）とする。飛来物の衝突方向は鉛直とし、衝突位置のスパンに合わせて、屋根に対して最小断面積で衝突する場合（縦衝突）とする。

解析ケースを表4-5に、解析ケース図を図4-2に示す。

表4-5 解析ケース（原子炉建屋壁面裏面剥離評価）

評価対象	飛来物	衝突箇所	飛来物の衝突方向	対象部材
原子炉建屋 原子炉棟 外壁	鋼製材	中央部	鉛直：縦	躯体コンクリート (<input type="text" value=""/> mm) 鉄筋 (D19@200)

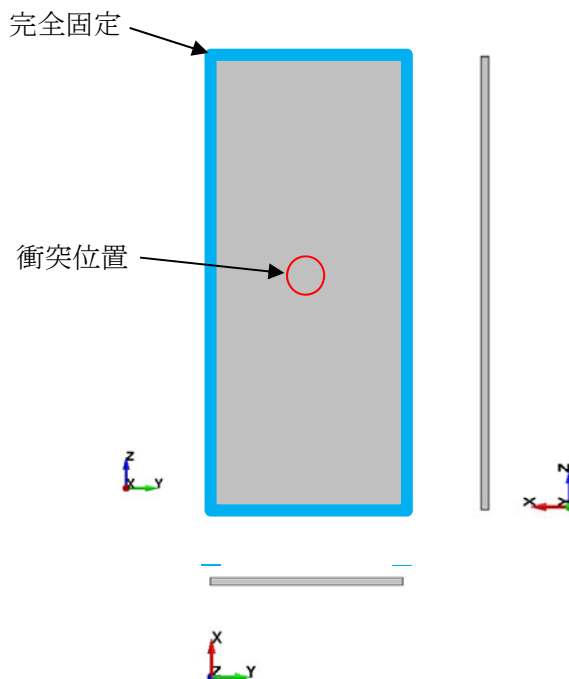


図4-2 解析ケース図（原子炉建屋壁面裏面剥離評価）

4.2.4 使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面

使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面の裏面剥離評価における、「3. 強度評価方法」に用いる「LS-DYNA」によるFEM解析の解析ケースを以下に示す。

飛来物の衝突位置は、衝突時間が長く、被衝突部材に伝達するエネルギーが大きくなるように部材長さ（支持スパン）が最大となる位置（中央部）とする。飛来物の衝突方向は鉛直とし、衝突位置のスパンに合わせて、建屋壁面に対して最小断面積で衝突する場合（縦衝突）とする。

解析ケースを表4-6に、解析ケース図を図4-3に示す。

表4-6 解析ケース（使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面裏面剥離評価）

評価対象	飛来物	衝突箇所	飛来物の衝突方向	対象部材
原子炉建屋 原子炉棟 外壁	鋼製材	中央部	鉛直：縦	躯体コンクリート(<input type="text"/> mm) 鉄筋(D22@250)

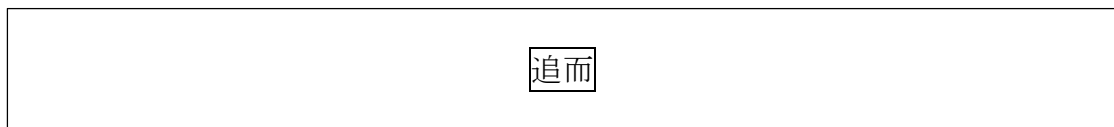


図4-3 解析ケース図（使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面裏面剥離評価）

4.3 変形評価

(1) 外壁

原子炉建屋，タービン建屋，使用済燃料乾式貯蔵建屋及び緊急時対策所の変形評価に用いる条件を表4-7から表4-10に示す。

表4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (1/5) (RC構造部)

質点	高さ	位置	風力係数 ^{※1}	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
1	63.65	風上	0.8	331	354
		風下	0.4		
2	57.00	風上	0.8	447	478
		風下	0.4		
3	46.50	風上	0.8	328	351
		風下	0.4		
4	38.80	風上	0.8	175	187
		風下	0.4		
5	34.70	風上	0.8	266	283
		風下	0.4		
6	29.00	風上	0.8	581	570
		風下	0.4		
7	20.30	風上	0.8	430	432
		風下	0.4		
8	14.00	風上	0.8	396	398
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (2/5) (鉄骨造部分：風荷重)

区画	高さ	位置	風力係数 ^{※1}	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
付属棟 南東	E. L. 22.0 ～ E. L. 35.0	風上	0.8	156	162
		風下	0.4		
付属棟 東側	E. L. 14.0 ～ E. L. 22.0	風上	0.8	— ^{※2}	391
		風下	0.4		
隔離弁室 ①	E. L. 22.0 ～ E. L. 30.0	風上	0.8	46	57
		風下	0.4		
隔離弁室 ②	E. L. 22.0 ～ E. L. 30.0	風上	0.8	13	104
		風下	0.4		

※1：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

※2：構造上、N-S方向に対し見附面を有しない。

表4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (3/5) (鉄骨造部分：部材断面)

部材断面	材質
H-350×350×12/19	SS400
H-300×300×10/15	SS400
H-800×550×30×60	SM490A
H-800×450×19×40	SM490A
H-800×300×16×32	SM490A
H-600×300×16×32	SM490A
H-600×300×14×25	SS400
H-600×200×11/17	SS400
H-500×200×10/16	SS400
H-450×200×9/14	SS400
H-400×200×8/13	SS400
H-350×175×7/11	SS400
H-300×150×6.5/9	SS400
H-200×100×5.5/8	SS400
H-294×200×8/12	SS400
H-244×175×7/11	SS400
H-194×150×6/9	SS400
H-200×200×8/12	SS400
C-200×80×7.5/11	SS400
L-150×150×10	SS400
L-90×90×10	SS400
L-75×75×9	SS400
L-65×65×6	SS400

表4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (4/5) (鉄骨造部分：地震荷重)

区画	高さ	入力値	
		N-S方向	E-W方向
付属棟 南東	E. L. 22.0 ～ E. L. 35.0	加速度 1.40	加速度 1.40
付属棟 東側	E. L. 14.0 ～ E. L. 22.0	加速度 1.29	変位 4.5 mm
隔離弁室 ①	E. L. 22.0 ～ E. L. 30.0	加速度 1.37	変位 4.8 mm
隔離弁室 ②	E. L. 22.0 ～ E. L. 30.0	変位 4.8 mm	変位 4.8 mm

表4-7 原子炉建屋変形評価の評価条件 (5/5) (鉄骨造部分：外装材仕様)

項目	記号	値	単位
外装材の取付幅	\varnothing	450	mm
外装材の断面係数	Z	3.70×10^4	mm ³
外装材の働き幅	b	600	mm

表4-8 タービン建屋変形評価の評価条件

質点	高さ	位置	風力係数※	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
1	40.64	風上	0.8	1408	585
		風下	0.4		
2	28.00	風上	0.8	1129	733
		風下	0.4		
3	18.00	風上	0.8	1034	696
		風下	0.4		

※：風下側の係数は、風上側と同じ向きを正とする。

表4-9 使用済燃料乾式貯蔵建屋変形評価の評価条件

質点	高さ	位置	風力係数※	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
BM03	29.20	風上	0.8	318	658
		風下	0.4		
BM02	17.75	風上	0.8	254	525
		風下	0.4		

※：風下側の係数は，風上側と同じ向きを正とする。

表4-10 緊急時対策所建屋変形評価の評価条件

質点	高さ	位置	風力係数※	受圧面積	
				N-S方向	E-W方向
1	51.00	風上	0.8	154	228
		風下	0.4		
2	43.50	風上	0.8	256	265
		風下	0.4		
3	37.00	風上	0.8	272	320
		風下	0.4		
4	30.30	風上	0.8	275	333
		風下	0.4		

※：風下側の係数は，風上側と同じ向きを正とする。

(2) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブの変形評価に用いる条件を表4-11に示す。

表4-11 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ変形評価の評価条件

記号	記号の説明	数値	単位
q	設計用速度圧	6100	N/m ²
C	風力係数	1.0	—
G	ガスト影響係数	1	—
ΔP	最大気圧低下量	8900	N/m ²
A_c	コーン状破壊面の有効投影面積	33123	mm ²
A_0	頭付きアンカーボルト頭部の支圧面積	442.3	mm ²
$s_c a$	頭付きアンカーボルトの断面積で、軸部断面積とねじ部有効断面積の小なる方の値	284	mm ²
b	部材幅	1000	mm
d'	部材の有効せい	50	mm
L	屋根スラブの支持スパン	2270	mm
p	頭付きアンカーボルトの間隔	360	mm
D	頭付きアンカーボルト頭部の直径	30.4	mm
d	頭付きアンカーボルト軸部の直径	19	mm
F_c	コンクリートの設計基準強度	22.1	N/mm ²
f_n	コンクリートの支圧強度	132.6	N/mm ²
f_s	コンクリートの許容せん断応力度	1.06	N/mm ²
f_t	鉄筋の許容引張応力度	345	N/mm ²
a_t	引張鉄筋断面積	703.9	mm ²
j	応力中心間距離 ($j = (7/8) \cdot d'$)	43.8	mm
l_{ce}	頭付きアンカーボルトの強度計算用埋込み長さ ($l_{ce} = l_e$)	88.6	mm
l_e	頭付きアンカーボルトのコンクリート内への有効埋込み長さ	88.6	mm
$c \sigma_t$	コーン状破壊に対するコンクリートの引張強度	1.457	N/mm ²
$s \sigma_{pa}$	頭付きアンカーボルトの引張強度	235	N/mm ²
$s \sigma_y$	頭付きアンカーボルトの規格降伏点強度	235	N/mm ²
ϕ_1	低減係数	1	—
ϕ_2	低減係数	0.67	—
ωd	常時作用する荷重による単位幅あたりの荷重	3.37	kN/m
$\omega T1$	評価に用いる竜巻の荷重 W_{T1} による単位幅あたりの荷重	-8.9*	kN/m
$\omega T2$	評価に用いる竜巻の荷重 W_{T2} による単位幅あたりの荷重	-10.55*	kN/m

※：下向きの荷重を正の値とする。

(3) 扉

- a. 原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉，原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉，原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)及び原子炉建屋付属棟1階東側水密扉

上記扉の変形評価に用いる条件を表4-11～4-13に示す。

表4-11 原子炉建屋原子炉棟水密扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		A_d	水密扉受圧面積	25.9	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	14	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	A_k	断面積	1963	mm^2
		L_k	軸支持間距離	66.0	mm
		Z_k	断面係数	12270	mm^3
	カンヌキ受けピン	A_p	断面積	490.9	mm^2
		L_p	軸支持間距離	91.0	mm
		Z_p	断面係数	1534	mm^3
	カンヌキ受けボルト	A_b	ボルト1本あたりの断面積	157	mm^2
		n_b	ボルト本数	2	本

表4-12 原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		A_d	水密扉受圧面積	3.61	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	4	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	A_k	断面積	1963	mm^2
		L_k	軸支持間距離	106.0	mm
		Z_k	断面係数	12270	mm^3
	カンヌキ受けピン	A_p	断面積	314.2	mm^2
		L_p	軸支持間距離	79.0	mm
		Z_p	断面係数	785.4	mm^3
	カンヌキ受けボルト	A_b	ボルト1本あたりの断面積	157	mm^2
		n_b	ボルト本数	2	本

表4-13 原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		A_d	水密扉受圧面積	1.57	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	4	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	A_k	断面積	1963	mm^2
		L_k	軸支持間距離	95.0	mm
		Z_k	断面係数	12270	mm^3
	カンヌキ受けピン	A_p	断面積	314.2	mm^2
		L_p	軸支持間距離	90.0	mm
		Z_p	断面係数	785.4	mm^3
	カンヌキ受けボルト	A_b	ボルト1本あたりの断面積	157	mm^2
		n_b	ボルト本数	2	本

表4-14 原子炉建屋付属棟1階東側水密扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		A_d	水密扉受圧面積	4.84	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	6	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	A_k	断面積	1963	mm^2
		L_k	軸支持間距離	106	mm
		Z_k	断面係数	12270	mm^3
	カンヌキ受けピン	A_p	断面積	314.2	mm^2
		L_p	軸支持間距離	79.0	mm
		Z_p	断面係数	785.4	mm^3
	カンヌキ受けボルト	A_b	ボルト1本あたりの断面積	157	mm^2
		n_b	ボルト本数	2	本

- b. 原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉，空調機械室搬入口扉及び空調機械室搬入口扉（潜戸）

上記扉の変形評価に用いる条件を表4-15～表4-17に示す。

表4-15 原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉及び原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		A_d	扉受圧面積	1.49	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	2	箇所
		n_h	ヒンジ部箇所数	2	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	A_k	断面積	1963	mm^2
		L_k	軸支持間距離	75	mm
		Z_k	断面係数	12270	mm^3
	カンヌキ受けピン	A_p	断面積	314.2	mm^2
		L_p	軸支持間距離	80	mm
		Z_p	断面係数	785.4	mm^3
	カンヌキ受けボルト	A_b	ボルト1本あたりの断面積	157	mm^2
		n	ボルト本数	2	本

表4-16 空調機械室搬入口扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		A_d	扉受圧面積	17.42	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	4	箇所
		n_h	ヒンジ部箇所数	2	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	A_k	断面積	1963	mm^2
		L_k	軸支持間距離	65	mm
		Z_k	断面係数	12270	mm^3
	カンヌキ受けピン	A_p	断面積	490.9	mm^2
		L_p	軸支持間距離	91	mm
		Z_p	断面係数	1534	mm^3
	カンヌキ受けボルト	A_b	ボルト1本あたりの断面積	—	mm^2
		n	ボルト本数	—	本

表4-17 空調機械室搬入口扉（潜戸）の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		A_d	扉受圧面積	1.84	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	2	箇所
		n_h	ヒンジ部箇所数	2	箇所
カンヌキ部	カンヌキ	A_k	断面積	1963	mm^2
		L_k	軸支持間距離	75	mm
		Z_k	断面係数	12270	mm^3
	カンヌキ受けピン	A_p	断面積	314.2	mm^2
		L_p	軸支持間距離	80	mm
		Z_p	断面係数	785.4	mm^3
	カンヌキ受けボルト	A_b	ボルト1本あたりの断面積	157	mm^2
		n	ボルト本数	2	本

- c. 原子炉建屋付属棟南側水密扉及び原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉
上記扉の変形評価に用いる条件を表4-18～表4-19に示す。

表4-18 原子炉建屋付属棟南側水密扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		A_d	扉受圧面積	3.59	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量	8900	N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数	4	箇所
		n_h	ヒンジ部箇所数	2	箇所
カンヌキ部	カンヌキバー	L_k	軸支持間距離	19	mm
		Z_1	断面係数	12271	mm^3
	カンヌキ受けボルト	A_b	ボルト1本あたりの断面積	4	mm^2
		n	ボルト本数	157	本

表4-19 原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉の変形評価の評価条件

部位		記号	記号の説明	数値	単位
扉体		A_d	扉受圧面積	追而	m^2
		ΔP	単位面積当たりの最大気圧低下量		N/m^2
		n_k	カンヌキ部箇所数		箇所
		n_h	ヒンジ部箇所数		箇所
カンヌキ部	カンヌキバー	L_k	軸支持間距離		mm
		Z_1	断面係数		mm^3
	カンヌキ受けボルト	A_b	ボルト1本あたりの断面積		mm^2
		n	ボルト本数		本

- d. 原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉及び原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉
上記扉の変形評価に用いる条件を表4-20～表4-21に示す。

追而

5. 強度評価結果

5.1 貫通評価

貫通限界厚さと許容限界の比較を表5-1に示す。式による評価で許容限界を満足しなかった原子炉建屋屋根スラブについては、解析による評価にてデッキプレートが破断しないことを確認した。

表5-1 貫通評価結果(1/2) (式による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)	
貫通評価	原子炉建屋	屋根スラブ		鋼製材	100 ^{※1}	
		外壁	R C 部	鋼製材	300	
			鋼構造部	鋼製材	16 ^{※2}	
	タービン建屋	オペレーティング フロア床版 ^{※3}		鋼製材	800	
		気体廃棄物処理系 隔離弁設置エリア壁		鋼製材	1000	
	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	屋根スラブ		鋼製材	450	
		外壁		車両	—	
				鋼製材	450	
					車両	450
					鋼製材	2000
	緊急時対策所	建屋屋根スラブ		鋼製材	600	
				車両	—	
		建屋外壁		鋼製材	1000	
				車両	1000	
	扉	原子炉建屋 大物搬入口扉		鋼製材	28	32
(吸収エネルギー評価)		鋼製材	175.9 kJ	175.6 kJ		
上記以外		鋼製材	32	32		

※1：表5-2(2/2)により内包する防護すべき施設への影響がないことを確認

※2：防護鋼板として、当該厚さでの耐貫通性を確認済（「V-3-別添1-2-1-2 防護鋼板の強度計算書」）

※3：竜巻より防護すべき施設の上部のスラブを対象とする。

表5-1 貫通評価結果(2/2) (解析による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (-)	許容限界 (-)
貫通評価	原子炉建屋 原子炉棟	屋根スラブ	鋼製材	2.0×10^{-3}	8.3×10^{-2}

5.2 裏面剥離評価

裏面剥離限界厚さと許容限界の比較を表5-2に示す。式による評価で許容限界を満足しなかった部位については、解析による評価にてデッキプレート若しくはライナが破断しないことを確認した。

表 5-2 裏面剥離評価結果(1/2) (式による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (mm)	許容限界 (mm)
裏面剥離評価	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	100 ^{※1}	
		外壁 R C 部	鋼製材	300 ^{※1}	
	タービン建屋	オペレーティング フロア床版 ^{※2}	鋼製材	800	
		気体廃棄物処理系 隔離弁設置エリア壁	鋼製材	1000	
	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	屋根スラブ	鋼製材	450	
			車両	—	
		外壁	鋼製材	450 ^{※3}	
	車両		450 ^{※1}		
	軽油貯蔵タンク タンク室	頂版	鋼製材	2000	
	緊急時対策所	建屋屋根スラブ	鋼製材	600	
			車両	—	
		建屋外壁	鋼製材	1000	
車両			1000		

※1：表 5-2(2/2)により内包する防護すべき施設への影響がないことを確認

※2：竜巻より防護すべき施設の上部のスラブを対象とする。

※3：内包する防護すべき施設への影響がないことを、表 5-2(2/2)の原子炉建屋外壁を代表とした評価により確認

表5-2 裏面剥離評価結果(2/2) (解析による評価)

評価項目		部位	飛来物	評価結果 (-)	許容限界 (-)
裏面剥離評価	原子炉建屋	屋根スラブ	鋼製材	0.013 [*]	0.082
		外壁 [※]	鋼製材	9.79×10^{-4} [*]	2.0×10^{-3}
	使用済燃料乾式 貯蔵建屋	外壁	車両	追而	

※：外殻となるRC壁の代表箇所（最少版厚部位）

*：速報値

5.3 変形評価

(1) 外壁（RC造部）

建屋に生じるせん断ひずみと許容限界の比較を表5-3に示す。建屋に生じるひずみが許容限界を超えないことを確認した。

表 5-3 変形評価結果（建屋）

評価項目	評価結果	評価結果	許容限界
建屋の せん断ひずみ	原子炉建屋	4.2×10^{-5}	2.0×10^{-3}
	タービン建屋	4.7×10^{-5}	2.0×10^{-3}
	使用済燃料乾式貯蔵建屋	5.0×10^{-5}	2.0×10^{-3}
	緊急時対策所	8.8×10^{-6}	2.0×10^{-3}

(2) 原子炉建屋（鉄骨構造部）

原子炉建屋（鉄骨構造部）の部材に発生する応力度を計算し、許容限界を超えないことを確認する。

評価項目	評価結果	許容限界
	迫而	

(3) 原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ

原子炉建屋原子炉棟屋根スラブに生じる荷重と許容限界の比較を表5-4に示す。スラブ及びスタッドに生じる荷重が許容限界を超えないことを確認した。

表5-4 変形評価結果（原子炉建屋原子炉棟屋根スラブ）

評価項目	評価結果	許容限界
屋根スラブの曲げモーメント	3	10
屋根スラブのせん断力	9	46
スタッドの発生引張力	4	32

(4) 扉

- a. 原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉，原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉，原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)，原子炉建屋付属棟1階東側水密扉

評価対象扉に生じる荷重と許容限界の比較を表5-5に示す。カンヌキ部に生じる荷重が許容限界を超えないことを確認した。

表5-5 原子炉建屋大物搬入口扉のうち原子炉建屋原子炉棟水密扉，原子炉建屋付属棟1階電気室搬入口水密扉，原子炉建屋原子炉棟水密扉(潜戸)，原子炉建屋付属棟1階東側水密扉の変形評価結果

評価対象部位		評価結果 (N/mm ²)	許容限界値 (N/mm ²)	
原子炉棟水密扉	カンヌキ部	カンヌキ	90	205
		カンヌキ受けピン ^(注1)	245	686
		カンヌキ受けボルト	53	651
電気室搬入口水密扉	カンヌキ部	カンヌキ	70	205
		カンヌキ受けピン ^(注1)	202	686
		カンヌキ受けボルト	26	651
原子炉棟水密扉(潜戸)	カンヌキ部	カンヌキ	28	205
		カンヌキ受けピン ^(注1)	101	345
		カンヌキ受けボルト	12	651
原子炉建屋付属棟1階東側水密扉	カンヌキ部	カンヌキ	94	205
		カンヌキ受けピン ^(注1)	271	686
		カンヌキ受けボルト	35	651

(注1) 曲げ及びせん断のうち評価結果が厳しい方の値を記載

- b. 原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉，空調機械室搬入口扉及び空調機械室搬入口扉（潜戸）

評価対象扉に生じる荷重と許容限界の比較を表5-6に示す。カンヌキ部に生じる荷重が許容限界を超えないことを確認した。

表5-6 原子炉建屋付属棟2階サンプルタンク室連絡通路扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室東側扉，原子炉建屋付属棟3階バルブ室北側扉，空調機械室搬入口扉及び空調機械室搬入口扉（潜戸）の評価結果

評価対象部位		評価結果 (N/mm ²)	許容限界値 (N/mm ²)	
原子炉建屋付属棟2階 サンプルタンク室連絡 通路扉	カンヌキ部	カンヌキ	20	205
		カンヌキ受けピン ^(注1)	84	345
		カンヌキ受けボルト	11	651
原子炉建屋付属棟3階 バルブ室東側扉	カンヌキ部	カンヌキ	25	205
		カンヌキ受けピン ^(注1)	104	345
		カンヌキ受けボルト	13	651
原子炉建屋付属棟3階 バルブ室北側扉	カンヌキ部	カンヌキ	137	651
		カンヌキ受けピン ^(注1)	383	686
		カンヌキ受けボルト	—	—
空調機械室搬入口扉(潜戸)	カンヌキ部	カンヌキ	25	205
		カンヌキ受けピン ^(注1)	104	345
		カンヌキ受けボルト	13	651
空調機械室搬入口扉	カンヌキ部	カンヌキ	137	651
		カンヌキ受けピン ^(注1)	383	686
		カンヌキ受けボルト	—	—

(注1) 曲げ及びせん断のうち評価結果が厳しい方の値を記載

- c. 原子炉建屋付属棟南側水密扉及び原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉
 評価対象扉に生じる荷重と許容限界の比較を表5-7に示す。カンヌキ部に生じる荷重が許容限界を超えないことを確認した。

表5-7 原子炉建屋付属棟南側水密扉及び原子炉建屋付属棟西側非常用階段連絡口扉の変形評価結果

評価対象部位		評価結果 (N/mm ²)	許容限界値 (N/mm ²)
原子炉建屋付属棟南側 水密扉	カンヌキ部	カンヌキバー	8
		カンヌキ受けボルト	8
原子炉建屋付属棟西側 非常用階段連絡口扉	カンヌキ部	カンヌキバー	追而
		カンヌキ受けボルト	

- d. 原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉及び原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉
 評価対象扉に生じる荷重と許容限界の比較を表5-8に示す。扉体固定部に生じる荷重が
 許容限界を超えないことを確認した。

表5-8 原子炉建屋付属棟2階東側機器搬入口扉及び原子炉建屋付属棟4階南東側機器搬入口扉
 の変形評価結果

評価対象部位	評価結果 (N/mm ²)	許容限界値 (N/mm ²)
<div style="border: 1px solid black; width: 60%; margin: auto; padding: 10px;"> 追而 </div>		

(白紙)

V-3-別添 1-1-4 主排気筒の強度計算書

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	4
2.4 適用規格	5
3. 強度評価方法	6
3.1 評価対象部位及び評価方針	6
3.2 荷重及び荷重の組合せ	6
3.3 許容限界	18
3.4 評価方法	18
4. 評価条件	20
5. 評価結果	22
5.1 筒身, 支柱材, 斜材, 水平材, 補助柱材, 補助斜材, 補助水平材	22
5.2 筒身脚部及び鉄塔脚部 (評価方法を含む)	29

1. 概要

本資料は、V-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、主排気筒が竜巻時及び竜巻通過後においても、主排気筒の機能の維持を考慮して、主要な構造部材が構造健全性を有することを確認するものである。

2. 基本方針

主排気筒について、V-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、主排気筒の「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

主排気筒は、V-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、屋外に設置する。

主排気筒の位置図を図2-1に示す。

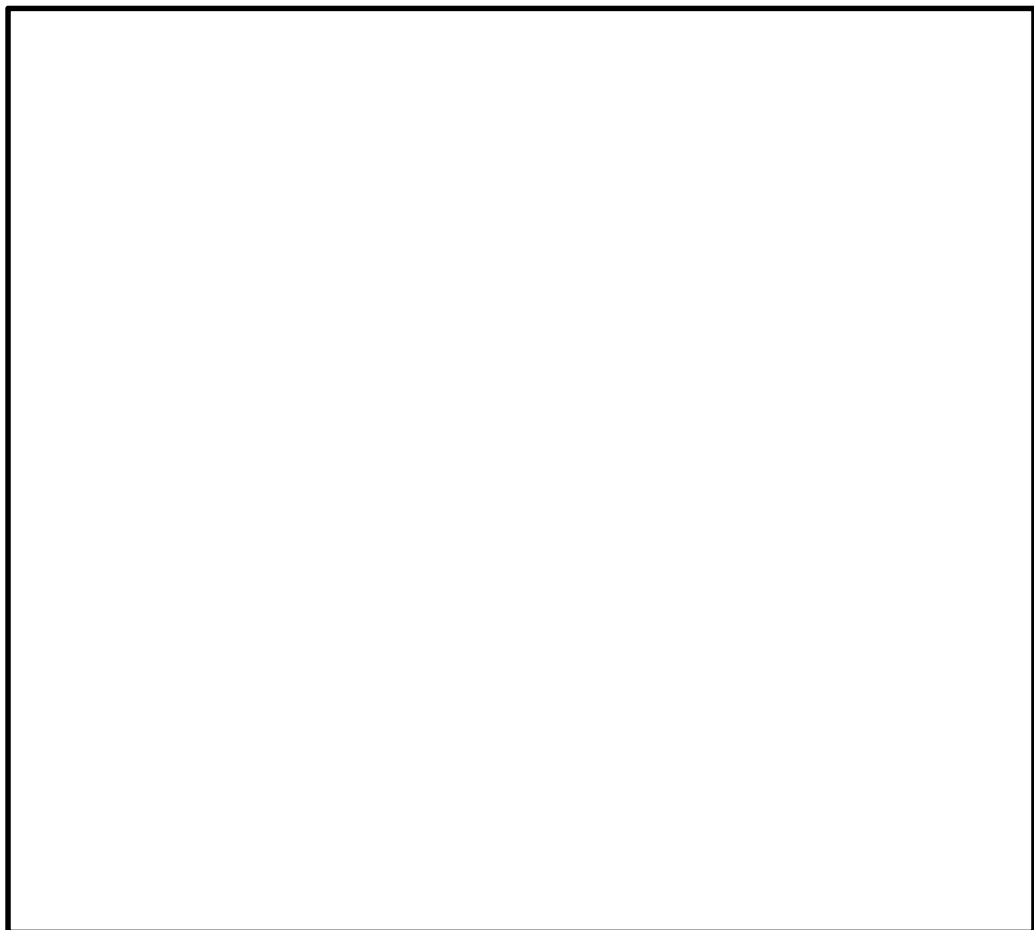


図 2-1 主排気筒の位置図

2.2 構造概要

主排気筒は、鉄塔支持型の鋼製排気筒である。中央の内径4.5 m、高さ140 mの筒身にかかる水平力を周囲の根開き28 m、高さ104.205 m (EL.112.205 m) の鋼管トラスの4脚鉄塔を補強して支える構造である。補強部分は高さ117.543 m (EL.125.543 m) まで主柱を伸ばすとともに、高さ104.205 m (EL.112.205 m) 以下において8脚増やす。筒身と鉄塔は、図2-2に示す6ヶ所で接続され、制振サポート（以下「オイルダンパ」という。）と弾塑性ダンパで接合した制震構造である。筒身の下端は固定である。

以下に、構造概要を示す。

構造概要

・ 構造形式	4脚鉄塔支持型
・ 筒身高さ	EL.148.000 m
・ 鉄塔高さ	EL.125.543 m
・ 筒身径	φ 4.500 m (内径)
・ 鉄塔開き	頂部開き 10.387 m 基部開き 28.000 m
・ 支持点位置	EL.125.543 m, EL.112.205 m, EL.95.432 m, EL.75.444 m, EL.52.618 m, EL.26.257 m
・ 接続方法	オイルダンパ (EL.125.543 m, EL.112.205 m) , 弾塑性ダンパ (EL.95.432 m, EL.75.444 m, EL.52.618 m) , 高力ボルト接合 (EL.26.257 m)
・ 基礎	鉄筋コンクリート造

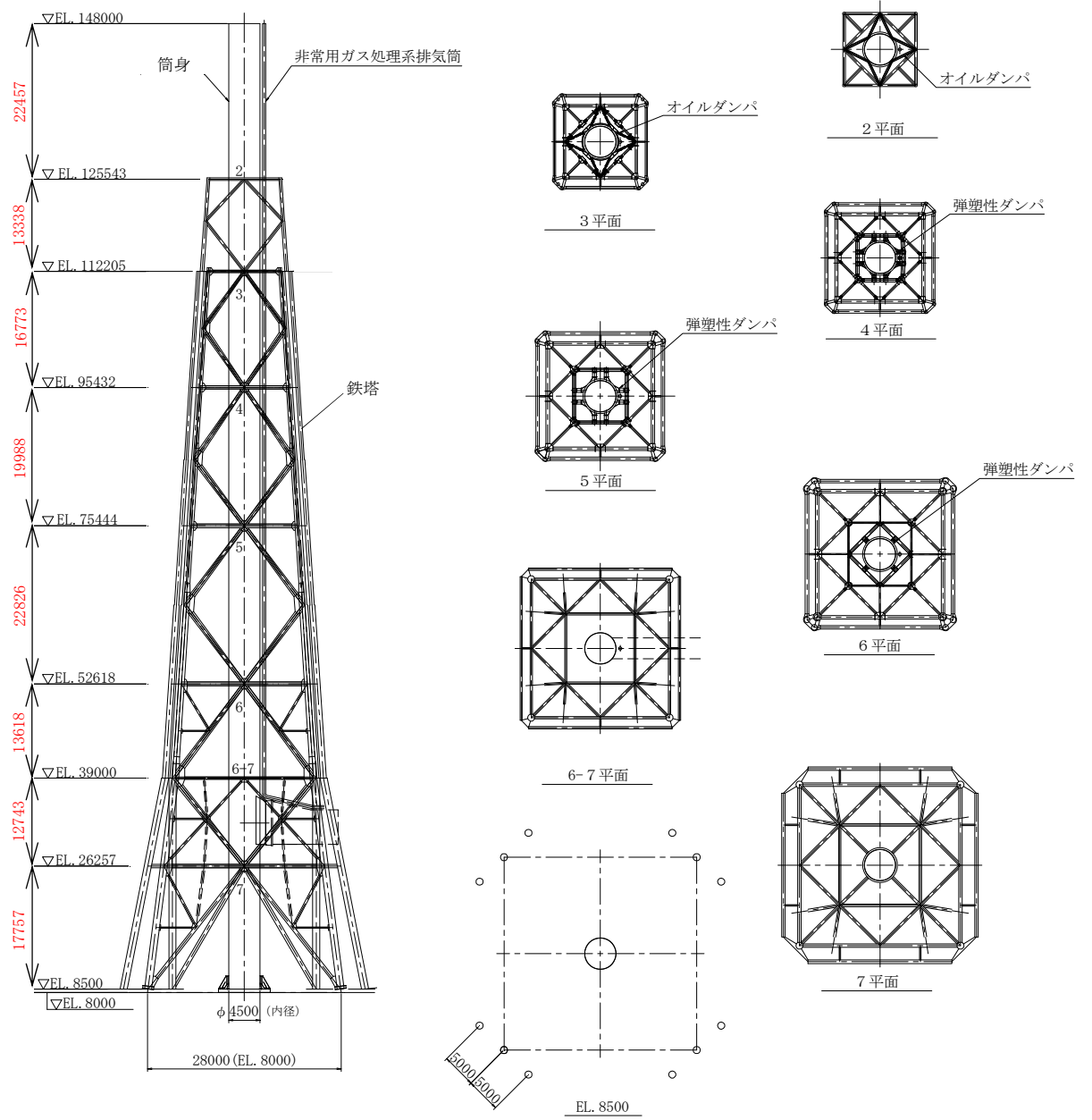


図 2-2 主排気筒概要図 (単位 : mm)

2.3 評価方針

主排気筒の強度評価は、V-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、主排気筒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。

主排気筒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。

(1) 強度評価方針

主排気筒の筒身及び鉄塔の強度評価フローを図 2-3 に示す。強度評価においては、主排気筒の構造を踏まえ、設計竜巻による荷重に自重を加えた荷重が主排気筒に作用した場合に、主排気筒の各評価対象部位に作用する荷重、応力等を、V-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」に示す応力解析による最大部材応力に対して、V-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」に示すそれぞれの許容限界以下であることを確認する。

なお、設計竜巻による荷重により評価することを基本とするが、評価対象部位において、耐震評価の結果と設計竜巻による荷重を比較できるものは、設計竜巻による荷重が耐震評価の結果より小さいことより、許容限界以下であることを確認する。また、設計竜巻による飛来物の衝突は、主排気筒の鉄塔部材を損傷させるものとして考慮し、強度評価においては、飛来物の衝突による衝撃荷重は考慮しないこととする。

主排気筒の筒身及び鉄塔の許容限界は、V-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材料強度より算出した弾性限耐力とする。

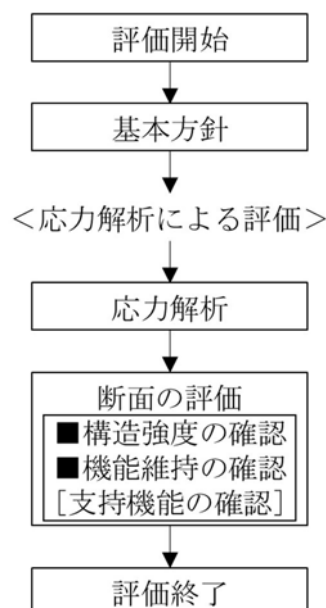


図 2-3 主排気筒の筒身及び鉄塔の強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- 建築基準法・同施行令
- 鋼構造設計規準 -許容応力度設計法-（（社）日本建築学会，2005）
- 容器構造設計指針・同解説（（社）日本建築学会，2010）
- 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，1988）
- 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説（（社）日本建築学会，1999）
- 煙突構造設計施工指針（（一財）日本建築センター，1982）
- 塔状鋼構造設計指針・同解説（（社）日本建築学会，1980）
- 煙突構造設計指針（（社）日本建築学会，2007）
- 日本工業規格（J I S）

3. 強度評価方法

3.1 評価対象部位及び評価方針

主排気筒の応力解析による評価対象部位は、設計竜巻による荷重を受ける主排気筒の筒身、筒身を支持する鉄塔主要部材（支柱材，斜材，水平材，補助柱材，補助斜材，補助水平材，鉄塔脚部）及び脚部とする。

強度評価は，図 3-1 に示す評価フローに基づき，設計荷重に対して，3次元FEMを用いた弾性応力解析を行う。

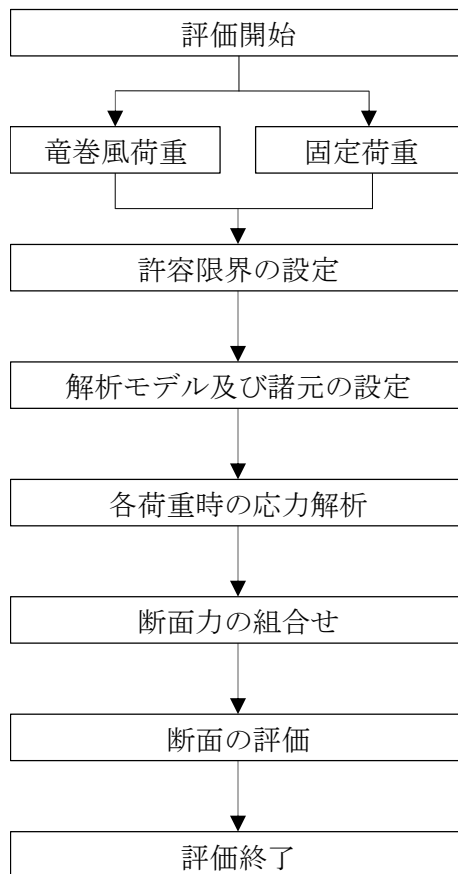


図 3-1 応力解析による評価フロー

3.2 荷重及び荷重の組合せ

荷重及び荷重の組合せは，V-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) 荷重の設定

a. 固定荷重

固定荷重として，持続的に生じる荷重である筒身及び鉄塔の自重の他に，ダンパ，歩廊等の付属設備の重量を考慮する。

d. 設計竜巻による荷重

屋外の施設であるため風圧力による荷重を考慮する。

(a) 風圧力による荷重 (W_w)

風圧力による荷重 W_w は、V-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(3)c. (a) 風圧力による荷重」に示す式に従い、算出する。

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

これより、**主**排気筒に作用する風荷重は、次式によって算定する。

$$W_{D1} = q_1 \cdot G \cdot C \cdot A$$

ここで

W_{D1} : 地表面からの高さ Z における風荷重 (N)

q_1 : 速度圧 ($q_1 = 6.1 \times 10^{-3}$) (N・mm²)

G : ガスト影響係数 ($G = 1.0$)

C : 風力係数

(筒身部 : $C = 0.9 k_z$ {煙突その他の円筒構造物})

(鉄塔部 {ラチス構造物の風力係数 C })

k_z : $k_z = 1.0$ とする。

A : 地表面からの高さ Z における風向に垂直な面に投影した建築物の面積 (見付面積) (m²)

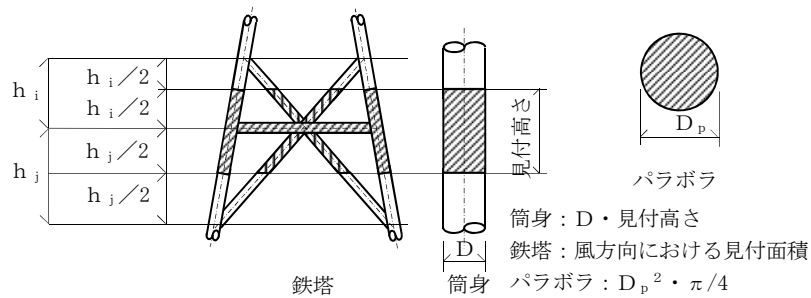


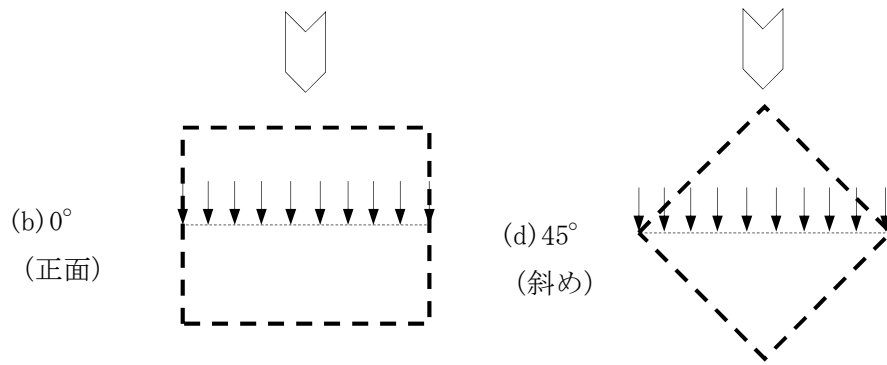
図 3-2 鉄塔及び筒身の見付面積 A

表 3-1 ラチス構造物の風力係数 C

種類		ϕ	(1)	(2)	(3)
			0.1 以下	0.1 を超え 0.6 未満	0.6
鋼管	(b) 0° (正面)		2.2 k_z	(1) と (3) とに掲げる数値 を直線的に補間した数値	1.5 k_z
	(d) 45° (斜め)		1.7 k_z		1.3 k_z

ここで、 ϕ : 充実率

(風を受ける部分の最外縁に囲まれる面積に対する見付面積の割合)



注1：上図はラチスばり及びラチス柱の断面を表す。

注2：風圧作用面積としては、 $\Sigma \triangleright$ の作用する方向から見たラチス構面の見付面積とする。

図 3-3 ラチス構造物

(b) 竜巻の荷重の組合せ

設計竜巻による複合荷重 W_T (W_{T1} , W_{T2})は、V-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、算出する。

$$W_{T1} = W_P$$

$$W_{T2} = W_W + 0.5 W_P + W_M$$

なお、主排気筒は大気中に開かれており、主排気筒内外に気圧差が生じ難い構造であるため、気圧差による荷重は考慮しない($W_P = 0$)。

また、「2.3(1) 強度評価方針」に示したとおり、設計飛来物による衝撃荷重 W_M は、飛来物の影響は鉄塔部材を損傷させるものとして考慮していることから考慮しない($W_M = 0$)。鉄塔部材の損傷を想定する箇所については、座屈の観点から軸力（圧縮）の影響を考慮し、健全時に負担する軸力（圧縮）が最大であり、損傷による荷重の再配分の影響が最も大きい最下層の主柱の補助柱とする。

図3-4に損傷を想定する箇所を示す。

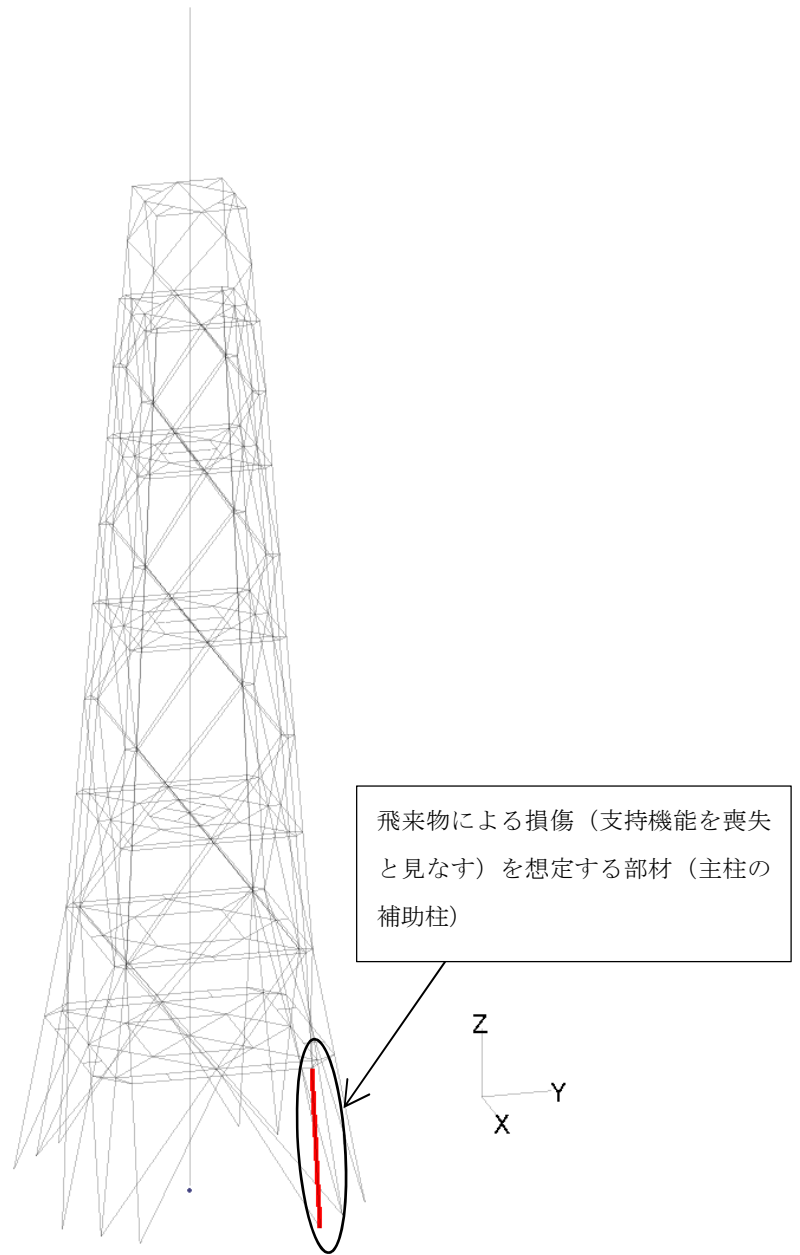


図3-4 飛来物による主排気筒（鉄塔部）の損傷想定箇所

したがって、設計竜巻による複合荷重 W_{T1} は0となり、 W_{T2} を設計竜巻による荷重として正面方向、斜め方向それぞれに対して考慮する。

各荷重を、表 3-2～表 3-6 及び図 3-5～図 3-8 に示す。

表 3-2 鉄塔及び筒身の固定荷重

EL. (m)	固定荷重 (kN)		
	筒身	鉄塔	計
148.000	0	—	0
138.000	141	—	141
125.543	299	0	299
112.205	333	339	672
95.432	379	937	1316
75.444	466	1443	1909
52.618	527	1854	2381
26.257	616	2705	3321
8.500	531	3383	3914

注記：ダンパ、歩廊等の付属設備の重量は、
鉄塔重量に含む。

表 3-3 筒身のせん断力

EL. Z (m)	層間高さ h (m)	せん断力 (kN)	
		竜巻風荷重	
		正面方向	斜め方向
148.000	10.000	0	0
138.000	12.457	124	124
125.543	13.338	335	335
112.205	16.773	639	639
95.432	19.988	992	992
75.444	22.826	1543	1543
52.618	26.361	376	369
26.257	17.757	89	60
8.500	0.000	242	268

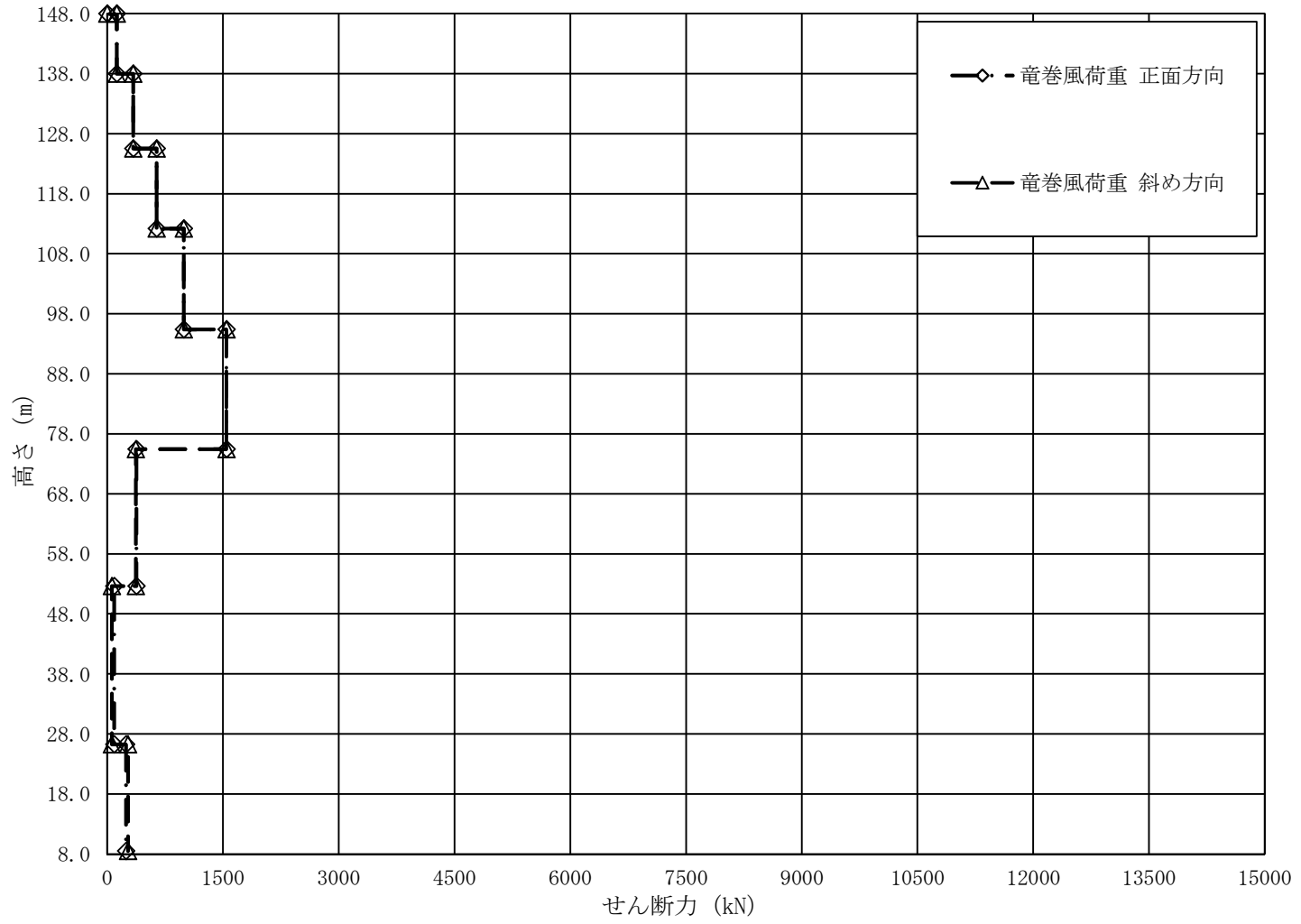


図 3-5 筒身のせん断力

表 3-4 筒身の曲げモーメント

EL. Z (m)	層間高さ h (m)	曲げモーメント (kN・m)	
		竜巻風荷重	
		正面方向	斜め方向
148.000	10.000	0	0
138.000	12.457	1240	1240
125.543	13.338	6259	6259
112.205	16.773	15910	15910
95.432	19.988	34339	34339
75.444	22.826	5871	5868
52.618	26.361	524	679
26.257	17.757	2479	3280
8.500	0.000	11963	13920

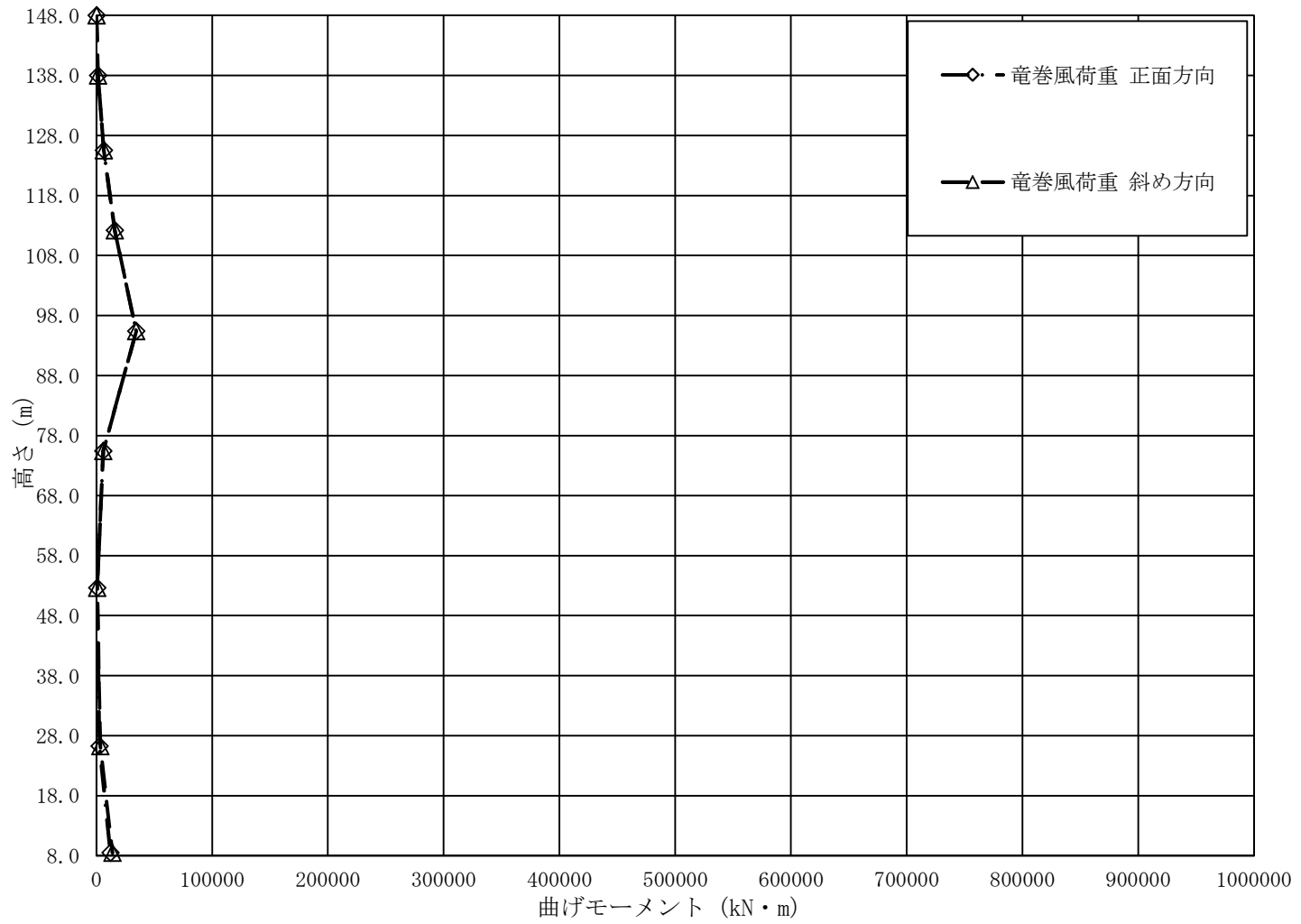


図 3-6 筒身の曲げモーメント

表 3-5 鉄塔のせん断力

EL. Z (m)	層間高さ h (m)	せん断力 (kN)	
		竜巻風荷重	
		正面方向	斜め方向
148.000	10.000	-	-
138.000	12.457	-	-
125.543	13.338	0	0
112.205	16.773	113	139
95.432	19.988	523	670
75.444	22.826	1306	1709
52.618	26.361	3945	4699
26.257	17.757	6201	7455
8.500	0.000	8745	10668

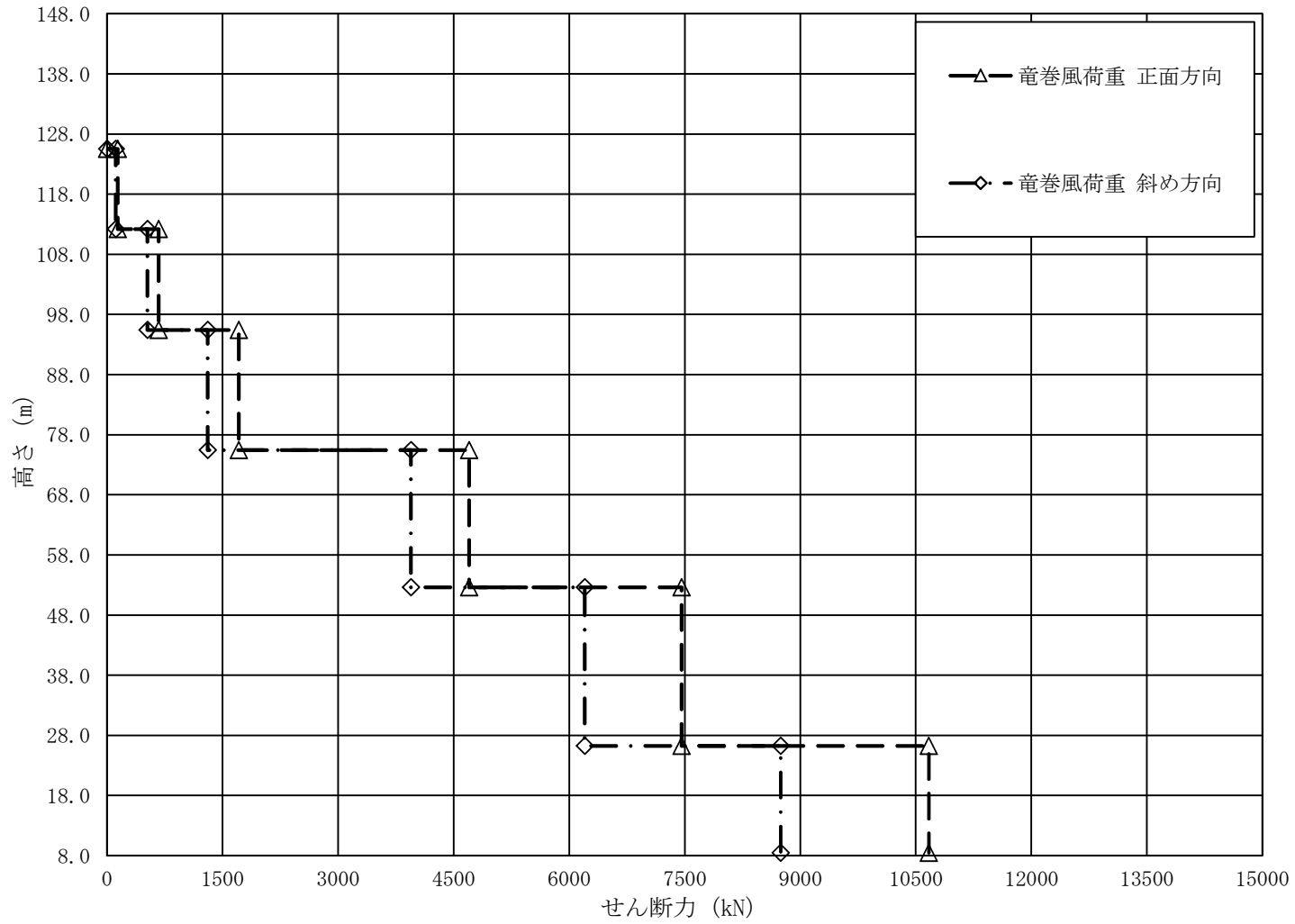


図 3-7 鉄塔のせん断力

表 3-6 鉄塔の曲げモーメント

EL. Z (m)	層間高さ h (m)	曲げモーメント (kN・m)	
		竜巻風荷重	
		正面方向	斜め方向
148.000	10.000	-	-
138.000	12.457	-	-
125.543	13.338	0	0
112.205	16.773	2533	3159
95.432	19.988	13833	17900
75.444	22.826	105517	119134
52.618	26.361	219285	252231
26.257	17.757	398503	467019
8.500	0.000	548605	650574

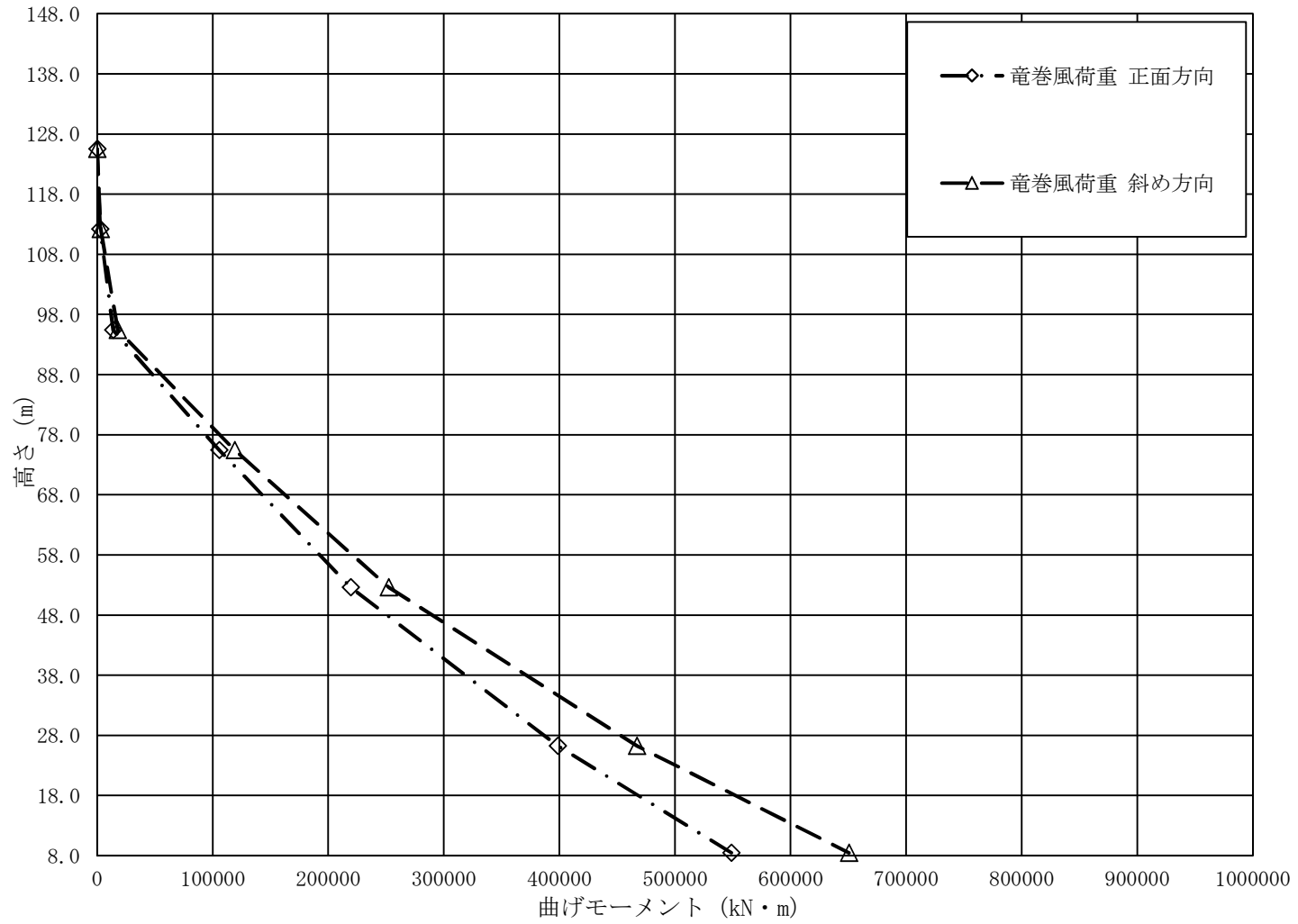


図 3-8 鉄塔の曲げモーメント

(2) 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、V-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踏まえて、主排気筒の評価対象部位ごとに設定する。

強度評価の荷重の組合せを、表 3-7 に示す。

表 3-7 荷重の組合せ

組合せ荷重 ケース	荷重状態	荷重の組合せ	水平荷重方向
ケース 1	竜巻時	①自重 ②風圧力による荷重	正面
ケース 2			斜め

3.3 許容限界

主排気筒の許容限界は、V-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、「3.1 評価対象部位及び評価方針」にて設定した評価対象部位ごとに材料強度より算出した弾性限耐力を用いる。

強度評価の許容限界（準拠規格・基準等）を、表 3-8 に示す。

表 3-8 許容限界（準拠規格・基準等）

評価対象部位	準拠基準等	備考
筒身	容器構造設計指針 短期	F=1.1F と読み替える (建告第 2464 号に規定 された J I S 規定品の み)
鉄塔	告示 材料強度	

3.4 評価方法

(1) 応力評価方法

主排気筒について、3次元 FEM を用いた弾性応力解析を実施する。

(2) 断面の評価方法

主排気筒の断面の評価に用いる応力は、3次元 FEM モデルを用いた応力解析により得られた各荷重による断面力（軸力、曲げモーメント、せん断力）を組み合わせることにより算定する。

a. 筒身に対する断面の評価方法

(a) 応力検定

応力に対する断面算定は、「容器構造設計指針・同解説」に準拠して行う。

なお、断面性能の算定においては、腐食代 2 mm（外側：1 mm，内側：1 mm）を控除した値を用いる。

$$\frac{\sigma_c}{c f_{c r}} + \frac{c \sigma_b}{c f_{c r}} \leq 1$$

かつ

$$\frac{\tau}{s f_{c r}} \leq 1$$

ここで

σ_c : 平均圧縮応力度 ($\sigma_c = N \cdot 10^3 / A$) (N/mm²)

N : 圧縮力 (kN)

A : 円筒の断面積 (mm²)

$c \sigma_b$: 圧縮側曲げ応力度 ($c \sigma_b = M \cdot 10^6 / Z_c$) (N/mm²)

M : 曲げモーメント (kN・m)

Z_c : 断面係数 (mm³)

τ : せん断応力度 ($\tau = Q \cdot 10^3 / A_s$) (N/mm²)

Q : せん断力 (kN)

A_s : 円筒のせん断断面積 (=A/2) (mm²)

$c f_{c r}$: 圧縮材料強度 (N/mm²)

$b f_{c r}$: 曲げ材料強度 (N/mm²)

$s f_{c r}$: せん断材料強度 (N/mm²)

($c f_{c r}$, $b f_{c r}$, $s f_{c r}$ は次項による。)

(b) 材料強度

材料強度は、「平 12 建告第 2464 号」に準拠し、材料強度 F 値を 1.1 倍した値を用いて許容応力度を算出し、部材に発生する応力が許容応力度を超えないことを確認する。

b. 鉄塔主要部材に対する断面の評価方法

(a) 応力検定

応力に対する断面算定は、「建築基準法施行令第 96 条」及び「平 13 国交告第 1024 号」に準拠して行う。

なお、断面性能の算定においては、腐食代 1 mm (外側のみ 1 mm) を控除した値を用いる。

$$\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b} \leq 1$$

ここで

σ_c : 平均圧縮応力度 ($\sigma_c = N \cdot 10^3 / A$) (N/mm²)

σ_b : 曲げ応力度 ($\sigma_b = M \cdot 10^6 / Z_t$) (N/mm²)

f_c : 圧縮材料強度 (N/mm²)

f_b : 曲げ材料強度 (N/mm²)

N : 圧縮力 (kN)

A : 断面積 (mm²)

M : 曲げモーメント (kN・m)
 Z_t : 断面係数 (mm³)
 (f_c , f_b は次項による。)

(b) 材料強度

材料強度は、「平 12 建告第 2464 号」に準拠し、材料強度 F 値を 1.1 倍した値を用いて算出した許容応力度に対して、部材に発生する応力が超えないことを確認する。

4. 評価条件

(1) 強度評価の評価条件

「3. 強度評価方法に用いる評価条件のうち、筒身を表 4-1 に、鉄塔主要部材を表 4-2 に示す。

表 4-1 評価条件 (筒身)

使用部材 $\phi \times t$ (mm)	材質	腐食代 (mm)	最高使用 温度 (°C)	重力加速度 g (m/s ²)	空気密度 ρ (kg/m ³)
4532.0×16.0	SS400	内側 1.0 外側 1.0	35	9.80665	1.22

最大風速 V (m/s)	ガスト 影響係数 G (-)	風力係数 C (-)	k_z (-)	構造物の基準 高さ H (m)	設計用 速度圧 q (N/m ²)
100	1.0	0.9	1.0	140.000	6,100

表 4-2 評価条件 (鉄塔主要部材) (1/2)

分類	使用部材 $\phi \times t$ (mm)	材質	腐食代 (mm)
主柱材	406.4×6.4	S T K 4 0 0	外側 1.0
	406.4×12.7		
	558.8×12.7		
	812.8×12.7		
	1016.0×12.7		

表 4-2 評価条件 (鉄塔主要部材) (2/2)

分類	使用部材 $\phi \times t$ (mm)	材質	腐食代 (mm)
斜材	355.6×6.4	S T K 4 0 0	外側 1.0
	457.2×6.4		
	508.0×6.4		
水平材	355.6×6.4	S T K 4 0 0	外側 1.0
	457.2×6.4		
	508.0×6.4		
補助主柱材	406.4×19.0	S T K 4 0 0	外側 1.0
	508.0×19.0	5 9 0 材	
	609.6×19.0		
	812.8×19.0		
	1016.0×19.0		
補助斜材	355.6×12.7	S T K 4 0 0	外側 1.0
	457.2×12.7		
	508.0×12.0	S T K 4 9 0	
	558.8×19.0	5 9 0 材	
補助水平材	355.6×6.4	S T K 4 0 0	外側 1.0
	457.2×6.4		
	508.0×6.4		

最高使用 温度 (°C)	重力加速度 g (m/s^2)	空気密度 ρ (kg/m^3)	最大風速 V (m/s)	ガスト 影響係数 G_f (-)	k_z (-)
35	9.80665	1.22	100	1.0	1.0

構造物の基準 高さ H (m)	設計用 速度圧 q (N/m^2)
140.000	6100

5. 評価結果

5.1 筒身，支柱材，斜材，水平材，補助柱材，補助斜材，補助水平材

「3.4(2) 断面の評価方法」に基づいた断面の評価結果を以下に示す。

(1) 筒身に対する断面評価結果

筒身に対する断面評価のうち，軸力+曲げに対する評価結果を表 5-1 に，せん断に対する評価結果を表 5-2 に示す。

表 5-1 筒身の断面評価 (軸力+曲げ)

EL. Z (m)	使用部材 $\Phi \times t$ (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能		材料強度		応力度		判定
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN・m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z _c (mm ³)	圧縮 c f _{cr} (N/mm ²)	曲げ b f _{cr} (N/mm ²)	圧縮 $\sigma_c = N/A_c$ (N/mm ²)	曲げ $\sigma_b = M/Z_c$ (N/mm ²)	
148.000	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	141	1240	198600	223000000	192.2	207.2	0.8	5.6	$0.04 \leq 1.00$
138.000	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	440	6259	198600	223000000	192.2	207.2	2.3	28.1	$0.15 \leq 1.00$
125.543	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	773	15910	198600	223000000	192.2	207.2	3.9	71.4	$0.37 \leq 1.00$
112.205	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	1152	34339	198600	223000000	192.2	207.2	5.9	154.0	$0.78 \leq 1.00$
95.432	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	1618	34339	198600	223000000	192.2	207.2	8.2	154.0	$0.79 \leq 1.00$
75.444	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	2145	5877	198600	223000000	192.2	207.2	10.9	26.4	$0.19 \leq 1.00$
52.618	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	2761	3416	198600	223000000	192.2	207.2	14.0	15.4	$0.15 \leq 1.00$
26.257	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	3292	14022	198600	223000000	192.2	207.2	16.6	62.9	$0.39 \leq 1.00$

注記： 腐食代 2 mm (内側：1 mm, 外側：1 mm) を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-2 筒身の断面評価 (せん断)

EL. Z (m)	使用部材 $\Phi \times t$ (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能		材料強度		応力度		判定 $\frac{\tau}{s f_{cr}}$
			せん断 Q (kN)	曲げ M (kN・m)	せん断断面積 A_s (mm ²)	断面係数 Z_c (mm ³)	せん断 $s f_{cr}$ (N/mm ²)	曲げ $b f_{cr}$ (N/mm ²)	せん断 $\tau = Q/A_s$ (N/mm ²)	曲げ $c \sigma_b = M/Z_c$ (N/mm ²)	
148.000	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	124	-	99300	-	69.6	-	1.3	-	$0.02 \leq 1.00$
138.000	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	490	-	99300	-	60.9	-	5.0	-	$0.09 \leq 1.00$
125.543	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	805	-	99300	-	58.5	-	8.2	-	$0.15 \leq 1.00$
112.205	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	1201	-	99300	-	52.2	-	12.1	-	$0.24 \leq 1.00$
95.432	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	1544	-	99300	-	47.8	-	15.6	-	$0.33 \leq 1.00$
75.444	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	376	-	99300	-	44.7	-	3.8	-	$0.09 \leq 1.00$
52.618	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	273	-	99300	-	41.6	-	2.8	-	$0.07 \leq 1.00$
26.257	$\Phi 4532.0 \times 16.0$	SS400	608	-	99300	-	50.7	-	6.2	-	$0.13 \leq 1.00$

注記： 腐食代 2 mm (内側：1 mm, 外側：1 mm) を控除した断面により算定した断面性能により評価。

(2) 鉄塔主要部材に対する断面評価結果

鉄塔主要部材に対する断面評価のうち、主柱材，斜材，水平材，補助柱材，補助斜材及び補助水平材に対する評価結果を表 5-3～表 5-8 に示す。

表 5-3 主柱の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 $\Phi \times t$ (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L_k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN·m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z_t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f_c (N/mm ²)	曲げ f_b (N/mm ²)	圧縮 $\sigma_c=N/A$ (N/mm ²)	曲げ $\sigma_b=M/Z_t$ (N/mm ²)	
112.205	$\Phi 406.4 \times 6.4$	STK400	120	18	6769	668000	141.2	8240.1	58.4	231.4	258.5	17.8	27.0	$0.19 \leq 1.00$
95.432	$\Phi 406.4 \times 12.7$	STK400	309	69	14430	1370000	138.8	10477.2	75.5	213.3	258.5	21.5	50.4	$0.30 \leq 1.00$
75.444	$\Phi 558.8 \times 12.7$	STK400	1703	89	20040	2680000	192.8	9597.2	49.8	238.8	258.5	85.0	33.3	$0.49 \leq 1.00$
52.618	$\Phi 812.8 \times 12.7$	STK400	3147	189	29370	5770000	282.3	6838.1	24.2	253.8	258.5	107.2	32.8	$0.55 \leq 1.00$
26.257	$\Phi 1016.0 \times 12.7$	STK400	5849	298	36840	9130000	354.5	9025.3	25.5	253.3	258.5	158.8	32.7	$0.76 \leq 1.00$

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-4 斜材の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 $\Phi \times t$ (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L_k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN·m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z_t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f_c (N/mm ²)	曲げ f_b (N/mm ²)	圧縮 $\sigma_c=N/A$ (N/mm ²)	曲げ $\sigma_b=M/Z_t$ (N/mm ²)	
112.205	$\Phi 355.6 \times 6.4$	STK400	44	—	5907	—	123.1	10023.4	81.4	205.9	—	7.5	—	$0.04 \leq 1.00$
95.432	$\Phi 457.2 \times 6.4$	STK400	794	—	7631	—	159.0	12570.6	79.1	208.8	—	104.1	—	$0.50 \leq 1.00$
75.444	$\Phi 508.0 \times 6.4$	STK400	590	—	8492	—	177.0	14191.3	80.2	207.5	—	69.5	—	$0.34 \leq 1.00$
52.618	$\Phi 508.0 \times 6.4$	STK400	796	—	8492	—	177.0	8459.3	47.8	240.3	—	93.8	—	$0.40 \leq 1.00$
26.257	$\Phi 508.0 \times 6.4$	STK400	1087	—	8492	—	177.0	11344.3	64.1	225.9	—	128.1	—	$0.57 \leq 1.00$

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-5 水平材の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 Φ×t (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L _k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN・m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z _t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f _c (N/mm ²)	曲げ f _b (N/mm ²)	圧縮 σ _c =N/A (N/mm ²)	曲げ σ _b =M/Z _t (N/mm ²)	
112.205	Φ355.6×6.4	STK400	73	3	5907	506000	123.1	5193.6	42.2	244.3	258.5	12.4	6.0	0.08 ≤ 1.00
95.432	Φ457.2×6.4	STK400	112	10	7631	848000	159.0	6295.0	39.6	246.0	258.5	14.7	11.8	0.11 ≤ 1.00
75.444	Φ508.0×6.4	STK400	182	4	8492	1050000	177.0	7607.2	43.0	243.8	258.5	21.5	3.9	0.11 ≤ 1.00
52.618	Φ508.0×6.4	STK400	244	5	8492	1050000	177.0	9105.9	51.4	237.5	258.5	28.8	4.8	0.14 ≤ 1.00
26.257	Φ508.0×6.4	STK400	399	4	8492	1050000	177.0	11644.2	65.8	224.1	258.5	47.0	3.9	0.23 ≤ 1.00

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-6 補助支柱材の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 Φ×t (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L _k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN・m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z _t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f _c (N/mm ²)	曲げ f _b (N/mm ²)	圧縮 σ _c =N/A (N/mm ²)	曲げ σ _b =M/Z _t (N/mm ²)	
125.543	Φ406.4×19.0	STK400	85	8	21850	2020000	136.8	6573.9	48.1	240.1	258.5	3.9	4.0	0.04 ≤ 1.00
112.205	Φ508.0×19.0	590材	217	71	27600	3250000	172.7	8240.1	47.7	367.0	413.0	7.9	21.9	0.08 ≤ 1.00
95.432	Φ508.0×19.0	590材	591	161	27600	3250000	172.7	10477.2	60.7	338.5	413.0	21.5	49.6	0.19 ≤ 1.00
75.444	Φ609.6×19.0	590材	2331	80	33340	4770000	208.5	11493.1	55.1	351.6	413.0	70.0	16.8	0.24 ≤ 1.00
52.618	Φ812.8×19.0	590材	4491	281	44830	8680000	280.2	13676.2	48.8	364.8	413.0	100.2	32.4	0.36 ≤ 1.00
26.257	Φ1016.0×19.0	590材	6401	401	56320	13800000	352.3	12988.6	36.9	385.4	413.0	113.7	29.1	0.37 ≤ 1.00

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-7 補助斜材の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 $\Phi \times t$ (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L_k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN·m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z_t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f_c (N/mm ²)	曲げ f_b (N/mm ²)	圧縮 $\sigma_c=N/A$ (N/mm ²)	曲げ $\sigma_b=M/Z_t$ (N/mm ²)	
125.543	$\Phi 355.6 \times 12.7$	STK400	48	—	12570	—	121.0	8652.7	71.5	217.9	—	3.9	—	$0.02 \leq 1.00$
112.205	$\Phi 355.6 \times 12.7$	STK400	166	—	12570	—	121.0	10250.4	84.7	201.6	—	13.3	—	$0.07 \leq 1.00$
95.432	$\Phi 457.2 \times 12.7$	STK400	1052	—	16300	—	156.8	12790.3	81.6	205.7	—	64.6	—	$0.32 \leq 1.00$
75.444	$\Phi 508.0 \times 12.0$	STK490	1050	—	17110	—	175.0	14423.4	82.4	254.5	—	61.4	—	$0.25 \leq 1.00$
52.618	$\Phi 508.0 \times 12.0$	STK490	1303	—	17110	—	175.0	17150.9	98.0	210.5	—	76.2	—	$0.37 \leq 1.00$
26.257	$\Phi 558.8 \times 19.0$	590材	2370	—	30470	—	190.9	20875.2	109.4	169.2	—	77.8	—	$0.46 \leq 1.00$

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

表 5-8 補助水平材の断面評価

EL. Z (m)	使用部材 $\Phi \times t$ (mm)	材質 (-)	設計用断面力		断面性能			座屈長 L_k (mm)	細長比 λ	材料強度		応力度		判定 $\frac{\sigma_c}{f_c} + \frac{\sigma_b}{f_b}$
			軸力 N (kN)	曲げ M (kN·m)	断面積 A (mm ²)	断面係数 Z_t (mm ³)	回転半径 i (mm)			圧縮 f_c (N/mm ²)	曲げ f_b (N/mm ²)	圧縮 $\sigma_c=N/A$ (N/mm ²)	曲げ $\sigma_b=M/Z_t$ (N/mm ²)	
125.543	$\Phi 355.6 \times 6.4$	STK400	30	1	5907	506000	123.1	5193.6	42.2	244.3	258.5	5.1	2.0	$0.03 \leq 1.00$
112.205	$\Phi 355.6 \times 6.4$	STK400	100	1	5907	506000	123.1	5581.8	45.3	242.2	258.5	17.0	2.0	$0.08 \leq 1.00$
95.432	$\Phi 457.2 \times 6.4$	STK400	698	7	7631	848000	159.0	6683.2	42.0	244.5	258.5	91.5	8.3	$0.41 \leq 1.00$
75.444	$\Phi 508.0 \times 6.4$	STK400	146	3	8492	1050000	177.0	7995.4	45.2	242.3	258.5	17.2	2.9	$0.09 \leq 1.00$
52.618	$\Phi 508.0 \times 6.4$	STK400	371	3	8492	1050000	177.0	9494.1	53.6	235.7	258.5	43.7	2.9	$0.20 \leq 1.00$
26.257	$\Phi 508.0 \times 6.4$	STK400	398	12	8492	1050000	177.0	10393.1	58.7	231.1	258.5	46.9	11.5	$0.25 \leq 1.00$

注記： 腐食代（外側：1 mm）を控除した断面により算定した断面性能により評価。

5.2 筒身脚部及び鉄塔脚部（評価方法を含む）

(1) 筒身脚部の評価

a. 設計荷重

設計荷重は、以下に示す荷重により、筒身脚部の検討を行う。なお、筒身脚部は補強を実施するため、自重は既設部で負担するものとし、補強部のみで設計荷重に対して検討を行う。

筒身脚部の形状図を、図 5-1 及び図 5-2 に示す。

圧縮力	$N_c = 0$ kN
	荷重ケース：竜巻荷重 斜め方向載荷時
引抜き力	$N_t = 0$ kN
	荷重ケース：竜巻荷重 斜め方向載荷時
曲げモーメント	$M = 13920$ kN・m
	荷重ケース：竜巻荷重 斜め方向載荷時
水平力	$H = 822$ kN
	荷重ケース：竜巻荷重 斜め方向載荷時

筒身脚部に作用する反力に対して、V-2-2-15-1「主排気筒の耐震性についての計算書」の S_s 設計用荷重による反力との比較を表 5-9 に示す。

表 5-9 に示すように、水平力は S_s 設計用荷重による反力の方が大きく、 S_s 設計用荷重に包絡されることを確認できるため、以後の検討は省略する。また鉛直荷重と曲げモーメントによる鉛直方向荷重の合計を比較し、 S_s 設計用荷重の方が大きい場合は、水平力同様検討を省略する。

表 5-9 筒身脚部反力比較表

	竜巻荷重時	S_s 設計用荷重時
圧縮力 (kN)	0	17000
引抜き力 (kN)	0	17000
曲げモーメント (kN・m)	13920	5812
水平力 (kN)	822	1089

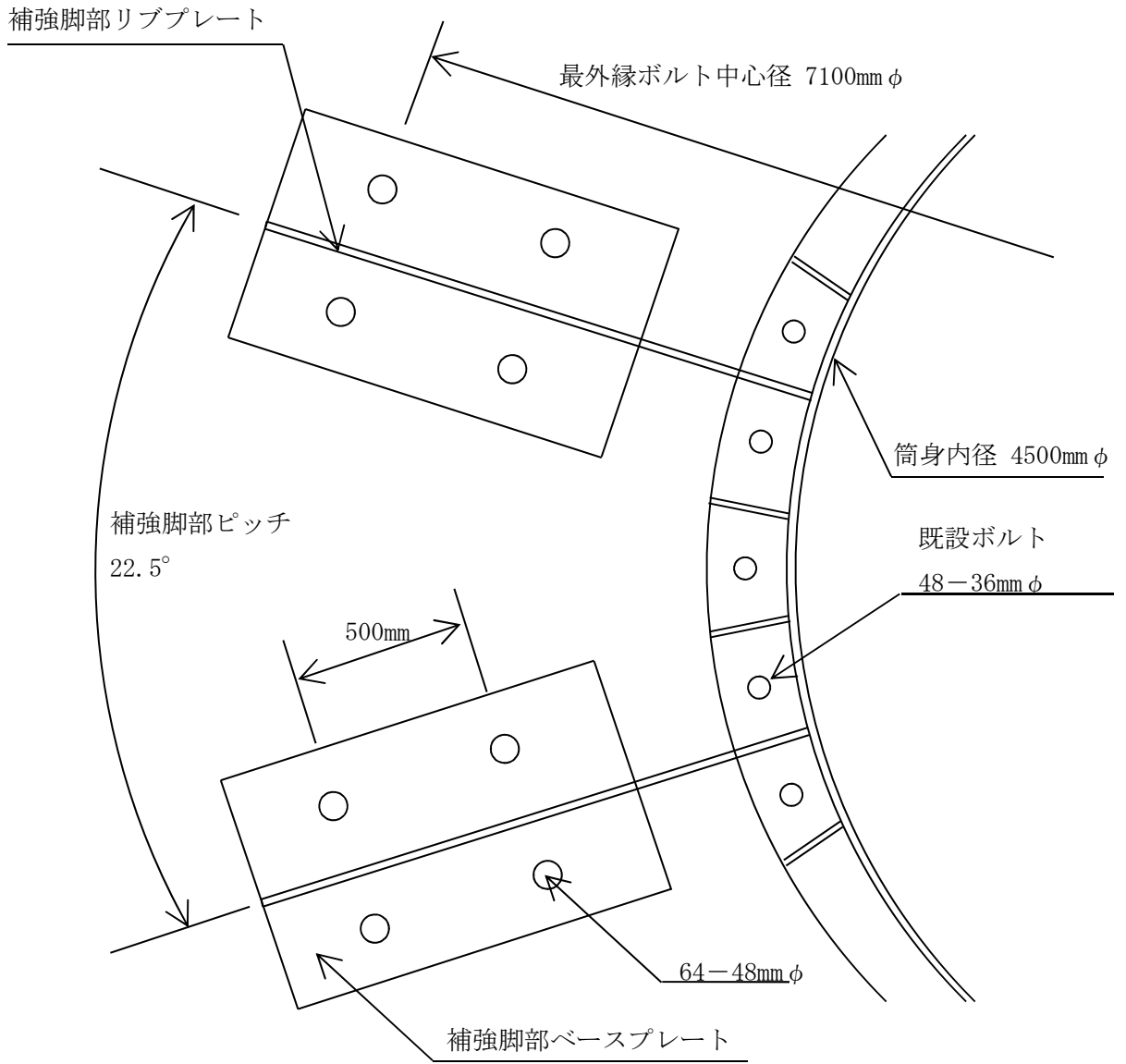


図 5-1 筒身脚部概略図

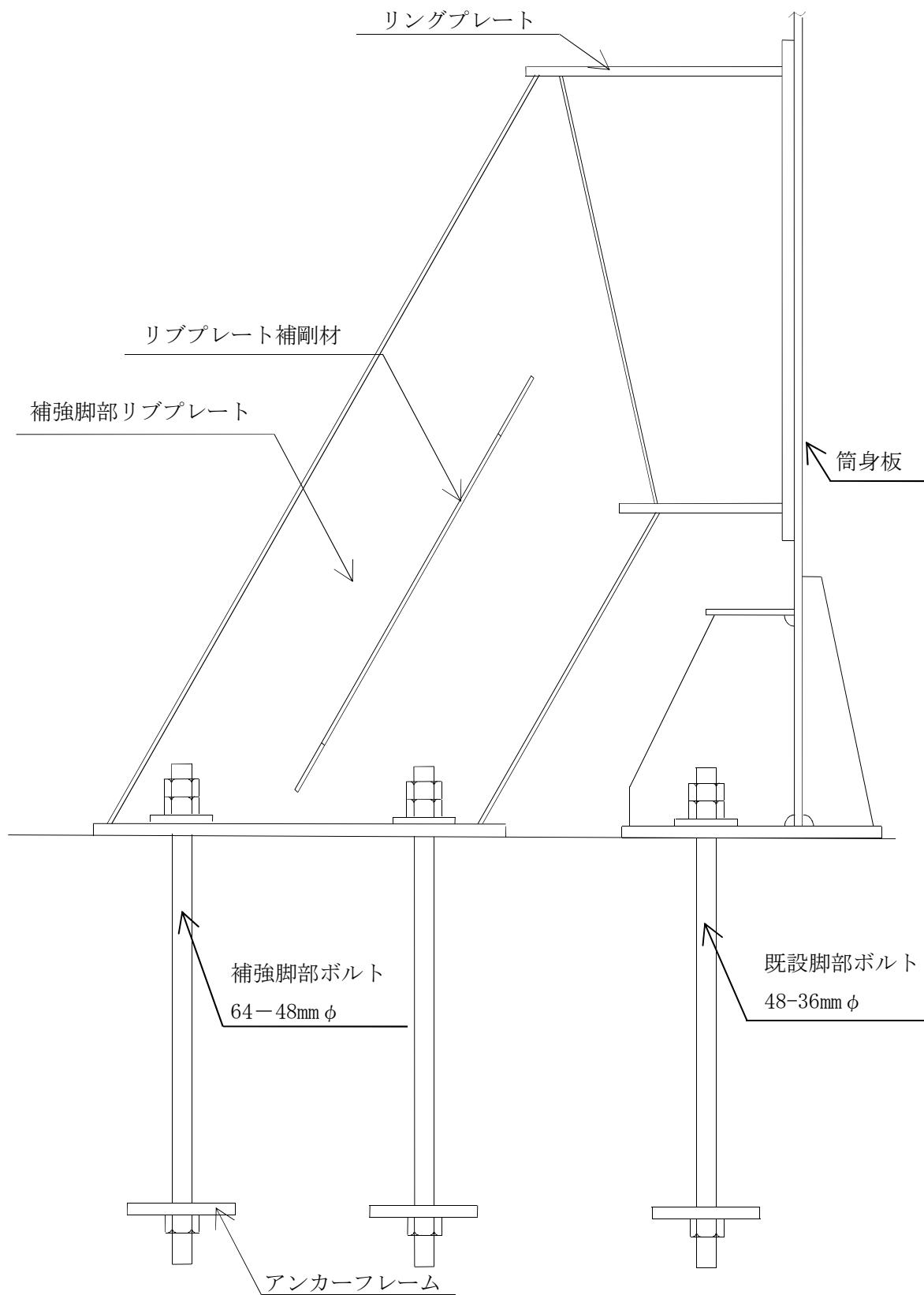


図 5-2 筒身脚部概略図

b. 引抜き力の比較

竜巻時にアンカーボルトが受ける引抜き力と S_s設計用地震時にアンカーボルトが受ける引抜き力を比較することで、引張力と圧縮力が S_s設計用地震荷重に包絡されていることを確認する。

- ・ボルト 1 本に作用する引抜き力

曲げモーメントによる引抜き力は、外側ボルト群からなる有効断面より算出する。

有効断面係数 $Z = 8.366 \times 10^7 \text{ mm}^3$

$$\begin{aligned} \text{曲げモーメントによる引抜き力 } T &= (M \cdot A_1) / Z = \frac{13920 \times 1473}{8.366 \times 10^7} \times 10^3 \\ &= 245.1 \text{ kN} \end{aligned}$$

ボルト引抜き力 $T = 245.1 \text{ kN} < 367.9 \text{ kN}$ (S_s設計用地震荷重時)

竜巻時にアンカーボルトが受ける鉛直力は S_s設計用地震荷重より小さくなるため、水平力同様引張力および圧縮力共に S_s設計用地震荷重に包絡されることを確認できるため、以後の検討を省略する。

(2) 鉄塔脚部の評価

a. 設計荷重

解析より求めた**支点反力**を座標変換して、鉄塔脚部垂直反力の向きと支柱脚部の軸方向とを一致させ、座標変換後の垂直反力と水平反力の最大値により脚部の検討を行う。

下記の手順に従い算出した反力の、最大圧縮力、最大引張力、最大水平力を以下に示す。

最大圧縮力	$cN_T = 7703 \text{ kN}$	竜巻荷重	斜め方向
最大引張力	$tN_T = 3532 \text{ kN}$	竜巻荷重	斜め方向
最大水平力	$H_T = 911 \text{ kN}$	竜巻荷重	斜め方向

※ただし、最大水平力は $H_T = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ とする。

鉄塔脚部に作用する反力に対して、V-2-2-14-1「主排気筒の耐震性についての計算書」の S_s設計用荷重による反力との比較を表 5-10 に示す。

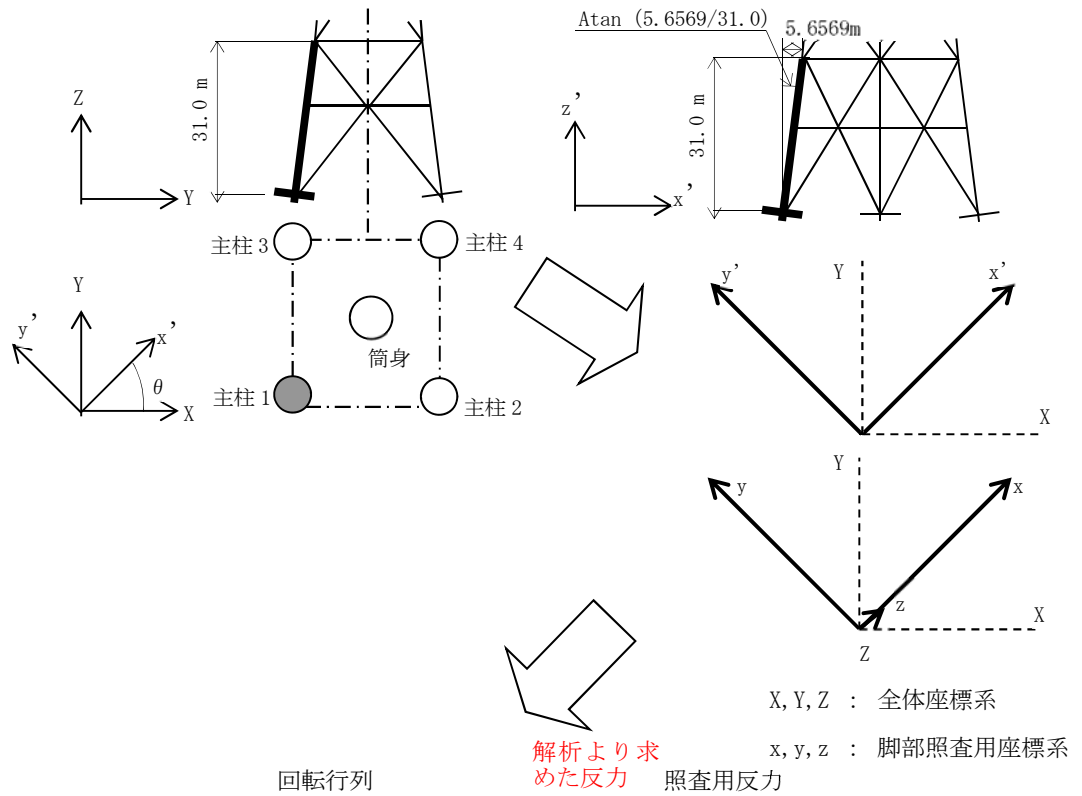
表 5-10 に示すように、引張力は S_s設計用荷重による反力の方が大きく、S_s設計用荷重に包絡されることを確認できるため、以降の検討は省略する。よって、水平力と圧縮力を支持するベースプレート、リブプレート、刃形プレートについての結果を記載する。

表 5-10 鉄塔脚部反力比較

	竜巻荷重時	S _s 設計用荷重時
圧縮力 (kN)	7703	7530
引張力 (kN)	3532	4807
水平力 (kN)	911	837

例) 主柱 1 の座標変換

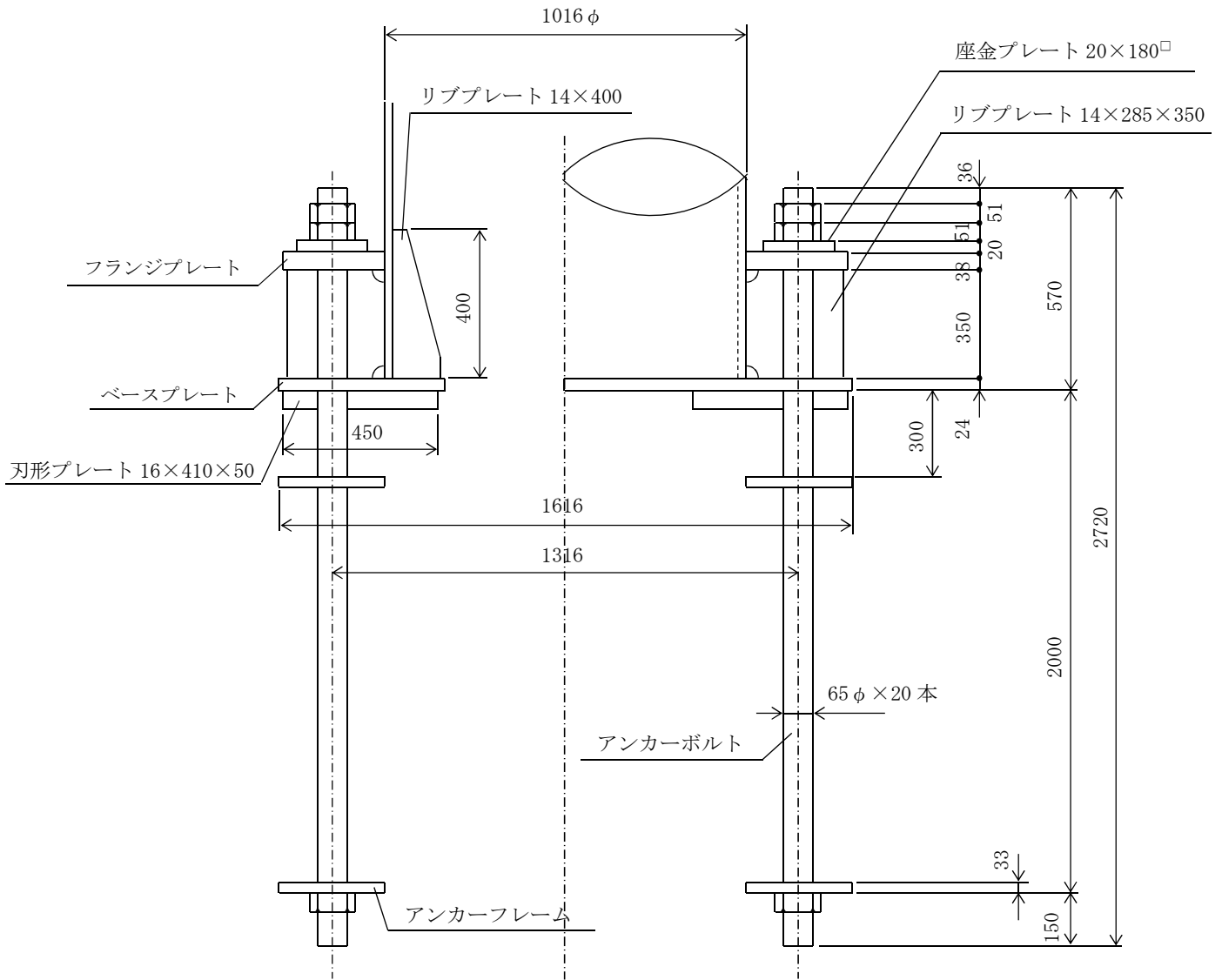
下図のように主柱脚部の軸方向と全体座標系の Z 方向は一致していないため、主柱 1 の解析より求めた反力を Z 軸周りに $\theta = 45^\circ$, 新しい Y 軸 (y') 周りに $\phi = 10.3416^\circ$ 回転する。



$$\begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} RX \\ RY \\ RZ \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Rx \\ Ry \\ Rz \end{Bmatrix}$$

図 5-3 に、鉄塔脚部の形状図を示す。

NT2 補② V-3-別添 1-1-4 R3



注 特記なき寸法は mm を示す。

図 5-3 鉄塔脚部概略図

b. ベースプレート

ベースプレートの曲げ及びコンクリートへの圧縮応力度について検討する。

・ベースプレート諸元

サイズ	外径	$D_1 = 1616 \text{ mm}$
	内径	$d_1 = 716 \text{ mm}$
	板厚	$t = 24 \text{ mm}$
ボルト孔		20- $\phi 75$
ボルト孔径		$b = 75 \text{ mm}$
ボルト孔欠損断面積		$A_B = b^2/4 \cdot \pi \cdot 20 = 88360 \text{ mm}^2$
材質		S S 4 0 0
設計基準強度		$F = 258.5 \text{ N/mm}^2$
許容引張応力度		$f_t = F = 258.5 \text{ N/mm}^2$
許容曲げ応力度		$f_b = F = 258.5 \text{ N/mm}^2$

(a) 下面のコンクリートに対する検討

・圧着面の断面性能 (ボルト孔控除)

断面積	$A_2 = \pi/4 \cdot (D_1^2 - d_1^2) - A_B$ $= \pi/4 \times (1616^2 - 716^2) - 88360$ $= 1.560 \times 10^6 \text{ mm}^2$
主柱圧縮力	${}_c N_T = 7703 \text{ kN}$
圧着面に作用する圧縮応力度	$\sigma_c = {}_c N_T / A_2$ $= \frac{7703}{1.560 \times 10^6} \times 10^3 = 5.0 \text{ N/mm}^2$

・コンクリート諸元

設計基準強度	$F_c = 22 \text{ N/mm}^2$
許容圧縮応力度	${}_c f_c = 2/3 \cdot F_c = 14.6 \text{ N/mm}^2$
応力度比	$\sigma_c / {}_c f_c = \frac{5.0}{14.6} = 0.35 \leq 1.00$

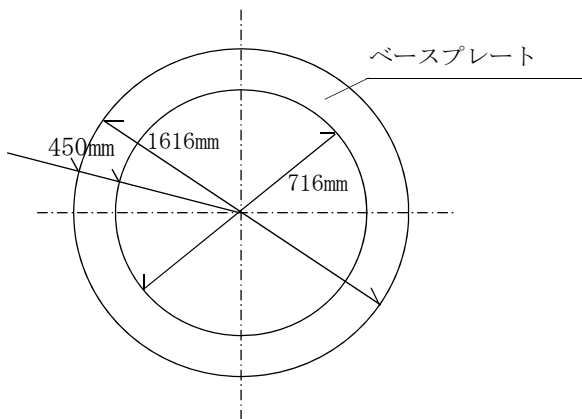


図 5-4 ベースプレートの寸法

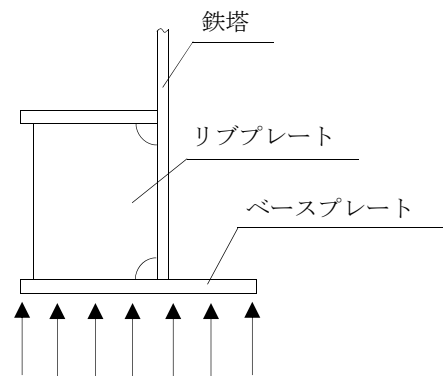


図 5-5 ベースプレートの断面

(a) ベースプレートの曲げに対する検討

ベースプレートを連続梁（リブを支点とする）とみなす。

$$\text{断面係数} \quad Z_1 = \frac{(t - t_c \cdot 1)^2}{6} = \frac{(24 - 1 \times 1)^2}{6} = 88.17 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

(※ ベースプレート上面のみの腐食代考慮，片面腐食代 $t_c = 1\text{mm}$)

・作用力

$$\text{ボルト芯径} \quad D_2 = 1316 \text{ mm}$$

$$\text{ボルト本数} \quad n = 20 \text{ 本}$$

$$\text{支間距離} \quad L = D_2 \cdot \pi / n = 1316 \times \pi / 20 = 206.7 \text{ mm}$$

(ボルト周方向ピッチ)

コンクリートの圧縮応力度

$$\sigma_c = 5.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{モーメント} \quad M_1 = 0.6 \cdot \sigma_c \cdot L^2 / 8 = \frac{0.6 \times 5.0 \times 206.7^2}{8} = 16022 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$$

$$\text{曲げ応力度} \quad \sigma_b = M_1 / Z_1 = \frac{16022}{88.17} = 181.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{応力度比} \quad \sigma_b / f_b = \frac{181.8}{258.5} = 0.71 \leq 1.00$$

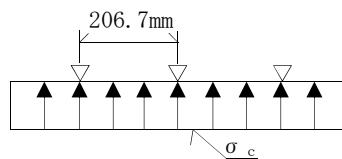


図 5-6 ベースプレート検討図

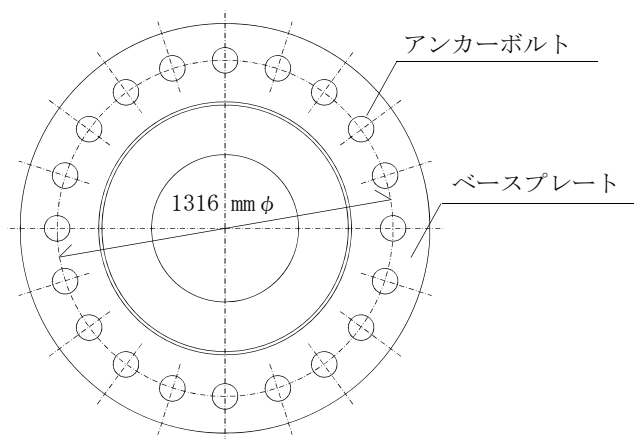


図 5-8 ボルト配置図

c. リブプレート

・リブプレート諸元

サイズ	高さ	$H = 350 \text{ mm}$
	幅	$B = 300 - 15 - 30 = 255 \text{ mm}$
	板厚	$t = 14 \text{ mm}$
	リブ枚数	$n = 20 \text{ 枚}$
	材質	SS400
	設計基準強度	$F = 258.5 \text{ N/mm}^2$
	限界細長比	$\Lambda = 114.2$

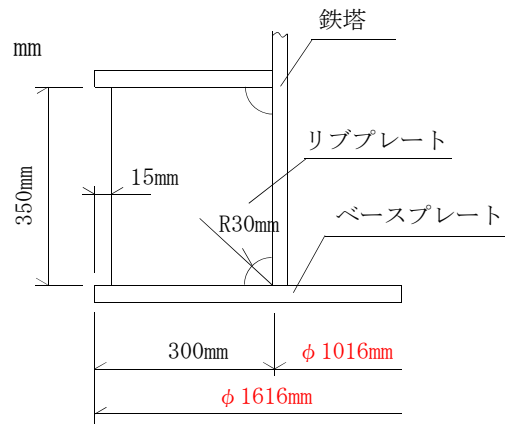


図 5-8 リブプレートの形状

(a) リブの圧縮に対する検討

断面積 $A_2 = (t - t_c \cdot 2) \cdot B = (14 - 1 \times 2) \times 255 = 3060 \text{ mm}^2$

(※ リブ両面の腐食代考慮, 片面腐食代 $t_c = 1\text{mm}$)

断面 2 次半径 $i = (t - t_c \cdot 2) / \sqrt{12} = \frac{(14 - 1 \times 2)}{\sqrt{12}} = 3.5 \text{ mm}$

(腐食代考慮)

座屈長 $\ell_k = H/2 = \frac{350}{2} = 175 \text{ mm}$ (両端固定)

細長比 $\lambda = \ell_k / i = \frac{175}{3.5} = 50.0 < \Lambda = 114.2$

許容圧縮応力度

$$f_c = F \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{5} \left(\frac{\lambda}{\Lambda} \right)^2 \right\} = 238.6 \text{ N/mm}^2$$

・作用力

1 枚のリブに作用する圧縮力

最大圧縮力作用時 $P_c = c N_T / n = \frac{7703}{20} = 385.2 \text{ kN}$

最大引張力作用時 $P_t = T N_T / n = \frac{3532}{20} = 176.6 \text{ kN}$

$P_c > P_t$ より以下 P_c に対してのみ照査を行う。

リブに作用する圧縮応力度 $\sigma_c = P_c / A_2 = \frac{385.2}{3060} \times 10^3 = 125.9 \text{ N/mm}^2$

応力度比 $\sigma_c / f_c = \frac{125.9}{238.6} = 0.53 \leq 1.00$

(b) リブの溶接部に対する検討

・溶接部諸元

鉛直方向

溶接長 $\ell_1 = (H - 30 \cdot 2) \cdot 2 = (350 - 30 \times 2) \times 2 = 580 \text{ mm}$

溶接脚長 $S_1 = 10 \text{ mm}$

有効のど厚 $a_1 = 0.7 \cdot S_1 - t_c \cdot 1 = 0.7 \times 10 - 1 \times 1 = 6.0 \text{ mm}$
(腐食代 $t_c = 1\text{mm}$)

有効面積 $A_{s1} = \ell_1 \cdot a_1 = 580 \times 6.0 = 3480 \text{ mm}^2$ (腐食代考慮)

水平方向

溶接長 $\ell_2 = B \cdot 2 = 255 \times 2 = 510 \text{ mm}$

溶接脚長 $S_2 = 10 \text{ mm}$

有効のど厚 $a_2 = 0.7 S_2 - t_c \cdot 1 = 0.7 \times 10 - 1 \times 1 = 6.0 \text{ mm}$
(腐食代 $t_c = 1\text{mm}$)

有効面積 $A_{s2} = \ell_2 \cdot a_2 = 510 \times 6.0 = 3060 \text{ mm}^2$

設計基準強度 $F = 258.5 \text{ N/mm}^2$

許容せん断応力度

$f_s = F / \sqrt{3} = 149.2 \text{ N/mm}^2$

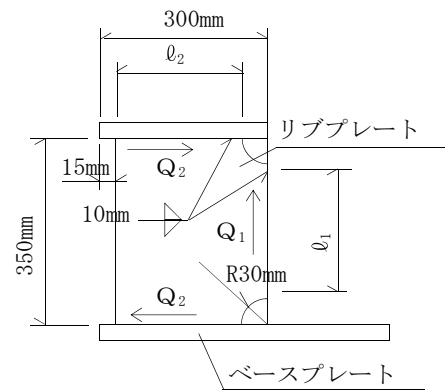


図 5-9 溶接位置図

・作用力

鉛直方向

$$Q_1 = P_c = 385.2 \text{ kN}$$

『5.2(2) c. (a)による』

水平方向（鋼管壁面に作用する偏心モーメント）

$$Q_2 = P_c \cdot 150/H = \frac{385.2 \times 150}{350} = 165.1 \text{ kN}$$

リブに作用するせん断応力度 $\tau_1 = Q_1/A_{s1} = \frac{385.2}{3480} \times 10^3 = 110.7 \text{ N/mm}^2$

$$\tau_2 = Q_2/A_{s2} = \frac{165.1}{3060} \times 10^3 = 54.0 \text{ N/mm}^2$$

応力度比 $\tau_1/f_s = \frac{110.7}{149.2} = 0.75 \leq 1.00$

$$\tau_2/f_s = \frac{54.0}{149.2} = 0.37 \leq 1.00$$

d. 刃形プレート

刃形プレートの強度検討を行う。

- ・圧縮側せん断に対する検討

$$\mu \cdot {}_c N_t = 0.4 \times 7703 = 3081.2 \text{ kN} > 911 \text{ kN}$$

μ : 摩擦係数 (0.4)

圧縮側せん断力に対してはベースプレート下面の摩擦抵抗によって十分抵抗しうるため、検討を省略する。

- ・引張側せん断に対する検討

水平力はアンカーボルトに負担させず全て刃形プレートで負担させる。

刃形プレート諸元

サイズ	高さ	H = 50 mm
	幅	B = 410 mm
	板厚	t = 16 mm
枚数		10枚 (36° ピッチ)
材質		S S 4 0 0
設計基準強度		F = 258.5 N/mm ²
許容曲げ応力度		f _b = F = 258.5 N/mm ²
許容せん断応力度		f _s = F / √3 = 149.2 N/mm ²

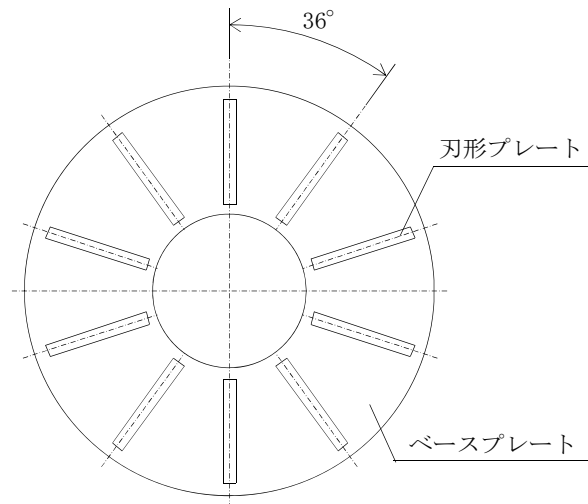


図 5-10 刃形プレート形状図

(a) 刃形プレート母材に対する検討

刃形プレートの強度検討を行う。

断面積 $A_4 = t = 16 \text{ mm}^2/\text{mm}$

断面係数 $Z_4 = t^2/6 = \frac{16^2}{6} = 42.67 \text{ mm}^3/\text{mm}$

単位面積当りの水平力

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{H_T}{H \cdot B \cdot \sum \sin \theta_i} \\ &= \frac{911}{50 \times 410 \times (4 \sin 18^\circ + 4 \sin 54^\circ + 2 \sin 90^\circ)} \times 10^3 \\ &= 6.9 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

モーメント $M_3 = \sigma_c \cdot H^2/2 = \frac{6.9 \times 50^2}{2} = 8625 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$

せん断力 $Q = \sigma_c \cdot H = 6.9 \times 50 = 345.0 \text{ N/mm}$

曲げ応力度 $\sigma_b = M_3/Z_4 = \frac{8625}{42.67} = 202.2 \text{ N/mm}^2$

せん断応力度 $\tau = Q/A_4 = \frac{345.0}{16} = 21.6 \text{ N/mm}^2$

応力度比 $\sigma_b/f_b = \frac{202.2}{258.5} = 0.79 \leq 1.00$

$\tau/f_s = \frac{21.6}{149.2} = 0.15 \leq 1.00$

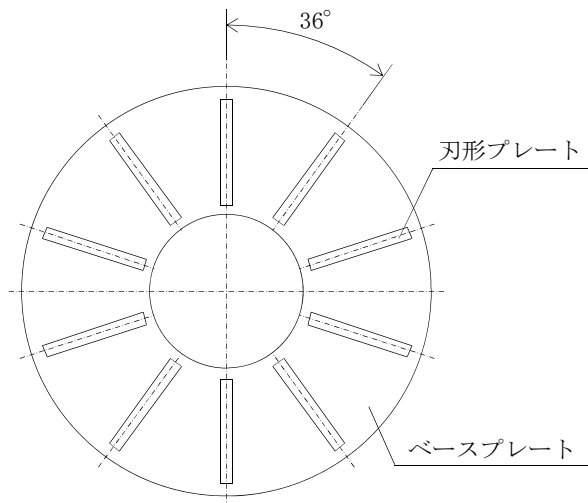


図 5-11 刃形プレート形状図

(b) 刃形プレート溶接部に対する検討
刃形プレートの強度検討を行う。

・溶接部諸元

溶接脚長	$S = 10 \text{ mm}$
有効のど厚	$a = 0.7 \cdot S = 0.7 \times 10 = 7.0 \text{ mm}$
	$\ell_1 = 15.0 \text{ mm}$
	$\ell_2 = 11.5 \text{ mm}$
有効面積 (単位幅当たり)	$A_s = 2 \cdot a = 2 \times 7.0 = 14.00 \text{ mm}^2/\text{mm}$
有効断面係数 (単位幅当たり)	$Z_s = A_s \cdot \ell_2^2 / \ell_1 = \frac{14.0 \times 11.5^2}{15.0}$ $= 123.4 \text{ mm}^3/\text{mm}$
設計基準強度	$F = 258.5 \text{ N/mm}^2$
許容せん断応力度	$f_s = F / \sqrt{3} = 149.2 \text{ N/mm}^2$
曲げ応力度	$\tau_b = M_3 / Z_s = \frac{8625}{123.4} = 69.9 \text{ N/mm}^2$
せん断応力度	$\tau_q = Q / A_s = \frac{345.0}{14.00} = 24.7 \text{ N/mm}^2$
合成応力度	$\tau = \sqrt{\tau_b^2 + \tau_q^2} = \sqrt{69.9^2 + 24.7^2} = 74.2 \text{ N/mm}^2$
応力度比	$\tau / f_s = \frac{74.2}{149.2} = 0.50 \leq 1.00$

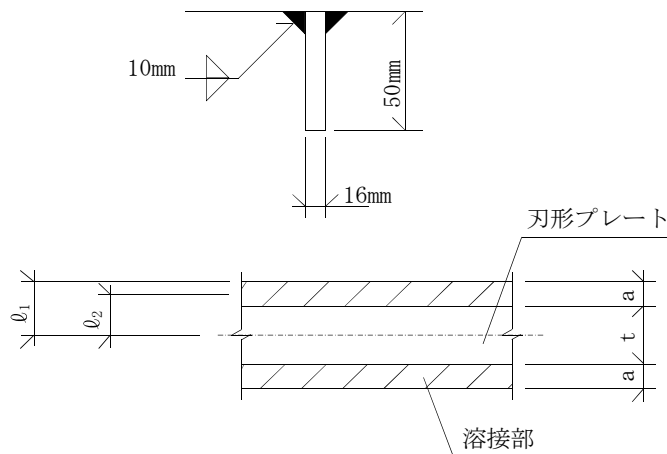


図 5-12 刃形プレート諸元

表 5-11 荷重時算定結果一覧

		発生応力度	許容応力度	$\frac{\text{発生応力度}}{\text{許容応力度}}$
ベースプレート	曲げ応力度	181.8	258.5	0.71 \leq 1.00
リブプレート	溶接部せん断応力度	110.7	149.2	0.75 \leq 1.00
刃形プレート	曲げ応力度	202.2	258.5	0.79 \leq 1.00

(3) 補助鉄塔脚部の評価

a. 設計荷重

設計荷重は、以下に示す荷重により補助鉄塔脚部の検討を行う。

最大圧縮力 $C N_T = 8685 \text{ kN}$ 設計用地震荷重 斜め方向

最大引張力 $T N_T = 5636 \text{ kN}$ 設計用地震荷重 斜め方向

最大水平力 $H_T = 2056 \text{ kN}$ 設計用地震荷重 斜め方向

※ただし、最大水平力は $H_T = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ とする。

補助鉄塔脚部に作用する反力に対して、V-2-2-15-1「主排気筒の耐震性についての計算書」の S_s 設計用荷重による反力との比較を表 5-12 に示す。

表 5-12 に示すように、竜巻時の反力は S_s 設計用荷重による反力の方が大きく、 S_s 設計用荷重に包絡されることを確認できるため、以降の検討は省略する。

表 5-12 補助鉄塔脚部反力比較

	竜巻 荷重時	S_s 設計用 荷重時
圧縮力 (kN)	8685	9176
引張力 (kN)	5636	7525
水平力 (kN)	2056	2202

V-3-別添 1-2-1-1 防護ネットの強度計算書

目次

1.	概要	1
2.	基本方針	1
2.1	位置	1
2.2	構造概要	11
2.3	評価方針	13
2.4	適用規格	15
3.	強度評価方法	16
3.1	記号の定義	16
3.2	評価対象部位	20
3.3	荷重及び荷重の組合せ	23
3.4	許容限界	27
3.5	評価方法	33
4.	評価条件	46
4.1	荷重条件	46
4.2	防護ネット仕様	46
5.	強度評価結果	51
5.1	ネットに作用する外力エネルギー評価	51
5.2	破断評価	53
5.3	たわみ評価	65

1. 概要

本資料は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」に示すとおり、防護対策施設である非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設、中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設、海水ポンプエリア竜巻防護対策施設、原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設及び使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の防護ネットが、防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物（以下「飛来物」という。）が防護対象施設へ衝突することを防止するために、主要な部材が破断せず、たわみを生じても飛来物が防護対象施設と衝突しないよう、飛来物のエネルギーが防護ネットの限界吸収エネルギーの値を下回っていること、及び防護ネットを構成する部材が許容限界に至らないことを確認するものである。

2. 基本方針

V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」を踏まえ、防護ネットの「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

防護ネットは、原子炉建屋（ディーゼル発電機室屋上、原子炉棟外壁及び付属棟屋上）、海水ポンプ室周り及び使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁に設置する。

防護ネットの設置位置図を図 2-1 に、各設置位置におけるネットの割付展開図を図 2-2 から図 2-9 に示す。



図 2-1 防護ネットの設置位置図

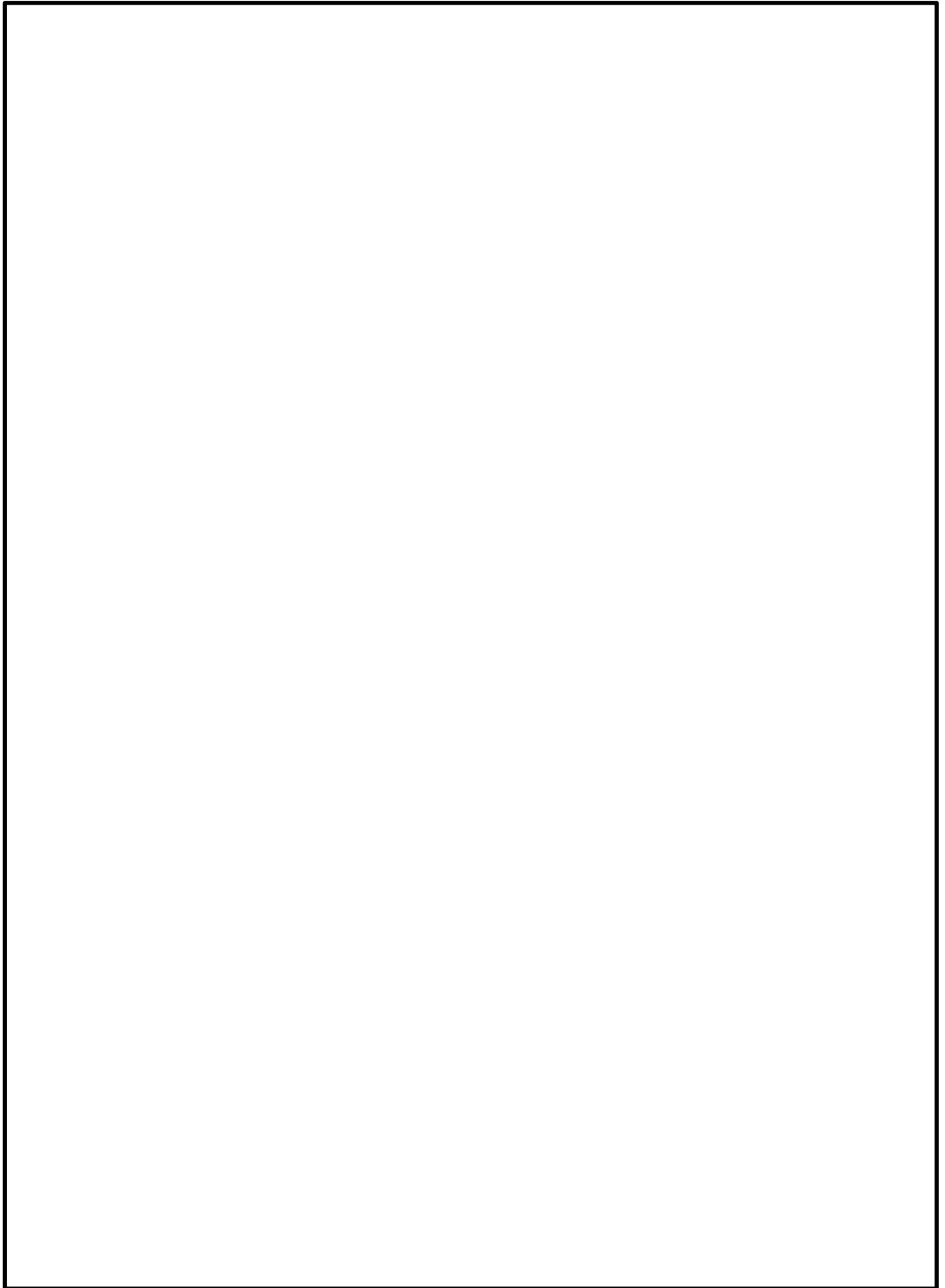


図 2-3 防護ネットの割付展開図
(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

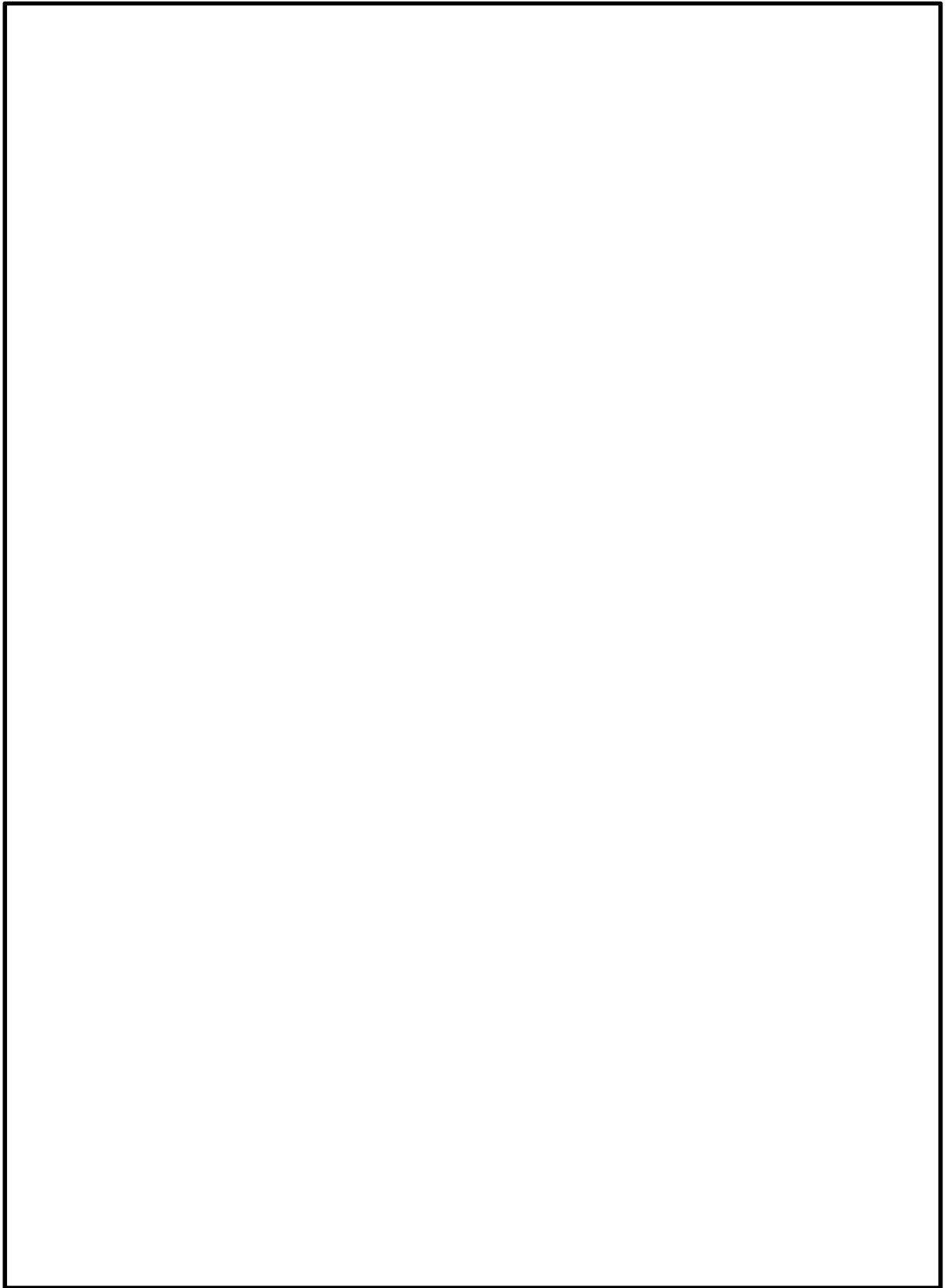


図 2-4 防護ネットの割付展開図
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

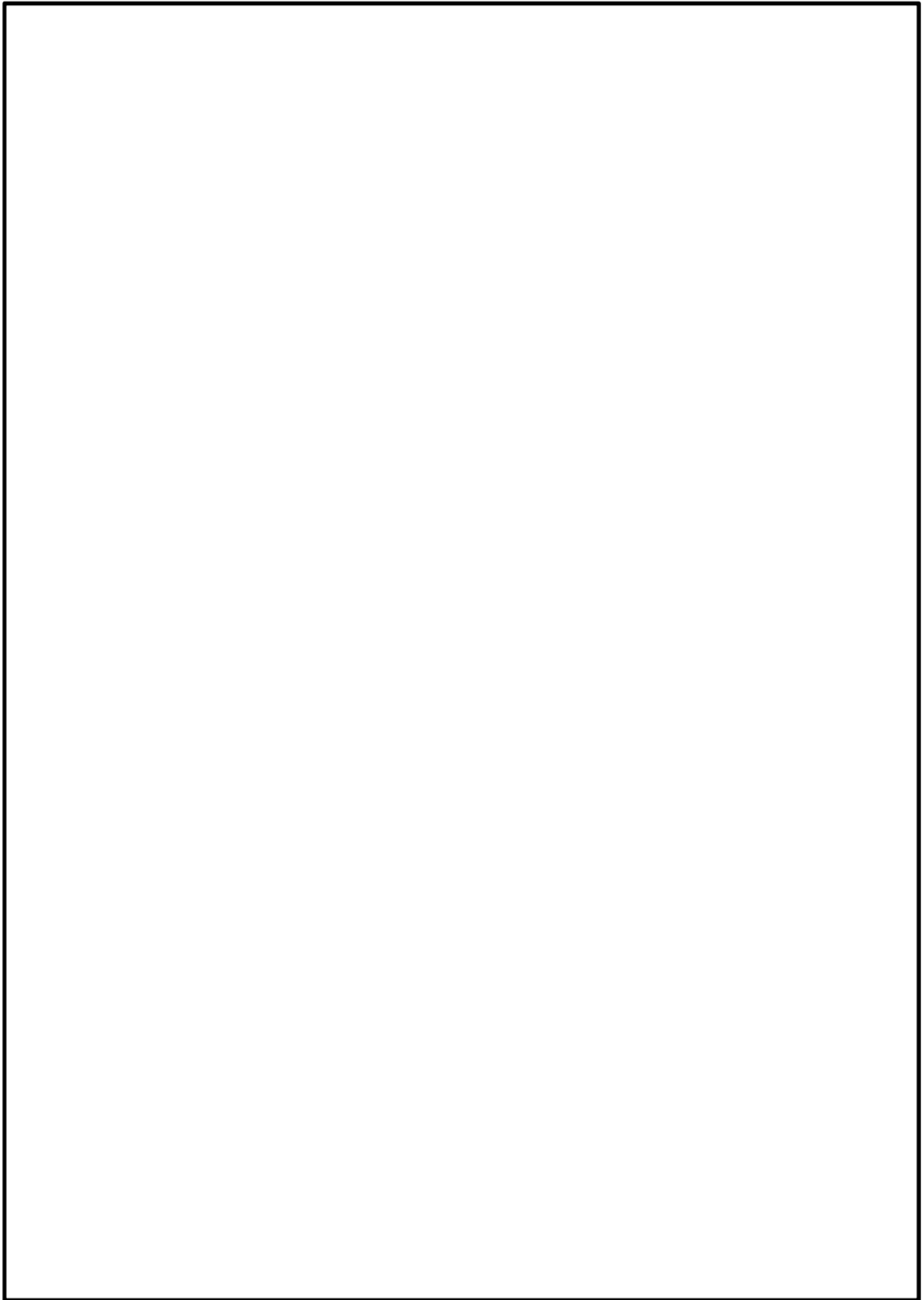


図 2-4 防護ネットの割付展開図(2/2)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

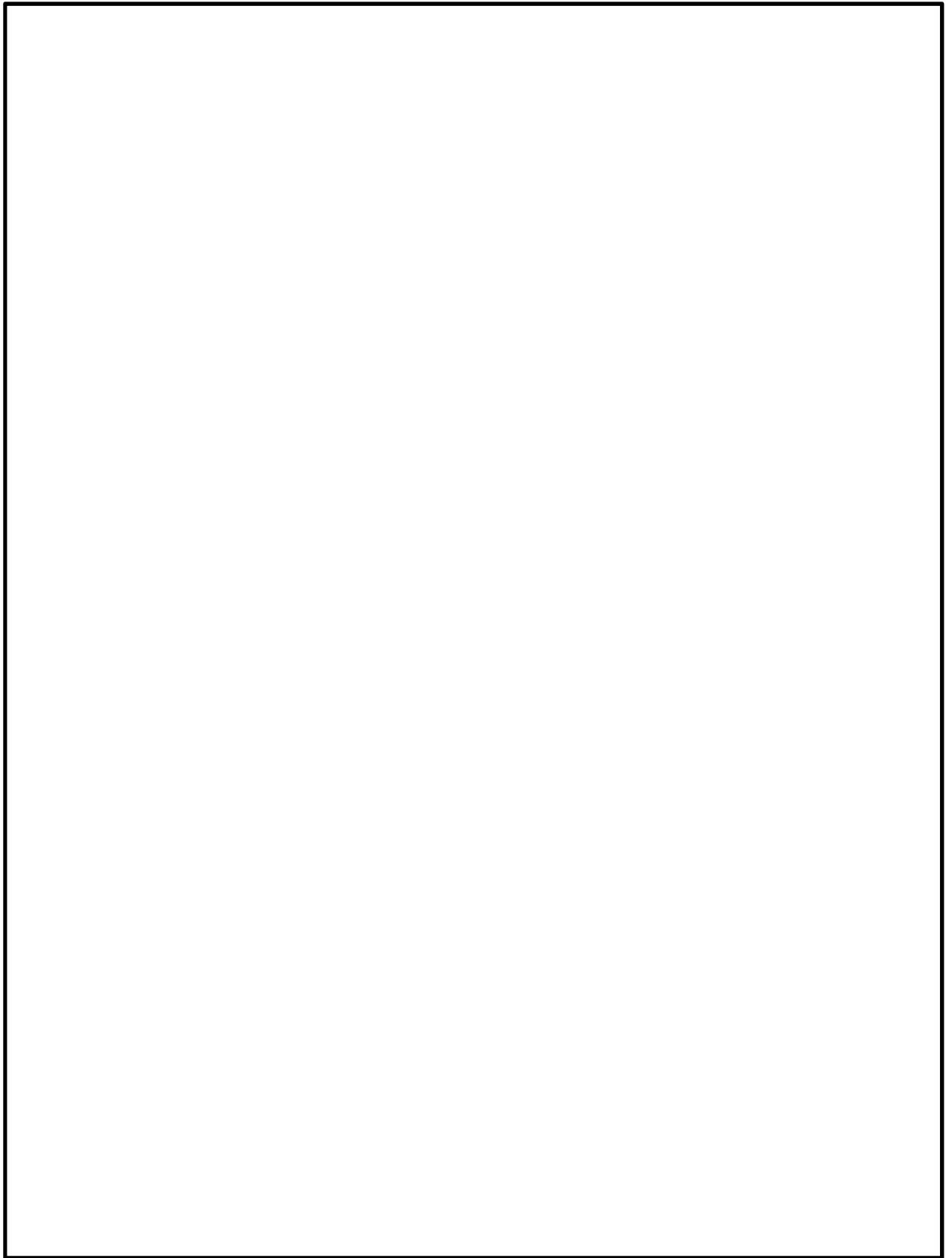


図 2-5 防護ネットの割付展開図
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設)

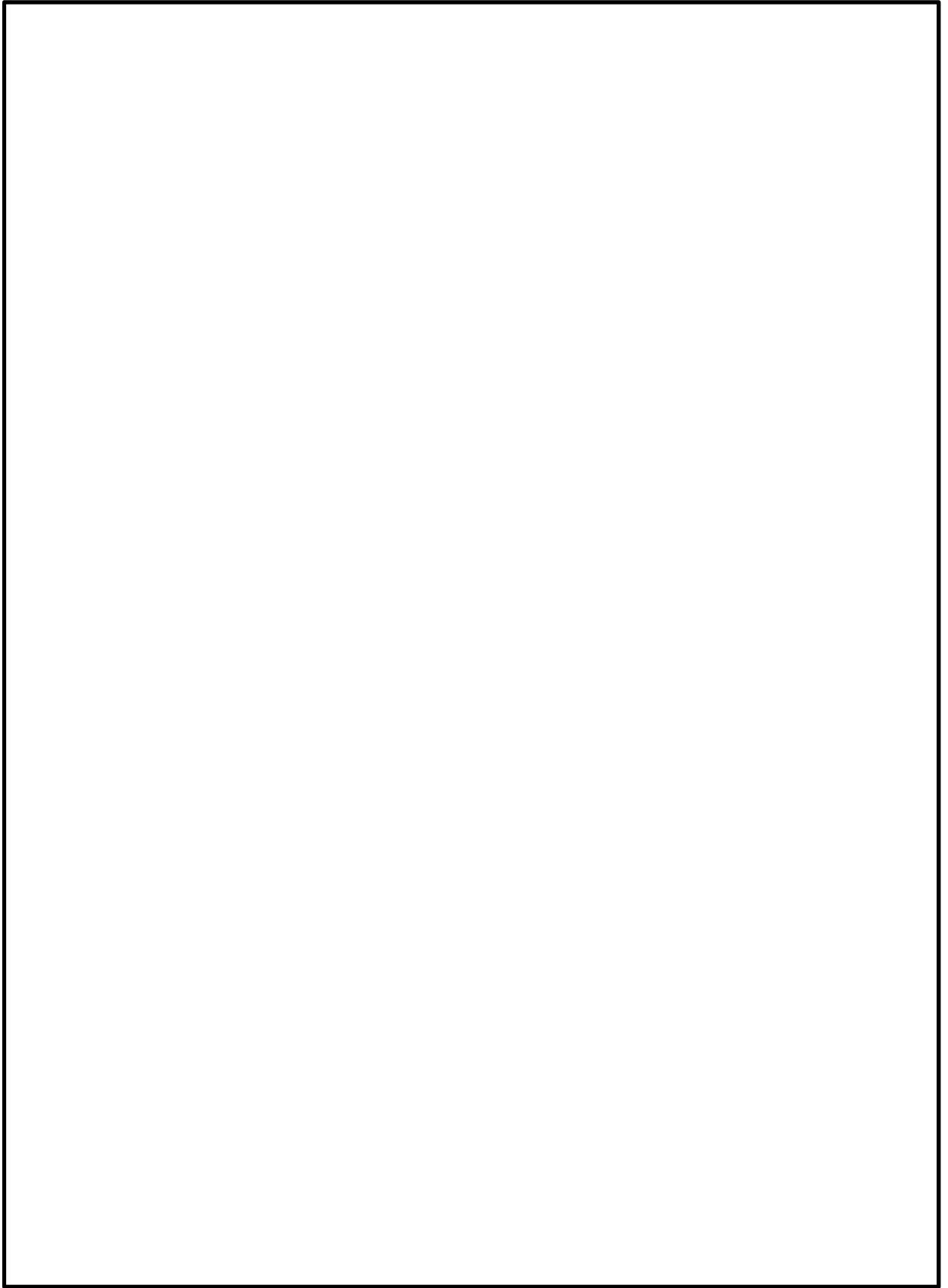


図 2-6 防護ネットの割付展開図(1/2)
(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設)

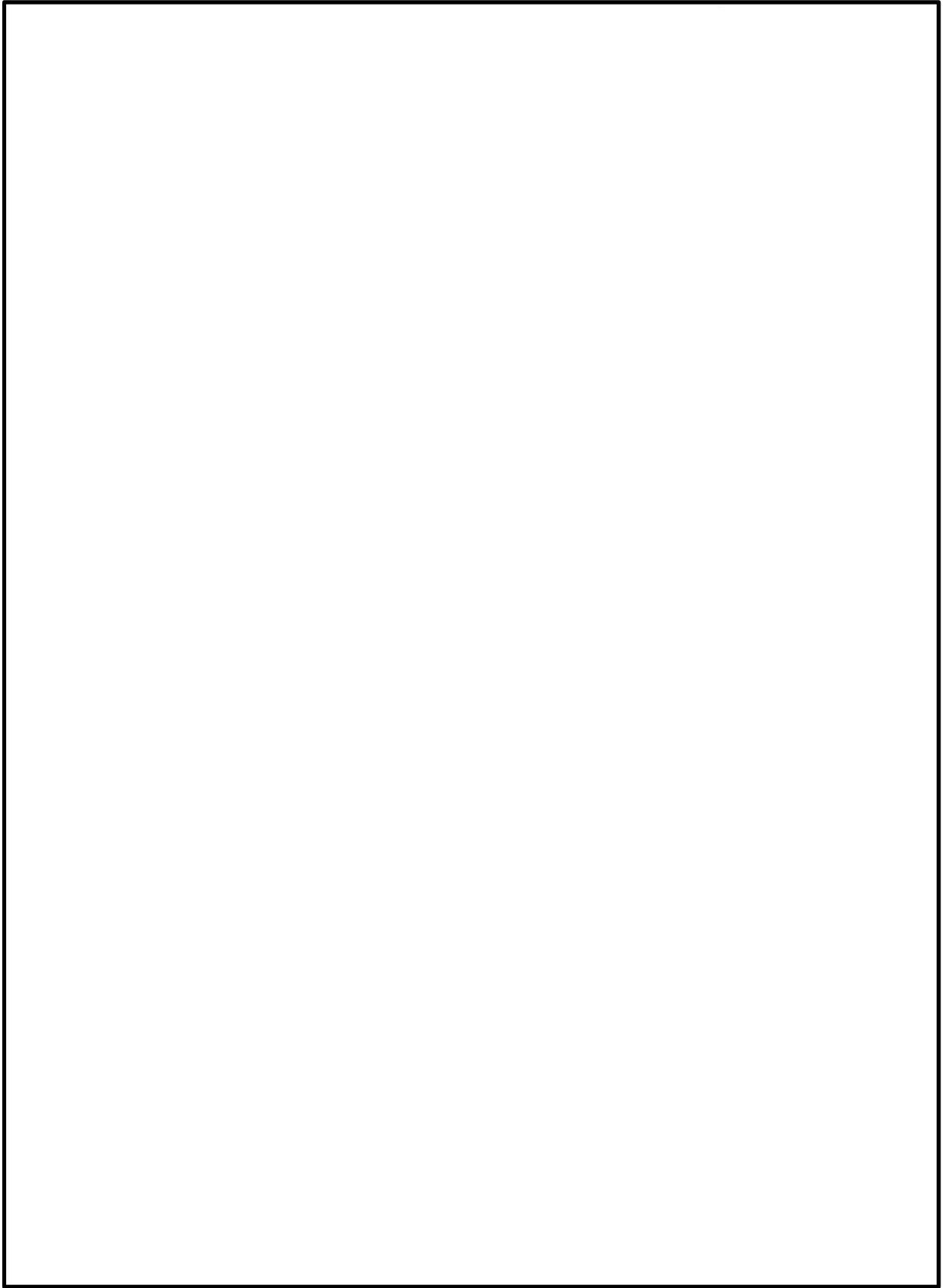


図 2-6 防護ネットの割付展開図
(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設)



図 2-7 防護ネットの割付展開図
(海水ポンプエリア竜巻防護対策施設配置図)

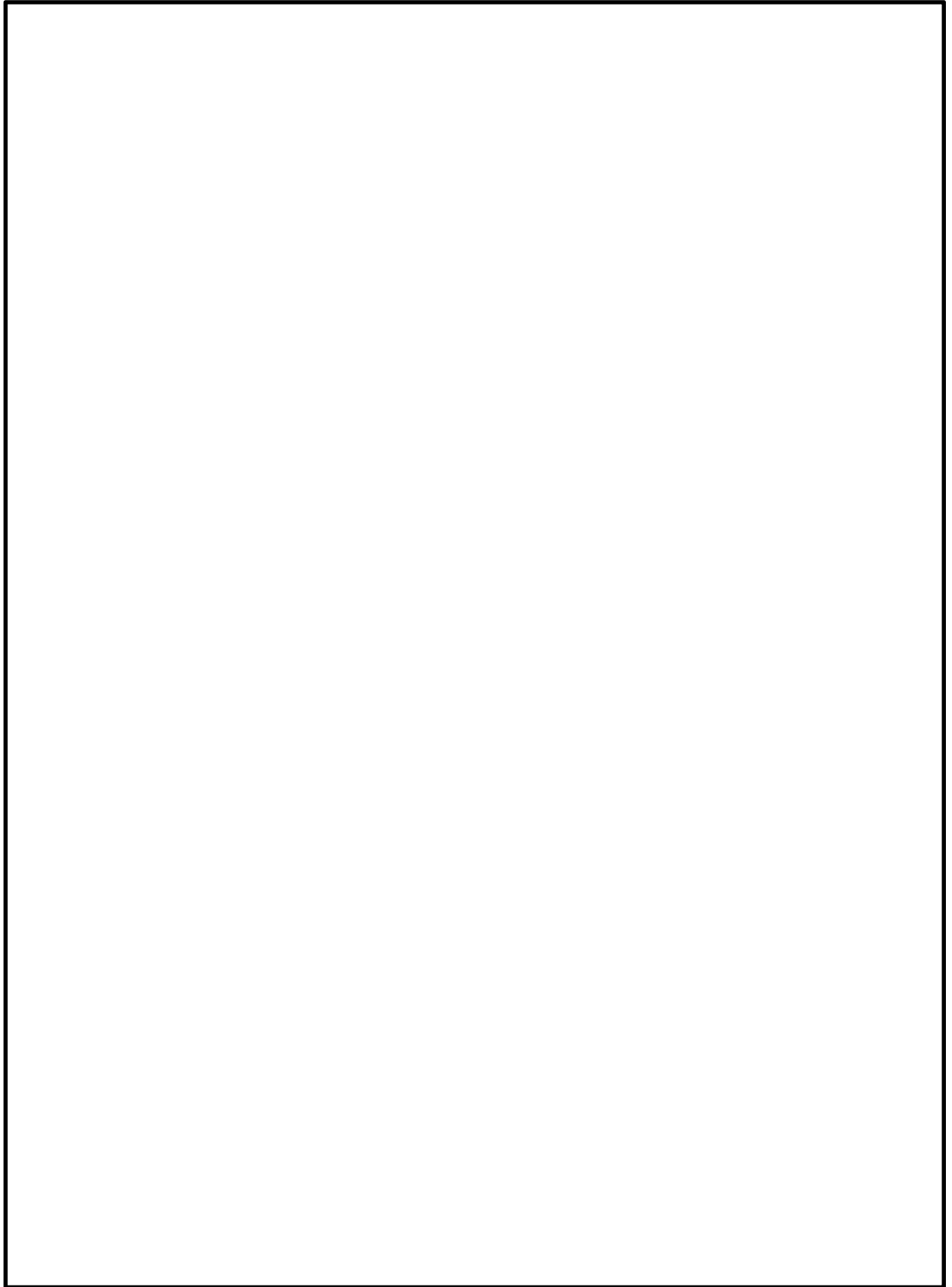


図 2-8 防護ネットの割付展開図
(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設)

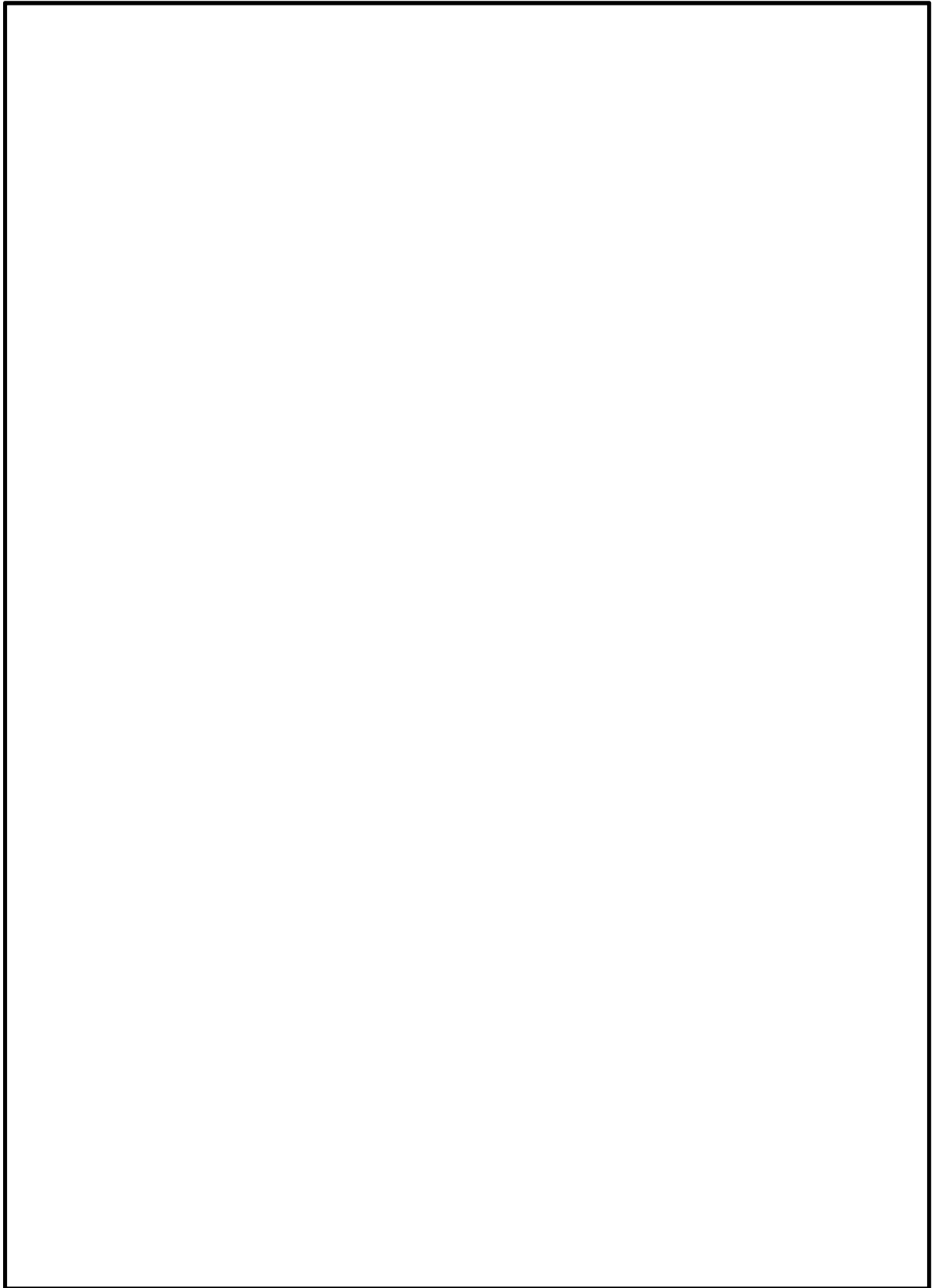


図 2-9 防護ネットの割付展開図
(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設)

2.2 構造概要

防護ネットの構造は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「3.1 防護ネットの構造設計」に示す構造計画を踏まえて設定する。

防護ネットは、ネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部、固定部）及び鋼製枠から構成され、原子炉建屋及び海水ポンプ室周り及び使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁に設置する。防護ネットは、防護対象施設又は開口部周辺に設置した架構に接続ボルト等を用いて取付けられ、架構は基礎若しくは建屋の床及び壁により支持される。

防護ネットのうちネットは、四隅にワイヤロープを縫うようにはわせたワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは接続治具（支持部）を介して、鋼製枠に設置した接続治具（固定部）にて支持する構造とする。

防護ネットは、ネットに作用する自重、飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重をワイヤロープ、接続治具（支持部、固定部）を介して、鋼製枠に伝達する。

防護ネットのうちネットは、飛来物が衝突した際に局部的に生じる衝撃荷重に耐え、変形することにより飛来物の持つ運動エネルギーを吸収し、防護対象施設への衝突を防止するものである。ネットは、らせん状の硬鋼線を3次元的に編み込み、編み込みの方向によって主に荷重を受け持つ展開方向と展開直角方向の異方性を持っており、ネットに対してL字に張った2本のワイヤロープで支持される。

ワイヤロープは、展開方向に並行するワイヤロープと、展開方向に直交するワイヤロープが接合されていることから、ワイヤロープの張力が均一に発生する構造となっており、ワイヤロープは接続治具（支持部）であるターンバックル及びシャックルで支持される。ワイヤロープは、ネットの自重による平常時のたわみが大きくなるように、初期張力をかけ、トルク管理を行う。また、ネットは2枚以上重ねて敷設するため、それぞれのネットの機能が発揮されるよう、ワイヤロープや接続治具等はネットごとに同じ構成にて設置する。

防護ネットの概要図を図 2-9 に示す。

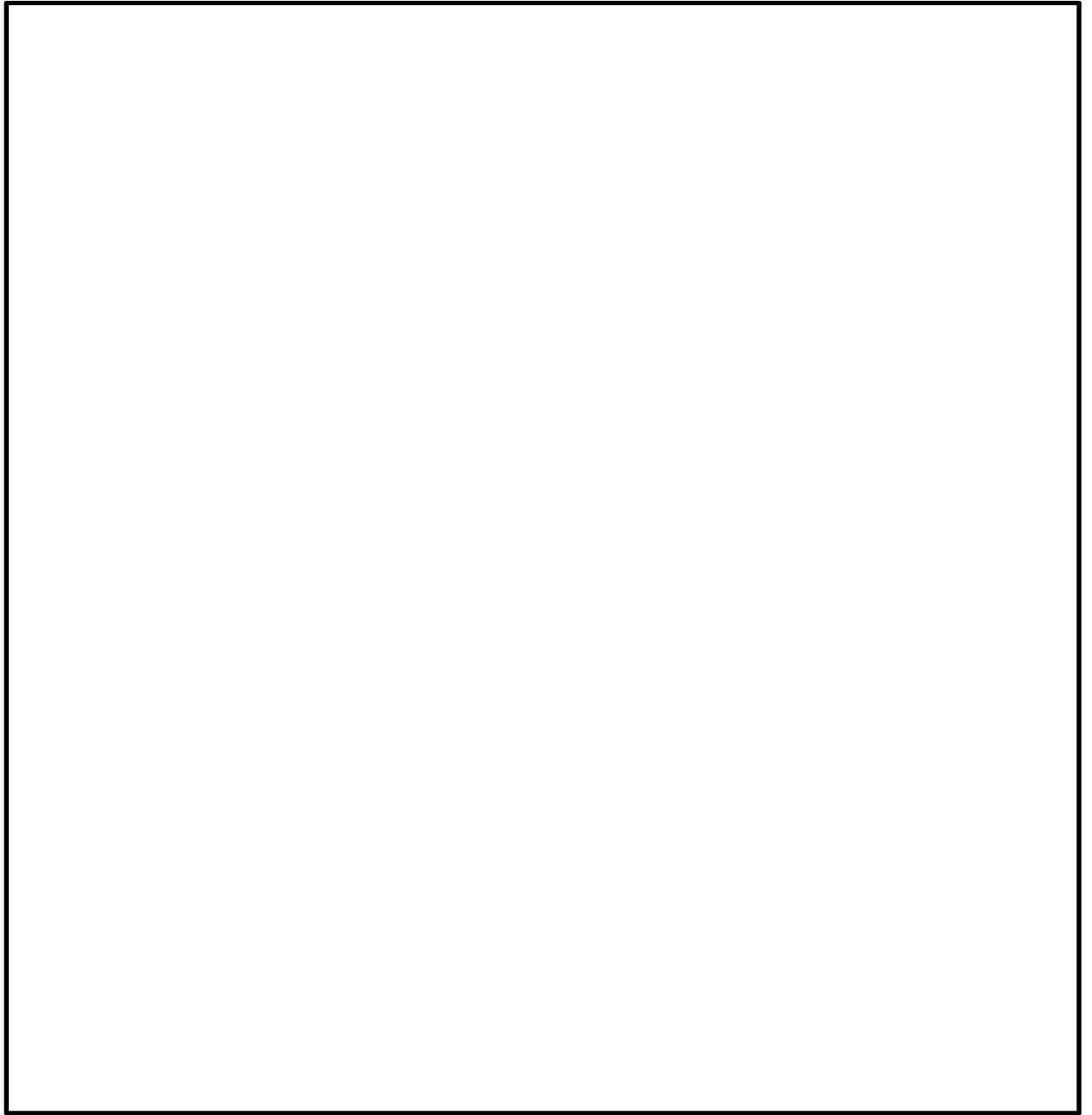


図 2-9 防護ネットの概要図

2.3 評価方針

防護ネットの強度計算は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」及び「5. 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、防護ネットの評価対象部位に作用する応力等が、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。

防護ネットの評価フローを図 2-10 に示す。

防護ネットの強度評価においては、その構造を踏まえて、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、評価対象部位を設定する。

具体的には、設計荷重に対して、防護ネットは内側に設置した防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物を捕捉し防護対象施設へ衝突させないために、破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有すること、及びたわみが生じても、飛来物が防護対象施設と衝突しないよう防護対象施設との離隔が確保できることを確認する。

防護ネットのうち、ネットは破断が生じないことの確認として、ネットが飛来物のエネルギーを吸収することができること、及び飛来物の衝突箇所においてネット目合いの破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを評価する。また、防護ネットが飛来物を捕捉可能であることを確認するために、設計荷重に対して、ネットを支持するワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）に破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを評価する。

防護ネットのうち、たわみについては、ネットに作用する設計荷重に対して、ネット及びワイヤロープにたわみが生じた場合でも、飛来物が防護対象施設に接触しないことを評価する。

評価においては、防護ネットの形状、及び評価条件として、展開方向寸去と展開直角方向寸法の比（以下「アスペクト比」という。）、飛来物の衝突位置の影響及びネットの等価剛性の取扱いの影響を考慮した評価を実施する。

ネット寸法のアスペクト比については、電力中央研究所報告書「高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法」（総合報告：O01）（以下「電中研報告書」という。）の評価式の適用性が確認されている 1:1～2:1 の範囲で使用し、その範囲を外れる部分はエネルギー吸収等において有効な面積とならないため、ネットの吸収エネルギー評価、ネットの破断評価及びたわみ評価において、評価ごとに保守的な設定となるように、アスペクト比を考慮した評価を実施する。アスペクト比の影響を考慮した評価におけるネット寸法の設定方法については、「3.5 評価方法」に示す。また、アスペクト比の影響を考慮した評価におけるネット寸法は、「4. 評価条件」に示す。

飛来物の衝突位置の影響については、評価において飛来物がネット中心に衝突する場合について評価を実施することから、中央位置からずれた位置（以下「オフセット位置」という。）に衝突する場合の影響を考慮し、ネット、ワイヤロープ及び接続治具の破断評価において、評価における係数を設定する。係数の設定については「3.5 評価方法」に示す。

ネットの等価剛性については、電中研にて複数回実施している衝撃引張試験の結果から算出する。等価剛性の算出の方法を考慮し、ネットの吸収エネルギー評価及び防護ネットのたわみ評

価において、評価における係数を設定する。係数の設定については、「3.4 許容限界」に示す。

ネット評価の考慮事項の選定について、表 2-1 に示す。

防護ネットを支持し、ネットに作用する荷重が伝達される架構の強度評価は、V-3-別添 1-2-1-3「架構の強度計算書」に示す。

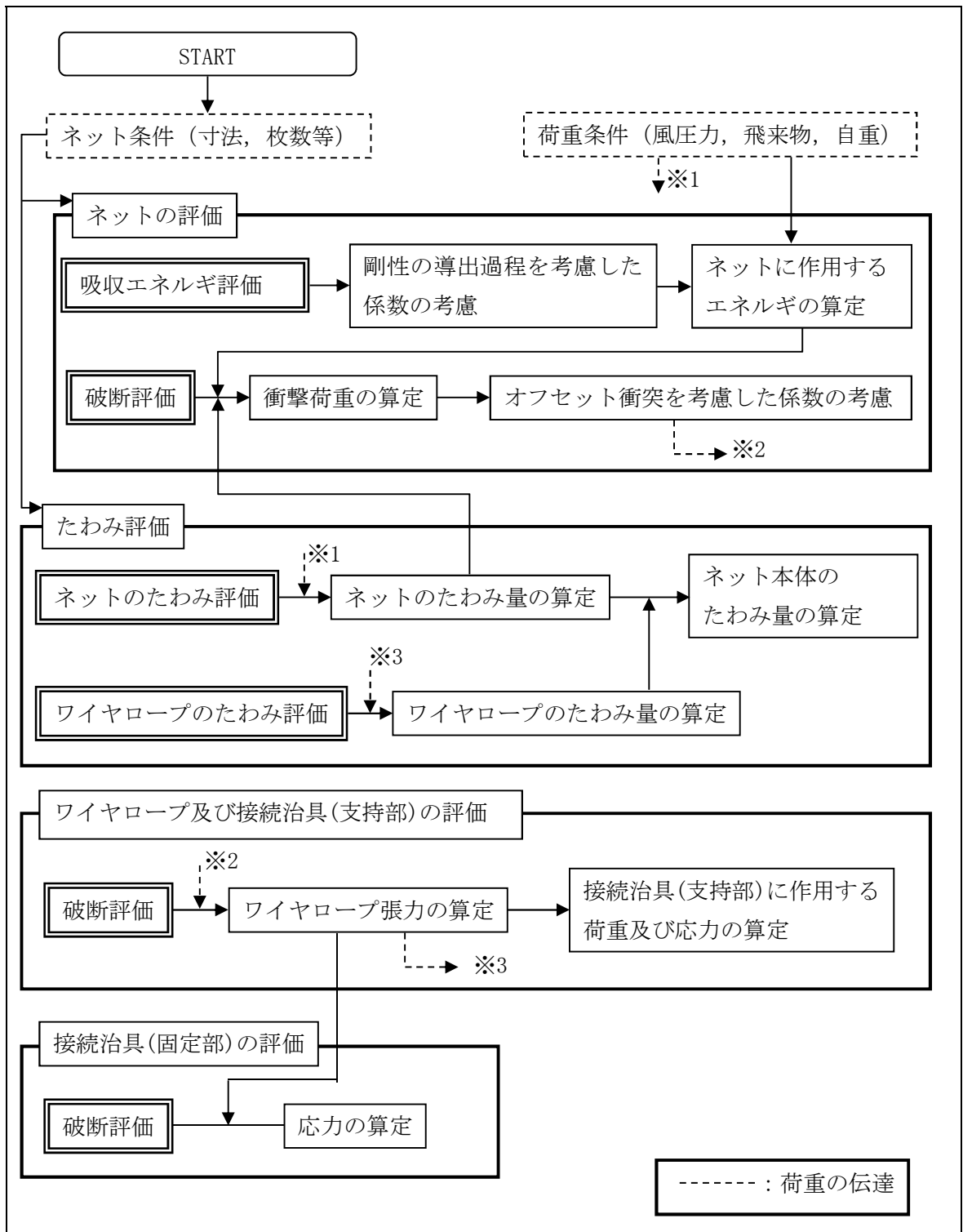


図 2-10 防護ネットの評価フロー

表 2-1 ネット評価の考慮事項の選定

	吸収エネルギー評価	破断評価	たわみ評価
算出方法	飛来物の有する運動エネルギー、自重及び風圧力により生じるエネルギーを算出し、ネットに生じるエネルギーの総量を算出。	自重、飛来物によるネットへの衝撃荷重及び風圧力による荷重を算出し、ネットの引張荷重及びワイヤロープの張力、接続治具に発生する応力を算出。	自重、飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重によりネット及びワイヤロープに生じるたわみ量を算出。
アスペクト比	アスペクト比の影響を考慮してネット寸法を設定。	アスペクト比の影響を考慮してネット寸法を設定。	アスペクト比の影響を考慮してネット寸法を設定。
衝突位置	オフセット衝突時のネットの吸収エネルギーは中央衝突と同等であることから、オフセットによる影響はなく考慮不要。	オフセット衝突時の衝撃荷重が中央衝突より増加することを算出荷重に考慮する。	ネットの最大たわみ位置である中央位置のたわみ及びオフセット位置のたわみを考慮して、たわみ量を設定。
ネット剛性	等価剛性の算出過程の影響から定められる係数を限界吸収エネルギーに考慮する。	荷重による各部位の評価であり、ネットの等価剛性を用いた評価は行っていないため考慮不要。	等価剛性の算出過程の影響から定められる係数を飛来物の衝突によりネット本体に生じるたわみ量に考慮する。

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・日本工業規格(J I S)
- ・「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」
((社) 日本機械学会 (以下「J S M E」という。)
- ・「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」 (社) 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」 (社) 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」 (社) 日本電気協会
- ・「鋼構造設計規準—許容応力度設計法—」 (社) 日本建築学会(2005)
- ・「建築物荷重指針・同解説」 (社) 日本建築学会(2004 改定)
- ・「小規模吊橋指針・同解説」 (社) 日本道路協会

3. 強度評価方法

3.1 記号の定義

(1) 防護ネット

a. 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価に用いる記号を表 3-1 に示す。

表 3-1 吸収エネルギー評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
a	mm	ネット 1 目合いの対角寸法
a_s	mm	ネット 1 目合いの破断変位
b	mm	設計飛来物の端面の長辺方向寸法
c	mm	設計飛来物の端面の短辺方向寸法
E_f	kJ	設計飛来物衝突時にネットに作用するエネルギー
E_i	kJ	i 番目の列におけるネットの吸収可能なエネルギー
E_{max}	kJ	ネット設置枚数 n を考慮した限界吸収エネルギー
E_t	kJ	ネット設置枚数 n を考慮したネットに作用する全エネルギー
E_w	kJ	自重及び風圧力によりネットに作用するエネルギー
F_i	kN	設計飛来物衝突時の i 番目の列における作用力
F_w	kN	自重及び風圧力によりネットに作用する荷重
K	kN/m	ネット 1 目合いの等価剛性
K_x	kN/m	ネット設置枚数 n を考慮したネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性
K_x'	kN/m	ネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性
L_x	m	ネット展開方向寸法
L_y	m	ネット展開直角方向寸法
m	kg	設計飛来物の質量
N_x	—	ネット展開方向目合い数
N_y	—	ネット展開直角方向目合い数
P_i	kN	設計飛来物衝突時にネットに発生する i 番目の列における張力
P_w	kN	ネットの自重により作用する荷重
v	m/s	設計飛来物の移動速度
W_w	kN	風圧力によりネットに作用する荷重
X_i	m	i 列目のネットの伸び

表 3-1 吸収エネルギー評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
δ	m	設計飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
δ_a	m	自重及び風圧力における荷重によるたわみ量
δ_i	m	i 番目の列におけるネットのたわみ量
δ_{max}	m	ネットの最大たわみ量
θ_i	deg	i 番目の列におけるネットたわみ角
θ_{max}	deg	ネットの最大たわみ角
ϕ	—	ネットの充実率
ρ	kg/m ³	空気密度

b. 破断評価

破断評価に用いる記号を表 3-2 に示す。

表 3-2 破断評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
a_w	mm	取付けプレート溶接部ののど厚
A_b	mm ²	ボルト呼び径断面積
C_c	—	ワイヤグリップの効率
E_t	kJ	ネット設置枚数nを考慮したネットに作用する全外力エネルギー
F_1	kN	設計飛来物衝突時のネットの許容荷重（ネット1目合いの破断荷重）
F_2	kN	設計飛来物衝突時にネット目合い1箇所が受ける衝撃荷重の最大値
F_3	kN	ワイヤロープ破断荷重（JIS規格値）
F_a	kN	設計飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
$F_{a'}$	kN	設計飛来物衝突時にネットが受けるオフセット衝突を加味した最大衝撃荷重
F_P	kN	ワイヤロープにより接続用の治具（支持部）に作用する荷重
F_{P1}	kN	設計飛来物がネットに衝突する際に1本目のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重
F_{P2}	kN	設計飛来物がネットに衝突する際に2本目のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重
F_x	kN	設計飛来物がネットに衝突する際ワイヤロープから隅角部へ作用するX方向の合成荷重
F_y	kN	設計飛来物がネットに衝突する際ワイヤロープから隅角部へ作用するY方向の合成荷重

表 3-2 破断評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
L	mm	面取り長さ
L_{Pw}	mm	取付けプレート溶接部の有効長さ
L_{P1}	mm	アイプレート長さ (縦方向)
L_{P2}	mm	アイプレート長さ (横方向)
L_x	m	ネット展開方向寸法
L_y	m	ネット展開直角方向寸法
n	枚	ネット設置枚数
n_1	個	飛来物の衝突位置周辺のネット1枚当たりの目合いの個数
n_2	本	隅角部固定ボルト本数
S	mm	アイプレート溶接部の溶接脚長
T'	kN	設計飛来物のネットへの衝突によりn枚のネットに発生する張力の合計の最大値
T_1'	kN	設計飛来物のネットへの衝突によりワイヤロープ1本に作用する張力の最大値
T_x	kN	設計飛来物のネットへの衝突により展開方向のワイヤロープから発生するX方向の荷重
T_x'	kN	設計飛来物のネットへの衝突により展開直角方向のワイヤロープから発生するX方向の荷重
T_y	kN	設計飛来物のネットへの衝突により展開方向のワイヤロープから発生するY方向の荷重
T_y'	kN	設計飛来物のネットへの衝突により展開直角方向のワイヤロープから発生するY方向の荷重
δ	m	設計飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
δ_w	m	ワイヤロープのたわみ量
θ	deg	設計飛来物衝突時のネットのたわみ角
θ_{w1}	deg	ネット展開方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_{w2}	deg	ネット展開直角方向に平行なワイヤロープのたわみ角
θ_x	deg	設計飛来物衝突時のネット展開方向に平行のネットたわみ角
θ_y	deg	設計飛来物衝突時のネット展開直角方向に平行のネットたわみ角
σ_s	MPa	隅角部固定ボルトに発生するせん断応力
τ_w	MPa	アイプレート溶接部に発生するせん断応力

c. たわみ評価

たわみ評価に用いる記号を表 3-3 に示す。

表 3-3 たわみ評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
E_i	kJ	i番目の列におけるネットの吸収可能なエネルギー
E_t	kJ	ネット設置枚数nを考慮したネットに作用する全外力エネルギー
F_a	kN	飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
F_P	kN	設計飛来物がネットに衝突する際2方向のワイヤーから支持部へ作用する合成荷重
K_x	kN/m	ネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性
L_b	m	変形前のワイヤロープ長さ
L_{min}	m	防護ネットと防護対象施設の最小離隔距離
L_x	m	ネット展開方向寸法
L_y'	m	ワイヤロープへの飛来物の影響範囲
L_y	m	ネット展開直角方向寸法
L_z	m	ワイヤロープの全長
n	枚	ネット設置枚数
N_y	個	ネット展開直角方向目合い数
S	m	変形後のワイヤロープ長さ
S_x	m	ネット展開方向と平行に配置されているワイヤロープの変形後の長さ
S_y	m	ネット展開直角方向と平行に配置されているワイヤロープの変形後の長さ
T_1'	kN	設計飛来物のネットへの衝突により1枚のネットのワイヤロープ1本に作用する張力の最大値
δ	m	飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
δ_i	m	飛来物衝突時のi番目の列におけるネットのたわみ量
δ'	m	設計飛来物衝突時のワイヤロープの変形による伸び量
δ_t	m	ワイヤロープのたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量
δ_w	m	ワイヤロープのたわみ量
δ_{wx}	m	ネット展開方向に平行に配置されているワイヤロープの変形後のたわみ量
δ_{wy}	m	ネット展開直角方向に平行に配置されているワイヤロープの変形後のたわみ量

表 3-3 たわみ評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
ε	—	ワイヤロープのひずみ量
θ	deg	設計飛来物衝突時のネットのたわみ角
θ_x	deg	設計飛来物衝突時のネット展開方向に平行のネットのたわみ角
θ_y	deg	設計飛来物衝突時のネット展開直角方向に平行のネットのたわみ角

3.2 評価対象部位

(1) 防護ネット

a. ネット

ネットの評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「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。

設計荷重は、ネットに直接作用する。このため、設計荷重に対する評価対象部位は、ネットとする。評価対象部位について図 3-1 に示す。

b. ワイヤロープ

ワイヤロープの評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「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。

設計荷重は、ネットに作用し、ワイヤロープに作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、ワイヤロープとする。

c. 接続治具（支持部）

接続治具（支持部）の評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「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。

設計荷重は、ネットに作用し、ワイヤロープを介して接続治具（支持部）に作用するため、設計荷重に対する評価対象部位は、接続治具（支持部）であるターンバックル及びビ Shackles とする。

d. 接続治具（固定部）

接続治具（固定部）の評価対象部位は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5.1 防護ネットの許容限界」にて示している評価対象部位を踏まえて、「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。

設計荷重は、ネットに作用し、ワイヤロープ、接続治具（支持部）を介して接続治具（固定部）である隅角部固定ボルト、アイプレートに作用する。

アイプレートは、プレート本体、プレートと鋼製枠の溶接部、プレートとリブの溶接部及びリブと鋼製枠の溶接部と評価部位があるが、評価上溶接線が最も短いリブと鋼製枠の溶接部を評価対象部位とする。

隅角部固定ボルトの評価対象部位を図 3-2 に、アイプレート（溶接部）の評価対象部位を図 3-3 に示す。

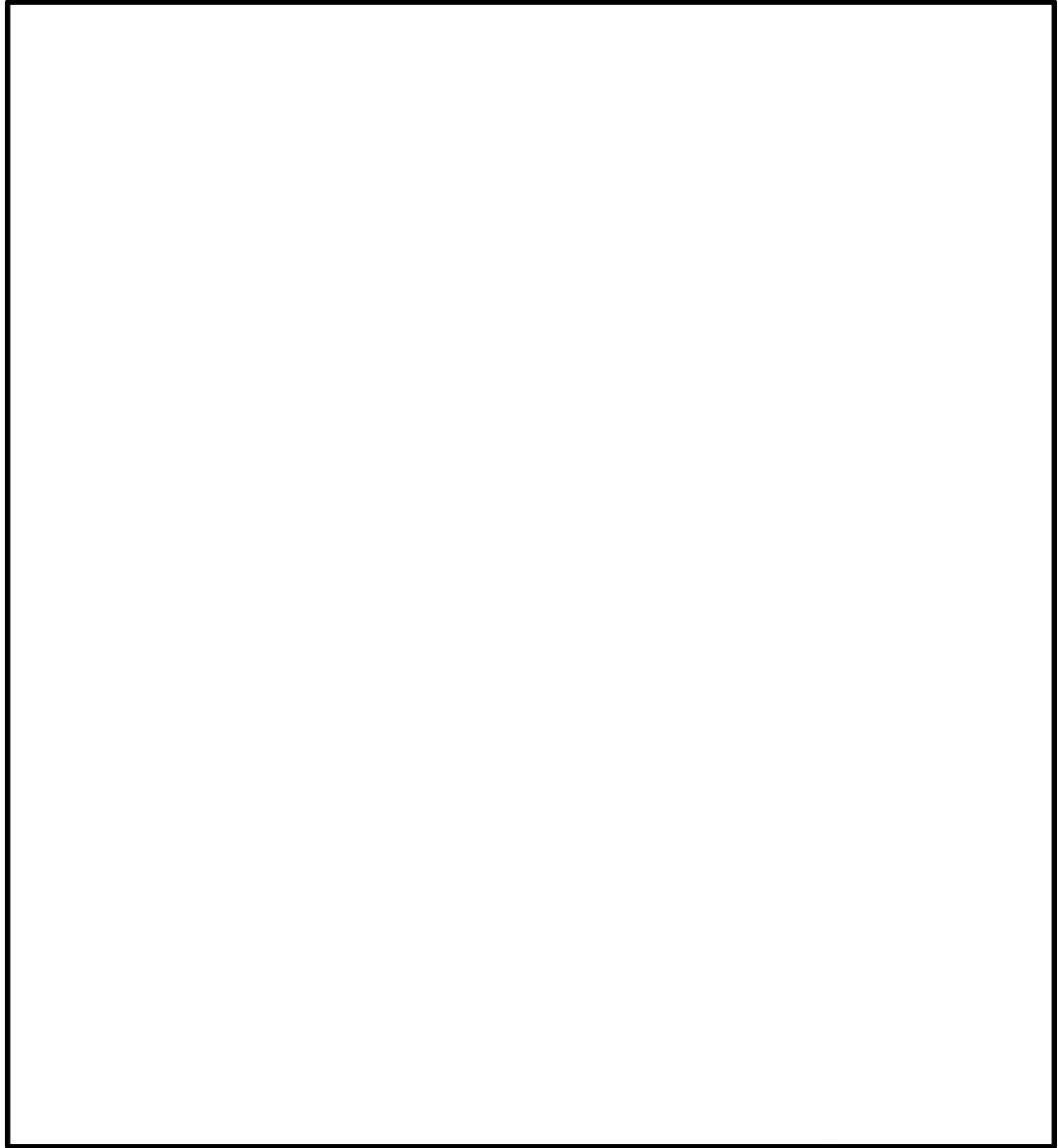


図 3-1 ネットの評価対象部位

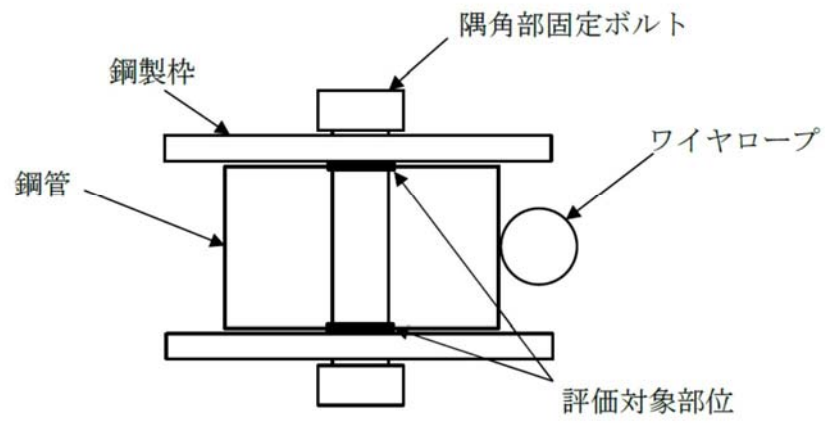


図 3-2 隅角部固定ボルトの評価対象部位

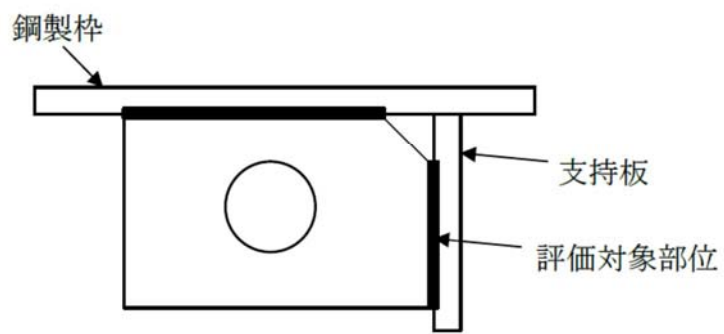


図 3-3 ワイヤロープの取付けプレート(溶接部)の評価対象部位

3.3 荷重及び荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「2.3 荷重及び荷重の組合せ」にて設定している荷重の種類を踏まえ設定する。

(1) 荷重の設定

a. 常時作用する荷重

自重を考慮する。なお、これらの荷重はネットの設置方向を考慮する。自重は鉛直下向きに発生するため、水平方向に設置した防護ネットに対し、考慮することとする。鉛直方向設置ネットについては、自重と飛来物の衝突荷重は作用する方向が異なることから考慮しない。

また、ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）の自重については、ネットから作用する荷重に比べ十分に小さいことから考慮しない。

ワイヤロープ及び接続治具（支持部、固定部）の評価時は、上載荷重としてネットの自重を考慮する。

b. 設計竜巻による荷重

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飛来物の衝撃荷重を考慮する。なお、防護ネットは閉じた空間にないため、気圧差による荷重は考慮しない。飛来物による衝撃荷重としては、衝撃荷重が大きくなる向きで飛来物がネットに衝突することを想定する。

強度評価に用いる荷重は、以下の荷重を用いる。荷重の算定に用いる竜巻の特性値を、表 3-4 に示す。

表 3-4 設計竜巻による荷重の算定に用いる竜巻の特性値

最大風速 V_D (m/s)	移動速度 V_T (m/s)	最大接線風速 V_{Rm} (m/s)	最大気圧低下量 ΔP_{max} (N/m ²)
100	15	85	8900

(a) 風圧力による荷重(W_w)

風圧力による荷重 W_w は、次式により算定する。

$$W_w = \frac{q \cdot G \cdot C \cdot A_a \cdot \phi}{1000}$$

設計用速度圧 q は、次式により算定する。

$$q = \frac{1}{2} \rho V_D^2$$

(b) 飛来物による衝撃荷重

破断評価においては、飛来物による衝撃荷重は以下のとおり算出する。

ネットの飛来物による衝撃荷重 F_a ”は時間とともに比例的に増加すると仮定すると、衝撃荷重 F_a ”は以下のとおり算出される。

$$F_a = Q \cdot t \quad \dots \textcircled{1}$$

したがって、速度 v は式①の衝撃荷重 F_a ”から、以下のとおり算出される

$$\begin{aligned} V &= -\frac{1}{m} \int_0^t F_a \, dt \\ &= -\frac{Q \cdot t^2}{2m} + V_1 \quad \dots \textcircled{2} \end{aligned}$$

さらに、設計飛来物の移動距離 d は、式②の速度 V から以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned} d &= \int_0^t V \, dt \\ &= -\frac{Q \cdot t^3}{6m} + V_1 t \quad \dots \textcircled{3} \end{aligned}$$

設計飛来物が衝突しネットのたわみが最大になる時間 t_1 におけるネットの変位は δ 、設計飛来物の速度は0であるから、式②及び③より、

$$Q \cdot t_1^2 = 2m \cdot V_1$$

$$\delta = -\frac{Q \cdot t_1^3}{6m} + V_1 t_1 \quad \dots \textcircled{4}$$

上記2式を連立し、

$$\delta = -\frac{2}{3} V_1 \cdot t_1$$

よって、

$$t_1 = \frac{3}{2V_1} \delta \quad \dots \textcircled{5}$$

以上より、時間 t_1 における衝撃荷重 F_a ”は式①及び④より、

$$F_a = \frac{2m V_1}{t_1}$$

さらに、式⑤と連立し、

$$F_a = \frac{4m V_1^2}{3 \cdot \delta} \quad \dots \textcircled{6}$$

また、時間 t_1 における設計飛来物の衝突によりネットに作用するエネルギー E_f は、衝突時の設計飛来物の運動エネルギーとして、以下より求められる。

$$E_f = \frac{1}{2} m V_1^2 \quad \dots \textcircled{7}$$

従って、式⑥及び⑦より、

$$F_a = \frac{8 E_f}{3 \cdot \delta} \quad \dots \textcircled{8}$$

(2) 荷重の組合せ

a. ネット

(a) ネット

ネット目合い寸法 40 mm のネットを 2 枚設置するため、鋼製パイプはすり抜けることはないが、鋼製パイプよりも小さい飛来物のすり抜け低減対策として、念のためにネット 2 枚の上部にさらにネット目合い寸法 40 mm のネット 1 枚を補助金網として設置していることから、これを上載荷重とし、ネットに作用する荷重として、上載荷重、ネットの自重、飛来物がネットに衝突する場合の衝撃荷重及び風圧力による荷重を組み合わせた荷重を設定する。

(b) ワイヤロープ及び接続治具（支持部）

設計飛来物がネットに衝突する場合にワイヤロープ等に作用する荷重は、ネットからワイヤロープに伝達し、その荷重を接続治具（支持部）を介して接続治具（固定部）に伝達することから、ネットに作用する荷重を評価対象部位であるワイヤロープ及び接続治具（支持部）に作用する荷重として設定する。

ワイヤロープ及び接続治具（支持部）に作用する自重及び風圧力による荷重については、ネットに作用する荷重に比べて十分小さいことから考慮しない。

(c) 接続治具（固定部）

設計飛来物がネットに衝突する場合にネット取付部への荷重は、ネットからワイヤロープ、接続治具（支持部）を介して接続治具（固定部）に作用することから、ワイヤロープからの荷重を評価対象部位である隅角部固定ボルト、アイプレートに作用する荷重として設定する。

接続治具（固定部）に作用する自重及び風圧力による荷重については、ネットに作用する荷重に比べて十分小さいことから考慮しない。

吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価における、ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）に作用する荷重及びその組合せを表 3-5 から表 3-7 に示す。

表 3-5 吸収エネルギー評価における荷重及びその組合せ

ネット		考慮する荷重		
		常時作用する荷重	飛来物による衝撃荷重	風圧力による荷重
<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋（ディーゼル発電機室屋上，原子炉棟外壁及び付属棟屋上） 海水ポンプ室周り 使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁 	水平	○ (自重+上載荷重)	○	—
	側面	—	○	○

<凡例> ○：考慮する，—：考慮しない

表 3-6 破断評価における荷重及びその組合せ(2/2)

設置エリア		評価対象部位	考慮する荷重		
			常時作用する荷重	飛来物による衝撃荷重	風圧力による荷重
<ul style="list-style-type: none"> 原子炉建屋（ディーゼル発電機室屋上，原子炉棟外壁及び付属棟屋上） 海水ポンプ室周り 使用済燃料乾式貯蔵建屋外壁 	水平	ネット	○ (自重+上載荷重)	○	—
		ワイヤロープ	○ (自重+上載荷重)	○	—
	側面	ネット	—	○	○
		ワイヤロープ	—	○	○

<凡例> ○：考慮する，—：考慮しない

3.4 許容限界

ネットの許容限界は、V-3-別添 1-2「防護対策施設の強度計算の方針」の「5. 許容限界」にて設定している許容限界を踏まえて、「3.2 評価対象部位」にて設定した評価対象部位の機能損傷モードを考慮して設定する。

吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価の許容限界を以下に示す。

(1) 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価においては、計算により算出するネットの限界吸収エネルギーがネットに作用する外力エネルギー以上であることにより、ネットが破断しないことを確認する。ネット 1 目合いの要素試験の結果から得られる目合い展開方向の限界伸び量によりネットの最大変形角が定まり、ネット最大変形角における吸収エネルギーがネットの有する限界吸収エネルギー E_{max} となる。 E_{max} に係数を考慮した値を吸収エネルギー評価の許容限界とする。

限界吸収エネルギーは、複数枚を重ね合わせたネットを一体として扱ったモデルにて算出する。また、ネットの変形及び吸収エネルギーの分布を考慮したオフセット衝突位置での吸収エネルギー評価の結果、電中研報告書を参照して、ネット最大たわみ時のネットの全長は飛来物のネットへの衝突位置によらずネット最大たわみ時展開方向の長さで一定であり、ネットに発生する張力も一定となることから、飛来物のネットへの衝突位置によらずネットから飛来物への反力も同等となり、オフセット位置への飛来物の衝突時の吸収エネルギーは中央衝突時と同等となる。したがって、吸収エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

最大吸収エネルギーは、ネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性、展開方向寸及びたわみ量から、以下のとおり算出される。吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図を図 3-4 に示す。

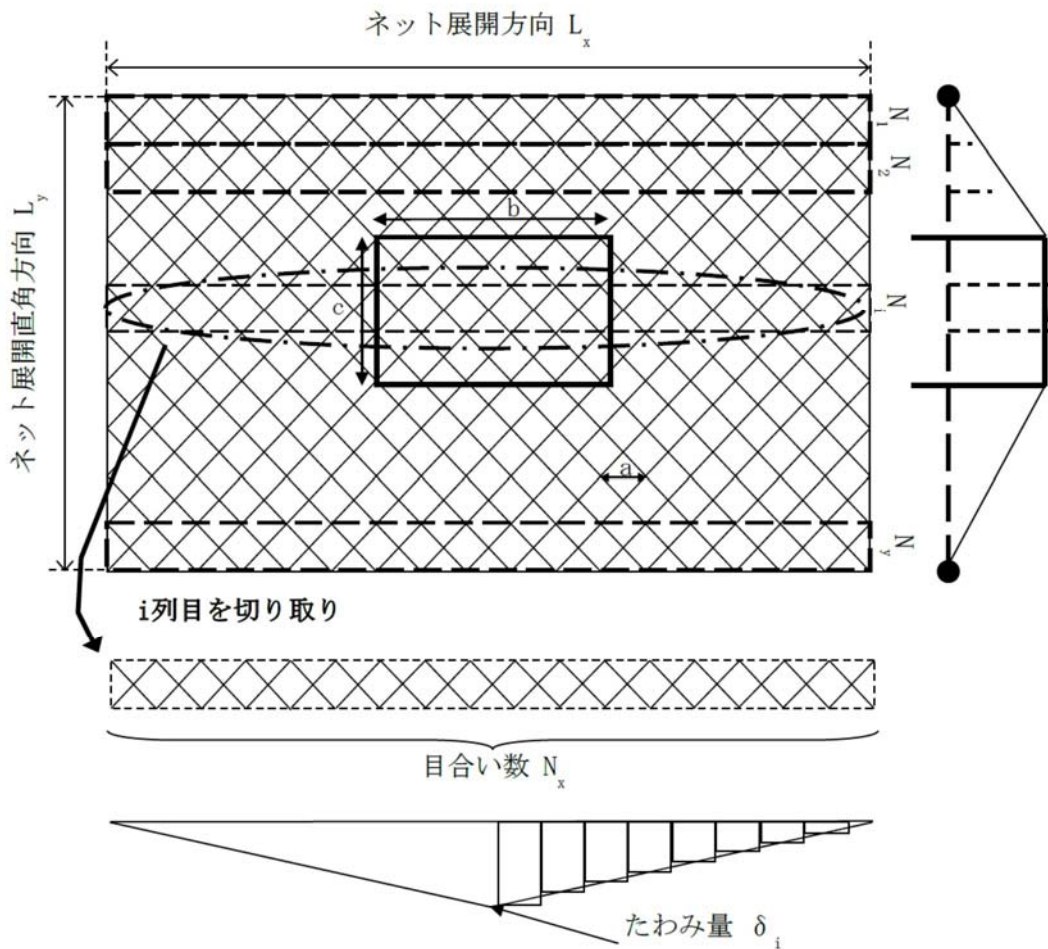


図 3-4 限界吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図

図 3-4 に示すとおりネットの展開方向に 1 目合いごとに □ で囲った形に帯状に分割し、 N_1 から N_y までの各列が分担するエネルギーを各列のたわみ量から算定し、それらを積算することによりネットの吸収するエネルギーを算出し、ネットが吸収可能な限界吸収エネルギーを算出する。

ただし、中央部の最大たわみ量が発生する列数は、飛来物の寸法及びネット目合いの対角寸法から算出されるネット展開直角方向目合い列数を考慮して設定する。飛来物の端部寸法 ($b \times c$) 及びネット目合いの対角寸法 a を考慮し、最大たわみが発生する場合のネット展開直角方向目合い列数を以下のとおり算出する。ネットの吸収エネルギーが小さくなるよう、目合い列数の算出に用いる飛来物の寸法として値の小さい寸法 c を適用し、最大たわみが生じる目合い列数を少なくすることにより、限界吸収エネルギーが小さくなるように評価する。

$$\text{ネット展開直角方向目合い列数} = \frac{c}{a}$$

評価モデルとしては、展開方向に 1 目合いごとに帯状に分割するモデルとしており、限界吸収エネルギーが小さく算出されるよう、三角形モデルとして評価を実施する。

吸収エネルギー評価の許容限界の算定フローを図 3-5 に示す。

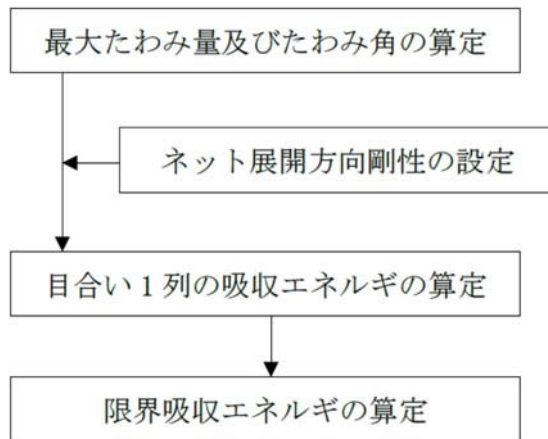
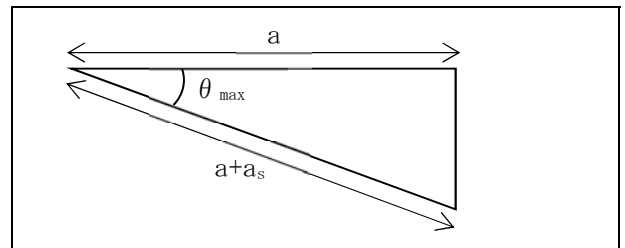


図 3-5 吸収エネルギー評価の許容限界の算定フロー

電中研報告書のネット 1 目合いの引張試験から 1 目合いの破断変位を設定する。ネット 1 目合いの破断変位から算出する最大たわみ角から、飛来物が衝突した際の列の最大たわみ量 δ_{max} は次式により算定される。

$$\delta_{max} = \frac{L_x}{2} \tan \theta_{max}$$

$$\theta_{max} = \cos^{-1} \left(\frac{a}{a + a_s} \right)$$



ネットを構成するネットの展開方向の目合い数 N_x は、ネット展開方向寸法 L_x 及びネット 1 目合いの対角寸法 a から求める。展開直角方向の目合い数 N_y は、ネット展開直角方向寸法 L_y 及びネット 1 目合いの対角寸法 a から求める。ネットを構成する 1 目合いはそれぞれ K の等価剛性を持っているため、1 列当たりバネ定数 K を持つバネを N_x 個直列に接続したものと考えることができる。そのため、1 列当たりの剛性 K_x' は

$$N_x = \frac{1000 L_x}{a}, \quad N_y = \frac{1000 L_y}{a}$$

ネット展開方向剛性

$$K_x' = \frac{K}{N_x}$$

となる。ただし、 N_x 、 N_y の算出において限界吸収エネルギーの値が小さくなるように N_x は保守的に切り上げ、 N_y は保守的に切り捨てた値を用いる。なお、電中研報告書によると補助金網は主金網 0.5 枚相当の吸収エネルギー能力を有していることが確認されていることから、補助金網は 0.5 枚として考慮し、ネット設置枚数を考慮したネット展開方向剛性 K_x は、次式により算出される。

$$K_x = K_x' (n + 0.5)$$

飛来物が衝突しなかった列のたわみ量 δ_i は、最大たわみ量 δ_{max} からネット端部のたわみ量 0 までの間を、非接触の列の数の分だけ段階的に減少していくと考える。ネットの最大たわみ量と最大たわみ角を図 3-6 に示す

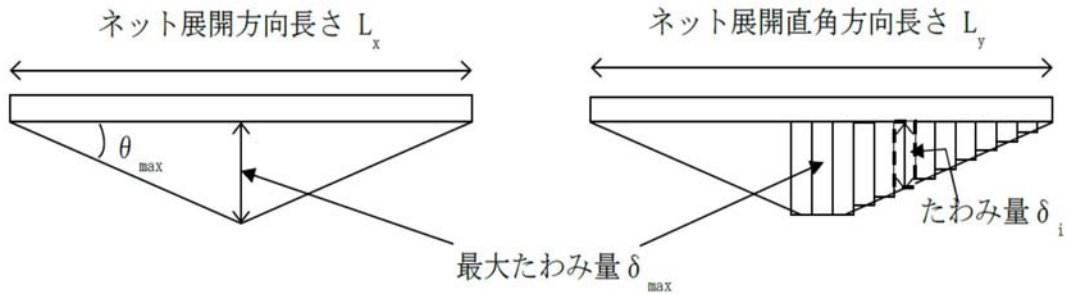


図 3-6 最大たわみ量と最大たわみ角

ネットに飛来物が衝突した際のネットにかかる張力を、ネットの剛性及びネットの伸び量から算出する。ネットに作用する力のつり合いを図 3-7 に示す。

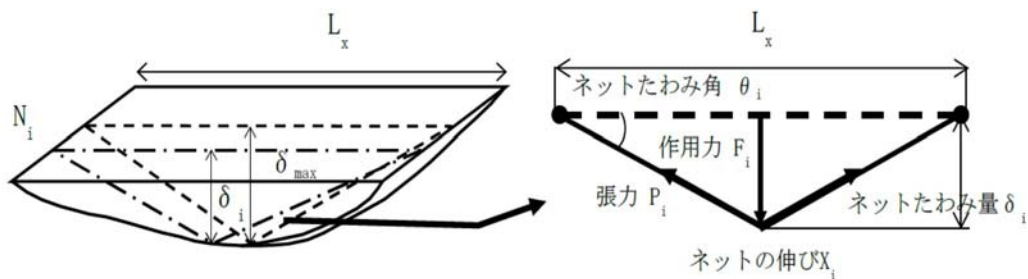


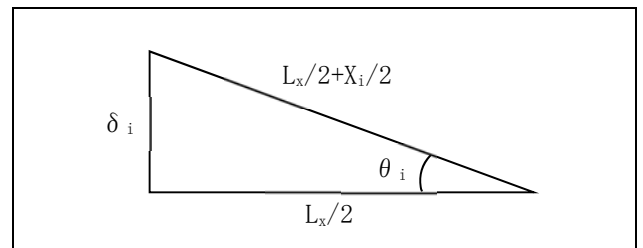
図 3-7 ネットに作用する力のつり合い

i 番目の列におけるネットの張力 P_i は、飛来物の衝突位置の左右を分割して考えると、伸び量は $X_i/2$ 、剛性は $2K_x$ となることから、

$$P_i = 2K_x \left(\frac{X_i}{2} \right) = K_x X_i$$

となる。また、作用力 F_i は変位量とたわみ量の関係から、

$$\begin{aligned} F_i &= 2P_i \sin \theta_i \\ &= 2K_x X_i \sin \theta_i \\ &= 2K_x L_x \left(\tan \theta_i - \sin \theta_i \right) \\ &= 4K_x \delta_i \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) \dots \textcircled{9} \end{aligned}$$



ネットに飛来物が衝突した際のネットにかかる作用力 F_i を積分することにより i 番目の列における吸収エネルギー E_i を次式に示す。

$$\begin{aligned}
 E_i &= \int_0^{\delta_i} F_i d\delta_i \\
 &= \int_0^{\delta_i} 4K_x \delta_i \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2}} \right) d\delta_i \\
 &= 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \dots \textcircled{10}
 \end{aligned}$$

以上から、ネット設置枚数 n を考慮した限界吸収エネルギー E_{max} は、各列の吸収エネルギー E_i を第 1 列から第 N_y 列まで積算することにより求められる。

$$\begin{aligned}
 E_{max} &= \sum_{i=1}^{N_y} E_i \\
 &= \sum_{i=1}^{N_y} \left\{ 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\} \dots \textcircled{11}
 \end{aligned}$$

(2) 破断評価

a. ネット

破断評価においては、計算により算出するネットに作用する荷重がネットの素材の持つ破断強度以下であることにより、ネットに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認する。防護ネットは、飛来物の衝突に対し、塑性変形することでエネルギーを吸収し、飛来物を捕捉することから、ネット目合いの破断試験結果を安全側に整理したものを許容限界とする。具体的には、ネット目合いに作用する引張荷重を算出するため、電中研報告書を参照してネット目合いの引張試験に基づいた 1 交点当たりの破断荷重、飛来物衝突時の周辺の交点数及び防護ネットの設置枚数から、防護ネットの許容引張荷重を算出する。

表 3-7 にネットの破断評価の許容限界を示す。

表 3-7 ネットの破断評価の許容限界

評価対象部位	許容限界
ネット	F_1

b. ワイヤロープ

ワイヤロープは、ネットと一体となって飛来物を捕捉するため、ネットと同様に塑性変形を許容することから、破断荷重を許容限界とする。具体的な破断荷重は、ネットメーカーが実施した引張試験にて確認した破断荷重よりも保守的な値である J I S に規定されている破断荷重を許容限界とする。ワイヤロープについては、その端部にワイヤグリップを設置しており、その効率 C_c に基づき、許容限界を表 3-8 のように設定する。

表 3-8 ワイヤロープの破断評価の許容限界

評価対象部位	規格値	許容限界	備考
ワイヤロープ	F_3	$C_c \cdot F_3$	ワイヤグリップの効率を考慮

c. 接続治具（支持部）

ターンバックル及びシャックルは、破断しなければネットを設置位置に保持することができ、飛来物を捕捉可能である。したがって、ワイヤロープの張力に対し、設計荷重が十分な裕度を有していることを確認する。ターンバックルについては、破断荷重よりも保守的な値である、規格値を 1.5 倍した値を許容限界として表 3-9 のように設定する。シャックルについては、試験結果を踏まえたメーカー保証値として、規格値を 2 倍した値を許容限界として設定する。

表 3-9 ターンバックル及びシャックルに適用する許容限界

評価対象部位	規格値	許容限界
ターンバックル	86.8 kN	130.2 kN
シャックル	78.4 kN	156.8 kN

d. 接続治具（固定部）

隅角部固定ボルトの破断評価においては、計算により算出する応力が隅角部固定ボルトに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を許容限界とする。具体的には、隅角部固定ボルトの許容限界は、J E A G 4601 を準用し、「その他の支持構造物」の許容限界を適用し、許容応力状態 IV_s から算出した許容応力を許容限界とする。

隅角部固定ボルトに適用する許容限界を表 3-10 に示す。

表 3-10 隅角部固定ボルトに適用する許容限界

評価対象部位	材質	温度 (°C)	考慮すべき 損傷モード	許容応力 (MPa)
隅角部固定ボルト	SCM435	40 (注1)	せん断	1.5 f_s^* (注2)
アイプレート溶接部	SM490A (注3)			

(注1) 各評価対象部位の最高使用温度を示す。

(注2) f_s^* : 許容せん断応力

J S M E S S B - 3 1 2 0 又は S S B - 3 1 3 0 に規定される値

(注3) 母材であるアイプレートの材質

(3) たわみ評価

防護ネットは、自重、設計飛来物による衝撃荷重及び設計竜巻の風圧力による荷重に対し、計算により算出する防護ネットの最大たわみ量がネットと防護対象施設の離隔距離未満であることを確認するため、ネットと防護対象施設の最小離隔距離を許容限界 L_{min} として設定する。

表 3-11 に防護ネットのたわみ評価の許容限界を示す。

表 3-11 防護ネットのたわみ評価の許容限界

評価対象項目	許容限界
防護ネットの最大たわみ量	ネットと防護対象施設の最少隔離距離(L_{min})

3.5 評価方法

防護ネットの吸収エネルギー評価、破断評価及びたわみ評価の方法を以下に示す。評価に際しては、アスペクト比及び飛来物の衝突位置の影響に対して以下を考慮した評価を実施する。

・アスペクト比の取扱い

ネットは展開方向、展開直角方向の2方向で剛性が異なり、それぞれの方向に対して伸び量の制限があるため、展開方向：展開直角方向のアスペクト比が1:1～2:1の範囲で使用し、その範囲を外れる部分はエネルギー吸収等において有効な面積とならないとして評価する。アスペクト比が1:1より小さな場合（展開方向寸法が展開直角方向寸法より短い場合）は、アスペクト比を1:1として評価する。エネルギー吸収できる量が小さく、破断荷重が大きく算出されるように設定する。アスペクト比が2:1より大きな場合（展開方向寸法が展開直角方向寸法の2倍より長い場合）は、ネット評価寸法のアスペクト比を2:1とするが、吸収エネルギー評価及びたわみ評価においては、エネルギー吸収できる量が小さく、たわみ量が大きくなるように、展開方向の1列の等価剛性は本来のネット形状の展開方向寸法に対応する値を用いて評価する。一方、破断評価においては、破断荷重が大きくなるように、展開方向寸法を短く見込んで等価剛性を設定し評価する。

アスペクト比が 1:1 より小さな場合の評価方法を表 3-12、アスペクト比が 2:1 より大きな場合の評価方法を表 3-13 に示す。

表 3-12 アスペクト比が 1:1 より小さな場合の評価方法

評価項目	吸収エネルギー	破断	たわみ
評価区画イメージ			

表 3-13 アスペクト比が 2:1 より大きな場合の評価方法

評価項目	吸収エネルギー	破断	たわみ
評価区画イメージ	<p>限界吸収エネルギー量が小さくなるようにアスペクト比を設定</p>	<p>作用する荷重が大きくなるようにアスペクト比を設定</p>	<p>たわみ量が大きくなるようにアスペクト比を設定</p>

・飛来物の衝突位置の影響

評価においては、飛来物の衝突位置として中央位置に衝突することを想定した評価を実施しており、中央位置からずれたオフセット位置に衝突する場合の影響を考慮する。

吸収エネルギー評価においては、電中研報告書を参照して、ネット最大たわみ時のネットの全長は飛来物のネットへの衝突位置によらずネット最大たわみ時展開方向の長さで一定であり、ネットに発生する張力も一定となることから、飛来物のネットへの衝突位置によらずネットから飛来物への反力も同等となり、オフセット位置への飛来物の衝突時の吸収エネルギーは中央衝突時と同等となる。従って、吸収エネルギー評価では中央衝突の場合にて評価を行う。

破断評価においては、中央位置への衝突に対してオフセット位置への衝突では、その移動距離が短くなることから、式⑧から中央位置衝突時よりもオフセット位置衝突時の方が作用する荷重が大きくなることを踏まえ、作用する荷重が大きくなるように、中央位置衝突時とオフセット位置衝突時の移動距離を踏まえた係数を作用する荷重に乗じる。ただし、ネット端部近傍に衝突する場合には、飛来物は傾き、飛来物の側面がネットや架構に接触すると考えられ、衝撃荷重は小さくなる。

たわみ評価においては、ネットの全長が飛来物の衝突位置によらず、ネット最大たわみ

時展開方向の長さで一定となるため、たわみの軌跡が楕円状となることを考慮して評価する。さらに、ネットに対して飛来物がオフセット位置へ衝突した場合においても、各ワイヤロープに対して均等に張力が発生するため、算出結果は飛来物の衝突位置によらず適用可能である。また、ワイヤロープの初期張力は小さくワイヤロープの評価において有意ではないため計算上考慮しない。

(1) 吸収エネルギー評価

吸収エネルギー評価においては、電中研評価式を参照して、ネットが異方性材料であることを考慮した吸収エネルギー算出のモデル化を行い、自重、上載荷重、風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重による外力エネルギーがネットの有する限界吸収エネルギーを下回ることを確認する。

評価においては、複数枚の重ね合わせたネットを一体として考えたモデルにて評価を実施する。

式⑩より、 E_{max} は以下のとおりである。

$$E_{max} = \sum_{i=1}^{N_y} \left\{ 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\}$$

自重、上載荷重及び風圧力による荷重によりネットに作用する荷重 F_w は、ネット全体に等分布荷重として作用するものであるため、実現象に合わせネット展開直角方向に対しては荷重が等分布となるよう作用させる。一方、ネット展開方向に対しては、評価モデル上の制約により均一に荷重を作用させることが困難であるため、ネットに作用する外力エネルギーが保守的に大きくなるよう、 F_w が全てネット展開方向 L_x の中央に作用したとして、ネットにかかる作用力の式を用いて展開方向の1列当たりの自重、上載荷重及び風圧力による荷重によりネットが受ける外力エネルギーを算出し、列数倍することでネット全体が自重、上載荷重及び風圧力による荷重により受ける外力エネルギーを算出する。

評価条件である K_x 及び L_x 並びに自重、上載荷重及び風圧力による荷重から算出する F_w を式⑨に代入して数値計算を実施することにより、自重、上載荷重及び風圧力による荷重によるたわみ量 δ_a が算出される。

$$F_w = N_y \times 4K_x \delta_a \left(1 - \frac{L_x}{\sqrt{4\delta_a^2 + L_x^2}} \right)$$

但し、 $F_w = P_w + W_w$

上式にて算出した δ_a を式⑩において、展開方向の1列当たりの自重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギーを列数倍する以下の式に代入することにより、自重及び風圧力による荷重によりネットが受けるエネルギー E_w が算出される。

$$E_w = N_y \times \left\{ 2K_x \delta_a^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_a^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\}$$

設計飛来物の衝突によりネットに作用するエネルギー E_f は、衝突時の設計飛来物の運動エネルギーとして、以下より求められる。

$$E_f = \frac{1}{2} m V^2$$

飛来物の飛来速度は、鉛直の飛来速度にて算出する。斜め方向から衝突した場合の飛来速度の水平方向速度成分及び鉛直方向速度成分は、評価に用いる鉛直最大飛来速度を下回る。また、飛来物がネットに対して斜め方向から衝突する場合は、飛来物が衝突後に回転し、ネットと飛来物の衝突面積が大きくなるため、ネットに局部的に作用する荷重は小さくなる。したがって、飛来物の衝突方向は、ネットに局部的に作用する荷重が大きくなるようにネットに対して垂直に入射するものとし、その飛来速度は鉛直最大飛来速度を用いる。

以上から、ネット設置枚数 n を考慮したネットに作用する全外力エネルギー E_t が以下のとおり算出される。

$$E_t = E_f + E_w \cdots \cdots \textcircled{12}$$

(2) 破断評価

破断評価においては、電中研の評価式を参照して、ネットに作用する飛来物による衝撃荷重が防護ネットを構成する部材の局部的な耐力未満であることを確認する。

評価に際しては、「2.3 評価の方針」のとおり、設計飛来物の衝突位置の影響として、オフセット衝突する場合の影響を考慮する。以下にオフセット衝突する場合の影響を係数として考慮した発生値の割増係数の設定方法を示す。

・オフセット衝突を考慮する係数

設計飛来物の移動距離が最も小さくなる場合のオフセット衝突を考えると、中央衝突と比較して δ が0.82倍となることから、中央衝突に比べ衝撃荷重が1.22倍となる。

ネット端部近傍に衝突する場合には、飛来物は傾き、飛来物の側面がネットや架構に接触すると考えられ、衝撃荷重は小さくなる。

また、アスペクト比についての扱いは吸収エネルギー評価同様に表 3-12, 表 3-13 のとおりとする。

a. ネット

ネットに飛来物が衝突した後、ネットのたわみが増加し、飛来物の運動エネルギーを吸収する。ネットに発生する飛来物による衝撃荷重はネット変位の増加に伴い大きくなり、最大変位発生時に最大値を示すため、破断評価では最大変位発生時の衝撃荷重を用いる。

最大変位発生時において、飛来物の衝突によりネットの目合いはネット展開方向に引張荷重を受けることから、破断評価としてネット目合いの引張荷重評価を実施する。

ネットの破断評価の評価フローを図 3-8 に示す。

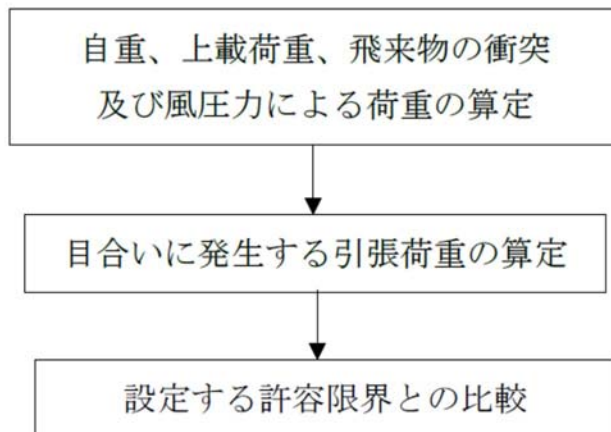


図 3-8 ネットの破断評価フロー

(a) 評価モデル

ネットに飛来物が衝突した際に生じる衝撃について評価を実施する。ネット構造及び飛来物の大きさを考慮し、ネットの目合い数が最小となるモデル化を行う。衝突位置周辺の目合い数はネット 1 枚あたり n_1 点となる。評価モデルを図 3-9 に示す。

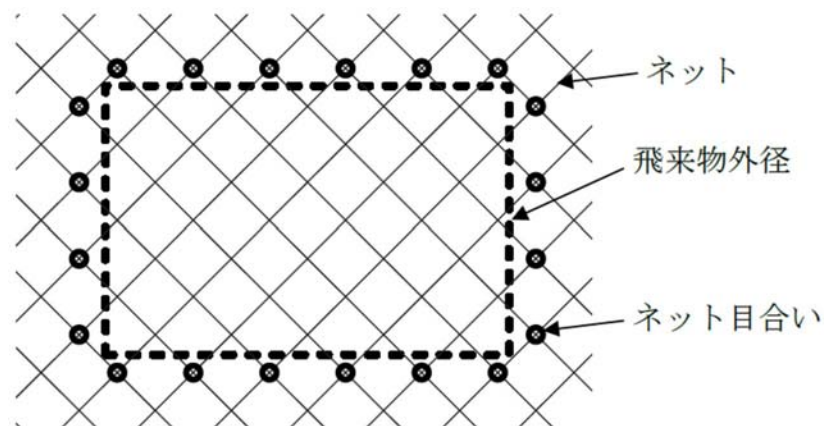


図 3-9 破断評価モデル

(b) 評価方法

ネットに飛来物が衝突した際に生じる衝撃荷重が、ネットの破断荷重以下であり、ネット目合いに破断が生じないよう十分な余裕を持った強度を有することを確認する。

ここで、ネットに飛来物が衝突した際に生じる衝撃荷重の最大値 F_a は、「3.3 荷重及び荷重の組合せ」にて算出した式⑧のたわみ量と飛来物による衝撃荷重の関係式を用いて算出する。

飛来物の衝突による荷重に加え、自重、上載荷重及び風圧力による荷重を考慮するため、 E_f を E_t と置き換えて、式⑧より、

$$F_a = \frac{8E_f}{3 \cdot \delta}$$

となる。

ここで、オフセット衝突による衝撃荷重の増加分による係数1.22を考慮し、衝撃荷重の最大値 F_a' は

$$F_a' = F_a \times 1.22$$

と算出される。

b. ワイヤロープ

設計飛来物による衝撃荷重については、「3.3 荷重及び荷重の組合せ」において算出した飛来物が衝突する場合のネットごとに作用する衝撃荷重の最大値 F_a を考慮する。

防護ネットは、電中研報告書と同様に2本のワイヤロープをL字に設置し、さらにワイヤロープが接続用の治具により拘束されない構造としており、電中研報告書において実施されている衝撃試験における実測値が包絡されることを確認している評価式を用いて評価を実施する。ネットに発生する荷重のつり合いのイメージ図を図3-10に示す。

自重、上載荷重、飛来物による衝撃荷重及び風圧力による荷重によりネットに作用する衝撃荷重の最大値 F_a が集中荷重として作用するとしてモデル化すると、飛来物が衝突する場合のネットに発生する張力の合計の最大値 T' は、図3-10のネット及びワイヤロープに発生する力のつり合いより以下のとおり算出される。

$$T' = \frac{F_a'}{2 \sin \theta}$$

但し、 θ は以下の式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2\delta}{L_x}$$

補助金網を除くネット設置枚数を考慮すると、1枚のネットのワイヤロープ1本に発生する張力の最大値 T_1' は、

$$T_1' = \frac{T'}{2} \cdot \frac{1}{n} = \frac{F_a'}{4n \sin \theta}$$

と算出される。

さらに、ワイヤロープが支持する防護ネットの枚数を考慮する。上段のワイヤロープには補助金網が設置されており、2枚のネットを支持しているため、下段のワイヤロープより大きな荷重が作用することとなるため、補助金網設置に伴う荷重の分担を考慮する。

電中研報告書によると、補助金網を設置している上段のワイヤロープには、補助金網を設置していないワイヤロープに比べ、1.5倍の張力が発生していることが確認されている。このことから、上段のワイヤロープは、下段のワイヤロープに比べ、補助金網の影響により1.5倍の張力が発生しているものとし、その影響を考慮する。

補助金網を支持しているワイヤロープに発生する張力 T_1'' は、

$$T_1'' = \frac{T'}{2} = \frac{F_a'}{4 \cdot \sin \theta} \cdot \left(\frac{1.5}{1.5+1} \right)$$

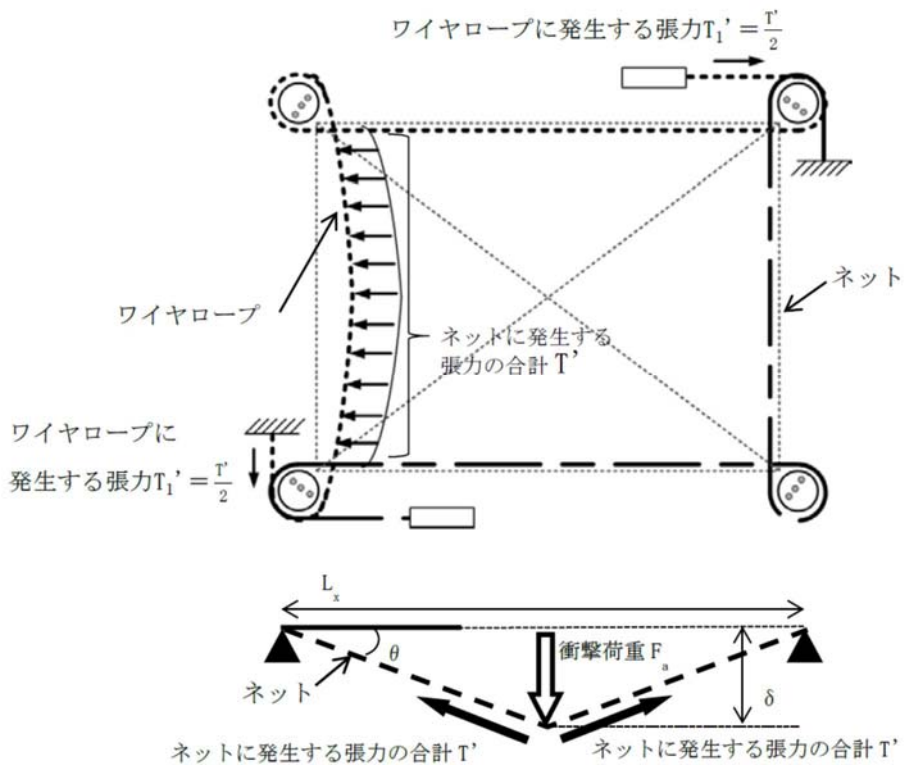


図 3-10 ネット及びワイヤロープに発生する力のつり合い(ネット平面図及び断面図)

c. 接続治具（支持部）

(a) ターンバックル

ターンバックルの評価については、以下の評価を実施する。

ターンバックルに作用するワイヤロープに発生する張力の最大値が、ターンバックルの設計荷重以下であることを確認する。

(b) シャックル

シャックルの評価については、以下の評価を実施する。

シャックルに作用するワイヤロープに発生する張力の最大値が、シャックルの設計荷重以下であることを確認する。

d. 接続治具（固定部）

(a) 隅角部固定ボルト

鋼製枠の 4 隅に設置した隅角部固定ボルトは、ワイヤロープの荷重を、鋼管を介して受けることとなる。

ここで、ワイヤロープはたわみにより鋼管に対して θ_{w1} 、 θ_{w2} のたわみ角を有することから、隅角部固定ボルトへ作用する荷重にはこのたわみ角を考慮する。

鉛直方向成分は、水平方向成分のように隅角部固定ボルトに対する有意な荷重ではないことから、面内荷重で評価する。

ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係を図 3-11 に示す。

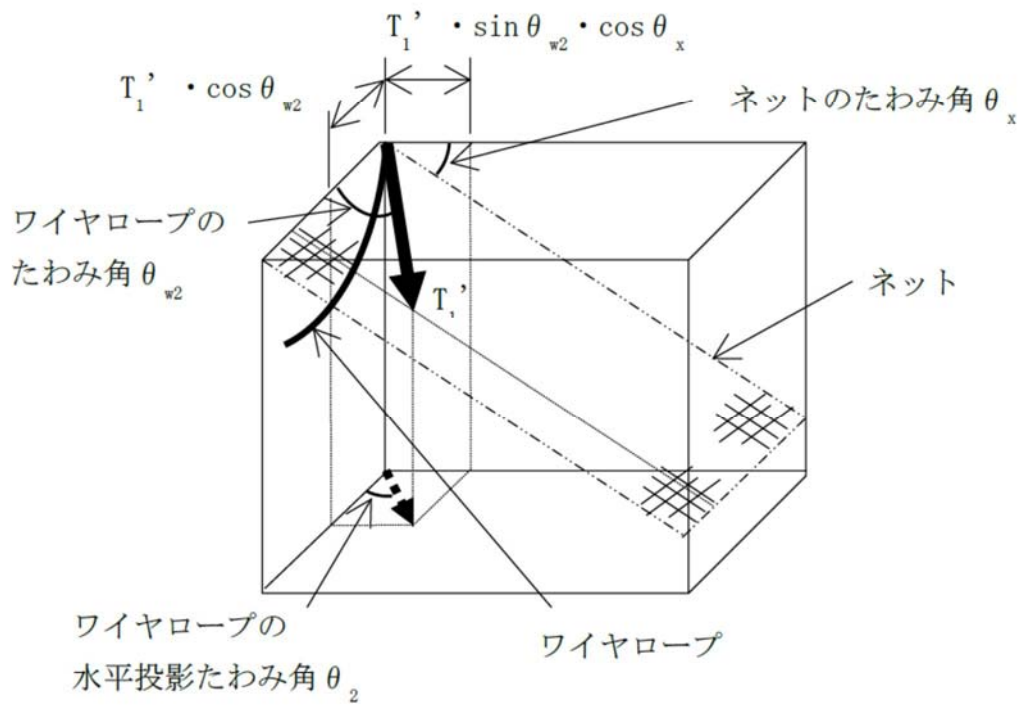
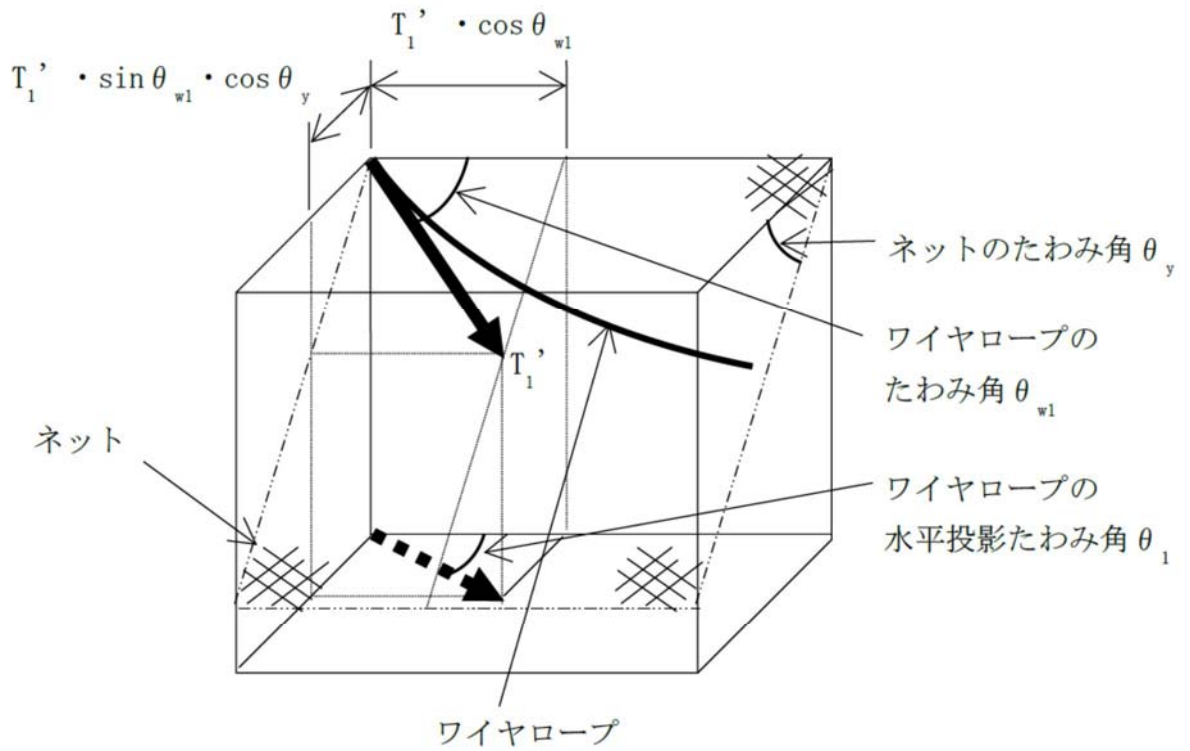


図 3-11 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

隅角部固定ボルトの荷重状態を図 3-12 に示す。

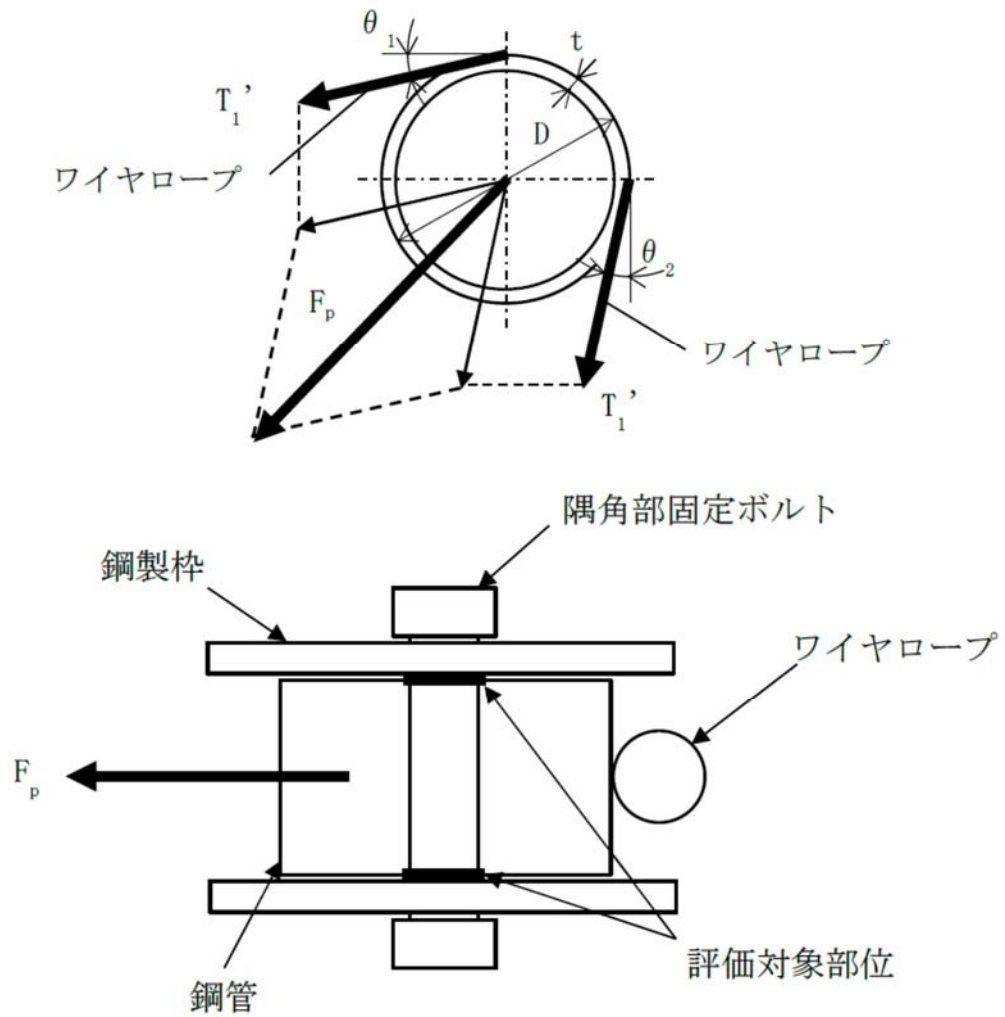


図 3-12 隅角部固定ボルトの荷重状態

図 3-12 より、隅角部固定ボルトへ作用する荷重 F_p は、

$$F_p = \sqrt{\left(T_{1'} + T_{1'} \cdot \cos(90 - \theta_1 - \theta_2)\right)^2 + \left(T_{1'} \cdot \sin(90 - \theta_1 - \theta_2)\right)^2}$$

隅角部固定ボルトに発生するせん断応力 τ_s は、

$$\tau_s = \frac{F_p \cdot n}{2 \cdot 3 \cdot A_b}$$

e. アイプレート

飛来物が防護ネットに衝突する場合にネット取付部への衝撃荷重 T_1' は、ワイヤロープの引張荷重として作用し、隅肉溶接部にはせん断応力が発生するため、せん断応力評価を実施する。アイプレートの溶接部を図 3-13 に示す。

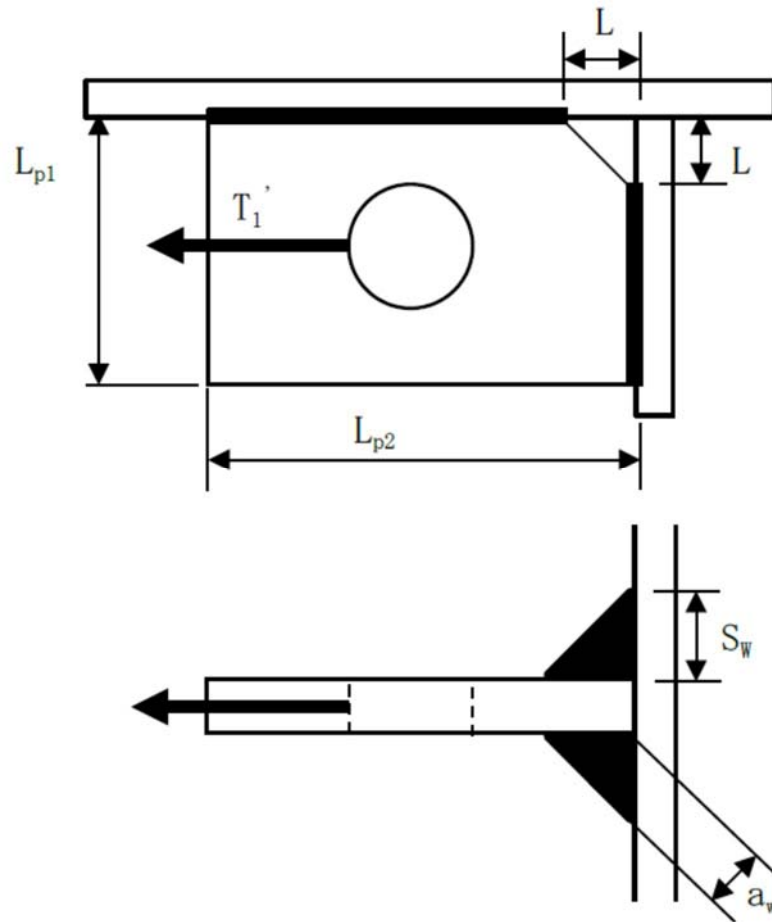


図 3-13 アイプレート溶接部

溶接部の有効脚長 L_{pw} は、

$$L_{pw} = L_{p1} - L - 2s + L_{ps} - L - 2S$$

溶接部に発生するせん断応力 τ_w は、

$$\tau_w = \frac{T}{2a_w L_{pw}}$$

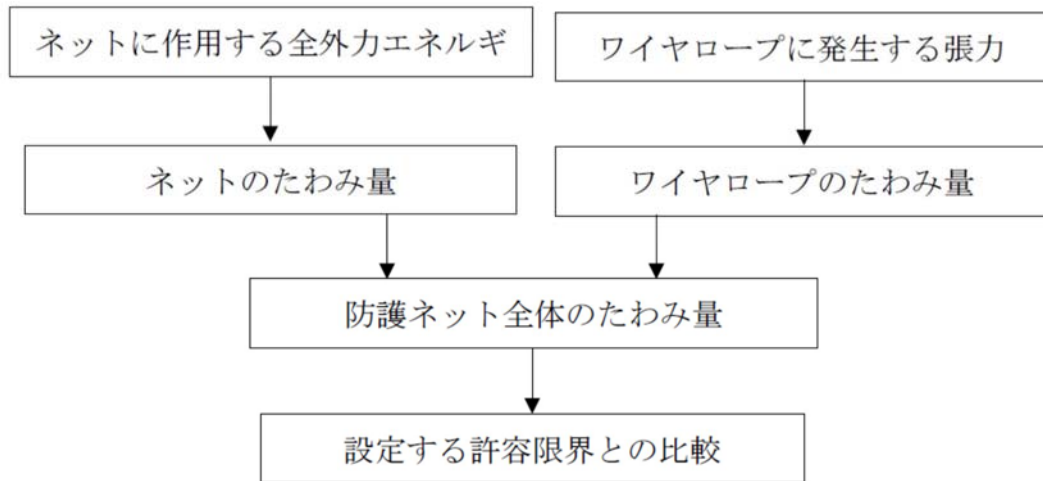
ここで溶接部ののど厚 a_w は以下の式で求められる。

$$a_w = \frac{S_w}{\sqrt{2}}$$

(3) たわみ評価

たわみ評価においては、吸収エネルギー算出モデルを用い、飛来物の運動エネルギー、風圧力による荷重、自重及び上載荷重によるエネルギーを吸収するために必要となるネットのたわみ量を導出する。また、ワイヤロープ張力に応じたワイヤロープのたわみ量についても算出し、離隔距離未満であることを確認する。

たわみ評価の評価フローを図 3-14 に示す。



第 3-14 図 たわみ評価の評価フロー

a. ネット

ネットの変位量と吸収エネルギーとの関係は式⑩のとおり、以下の式にて導出される。

$$E_i = 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \dots \textcircled{10}$$

ここで、 K_x 及び L_x は定数であるため、

$$\sum_{i=1}^{N_y} E_i = E_t$$

とすることで、ネットへの付加エネルギーに応じたたわみ量 δ を算出することができる。

b. ワイヤロープたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量の算出

ワイヤロープのたわみ量は、ネット張力によりワイヤロープが放物線状に変形するとし、算出したワイヤロープに発生する張力及びワイヤロープの引張試験結果（荷重－ひずみ曲線）から変形後のワイヤロープ長さを求めることで導出する。

また、ワイヤロープの初期張力は小さくワイヤロープのたわみ量の算出において有意ではないため計算上考慮しない。

式⑬に示す計算方法を用いて算出されるワイヤロープに発生する張力からワイヤロープのひずみ量 ε が算出される。したがって、ワイヤロープの変形による伸び量 δ' は、以下のとおり算出される。

$$\delta' = L_z \cdot \varepsilon$$

また、設計飛来物の衝突によりワイヤロープが図 3-15 のとおり放物線状に変形すると、変形後のワイヤロープ長さ S は放物線の弦長の式を用いて以下のとおり表される。

$$S = \frac{1}{2} \sqrt{L_b^2 + 16 \delta_w^2} + \frac{L_b^2}{8 \delta_w} \ln \left(\frac{4 \delta_w + \sqrt{L_b^2 + 16 \delta_w^2}}{L_b} \right)$$

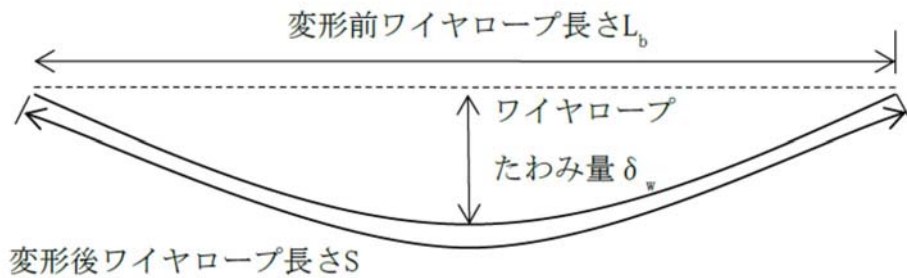


図 3-15 ワイヤロープ変形図

ワイヤロープたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量 δ_t の算出を行う。ネット及びワイヤロープ変形図を図 3-16 に示す。

ネット展開方向と平行に配置されているワイヤロープの変形後の長さを S_x 、ネット展開直角方向に配置されているワイヤロープの変形後の長さを S_y とすると、 S_x 及び S_y はそれぞれ δ_{wx} 、 δ_{wy} の関数であり、ワイヤロープ伸び量 δ' は、

$$\delta' = \{S_x(\delta_{wx}) - L_x\} + \{S_y(\delta_{wy}) - L_y\}$$

と表される。

また、ネット展開方向と平行な断面から見たたわみ量と、ネット展開方向と直交する断面から見たたわみ量は等しいことから、ワイヤロープたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量 δ_t は、

$$\delta_t = \sqrt{\left(\delta_{wy} + \frac{L_x}{2 \cos \theta_x}\right)^2 - \left(\frac{L_x}{2}\right)^2} = \sqrt{\left(\delta_{wx} + \frac{L_y}{2 \cos \theta_y}\right)^2 - \left(\frac{L_y}{2}\right)^2}$$

と表される。

ここで、 θ_x 及び θ_y は、「3.5.3 (1) ネット」で算出したネットに作用する全外力エネルギー E_t に応じたたわみ量 δ より、以下の式で求められる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta}{L_x} \right) \quad \theta_y = \tan^{-1} \left(\frac{2 \cdot \delta}{L_y} \right)$$

したがって、ワイヤロープたわみ量 δ_{wx} 及び δ_{wy} を導出することができ、同時にワイヤロープたわみ量を含めた防護ネット全体のたわみ量 δ_t が算出される。

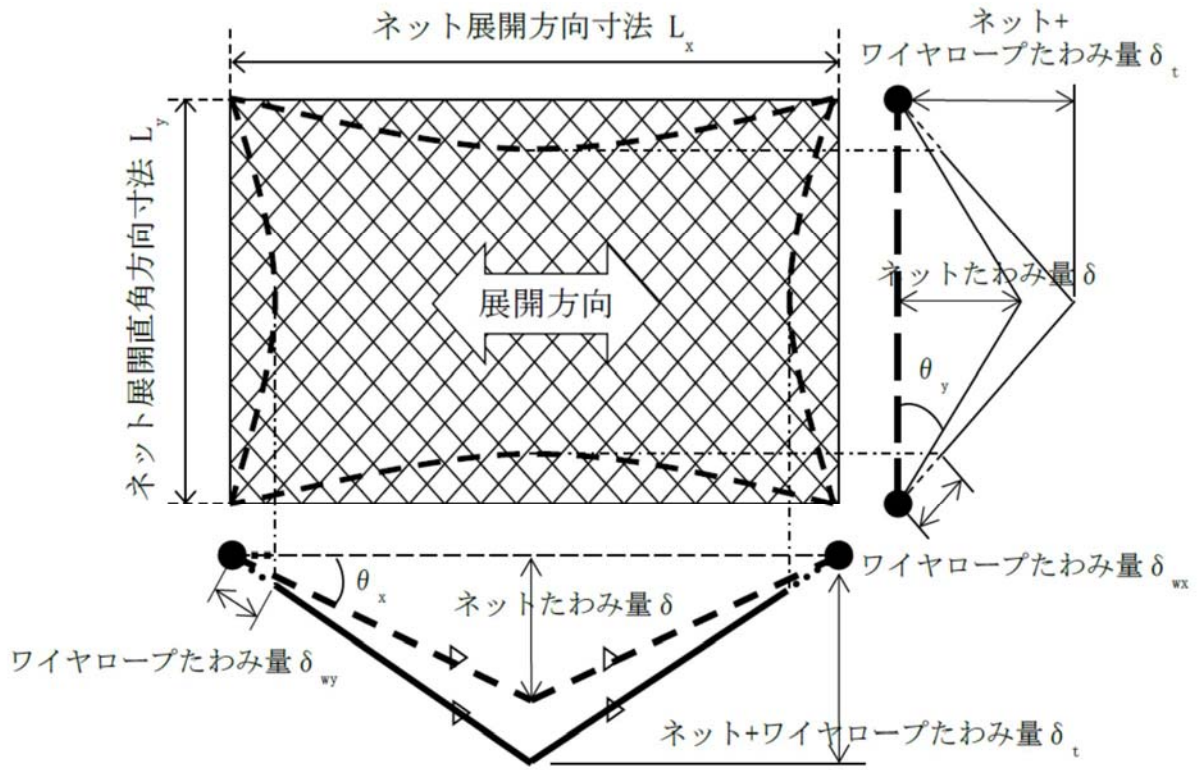


図 3-16 ネット及びワイヤロープ変形図

4. 評価条件

4.1 荷重条件

飛来物による衝撃荷重の算定条件を表 4-1 に、風圧力による荷重の算定条件を表 4-2 に示す。

表 4-1 飛来物による衝撃荷重の算定条件

飛来物	b × c (mm)	m (kg)	V ₁ (m/s)	
			水平方向	鉛直方向
鋼製材	300 × 200	135	51	34

表 4-2 風圧力による荷重の算定条件

C (-)	G (-)	ρ (kg/m ³)	V _D (m/s)
1.2	1.0	1.22	100

4.2 防護ネット仕様

(1) ネット仕様

ネット仕様を表 4-3 に示す。

表 4-3 ネット仕様

項目	記号	仕様	備考
ネット材料	-	硬鋼線材 (JIS G 3548)	—
ネット目合い寸法	-	40 mm	電中研レポート より
ネット1目合いの対角寸法	a	56.6 mm	
ネット1目合いの破断変位	a _s	13.9 mm	
ネット素線の直径	d'	4 mm	
ネット1目合いの破断荷重	F ₁	17.2 kN	
ネット1目合いの等価剛性	K	1239 kN/m	
衝突箇所周辺の ネット1枚当たりの目合い数	n ₁	20 個	
ネットの素線の引張強度	σ'	1400 MPa	
破断時たわみ角	θ _{max}	36.4 deg	
ネットの単位面積当たりの質量	m _N	5.7 kg/m ²	
ネットの充実率	φ	0.44 (3 枚 ^{※2})	計算値 ^{※1}

※1 φ = 1 - ((ネット目合い寸法)² / (ネット目合い寸法 + ネット素線径)²)ⁿ

※2 補助金網を含む

(2) 防護ネット構成

a. 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設

非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設の防護ネットの構成を表 4-4 に示す。

表 4-4 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設の防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
1	4.100	×	2.585	2 枚 (1 枚)
2	3.680	×	3.130	2 枚 (1 枚)
3	5.030	×	2.455	2 枚 (1 枚)
4	5.030	×	2.727	2 枚 (1 枚)
5	4.947	×	3.005	2 枚 (1 枚)
6	4.947	×	2.427	2 枚 (1 枚)

b. 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の防護ネットの構成を表 4-5 に示す。

表 4-5 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
1	2.880	×	2.380	2 枚 (1 枚)
2	3.055	×	2.380	2 枚 (1 枚)
3	3.130	×	2.880	2 枚 (1 枚)
4	3.130	×	3.055	2 枚 (1 枚)
5	3.160	×	2.880	2 枚 (1 枚)
6	3.160	×	3.055	2 枚 (1 枚)
7	5.230	×	2.880	2 枚 (1 枚)
8	5.230	×	3.055	2 枚 (1 枚)

() 内は補助金網

c. 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の防護ネットの構成を表 4-6 に示す。

表 4-6 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
1	3.19	×	3.02	2枚 (1枚)
2	3.19	×	3.07	2枚 (1枚)
3	3.49	×	3.02	2枚 (1枚)
4	3.49	×	3.07	2枚 (1枚)
5	3.57	×	3.02	2枚 (1枚)
6	3.57	×	3.07	2枚 (1枚)
7	4.78	×	3.57	2枚 (1枚)
8	4.78	×	3.57	2枚 (1枚)
9	3.13	×	3.32	2枚 (1枚)
10	3.13	×	3.52	2枚 (1枚)

() 内は補助金網

d. 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の防護ネットの構成を表 4-7 に示す。

表 4-7 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
1	3.665	×	2.850	2枚 (1枚)

() 内は補助金網

e. 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の防護ネットの構成を表 4-8 に示す。

表 4-8 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の防護ネットの構成

No.	ネットサイズ (m)			ネット枚数
	L _x	×	L _y	
1	3.43	×	2.68	2枚 (1枚)

() 内は補助金網

- (3) ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル
評価における条件を以下に示す。

a. ワイヤロープ

ワイヤロープの仕様を表 4-9 に示す。

表 4-9 ワイヤロープの仕様

評価対象部位	仕様	径	破断荷重 (kN)	ワイヤグリップ効率
ワイヤロープ	7×7	φ 16	165	0.8

(注 1) J I S G 3549 の破断強度

(注 2) J I S B 2809 及び (社) 日本道路協会「小規模吊橋指針・同解説」

b. ターンバックル

ターンバックルの仕様を表 4-10 に示す。

表 4-10 ターンバックルの仕様

評価対象項目	規格値	許容限界
ターンバックル	86.8 kN	130 kN

c. シャックル

シャックルの仕様を表 4-11 に示す。

表 4-11 シャックルの仕様

評価対象項目	規格値	許容限界
シャックル	78.4 kN	156 [※] kN

※：試験結果に基づくメーカー保証値

d. 接続用の治具

評価における条件を以下に示す。

(a) 隅角部固定ボルト

隅角部固定ボルトの評価条件を表 4-12 に示す。

表 4-12 隅角部固定ボルトの評価条件

評価対象項目	ボルト径	材質	ボルト本数
隅角部固定ボルト	M27	SCM435	3本

(b) アイプレート

アイプレートの評価条件を表 4-13 に示す。

表 4-13 アイプレートの評価条件

評価対象項目	アイプレート 母材	プレート長さ		面取り長さ	溶接脚長
		L_{p1} (mm)	L_{p2} (mm)	L (mm)	S_w (mm)
取付けプレート	SM490A	90	100	30	7

5. 強度評価結果

5.1 ネットに作用する外力エネルギー評価

竜巻発生時のネットに作用する外力エネルギー評価結果を表 5-1 から表 5-5 に示す。

すべての防護ネットにおいて、作用する全エネルギー(E_t)は、防護ネットの限界吸収エネルギー(E_{max})を下回っている。

(1) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設

表 5-1 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設の
外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
1	80	242
2	80	249
3	80	277
4	80	306
5	190	325
6	187	263

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-2 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
1	80	156
2	80	166
3	80	199
4	80	212
5	80	199
6	80	213
7	80	332
8	80	355

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-3 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
1	80	210
2	80	217
3	80	227
4	80	235
5	80	234
6	80	242
7	80	357
8	80	367
9	80	223
10	80	239

(4) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-4 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
1	183	231

(5) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-5 用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
1	182	208

5.2 破断評価

(1) ネット

竜巻による飛来物衝突時のネット目合いの破断評価結果を表 5-6 から表 5-10 に示す。

すべての防護ネットにおいて、飛来物による衝撃荷重(F_2)は、防護ネットの許容荷重(F_1)を下回っている。

a. 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設

表 5-6 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設の破断評価結果

No.	F_2 (kN)	F_1 (kN)
1	231	1032
2	258	1032
3	196	1032
4	201	1032
5	410	1032
6	367	1032

d. 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-7 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の破断評価結果

No.	F_2 (kN)	F_1 (kN)
1	293	1032
2	280	1032
3	287	1032
4	293	1032
5	283	1032
6	290	1032
7	196	1032
8	201	1032

e. 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-8 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の破断評価結果

No.	F ₂ (kN)	F ₁ (kN)
1	287	1032
2	287	1032
3	266	1032
4	269	1032
5	263	1032
6	263	1032
7	219	1032
8	221	1032
9	277	1032
10	266	1032

f. 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-9 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の破断評価結果

No.	F ₂ (kN)	F ₁ (kN)
1	469	1032

g. 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-10 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の破断評価結果

No.	F ₂ (kN)	F ₁ (kN)
1	482	1032

(2) ワイヤロープ、ターンバックル及びシャックル

a. ワイヤロープ

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-11 から表 5-15 に示す。

ワイヤロープが負担する荷重(T_1')は、ワイヤロープの許容荷重(P)を下回っている。

(a) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設

表 5-11 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設
のワイヤロープ強度評価結果

No.	T_1' (kN)	P (kN)
1	72	132
2	81	132
3	63	132
4	66	132
5	119	132
6	99	132

(b) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-12 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設のワイヤロープ強度評価結果

No.	T_1' (kN)	P (kN)
1	84	132
2	81	132
3	86	132
4	89	132
5	85	132
6	88	132
7	65	132
8	68	132

(c) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-13 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設のワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1'}$ (kN)	P (kN)
1	87	132
2	87	132
3	82	132
4	84	132
5	82	132
6	82	132
7	74	132
8	75	132
9	85	132
10	83	132

(d) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-14 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設のワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1'}$ (kN)	P (kN)
1	124	132

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-15 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のワイヤロープ強度評価結果

No.	$T_{1'}$ (kN)	P (kN)
1	125	132

b. ターンバックル

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-16 から表 5-20 に示す。
発生荷重は、ターンバックルの許容限界を下回っている。

(a) 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設

表 5-16 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設の
ターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	72	130
2	81	130
3	63	130
4	66	130
5	119	130
6	99	130

(b) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-17 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設のターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	84	130
2	81	130
3	86	130
4	89	130
5	85	130
6	88	130
7	65	130
8	68	130

(c) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-18 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設のターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	87	130
2	87	130

3	82	130
4	84	130
5	82	130
6	82	130
7	74	130
8	75	130
9	85	130
10	83	130

(注1) ワイヤロープ張力である T_1' (第 5-3 表参照) の値を示す。

(d) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-19 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設のターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	124	130

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-20 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	125	130

c. シャックル

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-21 から表 5-25 に示す。

発生荷重は、シャックルの許容限界を下回っている。

(a) 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設

表 5-21 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設のシャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	72	156
2	81	156
3	63	156
4	66	156
5	119	156

6	99	156
---	----	-----

(b) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-22 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設のシャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	84	156
2	81	156
3	86	156
4	89	156
5	85	156
6	88	156
7	65	156
8	68	156

(c) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-23 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設のシャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	87	120
2	87	120
3	82	120
4	84	120
5	82	120
6	82	120
7	74	120
8	75	120
9	85	120
10	83	120

(注 1) ワイヤロープ張力が最大である T_1' (表 5-3 参照) の値を示す。

(d) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-24 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設のシャックル強度評価結果

No.	発生荷重	許容限界
-----	------	------

	(kN)	(kN)
1	124	156

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-25 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のシャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	125	156

(3) 接続用の治具

a. 隅角部固定ボルト

接続用の治具のうち、隅角部固定ボルトの竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-26 から表 5-30 に示す。

ワイヤロープが負担する荷重(T_1')による発生応力は、隅角部固定ボルトの許容限界を下回っている。

(a) 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設

表 5-26 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設の接続用の治具(隅角固定ボルト)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	69	363
2	78	363
3	60	363
4	63	363
5	116	363
6	95	363

(b) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-27 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の接続用の治具(隅角固定ボルト)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	81	363
2	78	363
3	84	363
4	87	363
5	82	363
6	86	363
7	62	363
8	65	363

(c) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-28 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の接続用の治具(隅角固定ボルト)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	85	363
2	85	363
3	79	363
4	81	363
5	79	363
6	79	363
7	72	363
8	73	363
9	82	363
10	80	363

(d) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-29 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の接続用の治具
(隅角固定ボルト)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	122	363

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-30 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の接続用の治具
(隅角固定ボルト)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	122	363

b. アイプレート溶接部

接続用の治具のうち、アイプレート溶接部の竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表 5-31 から表 5-35 に示す。

ワイヤロープが負担する荷重(T_1')による発生応力は、アイプレート溶接部の許容限界を下回っている。

(a) 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設

表 5-31 非常用ディーゼル発電機室ルーフトファン竜巻防護対策施設の接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	73	135
2	82	135
3	64	135
4	67	135
5	120	135
6	100	135

(b) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-32 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設の接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	85	135
2	82	135
3	87	135
4	90	135
5	86	135
6	89	135
7	66	135
8	69	135

(c) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-33 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設の接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	88	135
2	88	135
3	83	135
4	85	135
5	83	135
6	83	135
7	75	135
8	76	135
9	86	135
10	84	135

(d) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-34 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設の接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	125	135

(e) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-35 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設の接続用の治具(アイプレート溶接部)の強度評価結果

No.	発生応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
1	126	135

5.3 たわみ評価

竜巻による飛来物衝突時の強度評価結果を表5-36から表5-40に示す。

すべての防護ネットにおいて、防護ネットへの飛来物衝突による防護ネット全体のたわみ量(δ_t)は、防護ネットと防護対象施設の最小離隔距離(L_{min})を下回っている。

(1) 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設

表 5-36 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設
のたわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
1	1.36	1.89
2	1.28	
3	1.56	1.70
4	1.55	
5	1.49	1.90
6	1.55	

(2) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-37 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設のたわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
1	1.09	1.58
2	1.13	
3	1.15	—※1
4	1.15	
5	1.16	1.58
6	1.16	
7	<0.80※2	
8	<0.80※3	

※1：当該ネットの直下には防護対象施設は無い。

※2：防護対象施設が存在する領域と最大たわみ点の関係は図 5-1 のとおりであり、防護対象施設が存在する領域のたわみは、最大たわみ (No. 7 : 1.60m, No. 8 : 1.58m) に比べ小さいため、ネットが防護対象施設に接触することはない。

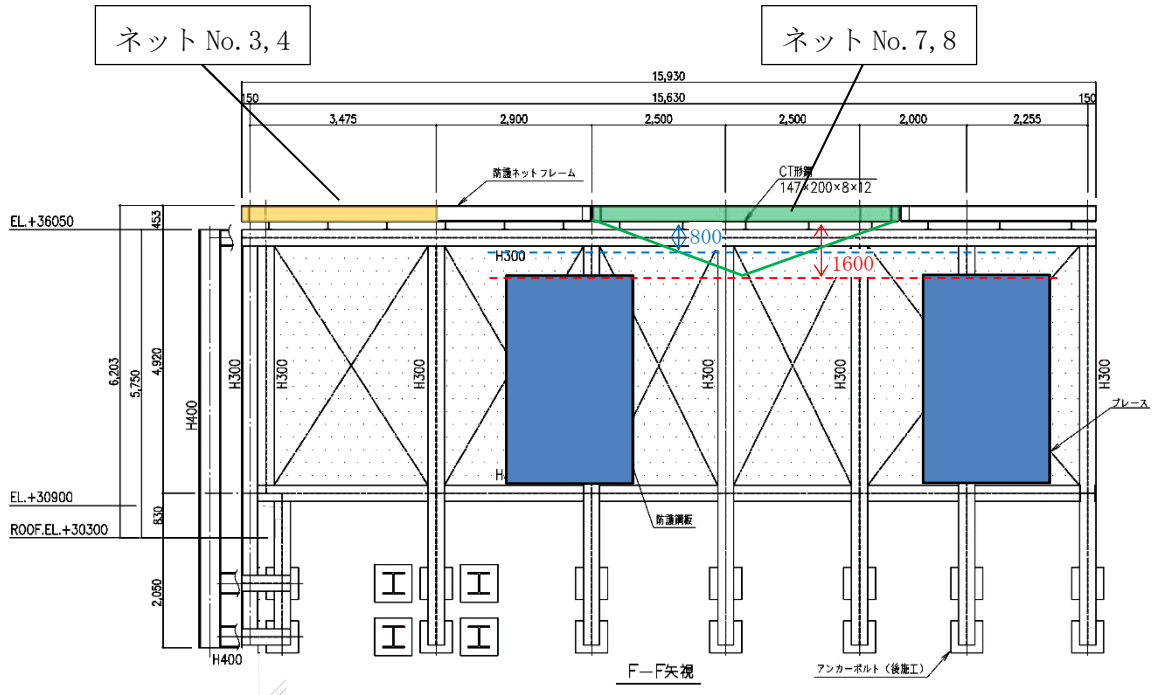


図 5-1 ネット (No. 7, 8) と防護対象施設の位置関係

(3) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-38 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設のたわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
1	1.16	2.29
2	1.17	
3	1.23	
4	1.24	
5	1.25	
6	1.25	
7	1.50	
8	1.50	
9	1.20	
10	1.25	

(4) 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設

表 5-39 原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設のたわみ評価結果

No.	最大たわみ量	最少離隔距離
-----	--------	--------

	δ_t (m)	L_{min} (m)
1	1.55	2.04

(5) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-40 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設のたわみ評価結果

No.	最大たわみ量 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
1	1.49	1.88