

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 15
提出年月日	平成 30 年 4 月 27 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 ディーゼル発電機吸気フィルタの強度計算書
- V-3-別添 1-1-3 残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書
- V-3-別添 1-1-4 ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書
- V-3-別添 1-1-5 残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書
- V-3-別添 1-1-6 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 1-1-7 排気筒の強度計算書
- V-3-別添 1-1-8 配管及び弁の強度計算書
- V-3-別添 1-1-9 換気空調設備の強度計算書
- 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 竜巻への配慮が必要な施設の強度計算の方針

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

5.2.2 容器

(1) 4脚たて置円筒形容器（ディーゼル発電機吸気フィルタ）

a. 評価条件

4脚たて置円筒形容器の強度評価を行う場合、以下の条件に従うものとする。

- (a) 設計竜巻の風圧力による荷重，気圧差による荷重，自重を加えた荷重に対する，胴板，支持脚の構造健全性を1質点系モデルとし，**JEAG 4601の4脚たて置円筒形容器の計算方法を準用**して計算を行う。ここで，荷重の作用点は評価上高さの1/2より高い容器の重心位置とする。

4脚たて置円筒形容器のモデル図を図5-9に示す。

b. 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表5-13に示す。

表5-13 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位	応力等の状態
胴板	<ul style="list-style-type: none"> ・一次一般膜 ・一次 ・一次+二次
支持脚	<ul style="list-style-type: none"> ・組合せ ・座屈

c. 強度評価方法

(a) 記号の定義

4脚たて置円筒形容器の強度計算に用いる記号を表5-14に示す。

V-3-別添 1-1-7 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、排気筒が竜巻時及び竜巻通過後においても、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

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、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

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。

排気筒の位置図を図2-1に示す。

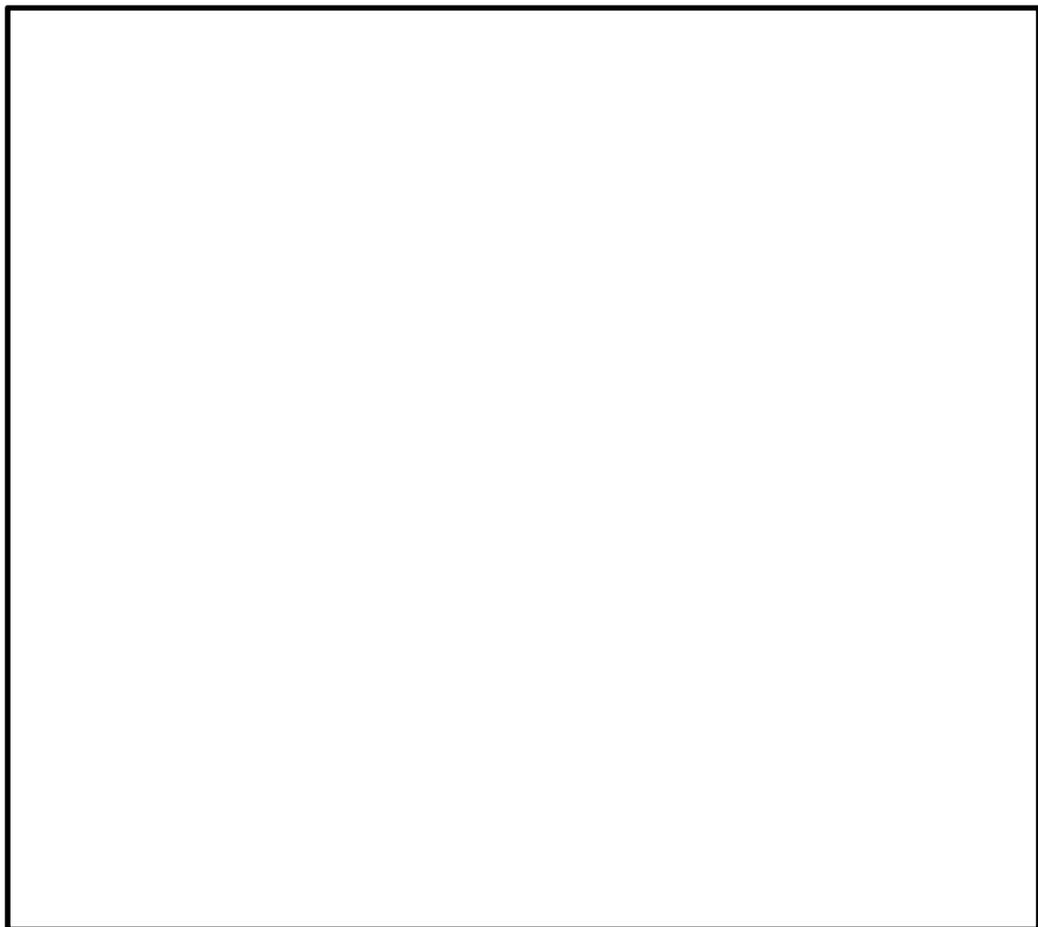


図 2-1 排気筒の位置図

2.2 構造概要

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) まで支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	4.500 mφ (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

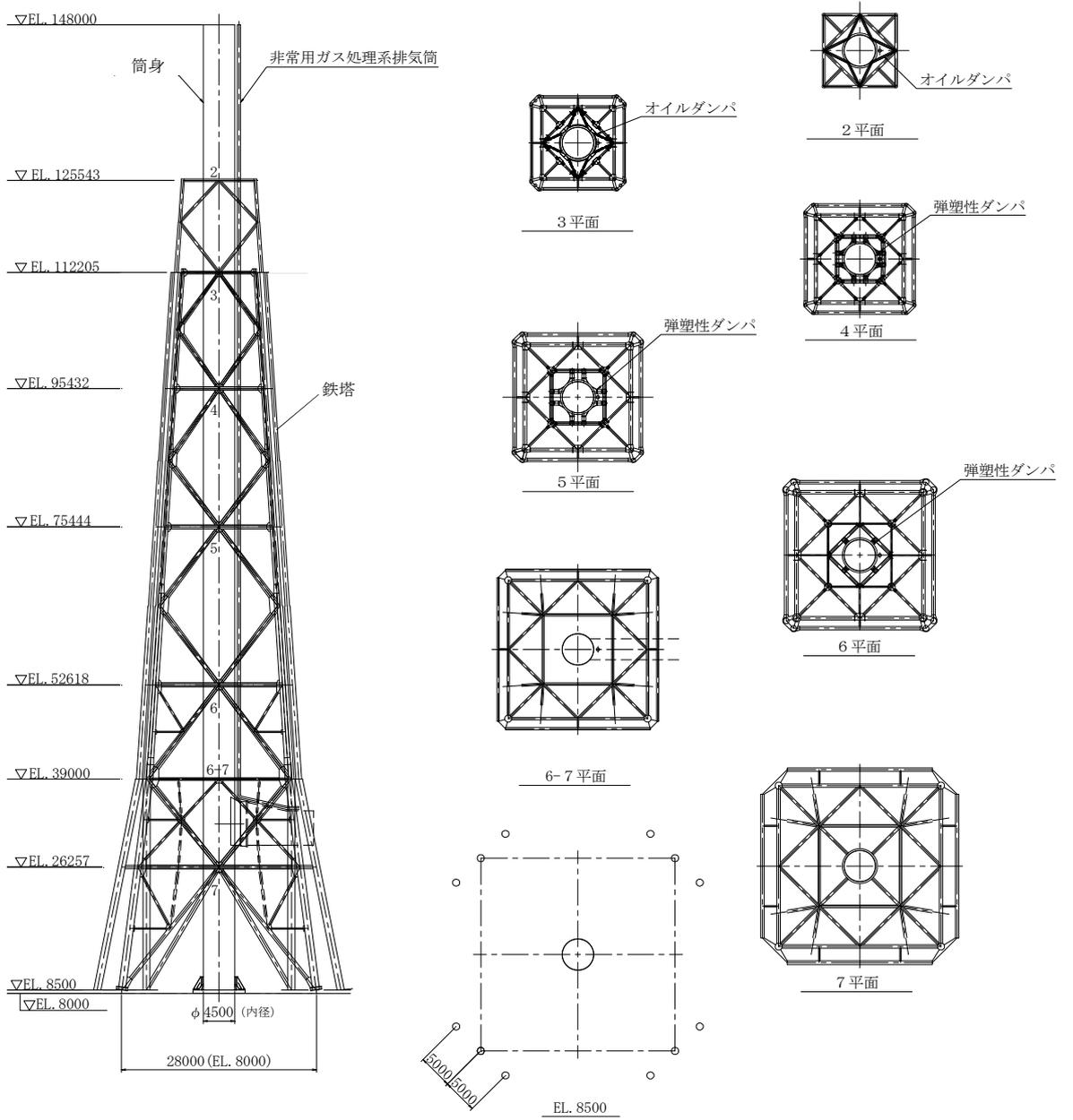


图 2-2 排気筒概要図 (单位 : mm)

2.3 評価方針

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、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。

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

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、排気筒の構造を踏まえ、設計竜巻の風圧力による荷重に自重を加えた荷重が排気筒に作用した場合に、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、設計竜巻の風圧力の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の風圧力による荷重を比較できるものは、設計竜巻の風圧力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、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。

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。

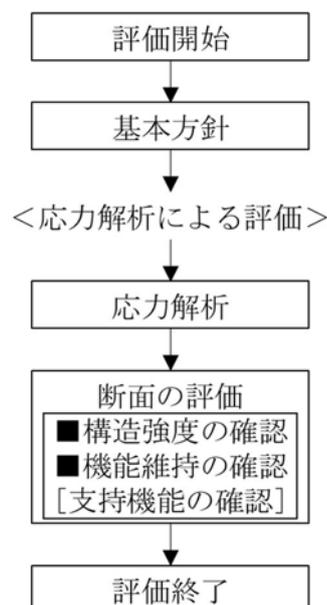


図 2-3 排気筒の筒身及び鉄塔の強度評価フロー

2.4 適用規格

排気筒の筒身及び鉄塔の評価において、準拠する規格・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

排気筒の応力解析による評価対象部位は、風圧力による荷重を受ける排気筒の筒身、筒身を支持する鉄塔主要部材（主柱材、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。

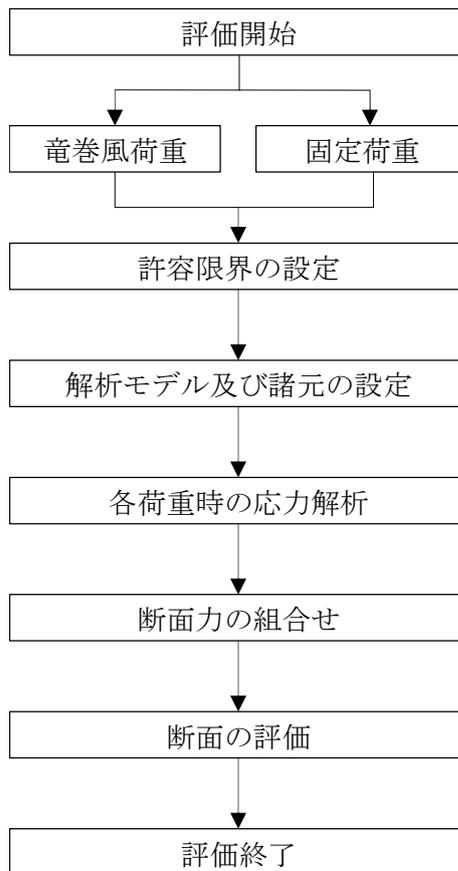


図 3-1 応力解析による評価フロー

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. 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、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 ($G = 1.0$)

H : 構造物の基準高さ ($H = 140.000$ m)

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)

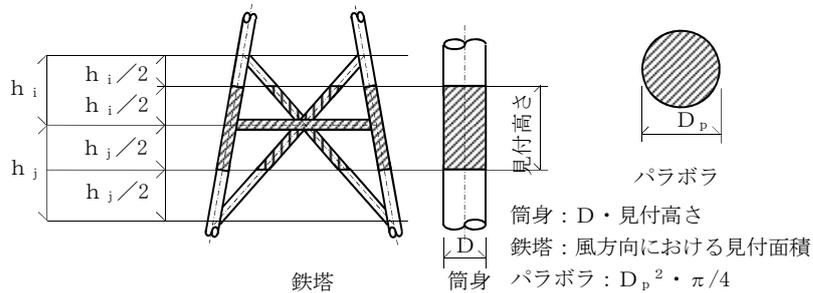


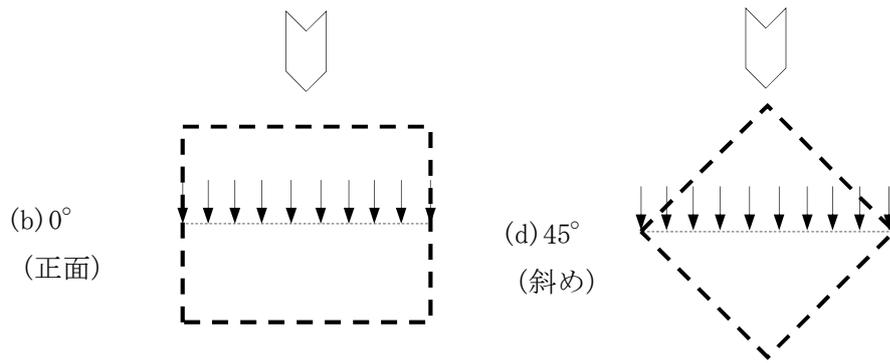
図 3-2 鉄塔及び筒身の見付面積 A

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、排気筒は大気中に開かれており、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。

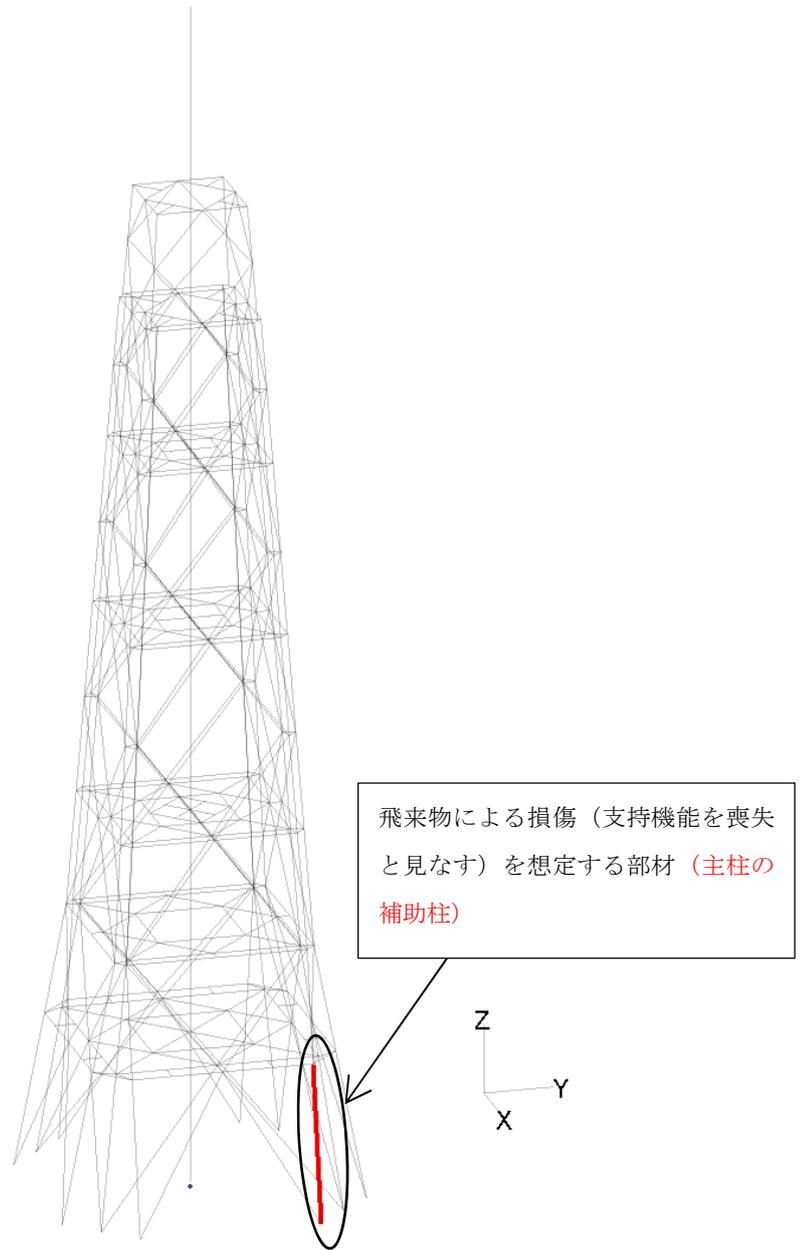


図3-4 飛来物による排気筒（鉄塔部）の損傷想定箇所

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

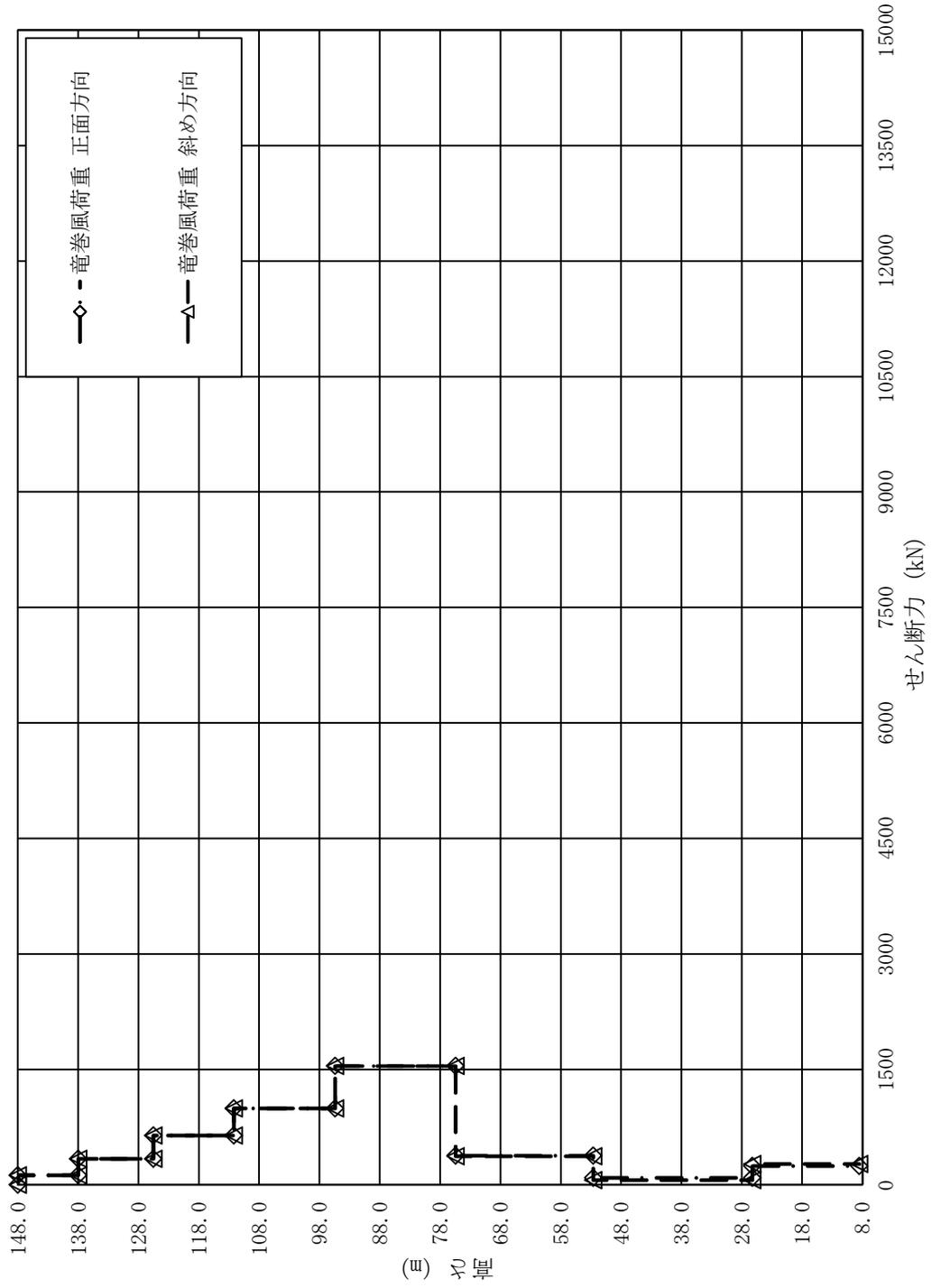


図 3-5 筒身のせん断力

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

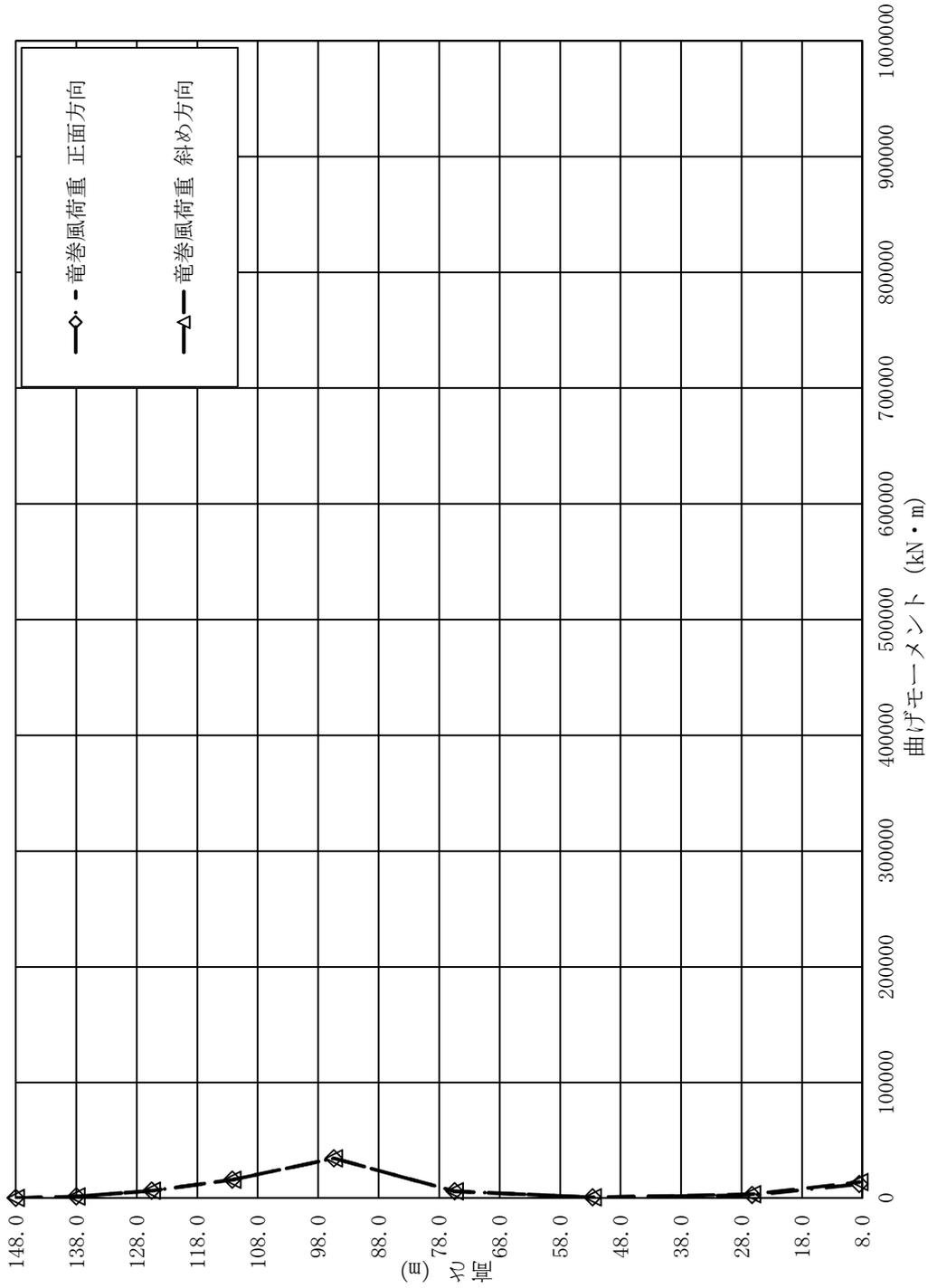


図 3-6 筒身の曲げモーメント

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

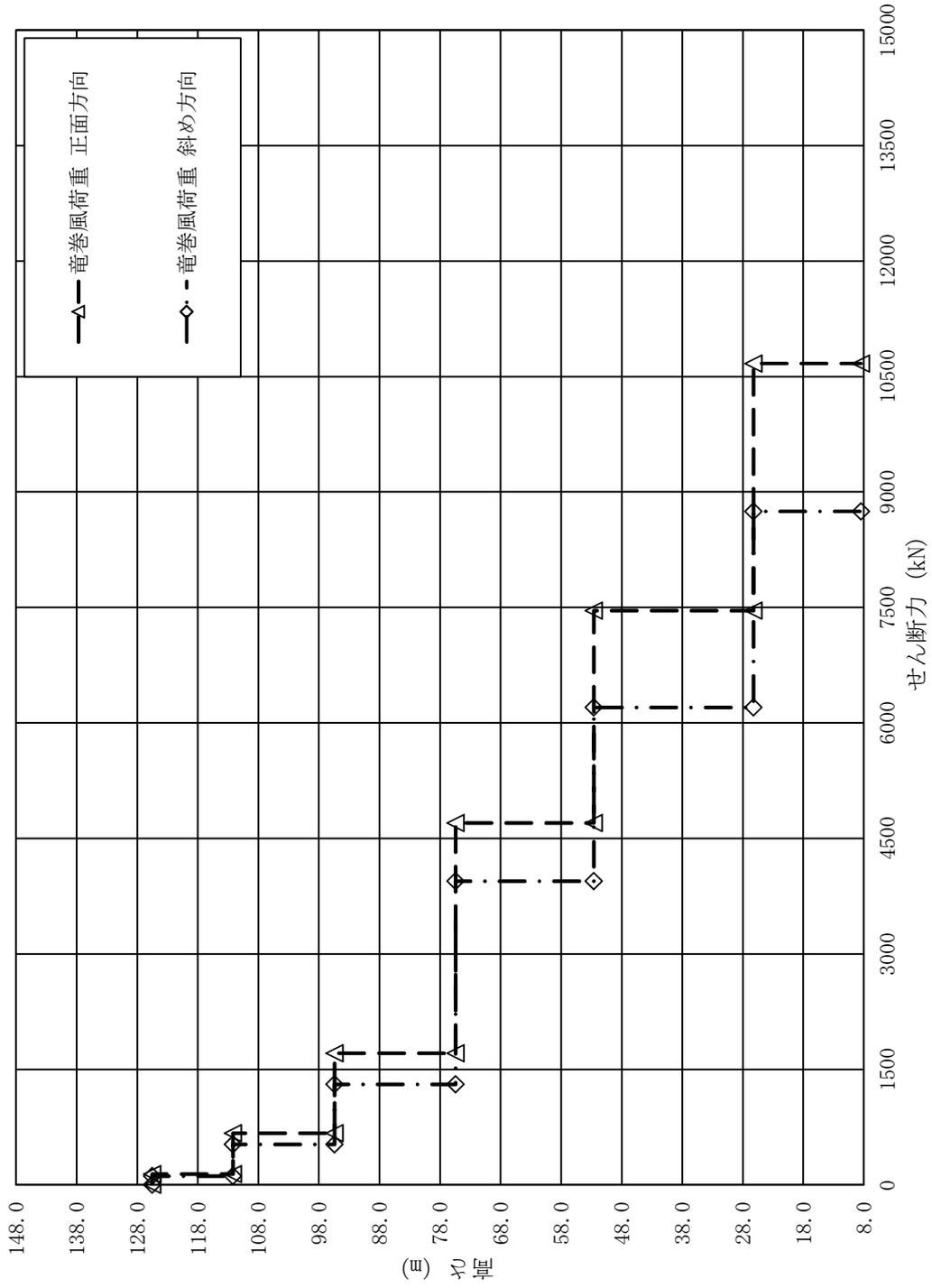


図 3-7 鉄塔のせん断力

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

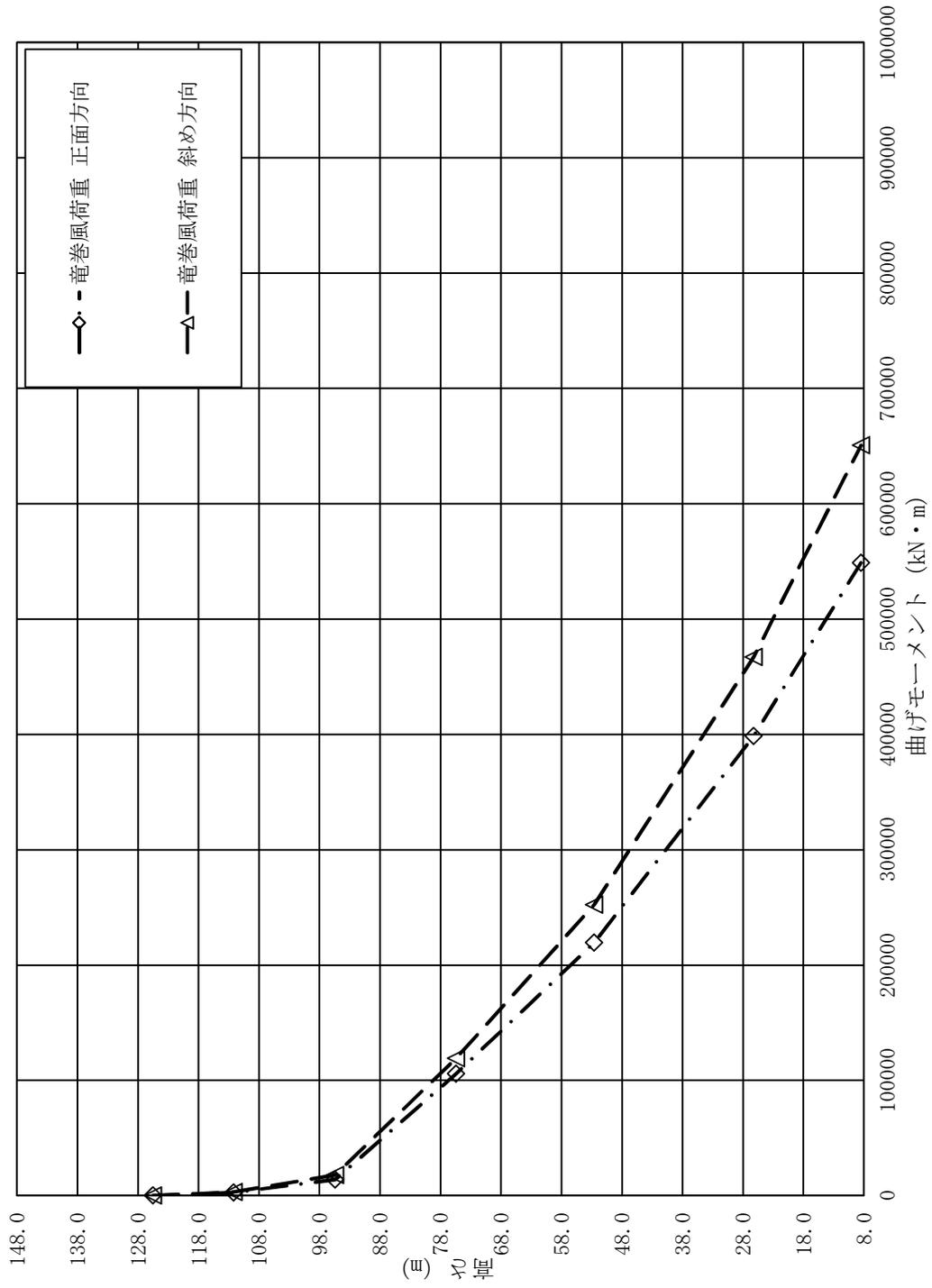


図 3-8 鉄塔の曲げモーメント

(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、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

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 (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

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

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 f _{c r} (N/mm ²)	曲げ f _{b c r} (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	Φ4532.0×16.0	SS400	141	1240	198600	223000000	192.2	207.2	0.8	5.6	0.04 ≤ 1.00
138.000	Φ4532.0×16.0	SS400	440	6259	198600	223000000	192.2	207.2	2.3	28.1	0.15 ≤ 1.00
125.543	Φ4532.0×16.0	SS400	773	15910	198600	223000000	192.2	207.2	3.9	71.4	0.37 ≤ 1.00
112.205	Φ4532.0×16.0	SS400	1152	34339	198600	223000000	192.2	207.2	5.9	154.0	0.78 ≤ 1.00
95.432	Φ4532.0×16.0	SS400	1618	34339	198600	223000000	192.2	207.2	8.2	154.0	0.79 ≤ 1.00
75.444	Φ4532.0×16.0	SS400	2145	5877	198600	223000000	192.2	207.2	10.9	26.4	0.19 ≤ 1.00
52.618	Φ4532.0×16.0	SS400	2761	3416	198600	223000000	192.2	207.2	14.0	15.4	0.15 ≤ 1.00
26.257	Φ4532.0×16.0	SS400	3292	14022	198600	223000000	192.2	207.2	16.6	62.9	0.39 ≤ 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)

E.L. 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
			せん断 Q (kN)	曲げ M (kN・m)	せん断面積 A_s (mm ²)	断面係数 Z_c (mm ³)	せん断 f_{cr} (N/mm ²)	曲げ f_{cr} (N/mm ²)	せん断 $\tau = Q/A_s$ (N/mm ²)	曲げ $\sigma_b = M/Z_c$ (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，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
			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
			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 $\Phi \times t$ (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
			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	73	3	5907	506000	123.1	5193.6	42.2	244.3	258.5	12.4	6.0	$0.08 \leq 1.00$
95.432	$\Phi 457.2 \times 6.4$	STK400	112	10	7631	848000	159.0	6295.0	39.6	246.0	258.5	14.7	11.8	$0.11 \leq 1.00$
75.444	$\Phi 508.0 \times 6.4$	STK400	182	4	8492	1050000	177.0	7607.2	43.0	243.8	258.5	21.5	3.9	$0.11 \leq 1.00$
52.618	$\Phi 508.0 \times 6.4$	STK400	244	5	8492	1050000	177.0	9105.9	51.4	237.5	258.5	28.8	4.8	$0.14 \leq 1.00$
26.257	$\Phi 508.0 \times 6.4$	STK400	399	4	8492	1050000	177.0	11644.2	65.8	224.1	258.5	47.0	3.9	$0.23 \leq 1.00$

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 5-6 補助主柱材の断面評価

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
			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	$\Phi 406.4 \times 19.0$	STK400	85	8	21850	2020000	136.8	6573.9	48.1	240.1	258.5	3.9	4.0	$0.04 \leq 1.00$
112.205	$\Phi 508.0 \times 19.0$	590材	217	71	27600	3250000	172.7	8240.1	47.7	367.0	413.0	7.9	21.9	$0.08 \leq 1.00$
95.432	$\Phi 508.0 \times 19.0$	590材	591	161	27600	3250000	172.7	10477.2	60.7	338.5	413.0	21.5	49.6	$0.19 \leq 1.00$
75.444	$\Phi 609.6 \times 19.0$	590材	2331	80	33340	4770000	208.5	11493.1	55.1	351.6	413.0	70.0	16.8	$0.24 \leq 1.00$
52.618	$\Phi 812.8 \times 19.0$	590材	4491	281	44830	8680000	280.2	13676.2	48.8	364.8	413.0	100.2	32.4	$0.36 \leq 1.00$
26.257	$\Phi 1016.0 \times 19.0$	590材	6401	401	56320	13800000	352.3	12988.6	36.9	385.4	413.0	113.7	29.1	$0.37 \leq 1.00$

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 5-7 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
			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
			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-2-2-14-1「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 5-9 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

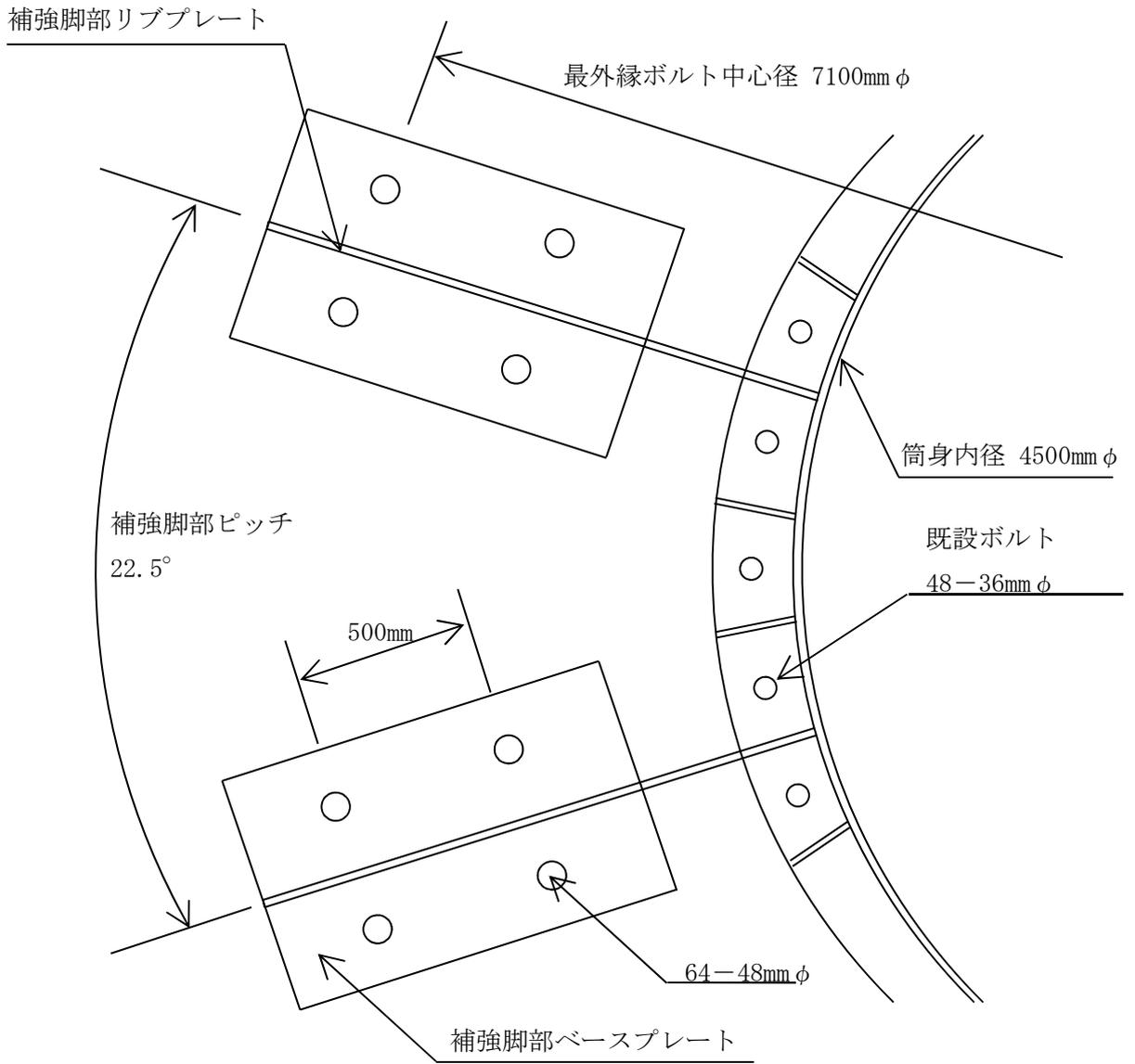


図 5-1 筒身脚部概略図

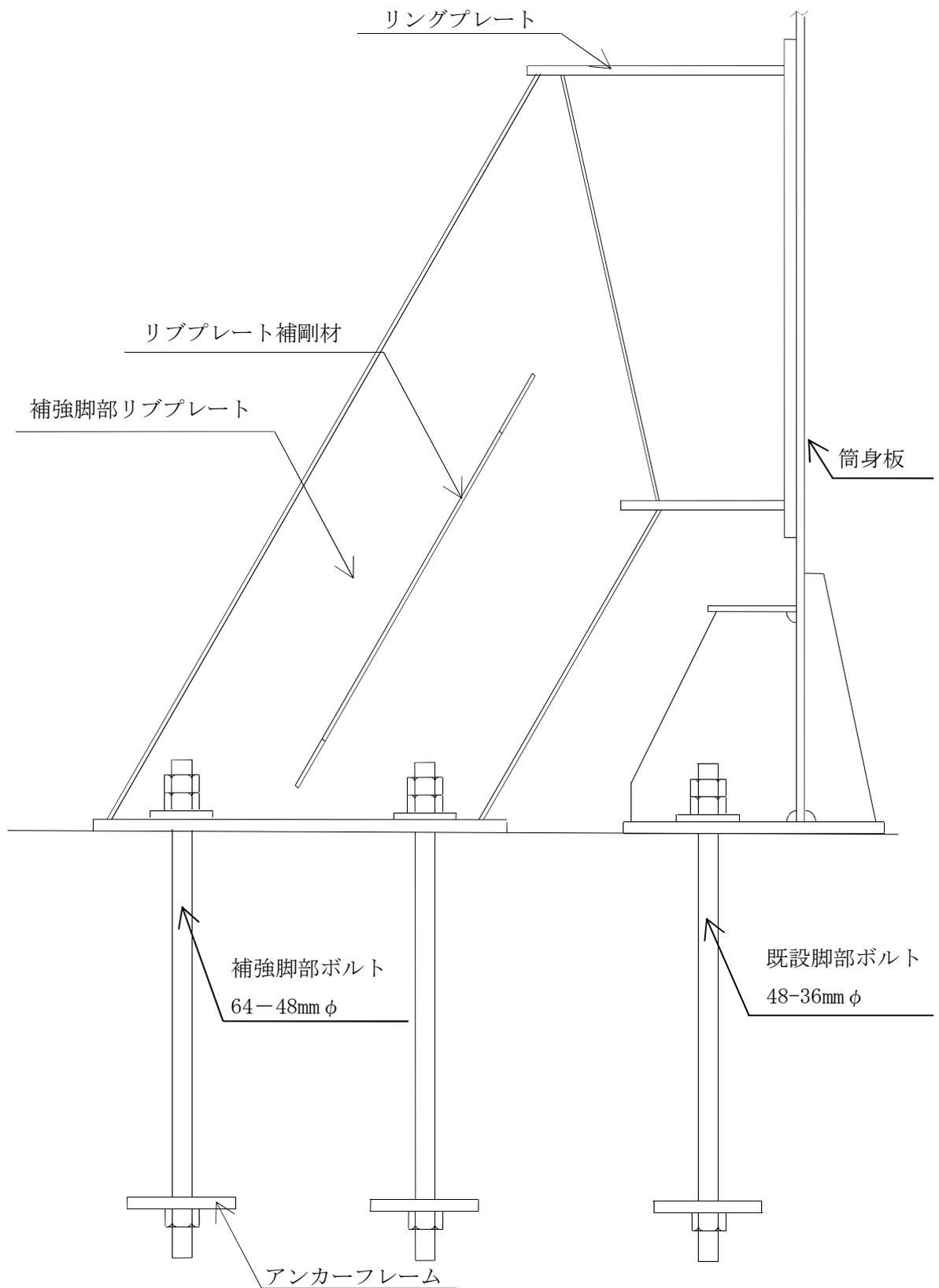


図 5-2 筒身脚部概略図

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

電算アウトプットの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。

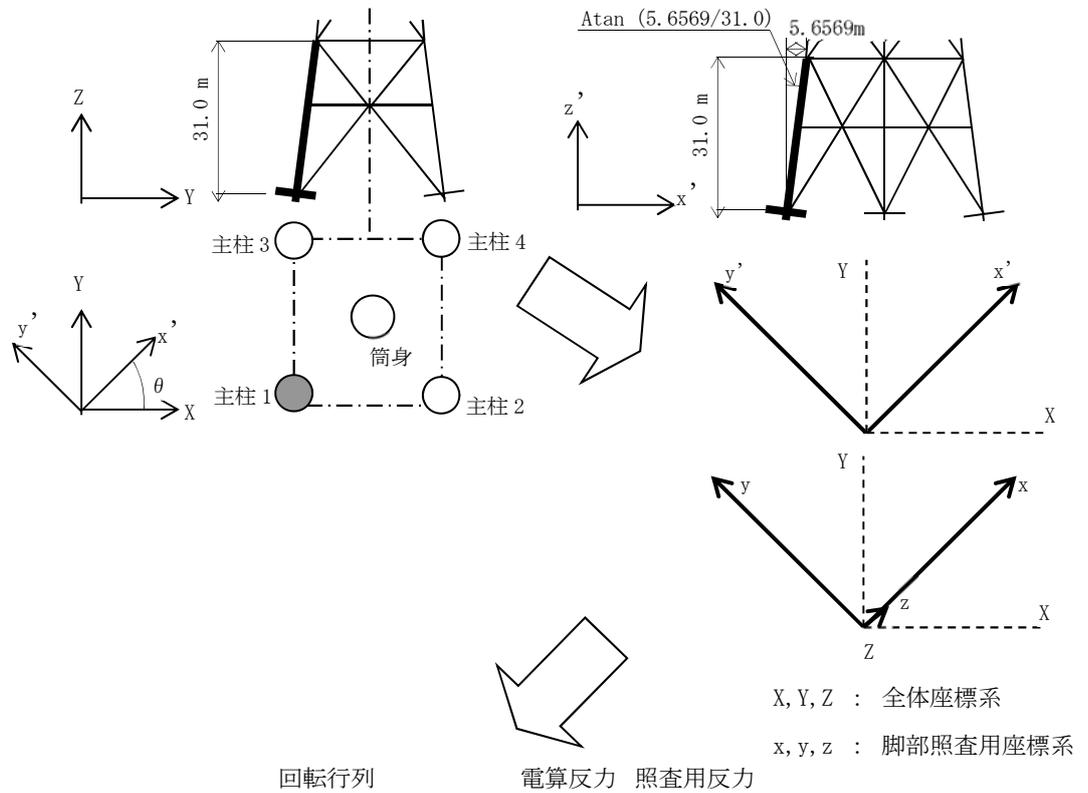
表 5-10 に示すように、引張力は S_s設計用荷重による反力の方が大きく、S_s設計用荷重に包絡されることを確認できるため、以降の検討は省略する。よって、水平力と圧縮力を支持するベースプレート、リブプレート、刃形プレートについての結果を記載する。

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

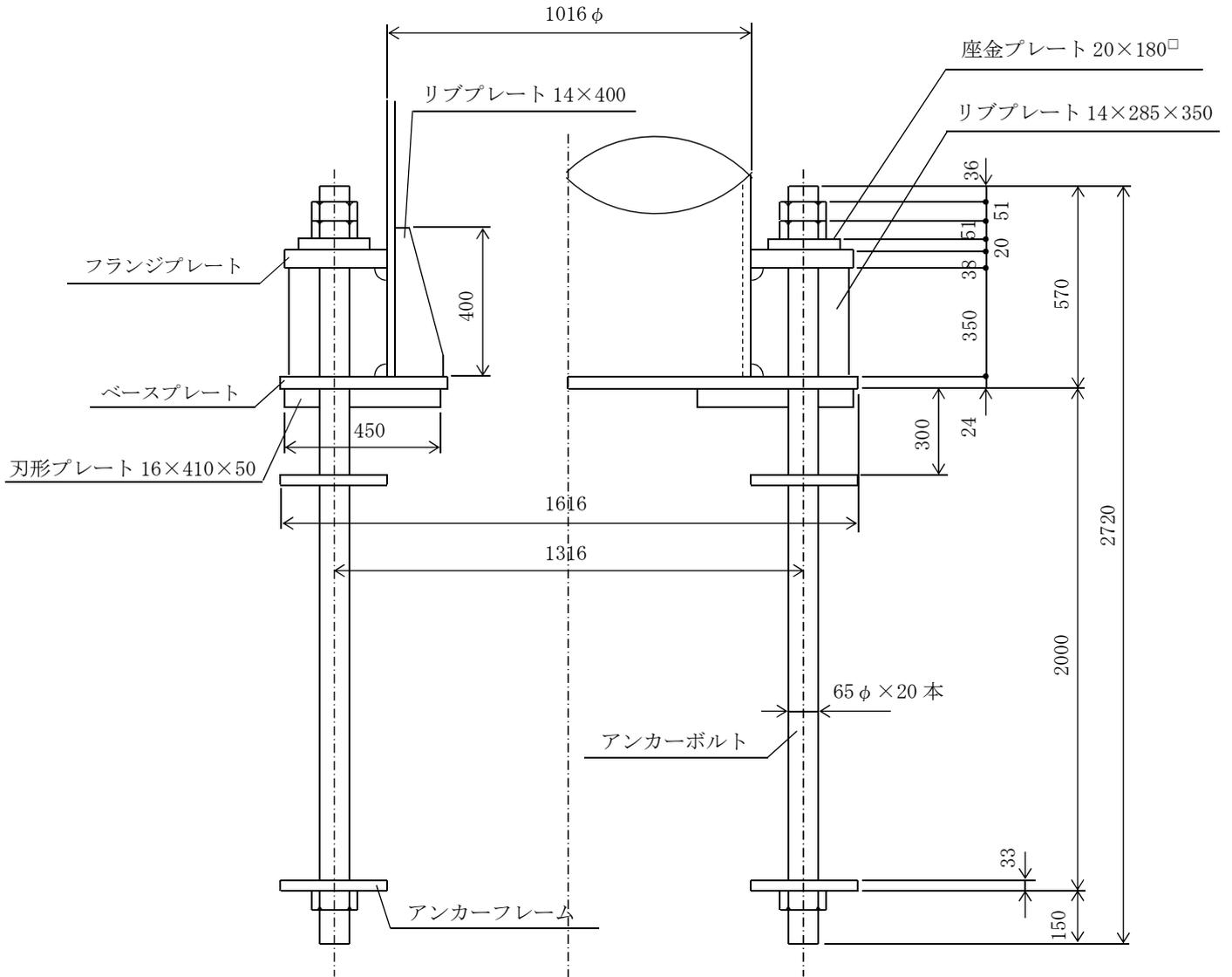
下図のように主柱脚部の軸方向と全体座標系の Z 方向は一致していないため、主柱 1 の電算反力を Z 軸周りに $\theta=45^\circ$, 新しい Y 軸 (y') 周りに $\phi=10.3416^\circ$ 回転する。



$$\begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & \cos \phi \sin \theta & -\sin \phi \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ \sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} RX \\ RY \\ RZ \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} Rx \\ Ry \\ Rz \end{Bmatrix}$$

図 5-3 に、鉄塔脚部の形状図を示す。

NT2 補② V-3-別添 1-1-7 R2



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	$\sigma_c / {}_c f_c = \frac{5.0}{14.6} = 0.35 \leq 1.00$

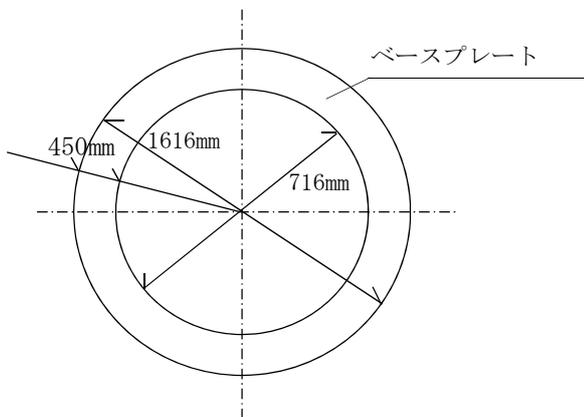


図 5-4 ベースプレートの寸法

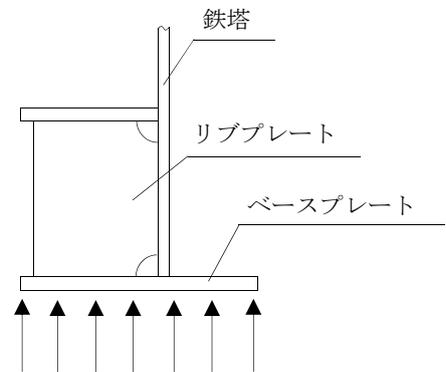


図 5-5 ベースプレートの断面

(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

$$\sigma_c = 5.0 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{モーメント} \quad M_1 = 0.6 \cdot \sigma_c \cdot L^2 / 8 = \frac{0.6 \times 5.0 \times 206.7^2}{8} = 16022 \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}$$

$$\text{曲げ応力度} \quad \sigma_b = M_1 / Z_1 = \frac{16022}{88.17} = 181.8 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{応力度比} \quad \sigma_b / f_b = \frac{181.8}{258.5} = 0.71 \leq 1.00$$

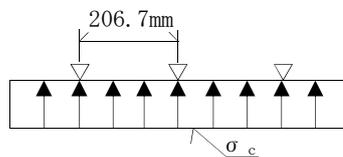


図 5-6 ベースプレート検討図

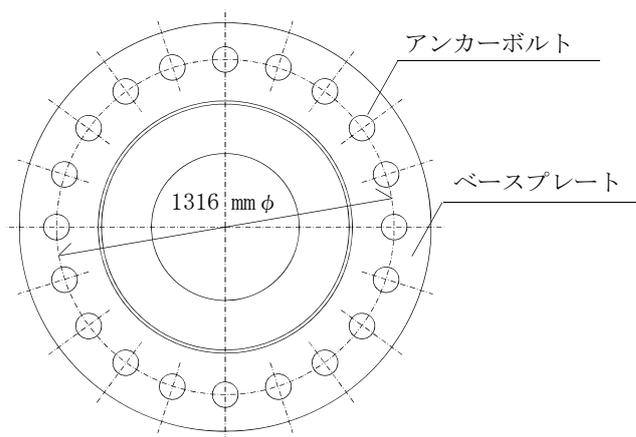


図 5-8 ボルト配置図

c. リブプレート

・リブプレート諸元

サイズ	高さ	H=350 mm
	幅	B=300-15-30=255 mm
	板厚	t=14 mm
	リブ枚数	n=20 枚
	材質	SS400
	設計基準強度	F=258.5 N/mm ²
	限界細長比	Λ=114.2

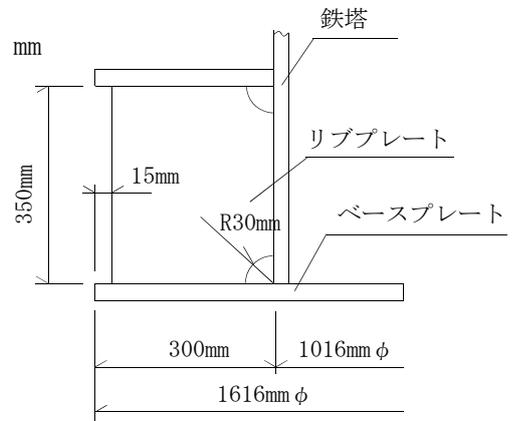


図 5-8 リブプレートの形状

(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

$$f_s = F / \sqrt{3} = 149.2 \text{ N/mm}^2$$

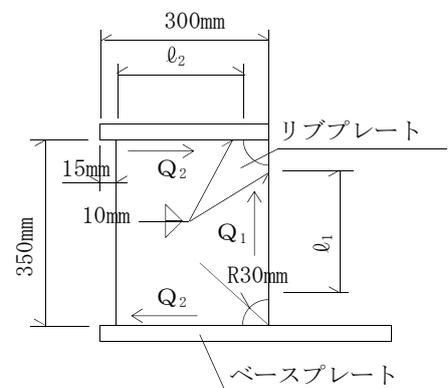


図 5-9 溶接位置図

・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

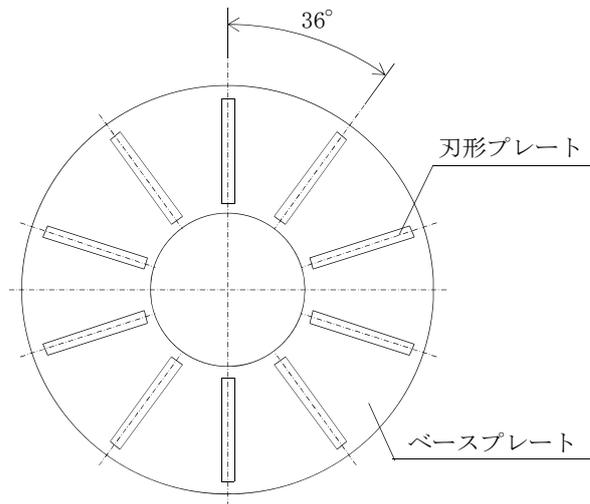


図 5-10 刃形プレート形状図

(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 $\sigma_b/f_b = \frac{202.2}{258.5} = 0.79 \leq 1.00$

$\tau/f_s = \frac{21.6}{149.2} = 0.15 \leq 1.00$

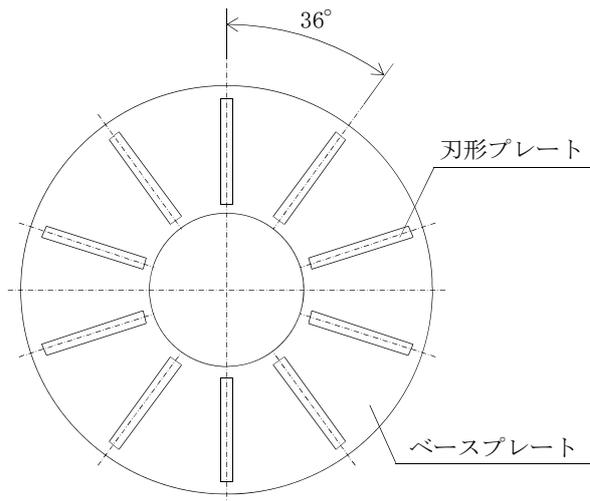


図 5-11 刃形プレート形状図

(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	$\tau / f_s = \frac{74.2}{149.2} = 0.50 \leq 1.00$

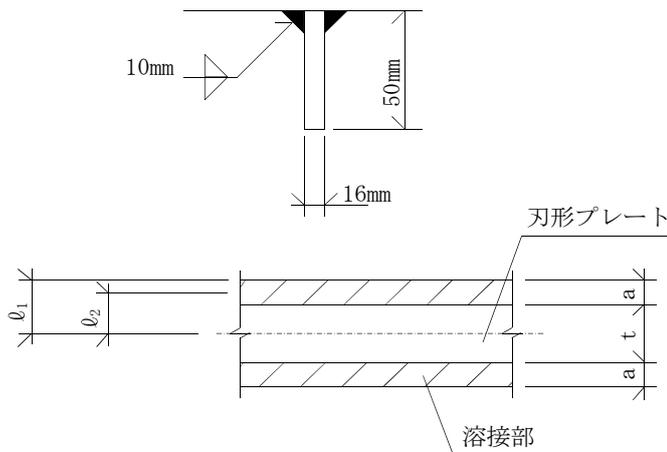


図 5-12 刃形プレート諸元

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-2-2-14-1「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 5-12 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 1-1-9 換気空調設備の強度計算書

目次

1. 概要.....	1
2. 基本方針.....	1
2.1 位置.....	1
2.2 構造概要.....	1
2.3 評価方針.....	4
2.4 適用規格.....	9
3. 強度評価方法.....	10
3.1 記号の定義.....	10
3.2 評価対象部位.....	15
3.3 荷重及び荷重の組合せ.....	19
3.4 許容限界.....	21
3.5 評価方法.....	25
4. 評価条件.....	35
5. 強度評価結果.....	40

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、角ダクト、丸ダクト、換気空調設備の隔離弁（以下「隔離弁」という。）、ファン及び冷凍機が竜巻時及び竜巻通過後においても、その施設の機能維持を考慮して、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

角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の構造について、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、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の「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

角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機は、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、十分な強度を有する原子炉建屋内、原子炉建屋付属棟屋上面又はディーゼル発電機室屋上面に設置する。

2.2 構造概要

換気空調設備の構造について、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、換気空調設備の構造を示す。

(1) 角ダクト及び丸ダクトの構造概要

角ダクトは、鋼板により構成される四角形断面のダクトであり、支持構造物にダクト鋼板面を接触させて支持する。

丸ダクトは、鋼板により構成される円筒形のダクトであり、支持構造物にダクト鋼板面を接触させて支持する。

角ダクトの概要図を図 2-1 に、丸ダクトの概要図を図 2-2 に示す。

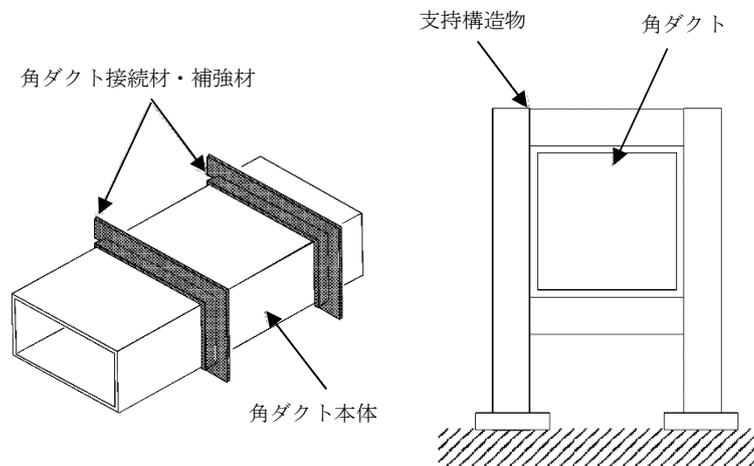


図 2-1 角ダクトの概要図

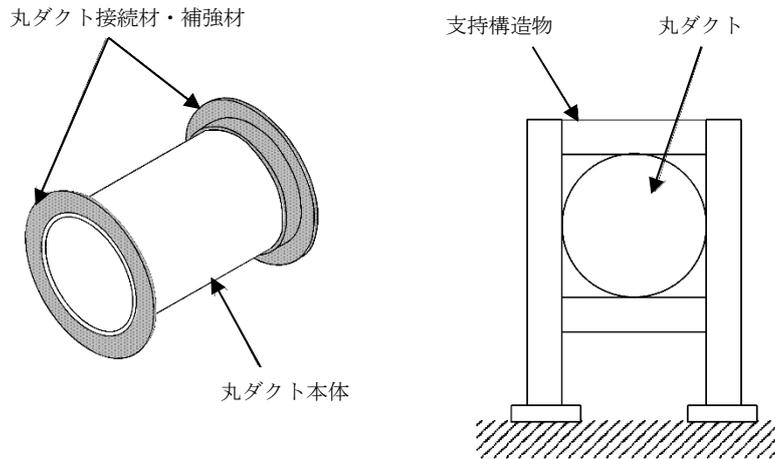


図 2-2 丸ダクトの概要図

(2) 隔離弁の構造概要

隔離弁は弁箱内部の弁体が弁棒を軸として回転することにより、開閉動作を行う弁である。隔離弁の概要図を図 2-3 に示す。

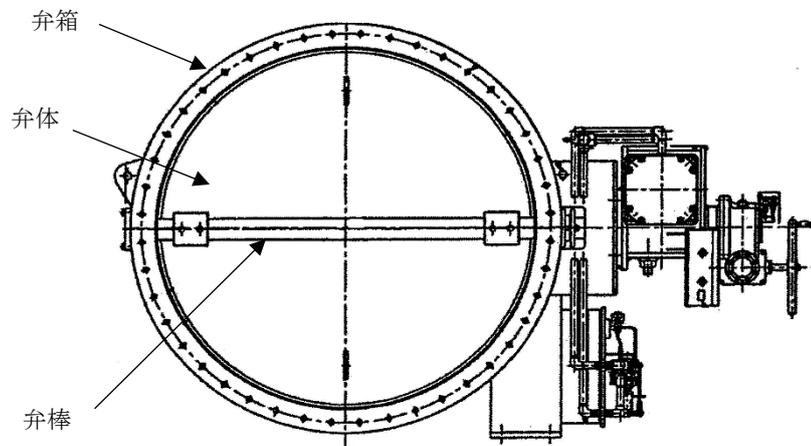


図 2-3 隔離弁の概要図

(3) ファンの構造概要

ファンは流路を形成するケーシング、冷却するための空気を送り込む羽根車及び原動機からの回転力を伝達する主軸で形成する。

中央制御室換気系フィルタ系ファンは屋内に設置しており、非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン及び高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機ルーフベントファン（以下「ディーゼル発電機室ルーフベントファン」という。）は屋外に設置している。

ファンの概要図を図 2-4, 図 2-5 に示す。

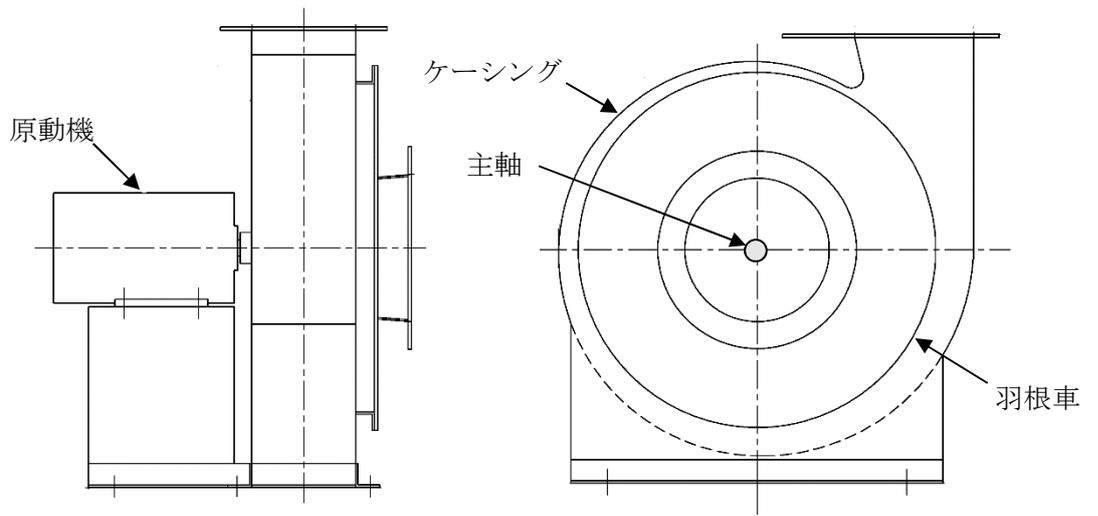


図 2-4 ファンの概要図 (中央制御室換気系フィルタ系ファン)

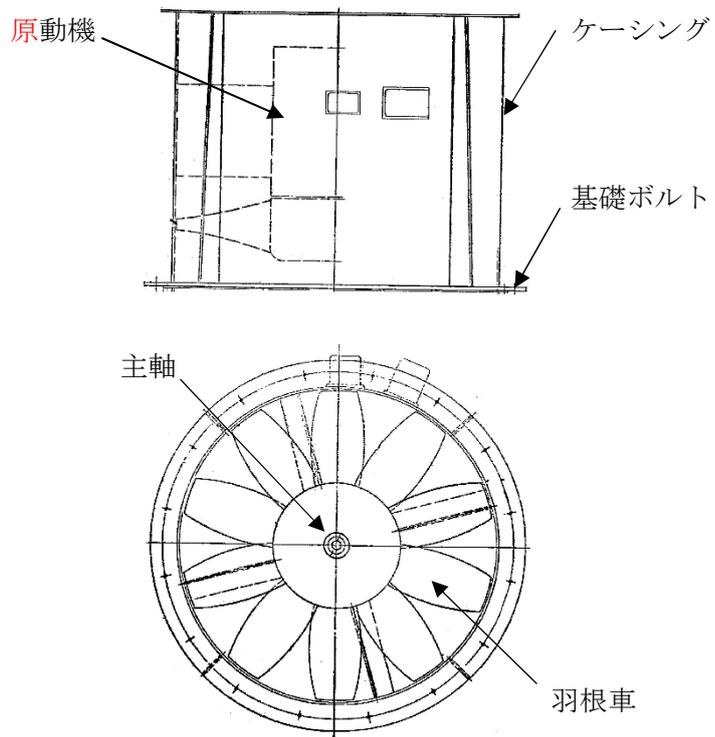


図 2-5 ファンの概要図 (ディーゼル発電機室ルーフベントファン)

(4) 冷凍機の構造概要

中央制御室換気系冷凍機は、空気を冷却する熱交換器、圧縮機及び送風機をケーシングで覆ったユニット形式であり、屋外に設置している。

中央制御室換気系冷凍機の概要図を図 2-6 に示す。

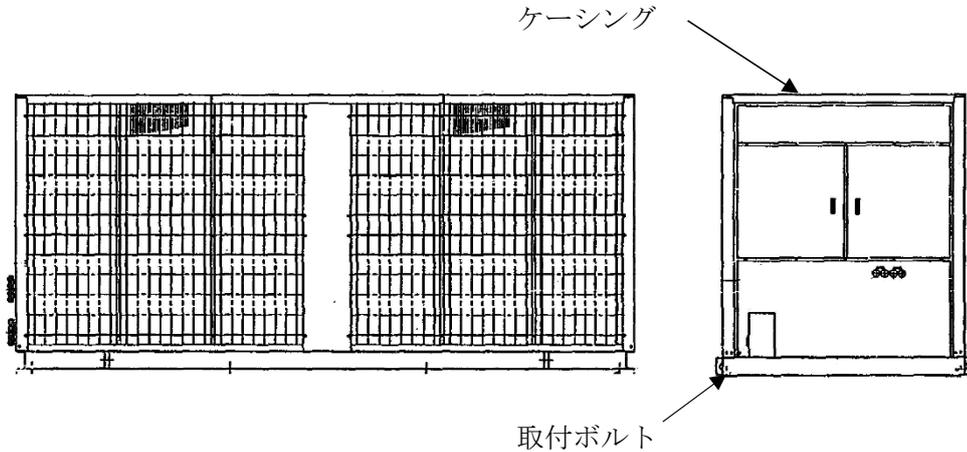


図 2-6 冷凍機の概要図（中央制御室換気系冷凍機）

2.3 評価方針

換気空調設備の強度評価は、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、角ダクト、丸ダクト、隔離弁、ファン及び冷凍機の各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。

(1) 衝突評価の評価方針

屋外に設置する換気空調設備の衝突評価フローを図2-7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。屋外に設置する換気空調設備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、外壳を構成する部材の厚さとする。

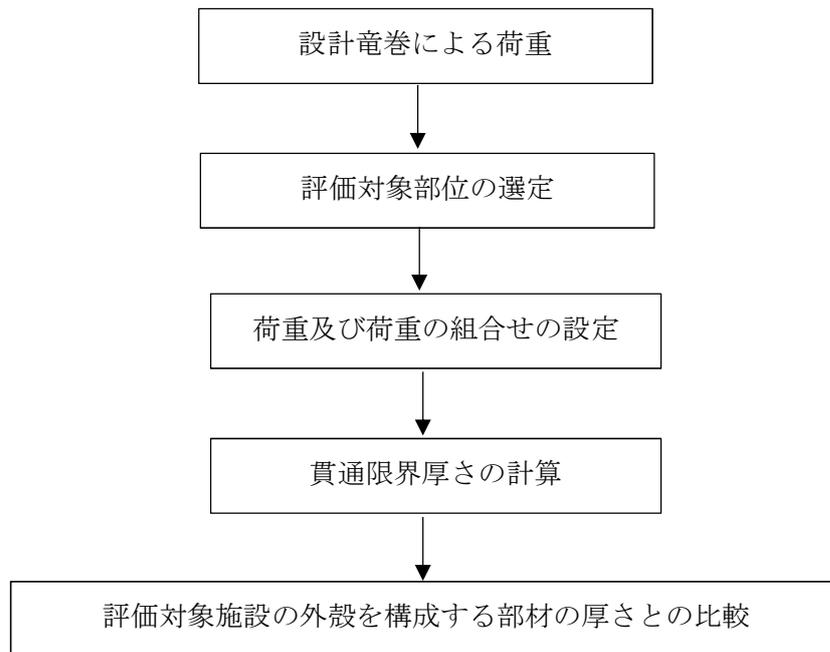


図2-7 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価フロー

(2) 構造強度評価の評価方針

a. 角ダクト及び丸ダクトの評価方針

角ダクト及び丸ダクトの強度評価フローを図 2-8 に示す。

竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置する、外気と繋がっている換気空調設備のうち、角ダクト及び丸ダクトの強度評価においては、その構造を踏まえ、設計荷重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。

角ダクトの強度評価においては、設計竜巻の気圧差による荷重を短期荷重とみなし、自重との組合せを考慮して、長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）による応力が許容応力以下であることを確認する。強度評価では、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」に示す角ダクトの評価式を用いる。

角ダクトの許容限界は、妥当な安全裕度を考慮して、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。ただし、座屈に対しては評価式を満足することを確認する。

丸ダクトの強度評価においては、設計竜巻の気圧差による荷重を短期荷重とみなし、自重との組合せを考慮して、外圧により生じる周方向応力が許容応力以下であること及び長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）により生じる応力が評価式を満足していることを確認する。強度評価では、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」に示す丸ダクトの評価式を用いる。

丸ダクトの許容限界は、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、クリッピング座屈の算出式に応じた値とする。

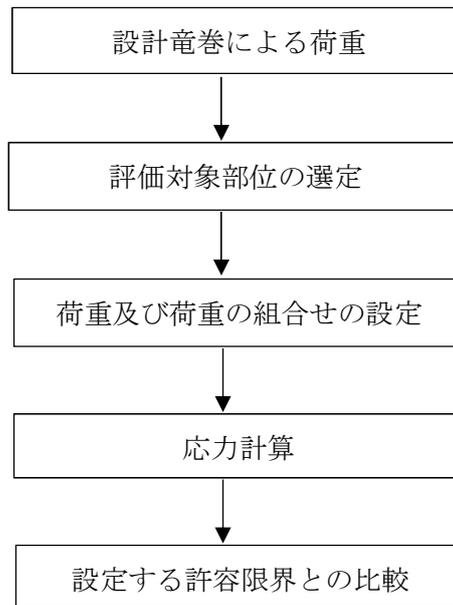


図 2-8 角ダクト及び丸ダクトの強度評価フロー

b. 隔離弁の評価方針

隔離弁の強度評価フローを図 2-9 に示す。

竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置する、外気と繋がっている換気空調設備のうち、隔離弁の強度評価においては、その構造を踏まえ、設計荷重の作用方向及び伝達過程を考慮し、評価対象部位を選定する。

強度評価においては、隔離弁に対して、設計竜巻の気圧差による荷重により生じる応力が許容応力以下であることを確認する。強度評価では、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」に示す隔離弁の評価方法を用いる。

隔離弁の許容限界は、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。

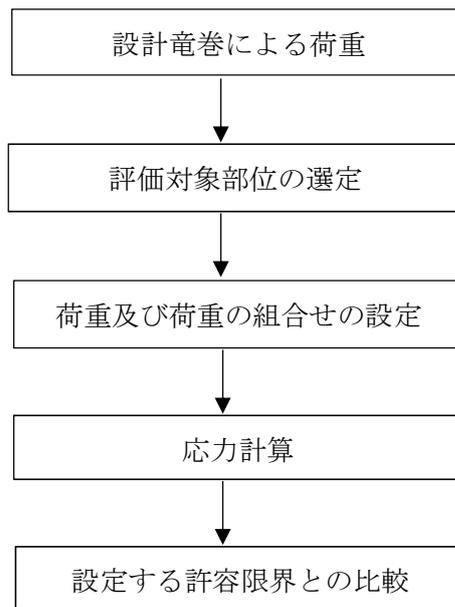


図 2-9 隔離弁の強度評価フロー

c. ファンの評価方針

ファンの強度評価フローを図 2-10 に示す。

強度評価において、屋外に設置する換気空調設備については、設計竜巻の風圧力によ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様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する。また、竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置する外気と繋がっている換気空調設備については、設計竜巻の気圧差による荷重により生じる応力が許容応力以下であることを確認する。強度評価では、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」に示すファンの評価式を用いる。

ファンの許容限界は、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。

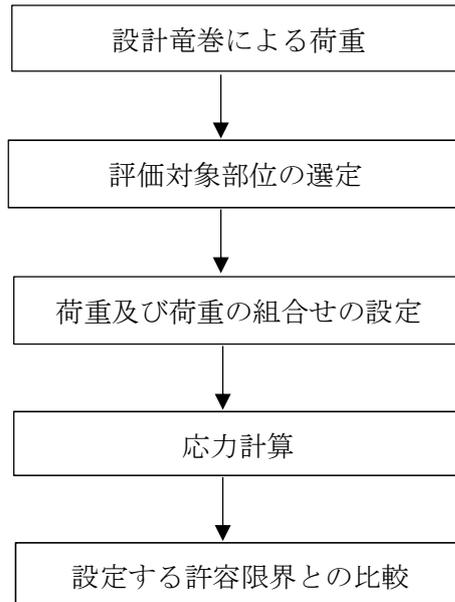


図 2-10 ファンの強度評価フロー

d. 冷凍機の評価方針

冷凍機の強度評価フローを図 2-11 に示す。

強度評価においては、中央制御室換気系冷凍機に対して、設計竜巻の風圧力によ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様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」に示す冷凍機の評価式を用いる。

冷凍機の許容限界は、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。

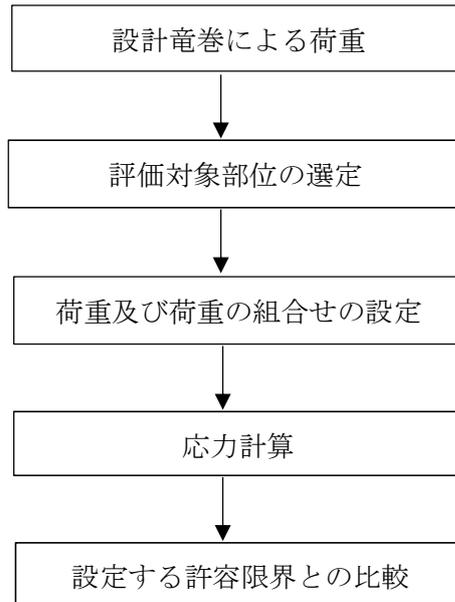


図 2-11 冷凍機の強度評価フロー

2.4 適用規格

適用する規格，基準等を以下に示す。

- ・「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。)
- ・日本工業規格 (J I S)

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

屋外に設置する換気空調設備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) 構造強度評価の記号の定義

a. 角ダクト

角ダクトの強度評価に用いる記号を表3-2に示す。

表3-2 角ダクトの強度評価に用いる記号(1/2)

記号	単位	定義
a	mm	ダクト幅
b	mm	ダクト高さ
c	mm	補強ピッチ
D_p	kg/m ²	単位面積当たりのダクト鋼板の質量
E	MPa	ヤング率
g	m/s ²	重力加速度
I	mm ⁴	断面二次モーメント
L	mm	ダクトサポートの支持間隔
M	N・mm	ダクトに作用する曲げモーメント
M_p	N・mm	自重により作用する曲げモーメント
P	MPa	ダクトにかかる外圧
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
t	mm	ダクト板厚
δ_{max}	mm	面外荷重によるダクト鋼板の最大変位量
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
π	—	円周率

表3-2 角ダクトの強度評価に用いる記号(2/2)

記号	単位	定義
μ	kg/m	ダクトの単位長さ当たり重量
ν	—	ポアソン比
σ_{max}	MPa	中心に生じる面外荷重による最大応力
σ_{p1}	MPa	面内荷重（外圧）による発生応力
σ_{p2}	MPa	面内荷重（自重）による発生応力
σ_w	MPa	短期荷重（設計竜巻による内外差圧）による発生応力と長期荷重（自重）による発生応力の和
σ_y	MPa	許容応力

b. 丸ダクト

丸ダクトの強度評価に用いる記号を表3-3に示す。

表3-3 丸ダクトの強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
c	mm	補強ピッチ
E	MPa	ヤング率
g	m/s ²	重力加速度
k_p	—	座屈係数
L	mm	ダクトサポートの支持間隔
M_{crip}	N・mm	クリッピング座屈が発生する際に作用する曲げモーメント
M_p	N・mm	自重により作用する曲げモーメント
n	—	座屈モードの次数
r	mm	丸ダクトのダクト半径
t	mm	ダクト板厚
Z_c	—	円筒かくの座屈応力の式における係数
β	—	円筒かくの座屈応力の式における係数
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
μ	kg/m	ダクトの単位長さ当たりの質量
ν	—	ポアソン比
π	—	円周率
σ_{crip}	MPa	クリッピング座屈が発生する際に生じる周方向応力
σ_{crip1}	MPa	外圧により生じる周方向応力

c. 隔離弁

隔離弁の強度評価に用いる記号を表 3-4 に示す。

表3-4 隔離弁の強度評価に用いる記号

記号	単位	定義
A_s	m^2	弁棒の断面積
A_v	m^2	弁体の受圧面積
a	mm	弁体の半径
d	mm	弁棒の直径
F_1	N	設計竜巻の気圧低下により弁棒に受ける荷重
F_2	N	弁体自重により弁棒に受ける荷重
g	m/s^2	重力加速度 ($g=9.80665$)
h	mm	弁体の板厚
m_v	kg	弁体自重
m_s	kg	弁棒自重
P_1	Pa	設計竜巻の気圧低下により弁体に受ける応力
P_2	Pa	自重により弁体に受ける応力
p_v	Pa	弁体に受ける応力
p_s	N	弁棒に受ける荷重
r	mm	内半径
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	板厚
π	—	円周率
τ	MPa	弁棒に対するせん断応力
σ_{max}	MPa	弁体に対する曲げ応力
σ_θ	MPa	周方向応力
ΔP	hPa	設計竜巻の気圧低下量

d. ファン

ファンの強度評価に用いる記号を表3-5に示す。

表3-5 ファンの強度評価に用いる記号

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	基礎ボルトの軸断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	基礎ボルトに対する引張力
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（g=9.80665）
h	mm	全高の1/2
L ₁ ～L ₇	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	ファンの質量
N	—	基礎ボルトの本数
Q _b	N	基礎ボルトに対するせん断力
q	N/m ²	設計用速度圧
r	mm	ケーシング内半径
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	ケーシング板厚
W _M	N	設置（変更）許可を受けた竜巻による飛来物の衝撃荷重
W _W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
ΔP	N/m ²	設計竜巻の気圧低下量
σ _b	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
σ _θ	MPa	周方向応力
τ	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

e. 冷凍機

冷凍機の強度評価に用いる記号を表3-6に示す。

表3-6 冷凍機の強度評価に用いる記号

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	基礎ボルトの軸断面積
C	—	建築物荷重指針・同解説により規定される風力係数
F	MPa	J S M E SSB-3121.1(1)により規定される値
F _b	N	基礎ボルトに対する引張力
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（g=9.80665）
h	mm	全高の1/2
L ₁	mm	基礎ボルト間の水平距離
L _H	mm	重心から基礎ボルト間の水平距離
m	kg	冷凍機の運転質量
N	—	基礎ボルトの本数
n _f	—	引張力を受ける基礎ボルトの本数
Q _b	N	基礎ボルトに対するせん断力
q	N/m ²	設計用速度圧
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
W _M	N	設置（変更）許可を受けた竜巻による飛来物の衝撃荷重
W _W	N	設計竜巻の風圧力による荷重
σ _b	MPa	基礎ボルトに生じる引張応力
τ	MPa	基礎ボルトに生じるせん断応力

3.2 評価対象部位

(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。

屋外に設置する換気空調設備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箇所を選定する。

屋外に設置する換気空調設備の衝突評価における評価対象部位を図3-1、図3-2に示す。

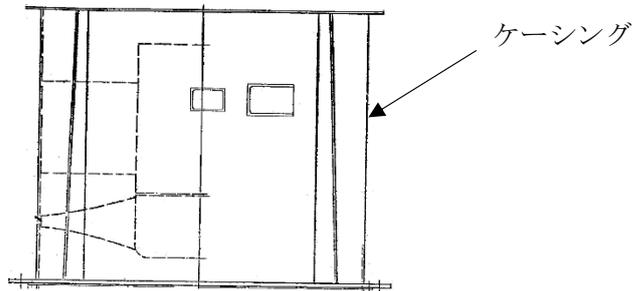


図 3-1 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価における評価対象部位
(ディーゼル発電機室ルーフベントファン)

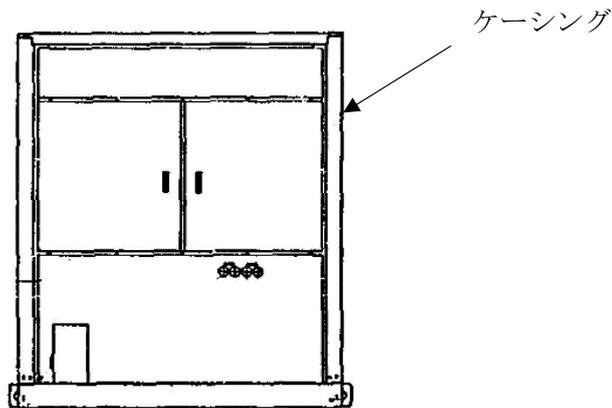


図 3-2 屋外に設置する換気空調設備の衝突評価における評価対象部位
(中央制御室換気系冷凍機)

(2) 構造強度評価の評価対象部位

a. ダクトの評価対象部位

角ダクト及び丸ダクトの評価対象部位は、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

選定する。

(a) 角ダクト

下記の外気と繋がる換気空調系を評価対象とする。

- ・中央制御室換気系
- ・非常用ディーゼル発電機室換気系
- ・高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室換気系

気圧差による荷重は、角ダクト本体の薄肉鋼板部に作用する。このことから、ダクト鋼板（本体）を評価対象部位として選定する。

角ダクトは薄肉角筒であり、発生応力はダクト鋼板中央部で最大となることから、ダクト鋼板を評価対象とする。フランジについては曲げモーメントが作用しないため、評価しない。ダクトは支持構造物にダクト鋼板面を接触させて支持されており、設計竜巻の気圧差によりダクトに作用する荷重は、ダクト支持構造物に作用しないことから、ダクト鋼板を評価する。

角ダクトの強度評価における評価対象部位を図3-3に示す。

ダクト鋼板（本体）

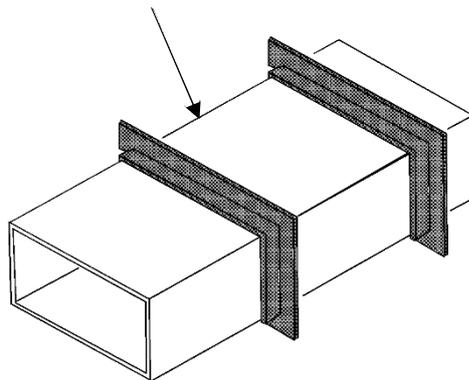


図3-3 角ダクトの評価対象部位

(b) 丸ダクト

下記の外気と繋がる換気空調系を評価対象とする。

- ・原子炉建屋換気系
- ・中央制御室換気系

気圧差による荷重は、丸ダクト本体の薄肉鋼板部に作用する。このことから、ダクト鋼板（本体）を評価対象部位として選定する。

丸ダクトは薄肉円筒であり、座屈を考慮してダクト鋼板を評価対象とする。

丸ダクトの強度評価における評価対象部位を図3-4に示す。

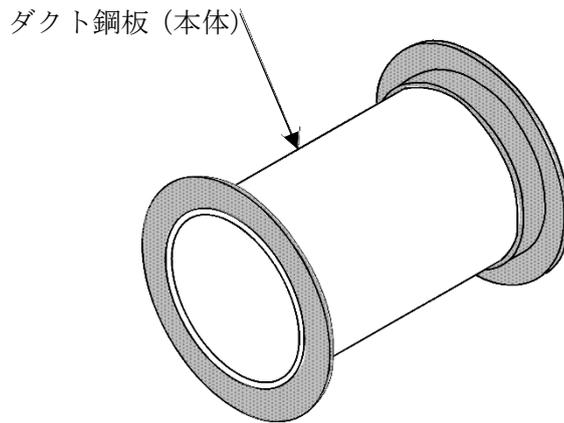


図3-4 丸ダクトの評価対象部位

b. 隔離弁の評価対象部位

隔離弁の評価対象部位は、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選定する。

気圧差による荷重は、隔離弁本体の耐圧部に作用する。

このことから、耐圧部を評価対象部位として選定する。

隔離弁の強度評価における評価対象部位を、図3-5に示す。

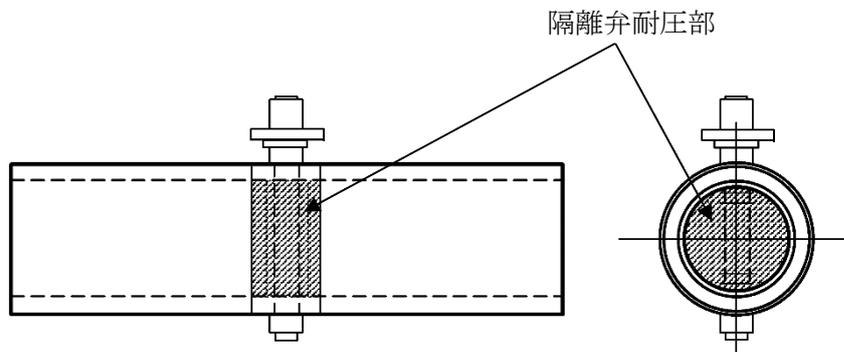


図3-5 隔離弁の評価対象部位

c. ファンの評価対象部位

ファンの評価対象部位は、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。

竜巻より防護すべき施設を内包する施設内に設置する、外気と繋がっている換気空調設備における気圧差による荷重は、ファンのケーシングに作用する。

このことから、ケーシングを評価対象部位として設定する。

また、屋外に設置する換気空調設備におけるファンに作用する風圧力による荷重は、ケーシングを介し、ケーシングを固定している基礎ボルトに作用する。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、基礎ボルトを強度評価の評価対象部位として選定する。

ファンの強度評価における評価対象部位を、図3-6～図3-7に示す。

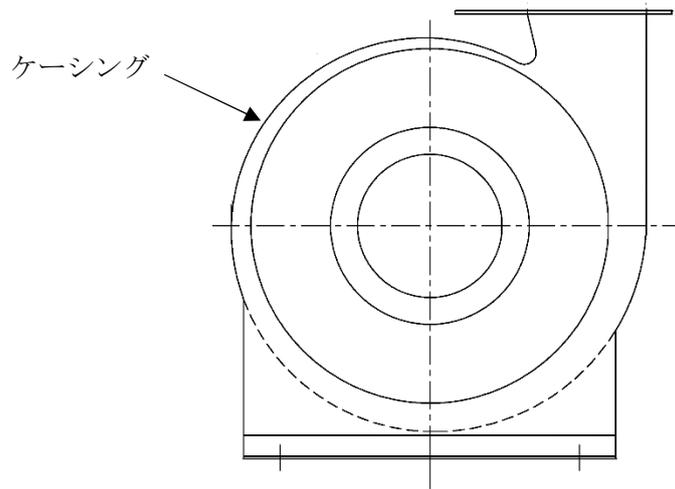


図3-6 ファンの評価対象部位（中央制御室換気系フィルタ系ファン）

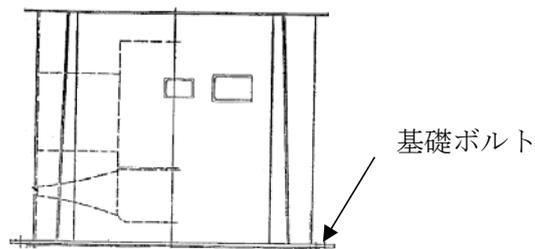


図 3-7 ファンの評価対象部位（ディーゼル発電機室ルーフベントファン）

d. 冷凍機の評価対象部位

冷凍機の評価対象部位は、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。

屋外に設置する換気空調設備における冷凍機に作用する風圧力による荷重は、ケーシングを介し、冷凍機を固定している取付ボルトに作用する。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、取付ボルトを強度評価の評価対象部位として選定する。

冷凍機の強度評価における評価対象部位を、図3-8に示す。

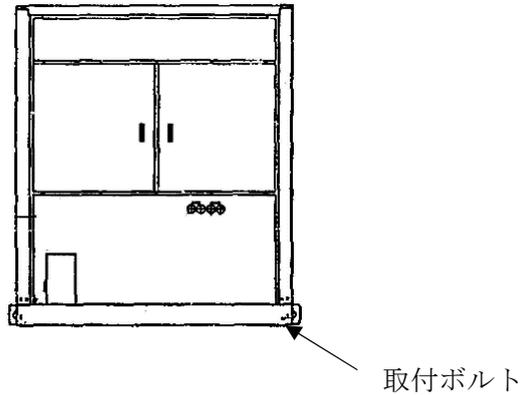


図3-8 冷凍機の評価対象部位（中央制御室換気系冷凍機）

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」にて示している荷重及び荷重の組合せを踏まえ、換気空調設備の評価対象施設ごとに設定する。

(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3-7、屋外に設置する換気空調設備の衝突評価に用いる荷重を表3-8に示す。

表3-7 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3-8 屋外に設置する換気空調設備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	ディーゼル発電機室ルーフトファン	ケーシング	飛来物による衝撃荷重
	中央制御室換気系冷凍機	ケーシング	飛来物による衝撃荷重

(2) 構造強度評価の荷重及び荷重の組合せ

a. 荷重の設定

強度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。

(b) 設計竜巻による荷重

イ. 建屋内にある換気空調設備については、気圧差による荷重を考慮する。

ロ. 屋外にある換気空調設備については、風圧力による荷重を考慮する。開放された施設であるため、ディーゼル発電機室ルーフトファン及び中央制御室換気系冷凍機内外に気圧差は発生しないことから気圧差による荷重は考慮しない。また、防護対策として、竜巻防護ネットを設置する施設については、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、竜巻防護ネットを通過する小さな飛来物による衝撃荷重は、衝突する機器へ伝わる加速度が小さく、機器へ作用する荷重は強度に影響を与えないので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。

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

b. 荷重の組合せ

強度評価に用いる荷重の組合せは、評価対象施設ごとに設定する。

角ダクト及び丸ダクトのダクト鋼板（本体）には、自重及び気圧差による荷重が作用する。

隔離弁の耐圧部には、気圧差による荷重が作用する。

建屋内のファンのケーシングには、気圧差による荷重が作用する。

屋外のファン及び冷凍機には、自重及び風圧力による荷重が作用する。

強度評価の荷重の組合せを表3-9に示す。

表3-9 荷重の組合せ

施設分類	施設名称	評価対象部位	荷重
外気と繋がっている 屋内の外部事象防護 対象施設	角ダクト	ダクト鋼板（本体）	①自重 ②気圧差による荷重
	丸ダクト	ダクト鋼板（本体）	①自重 ②気圧差による荷重
	隔離弁	耐圧部	①気圧差による荷重
	ファン	ケーシング	①気圧差による荷重
屋外の外部事象防護 対象施設	ファン	基礎ボルト	①自重 ②風圧力による荷重
	冷凍機	取付ボルト	①自重 ②風圧力による荷重

3.4 許容限界

(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。屋外に設置する換気空調設備の外殻を構成する部材の厚さを表3-10に示す。

表3-10 屋外に設置する換気空調設備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
ディーゼル発電機室ルーフベント ファン	9.0mm (ケーシング)
中央制御室換気系冷凍機	1.0mm (ケーシング)

(2) 構造強度評価における許容限界

a. 角ダクトの許容限界

角ダクトの許容限界は、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を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態Ⅲ_ASとする。

角ダクトの許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2, 3配管」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。ただし、妥当な安全裕度を考慮し、座屈を生じないように設定する許容限界は、座屈の算出式に応じた値を許容限界として設定する。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、角ダクトの最高使用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 Part 5, 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。なお、J S M E 付録材料図表 Part 5 に規定されていない材料許容値は J I S G 3302 を適用する。

(a) 面外荷重及び外圧による面内荷重に対する許容限界

角ダクトの面外荷重及び外圧による面内荷重に対する許容限界を表 3-11 に示す。

表 3-11 角ダクトの許容限界

状態	許容限界
	一次応力
	曲げ
許容応力状態 III _A S	S _y

(b) 長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）に対する許容限界

自重により発生する曲げモーメント M と発生応力 σ_{p2} の関係は以下の式で表される。



ここで

$$I = \frac{(a + 2t)(b + 2t)^3 - a \cdot b^3}{12}$$

短期荷重（設計竜巻による内外差圧）による発生応力 σ_{p1} と長期荷重（自重）による発生応力 σ_{p2} の和 σ_w が許容応力 σ_y に達した時に座屈が生じることから、長期荷重により発生する曲げモーメント M_p が、許容応力 σ_y と短期荷重による発生応力 σ_{p1} の差（ $\sigma_y - \sigma_{p1}$ ）から求まる長期荷重に対する許容曲げモーメント以下であることを確認する。



ここで、

$$\sigma_y = S_y$$

b. 丸ダクトの許容限界

丸ダクトの許容限界は、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を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、クリップリング座屈の算出式に応じた値とする。

丸ダクトの許容限界は、設計荷重に対して、塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が微小なレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、座屈を生じないこととするため、クリップリング座屈の算出式に応じた値を許容限界とする。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、丸ダクトの最高使用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。

(a) 外圧に対する許容限界

外圧により生じる周方向応力は、クリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力（座屈応力） $\sigma_{c r i p}$ を超えないこととする。

外圧によるクリップリング座屈が発生する際に生じる周方向応力 $\sigma_{c r i p}$ は、円筒かくの座屈応力の式より算出する。



(b) 長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）に対する許容限界

自重により作用する曲げモーメント M_p と外圧 ΔP （設計竜巻による気圧低下量）の組合せが、下式を満足させるものとする。



ここで、自重による曲げによってクリップリング座屈が発生する際に作用する曲げモーメント $M_{c r i p}$ は、下式より算出する。



c. 隔離弁の許容限界

隔離弁の許容限界は、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を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し設定する。

隔離弁の許容限界は、隔離弁の耐圧部に発生する圧力に対して、部材の降伏応力 S_y を許容限界とする。

d. ファンの許容限界

ファンの許容限界は、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を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態Ⅲ_ASとする。

ファンの許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス2ポンプ」及び「クラス2,3支持構造物」の許容限界を準用し、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、ファンの温度条件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。ファンの許容限界を表3-12、表3-13に示す。

表3-12 ファンの許容限界（ケーシング）

状態	許容限界
	一次一般膜応力
許容応力状態 Ⅲ _A S	$\text{Min}[S_y, 0.6 S_u]$

表3-13 ファンの許容限界（基礎ボルト）

状態	応力の種類		許容限界
許容応力状態 Ⅲ _A S	一次応力	引張	$1.5 f_t$
		せん断	$1.5 f_s$
		組合せ	$\text{Min} \{ 1.5 f_t, (2.1 f_t - 1.6 \tau) \}$

(5) 冷凍機の許容限界

冷凍機の許容限界は、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を踏まえ、「3.2 評価対象部位」にて設定している評価対象部位ごとに、機能損傷モードを考慮し、許容応力状態Ⅲ_ASとする。

冷凍機の許容限界は、J E A G 4 6 0 1を準用し、「クラス 2,3 支持構造物」の許容限界を準用し、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、冷凍機の温度条件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。冷凍機の許容限界を表 3-14 に示す。

表3-14 冷凍機の許容限界（基礎ボルト）

状態	応力の種類		許容限界
許容応力状態 Ⅲ _A S	一次応力	引張	1.5 f _t
		せん断	1.5 f _s
		組合せ	Min {1.5 f _t , (2.1 f _t - 1.6 τ)}

3.5 評価方法

(1) 衝突評価の評価方法

屋外に設置する換気空調設備の衝突評価は、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) 構造強度評価の評価方法

a. 角ダクトの評価方法

角ダクトの強度評価は、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「5. 強度評価方法」にて設定している角ダクトの評価式を用いる。

(a) 計算モデル

任意のダクト面に着目すると、ダクト面は両サイドをほかの2つの側面のダクト面で、軸方向（流れ方向）を補強部材（及び接続部材）で支持された長方形の板とみなすことができる。そのため、鋼板を補強部材と両サイドのウェブで支持された4辺単純支持矩形板とし評価を行う。自重等によりダクトに生じる曲げモーメントに関し、ウェブでの応力分布が線形で、中立面がフランジの両側から等距離の中央線上にあるとする。

角ダクトモデル図を図3-15に示す。

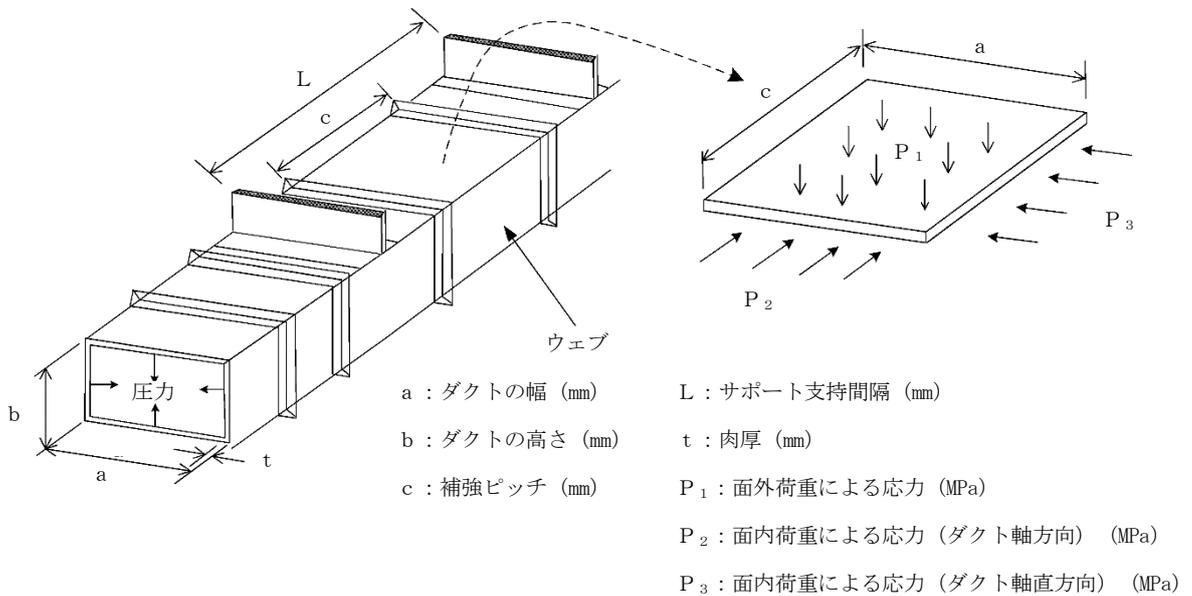


図3-15 角ダクトモデル図

(b) 計算方法

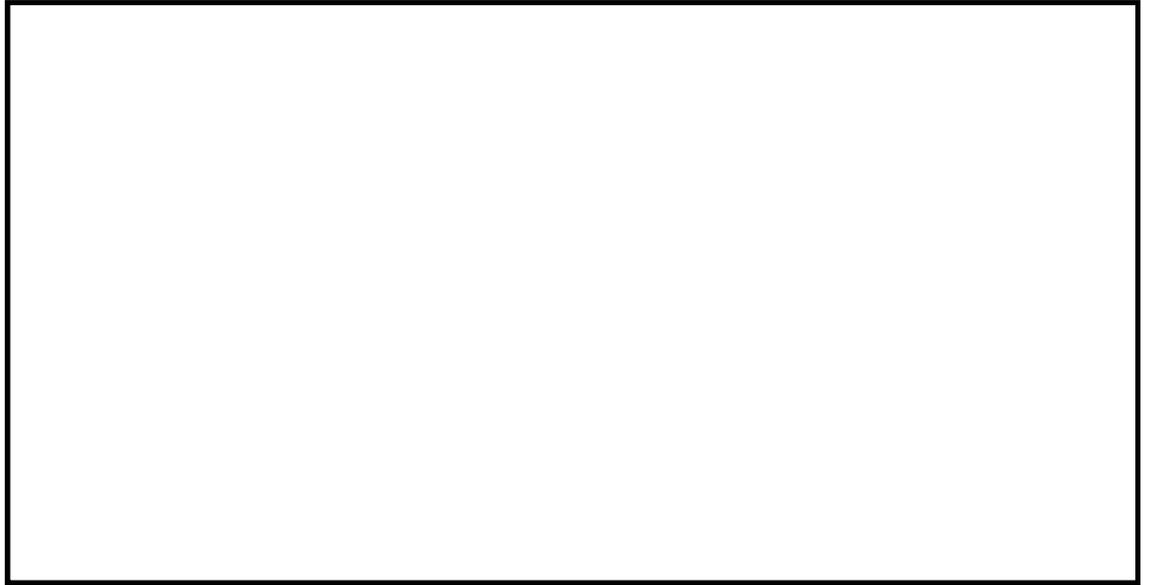
ダクトにかかる外圧は、設計竜巻により発生する気圧差が影響するので、

$$P = \Delta P$$

イ. 面外荷重による発生応力

4辺単純支持（周辺で水平，垂直方向の変位拘束，たわみ角は自由）の長方形板が等分布荷重を受ける場合において，中心に生じる外圧及び自重による面外荷重により作用する最大応力 σ_{max} とその面外荷重によるダクト鋼板の最大変位量 δ_{max} との関係は，以下の式で表される。

機械工学便覧に記載されている4辺単純支持の長方形板が等分布荷重を受ける場合の長方形板の大たわみ式を引用する。



式 (3.2) より得られる δ_{max} の値を式 (3.1) へ代入し、 σ_{max} を算出する。

ロ. 面内荷重による発生応力

機械工学便覧の「クリッピングの考え方」と日本機械学会ジャーナルの「薄肉長方形及び箱形はりの座屈と強度」に記載されている鷓戸口の式を準用する。

(イ) 外圧による発生応力

薄肉構造物のうち、長方形板の弾性座屈の式より算出する。



(ロ) 自重による曲げモーメント

自重によりダクト鋼板に作用する曲げモーメントは、以下の式により算出する。

$$M_p = \frac{g \cdot \mu \cdot L^2}{8}$$

b. 丸ダクトの評価方法

丸ダクトの強度評価は、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「5. 強度評価方法」にて設定している丸ダクトの評価式を用いる。

(a) 計算モデル

丸ダクトは両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。丸ダクトモデル図を図3-16に示す。

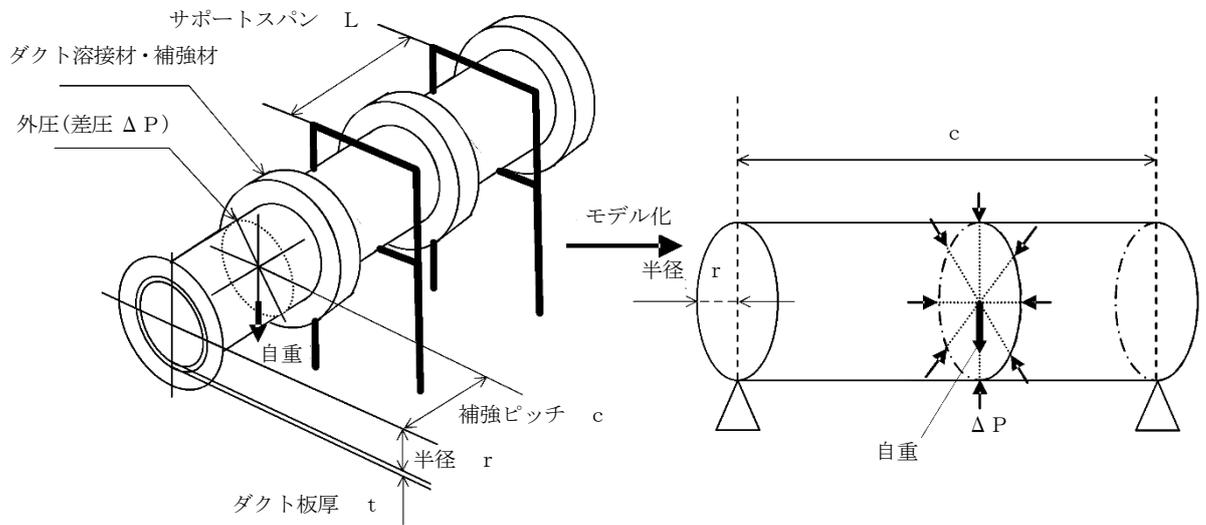


図3-16 丸ダクトモデル図

(b) 計算方法

計算式においては機械工学便覧及び「軽構造の理論とその応用（日本科学技術連盟（1966）」に記載されている式を準用する。

イ. 外圧により生じる周方向応力 $\sigma_{c r i p l}$

$$\sigma_{c r i p l} = \frac{\Delta P \cdot r}{t}$$

ロ. 自重により作用する曲げモーメント M_p

$$M_p = \frac{g \cdot \mu \cdot L^2}{8}$$

c. 隔離弁の評価方法

隔離弁の強度評価は、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「5. 強度評価方法」にて設定している隔離弁の評価方法を用いる。

(a) 弁箱

イ. 計算モデル

弁箱は両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。弁箱のモデル図を図3-17に示す。

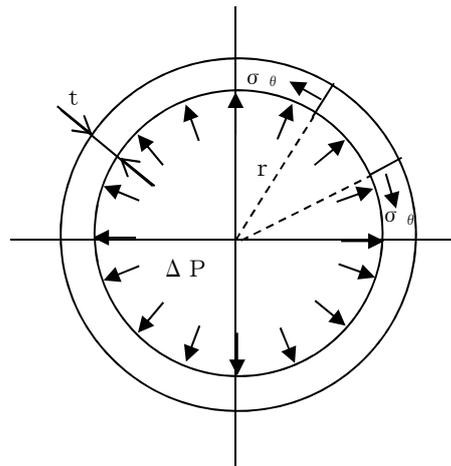


図3-17 弁箱モデル図

ロ. 計算方法

計算式においては機械工学便覧及び「軽構造の理論とその応用（日本科学技術連盟(1966)）」に記載されている式を準用する。

$$\sigma_{\theta} = \frac{\Delta P \cdot r}{t}$$

(b) 弁体

イ. 計算モデル

弁体は円板であるため、等分布荷重が作用する周辺支持円板とみなし、計算を行う。評価モデルを図 3-18 に示す。

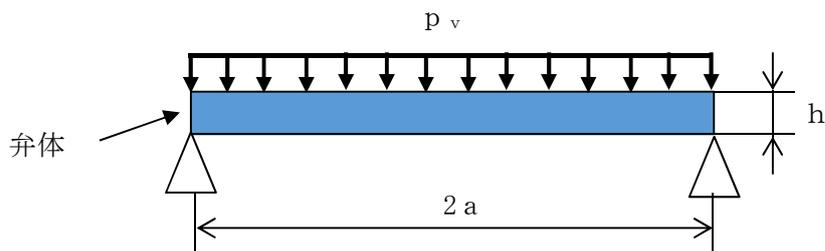


図 3-18 弁体の評価モデル

ロ. 計算方法

弁体に作用する曲げ応力の計算方法を以下に示す。

設計竜巻の気圧低下により弁体を受ける応力 P_1 及び自重により弁体を受ける応力 P_2 は次による。

$$P_1 = \Delta P$$

$$P_2 = \frac{m_v \cdot g}{A_v}$$

ここで

$$A_v = \frac{\pi}{4} (2a)^2$$

弁体に受ける応力 p_v は次による。

$$p_v = P_1 + P_2$$

弁体に対する曲げ応力は次による。

$$\sigma_{max} = 1.24 \cdot \frac{p_v \cdot a^2}{h^2}$$

(c) 弁棒

イ. 計算モデル

弁体を受ける等分布荷重を支持する弁棒断面について、計算を行う。評価モデルを図 3-19 に示す。

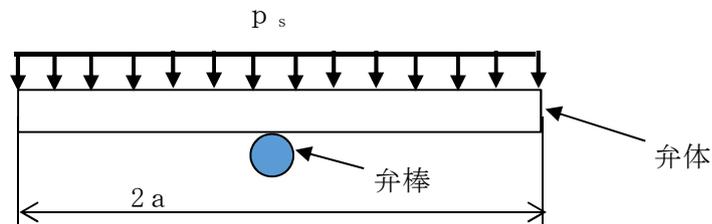


図 3-19 弁棒の評価モデル

ロ. 計算方法

弁棒に作用するせん断応力の計算方法を以下に示す。

設計竜巻の気圧低下により弁棒に受ける荷重 F_1 及び弁体及び弁棒自重により弁棒に受ける荷重 F_2 は次による。

$$F_1 = \Delta P \cdot \frac{\pi}{4} (2a)^2$$

$$F_2 = (m_v + m_s) \cdot g$$

弁棒に受ける荷重 p_s は次による。

$$p_s = F_1 + F_2$$

弁棒に対するせん断応力は次による。

$$\tau = \frac{p_s}{A_s}$$

ここで

$$A_s = \frac{\pi}{4} d^2$$

d. ファンの評価方法

ファンの強度評価は、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「5. 強度評価方法」にて設定しているファンの評価式を用いる。

(a) 中央制御室換気系フィルタ系ファン

イ. 計算モデル

ファンは両端を補強部材で支持された円筒の梁とみなし、計算を行う。ファンケーシングモデル図を図3-20に示す。

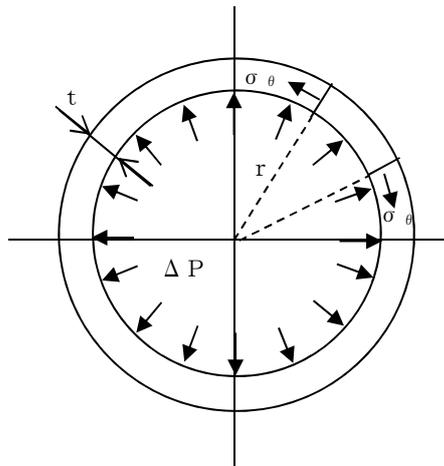


図3-20 ファンケーシングモデル図

ロ. 計算方法

計算式においては機械工学便覧及び「軽構造の理論とその応用（日本科学技術連盟(1966)）」に記載されている式を準用する。

$$\sigma_\theta = \frac{\Delta P \cdot r}{t}$$

(b) ディーゼル発電機室ルーフベントファン
イ. 計算モデル

ファンの計算モデルは円筒形の1質点モデルとし、全高の1/2の位置に複合荷重が作用することとする。ファンモデル図を図3-21に示す。

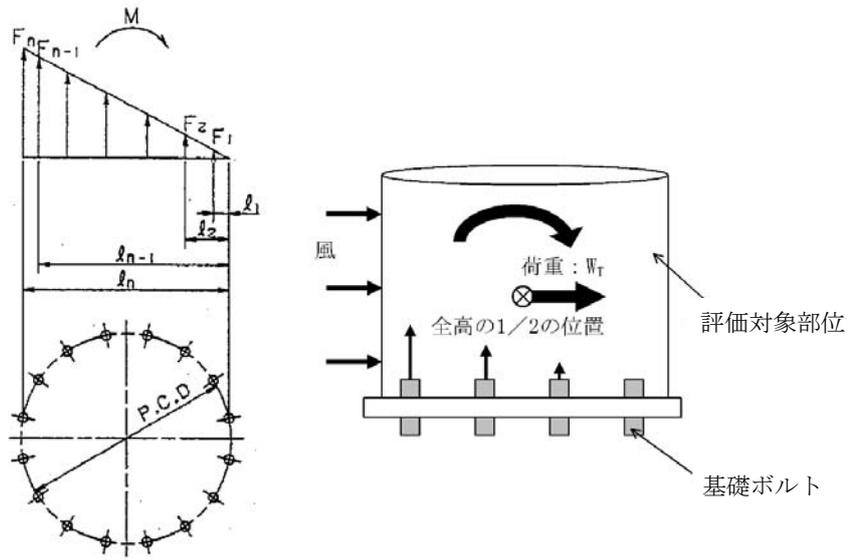


図 3-21 ファンモデル図

ロ. 計算方法

(イ) 引張応力

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

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

(3.1) (3.2) 式より,

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

ここで

$$M = W_w \cdot h - m \cdot g \cdot \frac{L_n}{2}$$

基礎ボルトの生じる引張応力 σ_b は次式より求める。

$$\sigma_b = \frac{F_n}{A_b}$$

(ロ) せん断応力

基礎ボルトに対するせん断応力は、基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

- ・ せん断力
- ・ せん断応力

$$Q_b = W_w$$

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

e. 冷凍機の評価方法

冷凍機の強度評価は、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「5. 強度評価方法」にて設定している冷凍機の評価式を用いる。

(a) 計算モデル

冷凍機の計算モデルは立方体の1質点モデルとし、全高の1/2の位置に複合荷重が作用することとする。冷凍機モデル図を図3-22に示す。

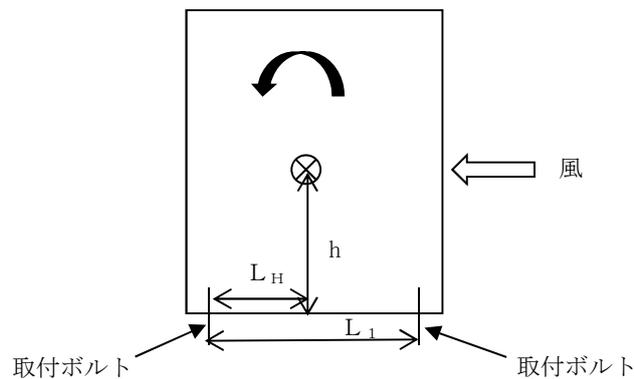


図 3-22 冷凍機モデル図

(b) 計算方法

イ. 引張応力

基礎ボルトに対する引張力は最も厳しい条件として、図 3-16 で基礎ボルトを支点とする転倒を考え、これを片側の基礎ボルトで受けるものとして計算する。

(イ) 引張力

$$F_b = \frac{W_w \cdot h - m \cdot g \cdot L_H}{n_f \cdot L_1}$$

(ロ) 引張応力

$$\sigma_b = \frac{F_b}{A_b}$$

ロ. せん断応力

基礎ボルトに対するせん断応力は，基礎ボルト全本数で受けるものとして計算する。

・ せん断力

$$Q_b = W_w$$

・ せん断応力

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

4. 評価条件

(1) 角ダクト

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-1及び表4-2に示す。

角ダクトにおいて、気圧差による発生応力が最も大きくなるものは面外荷重であり、その発生応力比が最も厳しくなる系統の角ダクトについて記載する。

表 4-1 許容応力計算に用いる条件

材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)
SUS304	40	205

表 4-2 評価条件

系統	ダクト種別
中央制御室換気系	SUS

Δ P (N/m ²)	g (m/s ²)	ν (-)
8.9×10 ³	9.80665	0.3

a (mm)	b (mm)	t (mm)	c (mm)	L (mm)
3200	2000	2.0	1830	1830

μ (kg/m)	g D _p (N/m ²)	材質	最高使用温度 (°C)	E (MPa)
165.1	155.5	SUS304	40	193800

(2) 丸ダクト

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-3に示す。丸ダクトにおいて、気圧差による発生応力が最も厳しくなるのは周方向応力であるため、その発生応力比が最も厳しくなる系統の丸ダクトについて記載する。

表 4-3 評価条件

系統	ダクト種別		
中央制御室換気系	SUS		
ΔP (N/m ²)	g (m/s ²)	ν (-)	
8.9×10^3	9.80665	0.3	
ダクトサイズ (mm)	c (mm)	L (mm)	
$\phi 450 \times 0.8$	960	3000	
μ (kg/m)	材質	最高使用温度 (°C)	E (MPa)
31.3	SUS304	40	193800

(3) 隔離弁の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-4～表4-7に示す。

評価対象施設ごとに、その発生応力比が最も厳しくなる隔離弁について記載する。

表 4-4 許容応力計算に用いる条件

評価対象施設	評価対象部位	材質	温度条件 (°C)	S_y (MPa)
原子炉建屋換気系隔離弁	弁箱	SS400	40	245
	弁体	SS400	40	235
	弁棒	SUS420J2	40	225
中央制御室換気系隔離弁	弁箱	SCPH2	40	245
	弁体	SCS13	40	185
	弁棒	SUS420J2	40	225

表 4-5 評価条件 (原子炉建屋換気系隔離弁)

ΔP (N/m ²)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	m _v (kg)
8.9×10 ³	1150	12	1133	1370

m _s (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	d (mm)
315	9.80665	32	150

表 4-6 評価条件 (中央制御室換気系隔離弁)

ΔP (N/m ²)	r (mm)	t (mm)	a (mm)	m _v (kg)
8.9×10 ³	222.5	25	215	53

m _s (kg)	g (m/s ²)	h (mm)	d (mm)
10	9.80665	10	58

(4) ファンの評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-8～表4-11に示す。

表 4-7 許容応力計算に用いる条件 (中央制御室換気系フィルタ系ファン)

評価対象部位	材料	温度条件 (°C)	S _y (MPa)	S _u (MPa)
ケーシング	SS400	40	245	400

表 4-8 許容応力計算に用いる条件 (ディーゼル発電機室ルーフベントファン)

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)
基礎ボルト	SS400	50*	231	394	231	173	133

注記 * : 周囲環境温度

表 4-9 評価条件 (中央制御室換気系フィルタ系ファン)

ΔP (N/m ²)	r (mm)	t (mm)
8.9×10 ³	590.5	4.5

表 4-10 評価条件（ディーゼル発電機室ルーフベントファン基礎ボルト）

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

L ₁ (mm)	L ₂ (mm)	L ₃ (mm)	L ₄ (mm)	L ₅ (mm)	L ₆ (mm)
118.7	338.0	624.6	934.8	1221.4	1440.7

L ₇ (mm)	C (-)	g (m/s ²)	A (m ²)	m (kg)	ボルト サイズ
1559.4	1.2	9.80665	1.980	940	M24

N (-)	A _b (mm ²)	h (mm)
16	452.4	600

(5) 冷凍機の評価条件

「3. 強度評価方法」に用いる評価条件を表4-12, 表4-13に示す。

表 4-12 許容応力計算に用いる条件

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)
取付ボルト	SS400	50*	231	394	231	173	133

注記 * : 周囲環境温度

表 4-13 評価条件

q (N/m ²)	G (-)	W _M (N)
6.1 × 10 ³	1	0

L _H (mm)	L ₁ (mm)	C (-)	g (m/s ²)	A (m ²)	m (kg)
910.0	1890	2.4	9.80665	11.48	4680

ボルト サイズ	n _f (-)	N (-)	A _b (mm ²)	h (mm)
M20	4	8	314.2	1125

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	0.58	0.97

砂利の貫通限界厚さ(0.97 mm)と屋外に設置する換気空調設備の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さとの比較を表5-2に示す。

砂利の貫通限界厚さは、屋外に設置する換気空調設備の外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ未満である。

表 5-2 防護対象施設の衝突評価結果 (砂利)

防護対象施設	外殻を構成する部材の厚さから計算上必要な厚さを差し引いた残りの厚さ (mm)	貫通限界厚さ T (mm)	結果
ディーゼル発電機室 ルーフベントファン	8.03	0.97	貫通しない
中央制御室換気系冷 凍機	0.03	0.97	貫通しない

(2) 構造強度評価結果

a. 角ダクト

角ダクト鋼板 (本体) の強度評価結果を表5-3に示す。

ダクト鋼板に発生する応力は許容応力以下であり、また、自重 (長期) + 設計竜巻による内外差圧 (短期) による面内荷重による発生モーメントは許容応力以下である。

表 5-3 強度評価結果

系統	ダクト種別	ダクトサイズ(mm)
中央制御室換気系	鋼板	3200×2000×2.0

面外荷重		外圧による面内荷重		長期荷重（自重）＋短期荷重 （設計竜巻による内外差圧に よる面内荷重）	
発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生応力 (MPa)	許容応力 (MPa)	発生値 (kN・mm)	許容値 (kN・mm)
125	205	61	205	678	81597

b. 丸ダクト

丸ダクト鋼板（本体）の強度評価結果を表5-4に示す。

ダクト鋼板に発生する周方向応力は許容応力以下であり、また、長期荷重（自重）＋短期荷重（設計竜巻による内外差圧）により発生する応力は許容応力以下である。

表 5-4 強度評価結果

系統	ダクト種別	ダクトサイズ(mm)
中央制御室換気系	SUS	φ 450×0.8

気圧差により生じる周方向応力(MPa)		長期荷重（自重）＋短期荷重 （設計竜巻による内外差圧）による制限値	
発生応力	許容応力	発生値	許容値
3	9	0.3	0.9

c. 隔離弁

隔離弁の強度評価結果を表5-5～表5-7に示す。

弁箱，弁体，弁棒に発生する応力は許容応力以下である。

表 5-5 強度評価結果（弁箱）

評価対象施設	弁箱に発生する周方向応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
原子炉建屋換気系隔離弁	1	245
中央制御室換気系隔離弁	1	245

表 5-6 強度評価結果（弁体）

評価対象施設	弁体に発生する曲げ応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
原子炉建屋換気系隔離弁	20	235
中央制御室換気系隔離弁	8	185

表 5-7 強度評価結果（弁棒）

評価対象施設	弁棒に発生するせん断応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
原子炉建屋換気系隔離弁	3	225
中央制御室換気系隔離弁	1	225

d. ファン

ファンの強度評価結果を表5-8、表5-9に示す。

ケーシングに発生する周方向応力は、許容応力以下である。

基礎ボルトに発生する応力は、許容応力以下である。

表 5-8 強度評価結果（ケーシング）

評価対象施設	ケーシングに発生する 周方向応力 (MPa)	許容応力 (MPa)
中央制御室換気系フィルタ系ファン	2	240

表 5-9 強度評価結果（基礎ボルト）

評価対象施設	応力分類	基礎ボルトに発生する応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
ディーゼル発電機室ルー フベントファン	引張	1	173
	せん断	3	133
	組合せ	1	173

e. 冷凍機

冷凍機の竜巻発生時の強度評価結果を表5-10に示す。

取付ボルトに発生する周応力は、許容応力以下である。

表 5-10 強度評価結果（取付ボルト）

評価対象施設	応力分類	基礎ボルトに発生する応力 (MPa)	許容限界 (MPa)
中央制御室換気系冷凍機	引張	63	173
	せん断	67	133
	組合せ	63	135

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。

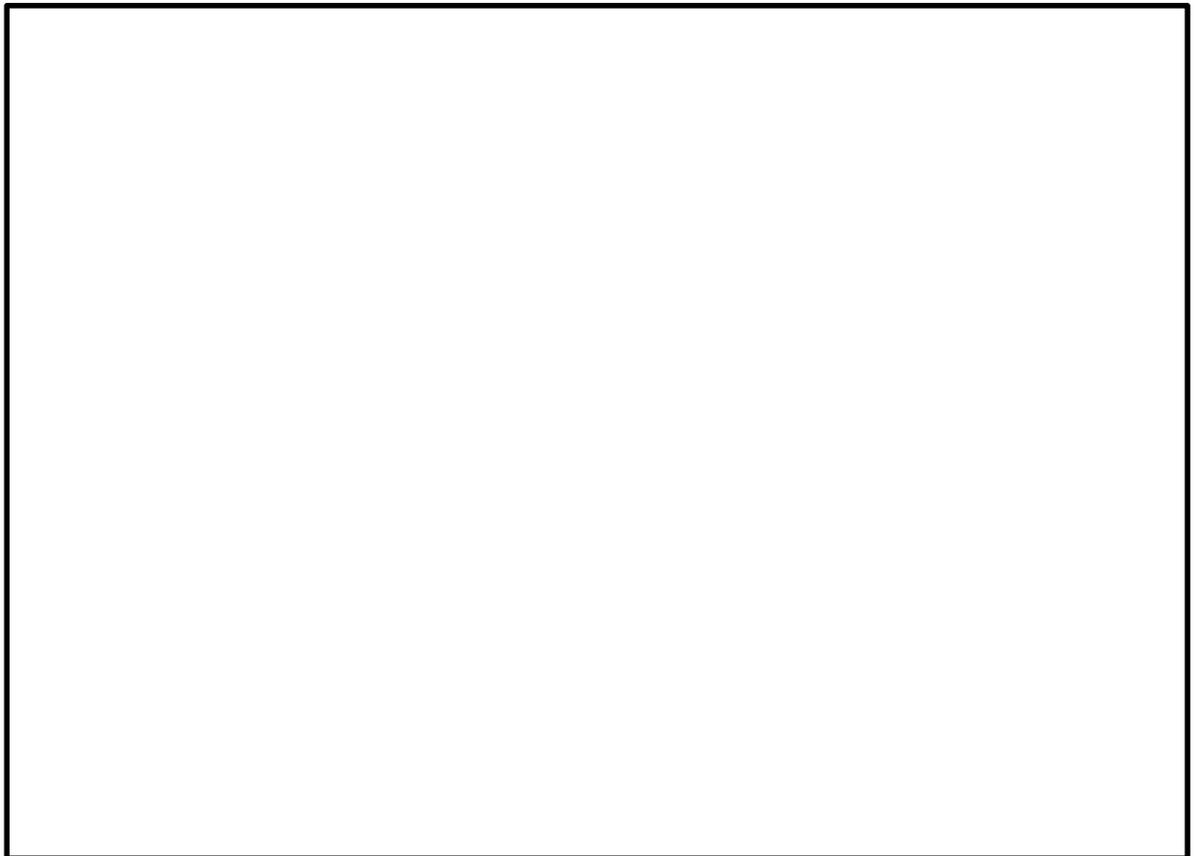


図 2-1 防護ネットの設置位置図

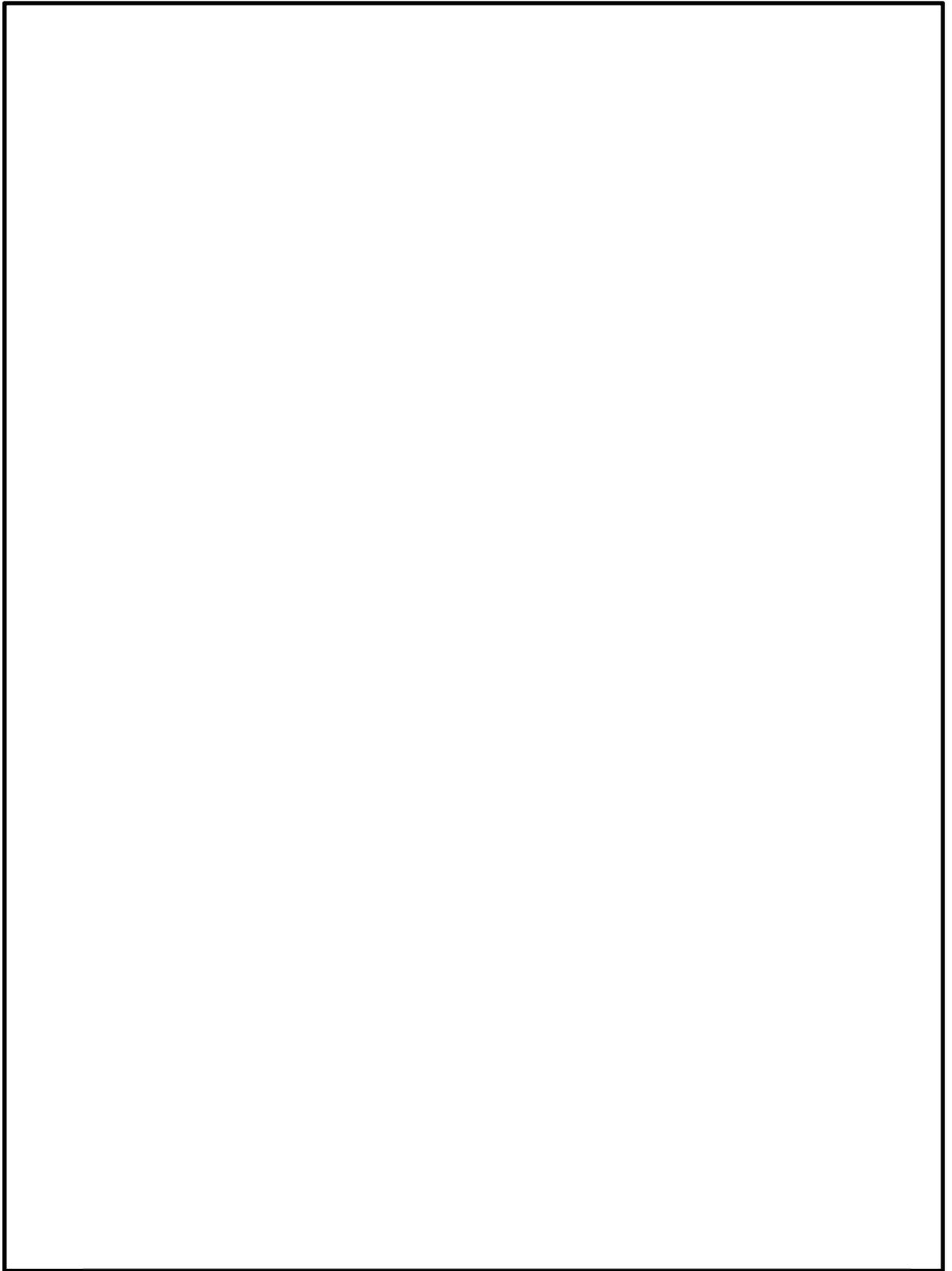


図 2-3 防護ネットの割付展開図
(2 C 非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

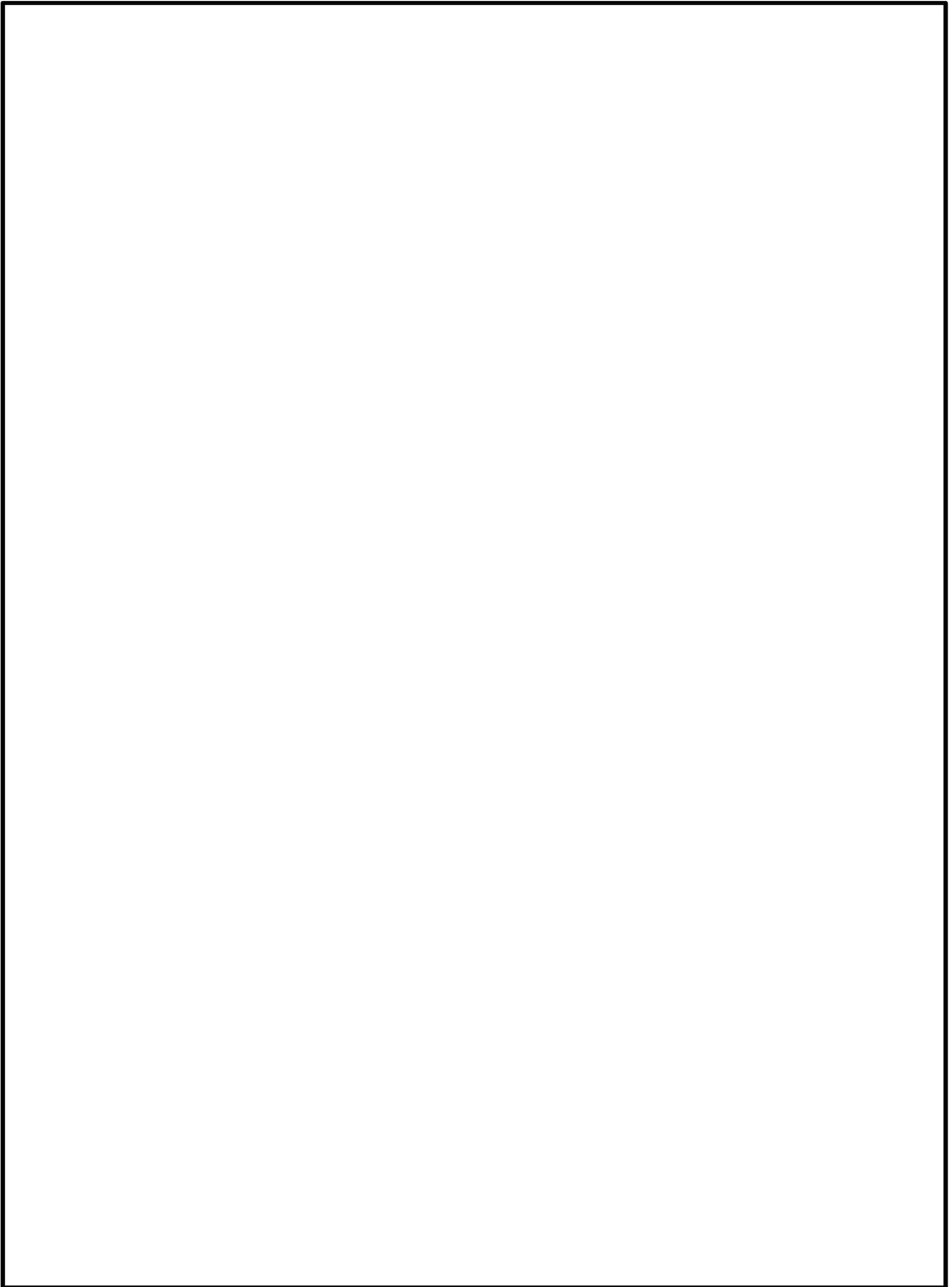


図 2-4 防護ネットの割付展開図
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

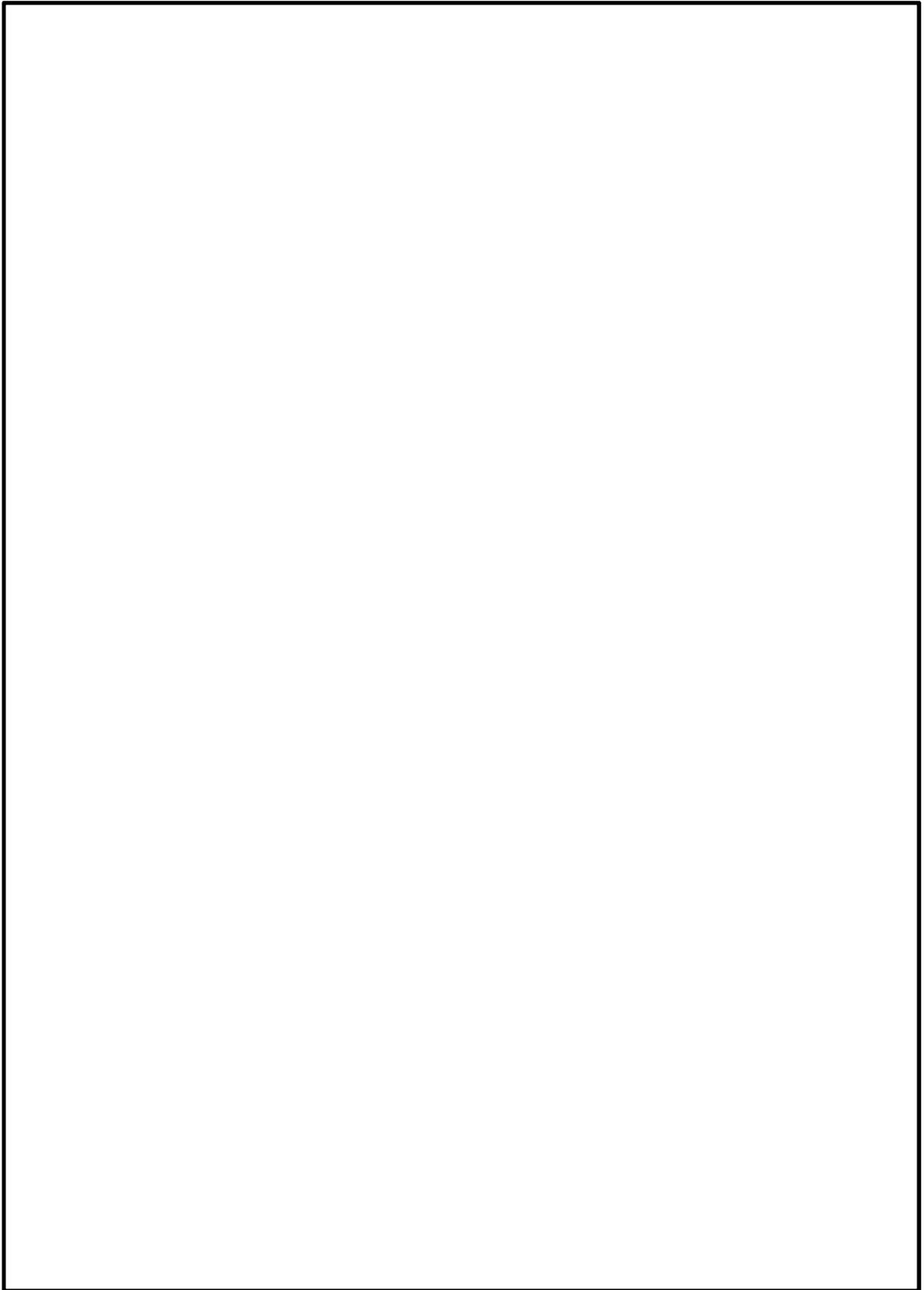


図 2-4 防護ネットの割付展開図(2/2)
(2D非常用ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

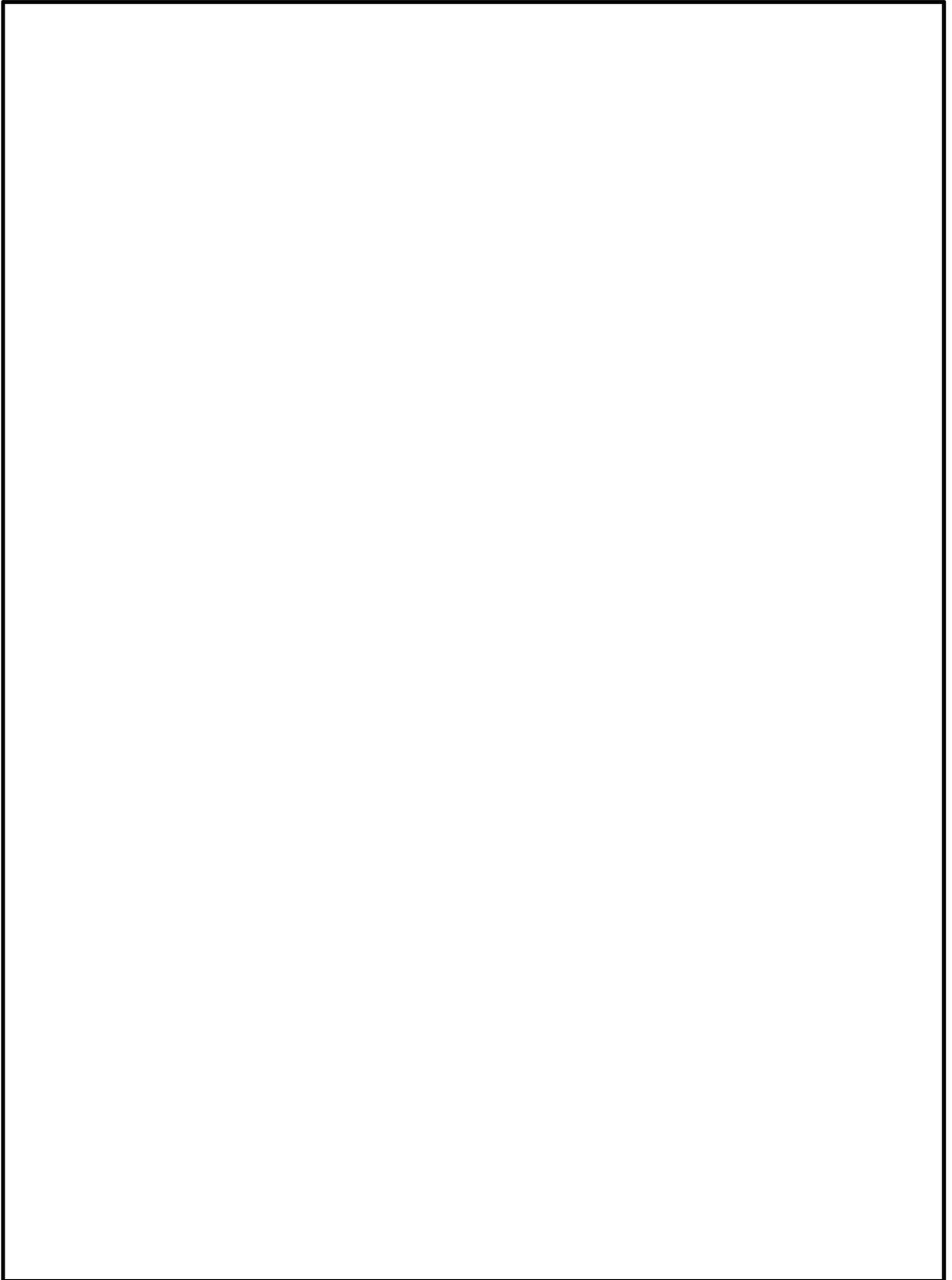


図 2-5 防護ネットの割付展開図
(高圧炉心スプレイ系ディーゼル発電機室ルーフベントファン竜巻防護対策施設)

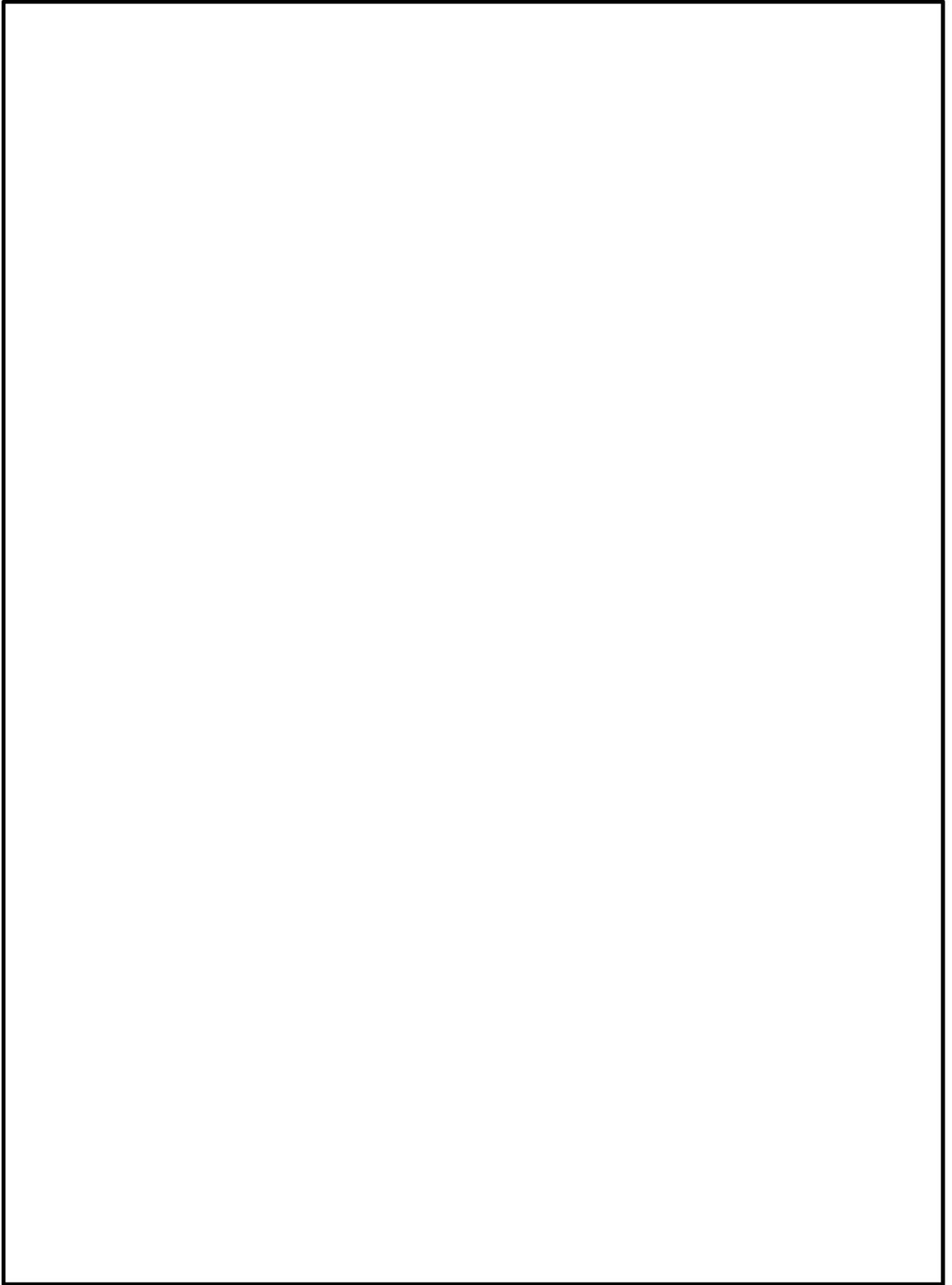


図 2-6 防護ネットの割付展開図(1/2)
(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設)

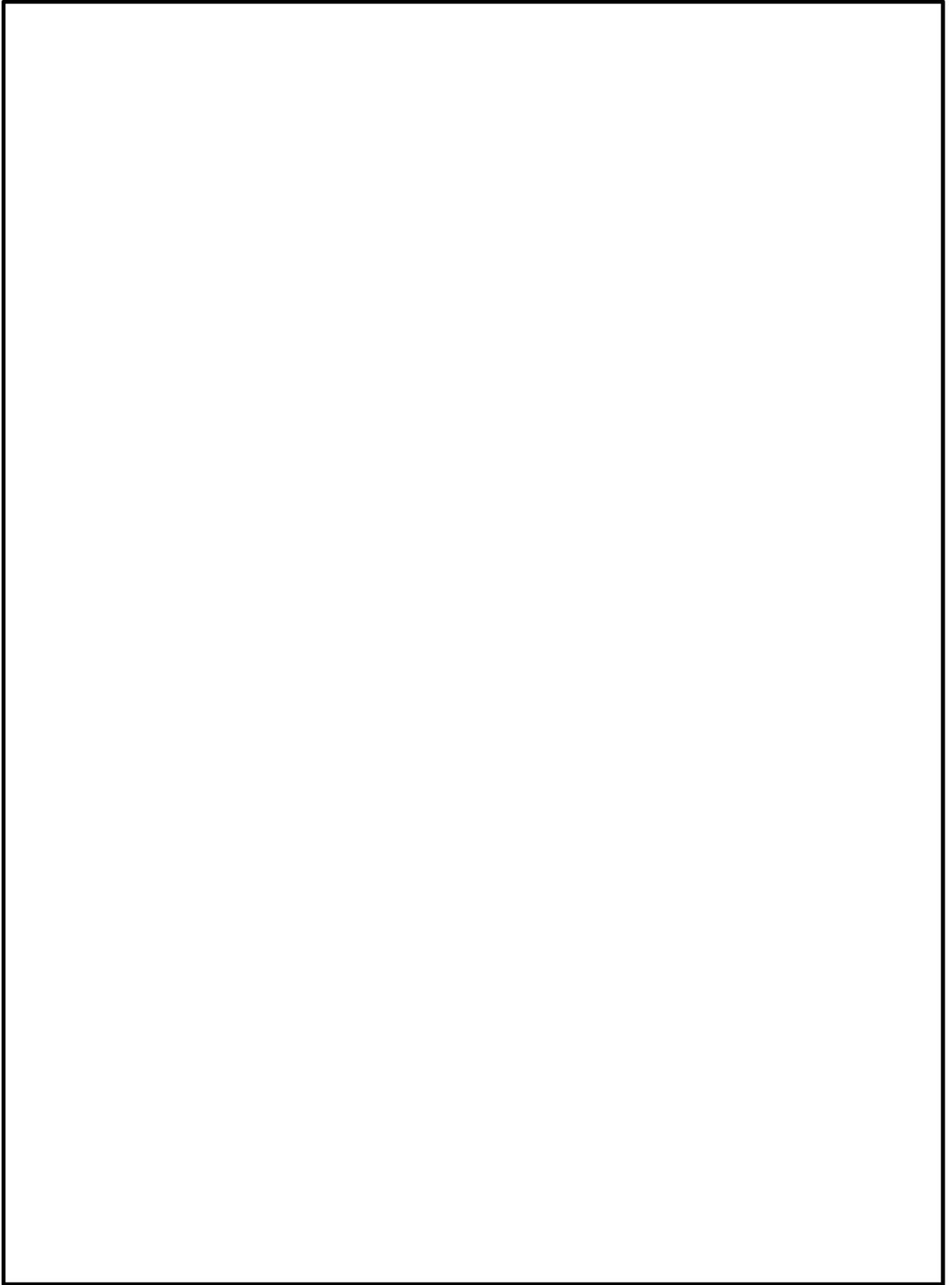


図 2-6 防護ネットの割付展開図
(中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設)



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)

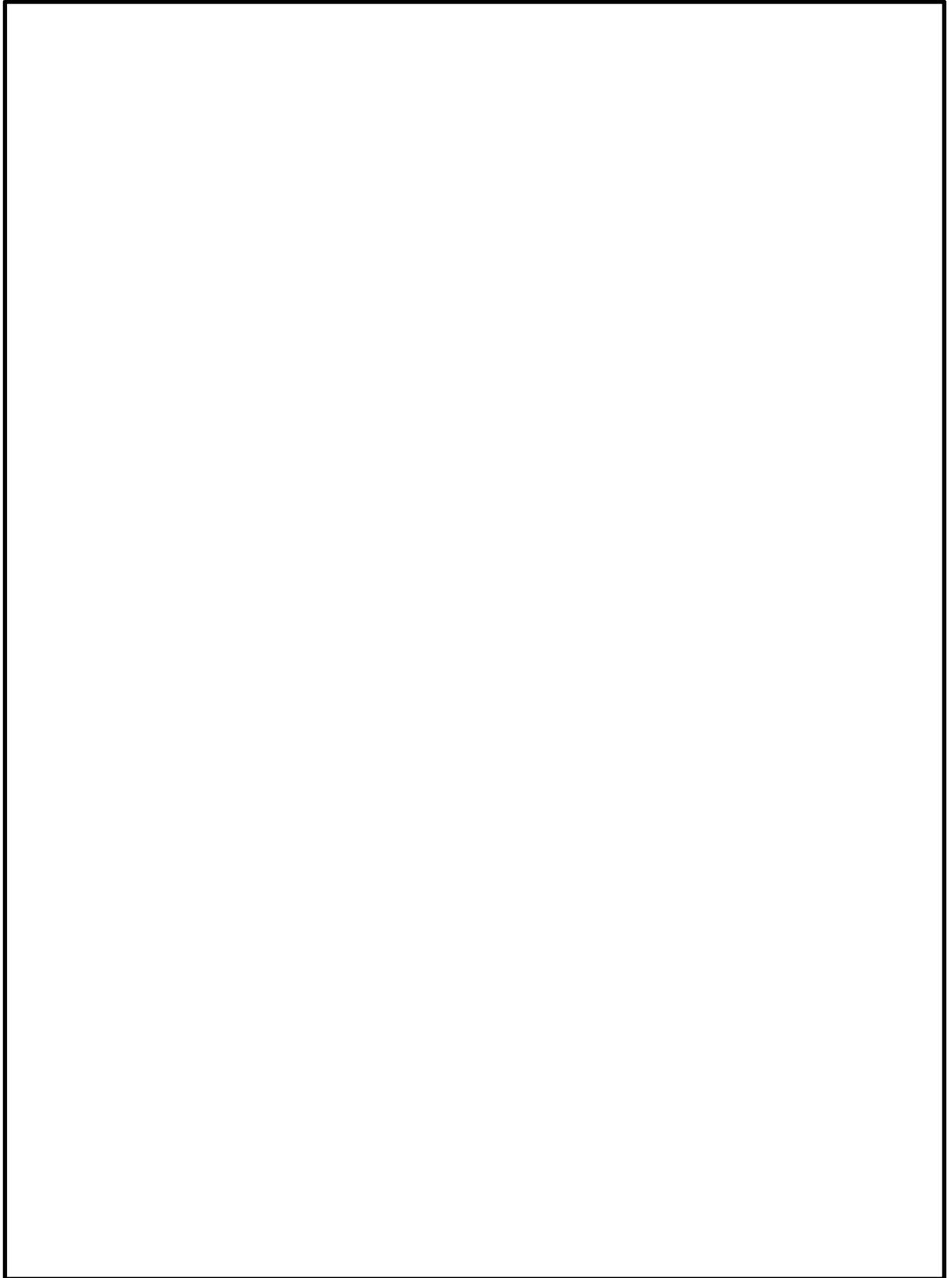


図 2-8 防護ネットの割付展開図
(原子炉建屋外側ブローアウトパネル竜巻防護対策施設)

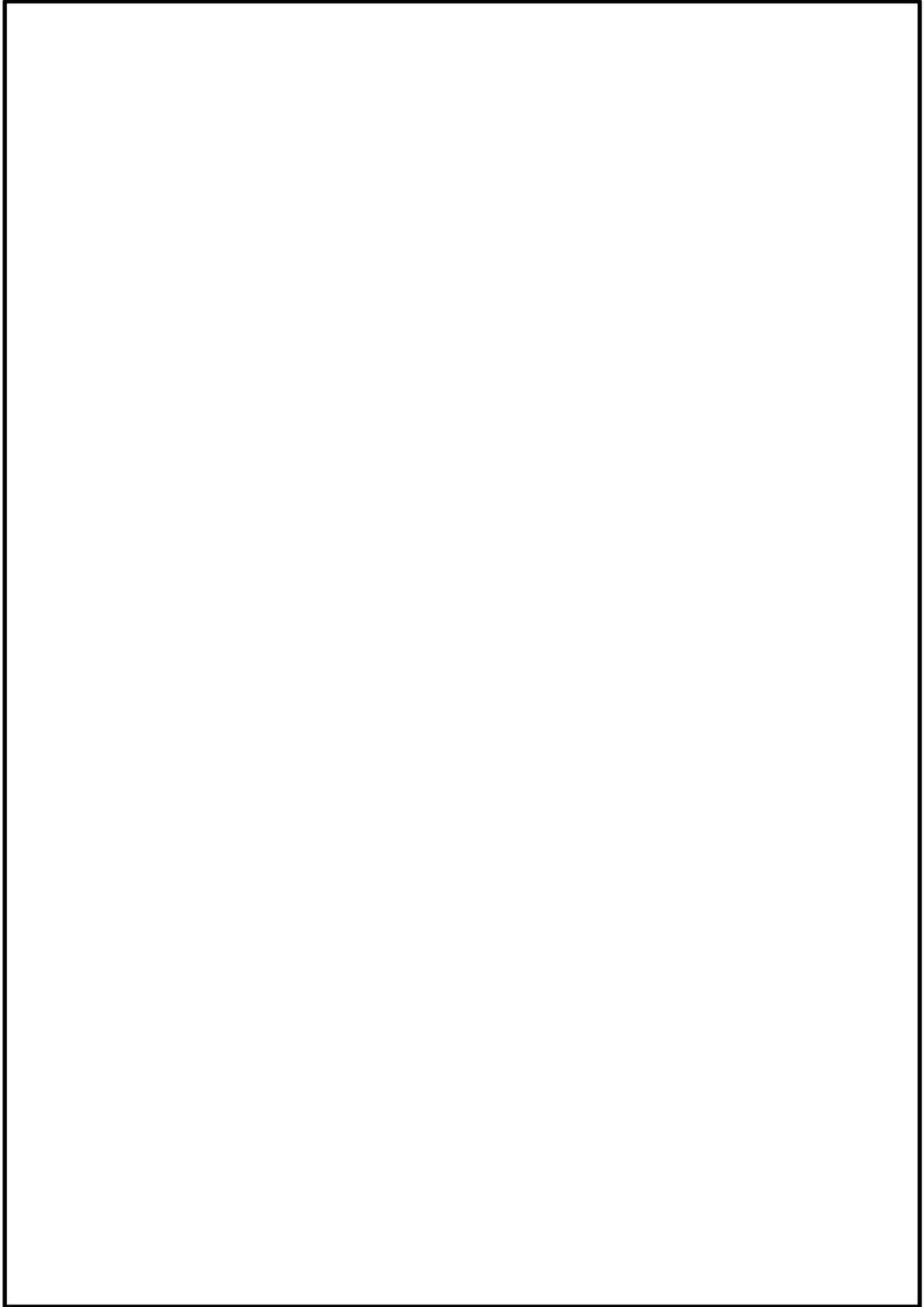


図 2-9 防護ネットの割付展開図
(使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設)

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。

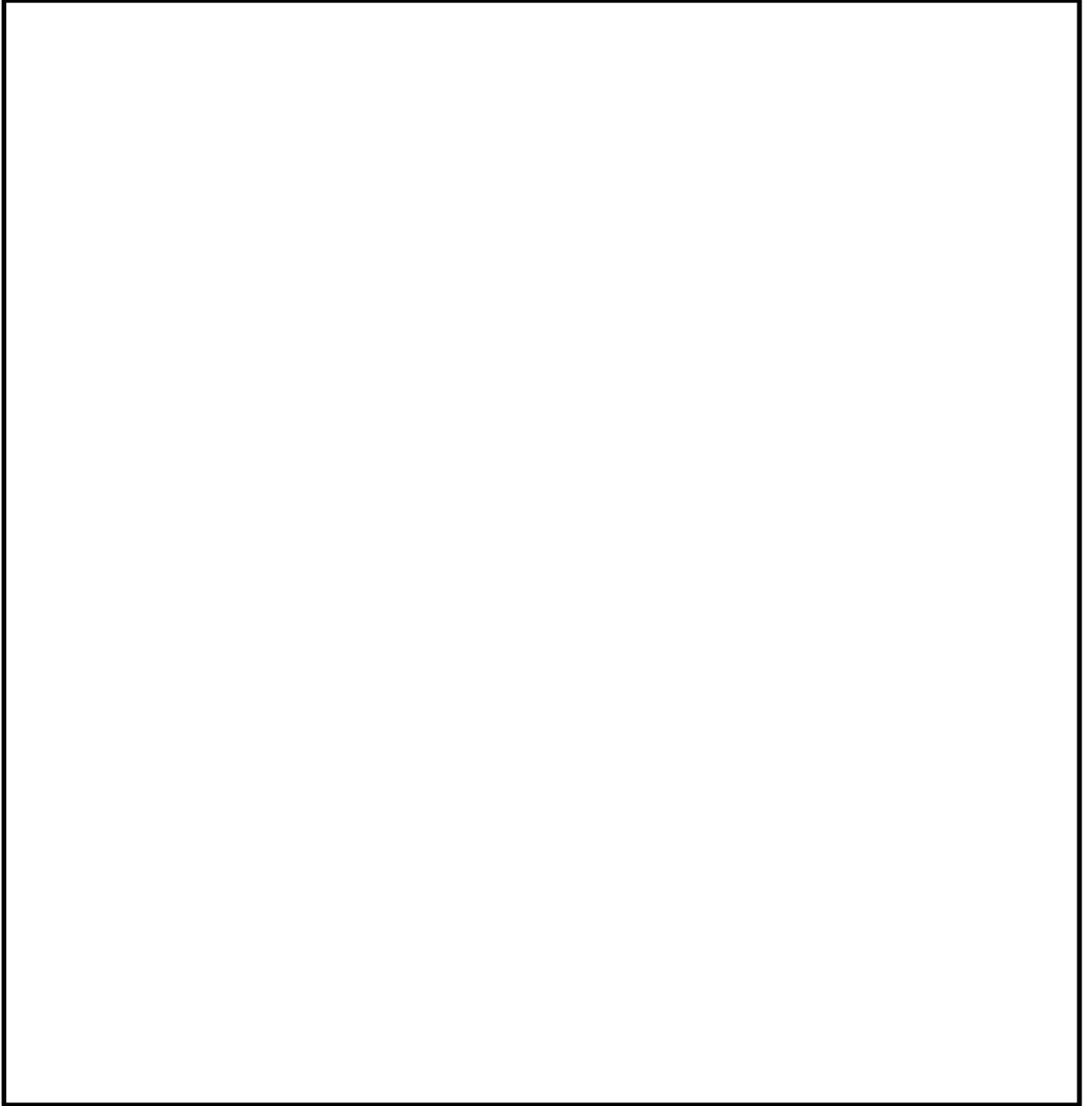


図 2-9 防護ネットの概要図

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。

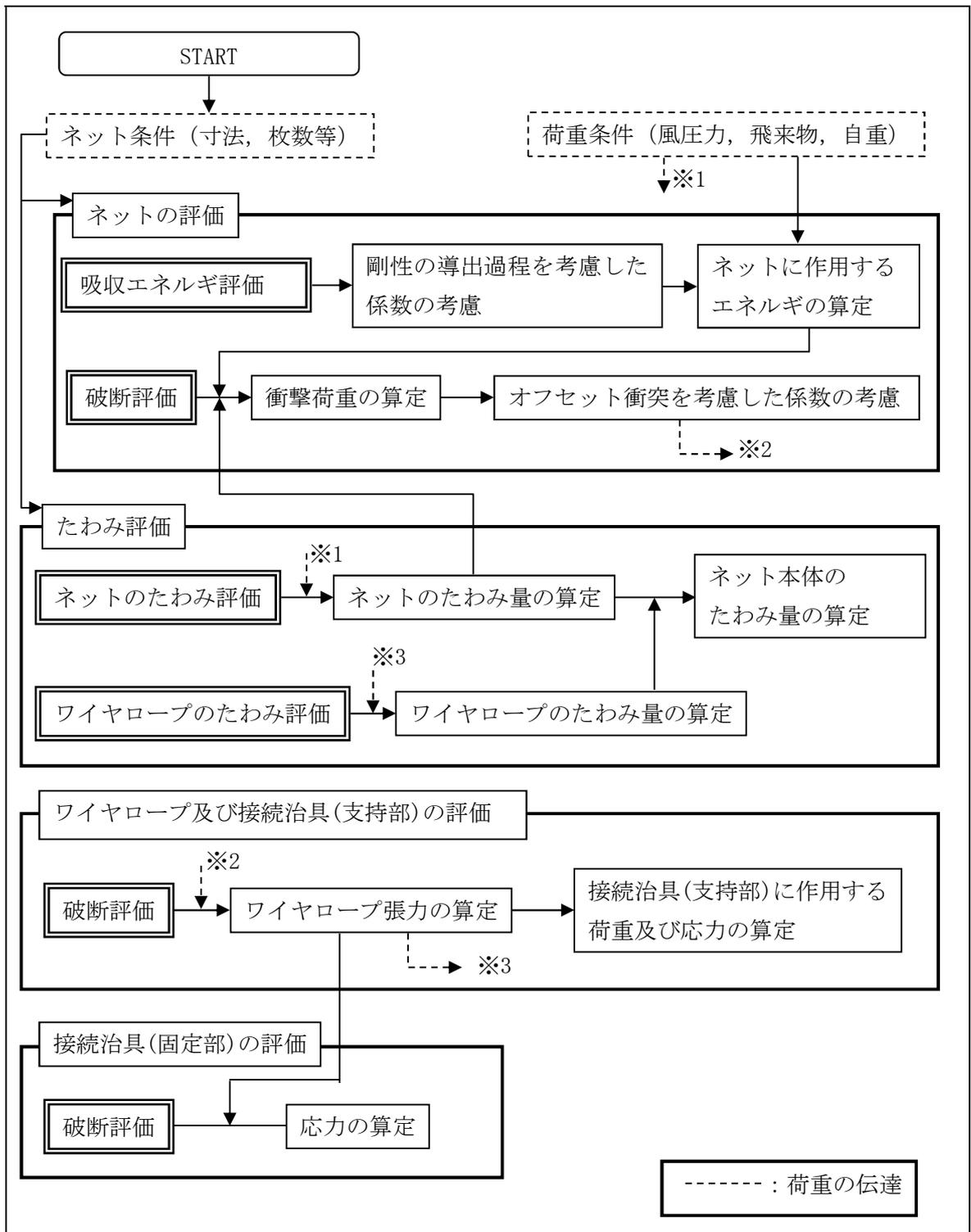


図 2-10 防護ネットの評価フロー

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。

NT2 補② V-3-別添 1-2-1-1 R2

2.4 適用規格

適用する規格，基準，指針等を以下に示す。

- ・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シヤックルとする。

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。

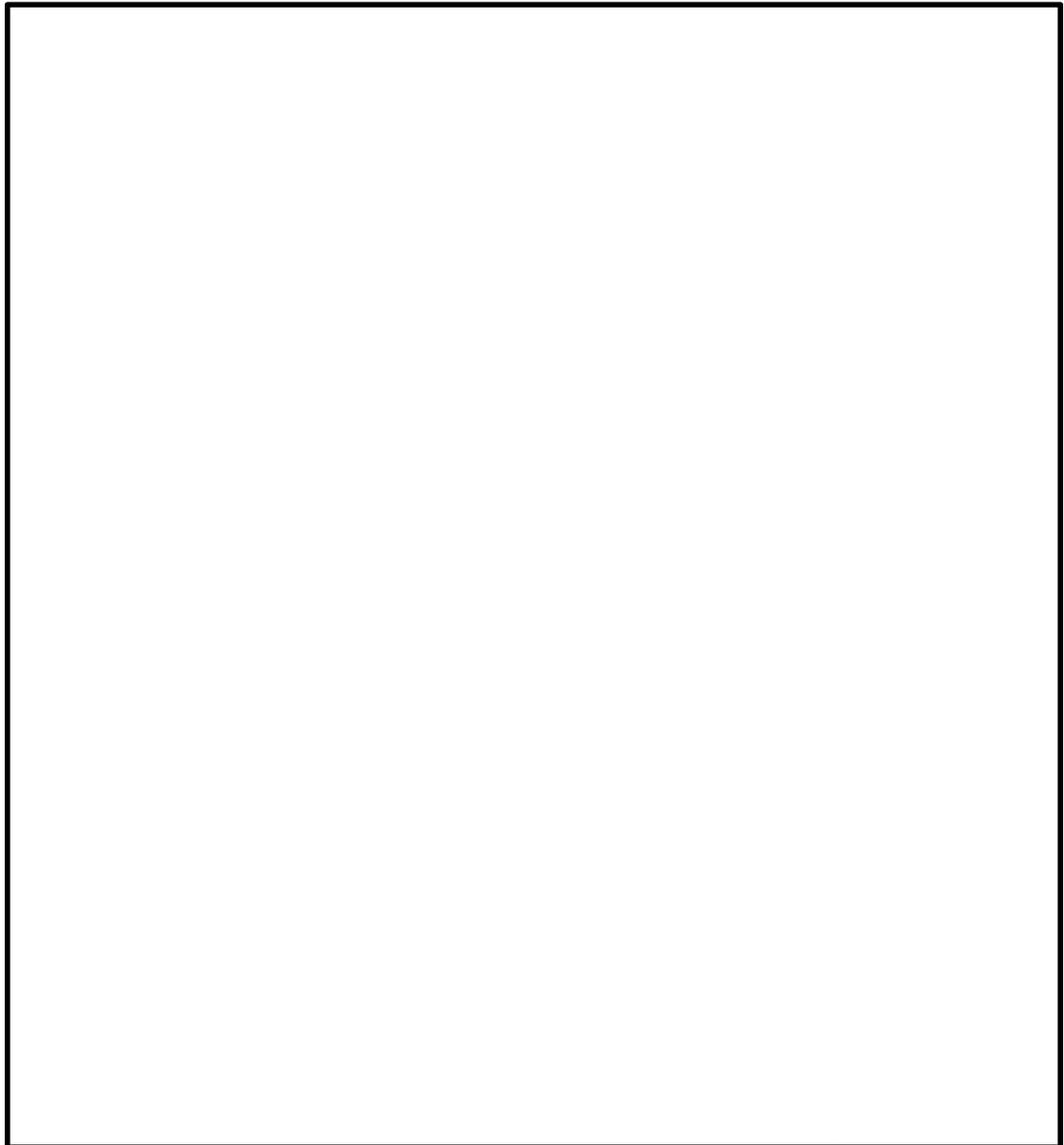


図 3-1 ネットの評価対象部位

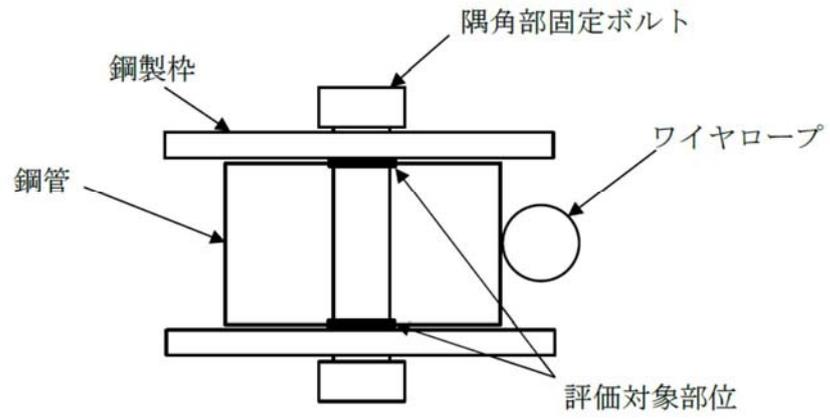


図 3-2 隅角部固定ボルトの評価対象部位

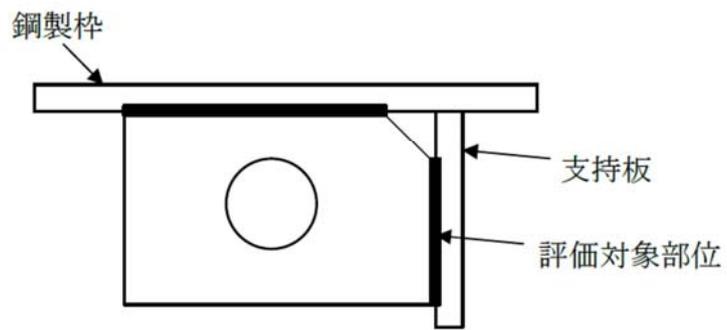


図 3-3 ワイヤロープの取付けプレート(溶接部)の評価対象部位

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、

$$F_a = \frac{8E_f}{3 \cdot \delta} \quad \dots \textcircled{8}$$

(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。

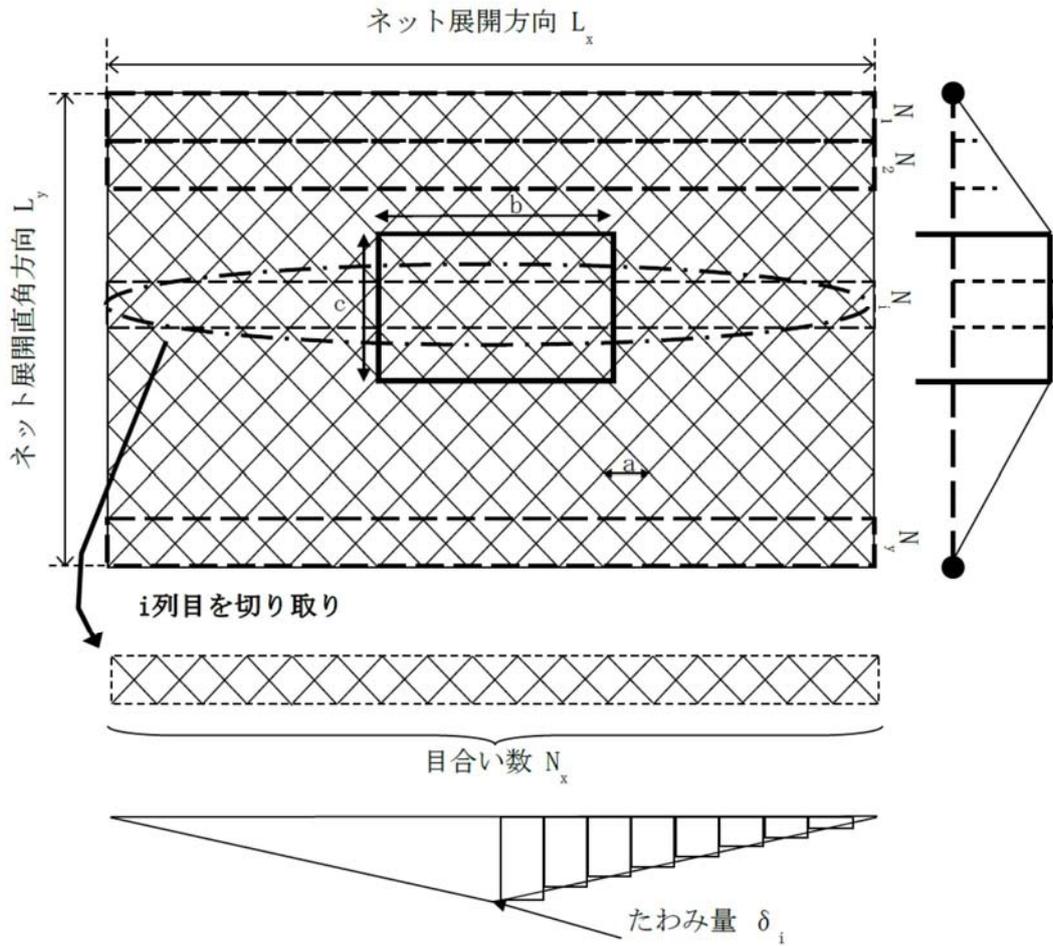


図 3-4 限界吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図

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。

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。

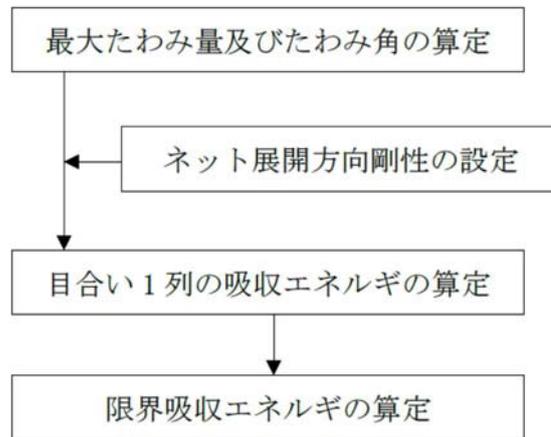
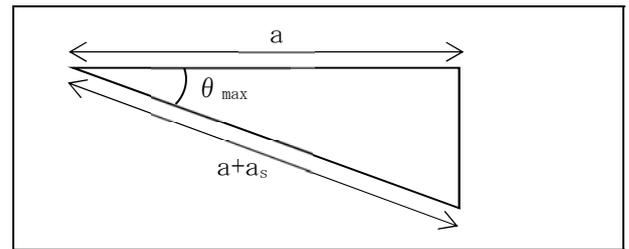


図 3-5 吸収エネルギー評価の許容限界の算定フロー

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。また、補助金網のエネルギー吸収に期待しないため、補助金網を除く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

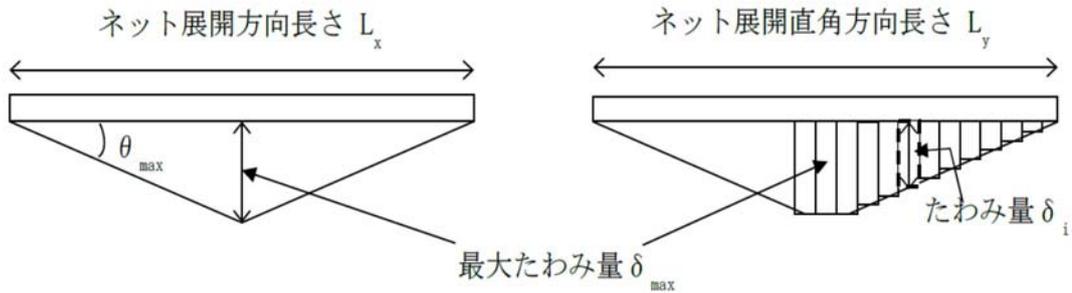


図 3-6 最大たわみ量と最大たわみ角

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。

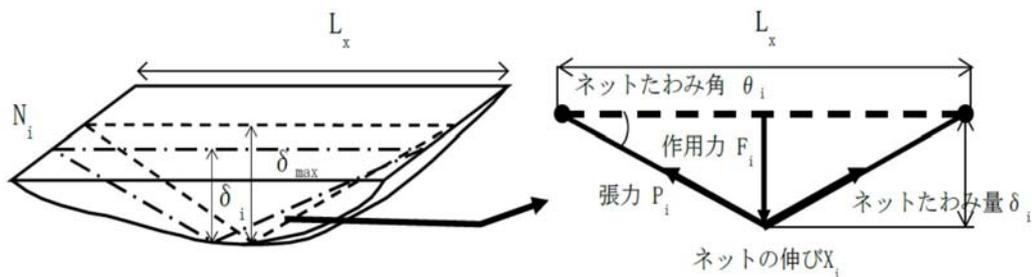


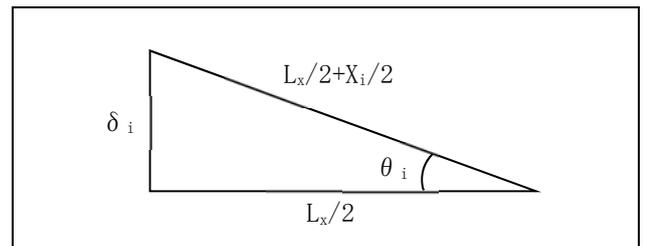
図 3-7 ネットに作用する力のつり合い

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。ターンバックル及びシャックルについては、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。

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	117.6 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に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	$1.5f_s^*$ (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

防護ネットのネットに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⑦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。

$$E_{max} = \sum_{i=1}^{N_y} \left\{ 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left(\sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\} \dots \text{⑩}$$

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。

$$E_t = E_f + E_w \cdots \textcircled{12}$$

(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8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。

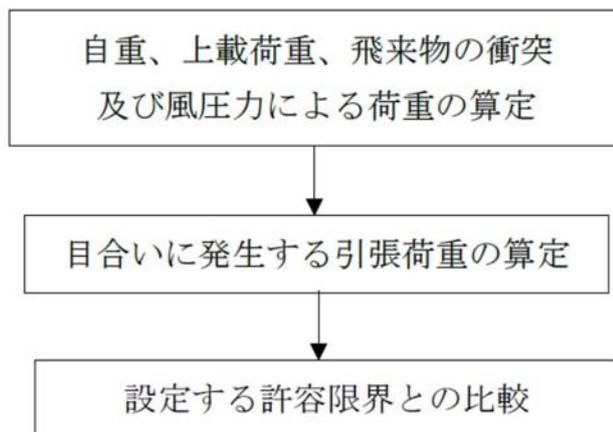


図 3-8 ネットの破断評価フロー

(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。

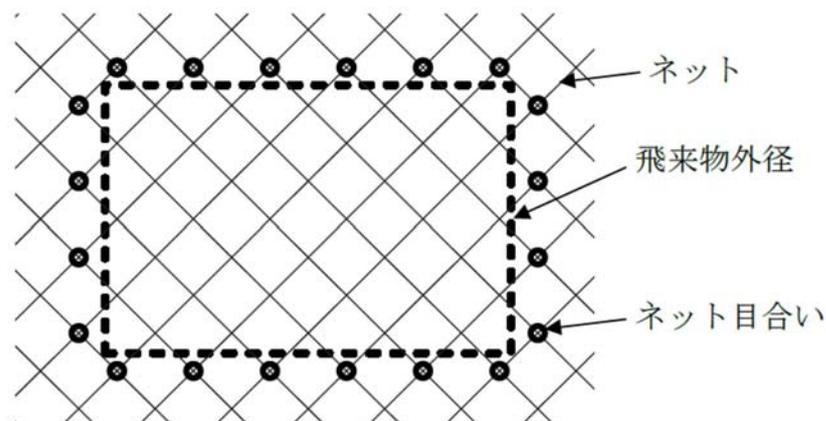


図 3-9 破断評価モデル

(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、

$$T_1' = \frac{T'}{2} \cdot \frac{1}{n} = \frac{F_a'}{4 \sin \theta}$$

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、

$$T_1'' = \frac{T'}{2} = \frac{F_a'}{4 \cdot \sin \theta} \cdot \left(\frac{1.5}{1.5+1} \right)$$

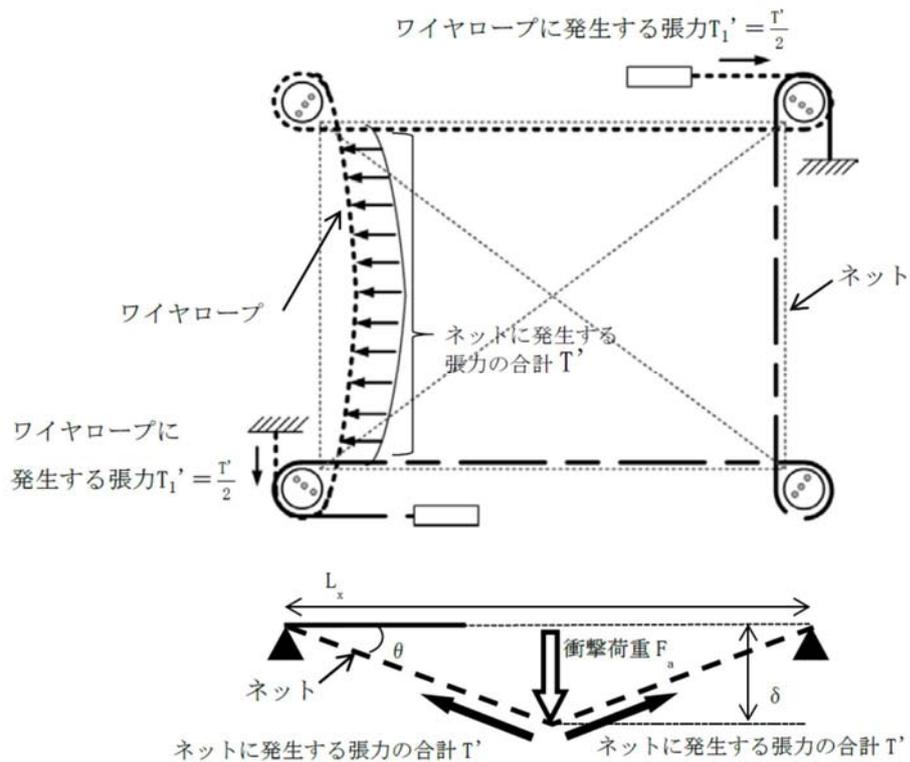


図 3-10 ネット及びワイヤロープに発生する力のつり合い(ネット平面図及び断面図)

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。

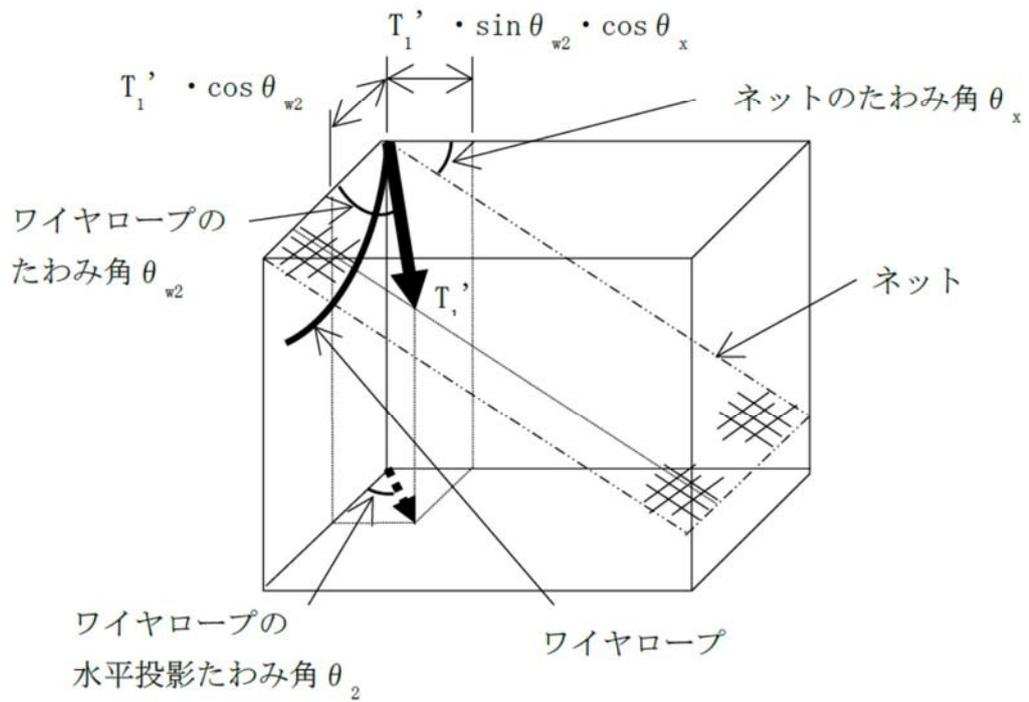
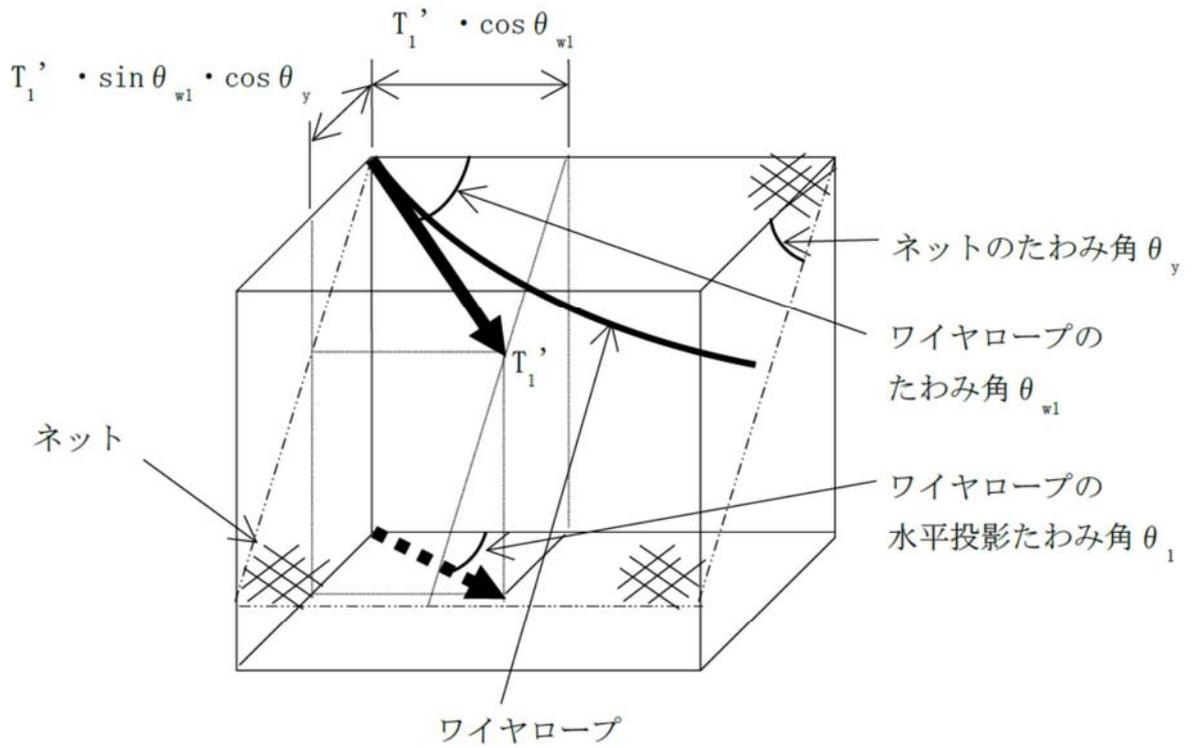


図 3-11 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係

隅角部固定ボルトの荷重状態を図 3-12 に示す。

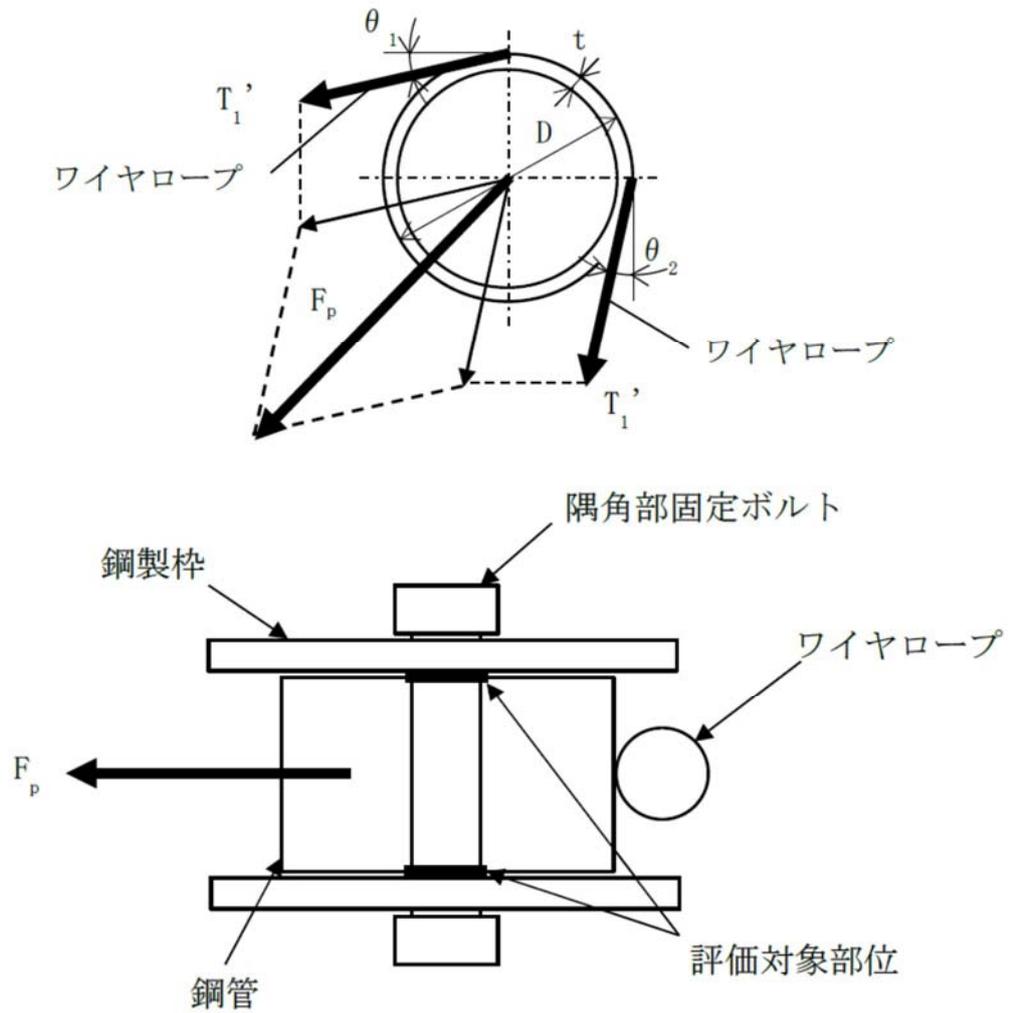


図 3-12 隅角部固定ボルトの荷重状態

図 3-13 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。

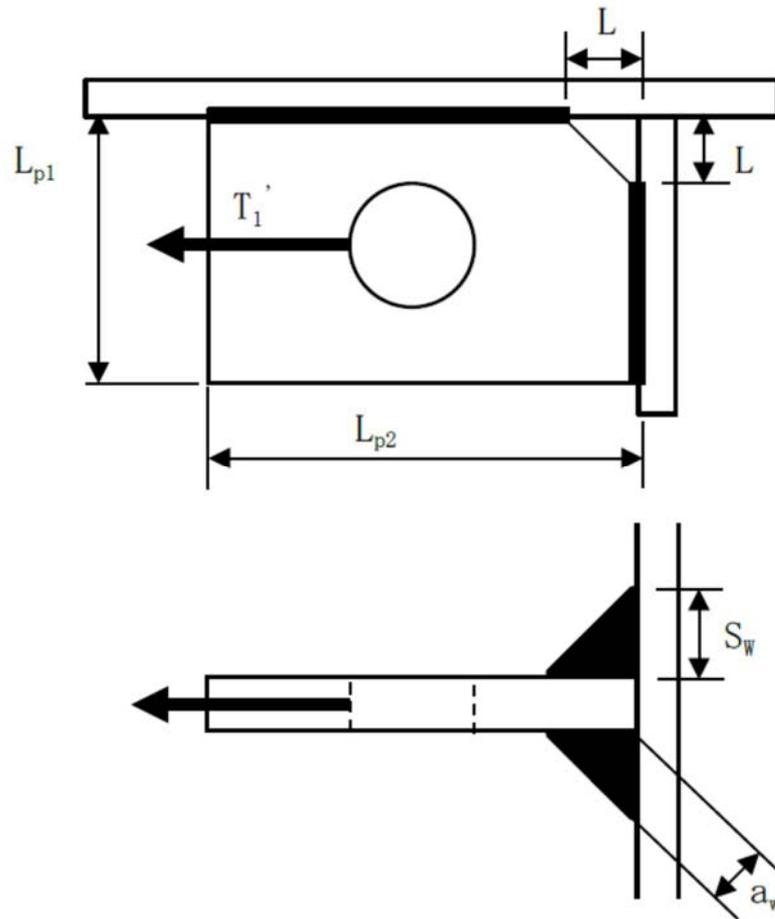


図 3-13 アイプレート溶接部

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、

$$\tau_w = \frac{T}{2a_w L_{pw}}$$

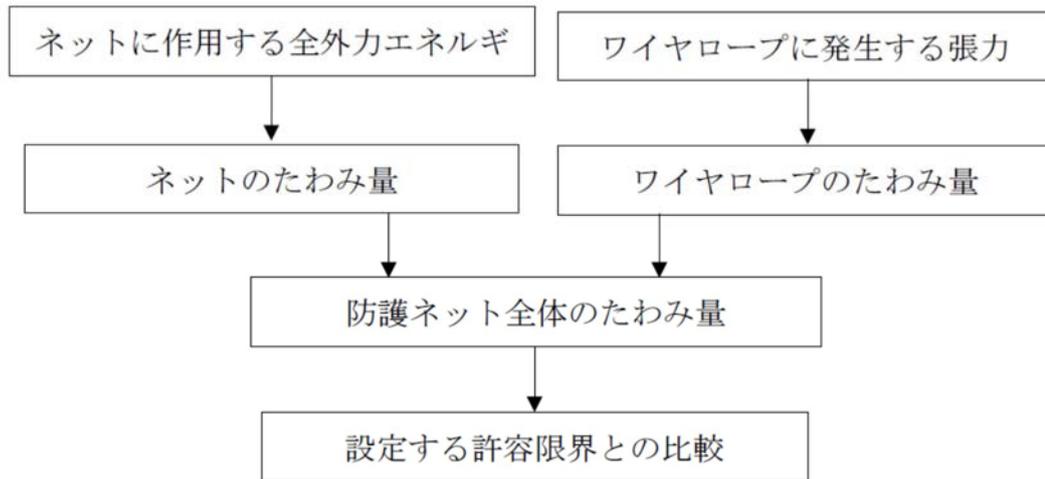
ここで溶接部ののど厚 a_w は以下の式で求められる。

$$a_w = \frac{S_w}{\sqrt{2}}$$

(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。

$$S = \frac{1}{2} \sqrt{L_b^2 + 16 \delta_w^2} + \frac{L_b}{8 \delta_w} \ln \left(\frac{4 \delta_w + \sqrt{L_b^2 + 16 \delta_w^2}}{L_b} \right)$$

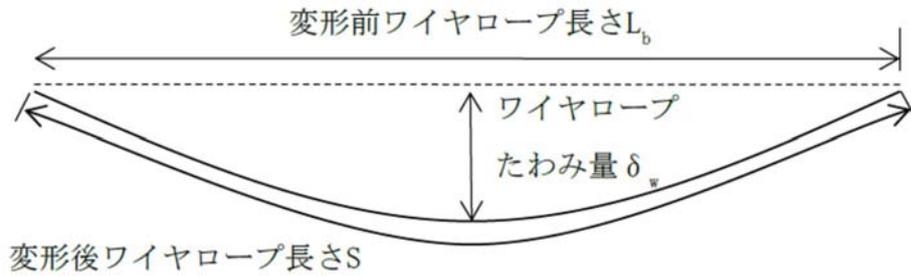


図 3-15 ワイヤロープ変形図

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 3-18 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、

$$\delta' = \left\{ S_x \left(S_x \left(\delta_{wx} \right) - L_x \right) \right\} + \left\{ S_y \left(\delta_{wy} \right) - L_y \right\}$$

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、

$$\delta_t = \sqrt{\left(\delta_{wy} + \frac{L_x}{2 \cos \theta_x} \right)^2 - \left(\frac{L_x}{2} \right)^2} = \sqrt{\left(\delta_{wx} + \frac{L_y}{2 \cos \theta_y} \right)^2 - \left(\frac{L_y}{2} \right)^2}$$

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。

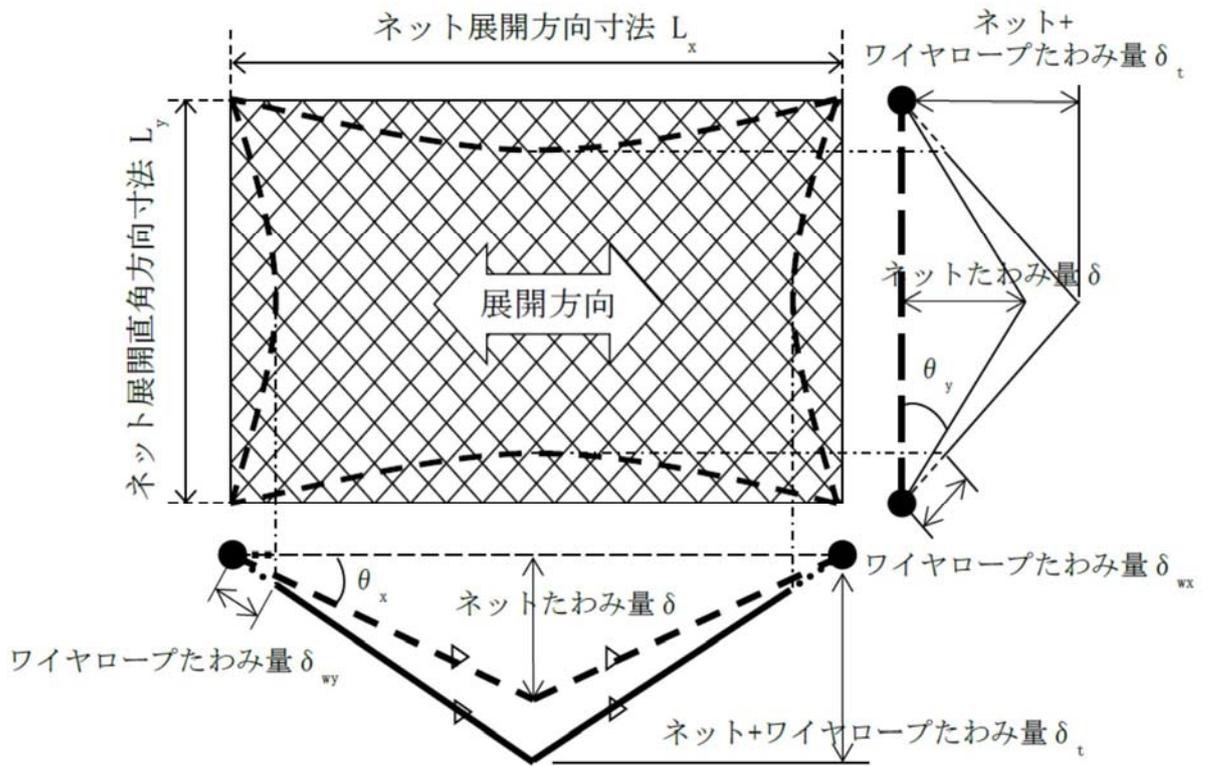


図 3-16 ネット及びワイヤロープ変形図

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)

※2 補助金網を含む

(2) 防護ネット構成

a. 2C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

2C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 2C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	
			追而	

b. 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

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の防護ネットの構成を表 4-5 に示す。

表 4-5 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	
			追而	

c. 高圧炉心スプレイ系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

高圧炉心スプレイ系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 4-7 に示す。

表 4-7 高圧炉心スプレイ系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	
			追而	

d. 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 4-8 に示す。

表 4-8 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	
			追而	

e. 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 4-9 に示す。

表 4-9 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

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

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 4-10 に示す。

表 4-10 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	
			追而	

g. 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 4-11 に示す。

表 4-11 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	3.83	×	3.01	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 4-12 に示す。

表 4-12 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	φ16	165	0.8

(注1) J I S G 3 5 4 9 の破断強度

(注2) J I S B 2 8 0 9 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 4-13 に示す。

表 4-13 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	130.2 kN

c. シャックル

シャックルの仕様を表 4-14 に示す。

表 4-14 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	117.6 kN

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 4-15 に示す。

表 4-15 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 4-16 に示す。

表 4-16 取付け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 L (mm)	溶接脚長 S _w (mm)
		L _{p1} (mm)	L _{p2} (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 5-1～7 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) 2C 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 2C 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)
	追而	

(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

表 5-2 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の
外力エネルギー評価結果

No.	E_t (kJ)	E_{max} (kJ)
	追而	

(3) 高圧炉心スプレイ系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 5-3 高圧炉心スプレイ系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)
	追而	

(4) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-4 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)
	追而	

(5) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-5 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

(6) 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 5-6 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)
	追而	

(7) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-7 使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	184	249

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 5-8～14 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. 2C 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 5-8 2C 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)
	追而	

b. 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

表 5-9 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の破断評価結果

No.	F_2 (kN)	F_1 (kN)
	追而	

c. 高圧炉心スプレイ系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 5-10 高圧炉心スプレイ系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)
	追而	

d. 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-11 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)
	追而	

e. 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-12 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	280	1032
2	280	1032
3	263	1032
4	263	1032
5	258	1032
6	258	1032
7	217	1032
8	217	1032
9	274	1032
10	263	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 5-13 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)
	追而	

g. 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-14 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	454	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 5-15~21 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) 2C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 5-15 2C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)
	追而	

(b) 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

表 5-16 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
のワイヤロープ強度評価結果

No.	T_1' (kN)	P (kN)
	追而	

(c) 高圧炉心スプレイ系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 5-17 高圧炉心スプレイ系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)
	追而	

(d) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-18 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)
	追而	

(e) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-19 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	84	132
2	84	132
3	80	132
4	80	132
5	79	132
6	79	132
7	73	132
8	73	132
9	83	132
10	81	132

(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 5-20 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)
	追而	

(g) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-21 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	120	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 5-22～28 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) 2C 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 5-22 2C 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

ターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
	追而	

(b) 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

表 5-23 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)
	追而	

(c) 高圧炉心スプレイ系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 5-24 高圧炉心スプレイ系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

ターンバックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
	追而	

(d) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-25 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)
	追而	

(e) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-26 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	84	130
2	84	130
3	80	130
4	80	130
5	79	130
6	79	130
7	73	130
8	73	130
9	83	130
10	81	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。

(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 5-27 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)
	追而	

(g) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-28 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	120	132

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 5-29～35 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) 2C 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 5-29 2C 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

シャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
	追而	

(b) 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

表 5-30 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の

シャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
	追而	

(c) 高圧炉心スプレイ系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 5-31 高圧炉心スプレイ系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

のシャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
	追而	

(d) 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シャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
	追而	

(e) 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シャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
1	84	120
2	84	120
3	80	120
4	80	120
5	79	120
6	79	120
7	73	120
8	73	120
9	83	120
10	81	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。

(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 5-34 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
シャックル強度評価結果

No.	発生荷重 (kN)	許容限界 (kN)
	追而	

(g) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-35 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	120	120

(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 5-36~42 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) 2C 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 5-36 2C 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)
	追而	

(b) 2D 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 5-37 2D 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)
	追而	

(c) 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

表 5-38 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)
	追而	

(d) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-39 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)
	追而	

(e) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-40 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	81	363
2	81	363
3	78	363
4	78	363
5	76	363
6	76	363
7	70	363
8	70	363
9	81	363
10	78	363

(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 5-41 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)
	追而	

(g) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-42 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	118	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 5-43～49 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) 2C 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 5-43 2C 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)
	追而	

(b) 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

表 5-44 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)
	追而	

(c) 高圧炉心スプレイ系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 5-45 高圧炉心スプレイ系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)
	追而	

(d) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-46 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)
	追而	

(e) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-47 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	42	135
2	42	135
3	40	135
4	40	135
5	40	135
6	40	135
7	37	135
8	37	135
9	42	135
10	41	135

(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 5-48 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)
	追而	

(g) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-49 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	60	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5-50～56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) 2C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 5-50 2C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)
	追而	

(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

表 5-51 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)
	追而	

(3) 高圧炉心スプレイ系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 5-52 高圧炉心スプレイ系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)
	追而	

(4) 中央制御室換気系冷凍機竜巻防護対策施設

表 5-53 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)
	追而	

(5) 海水ポンプエリア竜巻防護対策施設

表 5-54 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	1.17	
2	1.18	
3	1.24	
4	1.24	
5	1.26	追而
6	1.26	
7	1.51	
8	1.51	
9	1.21	
10	1.26	

(6) 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 5-55 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 δ_t (m)	最少離隔距離 L_{min} (m)
	追而	

(7) 使用済燃料乾式貯蔵容器竜巻防護対策施設

表 5-56 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	1.61	追而