

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 3-013-02
提出年月日	2022年12月5日

VI-3-別添 1-2 竜巻防護対策設備の強度計算の方針

2022年12月

中国電力株式会社

## 目 次

1. 概要	1
2. 強度設計の基本方針	2
2.1 対象施設	2
2.2 構造強度の設計方針	2
2.3 荷重及び荷重の組合せ	3
2.4 構造設計	10
2.5 評価方針	18
3. 竜巻防護対策設備の構成要素の設計方針	19
3.1 竜巻防護ネットの構造設計	20
3.2 竜巻防護鋼板の構造設計	23
3.3 架構の構造設計	24
4. 竜巻防護対策設備の構成要素の評価方針	25
4.1 竜巻防護ネットの評価方針	27
4.2 竜巻防護鋼板の評価方針	31
4.3 架構の評価方針	32
5. 許容限界	34
5.1 竜巻防護ネットの許容限界	34
5.2 竜巻防護鋼板の許容限界	43
5.3 架構の許容限界	44
6. 強度評価方法	45
6.1 竜巻防護ネットの強度評価	45
7. 適用規格	63

## 1. 概要

本資料は、「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」第7条及びその「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則の解釈」に適合する設計とするため、「VI-1-1-3 発電用原子炉施設の自然現象等による損傷の防止に関する説明書」のうち「VI-1-1-3-3-3 竜巻防護に関する施設の設計方針」に基づき、竜巻防護対策設備が、設計竜巻に対して要求される強度を確保するための強度設計方針について説明するものである。

## 2. 強度設計の基本方針

強度設計は、「2.1 対象施設」に示す施設を対象として、「2.3 荷重及び荷重の組合せ」で示す設計竜巻による荷重とこれと組み合わせる荷重を考慮し、「6. 強度評価方法」で示す評価方法により、「5. 許容限界」で設定する許容限界を超えない設計とする。

### 2.1 対象施設

VI-1-1-3-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」にて設定している以下の竜巻防護対策設備を対象とする。

- ・取水槽海水ポンプエリア防護対策設備
- ・取水槽循環水ポンプエリア防護対策設備
- ・燃料移送ポンプエリア防護対策設備
- ・建物開口部防護対策設備

### 2.2 構造強度の設計方針

竜巻防護対策設備は、設計飛来物（以下「飛来物」という。）の外部事象防護対象施設への衝突を防止するものであり、VI-1-1-3-3-3「竜巻防護に関する施設の設計方針」の「3. 要求機能及び性能目標」の「3.3(3) 性能目標」で設定している構造強度設計上の性能目標を踏まえ、以下の設計とする。

#### (1) 竜巻防護ネット

竜巻防護ネットは、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物が外部事象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、飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しないよう捕捉できる設計とする。

#### (2) 竜巻防護鋼板

竜巻防護鋼板は、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止するために、飛来物が竜巻防護鋼板を貫通せず、外部事象防護対象施設に波及的影響は与えない設計とする。

#### (3) 架構

架構は、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止するために、飛来物が架構を構成する主要な構造部材を貫通せず、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、架構を構成する部材自体の転倒及び脱落を生じない設計とする。

## 2.3 荷重及び荷重の組合せ

竜巻防護対策設備の強度評価に用いる荷重の種類及び荷重の組合せは、VI-1-1-3-3-1「竜巻への配慮に関する基本方針」の「2.1.3(2) 荷重の組合せ及び許容限界」を踏まえ、以下のとおり設定する。

### (1) 荷重の種類

#### a. 常時作用する荷重 ( $F_d$ )

常時作用する荷重は、持続的に生じる荷重であり、自重及び上載荷重とする。なお、竜巻防護ネットの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 ( $W_T$ )

設計竜巻（最大風速 92m/s）による荷重は、設計竜巻の以下の特性を踏まえ、風圧力による荷重、気圧差による荷重及び飛来物による衝撃荷重とする。

設計竜巻の特性値を表 2-1 に示す。

- 設計竜巻の移動速度 ( $V_T$ )

$$V_T = 0.15 \cdot V_D$$

$V_D$  : 設計竜巻の最大風速 (m/s)

- 竜巻の最大接線風速 ( $V_{Rm}$ )

$$V_{Rm} = V_D - V_T$$

$V_T$  : 設計竜巻の移動速度 (m/s)

- 竜巻の最大気圧低下量 ( $\Delta P_{max}$ )

$$\Delta P_{max} = \rho \cdot V_{Rm}^2$$

$\rho$  : 空気密度 (= 1.226 kg/m<sup>3</sup>)

$V_{Rm}$  : 設計竜巻の最大接線風速 (m/s)

表 2-1 設計竜巻の特性値

最大速度 $V_D$ (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 $\Delta P_{max}$ (N/m <sup>2</sup> )
92	14	78	7500

#### (a) 風圧力による荷重 ( $W_w$ )

風圧力による荷重は、設計竜巻の最大風速による荷重である。竜巻の最大風速は、一般的には水平方向の風速として算出されるが、鉛直方向の風圧力に対して脆弱と考

えられる場合には、鉛直方向の最大風速等に基づいて算出した鉛直方向の風圧力についても考慮する。

竜巻の風圧力による荷重は、施設の形状により変化するため、施設の部位ごとに異なる。そのため、各施設及び評価対象部位に対して厳しくなる方向からの風を想定し、各施設の部位ごとに荷重を設定する。

ガスト影響係数 $G$ は、設計竜巻の風速が最大瞬間風速をベースとしていること等から施設の形状によらず「竜巻影響評価ガイド」を参照して、 $G=1.0$ とする。空気密度 $\rho$ は「REGULATORY GUIDE 1.76, DESIGN-BASIS TORNADO AND TORNADO MISSILES FOR NUCLEAR POWER PLANTS, Revision1」（米国原子力規制委員会）より $\rho=1.226\text{kg/m}^3$ とする。

設計用速度圧 $q$ については施設の形状によらず $q=5189\text{N/m}^2$ と設定する。

(b) 気圧差による荷重 ( $W_P$ )

外気と隔離されている区画の境界部など、気圧差による圧力影響を受ける施設の建物壁、屋根等においては、設計竜巻による気圧低下によって生じる施設等の内外の気圧差による荷重が発生する。閉じた施設（通気がない施設）については、この圧力差により閉じた施設の隔壁に外向きに作用する圧力が生じるとみなし、設定することを基本としているが、竜巻防護対策設備は外気と通じており、設備の外殻に面する部材に気圧差は生じないことから考慮しない。

(c) 飛来物による衝撃荷重 ( $W_M$ )

衝突による影響が大きくなる向きで飛来物が竜巻防護対策設備に衝突した場合の衝撃荷重を算出する。

衝突評価においても、飛来物の衝突による影響が大きくなる向きで衝突することを考慮して評価を行う。

飛来物の諸元を表 2-2 に示す。

表 2-2 飛来物の諸元

	鋼製材	砂利
寸法 (m)	4.2×0.3×0.2	0.04×0.04×0.04
重量 (kg)	135	0.2
水平方向の飛来速度 (m/s)	51	54
鉛直方向の飛来速度 (m/s)	34	36

c. 運転時に作用する荷重（ $F_P$ ）

運転時の状態で作用する荷重は、配管等に作用する内圧等であり、竜巻防護対策設備には作用しないため考慮しない。

(2) 荷重の組合せ

竜巻の影響を考慮する施設の設計竜巻の荷重は、設計竜巻の気圧差による荷重（ $W_P$ ）を考慮した複合荷重 $W_{T1}$ 並びに設計竜巻の風圧力による荷重（ $W_w$ ）、気圧差による荷重（ $W_P$ ）及び飛来物による衝撃荷重（ $W_M$ ）を組合せた複合荷重 $W_{T2}$ を以下のとおり設定する。

$$W_{T1} = W_P$$

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

竜巻の影響を考慮する施設には $W_{T1}$ 及び $W_{T2}$ の両荷重をそれぞれ作用させる。各施設の設計竜巻による荷重の組合せについては、施設の設置状況及び構造を踏まえ、適切な組合せを設定する。竜巻防護対策設備の構成要素別の荷重の組合せを、表 2-3 に示す。

表2-3 竜巻防護対策設備構成要素別の荷重の組合せ

竜巻防護対策設備		評価内容	荷 重					
			常時作用する荷重 (F <sub>d</sub> )		風圧力による荷重 (W <sub>w</sub> )	気圧差による荷重 (W <sub>p</sub> )	飛来物による衝撃荷重 (W <sub>M</sub> )	運転時の状態で作用する荷重
			自重	上載荷重				
竜巻防護ネット	水平	構造強度	○	—	○	—*1	○	—
	鉛直		○	—	○	—*1	○	—
竜巻防護鋼板	水平	構造強度	○	—	—	—*1	○	—
	鉛直		—	—	○	—*1	○	—
架構	水平	構造強度	○	○*2	○	—*1	○	—
	鉛直		○	○*2	○	—*1	○	—

注記\*1：外気と通じており，気圧差は生じない。

\*2：竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板に作用する風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重を含む。



(3) 荷重の算定方法

「2.3(1) 荷重の種類」で設定している荷重のうち、竜巻防護ネットに生じる荷重の算出式を以下に示す。

a. 記号の定義

荷重の算出に用いる記号を表 2-4 に示す。

表 2-4 荷重の算出に用いる記号 (1/2)

記号	単位	定義
A	m <sup>2</sup>	竜巻防護ネットの受圧面積
A <sub>a</sub>	m <sup>2</sup>	ネットの面積
C	—	風力係数（施設の形状や風圧力が作用する部位（屋根，壁等）に応じて設定する）
d	m	飛来物衝突時の飛来物の移動距離
E <sub>f</sub>	kJ	飛来物衝突時にネットに作用するエネルギー
F <sub>a</sub>	kN	飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
F <sub>a</sub> ''	kN	飛来物衝突時にネットが受ける衝撃荷重
G	—	ガスト影響係数
g	m/s <sup>2</sup>	重力加速度（g = 9.80665）
L <sub>x</sub>	m	ネットの展開方向の実寸法
L <sub>y</sub>	m	ネットの展開直角方向の実寸法
m	kg	飛来物の質量
m <sub>N</sub>	kg/m <sup>2</sup>	ネットの単位面積あたりの質量
n	—	主金網の設置枚数
P <sub>w</sub>	kN	ネットの自重により作用する荷重
Q	kN/s	衝撃荷重が時間とともに比例する際の比例係数
q	N/mm <sup>2</sup>	設計用速度圧
t	s	時間
t <sub>1</sub>	s	飛来物が衝突しネットのたわみ量が最大になる時間
V	m/s	ネットへの衝突後の飛来物の移動速度
V <sub>1</sub>	m/s	ネットへの飛来物の衝突速度

表 2-4 荷重の算出に用いる記号 (2/2)

記号	単位	定義
$V_D$	m/s	設計竜巻の最大風速
$W_w$	kN	風圧力による荷重
$\delta$	m	飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	空気密度
$\phi$	—	ネットの充実率

b. 自重による荷重の算出

竜巻防護ネットに常時作用する荷重として、自重を考慮する。

ネットにおいては、自重による荷重  $P_w$  は、

$$P_w = \frac{A_a \cdot m_N \cdot g \cdot (n+1)}{1000}$$

と算出される。

$A_a$  はネットの実寸法  $L_x$ ,  $L_y$  を用いて、以下の式で求められる。

$$A_a = L_x \cdot L_y$$

c. 竜巻による荷重の算出

(a) 風圧力による荷重 ( $W_w$ )

風圧力による荷重は、「建築基準法施行令」及び「日本建築学会建築物荷重指針・同解説」に準拠して、次式のとおり算出する。

$$W_w = \frac{q \cdot G \cdot C \cdot A}{1000}$$

ここで、

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_D^2$$

ネットにおいては、ネットの充実率を  $\phi$  とすると、風圧力による荷重を受けるネットの受圧面積  $A$  は、次式のとおりとなる。

$$A = \phi \cdot A_a$$

d. 飛来物による衝撃荷重の算出

ネットにおいて、飛来物の衝突時に受ける衝撃荷重  $F_a''$  は時間とともに比例して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。

$$F_a'' = Q \cdot t \dots\dots\dots (2. 1)$$

したがって、ネットへの衝突後の飛来物の移動速度  $V$  は式 (2. 1) の衝撃荷重  $F_a''$  から、以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned}
 V &= -\frac{1}{m} \int_0^t F_a \, dt \\
 &= -\frac{Q \cdot t^2}{2 \cdot m} + V_1 \quad \dots\dots\dots (2. 2)
 \end{aligned}$$

さらに、ネットへの衝突後の飛来物の移動距離  $d$  は、式(2. 2)の速度  $V$  から以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned}
 d &= \int_0^t V \, dt \\
 &= -\frac{Q \cdot t^3}{6 \cdot m} + V_1 \cdot t \quad \dots\dots\dots (2. 3)
 \end{aligned}$$

飛来物が衝突しネットのたわみが最大になる時間  $t_1$  におけるネットの最大変位  $\delta$  は、飛来物の速度は  $V=0$  であるから、式(2. 2)、(2. 3)より、

$$\begin{aligned}
 Q \cdot t_1^2 &= 2 \cdot m \cdot V_1 \quad \dots\dots\dots (2. 4) \\
 \delta &= -\frac{Q \cdot t_1^3}{6 \cdot m} + V_1 \cdot t_1
 \end{aligned}$$

上記2式を連立し、

$$\delta = \frac{2}{3} \cdot V_1 \cdot t_1$$

よって、

$$t_1 = \frac{3}{2 \cdot V_1} \cdot \delta \quad \dots\dots\dots (2. 5)$$

以上より、時間  $t_1$  における飛来物による衝撃荷重  $F_a$  は式(2. 1)、(2. 4)より、

$$F_a = \frac{2 \cdot m \cdot V_1}{t_1}$$

さらに、式(2. 5)と連立し、

$$F_a = \frac{4 \cdot m \cdot V_1^2}{3 \cdot \delta} \quad \dots\dots\dots (2. 6)$$

また、時間  $t_1$  における飛来物の衝突によりネットに作用するエネルギー  $E_f$  としては、衝突時の飛来物の運動エネルギーとして、以下より求められる。

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_1^2 \quad \dots\dots\dots (2. 7)$$

したがって、式(2. 6)、(2. 7)より、

$$F_a = \frac{8 \cdot E_f}{3 \cdot \delta} \quad \dots\dots\dots (2. 8)$$

式(2. 8)にたわみ評価で算出する飛来物が衝突する場合のネットの最大たわみ量  $\delta$  を代入し、 $F_a$  を算出する。

## 2.4 構造設計

竜巻防護対策設備は、「2.2 構造強度の設計方針」で設定している設計方針及び「2.3 荷重及び荷重の組合せ」で設定している荷重を踏まえ、以下の構造とする。

### (1) 取水槽海水ポンプエリア防護対策設備

取水槽海水ポンプエリア防護対策設備は竜巻防護ネット、竜巻防護鋼板及び架構で構成し、外部事象防護対象施設を取り囲むように設置することで、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止し、外部事象防護対象施設と竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板の離隔を確保することなどにより、竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板は架構を介して、取水槽躯体に支持する構造とする。

竜巻防護ネットはネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部及び固定部）及び鋼製枠により構成され、竜巻防護ネットに作用する荷重をワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）を介して鋼製枠に伝達し、鋼製枠から架構を介して鉄筋コンクリート造の取水槽躯体に伝達する構造とする。

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荷重を受け持つ展開方向と展開直角方向の異方性を持ち、架構の配置、ネットに作用する荷重及び外部事象防護対象施設との離隔に応じて、ネットの展開方向と展開直角方向の長さの比を考慮して、鋼製枠内に複数枚を重ねて設置する構造とする。また、ネットに飛来物が衝突した際、ワイヤロープに瞬間的な大荷重が作用するのを防ぐため、鋼製枠の四隅には緩衝材を設置する設計とする。

竜巻防護鋼板は鋼板により構成され、竜巻防護鋼板に作用する荷重は架構を介して鉄筋コンクリート造の取水槽躯体に伝達する構造とする。

竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板を支持する架構は、H形鋼等から構成され、上載する竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板を支持する構造とする。また、架構に作用する荷重は、アンカーボルトを介して、鉄筋コンクリート造の取水槽躯体に伝達する構造とする。

なお、外部事象防護対象施設に衝突する可能性がある飛来物は竜巻防護ネットで捕捉する構造とするため、架構は開口部より大きな構造とし、飛来物の衝突により仮に架構が損傷した場合であっても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。

取水槽海水ポンプエリア防護対策設備の構造計画を表2-5に示す。

表 2-5 取水槽海水ポンプエリア防護対策設備(1/3)

構成要素	計画概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p><b>【位置】</b>                      取水槽海水ポンプエリア竜巻防護ネットは、取水槽海水ポンプエリアに設置する設計としている。</p>			
竜巻防護ネット	<p>竜巻防護ネットは、鋼製のネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部及び固定部）及び鋼製枠より構成する。</p>	<p>竜巻防護ネットに作用する荷重は、ワイヤロープ、接続治具（支持部及び固定部）を介して鋼製枠に伝達し、鋼製枠から架構を介して鉄筋コンクリート造の取水槽躯体に伝達する構造とする。</p>	

表 2-5 取水槽海水ポンプエリア防護対策設備 (2/3)

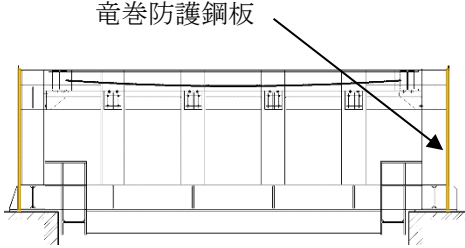
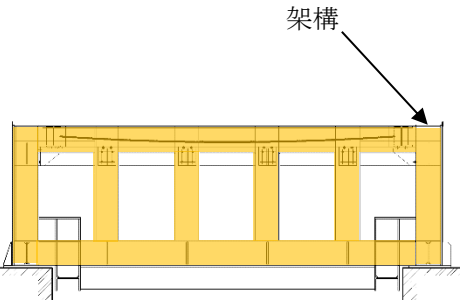
構成要素	計画概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】</p> <p>取水槽海水ポンプエリア竜巻防護鋼板は，取水槽海水ポンプエリアに設置する設計としている。</p>			
竜巻防護鋼板	竜巻防護鋼板は，鋼板により構成する。	竜巻防護鋼板に作用する荷重は，架構を介して鉄筋コンクリート造の取水槽躯体に伝達する構造とする。	

表 2-5 取水槽海水ポンプエリア防護対策設備 (3/3)

構成要素	計画概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p>【位置】</p> <p>取水槽海水ポンプエリア架構は，取水槽海水ポンプエリアに設置する設計としている。</p>			
架構	架構は，鋼製のH形鋼等より構成する。	架構に作用する荷重は，アンカーボルトを介して，鉄筋コンクリート造の取水槽躯体に伝達する構造とする。	

(2) 取水槽循環水ポンプエリア及び燃料移送ポンプエリア防護対策設備

取水槽循環水ポンプエリア及び燃料移送ポンプエリア防護対策設備は、竜巻防護鋼板及び架構で構成し、外部事象防護対象施設を取り囲むように設置することで、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止し、外部事象防護対象施設と竜巻防護鋼板の離隔を確保することなどにより、竜巻防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、竜巻防護鋼板は架構を介して、取水槽躯体又は燃料移送ポンプエリア躯体に支持する構造とする。

竜巻防護鋼板は鋼板より構成され、竜巻防護鋼板に作用する荷重は架構を介して鉄筋コンクリート造の取水槽躯体又は燃料移送ポンプエリア躯体に伝達する構造とする。

竜巻防護鋼板を支持する架構は、H形鋼等から構成され、架構に作用する荷重及び竜巻防護鋼板からの荷重を支持する構造とする。また、架構に作用する荷重は、アンカーボルトを介して、取水槽躯体又は燃料移送ポンプエリア躯体に伝達する構造とする。

取水槽循環水ポンプエリア及び燃料移送ポンプエリア防護対策設備の構造計画を表 2-6 に示す。

表 2-6 取水槽循環水ポンプエリア及び燃料移送ポンプエリア防護対策設備の構造計画

構成要素	計画概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p><b>【位置】</b>                      取水槽循環水ポンプエリア及び燃料移送ポンプエリア竜巻防護鋼板及び架構は、取水槽循環水ポンプエリア及び燃料移送ポンプエリアに設置する設計としている。</p>			
竜巻防護鋼板	竜巻防護鋼板は、鋼板により構成する。	竜巻防護鋼板に作用する荷重は、架構を介して鉄筋コンクリート造の取水槽躯体又は燃料移送ポンプエリア躯体に伝達する構造とする。	<p>竜巻防護鋼板</p> <p>取水槽循環水ポンプエリア竜巻防護鋼板</p> <p>竜巻防護鋼板</p> <p>燃料移送ポンプエリア竜巻防護鋼板</p>
架構	架構は、鋼製のH形鋼等より構成する。	架構に作用する荷重は、アンカーボルトを介して、鉄筋コンクリート造の取水槽躯体又は燃料移送ポンプエリア躯体に伝達する構造とする。	<p>架構</p> <p>取水槽循環水ポンプエリア架構</p> <p>架構</p> <p>燃料移送ポンプエリア架構</p>



### (3) 建物開口部防護対策設備

建物開口部防護対策設備は、竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板及び架構で構成し、飛来物が侵入した場合に外部事象防護対象施設に衝突する可能性のある原子炉建物及び廃棄物処理建物の開口部を取り囲むように設置することで、飛来物が建物内に侵入することを防止し、外部事象防護対象施設と竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板の離隔を確保することなどにより、竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板にたわみ及び変形が生じたとしても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。また、竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板は架構を介して、原子炉建物躯体又は廃棄物処理建物躯体に支持する構造とする。

竜巻防護ネットはネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部及び固定部）及び鋼製枠により構成され、竜巻防護ネットに作用する荷重をワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）を介して鋼製枠に伝達し、鋼製枠から架構を介して鉄筋コンクリート造の原子炉建物躯体又は廃棄物処理建物躯体に伝達する構造とする。

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荷重を受け持つ展開方向と展開直角方向の異方性を持ち、架構の配置、ネットに作用する荷重及び外部事象防護対象施設との離隔に応じて、ネットの展開方向と展開直角方向の長さの比を考慮して、鋼製枠内に複数枚を重ねて設置する構造とする。また、ネットに飛来物が衝突した際、ワイヤロープに瞬間的な大荷重が作用するのを防ぐため、鋼製枠の四隅には緩衝材を設置する設計とする。

竜巻防護鋼板は、鋼板により構成され、竜巻防護鋼板に作用する荷重は架構を介して鉄筋コンクリート造の原子炉建物躯体又は廃棄物処理建物躯体に伝達する構造とする。

竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板を支持する架構は、H形鋼等から構成され、直接架構に作用する荷重及び竜巻防護鋼板からの荷重を支持する構造とする。また、架構に作用する荷重は、アンカーボルトを介して、鉄筋コンクリート造の原子炉建物躯体又は廃棄物処理建物躯体に伝達する構造とする。

なお、外部事象防護対象施設に衝突する可能性がある飛来物は竜巻防護ネットで捕捉する構造とするため、架構は建物の開口部より大きな構造とし、飛来物の衝突により仮に架構が損傷した場合であっても、外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させない構造とする。

建物開口部防護対策設備の構造計画を表2-7に示す。

表 2-7 建物開口部防護対策設備の構造計画(1/2)

構成要素	計画概要		説明図
	主体構造	支持構造	
<p><b>【位置】</b>            建物開口部竜巻防護鋼板及び架構は、原子炉建物又は廃棄物処理建物の開口部に設置する設計としている。</p>			
竜巻防護ネット	<p>竜巻防護ネットは、鋼製のネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部及び固定部）及び鋼製枠より構成する</p>	<p>竜巻防護ネットに作用する荷重は、ワイヤロープ、接続治具（支持部及び固定部）を介して鋼製枠に伝達し、鋼製枠から架構を介して鉄筋コンクリート造の原子炉建物又は廃棄物処理建物躯体に伝達する構造とする。</p>	
竜巻防護鋼板	<p>竜巻防護鋼板は、鋼板により構成する。</p>	<p>竜巻防護鋼板に作用する荷重は、架構を介して鉄筋コンクリート造の原子炉建物躯体に伝達する構造とする。</p>	

表 2-7 建物開口部防護対策設備の構造計画 (2/2)

構成要素	計画概要		説明図
	主体構造	支持構造	
架構	<p>架構は、鋼製のH形鋼等より構成する。</p>	<p>架構に作用する荷重は、アンカーボルトを介して、鉄筋コンクリート造の原子炉建物又は廃棄物処理建物躯体に伝達する構造とする。</p>	<p>建物開口部架構 (竜巻防護鋼板)</p> <p>建物開口部架構 (竜巻防護ネット)</p>

## 2.5 評価方針

竜巻防護対策設備の強度評価は、「2.4 構造設計」を踏まえ、以下の評価方針とする。

### (1) 竜巻防護ネット

設計竜巻の風圧力による荷重, 飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し, 主要な部材が破断しなければ飛来物は捕捉可能であり, 飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しない。したがって, 竜巻防護ネットのうち, ネット, ワイヤロープ及び接続冶具(支持部及び固定部)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, 計算により確認する。

また, 設計竜巻の風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重に対し, 飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しないよう捕捉するために, 竜巻防護ネットのうち, ネット及びワイヤロープにたわみを生じて, 飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しないよう外部事象防護対象施設との離隔を確保できることを計算により確認する。

### (2) 竜巻防護鋼板

設計竜巻の風圧力による荷重, 飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し, 飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために, 竜巻防護鋼板が飛来物の貫通を生じない最小厚さ(以下「必要最小厚さ」という。)以上であることを計算により確認する。必要最小厚さについては, 解析により確認する。

なお, 竜巻防護鋼板は, 外部事象防護対象施設に対し, 十分な離隔距離を確保していることから, 外部事象防護対象施設に波及的影響を与えることはない。

### (3) 架構

設計竜巻の風圧力による荷重, 飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し, 外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう, 飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し, 架構全体の転倒及び架構部材の脱落を生じないことを解析により確認する。

なお, 架構部材に貫通が生じないことの評価については, 主要な架構部材の外側には竜巻防護ネット又は竜巻防護鋼板を設置しているため, 飛来物が架構に直接衝突することはないことから, 評価対象外とする。

### 3. 竜巻防護対策設備の構成要素の設計方針

竜巻防護対策設備は「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、「2.4 構造設計」で示した構造と「2.3 荷重及び荷重の組合せ」で設定した荷重を踏まえ、竜巻防護対策設備を構成する要素間での荷重の受け渡し、要素ごとの設計及び設計結果の全体設計への反映を行う。

竜巻防護対策設備の設計フローを図3-1に示す。

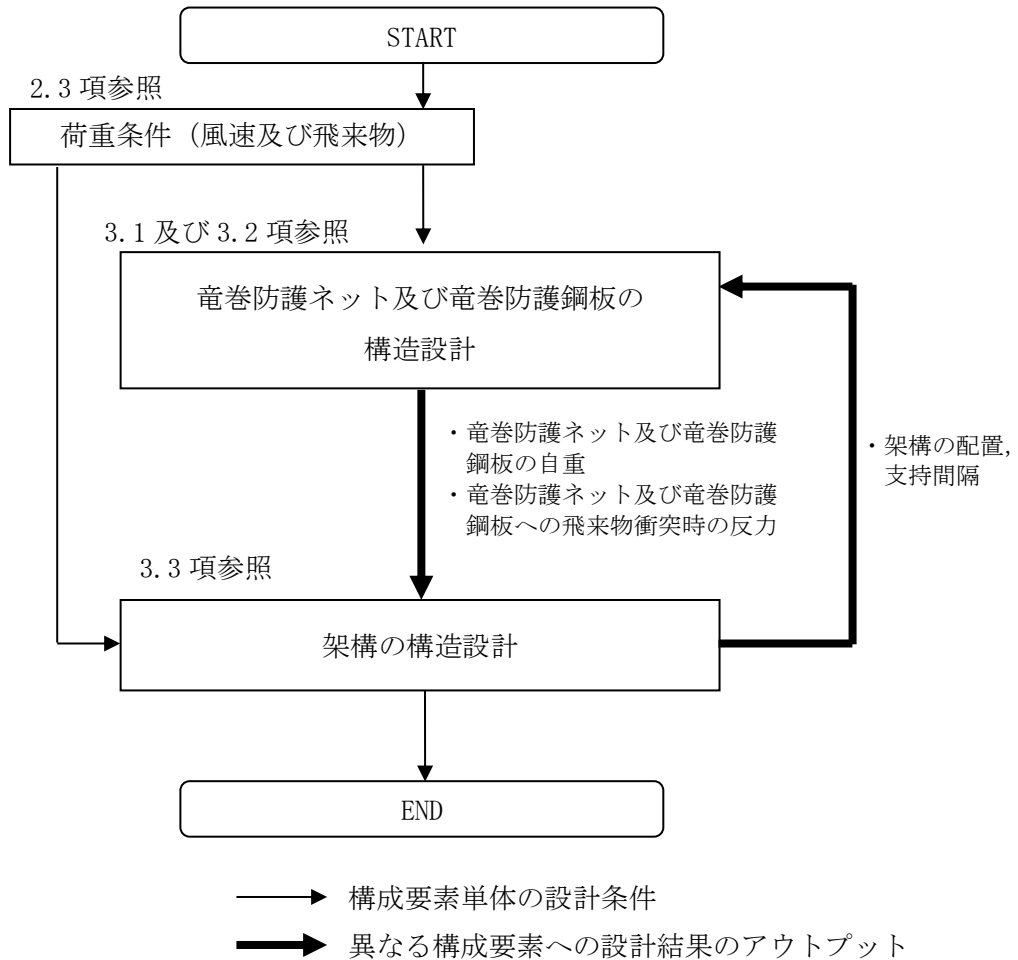


図3-1 竜巻防護対策設備の設計フロー

### 3.1 竜巻防護ネットの構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止可能な設計とするため、飛来物の竜巻防護ネットへの衝突に対し、主要な部材が破断することなく架構に荷重を伝達し、たわみを生じて、飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しないよう竜巻防護ネットで捕捉できる設計とする。

竜巻防護ネットの設計フローを図3-2に示す。

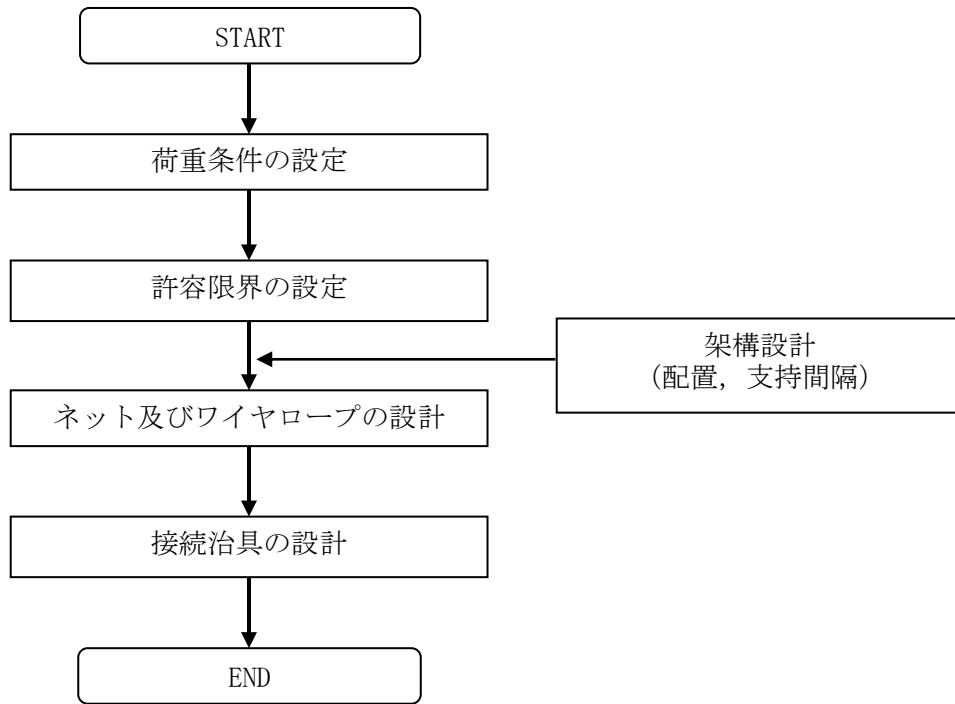


図3-2 竜巻防護ネットの設計フロー

竜巻防護ネットの概要図を図3-3に示す。ネット、ワイヤロープ、接続治具（支持部及び固定部）及び鋼製枠により構成され、ネットの4辺をワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは鋼製枠に設置した接続治具にて支持する構造とする。ワイヤロープの端部はターンバックル又はシャックルを設置し、ターンバックル又はシャックルを鋼製枠に設置した取付けプレートに接続する構造とする。

竜巻防護ネットは、ネットに作用する荷重、ネットの有する限界吸収エネルギー及び飛来物衝突時のたわみ量を考慮し、設置するネット枚数を設計する。

竜巻防護ネットは、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。）にて適用性が確認されている評価式及びネットの物性値を用いた設計とする。

竜巻防護ネットを構成するネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）についての構造設計を以下に示す。

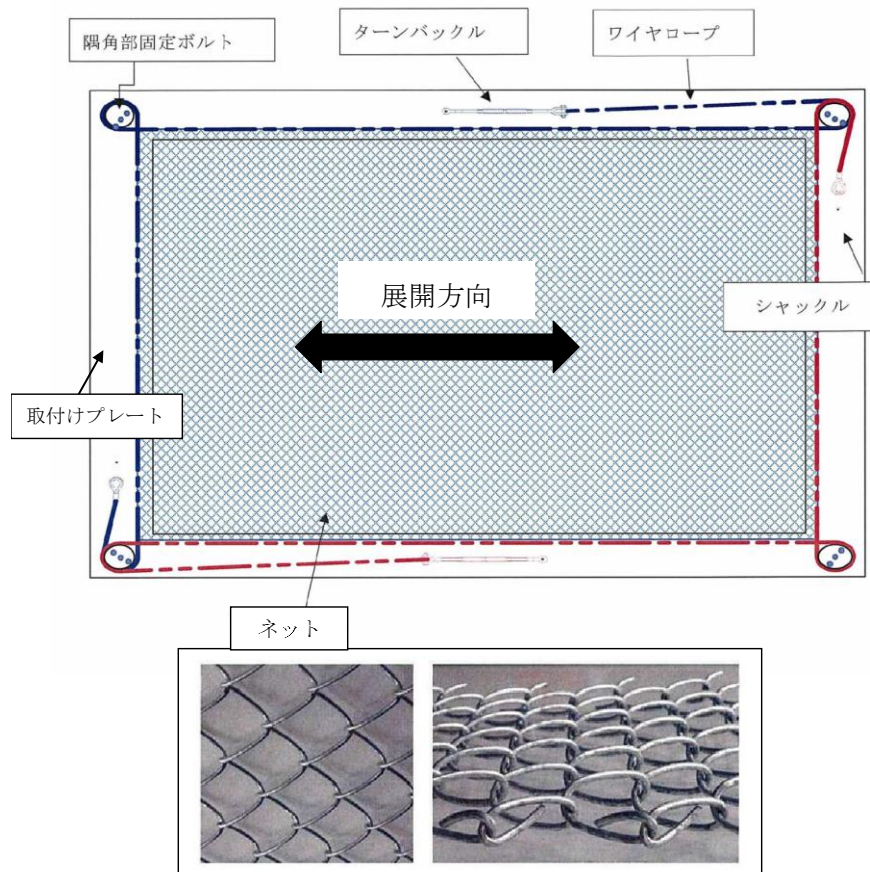


図3-3 竜巻防護ネットの概要図

(1) ネット

ネットは、らせん状の硬鋼線を山形に折り曲げて列線とし、3次元的に交差させて編み込んだものであり、編み込みの向きにより、展開方向とその直角方向の異方性を有する。展開方向が主に荷重を受け持ち、展開方向と展開直角方向で剛性や伸び量が異なるため、これらの異方性を考慮した設計とする。ネットは、電中研報告書において、その剛性、最大たわみ時のたわみ角、1目合いの破断変位等が確認されている。

ネットの寸法は、架構の柱・はりの間隔並びにネットの展開方向と展開直角方向の剛性や伸び量の異方性を考慮して、展開方向と展開直角方向の寸法の比（以下「アスペクト比」という。）について、原則として電中研報告書にて適用性が確認されている範囲（1:1~2:1）に入るように設計する。ただし、設定する寸法での限界吸収エネルギー量等を踏まえ、設置するネットの枚数を増やし、衝撃荷重に対する耐力を持たせるとともにたわみ量を低減させる設計とする。

(2) ワイヤロープ

ワイヤロープの取付部は、展開方向のワイヤロープと展開直角方向のワイヤロープで荷重の伝達分布が異なり、さらにワイヤロープの巻き方によりワイヤロープ間の荷重伝達に影響を及ぼす可能性があるため、ネットに対して2本をL字に設置することにより、ワイヤロープに作用する荷重が均一となるような設計とする。

(3) 接続治具（支持部及び固定部）

電中研報告書の評価式を適用するため、衝突試験における試験体と同じ構造を採用しており、飛来物衝突時に急激な大荷重が作用するのを抑制するために、緩衝装置を四隅に設置する設計とする。

接続治具は、ネットへの飛来物の衝突によりネットからワイヤロープを介して直接作用する荷重もしくは発生する応力に対して、破断することのない強度を有する設計とする。

接続治具（支持部）はワイヤロープを支持するターンバックル及びシャックルであり、接続治具（固定部）は隅角部固定ボルト及びターンバックル又はシャックルを鋼製枠に接続する取付けプレートである。



### 3.2 竜巻防護鋼板の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、飛来物が外部事象防護対象施設へ衝突することを防止するために、飛来物の竜巻防護鋼板への衝突に対し、竜巻防護鋼板が貫通しない構造強度を有する設計とする。

竜巻防護鋼板の設計フローを図3-4に示す。

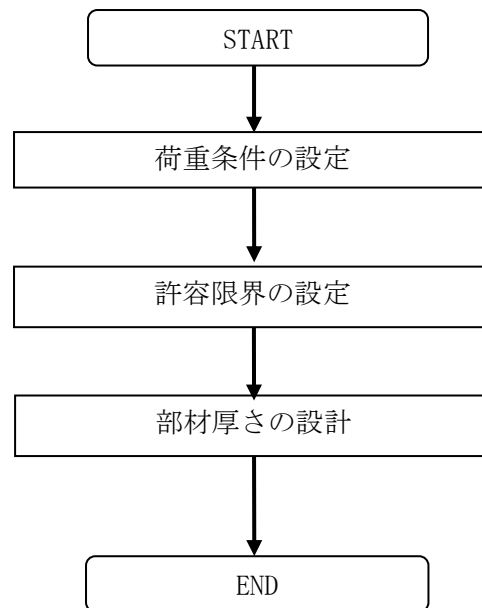


図3-4 竜巻防護鋼板の設計フロー

### 3.3 架構の構造設計

「2.2 構造強度の設計方針」に基づき、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないために、架構全体の転倒及び架構部材の脱落を生じない設計とする。

架構の設計フローを第3-5図に示す。

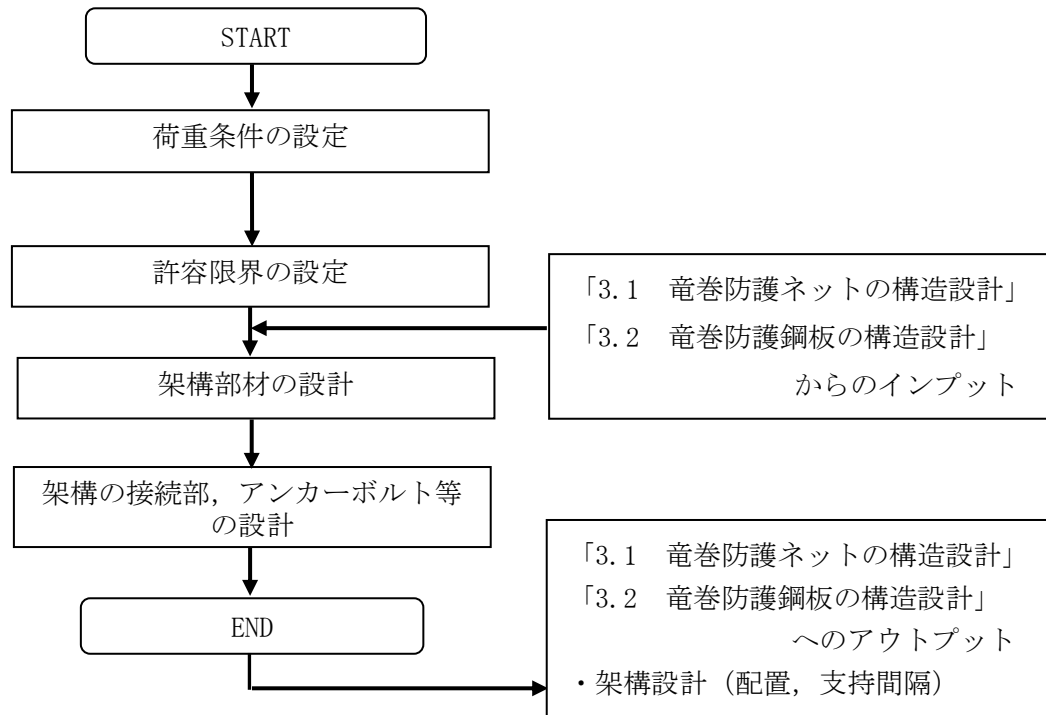


図3-5 架構の設計フロー

架構は、H形鋼等から構成し、竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板からの荷重を支持する設計とする。

架構の主体構造は、柱、はり等の鋼材であり、外殻に面する柱及びはりに竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板を設置し、アンカーボルトで建物等の躯体に固定する設計とする。架構の接続部については、母材と同等の耐力を有する設計とする。

また、作用する荷重については、飛来物による衝撃荷重が支配的であり、竜巻防護鋼板に作用する荷重を、周囲の柱、はり等に伝達し、アンカーボルトを介して建物等の躯体に伝達する設計とする。

#### 4. 竜巻防護対策設備の構成要素の評価方針

「2.3 荷重及び荷重の組合せ」, 「2.5 評価方針」及び「3. 竜巻防護対策設備の構成要素の設計方針」に基づき, 竜巻防護対策設備の構成要素ごとの評価方針を設定する。

竜巻防護対策設備を設計する上で, 飛来物の衝突回数については, 屋外の鋼製材等の飛来物となりうるものは, 飛来物発生防止管理を実施し, 飛来物となるものが少なくなるように運用することにより, 竜巻の影響期間中に複数の飛来物が同一の竜巻防護対策設備に衝突する可能性は十分低いことから, 同一の竜巻防護対策設備への複数の飛来物の衝突は考慮しない設計とする。

竜巻防護対策設備は, 飛来物衝突に対して, 竜巻防護対策設備を構成する部材が許容限界を満足し, 外部事象防護対象施設が飛来物の影響を受けないことを確認する。

竜巻防護対策設備の評価フローを図 4-1 に示す。

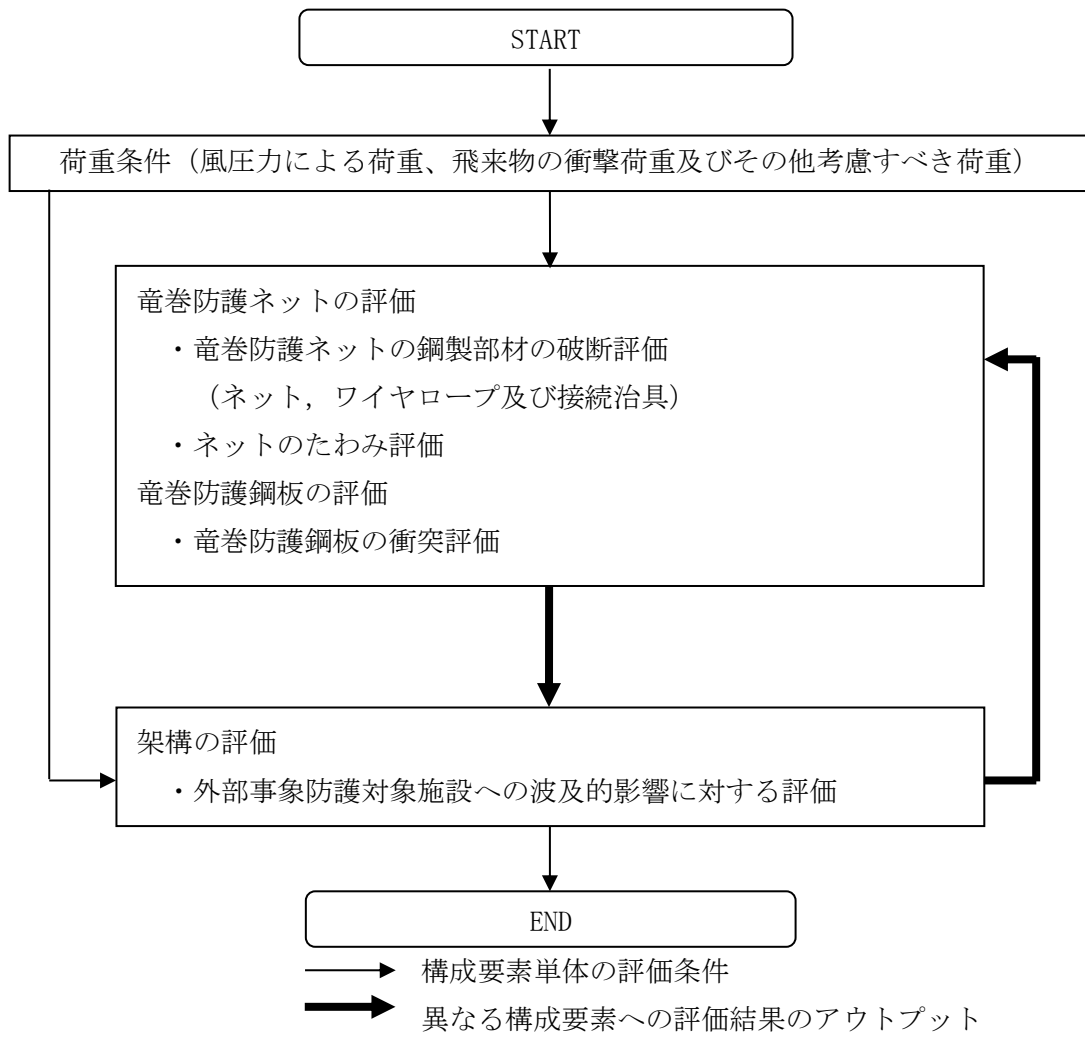


図 4-1 竜巻防護対策設備の評価フロー

#### 4.1 竜巻防護ネットの評価方針

「2.5(1) 竜巻防護ネット」の評価方針に基づき、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、主要な部材が破断しないために、竜巻防護ネットのうちネット、ワイヤロープ及び接続冶具（支持部及び固定部）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計算により確認する。その方法は「6.1 竜巻防護ネットの強度評価」に示すとおり、算出されるネットの限界吸収エネルギー及び衝撃荷重を基に吸収エネルギー評価及び破断評価を行う。

また、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、竜巻防護ネットのうちネット及びワイヤロープにたわみが生じても、飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しないよう、外部事象防護対象施設との離隔を確保できることを計算により確認する。その方法は、「6.1 竜巻防護ネットの強度評価」に示すとおり、算出されるネットのたわみ量を基にたわみ評価を行う。

竜巻防護ネットの評価フローを図4-2に示す。

竜巻防護ネットは竜巻による荷重が作用する場合に、破断が生じることなく、たわみを生じたとしても飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しないような離隔を有することを確認する。

竜巻防護ネットの破断及びたわみに対する評価方針を以下に示す。

竜巻防護ネットの具体的な計算方法及び結果は、VI-3-別添 1-3「竜巻防護ネットの強度計算書」に示す。

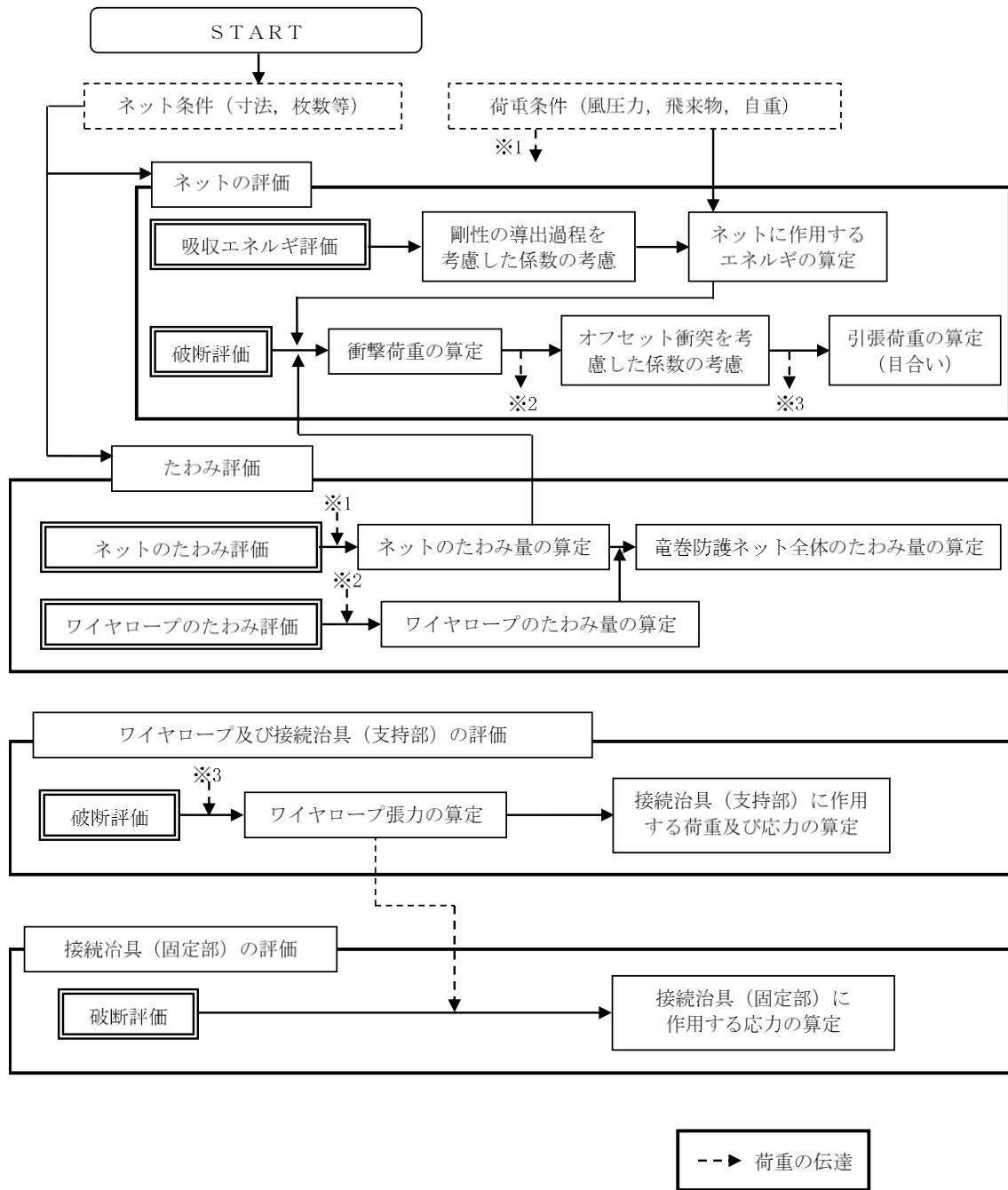


図 4-2 竜巻防護ネット本体の評価フロー

## (1) 強度評価

設計竜巻の風圧力による荷重，飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し，主要な部材が破断しないために，竜巻防護ネットのうちネット，ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）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計算により確認する。

自重，風圧力による荷重及び飛来物による衝撃荷重がネットに作用する場合に，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ために，以下を評価する。

ネットについては，設計竜巻による荷重が作用する場合に，ネット全体でエネルギー吸収することから，ネットの吸収エネルギーを評価する。評価方法としては，電中研報告書において，ネットへの適用性が確認されている評価式（以下「電中研評価式」という。）を参照して評価する。また，飛来物の衝突箇所において，破断が生じないことを確認するために，ネットに作用する引張荷重を，電中研評価式を参照して評価する。さらに，ネットが機能を発揮できるように，ネットに作用する荷重がワイヤロープ及び接続治具に伝達され，その荷重によりワイヤロープ及び接続治具（支持部）に発生する荷重，並びに接続治具（固定部）に発生する応力が許容値以下であることを確認する。

ネット，ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）の破断に対する評価においては，ネット寸法に対するアスペクト比及びネットの衝突位置の影響について，以下のとおり考慮して評価を実施する。

### a. ネットの吸収エネルギー評価

ネットの吸収エネルギー評価においては，ネットの目合いの方向に従ってネットの剛性を設定し，ネットのエネルギー吸収に有効な面積を考慮し，アスペクト比を考慮して，ネットの有効面積を設定し評価を実施する。また，飛来物の衝突位置の違いによりたわみ量の影響があり，衝突位置，ネットの剛性の設定によるたわみ量への影響を考慮して，評価を実施する。

ネットのアスペクト比については，ネットのエネルギー吸収性能が主に荷重を受け持つ展開方向寸法によることから，評価ごとに保守的な評価となるように，評価においてはアスペクト比を考慮した展開方向及び展開直角方向の寸法を設定する。

### b. ネット，ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）の破断評価

ネットの破断評価においては，吸収エネルギー評価と同様にネットのアスペクト比を考慮して，ネットの有効面積を設定し評価する。ネットのアスペクト比は，ネット目合いの方向を踏まえ，評価が保守的となるように，ネットの有効面積を設定して評価を実施する。

また，衝突位置を考慮して評価を実施する。

ネット，ワイヤロープ及び接続治具については，飛来物の衝突位置として，中央位置からずれた（以下「オフセット」という。）衝突についても考慮する。具体的には，電中研評価式では飛来物がネット中央位置に衝突する場合についてのみ評価を実施するため，オフセット位置に衝突する場合の評価においては，中央位置に衝突する場合とオフセット位

置に衝突する場合の飛来物の移動距離を考慮した評価を実施する。

ネットのアスペクト比については、吸収エネルギー評価と同様に考慮する。

(2) たわみ評価

設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しないよう捕捉するために、竜巻防護ネットのうちネット及びワイヤロープが、たわみを生じても、飛来物が外部事象防護対象施設と衝突しないよう外部事象防護対象施設との離隔を確保できることを計算により確認する。

竜巻防護ネットは、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重がネットに作用する場合に、ネットがたわむことでエネルギーを吸収することから、ネット及びワイヤロープがたわんでも、ネットと外部事象防護対象施設が衝突しないことを確認するために、ネットとワイヤロープのたわみ量を考慮して評価する。評価方法としては、電中研評価式等を用いて評価する。

ネット及びワイヤロープのたわみ評価においても、構造強度評価と同様にネット寸法に対するアスペクト比を考慮する必要があるため、評価が保守的となるように、ネットの有効面積を設定して評価を実施する。

評価の条件についても、構造強度評価と同様に飛来物のネットの衝突位置を考慮して評価を実施する。



#### 4.2 竜巻防護鋼板の評価方針

竜巻防護鋼板については、「2.5(2) 竜巻防護鋼板」の評価方針に基づき、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することを防止するために、竜巻防護鋼板が飛来物の貫通を生じない必要最小厚さ以上であることを確認する。

竜巻防護鋼板の評価フローを図4-3に示す。

竜巻防護鋼板の具体的な計算方法及び結果は、VI-3-別添1-4「竜巻防護鋼板の強度計算書」に示す。

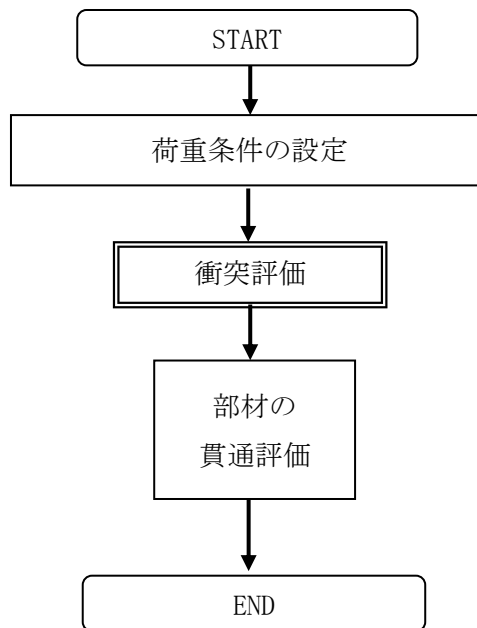


図 4-3 竜巻防護鋼板の評価フロー

##### (1) 衝突評価

設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他の荷重に対し、竜巻防護鋼板が外部事象防護対象施設の機能喪失に至る可能性のある飛来物を貫通させないために、竜巻防護鋼板が飛来物の貫通を生じない必要最小厚さ以上であることを計算により確認する。必要最小厚さは解析により算出することとし、算出方法は、FEMを用いた解析とし、使用する解析コードは「Virtual Performance Solution」とする。

### 4.3 架構の評価方針

「2.5(3) 架構」の評価方針に基づき、上載する竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板の自重並びに竜巻防護ネット、竜巻防護鋼板及び架構への飛来物の衝突時の荷重に対し、外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないよう、架構全体の転倒及び架構部材の脱落を生じないことの確認として、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、架構全体の転倒及び架構部材の脱落に至るような変形が生じないことを解析により確認する。

架構の評価フローを第4-4図に示す。

架構の具体的な計算方法及び結果は、VI-3-別添 1-5「架構の強度計算書」に示す。

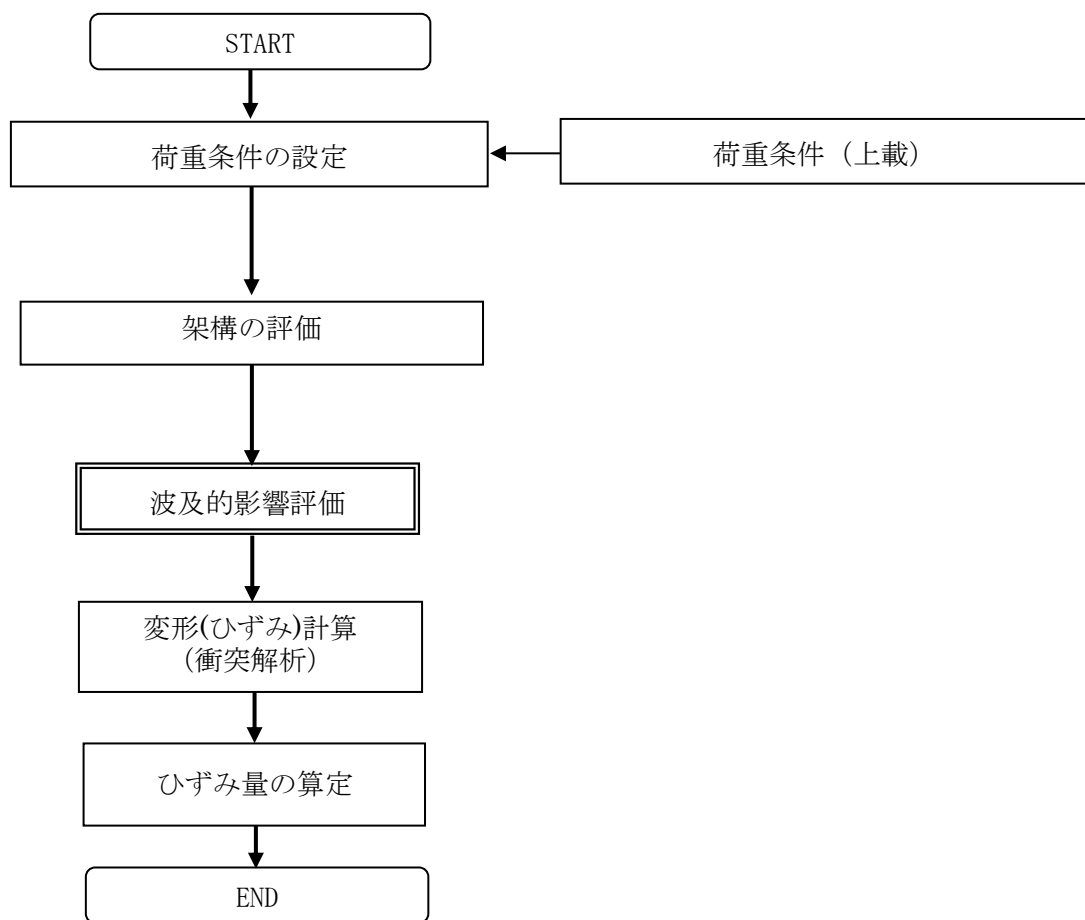


図4-4 架構の評価フロー

(1) 波及的影響評価

上載する竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板の自重並びに竜巻防護ネット、竜巻防護鋼板及び架構への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認及び外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないことの確認として、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、架構部材に破断が生じ、支持する竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板が脱落しないよう十分な余裕を持った強度が確保されていること並びに架構全体が竜巻防護対策設備の転倒に至るような変形が生じないことを解析により確認する。

設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重が架構に作用する場合に、以下のとおり評価する。

a. 架構全体

架構全体については、飛来物が衝突した際の架構のひずみ量を評価し、架構全体が転倒及び架構部材の脱落に至らないことを確認する。評価方法は、FEMを用いた解析とする。使用する解析コードは「Virtual Performance Solution」とする。

## 5. 許容限界

「2.5 評価方針」及び「4. 竜巻防護対策設備の構成要素の評価方針」を踏まえ、竜巻防護対策設備の構成要素ごとの設計に用いる許容限界を設定する。

### 5.1 竜巻防護ネットの許容限界

#### (1) 許容限界の設定

##### a. 構造強度評価

竜巻防護ネットは、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対する評価を行うため、破断せず、荷重が作用するとしても竜巻防護ネットが内包する外部事象防護対象施設に飛来物を衝突させないために、竜巻防護ネットの主要な部材が、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許容限界として設定する。

竜巻防護ネットのうちネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）の許容限界を以下のとおり設定する。

##### (a) ネット

ネットの許容限界は、吸収エネルギー評価及び破断評価（引張荷重評価）において設定する。

吸収エネルギー評価は、飛来物によりネットに与えられる全エネルギーがネットの限界吸収エネルギー以下であることにより、ネットが破断しないことを確認することから、ネットの限界吸収エネルギーを許容限界とする。

破断評価は、ネットが破断を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評価方針としている。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、飛来物の衝撃荷重に対し、ネットの許容引張荷重を許容限界とする。

ネットの許容限界を表 5-1 に示す。

表 5-1 ネットの許容限界

許容限界	
吸収エネルギー評価の許容値	破断評価の許容値
ネット設置枚数 $n$ を考慮した 限界吸収エネルギー	ネット設置枚数を考慮した 許容引張荷重
$E_{max}$	$F_{max}$

## (b) ワイヤロープ

ワイヤロープの端部にはワイヤグリップを取付ける。一般にワイヤロープの破断荷重の値はメーカーの引張試験によれば J I S 規格値よりも大きいので、ワイヤロープの許容限界は、J I S に規定する破断荷重にワイヤグリップ効率  $C_c$  を乗じた値とする。

ワイヤロープの許容限界を表5-2に示す。

表 5-2 ワイヤロープの許容限界

規格値	許容限界
$F_2^{*1}$	$C_c^{*2} \cdot F_2^{*1}$

注記\*1: J I S G 3 5 4 9 の破断荷重

\*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」

## (c) 接続冶具 (支持部)

接続冶具 (支持部) の強度評価は、接続冶具 (支持部) として、ワイヤロープを支持するターンバックル及びシャックルが、ワイヤロープから受ける引張荷重に対し、破断が生じない十分な強度を有することを確認する評価方針としていることを踏まえ、ターンバックルについては J I S に規定する保証荷重の 1.5 倍を、シャックルについては試験結果に基づくメーカー保証値を許容限界とする。

ターンバックル及びシャックルの許容限界を表 5-3 に示す。

表5-3 接続冶具の許容限界

評価部位	許容荷重
ターンバックル	$F_3^{*1}$
シャックル	$F_4^{*2}$

注記\*1: J I S A 5 5 4 0 の保証荷重の 1.5 倍

\*2: 試験結果に基づくメーカー保証値

## (d) 接続冶具 (固定部)

接続冶具 (固定部) の破断評価は、接続冶具 (固定部) である隅角部固定ボルト及び取付けプレートが、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評価方針としていることを踏まえ、鋼構造設計規準に基づいた短期許容応力度を許容限界とする。

設計竜巻による荷重は、ネットに作用し、ワイヤロープを介して接続冶具に作用するため、評価対象は、接続冶具 (固定部) である隅角部固定ボルト及び取付けプレートとする。取付けプレートは、プレート本体、プレートと鋼製枠、プレートとリブ及び鋼製枠とリブの溶接部が存在するが、強度評価上、溶接脚長が短い取付けプレートとリブの溶接部を評価対象部位とする。

接続治具（固定部）の許容限界を表 5-4 に示す。

表 5-4 接続治具（固定部）の許容限界

許容限界
せん断
$1.5 f_s^*$

注記\*：鋼構造設計規準に基づいた短期許容応力度

b. たわみ評価

竜巻防護ネットは，飛来物衝突時にたわんだとしても，飛来物が外部事象防護対象施設に衝突することがないように，十分な離隔を有していることを確認する評価方針としていることを踏まえ，ネットと外部事象防護対象施設の最小離隔距離  $L_{min}$  を許容限界として設定する。

竜巻防護ネットのたわみ評価の許容限界を表 5-5 に示す。

表 5-5 竜巻防護ネットのたわみ評価の許容限界

許容限界
竜巻防護ネットと外部事象防護対象施設の最小離隔距離
$L_{min}$

(2) 許容限界の設定方法

a. 記号の定義

竜巻防護ネットのうち、ネットの強度評価における許容限界の算出に用いる記号を表5-6に示す。

表5-6 ネットの強度評価における許容限界の算出に用いる記号

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	飛来物の端面の長辺方向寸法
c	mm	飛来物の端面の短辺方向寸法
$E_i$	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
$E_{max}'$	kJ	等価剛性の算出過程を踏まえた係数及びネット設置枚数を考慮した限界吸収エネルギー
$F_i$	kN	飛来物衝突時のi番目の列における作用力
$F_{max}$	kN	ネット設置枚数nを考慮したネットの許容破断荷重
$F_1$	kN	ネット1交点あたりの許容引張荷重
K	kN/m	ネット1目合いの等価剛性
$K_x'$	kN/m	ネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性
$K_x$	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
$L_x$	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	—	主金網の設置枚数
$N_i$	—	i列目のネット展開直角方向目合い数
$N_x$	—	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	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
$X_i$	m	i列目のネットの伸び
$\delta_i$	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
$\delta_{max}$	m	ネットの最大たわみ量
$\theta_i$	deg	i番目の列におけるネットたわみ角
$\theta_{max}$	deg	ネットの最大可能なたわみ角

b. 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エネルギー吸収量がネットの有する最大吸収エネルギー $E_{max}$ となる。この値に以下の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。

限界吸収エネルギーは、ネット1目合いの展開方向の1列の等価剛性、展開方向寸法及びたわみ量から、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5-1に示す。



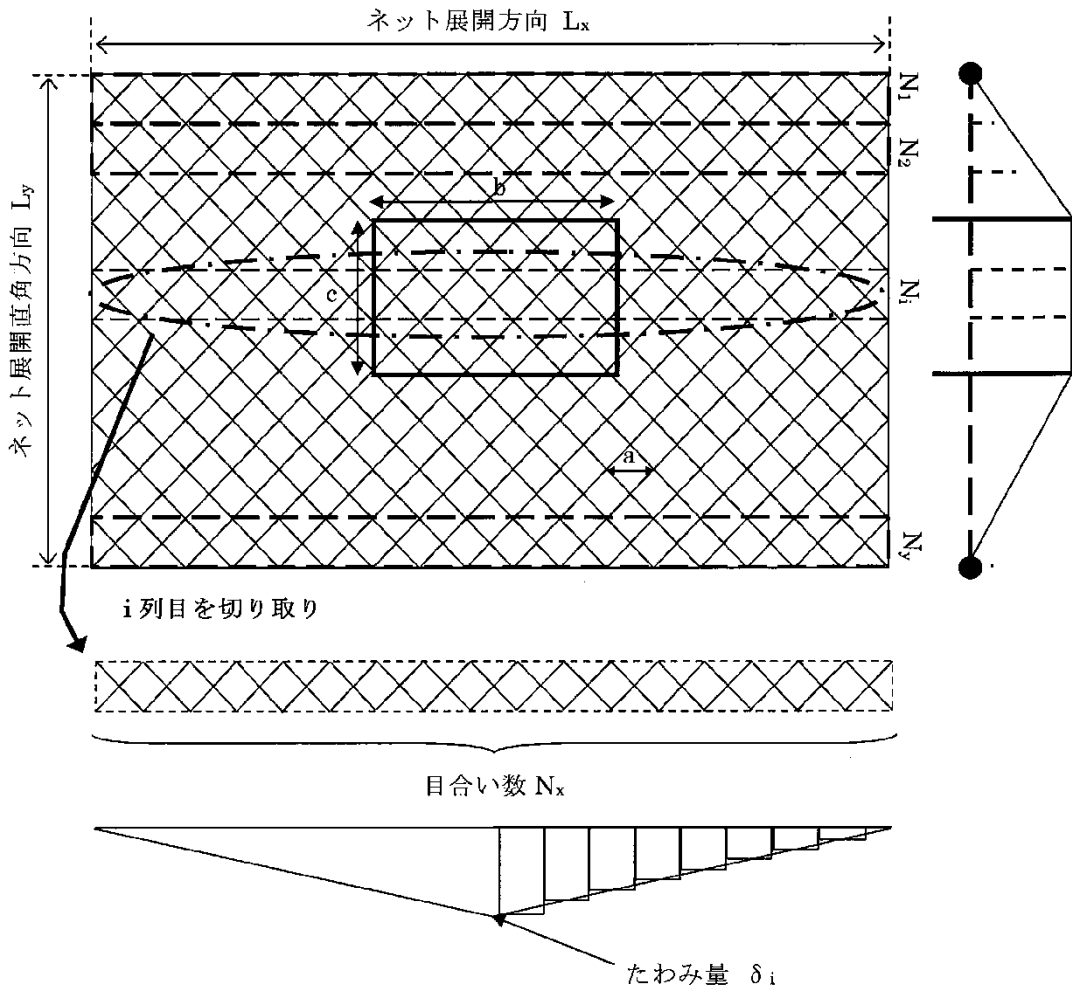


図5-1 吸収エネルギー評価におけるネットのモデル図

図5-1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量が小さくなるように評価する。

$$\text{ネット展開直角方向目合い列数} = \frac{c}{a}$$

評価モデルとしては、展開方向に1目合いごとに帯状に分割するモデルとしており、限界吸収エネルギー量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5-2に示す。

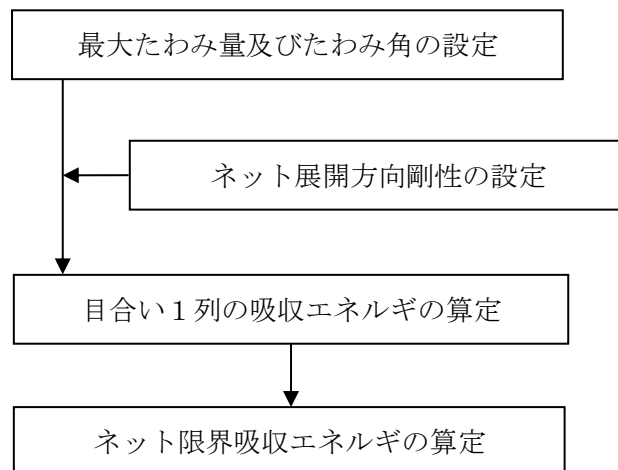
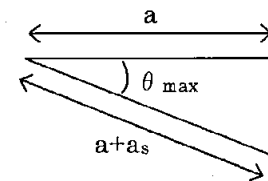


図5-2 吸収エネルギー評価の許容限界の算定フロー

ネット1目合いの最大伸び量は、電中研報告書のネット目合いの引張試験から求められ、そこ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  $\delta_{max}$  は次式により算定される。

$$\delta_{max} = \frac{L_x}{2} \cdot \tan \theta_{max}$$

$$\theta_{max} = \cos^{-1} \left( \frac{a}{a + a_s} \right)$$



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目合いあたりばね定数  $K$  を持つばねを  $N_x$  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列あたりの剛性  $K_x'$  は、

$$N_x = \frac{1000 \cdot L_x}{a}, \quad N_y = \frac{1000 \cdot L_y}{a}$$

$$\text{ネット展開方向剛性 } K_x' = \frac{K}{N_x}$$

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、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。電中研報告書によると、40mm 目合いの補助金網は、飛来物落下試験において40mm 目合い0.5枚相当の吸収エネルギー能力を有していることが確認されていることから、補助金網については、40mm 目合いの金網0.5枚として考慮する。

飛来物が衝突しなかった列のたわみ量  $\delta_i$  は、最大たわみ量  $\delta_{max}$  から定着部のたわみ量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5-3に示す。

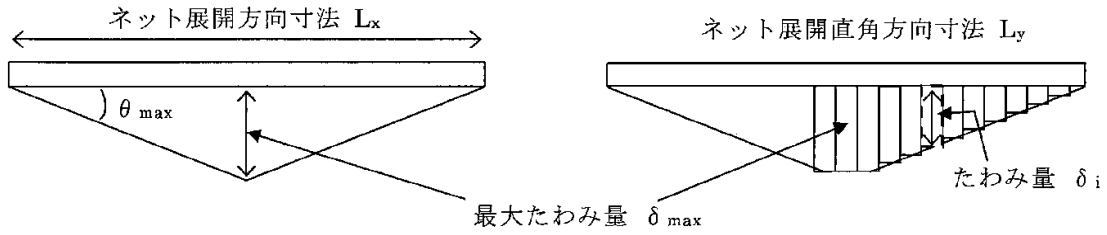


図5-3 ネットの最大たわみ量と最大たわみ角

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5-4に示す。

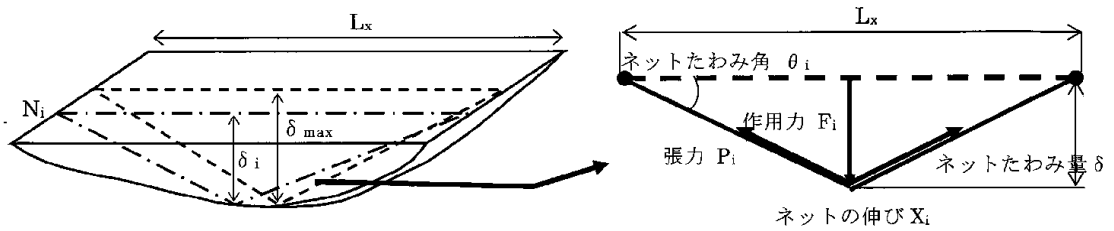


図5-4 ネットに作用する力のつり合い

$i$  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，

$$P_i = 2 \cdot K_x \cdot \frac{X_i}{2}$$

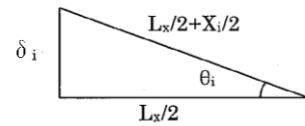
$$= K_x \cdot X_i$$

となる。また，作用力  $F_i$  は変位量とたわみ量の関係から，

$$F_i = 2 \cdot P_i \cdot \sin \theta_i$$

$$= 2 \cdot K_x \cdot X_i \cdot \sin \theta_i$$

$$= 2 \cdot K_x \cdot L_x \cdot (\tan \theta_i - \sin \theta_i)$$



$$= 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \cdot \left( 1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) \dots \dots \dots (5. 1)$$

ネットに飛来物が衝突した際のネットにかかる張力  $F_i$  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。

$$\begin{aligned}
 E_i &= \int_0^{\delta_i} F_i d \delta_i \\
 &= \int_0^{\delta_i} 4 \cdot K_x \cdot \delta_i \cdot \left( 1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2}} \right) d \delta_i \\
 &= 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \cdot \left( \sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \dots\dots\dots (5. 2)
 \end{aligned}$$

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。

$$\begin{aligned}
 E_{max} &= \sum_{i=1}^{N_y} E_i \\
 &= \sum_{i=1}^{N_y} \left\{ 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \cdot \left( \sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\} \dots\dots\dots (5. 3)
 \end{aligned}$$

また、等価剛性の導出過程を踏まえた係数及びネット設置枚数を考慮した限界吸収エネルギーを  $E_{max}'$  とする。係数としては、電中研報告書のネット引張試験結果より 1/1.03 と定める。

$$E_{max}' = \frac{1}{1.03} \cdot E_{max} \dots\dots\dots (5. 4)$$

c. 破断評価

ネットの破断評価においては、計算により算出するネットの許容引張荷重が飛来物の衝撃荷重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。

40mm 目合いのネットに飛来物（鋼製材）が衝突した評価モデルを図 5-5 に示す。

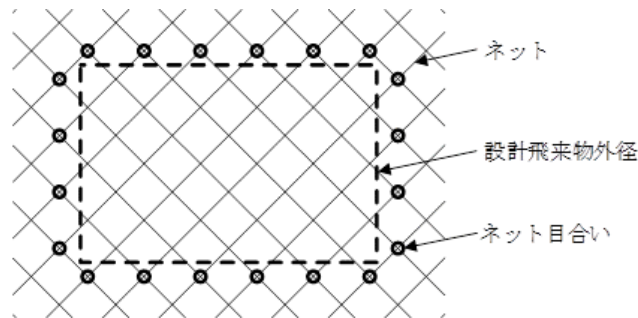


図 5-5 40mm 目合いのネットに飛来物が衝突した評価モデル

ネットの許容引張荷重はネットの 1 交点あたりの許容引張荷重から定まり、飛来物衝突時の周辺交点数から算出される許容引張荷重を許容限界とする。

図 5-5 に示すように、40mm 目合いのネットは飛来物（鋼製材）が衝突した際、20 交点が接触するため、許容引張荷重  $F_{max}$  は以下のとおり算出される。

$$F_{max} = F_1 \cdot 20 \cdot n$$

## 5.2 竜巻防護鋼板の許容限界

### (1) 衝突評価

飛来物による衝撃荷重に対し、竜巻防護鋼板に貫通が生じないことを解析により確認する評価方針としていることを踏まえ、解析により求めた飛来物の必要最小厚さを許容限界として設定する。解析における鋼板の破断ひずみは、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI 07-13 : Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs」(以下「NEI 07-13」という。)において、TF (多軸性係数) を考慮することが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として二軸引張状態でTF=2.0を考慮して設定する。

### 5.3 架構の許容限界

#### (1) 波及的影響評価

上載する竜巻防護ネット及び竜巻防護鋼板の自重並びに竜巻防護ネット、竜巻防護鋼板及び架構への飛来物の衝突時の荷重に対し、これらを支持する機能を維持可能な構造強度を有することの確認及び外部事象防護対象施設に波及的影響を与えないことの確認として、設計竜巻の風圧力による荷重、飛来物による衝撃荷重及びその他考慮すべき荷重に対し、架構全体が竜巻防護対策設備の転倒に至るような変形が生じないことを解析により確認する評価方針としていることを踏まえ以下のとおり許容限界を設定する。

##### a. 架構全体

架構全体の評価は、局所的なひずみの影響を考慮してひずみ量を評価し、破断が生じないことを確認する評価方針としていることを踏まえ、破断ひずみを許容限界として設定する。破断ひずみは、J I Sに規定されている伸びの下限値を基に設定するが、「NEI 07-13」において、TF（多軸性係数）を2.0とすることが推奨されていることを踏まえ、安全余裕として二軸引張状態でTF=2.0を考慮して設定する。最大ひずみが破断ひずみを超える場合には、破断箇所を確認し全断面に発生しないことを確認する。

## 6. 強度評価方法

評価手法は、以下に示す解析法により、適用性に留意の上、規格及び基準類や既往の文献において適用が妥当とされる手法に基づき実施することを基本とする。

- ・ FEM等を用いた解析法
- ・ 定式化された評価式を用いた解析法

### 6.1 竜巻防護ネットの強度評価

#### (1) 評価方針

- ネットの限界吸収エネルギーの算出においては、ネットの展開直角方向に1目合いごとに帯状に分割し、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する。
- ネットの限界吸収エネルギーの算出においては、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列あたりばね定数Kを持つばねを $N_x$ 個直列に接続したものと考える。
- 自重及び風圧力によるネットに作用する荷重は、ネット全体に等分布荷重として作用するものであり、ネット展開直角方向に対しては荷重が均一となるよう作用させる。
- 一方、ネット展開方向に対しては、設計モデル上均一に荷重を作用させることが困難であるため、保守的にエネルギー量が大きくなるよう、自重及び風圧力によりネットに作用する荷重 $F_w$ 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1列あ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算出し、列数倍することでネット全体が自重及び風圧力による荷重により受けるエネルギーを算出する。

#### (2) 評価対象部位

評価対象部位及び評価内容を表6-1に示す。

表 6-1 評価対象部位及び評価内容

評価対象部位		評価内容
ネット		<ul style="list-style-type: none"> <li>・限界吸収エネルギー</li> <li>・破断</li> <li>・たわみ</li> </ul>
ワイヤロープ		<ul style="list-style-type: none"> <li>・破断</li> <li>・たわみ*</li> </ul>
接続治具（支持部）	ターンバックル	・破断
	シャックル	・破断
接続治具（固定部）	隅角部固定ボルト	・破断
	取付けプレート溶接部	・破断

注記\*：竜巻防護ネット全体のたわみ評価に用いる。

(3) 強度計算

a. 記号の定義

ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）の強度評価に用いる記号を表 6-2 に示す。



表 6-2 ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）の  
強度評価に用いる記号(1/3)

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 <sup>2</sup>	隅角部固定ボルトの断面積
$E_f$	kJ	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
$E_{max}'$	kJ	等価剛性の導出過程を踏まえた係数及びネット設置枚数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
$F_a$	kN	飛来物衝突時にネットが受ける最大衝撃荷重
$F_a'$	kN	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
$F_i$	kN	飛来物衝突時の i 番目の列における作用力
$F_p$	kN	飛来物がネットに衝突する際 1 本のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重
$F_p'$	kN	飛来物がネットに衝突する際 2 本のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重
$F_w$	kN	自重及び風圧力によりネットに作用する荷重
$F_x$	kN	飛来物がネットに衝突する際に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	飛来物がネットに衝突する際にワイヤロープから隅角部へ作用する Y 方向の合成荷重
$K_x$	kN/m	ネット設置枚数を考慮したネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性
$L$	mm	取付けプレートの面取り長さ
$L_b$	m	変形前のワイヤロープ長さ
$L_{pw}$	mm	取付けプレートの溶接部の有効長さ
$L_{p1}$	mm	取り付けプレート長さ（縦方向）
$L_{p2}$	mm	取り付けプレート長さ（横方向）
$L_s$	m	直線区間のワイヤロープの変形後の長さの合計

表 6-2 ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）の  
強度評価に用いる記号(2/3)

記号	単位	定義
$L_x$	m	ネット展開方向寸法（吸収エネルギー，破断及びたわみ設計が安全側となるよう考慮する。）
$L_y$	m	ネット展開直角方向寸法（吸収エネルギー，破断及びたわみ設計が安全側となるよう考慮する。）
$L_y'$	m	飛来物衝突の影響範囲
$L_z$	m	ワイヤロープの全長
m	kg	飛来物の質量
n	—	主金網の設置枚数
$n_2$	—	飛来物の衝突位置周辺のネット1枚あたりの目合いの個数
$N_y$	—	ネット展開直角方向目合い数
$P_w$	kN	ネットの自重により作用する荷重
S	m	変形後のワイヤロープの長さ
$S_w$	mm	取付けプレート溶接部の隅肉厚さ
$S_x$	m	ネット展開方向と平行に配置したワイヤロープの変形後の長さ
$S_y$	m	ネット展開方向と直行するワイヤロープの変形後の長さ
V	m/s	飛来物の飛来速度
$T_1'$	kN	飛来物のネットへの衝突によりワイヤロープに発生する張力
$T_1''$	kN	補助金網を支持しているワイヤロープに発生する張力
$T_x$	kN	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	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	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	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
$W_w$	kN	風圧力による荷重
$\varepsilon$	—	ワイヤロープのひずみ量
$\delta$	m	飛来物衝突時のネットの最大たわみ量
$\delta'$	m	変形によるワイヤロープ伸び量
$\delta_a$	m	自重及び風圧力による荷重によるたわみ量

表 6-2 ネット、ワイヤロープ及び接続治具（支持部及び固定部）の  
強度評価に用いる記号(3/3)

記号	単位	定義
$\delta_i$	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
$\delta_L$	m	直線区間のワイヤロープたわみ量
$\delta_t$	m	ネットとワイヤロープの合計たわみ量
$\delta_w$	m	ワイヤロープのたわみ量
$\delta_{wx}$	m	ネット展開方向に平行に配置したワイヤロープの変形後のたわみ量
$\delta_{wy}$	m	ネット展開方向に直交に配置したワイヤロープの変形後のたわみ量
$\theta$	deg	飛来物衝突時のネットのたわみ角
$\theta_{w1}$	deg	ネット展開方向に平行なワイヤロープのたわみ角
$\theta_{w2}$	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
$\theta_x$	deg	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
$\theta_y$	deg	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
$\tau_s$	MPa	隅角部固定ボルトに発生するせん断応力
$\tau_w$	MPa	取付けプレート溶接部に発生するせん断応力

## b. 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定のモデル化を行い、自重、風圧力による荷重及び飛来物による衝突荷重による荷重及び自重によるエネルギーを算出する。

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(5. 3)及び(5. 4)より、 $E_{max}$ 及び $E_{max}'$ は以下のとおりである。

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

$$E_{max}' = \frac{1}{1.03} \cdot E_{max}$$

自重及び風圧力による荷重によりネットに作用する荷重は、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1列あ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算出し、列数倍することでネット全体が自重及び風圧力による荷重により受けるエネルギーを算出する。

評価条件である $K_x$ 及び $L_x$ 並びに自重及び風圧力による荷重から算出する $F_w$ を式(5. 1)の $F_i$ に代入して数値計算を実施することにより、自重及び風圧力による荷重によるたわみ量 $\delta_a$ が算出される。

$$F_w = N_y \cdot 4 \cdot K_x \cdot \delta_a \cdot \left( 1 - \frac{L_x}{\sqrt{4 \cdot \delta_a^2 + L_x^2}} \right)$$

$$\text{ただし、} F_w = P_w + W_w$$

上式にて算出した $\delta_a$ を式(5. 3)において、展開方向の1列あ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。

$$E_w = N_y \cdot \left\{ 2 \cdot K_x \cdot \delta_a^2 - K_x \cdot L_x \cdot \left( \sqrt{4 \cdot \delta_a^2 + L_x^2} - L_x \right) \right\}$$

飛来物の衝突によりネットに作用するエネルギー $E_f$ としては、衝突時の飛来物の運動エネルギーとして、以下より求められる。

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

飛来物の飛来速度は、ネットの設置方向により、水平設置の場合は鉛直の飛来速度、鉛直設置の場合は水平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、評価に用いる水平最大飛来速度及び鉛直最大飛来速度を下回る。また、飛来物がネットの設置方向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、その飛来速度はネットの設置方向に応じ、水平設置の場合は鉛直最大飛来速度、鉛直設置の場合は水平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。

$$E_t = E_f + E_w \quad \dots\dots\dots (6. 1)$$

### c. 破断評価

#### (a) ネットの引張荷重評価

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、「2.3 荷重及び荷重の組合せ」にて算出した式(2. 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(2. 8)より

$$F_a = \frac{8 \cdot E_t}{3 \cdot \delta}$$

となる。

$E_t$ としては、式(6. 1)により飛来物による運動エネルギー $E_f$ 並びに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 $E_w$ から算出したネットに作用する全エネルギー量を代入する。 $\delta$ としては、たわみ評価で算出する飛来物が衝突する場合のネットの最大たわみ量を代入し、 $F_a$ を算出する。

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 1.211 を考慮し、衝撃荷重の最大値 $F_a'$ は、

$$F_a' = 1.211 \cdot F_a$$

にて算出される。

## (b) ワイヤロープの破断評価

破断評価における衝撃荷重と、ネットとワイヤロープの接続構造からワイヤロープに作用する荷重を導出する。

ワイヤロープの設計において、ワイヤロープに発生する荷重として以下を考慮する。

- ① ネットの自重により作用する荷重
- ② 風圧力によりネットに作用する荷重
- ③ 飛来物の衝突によりネットに作用する衝撃荷重

竜巻防護ネットは、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緩衝材により拘束されない構造としており、衝突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。

自重、風圧力による荷重及び飛来物による衝撃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設置枚数 $n$ を考慮したネットに発生する張力の合計である張力 $T'$ は、図6-1に示すネットに発生する力のつり合いより以下のとおり算出され、各辺のワイヤロープが結合されていることから張力が一定となるため、ワイヤロープ1本が負担する張力は $T'/2$ と設定する。

$$T' = \frac{F_a'}{2 \cdot \sin \theta}$$

ただし、 $\theta$ は以下の式で求められる。

$$\theta = \tan^{-1} \frac{2 \cdot \delta}{L_x}$$

ネットに発生する力のつり合いを図6-1に示す。

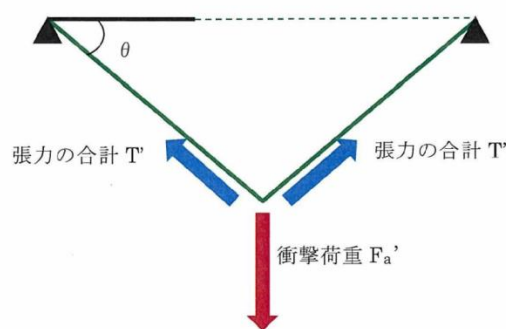


図6-1 ネットに発生する力のつり合い

主金網を $n$ 枚重ねて設置する場合、1枚のネットのワイヤロープに発生する張力の最大値 $T_1'$ は

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

と算出される。

さらに、ワイヤロープが支持する補助金網の影響を考慮する。電中研報告書による

と、主金網  $n$  枚及び補助金網 1 枚を重ねて設置する場合、補助金網を設置したネットのワイヤロープに作用する張力は、その他のネットの張力の 1.5 倍となることを考慮すると、主金網  $n$  枚及び補助金網 1 枚を重ねて設置する場合、1 枚のネットのワイヤロープに発生する張力の最大値  $T_{1'}'$  は、

$$T_{1'}' = \frac{T'}{2} \cdot \frac{1.5}{n+0.5} = \frac{F_a'}{4 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{1.5}{n+0.5}$$

と算出される。

ネットに対して飛来物がオフセット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ことが衝突試験により確認されており、算出結果は飛来物の衝突位置によらず適用可能である。

(c) 接続治具（支持部）の破断評価

イ. ターンバックル

ターンバックルは、ワイヤロープの引張荷重が作用する場合においても、許容値を満足することを確認することから、引張荷重の最大値としてワイヤロープに発生する張力  $T_{1'}'$  により評価を実施する。

ロ. シャックル

シャックルは、ワイヤロープの引張荷重が作用する場合においても、許容値を満足することを確認することから、引張荷重の最大値としてワイヤロープに発生する張力  $T_{1'}'$  により評価を実施する。

(d) 接続治具（固定部）の破断評価

イ. 隅角部固定ボルト

ワイヤロープは、設置するネット枚数に応じて設置するため、隅角部固定ボルトにかかる応力は、ネット枚数ごとに評価する。

ここで、ワイヤロープはたわみにより鋼管に対して  $\theta_{w1}$ 、 $\theta_{w2}$  の水平投影たわみ角を有することから、隅角部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溶接部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 6-2 に示す。

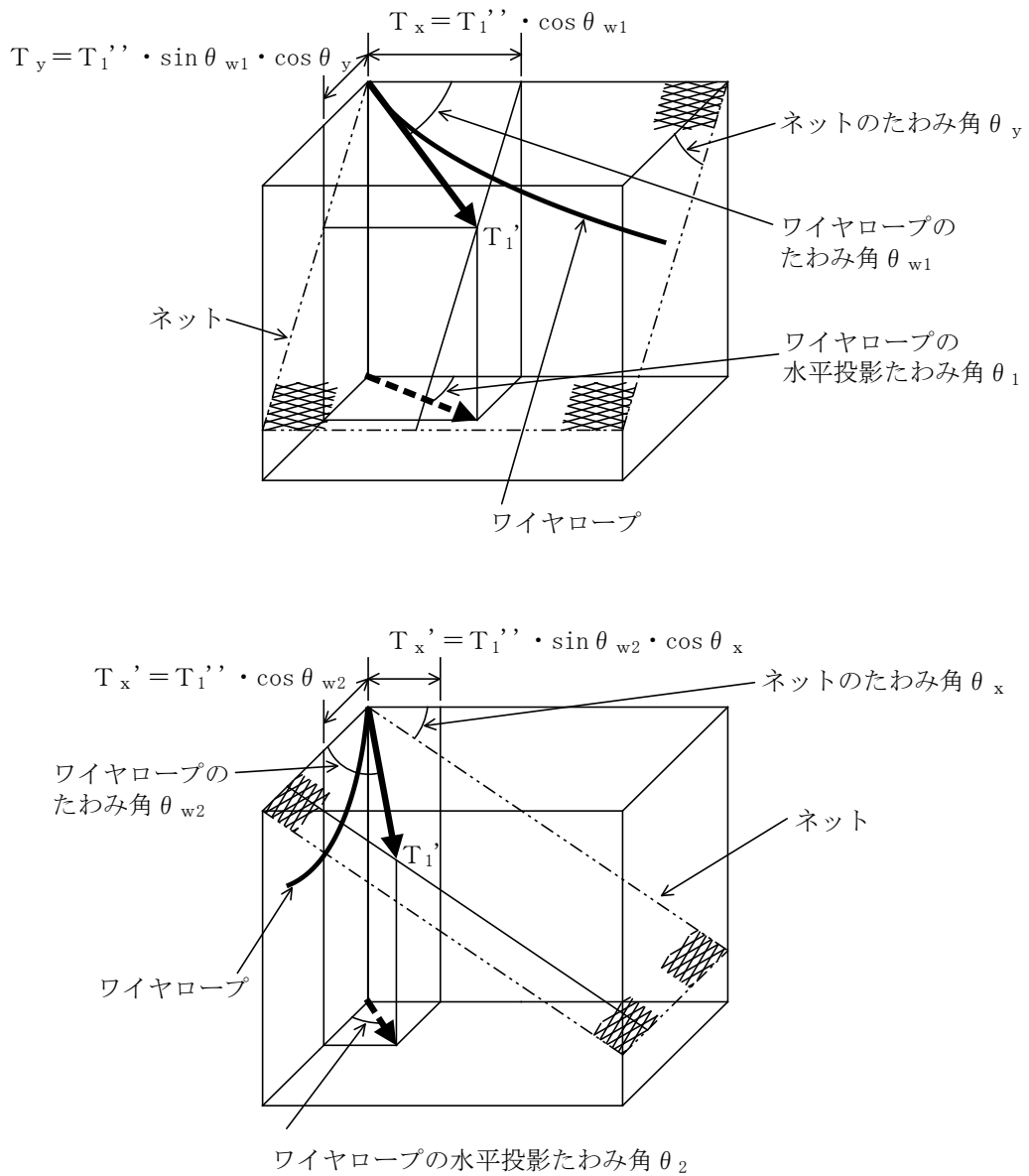


図6-2 ネットのたわみとワイヤロープのたわみ角の関係



鋼管の荷重状態を図 6-3、隅角部固定ボルトの荷重状態を図 6-4 に示す。

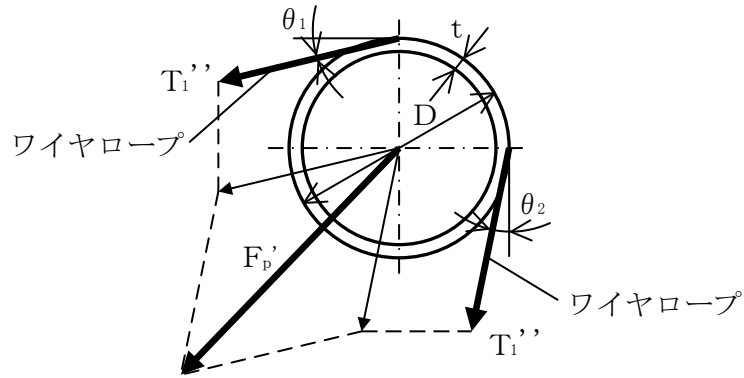


図6-3 鋼管の荷重状態

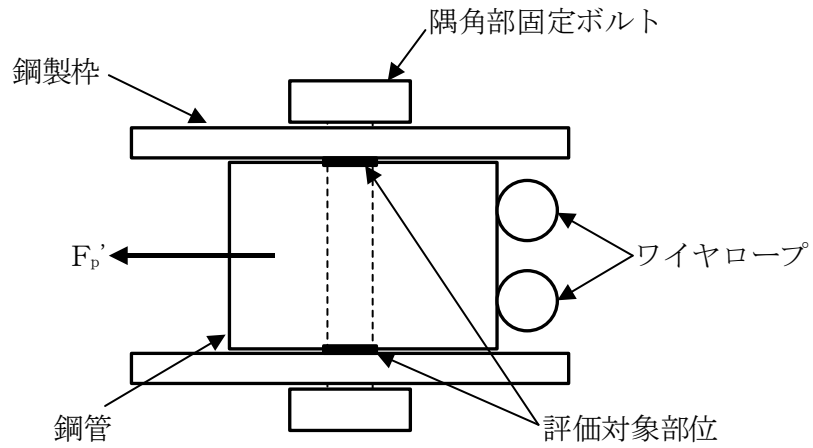


図6-4 隅角部固定ボルトの荷重状態

隅角部固定ボルトに発生するせん断応力を力のつり合いの関係から以下の評価式を用いて算出する。

ネット展開方向ワイヤロープから発生する各方向の荷重、 $T_x$ 及び $T_y$ は、以下のとおりとなる。

$$T_x = T_1'' \cdot \cos \theta_{w1}$$

$$T_y = T_1'' \cdot \sin \theta_{w1} \cdot \cos \theta_y$$

ただし、 $\theta_y$ 及び $\theta_{w1}$ は以下の式で求められる。

$$\theta_y = \tan^{-1} \left( \frac{2 \cdot \delta}{L_y} \right)$$

$$\theta_{w1} = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \cdot \left( \frac{\delta_{wx}}{L_x} \right)^2}} \right\}$$

また、ネット展開直角方向ワイヤロープから発生する各方向の荷重、 $T_x'$  及び  $T_y'$  は以下の関係となる。

$$T_x' = T_1'' \cdot \sin \theta_{w2} \cdot \cos \theta_x$$

$$T_y' = T_1'' \cdot \cos \theta_{w2}$$

ただし、 $\theta_x$  及び  $\theta_{w2}$  は以下の式で求められる。

$$\theta_x = \tan^{-1} \left( \frac{2 \cdot \delta}{L_x} \right)$$

$$\theta_{w2} = \cos^{-1} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + 16 \cdot \left( \frac{\delta_{wy}}{L_y} \right)^2}} \right\}$$

隅角部へ作用する X 方向及び Y 方向への合成荷重は、

$$F_x = T_x + T_x'$$

$$F_y = T_y + T_y'$$

より求まる。

1 本のワイヤロープから隅角部へ作用する合成荷重は、

$$F_p = \sqrt{F_x^2 + F_y^2}$$

より求まる。

隅角部には、2 本のワイヤロープが支持されていることから、隅角部へ作用する合成荷重  $F_p'$  は、

$$F_p' = 2 \cdot F_p$$

以上より、隅角部固定ボルトに発生するせん断応力  $\tau_s$  は、

$$\tau_s = \frac{F_p'}{2 \cdot n_2 \cdot A_b}$$

## ロ. 取付けプレート

設計飛来物が防護ネット本体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。取付けプレートの荷重状態を図6-5に示す。

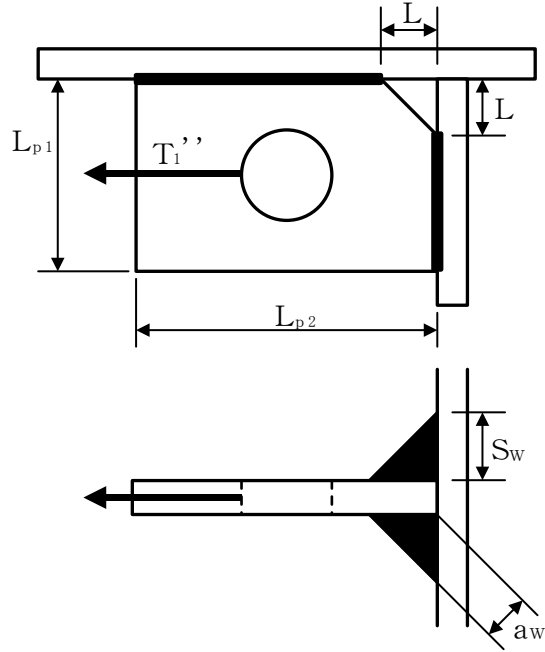


図6-5 取付けプレートの荷重状態

溶接部の有効脚長 $L_{pw}$ は、

$$L_{pw} = L_{p1} - L - 2 \cdot S_w + L_{p2} - L - 2 \cdot S_w$$

溶接部に発生するせん断応力 $\tau_w$ は、

$$\tau_w = \frac{T_1'}{2 \cdot a_w \cdot L_{pw}}$$

ここで溶接部ののど厚 $a_w$ は以下の式で求められる。

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

## d. たわみ評価

## (a) ネットのたわみ量の算出

ネットの変位量と吸収エネルギーとの関係は「5.1(2)b. 吸収エネルギー評価」の式(5.2)のとおり、以下の式にて導出される。

$$E_i = 2 \cdot K_x \cdot \delta_i^2 - K_x \cdot L_x \cdot \left( \sqrt{4 \cdot \delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right)$$

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 $\delta$ を算出することができる。

## (b) ワイヤロープのたわみ量を含めた竜巻防護ネットのたわみ量の算出

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、「6.1(3)c 破断評価」に示す評価方法を用いて算出される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。

以下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 $\varepsilon$ が算出される。よって、変形によるワイヤロープの伸び量 $\delta'$ は以下のとおり算出される。

$$\delta' = L_z \cdot \varepsilon$$

ワイヤロープの変形図を図6-6に示す。飛来物の衝突によりワイヤロープは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。

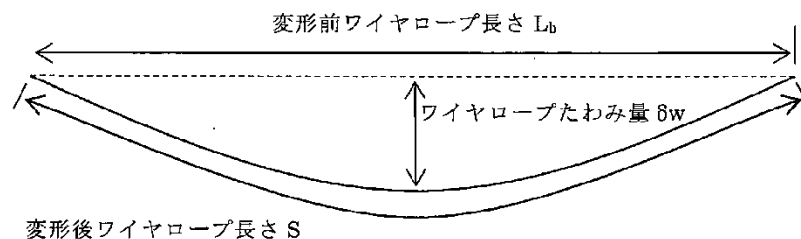


図6-6 ワイヤロープ変形図

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

また、ワイヤロープはネットのアスペクト比により、変形形状が異なる。ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が長い場合）を図6-7、ネット及びワイヤロープ変形

図（展開方向が短い場合）を図 6-8 に示す。

「展開方向寸法 > 展開直角方向寸法」の場合は，飛来物の衝突によるネット変形がネット全体に及ぶため，図 6-7 のとおり 4 辺のワイヤロープが変形する形状となり，「展開方向寸法 < 展開直角方向寸法」の場合は，ネット変形がネット展開方向長さの範囲に制限されるため図 6-8 のとおりネット展開直角方向のワイヤロープのみが変形する形状となる。

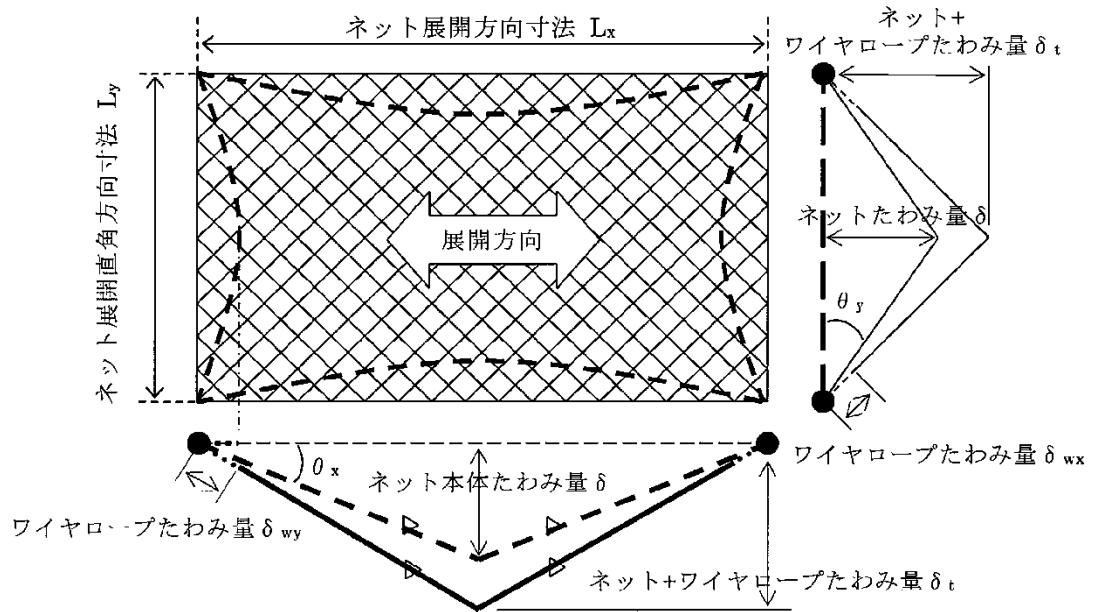


図 6-7 ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が長い場合）

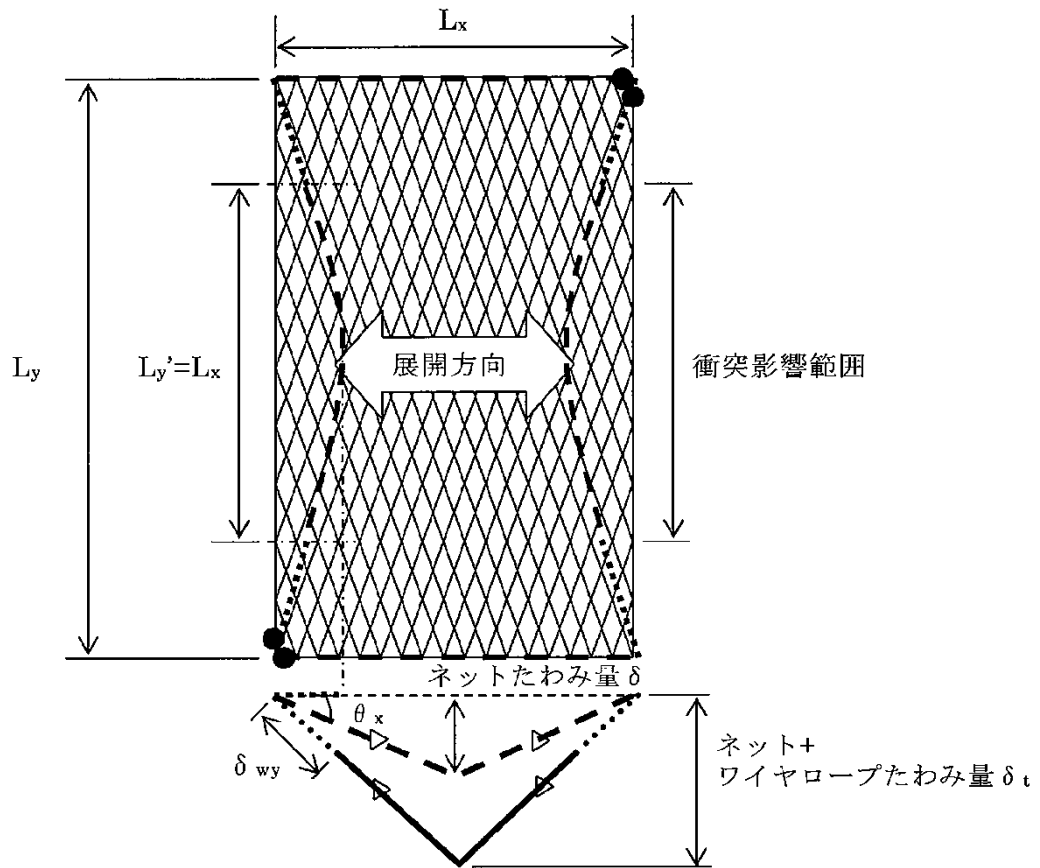


図6-8 ネット及びワイヤロープ変形図（展開方向が短い場合）

よって、ネットのアスペクト比に応じ、ワイヤロープたわみ量を含めた竜巻防護ネットのたわみ量の算出を行う。

「展開方向寸法 $\geq$ 展開直角方向寸法」の場合、図6-7のとおり、ネット展開方向と平行に配置したワイヤロープの変形後の長さを $S_x$ 、ネット展開方向と直交す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 $\delta_{wx}$ 、 $\delta_{wy}$ の関数であり、ワイヤロープの伸び量 $\delta'$ は、

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

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、

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

と表され、ワイヤロープたわみ量 $\delta_{wx}$ 及び $\delta_{wy}$ 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竜巻防護ネットのたわみ量 $\delta_t$ が算出される。

「展開直角方向寸法 $>$ 展開方向寸法」の場合、図6-8より、ワイヤロープ伸び量 $\delta'$ が、 $L_y$ の範囲に集約されて変形する。「展開直角方向寸法 $>$ 展開方向寸法」の場

合における，ワイヤロープの変形図を図6-9に示す。

ワイヤロープは，飛来物の影響範囲（ $L_y'$ ）にのみ分布荷重が発生するため放物線状となり，その両端部は放物線状に変形したワイヤロープからの引張力のみが作用するため，両端部の接線がそのままネット端部まで延長される形となる。

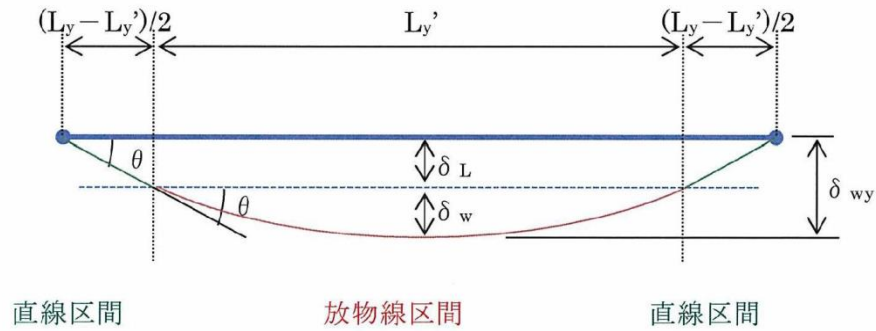


図6-9 「展開直角方向寸法>展開方向寸法」の場合におけるワイヤロープの変形図

ネット展開方向と直交するワイヤロープの変形後の長さを $S_y$ とすると， $S_y$ は $\delta_w$ の関数であり，

$$S_y = S_y(\delta_w)$$

と表される。

また，直線区間のワイヤロープの変形後の長さの合計 $L_s$ は

$$L_s = \frac{L_y - L_y'}{\cos \theta}$$

と表される。

$L_y$ （展開方向に直交する辺）の変形後のワイヤロープ長さ $S_t$ は，

$$S_t = L_y + \delta'$$

と算出されることから，

$$\begin{aligned} L_y + \delta' &= S_y + L_s \\ &= S_y \cdot (\delta_w) + \frac{L_y - L_y'}{\cos \theta} \end{aligned}$$

となり， $L_y$ ， $L_y'$ ， $\delta'$ ， $\theta$ は定数であることから，放物線区間のワイヤロープたわみ量 $\delta_w$ を導出することができる。

また，直線区間のワイヤロープのたわみ量 $\delta_L$ は，

$$\delta_L = \frac{L_y - L_y'}{2} \tan \theta$$

と算出されることから，放物線区間，直線区間を含むワイヤロープ全体のたわみ量が，

$$\delta_{wy} = \delta_w + \delta_L$$

と算出される。

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

より，ワイヤロープたわみ量を含めた竜巻防護ネットのたわみ量  $\delta_t$  が算出される。



## 7. 適用規格

竜巻の影響を考慮する施設の強度評価に用いる適用規格は、VI-1-1-3-3-3「竜巻への配慮に関する基本方針」による。

これらのうち、竜巻防護対策設備の強度設計に用いる規格、基準等を以下に示す。

- ・日本産業規格（J I S）
- ・発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005年版（2007年追補版を含む））＜第1編 軽水炉規格＞ J S M E S N C 1-2005/2007 （社）日本機械学会
- ・鋼構造設計規準—許容応力度設計法— （社）日本建築学会
- ・小規模吊橋指針・同解説（社）日本道路協会
- ・Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs (Nuclear Energy Institute 2011 Rev8 (NEI 07-13))
- ・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