

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-440-1 改7
提出年月日	平成30年7月6日

工事計画に係る補足説明資料

補足-440-1 【竜巻への配慮が必要な施設の強度に関する説明書
の全般の補足説明】

平成30年7月

日本原子力発電株式会社

補足説明資料目次

I. はじめに

1. 強度計算の方針に関する補足説明資料
 - 1.1 風力係数について
 - 1.2 強度計算時の施設の代表性について
 - 1.3 換気空調設備の竜巻の影響を考慮する施設について

2. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料
 - 2.1 鉄筋コンクリート部材の裏面剥離評価方法について
 - 2.2 コンクリートの裏面剥離に対する設備対策の評価手法について
 - 2.3 原子炉建屋大物搬入口扉の貫通評価について
 - 2.4 ブローアウトパネル開口部から侵入する風に対する対応方針について
 - 2.5 原子炉建屋外側ブローアウトパネルの飛び出し挙動について
 - 2.6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の使用済燃料乾式貯蔵容器冷却性能について
 - 2.7 使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面への車両の衝突影響について

3. 海水ストレーナの強度計算に関する補足説明資料
 - 3.1 海水ストレーナの評価対象部位について

4. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料
 - 4.1 固縛装置の設計における保守性について

5. 主排気筒の強度計算に関する補足説明資料
 - 5.1 竜巻飛来物による構造欠損の想定箇所について

6. ディーゼル発電機吸気口の強度計算に関する補足説明資料
 - 6.1 ディーゼル発電機吸気口の局部ばね定数及び局部応力の算出について

7. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料
 - 7.1 シャックルの許容限界について
 - 7.2 飛来物のオフセット衝突の影響について
 - 7.3 金網の設計裕度の考え方
 - 7.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのたわみについて
 - 7.5 ワイヤロープの初期張力について
 - 7.6 補助金網の影響について

8. 排気管，放出管及びベント管の強度計算に関する補足説明資料

8.1 ディーゼル発電機排気管の許容応力について

: 今回ご説明分

I. はじめに

1. 概要

本補足説明資料は、以下の説明書についての内容を補足するものである。
本補足説明資料と添付書類との関連を表-1に示す。

- ・ 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

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (1/4)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)		該当添付資料
1. 強度計算の方針に関する補足説明資料		
1.1 風力係数について		<p>V-3-別添 1-1-2 「残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-6 「ディーゼル発電機海水ポンプの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機海水ストレーナの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-9 「配管および弁の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-10-2 「消音器の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管およびベント管の強度計算書」</p>
1.2 強度計算時の施設の代表性について		<p>V-3-別添 1-1-2 「残留熱除去系海水系ポンプの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-6 「ディーゼル発電機用海水ポンプの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機用海水ストレーナの強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-9 「配管および弁の強度計算書」</p> <p>V-3-別添 1-1-10-3 「排気管、放出管およびベント管の強度計算書」</p>
1.3 換気空調設備の竜巻の影響を考慮する施設について		<p>V-3-別添 1-1-5 「換気空調設備の強度計算書」</p>

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (2/4)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
2. 竜巻より防護すべき施設を内包する施設の強度計算に関する補足説明資料	
2.1 鉄筋コンクリート部材の裏面剥離評価方法について	
2.2 コンクリートの裏面剥離に対する設備対策の評価手法について	
2.3 原子炉建屋大物搬入口扉の貫通評価について	
2.4 ブローアウトパネル開口部から侵入する風に対する対応方針について	
2.5 原子炉建屋外側ブローアウトパネルの飛び出し挙動について	
2.6 使用済燃料乾式貯蔵建屋の使用済燃料乾式貯蔵容器冷却性能について	
2.7 使用済燃料乾式貯蔵建屋壁面への車両の衝突影響について	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」

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (3/4)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
3. 海水ストレーナの強度計算に関する補足説明資料	
3.1 海水ストレーナの評価対象部位について	V-3-別添 1-1-3 「残留熱除去系海水系ストレーナの強度計算書」 V-3-別添 1-1-7 「ディーゼル発電機海水ストレーナの強度計算書」
4. 屋外の重大事故等対処設備の固縛装置の強度計算に関する補足説明資料	
4.1 固縛装置の設計における保守性について	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」
5. 主排気筒の強度計算に関する補足説明資料	
5.1 竜巻飛来物による構造欠損の想定箇所について	V-3-別添 1-1-4 「主排気筒の強度計算書」
6. ディーゼル発電機吸気口の強度計算に関する補足説明資料	
6.1 ディーゼル発電機吸気口の局部ばね定数及び局部応力の算出について	V-3-別添 1-1-8 「ディーゼル発電機吸気口の強度計算書」

表-1 補足説明資料と添付資料との関連 (4/4)

工事計画添付書類に係わる補足説明資料 (竜巻)	該当添付資料
7. 防護対策施設の強度計算に関する補足説明資料	
7.1 シヤックルの許容限界について	
7.2 飛来物のオフセット衝突の影響について	
7.3 金網の設計裕度の考え方	V-3-別添 1-2-1-1 「防護ネットの強度計算書」
7.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのためについて	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」
7.5 ワイヤロープの初期張力について	
7.6 補助金網の影響について	
8. 排気管, 放出管及びびべント管の強度計算に関する補足説明資料	
8.1 デイゼル発電機排気管の許容応力について	V-3-別添 1-1-10-3 「排気管, 放出管及びびべント管の強度計算書」

7.2 飛来物のオフセット衝突の影響について

1. 概要

本資料は、竜巻飛来物防護を目的とした防護ネットに関して、飛来物がオフセット衝突した場合の影響について説明するものである。

2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー

飛来物が、防護ネットに対して展開方向オフセット位置で展開方向の金網交点列1列と衝突した場合の展開方向の金網交点列1列の吸収エネルギー算出方法を以下に示す。

電力中央研究所報告書を参考に、飛来物が展開方向オフセット位置で展開方向の金網交点列1列と衝突した場合の飛来物と金網の挙動を以下のように仮定する。

- ① 金網展開方向の交点列の張力は常に均一である。
- ② 衝突後の飛来物と金網は衝突点で一体となって推移する。
- ③ 最大変形時の金網全長は破断時展開方向金網長さとする。

以上の仮定から、破断時の金網の全長は飛来物の衝突位置によらず、破断時展開方向金網長さで一定となり、最大変形時の衝突位置点P'の軌跡は、図2-1のとおり楕円形状となる。

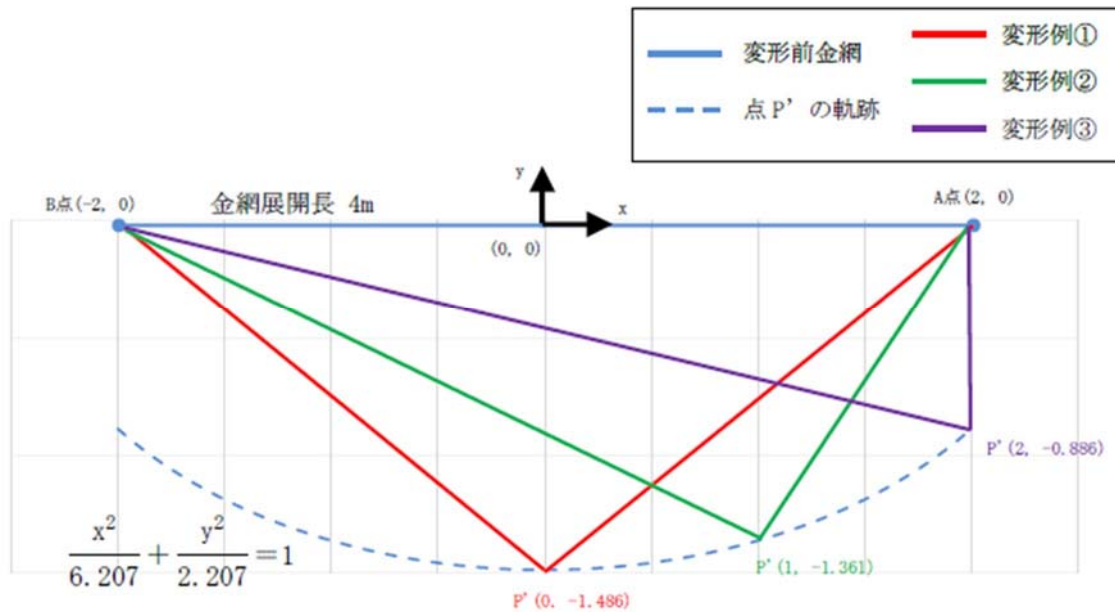


図 2-1 展開方向の金網交点列1列の衝突点P'の軌跡

金網は変位制御により評価可能であることから、図2-2に示す交点列の伸び率 ϵ_j を0から破断伸び率 ϵ_{cr} まで微小変形の積み重ねとして、徐々に変化させ、衝突点の移動量と交点列の張力から吸収エネルギーを算出する。ここで、破断伸び率 ϵ_{cr} は、V-3-別添1-2-1-1「防護ネットの強度計算書」の「4. 評価条件」のネット1目合い対角寸法aとネット1目合いの破断変位 a_s より、以下のとおり、求められる。

$$\varepsilon_{cr} = \frac{a_s}{a} = \frac{13.9}{56.6} \approx 0.25$$

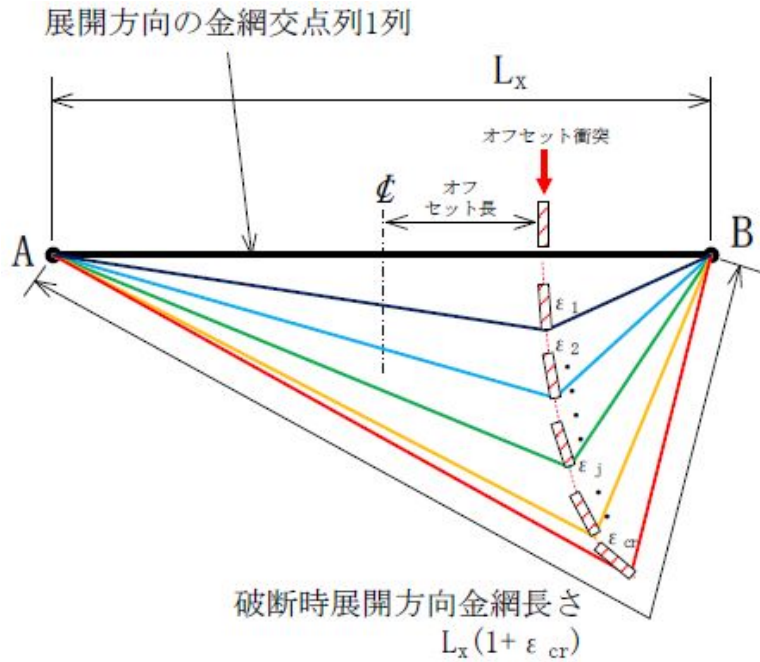


図 2-2 展開方向オフセット衝突時の展開方向の金網交点列 1 列の変位挙動図

また、図 2-3 に展開方向に展開方向オフセット衝突した場合を想定した伸び率 ε_j 時の金網交点列 1 列の変形状態の模式図を示す。

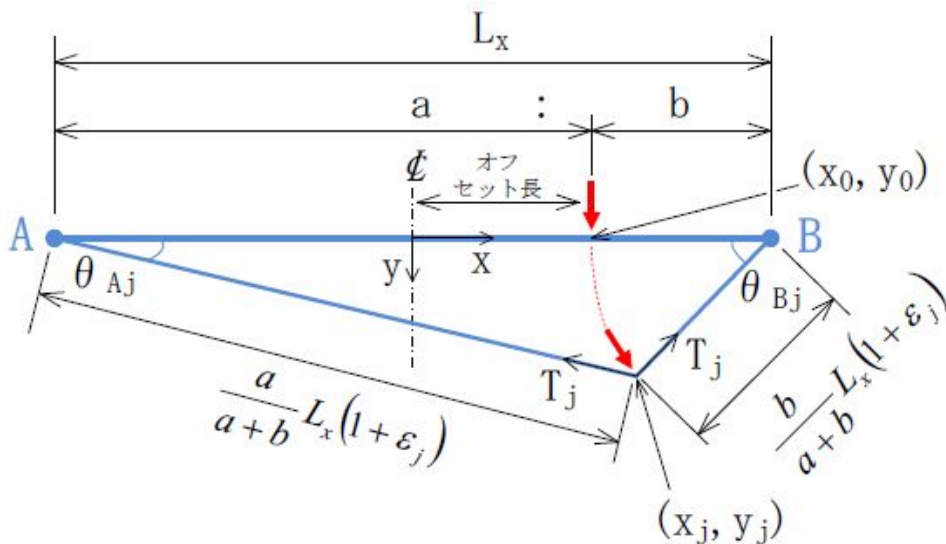


図 2-3 展開方向オフセット衝突の交点列 1 列の変形状態の模式図

V-3-別添 1-2-1-1 「防護ネットの強度計算書」の「4. 評価条件」のネット 1 目合い対角寸法 a 、ネット 1 目合いの等価剛性 K とすると、展開方向の金網交点列 1 列の剛性 K_x 、展開方向の金網交点列 1 列の張力 T_j は以下のとおりとなる。

$$K_x = \frac{K}{L_x/a}$$

$$T_j = K_x L_x \varepsilon_j = \frac{K}{L_x/a} L_x \varepsilon_j$$

伸び率が $\varepsilon_{j-1} \sim \varepsilon_j$ 間で微小量だけ増加すると、衝突点の座標も (x_{j-1}, y_{j-1}) から (x_j, y_j) と微小量だけ移動し、 x 方向変位 Δx_j 、 y 方向変位 Δy_j はそれぞれ $\Delta x_j = x_j - x_{j-1}$ 、 $\Delta y_j = y_j - y_{j-1}$ となる。このとき、展開長を $a : b$ で分割する点を衝突位置とし、伸び率 ε_j 時の衝突点の座標を (x_j, y_j) 、A 点、B 点のたわみ角を θ_{Aj} 、 θ_{Bj} とすると、伸び率 ε_j 時の展開方向の金網交点列 1 列の張力 T_j を x 方向成分と y 方向成分に分割でき、それぞれ x 方向反力 H_j 、 y 方向反力 V_j となる。よって、伸び率が $\varepsilon_{j-1} \sim \varepsilon_j$ 間で微小量だけ増加した際の吸収エネルギーの増分 ΔW_j は、以下のとおりとなる。

$$H_j = T_j \cos \theta_{Aj} - T_j \cos \theta_{Bj}$$

$$V_j = T_j \sin \theta_{Aj} + T_j \sin \theta_{Bj}$$

$$\Delta W_j = \frac{1}{2} (H_{j-1} + H_j) \times \Delta x_j + \frac{1}{2} (V_{j-1} + V_j) \times \Delta y_j$$

以上より、1 金網交点列の限界吸収エネルギーは下式となる。

$$W = \sum_j^{\varepsilon_{cr}} \Delta W_j$$

展開長 4m の 40mm 目合金網の交点列に、中央衝突、展開方向 1/4 オフセット衝突（展開方向オフセット長 1m）した場合の吸収エネルギーを比較する。図 2-4 に交点列の伸び率に対する吸収エネルギーを示す。

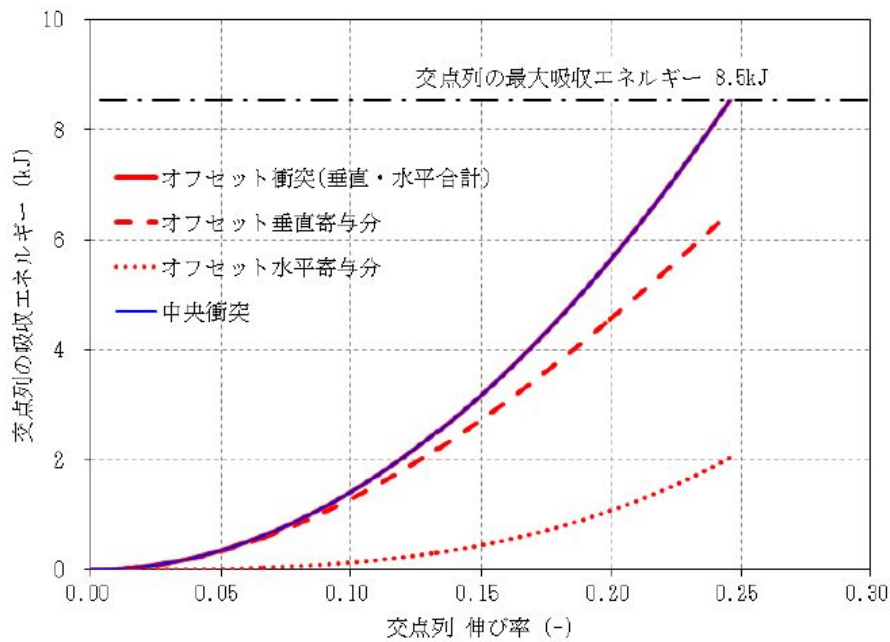


図 2-4 展開方向オフセット衝突と中央衝突のエネルギー比較

展開方向オフセット衝突では、垂直方向から飛来物が衝突することから、伸び率が小さな初期の段階では、垂直寄与分吸収エネルギーが支配的である。伸び率 0.1 程度になると、金網張力の分担から、衝突点は水平方向に移動し、徐々に水平寄与分の吸収エネルギーが増加していく。金網の張力の分担による衝突点の移動に飛来物が追従した場合、中央衝突時と展開方向オフセット衝突時（垂直寄与分と水平寄与分の合計）は、いずれも同等 (8.5kJ) となり、衝突点の違いによる吸収エネルギーへの影響はないと考えられる。

また、図 2-5 に展開方向オフセット衝突位置の違いによる 40mm 目合交点最終変位形態及び飛来物が衝突後、停止するまでの軌跡を累積移動量として示す。

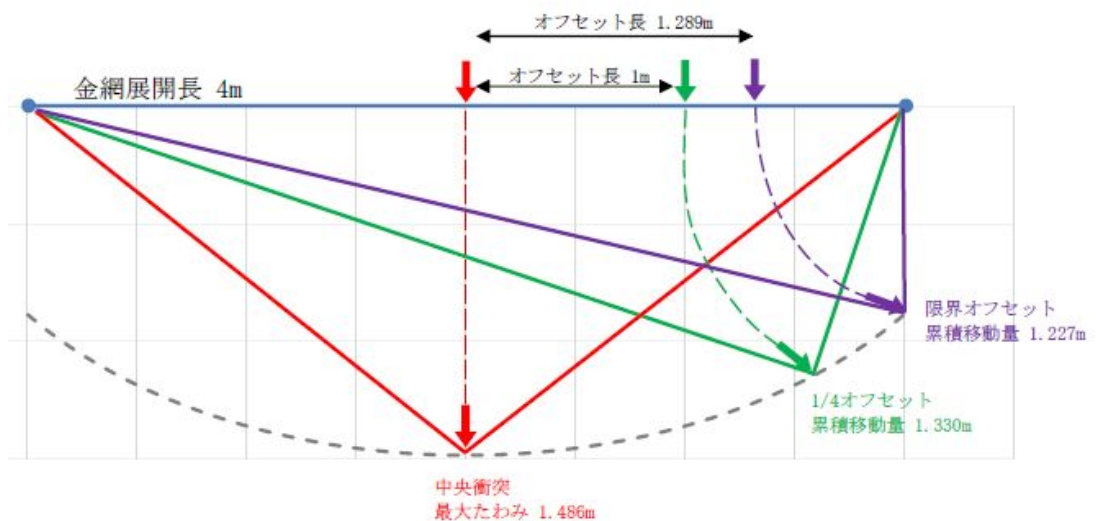


図 2-5 各衝突位置の 40mm 目合交点最終変形図

金網中央からの衝突点までの距離（以下、展開方向オフセット長）が大きくなると、交点列の最終形状は次第に直角三角形に近づき、さらに、展開方向オフセット長が大きくなると、衝突点の軌跡が支持部の外に飛び出したり、架台と衝突することが考えられるため、飛来物が防護対象施設に衝突することはないと考えられる。よって、展開方向オフセット評価では、交点列の最終形状が直角三角形となる衝突位置（限界オフセット）までを検討範囲とする。

表 2-1 に各展開方向オフセット長の 40mm 目合 1 交点列の最大吸収エネルギーと累積移動量を示す。

表 2-1 展開方向オフセット衝突時の応答値一覧（40mm 目合）

展開方向オフセット長 (m)	1 交点列最大吸収エネルギー (kJ)	累積移動量 (m)
0.000	8.5	1.486
1.000	8.5	1.330
1.289	8.5	1.227

以上より、飛来物の展開方向オフセット衝突時の最大吸収エネルギーは中央衝突時と同等となるため、展開方向オフセット衝突時の影響はないと判断している。

3. 展開直角方向オフセット衝突時吸収エネルギー

飛来物が、防護ネットに対して展開直角方向オフセット位置で金網と衝突した場合の吸収エネルギー算出方法を以下に示す。

電力中央研究所報告書を参考に、飛来物の衝突位置を、中央衝突以外に展開直角方向オフセット衝突位置を以下のとおり設定し、金網（展開方向 4m×展開直角方向 3m）の吸収エネルギーを算出する。

- ① 中央
- ② 展開直角方向 1/4 オフセット（展開直角方向オフセット長 0.75m）

図 2-6 に上記の 2 種類の衝突位置図を示す。

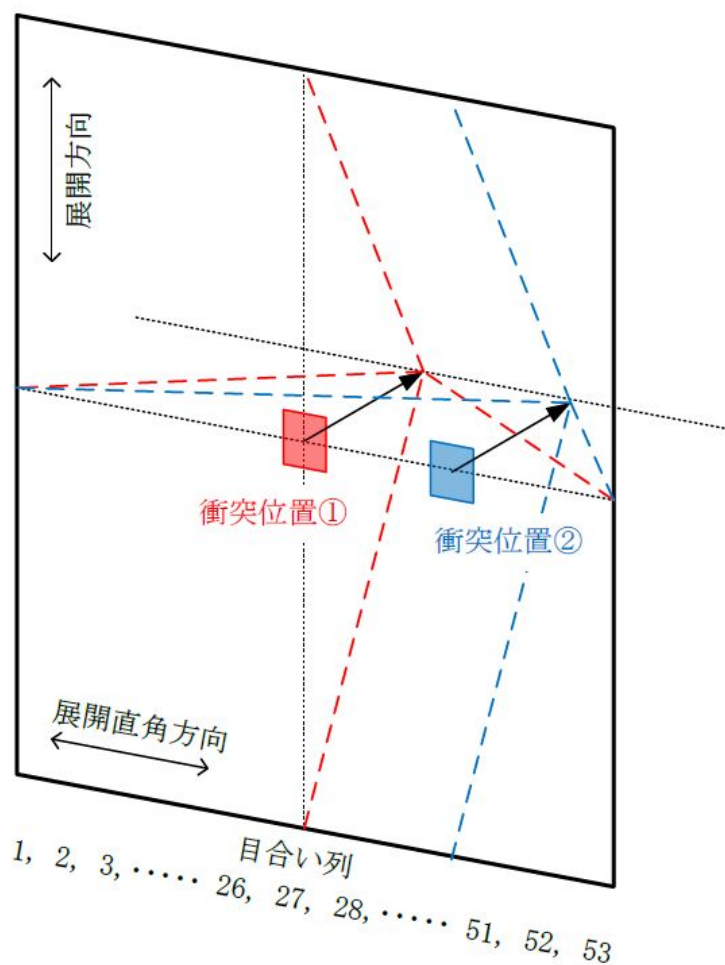


図 2-6 展開直角方向オフセット衝突位置図

図 2-6 に示すとおり、衝突位置で金網が最も大きく変形し、そこからネット端部までの間を段階的に減少していくとすると、目合い列 1 列ごとの吸収エネルギーは V-3-別添 1-2-1-1 「防護ネットの強度計算書」の「3.4(1) 吸収エネルギー評価」に示す以下の式により求められる。

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

ここで、 E_i : i 番目の列におけるネットの吸収可能なエネルギー

K_x : ネット 1 目合いの展開方向の 1 列の等価剛性

(「2. 展開方向オフセット衝突時吸収エネルギー」に示す。)

L_x : ネット展開方向寸法 (4m)

δ_i : i 番目の列における金網変形量

上式より、図 2-7 に各衝突位置における金網変形量及び吸収エネルギー分布を、表 2-2 に金網 1 枚分の吸収エネルギー量を示す。

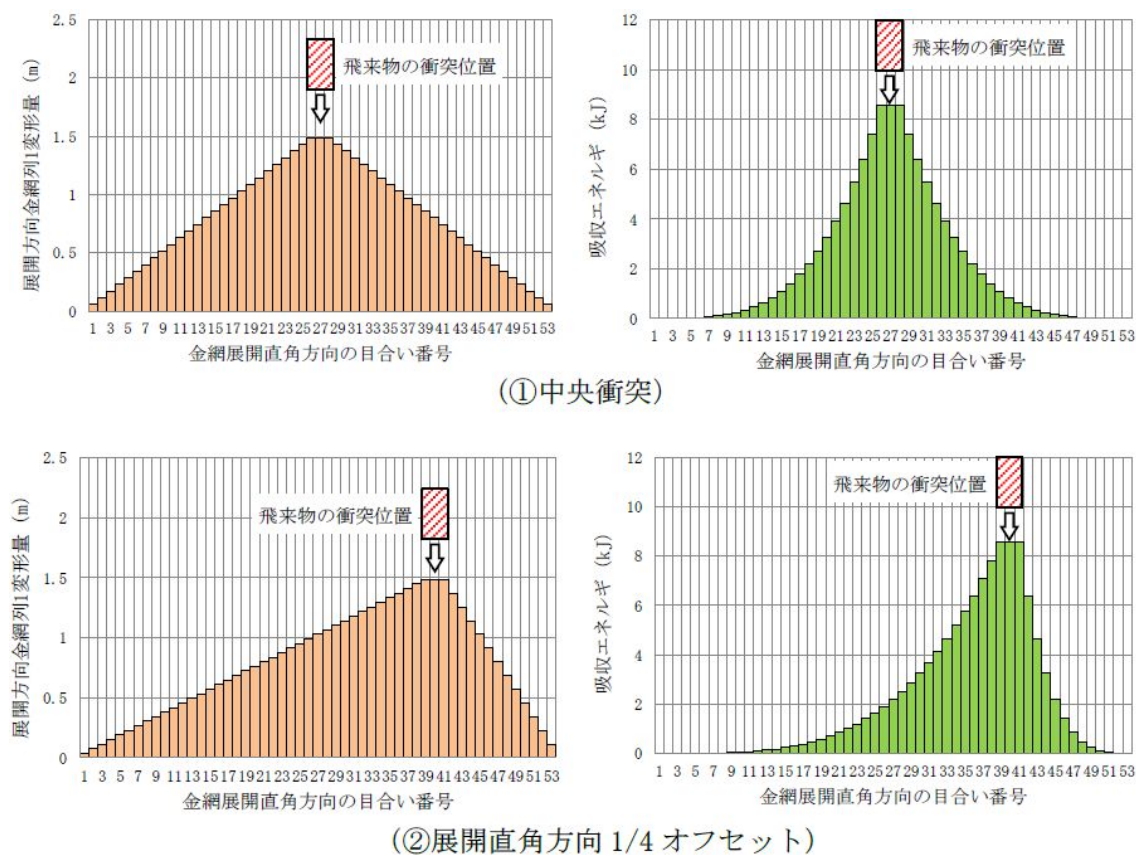


図 2-7 展開直角方向オフセットでの各衝突位置における金網変形量及び吸収エネルギー分布図

表 2-2 展開直角方向オフセット衝突時の吸収エネルギー量 (40mm 目合)

衝突位置	吸収エネルギー (kJ)
① 中央	111.8
② 展開直角方向 1/4 オフセット	111.9

図 2-7 及び表 2-2 のとおり、展開直角方向オフセット衝突時の最大吸収エネルギーは中央衝突時とほぼ同等となるため、展開直角方向オフセット衝突時の影響はないと判断している。

3. オフセット衝突時の衝撃荷重

衝撃荷重 F_a については、下式により算出している。

$$F_a = \frac{4 \cdot m \cdot V_1^2}{3 \cdot \delta}$$

上式より、衝撃荷重 F_a は防護ネットのたわみ量 δ に反比例していることが分かる。

同じ飛来物の中央衝突とオフセット衝突を比較する場合、表 2-1 から、防護ネットの累積移動量（たわみ量）はオフセット衝突の方が短く衝撃荷重が大きくなることから、オフセット衝突における衝撃荷重の増加率は、下式により算出できる。

$$\begin{aligned} \text{衝撃荷重の増加率} &= (\text{中央衝突時の累積移動量}) / (\text{オフセット衝突時の累積移動量}) \\ &= 1.486 / 1.227 \\ &= 1.211 \end{aligned}$$

よって、上式により算出される荷重を 1.22 倍することで、オフセット衝突を考慮した補正を行う。

以 上

7.3 金網の設計裕度の考え方

1. 概要

本資料は、竜巻飛来物防護を目的とした高強度金網の設計裕度に関して、金網の耐衝撃性能評価に用いる機械的特性値の設定の考え方について説明するものである。

2. 金網の機械的特性値

高強度金網の耐衝撃性能評価に用いる機械的特性値は、金網の交点引張試験から算定している。

金網（40mm 目合い）の交点引張試験結果（全 15 データ）を図 2-1 に示す。

また、図 2-1 より算出した金網の等価剛性、破断伸び量、破断荷重の平均値及び変動係数を表 2-1 に示す。

表 2-1 より、金網の等価剛性、破断伸び量、破断荷重の変動係数は、全て 0.05 未満であり、金網の交点引張試験結果はバラツキの少ない結果となっている。

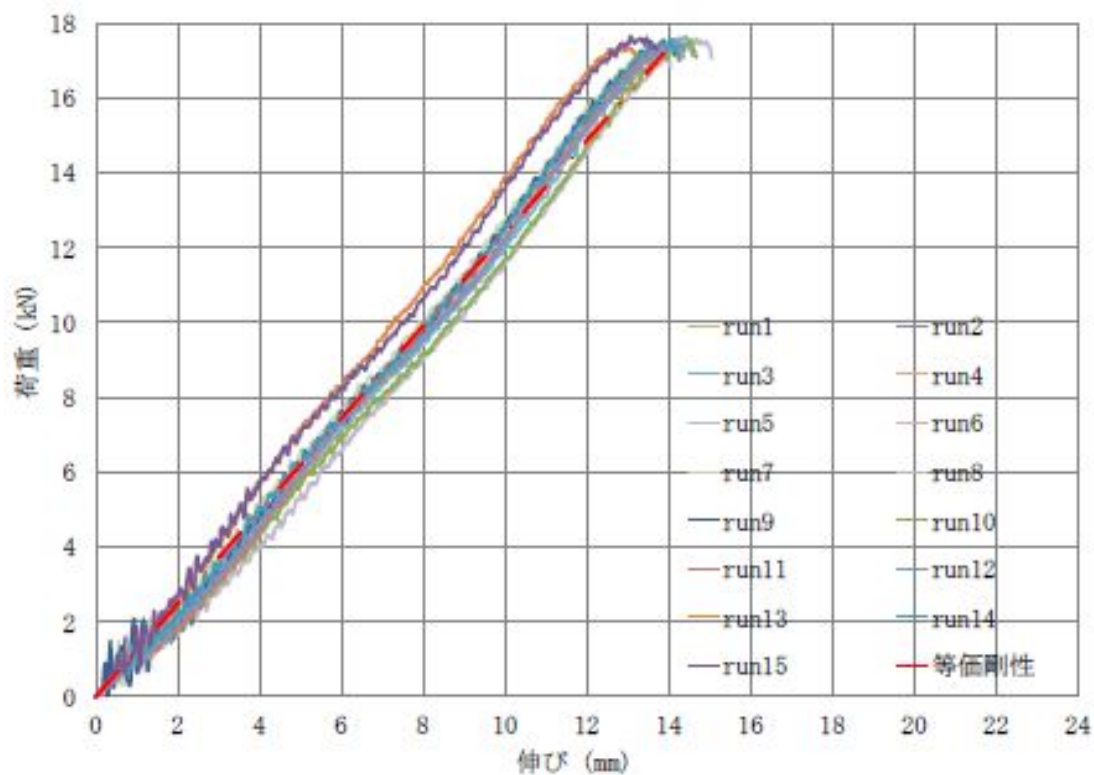


図 2-1 金網の交点引張試験結果

表 2-1 金網の交点引張試験結果の平均値及び変動係数

	等価剛性 (kN/m)	破断伸び量 (mm)	破断荷重 (kN)
平均値	1239	13.9	17.2
変動係数	0.0471	0.0371	0.0117

3. 耐衝撃性能評価に用いる機械的特性値

高強度金網の耐衝撃性能評価（吸収エネルギー、たわみ量及び衝撃荷重等）については、評価に用いる機械的特性値によっては、評価項目毎に安全裕度への寄与が相反するケースがあることを認識している。

そのため、高強度金網の設計では、予め、想定される設計飛来物に対して、十分余裕のある設計（吸収エネルギー、たわみ量及び衝撃荷重等）とすることで、システム全体として成立するようにしている。

したがって、高強度金網の耐衝撃性能評価に用いる機械的特性値には、バラツキの少ないデータが得られている金網の交点引張試験の全データの平均値（表 3-1）を用いることが現実的であると判断している。

表 3-1 強度計算に用いた金網交点諸元

等価剛性 (kN/m)	破断伸び量 (mm)	破断荷重 (kN)
1239	13.9	17.2

7.4 ワイヤロープの変形を考慮したネットシステムのたわみについて

1. 概要

防護ネットはネット本体の変形の外、防護ネット周辺を固定するワイヤロープの変形によってもたわみが生じる。そのためネットシステムのたわみ量の評価では、ワイヤロープのたわみ量を考慮した評価を行うこととしている。

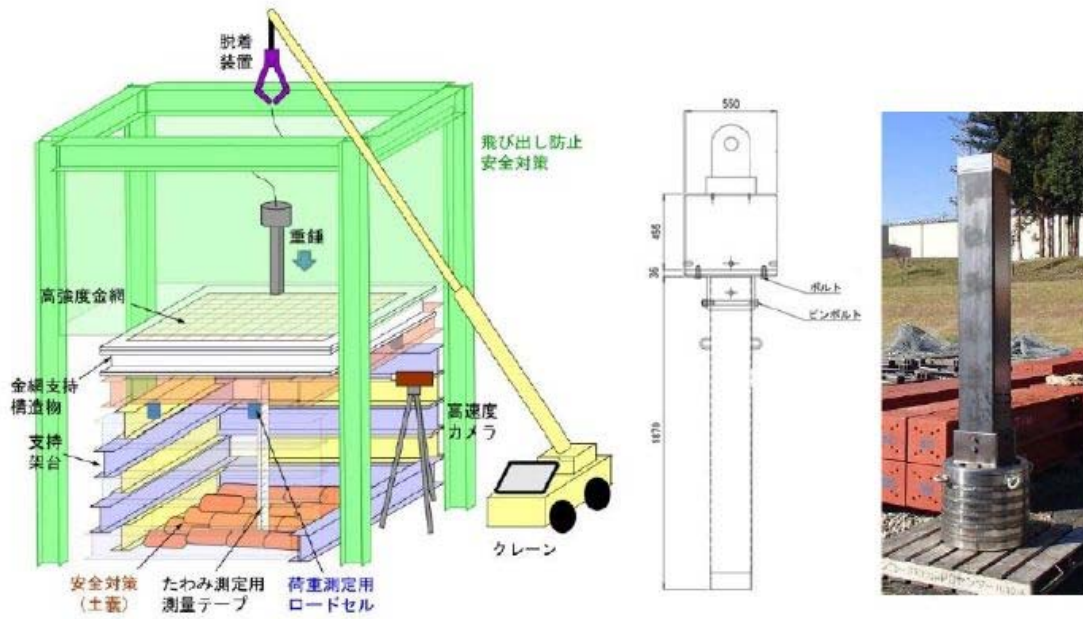
本資料は、その評価手法及び電中研試験結果との比較について説明するものである。

2. 評価手法の妥当性確認に用いる試験条件及び結果

ワイヤロープのたわみ量を考慮した評価手法が妥当であることを確認するため、比較対象とする試験条件及び結果を表 2-1 に、試験概要図を図 2-1 に示す。

表2-1 試験条件及び結果一覧

	項目	条件及び結果
条件	ネット構成	40mm目合い金網 2.5m (展開方向長さ) × 2.15m (展開直角方向長さ) : 2枚 2.15m (展開方向長さ) × 2.5m (展開直角方向長さ) : 1枚(補助)
	ワイヤロープ全長	9.3m
	落下物	角形鋼管 (先端形状 : 250×250×t4.5mm)
	落下物質量	1133kg
	衝突位置	中央
	落下高さ	9.0m
結果	ネット最大変位	1.04m
	総吸収エネルギー	112kJ



(a) 重錘落下試験概要

(b) 重錘構造図

図 2-1 試験概要図

表 2-1 及び図 2-1 に示す試験に対し、電中研評価手法を用いたネット本体のたわみ量に加え、ワイヤロープのたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量を算出し、試験結果との比較評価を行う。

3. ワイヤロープたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量

電中研報告書にて報告されている試験体サイズを図 3-1 に示す。

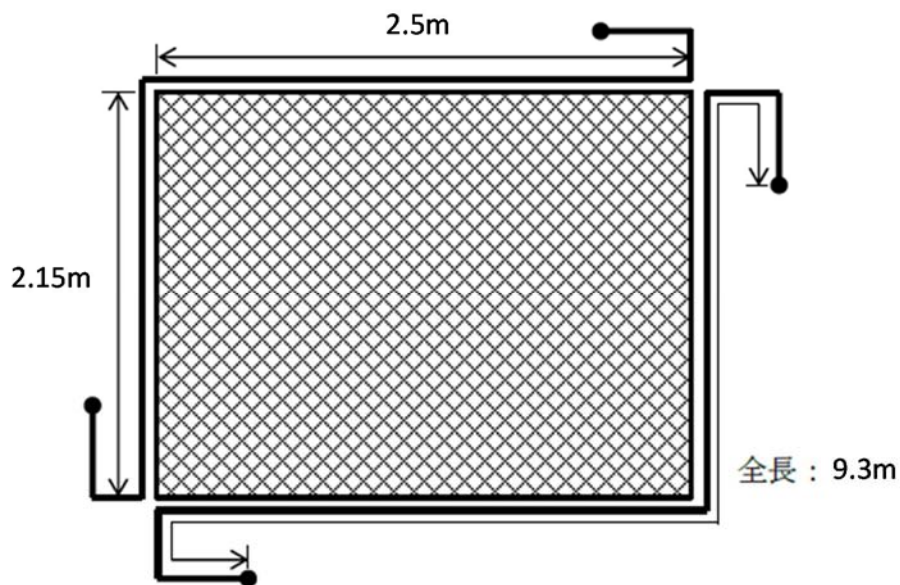


図 3-1 試験体サイズ

ワイヤロープのたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量は、V-3-別添 1-2-1-1「防護ネットの強度計算書」（以下「V-3-別添 1-2-1-1」という。）の「3.5(3) たわみ評価」に示す評価フローに基づき評価を実施する。たわみ評価のフローを図 3-2 に示す。

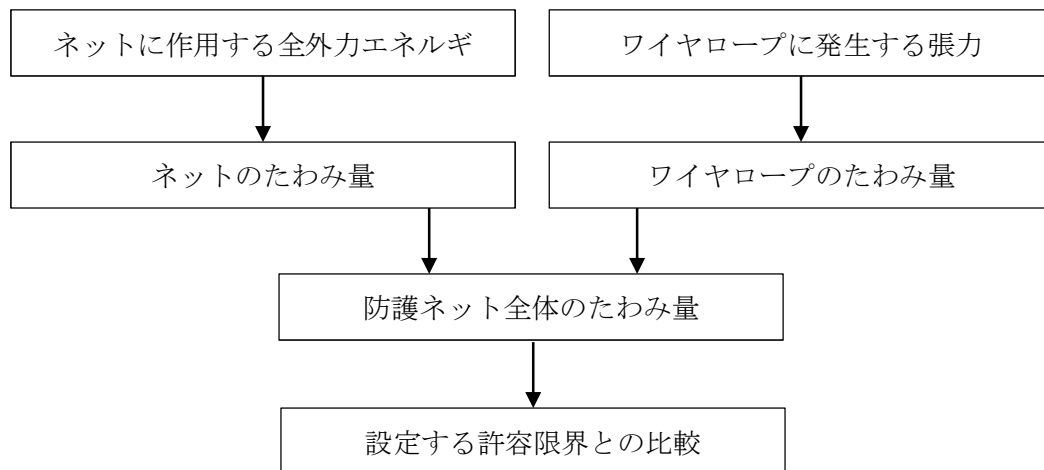


図 3-2 たわみ評価の評価フロー

たわみ評価においては、V-3-別添 1-2-1-1 の「3.4(1) 吸収エネルギー評価」に示す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導出する。

ワイヤロープのたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量を算出する上で以下の条件を仮定する。

- ① ワイヤロープのたわみ量は、飛来物の衝撃荷重並びに自重及び上載荷重による荷重によりワイヤロープに等分布荷重が発生する。
- ② 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。
- ③ ワイヤロープは放物線状に変形する。

3.1 ネットシステムのたわみ量評価

電中研報告書に従い、まずはネットのたわみ量 δ を算出する。ネットのたわみ量 δ については、V-3-別添 1-2-1-1 の「3.5(3) たわみ評価」で示す以下の式より、ネットの変位量と吸収エネルギーの関係から算出する。

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

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、飛来物の運動エネルギーに応じたたわみ量 δ を算出することができ、表 2-1 に示す試験の運動エネルギー 112kJ を吸収するためのネットのたわみ量 δ の算出値は 0.9m となる。

次に各ワイヤロープの張力を算出する。

ネットが受ける衝撃荷重は、V-3-別添 1-2-1-1 の「3.5(2) 破断評価」に示す以下の式より、ネットのたわみ量と飛来物の運動エネルギーから算出する。

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

ここで、オフセット衝突による衝撃荷重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、

$$F_a' = F_a \times 1.22$$

よって、運動エネルギー 112kJ がネットに作用した際の衝撃荷重は 409kN となる。ネット展開方向にかかる張力は、V-3-別添 1-2-1-1 の「3.5(2) 破断評価」に示す以下の式より、ネットのたわみ角とネットが受ける衝撃荷重から算出する。

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

たわみ角 θ は以下の式で求められ、

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

ネット展開方向にかかる張力 T' は、350kN となる。

そこから、ワイヤロープは、ネット展開方向 1 辺とネット展開直角方向 1 辺を 1 本のワイヤロープで L 字形に設置し、このワイヤロープと対称に設置したワイヤロープとの合計 2 本でネットを支持することにより、展開方向及び展開直角方向の各辺のワイヤロー

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。また、第2-1表で示す試験ではネットを2枚と、補助ネットを1枚重ねて設置しているため、補助ネットを支持しているワイヤロープに発生する張力 T_1' は以下の式より、

$$T_1' = \frac{F_a'}{4 \sin \theta} \cdot \left(\frac{1.5}{1.5 + 1} \right)$$

補助ネットを支持しているワイヤロープ1本あたりの張力は105kNとなる。

補助ネットを支持しているワイヤロープ1本あたりの張力(105kN)を用い、表3-1に諸元を示すワイヤロープに張力(105kN)が負荷されたとき、図3-2の引張試験結果より、ひずみは0.0065と求められる。

表 3-1 ワイヤロープの諸元

	仕様	径	破断荷重 (kN)
ワイヤロープ	7×7	∅16	165 ^(注1)

(注1) JIS G 3549 の破断強度

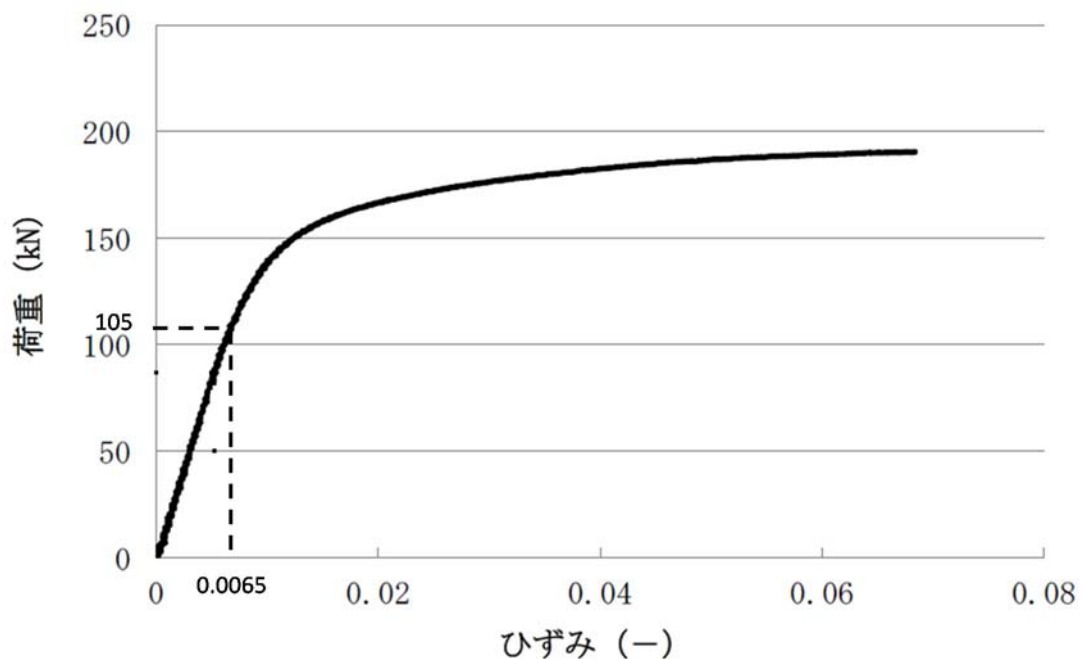
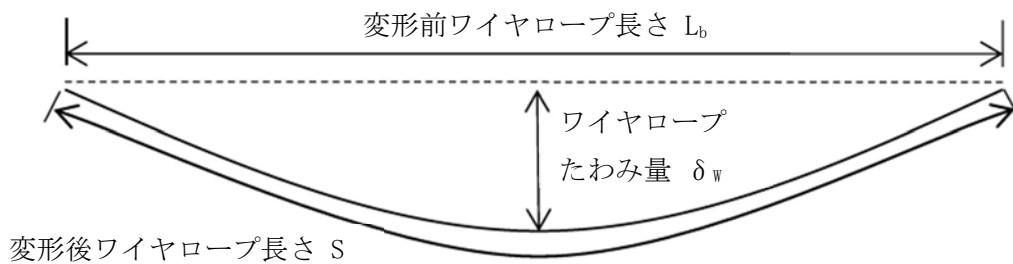


図 3-2 ワイヤロープ引張試験結果

ワイヤロープはネット長辺側と短辺側が結合されており、その発生張力は均一であると考えられる。したがって、変形後のワイヤロープ一本あたりの全長 S_t は、ワイヤロープの一本あたりの全長 ($9.3/2=4.65\text{m}$) が変形するものと考えられ、以下のとおり算出される。

$$S_t = 4.65(\text{m}) \times 1.0065 \\ = 4.68(\text{m})$$

また、飛来物の衝突によりワイヤロープが放物線上に変形すると図 3-3 のとおりとなり、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。



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

図 3-3 ワイヤロープ変形図

ここで、長さ L_x (2.5m) のワイヤロープのたわみ量を δ_{wx} 、長さ L_y (2.15m) のワイヤロープのたわみ量を δ_{wy} とすると、長さ L_x のワイヤロープの変形後の長さ S_x と長さ L_y のワイヤロープの変形後の長さ S_y の合計が S_t となることから、

$$S_t = \frac{1}{2}\sqrt{L_x^2 + 16\delta_{wx}^2} + \frac{L_x^2}{8\delta_{wx}} \ln\left(\frac{4\delta_{wx} + \sqrt{L_x^2 + 16\delta_{wx}^2}}{L_x}\right) \\ + \frac{1}{2}\sqrt{L_y^2 + 16\delta_{wy}^2} + \frac{L_y^2}{8\delta_{wy}} \ln\left(\frac{4\delta_{wy} + \sqrt{L_y^2 + 16\delta_{wy}^2}}{L_y}\right) \\ 4.68 = \frac{1}{2}\sqrt{L_x^2 + 16\delta_{wx}^2} + \frac{L_x^2}{8\delta_{wx}} \ln\left(\frac{4\delta_{wx} + \sqrt{L_x^2 + 16\delta_{wx}^2}}{L_x}\right) \\ + \frac{1}{2}\sqrt{L_y^2 + 16\delta_{wy}^2} + \frac{L_y^2}{8\delta_{wy}} \ln\left(\frac{4\delta_{wy} + \sqrt{L_y^2 + 16\delta_{wy}^2}}{L_y}\right) \dots \textcircled{1}$$

と表される。

一方、ワイヤロープたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量は、図 3-4 のとおり表される。

ここで、ネットのたわみ量 $\delta = 0.9\text{m}$ は決まっているため、三平方の定理より、長さ L_x のワイヤロープの変形後の長さ $S_x = 1.54\text{m}$ 、長さ L_y のワイヤロープの変形後の長さ $S_y = 1.40\text{m}$ と算出される。

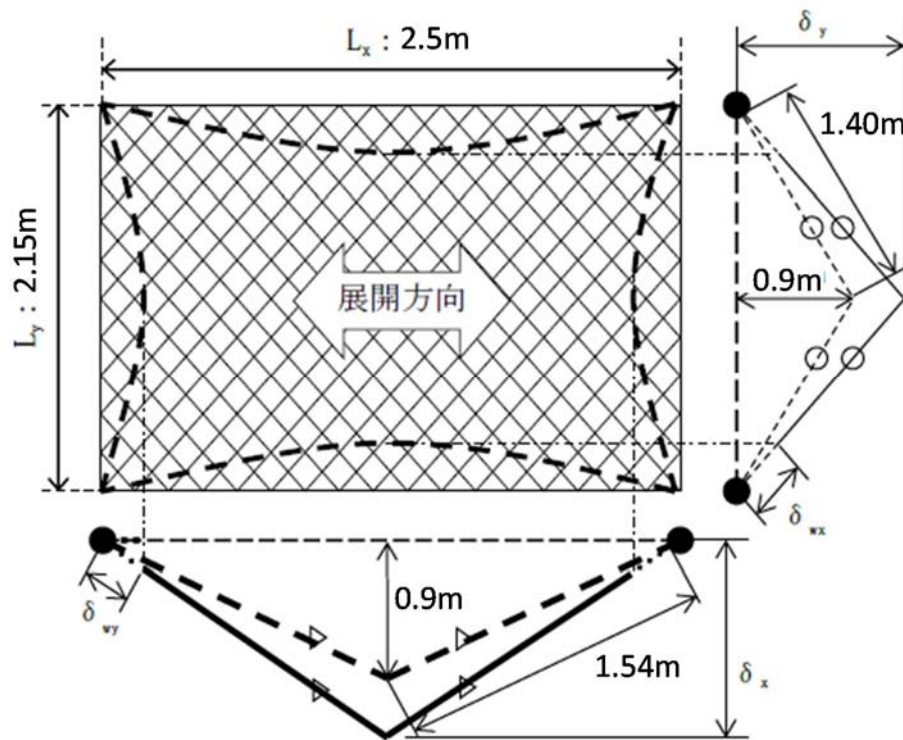


図 3-4 たわみ量の足し合わせ

図 3-4 より、ネット本体のたわみ量とワイヤロープのたわみ量を足し合わせたネットシステムのたわみ量 δ_x 及び δ_y はそれぞれ

$$\begin{aligned} \delta_x &= \sqrt{(\delta_{wy} + 1.54)^2 - \left(\frac{L_x}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{(\delta_{wy} + 1.54)^2 - \left(\frac{2.5}{2}\right)^2} \dots \textcircled{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_y &= \sqrt{(\delta_{wx} + 1.40)^2 - \left(\frac{L_y}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{(\delta_{wx} + 1.40)^2 - \left(\frac{2.15}{2}\right)^2} \dots \textcircled{3} \end{aligned}$$

と算出され、 δ_x 及び δ_y は双方とも同じネットシステムのたわみ量であり、等しいことから

$$\sqrt{(\delta_{wy} + 1.54)^2 - \left(\frac{2.5}{2}\right)^2} = \sqrt{(\delta_{wx} + 1.40)^2 - \left(\frac{2.15}{2}\right)^2} \dots \textcircled{4}$$

と表される。

以上より、①式と④式を連立して解くことで δ_{wx} 及び δ_{wy} を導出することができ、それぞれの値は、

$$\delta_{wx} = 0.12\text{m}$$

$$\delta_{wy} = 0.11\text{m}$$

と算出される。よって、ネット本体のたわみ量とワイヤロープのたわみ量を足し合わせたネットシステムのたわみ量は、②式及び③式を用い、

$$\delta_x = \sqrt{(0.11 + 1.54)^2 - \left(\frac{2.5}{2}\right)^2} = 1.08\text{m}$$

$$\delta_y = \sqrt{(0.12 + 1.40)^2 - \left(\frac{2.15}{2}\right)^2} = 1.08\text{m}$$

$$\delta_x = \delta_y = 1.08\text{m}$$

と算出される。

4. 試験における実測値との比較

ワイヤロープのたわみを含むネットシステムのたわみ量の試験における実測値と計測値との比較を以下に示す。

試験条件を表 4-1 に、また、実測値との比較を表 4-2 に示す。

表 4-1 電中研試験一覧

ケース	ネット枚数 (枚)	ネットサイズ※ (m)	落下物	落下物質量 (kg)	衝突位置	落下高さ (m)	エネルギー (kJ)
1	2 (補助1枚)	2.5×2.15 (2.15×2.5)	角形鋼管 (先端形状： 250×250×t4.5mm)	1133	中央	9.0	112

※寸法については、(展開方向長さ) × (展開直角方向長さ) の順

表 4-2 電中研試験におけるたわみ量の実測値と計算値の比較

ケース	ネットシステムのたわみ量	
	計算値 (m)	実測値 (m)
1	1.08	1.01

表 4-2 より、ワイヤロープのたわみを含むネットシステムのたわみ量は「実測値<計算値」であり、実測値にはネット、ワイヤロープ及び緩衝装置の変形によるたわみ量が含まれている。

したがって、本評価によりネットシステムのたわみ量を安全側に評価可能であることが確認された。

5. 実機設備への展開

本評価は、電中研報告書に記載の2.5m×2.15mの試験体に対して実施したものであるが、以下の観点から実機ネットに対しても適用可能と判断している。

5.1 ネットサイズ

本評価では、ネットシステムの仕様に応じて、飛来物捕捉時の衝撃荷重に基づくワイヤロープ張力が算定可能であり、それに応じたワイヤロープのたわみ量を算出できる。

以上より、本評価はネットサイズの影響が考慮されていると判断している。

7.5 ワイヤロープの初期張力について

1. 防護ネットの構造概要

防護ネットのうちネットは、ネット端部の網目を縫うように通したワイヤロープにより支持し、ワイヤロープは鋼製枠の四隅に設置した接続用の治具にて支持する。ワイヤロープ端部は、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。

ワイヤロープは、ネット展開方向と平行に配置されるワイヤロープと、ネット展開直角方向と平行に配置され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、ワイヤロープはネットの四隅の接続用の治具で支持される。また、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。

防護ネットの概要図を図 1-1 に示す。

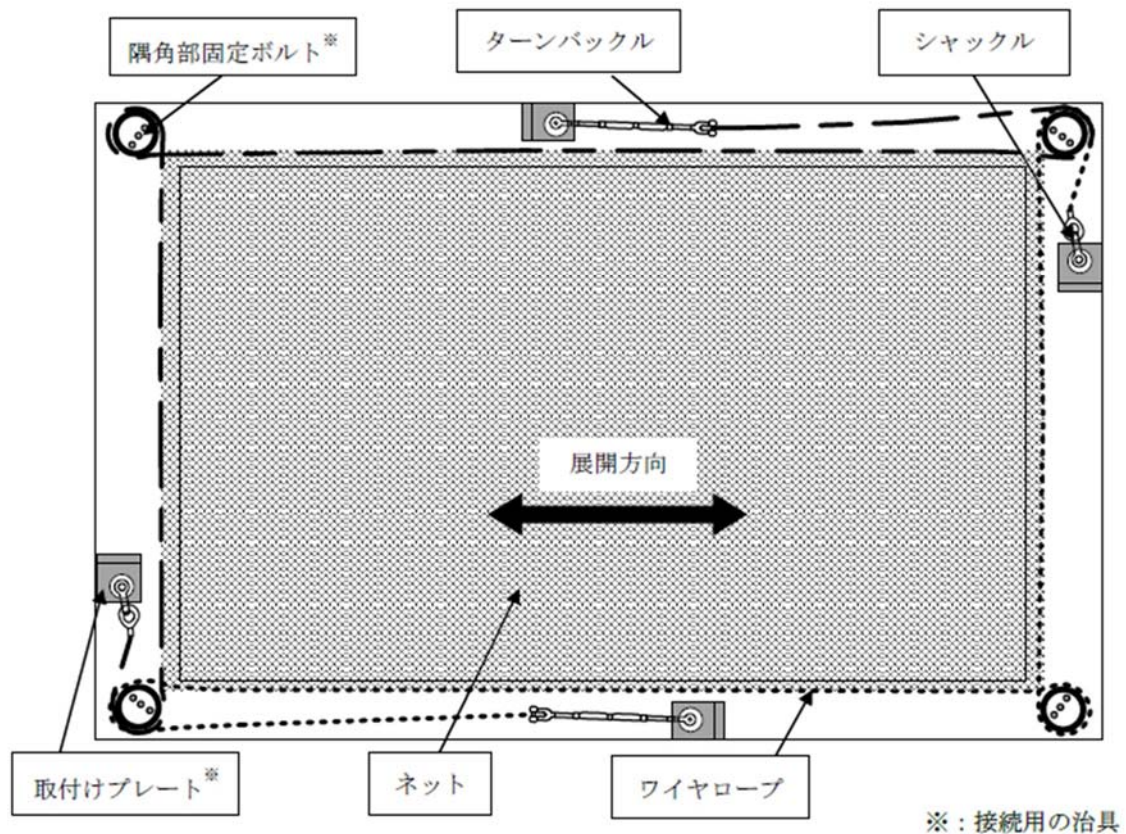


図 1-1 防護ネット概要図

2. ワイヤロープの初期張力について

ワイヤロープの初期張力については、電力中央研究所の試験時に測定しており、図 2-1 に示すワイヤロープ端部のターンバックルにひずみゲージを取り付けて、軸力を出力することでワイヤロープの初期張力を測定した。なお、ターンバックルの締め付けトルク値は $30\text{N}\cdot\text{m}$ である。



図 2-1 ひずみゲージ付きターンバックルの設置状況

電力中央研究所での 40mm 目合い金網を使用した防護ネットのワイヤロープの初期張力の測定結果の平均値と最大値を表 2-1 に示す。

表 2-1 ワイヤロープ初期張力の最大値

測定箇所	初期張力 (kN)	
	平均値	最大値
ターンバックル	2.5	5.0

3. ワイヤロープに作用する張力と許容荷重との比較

ワイヤロープに作用する初期張力は最大でも 5kN であり、V-3-別添 1-2-1-1「防護ネットの強度計算書」の表 5-11~15 に示す防護ネットに飛来物が衝突した際にワイヤロープに発生する張力 T_1' と比べて十分に小さいことから、評価結果に大きな影響を及ぼすものではない。表 3-1 にワイヤロープに作用する張力と許容荷重の比較を示す。

表 3-1 ワイヤロープに作用する張力と許容荷重との比較

ネット	張力			許容荷重 P (kN)
	初期張力 (kN)	T_1' ※ (kN)	合計 (kN)	
非常用ディーゼル発電機室 ルーフベントファン	5	119	124	132
中央制御室換気系冷凍機	5	89	94	132
海水ポンプエリア	5	85	90	132
原子炉建屋外側ブローアウト パネル	5	124	129	132
使用済燃料乾式貯蔵容器	5	123	128	132

※各防護対策施設おける最大の T_1' を記載

7.6 補助金網の影響について

1. 概要

防護ネットは、40mm ネット（主金網）2枚及び40mm ネット（補助金網）1枚の計3枚で構成することを基本構造としている。

補助金網は、金網の耐衝撃性能向上を目的に設置しているが、飛来物が防護ネットに衝突した際には、飛来物の受け止めに寄与することが予想されているため、その影響について検討した。

2. 防護ネットについて

防護ネットの構造図を図1に示す。

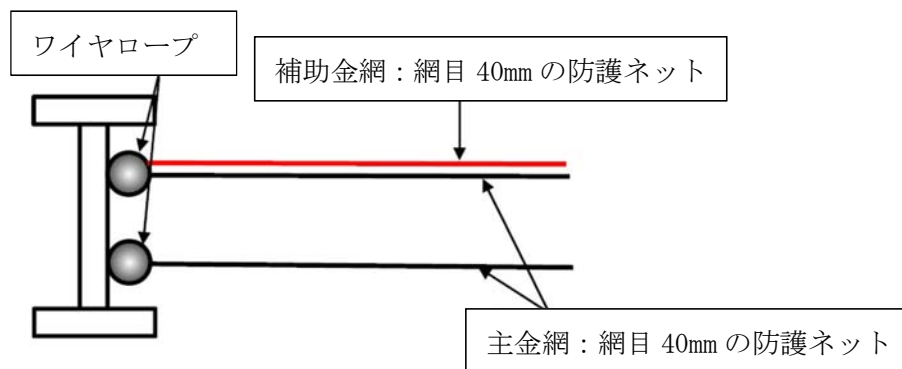


図1 防護ネットの構造図

図1より、上段のワイヤロープには主金網と補助金網の2枚の金網を支持しており、下段のワイヤロープは主金網1枚を支持していることが分かる。電力中央研究所の報告書（015502）では、上記の防護ネットに対し飛来物の落下試験を実施し、2本のワイヤロープに発生する張力を計測している。ワイヤ張力時刻歴の試験結果を図2に示す。

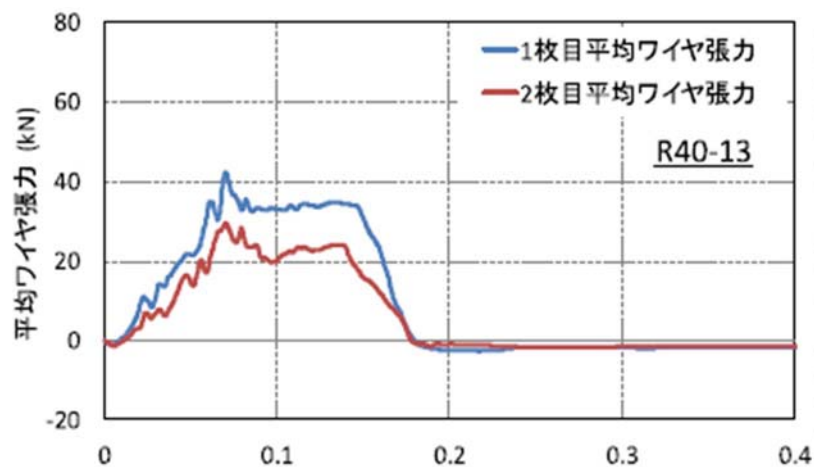


図2 ワイヤ張力時刻歴の試験結果

図2より、上段のワイヤロープは下段のワイヤロープと比較すると約1.5倍の張力が発生していることがわかる。

このことから、補助金網がありとなしの防護ネットにおけるたわみ量を一定とした場合、それぞれの補助金網ワイヤロープに発生する張力の関係は表1のようになる。

表1 ワイヤロープ張力

	補助金網あり	補助金網なし
上段のワイヤロープ	1.5T	1.0T
下段のワイヤロープ	1.0T	1.0T

また、張力Tと吸収エネルギーEの関係は、次式から比例関係であることが分かる。

$$T = \frac{F}{2 \cdot \sin \theta} \quad \dots \textcircled{1}$$

$$F = \frac{8}{3 \cdot \delta} E \quad \dots \textcircled{2}$$

①および②から

$$T = \frac{1}{2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{8}{3 \cdot \delta} \cdot E = \alpha E$$

ここで、 $\alpha = \frac{1}{2 \cdot \sin \theta} \cdot \frac{8}{3 \cdot \delta}$ とする。

以上から、補助金網の有無による吸収エネルギー量を表2に示す。

表2 補助金網の有無による吸収エネルギー量

	補助金網あり	補助金網なし
主金網+補助金網	1.5E	1.0E
主金網のみ	1.0E	1.0E

表2から、上段の主金網と補助金網の組み合わせは、下段の主金網に比べ1.5倍のエネルギーを吸収していることとなり、主金網は1.0枚以上のエネルギーを吸収できないことから、補助金網は主金網0.5枚分のエネルギーを吸収していることとなる。

3. ネット性能評価における補助金網の考慮

補助金網が防護ネットの評価に与える影響について検討した。電中研での試験結果から、補助金網を支持しているワイヤロープには補助金網が設置されていないワイヤロープに比べ約1.5倍の張力が発生している。ワイヤロープの張力は金網張力が伝達した荷重であり、金網のたわみ量に変化がないとすると、一枚目の主金網と補助金網の合計の

吸収エネルギーは二枚目の主金網の1.5倍生じていると考えられる。このことから、補助金網は主金網0.5枚分として評価に考慮することとする。

具体的には、防護ネットの剛性を算出する際に、主金網の枚数に0.5を加えることで、補助金網を考慮した評価とする。

以 上