

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 13 R <u>9</u>
提出年月日	令和 5 年 <u>11</u> 月 <u>30</u> 日

設工認に係る補足説明資料

竜巻防護対策設備の強度計算に関する 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. 文章中の下線部は、R 8 から R 9 への変更箇所を示す。
2. 本資料（R 9）は、第 2 回設工認申請に伴い、記載の適正化を行ったものである。

目 次

1. 概要	1
2. 評価手法の妥当性確認に用いる試験条件及び結果	1
3. 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	3
3.1 ネットシステムのたわみ量評価	4
4. 試験における実測値との比較	9
5. 実機設備への展開	10
5.1 ネットサイズ	10
5.2 ワイヤロープ張力	10
5.3 ネット目合	11
6. 参考文献	11

1. 概要

本資料は、再処理施設に対する第1回設工認申請(令和2年12月24日申請)及び第2回設工認申請(令和4年12月26日申請)のうち、以下の添付書類に示す竜巻防護対策設備の強度計算の方針を補足説明するものである。

- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-2-4-1-2 竜巻防護対策設備の強度計算の方針」
- ・再処理施設 添付書類「VI-1-1-1-2-4-2-2 竜巻防護対策設備の強度計算書」

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の評価手法において、再処理施設の飛来物防護ネットで用いる防護ネットは、ネット本体の変形の他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。

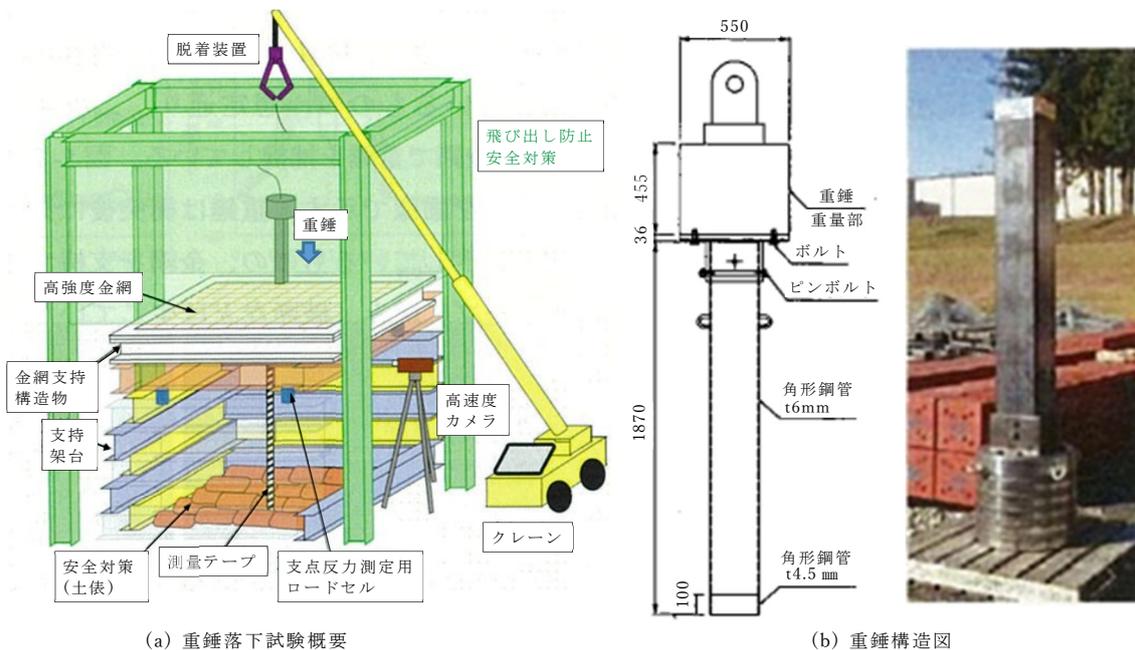
本資料では、ワイヤロープのたわみ量を考慮した評価手法と電力中央研究所(以下、「電中研」という。)報告書「高強度金網を用いた竜巻飛来物対策工の合理的な衝撃応答評価手法(総合報告:O01)」(以下、「電中研報告書」という。)の試験結果を比較し、評価手法の妥当性について補足する。

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、比較対象とする電中研評価手法の試験条件及び結果を第2-1表に、試験概要図を第2-1図に示す。

第 2-1 表 試験条件及び結果一覧

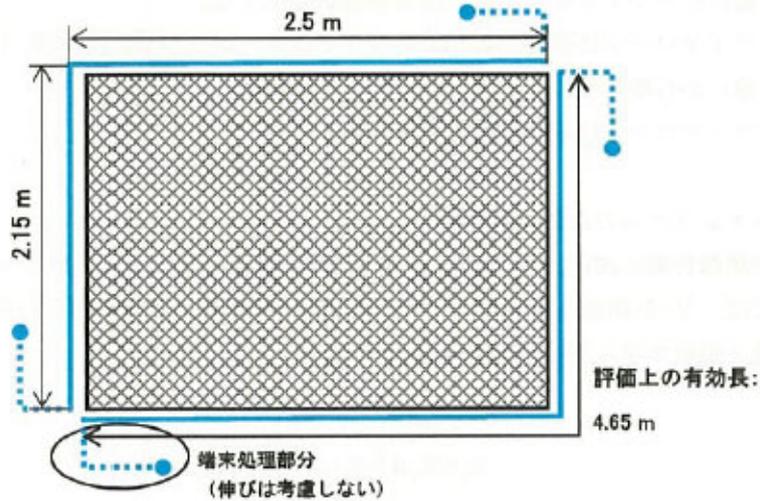
項目	条件及び結果	
条件	ネット構成	40mm目合ネット 2.5m(展開方向長さ)×2.15m(展開直角方向長さ): 2枚 2.15m(展開直角方向長さ)×2.5m(展開方向長さ): 1枚(補助)
	ワイヤロープ全長(評価上の有効長)	4.65m(1本当たり)
	落下物	角型鋼管 (先端形状: 250×250×t4.5mm)
	落下物質量	1,133kg
	衝突位置	中央
	落下高さ	9.0m
結果	ネット最大変位	1.04m
	総吸収エネルギー	112kJ



第 2-1 図 試験概要図

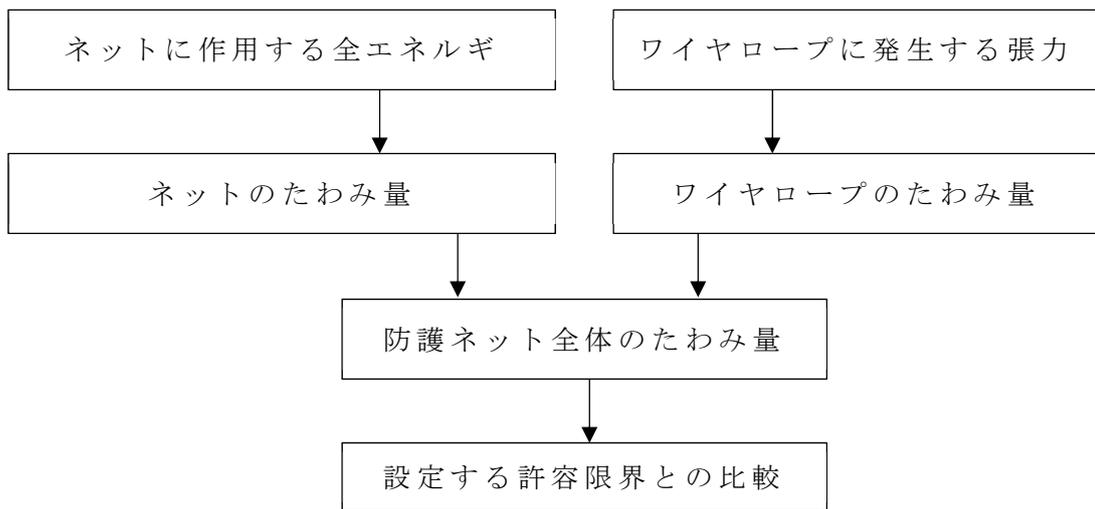
第 2-1 表に示す試験結果に対し、電中研評価手法を用いたネット本体及びワイヤロープのたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量を算出し、試験結果との比較評価を行う。

3. ワイヤロープの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第3-1図に示す。



第3-1図 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、1項及び2項変更の添付書類「VI-1-1-1-2-4-2-1-2 竜巻防護対策設備の強度計算の方針」（以下、「添付書類(竜巻強度計算方針)」という。）に記載の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第3-2図に示す。



第3-2図 たわみ評価の評価フロー

たわみ評価においては、添付書類(竜巻強度計算方針)に記載の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算出する。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

電中研報告書の記載に従い、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、添付書類(竜巻強度計算方針)に記載の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、以下の式で表される。

$$\sum_{i=1}^{N_y} E_i = E_t$$

よって、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、第2-1表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、添付書類(竜巻強度計算方針)に記載の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、以下のとおり算出する。

$$F_a' = F_a \times 1.22$$

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、添付書類(竜巻強度計算方針)に記載の破断評価に示す以下の式より、ネットのたわみ角(θ)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字型に設置し、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、ネット及び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、

$$T_1' = \frac{3}{4(2n+1)} \cdot \frac{F_a'}{\sin \theta}$$

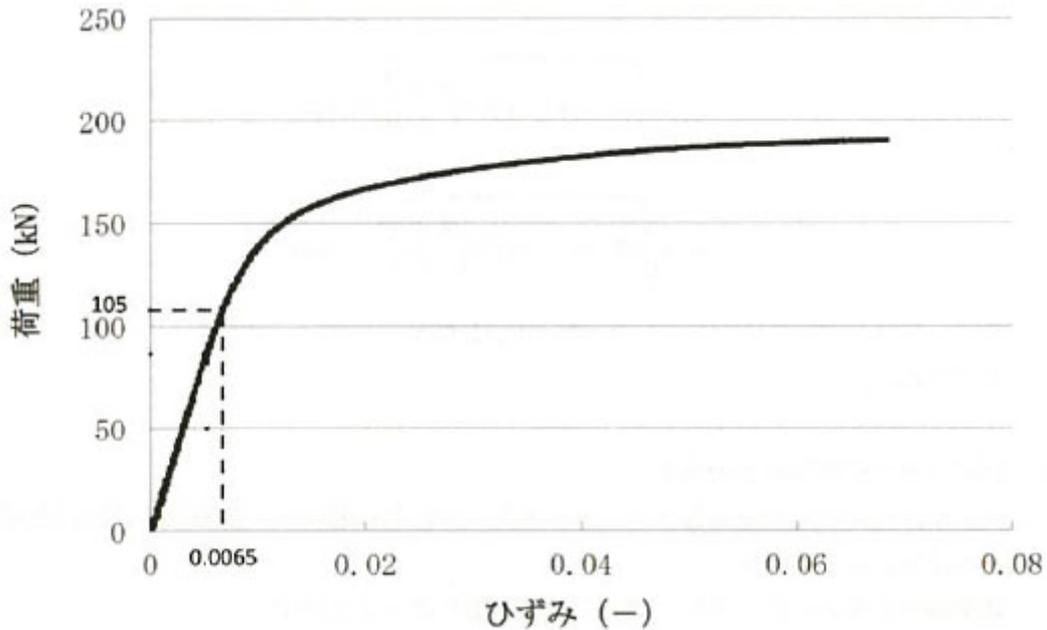
ネット及び補助ネットを支持しているワイヤロープ1本あたりの張力は105kNとなる。

ネット及び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、第3-1表に諸元を示すワイヤロープに張力(105kN)が負荷されたとき、第3-3図の引張試験結果より、ひずみは0.0065と求められる。

第 3-1 表 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*

注記_* : JIS G 3549 の破断強度

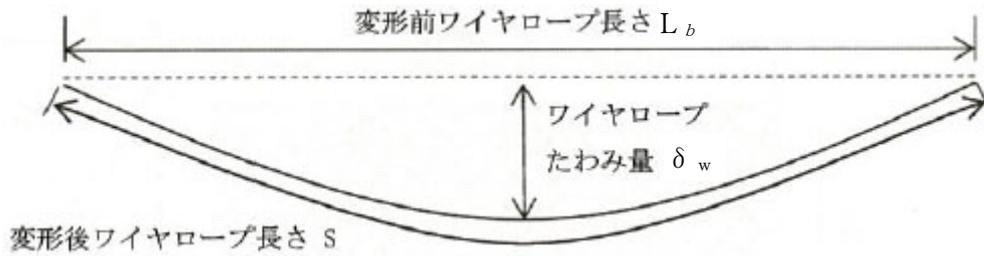


第 3-3 図 ワイヤロープ引張試験結果

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 1 本あたりの全長 (S_t) は、ワイヤロープの 1 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。

$$\begin{aligned}
 S_t &= 4.65(\text{m}) \times 1.0065 \\
 &= 4.68(\text{m})
 \end{aligned}$$

また、飛来物の衝突によりワイヤロープが放物線状に変形すると第 3-4 図のとおりとなり、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。



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

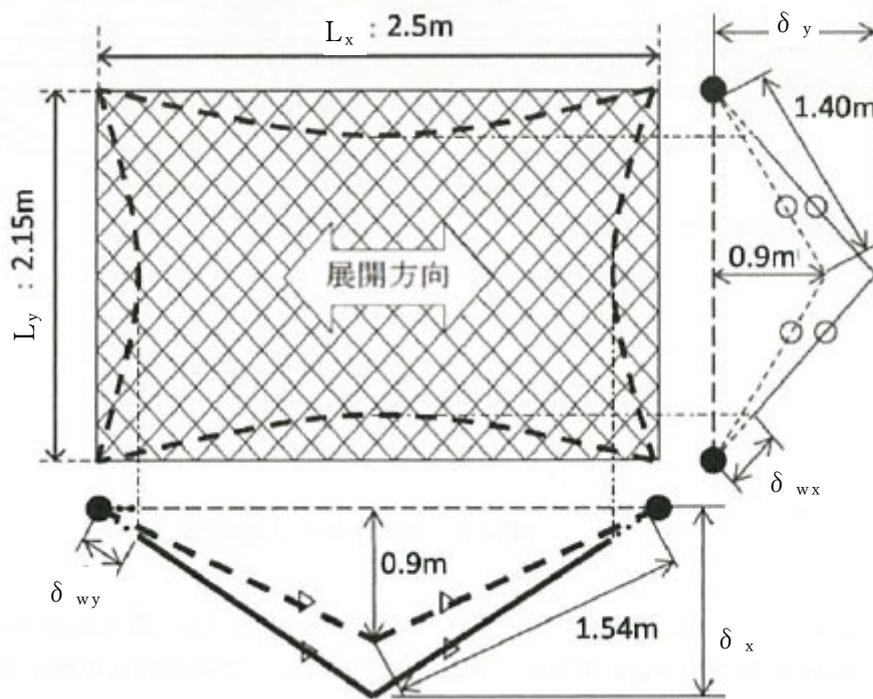
第 3-4 図 ワイヤロープ変形図

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、以下のとおり表される。

$$\begin{aligned}
 S_t &= \frac{1}{2} \sqrt{L_x^2 + 16\delta_{wx}^2} + \frac{L_x^2}{8\delta_{wx}} \ln \left(\frac{4\delta_{wx} + \sqrt{L_x^2 + 16\delta_{wx}^2}}{L_x} \right) \\
 &+ \frac{1}{2} \sqrt{L_y^2 + 16\delta_{wy}^2} + \frac{L_y^2}{8\delta_{wy}} \ln \left(\frac{4\delta_{wy} + \sqrt{L_y^2 + 16\delta_{wy}^2}}{L_y} \right) \\
 4.68 &= \frac{1}{2} \sqrt{L_x^2 + 16\delta_{wx}^2} + \frac{L_x^2}{8\delta_{wx}} \ln \left(\frac{4\delta_{wx} + \sqrt{L_x^2 + 16\delta_{wx}^2}}{L_x} \right) \\
 &+ \frac{1}{2} \sqrt{L_y^2 + 16\delta_{wy}^2} + \frac{L_y^2}{8\delta_{wy}} \ln \left(\frac{4\delta_{wy} + \sqrt{L_y^2 + 16\delta_{wy}^2}}{L_y} \right) \dots\dots\dots (3.1-1)
 \end{aligned}$$

一方、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、第 3-5 図のとおりに表される。

ここで、ネットのたわみ量 $(\delta = 0.9m)$ 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 $(S_x = 1.54m)$ 、長さ L_y のワイヤロープの変形後の長さ $(S_y = 1.40m)$ と算出される。



第 3-5 図 たわみ量の足し合わせ

第 3-5 図より，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、それぞれ以下のとおり算出される。

$$\begin{aligned} \delta_x &= \sqrt{(\delta_{wy} + 1.54)^2 - \left(\frac{L_x}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{(\delta_{wy} + 1.54)^2 - \left(\frac{2.5}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (3.1-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta_y &= \sqrt{(\delta_{wx} + 1.40)^2 - \left(\frac{L_y}{2}\right)^2} \\ &= \sqrt{(\delta_{wx} + 1.40)^2 - \left(\frac{2.15}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (3.1-3) \end{aligned}$$

また， δ_x 及び δ_y は，同ネットシステムのたわみ量を示しており，等しい関係であることから，以下のとおり表される。

$$\sqrt{(\Delta_{wy} + 1.54)^2 - \left(\frac{2.5}{2}\right)^2} = \sqrt{(\delta_{wx} + 1.40)^2 - \left(\frac{2.15}{2}\right)^2} \dots\dots\dots (3.1-4)$$

以上より、(3.1-1)式と(3.1-4)式を連立して解くことでワイヤロープのたわみ量(δ_{wx} 及び δ_{wy})は、以下のとおり算出することができる。

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

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

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、(3.1-2)式及び(3.1-3)式より、以下のとおり算出される。

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

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

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

4. 試験における実測値との比較

ワイヤロープのたわみ量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について、試験条件を第4-1表、実測値との比較を第4-2表に示す。

第4-1表 電中研試験条件

ネット枚数 (枚)	ネットサイズ ^{※2} (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)
2 ^{※1}	2.5×2.15 (2.15×2.5)	角型鋼管(先端形状：250×250×t4.5mm)	1,133	中央	9.0	112

注記 ※1：主ネット×1枚，補助ネット×1枚

※2：寸法については、(展開方向長さ)×(展開直角方向長さ)の順

第4-2表 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	1.04

第4-2表より、ワイヤロープのたわみ量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試験体(ネット構成：40mm目合2枚+補助ネット，2.5m×2.15m)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。

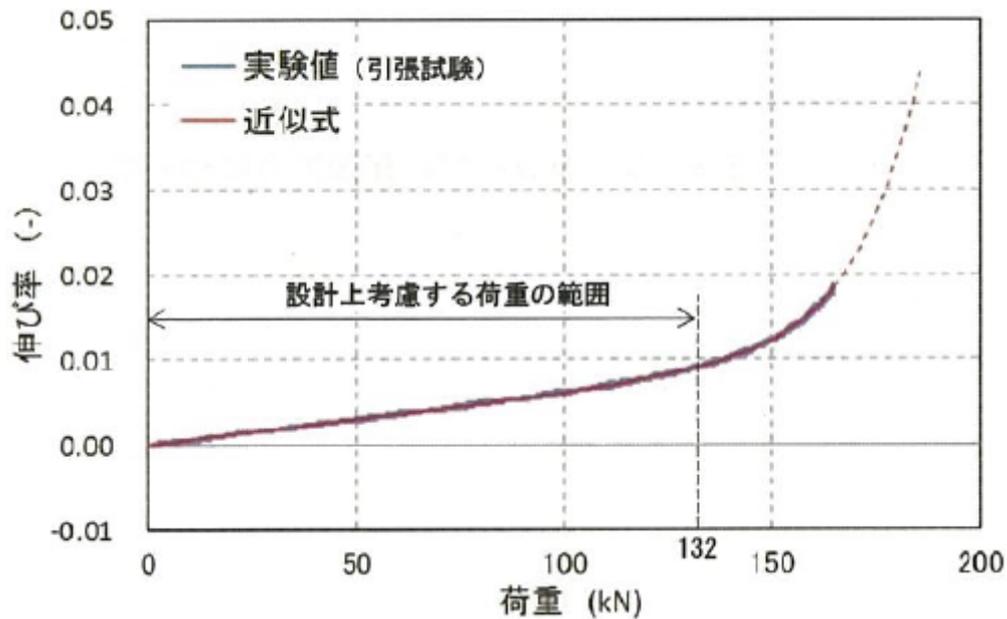
5.1 ネットサイズ

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出可能であり、それに応じたワイヤロープのたわみ量を算出できる。

以上により、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。

5.2 ワイヤロープ張力

電中研報告書においては、試験時におけるワイヤロープの最大張力は約103kNであり、実機に適用するワイヤロープの張力の許容限界より小さい値となっているが、第5-1図に示されるとおり、本評価に用いる、電中研報告書に示される多項式による近似式がワイヤロープの許容荷重である132kN以下の範囲において実験値とおおむね一致していることから、103kNを超える領域においても、算出される張力には信頼性があると判断している。



第5-1図 ワイヤロープ引張試験結果(近似式との比較)

5.3 ネット目合

試験体のネット構成(40mm目合2枚+補助ネット)と再処理施設の飛来物防護ネットのネット構成(50mm目合2枚+補助ネット)を比較するとネット目合が異なる。

ネット目合以外の違いはないことから、飛来物衝撃時の挙動に差はないこと及び飛来物防護ネットと同じネット構成(50mm目合2枚+補助ネット)の電中研試験において、50mm目合のネットの性能確認及び衝撃応答評価法の妥当性を確認している。

以上により、本評価はネット目合の影響は受けないと判断している。

6. 参考文献

- ・ 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 平成28年3月 電力中央研究所