

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 13 R <u>2</u>
提出年月日	令和 3 年 <u>5</u> 月 <u>14</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

文中の\_\_\_\_線部は R1 から R2 への差替え箇所を示す。

## 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. ワイヤロープたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量	2
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	11
5.1 ネットサイズ	11
5.2 ワイヤロープ張力	11
6. 参考文献	<u>12</u>

## 1. 概要

本資料は、再処理施設の設計基準対象施設に対する後次回申請を含めた竜巻防護対策設備等の強度計算の方針について補足説明するものである。

ここでは、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の妥当性について説明する。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おり、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。）試験結果を比較し、評価手法の妥当性について説明する。

また、本資料は、第1回申請（令和2年12月24日申請）のうち、以下に示す添付書類の補足説明に該当するものである。

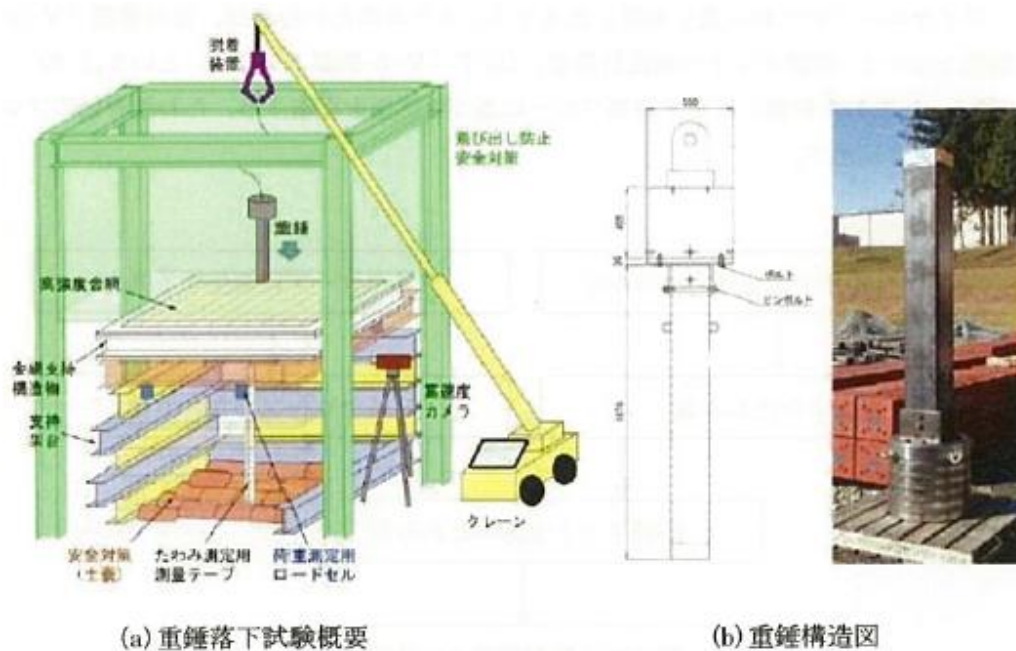
- ・再処理施設 添付書類「V-別添1-3 竜巻防護対策設備の強度計算の方針」
- ・再処理施設 添付書類「V-別添1-4 竜巻防護対策設備の強度計算書」

## 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	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

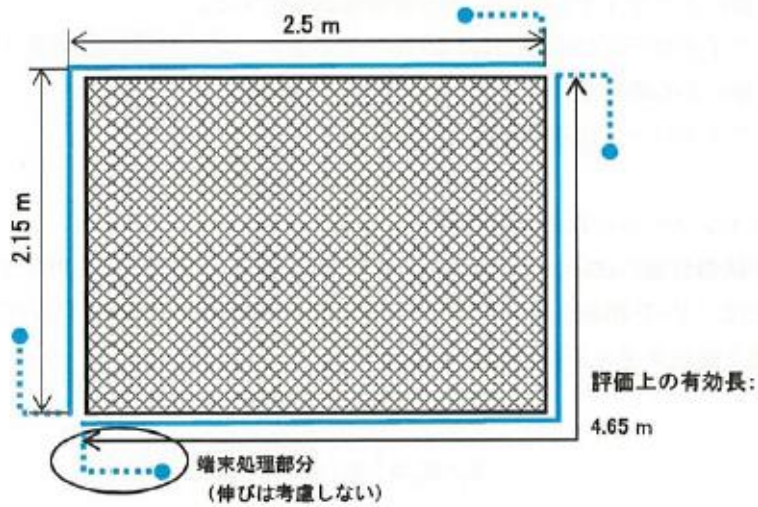


第 2-1 図 試験概要図

第 2-1 表及び第 2-1 図に示す電中研での重錘試験に対し，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。

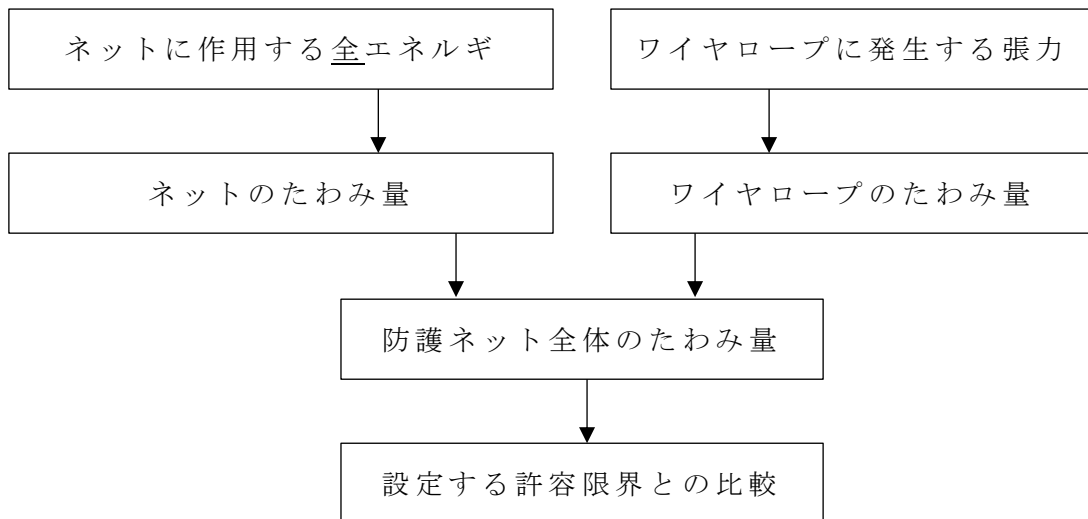
### 3. ワイヤロープたわみ量を考慮したネットシステムのたわみ量

電中研報告書にて報告されている試験体サイズを第 3-1 図に示す。当該試験体の構成(40mm 目合 2 枚+補助ネット)は，飛来物防護ネットの構成(50 mm 目合 2 枚+補助ネット)と同じではないが，電中研試験では飛来物防護ネットと同じ構成(50 mm 目合 2 枚+補助ネット)の試験を実施しており，50 mm 目合のネット，40 mm 目合のネット共に性能確認及び衝撃応答評価法の妥当性を確認できている。



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、添付書類「V-別添1-4-1 飛来物防護ネットの強度計算書」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「V-別添1-4-1 飛来物防護ネットの強度計算書」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 $\delta$ を算出する。ネットのたわみ量 $\delta$ については、添付書類「V-別添1-4-1 飛来物防護ネットの強度計算書」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、

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

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 $\delta$ 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 $\delta$ 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「V-別添1-4-1 飛来物防護ネットの強度計算書」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、

$$F_a' = F_a \times 1.22$$

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「V-別添 1-4-1 飛来物防護ネットの強度計算書」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  $\theta$  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 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、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、

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

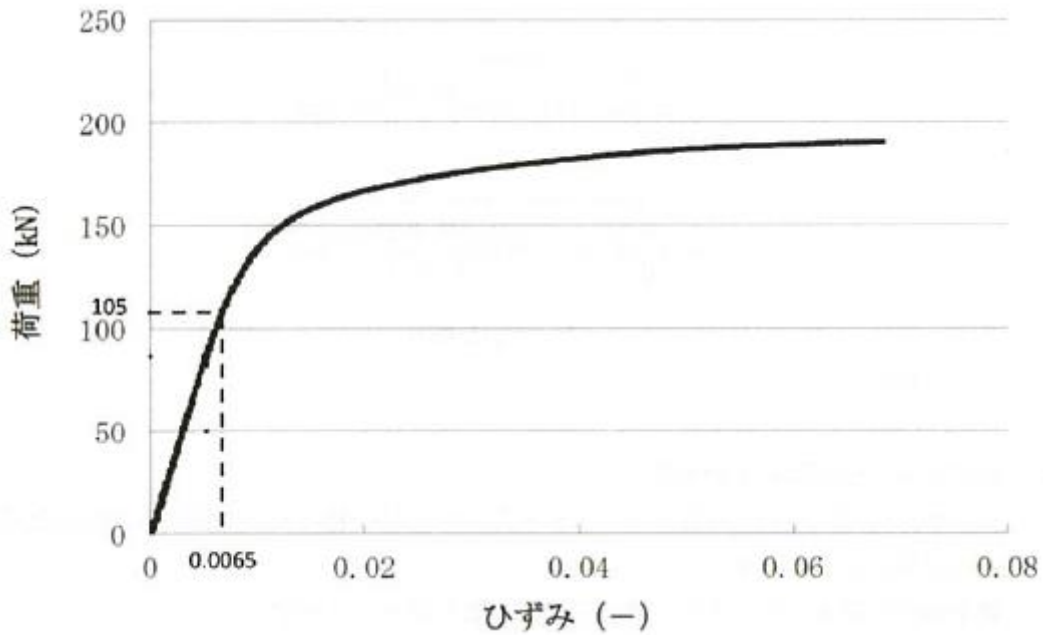
ネット及び補助ネットを支持しているワイヤロープ 1 本あたりの張力は 105kN となる。

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

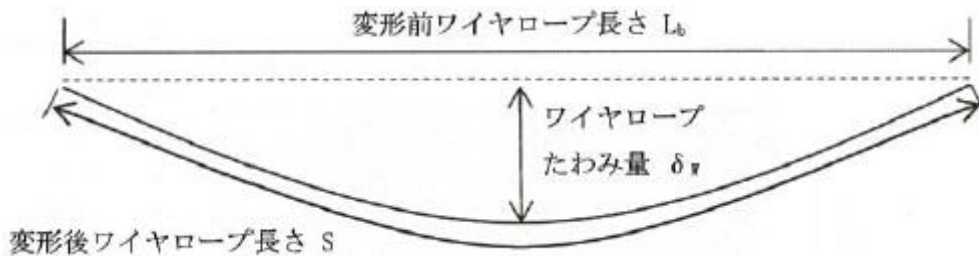


第 3-3 図 ワイヤロープ引張試験結果

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一本あたりの全長  $S_t$  は，ワイヤロープの 1 本あたりの全長 (9.3/2=4.65m) 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上に変形すると第 3-4 図ののとおりとなり，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。



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



第 3-4 図 ワイヤロープ変形図

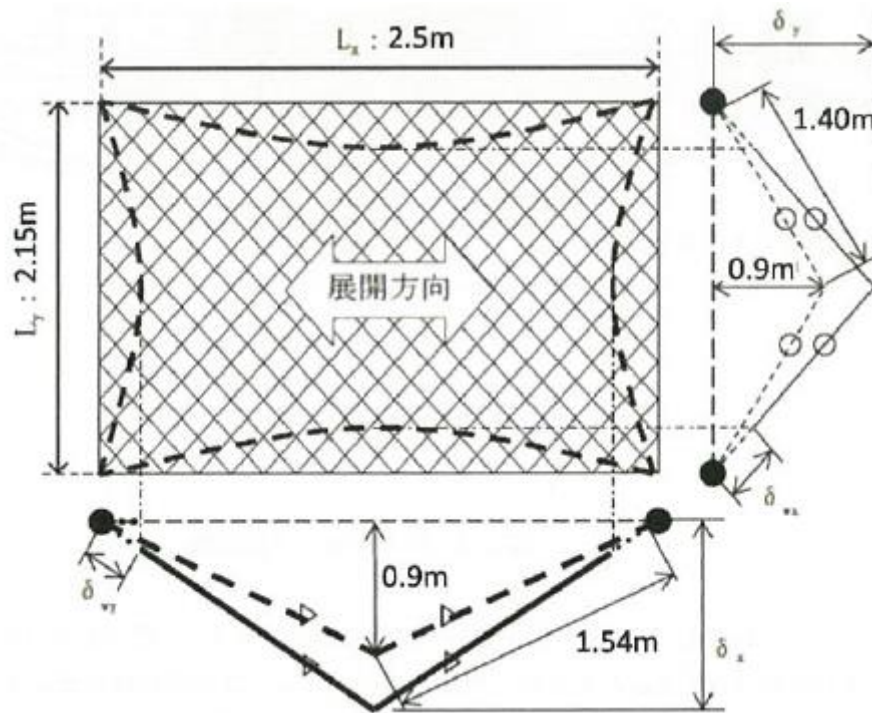
ここで、長さ  $L_x$  (2.5m) のワイヤロープのたわみ量を  $\delta_{wx}$ 、長さ  $L_y$  (2.15m) のワイヤロープのたわみ量を  $\delta_{wy}$  とすると、長さ  $L_x$  のワイヤロープの変形後の長さ  $S_x$  と長さ  $L_y$  のワイヤロープの変形後の長さ  $S_y$  の合計が  $S_t$  となることから、

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

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、第 3-5 図 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。



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  $\delta_x$  及び  $\delta_y$  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， $\delta_x$  及び  $\delta_y$  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 $\delta_{wx}$ 及び $\delta_{wy}$ 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。

試験条件を第4-1表に，また，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※ (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 (補助 1枚)	$\frac{2.5 \times 2.15}{(2.15 \times 2.5)}$	角型鋼管 (先端形状： 250×250× t4.5mm)	1133	中央	9.0	112

注記※：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	ネットシステムのとわみ量	
	計算値 (m)	実測値 (m)
1	1.08	1.04

第4-2表より、ワイヤロープのとわみを含むネットシステムのとわみ量は「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と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だが、ネットサイズおよびワイヤロープの張力に応じた伸び率を評価に取り込んでおり、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

防護ネットのサイズの違いは、ワイヤロープに作用する張力に影響する。そのため、防護ネットのサイズに応じた張力を算出する必要がある。

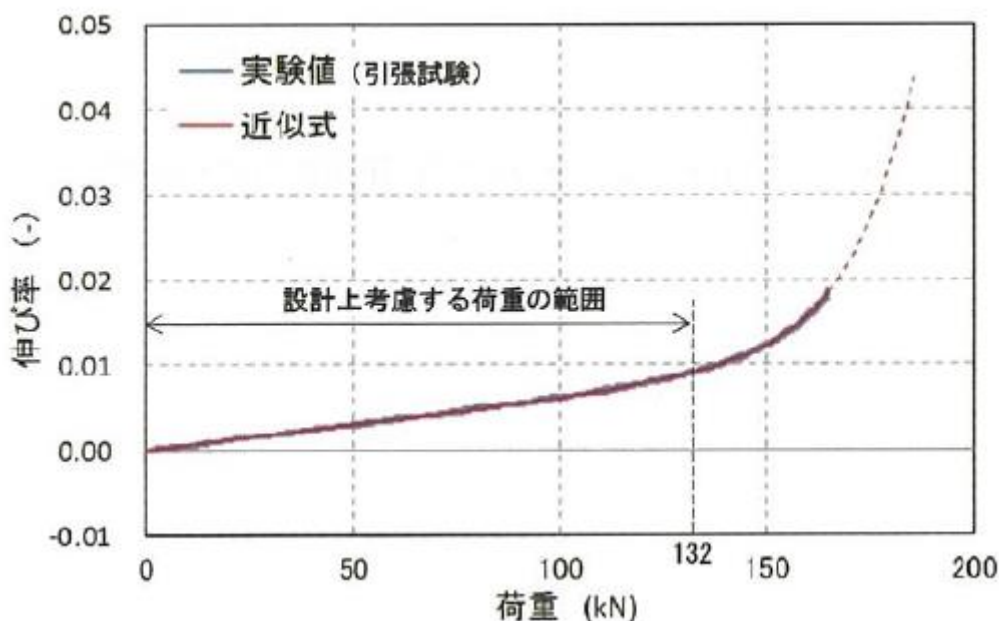
本評価では、防護ネットの評価においては、防護ネットのサイズに応じたワイヤロープの張力を算出していることから、防護ネットのサイズによる違いは評価に反映している。

### 5.2 ワイヤロープ張力

防護ネットのサイズの違いにより、ワイヤロープに作用する張力は異なる。ワイヤロープに作用する張力は、ワイヤロープの伸び率に影響する。そのため、評価においては、ワイヤロープの伸び率をネットサイズに応じたものを採用する必要がある。

本評価では、第5-1図に示すように電中研報告書内に記載されているワイヤロープの荷重-伸び率の近似式を取り込んでいる。そのため、各ワイヤロープの張力に応じた伸びを評価に反映している。

また、電中研報告書に示される多項式による近似式が 132kN 以下の範囲において実験値とよく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)

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