

【公開版】

日本原燃株式会社	
資料番号	外竜巻 13 R0
提出年月日	令和 3 年 2 月 10 日

設工認に係る補足説明資料

【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】

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	8
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	11

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、ワイヤロープのたわみ量を考慮した評価手法と電中研試験結果を比較し、評価手法の妥当性について説明するものである。

本資料は、第1回設工認申請書の安全冷却水B冷却塔 飛来物防護ネット並びに後次回で申請する竜巻防護対策設備の飛来物防護ネットについて補足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

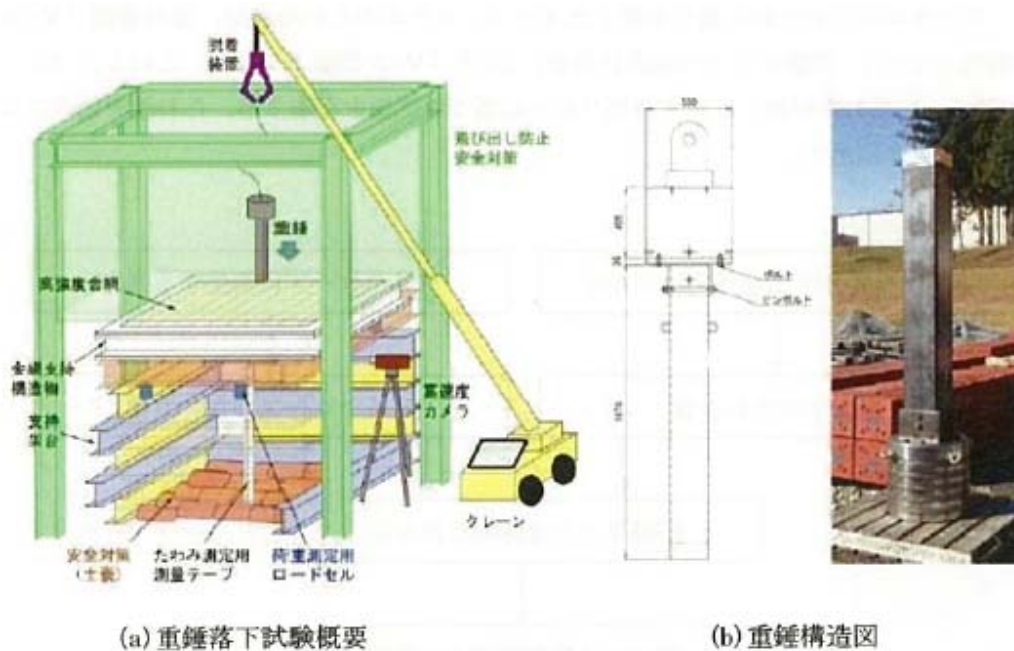


図 2-1 試験概要図

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。当該試験体の構成 (40mm 目合い 2 枚 + 補助ネット) は、飛来物防護ネットの構成 (50 mm 目合い 2 枚 + 補助ネット) と同じではないが、ワイヤロープへの荷重伝達とその変形機構は同一であることから、適用可能であると判断している。

電中研試験では、飛来物防護ネットと同じ構成 (50 mm 目合い 2 枚 + 補助ネット) の試験を実施しており、50 mm 目合の金網、40 mm 目合金網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。

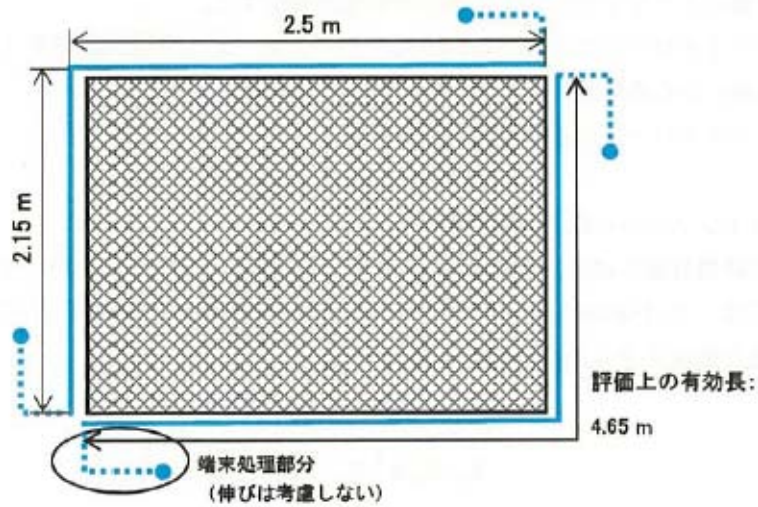


図 3-1 試験体サイズ

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、添付書類「V-別添 1-4-1 飛来物防護ネットの強度計算書 (2)安全冷却水 B 冷却塔 飛来物防護ネットの強度計算書」(以下「V-別添 1-4-1(2)」という。)の「3.1.5(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。

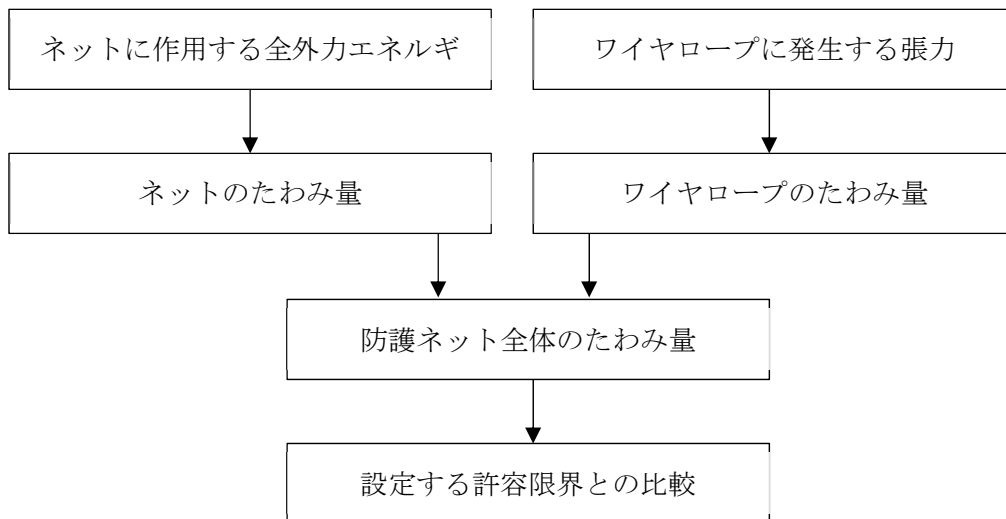


図 3-2 たわみ評価の評価フロー

たわみ評価においては、V-別添 1-4-1(2)の「3.1.5(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-別添 1-4-1(2)の「3.1.5(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。

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

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-別添 1-4-1(2)の「3.1.5 (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-別添 1-4-1(2)の「3.1.5 (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 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, 表 2-1 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,

$$T'_1 = \frac{3}{4(2n+1)} \cdot \frac{F'_a}{\sin \theta}$$

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*

注記 *: JIS G 3549 の破断強度

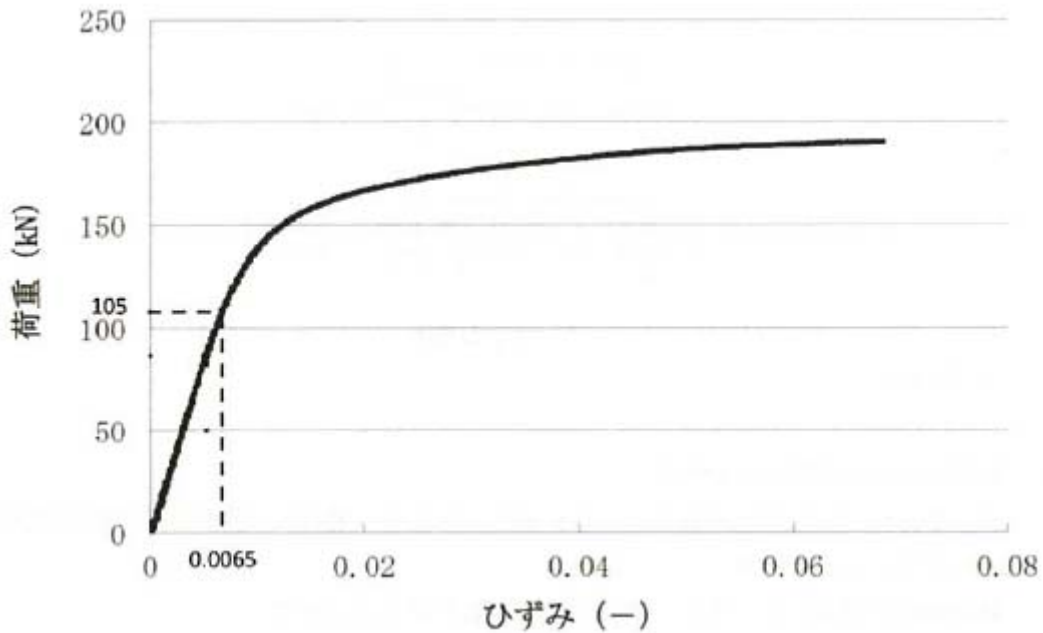
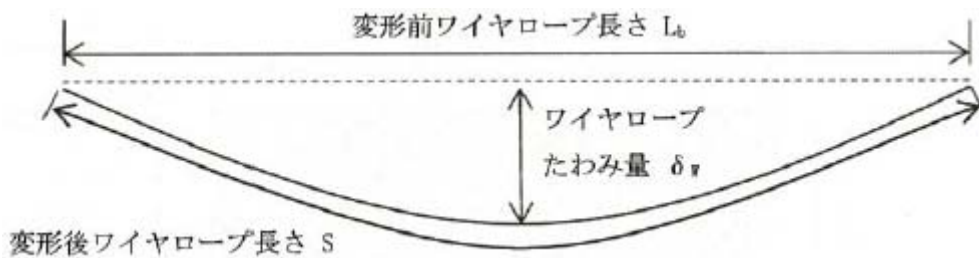


図 3-2 ワイヤロープ引張試験結果

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 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。



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

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、

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

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、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。

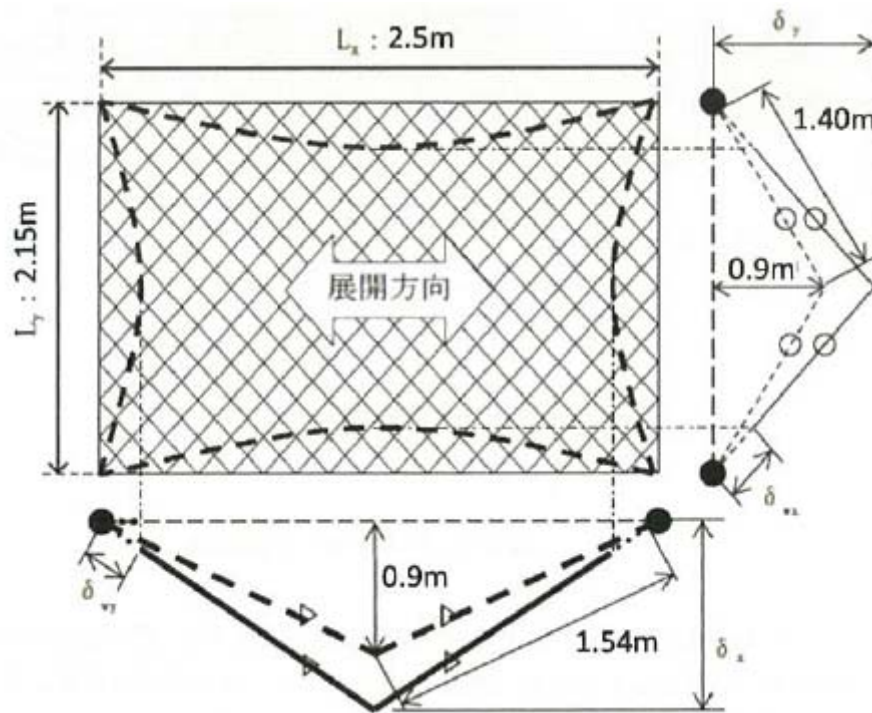


図 3-4 たわみ量の足し合わせ

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

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

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

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	1.04

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。

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 132kN より小さい値となっているが、図 5-1 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 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。

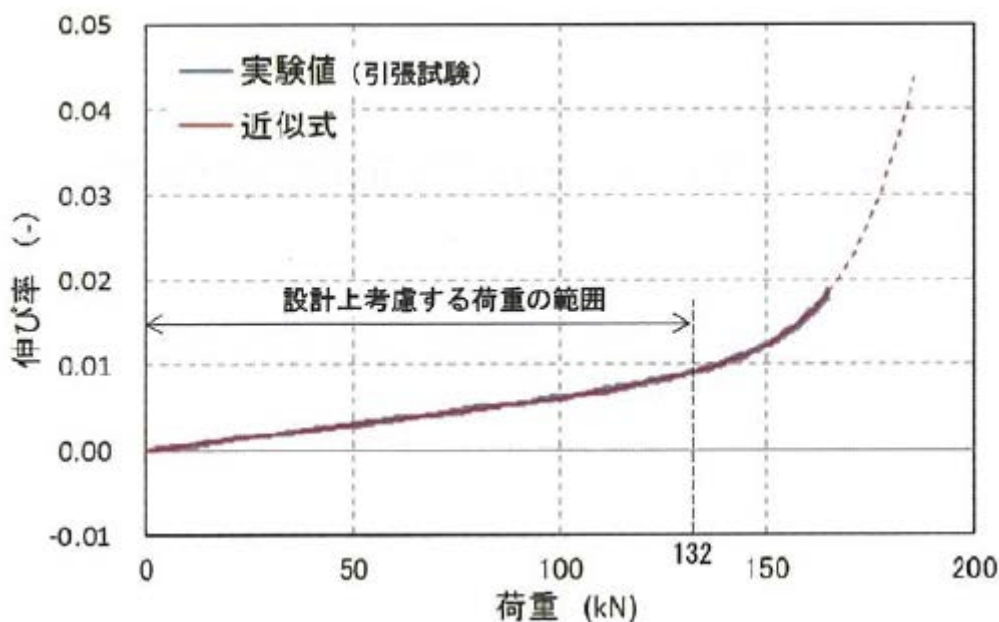


図 5-1 ワイヤロープ引張試験結果(近似式との比較)

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