

竜巻飛来物に対する防護ネットの限界吸収エネルギー算定手法の提案

電力中央研究所 正会員 ○南波 宏介
電力中央研究所 正会員 白井 孝治

1. 背景および目的

竜巻飛来物防護対策の一つとして、竜巻襲来時の風荷重や地震荷重の軽減の観点から、高強度金網を用いた防護ネットの設置が有望とされている。そこで、実規模大の高強度金網試験体に自由落下する重錘を衝突させる自由落下衝突試験を実施することで高強度金網試験体の限界吸収エネルギーを確認し、金網の変形状態から高強度金網の限界吸収エネルギーを算定する簡易な算定手法を提案した。

2. 重錘を用いた自由落下衝突試験

試験に使用した高強度金網は素線径 $\phi 4\text{mm}$ 、素線強度 1400N/mm^2 の亜鉛メッキ鋼線を目合い寸法 50mm で立体的に編み込んだ構造である。図 1 に自由落下衝突試験に使用した試験体の概要図を示す。試験体は $4\text{m} \times 3\text{m}$ サイズの高強度金網二枚の全周をワイヤーロープで支持した構造である。また、試験体の隅角部にはワイヤー張力低減のための緩衝構造を組み込んだ。試験では試験体中央に自由落下する重錘（直径 0.5m 、質量 1500kg ）を衝突させ、高速度カメラを用いて金網の変形状態を、ひずみゲージ付きターンバックルを用いてワイヤーロープ張力を、試験体下面に設置したロードセルを用いて衝撃荷重を測定した。表 1 に自由落下衝突試験の試験条件と試験結果の一覧を示す。試験は、落下高さを 17m 、 15.4m として各 2 回ずつ実施した。落下高さを 17m とした試験ケース 2 において、重錘は二枚の金網を貫通する結果となったが、その他の 3 回の試験では、試験体は重錘を捕捉している。図 2 に試験ケース 4 の結果を示す。試験ケース 4 では 1 枚目金網は破断したが、いずれのワイヤーロープにも破断なく、重錘は完全に捕捉された。衝突前後の画像解析より、最大変位 1.73m を得た。

以上の結果から、 $4\text{m} \times 3\text{m}$ サイズの二重高強度金網試験体は重錘の落下高さと最大変位を合計した位置エネルギー（総エネルギー）を満足する吸収エネルギー性能を有することが明らかとなった。

3. 限界吸収エネルギー算定手法の提案

金網の作用力と張力の釣り合い式から金網の限界変位に達するまでのたわみ量と作用力の関係を求め、金網の吸収可能エネルギーを算定する。図 3 に、金網の交点

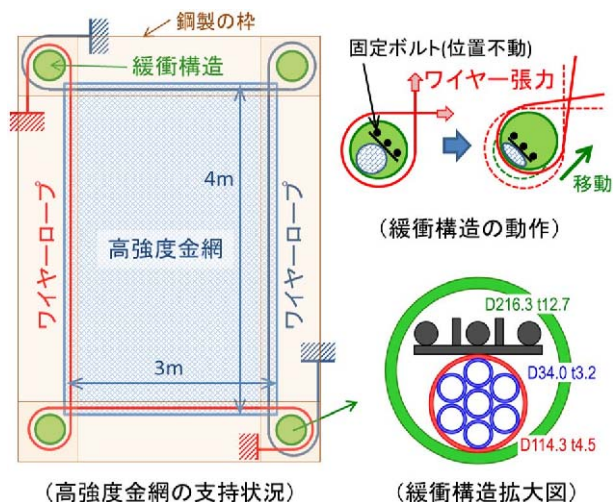
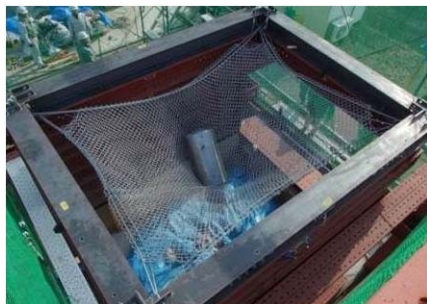


図 1 試験体概要図

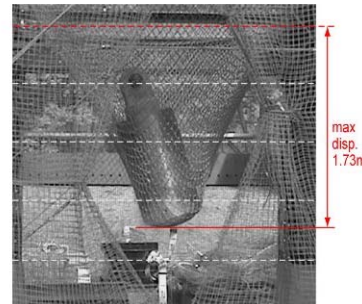
表 1 試験条件および試験結果一覧

試験 ケース	落下 高さ(m)	最大変位 測定値(m)	総エネ ルギー(kJ)	試験 結果
ケース 1	17.0	1.91	278	貫通無 ¹⁾
ケース 2	17.0	1.79 ²⁾	276	貫通
ケース 3	15.4	2.10	257	貫通無 ³⁾
ケース 4	15.4	1.73	252	貫通無 ⁴⁾

- 1) 一枚目金網と二枚目支持ワイヤーが破断
2) 金網破断時の変形量
3) 一枚目金網と支持ワイヤーが一部破断
4) 一枚目金網破断



(試験後試験体状況)



(金網の最大変形状況)

図 2 試験ケース 4 の試験結果

キーワード 竜巻防護設備、竜巻飛来物、防護ネット、耐衝撃性能、貫通

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 TEL 04-7182-1181

引張試験による1目合い(1交点)の荷重と伸びの関係を示す。また、表2に金網の限界吸収エネルギーの算定に必要な諸元を示す。金網は主に素線の網合わせ方向(展開方向)で荷重を受けるため、吸収エネルギーの算定では、金網を展開直角方向に長さ L_x の単位目合いが $N_y (=L_y/N)$ 列、並列して存在すると仮定する。ここで、金網展開方向の目合い数を $N_x (=L_x/N)$ とすると、金網展開方向の剛性は $K_x=K/N_x$ となる。図4に示した作用力と張力の関係から、i列目単位目合いの作用力と金網のたわみの関係は、式(1)で表される。

$$F_i = 2K_x x_i \cdot \sin \theta_i = 2K_x h_i (\tan \theta_i - \sin \theta_i) = 4K_x \delta_i (1 - h / \sqrt{4\delta_i^2 + h^2}) \quad (1)$$

i列目の金網の吸収エネルギーは式(1)を積分し、式(2)で表示される。

$$E_i = \int F_i d\delta = \int 4K_x \delta_i (1 - h / \sqrt{4\delta_i^2 + h^2}) d\delta = 2K_x \delta_i^2 - K_x h_i (\sqrt{4\delta_i^2 + h^2} - h) \quad (2)$$

したがって、金網の総吸収エネルギーは式(3)で得られる。

$$E = \sum_{i=1}^{N_y} E_i \quad (3)$$

自由落下衝突試験で使用した試験体は展開長さ 4m×展開直角長さ 3m の金網1枚と展開長さ 3m×展開直角長さ 4m の金網1枚を使用しているため、各々の吸収エネルギーの合計が金網の限界吸収エネルギーである。図5に、試験体中央に重錘の衝突を受ける展開長さ 4m×展開直角長さ 3m の金網の目合い変位分布と吸収エネルギー分布を示す。重錘衝突点の目合いは破断変位 20mm まで開ききると仮定し、最大変位 δ_{max} は 1.61m となる。重錘直径 (0.5m) から接触目合数を6目合とし、展開直角方向に二等辺三角形状に変位が分布すると仮定する。表2の算定諸元ならびに式(1)～式(3)を用いて吸収エネルギーを算定すると 112.6kJ となる。同様に、展開長さ 3m×展開直角長さ 4m の吸収エネルギーは 103.7kJ となる。また、試験体の緩衝構造の吸収エネルギーは 38.5kJ であることから、試験体全体の吸収エネルギーは、これらの合計値 ($E_{Design}=254.8kJ$) となる。

図6に、自由落下衝突試験における試験体の算定値 E_{Design} と衝突エネルギー E_{Drop} の比較を示す。なお、試験の衝突エネルギー E_{Drop} は落下高さと最大変形量を合わせた位置エネルギーとした。塗りつぶしの記号は貫通を表すが、 E_{Design} を下回る領域では貫通は発生しておらず、算定手法の有効性が示唆されている。

4. まとめ

自由落下衝突試験より、4m×3m サイズの二重高強度金網試験体は「竜巻影響評価ガイド」¹⁾に設計飛来物として例示されている鋼製材の質量 (135kg) と最大水平速度 (57m/s) から算出される運動エネルギー (219kJ) を満足する吸収エネルギー性能を有することが明らかとなった。また、金網の変形形状から高強度金網の限界吸収エネルギーを算定する簡易な手法を提案し、算定値と試験結果を比較することでその妥当性を確認し、有効な手段であることを示した。

参考文献

- 1) 原子力発電所の竜巻影響評価ガイド、原子力規制委員会、2013.6

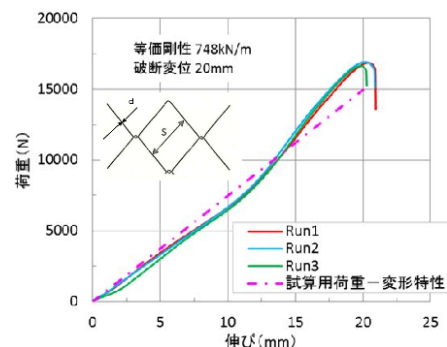


図3 金網1目合いの荷重-伸び関係

表2 吸収エネルギー算定に用いる諸元

金網目合い寸法 S	50mm
素線直径 d	4mm
素線強度	1400N/mm ²
目合い対角距離	71mm
1m 当たりの目合い数 N	14 個
交点破断強度	15kN
交点破断変位	20mm
等価剛性 K	748kN/m
破断時たわみ角	38.8deg

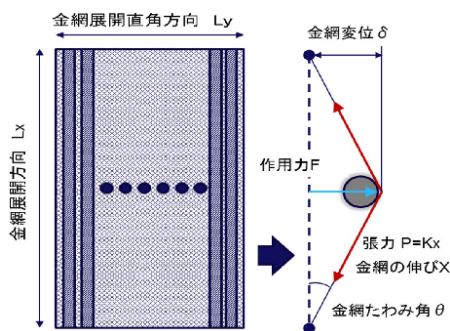


図4 吸収エネルギー算定モデル

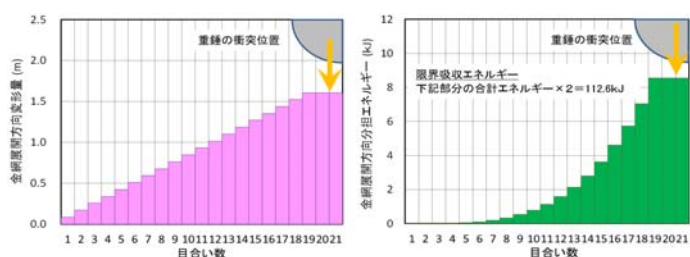


図5 4m×3m 金網の吸収エネルギー

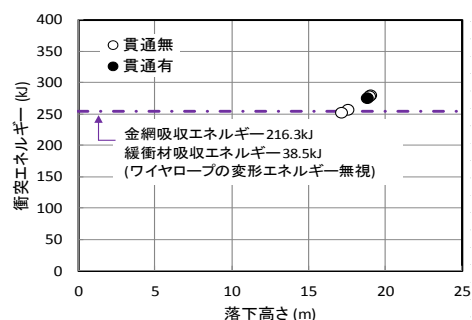


図6 算定値 E_{Design} と衝突エネルギー E_{Drop} の比較