

## 高強度金網を用いた竜巻防護設備の耐衝撃性評価

Evaluation on impact resistant performance of tornado missile protection net structure

白井 孝治\*, 南波 宏介\*\*  
Koji Shirai, Kosuke Namba

\* 工博, 副研究参事 (一財) 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

\*\* 工博, 主任研究員 (一財) 電力中央研究所 地球工学研究所 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

*Key Words: Tornado Protection Structure, Tornado Missile, Protection Net, Impact Resistant Performance*

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

### 1. はじめに

原子力規制委員会<sup>1)</sup>は, 外部からの衝撃による損傷の防止として, 安全施設は, 想定される自然現象(地震及び津波を除く)が発生した場合においても安全機能を損なわないものでなければならないとしており, 敷地周辺の自然環境を基に想定される自然現象の一つとして, 竜巻の影響を挙げ, 平成 25 年 6 月に原子力発電所の竜巻影響評価ガイド<sup>2)</sup>を定め, 事業者に対し, 竜巻影響評価と竜巻防護対策の実施を求めている。

電気事業では, 原子力発電所における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が可能な防護ネットが有望であり, 適切なネット材料の選定や吸収エネルギーの算定方法, ネット設置工法の仕様の決定が喫緊の課題となっている。

表1に, 竜巻影響評価ガイド<sup>2)</sup>に例示されている2種類の竜巻飛来物(鋼製パイプと鋼製材)の仕様および衝突速度の算定例を示す。鋼製パイプの場合, 最大水平速度 49m/s および最大鉛直速度 33m/s である。飛来物の衝突方向は竜巻防護施設にとって安全側の設計になるように設定することが求められており, 飛来物断面が衝突面となる衝突姿勢を想定することになる。

本研究では, 重錘の自由落下衝突による高強度金網を用いた実規模大のネット構造物のエネルギー吸収性能試

験, 小口径の飛来物貫通試験を実施した。これらの試験結果より, 耐衝撃性能に富む高強度金網の衝撃特性を評価すると共に, 所定の耐衝撃性能が得られる設置工法や設計時に利用可能な簡便な吸収エネルギー算定手法を提案した<sup>3)</sup>。

### 2. 重錘による自由落下衝突試験

#### 2.1 自由落下衝突試験概要

図1および図2に, 重錘を用いた自由落下衝突試験の概要と重錘の構造を示す。自由落下衝突試験では, H 形鋼をロの字に組み上げた支持架台上に, 寸法 3m×4m の高強度金網を取り付けた H300 形鋼製の 3.5m×4.5m の金網支持構造物を固定し, クレーンで吊り上げた重錘(直径 0.5m, 質量 1500kg)を脱着装置により自由落下させた。また, 重錘が試験体を貫通した場合を想定し, 試験体の下に土嚢を敷設した。さらに, 衝突後の重錘が周囲に飛び出さないように飛散防護ネットを設置した。



図1 重錘を用いた自由落下衝突試験の概要

表1 竜巻飛来物の想定条件

想定飛来物	寸法	質量	最大水平速度	最大鉛直速度
鋼製パイプ	長さ 2m×直径 5cm	8.4kg	49m/s	33m/s
鋼製材	長さ 4.2m×幅 0.3m×奥行 0.2m	135kg	57m/s	38m/s

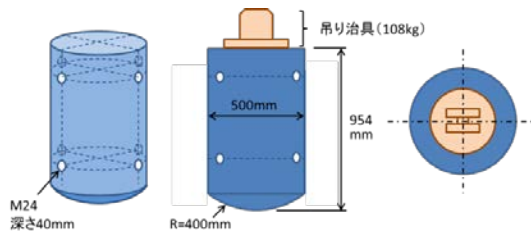


図2 重錘の形状・寸法

## 2.2 高強度金網試験体

図3に、金網試験体の概要を示す。試験体は、3m×4m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。試験に使用した高強度金網は、素線径φ4mm、素線強度1400N/mm<sup>2</sup>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。また、ワイヤー張力低減と試験体全体の吸収エネルギー性能の向上のため、試験体の隅角部4か所に鋼製の緩衝構造体を組み込んだ。

鋼製の緩衝構造体の吸収エネルギー性能は、衝撃応答解析コードLS-DYNAを用いて評価した。解析では緩衝構造を厚さ10mm、1/2モデルとしてモデル化し、荷重を外径保持管外周面に入力した。図4に、仮想的に1/1モデルとして表示した緩衝構造解析モデルの初期形状と最大変形時の変形状態を示す。荷重を受ける外径保持管が前方に移動し、内部の緩衝鋼管を圧縮変形させエネルギーを吸収する仕組みである。緩衝鋼管は複数の円柱鋼管を組み合わせた構造であり、圧縮荷重を受ける緩衝鋼管は、初期段階ではアーチ効果により強い抵抗力を示すが、変形が進行して内部への変形が発生すると剛性が低下するため、高ひずみ時にも急激な荷重の増加を抑えることが期待できる。緩衝鋼管の厚さは吸収エネルギー量が徐々に増加し、最終変形時に鋼管が内側に变形するように決定した。

図5に、緩衝構造の作用荷重・吸収エネルギー量と変形量の関係を示す。作用荷重・吸収エネルギー量は、緩衝

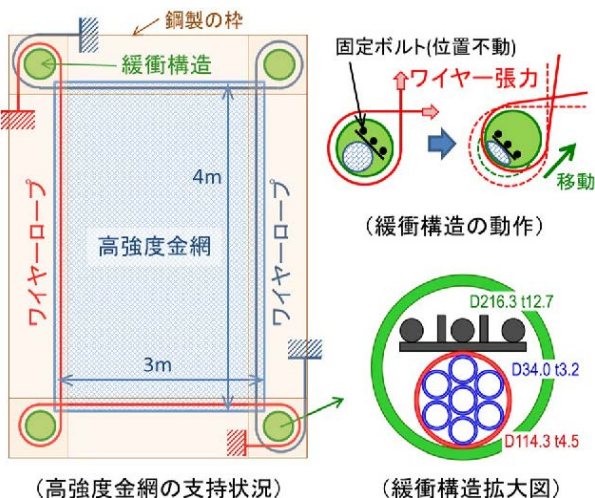


図3 金網試験体の概要

衝鋼管の変形と共に緩やかに増加しており、変形量70mm時点の吸収エネルギー量は0.37kJである。これより、実規模大試験体で使用する緩衝構造を同一断面形状、高さ130mmとすると、緩衝構造1体の吸収エネルギー量は9.62kJとなる。また、緩衝構造の変形により、緩衝構造に荷重を伝達するワイヤーロープに適度な緩みが発生し、急激な張力増加の緩和効果も期待できる。

## 2.3 試験結果

試験では、所定の高さから、金網試験体中央に重錘を自由落下衝突させた。試験時には、高速度カメラを用いて金網の変形状態を、図6に示す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、金網支持構造物下面と支持架台上面間に設置したロードセルを用いて衝撃荷重を測定した。なお、ワイヤーロープの初期張力は、ターンバックル締め付け時のトルク管理値(20N・m)で導入した。

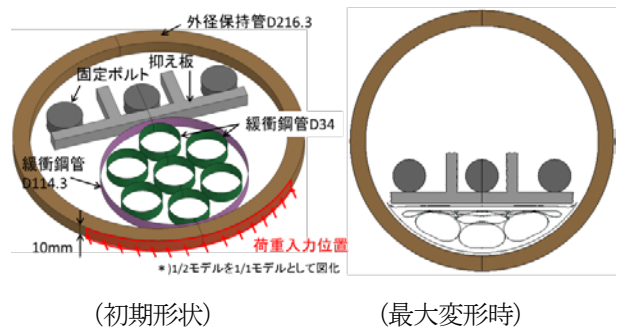


図4 緩衝構造解析モデル

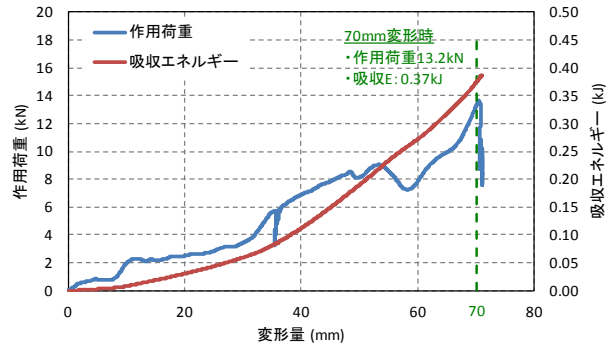


図5 作用荷重・吸収エネルギー量－変形量関係



図6 ターンバックルでの張力測定

表2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する結果となった。

図7に、試験ケース4の試験結果を示す。試験ケース4では1枚目金網は破断したものの、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。これより、隅角部に緩衝体を適用した4m×3mサイズの二重高強度金網試験体の吸収エネルギー性能として、重錘の落下高ささと最大変位を合計した位置エネルギーに相当する250kJ以上を有することが明らかとなった。

また、ワイヤーロープの張力は偏在なく均等に発生しており、最大張力は約90kNで破断荷重165kNを下回っている。また、最大衝撃力は約540kNであった。最大衝撃力発生時に金網の最大応答変位が発生したと仮定すると、たわみ角 $\theta$ は $\tan^{-1}(1.73/2.0)=40.9\text{deg}$ となり、金網展開方向の張力合計は、 $540\text{kN}/\sin(40.9\text{deg})=825\text{kN}$ となる。2枚の金網試験体はそれぞれ2本のワイヤーで支持されており、ワイヤー1本当当たりの張力は $825\text{kN}/8=103\text{kN}$ となり、ほぼ試験結果と符合する。これより、ワイヤーロープに発生する張力も、衝撃荷重から算定可能となる。

表2 自由落下衝突試験の一覧

試験ケース	落下高さ	最大変位測定値	総エネルギー	試験結果
ケース1	17.0m	1.91m	278kJ	○ <sup>1)</sup>
ケース2	17.0m	1.79m <sup>2)</sup>	276kJ	×
ケース3	15.4m	2.1 m	257kJ	○ <sup>3)</sup>
ケース4	15.4m	1.73m	252kJ	○ <sup>4)</sup>

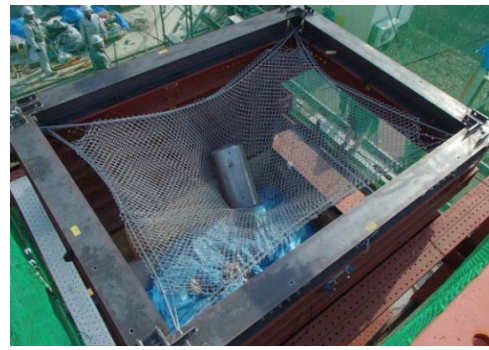
○：貫通せず，×：貫通

- 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

### 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9に、金網の交点引張試験による1目合い(1交点)の荷重と伸びの関係を示す。また、表3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

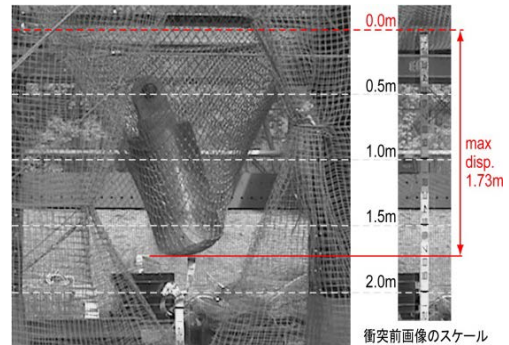


(試験後試験体)

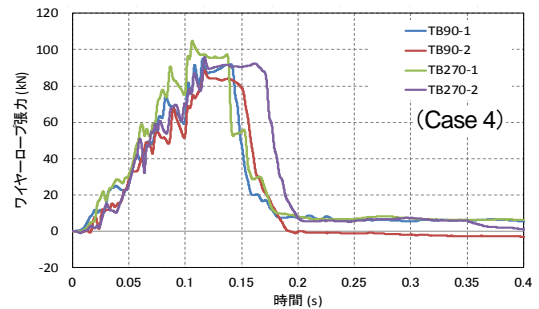


(試験前緩衝構造)

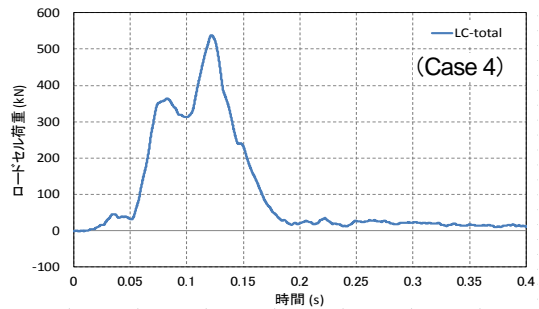
(試験後緩衝構造)



(金網の最大変形状況)



(ワイヤーロープ張力)



(ロードセル荷重合計)

図7 試験結果 (ケース4)

$L_x$ 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9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.

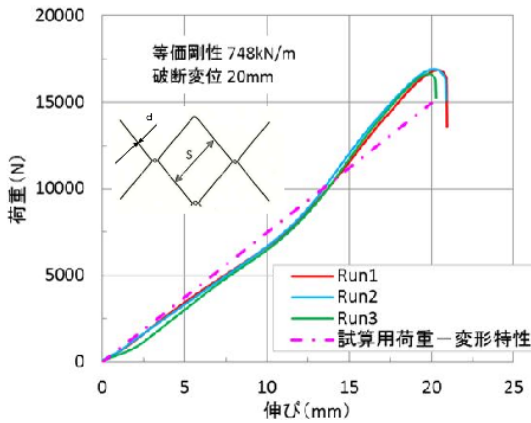


図8 金網1目合いの荷重-伸び関係

表3 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 <sup>2</sup>
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

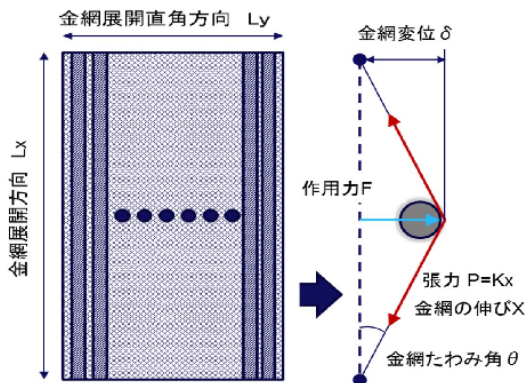


図9 吸収エネルギー算定モデル

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

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となる.

図10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 までの伸びを仮定すると, 最大変位  $\delta_{max}$  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形状に変位が分布すると仮定する. 表3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11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る.

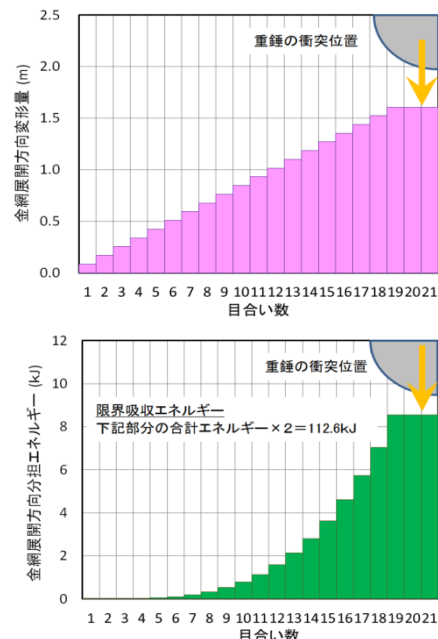


図10 4m × 3m 金網の吸収エネルギー

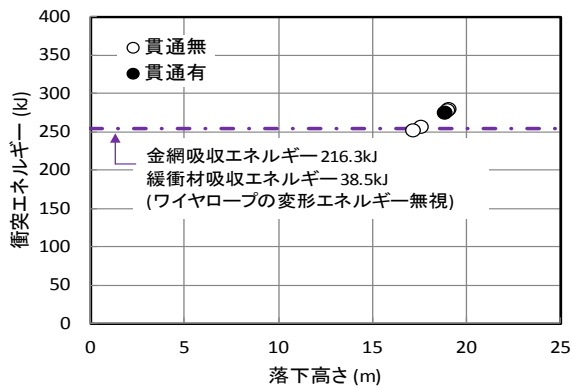


図 11 算定値 $E_{Design}$ と衝突エネルギー $E_{Drop}$ の比較

#### 4. 耐貫通性能確認試験

鋼製パイプをはじめとする小口径の飛来物が高強度金網へ衝突した場合、飛来物の目合いのすり抜けを防止し、飛来物を捕捉することを確認する必要がある。このため、高強度金網に対し、高強度金網の目合い寸法と同程度の直径 60mm の鋼製飛来物を衝突させる耐貫通性能確認試験（以下、貫通試験）を実施した。

##### 4.1 高強度金網試験体

貫通試験に使用した試験体は、自由落下衝突試験で用いた金網試験体と同一であり、H300 形鋼を用いた 3.5m×4.5m のネット支持構造物に 3m×4m の高強度金網 2 枚をワイヤーロープで固定した。図 12 に、高強度金網の目合い状況を示す。1 枚目と 2 枚目の金網を半目合いずらし、飛来物のすり抜けを防止する。金網を支持するワイヤーロープの初期張力は、ロープ端部のターンバックル締め付け時のトルク管理値 (20N・m) で導入した。



図 12 高強度金網の目合い状況

##### 4.2 試験方法

図 13 に、貫通試験の概要を示す。試験では縦置きした試験体に、火薬の推力で飛翔する鋼製の飛来物を水平方向から衝突させた。

試験設備はランチャー、支持架台から構成され、試験時に飛散物が発生する場合を考慮し、試験設備を射だ（トンネル）内に設置した。ランチャーは飛来物を所定の衝突位置に誘導するための軌道として設置され、その全長は飛来物が目標衝突速度に達するために必要な加速距離を確保するため、9m（飛来物滑走区間 7m、飛来物設置区間 2m）とした。支持架台は衝撃荷重を受ける試験体を地表面から浮かせた状態で支持する設備であり、コンクリート基礎上に、堅固なアンカーを介して固定した。支持架台には PC 鋼棒を用いて衝突荷重測定用のロードセルを設置した。また、衝突直後に試験体にリバウンドの発生に伴う引張力が発生することを考慮して PC 鋼棒にはプレストレス荷重 0.15MN を付与した。

図 14 に、小口径飛来物の形状と概況を示す。小口径飛来物は内部に推進薬を有する鋼製円柱体であり、質量は 8.5kg（推進薬を含まず）、外形は直径 60mm、全長

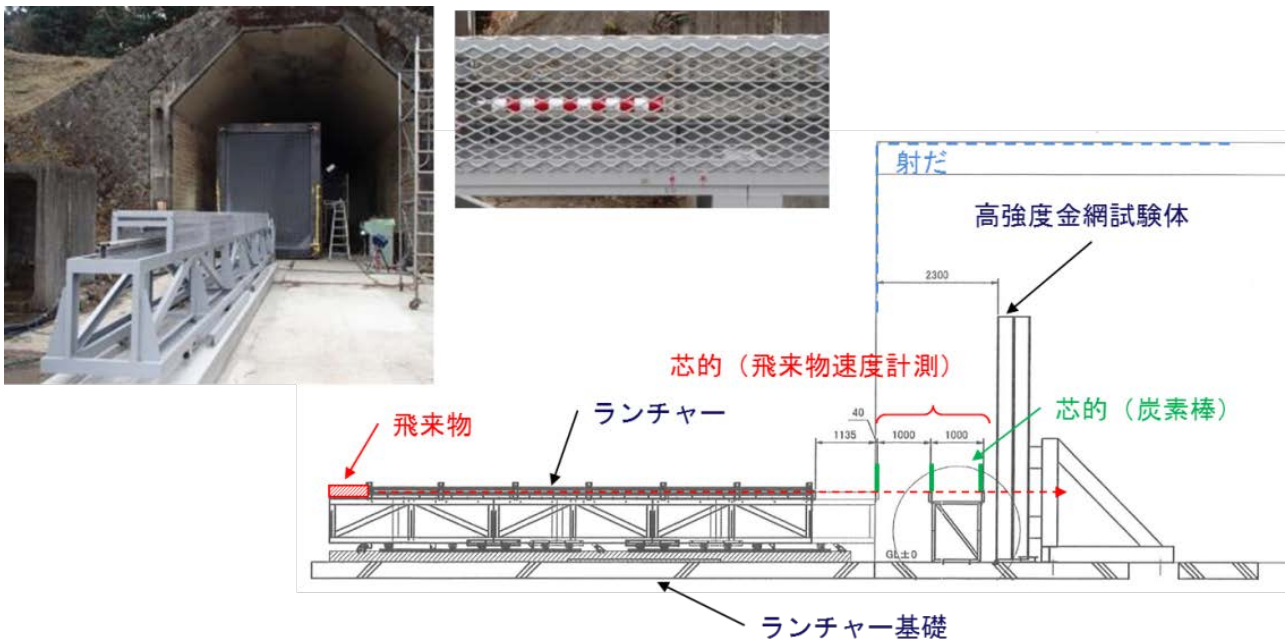


図 13 貫通試験の概要

612mm であり、鋼製パイプを模擬して先端部を厚さ 4mm のパイプ状とした。

### 4.3 試験結果

図 15 に、飛来物の衝突位置を示す。試験では想定飛来物を鋼製パイプとし、目標衝突速度を鋼製パイプの想定条件（表 1）の最大水平速度と最大鉛直速度の合成速度 59.1m/s を切り上げ保守的に 60m/s とした。また、試験体衝突位置を試験体中央から展開方向に 1m 鉛直移動したオフセットの位置とした。試験は同一条件で 2 回実施し、再現性を確認した。

表 4 に、貫通試験の結果のまとめを示す。芯的より測定された実測衝突速度は、ほぼ所定の目標速度を満足し、いずれの試験でも飛来物の貫通は発生していない。

図 16 に、試験ケース 5 において、高速度カメラで撮影した飛来物衝突状況を示す。飛来物は所定のオフセット位置に衝突し、衝突点で接触する金網素線を伸ばさせながら、同時に広範囲の金網にも変形を与える様子が見られる。飛来物は、金網を局部的に変形させた後、最大変位に達する時点（金網接触後 44.8ms 経過後）で回転しながらリバウンド（金網の最大変形量は 0.75m）しており、金網の素線の破断もなく貫通しない結果となった。

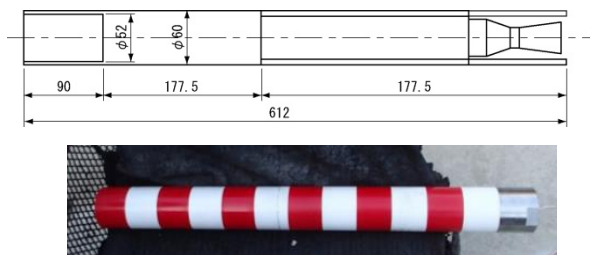


図 14 小口径飛来物の形状および概況

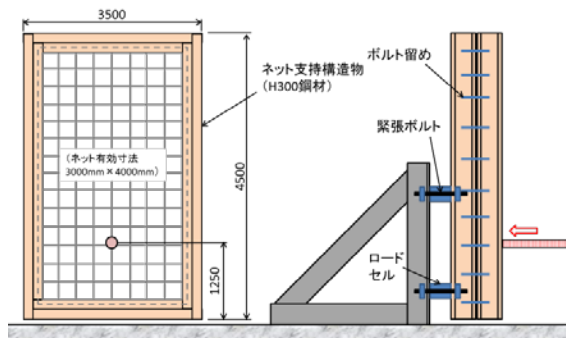
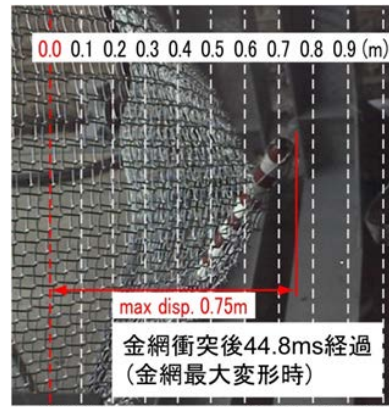


図 15 貫通試験での飛来物衝突位置

表 4 貫通試験結果一覧

試験ケース	ケース 5	ケース 6
実測衝突速度	60.3 m/s	59.5 m/s
衝突エネルギー	15.5 kJ	15.0 kJ
金網最大変形量	0.75m	0.74m
最大ワイヤー張力	11 kN	14 kN
最大衝撃荷重	26.5 kN	24.4 kN



\* 衝突前画像のスケールに基づき点線を追記

図 16 飛来物の衝突状況（試験ケース 5）

### 5. 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」<sup>1)</sup>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便な手法を提案し、算定値と試験結果を比較することによりその妥当性を確認し、有効な設計手法であることを示した。

さらに、高強度金網の目合い寸法と同程度の衝突径の飛来物に対する高強度金網の耐貫通性能を確認するため、4m×3mサイズの2枚の高強度金網を半目合いずらして取り付けられた試験体に衝突径 60mm の鋼製パイプ飛来物を高速（60m/s）で衝突させる試験を実施した。その結果、高強度金網は飛来物を捕捉し、耐貫通性能に優れることを示した。

### 謝辞

金網試験体製作におきましては東京製網(株)橋口寛史、高森 潔様、試験計測におきましてはエンター電子工業(株)加藤政志様、高速飛来物衝突試験におきましては旭化成ケミカルズ・久土試験場の方々にご多大なご助力を賜りました。ここに、厚くお礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 原子力規制委員会，“実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則の解釈”，平成 25 年 6 月 19 日，原規技発第 1306193 号。
- 2) 原子力規制委員会，“原子力発電所の竜巻影響評価ガイド”，平成 25 年 6 月 19 日，原規技発第 13061911 号。
- 3) 南波宏介 白井 孝治，“竜巻飛来物に対する防護ネットの評価手法と対策工法の提案”，電中研報告，N13017，H26 年 3 月。