

## 高速飛来物バリアの開発

Development of the Barrier against high speed flying object

梅沢広幸\*, 澤田梨沙\*, 鈴木利治\*, 筒井喜平\*\*

Hiroyuki Umezawa, Risa Sawada, Toshiharu Suzuki, Kihei Tsutsui

\*東亜グラウト工業株式会社 (〒160-0004 東京都新宿区四谷 2 丁目 10 番地 3 TMS ビル)

\*\*株式会社ランスモア (〒144-0052 東京都大田区蒲田 5 丁目 41 番 3 号 蒲田エム・アンド・エム 2 ビル 3F)

*Key Words: ( high speed flying object, full scale test, finite element method, Ring net)*

キーワード: 高速飛来物, 実物大実験, 有限要素法, リングネット

### 1. はじめに

原子力発電所の再稼働に必要な条件の一つとして、竜巻による高速飛来物（以下、「飛来物」という。）の衝突に対して施設が安全であることが、「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」<sup>1)</sup>（以下、「ガイド」という。）に挙げられている。想定される飛来物は形状・質量が様々である上、高速度を有することから、衝突時の運動エネルギーを吸収できることに加えて、貫通に対して強靱で粘り強い構造が求められる。また、既存建築物に設ける場合があることを考慮すると、耐震性の観点からできる限り軽量かつ単純な構造が求められる。このような背景から、国内で多くの施工実績がある高エネルギー吸収型落石防護柵であるリングネット落石防護柵の技術に応用した防護ネット（以下、「高速飛来物バリア」という。）を開発した。

本報は、高速飛来物バリアの実物大実験結果および実験再現解析結果を示すとともに、これらの結果に基づき原子力発電所の重要施設を飛来物から防護できる実用可能なモデル（以下「実用モデル」という。）の基本構造を提案するものである。

### 2. 落石防護柵の技術確立経緯および飛来物への応用

#### 2.1. 落石防護柵の技術確立経緯

高エネルギー吸収型落石防護柵は、衝撃作用時に大きな変形を許容することで大きな衝撃エネルギーを吸収する特徴を持ち、スイス連邦や EU 諸国において実物大実験に基づく性能照査型設計基準が確立されている。リングネット落石防護柵は、スイス連邦の認証試験方法<sup>2)3)</sup>（以下、「スイスガイドライン」という。）に基づいて構造決定された防護柵であり、以下の特徴を有する。

- ① 弾性変形部材と塑性変形部材を組み合わせ、維持管理性能を向上させるため塑性変形部材は単独で交換できるように配置している。
- ② 国内での施工実績が多く（約 900 件）、最大 3,000kJ の落石捕捉が可能である。
- ③ 信頼性確保のため実物大実験による性能照査を行い、スイス連邦の研究機関である WSL (The Swiss federal institute for forest snow and landscape research)（以下、「WSL」という。）による技術認証を受けている。
- ④ 主なエネルギー吸収部材は高強度鋼線をリング状に編んだリングネット、ワイヤロープに接続するブレーキリングであり、落石衝突時に部材に発生する力は部材の変形により軽減され、最終的には地盤に設置するアンカーで抵抗する構造となっている。

スイスガイドラインでは、柵への衝突速度が 25m/s となるように試験体を垂直に落下させ、①無保守を前提とした複数の小落石に対する衝撃試験、②柵の維持管理の容易性を判断するための公称能力の 50%エネルギー試験、

③公称能力を検証するための 100%エネルギー試験の 3 段階で実施される。写真-1 は実験場の全景、およびリングネット落石防護柵（落石エネルギー E=3,000kJ 対応）の 100%エネルギー試験状況である。



写真-1 落石防護柵実験場および実験状況（落石エネルギー E=3,000kJ）

リングネット落石防護柵を日本へ導入するにあたっては、様々な落石衝突状況を想定し、支柱への落石直撃実験、支柱損傷後の追加落石衝突実験、山側控えロープへの落石衝突実験等を東京都西多摩郡で実施し、柵の安全性を検証している。

## 2.2. 飛来物への応用

飛来物に対する防護工の設計基準は現在のところ日本において整備されていないため、高速飛来物バリアの開発にあたっては高エネルギー吸収型落石防護柵の性能照査型設計基準を参考とすることとした。

表-1 に、ガイドに例示されている設計飛来物の条件を示す。ガイドによると、飛来物は鋼製パイプ、鋼製材等、細長い形状が想定されている。飛来物防護と落石防護との主な相違点としては、

- ① 最も危険と考えられる衝突として、飛来物が長手方向に防護工に対して直角に衝突した場合、落石と比べ防護工への接触面積が著しく小さいこと。
- ② 落石の衝突速度は 25m/s 程度であるが、飛来物の場合、鋼製材の水平最大衝突速度が 57m/s と著しく大きいこと。
- ③ 防護工の重要度が高いこと。
- ④ 基本となるネットの支持構造が、落石防護柵の場合は支柱と地盤に打設するアンカーであることにに対し、飛来物防護の場合は鉄骨構造が想定されること。

が挙げられる。

落石防護と同様、飛来物防護においても実物大実験で捕捉性能を確認することが重要であると考えられるが、表-1 に示すガイド条件に合わせた高速衝突を実験にて実現することは困難である。そこで、まず実現可能な衝突速度で実物大実験を実施し、次に実験再現解析に基づいた高速衝突解析を実用モデルで行い、構造の検討を行うこととした。

なお、高速飛来物バリアは鋼製パイプ、鋼製材を主な対象と考えた。その理由は、衝突エネルギーが比較的大

きく防護工への接触面積が大きい落石よりも、接触面積が小さい飛来物の方が危険と考えたためである。

さらに乗用車についても捕捉対象とし、ネット中央および端部に衝突した場合に安全性を確保できる構造とした。その際の衝突角度は、ガイドを参考にネットに対して直角とすることを基本と考えた。

## 3. 実物大実験

### 3.1. 実験方法

実物大実験は、WSL の協力の下、スイス連邦ヴァーレンシュタット実験場において、2013（平成 25）年 11 月 22 日から 2014（平成 26）年 1 月 22 日にかけて計 10 回実施した。本実験場は、スイスガイドラインに基づく落石防護柵の認証試験にも使用されている。なお、写真-2 に示す本実験にて使用した実験用架台は、梁寸法 4.7m × 4.7m、柱寸法 5.5m であり、梁部にネットを設置した。また、実験用飛来物は鋼製パイプおよび鋼製材とし、クレーンで最大 55m の高さまで吊り上げて自由落下させた。実験では安全面への配慮から、クレーンから地上へ垂らしたガイドロープに実験用飛来物を通して落下させた。



写真-2 実験用架台

### 3.2. 実験条件

#### (1) 実験用飛来物の諸元

表-1、図-1 に、実験用飛来物の諸元を示す。なお、実験用飛来物質量には加速度計の質量が含まれている。

表-1 ガイドによる設計飛来物の条件および実験用飛来物の諸元

飛来物の種類	ガイドによる設計飛来物条件				実験用飛来物	
	サイズ	質量	最大水平速度	最大鉛直速度	サイズ	質量
鋼製パイプ	長さ 2.0m × 直径 50mm	8.4kg	49m/s (176km/h)	33 m/s (119km/h)	長さ 3.0m × 直径 50mm	33kg
鋼製材	長さ 4.2m × 幅 0.3m × 奥行 0.2m	135kg	57 m/s (205km/h)	38 m/s (137km/h)	長さ 3.0m × 幅 0.3m × 奥行 0.2m	140kg

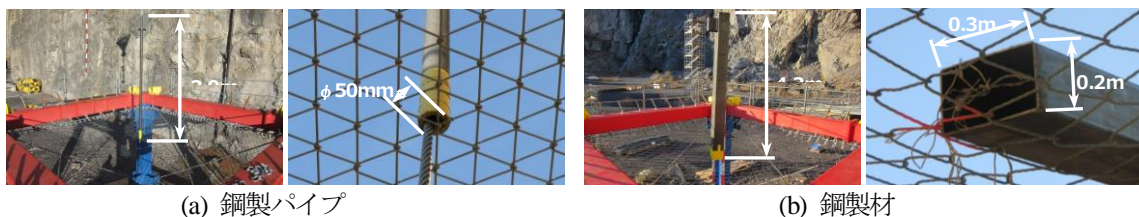
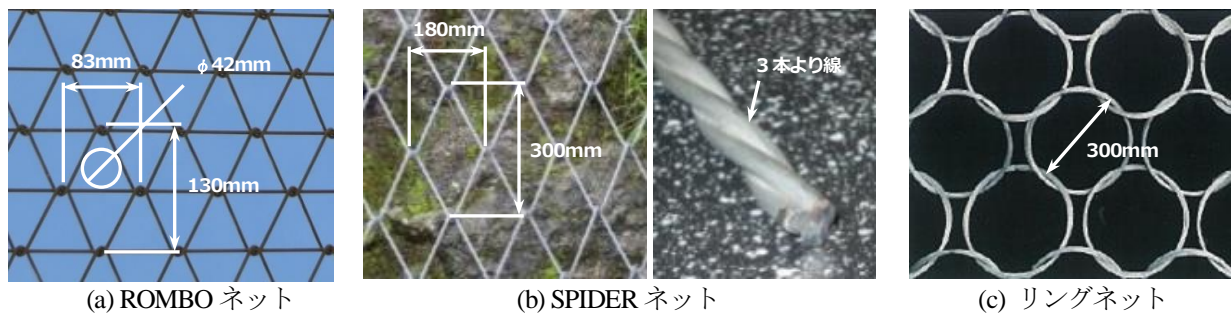
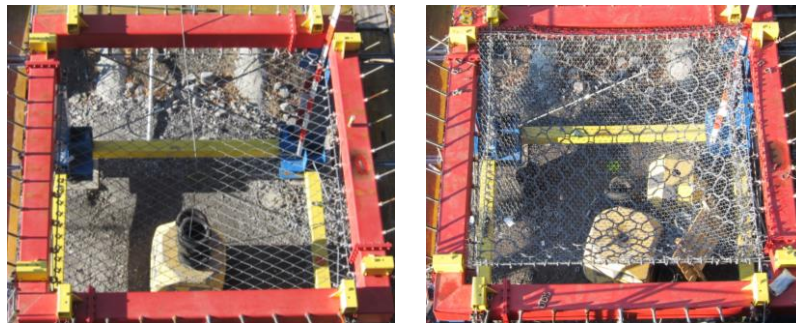


図-1 実験用飛来物



(a) ROMBO ネット (b) SPIDER ネット (c) リングネット  
図-2 高強度ネット



(a) 四辺固定状況 (b) 四点固定状況  
写真-3 ネット支持方法

表-2 主な実験条件および結果一覧

実験番号	飛来物の種類	落下高	衝突速度	衝突エネルギー	部材構成	ネット支持方法	衝突位置	捕捉可否
No.3	鋼製材	55m	32.6m/s (57m/s)	74.4kJ (219.3kJ)	SPIDER	四辺固定	中央	×
No.6	鋼製パイプ	30m	24.2m/s (49m/s)	9.7kJ (10.1kJ)	ROMBO	四辺固定	中央	×
No.8	鋼製材	55m	32.5 m/s (57m/s)	73.9 kJ (219.3kJ)	リングネット+ROMBO +ブレーキリング	四点固定	中央	○
No.9	鋼製パイプ	45m	27.3 m/s (49m/s)	12.3 kJ (10.1kJ)	リングネット+ROMBO +ブレーキリング	四点固定	中央	○

※ ( ) はガイド条件の数値

## (2) 実験用ネット

図-2 に、実験用ネットを示す。ネットは網目形状の異なる3種類の高強度ネットを使用した。いずれのネットも素線引張強さ  $1770\text{N/mm}^2$  の硬鋼線で編まれている。

直径 50mm の鋼製パイプを捕捉するネットには、素線径 4mm の硬鋼線をひし形に編み、メッシュ交点部にストレートワイヤを挿通した、開口部直径 42mm の ROMBO ネットを使用した。また、鋼製材を捕捉するネットは、素線径 4mm の硬鋼線 3 本をより線にし、開口部直径 130mm のひし形に編んだ SPIDER ネットおよび素線径 3mm の硬鋼線を直径 300mm のリング状に束ねたリングネットを使用した。

## (3) ネット支持方法

写真-3 に、ネット支持状況を示す。ネット支持方法は、ワイヤロープを介してアイボルトによりネットを固定する四辺固定、コーナー部四点を固定したワイヤロープにネットを取り付ける四点固定の二方法とした。

## (4) エネルギー吸収装置

エネルギー吸収装置は、リングネット落石防護柵等で用いられるブレーキリングを使用した。図-3 はエネルギー吸収前後のブレーキリングの状態である。ブレーキリングは鋼管をリング状にしたもので、鋼管内をワイヤロープが挿通しており、ロープに張力が作用すると絞られるように変形してエネルギーを吸収する構造である。



図-3 エネルギー吸収装置

## 3.3 実験結果

表-2 に、主な実験条件および結果を示す。四辺固定支持とした No.3, No.6 では実験用飛来物が貫通する結

果となった。写真-4に、No.3, No.6のネット破断状況を示す。これらの結果は、ネット支持方法が四辺固定であることからネットの変形が拘束されてしまい、エネルギー吸収に寄与できなかったためと考えられる。

高速飛来物バリアは、対象飛来物として鋼製パイプ、鋼製材のほか、衝突エネルギーの大きい乗用車を想定していることから、SPIDER ネットよりもエネルギー吸収量の大きいリングネットを使用することとし、鋼製パイプ捕捉用のROMBO ネットと重ねた2層のネット構造とすることとした。

また、ネット固定方法は可動支持となる四点固定が効果的と判断し、エネルギー吸収量を大きくするためにプレーキリングをワイヤロープ両端に配置した。さらに、ネット部材は高速飛来物の運動エネルギーを効率よく吸収させるため、設置時に初期たわみを設けることとした。写真-5は、初期たわみを設けた2層ネット設置状況をjである。

以上の基本的な部材配置で鋼製材および鋼製パイプに対する実験(No.8, No.9)を行い、各飛来物を捕捉できることを確認した。写真-6に、鋼製材および鋼製パイプの捕捉状況(No.8, No.9)を示す。

しかし、No.8で確認した衝突エネルギー73.9kJは、ガイドに例示されている鋼製材の想定衝突エネルギー219kJ(水平方向衝突時)を下回ることから、部材配置等のさらなる工夫が必要と考え、実験結果を基にした解析モデルを構築し、ガイドの想定条件に適合する実用モデルを検討することとした。

#### 4. 実験再現解析

実験再現解析は、基本的な部材配置を決定した実験No.8, No.9を基に行った。ネットのモデル化については、局部貫通に対する評価としてネット素線の破断を検証できるようにネット素線をビーム要素として組み立てた。なお、解析では非線形有限要素法解析コードLS-DYNAを使用した。

解析の実験に対する再現性を向上させるため、評価はネットとワイヤロープの変形量と作用荷重に着目して

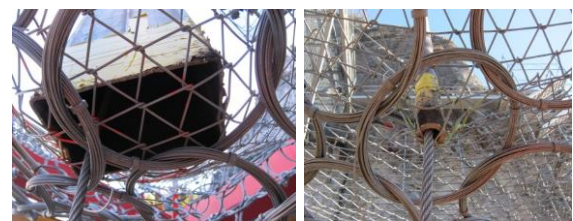
行った。表-3, 表-4に、再現評価の目安となるワイヤロープおよびネットたわみ量の評価結果を示す。各たわみ量の実験値は写真より推定した値、解析値は再現解析結果より得られた値である。また、ネットたわみ量は、鋼製材(No.8)はリングネット、鋼製パイプ(No.9)はROMBO ネットで主に捕捉するため、それぞれ捕捉するネットの値を示している。



(a) No.3 (鋼製材) (b) No.6 (鋼製パイプ)  
写真-4 ネット破断状況



写真-5 2層ネット設置状況 (No.8, No.9)



(a) No.8 (鋼製材) (b) No.9 (鋼製パイプ)  
写真-6 鋼製材および鋼製パイプ捕捉状況

表-3 ワイヤロープたわみ量の再現評価結果一覧

実験番号	①上部		②右部		③下部		④左部	
	実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値	実験値	解析値
No.8	0.83m	0.61m	0.41m	0.43m	0.56m	0.61m	0.45m	0.41m
No.9	0.36m	0.39m	0.30m	0.31m	0.50m	0.39m	0.28m	0.29m

表-4 ネットたわみ量の再現評価結果一覧

実験番号	飛来物の種類	主な捕捉ネット	実験値	解析値
No.8	鋼製材	リングネット	2.20m	2.30m
No.9	鋼製パイプ	ROMBO ネット	1.30m	1.40m

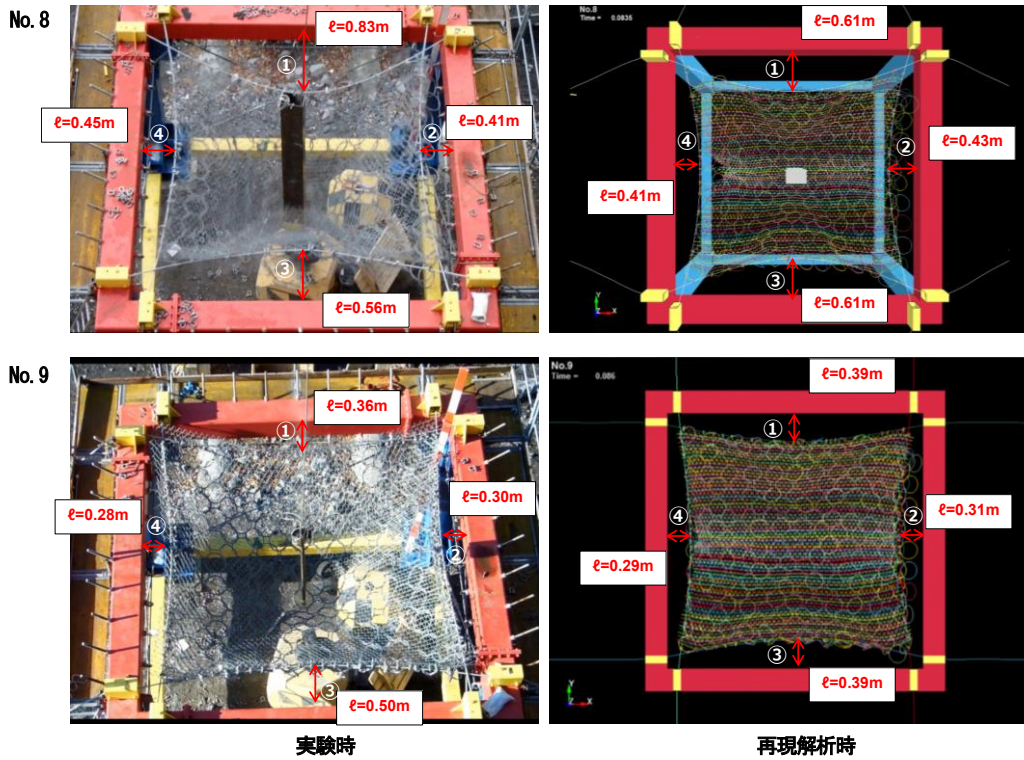


図-4 ワイヤロープたわみ量の比較 (No.8, No.9)

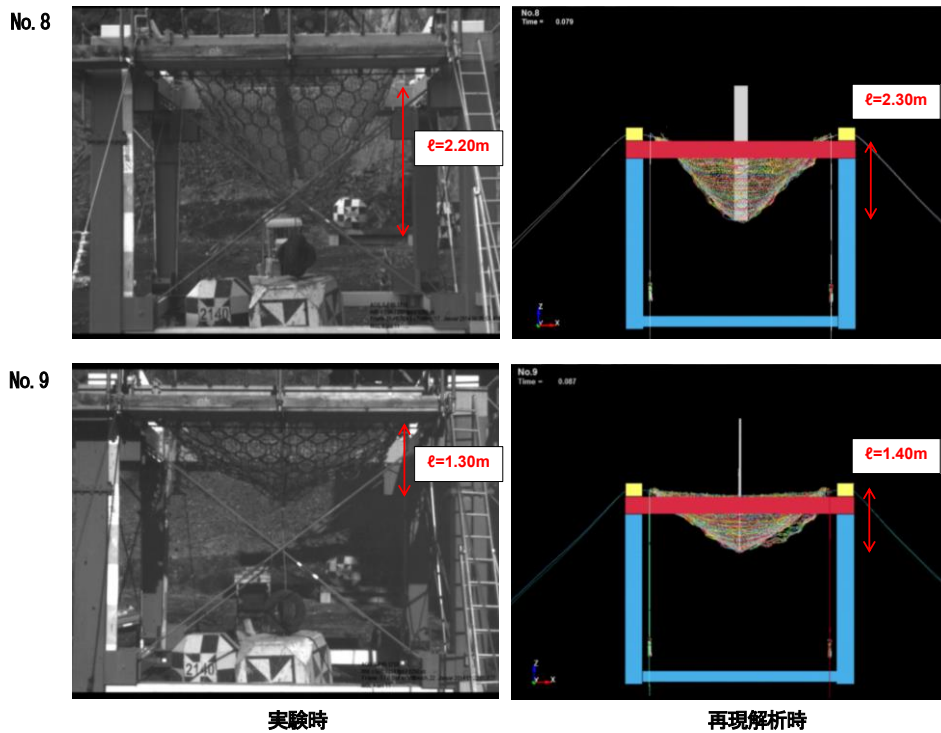


図-5 ネットたわみ量の比較 (No.8, No.9)

図-4, 図-5 は飛来物衝突時のワイヤロープおよびネットたわみ量を図示したものである。

ワイヤロープたわみ量は, No.8 実験時の①上部および No.9 実験時の③下部において差が見られるが, これは実験時の飛来物の落下方向が完全な垂直ではなかったため, 若干の偏りが生じているものと想定される。

再現評価の結果, ワイヤロープたわみ量, ネットたわ

み量ともに実験値と解析値は近似値を示しており, 高い再現性を確認できた。

## 5. 基本構造の提案

原子力発電所において竜巻防護が必要とされる施設の例として, 原子炉格納容器や安全機能を有する系統・

機器（配管等を含む）がガイドに挙げられている。高速飛来物バリアは、様々な防護箇所に対応できるよう施工性を考慮し、架構に取り付けるパネル構造を基本とすることとした。基本構造は、実験再現解析に基づき下記のとおりとした。図-6に、基本構造図を示す。

- ① 2層構造（ROMBO ネット+リングネット）にワイヤロープ、ブレーキリングを組み合わせる。
- ② ネットの支持方法は、四点（端点）で架構に接続する可動支持とする。
- ③ 端部補強のため、リングネット周縁部を二重リング構造とする（図-6の緑部リング）。
- ④ ネットは変形を促しエネルギー吸収量を増加させるため、適切な初期たわみを設ける。

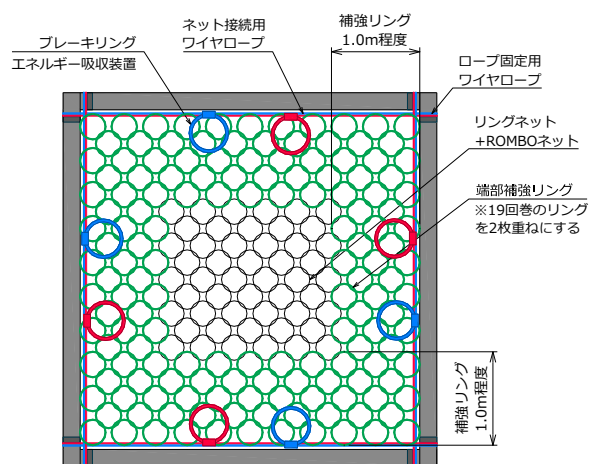


図-6 基本構造図

また、実用モデルにおける ROMBO ネットは、実物大実験時とガイド提示の衝突速度の違い、および構造の安全性を考慮し ROMBO ネット2枚仕様とすることを基本とした。しかし、これは取り付ける架構の大きさや形状によって変化するため、取り付け箇所ごとに検証が必要と考える。

## 6. 力のつり合いによる評価

飛来物に対するネットの評価手法の一つとして、「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 研究報告」<sup>4)</sup>に静的な力のつり合いによる評価手法が紹介されている。

高速飛来物バリアにおいても、この評価手法に基づきネットの安全性の評価を行うこととした。ネット寸法は実物大実験と同様に 4.0m×4.0m とし、衝突箇所はネット中央とした。対象飛来物は、鋼製材および鋼製パイプの2種類とし、鋼製材に対してはリングネット、鋼製パイプに対しては ROMBO ネットの評価を行った。評価結果を表-5、表-6に示す。両評価ともネットの限界吸収

エネルギーが衝突エネルギーを上回り、局部貫通が起らない結果となった。

表-5 力のつり合いによる評価結果（鋼製材）

項目	内容	照査結果
使用ネット	リングネット	—
衝突エネルギー	219.3kJ	219.3kJ ≤ 783.6kJ
限界吸収エネルギー	783.6kJ	OK
交点1点当たりの作用荷重	80.2kN	80.2kN ≤ 143.5kN
交点の破断強度	143.5kN	OK

表-6 力のつり合いによる評価結果（鋼製パイプ）

項目	内容	照査結果
使用ネット	ROMBO ネット	—
衝突エネルギー	10.1kJ	10.1kJ ≤ 18.0kJ
限界吸収エネルギー	18.0kJ	OK
交点1点当たりの作用荷重	19.6kN	19.6kN ≤ 23.2kN
交点の破断強度	23.2kN	OK

## 7. まとめ

本報では、実物大実験を基本とし、再現性の高い実験再現解析モデルに基づいた高速飛来物バリア実用モデルの基本構造を提案することができた。

また、評価方法については、本報条件下での貫通や吸収エネルギー評価において、数値解析の方が力のつり合いによる評価に比べて安全側の評価となった。

高速飛来物バリアは大変形を許容する構造であるため、保全対象物に対して必要な離隔を確保する必要がある。今後の課題として、個々の現場において現地条件をよく考慮した評価および保全対象物との位置関係を考慮した設計を行うことが重要と考える。

## 参考文献

- 1) 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、2013。
- 2) Gerber, W. : Guideline for the approval of rockfall protection kits., Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL) and the Swiss Federal Research Institute WSL Berne, 2001
- 3) Guideline for the approval of rockfall protection kits. Amendment 2006, [www.environment-switzerland.ch/publications](http://www.environment-switzerland.ch/publications)
- 4) 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 研究報告：N13014, 一般財団法人 電力中央研究所, 平成26年3月, 2014。