

リングネットを用いた防護ネットシステムに対する 竜巻飛来物の自由落下試験

The free-fall test of net protection system with Ring nets against tornado missile

原田怜[†], 星野賢治*, 秋岡民康**, 小室雅人***, 栗橋祐介***, 梅沢広幸****

Satoshi Harada, Kenji Hoshino, Tamiyasu Akioka, Masato Komuro, Yusuke Kurihashi, Hiroyuki Umezawa

[†]中部電力株式会社, 発電本部土木建築部(〒461-8680 愛知県名古屋市中区東新町 1 番地)

*中部電力株式会社, 浜岡原子力発電所保修部(〒437-1695 静岡県御前崎市佐倉 5561)

**鹿島建設株式会社, 原子力部(〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11)

***室蘭工業大学, 大学院工学研究科(〒050-8585 北海道室蘭市水元町 27-1)

****東亜グラウト工業株式会社, 斜面防災グループ技術開発室(〒160-0004 東京都新宿区四谷 2-10-3)

Protection Nets have been clarified as one of the countermeasures to protect facilities of Nuclear Power Plants against Tornado Missile. This research shows the performance of the Net Protection System, which has no anisotropy and high energy absorbing capacity, by conducting the free-fall test with Tornado Missile according to the “Assessment guide for tornado effect on nuclear power plants”. As a result of the test, the capacity and safety ratio of this system against series of impacts were confirmed, when the Tornado Missile hits the center and the corner point in the net, even when it hits the same point multiple times. Furthermore, this research concludes the method to calculate the amount of absorbing energy of Ring nets after clearing up the dynamic response of the system.

Key Words : tornado missile, protective net system, free-fall impact test, Ring net

キーワード: 竜巻飛来物, 防護ネットシステム, 自由落下試験, リングネット

1. はじめに

竜巻は極めて局所的ではあるが大きな被害をもたらす。平成 18 年に北海道佐呂間町で発生した竜巻では死者 9 名, 負傷者 31 名, 全壊 7 棟, 半壊 7 棟の被害が生じており, 平成 24 年に茨城県つくば市で発生した竜巻では, 死者 1 人, 負傷者 37 人, 全壊 76 棟, 半壊 158 棟の被害が生じている^{1, 2)}。竜巻のような強風時には, その風圧力だけでなく飛来物の衝突による被害が生じており, 平成 25 年 12 月に公表された「竜巻等突風対策局長級会議」報告では, 飛来物に対する外装材設計ガイドラインを平成 28 年度に策定し, オフィスビル, 公共施設等における被害軽減対策を促進することとしている³⁾。

また, 平成 25 年 7 月に施行された原子力規制委員会の

新規制基準では, 竜巻により原子炉施設の安全性が損なわれないことを評価するための指標として「原子力発電所の竜巻影響評価ガイド」⁴⁾ (以下, ガイドという) が制定されている。原子力発電所では竜巻による飛来物に対して設備を防護するための対策の一つとして防護ネットが採用されており, これまで複数の種類のネットについて飛来物捕捉性能を確認するための試験・解析が実施されている^{5~8)}。これらの研究で対象とした防護ネットはひし形金網を用いている。しかしながら, ひし形金網の場合には, 編み込みの向きにより荷重伝達に異方性があることや, 飛来物の運動エネルギーが大きい場合には複数枚を組合せて用いることが要求される^{7, 8)}。

一方, 梅沢らはこれらの欠点を改善する 1 つの方法として, 異方性がなくエネルギー吸収能力が高いリングネットに着目してブレーキリング等の部材と組合せた防護ネットシステムを提案し, その性能を実証試験および再

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: Harada.Satoshi@chuden.co.jp

現解析によって検証している⁹⁾。しかしながら、この研究成果はガイド条件の運動エネルギーに満たない飛来物をネット中央部に一度だけ衝突させたものであり、同ネットシステムを実構造物に適用する場合には、ガイドに準拠した運動エネルギーを有する飛来物を衝突させた検討が必要である。

以上の背景より、筆者らはリングネットを用いた防護ネットシステムを対象に、ガイドに基づき設定した条件下での自由落下試験を行い、ネット中央部および端部の捕捉性能を確認した。さらに、一度飛来物を捕捉した防護ネットに連続して飛来物を衝突させる試験を実施し、防護ネットシステムの耐衝撃余裕度を確認した。またリングネットやブレーキリングの変形状況により、同ネットシステムのエネルギー吸収性能について検討を行った。

2. 防護ネットシステムの部材構成

図-1 に試験で用いた防護ネットシステムの基本構造図を示す。リングネットを用いた防護ネットシステムは、飛来物が衝突してリングネットが大きく変形することでその運動エネルギーを吸収し、飛来物を捕捉するものである。リングネットはフレームドロープを介して固定用ロープにより架構に接続される。本防護ネットシステムの主要部材の詳細について以下に示す。

2.1 リングネット

図-2 にリングネットの形状寸法図を示す。リングネットは、素線径 3 mm の硬鋼線（引張強さ 1770 N/mm²）を $\phi 300$ mm に巻き束ねたリングをネット状に編んだ構造で、本防護ネットシステムにおいては素線を 19 回巻き束ねたリングを用いている。また、ネット周辺部は端部補強のために 19 回巻きリングを二重にしている。

2.2 ワイヤロープ

(1) フレームドロープ

フレームドロープは、ネットの周辺部にシャックルを介して設置するワイヤロープ部材で 1 辺に 2 本用いており、飛来物捕捉時においてネット材に作用した力を固定用ロープに伝達させる働きを持つ。なお、フレームドロープ 1 本に 1 つのブレーキリングが装着されている。このフレームドロープは、 $\phi 20$ mm のワイヤロープを使用しており、破断荷重は 252 kN である。

(2) 固定用ロープ

固定用ロープは、フレームドロープ端部を固定するワイヤロープ部材で、フレームドロープから伝わる力を架構へ伝達させる。この固定用ロープは、 $\phi 22$ mm のワイヤロープを使用しており、破断荷重は 400 kN である。

2.3 ブレーキリング（エネルギー吸収装置）

図-3 にエネルギー吸収前後のブレーキリングの状態

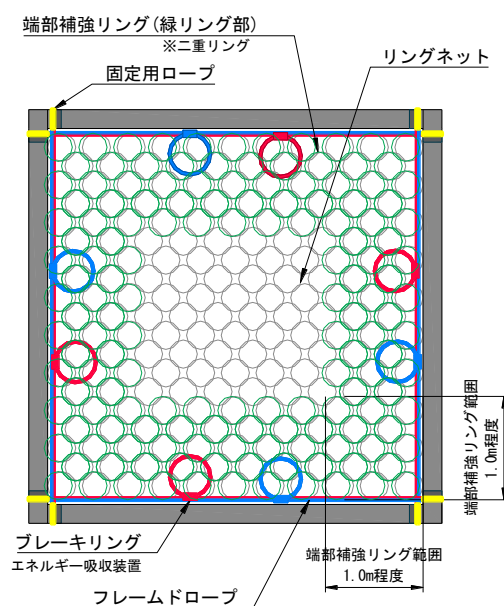


図-1 防護ネットシステム基本構造図

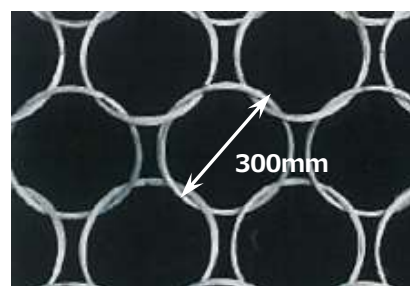


図-2 リングネット形状寸法



(a) エネルギー吸収前



(b) エネルギー吸収後

図-3 エネルギー吸収前後のブレーキリング（イメージ図）

を示す。ブレーキリングは鋼管をリング状にした構造で、鋼管内をワイヤロープが挿通しており、フレームド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機構である。なお、本研究で用いたブレーキリングの限界作動量は、1000 mm である。

表－1 想定飛来物および模擬飛来物諸元

飛来物種別	想定飛来物	模擬飛来物
	鋼製材	
飛来物質量 m (kg)	135	550～600 程度
飛来物速度 v (m/s)	59	30 程度
運動エネルギー E^* (kJ)	235	235 以上

※ $E = 0.5 \times m \times v^2$

表－2 各試験ケースの模擬飛来物諸元

	第一試験体	第二試験体		
	1 回目	1 回目	2 回目	3 回目
試験ケース	1-1E	2-1C	2-2E	2-3C
衝突位置	端部	中央部	端部	中央部
飛来物種別	鋼製材			
飛来物質量(kg)※	608.0	557.0	594.0	597.0
落下高さ(m)※	42.0	47.0	46.5	46.5
飛来物速度(m/s)※	28.4	30.1	30.0	30.0
運動エネルギー(kJ)	245.2	252.3	267.3	268.7

※実測値

3. 飛来物

ガイドに記載の飛来物のうち、本試験では質量 135 kg の鋼製材を想定飛来物として自由落下試験を実施した。想定飛来物の速度はガイドを参考に、設計上の余裕を含めて設定した。ただし、試験実施上、落下高さに制約があり飛来物速度が 31.3m/s 以下に制限されるため、想定飛来物と運動エネルギーが等価以上となるように質量を増した模擬飛来物により試験を実施した。表－1 に想定飛来物および模擬飛来物の諸元を、図－4 に両飛来物の形状寸法を示す。なお、模擬飛来物の先端形状は、想定飛来物と同形状としている。

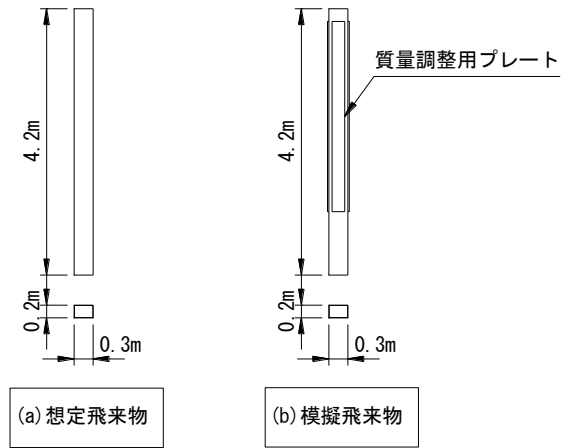
4. 試験計画および試験方法

4.1 試験目的

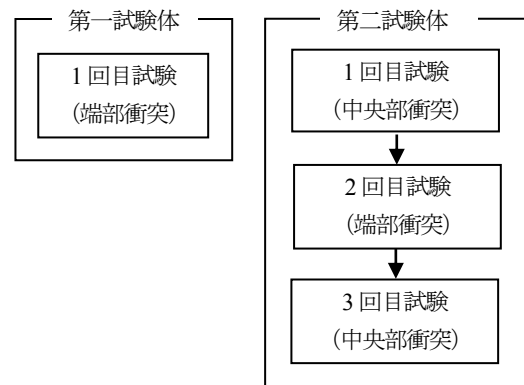
本試験の主目的は、リングネットを用いた防護ネットシステムを対象に、表－1 の飛来物条件での捕捉性能（特に、先行研究⁹⁾で実施されていない端部衝突時）および応答性状を確認することである。また、今後解析的評価を実施することを見据えて、解析の妥当性検証に資するデータを得ることも本試験の目的の一つである。

4.2 試験概要

図－5 に一連の試験の流れを示す。また、表－2 に各試験ケースと模擬飛来物諸元を示す。図－1 に示した試験体を 2 つ用意し、それぞれ第一試験体、第二試験体とした。衝突箇所の違いによるネットシステムの応答性状を



図－4 想定飛来物および模擬飛来物の形状寸法



図－5 試験の流れ

比較するために、第一試験体の 1 回目試験は端部に、第二試験体の 1 回目試験は中央部に衝突させた。第二試験体では、飛来物の衝突を受けた後のネットシステムの耐衝撃余裕度を確認するために、1 回目試験の後に連続して 2 回目（端部衝突）試験を実施し、さらに限界状態の把握を目指して追加的に 3 回目試験を実施した。

1 回目試験時の初期たわみ量は、梅沢らの試験⁹⁾等の結果を基に設定し、初期状態のばらつきを少なくするために模擬飛来物の静的载荷（ならし载荷）を実施した。第一試験体の 1 回目および第二試験体の 1 回目、2 回目試験では、模擬飛来物速度計測、フレームドロップ張力計測、ネット変形量計測、ブレーキリング作動量計測を実施した。なお、第二試験体の 3 回目試験ではフレームドロップ張力は計測していない。

4.3 試験体

図－6 に試験体設置状況を、図－7 に試験に使用した試験体の形状寸法を示す。

ネット寸法 4 m × 4 m のリングネットを内法寸法 4.2 m × 4.2 m、高さ 4.9 m の試験架構（H-400 × 400）にフレームドロップ、固定用ロープを介して固定した。また、第二試験体では複数回衝突させることからネットの変形量が大きくなることを想定し、試験架構の柱下部に嵩上げ用コンクリートブロックを設置した。

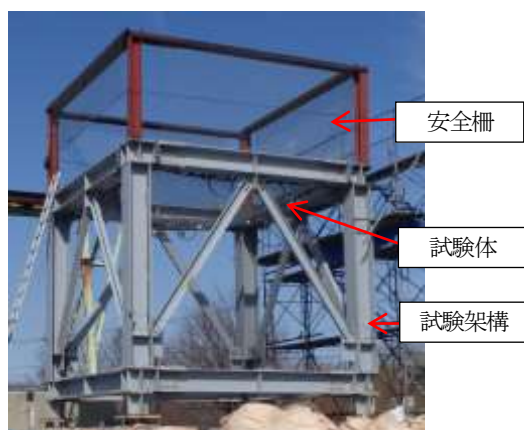


図-6 試験体設置状況 (第二試験体)

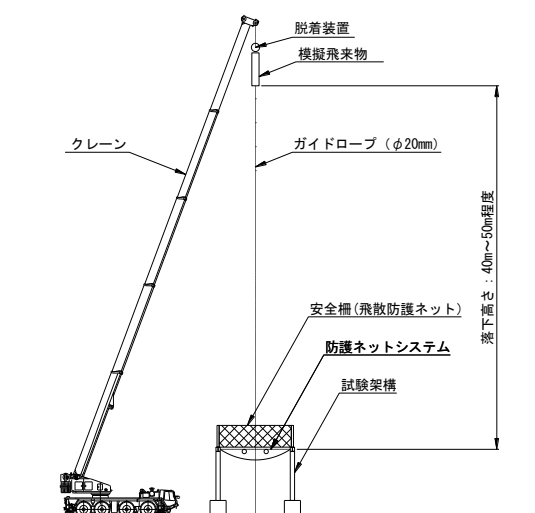


図-8 模擬飛来物落下方法

4.4 模擬飛来物の落下方法

図-8 に模擬飛来物の落下方法を示す。模擬飛来物はクレーンで所定の高さまで吊り上げ、油圧で作動する脱着装置により切り離し自由落下させた。本試験における模擬飛来物の落下高さは、クレーンの性能から 40 m～50 m 程度とし、製作された模擬飛来物の質量に応じて、必要な衝突エネルギーが確保できる高さに調整した。

なお、模擬飛来物速度計測の都合から落下高さは模擬飛来物の下端部から架構の梁までの高さとした。また、模擬飛来物は、落下目標位置にできるだけ正確に衝突させるため、クレーンの脱着装置から地盤間に張ったガイドロープに沿って落下させた。

4.5 計測方法

(1) 模擬飛来物速度計測およびネット変形量計測

図-9 に模擬飛来物速度計測時の高速度カメラ撮影状況を、図-10 に模擬飛来物速度およびネット変形量計測方法を示す。模擬飛来物の落下速度は、模擬飛来物に貼付した 2 点のターゲットマークが架構の梁を通過する時間により算出した。

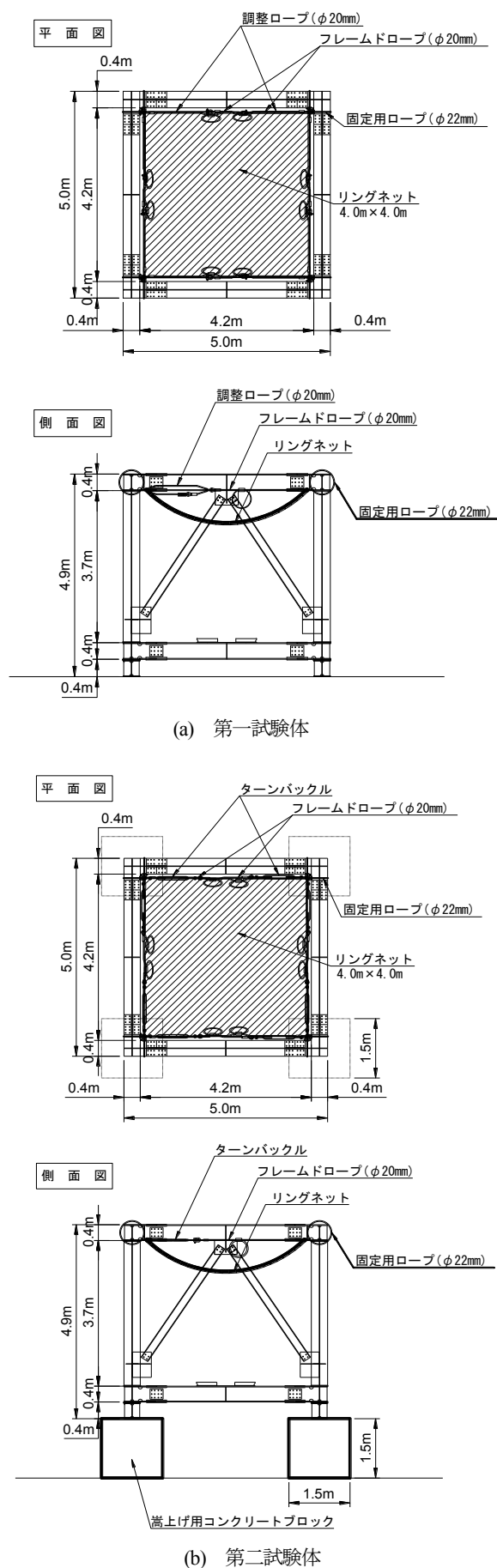


図-7 試験体の形状寸法

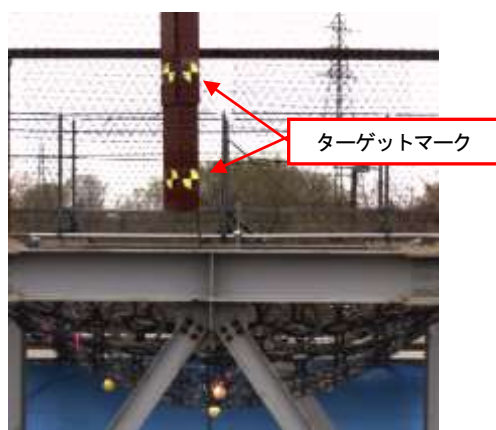


図-9 模擬飛来物の高速度カメラ撮影状況

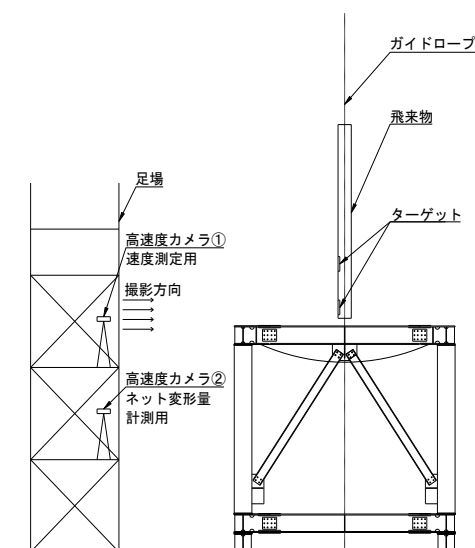
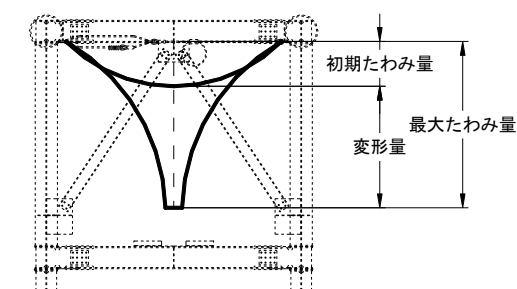


図-10 模擬飛来物速度およびネット変形量計測方法

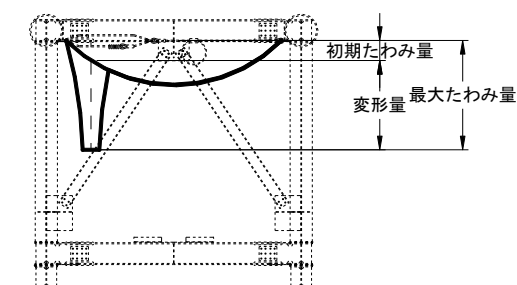
模擬飛来物衝突時のネット変形量については、ネット初期たわみ位置を原点として模擬飛来物下端付近に貼付したターゲットマークの移動距離を高速度カメラで2方向から撮影し、その画像をもとにネットの鉛直方向の変形量を算出した。図-11に示すように、中央部衝突ケースでは試験前のネットの中央部衝突位置を原点とし、端部衝突ケースでは試験前のネットの端部衝突位置を原点としてネットの鉛直方向の変形量を計測した。

(2) フレームドロップ張力計測

模擬飛来物衝突時の荷重伝播状況を確認するため、第一試験体では図-12に示すようにフレームドロップ端部にひずみゲージ付きシャックルを取り付けてフレームドロップ張力を計測した。しかしながら、この方法では、シャックル内に固定用ロープを通す作業において、固定用ロープがひずみゲージに接触したため、欠測が多く発生した。このため、第二試験体では図-13に示すように、マスターリンクを用いて固定用ロープとひずみゲージが直接接触しないように改善した。



(a) 中央部衝突



(b) 端部衝突

図-11 ネット変形量の計測方法

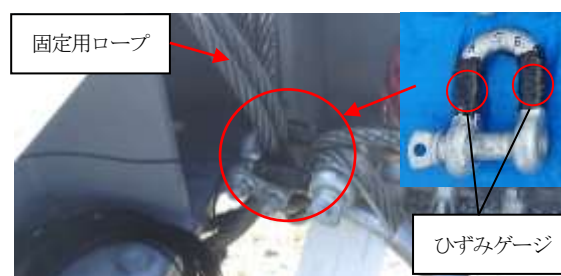


図-12 ひずみゲージ付きシャックル設置状況

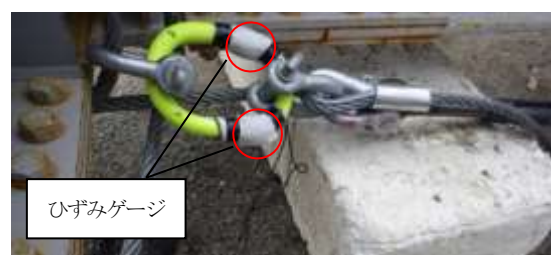


図-13 ひずみゲージ付きマスターリンク設置状況

計測用部材には、図-14に示すようにひずみゲージを4枚貼り付け、軸方向成分のみを測定するように配慮した。図-14にはマスターリンクの場合を示しているが、シャックルの場合にも同様とした。

なお、ひずみゲージ付きマスターリンクおよびシャックルには一ヶ所あたり2本のフレームドロップが接続されているため、計測値として出力されるフレームドロップ張力は、ロープ2本分の値となる。

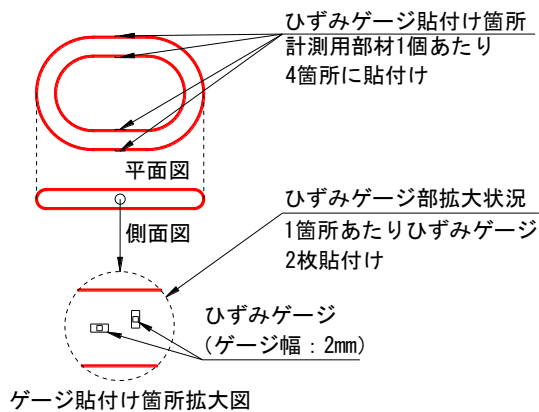


図-14 ひずみゲージ貼付け状況 (マスターリンク)

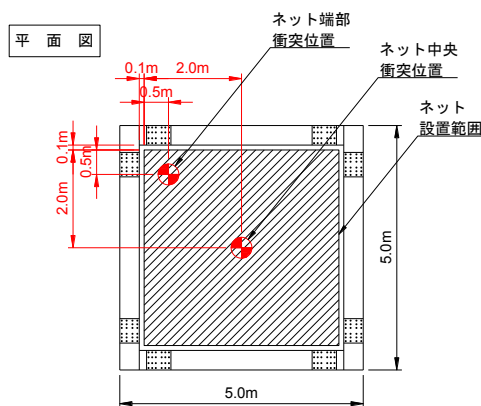


図-16 模擬飛来物の衝突位置図

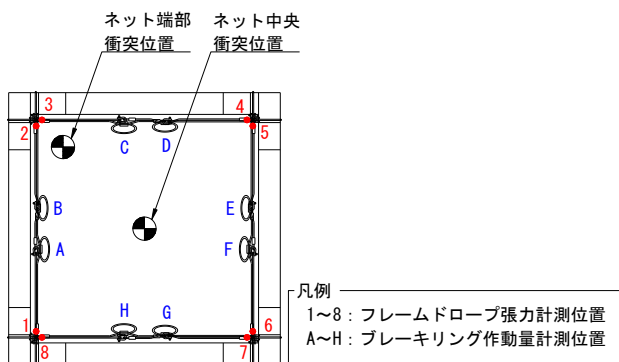


図-17 計測箇所位置図

(3) ブレーキリング作動量計測

図-15 にブレーキリング作動量計測方法を示す。ブレーキリングの作動量計測では、試験体設置時にマーキングしたブレーキリング圧着部から左右に作動した伸び量の和を計測した。

4.6 模擬飛来物の衝突位置および計測位置

図-16 に模擬飛来物の衝突位置を示す。模擬飛来物の衝突位置は、ネット中央部位置およびネット最端部より 0.5 m×0.5 m 内側の位置とした。また、図-17 にフレームドロップ張力・ブレーキリング作動量計測位置を示す。

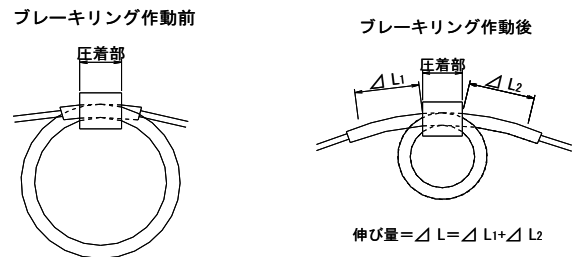


図-15 ブレーキリング作動量計測方法

5. 試験結果

5.1 ネットの変形状態

表-3 に各試験ケースのネット変形量を示す。各試験ケースの運動エネルギーは、表-1 に示す想定飛来物の運動エネルギー 235 kJ を満足する結果となった。全ての試験ケースにおいてネットの破断やすり抜けは生じずに模擬飛来物を捕捉した。

図-18 に各試験ケースのネット変形状況を示し、図-19 に中央部衝突時および端部衝突時のネット変形量の時刻歴波形を示す。試験 No. 2-3C と 2-2E では、ネットが最大たわみ量に達した後に模擬飛来物のターゲットマークが架構や架構保護材に隠れたため、それ以降の変形量の算出ができていない。また、図-20 に最大変形時の状況を、図-21 に衝突位置のネットの状況を示す。

中央部衝突ケースではネット全体が大きく変形し、最大変形時にはすり鉢状に模擬飛来物を受け止めている。一方、端部衝突ケースでは局所的な変形となり、中央部衝突ケースと比較してネット変形量が小さくなっている。

端部衝突ケースの試験 No.1-1E と 2-2E では、当該位置への最初の衝突試験でありネット変形性状に大きな差は見られない。試験 No. 2-2E の方がやや大きな最大たわみ量となっているのは、模擬飛来物の運動エネルギーの違いによるものと考えられる。一方、中央部衝突ケースでは、試験 No.2-3C は No.2-1C と比較して初期たわみ量が大きく、ネット変形量が小さくなっている。前者の初期たわみ量が大きい理由は、同一ネットに飛来物を 2 回衝突させたことによりブレーキリングが作動し、フレームドロップ長が伸びたためと考えられる。

一方、ネット変形量が小さい理由としては、(1) 第 1 回载荷 (No.2-1C) によってリングネットに塑性変形が生じたことにより初期のリングネット同士のゆるみが小さくなったこと、(2) 後述の図-26 に示すようにブレーキリングの吸収エネルギー量と作動量には放物線関係があることから、ブレーキリングが少ない作動量で大きなエネルギーを吸収できたこと、および(3)図-21(d)に示すように飛来物先端にき裂が生じリングネットが食い込んでいることから、第 1 回载荷の場合 (図-21(b)) と比較して飛来物の損傷 (塑性変形) によるエネルギー吸収効果が大きかったこと、等によるものと推察される。

表-3 試験結果一覧

試験 No.	1-1E	2-1C	2-2E	2-3C
衝突位置	端部	中央部	端部	中央部
捕捉の成否	○	○	○	○
模擬飛来物の運動エネルギー (kJ)	245.2	252.3	267.3	268.7
衝突部の初期たわみ量 (m) :a	0.93	1.07	0.97	2.22
最大たわみ量 (m) :b	2.15	3.52	2.36	4.10
ネット変形量 (m) :c	1.22	2.45	1.39	1.88

※ c=b-a

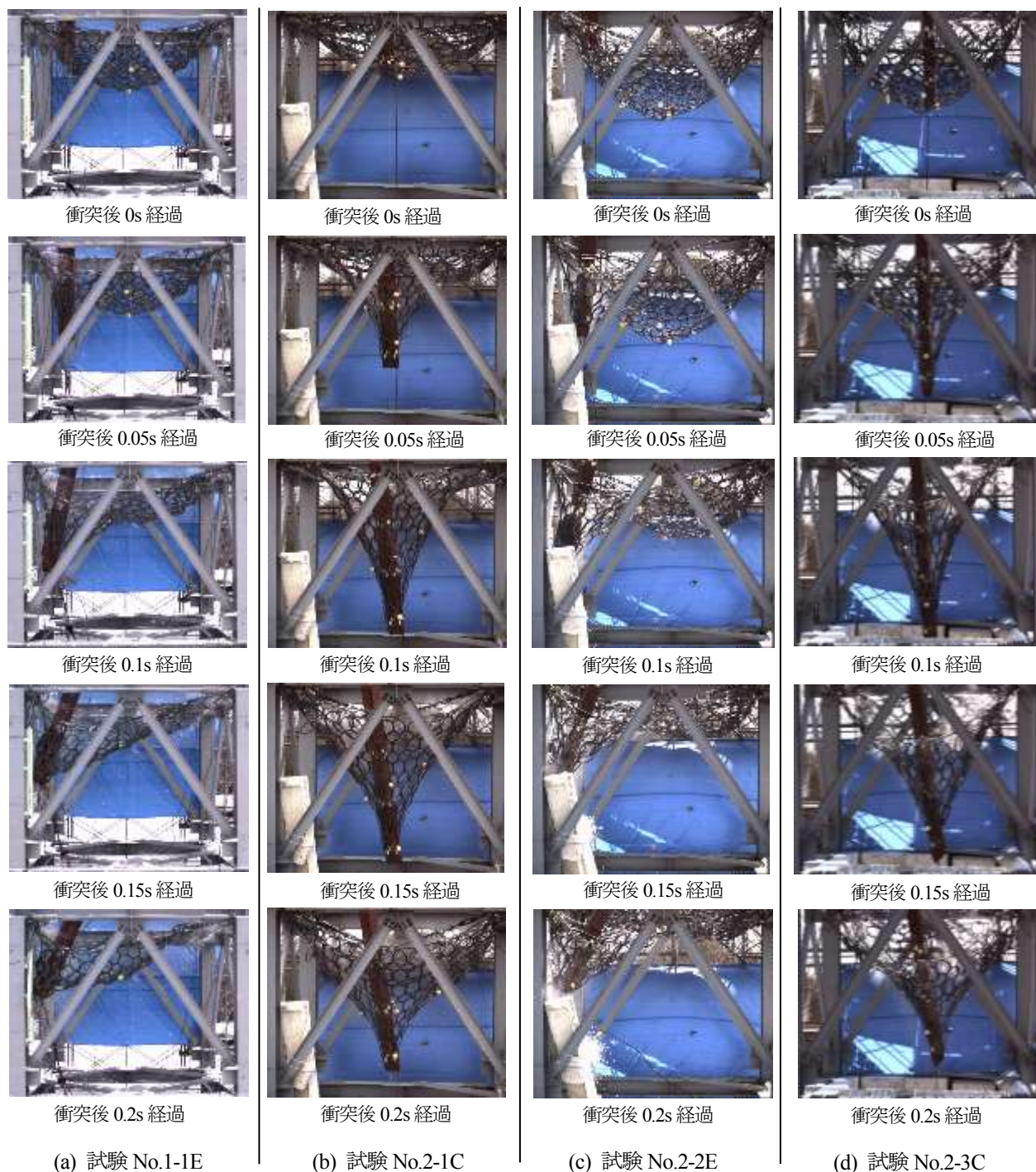
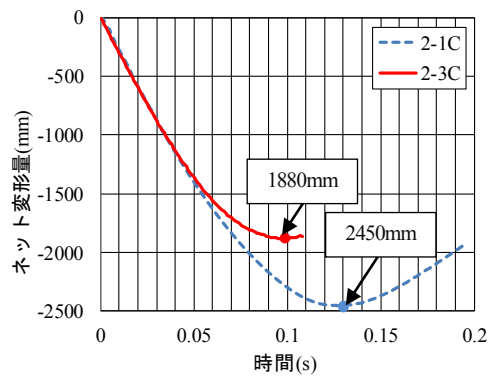
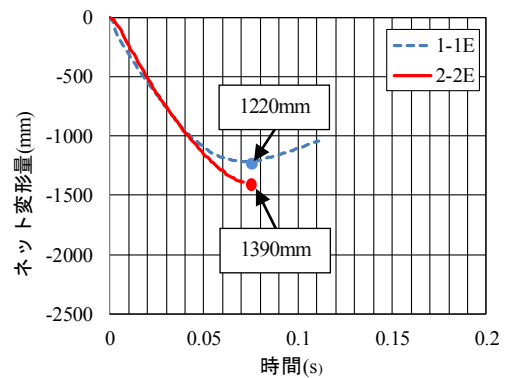


図-18 ネットの変形状況



(a) 中央部衝突(2-1C, 2-3C)



(b) 端部衝突(1-1E, 2-2E)

図-19 ネット変形量の時刻歴波形



(a) 試験 No.1-1E



(b) 試験 No.2-1C



(c) 試験 No.2-2E



(d) 試験 No.2-3C

図-20 ネット最大変形時の状況



(a) 試験 No.1-1E



(b) 試験 No.2-1C



(c) 試験 No.2-2E*



(d) 試験 No.2-3C

※衝突後に飛来物がネット中央部に移動したため、衝突位置に飛来物は確認できない。

図-21 試験終了後における衝突位置の状況

(1) 試験 No. 1-1E

試験 No.1-1E では、模擬飛来物がネットに衝突した後 0.075 秒で最大たわみ量に達した。この際にネットの変形は全体に広がっておらず、衝突部付近のネットの変形のみで模擬飛来物を受け止めていることが分かる。その後、模擬飛来物はリバウンドしながら先端が柱方向に傾き、架構の柱に接触している。なお、衝突部のリングネットには素線のほつれは見られるものの、破断は生じていない。

(2) 試験 No. 2-1C

試験 No. 2-1C では、模擬飛来物がネットに衝突した後 0.127 秒で最大たわみ量に達した。ネットはすり鉢状に大きく変形し、模擬飛来物を捕捉していることが分かる。なお、衝突部のリングネットには素線のほつれは見られるものの、破断は生じていない。

(3) 試験 No. 2-2E

試験 No.2-2E では、模擬飛来物がネットに衝突した後 0.071 秒で最大たわみ量に達した。試験 No.1-1E と同様にネットの変形は局所的であり、衝突部近傍のネットで模擬飛来物を受け止めている。その後、模擬飛来物は 1-1E の場合と同様に、リバウンドしながら架構の柱に接触している。なお、衝突部のリングネットには素線のほつれは見られるものの、破断は生じていない。

(4) 試験 No. 2-3C

試験 No. 2-3C では、模擬飛来物がネットに衝突した後 0.098 秒で最大たわみ量に達した。ネットは全体的に大きく変形し、模擬飛来物を受け止めている。模擬飛来物の先端部は裂け、リングネットが食い込んでいる。なお、衝突部のリングネットには素線のほつれは見られるものの、破断は生じていない。

表-4 フレームドロップ最大張力計測結果

試験No.	1-1E	2-1C	2-2E	2-3C
計測箇所	1	欠測	97.0kN (48.5kN)	91.9kN (46.0kN)
	2	欠測	欠測	欠測
	3	*	欠測	203.7kN (101.9kN)
	4	*	144.0kN (72.0kN)	148.5kN (74.3kN)
	5	欠測	148.0kN (74.0kN)	13.3kN (6.7kN)
	6	欠測	123.3kN (61.7kN)	17.0kN (8.5kN)
	7	欠測	86.8kN (43.4kN)	15.2kN (7.6kN)
	8	欠測	82.5kN (41.3kN)	13.3kN (6.7kN)

*：最大値を計測できず。

※括弧内数値はフレームドロップ 1 本あたりの平均張力を示す。

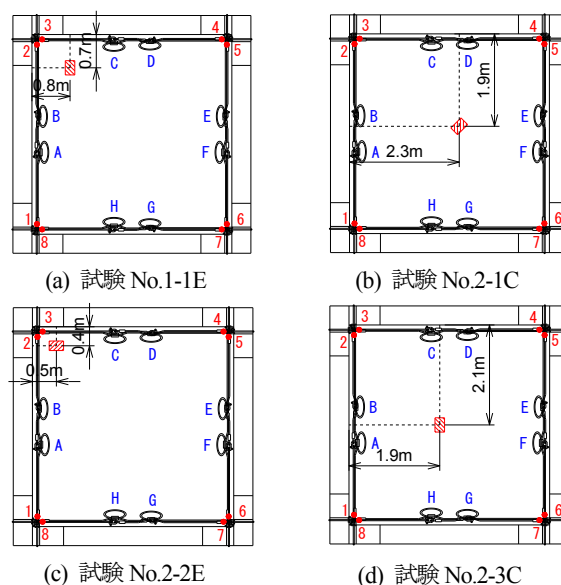


図-22 模擬飛来物の衝突位置

表-5 ブレーキリング作動量計測結果

試験No.	1-1E	2-1C	2-2E	2-3C
計測箇所	A	325mm	390mm	0mm (390mm)
	B	315mm	330mm	40mm (370mm)
	C	660mm	260mm	510mm (770mm)
	D	605mm	280mm	10mm (290mm)
	E	0mm	390mm	0mm (390mm)
	F	0mm	330mm	0mm (330mm)
	G	0mm	120mm	0mm (120mm)
	H	0mm	100mm	180mm (280mm)

※括弧内数値は累計の作動量を示す。

5.2 フレームドロップ張力・ブレーキリング作動量

表-4 に各試験ケースのフレームドロップ張力を、表-5 にブレーキリング作動量を示す。図-22 には各試験ケースの実際の模擬飛来物衝突位置を示す。

全ての試験ケースにおいて、フレームドロップ張力は破断荷重 (252 kN) を下回り、ブレーキリング作動量は限界作動量 (1000 mm) 以下となっていることが分かる。端部衝突ケースではフレームドロップ張力 1~4 およびブレーキリング A~D で大きな値が計測されており、4 辺のフレームドロップの中で衝突位置側の 2 辺に多くの荷重が作用したことが分かる。中央部衝突ケースでは 4 辺のフレームドロップに全体的に荷重が作用しているが、図-22 に示すように実際の模擬飛来物衝突位置がネット中央からややずれているため、衝突位置に近いフレームドロップ張力およびブレーキリング作動量が他方と比較して大きな値となっている。また、1つのフレームドロップの両端の計測位置では同程度の値が得られている。

5.3 防護ネットシステムの応答性状

試験 No.2-1C の計測記録を基に、模擬飛来物による衝撃荷重に対して防護ネットシステムがどのように応答し運動エネルギーを吸収したのかを考察する。

図-23 に模擬飛来物の運動履歴 (変位-時間関係) から算出した衝撃荷重と、その衝撃荷重と図-19 に示すネットの変形量から算出されるエネルギー吸収量の時刻歴応答波形を示し、図-24 にその衝撃荷重とフレームドロップ張力の時刻歴応答波形を示す。なお、時間刻みは 0.01 秒とした。また、図-25、26 にブレーキリングの荷重-変位関係と吸収エネルギー-変位関係を示す。

図-23 を見ると、衝撃荷重は模擬飛来物の衝突後 0.05 秒に至るまでに一度増大し、その後約 0.09 秒まではほぼ一定値を示している。また、図-18 を見ると飛来物衝突後 0.05 秒でリングネットの変形が全体に伝播しており、その後リングネットが大きく変形する過程では衝撃荷重の増加は見られない。このことは図-19(a)に示すネットの変形量が 0.09 秒まではほぼ線形に増加していることとよく対応している。衝撃荷重は 0.09 秒経過後にさらに増加し、時刻 0.13 秒において最大荷重 265 kN を示している。また、その時点までのエネルギー量の総和は 191.5 kJ であった。

リングネットからフレームドロップへの荷重伝達 (張力の増加) は、衝撃荷重が増加する時刻 (約 0.09 秒) とほぼ一致している。その後、計測箇所 4 を除き 1 辺あたりのフレームドロップ張力は 50 kN (フレームドロップ 1 本あたり 25 kN) 程度に達した時点で、ほぼ一定の値を示している。これは、図-25 に示すブレーキリングの作動荷重 (約 25 kN) とほぼ一致する。その後、衝撃荷重が最大値に達してもフレームドロップ張力は急激に増加することなく明確なピークが見られないことから、ブレーキリングが適切に作動しフレームドロップ張力の増加を抑制していることが分かる。なお、前述の表-5 およ

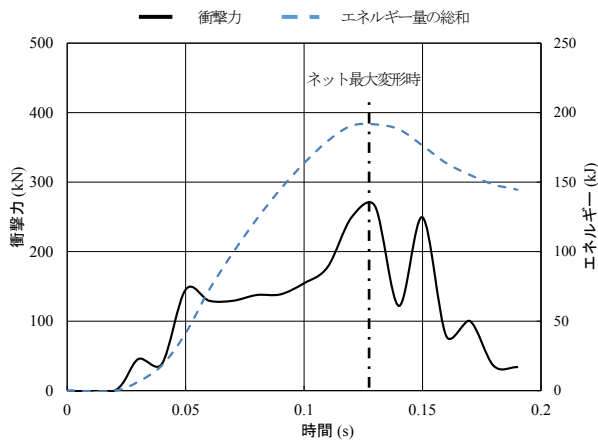


図-23 衝撃荷重と吸収エネルギーの時刻歴応答図
(試験 No.2-1C)

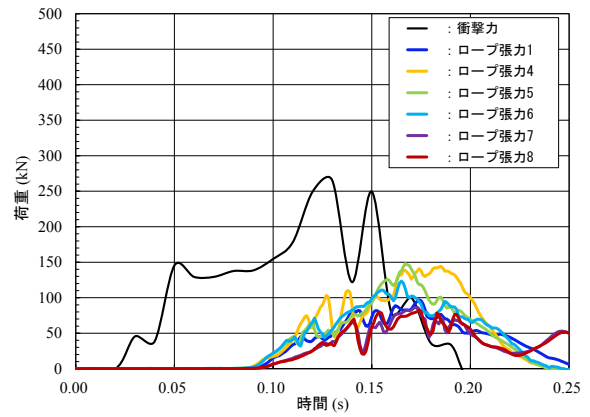


図-24 衝撃荷重とフレームドロップ張力の時刻歴応答図 (試験 No.2-1C)

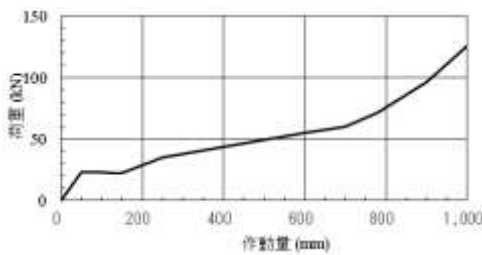


図-25 ブレーキリングの荷重-変位関係

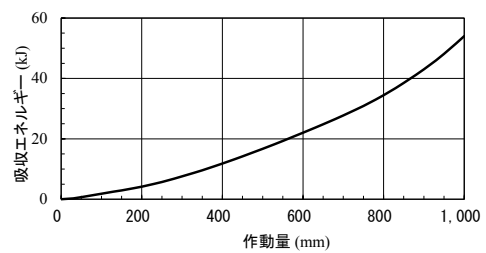


図-26 ブレーキリングの吸収エネルギー-変位関係

図-26 より、ブレーキリングの作動量から算出される吸収エネルギーは 57.3 kJ であった。

ブレーキリングの作動荷重に達する時刻はネット最大変形時の直前であることから、最大荷重に至るまでのエネルギー (191.5 kJ) のほとんどはリングネットにより吸収されていると推察できる。

6. リングネットの吸収エネルギー算定方法の試案

ここでは、リングネットを用いた防護ネットシステムの限界吸収エネルギーの評価に資することを目的に、リングネットの変形状態をモデル化することでそのエネルギー吸収量を評価する手法の試案を述べる。検討対象は試験 No.2-1C とした。

6.1 リングネットの吸収エネルギー算定方法

図-27 にネット変形状態のモデル図を示し、図-28 にリングネット展開図を示す。また、図-29 にリング変形状態の模式図を示す。

リングネットのリング 1 つには 4 つのリングが接続されているが、試験結果から衝突部とネット固定端を結ぶリングの列が大きく変形し、ほぼ 2 点引張状態になっていることを確認している。そこで、図-27 に示すようにネットが最大たわみ量に達したとき（飛来物速度が 0 になったとき）のネット形状を四角錐としてモデル化し、図-28, 29 に示すようにリングが 2 点引張状態の領域と、

4 点引張状態の領域に分けることで吸収エネルギー量の算出を試みた。この仮定に基づくと、2 点引張状態のリング 1 つの平均変形量 D_1 および 4 点引張状態のリング 1 つの平均変形量 D_2 は式(1)、(2)で表される。

$$D_1 = \frac{L_1}{N_1} - D_0 \quad (1)$$

$$D_2 = \frac{L_2}{N_2} - D_0 \quad (2)$$

ここで、

L_1 : 最大変形時の衝突位置から固定端までの長さ

L_2 : 最大変形時の衝突位置からフレームドロップ最大たわみ位置までの長さ

N_1 : 衝突位置から固定端までのリング数

N_2 : 衝突位置からフレームドロップ最大たわみ位置までのリング数

D_0 : 衝突前のリング直径

また、図-30 に事前に実施した 2 点および 4 点引張試験により得られたリングの変形量と吸収エネルギーの関係を示す。この関係を用いるとリング 1 つ当りのエネルギー吸収量が算出できるので、リングネット全体のエネルギー吸収量 E_{ALL} は式(3)で表される。

$$E_{ALL} = E_1 \times N_a + E_2 \times N_b \quad (3)$$

ここで、

E_1 : 変形量 D_1 のリングのエネルギー吸収量

E_2 : 変形量 D_2 のリングのエネルギー吸収量

N_a : 2 点引張状態の領域のリング数

N_b : 4 点引張状態の領域のリング数

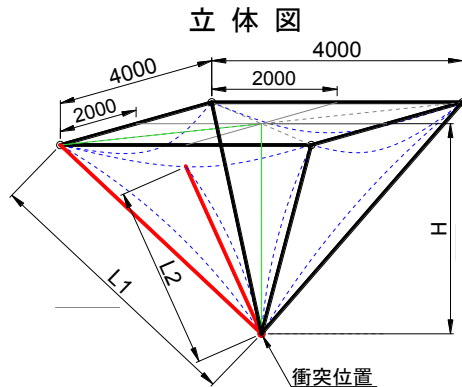


図-27 ネット変形状態のモデル図

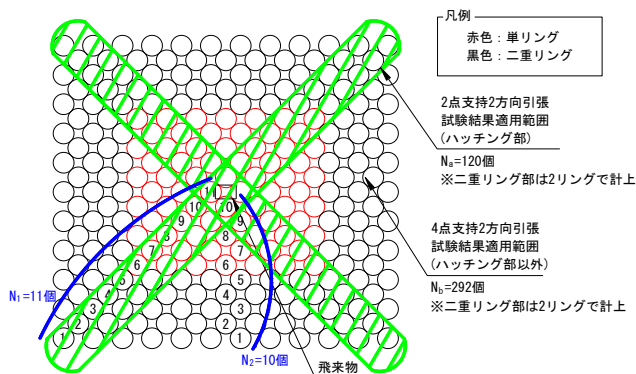


図-28 リングネット展開図

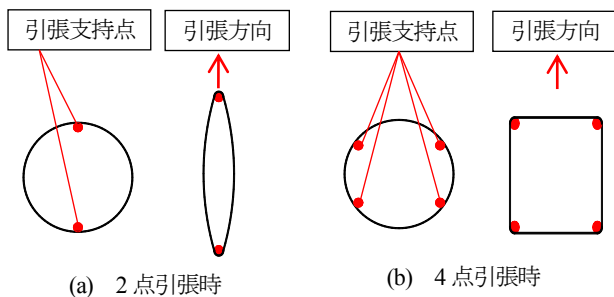


図-29 リング変形状態の模式図

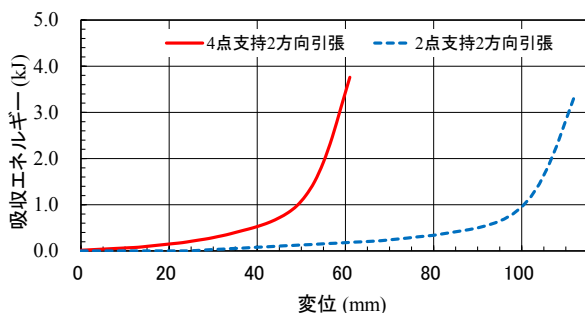


図-30 リングの吸収エネルギー変位関係

表-6 エネルギー吸収量の評価結果 (試験 No.2-1C)

吸収エネルギー(kJ)			総入力エネルギー(kJ)
リング ネット	ブレーキ リング	合計	
191.8	57.3	249.1	271.5

6.2 リングネットの吸収エネルギーの評価結果

前節で提案した評価手法を試験 No.2-1C に適用し、前章で衝撃荷重から求めたリングネットの吸収エネルギーと比較を試みた。ここで、長さ L_1 は最大たわみ量から算出し、長さ L_2 はネット最大変形時の画像から求めた。

表-6 にエネルギー吸収量の評価結果を示す。ここでは、模擬飛来物の計測速度から求めた運動エネルギー (252.3kJ) に、速度計測以降から最大たわみ量に達するまでの位置エネルギー (19.2kJ) を加えて総入力エネルギーとしている (271.5kJ)。提案した手法によるリングネットの吸収エネルギーは 191.8 kJ となり、前章で推定したリングネットによる吸収エネルギー 191.5 kJ とほぼ等しい値となった。また、ブレーキリングの吸収エネルギーを加えると総入力エネルギーの 9 割以上をこれらで吸収したという結果になった。

吸収エネルギーが総入力エネルギーに対して不足している原因の一つとしては、提案したリングネットの評価手法では、フレームドロップの最大たわみ点からの長さを L_2 として一律に 4 点引張領域のリング 1 つの変形量を求めていることから、リングの変形量を過小評価していることが考えられる。他に吸収エネルギーの不足分の理由としては、フレームドロップや固定用ロープの変形、模擬飛来物先端の変形および摩擦などが考えられる。

以上より、提案した手法によって吸収エネルギーを設計上安全側となるように評価できることを確認した。なお、リングネットの限界吸収エネルギー量は、同様の手法を用いてリングの破断時変位量とその時のエネルギー吸収量の関係から算出することも可能であるが、その妥当性については限界性能試験により確認する必要がある。

7. まとめ

ガイドに基づき設定した飛来物をリングネットを用いた防護ネットシステムに衝突させる自由落下試験を実施し、その性能を確認した。本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 今回実施した試験では、ネット中央部衝突、ネット端部衝突ともにネットの破断およびすり抜けなどを生じせず、衝突後も安定した状態で飛来物を捕捉できることが確認され、各部材の限界値に対しても余裕が確保されていることが明らかとなった。
- 2) 一度飛来物を捕捉した無補修の防護ネットに連続衝突させた試験においても全ての試験ケースで衝突に耐えることが確認された。

- 3) 本防護ネットシステムの応答性状を明らかにし、ブレーキリングによるフレームドロープ張力の低減効果を確認した。
- 4) リングの吸収エネルギー変形関係からリングネットの吸収エネルギーを算定する手法を提案し、実施した試験結果と比較することでその有効性を確認した。リングネットの限界吸収エネルギーを評価する際にこの手法を適用する場合は、限界性能試験によりその妥当性を確認する必要がある。
- 3) 竜巻等突風対策局長級会議：「竜巻等突風対策局長級会議」報告，2013.12.
- 4) 原子力規制委員会：原子力発電所の竜巻評価ガイド，2013.6.
- 5) 南波 宏介，白井 孝治，坂本 裕子：竜巻防護設備に用いる金網形状の異なる高強度金網に関する吸収エネルギー算定手法の適用性，構造工学論文集，Vol.61A, pp.958-969, 2015.3.
- 6) 白井孝治，南波宏介，坂本裕子：竜巻飛来物に対する硬鋼線製防護ネットの耐貫通性能に関する実験的評価 研究報告：N14009，一般財団法人 電力中央研究所，2015.2.
- 7) 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：N13014，一般財団法人 電力中央研究所，2014.3.
- 8) 白井孝治，南波宏介，坂本裕子：角型鋼管の先端形状を有する竜巻飛来物に対する 二段積防護ネットの耐貫通性能に関する実験的評価：N14018，一般財団法人 電力中央研究所，2015.3.
- 9) 梅沢広幸，澤田梨沙，鈴木利治，筒井喜平：高速飛来物バリアの開発，土木学会第11回 構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，2014.10.

謝辞

本報の取りまとめにあたり，独立行政法人 国立高等専門学校機構・釧路工業高等専門学校の岸学校長には貴重なご意見ならびにご指導を賜り，また国立研究開発法人 土木研究所・寒地土木研究所様には自由落下試験実施にあたり実験場のご提供ならびにご助言を賜りました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本風工学会風災害研究会：2006 年台風 13 号および同年 11 月 7 日に北海道佐呂間町で発生した竜巻による強風災害に関する調査報告書，2007.10.
- 2) 奥田泰雄，深井敦夫，槌本敬大，壁谷澤寿一，喜々津仁密，石井儀光，中川貴文，荒木康弘，永井渉：2012 年 5 月 6 日つくば市で発生した竜巻による建築物の被害，第 22 回風工学シンポジウム論文集，pp.97-102，2012.

(2015 年 9 月 25 日受付)

(2016 年 2 月 1 日受理)