

## 高張力鋼製ワイヤネットに対する竜巻飛来物の衝撃試験

The impact test of high tensile steel wire net against tornado missile

林尚宏<sup>†</sup>, 谷口敦\*, 伊泊淳司\*\*, 梅沢広幸\*\*\*, 澤田梨沙\*\*\*, 鈴木利治\*\*\*, 小室雅人\*\*\*\*

Naohiro Hayashi, Atsushi Taniguchi, Atsushi Idomari, Hiroyuki Umezawa,

Risa Sawada, Toshiharu Suzuki, Masato Komuro

<sup>†</sup>東京電力ホールディングス株式会社, 原子力設備管理部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

\*東京電力ホールディングス株式会社, 原子力設備管理部 (〒100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3)

\*\*東電設計株式会社, 原子力本部 (〒135-0062 東京都江東区東雲 1-7-12KDX 豊洲グランスクエア 9F)

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

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

Regarding the assessment of efficiency against the impact of diamond shaped braided steel net, it has been done by comparing absorbing energy and impacting energy till now, the former is calculated based on the geometric relational expression between tensile strength and the structure of the net.

In this paper, we described the comparison between absorbing energy which is calculated and the results of full-scale test that was implemented for various impact energy levels of steel structure against the special diamond shaped braided steel net which has inserted straight wire. Based on results, we examined and evaluated the mechanism of energy reduction on the special net.

*Key Words : Tornado Missile, TECCO net, impact test, Straight wire*

キーワード: 竜巻飛来物, TECCO ネット, 衝撃試験, ストレートワイヤ

## 1. はじめに

日本においても竜巻の被害は一年当たり約25件<sup>1)</sup>(2007~2015年, 海上竜巻は除く)の頻度で観測されており, 時には大きな被害をもたらしている. これまで北海道佐呂間町(2006年)や茨城県つくば市(2012年)のF3竜巻を始め, いくつかの竜巻では死傷者, 住宅損壊などの被害が確認されている<sup>2)</sup>. こうした背景を受け, 日本の原子力発電所においても竜巻の被害から原子炉の安全上重要な施設を防護することを目的として, 防護対策を図っている. 竜巻により発生する被害の中に飛来物の衝突が想定され, 対策の一つとして鋼製ワイヤネットを用いた飛来物の捕捉が検討されている. これまでいくつかの試験・評価が行われており, 電力中央研究所の白井らはひし形編み込み鋼製ネットについて限界吸収エネルギーを用いた性能評価方法を提案している<sup>3)</sup>. これによりネットについて限界吸収エネルギーを用いた飛来物捕捉の

性能評価が可能となった.

一方, ひし形編み込み構造と類似構造のネットについても, 竜巻対策に用いることができる可能性があるが, その場合には, 構造の違いを踏まえ, ひし形編み込み構造で評価されている限界吸収エネルギーとの差異を確認し, 適用可否を判断する必要がある. また限界吸収エネルギーを用いた評価では, 飛来物側の変形等が考慮されていないため実際の竜巻飛来物衝突現象に対して保守的な評価であると推定されるが, その影響は明らかにされていない.

本報告では, ひし形編み込み鋼製ワイヤネットに対して, 網目部にストレートワイヤを通した類似構造ネット(TECCO ネット)を用いて衝撃試験を行った. 試験では衝突物を白井らの評価に基づく「限界吸収エネルギー未満」, 「限界吸収エネルギーを上回る」エネルギーのそれぞれで衝突させることにより評価手法の裕度を確認するとともに, 衝突後のネットおよび衝突物の確認を行い,

<sup>†</sup> 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: hayashi.naohiro@tepcoco.jp

表-1 設計対象の飛来物諸元

飛来物種別	鋼製材	足場板
飛来物形状	0.2m×0.3m×4.2m	0.25m×0.04m×4.0m
飛来物速度	12.636m/s	58.315m/s
飛来物質量	135kg	14kg
飛来物エネルギー	11.0kJ	24.0kJ

表-2 試験に使用する衝突物

衝突物種別	鋼製材	足場板
衝突物形状	0.2m×0.3m×4.2m	0.25m×0.04m×4.0m
衝突物速度	12.636m/s 以上	28.2m/s
衝突物質量	135kg 以上	61kg 以上
衝突物エネルギー	11.0kJ 以上	24.0kJ 以上

吸収エネルギー評価式に対する追加項目としてストレートワイヤの摩擦力について検討した。また、飛来物の種別による影響や複数回の飛来物衝突に対する吸収エネルギー評価結果との比較を行った。

## 2. 試験に使用するネットの特性ならびに衝突物

### 2.1 防護ネット

本試験に使用したネット（TECCO ネット）の形状寸法を図-1に示す。TECCO ネットは、素線径 4mm、引張強さ  $1,770\text{N}/\text{mm}^2$  の硬鋼線を  $83\text{mm} \times 130\text{mm}$  のひし形状に編み込んだ異方性を有したネットであり、主に展開方向で荷重を受け持つ。また、メッシュ交点部にネットひし形部と同径、同強度の素線（ストレートワイヤ）を挿通して構成されている。

### 2.2 ネット試験体の構造

本試験におけるネット試験体の構造を図-2に示す。

ネットはシャックルを介してフレームドロップに固定され、フレームドロップは架構に巻き付けた固定用ロープと接続される構造とした。また、ネット端部は 3~4メッシュ間隔でフレームドロップに固定し、ロープ並行方向に自由度を有している。なお、一部試験ではフレームドロップにブレーキリング付属のワイヤロープを使用している。ここでブレーキリングと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、ワイヤ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部材を指す。

### 2.3 衝突物

試験に使用する衝突物は、表-1に示す設計対象の飛来物より選定した。設計対象の飛来物は、原子力規制庁が定める『原子力発電所の竜巻影響評価ガイド』<sup>4)</sup>を参考に発電所内に存在すると思われる一般的な建材を抽出し、速度については過去の竜巻の観測事例を踏まえ、風

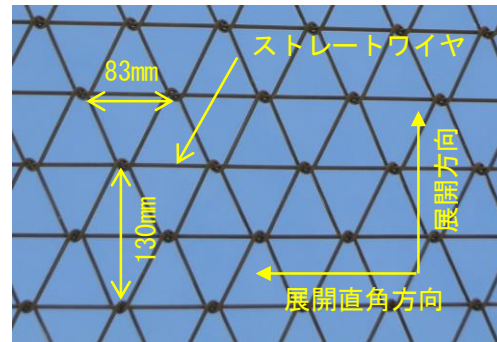


図-1 TECCO ネット形状寸法

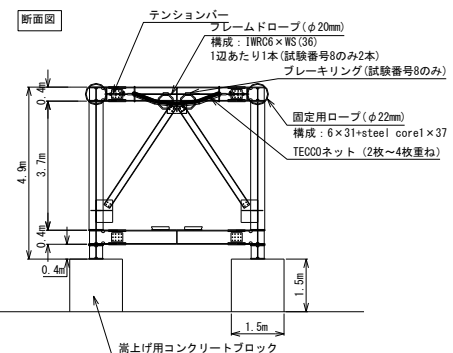
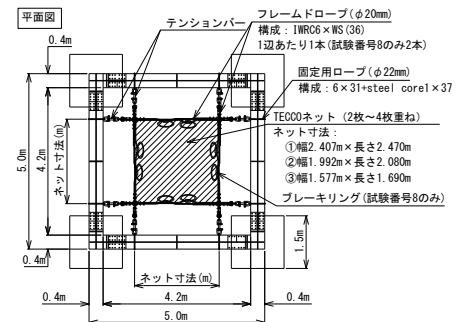


図-2 ネット試験体の構造

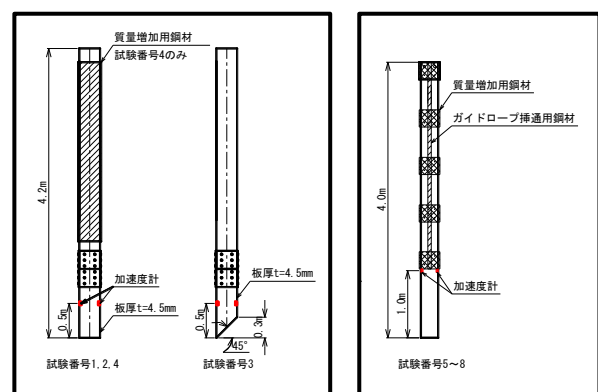


図-3 試験衝突物（左：鋼製材，右：足場板）

速 100m/s の竜巻を想定しフジタモデルで飛散させた場合の結果に基づき設定している。

試験に使用する衝突物は、クレーンを用いた自然落下方式において落下高さに限度があることから、必要な速度が確保されない場合には衝突エネルギーが等価となる

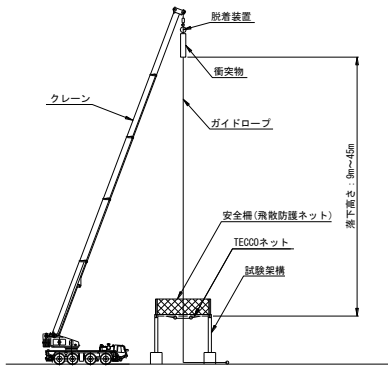


図-4 衝突物落下方法

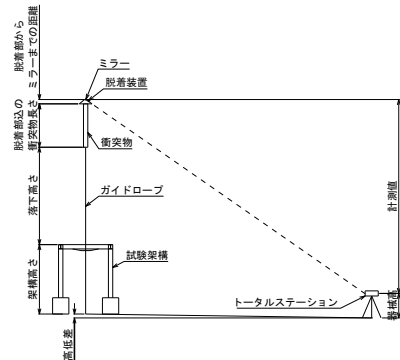


図-7 落下高さ計測方法

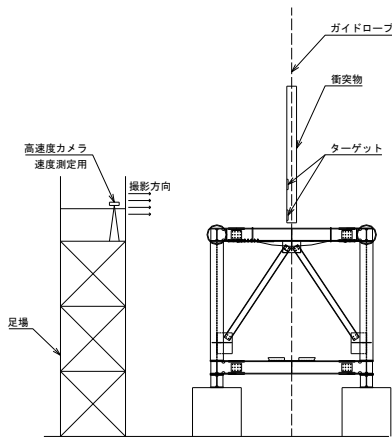


図-5 衝突物落下速度計測方法

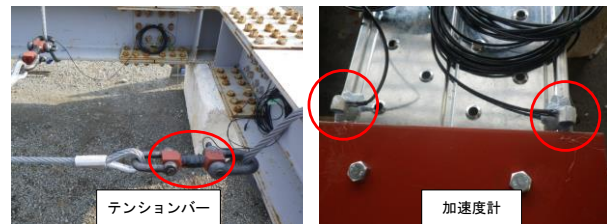


図-8 計測部材

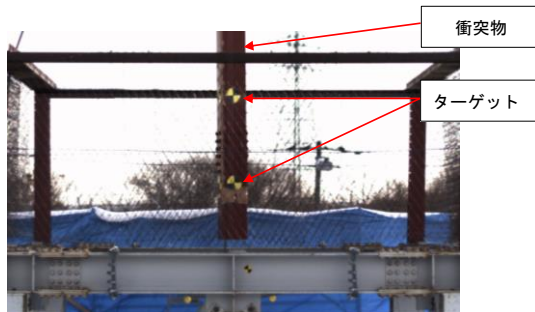


図-6 高速度カメラによる衝突物撮影状況 (鋼製材)

ように質量を増加させた (表-2 および図-3 参照)。また、衝突物の質量を増加させる際には衝突物の長さおよび先端形状 (先端から 1.0m) は設計対象の飛来物と同じ仕様とし、質量増加用鋼材は落下時の重心が安定するよう配置した。さらに、鋼製材は一般的な角形鋼管と先端を斜めに切断 (エッジ加工) した 2 種類を使用した。なお、衝突物には加速度計を取り付けているが、ネット衝突時に加速度計が損傷することを防ぐため、先端より 0.5m 以上離れた位置に取り付けるものとし、特に先端変形が大きいと推測される足場板は 1.0m 離れた位置とした。

表-3 計測方法一覧

項目	計測方法	図番号
落下速度	衝突物に貼り付けたターゲットが通過する速度を高速度カメラにて計測した画像より算出	図-5
ネット変形量	飛来物に貼り付けたターゲットの軌跡を高速度カメラにて計測し、その結果を基にネット変形量を導く	図-6
落下高さ	衝突物上部付近に取り付けたミラーと地盤高との関係性をトータルステーションにより計測	図-7
フレームドロープ張力	ロープ端部に校正済みのひずみ計測用部材 (テンションバー) を取り付け、衝突時に計測したひずみにより張力を導く	図-8
加速度	衝突物に取り付けた加速度計により計測	図-8

### 3. 試験内容

#### 3.1 試験目的

本試験は鋼製材を用いた試験と足場板を用いた試験の 2 種類に区分され、それぞれ実施の目的が異なる。

##### (1) 鋼製材を用いた試験

同一ネットへの複数回衝突の捕捉性能を確認すること、TECCO ネットの限界捕捉性能の確認を行うことを目的とした。

##### (2) 足場板を用いた試験

ネット衝突時における足場板の挙動を確認するとともに、既往の知見<sup>5)</sup>が無いネット 3 枚重ね、および 4 枚重ねの有効性を確認することを目的とした。

表-4 試験ケースおよび試験結果 (試験番号 1~4)

試験区分		鋼製材を用いた試験			
試験番号		1	2	3	4
ネット寸法(m)		2.407×2.470	2.407×2.470	2.407×2.470	2.407×2.470
ネット枚数(枚)		2	2	2	2
衝突回数(x 回目)		1	2 <sup>※4</sup>	1	1
ロープ本数	1 辺当たり	1	1	1	1
	合計(4 辺当たり)	4	4	4	4
ブレーキリング <sup>6)</sup> の有無		無	無	無	無
ネット端部 <sup>※2</sup> の接続交点		56	56	56	56
衝突箇所		中央	中央	中央	中央
テンションバーひずみ計測		有	有	有	無
衝突物諸元	種類	鋼製材	鋼製材	鋼製材(エッジ)	鋼製材
	幅(m) <sup>※1</sup>	0.30	0.30	0.30	0.30
	高さ(m) <sup>※1</sup>	0.20	0.20	0.20	0.20
	長さ(m) <sup>※1</sup>	4.20	4.20	4.20	4.20
質量(kg) <sup>※1</sup>		197.0	196.0	191.0	693.0
落下高さ(m) <sup>※1</sup>		9.287	45.213	9.191	25.069
衝突速度(m/s) <sup>※1</sup>		13.30	29.00	13.40	22.10
衝突時のネット変形量(m) <sup>※1</sup>		0.941	1.079	0.944	2.267
ネット端部	破断数(割合) <sup>※1</sup>	0(0%)	12(21%)	0(0%)	33(59%)
	残存数(割合) <sup>※1</sup>	56(100%)	44(79%)	56(100%)	23(41%)
捕捉の可否		捕捉可	捕捉可	捕捉可	捕捉可
総入力エネルギー(kJ) <sup>※3</sup>		19.2	84.5	18.9	184.6
評価式による限界吸収エネルギー(kJ)		45.6	45.6	45.6	45.6
ネットの有効交点数(箇所)		12	12	8	12
評価式による交点 1 点当たりの荷重(kN)		3.0	14.0	4.4	28.9
交点 1 点あたりの破断強度(kN)		22.5	22.5	22.5	22.5

※1 実測値を示す。

※2 ネット端部とは、シャックルを介してフレームドロップと接続した箇所を示す。

※3 総入力エネルギーとは、ネット衝突時の衝突物の運動エネルギーと衝突後のネット変形量における位置エネルギーとの和を示す。

※4 試験番号 2 は試験番号 1 のネットを無補修の状態です再衝突させたものである。

### 3.2 衝突物落下方法

図-4 に本試験における衝突物の落下方法を示す。落下方法は、衝突物をクレーンで吊り上げ、油圧で作動する脱着装置により切り離し落下させた。本試験における衝突物の落下高さは、クレーンの性能から 9m~45m の範囲内とし、衝突物の質量に応じて、必要な衝突エネルギーが確保できる高さに設定した。ここで、落下高さとは衝突物の下端部から架構天端間の高さを示している。

また、目標位置に確実に衝突させるため、および衝突物の飛散防止のために、衝突物はクレーンから地盤間に取り付けたガイドロープを通して落下させた。

### 3.3 各種計測方法

衝突物の落下速度、ネット変形量、落下高さ、ロープ張力、加速度については、それぞれ表-3、図-5~8 に

示す方法で計測を実施した。

### 3.4 試験ケース

表-4 および表-5 に各試験ケースの衝突物諸元および試験結果を示す。衝突物は図-3 に示したように大きく分けて 2 種類に区分されるが、各ケースで衝突物質量は異なる。試験に使用するネット寸法およびネット枚数は白井ら作成のネット評価式<sup>3)</sup>におけるエネルギー吸収の評価式および貫通性能の評価式を用いて、ネットが衝突物を捕捉可能な仕様として設定した。各評価式を(1)~(3)式に示す。

$$E_i = 2K_x \delta_i^2 - K_x L_x \left( \sqrt{4\delta_i^2 + L_x^2} - L_x \right) \quad (1)$$

表-5 試験ケースおよび試験結果 (試験番号5~8)

試験区分		足場板を用いた試験			
試験番号		5	6	7	8
ネット寸法(m)		2.407×2.470	1.992×2.080	1.577×1.690	2.407×2.470
ネット枚数(枚)		2	3	4	2
衝突回数(x 回目)		1	1	1	1
ロープ本数	1 辺当たり	1	1	1	2
	合計(4 辺当たり)	4	4	4	8
ブレーキリングの有無		無	無	無	有
ネット端部 <sup>※2</sup> の接続交点		56	48	40	56
衝突箇所		中央	中央	中央	中央
テンションバーひずみ計測		有	有	有	有
衝突物諸元	種類	足場板	足場板	足場板	足場板
	幅(m) <sup>※1</sup>	0.25	0.25	0.25	0.25
	高さ(m) <sup>※1</sup>	0.04	0.04	0.04	0.04
	長さ(m) <sup>※1</sup>	4.00	4.00	4.00	4.00
質量(kg) <sup>※1</sup>		62.0	63.0	70.0	64.0
落下高さ(m) <sup>※1</sup>		45.048	44.324	42.331	44.168
衝突速度(m/s) <sup>※1</sup>		29.50	29.30	27.70	28.90
衝突時のネット鉛直変形量(m) <sup>※1</sup>		1.015	0.885	0.746	0.606
ネット端部	破断数(割合) <sup>※1</sup>	0(0%)	0(0%)	0(0%)	0(0%)
	残存数(割合) <sup>※1</sup>	56(100%)	56(100%)	56(100%)	56(100%)
捕捉の可否		捕捉可	捕捉可	捕捉可	捕捉可
総入力エネルギー(kJ) <sup>※3</sup>		27.6	27.5	27.4	27.1
評価式による限界吸収エネルギー(kJ)		45.6	40.2	36.8	45.6
ネットの有効交点数(箇所)		6	6	6	6
評価式による交点1点当たりの荷重(kN)		9.2	7.4	7.1	9.1
交点1点あたりの破断強度(kN)		22.5	22.5	22.5	22.5

※1 実測値を示す。

※2 ネット端部とは、シャックルを介してフレームドロープと接続した箇所を示す。

※3 総入力エネルギーとは、ネット衝突時の衝突物の運動エネルギーと衝突後のネット変形量における位置エネルギーとの和を示す。

$$E = \sum_{i=1}^{N_y} E_i \quad (2)$$

$$F_0 = \frac{4mv_0^2}{3d_{\max}} \quad (3)$$

ここで、E：吸収エネルギー(kJ)、K：等価剛性(kN/m)、 $\delta$ ：ネットたわみ量(m)、L：ネット長(m)、 $F_0$ ：最大衝撃荷重(kN)、m：飛来物質質量(ton)、 $v_0$ ：衝突速度(m/s)、 $d_{\max}$ ：飛来物衝突後の移動量(m)となる。また、交点1点あたりの荷重は最大衝撃荷重 $F_0$ に対し、衝撃荷重が作用する交点数(有効交点数)で除した値として算出した。

ネット評価式には図-9および表-6に示すTECCO ネット引張試験結果より得られたネット交点特性を使用した。この試験は図-10に示すように展開方向7メッシュ×展開直角方向13メッシュの矩形ネットに対するネッ

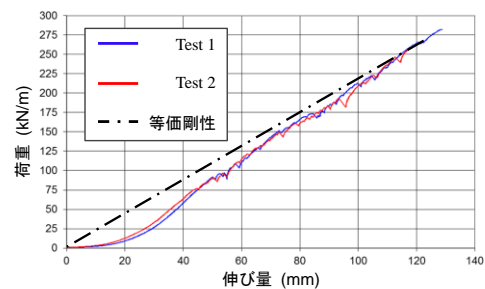


図-9 TECCO ネット引張試験結果

表-6 TECCO ネット交点特性

破断荷重 (kN)	破断伸び量 (mm)	吸収エネルギー (J)	等価剛性 (kN/m)
22.5	17.6	198	1278



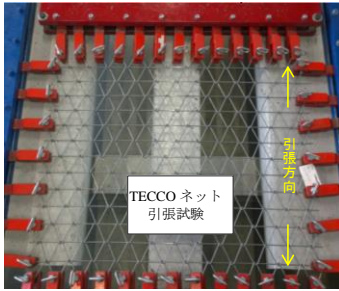


図-10 TECCO ネット引張試験状況

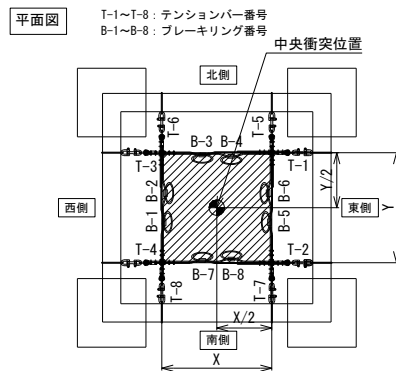


図-11 各設定位置図

ト展開方向の静的引張試験である。

ここで、図-11 にテンションバー、ブレイキリング位置および設定衝突位置を示す。なお、白井らの試験<sup>3)</sup>との違いとして使用したネットの構造に加え、本試験ではフレームドロップとネットの固定にはシャックルを用い、適切なピッチを設けて設置している。一方、白井らの試験では、ネットの目合いすべてにワイヤロープを通して固定しており、固定される目合い数に違いはあるが、ネット端部がロープ並行方向に自由度を有している点はいずれも同様であり、ロープで固定していない目合いについても、目合い間で荷重が伝達され変形が生じていることから、参考文献3に示されるエネルギー評価式の適用を妨げるものではないと考える。

なお、捕捉の可否の判断は、『衝突物がネットを貫通せず、ネット上で静止した状態にあること』とした。

## 4. 試験結果

### 4.1 鋼製材を用いた試験

#### (1) ネット変形および損傷状況

図-12 に衝突後のネット状況を示す。

試験番号 1 は設計対象の飛来物エネルギーを超える 19.2kJ のエネルギーを有する鋼製材をネット中央部に衝突させたものである。結果として、ネット端部に軽微な素線変形が確認されたが、ネット衝突部およびネット端部の破断は確認されず、鋼製材は安定した状態で捕捉された。

試験番号 2 は試験番号 1 の試験実施後に、ネットの補修を行わないまま、評価式による限界吸収エネルギー 45.6kJ の 1.8 倍程度である 84.5kJ のエネルギーを有する鋼製材をネット中央部に衝突させたものである。なお、この衝突エネルギーは試験番号 1 の結果からネットの限界吸収エネルギーが評価式による限界値よりも大きいと想定されたため、試験番号 1 と同程度の質量を有する鋼製材を、試験に使用したクレーンの限界高さから落下させるものとして設定した。結果として、ネット衝突部付近に軽微な変形が生じ、ネット端部に 56 箇所中 12 箇所の素線破断が確認されたが、鋼製材は安定した状態で捕捉された。この結果から、本試験に用いた TECCO ネットは想定する飛来物の複数回衝突に対して有効であること、またネット評価式による限界吸収エネルギーよりも 1.8 倍以上の裕度を有していることが確認された。

試験番号 3 は試験番号 1 と同程度のエネルギーを有し、先端がエッジ加工となる鋼製材をネット中央部に衝突させたものである。結果として、ネット衝突部付近およびネット端部に軽微な変形が生じたが、ネットの破断は確認されなかった。図-13 に示すように試験番号 1 では、鋼製材衝突部付近に局所的な変形は確認されなかったが、試験番号 3 では局所的な変形が確認された。総入力エネルギーが同程度であるにもかかわらず、局所変形が生じた理由としては、ネットへの鋼製材の衝突面積が試験番号 1 に比べ小さいために局所的に力が集中したものと考えられる。この結果は白井らの貫通性能の評価式における飛来物の衝突面積と貫通評価に使用するネット有効交点が比例関係となる設計の考えと一致する。

試験番号 4 は試験番号 2 の結果を基にネットの限界性能を想定した試験である。試験番号 2 の結果より鋼製材衝突時には衝突部ではなく、ネット端部から破断していく傾向にあることが確認された。また、既往の試験<sup>3)</sup>ではネット端部の破断傾向はネットの拘束方法により影響を受けることが確認されており、四辺を完全拘束する場合はネットが十分に変形する前に衝突部が貫通し、ネット端部に自由度を多く設けた場合はネットが十分に変形し、衝撃吸収機能が十分に機能するが、ネット端部からの破断が生じやすくなるものと見受けられる。これらを踏まえ、ネット端部の破断数と総入力エネルギーには比例関係があると仮定し、試験番号 4 ではすべての端部が損傷するものと想定される飛来物エネルギーを設定した。

本試験では、エネルギー吸収の評価式による限界吸収エネルギー 45.6kJ の 4 倍程度のエネルギー 184.6kJ を有し、かつ貫通性能評価において交点の破断強度 22.5kN の 1.3 倍程度の 29.0kN が作用する鋼製材をネット中央部に衝突させた。結果として、ネット衝突部付近は大きく変形し、ネット端部においては 56 箇所中 33 箇所の素線破断が確認されたが、鋼製材は貫通することなく捕捉された。

素線破断箇所が全交点の 60% 近い 33 箇所であること、またその他交点付近についても素線が大きく変形してい

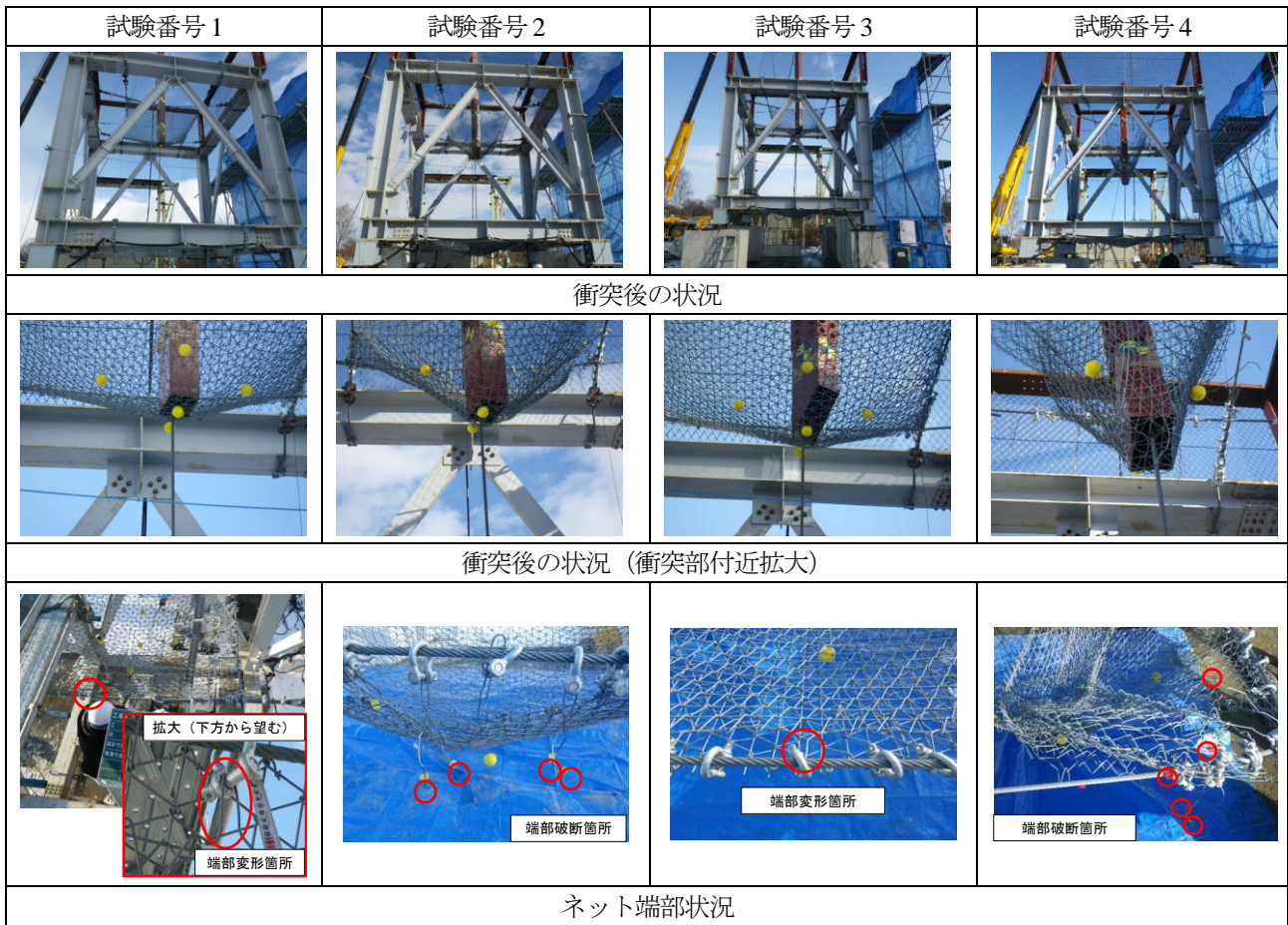


図-12 衝突後のネット状況（試験番号1~4）

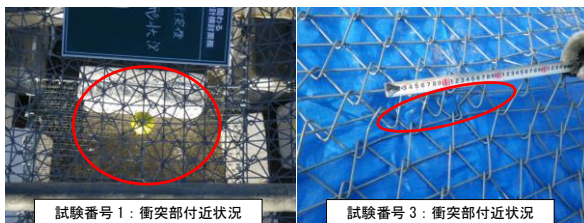


図-13 衝突部付近変形箇所比較

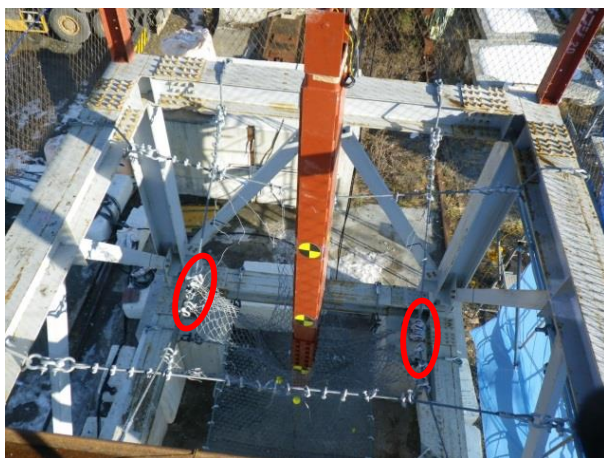


図-14 衝突後のシャックル移動状況（試験番号4）

測される。この結果から、第1回目衝突の場合、TECCO ネットのエネルギー吸収能力は評価式で評価されたものの4倍程度、貫通性能は評価式で評価された1.3倍となることが確認された。なお、図-14に示すようにネット端部が破断した場合、ネット端部に配置されるシャックルがネット中央方向に移動することでネットたわみ量が大きくなる傾向となることが確認された。

試験番号1および3の素線変形、試験番号2の素線破断はネット展開方向端部のみであり、試験番号4の素線破断はネット展開方向端部全箇所に加え、ネット展開直角方向端部が数箇所であることが確認された。これはネットが異方性を有していることから、展開方向に荷重が集中する傾向にあるためと考えられる。また、ネット端部が破断する理由としては、施工性を考慮しネット端部に取り付けるシャックルを3~4メッシュ間隔での配置としていることから、ネット端部への負担が大きくなるためと考えられる。

## (2) 衝突後の鋼製材先端変形状況

図-12の衝突部の状況（衝突部付近拡大）においてネット衝突後の鋼製材先端変形状況が確認できる。試験番号1~4の全ケースにおいて、鋼製材先端の変形はほとんど確認されず、試験番号1~4において衝突物側でのエネルギー吸収はなかったものと考えられる。

ることから、ネットは限界に近い状態だったものと推



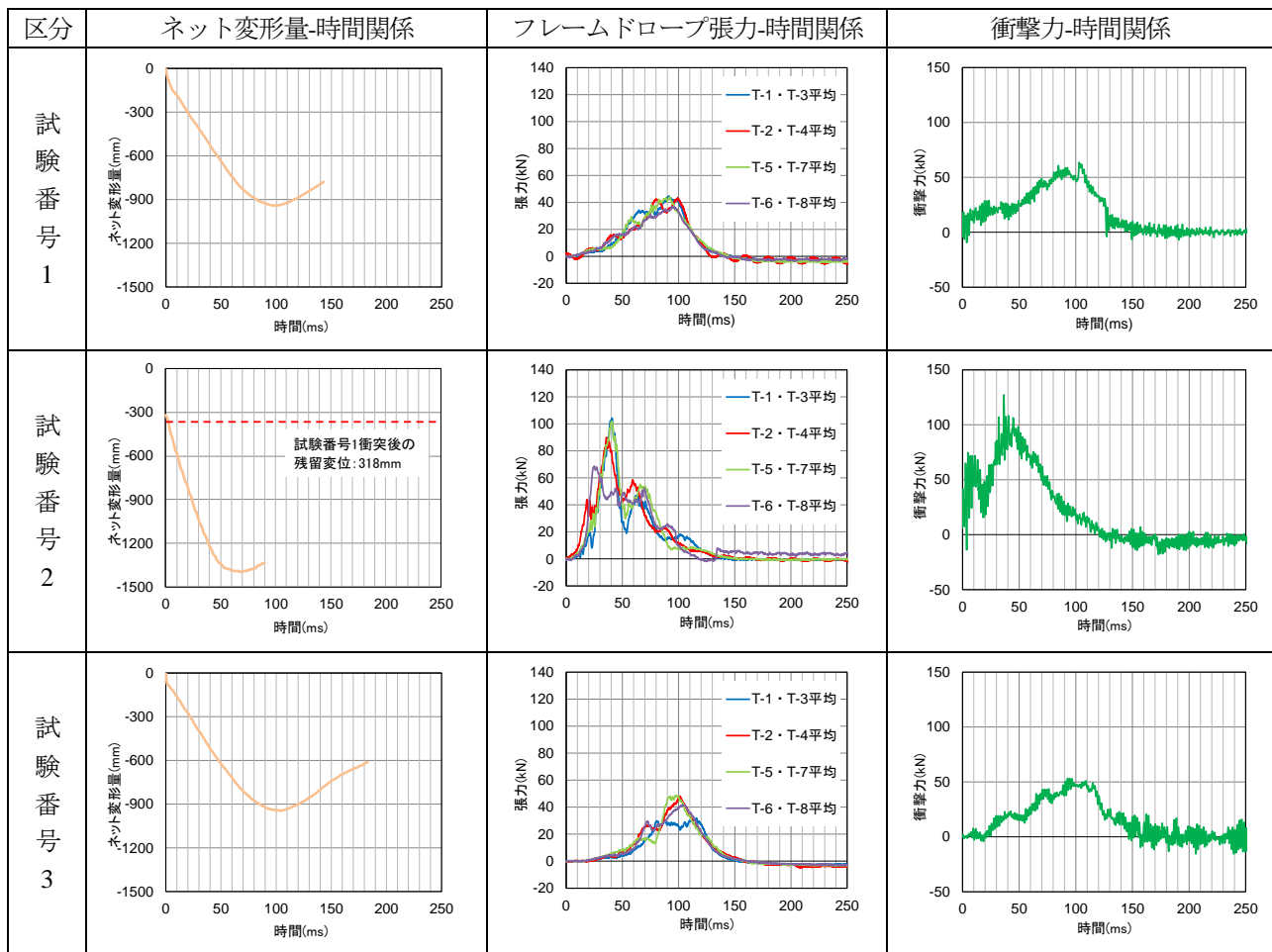


図-15 時刻歴グラフ一覧（試験番号1～3）

### (3) 試験毎の時刻歴関係

試験番号1～3において、図-15に時刻歴グラフ一覧を、図-16にネット変形の時刻歴図を示す。ここで、図-15に示す衝撃力-時間関係図に示す衝撃力は、計測により得られた加速度に質量を乗ずることにより導いたものである。試験番号4においては、ネットの限界性能を確認する試験であったため、各種計測は割愛した。

なお、ネット変形量-時間関係図は衝突物がネットに衝突してからリバウンドするまでを示している。

試験番号1におけるフレームドロップ張力および衝撃力のピークは90ms～100ms付近となり、ネット変形量のピークである100ms付近と概ね一致する。

試験番号2におけるフレームドロップ張力のピーク値は40～50ms付近となり、試験番号1と比べ、早い時間にピーク値を迎えている。ここで、図-16の0ms時のネット変形量を比較すると、試験番号2は試験番号1よりも変形量大きいことが確認できる。これは、試験番号2が試験番号1に使用したネットを補修なしに使用しているため、ネットに318mm程度の残留変位が生じており、部分的に塑性変形しているものと考えられる。以上より、試験番号2のネットはたるみが取れた状態であったことから、ネットからロープへ荷重が伝搬する速度が

速くなったものと推測できる。また、ネット変形量のピークは70ms付近となっているが、フレームドロップ張力および衝撃力のピークは40～50msと若干の誤差が生じている。これは40ms～50ms付近で荷重のピークを迎えた時点でネット端部の破断が始まったことにより、衝撃力は下がり始めるが、ネットの変形は増大したものと考えられる。その後、フレームドロップ張力は最大変形60ms～70ms付近で再び小さいながらピークを示している。

試験番号3におけるフレームドロップ張力および衝撃力のピークは100ms付近となり、ネット変形量のピークである100ms付近と概ね一致する。

また、試験番号1と試験番号3を比較すると、ネット変形量は同様な波形を示し、またそのピーク値はほぼ一致する。ロープ張力、衝撃力においてもピーク発生時間およびピーク値はほぼ一致する結果が得られている。この結果から、鋼製材先端の形状が異なる場合でも、ネット全体の変形や各種荷重の応答値は概ね同傾向となることが確認された。

















試験番号 1	試験番号 2	試験番号 3
		
0ms	0ms	0ms
		
30ms	30ms	30ms
		
60ms	60ms	60ms
		
90ms	70ms (ピーク時付近)	90ms
		
100ms (ピーク時付近)		100ms (ピーク時付近)

図-16 ネット変形の時刻歴図 (試験番号 1~3)

## 4.2 足場板を用いた試験

### (1) ネット変形および損傷状況

衝突後のネット状況を図-17 に示す。

試験番号 5 は設計対象の飛来物エネルギーを超える 27.6kJ のエネルギーを有する足場板をネット中央部に衝突させたものである。結果として、ネット衝突部およびネット端部に軽微な素線変形が確認されたが、ネットの破断は確認されず、足場板は安定した状態で捕捉された。

試験番号 6 および試験番号 7 は試験番号 5 とネット枚数およびネット寸法が異なるものであった。試験番号 5 と同程度のエネルギーを有する足場板をネット中央部に

衝突させたが、ネット端部の素線変形度合は試験番号 5 よりも小さい結果となった。これはネット枚数が多いために力が分散したものと考えられる。結果としては、ネットの破断は確認されず、足場板は安定した状態で捕捉されたことから、ネットは 3 枚、および 4 枚重ねに対しても十分な捕捉性能を有することが確認された。

試験番号 8 は試験番号 5 と同様な試験であるが、構造上、ネット周辺のフレームドロープに緩衝装置であるブレーキリングを設置している点が異なる。結果として、ネット衝突部にのみ軽微な素線変形が確認されたが、ネットの破断は確認されず、足場板は安定した状態で捕捉



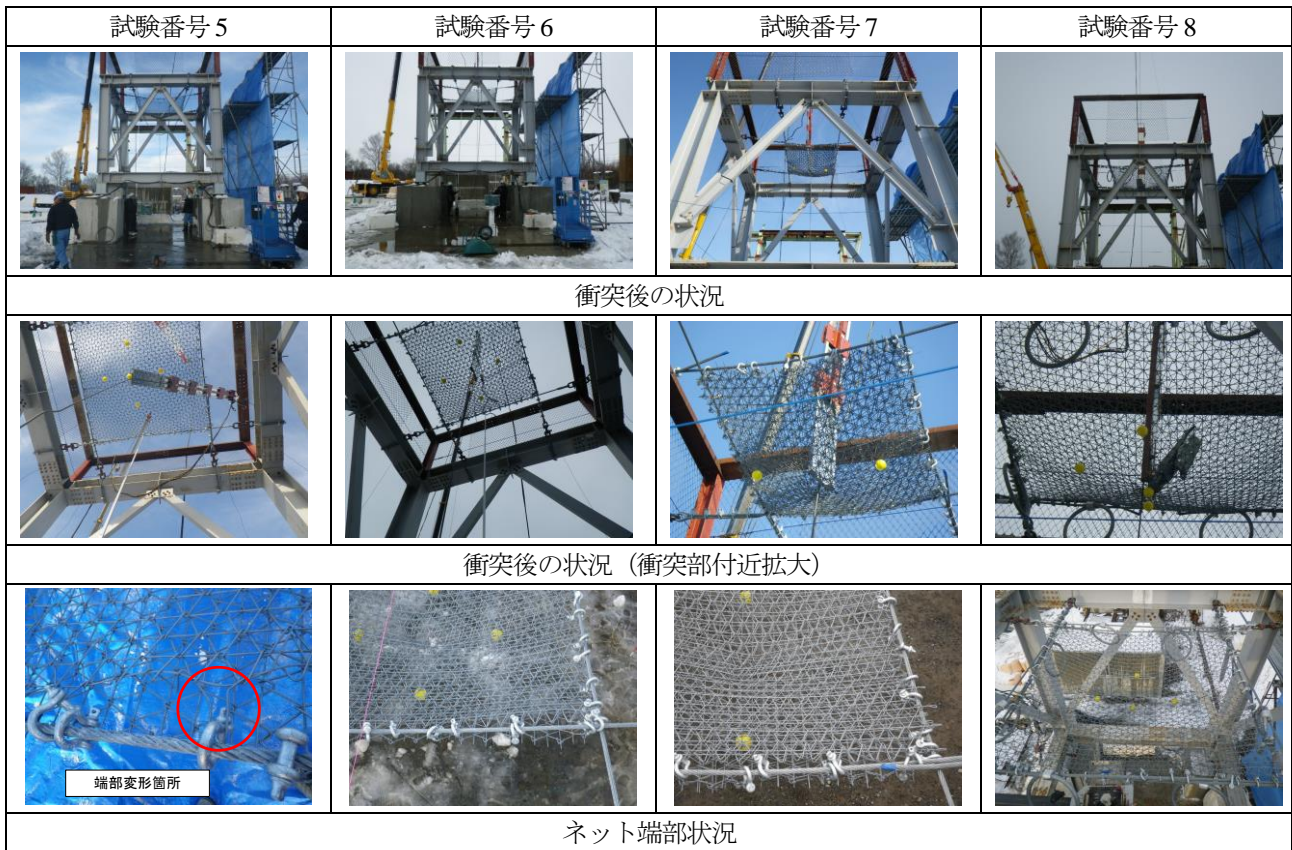


図-17 衝突後のネット状況 (試験番号5~8)

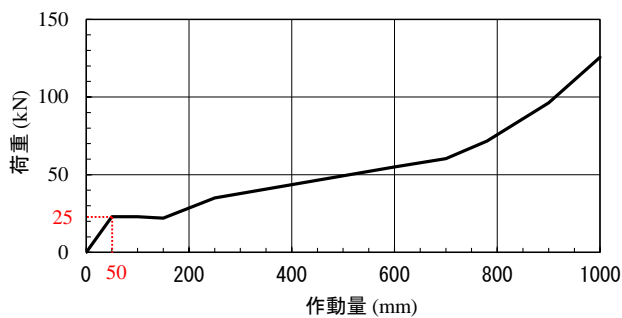


図-18 ブレーキリング引張試験結果

された。なお、ブレーキリングの静的引張試験(図-18)において、ワイヤロープに25kN以上の張力が作用した場合、ブレーキリングが大きく作動し始めている様子が確認されるが、本試験ではワイヤロープに最大40kN程度の張力が作用したにも関わらず、ブレーキリングはほとんど作動しない結果となった。これは作用した張力が40kNと比較的小さいこと、また張力の作用時間が短かったことから、ブレーキリングが大きく作動しなかったものと考えられる。

(2) 衝突後の足場板先端変形状況

図-19 にネット衝突後の足場板先端変形状況を示す。試験番号5~8の全ケースは同程度のエネルギーを有する試験であったにもかかわらず、その変形度合が異なっていた。これは同程度のエネルギーの衝突であったとし

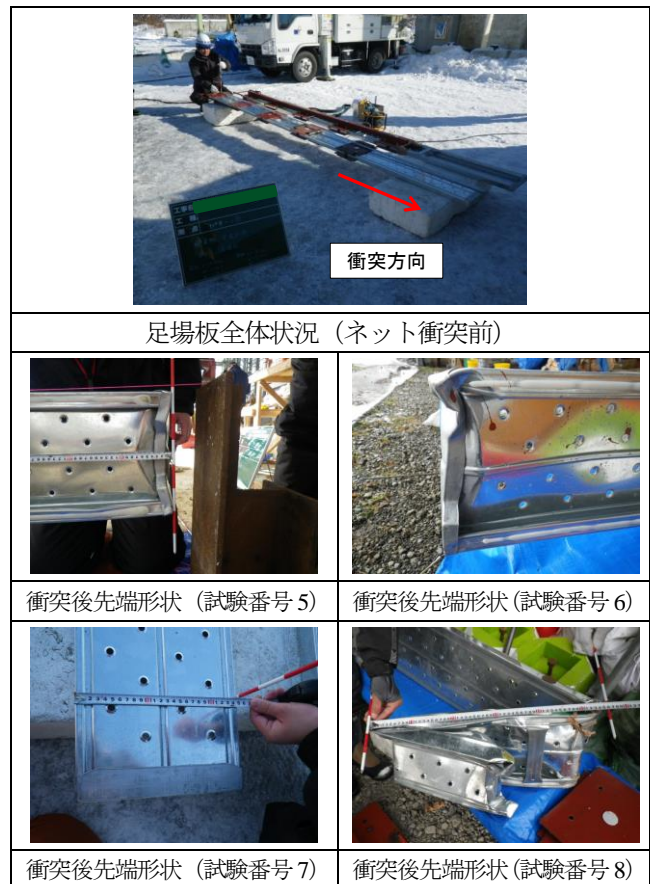


図-19 衝突後の足場板先端形状

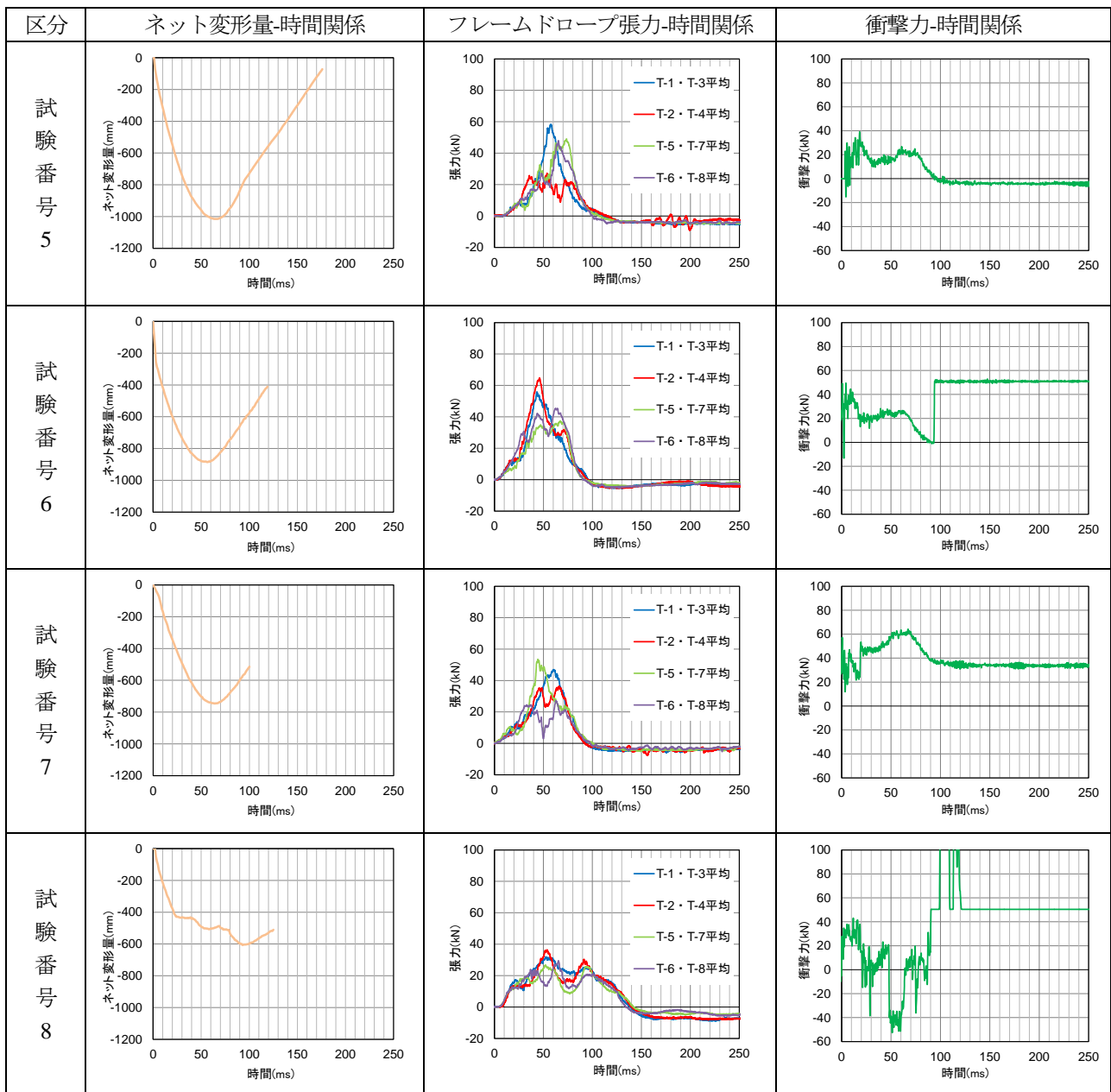


図-20 時刻歴グラフ一覧 (試験番号5~8)

でも衝突時の微小な角度の違い，ネットと衝突物との衝突条件によって変形状況が異なるものと推測される。したがって，足場板衝突時には変形の度合いが様々であるため，設計時では衝突物側のエネルギー吸収は考慮しないことで保守的な評価になるものと考えられる。

### (3) 試験毎の時刻歴関係

図-20 に時刻歴グラフ一覧を，図-21 にネット変形の時刻歴図を示す。

試験番号 5 におけるフレームドロープ張力は 60ms~70ms 付近でピークを迎えており，ネットの変形量のピークである 70ms 付近と概ね一致する。衝撃力は 0ms~20ms にかけて増加し，20ms 付近で一時的に減少傾向となる。これは足場板先端が変形したことにより，衝撃力が一時的に緩和されたものと考えられる。

試験番号 6 におけるフレームドロープ張力は 50ms~60ms 付近でピークを迎えており，ネット変形量のピークである 60ms 付近と概ね一致する。衝撃力は 0ms~10ms にかけて力が増加し，10ms 付近で一時的に減少傾向となる。これは試験番号 5 と同様に足場板先端が変形したことにより，衝撃力が一時的に緩和されたものと考えられる。

試験番号 7 におけるネット変形量のピークは 60ms 付近となっており，フレームドロープ張力および衝撃力のピーク値も同様に 60ms 付近となっている。図-19 に示すように，足場板先端に変形が生じていないことから，衝撃力の緩和は確認されない。

試験番号 8 におけるネット変形量は，20ms~40ms 付近，50ms~70ms 付近それぞれでネットの変形が一時的



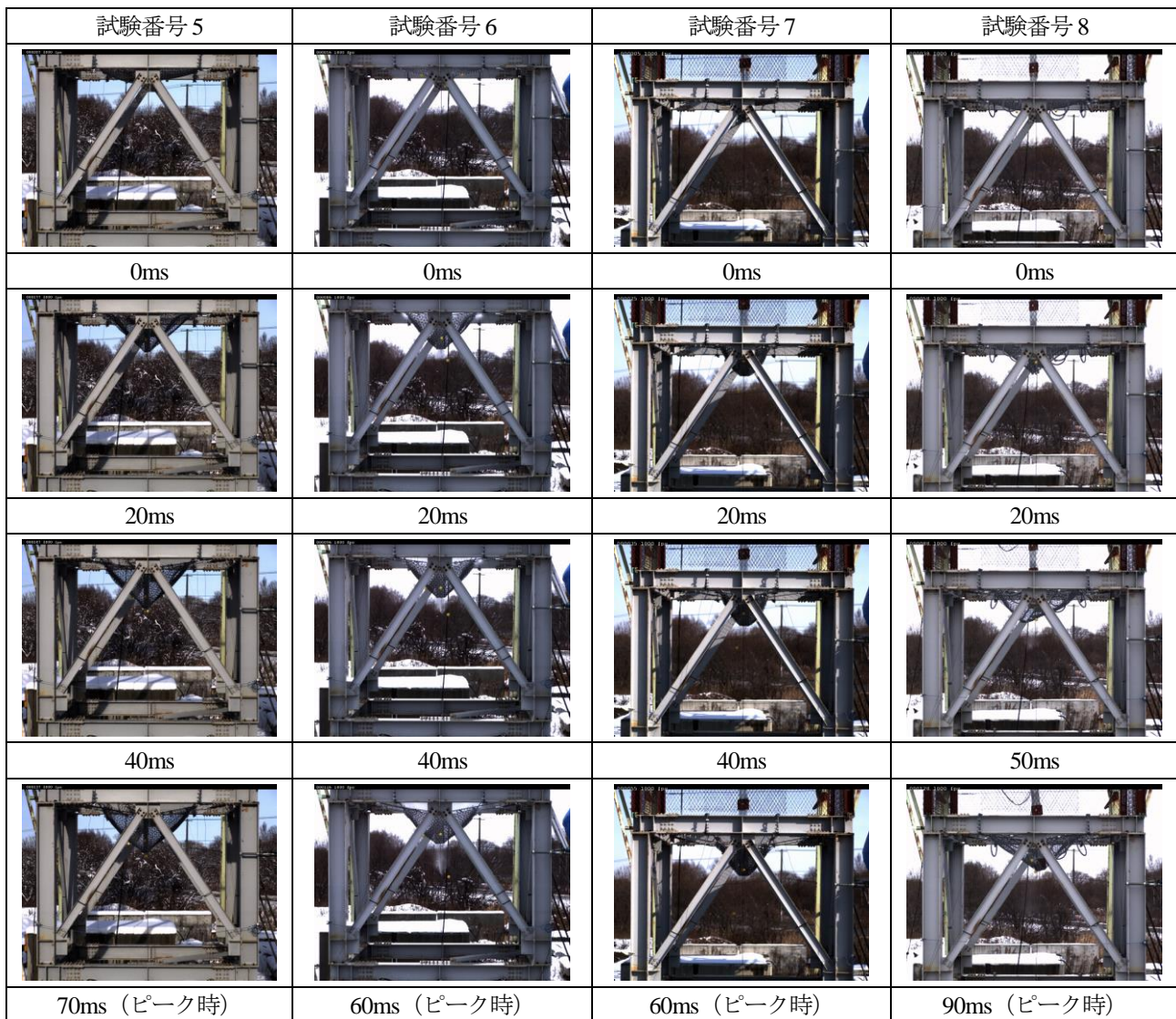


図-21 ネット変形の時刻歴図 (試験番号 5~8)

に停止している。また、衝撃力は20ms付近および50ms付近で減少している。ここで、図-21の連続写真を確認すると、20ms付近で足場板先端に変形が生じ、50ms付近でさらに変形が生じていることが分かる。これより、20ms付近および50ms付近のそれぞれで足場板先端の変形が生じたことにより、衝撃力が緩和され、ネットの変形も抑制されたものと考えられる。また、他の3ケースと比較すると、同じような衝突エネルギーの試験であるにもかかわらず、ロープ張力の最大値は他のケースよりも小さい値を示している。これについても足場板先端の変形によるものと考えられる。

ここで、試験番号5~7の3ケースは衝突エネルギーが同程度であるが、ネットの枚数や寸法が異なる試験である。これらと比較すると、ネット変形の波形は同傾向を示すが、試験番号5~7にかけて最大変形量が小さくなる傾向が確認される。これはネット寸法および面積が小さいほどネット最大変形量が小さくなるためと考えられる。また、フレームドロップ張力においては試験番号5~7

の3ケースでピーク値が同程度を示している。これらの関係性を以下のように推測した。

- ① ネットの枚数が少ない構成の場合、ネット1枚に作用する張力は比較的大きくなる。
- ② ネットの枚数が多い構成の場合、ネット1枚に作用する張力は比較的小さくなる。
- ③ 試験番号5~7においては、ネットの寸法および枚数は異なるものの、ネット合計の張力としては同程度となる。
- ④ ネット合計の張力がロープに作用するため、試験番号5~7におけるロープの作用張力最大値は同程度となる。

上記関係性が試験番号8では確認されなかった要因としては、足場板の先端変形により衝突エネルギーの一部を吸収してしまったためと考えられる。

## 5. TECCO ネットのストレートワイヤ構造による散逸エネルギーの試算

試験番号2および4の結果より TECCO ネットはネット



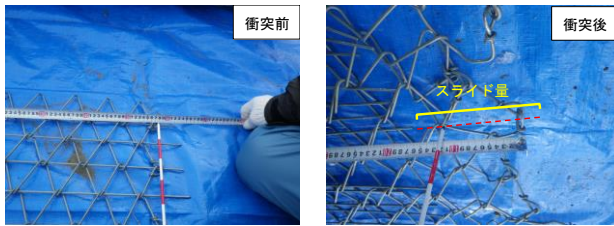


図-22 交点のスライド



図-23 試験番号2の交点のスライド状況

ト評価式による限界吸収エネルギーを上回る性能を有していることが確認された。この理由としては、TECCO ネットには金網に加え、ネット評価式では考慮されていないストレートワイヤを挿通しているため、飛来物衝突時において編み込み交点部との摩擦による抵抗力がエネルギー吸収に寄与しているものと考えられる。

したがって、本項ではこの交点とストレートワイヤによるエネルギー吸収性能について検討を行うものとする。なお、試験番号2および試験番号4においてネット端部の破断も確認されるが、ネットの破断によるエネルギー吸収機構は複雑であるため、本考察ではネットの破断に関するエネルギー吸収は考慮せず、比較的ネットの破断が少ない試験番号2の結果を基に交点とストレートワイヤのエネルギー吸収性能について検討を試みた。

### 5.1 ストレートワイヤの摩擦力

先述のとおり、ネットは異方性を有していることから展開方向に張力が作用しやすい傾向となる。試験番号2

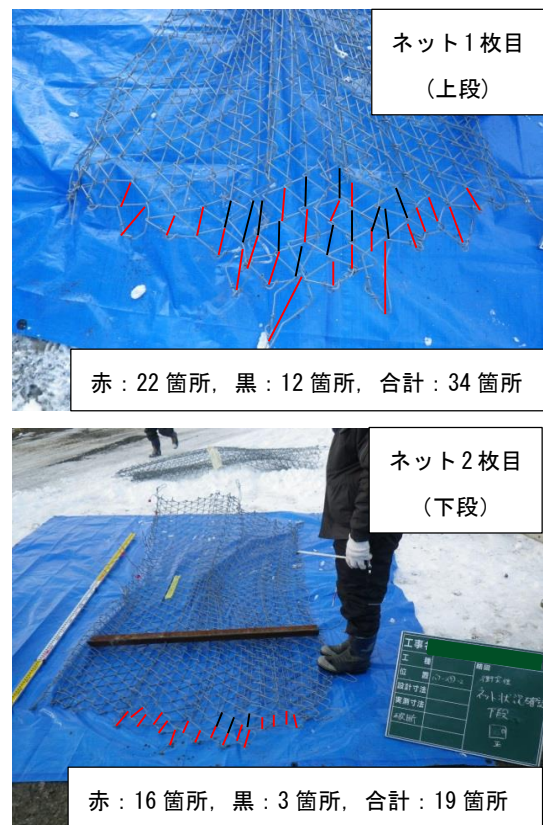


図-24 試験番号2の交点のスライド量推定  
(※隣り合うメッシュを区別するため黒と赤とに色分けしている。)

ではネット展開方向端部に破断が生じている箇所があることから、ネットは限界まで引き寄せられているものと考えられる。したがって、金網交点部-ワイヤ間に作用する摩擦力はワイヤが挿通される金網交点部の破断強度に摩擦係数を乗じたものと推測でき、さらに、ストレートワイヤは隣り合うひし形部よりそれぞれ引張を受けるため、編み込み交点のスライド量×2 箇所分の摩擦力が生じるものとする。

ここで、衝突前後のネット編み込み交点は図-22 に示すようにスライドすることが確認できる。

### 5.2 ネット編み込み交点の移動量

試験番号2の衝突後のネット状況を確認すると、図-23 に示すとおり、ネット編み込み交点が端部方向に引き寄せられ、変形する状況が確認された。

交点のスライド量は初期位置からネット変形後の端部位置までの距離とし、そのスライド量は図-24 より1箇所あたり展開直角方向のメッシュ寸法(83mm)がネット2枚で53箇所あるものと読み取れる。以上より、ネット2枚分のスライド量は  $83\text{mm} \times 53 \text{箇所} = 4399\text{mm}$  となる。

### 5.3 ストレートワイヤの散逸エネルギー量の推定

ネットは図-12 に示すとおり端部で編み込み交点の一部が破断していることから、ネット端部では交点破断

強度と同等の引張荷重が最終的に作用していると想定される。また、展開直角方向の編み込み交点端部側から順に大きく変形していることから、展開直角方向最端部の編み込みの交点から順次変形しながらストレートワイヤから引き抜けていったと想定される。

以上から、ストレートワイヤから引き抜けた編み込み交点では、ストレートワイヤとの間に引張荷重が作用した状態で摩擦力が作用していたと推定される。ここで、交点への荷重は飛来物衝突後の時間軸に対して一次関数的に増加すると仮定し<sup>3)</sup>、またストレートワイヤは一定の速度で引き抜けたと仮定する。この推定に基づき、交点に作用した摩擦力と交点の移動量によるエネルギー  $E_{sw}$  を(4)式のように仮定し算出した結果 19.8~49.5kJ となる。

$$E_{sw} = \frac{1}{2} f \cdot \mu \cdot n \cdot \Delta L \quad (4)$$

ここで、 $E_{sw}$ : ストレートワイヤの吸収エネルギー(kJ),  $f$ : 接触面に作用する荷重(22.5kN),  $\mu$ : 編み込み交点—ストレートワイヤ間の摩擦係数(0.2<sup>7)</sup>~0.5<sup>8)</sup>,  $n$ : 金網メッシュとストレートワイヤ間の接触交点数(2),  $\Delta L$ : スライド量(4.399m)を示す。摩擦係数については大きな値を用いると摩擦による散逸エネルギー量を過剰に見込むことから、金属間の一般的な静摩擦係数 0.5 程度に対して、より小さな金属間の摩擦係数の知見として参考文献 7 を参照し 0.2~0.5 として計算した。なお、ネットの素線には腐食防止のため金属めっきを用いていることから、金属接触での摩擦係数を参照している。

したがって、試験番号 2 における TECCO ネットの吸収エネルギー量はネット評価式によるネットのみの限界吸収エネルギー: 45.6kJ にストレートワイヤと金網との摩擦による散逸エネルギー量: 19.8~49.5kJ を加えた 65.4~95.1kJ となる。

これは、試験番号 2 の衝突エネルギー 84.5kJ と同程度となり、摩擦がエネルギー吸収に寄与している可能性が示唆された。

## 6. まとめ

TECCO ネットを用いた衝突試験を行ったことにより得られた結果を以下に示す。

- 1) 発電所内で想定される飛来物と同程度の衝突エネルギーを有する衝突物による試験を実施し、捕捉性能が十分であることを確認した。
- 2) 白井らが考案したネット評価式を用いて TECCO ネット

(ストレートワイヤを有するネット) の吸収エネルギーの評価が可能であることを確認した。

- 3) 編み込み交点とストレートワイヤとの間に摩擦が生じることにより、エネルギー吸収に寄与している可能性が確認された。
- 4) 足場板などの比較的変形が生じやすい飛来物の場合、変形の効果によってネットに作用する荷重が低減することが確認された。
- 5) 以上より、ストレートワイヤを有するネットを用いることで十分な裕度を有した防護ネットの設計が可能である。

## 謝辞

本試験を行うにあたり、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) 気象庁: 竜巻の年別発生確認数  
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/stats/annually.html> (2016.9.23 参照)
- 2) 気象庁: 竜巻等の突風の顕著な事例 (過去の主な事例)  
[http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/special/special\\_history.html](http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/tornado/special/special_history.html) (2016.9.23 参照)
- 3) 南波宏介, 白井孝治, 坂本裕子, 近藤俊介: 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: O01, 一般財団法人 電力中央研究所, 2016.3.
- 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) 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: N14009, 一般財団法人 電力中央研究所, 2015.3.
- 6) 原田怜, 星野賢治, 秋岡民康, 小室雅人, 栗橋祐介, 梅沢広幸: 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, 構造工学論文集 Vol.62A, 2016.3
- 7) 独立行政法人 原子力安全基盤機構: 貯蔵建屋内金属キャスク落下衝撃解析手法の整備に関する報告書, 2006.6
- 8) 社団法人 日本機械学会: 機械工学便覧 基礎編 α 2 機械力学, 2004.12

(2016年9月26日受付)

(2017年2月1日受理)