実物大落石防護網を用いた重錘衝突実験

Full Scale Experiments of Falling Rock Protection Net

高橋利延*・山本佳士**・香月 智***・高森 潔****

Toshinobu TAKAHASHI*, Yoshihito YAMAMOTO**, Satoshi KATSUKI***, Kiyoshi TAKAMORI****

* 防衛大学校理工学研究科 前期課程学生 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

** 博(工) 防衛大学校助教 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

*** 工博 防衛大学校教授 システム工学群建設環境工学科 (〒239-8686 神奈川県横須賀市走水 1-10-20)

**** 東京製綱株式会社エンジニアリング事業部 (〒103-8306 東京都中央区日本橋 3-6-2 日本橋フロント)

This paper presents full scale experiments of falling rock protection nets by using full scale falling rock collision test facilities. 4 types rock models, i.e. 0.35 to 2.5 ton in weight, and 6 types of collision energy parameters, i.e. 20 to 28 kJ, made by slopes set at vacant quarries are used. 4 types of real size nets, i.e. 5×15 to 15×30m are used as specimens. The dynamic deformation process of net are recorded by video and high speed camera, and the tensions of anchorage wire-ropes are measured by load cells. Experimental results are discussed from viewpoint of design code used in general.

Key words: falling rock protection net, full scale falling rock collision test, falling rock

1. 緒 言

わが国は、急峻な地形が多く、地震や火山活動も活発であり、台風や豪雨、豪雪に多く見舞われる¹⁾。一方で、交通需要の増加や都市開発により、困難な地形や地質条件を克服して交通網が拡大したため、落石災害が多く発生している。近年、落石対策の一方法として、写真-1に示すようなワイヤロープを用いたネット構造によって落石の道路侵入を防止する落石防護網が建設されている。

落石防護網は、施工期間が短く、景観性や環境面に優れているため広く使用されている。この構造の力学的な特徴は、ワイヤロープや金網で構成されており、非常に柔軟な構造であることに加えて、落石衝突に対して大きな変形を伴って落石を受け止めることにある。しかし、静的な荷重に対しても、大変形解析を要することや、主要部材であるワイヤロープは素線の応力を求めることが困難であるため、現行の設計では落石対策便覧²⁾で採用されているエネルギー照査手法が用いられることが多い。

これは、衝突直後の落石の運動エネルギーから完全非弾性衝突に基づく逸散エネルギーを差し引いたものが、ネットの変形エネルギーに変換されるという仮定を設け、予め設定されたネットの特定部位の可能吸収エネルギーに対する照査を行うものである。しかしながら、この仮定や、変形エネルギーを見込む部位の設定等の妥当性については、十分検証されていないのが現状である。

落石防護網を含むワイヤネット構造の衝撃応答特性の把握および性能評価に関する研究はこれまでに多く行わ

れてきている。例えば、吉田ら³⁾⁴⁾は、独自に開発した緩衝装置を組み込んだワイヤネット構造の重錘落下衝突実験を行い、緩衝装置および構造全体の力学応答および性能評価を行っている。また、小畑ら⁵⁾、田島ら⁶⁾も別の緩衝装置について同様な研究を行っている。

一方、大森ら⁷⁾は、ワイヤリングを用いたネット構造の重錘落下衝突実験を行うとともに、汎用有限要素解析コードを用いて解析を行い、実験との比較により解析手法の妥当性を示している。著者ら⁸⁾も、落石対策便覧に基づいて設計した一般的な構造を有する落石防護網の重錘衝突実験を行うとともに、円柱形要素を導入した個別要素法を用い、実験および解析両面から上述のエネルギー照査法の妥当性を検証している。また、福永ら⁹⁾および園田ら¹⁰⁾は、ワイヤリングを用いたネット構造の重錘落下衝突実験を行うとともに SPH 法を用いて解析を行い、同手法の適用性を示している。

以上の既往研究を総括すると、落石対策便覧に基づいて設計された基本的な構造を有する落石防護網を対象とし、

写真-1 落石防護網

図-1 実験供試体

表-1 ロープおよび金網の仕様

項目	部材仕様			
	供試体A	供試体B	供試体C	供試体D
サイズ (高さ×横幅)	5m×15m	15m×21m	15m×30m	15m×30m
部材	支柱吊ロープ	7×7, 18φ	7×7, 24φ	7×7, 30φ
	最上段横ロープ	7×7, 18φ	7×7, 24φ	7×7, 30φ
	縦主ロープ	3×7, 14φ	3×7, 18φ	3×7, 18φ
	横主ロープ	3×7, 14φ	3×7, 18φ	7×7, 24φ
	縦補助ロープ	1×7, 8φ	3×7, 14φ	3×7, 14φ
	横補助ロープ	1×7, 8φ	3×7, 14φ	3×7, 14φ
	金網	3.2φ	5.0φ	5.0φ

図-2 ロープ断面

かつ上述のエネルギー照査手法の妥当性の検証を目的とした研究は、少ないことがわかる。特に、エネルギー照査法の適用性もしくは、その限界について、構成および設置条件などを変化させて検討した例はない。したがって、実大規模、実供用条件下の実験により、落石防護網の力学応答およびエネルギー照査法の妥当性を検討することが必要である。

よって本研究は、実用スケールの15m 高規模の落石防

(a) 実験施設 I

(b) 実験施設 II

図-3 実験施設

護網に対するエネルギー照査型設計法の適用性を検証するために、実規模の落石入力エネルギーを再現可能な斜路を有する実験施設を用いて重錘衝突実験を行ったものである。

2. 実験方法

2.1 供試体

一般的な落石防護網は、写真-1 に示すように、斜面上に設置した支柱から法尻までネットを吊り下げた構造になっている。支柱頭部は斜面の上方に設置したアンカーにより、支柱吊ロープを介して吊っている。また、ネット部の構成は、縦横に設置した主ロープ、主ロープの間に一定間隔で設置する補助ロープ、金網等から成り、横方向の主ロープはネット端で切らずに適当な長さの張出部を設け、その端部を斜面に打設したアンカーに固定している。

本実験は、構成材料およびワイヤー構造の異なる4種類の供試体を使用して行った。図-1 および表-1 に各供試体の諸元を示す。ここで、ロープ諸元の3×7とは、図-2 (a) に示すように、7本の素線をより合わせた束(ストランド)を3本より合わせたロープのことであり、7×7については図-2 (b) に示すものである。図-1 (a)

表-2 供試体ごとの実験条件

ケース No.	供試体	重錘仕様			設計時の予測値		実験時の測定値	実験施設
		材質	形状	質量[t]	重錘の運動 エネルギー[kJ] (衝突速度 v_p [m/s])	摩擦を考慮した 重錘の運動 エネルギー[kJ] (衝突速度 v_D [m/s])	重錘の運動 エネルギー[kJ] (衝突速度 v [m/s])	
1	A	コンクリート	球(直径0.65m)	0.35	86 (22.1)	74 (20.6)	53 (17.4)	I
2		鉄	球(直径0.63m)	1.0	93 (13.6)	80 (12.7)	60 (11.0)	I
3	B	コンクリート	ブロック	1.0	392 (28.0)	378 (27.5)	346 (26.3)	II
4	C	コンクリート	ブロック	2.0	784 (28.0)	756 (27.5)	676 (26.0)	II
5	D	コンクリート	ブロック	2.0	784 (28.0)	756 (27.5)	718 (26.8)	II
6		コンクリート	ブロック	2.5	980 (28.0)	944 (27.5)	959 (27.7)	II

図-4 コンクリートブロックの形状

図-5 張力計測点

に示す供試体 A は、ネット部の高さ 5m、支柱間隔 15m であり、ロープ間隔は横主ロープ (3×7,14φ) 間が 5m、縦主ロープ (3×7,14φ) 間が 3m、縦横補助ロープ (1×7,8φ) 間が 1m である。

図-1 (b) に示す供試体 B は、ネット部の高さ 15m、支柱間隔 21m であり、ロープ間隔は横主ロープ (3×7,18φ) 間が下から 3m, 6m, 6m、縦主ロープ (3×7,18φ) 間が 3m、縦横補助ロープ (3×7,14φ) 間が 1m である。

図-1 (c) に示す供試体 C は、供試体 B の全長が 21m であるのに対して、30m とさらに大きくし、一方で、縦横補助ロープ間隔を 0.5m と細かくしたものである。また、供試体 D は供試体 C の横ロープに 7×7,24φ を用いたものである。なお供試体 A, B の最上段横ロープは 1 本であるが、供試体 C, D は最上段横ロープを 2 本並列して配置している。

2.2 衝突実験要領

(1) 実験施設

本実験は、採石場を利用して設置された斜路を用いて重錘を所定の高さから転落させ、斜路の下端前面に設置した防護網に衝突させるものである。なお、供試体の規模に応じて、図-3 に示す 2 種類の斜路を用いて実験を行った。すなわち、供試体 A に対しては実験施設 I (全

長 78m、勾配 20 度)、供試体 B・C・D に対しては実験施設 II (全長 60m、勾配 54 度) を用いて実験を行った。

(2) 衝突運動エネルギー

重錘の衝突運動エネルギー (重錘の落差ポテンシャルエネルギー) は、落石対策便覧²⁾の照査法に基づいて評価する各供試体の可能吸収エネルギーと同程度となるように設定した。すなわち、供試体 A, B, C, D はそれぞれ 86kJ, 392kJ, 784kJ, 784kJ の衝突運動エネルギーを見込んで実験を行った。それぞれの実験条件を表-2 に示す。参考までに、供試体 A および D に対しては、可能吸収エネルギーを超える衝突運動エネルギー (それぞれ 93kJ, 980kJ) による実験も行った。表中の設計時の予測値については 3.1 で、実験時の測定値については 4.4 で詳細を述べる。

(3) 落石モデル

使用した落石モデル (以下、重錘) は、コンクリート球 (0.35t)、鉄球 (1.0t)、コンクリートブロック (1.0t, 2.0t, 2.5t) の 5 種類のいずれかを用いた。ここで、コンクリートブロックは、図-4 に示すような立方体の角を削ることによって作成した十四面体である。ケース No.1 および 2 の実験では球体を用いたが、No.3 以降の実験で

図-6 落石の跳躍

表-3 等価摩擦係数 μ の値

区分	落石及び斜面の区分	設計に用いる μ
A	硬岩、丸状 凹凸小、立木なし	0.05
B	軟岩、丸状～角状 凹凸中～大、立木なし	0.15
C	土砂・崖錐、丸状～角状 凹凸小～大、立木なし	0.25
D	崖錐・巨礫混じり崖錐、角状 凹凸中～大、立木あり～なし	0.35

は高エネルギーであるので、さらに次のような効果を期待し、重錘形状を球体からブロック型に変更した。

- 実際の落石には角のあるものが多くあり、角があることで金網やロープに引っ掛かり易く、不利な条件を作為できる。
- 角をもたせることで実際の落石現象のようにランダムな跳躍を伴った落下運動を生起できる。

(4) 計測項目

実験においては、防護網の挙動および所定のロープの端部における張力を測定した。防護網の変形挙動は、高速カメラによる映像で記録した。この映像分析によって重錘衝突点のはらみ出し量の時刻歴応答を求めた。ロープの張力は、各供試体とも吊ロープ、最上段横ロープ、横主ロープ端部（アンカーとの接続部）において、ロードセルを接続して測定した。測定箇所数は図-5に示すように、供試体Aが8箇所、供試体Bが12箇所、供試体C、Dがそれぞれ14箇所である。

3. エネルギー照査法による評価

ここでは、落石対策便覧に基づくエネルギー照査法の概略と本研究で対象とする供試体の可能吸収エネルギーの計算過程および評価値について説明する。

3.1 落石の衝突速度

落石の衝突速度については、図-6に示すように、落差 H から自由落下した時の落石の速度 v_P に対して、落下途中における地面との衝突によって失われるエネルギーを考慮した v_D が用いられる。

図-7 完全非弾性衝突の説明図

$$v_P = \sqrt{2gH} \quad (1)$$

$$v_D = \alpha v_P \quad (2)$$

ここで、 H ：落石と防護網の落差、 g ：重力加速度、 α ：残存係数である。

残存係数 (α) は、斜面の土質、岩質、凹凸、勾配、および落石の形状によって異なり、次式で表わされる。

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan\theta}} \quad (3)$$

ここで、 μ ：等価摩擦係数、 θ ：斜面勾配である。

実設計では等価摩擦係数は表-3に示すものが使用されるが、本実験の条件は、重錘が凹凸のない斜路上を転落するので、 $\mu=0.05$ を用いると、各実験ケースの落石速度 v_D は、表-2の値となる。

3.2 エネルギーの照査式

落石対策便覧では、エネルギー照査式に用いる防護網の可能吸収エネルギー E_T は次式によって与えられる。

$$E_T = E_N + E_R + E_P + E_{HR} + E_L \quad (4)$$

ここで、 E_N ：金網の吸収エネルギー、 E_R ：落石衝突位置の上段および下段の横ロープの吸収エネルギー、 E_P ：支柱の吸収エネルギー、 E_{HR} ：吊ロープの吸収エネルギー、 E_L ：衝突の前後におけるエネルギー差である。

3.3 消失エネルギー

式 (4) における E_L は、落石が防護網に衝突すると、その直後に一体となって運動を開始するために、完全非弾性衝突を仮定したことによる見かけ上の消失エネルギーによって与えられるものである。その意義と適用限界を理解するため、以下にその誘導過程を示す。

図-7のように、防護網を一質点にモデル化できるものとする。衝突前の運動量 I_0 と運動エネルギー E_0 は次式によって与えられる。

$$I_0 = m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1 \quad (5)$$

$$E_0 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 \quad (6)$$

また、衝突後の運動量 $\tilde{I}$ と運動エネルギー $\tilde{E}$ は2質点が一体となって運動するので、次式となる。

図-8 供試体Cの質量寄与面積

図-9 金網の変形

表-4 消失エネルギー

ケース No.	供試体	重錘重量 m_1 (ton)	ネット 重量 m_2 (ton)	消失エネルギー E_L (kJ)	
				落差ポテン シャル速度 v_P 使用	摩擦考慮 速度 v_D 使用
1	A	0.35	0.517	51.1	44.1
2		1.0	0.517	31.7	27.4
3	B	1.0	3.78	309.7	298.4
4	C	2.0	6.89	607.6	585.5
5	D	2.0	6.89	607.6	585.5
6		2.5	6.89	719.0	692.9

$$\tilde{I} = (m_1 + m_2) \tilde{v}_1 = (m_1 + m_2) \tilde{v}_2 \quad (7)$$

$$\tilde{E} = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \tilde{v}_1^2 = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \tilde{v}_2^2 \quad (8)$$

ここで、衝突前後における運動量は保存されるので、衝突後の速度は次式となる。

$$\begin{aligned} I_0 &= \tilde{I} \\ m_1 v_1 &= (m_1 + m_2) \tilde{v}_1 \\ \therefore \tilde{v}_1 &= \tilde{v}_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_1 \end{aligned} \quad (9)$$

よって、衝突前後において消失したエネルギー E_L は次式となる。

$$\begin{aligned} E_L &= E_0 - \tilde{E} = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 - \frac{1}{2} (m_1 + m_2) \tilde{v}_1^2 \\ &= \frac{1}{2} \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} v_1^2 \\ &= \frac{m_2}{m_1 + m_2} E_0 \end{aligned} \quad (10)$$

このモデル化において、落石防護網の質量 m_2 をどのように決定するかについては、便覧では厳格に示されていない。そこで、仮に図-8 で示すように供試体の支柱間の全面積が寄与するものとする、各実験条件の消失エネルギーは表-4 のようになる。なお、表には重錘衝突

表-5 金網の吸収エネルギー

ケース No.	供試体	面積 (m ²)	金網の吸収エネルギー E_N (kJ)
1	A	75	14.1
2		75	13.3
3	B	315	58.8
4	C	450	74.0
5	D	450	74.0
6		450	79.8

表-6 ワイヤロープの諸元

種類	公称値 (kN)			引張試験値 (kN)			初期剛性 (kN)
	許容 張力 0.5T	降伏 張力 0.75T	破断 張力 T	許容 張力 0.5T	降伏 張力 0.75T	破断 張力 T	
3×7 14φ	49.1	73.6	98.1	64.4	96.6	128.8	7.92×10^3
3×7 18φ	78.5	118.0	157.0	104.1	156.1	208.2	1.22×10^4
7×7 18φ	104.5	156.8	209.0	117.4	176.1	234.8	1.31×10^4
7×7 24φ	186.0	279.0	372.0	220.7	331.0	441.4	2.90×10^4
7×7 30φ	290.0	435.0	580.0	340.0	510.0	680.0	6.38×10^4

衝突直前の速度として、摩擦を考慮しない速度 v_P を用いた場合と摩擦を考慮した速度 v_D を用いた場合の E_L をそれぞれ記載した。

3.4 金網の吸収エネルギー

金網の吸収エネルギーは、図-9 に示すように金網の許容荷重 P_{aN} における変形量を横ロープ間隔の 1/4 として、次式のように求められる。

$$E_N = 2P_{aN} \sin \theta \times \frac{1}{4} h = 0.22P_{aN} h \quad (11)$$

ここで、 θ : 金網の変形角度 (26.6°を仮定)、 h : 横主ロープの間隔である。また、金網の許容荷重 P_{aN} は落石の大きさによって値が異なり、落石の直径を D とし、金網への接触幅を $1.5D$ とすると、次式のように表せる。

$$P_{aN} = 1.5D \times p \quad (12)$$

ここで、 p : 幅 1m あたりの金網強度である。

以上より、各実験条件における金網の吸収エネルギーは、表-5 のようになる。

3.5 ワイヤロープの吸収エネルギー

まず、本実験で用いられたワイヤロープのうち吸収エネルギー算定に寄与するものは、3×7,14φ, 3×7,18φ, 7×7,18φ, 7×7,24φ, 7×7,30φの5種類である。これらのロープに対する降伏張力と破断張力の公称値は表-6 のように示されている。ここで、各ロープの許容張力は、破断張力を安全率 2.0 で除した値であり、降伏張力は破断張力の 3/4 の値となる。なお、3×7,14φ,18φのワイヤロープの破断張力の値は落石対策便覧に示されたものであり、7×7,18φ,24φ,30φのワイヤロープの値はJISの規格値を基にして、断面積の比から求めた値である。

これらの公称値との整合性を確認するために、本実験に先立って、写真-2 に示すように約 1m (7×7,30φのみ

(a) 引張試験供試体

(b) 引張試験機

写真-2 ワイヤロープ引張試験

図-10 ワイヤロープ引張試験結果

図-11 限界状態ごとの吸収エネルギー

表-7 ワイヤロープ径ごとの単位長あたり吸収エネルギー

種類	公称値ベース [kJ/m]			引張試験値ベース [kJ/m]		
	E_{cap-a}	E_{cap-y}	E_{cap-f}	E_{cap-a}	E_{cap-y}	E_{cap-f}
3×7 14φ	0.15	0.34	3.81	0.26	0.59	6.56
3×7 18φ	0.25	0.57	6.27	0.44	1.00	11.02
3×7 18φ	0.42	0.94	9.43	0.52	1.18	11.90
7×7 24φ	0.60	1.34	14.51	0.84	1.89	20.42
7×7 30φ	0.67	1.50	22.35	0.92	2.07	30.72

約 2m) の供試体を用いて引張試験を行った。供試体の両端には円錐台形の合金を取り付けて、くさびのように挟み込んで固定する。この際、端部の合金が治具にくい込むことにより変形した量を除くため、ロープの伸びの測定は供試体の中央付近 500mm (7×7, 30φのみ 1600mm) 当たりの伸びをカメラ撮影による映像分析により求めた。各ワイヤロープの荷重と伸び率の関係を図-10 に示す。

図-10 から、各ワイヤロープの降伏張力、破断張力は表-6 のようになり、公称値に対して総じて大きな値となる。また、参考までに表-6 には、初期剛性も示している。

これらの特性値を基に、ワイヤロープによる吸収エネルギー容量を決定するが、ワイヤロープはネット構造において、エネルギーの算定に用いる部材の発生張力を比較的容易に測定可能であるので、より詳細な検討をするために、限界状態ごとに吸収エネルギーを求めることとした。限界値の定義には、図-11 に示すようにパイリニアモデル化すると、①許容張力、②降伏点張力、③破断点張力の 3 種類に対応する吸収エネルギー容量が考えられる。すなわち、次式のようになる。

$$E_{cap-a} = \frac{1}{2} P_a \delta_a = \frac{1}{2} \frac{P_a^2}{k} \quad (13)$$

$$E_{cap-y} = \frac{1}{2} P_y \delta_y = \frac{1}{2} \frac{P_y^2}{k} \quad (14)$$

$$E_{cap-f} = \frac{1}{2} P_y \delta_y + \frac{1}{2} (P_y + P_f) (\delta_f - \delta_y) \quad (15)$$

これらの式によって、公称値と引張試験値に基づく単位長さあたりの吸収エネルギー容量は表-7 のようになる。

ただし、公称値についても引張試験値から求めた初期剛性 (k) を用いた。

また、図-12 に示した、重錘衝突位置上下の横ロープおよびネット全体を支持している最上段横ロープでは、特に大きな張力が発生すると考えられる。したがって、これらを吸収エネルギーに寄与するワイヤロープとして定義すると、各供試体のワイヤロープによる吸収エネルギーは、表-8 のようになる。

図-12 吸収エネルギー寄与ワイヤロープ

よって表-4, 5, 8 の値に基づく可能吸収エネルギーと落石の運動エネルギーとの比較は表-9 のようになる。表中の緑地の部分は実験時に測定した速度を基に求めた値であり、詳細は 4.4 において述べる。ここで、吊ロープの吸収エネルギー E_{HR} は、吊ロープの長さが図-12 に示した寄与ロープと比べて短く、吸収エネルギーが小さくなるためゼロとし、また、支柱の吸収エネルギー E_P は、支柱の基礎をヒンジであるため、支柱の変形を見込んでいないのでゼロとした。なお、表中の () 内の数字は、防護網の可能吸収エネルギーを落石の運動エネルギーで除した値であり、 E_{cap-a} を用いた場合 0.7~1.2, E_{cap-y} を用いた場合 1.0~1.7, E_{cap-f} を用いた場合 3.5~10.9 となっている。また、表中の判定とは、式 (13), (14), (15) を用いた設計としての合格判定を示しており、重錘の運動エネルギーが $(E_L + E_N + E_{cap-a})$ 未満のときを○として、 $(E_L + E_N + E_{cap-a})$ 以上、 $(E_L + E_N + E_{cap-y})$ 未満の場合を△として示す。ケース No1,3,5 は公称値ベース、引張試験値ベースともに判

表-8 ワイヤロープの吸収エネルギー

供試体	公称値ベース [kJ]			引張試験値ベース [kJ]		
	E_{cap-a}	E_{cap-y}	E_{cap-f}	E_{cap-a}	E_{cap-y}	E_{cap-f}
A	22.2	49.9	521.4	31.5	70.9	746.0
B	40.4	90.9	990.7	62.3	140.2	1530.6
C	100.5	226.1	3187.3	145.9	328.2	4573.2
D	127.9	287.9	3846.7	177.4	399.2	5325.8

表-9 エネルギー照査結果

ケース No.		運動 エネル ギー [kJ]	可能吸収エネルギー[kJ]（公称値ベース）				可能吸収エネルギー[kJ]（引張試験値ベース）			
			ワイヤ許容 E _L +E _N +E _{cap-a}	ワイヤ降伏 E _L +E _N +E _{cap-y}	ワイヤ破断 E _L +E _N +E _{cap-f}	判定 予想	ワイヤ許容 E _L +E _N +E _{cap-a}	ワイヤ降伏 E _L +E _N +E _{cap-y}	ワイヤ破断 E _L +E _N +E _{cap-f}	判定 予想
1	ポテンシャル	86	87.4 (1.02)	115.1 (1.34)	586.6 (6.82)	○	96.7 (1.12)	136.1 (1.58)	811.2 (9.43)	○
	摩擦考慮	74	80.4 (1.09)	108.1 (1.46)	579.6 (7.83)	○	89.7 (1.21)	129.1 (1.74)	804.2 (10.9)	○
	実測の速度	53	67.7 (1.28)	95.4 (1.80)	566.9 (10.7)	○	77.0 (1.45)	116.4 (2.20)	791.5 (14.9)	○
2	ポテンシャル	93	67.2 (0.72)	94.9 (1.02)	566.4 (6.09)	△	76.5 (0.82)	115.9 (1.25)	791.0 (8.51)	△
	摩擦考慮	80	62.9 (0.79)	90.6 (1.13)	562.1 (7.03)	△	72.2 (0.90)	111.6 (1.40)	786.7 (9.83)	△
	実測の速度	60	56.1 (0.93)	83.8 (1.40)	555.3 (9.25)	△	65.4 (1.09)	104.8 (1.75)	779.9 (13.0)	○
3	ポテンシャル	392	408.9 (1.04)	459.4 (1.17)	1359.2 (3.47)	○	430.8 (1.10)	508.7 (1.30)	1899.1 (4.84)	○
	摩擦考慮	378	397.6 (1.05)	448.1 (1.19)	1347.9 (3.57)	○	419.5 (1.11)	497.4 (1.32)	1887.8 (4.99)	○
	実測の速度	346	372.4 (1.08)	422.9 (1.22)	1322.7 (3.82)	○	394.3 (1.14)	472.2 (1.36)	1862.6 (5.38)	○
4	ポテンシャル	784	782.1 (1.00)	907.7 (1.16)	3868.9 (4.93)	△	827.5 (1.06)	1009.8 (1.29)	5254.8 (6.70)	○
	摩擦考慮	756	760.0 (1.01)	885.6 (1.17)	3846.8 (5.09)	○	805.4 (1.07)	987.7 (1.31)	5232.7 (6.92)	○
	実測の速度	676	698.4 (1.03)	824.0 (1.22)	3785.2 (5.60)	○	743.8 (1.10)	926.1 (1.37)	5171.1 (7.65)	○
5	ポテンシャル	784	809.5 (1.03)	969.5 (1.24)	4528.2 (5.78)	○	859.0 (1.10)	1080.8 (1.38)	6007.4 (7.66)	○
	摩擦考慮	756	787.4 (1.04)	947.4 (1.25)	4506.1 (5.96)	○	836.9 (1.11)	1058.7 (1.40)	5985.3 (7.92)	○
	実測の速度	718	758.5 (1.06)	918.5 (1.28)	4477.2 (6.24)	○	808.0 (1.13)	1029.8 (1.43)	5956.4 (8.30)	○
6	ポテンシャル	980	926.7 (0.95)	1086.7 (1.11)	4645.4 (4.74)	△	976.2 (1.00)	1198.0 (1.22)	6124.6 (6.25)	△
	摩擦考慮	944	900.6 (0.95)	1060.6 (1.12)	4619.3 (4.89)	△	950.1 (1.01)	1171.9 (1.24)	6098.5 (6.46)	○
	実測の速度	959	911.4 (0.95)	1071.4 (1.12)	4630.1 (4.83)	△	960.9 (1.00)	1182.7 (1.23)	6109.3 (6.37)	○

写真-3 重錘の落下 (ケース No.2)

写真-4 水平変位の分析

写真-5 ネットの変形 (ケース No.2)

図-13 張力と水平変位の時刻歴応答 (No.2)

定は○である。ケース No.4 は公称値ベースで摩擦を考慮しない場合判定は△, 摩擦を考慮する場合および引張試験値ベースでは判定は○である。なお, No.2, 6 は 2.2 の(2)で述べたように可能吸収エネルギーに対して重錘の運動エネルギーが大きいケースであるため, 摩擦を考慮しない場合, 引張試験値ベースで見ても判定は△である。ただし, 全てのケースにおいて, ロープの破断は見

られなかった。

4. 落石防護網の応答

4.1 実験施設 I における重錘衝突実験

(1) 重錘の落下の状態

実験施設 I では 2.2 の(3)で述べたように, コンクリート球 (0.35ton) および, 鉄球 (1.0ton) を用いて実験を行った。写真-3 に, ケース No.2 の鉄球の落下過程を分解写真で示す。重錘は斜面上で解放された後, 加速しながら, 斜路上のガイドに沿って落下している。

(2) 張力および変位の時刻歴応答

図-13 に, ケース No.2 の張力と防護網の重錘衝突位置の水平方向はらみ出し量 (以下, 水平変位) の時刻歴応答を示す。ここで, 水平変位は, 写真-4 に示すように, 防護網を側方から撮影した高速カメラの映像を用いて分析したものである。また, 重錘の衝突直前の時刻を 0.0sec として記している。図-13 から, すべてのロープの張力は波形の応答開始時刻と最大張力発生時刻, 波形の周期が同程度になっているが, これは, ネットのサ

写真-6 重錘の落下 (ケース No.3)

写真-7 ネット変形 (ケース No.3)

図-14 張力と水平変位の時刻歴応答

イズが小さいため、張力の伝播する時刻に差が出ていないものと考えられる。また、0.6sec以降はほとんど張力が生じていないが、これは横ロープが2本で構成されている単純な構造のために、複雑な挙動が生じていないものと考えられる。また、全てのロープの張力が最大値に達するのとほぼ同時に水平変位も最大値に達している。

(3) ネットの全体変形応答

写真-5には、最大変位までを拡大して示している。

写真-5(a)(b)の時点では、ネットは重錘の接触点が局所的に飛び出すように変形していることがわかる。写真-5(c)は、水平変位が最大値に達した時点の映像である。このとき、各ケーブルの張力が最大値に達している。

4.2 実験施設Ⅱにおける重錘衝突実験

(1) 重錘の落下の状態

実験施設Ⅱは、重錘としてコンクリートブロック(1.0t, 2.0t, 2.5t)を用いて実験を行った。写真-6にケース No.3の2.0tのコンクリートブロックの落下過程を示す。コン

クリートブロックは斜面上で解放されると、斜路上を加速しながら落下する様子が確認できる。

(2) 張力および変位の時刻歴応答

図-14に、ケース No.3(供試体 B)および No.4(供試体 C)のロープ張力の時刻歴応答と防護網の重錘衝突位置の水平変位の時刻歴応答を示す。

ケース No.3では、前述のケース No.2と異なり、各ロープの応答には時間差が生じている。また、その波形には明確な2回のピークが現れる。これは、後述するように、重錘を捕捉する過程で、防護網の中に波動の伝播のような変形モードが生ずるためである。その応答波形は、まず吊ロープ(グラフ右上の図の番号1)、最上段ロープ(番号3)の張力が上昇し始める。続いて上段ロープ(番号5)が上昇し、その後吊ロープおよび最上段ロープの張力が最大値に達し低下すると、下部にある中上段ロープ(番号7)の張力が上昇する。その後、中上段ロープの張力が低下し、下段ロープ(番号11)の張力が上昇する過程で、水平変位が最大値に達する。全てのロープの

写真-8 ネット変形 (ケース No.4)

図-15 変形エネルギー

2 回目のピークは、水平変位が低下した後、すなわち防護網が重錘を押し返した後の自由振動の過程で生じる。また、落石衝突位置から離れた位置にあるロープの方が発生張力は低くなると予測されるが、下段ロープは中下段ロープ (番号 9) よりも大きな張力が発生している。これは、縦ロープの端部を下段ロープに固定したため、縦ロープを介して伝達される荷重が下段ロープにおいて、より顕著に生じたためであると考えられる。ただし、その値は設計の段階では照査しがたいので、3.5 で述べたロープの吸収エネルギーには下段ロープによる吸収エネルギーは加味していない。

ケース No.4 は、ケース No.3 の応答と類似した傾向を示している。すなわち、吊ロープ、最上段ロープ、上段ロープ、中上段ロープと上部のロープが初めに最大張力に達し、その後、防護網が最大変位に達してから下段ロープが最大張力に達する。No.3 との相違点は、支柱間長さが大きいために、張力波形の周期が若干大きくなっていることである。

(3) ネットの全体変形応答

写真-7 に、ケース No.3 のビデオ映像を示す。写真-7 (b) は、重錘がネットに接触して 0.13sec 後の映像であるが、ケース No.2 と同様、ネットは衝突部が局所的に変形している。写真-7 (c) は、重錘接触の 0.20sec 後であるが、吊ロープおよび最上段ロープの張力が最大に達している。このとき、はらみ出す領域は写真-7 (b) と比べてより広範囲に広がり、ネット上部のロープが張り出

している。しかし、下部のロープはほとんど変形していない。さらに、重錘接触の 0.53sec 後の写真-7 (d) は、水平変位が最大値に達し、下段ロープの張力が最大値に達した時点に対応している。写真-7 (d) では、上部のはらみ出しが、下部へと伝播するとともに、ネット下端が持ち上がっている。このネットのはらみ出しの伝播とネットの持ちあがりに伴って下段ロープに張力が生じる。

写真-8 は、重錘の質量を 2 倍の 2ton としたケース No.4 のビデオ映像である。写真-8 (b) は、重錘とネットが接触してから 0.13sec 後の映像である。この時点では、ケース No.2, No.3 と同様、ネットは衝突部で局所的に変形している。写真-8 (c) の 0.20sec では、吊ロープおよび最上段ロープの張力が最大値に達している。写真-8 (d) は、中上段ロープの張力が最大値に達した時点であり、ネットの張り出し領域の広がりにはネット中央部まで達している。しかし、下部のロープはまっすぐに張られたままであり、大きな張力が作用している様子は見られない。写真-8 (e) は、下段ロープの張力が最大値に達した時点に対応している。この時点で、重錘の水平変位は戻り始めている。一方でネットの張り出し領域は下部まで拡大していき、ケース No.3 と同様、下段ロープが持ち上がり、ロープの張力が生じる。

4.3 防護網のひずみエネルギー

ここでは、実験により計測した張力に基づいて、防護網の変形エネルギーを評価することにより、重錘捕捉過程におけるエネルギー分担率の推移について考察する。

図-16 ロープ最大発生張力

図-15 に、ケース No.3, No.4 の変形エネルギー評価値の時刻歴応答を示す。ここで、変形エネルギーは、各ロープが実験で計測された張力を受けて一様に変形し、かつ弾性範囲内であると仮定して、以下の式 (16) により評価した。

$$E_i = \frac{1}{2} \cdot \frac{L_i}{K_i} \cdot T_i^2 \quad (16)$$

ここで、 T_i : 実験で計測した張力、 L_i : 変形エネルギーを評価するロープの長さ、 K_i : ロープの軸方向剛性である。なお、防護網が運動している過程において、慣性の影響により、横ロープ内において計測された張力が一様に生じないことも考えられる。しかし、写真-7, 8 より、ネットの重錘捕捉過程において、横に張り出した各ロープの変形挙動に着目すれば、高次のモードが発生しているように見えない。したがって、上記のように、張力を受けて一様に変形する仮定を用いた。また、実際には、張力を計測した横ロープの他にも、縦補強ロープ、金網部にも変形エネルギーが蓄えられていると考えられるが、ここでは、その寄与分は無視している。

図-15 より、ケース No.3 および No.4 の両者において防護網の水平変位が最大値に到達する近辺で変形エネルギーが大きく変動している。

4.2 においてケース No.3 および No.4 における防護網の変形はまず上部が張り出し、その変位が伝播して下部が張り出すという性状を示すことを確認した。すなわち、上部で生じた変形エネルギーが防護網の運動エネルギーに変換され、その運動エネルギーが再び下部のロープの変形エネルギーに伝達されて、図-15 のような応答を示したものと考えられる。

4.4 設計法との比較

図-16 に各実験ケースにおける、落石対策便覧に基づいて照査した張力値（以下、設計張力）と実験により得られた張力値（以下、実験張力）を比較した図を示す。図中には各ロープの許容張力および降伏張力を示している。ここで、許容張力とはワイヤロープの破断張力を安全率 2.0 で除した値であり、降伏張力とは破断張力の 3/4 の値である。2.2 の(2)で示したように、ケース No.2, No.6 は、防護網の設計エネルギー吸収容量を超える入力エネルギーを与えたものである。図-16 (b) のケース No.2

(a) ケース No.3 (b) ケース No.2

写真-9 実験後の供試体

の結果に着目すると、最上段ロープ（番号3, 4）については、設計許容張力を、下段ロープ（番号7, 8）については、降伏張力を超える張力が生じている。一方で、入力エネルギーが設計吸収エネルギー容量より少ない、ケース No.1, No.3, No.4, No.5 では、吊ロープおよび最上段ロープに関して十分に安全側の照査となっていることがわかる。ケース No.4, では中上段ロープ（番号7, 8）および下段ロープ（番号11, 12）は許容張力を超えているが、降伏張力と比較すると充分小さな値を示している。なお、図より現行の設計法では概して下部ロープの発生張力を過小に評価する傾向にあることがわかる。これは、現行設計法においては重錘の衝突した瞬間のネットの変形を簡易に求め、そのネットに働く力を基に静的なロープ張力を算定しているためであると考えられる。

また、表-9 の緑地の部分に、実験で測定した速度から求めた重錘の運動エネルギーと、そのエネルギーを基にして求めた可能吸収エネルギーを示す。()内の数字は可能吸収エネルギーを運動エネルギーで除した値であり、 $(E_L + E_N + E_{cap-a})$ では0.9~1.5程度、 $(E_L + E_N + E_y)$ では1.1~2.2程度、 $(E_L + E_N + E_{cap-f})$ では3.8~14.9程度となることがわかる。

4.5 実験後の供試体の状態

写真-9 に実験後の供試体の状態を示す。ケース No.1,3,4,5 および6においては、金網に写真-9 (a) に示すような若干の変形は見られるが、金網の目合いが変わるほどの変形はしていない。ケース No.2においては写真-9 (b) に示すように重錘衝突部に残留変形が見られた。ただし、全ケースの実験において、ロープの破断および金網の素線の切断は生じなかった。

5. 結 言

本研究では落石防護網の重錘衝突実験を複数の条件下で行い、重錘衝突時の応答を異なる条件下や現行設計法による設計値と比較した。得られた成果は以下のようになる

(1) 高さ15mの供試体を用いた実験(ケース No.3, No.4)において横に張り出したロープの変形エネルギーの時刻歴応答を示し、重錘衝突後にネット上部に生じた変形エネルギーが、運動エネルギーに変換され、その運動エネ

ルギーが変形エネルギーに変換されることを示した。

(2) 本研究で対象とした実物大レベルの供試体に対しても、落石対策便覧式のエネルギー照査手法を用いて安全側の照査が可能となることを示した。

(3) ただし、4.2の(2)に示したように、下部ロープに大きな張力が発生するなどの事象は現行設計法では考慮できていない。したがって、そのメカニズムを明らかにするために、解析を援用した分析や、より詳細な実験等が必要である。特に、解析を援用することで、ネット全体でのエネルギー収支を算定できる可能性がある。

(4) また、本実験では、同じ供試体に異なる形状(球とブロック型)の重錘を衝突させる実験は行っていないため、重錘形状による影響の考察が出来ていない。したがって、供試体Aにブロック型、供試体B,C,Dに球形の重錘を衝突させる実験を行うことが望ましい。

参考文献

- 1) 平成24年版防災白書, 2012.6.
- 2) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2000.6.
- 3) 吉田博, 澤田直子, 南和夫, 窪田俊男: 緩衝具を配置したワイヤネット工の性能に関する実験的研究, 第4回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.101-106, 1998.6.
- 4) 澤田直子, 吉田博, 藤井智弘, 窪田潤平, 前川幸次: 緩衝金具を配置した落石誘導ワイヤネットシステムの実規模実験, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.141-146, 2000.6.
- 5) 小畑康隆, 藤井智弘, 小林俊夫, 野村利充, 吉田博: 緩衝装置を配置したエネルギー吸収型落石防止柵に関する実験的研究, 第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.147-152, 2000.6.
- 6) 田島与典, 前川幸次, 岩崎征夫, 河上康太: 実物大重錘衝突実験による緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の評価, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.1088-1100, 2010.3.
- 7) 大森清武, 塩見昌紀, 吉田博: 落石防護柵用ネットの衝撃実験とその解析, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.141-146, 2002.7.
- 8) 原木大輔, 香月智, 田代元司: 円柱形要素を用いた個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析, 土木学会論文集A, Vol.65, No.2, pp.536-553, 2009.6.
- 9) 福永一基, 畑芳宏, 園田佳巨: ワイヤリング防護柵の重錘衝突実験, 第10回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.263-266, 2010.12.
- 10) 園田佳巨, 畑芳宏, 福永一基: SPH法を改良したワイヤリング防護柵の衝撃応答解析, 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1155-1162, 2011.3.

(2013年3月18日受付)