

実斜面を用いた実規模重錘衝突実験によるポケット式落石防護網の評価

Evaluation of pocket-type rockfall protective net by full scale weight impact tests using real slope

難波 正和*, 前川 幸次**, 田島 与典***, 横田 哲也****
Masakazu Namba, Koji Maegawa, Tomonori Tajima, Tetsuya Yokota* 金沢大学大学院博士後期課程, 自然科学研究科環境科学専攻 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)
nanba@raiteku.com

** 工博, 金沢大学教授, 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

*** 博士(工), 所長, (株)ライテク新潟事務所 (〒951-5061 新潟県新潟市中央区西堀通7番町)

**** 係長, (株)ライテク本社 (〒939-2701 富山県富山市婦中町西本郷)

Although pocket-type rockfall protective nets are more economical and easier to install, the amount of rockfall energy they can absorb and the locations where they can be implemented are limited. Because of this, in recent years, modified pocket-type rockfall protective nets with built-in shock absorbers have been developed to increase their ability to absorb rockfall energy. This study was conducted in order to determine the effective range of implementation for a modified pocket-type rockfall protective net, and to test the net's reaction and energy absorption capabilities upon the introduction of rotational energy closely approximating the actual behavior of a falling rocks. These tests were conducted on a steep and real slope which a full-scale weight rolled down, and utilized protective nets fitted with two types of shock absorbers, the capabilities for which had been confirmed in previous free-fall weight impact tests.

Key Words: pocket-type rockfall protective net, shock absorber, impact test, real slope

キーワード: ポケット式落石防護網, 緩衝装置, 衝突実験, 実斜面

1. はじめに

我が国の国土は、約 2/3 が山岳地帯であり、急峻な地形を呈しており、地方部における生活道路を担う主要幹線道路の多くは山岳地帯に建設されている。

また、我が国は降雨・降雪量が多く、環太平洋地震帯の上に位置しており、火山活動が活発で世界でも有数の火山国、地震国である。このように極めて厳しい自然状況下であり、斜面を抱える道路では、落石、雪崩及び崩壊土砂による斜面災害発生リスクが高く、近年では地球温暖化に伴う集中豪雨や頻発する地震等を起因とした斜面災害が増加傾向にある。なかでも落石については、全国一斉に実施した道路防災点検の「落石・崩壊」に該当される箇所数が他の点検項目に比べ多いこと、また、平成21年7月に富士山で発生したような落石事故も起こり得ることから、人命はもとより道路交通に対して適切な落石対策を実施することが社会的に重要な課題となっ



写真-1 ポケット式落石防護網

ている。

落石対策工は、落石の発生を未然に防止するため発生源の対策を行う落石予防工と発生した落石を待ち受けてその運動を停止させる、あるいは下方または側方へ誘導させる落石防護工に大別される¹⁾。

多岐におよぶ落石防護工の中で、写真-1 に示すよう

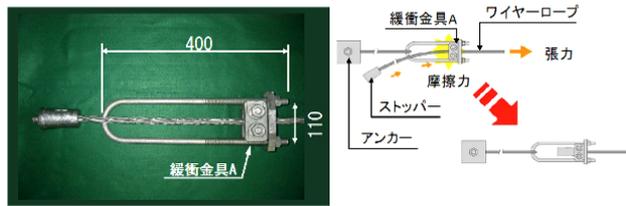


図-1 Uボルト型の緩衝装置



図-2 リング型の緩衝装置

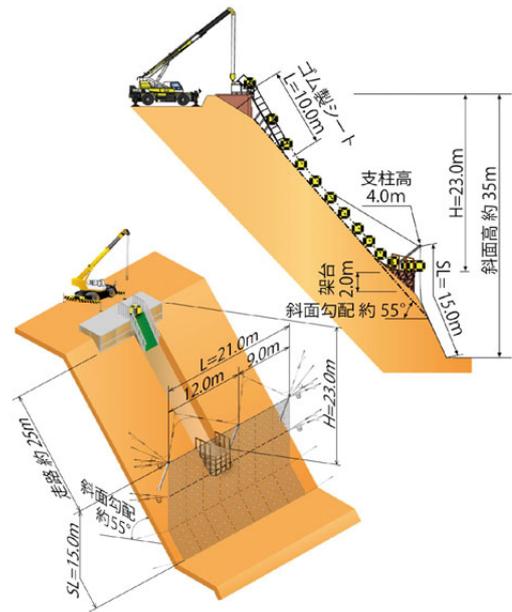


図-3 実験方法模式図

な斜面中腹から下方を面的に金網で覆い、上部に落石の入口を設けて落石を受け止め下方へ落とし込み誘導させるポケット式落石防護網は、H型鋼製支柱、金網、およびワイヤロープなどの汎用材料を用いているため、経済性や施工性に優れており施工実績も多い。その反面、適用可能な落石エネルギーは50~150kJ程度と小さく、適用できる箇所が限定される。このような従来型のポケット式落石防護網は、落石の衝突面を構成する金網および横ワイヤロープの端部を地盤に定着するアンカーへの負担が大きく、現状ではこれらの部材が弱点となり、大きな落石エネルギーに対応できない。これは、最近行った実規模実証実験^{2),3)}でも考察されている。このことから、落石衝突時に破断しないよう、金網やワイヤロープの部材強度を高めると同時に、これらを支える支柱とワイヤロープを定着するアンカーを強化することで大きな落石エネルギーに対応可能となり得る。ただし、部材重量の増加は施工性や経済性の低下につながり、また市場性に乏しい特殊な材料を用いれば、材料調達が困難になる。したがって、近年我が国では、緩衝装置等を構造体に組み込んで落石エネルギー吸収性能を向上させた、いわゆる高エネルギー吸収型と呼ばれる新しいタイプのポケット式落石防護網が開発されている。また、これら従来型とは異なる新しいタイプのポケット式落石防護網については、性能確認実験等を行い、その適用範囲を確認した上での採用が求められる傾向にある。

著者らはこれまで、緩衝装置を有する落石防護柵ならびに落石防護網の研究を行い、これらの構造体に緩衝装置を用いることの有効性について一定の評価を得ている。図-1および図-2は、それぞれUボルト型およびリング型と称する2種類の緩衝装置を示している。過去の研究では、これら2種類の緩衝装置を用いたポケット式落石防護網について、自由落下による実物大重錘衝突実験^{4),5)}を行い、その防護性能を確認した。ただし当時の実験では、実験場所と実験装置の制約等から実構造とは異なる重錘衝突方向であることや自由落下であるため重錘の

回転エネルギーが考慮されていないこと等が、研究課題として残されていた。

本研究では、過去の実験と同構造である2種類の緩衝装置を用いたポケット式落石防護網について、実際の構造物と同様、実斜面に設置し、重錘衝突方向は水平とし¹⁾、かつ回転エネルギーが加わった時のエネルギー吸収性能や落石捕捉挙動を確認し評価することを目的として、実規模重錘衝突実験を行った。なお、これらの目的を満足させるため、著者らが過去に行った他構造物の実規模実験^{6),7)}を参考に、実験方法は実斜面上方から重錘を転落させて供試体に衝突させる方法を採用した。また、従来のポケット式落石防護網は、鉄線(線種GS)を線材とした金網(以下、従来型金網という)を用いており、一般的に使用されている金網の線径は、2.6mm、3.2mm、4.0mm、5.0mmであり、線径は落石の規模に応じて選定される。鉄線で線径5.0mmのJIS規格における引張強度基準値は290~540N/mm²である。また最近では、引張強度が高い鋼線(線種GF)を線材とした金網(以下、新型金網という)を用いた落石防護構造物も開発されており、鋼線で線径5.0mmの引張強度規格値は780N/mm²以上と規定され、従来の鉄線に比べ高強度である。ここで、新型金網の引張強度に着目してみると、静的荷重が作用した場合、理論的には引張強度が向上すれば、線径を小さくすることができる。落石衝突は動的な衝撃問題として取り扱う必要があり、静的荷重の作用と同様ではないものの、仮に新型金網を用いて線径を小さくすることが可能となれば、金網重量の軽量化が図られ、施工性の向上に寄与できるものと考えられる。このことから、本実験では新型金網を用いた構造体に対する実規模重錘衝突実験も実施し、新型金網を用いたポケット式落石防護網の適用性について検討を行った。

2. 実斜面を用いた実規模重錘衝突実験

2.1 実験方法

図-3 は、実験方法を模式的に示している。本実験では、砂岩斜面で斜面高約 35 m、斜面勾配約 55° の斜面上部に重錘を落下させるための架台を構築し、斜面上端から約 25 m の中腹部まで走路を確保するための斜面掘削を行い、中腹部には重錘の衝突方向を水平にするための高さ 2.0 m の架台が構築されている。斜面上端から 10.0 m までの走路には重錘の回転を容易にさせるためのゴム製のシートを敷設した。

実験は斜面上端の架台に重錘をセットした後、クレーンにより架台端を吊り上げて重錘を転落させ、斜面下端に設置した供試体に衝突させた。

2.2 重錘

表-1 は実験に用いた重錘の質量と寸法を示し、写真-2 は重錘の形状を示している。欧州では EOTA (European Organization for Technical Approvals, 欧州技術認証機構) や SAEFL (Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape, スイスの環境・森林・景観庁) で落石防護柵製品を技術認証する際のガイドラインを作成し、重錘形状等を規定している。本実験では、実際の落石と同様の挙動を再現するため、斜面を転がりやすい形状である EOTA が定めるガイドライン ETAG27⁸⁾ に規定される重錘形状を採用した。重錘構造は表面を鉄板で覆った鉄筋コンクリート製とし、重錘中心部には三軸加速度計を取り付けるための空間を設けた。また、2.5 ton と 4.2 ton は一体型構造とし、5.2 ton の重錘は搬入性を考慮して上下 2 分割の構造とした。

2.3 供試体

図-4 は、実験供試体の形状・寸法を示しており、網高 15.0 m、支柱間隔 12.0 m と 9.0 m の非対称となる 2 スパン、全長 21.0 m とした。本来、本構造体の最大支柱間隔である 12.0 m の 2 スパンで実験を実施することが理想であったが、実験場の制約から、最大支柱間隔 12.0 m と最小支柱間隔 9.0 m を組み合わせて実験供試体を構築した。重錘の衝突位置は長さ方向で全長の中心 (10.5 m) とし、高さ方向は最上段横主ロープと 2 段目横主ロープの中心 (2.5 m) とした。なお、本構造体と異なるスパン数やスパン長とした場合、金網変形量、横主ロープ及び吊ロープの張力に対して影響が想定される。異なるスパン数やスパン長に対しては LS-DYNA (非線形構造解析ソフト) 等を用いて解析的な検討が可能であるため⁹⁾、衝突位置も含め今後、検証する予定としている。

主要部材は、支柱 (SS400, H-150×150×7×10, 支柱高 h=4.0 m)、金網 (GS-3 5.0 φ-50×50, GF-2 4.0 φ-50×50 の 2 種類)、吊・縦横主ロープ (3×7 G/O 18 φ)、縦横主ロープの間に配置した補助ロープ (3×7 G/O 14 φ)、

表-1 重錘の質量と寸法

質量 (ton)	2.5	4.2	5.2
L 寸法(mm)	1120	1328	1408

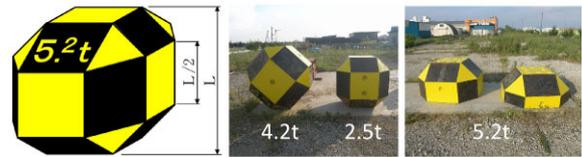
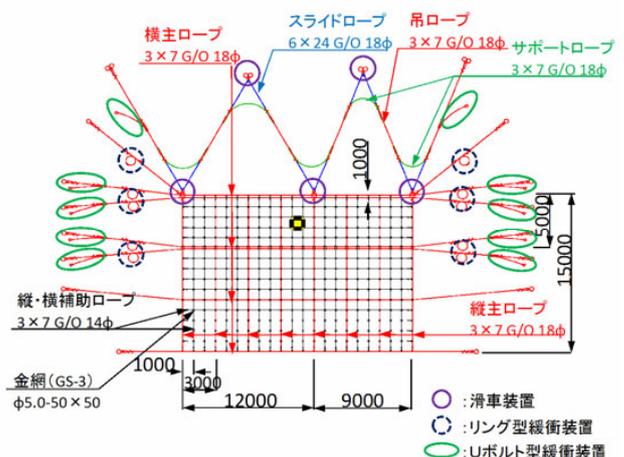
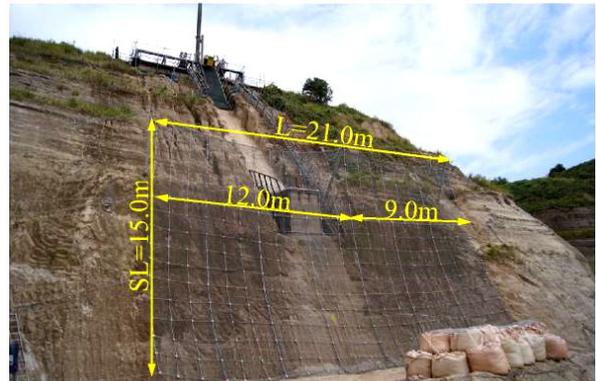


写真-2 重錘の形状



*横主ロープの緩衝装置に Uボルト型、リング型を併設した場合

図-4 実験供試体の形状・寸法



○ : リング型緩衝装置



○ : Uボルト型緩衝装置



○ : 滑車装置 (支柱部)



○ : 滑車装置 (アンカー部)

写真-3 緩衝装置・滑車装置

表-2 実験ケースの設定条件

実験 No.	金網		上段：吊・主ロープ 下段：補助ロープ	横主ロープ 緩衝装置	重錘質量 <i>m</i> (ton)	衝突エネルギー <i>E</i> * (kJ)
	形式	規格				
Case1-1	従来型金網	GS-3	3×7 G/O 18 φ 3×7 G/O 14 φ	リング型	2.5	554.5
Case1-2		(亜鉛めっき鉄線)		リング型	4.2	931.5
Case1-3		φ 5.0-50×50		U ボルト, リング型併用	5.2	1153.3
Case2-1	新型金網	GF-2	3×7 G/O 18 φ 3×7 G/O 14 φ	リング型	2.5	554.5
Case2-2		(亜鉛めっき鋼線)		リング型	4.2	931.5
Case2-3		φ 4.0-50×50		リング型	5.2	1153.3

*衝突エネルギーは、回転エネルギーを見込んだ理論値

滑車装置に取り付けるスライドロープ (6×24 G/O 18 φ), 吊ロープ破断時の滑車装置からのすり抜けを防止するためのサポートロープ (3×7 G/O 18 φ), アンカー (D29-3000) 及び写真-3 に示す緩衝装置 (U ボルト型, リング型の2種類), 滑車装置で構成されている。

横主ロープ (3×7 G/O 18 φ) は5 m 間隔で配置し, 重錘が直接衝突する範囲である最上段と2 段目については, 重錘の衝撃力に耐えた後に荷重を分散させることや緩衝装置の個数を増やしてエネルギー総吸収量を高めること等を目的として, 各々2 段配置としている。縦主ロープ (3×7 G/O 18 φ) は3 m 間隔で配置し, 横・縦主ロープ間に1.0 m 間隔で補助ロープ (3×7 G/O 14 φ) を配置している。

緩衝装置はU ボルト型およびリング型ともに2 枚の鋳造板で構成される本体部品でワイヤロープを挟み込み定着する形式である。この緩衝装置は, ワイヤロープに一定以上の張力が作用するとワイヤロープが滑り始め, ワイヤロープ表面と本体部品内面との間に生じる摩擦力によってワイヤロープが制動され, 落石エネルギーを吸収する仕組みである^{4),5)}。また, ワイヤロープに作用する張力は, 緩衝装置の滑り張力で制御されることからアンカーへの負担も軽減される。緩衝装置の平均滑り張力は, 滑り張力試験結果⁴⁾から, U ボルト型で30 kN (最大滑り張力90kN程度), リング型で28 kN (最大滑り張力60kN程度) である。実験に用いた横ロープの緩衝装置は, 落石エネルギーに応じてU ボルト型とリング型の併設, あるいはリング型単独配置とした。

滑車装置は, 支柱頭部と背面のアンカー位置に設置している。この滑車装置には, 両端末をロック加工したスライドロープと吊ロープを巻付グリップで接続させて1 連としたワイヤロープをW 形状に通して連続させている。これは, 落石の衝突時に吊ロープの移動を円滑にし, 負荷を釣り合わせると同時に, 落石の衝撃力を分散させ構造全体で落石エネルギーを吸収する仕組みである。

2.4 計測項目及び計測方法

本実験の計測項目及び計測方法は, 次のとおりとした。

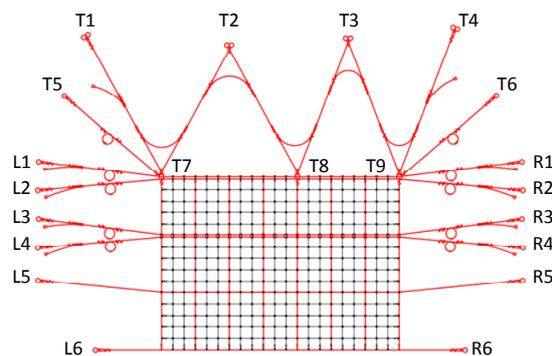


図-5 張力計測箇所図

(1) 緩衝装置スリップ量

吊ロープおよび横主ロープに設置したU ボルト型やリング型の緩衝装置について, 重錘落下後のスリップ量をスケールにより計測した。

(2) ワイヤロープ張力

図-5 は, 吊ワイヤロープ端部 (T1~T4), 支柱頭部 (T7~T9), サイドロープ端部 (T5~T6) および横ロープ左右の端部 (L1~L6, R1~R6) に貼付したひずみゲージ全21 箇所を示している。ひずみゲージは全てジャックルに貼付しており, 4 ゲージ法により測定した。

(3) 重錘加速度

重錘中心部の空間に圧電型3 軸加速度センサー (MEAS 製 M-4630, 定格 1000・5000 m/s²) と記録計 (増幅器とキーエンス製 NR-2000) を設置し, センサーからの出力を0.5 ms 間隔でサンプリングした。

(4) 重錘の挙動と金網の変形量

重錘の落下から捕捉するまでの挙動については, 3 方向 (正面, 左右側面) に配置した高速度カメラ (ディテクト製 SportsCorder, 200 fps, 640×480 pixels, およびカシオ製 EX-F1, 300 fps, 512×384 pixels) を用いて撮影した。衝突時における金網の最大変形量は側面から撮影した画像解析により測定した。

(5) 重錘線速度と回転速度

高速度カメラで側面から撮影した画像解析により, 金網衝突直前の速度を測定した。

2.5 実験ケース

表-2 は, 実験ケースの設定条件を示している。従来

表-3 実験結果一覧表

実験 No.	理論値	実験値							
	衝突エネルギー Et (kJ)	線速度 V (m/s)	回転速度 ω (rad/s)	横ロープ最大張力 t1 (kN) (発生位置)	吊ロープ最大張力 t2 (kN) (発生位置)	緩衝金具スリップ量 (設定長比率) L (mm)	金網最大変形量*1 δ (mm)	重錘最大合成加速度 α (m/s ²)	重錘最大衝撃力 F (kN)
Case1-1	554.5	14.2	19.0	38.0 (R3)	39.4 (T7)	3220 (25.6%)	2379	500.0	1249.9
Case1-2	931.5	14.6	16.7	26.8 (R4)	56.6 (T7)	7290 (57.9%)	2681	512.4	2151.0
Case1-3	1153.3	15.0	16.0	65.3 (R3)	53.5 (T7)	8190 (41.4%)	2543	642.4	3340.4
Case2-1	554.5	14.6	18.1	44.1 (L5)	53.7 (T8)	3310 (26.3%)	2505	368.4	921.0
Case2-2	931.5	14.2	14.8	39.9 (L5)	71.5 (T1)	10010 (79.4%)	2700	315.7	1326.1
Case2-3	1153.3	14.6	15.2	33.5 (R4)	44.1 (T2)	6800 (54.0%)	2595*2	272.3*3	1416.2*4
Case2-3C	1153.3	14.9	14.3	39.7 (R4)	67.6 (T2)	10210 (81.0%)	2760	230.8	1200.0

実験 No.	重錘捕捉	重錘捕捉状況等
Case1-1	○	衝突から回転停止, 誘導, 捕捉まで良好. 主要部材に損傷無し.
Case1-2	△	衝突から回転停止, 誘導は良好. 捕捉時に重錘抜け出し. 主要部材に損傷無し.
Case1-3	○	衝突から回転停止, 誘導, 捕捉まで良好. 主要部材に損傷無し.
Case2-1	○	衝突から回転停止, 誘導, 捕捉まで良好. 主要部材に損傷無し.
Case2-2	○	衝突から回転停止, 誘導, 捕捉まで良好. 主要部材に損傷無し.
Case2-3	×	交点クリップ締付弱く, 金網を貫通. 金網破損.
Case2-3 C	○	衝突から回転停止, 誘導, 捕捉まで良好. 金網の重錘衝突面に一部局所的な破断有り.

*1 重錘衝突時の金網最大変形量, *2, *3, *4 金網貫通直前の値.

型金網あるいは新型金網を用いた構造体に対して, それぞれ衝突エネルギーを3段階に設定した合計6ケースの実験を実施した.

緩衝装置は, 従来型金網を用いた Case1-3 のみ U ボルト型とリング型を横ロープに併設し, その他のケースはリング型のみを設置した. 実験ケースの選定目安とした衝突エネルギー Et は, 落石対策便覧¹⁾に記載される式(1)を用いて理論値として算定した. また, 理論値として算定した衝突エネルギー Et には, 重錘の回転を考慮し, 回転エネルギー係数を見込んでいる.

$$Et = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) m \cdot g \cdot H \quad (1)$$

ここに,

$$(1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right) \leq 1.0$$

Et : 理論値衝突エネルギー(kJ)

β : 回転エネルギー係数 (0.1)

μ : 等価摩擦係数 (0.15)

θ : 斜面勾配 (55 °)

m : 重錘の質量(ton)

g : 重力加速度(9.8 m/s²)

H : 落下高さ (23.0 m)

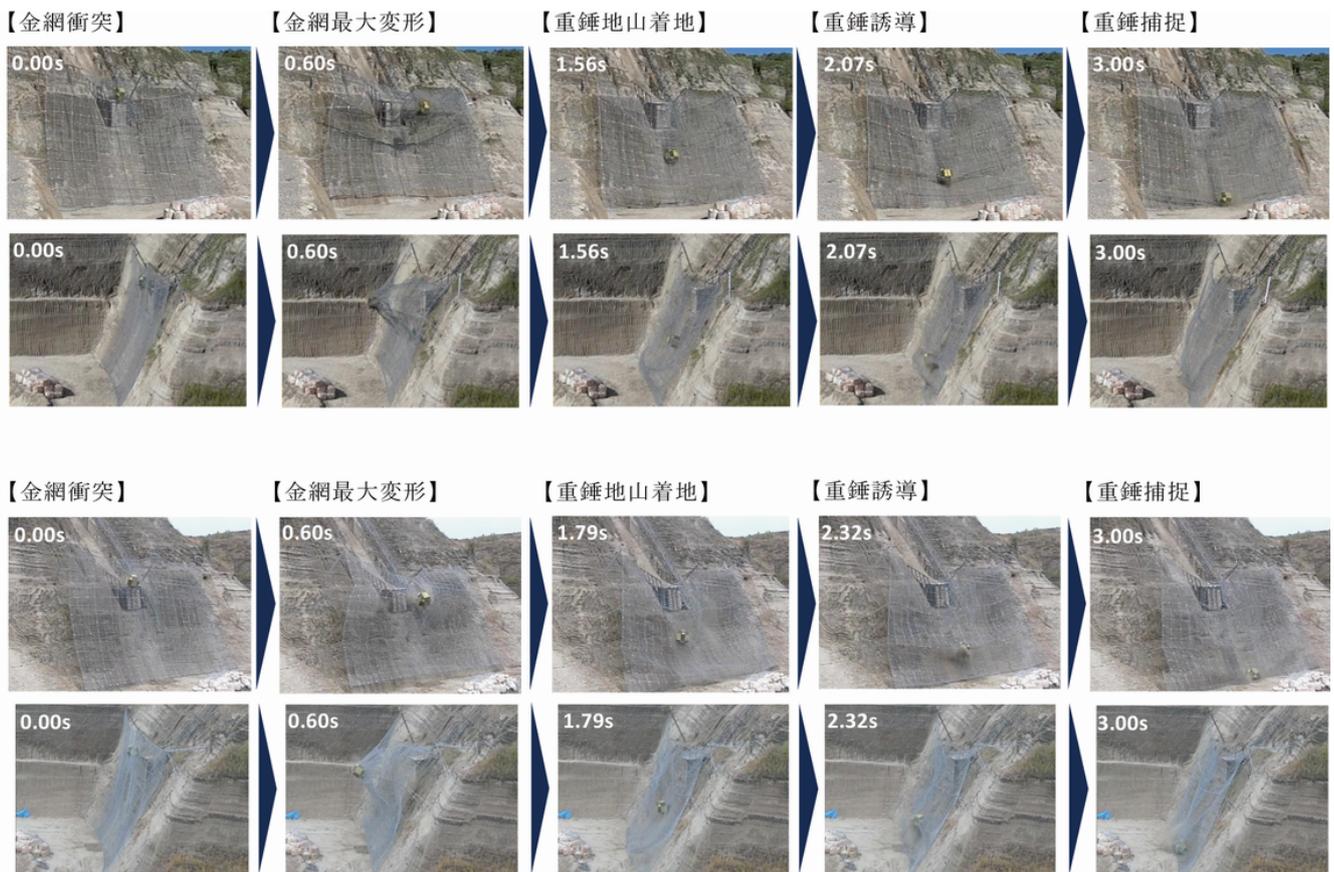
また, 等価摩擦係数¹⁾は, 過去に各地で行われた実験で得られた係数であり, 落石の形状, 斜面の特性から4区分に設定されている. 本実験で用いた重錘は丸状~角状の範囲であり, 斜面走路の凹凸状況は中~大, 走路上には立木がないことから, 区分 B と仮定し, 0.15 を採用した.

3. 実験結果と考察

3.1 実験結果概要

表-3 は, 実験結果の概要を示している. 新型金網を用いた Case2-3 以外の全ケースにおいて, 主要部材である金網や支柱の破損, ロープの破断およびアンカーの抜け出し等もなく重錘を捕捉した.

Case1-2 については, 金網に衝突してからの停止, 斜面法尻までの誘導まで問題はなかったが, 法尻に到達した後, 重錘が金網から抜け出した. これは設置した金網の高さ方向と延長方向の全範囲で金網が挙動し, エネルギーを吸収する過程で, タイミング的に金網下部が浮いた時に重錘が通過したためであり, 他ケースと比べて最下段横ロープに緩みが生じていたことから, 金網下部の浮き上がりが大きかったものと推察する. 実用に際して, 網高を調整することや金網下部に押さえアンカーを配置することで, 落石の抜け出しを防ぐことは十分可能である.



b) Case2-3C (上：正面，下：右側面)

写真-4 重錘捕捉状況 (重錘 5.2 ton, Case1-3 [従来型金網], Case2-3C [新型金網])

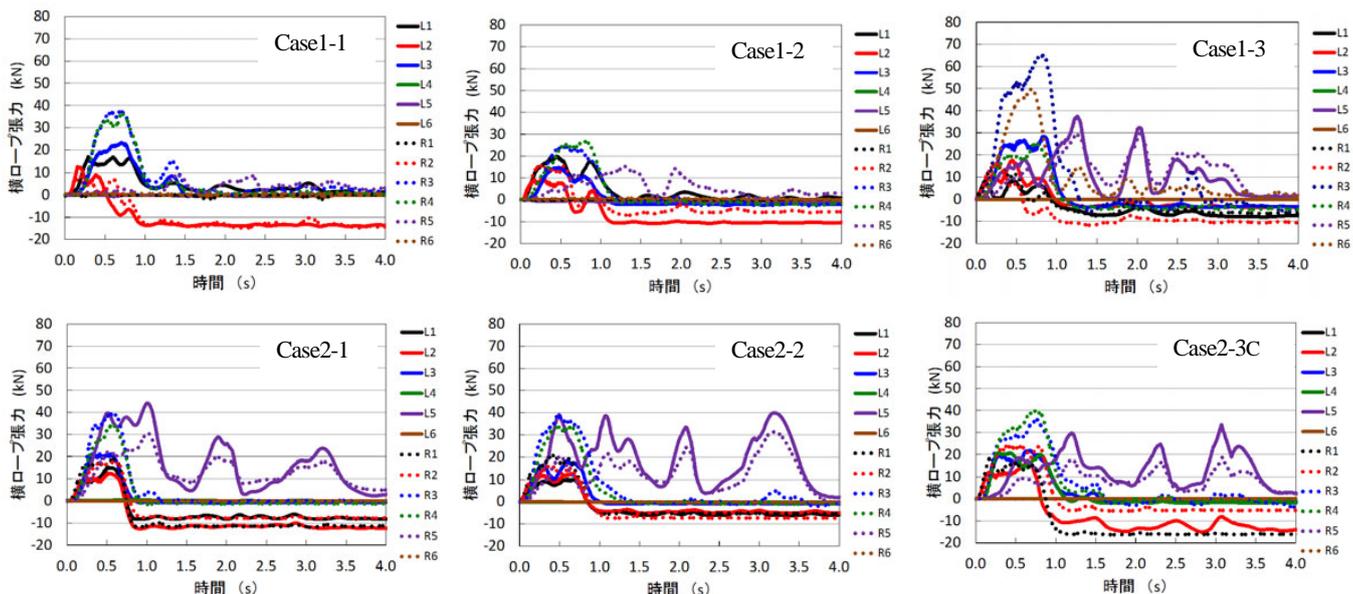
Case2-3については、実験後に縦ロープと横ロープを接続している交点クリップの緩みが確認された。したがって、重錘衝突部の縦・横ロープの間隔が広がり、金網のみで重錘を受ける結果となったことで金網を貫通し、捕捉に至らなかったものと推察する。本実験ケースでは、交点クリップの締付作業が適正ではなかったと考えられたため、交点クリップの締付作業を適正に行い、再実験 (Case2-3C) を行った。再実験の結果、金網は貫通せずに重錘を捕捉したものの、金網の衝突面に一部局所的な破断を生じた。このことから、本実験ケースで付与した衝突エネルギーあるいは衝撃力は、新型金網を用いた構造体の性能限界に近いと推測される。

写真-4a)および4b)は最大規模の重錘 5.2 ton の衝突から捕捉までの高速度カメラの画像であり、それぞれ従来型金網を用いた Case1-3 および新型金網を用いた Case2-3C の挙動を示している。なお、重錘が金網に衝突した時刻を 0.00 s としている。構造体の一連の挙動として、金網等の防護面で重錘を受け止めて回転運動を停止させ、衝突エネルギーを吸収した後、重錘を下方のポケット部に落とし込み斜面法尻まで重錘を誘導し、防護網の前面へ抜け出すことなく重錘を停止させていることが確認できた。これは他ケースの Case1-1, Case2-1 および Case2-2 でも同様の挙動が確認できた。

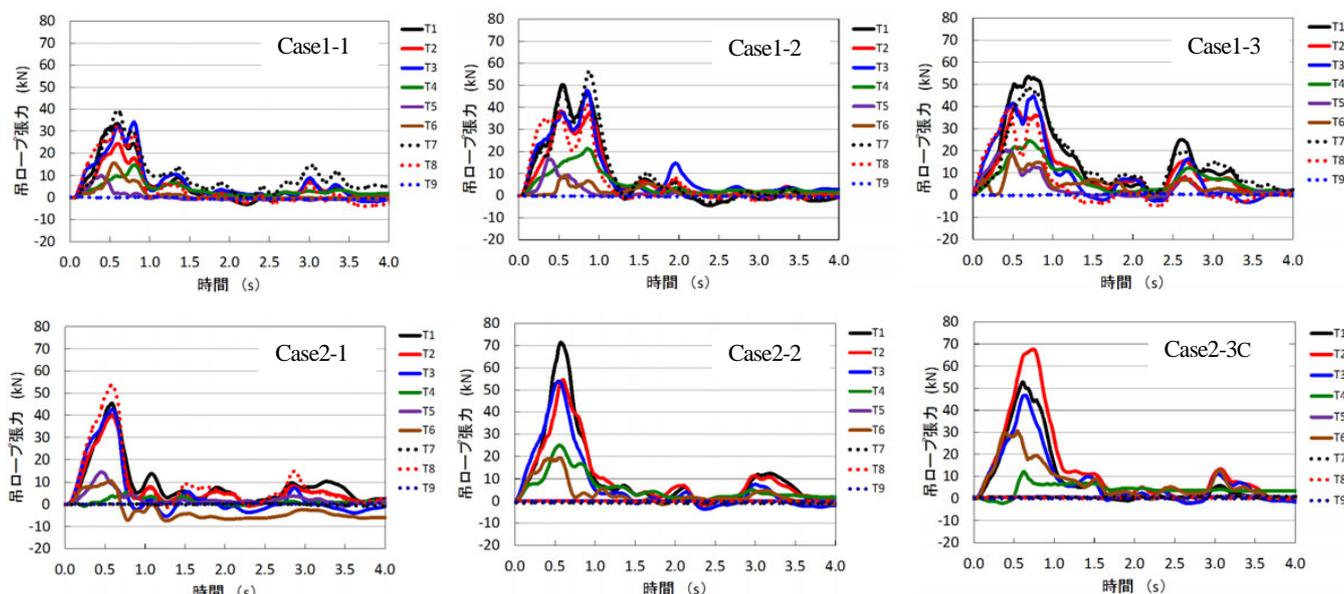
本実験結果より、従来型金網を用いた構造体は、重錘衝突エネルギー1150kJ程度のエネルギー吸収性能、防護性能を有することが確認できた。また、新型金網を用いた構造体については930 kJ程度のエネルギー吸収性能、防護性能を有することが確認できた。

また、本実験では、重錘は回転運動と跳躍運動を伴いながら斜面を落下し金網に衝突する。重錘の回転運動は、衝突面に接した後も暫く継続し、重錘の回転エネルギーを含む衝突エネルギーが構造体に吸収された後に重錘は回転運動を停止させ、地山に落下し法尻まで誘導される。これは、全ての実験ケースで同様の挙動が確認できた。実験で用いた重錘は表面を鉄板で覆っていることもあり、重錘が回転しながら衝突する際、衝突面から火花が出るケースも見られた。これは回転運動により、重錘と金網やワイヤロープの接触面に摩擦が発生したためであり、重錘の回転運動が衝突面の部材に与える影響が大きいことも確認できた。

このように回転運動を伴う重錘の挙動は、鉛直自然落下実験や振り子式実験では再現できず、実斜面で重錘を転落させる方法特有のものである。実際の落石は斜面上を転がり落ちてくるため、本実験で確認された挙動に近いものである。これらのことから、ポケット式落石防護網の防護機能において、落石の回転運動を停止させ、回



a) 横主ロープ張力経時変化



b) 吊ロープ張力経時変化

図-6 全ケースにおけるロープ張力の経時変化

転エネルギーを含む衝突エネルギーを吸収すること、回転運動による摩擦に耐える部材や構造を選定することが重要である。

3.2 各種ロープ張力について

図-6a)および 6b)は、それぞれ全てのケースにおける横主ロープ張力および吊ロープ張力の測定結果を示している。なお、重錘が金網に衝突した時刻を0.00 sとしている。横主ロープ端部に設置した緩衝装置は Case1-3 のみUボルト型とリング型を併設しており、それ以外のケースではリング型のみ設置している。

Uボルト型とリング型を併設した Case1-3 の最大張力

は 65.3 kN であり、Uボルト型の最大滑り張力 90 kN 以下であった。リング型のみ設置したケースの各張力は、26.8 kN~39.9 kN の範囲と大きなばらつきは見られず、リング型の最大滑り張力 60 kN 以下であった。これらのことから、Uボルト型、リング型ともに緩衝機構が有効に機能し、作用張力は衝突エネルギーの大小に関係なく一定の範囲内にあることを確認することができた。また、最大張力が発生した箇所のはほとんどは、2 段目横主ロープであり、衝突位置に近い横主ロープで発生していた。波形については、衝突 (0.0 s) から最大突出時 (0.6 s 程度) まで急速に増大し、最大突出時に最大張力となる。その後の波形に見られる振幅は、地面に着地するまでの



写真-5 金網最大変形量(上:従来型金網,下:新型金網)

誘導区間で金網と地山の間を重錘が回転と跳躍を繰り返しながら落下するためである。左右の張力については、衝突位置が全長の中心であったが、張力は左右対称の値ではなく、スパン長の短い区間(9.0m)側の方がスパン長の長い区間(12.0m)側に比べて大きな値を示す傾向が確認された。

実験 Case 全ての吊ロープの両端部(T1, T4)にはUボルト型の緩衝金具が設置してあり、吊ロープは支柱頭部と背面アンカーの滑車装置を介して1本のロープで連結された構造である。吊ロープの最大張力は、39.4 kN～71.5 kNの範囲であり、Uボルト型の最大滑り張力値である90 kN以下であった。これらのことから、ワイヤロープ張力を抑制させるという緩衝装置の機能について確認することができた。

また、吊ロープの支持点であるT2とT3、T7とT8およびT9でほぼ均等の張力が作用しており、滑車の効果も確認できた。

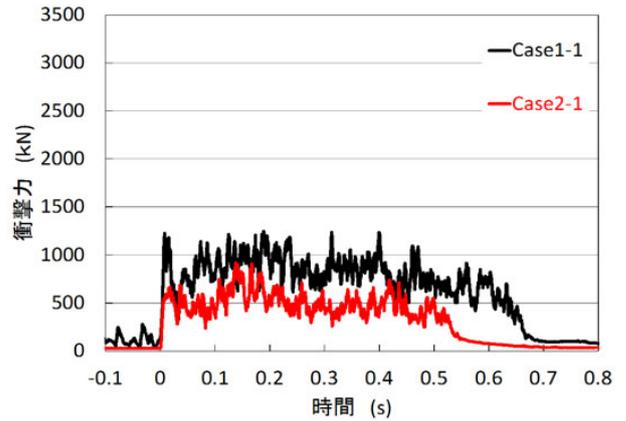
吊ロープ張力の波形については、横主ロープの張力波形とは相違し、最大突出時以降の誘導区間での振幅は小さかった。これは、最大突出時までは吊ロープにも荷重が作用するが、その後、重錘が誘導区間へ落下していく過程において、横主ロープの荷重分担が支配的となったことによる。

3.3 金網変形量と重錘衝撃力について

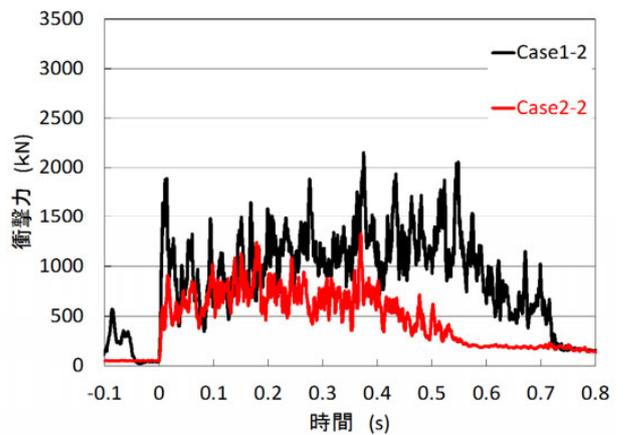
写真-5は、Case1-1とCase2-1およびCase1-2とCase2-2の重錘衝突時における金網最大変形量を示している。

金網最大変形量はCase1-1で2.379m、Case1-2で2.681m、Case2-1で2.505m、Case2-2で2.700mであり、横主ロープ間隔5.0mに対して47.6%～54.0%である。

落石対策便覧¹⁾によれば、ポケット式落石防護網の変形量は、金網の遊び等を考慮して横主ロープ間隔の1/4(25%)とされている。これに対して本実験の供試体では、概ね50%程度の変形量であった。これは横主ロープ



a)重錘2.5 ton・Case1-1とCase2-1



b) 重錘4.2 ton・Case1-2とCase2-2

図-7 重錘衝撃力の経時変化

に配置した緩衝装置のスリップにより、金網の大変形を可能としたものとする。

図-7は、重錘衝撃力の経時変化を示している。なお、重錘が金網に衝突した時刻を0.00 sとしている。最大重錘衝撃力は、重錘内部に設置した3軸加速度計から0.5 ms間隔でサンプリングした加速度から求めた合成加速度に重錘質量を乗じて算定した。最大重錘衝撃力は、2.5 tonの重錘に対するCase1-1(従来型金網)が1250 kNでCase2-1(新型金網)が921 kNであり、4.2 tonの重錘に対するCase1-2(従来型金網)が2151 kNでCase2-2(新型金網)が1326 kNである。新型金網の方が26%または38%小さくなっており、図-7の波形全体からも言える。新型金網では重錘衝撃力は小さいが、写真-5のように変形量は従来型金網と同等またはそれ以上になっていることから新型金網の剛性が小さいことが理解できる。

3.4 速度及び衝突エネルギーの実験値について

表-4は、高速度カメラの画像解析により算定した衝突直前の線速度および回転速度、ならびにこれらを基に算定した衝突エネルギーを実験値として示している。線

表-4 速度及び衝突エネルギーの実験値

実験 No.	重錘質量 m (ton)	理論値	実験値					
		衝突 エネルギー E_t (kJ)	線速度 V (m/s)	線速度エネルギー $1/2 \cdot m \cdot V^2$ E_v (kJ)	回転速度 ω (rad/s)	回転エネルギー $1/2 \cdot I^* \cdot \omega^2$ E_r (kJ) (Er/Ev)	衝突エネルギー $E_v + E_r$ E_a (kJ) (Ea/Et)	等価摩擦 係数 μ
Case1-1	2.5	554.5	14.2	252.1	19.0	69.3 (0.27)	321.4 (0.58)	0.79
Case1-2	4.2	931.5	14.6	447.6	16.7	126.6 (0.28)	574.3 (0.62)	0.75
Case1-3	5.2	1153.3	15.0	585.0	16.0	161.5 (0.28)	746.5 (0.65)	0.72
Case2-1	2.5	554.5	14.6	266.5	18.1	62.9 (0.24)	329.4 (0.59)	0.75
Case2-2	4.2	931.5	14.2	423.4	14.8	99.4 (0.23)	522.9 (0.56)	0.79
Case2-3	5.2	1153.3	14.6	554.2	15.2	145.8 (0.26)	700.0 (0.61)	0.75
Case2-3C	5.2	1153.3	14.9	577.2	14.3	129.0 (0.22)	706.3 (0.61)	0.72

* I : 重錘の慣性モーメントであり、ここでは使用した重錘を球形に換算し、球体の慣性モーメント ($2/5 \cdot m \cdot r^2$) で算定した。

速度は全ケースで 14.2 m/s～15.0 m/s の範囲であり、今回使用した重錘形状寸法と質量の範囲内では大きな速度の違いはない。しかし、回転速度については、重錘 2.5 ton は 18.1 rad/s と 19.0 rad/s、重錘 4.2 ton は 14.8 rad/s と 16.7 rad/s、重錘 5.2 ton は 14.3 rad/s、15.2 rad/s および 16.0 rad/s であり、重錘質量すなわち寸法が小さくなれば回転速度が速くなる傾向にある。これは、重錘質量が大きく、重錘形状が自然石のように扁平・不定形でないことから斜面上での跳躍が少なく、転がり落ちる挙動が卓越することに由来している。

本実験における衝突エネルギーの実験値 E_a は、理論値 E_t の 58%～65% であった。これは、実斜面を重錘が転落する際の線速度が理論値で推定した線速度に比べ遅かったため、結果的に線速度エネルギー E_v が小さくなったことが要因である。重錘が斜面を転がる際、地山との間に非弾性衝突（摩擦抵抗）が発生し、線速度は減衰するが、その減衰の度合いは斜面の性状に応じて異なる。本実験の限られたケース数だけで断定することはできないが、実務設計で用いられる落石対策便覧¹⁾で与えられる式(1)で算定する衝突エネルギー E_t には、相応の安全余裕が含まれているものと考えることができる。

回転エネルギー E_r については、線速度エネルギー E_v と相反した結果であった。回転エネルギーは、一般的に既往の実験結果¹⁾から線速度エネルギーの 10% 程度と言われている。これに対して本実験では、線速度エネルギーの 22%～28% であり、回転エネルギーの占める割合は大きい結果であった。これは、重錘が回転しやすい形状であったことに起因しており、実際の落石はそれぞれ形状が異なり、この値は変動する。

また、実験の線速度エネルギー E_v を式(1)の落石の全運動エネルギー E に代入し、さらに回転エネルギー係数 $\beta=0$ として等価摩擦係数 μ を逆算した結果、0.72～0.79 と大きければつきはなく、本実験の重錘形状および斜面特性を表した等価摩擦係数といえる。一方、本実験の重錘形状および斜面特性に相当する落石対策便覧¹⁾の区分

B の等価摩擦係数 $\mu=0.15$ は過小と言える。

4. 結論

本研究では、実斜面を用いたポケット式落石防護網の実規模重錘衝突実験を行い、以下のことがわかった。

- (1) 本構造体では、実斜面に設置されるポケット式落石防護網が必要とされる機能である、防護面で落石のエネルギーを吸収した後、ポケット部に落とし込み斜面法尻まで誘導させ、最終的に防護網の前面へ抜け出すことなく落石を停止させる一連の捕捉挙動と防護性能が確認できた。
- (2) 本実験では、従来型金網を用いた構造体については、衝突エネルギーの理論値 1150 kJ 程度まで対応可能であることが確認できた。また、引張強度を高めて線径を細径とした新型金網を用いた構造体については、衝突エネルギーの理論値 930 kJ 程度に対応可能であることが確認できた。したがって、落石エネルギーの適用範囲を限定することにより、新型金網を適用できる可能性があることがわかった。
- (3) 実斜面での回転速度は、線速度エネルギーと回転エネルギーとの比率から見ても速く、また重錘の回転運動から生じる摩擦力の影響が衝突面に対して大きいことが確認できた。このことから、ポケット式落石防護網の防護機能において、落石の回転エネルギーを停止させるための構造、ならびに回転運動による摩擦力に耐えうる構造を選定することも重要である。
- (4) 本実験で用いた供試体での重錘衝突時における金網最大変形量は、横主ローブ間隔 5.0 m に対して 1/2 (50.0%) 程度であり、緩衝装置のスリップ機構により金網の大変形を可能としている。また、金網種別の違いでは、線径の太い従来型金網の方が変形量を抑制することが可能であるが、衝撃力に対しては線径の小さい新型金網の方が緩和できる。
- (5) 本実験で与えた重錘衝突エネルギーの範囲内にお

いて、Uボルト型あるいはリング型の緩衝装置を設置したワイヤロープの張力は、緩衝装置の最大滑り張力値(Uボルト型:90kN程度、リング型:60kN程度)以下であり、実規模実験において緩衝装置の有効性とエネルギー吸収効果を確認することができた。

(6) 実斜面では、鉛直自由落下と違い、斜面の状況が衝突速度に影響する。結果的に衝突線速度は、理論値より実験値が遅く、理論値として算定した衝突エネルギーに比べ、実験値で得られた衝突エネルギーは最大で65%程度まで低減した。本実験の衝突時の線速度から得られる等価摩擦係数の平均値は0.75であった。一方、回転速度は一般的な設計値よりも速く、線速度エネルギーに対する比率は、最大28.0%であった。

以上の結果より、実斜面において緩衝装置を用いたポケット式落石防護網のエネルギー吸収性能や適用範囲および落石を捕捉するまでの一連の挙動を検証することができた。また、対応可能エネルギーは限定されるものの引張強度が高く線径を細径とした新型金網についても、実用化は十分可能であると判断でき、従来型金網と比較して軽量の新型金網を用いることによる施工性の向上が期待できる。

今後は、本実験結果を基に、LS-DYNA(非線形構造解析ソフト)を用いて、精度を高めた実験の再現モデルの構築を行い、実験では確認できなかった本構造体の終局限界エネルギーの確認、スパン数とスパン長の特性や影響等の確認を行う予定である。

また将来的には、本実験の供試体である緩衝装置を用いた従来型とは異なる新しいタイプのポケット式落石防護網における可能吸収エネルギーを評価するとともに、合理的な設計手法の確立に向け、研究を進めたい。

謝辞

本実験の実施にあたり、金森藤平商事株式会社および関

係企業に多大なる支援をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会:落石対策便覧, 2000.6.
- 2) 西 弘明, 今野久志, 山口 悟, 佐々木哲也, 小室雅人:ポケット式落石防護網の実規模実験, 土木学会第 68 回年次学術講演会, I-468, 2013.9
- 3) 山口 悟, 今野久志, 西 弘明, 加藤俊二, 栗橋祐介:ポケット式落石防護網の実規模実験における三次元挙動計測, 土木学会第 68 回年次学術講演会, I-469, 2013.9
- 4) 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, 土木学会 構造工学論文集, Vol.56A, pp.1088-1100, 2010.4.
- 5) 前川幸次, 河上康太, 田島与典, 岩崎征夫:ポケット式落石防護網のシミュレーション解析に関する研究, 土木学会 構造工学論文集, Vol.57A, pp.1134-1144, 2011.4
- 6) 田島与典, 前川幸次, 難波正和, 遠田真澄:落石防護補強土壁の実規模重錘衝突実験に関する一考察, 土木学会 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.239-244, 2010.12
- 7) 遠田真澄, 前川幸次, 田島与典, 難波正和:ジオテキスタイルを用いた落石防護補強土壁の動的応答解析, 土木学会 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.235-238, 2010.12
- 8) European Organization for Technical Approvals(EOTA): ETAG27, GUIDELINE FOR EUROPEAN TECHNICAL APPROVAL of FALLING ROCK PROTECTIONKITS, p34, 2008.2.1.

(2013年9月25日受付)