

緩衝装置を用い支柱を強化した高エネルギー吸収落石防護柵の 実物による衝撃載荷性能確認実験

Impact loading performance confirmation experiment
with the real high-energy absorption rockfall guard fence with shock absorbers and strengthened prop

福永一基*, 手嶋良祐**, 二見豪***, 松本栞***

Kazuki Fukunaga, Ryousuke Teshima, Gou Futami, Shiori Matsumoto

*博 (工), ゼニス羽田(株), 技術部担当部長 (〒102-0083 東京都千代田区麴町 5-7-2)

**ゼニス羽田(株), 技術部グループリーダー (〒102-0083 東京都千代田区麴町 5-7-2)

***ゼニス羽田(株), 技術部 (〒102-0083 東京都千代田区麴町 5-7-2)

Key Words : high energy absorption rockfall guard fence, real experiment, verification methods

キーワード : 高エネルギー吸収落石防護柵, 実物実験, 性能照査

1. はじめに

我が国では国土の 70%以上が山岳地帯であるとともに、梅雨や台風などによる集中豪雨の他、近年では地球温暖化の影響ともいわれるゲリラ豪雨による局地的集中豪雨などの影響で地盤が緩むほか、地震などをきっかけとして、全国各地で土砂災害や落石事故などが多発している。落石に対する防護工としては「ロックシェッド」に代表される大型の高剛性構造物や鋼製の「防護網」や「防護柵」などがある。前者の「ロックシェッド」は道路を覆うことで落石が直接落下することを防護する工法で、材料として RC 製, PC 製, 鋼製などがあり落石防護工の中で最も効果的かつ安心感の高い工法の一つではあるが、多額の建設費用を必要とする大きな課題がある。一方後者の「防護柵」は初期建設費用が低くできるという利点があるが、落石に対する耐力が小さいという課題がある。この課題に対し、近年ワイヤロープに緩衝装置を用いることでエネルギー吸収機能を持たせ、高耐力かつ高靱性の支柱を用いることによりエネルギー吸収能力に優れ、且つ経済性に優れる「高エネルギー吸収落石防護柵」と呼ばれる防護柵が数種類開発され、その施工数が増加している。しかし

一般的な落石防護網, 落石防護柵やロックシェッドなどはその設計方法が「落石対策便覧」等で示されているが、これまで「高エネルギー吸収落石防護柵」は新技術であるがゆえその性能検証方法については規定されたものが無く、各開発社にて独自に性能検証を行っているのが実情であり、評価法が統一されていないことや、安全余裕度などの面で課題があった。しかし平成 29 年 12 月に改訂された「落石対策便覧」¹⁾ (以下新便覧) では一般的な落石防護柵ではない落石防護柵については、実物実験による性能確認方法が規定された。本論文では緩衝装置を用い、支柱を強化した高エネルギー吸収落石防護柵に対し、新便覧で規定される実験基準に準じて行った実験について報告する。

2. 高エネルギー吸収落石防護柵の概要

高エネルギー吸収落石防護柵の多くは一般的な落石防護柵とは異なり、防護柵を構成する材料に高耐力、高靱性の材料を使用しているほか、構造体の一部が大きく変形することにより落石のエネルギーを吸収する防護柵である。本実験に供試体として使用した高エネルギー吸収落石防護柵の構造概要を図

ー1 に示す。使用した供試体は高耐力かつ高靱性とするために内部に鉄筋を配置し、コンクリートを充填した構造用鋼管を支柱材料とし、支柱間横方向にワイヤロープを張設している。またこの支柱間に張設したワイヤロープは、1本のワイヤロープを隣接する2本の支柱に巻き付けて環状とし、その重合箇所には一定の張力が作用するとスリップする緩衝装置が取付けられ固定されている。環状にワイヤロープを配置することによりワイヤスリップによる柵面の張出量の抑制や、1スパン毎に独立した構造とすることで維持管理性の向上を図っている。またその他にも金網を構成する素線には普通鉄線よりも高強度の線材を用いたり、ワイヤロープの間隔保持材料には変形性能の向上を目的とし、鋼板ではなくチェーンを用いていることなどが特徴である。

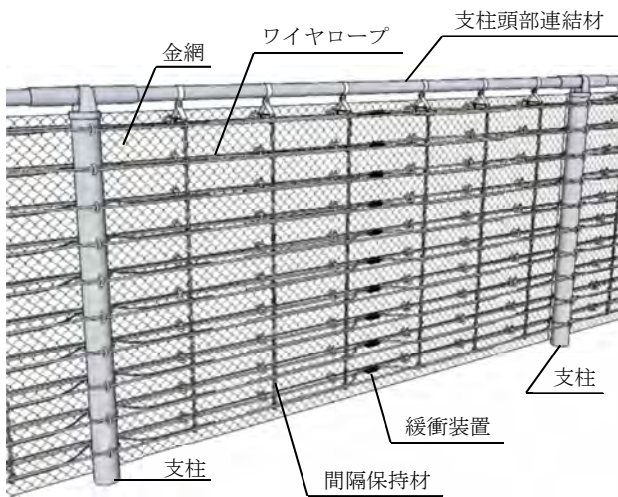


図-1 高エネルギー吸収落石防護柵構造概要

3. 実験概要

3.1 新便覧に規定される性能確認実験方法

新便覧では阻止面をひし形金網と多段のワイヤロープで構成し、H鋼の支柱を用いた落石防護柵を従

来型落石防護柵とし、設計法が示されているが、それ以外の落石防護柵については実験による性能検証法によることとし、その実験方法が規定されている。新便覧で示される実験供試体および実験条件を表-1 にまとめて示す。またこの他にも重錘重量、阻止面高さ、阻止面の最大変形量や実験後の損傷状況についてなどの計測項目や、緩衝装置を用いる場合にはその性能の安定性等に関する室内衝撃実験を別途行うこととしている。¹⁾

表-1 実験供試体および実験条件

| 項目 | 内容 | |
|---------|---|--------------------------------|
| 供試体 | 構造体の標準的外形寸法の実物大を原則とする。 | |
| スパン数 | 3スパン(支柱4本)を標準とする。 | |
| 支柱間隔 | 任意とする。ただし供試体の延長が現地における最低設置延長とする。 | |
| 実験方式 | 斜面滑走式、転落式、振り子式、鉛直落下式等 | |
| 重錘形状、材質 | 多面体コンクリート(密度2,300~3,000kg/m ³)を基本とする。 | |
| 衝突速度 | 25.0m/sec以上を標準とする。 | |
| 入射角度 | 阻止面に対し垂直を基本とする。 | |
| 衝突位置 | 水平方向 | スパン中央を基本とする。 |
| | 鉛直方向 | 実験精度を踏まえ鉛直高さ中央から最大衝突高さの間で設定する。 |

3.2 実験供試体の概要

実験に用いた供試体の形状寸法を図-2 に示す。実験供試体は新便覧で規定される通り実物の防護柵を使用し、現地における最低設置形状寸法を想定し、柵高はH=3.0m、支柱間隔はS=5.0mとした。支柱は構造用鋼管 STK400-φ267.4mm, t=12.7mmの内部に異

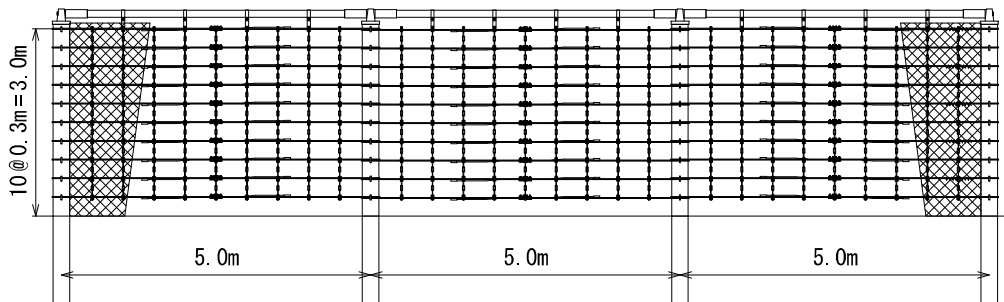


図-2 供試体寸法

形棒鋼 SD345-D38 を 9 本円周均等配置し、設計基準強度 $\sigma_{ck}=50.0\text{N/mm}^2$ のコンクリートを充填している。ワイヤロープは支柱に巻き付けるため屈曲性に優れた構成 7×19 の構造用ワイヤロープ (JIS G 3549) $\phi 16.0\text{mm}$ を使用し、その配置間隔は 300mm とした。谷側のワイヤロープには間隔保持材としてチェーン材を支柱間隔方向に 500mm 間隔で取付けた。

3.3 実験設備概要および実験方法

実験方法を図-3 に示す。重錘は実験供試体の落下位置に一旦セットしたのち、衝突時の重錘速度が $v=25.0\text{m/s}$ 以上となるようにクレーンで 32.0m 以上の高さまで吊上げ、その後重錘を離脱させ供試体へと衝突させる重錘自由落方式とした。

支柱設置方向は、重錘の衝突方向が供試体に対し最も厳しい条件となると共に支柱転倒による重錘のこぼれ落ちに対する安全性の確認が可能となるように水平架設とし、重錘の衝突は柵面に対し 90° とな

る様にした。支柱基礎となる反力壁は振動や滑動などにより衝突エネルギーが出来るだけ吸収されないよう堅固な作りとし、支柱の転倒時に作用する支柱の塑性抵抗モーメントに対し抵抗できるような十分な重量とするため 3 種 5 枚のプレキャストコンクリート版を PC 鋼棒により連結し構築した。この基礎反力壁 1 組の組立後の総重量は約 80ton である。基礎反力壁の組立時の状況を図-4 に、供試体の設置状況を図-5 に示す。重錘は図-6 に示すような多面体コンクリート製²⁾とし、その質量は 4.0ton である。



図-4 基礎反力壁の組立状況



図-5 供試体設置状況

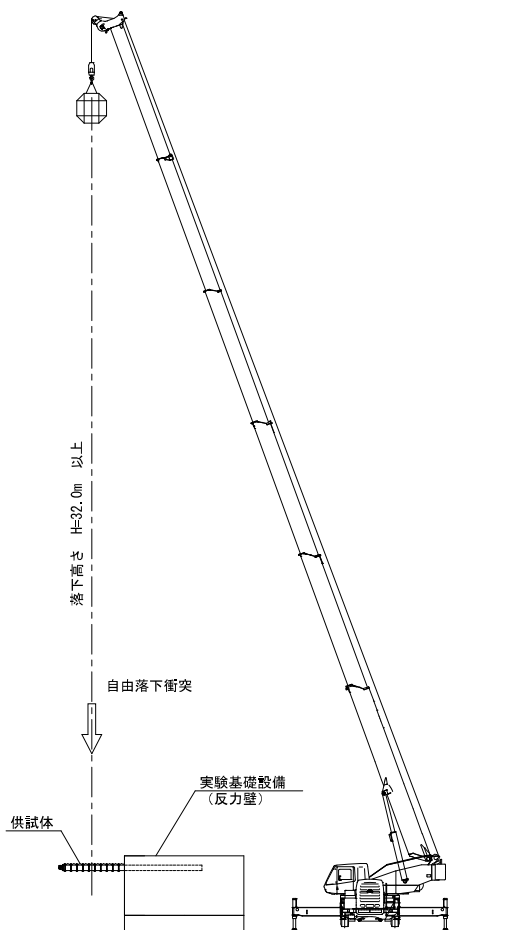


図-3 実験方法の概要



図-6 重錘

実験条件の一覧を表-2に整理する。

表-2 実験条件一覧

| | |
|----------|---------------------------|
| 実験方式 | 自由落下方式 |
| 柵高 | H=3.0m |
| 支柱間距離 | S=5.0m |
| 設置スパン数 | 3スパン(支柱4本) |
| 重錘形状 | 多面体(EOTA準拠) ²⁾ |
| 重錘の材質 | コンクリート製 |
| 重錘質量 | m=4.0ton |
| 重錘落下高 | h=32.0m |
| 重錘衝突速度 | V=25.0m/s |
| 衝突時エネルギー | E=1255kJ |
| 衝突角度 | 阻止面に対し垂直 |
| 衝突箇所 | 中間および端末スパン |
| 衝突位置 | スパン中央 h=1.8m |

4. 実験結果

防護柵の衝撃載荷性能確認実験結果を示す前に主要部材である支柱および緩衝装置の室内実験結果を示す。

4.1 支柱の性能確認実験

図-7に示すように、実物実験に使用するコンクリート充填鋼管支柱の静的曲げ実験を実施した。実験は1000kN耐圧試験機を用いて3点曲げとした。支間距離は4.0mとし、支点部は回転自在の治具を用いて支柱の変形に伴う角度の変化に対応させた。また、載荷点は鋼管の変形を妨げないように丸みを帯びた加工を施した治具を用いた。図-8に支柱の曲げモーメントと支柱回転角度の関係をグラフで示す。グラフから支柱は回転角度 θ が約50~60°付近まで耐力を維持しながら塑性変形を続けており、また実験結果より支柱の塑性抵抗モーメントは750kN・m程度であることがわかる。

4.2 緩衝装置の性能確認実験

緩衝装置の性能確認は図-9に示す実験設備で実施した。両端支点到にシャックルを用いてワイヤロープを固定し、ワイヤロープの重合部に緩衝装置を取付けて供試体とし、張設したワイヤロープに、重錘(W=696kg)を約1.0m上方より自由落下させ衝突させた。計測は重錘の落下高と衝突後の落ち込み量お

よび2本のワイヤのスリップ長とし、スリップ張力の算出は、緩衝装置の仕事量が落下する重錘を停止させたという考え方にに基づき、実験後における重錘の全落下エネルギーをスリップ長で除して求めた。

表-3に緩衝装置の性能確認実験結果を示す。

実験結果より緩衝装置のスリップ張力性能はT=30.0kN程度であることがわかる。



図-7 支柱曲げ実験

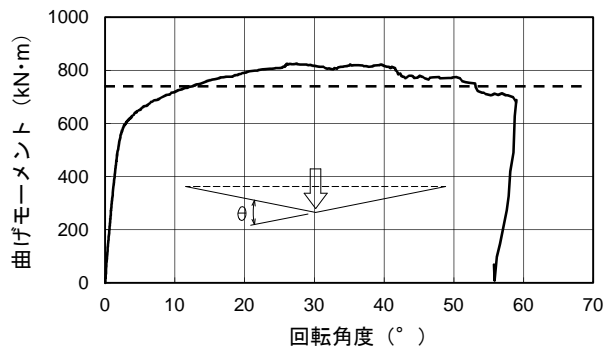


図-8 曲げモーメントと支柱回転角度の関係

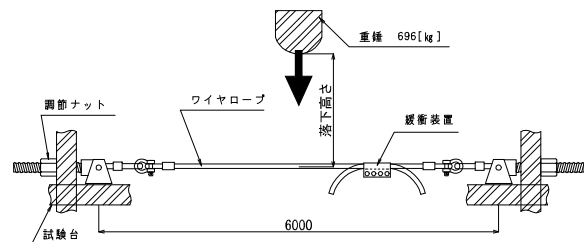


図-9 緩衝装置の性能確認実験設備概要

表-3 緩衝装置の性能確認実験結果

| No. | | 1 | 2 | 3 |
|---------|------|---------|---------|---------|
| 重錘 | 落下高 | 1.049m | 1.051m | 1.050m |
| | 落込量 | 0.910m | 0.951m | 0.950m |
| | 全変位量 | 1.959m | 2.002m | 2.000m |
| | 落下E | 13.37kJ | 13.66kJ | 13.65kJ |
| スリップ量① | | 0.095m | 0.250m | 0.352m |
| スリップ量② | | 0.290m | 0.155m | 0.055m |
| 合計スリップ量 | | 0.385m | 0.405m | 0.407m |
| スリップ張力 | | 34.7kN | 33.7kN | 33.5kN |

4.3 防護柵の衝撃載荷性能確認実験

4.3.1 重錘変位（阻止面変位量）

図-10 に重錘が防護柵阻止面に衝突した時点を開始点として、重錘が停止するまでの重錘変位量（阻止面の変位量）をグラフで示す。この変位量は落下させる重錘の内部に加速度計を取付けて得た重錘加速度を2回積分することによって得た処理データである。データから防護柵阻止面の最大変位量は、中間スパンでは 2856mm、端末スパンでは 3304mm であり端末スパンの方が阻止面の変形量が若干大きくなった。また図-11 に実験後の防護柵の状況を示す。

4.3.2 防護柵の吸収エネルギー

(1) 緩衝装置による吸収エネルギー

表-4 に各ロープにおける緩衝装置のスリップ量と算出した吸収エネルギーを示す。なお、緩衝装置のスリップ張力を室内試験結果による $T=30.0\text{KN}$ として吸収エネルギーを算出した結果であり、重錘衝突エネルギー1250kJ の 50~55%程度を緩衝装置により吸収していることがわかる。

表-4 緩衝装置のスリップ量と吸収エネルギー

| No. | 中間スパン衝突 | | 端末スパン衝突 | |
|-----|------------|----------|------------|----------|
| | スリップ量 (mm) | 吸収E (kJ) | スリップ量 (mm) | 吸収E (kJ) |
| 最上段 | 210 | 6.3 | 0 | 0.0 |
| 9 | 780 | 23.4 | 430 | 12.9 |
| 8 | 1560 | 46.8 | 1320 | 39.6 |
| 7 | 2620 | 78.6 | 2710 | 81.3 |
| 6 | 3600 | 108.0 | 3900 | 117.0 |
| 5 | 4730 | 141.9 | 3550 | 106.5 |
| 4 | 4500 | 135.0 | 3770 | 113.1 |
| 3 | 2480 | 74.4 | 2250 | 67.5 |
| 2 | 1650 | 49.5 | 2090 | 62.7 |
| 最下段 | 1310 | 39.3 | 1760 | 52.8 |
| 合計 | 23440 | 703.2 | 21780 | 653.4 |

(2) 支柱の転倒による吸収エネルギー

表-5 に各支柱の実験後の転倒角度と算出した吸収エネルギー量を示す。なお、支柱の塑性抵抗曲げモーメントを室内試験結果による $M_u=750.0\text{KN}\cdot\text{m}$ として吸収エネルギーを算出した結果であり、重錘衝突エネルギー1250kJ の 15~25%程度を支柱転倒により吸収していることがわかる。

表-5 支柱の転倒角度と吸収エネルギー

| No. | 中間スパン衝突 | | 端末スパン衝突 | |
|-----|----------|----------|----------|----------|
| | 転倒角度 (°) | 吸収E (kJ) | 転倒角度 (°) | 吸収E (kJ) |
| 1 | 0.9 | 11.8 | 0.1 | 1.3 |
| 2 | 5.8 | 75.9 | 0.3 | 3.9 |
| 3 | 5.2 | 68.1 | 4.5 | 58.9 |
| 4 | 0.4 | 5.2 | 20.2 | 264.4 |
| 合計 | 12.3 | 161.0 | 25.1 | 328.5 |

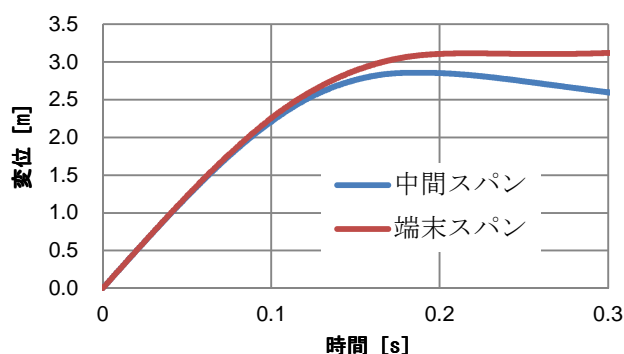


図-10 防護柵阻止面の変形量



図-11 実験後の状況（上：中間，下：端末）

(3) 支柱とワイヤの摩擦による吸収エネルギー

緩衝装置の働きによりワイヤがスリップする際、支柱と支柱に巻き付けたワイヤロープとの間に摩擦力が発生し、エネルギーが吸収される。その吸収エネルギー量を下式³⁾により求める。

$$E1 = P_p \cdot \mu \cdot \Delta L = \pi \cdot T \cdot \mu \cdot \Delta L_s / 8k$$

ここに

- E_l : 支柱とワイヤの摩擦による吸収エネルギー(kJ)
 P_p : 底圧力(kN)
 μ : 摩擦係数 (=0.18)
 ΔL : ワイヤの支柱表面移動量(m)
 T : ワイヤ張力(kN) (=30.0kN)
 ΔL_s : スリップ長(m)
 k : 接触係数 (=0.25)

表-6 支柱とワイヤの摩擦による吸収エネルギー

| | 中間スパン | 端末スパン |
|-------------|-------|-------|
| 全スリップ量 (m) | 23.44 | 21.78 |
| 吸収エネルギー(kJ) | 198.8 | 184.7 |

(4) その他の吸収エネルギー

これまで示した(1)緩衝装置、(2)支柱転倒、(3)支柱とワイヤの摩擦によるエネルギー吸収で、重錘衝突エネルギー $E=1250\text{kJ}$ の80%~90%が吸収されたと考えられる。その他のエネルギー吸収は、現時点では明確な算出は困難であるが、①ひし形金網の変形、②重錘衝突時の質量差によるエネルギーロス、③間隔保持材の変形による吸収等が考えられる。

5. まとめ

本実験は、平成29年12月に改訂された「落石対策便覧」内に規定される実験による性能検証法に準拠し、緩衝装置を用い支柱を強化した高エネルギー吸収落石防護柵の性能確認を目的として実施した。本実験で得た知見および今後の課題を以下にまとめる。

- 1) 緩衝装置を用い支柱を強化した高エネルギー吸収落石防護柵(H=3.0m, 3スパン@5.0m=15.0m)

に対し、新便覧で規定される性能検証法に準拠した条件にて実験を実施した結果、重錘衝突エネルギー $E=1250\text{kJ}$ において捕捉可能であることを中間スパンおよび端末スパンの両方において確認した。

- 2) $E=1250\text{kJ}$ の重錘補足時の防護柵阻止面の最大変形量は、緩衝装置によるワイヤスリップにより3.0m程度生じる結果となった。実設計ではさらに安全を考慮し防護対象から3.5m~4.0mの離れが必要である。
- 3) 重錘衝突エネルギーの吸収は、緩衝装置により約50%、支柱の変形により約20%、支柱とワイヤロープの摩擦により約15%が吸収され、残りのエネルギーについては金網や間隔保持材の変形等の他、質量差によるエネルギーロスにより吸収されていると考える。
- 4) 実験は新便覧に示される方法で実施し、その捕捉性能を確認したが、実現場への適用に当たっては実験とは柵高や支柱間隔など設置条件が同じであることは望めない。今後この実験結果を元に数値解析等を行い、実設計の検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2017.12.
- 2) EOTA：Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits (ETAG027)，2008.
- 3) ループフェンス研究会：高エネルギー吸収落石防護柵 Loop フェンス設計・施工・積算要領，平成27年11月1日.