

ハイブリッド構造の阻止面を有した落石防護柵の 実規模実験と解析に関する研究

Study on full scale experiment and analysis of rock fall barrier with fence panel of hybrid structure

石井 太一*, 西田 陽一**, 榎谷 浩***
Taichi Ishii, Yoichi Nishita, Hiroshi Masuya

* 株式会社プロテックエンジニアリング (〒957-0106 新潟県北蒲原郡聖籠町蓮潟 5322-26)
** 工博, 株式会社プロテックエンジニアリング (〒957-0106 新潟県北蒲原郡聖籠町蓮潟 5322-26)
*** 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)

Key Words:(rock fall, impact, energy dissipator, rock fall barrier)
キーワード: 落石, 衝撃, 緩衝装置, 落石防護柵

1. はじめに

我が国は、国土の相当部分が急峻な地形であり、豪雨や地震が頻繁に発生することから、落石による被災事例は少なくない。このため、様々な形式の落石防護施設の実規模実験、解析などの研究が進められている。

中でも、支柱が直接地盤に根入れされる自立支柱式の落石防護柵は、小規模なエネルギーの落石を捕捉可能な「従来型落石防護柵」と、緩衝装置や高強度金網を用いることで従来型よりも大きいエネルギーを吸収する「高エネルギー吸収型落石防護柵」に大別される。前者は、支柱の塑性変形とワイヤロープの伸びによりエネルギーを吸収する構造であり、経験・実績に基づいた慣用設計法が確立されている。後者は、従来の落石防護施設と適用範囲や力学的特性が異なることから、実験等により要求性能を検証することが求められている。

本研究は、落石衝突時の変形量が少なく、修復性に優

れた高エネルギー吸収型落石防護柵の開発を目的とし、ワイヤロープを格子状に編んだネットと、緩衝装置付きのワイヤロープを組み合わせたハイブリッド構造の阻止面を有した防護柵に重錘載荷実験を行い、衝撃吸収性能および修復性の評価を行った。

また、LS-Dyna を用いた大変形有限要素解析で本構造をモデル化し、解析を行った結果を述べたものである。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

実験供試体は柵高 3.5m, 延長 15m (支柱間隔 5m) とした。実験供試体の概要を図-1 に示す。

主要部材は、支柱、ワイヤロープ (FC6×24 φ12mm～φ22mm 3×7 G/O φ18mm), ワイヤロープを格子状に編み込み交点をクリップ止めたワイヤネット (FC6×24 φ12mm), ひし形金網 (φ4.0-50×50), 緩衝装置であ

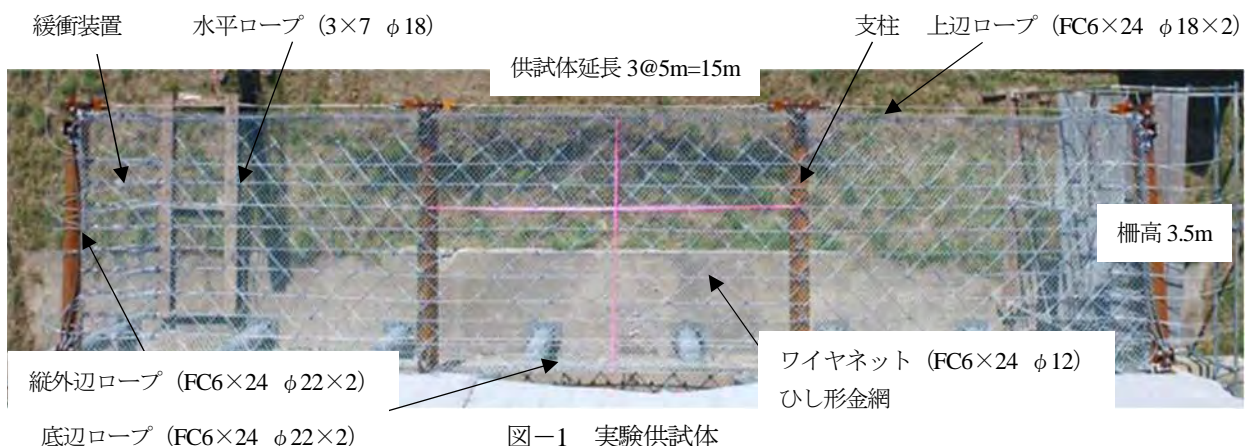


図-1 実験供試体

る。

支柱は図-2に示すように、外側鋼管 (STK400 ϕ 267.4 t=9.3mm) の内部に小口径鋼管 (STK400 ϕ 48.6 t=2.3) 7本と高強度鉄筋 (SD490 D41) を6本配置し、隙間にモルタルを充填した。

上辺・底辺ロープは、片側アイロック止め加工ロープを2本使用し、端末支柱で折り返してワイヤクリップで定着した。縦外辺ロープは、両側アイロック止め加工ロープを端末支柱に2本並列に設置した。

ワイヤネットの格子の目あいは、500mm \times 500mmであり、ネットと上辺・底辺・縦外辺ロープをシャックルで連結した。

柵高方向に30cm間隔で配置した水平ロープは、端末支柱の緩衝装置と接続し、所定の張力が作用したときに、ロープがスリップしながらエネルギーを吸収する構造である。

水平ロープとワイヤネットの交点には、重錘衝突時の間隔保持機能のワイヤクリップを1スパンあたり18ヶ所 (水平ロープ全9段 \times 2列) 設置した。

金網と上辺・底辺・縦外辺ロープは、結合コイルで連結しており、結合コイルはSWMGS-7、線径 ϕ 4.0mm、コイル径70mm、長さ300mmを用いた。

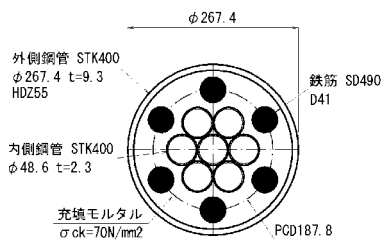


図-2 支柱断面図

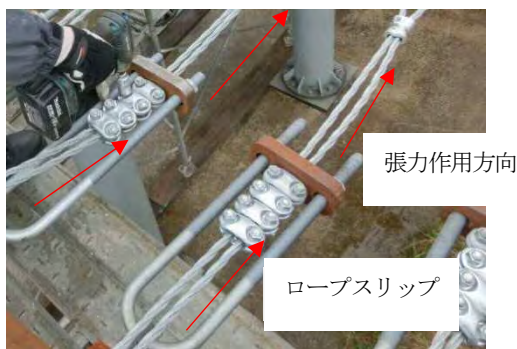


図-3 緩衝装置

2.2 実験ケースおよび実験方法

実験ケースを表-1に示し、実験方法を図-4に示す。実験供試体は、防護面が水平になるように、張出梁の形で実験架台に設置し、50t吊りクレーンで重錘を所定の高さまで吊り上げ、離脱装置を用い自由落下で衝突させた。

実験に使用した重錘は、質量1513kg (密度2.6t/m³) であり、鋼製殻にコンクリートを充填した多面体形状である。重錘の衝突位置は図-5に示すように、水平方向に

載荷スパンの中央、鉛直方向に高さ2.3mとした。

計測項目は、落下高さ、衝突速度、重錘加速度、ワイヤロープ張力、残存柵高、変形量、緩衝装置のロープスリップ量である。

表-1 実験ケース

ケース	落下高	衝突速度	入力E	載荷位置
CASE1	34.2m	25.9m/s	507kJ	中央スパン
CASE2	33.4m	25.7m/s	500kJ	端部スパン

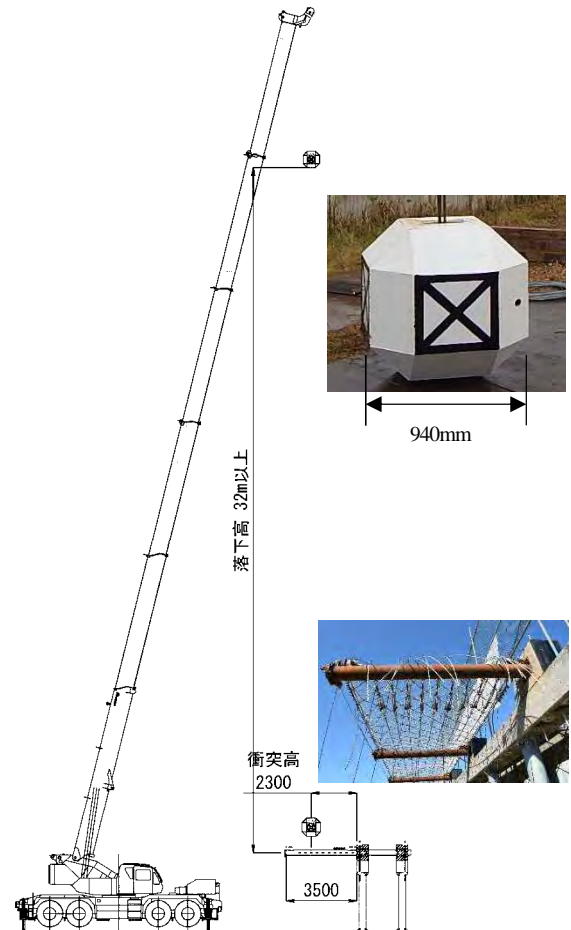


図-4 実験方法

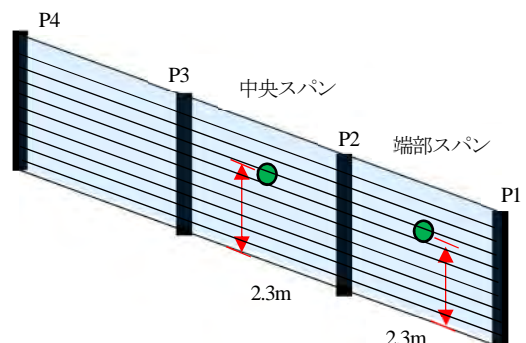


図-5 載荷位置

3. 実験結果

3.1 残存柵高・最大変形量

残存柵高および最大変形量の一覧を表-2 に示し、荷前後の状況、変形状況を図-6(a)~図-6(d)に示す。

CASE1 の残存柵高は、初期柵高 3.5m に対して 2.9m、最大変形量は 3.0m であり、CASE2 の残存柵高は、柵高 3.5m に対して 2.7m、最大変形量は 2.9m である。

CASE2 は、CASE1 に比べて最大変形量は小さいものの、残存柵高も小さくなっている。

表-2 残存柵高・最大変形量

ケース	荷位置	残存柵高	最大変形量
CASE1	中央スパン	2.9m	3.0m
CASE2	端部スパン	2.7m	2.9m

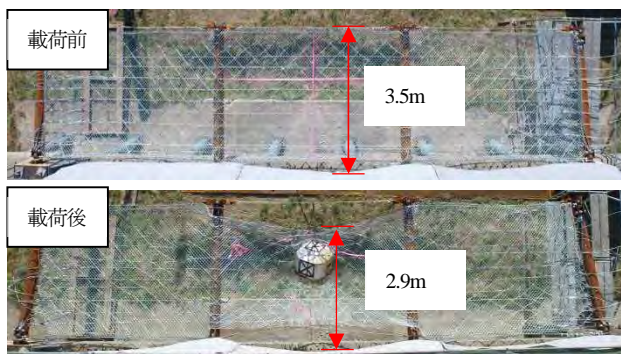


図-6(a) 柵高変化(CASE1)



図-6(b) 柵高変化(CASE2)

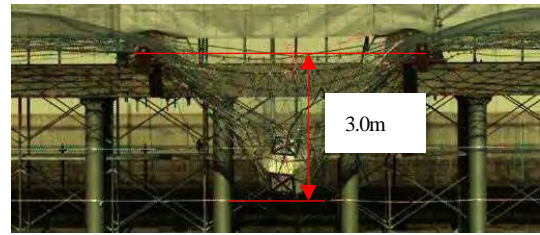


図-6(c) 最大変形量(CASE1)

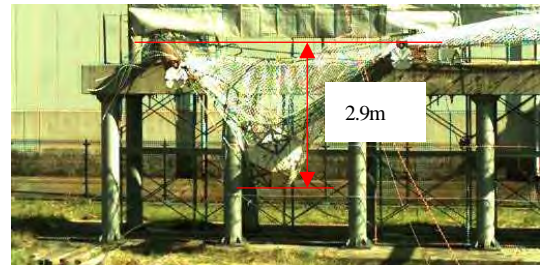


図-6(d) 最大変形量(CASE2)

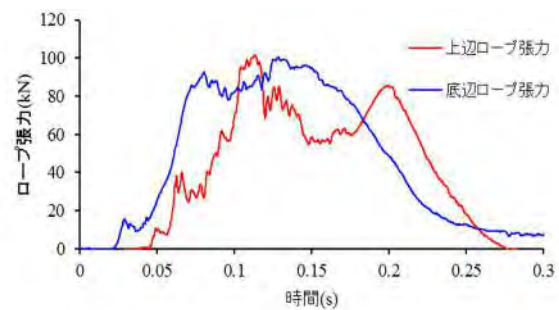


図-7(a) 上辺・底辺ロープ張力(CASE1)

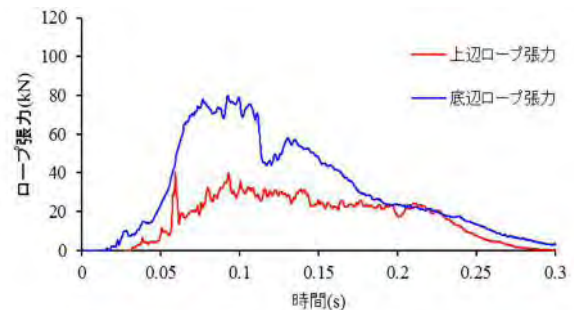


図-7(b) 上辺・底辺ロープ張力(CASE2)

3.2 上辺・底辺ロープ張力

上辺ロープ張力と底辺ロープ張力の経時変化を図-7(a), (b)に示す。

CASE1 の上辺ロープ 1 組の張力は 101kN、底辺ロープ 1 組の張力は 100kN であり、CASE2 の上辺ロープ 1 組の張力は 40kN、底辺ロープ 1 組の張力は 80kN である。

上辺ロープと底辺ロープの破断荷重はそれぞれ 296kN、444kN であることから、使用したロープは十分安全といえる。

CASE2 のワイヤロープ張力は、端支柱の変形によりエネルギーを吸収しており、CASE1 より小さくなったと推察できる。

3.3 緩衝装置の吸収エネルギー

緩衝装置のロープスリップ量の計測結果と推定吸収エネルギーを表-3 に示す。

緩衝装置による吸収エネルギーは、ロープスリップ量 (m) × スリップ張力 (kN) で求めたものである。本研究では、荷後の各緩衝装置のスリップ量を計測し、スリップ張力を既往の引張試験から得られた 40kN と仮定して求めた。

CASE1 の緩衝装置による吸収エネルギーは 279kJ であり、入力エネルギーの 55% となった。スリップしたロープは 1 段目~8 段目で、重錘衝突位置である 3 段目のスリップ量が最も大きく 1690mm である。CASE2 の緩衝装

置による吸収エネルギーは 188kJ で、入力エネルギーの 38%である。スリップしたロープは2 段目～8 段目で、重錘衝突位置である 3 段目のスリップ量が最も大きく 1850mm である。ロープの余長は 3m であることから、許容量の範囲である。

CASE1, CASE2 とともに、重錘が阻止面に衝突した後、ワイヤネットの変形にロープが追随しながら変形することで、衝突位置以外のロープに衝撃力が分散している。

また、CASE2 は支柱の変形が大きかったことで、ロープの吸収エネルギーが小さくなったものと考えられる。

表-3 ロープスリップ量計測結果

水平ロープ位置 (上から)	スリップ量(mm)	
	CASE1	CASE2
1 段目	455	0
2 段目	1005	305
3 段目	1690	1850
4 段目	1570	1545
5 段目	1010	510
6 段目	695	465
7 段目	320	15
8 段目	220	15
9 段目	0	0
合計(mm)	6965	4705
吸収エネルギー	279kJ	188kJ

3.4 支柱の吸収エネルギー

支柱の吸収エネルギーを表-4 に示す。

吸収エネルギーは、支柱の降伏モーメント M (kN・m) × 支柱の変形角 θ (rad) から求める。支柱の降伏モーメントは、断面分割法で算出した理論値より 500kN・m である。理論値の計算には、実験で使用した鋼材の材料強度を用いた。また、支柱の残留変位は、実験前後で計測した支柱頭部の座標から求めた。

表-4 ロープスリップ量計測結果

支柱 No.	CASE1		CASE2	
	残留変位	吸収エネルギー	残留変位	吸収エネルギー
P1	4°	35kJ	11°	96kJ
P2	0°	0kJ	0°	0kJ
P3	0°	0kJ	1°	8kJ
P4	4°	35kJ	2°	17kJ
計		70kJ		121kJ

CASE1 は、支柱の推定吸収エネルギーは 70kJ で、入力エネルギーの 14%であり、支柱と緩衝装置で約 70%のエネルギーを吸収したものと推定できる。CASE2 は、支柱の推定吸収エネルギーは 121kJ で、入力エネルギーの

24%であり、支柱と緩衝装置で約 60%のエネルギーを吸収したものと推定できる。

これらから、本構造のエネルギー吸収メカニズムは、支柱と緩衝装置で 60%～70%、ネットとロープで 30～40%であることが分かる。

3.5 吸収エネルギーと重錘変位の関係

CASE1 の重錘衝撃力・吸収エネルギーと重錘変位の関係を図-8(a)に示す。重錘衝撃力は、重錘に設置した 3 軸加速度計で計測した加速度に重錘質量を乗じて求めた。

重錘変位は、重錘加速度を時間で 2 階積分して求め、吸収エネルギーは、重錘衝撃力を重錘変位で積分して求めた。なお、重錘変位は、重錘がネット面に接触したときを $X=0m$ としている。

図より、重錘衝撃力は、重錘変位が 1.0m を超えてから緩やかに増加しており、柔軟に重錘を捕捉していることがわかる。

重錘変位と吸収エネルギーの関係を図-8(b)に示す。

図より、入力エネルギーに応じた変位は、300kJ～500kJ の範囲で簡便的に式(1)によって求めることができると考えられる。

$$\delta = 0.0028E + 1.52 \quad \text{式(1)}$$

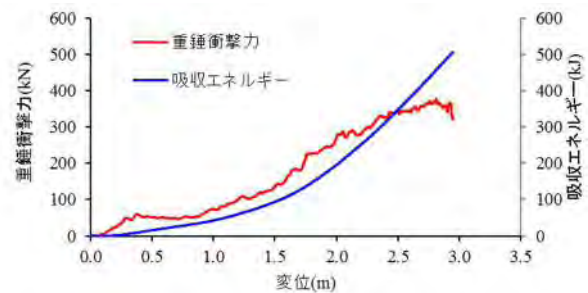


図-8(a) 重錘衝撃力・吸収エネルギーと重錘変位の関係

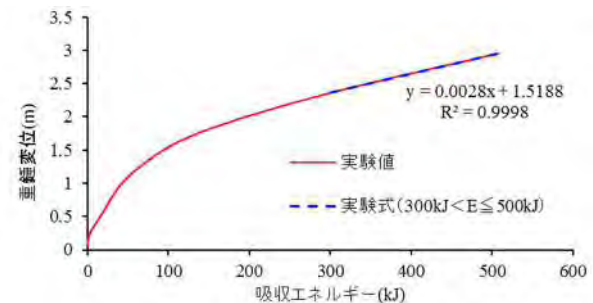


図-8(b) 重錘変位と吸収エネルギーの関係

3.6 損傷状況と性能評価

落石防護施設の要求性能は性能1～性能3に分類され、その考え方は次のように規定されている。

性能1：落石防護施設は健全、または損傷するが、道路機能に支障を及ぼさない性能。性能2：落石防護施設の損傷が限定的なものにとどまり、道路機能の一部に支障

を及ぼすが、速やかに回復できる性能。性能3：落石防護施設の損傷が道路機能に支障を及ぼすが、致命的なものとならない性能。

CASE1, CASE2 の部材損傷状況と性能評価を表-5に示し、重錘捕捉後の状況を図-9(a), (b)に示す。

CASE1 の損傷判定は次の通りである。

- ① 端末支柱は残留変位 4° であり、既往の静的支柱曲げ試験で最大変形角 15° までの耐荷性能を確認していることから、再使用可能と判定した。
- ② 各ワイヤロープは健全な状態であり、再使用可能と判定した。
- ③ ひし形金網は小礫のすり抜けを防止するものであり、凹み変形は健全であるものと判定した。
- ④ 緩衝装置はロープのスリップにより摩耗することから、交換が必要と判定した。
- ⑤ ワイヤネットは健全であり、再使用可能と判定した。

これらから、落石捕捉性能を復旧するための補修は、緩衝装置の交換と判定し、性能水準は「性能2」を満たすものといえる。

CASE2 の損傷判定は次の通りである。

- ① 端末支柱は残留変位 11° であり、交換が必要と判定した。
- ② 各ワイヤロープは健全な状態であり、再使用可能と判定した。
- ③ ひし形金網は小礫のすり抜けを防止するものであり、凹み変形は健全であるものと判定した。
- ④ 緩衝装置はロープのスリップにより摩耗することから、交換が必要と判定した。
- ⑤ ワイヤネットは一部破断が見られたため、補修が必要と判定した。

これらから、落石捕捉性能を復旧するための補修は、端末支柱および緩衝装置の交換と、ワイヤネットの補修と判定し、性能水準は「性能2」を満たすものといえる。

表-5 主要部材の損傷判定

ケース	阻止面	支柱	性能評価
CASE1	ひし形金網：凹み変形 上辺・底辺・縦外辺ロープ：健全 水平ロープ：健全 緩衝装置：ロープのスリップ ワイヤネット：健全	再使用可能	性能2
CASE2	ひし形金網：凹み変形 上辺・底辺・縦外辺ロープ：健全 水平ロープ：健全 緩衝装置：ロープのスリップ ワイヤネット：部分破断	端末支柱の交換	性能2

4. 大変形有限要素解析による性能評価

4.1 解析モデル

LS-Dyna による解析モデルを図-10に示す。

解析モデルの構成部材は支柱、ワイヤロープ、ワイヤネット、緩衝装置である。なお、本研究ではひし形金網はモデル化しない簡易モデルで検証を行った。



図-9(a) 重錘捕捉後の状況(CASE1)



図-9(b) 重錘捕捉後の状況(CASE2)

各部材の要素特性は、支柱にビーム要素、ワイヤロープとワイヤネットにケーブル要素、緩衝装置にばね要素とした。

支柱は、図-11(a)に示す断面分割法で求めた曲げモーメントと曲率の関係を定義し、支点を固定した。

ワイヤロープ (FC6×24) は、図-11(b)に示す既往の引張試験で求めた応力ひずみ関係を用いた。ワイヤロープ (3×7) は、ヤング係数 100GPa の弾性材料とした。緩衝装置は等方弾塑性ばね要素とし、降伏荷重を 40kN とした。

ワイヤネットの要素は、ロープの交点間を1要素とし、交点はヒンジ結合とした。

上辺・底辺・縦外辺ロープは、ワイヤネットとの交点間を1要素とし、ワイヤネットとの接続は、シャックルを用いることから、ネットとロープの間にスライディングコンタクトを定義した。

水平ロープの要素長は、上辺・底辺ロープと同じとし、水平ロープとワイヤネットの間隔保持の役割を持つワイヤクリップのモデルは、等方弾塑性ばね要素とし、降伏荷重を 3kN と仮定した。

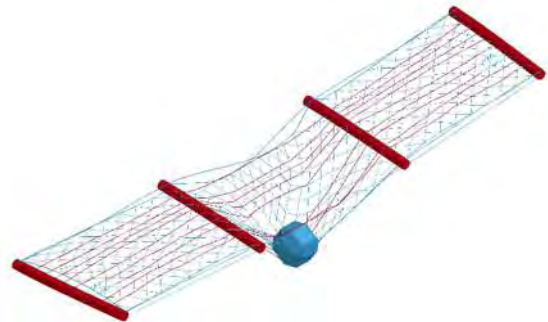


図-10 解析モデル (最大変形時)

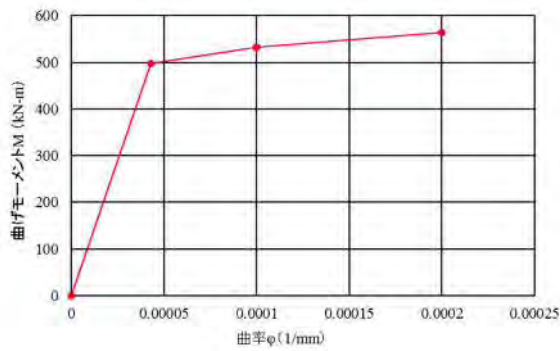


図-11(a) 支柱の曲げモーメントと曲率の関係

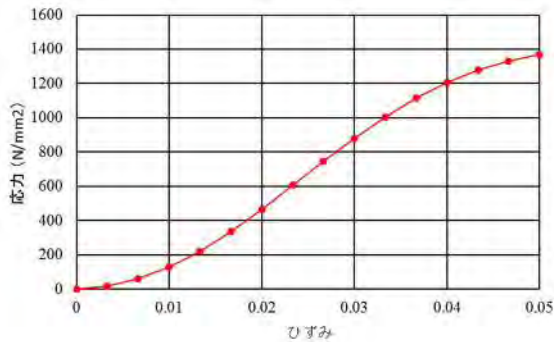


図-11(b) ワイヤロープの応力ひずみ関係

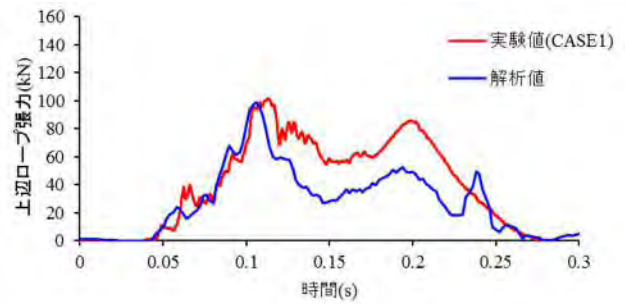


図-12(b) 上辺ロープ張力の経時変化

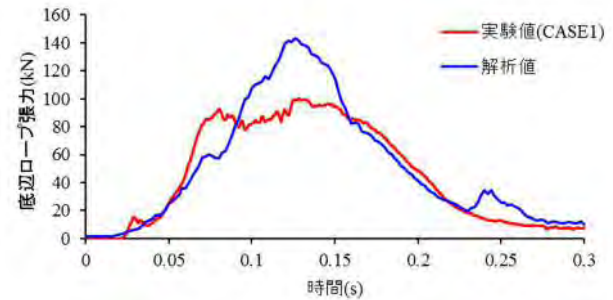


図-12(c) 底辺ロープ張力の経時変化

4.2 解析結果

図-12(a)~(c)に実験計測値と解析結果の比較を示す。

重錘変位と吸収エネルギーの関係より、重錘変位の最大値は、実験値は3.0m、解析値は2.6mとなり、解析値の方がやや小さい。実験供試体は、阻止面のワイヤネットやワイヤロープの初期たわみの影響で、重錘変位が大きくなっていると考えられる。

上辺ロープ張力と底辺ロープ張力の経時変化より、上辺ロープ張力は実験値と解析値が概ね一致している。底辺ロープ張力の作用時間は概ね一致しているものの、最大値は解析値のほうがやや大きい。これは、実験供試体と実験架台の支点移動によって、ロープ張力が解析値よりも小さくなっているものと考えられる。

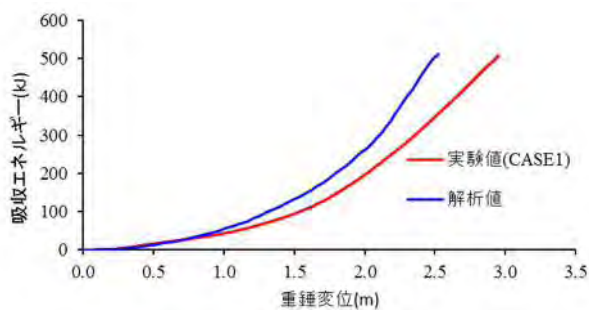


図-12(a) 重錘変位と吸収エネルギーの関係

5. まとめ

本研究で行った落石防護柵の重錘落下実験による性能評価と、LS-Dynaの解析結果を次に述べる。

- 1) 柵高3.5m、延長15m（支柱間隔5m）の本防護柵のエネルギー吸収性能は500kJである。
- 2) 残存柵高は、中間スパンに載荷したとき、柵高3.5mに対して2.9mであり、端部スパンに載荷したとき、2.7mである。
- 3) 最大変形量は、中間スパンに載荷したとき3.0mであり、端部スパンに載荷したとき2.9mである。
- 4) 緩衝装置と支柱の変形による吸収エネルギーは、中間スパンに載荷したときで約70%、端部スパンに載荷したときで約60%と推定できる。
- 5) 実験で計測した重錘変位と吸収エネルギーの関係より、入力エネルギーに応じた重錘変位を求める簡便式を導いた。
- 6) 本防護柵の性能水準は「性能2」を満たすものといえる。
- 7) 本研究で検討したLS-Dynaの解析モデルは、重錘変位が実験値よりやや小さいものの、防護柵の変形挙動やロープ張力の経時変化は概ね再現できている。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：落石対策便覧，2017.12.