

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(その2)

Study on full scale experiment and analysis of rockfall barrier with fence panel of hybrid structure (part2)

石井太一*, 西田陽一**, 榎谷浩***, 栗橋祐介****
Taichi Ishii, Yoichi Nishita, Hiroshi Masuya, Yusuke Kurihashi

*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)

** 博(工), 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, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

**** 博(工), 金沢大学准教授, 理工研究域地球社会基盤学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

キーワード: 落石, 衝撃, 緩衝装置, 落石防護柵

Keywords: rockfall, impact, energy dissipator, rockfall barrier

1. はじめに

我が国は、国土の相当部分が急峻な地形で、豪雨や地震の影響による土砂災害や落石による被災事例が絶えない。落石防護柵は、落石を待ち受けて防護する構造物で、主に道路際や斜面上に設置される。防護柵の種類は、100kJ程度の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た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で設計されている。後者は、従来の落石防護施設と比較すると、適用範囲や力学的特性が異なることから、実験等により性能を検証することが求められるようになっており¹⁾、高エネルギー吸収型落石防護柵の実規模実験や数値解析事例が多く報告されている^{2)~4)}。

著者らは、既往の研究⁵⁾で、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、高強度で靱性に優れた支柱と、柵高方向に30cm間隔で多段配置した緩衝装置付きワイヤロープとワイヤネットを組み合わせたハイブリッド構造の阻止面を有する防護柵に500kJの実規模衝撃実験を行っている。

本研究では、既往の研究の柵構造を基本とした防護柵で、支柱規格や、緩衝装置の設置個所数を変化させて、500kJ、1200kJの実規模衝撃実験を行った。数値解析は、実験結果を適切に再現可能な解析モデルの構築を目的として、LS-DYNAを用いた弾塑性衝撃応答解析を実施し、

実験結果と比較する形で解析モデルの妥当性を検討した。

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。供試体の概要を表-1に示す。供試体タイプはTypeA~TypeCの3種類である。TypeA、TypeBは500kJタイプ、TypeCは1200kJタイプとする。

主要部材は、支柱(STK400)、上弦材(STK400)、ワイヤロープ(FC6×24 φ22mmまたは3×7 φ18mm)、ワイヤネット(FC6×24 φ12mm)、ひし形金網(Z-GS7 φ4.0mm-50×50)、緩衝装置である。

支柱は、図-1に示す外側鋼管の内部に小口径鋼管7本と高強度鉄筋を6本配置し、隙間にモルタルを充填したLST部材を使用し、外径がφ267mmとφ318mmの2種類とした。上弦材は、支柱頭部間に設置する部材であり、阻止面を介して端末支柱に伝達された縦断方向の荷重を、複数の支柱で抵抗し、柵全体の变形性能をコントロールする。上弦材を設置しない場合は、支柱頭部間をワイヤロープ(形状維持ロープ)で接続した。TypeAは、全スパンに上弦材を設置し、TypeBは、全スパンに形状維持ロープを設置した。TypeCは、端部スパンは上弦材を設置し、中間スパンは形状維持ロープを設置した。

阻止面は、谷側から緩衝ロープ・ワイヤネット・ひし形金網の順に設置される。緩衝ロープは、柵高方向に25cm間隔で、計13段設置した。ワイヤネットは、ロープを格子状に編み込んだもので、上辺・底辺・縦外辺ロ

表-1 供試体タイプ

供試体タイプ	概要図	備考
A		<ul style="list-style-type: none"> ・500kJ タイプ ・支柱 (φ267) ・全スパンに上弦材設置 ・ネット (φ12mm 300mm×300mm) ・緩衝ロープの片側に緩衝装置を設置 ・上辺ロープに緩衝装置なし ・底辺ロープに緩衝装置なし ・間隔保持プレートなし
B		<ul style="list-style-type: none"> ・500kJ タイプ ・支柱 (φ267) ・上弦材なし ・ネット (φ14mm 500mm×500mm) ・緩衝ロープの片側に緩衝装置を設置 ・上辺ロープに緩衝装置なし ・底辺ロープに緩衝装置なし ・間隔保持プレートなし
C		<ul style="list-style-type: none"> ・1200kJ タイプ ・支柱 (φ318) ・端部スパンに上弦材設置 ・ネット (φ12mm 300mm×300mm) ・緩衝ロープの両側に緩衝装置を設置 ・上辺ロープの片側に緩衝装置を設置 ・底辺ロープの片側に緩衝装置を設置 ・間隔保持プレートあり

ープにシャックルで接続した。

緩衝装置は、図-2 に示すように、緩衝ロープを1組当たり2枚のプレートで挟み込み、ハイテンションボルトで締め付ける構造である。エネルギー吸収機構は、所定の張力が発生すると、ロープの余長がスリップする摩擦摺動型である。TypeA、TypeB は緩衝ロープの片側に緩衝装置を設置し、TypeC は緩衝ロープの両側に緩衝装置を設置した。また、TypeC は上辺ロープと底辺ロープにも緩衝装置を設置した。

ワイヤネットは、図-3 に示すワイヤロープを格子状に編み込んだものであり、ネットは TypeA、TypeC でφ12mm (目あい幅 300mm×300mm)、TypeB でφ14mm (目あい幅 500mm×500mm) とし、シャックルで上辺・底辺・縦外辺ロープと連結した。

間隔保持用 U ボルトは、緩衝ロープとワイヤネットの

交点に設置し、ロープとネットの間隔を保持している。間隔保持プレートは、緩衝ロープ同士の柵高方向の間隔を保持するプレートであり、TypeC のみ設置した。

2.2 実験ケースおよび実験方法

実験ケースを表-2 に示し、実験状況を図-4、図-5 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、ラフテレーン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) および 3479kg (密度 2.5t/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。重錘載荷位置は、水平方向に中間スパンと端部スパンの中央、鉛直方向に高さ 2.5m とした。載荷は、中間スパン載荷後に部材の補修や交換を行い、端部スパンに載荷した。

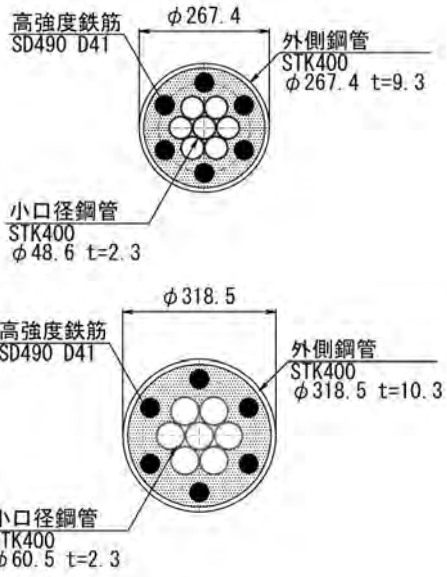


図-1 支柱断面図



図-2 摩擦摺動型緩衝装置

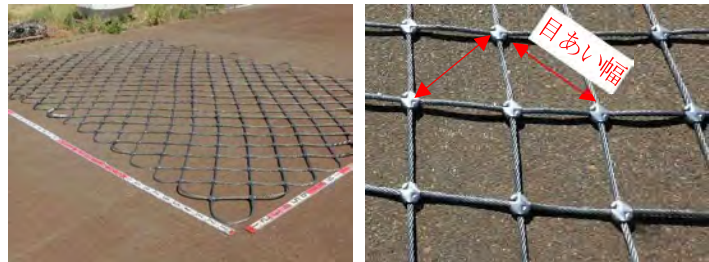


図-3 ワイヤネット

表-2 実験ケース

ケース	供試体タイプ	重錘質量 (kg)	落下高(m)	衝突速度 (m/s)	衝突エネルギー(kJ)	载荷位置
CASE 1	A	1513	35.0	26.2	519	中央
CASE 2	A	1513	33.9	25.8	503	端部
CASE 3	B	1513	34.4	26.0	510	中央
CASE 4	B	1513	34.3	25.9	509	端部
CASE 5	C	3479	35.2	26.3	1200	中央
CASE 6	C	3479	35.3	26.3	1204	端部



図-4 実験供試体

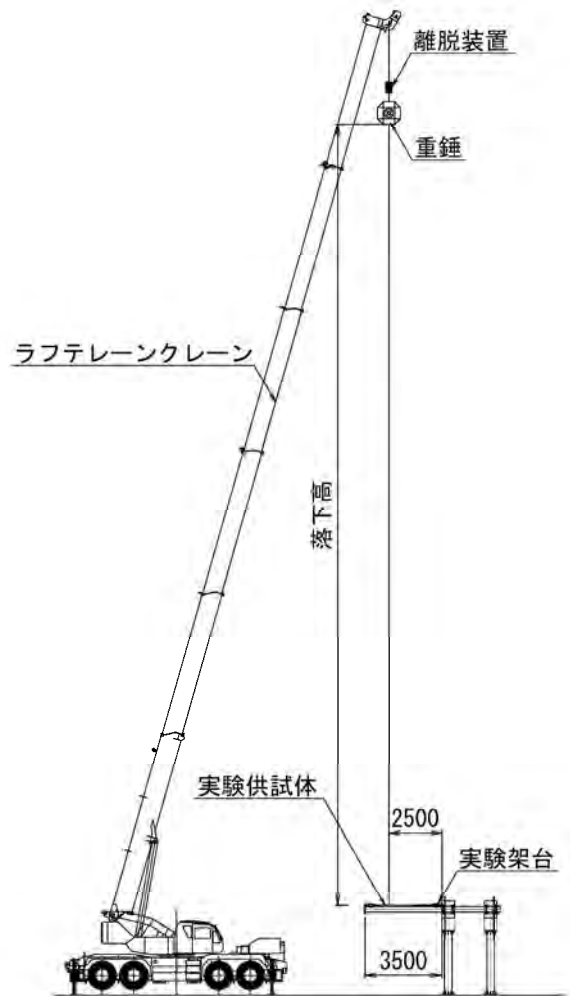


図-5 実験概要図

表-3 実験結果と損傷判定

ケース	供試体 タイプ	衝突エネ ルギー(kJ)	実験 結果	損傷判定		性能評価
				阻止面	支柱	
CASE1	A	519	捕捉	金網：凹み変形 上辺・底辺・縦外辺ロープ：健全 ワイヤロープ：健全 緩衝装置：摩耗・ロープのスリップ ワイヤネット：部分破断	再使用可能 (残留変位 2°)	性能 2
CASE2	A	503	捕捉	金網：凹み変形 上辺・底辺・縦外辺ロープ：健全 ワイヤロープ：健全 緩衝装置：摩耗・ロープのスリップ ワイヤネット：部分破断	再使用可能 (残留変位 7°)	性能 2
CASE3	B	510	捕捉	金網：凹み変形 上辺・底辺・縦外辺ロープ：健全 ワイヤロープ：健全 緩衝装置：摩耗・ロープのスリップ ワイヤネット：部分破断	再使用可能 (残留変位 5°)	性能 2
CASE4	B	509	捕捉	金網：凹み変形 上辺・底辺・縦外辺ロープ：健全 ワイヤロープ：健全 緩衝装置：摩耗・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 (残留変位 15°)	性能 2
CASE5	C	1200	捕捉	金網：凹み変形 上辺・底辺・縦外辺ロープ：健全 ワイヤロープ：健全 緩衝装置：摩耗・ロープのスリップ ワイヤネット：部分破断 間隔保持プレート：塑性変形	再使用可能 (残留変位 1°)	性能 2
CASE6	C	1204	捕捉	金網：凹み変形 上辺・底辺・縦外辺ロープ：健全 ワイヤロープ：健全 緩衝装置：摩耗・ロープのスリップ ワイヤネット：部分破断 間隔保持プレート：塑性変形	端末支柱の交換 (残留変位 10°)	性能 2

計測項目は、落下高さ、衝突速度、重錘加速度、残存柵高、阻止面の変形量、ワイヤロープ張力である。

3. 実験結果

3.1 実験結果と損傷判定

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。

実験結果と損傷判定を表-3に示す。

CASE1～CASE4の結果より、500kJタイプの供試体のワイヤネットは、上弦材を設置する場合、φ12mm 目あい幅 300mm×300mm を使用し、上弦材を設置しない場

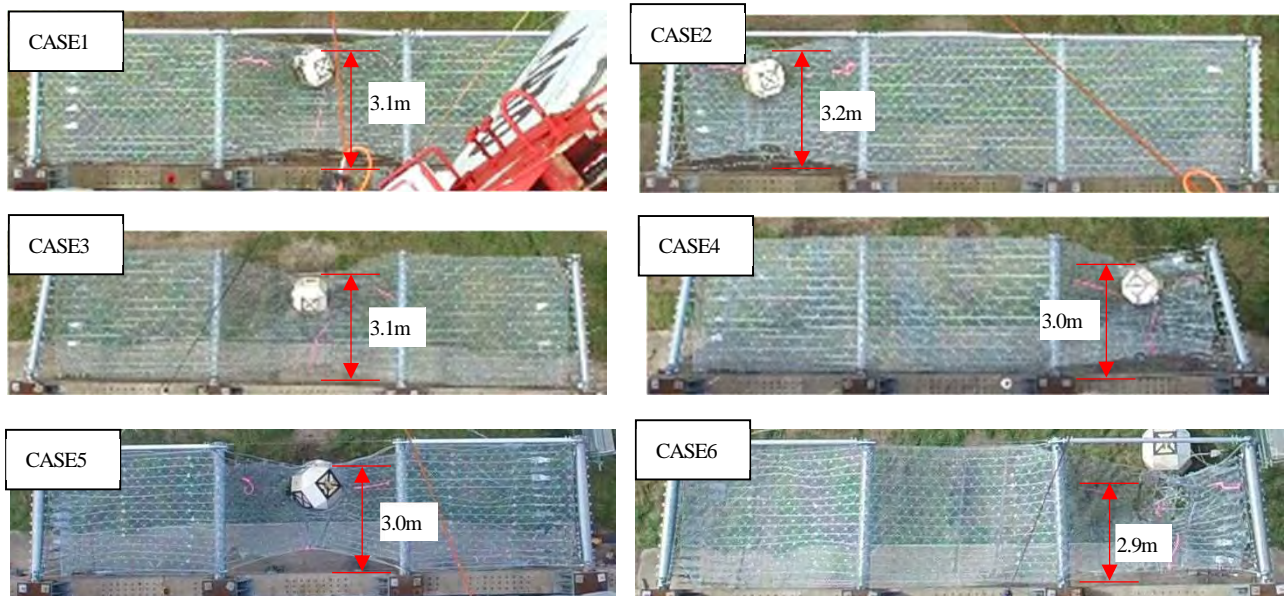
合、φ14mm 目あい幅 500mm×500mm を使用することで捕捉可能である。捕捉後の阻止面部材について、金網は凹み変形がみられたものの、金網の機能はワイヤネットの目あいよりも小さい小礫などのすり抜けを防ぐことであることから、大きな破断がない限り、落石の捕捉性能への影響は小さいと考える。各種ワイヤロープは、健全であった。緩衝装置は、ワイヤロープのスリップで摩擦することから、交換およびワイヤロープの引き直し作業が必要と判定した。ワイヤネットは、部分的に破断が見られており、交換が必要と判定した。支柱は、重錘载荷後に残留変位が発生するものの、実験で使用した LST 部材は、既往の実験で最大変形角 15° まで支柱耐力を保持できることが確認されていることから、CASE1～CASE3 は再使用しても影響は小さいといえる。CASE4 は、支柱の残留変位が 15° であり、交換が必要と判定した。CASE1 と CASE3 および CASE2 と CASE4 を比較すると、支柱の残留変位は、上弦材を設置することで、上弦材を設置しない場合の 40% 程度まで低減することができるといえる。

CASE5, CASE6 の結果より、支柱の耐力を高め、緩衝装置の設置箇所数を増やした 1200kJ タイプは、捕捉後の阻止面部材は、500kJ タイプと同等程度の損傷状況であった。間隔保持プレートは、塑性変形が見られ、交換が必要と判定した。支柱の残留変位は、中間スパン载荷で 1°、端部スパン载荷で 10° であり、端部スパン载荷では交換が必要と判定した。

これらより、500kJ タイプ、1200kJ タイプの防護柵の性能水準は「性能 2」を満たすものといえる。

3.2 残存柵高と最大変形量

実験で計測した残存柵高と最大変形量の一覧表を表一



図－6 残存柵高

4 に示す。

本防護柵の重錘捕捉後の残存柵高は、2.9m～3.2m であり、初期柵高 3.5m に対して 80%～90% の柵高を保持できる。CASE1, CASE3 の結果より、中間スパンに载荷したとき、上弦材の有無やワイヤネットの種類の違いによる残存柵高への影響は、ほぼ見られない。端部スパンに载荷した CASE2, CASE4 の結果より、上弦材を設置しないほうが、やや残存柵高は小さくなる。

最大変形量は、CASE1, CASE3 の結果より、中間スパンに载荷したとき、上弦材の有無やワイヤネットの種類の違いによる影響は、ほぼ見られない。端部スパンに载荷した CASE2, CASE4 の結果より、上弦材を設置しないほうが、最大変形量は 10% 程度大きくなった。これは、端部支柱の変形が影響していると考えられる。CASE5, CASE6 の最大変形量は、CASE1～CASE4 と比較すると、40% 程度大きくなった。これは、1200kJ タイプの供試体は、上辺ロープと底辺ロープに設置した緩衝装置のエネルギー吸収効果で、ロープがスリップしたことが影響していると考えられる。

表－4 残存柵高と最大変形量

ケース	残存柵高(m)	最大変形量(m)
CASE1	3.1	2.7
CASE2	3.2	2.4
CASE3	3.1	2.7
CASE4	3.0	2.7
CASE5	3.0	3.7
CASE6	2.9	3.4

※重錘捕捉後、リバウンドして端部スパンに落下

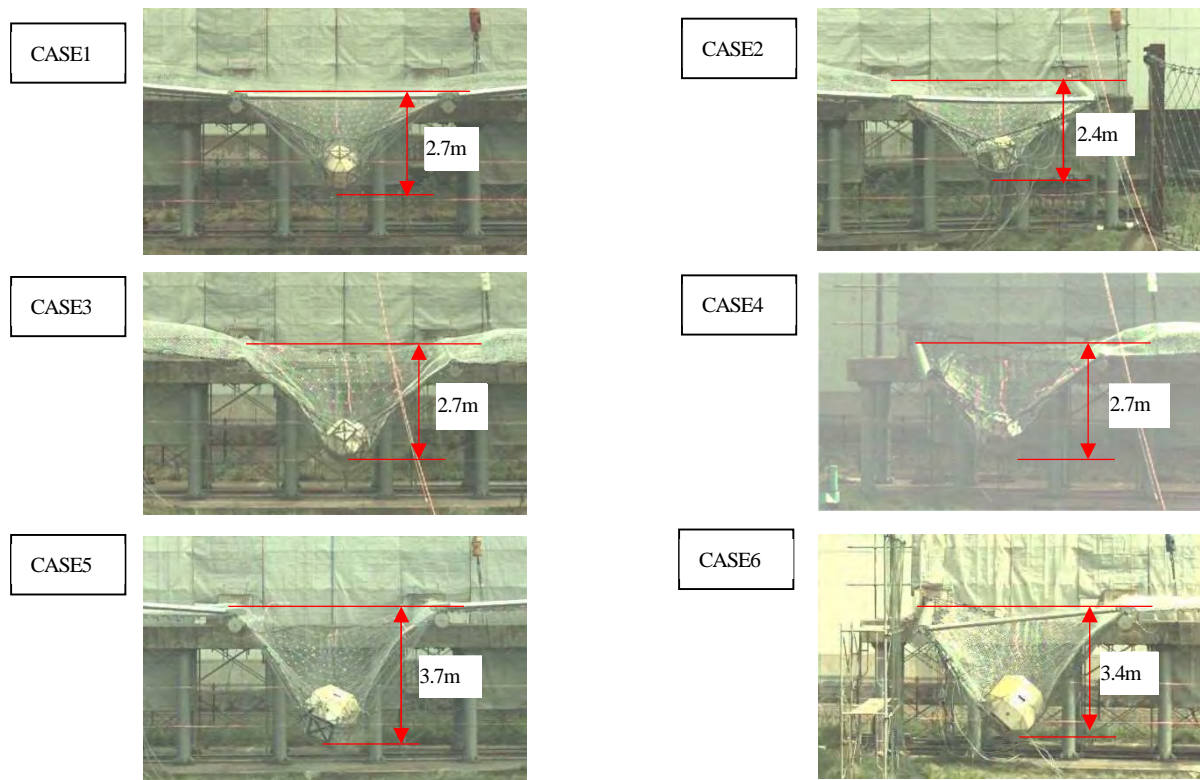


図-7 最大変形量

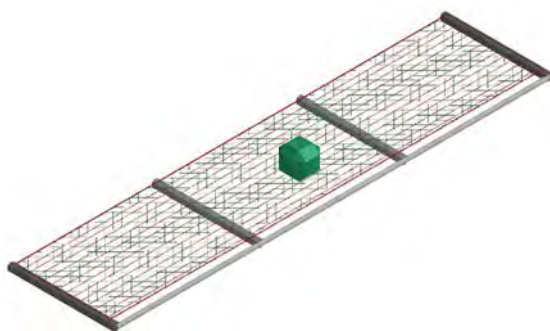


図-8 解析モデル

4. 大変形有限要素解析による性能評価

4.1 解析概要

LS-DYNA による解析モデルを図-8に示す。解析モデルの構成部材は支柱、上弦材、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。重錘载荷条件は、各供試体タイプで中間スパンに载荷したケース (CASE1, CASE3, CASE5) を再現した。

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、実験で使用した材料の強度特性値を用い、断面分割法で求めた曲げモーメント-曲率関係を定義し、支柱基部は固定支点とした。ワイヤロープ (FC6×24) は、既往の引張試験で求めた応力ひずみ関係を用い、

各ロープ径の断面積を入力した。ワイヤロープ (3×7) は、落石対策便覧を参考に応力ひずみ関係を定義し、ロープ断面積を入力した。緩衝装置は、引張にのみ作用する並進ばねを定義した。緩衝装置が作動し、ロープがスリップしながらエネルギー吸収するときの張力は、実験で計測したロープ張力の経時変化を基に、ロープがスリップしている時間内での平均張力を求め、定義した。間隔保持用 U ボルトは、ケーブル要素を用いてワイヤロープとワイヤネットを連結することで再現し、間隔保持用プレートは、弾塑性体の鋼材 (SS400) としてビーム要素でモデル化した。

解析結果は、実規模実験で計測した重錘変位、上辺ロープ張力、底辺ロープ張力を出力し、実験値と比較した。重錘変位の実験値は、重錘加速度の計測値を時間で 2 回積分して求めた。このとき、重錘変位は、重錘が阻止面に接触したときを $X=0m$ と表している。上辺ロープ張力、底辺ロープ張力は、張力最大値を比較した。なお、CASE1 の重錘変位は、実験で 3 軸加速度計に取り付けたシールド線の断線により、重錘加速度の計測データが得られなかったため、解析値との比較はしていない。

4.2 解析結果

(1) 重錘変位

重錘変位の経時変化を図-9に示す。

重錘変位の最大値と重錘変位が最大となるまでの経時変化の波形は、実験値と解析値で概ね一致しており、重錘変位最大値の解析値は、実験値の 0.9~1.0 倍である。

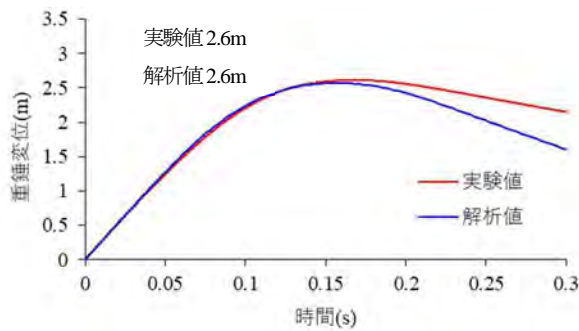


図-9(a) 重錘変位(CASE3)

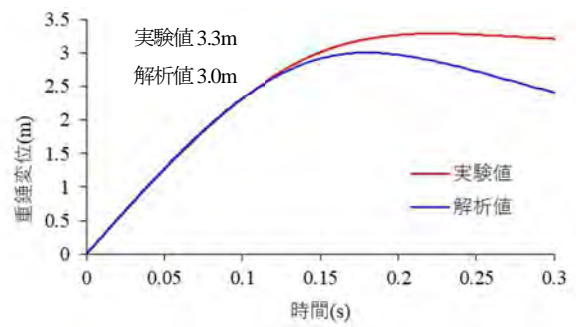


図-9(b) 重錘変位(CASE5)

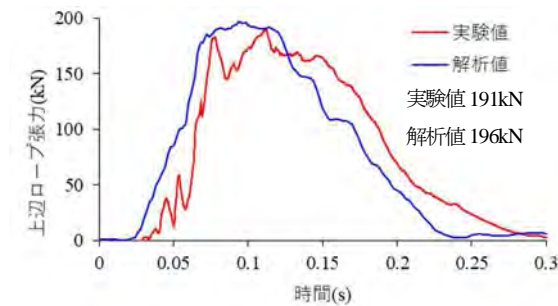


図-10(a) 上辺ロープ張力(CASE1)

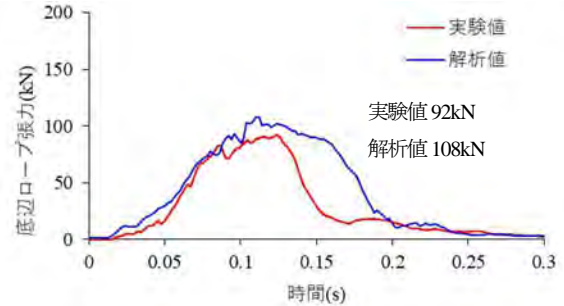


図-10(b) 底辺ロープ張力(CASE1)

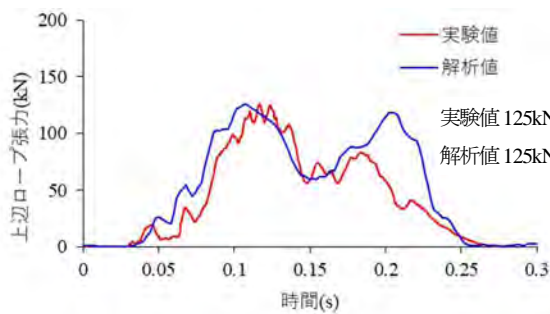


図-10(c) 上辺ロープ張力(CASE3)

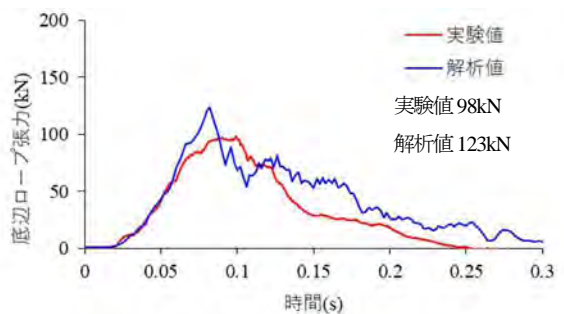


図-10(d) 底辺ロープ張力(CASE3)

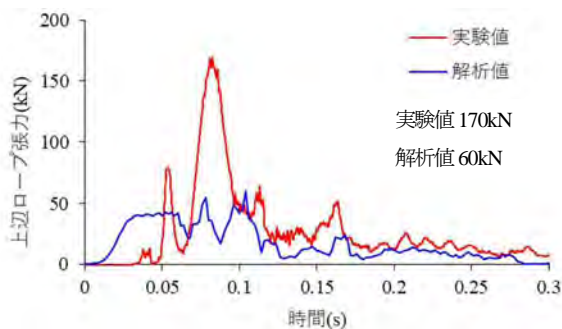


図-10(e) 上辺ロープ張力(CASE5)

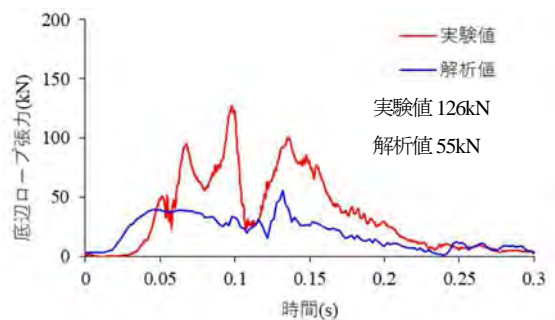


図-10(f) 底辺ロープ張力(CASE5)

これより LS-DYNA を用いた大変形有限要素解析は、本防護柵の変形挙動を概ね再現でき、実験と異なる条件下での阻止面の変形量を求める上で有用な手法であると考えられる。

(2) 上辺ロープ・底辺ロープ張力

ワイヤロープ張力の経時変化を図-10 に示す。上辺ロ

ープ、底辺ロープに緩衝装置を設置していない CASE1、CASE3 の張力最大値と張力の作用時間は、実験値と解析値で概ね一致している。緩衝装置を設置した CASE5 は、CASE1、CASE3 と比較すると、実験値と解析値のロープ張力最大値に差が発生している。これは、実験でロープがスリップを開始するとき、瞬間的に張力が大きくなり、解析は、ばね要素に実験で計測したロープがスリップし

ながらエネルギー吸収するときの平均張力を定義していることが要因と考えられる。ロープ張力の作用時間は、実験値と解析値で概ね一致している。

5. まとめ

本研究では、柵高 3.5m, 延長 15m の防護柵で、500kJ, 1200kJ の実規模衝撃実験と、LS-DYNA を用いた実験結果を再現可能な解析モデルの構築を行った。結果を次に述べる。

- 1) 落石捕捉後は、緩衝装置の交換およびワイヤロープの引き直し作業、ワイヤネットの交換、間隔保持プレートの交換で性能を復旧できる。上弦材を設置しない 500kJ タイプと 1200kJ タイプは、端末スパンに載荷したとき、端末支柱の交換が必要となる。
- 2) 500kJ タイプの支柱の残留変位は、上弦材を設置することで、上弦材を設置しない場合の 40% 程度まで低減することができる。
- 3) 残存柵高は、初期柵高に対して 80%~90% の柵高を保持できる。500kJ タイプは、中間スパンに載荷したとき、上弦材の有無やワイヤネットの種類の違いによる残存柵高への影響は、ほぼ見られないものの、端部スパンに載荷したときは、上弦材を設置しないほうが、やや残存柵高は小さくなる。
- 4) 最大変形量は、500kJ タイプで中間スパンに載荷したとき、上弦材の有無やワイヤネットの種類の違いによる影響は、ほぼ見られない。端部スパンに載荷したときは、上弦材を設置しないほうが

10% 程度大きくなる。1200kJ タイプの最大変形量は、500kJ タイプより 40% 程度大きくなる。

- 5) LS-DYNA を用いた解析で求めた重錘変位の最大値は、実験値の 0.9~1.0 倍であり、解析は、実験と異なる条件での変形挙動を求める上で有用な手法であると考えられる。
- 6) 500kJ タイプのワイヤロープ張力は、実験値と解析値で概ね一致している。1200kJ タイプは、実験値と解析値の最大張力に差があるものの、張力の作用時間は概ね一致している。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：落石対策便覧, 2017.12.
- 2) 酒井啓介, 奥田峻, 田邊梨沙, 岸徳光, 小室雅人：支柱が強化された高エネルギー吸収型落石防護柵の防護性能に関する数値解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 946-954, 2019.
- 3) 小室雅人, 梅沢広幸, 奥田峻, 瓦井智貴, 岸徳光：高エネルギー吸収型落石防護柵（支柱強化型）の実物大衝撃荷重載荷実験による性能検証, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 955-963, 2019.
- 4) 福永一基, 手嶋良祐, 二見豪, 松本栞：緩衝装置を用いた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, 第 12 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 2019.
- 5) 石井太一, 西田陽一, 梶谷浩：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, 第 12 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, 土木学会, 2019.