

小変形落石防護柵の動的挙動に関する衝撃応答解析

Impact response analysis of dynamic behavior of low deflection barrier for rockfall protection

室蘭工業大学大学院	○学生員	堅田 恭輔 (Kyouzuke Katada)
室蘭工業大学大学院	正員	小室 雅人 (Masato Komuro)
東亜グラウト工業株式会社	非会員	奥田 峻 (Shun Okuda)
東亜グラウト工業株式会社	非会員	酒井 啓介 (Keisuke Sakai)
室蘭工業大学大学院	正員	栗橋 祐介 (Yusuke Kurihashi)

1. はじめに

我が国では、落石による被害を抑制するために、落石防護工が数多く設置されている。その中の一つである落石防護柵¹⁾³⁾は、鋼製支柱、ワイヤロープ、ひし形金網などから構成され、主に道路沿いに設置されている。しかしながら、近年の異常気象により、落石規模が増大し、落石衝突時に防護柵が大きく変形し、道路機能に支障をきたす場合が増えつつある。従って、このような状況を回避するためには、落石荷重作用時の変形量を抑制し、かつ大きなエネルギーに耐えうる構造が必要となる。

このような背景により、著者らの研究グループでは、大きな落石エネルギーに対して変形量を抑えた新しいタイプの防護柵を開発し、その性能を実物大実験によって検証してきた。

本論文では、同防護柵を対象に三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、実験結果との比較によって解析手法の妥当性を検証するとともに、試験体の応力状態等を数値解析の側面から検討した。本解析にはLS-DYNA⁴⁾を使用している。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図-1には、実験に用いた試験体の形状寸法(柵高4.0m, 延長15.0m(5.0m×3スパン))を示している。防護柵は、鋼管(外径 $\phi=273$ mm, 板厚 $t=9.25$ mm)の内部にH形鋼を配置した鋼製支柱の他、それらをつなぐ上弦材、落石を捕捉するためのワイヤロープとひし形金網、およ

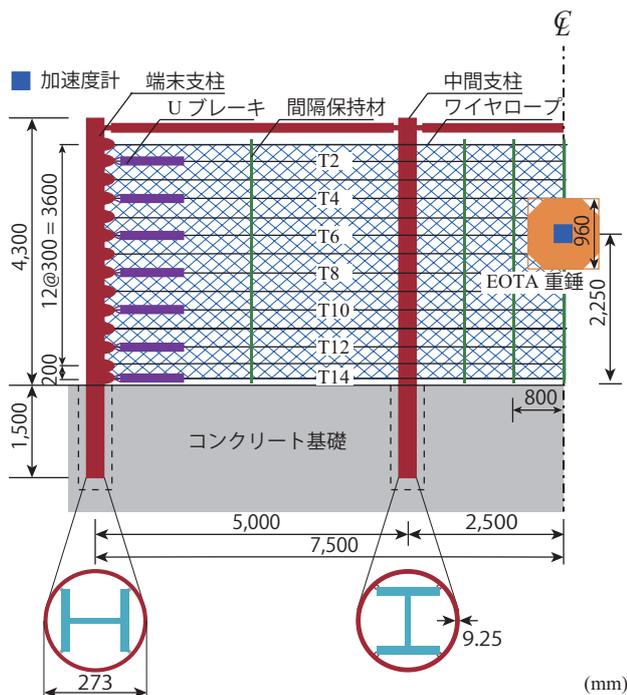


図-1 試験体の形状寸法



(a) 全景



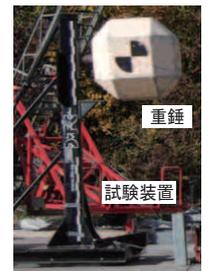
(b) 中間支柱



(c) ワイヤロープ



(d) Uブレイキ



(e) 試験装置

写真-1 試験体の概要と試験装置

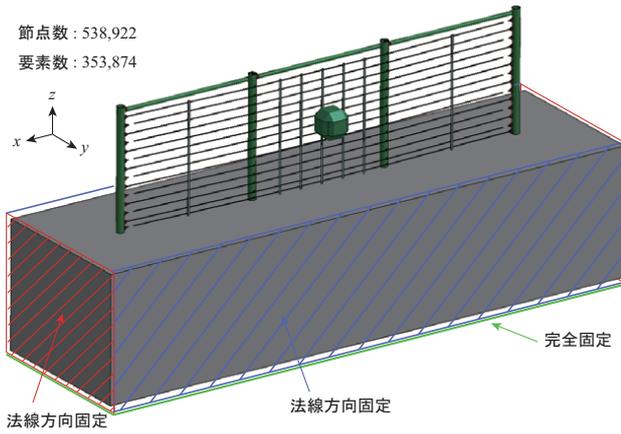


図-2 数値解析モデル

びロープ間の落石すり抜けを阻止するための間隔保持材から構成される。なお、鋼製支柱内部のH形鋼の向きは、中間支柱と端末支柱で異なる構造となっている。上弦材は、外径 ϕ 141.3 mm、板厚 $t=9.53$ mmの鋼管を使用し、支柱に取り付けられたプレートと高力ボルトを介して接続されている(後述、写真-1(b)参照)。ワイヤロープには ϕ 18を、ひし形金網には、素線径4.0 mmを用いた。水平ロープは図-1に示すように上から300 mm間隔で13本、最下端のみ200 mm間隔で1本の計14本を配置した。

写真-1には、試験体の全景を示している。ワイヤロープ、間隔保持材およびひし形金網の結合には、写真-1(c)に示すU字ボルトおよび結合コイルを使用している。ワイヤロープ端部は、写真-1(d)に示すようにシャックルまたはUブレーキを介して端末支柱に接続されている。なお、Uブレーキは、鋼板の曲げ変形を利用した衝撃緩衝装置であり、重錘衝突時に発生するロープ張力を緩和し、かつ落石エネルギーを吸収することを目的に設置した。また、支柱の基部はコンクリート基礎に埋め込まれている。なお、本試験体の設計吸収可能エネルギーは500 kJである。

2.2 実験方法と測定項目

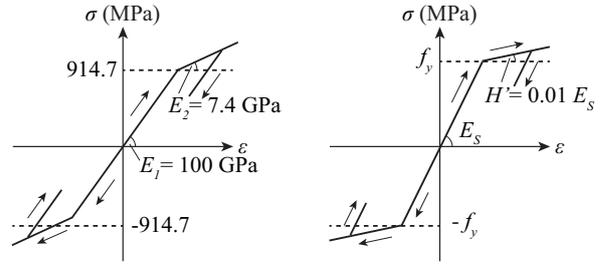
実験は、スイス・ブッフフェリンにあるDTC (Dynamic Test Center)にて実施した。写真-1(e)に示す試験装置を用いて、重錘を速度26.16 m/sでスパン中央の高さ2.25 mに衝突させた。実験における衝突エネルギーは513 kJであった。使用した重錘は、EOTA規格⁵⁾に準拠したコンクリート多面体とし、外寸960 mm、質量1,499 kgである。

測定項目は、1) 重錘に内蔵されたセンサーによる加速度、2) 重錘の水平変位(重錘貫入量)、および3) ロードセルによるワイヤロープ張力である。なお、重錘内には、三軸加速度センサと三軸回転速度センサの二種類が内蔵されている。

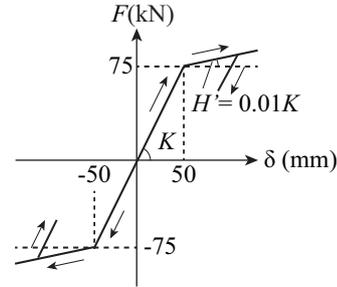
3. 数値解析概要

3.1 解析モデル

図-2には、本数値解析で用いた試験体モデルの要素分割状況を示している。総節点数及び総要素数はそれぞれ約540,000、約350,000である。上弦材と支柱間の接続プレートにはシェル要素を、Uブレーキにはバネ要素を用いた。また、その他の要素にはすべて8節点固体要素を用いた。



(a) ワイヤロープ (b) 鋼製支柱, 上弦材, 間隔保持材



(c) Uブレーキ

図-3 材料物性モデル

表-1 鋼材の材料物性値

	降伏応力 f_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
鋼製支柱, 上弦材	355	200	0.3
間隔保持材	235		

なお、本解析では、1) 防護柵の変形性状やロープ張力に着目すること、2) 重錘を間隔保持材に衝突させていること、3) 実験で重錘のすり抜けが起きていないこと等から、煩雑さを避けるため、ひし形金網のモデル化は省略した。

境界条件は、図-2に示すように、コンクリート基礎底面を完全固定とし、基礎側面および正面の法線方向を固定した。

解析は実験条件と等しくなるように、重錘に実測速度を付加し、所定の高さに衝突させることで実施した。

3.2 材料構成則

図-3には、本数値解析で用いたワイヤロープ、鋼製支柱、上弦材、間隔保持材およびUブレーキに用いた応力-ひずみ関係を示している。

(a) 図には、ワイヤロープに用いた応力-ひずみ関係を示している。ここでは、バイリニア型の構成則モデルを適用した。ロープの強度特性は、材料試験結果と落石対策便覧を参考に設定した。

(b) 図には、鋼製支柱、上弦材および間隔保持材に用いた応力-ひずみ関係を示している。ここでは、降伏後の塑性硬化を考慮したバイリニア型の等方性構成則モデルを適用することとし、塑性硬化係数 H' は弾性係数の1%と仮定した。なお、各構成部材の降伏応力 f_y 、弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_s は、表-1に示す公称値を用いた。なお、いずれの場合も、降伏判定は von Mises の降伏条件に従うものとした。

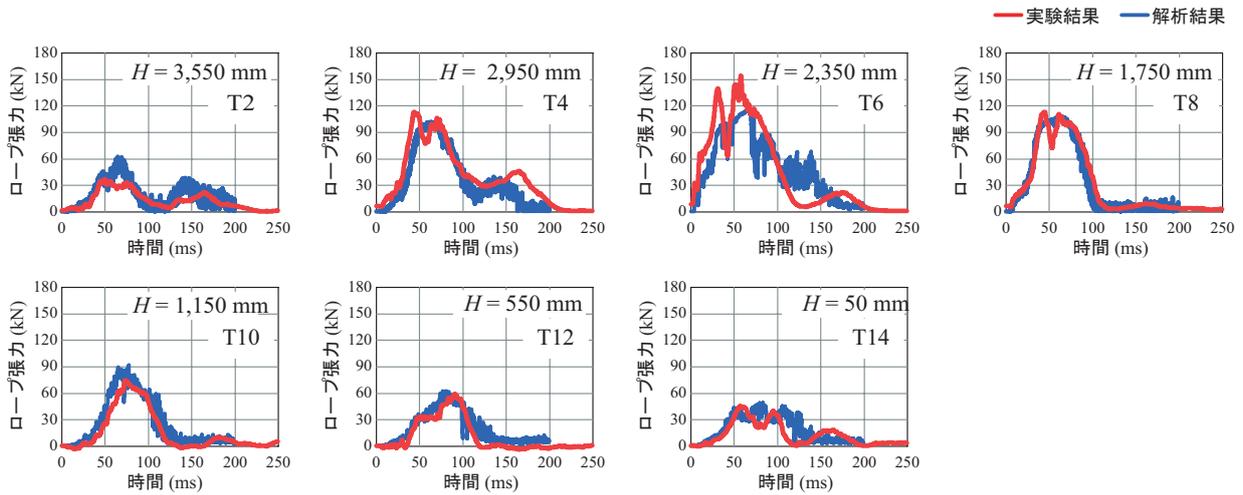


図-4 ロープ張力

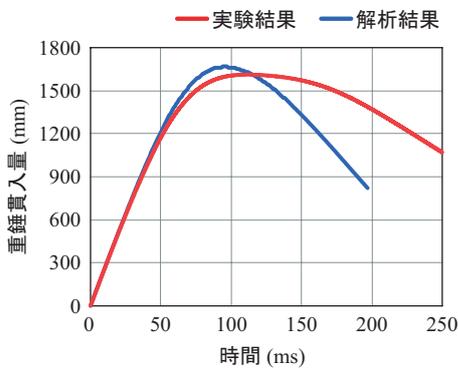


図-5 重錘貫入量の時刻歴波形

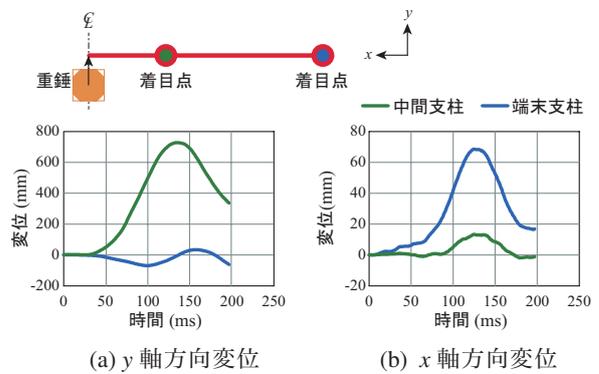


図-6 支柱変位応答(解析結果)

(c) 図には、Uブレーキ(ばね要素)に用いた荷重-変位関係を示している。静載荷実験結果を参考にすべり荷重を75 kNとし、その後の摩擦抵抗の影響を簡易にモデル化するため、初期勾配の1%で荷重が増加すると仮定した。また、実験に用いたUブレーキと同様、変位 δ が1 mで止まるように設定している。なお、実際のUブレーキは一度変位が生じると、除荷時に残留変位が生じ、元に戻ることはないが、本解析では、弾性変形分(50 mm)だけ復元される。

コンクリート基盤、重錘に関しては弾性体(弾性係数 $E_c = 200$ GPa, ポアソン比 $\nu_s = 0.16$)とした。

4. 数値解析結果および考察

4.1 ロープ張力

図-4には、各ワイヤロープに作用する張力の時刻歴応答波形を実験結果と解析結果を比較して示している。なお、各図に示す番号T2, T4, T6, T8, T10, T12, T14は図-1に示すロープ番号と対応しており、上端から下端に向かって数字が大きくなる。また、時間軸の零は重錘衝突時を意味する。

図より、実験結果と数値解析結果を比較すると、張力の立ち上がりや最大値、作用継続時間、最大値後の波形形状をほぼ適切に再現できていることが分かる。なお、詳細に両者を比較すると、重錘衝突位置付近のT6において数値解析結果が実験結果のロープ張力よりも40 kN程度低い

値を示している。これは、本数値解析では、Uブレーキの降伏すべり荷重を75 kNと設定しているのに対し、実験では動的作用によって、すべり荷重が解析仮定と必ずしも一致していないことによるものと推察される。また、衝突位置よりも上方にあるT2, T4においても、実験結果と数値解析結果に若干の差異がみられる。これは、実験では上弦材は接続プレートと高力ボルトを介して支柱に接続されているのに対し、本解析では高力ボルトを無視し、簡易にモデル化していること等がその要因と考えられる。

4.2 重錘貫入量

図-5には、重錘貫入量(水平方向)の時刻歴応答波形を実験結果と解析結果を比較して示している。

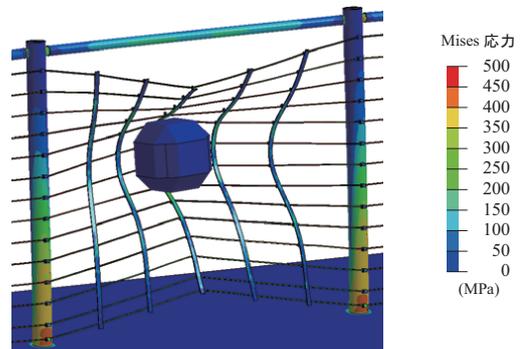
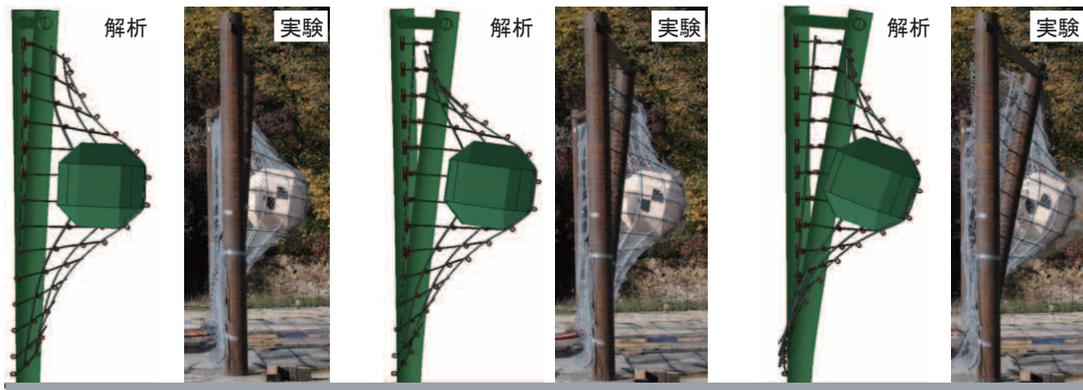


図-7 変形状況 (t = 125 msec)



(a) 最大張力時 ($t \approx 75$ msec) (b) 最大重錘貫入時 ($t \approx 95$ msec) (c) 中間柱最大変位時 ($t \approx 125$ msec)

図-8 変形状況の比較

図より、実験結果は重錘衝突後、約 40 msec まではほぼ線形に変位が増大し、徐々に勾配が緩やかになり、約 125 msec で最大値 (1,611 mm) を示し、その後、リバウンド状態に至っている。一方、数値解析結果を見ると、実験結果の立ち上がりはほぼ適切に再現しているものの、120 msec 後から両者に差異が見られるとともに、最大変形量も実験結果と比較して若干大きいことが分かる。これは、本解析では、1) 鋼材などの物性値に公称値を与えていること、および 2) 前述のように上弦材と支柱の接続を簡易にモデル化していること等に起因しているものと考えられる。

4.3 支柱変形状況

図-6には、解析結果の中間および端末支柱天端の二方向(x, y方向)変位量について示している。図より、y軸方向変位を見ると、中間支柱は重錘衝突後に後方に大きく変形しているのに対し、端末支柱は逆に前方に若干変形している。また、ワイヤロープの影響によって、中間支柱および端末支柱はいずれも内側に向かって変形していることが分かる。なお、その変形量は端末柱の方が大きい。

図-7には、中間支柱の最大変形時 ($t = 125$ msec) における重錘衝突位置近傍の Mises 応力分布図を示している。図より、柱基部には鋼管の降伏応力 (355 MPa) 以上の応力が発生していることより、実験においても柱基部は降伏状態にあるものと推察される。

図-8には、試験体側面から見た変形状況について測定ロープ張力の合計最大張力時、最大重錘貫入量時および中間支柱の最大変位時の実験結果と解析結果をそれぞれ比較して示している。解析結果における着目時刻は、それぞれ $t \approx 75, 95, 125$ msec である。なお、解析結果においては、重錘の動きが分かるように、半分に切断して示している。

図より、最大貫入量を示す $t \approx 95$ msec までは、解析結果は実験結果と類似の挙動を示していることが分かる。

5. まとめ

本論文では、支柱強化型落石防護柵の動的試験を対象に、LS-DYNA を用いた三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) 提案の材料構成則および解析手法を用いることにより、ロープ張力の立ち上がりや最大値、作用継続時間、および最大値後の波形性状をほぼ適切に再現可能である。
- 2) 数値解析結果は、実験結果の最大重錘貫入量を若干過大に評価するもののほぼ再現可能である。

6. まとめ参考文献

- 1) 荒木恒也, 今野久志, 西弘明, 小室雅人: 従来型落石防護柵の重錘衝突実験, 土木学会北海道支部論文報告集, 第73号, 2017.4.
- 2) 園雅伊, 潮見昌紀, 吉田博, 前川幸次: ワイヤロープを支柱に巻き付けた落石防護柵の実物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論文集, pp.153-158, 2002.7.
- 3) 辻慎一郎, 原隆史, 八嶋厚, 吉田真輝: エネルギー吸収ネットを用いた既設落石防護柵の機能向上に関する現場実験と数値解析, ジオシンセテックス論文集, Vol.24, pp.189-192, 2009
- 4) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2014
- 5) EOTA, Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits (ETAG 027), 2008