

# 従来型落石防護柵の耐衝撃挙動に関する数値シミュレーション

Numerical simulation of impact resistance performance of conventional rockfall protection fence

室蘭工業大学大学院 ○正員 小室 雅人 (Masato Komuro)  
 室蘭工業大学大学院 学生員 服部 桃加 (Momoka Hattori)  
 室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)  
 (国研)寒地土木研究所 正員 中村 拓郎 (Takuro Nakamura)  
 (国研)寒地土木研究所 正員 今野 久志 (Hisashi Konno)

## 1. はじめに

我が国の山岳部や海岸線の道路沿いには、落石災害から道路交通の安全を守るために種々の落石防護工が設置されており、その一つに従来型落石防護柵がある。同防護柵は、金網、ワイヤロープおよび支柱の弾塑性変形により落石の運動エネルギーを吸収する構造であり、それらの可能吸収エネルギーの総和が落石エネルギーを上回るように設計される<sup>1)</sup>。しかしながら、その損傷状況を見ると、支柱基部の局部座屈や金網の貫通など、設計では想定していない事例も確認されている<sup>2)</sup>。

このような背景の下、著者らの研究グループでは、従来型落石防護柵の耐衝撃挙動や保有性能を明らかにし、統一的な性能評価手法や合理的な設計法の確立を最終目的とした種々の実験を実施している<sup>3)</sup>。しかしながら、同防護柵は各構成部材の弾塑性変形により落石エネルギーを吸収することから、より詳細な検討を行うためには実験的検討のみならず数値解析的検討も必要不可欠である。

このような観点より、本論文では、従来型落石防護柵の耐衝撃挙動に及ぼす落石径や径間数、および衝突位置の影響を把握するために、弾塑性衝撃応答解析を実施した。なお、本解析にはLS-DYNA (Ver. R9)<sup>4)</sup>を使用した。

## 2. 従来型落石防護柵の概要

図-1には、柵高2m、延長9m(支柱間隔3m×3径間)における従来型落石防護柵の形状寸法を示している。端末支柱および中間支柱はH形鋼支柱を用い、支柱基部はコンクリート基礎に埋め込まれている。表-1には、防護柵構成部材の諸元を示している。端末支柱は、落石衝突時に水平力が作用するため、控え材(みぞ形鋼)で補強されている。阻止面は、ワイヤロープ(φ18)を300mm間隔で7本配置し、その前面に落石を捕捉するためのひし形金網を設置している。ひし形金網(φ3.2mm、目合い50mm)は、山形に折り曲げられた素線を互いに交差させたものであり、編み込みの方向により剛性が異なる。実防護柵では金網の

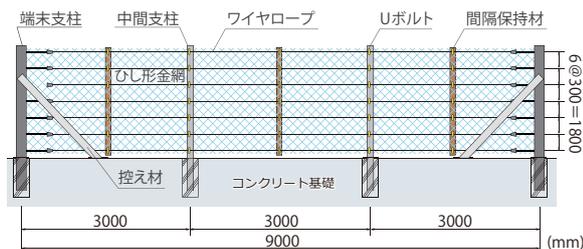


図-1 従来型落石防護柵の形状寸法

展開方向とワイヤロープの軸方向が一致するように設置される。支柱間の中央部には、落石がワイヤロープを押し開き金網をすり抜けることを抑制するために間隔保持材を設置し、ワイヤロープおよび金網を介してU字ボルトで固定している。

## 3. 衝撃応答解析の概要

### 3.1 有限要素モデル

図-2には、本解析で用いた有限要素モデルの一例として、延長9m(3m×3径間)の場合を示している。H形鋼支柱、控え材、間隔保持材および落石には、8節点固体要素を用いた。なお、ワイヤロープに関しては、圧縮力を伝達しないケーブル要素を用いることが一般的と考えられるが、本解析では、落石と間隔保持材間や近接部材同士の接触判定を適切に評価するために、8節点固体要素を使用している。ただし、ロープ全てに固体要素を適用する場合には、曲げ応力や圧縮応力が生じ、ワイヤロープの特性とは異なることとなる。この問題を回避するために、ここでは8節点固体要素間に圧縮力を伝達しないケーブル要素をUボルトや間隔保持材との接触を避けるように750mm間隔を基本(落石衝突部近傍に関してはその半分)として配置した。各要素の積分点数は、8節点固体要素は1点積分、2節点ケーブル要素は4点積分とした。なお、本解析では、落石を間隔保持材に直接衝突させていることから、ひし形金網の影響は小さいものと判断し、そのモデル化を

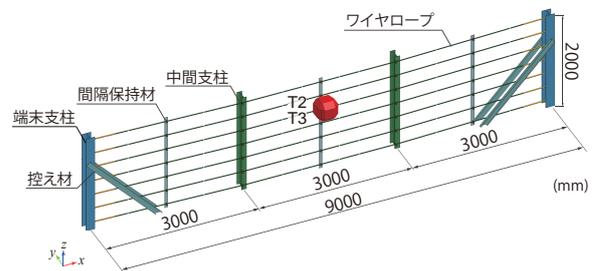


図-2 有限要素モデル

表-1 各構成部材の諸元

構成部材	種類	規格	断面寸法
端末支柱	H形鋼	SS400	H175×175×7.5×11
中間支柱			H200×100×5.8×8
控え材	みぞ形鋼		[100×50×5×7.5
間隔保持材	鋼板		PL-4.5t×65×950(2枚)
索端金具	棒鋼	SS490	25φ×500
ワイヤロープ	3×7 G/O	JISG3525 準抛	φ18
ひし形金網	亜鉛メッキ	JISG3552	3.2φ×50×50

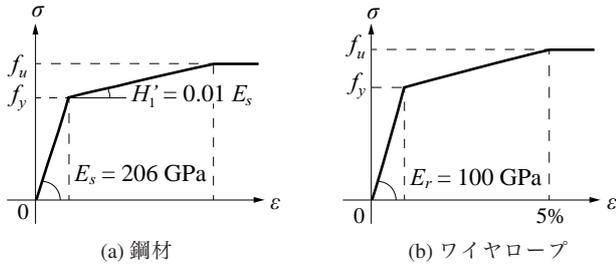


図-3 応力-ひずみ関係

省略した。

接触条件は、固体要素間にはそれぞれに面と面の接触を定義した。いずれの接触面においても剥離およびすべりを考慮し、予備解析や既往の文献を参考に摩擦係数は0.4と設定した。なお、接触解析には、ペナルティ法を採用している。

境界条件は、支柱および控え材の底部を完全固定とした。また、1)ワイヤロープ端部と端末支柱、および2)中間支柱や間隔保持材とUボルトの連結は、完全結合とした。なお、本解析では、減衰や重力およびワイヤロープの初期張力は考慮していない。

3.2 材料構成則

図-3には、本数値解析で用いた鋼材およびワイヤロープの応力-ひずみ関係を示している。(a)図に示す鋼材には、トリリニア型の弾塑性体モデルを適用し、塑性硬化係数  $H_1'$  は、弾性係数  $E_s$  の1%とし、引張強度まで線形に増大するモデルとした。鋼部材の材料物性値は、既往の実験で用いた鋼材の検査証明書(ミルシート)を参考に表-2に示す値を用いた。なお、降伏判定には von Mises の降伏条件を用いた。

(b)図に示すワイヤロープについても、鋼材と同様にトリリニア型の構成則を適用した。ワイヤロープにおける降伏荷重  $P_y$  および破断荷重  $P_u$  に関しては、前者は落石対策便覧を参考に、後者はミルシートを用いて、それぞれ  $P_y = 117\text{kN}$  および  $P_u = 193\text{kN}$  と設定し、ロープ断面積  $A_w$  で除すことにより、降伏応力  $f_y$  および破断強度  $f_u$  を算出した。また、弾性係数  $E_r$  についても落石対策便覧を参考に  $E_r = 100\text{GPa}$  と設定した。なお、破断強度  $f_u$  に達するひずみ  $\epsilon_u$  に関しては、ミルシートに記載がないことから、本数値解析では、 $\epsilon_u = 5\%$  と仮定し、その後はひずみのみが増大するように仮定した。また、前述のように本数値解析では、接触判定を適切に評価するために、ワイヤロープには8節点固体要素を基本にモデル化を行っているが、ワイヤロープの一部に圧縮力を伝達しないケーブル要素を挿入することで、曲げ成分の伝達を防ぐように配慮している。なお、鋼材の単位体積質量  $\rho_s$ 、ポアソン比  $\nu_s$  は、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3\text{kg/m}^3$ 、 $\nu_s = 0.3$  とした。

本解析に用いる落石は、落石対策便覧に準拠し図-4に示すように多面体<sup>5)</sup>とし、その単位体積質量  $\rho_b$  は  $\rho_b = 2.65 \times 10^3\text{kg/m}^3$  と設定した。

3.3 解析条件

表-3には、落石径  $D$  とその質量  $m$  および設定衝突速度  $V$  を一覧にして示している。いずれも入力エネルギーは、52.0kJ とした。

図-5には、延長の異なる3種類の防護柵に対する有限

表-2 材料物性値

	弾性係数 $E_i$ (GPa)	降伏応力 $f_y$ (MPa)	引張強度 $f_u$ (MPa)
端末支柱	206	307	438
中間支柱		379	471
控え材		319	461
間隔保持材		343	466
ワイヤロープ	100	914.7	1496.1

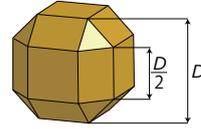


図-4 パラメトリック解析に用いた落石形状

表-3 落石径と衝突速度の関係

ケース名	落石径 $D$ (mm)	質量 $m$ (kg)	衝突速度 $V$ (m/s)
D400	400	120.0	29.4
D600	600	405.7	16.0
D800	800	961.2	10.4

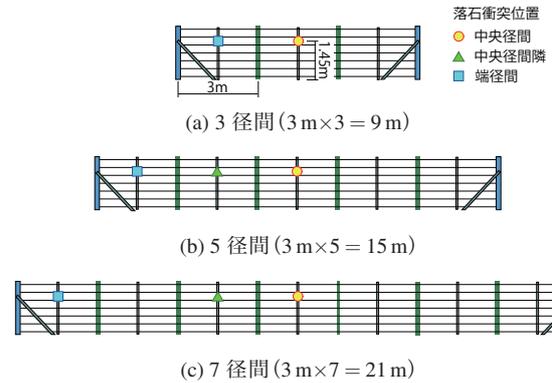


図-5 FEモデルと落石衝突位置の関係

要素モデルと落石衝突位置を示している。ここでは、中央径間、端径間および中央径間隣(中央径間の1つ隣)を対象に、各径間の中央に設置される間隔保持材に対して、衝突位置を1.45mとした数値解析を実施した。なお、実設計において端径間は調整径間とされ、実際に落石が衝突することを想定していないが、ここでは最も厳しい条件と想定される端径間についても衝撃解析を実施した。

4. 同一衝突エネルギー下におけるパラメトリック解析

4.1 落石径に関する検討

図-6には、延長9m(径間数:3)を対象に落石径  $D$  を変化させた場合の各種応答波形を示している。(a)図より、落石径  $D$  が小さく衝突速度  $V$  が大きいほど衝撃力は大きく、かつその作用時間は短くなる傾向が確認される。一方、(b)図に示す落石貫入量に着目すると、衝突速度  $V$  が大きいほど最大値に至る時刻は短くなるものの、その値は落石径  $D$  にかかわらずほぼ一定の値を示していることが分かる。また、(c)図に示す落石衝突位置近傍のロープ張力を見ると、衝撃力と類似の波形性状を示しており、衝撃力が最大値を示す同程度の時刻でロープ張力も最大値を示す傾向に

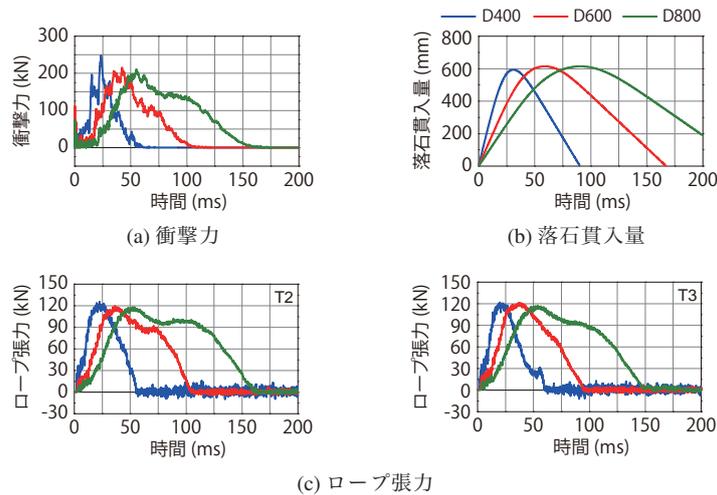


図-6 異なる落石径における時刻歴応答波形の比較(延長:9m, 衝突位置:中央径間)

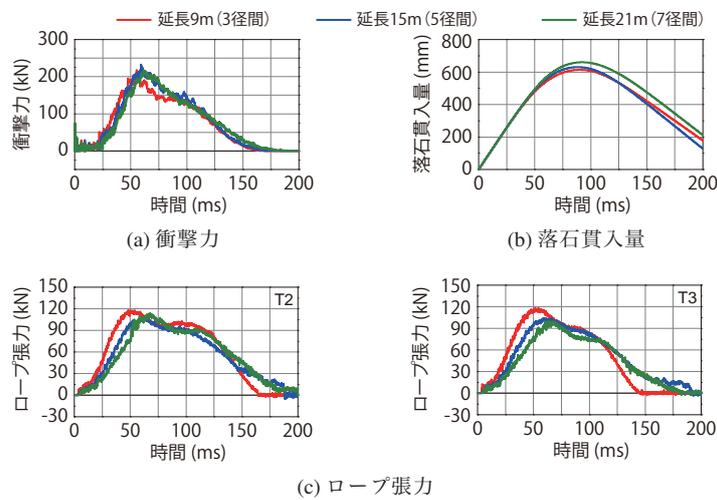


図-7 延長が異なる場合の時刻歴応答波形の比較(落石径:800mm, 衝突位置:中央径間)

あることが分かる。最大ロープ張力に及ぼす落石径  $D$  の影響を詳細に見ると、落石径が小さく衝突速度の大きい場合が若干大きくなる傾向があるものの、その差は小さいことが確認される。本数値解析ではロープの降伏荷重  $P_y$  を 117 kN と設定していることから、いずれの場合においてもロープは降伏状態に到達しているものと判断される。

なお、ここでは、解析結果の一例として延長:9m, 衝突位置:中央径間の結果を示しているが、上記の傾向は、延長および衝突位置にかかわらず、同様であることを確認している。

#### 4.2 延長(径間数)に関する検討

図-7および図-8には、落石径  $D=800$  mm と固定し、衝突位置を中央径間および端径間とした場合の各種応答波形に及ぼす延長の影響を比較して示している。

(a) 図より、衝突位置を中央径間とした場合の衝撃力は、延長にかかわらず最大値およびその波形形状はほぼ同様であることが分かる。また、(b) 図に示す落石貫入量を見ると、延長(径間数)が大きいほど、最大値は大きくなる傾向にあるものの、延長 21 m の場合で 660 mm であるのに対し、延長 9 m では 614 mm であり、その差は 46 mm (7%) と小さいことが分かる。

(c) 図に示すロープ張力を見ると、T2 および T3 ロープともに延長の短い 9 m の場合が最も大きな引張力が作用することが分かる。また、最大値に到達する時刻は、延長が短いほうが早くなる傾向が確認される。

次に、端径間に載荷した場合について着目する。(a) 図より、衝撃力に及ぼす延長による影響は小さいことが分かる。また、(b) 図に示す落石貫入量を見ると、中央径間に衝突させる場合と同様に、延長(径間数)が大きいほど、最大値は大きくなる傾向にあることが分かる。

(c) 図に示すロープ張力を見ると、T2 および T3 ロープともに延長の短い 9 m の場合が最も大きな引張力が作用していることが分かる。この結果は、衝突位置が中央径間の場合と同様な傾向である。

#### 4.3 各種最大値の比較

図-9には、全ての解析ケースにおける各種最大応答値を比較して示している。

(a) 図に示す最大衝撃力は、延長(径間数)や衝突位置にかかわらず、落石径  $D$  が小さいほど、大きな値を示す傾向にあることが分かる。

(b) 図に示す落石貫入量を見ると、延長(径間数)が大きいほど、その最大値は大きくなる傾向がある。これは、延長

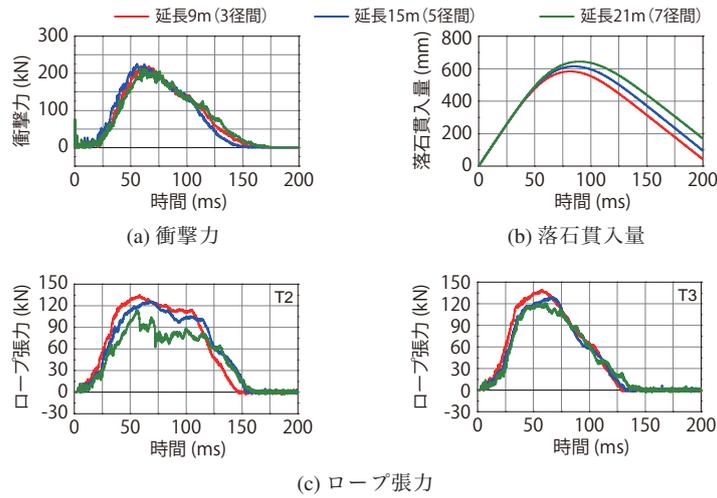


図-8 延長が異なる場合の時刻歴応答波形の比較(落石径：800mm，衝突位置：端径間)

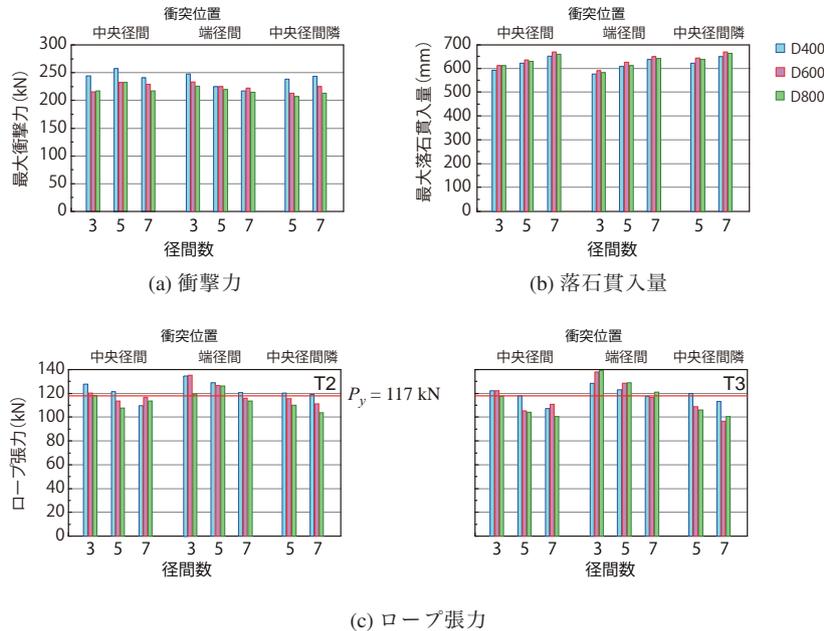


図-9 各種最大値の比較

が大きいほどワイヤロープが長くなることに起因しているものと推察される。また、同一延長(径間数)であれば、衝突位置にかかわらず、その最大値は同程度を示している。

(c) 図に示すロープ張力は、衝突位置にかかわらず延長(径間数)が大きいほど、最大値は小さくなる傾向にあることが分かる。また、同一延長(径間数)における衝突位置で比較を行うと、中央径間よりも端径間に衝突させる場合の方が大きい値を示している。

5. まとめ

本研究では、従来型落石防護柵を対象に、同一衝撃エネルギー下で径間中央に設置される間隔保持材に落石を衝突させる場合について、(1) 落石径(衝突速度)や(2) 延長(径間数)を変数としたパラメトリック解析を実施し、防護性能に与えるそれらの影響について数値解析的に検討を行った。本研究の範囲内で得られた知見をまとめると、以下の通りである。

- 1) 同一延長(径間数)の場合には、最大落石貫入量は落石径や衝突位置にかかわらず、ほぼ同程度の値を示す。
- 2) 一方、最大ロープ張力に関しては、延長に影響を受け延長(径間数)が大きいほど、小さくなる傾向にある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧, 2017.
- 2) (公社)地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例, 2014.
- 3) 中村拓郎, 今野久志, 葛西聡, 小室雅人：従来型落石防護柵の補足性能に関する実験的検討, 鋼構造年次論文報告集, 第27巻, pp. 60-67, 2019.
- 4) Hallquist, J. O.: *LS-DYNA User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2018.
- 5) EOTA, *Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits (ETAG 027)*, 2008.