

# 従来型落石防護柵の動的応答性状に関する数値解析的検討

Numerical study on dynamic response behavior of conventional rockfall protection fence

室蘭工業大学大学院  
室蘭工業大学大学院  
室蘭工業大学大学院  
(国研)寒地土木研究所  
(国研)寒地土木研究所

○ 学生員 服部 桃加 (Momoka Hattori)  
正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)  
フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)  
正 員 中村 拓郎 (Takuro Nakamura)  
正 員 今野 久志 (Hisashi Konno)

## 1. はじめに

我が国の山間部や海岸線沿いには、比較的小規模な落石を対象に従来型落石防護柵が設置されている。同防護柵は、H形鋼支柱、ワイヤロープ、ひし形金網および間隔保持材などの比較的入手しやすい材料から構成されており、施工性・経済性に優れた特徴を有する。また、同防護柵は、ひし形金網、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、落石対策便覧(以後、便覧)<sup>1)</sup>に基づき、各構成部材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ことによって設計が行われている。しかしながら、実際に落石の衝突を受けた防護柵を見ると、支柱基部の局部座屈による横倒れや落石が金網を貫通するなど、設計では想定していない損傷事例も報告されている(写真-1)<sup>2),3)</sup>。

このような背景の下、著者らの研究グループでは、従来型落石防護柵に関する落石衝突時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耐衝撃設計法を提案することを最終目的とし、種々の実験を実施している<sup>4),5)</sup>。一方、同防護柵は落石時に大きな塑性変形を伴うことから、その保有性能や構成部材ごとの可能吸収エネルギーを評価・分析するためには、数値解析による詳細な検討が必要不可欠である。著者らは、既往の研究において、重錘衝撃を受ける従来型落石防護柵の衝撃応答解析<sup>6)</sup>を実施し、別途実施した実験結果と比較することにより、解析手法の妥当性を確認してきた。

本論文では、既往の研究で用いた従来型落石防護柵モデルを用いて、同防護柵に関する基礎的資料の収集を目的に、落石質量パラメータとした三次元弾塑性衝撃応答解析を実施した。ここでは、便覧に基づき慣用設計法で算出された可能吸収エネルギーを衝突エネルギーとして、落石質量(寸法)と衝突速度を変化させた3ケースについて数値解析を実施し、それらが防護柵の動的応答特性に与える影響について検討を行った。なお、本数値解析には、汎用構造解析コードLS-DYNA(Ver. R9)<sup>7)</sup>を使用した。



写真-1 被害事例

## 2. 数値解析概要

### 2.1 有限要素モデル

図-1には、本数値解析で用いた有限要素モデルを示している。試験体は、柵高2m、延長9m(3m×3スパン)の従来型落石防護柵を模擬した実物大モデルである。

H形鋼支柱、控え材、間隔保持材および重錘には、8節点固体要素を用いた。なお、ワイヤロープに関しては、重錘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、2節点梁(ケーブル)要素ではなく、8節点固体要素を使用している。しかしながら、この場合には要素に曲げ応力が作用し、引張力のみを伝達するワイヤロープの特性と異なることになる。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梁要素を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(重錘衝突部近傍に関してはその半分)として配置した。梁要素はワイヤロープと同じ断面とした。また、各要素の積分点数は、8節点固体要素は1点積分、2節点梁要素は4点積分とした。なお、本研究では落石を間隔保持材に衝突させることから、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、既往の文献<sup>8)</sup>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、実構造物でボルトを用いて固定している箇所(ワイヤロープ端部と端末支柱、中間支柱および間隔保持材とUボルト)の接続については、完全結合とした。

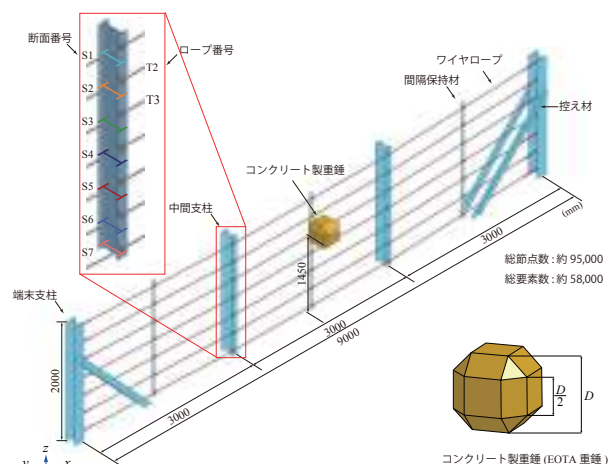


図-1 有限要素モデル

表-1 数値解析ケース

| 解析<br>ケース | 落石径<br>$D$<br>(mm) | 質量<br>$m$<br>(kg) | 衝突速度<br>$V$<br>(m/s) | 衝突エネ<br>ルギー $E$<br>(kJ) |
|-----------|--------------------|-------------------|----------------------|-------------------------|
| D400      | 400                | 120.0             | 29.4                 | 52.0                    |
| D600      | 600                | 405.7             | 16.0                 |                         |
| D800      | 800                | 961.2             | 10.4                 |                         |

重錘は、EOTA 規格<sup>9)</sup>に準拠したコンクリート製の多面体とした。重錘には所定の衝突速度を付加して防護柵に衝突させた。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。

## 2.2 材料構成則

図-2には、本研究で使用し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(H形鋼支柱、間隔保持材他)には、トリリニア型の弾塑性体モデルを適用した。なお、図は引張側のみを示している。また、便覧に基づき鋼材の材質はSS400と仮定し、降伏応力 $f_y$ を $f_y = 235$  MPa、引張強度 $f_u$ を $f_u = 400$  MPaと設定した。弾性係数 $E_1$ およびポアソン比 $\nu_s$ はそれぞれ200 GPa、0.3とした。塑性硬化係数 $E_2$ は、弾性係数 $E_1$ の1%とし、引張強度まで線形に増大するモデルと設定した。

(b) 図に示すワイヤロープについても、鋼材と同じくトリリニア型の構成則を適用した。降伏荷重 $P_y$ および破断荷重 $P_u$ に関しては、便覧を参考に決定し、ワイヤロープの断面積 $A_w$ 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、明確な規定が無いことから、本数値解析では $\epsilon_u = 5\%$ と仮定し、その後はひずみが増大するように設定した。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。

降伏の判定は von Mises の降伏条件式を採用し、鋼材の密度 $\rho_s$ 、ポアソン比 $\nu_s$ は、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>、 $\nu_s = 0.3$ とした。また、多面体重錘に関しては弾性体を仮定し、その密度は $\rho_s = 2.65 \times 10^3$  kg/m<sup>3</sup>となるように重錘の質量を設定している。

## 2.3 数値解析ケース

本論文では、一般的な従来型落石防護柵を対象に、同一落石エネルギーが作用した場合の防護柵の動的応答性状を明らかにするために、重錘質量を衝突速度をパラメータとした数値解析を実施した。なお、ここではスパン中央の間隔保持材に落石が衝突するものと仮定し、その高さを基部から1.45 mとした。これは、落石に対して2本のワイヤロープで抵抗することを想定したことによる。

表-1には、解析ケースの一覧を示している。数値解析は、落石質量 $m$ および衝突速度 $V$ を変化させた3ケース実施した。なお、本防護柵モデルの設計吸収可能エネルギーは、便覧の慣用設計法によると約52 kJである。ここでは、落石の外寸 $D$ が400, 600, 800 mmの3種類と設定し、衝突エネルギー $E$ が52 kJとなるように衝突速度 $V$ を決定した。

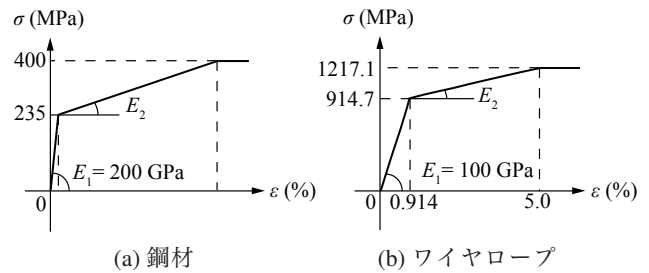


図-2 材料構成則

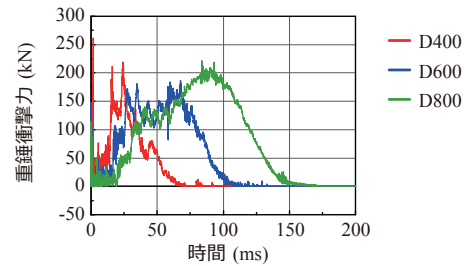


図-3 重錘衝撃力

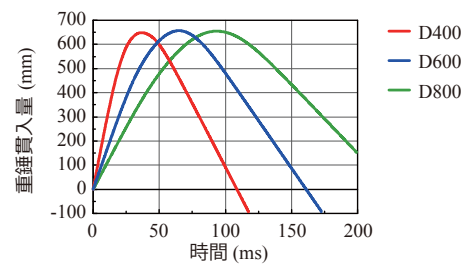


図-4 重錘貫入量

## 3. 数値解析結果および考察

### 3.1 各種時刻歴応答波形

#### (1) 重錘衝撃力

図-3には、解析結果から得られる重錘衝撃力の時刻歴応答波形を示している。なお、重錘衝撃力は接触反力を総和して評価している。図より、いずれの解析ケースにおいても、落石衝突時に継続時間が1 ms程度の第1波が生じた後に、継続時間の長い第2波目が生じている。第2波目の継続時間を見ると、重錘径が大きいほど長くなる傾向が見られる。

#### (2) 重錘貫入量

図-4には、解析結果から得られる重錘貫入量の時刻歴応答波形をすべてのケースで比較して示している。なお、重錘貫入量は落石先端部節点の衝突方向(y)変位である。図より、いずれの解析ケースにおいても、最大貫入量は650 mm程度であることが分かる。このことは、入力エネルギーが同一の場合、落石防護柵の変形量はほぼ等しいことを示唆している。ただし、本数値解析では、落石を間隔保持材に衝突させていることに留意する必要がある。なお、衝突速度が大きいほど、最大貫入量に到達する時刻も早くなる傾向が確認される。

#### (3) ロープ張力

図-5には、重錘衝突位置近傍の2本のワイヤロープ

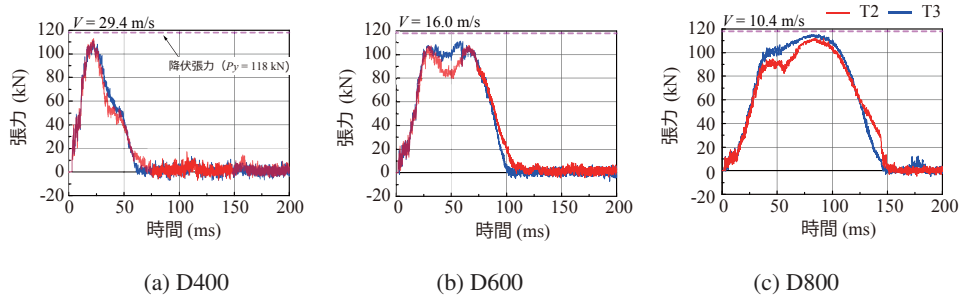


図-5 ロープ張力

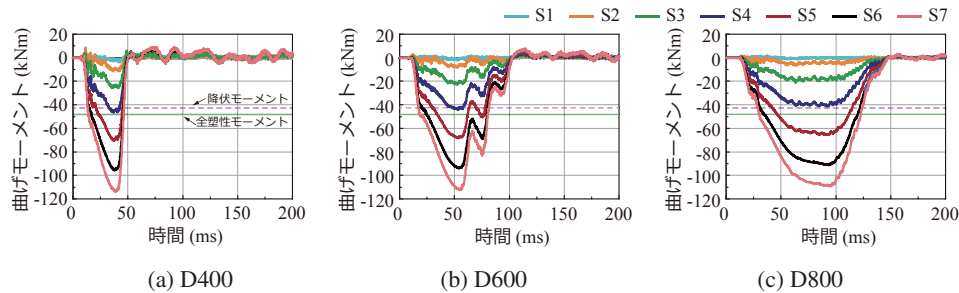


図-6 中間支柱の強軸方向の曲げモーメント

(図-1 参照) 張力の時刻歴波形を示している。図には、ワイヤロープの降伏張力  $P_y = 118 \text{ kN}$  も示している。

(a) 図より、落石径の小さな D400 の場合には、重錘衝突位置近傍の 2 本のワイヤロープ (T2, T3) には、ほぼ等しい張力が作用していることが分かる。また、その作用継続時間は落石がリバウンドを開始する時刻とほぼ等しい。

(b) および (c) 図に示す落石径が大きな D600, D800 の場合には、D400 の場合と異なり、落石より下方に配置されている T3 ロープには T2 ロープと比較して若干大きな張力が作用しているものの、全体的に見ると最大張力や継続時間は両ロープでほぼ等しいことが分かる。

また、ロープに作用する最大張力は、落石径によって若干異なる傾向が見られるが、いずれの場合も降伏荷重 ( $P_y = 118 \text{ kN}$ ) には達していない。なお、最大張力は D800 の場合で  $115.2 \text{ kN}$  であった。また、最大張力発生時刻は、最大重錘貫入量に到達する時刻とほぼ等しい。

これより、同一落石エネルギーを作用させた場合のワイヤロープ張力の最大値は、落石径にかかわらずほぼ等しい値を示すことが確認された。なお、その到達時刻は落石速度が大きいほど早く、かつ継続時間も短い。

#### (4) 中間支柱の強軸曲げモーメント

図-6 には、落石作用時の中間支柱における強軸方向曲げモーメント  $M_x$  について、各断面 (S1~S7, 図-1 参照) の時刻歴応答波形を示している。なお、着目断面 (Si) は、ワイヤロープ間の中間位置を基本とし、最下段の S7 のみ基部から  $50 \text{ mm}$  とした。また、図中には、鋼材を完全弾塑性体 ( $f_y = 235 \text{ MPa}$ ) と仮定し算出した降伏曲げモーメント  $M_y = 42.5 \text{ kNm}$  と全塑性曲げモーメント  $M_x = 48.2 \text{ kNm}$  も示している。

図より、いずれの落石径においても、支柱基部に近づくほどモーメントが増加する傾向が確認される。一方で落石

衝突位置よりも上方に位置する S1 断面では、自由端に近いことから曲げモーメントはほぼ零となっている。各断面における曲げモーメントの作用時間は、ロープ張力の作用継続時間とほぼ等しい。

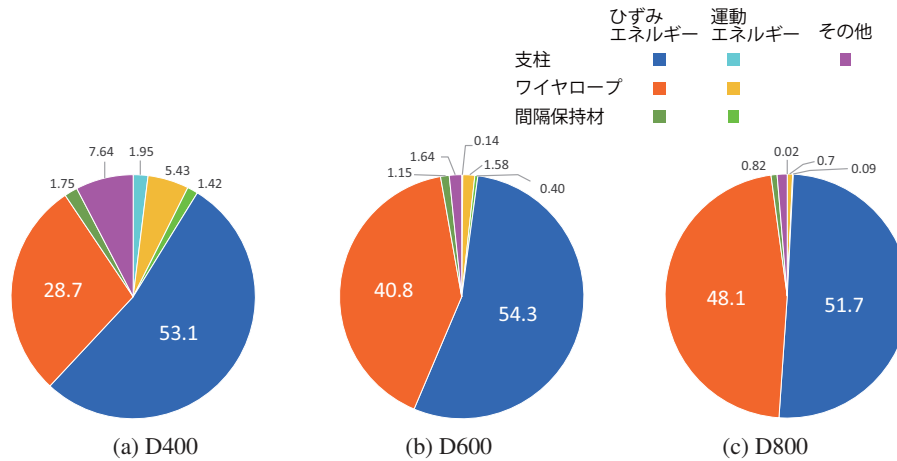
また、落石径にかかわらず、S4 断面より下方の断面に作用する曲げモーメントは、降伏曲げモーメントを超えていることが分かる。なお、各断面に作用する曲げモーメントの立ち上がりが若干遅く示されているが、これは落石衝突後、ワイヤロープを介して衝撃力が中間支柱に伝達されたことを示している。

#### 3.2 変形状況

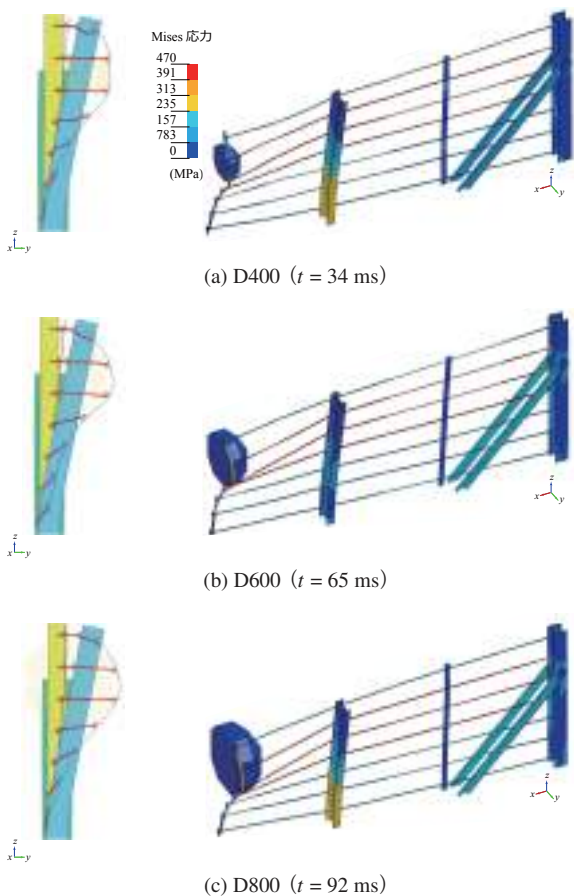
図-7 には、最大重錘貫入量発生時における落石防護柵の変形状況および Mises 応力分布を示している。図より、D400 および D800 の場合には、中間支柱基部には降伏応力を超える応力が発生していることが確認される。なお、D600 に関しては降伏応力以下となっているが、これは最大変位発生時刻においてロープ張力が減少していることから、一時的に応力が開放されているためであり、その前後の時刻においては他のケースと同様な分布性状を示していることを確認している。

#### 3.3 エネルギー分担率

図-8 には、防護柵の最大変位発生時刻における各構成部材のエネルギー分担率を示している。図より、落石径の小さい D400 の場合には、ワイヤロープの運動エネルギー分担率が 5% 程度を示しているものの、落石径が大きくなるほど、その分担率は小さくなっている。また、いずれの場合も支柱のひずみエネルギーが最も大きな分担率を示している。なお、落石径が大きくなる (衝突速度が遅くなる) ほど、ワイヤロープのひずみエネルギーが増加し、一方で支柱のひずみエネルギーが減少する傾向が確認される。



図－8 エネルギー分担率



図－7 落石防護柵の変形状況

#### 4. まとめ

本研究では、従来型落石防護柵モデルを用いて、防護柵の可能吸収エネルギーを衝突エネルギーとして、落石質量と衝突速度を変化させた3ケースについて数値解析を実施し、それらが防護柵の動的応答特性に与える影響について検討を行った。

本研究で得られた結果を整理すると、以下のように示される。

- 1) 可能吸収エネルギーが一定の条件であれば、重錘質量や速度を変化させても、各種応答波形の最大値はほぼ同程度である。
- 2) 各構成部材のエネルギー分担は、重錘の衝突速度が小さくなると、ワイヤロープのひずみエネルギーは増加するものの、支柱のひずみエネルギーは減少する傾向にある。
- 3) 本解析範囲内では、いずれのケースにおいても支柱のひずみエネルギーが最も大きな分担率を示している。

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2017.12
- 2) (公社)地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例，2014.
- 3) (国研)土木研究所：高エネルギー吸収型落石防護工等の性能照査手法に関する研究，共同研究報告書，第491号，2017.
- 4) 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，A-22(CD-ROM)，2017.1
- 5) 今野久志，小室雅人，西 弘明，荒木恒也，岸 徳光：従来型落石防護柵に用いられる間隔保持材の設置効果に関する研究，鋼構造年次論文報告集，第25巻，pp. 151-158，2017.11
- 6) 田畑翔大，小室雅人，西 弘明，今野久志，荒木恒也：重錘衝突を受ける従来型落石防護柵の動的応答解析，土木学会北海道支部論文報告集，第74号，A-17(CD-ROM)，2018.1
- 7) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version R9 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2016.
- 8) British Standards Institution, BS 5975: 1996: Code of Practice for Falsework, London, 1996.
- 9) EOTA, Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits (ETAG 027), 2008