

## 従来型落石防護柵の耐衝撃挙動に及ぼす落石質量の影響

室蘭工業大学大学院 学生会員 ○服部 桃加 室蘭工業大学大学院 正会員 小室 雅人  
 (国研)寒地土木研究所 正会員 中村 拓郎 (国研)寒地土木研究所 正会員 西 弘明

## 1. はじめに

従来型落石防護柵は、H形鋼支柱、ワイヤロープ、ひし形金網などの比較的入手しやすい材料から構成されており、我が国の道路沿いに数多く設置されている。しかしながら、各部材の可能吸収エネルギーに関しては、必ずしも十分な検討がされておらず、また、設計では想定していない損傷事例も発生している。本研究では、同防護柵の合理的な耐衝撃設計法の確立を最終目的に、従来型落石防護柵モデルを用いた三次元弾塑性応答解析を実施した。ここでは、衝突エネルギーを同一とした上で落石質量(寸法)と衝突速度を変化させたパラメトリック解析を実施し、それらが防護柵の耐衝撃挙動に与える影響について検討を行った。

## 2. 数値解析概要

## 2.1 有限要素モデル

図1には、有限要素モデルを示している。試験体は、従来型落石防護柵を模擬し、柵高2m、延長9m(3m×3スパン)からなる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。ワイヤロープに関しても、8節点固体要素を基本としたが、圧縮力を伝達しない2節点ケーブル要素をUボルトや間隔保持材との接触を避けるように一定間隔で挿入することで、引張力のみを伝達するように配慮した。なお、重錘と間隔保持材間、ワイヤロープと間隔保持材(あるいは中間支柱)間などについては、面と面の接触・すべりを考慮可能な接触面(摩擦係数:0.4)を定義した。本解析における落石衝突位置はスパン中央の高さ1.45mとした。また、落石を間隔保持材に衝突させていることから、ひし形金網への影響は小さいと判断し、そのモデル化を省略した。なお、落石対策便覧(以後、便覧)の慣用設計

法によると、同防護柵の可能吸収エネルギーは約52.0kJである。

表1には、解析ケースの一覧を示している。ここでは、EOTAに準拠した多面体重錘を3種類(外寸 $D=400, 600, 800$ mm)を設定し、衝突エネルギー $E$ が52.0kJとなるように衝突速度 $V$ を決定した。

## 2.2 材料構成則

図2には、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。いずれもトリリニア型の構成則を用い、降伏の判定はvon Misesの降伏条件式を採用した。

H形鋼支柱、間隔保持材他の鋼材(図参照)には、便覧に基づきSS400を用いることとし、降伏応力 $f_y$ および引張強度 $f_u$ をそれぞれ235, 400MPaと設定した。弾性係数 $E_s$ 、ポアソン比 $\nu_s$ および密度 $\rho_s$ は、はそれぞれ200GPa, 0.3,  $7.85 \times 10^3$ kg/m<sup>3</sup>とした。塑性硬化係数 $H'$ 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設定した。

ワイヤロープの降伏荷重 $P_y$ および破断荷重 $P_u$ は、便覧を参考に決定し、ロープ断面積 $A_w$ で除すことにより、(b)図に示す降伏応力 $f_y$ 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、重錘に関しては弾性体(弾性係数 $E_b=200$ GPa, ポアソン比 $\nu_b=0.167$ )とし、その密度 $\rho_b$ は大きさにかかわらず $\rho_b=2.65 \times 10^3$ kg/m<sup>3</sup>と一定とした。

表1 解析ケース

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

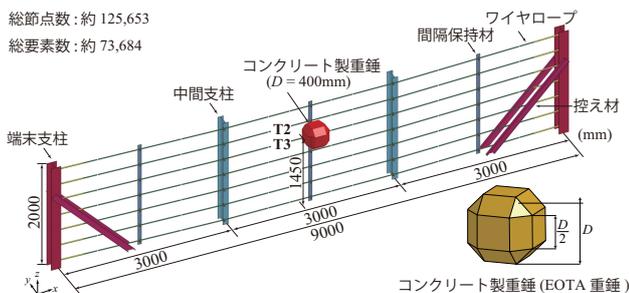


図1 有限要素モデル

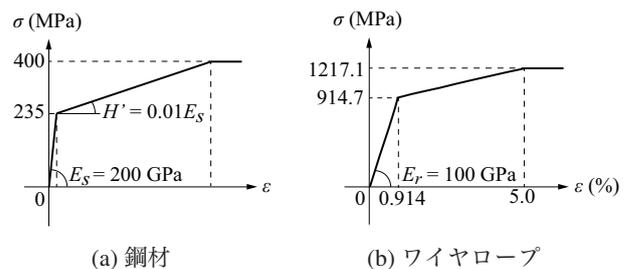


図2 材料構成則

キーワード：従来型落石防護柵、耐衝撃挙動、衝撃応答解析

連絡先：〒050-8585 室蘭工業大学大学院 暮らし環境系領域 社会基盤ユニット TEL/FAX 0143-46-5228

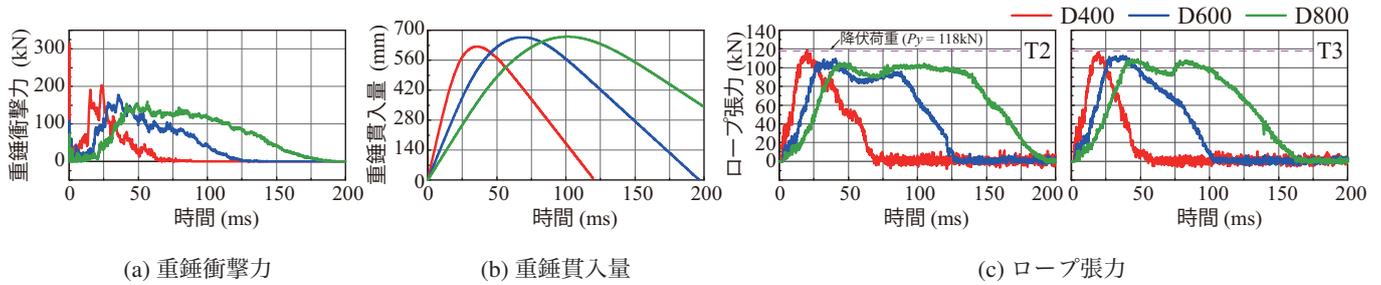


図3 各種時刻歴応答波形

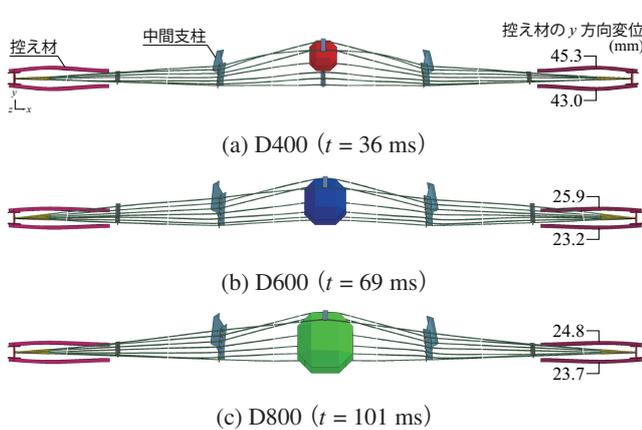


図4 最大重錘貫入量発生時刻における防護柵の変形状況

### 3. 数値解析結果および考察

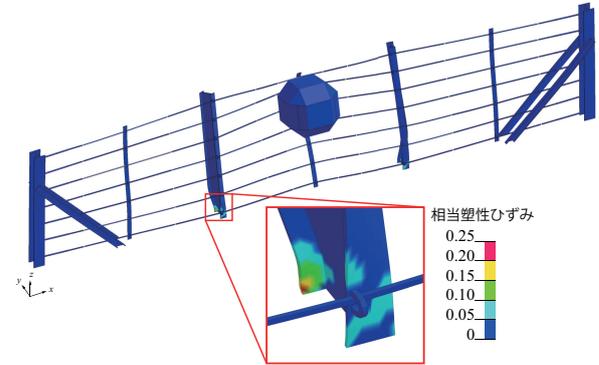
#### 3.1 各種時刻歴応答波形

図3には、解析結果の各種応答波形を比較して示している。ここでは、重錘衝撃力、重錘貫入量およびロープ張力について示している。なお、重錘衝撃力は、接触反力の総和として算出した。重錘貫入量は、落石先端部の節点の衝突方向(y)変位である。また、ロープ張力は衝突位置近傍の2本のロープ張力のみ示している。

(a)図に示す重錘衝撃力波形は、いずれの解析ケースにおいても、落石衝突時に極めて継続時間が短い第1波と継続時間の長い第2波から構成されている。第2波目の継続時間を見ると、落石径 $D$ が大きいほど長くなる傾向にあることが分かる。

(b)図に示す重錘貫入量波形を見ると、落石径 $D$ が大きく衝突速度 $V$ が小さいほど、最大重錘貫入量は大きくなる傾向が見られるものの、 $D = 400$  mmの場合で623 mmに対して、 $D = 800$  mmでは670 mmとなっており、その差は約50 mmと比較的小さい。

(c)図に示すロープ張力は、重錘貫入量の場合とは異なり、落石径 $D$ が小さく衝突速度 $V$ が大きいほど最大値が大きくなる傾向が確認される。一方、継続時間は落石径 $D$ が大きいほど、長くなる傾向にある。なお、ロープ張力が減少する時刻は、(b)図に示す最大重錘貫入量到達時刻と対応している。また、最大ロープ張力はいずれの場合も降伏荷重( $P_y = 118$  kN)と同程度もしくはそれ以下であることが分かる。

図5 ひずみ分布 (D800,  $t = 101$  ms)

#### 3.2 解析モデルの変形状況

図4には、最大重錘貫入量発生時刻における防護柵の変形状況(上方俯瞰)を示している。図より、3ケースを比較すると、落石径 $D$ が小さく衝突速度 $V$ が大きいほど、控え材の変形が大きくなる傾向が確認される。これは、図3(c)に示すように大きなロープ張力が発生したことで、末端支柱に衝突直角方向の大きな力が作用したことに起因しているものと推察される。一方、落石径 $D$ が大きく衝突速度 $V$ が小さい場合には、中間支柱の変形が大きくなっている。これは、落石径 $D$ が大きい場合には、複数のロープによって重錘を捕捉することから、中間支柱の衝突方向に大きな力が作用することによるものと考えられる。

#### 3.3 ひずみ分布

図5には、最大重錘貫入量発生時刻における変形状況および相当塑性ひずみ分布の一例として、D800のケースを示している。図より、中間支柱基部には圧縮側フランジにおいて20%程度の塑性ひずみが発生しているとともに、基部には座屈に似たねじれ変形が生じていることが確認される。なお、この傾向は、D600のケースにおいても確認されている。

### 4. まとめ

本研究の範囲内で得られた結果を整理すると、

- (1) 一定衝突エネルギー条件下では、落石径が小さく衝突速度が大きいほど防護柵の変形は小さくなる。一方、ロープに生じる張力は大きくなる傾向にある。
- (2) 落石径が大きいほど、中間支柱の変形が大きくなるとともに、基部ではねじり変形が生じる傾向にある。