

従来型落石防護柵の耐衝撃挙動に関する数値解析的検討

3D numerical consideration on impact resistant behavior of conventional rockfall protection fence

小室雅人[†], 服部桃加^{*}, 中村拓郎^{**}, 西弘明^{***}, 岸徳光^{****}

Masato Komuro, Momoka Hattori, Takuro Nakamura, Hiroaki Nishi, Norimitsu Kishi

[†]博(工), 室蘭工業大学大学院教授, もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)^{*}室蘭工業大学大学院, 工学研究科博士前期課程 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)^{**}博(工), (国研) 土木研究所寒地土木研究所研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)^{***}博(工), (国研) 土木研究所寒地土木研究所グループ長, 寒地基礎技術研究グループ
(〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)^{****}工博, 室蘭工業大学大学院特任教授, もの創造系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

In this paper, a three-dimensional elasto-plastic response analysis on impact loading tests of a full-scale conventional rockfall protection fence was performed, and the applicability of the proposed analysis method was verified by comparing with the experimental results. Furthermore, using the proposed method, a parametric study was conducted to investigate effects of the magnitude of diameter of the falling rock and number of spans on dynamic behavior of the fence under the condition of the same impact energy. The results obtained from this study were as follows: 1) time histories of the dynamic responses can be appropriately estimated by using the proposed method; and 2) effects of the mass of the falling rock and number of spans were numerically clarified.

Key Words: conventional rockfall protection fence, impact loading test, elasto-plastic response analysis, impact resistant behavior

キーワード: 従来型落石防護柵, 衝撃荷重載荷実験, 弾塑性応答解析, 耐衝撃挙動

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, その一つに落石防護柵がある. 我が国の落石防護柵は大きく 2 種類に分類される¹⁾. 写真-1 に示すような H 形鋼支柱, ワイヤロープ, ひし形金網および間隔保持材等から構成される従来型落石防護柵と, ワイヤロープ端部に緩衝装置などを設置することで, より大きな落石エネルギーに抵抗できるように設計された高エネルギー吸収型落石防護柵である. 前者は, 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もので, 落石エネルギーが 100 kJ 程度までの比較的小規模な落石を対象として設置される場合が多い. 一方, 後者は, 防護柵

支柱の強化や金網の高強度化, および緩衝装置の設置などにより, より大きな落石エネルギーに抵抗可能となっており, その可能吸収エネルギーは, それらの組み合わせによって異なるものの, 最大で 5,000 kJ 程度である.

2017 年に改訂された落石対策便覧¹⁾では, 落石防護柵の性能検証に関する項目が追加され, 実物大供試体による標準的な実験方法が示されるとともに, 性能検



写真-1 従来型落石防護柵の一例

[†] 連絡著者 / Corresponding author

E-mail: komuro@mmm.muroran-it.ac.jp

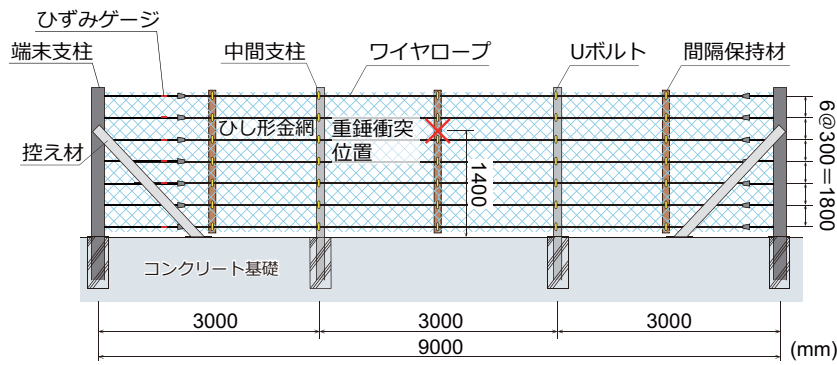


図-1 試験体の形状寸法

表-1 実物大実験に用いた各構成部材

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	JIS G 3525 準抛	18φ
ひし形金網	亜鉛メッキ	JIS G 3552	φ3.2 × 50 × 50

証実験とは異なる現場条件における性能検討にあたっては、部分的な実験や数値解析的手法等を用いて補完することができる。これらのことから、後者に関しては、実験的検討や数値解析的検討が実施されている^{2)~4)}。一方、前者に関しては、実物大実験を実施せず、従前の設計法（各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ように設計）の適用が可能となっている。しかしながら、前者の防護柵に関しても、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^{5), 6)}。

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、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^{7), 8)}。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。

本論文では、実規模従来型落石防護柵を用いた衝撃荷重実験を対象に、三次元弾塑性応答解析を実施し、解析手法の妥当性を実験結果との比較によって検証した。さらに、提案の解析手法を用いて、同一衝撃エネルギー下で間隔保持材に衝突させた場合における(1)落石径(衝突速度)や(2)径間数を変数としたパラメトリック解析を実施し、防護性能に与える影響について数値解析的に検討を行った。なお、本解析には

LS-DYNA (Ver. R9)⁹⁾を使用した。

2. 実物大衝撃荷重実験の概要

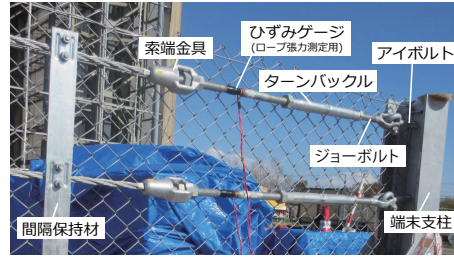
2.1 試験体概要

図-1には、本研究で用いた試験体の形状寸法を示している。試験体は、実規模の従来型落石防護柵を模擬し、柵高2m、延長9m(支柱間隔3m × 3径間)とした。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(18φ)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。本実験では、実構造物と同様に、金網の展開方向をワイヤロープの軸方向とした。

写真-2には、試験体の全景および各部材を示している。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ており、写真-2(a)に示すように、Uボルトを用いてワイヤロープおよび金網に固定している。なお、実験時にはワイヤロープの自重によるたわ



(a) 間隔保持材



(b) ロープ端部



(c) 全景

写真-2 試験体の全景および各構成部材の詳細

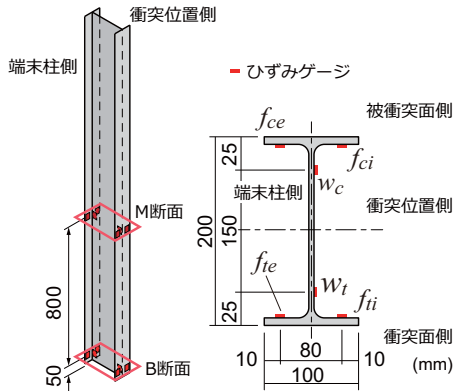


図-2 中間支柱に貼付したひずみゲージの位置とその名称

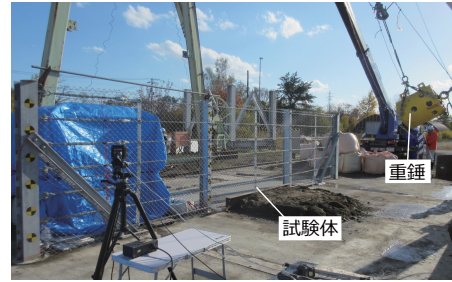


写真-3 実験状況

みを除去するために、1本あたり5kN程度の初期張力を導入した。

ワイヤロープは、片側を一般的に使用されているソケット式の索端金具を介して端末支柱に固定した。一方、反対側はロープに作用する張力を適切に測定するために、写真-2(b)に示すように、索端金具にターンバックルを取り付け、ジョーボルト、アイボルトを介して端末支柱に接続した。なお、ロープ張力に関しては、索端金具に貼付したひずみゲージを用いて測定している。また、図-2に示すように中間支柱の2断面(B断面：高さ50mm、M断面：高さ850mm)において、部材軸方向ひずみを測定した。

重錘の衝突位置は径間中央とし、その高さは基礎天端から1.4mとした。なお、落石対策便覧による本試験体の設計可能吸収エネルギーは、52.2kJである。

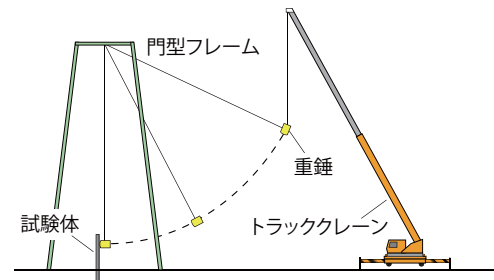


図-3 実験方法

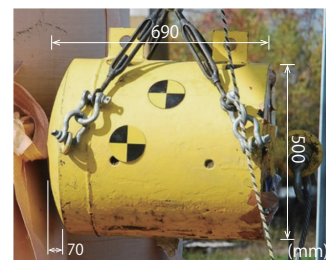


写真-4 実験に用いた鋼製重錘(質量：890kg)

2.2 実験方法と測定項目

写真-3には、衝撃荷重実験状況を示している。実験は、図-3に示すように門型フレームに吊り下げた重錘をトラッククレーンで所定の高さまで吊り上げ、振り子で防護柵に水平衝突させることで実施した。なお、重錘は防護柵衝突時に吊り下げロープから切り離している。

重錘は、写真-4に示すように鋼製の円筒状(直径

500mm、長さ690mm、質量890kg)で、先端の曲率半径は481.4mmである。なお、実験における重錘の衝突速度 V は、高速度カメラによる映像を用いた画像解析より、 $V = 10.4 \text{ m/s}$ であった。

本実験における測定項目は、1) 重錘に取り付けたひずみゲージ型加速度計による加速度、2) 高速度カメラ映像の画像解析による重錘貫入量、3) ワイヤロー

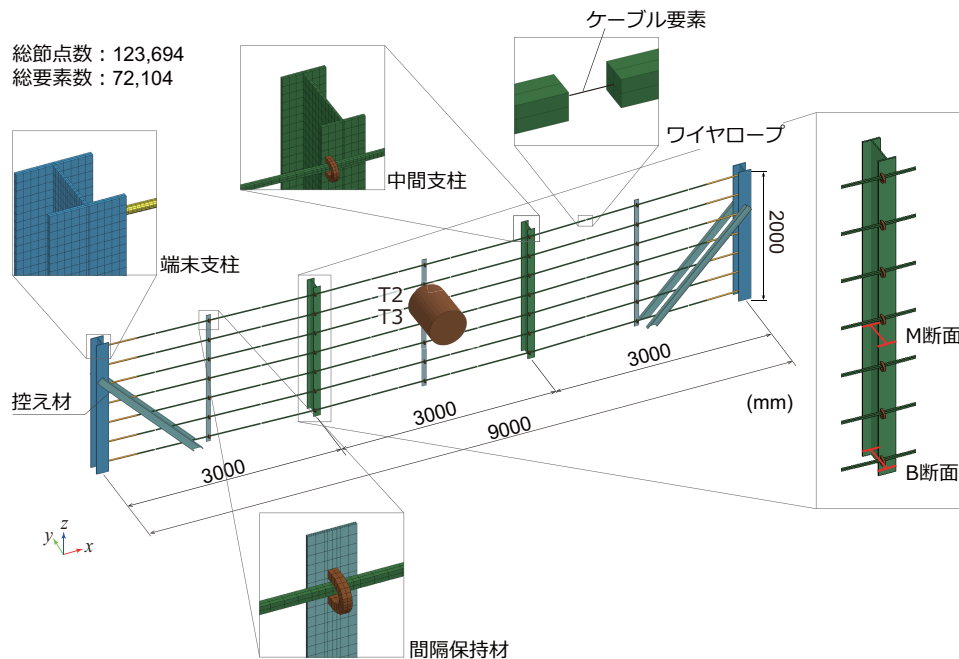


図-4 有限要素モデル

ブ端部の索端金具に生じるひずみから換算されるロープ張力、および4) 中間支柱に貼付したひずみゲージ(図-2参照)による部材軸方向ひずみである。

3. 衝撃応答解析の概要

3.1 有限要素モデル

図-4には、本数値解析で用いた有限要素モデルを示している。なお、図中には中間支柱のひずみゲージ計測断面も併せて示した。試験体は、実験と同様に柵高2m、延長9m(3m×3径間)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。H形鋼支柱、控え材および間隔保持材の要素分割に関しては、図-4に示すように板厚方向に2分割(間隔保持材のみ4分割)とし、幅方向には要素長が5~20mm程度となるように分割した。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、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、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、ここでは図-4に示すように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ロープ軸線がずれないように節点共有で挿入するとともに、その要素は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。

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、実験時において重錘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、そのモデル化を省略した。

接触条件は、固体要素間(重錘と間隔保持材間、ロープとUボルトおよび支柱間、ロープと控え材間など)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^{8),10)}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、ワイヤロープ端部と末端支柱および中間支柱とUボルトの連結には、両者の間に接触面を定義しタイト条件を設定することにより完全結合とした。一方、間隔保持材とUボルトに関しては、節点共有により結合した。数値解析は、衝撃荷重実験で得られた実測速度($V = 10.4 \text{ m/s}$)を初速度として重錘節点に付加することにより防護柵に衝突させた。なお、本解析では、幾何学的非線形性は考慮しているものの、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-5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。図-5(a)に示す鋼材には、トリリニア型の弾塑性体モデルを適

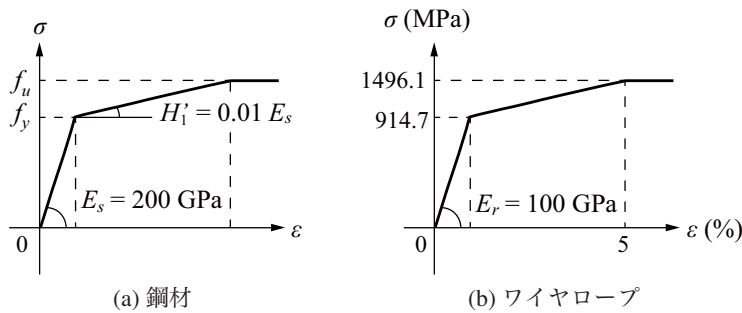


図-5 応力-ひずみ関係

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	200	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

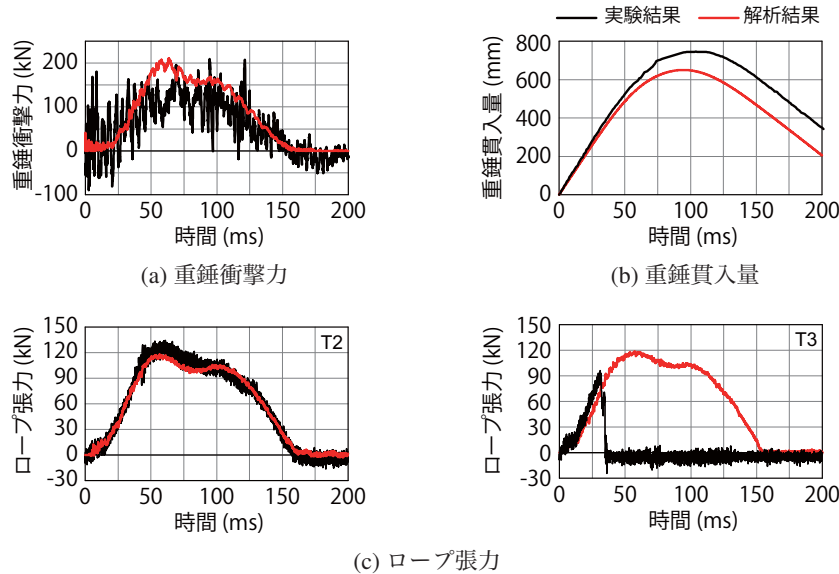


図-6 各種時刻歴応答波形

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、鋼材検査証明書(ミルシート)より、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。

図-5(b) 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 $P_y = 118 \text{ kN}$ 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 に関し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 ϵ_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¹⁾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 ρ_s 、ポアソン比 ν_s は、 $\rho_s = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 、 $\nu_s = 0.3$ とした。

また、重錘は鋼弾性体(弾性係数 $E_s = 200 \text{ GPa}$ 、ポアソン比 $\nu_s = 0.3$)と仮定し、単位体積質量 ρ_w は重錘質量 ($m = 890 \text{ kg}$) と等価になるように解析モデルの体積で除した値を入力している。

4. 実験結果と数値解析結果の比較

4.1 時刻歴応答波形

図-6には、重錘衝撃力、重錘貫入量(重錘の水平方向変位)および重錘衝突位置近傍のワイヤロープ張力(T2, T3)に関する時刻歴応答波形について、実験結果と解析結果を比較して示している。なお、各波形の横軸は、重錘が試験体に衝突した時刻を零としている。

図-6(a)には、重錘衝撃力波形を示している。実験結果における重錘衝撃力は、重錘に取り付けた加速度計より得られた加速度 α に重錘質量 ($m = 890 \text{ kg}$) を乗じることで評価した。一方、解析結果については、重錘に定義した接触面における反力の総和により評価している。図-6(a)より、実験結果の衝撃力波形には、

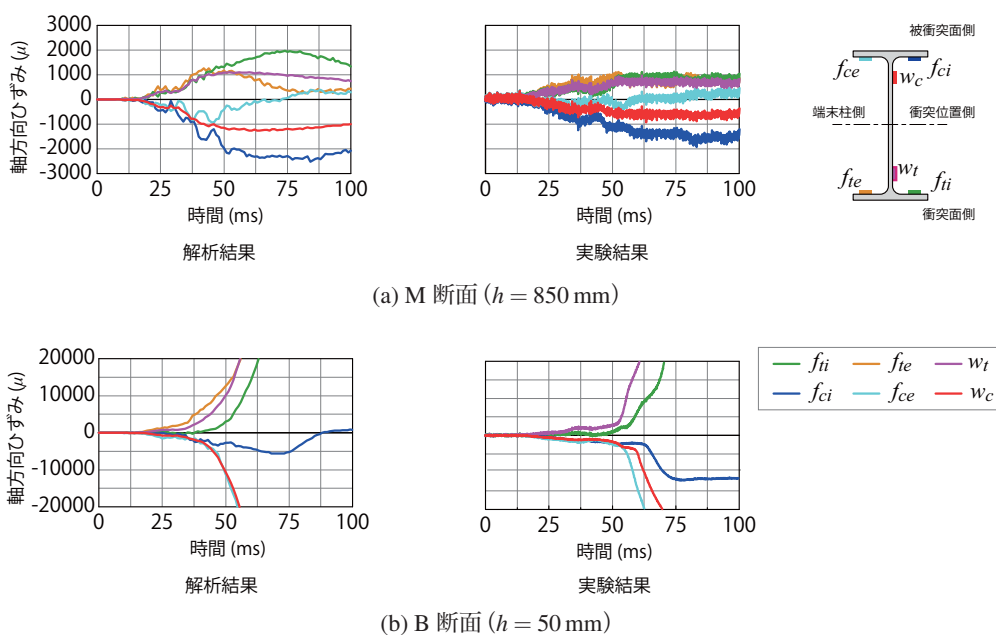


図-7 中間支柱の軸方向ひずみに関する時刻歴応答波形

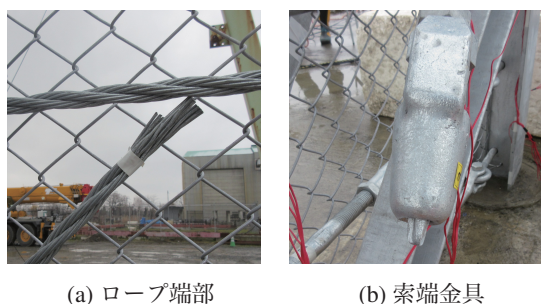


写真-5 実験終了後の T3 ロープにおける索端金具とロープ端部の状況

高周波成分が含まれているものの、その継続時間は約 150ms 程度であることが分かる。一方、数値解析結果を見ると、実験結果の最大値を若干過大に評価しているものの、継続時間は実験結果とよく一致していることが分かる。

図-6(b)に示す重錘貫入量波形に着目すると、数値解析結果における最大値は、実験結果と比較して過小評価しているものの、波形の立ち上がりやリバウンド後の挙動は、両者でほぼ一致していることが分かる。なお、数値解析結果と実験結果の最大値の差異は、後述するように、実験時に重錘衝突位置近傍のワイヤロープ (T3) が索端金具から外れたことによる影響であると判断している。

図-6(c)に示すロープ張力波形を見ると、衝突位置よりも上方にある T2 ロープの場合には、数値解析結果は実験結果と非常によく一致していることが分かる。一方、実験時に索端金具からロープが外れた T3 ロープの場合 (写真-5 参照) には、ロープが外れる

$t = 30 \text{ ms}$ までは実験結果における張力の立ち上がりをよく再現しているものの、その後は実験結果において張力が零を示しており、両者の差は顕著となっている。なお、写真-5に示す実験終了後における T3 ロープ端部の状況より、ワイヤロープが降伏荷重に達する前に索端金具からロープの引抜けが生じたものと推察される。

4.2 軸方向ひずみおよび試験体の変形状況

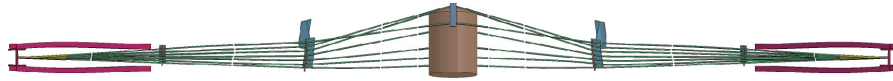
図-7には、中間支柱の2断面における軸方向ひずみ波形を示している。なお、横軸は最大重錘貫入量発生時刻近傍の 100ms までとした。また、B断面におけるひずみゲージ f_{ie} については、実験時にひずみゲージ計測に不具合が生じ、データの収集ができなかったため表示していない。

図-7より、着目断面の高さにかかわらず、衝突面側のフランジ (f_{ii}, f_{ie})、およびウェブ (w_t) の軸方向ひずみには引張ひずみが、被衝突面側のフランジ (f_{ci}, f_{ce}) およびウェブ (w_c) には圧縮ひずみが生じていることが分かる。このことは、重錘衝突後、中間支柱が後方に変形していることを意味している。また、数値解析結果についても同様な傾向が確認される。

各断面のひずみ分布を詳細に見ると、基部近傍の B 断面 (図-7(b)) では、実験結果における被衝突面側のひずみ f_{ci} において、 $t = 75 \text{ ms}$ 以降にひずみの増加が抑制されていることが分かる。また、同一箇所における数値解析結果は、圧縮ひずみから引張ひずみに転じている。これは、中間支柱の基部近傍は、重錘衝突時には純曲げ成分が卓越するものの、重錘の貫入とともに中間支柱基部にはねじりが生じていることを示唆し

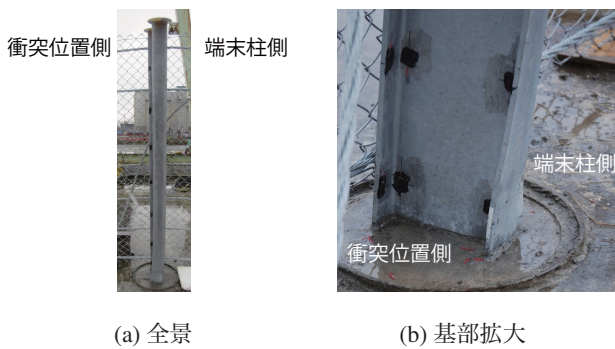


(a) 実験結果 ($t = 104 \text{ ms}$)



(b) 解析結果 ($t = 94.6 \text{ ms}$)

図-8 試験体の変形状況



(a) 全景

(b) 基部拡大

写真-6 実験終了後における中間支柱の変形状況

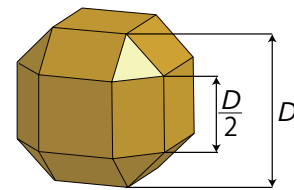


図-9 パラメトリック解析に用いた落石形状

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

ている。このことは、写真-6に示す実験終了後の中間支柱の変形状況からも確認される。

一方、図-7(a)に示すM断面では、数値解析結果において被衝突面側のひずみ f_{ce} が $t = 75 \text{ ms}$ において、圧縮ひずみから引張ひずみに転じていることが分かる。これは、中間支柱の高さ 850 mm 近傍では、後方に変形するとともに衝突位置側にも変形していることを示唆している。このことは、後述の図-8(b)に示す数値解析結果から得られる中間支柱の変形状況からも確認できる。なお、実験結果においても波形の立ち上がり時刻が $t = 20 \text{ ms}$ 程度と数値解析結果と同様な傾向が見られるものの、前述のように実験では T3 ロープが索端金具から外れたことから、全体的にひずみは小さい。

図-8には、重錘が最も貫入した時刻における防護柵の変形状況について実験結果と数値解析結果を比較して示している。図-8より、数値解析結果は実験結果の変形状況を概ね再現可能であることが分かる。

これより、本研究で用いた解析手法を用いることで、実験結果の重錘衝撃力、重錘貫入量、ロープ張力および中間支柱の軸方向ひずみをほぼ適切に再現可能であるものと判断される。

5. 同一衝撃エネルギー下におけるパラメトリック解析

5.1 解析条件

前章までは、従来型落石防護柵の衝撃荷重載荷実験を対象に、実験条件を可能な限り適切に再現をした数値解析を実施し、その妥当性を実験結果と比較することで検証した。本章では、前節で妥当性が確認された解析手法を基に、同一衝撃エネルギー下における(1)落石径(あるいは衝突速度)および(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、それらが防護性能に与える影響について解析的に検討を行う。

なお、本解析に用いる重錘は、落石対策便覧に準拠し図-9に示すように多面体¹²⁾とし、その単位体積質量 ρ_b は $\rho_b = 2.65 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ と設定した。したがって、解析手法の妥当性検証に用いた重錘(図-4)とは異なる。ここでは、落石径 D を3種類 ($D = 400, 600, 800 \text{ mm}$) に変化させることとした。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(衝撃)エネルギーは、

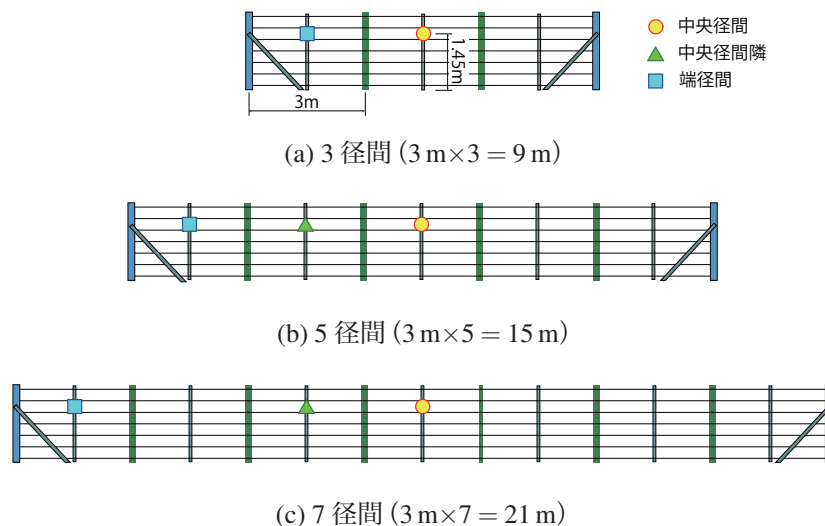


図-10 有限要素モデルと重錘衝突位置の関係

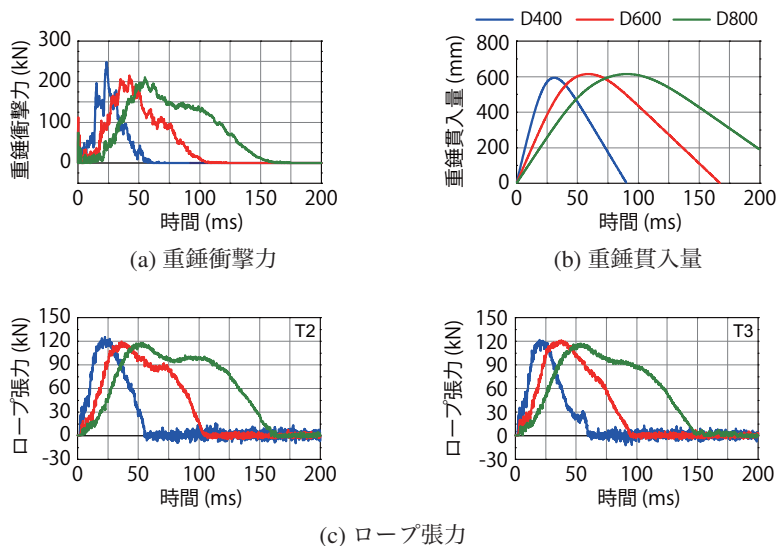


図-11 異なる落石径における時刻歴応答波形の比較 (延長：9 m, 衝突位置：中央径間)

52.0 kJ とした。

図-10には、延長の異なる3種類の防護柵に対する有限要素モデルと重錘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、衝突位置を基礎天端から1.45 m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。また、衝突位置は前章の実験条件($h = 1.4$ m)と異なるが、これは落石を2本のワイヤロープの中心に衝突させたためである。なお、本解析では、実験条件と同様に、ひずみゲージを貼付した位置(索端金具位置)でロープ張力を評価することとした。

5.2 落石径に関する検討

図-11には、延長9 m(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。図-11(a)より、落石径 D が小さく衝突速度 V が大きいほど重錘衝撃力は大きく、かつその作用時間は短くなる傾向が確認される。一方、図-11(b)に示す重錘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、その最大値は落石径 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、図-11(c)に示す落石衝突位置近傍のロープ張力を見ると、重錘衝撃力と類似の波形性状を示しており、重錘衝撃力が最大となる時刻でロープ張力も最大値を示す傾向にあることが分かる。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

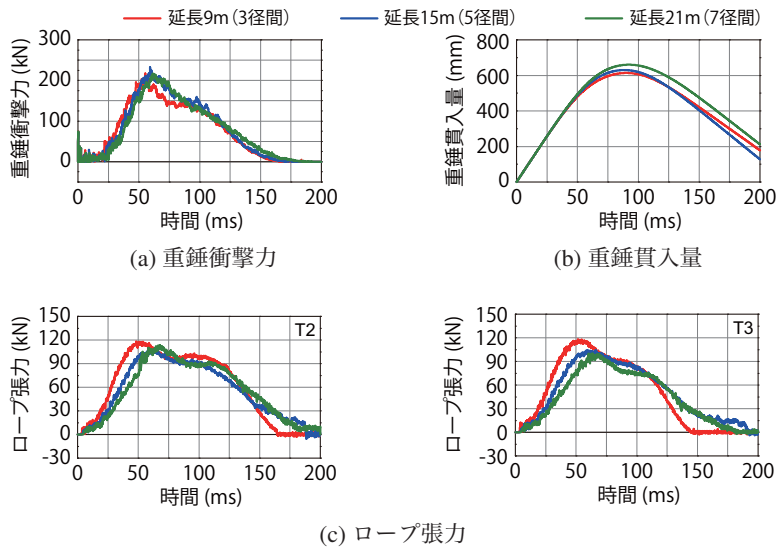


図-12 延長が異なる場合の時刻歴応答波形の比較 (落石径：800 mm，衝突位置：中央径間)

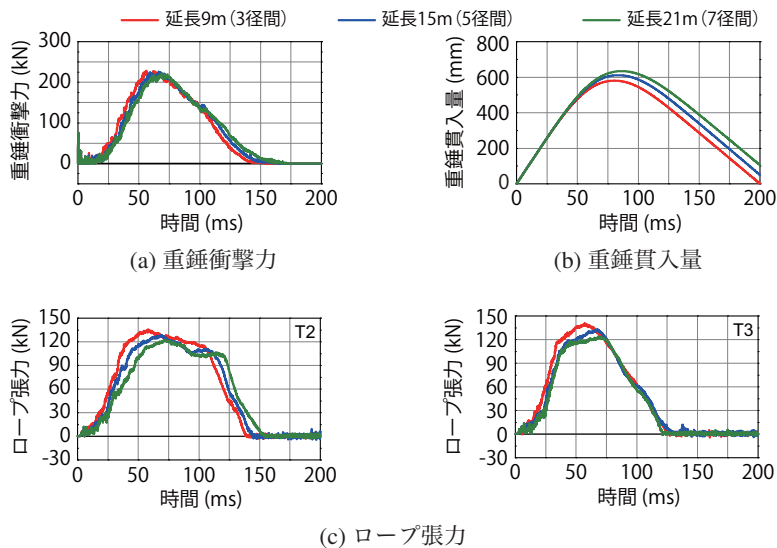


図-13 延長が異なる場合の時刻歴応答波形の比較 (落石径：800 mm，衝突位置：端径間)

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 118kN 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。

5.3 延長 (径間数) に関する検討

図-12 および図-13 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。

図-12(a) より、衝突位置を中央径間とした場合

の重錘衝撃力は、延長にかかわらず最大値およびその波形性状はほぼ同様であることが分かる。また、図-12(b) に示す重錘貫入量を見ると、延長 (径間数) が長いほど、最大値は大きくなる傾向にあるものの、延長 21m の場合で 660mm であるのに対し、延長 9m では 614mm であり、その差は 46mm (7%) と小さいことが分かる。

図-12(c) 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 9m 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および波形の立ち上がりも、延長が短いほうが早くなる傾向が確認される。

次に、端径間に衝突した場合について着目する。図-13(a) より、重錘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、図-13(b) に示す重錘

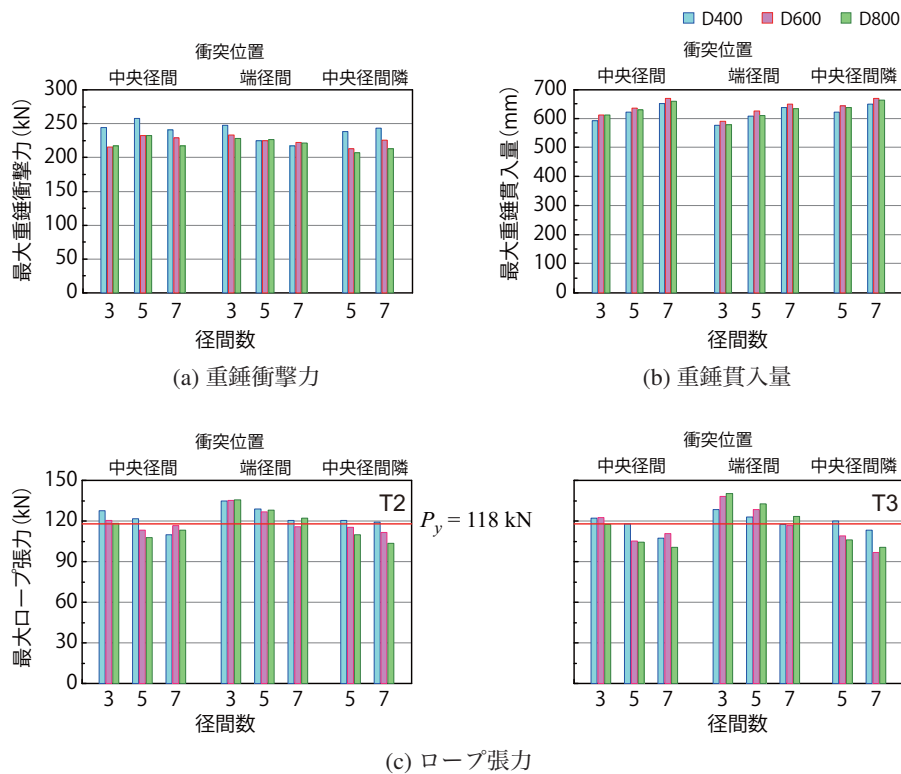


図-14 各種最大値の比較

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)が長いほど、最大値は大きくなる傾向にあることが分かる。

図-13(c)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9m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。

5.4 各種最大値の比較

図-14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。

図-14(a)に示す最大重錘衝撃力は、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。

図-14(b)に示す重錘貫入量を見ると、延長(径間数)が長いほど、その最大値は大きくなる傾向がある。これは、延長が長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。

図-14(c)に示すロープ張力は、衝突位置にかかわらず延長(径間数)が長いほど、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、中央径間に衝突される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。

6. まとめ

本研究では、実規模の従来型落石防護柵を用いた衝撃荷重実験を対象に、三次元弾塑性応答解析を実施し、解析手法の妥当性を実験結果との比較によって検証した。さらに、提案の解析手法を用いて、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) 提案の材料構成則および解析手法を用いることによって、実験結果の重錘衝撃力、重錘貫入量およびロープ張力をほぼ適切に再現可能である。また、中間支柱の軸方向ひずみについても概ね再現可能である。
- 2) 同一衝撃エネルギー下におけるパラメトリック解析結果より、同一延長(径間数)の場合には、最大重錘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。
- 3) 一方、延長(径間数)を変化させた場合には、最大ロープ張力は延長に影響を受け延長(径間数)が長いほど、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) 園田佳巨, 福永一基：実規模実験と数値解析によるワイヤリング落石防護柵の性能照査, 構造工学論文集, Vol. 64A, pp. 811-818, 2018.
- 3) 酒井啓介, 奥田峻, 田邊梨沙, 岸徳光, 小室雅人：高エネルギー吸収型落石防護柵（支柱強化型）の実物大衝撃荷重実験による性能検証, 構造工学論文集, Vol. 65A, pp. 946-954, 2019.
- 4) 小室雅人, 梅沢広幸, 奥田峻, 瓦井智貴, 岸徳光：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. 955-963, 2019.
- 5) (公社)地盤工学会：落石対策工の設計法と計算例, 2014.
- 6) (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.
- 7) 中村拓郎, 今野久志, 葛西聡, 小室雅人：従来型落石防護柵の捕捉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.
- 8) 小室雅人, 服部桃加, 今野久志, 荒木恒也：重錘落下を受ける従来型落石防護柵模型の衝撃応答解析, 土木学会論文集(応用力学), Vol. 74, No. 2, pp. L303-L313, 2019.
- 9) Hallquist, J. O.: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2018.
- 10) British Standards Institution, BS 5975: 1996 Code of practice for falsework, London, 1996.
- 11) 小室雅人, 西弘明, 今野久志, 荒木恒也, 田中優貴：ひし形金網の耐衝撃挙動に関する数値シミュレーション, 構造工学論文集, Vol. 63A, pp. 1084-1095, 2017.
- 12) EOTA: Guideline for European Technical Approval of Falling Rock Protection Kits (ETAG 027), 2008.

(2019年9月20日受付)

(2020年2月1日受理)