小変形落石防護柵の防護性能に関する数値解析的検討

Numerical study on impact resistance performance of low deflection barrier for rockfall protection

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 梅沢 広幸 (Hiroyuki Umezawa) 東亜グラウト工業株式会社 非会員 奥田 峻 (Shun Okuda) 室蘭工業大学大学院 学生員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawarai) 室蘭工業大学大学院 フェロー 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

我が国は,急峻な国土を有するために海岸線や山間部の 道路沿いには,落石などによる被害の抑制を目的に数多く の落石防護工が設置されている.近年では従来型落石防護 柵とは異なり,より大きな落石エネルギーに対して抵抗が できるように,ワイヤロープ端部などに緩衝装置を配置し た防護柵,いわゆる高エネルギー吸収型落石防護柵が開発 され,実用化されている^{1),2)}.

一方で、このような防護柵はワイヤロープ端部などに配置される緩衝装置などによって、落石衝突時のエネルギーを吸収する構造であることから、一般的には非常に大きな 変形を伴う.しかしながら、このように大きな変形が伴う 防護柵の場合には、その変形量によっては道路空間の安全 性に支障をきたす場合も報告されている.

このような背景より,著者らは 500 kJ 程度の落石エネ ルギーに対して,柵の変形量を2m以下とする新しいタイ プの落石防護柵を開発し,その防護性能を実物大衝撃荷重 載荷実験において検証してきた³⁾.また,併せて弾塑性衝 撃応答解析を実施し,解析結果と実験結果を比較すること で,防護柵の耐衝撃挙動を再現可能な解析手法の適用性に ついても検討してきた⁴⁾.しかしながら,実際に防護柵の 設置を考えた場合には,同実験で対象とした防護柵以外の 条件下においても,その防護性能に関する検討が必要であ るものと考えられる.

以上より本研究では,既往の研究より構築された有限要 素解析モデルを基本とし,支柱間隔やスパン数を変化させ た場合について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数値解析的に検討を行った. なお、本解析にはLS-DYNA⁵⁾を使用した.

2. 数值解析概要

2.1 実験概要

図-1には、既往の研究で対象とした落石防護柵試験体の 形状寸法を示している.試験体の形状寸法(柵高×延長) は、 $4.0 \times 15.0 \text{ m} (5 \text{ m} \times 3 \text{ ス} n \times)$ である.写真-1には、試 験体の各部材および全景を示している.写真-1(a)に示す 上弦材は、外径 $\phi_u = 141.3 \text{ mm},$ 板厚 $t_u = 9.53 \text{ mm}$ の鋼管を 使用し、支柱に取り付けられたプレート($t_p = 25 \text{ mm}$)と高 力ボルトを介して接続されている.ワイヤロープ,間隔保



図-1 試験体の形状寸法



(c) ワイヤロープ端部と緩衝装置(U ブレーキ)

(d) 全景

写真-1 試験体の概要と試験装置

総節点数 : 529,433 総要素数 : 349,080



図-2 有限要素モデル(5 m×3 スパン試験体)





持材および金網の結合には、写真-1(b)に示すUボルトお よび結合コイルを使用している.計14本設置されている ワイヤロープ端部には、写真-1(c)に示すようにシャック ルを介してロードセルあるいはUブレーキに接続し、さら に端末支柱に接続されている.ロードセルはロープ端部の 片側のみに、Uブレーキは全てのロープ端部に設置した. 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の緩和とエネ ルギー吸収を目的に設置した.支柱の基部はコンクリート 基礎に埋め込まれている.

実験は,EOTA 規格に準拠したコンクリート製多面体重 錘(外寸 960 mm,質量 1,499 kg)を速度 26.16 m/s でスパン 中央の高さ 2.25 m に衝突させることで実施した.

2.2 数值解析手法

(1) 数値解析モデル

図-2には、既往の研究で用いた試験体モデルの要素分割状況を示している。上弦材と支柱間の接続プレートには

表-1 鋼材の材料物性値

	降伏応力	弾性係数	ポアソン比
	f_y (MPa)	E_s (GPa)	V_{S}
鋼製支柱, 上弦材	355	200	0.2
間隔保持材	235	200	0.5



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.

境界条件は、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.なお、本数値解析におい て減衰および重力は考慮していない.

(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.

ワイヤロープに関しては、別途実施した引張試験結果か ら得られた荷重-伸び関係を用い、ロープ断面積および定 着長を考慮して、図-3(a)に示す応力-ひずみ関係に変換 し与えている.なお、前述のようにワイヤロープに関して は接触判定を精度よく行うために、固体要素を用いてモデ ル化しているが、その一部に引張力のみ伝達するケーブル 要素を一定間隔で配置することにより、変形に伴う曲げ成 分を排除することとした.

図-3(b)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1m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 すべりが発生すると、除荷時においても変位は戻らず残留 変位が生じるが、本数値解析では載荷時と同じ過程で除荷 する非線形弾性体モデルを用いている.

鋼製支柱,上弦材および間隔保持材に関しては,降伏後



(a) 5m × 5 スパン



(b) 10m × 3 スパン図-5 有限要素モデル

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 v_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.また、コンクリート基盤、重錘に関しては弾性体 (弾性係数 $E_c = 20$ GPa、ポアソン比 $v_s = 0.167$)とした.

2.3 数値解析手法の妥当性

図-4には、重錘の水平方向速度、貫入量(水平方向)および T6(高さ h = 2350 mm)におけるロープ張力の時刻歴応 答波形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.なお、時間軸は重錘が防護柵に衝突した時刻を零としている.

図-4(a)に示す水平方向速度を見ると,重錘衝突後から 約90ms 程度までは実験結果と数値解析結果は概ね一致し ていることが分かる.図-4(b)に示す貫入量に着目すると, 数値解析結果は実験結果の立ち上がりをほぼ適切に再現し ている.最大貫入量に関しては,数値解析結果は実験結果 と比較して若干大きいものの,ほぼ適切に再現可能であ る.図-4(c)に示すロープ張力に着目すると,重錘衝突位 置近傍のT6に関しては,数値解析結果が実験結果よりも 40kN 程度張力が低く評価されている.これは,本解析で はUブレーキの降伏すべり荷重を75kN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設定値と 必ずしも一致しないことによるものと推察される.

以上より,ロープ張力を過小評価する傾向にあるもの の,重錘の速度や貫入量など概ね再現可能であることがわ かる.

支柱間隔等を変化させた場合の動的応答特性に関す る検討

ここでは、図-5に示すように支柱間隔やスパン数が異



図-6 重錘貫入量に関する時刻歴応答波形の比較

表-2 最大ロープ張力の比較

ワイヤ	最大ロープ張力(kN)			
ロープ	5m imes 3sp	5m imes 5sp	$10m \times 3sp$	
T2	84.1	76.2	86.9	
T4	108.9	110.3	104.5	
T6	117.5	118.2	118.8	
T8	135.1	122.3	117.3	
T10	96.1	92.6	89.7	
T12	64.2	55.5	68.5	
T14	62.6	59.7	65.3	



なる場合の動的応答特性について,既往の研究による有 限要素モデルを修正する形で三次元弾塑性衝撃応答解析 を実施した.すなわち,1)スパン数を3から5スパンに変 化させた5m×5スパン(柵長:25m)および2)支柱間隔を 5mから10mに変化させた10m×3スパン(柵長:30m)の 防護柵を対象に数値解析的な検討を行った.なお,柵高は 4mと実物大実験と同一とした.また,構成部材の材料構 成則,境界条件および重錘の質量と速度およびその位置に 関しては前節と同一の条件とした.

3.1 重錘貫入量

図-6には、重錘貫入量(水平方向)の時刻歴応答波形について、3ケースの数値解析結果を比較して示している. 図より、5m×3スパンと5m×5スパンの数値解析結果を比 較すると、最大貫入量に到達するまでの応答性状はほぼ等



図-8 各解析ケースにおける最大変位時のミーゼス応力分布および変形状況比較

しいことが分かる.これより,支柱間隔を同一としてスパン数を変化させる場合には,類似の捕捉性能を有するものと考えられる.

一方,10m×3スパンの数値解析結果に着目すると,最 大重錘貫入量は2,333mmを示しており,支柱間隔が5m の場合の最大変形量(1,684mm)と比較して,貫入量は1.4 倍程度大きい.したがって,支柱間隔を2倍の10mとす る場合には,最大変形量が2.0mを超えることから,防護 柵の最大変形量を抑えるためには支柱間隔を狭くする必要 があるものと考えられる.

3.2 ロープ張力

表-2には、数値解析結果より得られた最大ロープ張力を 一覧にして示している.ここでは、実験時にロードセルが 設置された7本のワイヤロープの結果を比較して示してい る.また、図-7には、それらの値をグラフ化したものを 示す.

表および図より,5m×3スパンと5m×5スパンの結果を 比較すると,各ロープにおいて若干の差異が確認されるも のの,全体的に見るとほぼ同様な値を示していることが分 かる.これは,前述の重錘貫入量波形が両者で類似の応答 特性を示していることからも理解できる.

また,支柱間隔を2倍とした10m×3スパンについても, 支柱間隔が5mの場合と顕著な差は確認されない.これ は,ワイヤロープ端部に設置した緩衝構造(Uブレーキ)が 機能を発揮することによって,支柱間隔にかかわらずロー プに作用する最大張力はほぼ等しくなることを示唆してい る.なお,いずれの解析においてもUブレーキのすべり量 は最大でも570mm以下であり,限界すべり量(1,000mm) 以下であることを確認している.

3.3 最大変位時のミーゼス応力分布および変形状況

図-8には、各解析ケースにおける最大重錘貫入量時にお ける中央スパン部の Mises 応力分布および変形性状を示し ている.図-8(a) に示す 5m×3 スパンの場合には、中間支 柱基部に降伏応力 (*f*_y = 355 MPa) を超える応力が発生して いることが確認される.また、上弦材には 200 MPa 程度の 応力が発生している.

図-8(b) に示す 5m×5 スパンの場合には,前述の重錘貫 入量からもわかるように,5m×3 スパンの場合と同様な応 力分布および変形状況を示していることが分かる.

図-8(c) に示す 10m×3 スパンの場合には,他の2つの ケースと比較して,柵全体の変形が大きく,また上弦材に 作用する応力も大きくなっていることがわかる.また,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 が確認できる.

4. 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.

- 支柱間隔が同一でスパン数のみを増やした場合には、 スパン数にかかわらずその動的応答特性は類似の傾向 を示す。
- 一方、スパン数が同一で支柱間隔を大きくする場合には、支柱間隔が小さい場合と比較して、最大重錘貫入量が大きくなる傾向が見られるものの、最大ロープ張力に関しては支柱間隔の影響は小さい。

参考文献

- 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.
- Gentilini, C., Ubertini, F., Govoni, L., Gottardi, G, and Miranda, S.: Modelling of falling rock protection barriers, *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 11(4), pp. 126-137, 2011.
- 石川芳治,酒井啓介,奥田峻,小室雅人:小変形バリアの機能と特徴,平成30年度砂防学会研究発表会概要集,pp. 75-76,2018.
- 堅田恭輔,小室雅人,奥田峻,酒井啓介,栗橋祐介:小変 形落石防護柵の動的挙動に関する衝撃応答解析,土木 学会北海道支部論文報告集,第74号,A-20(CD-ROM), 2018.
- Hallquist, J. O.: LS-DYNA User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2018.