

小変形バリアの防護性能に及ぼす衝突位置の影響

Effect of collision position on impact resistance performance of low deflection barrier

室蘭工業大学大学院
室蘭工業大学大学院
東亜グラウト工業株式会社
東亜グラウト工業株式会社
室蘭工業大学大学院

○正 員 小室 雅人 (Masato Komuro)
学生員 瓦井 智貴 (Tomoki Kawai)
梅沢 広幸 (Hiroyuki Umezawa)
奥田 峻 (Shun Okuda)
名誉会員 岸 徳光 (Norimitsu Kishi)

1. はじめに

近年、異常気象などに起因する落石規模の大型化に伴い、従来型落石防護柵よりも大きな落石エネルギーを捕捉可能な高エネルギー吸収型落石防護柵が開発、実用化されている^{1),2)}。著者らも、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実験において検証してきた³⁾。また、併せて同実験を対象に弾塑性衝撃応答解析を実施し、数値解析結果を実験結果と比較することによって、解析モデル(手法)の妥当性を確認した⁴⁾。

一方、上記の数値解析的検討では、落石対策便覧⁵⁾に基づき、落石の衝突位置を中央径間に限定してきた。しかしながら、実設計では落石が衝突することを想定していない端径間においても、落石衝突の可能性があることから、その防護性能を把握しておくことは安全性を担保する上で重要であるものと考えられる。

このような背景より、本研究では、既往の研究によって実験結果の高い再現性が確認された有限要素解析モデル⁴⁾を基本とし、端径間に落石が作用する場合を想定した数値解析を実施し、その防護性能の評価を行った。さらに、既往の中央径間載荷の結果と比較することで、落石衝突位置が防護性能に及ぼす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-DYNA⁶⁾を使用した。

2. 数値解析概要

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、4.0×15.0m (5m×3スパン)である。防護柵は、鋼管の内部にH形鋼を配置した鋼製支柱の他、それらをつなぐ上弦材、落石を捕捉するためのワイヤロープと高強度金網、およびロープ間の落石すり抜けを阻止するための間隔保持材から構成される。ワイヤロープにはφ18を、金網には素線径4.0mmを用いた。上弦材は鋼管を使用し、支柱に取り付けられたプレートと高力ボルトを介して接続されている。ワイヤロープ、間隔保持材および金網の結合には、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、シャックルを介してUブレーキに接続し、さらに端末支柱に接続されている。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。試験体の詳細に関しては、文献3)

を参照されたい。

なお、防護性能の検証実験では、EOTA規格に準拠したコンクリート製多面体重錘(外寸960mm、質量1,499kg)を速度26.2m/sでスパン中央の高さ2.25mに衝突させることで実施した。写真-1には、検証実験における重錘最大貫入時の変形状況を示している。

2.2 数値解析手法

(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シェル要素を、Uブレーキには2節点バネ要素を用いた。また、その他の要素にはすべて8節点固体要素を用いた。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、節点固体要素間に圧縮力を伝達しないケーブル要素を挿入した。また、ケーブル要

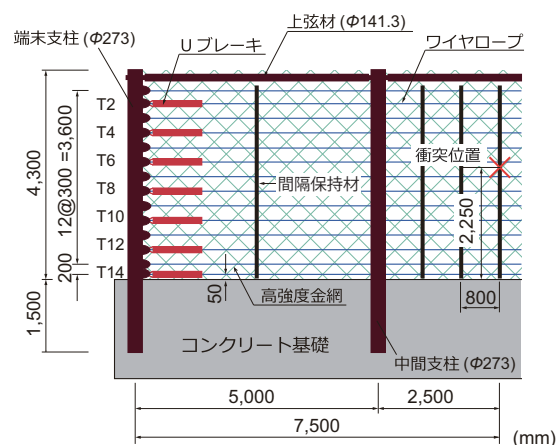
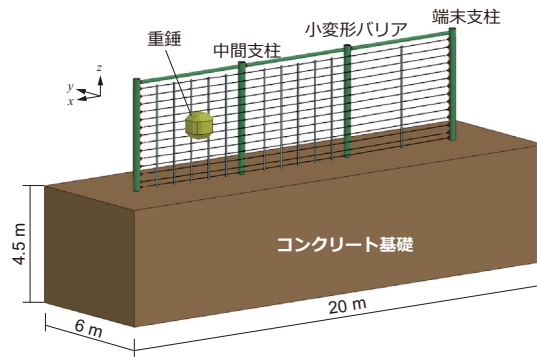


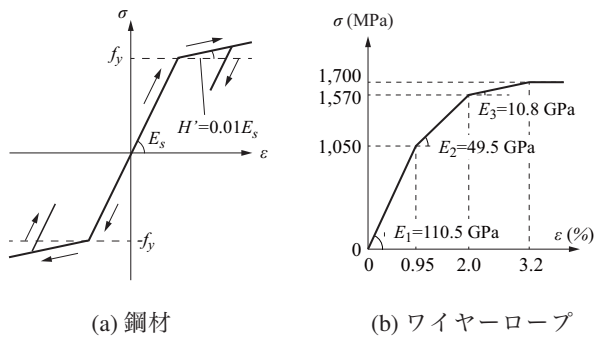
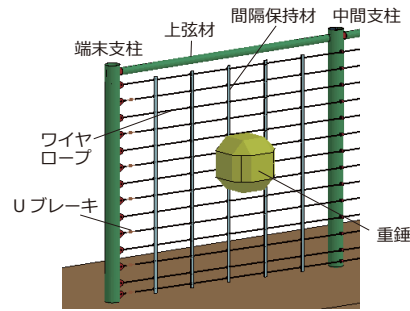
図-1 試験体の形状寸法



写真-1 検証実験における最大重錘貫入時の変形状況



図－2 有限要素モデル



図－3 材料物性モデル

表－1 鋼材の材料物性値

	降伏応力 f_y (MPa)	弾性係数 E_s (GPa)	ポアソン比 ν_s
鋼製支柱, 上弦材	355	200	0.3
間隔保持材	235		

素はUボルトや間隔保持材との接触を避けるように500mm間隔で配置した。ケーブル要素はワイヤロープと同じ断面とした。なお、本解析では、1) 防護柵の変形状やロープ張力に着目すること、2) 重錘を間隔保持材に衝突させていること、3) 実験で重錘のすり抜けが起きていないこと等から、煩雑さを避けるため、金網のモデル化は省略した。

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。また、実構造と同一条件となるように、重錘と間隔保持材および近接する部材間には、接触・剥離を伴う接触面(摩擦係数:0)を定義した。重錘形状、質量および衝突速度に関しては、検証実験と同じ条件となるように設定した。

重錘衝突位置は、端径間の径間中央とし、その高さは検証実験と同じく基部から高さ2.25mとした。解析では重錘に実測速度($V = 26.2$ m/s)を付加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鋼部材(鋼製支柱、上弦材、間隔保持材)およびワイヤロープの応力－ひずみ関係を示している。

図－3(a)に示す鋼材には、降伏後の塑性硬化を考慮し

図－4 Uブレーキの荷重－すべり関係

たバイリニア型の等硬化則モデルを適用することとし、塑性硬化係数 H' は弾性係数の1%と仮定した。また、各構成部材の降伏応力 f_y 、弾性係数 E_s 、ポアソン比 ν_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。

ワイヤロープに関しては、別途実施した引張試験結果(破断強度245kN)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(b)に示す応力－ひずみ関係に変換し与えた。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－4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。静载荷実験結果を参考にすべり荷重を75kN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、最大すべり量は1mとなるように設定した。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。ここでは、その現象を数値解析的に再現するために、除荷時には変位が戻らず圧縮力を伝達しないモデルを用いた。

その他のコンクリート基盤や重錘に関しては、実験終了後に損傷が確認されなかったことから、弾性体(弾性係数 $E_c = 20$ GPa、ポアソン比 $\nu_s = 0.167$)と仮定した。

3. 数値解析結果

図－5には、重錘の水平方向速度および貫入量(水平方向)に関する時刻歴応答波形を重錘衝突位置で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

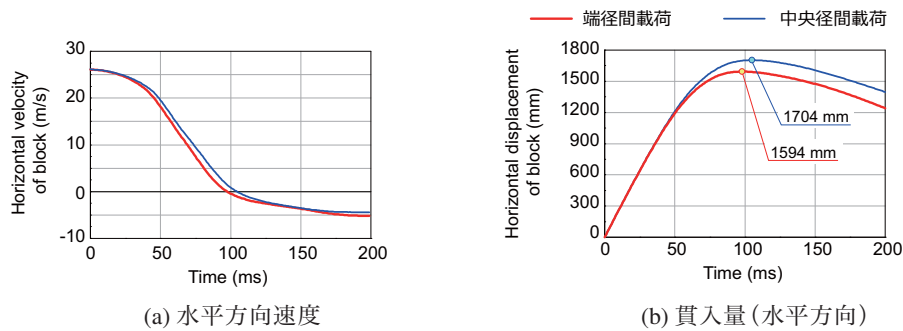


図-5 重錘の水平方向速度および貫入量(水平方向)に関する時刻歴応答波形の比較

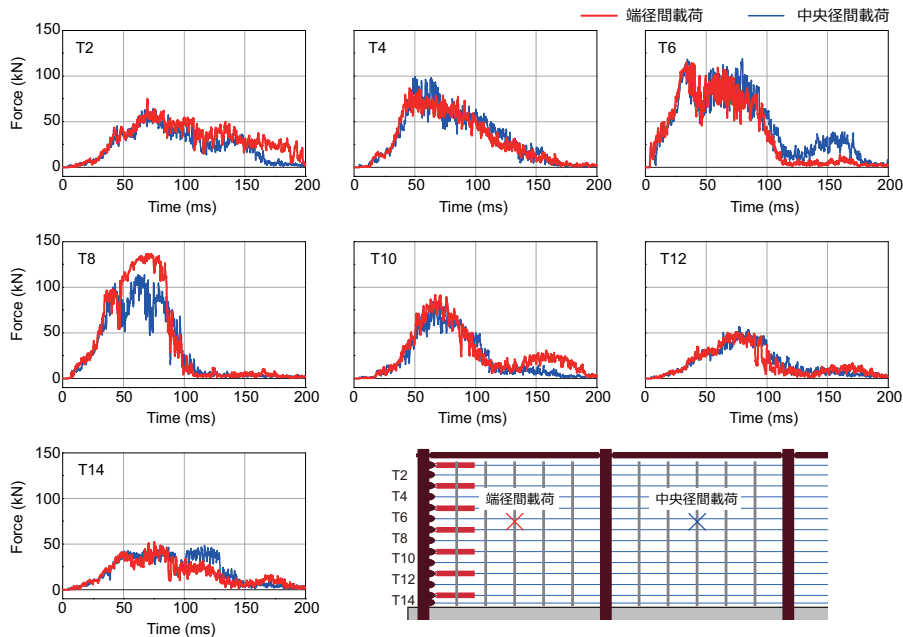


図-6 ロープ張力に関する時刻歴応答波形の比較

基準としている。なお、中央径間に衝突させた場合(中央径間载荷)については、既往の解析結果⁴⁾である。

図-5(a)に示す水平方向速度を見ると、重錘衝突後から徐々に減少し、衝突位置にかかわらず約100ms程度で速度が0となり、リバウンドに移行していることが分かる。なお、端径間载荷と中央径間载荷を比較すると、前者の方が若干速度の低下が大きくなっている。

図-5(b)に示す貫入量に着目すると、衝突位置にかかわらず、重錘衝突後の貫入量の立ち上がりは両者で一致していることが分かる。最大貫入量に関しては、端径間载荷の場合は約1.6m、中央径間载荷の場合は約1.7mとなり、前者の方が若干小さい。

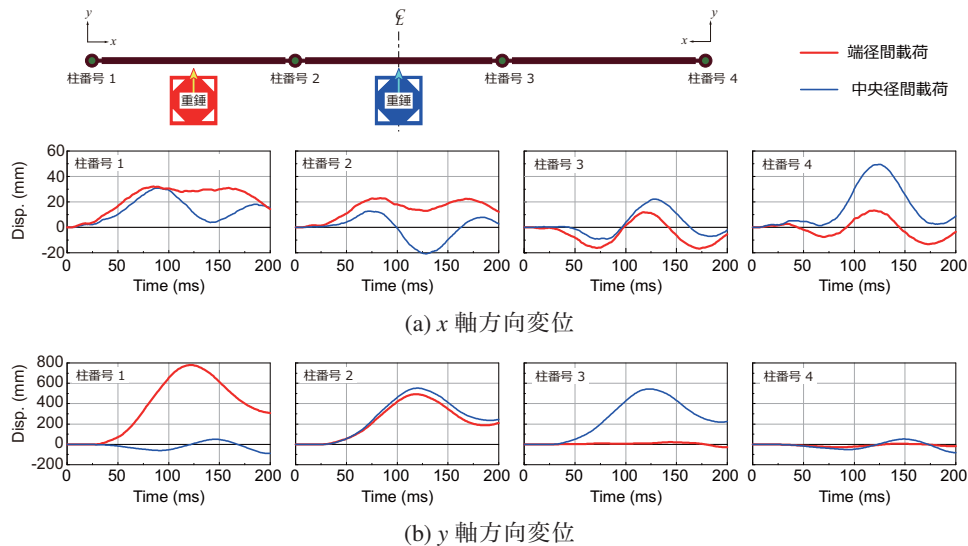
図-6には、各ワイヤロープに作用する張力の時刻歴応答波形について衝突位置による結果を比較して示している。図より、重錘衝突位置近傍のT8を除き、他のロープ張力は両者でほぼ類似の応答波形を示していることが分かる。これより、载荷位置にかかわらず、ロープにはほぼ同程度の張力が作用することが確認される。T8において端径間载荷において50ms以降に張力が増加する傾向が確認されるが、この要因については特定できていない。なお、いずれの場合もUブレーキのすべり量は、限界すべり量

(1m)以下であることを確認している。

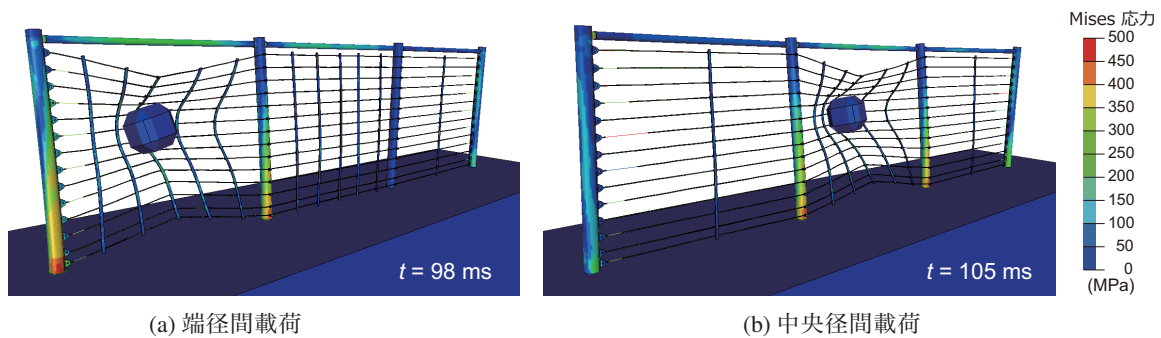
図-7には、中間および端末支柱天端の2方向(x,y軸方向)変位に関する時刻歴応答波形を示している。図-7(a)より、衝突直角(x軸)方向変位を見ると、衝突位置にかかわらず、重錘衝突後に端末支柱はいずれも内側に変形することが分かる。これは、重錘が間隔保持材に衝突することによって、衝突位置近傍のワイヤロープを介して端末支柱に引張力が作用することによるものと考えられる。ただし、その変形量は最大でも50mm程度と小さい。

図-7(b)に示す衝突(y軸)方向変位に着目すると、中央径間载荷の場合には、衝突位置を中心にほぼ左右対称の変形を示していることが分かる。中間支柱(柱番号2,3)における最大変位量は約550mm程度である。一方、端径間载荷の場合には、衝突位置に近い端末支柱(柱番号1)が最も大きく変形している。また、衝突位置に近い中間支柱(柱番号2)においても中央径間载荷と同程度の変形が確認される。しかしながら、それよりも離れた支柱(柱番号3,4)においては、変形がほとんど生じていない。なお、最大変形量は端末支柱(柱番号1)において780mm程度である。

図-8には、最大重錘貫入量到達時における防護柵の変形状況とMises応力分布を示している。図-8(a)に示す



図－7 支柱天端変位に関する時刻歴応答波形の比較



図－8 最大重錘貫入量到達時における変形状況とMises 応力分布

端径間载荷の場合には、衝突側の端部支柱が大きく後方に变形している様子が窺える。また、端末支柱および中間支柱の基部近傍では降伏応力 ($f_y = 355 \text{ MPa}$) を超える応力が発生していることが確認される。一方、重錘衝突位置から離れた中間支柱には大きな変形や応力は見られず、衝突位置近傍の2つの支柱の働きによって重錘を捕捉していることが確認できる。

図－8(b)に示す中央径間载荷の場合には、重錘衝突位置の両側の中間支柱が変形するとともに基部近傍において、降伏応力 ($f_y = 355 \text{ MPa}$) を超える応力が発生していることが分かる。

また、上弦材に着目すると、端径間载荷の場合には、衝突径間および隣接径間においても 200 MPa を超える応力が生じているのに対し、中央径間载荷の場合には、衝突径間のみに大きな応力が発生しており、衝突径間によって上弦材に作用する応力は異なることも確認できる。

4. まとめ

- 1) 端径間载荷における最大重錘貫入量は、中央径間载荷の場合よりも若干小さくなる傾向を示す。また、ロープ張力は载荷位置にかかわらずほぼ同様な性状を示す。なお、いずれの場合も衝突径間近傍の支柱基部には降伏応力を超える応力が発生し、塑性化に至る。
- 2) これより、落石が端径間に衝突した場合においても、

中央径間に衝突した場合と同程度の防護性能を有することを数値解析的に確認した。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.
- 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)の実物大衝撃荷重载荷実験による性能検証, 土木学会構造工学論文集, 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, 土木学会構造工学論文集, 65A, pp. 955-993, 2019.
- 5) 日本道路協会: 落石対策便覧, 2017.
- 6) Hallquist, J. O.: *LS-DYNA User's Manual*, Livermore Software Technology Corporation, 2018.