

ワイヤロープ支持式落石防護柵の実規模重錘衝突実験

Full scale experiments of falling rock protection fence supported by wire rope

高橋利延*, 橋口寛史*, 堀口俊行**

Toshinobu Takahashi, Hiroshi Hashiguchi, Toshiyuki Horiguchi

*東京製綱株式会社, エンジニアリング事業部(〒103-8306 東京都中央区日本橋3-6-2)

**博(工), 防衛大学校准教授, システム工学群建設環境工学科(〒239-8686 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

Key Words: falling rock protection structure, falling rock protection fence, full scale experiments, falling weight impact experiments

キーワード: 落石防護構造物, 落石防護柵, 実規模実験, 重錘衝突実験

1. 緒言

わが国は急峻な地形が多く、地震や火山活動も活発であり、加えて台風や豪雨、豪雪に多く見舞われる環境にある。一方で、交通需要の増加や都市開発により、困難な地形や地質条件を克服して交通網が拡大したため、落石災害が多く発生している。近年、落石対策の一方法として、ワイヤロープを用いた柵構造によって落石の道路への侵入を防止する落石防護柵が建設されている。特に、写真-1に示すように支柱頭部をワイヤロープで支持した構造は、ワイヤロープ支持式落石防護柵¹⁾と呼ばれ、従来の片持ち構造の柵と比較して支柱および支柱の基礎に生じる荷重が小さくなるため、部材が軽量となり、経済性、施工性に優れた特長がある。このような新しい構造は、衝撃応答特性の把握および性能照査の手法として、実規模の実験や解析による性能照査^{2)~4)}が行われている。また、実験の性能照査は、落石対策便覧¹⁾に最低限統一すべき項目として、実験条件や計測項目等の基準が示されている。そのため、新しい構造物における性能評価に関しては、可能な限り実スケールでの照査を行うことが



写真-1 ワイヤロープ支持式落石防護柵

必要であり、最大衝撃荷重を予め把握し、基礎データとして収集することが重要である。

そこで本研究は、実規模のスケールでワイヤロープ支持式落石防護柵の重錘衝突実験を行い、最大衝撃荷重を計測し、構造物の適用性を検討するものである。その際、性能照査を行い2種類の防護柵が受けた衝撃荷重の応答を評価する。

2. 実験条件

2.1. 供試体

図-1に示すように実験供試体は、横ロープ、間隔保持材(横ロープ間の開き防止部材)、および金網からなる支持面を4本の支柱で支えた構造である。各支柱は、下端を架台にヒンジ結合、頭部を吊ロープで支持しており、左右の端末支柱は、側方からもそれぞれ4本のサイドロープで支持している。また、吊ロープおよびサイドロープの端部は架台に固定している。なお、図-1の側面図に示すように、本実験では後述の試験方法の都合上、供試体の支持面が水平となるようにして架台に設置した。

供試体は、使用部材の異なる2タイプ(それぞれ50kJタイプ、100kJタイプと呼ぶ。)を用いており、それぞれの使用部材は図-1に示すとおりである。また、供試体の柵高は2.5m、延長は18.0m(支柱間隔6.0m)および9.0m(支柱間隔3.0m)である。表-1に、上記4ケースの供試体仕様を示す。

2.2 重錘

写真-2に示すように、本実験では多面体のコンクリート製重錘を使用し、実験の前後に質量を測定した。重錘の質量 m については、式(1)により求まるエネルギー E が所定のエネルギー(Case1, Case2では50kJ、

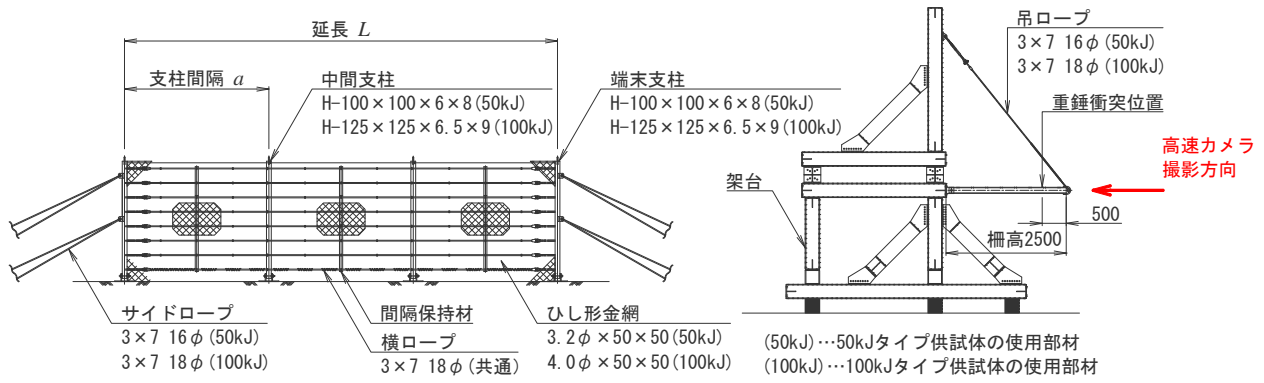


図-1 供試体の平面図および側面図

表-1 実験ケースごとの供試体仕様

項目	Case1	Case2	Case3	Case4
供試体タイプ	50kJタイプ		100kJタイプ	
柵高	2.5m			
延長 L	18.0m	9.0m	18.0m	9.0m
支柱間隔 a	6.0m	3.0m	6.0m	3.0m

表-2 測定項目

項目	測定方法
各ロープ張力	ロープ端部のテンションロッドにより測定
重錘衝突速度	正面から撮影した高速カメラの画像により確認
支持面張出量	同上
支持面残存高さ	測量用アルミスタッフにより測定
損傷状況	目視にて確認



写真-2 重錘 (左 50kJ 用, 右 100kJ 用)

Case3, Case4 では 100kJ) 以上となるように設定したもので、実測値は 50kJ 用が 0.18ton、100kJ 用が 0.35ton である。単位体積重量はいずれも 2.3ton/m³ とした。

$$E = 1/2 \times m \times v^2 \quad (1)$$

2. 3. 実験方法

本実験は、写真-3 のように、重錘をクレーンで落差 33.0m の地点まで持ち上げたのち、空圧式の離脱装置を用いて自由落下させ、供試体に衝突させた。ここで、重錘の落差 h については、衝突速度 v が式 (2) を満たすように値を決定し、重錘の衝突目標位置は、柵の延長方向には全長の中央、柵の高さ方向には柵頭部より 0.5m 下方の位置とした。

$$v = \sqrt{2 \times 9.8 \times h} \geq 25.0 \text{ m/sec} \quad (2)$$

表-2 に、本実験での測定項目を示す。高速カメラにより図-1 の側面図に示す方向から重錘衝突前後の挙動を撮影し、重錘の衝突速度および供試体の張出量を測定した。また、各ワイヤロープの端部にテンションロッドを取り付け、ロープ張力を測定した。図-2 に、張力の測定位置を示す。横ロープは、上方から見て右側端部に接続した索端金具にロッドを取り付けており、測点番号は最下段から上段に向かってそれぞれ横 1 から横 8 とした。サイドロープおよび吊ロープは、架台側の端部に接続したターンバックルにロッドを取り付けており、測点番号は、図-2 に示すとおりである。

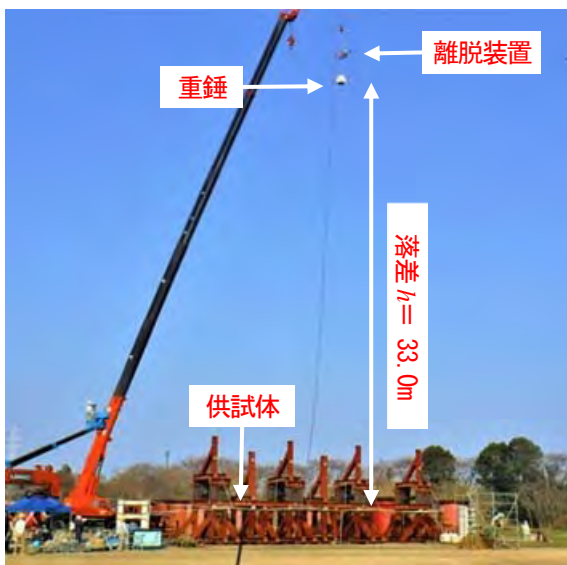


写真-3 実験状況全景

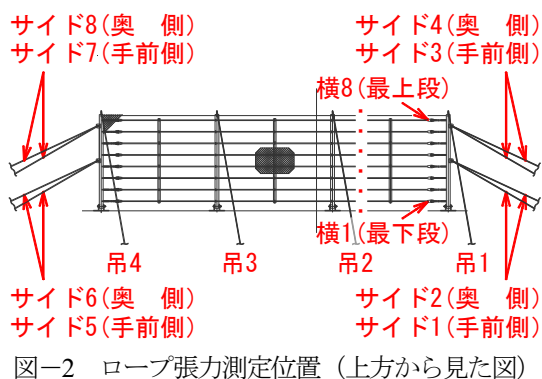


表-3 実験結果

項目	Case1	Case2	Case3	Case4
重錘捕捉	○	○	○	○
衝突速度	25.7m/s	25.7m/s	25.7m/s	26.1m/s
衝突エネルギー	59kJ	59kJ	116kJ	119kJ
支持面張出量	1.1m	1.1m	1.3m	1.2m



写真-4 重錘衝突後の供試体挙動

3. 実験結果

表-3 に、実験の結果を示す。いずれのケースも重錘を捕捉しており、重錘の衝突速度は 25.0 m/sec 以上であることを確認した。衝突エネルギーは式 (1) により求めた値であり、目標値 (Case1, Case2 では 50kJ, Case3, Case4 では 100kJ) より 2 割ほど大きい値であった。また、重錘の衝突位置は Case1, Case4 ではおおむね目標通りの位置 (柵上端から 0.5 m, 横 7 付近) に衝突したが、Case2, Case3 では目標の 0.25 m 程度下方 (柵上端から 0.75 m, 横 6 付近) に衝突した。その他の結果は以下に示す。

3. 1. 挙動応答

写真-4 に重錘衝突後の供試体の挙動を示す。ここで、写真中の t は重錘衝突直後からの時刻である。

Case1 では時刻 0.03sec で支持面の張出量が最大値 1.1m となった。この際、中間支柱は内側下方に引張られているが、大きな変形は見られなかった。その後、0.04sec に降は支持面が重錘を押し戻す挙動となった。

Case2 では時刻 0.02sec において両側の中間支柱において変形が見られた。その後、吊 2 側の中間支柱には大きな変化は見られなかったが、吊 3 側の中間支柱は時刻経過とともに変形が大きくなり、0.04sec で最大となった。



写真一五 重錘衝突後の供試体損傷状況

また、支持面は時刻 0.03sec で最大張出量 1.1m に達したのち、0.04sec まで張出量を維持し、0.05sec 以降は重錘を押し戻す挙動となった。

Case3 では時刻 0.03sec において吊 3 側の支柱において変形が見られた。その後、時刻経過とともに変形が大きくなり、0.06sec で吊 3 側中間支柱の変形が最大となった。また、支持面は時刻 0.04sec で最大張出量 1.3m に達したのち、0.05sec まで張出量を維持し、0.06sec 以降は重錘を押し戻す挙動となった。

Case4 では時刻 0.02sec において両側の中間支柱に変形が見られた。その後、時刻経過とともに変形が大きくなり、0.04sec で最大となった。また、支持面は時刻 0.04sec で最大張出量 1.2m に達したのち、0.05sec まで張出量を維持し、0.06sec 以降は重錘を押し戻す挙動となった。

3. 2. 損傷状況

写真一五 に、各ケースにおける重錘衝突後の供試体の損傷状況を示す。

Case1 では、写真で見て右側の端末支柱が内側に張り出すように弓なりに変形しており、衝突箇所の金網およびワイヤロープには塑性変形が生じたが、金網の破網やロープの破断、索端金具の抜けは見られなかった。阻止面の残留高さは 2.3 m (初期柵高の 2.5 m の 92 %) であった。なお、重錘衝突後に重錘を大きく跳ね返しており、この条件下ではまだ余力があるものと考えられる。

Case2 では、両側の端末支柱が内側に反るように弓なりに変形し、写真で見て左側の中間支柱は面外奥側に張り出す方向に「く」の字に変形し、右側の中間支柱は面外奥側に弓なりに変形した。衝突箇所の金網およびワイヤロープには塑性変形が生じ、金網には素線 4 本分の範囲で破網が見られた。ワイヤロープには破断や、索端金具の抜けは見られなかった。阻止面の残留高さは 2.2m (初期柵高の 88 %) であった。

Case3 では、両側の端末支柱が内側に反るように弓なりに変形し、写真で見て左側の中間支柱が面外奥側に張り出す方向に「く」の字に変形した。中間支柱はほぼ直角に変形していたが、支柱頭部を支持する構造としていたことで、全体的な構造の崩壊には至らなかった。また、衝突箇所の金網およびワイヤロープに塑性変形が見られたが、金網の破網やロープの破断、索端金具の抜けは見られなかった。阻止面の残留高さは 2.0 m (初期柵高の 80 %) であった。

Case4 では、両側の端末支柱が内側に反るように弓なりに変形し、両側の中間支柱が面外奥側に張り出す方向に「く」の字に変形した。中間支柱は Case3 の左側中間支柱と同様に、ほぼ直角に変形していたが、全体的な構造の崩壊には至っていない。また、衝突面の金網およびワイヤロープに塑性変形が見られたが、金網の破網やロープの破断、索端金具の抜けは見られなかった。阻止面の残留高さは 2.1 m (初期柵高の 84 %) であった。

表-4 最大張力 (単位: kN)

箇所	Case1	Case2	Case3	Case4	箇所	Case1	Case2	Case3	Case4
横 1	11.8	14.5	21.0	22.6	サイド3	89.4	31.1	55.3	95.8
横 2	3.47	7.25	10.6	18.5	サイド4	110	37.6	73.6	91.8
横 3	3.59	5.23	15.0	14.1	サイド5	34.3	59.0	99.4	60.9
横 4	6.54	11.8	12.4	12.0	サイド6	欠測	欠測	112	52.4
横 5	12.8	32.6	50.0	14.1	サイド7	87.6	30.1	55.2	104
横 6	17.8	96.1	125	88.3	サイド8	88.8	38.9	70.1	96.6
横 7	121	7.85	43.2	121	吊 1	8.09	2.02	4.18	21.7
横 8	70.4	60.1	66.1	97.2	吊 2	69.7	47.2	73.7	102
サイド1	26.5	60.9	107	48.5	吊 3	欠測	48.2	80.0	97.2
サイド2	51.6	61.1	104	63.3	吊 4	4.26	欠測	9.13	13.2

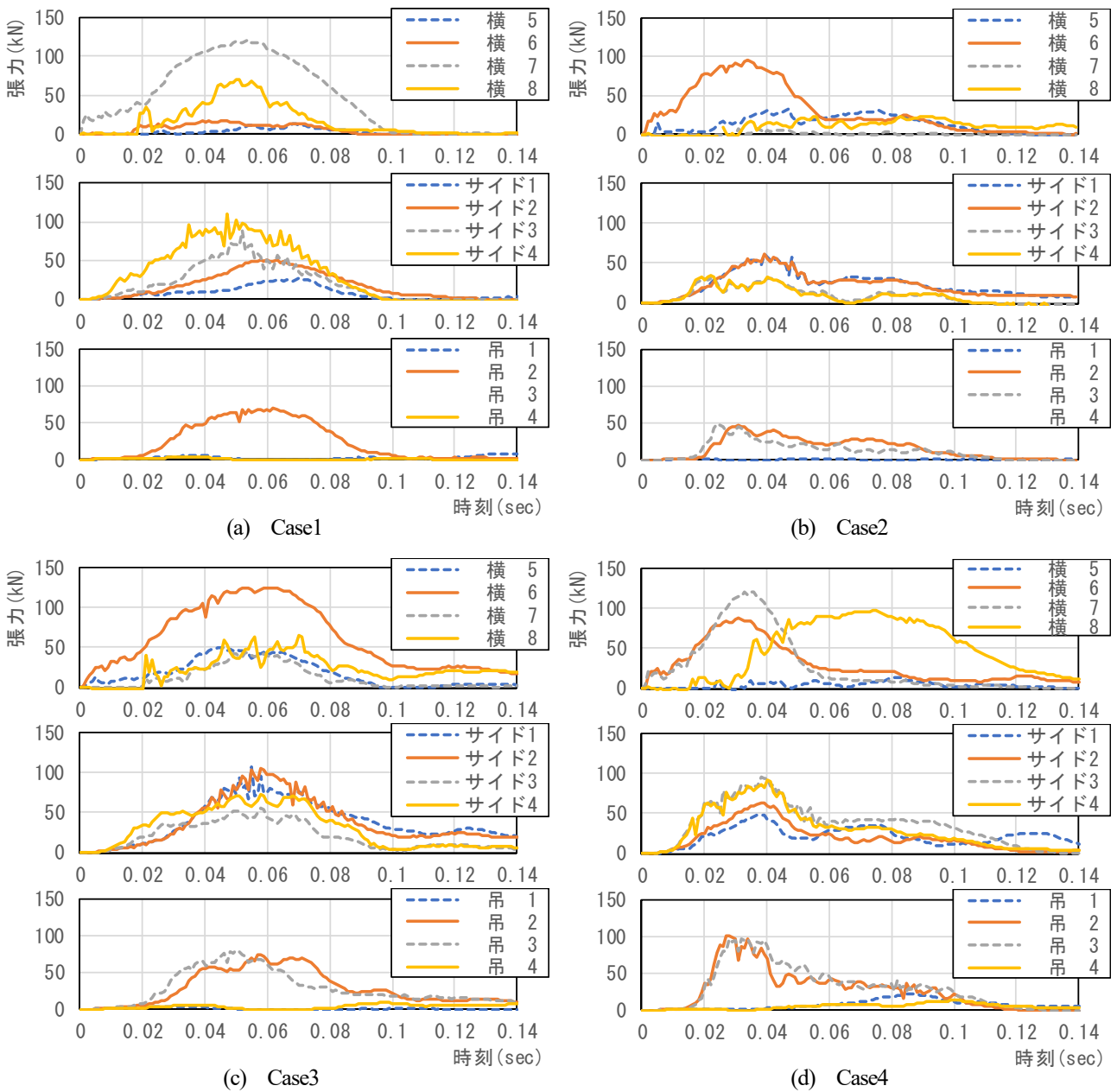


図-3 張力の時刻歴応答

3. 3. 張力応答

表-4 に各ケースのワイヤロープの張力応答の最大値を、図-3 に各ケースの張力の時刻歴応答を示す。なお、図-3 の横ロープについては荷重の小さい下部 4 本を省略し、サイドロープについては左側と右側で同様の応答であったため、左側の 4 本を省略している。

張力の応答について、まず横ロープに着目すると、各ケースで応答に差があり、張力が最も大きくなったロープは Case1, Case4 では横 7, Case2, Case3 では横 6 であった。これらのロープは前述のようにそれぞれ重錘が直撃したロープに該当することから、重錘衝突位置がずれたことにより、応答波形に影響が生じたものと考えられる。また、最大張力の値は Case1, Case3, Case4 が 121~125kN (3×7 18φ の降伏張力 118kN の 103%~106%)、Case2 が 96kN (降伏張力 118kN の 81%) であり、表-1 に示した供試体タイプと最大張力の値の相関は確認できなかった。これは、写真-4 で示したように、横ロープ荷重のピーク付近で支柱が塑性変形したことにより、エネルギーが吸収されるとともに、横ロープの固定状況が変化し、ロープ張力が低減されたものと考えられる。

次に、サイドロープに着目すると、いずれのケースもピーク荷重の発生時刻が横ロープと近い時刻となっていた。また、横ロープと同様に重錘の衝突位置により応答波形に差異が見られ、Case1, Case4 では上段、Case2, Case3 では下段のサイドロープで張力が大きくなる傾向が見られた。最大荷重は 50kJ タイプ (Case1, Case2) では 110kN (3×7 16φ の降伏張力 88.5kN の 124%)、100kJ タイプ (Case3, Case4) では 112kN (3×7 18φ の降伏張力 118kN の 95%) であったが、破断等は見られなかった。次に、吊ロープに着目すると、中間部の最大荷重は 50kJ タイプ (Case1, Case2) では 70kN (3×7 16φ の降伏張力 88.5kN の 79%)、100kJ タイプ (Case3, Case4) では 102kN (3×7 18φ の降伏張力 118kN の 86%) であった。また、横ロープやサイドロープと比較して、吊ロープの張力は上昇するまでの時間が遅くなる傾向が見られ

た。このことから、横ロープを介して面内横方向の荷重伝達が先行して生じたものと考えられる。

4. 結 言

本研究では、実スケールにおけるワイヤロープ支持式落石防護柵に重錘衝突実験を行い、落石から受ける衝突荷重に対する応答を計測し、その性能を評価したものである。本研究の成果をまとめると、以下のようになる。

- (1) 図-1 および表-1 に示した 2 タイプの供試体について、それぞれ 50kJ, 100kJ 以上のエネルギー吸収性能を有することがわかった。
- (2) 横ロープ張力のピーク付近で支柱が塑性変形したことにより、ロープ張力が低減し、ロープに大きな損傷が生じないことがわかった。
- (3) 支柱の頭部をワイヤロープで支持した構造とすることで、支柱が大きく変形した場合にも全体の構造の崩壊には至らないことがわかった。
- (4) 阻止面の張出力は支柱間隔が 3.0 m の場合と 6.0 m の場合で大きな差はなく、最大で 1.3 m であった。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2017.12
- 2) 西田陽一，石井太一，榎谷浩：ワイヤネット式落石防護柵の性能評価に関する実規模実験と解析について，第 11 回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，2014.10
- 3) 園田佳臣，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，2018.3
- 4) 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）の実物大衝撃荷重載荷実験による性能検証，構造工学論文集 Vol.65A，2019.3