従来型落石防護柵の実規模静的載荷実験

Full Scale Static Loading Test of Conventional Rockfall Protection Fences

(国研)土木研究所 寒地土木研究所	〇正 員	中村拓郎 (Takuro Nakamura)
室蘭工業大学大学院	学正員	服部桃加 (Momoka Hattori)
(国研)土木研究所 寒地土木研究所	正 員	今野久志 (Hisashi Konno)
(国研)土木研究所 寒地土木研究所	正 員	西 弘明 (Hiroaki Nishi)
室蘭工業大学大学院	正 員	小室雅人 (Masato Komuro)

1. はじめに

従来型落石防護柵は、ひし形金網と多段のワイヤロー プで構成される阻止面とH形鋼の支柱を用いた自立支柱 式の落石防護柵であり、落石エネルギーが100kJ程度ま での小規模な落石への対策工として適用されてきた。日 本道路協会の落石対策便覧 りには、その設計の考え方と 手順が示されており、従来型落石防護柵については慣用 設計法を適用してもよいとされている。この慣用設計法 では、主たる構成部材であるワイヤロープ、支柱、金網 の可能吸収エネルギーの総和を従来型落石防護柵の可能 吸収エネルギーとし、支柱が先行して塑性変形する場合 と、ワイヤロープが先行して塑性変形する場合を想定し て各部材の可能吸収エネルギーが算定されている。これ らの可能吸収エネルギーの総和が、落石の持ち込む運動 エネルギーを上回ることを確認することによって、安全 側の照査とするとしている。

一方、落石防護柵を含めた北海道における落石防護施 設の損傷事例の調査結果²⁾では、腐食等の環境作用によ る劣化に比べて、支柱やワイヤロープの変形や金網の破 網等の落石の衝撃作用が原因と考えられる損傷の割合が 大きいことも確認されており、現在供用されている従来 型落石防護柵において、設計時に想定されていない損傷 事例も報告されている。また、落石対策便覧においても、 従来型落石防護柵の落石作用時の詳細な挙動、限界状態 等については十分に明らかにされていないことが指摘さ れている。このため、今後、膨大な数の従来型落石防護 柵を適切に維持管理していくためには、その保有性能を 明らかにするとともに、より合理的な性能評価手法につ いても検討を深める必要がある。 するための検討の一部として、従来型落石防護柵の静的 破壊挙動を確認することを目的に、実規模落石防護柵を 供試体とした静的載荷実験を実施した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

図-1 に供試体概要図を示す。供試体は、柵高 2m、 延長 9m (支柱間隔 3m、3 スパン)の実規模の従来型落 石防護柵とした。本研究では、慣用設計法による設計時 に想定される塑性変形部材が支柱またはワイヤロープと なり、かつ、載荷点近傍の2本のワイヤロープのほぼ中 間の高さとなるように、落石衝突高さを模擬した載荷点 高さ h2を表-1 に示すように 1.4m、0.6m の2 水準に設 定した。なお、表-1 には参考として慣用設計法による 可能吸収エネルギーの計算値を付記している。

表-2 に主たる構成部材を示す。端末支柱および中間 支柱は SS400 材の H 形鋼とし、基部はコンクリート基 礎に埋め込まれている。なお、本研究で用いた中間支柱 の基部には吊線用の 4φワイヤを固定するための孔は設 けていない。控え材は SS400 材の溝形鋼とし、1本の端 末支柱に対して挟み込むように2本設置した。間隔保持 材は SS400 材の平板とし、各スパンの中央に配置した。 阻止面は 300mm 間隔で配置した 7本のワイヤロープと

表-1 実験ケース				
供試体	h_2	E_T	設計想定	
	(mm)	(kJ)	塑性部材	
S-H1.4	1.4	52.2	支柱	
S-H0.6	0.6	44.5	ワイヤローフ。	
the state of the s				

h₂:載荷点高さ、E_T:設計可能吸収エネルギー



本研究では、従来型落石防護柵の保有性能を明らかに

部材	仕様・寸法	
ワイヤロープ	18φ、3×7 G/O、JIS G3525 準拠、破断荷重 193kN	
金網	3.2\$×50×50、Z-GS3、JIS G 3552 準拠、引張強さ 409N/mm ²	
間隔保持材	2PL-4.5t×65、SS400、JIS G3101、降伏点:343N/mm ² (S-H1.4)、349N/mm ² (S-H0.6)、	
	引張強さ 466N/mm ² (S-H1.4)、459 N/mm ² (S-H1.4)	
索端金具	25♦、降伏点 372N/mm ² 、引張強さ 554N/mm ²	
中間支柱	H-200×100×5.5×8、SS400、JIS G3101、降伏点 379N/mm ² 、引張強さ 471N/mm ²	
端末支柱	H-175×175×7.5×11、SS400、JIS G3101、降伏点 307N/mm ² 、引張強さ 438N/mm ²	
控え材	[-100×50×5×7.5、SS400、JIS G3101、降伏点:319N/mm ² 、引張強さ 461N/mm ²	

表-2 主たる構成部材一覧



金網によって構成した。金網には線径 3.2mm、網目付 50×50mm のひし形金網を用いた。ワイヤロープの径は 18mm であり、ソケット式の索端金具を介して端末支柱 に固定した。なお、片方の索端金具は、ワイヤロープの 張力を測定する引付棒に曲げ変形が生じないように、タ ーンバックル、ジョーボルト、アイボルトを介して端末 支柱に接続した(写真-1)。ワイヤロープおよび金網 は、Uボルトを用いて各支柱および間隔保持材に固定し た。

載荷直前には、ターンバックルまたは端末支柱外側の ナットを締め付けることによって、約5kNの張力をワイ ヤロープに導入した。

2.2 載荷方法と測定項目

載荷は、油圧式ジャッキ(容量 1000kN、ストローク 300mm)を3基連結させ、スパン中央の所定の載荷点高 さで載荷冶具を押出す一方向載荷とした。各ジャッキは、 リニアレール架台に設置することによって、載荷中の水 平方向の摩擦を低減させた。載荷冶具は、載荷点近傍の ワイヤロープ2本に荷重が作用するように \$500mmの半 球鋼製冶具を取り付けたH形鋼とした。なお、本実験で は、供試体と載荷冶具の固定は行わず、半球鋼製冶具を 載荷点である間隔保持材に直接接触させている。

測定項目は、荷重、載荷点変位、ワイヤロープ張力と した。荷重は、載荷冶具と油圧式ジャッキの間に設置し たワッシャ型ロードセルによって、載荷点変位は、ワイ ヤ式変位変換器によって測定した。ワイヤロープ張力は、 索端金具の引付棒に4点のひずみゲージを円周上に均等 に貼付け、その平均値から算定した。なお、各索端金具 の一軸引張試験を別途実施しており、その際に得られた



ここに、R:支柱反力、T:ワイヤロープ張力、
a:支柱間隔、h₂:載荷点高さ、δ_p:支柱変位
図-3 荷重-載荷点変位関係の算定モデル

荷重-ひずみ関係を用いて本実験における張力を算定している。

3. 実験結果

3.1 荷重-載荷点変位関係

図-2 に各供試体の荷重-載荷点変位関係を示す。載荷点高さを1.4m とした S-H1.4 供試体では、載荷点変位 200mm 程度までは荷重の増加が小さく、その後、ワイ ヤロープの伸びや中間支柱の変形とともに荷重は増加し、 中間支柱の塑性変形にともなって荷重の増加が緩やかに なった。最大荷重後には、中間支柱の載荷点方向へのね じれが大きくなり、荷重は緩やかに低下した。

また、載荷点高さを 0.6m とした S-H0.6 供試体では、 載荷中の支柱の顕著な変形は目視上確認できず、載荷点 に近いワイヤロープのストランドの破断とともに荷重が 一度低下したものの、荷重は再度増加した。その後、載 荷点付近の間隔保持材の下段側のUボルトが破断し、金

網の破網が発生するとともにワイヤロープが載荷冶具先 端の球面を滑るようにすり抜けが発生し、荷重が急激に 低下した。

次に、本実験で得られた荷重-載荷点変位関係と計算 値の比較を試みる。計算値は、既往文献³⁾を参考に、図 -3 に示す算定モデルを用いてワイヤロープの変位 v を 1mmずつ増加させることによって算定した。荷重は2本 の支柱反力Rの合力とし、載荷点変位は支柱の変位ると ワイヤロープの変位 y の和とした。なお、計算値におけ る各部材の物性値は落石対策便覧等を参考に、ワイヤロ ープの初期張力を5kN、弾性係数を100kN/mm²、降伏荷 重を 118kN とし、支柱の弾性係数を 200kN/mm²、降伏 強度を 235N/mm² とした。また、計算上の仮定として 2 本のワイヤロープが均等に荷重を分担してワイヤロープ のひずみは一様となること、支柱の H 形鋼は強軸方向 (載荷方向) にのみ変形することとした。また、支柱が

先行して降伏した場合には、支柱変位 δ_p が $h_2 \times tan 15^{\circ} と$ なるまでワイヤロープと支柱の応力を保持することとし た。ワイヤロープが先行して降伏する場合には、ワイヤ ロープの降伏荷重までを計算値とした。

実験値と計算値を比較すると、最大荷重はいずれも実 験値が計算値を上回る結果となった。載荷点高さを 0.6m とした S-H0.6 供試体では、載荷点変位に対する荷 重において、計算値が実験値をやや上回るものの、計算 上のワイヤロープ降伏荷重までは荷重-載荷点変位が概 ね一致している。また、ワイヤロープの降伏強度を上限 とした計算値に対して、実験時の最大荷重は 1.8 倍ほど 大きくなっている。一方、載荷点高さを 1.4m とした S-H1.4 供試体では、実験時の荷重の立ち上がりが遅れて おり、これは、実験時のワイヤロープと載荷冶具等との 接触やワイヤロープと間隔保持材が剛結されていないこ

とによるなじみの影響と考えられる。このなじみに起因 すると考えられる載荷点変位を除去した実験値(図-2 の破線)と計算値を比較すると、その挙動は最大荷重付 近まで概ね一致する。ただし、実験値では、最大荷重以 降で荷重が緩やかに低下しており、これは、計算値にお いては強軸方向に 15°まで変形することや降伏後には応 力を保持することを仮定している一方で、実際には弱軸 方向への変形が顕著になるためと考えられる。

3.2 破壞性状

載荷点高さを 1.4m とした S-H1.4 供試体の実験終了時 の破壊性状を写真-2 に示す。中間支柱が大きく塑性変 形しており、強軸方向だけではなく載荷点に向かうよう に弱軸方向にもねじれて変形していることがわかる。中 間支柱の基部付近のUボルト用の孔には亀裂も生じてい た。また、端末支柱の控え材においても面外に膨らむよ うな塑性変形が確認できる。なお、実験終了まで、ワイ ヤロープの索端金具からの引き抜けや金網の破網は生じ ていない。

載荷点高さを 0.6m とした S-H0.6 供試体の実験終了時 の破壊性状を写真-3 に示す。端末支柱および中間支柱、 控え材には、目視下において顕著な塑性変形は認められ なかった。供試体下段から3段目のワイヤロープでスト ランドの破断が確認された。また、金網は載荷点付近で 間隔保持材に沿って破網し、間隔保持材の下段から2つ のUボルトは破断していた。ただし、こうしたワイヤロ ープのストランドの破断や金網の破網については、ワイ ヤロープの降伏強度を上限とした計算値以上の荷重が作 用した際に発生している。

慣用設計法を用いた設計においては、S-H1.4供試体は 支柱の塑性変形が先行し、S-H0.6供試体ではワイヤロー プの塑性変形が先行することが想定されており、本実験



(b) 中間支柱近傍 写真-2 S-H1.4 供試体の破壊性状(h2=1.4m)



(b) 中間支柱近傍 写真-3 S-H0.6 供試体の破壊性状 (h2=0.6m)

(c) 端末支柱・控え材近傍



の破壊形式も設計において想定した破壊形式と一致して いる。

3.3 ワイヤロープ張力

図-4 に各供試体のワイヤロープ張力-載荷点変位関係を示す。各ワイヤロープの張力は、供試体上段より T1~T7 である。いずれの供試体においても、載荷点に 近い2本のワイヤロープ(S-H1.4 供試体ではT2とT3、 S-H0.6 供試体ではT5とT6)の張力が卓越し、載荷点変 位の進行とともに大きく増加していることがわかる。ま た、前述した載荷初期におけるなじみと推察される挙動 は、各ワイヤロープ張力においても確認できる。

S-H1.4 供試体では、載荷点変位 400mm 程度から張力 T2、T3 の増加が緩やかになっており、これは、中間支 柱の変形が大きくなった点と概ね一致する。最大荷重以 降では、中間支柱の載荷点へ向けたねじれ変形が顕著に なることによって、ワイヤロープ張力も減少へ転じたと 考えられる。また、S-H0.6 供試体では、ワイヤロープ T5 のストランド破断にともなって、T5 の張力が大きく 低下した。T5 以外のワイヤロープの張力についても一 時的な低下が認められるものの、その後、張力が再度増 加する傾向を示した。これは、間隔保持材によって阻止 面が維持されていることによって、他のワイヤロープへ の荷重の再分配が行われたものと推察される。

慣用設計法や本研究における荷重-載荷点変位の計算 値の算定においては、2本のワイヤロープが荷重を均等 に支持することを仮定しているが、間隔保持材が設置さ れる場合には、ワイヤロープの柵高方向への押し開きは 抑制され、阻止面が保持されるため、他のワイヤロープ も支柱の変形に追従すると考えられる。本実験において も載荷点近傍の2本のワイヤロープと比較して小さい値 ではあるものの、他のワイヤロープでも張力の発生が認 められた。

4. おわりに

本研究では、従来型落石防護柵の静的破壊挙動を確認 することを目的に、実規模落石防護柵を供試体とした静 的載荷実験を実施した。本研究で得られた知見を以下に 示す。

 静的載荷実験において先行して塑性変形する部材は、 落石対策便覧に示される慣用設計法において設計時 に想定される部材と一致した。

- 2) 中間支柱が先行して塑性変形する場合には、ワイヤ ロープの破断や金網の破網は生じずに、中間支柱が 弱軸方向へも塑性変形するとともに、最大荷重後の 荷重は緩やかに低下した。
- 3) ワイヤロープが先行して塑性変形することが想定される場合には、各支柱に目視下での塑性変形は認められず、ワイヤロープの破断や金網の破網をともなって荷重が急激に低下した。ただし、これらの破壊現象は、ワイヤロープの降伏強度を上限とした計算値以上の荷重が作用した際に発生している。

本研究では、従来型落石防護柵の保有性能を明らかに するための検討の一部として、従来型落石防護柵の静的 荷重に対する破壊挙動の確認を行った。その結果、静的 な算定モデルによる計算値と実験値は概ね一致すること が確認できた。しかしながら、実際には計算上の仮定と は異なる現象も認められ、引き続き各部材の変形量やひ ずみに関する分析を進めることで、従来型落石防護柵の 静的な破壊性状について詳細な検討を行う予定である。

また、落石等による衝撃作用時には各部材の変形性能 や破壊形式等が静的な挙動とは異なることが推察される。 今後、本実験と衝撃実験との比較を行うことによって、 従来型落石防護柵の保有性能を検証していくとともに、 現行の設計法を含めた合理的な性能評価方法についても 検討を進める予定である。

謝辞

本研究に際して、室蘭工業大学大学院の岸徳光特任教 授より有益なご助言を賜りました。また、本実験は、瓦 井智貴氏をはじめとする室蘭工業大学の学生諸子にご協 力いただきました。ここに付記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会: 落石対策便覧、2017.12
- 中村拓郎、今野久志、山澤文雄、寺澤貴裕、西 弘 明:北海道における落石防護施設の損傷形態に関す る事例調査、寒地土木研究所月報、No.786、pp.33-38、2018.11
- 道路保全技術センター:落石防止柵検討会報告書、 1992.6