

## 従来型落石防護柵の静的破壊挙動

Static failure behavior of conventional rockfall protection fences

中村 拓郎\*, 今野 久志\*\*, 小室 雅人\*\*\*, 岸 徳光\*\*\*\*

Takuro Nakamura, Hisashi Konno, Masato Komuro and Norimitsu Kishi

\*博 (工), 土木研究所寒地土木研究所 研究員 (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34)

\*\*博 (工), 土木研究所寒地土木研究所 総括主任研究員 (同上)

\*\*\* 博 (工), 室蘭工業大学大学院 准教授 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*\* 工博, 室蘭工業大学大学院 特任教授 (同上)

*Key Words: conventional rockfall protection fence, tension force of wire rope, strain of post, static loading test*

キーワード: 従来型落石防護柵, ワイヤロープ張力, 支柱ひずみ, 静的載荷実験

### 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 形鋼の支柱による自立支柱式の落石防護柵(写真-1)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いる。北海道の落石防護施設を対象とした損傷事例調査<sup>1)</sup>では、従来型落石防護柵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く、設計時に想定されていない損傷も確認されている。また、日本道路協会の落石対策便覧<sup>2)</sup>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。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合理的な性能評価手法について検討を深める必要がある。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。なお、本論文は、既発表の実験結果<sup>3)</sup>に支柱基部のひずみに関する実験データと考察を加えて再構成したものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 供試体概要

供試体は、図-1 に示すように柵高 2m、支柱間隔 3m で 3 スパンの延長 9m の従来型落石防護柵とした。主たる構成部材を表-1 に示す。端末支柱および中間支柱は SS400 材の H 形鋼とし、支柱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では、支柱基部に吊線用の 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 本を設置した。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。



写真-1 従来型落石防護柵

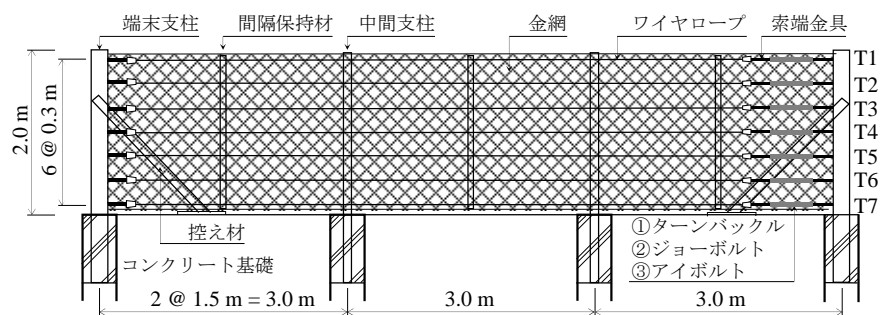


図-1 供試体概要図

表-1 主たる構成部材一覧

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	3.2φ×50×50, Z-GS3, JIS G3552 準拠, 引張強さ 409N/mm <sup>2</sup>
間隔保持材	2PL-4.5t×65, SS400, JIS G3101, 降伏点: 343N/mm <sup>2</sup> (S-H1.4), 349N/mm <sup>2</sup> (S-H0.6), 引張強さ 466N/mm <sup>2</sup> (S-H1.4), 459N/mm <sup>2</sup> (S-H0.6)
索端金具	25φ, 降伏点 372N/mm <sup>2</sup> , 引張強さ 554N/mm <sup>2</sup>
中間支柱	H-200×100×5.5×8, SS400, JIS G3101, 降伏点 379N/mm <sup>2</sup> , 引張強さ 471N/mm <sup>2</sup>
端末支柱	H-175×175×7.5×11, SS400, JIS G3101, 降伏点 307N/mm <sup>2</sup> , 引張強さ 438N/mm <sup>2</sup>
控え材	[-100×50×5×7.5, SS400, JIS G3101, 降伏点: 319N/mm <sup>2</sup> , 引張強さ 461N/mm <sup>2</sup>

阻止面は 300mm 間隔で配置した 7 本のワイヤロープと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。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。荷重直前には, 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ている。

表-2 に実験ケースを示す。落石対策便覧に示されている慣用設計法では, 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ており, 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仮定して各部材の可能吸収エネルギーが算定される。本研究では, 慣用設計法を用いた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, 荷重点近傍の 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荷重点高さ  $h_2$  を 1.4m, 0.6m の 2 つの実験ケースを設定した。

## 2. 2 荷重方法と測定項目

静的荷重実験の全景を写真-2 に示す。荷重は, 容量 1000kN, ストローク 300mm の油圧式ジャッキを 3 基連結させてスパン中央の所定の荷重点高さ  $h_2$  で荷重治具を押し出す一方向荷重とした。各ジャッキは, 荷重中の水平方向の摩擦を低減させるためにリニアウエイレール架台に設置した。荷重治具は, 荷重点近傍のワイヤロープ 2 本に荷重が作用するようにφ500mm の半球鋼製治具を取り付けた H 形鋼とした。なお, 半球鋼製治具は間隔保持材に直接接触しており, 供試体と荷重治具は固定していない。

測定項目は, 荷重, 荷重点変位, ワイヤロープ張力, 中間支柱基部のひずみとした。荷重は, 荷重治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を用いて, 荷重点変位は, ワイヤ式変位変換器によって測定し

表-2 実験ケース

ケース	$h_2$ (m)	$E_T$ (kJ)	設計想定塑性部材
S-H1.4	1.4	52.2	支柱
S-H0.6	0.6	44.5	ワイヤロープ

$h_2$ : 荷重点高さ,  $E_T$ : 設計可能吸収エネルギー



写真-2 荷重実験全景

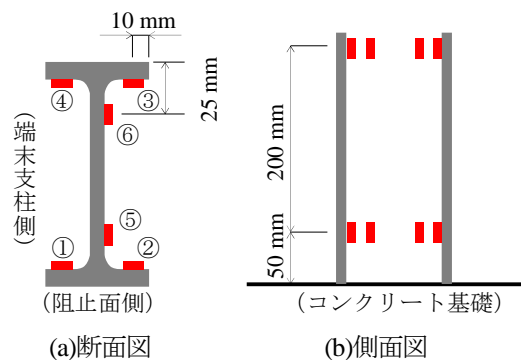


図-2 中間支柱のひずみゲージの貼付け位置

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。支柱基部のひずみは, 張力測定側の中間支柱でのみ測定しており, ひずみゲージは図-2 に示す位置に貼付けている。

### 3. 実験結果

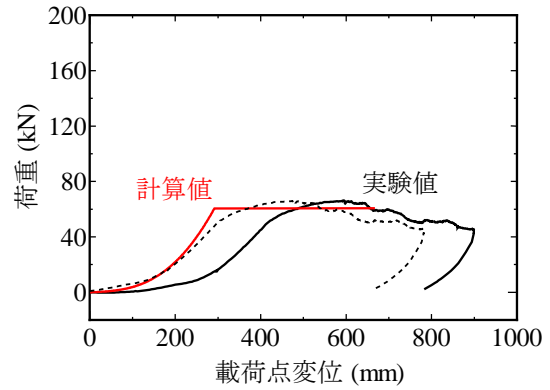
#### 3.1 荷重-載荷点変位関係

図-3 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 とした実験ケース S-H1.4 の場合には、載荷点変位が 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。載荷点高さを 0.6m とした実験ケース S-H0.6 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素線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治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ている。

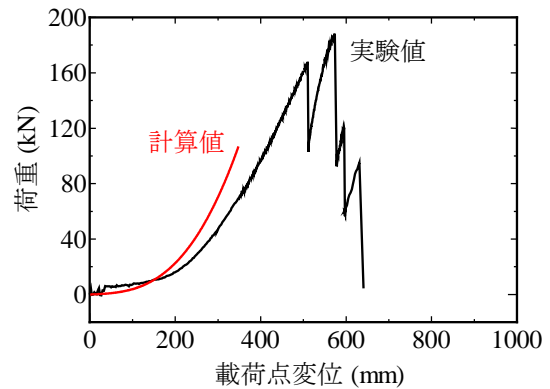
#### 3.2 慣用設計法における変形モデルとの比較

既往文献<sup>4)</sup>を参考に、図-4 に示す算定モデルを用いて荷重-変位関係を算定した。計算値は、ワイヤロープの変位  $y$  を 1mm ずつ増加させることによって求めた。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  $\delta_p$  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/mm<sup>2</sup>、降伏荷重を 118kN とし、支柱の弾性係数を 200kN/mm<sup>2</sup>、降伏強度を 235N/mm<sup>2</sup> 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樣となること、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  $\delta_p$  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。

図-3 に上記の算定手法によって求めた計算値を示す。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 1.4m とした S-H1.4 では、実験時の荷重の立ち上がりが計算値に比べてやや遅れている。これは、実験時のワイヤロープと載荷治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荷重が増加し始める点まで除去した実験値（図-3 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、実験では、最大荷重以降で荷重が緩やかに低下している。これは、計算値においては支柱が強軸方向に 15°まで変形することや完全弾塑性体を仮定しているが、実際には弱軸方向への変形が顕著になった

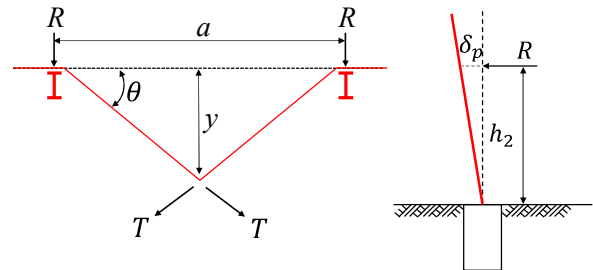


(a) S-H1.4 ( $h_2=1.4\text{m}$ )



(b) S-H0.6 ( $h_2=0.6\text{m}$ )

図-3 荷重-載荷点変位関係



ここに、 $R$ : 支柱反力、 $T$ : ワイヤロープ張力、 $a$ : 支柱間隔、 $h_2$ : 載荷点高さ、 $\delta_p$ : 支柱変位

図-4 荷重-変位関係の算定モデル

ためと考えられる。一方、載荷点高さを 0.6m とした S-H0.6 においても、計算結果の荷重の増加が実験値よりも先行しているものの、計算上のワイヤロープ降伏荷重までは概ねその挙動は類似している。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。

#### 3.3 ワイヤロープ張力

図-5 にワイヤロープ張力-載荷点変位関係を示す。なお、各ワイヤロープの張力は、図-1 に示すように供試体上段より T1~T7 である。実験ケース S-H1.4 では T2 と T3 の張力が、S-H0.6 では T5 と T6 の張力が卓越して

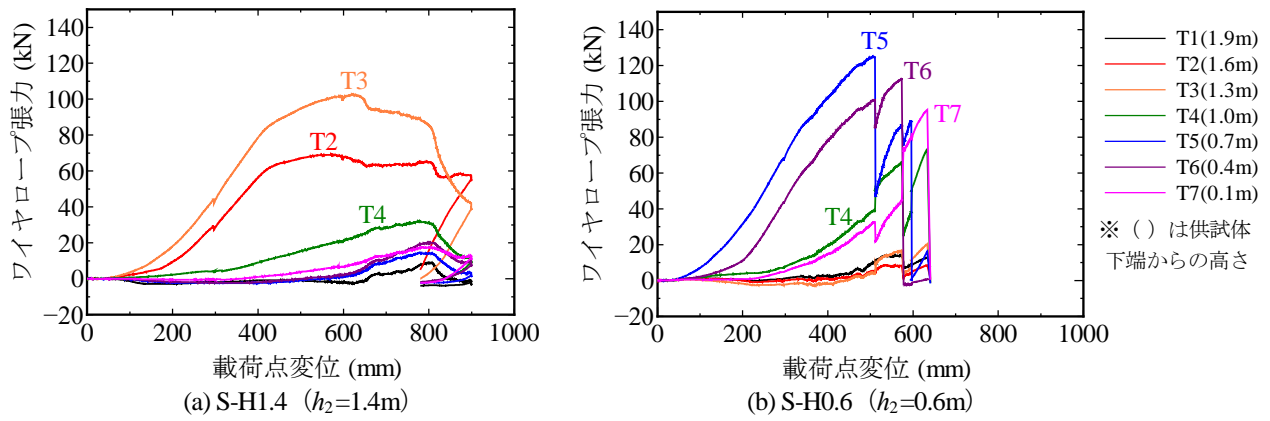


図-5 ワイヤロープ張力-載荷点変位関係

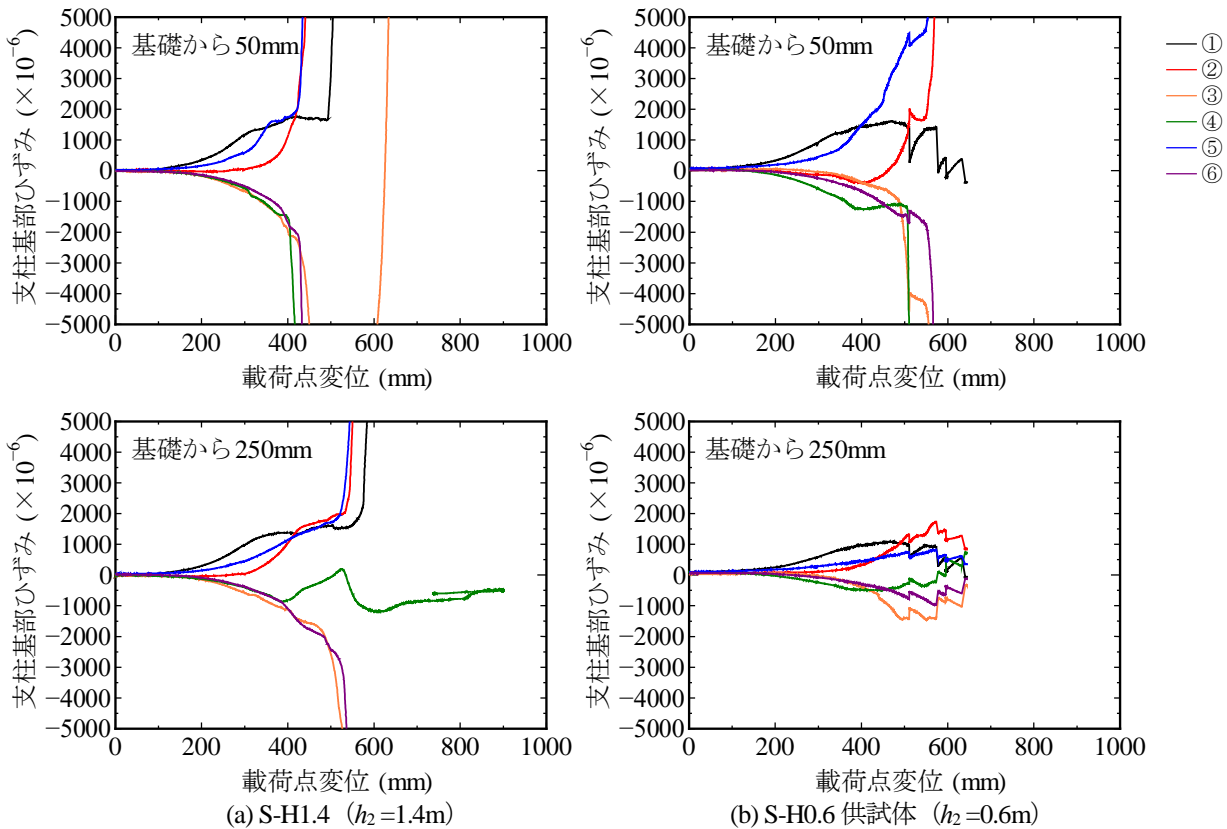


図-6 中間支柱基部のひずみ

おり、載荷点変位とともに張力は大きく増加した。これらはいずれも載荷点に近い2本のワイヤロープである。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ワイヤロープ張力においても確認できる。

実験ケース S-H1.4 では、載荷点変位 400mm 程度から張力 T2, T3 の増加が停滞しており、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、実験ケース S-H0.6 では、ワイヤロープ T5 の素線の破断にともなって、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、張力は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ためと推察される。

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るとともに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べると小さな値ではあるものの、他のワイヤロープでも張力の

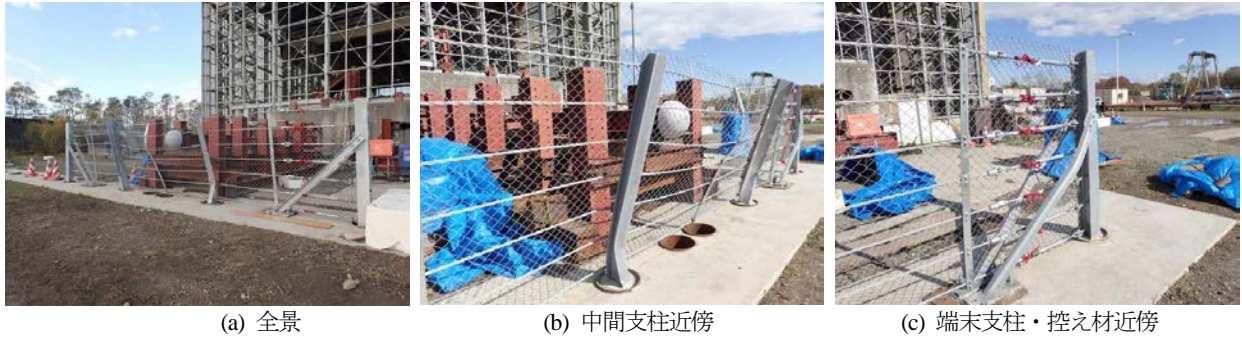


写真-3 S-H1.4の破壊性状 ( $h_2=1.4\text{m}$ )

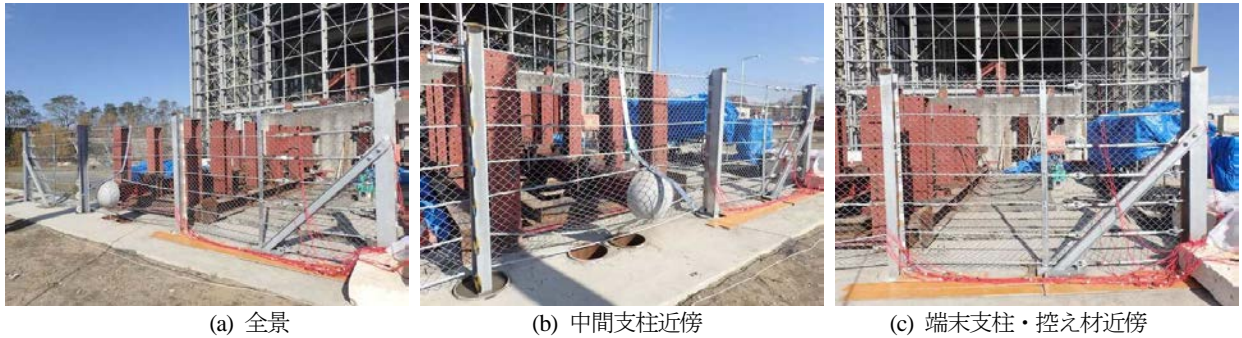


写真-4 S-H0.6の破壊性状 ( $h_2=0.6\text{m}$ )

発生が認められた。

### 3. 4 支柱ひずみ

図-6 に中間支柱基部のひずみと載荷点変位の関係を示す。実験ケース S-H1.4 では、載荷点変位 400mm 程度でコンクリート基礎から 50mm の断面においてひずみが急増しており、載荷点変位 500mm の時点ではコンクリート基礎から 250mm の断面においても降伏ひずみに到達している。前述のとおりワイヤロープの張力の増加がワイヤロープの降伏強度よりも小さな荷重で停滞していたことから、実験ケース S-H1.4 では、支柱の塑性変形が先行するという設計時の想定と一致する結果となった。一方、実験ケース S-H0.6 では、支柱基礎のひずみの増加よりもワイヤロープの張力の増加が先行しており、ワイヤロープ T7 と基礎コンクリートの中間である高さ 50mm の断面ではひずみが大きくなっているものの、ワイヤロープ T6 と T7 の中間である高さ 250mm の断面では S-H1.4 に比べてひずみの増加は小さい。実験ケース S-H0.6 においても、ワイヤロープの塑性変形が先行するという設計時の想定と概ね一致する挙動を示したと考えられる。

### 3. 5 破壊性状

載荷点高さを 1.4m とした実験ケース S-H1.4 の実験終了時の破壊性状を写真-3 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なかった。

載荷点高さを 0.6m とした実験ケース S-H0.6 の実験終了時の破壊性状を写真-4 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。前述のとおり供試体下段から 3 段目のワイヤロープで素線の破断に至っている。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素線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ことから、計算値は安全側の評価となっている。

慣用設計法を用いた設計においては、実験ケース S-H1.4 は支柱の塑性変形が先行し、S-H0.6 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、本実験の破壊性状も設計において想定した破壊性状と一致している。一方、端末支柱や控え材に塑性変形が生じてしまう場合があること、中間支柱が強軸方向だけではなく弱軸方向にもねじれることで荷重が低下してしまうことなど、実際には計算上の仮定とは異なる現象も認められた。

## 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。

- 1) 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

が確認できたものの、計算上の仮定とは異なる現象も認められた。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も考えられるため、今後、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するとともに、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。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧、2017。
- 2) 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。
- 3) 中村拓郎，服部桃加，今野久志，西 弘明，小室雅人，従来型落石防護柵の実規模静的載荷実験，平成 30 年度土木学会北海道支部 論文報告集，第 75 号，A-31，2019。
- 4) 道路保全技術センター：落石防止柵検討会報告書，1992。