

従来型ポケット式落石防護金網の実規模静的載荷実験

Experimental study of static loading full scale pocket-type rockfall protection nets

| | | |
|-------------------|-----|-------------------------|
| (独) 土木研究所寒地土木研究所 | ○正員 | 山口 悟 (Satoru Yamaguchi) |
| (独) 土木研究所寒地土木研究所 | 正員 | 今野久志 (Hisashi Konno) |
| (独) 土木研究所寒地土木研究所 | 正員 | 西 弘明 (Hiroaki Nishi) |
| (独) 土木研究所つくば中央研究所 | 正員 | 佐々木哲也 (Tetsuya Sasaki) |
| 室蘭工業大学大学院 | 正員 | 小室雅人 (Masato Komuro) |
| 室蘭工業大学大学院 | 正員 | 栗橋祐介 (Yusuke Kurihashi) |

1. はじめに

山間部や海岸線の道路には、落石災害を防止するための様々な落石対策工が数多く建設されている。落石対策工の一つに、吊りロープや支柱、金網、ワイヤロープ等の部材を組み合わせたポケット式落石防護網がある。ポケット式落石防護網は、経済性や施工性に優れており、比較的規模の小さい落石に対して適用されている。

従来型のポケット式落石防護網の設計は落石対策便覧(以後、便覧)¹⁾を参考に、構成部材の可能吸収エネルギー及び衝突の前後におけるエネルギー差を用いた簡便式により行われているが、落石衝突に対する応答メカニズムの解明という観点から行われた検討事例²⁾はごく限られている。

また、近年では緩衝装置等を組み込んだ高エネルギー吸収型と呼ばれる落石防護網が開発され、経済性や適用範囲の広さから、現場適用事例が増えている。それらの性能評価については、主として実験的検証により行われている事例^{3,4)}が多いようであるが、開発者独自の手法で実施されており、統一的な指標もないのが現状である。

このような背景のもと、著者らは従来型のポケット式落石防護網も含めて、落石対策工として求められる機能の明確化と性能照査技術の確立に向けた検討を行っている。過年度には、現地設置状況をできるだけ再現した従来型ポケット式落石防護網の実規模衝撃実験⁵⁾を実施し、重錘衝突時の金網全体の応答性状等について検討を行った。ここで、ポケット式落石防護網は落石荷重の作用時において、金網やワイヤロープ等の構成部材に大きな変形を伴う柔構造であることから、これらの検討を進めていくため、特に数値解析的検討のためには落石荷重作用時の構成部材の挙動を正確に把握することが重要である。本稿では、数値解析による落石防護網の構成部材のエネルギー吸収量の算定や材料構成則等の設定を最終目的として、実規模の静的載荷実験を実施したので、その概要について報告する。

2. 実規模実験概要

2.1 供試体概要

本実験に用いた供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体は過年度に実施した実規模衝撃実験⁵⁾と同一としており、金網高10m、金網幅15mのものを水平に設置している。

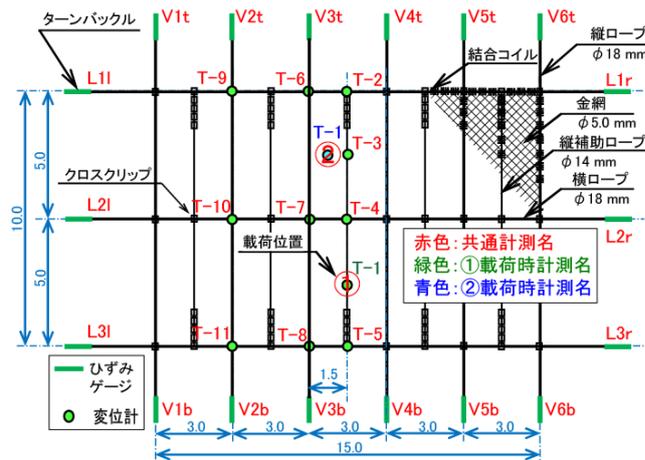


図-1 供試体の形状寸法

表-1 供試体材料諸元

| | 諸元 |
|-----------|--|
| | ミルシートより [部材耐力] |
| 菱形金網 | 5.0φ×50×50 mm 引張強さ: 405 [290~540] N/mm ² |
| 縦ワイヤロープ | 18φ3×7 G/O, L=20.4 m 設計破断荷重: 208.8 [160] kN |
| 横ワイヤロープ | 18φ3×7 G/O, L=13.5 m 設計破断荷重: 208.8 [160] kN |
| 縦補助ワイヤロープ | 14φ3×7 G/O, L=13.0 m 設計破断荷重: 119.4 [110] kN |
| ターンバックル | 両アイ型 1×12 ネジ径 W=1 公称破断荷重: なし[222] kN |

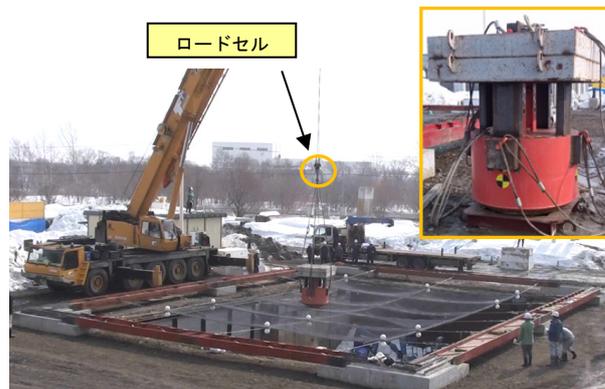


写真-1 実験状況 (載荷位置①)

表-1 に、供試体材料の諸元を示す。金網には菱形金網 $5.0 \phi \times 50 \times 50 \text{ mm}$ を、縦ロープおよび横ロープには 18ϕ を、縦補助ロープには 14ϕ を用いている。ワイヤロープの配置は、縦ロープ間隔 3.0 m 、縦補助ロープ間隔 1.5 m 、横ロープの間隔 5.0 m としている。ワイヤロープの各交点にはクロスクリップを、ワイヤロープと金網の結合には結合コイルを使用している。縦・横ロープの末端処理には、現地施工では一般に巻付グリップが用いられているが、本実験では衝撃による巻付グリップの引き抜けを防止するため⁶⁾両端をアルミロック(圧縮)加工とした。縦補助ロープについては両端部を 1.5 m 程度折り返し、ワイヤクリップ4個を用いて固定した。また、縦・横ロープ端部と鋼製枠架台との連結には、張力調整のためにターンバックルを使用している。なお、ワイヤロープの初期張力は、縦ロープを $6 \sim 11 \text{ kN}$ 、横ロープを $15 \sim 23 \text{ kN}$ とした。

ここで、縦ロープの両端は固定条件としているが、これは現地と同様な鉛直に設置した時と同じ片端固定では、自重によるたわみが想定より大きくなりすぎたこと、および今後の数値解析上の境界条件を明確にすることなどを考慮し決定したものである。

2.2 実験方法

写真-1、2 に実験状況と載荷用重錘、計測機器の設置状況等を示す。実験は掘込式の試験ヤード外周に配置した H 形鋼の鋼製枠架台上に、水平に設置した供試体にトラッククレーンで吊り下げた重錘を静的に載荷することにより実施した。載荷には、重錘衝撃実験用の質量 10 t (直径 1.25 m 、高さ 95 cm 、底部より高さ 30 cm の範囲が半径 1 m の球状)の重錘に鉛部材を設置し、質量を約 22 t に調整して使用している。本実験における測定項目は、重錘吊り下げ用のワイヤロープに取り付けたロードセルによる載荷荷重、縦・横ロープ端部のターンバックルに貼付した歪ゲージによるロープ張力、ワイヤ式変位計による重錘直下 (T-1) およびロープ交点の鉛直変位である。載荷位置は、図-1 に示す 2 箇所であり、便覧に示されている荷重の作用位置(縦位置：横ロープ間中央、横位置：補助ロープ上(載荷位置 ①))を基本とし、もう 1 箇所は横位置を縦ロープと縦補助ロープの中間位置である金網上(載荷位置 ②)とした。

3. 実験結果

3.1 荷重-金網鉛直変位

図-2 に載荷位置①(縦補助ロープ上)における荷重と補助ロープの鉛直変位の関係を、図-3 に載荷位置②(金網上)における荷重と補助ロープの鉛直変位の関係 (T-1 は重錘直下)を示す。両図とも、載荷時には実線で、除荷時には点線で荷重-変位関係を示している。図-2 より、載荷点直下の測定点である T-1 に着目すると、変位が 0.3 m 程度に達するまでは荷重は数 kN 程度であり、変位の増加に対して非常に緩やかな変化となっている。その後、荷重 30 kN (変位 0.9 m) 程度からは、ワイヤクリップのすべり等によるものと考えられる数 kN の増減を伴いながら、荷重は変位に対してほぼ線形的に増加している。本ケースでは、載荷点近傍の金網の変形状

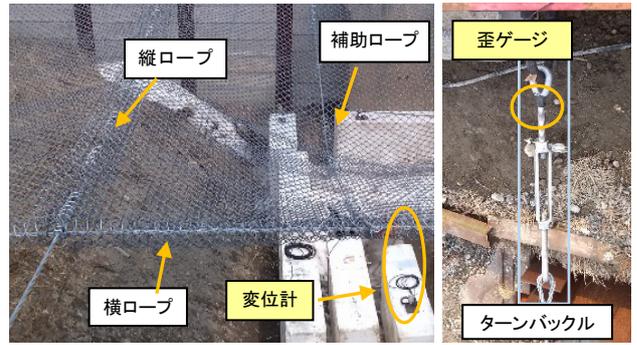


写真-2 計測機器の設置状況

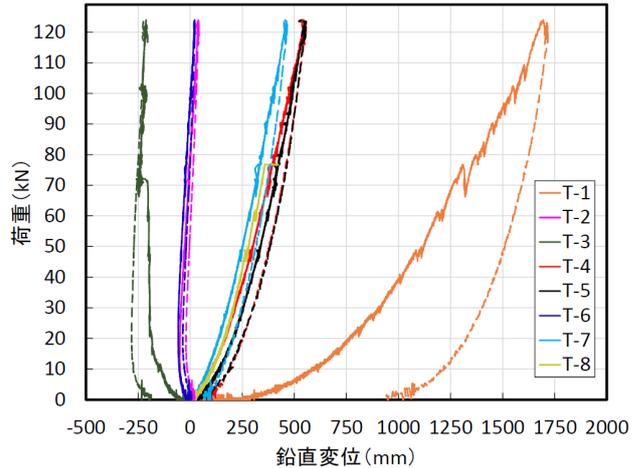


図-2 荷重-変位関係 (載荷位置①)

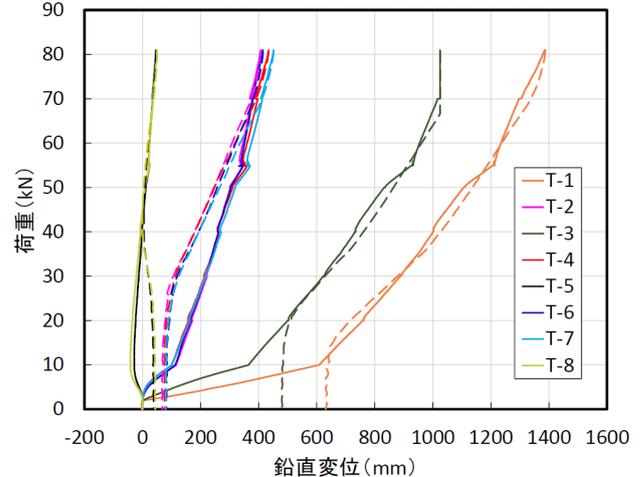


図-3 荷重-変位関係 (載荷位置②)

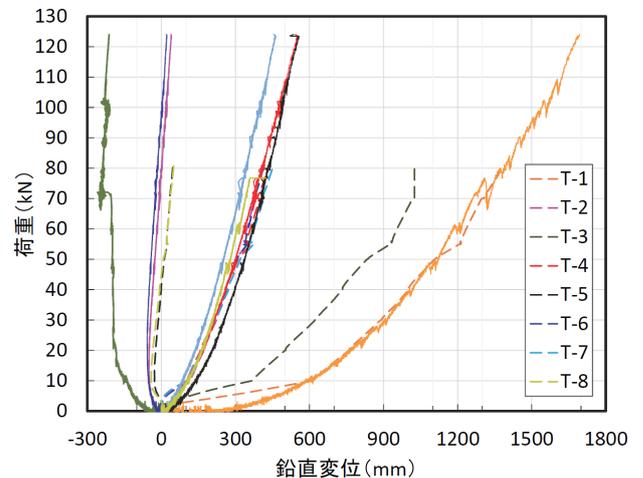


図-4 荷重-変位関係 (載荷位置①、②)

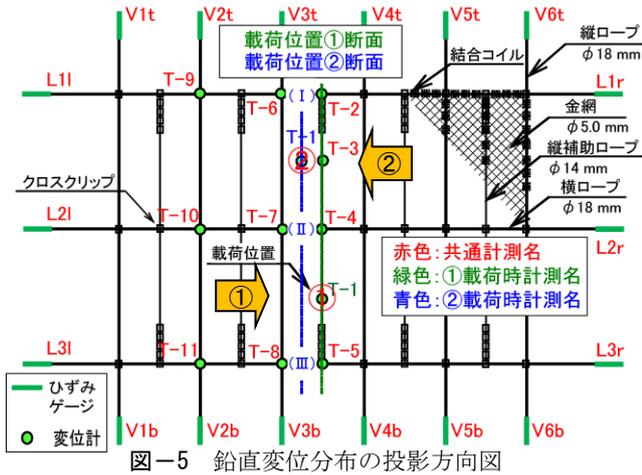


図-5 鉛直変位分布の投影方向図

況やロープ張力等から判断して、124 kN (変位約 1.7 m) までの荷重とした。本実験条件における金網とワイヤロープから構成される構造全体系の最大荷重作用時点までのエネルギー吸収量は、この荷重-変位関係の面積より約 70 kJ と算定される。またこの時の T-4,5 と T-1 の変位量差は 1.16 m となっており、便覧に記載されている横ワイヤロープ間隔の最大変位量 $\delta = l / 4 = 5 / 4 = 1.25$ m とほぼ同様な値となっている。

載荷時と除荷時に着目すると載荷点から遠い T-2 と T-6 において、除荷時の点線が載荷時の実線よりも負側に変位が計測されている。これは載荷点から遠いことから初期張力により弾性的に変位が戻っているためと推察される。これに対して、他の測定点に対する載荷時と除荷時を比較すると除荷時の方が同一荷重に対する変位量は大きく、T-1 においては除荷後の残留変位が約 0.9 m となっている。

図-3 より、載荷点直下の測定点である T-1 に着目すると、変位が 0.6 m 程度に達するまでは荷重は数 kN 程度であり、変位の増加に対して非常に緩やかな荷重変化となっている。その後、荷重は変位に対してほぼ線形的に増加している。本ケースでは、載荷点近傍の金網の変形状況やロープ張力等から判断して、81 kN (変位約 1.4 m) までの荷重とした。この荷重-変位関係から、本実験条件における金網とワイヤロープから構成される構造全体系の最大荷重作用時点までのエネルギー吸収量は約 35 kJ と算定される。

図-4 には載荷位置 (① (実線) と ② (破線)) の荷重-変位関係を示している。図より載荷点 (T-1) の荷重-変位関係はほぼ同一となっており、載荷位置が違うにもかかわらず、ほぼ同様な性状を示していることがわかる。また、載荷位置を囲むワイヤロープ交点 (① : T-4,5,7,8, ② : T-2,4,6,7) での荷重-変位関係もほぼ同様であることがわかる。

図-5 には、図-6, 7 に示す鉛直変位分布の投影方向を示している。載荷位置①の場合には、図中緑線の縦補助ロープの鉛直変位分布を、載荷位置②の場合には図中青線の T-2 と T-6 の平均値を I として、T-4 と T-7 の平均値を II として、T-5 と T-8 の平均値を III として、各載荷時の断面鉛直変位を示す。

図-6 より、81 kN までの各載荷時の変位分布図は載

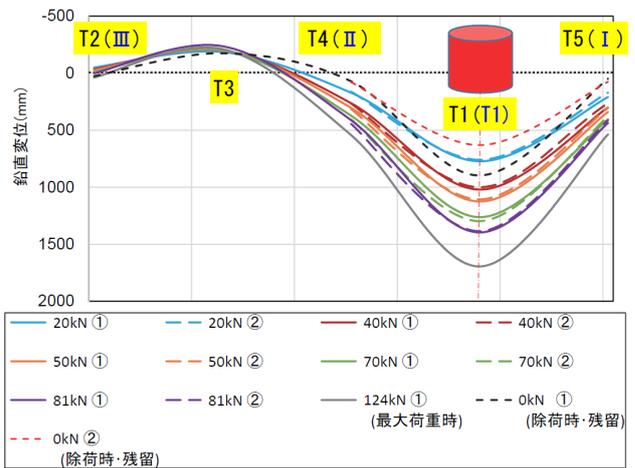


図-6 鉛直変位分布図 (載荷位置①、②)

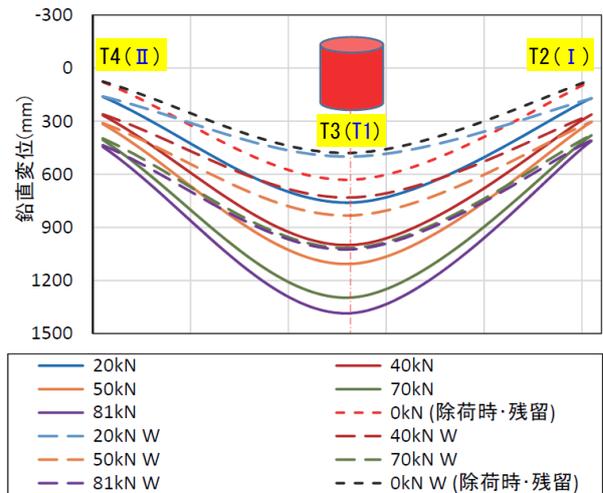


図-7 鉛直変位分布図 (載荷位置②)

荷位置が違うにもかかわらず、ほぼ同様であることがわかる。点線の除荷時の残留変位では、より荷重が大きい載荷位置①の方が塑性変形量は大きいことがわかる。

以上のことから、便覧に記載の縦補助ロープ上での載荷と隣接する金網上での載荷では、全体の鉛直変位分布は同様な形状となることがわかった。

図-7 には載荷位置②における、図-5 の青色と緑色 (縦補助ワイヤ (W)) 断面の鉛直変位分布を示している。図より、実線の載荷点 (T-1) と破線の載荷点近傍 (T-3) との鉛直変位の差は 20 kN 時が T-3 の 1.5 倍であり、その他は残留変位を含めて 1.3~1.35 倍となっている。このことから、金網に直接載荷を行った際には、隣接する縦補助ワイヤロープの変位に比較し、金網の鉛直変位が局所的に大きくなっていることがわかる。

3.2 荷重-ワイヤロープ張力

図-8 に載荷位置① (縦補助ロープ上) における荷重と縦・横ロープ張力の関係について載荷時を実線、除荷時を破線で示す。(a) 図より、同一のロープでは両端 (t, b) でほぼ等しい張力となっていること、また、荷重-変位の関係と同様に、載荷初期の荷重の増加は緩やかであること、縦ロープは何れの場合にも除荷時の方が張力は負側にあり、弾性的に戻っていることがわかる。また、縦ロープの最大張力に着目すると、載荷点近傍の V3 および V4 がそれぞれ両端の平均値で約 85、

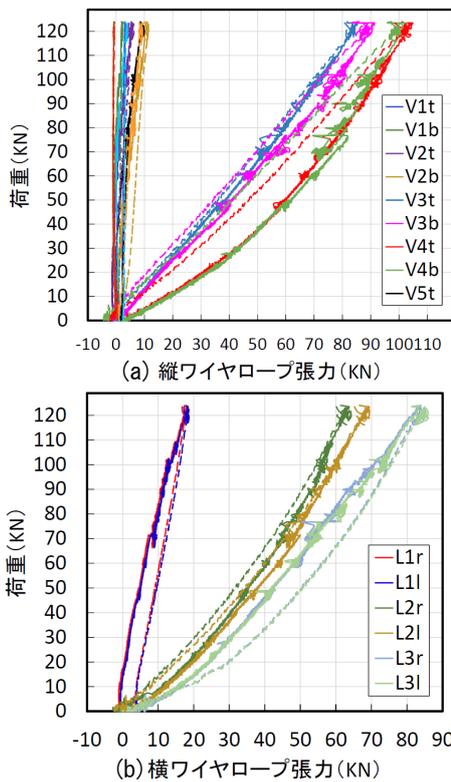


図-8 載荷荷重-ロープ張力関係 (載荷位置①)

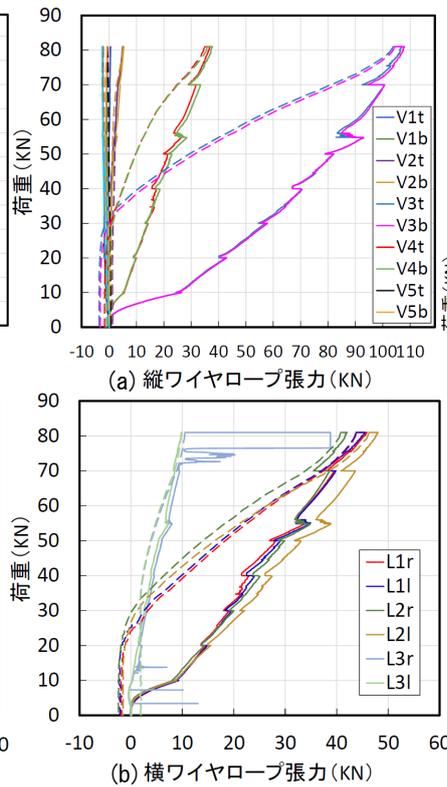


図-9 載荷荷重-ロープ張力関係 (載荷位置②)

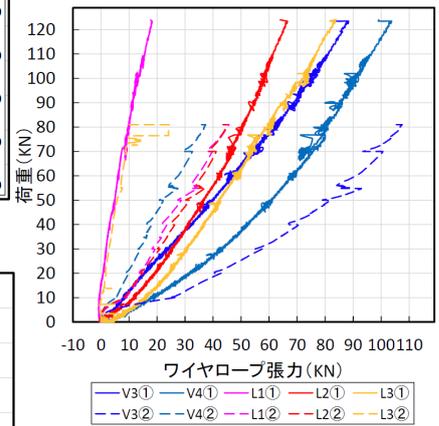


図-10 載荷荷重-ロープ張力関係 (載荷位置①、②)

100 kN であり、他の 0~10 kN 程度に比較して大きな状態となっている。これは (b) 図に示す横ロープに関しても同様で、載荷点近傍の L2、L3 の張力がそれぞれ両端の平均値で約 66、85 kN であり、L1 と比較して大きく、本供試体のような構造 (部材構成)、支持条件に対する静的載荷では、載荷点近傍のロープで大部分の荷重を分担していることがわかる。

図-9 に載荷位置② (金網上) における荷重と縦・横ロープ張力の関係について示す。(a) 図より、載荷位置に隣接する V3 (t, b) での張力が 100 kN 以上と最も大きく、次いで V4 が約 38 kN となっている。(b) 図の横ロープも除荷時には縦ロープ同様、負側に戻っていることがわかる。

図-10 には、載荷荷重と載荷位置を挟む 2 本の縦ロープ張力と全横ロープ張力の平均値との関係を示している。載荷位置①と②でほぼ同じ荷重-張力関係を示しているのは、載荷点から遠い横ロープ張力 (①: L1、②: L3) のみであり、他のロープ張力はそれぞれ違った値を示している。このことから前述のように全体の鉛直変位分布は、載荷位置によらず同じ性状を示すのに対し、載荷位置と隣接するワイヤロープが分担する張力は載荷位置により異なる。

4. まとめ

本研究では、現在、便覧による簡便式により設計が行われている従来型のポケット式落石防護網の構成部材のエネルギー吸収量の算定や数値解析における材料構成則等の設定を最終目的として、実規模の静的載荷実験を実施した。本実験の範囲内で明らかとなったことを整理す

ると、以下ようになる。

- 1) 本供試体のような構造 (部材構成)、支持条件に対する静載荷では、載荷点近傍に局所的変形が生じる。また、載荷点近傍のワイヤロープで大部分の荷重を分担する。
- 2) 便覧に記載の縦補助ロープ上での載荷と隣接する金網上での載荷では、全体の荷重-鉛直変位関係は同様な結果となる。しかし、載荷位置と隣接するワイヤロープが分担する張力は載荷位置により異なる。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 原木大輔，香月 智，田代元司：円柱形要素を用いた個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析，土木学会論文集 A，Vol.65 No.2，pp.536~553，2009.6
- 3) 高橋利延，山本佳士，香月 智，高森 潔：落石防護網のエネルギー吸収性能の評価に関する実験的検討，第 40 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集，2013.3
- 4) 難波正和，前川幸次，田島与典，横田哲也：実斜面を用いた実規模重錘衝突実験によるポケット式落石防護網の評価，構造工学論文集，Vol.60A，pp.1032-1041，2014.3
- 5) 山口 悟，今野久志，西 弘明，佐々木哲也，小室雅人：従来型ポケット式落石防護網の実規模重錘衝突実験，鋼構造年次論文報告集，巻 21 巻，pp.104-110，2013.11
- 6) 社団法人地盤工学会四国支部：落石対策 Q&A，P79，2009.12