

2.5 規模の大きな落石に対応する斜面对策工の性能照査技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究機関：平 23～平 27

担当チーム：寒地基礎技術研究グループ（寒地構造）

研究担当者：西 弘明、今野久志、山口 悟、角間 恒

【要旨】

本研究は、大規模土砂災害等に対する対策技術の構築に係る研究として、近年、採用事例が増加している高エネルギー吸収型を含めた落石防護工（網・柵）に求められる機能を明確化するとともに、性能照査技術を確立することを目的に実施している。

H25 年度は、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目的として、実規模の静的載荷実験および重錘落下衝撃実験を実施し、その挙動について検討を行った。また、過年度に実施した実規模重錘衝突実験を対象に、三次元弾塑性衝撃応答解析を実施し、解析手法の妥当性について検証するとともに、エネルギー吸収機構等についても検討を行った。

キーワード：落石防護工、落石防護網、性能照査技術、静的載荷実験、衝撃載荷実験、エネルギー吸収機構

1. はじめに

我が国の山岳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防護工が数多く建設されている。近年、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工（落石防護網や落石防護柵等）が開発され、経済性及び適用範囲の広さから、現場適用事例が増えている。しかしながら、それらの性能評価については統一的な指標がなく、従来型との性能比較も曖昧で安全余裕度等も不明確である。このような背景のもと、本プロジェクト研究では従来型落石防護工も含めて、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¹⁾。

落石防護工の一つであるポケット式落石防護網は、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構造であり、規模の比較的小さい落石に対して適用されている。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荷重作用時の構造部材の挙動を正確に把握することが重要である。

本研究では、従来型のポケット式落石防護網について、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目的として、実規模の静的載荷実験および重錘落下衝撃実験を実施し、その挙動について検討を行った。また、過年度に実施した実規模重錘衝突実験を対象に、三次元弾塑性衝撃応答

析を実施し、解析手法の妥当性について検証するとともに、エネルギー吸収機構等についても検討を行った。

2. 実規模静的載荷実験

2.1 供試体概要

本実験に用いた供試体の形状寸法を図-2.1 に示す。供試体は過年度に実施した実規模衝撃実験¹⁾と同一としており、金網高 10 m、金網幅 15 m である（4.1 参照）。

表-2.1 に、供試体材料の諸元を示す。金網には菱形金網 5.0 φ × 50 × 50 mm を、縦ロープおよび横ロープには 18 φ を、縦補助ロープには 14 φ を用いている。縦（補助）ロープの間隔は 3.0 (1.5) m、横ロープの間隔は 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²⁾には、現地施工では一般に巻付グリッパが用いられているが、本実験では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。

2.2 実験方法

写真-2.1、2.2 に実験状況と載荷用重錘、センサーを示す。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により静的に載荷させて実施した。

2.5 規模の大きな落石に対応する斜面对策工の性能照査技術に関する研究

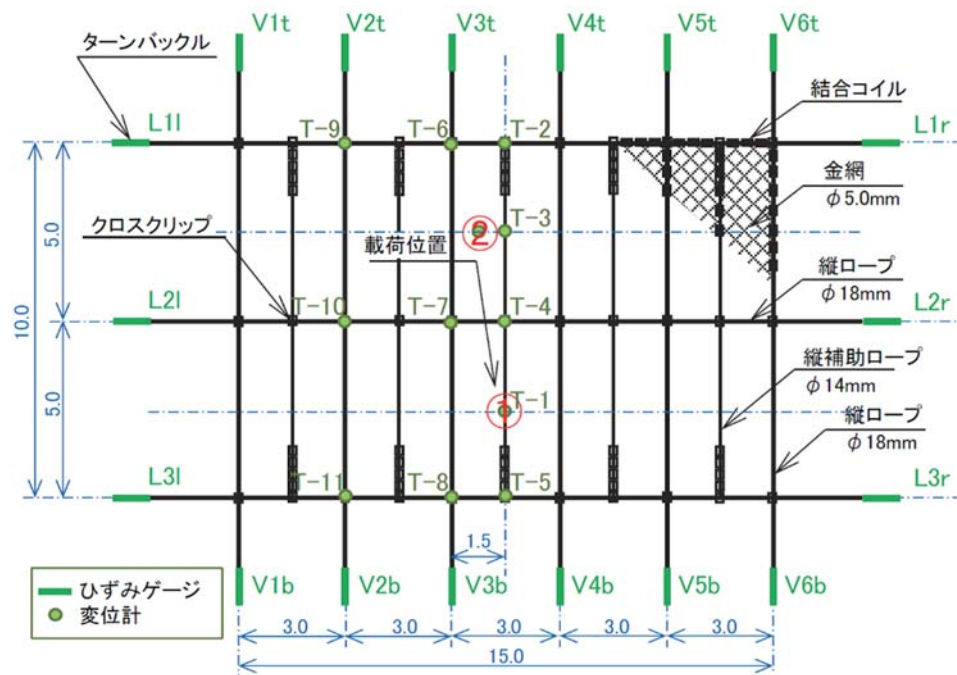


図-2.1 供試体の形状寸法(静的載荷実験)

表-2.1 供試体材料諸元

	諸元	部材耐力 [ミルシートより]
菱形金網	5.0 $\phi \times 50 \times 50$ mm	引張強さ:290~540 [405] N/mm ²
縦ワイヤロープ	18 $\phi 3 \times 7$ G/O , L=20.4 m	設計破断荷重:160 [208.8] kN
横ワイヤロープ	18 $\phi 3 \times 7$ G/O , L=13.5 m	設計破断荷重:160 [208.8] kN
縦補助ワイヤロープ	14 $\phi 3 \times 7$ G/O, L=13.0 m	設計破断荷重:110 [119.4] kN
ターンバックル	両アイ型	最小破断荷重:222kN

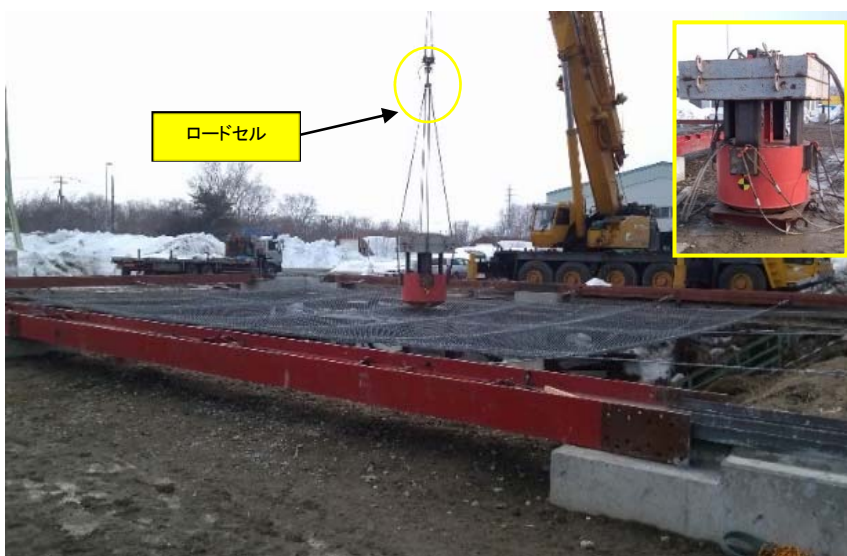


写真-2.1 実験状況(静的载荷実験)

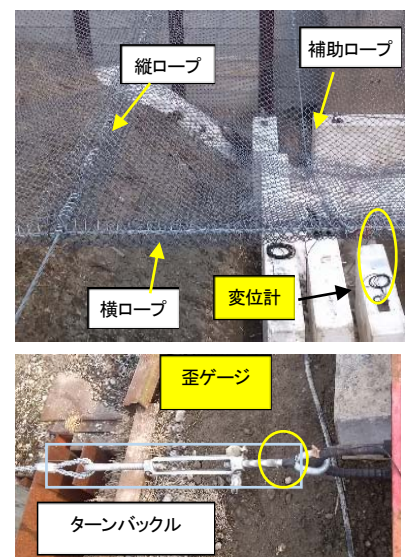


写真-2.2 センサー設置状況

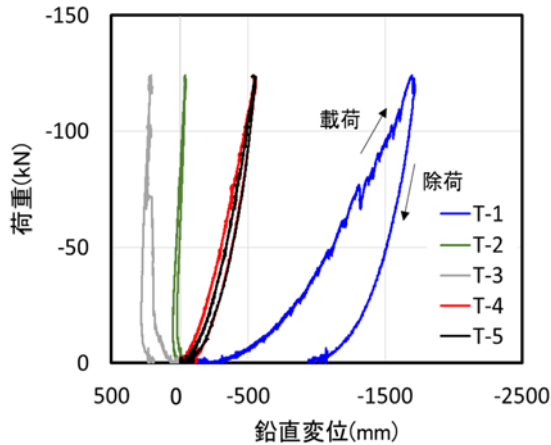


図-2.2 荷重-変位関係

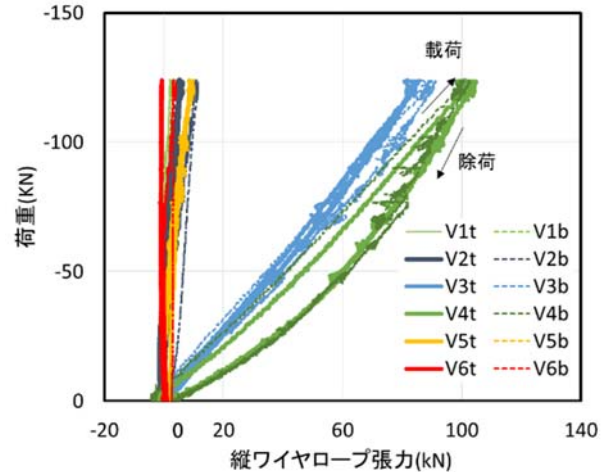


図-2.3 荷重-縦ロープ張力関係

載荷には、落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およびロープ交点の鉛直変位である。載荷位置は、図-2.1 に示す 2 箇所であり、便覧³⁾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）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とした。なお、ワイヤロープの初期張力は、縦ロープを 6～11 kN、横ロープを 15～23 kN としたが、金網も含めた自重によりたわみが生じている状態であった。

2.3 実験結果及び考察

2.3.1 金網鉛直変位

図-2.2 に、縦補助ロープ上への載荷ケース（載荷位置①）における荷重と補助ロープの鉛直変位の関係を示す。図より、載荷点直下の測定点である T-1 に着目すると、変位が 300 mm 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 900 mm）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況やロープ張力等から判断して、約 120 kN（変位約 1,700 mm）までの載荷とした。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 70 kJ と算

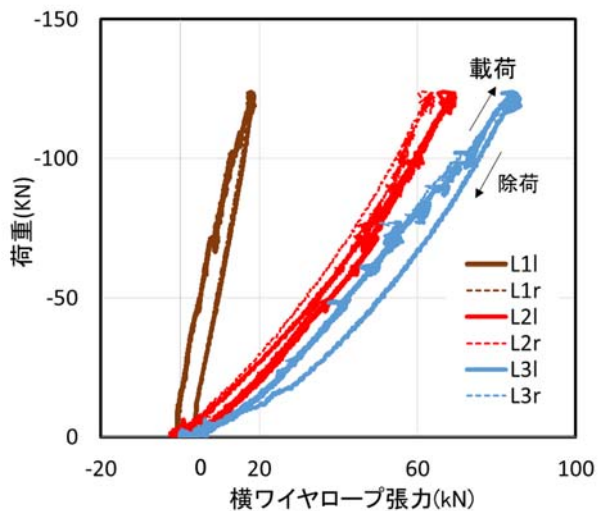


図-2.4 荷重-横ロープ張力関係

定される。なお、除荷時の残留変位は 900 mm 程度であった。

一方、載荷点以外の測定点に着目すると、近傍の T-4 と T-5 がほぼ同様な挙動を示しており、その最大変位は約 500 mm と載荷点 T-1 の 3 割程度にとどまっている。最遠端の T-2 ではほぼ変位は生じておらず、また、その手前の T-3 においては載荷方向とは反対に 200 mm 程度盛り上がった状態になっている。図示していないその他の測定点においても、最大変位は 400 mm 程度であり、載荷点近傍で局所的に大きな変位が生じている状態であることがわかる。

2.3.2 ワイヤロープ張力

図-2.3、2.4 に、縦補助ロープ上への載荷ケースにおける荷重とロープ張力の関係を示す。図より、ロープの両端 (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

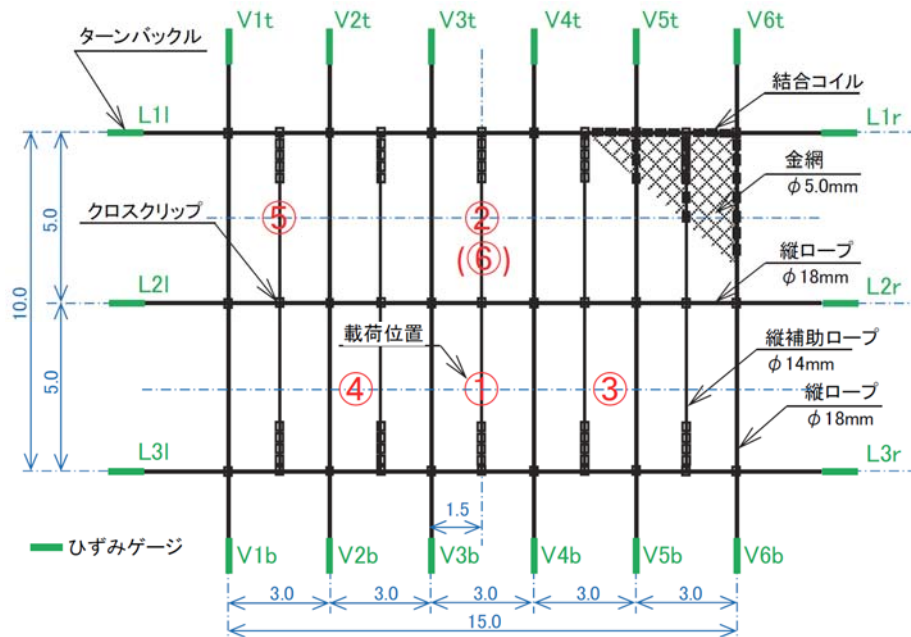


図-3.1 供試体の形状寸法 (衝撃载荷実験)

表-3.1 実験ケース一覧 (衝撃载荷実験)

実験 ケース	重錘質量 (t)	落下高 (m)	载荷位置	備考
D1-w5.0	1.0	5.0	① 補助	連続载荷
D1-w7.5		7.5	② ロープ上	
D2-n5.0		5.0	③ 金網上	中央スパン 金網交換後 連続载荷
D2-n7.5		7.5	④ 金網上	
D3-w5.0		5.0	⑤ 補助	
D1-w10.0		10.0	⑥ ロープ上	

増加は緩やかであることがわかる。縦ロープの最大張力に着目すると、载荷点近傍の V3 および V4 がそれぞれ両端の平均値で約 85、100kN であり、他の 0～10kN 程度に比較して大きな状態となっている。これは横ロープに関しても同様で、载荷点近傍の L2、L3 の張力が 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载荷では、载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。

3. 実規模衝撃载荷実験

3.1 供試体概要

本実験で用いた供試体の形状寸法は、静的载荷実験における供試体と同一である。

3.2 実験方法

図-3.1 に供試体形状を、写真-3.1、3.2 に実験状

況と変位計測状況を示す。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所定の高さに吊り上げた重錘を自由落下衝突させることにより実施した。

衝撃载荷には、質量 1 t（直径 50 cm、高さ 61 cm、底部より高さ 6 cm の範囲が半球状）の重錘を使用している。本実験における測定項目は、重錘に取り付けた加速度計による重錘衝撃力、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、高速度カメラ撮影による金網の重錘载荷点直下の鉛直変位量である。各センサーの応答波形は、データレコーダにてサンプリングタイム 1 ms で一括収録を行っている。

実験は、表-3.1 に示す計 6 ケースを実施した。载荷位置は、ここでも落石対策便覧に示されている作用

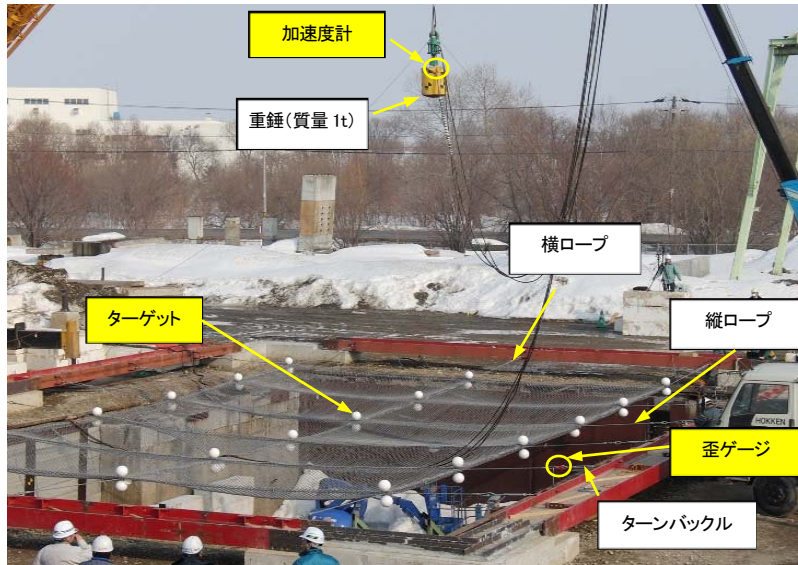


写真-3.1 実験状況 (衝撃実験)

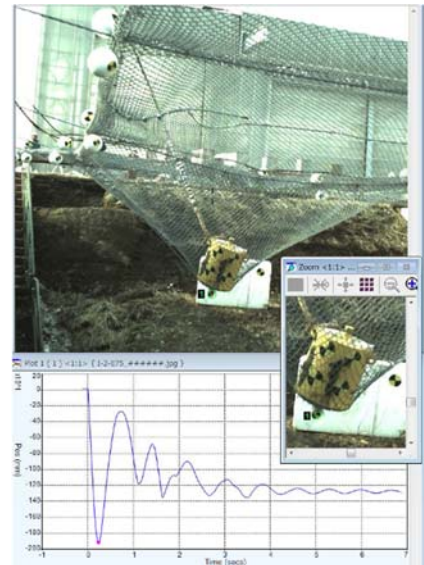
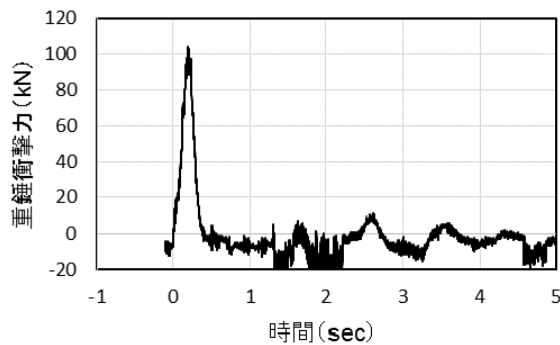
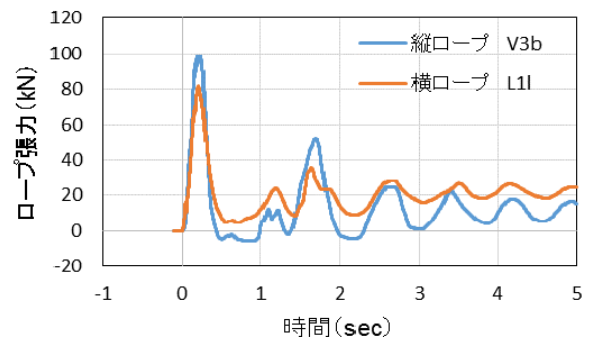


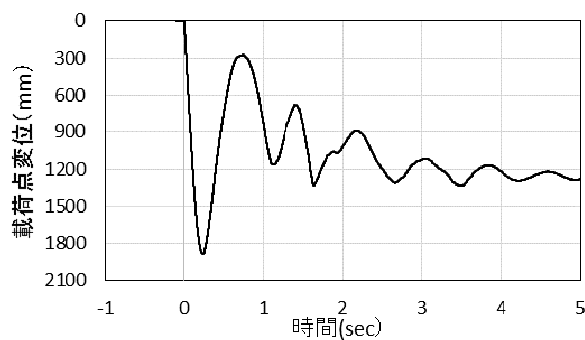
写真-3.2 変位計測状況



(a) 重錘衝撃力



(c) ロープ張力



(b) 載荷点変位

図-3.2 各種時刻歴応答波形 (D1-w7.5)

図-3.2(a)～(c)には、一例として実験ケース D1-w7.5 における重錘衝撃力波形、載荷点変位波形およびロープ張力波形を示している。その他の実験ケースにおいてもほぼ同様の時刻歴応答波形性状を示していることを確認している。(a) 図より、重錘衝撃力波形は継続時間が 0.4 sec 程度の三角形の波形性状を示しており最大重錘衝撃力は 100 kN 程度である。(b) 図より、載荷点変位は重錘衝突後急激に増加し 0.23 sec 後に最大変位 1.89 m に達した後、リバウンドしながら上下動を繰り返し最終的に 1.3 m 程度の残留変位が発生している。高速度カメラによる画像観察により重錘はリバウンドにより 0.46 sec で金網と分離し、1.29 秒後に再度金網と接触している。また、実験ケース D1-w5.0 および D1-w10.0 の載荷点最大変位は、それぞれ 1.57 m および 2.11 m であり入力エネルギーの増加に対応した変位量が計測されている。(c) 図には、縦・横ロープ

位置 (縦位置: 横ロープ間中央、横位置: 縦補助ロープ上) を基本ケースとして設定している。ロープの初期張力については、試験体設置後の張力を基準とし、各実験ケース終了後にはロープの位置および張力の調整を行っている。

3.3 実験結果および考察

3.3.1 各種応答波形

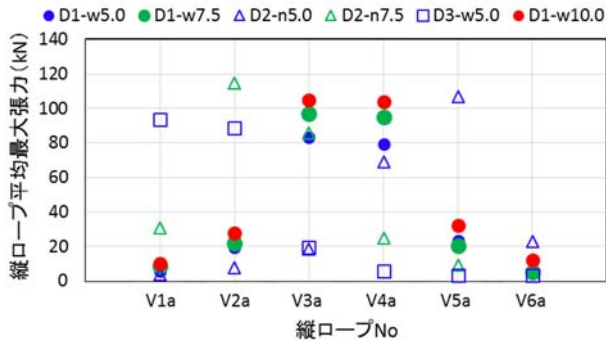


図-3.3 縦ロープ平均最大張力

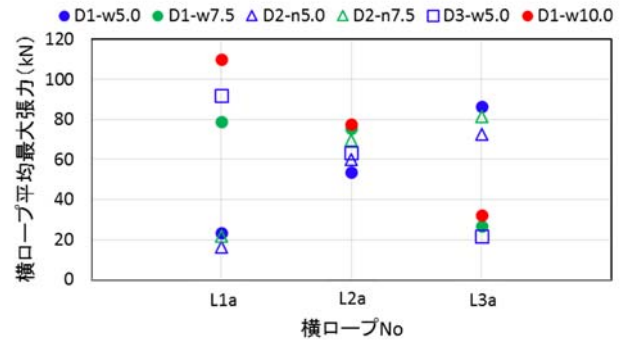


図-3.4 横ロープ平均最大張力

において最大張力を示したセンサーの時刻歴応答波形を示している。両ロープ張力波形は、载荷点変位に対応した波形性状を示しており、鉛直下方への载荷点変位ピーク発生時点において各ロープ張力においてもピーク値が示されている。最大張力に関しては縦ロープの方が大きいものの残留値については横ロープの方が大きくなっている。

3. 3. 2 ロープ張力

図-3.3、3.4には、1本の縦または横ロープの両端において計測された最大張力の平均値とロープ位置の関係を示している。

図中の凡例は、例えばV1tとV1bの平均値を示すロープ位置をV1aと表示している。なお、1本のロープの両端部においてはほぼ同様の波形性状およびピーク値を示すことを確認している。

図-3.3より、縦補助ロープ上に载荷した実験ケースD1-w5.0/7.5/10.0およびD3-w5.0では、载荷位置両側の縦ロープにおいてほぼ同程度の大きな張力が発生しており、载荷位置から離れるに従って張力が大きく減少する状況が示されている。金網上に载荷した実験ケースD2-n5.0/7.5においては载荷位置直近の縦ロープにおいて大きな張力が発生し、载荷位置から離れるに従って張力は減少している。同一条件の载荷位置では、入力エネルギーの増加に対応してロープ張力も増加する傾向が示されている。

図-3.4より、横ロープ張力は载荷位置に対して自由端側の横ロープ張力が最も大きく示され、逆側に向かってほぼ線形にロープ張力が減少する傾向が示されている。

4. 耐衝撃性能に関する数値シミュレーション

4. 1 実験概要

4. 1. 1 供試体概要

図-4.1には数値解析で対象とした実規模実験の試

験体の正面図および側面図を、表-4.1には試験体の設計条件を示している。落石防護網を構成する各部材の諸元は、表に示すように便覧²⁾の設計法を参考に落石の衝突前後のエネルギー差 E_L を考慮し決定した。試験体の形状寸法は、従来型のポケット式落石防護網とし、標準的な支柱間隔3mを基本として、金網全幅を5スパン分の15mとし、実験施設規模から金網高さを10m、支柱高さを3.5mに設定している。金網は幅3.3mのものを重ね代0.3mでラップさせて設置している。吊りロープ及び縦・横ロープにはφ18mmを、アンカーボルトにはD32(M30)×1000を用いている。なお、縦ロープの間隔は1.5m、横ロープの間隔は5.0mを基本に考えたが、重錘衝突の設定位置と重錘滑落装置の高さの関係から、横ロープは図に示すように変則的な配置としている。

4. 1. 2 実験方法

実験は、図-4.1に示すように実験施設内の傾斜角度約45°の法面に固定された重錘滑落装置を用いて、所定の高さに設置した重錘を滑落させて試験体に衝突させることにより実施した。写真-4.1には試験体の設置状況を示している。

落石対策便覧における設計上の落石の作用位置は、上端横ロープと2段目の横ロープの中央、縦ロープ方向については支柱間隔中央とされている。しかしながら、本実験においては、重錘滑落装置との位置関係から前述のように2段目と3段目横ロープの中央位置に重錘を衝突させている。重錘の質量は1t、形状は幅80cm×高さ75cm×長さ95cmであり、衝突部が球面形状となっている(写真-4.2a参照)。

本実験における測定項目は、ロープ端部のターンバックルに貼付したひずみゲージによるロープ張力、支柱H形鋼の基部に貼付したひずみゲージによる軸力、高速度カメラによる金網の二次元及び三次元変位等である。実験時のロープ張力等の応答波形は、サンパ

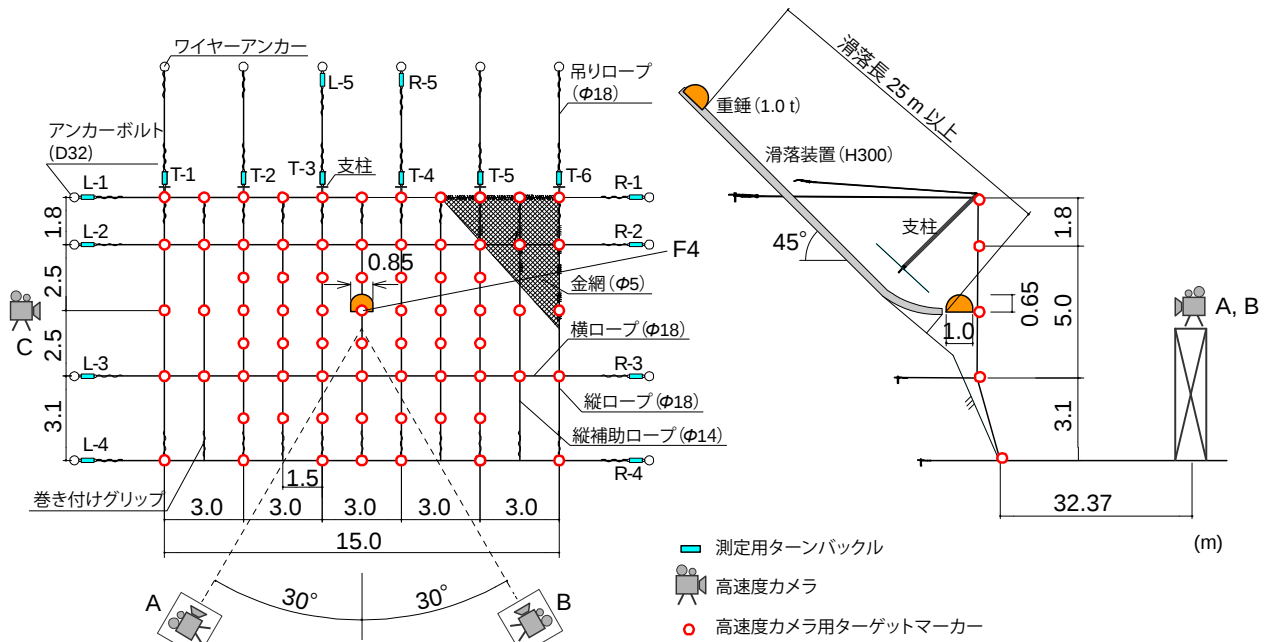


写真-4.1 供試体の設置状況



(a) 重錘

(b) 金網

写真-4.2 重錘および金網

表-4.1 供試体の設計条件

	(kJ)	諸元
落石持込エネルギー E_W	150.10	$W = 1 \text{ t}, H = 17 \text{ m}, \theta = 45^\circ$
吸収可能エネルギー E_T	151.26	$E_N + E_R + E_P + E_{ER} + E_L$
(a) 菱形金網 E_N	61.49	$5.0\phi \times 50 \times 50 \text{ mm}$
(b) 横ロープ E_R	14.78	$18\phi 3 \times 7 \text{ G/O}, L = 27 \text{ m}$
(c) 支柱 (ピン構造) E_P	0.00	$H100 \times 100 \times 6 \times 8, L = 3.5 \text{ m}$
(d) 吊りロープ E_{ER}	0.71	$18\phi 3 \times 7 \text{ G/O}, L = 8 \text{ m}$
(e) 縦ロープ	-	$18\phi 3 \times 7 \text{ G/O}, L = 10 \text{ m}$
(f) エネルギー差 E_L	74.28	
横ロープ端部アンカー		D32 (M30) $\times$ 1000

$E_T > E_W$ となるように設計

表-4.2 実験ケース一覧

ケース名	落下高さ H (m)	入力エネルギー (kJ)	
		設計時 E_{wd}	実験時* E_{we}
1-1	6	53	50
1-2	12	106	95
1-3	6	53	49
2-1	6	53	45
2-2	18	159	142

* 高速度カメラによる実測衝突速度から算出

リングタイム 0.1ms でデータレコーダにて一括収録を行っている。

表-4.2 には、実験ケースの一覧を示している。実験は、供試体の設計条件における落下高さの 1/3 程度である $H=6\text{m}$ を基準として、その整数倍で実施した。

4.1.3 金網の挙動計測方法

本実験では、金網の挙動を詳細に把握するため、2 台の高速度カメラ (A, B) を用いた三次元挙動計測と、重錘による入力エネルギーや最大変位量を確認するため 1 台の高速度カメラ (C) で側面からの二次元挙

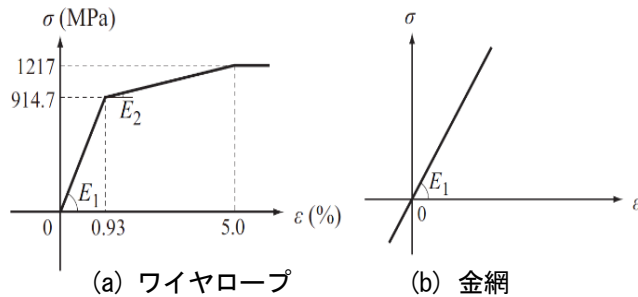
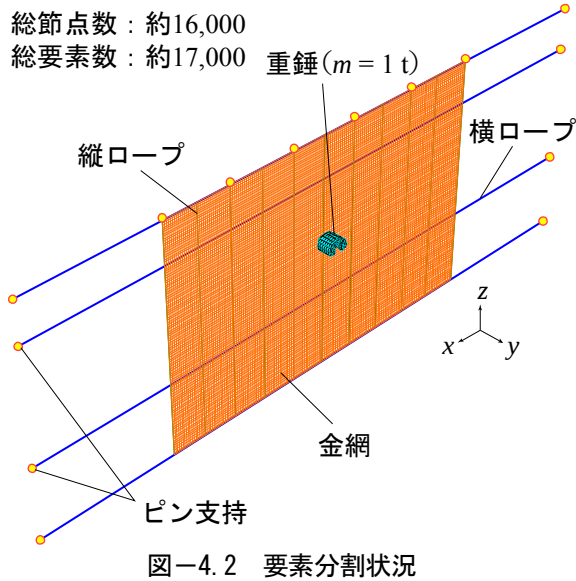


表-4.3 材料物性値

材料	単位体積 質量 $\rho \text{ (t/m}^3\text{)}$	降伏 応力 $f_y \text{ (MPa)}$	引張 強度 $f_u \text{ (MPa)}$	一次 弾性係数 $E_1 \text{ (GPa)}$	二次 弾性係数 $E_2 \text{ (GPa)}$	ポアソ ン比 ν
ロープ	7.85	915	1,270	98	7.43	0.3
金網	6.20	-	-	0.4	-	0
重錘	-	-	-	206	-	0.3

表-4.4 重錘衝突位置における最大水平変位一覧

実験 ケース	落下 高さ $H \text{ (m)}$	最大水平変位 (出力点: F4) (mm)		
		解析結果 $\delta_{a\max}$	実験結果 $\delta_{e\max}$	$\delta_{a\max} / \delta_{e\max}$
1-1	6	1,748	1,858	0.94
1-2	12	2,003	1,974	0.98
2-2	18	2,157	2,206	1.01

動計測を行った。高速度カメラ用のターゲットマーカに関しては 図-4.1 に示すように 72 点設置している。高速度カメラのフレームレートは、カメラ A および B で 250 コマ/秒、カメラ C で 400 コマ/秒である。

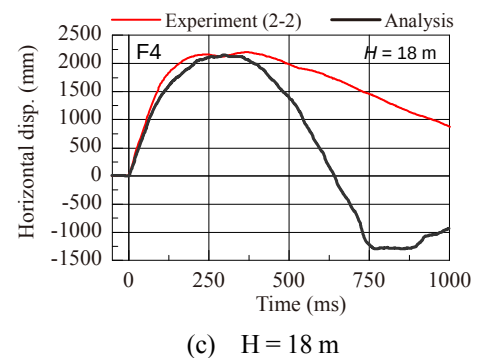
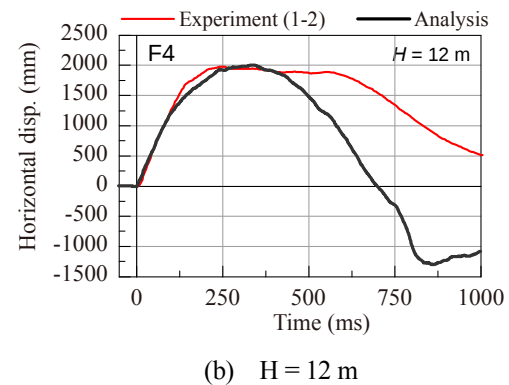
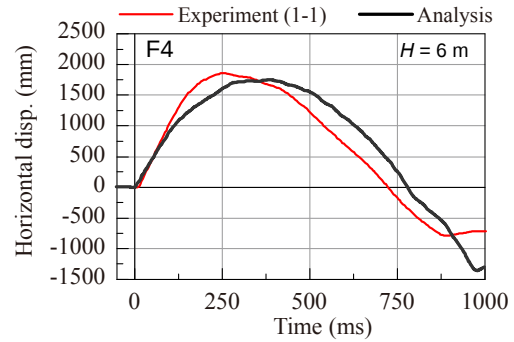


表-4.4 重錘衝突位置における水平変位の時刻歴波形

4.2 数値解析の概要

4.2.1 解析モデルおよび解析手法

写真-4.1 に示すように、実際の試験体は三次元的に複雑な形状を示しているが、それらの形状を全て数値解析モデルに反映させることは煩雑かつ困難であることより、本数値解析では二次元平面としてモデル化を行った。なお、本解析には LS-DYNA⁴⁾ を使用している。図-4.2 には、数値解析に用いた要素分割状況を示している。金網の寸法は縦 10 m、横 15 m とし、横ロープの長さは 27 m とした。金網に関しては 4 節点シェル要素を、ワイヤロープに関しては圧縮力を伝達しない 2 節点ケーブル要素を用いた。ワイヤロープ

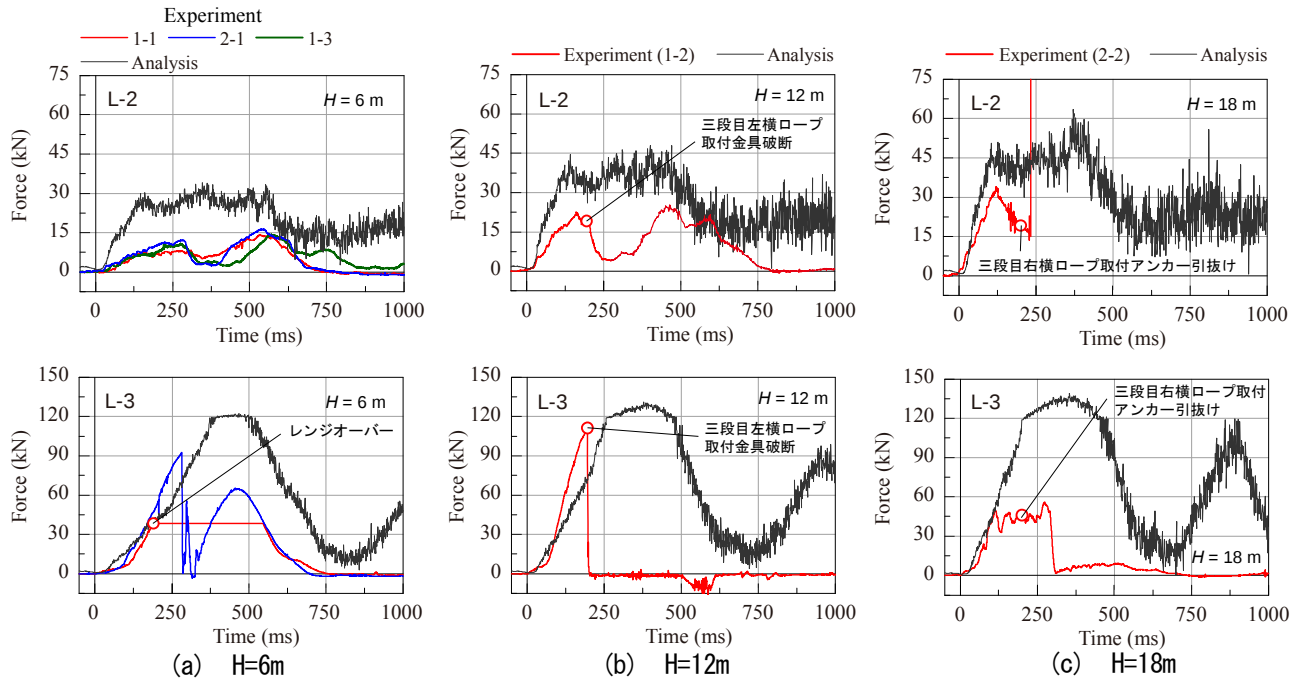


図-4.5 横ワイヤロープ張力の時刻歴波形 (L-2, L-3)

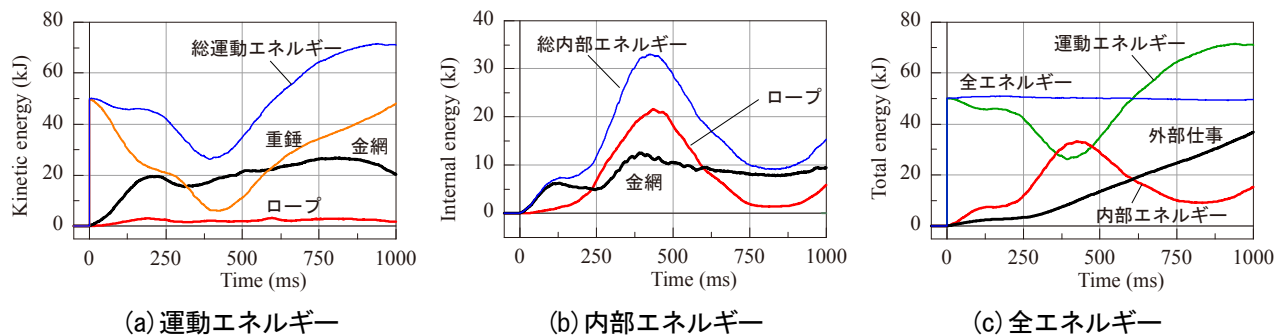


図-4.6 エネルギーの経時変化 (H=6m)

要素の積分点に関しては、計算精度を向上させるために 2×2 Gauss 積分を用いている。なお、金網は複数本の素線を組み合わせた三次元的な構造 (写真-4.2b 参照) であるが、それらを詳細にモデル化することは、計算時間の観点から現実的ではない。したがって、本論文では金網を便宜的に二次元として考え、シェル要素を用いて簡略化したモデルを使用した。

境界条件は、図-4.2 に示すようにワイヤロープ端部をピン支持としている。また、金網とワイヤロープは完全付着と仮定している。重錘と金網の間には、面と面との接触・剥離を伴う滑りを考慮した接触面を定義している。なお、接触面における摩擦は考慮していない。

数値解析は、重錘に高速度カメラから算出された衝突速度を初期速度として与えることにより行っている。解析時間は 1,000 ms とした。なお、減衰に関しては考慮していない。

4.2.2 材料構成則

図-4.3 には、ワイヤロープおよび金網の材料構成則を示している。図-4.3(a) にはワイヤロープに用いた応力-ひずみ関係を示している。応力-ひずみ関係は、表-4.3 に示す公称値を基本とし、破断ひずみを 5% と仮定して設定した。

図-4.3(b) には金網に用いた応力-ひずみ関係を示している。金網に関しては弾性体と仮定し、弾性係数 E_1 に関しては、既往の研究成果を参考に決定した。

なお、重錘に関しては、鋼弾性体と仮定し質量 1t となるように単位体積質量を換算している。表-4.3 には、解析に用いた材料特性値を一覧にして示している。

4.3 数値解析結果と考察

4.3.1 変形状況

図-4.4 には、解析結果から得られた重錘衝突位置 (図-4.1, F4 参照) における水平変位の時刻歴波形を実験結果と比較して示している。図より、落下高さ H

にかかわらず、数値解析結果は、重錘衝突初期から最大変位に至るまで非常によく一致していることが分かる。一方、落下高さが大きいほど最大変位以降のリバウンド状態において、数値解析結果は実験結果と異なる挙動を示している。これは、実験では3段目ロープ取付金具の破断 ($H=12\text{ m}$) やアンカーボルトの引き抜け ($H=18\text{ m}$) が生じていることが要因と考えられる。表-4.4には、重錘衝突位置における最大水平変位について、数値解析結果を実験結果と比較して示している。表より、数値解析結果と実験結果の比は5%以内であり、数値解析結果は実験結果の最大変位を精度よく再現できることが分かる。

4.3.2 ワイヤロープ張力

図-4.5には、横ワイヤロープ張力の時刻歴波形について、実験結果と数値解析結果を落下高さごとに比較して示している。着目した箇所は、重錘衝突位置を中心にその上下に位置する2段目および3段目の横ロープ左側 (L-2, L-3) である。

(a) 図に示す落下高さ $H=6\text{ m}$ について着目する。 $H=6\text{ m}$ に関しては同一条件で計3回の実験を実施していることより、それらの実験結果を全て記載している。なお、実験ケース1-1のL-3に関しては、40 kN程度でレンジオーバーのため張力が頭打ちとなっている。図より、重錘衝突位置よりも上方に位置するL-2の張力に関しては、数値解析結果が実験結果を過大に評価していることが分かる。最大張力を比較すると、実験結果では14 kN程度であるのに対し、数値解析結果は約34 kNと約2.8倍大きい。さらに、重錘衝突後における張力の増加率においても、実験結果と比較して数値解析結果は大きく示されている。一方、重錘衝突位置よりも下側に位置するL-3を見ると、数値解析結果は重錘衝突後における張力の増加傾向など、実験結果を非常に良く再現できている。さらに、張力の作用継続時間に関しても、数値解析結果は実験結果と比較して若干大きく評価しているものの、除荷勾配は両者でよく一致していることが分かる。

次に落下高さ $H=12\text{ m}$ の結果 (b 図参照) について考察する。L-2における張力の時系列波形を見ると、数値解析結果は $H=6\text{ m}$ の場合と同様に実験結果を過大に評価していることが分かる。また、L-3に関しても、 $H=6\text{ m}$ の場合と同様、数値解析結果は取付金具が破断するまでの実験結果を精度よく再現しているものと考えられる。また、(c) 図に示す $H=18\text{ m}$ の場合においても、 $H=6, 12\text{ m}$ の場合と同様な傾向を示していることが分かる。ただし、L-2の張力に関し

ては、落下高さ H が大きくなるほど、数値解析結果は実験結果に近づく傾向にある。

なお、L-3の張力に関しては、落下高さ H にかかわらず、数値解析結果における張力が118 kN程度で横ばいとなっているが、これはワイヤロープの降伏張力と一致していることより、数値解析上ではワイヤロープが降伏状態にあることを示唆している。

4.3.3 エネルギーの経時変化

エネルギー収支の解明という観点から行われた検討事例⁵⁾はごく限られている現状にある。

図-4.6には、エネルギーの経時変化の一例として $H=6\text{ m}$ における運動、内部および全エネルギーについて示している。(a) 図より、重錘の運動エネルギーは金網に衝突後徐々に減少し、金網が最大変位を示す400 ms前後で最小値を示し、その後重錘のリバウンドとともに運動エネルギーが増加している。また、金網の振動に伴う運動エネルギーが増加していることが分かる。一方、ワイヤロープの運動エネルギーはそれらに比較して小さい。

次に、(b) 図に示す内部エネルギーに着目すると、ワイヤロープの内部エネルギーは、400 ms前後で最大値を示し、その後減少傾向にあることが分かる。なお、内部エネルギーが最大値を示す時刻における金網とワイヤロープの分担率を比較すると、後者が約2/3程度となることが確認される。(c) 図より、解析時間内における全エネルギーは入力エネルギーである50 kJを示しており、本数値解析におけるエネルギー収支は適切であることが確認される。なお、外部仕事に関しては系全体の重力による仕事を意味する。

4. まとめ

本研究では、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目的として、実規模の静的載荷実験および重錘落下衝撃実験を実施し、その挙動について検討を行った。また、過年度に実施した実規模重錘衝突実験を対象に、その耐衝撃性能を適切に評価可能な解析手法を確立することを目的に、LS-DYNAを用いた三次元弾塑性衝撃解析を実施した。本研究で得られた結果を整理すると、以下ようになる。

・静的載荷実験に関して、

- 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。
- 2) 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。

・重錘衝突実験に関して、

- 3) 重錘が金網に衝突(接触)してからリバウンドして分離するまで間の重錘衝撃力、載荷点変位およびロープ張力は、三角形形状の波形性状を示す。
- 4) 静的載荷の場合と同様に、載荷点近傍のワイヤロープが大きな荷重を分担する。
- 5) 同程度の載荷荷重に対する載荷点変位量は、静的載荷の場合に比較して大きい。
- ・三次元弾塑性衝撃解析に関して、
- 6) 提案の材料構成則および解析手法を用いることにより、重錘衝突を受ける金網の変形性状をほぼ適切に再現可能である。
- 7) 一方、ワイヤロープの張力に関しては、衝突位置より上側横ロープの張力を過大評価する傾向にあり、実験結果を必ずしも再現できるまでには至らなかった。

参考文献

- 1) 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 年 11 月
- 2) 社団法人地盤工学会四国支部: 落石対策 Q&A, P79, 2009.
- 3) 社団法人日本道路協会: 落石対策便覧, 2000 年 6 月
- 4) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Liv-ermore Software Technology Corporation, 2012.
- 5) 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.

A STUDY ON PERFORMANCE VERIFICATION TECHNOLOGY FOR SLOPE STABILIZATION TO REDUCE THE RISK OF LARGE ROCKS FALLING

Budget: Grants for operating expense General account

Research Period: FY2011 – 2015

Research Team: Cold-Region Construction
Engineering Group (Structures)

Author: NISHI Hiroaki

KONNO Hisashi

YAMAGUCHI Satoru

KAKUKA Ko

Abstract: As a part of studies for establishing measures against large-scale landslide disasters, this study aims at elucidating the functions required of rock-fall protection structures with high-energy-absorption capacities, which have been increasingly adopted in recent year, and at establishing a technique to verify the performance of such structures.

To calculate the energy absorption of the component materials of a conventional pocket-type rock-fall protection net and to establish the material constitutive law for numerical analysis of the energy absorption, full-scale static loading tests and falling-weight impact tests were done for behavioral measurement of a conventional pocket-type rock-fall protection net. In addition, to examine the validity of the analytical method of full-scale falling-weight impact tests conducted in previous fiscal years, 3-dimensional elastic-plastic impact response analysis was conducted; at the same time, the energy absorption mechanism was clarified.

Keywords: rock-fall protection structures, rock-fall protection net, technique for verifying performance, static loading test, impact loading test, energy absorbing mechanism