

## 従来型ポケット式落石防護網の重錘衝突実験

Falling-weight impact test of traditional pocket type rockfall protection net

西 弘明\*, 今野久志\*\*, 山口 悟\*\*\*, 佐々木哲也\*\*\*\*, 小室雅人\*\*\*\*\*  
Hiroaki Nishi, Hisashi Konno, Satoru Yamaguchi, Tetsuya Sasaki, Masato Komuro

\*工博, 土木研究所寒地土木研究所上席研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

\*\*工博, 寒地土木研究所総括主任研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

\*\*\*寒地土木研究所研究員, 寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

\*\*\*\*土木研究所つくば中央研究所上席研究員, 土質・振動チーム (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

\*\*\*\*\* 工博, 室蘭工業大学大学院准教授, 工学研究科 (〒050-0071 室蘭市水元町 27-1)

*Key Words: rockfall protection structure, pocket type rockfall protection net,  
full scale test, falling-weight impact test*

キーワード: 落石防護構造物, ポケット式落石防護網, 実規模実験, 重錘衝突実験

### 1. はじめに

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対策工が設置されている。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, 上部に落石の入り口を設けた状態で斜面上に設置された金網に落石が衝突することにより, 落石の持つエネルギーを吸収する機能を持つ構造であり, 経済性や施工性に優れ, 規模の比較的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)<sup>1)</sup>を参考に, 構成部材の吸収可能エネルギー及びエネルギー差を用いて行われているが, 落石衝突に対する耐衝撃挙動という観点での検討事例<sup>2)~4)</sup>はごく限られている。

著者らは落石防護網工として求められる機能の明確化や性能照査技術の確立に向けた検討を行っている。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造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, ポケット式落石防護網の耐衝撃挙動やエネルギー吸収機構等を詳細に検討するための基礎資料を得ることを目的として実施した, 従来型落石防護網の実規模の重錘衝突実験とその三次元挙動計測の概要について報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 供試体

図-1 に実験供試体の正面図及び側面図を, 表-1 に供試体の設計条件を示す。

落石防護網を構成する部材の諸元は, 便覧における設計法を参考に, 落石の衝突前後のエネルギー差  $E_L$  を考慮し決定した。供試体の形状寸法は, 従来型のポケット式落石防護網で標準的な支柱間隔 3 m を基本として, 金網全幅を 5 スパン分の 15 m とし, 実験施設規模から金網高さを 10 m に, 支柱高さを 3.5 m に設定している。ここで, 縦ロープの間隔は 1.5 m, 横ロープの間隔は 5.0 m 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。

従来型における金網には, 一般にひし形金網  $\phi 3.2 \sim 5.0 \times 50 \times 50$  mm が用いられているようであるが, 本実験では  $\phi 5.0$  mm のものを選定している。なお, 金網は幅 3.3 m のものを重ね代 0.3 m 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  $\phi 18$  mm を, アンカーボルトには D32 (M30)  $\times$  1000 を用いている。

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  $\phi 4.0$  mm の結合コイルを縦ロープには 5 m に 8 個, 同じく横ロープには 3 m に 4 個を使用している。横ロープの端部処理には, 一般に採用されている巻付グリップを用いているが, 巻付グリップの引き抜けを防止するためワイヤクリップを併用した。また, 巻付グリップとアンカーボルトの連結にはタ

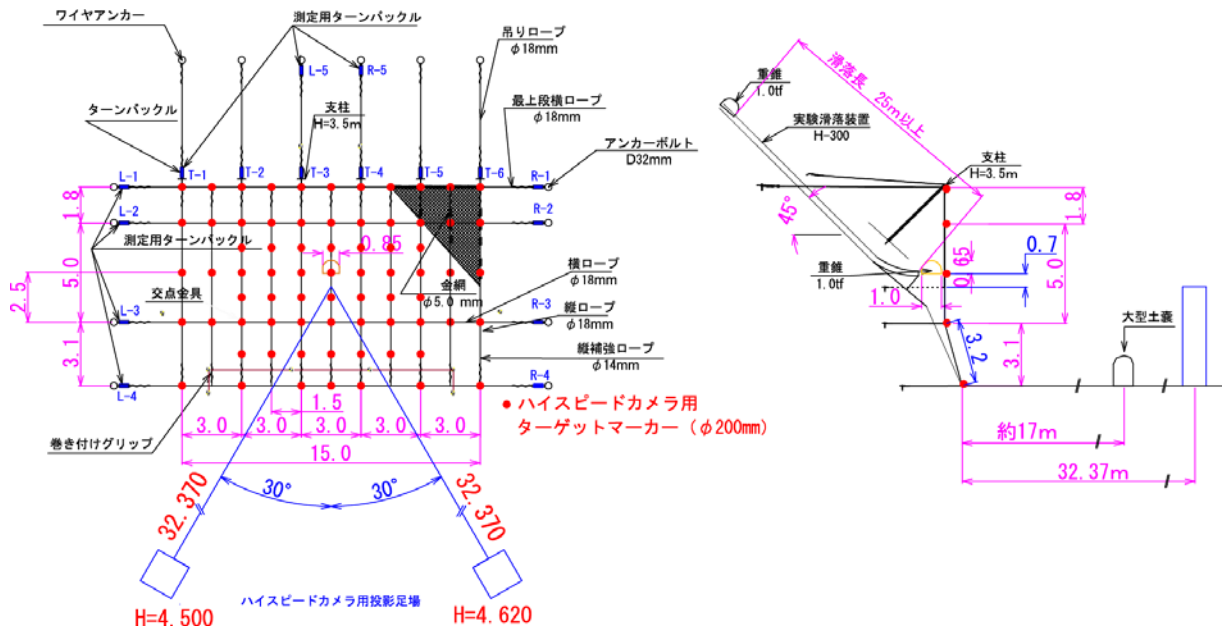


図-1 ポケット式落石防護網供試体の正面図及び側面図

表-1 供試体の設計条件

	(kJ)	諸元	部材耐力 [ミルシートより]	安全率
落石持込エネルギー: $E_W$	150.10	$W = 1 \text{ t}, H = 17 \text{ m}, \theta = 45^\circ, \mu = 0.1$		-
吸収可能エネルギー: $E_T$	151.26	$E_N + E_R + E_P + E_{ER} + E_L$		$E_T > E_W$
・菱形金網: $E_N$	61.49	5.0 $\phi \times 50 \times 50 \text{ mm}$	有効張力: 41.1 kN/m	2.24 > 1.0
・横ロープ: $E_R$	14.78	18 $\phi 3 \times 7 \text{ G/O}, L = 27 \text{ m}$	設計破断荷重: 157.0 [190] kN	1.88 < 2.0
・支柱(ピン構造): $E_P$	0.00	H100 $\times 100 \times 6 \times 8, L = 3.5 \text{ m}$		-
・吊りロープ: $E_{ER}$	0.71	18 $\phi 3 \times 7 \text{ G/O}, L = 8 \text{ m}$	設計破断荷重: 157.0 [190] kN	4.68 > 3.0
・縦ロープ	-	18 $\phi 3 \times 7 \text{ G/O}, L = 10 \text{ m}$	設計破断荷重: 157.0 [190] kN	5.25 > 2.0
・エネルギー差: $E_L$	74.28	-		-
横ロープ端部アンカー		D32 (M30) $\times 1000$	設計せん断耐力: 111.0 kN	1.33 > 1.0

ーンバックルと取付け金具を使用している。

## 2.2 実験方法

実験は図-1 に示すように、実験施設内の傾斜角度約  $45^\circ$  の法面に固定された重錘滑落装置に、所定の高さで設置した重錘を滑落させて、供試体に衝突させることにより実施した。写真1に実験状況を示す。

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。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1.0ton、形状は幅80cm $\times$ 高さ75cm $\times$ 長さ95cmで、衝突部が球面形状である(写真-2)。

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歪ゲージによるロープ張力、支柱H形鋼の基部に貼付した歪ゲージによる軸力、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、サンプリングタイム0.1msでデータレコーダにて一括収録を行っている。

表-2 に実験ケースの一覧を示す。落下条件は落石持込みエネルギー  $E_W$  が、エネルギー差  $E_L$  を除く可能吸収エネルギーを下回る落下高さ  $H = 6 \text{ m}$  を基準として、整数倍で設定したものである。なお、重錘衝突により金網およびワイヤーロープの一部には塑性変形が生じることになるが、金網の交換を行ったのは実験ケースNo.1-3の終了後のみであり、No.1-とNo.2-では、それぞれ同一の金網を使用している。

## 2.3 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動計測を行った。カメラA, Bは、実験条件を踏まえて冬期の屋外で使用する、撮影距離が20m以上で1ms程度の

表-2 実験ケースと損傷状況の概要

ケース名	H(m)	$E_{wd}$ (kJ) (設計※)	$E_{we}$ (kJ) (計測※※)	損傷状況の概要	備考
No.1-1	6.0	53	50	重錘衝突部の金網の塑性変形	新材金網
No.1-2	12.0	106	95	3 段目横ロープ左側の取付け金具の破断・右側アンカーボルト周辺の岩盤の局部破壊・巻付グリップの緩み	金網再利用
No.1-3	6.0	53	49	3 段目横ロープ左側のアンカーボルトの破断	金網再利用, 実験開始前に取付け金具撤去(以降未使用)
No.2-1	6.0	53	45	最下段(4 段目)横ロープ右側のアンカーボルトの破断・横ロープの緩み	新材金網(実験開始前に交換)
No.2-2	18.0	159	142	3 段目横ロープ右側のアンカーボルトの引抜	金網再利用

落石持込エネルギー算出時の重錘速度 ※: 理論速度, ※※: 二次元高速度カメラ計測結果より



写真-1 実験状況



写真-2 重錘・巻付グリップ・アンカー破断状況

分解能を有することなどを条件に選定した. カメラ A, B は時刻歴変位を一致させるため同一有効画素数 1,024×1,024 とし, フレームレート 250 コマ/秒 (1/250 sec) にて収録している. 一方, 二次元計測においては, 有効画素数 640×480, フレームレート 400 コマ/秒 (1/400 sec) にて収録している.

カメラ撮影用のターゲットマーカーとして, 白色の EPS 製球体 (φ200 mm) を金網上の縦横ロープの交点を中心に 72 点 (図-1 中●印) 設置している.

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 損傷状況等の概要

表-2 に損傷状況の概要を, 写真-2 に実験後の横ワイヤー端部及びアンカー破断部の状況を, また, 表-3 にワイヤーロープの最大張力の一覧を示す.

各実験ケースとも, 重錘は想定どおり 2 段目と 3 段目横ロープのほぼ中間位置に衝突した後, 落下しながら最大変位に達し, 金網に誘導されて地盤面まで到達している. 損傷状況としては, 最初の実験ケース No.1-1 (H=6 m) では, 重錘衝突部近傍の金網に若干の塑性変形が生じている程度であったが, このケースを除き, 横ロープ

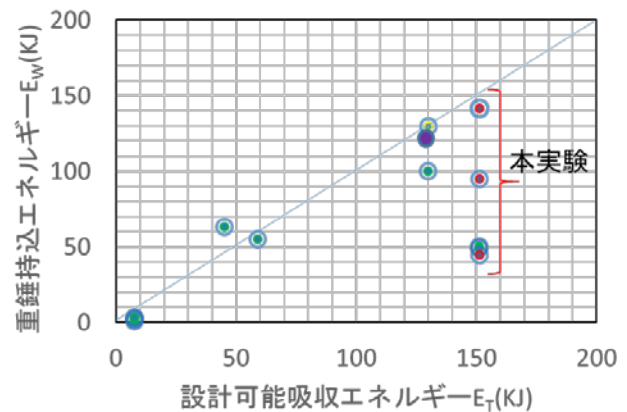


図-2 設計可能吸収エネルギーと実験時の重錘(落石)持込エネルギーの関係

端部の取付け金具やアンカーボルト部で破断等が生じている (表-3 の赤字箇所). 実験ケース No.1-3 では, 落下高さ H=6 m の条件にもかかわらず, アンカーボルトの破断が生じているが, これは直前の実験ケース No.1-2 において当該アンカーボルトのネジ部に何らかの損傷が生じていたことが原因と考えられる. 本実験で使用したワイヤーロープ φ18 mm のミルシートによる破断荷重は 190 kN であるのに対し, アンカーボルト D 32

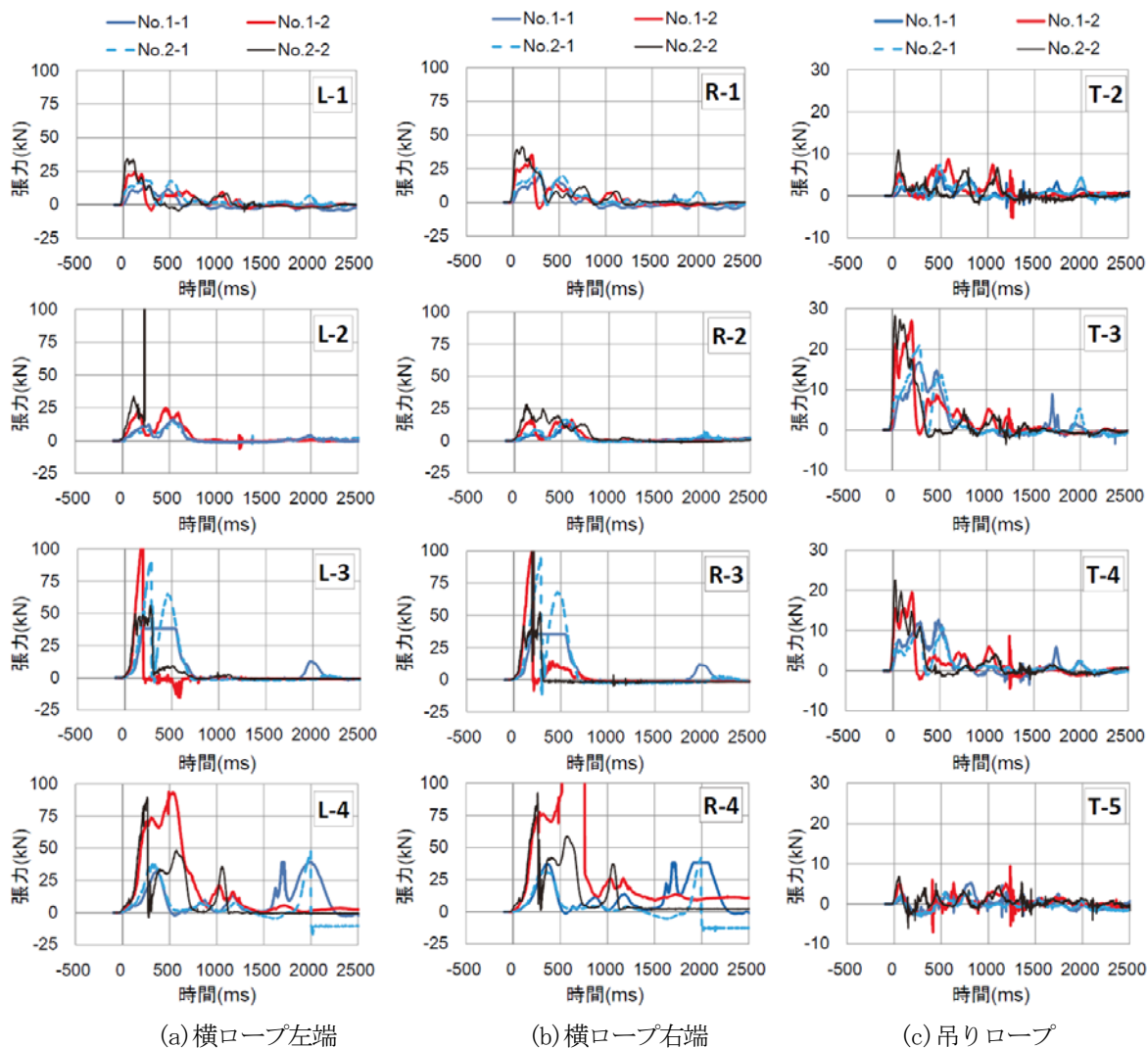


図-3 ワイヤロープ張力の時刻歴波形

(M30) の設計せん断耐力は 111 kN であることから、ロープの破断には至らずにアンカーボルト部での損傷が生じたものである。これは上述のとおり、重錘は最初に横ロープ間の金網に衝突しているが、落下しながら衝突点直下の横ロープに接触したことにより、横ロープに想定以上の張力が作用したことによるものと推察される。なお、各ケースにおいて、特に下段横ロープ端部の巻付グリップには緩みが確認されている。

図-2 には、落石防護網の設計上の可能吸収エネルギーと実験時の重錘持込エネルギーの関係を示す。図中には既往研究<sup>2~4)</sup>より、緩衝装置類を採用していない従来型の落石防護網を用いた場合の結果を併記している。

前述のように従来型ポケット式落石防護網の耐衝撃挙動に関する研究事例は少なく、特に実規模かつ設計可能吸収エネルギーを超える条件での実験はほとんど行われていない。本実験結果のように、一部構成部材に損傷が見られるようなケースもあるものの、落石(重錘)持込エネルギー 150 kJ 程度までに対して従来型ポケット式落石防護網により落石を概ね捕捉することが可能であることを確認できた。

### 3.2 ワイヤロープ張力

図-3 に、実験ケース(No.1-1:青実線, No.1-2:赤実線, No.2-1:青破線, No.2-2:黒実線)におけるワイヤロープ張力の時刻歴波形を示す。L-1~4 は横ロープ左端, R-1~4 は横ロープ右端, T-2~5 は吊りロープの張力である。ここで、表-3 に下線で示している、実験ケース No.1-1 の L-3, L-4, R-3, R-4, および No.2-1 の R-4 は 40 kN 程度でレンジオーバーのため頭打ちとなっている。なお、No.2-1 は No.1-1 と同一の落石持込エネルギーであるが、両者はほぼ類似の波形性状となっており、比較的再現性の高い実験を実施できたと考える。

図より、横ロープ張力に着目すると、左右で概ね等しい応答波形となっていること、重錘衝突点より下方 L-3, L-4, R-3, R-4 の張力が上方 L-1, L-2, R-1, R-2 に比較して大きな値を示していることがわかる。また、縦ロープ張力に着目すると、衝突位置を中心として左右で概ね対象な応答波形となっており、重錘衝突点近傍の T-3, T-4 が大きな値を示していることがわかる。

縦ロープ張力の応答波形は重錘衝突直後に急な立ち

表-3 ワイヤロープの最大張力一覧

ケース (落下高さ)	横ロープ張力(kN)				吊りロープ張力(kN)					
	L-1 R-1	L-2 R-2	L-3 R-3	L-4 R-4	T-1	T-2	T-3 L-5	T-4 R-5	T-5	T-6
No.1-1 (H=6m)	14.2	14.2	38.3	39.1	6.1	5.3	16.9	12.7	5.3	18.8
	20.0	14.1	35.3	38.1			16.8	12.3		
No.1-2 (H=12m)	24.5	25.2	111.2	94.0	13.7	8.8	27.1	19.6	9.4	16.4
	35.6	16.6	101.3	—			27.7	20.3		
No.1-3 (H=6m)	17.7	14.5	—	51.5	7.3	6.8	23.0	19.9	4.8	11.8
	26.3	7.6	83.8	46.7			23.3	20.9		
No.2-1 (H=6m)	18.4	16.3	92.6	48.0	6.7	7.4	20.9	10.7	3.0	11.6
	25.5	17.1	96.6	42.2			20.8	10.6		
No.2-2 (H=18m)	34.4	—	56.1	89.8	14.2	10.9	28.3	22.6	6.8	29.3
	41.3	28.3	—	92.7			28.3	22.9		

※赤字は部材破断箇所，下線はレンジオーバー，— は異常値により評価から除外

上がりを示しているが、特に落石持込エネルギーが大きくなるとより急激な立ち上がりとなっている。一方、横ロープ張力は L-1,R-1 で入力エネルギーが大きい場合には縦ロープと同じように急な立ち上がりであるが、下方のロープほど緩やかな立ち上がりとなっている。

各実験ケースの波形性状は、No.1-1, No.2-1 においては二つの大きなピーク(300 ms と 2000 ms 前後)がみられるが、二つ目のピークは回転する重錘が地盤面に着地し、リバウンドすることに伴って、最下段のロープに大きな張力が作用しているものと考えられる。No.2-1 ではこの二つ目のピーク時点で R-4 箇所においてアンカーボルトが破断している。また、L-3,R-3 や T-3,T-4 で顕著であるが、一つ目のピークでは急激な張力の増加後、急激な低下と急激な増加が生じているが、これはワイヤロープ端部の振れに伴う張力変化が計測されたことによるものと考えられる。

実験ケース No.1-2 においては、金網の最大変位発生前後で、重錘が3段目の横ロープ位置に達する前に L-3 箇所で取付け金具の破断が発生している。これに対応して L-3,R-3 の応答波形は 200 ms 経過時点でピークに達した後、ほぼ零レベルまで急激に低下し、500 ms 経過時点で L-4,R-4 の張力がピークに達している。

実験ケース No.2-2 では、R-3 箇所でアンカーの引き抜けが生じているが、これに対応して L-3,R-3 において約 300 ms 経過時点で張力の低下が生じている。L-4,R-4 の張力は、L-3,R-3 よりも若干早くピークを迎え、一度零レベルまで低下した後、約 600 ms 経過時点で 50 kN, 1,100 ms 経過時点で 40 kN 程度に達している。

本実験で用いた横ロープの設計張力は約 83 kN であり、落下高さ 6m の条件においても、重錘の衝突状況によっては同程度以上の張力が作用するケースがあり、ロープ端部の定着箇所に大きな損傷が生じることを確認

できた。一方、縦ロープの設計増加張力は約 30 kN であるのに対し、設計上とはほぼ落石持ち込みエネルギーの等しい実験ケース No.2-2 の T-3 で約 30 kN となっており、ほぼ等しい張力となっていることがわかった。

### 3.3 部材の三次元挙動

図-4 に実験ケース No.1-1 における高速度カメラ C による左側面からの二次元挙動計測例を、図-5 に三次元挙動計測例を、図-6 に三次元挙動による金網の変位分布を、図-7 に時刻歴変位波形(図-4 中の F4 点の Y 方向)の解析例を示す。

各実験ケースとも、挙動計測によって重錘の金網への衝突から地盤面に落下していくまでの様子を把握できており、最大変位は衝突より概ね 0.5 sec 程度で、3 段目の横ロープ位置において発生していることなどが画像からも確認できている。

表-4 には、金網の重錘衝突位置(横方向の中心線)の二次元計測と三次元計測による最大変位量を示している。なお、最大変位量は必ずしもターゲットマーカ位置で発生しているわけではなく、二次元計測では側面から見た重錘位置での最大変位量を示しているのに対して、三次元計測ではターゲットマーカ位置での最大変位量を示していることから、両者は一致していない。

今回、従来から用いられている二次元的な最大変位量計測に加えて、斜め 2 方向からの高速度カメラを用いた三次元挙動計測により、ポケット式落石防護網のように荷重作用時において部材に大変形を伴うような構造物の全体の変位分布や着目点の時刻歴変位波形を得ることができていることを確認できた。これらを活用することにより、落石防護網の耐衝撃挙動やエネルギー吸収機構等の詳細な検討を行うことが可能になるものと考えられる。

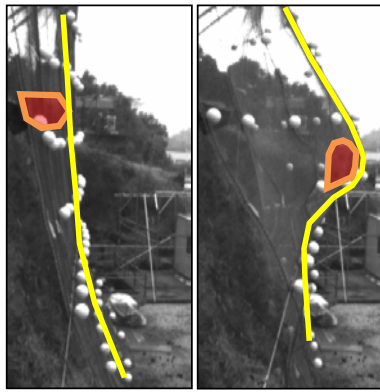


図-4 二次元挙動計測例

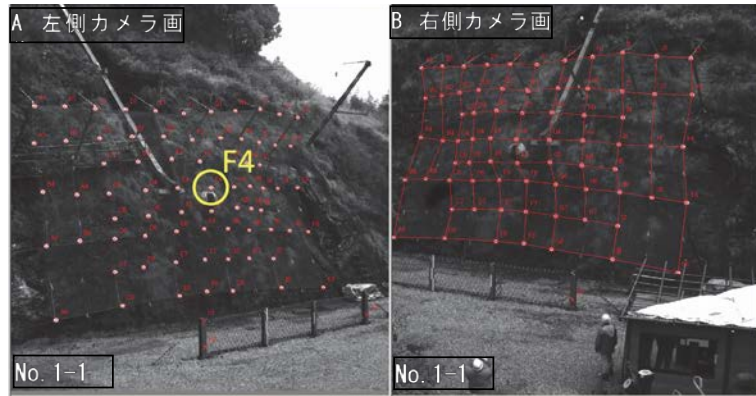


図-5 三次元挙動計測例

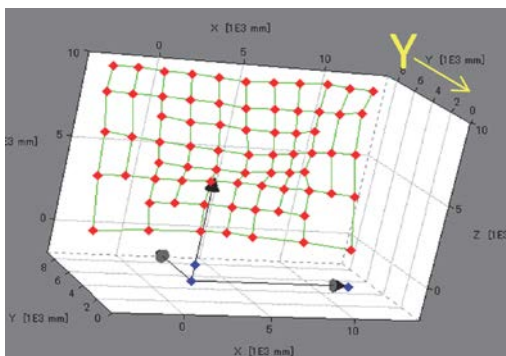


図-6 三次元変位分布解析例

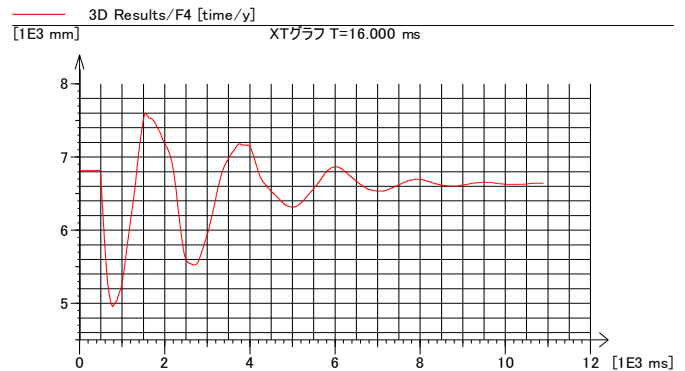


図-7 三次元計測による時刻歴波形(F4,Y方向)

#### 4. まとめ

従来型のポケット式落石防護網の耐衝撃挙動に着目し、実規模の重錘衝突実験を実施した。本実験の範囲内で明らかとなったことを整理すると、以下のようになる。

- 1) 落下高さ 6 m の条件において横ロープの設計張力と同程度以上の張力が作用するケースがあること、このことよりロープ端部の定着箇所には大きな損傷が生じることを確認した。これは、金網に衝突した重錘が跳ね返されることなく、落下しながら直下の横ロープに接触(作用)していることによるものと推察される。
- 2) 一方、縦ロープの設計張力と実験結果は、ほぼ等しい張力となっていることがわかった。
- 3) 横ロープ張力は重錘衝突点より下方で大きく、重錘の地盤面への着地の状態によっては最下段でも大きくなることわかった。
- 4) 防護網の応答は重錘衝突点近傍の局所的な塑性変形だけでなく、全体的変形や揺動も伴うことを確認した。
- 5) 落石防護網のように大変形を伴う三次元動的挙動の把握には、斜め2方向からの高速度カメラ計測手法が有効であることがわかった。
- 6) 構成部材の一部に損傷が見られる場合もあるが、落石持込エネルギー150 kJ程度までに対して、落石を補足可能であることを確認できた。

表-4 防護網(金網)の最大変位量

ケース名	H (m)	二次元計測による最大変位量 (m)	三次元計測による最大変位量 (m)
No.1-1	6.0	2.05	2.11
No.1-2	12.0	2.94	2.80
No.1-3	6.0	2.44	2.30
No.2-1	6.0	2.00	2.16
No.2-2	18.0	3.26	3.11

#### 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧，2000年6月
- 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) 田島与典，前川幸次，岩崎征夫，河上康太：実物大重錘衝突実験による緩衝装置を用いたポケット式落石防護網の評価，構造工学論文集 Vol.56A，2010.3
- 4) 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概要集，2013.3