



従来型ポケット式落石防護網の耐衝撃挙動に関する 衝撃応答解析

メタデータ	言語: jpn 出版者: 日本鋼構造協会 公開日: 2019-03-04 キーワード (Ja): 落石防護網, 重錘衝撃実験, 有限要素解析 キーワード (En): rockfall protection nets, falling-weight impact loading test, finite element analysis 作成者: 平田, 健朗, 小室, 雅人, 西, 弘明, 今野, 久志, 山口, 悟 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009703

従来型ポケット式落石防護網の耐衝撃挙動に関する衝撃応答解析

Numerical simulation of impact resistant behavior of full-scale pocket-type rockfall protection nets

○ 平田 健朗* 小室 雅人** 西 弘明*** 今野 久志**** 山口 悟*****
Takero HIRATA Masato KOMURO Hiroaki NISHI Hisashi KONNO Satoru YAMAGUCHI

ABSTRACT In order to establish a numerical analysis method for appropriately evaluating dynamic response characteristics of full-scale pocket-type rockfall protection nets, three-dimensional impact response analysis was conducted taking impact velocity of the weight as variable. An applicability of this analysis method for rockfall protection nets was discussed comparing with the experimental results. From this study, it was confirmed that the horizontal displacement at the loading point can be appropriately predicted irrespective of the impact velocity of the weight.

Keywords: 落石防護網, 重錘衝撃実験, 有限要素解析
rockfall protection nets, falling-weight impact loading test, finite element analysis

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種々の落石対策工が数多く建設されている。これらの落石対策工の一つに、吊りロープや支柱、金網、ワイヤー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。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⁾)に基づき、構成部材の吸収可能エネルギーおよびエネルギー差を用いて行われている。しかしながら、落石衝突に対する応答メカニズムや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²⁾はごく限られている。

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。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ー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、これらの検討を効率よく遂行するためには、数値解析的な検討が不可欠であり、それらを援用して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必要となる。

本論文では、著者らによって実施されたポケッ

ト式落石防護網の実規模衝突実験³⁾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、三次元弾塑性衝撃解析を実施した。得られた解析結果を実験結果と比較することにより、解析手法の妥当性を検証した後、各構成部材におけるエネルギーの経時変化についても検討を行っている。なお、本解析にはLS-DYNA⁴⁾を使用している。

2. 実験概要

2.1 試験体概要

図1には本実験で対象とした試験体の正面図および側面図を、表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。吊りロープおよび縦・横ロープには $\phi 18$ mmを、アンカーボルトにはD32

* 室蘭工業大学大学院 工学研究科建築社会基盤系専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

** 博(工) 室蘭工業大学大学院准教授 工学研究科くらし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1) 第2種正会員

*** 博(工) (独) 土木研究所寒地土木研究所寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

**** 博(工) (独) 土木研究所寒地土木研究所寒地構造チーム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1-3-1-34)

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

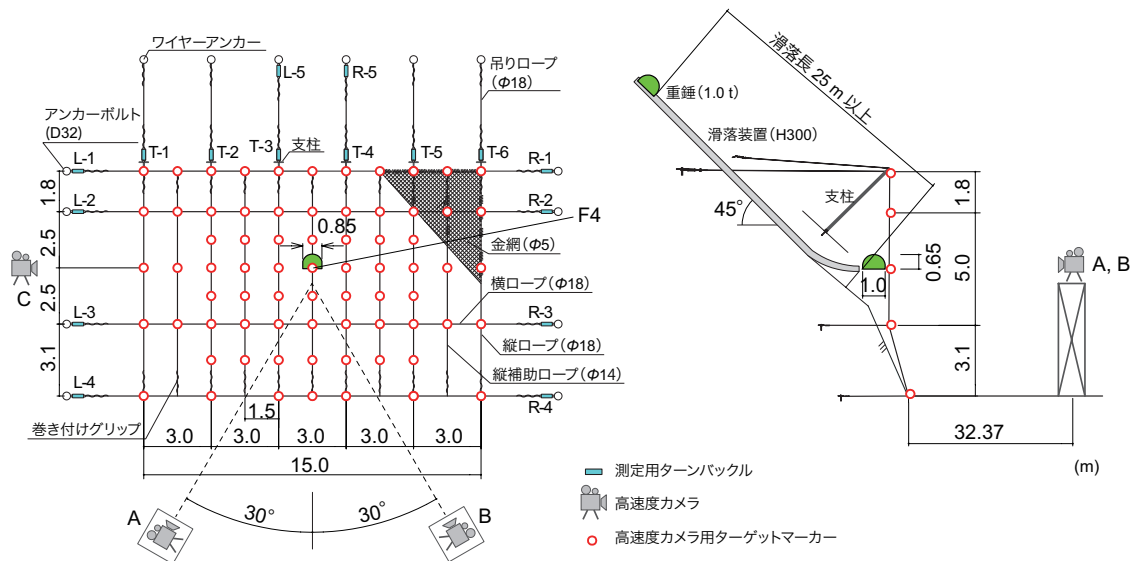


図1 ポケット式落石防護網試験体の正面図および側面図

表1 試験体の設計条件

	(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



写真1 試験体の設置状況

(M30) $\times$ 1000 を用いている。なお、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1に示すように変則的な配置としている。また、ロープと金網の結合には $\phi 4.0 \text{ mm}$ の結合コイルを使用している(後述写真2b 参照)。

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° 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1には

試験体の設置状況を示している。

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 1 t、形状は幅 80 cm $\times$ 高さ 75 cm $\times$ 長さ 95 cm であり、衝突部が球面形状となっている(写真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



(a) 重錘



(b) 金網

写真2 重錘および金網

表2 実験ケース

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

による軸力、高速度カメラによる金網の二次元およ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 0.1 ms でデータレコードにて一括収録を行っている。

表2には、実験ケースの一覧³⁾を示している。落下高さ H は、落石持込みエネルギー E_W が設計上のエネルギー差 E_L を除く可能吸収エネルギーを下回る落下高さ $H = 6$ m を基準として、整数倍で設定した。

2.3 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。その他の詳細な条件は文献3)を参照されたい。

3. 数値解析概要

3.1 解析モデルおよび解析手法

写真1に示すように、実際の試験体は三次元的

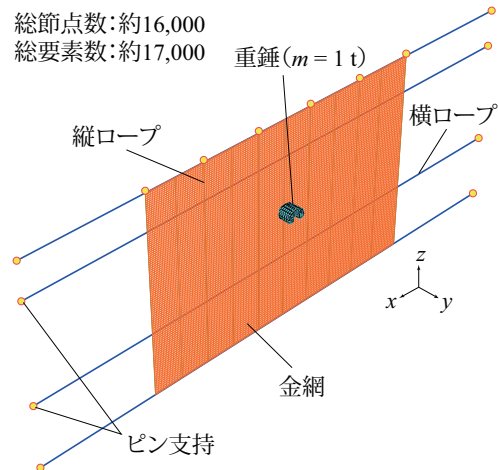


図2 要素分割状況

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上に離散化した。図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、ワイヤー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。ワイヤーロープ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2に示すようにワイヤーロープ端部をピン支持としている。また、金網とワイヤーロープは完全結合と仮定している。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。

3.2 材料構成則

図3には、ワイヤーロープおよび金網の材料構成則を示している。図3(a)にはワイヤーロープに用いた応力-ひずみ関係を示している。応力-

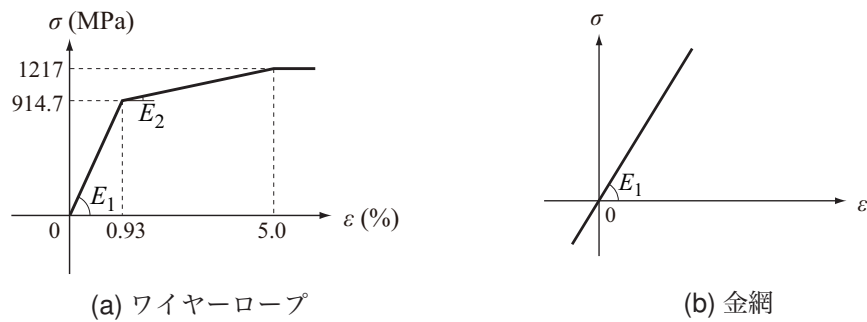


図3 材料構成則

表3 材料物性値

材料	単位体積 質量 ρ (t/m ³)	降伏 応力 f_y (MPa)	引張 強度 f_u (MPa)	一次 弾性係数 E_1 (GPa)	二次 弾性係数 E_2 (GPa)	ポアソ ン比 ν
ロープ	7.85	914.7	1,217	98	7.43	0.3
金網	6.20	—	—	0.4	—	0
重錘	—	—	—	206	—	0.3

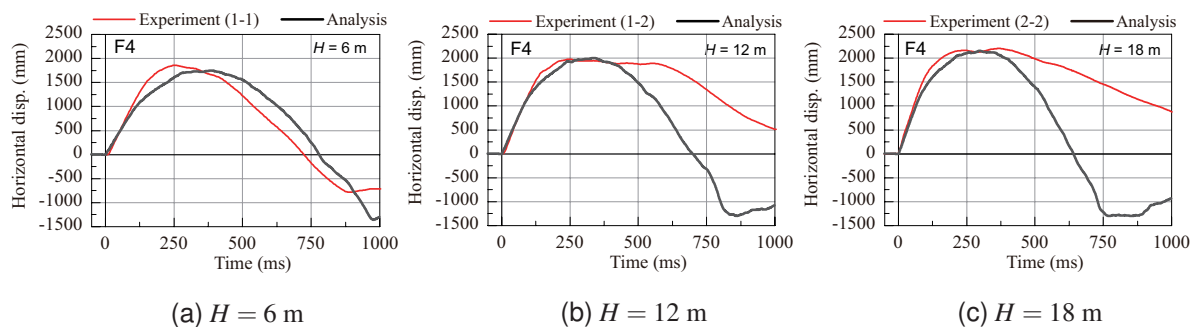


図4 重錘衝突位置における水平変位の時刻歴波形

ひずみ関係は、表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1 tとなるように単位体積質量を換算している。表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. 数値解析結果と考察

4.1 変形状況

図4には、解析結果から得られた重錘衝突位置(F4、図1参照)における水平変位の時刻歴波形を

表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 (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	1.01
2-2	18	2,157	2,206	0.98

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

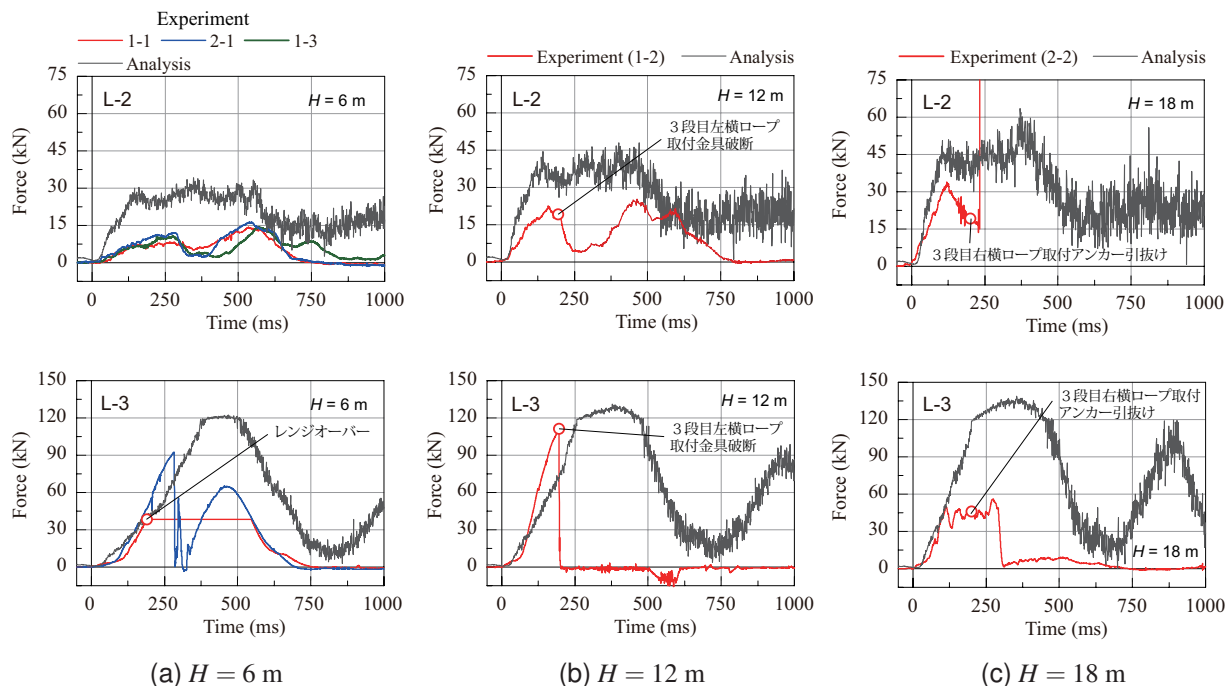


図5 ワイヤロープ張力の時刻歴波形 (L-2, L-3)

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6%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。

4.2 ワイヤロープ張力

図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。これは、本解析では三次元形状の落石防護網を二次元平面に離散化していること、および金網とワイヤロープは完全結合と仮定していること等が要因と考えられる。

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 における張力の時刻歴波形を見ると、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、 $H = 6 \text{ m}$ の場合と同様に、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

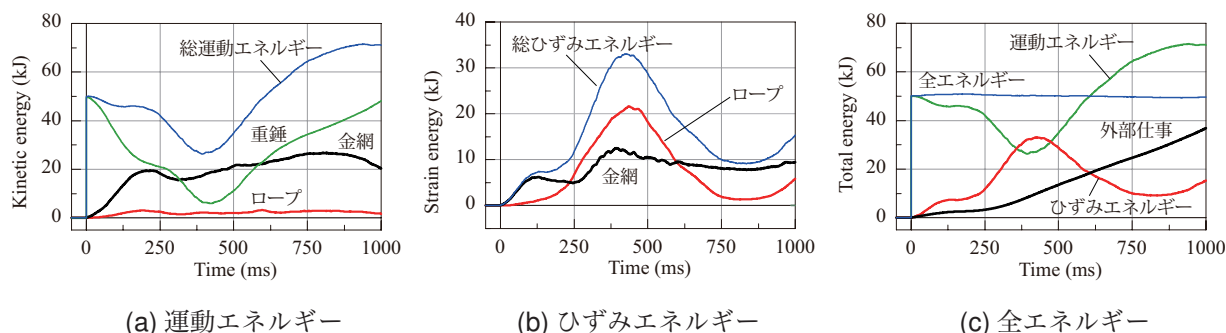


図 6 エネルギーの経時変化($H = 6$ m)

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、これはワイヤー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ーロープが降伏状態にあることを示唆している。

4.3 エネルギーの経時変化

図 6 には、エネルギーの経時変化の一例として $H = 6$ m における運動、ひずみ、および全エネルギーについて示している。なお、全エネルギーは運動エネルギーとひずみエネルギーの和から外部仕事を引いたものを意味する。また、外部仕事は系全体の重力による仕事を意味する。

(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発生していることが分かる。一方、ワイヤー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) 図に示すひずみエネルギーに着目すると、ワイヤーロープのひずみエネルギーは、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、ひずみエネルギーが最大値を示す時刻における金網とワイヤーロープの分担率を比較すると 1:2 程度である。(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。

5. まとめ

本論文では、ポケット式落石防護網の実規模衝突実験を対象に、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、以下のようになる。

- 1) 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状をほぼ適切に再現可能である。
- 2) 一方、ワイヤー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。

今後は、異なる条件下における追加実験を実施するとともに数値解析を試み、解析精度の向上を図る予定である。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：落石対策便覧，2000。
- 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。
- 3) 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，Vol. 21，pp. 104-110，2013。
- 4) Hallquist, J. O., LS-DYNA Version 971 User's Manual, Livermore Software Technology Corporation, 2012。