

# 落石防護網に使用するひし形金網の重錘落下衝撃実験

Falling-weight impact test of diamond-shaped wire net to use for rockfall protection nets

荒木恒也<sup>†</sup>, 今野久志\*, 西弘明\*, 小室雅人\*\*, 田中優貴\*\*\*

Nobuya Araki, Hisashi Konno, Hiroaki Nishi, Masato Komuro, Yuki Tanaka

<sup>†</sup> (国研) 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), (国研) 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), 室蘭工業大学大学院准教授, くらし環境系領域 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

\*\*\*室蘭工業大学大学院, 工学研究科環境創生工学系専攻 (〒050-8585 室蘭市水元町 27-1)

This study aims at elucidating the functions required of pocket-type rockfall protection structures, and also at establishing a technique to verify the performance of such structures. Falling-weight impact tests on the diamond-shaped wire net used for rockfall protection structures were performed for analyzing the behavior of conventional pocket-type rockfall protection nets with the aim of calculating the amount of energy absorbed by diamond-shaped wire net as well as of identifying a constitutive law for materials that was applicable to numerical analysis of energy absorption.

*Key Words: rockfall protection nets, diamond-shaped wire net, falling-weight impact test*

キーワード: 落石防護網, ひし形金網, 重錘落下衝撃実験

## 1. はじめに

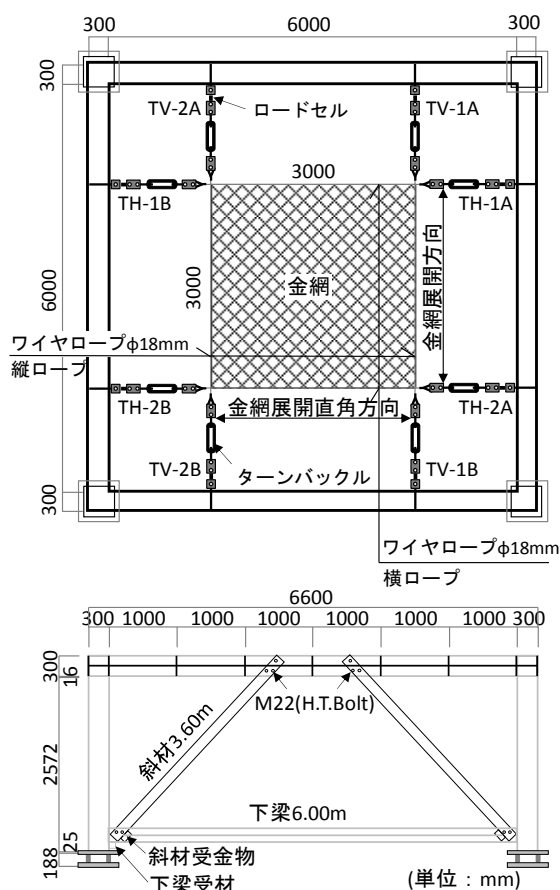
我が国の山岳部や海岸線の道路には, 落石災害を防止するための様々な落石対策工が建設されている. 落石対策工の一つに, H形鋼製支柱, ひし形金網およびワイヤロープ等の汎用性の高い部材を組み合わせたポケット式落石防護網がある. 落石エネルギーが 150kJ 程度までの比較的小規模な落石に対して適用されている従来型のポケット式落石防護網は, 落石対策便覧<sup>1)</sup>を参考に, 構成部材の吸収可能エネルギーと落石衝突前後におけるエネルギー差を用いて設計を行っているが, 落石衝突に対する応答メカニズムの解明やエネルギー収支という観点から行われた検討事例<sup>2),3)</sup>は限られている. また, 近年では, より大きな落石エネルギーに対して適用可能なように, 落石防護網のワイヤロープ端部に緩衝装置を組み込んだ高エネルギー吸収型の落石防護網が開発・実用化されている. しかしながら, 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<sup>4)-7)</sup>が多いようであるが, 実験も開発者独自の手法で実施されており, 統一的な指標がないのが現状である.

このような背景より, 著者らは従来型ポケット式落石防護網も含めて, 落石防護網等の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, エネルギー吸収機構の解明という観点から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<sup>8),9)</sup>を実施し, 重錘衝突時の全体応答性状等について検討を行った. しかしながら, 各構成部材のエネルギー吸収機構については, 十分な検討ができなかった. 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, これらの検討を効率よくすすめるためには, 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.

本研究では, 従来型ポケット式落石防護網の構成部材の一つであるひし形金網に着目し, 構成部材のエネルギー吸収量の算定や材料構成則等を検討するための基礎的なデータ収集を目的として, 縦・横それぞれ2本のワイヤロープとひし形金網から構成される最小部材構成の金網構造に対して, 重錘落下衝撃実験を実施して, 重錘の入力エネルギーを変化させた場合や重錘落下時における回転エネルギーの有無による耐衝撃挙動について検討を行った.

<sup>†</sup> 連絡著者 / Corresponding author

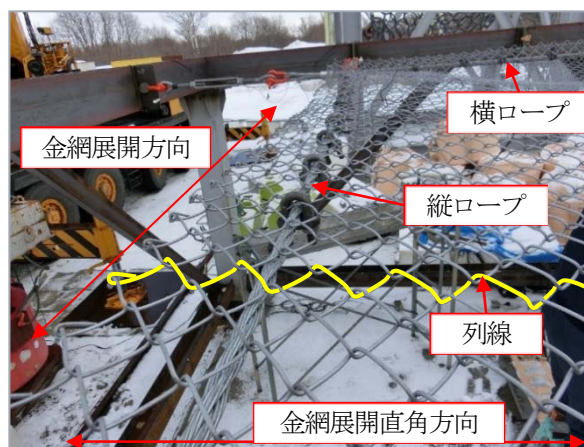
E-mail: araki-n22aa@ceri.go.jp



図ー1 実験装置および試験体の形状寸法

表ー1 使用部材の諸元

部材名	規格	部材耐力	使用部材
ひし形金網	3.2φ×50×50mm	引張強さ:386N/mm <sup>2</sup>	A
		引張強さ:400N/mm <sup>2</sup>	B
	4.0φ×50×50mm	引張強さ:389N/mm <sup>2</sup>	A
		引張強さ:408N/mm <sup>2</sup>	B
	5.0φ×50×50mm	引張強さ:387N/mm <sup>2</sup>	A
		引張強さ:411N/mm <sup>2</sup>	B
ワイヤロープ	18φ 3×7G/O	破断荷重:222kN	A
		破断荷重:193kN	B



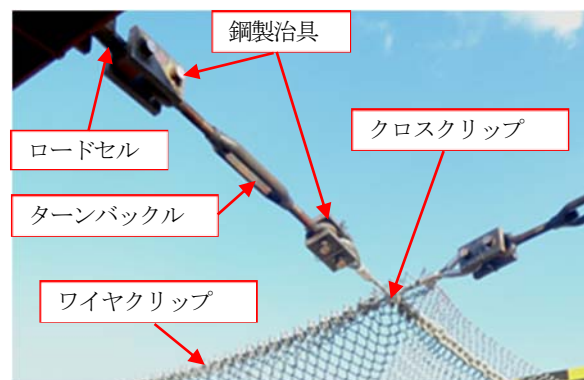
写真ー1 ひし形金網の構成

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

図ー1 には、実験装置および試験体の形状寸法を示している。実験は、6m 四方のH形鋼で構成される鋼製枠架台に 3m 間隔で縦横それぞれ 2 本のワイヤロープを設置し、ワイヤロープで囲まれる 3m 四方の領域にひし形金網を設置して行っている。表ー1 には、試験体を使用した部材の諸元を示している。ひし形金網には素線径の異なる 3 種類 (3.2, 4.0, 5.0φ) を、ワイヤロープには 18φを用いている。使用部材に関しては、実験の実施年度の違いにより A, B の 2 種類となっており、引張強さまたは破断強度が異なるもののそれらの状態に至るまでの耐荷性状に関してはほぼ同様となっている。

ひし形金網は、写真ー1 に示すように山形に折り曲げられた列線 (1 本の列線を黄色で示す) を互いに交差させることで構成されている。列線を組み合わせた金網は、編み込みの向きにより主に荷重を受け持つ列線と直角になる展開方向と、列線と平行になる展開直角方向を有する異方性材料である。本研究では、試験体を水平に設置して実施しているが、現地設置状況と同様にひし形金網の設置方向に対応させてワイヤロープを便宜的に縦ロープと横ロープに区別して整理している。



写真ー2 試験体の固定状況 (使用部材 B の場合)

金網とワイヤロープとの接続は、写真ー2 に示すようにひし形金網の交点にワイヤクリップを用いて固定している。表ー1 の使用部材 A の実験についてはワイヤクリップを 250mm 間隔で固定し、使用部材 B の実験については 50mm 間隔で固定している。ワイヤロープの端部処理は両端アルミロックとしており、縦・横ワイヤロープの交点はクロスクリップで固定している。ワイヤロープは、鋼製治具、ターンバックル、ロードセルを介して鋼製枠にピン接合に近い状態で固定されている。

### 2.2 実験方法

写真ー3 には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。

表-2 実験ケース一覧

実験 No.	実験ケース名	金網径 (mm)	重錘 重量 (kN)	落下高 (m)	使用 部材	衝突エネルギー (kJ)			備考
						並 進	回 転	合 計	
1	D3.2W3H5A	3.2	3	5.0	A	14.7	—	14.7	
2	D3.2W3H7.5A			7.5	A	22.1	—	22.1	
3	D3.2W3H10A			10.0	A	29.4	—	29.4	破網
4	D3.2W3H10B			10.0	B	29.4	—	29.4	破網
5	D4.0W3H5A	4.0	3	5.0	A	14.7	—	14.7	
6	D4.0W3H7.5A			7.5	A	22.1	—	22.1	
7	D4.0W3H10A			10.0	A	29.4	—	29.4	
8	D4.0W3H10B			10.0	B	29.4	—	29.4	
9	D4.0W3H15B			15.0	B	44.1	—	44.1	
10	D4.0W3H20B			20.0	B	58.8	—	58.8	
11	D4.0W3H25B			25.0	B	73.5	—	73.5	破網，横ロープ破断
12	D5.0W3H5A	5.0	3	5.0	A	14.7	—	14.7	
13	D5.0W3H7.5A			7.5	A	22.1	—	22.1	
14	D5.0W3H10A			10.0	A	29.4	—	29.4	
15	D5.0W3H10B			10.0	B	29.4	—	29.4	
16	D5.0W3H15B			15.0	B	44.1	—	44.1	
17	D5.0W3H20B			20.0	B	58.8	—	58.8	
18	D5.0W3H25B			25.0	B	73.5	—	73.5	横ロープ破断
19	D4.0W3H10AR	4.0	3	10.0	A	26.1	3.3	29.4	
20	D4.0W3H20BR			20.0	B	50.2	8.6	58.8	
21	D5.0W3H10AR	5.0		10.0	A	26.1	3.3	29.4	
22	D5.0W3H20BR			20.0	B	48.9	9.9	58.8	
23	D3.2W1H30B	3.2	1	30.0	B	29.4	—	29.4	
24	D4.0W1H30B	4.0	1	30.0	B	29.4	—	29.4	
25	D5.0W1H30B	5.0	1	30.0	B	29.4	—	29.4	
26	D5.0W10H3A		10	3.0	A	29.4	—	29.4	
27	D5.0WT10H3A		10(3×3+1)	3.0	A	29.4	—	29.4	

実験は、金網中央部にコンクリート製の重錘をトラッククレーンにより自由落下衝突させることにより行っている。重錘は、スイスでの落石防護柵に対する性能照査試験方法 SAEFL<sup>10)</sup>を参考に、1 辺の長さが 500 mm の立方体より 8 つの角部を切り取った重量 3kN、1 辺の長さが 350 mm の立方体より 8 つの角部を切り取った重量 1kN、1 辺の長さが 750 mm の立方体より 8 つの角部を切り取った重量 10kN および写真-4 に示すように 3kN の重錘 3 体を縦 1 列に組み合わせ重錘間に調整プレートを取り付けた重量 10kN の 4 種類を使用している。

表-2 には、実験ケース一覧を示している。実験では、ひし形金網の素線径および入力エネルギーが異なる場合、重錘の回転エネルギー有無の影響および等価エネルギーの場合について検討している。落下高は重錘落下点の金網表面から重錘底面のまでの高さであり、衝突エネルギー

はその高さより算定した重錘の位置エネルギーである。重錘に回転を与える実験は、多面体重錘に荷吊り用の帯を巻き付け自由落下時に回転を与えている。実験ケース名は、D の後ろに金網の素線径 (mm)、W の後ろに重錘重量 (kN)、H の後ろに重錘の落下高さ (m)、その後ろに使用部材を示す記号 (A または B)、さらに重錘に回転を与えた実験については最後尾に R を付している。また、等価エネルギーに関する検討で重錘質量と落下高さの組合せが異なる実験において、3kN の重錘を 3 個組み合わせ 10kN に調整した重錘を使用した実験ケースでは、重錘重量に関する記号を WT10 として表示している。

表-2 の実験 No.1~18 に関しては、素線径の異なる金網に対して入力エネルギーを変化させた場合における耐衝撃挙動の把握に着目した実験ケースであり、実験 No.19~22 に関しては回転エネルギーの有無による影響、

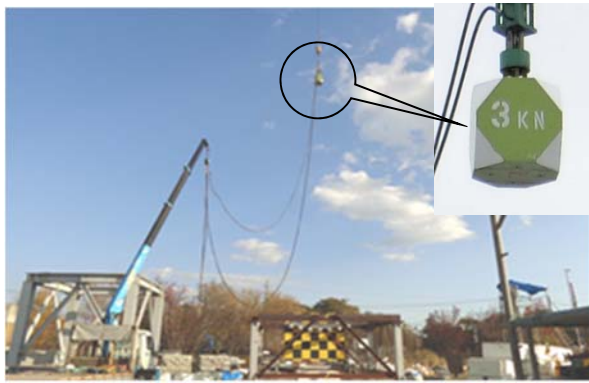


写真-3 実験状況



写真-4 10kN 重錘

また実験 No.23～27 に関しては同一の衝突エネルギーにおいて、重錘重量と落下高さの組合せが異なる場合の影響に着目した実験ケースである。なお、前述したとおり、使用部材 A および B は実験の実施年度が異なっており、A は金網のワイヤロープへの固定間隔が荒く、落下高 10m までの実験としており、B は固定間隔を密にしてさらに落下高を高くして衝突エネルギーを増加させた実験としている。

実験における計測項目は、ロードセルによるワイヤロープ張力、高速度カメラ撮影による金網の載荷点直下の鉛直変位量である。また、ワイヤロープには約 10 kN の初期張力を導入している。なお、表-2 に示す回転エネルギーは、高速度カメラの映像により算定した値であり、回転エネルギーの全エネルギーに対する割合は落下高 10m の実験ケースで 11%、落下高 20m の実験ケースで 15%および 17%であった。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 各種応答波形

##### (1) 落下高の異なる場合

図-2～5 には、金網素線径 4.0mm、重錘重量 3kN、使用部材 B で落下高が 10m から 25m までの間で異なる 4 ケース (D4.0W3H10/H15/H20/H25B) の載荷点変位、縦ロープ (TV-1A/B) 張力および横ロープ (TH-1A/B) 張力の時刻歴応答波形を示している。なお、載荷点変位は高速度カメラの映像から確認できる時間まで算定して示している。

(a)図の載荷点変位波形について比較すると、いずれの実験ケースにおいても重錘が金網に接触後から最大変位到達直後まで正弦半波状の波形性状を示している。最大変位発生時刻は落下高によらずいずれも重錘接触後 100ms 程度となっており、載荷点最大変位は落下高の増加と共に増大する傾向が示されている。最大変位到達後のリバウンド状態における変位波形についてみると、落下高の増加とともに残留変位量も増加し、落下高 25m の D4.0W3H25B では、最大変位到達後リバウンド量が載荷前の状態にまで復元せず 500mm 程度の残留変位を示し

ている。これは衝突エネルギーの増加に伴い載荷点直下の金網の塑性化が著しくなったためと推察される。

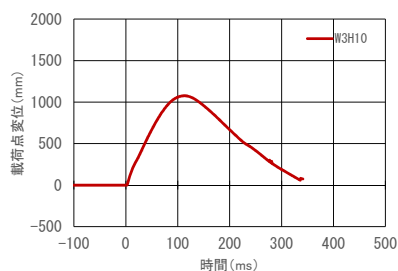
次に (b)、(c)図のワイヤロープの張力波形について着目すると、載荷点変位の最大変位時において各ロープ張力のピーク値が示されているものの、波形性状は載荷点変位波形とは異なる三角形状となっている。また、最大張力発生後の除荷勾配は、重錘衝突後の載荷時勾配よりも急勾配となっている。これは重錘衝突後最大変位到達まではほぼ線形に張力が増加するもののリバウンド後は重錘が金網から離脱する傾向となり急激に張力が除荷されるためと推察される。(b)図、(c)図のワイヤロープ最大張力を比較するといずれも横ロープである(c)図の張力が大きく示されている。これは、ひし形金網の異方性により、重錘衝突時にひし形金網の展開方向の変形が大きくなることから、横ロープの方がより大きく載荷点側に引き寄せられるためと推察される。

##### (2) 使用部材 (金網の固定間隔) の異なる場合

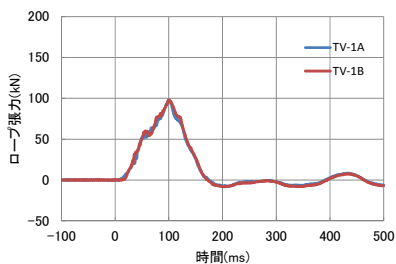
図-6,7 には、金網素線径が 5.0mm、重錘重量 3kN、落下高が 10m で金網の固定間隔が異なる場合 (250mm および 50mm) 2 ケース (D5.0W3H10A/B) の載荷点変位、縦ロープ張力および横ロープ張力の時刻歴応答波形を (1)と同様に示している。

(a)図の載荷点変位波形について比較すると、いずれの実験ケースにおいても重錘が金網に接触後から最大変位到達直後まで正弦半波状の波形性状を示しており、最大変位発生時刻はいずれも重錘接触後 100ms 程度となっている。また、最大変位量は金網の固定間隔が 250mm と広い D5.0W3H10A の場合が大きく、リバウンド量は逆に小さく示されている。これは写真-5 に示すように金網固定箇所が局所的に大きく変形したために金網全体の変形量が大きくなり、またこれによりリバウンド量が小さくなったものと考えられる。

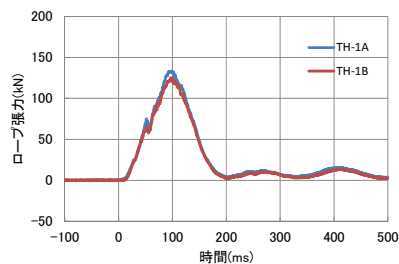
(b)図、(c)図のワイヤロープの張力波形についてみると、載荷点変位の最大変位発生時において各ロープ張力のピーク値が示されている。また、最大張力は縦ロープ、横ロープいずれも D5.0W3H10A の場合が小さく、D5.0W3H10B の場合が大きい。これは上述したように D5.0W3H10A の場合には金網固定箇所が局所的に大き



(a) 載荷点変位

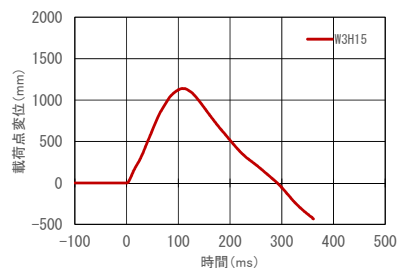


(b) 縦ロープ張力

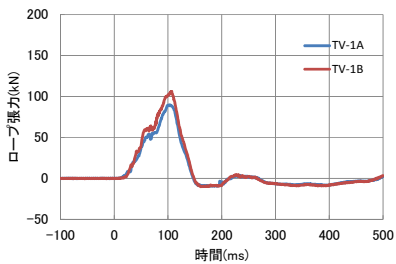


(c) 横ロープ張力

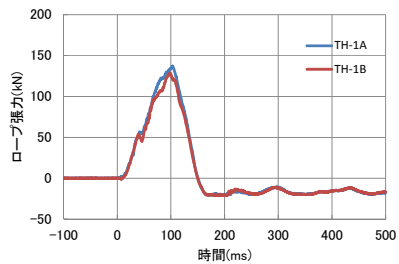
図-2 各種応答波形 (D4.0W3H10B)



(a) 載荷点変位

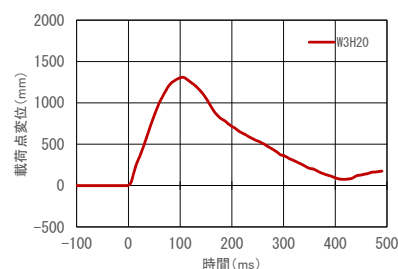


(b) 縦ロープ張力

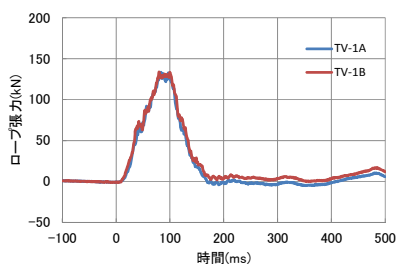


(c) 横ロープ張力

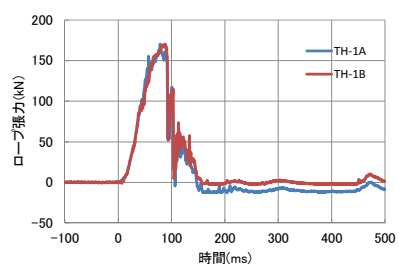
図-3 各種応答波形 (D4.0W3H15B)



(a) 載荷点変位

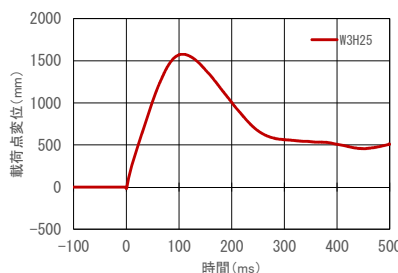


(b) 縦ロープ張力

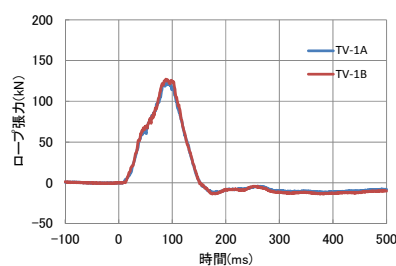


(c) 横ロープ張力

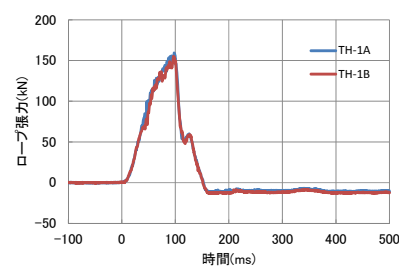
図-4 各種応答波形 (D4.0W3H20B)



(a) 載荷点変位



(b) 縦ロープ張力



(c) 横ロープ張力

図-5 各種応答波形 (D4.0W3H25B)

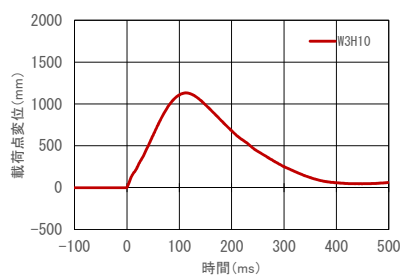
く変形したためにワイヤロープに作用する力が減少したこと、D5.0W3H10B の場合には金網の固定箇所が密なために金網から伝達される力が均等にワイヤロープに作用したためと推察される。(b)図、(c)図のワイヤロープ最大張力を比較するといずれも横ロープである(c)図の張力が大きく示されている。これは、前述と同様にひし形金

網の異方性によるものと推察される。

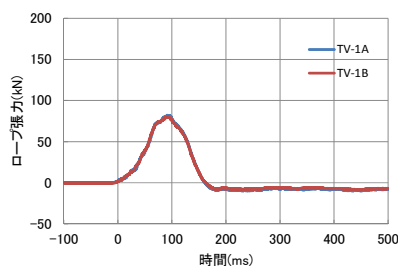
### (3) 重錘重量と落下高の組合せが異なる場合 (エネルギー等価)

図-8.9 には、金網素線径 3.2mm、衝突エネルギーが 29.4kJ と同一で重錘重量と落下高の組合せが異なる 2 ケース (D3.2W3H10B, D3.2W1H30B) について、載荷点変

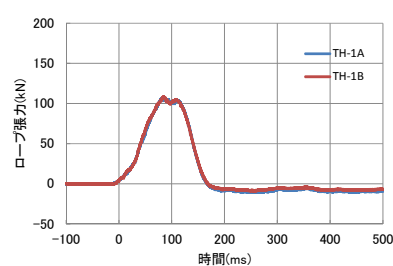




(a) 載荷点変位

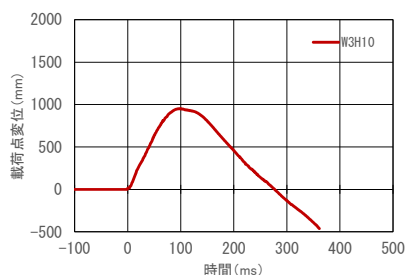


(b) 縦ロープ張力

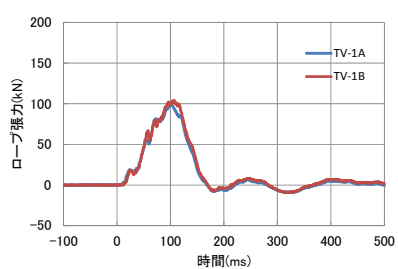


(c) 横ロープ張力

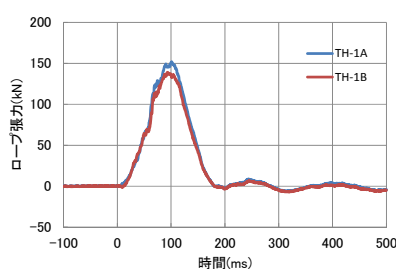
図-6 各種応答波形 (D5.0W3H10A)



(a) 載荷点変位

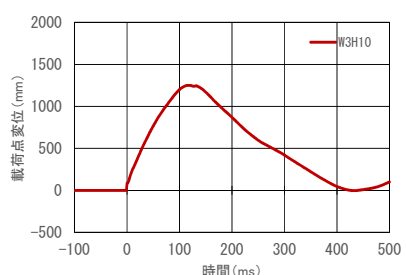


(b) 縦ロープ張力

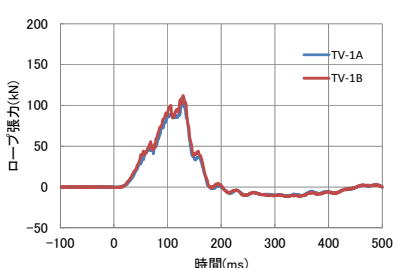


(c) 横ロープ張力

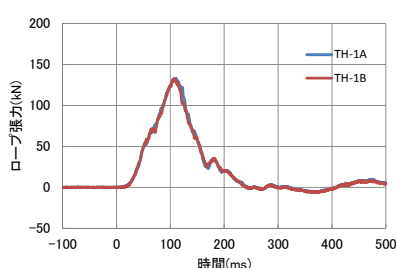
図-7 各種応答波形 (D5.0W3H10B)



(a) 載荷点変位

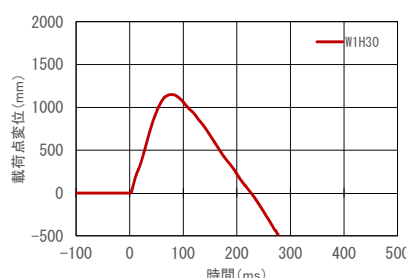


(b) 縦ロープ張力

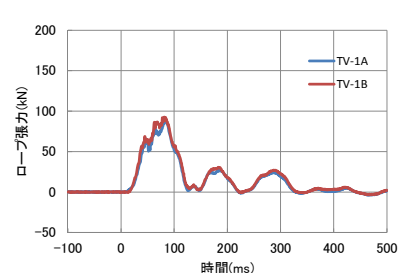


(c) 横ロープ張力

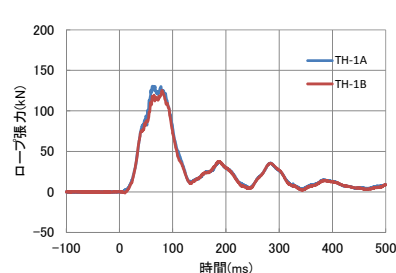
図-8 各種応答波形 (D3.2W3H10B)



(a) 載荷点変位



(b) 縦ロープ張力



(c) 横ロープ張力

図-9 各種応答波形 (D3.2W1H30B)

位、縦ロープ張力および横ロープ張力の時刻歴応答波形を(1)と同様に示している。

(a)図の載荷点変位波形について比較すると、いずれの実験ケースにおいても重錘が金網に接触後から最大変位到達直後まで正弦半波状の波形性状を示しているが、落下高の高い D3.2W1H30B の場合が重錘衝突後の波形の

立ち上がり勾配が急であり、最大変位発生時刻も 80ms 程度と D3.2W3H10B の場合よりも 20ms 程度早くなっている。リバウンド量については、重錘重量の小さい D3.2W1H30B の場合が大きく示されていることがわかる。

(b)図、(c)図のワイヤロープの張力波形についてみると、D3.2W1H30B の場合は載荷速度が大きいためか最大

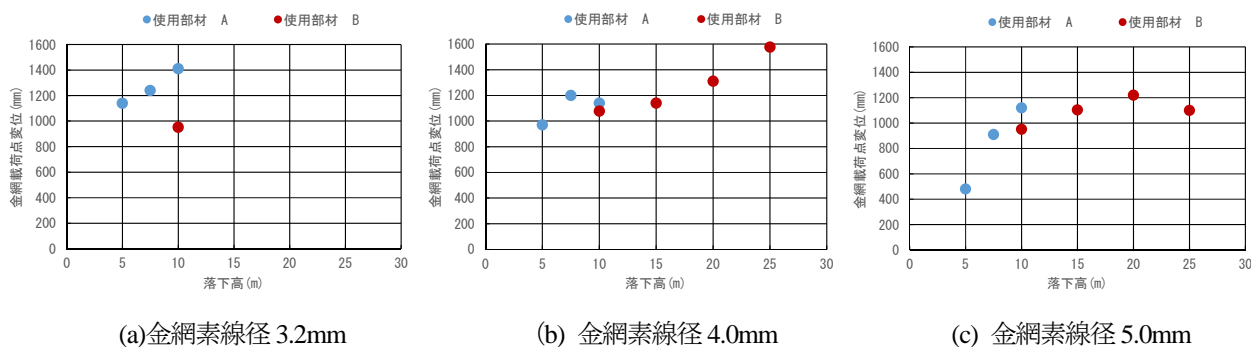


図-10 重錘落下高と金網の最大載荷点変位の関係

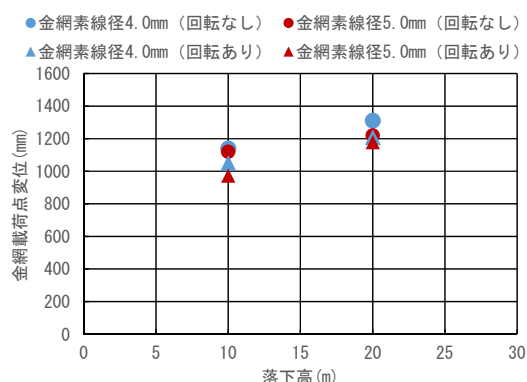


図-11 重錘落下高と金網の最大載荷点変位の関係  
(回転エネルギーの有無)

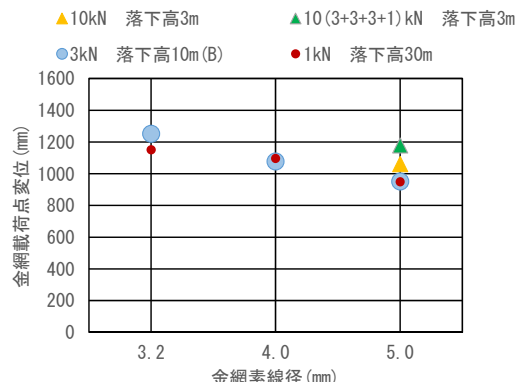


図-12 金網素線径と最大載荷点変位の関係  
(同一衝突エネルギー)

張力発生以降に減衰自由振動状態となっている。また、最大張力は縦ロープ、横ロープいずれも D3.2W3H10B の場合が大きく、D3.2W1H30B の場合が小さい。これは重錘衝突時から最大変位到達時までの重錘の位置エネルギーが D3.2W3H10B の場合が大きいことも一因と考えられるが、重錘の載荷面積の影響や載荷時間とワイヤロープの固有周期との関係等に関する影響についても今後数値解析等を併用して明らかにする必要があるものと考えている。

### 3.2 落下高と金網の最大載荷点変位の関係

図-10 には、各金網素線径における重錘落下高と金網の最大載荷点変位の関係を示している。いずれの素線径においても落下高の増加に対応して最大載荷点変位も増加する傾向にあること、金網素線径が小さい方が同一の落下高においては最大載荷点変位が大きく示される傾向にあること、ひし形金網とワイヤロープの固定方法の違いに対しては 250mm 間隔で固定した場合 (使用部材 A) が 50mm 間隔で固定した場合 (使用部材 B) よりも最大載荷点変位が大きく示される傾向にあることが分かる。(b)図の落下高 10m における使用部材 A (D4.0W3H10A) の最大載荷点変位量および(c)図の落下高 25m における使用部材 B (D5.0W3H25B) の載荷点最大変位が小さく示されているのは、重錘衝突位置が金網中央部より金網



写真-5 金網の破網状況(D4.0W3H25B)



写真-6 金網とワイヤロープの接続部の局所変形  
(D5.0W10H3A)

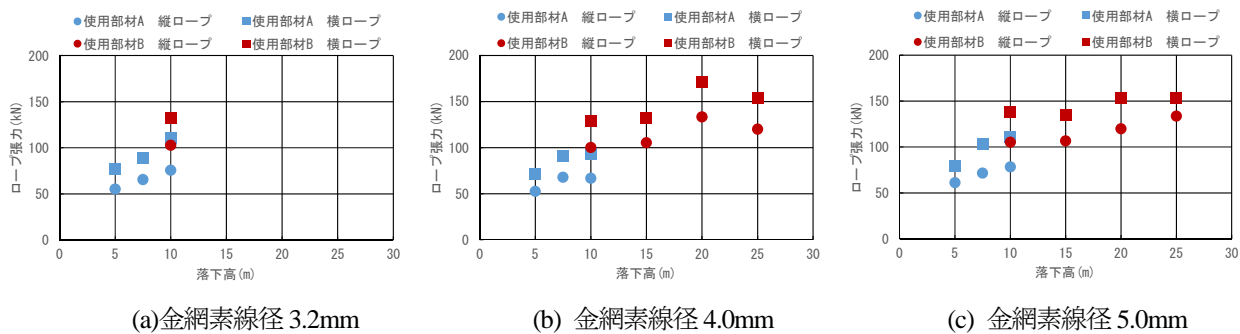


図-13 重錘落下高とワイヤロープ最大張力の関係

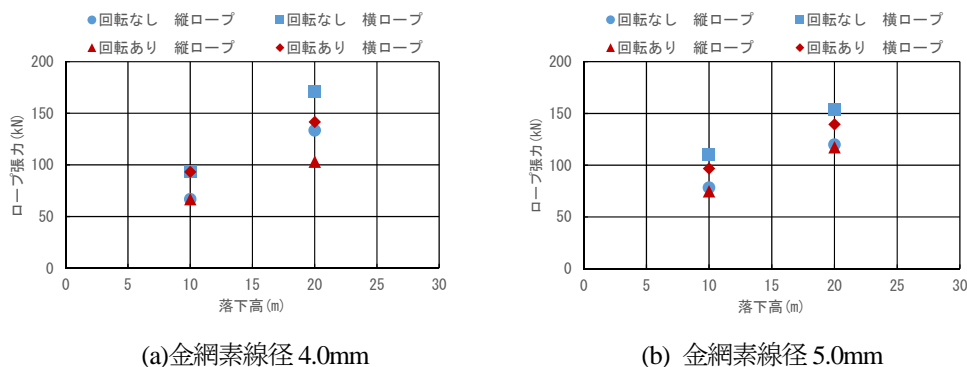


図-14 重錘落下高とワイヤロープ最大張力の関係 (回転エネルギーの有無)

展開直角方向に約 30 cm 移動していたためと推測される。また、(a)図の金網素線径 3.2mm を使用した落下高 10m (D3.2W3H10A/B) と(b)図の金網素線径 4.0mm を使用した落下高 25m (D4.0W3H25B) の実験ケースにおいて、載荷点最大変位到達時において写真-5 に示すような金網の破網を確認しているが、重錘は捕捉している。

図-11 には、回転エネルギーの有無における重錘落下高と金網の最大載荷点変位の関係について示している。重錘の回転エネルギー有無の影響については、回転有りの場合が無い場合よりも最大載荷点変位は小さく示される傾向にある。落下高 20m の場合 (D4.0W3H20B/BR, D5.0W3H20B/BR) を比較すると、回転有りの場合の最大載荷点変位は回転無しの場合に対して、素線径が 4.0mm, 5.0mm でそれぞれ 92%, 97% となっている。落石対策便覧では、設計に用いる落石の全エネルギーは線速度エネルギー (本実験では並進エネルギー) と回転エネルギーの和としており、さらに回転エネルギーは線速度エネルギーの 10% 程度と仮定している。本実験での回転エネルギーの並進エネルギーに対する割合は、素線径が 4.0mm, 5.0mm の実験ケースにおいて、それぞれ 17%, 20% であり、設計で仮定している割合の 2 倍程度となっている。これより、最大載荷点変位に対しては回転エネルギーの有無による影響は顕著に示されない結果となっている。回転エネルギーの有無における重錘落下高と金網の最大載荷点変位の関係については、数値解析等を併用して明らかにする必要があるものと考えている。

図-12 には、同一衝突エネルギーにおける金網素線径

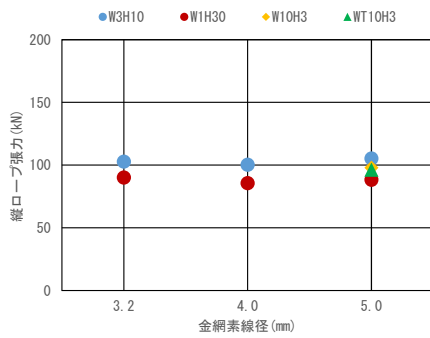
と最大載荷点変位の関係について示している。落下高の増加に対応して最大載荷点変位も増加する傾向にあること、金網素線径が小さい方が最大載荷点変位が大きく示される傾向にあることが分かる。3 kN の重錘を 10 m 落下させたケース (D3.2/D4.0/D5.0W3H10B) と 1 kN の重錘を 30 m 落下させたケース (D3.2/D4.0/D5.0W1H30B) を比較すると、金網素線径が同一であれば最大載荷点変位はほぼ同様の値を示している。金網素線径が 5.0mm, 落下高 3m のケース (D5.0W10/WT10H3A) については、写真-6 に示すように固定部に局所変形が確認されていることから、金網とワイヤロープの接続方法が異なるために、D5.0W3H10B および D5.0W1H30B に比較して最大載荷点変位が大きく示されているものと考えられる。重錘重量が 10kN と同様に形状の異なる D5.0W10H3A と D5.0WT10H3A を比較すると D5.0WT10H3A の場合が載荷点最大変位が大きく示されている。これは載荷面積の違いによる影響と考えられる。

### 3.3 落下高とワイヤロープの最大張力の関係

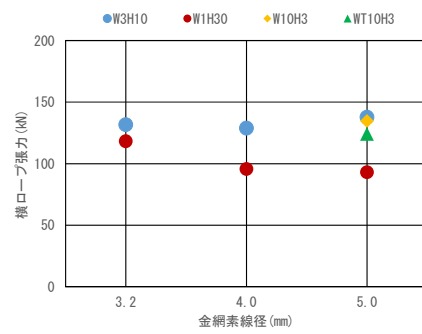
図-13 には、各金網素線径における重錘落下高とワイヤロープの最大張力の関係を示している。なお、重錘落下衝撃実験では、重錘が必ずしも金網の中央部に衝突していないことから、ワイヤロープの最大張力は重錘落下位置の偏心を考慮して、縦・横ロープともにそれぞれ 4 箇所のロードセルにより計測された最大張力を平均した値を使用している。

全体的な傾向として、落下高の増加に対応して最大張





(a) 縦ロープ張力



(b) 横ロープ張力

図-15 金網素線径とワイヤロープ最大張力の関係 (同一衝突エネルギー)

力も増加する傾向にあること、金網の異方性より縦ロープよりも横ロープの最大張力が大きく示される傾向にあること、ひし形金網とワイヤロープの固定方法の違いに対しては 250mm 間隔で固定した場合 (使用部材 A) が 50mm 間隔で固定した場合 (使用部材 B) よりも最大張力が小さい傾向にあることが分かる。なお、(b)図の落下高 25 m の実験ケース (D4.0W3H25B) において、ワイヤロープの最大張力が減少しているのは重錘衝突時に横ロープが破断したためと推測される。

図-14 には、重錘の回転エネルギー有無の影響について示している。金網素線径 4.0mm を使用した実験ケース (D4.0W3H10B/BR, D4.0W3H20B/BR) で比較すると、落下高さ 20m の横ロープにおいて、回転有りの場合の最大張力が回転無しの場合に比較して 73%と小さく示されている。しかしながら、落下高 20m の縦ロープの最大張力および落下高 10m の実験ケースでは重錘回転による明瞭な違いが見られない。金網素線径 5.0mm を使用した実験ケース (D5.0W3H10B/BR, D5.0W3H20B/BR) で比較すると、重錘の回転の有無に対しては、落下高さ 20m の実験ケースの横ロープにおいて、回転有りの場合の最大張力が回転無しの場合に比較して 91%と小さく示されているものの、同実験ケースの縦ロープおよび落下高 10m の実験ケースでは、重錘回転による明瞭な違いが見られない。これより、ワイヤロープ張力に及ぼす重錘の回転エネルギーの影響に関しては、全エネルギーに対する回転エネルギー割合がさらに大きい場合についての実験や解析的な検討が必要であるものと考えている。

図-15 には、同一衝突エネルギー ( $E=29.4 \text{ kJ}$ ) における金網素線径とワイヤロープの最大張力の関係を示している。金網素線径 3.2mm における 1kN の重錘を 30m の高さから落下させたケース (D3.2W1H30B) において横ロープ張力が若干大きく示されているものの、重錘重量が同一の場合には縦ロープ、横ロープそれぞれにおいてほぼ同程度の最大張力となっている。また、3kN の重錘を 10m の高さから落下させた実験ケース (D3.2/D4.0/D5.0W3H10B) は 1kN の重錘を 30m の高さから落下させた実験ケース (D3.2/D4.0/D5.0W1H30B) と比較してワイヤロープの最大張力が 30~50 %程度大きい値を示し



写真-7 実験終了後の金網状況(D4.0W3H10B)

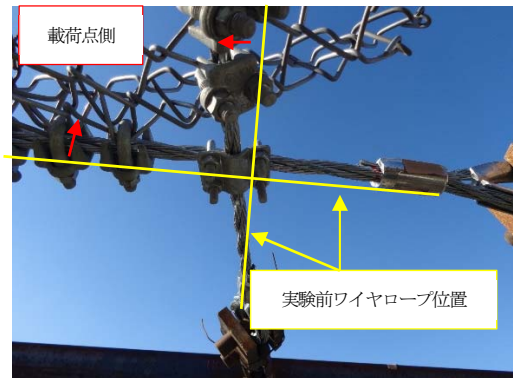


写真-8 実験終了後のワイヤロープ交点状況 (D4.0W3H10B)

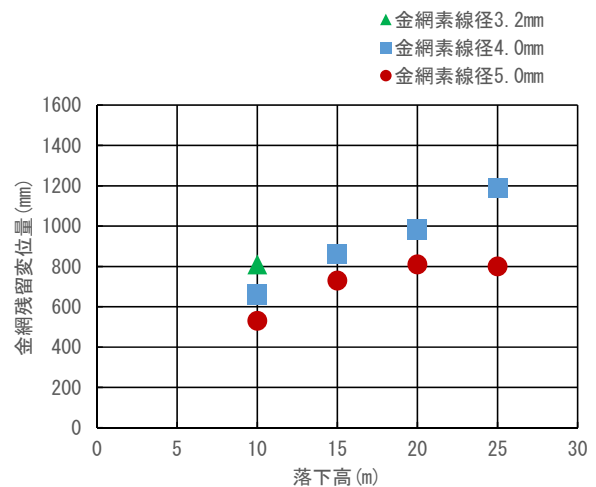


図-16 重錘落下高と金網残留変位量の関係 (使用部材 B)

ている。これは、重錘寸法の違いにより、3 kN の重錘の方が金網との接触面積が大きいため、載荷点変位には大きな差が見られないものの、ロープ張力が異なるものと推測される。しかしながら、10kN の重錘を 3m の高さから落下させた実験ケース (D5.0W10H3A) については、3 kN の重錘を 10 m の高さから落下させた実験ケース (D5.0W3H10B) とほぼ同程度のワイヤロープの最大張力となっており、このような傾向は確認されない。これは、金網とワイヤロープの固定間隔の影響と推察される。

### 3.4 落下高と残留変位の関係

写真-7,8 には、実験ケース D4.0W3H10B の実験終了後の金網状況およびワイヤロープ交点状況を示している。ひし形金網には残留変位が発生しており、ワイヤロープ交点のクロスクリップが重錘衝突の影響で載荷点側に引き寄せられている。図-16 には、使用部材 B における実験終了後の金網の残留変位量を示している。落下高の増加に対応して残留変位量も増加する傾向にあること、金網素線径の小さい方が残留変位量が大きく示される傾向にあることが分かる。

## 4. まとめ

従来型ポケット式落石防護網の構成部材の一つであるひし形金網に着目し、構成部材のエネルギー吸収量の算定や材料構成則等を検討することを目的として、縦・横それぞれ 2 本のワイヤロープとひし形金網から構成される最小部材構成の金網構造に対して、重錘落下衝撃実験を実施して、重錘の入力エネルギーを変化させた場合や重錘落下時における回転エネルギーの有無による耐衝撃挙動について検討した。本実験の範囲内で明らかになったことを整理すると、以下のようになる。

- 1) 金網の最大載荷点変位およびワイヤロープの最大張力は、落下高の増加に対応して大きくなり、素線径が小さいほど変位量は大きくなる。また、最大張力は横ロープの方が縦ロープよりも大きい。
- 2) 回転の有無に対しては、回転有りの場合が無い場合よりも最大変位は若干小さく示される傾向にあるものの明瞭な違いは見られない。また、ワイヤロープの最大張力については、回転有りの場合が無い場合よりも小さく示される場合がある。
- 3) エネルギーが同一の場合、金網素線径が小さいほど変

位量は大きくなる。また、重錘の質量の違いによらず載荷点変位はほぼ同様である。一方、ロープ張力に関しては、金網素線径の違いによらず張力はほぼ同様であり、重錘の質量が大きいほどロープ張力が大きくなる。

- 4) 落下高の増加に対応して金網の残留変位量も増加する傾向にあり、金網素線径の小さい方が残留変位量が大きく示される傾向にある。

## 参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：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) 高橋利延，山本圭士，香月 智，高森 潔：三次元個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol. 60A, pp.1042-1055, 2014.
- 4) 窪田潤平，中村浩喜，吉田 博：特殊ひし形金網および緩衝金具を配置した落石防護網の実斜面実験について，構造工学論文集，Vol.54A, pp.11～22, 2008.
- 5) 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, pp.1088～1100, 2010.
- 6) 加賀山肇，奥村昌史，右城猛：新しい落石防護ネットの開発，平成 22 年度地盤工学会四国支部技術研究発表講演概要集，2010.
- 7) 下条和史，渡辺達男：高エネルギー対応落石防護網の開発とその安全対策工としての適用性，第 61 回平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集，pp.68～69, 2012.
- 8) 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.
- 9) 山口 悟，今野久志，西 弘明，加藤俊二，小室雅人：落石防護網の実規模模型実験，鋼構造年次論文報告集，巻 22 巻，pp.137-143, 2014.
- 10) Werner Gerber: Guideline for the approval of rockfall protection kits, Swiss Agency for the Environment, Forest and Landscape (SAEFL) and the Swiss Federal Research Institute (WSL), 2001.

(2016 年 9 月 26 日受付)

(2017 年 2 月 1 日受理)