

ポケット式落石防護網の落石衝突時における回転エネルギーの影響に関する実験的研究

Experimental study for influence of rotational energy at rock collision of the pocket-type rockfall protection nets

土木研究所寒地土木研究所	○正員	今野久志 (Hisashi Konno)
土木研究所寒地土木研究所	正員	西 弘明 (Hiroaki Nishi)
土木研究所寒地土木研究所	正員	山澤文雄 (Fumio Yamasawa)
土木研究所つくば中央研究所	正員	加藤俊二 (Syunji Kato)
名古屋工業大学	学生員	内藤直人 (Naoto Naitou)
室蘭工業大学大学院	正員	小室雅人 (Masato Komuro)

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。それら落石防護工の一つに、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従来型のポケット式落石防護網がある。ポケット式落石防護網は、落石エネルギーが 150kJ 程度までの比較的規模の小さい落石に対して適用される防護工である。その設計は、落石対策便覧¹⁾を参考に、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、経済性や落石エネルギーに対する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、それらの落石防護構造物として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)}が多く、実験も開発者独自の手法で実施されており、性能評価に関する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、著者らは従来型ポケット式落石防護網も含め、落石防護網等の落石防護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^{5),6)}を実施している。しかしながら、実規模実験は費用等の制約もあることから様々な実験ケースを実施することが困難である。また、それらを対象とした数値解析においても、境界条件等が複雑になるなどの課題もある。これらのことから、筆者らは従来型ポケット式落石防護網の実規模実験と平行して、最小部材構成による比較的規模の小さい実験を数多く実施し、基礎的データの収集も実施している。

本研究では、従来型ポケット式落石防護網に落石が衝突した際の回転エネルギーの影響について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、その耐衝撃挙動について検討したのでその概要について報告する。

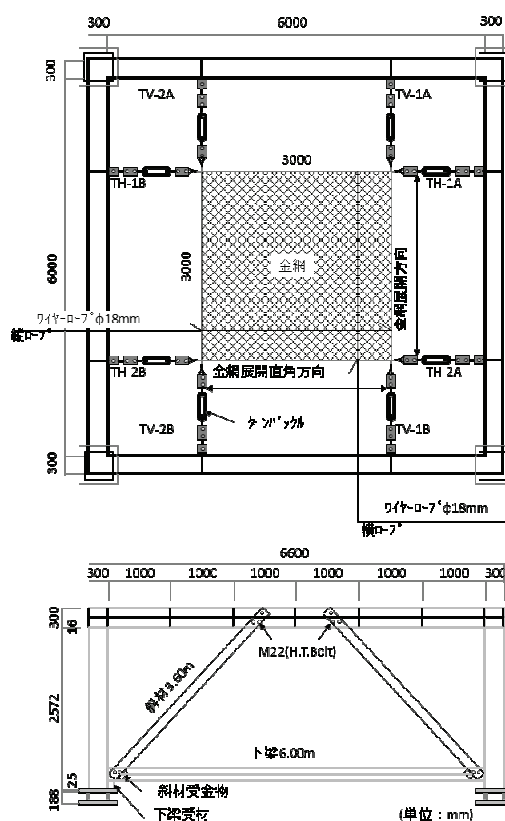


図1 実験装置および試験体の形状寸法

2. 実験概要

図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、H形鋼で構成される6m四方の鋼製枠内に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(3.3m×3.3m)を設置して実験を行っている。ひし形金網には素線径の異なる2種類(4.0、5.0φ)を、ワイヤロープには18φを用いている。金網とワイヤロープとの接続は、写真1に示すようにひし形金網の全ての交点をワイヤクリップを用いて固定している。また、ワイヤロープは両端アルミロックとしており、ワイヤロープの交点はクロスクリップで固定した。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。なお、ひし形金網は写真1に示すように山形に折り曲げられた列



写真1 ひし形金網の構成

表1 使用部材の諸元

材料名	諸元 部材耐力(規格値)
ひし形金網	5.0φ×50×50mm
	引張強さ:411(290~540)N/mm ²
	4.0φ×50×50mm
	引張強さ:408(290~540)N/mm ²
ワイヤロープ	18φ 3×7G/O 両端アルミロック 破断荷重:193(≧160)kN

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展開方向と展開直角方向を有する異方性材料である。本研究では、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。表1には、試験体に使用した部材の諸元を示している。

3. 実験方法

写真2には、重錘落下衝撃実験の状況を示している。実験は、金網中央部に1辺の長さが50cmの立方体より8つの角部を切り取った重量3kNのコンクリート製多面体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。

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衝突エネルギーが異なる場合における重錘の回転エネルギーの有無の影響を検討している。ここで、表中の落下高は重錘落下点の金網表面から重錘底面までの高さであり、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。計測項目は、ロードセルによるロープ張力、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。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。なお、落下高10mの実験ケースは過年度に実施した実験ケースであり、落下高20mの実験ケースとは、ひし形金網とワイヤロープとの接続方法および部材の諸元が若干異なっている。詳細については参考文献7)を参照されたい。



写真2 衝撃実験の状況

表2 実験ケース一覧

実験ケース名	金網 (mm)	重錘 (kN)	落下高 (m)	衝突エネルギー(kJ)		
				並進	回転	合計
D4.0W3H10	4.0	3	10.0	29.4	—	29.4
D5.0W3H10	5.0		10.0	29.4	—	29.4
D4.0W3H10R	4.0		10.0	26.1	3.3	29.4
D5.0W3H10R	5.0		10.0	26.1	3.3	29.4
D4.0W3H20	4.0	3	20.0	58.8	—	58.8
D5.0W3H20	5.0		20.0	58.8	—	58.8
D4.0W3H20R	4.0		20.0	50.2	8.6	58.8
D5.0W3H20R	5.0		20.0	48.9	9.9	58.8

4. 実験結果および考察

4.1 各種応答波形

図2～5には、落下高20mで実施した4ケースの載荷点変位、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。

(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、載荷時間に対してほぼ同様の勾配で変位が増加し、100ms程度で最大変位に達している。最大変位到達後リバウンド状態に移行しているが、除荷時間に対する変位の減少量は金網の素線径によって異なっており、5.0mmの場合が大きく示されている。これは金網の剛性の違いによるものと推察される。

次に、(b)図、(c)図のワイヤロープの張力波形についてみると、いずれも載荷点変位波形と同様の勾配で立ち上がる正弦半波状の第1波とその後の振動波形が示されている。第1波の最大張力発生後の波形勾配は、重錘がリバウンドにより金網から離脱するためか立ち上がり勾配よりも急勾配となっている。(b)図、(c)図の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おり、金網の異方性の影響が現れている。

4.2 落下高と金網の最大載荷点変位の関係

図6には、重錘落下高と金網の最大載荷点変位（以後、単に最大変位と示す。）の関係を示している。落下高10mと20mの実験では前述のとおり金網とワイヤロープの固定方法が若干異なるものの全体的な傾向として、落下高の増加に対応して最大変位も増加する傾向にあること、素線径が小さい方が最大変位が大きく示される傾向にあること、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小さく示される傾向にあることなどが分かる。落下高20mの実験ケースについて比較すると、回転有りの場合の最大変位は回転無しの場合

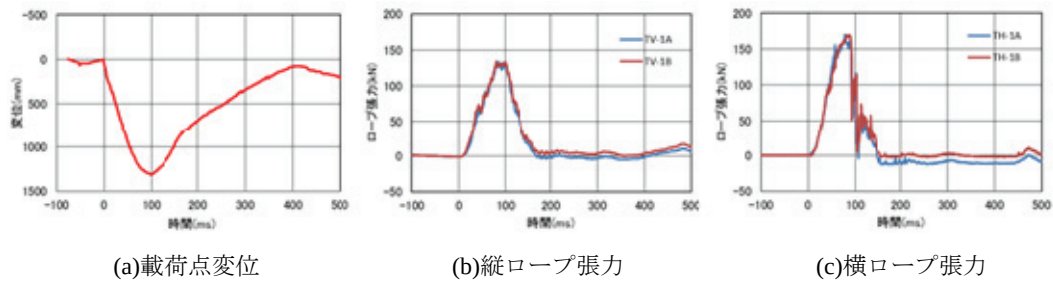


図2 各種応答波形 (D4.0W3H20)

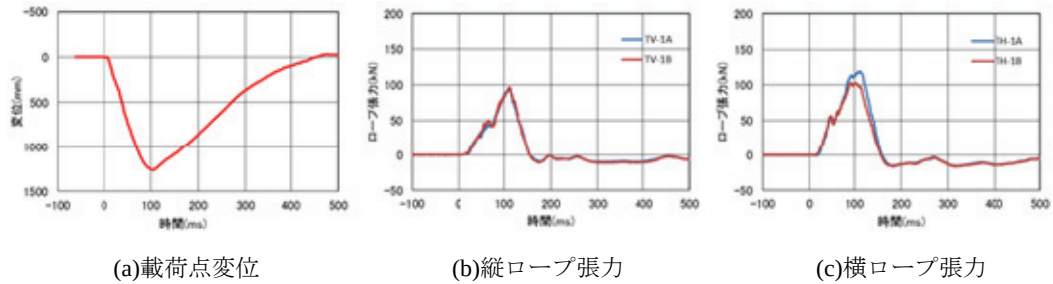


図3 各種応答波形 (D4.0W3H20R)

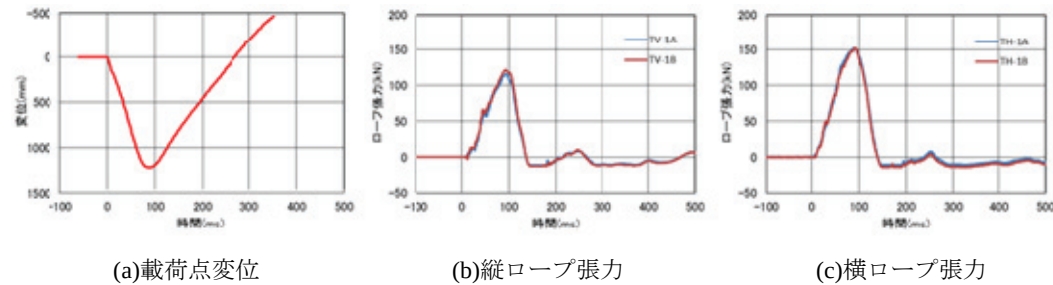


図4 各種応答波形 (D5.0W3H20)

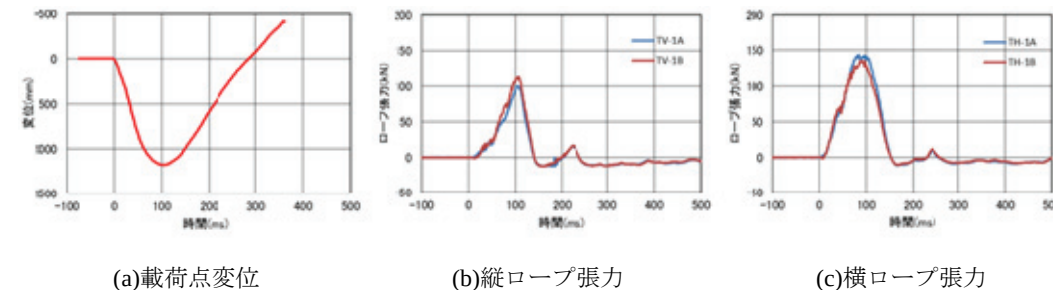


図5 各種応答波形 (D5.0W3H20R)

に対して、素線径が 4.0mm、5.0mm でそれぞれ 96%、97%となっている。全エネルギーに対する並進エネルギーの割合は、素線径が 4.0mm、5.0mm の実験ケースにおいて、それぞれ 85%、83%であることから、最大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。

4.3 落下高とワイヤロープの最大張力の関係

図7、図8には、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。

図7には、素線径 4.0mm のひし形金網を使用した実験

ケースに対する重錘落下高と最大張力の関係を示している。図より、落下高の増加に対応して最大張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が分かる。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 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。

図-8には、素線径 5.0mm のひし形金網を使用した実験ケースに対する重錘落下高と最大張力の関係を示している。図より、素線径が 5.0mm の場合においても、落下高の増加に対応して最大張力も増加する傾向にあること、金

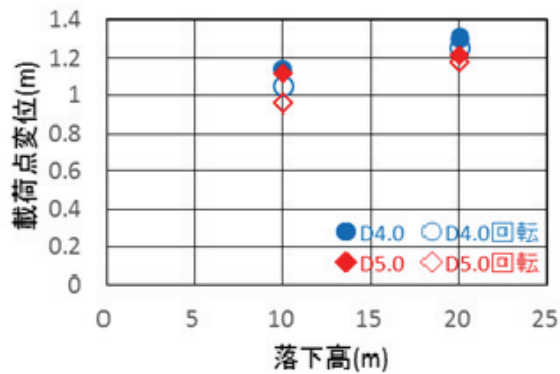


図6 重錘落下高と金網の最大載荷点変位の関係

網の異方性より縦ロープより横ロープの最大張力が大きく示される傾向にあることが分かる。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は見られない。以上より、重錘衝突時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。

5. まとめ

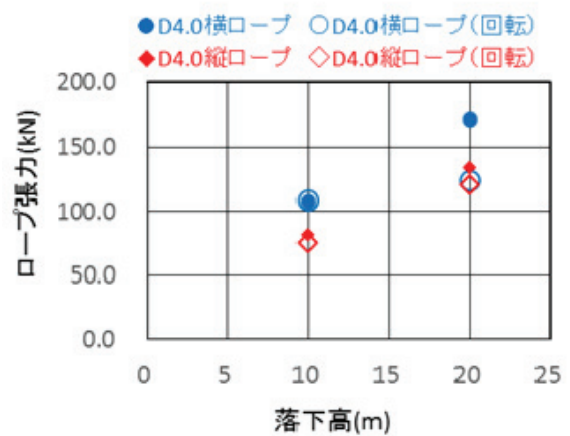
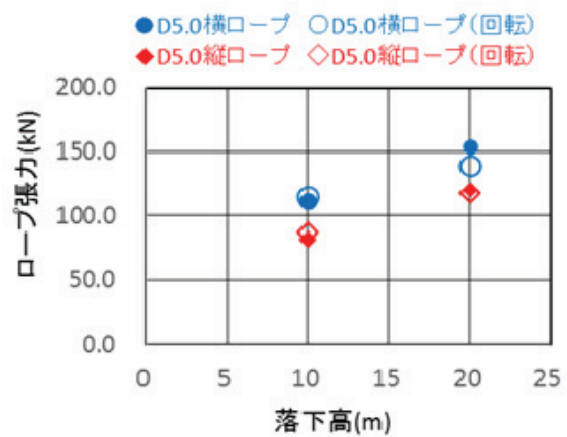
本研究では、従来型ポケット式落石防護網に落石が衝突した際の回転エネルギーの影響について検討することを目的として、縦・横それぞれ 2 本のワイヤロープとひし形金網から構成される最小部材構成の金網構造に対して、重錘落下衝撃実験を実施し、その耐衝撃挙動について検討した。本実験の範囲内で明らかになったことを整理すると、以下のようになる。

- 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、ロープ張力については、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。

今後は、重錘衝突時の回転エネルギーの影響に関して、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。

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

図7 重錘落下高とワイヤロープの最大張力の関係
(ひし形金網の素線径 4.0mm)図8 重錘落下高とワイヤロープの最大張力の関係
(ひし形金網の素線径 5.0mm)

- 3) 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.11～22，2008.3
- 4) 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.1088～1100，2010.3
- 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) 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.137-143，2014.11
- 7) 今野久志，西 弘明，荒木恒也，加藤俊二，小室雅人：落石防護網に使用するひし形金網の実規模載荷実験，鋼構造年次論文報告集，巻 23 巻，pp.650-656，2015.11