

落石の運動エネルギーを低下させる新たな落石対策施設の検討及び効果検証

中央復建コンサルタンツ(株) 吉田 泰治

論文要旨

高標高部からの落石対策において、発生源対策では高標高部での工事の必要性があることから、仮設に時間とコストを要する。また、不安定な落石源に対して対策を検討する場合、発生源対策では施工時の安全性確保が困難となる可能性がある。待ち受け対策では、落石源までの高低差が大きく、対象落石のエネルギーが大きくなることから施設規模が大きくなりコストが増大する。繰り返し落石が発生する箇所では、施設背面の落石・土砂の堆積が懸念され、維持管理性の向上が求められる。対策検討にあたっては、施工時の安全性確保、維持管理性の向上、対策コストの縮減が課題である。この課題に対し、国内で例のない、既存落石防護工の有効利用に着目し、落下途中で落石エネルギーを低下させる落石対策工(以下、落石減勢工とする)を解析・設計し、2023年に竣工した。また、落石減勢工の挙動を確認するとともに、落石の運動エネルギーを低下させる機構を詳細に調べることを目的に、実施工現場で小規模落石実験を実施し、対策効果の検証を行った。

キーワード：落石，斜面，落石減勢工，落石実験

1. はじめに

国の施策「防災・減災，国土強靱化のための5か年加速化対策」において、道路法面での、レーザープロファイラ調査(LP調査)が実施されており、その結果として、高標高部の斜面に要対策となる落石源が数多く発見されている。

図-1に示すように、一般的に落石対策施設は、落石を斜面中腹や道路際で待ち受けて捕捉する落石防護工と発生源対策を行う落石予防工の2種類に大別される¹⁾。

高標高部からの落石に対応する落石防護工は、落石源までの高低差が大きくなると、エネルギー吸収能力の観点から施設規模が大きくなりコストが増大する。また、繰り返し、落石が発生する箇所においては、対策工背面に堆積した落石・土砂の処理等、維持管理上、問題が残る。一方、落石予防工を考える場合、運動エネルギーを生じさせないことには有効であるが、高標高部での工事・作業の必要性から、仮設に時間とコストを要する。また、対象落石源に亀裂が認められ、不安定な場合、施工時の安全性確保が確保できないケースが見られる。さらに、高標高部に設置された落石予防工は、点検時に斜面上方まで登る必要があり、維持管理上、時間や安全面での問題が残る。以上より、高標高部の落石源に対応する落石対策施設の検討にあたっては、施工時の安全性確保、維持管理性の向上、対策コストの縮減といった課題が挙げられる。

これらの課題に対応する工法として、高標高からの落石に対し、「落下途中で落石エネルギーを低下させる工法」(図-1赤枠部分)を解析・設計した。落石減勢工による落

石対策は海外での採用事例はあるが、国内においての採用事例はないのが現状である。また、実施工現場において、落石減勢工に対する小規模落石実験を行い、対策効果を検証したので、その事例を紹介する。



図-1 落石対策工の種類

2. 落石減勢工の検討

2.1 現地状況

当該箇所は、比高150m程度、勾配40度程度の斜面であり、比高40m~80m程度付近には、濃飛流紋岩類の溶結凝灰岩を主体とする岩盤露頭があり、急崖を形成している。岩盤露頭は、節理面が発達しており、写真-1のように、風化により節理面を境に基岩から分離した不安定な浮石が確認される。

図-2に示すように、既設対策工として、道路際にロックシェッドと高エネルギー吸収型落石防護柵が設置されている。当該箇所において、落石防護工は、高標高部からの落石のため、高エネルギー吸収タイプの防護工が適しているが、既設防護柵は繰り返しの落石により、写真-2のように土砂が堆積し、破損している。



写真-1 不安定な浮石



図-2 現地周辺の微地形表現図



写真-2 損傷した落石防護柵

2.2 対策方針

落石発生源はロックシェッド耐力を上回る大規模なものであり、国道に影響を及ぼす可能性があるため落石対策を実施した。発生源対策を行う落石予防工は、対象落石源が写真-1のように節理面の発達が顕著な浮石群の場合、施工時の安全性が確保できないため採用ができない。以上のことから、表-1に示す対策工法を検討した。

第1案は、現況対策の更新と同等の案である。この案は、繰り返し落石があり、崩壊土砂が堆積する当該箇所では、防護柵の倒壊・破損の危険性がある。第2案は、落石減勢工の斜面法尻設置案である。この案は、ロックシェッドとの距離が近くなるため、ロックシェッド手前で落石エネルギーを低下させる効果が高く、ロックシェッドの許容衝撃力に対し十分小さい衝撃に低減させられるが、斜面法尻に近づくると落石の軌跡が拡がり、対策施設延長が大きくなるため、経済性に劣る。第3案は、落石減勢工の斜面中腹部設置案である。この案は、第2案に比べると、ロックシェッド手前での落石エネルギーの低減効果は小さいが、ロックシェッドの許容衝撃力を超えることはなく施工費用も従来の工法と遜色がない。

今回のように、新たな浮石が確認され、待ち受け対策する場合、一般的にその落石エネルギーに見合う防護施設を検討するところであるが、今回落石エネルギーを低下させることに重点を置き、既存施設であるロックシェッドの活用を検討した結果、第3案の設計について、検討することとした。

表-1 対策工法比較表

比較案	第1案 アンカー式落石防護柵工 (E=750kJ 対応)	第2案 落石減勢工 (法尻設置案)	第3案 落石減勢工 (中腹設置案)
横断面			
工種	高エネルギー吸収型落石防護柵工 L=40m (10m×4 スパン、H=4.0m)	落石減勢工 L=48m (4m×12 スパン)	落石減勢工 L=24m (4m×3 スパン×2 箇所)
対策位置	待ち受け対策(法尻)	待ち受け対策(法尻)	待ち受け対策(中腹)
対策工効果	◎: 落石防護柵により落石を確実に捕捉できる	◎: 斜面法尻に設置するため、落石エネルギーの減衰効果が高い (落下衝撃力 770kN < 許容衝撃力 1,764kN)	○: 第1案に比べると、落石エネルギー減衰効果は低いが、ロックシェッドの許容衝撃力は満足できる (落下衝撃力 1,484kN < 許容衝撃力 1,764kN)
施工性	◎: 標準工法であり実績豊富	○: 事例の無い工法であるが、人力施工が可能。	○: 事例の無い工法であるが、人力施工が可能。
施工安全性	○: 仮設対策により安全な施工が可能	○: 仮設対策により安全な施工が可能	○: 仮設対策により安全な施工が可能
維持管理性	×: 崩壊土砂が堆積することにより、防護柵の倒壊や、効果を発揮しなくなるおそれがある	○: 対策工が斜面下方にあり点検が容易	△: 対策工の点検時に斜面上方まで登る必要がある
概算工事費(直工)	29,000 千円	55,000 千円	30,000 千円
評価	×: 当該現場には不向き	△: 経済性に劣る	○: 推奨案 (十分な対策効果があり、経済性にも優れる)

2.3 落石減勢工の解析・設計

施工された落石減勢工の仕様を図-3に、落石減勢工の各諸元を表-2に示す。落石の運動エネルギーを低減させるための落石減勢工の主な仕様は以下のとおりである。

- ・設計時の数値解析モデルの対象落石はφ1.244m, 想定速度23.3m/s, 落石エネルギー793kJである。
- ・ポケット式落石防護網工のような網構造としつつ, 下端をアンカーで固定しないことで, 落石が堆積せずに通過するような構造とした。
- ・既設防護施設としてロックシェッドがあり, 小規模な落石は防護できるため, 落石減勢工の阻止面はφ500mmのワイヤーロープ格子状とした。
- ・落石に対して格子状のワイヤーロープが跳ね上がることを制御するための装置として, コントロールロープを設置した。
- ・衝撃・構造解析ソフトウェア Ansys LS-DYNA を用いた数値解析により, 落石減勢工を設計した。

表-2 落石減勢工の各諸元

・支柱: H-125×125×6.5×9, 長さ3m
・ネット高さ: 8m, 延長12m (4m×3スパン)
・阻止面: ワイヤーロープφ500格子状 ネット部φ16
・吊りロープ・横ロープ・コントロールロープ: φ18
・金網: φ4.0 (鋼線: 結合コイルでワイヤーロープと連結)

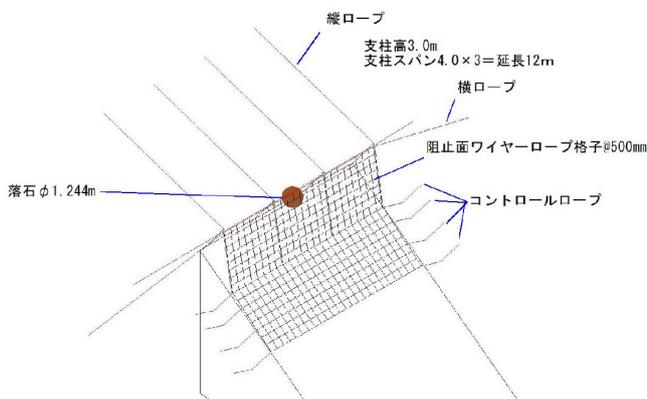


図-3 落石減勢工の仕様

3. 落石減勢工の効果検証

3.1 小規模落石実験の概要

落石減勢工は、まだ全国的に施工例がなく、落石の減勢機構が確認されていない状況にある。そこで、落石減勢工の挙動を確認するとともに、落石の運動エネルギーを低下させる機構を詳細に調べることを目的に、実施工現場にて小規模落石実験を行った。

小規模落石実験は、落石減勢工の上方斜面にある小規模

な岩石を落下させ、落石減勢工に衝突させることで効果を確認した。実験に際し、動画および静止画像による落石の軌跡を用いて落石の運動エネルギー等の解析検証を行った。速度については、落石減勢工の横に設置した高速度カメラにより解析した。表-3に実験対象のうちの代表的な3つの落石源、図-4、図-5に落石源位置図及び経路図、実験概要断面図を示す。

本実験では、設計時の対象落石より小規模な落石を対象として実験を実施し、挙動を確認した。

表-3 実験対象の落石源

No.	種類	安定状態	減勢工までの比高(m)	高さH(m)	幅W(m)	奥行L(m)	落石の体積(m ³)	減勢工までの平均勾配(度)	形状	重量(kN)
A	転石	2	13.3	0.50 × 0.50 × 0.90	0.23	34	角	5.9		
B	転石	2	16.4	0.70 × 0.50 × 0.40	0.14	33	角	3.6		
C	転石	2	14.3	0.40 × 0.80 × 0.50	0.16	36	角	4.2		

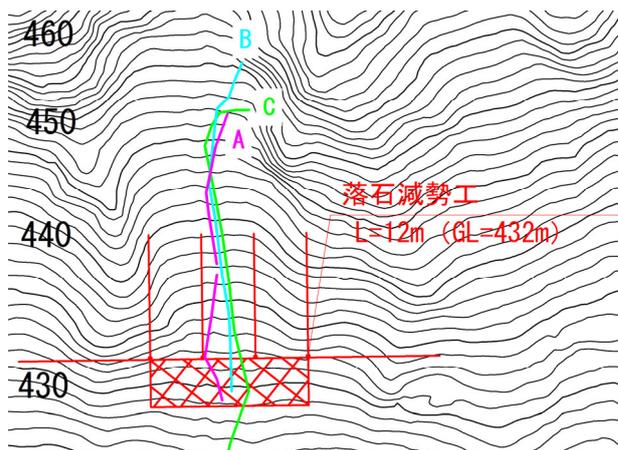


図-4 落石源位置図及び経路図

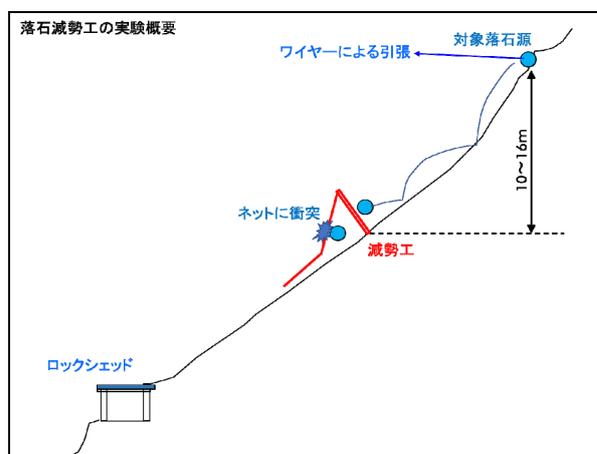


図-5 実験概要断面図

3.2 落石実験結果と考察

実験結果を表-4に示す。各部材損傷の有無、落石減勢工の衝突前後の速度および落石エネルギーについて、実験結果を考察した。以下に結果をまとめる。

- 落下した落石は、6.52~7.29m/sで落石減勢工に衝突し、速度から算出した落石減勢工衝突時の落石エネルギーは9.9~12.7kJであり、大半が落石減勢工にて捕捉された。
- 落石No.Aは写真-3に示すように、捕捉時の落石減勢工は落石の衝突により阻止面が変形し、両サイドに設置したコントロールロープに張力の作用が確認された。落石は、落石減勢工衝突後、地面に落下したのち停止した。No.Bも同様の挙動を示した。
- 阻止面をくぐり抜けた落石(No.C)は、落石の衝突により落石減勢工阻止面が変形した後、ワイヤーロープ500mm格子状の間をくぐり抜ける際に減速した後、斜面下のロックシェッドまで落下し停止した。くぐり抜けた落石は短辺が0.5m未満であり、ワイヤーロープ格子より小さいものであった。落石No.Cの落石減勢工衝突前後の状況写真を、写真-4~写真-5に示す。
- 部材の損傷は、衝突による支柱の軽微な変形およびワイヤーロープの金具のずれが確認されたが、構造系に大きな損傷はなかった。落石減勢工は落石が堆積せずに通過するような構造とし、減勢させる目的であったため、部材の損傷は少なかったことが考えられる。



写真-4 落石減勢工衝突前 (落石 No. C)



写真-5 落石減勢工衝突後 (落石 No. C)

表-4 落石減勢工の解析結果一覧

落石 No.		No.A	No.B	No.C
高さ×幅×奥行 (m)		0.50×0.50×0.90	0.70×0.50×0.40	0.40×0.80×0.50
重量 (kN)		5.9	3.6	4.2
比高 (m)		13.3	16.4	14.3
検証結果	落石挙動 (衝突時)	逆回転	逆回転	くぐり抜け
	損傷	ロープ 支柱	金具ずれ	金具ずれ
	落石減勢工衝突前実測速度 (m/s)	6.52	7.29	7.13
	落石減勢工衝突後実測速度 (m/s)	捕捉	捕捉	5.68
	衝突時の落石エネルギー (kJ) ※	12.7	9.9	10.8



写真-3 落石減勢工衝突時の状況 (落石 No. A 捕捉時)

落石速度の推移を図-6に示す。図-6は、落石減勢工に接触する直前からの落石速度の時間的変化を表したものである。本実験においては、いずれも落石が落石減勢工に接触すると、落石速度が低下し、衝突前速度が速いほど、減速効果は高い。図中の黒丸は、落石減勢工にて捕捉された落石を示す。捕捉された落石は、地面との衝突により速度が低下し、その後停止した。一方、阻止面をくぐり抜けた落石は、落石減勢工衝突時に減速し、落石減勢工衝突時(阻止面くぐり抜け時)の20%程度の減速効果が確認された。

また、落石減勢工捕捉時(落石No.A)と落石減勢工くぐり抜け時(落石No.C)の落下時の挙動を図-7、図-8に示す。捕捉時の挙動は、落石減勢工衝突により地面に衝突し停止していることが確認された。一方、くぐり抜けた際の挙動は、落石減勢工横ロープにより跳躍していることがわかる。

本実験で得られた知見を以下にまとめる。

- 落石の衝突により阻止面が変形し、コントロールロープに張力が作用する挙動が確認された。
- 衝突前速度が大きいほど、落石減勢工衝突による減速効果が大きい。

- ・地面衝突時にも減速効果が見られ、今回落石実験では、落下した落石の大半が捕捉された。
- ・阻止面をくぐり抜けた落石は、衝突による減速効果が確認された。

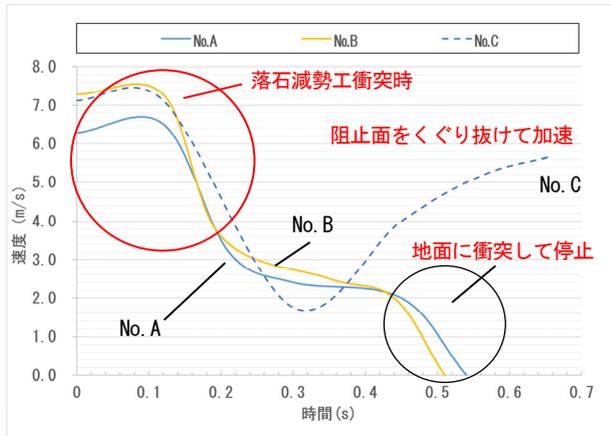


図-6 時間と落石速度推移

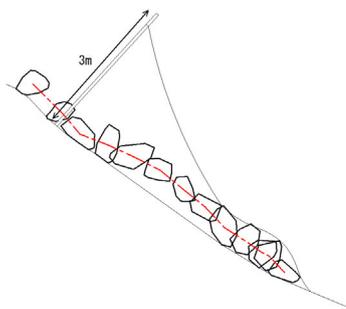


図-7 捕捉時の挙動(落石 No. A)

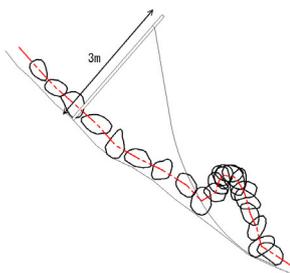


図-8 くぐり抜け時の挙動(落石 No. C)

4. おわりに

本論文では、落石減勢工の検討及び小規模落石実験による効果検証について報告した。本実験により、落石減勢工における落石エネルギーを低下させる機構について、一定の効果は確認されたと考える。ただし、小規模な落石での実験、かつ数少ない実験結果で得られた情報であるため、更なる検証が必要である。落石減勢工による落石対策は海外での採用事例はあるが、国内においての採用例はほと

んどないのが現状である。今後、実大実験による検討とさらなる解析検証を行い、落石減勢工の評価を行う予定である。

謝辞：本対策の検討及び小規模落石実験にあたり、ご尽力いただいた岐阜大学工学部沢田和秀様、国土交通省中部地方整備局高山国道事務所様、株式会社ライテック様に深く感謝を申し上げます。

参考文献(または引用文献)

- 1) 公益社団法人日本道路協会：落石対策便覧，H. 29. 4, 79p.