

落石の運動エネルギーを低下させる 対策工設計の考察

西川 朋秀

中部地方整備局 高山国道事務所 管理第二課 (〒506-0055岐阜県高山市上岡本町7-425)

国の施策である「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が実施されており，その結果として，高標高部の要対策となる落石群が数多く発見されている．高標高からの落石に対応する落石防護施設は，落石のエネルギーが大きくなることや，高所地での作業の必要が生じることにより，コストの増大や作業者の危険性が高まるといった課題を抱えている．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，発生源の対策が不要であり，施設も小規模にできる，国内では例のない「落下途中で落石エネルギーを低下させる工法」を検討し，現地施工まで実施したことについて報告する．

キーワード 落石防護工，落石予防工，落石減勢工

1. はじめに

落石対策施設は，落下物を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⁾．

高標高からの落石に対応する落石防護工は，保全対象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選択できる工法に限られる．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，高標高での工事・作業の必要性から，仮設に時間とコストが見込まれるため，選択できないことがある．また，高標高に設置された設備は，維持管理に問題が残る．本報告では，高標高からの落石に対し，既設の落石防護工を活かした上で，落下途中で落石エネルギーを低下させる工法（以下，落石減勢工とする）を検討したので，その事例を紹介する（図-1）．

落石減勢工は，落石を捕捉・停止させるのではなく，落石の速度を低下させることで運動エネルギーを減少させ，落石防護柵やロックシェッドといった既設の防護施設を活用することが目的である．この工法は，落石対策便覧に記載がなく，過去の採用例はないが，新技術開発には既存技術にとらわれない考え方が必要であるため，防災ドクターの意見を踏まえ，検討することとした．

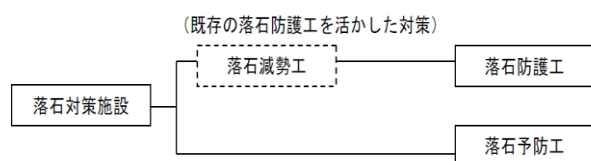


図-1 落石対策工の種類

2. 現地の状況

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，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，落石発生源となっている（図-2）．既設対策工として，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．

3. 当該現地の対策方針

当該現地において，落下物を待ち受けて捕捉する落石防護工は，高標高部からの落石のため，高エネルギー吸



図-2 現地周辺の微地形表現図



写真-1 損傷した落石防護柵



写真-2 不安定な浮石

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-1のように土砂が堆積し、ワイヤーロープが伸びてしまっているため、要求される性能を満足するためには再設置が必要である。また、落石対策便覧に記載されている他の工法では、施工範囲が大規模になり、当該現地の地形や既設のロックシェッドを踏まえると適用が困難である。一方、発生源対策を行う落石予防工は、写真-2のように節理面の発達が顕著な対象浮石群があり、施工時の安全性が確保できないため採用ができない。

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、既設施設の活用及びコスト削減を検討した。

対策工法比較表を表-1 に示す。第1案は、現況対策の更新と同等の案である。この案は、堆積土砂の撤去や倒壊した防護柵の修復が必要となり、維持管理面で課題が大きい。第2案は、落石減勢工の斜面法尻設置案である。この案は、落石エネルギーを低下させる効果が高いだけ

表-1 対策工法比較表

比較項目	第1案 アシカー式落石防護柵工 (既設工法)	第2案 落石減勢工 (斜面法尻設置)	第3案 落石減勢工 (中腹部設置)
工種	高さエネルギー吸収型落石防護柵工(4m) (3m×4スパン、B=4.0m)	落石減勢工(4m) (4m×12スパン)	落石減勢工(4m) (4m×12スパン(主部))
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)
対策工事 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大きい (落下衝撃力 170kN < 許容衝撃力 1,704kN)	○：斜面法尻に設置するため、落石エネルギーの減衰効果が大きい (落下衝撃力 170kN < 許容衝撃力 1,704kN)	○：第1案に比べると、落石エネルギー減衰効果は大きい ○：ロックシェッドの設置衝撃力に満足できる (落下衝撃力 1,414kN < 許容衝撃力 1,704kN)
施工性	○：標準工法であり実施容易 ○：保護対策により安全な施工が可能	○：事例の施工法であるが、人力施工が可能 ○：保護対策により安全な施工が可能	○：事例の施工法であるが、人力施工が可能 ○：保護対策により安全な施工が可能
施工 費用 (概算)	20,000千円	30,000千円	30,000千円
評価	※：適用不可	△：経済性に劣る	○：優れる (十分な対策効果があり、経済性にも優れる)

でなく、ロックシェッドとの距離が近くなるため、ロックシェッドの許容衝撃力に対し十分小さい衝撃に減衰させられるが施工費用が大きい。第3案は、落石減勢工の中腹部設置案である。この案は、第2案に比べると、落石エネルギーの減衰効果は小さいが、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。これらを総合的に検討した結果、第3案の設計について検討することとした。

4. 落石減勢工の仕様

落石減勢工は以下を考慮し、仕様を決定した。

落石減勢工は、海外の事例を踏まえポケット式落石防護網工をイメージし、防護網の裾から落石がこぼれ出るようにするため、下端を固定しないことで、落石が堆積せずに通過する構造とした。

落石減勢工の部材仕様は、減衰した落石速度がロックシェッドの耐力を下回る効果が得られ、かつ、落石減勢工そのものが破損しないように数値解析を用いて検討した。

減衰方法として、金網の有無および両サイドへのコントロールロープを設けることを検討し、それぞれのケースについて、数値解析により、落石減勢工の設計内容を調査した。

図-3に落石減勢工のイメージ図を示す。図中のコントロールロープは、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設備である。

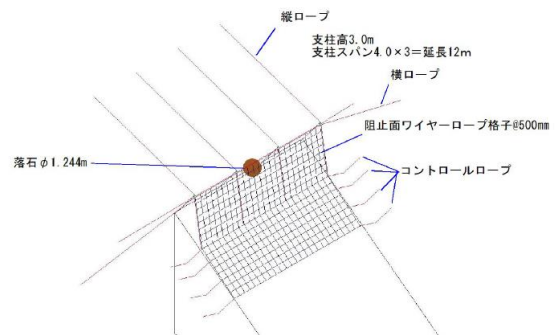


図-3 落石減勢工のイメージ

5. 解析モデル

図4に数値解析モデルを示す。現地調査結果より、当該現地の最大落石の寸法であるφ1.244mの球体と仮定した。落下高さ・傾斜等から算出した落石減勢工衝突時の落石速度は23.3m/s、落石エネルギーは793kJである。落石減勢工の解析モデルは、支柱高さ3m、支柱延長12m(スパン 4m×3)、落石減勢工設置面での斜面角度は37度、ワイヤーロープ角度は80度とし、現地の状況を再現した。

表4に解析ケース一覧を示す。落石の速度を減衰させる面的施設は、ワイヤーロープの格子状構造を基本とし、解析は、金網の有無、コントロールロープの有無（3段または4段）の組み合わせによる6ケースにて比較検討を行った。金網無は、ワイヤーロープ格子状構造のみ、金網有は、ワイヤーロープ格子状構造に金網を付加したものである。

6. 解析結果

現地の地形を踏まえ、既設ロックシェットの許容衝撃力以下となる減衰工設置箇所での落石の速度を落石対策便覧より計算した結果、15.4m/sであった。検討結果は、減勢工により、減衰した後の速度が15.4m/s以下となるか、各部材損傷の有無により適用の可否を判定した。

落石速度の推移を図5に示す。図5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示したものである。いずれのケースでも落石が減勢工に接触すると、落石速度が低下した。また、コントロールロープのない

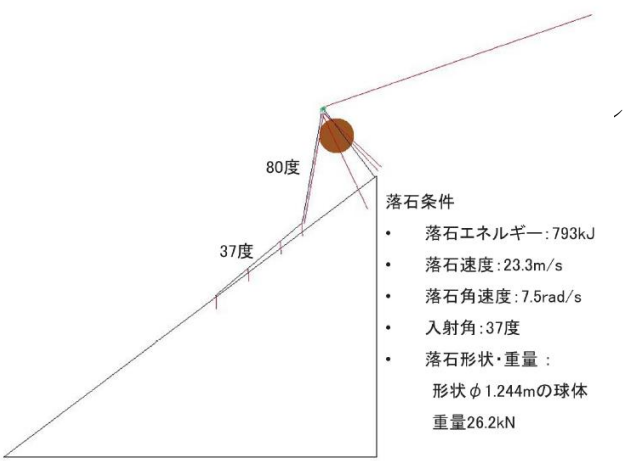


図4 数値解析モデル

コントロールロープ	無	3段	4段
金網無	Case1	Case3	Case5
金網有	Case2	Case4	Case6

表4 解析ケース一覧

ケース（case1, case2）と比較して、コントロールロープの設置されたcase3～6の減衰効果が高かった。図中の黒丸は、落石が斜面に接触した時間を示しており、斜面に接触すると落石速度が急激に低下する。一方、金網の有無は、速度低下にあまり効果を示していないことが分かった。

落石解析結果を表5に示す。

金網の有無について、減衰効果の差は小さかった。

コントロールロープについて、設置した場合、減衰効果が高く、3段より4段の方がより効果的であった。

コントロールロープの段数が違うcase3, 5について、3段では破断したが、4段の損傷はほとんど見られなかった。

7. 解析結果を踏まえた対策工法

当該現地における落石防護柵は、繰り返しの落石により土砂が堆積し損傷している。格子状のワイヤーロープをすり抜ける小径の落石については、ロックシェッドで捕捉可能である。

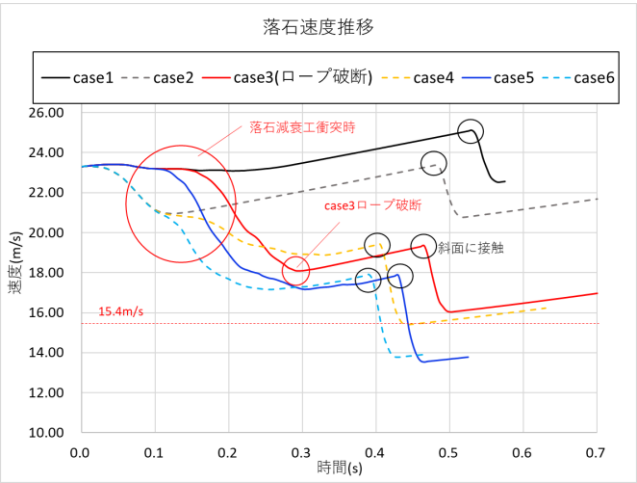


図5 時間と落石速度の推移

表5 落石減勢工の解析結果一覧

ケース		Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
モデル	ワイヤーロープ	φ18	φ18	φ18	φ18	φ18	φ18
	初部以外	φ18	φ18	φ16	φ16	φ16	φ16
	金網の有無	無	有	無	有	無	有
	コントロールロープの有無	無	無	3段	3段	4段	4段
解析結果	損傷	金網	—	ほぼなし	—	ほぼなし	—
	ロープ	伸び	伸び	2本破断	伸び	伸び	伸び
	支柱	なし	なし	なし	なし	なし	なし
	残留速度 (m/s)	22.5	20.8	16.0	15.4	13.5	13.8
残留落石エネルギー (kJ)		752	617	415	392	293	304
検討結果		×	×	×	○	○	○

以上の現地状況と解析結果を踏まえ、対策工法は case5 のコントロールロープを4段配置、金網無しとし、ワイヤーロープの間隔を一般的な50 cmの格子状構造とした。対策工法図を図-6、図-7 に示し、その完成写真を写真-3に示す。

8. 対策工設計の考察

本解析結果によれば、減衰効果は金網の有無による影響は小さく、コントロールロープは有りの方が大きいことが分かった。今後、減勢工を検討する場合は、コントロールロープに重点を置き、ロープの径や材料を検討することが望ましい。一方、金網については、中小規模の落石を減衰させることが可能であるため、ワイヤーロープの間隔・径との組み合わせも考慮して採用の可否を判断すべきと考える。

9. おわりに

国の施策である「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、法面のレーザープロファイラー調査を実施しており、その結果として、高標高部の要対策箇所が数多く発見されている。

今回、高標高部からの落石エネルギーを低下させる対策として、落石減勢工の効果を、数値解析を用いることにより考察した。落石対策においては、既設対策工耐力を上回る落石源が確認された場合、さらに施設規模の大きい落石防護工を追加するケースも少なくない。落石減勢工を採用することで、既設対策工を活用しながら、り効果的な落石対策を実現できると思われる。

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：本対策の検討にあたりご尽力いただいた岐阜大学工学部沢田和秀様、中央復建コンサルタンツ株式会社様、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

1) 日本道路協会 (2017)：落石対策便覧，p.75

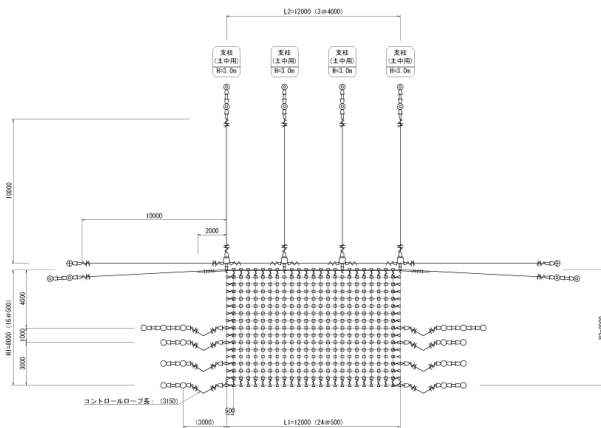


図-6 正面図

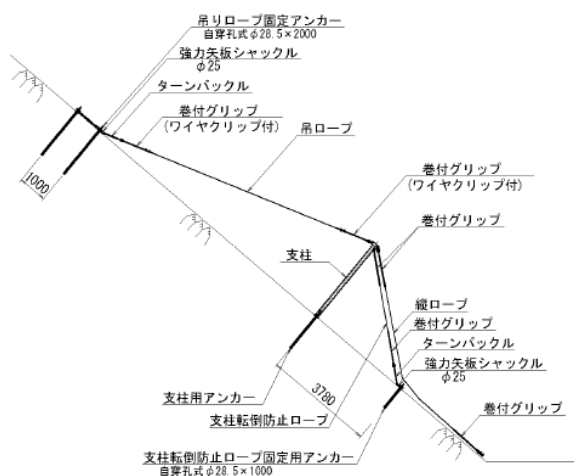


図-7 側面図



写真-3 完成写真