

# 斜面の転石・浮石の分布状況に応じた最適な落石対策工選定手法の報告

齋藤 裕太

四国地方整備局 土佐国道事務所 計画課 (〒780-0055 高知県高知市江陽町2-2)

落石対策工の選定は、斜面上に分布する転石・浮石の規模や分布状況に応じ施工性・安全性を考慮したうえで経済性に優れたものとする必要がある。

本稿では、転石・浮石の詳細調査を基に、落石シミュレーションを用いてより現実的な落石エネルギーを算出し、経済性において最適な落石予防工と落石防護工の組合せを検討した事例を報告する。

キーワード 落石対策工, 等価摩擦係数, 落石シミュレーション

## 1. はじめに

一般国道32号は香川県高松市から高知県高知市を結ぶ延長約137kmの幹線道路であり、今後発生が予想される東南海・南海大地震等の大規模地震時における緊急輸送路としても重要な役割を担う路線である。一方、急峻かつ多雨地帯である山間部を通過することから、降雨による事前通行規制区間が全延長のうち約42% (58km) を占めており過去には土砂災害も発生しているなど、安全・安心に通行するための課題を依然として抱えている。

同路線のうち土佐国道事務所管内の大豊町小川～馬瀬は事前通行規制区間 (⑤区間L=6.2km) に指定されており、平成15年から平成24年までの10年間で計12回の通行止めが実施されている。板木野防災事業はその解除を目的とした事業である。



図-1 板木野防災事業の概要

同事業は、事前通行規制区間のうち崩壊地形が見られ

る板木野洞門周辺斜面など防災危険箇所が連続する区間をトンネルで回避し、災害に強い道路づくりを実現するものである。トンネルの前後の区間は地質が硬質なチャート主体であり、急峻な地形に亀裂の発達した巨岩が点在していることから、事前通行規制区間の解除に向けた取り組みとして落石対策が重要な課題となっている。

一般的な落石対策として、待ち受け対策である落石防護工と発生源対策である落石予防工の2種類の落石対策工が挙げられる。前者は発生頻度が多い比較的小さな転石・浮石に適用され、後者は落石防護工が適用できない比較的大きな転石・浮石に適用される。これら対策工の計画に当たっては各工種の持つ構造的な機能限界を十分認識して工種の選定を行うことが安全性・効率性の面から見て重要であるが、転石・浮石は落下の際複雑な挙動を示すため、対象となる落石数が増えると対策工の受け持つ落石エネルギーの算出に多くの手間がかかるという課題がある。

本稿では以上の議論を踏まえた上で、実際の斜面における転石・浮石の詳細調査を基に、落石シミュレーションを用いてより現実的な落石エネルギーを算出し、経済性において最適な落石予防工と落石防護工の組合せを検討した事例を報告する。

## 2. 落石対策工選定手法の概要

本稿では、①転石・浮石調査、②落石エネルギーの算出、③落石対策工の工種選定、④落石対策工の詳細検討の流れにより落石対策工の選定を行う。

### 3. 転石・浮石調査

#### (1) 調査方針

落石対策の基礎資料収集を目的として、現地踏査により斜面上に分布する転石・浮石について調査する。本稿では、新設するトンネルの高松側抗口付近の落石対策範囲における対策検討について報告の対象とする。



図2 高松側抗口付近の状況

調査に当たっては、浮石・転石の位置、規模、岩盤亀裂分布と表-1の分類による不安程度の評価を行う。なお、調査範囲には、中央部に大きな谷地形の集水エリアとなる範囲と、道路際に計画されている砂防堰堤により捕捉される範囲があり、これらについては落石対策の必要はないと判断した。したがって、斜面防災対策の範囲は、中央部の溪流を除いた両側の尾根地形をなし転石・浮石が道路まで至る可能性のある範囲とする。

表-1 転石・浮石安定状態評価

◆転石・浮石 安定状態評価				
安定状態	転石	記事	浮石	記事
1		木で停止		完全に分離
2		急崖上で停止 完全露出		下部の浸食が進行
3		下部やや緩傾斜 2/3以上露出		やや不安定な形状
4		下部平坦面あり 2/3~1/2程度露出		亀裂が発達
5		平坦面で停止 1/2以下露出		ほぼ健全

出典 『道路土工一切土工・斜面安定工指針（平成21年版）P330』を一部改変



図3 転石・浮石の状況（左：安定状態2，右：安定状態1）

#### (2) 結果とりまとめ、調査票の作成

(1)の結果を調査票に取りまとめる。次ページの表-2に調査結果の一覧表を示す。

### 4. 落石エネルギーの算出

#### (1) 算出の目的と方法

従来、落石防護工の設計に用いられてきた落石エネルギーは、各地で行われた実験値による等価摩擦係数を用いて推定されてきたが、実際の被災事例や個別にシミュレーション解析を行って算出した落石エネルギーに比べて過大になるという課題がある。また、シミュレーション解析による方法を斜面上の全ての不安定岩塊に対して行うことは多くの手間を要し非現実的である。

一方、事前シミュレーションを行ったところ、等価摩擦係数の大きさは落石重量によらず、斜面勾配により一定の値を示す傾向が見られた（図-4）。そこで本稿では、現実的な落石エネルギーを算出することを目的として、落石シミュレーションから対象斜面における等価摩擦係数を逆算し、その等価摩擦係数を用いて転石・浮石ごとの落石エネルギーを算出する。

#### (2) 落石シミュレーションによる等価摩擦係数算出

落石シミュレーションは300回計算を行い95%信頼区間の等価摩擦係数を算定する。解析測線は、代表的な断面を地形的特徴や転石・浮石の分布状況から選定する。落石の発生源は現地踏査により設定するものとするが、斜面の最遠点や遷急線などの勾配変化点など、1測線あたり2カ所以上実施する。投下する石の大きさは近傍で確認されている最大径の石と発生確率が高いと予測される石など数個を選定して実施する。等価摩擦係数は、式(1)を用いて速度から逆算する。結果を図-4に示す。

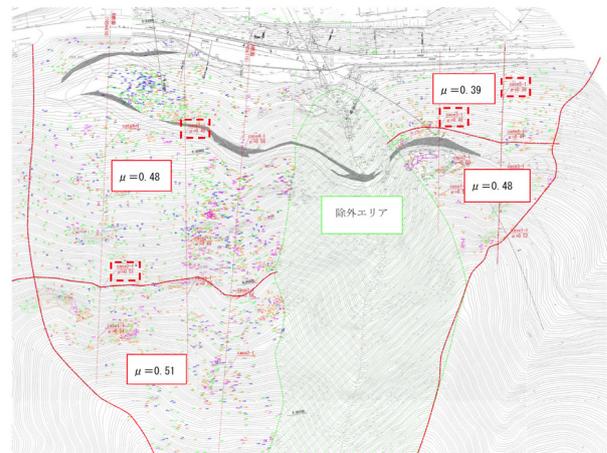


図4 高松側 落石シミュレーション結果

$$\mu = \tan \theta \left( 1 - \frac{V^2}{2gh} \right) \quad (1)$$

ここに、V：落石速度(m/s)、θ：斜面傾斜角(°)、g：重力加

速度(m/s<sup>2</sup>), h: 落石高(m),  $\mu$ : 等価摩擦係数

### (3) 落石エネルギーの算出

上で求めた等価摩擦係数と、全数調査による高さ・重量より全転石・浮石の落石エネルギーを求める。結果は、表-2のように各石に対して取りまとめる。

表-2 転石・浮石調査票 (高松側: 1700~1300kJ抜粋)

転石・浮石 No.	状態	安定状態	寸法 (m)	重量 (kN)	落石エネルギー (kJ)	球形換算直径 (m)
156	転石	3	2.4 × 1.6 × 0.9	89.9	1719.8	1.876
1770	浮石	2	1.5 × 1.3 × 1.4	71.0	1716.9	1.734
3059	転石	2	2.4 × 1.4 × 0.8	69.9	1646.2	1.725
1929	転石	3	2.2 × 1.6 × 0.8	73.2	1635.1	1.752
1166	転石	3	2.0 × 1.3 × 1.0	67.6	1606.6	1.706
3061	浮石	2	2.4 × 1.2 × 1.0	74.9	1606.2	1.765
1611	転石	3	3.0 × 1.3 × 0.7	71.0	1573.9	1.734
D147-1	転石	2	1.2 × 1.4 × 0.8	34.8	1552.1	1.367
1101	浮石	2	4.0 × 0.8 × 0.8	66.6	1516.4	1.698
2020	転石	3	1.8 × 1.4 × 1.0	65.5	1495.1	1.688
4009	転石	2	2.1 × 1.6 × 0.9	78.6	1479.5	1.794
D9	転石	3	2.0 × 2.5 × 1.6	208.0	1456.0	2.481
415	浮石	3	1.4 × 1.7 × 1.0	61.9	1448.4	1.657
D205	転石	2	2.0 × 0.7 × 0.5	18.2	1445.1	1.102
3018	転石	2	3.1 × 1.2 × 0.8	77.4	1433.6	1.785
4004	転石	2	2.2 × 1.2 × 1.0	68.6	1424.8	1.714
1820	転石	4	2.5 × 1.8 × 0.5	58.5	1422.5	1.626
1722	転石	3	1.4 × 1.2 × 1.4	61.2	1381.9	1.650
1609	転石	3	1.8 × 1.3 × 1.0	60.8	1352.7	1.647
1713	浮石	4	2.9 × 1.3 × 0.6	58.8	1339.7	1.629

## 5. 落石対策工の工種選定

### (1) 選定方法の概要

道路土工<sup>1)</sup>に基づき、落石対策工の選定を行う。

落石防護工は、可能吸収エネルギーが設定されているため、それを超える落石エネルギーを持つ転石・浮石は、全て予防工で対応することとなる。したがって、たとえば巨岩を個別に予防工で対応し、他の転石・浮石を防護工で対応することで、より経済的な対策工とすることが期待される。

そこで本稿では、前項で求めた落石エネルギーと転石・落石調査票をもとに、落石防護工の可能吸収エネルギー別に落石防護工と予防工の概算工事費と経済曲線を作成し、斜面全体の経済性において最適となる落石防護工と予防工の組合せを選定する。また、対象は安定状態5以外の転石・浮石とした。

なお、ここで算出される数値は、きわめて大まかな概算工事費であることに注意されたい。

### (2) 概算工事費の算出

本検討斜面は、全体的に道路際が緩勾配になっており、地形的な要因から設置に適する高エネルギー吸収タイプの落石防護施設としては、『斜面設置型落石防護柵』が最適となる。概算工事費の算定にあたっては、NETIS登録工法の中から、高エネルギー吸収タイプの斜面設置型落石防護柵工を選定して検討を行った。当該斜面の安定状態5と除外エリアに分布する転石・浮石を除く対策が必要な転石・浮石は2,248個となり、落石対策工の組み合わせごとの工事費の経済曲線は図-5のとおりとなり、経済曲線より求めた当該斜面の最適な落石防護工の可能

吸収エネルギーは、『1500kJ』となった。

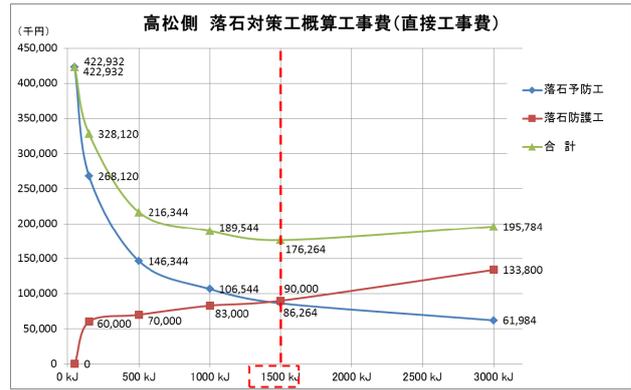


図-5 高松側概算工事費

## 6. 落石対策工の詳細検討

### (1) 落石予防工の選定

#### a) 落石予防工の種類と特徴

現地踏査より、それぞれの石に適した対策工法を選定する。落石予防工の選定にあたっては、前項で設定された落石防護工で捕捉することが出来ないエネルギーを保有する石を対象に現地踏査を実施し、それぞれの石に適した対策工法を選定する。

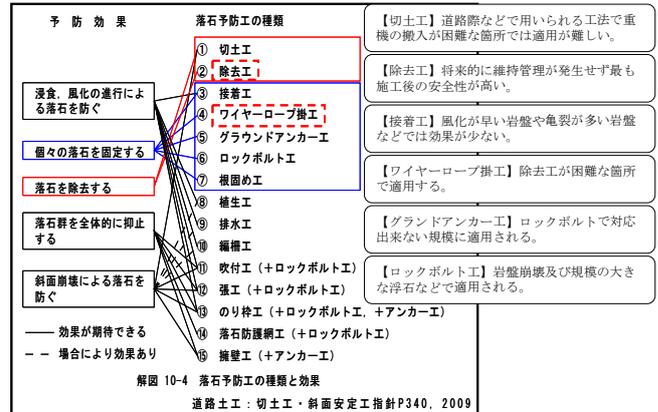


図-6 落石予防工の種類と特徴

#### b) 本稿における採用工法

本検討では基本的に除去工を採用し、除去することで周辺の地山を不安定にする可能性があるか除去時に仮設工法が適切に配置できない場合はワイヤーロープ掛工を採用した。



図-7 除去可・不可の例

(2) 落石防護工の選定

a) 落石防護工の種類と特徴

落石防護工の選定にあたっては、前項で設定された落石エネルギーで検討を行う。また、落石防護工はそれぞれ斜面の地形にあった工法を選択し、落石を確実に捕捉することができる対策工法を選定する。

b) 当該斜面の特徴と採用工法

当該斜面は路側からの立ち上がり勾配が約30°前後の緩勾配斜面が広範囲で見受けられる。このような極端な緩勾配斜面では、落石防護網工の金網部分が斜面中腹で地山と接触することは避けられず、防護網の特徴である広い範囲の金網部分で落石エネルギーをソフトに受け止める効果が薄くなり、本来の性能を引き出すことが難しいと推測できる。以上より、当該箇所における落石防護工は、緩勾配斜面に適している落石防護柵工による計画とする。落石防護網の可能吸収エネルギーについては、道路土工に準拠して行う。高エネルギー吸収防護柵の工法選定においては、NETIS登録工法を主体に検討を行い採用案を決定した。表-3に比較表(例)を示す。

(3) 落石対策施設検討結果

以上より決定した各落石対策工の対象となる転石・浮石の個数を表-4に、落石対策工の実施数量を表-5に示す。

経済曲線より求めた当該斜面の経済性において最適な落石防護工の可能吸収エネルギーは『1500kJ』であり、それ以上の落石エネルギーを保有する転石・浮石については、現位置対策である落石予防工で検討を行った。なお、実際には落石対策工施設配置計画も行っているが、紙幅の都合よりここでは割愛する。

表-4 落石対策工対象数量

対策工	対象対象	備考
ロープ伏工	217 個	51 箇所
高エネルギー吸収型落石防護柵 (1500kJ)	1,888 個	
除去工	56 個	

表-5 落石対策工実施数量

工種	規格	単位	数量	備考
ロープ伏工		箇所	51	
高エネルギー吸収型落石防護柵工	1,500kJ	m	420	
除去工		箇所	56	
仮設モノレール		m	1,440	

7. まとめ

本稿では、板木野防災事業を事例に、転石・浮石の詳細調査を基に、より現実的な落石エネルギーを算出し、経済性において最適な落石予防工と落石防護工の組合せを検討した事例を報告した。土佐国道事務所では、同様の手法を用いて越知道路(2工区)等における落石対策工の選定もおこなっており、より効率的な転石・浮石調査の方法や対策工の選定方法を構築すべく事例を重ねる予定である。

自然条件の厳しい山間部の道路を多く抱える事務所として、今後も限られた予算の中で地域の安全・安心をより高めていく事業を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会 (2009) : 道路土工一切土工・斜面安定工指針
- 2) 社団法人 日本道路協会 (2000) : 落石対策便覧
- 3) 社団法人 地盤工学会 四国支部 (2010) : 落石対策 Q&A

表-3 工法比較表(例)

工法	MJネット工法 (G-15) SK-010023-V	リングネット工法 (RX-150) HR-99001-V	ハイジュールネット工法 (HJN-1500) GS-08010-A
概要			
1.844-吸収量	E=1500 (KJ)	E=1500 (KJ)	E=1500 (KJ)
幅高さ	標準4.0m	標準4.0m	標準4.0m
支柱間長	標準 5~10m	標準 5~10m	標準 5~10m
柵の構成	ASMネット・支柱・ワイヤーロープ・ワイヤーロープアンカー・金網等	ROCCOネット・支柱・ワイヤーロープ(ブレーキリング付)を懸架するサポートロープ(ブレーキリング付)・ワイヤーロープアンカー・ゲルニスタープ・グラントプレート・金網など	ケーブルネット上下部ケーブル・支柱・保持ケーブル・ベースプレート・金網等上下ケーブル・保持ケーブルにはブレーキエレメントを設置
1.844-吸収機能	①ASMネットの変形 ②ワイヤースリッパ(ブレーキシステム)	①ROCCOネットの変形 ②ブレーキリングの変形	①ケーブルネットの伸長 ②ブレーキエレメントによるワイヤーのスリッパ
工法概要	1.柵の距離を任意に設定し1本のリングを編成し、同時に1本のリングを相互に交差させASMネットを形成し、落石時にこのASMネットの変形及びブレーキシステムの摩擦作用により落石エネルギーを吸収する防護工法。	1.柵の距離を任意に設定し1本のリングを編成し、同時に1本のリングを相互に交差させネットを形成し、落石時にこのネットの変形及びブレーキシステムの摩擦作用により落石エネルギーを吸収する防護工法。	ケーブルネット上下部ケーブル・支柱・保持ケーブル・ベースプレート、金網等上下ケーブル、保持ケーブルにはブレーキエレメントを設置したケーブルネットと、下部ケーブル及び保持ケーブルに接続されたブレーキエレメントが構成されており、落石時にシステム全体の変形およびブレーキエレメントにより落石エネルギーを吸収する防護工法。
特徴	・落石がネットに直撃したとき衝撃→最大10m飛び出す。 ・ネットの変形は任意に設定し、落石がネットに直撃したとき衝撃→最大10m飛び出す。 ・最大吸収可能エネルギー(性能限界)での実物実験が行われている。	・落石がネットに直撃したとき衝撃→最大10m飛び出す。 ・支柱下部にはアンカーが必要である。 ・最大吸収可能エネルギー(性能限界)での実物実験が行われている。	・落石がネットに直撃したとき衝撃→最大7m飛び出す。 ・支柱下部にはアンカーが必要である。 ・最大吸収可能エネルギー(性能限界)での実物実験が行われている。
施工性	・部材が軽量であり、施工は比較的容易である。 ・資機材の搬上時にチェーン等が必要になるが、基礎を必要としない工法のため、施工性は良い。 ・仮設足場は、アンカー施工時に必要となる。支柱立ち込み、ネット張り施工の作業足場が必要となる。	・部材が軽量であり、施工は比較的容易である。 ・資機材の搬上時にチェーン等が必要になる。また支柱下部にはコンクリート基礎を必要とする場合が多い。 ・仮設足場は、ゲルニスタープ・アンカー、ワイヤーロープアンカー施工時に必要となる。	・部材が軽量であり、施工は比較的容易である。 ・資機材の搬上時にチェーン等が必要になる。また支柱下部には基礎アンカーを必要とする。 ・仮設足場は、ゲルニスタープ・アンカー、ワイヤーロープアンカー施工時に必要となる。
維持管理およびメンテナンス	・落石時にASMネットが塑性変形しても、部分的な修繕ができる。 ・支柱の変形に起因して基礎工事が不要である。 ・ワイヤースリッパが作用するときに、引張強さを十分に確保する。 ・部分的なメンテナンスの取り入れが可能である。 ・今回の落石エネルギーに対しASMネットの吸収エネルギーだけでほぼ対応できるため、メンテナンスの頻度は少なくなる。 ・3工法の中で最も容易に維持管理およびメンテナンスが可能である。	・落石時にROCCOネットが塑性変形しても、部分的な修繕ができる。 ・支柱の変形に起因して基礎工事が不要である。 ・ワイヤースリッパが作用するときに、引張強さを十分に確保する。 ・部分的なメンテナンスの取り入れが可能である。	・落石時にケーブルネットが塑性変形しても、部分的な修繕ができる。 ・支柱の変形に起因してベースプレートの交換が必要である。 ・ワイヤースリッパが作用するときに、引張強さを十分に確保する。 ・部分的なメンテナンスの取り入れが可能である。
落石捕捉後のメンテナンス	・落石捕捉後、ASMネットの変形、ブレーキシステムの作用、ワイヤーロープや金網が変形した場合は、各部材の取替のみで対応が可能である。 ・3工法中、唯一落石捕捉後のメンテナンスを取り入れた防護工法である。	・落石捕捉後、ROCCOネットの変形、ブレーキリングの変形、ワイヤーロープや金網が変形した場合は、各部材の取替のみで対応が可能である。 ・ブレーキリングが変形した場合は交換が必要である。	・落石捕捉後、ケーブルネットの変形、ブレーキエレメントの変形、ワイヤーロープや金網が変形した場合は、各部材の取替のみで対応が可能である。 ・ブレーキエレメントが変形した場合は交換が必要である。
耐用年数	・山岳部 40年	・落石捕捉後、ROCCOネットの変形、ブレーキリングの変形、ワイヤーロープや金網の損傷などが無い場合でも、溶融温度メッキの耐用年数約50年を考慮して取り替えが必要である。 ・山岳部 40年	・落石捕捉後、ケーブルネットの変形、ブレーキエレメントの変形、ワイヤーロープや金網の損傷などが無い場合でも、溶融温度メッキの耐用年数約50年を考慮して取り替えが必要である。 ・山岳部 40年
更新計画(100年)	・落石捕捉後、ASMネットの変形、ブレーキシステムの作用、ワイヤーロープや金網の損傷などが無い場合でも、溶融温度メッキの耐用年数約50年を考慮して取り替えが必要である。	・落石捕捉後、ROCCOネットの変形、ブレーキリングの変形、ワイヤーロープや金網の損傷などが無い場合でも、溶融温度メッキの耐用年数約50年を考慮して取り替えが必要である。	・落石捕捉後、ケーブルネットの変形、ブレーキエレメントの変形、ワイヤーロープや金網の損傷などが無い場合でも、溶融温度メッキの耐用年数約50年を考慮して取り替えが必要である。
更新時の進入路	・通行止め要する道路からクレーンでの荷上げが困難な場合、モノレールでの荷上げが最速である。	・通行止め要する道路からクレーンでの荷上げが困難な場合、モノレールでの荷上げが最速である。	・通行止め要する道路からクレーンでの荷上げが困難な場合、モノレールでの荷上げが最速である。
概算工事費	¥450,000/m 3工法の中で最も価格が低く、経済的である。	¥373,000/m 3工法の中で2番目に経済的な価格である。	¥555,800/m 3工法の中で最も価格が高く経済性に劣る。