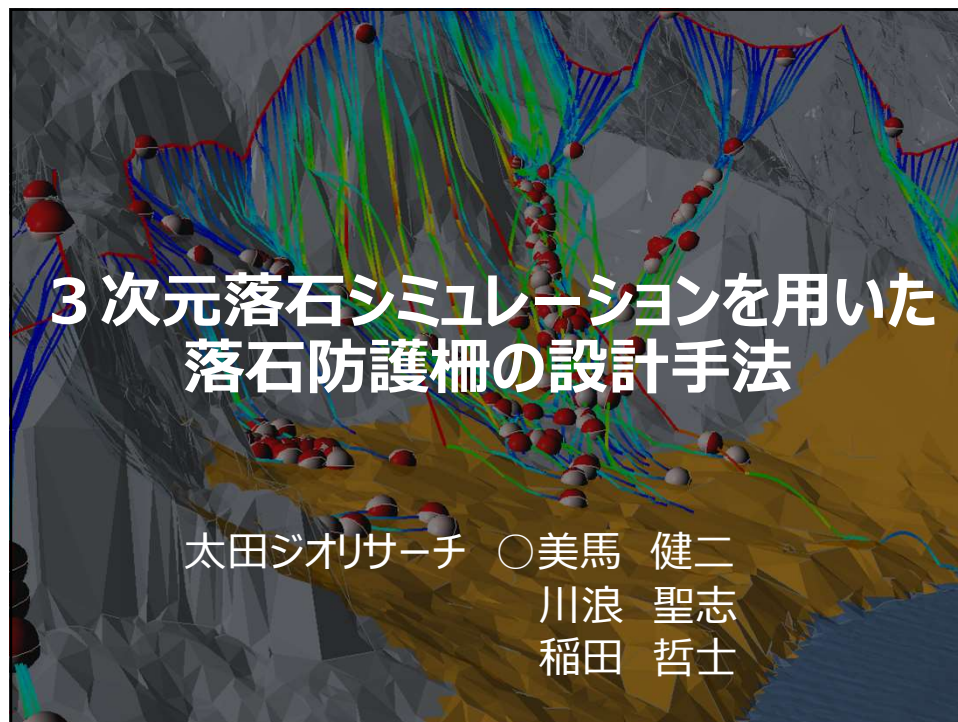




3次元落石シミュレーションを用いた 落石防護柵の設計手法

太田ジオリサーチ ○美馬 健二
川浪 聖志
稲田 哲士

発表概要

1. 背景

- ・落石防護柵の説明
- ・落石防護柵の設計手法の歴史的経緯
- ・落石防護柵の慣用設計法における不確実性

2. 3次元落石シミュレーションの概要

3. 3次元落石シミュレーションを用いた落石防護柵の 設計事例

4. まとめ

1. 背景

・落石防護柵の説明

落石防護柵は、下の写真のように、斜面下方に鉛直や斜め方向に支柱を立て、落石を一連のワイヤーやネットで防護する待ち受け型の工法である。落石防護柵の設計は、主に落石の経路、跳躍高、衝撃力に応じて、工法の規格が選定される。



従来工法の特徴

工事費：安価

耐衝撃力：小



新技術工法の特徴

工事費：高価

耐衝撃力：大



待ち受け型の落石防護柵

・落石防護柵の設計手法の歴史的経緯

年	経緯	観点
1954年～	本格的道路整備	
1968年	飛騨川バス転落事故	これを契機に道路の安全性向上が要望される。
1983年	日本道路協会：落石対策便覧（初版） 発刊	慣用設計法が示される。
2002年	日本道路協会：落石シミュレーション手法の調査研究資料 発刊	PCの性能向上に伴い、2次元落石シミュレーションが普及する。



PCの性能向上に伴い、近年は、3次元点群測量が普及している。



3次元落石シミュレーションができる。

・落石防護柵の慣用設計法における不確実性（その1）

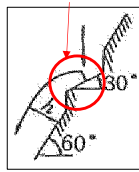
落石防護柵高の規定があいまいである。

一般に、落石の跳躍量（＝跳躍高）は、右図を参考に2mを想定し、落石防護柵高は2mと決定することが多い。

しかし、右図を見ると、跳躍量2mを超える落石がたくさんあることが読み取れる。解説では、「総落石数の80～85%が2m以下の跳躍量となっている」と示されている。

80%は、落石防護柵高2mの斜面上で10個石を落とすと、その内2個は柵を越えてしまう確率である。

凹凸重要！



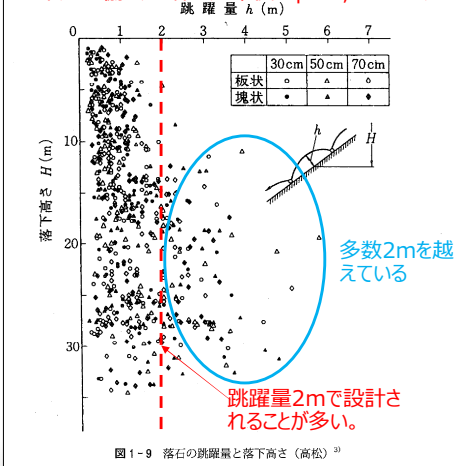
十分ではない。

落石対策便覧では、「凹凸の多い斜面では、跳躍量は2m以上になることがあり、落下高さの大きい場合には4～5mに達することもある」と示されている。

落石シミュレーションが有効。

図1-9に示した実験結果³⁾では、 h の値は2mを超えるものも少なからず観察されているが、総落石数の80～85%は2m以下の跳躍量となっていることが報告されている。この実験斜面は凹凸のある植生のない斜面であり、斜面に突起があったり、凹凸が存在する場合で落下高さの大きい場合には注意する必要があることを示している。図1-10は、斜面内に突起が存在する場合を△、平坦な場合を○、□の記号で実験値を示し、計算値を実線で示して比較したものである。

日本道路協会：落石対策便覧p.15,2019引用



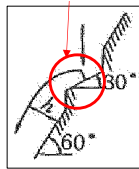
3) 佐々木康他：落石の跳躍量に関する実験，第14回日本道路学会特定課題論文集，pp.113-115，1981。

・落石防護柵の慣用設計法における不確実性（その2）

落石防護柵設置範囲の規定があいまいである。

落石経路の拡がり、落石対策便覧では、右図のように最大45度程度と示されている。

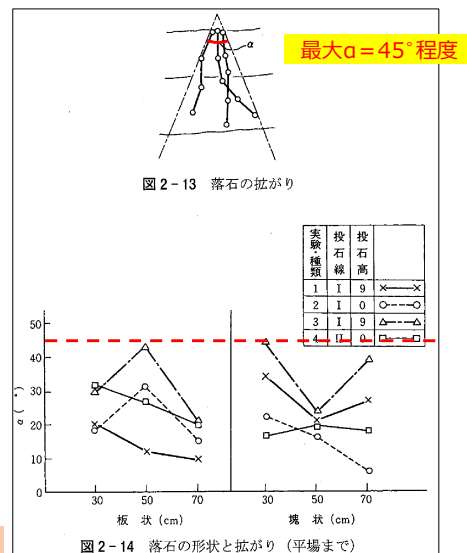
凹凸重要！



しかし、統計値が少なく、前述の地形の凹凸の多い斜面の場合は、45度以上に拡がる可能性もあると考えられる。

2次元落石シミュレーションで、落石の平面的な拡がりを求めるのは困難。

3次元落石シミュレーションで求めることができる。



日本道路協会：落石対策便覧p.306,2019引用

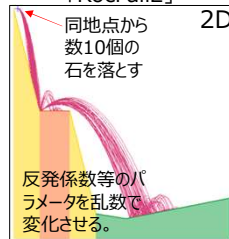
3次元点群測量の地形図（DEM）で、3次元落石シミュレーションを行い、落石の跳躍高、落石経路の拡がり、落石の衝撃力分布に応じて、落石防護柵の規格を検討した。

2. 3次元落石シミュレーションの概要

2次元と3次元落石シミュレーションの違い

2次元落石シミュレーションソフト

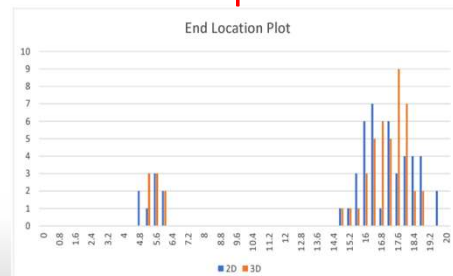
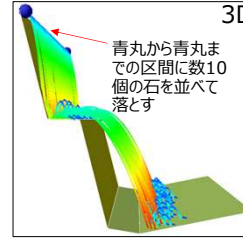
「RocFall2」



拡張

3次元落石シミュレーションソフト

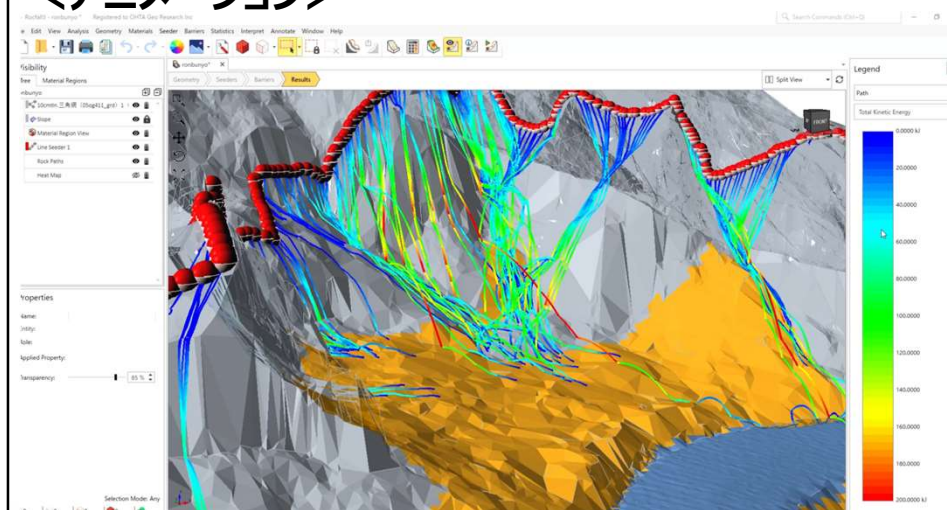
「RocFall3」



2次元と3次元落石シミュレーション落石の到達地点の比較

3次元落石シミュレーション例

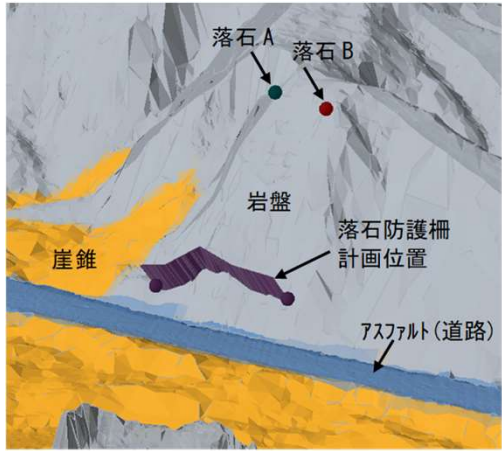
<アニメーション>



3次元落石シミュレーション例

(落石の軌跡に衝撃力をグラデーション色で表示)

3. 3次元落石シミュレーションを用いた落石防護柵の設計事例



- ・落石発生源は、落石AとBの計2個
- ・落石重量は、A、Bいずれも2.6t/個
- ・乱数の発生回数は、落石1個当たり200回



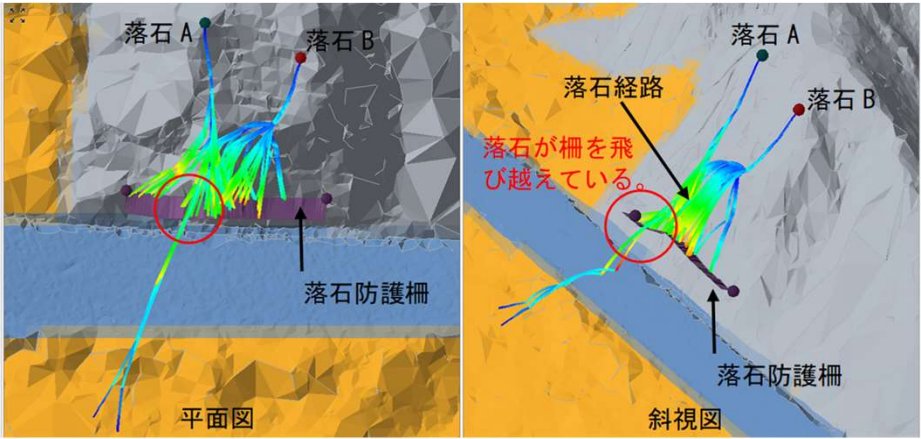
3次元落石シミュレーションを行い、落石の跳躍高、落石経路の拡がり、落石の衝撃力分布に応じて、落石防護柵の規格を検討した。

落石位置と地盤特性の設定
設定した地盤特性一覧

地盤種類	岩盤	崖錐	アスファルト
設定値			
反発係数	0.35	0.32	0.4
接線方向の速度比	0.85	0.8	0.9
摩擦角(°)	30	30	30

設定値は、「(公社)日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料-落石シミュレーション手法の調査研究資料，p.243，2002.」を参考にした。

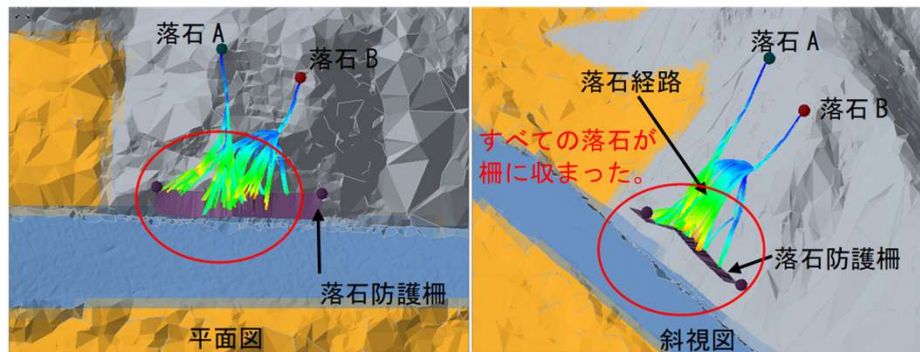
柵高不足のケース



※経路の色は衝撃力を示す（青：小、赤：大）

跳躍した落石が落石防護柵（柵高2.5m）を越えるケースあり。

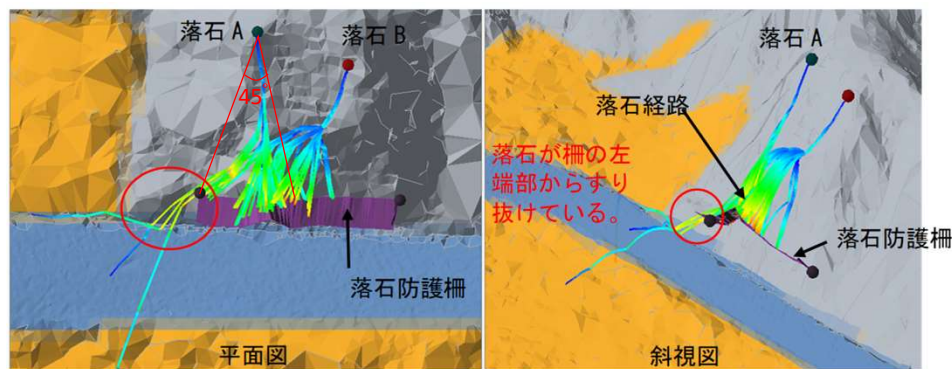
柵高調整後



※経路の色は衝撃力を示す（青：小、赤：大）

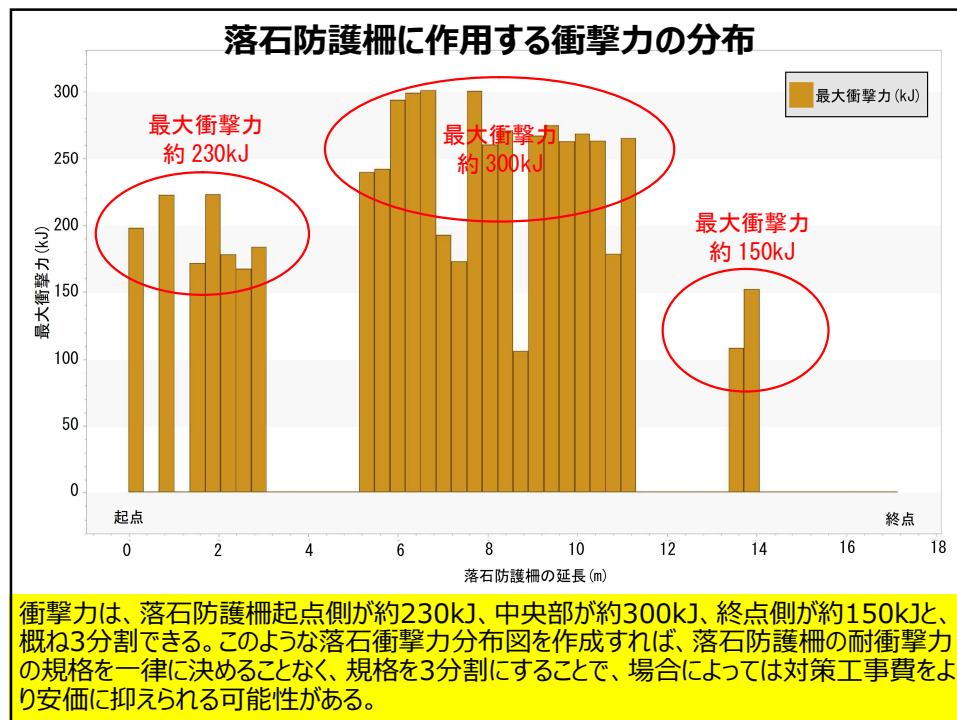
落石防護柵の柵高を2.5mから3.5mに高くすることで、すべての落石を防護することができた。

柵設置範囲不足のケース



※経路の色は衝撃力を示す（青：小、赤：大）

落石が急激に曲がり、落石防護柵の左端部から落石がすり抜けるケースが発生。



4. まとめ

- ・点群測量データ（DEM）を用いて、3次元落石シミュレーションができる。
- ・3次元落石シミュレーションで、複雑な地形でも跳躍高を求めることができた。
- ・また、2次元落石シミュレーションでは対応困難であった平面的な落石経路が、3次元落石シミュレーションで求めることができるようになった。
- ・3次元落石シミュレーションにより、落石防護柵に作用する衝撃力の分布を可視化することで、落石対策の必要な範囲及び規格を合理的に選定することができるようになった。