

DEM を用いた落石対策工効果の定量化手法に関する研究

名古屋工業大学大学院	学生会員	○ 湯浅 知英
名古屋工業大学	正会員	前田 健一
(株) 構研エンジニアリング	正会員	刈田 圭一
(株) 構研エンジニアリング	正会員	川瀬 良司
(株) 構研エンジニアリング	正会員	牛渡 裕二

1 はじめに

現在、落石災害に対して、リスクマネジメントを適応させる研究が進められている。既報¹⁾では、斜面リスク(発生確率×損失額)という指標を用いて、どの斜面から優先的に対策すべきか判断する手法について述べた。また、新設する対策工の投資効率を評価するため、斜面リスクをLCC(Life Cycle Cost)の概念にまで拡張することで評価する手法を示した。しかし、斜面リスクマネジメントを実用的なレベルにするためには、対策工設置効果を含めた斜面リスク定量化が必要不可欠である。

本研究では、こうした対策効果の定量化のため、DEM(Discrete Element Method)といった数値解析シミュレーションを用いる。DEMは、落石災害発生時の落石軌跡等を予測できる解析手法であり、実務レベルで最もよく使われている解析手法である。しかし、落石挙動は、それ自体に大きなばらつきを有しており、仮にシミュレーション精度を十分向上できたとしても、その結果は確率的にしか表現できない特徴を持つ。現状では、対策工効果の定量化に関する研究が少ないだけでなく、こうしたDEM結果を統計的処理するための研究もほとんどないのが現状である。

そこで本研究では、対策工効果をDEMを用いて検証すると同時に、その結果を確率的に表現することを目指す。さらに、対策工費用(Cost)と効果(Benefit)の両面から、対策設置効率を評価する方法について考察する。

2 対策工の設置効果 W (被災低減率=被災確率の減少量)

対策工の種類として待ち受け対策(防護工)を想定すると、無対策時と対策時の斜面リスクは表1のように表せる。ここで、対策の設置効果は、無対策時の被災確率と、対策時の被災確率の差 W の大きさで評価できると考えられる。例えば、ある斜面において複数の対策案(i,j)がある場合、対策案によって変化するのは w_i, w_j のみである。よって、効果が高い対策案を、 W によって評価できる。もちろん、ここでは効果のみに着目しCostを無視しているが、算出した効果とCostの両方を考慮することで対策投資の効率性をも評価できる可能性がある。なお、これについては5で述べる。

表1 斜面リスクと被災低減率の定義

無対策時の斜面リスク	$R = p \times w_{non} \times D$
対策工i設置時の斜面リスク	$R = p \times w_i \times D$
対策工j設置時の斜面リスク	$R = p \times w_j \times D$
対策工iの被災低減率	$W = w_{non} - w_i$
対策工jの被災低減率	$W = w_{non} - w_j$

ここで、 R は斜面リスク、 p は落石発生確率、 w_{non} は無対策時の被災確率、 w は対策時の被災確率、 D は被災時の損失額を示す。

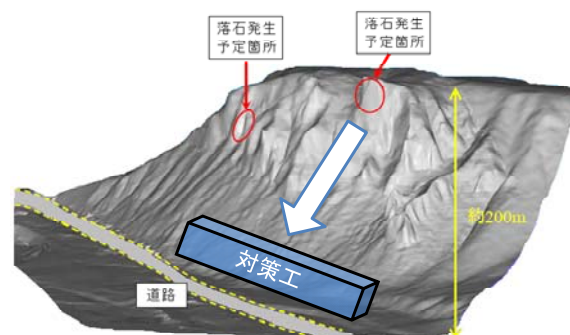


図1 対策工効果のイメージ

3 対策工効果の定量化手法

3.1 ばらつきを考慮したDEM解析

対策工の効果 W は、無対策時の被災確率 w_{non} と対策時の被災確率 w の両者から定量化できる。ここでは、DEMによる落石シミュレーションを用いてこの両者の定量化する。ここで落石挙動には幾何学的なばらつきが生じるため、これを解析結果に反映させ必要がある。特にばらつきを発生させる要因として、1)落石発生条件(初期姿勢、落下高さ) 2)地盤表面のラフネス 3)斜面形状の変化、が考慮される場合が多い。そこで本研究でも、1)に着目し、落石の発生箇所を規則的に変化させて複数回の落石シミュレーションを実施することとした。また、落石軌跡のばらつきは正規分布に従うと仮定し結果を処理した。なお、現状では計算機の処理スピードの制約によって、モンテカルロ的な手法を活用できないが、今後こうした手法が一般的になるものと考えられる。

3.2 被災の判定基準の設定

被災確率の算定にあたり、「被災」の定義が必要となる。ここでは、「道路に落石が到達した場合」を被災とみなす。具体的に対策工に擁壁を想定した場合、被災の判定基準は「①落石が対策工高さを超えて飛行するケース」、「②落石が対策工に衝突し、その際、落石エネルギーが対策工の吸収可能エネルギーを上回るケース」のうちどちらか一方でも満たす場合と定義することができる。(図2)

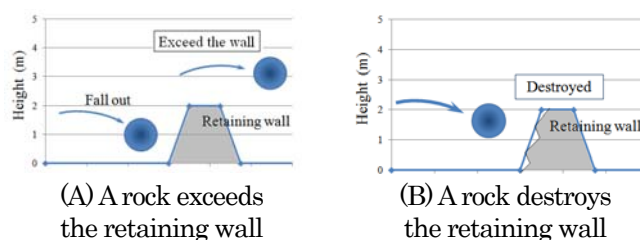


図2 被災判定基準(擁壁の例)

キーワード： 落石 対策工 効果 DEM

連絡先： ☎466-8555 名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 16号館 前田研究室 TEL 052-735-5497

4 落石シミュレーションによる被災確率の算定

4.1 解析条件の設定

落石シミュレーションの実施に際して設定した解析パラメータを表2に示す。今回解析で用いた断面は、実存するある落石サイトの断面であり、落体の発生位置は、事前の現場調査に基づき設定した。ただし、落石形状は簡単のため円形としている。本解析の特徴は、解析1回あたりの計算時間を短縮するため、斜面表層を一層のみからなる地盤粒子で表現していることである。また、対策工である擁壁の形状、位置は任意に設定した。これは対策工の新設を想定したものであり、必要に応じて自由に変更可能である。

表2 DEMの解析パラメータ

Spring constant (normal)	5.0×10^6 (N/m)
Spring constant (shear)	$5.0 \times 10^6 \times 1/4$ (N/m)
Damping factor (normal & shear)	0.3
Coefficient of particle friction	0.477

擁壁の被災判定基準は、表3の通り設定した。擁壁高さは2.0mの場合(ケース1)と、2.5mの場合(ケース2)の2ケースを設定した。また擁壁の可能吸収エネルギー量はどちらのケースも300(KJ)と設定し、擁壁がそれを上回る水平方向の運動エネルギーを受けた場合には破壊し、被災に至るとした。

表3 被災判定基準の設定

Height of retaining wall	2.0 / 2.5 (m)
Capacity of absorption energy	300 (kJ)

4.2 解析結果の処理

上記の条件で解析した結果を図3に示す。落石軌跡のばらつきが正規分布に従うとみなしたうえで、表3の被災判定基準を満たす確率を求める。図4は、擁壁の直前における落石の「地上からの高さ」と「水平方向の運動エネルギー」の確率分布を模式的に表したものである。その結果、高さに関しては、ケース1では、51%が対策を越えて飛行すると予測されるのに対して、ケース2では、確率は15%にまで低下した。エネルギーに関しては、どちらのケースも吸収可能エネルギーが300(kJ)で同じ設定であるため、破壊確率も24%で同じ結果となった。

以上より、被災確率は、ケース1では $w_1 = 63.0\%$ 、ケース2では $w_2 = 36.2(\%)$ となり、擁壁高さが50(cm)高いケース2の方が、被災確率は小さい結果となった。そして、被災低減率は、無対策時の被災確率 w_{non} が100%であるため、 $W = w_{non} - w_1$ より、ケース1では被災低減率 $W = 37.0\%$ 、ケース2では $W = 63.8\%$ となった。なお、被災確率の算定に関して、被災判定基準の両方を満たす確率は、それぞれの確率を基に条件付き確率を算定して求めている。

これより、対策効果は、対策の仕様(スペック)に応じて被災低減率 $W(\%)$ という指標により定量化できることが分かった。また、例えば擁壁高さを上げていっても、その効果は頭打ちになっていくことが予測されるため、最適なスペックの決定においても、 W が重要な指標となると考えられる。

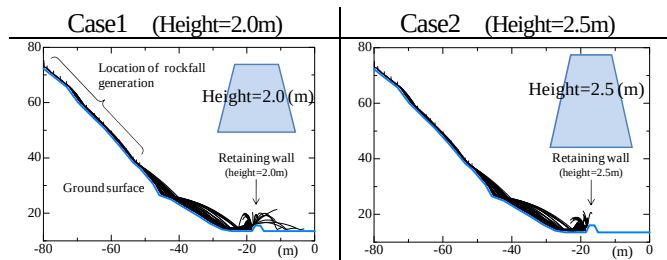


図3 落石シミュレーション結果

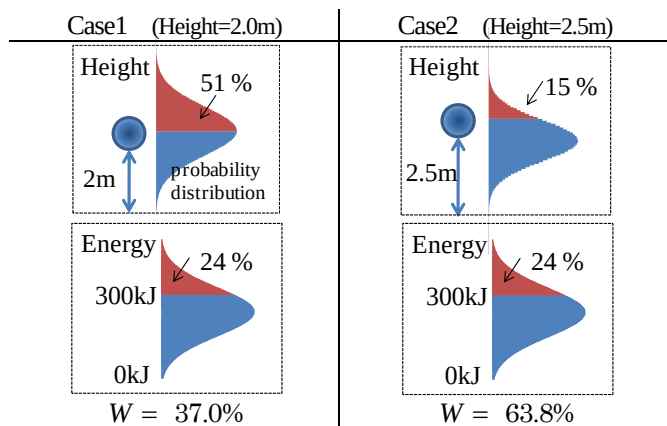


図4 落石高さエネルギーの確率分布

5 費用便益分析へのアプローチ

ここまで、被災確率をどれだけ低減させるかによって、対策設置効果を定量化できることを示した。しかし、防災計画策定といった上流段階や斜面リスクマネジメント実現のためには、効果だけでなく、投資効率も同時に評価することが求められる。投資効率は投資のCostとBenefitの関係で決まる。ここでCostは対策のスペックによって決まるため、定量化は比較的容易であると考えられるが、Benefitは、 W に加え、被災時の損失額 D (復旧費や道路迂回損失など)の定量化も必要となる。ただし、 W には1で述べた落石事象がもつ除去できない本質的なばらつきに加えて、解析精度や情報不足による信頼性の問題が含まれる。また、 D は被災発生時の交通状況等によっても変化し、復旧費などの推定誤差もあるため、やはりばらつきを考慮する必要がある。さらに、一般的な費用便益分析では、ライフサイクルを通しての評価が求められるが、その際には、 W, D に加えて落石発生確率 p の定量化も必要になるが、 p は不確実性が大きく現状では、定量化は困難である。以上より、現状ではBenefitを $W \times D$ のみで評価することが妥当であると考えられる。

6. まとめ

DEM解析の結果を統計的に処理することで、対策効果を定量化する手法を紹介した。今後は、処理法やばらつきをどう評価結果に取り込むのか等についても検討していきたい。

参考文献: 1) 湯浅知英, 和久昭正, 前田健一: 斜面リスクを用いた斜面対策費用の検討に関する研究, 土木学会第63回年次学術講演会概要集, 939-940, 2008 2) 沖村孝ら: 道路斜面における落石危険度評価手法の一提案, 日本地すべり学会誌, Vol.39, No.1, 22-29, 2002 3) 大津ら: 不連続面の空間分布特性に着目した斜面崩壊に伴う社会的損失推定, 土木学会論文集, No.736/III-63, 231-248, 2003