DEMを用いた斜面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

1. はじめに

現在日本では，土構造物である斜面やトンネルといったインフラ構造物に対してリスクマネジメントを適応させるための研究が盛んになりつつある．既報[1)]では，斜面リスク（斜面崩壊確率×崩壊の被災額）という指標により斜面対策の優先順位を定量的に判断できることを示した．また対策工の新設時にどの程度の初期投資額が妥当であるのかを，斜面リスクに基づいて作成した指標によって評価する手法を提案した．

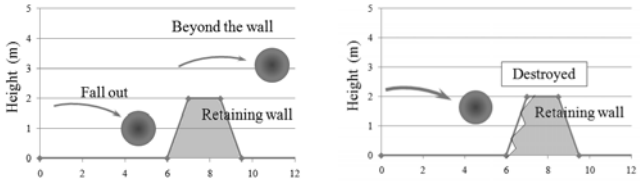
しかし，斜面リスクマネジメントを実現するにあたり，斜面リスク算定精度向上という大きな課題が残っているのも事実である．斜面崩壊や落石といった斜面災害発生時に，どの程度の被災が生じるのかあらかじめ精度よく予測することは防災面でも大変重要である．また，今まで困難とされてきた既設の対策工や対策工の新設によるリスク低減効果の定量化も，リスク精度の向上において必要不可欠な課題である．

本研究では，斜面災害によって発生する斜面リスクのうち，特に落石リスクに着目したうえで，個別要素法（DEM：Discrete Element Method）を活用し，対策工効果の定量化手法について述べる．また，リスク算定精度の向上に関連し，落石挙動に大きな影響を与える回転挙動に着目したシミュレーション結果も示す．

2. 対策工効果の定量化手法

対策工効果の定量化手法を示す．まず落石の発生条件や地盤のラフネス等により生じる落石挙動の不確実性を表現するため，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．これにより，落石挙動にどれだけのふれ幅が生じるのかも検証できる．

次に，落石シミュレーション結果を基に，道路への被災が発生するか否かを判定する必要がある．その判定基準としては「①落石が対策工の高さを超えて飛行するケース」．「②落石が対策工に衝突し，落石の持つエネルギーが対策工の吸収可能エネルギーを上回ったケース」の2ケースが考えられる．（**図-1**）よって被災確率は，①または②の判定基準を満たす回数を全試行回数で除すことによって求めることができる．なお，不確実性の表現方法としては，解析パラメータそのものに確率変数を導入する方法も考えられるが，パラメータが落石挙動に与える影響については未だ十分に解明されていないため，今回は上記のような方法を用いることとした．



(A) A rock exceeds the retaining wall　(B) A rock destroys the retaining wall

図-1 被災判定基準

3. 落石シミュレーション結果

DEMによる落石シミュレーションで設定した解析パラメータを**表-1**に示す．

表-1 DEMの解析パラメータ

Spring constant (normal)	5.0×10^{6}	(N/m)
Spring constant (shear)	$5.0\times10^{6}\times1/4$	(N/m)
Damping factor (normal)	0.3	
Damping factor (shear)	0.3	
Coefficient of particle friction	0.477	

今回解析で用いた断面は，実際に存在するある落石箇所の断面であり，表層を一層のみの粒子で配置することで表現した．一般的に地盤全体や一部を粒子群で表現する場合が多いが，1回あたりの計算時間を短縮するため上記のような設定とした．落体の発生位置は，事前の現場調査に基づき発生が予測される場所に設定したが，形状は簡単のため円形とした．また，対策工である擁壁の形状や場所は任意に設定した．これは対策工を新設することを想定したものである．（**図-2**）

ここで①に関して，擁壁の高さが2.0mの場合と，2.5mの場合を示した．また②に関しては，擁壁の可能吸収エネルギー量を300(KJ)と設定し，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すると仮定した．

今回のシミュレーションでは，全試行回数の38回のうち①または②を満たした回数は21回であった．これより，落石発生時の被災確率が55%であることが分かる．また，仮に無対策の場合には100%被災していたことを考えれば，対策工によるリスク低減率は45%と推定される．

さらに，対策工の規模を変化させた場合に，リスク低減効果に反映されているのかを確認するため，上記と同条件で，擁壁高さのみを2.5mに変更してシミュレーショ

ンを実施した．その結果を図-3 に示す．この場合，①を満たす回数が減少しリスク低減率が 70%まで上昇することが明らとなった．

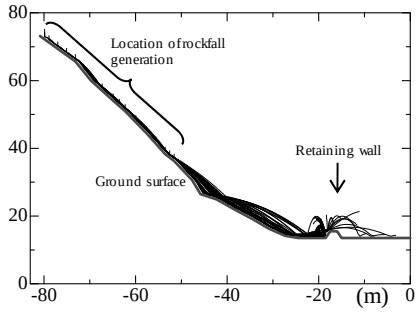


図-2 落石シミュレーション結果(擁壁高さ=2.0m)

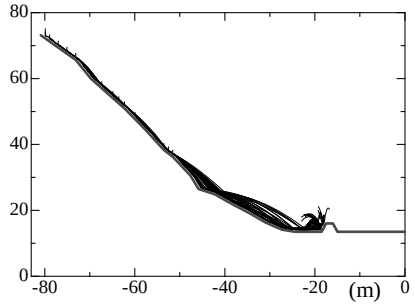


図-3 落石シミュレーション結果(擁壁高さ=2.5m)

以上より，DEM によって任意の形状と吸収可能エネルギーを持つ斜面対策工によるリスク低減率を適切に評価できることが明らかとなった．

4. 落石回転効果の影響

落石対策便覧では，落体の回転挙動や破砕，崖錐（がいすい），ポケットなどによる落石エネルギーの消散を適切に評価できていない．それゆえに高エネルギーの落石などでは便覧の許容範囲外として扱われたり，過度に安全側な設計や非効率な設計が行われる可能性がある．そこで，今回は落石の運動挙動に大きな影響を与える要因の 1 つである落体の回転挙動に着目し，DEM シミュレーションを行った結果について紹介する．

具体的には，板要素に回転速度 ω を与えた粒子を 45 度の入射角で与え，x 方向の運動エネルギーと回転エネルギーの両者がどのように変化するかを調べた．摩擦係数 0.5，初期の回転速度の大きさを 25(rad/s)とし減衰係数 h のみを変化させて正回転と負回転の両者で計算した．（図-4）

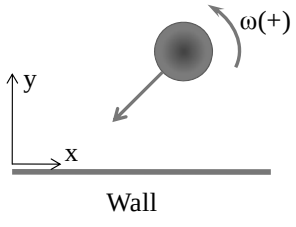


図-4 回転効果のモデル

図-4，図-5 は衝突後の x 方向運動エネルギーと回転エネルギーを衝突前のそれらの合計エネルギーで割った結果である． その結果，正回転の場合と比較すると明らかなように，負回転の場合には，合計のエネルギーの低減は大きく，また h の影響も大きいことが分かった．さらにいわゆる「バックスピン」効果により回転エネルギーの割合が大きく，x 方向運動エネルギーが圧倒的に小さくなることが分かった．

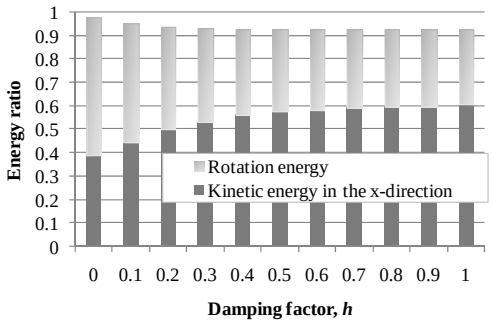


図-4 減衰係数 h によるエネルギー分担率(正回転 ω=25rad/s)

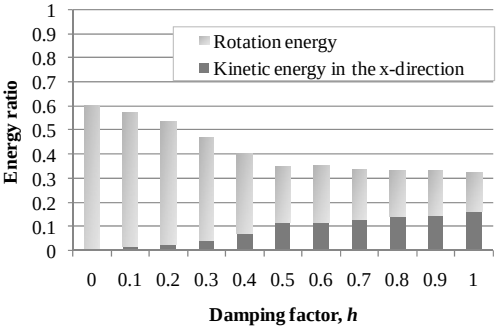


図-5 減衰係数 h によるエネルギー分担率(負回転 ω=-25rad/s)

5. まとめ

落石被災予測にあたり，対策工効果を定量化するだけでなく，落石の回転や破砕といった基本的なメカニズムの解明が必要不可欠である．これらの要素は，災害軽減にとってポジティブな効果である場合も多く，これらの要素を適切に反映したシミュレーションを実施することで効果的かつ効率的な斜面対策の実施を実現できると考えられる．今後は落石挙動に影響を与えるその他の要因についても詳しく研究していく予定である．

参考文献: 1) 湯浅, 前田, 和久: 土木学会第 63 回年次学術講演会, 斜面リスクを用いた斜面対策費用の検討に関する研究, 939-940, 2) 沖村，鳥居，萩原，吉田：道路斜面における落石危険度評価手法の一提案，2002， 3) 馬, 松山, 西山, 大西:落石シミュレーションのための解析手法の研究, 土木学会論文C Vol.63 No.3, 913-922, 2007 1991-1992, 2007， 4) 社団法人 日本道路協会: 落石対策便覧, 平成 12 年 6 月