

個別要素法による落石シミュレーション解析

株式会社キタック 李 鋒
宮島 正法
伊藤 克己
堀内 宏信

1. はじめに

供用中の道路沿いの斜面において、落石が繰り返し発生している。道路はスノーシェッドにて防護されていること、落石規模が小さかったこと、斜面末端部に僅かな平坦部があることなどから、これまで特に大きな被害は発生していなかった。

しかし斜面を調査した結果、大規模な落石が発生する可能性が否定できないことが判明した。このため大規模な落石が発生した場合の基本的な情報を得る目的で、個別要素法を利用した落石シミュレーション解析を実施した。

本報告は、この解析の方法と結果について紹介するものである。

2. 地質概要と現地の状況

(1) 地形、地質概要

当該斜面は、尾根の先端にある三角末端面に当たり、この斜面の裾を道路と河川が並行している。この三角末端面は、平面に近い明瞭なもので $40 \sim 50^\circ$ の斜面を形成している。斜面の比高は $100 \sim 300\text{m}$ で、花崗閃緑岩からなる露頭が各所にある。また所々勾配が $65 \sim 70^\circ$ に達する急崖が形成されており、落石の発生源となっている。

この花崗閃緑岩は、亀裂が発達しており、開口しているところも多い。そして亀裂間隔が比較的大きいため、所々 $1 \sim 2\text{m}$ 規模の不安定岩塊が分布している。

当該斜面の模式図を図 - 1 に示す。

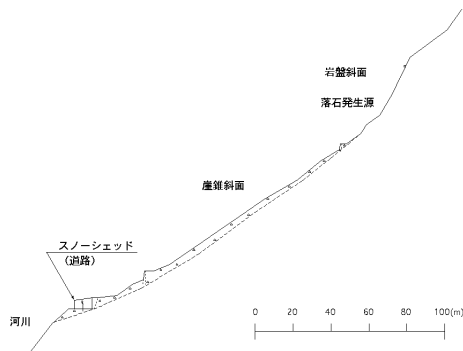


図 - 1 斜面模式断面図

(2) 落石の状況

現地調査結果に基づく落石の状況を以下にまとめる。

毎年多くの落石が、雪崩とともに発生している。

少数ではあるが、無雪期にスノーシェッドに衝突痕を残す落石も発生しており、このような落石

の最大径は、約 1.0m である。

上部斜面には、最大径約 2.0m の不安定岩塊が分布しており、地震や豪雨により落下する可能性がある。

3. 個別要素法による落石シミュレーション

(1) 個別要素法の概要

不連続な要素の運動を扱う代表的な数値解析の方法として、個別要素法 (Distinct Element Method) や、不連続変形法 (Discontinuous Deformation Analysis) 等が挙げられる。

個別要素法は 1971 年に Cundall が亀裂性岩盤を解析するために開発したものであり、粒状体や岩盤ブロックの運動を扱う解析手法として現在広く利用されている。これは、ブロックなどの離散体を個別要素と呼ばれる剛体要素にモデル化し、各要素の接触面について接触力を求め、その結果得られた各要素毎の運動方程式を時間積分することにより、動的解析を行う方法である。

ブロック間の貫入や粘性によるエネルギー逸散等の問題点も指摘されているが、プログラムのコードがコンパクトであり、解析パラメータ数を絞り込める等、小回りの利いた解析が可能であるという実務的な理由から、今回の解析では個別要素法を採用している。

(2) パラメータ

解析に必要な基本パラメータは、 ρ (密度), k (バネ定数), η_n (粘性係数), μ (摩擦係数), t (時間増分) の 5 種類となる。なお要素間の接触レオロジーを図 - 2 に示す。

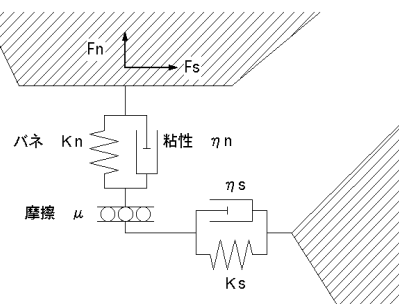


図 - 2 接触レオロジー

(3) 解析モデル

落石の発生源となる不安定岩塊の分布状況に基づき、解析モデルは合計 5 断面とした。

(4) シミュレーション結果

一般的な岩の物性及び、当該斜面における既往の落石事例の逆解析から、各パラメータを表 - 1 のように設定した。また時間増分は、 $t = 1.0 \times 10^{-4}$ (sec) とした。

表 - 1 設定パラメータ

パラメータ	崖 錐	岩 盤
(kg/m^3)		2500
k (N/m)	1.0E+05	1.0E+08
($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$)	1.0E+06	4.0E+05
μ	5.0	1.0

この結果を基に、各解析断面において現地調査より想定した最大規模の落石 ($B \times H = 2.0 \times 2.0\text{m}$) が発生した場合のシミュレーションを実施し、落石の到達位置及びスノーシェッドへの衝突速度を求めた。

シミュレーション結果の例を図 - 3, 4 に示す。

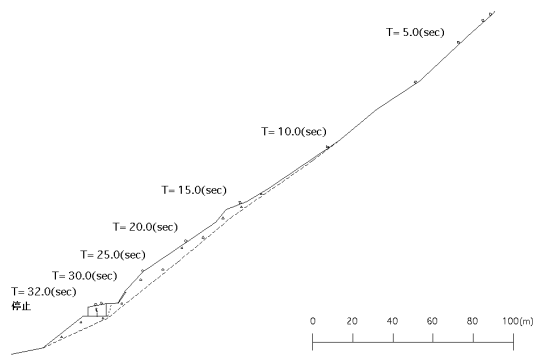


図 - 3 既往落石の逆解析 (断面)

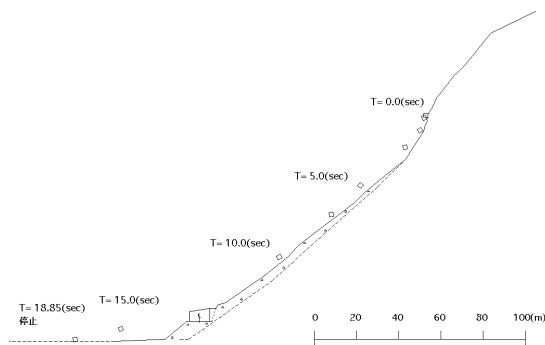


図 - 4 モデル落石の解析 (断面)

各断面の解析の結果を以下にまとめる。

落石形状の影響もあるが、全ての断面においてモデル落石 ($B \times H = 2.0 \times 2.0\text{m}$) の方が既往落石 ($B \times H = 0.8 \times 1.0\text{m}$) より遠方に到達した。これは斜面勾配が急であるため、一旦運動を開始すると、崖錐や植生等による減速 (μ により表現している) では運動を止めるには不十分であるためと考えられる。また、減速に関与するのを摩擦項のみとし、粘性項を考慮していないことも関係している可能性がある。

斜面末端部に平坦地を持つ断面では、一旦平坦地に落下してエネルギーの大部分を失うため、スノーシェッドとの衝突速度は $v = 7(\text{m}/\text{sec})$ 程度となった。しかし平坦地を持たない断面では、途中で減速することなくスノーシェッドに衝突する。このときの衝

突速度は表 - 2 に示すように、最大 $V = 34(\text{m}/\text{sec})$ に達した。

表 - 2 モデル落石のスノーシェッド衝突速度

解析断面	$v_x(\text{m}/\text{sec})$	$v_y(\text{m}/\text{sec})$	$V(\text{m}/\text{sec})$
	5.97	1.56	6.17
	14.14	17.63	22.60
	22.68	25.92	34.44
	6.56	1.80	6.80
	24.79	9.95	26.71

但し、 v_x, v_y は絶対値としている。

以上のことから、この規模の落石が発生した場合、平坦地を持たない断面では、スノーシェッドを直撃する可能性がある。特に構造計算は実施していないが、衝突速度から推定すると、スノーシェッドの塑性変形の限界を超えて破壊に至る可能性が高い。

但し、追加で実施した検討の結果から、落石経路については、初期条件の僅かな違いにより千差万別に変化するため、確定論的に特定することは不可能である。このため、適当な方法により確率論的な概念を導入する必要がある。(図 - 5 参照)

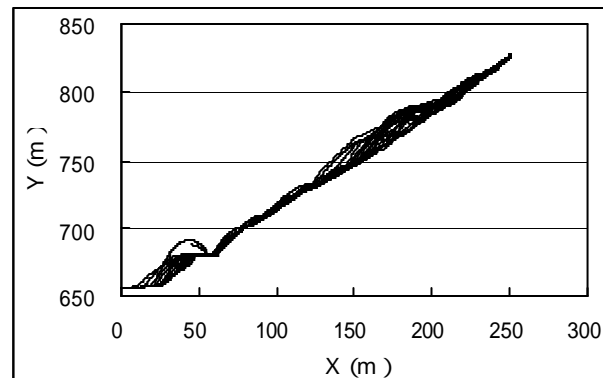


図 - 5 初期条件による落石経路の変化

4. あとがき

個別要素法による落石シミュレーションを、落石対策工の設計荷重の決定といった実際の業務へ適用するためには、パラメータ設定等解決しなければならない課題も残されている。しかし、このようなツールを利用することにより、これまで詳細な現地調査を実施しても定量的な評価が困難であった岩盤斜面の落石、岩石崩壊にも一応の解を得ることが可能となりつつある。

今後実験等によりデータを蓄積し、実用的な解析の実現に向けて進めていきたいと考えている。

謝 辞：本プログラムの開発に協力していただいた、新潟大学工学建設工学科部阿部助教授に深く感謝致します。なお、本報告の解析には、MkLinux, FreeBSD 及び GNU ソフトウェアを使用しています。

《参考文献》

- 社団法人システム総合研究所：D D A 解説書, 1994
- 社団法人システム総合研究所：Manifold Method 実用化研究会 (第 1 回 ~): 1995 ~