

個別要素法による 3 次元落石運動解析と適用に関する研究

サンイン技術コンサルタント ○正会員 谷口洋二
鳥取大学大学院 学生会員 精山誉志
鳥取大学工学部 正会員 西村 強・木山英郎

1. はじめに

山地の多いわが国では、主要幹線道路や観光道路が、山間部を縫うように走っている。脆い地盤が広く分布しているため、降雨や地震等によって土石流や落石が発生し、道路が寸断されるあるいは重大な事故に通じるといった事例が後を絶たない。山間地域での道路交通の安全確保は重要な問題といえる。落石に対する防護構造物の設計に際しては、構造物の強度、規模（高さ）および位置を決定するため、次のような条件を必要とする。

(1) 落石到達範囲の水平方向への広がり（防護工の位置と延長）、(2) 落石が防護構造物の位置に達した時の落石の運動形態（飛躍高さなど）、(3) 落石が防護構造物に衝突する時に防護構造物に与える衝撃力（エネルギー）。このような条件を決定するためには、

(a) 落石の発生位置と規模、(b) 落石の到達域、(c) 斜面の状態を考慮した落石の運動形態と落石エネルギーを特定する必要がある。落石を質点あるいは剛体と見なした 2 次元解析手法が提案されているが、2 次元解析は、ある断面線上でのモデルにしか過ぎないため、軌跡の水平方向への広がりを表現できない。そこで、本文では、個別要素法を用いた 3 次元落石数値シミュレーション[1]の計算例について示す。落石の形状や地表面の形状などの不確定性を考慮するため、それらを確率変数として取り扱い、モンテカルロ法を併用した。

2. 3 次元個別要素解析法と入力変数の不確定性

本研究で用いた解析プログラムは、著者らが開発したものであり、落石を剛体と仮定して 3 次元空間内の並進ならびに回転運動を解くものである[1]。回転運動は、次のオイラーの式で表現される。

$$I_1 \dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2) \omega_3 \omega_2 = M_1 \quad I_2 \dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3) \omega_1 \omega_3 = M_2 \quad I_3 \dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1) \omega_2 \omega_1 = M_3$$

詳細は、省略するが、地表面との接触判定手順や接触に関する定数の決定法、たとえば、反発係数と減衰係数の関係についてもすでに報告している。なお、本プログラムでは、落石が地表面や落石同士の衝突等によって、複数の要素に分解するようなことは表現していない。解析に際しては、次のような岩塊の諸元や地表面との接触に関する事項が必要となる。

- 岩塊に関する事項、

体積、密度、形状、初期位置、初速度など、

- 地表面に関する事項、

表面形状、地表面の微視的变化、接線および法線方向速度比、摩擦係数など。

しかし、これらに関する情報を、事前に把握することは難しく、何らかの値を仮定する、さらにはある分布を持つ量として取り扱わざるを得ないことになる。本例では、これらの事項は 2 つの区分で取り扱うことにした。1 つは“random”と呼ぶものであり、もう 1 つは“unknown”と呼ぶ区分である[2]。random に属す変数は予め定義した分布に従い取り扱えるとする。一方、unknown に区分する変数は、解析に際して未知であり、何らかの値を仮定する。つまり、random に区分した変数は、用いられるとき（例えば、岩塊が地表面に接する毎に）、モンテカルロ法により、既知の分布形に基づき決定されるのに対し、unknown に区分した変数は岩塊の運動開始前に与えられ、その試行中は一定値として取り扱う。当然、unknown とした変数の値を、適宜変化させて試行を繰り返し、運動軌跡への影響を知ることは可能である。

キーワード：落石、3 次元解析、個別要素法、モンテカルロ法。

連絡先（680-8552：鳥取市湖山町南 4-101，0857-31-5297，0857-28-7899）。

3. 落石軌跡解析への適用

図-1 のように落石源が尾根部にある解析例を示す．尾根部を連ねる断面では，斜面高さは 50m であり，最大傾斜角は 90° に近く，平均傾斜角は 40° となっている．この解析では，入力条件次のように取り扱った．

- random とした事項

$$\eta/\eta_0 = \bar{\eta}/\eta_0 \pm 20\%$$

(正規分布)

- unknown とした事項

岩塊の形状，初期位置，初速度，地表面を表す三角形頂点の座標値，地表面の微視的变化，粘性係数比 η/η_0 と ϕ の中央値 ($\bar{\eta}/\eta_0$, $\bar{\phi}$)

これらの事項については，次のような値を与えた．

- 形 状：立方体
- 大 き さ：1m×1m×1m
- 密 度：2.650Mg/m³
- 粘性係数比： $\bar{\eta}/\eta_0 = 0.16$
- 表面摩擦角： $\bar{\phi} = 30^\circ$

初期位置は，一様分布を仮定して試行を繰り返すとともに，5 点について解析を実施した．

図-2 は，要素重心の軌跡を水平面へ投影したものである．各初期位置について，5000 回の試行のうち，500 例を示した．また，同図には運動エネルギーの平均値を軌跡上に表示した．これらの結果より，尾根地形においては，落石発生位置がわずかに変動するだけでも，広範囲にわたって到達することがわかる．

4. まとめ

落石が生活圏や交通施設におよぶ可能性を評価し，かつ到達速度などの客観的な設計資料を提供することが，このような数値解析法の役目である．本研究で示したことをまとめると以下ようになる．

- 落石の運動に影響を与える事項を二つに区分し，それらの運動解析への与え方について考察した．
- 上記を元に，入力条件の不確定性を考慮した 3 次元解析を実施し，運動軌跡，落石の到達域，運動エネルギーの結果を示した．

参考文献：

- [1] Nishimura, T., et.al: International Symposium on Rock Stress, Kumamoto, pp.449-454, 2003.
 [2] Dudt, J.P. & Heidenreich, B.: International Conference on Landslides, Davos, pp. 507-514, 2001.

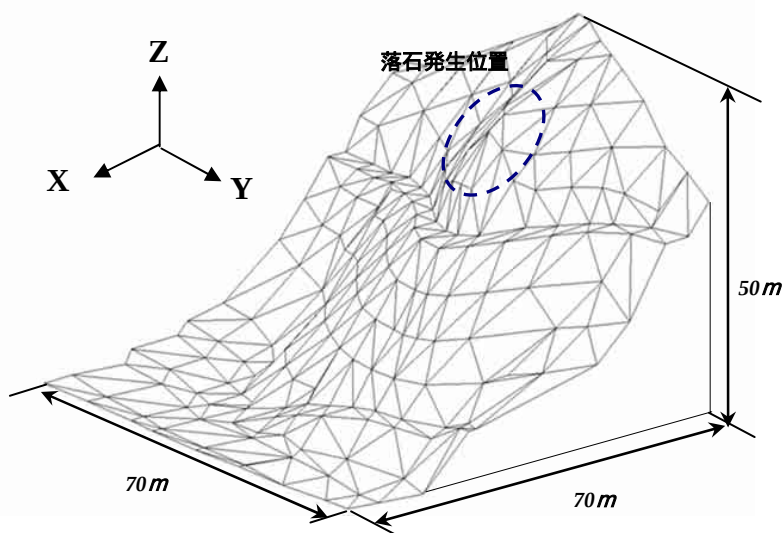


図-1 解析モデル図

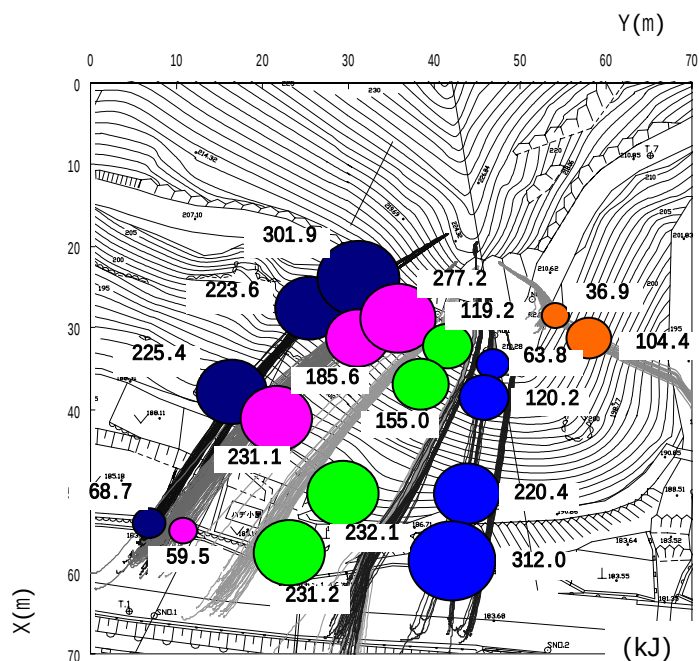


図-2 軌跡と運動エネルギー