

(株)建設企画コンサルタント 正会員 ○ 嘉村 大輔 白子 博明
 同 上 佐藤 嘉広 広田 治
 東海大学工学部 正会員 杉山 太宏

1. まえがき

山がちな我国の土木工事では、落石防護対策を必要とする現場が多く存在し、豊浜トンネルの岩盤崩落事故を契機に危険個所の再調査が行われ、落石対策の重要性が再認識されている。現行の落石対策の設計では、落石の跳躍量、運動エネルギー、衝撃力を推定する方法として、主に現場試験データに基づいた落石対策便覧¹⁾の推定式が利用されている。しかし、便覧式では、具体的な落石と地盤の材料特性や形状が評価されておらず、また、落石の到達距離や経時変化を予測することは不可能である。

Cundall が岩盤の動的崩壊過程をシュミレートするために開発した個別要素法 (DEM)²⁾ は、岩盤崩壊以外にも土石流³⁾、落石による衝撃力⁴⁾、室内要素試験の再現計算^{5), 6)} など、今日では幅広い分野で利用されている。しかし、解析に必要な材料定数の決定法や結果への影響など、未だ明確にされていない点もあり、実務への適用にはこれらを明らかにする必要がある。

この報告は、落石対策の検討に個別要素法を利用するための基礎的研究として、落石の材料定数(減衰定数、摩擦係数)、落下高さならびに形状を変化させた解析を行い、結果に及ぼす影響について検討した。

2. 解析モデルと解析条件

物理量を離散化し各要素の代表点で表す DEM では、要素境界の接触力や要素変位が時間差分によって各時間毎に求められる。物理量を離散化させているために、大変形問題にも適用が可能である⁷⁾。落石運動は岩塊と岩盤あるいは地盤との動的挙動であることから、DEM は最適な手法と考えられる。

解析には接触判定を容易にするため、円形要素が用いられることも多いが、ここでは落石の形状から多角形要素を使用し、落石対策便覧との対比を念頭において、表-1 の材料定数と解析条件により以下の計算を行った。

解析 A : 便覧では、落石の最大跳躍量 h が斜面内の突起により増加するものの、落下高さ H によらず 2m 未満であるとされている。そこで、図-2 のように $\beta_1=60^\circ$ 、 $\beta_2=30^\circ$ の斜面に、直径 1m の円に内接する正八角形の要素を自由落下させて、 h とその時の落下方向速度 v を求め、材料定数と落下高さ H の影響を調べた。また、斜面表面層 1m を可動要素とし、落石の落下位置を変えることにより (図-2 (b),(c)) 要素分割が h に及ぼす影響を調べた。

解析 B : 30° と 60° の単一勾配斜面を転がり落ちる時の最大跳躍量を解析 A と同じ条件で計算した。ただし、転がる要素は、斜面上に設置して、形状を正八角形と正方形の 2 種類とした。

なお、本解析ではレーリー型の減衰機構を使用し、落石と斜面の材料定数を同じとした。

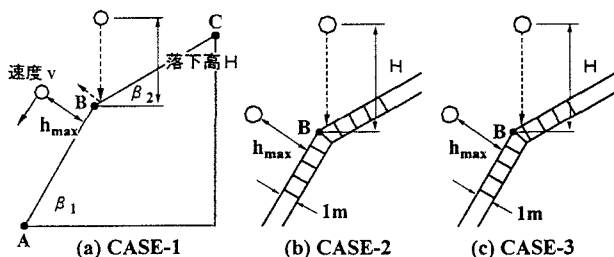


図-1 DEM 解析モデル

表-1 材料定数と解析条件

要素密度 ρ (kg/m^3)	2.60×10^3
バネ定数 $K_n=K_s$ (N/m)	9.8×10^7
減衰定数 h	0.1, 0.2, 0.3, 0.4
摩擦係数 μ	0.15, 0.35, 0.5
時間間隔 Δt (sec)	5.0×10^{-4}
要素形状(落石)	正八角形
落下高さ H (m)	2.0 ~ 14.0

キーワード：落石、個別要素法、跳躍量、材料定数

連絡先：〒169 東京都新宿区大久保 2-1-9 (株)建設企画コンサルタント TEL 03-3202-8122 FAX 03-3204-4839

3. 計算結果と考察

図-2は、解析 A で求めた最大跳躍量 h と落石の落下高さ H の関係を示したものである。図からいずれの跳躍量も、材料定数によらず落下高さの増加とともに大きくなり、減衰定数の増加によって減少する傾向を示すが、斜面を要素分割することにより h の減少が観察される。摩擦係数 μ の影響は要素を分割することにより大きく現れ、特に μ を 0.15 としたときの h が大きく減少している。

図-3は、最大跳躍量とそのときの速度 v の関係を示したもので、図には便覧の実験データ($\diamond$)と理論式を実線で併記した。要素中央に落とした CASE-2 では、材料定数によらず落下高さごとに速度が分布しているが、要素間に落とした CASE-3 では、 $\mu = 0.15$ において著しく速度が減少している。これは、斜面要素間の摩擦力が小さいため、落石が接触する前に要素がわずかに下方に移動したことによるものと考えられる。今回計算に利用した材料定数は実際の落石を表したものではないが、振動解析では普通採用されない減衰定数 0.30 以上で便覧データに近づく結果となった。

以上の計算結果から、斜面要素の影響が少なくないことが解った。落石対策を必要とする斜面表層は、未風化の基岩が露出したり、崖すいが厚く堆積するなど現場ごとに大きく異なる。材料定数の決定法も明確ではないが、斜面の要素分割に関しても更なる検討が必要と思われる。なお、紙面の都合上、解析 B の結果の詳細は会場にて説明したい。

4. あとがき

DEM の落石対策への適用性について検討した。FEM 解析が設計にも取り入れられるようになった今日において、落石の挙動を視覚的に表すことのできる DEM は、非常に魅力的である。しかし、解明しなければならない点も残存するので、今後さらに条件を追加検討する予定である。

一参考文献一

- 1) 落石対策便覧：(社)日本道路協会、
- 2) Cundall, P.A.: A Computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems, Symp. ISRM, Nancy, France, Proc. Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 3) 山本修一 他：個別要素法による土石流模型実験のシミュレーション解析、西日本工業大学開学 30 周年記念シンポジウム、pp.227-232, 1997.
- 4) F. Calvetti et al.: Numerical simulation of rock block impacts on rigid sheds, Proceedings NUMOG VI, pp.635-640.
- 5) 木山英郎 他：せん断モデルを用いた離散剛要素法の材料定数に検討、土木学会論文集, No.382/Ⅲ-7, pp.167-174, 1987-6.
- 6) 例えば、松岡 元、山本修一：個別要素法による粒状体のせん断機構の微視的考察、土木学会論文集, No.487/Ⅲ-26, pp.167-175, 1994-3.
- 7) 大西有三 他：個別要素法による岩盤の動的挙動解析、第 19 回土質工学研究発表会、pp.799-802, 1984.

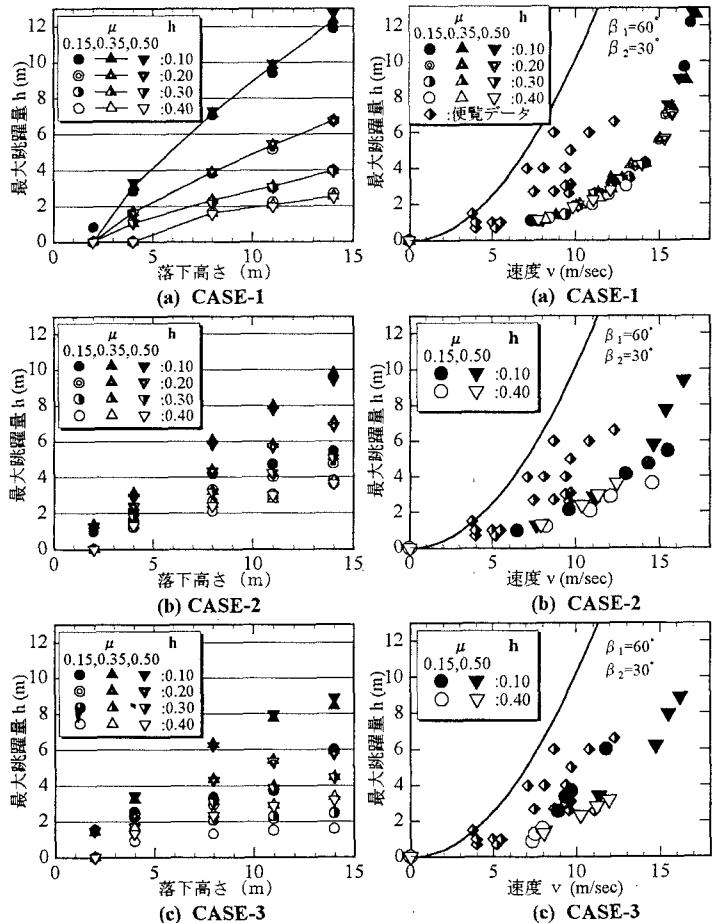


図-2 落下高さと最大跳躍量

図-3 速度と最大跳躍量