

# 3次元個別要素法による落石シミュレーション

市川卓也<sup>1\*</sup>・日下部祐基<sup>2</sup>・伊東佳彦<sup>2</sup>・中瀬仁<sup>1</sup>・足立正信<sup>1</sup>

<sup>1</sup> 東電設計株式会社 構造・耐震技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

<sup>2</sup> 独立行政法人土木研究所 寒地土木研究所 防災地質チ - ム (〒062-8602 札幌市豊平区平岸1条3-1-34)

\*E-mail: ichikawa@tepsc.co.jp

急峻な山岳地形を有する地域では落石が頻発しており、道路災害における落石対策は地域の防災計画にとって大きな課題の一つである。落石対策を検討する上で、落石の経路、到達距離、速度や跳躍などを的確に予測することが重要である。落石シミュレーション手法として、不連続変形解析法(DDA)や個別要素法(DEM)などが使われているが、2次元解析であることが多い。本研究は、3次元DEMに供する斜面および落石のモデル化手法を提案するとともに、落石実験とそのフィッティング解析より、解析に必要なパラメータを設定して実験シミュレーションを行い、複雑な落石挙動を再現することを示した。

**Key Words :** rockfall, rockfalling test, 3D-distinct element method, simulation method

## 1. はじめに

日本国土はその70%以上が山岳・丘陵で占められており、その中に生活道路網が整備され、大小様々な落石災害が起きている。特に、経済発展に伴う交通量の増大や高速化により、道路利用者が被る自然災害の中で、落石災害はかなりの割合を占めるといわれる。

落石防災対策では、発生源における落石発生の危険度評価と合わせて、それが起きた時に、どのような経路や速度(エネルギー)を持ってどこまで到達するかを評価することが重要である。落石の運動形態を評価する手法として、質点系モデルによる数値解析、不連続変形解析法(DDA)や個別要素法(DEM)が挙げられるが、その多くは2次元解析であるため、斜面の細かな起伏表現と、それによる複雑な落石挙動を精度良く評価することは難しい。中瀬ら<sup>1)</sup>は、海岸構造物の地震時安定性問題でDEMの3次元化を図っており、本研究では、現場落石実験と、その3次元DEMによる実験シミュレーションから、複雑な運動を呈する落石挙動を検討した。3次元DEMによる落石解析では、斜面と落石岩塊の細かな凹凸を出来るだけ忠実にモデル化する必要がある。著者らは、レザプロファイラで取得した3次元地形データを平面規則配列データに変換して、数値モデル化する方法を考案した。また、落石岩塊についても、レザスキャナデータをDEM用モデリングデータにする上で、松島ら<sup>2)</sup>が提案する六方最密配置で岩塊内部を微小要素で離散化する方法を用いている。

## 2. 現場落石実験

落石実験は、長野県南佐久郡に位置する南相木ダムの貯水池斜面で実施した。ダムサイトの地質は、中古生層の混在岩であり、主に、砂岩、チャートや石灰岩などのオリストリスが分布する。実験を行った斜面は、写真-1に示すような窪地形であり、斜面上部は裸地で所々草木で、中部から下部は、崖錘堆積物などの未固結堆積物で覆われている。斜面の比高は約40m、最大斜度はおおよそ36度である。落石用の岩塊は、原石で採取されたダム堤体のリップラップとして使用された石灰岩を用いた。実験は、写真-1の左側斜面で行ったが、石をパワショベルで斜面上部まで運び、そこから自由落下させる方法で行った。落下の状況は、法尻に設置したビデオカメラで撮影した。なお、実験に際しては、現場斜面および選定した落石岩塊を3次元レザプロファイラで測量した。



写真 - 1 落石斜面

ビデオカメラの画像から、2つの試験体の落下軌跡を図-1に示す。2つの試験体はほぼ同じ落下経路を辿り、ほぼ同じ場所で止まっているが、試験体2 (9.8kN)の方が試験体1に比べて20%ほど重く、落下エネルギーが大きいため、向かい側斜面の中腹辺りまで駆け上がっている。また、落下の運動形態をみると、2体とも転がりによる線運動が卓越しているが、試験体1の方は所々で跳躍運動が現れている。



図 - 1 落石軌跡図 (実験)

### 3. 3次元DEMによる落石解析

#### (1) DEMの概要

DEM(Distinct Element Method)は、対象を粒状体で解析する目的として、Cundall(1971)によって開発された。その基本モデルは、対象を剛体または変形可能な微小要素で離散化し、要素間の接触をバネとダッシュポットでモデル化するものである(図-2参照)。落石解析では、斜面と落石との接触を、斜面法線方向および斜面方向(せん断)のバネと粘性ダンパで表現される。

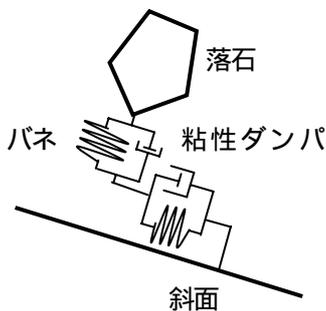


図 - 2 DEM概念図

#### (2) 試験体および斜面のモデル化

レーザ測量データを基に、試験体をモデル化するため、松島ら(筑波大)が開発した手法を用いた。以下にその概要を示す。

レーザプロファイラから得られた落石形状データは、 $x, y, z$ が不規則に並んだデータであり、そのままではモデリングを行う上で扱いづらい。ここでは、ある1つの軸(ここでは $z$ 軸とする)に垂直な平面( $x - y$ )を基準として、落石を等間隔にスライスした各断面における等間隔円柱座標データ( $r, z$ )を求めることを考える。まず、断面間隔を $dz$ とし、ある断面 $z = z_1$ での断面形状は、 $z_1 - dz/2 < z < z_1 + dz/2$ の領域にあるデータポイントを対象とする。全てのデータポイントの $x, y$ 座標についての平均値をデータの中心値として、そこからの等間隔極座標データ( $r, \theta$ )を求める。ここでは、粒子平均化法の一つであるSPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いて、ある $i$ の方向の半径( $r_i$ )を求めるのに、近傍のデータ $r_j$ の距離に関する重み付き平均によって行う。重み付けはガウス分布を近似した式(1)の5次スプライン関数を用いた。

$$W = \begin{cases} a\{(3-s)^5 - 6(2-s)^5 + 15(1-s)^5\} & (0 \leq s < 1) \\ a\{(3-s)^5 - 6(2-s)^5\} & (1 \leq s < 2) \\ a(3-s)^5 & (2 \leq s < 3) \\ 0 & (3 \leq s) \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{ただし, } a = \frac{7}{478\pi h^2} \quad s = \frac{d}{h} \quad h = \frac{d_{cut}}{3}$$

であり、これより $r_i$ は式(2)となる。

$$r(\phi_i) = \frac{\sum_j^N r(\phi_j) \cdot W}{\sum_j^N W} \quad (2)$$

岩塊表面の不規則な配列データから、5次スプライン関数で平均化し、規則配列データをもとに表現したものを図-3に示す。次に、岩塊内部に球体要素を充填するが、その方法として、球体を最小の体積を持つように空間内部に充填する並べ方として、六方最密配置と呼ばれる方法を用いた(詳細は文献2を参照)。その方法でモデル化した落石岩塊を図-4に示す。

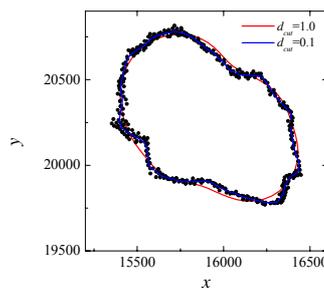


図 - 3 平面形状モデル



図 - 4 岩塊モデル

### (3) 解析モデルおよび解析パラメータ

測量データから作成した斜面モデルを図-5に示す。斜面モデルは、約83万個の微小要素で構成される。DEMの解析に必要なパラメータは、斜面法線方向および斜面方向のバネと粘性減衰係数である。そのパラメータについては、模型斜面による実験とキャリブレーション、土質試験や過去の解析例などから推定されるが、ここでは、現場で実施したサウンディング試験をもとに、跳躍や速度が再現されるようフィッティング解析を行って定めた。その結果、バネ定数を $K=7.3 \times 10^5 \text{ N/m}$ 、斜面と落石の衝突によるエネルギー損失に当たる粘性減衰係数を $\eta=2.773 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ とした。

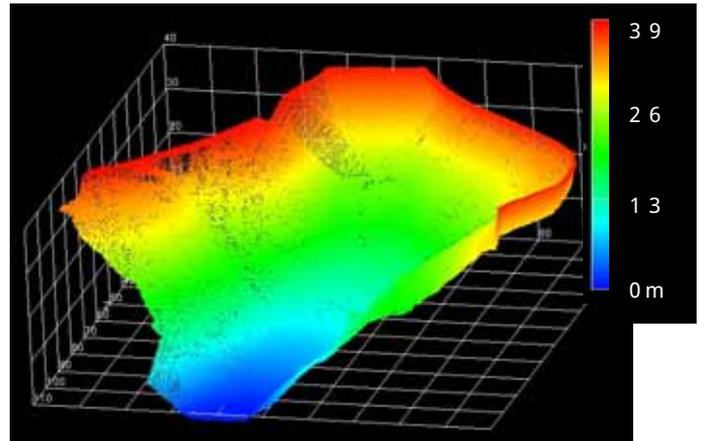


図 - 5 三次元DEMモデル図 (高さ表示)

### (4) 実験シミュレーション

落石実験シミュレーションは、試験体1および試験体2を対象に行った。最初の落下は、実験と同じ高さから自由落下させている。落石の軌跡を図-6に示す。図-1に示した画像上の軌跡図と比べると、試験体1は、実験の軌跡とほぼ同じ経路であるが、試験体2は落下当初から試験体1とは異なる経路を辿っており、やや実験に対する再現性が良くない。これは、実際の斜面では、上部付近で細かな凹凸があり、しかも、露岩している所と草木がある所が混在するが、そこまでモデルで表現することが難しく、その辺りの接触判定に大きく依存されたためと考えられる。ただし、両試験体とも、その運動形態は回転が卓越した線運動を呈しており、落下に要する時間もさほど変わらない。このことは、時々刻々の接触判定の積み重ねで評価されるDEMで、大筋の落下経路および運動形態は捉えており、複雑な運動を呈する落石挙動を良く表現できているといえる。

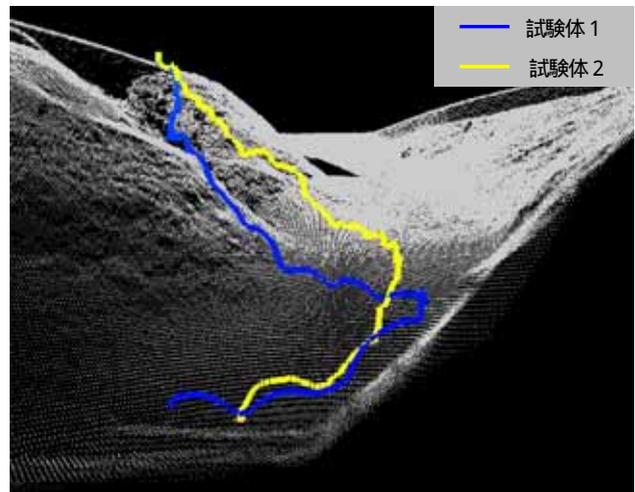


図 - 6 落石軌跡図 (解析)

### (5) 解析パラメータの影響検討

(3)項に示した解析パラメータは、前述のとおり、原位置試験を行い、地盤N値( $N=1$ )から地盤反力係数を算出する道路橋示方書の方法でバネ定数を、一自由度系の減衰自由振動から減衰定数5%を目安として粘性減衰係数を設定したが、これらパラメータ値が落石挙動に及ぼす影響が大きいと考えられたため、バネ定数を初期値の2倍と1/2に、粘性減衰係数を同じく2倍とした計3ケースを行った。落下軌跡を図-7に、線速度の比較を図-8および図-9に示す。

バネの影響では、バネを2倍大きくすると、斜面上部にある露岩部分で跳躍運動がみられ、その後、斜面中腹の急斜面で落下速度が大きくなり、転がり卓越する線運動で向かい側斜面の中程まで駆け上がり、到達距離も長い。一方、バネを1/2にすると、落下速度はかなり遅くなり、実験の落下状況とは大きく異なり、落石は

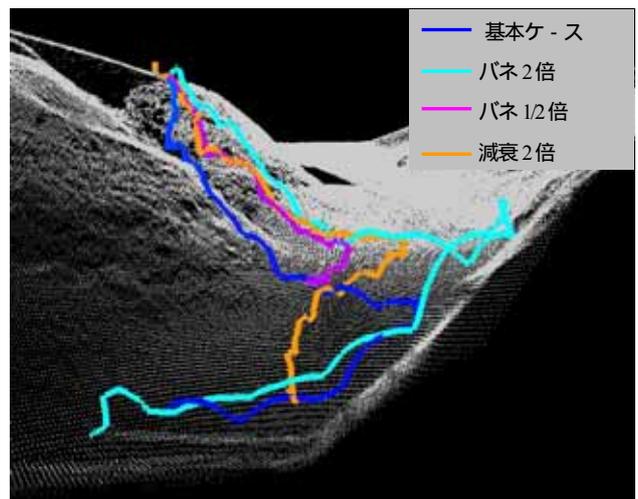


図 - 7 解析パラメータを変えた軌跡図

斜面窪地の中程で止まってしまう。図-8に示す線速度分布をみても、バネを1/2としたケ-スに比べて2倍としたケ-スは、落下運動中、全般に亘り速くなる。また、粘性減衰の影響では、実験シミュレーション(基本ケ-ス)の落下軌跡とは異なる経路を辿っており、むしろ、バネ定数を1/2としたケ-スに近い経路を辿る。

以上、解析パラメ-タが解に及ぼす影響が大きいことから、その設定では、岩盤斜面の力学特性を把握した上で、例えば、模型による小規模な実験や要素試験から跳躍量や速度を計測し、そこから1自由度振動の視点で、バネ(K)や減衰( $\eta$ )を定めることが有用と考えられる。

#### 4. まとめ

現場落石実験をもとに、3次元DEMでシミュレーションした結果、解析パラメ-タをある程度適切に設定することで複雑な挙動を呈する落石挙動を概ね捉えることができ、3次元DEMの有効性が示された。また、パラメ-タの影響検討から、解析パラメ-タが落石経路や落石速度といった落石運動に及ぼす影響が大きいことも明らかとなった。

謝辞：斜面および落石を3次元個別要素法でモデル化するに当たって、筑波大学松島巨志教授には、モデリングプログラムの提供と多大なご指導を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 藤谷昌弘, 中瀬仁他: 改良個別要素法による消波ブロックの三次元モデル: 土木学会, 第50回学術年次講演会, I-817, 1995.9
- 2) Matsushima, T. and Saomoto, H.: Discrete Element Modeling for Irregularly-shaped Sand Grains, Proc. NUMGE2002: Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Mestat (ed.), pp. 239-246, 2002

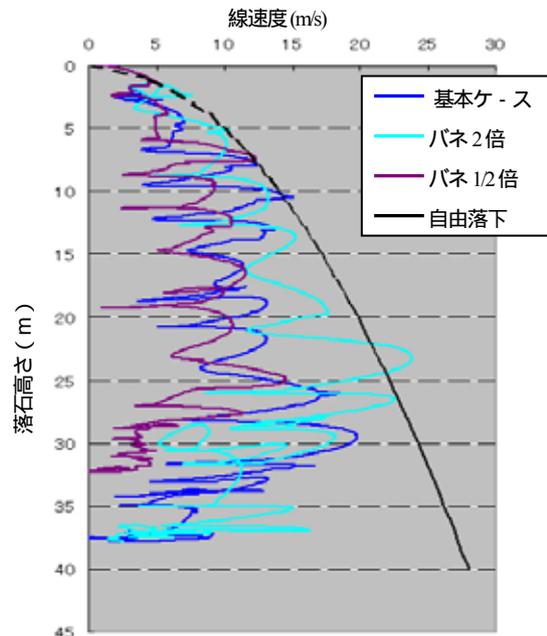


図 - 8 バネ定数を変えた線速度の比較

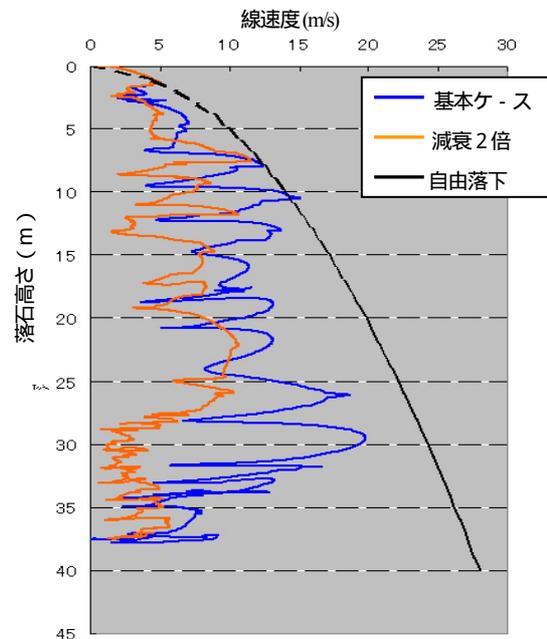


図 - 9 減衰を変えた線速度の比較

## NUMERICAL SIMULATION OF ROCKFALL BY THREE-DIMENSIONAL DISTINCT ELEMENT METHOD

Takuya ICHIKAWA, Yuki KUSAKABE, Yoshihiko ITO, Hitoshi NAKASE and Masanobu ADACHI

From the reasonable design of preventive structures for rockfall, it is important to estimate the route, the arrival distance, the speed and the jump of the falling rock. However, they are often two dimensional analysis though discontinuous deformation analysis (DDA) and distinct element method (DEM) are used as a falling rock simulation method.

This report aim is to propose the modeling method of slope and falling rock, and the comparison of experiment and analysis shows the validity of 3D-DEM.