

# 104 . 不連続変形法を用いた落石シミュレーションの基礎的研究

## Basic Study of Rock Stone Falling Simulation using Discontinuous Deformation Analysis

佐々木 勝司、佐々木 猛、萩原 育夫

(サンコーコンサルタント株式会社)

吉中 龍之進(埼玉大学)

katsuji sasaki, takeshi sasaki, ikuo hagiwara, ryuunoshin yoshinaka

### 1 . はじめに

落石防災対策では、落石発生域での落石発生危険性の評価とともに、落石発生域から落石到達域に達するまでの落石の軌跡・跳躍高さ・運動エネルギー等を評価することが、対策工の検討上非常に重要である。落石対策を要する斜面性状は多様であり、また落石対策便覧に示された経験則の適用が適切でない落石現象も往々にして見受けられる。そのため、近年、落石運動を定量的かつ合理的に予測評価するために、各種の落石シミュレーション手法が開発・提案され、実際の現場に適用されつつある段階である。しかしながら、解析斜面のモデル化、解析パラメータの設定法、解析結果の妥当性の検証および計算結果の評価法に多くの課題が残されているのも事実である<sup>1)</sup>。

関他<sup>2)</sup>は、ビデオによる落石運動を解析し、落石の斜面衝突時に速度減衰が見られること、その速度エネルギー比は、斜面への落石の入射角と相関があり、かつ 0.03~0.40 であることを報告している。関他<sup>3)</sup>は、落石解析に不連続変形法を適用し、斜面から落石が跳躍する際のエネルギーロスや飛翔中の空気抵抗を解析に組み込むために、不連続変形法に一律の粘性係数を導入した。粘性係数 = 0.05、0.10、0.15 の 3 ケースで数値シミュレーションを行い、ビデオ解析結果と比較して、0.10 または 0.15 が合致するとしている。上野他<sup>4)</sup>は、不連続変形法を用いて、落石斜面の植生の違いから個別の粘性係数を代入法により入力し、試行計算により落石経路を推察した。実際の落石箇所での樹木の痕跡と比較し、表土が薄く岩盤が露出した落葉広葉樹林帯で粘性係数 = 0.02、崩積土が分布するスギ・ヒノキ樹林帯で 0.05 が近似することを報告している。立花他<sup>5)</sup>は、落石対策工の設計に際し、不連続変形法を用いて粘性係数を 0.05、0.10、0.15 として解析し、0.10 のケースが最も現地の落石状況と適合したとしている。よって、不連続変形法の適用に際し、粘性係数と速度エネルギー比の設定は解析結果を左右する非常に重要な問題であると言える。

### 2 . 解析に用いた不連続変形法の特徴

本報告では、不連続変形法 (DDA) の解析パラメータの内、粘性係数と速度エネルギー比に着目し、落石経路の任意の区間毎に粘性係数と速度エネルギー比を設定できるように改良したプログラム<sup>6)</sup>を用いた。

粘性係数( )は、落石が斜面との接触以外の理由、つまり地表では樹木、植生等との接触・衝突であり、

液体中では液体の粘性抵抗による運動エネルギーの損失である。一方、速度エネルギー比( )は、式(1)に示すように、落石が斜面に衝突する際の衝突前後の速度比であり、これは衝突時の斜面の微少な凹凸・変形による運動エネルギーの損失である。

$$= V_{out}^2 / V_{in}^2 \quad (1)$$

ここに、 $V_{out}$  : 衝突後速度、 $V_{in}$  : 衝突前速度である。

本プログラムを適用しうる事例を、図 - 1 に示しているが、斜面を構成する多様な地盤特性を区間毎の速度エネルギー比として、また地表部の植生状況を粘性係数として解析に取り込むことが可能になっている。

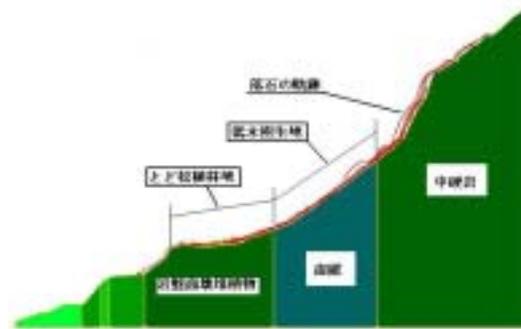


図 - 1 多様な斜面構成事例

本報告では、まず均一物性のモデル斜面で、粘性係数と速度エネルギー比のパラメータスタディを行い、落石運動に及ぼす影響度を検討した。

### 3 . モデル計算解析条件

#### 3.1 モデル斜面の形状と物性値

解析に用いたモデル斜面は、図 - 2 に示すように、斜面勾配 45°、60°、75° の 3 ケースとし、斜面高さは一律 100m、のり尻

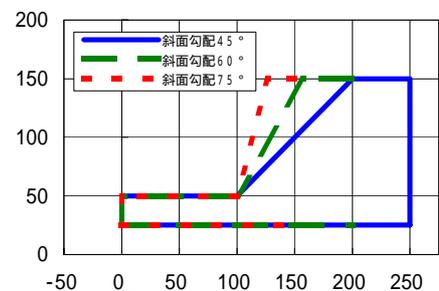


図 - 2 解析斜面の形状

表 - 1 解析斜面の岩盤物性

岩盤の単位重量	25kN/m <sup>3</sup>
ジョイントの摩擦角	35°
ジョイントの粘着力	0.0kPa
ヤング率	7.0GPa
ポアソン比	0.35

下部は水平面とした。

モデル解析に用いた斜面は一般的な硬岩斜面を想定し、その入力物性

を表 - 1 に示す。

### 3.2 落石の形状と物性値

モデル解析に用いた落石形状は図 - 3 に示すように、径約 1 m の八角形であり、落石の物性を表 - 2 に示す。

表 - 2 落石の物性

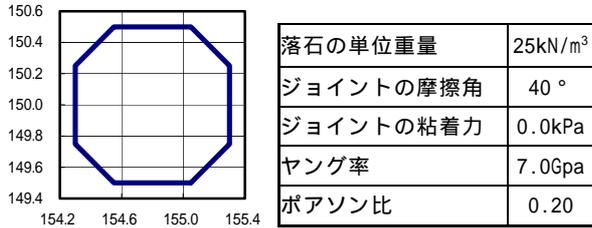


図 - 3 落石の形状

落石は、のり尻との比高差 100m の位置から約 5m の自由落下で斜面に到達させた。

### 3.3 粘性係数 ( )

既往発表文献<sup>3) 4) 5)</sup>では、実際の斜面における落石の現状と比較して、粘性係数の値を 0.02~0.15 の間で設定している事を参考にして、本シミュレーションでは、表 - 3 に示す 8 種とした。

### 3.4 速度エネルギー比 ( )

落石が斜面に衝突する際に、斜面の微小な凹凸部での地盤の摩擦による運動エネルギーの損失が生じ、関他<sup>2)</sup>は落石のビデオ撮影結果から、0.03~0.4 が観察されたとしている。また多くの落石実験で落石衝突時のエネルギー消費が計測され、ばらつきが大きいが法線方向速度比(Ru)は、0.1~1.0 が多い<sup>7)</sup>。これらの結果から、本シミュレーションでは表 - 4 に示す 5 種とした。

以上の解析条件の組み合わせから、斜面傾斜 3 種 × 粘性係数 8 種 × 速度エネルギー比 5 種となり、計 120 ケースのモデル計算を行った。

## 4. モデル斜面解析結果

### 4.1 落石の軌跡

斜面角度 45° 粘性係数 0.03 の場合の速度エネルギー比をパラメータとして解析した落石の軌跡の一例を図 - 4 に示す。

このケースの場合に、法肩から高さで約 35m 落下し始めてから、顕著な落石の跳躍が見られ、最大跳躍高さは、速度エネルギー比 0.6 の場合で、約 6m が得られた。跳躍量は落石と斜面との接触位置により大きく変化し、一般に速度エネルギー比が増加するに伴い跳躍量が増加すると考えられるが、本結果では速度エネルギー比 1.0 の場合に跳躍量が低い結果である。これは、

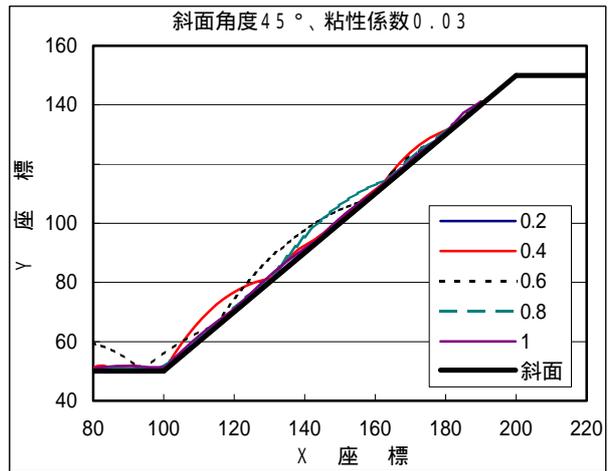


図 - 4 落石の軌跡例

落石がすべりモードの運動形態となり、落石の微妙な形状が影響している可能性がある。

### 4.2 落石の X 方向速度

同様に、斜面角度 60° 粘性係数 0.05 の場合の、落石中の X 方向速度を図 - 5 に示す。速度エネルギー比を大きくするほど、つまり落石が斜面との衝突によるエネルギー損失が少ないほど、落石中の X 方向速度は大きくなる傾向が読みとれる。この傾向は、斜面角度 45°、75° にもほぼ同様に認められる。速度エネルギー比 = 1.0 (完全弾性衝突) の場合は、のり尻から落石停止迄の距離が約 50m であり、解析上発散しているものと考えられる。

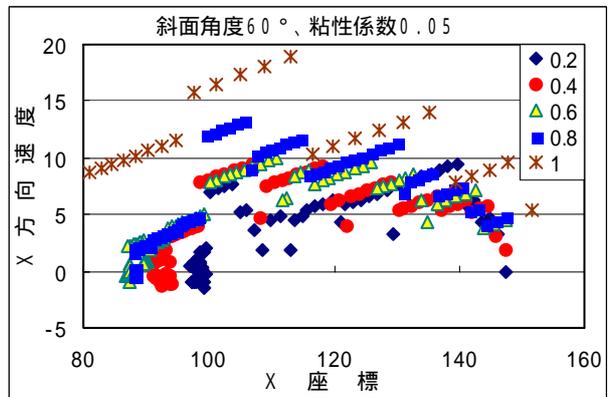


図 - 5 速度エネルギー比変化による X 方向速度

### 4.3 落石の運動エネルギー

落石の軌跡や落石速度により比較することも可能であるが、落石運動は落石の速度と回転からなり、これらの運動エネルギーを比較することが有効である。落石の全運動エネルギーは、線速度エネルギーと回転エネルギーの和で表される<sup>1)</sup>。すなわち、

$$E = E_v + E_r$$

$$= \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$$

ここに、  
 E : 落石の全運動エネルギー  
 E<sub>v</sub> : 落石の線速度エネルギー  
 E<sub>r</sub> : 落石の回転エネルギー

m : 落石の質量  
 I : 落石の回転モーメント  
 ω : 落石の回転角速度 (rad/s)

斜面角度 60° 粘性係数 0.05 のケースで、速度エネルギー毎に求めた落石中の全運動エネルギーの変化を図 - 6 に示す。

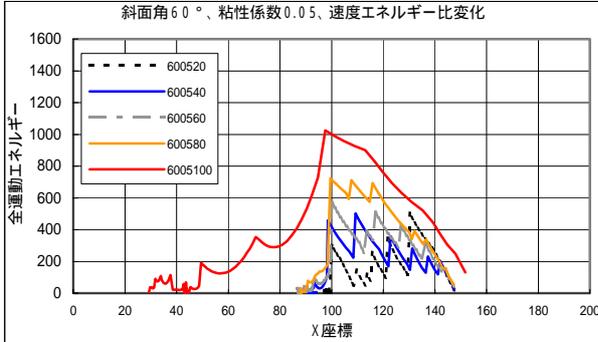


図 - 6 落石中の全運動エネルギー変化

速度エネルギー比が増加するにつれて落石の全運動エネルギーも増加し、落石が斜面に接触する毎に運動エネルギーが減少する。特にのり尻では急激に減少する。のり尻のX座標は 100 であり、速度エネルギー比が 1.0 の場合は、落石が 50m 付近にも達しているが、これは解析上の発散であると考えられる。

落石が斜面下の平坦部に達すれば、その落石の運動エネルギーは急速に低下することは充分考えられ、本解析においても、全てのケースでその傾向が認められる。そのため、のり尻部での落石の全運動エネルギーに着目し、斜面角度毎に集約して図 - 7 ~ 9 に示す。

斜面角度と粘性係数が異なっても、速度エネルギーの増加に伴い、ばらつきがあるものの全運動エネルギーは増加傾向を示している。粘性係数が 0.00 の場合は、同様の傾向を有するもののばらつきが大きく、特に速度エネルギー比が低い段階では他の粘性係数と逆転現象が見られる。

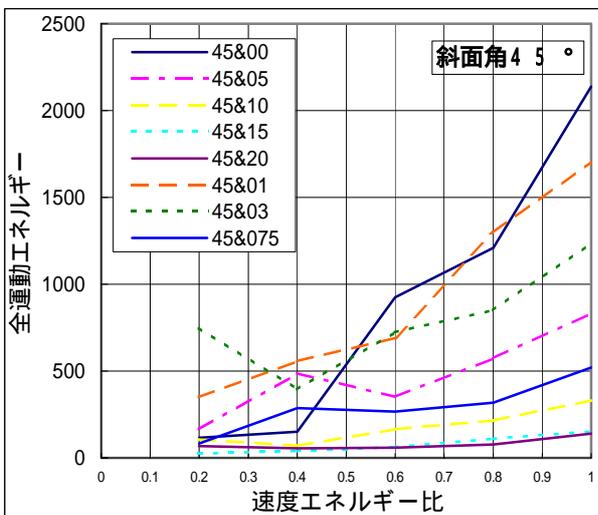


図 - 7 傾斜角 45° の全運動エネルギーの変化

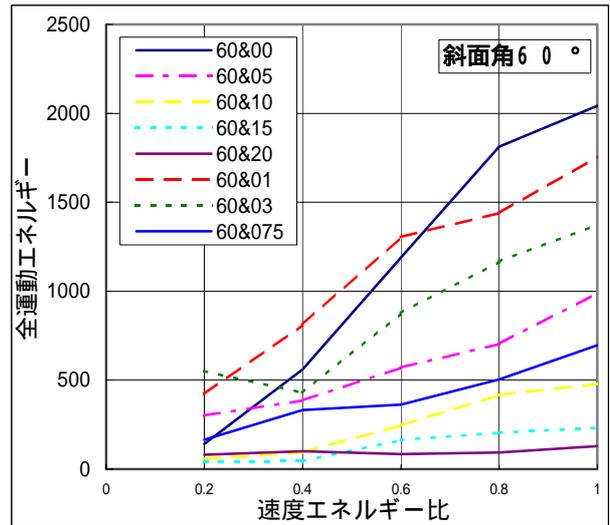


図 - 8 傾斜角 60° の全運動エネルギーの変化

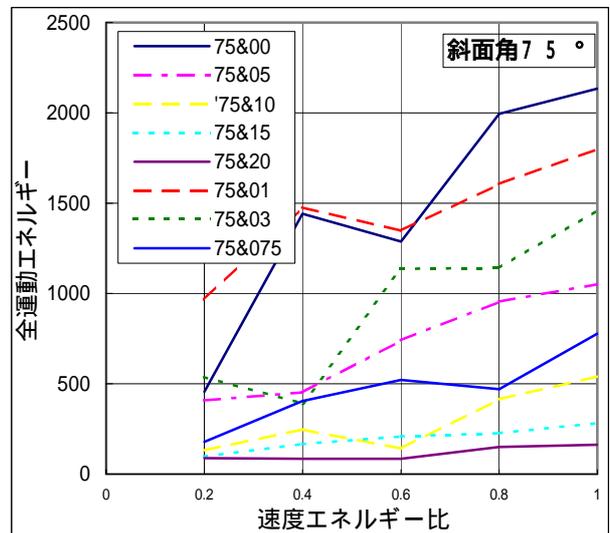


図 - 9 傾斜角 75° の全運動エネルギーの変化

斜面の傾斜角により全運動エネルギーの顕著な差が見られないことから、粘性係数毎に速度エネルギーに対する全運動エネルギーの関係をプロットし、粘性係数毎に最小自乗法で関係を求め、図 - 10 に示す。

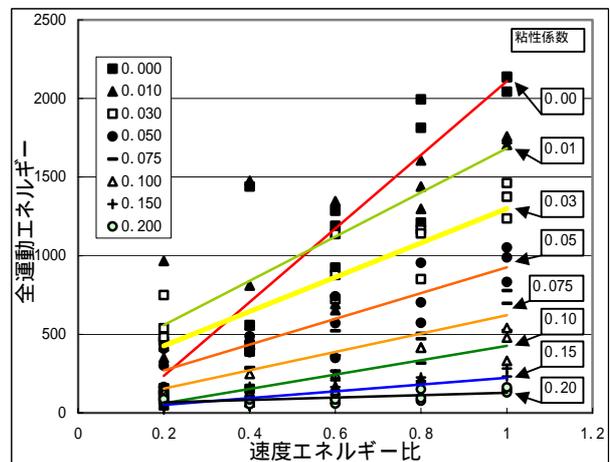


図 - 10 全運動エネルギーの粘性係数別変化

粘性係数 0.00 を除けば、全ての粘性係数において速度エネルギー比の増加に伴い、ばらつきはあるものの全運動エネルギーが増加している。同一の粘性係数および速度エネルギー比では、斜面傾斜角が急になるほど、全運動エネルギーは増加している。しかしながら粘性係数と速度エネルギー比の変化の方が、全運動エネルギーに与える変化が大きい傾向が認められる。

本シミュレーションにより不連続変形法に於いては、斜面形状を的確に把握することは重要であるが、それ以上に、落石斜面の粘性係数および速度エネルギー比を設定することが重要であると考えられる。

5. 適用事例

愛知県内の花崗岩からなる山体の中腹斜面から、岩塊が降雨後に落下し、民家に接触して停止した事例に本解析を適用した。落石の形状は 1.2m x 0.95m x 0.80m のほぼ円形に近く、岩種は新鮮な花崗岩である。落石は標高 525m の斜面中腹から発生し、標高差約 60m の平均傾斜 37° の斜面を落下した。斜面は、杉の植林地内であり、落石は、杉の幹に傷を付けながらかつ一部では立木を転倒させ、また地表にはバウンド跡が認められたため落石経路の推定が明確であった。

落石発生斜面の断面図を図 - 11 に示す。

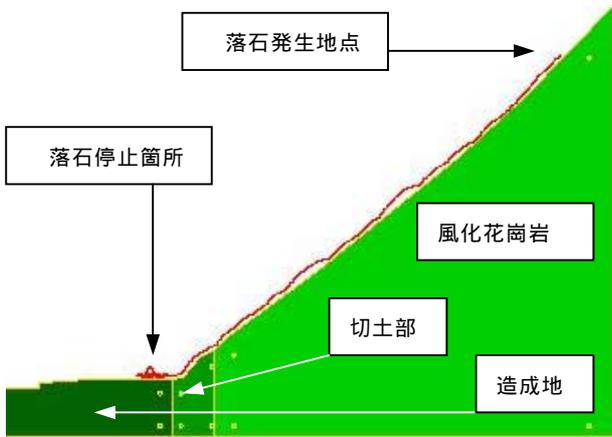


図 - 11 落石発生斜面の断面図

解析に用いた地盤物性および解析定数を、表 - 4 に示す。

表 - 4 地盤物性および解析定数

地盤物性		落石	風化花崗岩	切土部	造成地
単位重量	(kN/m <sup>3</sup> )	25.0	23.0	21.0	20.0
ヤング率	(Mpa)	7000	500	168	42
ポアソン比		0.25	0.3	0.3	0.35
シームポイント	粘着力 (kPa)	0.00	0.00	0.00	0.00
物性	摩擦角 (°)	40	40	40	35
粘性係数		0.01	0.05	0.03	0.01
速度エネルギー比		0.40	0.40	0.40	0.20

解析結果から落石の軌跡を、図 - 11 に示す。実際の落石の停止位置は、ノリ尻から約 5m 離れた民家であった。一方、本解析結果では全運動エネルギーがノリ尻から約 5m で 0 に近くなり、ほぼ運動停止と考えられる。よって、解析結果は、実際の落石現象を表現していると考えられる。

6. まとめ

本研究内容をまとめれば次のとおりである。

- 不連続変形法プログラムの改良により、多様な地盤で構成される複雑な斜面および表層の風化部の影響等を速度エネルギー比で考慮することができ、より現実に近い解析が可能である。
- 落石運動に影響を与える斜面上の樹木・植生を粘性係数で区間毎に設定することが可能であり、複雑な斜面状況を解析に取り込むことができる。
- モデル計算の結果、粘性係数と速度エネルギー比が解析結果に大きく影響を及ぼし、これらの定数設定が重要である。
- 斜面の樹木・植生は、落石の運動エネルギーを低減させる効果があり、落石被害抑制に有効であり、環境に配慮した対策となる可能性がある。
- 一般の斜面下部に見られる崖錐の速度エネルギー比を解析に取り込むことにより、低減した落石の運動エネルギーを評価することができ、落石防護工の設計においてコスト縮減に繋がる可能性がある。
- 今後、樹木・植生が繁茂している斜面、崖錐斜面等での落石事例から粘性係数および速度エネルギー比の設定精度の向上を図る必要がある。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料 - 落石シミュレーションの調査研究資料 -、平成 14 年 4 月
- 2) 関、伊藤、笹原、吉中、下村：ビデオによる落石運動の解析、第 26 回岩盤力学に関するシポジウム講演論文集、1995
- 3) 関、笹原、伊藤、吉中、進士：落石防護工設計への不連続変形法の適用、第 26 回岩盤力学に関するシポジウム講演論文集、1995
- 4) 上野、小田桐、馬：植生の違いに着目した DDA 解析の例、第 36 回地盤工学研究発表会、2001.6
- 5) 立花、村本：落石対策工設計における DDA 解析の適用例、第 36 回地盤工学研究発表会、2001.6
- 6) 佐々木、佐々木、吉中：不連続変形法 (DDA) による落石問題の検討、計算工学会講演論文集 Vol.7、2002.5
- 7) 日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料、2002.4