

3次元落石軌跡解析における入力値の影響

—斜面地形と要素形状—

鳥取大学工学部 学 山本 智司

西村 強

橋本 純成

1. はじめに

落石に関するリスクを評価する際には、数値モデルを用いることが多い。その数値モデルのもたらす解析結果の確からしさは、用いられる入力変数の不確実性や空間的な分布に影響を受けるものとなる。特に、3次元解析に対して、最も期待されている役割は、地形などをより忠実に表わせるという点よりも、落石軌跡の水平方向への拡がりを表わせるという点であろう。このようなことからすれば、衝突時のエネルギー変化を表わす指標（速度比）や摩擦係数が与える影響とともに、地形や斜面表面などの幾何学的要因が与える影響にも注意が必要である。しかしながら、これらの軌跡の拡がりに対する影響を系統的に解析した例は見当たらないようである。そこで、本研究では、著者らが開発した解析プログラムを用いて、地形や斜面表面などの幾何学的要因が与える影響について3次元解析を実施した。すなわち、2面から成る地形を設定し、それらの面は平均勾配によって表現し（1つの面は、水平面と一致）、さらに、各々の面には凹凸があるとして、細かく格子状に分割の上、斜面上の格子点の座標（標高）を設定する斜面モデルである。平均勾配、格子の大きさ（grid size）と凹凸（roughness）に注目した解析結果を報告する。

2. 3次元落石軌跡解析の概要

ここで用いる計算モデルは、剛体の運動方程式の時間差分解法¹⁾に基づいた完全に動力学的な3次元モデル²⁾である。1つのブロックの並進に関する運動方程式は次のように表せる。

$$\ddot{x}_i = F_i^c / m_i + g_i \quad (1)$$

ブロックの重心の加速度 $\ddot{x}_i$ で示し、 F_i^c は地表面との接触力、 m_i はブロックの質量、 g_i は重力加速度ベクトルである。 i は 1~3 の範囲で、地形座標のベクトルの成分を表す。このモデルでは、重力方向と x_3 軸が一致する。剛体の回転運動はオイラー式で表され、ブロックの慣性主軸（ ξ, η, ζ ）に対して表される。

$$\begin{aligned} I_\xi \dot{\omega}_\xi + (I_\zeta - I_\eta) \omega_\zeta \omega_\eta &= M_\xi \\ I_\eta \dot{\omega}_\eta + (I_\xi - I_\zeta) \omega_\xi \omega_\zeta &= M_\eta \\ I_\zeta \dot{\omega}_\zeta + (I_\eta - I_\xi) \omega_\eta \omega_\xi &= M_\zeta \end{aligned} \quad (2)$$

ここに、 I_ξ, I_η, I_ζ は慣性主軸モーメント、 $\omega_\xi, \omega_\eta, \omega_\zeta$ は主軸に対する回転速度、 M_ξ, M_η, M_ζ はブロックの主軸周りのモーメントである。なお、本解析法では、直方体と正六角柱を用いた解析が可能である。式（1）および（2）の時間差分解法、地表面への剛体ブロックの接触に伴うエネルギー損失などのモデル化の詳細については、既報を参照されたい²⁾。

3. 斜面モデルの設定と要素形状

1.で述べたように、異なる平均勾配を有する2つの面からなる解析モデルを設定した。図-1 に一例を示す。まず、平均勾配 β と一致する傾斜を有する2つの平面を設定した後（この内、一面は水平面(x_1 - x_2)と一致させている）、水平面上に生成した一辺 d の正方形格子を斜面に投影して斜面を小区画に分割する。斜面上の区画線交点には平均勾配により算出する高さに、乱数を用いて算定した（凹凸を表現する）調整量を加えて、交点の標高 x_3 を決定する。乱数の発生に際しては、正規分布（平均値 0、標準偏差 σ ）より抽出した。表-1 に斜面

表-1 平均斜面勾配および凹凸と軌跡の水平方向の拡がり (W/L) の関係

		Grid size d (m)		
		2	5	10
Roughness σ (m)	Average slope angle β (°)	W/L		
0.1	30	0.183	0.041	0.039
0.2	30	0.317	0.103	0.077
0.1	45	0.119	0.042	0.032
0.2	45	0.308	0.092	0.056
0.1	60	0.071	0.029	0.023
0.2	60	0.203	0.060	0.042

モデルの平均勾配 β , 格子長 d および標準偏差 σ を記載している。解析全領域は、水平面(x_1 - x_2)上で 500m×250m の範囲とし、図-1 に示すように、斜面部および水平部の長さをそれぞれ 250m とした。斜面上の小区画は、当然のことながら、長方形であり、 d が同一の値であっても、この長方形小区画の長辺の長さは、勾配により変化することになる。なお、解析においては、この小区画は、接触判定用の三角形に分割される。

落石岩塊を表現する剛体要素の形状には、立方体を選び、その1辺を1mとした。この一辺長と対応させて、水平面上の正方形格子長 d を2m, 5m, 10mと変化させて、凹凸の程度を表現しようとしている。また、要素形状の影響を知るため、この立方体と同体積を有する正六角柱を用いた解析を $\beta=45^\circ$ について実施することにした。計算に際して必要となる諸量は表-2 の通りである。摩擦角 ϕ および反発係数 e は全領域一定とし、解析においては、前述の平均勾配 β , 小地形の変化ならびに要素形状に注目することにした。なお、表-1 に示す反発係数 e に対して、次式によって、粘性係数 η を算出した。

$$\eta = \frac{|\ln e| \cdot \eta_0}{\sqrt{\pi^2 + (\ln e)^2}} \quad (3)$$

反発係数 e は、衝突面（接触面）法線方向の（衝突前後の）速度変化を表わす指標である。接線方向の粘性係数に、そのまま使用するのには注意が必要である。本解析法では、接触点における反力の算出を法線方向と接線方向に独立に行っているが、接触力の弾性成分間には摩擦の条件を適用している。摩擦の条件が適用されたとき、ダッシュポットの抗力は0（ゼロ）となる。このような条件を与えた計算過程では、衝突後の接線方向速度は、法線方向の入射速度と摩擦角 ϕ の影響を受けることになる。すなわち、衝突前後の速度比の観点からすれば、反発係数 e を一定値として与えても、摩擦角に応じて、速度比は変化することになる。速度比を用いて、衝突前後のエネルギー損失を表現する手法もあるが、多面体剛体要素の1頂点ごとに平面への接触を取り扱う場合では、接触頂点ごとに速度比に基づいてエネルギー損失を求めた後、要素全体についてその総和などを求

表-2 解析条件

<u>Block</u>	Shape: Cubic, Hexagonal prism Density: 2.220Mg/m ³ Volume: 1m ³ Initial velocity: 0 (at rest)
<u>Ground surface</u>	Contact stiffness: $k_n=10$ (MN/m) $k_s=10$ (MN/m) Cohesion $c=0$, Friction angle $\phi=25^\circ$ Restitution coefficient $e=0.3$
Time step:	$\Delta t=1.0 \times 10^{-4}$ (sec)

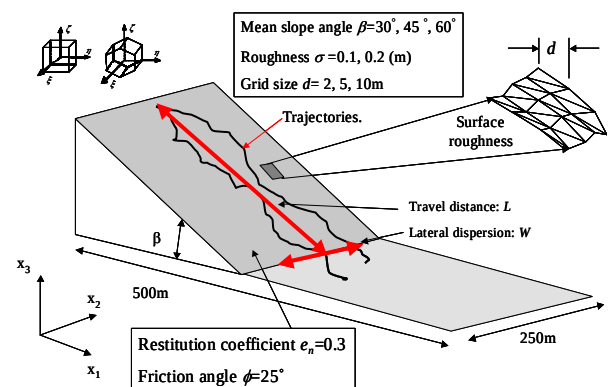


図-1 要素形状、座標系および斜面の設定

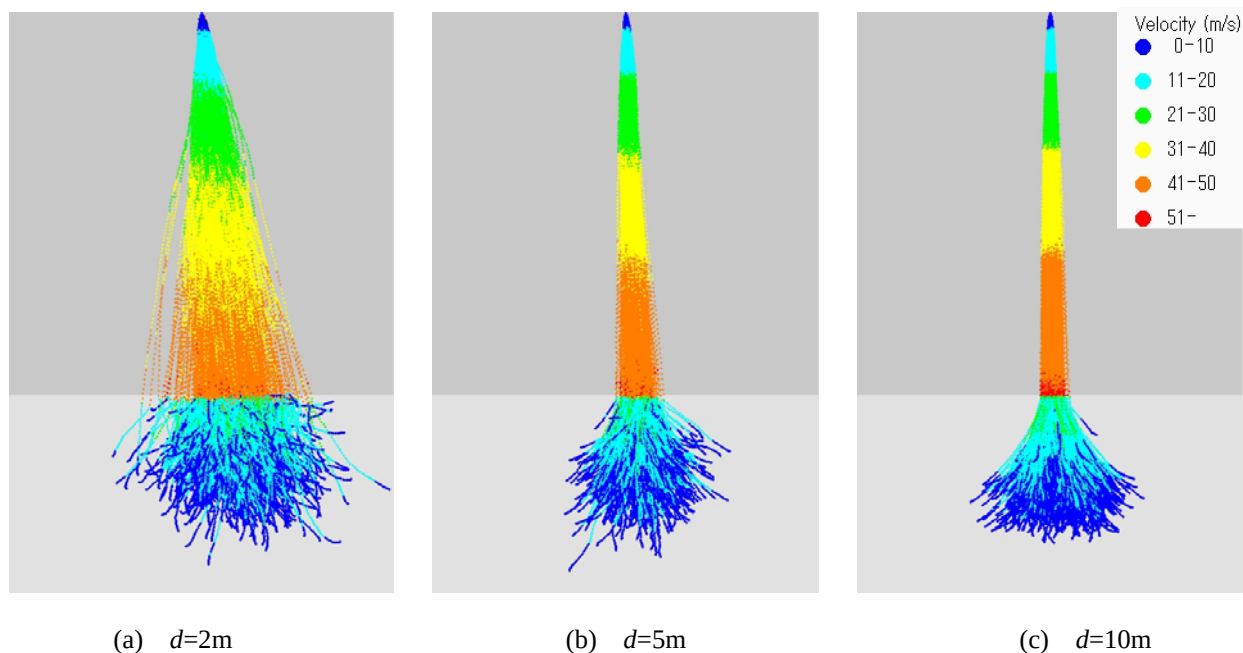


図-2 格子長 d の差異が軌跡の拡がりの与える影響 ($\beta=45^\circ$, $\sigma=0.2\text{m}$)

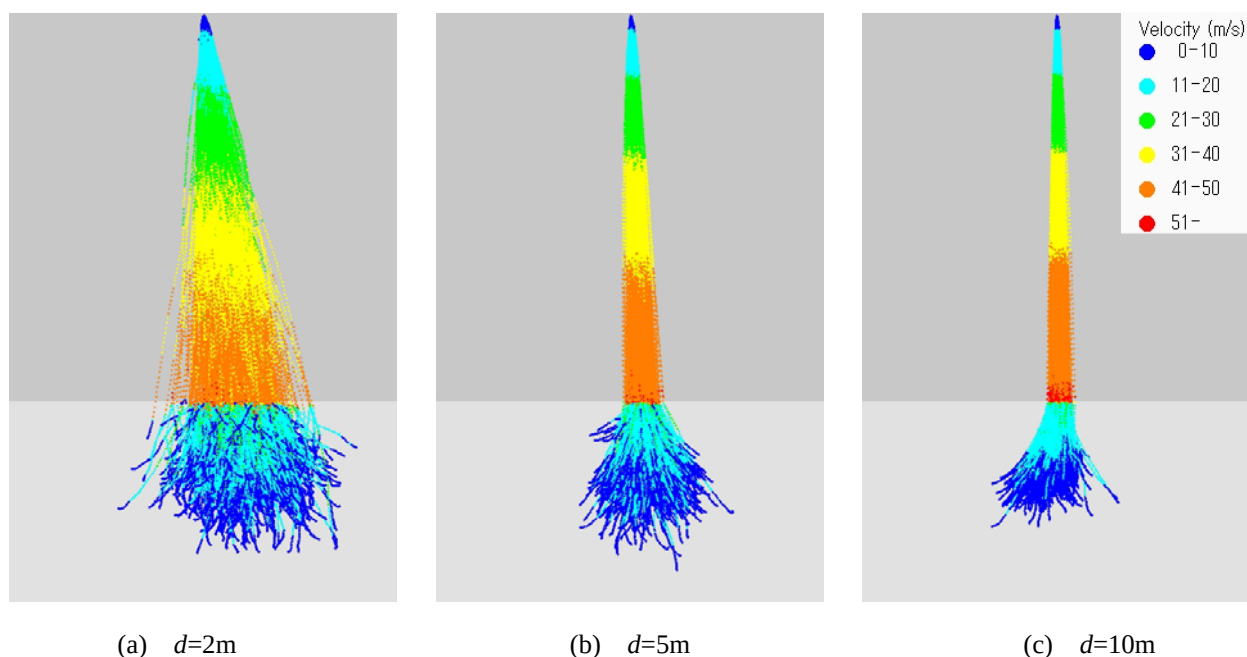


図-3 要素形状の影響 —正六角柱の例 ($\beta=45^\circ$, $\sigma=0.2\text{m}$) —

める、あるいは、速度比を重心位置の速度に対して用いた後、落石要素を剛体と仮定する条件のもと、各頂点の並進速度を決定する等の手順を考えざるを得ないと考えられる。いずれにせよ、(摩擦角など) 入力値と解析アルゴリズムが影響を与えることは間違いない。1.にも述べたように、解析法の特徴(性能)を知って、それを利用することが重要であると理解している。

4. 水平方向の軌跡解析跡の拡がり

表-1 に示した条件のもと、立方体要素について、計 18 例の勾配 β と偏差 σ の組み合わせに対して解析を実施した。実施に際しては、要素を斜面上部の境界線上に静置した状態(初速度 0) から、重力を作用させて運動

を開始させた。(平均勾配 β と偏差 σ を固定した)一斜面ごとに 1000 回の計算を実施したが、その計算ごとに斜面表面の凹凸を前述のように変化させている。軌跡の拡がり W は、平均勾配 $\beta=30^\circ$ のときの斜面長($L=288\text{m}$)を基準として、 $x_1=L\cos\beta$ を落石要素が通過するときの(1000 回の試行における) x_2 の最大値と最小値の差 W で表すことにした。

図-2 は、格子長の差異が、軌跡の拡がりの与える影響を斜面傾斜角 45° としたときの、 $d=2, 5, 10\text{m}$ について示している。 σ は 0.2m である。 $d=2\text{m}$ では、 $W/L=0.308$ であるが、 $d=10\text{m}$ では、 $W/L=0.056$ となっており、 σ/d の値が小さくなるにつれ、拡がり幅 W が小さくなることがわかる。ちなみに、この斜面では、 $L=288\text{m}$ に対して、 $d=2\text{m}$ において、 $W=88.79\text{m}$ である。

図-3 は、要素形状の影響を表現するために実施した正六角柱の解析例である。この図より、立方体の解析結果と比べて、 W/L はやや小さいが速度については大きな差は認められない、などの特徴が読み取れる。

以上の結果を総合して、 $\sigma/d-W/L$ 関係としてまとめたものが図-4 である。この図から、以下のようなことがわかる。

- ・ σ/d が大きいほど W/L は大きくなっており、軌跡の水平方向の拡がりが大きくなる傾向にある。
- ・ 要素形状の影響を $\beta=45^\circ$ の場合についてみると、立方体の場合の W/L が大きくなるが、大きな影響は認めにくい。
- ・ 傾斜の影響をみると β が大きいほど W/L が小さくなっていることがわかる。重力の斜面法線成分および斜面平行下向き成分の大小の影響と考えられる。

5. 結 語

落石岩塊の形状が球形であり、また、斜面が凹凸のない、一様勾配の連続として存在するならば、落石の運動は、予測しやすい(すなわち‘単純’)ものとできるであろう。3次元解析を用いる必要性は小さい。実際には、形状や斜面状態(地形およびその微視的部分(凹凸))の空間的変化のため、予測ににくい(すなわち、‘複雑’)ものとなり、工学的モデル化およびそれによる解析結果には、推計的な部分を含むことになる。さらに、2次元解析に比べ、3次元解析では、このような点への配慮の重要性は大きくなる。

本解析では、模擬斜面を設定して、斜面の平均勾配と微小な地形変化が水平方向の拡がりに与える影響を例示した。水平方向の拡がりに関する結果は、防護工(策)の必要性のみならず、その設置位置や長さの決定に用いることができる。ここに示した結果からは、地形に関する情報の収集の重要性が伝わってくる。なお、今回の解析では、表面摩擦角と反発係数は一定値としている。これらも、落石岩塊の形状、斜面の微小な地形変化や植生などを反映すると考えられる。解析法の特徴(性能)を知る上では、検討をしておく必要があるかもしれない。

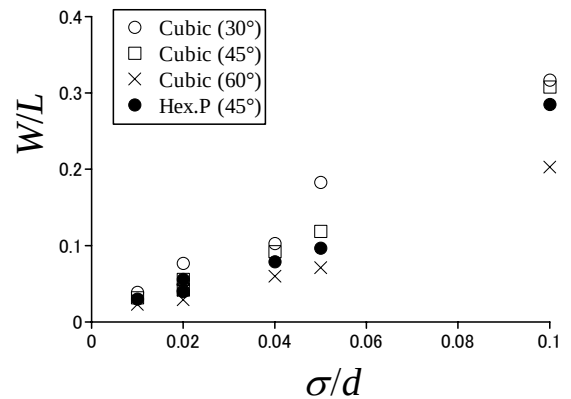


図-4 斜面表面の粗さ(σ/d)が W/L に与える影響

参考文献 : 1) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock systems. *Symposium on rock mechanics*, Nancy, Vol. 2, pp.129-136, 1971. 2) Nishimura, T., et.al. : A three-dimensional simulation model for rockfall using distinct element method, *Proceedings of the 3rd international symposium on rock stress*, RS Kumamoto 03, pp.449-454, 2003.