

3次元個別要素法を用いた落石遭遇確率の一算定法

鳥取大学 学生会員○橋本 純成

鳥取大学 正会員 西村 強 木山 英郎

1.はじめに

わが国は山地が多く、主要道路が山間部を縫うように走っている。また、脆い地盤が広く分布しているため、降雨や地震等により落石が発生し道路が寸断される、または通行者に当たるなど重大な事故に繋がるケースがある。その為、事故防止を目的とした落石対策工を講ずる必要がある。そこで、落石対策工を行う上で重要となるのが、落石の落下軌跡や到達距離を解析によって予測することである。

本研究では、3次元個別要素法を用いて落石運動を解析し、落石の軌跡や到達域を求めることにより、道路に崩壊岩塊が至る可能性があるのかを検討する。その結果を利用して、道路での車両との遭遇確率を算定する一手法を考案することを目標とする。

2.個別要素法(DEM)の概要

解析には個別要素法の3次元プログラム¹⁾を使用した。このプログラムでは、剛体要素が重力の作用下で、地表面との衝突・跳躍を繰り返しながら運動する様子を表現できる。剛体の回転運動についてオイラー式で表され、剛体要素の慣性主軸に対して記述している。

$I_1\dot{\omega}_1 + (I_3 - I_2)\omega_3\omega_2 = M_1$ $I_2\dot{\omega}_2 + (I_1 - I_3)\omega_1\omega_3 = M_2$ $I_3\dot{\omega}_3 + (I_2 - I_1)\omega_2\omega_1 = M_3$
 I_1, I_2, I_3 は慣性主軸モーメント、 $\dot{\omega}_1, \dot{\omega}_2, \dot{\omega}_3$ は主軸に対する回転速度、 M_1, M_2, M_3 は主軸周りの力のモーメントである。

本研究では落石要素に図1のような立方体と正六角柱を用いた。慣性主軸(ξ, η, ζ)に対する慣性モーメントを I_1, I_2, I_3 とすると次式で表される。

立方体 : $I_1 = I_2 = I_3 = l_1^2 M / 6$

正六角柱 : $I_1 = I_2 = l_2^2 M / 4, I_3 = 5l_2^2 M / 12$ (M: 質量)

3.落石の3次元運動解析

落石の解析は尾根および谷の2つの地形について試行した。図2, 3は尾根地形、図4, 5は谷地形での落石要素の重心軌跡の水平面への投影図を示しており、落石要素の初期位置はどちらの地形ともa~c点の3箇所を仮定、それぞれの点について解析を1000回の試行した内の100例を描いている。図は落石要素の l_2 を1mとし、 l_1 は立方体の体積が正六角柱の体積と等しくなるように設定した。

図より、尾根地形、谷地形どちらとも初期位置によって落下する方向に違いがあり、全て最大傾斜方向に落下している。また、尾根地形では到達域幅が広くなりやすく、谷地形では集中しやすい傾向が見られた。

要素形状で比較すると、どの初期位置に関しても正六角柱の方が停止するまでの距離が長くなる傾向が見られた。これは、頂点が増えたことにより立方体に比べて転がりやすくなったためだと考えられる。

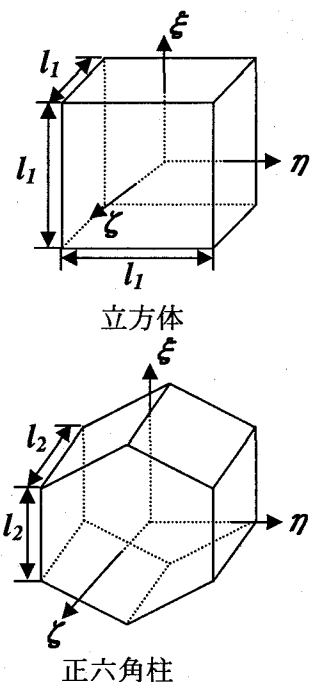


図1 落石要素

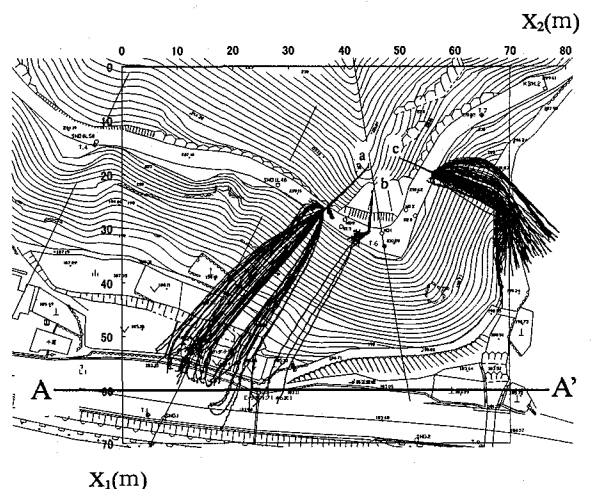


図2 立方体の落下軌跡

4. 遭遇確率の算定

質量 M を有する岩塊の落下発生回数を年 F_i 回であると想定する。落石が対象区間にある時間 Δt だけ存在する確率は次のようになる。

$$P(R_i) = \frac{F_i \Delta t}{365 \times 24 \times 3600}$$

一台の車両の占有長さ L_{min} を定義して、DEM 軌跡解析結果（試行回数 N ）より、図中 A-A' 線上で軌跡が最も集中する地点において、一占有区間 L_{min} を通過する試行回数 n を求めれば、 $P(R_i)$ は次式に書き換えられる。

$$P(R_i) = \frac{F_i \Delta t}{365 \times 24 \times 3600} \times \frac{n}{N}$$

ここで、車両の平均時速を V_{avg} (km/h) として Δt 間の移動距離を一台の車両の占有長さ L_{min} として用いる。当該地点の一日あたりの交通量が ADT (台/1 日) とすれば、この一占有区間に車両が存在する確率は、

$$P(V) = \frac{ADT \times L_{min}}{24 \times V_{avg} \times 1000}$$

この式より、車両が存在する確率は、平均時速をもとに 1 台の車両の移動距離に対して交通量を勘案した車両の空間的存在割合として求めていることになる。よって、遭遇確率は $P(E)$ 、年発生回数は E によって求められる。

$$P(E) = P(R_i) \times P(V)$$

$$E = P(E) \times ADT \times 365$$

$F_i=1$ (回/年), $ADT=200$ (台/1 日), $V_{avg}=50$ (km/h) とした。以上から求めた落石遭遇確率を表 1、表 2 に示す。

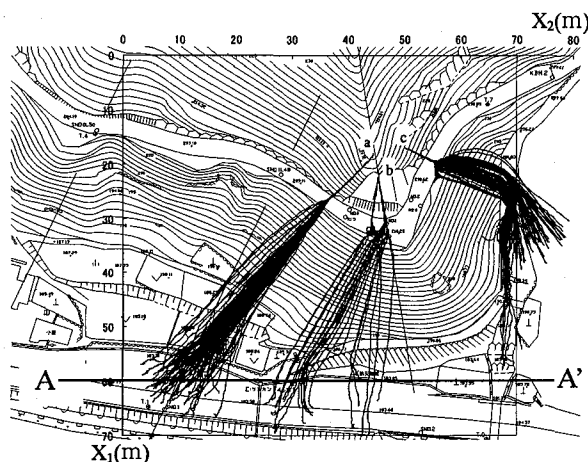


図 3 正六角柱の落下軌跡

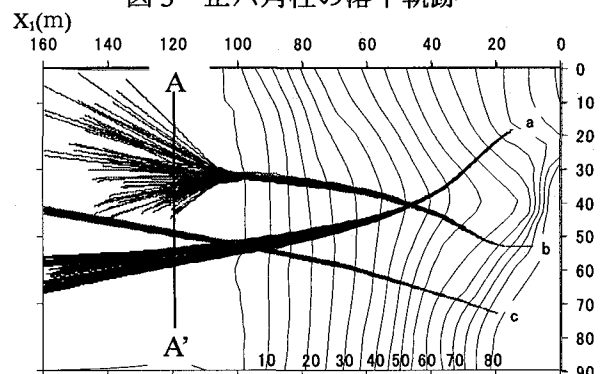


図 4 立方体の落下軌跡

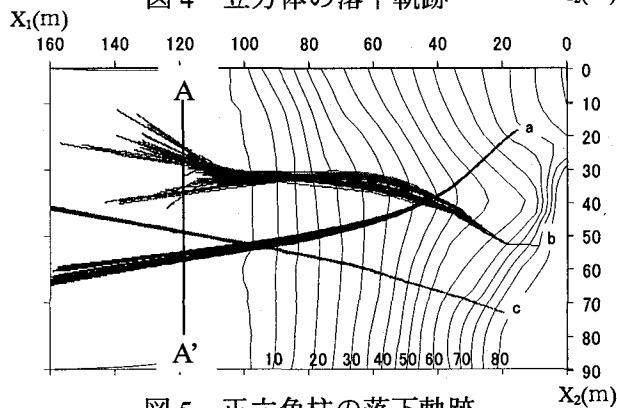


図 5 正六角柱の落下軌跡

表 1 尾根地形の落石遭遇確率

		$P(R_i)$	$P(V)$	$P(E)$	E
立方体	a	5.45×10^{-9}	0.004	2.18×10^{-11}	1.59×10^{-6}
	b	3.17×10^{-9}	0.004	1.27×10^{-11}	9.26×10^{-7}
	c	0	0.004	0	0
正六角柱	a	2.38×10^{-8}	0.004	9.54×10^{-11}	6.96×10^{-6}
	b	1.48×10^{-8}	0.004	5.91×10^{-11}	4.31×10^{-6}
	c	3.17×10^{-10}	0.004	1.27×10^{-12}	9.26×10^{-8}

表 2 谷地形の落石遭遇確率

		$P(R_i)$	$P(V)$	$P(E)$	E
立方体	a	6.34×10^{-8}	0.004	2.54×10^{-10}	1.85×10^{-5}
	b	4.85×10^{-8}	0.004	1.94×10^{-10}	1.42×10^{-5}
	c	6.34×10^{-8}	0.004	2.54×10^{-10}	1.85×10^{-5}
正六角柱	a	6.34×10^{-8}	0.004	2.54×10^{-10}	1.85×10^{-5}
	b	1.83×10^{-8}	0.004	7.31×10^{-11}	5.33×10^{-6}
	c	6.34×10^{-8}	0.004	2.54×10^{-10}	1.85×10^{-5}

5. まとめ

本研究では、3 次元個別要素法を用いて落石運動を解析した。その解析結果を用いて車両との遭遇確率を算定する手順を考案した。地形や要素形状によって、遭遇確率は異なる結果となった。

参考文献

- 1) 精山誉志：斜面上の落石の 3 次元運動解析法の開発に関する研究，鳥取大学修士論文，2004