

# 落石ハザードマップ作成のための 3次元個別要素法の検討

## DEVELOPMENT OF 3-DIMENSIONAL DISTINCT ELEMENT METHOD FOR HAZARD MAP OF ROCKFALLS

牧野孝久<sup>1</sup>・倉岡千郎<sup>2</sup>・杉山文乃<sup>3</sup>

Takahisa MAKINO, Senro KURAOKA and Ayano SUGIYAMA

<sup>1</sup>日本工営株式会社中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

E-mail: makino-tk@n-koei.jp

<sup>2</sup>日本工営株式会社中央研究所 (〒300-1259 茨城県つくば市稲荷原 2304)

E-mail: kuraoka-sn@n-koei.jp

<sup>3</sup>筑波大学大学院システム情報工学研究科 (〒305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

**Key Words:** *distinct element method, rockfall, 3-dimensional analysis, hazard map*

### 1. はじめに

急峻な地形を有する我が国では落石被害は後を絶たず、よりの確な落石挙動の事前予測と合理的な対策法の確立が急務である。近年、落石調査および対策工の検討に際して、個別要素法等による落石シミュレーションが広く用いられてきている。落石の予測解析を実施する場合、現状では2次元解析で行うことが多い。2次元解析は落石の到達位置、跳躍高、速度などの推定に用いることが可能だが、留意点としては、地形形状を2次元断面でモデル化するために、まず落石の落下経路を決定しなければならないことである。落石の平面的な到達領域を推定するためには3次元解析が必要である。

本報告は、落石発生時の危険区域を推定するための一手法として、3次元個別要素法による落石シミュレーションの適用を提案するものである。まず、基礎検討として落石形状による到達範囲の検討、実際の落石の再現解析、および危険区域の推定解析例を報告する。

### 2. 解析手法

本解析では粒状体要素の3次元個別要素法(DEM)を用いた。本手法では、落石を粒状体要素によりモデル化し、要素間の接触メカニズムは、図-1に示すように斜面法線方向とせん断方向のばね、ダッシュ

ポット、およびせん断方向のスライダ(モールクーロン則に基づくせん断破壊機構)でモデル化される。ばねにより、斜面法線方向、およびせん断方向の衝突力が計算され、ダッシュポットにより落石と斜面の衝突によるエネルギー損失をモデル化する。スライダはモールクーロンの破壊基準に従い、せん断力が抵抗力より大きければすべりが発生し、この時のエネルギー損失は摩擦に起因するものと考え、ダッシュポットは働かないものとする。粘性(減衰)係数については、反発係数と粘性係数の関係から設定できる。反発係数 $e$ と粘性係数 $C$ の関係はエネルギー損失と衝突前後の運動エネルギーとの関係から、式(1)により求める。個別要素法の詳細については文献<sup>1)</sup>に記載があるので本論文では省略する。

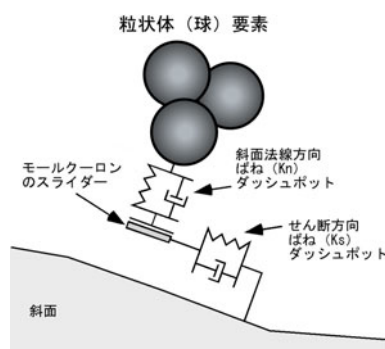


図-1 個別要素法モデル(落石と斜面の接触)

$$C_n = \frac{2|\ln e|\sqrt{K_n m}}{\sqrt{(\ln e)^2 + \pi^2}} \quad (1)$$

ここで、 $K_n$  : ばね剛性 (N/m)  
 $m$  : 粒子質量

### 3. 落石形状による落下挙動の影響検討

#### (1) 解析方法

落石形状の影響を把握するため、三角形型、塊状型、および長方形型の3種類の落石形状について、傾斜45°の斜面に落下させる解析を行った(図-2)。三角形型は3つの球形粒子により重なり合うように形成し、塊状型は4つの球形粒子を正方形型に並べてその両面の中心に一つの球を加えた。長方形型は9つの球形粒子を重ね合わせて作成した(図-3)。粒子半径は落石重量が一定となるように設定した。鉛直方向をz軸、斜面の傾斜する方向をx軸、斜面の横断方向をy軸とし、初期位置での落石姿勢を、x軸及びy軸回りに $\Delta\theta=0.9^\circ$ ( $=90^\circ/100$ )ずつ90°まで回転させて、ばらつきを発生させた100回の計算を実施した。落石密度は、2650 kg/m<sup>2</sup>、バネ剛性は法線方向および接線方向とも1000 MN/m、反発係数は0.2、摩擦係数は0.7とした。

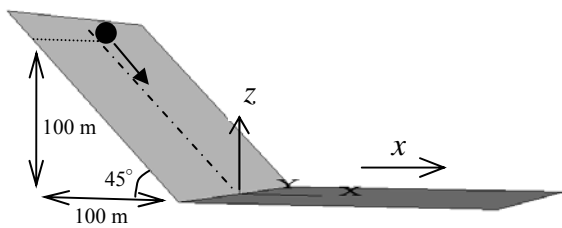


図-2 斜面モデルと座標軸



図-3 落石モデル (左から三角形、塊状、長方形)

表-1 落石モデルの設定

ケース	1	2	3	4	5	6
回転軸	x	y	x	y	x	y
落石形状	三角形		塊状		長方形	
構成粒子数	粒子3個		粒子6個		粒子9個	
粒子直径	0.347 m		0.275 m		0.240 m	

#### (2) 解析結果

表-1に示した6ケースについて平面的な落石経路の分布を調べた。その結果、どのケースもx軸を境にした

片側において約20°以内の拡がりとなっている。ケース1の結果を図-4に示す。このシミュレーションを、x軸を回転軸として180°まで初期姿勢の回転を実施したとすると、x軸に対し対称な軌跡が得られるため、拡がりは約40°となる。これは、落石の拡がり角度が概ね45°の範囲であるという知見<sup>2)</sup>と調和的である。

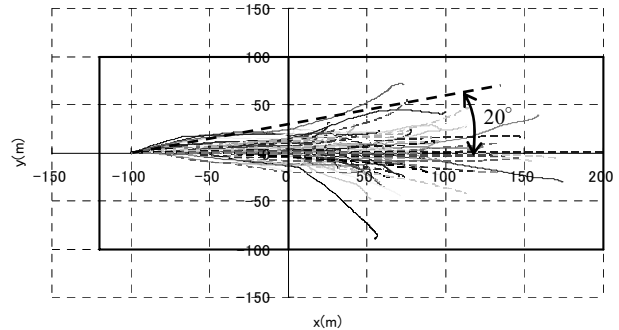


図-4 落石経路の解析結果 (case1)

次に、 $x=-10m$ の位置における、落石速度、回転速度、跳躍量(斜面法線方向)をヒストグラム化して比較した。ケース1, 3, 5の結果を図-5~図-7に示す。

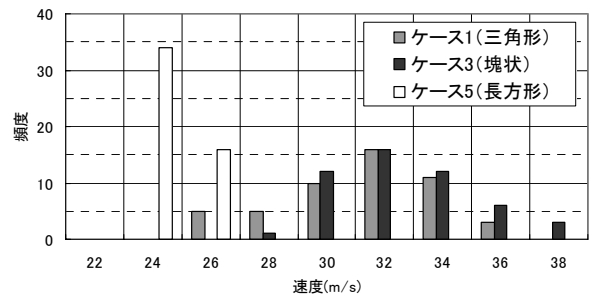


図-5 線速度のヒストグラム

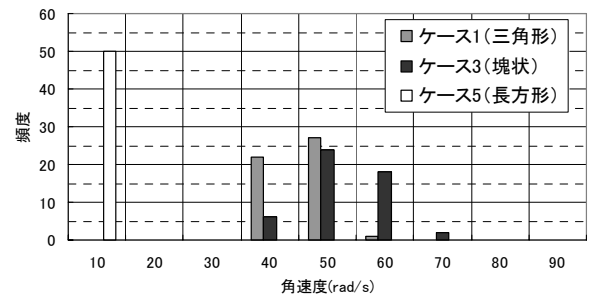


図-6 回転速度のヒストグラム

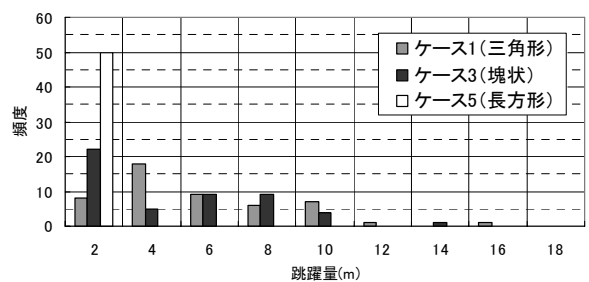


図-7 跳躍量のヒストグラム

この結果より、3種類の落石形状の中で、塊状型が最も線速度および回転速度が大きくなる傾向があり、塊状型が回転しやすい形状であることが示唆される。長方形型については、回転しにくい形状であるとともに跳躍量は初期姿勢による影響が少ない。なお、跳躍量は落石の形状によらず2mの頻度が最も高い結果となった。

#### 4. 過去に発生した落石の再現解析

##### (1) 対象斜面と落石の概要

再現対象とするのは、平成11年11月に急傾斜地で発生した落石である<sup>3)</sup>。落下高さは、落石経路に沿った断面図(図-8)に示すように約75mであり、落石は長径約2.7m、厚さ約1.2mの盤状を呈する大きな岩塊である(図-9)。現場に認められた衝突痕によれば落石は図-10に示すように尾根と衝突して、方向を大きく変え谷地形に沿って落下した。このような三次元的な軌跡を再現することで本解析手法の適用性を評価した。

##### (2) 解析方法および結果

斜面形状は三角形の剛体平板要素により作成した。落石は長方形型とし、直径1mの粒子9個を重ねて結合することで縦横の大きさが実際の落石に概ね合うように設定した(図-11)。モデル化した落石は、発生位置において短軸が落下方向になり底面が斜面とほぼ平行になるように設定した。なお、落石および斜面形状は、調査データの精度や斜面を表す要素数の限界に制約され厳密ではない。また、最初の衝突時の落石の向きは不明であり、衝突時の落石の方向や姿勢を検証することは難しい。しかし、尾根と衝突して方向転換する挙動は、尾根と谷の巨視的な形状に支配され、微地形的な形状には左右されないもの仮定して、落下経路の特徴の再現性を検討した。

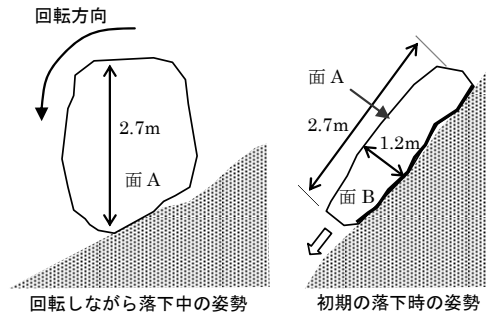


図-9 落石形状の模式図

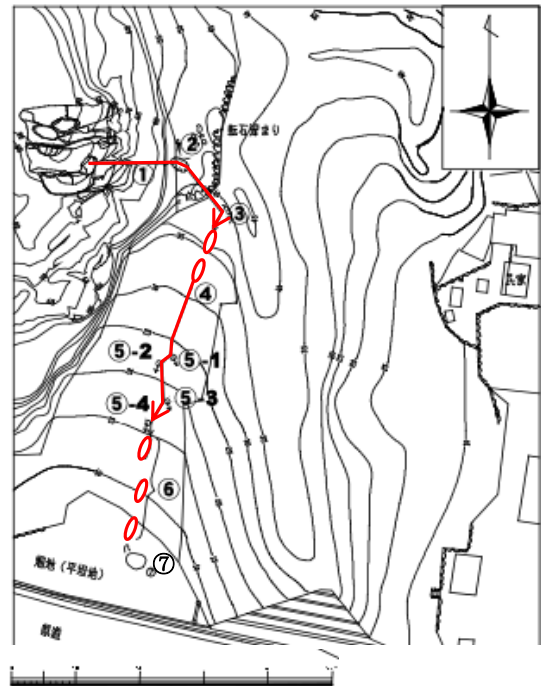


図-10 実際の落下経路

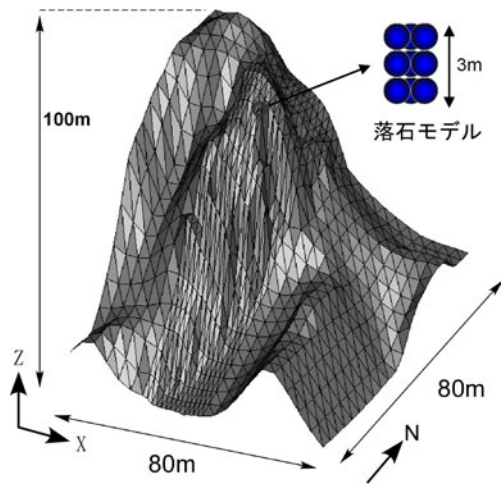


図-11 斜面および落石モデル

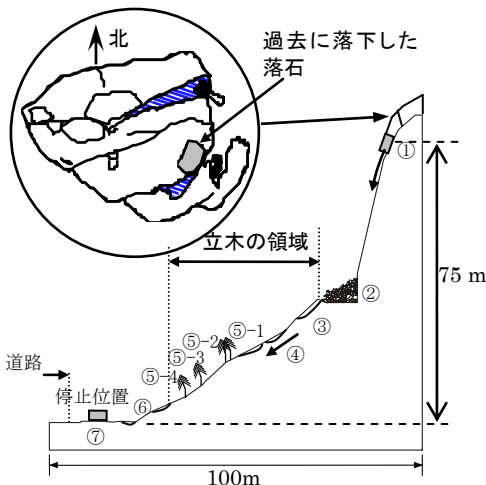


図-8 落石経路に沿った断面図

落石の最初の衝突時の姿勢によってその後の経路が変わるものと考え、落石の初期位置においてz軸(鉛直方向)を中心に落石を9度ずつ回転させ、10回の解析を実施した。図-12に示すように解析から得られた落下



経路は、実際の経路と比較して傾向は整合しており、10ケース中1ケースは実際の経路と概ね一致している。最も再現性の良いケースの初期姿勢を図-13に示す。

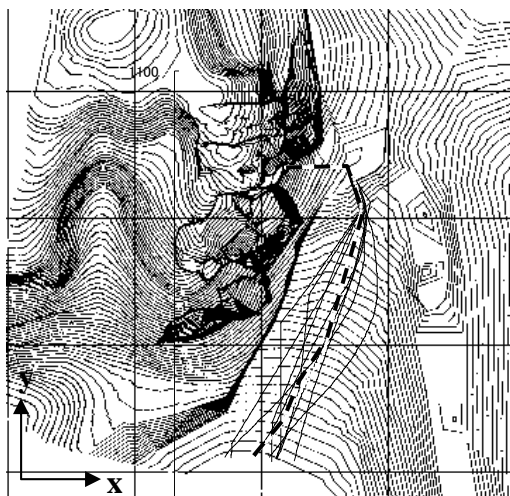


図-12 解析結果の落石経路平面図

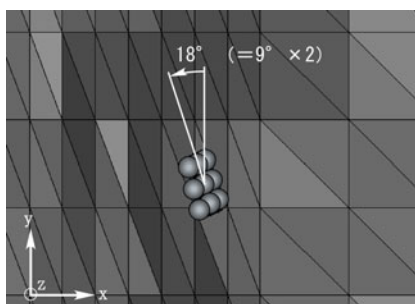


図-13 落石の初期姿勢

## 5. 落石危険区域の推定解析例

本手法を用いた落石危険区域の推定解析例を示す。斜面形状はレーザープロファイラ（航空機レーザー測量）による測量結果に基づき、x方向400m、y方向400mの領域を10mメッシュでモデル化した（図-14）。落石モデルは図-2の塊状型と同じモデルとし、物性値設定も同値とした。ばらつきを与えるため、落石の初期姿勢をx軸回りに $\Delta\theta=1.8^\circ$ （ $=90^\circ/50$ ）ずつ回転させ、50ケースの落石計算を行った。解析結果の落下軌跡を図-15に示す。このように、地形形状に基づき落石経路の集中しやすい領域が把握できる。なお、落下方向が異なるケースが2ケース確認できる。これは、発生源が尾根付近であるため、初期姿勢によって落下方向が異なったものである。このような落下経路も可能性として発生し得ることが示された。

以上より、現地調査に基づき落石径や発生源を変えた解析を行うことで、危険区域の推定や対策工の設置範囲、優先順位の検討に用いることができる。

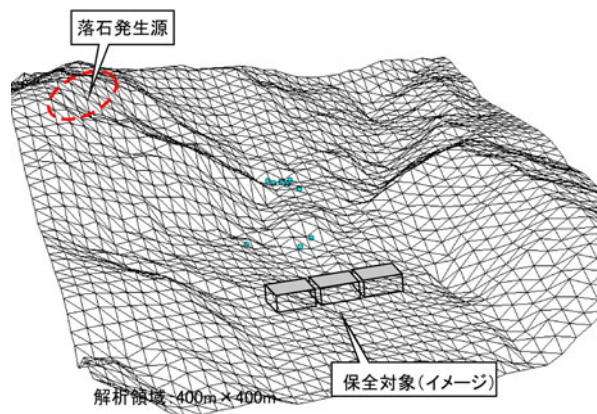


図-14 解析地形モデル図（鳥瞰図）

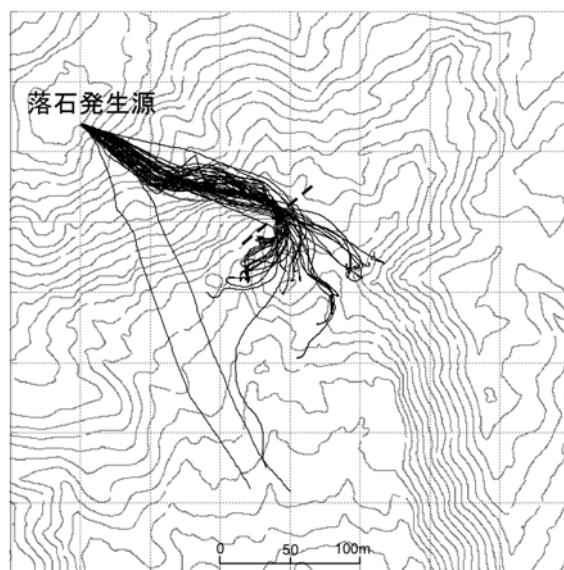


図-15 解析結果の落石経路平面図

## 6. まとめ

本報告では、落石の危険区域判定の一手法として、3次元個別要素法による落石シミュレーションの適用例を示した。本手法は、地形形状のモデル化精度による落下経路の影響や、斜面物性値の設定による影響などの検討課題があるが、落石危険度評価の検討において有効な手法になるものと考えられる。

### 参考文献

- 1) 落石対策便覧に関する参考資料—落石シミュレーション手法の調査研究資料—、社団法人日本道路協会、pp68～80、pp353～363、2002
- 2) 落石対策便覧、社団法人日本道路協会
- 3) 松本司・山口薫・倉岡千郎・藤原一啓・小野慎吾：急崖斜面における大岩塊の落下機構の調査と数値解析、地すべり学会誌、Vol. 40, No.6, 2004.