

質点系解析による簡易な落石シミュレーションの提案

吉田 郁政* 鈴木 嶺太* 中村晋**

Proposal of simple rockfall simulation by point mass system

by

Ikumasa YOSHIDA*, Ryota SUZUKI* and Susumu NAKAMURA**

It is difficult to predict the behavior of rockfall deterministically if a sophisticated simulation method like Distinct Element Method (DEM) is used because movement of rockfall is strongly affected by small irregularity of slope surface and shape of falling rock. It is not practical to consider all the small irregularities in the simulation to predict rockfall behavior. Simple point mass simulation method with random numbers is proposed for numerical simulation of rockfall. The proposed method considers only bounce, ignoring rolling and slide of the falling rock. Randomness is added to normal vector of a slope by generated random numbers so that the simulated moving direction of rockfall is fluctuated at every bounce. Calculation cost of the proposed method is very low compared with that of DEM. The proposed method is applied to simulations of a rockfall experiment with a model slope and small stones. The simulated result shows very good agreement with experiment result in terms of cumulative distribution of coordinate where a rockfall reaches. It is shown that the individual simulation result is strongly affected by the generated random numbers, but the random numbers have small influence on the cumulative distribution of the coordinates.

Key words: Uncertainty, Rockfall, Simplified method, Point mass system, Slope

1 緒 言

落石は道路などの安全管理を行う上での重要なハザードの一つであり、その正確なシミュレーション手法の開発は重要な研究テーマである。対象となる岩石の形状や斜面の地形について詳細にモデル化を行い、精緻な力学モデルでその再現を試みても落石の予測には大きな不確定性が伴う。斜面の表面には基本的に細かな凹凸があり物性値も均質ではなく、岩塊の形状は真球ではない。それら斜面や岩塊の形状や物性の情報を全て詳細に調査してモデルに反映させることは現実的ではない。また、同じ斜面、同じ石を用いた同じ条件の落石実験を複数回実施した場合でも、落石の経路や到達距離は大きくばらつくこととなり、一般には同じ結果を再現することは困難である。詳細に形状等の情報を考慮しても、強非線形の問題には予測が困難な不確定性が伴うことも報告されている¹⁾。このように落石のような現象には大きな不確定性が伴うため、その到達位置などは確率分布で評価を行い、注目する構造物への衝突確率などを用いて落石の危険性を評価することが妥当であろう²⁾。

落石などに対するシミュレーション手法として個別要素法^{3),4)}や質点解析^{5),6)}などが用いられている。個々の落石の詳細な力学挙動を分析することを目的とする場合は個別要素法などの詳細な方法が適切と考えられるが、実際の斜面を対象として形状等の不確定性を考慮

して落石の到達位置の分布を評価することを目的とする場合は簡易な方法でも十分である可能性がある。そこで、本研究では質点系の単純な力学モデルに、跳ね返りの方向に関して乱数を用いた不確定性を与えて、落石の到達位置分布を予測する方法を検討する。提案する方法では質点(落石)のすべりや回転は考慮せずに、斜面との衝突、跳ね返りだけで落石の挙動を表現する簡易的な方法であり、計算時間は個別要素法などに比較すると圧倒的に短い。

栃木らによる室内の落石実験^{7),8)}では一個ずつ個別に岩塊モデルを斜面の上から落とした場合とまとめて同時に落とした場合の落石の到達位置の情報が得られている。本研究ではこのうち個別落下の場合の到達位置を対象に提案手法による落石実験の再現解析を行い、提案手法の有効性について論じる。

2 不確定性を考慮した質点解析の概要

2.1 落石運動に関する定式化

本研究では落石を質点で表すため微小な形状の凹凸による跳ね返り方向の挙動を厳密に表現することはできないが、そのばらつきについて乱数を用いて近似的に表すことを試みる。まず、斜面の任意位置法線ベクトルを \mathbf{r}_{n0} とする。斜面表面や岩塊の微小な凹凸を考慮するため地盤(斜面)の法線ベクトル \mathbf{r}_{n0} にランダムなベク

+ 原稿受理 2015年4月10日 Received

* 東京都市大学都市工学科 〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1, Dept. of Urban and Civil Engr., Tokyo City Univ., 1-28-1 Tamazutsumi Setagaya-ku Tokyo 158-8557 Japan

** 日本大学工学部 〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1, College of Engineering, Nihon University, Nakagawara 1, Tokusada, Tamura Koriyama, Fukushima Pref. Japan 963-8642

トル r_r を加え、落石の跳ね返りの方向ベクトル r_n を以下のように定める。

$$r_n = r_{n0} + r_r \quad (1)$$

ベクトル r_r は、各成分について独立な一様乱数から算出して方向を定め、そのベクトルの大きさは平均0、標準偏差 σ_r のガウス分布に従う乱数で与えることとした。

つまり、凹凸の大きさは標準偏差 σ_r によって制御されることになる。この標準偏差を凹凸度と呼ぶことにする。本論文における凹凸度とは地盤と岩塊の両方から決まるパラメタであり、地盤に全く凹凸がなく、なおかつ岩塊が真球の場合のみ0となることに注意されたい。その場合は、落石の挙動にばらつきは生じず、同じ位置からの落石は全く同じ軌跡となる。

岩塊の地盤面接触直前の速度ベクトルを v とする。これを地盤面法線方向とそれに直交するベクトル v_n , v_l に分ける。

$$v = v_n + v_l \quad (2)$$

ここで、

$$v_n = (v \cdot r_n) r_n, \quad v_l = v - v_n \quad (3)$$

法線方向とそれに直行する方向の反発係数 c_n , c_l から接触して跳ね返った直後の速度ベクトルを次のように求める。

$$v = -c_n v_n + c_l v_l \quad (4)$$

前回地盤と接触した時刻を t として、次に接触する時刻 t_c を二分法で求める。時刻 t から $t + \Delta t$ の間で接触がない場合、時刻 $t + \Delta t$ における岩塊の位置 $u_{t+\Delta t}$ は次式でもとめることができる。

$$u_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t v_t + \frac{1}{2} (\Delta t)^2 g \quad (5)$$

ここで、 g は重力加速度を表しており、以下の式で与えられる。

$$g^T = (0, 0, -9.8) \quad (6)$$

式(5)で算定した位置が地盤面より上にあれば、時刻 t 以降、落石は地盤面とまだ接触していないので地盤面の下になるまで $t + n\Delta t$ として n を増加させる。初めて地盤面の下側になる n に対して、時刻 $t + (n-1)\Delta t$ と $t + n\Delta t$ の間で地盤と接触していることになる。これらを接触時刻の下限 t_1 、上限 t_2 として二分法を用いて以下のように新たな接触時刻 t_c を算定する。

- 1) 上記の方法に従い接触時刻の上限 t_2 、下限 t_1 の初期値を決める。
- 2) 上下限の時刻の平均 t_m に対して式(5)によって位置を計算する。
- 3) 計算された位置が地盤面より上であればそれを新たな下限 $t_1 = t_m$ 、地盤面より下であれば上限 $t_2 = t_m$ とする
- 4) 上下限の差 $t_2 - t_1$ がある一定値 ε 以下になれば終了、そうでなければ2)へ

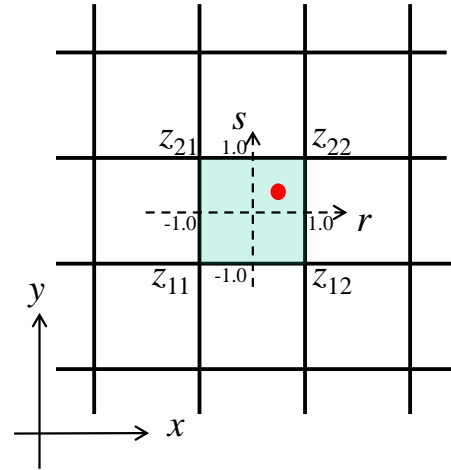


Fig. 1 Mesh to estimate height and normal vector of slope at arbitrary point

このようにして求めた新たに接触する時刻 t_c において式(4)を適用して落石の跳ね返りを考慮する。時刻 t_c を前回地盤と接触した時刻 t へと更新して次の接触時刻を算定する。新旧の接触時間の間の任意の時刻について、落石が存在する位置の座標を式(5)より算定することができる。この手続きを繰り返すことで落石の挙動をシミュレーションする。

2.2 任意地形に対するモデル化

各格子点に与えられる標高情報に基づき任意の3次元斜面形状をモデル化する。格子点を基に正方形のメッシュを設定して、有限要素法の四角形要素で用いられる内挿関数 n によって任意点の標高、ならびに法線ベクトルを算定する。

質点の全体座標から対応するメッシュを求め、メッシュ内における局所座標 (r, s) を算定する。局所座標 r, s が求められとすると、Fig.1に示すようにその局所座標から質点が存在する位置における標高を以下の式で算定することができる。

$$z(r, s) = \frac{1}{4}(1-r)(1-s)z_{11} + \frac{1}{4}(1-r)(1+s)z_{12} + \frac{1}{4}(1+r)(1-s)z_{21} + \frac{1}{4}(1+r)(1+s)z_{22} \quad (7)$$

ここで、 z_{11} , z_{12} , z_{21} , z_{22} は四角形メッシュの頂点、すなわち、局所座標 $(-1,-1)$, $(-1,1)$, $(1,-1)$, $(1,1)$ における標高である。

局所座標 (r, s) における斜面の法線ベクトルは以下の式で求められる。

$$r_{n0}^T = \left(-r_z \frac{dz}{dx}, -r_z \frac{dz}{dy}, r_z \right) \quad (8)$$

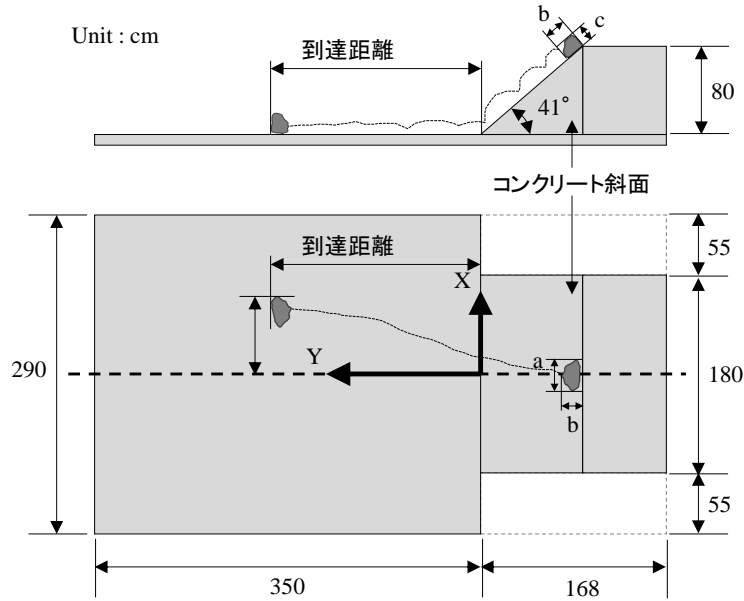
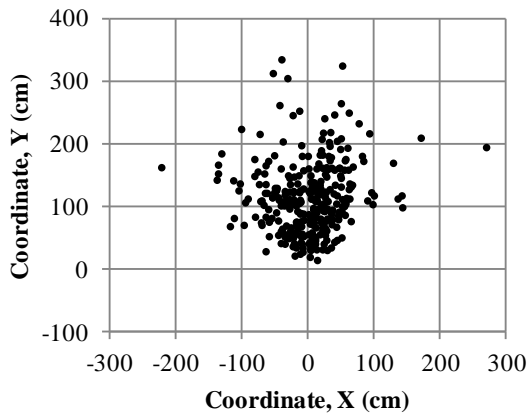
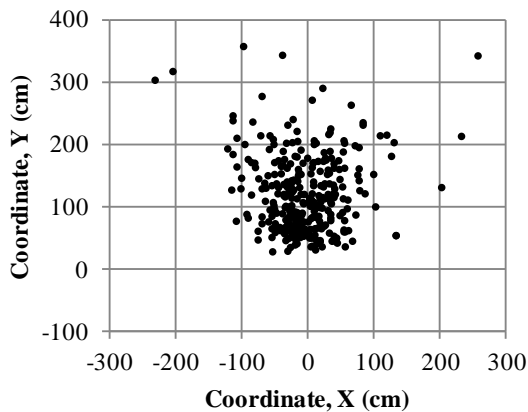


Fig. 2 Outline of rock-fall experiment performed by Tochigi et al. ^{7), 8)}



(1) Case 1 (40-80mm)



(2) Case 2 (20-30mm)

Fig. 3 Distribution of falling rocks obtained by model experiment (Tochigi et al.)^{7), 8)}

ここで,

$$r_z = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2 + 1}}$$

式(8)に現れる微分値は上記の内挿関数から次式で求められる.

$$\begin{aligned} \frac{dz(r, s)}{dx} &= \frac{dz(r, s)}{dr} \frac{dr}{dx} \\ &= \frac{1}{2\Delta l} \left(-(1-s)z_{11} - (1+s)z_{12} + (1-s)z_{21} + (1+s)z_{22} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dz(r, s)}{dy} &= \frac{dz(r, s)}{ds} \frac{ds}{dy} \\ &= \frac{1}{2\Delta l} \left(-(1-r)z_{11} + (1-r)z_{12} - (1+r)z_{21} + (1+r)z_{22} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで, Δl は正方形メッシュの一辺の長さである.

3 既往の落石実験の再現解析

3.1 桁木による落石実験^{7), 8)}の概要

斜面崩壊や落石による岩塊の飛散分布特性を把握することを目的として, 岩塊の崩落実験が桁木らにより実施された^{7), 8)}. 20-30mm と 40-80mm の 2 種類のサイズの塊状岩塊について, 岩塊群と単一岩塊を落下させる実験を行っているが, 本研究では単一岩塊の実験結果を対象に検討を行う. その実験結果の概要を Fig.2 に示す. 実験に用いた 20-30mm および 40-80mm の岩塊は Zingg の方法による形状分類¹⁰⁾を実施し, 岩塊の長辺長 a , 中間長 b および短辺長 c ($a > b > c$ の関係) の寸法比と

Table 1 Simulation case and parameters

Case	Restitution 反発係数	Roughness 凹凸度
1	0.84	0.25
2	0.80	0.25
3	0.84	0.15

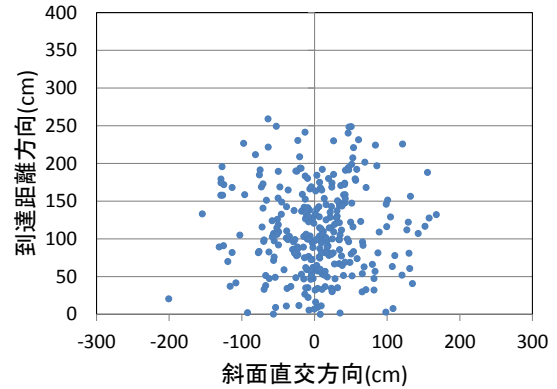
して定められる扁平率 c/b と細長率 b/a の大小により塊状を選定したものである。

単一岩塊の落下実験は 20・30mm と 40・80mm の岩塊の 2 ケース行われている。それぞれ代表 300 個を抽出し、ひとつずつ落下させており、岩塊はひとつ落下させた後にその岩塊を平板上から取り除いてから次の岩塊を落下させている。落下方法は、Fig.2 の斜面中央の法肩手前に岩塊の長辺が斜面傾斜方向に向くようセットし、指で少しずつ押し出して落下させる。岩塊は、数 cm 滑動したところで回転し始め、法尻まで滑動するケースはほとんどなかった。

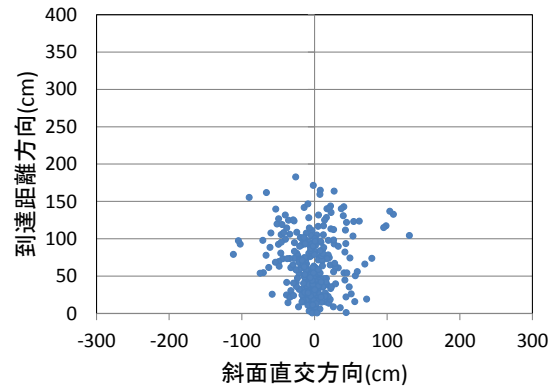
岩塊が到達した位置の座標を記録しており、20・30mm と 40・80mm の岩塊を用いた 2 ケースについての岩塊の到達位置の分布を Fig.3 に示す。これらの図では岩塊が斜面上部から転がり落ち、最終的に止まった位置の分布を表している。両ケースで到達位置の分布に大きな差は見られない。後述の Fig.5 では解析結果とともに実験結果の累積分布も示しているが、そこに示されているように 2 種類の実験による分布の差は小さい。つまり、岩塊の大きさ 40・80mm や 20・30mm によらず、同じような到達位置分布が得られている。実験の詳細については柘木による論文^{7),8)}を参照されたい。

3.2 提案する質点解析による再現性

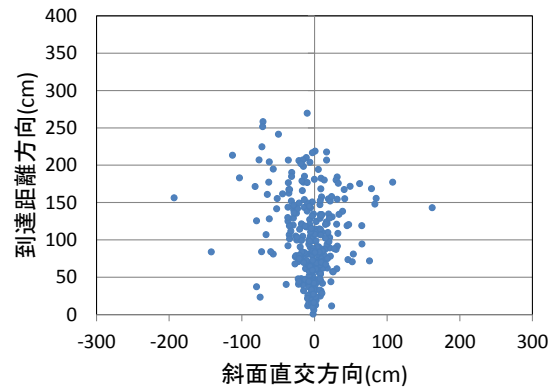
斜面形状など実験の条件に合わせて 300 個の落石のシミュレーションを前述の提案する質点解析により行った。実験結果の到達位置の累積分布ができるだけ一致するように反発係数と凹凸度を試行錯誤により求めたところ、反発係数（斜面法線方向とその直交方向で同じ値を設定、 $c_n = c_t$ ）は 0.84、凹凸度については 0.25 が求まった。反発係数に関してはかなり大きめの数値となっているが、提案手法では転がりやすさを無視して跳ね返り（バウンド）だけで落石の運動を表現しているため大きめの数値になっていると考えられる。反発係数や凹凸度の感度を調べるために反発係数を 0.84 から 0.8 にしたケース 2、凹凸度を 0.25 から 0.15 としたケース 3 も比較解析として実施した。実施した解析ケースの一覧を Table 1 に示す。これら 3 ケースについての 300 個の到達位置の分布を Fig.4 に示す。反発係数を 0.8 に小さくして計算



(1) Case 1 (Restitution 0.84, Roughness 0.25)



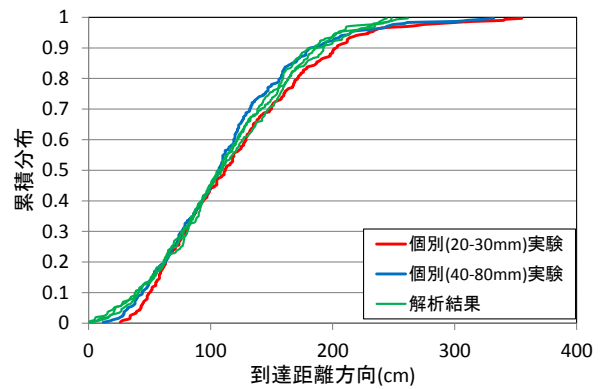
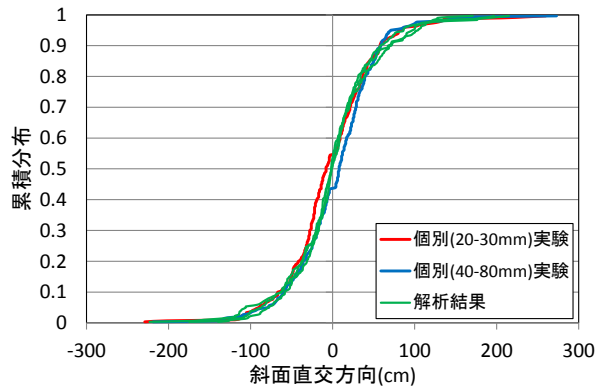
(2) Case 2 (Restitution 0.80, Roughness 0.25)



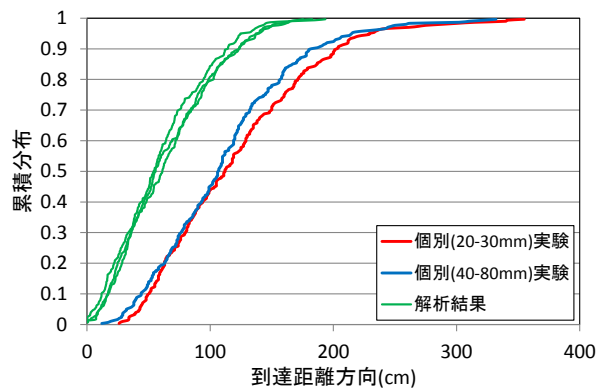
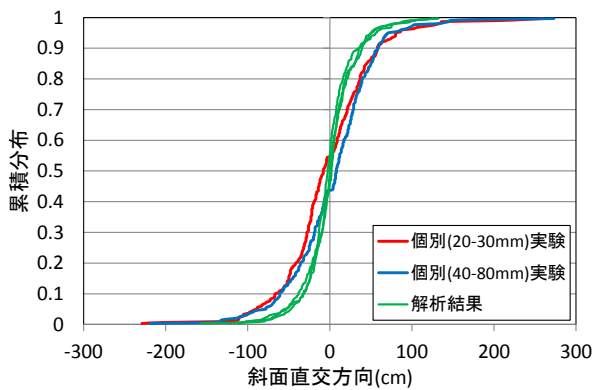
(3) Case 3 (Restitution 0.84, Roughness 0.15)

Fig. 4 Distribution of falling rocks obtained by point mass simulation with random number

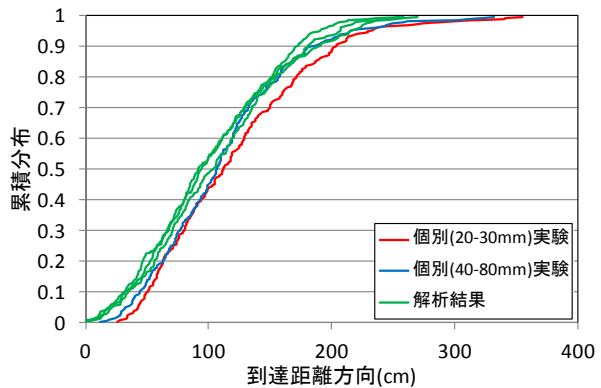
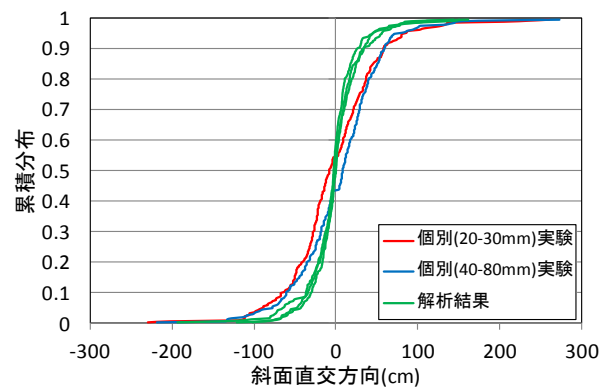
を行ったケース 2 の到達距離が明確に短くなっていることがわかる。凹凸度を 0.15 と小さくしたケース 3 については、到達距離方向については明確な差は見られないが、斜面直交方向のちらばり具合は小さくなっていることがわかる。



(1) Case 1 (Restitution 0.84, Roughness 0.25)



(2) Case 2 (Restitution 0.80, Roughness 0.25)



(3) Case 3 (Restitution 0.84, Roughness 0.15)

Fig. 5 Comparison of cumulative distribution of falling rock

より詳細に分布の特徴を議論するために斜面直交方向（斜面の最急勾配方向と直交する方向）と到達距離方向（最急勾配方向）のそれぞれの方向に対する到達位置の累積分布を求めた。これらの分布に関する実験結果との比較を Fig.5 に示す。図には上述の2種類の大きさの岩塊を用いた実験結果の累積分布も示している。解析結果については斜面法線ベクトルに与える乱数の種をかえてそれぞれ3回ずつ計算を実施して3本の累積分布曲線を示している。提案する質点解析においては、乱数の種を変更すると質点が地盤と衝突する際の跳ね返る方

向が変わるため、個々の落石の経路や到達位置は大きく異なることとなるが、図に示されているように累積分布で比較するとその影響は小さく、ほとんど同じような曲線が得られていることがわかる。Fig.5の(1)に示したケース1については両方向ともに実験結果と非常に良好に一致した累積分布が得られている。ケース2（反発係数を0.84から0.8に変更）では斜面直交方向はFig.5(2)に示されているようにばらつきが小さくなり、到達距離方向（最急勾配方向）は到達距離が全体的に小さくなっていることわかる。一方、ケース3（凹凸度を0.25から0.15

に変更)では、ケース1に比較して、斜面直交方向は明確にばらつきが小さくなっているが、到達距離方向は多少小さくなっているもののあまり大きくは変化していない。凹凸度を0とすると斜面直交方向には全くばらつきなくなる。反発係数は到達距離の全体的な大きさを、凹凸度は斜面直交方向と到達距離方向のバランスを決めるパラメタとなっていることがわかる。

4 3次元形状斜面に対する試算例

実際の斜面に対する落石のシミュレーションを行う場合、その3次元形状を考慮することは必須である。そのため、2・2で示した任意地形に対するモデル化が必要となる。ここでは、その簡単な計算例として、Fig.6に示す3次元形状の斜面を対象として落石シミュレーションを行った例を示す。対象とした斜面は実験で用いた斜面の両サイドを吊り上げたような形状としている。Fig.7のA、B、Cの3地点からそれぞれ100個ずつの落石を考慮してシミュレーションを行った。Fig.7(1)では1.0秒時の落石の位置、(2)では最終的な到達位置を示している。(1)ではそれぞれの落石位置から最急勾配方向に向かって落石している様子がわかる。また、AやCの方が急勾配であるため移動距離がBからの落石よりも大きいことがわかる。(2)の最終的な到達位置については斜面の直下の中央付近にある程度集中しているがこれらはBからの落石であり、AやCについては高い位置から落としているため遠くまで到達している。

ここで示した結果は試算結果であり定性的には自然な解析結果となっているものの、定量的な有効性は不明である。今後は実際落石や落石実験との比較、及びDEMなどの詳細な方法との比較を通して、提案手法のより定量的な有効性確認を行う予定である。

5 まとめ

落石のシミュレーション手法として乱数を用いた質点解析法の提案を行った。既往の実験結果との比較を行ったところ、適切なパラメタを与えれば良好に実験によって得られた落石の到達位置の座標の累積分布を再現できることを示した。複雑な3次元形状にも簡単に適用することが可能であり、個別要素法などに比較して圧倒的に短い時間で計算することができる。本論文で紹介した300個の落石計算は通常のPC (Intel Core i7)で行っているが、その計算時間は0.5秒以下である。

反発係数や凹凸度といった解析パラメタを事前にどのように定めるかが今後の課題である。本論文で示したような実験の再現やDEMのようなより詳細な方法との比較を通して、設定方法を検討することが必要である。また、転がりやすべりを無視して跳ね返りだけで落石挙動を予測しようとする方法であるため当然適用範囲には限界がある。その適用範囲を明らかにすることも重要な課題であろう。また、多数の岩塊が同時に落ちる場合

は落石同士の接触によってエネルギーが消費され到達距離が短くなるが、そうした効果を考慮するには更なる工夫が必要である。これらについては将来課題としたい。

なお、本研究は原子力規制庁からの委託業務として実施したものである。記して謝意を表す。

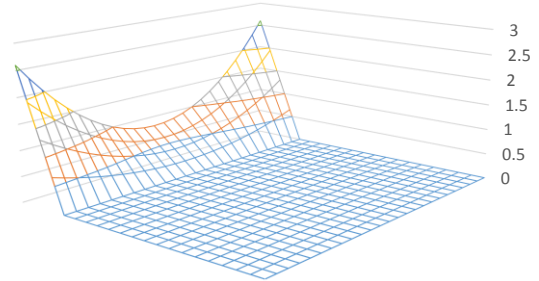
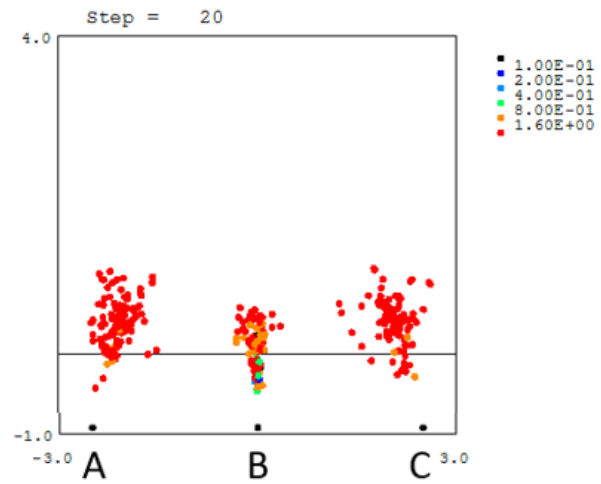
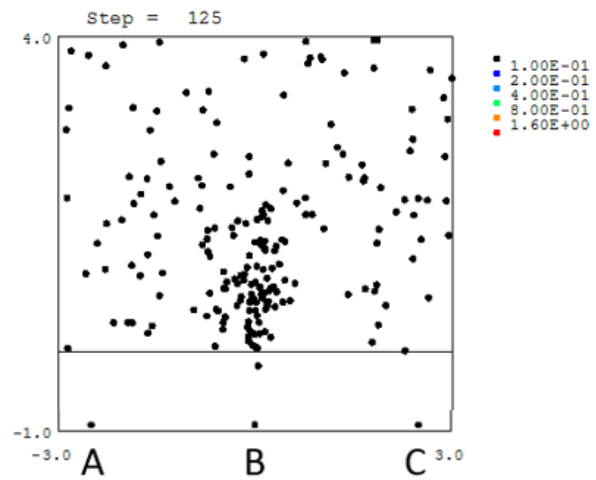


Fig. 6 Slope model with three dimensional shape



(1) Locations of falling rock at 1.0 second



(2) Final locations of falling rock

Fig. 7 Distribution of falling rocks obtained by point mass simulation from the slope with three dimensional shape

参考文献

- 1) 吉田郁政, 大庭啓輔, 石丸 真: MPS法あるいはDEMを用いた破壊挙動の不確定性に関する基礎的考察, 土木学会論文集A2 (応用力学), Vol. 67, No. 2 (応用力学論文集 Vol. 14), I_365-I_374, 2011
- 2) 吉田郁政, 内藤直人, 中瀬仁: 斜面崩壊による岩塊や落石の衝突ハザードの評価法落石ハザード評価に関する提案, 土木学会論文集 (地震工学), 2015.
- 3) 市川卓也, 日下部祐基, 伊東佳彦, 中瀬仁, 足立正信: 3次元個別要素法による落石シミュレーション, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.165-168, 2007.
- 4) 表真也, 西弘明, 今野久志, 伊東佳彦, 日下部祐基, 前田健一: 実測値を用いた2次元個別要素法の落石解析パラメータに関する検討, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.346-351, 2010.
- 5) 右城 猛, 楠本雅博, 加賀山肇: 落石の運動特性と現行の運動予測法の問題点, 第5回地盤と環境に関するシンポジウム, pp.1-10, 2009.
- 6) 右城 猛, 楠本雅博, 加賀山肇: 岩盤上の跳ね返り速度に及ぼす影響に関する研究, 第6回地盤と環境に関するシンポジウム, pp.1-9, 2010.
- 7) 栃木均: 地震時崩落岩塊の到達距離に関する影響要因の検討-斜面崩壊を想定した振動台実験と二次元個別要素法解析による影響予測手法の開発, 電力中央研究所報告, N08084, 2009.
- 8) 栃木均: 地震時崩落岩塊の到達距離に及ぼす岩塊の大きさと形状の影響, 電力中央研究所報告, N09021, 2010.
- 9) K.J.Bathe, E.L.Wilson (菊池文雄 訳): 有限要素法の数値計算 (計算力学シリーズ), 科学技術出版, 1979.
- 10) 地盤工学会: ロックフィル材料の試験と設計強度, pp.88-90, 1982.