DDA による落石シミュレーション (落石形状の違いが解析結果に与える影響)

島内哲哉[1*]・中村公一[2]・佐々木猛[3]・西山哲[4]・大西 有三[5]

[1]オフィスim3(〒174-0063東京都板橋区前野町3-6-10)
[2]鳥取大学大学院工学研究科(〒680-8550鳥取市湖山町南4-101)
[3]サンコーコンサルタント(株) (〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)
[4]岡山大学大学院環境生命科学研究科(〒700-8530岡山市北区津島中3-1-1)
[5]関西大学 都市環境工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

*E-mail: shimauchi-t@mdss.jp

落石シミュレーションの結果は，運動係数とモデルによって大きく左右される．これまで，運動係数に関する研究は多いが，落石形状に関するものは少ない．本研究では，球体と直方体による落下実験を行い，DDAを用いて18角形，五角形，正方形，長方形のシミュレーションを行った．その結果，全体的な速度と軌跡は，形状が五角形から長方形になるにしたがい，早い段階でその運動が，跳躍-回転から滑動へと遷移する様子が捉えられた．このような変化は，複雑な地形を持つ実斜面においても同様である．しかし，このような中でも，跳躍-回転を持続し，高い速度と軌跡を維持する落石が現れる．この割合の予測が，シミュレーションでは重要となる．

Key Words : *rock fall, DDA, trajectory, velocity,block shape*

1. はじめに

国土の 70%以上が山岳部を占める我が国では，落石は主要な災害の一つであり，その防災計画には精度の良いシミュレーションが不可欠である．近年では，不連続体解析法が用いられることも増えているが，この解析法では反発係数や摩擦などと同様，落石形状もまた重要な要素となる．しかし，落石形状が速度や運動や到達距離などの解析結果に与える影響について調べた研究はそれほど多くない．

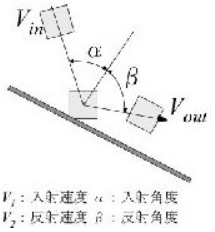
本稿では，落石形状が結果に与える影響を中心に検討を行う．

2. 落石解析の結果に影響を及ぼす要素

2.1 反発係数

落石シミュレーションでは，**図-1** で定義される反発係数が用いられる．反発係数には，入射角度や法線方向入射速度に対する依存性があることが知られている [1)]．ここで，反発係数について述べるのは，形状を考慮した解析においても，その性質は考慮すべき重要な要素と考えられるためである．質点解析では，このような性質を考慮するために，法線方向速度比(Rn)と法線方向入射速度との関係を表す近似式が導入されており [2)] 筆者等も速度比(Rv)に同様の近似式を導入している．

一方，現場実験では法線方向速度比(Rn)がしばしば 1.0 を超える値が報告されている [1)3)4)]．Azzoni 等 [5)]は，このような現象が，楕円形のブロックが回転しながら小さなステップを乗り越える際に生じることを説明した．また，Buzzi 等 [6)]は，この現象が，回転を伴いながら低い角度で衝突する際の多重衝突によって反射方向が大きく変化することによって生じることを五角形ブロックを



$$Rv = \frac{V_{out}}{V_{in}}$$

$$Rn = \frac{V_{out}\cos\beta}{V_{in}\cos\alpha}$$

$$Rt = \frac{V_{out}\sin\beta}{V_{in}\sin\alpha}$$

図-1 落石解析に用いる代表的な反発係数

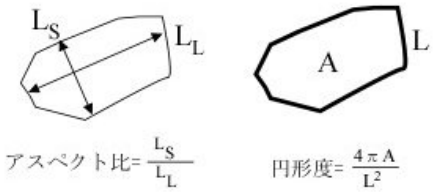


図-2 落石の代表的な形状指標

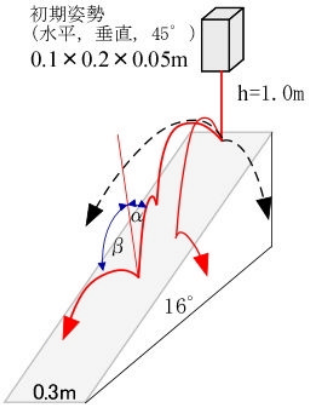


図-3 多角形ブロックの落下実験

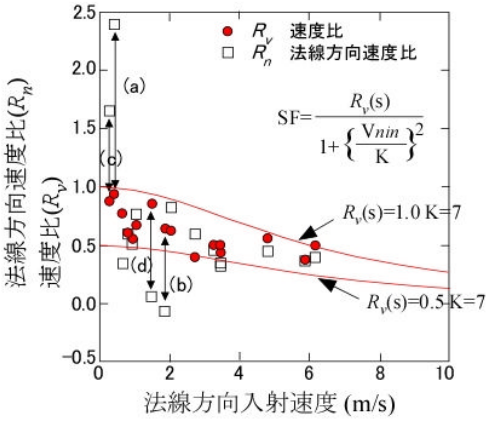


図-4 落下実験から得られた速度比(Rv)と法線方向速度比(Rn)

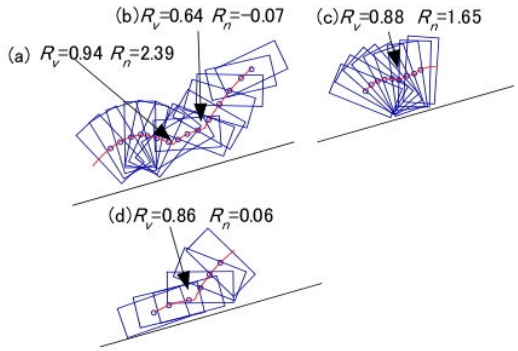


図-5 Rn が 1.0 を超える反発の例(フレーム図)

用いた実験によって確認している．すなわち，Rn が 1.0 を超える原因は，多角形の衝突時に生じる反射角度の異常にあると考えられる．ただし，Rn>1.0 となるような運動は，角度や速度などの特定の条件下で生じるものではなく，ある条件の範囲内で多角形に現れる確率的な現象といえる．

2.2落石形状

落石の形状は，主に回転エネルギーの大小や，到達距離に影響するといわれる [1),7)]．一般には，角，丸，円柱，あるいは塊状，板状，棒状のうに表され，経験法では等価摩擦係数に考慮されている [1)]．

一方，現地調査では落石形状の特徴は，アスペクト比や円形度で示されることが多い(**図-2**)．不連続体解析の利用が増えれば，今後は数多く分布する落石の代表形状を決定するための手法として重要になるものと考えられるが，今のところ研究例は少ない．本研究では，より簡単な形状モデルを用いて運動の特徴を比較し，反発や回転などを含めた運動を，実際の落石の挙動に近づけるためのモデル作成法について検討を行う．

3. 形状モデルが軌跡と速度に与える影響

3.1 多角形ブロックの落下実験

筆者等は，落石形状の影響を調べ，後の DDA 解析のための基礎資料を得ることを目的とした実験を行っている [8)](**図-3**)．実験は，幅 30cm，厚さ 5cm の木製の板を傾斜 16° で設置し，球体と直方体のブロック(硬質ゴム)を高さ約 1m から落としている．実験では，直方体の初期姿勢を水平，垂直，45° と変えて行っているが，球体と異なり直方体では最初の反発で軌道が大きく逸れ，反射板から飛び出すものが多い．今回は，形状の違いと Rn および Rv との関係を調べることが目的であるため，繰り返し落下させて 2 回目の反発が幅 30cm の反射板内に収まったもののみをデータとして採用した．

図-4 は，実験結果から法線方向速度比(Rn)と速度比(Rv)を計測し，法線方向入射速度との関係を示したものである．計測は，反射板の直交方向に設置した高速度カメラで行っている．実験数はまだ十分ではないが，それでも図中の(a)～(d)に示すように Rn が 1.0 を超えたりゼロに近いケースが捉えられている．この時のブロックの挙動をフレーム図で示したのが**図-5** である．速度が遅く回転も小さいため Buzzi 等 [6)]の条件とは異なるが，衝突時の姿勢の変化によって反射角度が大きく変化することが原因であることを示している．これに対し，入反射角度の影響を受けない Rv は，ばらつきはあるものの図

表-1 解析に用いた物性値

物性及びパラメータ	入力値
密度(kN/m^3)	11
弾性係数(MPa)	30000
R_v(scaled)	0.90
SFの補正値 (K)	7
摩擦角(°)	20
タイムステップ (g1=0)	0.0004 ～0.0002
最大想定変位比(g0)	0.0001
ペナルティバネ (kN/m)	20000
バネ比 (kn/ks)	2.0

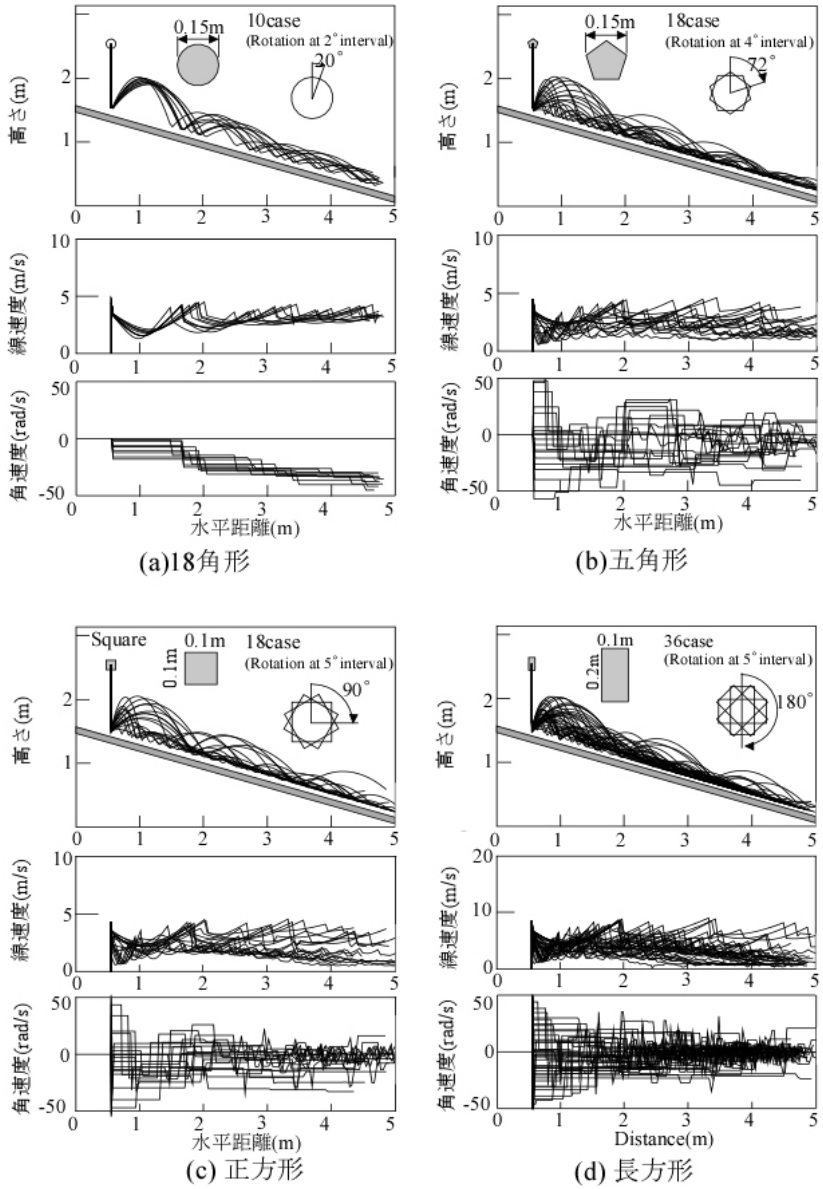


図-6 形状の異なる4つのブロックのDDAシミュレーション結果

中の赤線で示した 2 本の相関曲線(スケールファクター(SF)曲線)に挟まれた範囲に分布する．

3.2 DDAによる多角形ブロックのシミュレーション

実験結果を基に再現可能な解析パラメータ(バネ)を決定し，球体を 18 角形で，直方体を長方形でモデル化し，さらに五角形と正方形を追加したうえで，二次元 DDA による解析を行った．解析に用いた物性値を**表-1** に，解析結果を**図-6** に示す．落下時のブロックの初期姿勢は，文献 [1]の方法により変えて行っており，その検討ケース数は図中に示している．

結果を概観すると，18 角形モデルと他のモデルとの間には，軌跡と速度に大きな違いが見られる．すなわち，18 角形は反射後の軌跡の範囲は狭く，軌跡や速度のばらつきも少なく，その結果は質点解析に似ている．これに対し，他の形状は反射角度の範囲が広く放射状の反射軌跡を示す．また，初期姿勢以外にブロックに回転を加えていないため，四角形や長方形では，面積中心と接触点との位置関係によって最初の反射で後方回転となることがある．前方回転の場合，反射角は大きく比距離も大きいが，逆の場合は反射角も飛距離も小さい．

速度も，最大速度の包絡線でみると形状による大きな差は見られないが，18 角形では解析範囲内(水平距離約5m)で微増傾向を示す．これに対し，他の形状では長方

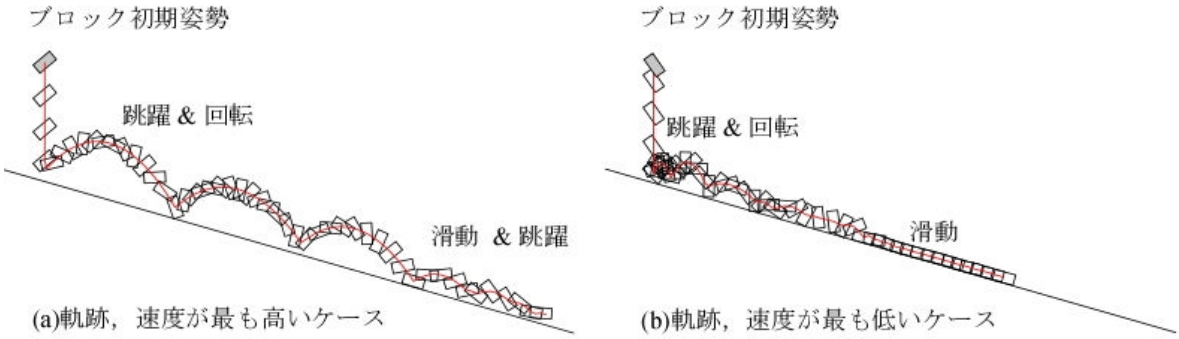


図-7 長方形ブロックの結果のうち最も軌跡と速度の大きい例と小さい例のフレーム図

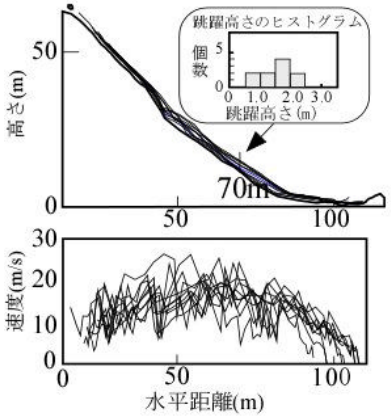


図-8 DDA による落石解析を適用する斜面

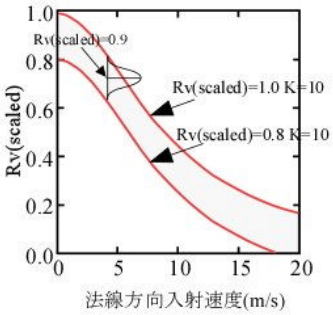


図-9 解析に用いた速度比のスケールファクター曲線

表-2 実斜面で検討を行った落石の形状

形状	正八角形	正五角形	四角形
面積=1.44m²	1.3m	1.48m	1.2m × 1.2m
アスペクト比	1.0	0.95	1.0
円形度	0.97	0.93	0.79
形状	長方形(1)	長方形(2)	
面積=1.44m²	1.11m × 1.3m	1.0m × 1.44m	
アスペクト比	0.85	0.69	
円形度	0.78	0.76	

形，4 角形，五角形の順に早く減少する．軌跡も同様であるが，最大軌跡の崩落線でみると，18 角形よりも他の形状の方が後半での跳躍高さが高いものがみられる点が特徴である．

このような形状による速度と軌跡の違いは，落下中の運動が跳躍，回転，滑動へと転じる早さの違いによって生じるためで，平均的には，円形から頂点数の少ない多角形になるほど，また扁平になるほど，速度や跳躍高さも低下し易いといえる．しかし，前方回転したものの一部には円形ほどでなくとも高い跳躍と速度を持続するケースがみられる．**図-7**は，長方形のなかで最初の反発が最も高かったケースと最も低かったケースを，0.06secピッチで示したものである．大きな反発は，前方回転が加わったことで生じており，それが解析範囲内の後半まで持続している．これに対し，小さな反発は後方回転で生じ，早い段階で運動が滑動に変化している．実斜面の解析では，前者のような跳躍の持続するケースが解析結果の中にどれくらいの割合で含まれるかが，問題になるものと考えられる．これが，形状を考慮した落石解析においても，モンテカルロ解析が必要となる理由の一つである．

4. 実際の斜面でのシミュレーション

室内実験と，その DDA による検討により，平板な斜面において落石の形状が速度や軌跡に及ぼす影響の一端が明らかとなってきた．検討自体は，まだ十分とは云えないが，ここでは複雑な地形の実斜面において，落石形状がどのように影響するのかを検討する．

検討現場は，比高約 60m，水平距離約 90m，平均傾斜 33° の採石場の斜面である．上部斜面は岩盤が露出し，斜面の下半分は崩れたばかりの崖錐で覆われている．この斜面では，10 個の落石の速度と軌跡の計測を行っている(**図 8**).

ここでは岩塊形状を**表-2** に示す 5 つのタイプで解析を行った．形状の初期姿勢の変化は，正八角形，正五角

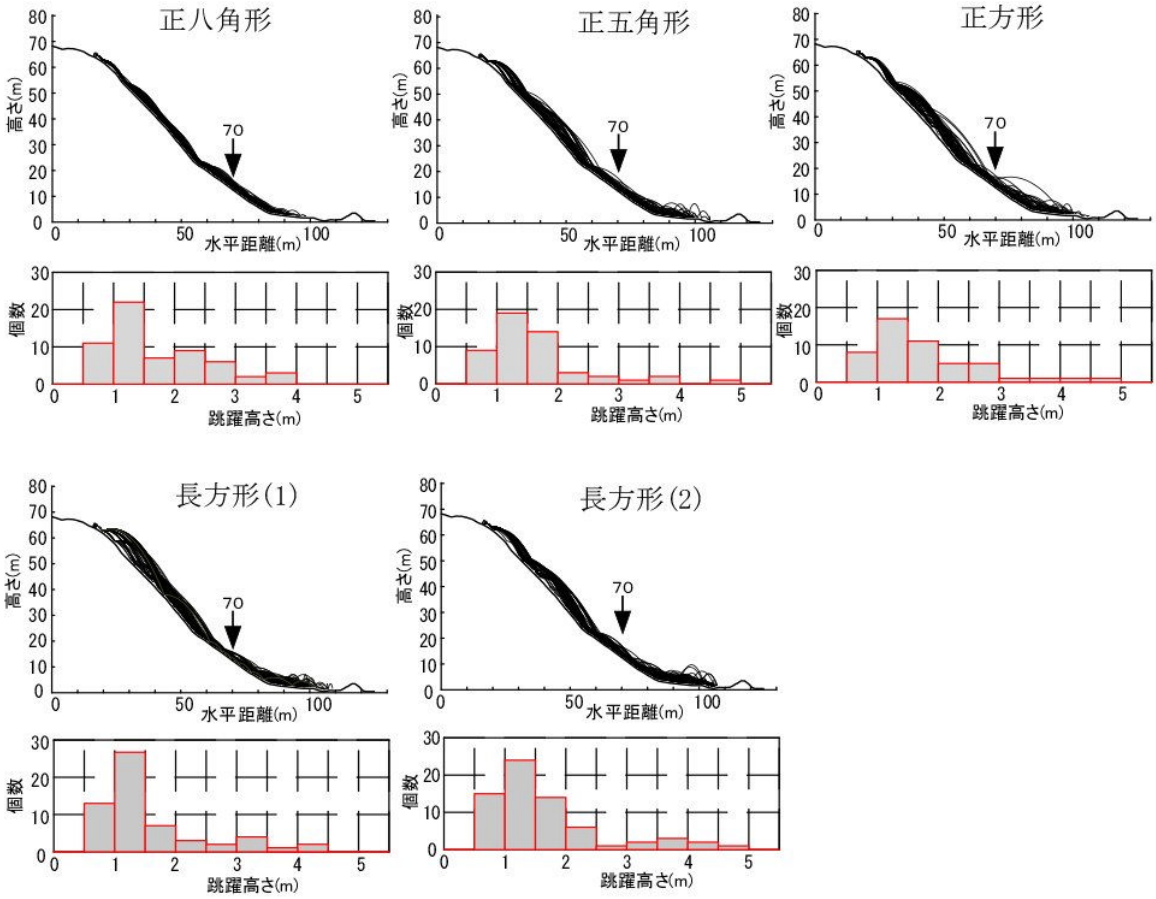


図-10 解析を行った斜面下部 70m 地点での跳躍高さのヒストグラム

形，四角形では内角の 1/3 ずつ，長方形(1)(2)については内角の 1/4 ずつで行っている．計算回数は，各姿勢ごとに 20 回であり，各形状における総計算回数は 60～80 回である．なお速度比(Rv)には**図-9** に示すスケールファクター曲線を用いた．各姿勢ごとに，DDA 用に開発したモンテカルロ解析用プログラムを用いて発生させた，平均値=0.9，標準偏差=0.04 の正規乱数を用いている [9]．

図-10 は，各形状の 70m 地点の跳躍高さを比較したものである．この地点は，**図-8** に示す跳躍高さのヒストグラムの地点にあたる．この区間の跳躍高さのピークは，形状によらず 1.0～1.5m 間に集中している．ただし，ブロック形状が正八角形から長方形(2)へと変化するほど，1.0～1.5m のピークは変わらずに，跳躍高さの高い落石が増える．すなわち，形状が正八角形から長方形になると，数こそ少ないものの高い跳躍を示す落石が出現するということを示している．この傾向は，平板での解析結果と同じである．

因みに，10 個の落石の平均的な形状は，アスペクト比が 0.65～0.8，円形度が 0.8 前後であり，これはアスペクト比でみると長方形(2)に，円形度でみると五角形と四角形のほぼ中間の形状に相当する．跳躍高さの分布傾向からみると，解析結果の形状は正八角形ないし正五角形の軌跡が実際に近いように見える．この場合，適用する形状指標としては，萩原等 [10]が指摘しているように，円形度の方がアスペクト比よりも実際に近いということになる．

5. まとめと今後の課題

本論文では，現在筆者等が行っている室内実験や過去の現場実験結果を基にした落石形状に関する基礎的な検討結果について述べた．概要は，以下のようである．

・最大線速度の推移には，形状による大きな違いは見られない．

・平均的な線速度は，18 角形では微増傾向だが，形状が円形から四角形，さらに長方形へと進むほど早い段階で減少する．この原因は，落石の運動が跳躍-回転から滑動へと運動が遷移するためである．

・軌跡も同様の傾向を示すが，円形から四角形，さらに

長方形になると，跳躍-回転運動の持続により高い軌跡を継続する落石が少なからず出現する．この割合の現実的な推定がきわめて重要となる．

本結果は，18 角形，五角形，四角形，長方形といった極単純な形状によるもので，衝突速度や角度条件の範囲も狭い．また，扁平度が大きくなると，落下途中の運動が三次元的に変化し，その後の跳躍高さや速度が大きく変わる可能性もある．この点は，二次元解析の限界と結果の妥当性を踏まえつつ検討することが求められることになる．

参考文献

1) 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手法の調査研究資料-，2002.
2) *Pfeiffer,T.J.,Bowen,T.D : Computer Simulation of Rockfalls;Bulletin of the Association of Engineering Geologists Vol.X X VI.No.1,pp135-146,1989.*
3) *P.Asteriou, H.Saroglou, G.Tsiambaos : Geotechnical and kinematic parameters affecting the coefficients of restitution for rock fall analysis, Int J Rock Mech Min Sci 54, pp103-113,2012.*
4) *M.Spadari, A.Giacomini, O.Buzzi, S.Fityus, G.P. Giani : In situ rockfall testing in New South Wales, Australia, Int J Rock Mech Min Sci 49, pp84-93,2012.*
5) *A.Azzoni, P.Rossi, A.Zaninetti : Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr 32, No7, pp709-724, 1995.*
6) *O.Buzzi, A.Giacomini, M.Spadari : Laboratory Investigation on high value of restitution coefficients, Rock Mech Rock Eng 45, pp35-43, 2012.*
7) 氏平増之，細貝昭悟，小川健太，高貝暢浩 :落石の運動エネルギーと到達距離の関係-岩盤斜面の落石に関する研究(第 2 報)-，資源と素材，Vol.113,pp309-315, 1997.
8) 中村公一，島内哲哉，小野和行：落石形状が軌跡と速度に及ぼす影響に関する実験的検討，第 48 回地盤工学会研究発表会発表講演集，p.2049-2050，2013.
9) 中村公一，島内哲哉，佐々木猛，西山哲，大西有三：DDA による落石形状を考慮したモンテカルロ解析，第 47 回地盤工学会研究発表会，pp1793-1794 ,2012.
10) 萩原育夫、大西有三，佐々木猛，西山哲：非質点系落石シミュレーションにおける落石形状指標に関する検討，地盤工学ジャーナル，Vol.4, No.4, pp.357-367, 2009.

STUDY OF ROCKFALL SIMULATION USING DDA

Tetsuya SHIMAUCHI, Koichi NAKAMURA, TakeshiSASAKI, Satoshi NISHIYAMA and Yuzo OHNISHI

The result of rockfall simulation is affected by the kinematic coefficients and the shape of blocks. In this study, rockfall simulation using DDA was performed for the four differently shaped blocks(circle, pentagon,square,rectangle). As a result, the velocity and locus of the square and rectangle tend to decrease at a faster rate than those of circle. This is because that the motion of the blocks shifts from rotation and bouncing to sliding at an earlier point in time compared to the circle. However, some blocks reaches far while continuing the bouncing and rotation. Hence, the critical theme of rockfall simulation is to determine the incidence rate of blocks that fall with continuously rotating and bouncing motion.