

DDAによる落石形状を考慮したモンテカルロ解析

A Study of The Considering of Rock Shape in The Monte Carlo Rock-fall Simulation Using DDA

中村公一 Koichi NAKAMURA (鳥取大学大学院工学研究科)
 小野和行 Kazuyuki ONO (日本総合建設(株)松本支店)
 鄭 惟 Wei ZHENG (オフィス im3)
 島内哲哉 Tetsuya SHIMAUCHI (オフィス im3)
 酒井直樹 Naoki SAKAI (防災科学技術研究所)

斜面を落下する落石の挙動は、斜面の形状や凹凸、地盤の硬軟、立木などの影響によって複雑に変化する。その変化の要素には、速度比や摩擦といった運動定数のほかにも、経路途中の地形の変化や落石形状などがある。なかでも落石形状は、解析結果にばらつきを与える大きな要因の一つであるが、これを考慮可能な解析法である不連続変形法(DDA)には、モンテカルロ解析用のルーチンが準備されていない。本論文では、DDAによる落石解析に、モンテカルロ解析を行うためのプログラムを試行的に作成し、速度比や落石形状が結果に与える影響について検討を行った。

キーワード：DDA, 落石形状, モンテカルロ解析, 速度比, 速度依存性 (IGC : G-2,G-13)

1. はじめに

斜面を落下する落石の挙動は、斜面の形状や凹凸、地盤の硬軟、立木などの影響によって複雑に変化する。質点解析では、このような落石の不確実な挙動を考慮するために、反発係数や摩擦などの運動定数、あるいは地形の起伏を確率変数としたモンテカルロシミュレーションが導入されている¹⁾。しかし、質点解析では落石の形状を扱うことが難しいため、規模や形状の影響に関する検討は難しい。

一方、不連続変形法(DDA)は、落石形状を考慮できる解析法の一つであるが、解析法の性質上ばらつきを考慮するルーチンは準備されていない。落石対策便覧では、ブロックの姿勢を変えて複数回解析を行うことで、結果へのばらつきを考慮する方法も提案されているが、この場合でも速度比や摩擦のばらつきまでは考慮していない¹⁾。このため、形状の影響を必ずしも正確に評価していると言い難い。

本研究では、不連続変形法(DDA)で速度や形状を考慮したモンテカルロ解析を行うために、速度比や摩擦や粘性係数を確率変数として扱うためのサブプログラムを開発した。これにより、前述の各要因や形状などが結果に与える感度を調べ、シミュレーションの精度向上を図ることが目的である。本論文では、形状と速度比の関係について試行的に行った初期的なテストの結果について報告する。

2. DDAによるモンテカルロ解析の方法

DDAは、任意の多角形で構成されるブロック同士の運動を解析する方法である。ブロックの運動方程式は、ハミルトンの原理に基づいて定式化され、最終的に、並進、回転、弾性ひずみを含む以下の式で表される。

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = F \quad (1)$$

ここに、 M は質量マトリックス、 C は減衰マトリックス、 K は剛性マトリックス、 F は外力マトリックスを表す。 \ddot{u} は重心加速度、 \dot{u} は重心速度、 u は重心変位を表す。

図-1は、DDAの解析部を概念的に示したものである。図には示していないが、DDAは解析が始まると最初にDCと呼ばれる幾何情報ファイルと、DFと呼ばれる入力パラメータファイルを読み込む。その後、図-1に示す、①ブロックの弾性、初期応力、慣性力、外力などのサブマトリックスの作成、②節点の接触マトリックスの作成、③全体剛性マトリックスの作成とブロックの変位及び速度の計算、という解析過程が始まる。落石解析では、接触が判定されるとペナルティバネと速度比が導入され、所定の速度でブロックを跳ね返した後、再び①②③のルーチンを繰り返す。このように、DDAは確定論的な解析法であるため、途中で確率変数を導入することは難しい。そこで、本研究では図-2に示すような方法を考案した。最初に、所定の確率変数に乱数を n 回発生させ、これを埋め込んだDFファイルを n 個作成する。ついで、(1)DFを読み込み、(2)

解析を行い、(3)結果を出力する、という過程をn回繰り返す。この過程をプログラム化することで、DDAでモンテカルロシミュレーションを行うことを可能にした。

なお、プログラム作成にあたって、図-1に示すDDAプログラムでの解析停止条件を、従来の指定回数から、一定速度以下になった場合へと部分的に変更を加えた。また、後述する速度比の法線方向入射速度依存を考慮するために、後述する式(4)を組み込んだ。なお、本検討では、DCファイルについては変更を加えていない。このため形状については、後述する落石対策便覧の方法で検討を行った。

3. 落石形状と速度比のばらつきへの考慮方法

3.1 落石形状による影響

落石の形状は通常、板状、塊状、長柱状のように表現される。また、現地調査では落石の規模や扁平度の特徴を表すために、長径、中径、短径を計測して示すことも多い。形状については、ブロックの頂点数が少ないほど、すなわち形状が扁平な多角形ほど衝突後の射出方向が多様化し、跳躍高さのばらつきも大きくなるという報告の他、形状が最終到達距離や運動に影響を与えているという報告がある¹⁾³⁾。落石対策便覧¹⁾では、形状によるばらつきを不連続体解析で考慮する方法として、発生源での初期姿勢を、内角の1/10ずつ回転させる、あるいはそれに相当する角速度を与える方法が提案されている(図-3)。本論文でも、同様の方法を用いるが、現段階の不連続体解析では、質点解析のように速度比や摩擦といった他の運動定数ももたらす結果への影響と、形状が軌跡や速度に与える結果への影響との関係が明らかでない。このため、調査の結果を、落石解析にどのように反映すべきかが曖昧なままである。このためか、落石で形状を扱った報告は今でもきわめて少ない。

萩原ら³⁾は、落石の形状を表す指標として、アスペクト比、円形度、重心距離比や曲率を考慮した形状エントロピーなどについて検討し、このうち円形度と重心距離比による形状エントロピーが指標として適していると報告している(図-4)。アスペクト比(C_L)は、多角形ブロックの長軸を L_L とし、短軸を L_S として式(2)で表される指標で、現地で最も多用される指標である。真円のとき1を示し、扁平に近づくほど0に近づくが、円と正方形との区別がつきにくい。

$$C_L = L_S / L_L \quad (2)$$

また、円形度(C_R)は、多角形ブロックの面積(A)と周長(L)

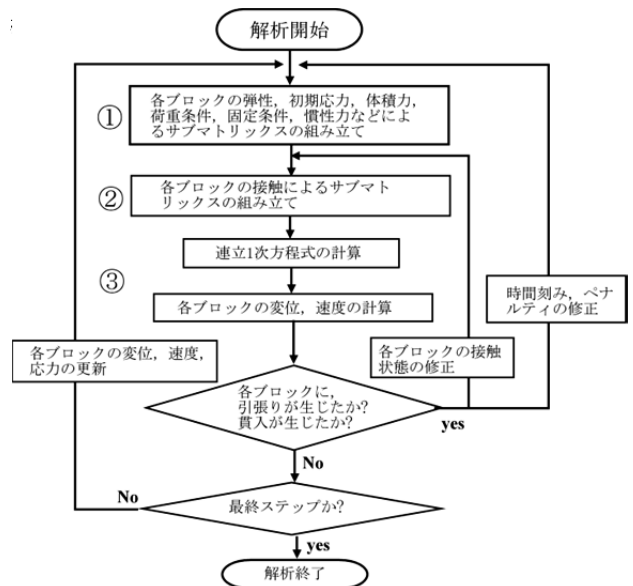


図-1 DDA 解析フローの概要図³⁾

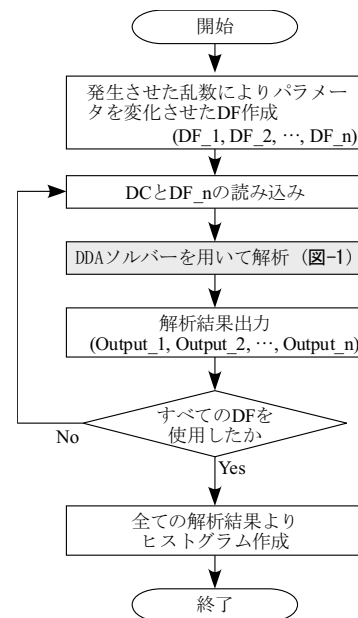


図-2 DDAによるモンテカルロの方法

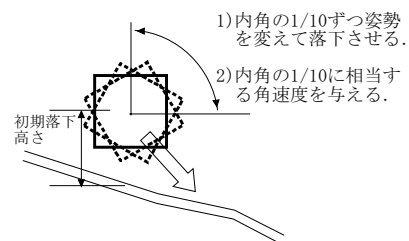


図-3 形状によるばらつきを考慮する方法¹⁾

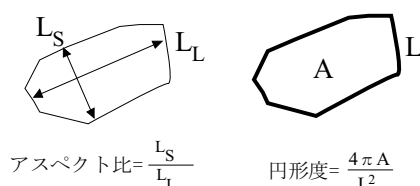


図-4 落石形状に用いる指標³⁾

のとき 1 を示し不定形な形状ほど 0 に近づくが、面積が同じだと長方形と正方形の区別がつきにくい。

$$C_R = 4\pi A / L^2 \quad (3)$$

このように、アスペクト比、円形度ともに一長一短があるが、調査の視点でみると、アスペクト比を除けばいずれも現地での計測は煩雑である。この点から、本論文ではアスペクト比と円形度という、もっとも馴染みのある指標を用いて検討することにした。本論文における試行にあたり、準備した形状とその形状係数を図-5 に示す。

形状	正八角形	正五角形	四角形
面積=1.44m ²			
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=1.44m ²			
アスペクト比	0.85	0.69	
円形度	0.78	0.76	

図-5 例題モデルとその形状指標

3.2 速度比のばらつきへの影響

落石の反発現象に用いられる運動定数には、図-6 に示す速度比(Rv)、法線方向速度比(Rn)、接線方向速度比(Rt)などがある。このうち、DDA では速度比を用いる。なお、速度比、法線方向速度比ともに、法線方向入射速度(Vnin)に依存する性質がある¹⁾⁵⁾。図-7 は、筆者等が行った3箇所の現場実験から得られた速度比と法線方向入射速度との関係を示した図である⁹⁾。図中のデータは、入射角度別に記号を変えてプロットしている。この図から、法線方向入射速度が増加するほど速度比は低下すること、また入射角度が小さくなるほど速度比が低下するといった、速度比の性質が読み取れる。図中の点線で表した曲線は、速度比と法線方向入射速度の関係解析に反映させるために導入した曲線であり、スケールファクター曲線(SF、式(5))と呼ばれ⁴⁾⁵⁾、これをもとに反射速度は式(4)で求められる。このほかにも、指数回帰や、実験結果をもとにした回帰曲線を用いた例が報告されており、いずれも良好な結果が得られている¹⁾。

$$V_{out} = Rv(Scaled) \times SF \times V_{nin} \quad (4)$$

$$SF = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{nin}}{K}\right)^2} \quad (5)$$

ここに、V_{out} は予測反射速度であり、Rv(scaled)は図-7中の曲線の起点の速度比を表す。また、Kは補正速度であり、スケールファクター曲線の傾きを決定する係数である。入力値のばらつきは、この起点速度比に導入し、補正速度については現場での計測結果をもとに確定的に扱うものとした。これにより、例えば起点速度比の平均値を 0.9、標準偏差を 0.1 とする正規分布にしたがうものとする、入力する速度比のばらつきのイメージは、図-8 のようなものとなる。

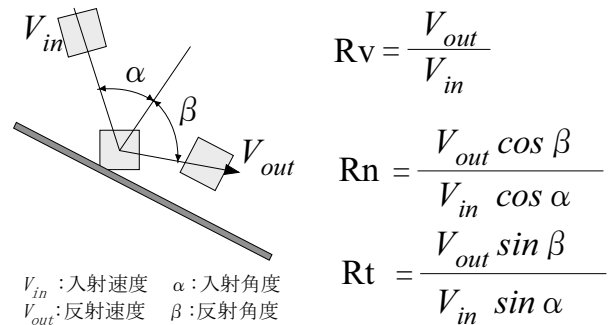


図-6 落石解析に用いる運動定数の種類

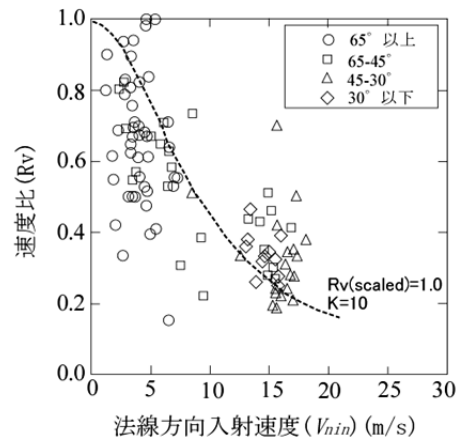


図-7 速度比と法線方向入射速度との関係

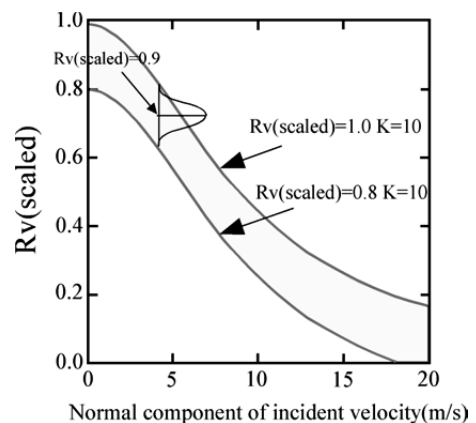


図-8 スケールファクター曲線でばらつきを考慮する方法

4. 落石形状と速度比のばらつきの考慮方法

4.1 落石形状による影響

モンテカルロ解析を試行する現場は、比高約 60m、水平距離約 90m、平均傾斜 33° ほどの採石場の斜面である(図-9)。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。岩塊は、斜面上部から重機によって押し出しており、このため、計測開始区間ですでに速度は 5~6m/s に達している。計測は、10 個の岩塊について行っており、図-9 中に現場実験における岩塊の代表的な軌跡と、計測された速度図を示した⁵⁾。また、図中の c1, c2 は、速度比の計測地点を指す。この斜面で、後述するモデル岩塊の姿勢を変えながら、同時に速度比を確率変数としたモンテカルロ解析を試行する。入力定数は、表-1 に示すとおりである。

なお DDA では落石解析を行う際、落石と地盤はそれぞれ独立したブロックとして扱う。このとき、落石ブロックと地盤ブロックの面積が極端に異なると、接触時に透過、異常反発、あるいは意図しない大きな減衰を生じることがある。これを避けるために、地盤モデルを薄く細長い板状のブロックで作成し、落石ブロックとの面積比を 1:50 以下になるようにモデル化している⁶⁾。

また、タイムステップについても、解の安定性と精度の面からは極力小さい方が望ましい。本検討では、島内ほか⁶⁾にしたがいタイムステップとペナルティバネの感度解析を行って値を決定している。

なお、解析停止の条件は、本現場で観察された岩塊が停止する直前の線速度から 0.5m/s とした。

4.2 岩塊形状に着目したモンテカルロ解析

本論文で作成した DDA の落石解析のためのモンテカルロ解析プログラムを用いて、速度比と落石形状が解析結果に与える影響を調べた。検討は、適用現場の速度分布の傾向とばらつきの範囲をもとに、これを表すスケールファクター曲線を探索し、ついでこの曲線を用いて形状による影響を調べるという手順で行った。

a) 速度のばらつきについて

スケールファクター曲線に与えるばらつきを、起点速度比($Rv(scaled)$)の平均値を 0.9、標準偏差を 0.1 とする正規分布にしたがうものとして解析を行った。このときの起点速度比の分布例を、図-10 に示す。解析結果は、図-11 に示すように、速度はおおよそ 5~20m/s の範囲にあり、値そのものは計測値(10~25m/s)に比べるとやや低めだが、速度の分布範囲としてはほぼ同じとみなせる。

なお、速度分布が実測よりも全体的に低めなのは、本試行解析では初速を 5m/s としたが、計測値には 10m/s を超えるものが多く含まれることによるものと考えられる。このことから、落石解析では、初速もまた確率変数として重要な要素になると考えられる。

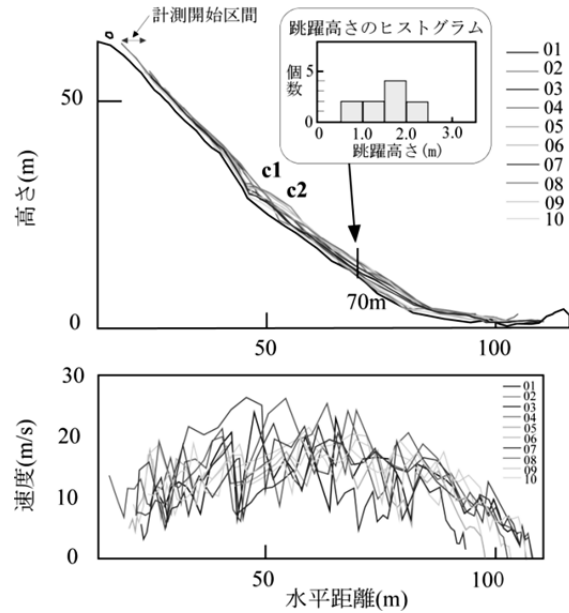


図-9 モンテカルロ解析を適用する現場

表-1 解析に用いた入力値

入力項目	入力値
密度	$2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
摩擦角	10°
許容変位比 ($\Delta t \text{ sec}$)	0.00001 ($1 \times 10^{-5} \text{ sec}$)
ペナルティバネ (Kn)	40000 kN/m
落下開始点での初速度	$v_x = 4.5 \text{ m/s}$ $v_y = -0.5 \text{ m/s}$
$Rv \text{ (scaled)}$	$Rv \text{ (s)} = 0.9 \pm 0.1 \text{ (K=13)}$

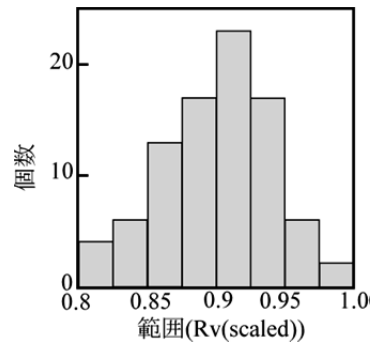


図-10 ヒストグラム

一方、スケールファクター曲線の補正速度(K)の値を $K=7$, $K=10$, $K=13$ としたときの速度分布への影響を、図-9 の水平距離 70m 地点の速度分布と比較して決定した。すなわち、K の値は、 $K=7$ のとき 5~10m/s と低く、 $K=13$ のときで 5~19m/s と、その値が大きくなるほど実際の速度分布形($K=8 \sim 22\text{m/s}$)に近づく傾向を示している。この結果をもとに、本検討では $K=13$ を入力値とした。

b) 軌跡のばらつきについて

用いた落石の形状は、図-5 に示した 5 つのタイプである。なお、実験斜面で計測を行った 10 個の岩塊は、アスペクト比が 0.65~0.8、円形度は 0.8 前後である。これは、

アスペクト比でみると長方形(2)に、また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。形状の影響は、落石対策便覧の方法¹⁾を用いて考慮した。ただし、今回は軌跡の傾向をみるのが目的であるため、各形状の姿勢変化は、正八角形、正五角形、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ずつと、簡略化している。また、計算回数も姿勢毎に20回であり、各形状における総計算回数は60~80回としている。

図-12は、正八角形形状のブロックを落下させたときの跳躍高さの変化を、図中の20m,50m,70m,80m地点で比較したものである。10m地点から落下を開始したブロックは、最初の跳躍地点を過ぎた20m地点では、まだその跳躍高さは0.5~1.5mと狭い範囲にある。しかし飛び跳ねながら50m地点まで達する頃には最大5mに及ぶ跳躍高さのブロックが出現する。しかし、小さな遷急線を飛び越えて下方斜面の70m,80m地点に達すると、跳躍高さは4m以下と低くなる。跳躍高さの分布の推移は、全体を通して1.0~2.0mの範囲に集中しているが、この傾向は図-9に示した実測に近い。

一方、図-12は、各形状の70m地点の跳躍高さの分布を比較したものである。この地点は、図-9に示す跳躍高さのヒストグラムの地点にあたる。この区間では、形状によらず1.0~1.5m間に跳躍高さに集中する。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、すなわちアスペクト比や円形度が低下するほど、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ようになる。当初は、多角形の形状が八角形から長方形へ変化するると跳躍高さのピークも高い方に移動するか、あるいは全体に一様分布するものと考えられた。しかし、図-13の結果からは、岩塊の規模が同じであれば、跳躍高さの1.0~1.5mというピークは変わらずに、形状が正八角形から長方形に近づくほど異常な跳躍が増えるという傾向がみられる。

本結果は解析の途中段階であり、初期ブロックの姿勢変化数も少なく、限られた範囲の解析結果である。しかし、斜面下方の観察では4mを超えるような跳躍が観察されていないことや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、円形度の方が実際に近いということになる。

6. まとめ

落石の挙動には、落石形状や規模、入射角度や入射速度によって変化するエネルギー損失や回転、地形の細かな変化など、多くの条件が複雑に絡む。本論文では、このうち落石形状の影響に着目し、これを解くために不連続変形法(DDA)にモンテカルロシミュレーションを導入するためのサブプログラムを開発した。これにより、速度比の法線方向入射速度依存性を考慮したうえで、複雑な形状を持

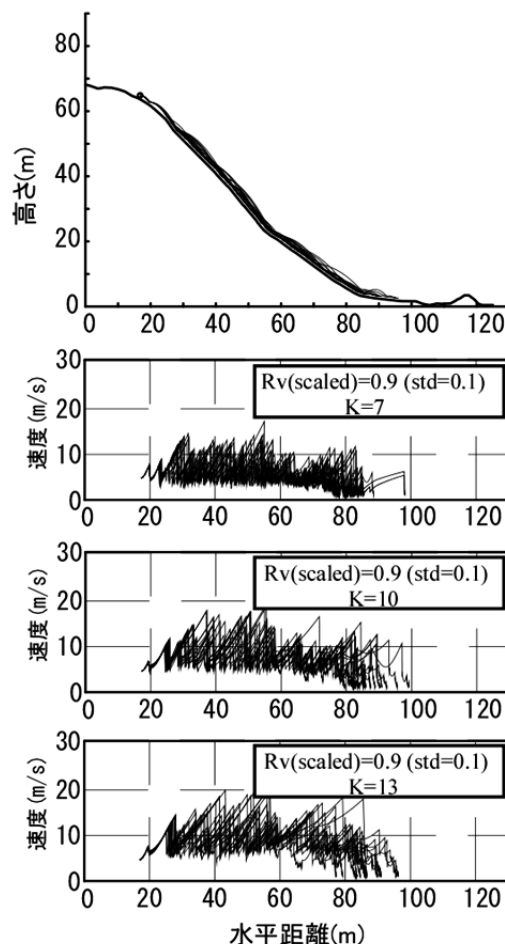


図-11 速度比のばらつきを考慮した解析結果

った落石のモンテカルロシミュレーションが可能となった。

このサブプログラムを用いて、正八角形、正五角形、正方形、および長辺と短辺の比を変えた2つの長方形の、計5種類のモデルの軌跡に与える影響を比較した。その結果、落石形状が円形に近いほど跳躍高さが低く、四角形に近づくほど(アスペクト比、円形度ともに低くなるほど)跳躍高さが高くなること、跳躍高さの分布は全形状を通じてほぼ変わらないが、四角形から長方形へとなるほど高い跳躍が出現する割合が増加する様子が捉えられた。これは、現場実験での観察結果にも近いものといえる。

現段階は途中経過であるため、今後、試行回数を増やすとともに多くの形状について検討を加え、さらには質量や摩擦などのパラメータが結果のばらつきに与える影響についても検討を進めたいと考えている。

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。

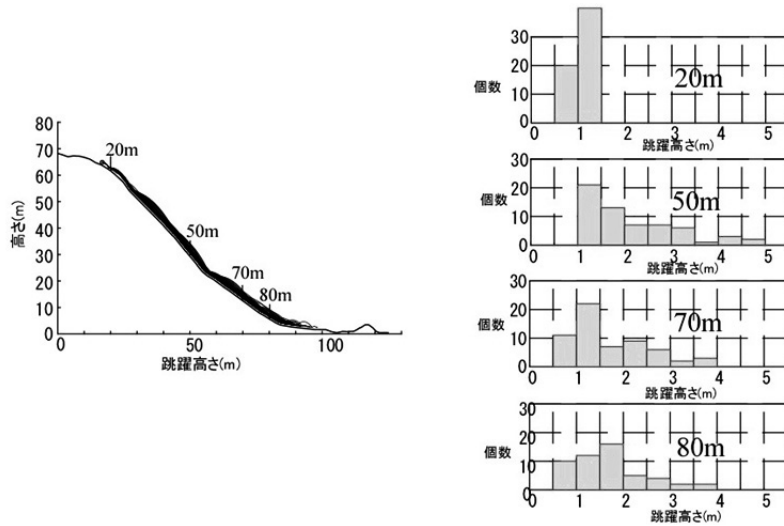


図-12 正八角形の4地点での跳躍高さのヒストグラム

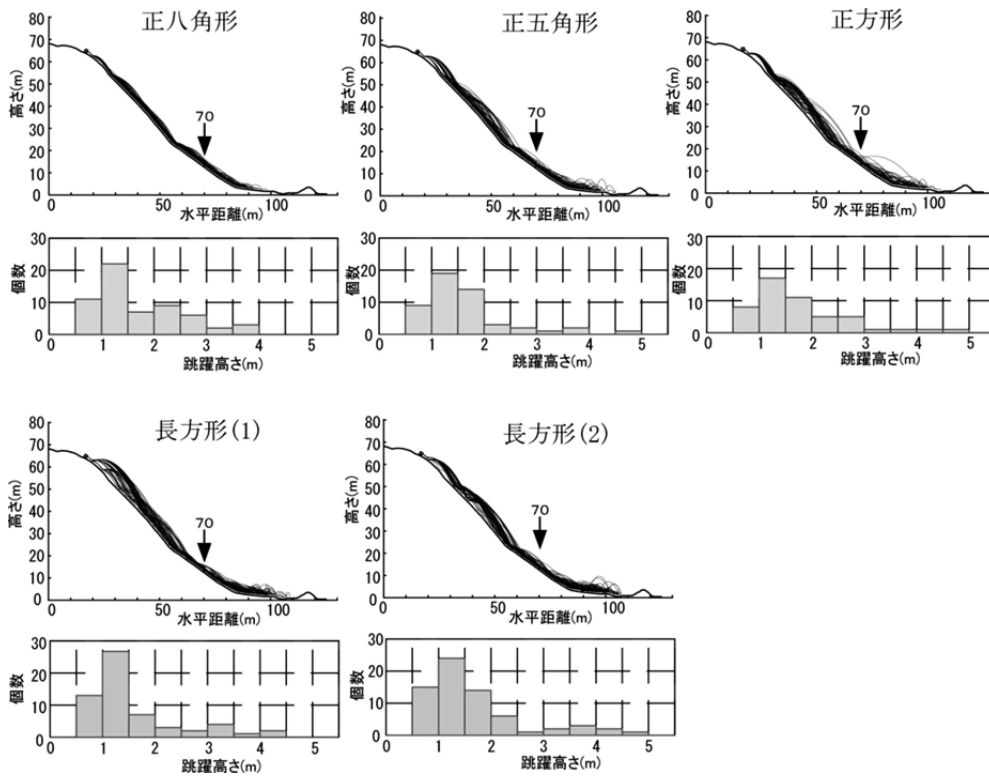


図-13 斜面下部70m地点での跳躍高さのヒストグラム

2) 不連続変形法(DDA), 計算力学レクチャーシリーズ6, 丸善, 2006.

3) 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.

4) 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.

5) 島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 酒井直樹: 衝突

時の特性を考慮した不連続変形法の落石シミュレーションへの適用性の研究, 土木学会論文集 C, Vol.62, No.3, pp707-721, 2006.

6) 島内哲哉, 鄭惟, 中村公一, 佐々木猛, 西山哲, 大西有三: DDAによる落石解析のための解析パラメータ決定法に関する研究, 第40回岩盤力学シンポジウム講演論文集, p.55, 2011.

(2011年6月27日 受付)