

落石防護工設計のための三次元 DDA の活用

北内宏明・西山哲

岡山大学大学院環境生命科学研究科

1. はじめに

落石対策において、落石防護工(図1)を設計する際には、落石を捕捉するための落石の挙動(エネルギーや跳躍量等)の予測が重要となる¹⁾。しかし、落石の挙動は斜面のさまざまな条件によって複雑に変化するため、その予測が困難な現象である。そこで近年では多くの高度な数値解析手法(落石シミュレーション)が開発され、複雑な落下経路を予測することが可能となっている。

落石シミュレーションの手法は、落石を質点や単純な剛体としてモデル化し落石挙動を解析する質点系解析法と、落石を多角形ブロックとしてモデル化し解析する非質点系解析法に大別される。

前者は落石の形状や斜面の状態等を係数で表し、確率論的に落石挙動を予測する。対して後者は落石の形状が多角形であるため、解析時に落石と斜面の接触部で発生するモーメントや回転を考慮した落石挙動を予測する²⁾。非質点系解析法の代表的な手法として、不連続変形法(Discontinuous Deformation Analysis, 以下 DDA と称する)がある。DDA の特徴として、解析対象全体にエネルギー保存則並びに解の唯一性・収束性が保障されている。DDA においては、衝突時のエネルギーの減衰を表すパラメータである速度エネルギー比や落石の形状がブロック衝突時の落石挙動に大きな影響を与える。しかし、これらのパラメータが落石挙動に与える影響は十分に把握されておらず、現状において DDA シミュレーションの運用方法は定まっていない。そのため本研究では三次元の DDA 落石シミュレーションに着目し、落石の形状や速度エネルギー比を変化させて複数回シミュレーションを行うことで各パラメータが落石挙動に与える影響を定量的に把握した。そして、その結果に基づき落石防護工の設計のための三次元 DDA 落石シミュレーションの運用方法を検討した。

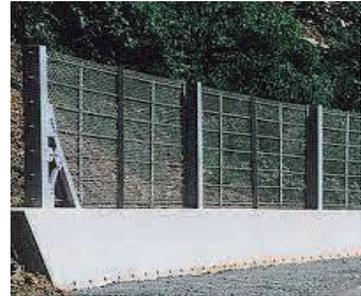


図1 落石防護工(落石防護柵)

2. 解析概要

2.1 解析現場概要

本研究は、岡山県御津草生地区の国道53号沿いの斜面を対象に解析を実施した。この斜面は、航空レーザ測量による三次元の点群データの取得を実施しており、樹木の形状やノイズ等の計測データを除去することで、地形データを抽出している。本研究ではこの地形データを使用し、1mメッシュのラスタデータから解析斜面をモデル化した(図2)。次に、本研究で解析の対象とした落石危険石とその分布位置を図3、4に示す。対象の危険石は谷付近に位置しており、落下時には谷方向へ流れることが想定される。危険石の落石経路の

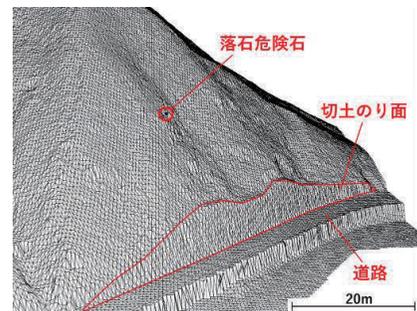


図2 解析斜面



図3 落石危険石

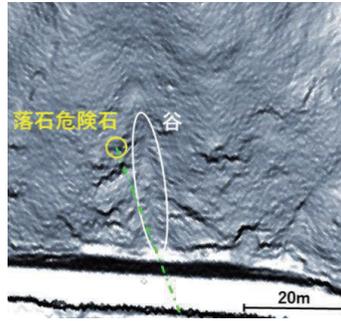


図4 現場傾斜量図

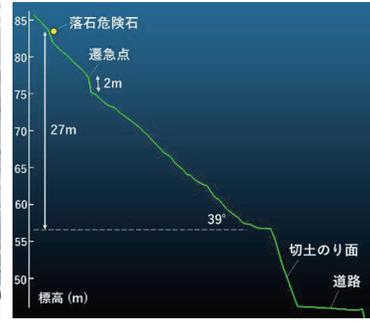
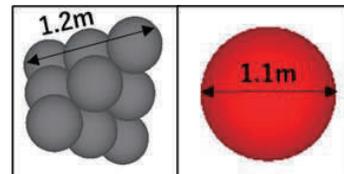


図5 地形断面図

地形を把握するため、図4破線上の地形断面図を図5に示す。図5より現場の切土のり面は高く急勾配であるため側道に落石防護工は設置できず、落石防護工は斜面の中腹部～末端部（切土のり面上端部）上に設計する必要がある。落石開始位置から斜面末端部までの落下高さ（鉛直方向の落下距離）は約27mであり、斜面勾配は約39°である。標高77mの位置には遷急点があり、この位置では転がりやすべり運動をしている落石が飛び出し、跳躍することが予想される。現場斜面の凹凸は一辺が数十cm程の規模が中心であり、他の現場の斜面と比較すると小～中程度の凹凸度合いである。

2.2 解析に用いるパラメータと解析方法

図6に解析に用いる落石形状を示す。落石形状は図3の現場の実形状と球体の2種類を使用し、落石形状が落石挙動に与える影響を比較した。実形状の落石については球の集合体として正四面体状に球を配列しモデル化した。また、落石の重量はどちらも17kNとし、規模を等しくした。次に、本研究の解析で設定した物性パラメータの値を表1に示す。DDAでは接触時のエネルギー減衰効果に関して速度エネルギー比 γ が導入され解析に組み込まれている。

図6 解析に用いる落石形状
(左：球体、右：実形状)

$$\gamma = V_{out}^2 / V_{in}^2 \quad (1)$$

ここで、 V_{out} ：接触後速度、 V_{in} ：接触前速度である。実際の落石の速度エネルギー比の値について、右城らは既往の落石実験結果から再分析を行い、土砂斜面では 0.71 ± 0.19 、岩盤斜面では 0.66 ± 0.23 であると報告している³⁾。本研究の解析現場の斜面は、岩盤斜面であるが、表層が風化により土砂化しているため、解析では土砂斜面として速度エネルギー比の値を0.5～0.9で設定した。また落石は複雑で正確な予測が困難な現象であるため、シミュレーションでは範囲的に落石挙動を予測することが重要である¹⁾³⁾。そのため、本研究では、速度エネルギー比の値を一様乱数により変化させ、落石挙動を範囲的に予測した。本研究の解析方法は、速度エネルギー比が落石挙動に与える影響を比較するため、速度エネルギー比の値を0.5～0.6、0.6～0.7、0.7～0.8、0.8～0.9の4つのパターンで各100回解析し、2つの形状を使用するため計800回の解析を行った。

表1 解析の入力条件

摩擦角 [°]	35	時間刻み [s]	1.0×10^{-4}	速度エネルギー比	0.5 - 0.9
粘着力 [Pa]	0	ペナルティバネ係数 [N/m]	1.0×10^8		

3. 解析結果と考察

3.1 落石の速度について

落石防護工の設計では、防護工の耐久性能を決定するために落石の速度（運動エネルギー）の値が必要である。そのため、落石の標高ごとの速度について、解析結果を図7に示す。図7より、落石の速度は落下高さが大きくなるにつれて増加している。速度エネルギー比 0.8-0.9 においては、球体の速度は最大約 22m/s、実形状の速度は最大約 20m/s であり、速度エネルギー比 0.8-0.9 では、球体より実形状の方が最大速度が小さい。これは他の速度エネルギー比においても同じであり、球体より実形状落石の速度の方が速度エネルギー比の影響を大きく受け、値が小さくなることを確認できる。

衝突時に速度エネルギー比が速度に与える影響を確認するため、速度エネルギー比の値を 0.7 に設定した際の、落石の標高ごとの速度を図8に示す。図8において、速度が減少方向（左向き）に移動しているのは、落石が斜面に衝突したことを意味している。速度エネルギー比 0.7 において、球体の衝突回数は 13 回、実形状の衝突回数は 23 回であり、衝突回数は実形状の方が多し。また、各衝突において計測した速度エネルギー比は、球体は平均 0.686、標準偏差 0.037、実形状は 0.634、標準偏差 0.143 となり、実形状の方が平均は 0.05 小さく、標準偏差は 0.1 大きい。この結果から、実形状は球体よりも衝突回数が多く、かつ衝突時のエネルギー減衰量も大きい。また、速度エネルギー比の標準偏差が球体よりも大きくなったのは、実形状は多角形であるため衝突が球体よりも多様化したことが原因であると考えられる。

3.2 落石の跳躍高について

落石防護工の設計には、防護工の高さを決定するために落石の跳躍高（落石の重心と斜面の鉛直方向の距離）の値が必要である。そのため、落石の標高ごとの跳躍高について、解析結果を図9に示す。図9では、先述した斜面の遷急点を超えた位置（斜面標高 77m 付近）において、跳躍が生じていることが確認できる。速度エネルギー比 0.8-0.9 においては、球体の跳躍高は最大約 12m、実形状の跳躍高は最大約 6.5m であり、速度エネルギー比 0.8-0.9 では、球体より実形状の方が最大跳躍高が小さい。これは他の速度エネルギー比においても同じであり、最大跳躍高は球体より実形状落石の方が低くなる。これは、球体は実形状より

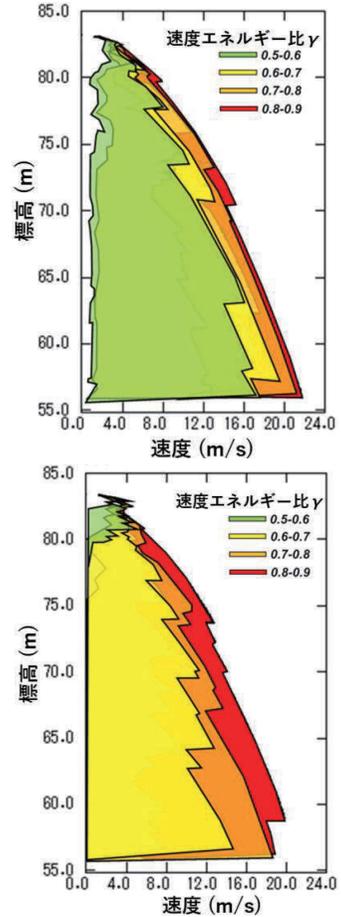


図7 落石の標高と速度
(上：球体，下：実形状)

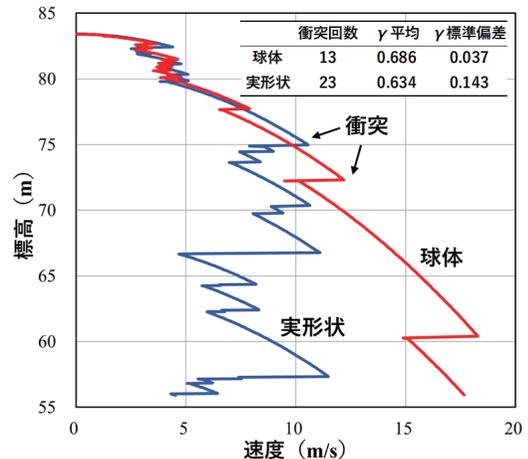


図8 落石の標高と速度
(速度エネルギー比 γ : 0.7)

も速度が速いため、落石の運動形態が滑り・転がり運動から跳躍運動に変遷しやすいこと、また斜面と衝突した際により大きな跳躍を生じやすいことが原因であると考えられる。勘田等は、斜面の凹凸が大きく、落石の落下高さが大きい場合には、跳躍量が最大 4～5m に達することを報告している³⁾。斜面の凹凸が小～中程度であり、落石の落下高さが 27m と比較的小さい本研究の斜面においては、落石の跳躍高さは 5m 未満となることが予想される。これを踏まえると、球体の解析結果ではすべての速度エネルギー比において 5m を超える跳躍高がみられ、球体においては跳躍高が実際の値よりも過大に評価されることが考えられる。対して実形状落石では、速度エネルギー比 0.8 以下において跳躍高はすべて 5m 未満であり、過去の知見と合致した結果となっている。そのため、落石防護工の高さの設計を行う際には、落石形状をモデル化することで球体よりも精度の高い落石挙動の予測を行うことができ、より経済的・合理的な落石防護工の設計を行うことができると考えられる。また、解析時の速度エネルギー比については、実形状落石は速度エネルギー比 0.5-0.6 において斜面の中腹部で落石が停止しているため、速度エネルギー比 0.6-0.8 の範囲を使用することで、過去の知見と合致する落石挙動の予測が可能であると考えられる。図 7 より実形状落石の速度エネルギー比の標準偏差は 0.143 であるために、解析時に速度エネルギー比 0.6-0.8 を使用することで、解析で計測される速度エネルギー比は、既往の土砂斜面の落石実験の結果 (0.71 ± 0.19) に近い値となることが考えられる。

4. まとめ

本研究では、落石防護工を設計する際の三次元 DDA 落石シミュレーションの運用方法の検討を行うことを目的に、パラメータの速度エネルギー比や落石形状を変化させた解析を行った。その結果は、球体落石より実形状落石の方が速度エネルギー比の影響を大きく受け、落石の速度や跳躍高が小さくなることがわかった。過去の知見を踏まえると、三次元 DDA の球体の跳躍高は実際の値よりも過大に評価される可能性があり、実現場の落石形状を再現し、速度エネルギー比は既往の落石実験結果に沿った値 (0.6-0.8) を使用することで、過去の知見と合致した落石挙動となった。そのため、この結果を用いることで、経済的・合理的な落石防護工の設計を行うことができると考えられる。今後は、他の現場でも解析を行い、本研究結果の適用性を検証する。

参考文献

- 1) 萩原育夫, 三木茂, 佐々木猛, 西山哲, 大西有三: 不連続変形法による 3 次元落石解析事例, 2004
- 2) 日本道路協会: 落石対策便覧に関する参考資料, 2002
- 3) 右城猛, 吉田博, 矢野光明, 高石協, 八木則男: 斜面を落下する落石の運動定数と跳躍量に関する考察, 土木学会論文集 No. 581, p. 54, 1997
- 4) 勘田益男, 西川幸成, 中村幸太郎: 落石対策工の設計法, p. 4, 2019

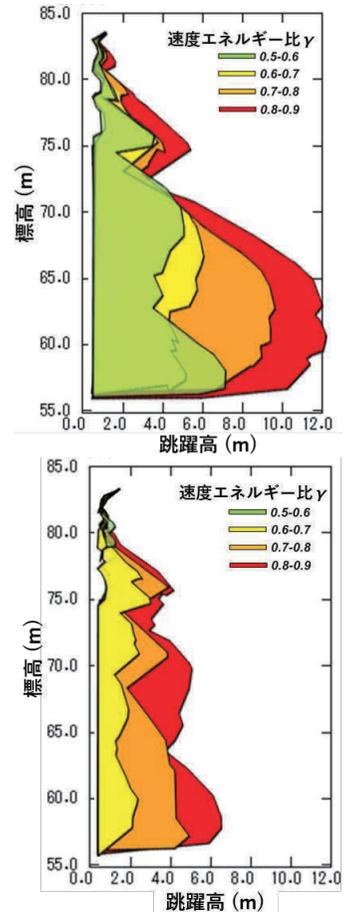


図 9 落石の標高と跳躍高
(上: 球体, 下: 実形状)