

三次元非質点系落石シミュレーションの運用方法の検討

岡山大学大学院 学生会員 ○北内 宏明
 岡山大学大学院 正会員 西山 哲
 明治コンサルタント株式会社 正会員 島内 哲哉

1. はじめに

落石対策において、落石防護工を設計する際には、落石を捕捉するための落石挙動（エネルギーや跳躍量等）の予測が重要となる。落石挙動を予測する際には、落石シミュレーションを用いることで複雑な落下運動を予測することが可能である。落石シミュレーションは、落石を質点として解析する質点系解析法と、落石を多角形ブロックとして解析する非質点系解析法に大別される。ここで、非質点系解析法は落石が形状を有するため落石の斜面衝突時のモーメントや回転を考慮した落石挙動の予測が可能である。また、近年においては三次元で解析を実施することができ、これによって落石の経路の予測が可能となっている。非質点系解析法は、手法の一つに DDA (Discontinuous Deformation Analysis：不連続変形法) がある。DDA は、特徴として、ポテンシャルエネルギー最小化原理を用いて定式化を行うため、解析全体にエネルギー保存則が保障される。DDA においては落石を任意の形状で表すため、設定した落石形状や落石の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が落石挙動に大きな影響を与える。しかし、これらが落石挙動に与える影響は十分に把握されておらず、現状においては DDA 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 に着目し、落石形状や速度エネルギー比を変化させてシミュレーションを行うことで両者が落石挙動に与える影響を把握した。そして、その結果

より三次元 DDA の運用方法の検討を行った。

2. 解析概要

本研究の落石シミュレーションは、岡山県御津草生地 区国道 53 号沿いの斜面を対象に実施した。図 1 に解析で使用した斜面と落石のモデルを示す。解析斜面は、航空レーザ測量により取得した 1m メッシュのラスタデータを使用しモデル化を行った。解析斜面は平均勾配が約 39° であり、起伏は数十 cm 程のものが中心である。落石は、図 1 の現場の危険石を対象に解析を行った。危険石から切土のり面上端までの鉛直距離は約 27m である。解析時には、現場の実形状をモデル化したものと単球の 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。次に、解析時の物性パラメータの入力値を表 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。

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

ここで、 V_{out} ：接触後速度、 V_{in} ：接触前速度である。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 であると報告している¹⁾。そのため、本研究では速度エネルギー比の値は 0.60-0.65, 0.65-0.70, 0.70-0.75, 0.75-0.80 の 4 つの範囲を使用し、各範囲の中で値を一樣乱数により変化させ、各 100 回の解析を行い速度エネルギー比が落石挙動に与える影響を比較した。

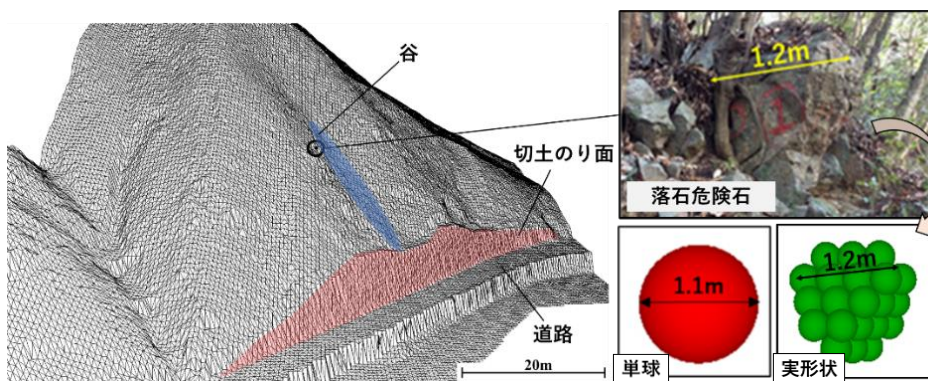


図 1 解析モデル

落石重量[kN]	17
摩擦角[°]	35
粘着力[Pa]	0
時間刻み[s]	1.0 × 10 ⁻⁴
ペネルティバネ[N/m]	1.0 × 10 ⁸
速度エネルギー比	0.6 - 0.8

キーワード 非質点系落石シミュレーション, DDA, 三次元, 落石形状, 速度エネルギー比

連絡先 〒700-8530 岡山市北区津島中 3-1-1 環境理工棟 TEL080-2973-5525

3. 解析結果

3.1 落石の速度について

各落石形状，速度エネルギー比の 100 回のシミュレーションにおける落石速度の範囲を図 2 に示す。また，実際の落石挙動との比較を行うため，本研究の斜面と勾配や凹凸度合いが近い条件である広島の実験（1991 年実施）²⁾において計測された落石速度の上限値を破線で示す。図 2 より，すべての落石形状・速度エネルギー比において，標高 80m 以下では，本研究の速度は広島の実験結果の上限値より低い値であった。また，単球ではすべての速度エネルギー比において広島の実験結果の上限値との速度差は 4m/s 以内であったが，実形状は速度エネルギー比 0.60-0.65 において広島の実験結果の上限値との速度差は斜面末端部で 10m/s 以上あり，単球よりも実形状の方が速度エネルギー比の影響を大きく受け，速度は小さくなることわかった。

3.2 落石の跳躍高について

各落石形状，速度エネルギー比の 100 回のシミュレーションにおける落石の跳躍量（落石の重心と斜面の斜面垂直方向の距離）の範囲を図 3 に示す。また，速度と同様に，広島の実験において計測された落石の跳躍量の上限値を破線で示す。図 3 より，単球ではすべての速度エネルギー比において跳躍量の最大値は 4m を超えており，広島の実験結果の上限値（2.8m）よりも大きい値であった。それに対し，実形状では速度エネルギー比 0.60-0.65 において跳躍量の最大値は約 2m であり，落石実験の結果の上限値よりも小さい値であった。また，実形状はすべての速度エネルギー比において跳躍量は 4m 以下であり，単球よりも実形状の方が跳躍量は小さいことがわかった。

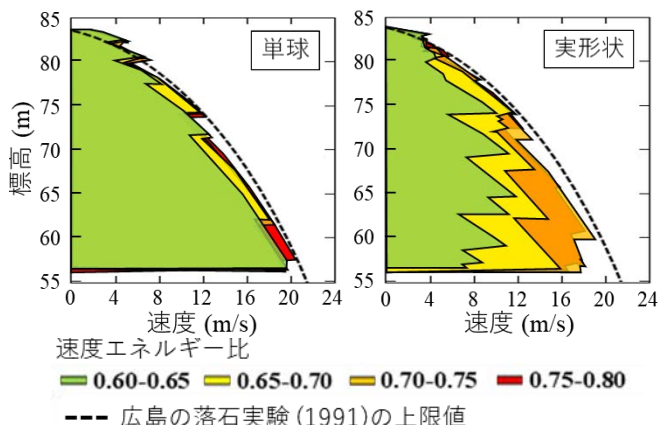


図 2 落石の速度の範囲

4. 三次元 DDA の運用方法の考察

解析結果より，三次元 DDA においては，実形状落石を用いることで単球よりも予測される速度や跳躍量の値が小さくなることわかった。これによって想定される落石のエネルギーや跳躍量は小さくなり，落石防護工はエネルギー吸収性能や柵高の低い，より経済的なものを設計することが可能であると考えられる。また，設定する速度エネルギー比については，実形状の速度エネルギー比 0.60-0.70 においては広島の実験結果の上限値よりも速度は 12m/s，跳躍量は 1m 以上小さい位置があり，想定されるエネルギーや跳躍量を過小に予測する可能性が考えられる。そのため，設定する速度エネルギー比については 0.70 より大きい値を使用する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では，三次元 DDA 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が落石挙動に与える影響の把握を行った。その結果，落石形状による影響については，単球よりも実形状のほうが速度，跳躍量は小さい値となり，実形状を使用することで経済的な落石防護工の設計を実施することができたことがわかった。また，速度エネルギー比による影響については，速度エネルギー比 0.70 以下の値を使用すると落石挙動を過小に評価する可能性が考えられたため，安全側で落石防護工を設計するためには速度エネルギー比 0.70 以上の値を使用することが望ましいことがわかった。

参考文献

- 1) 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, p54, 1997
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧に関する参考資料，p120

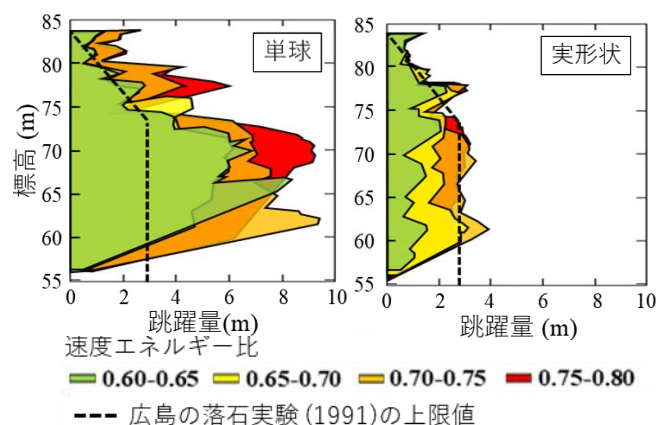


図 3 落石の跳躍量の範囲