

衝突時係数の入射速度，角度による依存性を考慮した 不連続変形法 (DDA) による落石シミュレーション

○明治コンサルタント(株) 正会員 島内哲哉
京都大学大学院工学研究科 正会員 大西有三
京都大学大学院工学研究科 正会員 西山 哲
明治コンサルタント(株) 正会員 酒井直樹

1. はじめに

落石シミュレーションでは，落石や崩壊後の岩塊の挙動の評価のために，さまざまなパラメータが用いられる．このうち，衝突時のパラメータである法線方向速度比(Rn)には，速度に関する依存性があること，これを考慮することでシミュレーションの再現性が大きく改善されることが，これまでの多くの研究で指摘されている¹⁾．本研究は，現場観察を通じて，衝突時パラメータ特性の再検討を行い，速度エネルギー比(Ev)に関する同様の性質を明らかにするとともに，不連続変形法(DDA)による落石シミュレーションの実用精度向上を目的としている．

2. 現場観察結果から得られた，法線方向速度比(Rn)と速度エネルギー比(Ev)の特徴

観察を行った，(b)(d)現場と(c)現場の断面図を示す(図.1)．図中の，b1,b2などの記号は，計測した主要な反発地点を指す．観察結果から，法線および接線方向速度比(Rn,Rt)，速度エネルギー比(Ev)の，3 つについて求めた(図.2)²⁾．結果は，入射角度の小さいグループ(b1,d1)と，入射角度の大きいグループ(b2,d2,c1,c2)の2つに区分して表した．

図.3 は，得られた Rn と Ev を，入射角度，法線方向入射速度と対比した図である．入射角度の小さいグループを●記号で，入射角度が大きいグループを○記号で示している．本図から，Rn と Ev にはともに，入射角度や法線方向入射速度に依存する傾向のあることがわかる．このような依存性は，シミュレーション時には，軌跡や速度に与える影響が大きいため，この性質を直接，間接に解析で考慮する工夫が，多くの質点解析では行われている¹⁾．

3. 法線方向速度比(Rn)と速度エネルギー比(Ev)の法線方向速度依存性について

Pfeiffer 等(1989)は，法線方向速度比(Rn)に対する依存性を，式(1)中のスケールファクター(SF)で表現している³⁾．

$$Rn(scaled) = Rn \times SF \quad (1)$$

ここに，Rn:法線方向速度比

SF:スケールファクター

ただし， $SF = 1 / (1 + (Vnin/K)^2)$

Vnin:入射法線方向速度(m/s)

K=9.144m/s(ここでは，10m/sとした)

$$Vnout = Rn(scaled) \times Vnin \quad (2)$$

式(1)は，法線方向入射速度の増加に伴う Rn の減衰率を表したものであり，図.4 は，Rn=1 の時の SF 曲線を示したものである．スケールファクターを用いて，反射法線方向速度は式(2)で求められるが，Pfeiffer 等は，背景となるデータを公表していない．そこで，(b)(d)(c)現場のデータを用いて，式(2)による予測値と，実際の計測結果とを対比した(図.5)．本図から，式(2)は，○記号で示した入射角度が 60～90° の範囲において，特に有効であることがわかる．

一方，不連続変形法(DDA)では，衝突時パラメータに速度エネルギー比(Ev)を用いる．Ev の性質が Rn と類似していることは，図.3 から明らかである．しかし，Rn と Ev には直接的な相関はみられない．

ところで，図.2 に示したように，DDA で用いる速度エネルギー比(Ev)は，速度エネルギーの線速度成分である．したがって，反射速度は，Ev を用いて式(3)で求められる．これに対し，式(2)は，速度比の法線成分に着目したもので，スケールファクターは，入射時の速度と角度に対する補正項と

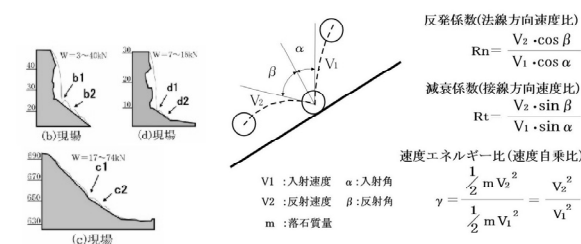


図.1 観察現場の代表地形 図.2 衝突地点で計測した項目

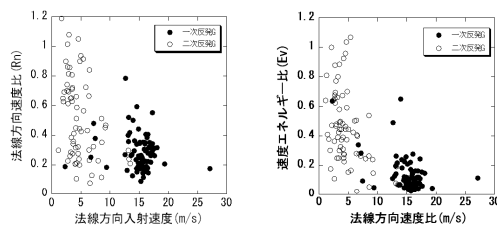


図.3 法線方向速度比(Rn)と速度エネルギー比(Ev)の法線方向入射速度との関係

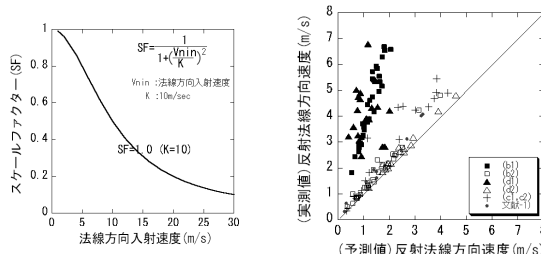


図.4 スケールファクター 図.5 反射法線方向速度の予測値と実測値の比較

キーワード: 落石，速度依存，DDA

連絡先: 〒333-0801 埼玉県川口市東川口 1-22-4 明治コンサルタント(株)東川口分室, E-Mail: shimauch-t@meicon.co.jp

しての役割を持つ。したがって、式(3)は、式(4)のように表すことも可能である。式(4)を基に、予測反射速度を求め、実測値と対比したのが図.6である。一次反発、二次反発のグループともに、図.5とほとんど同じ分布を示す。このことから、スケールファクターは、速度エネルギー比(速度比)の角度と速度に対する補正項としても有効であることがわかる。

$$V_{out} = \sqrt{E_v} \times V_{in} \quad (3)$$

$$V_{out} = \sqrt{E_v} \times SF \times V_{in} \quad (4)$$

ここに、 V_{out} : 反射速度
 V_{in} : 入射速度
 $SF = 1 / (1 + (V_{in}/K)^2)$

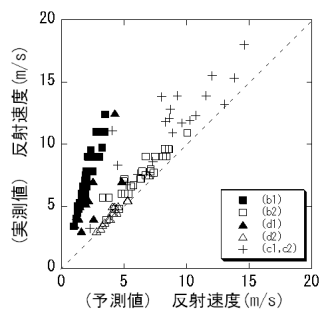


図.6 反射速度の実測値と予測値の比較

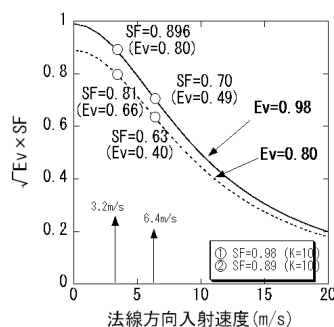


図.7 スケールファクターによるEv値の決定

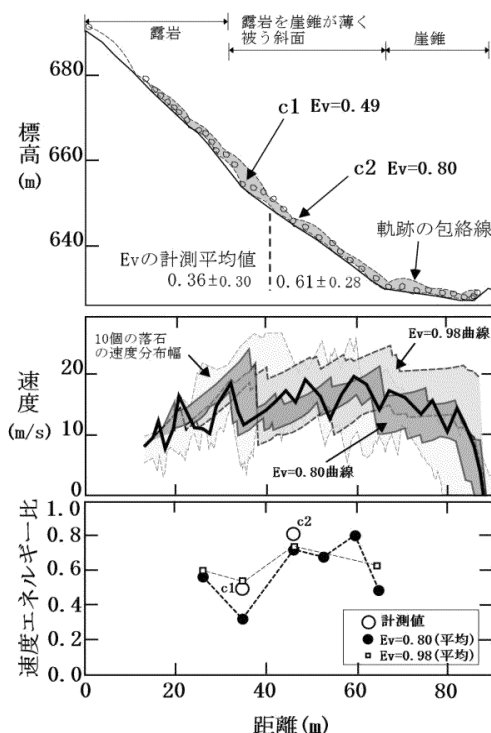


図.8 (c)現場における、DDAによる再現解析

ただし、入射時の角度が小さく速度の速い一次反発グループ(入射角度 60° 以下)に対する有効性は低い。

4. 速度エネルギー比の法線方向速度依存性を適用した不連続変形法(DDA)による再現解析

(c)現場の斜面は、水平距離約 90m、比高差約 60m、平均傾斜が約 33° である。上部が露岩(安山岩)、中央付近では薄い崖壁が被覆しており、末端はほぼ水平である。この斜面を、 ϕ 1m ほど(約 1.2t)の塊状の岩塊が、低く飛び跳ねるように落下する。この観察結果を例題として、 E_v の法線方向速度依存効果を確認するための再現解析を行った。入力値は本来、斜面の性状毎に変えるべきであるが、ここでは一つの値で代表させている。速度エネルギー比は、計測値である c1,c2 の値に直接スケールファクター(SF)を当てはめて $E_v=0.98$ とする場合と、計測最大値である $E_v=0.8$ をそのまま使用する、2つのケースについて行っている。この時の、SF曲線が図.7であり、縦軸は速度比×SFとしている。

式(4)を組み込んだ DDA による(c)現場の再現解析結果を、図.8に示す。ここではスケールファクターの効果を見るために、落石形状の初期姿勢による、軌跡と速度の変化幅を、そのまま範囲で示した。落石形状は、観察した落石と面積等価な 20 角形としている。また、図.8 の最下段には、解析結果における主要な反発点から求めた、 E_v 値の平均をプロットした。解析条件を下表に示す。

表.1 解析条件

落石密度	26kN/m ³
弾性係数	10 ⁹ N/m ²
ポアソン比	0.2
摩擦角	30°
ペナルティ係数	10 ⁷ N/m

解析された軌跡の包絡線は、全体に実測より落石径一つ分高いが、 $E_v=0.98$ が $E_v=0.80$ をやや上回る。また、速度は、 $E_v=0.98$ では最大最小の幅が大きいが、総じて速い場合が多く、平坦地に達しても速度は低下しない。これに対し、 $E_v=0.80$ では、SFにより上限を 0.8 に抑制されるため、速度の分布範囲が狭く、反発も小刻みである。速度エネルギー比は、 $E_v=0.98$ の方が c1,c2 の値に近いが、平坦地に達しても下らない。これに対し、 $E_v=0.80$ の結果は、速度エネルギー比の小刻みな分布状況や、平坦地に達した時の大きな減衰の様子から、法線方向入射角度による依存効果が明瞭で、結果もより実際に近い挙動となった。

5. まとめ

現場観察結果を基に、法線方向速度比(R)の法線方向速度による依存性を、Pfeiffer 等の方法を適用して明らかにした。また、この方法が速度エネルギー比にも適用可能であることを示した。スケールファクターを考慮した DDA による再現解析結果は、良好であった。しかし、その効果を引き出すためには、その斜面における、適切な速度エネルギー比を設定することが重要である。

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) 島内哲哉, 酒井直樹, 大西有三:衝突角度の違いが落石解析結果に与える影響, 第 33 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, p337-342,2004, 3) Pfeiffer,T.J.,Bowen,T.D: Computer Simulation of Rockfalls;Bulletin of the Association of Engineering Geologists Vol.X XVI ,No.1,1989,pp135-146,