

速度依存性を考慮した DDA による 落石シミュレーション

島内哲哉¹・大西有三²・西山哲³・酒井直樹⁴・中村公一⁵

¹正会員 明治コンサルタント株式会社 技術統括部 (〒160-0004 埼玉県川口市東川口 2-1-1)

E-mail: shimauchi-t@meicon.co.jp

²正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

⁴正会員 (独) 土木研究所 土砂管理研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-16)

⁵正会員 長岡技術科学大学大学院 建設系 (〒940-2181 長岡市上富岡町 1603-1)

落石シミュレーションでは、衝突現象のための入力係数として、斜面の物性を考慮した速度比や速度エネルギー比が用いられる。しかし、その一方で、これらの係数は入射時の速度や角度によっても大きく変化することが知られている。衝突時係数のこのような性質は、“速度依存性”と呼ばれており、その考慮の有無は解析結果の再現性に大きく影響することが指摘されている。

本論文では、不連続変形法(DDA)を用いた落石シミュレーションに、Pfeiffer(1989)等が速度依存性を考慮するために提案したスケールファクターを適用し、現場観察実験の再現実験を通じてその効果を確認した結果を示す。

Key Words : rockfall, simulation, DDA, velocity of energy, velocity dependence

1. はじめに

落石の挙動は、斜面の傾斜や構成材質、落石の形状や規模などさまざまな条件によって複雑に変化する。このため、挙動の再現や予測が最も難しい現象の一つといえる。落石の運動は一般に落下、衝突、回転、滑りの組み合わせで表現されるが、このうち落石挙動に最も大きな影響を及ぼすのが衝突である。落石シミュレーションでは、この衝突時の挙動を表現するための入力値に、速度比や速度エネルギー比が用いられる。

ところで、速度比のうち法線方向の速度比(R_n)には、

法線方向入射速度が大きいほどその値が大きくなるという性質がある。この性質は、“速度依存性”と呼ばれ、その考慮の有無はシミュレーションの結果に大きく影響することが指摘されている¹⁾。

一方、不連続変形法(DDA)では、衝突時のエネルギー損失を速度エネルギー比で表す。本論文では、速度エネルギー比にも法線方向速度比同様の速度依存性があることを現場実験において確認した結果と、それを考慮した場合の再現効果について報告する。

2. 速度依存性について

図-1および式(1)~(3)は、シミュレーションで用いられる代表的な衝突時の係数である。このうち、法線方向の速度比には、入射速度の法線方向成分が大きいほど値が小さくなる性質が知られている^{1),2,3)}。また、速度エネルギー比にも、同様の性質があることが指摘されている^{1),9)}。

図-2は、文献¹⁾で公表されている既往実験結果(蘭原の事例A(日本道路公団, 1973)を基に、法線方向速度比と速度エネルギー比を求め、その推移を断面図とともに表したものである。図から、法線方向速度比や速度エネルギー比は、斜面における一定の定数ではなく、衝突時の

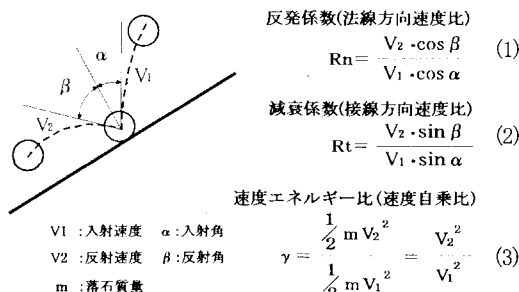


図-1 入反射角度と速度の定義

速度や入射角度によって場所毎に変化する係数であることがわかる。

一方、このような衝突時の特性をシミュレーション中で考慮するために、古賀²⁾や榎谷等³⁾はころがり摩擦係数を提案し、右城等⁴⁾は地盤の荷重-変位関係を基に衝突地盤での落石のめり込みや滑りを直接考慮する方法を提案している。また、Pfeiffer等⁶⁾は、式(4)に示すスケールファクター(SF)を導入して法線方向反射速度を式(5)によって求める方法を提案している。

$$Rn(scaled) = Rn \times SF \quad (4)$$

ここに、Rn：法線方向速度比

SF：スケールファクター

$$SF = 1 / (1 + (V_{nin}/k)^2)$$

Vnin：入射法線方向速度(m/s)

K：9.144m/s

$$V_{nout} = Rn(scaled) \times V_{nin} \quad (5)$$

ここに、Vnout：反射法線方向速度(m/s)

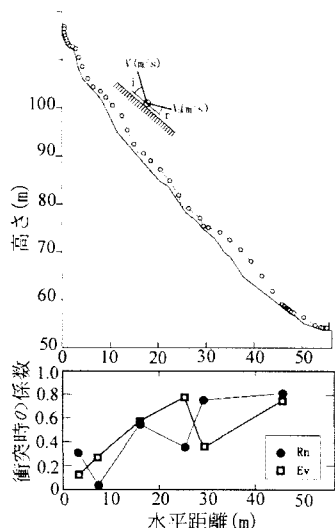


図-2 既往実験斜面における Rn, Ev の変動

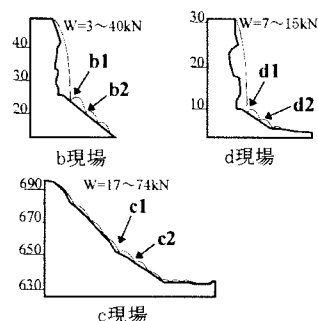


図-3 実験観察を行った現場の代表断面

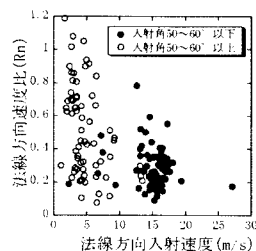


図-4 法線方向入射速度と Rn との関係

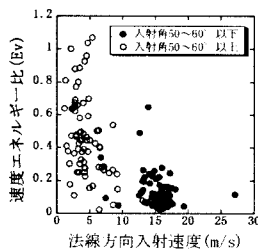


図-5 法線方向入射速度と Ev との関係

3. 現場実験にみる速度依存性の効果

筆者等は、これまで採石場や危険岩塊除去現場を利用して、5箇所の現場で落下する岩塊の挙動観察実験を行っている^{7,8,9)}。本論文では、このうち落下地点の地盤が、いずれも小岩塊が折り重なるように堆積している点で似た状況にある、b,c,d現場の結果を基に衝突時係数の特性を調べた。

図-3は、b,c,d現場の断面図であり図中の添え字付き記号は、データを取得した地点を示す。観察は、同じ岩塊が入射角度や速度の違いによってどのように変化するかを見たもので、その最も大きな違いは入射角度の違いにある。すなわち、観察されたb1,d1地点での岩塊の入射角度は60°以下、これに対しb2,d2地点は50°以上、特にc1,c2地点は60°以上である。したがって、本結果を図で表すにあたって、入射角度の違いを基に、b1,d1のグループを●記号で、またb2,d2,c1,c2のグループを○記号で表すこととした。

図-4は、このようにして法線方向速度比(Rn)と法線方向入射速度との関係をみたもので、法線方向入射速度が大きくなるほど、また入射角度が小さいほどRnが小さいことを示している。これが、速度依存性と呼ばれる性質である。注目されるのは、図-5に示した法線方向入射速度と速度エネルギー比の関係も、図-4とほぼ同じ分布を示すことである。これらの図から、入射角度や法線方向入射速度に対して、両者はほぼ同じ挙動を示すことがわかる。

一方、法線方向入射速度の速度依存性を表す方法として、Pfeiffer等は式(4)に示すスケールファクターを導入しているが、残念ながらその背景となったデータは公表されていない。そこで、ここでは本実験結果を基に、Pfeiffer等の式を用いて反射法線方向速度の予測値と実測値を求めた。結果を図-6に示す。図中の○、●記号は全掲のとおりであり、式(5)は入射角度が50~60°以上のグループにおいてきわめて良い適合性を持つことがわかる。

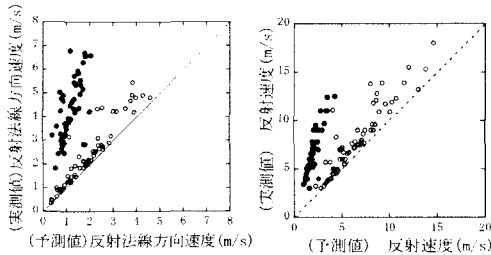


図-6 式(5)による反射法線方向速度の予測と実測 図-7 式(7)による反射速度の予測と実測

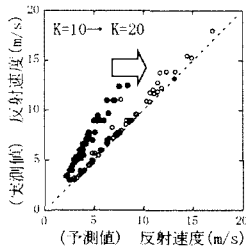


図-8 式(7)で $k=20\text{m/s}$ とした場合の反射速度の予測と実測

一方、法線方向速度比と速度エネルギー比の法線方向入射速度に対する応答が同じであることは、前述のとおりである。そこで、式(3)を変形して、スケールファクターを速度エネルギー比に適用したのが式(6)である。

$$V_{out} = \sqrt{Ev \times SF} \times V_{in} \quad (6)$$

ここに、

V_{out} : 反射速度

V_{in} : 入射速度

本予測式を用いて、再び反射速度を求め、その関係に対比したのが図-7である。分布の傾向は、法線方向速度比による場合の図-6とほとんど同じである。このことから、スケールファクターによる補正は速度エネルギー比にも適用可能で、特に入射角度が $50^\circ \sim 60^\circ$ 以上の場合において良好であることが明らかとなった。

一方、入射角度 $50 \sim 60^\circ$ 以下のグループに対しては、法線方向入射速度も速度エネルギー比も同様に予測値が小さい結果を示す。しかも、両者ともに一定の同じ傾きを持つ。この点については、スケールファクター中(式(4))のKを調整することで改善可能なことがわかっている⁹⁾。図-8は、図-7をkの値を 9.144m/s から 20m/s に変えてプロットした図であり、図中の矢印で示したように、入射角度 $50 \sim 60^\circ$ 以下の●のグループが改善されている様子がわかる。Pfeiffer等は、Kを 9.144m/s としておりそれ以上の説明を加えていないが、本結果からKの値は物性や衝突時の速度などの条件によっておよそ $10 \sim 20\text{m/s}$ くらいの間で変化する値と考えられる。この点については、今後さらに情報を収集していく必要がある。

4. DDAによる再現実験

DDAは、岩盤をブロックに分割し、ブロック内のひずみと剛体位を未知数として、有限要素法のように連立方程式を解く方法であり、近年、落石や岩盤崩落シミュレーションへの適用も増えている。その実用面からみた利点は、衝突時のエネルギー損失を扱うために、速度エネルギー比という現場で計測可能な係数を用いている点にある。

ここでは、式(6)をDDAに組み込み、速度依存性を考慮することで、結果がどのように変化するかを見た。解析を行ったのは、式(6)の適合性が最も高い現場である。

表-1に、解析に用いた入力条件を一覧する。

落石は、現地で計測した落石形状をもとに、面積等価な20角形で表した。なお、本来、形状を考慮できることが特徴のDDAは、逆にその形状が反発時の複雑な挙動の原因ともなっている。そこで、ここでは初期位置の落石の姿勢を少しづつ変化させて解析を行い、結果は軌跡、速度ともに範囲で示した。具体的には、20角形の外角(18°)を6等分して 3° づつ姿勢を変化させた。

図-9は、速度依存性を考慮しない場合の解析結果図である。図中には、本現場で計測した10個の落石の軌跡と速度を範囲で示している。また、図中の太線は、解析を行った落石の測定速度曲線である。斜面には、速度エネルギー比 $=0.8$ を設定した。解析結果は、速度は斜面を落下するほどに増加し、軌跡も実測より大きくなっている。これは、どのような状態で斜面に衝突しても、入力値である $Ev=0.8$ で反発するためである。

一方、図-10は、速度依存性を考慮した場合である。速度は、ほぼ実測のように緩やかな上に凸形状の曲線に近づく。また、主要な反発点から求めた速度エネルギー比は、速度や角度の違いによって変化しており、図-2同様の結果となっている。

本結果の比較から、落石シミュレーションでは、入力係数の速度依存性を考慮することが、実用精度の向上には重要であることが明らかである。

5 まとめ

本論文の結果は、以下のようにまとめられる。

- ①現場観察実験結果を基に、速度エネルギー比(Ev)にも、法線方向速度比(Rn)同様、入射角度と速度に依存する性質のあることを示した。
- ②Pfeiffer(1989)等が、 Rn の速度依存性を考慮するために提案したスケールファクター(SF)は、速度エネルギー比にも適用できることを示した。

表-1 DDA 解析条件

落石密度	26kN/m ³
弾性係数	10 ⁸ N/m ²
ポアソン比	0.2
摩擦角	30
ペナルティー係数	10 ⁷ N/m

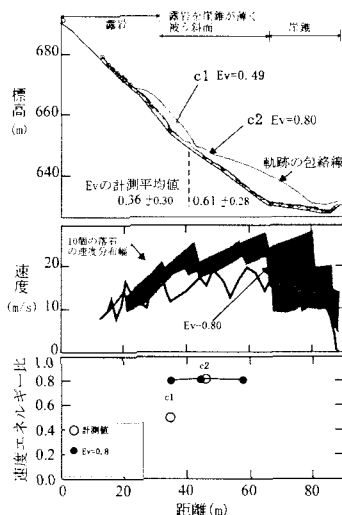


図-9 速度依存性を考慮しない
場合の解析結果

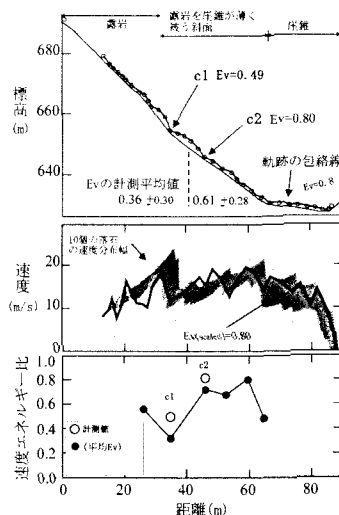


図-10 速度依存性を考慮した
場合の解析結果

③スケールファクターは、入射角度が50° ～60° 以上の条件においてその適合性が高いことを示した。

この結果を基に、速度依存性を考慮できるよう改良したDDAにより、該当する条件の観察実験現場において再現実験を行った。その結果、速度依存性を組み込むことで良好な再現結果が得られることを示した。

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) 古賀泰之, 伊藤良弘, 鷺田修三, 森下義:落石の運動軌跡の予測法に関する検討, 土木技術資料, Vol.31-8,9942-47,1989.
- 3) 梶谷浩, 福田尚晃, 堤下克彦:斜面上の落石の運動解析手法の開発, 構造工学論文集, Vol.43A,pp.1589-1596,1997.
- 4) 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/VI-37, pp49-58,1997,12.

- 5) 関 博, 笹原克夫, 伊藤興一, 吉中龍之進, 進士正人:落石防護工設計への不連続変形法の適用, 第 26 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, Vol.26,pp391-395,1995.
- 6) 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.
- 7) 島内哲哉, 酒井直樹, 有賀誠, 大西有三, 西山哲:写真測量と CG を用いた落石挙動追跡手法に関する研究, 第 59 回土木学会講演論文集,2004.
- 8) 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, pp337-342,2004.
- 9) 島内哲哉, 酒井直樹, 大西有三, 西山哲:落石シミュレーションに用いるパラメータの速度依存効果に関する検討, 第 40 回地盤工学研究発表会講演論文集, No.1235, 2005.

ROCKFALL SIMULATION USING DDA BY CONSIDERING VELOCITY-DEPENDENCE

Tetsuya SHIMAUCHI, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISIYAMA, Naoki SAKAI and Kouichi NAKAMURA

For the RockFall simulation, the velocity ratio and velocity energy ratio taking account of slope physical properties are applied to the input parameters due to impact phenomena. However these parameters are known to have the characteristics of being dependent on the velocity and angle during incidence and reflection. This property of input parameters at the time of impact is designated as "Velocity Dependence". The reproducible results are quite different according to whether this dependence is taken into consideration or not.

In this study, the equation by considering the velocity dependence was applied to DDA as suggested by Pfeiffer et al.(1989) Its effectiveness is confirmed through the reproducible simulation by observation results on the site.