

DDAによる落石シミュレーションにおける衝突時係数の設定法に関する検討

○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

1. はじめに

我が国では、落石は頻発する斜面災害の一つであり、規模が大きな場合、地形が複雑な場合にはシミュレーションが実施される。しかし、入力値の決定方法が確立されていないため、依然として経験によるところが大きいことがしばしば問題となる。なかでも、結果に大きく影響する衝突時係数には入射時の角度や速度に大きく依存する性質があることが、岩盤や崖錘といった現地の物性と対比を難しくしている。ここでは、まず室内実験結果をもとに、速度依存性の評価方法について考察し、この結果をもとに実際の斜面への適用方法について検討した。

2. 室内実験による速度比(Re_v)の特性

落石シミュレーションにおける反発時の物理定数として最も有名なものが、法線方向速度比(R_n)である。衝突材料の物性(硬さ)によって異なる定数であり、衝突時の速度や入射角度に依存する定数である(図-1)。一方、反射速度と入射速度の比である速度比(Re_v)にも、同様の性質がある。

図-2は、石英球(φ=59mm)とアルミ球(φ~30mm)を、木製と花崗岩からなる2種類の反射板に落としたときの速度比(Re_v)と法線方向入射速度との関係を示したものである。落下高さは、1, 2, 3, 5mの4種類であり、反射板の角度も15°, 30°, 45°, 60°, 75°と変化させている。本図から、法線方向入射速度が増加するほど速度比が減少すること、同じ球体が衝突しても反射板が花崗岩と板とでは速度比(Re_v)の分布傾向が異なることなどがわかる。また、図中には示していないが、反射板の角度が低角になるほど速度比が小さくなることから、速度比の低下には衝突角度の影響が大きいことが確認された。このような衝突時の速度と角度によって変化する衝突時係数の特性を定式化する目的で、Pfeifferらは式(1)に示すスケールファクターと呼ばれる補正曲線を導入している。

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

ここに、SF: スケールファクター、V_{nin}: 入射法線方向速度、K: 速度補正係数である。式(1)は、もとは法線方向速度比(R_n)の補正のために提案されたものであるが、速度比に対しても適用可能である。スケールファクターを用いると、反射速度は式(2)によって求められる。

$$V_{out} = SF \times RE_{v_{ini}} \times V_{in} \quad (2)$$

ここで、V_{out}は反射速度、V_{in}は入射速度であり、RE_{v_{ini}}はグラフ左側の起点を決定する値で0.0~1.0である。

図-3は、図-1中の石英球-木製反射板の結果をもとに、式(2)により求めた反射速度を実測結果と対比した図である。速度補正係数KはK=10m/s, 7m/s, 4m/sと変えている。本図からK=7m/sのとき、最も1:1の関係に近づくことがわかる。図-4は、この結果の基となった実験結果に、各々のKの値のSF曲線を示したものである。本図から、K=7m/sのSF曲線は、計測結果のほぼ外側、つまり

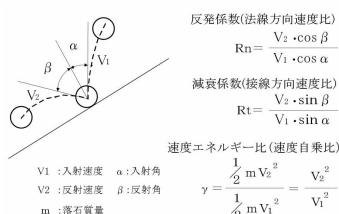


図-1 衝突を表す物理定数

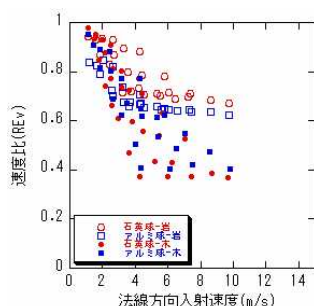


図-2 石英球とアルミ球による傾斜衝突実験結果

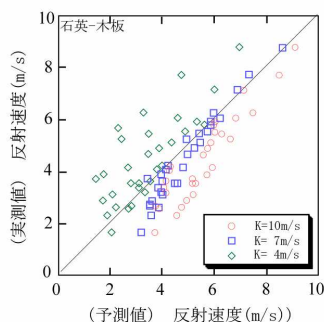


図-3 石英球-木板衝突実験の反射速度の予測

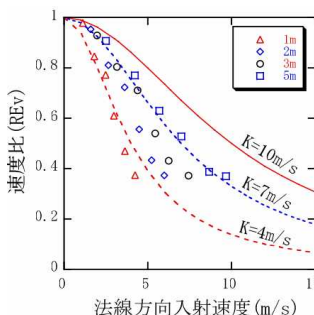


図-4 石英球-木板衝突実験へのSF曲線の当てはめ

キーワード 落石シミュレーション, 速度比, 速度エネルギー比, 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

速度分布の包絡線に相当することがわかる．これは，他の球体の実験結果で推定した SF 曲線でも同じであった．このことは，SF 曲線中の K は衝突物質同士の物性により変化するが，最適な SF 線は速度比-法線方向入射速度関係図の包絡線から推定できることを示唆している．なお， REv_{ini} についても同様に，衝突物質同士の物性によって変化する．

3. DDA による実斜面への適用

実際の斜面では，図-2 のような速度と角度に関する系統的なデータが得られることはほとんどない．そこで，ここでは 2. で述べた方法を実現場に適用し，得られた SF 曲線によるシミュレーションを行い，その適用性について検討する．図-5 は，検討を行った斜面である．斜面上部は露岩，中段から下の斜面は崖錐で構成される採石場の斜面である．平均傾斜は約 33° であり，この斜面を大きさ $\phi 1 \sim 2m$ ($1t \sim 7t$) の，ほぼ塊状の岩塊が低く飛び跳ねるように落下する．図中の $c1, c2$ は計測を行った地点(いずれも崖錐)であり，計測総数は 10 個である．得られた速度比は， $c1$ 地点で $REv=0.15 \sim 1.05$ (平均=0.55)， $c2$ 地点で $REv=0.53 \sim 1.02$ (平均=0.76) である．図-6 は計測結果を，法線方向入射速度と速度比の関係で示した図である．この結果を基に，式(2)を用いて予測値と実測値の相関が最も高くなる K と REv_{ini} を探索した．その結果， $K=15m/s$ ， $REv_{ini}=0.9$ のとき，最も良好な相関が得られた(図-7)．この時の SF 曲線は図-6 中にも示した． $c2$ 地点に比べて $c1$ 地点のばらつきが大きいのは，主に衝突時の凹みによるものと考えられる．

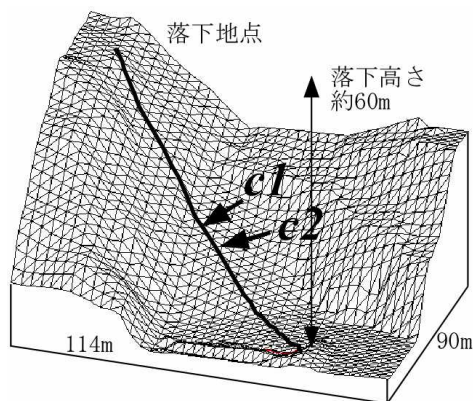


図-5 実験を行った採石場の斜面

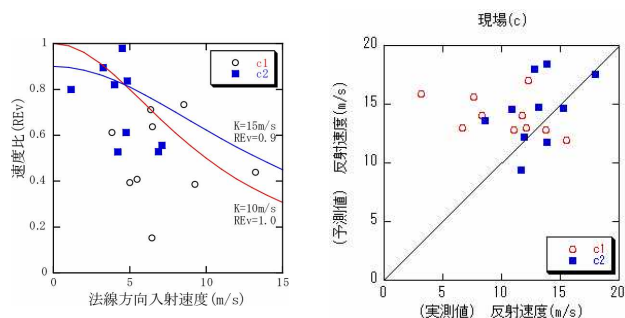


図-6 $c1, c2$ での計測結果と SF 曲線

図-7 $c1, c2$ での反射速度の予測と実測の結果

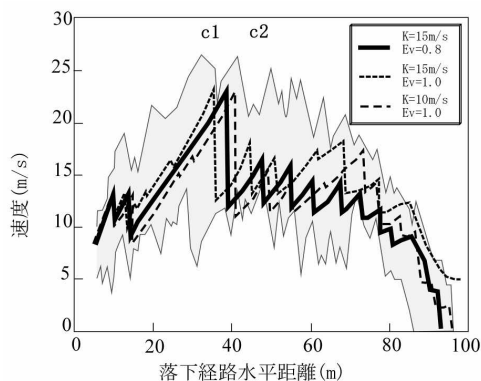


図-8 図-7 の結果をもとに行った DDA による解析結果

このようにして得られた SF 曲線を基に，DDA による再現解析を行った結果を図-8 に示す．用いたのは，不連続変形法の三次元剛体球要素による解析コード (DDAball) である．なお，DDA では入力値に速度エネルギー比(速度二乗比)を用いている．薄くハッチングした範囲は，10 個の落石速度の最大最小範囲である． K の値が大きいと下方斜面の跳躍は減り， Ev の値を大きくすると一回当たりの跳躍量が大きく到達距離も延びる傾向がみられる．本結果は，一地点のみでの計測結果を基にしているが，それでも斜面最大速度区間での速度比が推定できれば，斜面全体をあらわす SF 曲線の目安が得られる可能性を示唆している．ただし，本方法は $c1$ 地点のような，衝突時に著しい塑性変形を伴う地盤への適用には注意が必要である．

4. まとめ

室内実験結果を基に，Pfeiffer らの方法を用いて衝突時の入反射速度比の角度と速度に対する依存性を説明し，さらに DDA による実斜面への適用性について検討した．

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) 島内哲哉, 大西有三, 西山哲, 酒井直樹, 中村公一: 速度依存性を考慮した DDA による落石シミュレーション, 第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2005, 3) Pfeiffer,T.J.,Bowen,T.D: Computer Simulation of Rockfalls;Bulletin of the Association of Engineering Geologists Vol. X X VI, No.1,1989 ,pp135-146, 4) 布川哲也, 楊萌, 大西有三, 西山哲, 三木茂:不連続変形法(DDA)を用いた 3 次元落石解析に関する研究, 第 33 回岩盤力学シンポジウム講演論文集, pp469-474,2004,1.