

DDA落石シミュレーションに用いる 速度エネルギー比の基礎的特性に関する研究

島内哲哉^{1*}・鄭 惟¹・中村公一²・西山哲³・大西有三³

¹明治コンサルタント（株）東川口分室（〒333-0801 埼玉県川口市東川口1-22-4）

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

²(独)日本学術振興会 新潟大学工学部(〒950-2181 新潟市五十嵐2-8050)

³京都大学大学院工学研究科(〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

DDAによる落石シミュレーションでは、衝突のための入力定数に速度エネルギー比(E_v)が用いられる。しかし、速度エネルギー比(速度比)には、法線方向入射速度の増加とともに減少する性質があることが知られている。本研究では、小球を落下させる室内実験を行い、速度比が、1)入射角度によって大きく変化し、上限を1.0として入射角度が小さくなるほど値が減少すること、2)法線方向入射速度が速くなるほど値が減少すること、3)材質の違いは、速度比の下限に表れることなどを明らかにした。この結果をもとに、既往の現場実験結果を見直し、Pfeifferら(1989)の提案したスケールファクターを導入することで、DDAによる落石シミュレーションの再現性が向上することを明らかにした。

Key Words : ratio of velocity energy, ratio of verocity, rockfall simulation, DDA

1. はじめに

国土の3/4が山岳地を占める我が国では、落石は頻度の高い斜面災害の一つに数えられる。その災害防止を目的として、落石の影響範囲の想定や対策計画のための落石シミュレーションソフトが、これまでも数多く開発されてきた^{1,2)}。一方、このような解析手法の進展に比べると、その入力値の特性や設定法に関する研究は遅れているように思われる。これは、落石という現象が突然発生して瞬時に終了するため、挙動を子細に観察したり、記録として保存することが難しいためと推察される。

筆者らは、このような落石問題に不連続変形法(DDA)を適用することを提案しており、これまで、現場観察実験をもとに、その主な入力値である速度エネルギー比(E_v)の特性について報告してきた³⁾。しかし前述のように、現場観察から得られる値には、落石の形状や規模、岩盤や崖錘といった斜面性状の違いが大きく影響し、入射角度や速度の影響を詳細に評価することが難しいという問題がつかまとう。本研究では、この点を補う目的で室内実験を行い、その結果得られた速度エネルギー比の特性を考慮のうえ、これまでの現場実験結果の再考察を行い、さらにその適用性についての検討を行った。

落石の主要な運動は、飛行、衝突、すべり、ころがりの4種類に区分される。このうち、到達距離や軌跡に最も大きな影響を与えるのが衝突運動である。落石シミュレーションでは、このような衝突時のエネルギー損失を、速度比(R_n, R_v)や速度エネルギー比(E_v)などを用いて評価している。

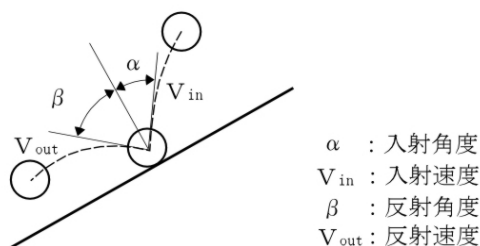


図-1 入射角度と速度の定義

$$R_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (1)$$

$$R_n = \frac{V_{out} \cos \alpha}{V_{in} \cos \beta} \quad (2)$$

$$E_v = \frac{\frac{1}{2} m V_{out}^2}{\frac{1}{2} m V_{in}^2} \quad (3)$$

2. 落石衝突時のエネルギー損失評価

右城ら⁴⁾は、我が国における既往の10箇所あまりの現

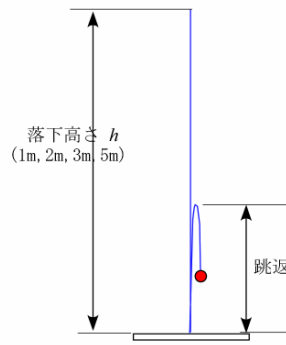


図-2 垂直反発実験

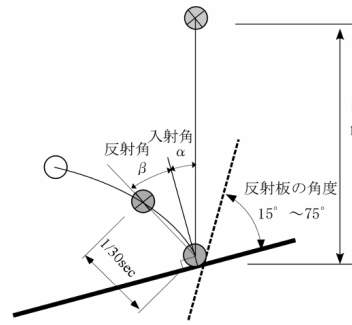


図-3 傾斜反発実験

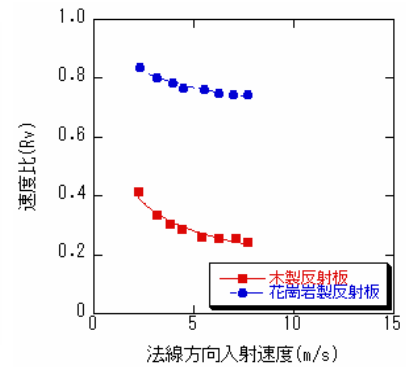


図-4 垂直反発実験(φ6cm石英球)

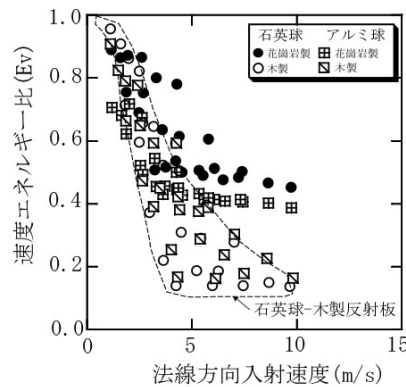
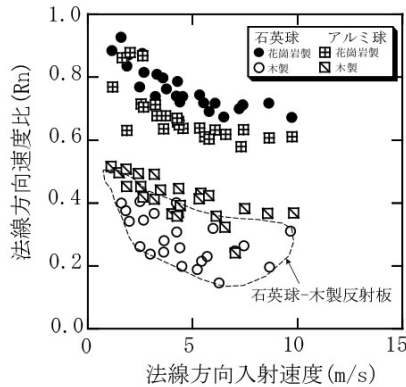


図-5 傾斜反発実験から得られた法線方向速度比(R_n)と速度エネルギー比(E_v)の分布

場実験事例の再分析結果から、 R_n と E_v の値を斜面の性状別に次のように報告している。

- 1) 法線方向速度比(R_n)は、土砂斜面で 0.61 ± 0.23 、岩盤斜面で 0.54 ± 0.26 である。
- 2) 速度エネルギー比(E_v)は、土砂斜面で 0.71 ± 0.19 、岩盤斜面で 0.66 ± 0.23 である。

ところで、このうち法線方向速度比(R_n)には、法線方向入射速度の増加とともに減少する性質があることが知られている。この性質は速度依存性と呼ばれ、落石対策便覧参考資料¹⁾では、その考慮の有無が、軌跡や速度の再現に重要であると述べられている。一方、DDAで用いる速度エネルギー比(E_v)にもほぼ同様の性質があることが、現場観察を通じた筆者らの研究によって明らかとなっている³⁾。

3. 反発係数と速度エネルギー比の性質

本研究では、法線方向速度比(R_n)と速度エネルギー比(E_v)の入射速度と入射角度に対する基礎的特性を調べる目的で、直径4～6cmの球体を、木製と花崗岩製の反射板上に落下させる実験を行った。実験ケースは、入射角度を 0° とした垂直反発実験と、入射角度を $15^\circ \sim 75^\circ$ の範囲で変化させた傾斜衝突実験の2種類である。

(1) 垂直反発実験

垂直実験は、図-2に示すように地表に水平に置いた $0.4m \times 0.8m$ の木製(厚さ5cm)と花崗岩製(厚さ4.5cm)反射板上に、直径6cmの石英球を、高さを0.5m、1.0m、2.0m、3.0m、5.0mと変えて落下させて行った。反発後の最大高さはビデオカメラの画像(1/30sec)から求め、入射速度については落下高さから換算した。

図-4に、石英球の木製反射板と花崗岩製反射板に対する速度比(R_v)の変化を示す。本図から、同じ球体であっても、速度比(R_v)は反射板の材質によって異なること、衝突速度が速くなるほど減少することなどがわかる。このような速度比(R_v)の変化は、衝突時の球体に生じる傷や、反射板に生じる凹み(塑性流動)の大小によって生じると考えられる。同様の実験は、既に古賀ら⁵⁾、右城ら⁴⁾、Ishikawaら⁶⁾によっても行われている。

(2) 傾斜衝突実験

傾斜衝突実験は、図-3に示すように、φ6cmの石英球とφ4cmのアルミ球を、落下高さと反射板の角度を変えて行った。落下高さは1m、2m、3m、5mの4種類、反射板の角度は 15° 、 30° 、 45° 、 65° 、 75° の5種類である。入射速度は落下高さから換算によって求め、反射速度は高速カメラの画像をもとに、衝突後～1/30sec間の速度として求めた。

図-5は、石英球とアルミ球の、法線方向入射速度に対する法線方向速度比(R_n)と速度エネルギー比(E_v)の関係

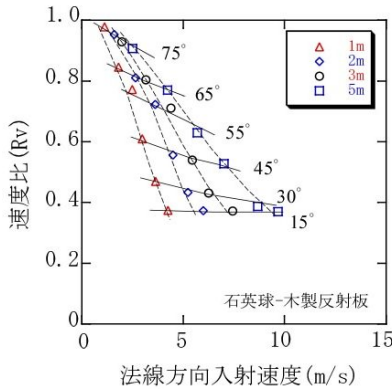


図-6 反射板の違いによる速度比(Rv)分布の違い

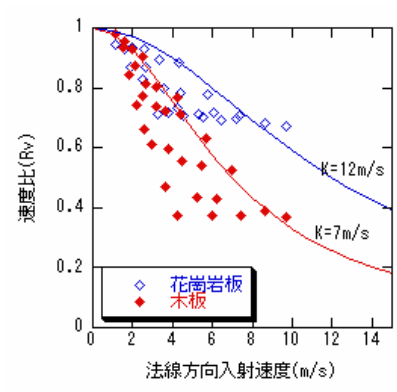
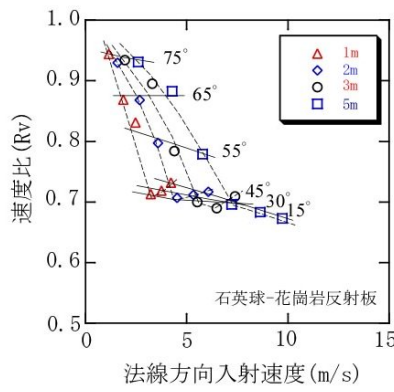


図-7 速度比分布へのSF曲線の当てはめ

を示したものである。本図から、法線方向速度比と速度エネルギー比には次のような性質のあることがわかる。

- 1) 法線方向速度比、速度エネルギー比ともに、法線方向入射速度の増加にしたがい値は減少する。
- 2) 法線方向速度比(Rn)は、球体と材質により異なる。
- 3) 速度エネルギー比は、反射板の角度が急なとき、すなわち入射角度が大きいくときに上限値(1.0)をとり、入射角度が小さくなるほど低下する。その下限は反射板の材質によって異なる。

1)は、垂直落下実験で述べた速度依存性によるものである。2)は、法線方向速度比(Rn)が材質の違いを表すことを示している。一方3)は、速度エネルギー比(Ev)の値そのものは、材質の違いを表さないことを意味している。

図-6は、この点をさらに詳しくみるために、速度エネルギー比(Ev)を換算速度比(Rv)で表し、石英球-木製反射板における法線方向入射速度との関係を示したものである。図中では計測結果を入射角度毎に別記号で示し、同時に等速度のラインを点線で結んで示した。この図は、速度による変化が速度比(Rv)=1.0付近を起点とする放射状分布となること、反射板の角度が急なとき速度比は1.0近くにあり、逆に反射板の角度が低角になるほど減少していくことを示している。また、木製反射板ではEv=1.0~0.39だが、花崗岩製反射板ではRv=1.0~0.49であり、その分布の範囲も異なる。この分布の違いから、換算速度比(Rv)、すなわち速度エネルギー比(Ev)の材質の違いによる影響は、法線方向入射速度との関係における分布の傾きと、分布の下限に表れることがわかる。なかでも、速度エネルギー比に材質の違いを反映させるためには、入射角度に対する影響を考慮することが重要といえる。

4. 速度比の法線方向速度依存性による評価

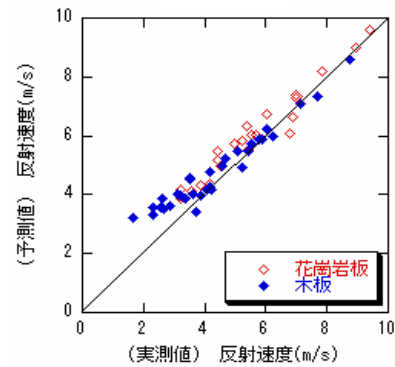


図-8 実測予測の比較

(1) 入射角度依存性の補正

速度エネルギー比(速度比)の入射角度依存性をDDAに考慮する方法として、筆者らはPfeifferら⁸⁾が法線方向速度比の速度依存性を考慮するために提案した近似式を適用する方法を提案している。

Pfeifferらは、法線方向速度(Rn)の入射速度に対する依存性を考慮するために、式(4)に示すスケールファクター(SF)と呼ぶ曲線を導入している。

$$SF = \frac{1}{1 + \left(\frac{V_{nin}}{K} \right)^2} \quad (4)$$

ここに、 V_{nin} は法線方向入射速度(m/s)、 K は速度補正係数である。スケールファクターを用いると、法線方向の反射速度は式(5)で表される。

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

ここに、 V_{nout} は法線方向反射速度(m/s)であり、 $Rn(scaled)$ は、法線方向速度比と入射法線方向速度の関係を表すSF曲線の起点となる法線方向速度比を表す。

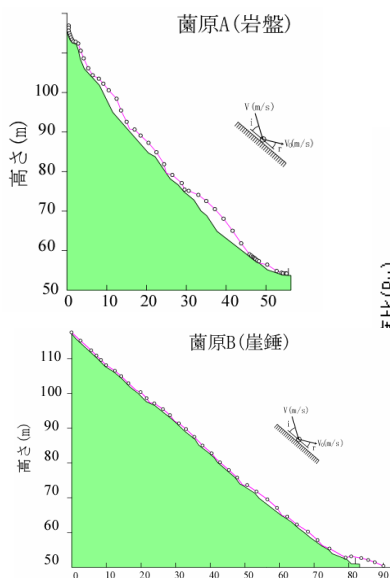


図-9 菌原の事例¹⁾

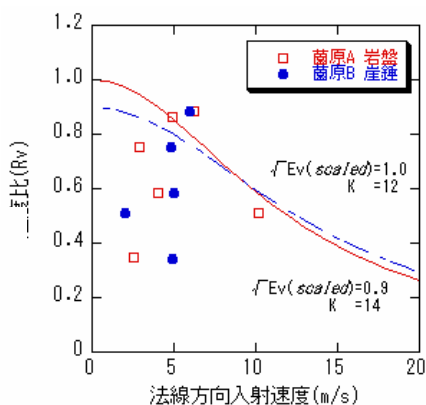


図-10 菌原事例へのSF曲線の当てはめ

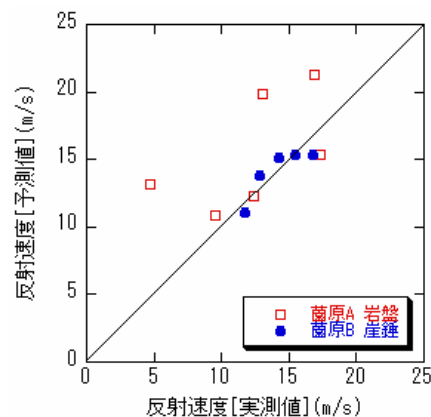


図-11 実測予測の比較

一方、筆者らは、PfeifferらのSF曲線が速度比にも適用可能で、それが主に入射角度による影響を補正するものであることを明らかにした³⁾⁹⁾。スケールファクターを用いた反射速度は、式(6)で表される。

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

ここに V_{out} は反射速度(m/s)である。 $\sqrt{E_v(scaled)}$ は速度エネルギー比の換算速度比であり、 $Rr(scaled)$ 同様にSF曲線の図上の起点位置を表す。

(2) Pfeiffer式による入射角度依存性の評価

図-7は、石英球と木製反射板の実験結果から得られた反射速度と、式(6)を用いて予測した反射速度の結果を比較したものである。 $\sqrt{E_v(scaled)}$ は1.0、補正速度 K は、木製反射板で $K=7\text{m/s}$ 、花崗岩製反射板で $K=12\text{m/s}$ である。SF曲線は、いずれも分布外側の包絡線である。このことから、 K の値が斜面材質の違いを反映することがわかる。ただし、3章で述べたように速度エネルギー比の分布には下限があるため、SF曲線の適用範囲にも下限の打切りが必要となる。

図-8は、決定した $\sqrt{E_v(scaled)}$ と K の値をもとに、式(6)を用いて求めた予測反射速度を実測値と比較したものである。本結果から、式(6)による導入効果の高いことがわかる。

5. 現場事例への適用性の検討

速度比にPfeiffer式を適用することで、落石衝突時の入

射角度と速度から、反射速度が予測可能であることを示した。しかし、実際の現場で見る現象は、落石の規模や形状、斜面の条件が、室内実験に比べてはるかに複雑である。ここでは、実際の現場から得られた計測結果をもとに、Pfeiffer式の適用性について検討する。

(1) 菌原の実験

落下開始から停止までの衝突を、斜面全体にわたって記録した例はきわめて少ない。ここでは文献より、菌原の事例による検討を行った。

菌原地区では、岩盤斜面と崖錘斜面の2種類の斜面の記録がある(図-9)。岩盤斜面は、水平距離55m、比高差70m、平均傾斜約 50° である。また、崖錘斜面は、水平距離90m、比高差65m、平均傾斜約 36° である。

図-10は、岩盤斜面および崖錘斜面での記録をもとに、法線方向入射速度と速度比(R_v)の関係をプロットした図である。入射角度は、図上で読み取った。この結果をもとに、式(6)を用いて反射速度の実測値と予測値とを比較したのが図-11である。図上で直接SF曲線を決定することは難しいため、 $\sqrt{E_v(scaled)}$ と K の値は試行錯誤で最も相関性の高くなる値を探索した。

本図から、一見するとSF曲線の適用が難しそうな崖錘斜面でも、高い精度で予測できていることがわかる。一方、崖錘とほぼ同様の分布を示す岩盤斜面では、予測と実測がほぼ1:1にあるものと、予測が実測を上回るものとに分かれた。実測を大きく上回るのは、大きく跳ねて長い距離を飛んだあとの反発であることから、岩塊自体の損傷や斜面の破壊などによるエネルギー損失が場所によって予想以上に大きかったことが原因と推察される。

(2) C現場での実験

本現場は、水平距離90m、比高差およそ60mの採石場

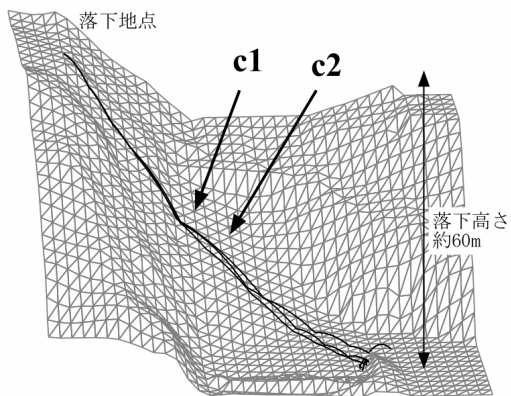


図-12 現場(c)の地形と計測地点(DDAball)

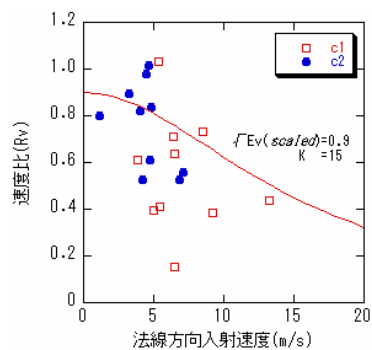


図-13 c現場へのSF曲線の当てはめ

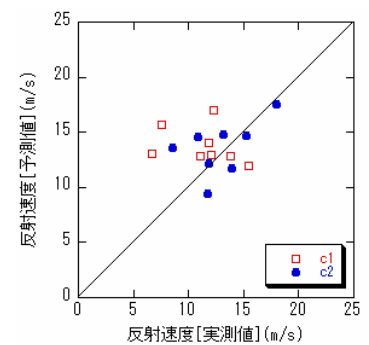


図-14 c現場 実測予測の比較

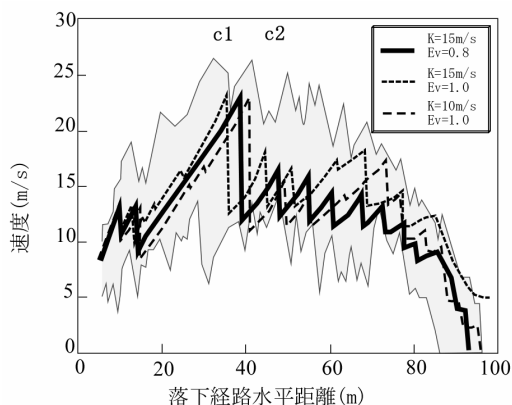


図-15 c現場 Pfeiffer式を適用したDDAballによる落石シミュレーション

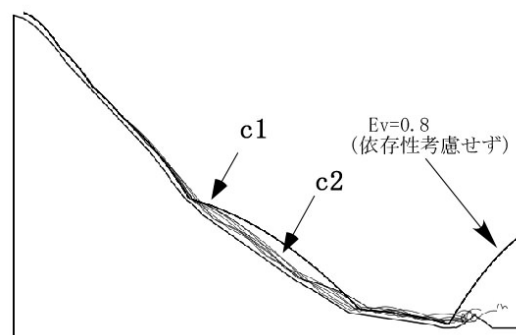


図-16 DDAballによる解析結果(軌跡図)

の斜面である⁹⁾。岩塊は、平均傾斜33°で、地形の凹凸変化の少ない斜面を、低い跳躍を繰り返しながら落下する。速度比の計測地点は、図-12のc1,c2地点であり、ここは本斜面における落石の最大速度区間にあたる。

図-13は、c1,c2計測地点での法線方向入射速度と速度比(R_v)の結果を表したものである。本図のようにc1,c2をまとめてプロットすると、室内実験結果のように速度の最大崩落線としてSF曲線を推定することは難しい。ここではc1,c2を別々に検討し、衝突による地盤変形の可能性が低いc2地点でのSF曲線を決定した。決定したパラメータは、 $\sqrt{Ev(scaled)}=0.9$ 、 $K=15$ である。反射速度の実測値と予測値の対比結果は図-14に示すとおりであり、c2地点ではほぼ良好な正相関の関係にある。これに対し、c1地点結果の分布は逆相関に近く、岩塊の規模が大きくなるほど、予測が実測を上回る傾向にある。これは、衝突地点での地盤への(凹みなどの)影響が、大きな岩塊ほど大きいためと考えられる。このことは、解析では岩塊の大きさも重要な影響要素となることを示している。

C現場では、以上のようにして得られたSF曲線を用いて、不連続変形法(DDA)による再現解析を行った。用いたのは、三次元剛体球要素コード(DDAball)である²⁾。

DDAでは、接触する地表面と落石の位置関係、すな

わち入射速度と入射角度の関係を計算ステップ毎に監視し、接触が判定されると速度エネルギー比が適用される。したがって、速度エネルギー比にPfeifferらの方法を用いる場合には、その適用時に式(4)、式(6)を導入する。入力値は、SF曲線の起点を示す $\sqrt{Ev(scaled)}$ と傾きを表す補正速度(K)である。

図-15では、c現場で観察した10個の落石の速度の最小最大範囲を、薄くハッチングして示した。図中には、 $Ev=0.8$ および1.0、 $K=10$ および15で計算した3種類のケースを示している。 $\sqrt{Ev(scaled)}$ が同じ場合、 K の値が大きいと斜面下方での跳躍高さが減少し到達距離が延びる。逆の場合には、跳躍高さの減少とともに到達距離も減少する。

図-16は、 $\sqrt{Ev(scaled)}=0.9\sim0.83$ ($Ev=0.8\sim0.7$)、 $K=12\sim15$ m/sと、値に多少範囲をもたせたときの軌跡図である。図中にはPfeiffer式による入射角度依存性を考慮しない場合の軌跡($Ev=0.8$)を示しており、両者の違いは明らかである。依存性を考慮した場合の軌跡は、実際の観察結果よりわずかに高めであるものの、ほぼ観察結果に近い結果が再現されている。

6. まとめと今後の課題

本論文では、不連続変形法(DDA)を落石シミュレーションに適用する際の入力値である速度エネルギー比の基礎となる速度比(Rv)の特性について述べた。その結果、速度比(Rv)は、法線方向速度比のように材質による違いを直接反映せず、材質の違いは入射速度と入射角度の両方に表れることを明らかにした。

また、速度比の性質を落石シミュレーションに考慮する方法として、Pfeifferらが提案したスケールファクターによる補正法が有効であることを、室内実験結果、現場実験結果への適用を通して示した。ただし、Pfeifferらの方法は、衝突時の地盤変形が大きい場合や、岩塊規模の影響が大きい場合には注意が必要である。

Pfeiffer式適用時の詳細な入力値($\sqrt{Ev}(\text{scaled})$, K)については、今後、さらに集積していく必要があるが、このような速度比の角度と速度に対する依存性を考慮したことで、DDAによる落石シミュレーションの精度は大きく向上したものと考えられる。

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，20002.
- 2) 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，pp.469-474,2004.
- 3) 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35回岩盤力学シンポジウム講演論文集，pp.83-86,2006.
- 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,pp.49-58,1997.
- 5) 古賀泰之，伊東良弘，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,pp.42-47,1989.
- 6) Ishikawa,T.,Miura,S., and Ohnishi,Y. : Influence of input parameters on energy loss in free fall test with DDA, *Int.Proc. of the 7th Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD-7)*, pp.148-158, 2005.
- 7) Wu,S.-S. : Rockfall Evaluation by Computer Simulation, *Transportation Reserch Record 1031*,pp.1-5,1984.
- 8) 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.
- 9) 島内哲哉，大西有三，西山哲，酒井直樹：衝突時の特性を考慮した不連続変形法の落石シミュレーションへの適用性の研究，土木学会論文集C,Vol.62,No.3,pp707-721,2006.

FUNDAMENTAL STUDY OF VELOCITY ENERGY RATIO BY USING DDA-ROCKFALL SIMULATION

Tetsuya SHIMAUCHI, Wei ZHENG, Koichi NAKAMURA,
Satoshi NISHIYAMA and Yuzo OHNISHI

In the DDA (Discontinuous Deformation Analysis), the ratio of velocity energies (squared velocity ratio) is used for the energy loss during collision. Through the field observation of rockfall behaviors, we have clarified that the velocity ratio is dependent on the normal velocity just as the coefficient of restitution.

Recently this property has been investigated in detail by high-speed camera in experimentation. From the results the following facts were made clear.

- (1) The velocity ratio is greatly dependent on the incident angle, i.e. the larger the incident angle is, the more closely the velocity ratio approaches to unity, and the smaller the incident angle is, the lower the velocity ratio becomes.
- (2) The faster the incident velocity is, the lower the value of the velocity ratio becomes.
- (3) The difference of the velocity ratio according to the material quality shows the lower limit of the velocity ratio.

Therefore, the velocity ratio is different from the normal restitution, and it is incapable of directly expressing the difference of the material quality. Consequently, it is not appropriate to consider the velocity ratio as a direct input value of the simulation. However, we have clarified that it is possible to perform a rockfall simulation by considering the velocity-dependence of the velocity ratio in the application of DDA by using the "Scale Factor" as proposed by Pfeiffer et al. (1989).