

速度比の基礎的性質に着目した不連続変形法(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・中村公一⁴・酒井直樹⁵

¹正会員 明治コンサルタント株式会社 技術統括部分室 (〒333-0801 埼玉県川口市東川口1-22-4)

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

²フェロー会員 京都大学副学長 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 京都大学大学院准教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

⁴鳥取大学大学院助教 工学研究科 (〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101)

⁵(独)防災科学技術研究所 水・土砂防災研究部 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)

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比(R_v)が用いられる。筆者らは、現場実験結果をもとに、速度比(R_v)には法線方向入射速度の増加にともない大きく減少する性質があることを報告した。本研究では、室内実験結果を基にその詳細を調べ、(1)速度比は法線方向入射速度に大きく依存する、(2)速度比そのものは材質の違いを表さない、(3)材質の違いは、法線方向入射速度との関係において最大入射速度に対する勾配と速度比の下限に表れる、などを明らかにした。この結果を踏まえて、速度比(R_v)の法線方向依存性を補正する方法を三次元球要素剛体不連続変形法(DDAball)に導入し、現場実験結果の再現シミュレーションを通じて適用性を確認した。

Key Words : ratio of velocity energy, ratio of verocity, rockfall simulation, 3-dimension, DDA

1. はじめに

落石による災害を未然に防止するためには、落石発生源と保全対象間の挙動を精度よく予測することが重要である。この目的のために、これまでも数多くの落石シミュレーション手法が提案されており¹⁾、現在では形状や地形の不規則性を考慮した三次元解析も提案されている^{2),3)}。しかし、これらのシミュレーションを実用的に用いるためには、斜面の性状や起伏、落石の規模や形状によって複雑に変化する落石の挙動を適切に表現し得る入力定数を選定しなければならない。

不連続変形法(DDA)では、エネルギー損失評価のために線速度エネルギー比(速度自乗比)が用いられる。筆者らは、現場実験を通じて、この速度比に法線方向入射速度依存性があることを明らかにし、Pfeiffer & Bowen⁴⁾の方法(SF曲線法と呼ぶ)を援用することで、現場実験の良好な再現結果が得られることを報告した⁵⁾。しかし、さまざまな角度と速度で衝突する落石のデータから適切なSF曲線を見いだすことは難しく、これを実用的に用いるためには、速度比のより詳細な性質を把握する必要がある。本

論文では、この速度比(R_v)の入射速度や入射角度に対する基礎的な性質を調べるために行った傾斜衝突実験結果を述べるとともに、その性質を用いてDDAによる落石シミュレーションを行う方法について検討した。

2. 落石衝突時のエネルギー損失評価

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¹⁾。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、一般に、衝突に

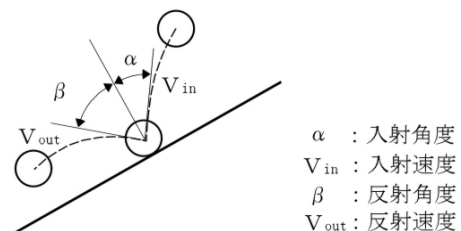


図-1 入反射角度と速度の定義

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

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

$$R_t = \frac{-V_{out} \sin \beta}{V_{in} \sin \alpha} \quad (3)$$

$$E_v = \frac{\frac{1}{2} m V_{out}^2}{\frac{1}{2} m V_{in}^2} \quad (4)$$

よるエネルギー損失を図-1および式(1)～(4)に示す入力値を用いて評価している。

法線方向速度比(R_n)や接線方向速度比(R_t)は多くの質点系落石シミュレーションで単独あるいは組み合わせられて用いられる。また、DDAでは、既に述べたように速度エネルギー比(E_v)、あるいは速度比(R_v)が用いられる¹²⁾。

落石シミュレーションでは、これらの値は岩盤や崖錐といった斜面の材質を考慮して選定される。実際、これまでの多くの現場実験が、これらの入力定数と斜面性状との関係を明らかにする目的で行われており、質点系落石シミュレーションの研究では、法線や接線方向の速度比(R_n, R_t)と斜面性状との関係を例示した報告も多い^{1),6),7)}。

ところでこれらの値も、例えば見掛け上一様な崖錐や岩盤と区分される斜面であっても、実際には大きく変動することが知られている。図-2は、文献¹⁾中において公表されている群馬県蕨原での現場実験の事例(旧日本道路公団 1973)である。落石の開始から停止まで、斜面全体にわたる挙動を追跡した貴重な例である。断面図の下には、図中で公表された結果をもとに求めた各点での速度比(R_v, R_n, R_t)を示した。この図から、各速度比の値は決して一定ではなく、衝突の都度大きく変化することがわかる。このような変動の理由として、落石形状や斜面の小さな起伏や斜面へのめりこみなど、さまざまな要因が考えられている¹⁾。

一方、図-3は傾斜した反射板上に小球を落下させたときの法線方向入射速度と法線方向の高さ比から求めた反発係数(e)との関係を示した図である⁷⁾。この図から、反発係数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わかる。この性質は、一般には反発係数の速度依存性と呼ばれており、これも実現場での複雑な落石の運動に大きく影響している。実際、落石対策便覧参考資料¹⁾では、

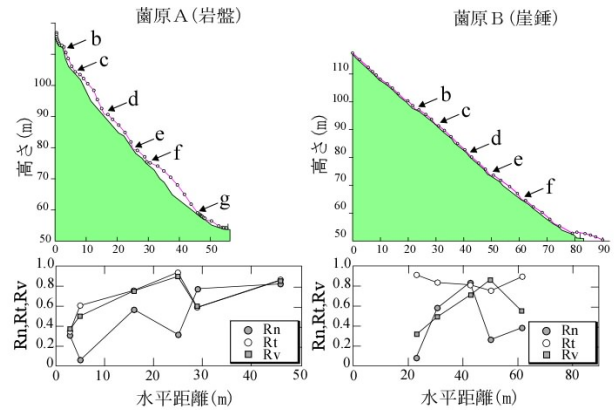


図-2 自然斜面での R_n, R_v, R_t の挙動¹⁾

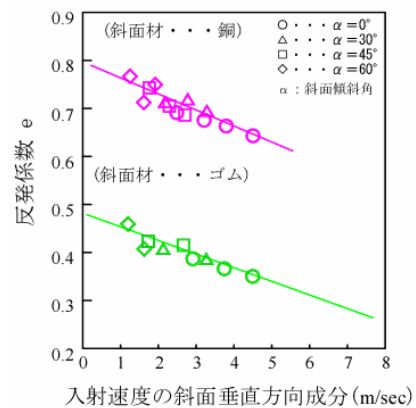


図-3 反発係数の法線方向速度依存性⁷⁾

その性質を考慮することでシミュレーションによる軌跡や入射速度の再現性が向上すると指摘している。筆者らは、現場実験を通じた研究により、速度比(R_v)にも法線方向速度比(R_n)と同様の性質があることを報告した⁵⁾。しかし、速度比(R_v)の性質は法線方向速度比(R_n)ほどには知られていないため、現段階では再現や予測解析のための適切な関係を見つけることが難しい。

3. 傾斜衝突実験にみる速度比の特性

(1) 実験方法

落石の衝突現象は、広い範囲の入射角度と入射速度のなかで生じている。したがって、各速度比(R_n, R_v, R_t)の性質を把握するためには、なるべく実現象に近い入射角度と速度の条件で、反発特性を調べる必要がある。この目的のために、反射板の傾斜角度を変えた衝突実験が可能な鋼製枠(高さ1m, 幅0.6m, 奥行き0.5m)を作成し、反射板の角度と落下高さを変えた反発実験を行った。使用した反射板は、木製(厚さ5cm)と岩製(厚さ4.5cmの花崗岩)の2種類であり、大きさはいずれも0.4m×0.8mである。落

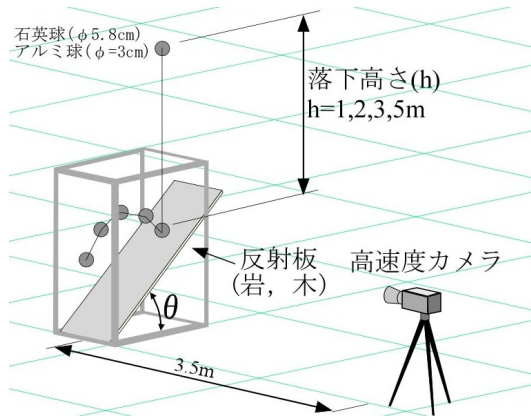
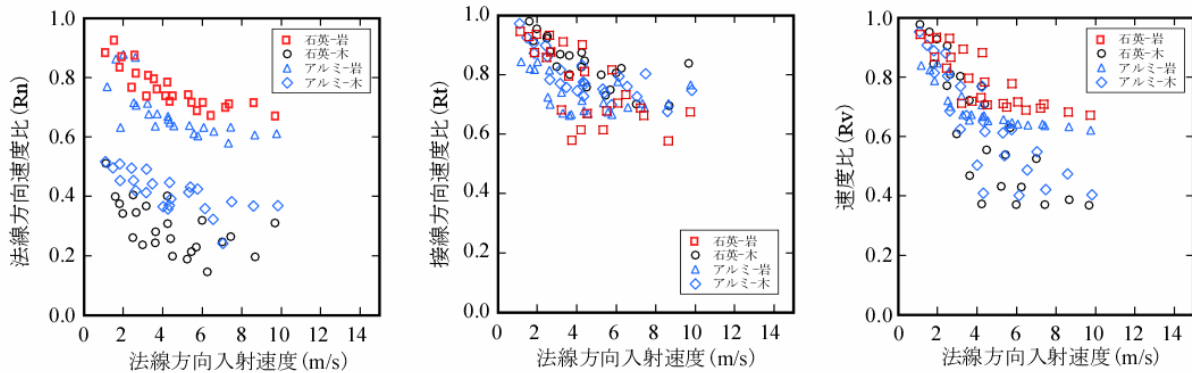
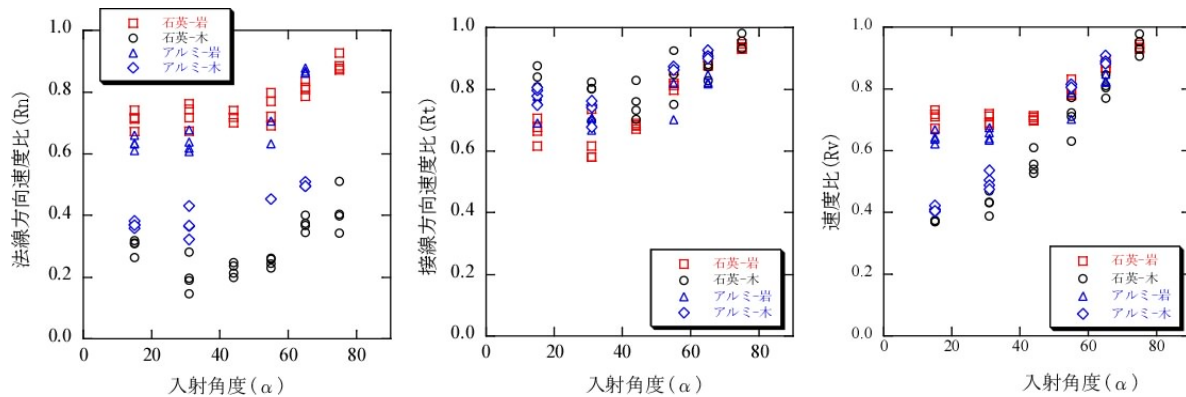


図-4 傾斜衝突実験の方法

表-1 実験に用いた材料の諸元

	密度 (g/cm ³)	弾性係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)
石英球	2.70	※1 30000	※1 119
アルミ球	2.69	27000	126
岩製反射板	2.65	※2 42000	※2 149
木製反射板	0.6	1260	36

※1 メーカーカタログ および材質番号による
 ※2 シュミットハンマーテストによる


図-5 傾斜反発実験における R_n, R_t, R_v と法線方向入射速度との関係

図-6 傾斜反発実験における R_n, R_t, R_v と入射角度との関係

下体には、速度比が形状の影響を受けないよう直径5.8cmの石英と直径3.0cmのアルミの球体を用いた。これらの諸元を表-1に示す。

実験は、図-4中に示す反射板の角度(θ)を 0° , 15° , 30° , 45° , 55° , 65° , 75° と変化させ、各角度毎に落下高さ(h)を1.0m, 2.0m, 3.0m, 5.0mと変えて、各球体を落とす方法で行った。落下は3回行い、その平均値を結果とした。計測には高速カメラ(Phantom450, 撮影速度1/1900sec)を使用し、反発後の跳ね返り速度と角度は、カメラに付属の画像解析ソフトを用いて求めた。なお、反射の速度と

角度は、反射後から1/30秒後の位置で計測した。これは、同時に撮影した市販ビデオカメラと比較するためである。

(2) 法線方向入射速度および入射角度と速度比の関係

傾斜反発実験における各速度比(R_n, R_t, R_v)と、法線方向入射速度との関係を図-5に、また入射角度との関係を図-6に示す。

図-5から、法線方向入射速度の増加に伴い各速度比が減少する様子がわかる。なかでも法線方向速

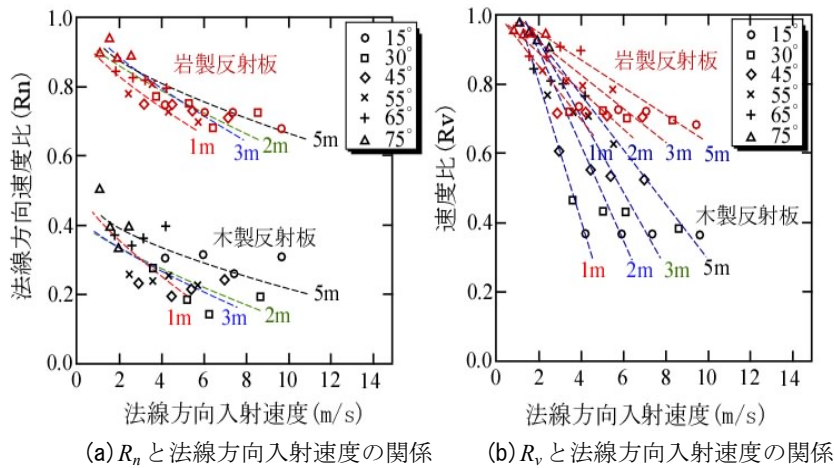


図-7 法線方向入射速度と R_n , R_v 関係における入射速度と入射角度の影響
(石英球の例)

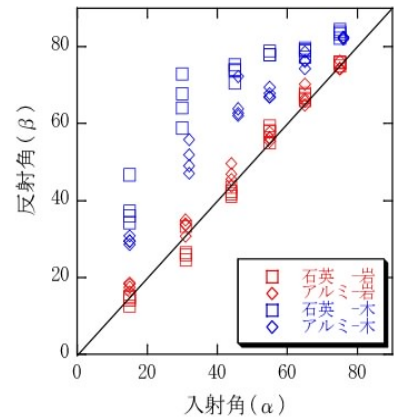


図-8 入射角度と反射角の関係

度比(R_n)の分布は特徴的であり、例えば石英球の場合、岩製反射板では0.93～0.69、木製反射板では0.51～0.26というように、反射板によって値の分布範囲が異なる。これに対し、接線方向速度比(R_t)と速度比(R_v)には、このような分布の違いはみられない。いずれも法線方向入射速度が小さいときには1.0に近い値をとり、法線方向入射速度の増加とともに減少する。 R_t は、 R_n と呼应した動きを示すが、反射板による違いは見られず、 R_n とは逆に木製反射板より岩製反射板で大きく低下している。

図-6に示す入射角度との関係も、法線方向入射速度との関係同様、各速度比とも入射角度が小さくなるほど値が低下している。その分布傾向も法線方向入射速度との関係同様、 R_n は反射板別に分布し、 R_t , R_v は入射角度が75°で1.0に近い値をとり、入射角度が低くなるにしたがって低下する。入射角15°のときの R_v の値が反射板別に異なる点も同じである。なお、 R_t や R_n では入射角度が30°のとき値が最も低くなる傾向がみられた。これは入射角度が小さくなるほど、反射角度が大きくなり、30°で反射角度と入射角度の差が最大になるためである。その理由としては、衝突時の滑りの有無や球体と反射板間の摩擦や塑性変形の影響などが考えられるが、詳細を明らかにするには至っていない。いずれにしてもこれらのことから、各速度比の変動には入射角度が大きく影響していることがわかる。

図中には、各入射角度の位置で計測値が縦方向に4点ずつプロットされているが、これは同一入射角度での落下高さ別速度の値をプロットしたものであり、いずれも下の値ほど落下高さが大きいことを示す。これが、入射角度が同じときの入射速度の違いによる各速度比の変化幅である。

以上の室内実験結果から、各速度比の変化は、

入射速度よりも入射角度の影響に大きく依存し、しかもその影響は R_n と R_v では異なることが明らかとなった。そこで、法線方向入射速度と R_n , R_v の関係図において R_n と R_v が、入射速度や入射角度とどのような関係にあるのかを、石英球と各反射板の関係を例にまとめたのが図-7である。図中では、いずれも入射角度別に記号を変え、また入射速度の違いを回帰曲線で示した。なお、入射速度の違いは落下高さ(h)表示で示している。

法線方向速度比(R_n)をみると、岩製反射板では入射角度75°のとき0.87～0.90だった値が15°では0.67～0.74に、また木製反射板でも入射角度が75°のとき0.35～0.40だった値が、15°では0.26～0.32に低下している。各反射板での R_n の変動範囲自体は R_v に比べると狭いが、その変動は入射角度により生じていることがわかる。

速度比(R_v)も同様だが、こちらは入射角75°のときは反射板の種類によらず0.90～0.98と高く、逆に15°のとき岩製反射板では0.67～0.72に、また木製反射板では0.37にまで低下する。速度比(R_v)では、入射速度よりも入射角度による影響が大きく表れており、その影響は木製反射板のように柔らかい材質すなわち強度の低い材質で顕著である。

一方、このような速度比の低下の影響は、入射角度にも表れている。図-8は、実験結果における入射角度と反射角度の関係を示した図である。本図から、石英球-岩製反射板では R_n や R_v の値がほぼ一定となる45°以下でも、入射角の関係はほぼ1:1であること、また木製反射板では、75°から30°にかけて反射角度が増していく様子がわかる。

このような速度比や入射角度の変化は、摩擦や回転の影響で説明されることも多いが、本実験結果からは、むしろ衝突時の球体や反射板に生じる傷

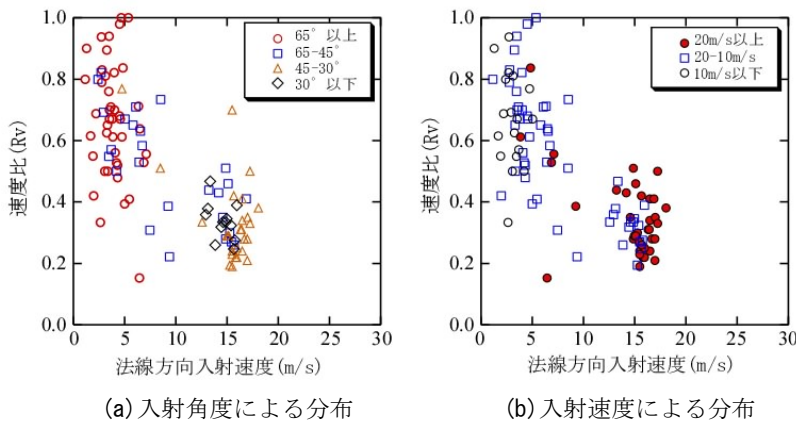


図-9 現場実験結果の速度比と法線方向入射速度結果

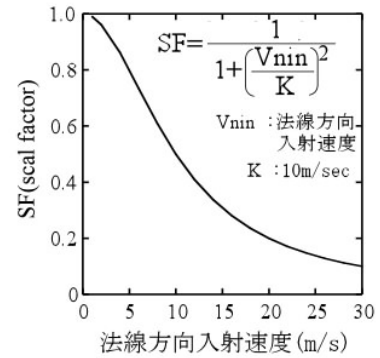


図-10 スケールファクター曲線

や凹みの影響が大きいと考えられる。すなわち岩製反射板では、入射速度が速く、入射角度が小さくなるほど、微少な放射状ないし同心円状のひび割れ(石英球)や、小さな凹み跡(アルミ球)などの衝突跡が目立つようになる。また木製反射板では入射角度が小さくなるほど反射板上の衝突痕(凹み)が大きくなる。そして、岩製反射板では 45° 以下で速度と角度に対する変動が小さくなり、木製反射板でも同様に 15° 以下で速度による変化がなくなる。このように、入射速度がある値以上になると速度比の低下がみられなくなる現象は、コンクリート球を用いた地盤への垂直落下実験でも報告されている⁸⁾。この原因は、衝撃力の増加に伴い、地盤と衝突物質間の弾性変形量が限界に近づき、変わって圧縮塑性ひずみとせん断ひずみが増加することで、材質本来の持つ速度比(いわば限界速度比)に近づくためと考えられている。木製反射板では入射角 15° 以下が、また岩製反射板では 45° 以下が、この限界速度比に相当するものと推察される。

(3) 室内実験結果と実現場での R_v と法線方向入射速度の関係

室内実験から、法線方向速度比(R_n)や速度比(R_v)の変動には入射角度が大きく影響することを説明した。ところで、実現場での速度比と法線方向入射速度との関係にもこのような関係が明瞭にみられるのだろうか。

図-9は、筆者らが報告した、速度比(R_v)と法線方向入射速度との現場実験での関係である⁵⁾。図中では、入射角度と入射速度別に記号を変えてプロットした。図-9(a)は入射角度別の図である。細かくみると、入射角度 30° 以下では 0.47 以下に集中するが、入射角度が 65° 以上では R_v の分布は $0.15 \sim 1.0$ まで広がる。しかし全体としては、室内実験同様に入射角

度が小さいほど低く、大きくなるほど高い傾向はみられる。一方、図-9(b)は入射速度別にみた図である。ここでもばらつきが大きく判然とはしないものの、入射速度が 10m/s から 20m/s へと速くなるにつれて傾きが緩くなる、すなわち図-7(b)と同じ傾向があることはわかる。

このようなばらつきの原因には、岩塊の形状や規模、回転や摩擦の他、地盤側の塑性変形などの影響が考えられるため、個々にその影響を評価することは不可能である。しかし本結果からも、速度比では入射角度が高くなるほど 1.0 に近く、入射角度が小さくなるほど値が低下する傾向や、また入射速度が速くなるほど速度比の低下勾配が緩傾斜となる性質は、現場実験結果にも認められることがわかる。

以上の結果から、 R_n と R_v は同じように法線方向入射速度依存性があり、いずれも入射角度に依存する性質を持つこと、実際の斜面では大きくばらつくこれらの値も基本的には室内実験結果と同様の分布をみせることを説明した。しかし最も重要なことは、 R_n が反射板の材質により分布範囲が異なるのに対し、 R_v の変動は主に入射角度に依存しており、崖錐や露岩といった斜面の影響は、あっても小さいという点である。

4. 実験結果の評価と実現場への適用性

(1) SF曲線による反射速度の予測

法線方向速度比(R_n)が法線方向入射速度に依存して変化することは、多くの研究が指摘している¹⁾。その補正の方法についても、既にさまざまな提案があり、式(5)に示すPfeiffer & Bowenの方法もその一つである⁴⁾。

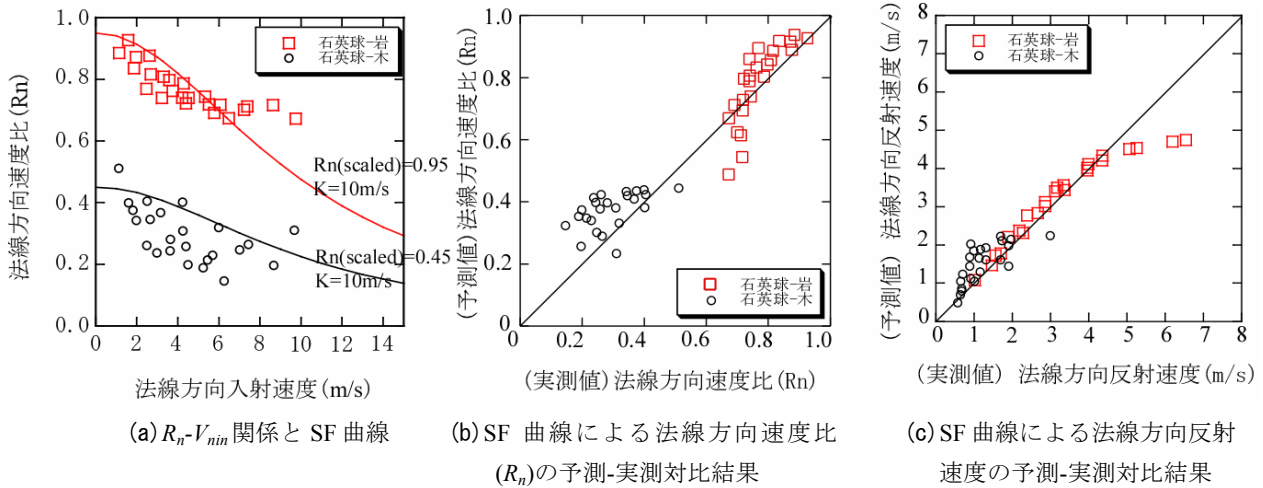


図-11 R_n - V_{nin} 関係に SF 曲線を用いた反射速度の予測

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

ここに,

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

V_{nout} は法線方向の反射速度であり, V_{nin} は法線方向入射速度を表す. ただし, $V_{nin} \neq 0$ である. また, SF はスケールファクターと呼ばれる曲線の式を表す(図-10). この曲線を, 本論文では以後 SF 曲線と呼ぶ. $R_n(\text{scaled})$ は, 例えば図-11 (a) の木製反射板の $R_n(\text{scaled})=0.45$ の SF 曲線をみればわかるように, SF 曲線左側の開始位置を決定するためのパラメータである. また, K は SF 曲線の勾配を決定するパラメータであり, ここでは補正速度と呼ぶ. Pfeiffer らは K の値 9.144m/s(30feet/sec)としているが, 本論文では簡単のために 10m/s とした. Pfeiffer らの方法では, この SF 曲線を用いて, 衝突の都度変化する法線方向入射速度に対する法線方向速度比(R_n)を補正し, 各衝突点での法線方向反射速度を求めている.

一方, 速度比(R_v)は, 前述のように斜面の状況を直接表さない. したがって, 速度比(R_v)をシミュレーションに用いるためには, その分布特性を考慮した形で定式化する必要がある. 筆者らは, 既に式(5)中の $R_n(\text{scaled})$ を速度比に換えた式(6)が, 反射速度の予測に適用できることを報告した⁵⁾.

$$V_{out} = R_v(\text{scaled}) \times SF \times V_{in} \quad (6)$$

ここに, V_{out} は反射速度(m/s)であり, V_{in} は入射速

度である. 本方法は, R_v を法線方向入射速度の関数とする方法で, 実験結果の項で述べたように, $R_v(\text{scaled})$ や補正速度 K は, 反射板材質すなわち崖錐や露岩といった斜面の特徴を表すと考えられる.

(2) SF 曲線法を用いた実験結果の評価

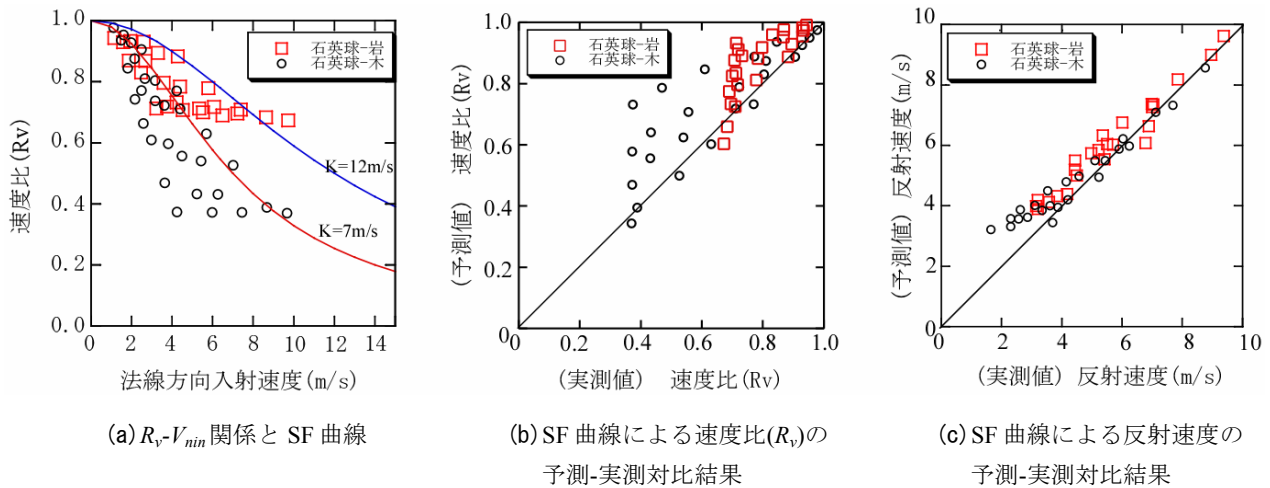
ここでは, 実験結果を用いて, 式(5)と式(6)による反射速度の予測法の適用性について考察する.

a) 法線方向速度比(R_n)による SF 曲線の適用

図-11は, 石英球と, 木製および岩製反射板との実験結果に式(5)を適用した結果である.

図-11 (a) は, R_n と法線方向入射速度(V_{nin})との関係を示しており, 図中には石英球-岩製の SF 曲線 ($R_n(\text{scaled})=0.95$, $K=10\text{m/s}$)と, 石英球-木製の SF 曲線 ($R_n(\text{scaled})=0.45$, $K=10\text{m/s}$)を示している. $R_n(\text{scaled})$ は, 最大入射角度 $=75^\circ$ のときの値を参考に想定した. なお, 補正速度 K は, 法線方向入射速度の増加に伴う R_n の低下幅を表している.

図-11 (b) は, この SF 曲線を用いて求めた法線方向速度比(R_n)の実測値と予測値の対比結果である. 予測値が実測を上回るものが多いのは, 図-11 (a) で SF 曲線を R_n 分布の上側を通るように設定したためである. このため, 図-11 (b) では予測 R_n のほとんどが予測値を上回り, 図-11 (c) でも予測法線方向反射速度のほとんどが実測値を上回る結果となっている. なお, 図-11 (b) (c) の岩製反射板の結果で, 実測値に比べて予測値が著しく低い部分は, 図-12 (a) の法線方向入射速度が8m/s 以上で R_n がほぼ0.67付近で一定となる部分である. 本検討では処理しなかったが, SF 曲線を適用する際には, このような部分は予測時に別に処理が必要となる.


 図-12 R_v - V_{nin} 関係に SF 曲線を用いた反射速度の予測

b) 速度比(R_v)による SF 曲線の適用

図-12は、石英球と、木製および岩製反射板との実験結果に式(6)を適用した結果である。

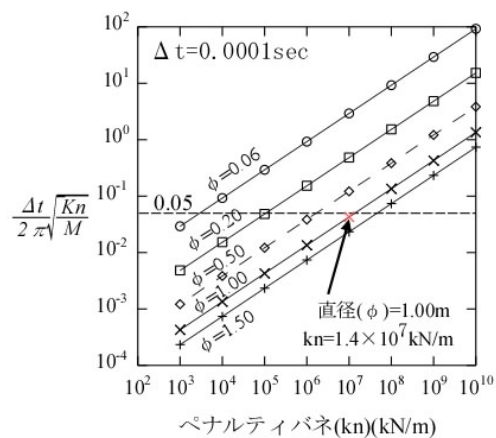
図-12(a)は R_v と法線方向入射速度との関係を示しており、SF 曲線の起点となる $R_v(\text{scaled})$ は、1.0としている。一方、補正速度 K は材質により異なる。ここでの SF 曲線は分布の外側、すなわち最大速度付近を通るよう設定し、岩製反射板では $K=12\text{m/s}$ 、また木製反射板では $K=7\text{m/s}$ とした。

図-12(b)は、それらの SF 曲線を用いて求めた速度比(R_v)の実測値と予測値の対比結果である。予測値がいずれもやや過大評価ぎみなのは、図-12(a)で SF 曲線を分布最大側を通るように設定したためである。このように SF 曲線を最大速度に合わせて決定すると、入射角度が小さく入射速度が遅いものほど、すなわち法線方向入射速度が小さく速度比が小さいほど、 R_v の予測値は実測値を上回るようになる。この影響は、例えば岩塊が階段状の地形をゆっくり落下するような場合の解析時に、予想以上の反発となって表れる。 R_v による SF 曲線法を適用する際の注意点である。図-12(c)は反射速度の実測値と予測値の対比結果であり、上述の原因で速度比が小さいほど反射速度を過大評価する傾向はあるものの、反射速度の予測は良好に行われている。

5. 速度比の入射角度と速度の依存性を考慮した落石シミュレーションへのDDA適用

(1) DDAの概要と入力定数について

不連続変形法(DDA)では、衝突時のエネルギー損失を表すために速度エネルギー比(速度自乗比)を用いる¹²⁾。ここでは、速度比(R_v)を用いたSF曲線法を


 図-13 ペナルティバネと球体規模(質量)と Δt との関係

不連続変形法(DDA)に導入し、落石シミュレーションへの適用性について検討した。なお、導入の方法は前報で報告したとおりであり⁵⁾、落体と地表面要素が接触する際の法線方向入射角度と入射速度をもとに接触の都度、式(6)の右辺より反射速度を求めている。

用いた解析法は三次元球要素剛体解析コード(DDAball)である^{2),12)}。本解析法は、落石を球状剛体要素、斜面を平面要素で表した三次元解析コードである。球を剛体としたことで、手法上では接触判定が単純化され、同時に実用面では衝突時の球体変形が反射軌跡に及ぼす影響を無視できるなど、落石解析に特化した方法である。なお、DDAballは、もともと複数の球体を接合して落石形状を表すよう作成されているが、本論文は、速度比(R_v)の基礎的特性を考慮したSF曲線法の落石シミュレーションへの適用性を検討することを目的としているため、解析には形状の影響を受けない球体を用いた。

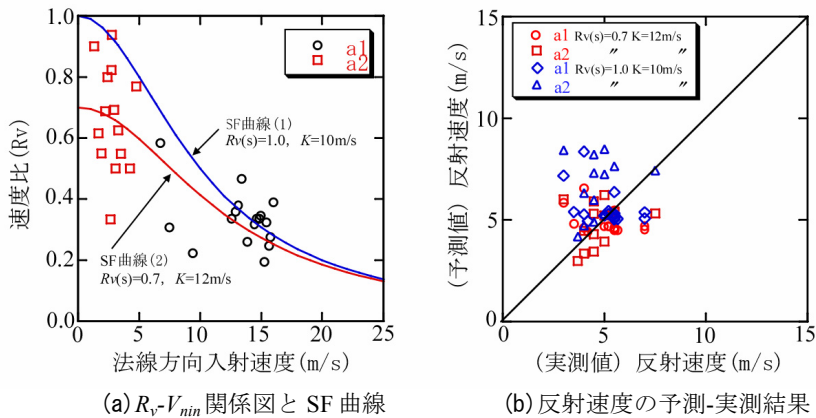


図-14 現場(a) SF 曲線による反射速度の解析結果

表-2 現場(a) 解析に用いた入力値

入力項目	入力値
落石質量	470kg
密度	$2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
摩擦角	30°
Δt (sec)	0.00005
ペナルティバネ (Kn)	$1.8 \times 10^7 \text{ kN/m}$
落下開始点での初速度	$v_x = 1.0 \text{ m/s (stdv=0.5m/s)}$ $v_y = -1.0 \text{ m/s (stdv=0.5m/s)}$
ケース1 $R_v(\text{scaled})$	$R_v(s)=0.7$ ($K=12$)
ケース2 $R_v(\text{scaled})$	$R_v(s)=1.0$ ($K=10$)

一方, DDAを用いて精度の高い衝突解析を行うためには, 速度比や摩擦角などの物理定数以外にも, 時間刻みやペナルティバネなどの解析パラメータを適切に設定しなければならない. 例えば, DDAによる落石解析では, 計算を効率的に進めるために落石が接触探索領域の外にあるときは大きな時間刻みが, また接触探索領域に入ると小さい時間刻みが採用される. しかし, 時間刻みにあまり大きな値を設定すると, 異常な反発や平面要素(想定地表面)を透過する原因となる. ペナルティバネもまた同様であり, このような時間刻みとペナルティバネの設定値が解析結果に大きく影響することが近年指摘されている^{9),10)}. この問題に対し, 布川は一次元バネモデルの減衰に関する検討結果をもとに, DDAの解析において数値減衰のない安定な解を得るためには, 式(7)の条件を満たす必要があると報告している¹¹⁾.

$$\frac{\Delta t}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \leq 0.05 \quad (7)$$

ここに, Δt は時間刻み, K_n はペナルティバネ剛性, M は落石質量である.

ところで, 式(7)は, シミュレーションに先立って落石質量が決定されれば, あとは時間刻みを設定することで, 自動的にペナルティバネが求まることを示している. 今, 時間刻みを $\Delta t=0.0001 \text{ sec}$ とすると, 直径 ϕ の球体に対する式(7)とペナルティバネ (K)との関係は図-13のように表される. なお, 密度は $2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ としている. 本図から, 式(7)を満たすペナルティバネは, 球体の大きさに応じて大きな値を必要とすることがわかる. 本図にしたがえば, 直径 1.00 m の球体を用いて解析を行う場合, 時間刻みを $\Delta t=0.0001 \text{ sec}$ とすると, ペナルティバネは $1.4 \times 10^7 \text{ kN/m}$ 以下に設定しなければならないことになる.

このように適切にパラメータが決定できれば数値減衰の問題を回避できるため, あとは落石現象に対する速度比の特性評価の問題に移ることができる. 次では, 筆者らがこれまでに報告してきた現場実験のうち, 現場(a)と現場(c)の2箇所の再現解析を通じて, SF曲線を導入したDDAballによる落石シミュレーションの適用性を検討する.

(2) SF曲線の実際の斜面への適用例(1)

現場(a)は, 落差 $15 \sim 16 \text{ m}$ の急崖上にあるオーバーハング岩塊の除去現場である⁵⁾. 計測個数は19個であり, 各岩塊の最初の反発地点をa1, 次の反発地点をa2として計測した. 計測した地点のおよその位置を図-15に示す.

本現場の特徴は, 落下地点が同じ岩砕上であるにもかかわらず, a1 地点での平均が $R_v=0.33$, a2 地点での平均が $R_v=0.66$ と, ほぼ2倍の開きを持つことである. 計測では, a1 に $14 \sim 18 \text{ m/s}$ (入射角度 $20^\circ \sim 30^\circ$) の速度で衝突した岩塊は, 2 m 前後を跳んで a2 でバウンドした後, 平均傾斜 30° の岩砕上を小さくバウンドしながらころがり, そのほとんどが斜面末端に達して止まる. a2 への入射速度は $5 \sim 10 \text{ m/s}$ (入射角度 $40^\circ \sim 60^\circ$) である.

図-14(a)は, 速度比 (R_v) の計測結果と法線方向入射速度との関係を示した図である. 同図には, 室内実験結果にしたがった $R_v(\text{scaled})=1.0$ としたときに a1 のほぼ平均を通る $K=10 \text{ m/s}$ の SF 曲線(1)と, a1,a2 両方の平均を通る $R_v(\text{scaled})=0.70$, $K=12 \text{ m/s}$ の SF 曲線(2)の2つを示した. 図-14(b)は, この2つのSF曲線による反射速度の予測-実測結果である. 結果は, SF 曲線(1)では実際に大きく上回り, SF 曲線(2)の方が予測-実測の関係は良好となった. このことは, 室内実験とは異なり実斜面では SF 曲線の起点 ($R_v(\text{scaled})$) が 1.0 以下となる場合もあることを示

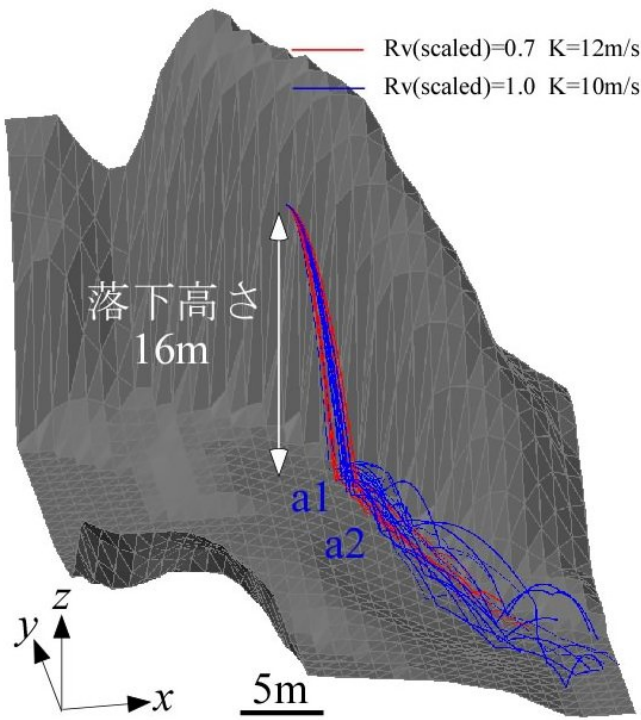


図-15 現場(a)の地形モデルと解析結果(軌跡図)

している．解析では，この 2 つの SF 曲線を比較した．

解析に用いた入力値を，表-2 に示す．なお，前述の式(7)の結果は 0.0492 であり，0.05 以下という条件を満足している．

図-15 は，DDAball による解析地形モデルと解析結果の軌跡である．解析モデルは，1m 間隔の等高線平面図に，1m 間隔の正方形格子枠を当てはめ，これをもとにした三角形要素で作成した．落下岩塊は，計測した岩塊の平均形状(0.70×0.5×0.5)をもとに，ほぼ同体積となる半径 0.35m の球体でモデル化した．なお，解析回数は 50 回とし，初速には正規乱数を用いてばらつきを与えた．初速は， x, y 方向の平均速度が $v_x=1.0\text{m/s}$ ， $v_y=-1.0\text{m/s}$ であり，標準偏差はそれぞれ 0.5m/s とした．これにより，投下地点と a1 地点とを結ぶ落下方向に対しておよそ $\pm 26^\circ$ の広がりとなり，平均初速を 1.4m/s として標準偏差 0.7m/s の変化を与えた．DDAball は三次元解析法であるため，落下地点での入射角度と速度の変化は反射時の角度と速度にも影響し，これが最終的な軌跡と速度に広がりやばらつきを与える．軌跡と速度軌跡の結果は 5 回おきの結果を示しているが，結果は赤線で示した SF 曲線(2)の方が実際に近い．

図-16 は，解析結果の速度軌跡を示した図である．図の下には，a1, a2 での速度比の解析値と実測値を示している．本図から，落下直後の a1 地点での速度

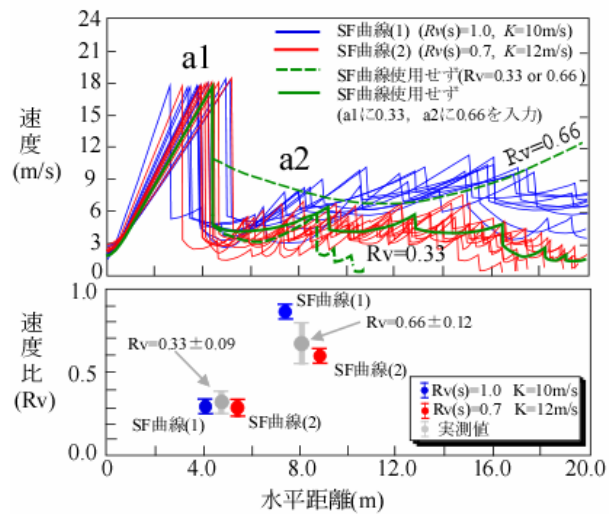


図-16 DDAball による解析結果(速度軌跡図)

減衰がほぼ同じでも，SF 曲線が異なるとその後の落体の挙動も大きく変化する様子がわかる．すなわち，SF 曲線(1)では 2～4m の跳躍を繰り返し，斜面末端に到達しても速度は低下しないが，SF 曲線(2)では 1～2m の小さな跳躍を繰り返しつつ落下して斜面末端では速度は 1m/s 以下となりほぼ停止とみなせるまでに低下する．図-16 の下に示したように a1 での解析結果と実測値がほぼ同じであるのに対し，a2 で得られた SF 曲線(1)の結果は $R_v=0.86$ と実測に比べて著しく大きい．この a2 での速度比の違いが，軌跡と到達距離に大きく影響している．

図-16 には，SF 曲線を使用せず，a1 地点での速度比($R_v=0.33$)と，a2 での速度比($R_v=0.66$)を，それぞれ斜面全体の代表値として解析したときの速度軌跡を緑色の点線で示した．斜面の代表値を $R_v=0.66$ としたとき，落下した岩塊は a1 で大きく反発し，a2 を飛び越えて解析範囲の外に出る．代表値を $R_v=0.33$ とすると，岩塊は a1 ではほぼ計測結果どおりに反発するが，a2 では反発後すぐに停止する．一方，a1, a2 にそれぞれの計測値を入力すると，図-16 上の緑の実線で示したように，解析結果の速度はほぼ SF 曲線(2)と同じになる．

本結果からは，落下地点途中に大きな地形変化点がある場合でも，速度比(R_v)の法線方向入射速度依存性を考慮することで落石の反発現象による速度の変化を良好に再現することが可能であり，結果的

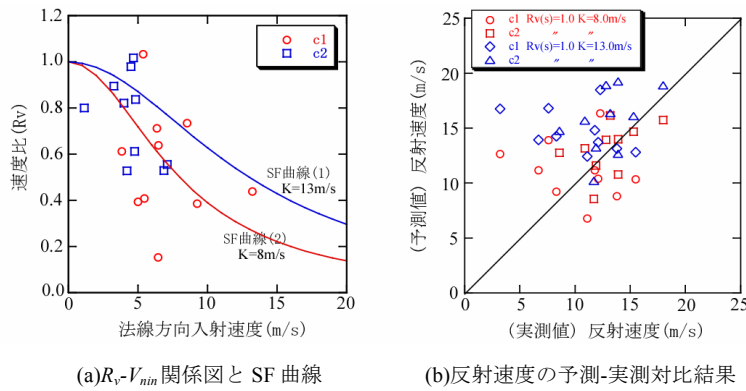


図-17 現場(c)SF 曲線による反射速度の解析結果

表-3 現場(c) 解析に用いた入力値

入力項目	入力値
落石質量	2352kg
密度	$2.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$
摩擦角	30°
Δt (sec)	0.0001
ペナルティバネ (Kn)	$2.3 \times 10^7 \text{ kN/m}$
落下開始点での初速度	$v_x = 4.0 \text{ m/s}$ (stdv=0.25m/s) $v_y = -3.0 \text{ m/s}$ (stdv=0.55m/s)
ケース1 R_v (scaled)	$R_v(s) = 1.0$ ($K=13$)
ケース2 R_v (scaled)	$R_v(s) = 1.0$ ($K=13$)

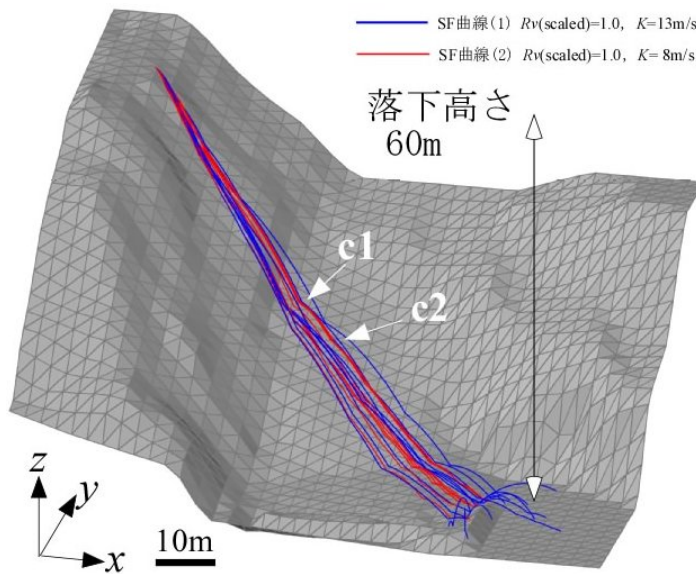


図-18 現場(c)の地形モデルと解析結果(軌跡図)

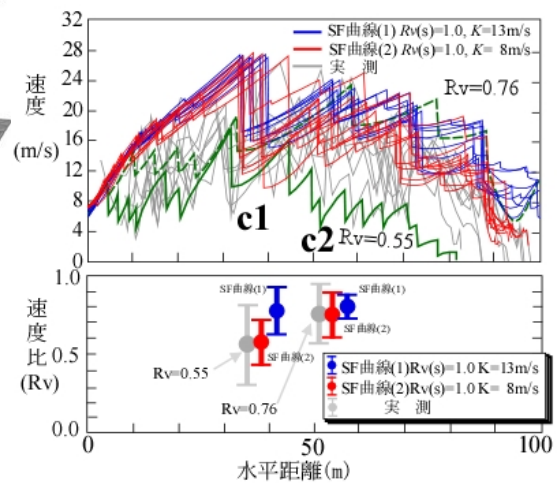


図-19 DDAball による解析結果(速度軌跡図)

に落石の三次元的方向の軌跡も良好に再現可能となることがわかる。

(3) SF 曲線の実際の斜面への適用例 (2)

現場(c)は、水平距離90m、比高差およそ60mの採石場の斜面である^{5), 13)}。斜面頂部からブルドーザーで押し出された岩塊は、平均傾斜 33° 、地形の凹凸変化の少ない崖錐の斜面上を、低い跳躍を繰り返しながら落下する。最初の反発計測地点は、斜面中間の小崖から飛びだした各岩塊の最初の反発地点であり、これをc1地点とした。噴煙の大きさからみて地盤の変形によるエネルギー損失の最も大きい場所である。一方、c1地点の次の反発点をc2地点とした。それぞれ、およその位置を図-18に記号で示す。

計測した岩塊の個数は10個である。c1地点への平均入射速度は19m/s、入射角度は 69° 、得られた速度比の平均が $R_v = 0.55$ である。c2地点での平均入射

速度は18m/s、入射角度は 75° であり得られた速度比の平均は $R_v = 0.76$ である。

図-17(a)は、速度比の計測結果(R_v)と法線方向入射速度との関係を示した図である。ばらつきが大きいため適切なSF曲線を想定しにくい、ここでは室内実験の結果を踏まえて、 $R_v(\text{scaled})$ を1.0とする2つのSF曲線を比較した。速度比分布の最大側を通る補正速度 $K=13 \text{ m/s}$ のSF曲線(1)と、c1,c2の平均を通る速度比 $K=8 \text{ m/s}$ のSF曲線(2)の2つである。なお、計測結果中には $R_v=1.0$ ないしそれ以上の値もみられるが、これについては補正速度の値が著しく大きくなること、解析結果も実際とは大きくかけ離れること等の理由でSF曲線探索時には除外した。図-17(b)に示す予測結果では、SF曲線(1)では予測が実測を上回るものが多く、SF曲線(2)の予測-実測結果は平均的である。解析では、この2つのSF曲線を比較した。

解析に用いた入力定数を表-3に示す．なお，前述の式(7)の結果は0.04440であり，0.05以下という条件を満足している．

図-18は，DDAballによる解析地形モデルと解析結果の軌跡である．解析モデルは，2.5m間隔の等高線平面図に3m間隔の正方格子枠を当てはめ，これをもとにした三角形要素で作成した．落下岩塊は，計測岩塊の平均形状をもとに半径0.6mの球体でモデル化した．なお，解析回数は50回とし，初速には正規乱数を用いてばらつきを与えた．乱数発生範囲は，x方向が $v_x=4.0\text{m/s}$ ，y方向が $v_y=-3.0\text{m/s}$ であり，標準偏差はそれぞれ0.25m/sとした．これにより投下地点とc1地点(平均位置)とを結ぶ落下方向に対しておよそ $\pm 4^\circ$ の広がりとし，初速平均5.00m/sに対し標準偏差0.35m/sの変化を与えた．現場(a)で述べたように本解析法は三次元解析法であり，反発地点での入射角度と速度の変化，すなわち三次元モデルによる変化に法線方向入射速度依存性を加えたことで，最終的な軌跡と速度に広がりやばらつきを与えたことになる．ここでも，軌跡と速度軌跡の結果は5回おきの結果を示した．ただし，本結果では，軌跡にSF曲線による違いは表れておらず，むしろ後述する速度の結果に影響が表れている．

図-19は，解析結果の速度軌跡を示した図である．図の下には，c1, c2地点での速度比の解析値と実測値を示した．解析結果の速度比は，SF曲線(1)がc1地点で $R_v=0.78$ ，c2地点で $R_v=0.58$ と，いずれも実測値である $R_v=0.55$ を上回るのに対し，c1, c2での実測平均を通るように設定したSF曲線(2)ではc1地点で $R_v=0.88$ ，c2地点で $R_v=0.75$ と，実測値($R_v=0.76$)をわずかに上回る程度であった．この結果は，図-18の軌跡にも表れており，SF曲線(1)では，速度軌跡は実測範囲を大きく上回るため，末端の堤に達しても止まらずに跳ねるが，SF曲線(2)での速度軌跡はほぼ実測に近く，停止位置も広がり範囲もほぼ計測結果どおりである．本結果からは，実測値の平均を通るSF曲線(2)の方が再現性が良好といえる．

なお，図-19には，SF曲線を使用せず，c1地点での速度比($R_v=0.55$)と，c2地点での速度比($R_v=0.76$)，それぞれ斜面全体の代表値として解析したときの速度軌跡を緑色の点線と実践で示した．斜面全体をc1の値($R_v=0.55$)で解析すると，全体に速度が低くなり平坦部に到達した直後で1m/s以下になる．c2の値($R_v=0.75$)で解析すると，斜面下方ではSF曲線(1)(2)のほぼ中間の結果となる．ただし，落下開始点とc1間の速度軌跡をみれば明らかなように，入射角度と速度の依存性を考慮しない場合は，入射角度や速度

によらず一定の速度比で減衰する．このため地形の起伏による減衰の特徴は見られなくなり，シミュレーションによる再現挙動と実際の挙動とがかけ離れていく．このことから，落石挙動における法線方向入射速度依存の影響の大きさがわかる．

以上，実現場へのSF曲線を用いたDDAballによる検討結果から，速度比を用いた落石シミュレーションでは，その法線方向入射速度依存性を考慮することで再現性が向上すること，また斜面上の代表的な2箇所以上の衝突地点で速度比と法線方向入射速度の関係が得られれば，SF曲線の探索が可能となり，落石の反発挙動の再現が容易に可能となることを示した．

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主要な入力値である速度比(R_v)の基礎的特性を，室内傾斜衝突実験結果をもとに，法線方向速度比(R_n)と比較しつつ説明した．法線方向速度比(R_n)が，反射板材質の違いを反映するのに対し，同じように法線方向入射速度に依存して変化する速度比(R_v)には，本実験結果から次のような性質があることが明らかとなった．

- (1)速度比(R_v)は，法線方向入射速度に依存して変化するが，詳しくみると入射角度に依存する部分が大きく，その分布は最大入射角度(75°)でほぼ $R_v=1.0$ に近く，以後入射角度が小さくなるにつれて R_v は低下し，最小入射角度(15°)で最低値となる．一方，入射角度一定のときには，入射速度が速いほど値は低下するが，その変動幅は入射角度による変動幅に比べて小さい．
- (2)速度比(R_v)の値には，法線方向速度比(R_n)のように反射板材質の違いを反映する性質はみられない．材質の違いは，法線方向入射速度の増加に対する R_v の低下勾配と，最小入射角度(15°)のときの値に表われる．なお，入射角度がおよそ 45° 以下になると R_v の低下が止まる場合がある．この， R_v の低下が止まる入射の角度と速度も，材質によって異なる．

以上の結果から，速度比(R_v)は，法線方向速度比(R_n)のように岩盤や崖錐といった斜面の性状に関連づけられた入力値として適用することはできないと判断される．そこで，本論文では，Pfeiffer & Bowenが R_n の法線方向入射速度依存性を表すために導入したスケールファクター(SF曲線)を援用し， R_v を法線方

向入射速度の関数で表す方法を提案した。そして、この方法を導入した三次元球要素剛体DDA (DDAball)による落石シミュレーションを、落下経路の地形が異なる2箇所の現場実験結果の再現解析に適用し、次の結果を得た。

- (3)法線方向入射速度依存性を考慮することで、落下経路途中に大きな地形変換点があっても、良好な速度の再現結果を得ることができる。
- (4)速度の再現性の向上により、軌跡の再現性も向上する。
- (5)現場から得られる速度比と法線方向入射速度との関係は大きくばらつくが、室内実験から得られる(1)(2)の性質をもとにSF曲線を推定することが可能である。

以上、速度比(R_v)の法線方向入射速度依存性を考慮することで、DDAballによる反発を中心とした落石挙動の再現性が大きく向上することを示した。

ただし、本論文では、速度比(R_v)の変動が入射角度に大きく依存する性質のみに着目したため、摩擦や回転、それに地盤の塑性変形などの影響については検討していない。加えて、速度比の入射角度による変動を考慮した方法であることから、特に三次元解析では地形モデルの影響も無視できないという課題もある。

また、適切なSF曲線を設定するためには、本論文で扱った崖錐以外の、岩盤や土砂といった条件の異なる斜面への適用性についても検討していく必要があり、この面からのさらなる事例収集も望まれる。しかしながら、速度比の基礎的な性質が明らかになったこと、これをDDAballに導入したことで、少なくとも反発現象を中心とした三次元での落石挙動解析を容易に利用できる環境は整ったものと考えられる。本手法は、文中でも述べたように落石形状を球の集合体で考慮することも可能であることから、今後は前述の問題も含めて、落石形状や地形モデルに対する検討を進めつつ、その実用性をさらに高めていきたいと考えている。

謝辞:本研究を進めるにあたり、布川哲也氏(現大成建設(株))、ならびに不連続性岩盤実用化研究会の方々、特に佐々木猛氏(サンコーコンサルタント株)、三木茂氏(基礎地盤コンサルタンツ(株))には、終始懇切丁寧な御指導、御助言を頂いた。ここに記して感謝いたします。

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) 細谷昭悟，岩間倫秀，中根昌士，伊藤大輔，氏平増之：落石の三次元数値シミュレーションに関する研究—数値解析の方法と直線型斜面へ適用した場合—，応用地質，Vol44，No.1，pp.25-35，2003.
- 4) Pfeiffer, T. J., Bowen, T. D. : Computer Simulation of Rockfalls, *Bulletin of the Association of Engineering Geologists*, Vol.XXVI, No.1, pp.135-146, 1989.
- 5) 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，pp.707-721，2006.
- 6) 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.
- 7) 古賀泰之，伊東良弘，鷲田修三，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.
- 8) 右城猛，田中宏和，家石一美：落石の運動機構に関する研究その3—衝突による衝撃力—，地盤工学会四国支部，四国の地盤災害・地盤環境に関するシンポジウム，2004.
- 9) Ohnishi, Y., Nishiyama, S., Sasaki, T., and Nakai, T.: The Application of DDA to practical Rock Engineering Problem, Issues and Recent Insights, *Int. Proc. of the 7th Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (ICADD-7)*, pp.277-287, 2005.
- 10) 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.
- 11) 布川哲也：不連続変形法の岩盤動的問題への適用に関する研究，京都大学大学院工学研究科 都市環境工学専攻修士論文，2006.
- 12) 大西有三，佐々木猛，Gen-Hau Shi：不連続性岩盤解析実用化研究会，不連続変形法(DDA)，計算力学レクチャーシリーズ6，計算工学会編，pp.56-58，2005.
- 13) 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.

(2007. 7. 13 受付)

STUDY ON FUNDAMENTAL CHARACTERISTICS OF VELOCITY- RATIO USED IN ROCKFALL SIMULATION AND ITS APPLICATION TO DDA

Tetsuya SHIMAUCHI, Yuzo OHNISHI, Satoshi NISHIYAMA,
Koichi NAKAMURA and Naoki SAKAI

In the DDA (Discontinuous Deformation Analysis), the ratio of velocity energies (squared velocity ratio) is used for the energy loss during collision. The velocity ratio is investigated in detail with the experiments. It was clear that the velocity ratio is dependent on the incident velocity of the normal direction. Therefore, velocity ratio is not appropriate to consider the property 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).