現場落石実験から得られる斜面性状を 考慮した速度比の特徴について

萩原育夫1, 佐々木勝司1, 島内哲哉2*, 中村公一3, 西山哲4, 大西有三5

¹正会員 サンコーコンサルタント (株) 地盤防災部(〒136-8522 江東区亀戸1-8-9)

2正会員 明治コンサルタント株式会社,技術統括部東川口分室(〒333-0801 埼玉県川口市東川口1-22-4)

3正会員 鳥取大学大学院工学研究科 助教 (〒680-8552 鳥取県鳥取市胡山町南4-101)

4京都大学大学院工学研究科 准教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

5京都大学大学院工学研究科 教授 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)

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

落石の挙動は、斜面の傾斜や性状、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ため予測の難しい現象である。そのメカニズム解明や防災計画を目的として、数多くのシミュレーション手法が提案されてはいるが、入力定数の特性や地盤との対応関係など、未解明な点も多く残されている。筆者らは、これまで現場および室内落石実験を通じて、その主要な入力定数である反発係数(速度比)の性質を調べている。本報告では、落差90m、平均傾斜42°の立木のある斜面で行った現場落石実験結果をもとに、速度比と法線方向速度比の法線方向入射速度依存性や、立木の影響などについて述べる。

Key Words: rockfall, coefficient of restitution, velocity ratio, DDA

1. はじめに

山岳道路の多い我が国では、落石災害は主要な斜面災害の一つである。そのメカニズム解明や適切な防災計画を目的として、数多くの落石シミュレーション手法が開発されている¹⁾. これらの解析手法を活用するためには、斜面や落石運動の特徴を踏まえた入力定数の設定が必要となるが、地盤や斜面の性状に応じた適切な値を決定することは難しい.

筆者らは、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定数である速度比の性質を明らかにする目的で、これまで現場および室内実験や、落石発生後の調査を行ってきた ^{3),4),7)}. 本論文では、比高差約 95m、平均傾斜 42° の立木のある斜面において行った現場落石実験結果をもとに、得られた速度比の特徴について述べる.

2. 実験の概要

実験現場は、東北地方のあるダムサイト計画地の 斜面である。規模は、比高差約 95m で平均傾斜は 39~45 度の北向き斜面である。斜面は ϕ 7~20cm クラスの立木で覆われており、足下は高さ 20~ 30cm ほどの笹藪が繁茂する.このため実験時には、想定落下経路に沿う幅 10m~15m の範囲を伐採したが、必ずしもきれいに伐採できた訳ではない. 図-1 に示すように正面から見ると、伐採した範囲はほとんどわからない. 斜面の特徴を落石対策便覧にしたがえば、植生、立木のある土砂で、地形としての起伏は小さい斜面ということになる.また、後述する等価摩擦係数区分表(表-1)では、斜面区分は D、等価摩擦係数は 0.35 と想定された.

実験に用いた落石は,直径0.4 mの球体(10個)と 一辺が0.4mの立方体(9個)であり,いずれもコンク



図-1 正面(カメラ 6)からみた実験現場

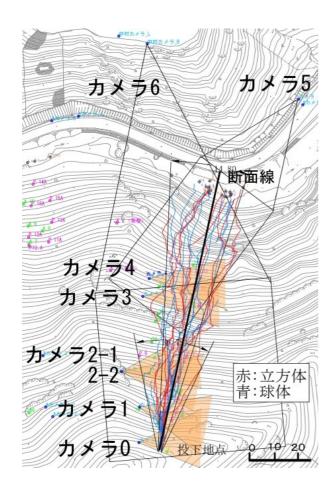


図-2 実験現場平面図 カメラ配置と落下軌跡

リート製である. これを斜面の頂部に設けた高さ約 2mの仮設台から人力で投下した. このため最初の投下地点への入射速度が, 4.0~5.2m/sとなっている.

実験の記録は、斜面の対岸と、斜面上~中段にかけて配置した合計8台のビデオカメラで行った(図-2). 斜面上~中段に掛けてのカメラ(0~4)は、落下中の反発挙動を捉えることを目的として配置した.これに対し、対岸のカメラ(5,6)は軌跡全体を追跡することが目的である.カメラはいずれも市販の家庭用ビデオカメラであり、記録画素数は34万画素(NTSC 720×480)、撮影速度は1/30secである.撮影は、カメラ位置を固定しかつ焦点距離を広角に固定して行った.このため、落石の反発挙動を捉えることが目的のカメラ0~4の6台のカメラは、落下経路から数m~20mの至近距離に設置した.

実験後,落石の挙動をビデオ画像から読み取り, 平面軌跡と断面軌跡を作成した.これらの作業は, 地形等高線から作成した3次元コンピュータグラフィクス(3dCG地形)をもとに作成した各カメラ位置からのパース画像と,各カメラの撮影画像とを重ね合わせることで行った.

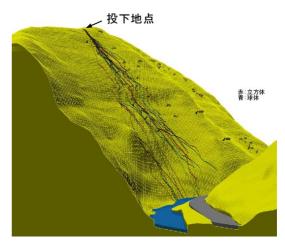


図-3 カメラ5の方向からみた落下軌跡図

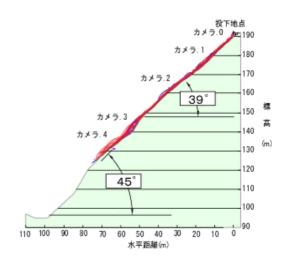


図-4 軌跡断面図

3. 落下軌跡と等価摩擦係数

(1) 落下軌跡

落下経路の地形は、図-2に見るように落下方向に対して等高線が直交するわずかに凹んだ平面地形である。このため投下直後はやや広がる様子をみせるものの、その後は等高線直交方向に落下する。斜面下方の河川の狭い範囲に落石が集中するのは、斜面下方の凹地形の中央に集められるように落下するためである。カメラ5の方向からみたCG地形図上に平面軌跡をプロットした結果を図-3に示す。

平面落下軌跡が、所々で急に大きく方向を変えるのは、立木に衝突したり植生の下に隠れた木の根やツルなどにひっかかって跳ね上がることが原因である。このような進行方向の急激な変化は、球体よりも立方体に多くみられる。

図-4は、カメラ0~4の結果をもとに作成した断面 軌跡図である.投下地点から落下した落下体は、平 均傾斜39度の斜面を、跳躍高さ1.0~2.0m程の低い 跳躍と、回転(転がり)運動を繰り返しながら落下す る.ここでの転がり運動は、跳躍高さが計測不能な ほど低い跳躍が連続するような運動であり、立方体

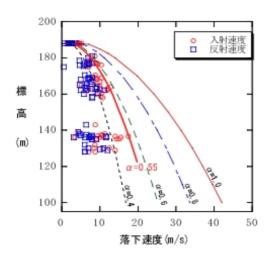


図-5 計測速度と落下標高関係図

に多く見られた. 一方, 球体は速度が遅いときは回 転運動であるが, 速度が増すにしたがって転がり運 動へと変化する.

観察区間における最大跳躍は、カメラ3付近の高さ4~5 mの小さな崖から飛び出す時に観察され、その高さは3~5mあまりに達する.

これより下方の標高120m付近から標高95mにかけては、斜面傾斜も45°と急になり、反発による飛距離も長く、その挙動は飛行というより落下に近くなる.

(2) 等価摩擦係数

落石対策便覧では、落石防護工計画に必要な速度 を得るために、以下の式を挙げている⁸⁾.

$$V = \alpha \sqrt{2gH} \tag{1}$$

$$\mu = \tan \theta (1 - \alpha^2) \tag{2}$$

$$V = \sqrt{2g(1 - \mu/\tan\theta)H}$$
 (3)

ここに、Vは落石の速度、 θ は斜面角度、Hは落下高さ、gは重力加速度である。また、 α は速度残存係数、 μ は等価摩擦係数である。速度を求める手順は、まず式(1)より速度残存係数(α)を推定し、ついで式(2)により等価摩擦係数 μ を求め、設計計画位置での速度を式(3)による求める。

図-5は、後述する入射速度と反射速度の計測結果を、計測地点の標高で整理した図である。図中には、式(1)をもとに α =1.0, 0.8, 0.6, 0.4 の速度線を示している。本図から、標高190m~125m間における速度残存係数(a)は0.55と想定される。この間の斜面傾斜角はほぼ39°であるから、 α =0.55とすると等価摩擦係数は式(2)より μ =0.56と求められる。落石対策便覧 8 では、斜面の状況に応じた等価摩擦係数の値

表-1 斜面の種類と等価摩擦係数の値 8)

区分	落石および斜面の特性	設計に 用いるμ	実験から得ら れるμの範囲
A	硬岩, 丸状, 凹凸小, 立木なし	0.05	0~0.1
В	硬岩,丸状〜角状, 凹凸小〜中,立木なし	0.15	0.11~0.2
С	土砂,崖錐,丸状〜角状, 凹凸小〜中,立木なし	0.25	0.21~0.3
D	崖錐, 巨レキ混じり崖錐, 角状, 凹凸中〜大, 立木なし〜あり	0.35	0.31~

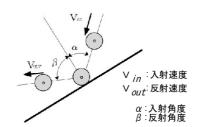


図-6 入反射速度と角度の定義

を表-1のように例示している。しかし、これを上回る値が計測されることも多く、本結果も事前の推定値 μ =0.35を大きく上回っている。この原因は、植生や地盤衝突時の速度減衰よりも、落下体が立木に衝突したりツルなどにひっかかって速度低下が頻繁に生じるためである。したがって、精度の高い等価摩擦係数を見積もるためには、このような立木の影響を適切に評価することが重要となるが、今のところこれは難しい。

4. 反発係数の計測結果

(1) 反発係数の計測

斜面における落石の運動では、一般に跳躍と回転(転がり)が卓越する。本実験では、カメラ0~4の画像から、衝突地点の反発係数を計測した。計測では、カメラの光軸方向と落下方向とが直交していることが理想である。ただし、落下経路が常に直交しているとはかぎらず、本実験の場合、結果的に計測時の落石の経路とカメラ光軸の交差角度は、カメラ位置によっても異なるが、およそ82°~97°の範囲である

速度の計測は、1/30sec~3/30secで行ったが、衝突は決して単純ではなく、衝突時にわずかに滑るもの、方向を変えるもの、斜面上に潜むツタや木の根の影響で跳ね上がるものなどさまざまである。また、低い跳躍が連続する場合は斜面傾斜と入反射角度の読み取りが困難な場合も多い。このようななかから、入反射時の落石全体の挙動が明瞭に確認できるものを計測の対象とした。

計測した項目は、図-6に示す3種類である.本論文では、このうち法線方向速度比(Rn)と速度エネルギー比を求める際に計測する速度比(Rv)の性質に着目した.

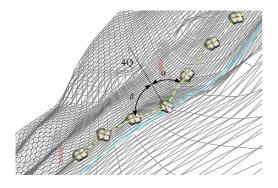
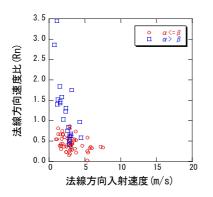
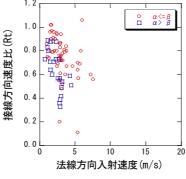


図-7 CG 地形図での計測例

表-2 反発係数の計測結果

カメラ 番号	計測斜面 の平均傾斜	平均 入射速度	平均 入射角度	法線方向 速度比(Rn)	接線方向 速度比(Rt)	速度比(Rv)
0	30	4. 3	46.5	0.38	0.62	0.53
1	43	8.5	70.8	0. 37	0.75	0.72
2-1	35	9.0	77.6	0. 48	0.81	0.80
2-2	35	9.6	73.9	0. 52	0.87	0.83
3	38	11.0	67.0	0.42	0.76	0.69
4	37	10. 2	74. 9	0.44	0.75	0.70





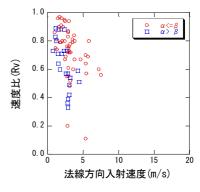


図-8 法線方向速度比の結果

図-9 接線方向速度比の結果

図-10 速度比の結果

$$Rn = \frac{-V_{out}\cos\beta}{V_{in}\cos\alpha} \tag{4}$$

$$Rt = \frac{-V_{out}\sin\beta}{V_{in}\sin\alpha}$$
 (5)

$$Ev = \frac{\frac{1}{2}m(-V_{out})^2}{\frac{1}{2}m(V_{in})^2} = \left(\frac{-V_{out}}{V_{in}}\right)^2$$
 (6)

計測は、図-2に示したCG地形を用いて作成した各カメラ位置からのCG画像と撮影画像を重ねることで行った⁷⁾. 計測例を図-7に示す. また, 表-2には、計測結果を各カメラ別に得られた平均値を示した. この表に、斜面傾斜、入射速度や入射角度の計測値を併記したのは、速度比(Rv)や法線方向速度比(Rn)が法線方向入射速度に依存する性質があるためである. 次に、各計測項目別に結果を述べる.

(2) 法線方向速度比(Rn)

法線方向速度比(Rn)と法線方向入射速度との関係を図-8に示す.図では、Rnの値を計測最大のRn=3.5まで示している.Rnが1.0を上回る現象は既往実験でも数多く報告されている.その原因として、斜面に隠れた突起に当たった場合、衝突地盤の塑性破壊の影響、落石形状によっては回転による跳ね上がりなど、いずれも入射角度より反射角度が小さくなるケースが考えられる.また、この他にも、計測時に生じる傾斜の読み時に生じる誤差、例えば計測

時の単純化された斜面傾斜と,実際の衝突地点の起伏による傾斜の違いなども要因として考えられている 2 . これらの原因は,個々の現場の斜面条件や撮影条件によっても異なるが,本実験現場の場合は,比較的はっきりしている.これは,実験中に,斜面途中の立木の根やツルに,落下体が衝突したり引っかかったりして,大きく跳ね上がる現象がしばしばみられ,このようなケースのRnがほとんど1.0以上となるためである.図-8では,このような原因によって入射角(α)>反射角(β)となったケースと,その影響が無いと判断できるケースとを記号を変えてプロットしている.本図において,立木やツルの影響受けた α > β のケースを除くと,その他のデータは概ね1.0以下となることがわかる.

ただし、このようなデータを除外したとしても値は0.07~0.86の広い範囲に分布する. 観察結果から、ばらつき原因は、衝突時の地盤破壊の程度や滑りの有無が、反射角度に反映された結果と思われる.

(3) 接線方向速度比(Rt)

接線方向速度比(Rt)の性質を詳述した例は少ない. 図-9は参考までに示したが、Rtにも法線方向入射速度の増加に伴い減少する傾向があり、これは他の現場実験でも見られる.詳しいことは不明だが、この傾向は衝突角度に対する入反射角度の変化の傾向を示しているのかも知れない.

(4) 速度比(Rv)

速度エネルギー比(Ev)は、本来は線速度と角速度 の成分からなる.ただし、現在のところは線速度成

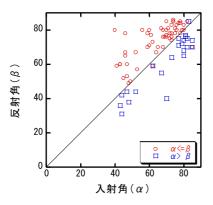


図-11 入反射角度の関係

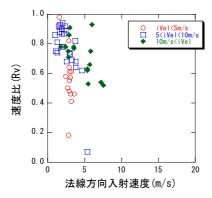


図-13 速度比-法線方向入射速度図 入射速度別分布図

分のみが計測の対象となっている。この線速度成分算出の根拠となる計測値が速度比(Rv)である。図-10に、計測された速度比(Rv)と法線方向入射速度との関係を示した。Rvは、法線方向速度比(Rn)と異なり入反射角度の項を含まない。このためか、Rvが1.0以上となることは、これまでの他の現場実験をみてもほとんどない。法線方向入射速度の増加とともにRvが低下する分布も、室内実験でみられる分布と同じである。

(5) 入反射角度の関係

室内実験において、硬質な反射板を用いた衝突実験を行うと、入射角と反射角の関係はほぼ1:1になる.しかし、衝突時に凹みが生じるような軟らかい反射板を用いて実験すると、入射角が小さくなるほど入射角<反射角となる傾向が表れる^{51.6}.

図-11は、本実験現場での入反射角の関係を示したものである。ここでも、これまで同様立木やツルの影響を受けた計測値($\alpha > \beta$)とそうでないものを記号別に示している。この図から、これらの影響を受けた計測値($\alpha > \beta$)を削除すると、ほとんどのケースで入射角<反射角の関係となることがわかる。ただし、この関係は入射角度が小さくなるほど大きくなる傾向がみられ、これは例えば木製反射板に石英球を落下させた室内実験結果とも傾向が同じである。この原因としては、衝突時の地盤側の塑性破壊の大きさが衝突角度によって変化し、入射角度が小さいほど地盤側への影響が大きくなるためではない

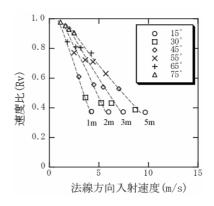


図-12 速度比と法線方向入射速度の室 内実験結果⁶⁾

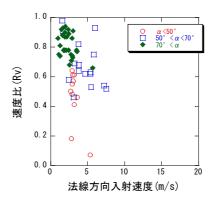


図-14 速度比-法線方向入射速度図 入射角度別分布図

かと考えられる。また、この傾向はRtの法線方向入 射速度への依存傾向とも一致する。もし、このよう な地盤の性状(硬軟)が入反射角の変化に一定の傾向 与えるなら、これはシミュレーション時の跳躍高さ や到達距離に影響することになる。今後、さらに検 討する必要があろう。

5. 実験から得られた速度比の特徴

本実験から、法線方向速度比(Rn)、速度比(Rv)ともに法線方向入射速度に依存して変化する性質が確認された.しかし、このような性質は、ただ単にRnやRvの値を与えられただけでは、なにもわからないことも暗示している.RnやRvを斜面との関係で評価するためには、表-2に示したように、計測地点の斜面傾斜角、入射速度、入射角度などの情報が必要である.今後、現場実験結果を集積していくに当たって重要な項目である.

一方,図-12は、速度比(Rv)の法線方向入試速度に対する依存性を確認するために行った室内実験の例である⁶⁾.反射板には木製合板を用い、角度を15~75の間で6段階に変化させ、また各傾斜角度において、落下高さを1,2,3,5mと変化させた実験を行った。落下に用いたのは直径6cmの石英球である。図中では、反射板の角度別に記号を変え、また速度が同じ計測値を点線で結んで示した。木製の反射板には、衝突速度が増すほど深い衝突痕が生じる。こ

の図から,速度比(Rv)の法線方向入射速度依存性には,入射角度による影響が大きく,入射速度の影響はさほど大きくないことがわかる.

この結果を基に、本現場実験結果の入射速度を5m/sと10m/sに境を設けて3つに区分し、これを記号別に表した結果を図-13に示した.同様にして、入射角度についても50°、70°を境にして3つに区分して記号別に表したものを図-14に示した.現場実験の結果は室内実験結果ほど明瞭ではないが、それでも入射速度が5m/s以下と10m/s以上では分布の傾きが異なり、室内実験結果と傾向が同じである.入射角度の方も、同様に大きくばらつくが、入射角度が50°以下と70°以上とでは分布範囲が異なること、室内実験結果同様に入射角とが大きいグループの方が上に位置している.このことから、本現場実験で得られた速度比(Rv)においても、その入射角度と入射速度の関係は室内実験結果と同じ傾向にあるものと考えられる.

近年、特定の運動定数や入射角度にばらつきを考慮することで、落石挙動の不確実性を表す試みも増えている。しかし、この結果からみると、速度依存性を持つ係数に直接ばらつきを与えてもあまり意味はないと考えられる。このような分布特性を持つ係数に対しては、その特性を考慮したばらつきの与え方が必要となる。

6. まとめ

落差95m, 平均斜度42°の植生と立木のある斜面で, 球体と立方体のコンクリート塊を用いた現場落石実験を行い, 計測された速度比の特徴を報告した. (1)実験結果の概要

落石形状や速度に対する軌跡や速度の明瞭な違いは確認できなかった.投下地点と停止位置間の広がり角は15°ほどと狭かった.最大跳躍高さは、落下経路の断面地形に支配された場合で最大5mであったが、平均的には2.5m以下である.跳躍高さには立木や根、ツルなどが大きく影響している.

(2)実験斜面の速度比の特徴

計測結果では、法線方向速度比(Rn)が1.0を大きく上回るケースが多くみられた.この原因は、立木の根やツルの影響によるもので、反射角度が入射角度より小さくなる、すなわち跳ね上がりが原因と考えらる.このようなデータを除外したところ、すべてのRnは1.0以下となった.速度比(Rv)には1.0を越える計測値はみられなかった.

また、計測結果をもとに、速度比(Rv)の法線方向入射速度依存性質を確認した。また、速度比(Rv)への入射角度と入射速度による影響を調べたところ、室内実験結果とほぼ同じ傾向であることを確認した。今後は、本結果をもとに、これらのばらつきを考

慮する方法について検討を行っていく予定である.

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) 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.
- 3) 佐々木猛, 佐々木勝司, 萩原育夫, 吉中龍之進: 不連続 変形法を用いた落石シミュレーションの基礎的研究, 第8回計算工学会講演論文集, Vol.7,pp.371-374,2002.
- 4) 萩原育夫,吉田淳,寺尾友宏,大西有三: DDA による 落石解析事例,日本応用地質学会,平成 12 年度研究発 表会講演論文集,pp.253-256,2000.
- 5) 島内哲哉,大西有三,西山哲,中村公一:落石シミュレーションに用いる速度エネルギー比の速度依存性に関する検討. 第 41 回地盤工学会講演論文集,pp.2241-2242,2006.
- 6) 島内哲哉,鄭惟,中村公一,西山哲,大西有三: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,第 36 回岩盤力学シンポジウム 講演論文集,pp153-158,2007.
- 7) 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に関する研究, 土木学会論文集 C,Vol.62,No3,pp707-721,2006.
- 8) 日本道路協会: 落石対策便覧, 平成 12 年版.

THE CHARACTERISTIC OF THE COEFFICIENT OF RESTITUTION IN THE SLOPE TO DETECT FROM ROCKFALL FIELD EXPERIMENT

Ikuo HAGIWARA, Katsuji SASAKI, Tetsuya SHIMAUCHI, Koichi NAKAMURA, Satoshi NISHIYAMA and Yuzo OHNISHI

For the prevention of rockfall disasters, various simulation methods have been developed. However, there have been few studies using the coefficient of restitution to influence the analysis result. Hence it is still difficult to design rockfall countermeasures with numerical simulations. Therefore, in this study, we examined characteristics of the coefficient of restitution by field experiments, especially focusing on the two points; following two points; (1)The velocity ratio and normal direction velocity ratio depend greatly on the normal direction incidence velocity, and (2)The reflection angle after the collision tends to be smaller than the incident angle. These characteristics should be considered in the numerical simulations.