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 \$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

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
А	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~
B C D	(報号, 丸状~月状, 凹凸小~中, 立木なし 土砂, 崖錐, 丸状~角状, 凹凸小~中, 立木なし 崖錐, 巨レキ混じり崖錐, 角状, 凹凸中~大, 立木なし~あり	0.15 0.25 0.35	0.11~0.2 0.21~0.3 0.31~



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4~5m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 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



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

$$Rt = \frac{-V_{out}\sin\beta}{V_{in}\sin\alpha}$$
(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 a^{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 $\alpha > \beta$ 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



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^{5.6}.

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

- 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.
- 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.