

落石の運動機構に関する実験的研究

右城 猛¹・楠本 雅博²・篠原 昌二³・木下 賢司⁴

¹正会員 株式会社第一コンサルタンツ (〒781-8122 高知市高須新町三丁目1-5)

E-mail:t-ushiro@daiichi-c.co.jp

²正会員 株式会社第一コンサルタンツ (〒781-8122 高知市高須新町三丁目1-5)

³株式会社第一コンサルタンツ (〒781-8122 高知市高須新町三丁目1-5)

⁴国土交通省四国地方整備局 (〒760-8554 高松市福岡町4-26-32)

岩盤と崖錐からなる比高約45mの斜面から、岩塊および加速度計を埋め込んだコンクリート球と立方体を落下させ、それらの運動を観測した。その結果、1)落石の運動形態は跳躍と衝突が主体的であること、2)衝突時に地盤の破壊でエネルギーが消費されるため飛び出し速度は限界速度をもつこと、3)落石の質量が大きいほど速度が速くなること、4)緩斜面から飛び出すと跳躍時間が長くなり跳躍量と着地速度が大きくなること、5)衝突時の入射角が小さいと速度減衰が大きいこと、6)等価摩擦係数は落下に伴って変化すること、7)跳躍量は斜面の幾何学的形状に支配されること等を明らかにすることができた。

Key Words : rock fall, field experiment, falling velocity, rolling velocity, bounce height, kinetic energy

1. まえがき

斜面を落下する落石の運動は、斜面勾配や局所的な凹凸、地質、植生、落石の形状・寸法などの影響を受け複雑であり、理論解析のみで予測することは難しい。

わが国では、1961年に岩内町雷電岬で現場落石実験が行われて以来、運動機構の解明を目的とした落石実験が図-1に示す場所で実施されてきた^{1)~9)}。これらの実験の概要は「落石対策便覧に関する参考資料」¹⁾に紹介されている。また、実験から得られた知見は「落石対策便覧」¹⁰⁾として取りまとめられ、設計の実務で広く活用されている。

近年、エネルギー吸収性能と経済性に優れた各種の高性能型防護柵が競って開発され^{11)~14)}、施工実績も急増しているが、高性能型防護柵の適用対象となるような大きい落石、あるいは長大斜面からの落石に対して、過去の落石実験から得られた経験則がそのまま適用できるのか明らかでない。

また、過去の落石実験で得られたデータの中には、計測機器が発達していなかった等の理由で信頼性に乏しいものも含まれていると考えられる。

こうしたことから、本研究は、約0.1~2tの岩塊や加速度計を内蔵したコンクリート製の球と立方体を比高約45mの実斜面で落下させて、その運動機構を詳細に調べ、過去の実験から得られている知見や設計の実務で用いられている経験則の妥当性を検証したものである。

2. 落石実験の概要

(1) 実験斜面

落石実験を行った場所は、愛媛県宇摩郡土居町の愛媛砕石工業(株)敷地内の自然斜面である。

斜面は写真-1、図-2、図-3に示すような沢地地形をしている。斜面比高は約45mである。上部の約25mの範囲には砂岩泥岩が互層になった岩盤が露出し、下部には崖

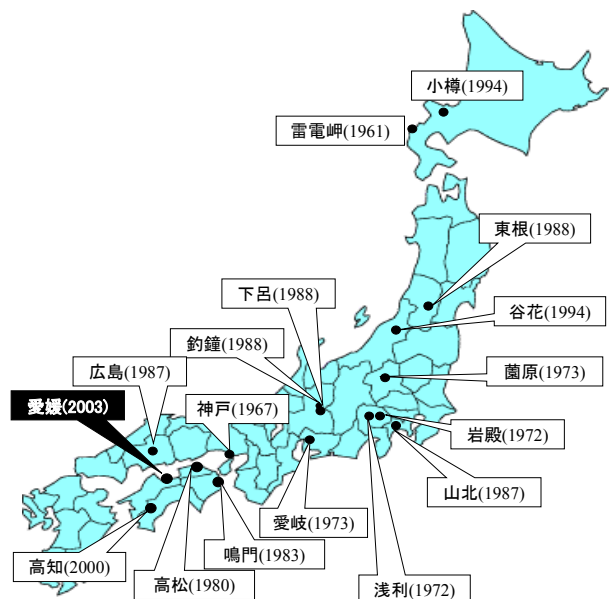


図-1 既往の主な現場落石実験(松尾修の図に加筆)



写真-1 実験斜面

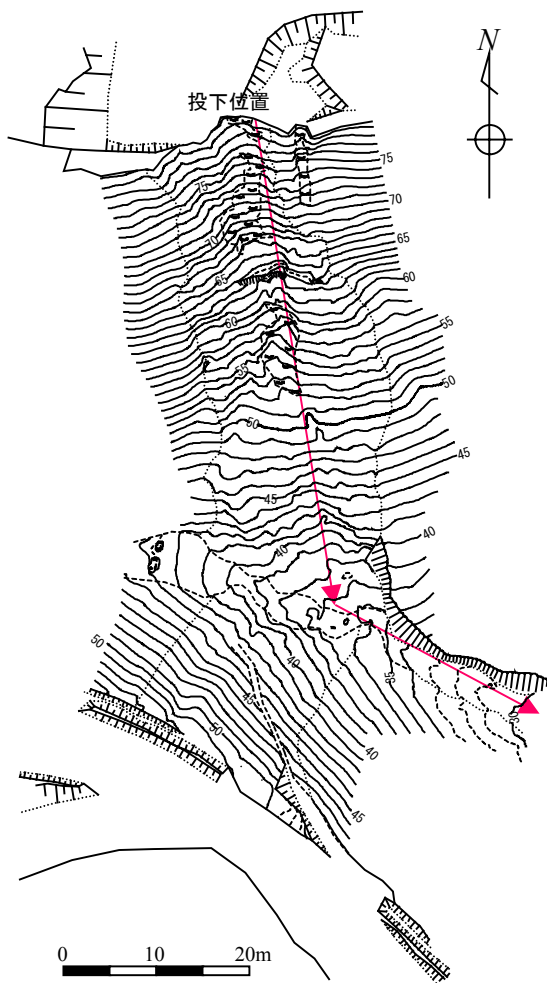


図-2 実験斜面の平面図

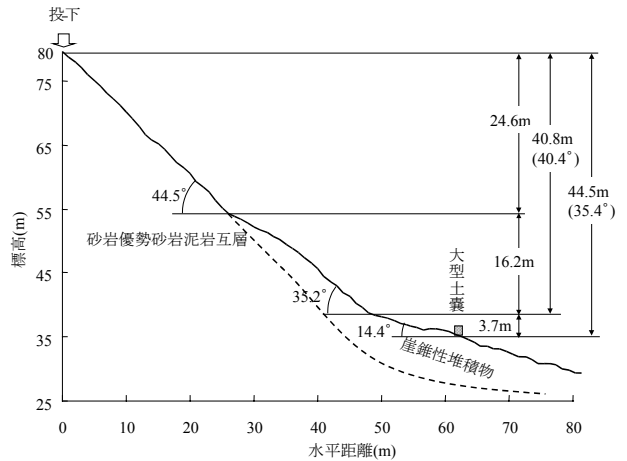


図-3 実験斜面の縦断面図



コンクリート球
(D=0.54m, 196kg)

コンクリート立方体
(D=0.6m, 520kg)



岩塊(2,060kg)

岩塊(160kg)

写真-2 実験に用いた落石

錐が形成されている。岩盤斜面の傾斜角は約 44 度である。ロックシュミットハンマーによる反発度は 17.7～38.6 である。この結果より一軸圧縮強度は 6～27MPa と推定される。岩級区分は C_L～C_H である。

崖錐斜面の傾斜角は約 35 度である。崖錐を構成する礫径は 2～5cm が 68%、5～10cm が 24%、10～50cm が 8% である。崖錐斜面には直径 10～20cm のマツ、ナラなどがまばらに生えている。

(2) 落石

実験に用いた落石は、写真-2に示すコンクリート製の球体と立方体、11種類の岩塊(質量0.12～2.06t)である。コンクリート製落石の設計基準強度は50MPaである。内部には三軸の加速度センサーとデータロガーを埋め込んでいる。

表-1 実験の種類

斜面状態	落石の種類	落石質量(kg)	落下回数
立木あり	球体	200	5
	立方体	520	5
	岩塊	120,160,550,790,990,990 1260,1320,1330,1360	10
立木なし	球体	200	5
	立方体	520	5
	岩塊	120,160,550,790,990,1260,1320,13 30,1360,2060	10

岩塊は採石場で切り出した砂岩で、圧縮強さは200MPa、密度は2.6t/m³である。

(3) 実験の方法

落石を重機のフォークで掴み斜面上部の定位置まで運搬し、下端を地面に接触させた状態でフォークを開き自重で転落させた。立方体は自重で転がり落ちないので、フォークの先で軽く押し出した。

落石の運動は斜面の上部、正面、落下経路の左右の斜面上にデジタルビデオカメラ(30コマ/秒)を合計14台設置して撮影した。

コンクリート製落石に埋め込んだ加速度計は、フォークから離脱した瞬間にスイッチが入り、3方向の加速度成分をサンプリング速度2kHzで最大60秒間記録できるように設計されている。落石が停止した時点でスイッチをオフにし、加速度データをパソコンに取り込んだ。

実験は斜面の立木を伐採する前と伐採した後についてそれぞれ球体を5回、立方体を5回、岩塊を10回落下させた。球体と立方体については投下後に回収して繰り返し落下させた(表-1)。

3. 速度および跳躍量の算定方法

落石の並進速度、角速度、跳躍量は、落石が跳躍運動した地点の計測データより求めた。

図-4に示すように飛び出し点と着地点の座標間距離を Δx 、 Δy 、跳躍時間を Δt とすると、初速度 $V_1(u_1, v_1)$ および着地速度 $V_2(u_2, v_2)$ は式(1)で算定できる。飛び出し点と着地点の座標値は、ビデオ画像解析を行って求めた。跳躍時間は、コンクリート製の落石については加速度波形の山と山の時間間隔から、岩塊についてはビデオ画像より30コマ/秒として跳躍期間のコマ数から求めた。

角速度 ω は、跳躍中の落石が半回転または1回転するコマ数をビデオ画像から読みとって求めた。

跳躍量 h は式(2)で算定した。飛び出し点と着地点における落石の重心を直線で結んだ線を基準線とし、基準線から落石の重心が描く跳躍軌跡までの垂直方向距離の

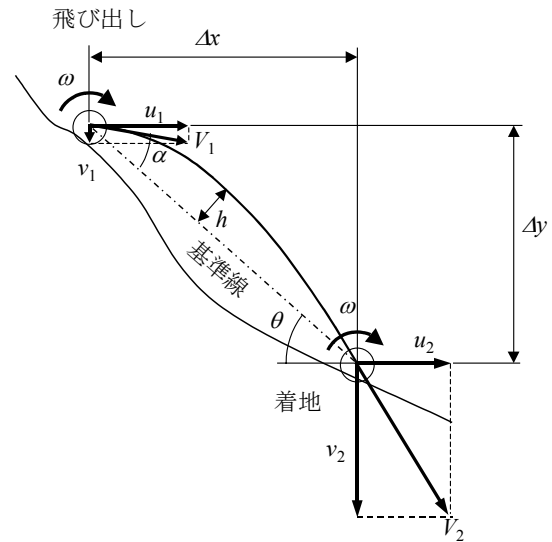


図-4 記号の説明

最大値を跳躍量 h としている。

$$\left. \begin{aligned} V_1 &= \sqrt{u_1^2 + v_1^2}, & V_2 &= \sqrt{u_2^2 + v_2^2} \\ u_1 &= u_2 = \frac{\Delta x}{\Delta t} \\ v_1 &= \frac{\Delta y}{\Delta t} - \frac{1}{2}g\Delta t, & v_2 &= v_1 + g\Delta t \\ \alpha &= \theta - \tan^{-1} \frac{v_1}{u_1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$h = \frac{(V_1 \sin \alpha)^2}{2g \cos \theta} \quad (2)$$

4. 実験結果

(1) 落石の運動形態

立木伐採後の立方体の落下状況の一例を写真-3に示す。落石の画像が写っている位置が衝突点で、画像の間は跳躍運動をしている。

図-5は球体に内蔵した加速度計から求められた波形の一例である。斜面に接触すると加速度波形が表れるので運動形態を識別することが可能である。

落石は投下の直後にわずかなすべりと転がりを見せるが、直ぐに跳躍に移行する。その後は衝突と跳躍を繰り返し、斜面下端まで落下する。斜面下端の崖錐に衝突してそのまま停止することもあるが、少し回転した後に数cm滑って停止することが多い。運動形態を模式的に示すと図-6のようになる。

(2) 落下軌跡と停止位置

a) 平面的落下経路

図-7に斜面の等高線、岩塊の落下経路の鉛直投影図を



写真3 立方体の落下状況(立木伐採後)

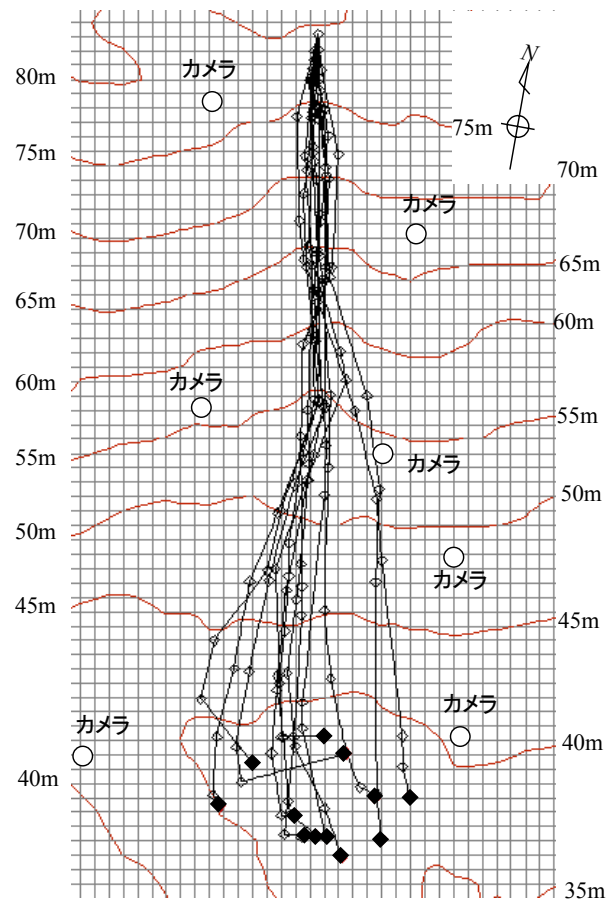


図-7 岩塊の落下経路の鉛直投影図

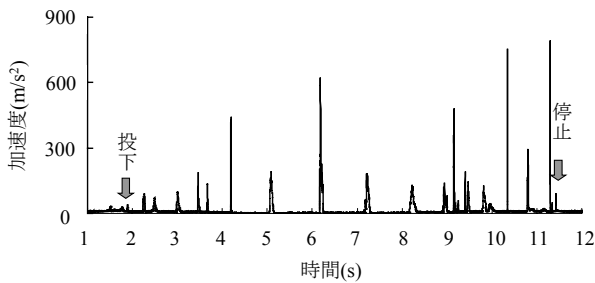


図-5 加速度波形の一例(立木伐採後, 球体)

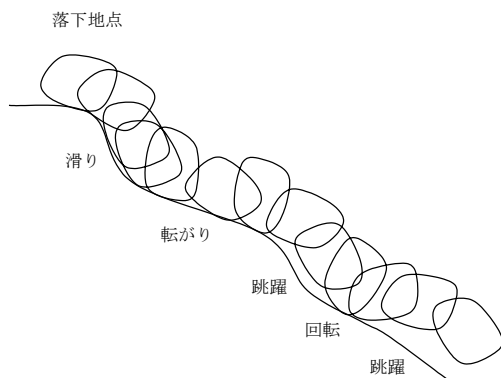


図-6 岩塊の運動形態の模式図

示す。立木を伐採する前と後で顕著な差異は見られなかったため、区別せずに表示してある。図中の白抜菱形は落石の衝突点を、黒色菱形は停止位置を表している。

岩盤が露出した斜面上部では、落石は沢地形に沿って落下する。図-8~10の縦軸における標高55m付近から下には崖錐が扇状に堆積しているため左右に拡がって落下する。左右への拡がり、コンクリート球に比べて立方体と岩塊の方が明らかに大きい。標高55m付近に露出している岩盤への衝突状態によって運動の方向が支配される。

b) 縦断的落下軌跡

図-8は全ての落石について、落下経路に沿った跳躍軌跡を重ね合わせたものである。実験ケース毎に落下経路が異なるので地盤線は描いていない。

図-9は最も大きな速度が記録された立方体の落下軌跡である。跳躍による飛行距離は、跳躍開始位置の斜面勾配に大きく支配される。大きな跳躍運動を始めた標高74m付近、65m付近、51m付近はいずれも斜面勾配が局所的に緩くなっていた。

図中の θ は、落石の落下点と停止点を結んだ直線の仰角を表している。

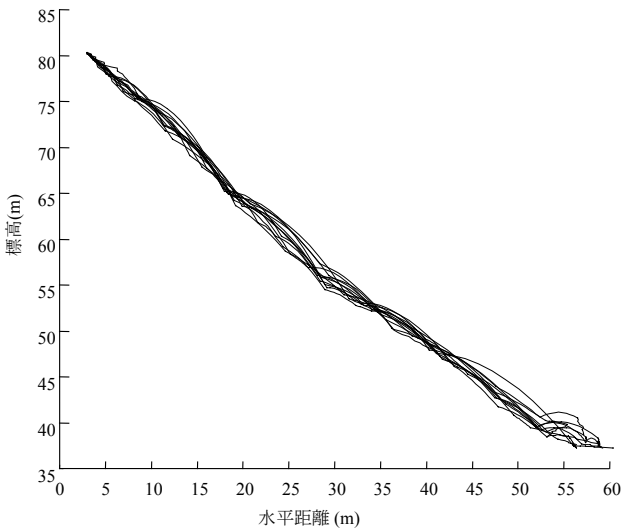


図-8 落石の縦断的落下経路(立木伐採後)

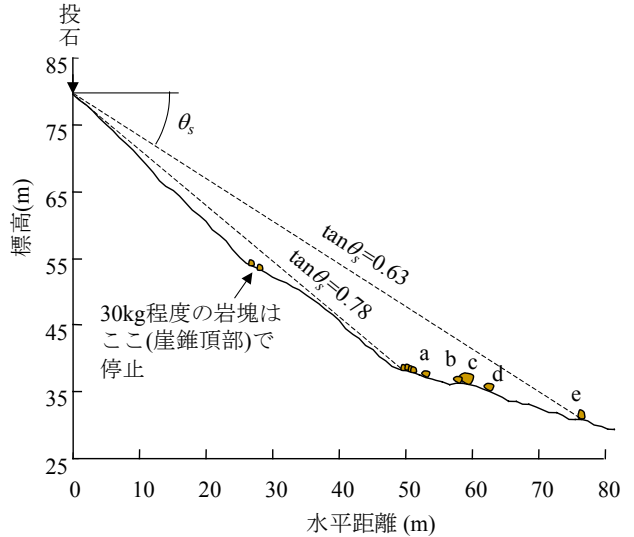


図-10 予備実験における落石の停止位置(伐採前, 岩塊)

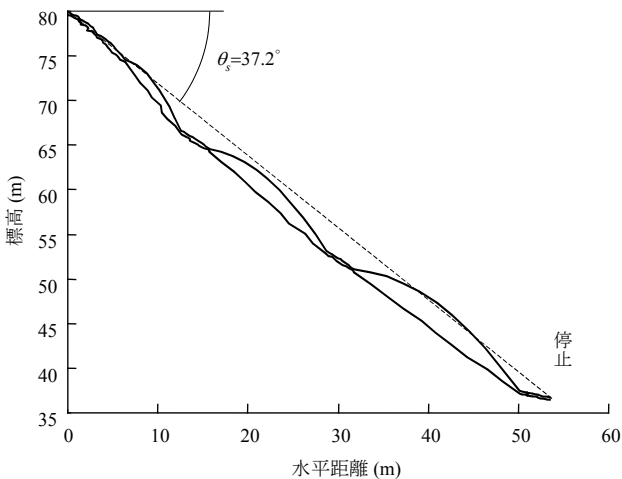


図-9 立方体の縦断的落下経路(立木伐採後)

c) 停止位置

本実験に先立ち予備試験として、質量が30~1,200kg程度の岩塊を11個落下させた。30kgの小規模な岩塊は斜面途中の岩盤露出部と崖錐堆積部の境界付近で、100kg以上の岩塊は図-10に示すa~eの位置で停止した。落下地点と停止位置を結んだ直線の勾配tanθ_sは0.63~0.78である。

本実験では、コンクリート球が谷に沿って転がり落ちるのを防ぐため、dの位置に大型土嚢を積んで行ったので全ての岩塊がdの位置より手前で停止した。

(3) 落石の並進速度

a) 落下高と並進速度、速度残存係数の関係

落下高と並進速度の関係を図-11に示す。○印は落石が斜面へ衝突する直前の速度、●印は衝突後の飛び出し速度を表している。速度の上限は、落下高5mまでは自由落下速度に近いが、落下高15m以降は17~18m/sとなる。

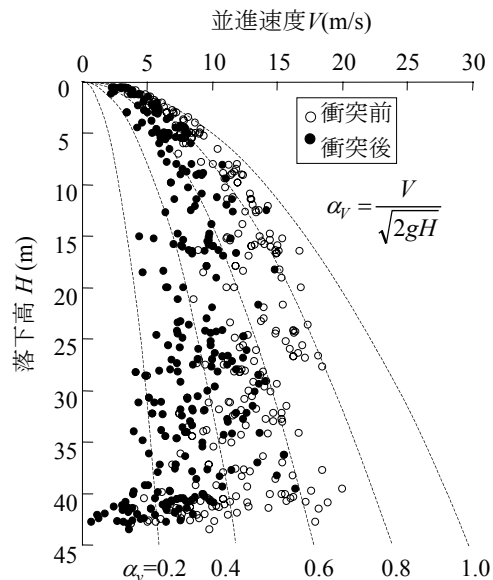


図-11 落下高と並進速度の関係(全ケース)

っている。

落下高と速度残存係数の関係は図-11、図-12となる。速度残存係数 α_v とは、ある落下高 H で測定された並進速度 V とその高さにおける自由落下速度との比であり、式(3)で定義されている。

$$\alpha_v = \frac{V}{\sqrt{2gH}} \quad (3)$$

速度残存係数は投下直後 1.0 であるが、落下に伴って減少する。斜面下端の平坦部に達すると急減し、停止した時点で0になる。

図-13(左)は、図-9に示した実験ケースにおける並進速度変化の様子を示している。跳躍中は速度を増加させるが、落石が斜面に衝突すると減速する。減速の程度は、

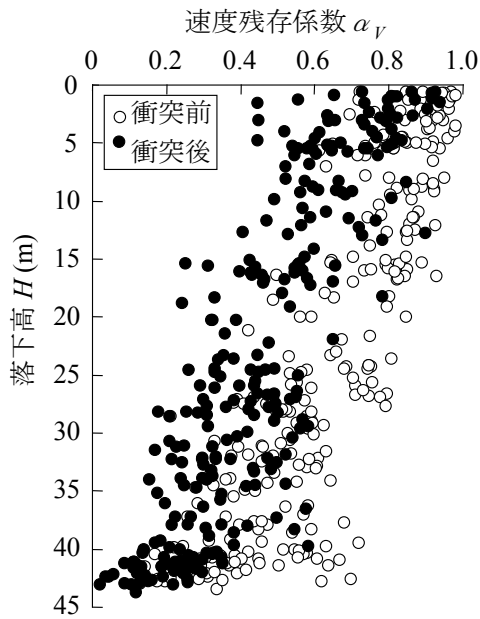


図-12 落下高と速度残存係数の関係(全ケース)

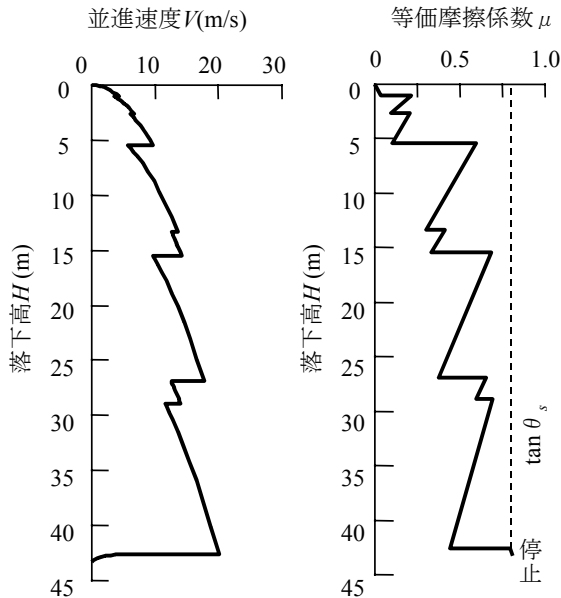


図-13 並進速度と等価摩擦係数(伐採後, 立方体)

衝突の方向が地盤面に対して垂直に近いほど大きくなる。衝突時に地盤をせん断破壊あるいは塑性変形させエネルギーを消費するためである。

b) 等価摩擦係数

落石の位置エネルギーは、落下に伴って並進運動エネルギー、回転エネルギー、斜面への衝突等による消費エネルギーに転化される。回転エネルギーと消費エネルギーの和が、すべり運動と見なした摩擦エネルギーに等しいとした摩擦係数を等価摩擦係数 μ と呼び、式(4)で与えられる。 V は落下高 H の位置の並進速度、 θ は投下点から H までの斜面の平均傾斜角である。

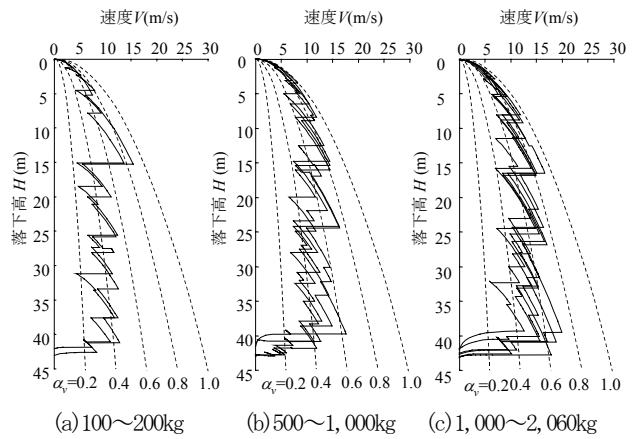


図-14 落石の質量と並進速度(伐採後, 岩塊)

$$\mu = \left(1 - \frac{V^2}{2gH} \right) \tan \theta \quad (4)$$

図-9に示した実験ケースについて並進速度と等価摩擦係数を求めると図-13(右)となる。並進速度が増加すれば等価摩擦係数は減少する関係にある。

投下直後の等価摩擦係数は0で、斜面に衝突すると増加する。跳躍期間中は減少する。最終的に落石が停止すれば $\mu = \tan \theta_s$ となる。 θ_s は投石点から停止点までの斜面の平均傾斜角である。

落石対策便覧では、斜面の性状と落石の形状から0.05~0.35の範囲で等価摩擦係数を決定し、式(5)で速度を算定するものとしている。

$$V = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta} \right)} \quad (5)$$

等価摩擦係数は落下に伴って0から $\tan \theta_s$ の間で変化する係数であるので、式(5)で求められる値はどの位置の速度であるのか曖昧である。さらに、 θ が一定の場合、速度は H に伴って増加を続けるという問題を生じる。

$\tan \theta_s$ の値は、斜面性状や落石の形状・寸法によって決まると考えられる。本実験斜面の場合は0.63~0.78である。斜面の $\tan \theta_s$ が分かれば落石の到達距離の予測が可能になる。

c) 速度の質量依存性

図-14は立木伐採後の岩塊の並進速度を、3種類の質量に分類して示している。質量が大きいくほど速度が速くなる傾向が見られる。落石径が大きくと衝突によるエネルギー消費割合が相対的に少なくなるからと考えられる。

d) 法線方向速度と接線方向速度

図-15は衝突後の飛びだし速度の法線方向成分 v_2 と接線方向成分 u_2 を示したものである。 v_2 の上限は5m/s, u_2 の上限は15m/sになっている。

落下高が35~40m付近において接線方向速度が15mを

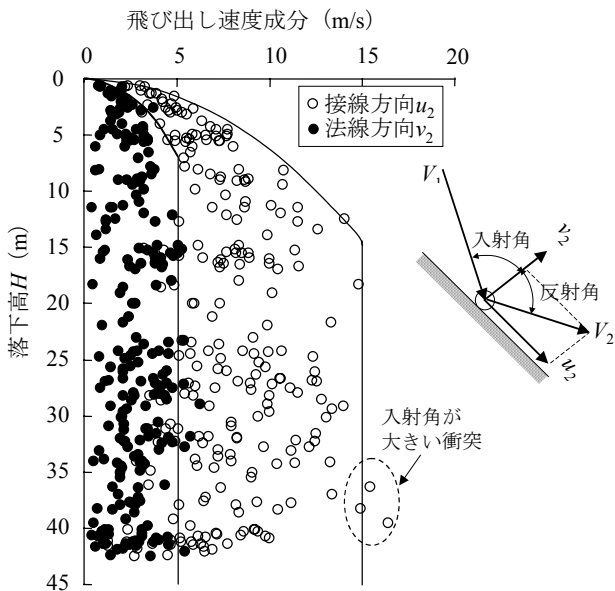


図-15 衝突後の飛び出し速度成分(全ケース)

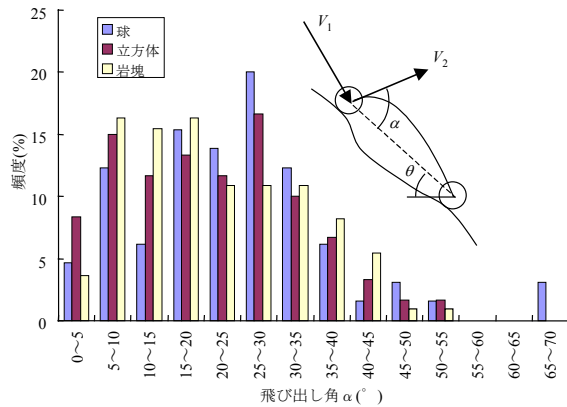


図-16 衝突後の飛び出し角度(全ケース)

超えるデータが3個見られる。崖錐部であるにも関わらず速度が大きいのは、衝突時の入射角が大きいためである。衝突後の速度減衰は入射角に左右される。入射角が大きくて落石が斜面をかすめるように衝突すると、斜面から受ける反力の力積が小さくなるので速度変化は小さくなる。

e) 衝突後の飛び出し角度

飛び出し点と着地点を結んだ線から測った飛び出し角度 α を図-16に示す。落石形状によって若干異なるが全データの平均は22度、標準偏差は12度である。

f) 立木が並進速度に及ぼす影響

立木伐採前と伐採後の着地速度を比較すると表-2 となる。立木があるのは標高 55m より下の崖錐斜面のみであるので、崖錐斜面で出現した速度についても比較した。

斜面全体で見ると、伐採後の平均速度は伐採前の1.04倍、崖錐斜面では1.08倍となっており、立木の影響があるように見えるが、これは実験の繰り返しにより岩盤上

表-2 立木の有無による平均着地速度の比較

	立木伐採前	立木伐採後	伐採前/伐採後
斜面全体	8.11m/s	7.83m/s	1.04
崖錐斜面	8.74m/s	8.12m/s	1.08

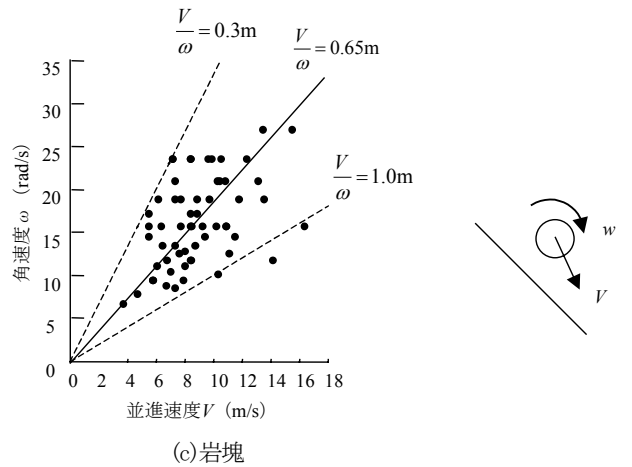
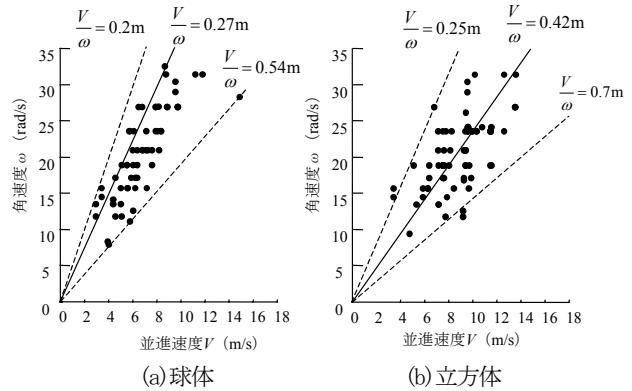


図-17 並進速度と角速度の関係

の表土が飛散し岩盤露出部が広がった影響が大きいと考えられる。

落石が立木に衝突すると減速するが、地盤に衝突して減速するのと有意な差が無い可能性がある。

(4) 角速度

図-17は、並進速度 V と跳躍中の落石が半回転あるいは1回転するコマ数をビデオ画像から読みとって求めた角速度 ω の関係を表している。 V/ω の値は球体が0.2~0.54m、立方体が0.25~0.7m、岩塊が0.3~1.0mの範囲にある。

落石は斜面衝突時に接触点回りの回転運動をしてから飛び出す。回転運動の半径 r は、コンクリート球が0.27m、立方体が0.42mである。岩塊は比重を2.6として質量が等価な立方体に換算すると $r=0.26\sim0.65m$ である。

球体、立方体、岩塊とも実験結果は、衝突時に接触点か滑らずに回転しながら飛び出すとした理論値 $V/\omega=r$ と概ね一致している。

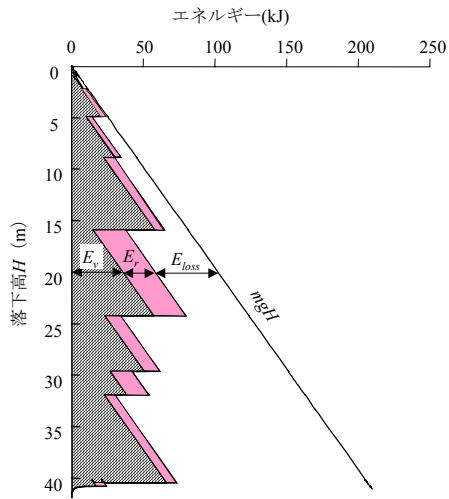
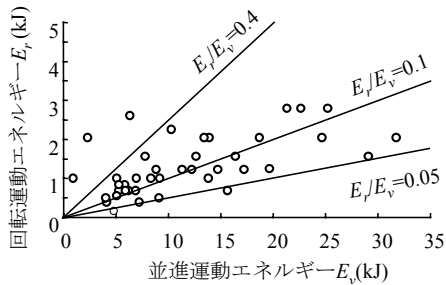
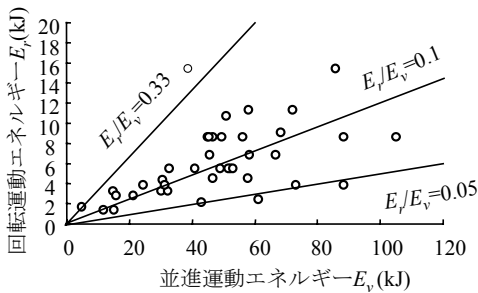


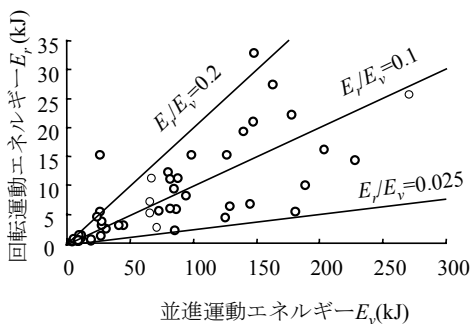
図-18 落石のエネルギーの変化(伐採後, 立方体)



(a) コンクリート球体



(b) コンクリート立方体



(c) 岩塊

図-19 並進運動エネルギーと回転エネルギーの関係

(5) 運動エネルギー

図-18は図-9, 図-12で示した実験ケースの立方体のエネルギーの変化を表している。跳躍期間中は位置エネルギー

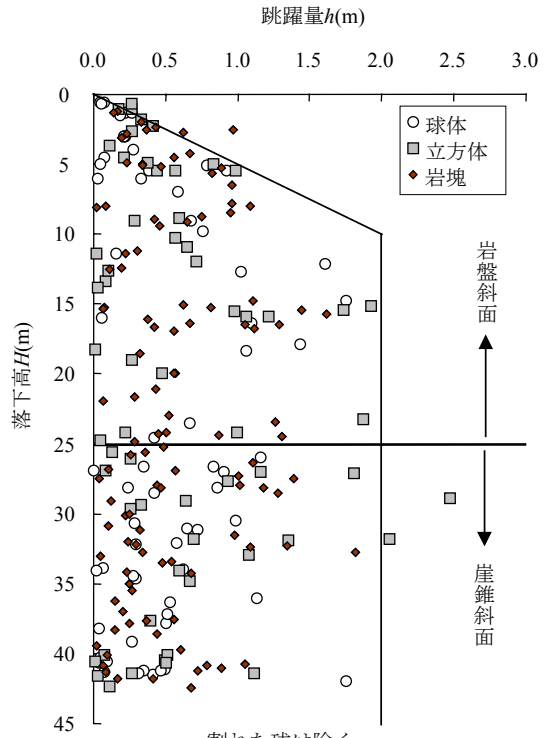


図-20 落石の跳躍量

ギー mgH が並進運動エネルギー E_v に転化するため、エネルギーは直線的に増加する。斜面に衝突すると、地盤がせん断破壊あるいは塑性変形し運動エネルギーの一部が消失する。回転運動エネルギー E_r は、斜面から受ける抗力の作用方向によって増加するときと減少するときがある。

図-19は回転運動エネルギー $E_r(=1/2I\omega^2)$ と並進運動エネルギー $E_v(=1/2mV^2)$ の関係を求めたものである。なお、岩塊の慣性モーメント I は密度を 2.6 t/m^3 として質量が等価な立方体に換算して求めている。

球体, 立方体, 岩塊のいずれの回転エネルギー比も概ね $E_r/E_v=0.1$ となっており、落石対策便覧に示されている値と一致する。

ただし、跳躍中 E_r は変化しないが E_v は増加するため E_r/E_v は一定ではなく、跳躍に伴って減少することになる。

(6) 跳躍量

式(2)で求めた跳躍量 h と落下高との関係は図-20となる。跳躍量の包絡線を描くと、落下高10mまでは落下高に伴って増加するが、落下高が10mを超えると2mで頭打ちになる傾向が見られる。落下高が35mを超えると跳躍量が1m程度になっているのは、落下高25mからは崖錐が堆積していることと、斜面勾配が緩くなっていることによる影響と思われる。

図-21は跳躍量のヒストグラムを示している。235個のデータの95%は跳躍量が1.5m以下、99%が2.0m以下

石に移り、異常に大きな跳躍を発生させたものと思われる。

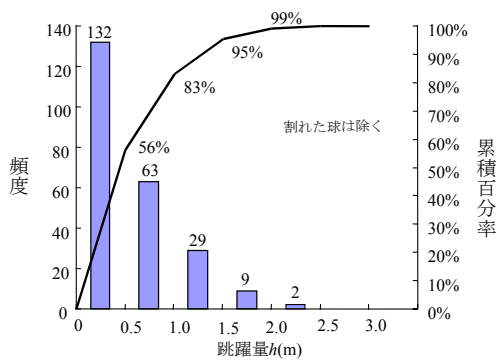


図-21 跳躍量のヒストグラム

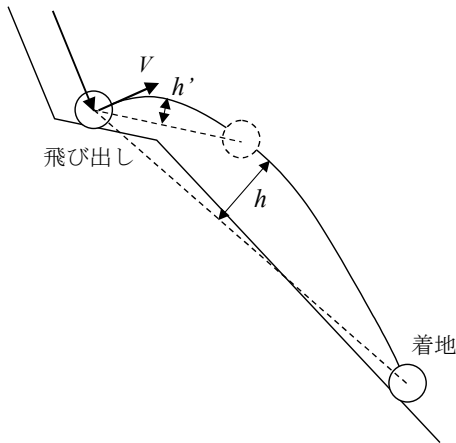


図-22 緩傾斜部からの飛び出し

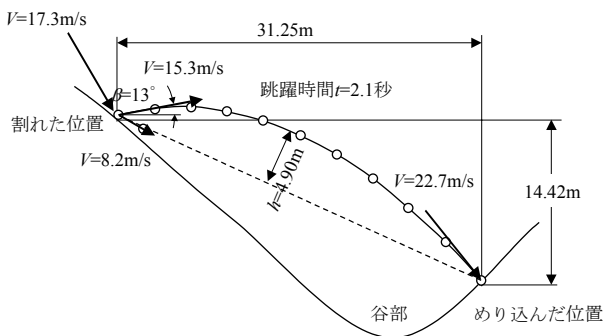


図-23 割れたコンクリート球の跳躍運動

であった。跳躍量の最大値は球体が 1.75m、立方体が 2.48m、岩塊が 1.82m である。1.5m 以上の跳躍は緩傾斜部からの飛び出しか、切株や基岩の突起部へ衝突したときに出現している。

跳躍量は図-22に示す h を測定しているが、跳躍量が 1.5m を超えた落石について、飛び出し点の斜面勾配を基準にした h' を測定すれば 1m 以下であった。

図-22のように斜面勾配が凹形に変化していると、跳躍量は斜面の幾何学的形状に影響され、物理的意味を持たなくなるので注意が必要である。

実験中に 1 度だけコンクリート球が岩盤の露頭に衝突して真っ二つに割れ、図-23に示す跳躍が出現した。落石が分割された際に、運動エネルギーの多くが片方の落

5. まとめ

岩盤と崖錐からなる平均傾斜約40度(図-3)、高さ約45mの斜面から、岩塊および加速度計を埋め込んだコンクリート球と立方体を落下させ、それらの運動を観測した。その結果下記の知見が得られた。

- (1) 落石の運動形態は跳躍と衝突の繰り返しが主体的である。
- (2) 落下時の左右への拡がり、球体よりも立方体が多い。
- (3) 飛び出し速度が速いほど、斜面からの飛び出し角度が大きいほど、斜面の傾斜が急なほど跳躍時間が長くなり、着地速度が速くなる。
- (4) 落石の質量が大きいほど速度減衰は小さい。
- (5) 速度残存係数は落石の落下に伴って1.0から0へと変化する。
- (6) 等価摩擦係数は斜面特性等によって決まる定数ではない。落石の落下に伴って0から $\tan \theta_s$ へと変化する。実験斜面の $\tan \theta_s$ は0.63~0.78であった。
- (7) 落石が斜面に衝突すると、地盤がせん断破壊あるいは塑性変形してエネルギーを消費させる。このため、飛び出し速度には斜面の条件から決まる限界値が存在する。
- (8) 今回の実験では、立木による速度減衰効果は確認できなかった。
- (9) 半径 r の落石の角速度 ω と並進速度 V との関係は、概ね $\omega=V/r$ で表される。
- (10) 回転エネルギー比(E_r/E_v)は跳躍中変化するが、概ね0.1である。
- (11) 落石の跳躍量は95%が1.5m以下、99%が2m以下であった。地形の勾配変化点から飛び出した場合、切株や岩盤の突起に衝突した場合、落石が割れたときには大きな跳躍量が出現する可能性がある。

謝辞: 本研究は国土交通省四国地方整備局四国技術事務所「平成 15 年度落石防護対策検討業務委託」において実施したものである。業務を実施するにあたり、落石防護技術検討会の方を通じて愛媛大学工学部環境建設工学科の矢田部龍一教授、小野田ケミコ(株)の古賀泰之氏、(独)土木研究所耐震研究グループ長の松尾修氏から貴重なご助言を賜った。ここに感謝の意を表す。

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，pp.101-157,

- 2002.
- 2) 佐々木康, 谷口栄一, 舟見清巳, 谷本 亘, 堀口正巳: 落石の跳躍量に関する実験: 第14回日本道路会議論文集, pp.113-115, 1981.
 - 3) 土井鐵徳: 落石の発生に関する調査, 落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会構造工学委員会衝撃問題研究小委員会, pp.45-51, 1991.
 - 4) 右城 猛, 村上哲彦: 落石の飛跳高の推定, 第1回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計法に関するシンポジウム論文集, pp.48-54, 1983.
 - 5) 吉田 博, 右城 猛, 柘谷 浩, 藤井智弘: 斜面性状を考慮した落石覆工の衝撃荷重の評価, 構造工学論文集, Vol.37A, pp.106-119, 1991.
 - 6) 氏平増之, 細谷昭悟, 小川健太, 高貝暢浩: フィールドにおける落石の落下挙動—岩盤斜面の落石に関する研究(第1報)—, 資源と素材, Vol.112, 資源・素材学会, pp.843-850, 1996.
 - 7) 氏平増之, 細谷昭悟, 小川健太, 高貝暢浩: 落石の運動エネルギーと到達距離の関係—岩盤斜面の落石に関する研究(第2報)—, 資源と素材, Vol.113, 資源・素材学会, pp.309-315, 1997.
 - 8) Ushiro .T, and Tsutsui .H : Movement of rockfall and a study on its prediction, International Symposium on Geotechnical & Environmental Challenges in Mountainous Terrain, Kathmandu, Nepal, pp.366-375, 2001.
 - 9) 右城 猛, 筒井秀樹, 篠原昌二: 実斜面における落石実験, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.77-80, 2002.
 - 10) 日本道路協会: 落石対策便覧, pp.9-20, 2000.
 - 11) 柴田健次, 中田 隆, 吉田 博: 高エネルギー吸収落石防護柵の設計, 第2回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.205-211, 1993.
 - 12) 大森清武, 塩見昌紀, 吉田 博: 落石防護用ネットの衝撃実験とその解析, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.141-146, 2002.
 - 13) 園雅伊, 塩見昌紀, 吉田博, 前川幸次: ワイヤロープを支柱に巻き付けた落石防護柵の実物衝撃実験とその解析, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.153-158, 2002.
 - 14) 園田佳臣, 村石 尚, 門間敬一, 彦坂 熙: リングネット落石吸収柵の衝撃応答特性に関する解析的考察, 第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集, pp.147-152, 2002.

(2005.8.4 受付)

AN EXPERIMENTAL STUDY RELATED TO ROCK FALL MOVEMENT MECHANISM

Takeshi USHIRO, Masahiro KUSUMOTO, Shouji SHINOHARA and Kenji KINOSHITA

In this experimental study, natural rock pieces as well as concrete balls and cubes having imbedded accelerometers in them were made to fall and roll over a 45m high natural slope composed of exposed rocks and vertical planes in an attempt to elucidate further the mechanism of rock fall movement along the slopes and the energy associated with the movement. As a result the following points were mainly clarified: 1) flight and collision are the main forms of the rock fall movement; 2) collision causes ground destruction, thereby resulting in loss of energy, so the bouncing velocity becomes the critical velocity; 3) bigger the size of the falling rock piece, higher the falling velocity; 4) when bounced from a gentler portion of the slope, the flight time becomes longer with greater bouncing height and larger colliding velocity; 5) the reduction rate of velocity is high when the angle of collision is small; 6) equivalent friction coefficient changes with the falling movement; and 7) the geometric configuration of the slope governs the amount of bouncing height.