

斜面を落下する落石の運動定数と 跳躍量に関する考察

右城猛¹・吉田博²・矢野光明³・高石協⁴・八木則男⁵

¹正会員 工博 (株)第一コンサルタンツ常務取締役 (〒780 高知市高須新町 3-1-5)

²正会員 工博 (株)第一コンサルタンツ技術顧問 (〒780 高知市高須新町 3-1-5)

³正会員 (株)第一コンサルタンツ技術部構造課課長補佐 (〒780 高知市高須新町 3-1-5)

⁴(株)第一コンサルタンツ技術部設計課係長 (〒780 高知市高須新町 3-1-5)

⁵フェロー 工博 愛媛大学教授 工学部環境建設工学科 (〒790-77 松山市文京町 3 番)

斜面の性状を定量的に評価して落石の運動を予測する手法として、Monte Carlo 法によるシミュレーション解析が提案されている。しかしながら、その解析に必要な運動定数についてはほとんど研究されていない。そこで、既往の 10 種類の現場落石実験データを整理・分析し、運動定数に関する考察を行った。また、現在、実務で用いられている跳躍量 2m の妥当性についても実験データに基づいて考察を行った。

Key Words : falling rock, field test, statistical analysis, characteristic of motion, slope

1. はじめに

落石防護工を設計する場合、防護工に持ち込まれる落石のエネルギーや防護工に衝突する際の衝撃力、落石の落下位置の予測が極めて重要になる。これらの予測を誤ると防護工の過大な変形や破壊、落石の防護工上の飛び越え、防護工設置範囲外への落下等によって重大な事故を招く恐れがあるからである。

落石のエネルギーや衝撃力、落下位置を求めるためには、斜面を落下する落石の運動、すなわち、落石の落下軌跡や速度を予測する必要がある。

高速道路調査会¹⁾では、蘭原²⁾と愛岐³⁾での現場落石実験結果に基づき、落石の最大跳躍量の標準値として 2m を、また、落下速度 V の推定式として等価摩擦係数 μ を用いた式(1)を提案している。

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

ここに、 g は重力加速度、 θ は斜面傾斜角、 H は落下高さである。

落石対策便覧⁴⁾には、高速道路調査会によって提案された経験式がそのまま掲載されており、実務ではこれらの経験式によって落石防護工の設計が行わ

れている。この方法は極めて簡便であるが、斜面の性状を定量的に評価した予測が行えないという欠点がある。例えば、落石対策として自然斜面を一定勾配に切り直した場合の効果や斜面の途中に小段を設けた場合の影響などを評価することができない。

こうしたことから、著者ら^{5),6)}は数値解析に Monte Carlo 法を用いたシミュレーション解析を提案している。この方法は、落石を質点あるいは剛球と仮定し、斜面をモデリングした上で摩擦係数や反発係数などの運動定数を確率論的に決定し、滑り運動、転がり運動、跳躍運動などの運動方程式を解いて落石の軌道と速度を求めるものである。

Monte Carlo 法による数値解析では、運動定数の確率密度関数が重要となるが、これに関してはほとんど研究されていない。

そこで、本研究では、わが国でこれまでに実施されている 10 種類の現場落石実験データを整理・分析し、運動定数についての考察を行う。

また、現在、実務で用いられている最大跳躍量 2m の妥当性についてもこれまでに蓄積された実験データに基づいて言及する。

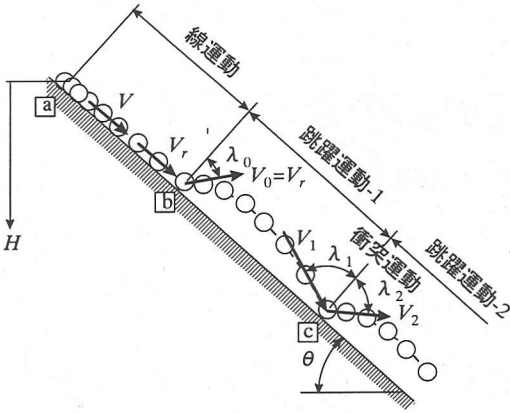


図-1 落石の運動

2. 落石の運動定数

図-1 に示すように θ で一様な斜面上を落石が落下する場合について考えてみる。

落石は、a 点から斜面に沿って b 点まで落下し、そこから跳躍運動をはじめ c 点へ着地し、再び飛び出すものとする。

a 点から b 点まで区間の運動を滑り運動とすると、a 点から H の落下高さの位置での速度は式(2)⁴⁾で与えられる。

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

ここに、 μ は等価摩擦係数である。

また、a 点から b 点まで区間の運動を転がり運動とすれば、速度は式(3)⁴⁾で与えられる。

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

ここに、 α_v は速度残存係数である。

次に、斜面に沿った線運動から跳躍運動に移行する限界速度を V_r 、跳躍を開始するときの飛び出し角を λ_0 、そして、跳躍運動の初速度 V_0 は V_r に等しいと仮定すれば、b 点から c 点までの跳躍運動に関しては、初等力学における質点の放物線運動の式によって計算することができ、斜面へ着地（衝突）する際の速度 V_1 （入射速）および角度 λ_1 （入射角度）も容易に求めることができる。

c 点から再び飛び出すときの速度 V_2 （反射速度）および角度 λ_2 （反射角度）は式(4)、(5)でそれぞれ求めることができる。

$$V_2 = V_1 \sqrt{(e \cdot \cos \lambda_1)^2 + (\rho \cdot \sin \lambda_1)^2} \quad (4)$$

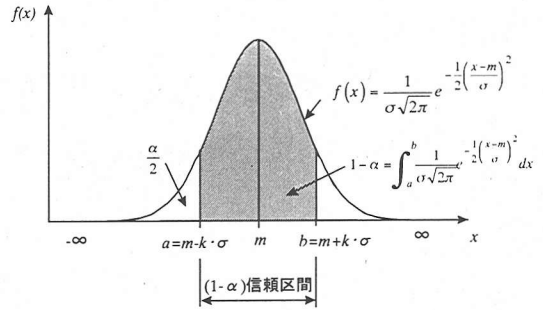


図-2 運動定数の確率密度関数（正規分布の場合）

$$\lambda_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\rho}{e} \tan \lambda_1 \right) \quad (5)$$

ここに、 e は反発係数、 ρ は減衰係数⁶⁾であり式(6)、(7)でそれぞれ定義される。

$$e = \frac{V_2 \cos \lambda_2}{V_1 \cos \lambda_1} \quad (6)$$

$$\rho = \frac{V_2 \sin \lambda_2}{V_1 \sin \lambda_1} \quad (7)$$

反射速度は、速度エネルギー比 γ ¹⁾を用いて式(8)のように表すことも可能である。

$$V_2 = V_1 \sqrt{\gamma} \quad (8)$$

以上の計算を実行するためには、等価摩擦係数 μ 、速度残存係数 α_v 、跳躍運動へ移行する限界線速度 V_r 、跳躍開始時の飛び出し角 λ_0 、衝突時の反発係数 e 、減衰係数 ρ あるいは速度エネルギー比 γ が既知でなければならない。これらの既知でなければならない定数を本論文では運動定数と呼ぶ。

運動定数は、現場落石実験によって求めなければならないが、測定された落石の速度や運動軌跡から求められる運動定数は大きくばらつく。これは、落石の形状が複雑なものに加え、不規則に変化する斜面の微地形、凹凸、硬度、植生等の影響で落石はランダムに運動するためである。

不確定な落石の運動をシミュレートするためには、実験より得られた運動定数を確率変量としてとらえ、シミュレーション結果を確率的に評価するのが合理的である。

例えば、図-2 に示すように、それぞれの運動定数を $N(m, \sigma^2)$ で正規分布する乱数列と見なせば、その確率密度関数のある信頼区間で運動単位毎に乱数を発生させて運動定数を決定することができる。

表-1 既往の現場落石実験の概要

実験名	実験主催 解析団体	実験場所	実験 年月	測定項目	斜面の特性					供試落石			
					種類	岩質地質	凹凸	勾配	植生	斜面高	形状	石質	重量
雷電岬	北海道開発局・札幌鉄道管理局・(株)東京製綱	北海道岩内郡岩内町雷電岬	S36.8	落石速度、防止柵の歪位および応力測定落石:50case	自然斜面	転石混じり土砂	大	38° 47° (43°)	裸地	32m	角状	自然石	170~1720kg
神戸	神戸大学畑中・西村研究室 (株)神戸製鋼所	神戸市灘区円山グランド	S42.4	落石速度防止柵の歪位および応力測定落石:101case	切土のり面	風化花崗岩	小	45°	裸地	20m	円筒形	コンクリート	66~600kg
岩殿	日本道路公団東京建設局・(株)片平エンジニアリング	山梨県大月市賑岡町岩殿	S47.10	落石速度及び跳躍量	自然斜面	土砂	中	36°	草地	24m	角状	自然石	不明
浅利	同上	山梨県大月市賑岡町浅利	同上	同上	同上	同上	中	40°	裸地	26m	同上	同上	不明
蘭原	日本道路公団東京支社・(株)建設企画コンサルタント	群馬県利根郡利根村大字蘭原	S48.11	落石速度・回転、防止柵の歪位・応力測定	自然斜面	軟岩	大	55°	裸地	65m	丸状	河床石	30~800kg
						土砂	小	40°	同上	75m	同上	同上	同上
愛岐	日本道路公団名古屋管理局・(株)建設企画コンサルタント	愛知県瀬戸市小西砕石場	S48.11	落石速度・回転、防止柵の歪位・応力測定	自然斜面	土砂	中	27°~39°	裸地	60m	塊状	自然石(粘板岩)	20~2000kg
高松	建設省土木研究所・(株)建設企画コンサルタント	香川県牟礼町の土取り場跡地	S55.10	落石軌跡、線速度、角速度、跳躍量落石:213case	切土のり面+コンクリートのり面	風化花崗岩	小	30° 60° 48°	裸地	30m	塊状板状	自然石(花崗岩)	19~800kg
鳴門	(株)四国建設コンサルタント	徳島県鳴門市中山砕石場内	S58.4	落石軌跡、速度、跳躍量落石:30case	切土のり面	砂岩頁岩互層	小	48°	裸地	25.5m	塊状	自然石(砂岩)	6~47.51kg
広島	金沢大学吉田研究室・(株)日本サミコン	広島県高田郡甲田町増田砕石場内	S62.8	落石軌跡、速度、跳躍量落石:79case	切土のり面	土砂	大	38°	裸地	62.5m	塊状	自然石(砂岩)	20~4000kg
山北	日本道路公団東京第一建設局・(株)旭技建	神奈川県足柄上郡山北町川西砕石場内	S62.10	落石軌跡、跳躍量、防止柵の変形量、衝突音	コンクリート吹付け切土のり面(小段有)	軟岩~硬岩	無し	51°	裸地	22m	角石玉石	自然石(砂岩)	14~2900kg

3. 本研究に用いた現場落石実験データ

わが国では、これまでに表-1に示す10種類の現場落石実験が実施されている。本研究では、これらの実験データを使用した。

4. 運動定数のパラメータと考察

(1) 速度残存係数

落石実験より得られた落石の速度から式(3)によって速度残存係数を求めた結果を図-3~図-6に示す。実験データのうち数値データが入手できなかったものについては、落下高 H と速度 V の関係を表したグラフから落下高と速度を読みとって速度残存係数を求めた。

図-3は各実験の結果をヒストグラムと累積度数多角形に描いたものである。図中の N は標本数、 m は平均値、 σ は標準偏差を表している。実験で得られた速度残存係数は0.19~1.21の範囲に分布しており、非常にばらつきが大きいといえる。

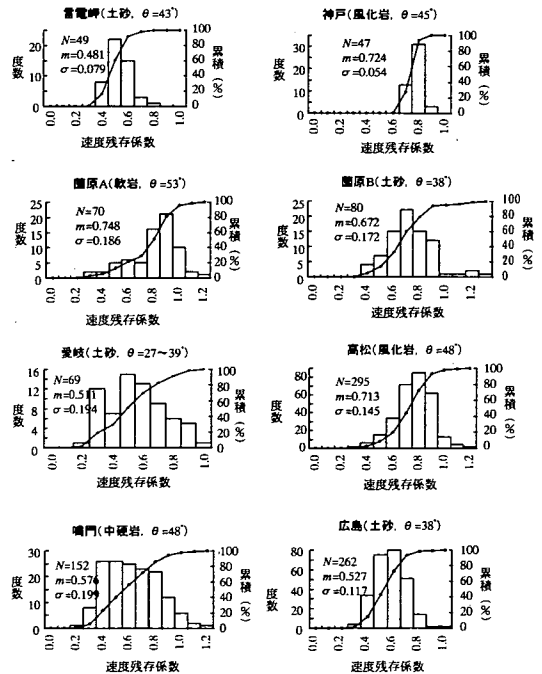
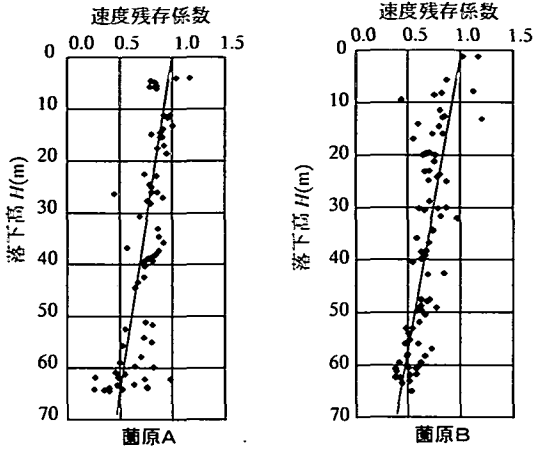


図-3 速度残存係数のヒストグラム



菌原A

菌原B

高松

広島

図-4 落下高と速度残存係数の関係

図-4はデータ数が比較的多い菌原A²⁾、菌原B²⁾、高松⁹⁾、広島⁶⁾での各実験について、落下高さと速度残存係数の関係を調べたものである。菌原A、菌原Bの実験では落下高さの増加に伴って速度残存係数が減少する傾向が見られる。高松、広島の実験においても顕著ではないが同様の傾向が見られる。このことは、落石の速度は落下高に伴って無限に増加するのではなく、ある落下高で速度の上限値が現れることを意味する。この原因としては、斜面の抵抗が速度に比例して増加すること、落下高が大きくなると跳躍運動が卓越し、斜面に衝突した際のエネルギー損失が大きくなるためと考えられる。

落下高さが小さい地点では速度残存係数が大きく、菌原A²⁾、菌原B²⁾、高松⁹⁾、鳴門¹⁰⁾の各実験データの最大値は1.0を超えている。投石直後の落石の運動は、ほとんどの場合転がり運動である。摩擦以外に抵抗がない様な斜面を球体が転がり落ちる時の

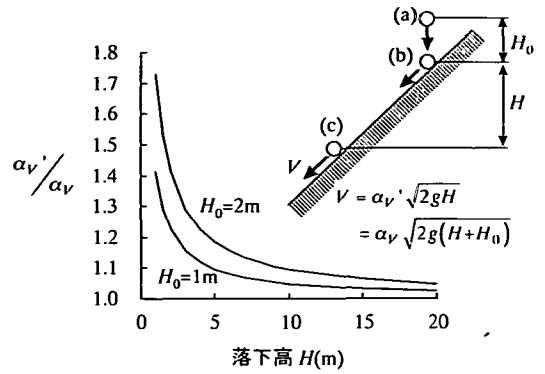


図-5 落下高差の誤差が速度残存係数に与える影響

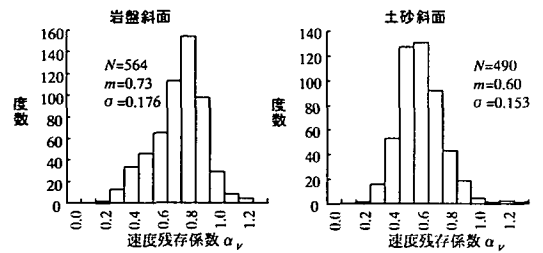


図-6 斜面の地質と速度残存係数の関係

速度残存係数の理論値は0.85である。したがって、投石直後に速度残存係数がこの値を超えている理由は、測定誤差の影響も考えられるが、投石時にエネルギーが加えられたことによるものと推測される。

現場落石実験では、小さい石は人力で転がし、大きい石はバックホーやクレーン等の重機を用いて落下させている。図-5に示すように、実際の投石位置(a)から計算上の投石位置(b)までの落差を H_0 、計算上の投石地点(b)から速度を求める位置(c)までの落下高さを H 、斜面の速度残存係数を α_v 、 H_0 の影響による見掛けの速度残存係数を α_v' とすれば、見掛けの速度残存係数は式(9)のように表される。

$$\alpha_v' = \alpha_v \sqrt{1 + \frac{H_0}{H}} \quad (9)$$

図-5は H_0 が1mと2mの場合について見掛けの速度残存係数と実際の速度残存係数の比を示している。この図からも明らかなように落下高さ H が小さい地点では H_0 の影響が顕著に現れるといえよう。落石実験を行う際には、実際の投石位置とその際に加えられるエネルギーを正確に把握しておく必要がある。

図-6は、斜面の地質が速度残存係数に及ぼす影響を調べるため、岩盤斜面と土砂(崖錐性堆積物)斜

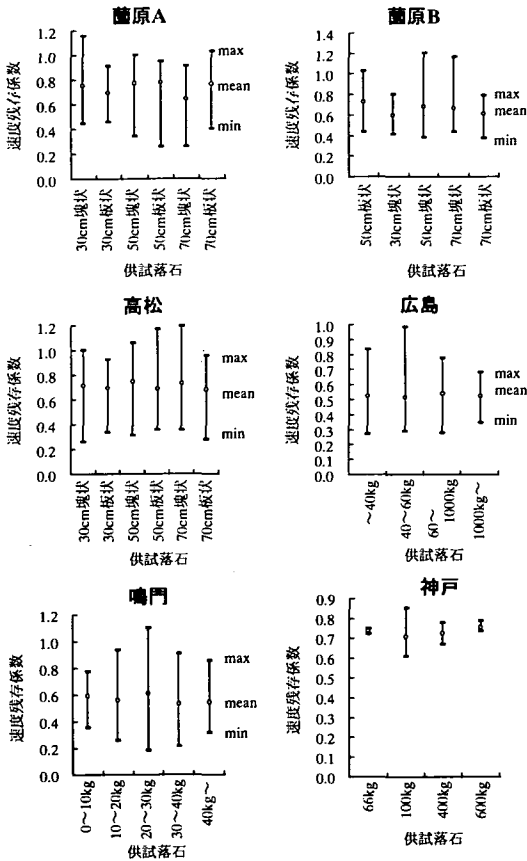


図-7 落石の形状・大きさと速度残存係数の関係

面に区分してヒストグラムを描いたものである。岩盤斜面には、神戸⁸⁾、藪原A²⁾、高松⁹⁾、鳴門¹⁰⁾の実験データを、土砂斜面には雷電岬¹⁾、岩殿¹⁾、浅利¹⁾、藪原B²⁾、愛岐³⁾、広島⁶⁾の実験データを使用した。

岩盤斜面の速度残存係数は平均値が0.73、標準偏差が0.176である。これに対して、土砂斜面は平均値が0.60、標準偏差が0.153である。平均値、標準偏差とも岩盤斜面が若干大きな値を示しているが、岩盤斜面と土砂斜面とに有意な差異は認め難い。

図-7は、落石の形状と大きさが速度残存係数に及ぼす影響を調べたものである。落石の形状や大きさによって速度残存係数は大きくばらつくが、平均値は落石の形状や大きさの影響を余り受けない。

(2) 等価摩擦係数

図-8は等価摩擦係数のヒストグラムを描いたものである。等価摩擦係数が求められているのは、藪原と広島の実験のみである。

等価摩擦係数の平均値は岩盤斜面が0.59、土砂斜

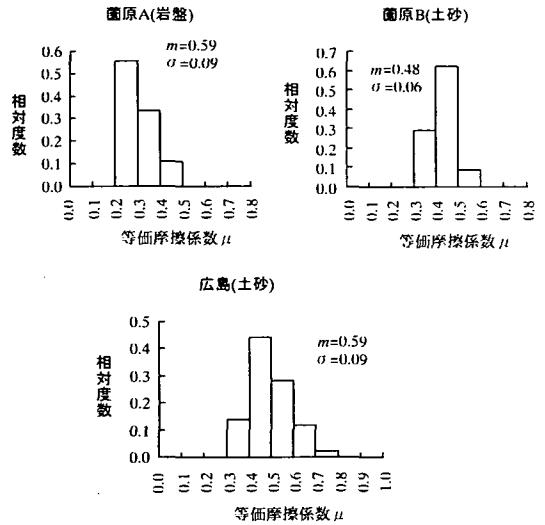


図-8 等価摩擦係数のヒストグラム

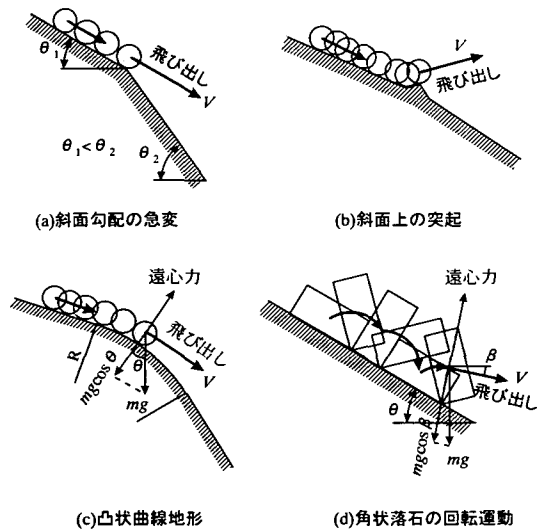


図-9 線運動から跳躍運動への移行の要因

面は藪原Bが0.48、広島が0.59となっている。データ数が少ないため、岩盤斜面と土砂斜面の相違については明らかにすることができないが、標準偏差は0.06~0.09と小さく、データのばらつきは少ない。

(3) 限界線速度

落石が斜面に沿った線運動から跳躍運動へと移行する要因には、図-9のものがある。

(a)のように斜面に明瞭な遷急線があり、上部斜面よりも下部斜面の勾配が急である ($\theta_1 < \theta_2$) と、落石は上部斜面の接線方向に運動を続けようとする

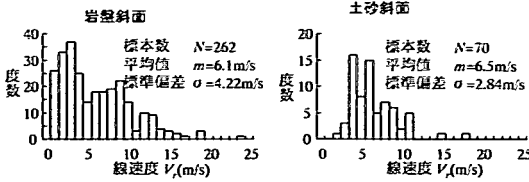


図-10 限界線速度のヒストグラム

ため、跳躍運動へ移行する。また、(b)のように斜面上に突起があるとこれがジャンプ台の役割を果たし、(a)の場合と同様に跳躍運動へと移行する。(c)は斜面が凸状の曲線をなしている場合である。線運動している落石には速度に比例した遠心力が働くため、遠心力が落石の重量によって斜面から受ける垂直抗力以上になれば跳躍運動を開始する。(d)のように斜面が一様勾配であっても、落石が転がりながら落下すると、落石の重心の運動は円弧を連ねた形となるため、(c)の場合と同様に遠心力が発生する。このため、角速度が大きくなれば跳躍運動へ移行することになる。

図-10は、菌原A²⁾、菌原B²⁾、愛岐³⁾、高松⁹⁾、鳴門¹⁰⁾、広島⁶⁾での落石実験から得られたデータを元に限界速度のヒストグラムを描いたものである。限界線速度の平均値は岩盤斜面が6.1m/s、土砂斜面が6.5m/sで両者にほとんど差はない。しかし、標準偏差は岩盤斜面が4.22m/s、土砂斜面が2.84m/sであり、土砂斜面に比べて岩盤斜面のばらつきが非常に大きいといえる。

ばらつきが大きい原因は、斜面の地形や落石の形状によって跳躍運動へ移行するメカニズムがそれぞれ異なるためと考えられる。

(4) 衝突時の速度エネルギー比

落石が斜面へ衝突すると地盤の塑性変形によって力学的エネルギーの一部が吸収される。このため、衝突後の速度（反射速度）は衝突直前の速度（入射速度）よりも小さくなる。速度エネルギー比は、衝突時のエネルギー損失を評価する一つの方法であり、式(10)¹⁾で定義される。

$$\gamma = \frac{\frac{1}{2}mV_2^2}{\frac{1}{2}mV_1^2} = \frac{V_2^2}{V_1^2} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2 \quad (10)$$

ここに、 γ は速度エネルギー比、 m は落石の質量、 V_1 は入射速度、 V_2 は反射速度である。

図-11は、斜面の地質が速度エネルギー比に及ぼす影響を調べるため、岩盤斜面と土砂斜面に区分してヒストグラムを描いたものである。岩盤斜面には、

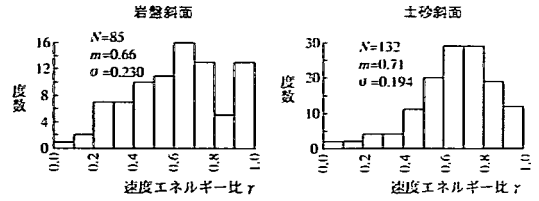


図-11 速度エネルギー比のヒストグラム

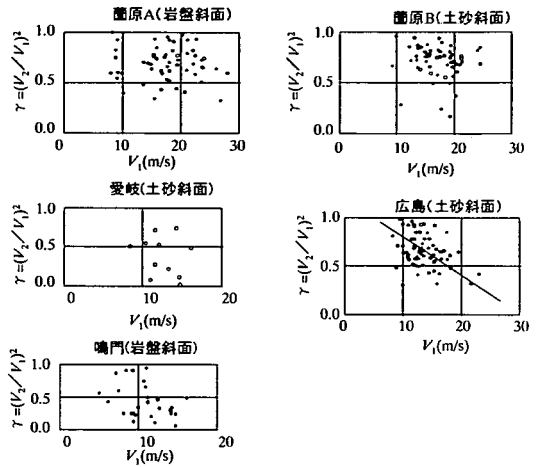


図-12 入射速度と速度エネルギー比の関係

菌原A²⁾、高松⁹⁾、鳴門¹⁰⁾の実験データを、土砂斜面には、菌原B²⁾、愛岐³⁾、広島⁶⁾の実験データを使用した。岩盤斜面の速度エネルギー比は平均値が0.66、標準偏差が0.230である。これに対して、土砂斜面は平均値が0.71、標準偏差が0.194である。落石が衝突した際の塑性変形は岩盤斜面よりも土砂斜面の方が大きく、エネルギー吸収も土砂斜面が大きいと考えられるが、実験データでは逆に岩盤斜面のエネルギー吸収が若干大きいという結果になっている。

図-12は、入射速度と速度エネルギー比の関係を示したものである。広島の実験では、入射速度の増加に伴って速度エネルギー比の減少傾向が認められる。しかし、その他の実験では、そのような傾向が見られない。

(5) 反発係数と減衰係数

図-13は岩盤斜面、土砂斜面に区分して反発係数 e のヒストグラムを描いたものである。岩盤斜面は菌原A²⁾、土砂斜面は菌原B²⁾と広島⁶⁾と高松⁹⁾での実験データよりそれぞれ作成した。反発係数の平均値は岩盤斜面が0.54、土砂斜面が0.61である。標準偏差は岩盤斜面が0.262、土砂斜面が0.231である。

図-14は愛岐³⁾での実験結果である。速度エネルギー

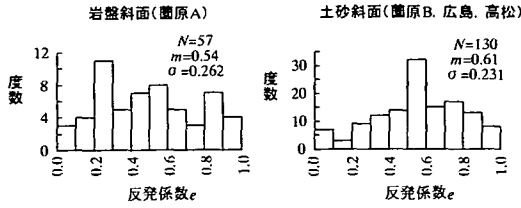


図-13 反発係数のヒストグラム

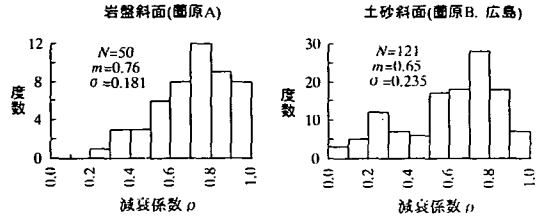
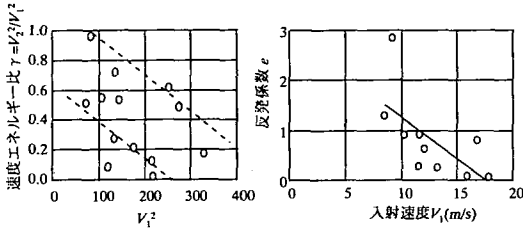
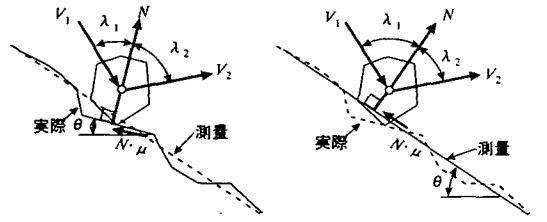


図-16 減衰係数のヒストグラム



(a) 速度エネルギー比 (b) 入射速度と反発係数の関係

図-14 愛岐での実験結果³⁾



(a) 実際の入射角と反射角 (b) 測量結果による入射角と反射角

図-17 入射角と反射角決定上の問題点

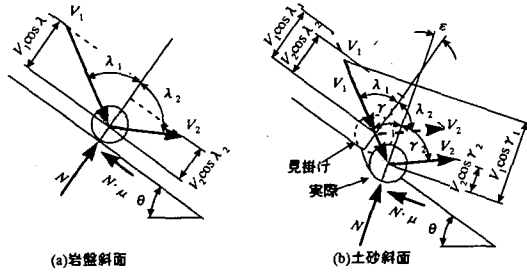


図-15 斜面衝突時の入射角と反射角

一比は 1.0 未満であるが、反発係数は 0.07 から 2.83 の範囲にばらついている。落石が土砂斜面へ衝突した際には窪みを残す。これは地盤が塑性変形するためであり、塑性変形が大きいほど反発係数は小さくなる。

ところが、図-13 では、土砂斜面の反発係数が岩盤斜面よりも大きいという結果になっている。また、土砂斜面である愛岐の実験では反発係数が 1.0 を超える値が出現している。

このように極めて不合理な反発係数が得られた原因としては、以下のことが考えられる。

図-15 は落石が斜面へ衝突した状態を模式的に表している。岩盤斜面の場合には、落石が斜面へ衝突すると落石あるいは斜面が欠損するが、大きな塑性変形は生じない。ところが、土砂斜面の場合には、地盤がせん断破壊を生じるため、速度が 0 になった時点では図-15(b)のような状態になると考えられる。

すなわち、この場合の反発係数は式(11)のように表され、垂直抗力の見掛けの作用方向と実際の作用方向の角度差 ϵ が大きくなるほど反発係数は過大に評価されることになる。したがって、図-13 に示されている土砂斜面の反発係数は見掛けの反発係数であり、実際の反発係数はこれよりも小さい値であると思われる。

$$e = \frac{V_2 \cos \gamma_2}{V_1 \cos \gamma_1} = \frac{V_2 \cos(\lambda_2 + \epsilon)}{V_1 \cos(\lambda_1 - \epsilon)} \quad (11)$$

図-16 は園原 A²⁾、園原 B²⁾ および広島⁶⁾ での実験データより減衰係数のヒストグラムを描いたものである。減衰係数の平均値は、岩盤斜面が 0.76、土砂斜面が 0.65 であり、15%ほど土砂斜面が小さい値を示している。標準偏差は、岩盤斜面が 0.181、土砂斜面が 0.235 で、30%ほど土砂斜面が大きくなっている。岩盤斜面に比べて土砂斜面は衝突時の動摩擦係数が小さいためこのような結果が現れているものと推察される。しかし、減衰係数についても反発係数と同じで、土砂斜面の値は見掛けの減衰係数と考えるべきである。

反発係数と減衰係数を正確に求め難い理由は、衝突地点の斜面勾配の測定にもある。実際の斜面は図-17(a)のように複雑に変化しているが、(b)図のように測量された結果から入射角と反射角を判断すれば実際とは異なったものになる。地形の変化は三次元的である。しかも、落石の運動も三次元的であるか

表-2 運動定数のパラメータ

運動定数	斜面の種類別	適用した実験名称	パラメータ	
			m	σ
等価摩擦係数 μ	岩盤	園原 A	0.59	0.09
	土砂	園原 B 広島	0.48 0.59	0.06 0.09
限界線速度 $Vr(m/s)$	岩盤	園原 A, 高松, 鳴門	6.1	4.22
	土砂	園原 B, 愛媛, 広島	6.5	2.84
飛び出し角度 λ_0	岩盤	データなし	不明	不明
	土砂	データなし	不明	不明
反発係数 e	岩盤	園原 A	0.54	0.26
	土砂	園原 B, 広島, 高松	0.61	0.23
減衰係数 ρ	岩盤	園原 A	0.76	0.18
	土砂	園原 B, 広島	0.65	0.24

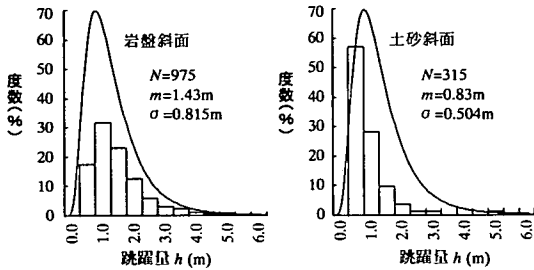


図-18 跳躍量のヒストグラム

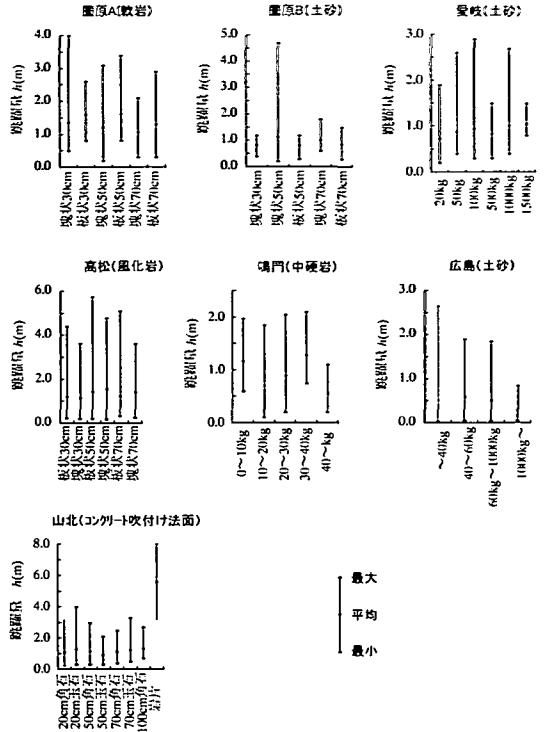


図-19 落石の形状・大きさと跳躍量の関係

ら、落石が衝突する地点の傾斜角を正確に測定することは極めて難しい。

(6) 運動定数のパラメータ

現場落石実験から得られたデータに基づき運動定数の平均値 m と標準偏差 σ を求めた。その結果をまとめて表-2 に示す。線運動から跳躍運動へ移行する時の飛び出し角度についてはデータを得ることができなかった。

5. 跳躍量

落石の跳躍量を岩盤斜面と土砂斜面に区分してヒストグラムで表せば図-18 となる。岩盤斜面には園原 A²⁾、高松⁹⁾、鳴門¹⁰⁾、山北¹¹⁾の実験データを、土砂斜面には園原 B²⁾、広島⁹⁾の実験データを用いた。ただし、山北¹¹⁾の実験については岩片の跳躍量は除いている。跳躍量の分布は正規分布よりも対数正規分布に近い。

実験で観測された跳躍量の最大値は高松の 5.7m (岩片は山北の 8m) である。平均値は、岩盤斜面が 1.43m、土砂斜面が 0.83m である。分布形を対数正規

分布と見なすと、その確率密度関数は式(12)で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\xi \cdot x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\xi}\right)^2\right] \quad (12)$$

ただし、

$$\xi^2 = \ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{m^2}\right), \quad \lambda = \ln m - \frac{1}{2}\xi^2$$

対数正規分布として跳躍量の 95%信頼値を求めると、岩盤斜面が 3.0m、土砂斜面が 1.8m になり、岩盤斜面と土砂斜面とでは跳躍量が明らかに異なる。

現在、落石防護工設計の実務では、跳躍量の最大値を 2.0m⁴⁾と見なして行われているが、斜面が岩盤の場合には 3.0m と考えるべきであろう。

図-19 は落石の形状や大きさが跳躍量に及ぼす影響を調べたものである。跳躍量の平均値で見ると形状や大きさによって差があるとは言いがたい。ただし、岩片は大きな跳躍量を示している。

図-20 は実験斜面の平均勾配と平均跳躍量の関係、および平均速度残存係数と平均跳躍量の関係を調べたものである。直線で回帰させると、平均斜面勾配

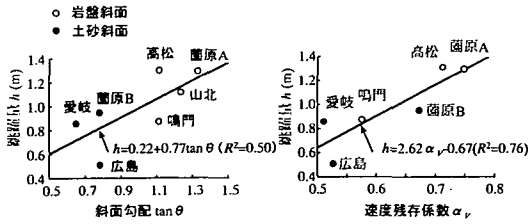


図-20 斜面勾配、速度残存係数と跳躍量の関係

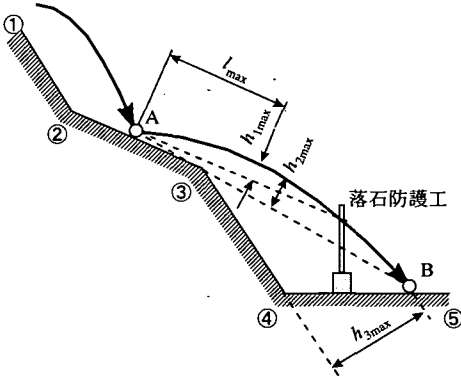


図-21 跳躍量の定義

の寄与率は 0.5 であるのに対して速度残存係数の寄与率は 0.76 と高い。このことは、跳躍量は落石の速度に依存していることになる。

既往の落石実験報告書を見ると、跳躍量が明確に定義されていない。斜面が一樣勾配と見なされる場合には、斜面から落石の軌道までの距離を斜面の法線方向に測ればよい。しかし、図-21 のように折れ曲がった斜面の場合の跳躍量は統一されておらず、図-21 に示す h_{1max} 、 h_{2max} 、 h_{3max} の 3 種類が用いられている。

斜面の勾配が複雑に変化し、勾配変化点間の距離が短い場合には h_{2max} を便宜的に跳躍量と見なした方が都合がよい。また、落石防護工の規模を決定する立場では、 h_{3max} を跳躍量とする方が使い勝手が良い。しかし、 h_{2max} 、 h_{3max} を跳躍量と定義すれば落石の力学的現象を厳密に表すことができない。跳躍現象は跳躍開始地点（衝突地点）の物理的条件に支配される。従って、落石の運動を客観的に評価するためには、跳躍開始地点の斜面を基準にして測定した h_{1max} を跳躍量と定義すべきである。ただし、この場合には、 h_{1max} 以外に h_{1max} の発生する位置 l_{max} も明らかにしないと意味がないものになる。

6. まとめ

本研究は、わが国でこれまでに実施されている 10 種類の現場落石実験データを整理・分析し、斜面を落下する落石の運動定数と落石の跳躍量について考察を行ったものである。本研究の結果をまとめると以下ようになる。なお、土砂斜面とは、崖錐性堆積物の斜面である。

- (1)速度残存係数は、0.19～1.21 の範囲でばらつき、落下高さに伴って減少する傾向がみられる。落石の形状や大きさの影響はほとんど見られない。斜面の地質別に見ると、速度残存係数の平均値は岩盤斜面が 0.73、土砂斜面が 0.60、標準偏差は岩盤斜面が 0.18、土砂斜面が 0.15 であり顕著な差は認められない。
- (2)等価摩擦係数は、岩盤、土砂斜面ともほとんど同じでその平均値は 0.5～0.6 程度である。標準偏差は 0.06～0.09 と小さい。
- (3)線運動から跳躍運動へ移行する限界線速度の平均値は岩盤斜面が 6.1m/s、土砂斜面が 6.5m/s であり両者に有意な差は認められない。
- (4)速度エネルギー比の平均値は岩盤斜面が 0.66、土砂斜面が 0.71 であり、速度エネルギー比は入射速度が大きくなると減少する傾向が認められた。
- (5)反発係数の平均値は岩盤斜面が 0.54、土砂斜面が 0.61 となった。岩盤斜面に比べて土砂斜面の反発係数が大きくなっている原因は、土砂斜面の場合衝突時に地盤がせん断変形を生じ見掛けの反発係数が測定されているためと推測される。
- (6)減衰係数の平均値は岩盤斜面が 0.76、土砂斜面が 0.65 である反発係数同様、土砂斜面の減衰係数は見掛けの値が測定されていると推測される。
- (7)地形の変化は三次元的であり、落石の運動も三次元的であるため、落石が衝突する地点の傾斜角を正確に測定することは困難である。このため、現場実験で求められる反発係数や減衰係数は信頼性に乏しい。
- (8)実験で観測された跳躍量の最大値は 5.7m (岩片は 8m) である。跳躍量の平均値は岩盤斜面が 1.43m、土砂斜面が 0.83m であり、跳躍量は斜面の地質によって異なる。
- (9)跳躍量の 95%信頼値は岩盤斜面が 3.0m、土砂斜面が 1.8m である。斜面の地質に関係なく跳躍量を一律 2m と見なすのは危険である。
- (10)跳躍量は、落石の形状や大きさの影響をほとんど受けない。ただし、岩片は大きな跳躍量を示す。
- (11)跳躍量は速度残存係数と強い相関関係を示す。落石の運動に関する研究は、歴史が浅く現場実験

データの蓄積も乏しい。今後、研究すべき課題で特に重要と思われるものを以下に列記する。

- (1) 斜面を落下する落石の運動を数値解析する上で、斜面へ衝突した際の挙動解析が極めて重要になる。しかしながら、その際の運動定数である反発係数、減衰係数に関しては測定データが非常に乏しい。また、現在得られているデータにおいても十分信頼性があるとは言い難い。今後は、実斜面での落石実験によるデータの蓄積を図るとともに、理想状態での基礎的実験も併せて行う必要がある。その際、衝突による地盤の変形の影響が大きいと考えられるため、地盤の変形と落石の挙動の関係を明らかにしなければならない。
- (2) 線運動から跳躍運動へ移行する際の限界線速度に関しては、本研究である程度明らかにすることができた。しかし、その際の飛び出し角については実験データが皆無に等しく、本研究においても言及することができなかった。飛び出し角は、それ以降の運動を大きく支配するため、これに関する研究が必要である。
- (3) 現場落石実験はいずれも観測上の都合から裸地斜面で実施されている。実際の落石斜面には立木があることから、立木の幹径や繁茂密度などの影響を定量的に評価するための研究が必要である。

参考文献

- 1) 高速道路調査会：落石防護施設の設置に関する調査研

究報告書（日本道路公団委託）、1974。

- 2) 日本道路公団東京支社、(株)建設企画コンサルタント：落石実験調査報告書、1973。
- 3) 日本道路公団名古屋管理局、(株)建設企画コンサルタント：愛岐道路落石防止柵耐衝撃力測定実験報告書、1973。
- 4) 社団法人日本道路協会：落石対策便覧、1983。
- 5) 右城猛、大原健史、明坂宣行、吉崎和人：実験データを用いた落石の運動軌跡のシミュレーション。第2回落石の衝撃力およびロックシェッドの設計に関するシンポジウム論文集、1986。
- 6) 吉田博、右城猛、榎谷浩、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.1603-1616, 1991。
- 7) 吉田博、榎谷浩、右城猛、柴田健次：落石覆工の設計の現状と合理的設計へのアプローチ、土木学会論文集、第421号/VI-13(研究展望)、pp.213-222, 1990。
- 8) 神戸大学工学部土木工学科、(株)神戸製鋼所：神鋼型落石防止柵実地試験報告書、1967。
- 9) 建設省土木研究所、(株)建設企画コンサルタント：落石の跳躍量に関する現場実験報告書、1980。
- 10) 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。
- 11) 日本道路公団東京第一建設局松田工事事務所、(株)旭技建：東名高速道路(改築)落石防止柵実験報告書、1985。
- 12) 高橋克好：東名高速道路(改築)供用線に近接した法面工事での安全管理、基礎工、Vol.20, pp.82-88, 1992。

(1997. 2. 25 受付)

A STUDY OF PARAMETERS FOR MOTION OF FALLING ROCKS ON SLOPES AND JUMPING HEIGHT

Takeshi USHIRO, Hiroshi YOSHIDA, Mitsuaki YANO, Kyo TAKAISHI and Norio YAGI

As an estimation method for falling rocks, the Monte Carlo simulation analysis has been developed taking numerically into account of slope properties. However, the parameters of the simulation method, which might control the motion of a rock on slopes have not yet studied sufficiently.

In this study, these parameters are statistically discussed based on a decade of previously existing field experiments. The jumping height 2m using practical design of preventing structures against rock falls is also investigated from these experimental data.