

落石の運動特性と現行の運動予測法の問題点

右城 猛¹, 筒井秀樹², 加賀山肇³

- 1 株式会社 第一コンサルタンツ
2 株式会社 ロイヤルコンサルタンツ
3 日本プロテクト株式会社

概 要

著者らは、自然斜面で落石実験を実施すると共に、落石事故現場に残された痕跡から逆解析するなどによって落石の運動形態や落下速度、運動エネルギー、跳躍量を調べてきた。それらの中には、2009年7月13日に富士山登山道の新五合目駐車場で起きた落石事故も含まれている。

本論文ではこれらの事例を紹介し、落石対策の実務において現在用いられている落石速度や跳躍量の予測手法の問題点を明らかにした。

キーワード：落石，速度，運動エネルギー，跳躍量，落石事故

1. はじめに

落石対策においては、斜面から落下してくる落石の運動を正確に予測することが重要である。落石対策の実務では、既往の落石実験等の実績に基づいた経験則が適用されているが、その妥当性に対する検証は行われていない。近年では、落石の落下軌跡や速度を定量的・合理的に予測評価するために、運動力学に基づいた各種のシミュレーション手法が開発・提案されているが、現地条件に対応したモデル化、計算パラメータの設定方法、計算結果の妥当性の検証、計算結果の評価等、多くの課題が残されているのが実情である¹⁾。

著者らは、実際の斜面で落石実験を実施すると共に、落石事故現場に残された痕跡から逆解析するなどによって落石の運動形態や落下速度、運動エネルギー、跳躍量を調べてきた^{4)~15)}。それらの中には、2009年7月13日に富士山登山道の新五合目駐車場で起きた落石事故²⁾も含まれている。

本論文では、これらを紹介すると共に、落石対策便覧等にも紹介されている経験則に基づいた予測手法の問題点についても言及する。

2. 落石の発生源とメカニズム

四国の山岳道路では、図1のような断面形状をした地形が多い。道路際には切土法面があり、その上の緩斜面に崖錐性堆積物が存在し、さらに上部には切り立った崖がある。緩斜面には、地盤から浮き出した転石が多数見られる。不

安定そうに見えるが、意外と安定している。元々、上方の崖部にあったものが落下してきて停止したものであるため、斜面崩壊等で地形が変化しない限り落石になる可能性は低い。

死亡事故に繋がるような落石の発生源は、大概が斜面上方の崖部である。四国では過去20年間に5件の落石による死亡事故が発生している。高知県道東洋安田線の北川村二股(1988)、国道321号の大月町才角(1988)、国道11号の鳴門市北灘(1990)、高知県道東洋安田線の北川村島(1996)、国道195号那賀町(2006)である。いずれも落石発生源は、道路の上方の崖部であった。

崖から剥離あるいは抜け出した岩塊が、斜面をバウンドしながら道路まで到達したときに、運悪く歩行者や車両が通りかかると落石事故になる。

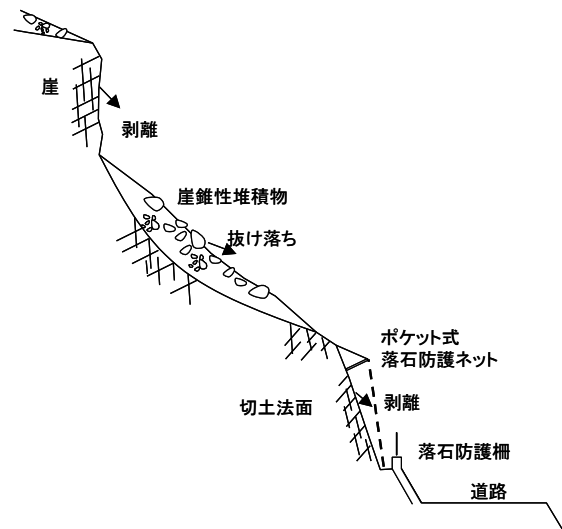


図1 四国の代表的な地形⁹⁾

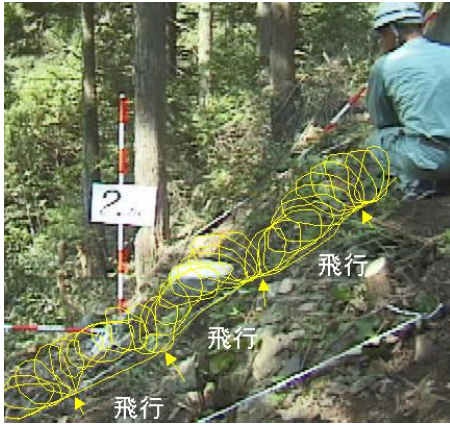


写真1 運動開始直後における砂岩塊(18kg)の挙動



写真2 平坦地でのコンクリート球(直径54cm)の運動

斜面は樹木で覆われているので、崖を発見することは難しいが、崖を発見できたとしてもそれが安定しているかどうかを判断することはさらに困難である。

落石は地質的要因が大きい。発生源の多くは砂岩やチャートが露出した崖部である。砂岩やチャートは節理が発達して落石になりやすい。砂岩、チャート層が分布する地域で、過去に落石があった地点は、山腹に崖が形成されている可能性がある所以需要である。

3. 落石の運動形態

写真1は、白色のペンキで着色した質量18kgの砂岩塊を斜面上で転がして、その挙動をビデオカメラで撮影したものである。最初は転がり運動をするが、すぐに飛行運動へ移行している。

写真2は、直径54cm、質量200kgのコンクリート球を平坦地で転がした実験である。運動形態は飛行と衝突を繰り返すバウンドである。地面が完全に平滑でない限り、転がり運動にはならない。

写真3は、自然斜面から一辺が60cmの立方体のコンクリート塊(質量520kg)を落下させた映像である。コンクリート塊は、バウンドを繰り返しながら斜面を落下した。コンクリート塊が写っている箇所が斜面への衝突点である。コンクリート塊の中には、加速度センサーとデータロガーを埋め込んであるので、斜面に衝突した位置を正確に把握



写真3 立方体の落下状況¹⁵⁾

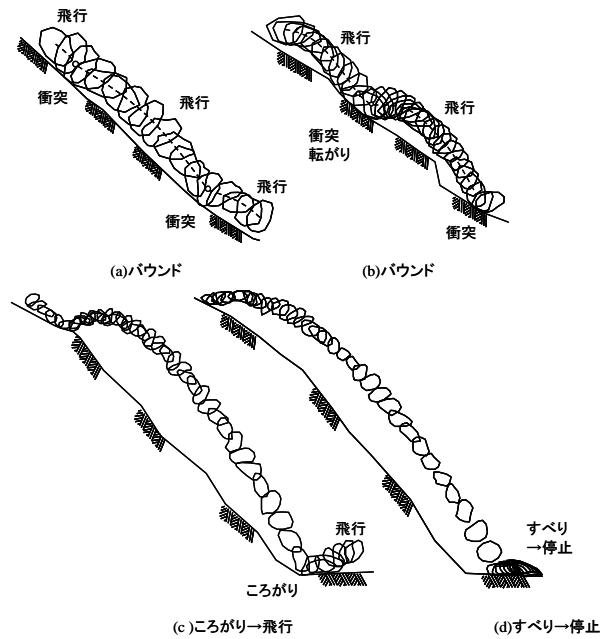


図2 自然斜面における砂岩塊の運動形態⁹⁾

できるようになっている。

図2は、質量が30~40kgの砂岩塊を自然斜面で落下させ、ビデオカメラで撮影し、それを元にして描いた落石の挙動である。落石が斜面に衝突すると、着地点を中心に回転、あるいは少しか転がり運動をする。飛行中は、落石の中立軸を中心に回転をしているが、三次元的回転であるため角速度を測定するのは困難である。

図2(c), (d)は斜面下端の落石の運動である。平坦地に衝突すると少し回転し、すべり運動をして停止するパターンと、少し回転して飛行に移行するパターンが見られた。

落石の運動形態はバウンドが主体である。すべりや転がりが見られるのは、運動を開始する初期と斜面への衝突時、それに停止直前だけである。

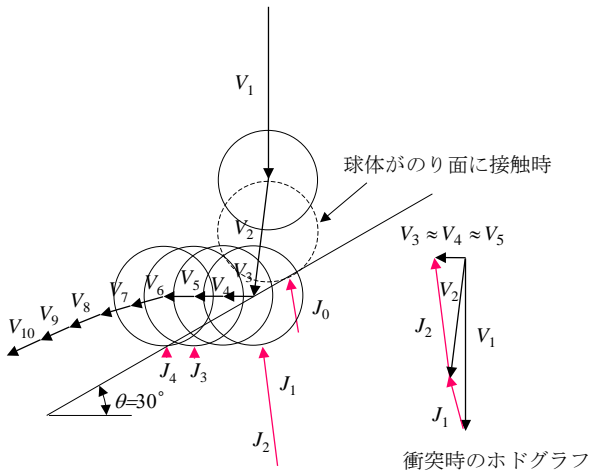


図3 衝突時の速度変化と単位力積

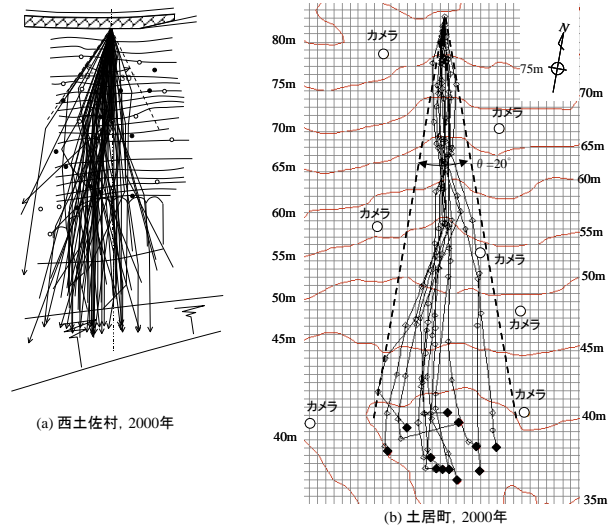


図4 岩塊の落下経路の鉛直投影図^{9), 15)}

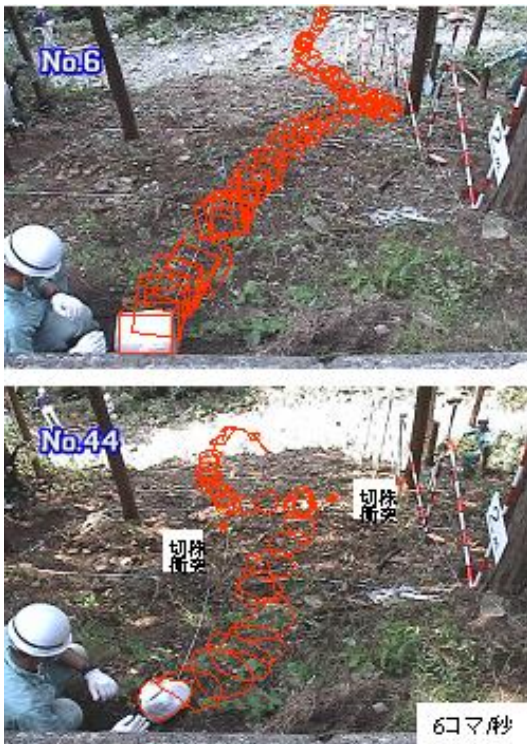


写真4 落石の落下経路(高知県西土佐村, 2000年)

図3は傾斜角30°の盛土斜面にコンクリート球を自由落下させたときの挙動を示している。コンクリート球は斜面に衝突すると、斜面から抗力を受ける。球の速度Vと単位力積J(質量を1とした力積)の変化は図3のようになる。

斜面からの抗力の大きさや方向は経時的に変化する。教科書に紹介されている質点系の衝突運動のように単純なものではない。入射角や反射角を特定することは困難である。

4. 落石の平面的落下経路

落石は、斜面の最急勾配方向に落下する傾向があるが、写真4に示すように斜面の僅かな凹凸や立木などの影響

を敏感に受けて、進行方向を変化させる。このため、斜面上の同一地点から落石が発生させても同一の経路をたどることはない。

図4は落石時実験から得られた落石の落下経路である。地形のコンターラインがほぼ平行になった高知県西土佐村の実験斜面⁹⁾では分散角が $\theta = 30^\circ$ 、沢地形となった愛媛県土居町の実験斜面¹⁵⁾では $\theta = 20^\circ$ という結果が得られた。建設省が1985年に高松で行った実験^{2), 3)}では、 $\theta = 45^\circ$ であったという結果が報告されている。

5. 落石の跳躍量

5.1 跳躍量の定義

落石対策の実務では跳躍量を2mと見なし、それに余裕高さを加味して防護柵の高さを決めることになっているが、跳躍量が明確にされていないため、混乱を生じている。

その1例を図5に示す。路面からの高さが5.4mの防護柵の頂部を落石が跳び越えて国道に落下した。落石が描く放物線までの距離をのり尻から測定すると7mであるが、飛行を開始した斜面を延長した線を基準にして測定すると2mになる。測定の仕方によって跳躍量は全く異なった値になる。

「落石対策便覧に関する参考資料」(日本道路協会)³⁾では、跳躍量を図6(a)のhように定義している。落石が小さい場合にはこのような定義でも問題にならないが、例えば落石の直径が4mであったら、地面からわずか0.1m飛び上がっただけでも跳躍量は2.1mということになる。跳躍量は落石径Dを考慮し、 $h - D/2$ と定義すべきであるが、本論文では、図6に示すhを跳躍量と呼ぶものとする。

図6(b)のように斜面勾配が変化している場合に、h'のように測定すると、落石が描く軌跡は同じでも、地形の状況によって跳躍量が異なることになる。飛行を開始した斜面勾配を延長した線を基準にhを測定すべきであろう。

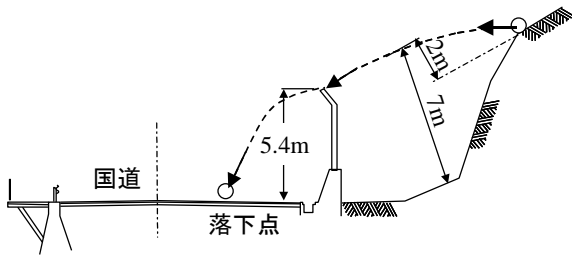


図5 四国の国道における落石事故例¹⁹⁾

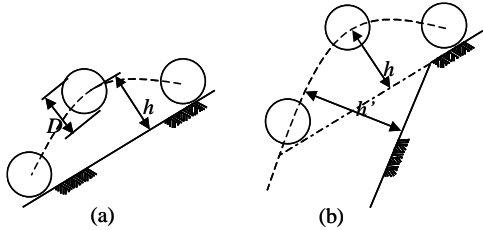


図6 跳躍量とは

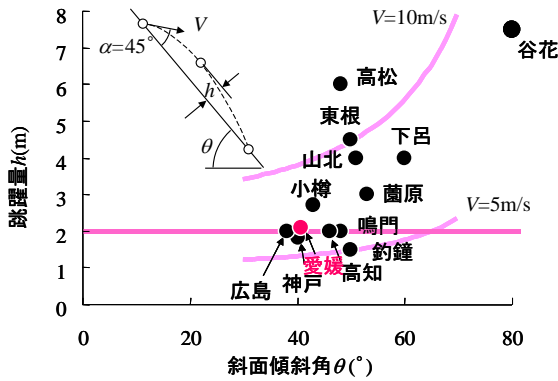


図7 現場落石実験で測定された跳躍量

5.2 跳躍量の実測値

図7は過去の落石実験で観測されている跳躍量である。斜面傾斜角が大きいほど跳躍量も大きくなる傾向が見られる。図中の2本の曲線は、落石が斜面から $\alpha=45^\circ$ の角度で、速度 $V=5\text{m/s}$ および 10m/s で飛び出すとして、式(1)で計算した跳躍量 h である。

$$h = \frac{V^2 \sin^2 \alpha}{2g \cos \theta} \tag{1}$$

ただし、図7に示した跳躍量がどのように測定されたものか定かでない。図6(b)の h' のように測定されている可能性が大きい。

跳躍量に関しては、測定方法を明確にした上で正確なデータを今後蓄積していく必要があると考えている。

6. 落石の速度と運動エネルギー

6.1 速度の予測法

落石の速度を予測する方法には、等価摩擦係数法と数値シミュレーションによる方法がある。

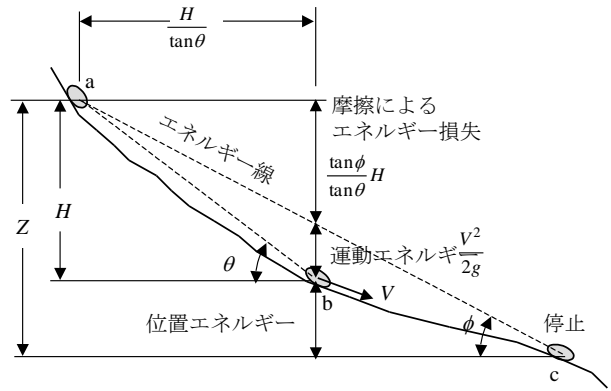


図8 そりモデル²²⁾

等価摩擦係数法とは、ハイム(1932年)が提案した「そりモデル」²²⁾に基づいている。ある質点が、斜面から摩擦を受けながらすべり、運動エネルギーが0になった点で停止するという理論である。計算が簡便なことから実務ではこの方法が専ら用いられている。

近年では、落石が斜面を落下する際の落下軌跡及び速度等を定量的・合理的に予測評価するために、質点系落石シミュレーションや非質点系落石シミュレーション等の各種のシミュレーション手法が開発・提案されているが、現地条件に対応したモデル化、計算パラメータの設定方法、計算結果の妥当性の検証、計算結果の評価等、多くの課題が残されているのが実情である¹⁾。

6.2 等価摩擦係数法による計算式

図8に示すように落石がa点から斜面を滑りながら落下する場合、落差Hの位置bでの速度Vは式(2)で、運動エネルギーは式(3)で表すことができる²⁾。

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

$$E = (1 + \beta) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta}\right) mgH \tag{3}$$

ここに、 θ はa点からb点までの斜面の平均傾斜角、 g は重力加速度、 μ は等価摩擦係数、 m は落石の質量、 β は回転エネルギー係数である。

速度あるいは運動エネルギーが既知であれば、等価摩擦係数は式(4)、または式(5)で求めることができる。

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

$$\mu = \left\{1 - \frac{E}{(1 + \beta)mgH}\right\} \tan \theta \tag{5}$$

6.3 等価摩擦係数

(1)地すべり対策で用いられる等価摩擦係数

等価摩擦係数法は、元々は地すべり土塊の到達地点を予測する目的で提案されたものであり。この場合の等価摩擦係数は、運動の開始点から停止点の間で発揮される平均

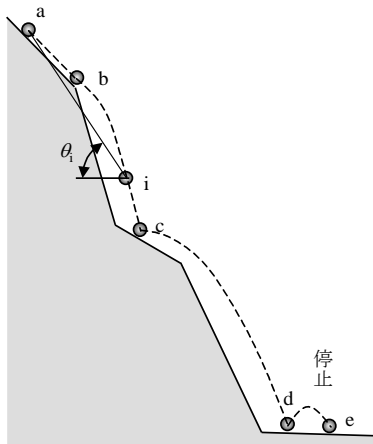


図9 落石の落下経路の模式図

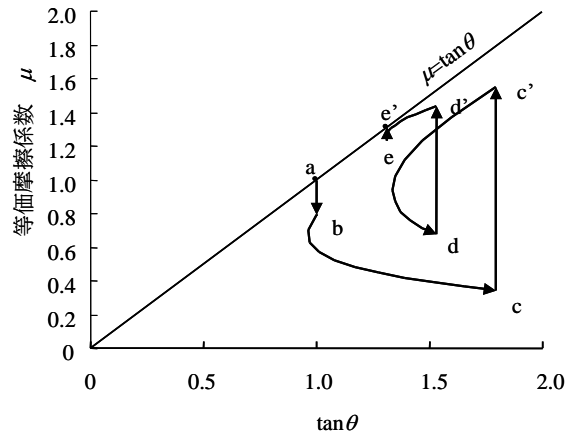


図11 落下経路の勾配と等価摩擦係数の関係

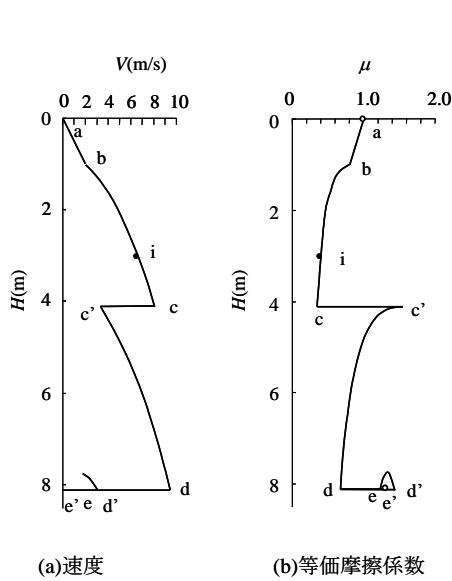


図10 落石の速度と等価摩擦係数の変化

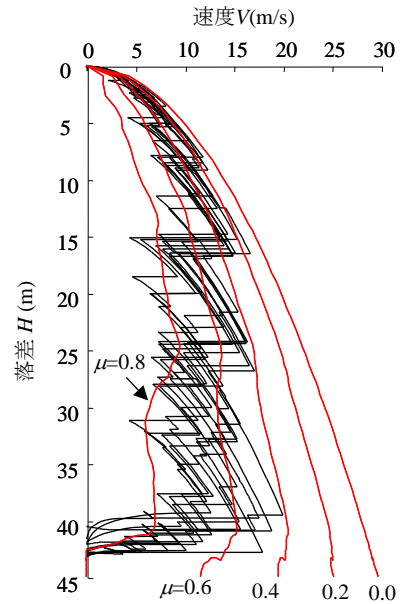


図12 落石の速度変化(愛媛県土居町)¹⁵⁾

的な摩擦係数を意味しており、式(6)で定義される。

$$\mu = \tan \phi \tag{6}$$

ここに、 ϕ は落石の運動開始点から停止点までの斜面の平均傾斜角である(図8参照)。

(2)落石対策における等価摩擦係数

図9は斜面における落石の落下経路を模式的に描いたものである。a点で運動を開始した落石が斜面に沿って滑り、b点から飛行を開始し、c点、d点とバウンドしながら落下してe点で停止したものとすれば、落石の速度は図10(a)のように変化する。この速度から式(4)で等価摩擦係数を求めると、図10(b)のようになる。ただし、 θ としては運動開始点aから速度を算定する点iまでの落石の落下経路の平均傾斜角を用いている。

図11は、落石の落下経路の勾配と等価摩擦係数の関係を示したもので、運動の開始から停止までの間に、等価摩擦係数がどのように変化するかを表している。図中のa、b・・・e点は、図9、図10のそれと対応している。

運動を開始する前は $\mu = \tan \theta$ のライン上にある。運動を開

表1 設計に用いる等価摩擦係数 μ^2

区分	落石形状	地質	凹凸	立木	μ
A	丸状	軟岩	小	なし	0.05
B	丸状~角状	軟岩	中~大	なし	0.15
C	丸状~角状	土砂, 崖錐	小~中	なし	0.25
D	角状	崖錐, 巨礫混じり崖錐	中~大	なし~あり	0.35

始して加速運動をすると、等価摩擦係数は減少する。斜面に衝突して減速すると等価摩擦係数は増加する。停止すると $\mu = \tan \theta$ のライン上にくる。つまり、等価摩擦係数は、落石の運動期間中、 $0 < \mu \leq \tan \theta$ の範囲で変化することになる。

図12は、写真3に示した自然斜面で行った落石実験から得られたもので、質量120~2060kgの岩塊の速度変化を表している。落差15mまでであれば等価摩擦係数0.2、15m以上であると等価摩擦係数0.4を用いて求めた速度で包含できる。

落石対策の実務においては、等価摩擦係数は斜面の性状から決まる定数であるとして、表1の値が用いられている。しかしながら、等価摩擦係数は、落石の発生源からの落差

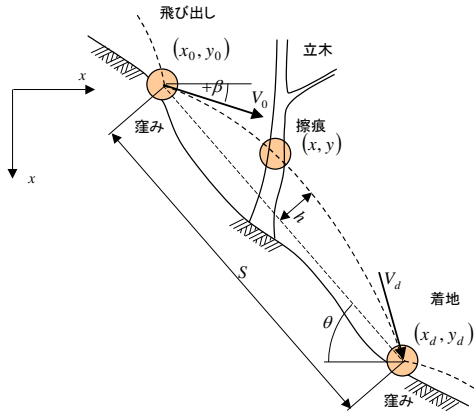


図 13 飛行運動の記号の説明

や運動形態の影響をより顕著に受けるので、表1の値で速度を計算すると、ある落差では速度を過小に評価し、ある落差では逆に過大に評価することになると考えられる。

6.4 落石現場の痕跡から逆解析

落石事故現場には、斜面に窪み、立木への擦痕などが残されている。これらを詳細に調査すれば、落石の運動経路や運動形態を推測することができ、それから落石の速度や運動エネルギーを推定することができる。

例えば、図13に示すように飛行開始点と着地点に窪みがあり、その間の立木に擦痕が残っていることがある。落石の飛行軌跡における任意の3点の座標値 (x_0, y_0) , (x_d, y_d) , (x, y) を特定することができれば、次式で初速度 V_0 、着地速度 V_d を計算で求めることができる⁶⁾。

飛び出し速度

$$V_0 = \sqrt{V_{0x}^2 + V_{0y}^2} \tag{7}$$

$$V_{0x} = \sqrt{\frac{g(x-x_0)(x_d-x_0)(x_d-x)}{2\{(x-x_0)(y_d-y_0)-(x_d-x_0)(y-y_0)\}}} \tag{8}$$

$$V_{0y} = \frac{(x_d-x_0)^2(y-y_0)-(x-x_0)^2(y_d-y_0)}{(x-x_0)(x_d-x_0)(x_d-x)} V_{0x} \tag{9}$$

着地速度

$$V_d = \sqrt{V_{dx}^2 + V_{dy}^2} \tag{10}$$

$$V_{dx} = V_{0x} \tag{11}$$

$$V_{dy} = \sqrt{V_{0y}^2 + 2g(y_d - y_0)} \tag{12}$$

6.5 四国における落石事故現場の調査例

(1)松山市玉谷町の例

図12は芸予地震(2001)の際に落石があった松山市玉谷町の斜面である。道路脇に設置されていた落石防護柵は、約27m上方から落下してきた質量1tの岩塊の直撃を受けたが、写真5に見られるように変形しただけで落石を受け止めた。

等価摩擦係数を $\mu=0.35$ として、式(2)で落石の運動エネルギーを算定すると151kJとなる。しかしながら、この防護柵が吸収できるエネルギーは50kJ程度であるので、落石

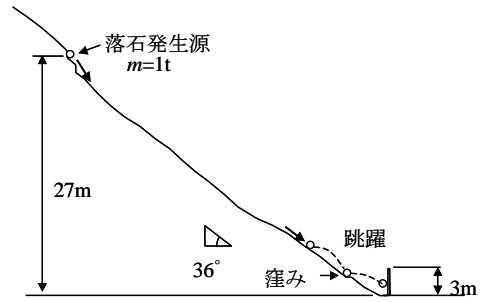


図 14 国道317号松山市玉谷町の落石斜面(2001)



写真 5 落石へ防護柵の破損状況と衝突した落石

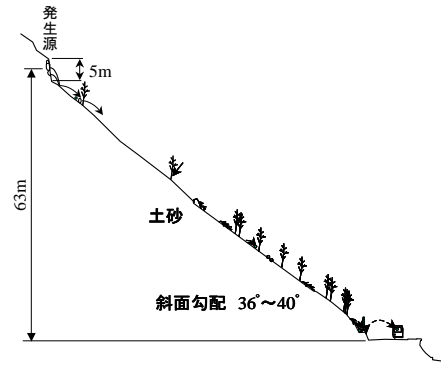


図 15 国道11号鳴門市北灘の落石斜面(1990)³⁾

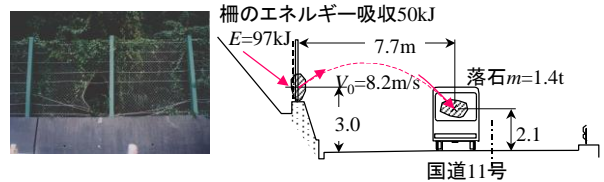


図 16 防護柵の破損状況と道路での落石の飛行経路³⁾

の運動エネルギーは 50kJ 以下であると判断される。運動エネルギーを 50kJ として式(4)で等価摩擦係数を計算すると 0.6 になる。

(2)鳴門市北灘の例

図15は、1990年に落石事故があった徳島県鳴門市北灘町鳥ヶ丸の斜面である。道路上63mの崖から抜け落ちた質量1.4tの落石が道路脇の落石防護柵を突き破って、一般国道11号を高松方面に向かって走行中の観光バスを直撃し、3名が死亡、14名が負傷した。

防護柵を突破した位置とバスに衝突した位置から落石の飛行軌跡を図16のように推定し、落石速度を算定すると初速度 $V_0=6.33m/s$ 、着地速度 $V_d=10.58m/s$ となる。落石防護柵の破損で消費されたエネルギーを50kJと考え、柵に衝突する前のエネルギーは78.6kJになり、等価摩擦係数は式(4)より $\mu=0.7$ となる。

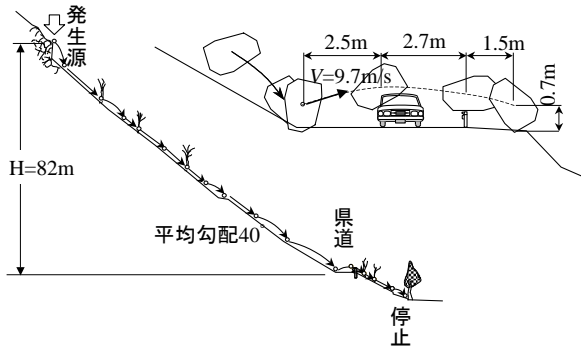


図 17 県道東洋安田線の北川村島の落石斜面(1996)^{3), 6)}



写真 6 落石発生源と立木に残されていた擦痕⁶⁾



写真 7 被災した乗用車と落石が跳び越えたガードレール⁶⁾

(3)北川村島の例

図17は、1996年に落石事故があった高知県北川村島の斜面である。県道東洋安田線を国道439号に向かって走行中の乗用車を推定質量10tの落石が直撃した。

落石発生源から停止位置までの間の落下経路には、写真6に示すように斜面の窪み、立木の擦痕などが確認された。擦痕の高さは、立木の根元から1.0m以下であった。県道の路側部のガードレール支柱は、写真7のように13cm押し込まれ、ビームの変形は落石の底面形状と一致していた。落石がガードレールをかすめながら飛び越えたことは明らかである。

県道部での跳躍軌跡が図17のように特定できるので、これから落石の速度を求めると、初速度 $V_0=9.67\text{m/s}$ 、着地速度 $V_f=10.53\text{m/s}$ となる。この速度から等価摩擦係数を求めると、飛行開始点が $\mu=0.78$ 、着地点が $\mu=0.77$ となる。

6.6 富士山の落石事故²¹⁾

(1) 事故の概要

2009年7月13日の夜、富士山スカイラインの富士宮口新五合目駐車場で、落石が防護柵を突き破ってキャンピングカーを直撃し、キャンピングカーの中にいた男性が死亡するという事故が発生した。

質量1tの落石が、標高3000m付近から約600m下の駐車場までバウンドしながら約1.5kmの距離を転がり落ち、高さ

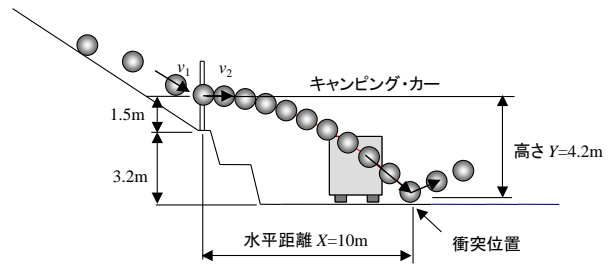


図 18 事故現場の痕跡から推定される落石の飛行軌跡²¹⁾

3mの落石防護柵を突破し、駐車場のキャンピングカーを直撃した。斜面の傾斜角は $20\sim 30^\circ$ と比較的緩い。

(2) 落石の速度

斜面の末端には高さ約3mの擁壁があり、その前が駐車場になっている。擁壁の上に設置されていた防護柵を落石が突破して、キャンピングカーを貫通して路面に落下した後、バウンドして前方の車に衝突している。日本テレビの現地取材班に調べてもらった防護柵の穴の位置と、落石が路面に衝突した際に付いた痕跡の位置から、落石の軌跡を推定すると図18のようになる。

防護柵を突破した落石が水平に飛び出したと仮定すると、着地するまでの飛行時間はニュートン力学で次のように計算できる。ただし、落石はキャンピングカーの屋根を貫通しているが、それによるエネルギー消費は少なくして無視できるものとする。

防護柵突破後の初速度 v_2 は、

$$v_2 = \sqrt{\frac{X^2}{2Y}g} = \sqrt{\frac{10^2}{2 \times 4.2} \times 9.8} = 10.8\text{m/s} (39\text{km/h})$$

この時の運動エネルギー E_2 は

$$E_2 = \frac{1}{2}mv_2^2 = \frac{1}{2} \times 1.0 \times 10.8^2 = 58\text{kJ}$$

落石は、52kJの運動エネルギーに耐えられる防護柵を突破してキャンピングカーを直撃していることから、防護柵で消費された運動エネルギーは $E_L=52\text{kJ}$ であり、防護柵に持ち込まれた運動エネルギー E_1 は次のようになる。

$$E_1 = E_2 + E_L = 58 + 52 = 110\text{kJ}$$

防護柵に衝突する直前の落石の速度 v_1 は下記のように求められる。

$$v_1 = \sqrt{\frac{2E_1}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 110}{1.0}} = 14.8\text{m/s} (53\text{km/h})$$

斜面をバウンドしながら落下してきた落石の速度は、一般道を走る自動車の速度程度であったと推測される。

落石の速度に関して、7月15日朝の報道番組で、某大学教授は「車に衝突したときの速度は時速200～360km」とコメントされていた。日本テレビの記者が取材した専門家の出した値も、私の推定値よりはるかに大きかったようである。

落石を円柱と仮定して、転がり速度を計算すると、次のようになる。

$$v_1 = 0.816\sqrt{2gH} = 0.816\sqrt{2 \times 9.8 \times 600} = 88.5\text{m/s} (319\text{km/h})$$

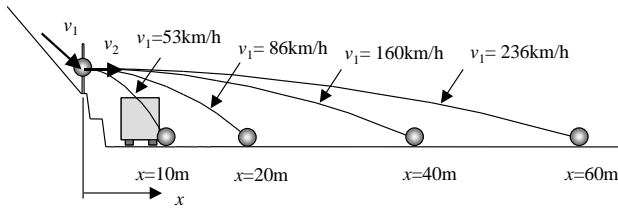


図 19 落石の速度と飛行軌跡の関係²¹⁾



写真 8 実験装置²¹⁾

$\mu=0.35$ として速度と運動エネルギーを算定すると、下記の値になる。

$$v_1 = \sqrt{2 \times 9.8 \times 600 \times \left(1 - \frac{0.35}{\tan 25}\right)} = 54 \text{ m/s (195 km/h)}$$

$$E = (1 + 0.1) \times \left(1 - \frac{0.35}{\tan 25}\right) \times 1.0 \times 9.8 \times 600 = 1613 \text{ kJ}$$

学識経験者が予測した速度や運動エネルギーは、このような計算結果を拠り所していると思われる。

もしも落石の速度が、学識経験者の方々が言われるように新幹線並であれば、落石の着地点は落石防護柵の位置から50m以上離れた所になる。速度が80km/h以上であれば、落石はキャンピングカーを直撃することにはならない。図19に示すように頭上を飛び越えていたはずである。

(3)検証実験

一般の土木構造物は、設計荷重に対して2~3倍の安全余裕を持っている。52kJの運動エネルギーに対して設計された防護柵が、110kJ程度の落石のエネルギーで破壊されるものかどうかを検証する目的で実験を行った。

実験は写真8のように斜面に設置したレールの上を、重さ2tのコンクリート塊を滑走させ、レールの前方に設置した防護柵に衝突させた。レールの傾斜角は45度であるが、下端は23度になっている。コンクリート塊の落下高さは8mとした。防護柵に衝突する際の速度は10m/s(36km/h)、運動エネルギーは富士山の落石とほぼ同じ100kJである。なお、コンクリート塊の速度はスピードガンで測定した。

被災したのは高さ3mの防護柵であるが、実験には高さ1.5m、延長9mの防護柵を用いた。計算上の可能吸収エネルギーは55kJであるので、性能は被災した防護柵とほぼ同じである。ただし、市販の防護柵は端末支柱の強度不足が考えられたので、斜材(H形鋼)で補強している。



写真 9 コンクリート塊が防護柵を突破²¹⁾



写真 10 破断した防護柵²¹⁾

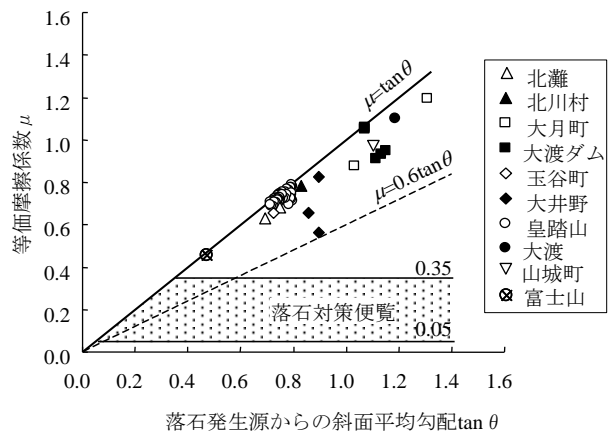


図 20 逆算で求められた等価摩擦係数

実験結果は写真9、写真10に示す通りである。コンクリート塊はワイヤロープを破断して防護柵を突き破った。このことより、富士山の事故現場の落石速度 14.8m/s は妥当であると言える。この速度から等価摩擦係数を逆算すると、 $\mu=0.46$ となる。

6.7 等価摩擦係数と斜面勾配の関係

図 20 は、落石事故現場に残された痕跡等を元にして求めた等価摩擦係数である。皇踏山(香川県)のデータ以外は、斜面下端の道路脇で推定された速度から求めている。

等価摩擦係数は、斜面勾配が急なほど大きくなる傾向があり、 $0.6 \tan \theta < \mu < \tan \theta$ の範囲にある。

落石対策便覧では、0.05~0.35の値を用いるものとしているが、このような値を用いると、落石事故現場に残された落石の痕跡を説明することができない。

落石対策便覧に示されたような等価摩擦係数が出現するのは、道路際に崖があり、その直近で落石が発生するような場合に限定されるのではないと思われる。バウンドを繰り返しながら落下する場合は、斜面へ衝突する際にエネルギーが吸収されるので、このような小さな値にはならない。

7. まとめ

自然斜面で行った落石実験および落石事故現場に残された痕跡から運動特性と現行の運動の予測法について検討した。その結果をまとめると以下ようになる。

- 1) 死亡事故に繋がるような落石のほとんどは、斜面上方の崖から剥離または抜け出した岩塊である。
- 2) 斜面を落下する落石の運動形態はバウンドが主体である。
- 3) 飛行中の落石は、三次元的な回転をするので、角速度を測定するのは困難。
- 4) 斜面に衝突すると、斜面からの抗力の大きさと向きは経時的に変化する。質点系の衝突運動のような入射角や反射角を特定することは困難。
- 5) 落石は斜面わずかな凹凸や立木などの影響を敏感に受けて、進行方向を変化させる。
- 6) 落石の平面的な落下経路の分散角は、コンターラインがほぼ平行な西土佐村の実験では 30° 、沢地形の土居町の実験では 20° であった。
- 7) 跳躍量が明確に定義されていないので、混乱を生じている。落石の直径や斜面の傾斜角を考慮した定義が必要。
- 8) 斜面傾斜角が急なほど落石の跳躍量が大きくなる傾向がある。
- 9) 等価摩擦係数 μ は、斜面特性によって決まる定数ではない。落石の発生源からの落差や運動形態の影響を顕著に受け、 $0 < \mu \leq \tan \theta$ の範囲で変化する。
- 10) 落石事故現場から推定された等価摩擦係数は、斜面勾配が急なほど大きくなり、 $0.6 \tan \theta < \mu < \tan \theta$ の範囲にある。
- 11) 等価摩擦係数として $0.05 \sim 0.35$ の値が一般的に用いられているが、このような値を用いると、速度や運動エネルギーを過大に評価する恐れがある。

8. 今後の課題

わが国では、1963年に起きた「高知国道56号落石事故」、そして1963年の「飛騨川バス転落事故」を契機に道路防災点検が実施されるようになり、落石対策が積極的に行われてきた。しかしながら、落石の危険箇所が広範囲に存在することに加えて、斜面の風化によって危険箇所が増加し、落石対策が追いつかない状況にある。

今後においては、少子化・高齢化・人口減少といった社会構造の変化が急速に進んでおり、落石対策に充当できる予算は益々厳しくなると予想される。

このような状況下で、落石に対する安全性を高めてゆくには、研究開発を積極的に進める以外にない。具体的には、下記の研究が必要と考えている。

- 1) 落石の発生域、発生要因を特定する調査技術の研究。
- 2) 落石の落下経路、跳躍量、速度、運動エネルギー、到達位置を正確に予測する手法の研究。
- 3) 落石の危険度を事故の頻度と影響度の観点から合理的に評価する手法の研究。
- 4) 落石の衝突速度、運動量、運動エネルギー、衝突位置などの条件を考慮して、落石防護工の安全性を適切に評価する設計手法の研究。
- 5) 構成されている各部材の安全性にバランスがとれた落石防護工の研究開発。
- 6) 部材にダンパーを組み込むなどエネルギー吸収性能や耐衝撃性能に優れ、コストパフォーマンスの高い落石防護工の研究開発。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工一切土工・斜面安定工指針，p337，2009。
- 2) 日本道路協会：落石対策便覧，2000。
- 3) 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。
- 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) 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,pp49-58，1997。
- 6) 右城猛，玉井佐一，明坂宣行，山岡幸弘，八木則男：高知県における落石災害と落石の運動特性，土木学会論文集 No.581/VI-37,pp39-48，1997。
- 7) T.Ushiro,Y.Matsumoto, N.Akesaka,N.Yagi : The accidents caused by falling rocks and its behavior in Kochi Prefecture, Proceedings of the International Symposium on Slope Stability Engineering -IS-SHIKOKU'99, 1999.
- 8) 右城猛，篠原昌二，谷田幸治，八木則男：石の斜面衝突運動に関する研究，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集，土木学会構造工学委員会，2000。
- 9) 右城猛，筒井秀樹：実斜面での落石実験1（落石運動のメカニズム），第36回地盤工学研究発表会，2001。
- 10) 右城猛，筒井秀樹：実斜面での落石実験2（落石の運動特性），第36回地盤工学研究発表会，2001。
- 11) 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.
- 12) 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，土木学会構造工学委員会，pp.77-80，2002。
- 13) T. USIRO, M. KUSUMOTO, K.ONISHI : An experimental study related to rock fall movement mechanism., International Conference on Disaster Management: achievements and challenges DiMAC-2005
- 14) T. USIRO, M. KUSUMOTO, K.ONISHI : Effect of surface soil over

- the bedrock on the rebound speed of falling rock, International Conference on Disaster Management: achievements and challenges DiMAC-2005
- 15) 右城猛, 楠本雅博, 篠原昌二, 木下賢司: 落石の運動機構に関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol.62, NO.2, 377-386, 2006.6
 - 16) 右城猛: 土はなぜ崩れるのか 第19回落石が防護柵を飛び越えたのはなぜ? 日経コンストラクション4.4, 日経 BP 社, 2005.
 - 17) 右城猛: 土はなぜ崩れるのか 第49回落石を予測できたのか? 日経コンストラクション12.12. 日経 BP 社, 2008.
 - 18) 右城猛, 西岡南海男, 筒井秀樹, 田中登志男, 堀地幹夫: エネルギー吸収金具を付けた落石防護ネットの開発, 第3回南海地震四国地域学術シンポジウム論文集, 土木学会四国支部, 2008.12.
 - 19) 松尾修, 池田憲二, 村石尚: 落石対策の概要, 講座落石対策, 土と基礎, Vol.50, No.1, 口絵写真, 2002.
 - 20) 古賀泰之, 右城猛, 小村辰彦: 落石運動のメカニズムと予測(その1), 講座落石対策, 土と基礎, Vol.50, No.3, pp68-73, 2002
 - 21) 右城猛: 富士山新五合目駐車場における落石事故の検証, http://www.daiichi-c.co.jp/authors/ushiro/rakuseki/fuji_rakuseki.pdf.
 - 22) 小橋澄治, 佐々恭二: 地すべり・斜面災害を防ぐために, pp70-85, 山海堂, 1990.

Problem of movement characteristic of falling rock and present movement forecast method

Takeshi USHIRO¹, Hideki TSUTSUI², Hajime KAGAYAMA³

1 Daiichi Consultants Company Limited

2 Loyal Consultant Company Limited

3 Nihon Protect Company Limited

Abstract

We conducted the rock fall experiments on a natural slope and have investigated falling movement, speed, kinetic energy, and bounce height of rock by analyzing the trace at the scenes of accidents.

A rock fall happened in the parking lot at the fifth stage of Mt. Fuji on the 3 July 2009 is included in them.

In this thesis, we introduced these examples and clarified the problems of the ways of estimating falling velocity and bounce height that are used now.

Key words: rock fall, velocity, kinetic energy, bounce height, accident caused by falling rocks