

落石の速度に関する研究

右城 猛 (株式会社第一コンサルタンツ)

1. まえがき

道路における落石対策を検討する上で、落石が道路まで到達する可能性、落石の速度(運動エネルギー)、跳躍量を的確に予測することが極めて重要である。

落石運動の予測には、これまで、主として経験則に基づいた落石対策便覧¹⁾の方法が用いられてきた。既往の実験データから得られた知見に基づいて落石の速度や跳躍量を予測する手法である。しかし、最近では、建設工事のコスト縮減の観点から、落石の危険度をより合理的かつ正確に予測し、その結果に基づいた防災対策が求められている。

こうしたことから、コンピューターを用いた各種の数値シミュレーションソフトが開発されている²⁾。数値シミュレーションは、斜面形状や地質、落石の規模などの斜面特性を定量的に評価した解析が可能である。しかし、解析結果は入力データに大きく支配される。このため、現場の落石分布状況に対する逆解析や類似斜面における実験データ分析などによって入力値を決定する必要があるが、信頼性の高い結果を得ることは容易でない。

筆者は、数値シミュレーション結果の妥当性を評価する上で、経験則による予測値と比較することが重要と考えている。当然のことであるが、経験則は、その知見が得られた条件の範囲内でしか適用できない。ところが、落石対策便覧には適用範囲が明確にされていないこともあり、誤って活用されている事例が少なくない。

本論文では、筆者が、これまでに調査した落石災害事例を紹介すると共に、斜面に残された痕跡から落石運動を逆解析した結果を示す。そして、解析結果を分析し、落石速度の支配要因について考察する。さらに、落石対策便覧に示された等価摩擦係数の適用範囲に対しても言及する。

2. 斜面上の痕跡から落石運動を推定する方法

2.1 飛行軌跡上の3点が既知の場合

落石現場では、斜面上に飛行開始点と着地点を示す窪みが残されていることが多い。また、その間の立木に擦痕が残されていることもある。もしも、図1に示すように、飛行開始点、着地点、軌跡上の任意点の3点の座標値 (x_0, y_0) 、 (x_d, y_d) 、 (x, y) がそれぞれ既知であれば、初速度 V_0 、着地速度 V_d を計算で求めることができる³⁾。

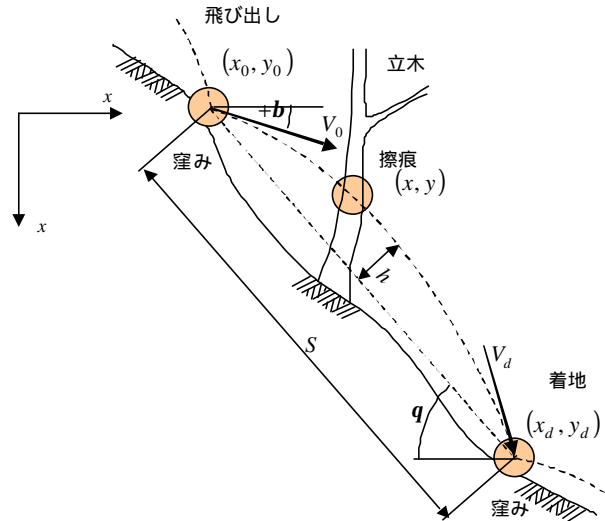


図1 飛行運動の記号の説明

飛び出し速度

$$V_0 = \sqrt{V_{0x}^2 + V_{0y}^2} \dots\dots\dots (1)$$

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

$$V_{0y} = \frac{(x_d-x_0)^2(y-y_0)-(x-x_0)^2(y_d-y_0)}{(x-x_0)(x_d-x_0)(x_d-x)} V_{0x} \dots\dots\dots (3)$$

着地速度

$$V_d = \sqrt{V_{dx}^2 + V_{dy}^2} \dots\dots\dots (4) \quad V_{dx} = V_{0x} \dots\dots\dots (5)$$

$$V_{dy} = \sqrt{V_{0y}^2 + 2g(y_d - y_0)} \dots\dots\dots (6)$$

着地までの飛行時間 t_d 、最大跳躍高 h は次式で与えられる。

$$t_d = \frac{2V_0 \sin(q-b)}{g \cos q} \dots\dots\dots (7) \quad h = \frac{V_0^2 \sin^2(q-b)}{2g \cos q} \dots\dots\dots (8)$$

2.2 飛行軌跡上の2点のみが既知の場合

落石現場で飛行軌跡上の3点が特定される場合は希である。多くの場合には飛行開始点と着地点の2点しか特定できない。その場合、落石を質点と見なせば、運動方程式の他にエネルギー最小定理を適用することができるので、落石の運動を式(9)～式(11)で逆解析できる。ただし、 S は図1に示すように飛び出し点から着地点までの斜距離である。なお、着地までの飛行時間 t_d 、最大跳躍高 h は前述の式で求めることができる。

$$V_0 = \frac{1}{\sin(q-b)} \sqrt{\frac{gS \cos q}{2\{\tan q + \cot(q-b)\}}} \dots (9) \quad V_d = \sqrt{V_0^2 + (gt_d)^2 + 2V_0gt_d \sin b} \dots (10) \quad b = q - \tan^{-1}(\tan q + \sec q) \dots (11)$$

3. 落石速度と等価摩擦係数

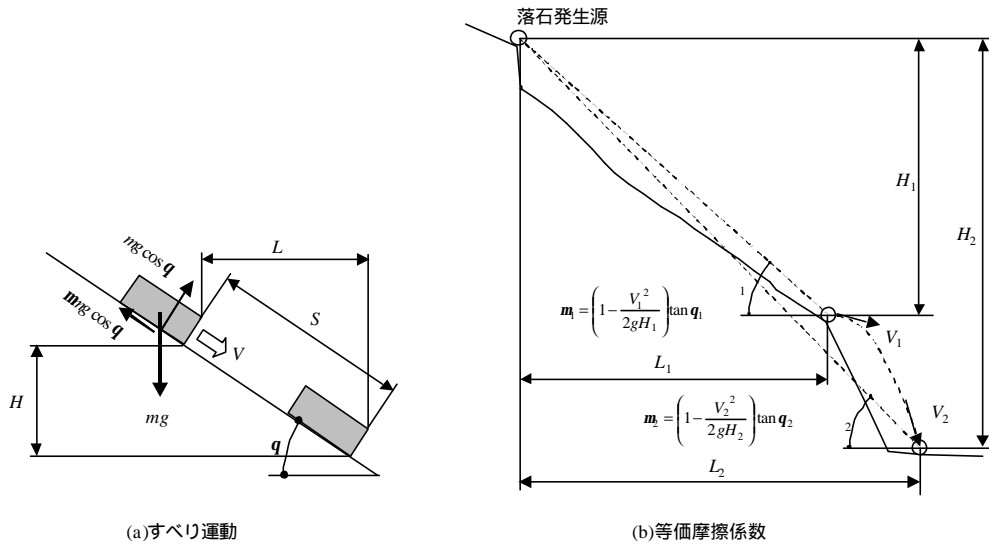


図2 等価摩擦係数の説明

落石の持つポテンシャルエネルギーは、斜面や立木への衝突、転がりによる地面の締め固め、摩擦などで消費され、残りが運動エネルギー（線速度エネルギーと回転エネルギー）に変換される。これをエネルギー保存則の形で示せば式(12)となる。ただし、 V は線速度、 I は落石の慣性モーメント、 ω は角速度、 E_{loss} は消費エネルギーである。

$$\frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 + E_{loss} = mgH \dots (12)$$

落石対策便覧では、落石の運動を図2(a)のようなすべり運動にモデル化し、線速度に変換される運動エネルギー以外のポテンシャルエネルギーは全て摩擦で消費されるものとしている。そうすれば、式(12)は式(13)のように表される。 μ は回転運動エネルギー、斜面や立木への衝突によるエネルギー損失なども含んだ見掛けの摩擦係数であり、等価摩擦係数と呼んでいる。

$$\frac{1}{2}mV^2 + m \cdot mg \frac{H}{\tan q} = mgH \dots (13)$$

式(13)より、落石の線速度 V は式(14)のように求められる。なお、 m は、落石発生源から速度を算出する位置までの平均傾斜角、 H は鉛直落下高であり、図2(b)のように測定する。式(14)は、落石発生源からの水平距離 L を用いて式(15)のように表すこともできる。

$$V = \sqrt{2gH \left(1 - \frac{m}{\tan q}\right)} \dots (14)$$

$$V = \sqrt{2g(H - L \cdot m)} \dots (15)$$

前述の式(1)～式(11)によって落下高さ H の地点における速度 V が既知になっておれば、(16)で等価摩擦係数を求めることができる。また、落石防護柵の変状等から落石の運動エネルギー E が推定できるならば、(17)で等価摩擦係数が求められる。

$$m = \left(1 - \frac{V^2}{2gH}\right) \tan q = \frac{H}{L} \left(1 - \frac{V^2}{2gH^2}\right) \dots (16)$$

$$m = \left(1 - \frac{E}{mgH}\right) \tan q = \frac{H}{L} \left(1 - \frac{E}{mgH^2}\right) \dots (17)$$

4. 落石斜面の痕跡より逆算された等価摩擦係数

4.1 大月町才角の事例

1988年8月12日午後2時20分頃、高知県幡多郡大月町才角の一般国道321号(足摺サニード道路)で、道路沿いの山肌が突然崩壊し、落下してきた数個の岩塊の1つが宿毛市方面へ向かって走行中の乗用車を直撃した。落石は、車のフロントガラスを突き破り、ハンドルにあたった後運転者の頭をかすめ後方へ飛び、後部左座席に乗っていた運転者の祖母の頭部を直撃し、リアウィンドウを突き破って外に飛び出した。

落石のあった斜面は、四万十南帯に属する砂岩および頁岩からなる岩盤斜面で、斜面勾配は約 53° と急である。斜面にはウ

バメガシが密生しているが、落石が通過した地点は旧崩壊跡地であり、まばらである。道路の上方48mの崖に剥離した形跡が認められ、ここが落石の発生源と推定される。路面の海側車線には、 $0.5\text{m} \times 0.3\text{m} \times 0.2\text{m}$ 大の砂岩塊が8個、 $0.05\text{m} \sim 0.1\text{m}$ 大のものは多数散乱していた。また、山側の路側擁壁の下および旧道部にも多数の砂岩塊が見られた。

これらの状況から、落石は図3に示すように、落石発生源から転がりながら落下し、途中から跳躍運動に移り旧道に落下した後、速い角速度で転がりながら旧道を横断し、路側ブロック積み擁壁の肩で跳躍して乗用車を直撃したものと推測される。

そこで、ブロック積み擁壁の肩を飛行開始点、フロントガラスの衝突点を着地点とし、この2点から落石の速度を推定すると、初速度 $V_0=8.63\text{m/s}$ 、着地速度 $V_d=11.58\text{m/s}$ となる。また、等価摩擦係数は、飛行開始点が $\mu=1.19$ 、着地点が $\mu=0.98$ となる。

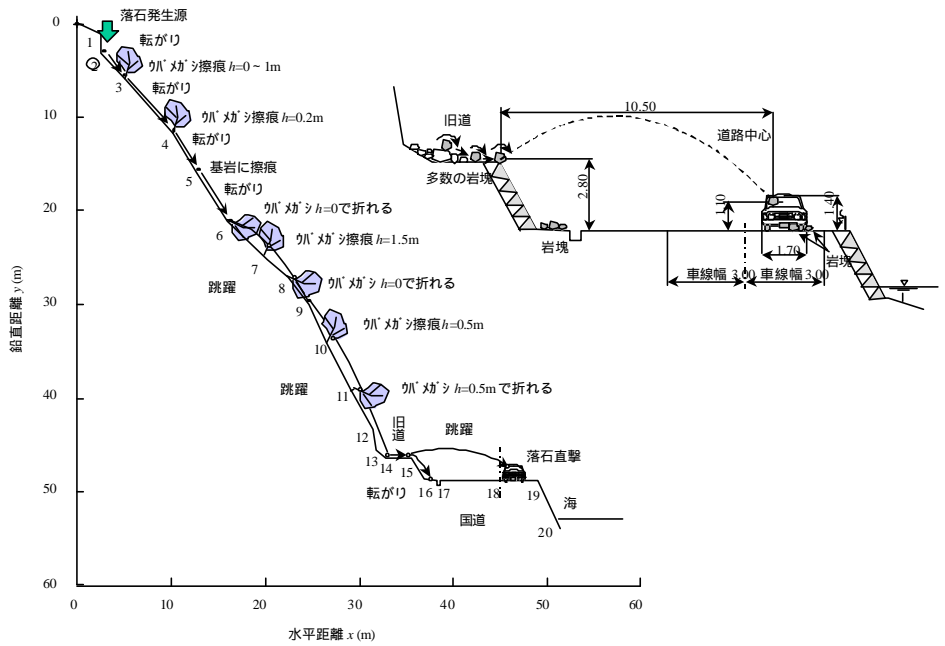


図3 大月町才角の落石斜面^{4), 5)}

4.2 北川村島の事例

1996年3月2日午前7時50分頃、高知県安芸郡北川村島において、県道東洋安田線を国道439号に向かって走行中の普通乗用車を推定質量10tの落石が直撃した。運転者はこの時の衝撃で胸部をハンドルで強打し、近隣の病院に運ばれたが死亡した。

落石地点は沢状地形部にあたり、斜面勾配は県道から約25m上方の旧県道跡地までが 36° 、それより上方が 41° となっている。地質は、四万十川層群の砂岩泥岩互層である。落石発生源は、県道より比高82mの斜面中腹部の基岩露頭部で、落石の抜け出しによる崩壊跡が確認された。落石発生源より下部斜面には崖錐性堆積物が

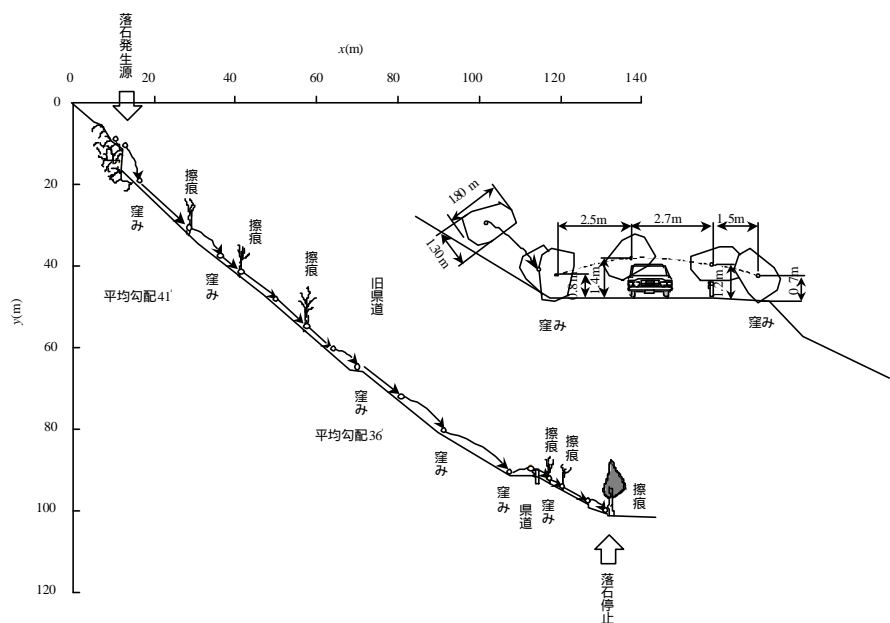


図4 北川村島の落石斜面^{4), 5)}

見られ、下部斜面ほど厚くなっている。旧県道付近および旧県道から現県道までの崖錐性堆積物には、上方から落下してきた0.5m～0.8m大の砂岩塊が多数存在する。斜面の植生は、樹齢45年生の広葉樹林である。

自動車を直撃した落石は、2.6m×1.3m×1.8m(推定質量10t)の砂岩塊で、県道から水平距離で約18m下方のスギの幹に衝突して停止していた。

落石発生源から停止位置までの間の落下経路には、立木の擦痕、樹木の圧裂およびせん断が随所で確認された。その高さは、立木の根元から1.0m以下である。落石の衝突による窪みは、図4に示す6箇所を確認された。県道路側部の土中用C種ガードレール支柱は、13cm押し込まれ路面からの突出長が57cm(正常値70cm)に、ビームはW形に変形していた。ビームの変形は、落石の底面形状と一致しており、落石がガードレールをかすめながら飛び越えたことを物語っている。

県道部での跳躍軌跡が特定できるので、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 $V_d=10.53\text{m/s}$ となる。また、等価摩擦係数は、飛行開始点が $\mu=0.78$ 、着地点が $\mu=0.77$ となる。

4.3 鳴門市北灘の事例

1990年10月8日午前10時頃、徳島県鳴門市北灘町烏ヶ丸(29K650m付近)において、一般国道11号を高松方面に向かって走行中の観光バス(奈良交通、乗客乗員49名)を質量1.43tの落石が直撃し、運転手とバスガイドおよび乗客1名の計3名が死亡、乗客14名が負傷した。

落石があった斜面の断面を図5に示す。斜面勾配は標高40m付近までが約36度、標高40m～70m付近までが約40度と上方ほど急勾配になっている。平均勾配は38度である。

斜面の基岩盤は中生代白亜紀の礫岩、砂岩、頁岩の互層である。被覆層は薄く、基岩の露頭が点々と見られる。溝状地形部には、岩片主体の崩積土が厚さ1m程度に分布している。斜面の植生は、広葉樹と松の混交林である。樹齢20年程度で胸高直径5～10cm、樹高5～10mのウバメガシが密生し、この中に樹齢10～35年、幹径30～50cmの松が20m²に1本程度の割合で分布する。

落石発生源は、標高70m付近(国道からの比高63m)で、砂岩・頁岩が互層を成す基岩が露頭し、高さ約5mの崖を形成している。露頭部から抜け落ちた岩塊は6個であるが、5個は斜面内に停止し、質量の最も大きい1.43tの岩塊が道路路際のコンクリート擁壁上に設置されていた落石防止柵(柵高H=3m)を突き破ってバスを直撃した。

落石防止柵は図6のような損傷を被った。8本のワイヤーロープの内、下段の4本のワ

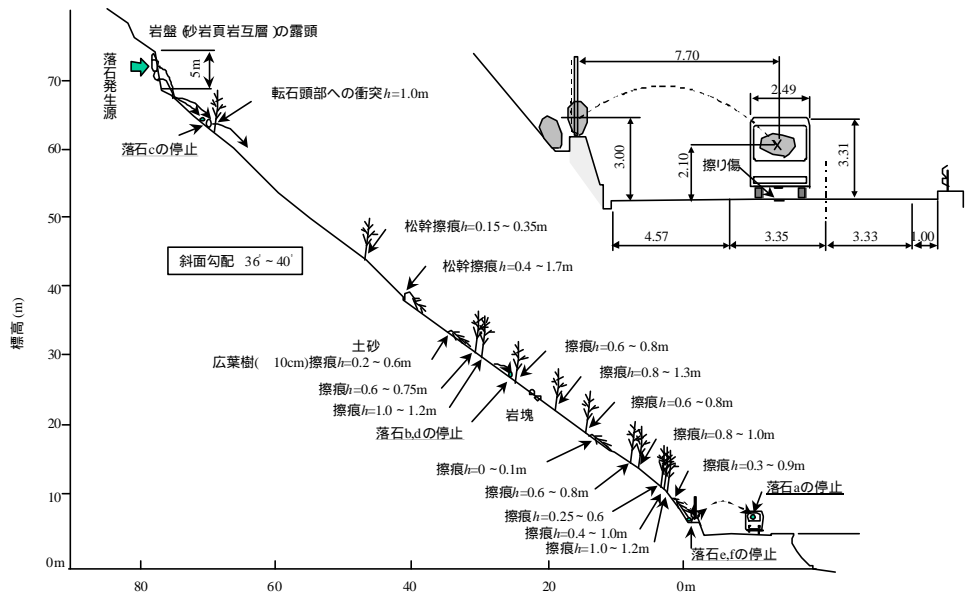


図5 鳴門市北灘の落石斜面⁶⁾

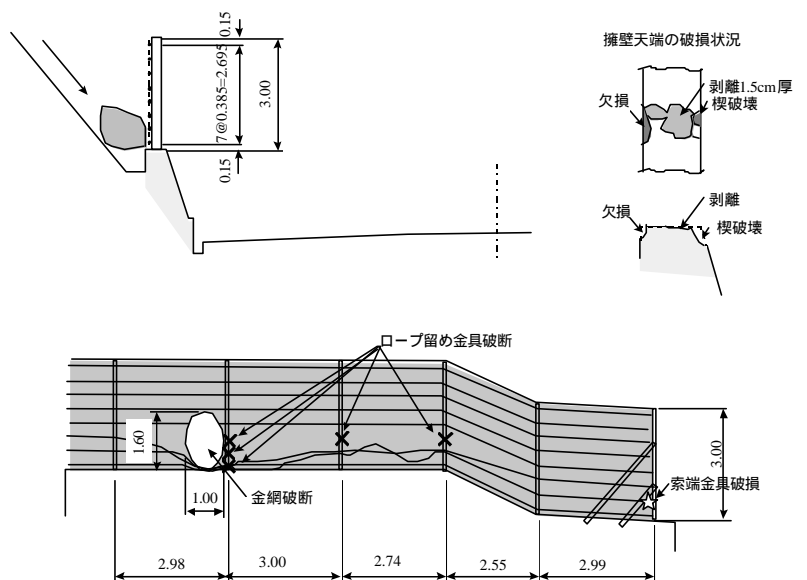


図6 落石防護柵の破損状況⁶⁾

ワイヤーロープに塑性変形が見られる。伸び変形量は最下段が2cm、2～4段目が23～26cmである。また、ワイヤーロープの支柱への留め金具5個と、2段目のワイヤーロープ索端金具が破損した。金網には、楕円形状の穴が開いており、落石の通過状況を示している。金網が切断された箇所では、擁壁の天端コンクリートが角部の欠損、楔破壊、表面剝離を生じている。

国道部を飛行した落石の跳躍開始点と着地点(パス衝突点)から落石速度を推定すると、初速度 $V_0=6.33\text{m/s}$ 、着地速度 $V_d=10.58\text{m/s}$ となるが、落石防護柵の破損によりエネルギーが消費されているので、このエネルギーを加算する必要がある。消費されたエネルギーを $E=50\text{kJ}$ と考えれば、柵に衝突する前のエネルギーは次のようになる。

$$E = \frac{1}{2} mV_0^2 + DE = \frac{1}{2} \times 1.43 \times 6.33^2 + 50 = 78.6\text{kJ} \quad m = \left(1 - \frac{E}{mgH}\right) \tan q = \left(1 - \frac{78.6}{1.43 \times 9.8 \times 60}\right) \times 0.75 = 0.68$$

したがって、落石防護柵位置での等価摩擦係数は $\mu=0.68$ となる。

4.4 仁淀村大渡ダムの事例

1996年6月に、高知県吾川郡吾川村に位置する大渡ダム左岸側のダムサイトの上方斜面上で落石が発生し、数個の岩塊がダム堰堤及び管理事務所へ通じる道路上に落下した。

落石地点の斜面の断面を図7に示す。斜面の地質は秩父帯北帯の仁淀川層に属す。基盤岩は輝緑凝灰岩が主体をなし、その中にチャートと泥質岩をレンズ状に挟む。道路上約57mより上部斜面には基盤岩が露頭しているが、これより下方は崖錐が基盤岩上に薄く堆積している。斜面下部は切土法面となっており、高さ11mのコンクリート擁壁、高さ約12mのコンクリート吹き付け工が施工されている。コンクリート吹き付けより上部の自然斜面の勾配は約 46° である。落石があったのは、ダム管理用道路の上方約67mの地点である。この付近には開口亀裂の発達したチャートの基盤岩が露頭し、トップリング性崩壊跡が確認される。また、落石発生源より上部斜面には1.5m～2.5m大の転石が多数分布している。斜面の植生は、幹径が10～15cmの広葉樹が主体である。

落石発生源の下方約10m～17m付近の広葉樹4本の幹に落石による擦痕が見られる。また、管理用道路際の緑地内に植えられている広葉樹の幹に5箇所の擦痕が見られる。さらに、落石の衝突によってできた窪みが緑地内および緑地の上の管理通路に見られる。

擁壁部の飛行運動について、跳躍開始点、立木の擦痕、緑地の窪みから3種類の軌道を設定し、それぞれの軌道について速度と等価摩擦係数を推定した。その結果を表1に示す。

4.5 芸予地震による落石事例

2001年3月24日15時28分、安芸灘を震源とするMj6.4の地震が発生した。松山市の震度は5であった。この地震により、愛媛県や広島県の各地で多くの落石が発生した。以下に示すのは、一般国道317号での落石である。

(1) 玉谷町の落石

落石発生源は国道から約27m上方で、斜面は平均傾斜 36° 、地質はまさ土、植生は幹径が数cmの雑木林である。斜面の雑木や露頭基岩に落石による擦痕が随所に見られる。落石の衝突による窪みは斜面下方(路面から高さ2m地点)

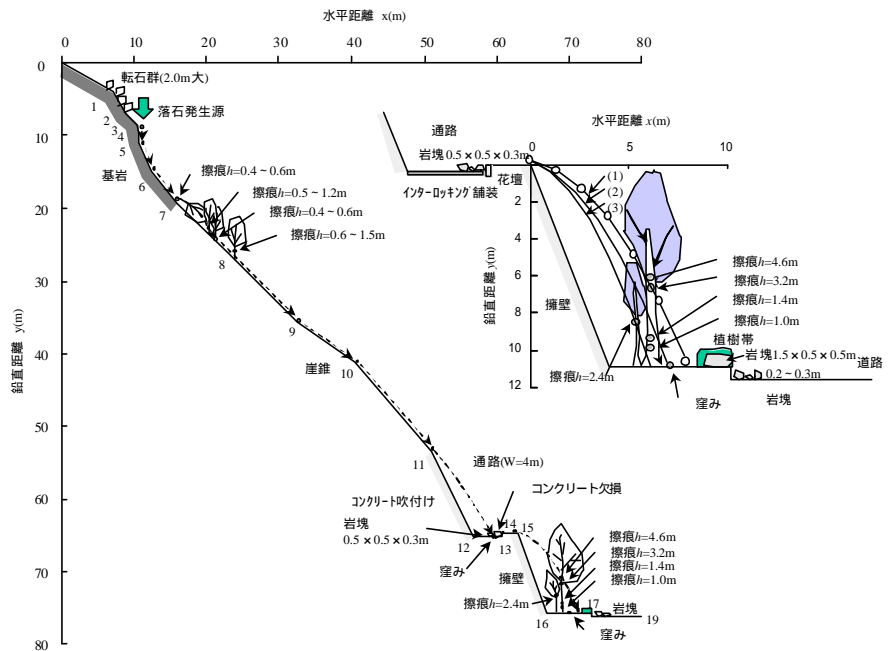


図7 大渡ダムの落石斜面

表1 大渡ダムの逆解析結果

		軌道1	軌道2	軌道3
速度(m/s)	跳躍開始点	5.02	4.44	3.85
	着地点	15.61	15.44	15.28
等価摩擦係数	跳躍開始点	1.048	1.053	1.058
	着地点	1.095	1.118	1.141

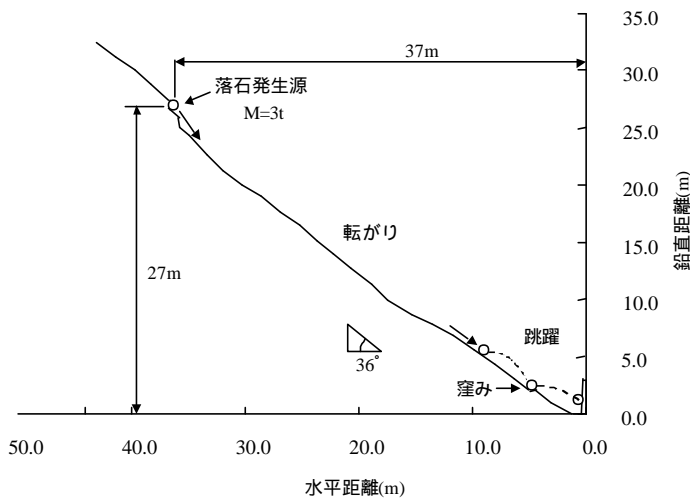


図8 玉谷町の落石斜面

写真1 落石防護柵の変形

に1箇所のみ確認された。落石は斜面を転がりながら落下し、斜面下方で跳躍運動へ移行し、落石防護柵を直撃したと推測される。

落石防護柵は高さ3m、支柱間隔3mで、支柱にはH-200×100が使用されている。落石は路面から高さ1mの位置の金網を直撃した。落石の直撃を受けた位置の金網には直径20cm程の穴が開き、ワイヤーロープは緩んでいるが、落石防護機能を十分発揮した。落石防護柵の破損が少なかった原因は、1990年の鳴門市北灘の落石事故を教訓に開発されたワイヤーロープ間隔保持材付き落石防護柵が使用されていたためと思われる。防護柵支柱は、くの字形に変形していた。片持ち梁ではなく、下端を固定、上端を弾性支持された梁のように変形している。これも間隔保持材の効果と推測される。基礎コンクリートには、何ら変状が認められなかった。

落石防護柵の変状の程度から判断し、柵に持ち込まれたエネルギーは多く見積もっても $E=50\text{kJ}$ までである。運動エネルギーを50kJ、落石質量を3tとして等価摩擦係数を推定すると $\mu=0.68$ となる。

(2)大井野町の落石

落石発生源は道路面より上方53m付近の花崗岩盤の露頭部。節理が発達しブロック状に分割された岩塊が、地震動によって落下したと推定される。

斜面は、傾斜角約 37° のまさ土で、斜面下部は高さ17.5mで切土され傾斜角 64° の崖を形成している。植生は、道路から落石発生源までが手入れの比較的行き届いた竹林で、それより上部は杉の植林である。落石は、竹をなぎ倒しながら転がり落ち、崖部の上端(おおきな窪みが見られる)で跳躍し、道路の山側路側に衝突。少し回転して、再び跳躍を開始し、車道部を飛び越え反対側の路側でリバウンドしてガードレールに接触しながら飛び越えて石手川の河床に落下した。

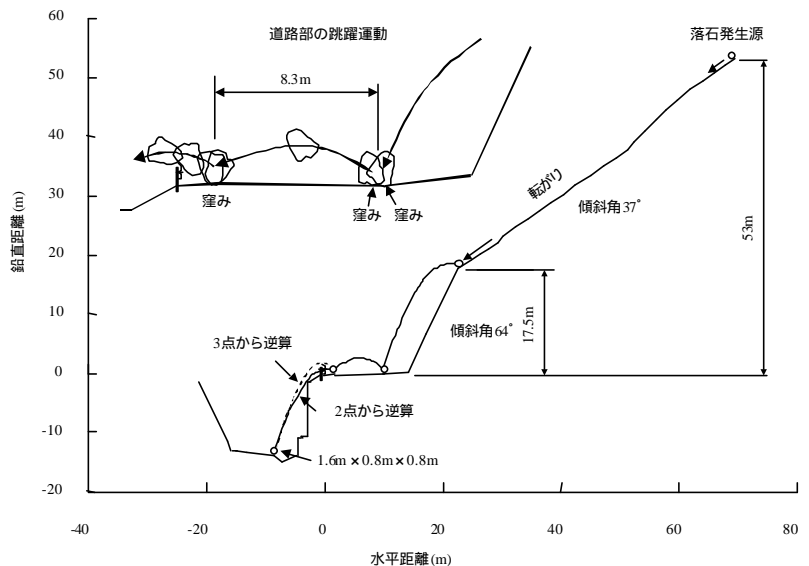


図9 大井野町の落石斜面

図9に実線で描いた落石の軌跡は、2点の痕跡から逆解析で求めた。破線は、落石がガードレールをかすめて飛び越えたことを考慮して3点の座標値を与えて求めたものである。逆解析の結果は、表2に示す通りである。2点から推定した場合と3点で推定した場合で軌跡は異なるが、等価摩擦係数への影響はほとんどない。

表2 大井野町の逆解析結果

		軌道1(2点)	軌道2(2点)	軌道3(2点)	軌道3(3点)
速度(m/s)	跳躍開始点	6.38	9.00	5.77	6.60
	着地点	19.77	9.04	17.41	17.70
等価摩擦係数	跳躍開始点	0.726	0.826	0.761	0.753
	着地点	0.864	0.755	0.839	0.831

4.6 皇踏山の事例

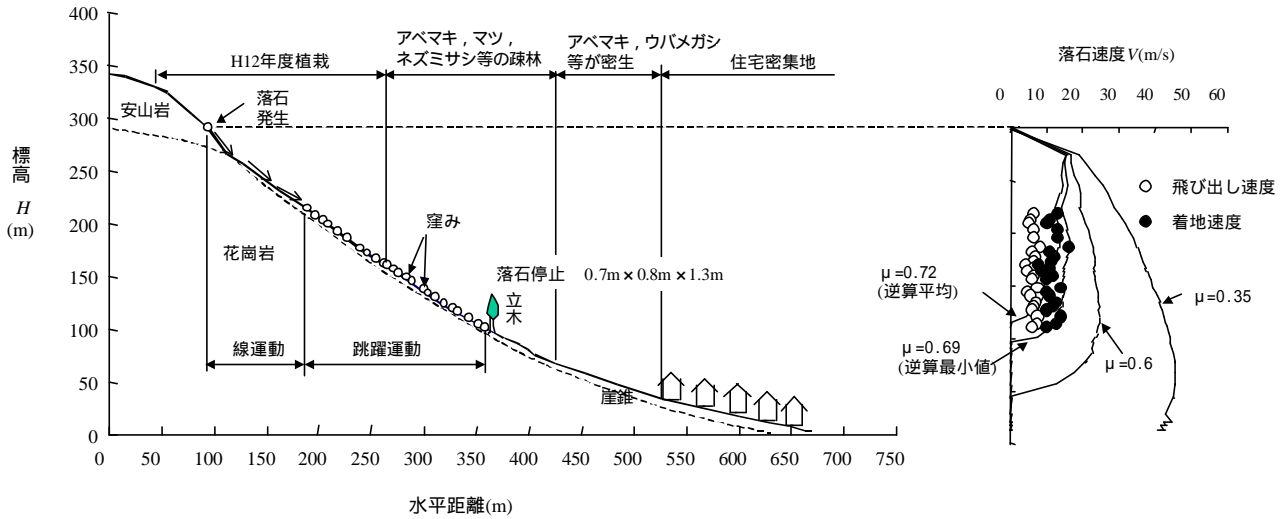


図10 皇踏山の落石斜面と逆算された落石速度

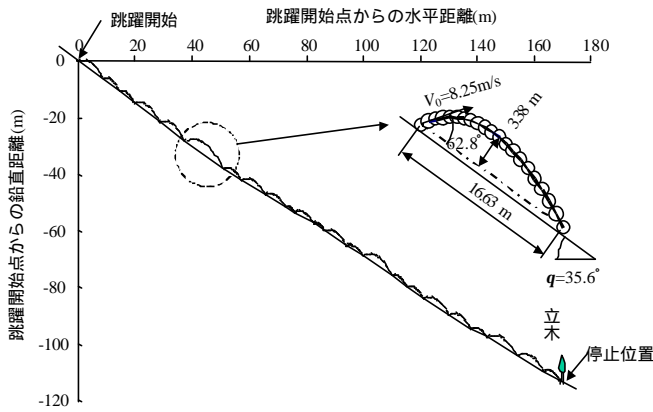


図11 逆算された跳躍軌跡(皇踏山)

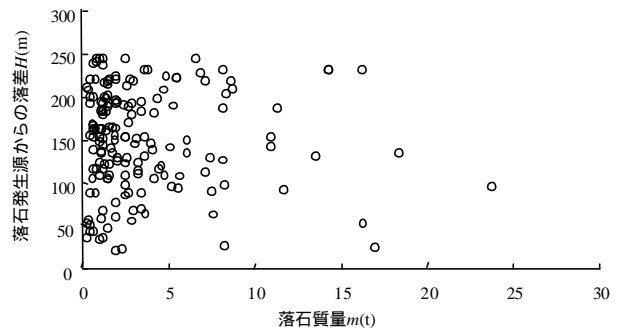
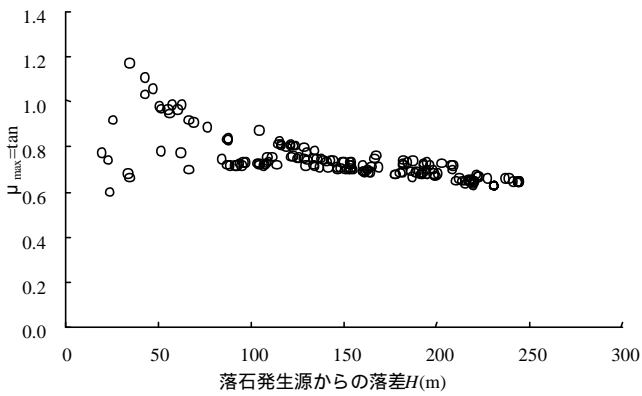
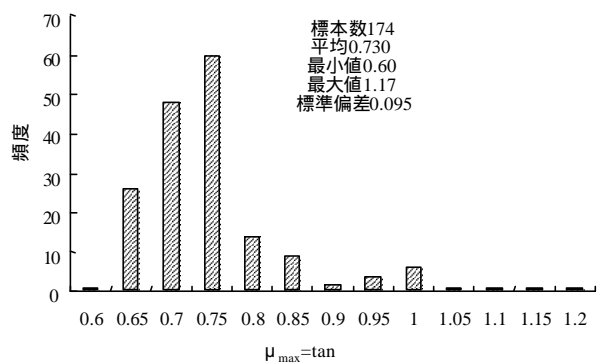


図12 落石質量と到達距離の関係(皇踏山)



(a) 落石発生源の落差と最大等価摩擦係数の関係



(b) 最大等価摩擦係数のヒストグラム

図13 斜面に分布する岩塊位置から推定した等価摩擦係数 (皇踏山)

2001年5月25日、香川県小豆郡土庄町の皇踏山(標高394m)の南斜面において、標高291m付近の崖部より0.7m×0.8m×1.3mの岩塊が向け落ち、約189m落下し、標高102m地点の樹木の幹に衝突して停止した。落石は、標高215m付近から跳躍を開始し、停止するまでの区間に落石の斜面点を示す24個の窪みが確認された。

落石の落下経路に沿った斜面縦断面図を図10に示す。斜面の地質は花崗岩が主体で、頂上付近に安山岩が露頭し、これが風化し落石発生源になっている。落石発生源付近の斜面傾斜角は55°と急であるが、跳躍運動した区間は30～

40° と比較的緩い。植生は、標高 70～160m の間はアベマキ、マツ等の疎林で、それより上部は 1999 年 2 月の山火事で禿げ山になっている。

痕跡から逆解析で求めた落石速度を図 10 に、軌跡図を図 11 に示す。着地速度の等価摩擦係数の最小値は 0.69，平均値は 0.72 であった。図 10 に示している $\mu=0.35$ の値は、落石対策便覧に示されている設計用値の最大値である。この値で計算すると、落石は民家を $V=45\text{m/s}$ の高速で直撃することになる。 $\mu=0.6$ は、落石対策便覧に紹介されている既往の現場落石実験から求められた等価摩擦係数の最大値である。

当該斜面には、標高 70m～250m にかけて無数の岩塊が分布している。その内、幅 200m 区間に分布する質量 0.5t 以上の岩塊 174 個を調査した結果を図 12，図 13 に示す。図 12 は、岩塊質量と落石発生源からの落差の関係を示したものであるが、両者に明確な相関性は見られなかった。図 13 は、落石発生源と岩塊位置の間の勾配 \tan から最大等価摩擦係数 μ_{\max} を推定した結果である。最大等価摩擦係数は 0.6～1.17(平均 0.73，標準偏差 0.095)の範囲にあり、痕跡から逆算した値との差異は少ない。

当該斜面の最大等価摩擦係数は、Ritchie の知見⁸⁾とも一致する。1963 年、道路脇に設けられる落石防止溝に関する設計基準を見直す目的で、石切場の岩盤切土斜面および自然崖斜面において、サイズの異なる硬質玄武岩の岩塊を落下させた実験の結果、斜面勾配が $1:1.3(37.6^\circ)$ より緩い斜面では落石が生じにくい、と述べている。これは最大等価摩擦係数が $\mu=0.77$ であることを意味している。

5. 既往の落石実験による等価摩擦係数との比較

5.1 落石対策便覧における等価摩擦係数

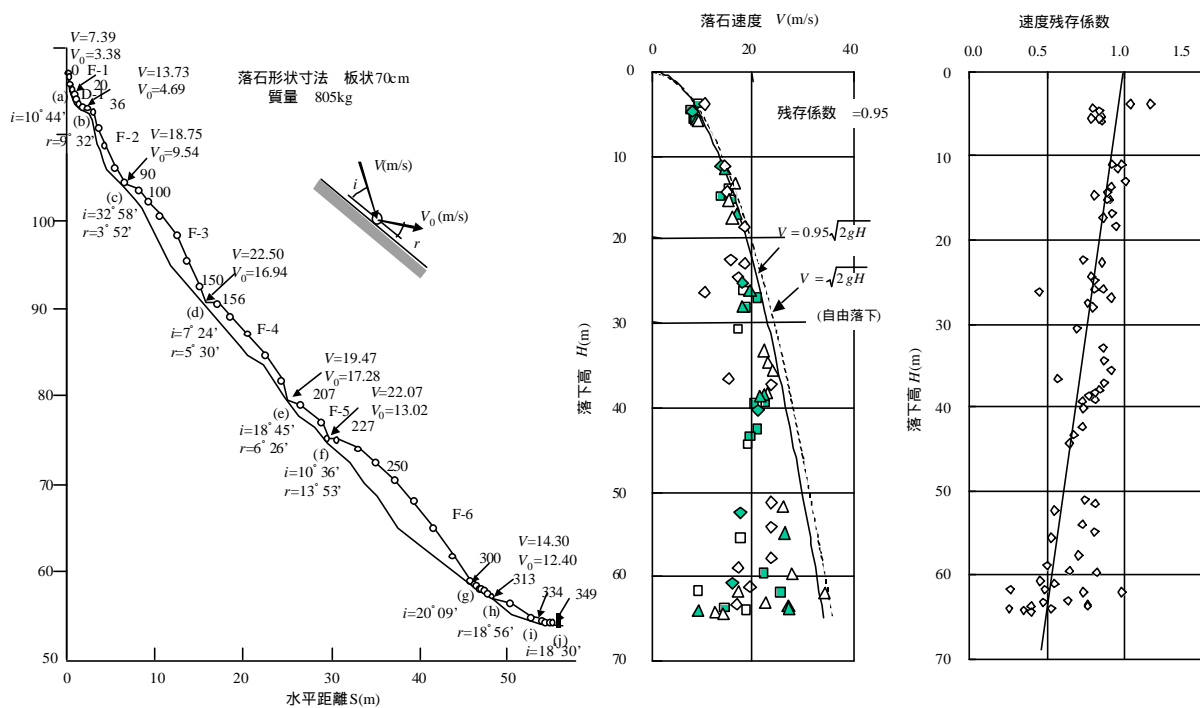


図 14 園原ダムサイト（園原 A）の落石実験(文献 7)に加筆

表 3 既往の現場落石実験による速度残存係数と等価摩擦係数(文献 1)に加筆

実験地点	斜面高H(m)	斜面勾配	落石形状	斜面の状態	残存係数	等価摩擦係数
園原A	65	55	角～丸	軟岩，凹凸大，立木なし	0.95	0.14
高松	35	52	角～丸	軟岩，凹凸小，立木なし	0.92	0.20
園原B	75	40	角～丸	土砂崖錐，凹凸小，立木なし	0.85	0.23
神戸	20	45	円柱	土砂，凹凸小，立木なし	0.85	0.28
愛岐	60	32	角～丸	崖錐，凹凸中～小，立木なし	0.75	0.27
浅利	26	40	角	崖錐，凹凸大～中，立木なし	0.75	0.37
東伊豆	不明	42	“	“ “ 立木なし	0.75	0.39
岩殿	24	36	“	“ “ 立木なし	0.65	0.42
雷電岬	32	43	“	巨礫混じり崖錐，凹凸大，立木なし	0.6	0.60

表 4 斜面の種類と等価摩擦係数 μ の値¹⁾

区分	落石形状	斜面特性	実験から得られる μ	設計に用いる μ
A	丸状	硬岩, 凹凸小, 立木なし	0~0.1	0.05
B	丸状~角状	軟岩, 凹凸中~大, 立木なし	0.11~0.2	0.15
C	丸状~角状	土砂 崖錐, 凹凸小~中, 立木なし	0.21~0.3	0.25
D	角状	崖錐, 巨礫混じり崖錐, 凹凸大, 立木なし~あり	0.310~	0.35

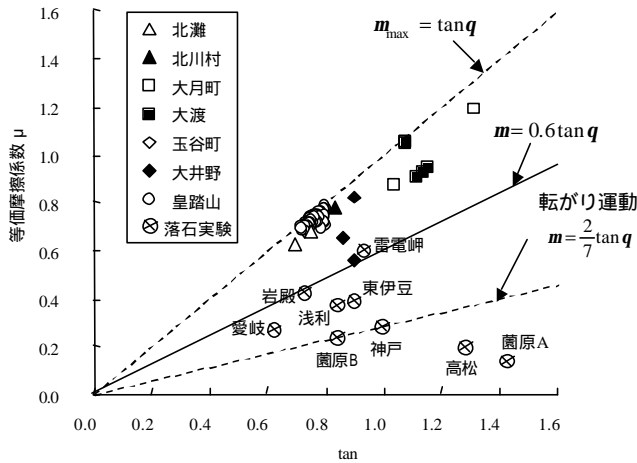


図 15 tan と等価摩擦係数の関係

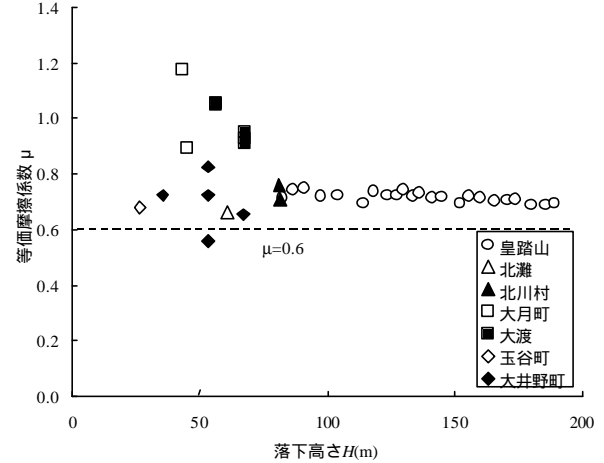


図 16 落下高さと等価摩擦係数の関係

落石対策便覧では、等価摩擦係数を用いた式(14)によって速度を算定するものとしている。その際の等価摩擦係数としては、表 3 に示す既往の落石実験から等価摩擦係数を求め、これを基に表 4 を示している。

落石対策便覧の等価摩擦係数の求め方を具体的に示すと次のようになる。まず、落石実験から得られた線速度データと落下高さの関係を図 14 のようにグラフ化し、実験データを概ね包絡する速度曲線を描いて速度残存係数 a を求める。園原 A の例では $a = 0.95$ となっている。この速度残存係数を用い $m = (1 - a^2) \tan q$ の式で等価摩擦係数を算出している。 q は斜面の傾斜角である。

5.2 既往の落石実験との比較

7 箇所の落石災害斜面の痕跡から逆算された等価摩擦係数と、落石発生源から等価摩擦係数を算出した地点までの平均勾配 \tan との関係を整理すると図 15 となる。等価摩擦係数は $0.6 \tan < \mu < \tan$ の範囲に入っている。図 16 は落石発生源から等価摩擦係数を算出した地点までの落下高さの関係を調べたものである。落下高さと等価摩擦係数の関係は見られない。

図 15 には、表 3 に示した落石実験から得られた等価摩擦係数も併記してある。ただし、落石実験の等価摩擦係数は、算出位置が不明であるため \tan としては実験斜面の平均勾配を用いた。落石実験による等価摩擦係数は、落石災害斜面から逆算された値に比べて非常に小さい。エネルギーロスが 0 で転がり運動をしたと仮定して求めた等価摩擦係数の値さえも下回ったデータがいくつか見られる。また、 \tan に比例するような関係も見られない。

5.3 落石災害斜面と落石実験で等価摩擦係数が異なる理由

落石災害斜面から逆算した等価摩擦係数に比べて落石実験から求められた等価摩擦係数は非常に小さい。この理由として、下記の 4 点が考えられるが、根本的な原因は「速度算出位置の相違」にあると思われる。

(1) 斜面条件の相違

落石実験斜面は、観測の都合上、採石場などの切土斜面、あるいは草木を除去した後の自然斜面で実施されている。これに対して落石災害斜面では、落石が草木をなぎ倒したり、立木に擦痕を付けるなどによって多くのエネルギーを消費することで、等価摩擦係数が大きくなっている。

(2) データ数の相違

落石実験では数十個~数百個の供試落石を落下させ、得られた等価摩擦係数の最小値を求めるのに対して、落石斜面では 1 個の落石の速度から等価摩擦係数を算出している。このため、落石実験値が小さくなるのは当然という考え

がある。しかし、落石斜面には、道路まで到達しなかった落石が多数存在するのが一般的であり、何度か発生した落石の一つがたまたま道路まで到達したと解釈すれば、等価摩擦係数を過大に評価していることにはならない。

(3) 速度算出位置の相違

落石は、転がり、飛行、衝突の運動を繰り返しながら斜面を落下する。エネルギー消費が最も多いのは、衝突時である。飛行期間にはエネルギーを消費しない。図 17 に示す高松の実験のように落石発生源の直下が崖の場合、落石は少し転がって飛行運動へ移行する。この飛行運動中の速度から速度残存係数を求めると 1 に近い。既往の落石実験では、このように求めた速度残存係数を実験斜面の速度残存係数とし、それから等価摩擦係数を算出している。

一方、落石災害斜面では、道路上あるいは道路際の飛行軌跡から速度を逆算し、等価摩擦係数を算出している。落石が道路に到達するまでには、転がりや斜面への衝突によって多くのエネルギーを消費している。

落石の速度を求めた位置の相違が、等価摩擦係数の違いとして現れていると思われる。

(4) 速度の算定誤差

落石実験で測定された速度データを見ると、図 12 に示した藺原 A の実験と同様に斜面の上方で自由落下速度よりも大きい(速度残存係数が 1 を超える)データが散見される。また、落石の線速度エネルギーと、落石を球と仮定して推定した角速度エネルギーの和が、ポテンシャルエネルギーを超えるような実験データもある。落石の運動が三次元的であるため、落下コースに沿った距離を正確に測定するのは難しく、速度を過大に算定している疑いがある。あるいは、落石を投下させる際のエネルギーが加わり、速度を過大に算定している可能性がある。

落石災害斜面では、飛行軌跡が不明な個所では飛行開始点と着地点の 2 点から、最小仕事の定理を用いて飛び出し方向を求めて実速度を推定した。しかし、実際の落石は質点ではないため、飛び出し方向は、落石の寸法・形状および角速度の影響を受ける。この結果、速度を過小に評価している可能性がある。

6. 落石の運動と速度の関係

落石の運動特性を調べるため、図 16 に示す単純な斜面で試算をしてみた。実際の斜面は、勾配が一様でないことや、落石形状、植生の影響等を受けるため、運動形態および速度の変化も複雑になるが、落石の運動の傾向は明らかにできる。ただし、計算にあたっては、下記の仮定を設けている。

落石は質量 1t の完全球とする。ただし、衝突、飛行においては質点と見なす。

反発係数(速度比)には、 Wu^9 が岩盤斜面の実験値で求めた式(18)²⁾を用いる。斜面法線方向反発係数 R_n 、接線方向反発係数は R_t は、次式で与えられるものとする。ただし、 V_{in} は入射速度の斜面法線方向成分である。

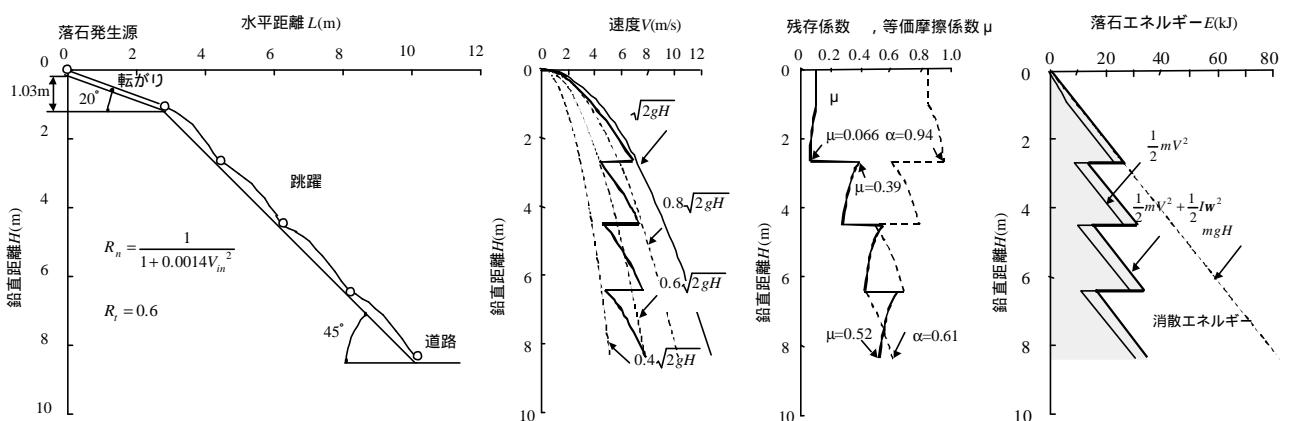


図 18 落石の運動と速度，残存係数，等価摩擦係数，落石エネルギーの試算結果

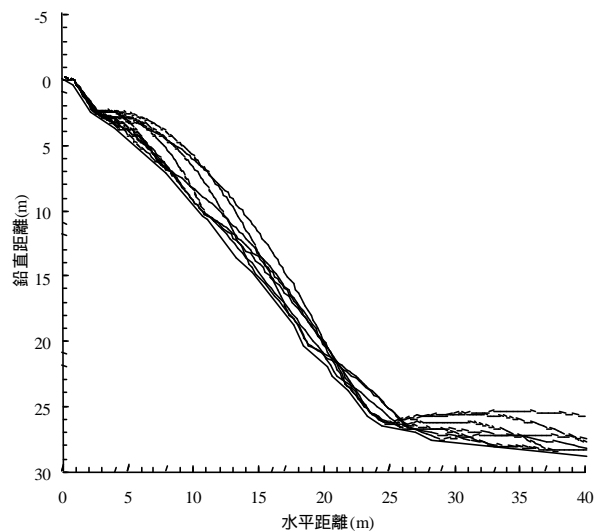


図 17 高松の落石実験による落石の軌跡²⁾

$$R_n = \frac{1}{1 + 0.0014 V_{in}^2}, \quad R_r = 0.6 \dots \dots \dots (18)$$

転がり運動時、および衝突時にはすべりを伴わない。つまり、落石の角速度と落石半径の積が線速度に一致する。

上部斜面は転がり運動、下部斜面は跳躍運動する。

転がり運動および飛行期間中は力学的エネルギーが保存される。

転がり運動時には、位置エネルギーが線速度エネルギーと回転エネルギーに変換されるため、速度 V 、残存係数 R 、等価摩擦係数 μ はそれぞれ次式のようなになる。

$$V = \sqrt{\frac{10}{7} gH} \quad (19) \quad a = \sqrt{\frac{5}{7}} \approx 0.845 \quad (20) \quad m = \frac{2}{7} \tan q \quad (21)$$

飛行運動中は、水平方向速度は変化しないが、鉛直方向速度は重力の影響で加速され、落下高さと共に速度が増大する。

等価摩擦係数が最も小さくなるのは、最初の飛行運動で着地する時で、 $\mu = 0.066$ となっている。衝突すると、減速し、等価摩擦係数が 0.39 まで増加している。以後、飛行によって等価摩擦係数が減少し、衝突で再び増加するという状態を繰り返す。

図 19 は、下部斜面の傾斜角 q を 30° 、 50° 、 60° と変化させて速度を試算した結果である。 $q = 30^\circ$ の場合は、跳躍運動の毎に着地速度が減速し、ある落下高さで停止することになる。 $q = 50^\circ$ の場合の着地および飛び出し速度は、落下高に伴ってわずかに増加するにすぎない。 $q = 60^\circ$ の場合は落下高による速度の増加の程度が大きくなっている。しかしながら、等価摩擦係数は $q = 60^\circ$ の場合でも落下高さと共に増加している。

図 20 は落石斜面の痕跡から逆算された飛び出し速度 V_1 、着地速度 V_2 と落石発生源からの落下高さの関係を示している。着地速度は 6~20m/s の範囲にばらついているが、飛び出し速度は、上限が落下高さに関わらず 10m/s 程度になっている。

図 21 は飛び出し速度を 6m/s で一定として、斜面傾斜角によって着地速度がどのようになるかを試算したものである。ただし、飛び出し方向は最小エネルギー定理に従うと仮定している。斜面傾斜角が大きいくほど、飛行落下距離が長く、着地速度も大きくなる。図 20 で飛び出し速度が 10m/s 以下になっているのは、反発係数の速度依存性の影響が大きい。落石が斜面へ衝突すると、運動エネルギーは地盤の歪みエネルギーに変換される。ところが、斜面への衝突速度が大きいと、地盤のせん断破壊あるいは塑性変形によるエネルギー消費も増加し、衝突後に運動エネルギーとして回復するエネルギーはあまり変わらず、結局、衝突後の速度は 10m/s 程度になっているものと想像される。

7. 結 論

落石斜面の痕跡から落石の速度を逆解析する方法を提案し、7 箇所の斜面より速度を逆算で求めた。その速度から等価摩擦係数 μ を算出すると、最小値は 0.56、最大値は 1.19 であり、 $0.6 \tan q < \mu < \tan q$ の範囲にあった。既往の落石実験から求めにれた等価摩擦係数 (0.14~0.6) に比べて非常に大きいことが判明した。この主たる原因は、等価摩擦係数を算出した位置の相違にある。落石実験では、投石後の最初に出現する飛行運動における着地速度から等価摩擦係数を算出している。一方、落石斜面からの逆解析は、数度の跳躍を繰り返し、道路脇に到達した落石の速度から等価摩擦係数を算出している。落石が停止した位置で求めると $\mu = \tan$

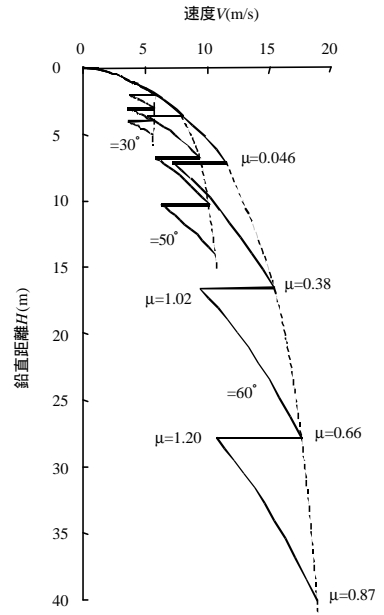


図 19 斜面傾斜角と落石の速度

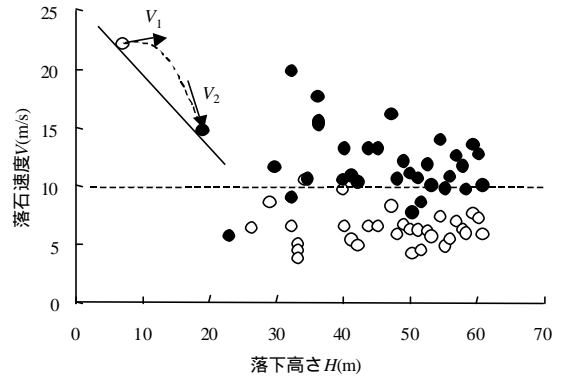


図 20 落石の落下高と速度の関係

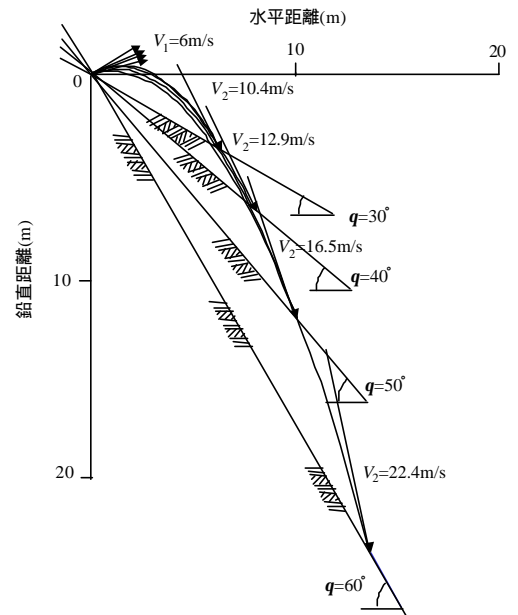


図 21 斜面傾斜角と着地速度の関係

になる。

設計の実務では、落石対策便覧に示された0.05～0.35の範囲の等価摩擦係数を用いて落石の速度を算出している。芸予地震の際、質量3t程度の落石が数カ所で落石防護柵を直撃した。等価摩擦係数を0.35とすれば、速度は16.4m/s、運動エネルギーは446kJとなる。けれども、いずれの現場も吸収エネルギーは50kJ程度の防護柵で落石を阻止していた。不安定岩塊だらけの皇踏山の斜面で等価摩擦係数を0.35とすると、速度45m/sの猛スピードで斜面下方の人家密集地を直撃することになるが、落石が人家まで到達した経歴は皆無であった。

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られる。落石が、跳躍運動を繰り返し落下する場合は、落下高に伴って等価摩擦係数は増加するため、このような小さな値にはならない。

また、落石対策便覧では、斜面の地質の硬軟、凹凸、立木の有無によって設計用の等価摩擦係数を定めている。しかし、等価摩擦係数は、斜面の状態に関係なく落石運動に伴って $0 < \mu \tan$ （は落下高さに伴って変化する）の間で変化し、最終的には $\mu = \tan$ となる。落石運動区間中のどの位置で速度を算出するのかによって採用すべき等価摩擦係数は異なる。このため、斜面固有のパラメータと見なすのは誤りである。

落石の速度を予測する上で重要な点は、落石速度は落石発生源からの落下高さに支配されるのではなく、飛行運動地点の斜面傾斜角の影響が大きいことである。落石の速度は、転がり運動でも加速されるが、飛行期間中の加速が最も大きい。斜面傾斜角が大きいほど飛行落下距離が大きくなり加速され、着地速度が大きくなる。しかし、それに伴って衝突時のエネルギー損失も大きくなるため、衝突後の速度はある一定値(限界速度)以上にならない。限界速度は、斜面の傾斜角や地盤の力学特性、落石の硬度などに支配されると考えられるが、落石斜面から逆解析された結果によれば概ね10m/sであった。このことは、飛行運動で大きな速度が出現しても、それが以後の落石の速度にあまり関与しないと言える。逆に、落石が斜面途中の立木に衝突し減速しても速度は回復するので、斜面下部では立木による減速効果が期待できないことになる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.6
- 2) 日本道路協会：落石の運動挙動とそのシミュレーション手法に関する検討報告書（仮題），2002 予定．
- 3) 福岡正巳：落石の運動機構について，第11回道路会議論文集，第2部会，pp96-98，1973.
- 4) T.Ushiro, Y.Matsumoto, N.Akesaka and N.Yagi: Study of accidents caused by rockfall in Kochi Prefecture, Proceedings of the International Symposium on slope stability engineering-IS-SHIKOKU'99, pp.1349-1354, 1999.
- 5) 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/ -37, pp.39-48, 1997.
- 6) 一般国道11号落石災害調査委員会：一般国道11号落石災害調査報告書，1991.
- 7) 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，1974
- 8) Ritchie, A.M.: Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Record, No.17, pp.13-28, 1963.
- 9) Wu, S-S.: Rockfall evaluation by computer simulation, Transportation Research Record, No.1031, pp.1-5, 1985.