

高知県における落石災害と 落石の運動特性

右城 猛¹・玉井佐一²・明坂宣行³・山岡幸弘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常務取締役 (〒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長 (〒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構造課係長 (〒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)

高知県では管理瑕疵の間われる落石事故が毎年 10 件程度発生している。その多くは四万十層群の砂岩卓越地域に集中している。落石による死亡事故が発生した 3 箇所の現場について、斜面に残された落石による痕跡を調査し、痕跡から落石の運動を推定した。そして、斜面調査から推定された落石の運動特性と既往の落石実験データを比較し、斜面の立木が落石の運動特性に与える影響を明らかにした。

Key Words : *falling rock, accident, case history, slope*

1. はじめに

わが国では、毎年 2,000 件～5,000 件の管理瑕疵が問われる落石事故が発生している。特に、1989 年 7 月に発生した越前町の国道 305 号の岩盤崩壊事故は 15 名の犠牲者を、1996 年 2 月の古平町豊浜トンネルの岩盤崩壊事故は 20 名の犠牲者を出す重大事故となった。

こうした落石事故を未然に防ぐため、建設省では 1968 年以降これまでに 9 回の道路防災点検を実施し、緊急性の高いところから順次、落石防止柵、落石覆工など落石防護工の施工が実施されている。

ところで、落石防護工を設計するためには、斜面を落下する落石の運動を的確に予測することが極めて重要になる。このことは、落石防護工の被災形態が下記の 3 つに分類されるという建設省^{1),2)}の調査結果からも明らかである。

- ①防護施設の高さは十分であるが、落石エネルギーに耐えられなくて降伏したもの。
- ②防護施設の高さが足りないため、これを飛び越えて路面に落石が到達したもの。
- ③防護施設の道路延長方向の設置長が足りないため、あるいは隣接する 2 つの施設間のわずかな

間隙から路面に落石が到達したもの。

斜面を落下する落石の運動は、斜面の形状、勾配、凹凸、地質、植生状況、落石の形状、寸法、岩質などの影響を顕著に受ける。このため、運動力学的理論解析だけでもって予測することは困難である。こうしたことから、現場落石実験^{3)~13)}によって落石の落下速度や跳躍量が測定され、運動機構に関する研究が行われてきた。

これまでの落石実験はいずれも観測の都合から碎石場など立木のない裸地斜面で実施されている。しかし、落石は道路敷地の上方の植林や広葉樹林地で発生していることが多い。この場合、当然のことながら落石の挙動は立木の影響を受け、現場落石実験で観測されたものとは大きく異なると考えられるが、立木が落石の運動に及ぼす影響については全く明らかにされていない。

本研究では、高知県の落石災害斜面を詳細に調査し、斜面に残された落石による痕跡から落石の運動機構と落下軌跡を解明するとともに、落下軌跡から落石の跳躍量や落下速度の推定を試みた。

そして、この結果を既往の現場落石実験結果と対比し、斜面の立木が落石の跳躍量や落下速度に及ぼす影響を調べた。

表-1 速度残存係数

滑り運動	転がり運動	自由落下運動
$\alpha_V = \sqrt{1 - \frac{\mu}{\tan \theta}}$ θ : 斜面が水平となす角度 μ : 斜面の等価摩擦係数	球体 $\alpha_V = 0.845$ 円柱体 $\alpha_V = 0.816$	$\alpha_V = 1.00$

2. 落石の運動形態と速度

落石の運動形態は、線運動（滑り運動、転がり運動）と跳躍運動に区分される。落石はこれらの運動形態を複雑に変化させながら斜面を落下する。

線運動する落石が斜面上のある地点から鉛直に H だけ落下したときの速度 V は次式で与えられる¹⁴⁾。

$$V = \alpha_V \sqrt{2gH} \quad (1)$$

ここに、 α_V は速度残存係数、 g は重力加速度である。速度残存係数とは、自由落下速度に対する落石の速度比であり、落石の運動形態に応じて表-1 のようになる。

落石が跳躍運動をした場合、図-1 に示すように跳躍軌道上の3点の座標値、例えば、飛び出し位置 (x_0, y_0) と着地点 (x_d, y_d) と軌道上の任意の1点 (x, y) の座標が既知であれば、飛び出し速度 V_0 、着地速度 V_d 、飛び出し角度 β_0 、着地角度 β_d は、質点の放物線運動として求めることができ、式(2)、(3)で表される。

飛び出し速度

$$\left. \begin{aligned} V_0 &= \sqrt{V_{0x}^2 + V_{0y}^2} \\ V_{0x} &= \sqrt{\frac{g(x-x_0)(x_d-x_0)(x_d-x)}{2\{(x-x_0)(y_d-y_0)-(x_d-x_0)(y-y_0)\}}} \\ V_{0y} &= \frac{(x_d-x_0)^2(y-y_0)-(x-x_0)^2(y_d-y_0)}{(x-x_0)(x_d-x_0)(x_d-x)} V_{0x} \\ \beta_0 &= \tan^{-1} \frac{V_{0y}}{V_{0x}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

着地速度

$$\left. \begin{aligned} V_d &= \sqrt{V_{dx}^2 + V_{dy}^2} \\ V_{dx} &= V_{0x}, \quad V_{dy} = \sqrt{V_{0y}^2 + 2g(y_d - y_0)} \\ \beta_d &= \tan^{-1} \frac{V_{dy}}{V_{dx}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

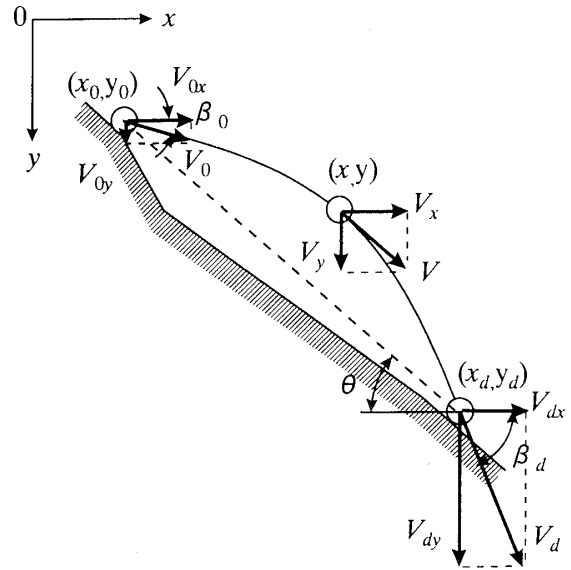


図-1 跳躍運動の記号の説明

3. 高知県における落石災害

(1) 概要

高知県は総面積 7,107km² の 84% が山地で占められている。県内を走る道路の総延長は 12,615km で、その内訳は一般国道 1,074km、主要地方道 1,063km、一般県道 964km、市町村道 9,515km である。

これらの道路の多くは地形の急峻な山間部を通過しており、改良率も平均 39% と低い。加えて、年間降水量は 2,600mm とわが国有数の多雨地帯となっており、梅雨・台風シーズンの 6 月から 9 月にかけては月間降水量が 300mm を超えている。

こうしたことから、高知県では毎年多くの落石災害が発生している。最近では、古平町の豊浜トンネル岩盤崩壊事故発生から 21 日後の 1996 年 3 月 2 日に、安芸郡北川村島の県道安田東洋線で落石事故のため運転者が死亡する事故¹⁵⁾が発生し、全国的ニュースとしてマスコミに取り上げられた。

1986 年から 1996 年の 10 年間に高知県が管理する道路上で発生した事故のうち、落石によって管理瑕疵が問われた件数は 91 件にのぼる。

高知県の落石災害は、中世期白亜紀の四万十帯四万十川層群に集中している。四万十川層群は砂岩と泥岩の互層からなっているが、落石の多くは砂岩が卓越した箇所が発生している。泥岩は風化し土砂化するが、砂岩の場合は風化に対して強く、ブロック状に割れて残るためである。砂岩地帯の落石の規模は 0.5m~1.5m 大がほとんどであるが、砂岩層の厚い箇所では 5~6m 大の落石が発生するケースもある。

高知県では過去 10 年間に落石による死亡事故が 3

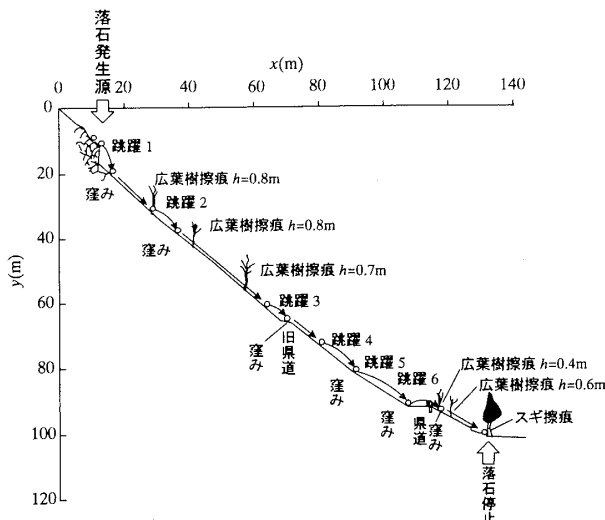


図-2 北川村島の落石事故斜面

件発生している。ここでは、死亡事故が発生した斜面の調査結果とそれから推定される落石の運動機構と運動特性について述べる。

(2) 北川村島の落石事故¹⁵⁾

a) 落石事故の概要

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重量10tf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。

b) 斜面の概要

落石地点は沢状地形部にあたり、斜度は図-2のように県道から約25m上方の旧県道跡地までが36度、それより上方が41度となっている。

斜面の地質は、四万十川層群に属し、砂岩、泥岩の互層よりなっている。落石地点では、県道から高さ80mほど上方の斜面中腹部に基岩が所々に露頭し崖を形成している。この地点より下部斜面には崖錐性堆積物が見られ、その厚さは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が、落石発生源の上部斜面は樹齢25～29年生のスギ林である。

c) 落石の発生機構

事故を発生させた落石は、図-3に示す2.6m×1.3m×1.8m(推定重量10tf)の砂岩塊である。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。

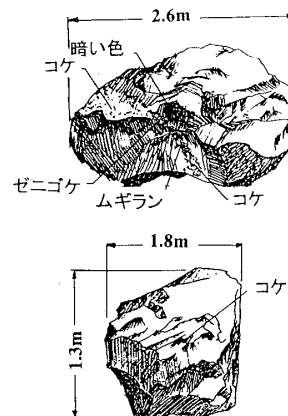


図-3 落石の形状

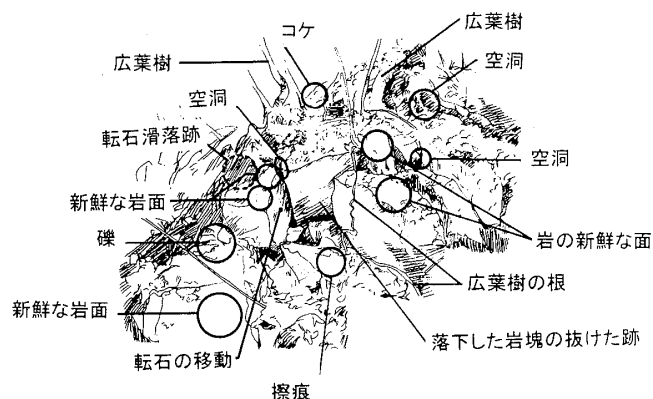


図-4 落石発生源

落石の発生源は、県道より比高82mの斜面中腹部の基岩露頭部(図-4)で、落石の抜け出しによる崩壊跡が確認される。岩盤には亀裂が縦横に入り、亀裂は大きく開口している。海底数千米で固結した砂岩が、隆起・除荷作用による応力解放で亀裂を生じ、これが間隙水の凍結・融解作用や植物の根系の侵入によって発達開口したものと考えられる。

落石の原因を特定することは困難であるが、それまでの雨で岩目に挟まれた粘土の含水比が増え、クリープ変形でブロック化した岩塊が緩み、応力のバランスが崩れて崩壊した可能性が高い。

d) 落石の運動機構

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。これらはいずれも立木の根元から1.0m以下の高さに見られる。また、落石の衝突による窪みは、図-2に示す6箇所を確認された。

県道の路側部には、土中用C種ガードレールが設置されているが、支柱は13cm押し込まれ路面からの突出長は57cm(正常値70cm)になっている。また、ビームはW形に変形している(写真-1)。この

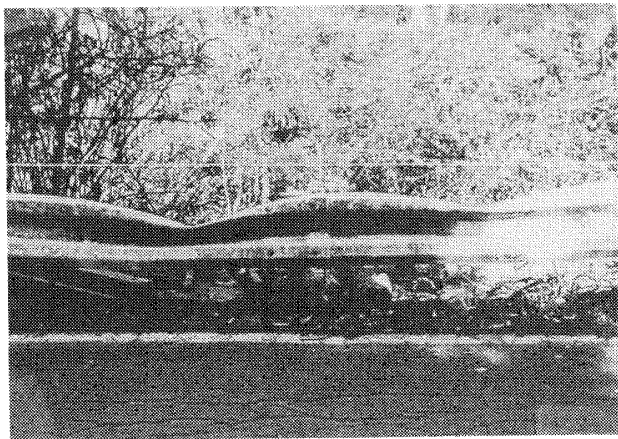


写真-1 落石によるガードレールの変形

変形は、落石の底面の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。

被災乗用車の損傷状態および路面にタイヤのスリップ跡が残されていないことから、被災乗用車は県道上を跳躍中の落石に衝突し、ブレーキを踏む間もなく停止したものと考えられる。また、右側のヘッドライト付近が落石に衝突したことにより偶力の発生で乗用車は右回転し、車体後部左がガードレールに接触したものと推測される。

以上の痕跡等から落石の運動軌跡を推定すれば図-2、図-5 のようになる。

e) 落石の落下速度

落石発生源から県道までの運動形態は痕跡調査の結果から、滑りあるいは転がり運動が4箇所、跳躍運動が6箇所（県道部も含む）と推定される。これらの運動形態から落石の速度を特定するためには、線運動の場合には斜面の等価摩擦係数または速度残存係数と、初速度または終速度が既知でなければならない。また、跳躍運動では、跳躍開始地点と着地地点および跳躍軌道上の1点の座標値が既知でなければならない。

当落石現場の場合、県道位置の跳躍運動については図-5 に示すように3点の座標値を特定することができるが、その他の跳躍運動については離陸地点と着地地点が推定されるだけである。一方、線運動については全く不明である。

そこで、下記の条件を仮定し、これらの条件をすべて満たす速度残存係数 α_v 、跳躍軌道上の任意点Pの座標値を試行錯誤によって求め、それから速度、最大跳躍量、飛び出し角度等を計算した。

- ①落石発生時の初速度は0である。
- ②線運動から跳躍運動へ移行する場合、線運動の終速度は跳躍開始（離陸）速度に等しい。

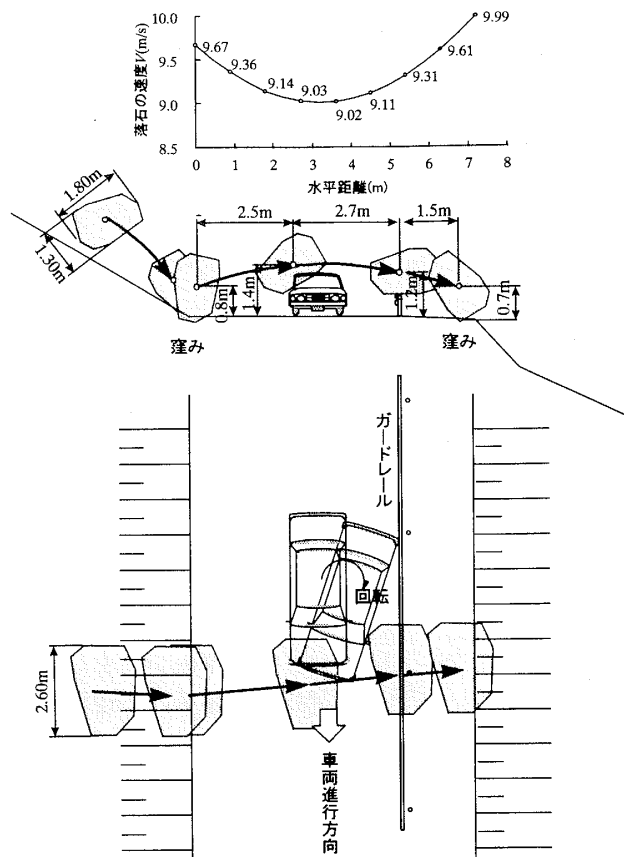


図-5 落石事故状況（跳躍6）

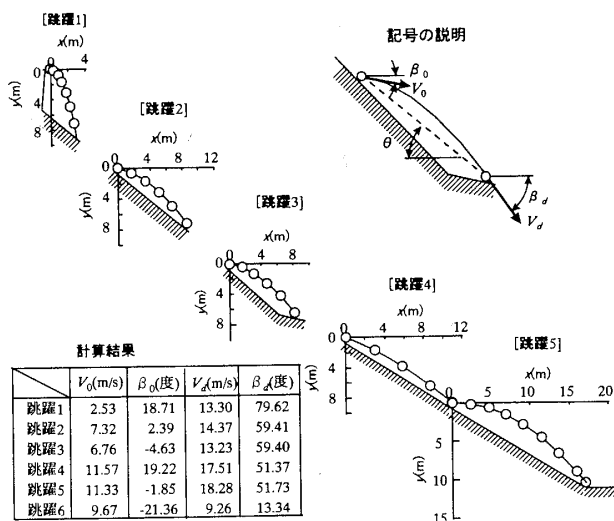


図-6 斜面での跳躍運動

- ③線運動時の速度残存係数は $0 < \alpha_v < 1.0$ で、斜面全体で一定。跳躍運動時の速度残存係数は1.0。
- ④跳躍運動が連続する場合、跳躍開始速度はその前の跳躍運動の着地速度よりも小さい。

計算結果は、図-5、図-6 に示すとおりである。これらの結果より、当該斜面の運動特性は図-7 のように推定された。

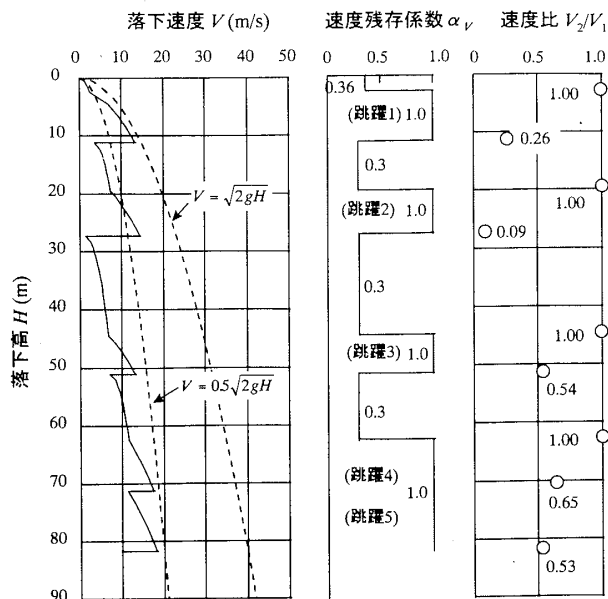


図-7 落石斜面の運動特性（北川村島）

線運動中の速度残存係数は 0.3 である。最初の線運動の速度残存係数のみ 0.36 になっているが、これは他の線運動の速度残存係数の値を小数第一位で丸め、この運動で全体の整合性を図ったためである。

落石が斜面に衝突した後の速度は、衝突前の速度の 0.1～0.6 倍である。斜面下部に比べて斜面上部の方がエネルギー損失が大きい。これは、斜面下部には大きな径の岩塊が多数存在するのに対して、斜面上部には粒径の小さい礫が堆積しており緩衝効果が大きいと考えられる。

(3) 北川村二股の落石事故

a) 事故の概要

1988 年 8 月 11 日午前 8 時 20 分頃、高知県安芸郡北川村二股において、県道東洋安田線を国道 439 号に向かって走行中の軽トラックを 1.0t（推定）の落石が直撃した。落石は軽トラックの助手席を押し潰し、助手席に乗っていた運転者の妻が頭蓋骨を折って即死、運転者も二ヶ月の重傷を負った。

現場付近は雨が降り続いており、雨で地盤が緩んだことが落石の原因と判断されている。

b) 斜面の概要（図-8）

当地区の地質は、四万十南帯に属し、基岩盤は砂岩・頁岩の互層より構成されている。当該斜面においては、この基岩盤を土砂が 1～2m の厚さで覆っている。斜面には、0.3m～0.5m 大の転石が多数分布するが、今回落下した落石と同程度の規模の転石が見られるのは県道から比高 47m 付近より上部であり、落石の発生源は比高 47.6m 地点と推定される。この

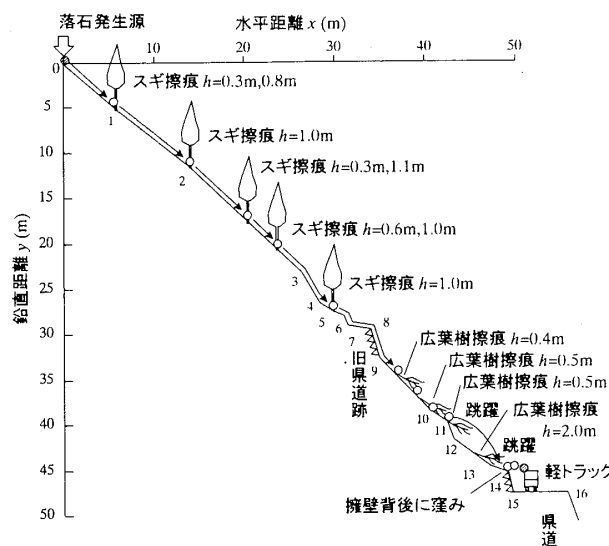


図-8 北川村二股の落石事故斜面

地点の約 20m 上方には、基岩盤が露頭し崖を形成しており、転石の供給源になっている。斜面の勾配は、県道から 18.1m 上方に見られる旧県道跡までが平均 49 度、旧県道跡から落石発生源までが平均 41° で、下部斜面ほど急勾配になっている。県道から落石発生源までの平均勾配は 44° である。

県道から旧県道跡の区間の斜面は、カシ、ツツジ、サカキなどの広葉樹林地となっているが、旧県道跡から上部の斜面は植林地で、幹径 30cm 程度のスギが整然と立ち並んで生えている。

c) 落石の運動形態と落下軌跡

軽トラックを直撃した落石は角状の砂岩塊で、大きさは 1.0m×0.7m×0.55m（推定重量 1.0t）である。この岩塊が落下する際、斜面上のスギや広葉樹の幹に擦痕を残している。擦痕の位置は図-8 に示すようにほとんどが地盤面から 1.1m までの高さである。斜面下部の 1 本の広葉樹のみ高さ 2m の位置に擦痕が認められる。

こうした痕跡から、落石は斜面を回転あるいは滑りながら落下し、斜面下方の point11 の地点から跳躍運動に移行し、斜面裾のブロック積み擁壁の位置（point14）でバウンドした後、再び跳躍し、軽トラックの助手席の屋根部を直撃したものと推測される。

落石の長辺は 1.0m であるが、斜面の傾斜角 θ が 41°～49° であるため、落石が跳躍しないとしても、鉛直高さ

$$h = \frac{D}{\cos \theta} = \frac{1.0}{\cos(41 \sim 49^\circ)} = 1.33\text{m} \sim 1.52\text{m}$$

の位置まで痕跡を残す可能性がある。また、point11

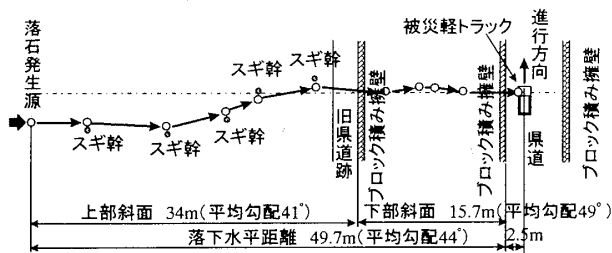
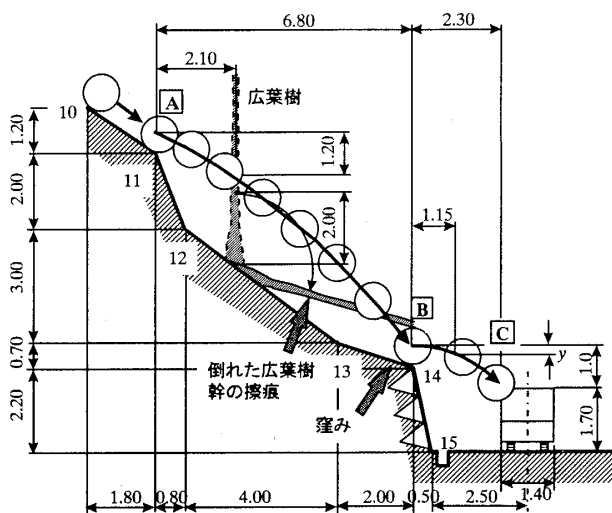


図-9 落石の平面的落下経路



	跳躍運動 (A-B区間)	跳躍運動(B-C区間)			
		y=0.0m	y=0.1m	y=0.2m	y=0.3m
飛び出し速度 V_0 (m/s)	10.20	3.93	4.16	4.67	5.71
速度水平成分 u_0 (m/s)	9.29	3.60	4.03	4.65	5.69
速度鉛直成分 v_0 (m/s)	4.20	-1.57	-1.05	-0.40	0.49
飛び出し角 $\beta_0(^{\circ})$	24.33	-23.50	-14.62	-4.97	4.97
着地速度 V_d (m/s)	14.69	5.92	6.07	6.43	7.23

図-10 落石の跳躍軌道 (北川村二股)

の地点まで跳躍運動していないことは、斜面に衝突による窪みが残されていないことから判断される。

落石の平面的落下経路は図-9 のように推測される。当該斜面の地形は平面的な変化は少なく、等高線はほぼ平行になっている。このため、落石は直進するものの、立木に衝突すると運動の方向を変えることが判る。

d) 落石の速度

跳躍運動の際に落石が描く軌道を推定すると図-10 のようになる。B-C 区間の跳躍については、離陸地点と着地地点しか既知でなく、軌道を特定することができないので、point14 から 1.15m 離れた位置で 4 種類の縦距 y を想定し計算した。速度は 6~7m/s と推定される。また、衝突の際の速度比は 0.27~0.39 になる。

次に、線運動について考察する。当該斜面では、勾配が比較的平坦になっている旧県道跡に多数の転石が存在している。ほとんどの転石は旧県道跡で停

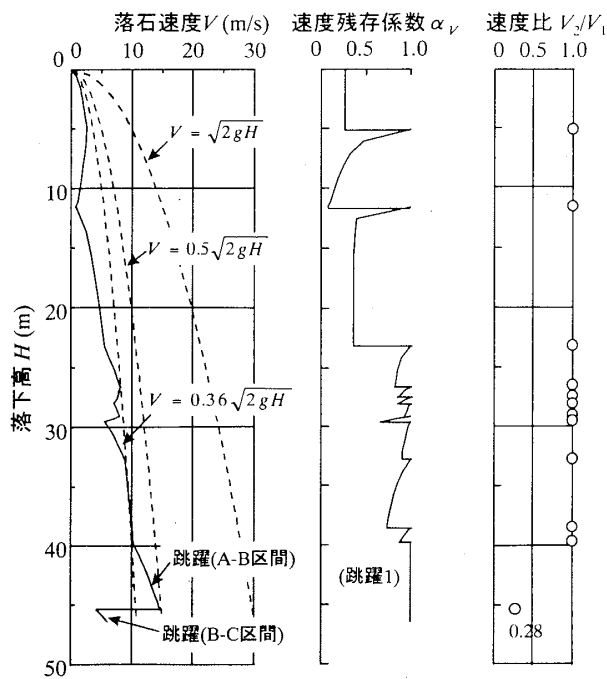


図-11 落石の速度 (北川村二股)

止するものと考えられる。この原因としては、斜面勾配、地質、立木などの影響が考えられる。斜面全体にわたり等価摩擦係数 μ が一定であるものと仮定し、斜面を滑ってきた落石の速度は point11 で跳躍開始時の初速度に一致するものとして、試行錯誤的に等価摩擦係数を求めると $\mu=0.82$ となる。等価摩擦係数がこれよりも大きいと、point2 で落石は停止することになる。ただし、滑り速度は、斜面の勾配の変化を考慮した式(4)を用いて計算した。

$$V_i = \sqrt{2g(H_i - H_{i-1}) \left(1 - \frac{\mu}{\tan \theta_i}\right) + V_{i-1}^2} \quad (4)$$

また、落下速度が point11 で跳躍開始時の初速度に等しくなる速度残存係数は $\alpha_v=0.36$ になる。

以上によって求めた落石の速度と落下高さの関係を図-11 に示す。

(4) 大月町才角の落石事故

a) 事故の概要

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(足摺サニード路)で、道路沿いの山肌が突然崩壊し、落下した数個の岩塊の内の 1 つが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、ハンドルに当たったあと運転者の頭をかすめて後方へ飛び、後部左座席に乗っていた運転者の祖母の頭を直撃し、そのあとリアウィンドウを突き破って外に飛び出し

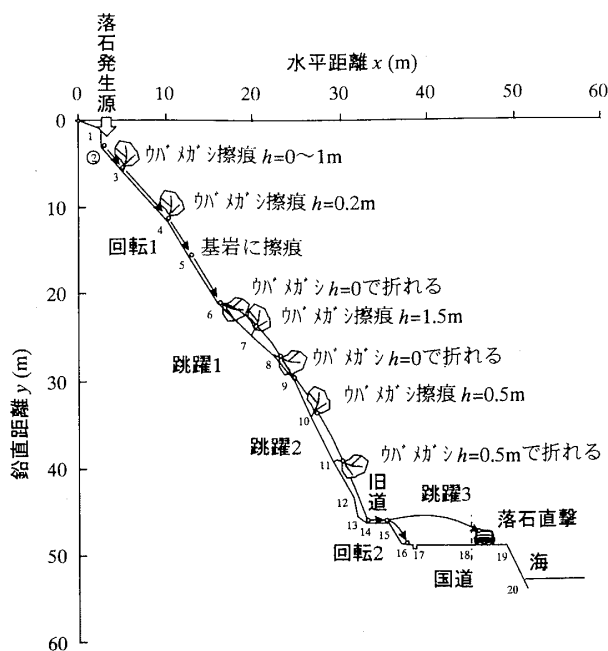


図-12 大月町才角の落石事故斜面

た。この事故で、後部座席に乗っていた老女は頭蓋骨骨折のため即死、運転者も頭などに重傷を負った。現場付近は当日の早朝に集中豪雨があり、雨で地盤が緩んだことが落石の原因と推測されている。

b) 斜面の概要 (図-12)

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、まばらに生えている程度である。

当該斜面の前後には落石防止網が見られるが事故発生箇所には落石防護工が施工されていない。山裾部に幅 3.7m の旧道がありポケットの役割を果たしていること、道路線形の関係で山側の路側に広い余裕 (5m) が確保されていることから、落石に対して十分安全と判断されていたものと思われる。

c) 落石の運動形態と落下軌跡

道路から 48m 上方の旧崩壊跡頭部で崖が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る。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る。これらの状況から、崖部で剥離した岩塊が斜面を落下する途中あるいは路面に落下した際に破碎されたものと推測される。

落石の通過地点ではウバメガシが折れたり、幹に擦痕が残されているほか、斜面の岩盤には落石の衝突跡が認められる。これらの状況から、落石は図-12

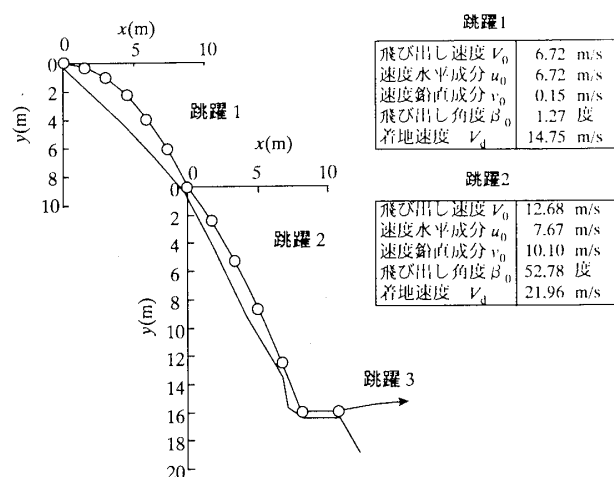


図-13 跳躍運動 1, 2 における落石の速度

に示すように、落石発生源から転がりながら落下し、point6 で跳躍運動に移行、point9 でバウンドして再び跳躍、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ある point15 でジャンプして乗用車を直撃したものと推測される。

d) 落石の速度

斜面上での跳躍運動 1, 2 の軌道を、ウバメガシに残された擦痕から推定し計算すると、落石の速度は図-13 のようになる。

国道上の跳躍運動 3 については、落石事故発生時に被災乗用車は海側車線の中央を走行していたものと仮定すると、図-14 のような軌跡が描かれる。図には 3 種類の軌跡を描いているが、事故状況から判断し、case2 の可能性が最も高い。落石が case2 の軌道を描いたものとする、飛び出し速度は 10.7m/s、乗用車への衝突速度は 12.1m/s ということになる。

落石が斜面へ衝突する際の速度比は、斜面上が 0.86、旧道部が 0.49 となる。ただし、point14 と point15 の間で速度変化はないものと仮定している。

斜面を転落する際の速度残存係数は、初速度を 0、跳躍運動に移行する際の速度変化率を 1.0 と仮定すれば $\alpha_v = 0.36$ となる。

以上より、落石が発生して乗用車に衝突するまでの速度変化は図-15 のように推定される。この速度曲線を包含する速度残存係数は $\alpha_v = 0.75$ である。

(5) 落石災害斜面の落石の運動特性

落石災害斜面調査から推定された落石の運動特性をまとめると表-2 になる。この表には本論文で紹介した落石災害斜面以外に 1990 年 10 月に 3 名の犠牲者を出した徳島県鳴門市北灘の落石事故斜面¹⁶⁾およ

表-2 災害斜面から得られた運動特性

			鳴門市北灘	北川村島	北川村二股	大月町才角	大渡ダム
斜面性状	斜面高	全斜面 H_1	63m	82m	48m	46m	67m
		自然斜面 H_2	60m	82m	45m	43m	44m
	平均傾斜角	全斜面 θ_1	38度	40度	44度	53度	44度
		自然斜面 θ_2	37度	40度	43度	55度	48度
	地質		土砂	土砂	土砂	岩盤	岩盤・土砂
落石	植生		広葉樹密	広葉樹疎	針広葉樹密	広葉樹疎	広葉樹疎
	重量		1.43t	10t	1.0t	0.08t	1.0t
	岩質		砂岩	砂岩	砂岩	砂岩	チャート
	形状		塊状	塊状	塊状	塊状	板状
運動特性	速度残存係数	全運動包絡線運動包絡	—	0.5	0.5	0.75	0.7
			0.4	0.3	0.36	0.36	0.59
	衝突時速度比	傾斜地 平坦地	— —	0.1~0.6 0.5	— 0.3	0.9 0.5	— 0.26
	飛出し速度	勾配急変点 一般斜面	8m/s —	3m/s 7~12m/s	4~10m/s —	10m/s 7~13m/s	6~18m/s —
	最大跳躍量		0.9m	0.8m	1.6m	1.1m	0.7m

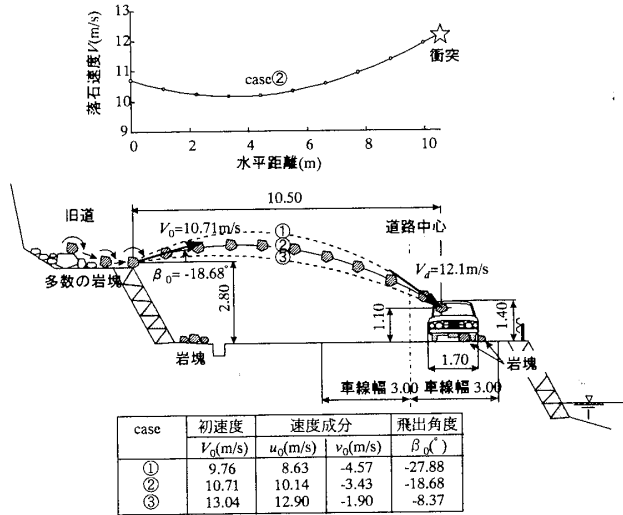


図-14 国道上を跳躍する落石の運動

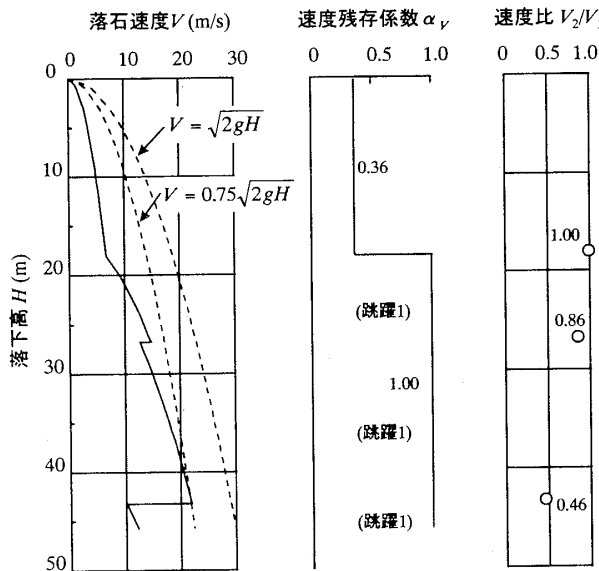
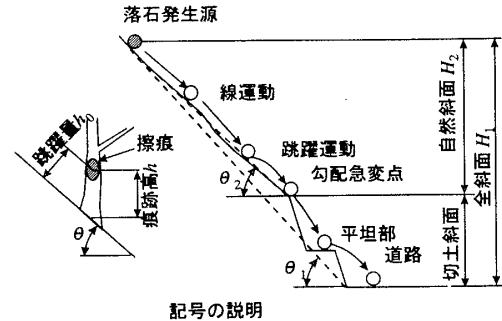


図-15 落石の速度 (大月町)



は議論の余地が残されている。しかし、ここで紹介したいずれの斜面も、過去に度々落石が発生しており、落石のほとんどは斜面途中で停止している。道路まで到達するのは極めて稀である。したがって、表-2 に示した運動特性の値は、かなり生起確率が小さい値とみなすことができよう。したがって、落石防護工の設計の際の参考値として十分価値があるものと思われる。

4.立木が落石の運動特性に及ぼす影響

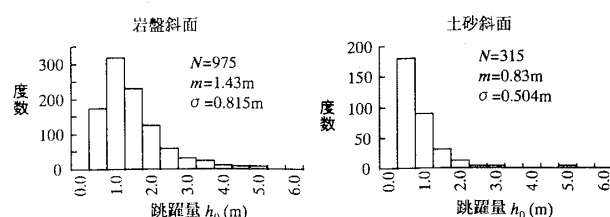
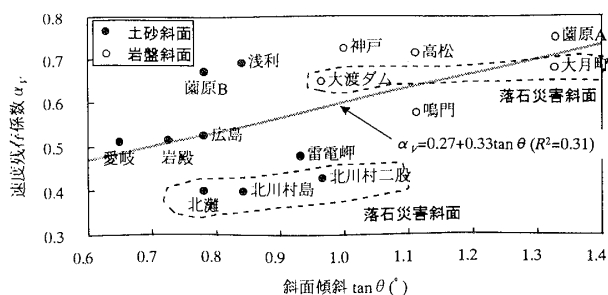
わが国ではこれまでに落石の運動機構の解明を目的とし、雷電岬³⁾、神戸⁴⁾、岩殿³⁾、浅利³⁾、蘭原⁵⁾、愛岐⁶⁾、高松⁸⁾、鳴門⁹⁾、広島¹⁰⁾、山北¹¹⁾でそれぞれ落石実験が行われている。いずれも観測の都合から立木のない裸地斜面で行われている。従って、これらの実験データと災害斜面から推定されたデータを比較すれば立木の影響を知ることができる。図-16 は速度残存係数と斜面傾斜角の関係を示したものである。ただし、落石実験の速度残存係数は実験値の平均値である。

斜面が土砂の場合、落石実験から求められた速度

び1996年6月に落石があった高知県吾川郡吾北村の大渡ダム¹⁷⁾の調査データも併記してある。

なお、本論文で用いた跳躍量とは、実際に落石が飛び跳ねた大きさではない。斜面からその面に直角方向に測った落石重心が描く跳躍軌道までの距離である。これは落石対策便覧¹⁴⁾の定義に従った。このように定義された跳躍量は、斜面勾配が比較的一様と見なされる場合に限って意味をなすものである。従って、表-2 に示した跳躍量には、斜面勾配が大きく変化する斜面下端での跳躍運動は含めていない。

表-2 に示した落石の運動特性値は、災害を発生させた1個の落石によって残された斜面上の痕跡から推定されたものである。ただ1個のみの落石の運動からその斜面の特性を把握することが適切かどうか



残存係数と落石災害斜面から得られた速度残存係数は明らかに異なり、落石災害斜面から得られた値が25%程度小さい。これは、斜面上の立木の影響と判断される。一方、岩盤斜面においては両者に差が見られないが、これは、落石災害斜面に立木が少なく、立木によるエネルギー吸収が少ないためである。

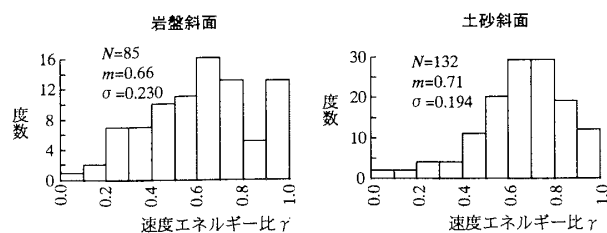


図-17 は落石実験から得られた跳躍量のヒストグラムである。岩盤斜面には藺原 A, 高松, 鳴門, 山北, 土砂斜面には藺原 B, 広島の方の実験データを用いた。図中の N は標本数, m は平均値, σ は標準偏差を表している。

痕跡から推定される落石災害斜面での跳躍量は、岩盤斜面で0.7~1.1m、土砂斜面で0.8~1.6mである。これに対して、実験から得られた跳躍量の平均値は岩盤斜面が1.43m、土砂斜面が0.83mとなっており、実験結果と災害斜面とで明確な違いは認められない。

図-18 は落石実験から得られた速度エネルギー比（衝突後と衝突前の運動エネルギー比）のヒストグラムである。岩盤斜面には藺原 A、高松、鳴門、土砂斜面には藺原 B、愛岐、広島の実験データを用いた。災害斜面の調査から推定される衝突時の速度比は 0.1~0.86 である。速度エネルギー比になおせば 0.01~0.74 となる。

落石実験の結果は、岩盤斜面の平均値が 0.66、土砂斜面の平均値が 0.71 であるので災害斜面調査結果と落石実験の差違は認められない。

跳躍を開始する速度を比較すると図-19 となり、落石実験結果と災害斜面調査結果との差は認められない。

図-18 落石実験から得られた速度エネルギー比

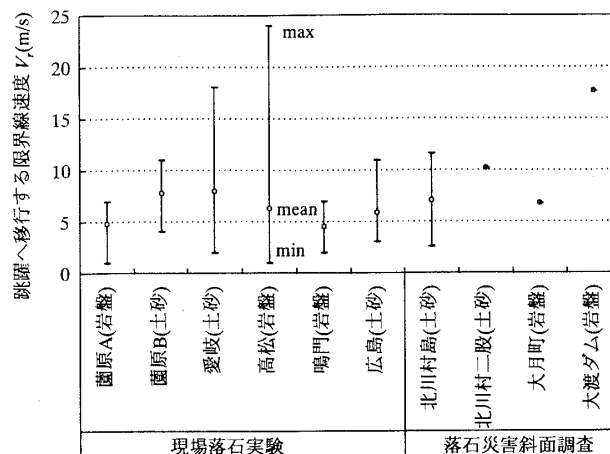


図-19 跳躍を開始する速度

5. 結 語

落石によって死亡事故が発生した高知県内の3箇所の現場について、斜面に残された落石による痕跡を詳細に調査し、痕跡から落石の運動軌跡を推定した。そして、その軌跡を元に落石の跳躍量、速度残存係数、落石が斜面へ衝突した際の速度比、跳躍を開始する速度などの運動特性を求めた。

また、災害斜面の調査から推定された落石の運動特性と既往の落石実験データを比較し、斜面の立木が落石の運動特性に与える影響を調べた。

その結果，以下の結論を得た．

- (1) 落石が発生した直後に斜面を調査すれば、落石の痕跡が残されており、痕跡から落石の運動を推定することができる。
- (2) 斜面調査から推定された速度残存係数は土砂斜面の場合 0.3~0.5、岩盤斜面の場合 0.36~0.75 である。土砂斜面の値は、既往の落石実験データに比べて 25%程度小さく、これは立木の影響と推定される。岩盤斜面については、ほとんど同じ値を示した。調査斜面の樹木は疎らでエネルギー吸収が少ないためと判断される。
- (3) 跳躍量は 0.7m~1.6m である。跳躍量に及ぼす影響は、斜面の地質のよりも勾配の変化が大きい。また、立木の影響は認められない。

- (4) 落石が斜面に衝突した際の速度比は、衝突位置の斜面勾配の影響が大きく、傾斜地で 0.1~0.86, 平坦地で 0.26~0.5 であった。立木の影響は認められない。
- (5) 跳躍を開始する速度は、勾配急変地点で 3~18m/s, 一様勾配地点で 7~13m/s であった。これに関しても立木の影響は認め難い。

参考文献

- 1) 佐々木康, 谷口栄一, 舟見清己: 落石防護工の被害に関する実態調査 (第 1 報), 土木研究所技術資料第 1572 号, 1980.
- 2) 佐々木康, 谷口栄一, 舟見清己: 落石防護工の被害に関する実態調査, 土木技術資料, Vol.23-8, 1981.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 佐々木康, 谷口栄一, 舟見清己, 谷本亘, 堀口正巳: 落石の跳躍量に関する実験: 第 14 回日本道路協会会議論文集, pp113-115, 1981.
- 8) 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.
- 9) 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, pp48-54, 1983.
- 10) 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, pp1603-1616, 1991.
- 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, pp82-88, 1992.
- 13) 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, pp45-51, 1991.
- 14) 日本道路協会: 落石対策便覧, 1983.
- 15) 県道安田東洋線落石事故調査検討会: 県道安田東洋線落石事故調査報告書, 1996.
- 16) 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.
- 17) 建設省大渡ダム管理事務所, (株)第一コンサルタンツ: 落石調査報告書, 1996.

(1997. 2. 25 受付)

THE ACCIDENTS CAUSED BY FALLING ROCKS AND ITS BEHAVIOR IN KOCHI PREFECTURE

Takeshi USHIRO, Saichi TAMAI, Noriyuki AKESAKA, Yukihiro YAMAOKA
and Norio YAGI

This report aim is to evaluate and study the critical behavior of falling rocks situated along the road in the mountain. According to the reporters who met the accident caused by falling rock, it occurred about ten times in one year. It damaged vehicles. Here, we gather three cases and each cases man was killed by the falling rock. Therefore, the location, the geological rock bed, rock slope were traced. It was studied through determining the critical velocity and maximum projectile distance from falling slope by calculation.

By experimental data, maximum velocity and projectile distance from falling slopes were obtain. Comparing the values with the unpredictable falling rocks value, effect of trees were evaluated.

At last, it clarified that the effect of the natural trees lessen the falling rocks' characteristic in motion.