

4.1 はじめに

落石被害の予測や具体的な落石対策を行うためには, 各現場において対象となる落石を特定するための調査, 次に,落石がどのように落下するか(運動形態・落下速 度・跳躍量等),また落下した落石が各種構造物にどの ような影響を及ぼすか(衝撃荷重・運動エネルギーなど) の予測が不可欠である。調査に関しては第3章に記述さ れており,本章では4.2において斜面上の落石運動のメ カニズムを,4.3で落石運動の予測法を,4.4で落石防護 工への設計外力について述べる。

まず,4.2では現場や室内の斜面での落石落下実験や 災害記録から知られている落石運動の特徴を紹介する。 この特徴は,落下速度や跳躍量,落下時の平面的な広が りといったマクロな運動特性と,落石運動時の運動形態 の遷移,線速度と回転速度の関係,斜面への衝突前後の 運動の変化といったミクロな特性とがある。前者は各方 面の設計指針類の基礎となっている。後者は個別の斜面 において落石の運動性状を予測する数値シミュレーショ ンに対して重要な情報となっている。

4.3においては、斜面上の落石の運動を予測する方法 として、4.2で述べた多くの落石運動の観察に基づく経 験的手法と、個別の斜面・落石を対象とする数値シミュ レーションによる方法とを紹介する。前者は、落石・斜 面条件が比較的単純な場合に適用されるもので、その前 提が満たされない複雑な条件の場合には、後者の適用が 期待される。シミュレーションモデルには様々のものが あり、多くは開発途上であるが、4.2で述べるような落 石運動に関する経験と矛盾しないような工夫がなされて いる。

4.4では落下運動する落石を受けとめる落石防護工の 設計に用いる外力について述べる。防護工の設計は変形 を許容して落石運動エネルギーを吸収するものと落石衝 突時の衝撃力に対して行うものとがある。落石運動エネ ルギーは落石の規模と落下速度により算定されるので, ここでは主として落石による衝撃力を対象とする。防護 工に作用する落石衝撃力を低減するためには通常砂等の 緩衝材が設けられるので,従来から砂等の緩衝材に落石 (重錘)を落下させて衝撃力を評価する実験が多く行わ れており,設計に用いる衝撃力評価式やその基となる理 論や実験例を紹介する。

4.2 斜面上の落石運動のメカニズム

4.2.1 落石実験

斜面を落下する落石は、斜面勾配の変化や微小な凹凸, 地質の硬軟,植生状況および落石の形状や大きさなどの 影響を受け複雑に振る舞うため、力学的理論解析のみで 運動を予測することは困難である。こうしたことから, 現場実験,室内実験および災害斜面の逆解析等によって 運動パラメーターを求める研究が行われてきた。

我が国では,1961年に北海道岩内町雷電岬で北海道 開発局が現場実験を行って以来,現在までに表-4.1¹⁾ に示す16件の現場落石実験が行われている。初期には, 落石防護柵の安全性の検証を主眼にした実験が多い。 1973年に群馬県利根村薗原ダムサイトで日本道路公団 が行った実験は,落石防護施設の設置に関する研究報 告²⁾として取りまとめられ,その後の落石防護工の設計 資料となった。1980年の建設省土木研究所による香川 県高松市郊外の実験³⁾は,落石の運動機構の解明を目的 とした最初の実験であった。この頃から数値シミュレー ションにより落石運動を予測する研究が本格的に始まり, 以後の現場実験は,解析に用いるパラメーターを明らか にすることに主眼がおかれている。

現場実験は,落石の全体的な挙動ならびに個々の運動 形態の特徴を把握する上で価値が高い。しかし,落石の ミクロな挙動を見たり解析に用いる各種パラメーターの 特性を力学的に分析することは難しい。1989年,建設 省土木研究所⁴⁾では,室内模型実験を行って,斜面法線 方向速度比(反発係数)に速度依存性があることを明ら かにしている。その後,右城・八木ら⁵⁾,室ら⁶⁾も斜面 法線方向速度比や速度残存係数の特性を調べる実験をし ている。

ところで,我が国における落石の多くは,道路敷地よ り上の針葉樹植林地や広葉樹林地から発生しているが, 現場実験は観測の都合から裸地斜面で行われており,こ のデータには樹木の影響が入っていない。こうしたこと から,福岡⁷¹,右城ら^{8),9)},上野ら¹⁰⁾は,落石災害斜面 に残された痕跡をもとに落石の運動機構を推定し,落石 の速度や運動定数を軌跡から逆算で求めると共に,樹木 が落石の運動に及ぼす影響について考察している。

一方,海外では,北米(米国・カナダ),欧州(スイ ス・オーストリア・フランス・ドイツ・イタリー等),

土と基礎, 50---3 (530)

ch #4 /2	実験主催									供試落石	1	(4): +tr.			
夫职名	解析団体	夫职场所	夫鞅年月	夫职日的	侧正項目	種類	岩質土質	凹凸	勾配	植生	斜面高	形状	石質	規模	加考
雷電岬	北海道開発局・札 幌鉄道管理局・㈱ 東京製綱	北海道岩内 郡岩内町雷 電岬	1961年8月	ケーブ ル型落石 防止柵及び 国鉄型落石 防止柵の安 全確認	落石速度,防 止柵の変位, 応力 落 石50個	自然斜面	転石混じ り崖錐	大	38° 47° (43°)	裸地	32m	角状	自然石	170∼ 1720kg	5斜面を選定
神戸	神戸大学畑中・西 村研究室, ㈱神戸 製鋼所	神戸市灘区 円山グランド	1967年4月	落石防止柵 の安全性確 認	落石速度,防 止柵の変位, 応力 落 石101個	切土法面	風化花崗 岩	小	45°	裸地	20m	円筒形	コンクリート	60~ 600kg	切土法面を 櫓で嵩上げ しシュート で落下
岩殿	日本道路公団東京 建設局. ㈱片平エ ンジニアリング	山梨県大月 市賑岡町岩 殿	1972年10月	岩殿山南斜 面に設置す る落石防止 施設の設計	落石速度,跳 躍高	自然斜面	崖錐	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	间	旧	40°	裸地	26m	同上	同上	不明	
薗原	日本道路公団東京 支社, ㈱建設企画	群馬県利根 郡利根村大	1973年11月	落石運動機 構の解明,	落石速度,回 転,防止欄の 亦位 たわ	自然斜面	軟岩	大	55°	裸地	65m	丸状	河原石	30∼ 800kg	
	コンサルタント	字薗原		溶石防止槽 の安全確認 <u>土 - 11日</u> の	変位, 応刀 落石96個		崖錐	小	40°	裸地	75m	同上	同上	同上	
愛岐	日本 <u></u> <u></u> 国 国 国 国 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二 二	愛知県瀬戸 市小西採石 場	1973年11月	立木利用の 落石防止柵E 型の安全確 認	^{洛石速度,回} 転,防止柵の 変位,応力 落石34個	自然斜面	崖錐	中	27~ 39°	裸地	60m	塊状	自然石(粘 板岩)	20~ 2000kg	簡易索道に よって3箇所 から落下
高松	建設省土木研究 所.(㈱建設企画コ ンサルタント	香川県牟礼 町の土取場 跡地	1980年10月	落石運動機 構の解明	落石軌跡、線 速度,角速 度,跳躍量, 落石213個	切土法面 +コンクリート 法面	風化花崗 岩	小	$30^{\circ} \\ 60^{\circ} \\ 48^{\circ}$	裸地	30m	塊状 板状	自然石(花 崗岩)	19~ 800kg	トラッククレーンお よび人力で 落下
鳴門	㈱四国建設コンサ ルタント	鳴門市中山 採石場	1983年4月	シミュレー ション解析 法の確立	落石軌跡、速 度,跳躍量, 落石30個	切土法面	砂岩頁岩 互層	小	48°	裸地	25. 5m	塊状	自然石(砂 岩)	6∼ 47.5kg	人力で落下
広島	金沢大学吉田研究 室,㈱日本サミコ ン	広島県高田 郡甲田町増 田採石場	1987年8月	シミュレー ション解析 法の確立	落石軌跡、速 度,跳躍量, 落石79個	切土法面	土砂	大	38°	裸地	62. 5m	塊状	自然石(砂 岩)	20~ 4000kg	人力, バッ クホーで落 下
山北	日本道路公団東京 第一建設局,㈱旭 技建	神奈川県足 柄上郡山北 町川西採石 場	1987年10月	工事用落石 防止柵の安 全確認	落石軌跡、速 度,跳躍量, 防止柵の変 形,衝突音, 落石95個	コンクリート吹 付け切土 法面(小 段有り)	軟岩~硬 岩	なし	51°	裸地	22m	角石, 玉石	自然石(砂 岩)	14~ 2900kg	
東根	建設省東北技術事 務所,㈱国際航業	山形県東根 市関山字滝 山	1988年10月	落石軌跡, エネルギー の解明	速度, 跳躍 量, 角速度 落石30個	自然斜面	風化凝灰 岩	大	50°	裸地	50m	塊状	自然石(凝 灰岩)	1.8∼ 33.5kg	
下呂	建設省中部技術事 務所	岐阜県益田 郡下呂町	1988年10月	落石現象の 観察	速度,跳躍 量,角速度 落石60個	自然斜面	崖錐, 露 岩	大	上部50 ~60下 部38°	裸地	75m	塊状 板状	自然石	30cm~ 50cm	斜面上の浮 石除去
釣鐘	建設省中部技術事 務所	岐阜県益田 郡下呂町釣 鐘	1988年12月	落石運動 データの蓄 積	速度, 跳躍量 落石71個	自然斜面	 濃飛流紋 岩上に崖 錐が薄く 分布 	大	50°	裸地	6∼14m	塊状	破砕自然 石	0.3m∼ 1.3m	巨岩を小割 りして人力 で落下
谷花	建設省北陸地方建 設局	一般国道49 号,三河村 谷花	1994年	落石の速 度,軌跡の 観察	速度,跳躍量 落石100個	自然斜面	崖錐, 露 岩	大	80°, 40~ 55°	裸地	110m	球状, 板状, 直方 体,棒 状	自然石(流 紋岩)	5cm~1m 以上	斜面上の浮 石除去
小樽	北海道大学工学部 資源開発工学科	小樽市銭函 小樽石産㈱ 銭函採石場	1994年	露天掘り鉱 山の落石対 策資料の蓄 積	速度, 角速度 落石239個	切土法面	崖錐	大	上部 43°下 部39°	裸地	65m	塊状, 板状, 棒状	輝石安山 岩	40cm以上	ダンプカー によるダン ピングで落 下
高知	㈱第一コンサルタ ンツ	高知県幡 多 郡西土佐村	2000年10月	落石運動機 構の解明	落石軌跡、線 速度,角速 度,跳躍量, 落石69個	自然斜面	崖錐, 露 岩	中	46°	裸地 切株	17.6m	球, 立 方体, 塊状	32月-ト 砂岩砕石 砂岩玉石	16~ 200kg	ヒノキの植 林地内,人 力,ユニッ ク車で落下

表-4.1 我が国の現場落石実験¹⁾

東アジア(香港等)において,落石運動に関する現場お よび室内実験的研究例が報告されている¹⁾。現場実験は 我が国の場合と同様に,落石防護柵等の落石防護工への 落石実験^{11),12)}から始まり,落石運動を観察する実 験^{13)~16)}が行われている。

これらの実験に基づいて、**4.3**に紹介するような各種の落石運動シミュレーションプログラムが開発されている。

本節では、これまでに国内外で実施されてきた現場実 験、室内実験等から得られた知見を基に落石運動のメカ ニズムについて述べる。

4.2.2 落石の運動形態

斜面を落下する落石の運動形態は、すべり、ころがり、 跳躍(衝突と飛行)に分類される¹⁾。斜面勾配、地質、 斜面に堆積する礫径などによって卓越する運動形態が異 なる。

一般的な傾向を述べると、すべり運動は運動の初期段 階、停止直前、斜面衝突時において、落石がころがるだ けの回転エネルギーを持たないとき、小さな礫に衝突し たときなど限られた場面に出現する^{1),15),16)}。すべり運 動をすればエネルギー消費が大きいため、減速または停 止することが多い。

斜面勾配が緩いと、ころがり運動が卓越する。急斜面 でころがりが見られるのは、運動の初期段階と停止時あ るいは土砂斜面に衝突したときである。ころがり運動は エネルギー消費が少なく、落石の到達距離が大きくな る¹⁵⁾。落石径が斜面上に堆積する礫径よりも大きい場 合には、角速度を増しながら落下していき、斜面勾配が 緩くなるか、あるいは堆積している礫径が大きい所で停 止することが多い¹¹⁾。なお、斜面勾配が1:1.3 (38°) より緩いと落石は生じ難いという観察もある¹¹⁾。

急斜面では跳躍運動が卓越する。また,落石がそれと 同規模の岩塊が分布する斜面を落下するときには跳躍を 繰り返す¹¹⁾。

図-4.1,図-4.2は高松の実験結果¹⁾である。図-4.1は,跳躍運動が連続した地点,跳躍運動から線運動 (すべりまたはころがり)へ遷移した地点の斜面傾斜角 をヒストグラムで表している。傾斜角が0~20°の緩い 斜面に衝突すると線運動になりやすいことが分かる。

図一4.2は、線運動から跳躍運動に遷移するときの線 速度(限界線速度)および角速度のヒストグラムを示す。

69



(a) 瞬間的な回転による衝突
 (b) ころがりを伴った衝突
 図一4.3 落石が斜面へ衝突したときの挙動¹⁹⁾

線運動から飛び出すときの線速度は 3~20 m/s,角速度 は 2~30 rad/s となっている。斜面勾配が急変する場合 には,小さい線速度で飛行に遷移している。

限界線速度については,鳴門の実験¹⁷⁾で2~8 m/s, 下呂の実験¹⁸⁾で6~18 m/s,高知の実験¹⁹⁾で1.2~1.8 m /s というデータが得られている。観測データの幅が大 きいのは観察の細かさの影響が考えられる。自然斜面は 凹凸が多く落石形状も複雑なため,跳躍量が小さい場合 には跳躍かころがり運動かの識別が難しい¹⁹⁾。また, 限界線速度は,落石形状によって異なるし,落石の初動 時の回転が最大慣性主軸回りか,最小慣性主軸回りかの 影響も受ける。こうしたことが,実験結果のばらつきと なって現れている。

落石が斜面へ衝突し飛行に遷移する過程をミクロに見ると,図─4.3(a)のような瞬間的な回転か,図─4.3(b)のようなころがりである。速い速度で岩盤に衝突すると瞬間的な回転となるが,土砂の場合や速度が遅い場合にはころがりとなる。



図-4.4 落下高さと速度の関係



4.2.3 落石の落下速度

(1) 残存係数

落石の速度は種々の要因に影響されるが、支配的なの は落下高さHである。そこで、斜面特性や落石形状に かかわるすべての要因を残存係数 α で表せば落石の速 度Vは自由落下速度 $\sqrt{2gH}$ に対して式(4.1)で表され る²⁰⁾。

図一4.4は薗原²²⁾,広島²³⁾での落石実験から得られた 落下高さと速度の関係を示している。残存係数は落下高 さに伴って減少している。その他の実験においても、落 下の初期段階で残存係数が大きく、落下高さがある値以 上になると減少する傾向が見られる。落下高さがある値 以上で速度が一定値に収束するという報告もある が^{19),20)},これは、残存係数が減少することと同じであ る。

落下高さに伴って残存係数が減少するのは,速度が大 きくなるほど衝突によるエネルギー消費の割合が大きく なるためと解釈することができる。

ちなみに、球が力学的エネルギーを保存したまま斜面 をころがる場合、初期の位置エネルギーは線運動エネル ギーと回転運動エネルギーとに分配され、線速度で規定 される残存係数の理論値は0.85となる。落下の初期段階 で落石の残存係数が0.85を超えるのは、飛行運動が卓越 するためと考えられる。

(2) 等価摩擦係数

図-4.5(a)のように複雑な運動形態からなる落石の 運動を、図-4.5(b)のように速度が等価なすべり運動

土と基礎, 50-3 (530)



図一4.6 残存係数,等価摩擦係数と斜面勾配の関係(文 献1)に加筆)

と見なし,摩擦のみによってエネルギーを消費するとす れば,残存係数は式(4.2)となる。ここに, μ は等価摩 擦係数, $\tan \theta$ は斜面勾配である。

既往の落石実験では,式(4.1)の速度曲線が実験で得られた速度をおおむね包絡する残存係数αを求め,式 (4.2)によって等価摩擦係数μが算出されている。

図一4.6は落石実験等から求められた残存係数,等価 摩擦と斜面勾配の関係を示している。北川村島⁹⁾,北川 村二股⁹⁾,北灘²¹⁾,大月町⁹⁾,山城町¹⁰⁾の各データは落 石災害斜面から推定されたものである。現場落石実験に 比べて残存係数が小さく(等価摩擦係数が大きく)なっ ている。これらの現場にはいずれも樹木があったことか ら,それによる減衰効果が表れたものと思われる。

4.2.4 衝突による速度の変化

落石が斜面を落下する際,すべり摩擦やころがり摩擦 によってもエネルギーを消費するが,エネルギー消費が 最も大きいのは斜面への衝突時である。斜面への衝突に よって落石の運動にブレーキがかかる。ブレーキの程度 は,法線方向速度比 *R*_nと接線方向速度比 *R*_tで表され, これらは式(4.3)で定義される。

 $R_{\rm n} = -\frac{V_{\rm m}}{V_{\rm in}} = -\frac{V_{\rm r} \cos \lambda_{\rm r}}{V_{\rm i} \cos \lambda_{\rm i}} \qquad R_{\rm t} = \frac{V_{\rm r}}{V_{\rm it}} = \frac{V_{\rm r} \sin \lambda_{\rm r}}{V_{\rm i} \sin \lambda_{\rm i}} \quad \cdots (4.3)$

ここに、 V_i は入射速度、 V_r は反射速度、 λ_i は入射角、 λ_r は反射角である(後出の図—4.11参照)。

これらは、落石の数値シミュレーションを行う上で重 要なパラメーターとなることから多くの落石実験で測定 されている。それらの結果を整理すると図-4.7となる。

法線方向速度比 R_n,接線方向速度比 R_tとも室内実験 に比べて現場実験のばらつきが大きい。法線方向速度比 では1.0を超える値も測定されている。大きなばらつき や一見不合理な値が求められる原因として,衝突時に回 転エネルギーの一部が線速度エネルギーに変換されるこ ともあるが,これ以外に,落石および自然斜面はその表 面形状が複雑であることに加え,落石が斜面へ衝突する と地盤はせん断破壊または塑性変形するため,現場実験 で入射角や反射角を正確に測定することが非常に難しい。 このため法線方向速度比として見掛けの反発係数が測定 されていると考えられる。



入射時の法線方向成分V_{in}(m/s)

図-4.8 Wuの実験から求められた法線方向速度比と接 線方向速度比¹⁾

法線方向速度比は,落石や斜面の材質のみで決定される定数と思われがちであるが,入射速度の斜面法線方向成分 *V*_{in}の影響を顕著に受ける。

Wu¹³⁾は、木の角材で組み立てた人工斜面と実際の岩 盤切土斜面で落石実験を行い、衝突時の反発特性を調べ ている。この結果を再整理した図一4.8によれば、法線 方向速度比は入射速度の法線方向速度に依存することが わかる。他方、接線方向速度比の方は、ほぼ一定の値と なっている。

図一4.9は,傾斜角30°と60°のコンクリート斜面へ花 崗岩塊を自由落下させた高松の実験³⁾から得られたもの である。図中にはWuの実験¹³⁾から求められた回帰曲 線も併記してある。測定結果のばらつきが大きいが, Wuの実験結果と同様に,入射線速度の法線方向速度が 大きいほど法線方向速度比が小さくなる傾向が見られる。 このことは,古賀ら⁴⁾,右城・八木ら⁵⁾も室内実験で確 認している。

落石が斜面へ衝突すると,運動エネルギーは,音,熱 地盤のひずみエネルギーに変換される。その後,ひずみ エネルギーの何割かは運動エネルギーとして回復するが, 残りは残留する。衝突速度の法線方向成分が大きいほど

71

遘



図-4.9 高松の実験から求められた法線方向速度比と入 射速度の法線方向成分との関係¹⁾



図-4.10 落石の落下高と跳躍高の関係

地盤に残留するひずみエネルギーの比率が大きくなるの で,法線方向速度比に速度依存性が現れることになると 考えられる。

4.2.5 跳躍高

薗原²²⁾と広島²³⁾の実験における落下高と跳躍高の関係を図-4.10に示す。その他の落石実験においても落下高20~30mまでは落下高に伴って跳躍高が大きくなり、 それ以降は2m程度に収束する傾向が確認されている。

跳躍量が2mに収束する主たる要因は,法線方向速 度比の速度依存性にあると考えられる。

法線方向速度比 R_n がWuの実験による回帰曲線で表 されるとすると、跳躍高は式(4.4)となる。

$$h = \frac{1}{2g\cos\theta} \left[\frac{V_i\cos\lambda_i}{1 + 0.0014 (V_i\cos\lambda_i)^2} \right]^2 + r \dots \dots (4.4)$$

この式で、入射角 $\lambda_i \in \theta \leq \lambda_i \leq 90^\circ$ の範囲で変化させてhの最大値を探索すれば、跳躍高を求めることができる。

落石半径をr=0.5 m として入射速度と跳躍高の関係 を求めると図─4.11となる。落石の速度に伴って跳躍高 は増加するが,ある速度に達すると2m付近に収束す る。また,斜面勾配が急なほど跳躍高は大きくなってい る。

一様勾配の斜面の跳躍高は図一4.12に示す h₁となる が,斜面勾配に急変があったり凹凸が著しい箇所などで



図-4.11 式(4.4)で求められる跳躍高24)



図-4.12 斜面勾配が急変する箇所での跳躍高



は h₂ となり, 5 m を超えるような跳躍高が観測された

事例^{3),25)}がある。このため、跳躍高を一律2m程度と 判断するのは適切でない。

4.2.6 落石の落下軌跡

落石対策工の高さおよび設置延長を決定する上で,跳 躍軌跡および表面的な広がりを予測する必要がある。図 一4.13は高松の実験結果¹⁾である。落石の平面的落下軌 跡は個々に異なるが,落石の軌跡を重ねて描いてある。 包絡線はすべての軌跡を包絡させたものである。

斜面末端の平坦部で落石の跳躍高が小さくなっている。 これは,前述した法線方向速度比の速度依存性の影響が 多いと思われる。

落石は斜面に沿って直線的に落下するわけではなく, 平面的にある範囲で左右へ広がる。既住の落石実験では, 斜面の等高線の法線に対して投石地点から左右へそれぞ れ20~35°の範囲に広がることが観測されてい る^{3),18)~20),22),26)}。これらの実験は等高線が比較的単調な 斜面で実施されたものであり,尾根地形ではより広く, 沢地形ではより狭くなる。また,落石経路は樹木や斜面 の露岩等との衝突により変化しやすい。落石が大きいと 直進する傾向がある²³⁾。

4.2.7 今後の課題

本節では、国内外における既往の現場実験、室内実験

土と基礎, 50-3 (530)

に基づき,落石の運動形態,落下速度,反発係数,跳躍 高,落石の落下軌跡についての知見を整理すると共に, 運動メカニズムに関する理論的考察を加えた。

斜面を落下する落石の運動は,斜面の微小な凹凸や勾 配の変化,基岩の露頭,斜面に堆積する礫径,地質,樹 木,落石の大きさと形状の影響によって敏感に反応する ことがこれまでの研究で明らかになっている。しかし, これらを定量的に評価できるまでには至っていない。今 後共,現場落石実験,室内実験等によるデータの蓄積が 必要である。ただし,その場合,運動の力学的メカニズ ムと関連付けされたデータの整理が望まれる。例えば, 跳躍量だけを測定するのではなく,その落石の形状寸法, 跳躍地点の斜面勾配,土質特性などとの関係を明らかに しておく必要がある。

落石の速度やエネルギーを論じる上で,角速度も重要 である。しかしながら,角速度に関しては,落石の形状 が複雑であることや回転が三次元的であること等のため 観測が難しく,その実態はほとんど明らかになっていな い。形状の単純な模擬落石を用いた現場実験や室内実験 による今後の研究が必要である。

参考文献

- 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.
- 2) 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.
- 3) 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回日本道路会議特定課 題論文集,pp.113~115,1981.
- 古賀泰之・伊藤良弘・森下 義・鷲田修三・谷口栄一: 落石防災対策に関する調査報告書(その1),土木研究 所資料,第2770号,1989.
- 5) 右城 猛・篠原昌二・谷田幸治・八木則男:落石の斜面 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衝撃実 験・解析法の標準化に関する研究小委員会,pp.91~96, 2000.
- 6) 室 達郎・深川良一・河原荘一郎:傾斜した軟弱地にお ける落石の転動機構に関する研究,科学研究費補助金 (基盤研究 c, 2)研究成果報告書, 1999.
- 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, pp. 96~98, 1973.
- 8) T. Ushiro, Y. Matsumoto, N. Akesaka and N. Yagi: Study of accidents caused by rockfall in Kochi Prefec-

ture, Proceedings of the International Symposium on Slope Stability Engineering—IS-SHIKOKU '99, pp. 1349~1354, 1999.

- 9) 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, pp. 39~48, 1997.
- 上野将司・小田桐七郎・馬 貴臣:植生の違いに着目した DDA 解析の例,第36回地盤工学研究発表会,pp. 2503~2504,2001.
- Ritchie, A. M.: Evaluation of rockfall and its control, Highway Research Record, No. 17, pp. 13~28, 1963.
- Duffy, J. D.: Flexible wire rope rockfall nets, Transportation Research Record, No. 1343, pp. 30~35, 1992.
- Wu, S-S.: Rockfall evaluation by computer simulation, Transportation Research Record, No. 1031, pp. 1~5, 1985.
- 14) Pfeiffer, T. J. and Higgins, J. D.: Rockfall hazard analysis using the Colorado Rockfall Simulation Program, Transportation Research Record, No. 1288, pp. 117~ 126, 1990.
- Bozzolo, D. and Pamini, R.: Simulation of rock falls down a valley side, Acta Mechanica, No. 63, pp. 113~130, 1986.
- 16) Azzoni, A. and Freitas, M. H.: Experimentally gained parameters, decisive for rock fall analysis, Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 28, No. 2, pp. 111~124, 1995.
- 17) 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.
- 18) 建設省中部地方建設局中部技術事務所:平成元年度 落 石防災対策に関する調査検討業務委託報告書(下呂), 1990.
- 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,pp. 2513 ~2514,2001.
- 20) 日本道路協会:落石対策便覧, 2000.
- 21) 一般国道11号落石災害調查委員会:一般国道11号落石 災害調查報告書, 1991.
- 22) 日本道路公団東京支社, ㈱建設企画コンサルタント: 落 石実験調査報告書, 1973.
- 23) 吉田 博・右城 猛・桝谷 浩・藤井智弘:斜面性状を 考慮した落石覆工の襲撃荷重の評価,構造工学論文集, Vol. 37A, pp. 1603~1616, 1991.
- 24) 右城 猛·柴岡孝行:跳躍量の簡易予測法,土木学会四 国支部技術研究発表会講演概要集,pp. 232~233, 2001.
- 25) 道路保全センター:平成5年度一般国道49号谷花地先 防災対策業務報告書, 1994.
- 26) 建設省中部地方建設局中部技術事務所:昭和63年度 落石防災対策に関する調査報告書(下呂), 1988.

73