

# 落石シミュレーションに用いるパラメータに関する研究

(株)第一コンサルタンツ 右城 猛  
(株)第一コンサルタンツ 篠原昌二

## 1. まえがき

斜面上を落下する落石の運動は、岩塊の寸法や形状、斜面の微地形、硬度、植生などの影響を顕著に受ける。したがって、これらの影響を確率的に評価した数値シミュレーションを行うのが実際である。

筆者らは、古典的剛体運動力学にモンテカルロ法を適用した二次元数値シミュレーションプログラムDRSP(Daiichi-Consultants Rockfall Simulation Program)を開発した。このプログラムの実行には、衝突時における地盤の降伏強度、バネ定数、動的摩擦係数、ラフネスなどの斜面特性パラメータが必要となる。

DRSPでは表 1に示す入力データを用いてシミュレーションを行う。

これらの入力データは、決定方法によって次の3種類に分類される。

### 1. 斜面に依存しないデータ

落石の密度(一般に $2.65\text{t/m}^3$ )

計算刻み幅(一般に $0.05\text{s}$ )

試行回数(一般に200回)

### 2. 現地調査・測量によって決定するデータ

地形変化点の座標値

落石発生位置の座標値

解析終了位置

初期線速度

初期角速度

落石の半径

### 3. 落石実験から決定するデータ

衝突時の地盤の降伏強度

衝突時の地盤反力係数

除荷時の地盤剛性硬化率

動的摩擦係数

斜面補正係数

斜面抵抗力

ラフネス係数

限界線速度

表 1 DRSPが使う入力データ

入力データの種類	記号	単位	データ種類	
斜面形状	地形変化点座標	$x, y$	m	固定値
	衝突点の地盤の極限支持力度	$q_d$	$\text{kN/m}^2$	固定値
斜面特性	衝突点の動的地盤反力係数	$k$	$\text{kN/m}^3$	固定値
	除荷時の地盤剛性硬化率	$\varepsilon$	-	固定値
	動的摩擦係数	$\mu$	-	固定値
	斜面補正係数	$K_s(m, \sigma)$	-	正規分布
	斜面抵抗力	$C_o$	$\text{kN/m}^2$	固定値
	ラフネス係数	$R_o(m, \sigma)$	-	正規分布
	落石条件	球の半径	$r$	m
初期条件	密度	$\rho$	$\text{t/m}^3$	固定値
	落石発生位置の座標	$x_0, y_0$	m	固定値
	初期線速度	$u_0, v_0$	m/s	固定値
解析条件	初期角速度	$\omega_0$	rad/s	固定値
	限界線速度	$V_{\text{lim}}(m, \sigma)$	m/s	正規分布
	計算時間刻み幅	$\Delta t$	s	固定値
	解析終了位置	$x_{\text{end}}$	m	固定値
	試行回数	$N$	回	固定値

斜面特性データは斜面のセル毎に設定  
データ種類が正規分布であるものは、平均値 $m$ と標準偏差 $\sigma$ を指定する

入力データのうち、決定が難しいのは落石実験等から求める必要がある8個のデータである。ところが、シミュレーションに先立って現場落石実験を実施できるケースは希であり、ほとんどの場合は、類似斜面の実験データを用いるか、簡単な現地試験で推測する必要がある。

DRSPを実用化するには、落石実験のデータベース化を図り、上記8個の入力データについて斜面状態に応じたデフォルト値を用意するか、簡単な現場試験法を開発する必要がある。

本論文では、1980年に建設省土木研究所と四国地方建設局が香川県牟礼町の土取場跡地の切土法面で実施した落石実験斜面を対象にシミュレーション解析を行い、上記パラメータの同定を行ったのでその結果を発表する。

## 2. 高松の現場落石実験の概要

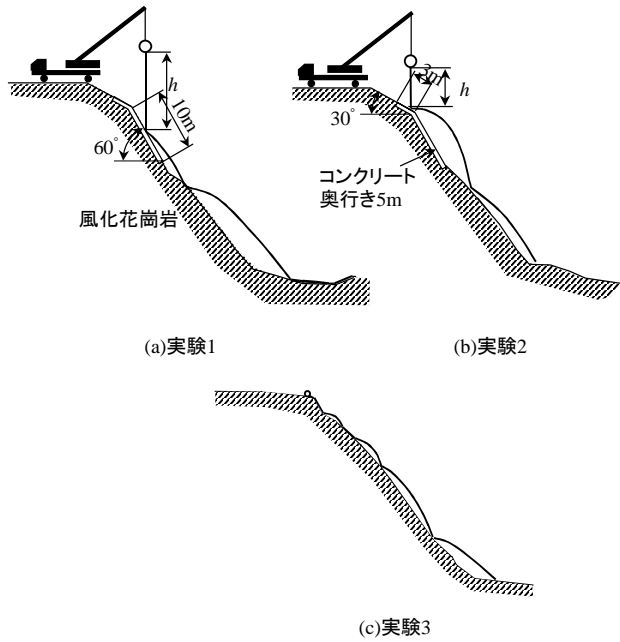


図 1 高松の落石実験

落石実験斜面の勾配は約 $48^\circ$ ，斜面長は約35m，地質は等高線沿いに凹凸が顕著に発達した風化花崗岩である．投石地点の横断面を図 1 に示す．

実験1と実験2は，斜面上に人工的にコンクリート斜面を構築し，その上に落石を自由落下させている．コンクリート斜面は上部が傾斜角  $=30^\circ$  法長3m，下部が  $=60^\circ$ ，法長10mで，コンクリート強度は $\sigma_c = 16 \sim 18 \text{ N/mm}^2$ である．実験3は自然斜面上方の法肩付近から落石を転がして落下させている．

実験より得られた落石の軌跡の一例を図 2 に示す．

## 3. 運動のパラメータ

### 3.1. 反発係数と斜面補正係数

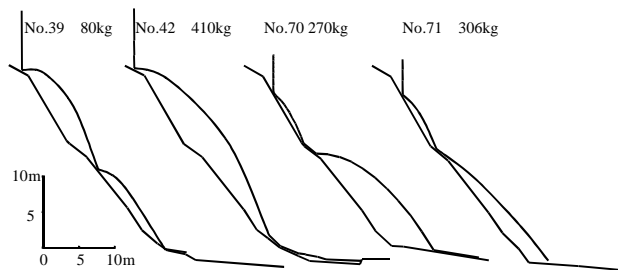


図 2 実験 1，実験 2 による軌跡の一例

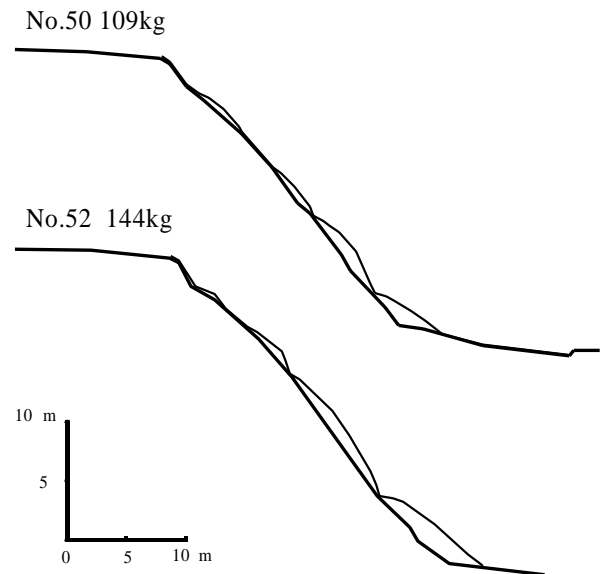


図 3 実験 3 による軌跡の一例

実験 1 と実験 2 より得られた跳躍軌跡から落石の跳躍開始速度，着地速度を求め，リバウンド地点の入射速度と反射速度から反発係数を算出すると図 4，図 5 となる．

落石の衝突位置毎に反発係数の平均値を求めれば，図 4(a)となり，岩盤が最も大きく，次にコンクリート60度斜面が大きい．落石の形状と反発係数の関係は図 4(b)となり，形状の影響は見られない．落石質量と反発係数の関係は 図 4(c)となる．質量の影響はほとんど見られない．

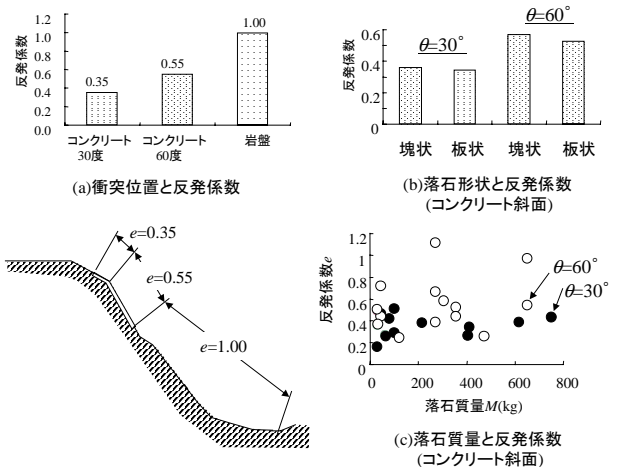


図 4 実験 1，実験 2 による反発係数

図 5 は入射速度の法線方向成分 $v_1$ と反発係数 $e$ の関係を表している． $v_1$ の増加に伴い反発係数は減少する．コンクリート斜面，岩盤斜面ともにはばらつきが非常に大きい．この原因は，図6に示すような衝突時の地盤の変形，斜面のラフネス，落石の形状の影響

響と考えられる。

反発係数 $e$ は、軌跡図から測定された入射速度 $V_1$ と反射速度 $V_2$ より式(1)で算出される。

$$e = \frac{V_2 \cos \alpha_2}{V_1 \cos \alpha_1} \quad (1)$$

ところが、落石衝突点の真の斜面傾斜角が現地測量で測定された値よりも $\Delta\theta$ だけ緩いとすれば、式(1)で求められた反発係数は見かけの反発係数ということになる。反発係数のばらつきの原因が全て衝突点の斜面傾斜角の測定誤差 $\Delta\theta$ に起因していると思えば、真の反発係数 $e'$ は式(2)で与えられることになる。

$$e' = \frac{V_2 \cos(\alpha_2 + \Delta\theta)}{V_1 \cos(\alpha_1 - \Delta\theta)} \quad (2)$$

式(2)を変形すれば、測定誤差は次式で表される。

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{V_2 \cos \alpha_2 - e' V_1 \cos \alpha_1}{V_2 \sin \alpha_2 + e' V_1 \sin \alpha_1} \quad (3)$$

線速度 $V$ を斜面方向成分 $u$ と斜面垂直方向成分 $v$ で表せば、式(3)は次のようになる。

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{v_2 - e' v_1}{u_2 + e' u_1} \quad (4)$$

反発係数は、式(5)の双曲線関数で近似できる。

$$e' = \frac{A}{1 + Bv_1^2} \quad (5)$$

$A, B$ は定数であり、落石実験で求められた見かけの反発係数 $e$ から最小二乗法を用いて求めれば、図8となる。ただし、明らかに不合理な $e > 1$ のデータは棄却した。

当該斜面の岩質は風化花崗岩である。にも関わらず回帰式から得られた反発係数は、 $v_1 < 6.5 \text{ m/s}^2$ の領域でコンクリート斜面よりも岩盤斜面の値が大きくなっている。これはラフネスの影響と考えられる。

双曲線回帰式で求められた反発係数を真の反発係数 $e'$ と見なせば、式(3)あるいは式(4)でそれぞれの $e$ に対応する $\Delta\theta$ を求めることができる。

斜面補正角 $\Delta\theta$ と衝突地点の見掛け斜面傾斜角 $\theta$ の比 $\Delta\theta/\theta$ を斜面補正係数と定義すれば、斜面補正係数 $\Delta\theta/\theta$ は図10となる。

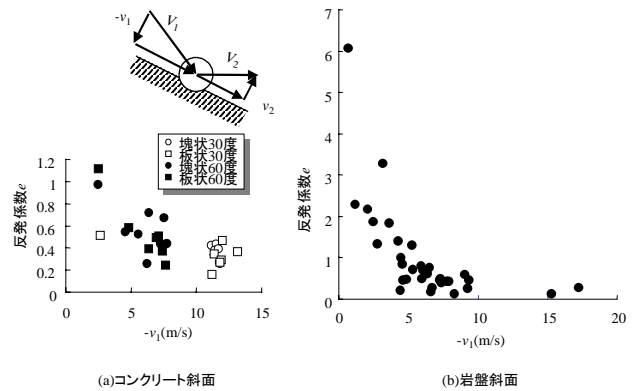


図5 入射速度の斜面法線方向成分と反発係数の関係

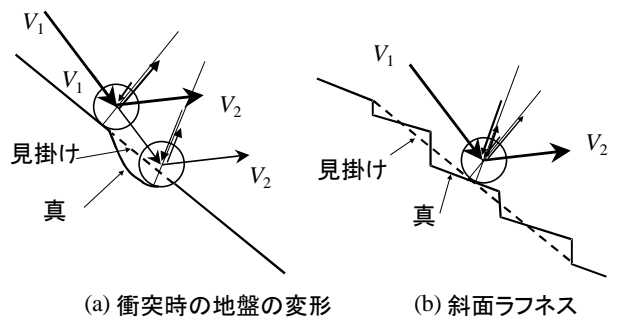


図6 地盤の変形とラフネス

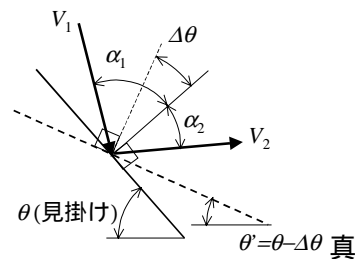


図7 入射角・反射角

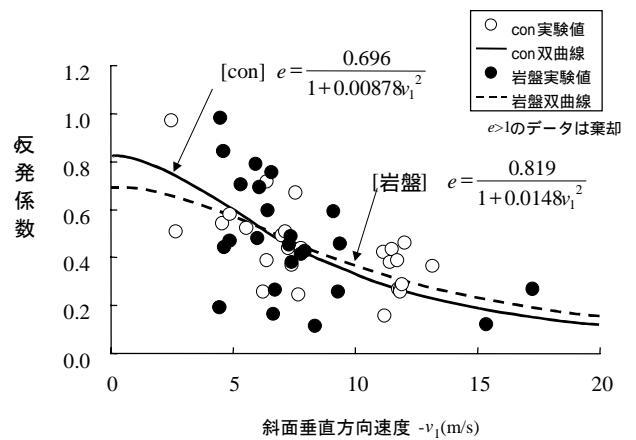


図8 入射速度の斜面垂直方向成分と反発係数との関係

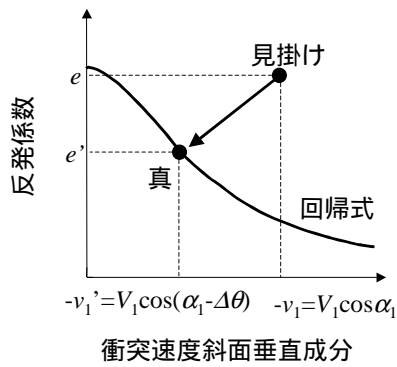
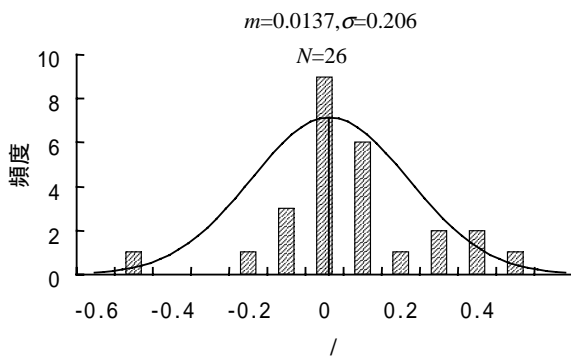
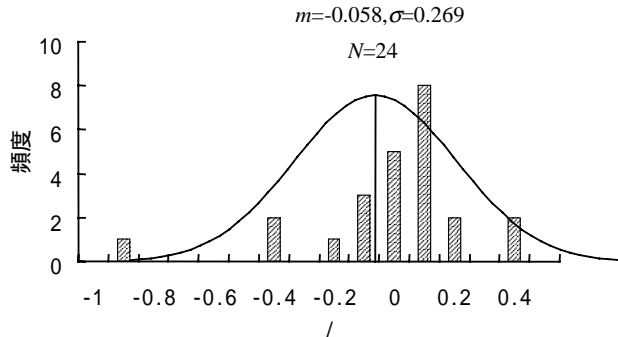


図 9 補正傾斜角



(a)コンクリート斜面



(b)岩盤斜面

図 10 衝突点の斜面補正係数

### 3.2. 地盤の極限支持力度，動的地盤反力係数，除荷時の地盤剛性硬化率

DRSPで定式化された反発係数 $e$ は，地盤の極限支持力度 $q_d$ ，動的地盤反力係数 $k$ ，除荷時の剛性硬化率 $\epsilon$ は落石の半径 $r$ (落石質量に関係する)入射速度の斜面法線方向成分 $v_1$ の影響を受ける．これらのパラメータに対する反発係数の感度を調べると図 11となる．なお，反発係数の算定式には衝突地点の斜面傾斜角 $\theta$ も現れるが， $\theta$ の影響は微小であり意識する必要はない．

実験結果から $q_d, k, \epsilon$ を逆解析で求めるには，前述した双曲線回帰式の反発係数を真の反発係数とみなし，双曲線回帰式にマッチングするような $q_d, k, \epsilon$ を試行錯誤的に決定すればよい．図 12(a)はコンクリート斜面について，図 12(b)は岩盤斜面について $q_d, k, \epsilon$ を同定した結果である．

人工斜面のコンクリート圧縮強度は $16 \sim 8\text{MN/m}^2$ である．これに対して同定された極限支持力度は $q_d = 10\text{MN/m}^2$ であり，コンクリート強度の $1/1.6 \sim 1/1.8$ となっている．また，コンクリートのヤング係数は圧縮強度の約1,000倍であるが，同定された地盤反力係数は極限支持力度の120倍でありかなり小さい．この原因は，実験に用いられた供試落石が現地調達された花崗岩塊であるので，供試落石の強度および形状の影響を受けているものと考えられる．

岩盤斜面で同定された値は $q_d = 5\text{MN/m}^2, k/q_d = 100$ である．斜面の岩盤の強度試験が行われていないので検証はできないが，風化花崗岩としては妥当な値と判断した．

### 3.3. 限界線速度

斜面勾配が一樣であったとしても，落石の角速度による遠心力が大きくなれば落石は線運動から跳躍運動へモードを変える．落石の形状が立方体のように単純なものであれば理論的に限界速度を算出できる．

しかし，実際には落石のみならず斜面の形状も複雑であるから実験によって推定する他はない．

図 13は実験3から得られた限界線速度のヒストグラムである．限界線速度の平均値は $m \approx 8\text{m/s}$ ，標準偏差は $\sigma \approx 3.6\text{m/s}$ である．

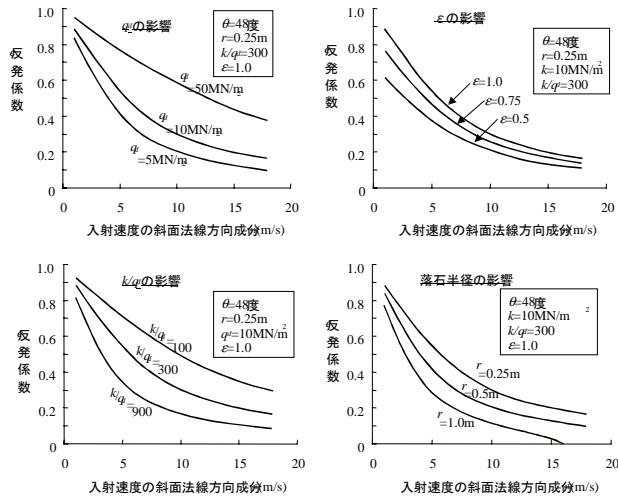


図 11 反発係数の感度分析

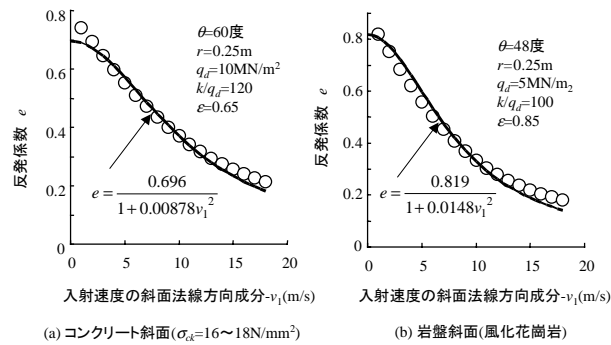


図 12 反発係数のパラメータの逆解析

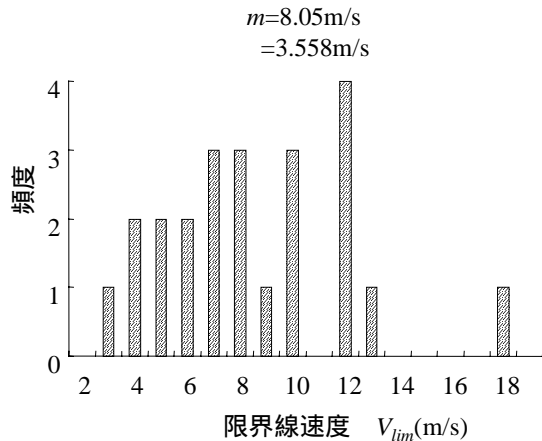


図 13 跳躍へ移行する限界線速度

### 3.4. 動的摩擦係数

動的摩擦は線運動と衝突の際に発揮される。斜面傾斜角が非常に急勾配であれば、落石の線運動は滑りモードになるため摩擦係数が重要になってくる。また、衝突の際の入射角が90度に近い場合、衝突時に滑りを伴うため摩擦係数が運動に影響を及ぼす。

しかし、ほとんどの場合一般の斜面では、線運動は転がりモードになる。また、衝突は滑りを伴わない。このため、摩擦係数については細かく検討する

必要はなく、通常の構造物設計に用いられている0.4~0.6の値を採用すればよい。高松実験の場合は、斜面が岩盤あるいはコンクリートであるので0.6とした。

### 3.5. ラフネス係数

ラフネス $h_r$ は斜面の凹凸の程度を示す指標であり、現地調査から図16のように求める。ラフネス係数は、 $R_o = h_r/r$  ( $0 \leq R_o \leq 1.0$ )として算定する。

高松の斜面では平均値 $m=0.3$ 。標準偏差 $\sigma=0.01$ とした。

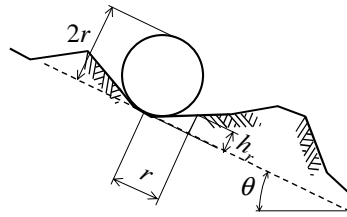


図 14 ラフネス

### 3.6. 斜面抵抗係数

抵抗係数 $C_o$ は斜面上の植生などによる抵抗である。高松の実験斜面は裸地であるので $C_o=0$ とした。

## 4. シミュレーション結果

シミュレーションの条件を表2に示す。

表 2 シミュレーションに使用した斜面パラメータ

	実験 1	実験 2	実験 3
画 線 ト ー ク ン 口	極限支持力度	10,000 N/m <sup>2</sup>	
	動的地盤反力係数	1,200,000 kN/m <sup>3</sup>	
	除荷時の地盤剛性硬化率	0.696	
	動的摩擦係数	0.6	
	斜面補正係数	$m=0, \sigma=0.21$	
	斜面抵抗力	0	
	ラフネス係数	$m=0.3, \sigma=0.01$	
画 線 細 取	極限支持力度	5,000 N/m <sup>2</sup>	
	動的地盤反力係数	500,000 kN/m <sup>3</sup>	
	除荷時の地盤剛性硬化率	0.819	
	動的摩擦係数	0.6	
	斜面補正係数	$m=0, \sigma=0.27$	
	斜面抵抗力	0	
	ラフネス係数	$m=0.3, \sigma=0.01$	
限界線速度	$m=8.05, \sigma=3.558$		
試行回数	200回		

各実験に対する200ケースの軌跡図のうち任意の20ケース分をそれぞれ図15, 図18, 図21に示す。

落石がバウンドした地点での入射速度，反射速度と鉛直落下距離との関係を図16，図19，図23に示す．

運動エネルギーの変化は任意の1ケースについてのみ図化した．その結果を図17，図20，図23に示す．

実験 1

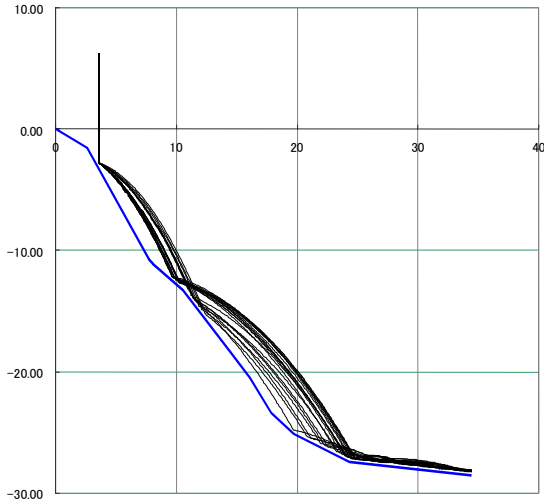


図 15 軌跡図(実験 1)

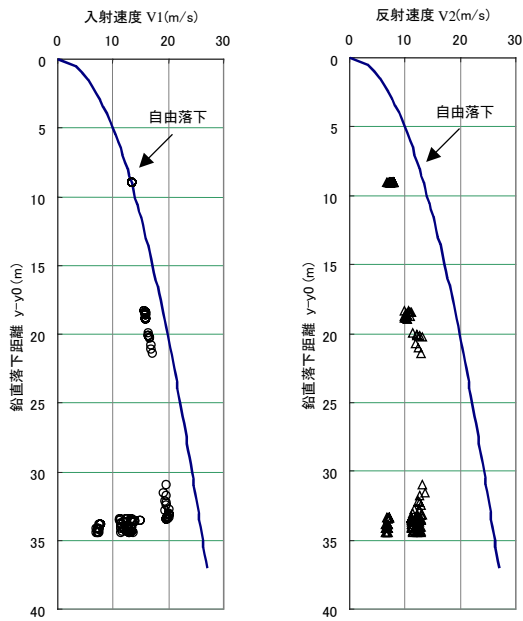


図 16 速度分布(実験 1)

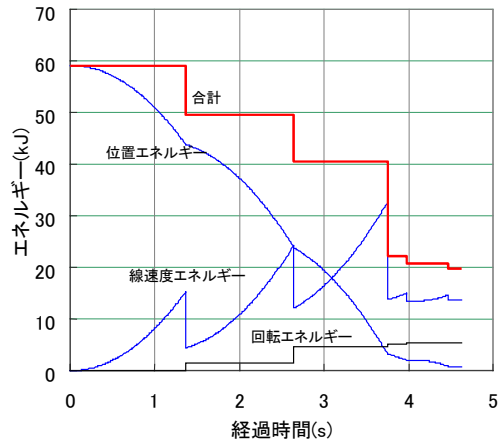


図 17 落石のエネルギー変化(実験 1)

実験 2

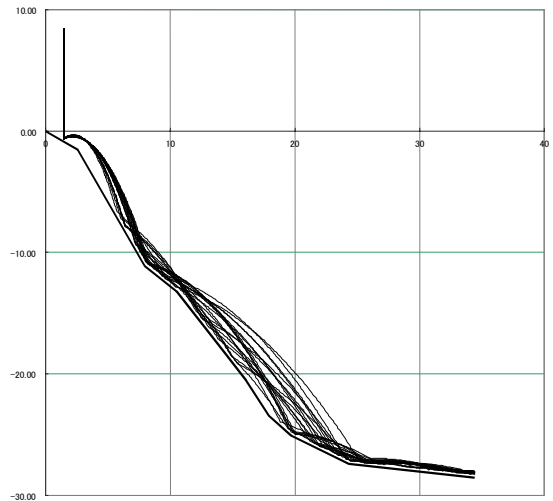


図 18 軌跡図(実験 2)

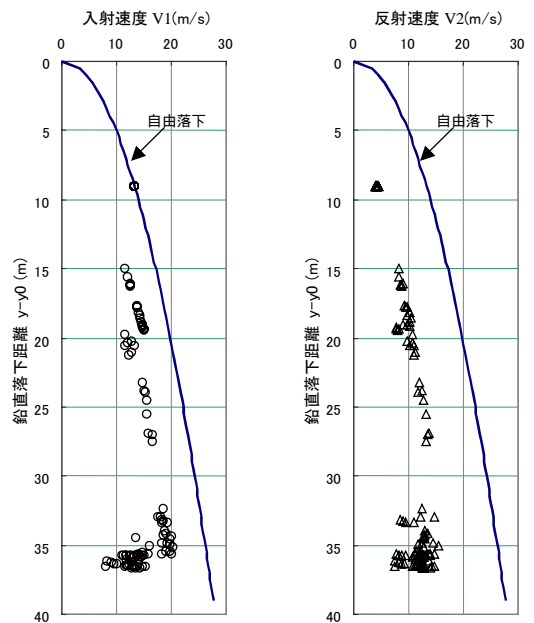


図 19 速度分布(実験 2)

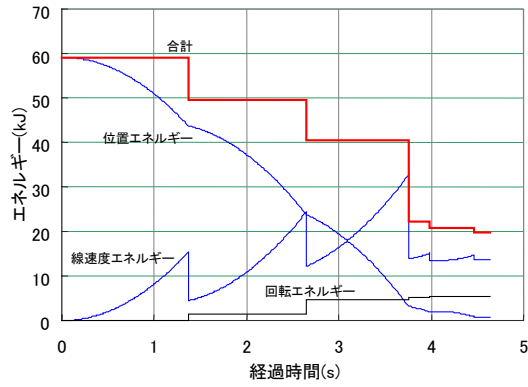


図 20 落石のエネルギー変化(実験 2)

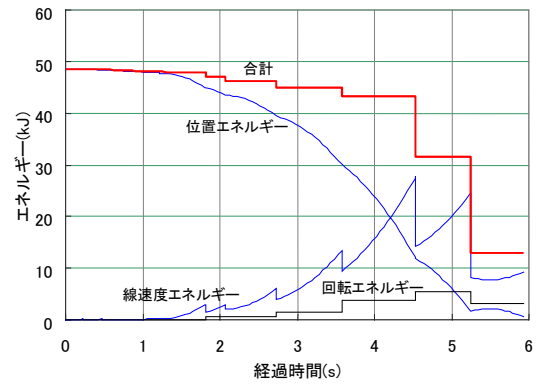


図 23 落石のエネルギー変化(実験 3)

実験 3

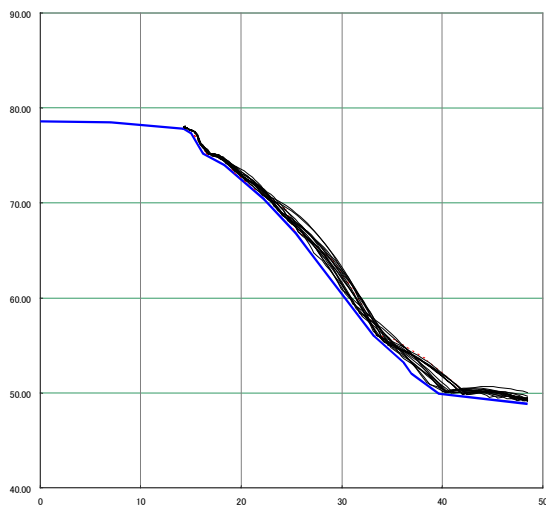


図 21 軌跡図(実験 3)

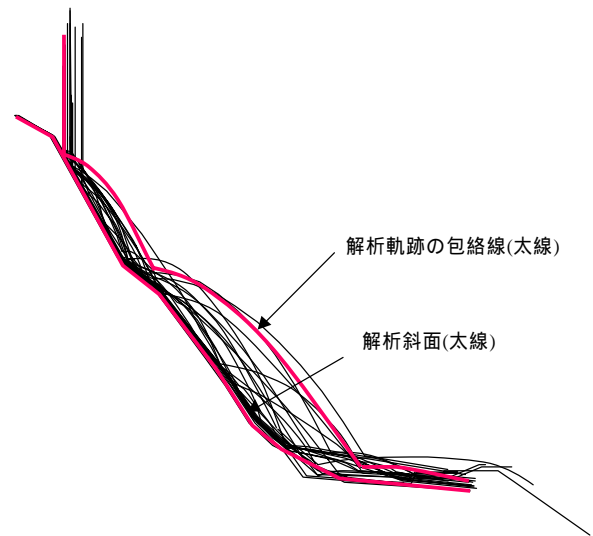


図 24 現場実験斜面と軌跡の包絡線(実験 2)

図 24は、落石実験より得られた実験 2 の軌跡図およびシミュレーションで求められた軌跡の包絡線を重ねて描いている。現場実験を十分な精度でシミュレートできている。

図25, 図26は衝突点の入射速度, 反射速度について, 実験値とシミュレーション結果を比較したものである。

シミュレーション結果は現場実験に比べてばらつきが少ない。この理由は、両者で表 3 のような相違点があるためと考えられる。

表 3 条件の相違点

	現場実験	シミュレーション
落石重量	29kg ~ 750kg	173.6kg
自由落下高 (第 1 衝突点までの落下高)	4.5m ~ 12.5m	9m
初期線速度	不明	0 m/s
初期角速度	不明	0 deg/s

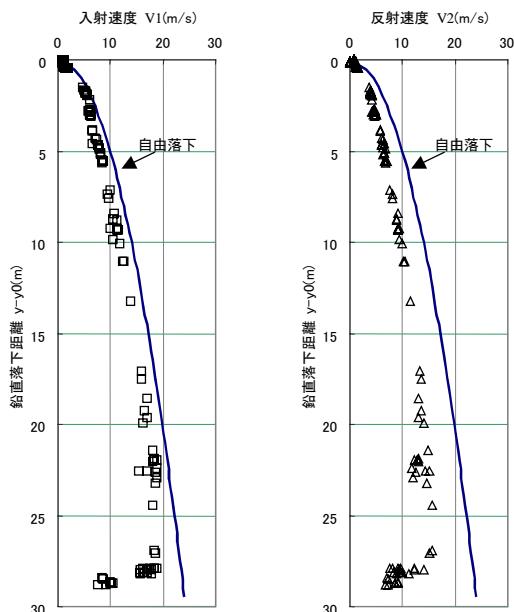


図 22 速度分布(実験 3)

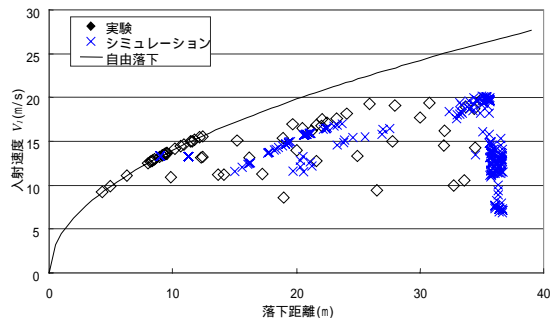


図 25 落下距離と衝突時の入射速度(実験 1, 2)

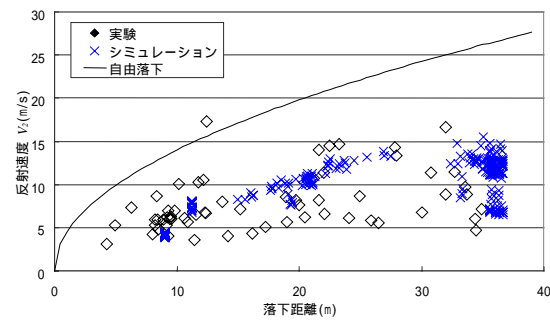


図 26 落下距離と衝突後の反射速度(実験 1, 2)

図 25, 図 26 に衝突時の入射速度, 反射速度と落下距離との関係を示す。

現場実験とシミュレーション解析とでは落石投下位置や落石の形状が異なることを考慮すると, 妥当な結果が得られたと判断できる。

落石のエネルギーは次式で表される。

$$E_T = mg(y - y_0) + \frac{1}{2}mV^2 + \frac{1}{2}I\omega^2 + \Delta E \quad (6)$$

ここに,

- $E_T$ : トータルエネルギー
- $m$ : 落石質量
- $g$ : 重力加速度
- $y - y_0$ : 落差
- $V$ : 線速度
- $I$ : 落石の慣性モーメント
- $\omega$ : 角速度
- $\Delta E$ : 損失エネルギー

図17, 図20, 図23に示したエネルギー変化図は, いずれも力学的に矛盾がない。衝突のたびにエネルギーが散逸している様子が表れている。

## 5. 結論と今後の課題

高松の落石実験斜面を対象に, (株)第一コンサルタンツが開発したDRSPにより, 運動パラメータを同定した上で, 数値シミュレーションを試みた。その

結果, 傾斜角 $30^\circ$  と $60^\circ$  の人工コンクリート斜面へ自由落下させた実験, 自然斜面の頂部から転がした実験のいずれについても実験結果を高い精度でシミュレートできた。

今後の課題としては,

高松の実験斜面で同定された運動パラメータが他の岩盤斜面へそのまま適用できるか確認する必要がある。

高松とは性状の異なる崖錐斜面, 立木のある斜面, 斜面傾斜角の緩い斜面, ラフネスの大きい斜面, 長大斜面などに適合するパラメータの同定が必要である。

斜面性状に応じたDRSP用のデフォルト値を決定する必要がある。

現地で簡単に地盤特性を評価できる試験方法を開発する必要がある。

本論文は, 社団法人日本道路協会「落石シミュレーション手法検討W.G.」(座長: 松尾修建設省土木研究所動土質研究室長) から提供されたデータをもとに, 筆者らが会議用資料として作成した成果を取りまとめたものである。シミュレーション解析に際しては, 松尾座長をはじめメンバー各位より貴重なご助言を賜った。心より感謝申し上げたい。

## 参考文献

- 1) 右城猛: 落石シミュレーション手法の開発, 地すべりと斜面崩壊に関するシンポジウム論文集, 地盤工学会四国支部, 2000.9
- 2) 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.