

落石シミュレーション解析における落石の斜面衝突現象

Impact of falling rock on field slopes used in rock-fall simulation method

小村辰彦*, 村西隆之**, 西澤謙二***, 榎谷 浩****

Tatsuhiko KOMURA, Takayuki MURANISHI, Kenji NISHIZAWA, Hiroshi MASUYA

- * 工博 東京コンサルタンツ(株) 企画部開発研究室長 (〒101-0041 東京都神田須田町 1-13-8)
- ** 東京コンサルタンツ(株) 企画部長 (〒101-0041 東京都神田須田町 1-13-8)
- *** 工修 東京コンサルタンツ(株) 企画部開発研究室 (〒101-0041 東京都神田須田町 1-13-8)
- **** 工博 金沢大学助教授 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 石川県金沢市小立野 2-40-20)

On protective plan or designs for a falling rock, it is important to predict the motion of falling rock on the slope. The purpose of the present investigation is to develop the useful simulating method for falling rock on the field slope. In this paper we explain the difference between the model used to simulate the motion of falling rock and the field slope, and we have arranged the motion of a falling rock usefully for plan or designs of the field for the Masuya's method. Concretely we have given the slope roughness and Monte Carlo simulation to the Masuya's method. Furthermore the relation between the restitution coefficients and the normal components of impact velocity has been shown by results of the field experiments in Takamatsu (1980), and the effectiveness of this relation has been shown with numerical examples for Takamatsu's experiments.

Key Word : Rock-fall kinematics, slope roughness, simulation, parameter

キーワード：落石運動，斜面の凹凸，シミュレーション，パラメータ

1. 緒 言

落石は道路の安全性を脅かす自然災害の一つであり、我が国の道路では発生頻度の高い災害でもある。道路の落石対策を行うには、落石対策便覧¹⁾に基づき、落石の運動形態、防護施設位置での運動エネルギーおよび衝撃力を求め、適切な対策工を施すこととなっている。しかし、落石現象に関しては未だ不明な点が多く、近年、積極的に落石に関する研究が行われている^{2), 3)}。

落石対策において、今後発生するであろう落石の運動機構を的確に予測し、対策工の計画に反映することは重要である。落石運動の予測手法として落石シミュレーション解析法が開発されており、適切な落石対策を行う上で、今後、広く利用されると予測される。落石シミュレーション手法には、質点モデルにてモンテカルロ法により確率的に落石運動を評価する手法^{4), 5), 6), 7)}と個別要素法や不連続変形法を用いた岩盤崩壊の解析手法を落石に応用した手法⁸⁾に大別できる。しかし、落石運動機構については不明な点が多く、落石シミュレーション解析は

一部、実用化されているが、広く利用されていない。

解析上、落石の斜面への衝突は斜面を平面として取り扱われることが多く、このとき、斜面への接触による落石エネルギーの消費を表現するために、一般に、斜面法線方向では力学上の反発係数を利用し、斜面接線方向では速度比や摩擦係数が利用される。しかし、解析手法によって、衝突時に生じる不確定を表現するために構成式や乱数の取り扱いが異なり、パラメータの定義も異なる。

したがって、実用的な落石シミュレーション手法の確立にあたり、パラメータの定義を明確にし、実斜面における不確定な現象に対して、信頼性のある表現が望まれるところである。

本論では、飛行運動、すべり運動、ころがり運動からなる落石運動のうち、斜面への落石の衝突現象に着目し、まず、榎谷らの手法⁹⁾について、衝突の表現手法を説明し、使用するパラメータを示す。次に、過去に建設省土木研究所が高松市で実施した実斜面での実験⁴⁾から解析に使用するパラメータの与え方について検討する。また、解析モデルと実斜面との相違について説明し、実斜面に

おける不確定運動に対して、梶谷らの手法に斜面のラフネスとパラメータの確率変動を取り入れた手法を提示する。最後に、高松の実験に対するシミュレーションの結果から本解析の有用性を示す。

2. 梶谷らの解析手法⁶⁾とパラメータ

本論では、質点モデルにて落石と斜面の衝突を解析する梶谷らの手法⁶⁾を用いる。

梶谷らの手法は、落石を剛体の球と仮定し、落石運動を飛行運動と斜面への衝突に分けて解析を行う。

飛行時は抵抗を受けない質点の放物線運動であり、飛行中は回転運動が一定である。解析には、全体座標系を用い、次式で表す。

$$\mathbf{M} \frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} = \mathbf{f} \quad (1)$$

ここに、

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} M & 0 & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} = \left[\frac{d^2 u}{dt^2} \quad \frac{d^2 v}{dt^2} \quad \frac{d^2 \phi}{dt^2} \right] \quad (3)$$

$$\mathbf{f} = [f_x \quad f_z \quad m] \quad (4)$$

M は落石の質量であり、 I は落石の回転慣性である。 $\mathbf{u}$ は変位ベクトルであり、 $\mathbf{f}$ は作用力ベクトルで、飛行時は $f_x = 0$ 、 $f_z = Mg$ 、 $m = 0$ となる。 g は重力加速度である。

衝突運動は、図-1の解析モデルに示すように局所座標で解析する。斜面法線方向の運動は反発係数 e より運動量の変化を求め、斜面接線方向の運動や回転運動は動摩擦係数 μ_r とこがり摩擦係数 $\mu_r = \delta/r$ を用いて、剛体の回転とすべりを考慮して運動量の変化を求める。 r は落石の半径であり、 δ は落石の回転軸と抗力 N の作用位置の偏心量である。斜面接線方向の運動と回転運動の変化を求めるに際し、落石と斜面が接する地盤に対して斜面法線方向に弾性地盤バネ K を与え、斜面法線方向の

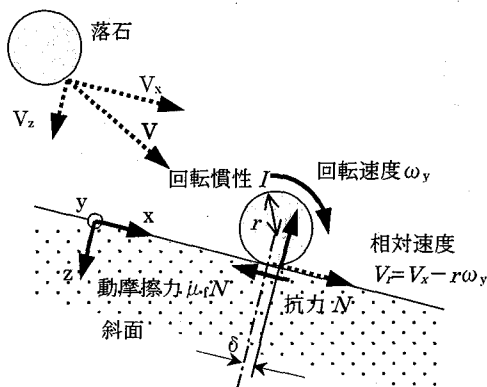


図-1 落石衝突時の解析モデル

運動を弾性振動と仮定することにより、斜面に接する落石の斜面法線方向の加速度は、

$$\frac{\partial^2 V_z}{\partial t^2} = V_{z0} \sqrt{\frac{K}{M}} \sin \sqrt{\frac{K}{M}} t \quad (5)$$

で表す。ここに、 V_{z0} は落石の入射速度の斜面法線方向成分である。斜面接線方向の運動量の変化を衝突開始より任意時間 t までの力積とすることで、任意時間 t における斜面接線方向の速度 V_x と角速度 ω_y は

$$V_x = V_{x0} - \mu_r V_{z0} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{K}{M}} t \right) \quad (6)$$

$$\omega_y = \omega_{y0} - \frac{rM}{I} (\mu_r - \mu_f) V_{z0} \left(1 - \cos \sqrt{\frac{K}{M}} t \right) \quad (7)$$

となる。 V_{x0} は落石の入射速度の斜面接線方向成分であり、 ω_{y0} は入射角速度であり、 r は落石の半径である。

落石と斜面が接している接触時間 t_1 は、1質点系振動モデルにおける固有振動の半周期と接触面における落石のすべりが止まるまで、すなわち、落石と斜面の接触面の相対速度 $V_r = V_x - r\omega_y = 0$ となるまでの時間の短い方とする。 $V_x - r\omega_y = 0$ となるまでの時間 t_r は式(5)と式(6)の連立方程式より

$$t_r = \sqrt{\frac{M}{K}} \cos^{-1} \left[\frac{\mu_f V_{z0} - \frac{r^2 M}{I} (\mu_f - \mu_r) V_{z0} - (V_{x0} - r\omega_{y0})}{\mu_f V_{z0} - \frac{r^2 M}{I} (\mu_f - \mu_r) V_{z0}} \right] \quad (8)$$

となる。したがって、接触時間 t_1 は、

$$\begin{aligned} t_1 &= t_r & \text{at } t_r &\leq \pi \sqrt{M/K} \\ t_1 &= \pi \sqrt{M/K} & \text{at } t_r &> \pi \sqrt{M/K} \end{aligned} \quad (9)$$

となり、落石が斜面を離脱するときの反射速度の斜面接線方向成分 V_{x1} と反射角速度 ω_{y1} は式(5)と式(6)に t_1 を代入することにより算出する。

したがって、梶谷らの手法に用いられる反発係数 e および動摩擦係数 μ_r は一般に力学で定義される値である。

3. 実験からの反発係数 e と地盤バネ K

建設省土木研究所が高松市で実施した実斜面における実験の結果⁴⁾から落石衝突時の反発係数と動摩擦係数について再分析する。

3.1 実験の概要

実験地は高松市近郊の土取場跡地で、斜面はシュミットハンマー試験による硬度が10~15の風化花崗岩からなり、勾配は約60°、斜面長は約35mである。ここでは、斜面上部に長さ10mで整形したコンクリートによる人工斜面を有する投石線I⁴⁾への自由落下による実験データを利用する。落石の第1衝突点は勾配30°および60°の

凹凸のないコンクリート人工斜面である。実験に用いている石は最大径が概ね 0.3m、0.5m および 0.7m の塊状または板状の花崗岩であり、初期の投石高さは 3m、6m および 9m である。

3.2 反発係数 e

自由落下後のコンクリート斜面への第 1 衝突点に着目し、斜面の凹凸に影響されていない衝突より斜面上での反発係数 e の特性を求める。 e は分析上モデル化した斜面に対する衝突前後の斜面法線方向速度比で示す。図-3 はコンクリート斜面への衝突に対する反発係数と落石速度の斜面法線方向成分 V_{z0} との関係を示す。図中、●は斜面勾配 60° への衝突であり、○は斜面勾配 30° への衝突である。図-2 より e は V_{z0} に対して依存性があることが分かる。その速度依存性は図中の回帰式で与えられる。ただし、衝突による跳ね返りは運動量で表現されるので、 e は落石質量 M にも依存すると考えられるが、この実験では質量依存性は明確ではない。実験データが希少であり、 e の速度と質量に対する依存性については課題が残される。また、A. Azzoni ら⁹⁾ が示す斜面性状に対する最大反発係数を利用して推奨値を設定することも可能である。

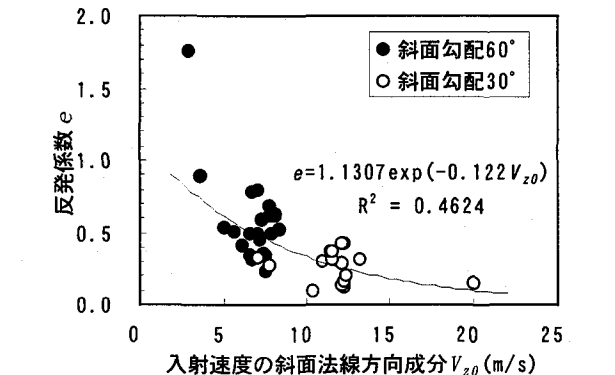


図-2 反発係数 e と入射速度の斜面法線方向成分

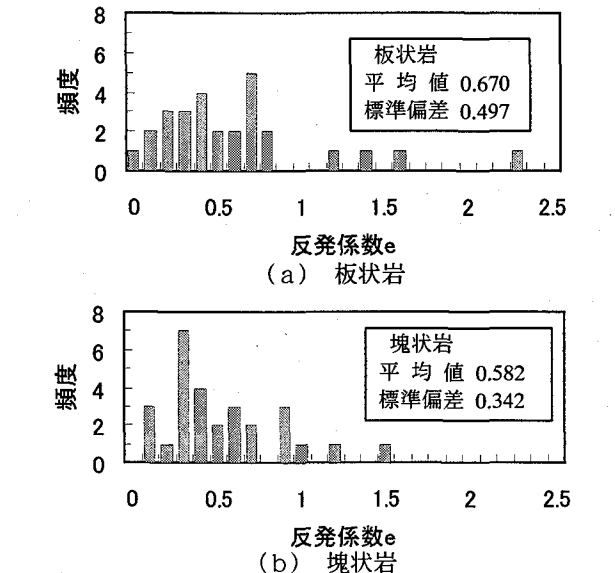


図-3 高松の自由落下実験による反発係数

実験における落石の斜面への衝突と飛び出しにより求められる反発係数 e の頻度分布を図-3 に示す。 e は斜面モデルに対して求めた値である。(a) は落石が板状岩であり、(b) は落石が塊状岩である。板状岩の方がばらつく傾向が見られる。 e の平均値と標準偏差は、

- 1) 板状岩：平均値 0.670，標準偏差 0.497
- 2) 塊状岩：平均値 0.582，標準偏差 0.342

である。 $e > 1$ となる現象が見られるが、その原因については後述する。

3.3 地盤バネ K

地盤バネ K は動的運動に対する弾性バネであるので、道路橋示方書 V 編¹⁰⁾ より地盤のせん断弾性波速度 V_s から求まる地震時の地盤反力係数 k_{v0} を用いて簡易化する。地盤バネ K についても、図-4 の球モデルに対してエネルギー保存則から次式より V_{z0} による最大沈下変位 z_B を求めることにより V_{z0} に対する依存性を与える。式中の A は接触面の投影面積である。

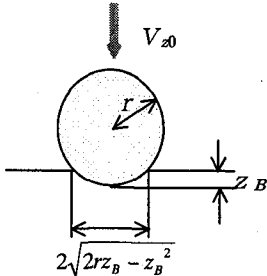


図-4 地盤バネの接触

$$\frac{1}{2} M V_{z0}^2 = \frac{1}{2} K z_B^2 \tag{10}$$

$$K = k_{v0} A = k_{v0} \pi (2 r z_B - z_B^2) \tag{11}$$

$$K = \begin{cases} k_{v0} \pi (2 r z_B - z_B^2) & z_B < r \\ k_{v0} \pi r^2 & z_B \geq r \end{cases} \tag{12}$$

4. 解析モデルと実斜面の相違と評価¹¹⁾

4.1 モデル斜面と実斜面の相違

落石運動を解析する場合、実際の斜面には大小さまざまな凹凸が存在するが、解析手法を問わず図-5のように、小さな凹凸を無視して、大きな変化点にのみ着目し、モデル化する。落石形状もまた、実際には不定形なものが多いが、球や多角形に置き換える。

図-3 に見られるように実験結果に対して、机上で図化したモデル斜面から反発係数を求めると、 $e > 1$ となる値が得られることがある。また、動摩擦係数が負の値となることや斜面の静止摩擦係数を超えることがある。

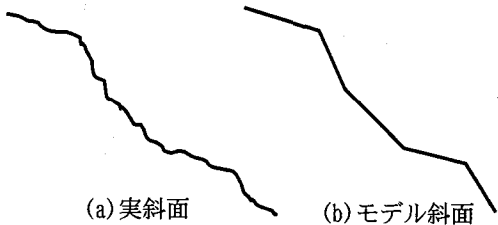


図-5 斜面のモデル化

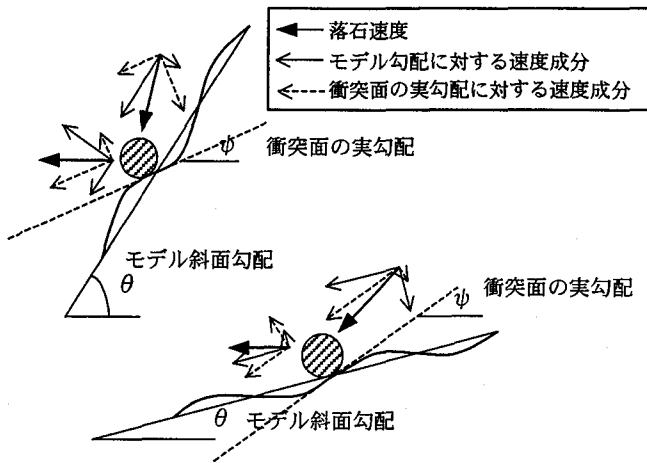


図-6 実斜面とモデル斜面への落石衝突の相違

解析上、衝突現象を力学公式により表現する限り、反発係数 e が 1 を超え、衝突により落石の総エネルギーが増大するので、実際の物理現象を正確に表現しない。このような現象が生じる理由には、図-6 に示すように、モデル斜面に対して、実斜面の表面には凹凸があり、実斜面とモデル斜面の落石衝突面の勾配に差異があることで説明できる。また、落石の形状による影響も考えられる。

4.2 斜面補正角 $\Delta\theta$

落石シミュレーション解析を行う上で、力学公式による場合には、実斜面の凹凸に関して、斜面のモデル化による見かけの勾配と実勾配との斜面補正を行うことが落石のエネルギー収支の面で必要なことである。

落石が斜面に衝突する衝突面の勾配とモデル斜面との勾配の差を斜面補正角 $\Delta\theta$ とし、高松の実験で得た反発係数の平均値 e_m 、入射速度 V_{z0e} および反射速度 V_{z1e} 、モデル斜面に対する落石の入射角 θ_{0e} および反射角 θ_{1e} を用いて、次式より求める。

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{V_{z1e} \sin\theta_{1e} - e_m V_{z0e} \sin\theta_{0e}}{V_{z1e} \cos\theta_{1e} + e_m V_{z0e} \cos\theta_{0e}} \quad (13)$$

したがって、斜面実勾配は $\psi = \theta - \Delta\theta$ となる。 θ はモデル斜面の勾配である。

図-7 にモデル斜面の勾配 θ と斜面補正角 $\Delta\theta$ の関係を示す。 θ が小さい場合に $\psi > \theta$ となり、 θ が大きい場合に $\psi < \theta$ となる傾向にある。 $\Delta\theta$ は $-25^\circ \sim 25^\circ$ の範

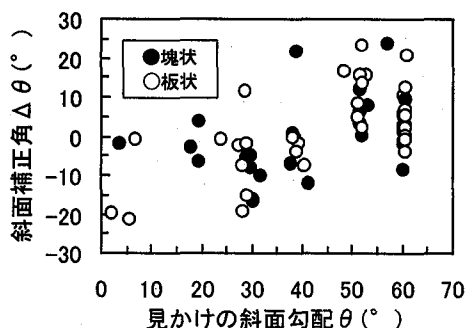


図-7 モデル斜面勾配と斜面補正角

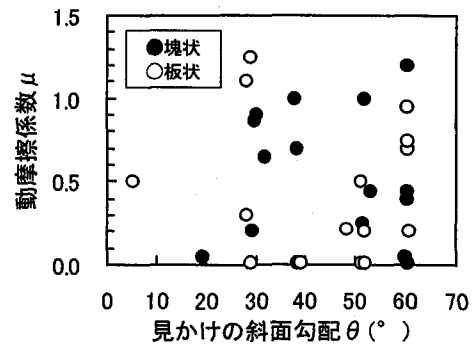


図-8 モデル斜面勾配と動摩擦係数

囲で分布する。

4.3 動摩擦係数 μ_f

μ_f は衝突時にすべりモードとなっている接触時間と斜面抗力が関与するので、2. の解析手法を用い、 e の平均値と $\Delta\theta$ を与え、実験記録の落石軌跡と解析による軌跡が一致するときの値を逆解析により求める。

図-8 にモデル斜面勾配 θ と μ_f の関係を示す。 μ_f は θ に関わらず $0 \sim 1.3$ の範囲で一様に分散する。

この解析手法では、落石を球として式(7)の地盤バネから接触時間を求めて摩擦力を算出するが、落石の形状は不定形であるために斜面に対する衝突面が角または面となるので、接触面積や埋設部の掘り起こし抵抗力の相違から実現象では摩擦力にばらつきが生じるものと考えられる。

4.4 解析のアルゴリズム

$\Delta\theta$ および μ_f は落石形状および斜面の凹凸に対して、落石の衝突位置により不確実な現象が発生することから、シミュレーションの実用化に際して、確率的に処理することが適切と言える。したがって、梶谷らの手法において、 $\Delta\theta$ と μ_f に一定の範囲で乱数を与えることで実用的な解析手法とする。図-9 に衝突現象と跳躍運動に対する解析手法のアルゴリズムを示す。 $\Delta\theta$ と μ_f の確率変動は図-7 および図-8 より一様な分散を示すことから一様乱数で与える。

5. 解析事例

5.1 解析条件

高松の実験斜面を対象にシミュレーションを行う。初期条件として、落石を斜面上方 9m から自由落下させることとし、自由落下の第 1 衝突点を勾配 60° のコンクリート斜面とする場合と勾配 30° のコンクリート斜面とする場合の 2 とおりで解析する。諸条件は以下のとおりである。

- 1) 落石形状：塊状[球形](落石径 0.5m)
- 2) 落石質量：0.170t
- 3) 初期条件：落下高 9m(斜面と落石中心間の距離)
- 4) 第 1 衝突：コンクリート斜面 60°
コンクリート斜面 30°

5)投石回数：200 回

解析上、 e は速度依存性があるものと仮定し、図-2の回帰式で与える。 e の上限値およびころがり摩擦係数 μ_r はA. Azzoni らの実験値⁹⁾より $e_{max}=0.85$ および $\mu_r=0.2$ とする。また、 $\Delta\theta$ は図-8より $-25^\circ\sim25^\circ$ の範囲で、 μ_r は図-8より $0\sim1.5$ の範囲で一様乱数を発生する。 K は実験斜面の岩質と硬度より岩級区分D₄級相当とみなし、せん断弾性波速度は $V_s=1.2\text{km/s}$ 程度¹²⁾と与

えることにより算出する。

5.2 解析結果と実験値

図-10(a)、(b)および(c)にコンクリート 60° 斜面へ投石したときの落石軌跡を示す。(a)は e を実験の平均値で一定値とした場合であり、(b)は e に速度依存効果を与えた場合であり、(c)は実験で得られた軌跡を重ねたものである。(a)および(b)より第1衝突点が 60° 斜面では e の速度依存性による影響は見られない。解析値はいずれも実験値をよく近似している。

図-11(a)および(b)は図-10の軌跡における投石位置から鉛直下方に25mの位置すなわち落下高さ25mにおける落石の跳躍高の頻度分布を示す。(a)は解析値であり、図中、□は e を実験の平均値で一定値とした場合であり、

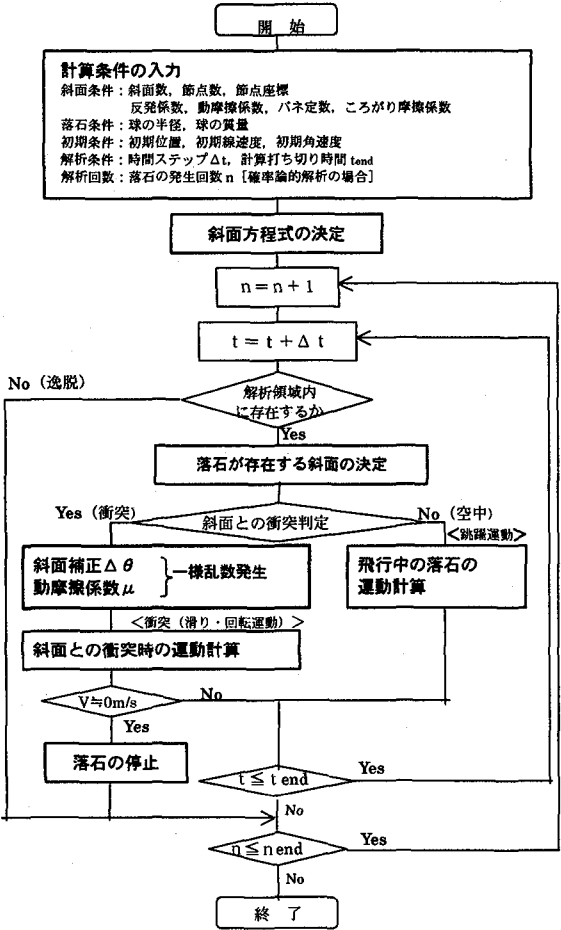
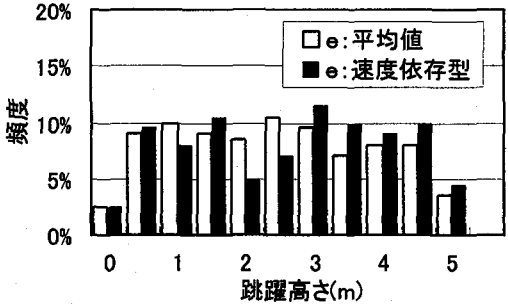
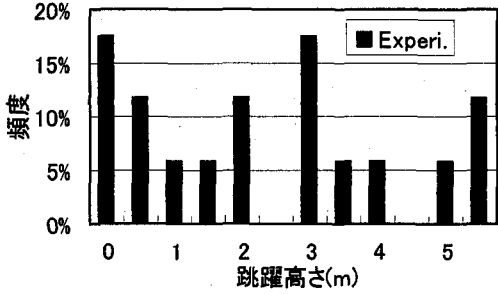


図-9 解析手法のアルゴリズム

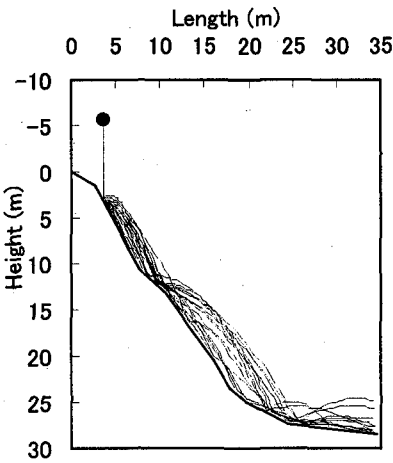


(a)解析値(落下高 25m)

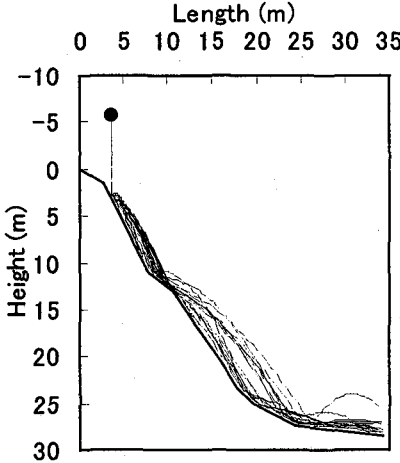


(b)実験値(落下高 25m)

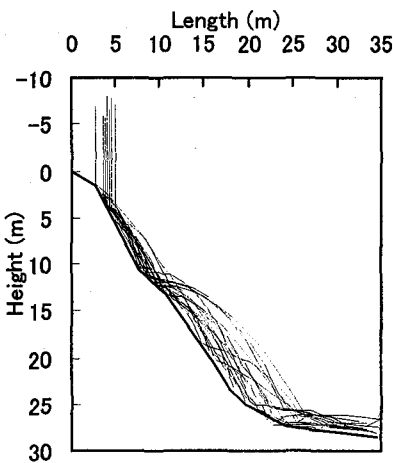
図-11 コンクリート 60° 斜面への自由落下に対する落下高 25mにおける跳躍高



(a)解析値(e : 平均値一定)



(b)解析値(e : 速度依存効果)



(c)実験記録

図-10 コンクリート 60° 斜面への投石における落石軌跡

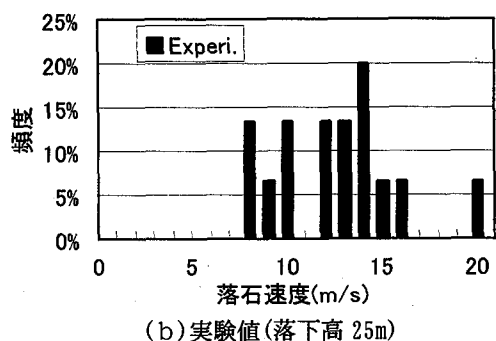
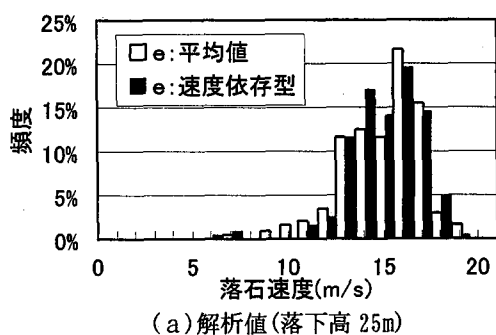


図-12 コンクリート 60°斜面への自由落下に対する落下高 25m における落石速度

■は e に速度依存効果を与えた場合である。また、(b)は実験値である。実験値のデータ総数は 17 個である。

図-12(a)および(b)は図-10 の軌跡における投石位置から落下高 25m での落石速度の頻度分布を示す。(a)は解析結果を示し、図中、□は e を実験の平均値で一定値とした場合であり、■は e に速度依存効果を与えた場合である。また、(b)は実験値である。図-11 および図-12 とともに頻度に多少のばらつきは見られるが分布形状は類似する。また、実験値は解析の分布範囲と類似する。

図-13(a)、(b)および(c)にコンクリート 30°斜面へ投石したときの落石軌跡を示す。(a)は e を実験の平均値で

一定値とした場合であり、(b)は e に速度依存効果を与えた場合であり、(c)は実験で得られた軌跡を重ねたものである。(a)の e を平均値とした場合、斜面勾配が緩い斜面で斜面からの飛び出し角が大きく、速度依存効果を考慮する(b)では(c)の実験軌跡をよく近似している。

図-14(a)および(b)は図-13 の軌跡における投石位置から落下高 25m での落石の跳躍高の頻度分布を示す。(a)は解析値であり、図中、□は e を実験の平均値で一定値とした場合であり、■は e に速度依存効果を与えた場合である。また、(b)は実験値である。実験値のデータ総数は 13 個である。(a)の□では最大跳躍量が 8m 程度であるが、■では最大跳躍量が 5.5m 程度となり、(b)の実験値とよく一致している。 e に速度依存効果を与えることにより、緩斜面からの飛び出しが制御されることが分かる。

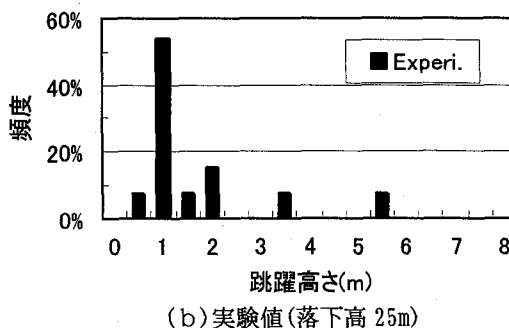
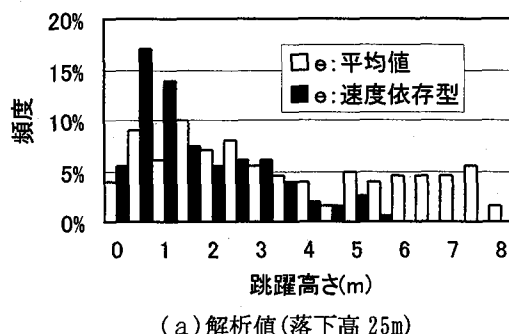


図-14 コンクリート 30°斜面への自由落下に対する落下高 25m における跳躍高

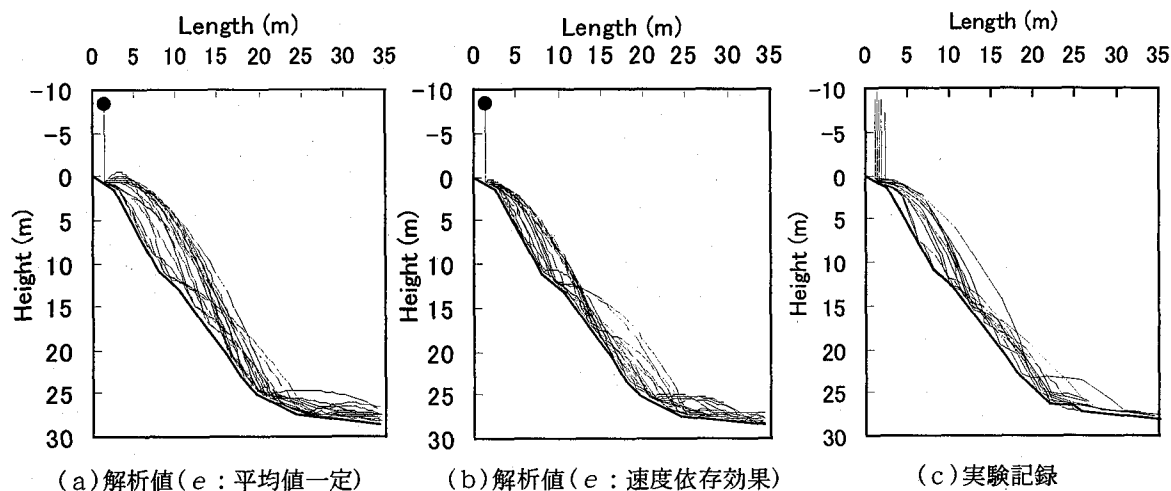
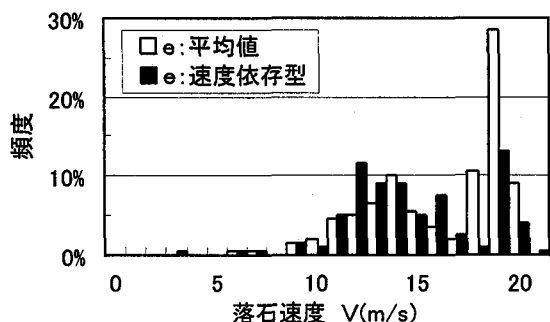
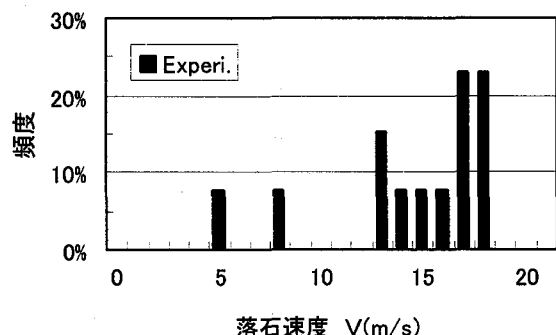


図-13 コンクリート 30°斜面への投石における落石軌跡



(a) 解析値 (落下高 25m)



(b) 実験値 (落下高 25m)

図-15 コンクリート 30° 斜面への自由落下に対する落下高 25m における落石速度

図-15(a)および(b)は図-13の軌跡における投石位置から落下高 25m での落石速度の頻度分布を示す。(a)は解析結果を示し、図中、□は e を実験の平均値で一定値とした場合であり、■は e に速度依存効果を与えた場合である。また、(b)は実験値である。(a)の解析結果より e を平均値とした場合、最大速度付近の頻度が高くなるが、速度依存効果を考慮した方が最大速度が大きくなっている。(a)はいずれも(b)の実験結果より最大速度が大きいが、実験では斜面途中で斜面上の束縛運動(ころがり・すべり)が生じており、摩擦によるエネルギーの損失が大きいと考えられる。

図-16は、コンクリート 60° 斜面への自由落下投石の場合における反発係数の速度依存効果を考慮した解析から得られた任意の 1 軌跡について、落石の投下位置から

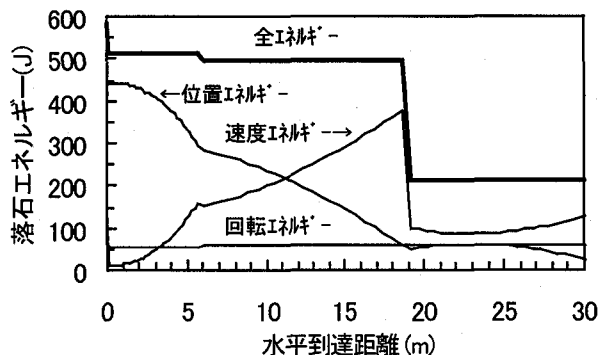


図-16 落石到達位置と落石エネルギーの変化

の水平到達位置における落石エネルギーの変化を示す。図中では全落石エネルギー、位置エネルギー、速度エネルギーおよび回転エネルギーの解析結果である。いずれも斜面への衝突後の減衰を表現している。

6. 結 語

本論では、落石シミュレーション解析の実用化に対して、梶谷らの手法において一般に力学で定義されているパラメータを使用することを提示し、実斜面とモデル化の差異から生じる課題を説明するとともに、その対処法を提案した。また、実験結果をもとに斜面上でのパラメータの特性について検証し、解析手法への導入効果を実験結果と比較した。結果は次のとおりである。

- 1) 梶谷らの手法における落石の衝突現象の解析方法を説明し、使用するパラメータが力学上の定義に従うことから、広く分かりやすく実用的であることを提示した。
- 2) 高松の実験のうち、コンクリート斜面に自由落下させる実験結果から反発係数が落石入射速度の斜面法線方向成分の大きさにより変化することを提示した。解析手法に実験からの回帰式を与えることにより反発係数の速度依存性を考慮した。また、地盤バネについても速度依存性が考慮できる式とした。
- 3) 実斜面とモデルとの相違について、高松の実験結果を基に実斜面の凹凸と落石形状の不確定性から推定し、落石衝突面の斜面補正として斜面補正角を与えて、斜面のラフネスを考慮することを提案した。実現象に近似するために、斜面補正角と動摩擦係数に一樣乱数を与えて確率論的解析手法とすることにより、より実用的な解析手法とすることができた。
- 4) 高松の実験に対して、反発係数に速度依存性を与えた場合と与えない場合をシミュレーションして、実験結果と比較した結果、斜面勾配が緩い場合に反発係数の速度依存効果を与えた方が実験結果とよく一致することを示した。また、本解析では、塊状岩を対象としたが、参考文献 11) で板状岩についても同様な結果を得ている。

本解析手法を実用化するにあたり、さらに次の事項が今後の課題となる。

- 1) 斜面上の束縛運動(すべり・ころがり)に対する実用的な評価方法の確立
- 2) 地盤に対する反発係数の速度依存性の定式化および落石質量への依存性の確認
- 3) 動摩擦係数・斜面補正角の現場状況に対する評価方法
- 4) 植生効果の考慮

謝 辞

最後に、本研究は、「落石シミュレーション手法検討WG」(日本道路協会)において検討した解析を一部、引用しております。有意義な討論と助言を頂きました委員各

位には感謝いたしますとともに、貴重な実験データを提供して頂きました建設省土木研究所の方々に深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，2000.
- 2) 土木学会衝撃問題研究小委員会：構造物の衝撃挙動と設計法，土木学会，構造工学シリーズ6，1994.
- 3) 土木学会衝撃問題研究小委員会：ロックシェッドの耐衝撃設計，土木学会，構造工学シリーズ8，1998.
- 4) 建設省土木研究所：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) 建設省土木研究所：落石防災対策に関する調査報告書(その2)，土木研究所資料第2771号，1989.
- 6) 榎谷浩・福田尚晃・堤下克彦：斜面上の落石の運動解析手法の開発，構造工学論文集 Vol.43A，pp.1589-1596，1997.
- 7) 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，1991.
- 8) Yuzo Ohnishi, Kaoru Yamamukai and Guangqi Chen：Application of DDA in rock fall analysis, Proceeding of the 2nd North America Rock Mechanics Symposium, pp.2031-2037, 1996.
- 9) A. Azzoni, G. La Barbera, A. Zaninetti: Analysis and prediction of rockfalls using a mathematical model, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr. Vol.32, No.7, pp.709-724, 1995.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1996.
- 11) 小村辰彦・村西隆之・西澤謙二・榎谷浩：落石シミュレーション解析のパラメータ設定と実斜面の凹凸評価，第5回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム講演会論文集，pp.63-68，2000.
- 12) 土木学会：軟岩－調査・設計・施工の基本と事例－，1991.

(2000年9月14日 受付)