

# 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

## A VIEW OF PARAMETER AND ROUGHNESS ON FIELD SLOP 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) 技術本部 課長 (〒168-0063 東京都杉並区和泉 3-1-8)  
 \*\* 東京コンサルタンツ(株) 技術本部 次長 (〒168-0063 東京都杉並区和泉 3-1-8)  
 \*\*\* 工修 東京コンサルタンツ(株) 技術本部 (〒168-0063 東京都杉並区和泉 3-1-8)  
 \*\*\*\* 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)

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，モンテカルロ法  
 (Rock-fall kinematics, slop roughness, simulation, parameter, Monte Carlo method)

### 1. 緒言

兵庫県南部地震や豊浜トンネル岩盤崩落事故等の発生以来、道路および構造物の安全性がよりいっそう重要視されている。平成8年度より国道をはじめとする全国の道路において、道路防災総点検が実施され、防災対策が現在も進められている。

落石も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<sup>1)</sup>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<sup>2),3)</sup>。

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り、落石シミュレーション解析法が開発されている。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<sup>4),5),6),7)</sup>と個別要素法を用いた岩盤崩壊の解析手法を落石に応用した手法に大別できる。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。

現在の落石対策の現況から落石運動を合理的に推定でき、適切な落石対策処置を行う上で、今後、落石シミュレーション手法が広く使用されるのは必至である。そこで、著者らは、より実用的な落石シミュレーション手法の確立を目指し、衝突現象の評価方法と解析に使用するパラメータについて検討する。本論では、落石シミュレーションの解析モデルと実斜面との相違とシミュレーションでの考え方について述べ、榎谷らの手法<sup>6)</sup>に斜面のラフネスを取り入れた手法を提示し、次に、解析に使用するパラメータについて過去に高松市で実施された実斜面での実験<sup>4)</sup>を基に分析し、最後に、いくつかの解析事例を用いて、本解析の有用性を示す。

### 2. 解析モデルと実斜面

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-1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、モデル化される。落石形状もまた、実際には不定形なものが多いが、球や多角形に換算される。

解析上、落石の斜面への衝突は斜面を水平面として取り扱われることが多く、このとき、斜面垂直方向落石速度成分比や斜面水平方向速度成分比をパラ

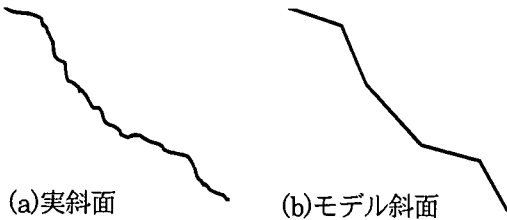


図-1 斜面のモデル化

メータとする。一般に、斜面垂直方向落石速度成分比は力学上の反発係数として取り扱われる。また、斜面水平方向速度成分比は減衰係数や摩擦係数として取り扱われ、解析手法によって定義が異なる。

これらのパラメータ値は既往の落石実験や災害事例より求められることが多いが、パラメータ値の検討において、一般的にモデル化した斜面を対象に斜面垂直方向落石速度成分比や斜面水平方向落石速度成分比を求めるので、反発係数が1を超えることや摩擦係数が負の値となることがある。しかし、解析上、衝突現象を解く際に、力学公式を用いる限り、反発係数が1を超えることや摩擦係数が負の値となることは衝突の前後で落石が有するエネルギーが増大することを意味し、実際の物理現象を表現できなくなる。このような現象が生じる理由には、図-2に示すように、実斜面上では凹凸があり、斜面モデルの勾配と実衝突面の勾配に差異が生じ、見かけ上の速度成分比を求めていることと、落石の形状による反射方向の不規則性によることが考えられる。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、前者の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はエネルギー収支の面で必要なことであ

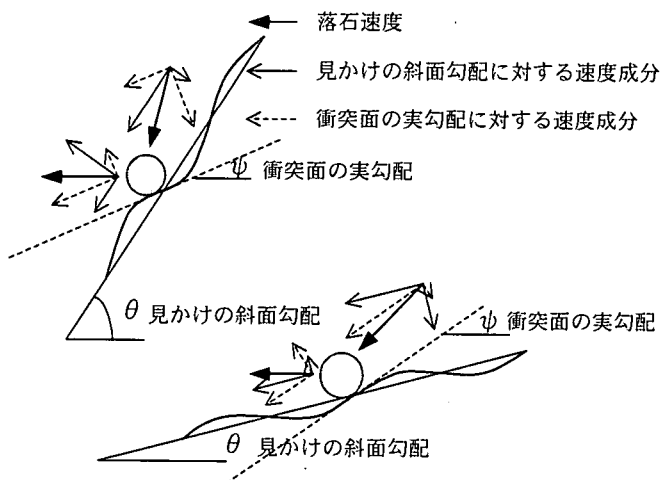


図-2 実斜面とモデル斜面への落石衝突の相違

る。後者の落石形状については、衝突現象の不規則性と衝突現象の複雑さから不確定な実現象をシミュレーションに取り組むことは実用性に欠ける。また、斜面の凹凸についても、衝突位置の不規則性から厳密解は得られない。したがって、このような不確定な現象を再現するには、斜面勾配の補正值にモンテカルロ法を用いて、シミュレーションを行うことが適切であると言える。

### 3. 斜面補正を考慮した解析手法

解析手法は、梶谷らの手法<sup>6)</sup>に斜面補正角を与え、パラメータに乱数を発生させて、モンテカルロ法を取り入れることにより実用的な解析手法に拡張する。

梶谷らの手法は、落石を剛体の球と仮定し、落石運動を跳躍運動と斜面への衝突に分けて解析を行い、斜面衝突時の運動量変化の解析は、斜面上に設けた局所座標を用いる。

落石の運動方程式は運動形態に無関係に次式で表される。

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

ここに、

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

$$\frac{d^2 \mathbf{u}}{dt^2} = \begin{bmatrix} \frac{d^2 u}{dt^2} & \frac{d^2 v}{dt^2} & \frac{d^2 \phi}{dt^2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

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

$M$ 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、 $f_x$ は斜面水平方向力、 $f_z$ は斜面垂直方向力、 $m$ はモーメントである。ただし、跳躍時は $f_x = 0$ 、 $f_z = Mg$ 、 $m = 0$ となる。

図-3に落石が斜面に衝突する時の解析モデルを示す。斜面垂直方向の落石運動は反発係数 $e$ により表現し、斜面水平方向の運動と落石の回転運動は斜面垂直方向に圧縮のみに作用する弾性地盤バネ $K$ を設定することにより、落石と斜面の接触時間から落石に作用する力積量を求め、摩擦係数 $\mu$ を乗ずることで表現する。ここに、接触時間は弾性地盤バネ $K$ の固有振動の半周期と回転と斜面水平速度の相対速

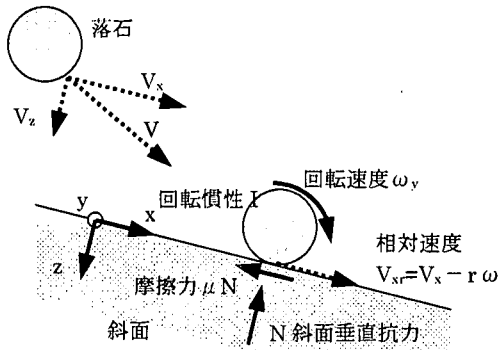


図-3 落石衝突時の解析モデル

度  $V_r$  がゼロとなるまでの時間の小さい方とする。

図-4に解析のアルゴリズムを示す。斜面補正と運動の不規則性は、斜面との衝突判定ののち、衝突する場合に、斜面の凹凸・地質および落石形状により変動すると考えられる斜面補正角  $\Delta\theta$  と摩擦係数  $\mu$  に乱数を発生させることで考慮する。その後、補正した角度にて、局所座標を設定し、衝突時の落石運動を計算する。

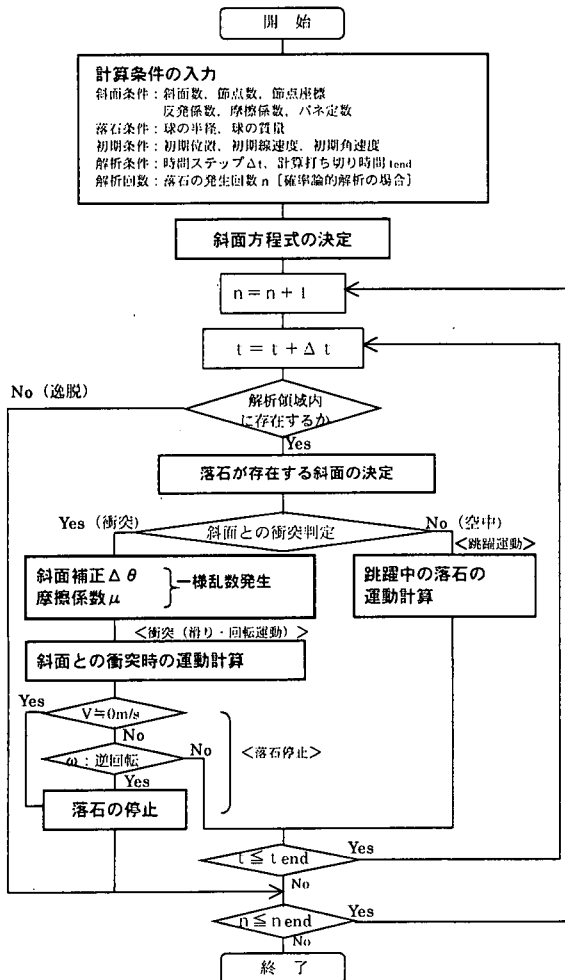


図-4 解析手法のアルゴリズム

#### 4. 実験からのパラメータ設定

落石シミュレーション解析に使用するパラメータを設定するにあたり、現場実験の1例として高松の実験結果<sup>4)</sup>を参考とする。

##### (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、初期条件が明確である自由落下による投石線Iの実験データを利用するが、投石線Iの落石第1衝突点は勾配30°および60°のコンクリートによる人工斜面である。実験に用いている石は概ね30cm, 50cm, 70cmであり、初期落下高さは3m, 6m, 9mである。

##### (2) 地盤バネKの設定

実験斜面の岩質と硬度より岩級区分  $D_M$  級相当と推測でき、せん断弾性波速度は  $V_p = 1.2 \text{ km/s}$  程度と推定される<sup>8)</sup>。Kは動的な弾性バネであるので、道路橋示方書V編<sup>9)</sup>により地震時の地盤バネと同様に算定する。このときの地盤変形量を0.02m程度とし、バネ値を  $K = 1 \times 10^6 \text{ N/m}$  とする。

##### (3) 反発係数eの設定

実験における見かけの斜面勾配  $\theta$  と反発係数  $e$  の関係を図-5に示す。図中、●が塊状岩であり、○が板状岩である。反発係数は斜面が急勾配ほどばらつく傾向にあり、 $\theta = 45^\circ$  までは  $e < 0.5$  である。図-6に反発係数の頻度分布を示すが、斜面モデルの勾配は見かけの勾配とはいえ、斜面性状の大要を示すことから、反発係数は  $e < 1$  の範囲に多く分布している。したがって、実験結果のうち、 $e < 1$  の範囲の反発係数が真の値に近似しているとみなし、解析には、 $e < 1$  の範囲で次の平均値を採用する。

- 1) コンクリート斜面：塊状 0.48, 板状 0.38
- 2) 岩盤裸地斜面：塊状 0.47, 板状 0.48

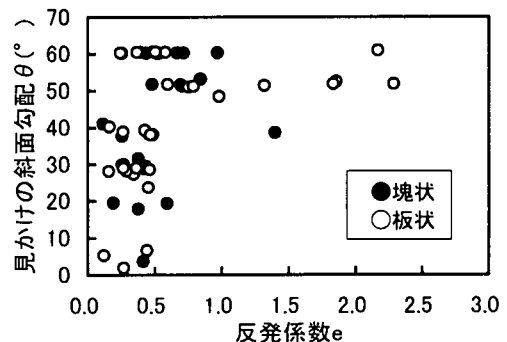


図-5 モデル斜面勾配と反発係数

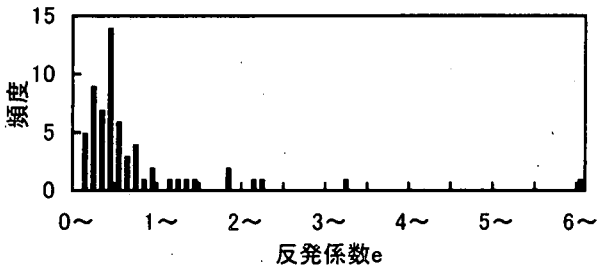


図-6 反発係数の頻度分布

#### (4) 斜面補正角の設定

斜面補正角  $\Delta\theta$  は平均反発係数  $e$  と図-5 に示す落石の入射速度  $V_1$  および反射速度  $V_2$  とモデル斜面勾配に対する落石の入射角  $\theta_1$  および反射角  $\theta_2$  より次式で算出する。

$$\Delta\theta = \tan^{-1} \frac{V_2 \sin \theta_2 - eV_1 \sin \theta_1}{V_2 \cos \theta_2 + eV_1 \cos \theta_1} \quad (5)$$

また、斜面実勾配は  $\psi = \theta - \Delta\theta$  となる。

図-7 に見かけの斜面勾配  $\theta$  と斜面補正角  $\Delta\theta$  の関係を示す。 $\theta$  が小さい場合に  $\psi > \theta$  となり、 $\theta$  が大きい場合に  $\psi < \theta$  となる傾向にある。 $\Delta\theta$  は実斜面における落石の大きさ・モデル斜面のメッシュ・斜面の凹凸から決める値であるが、高松の実験では斜面の凹凸に関する記録がない。図-7 より  $\Delta\theta$  は  $-25^\circ \sim 25^\circ$  の範囲で一様に分布するので、解析ではこの範囲で一様乱数とする。ただし、補正後の斜面勾配が落石の入射角より大きい場合は、乱数を再発生させる。

#### (5) 摩擦係数 $\mu$ の設定

摩擦係数  $\mu$  は3. の解析手法に平均  $e$  と衝突後との  $\Delta\theta$  を与え、逆解析により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算する。

図-8 に見かけの斜面勾配  $\theta$  と摩擦係数  $\mu$  の関係

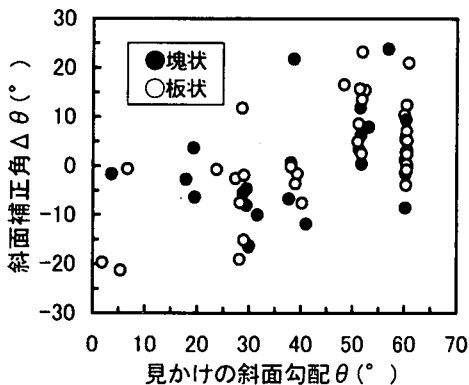


図-7 モデル斜面勾配と斜面補正角

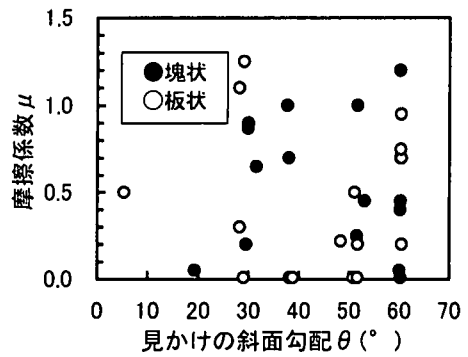


図-8 モデル斜面勾配と摩擦係数

を示す。摩擦係数は斜面勾配に関わらず  $0 \sim 1.5$  の範囲で分散する。解析上、落石軌跡が連続跳躍しない地点で  $\mu$  の逆解析を終了するので、図-8 のようにデータ数が少なくなり、落石条件に対する摩擦係数の特性が得られない。したがって、落石の衝突時の摩擦係数は  $0 \sim 1.5$  の範囲で一様乱数を発生させる。

#### 5. 解析事例

高松の実験における軌跡の1例に対して、以下の条件にて、シミュレーションを実施する。なお、板状岩塊では、回転半径を長径と短径の対角長とし、回転慣性を長径×短径の長方形の値とする。

1) 落石形状：塊状[球形](落石径 0.5m)

板状(長径 1.13m, 中径 0.85m, 短径 0.46m)

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)

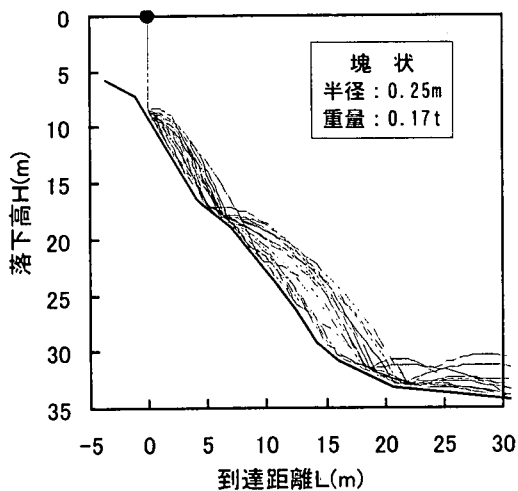
4) 第1衝突：コンクリート斜面  $60^\circ$

5) 投石回数：200回

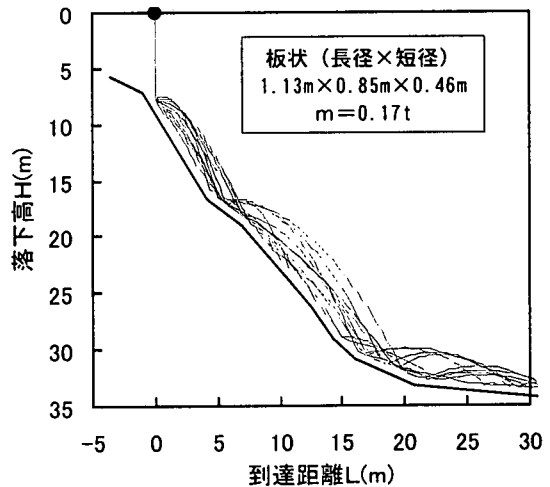
図-9 (a) および (b) に塊状岩および板状岩の落石軌跡を示す。落石の初期位置を起点に、鉛直下向きに落下高  $H$ 、水平方向に到達距離  $L$  とする。軌跡では塊状と板状による違いは見られない。いずれも、コンクリート  $60^\circ$  斜面に衝突後、コンクリート斜面末端の約  $45^\circ$  の岩盤斜面付近で第2衝突点となる。

図-10(a), (b) および (c) に初期位置からの落下高 15m, 20m および 25m での落石の跳躍高の頻度分布を示す。図中、■は塊状であり、□は板状である。分布形態は塊状と板状ともに一様な分布を示す。落下高 20m では第2衝突直後であるために、跳躍量がやや低くなっている。

図-11(a), (b) および (c) に落下高 15m, 20m および 25m での落石の速度分布を示す。図中、■は塊状であり、□は板状である。速度も分布形態は塊状と



(a) 塊状岩塊(落石径 0.5m)



(b) 板状岩塊(長径1.13m・中径0.85m・短径0.46m)

図-9 解析による落石軌跡図

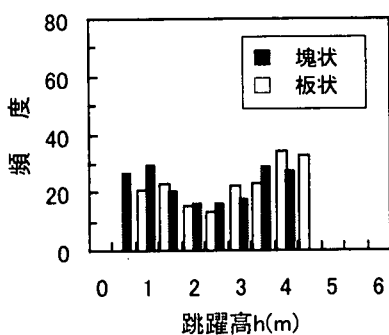
板状とも同様で、跳躍量とは異なり、正規分布に近似した分布となる。

図-12 に落下高別に跳躍高さの分布範囲を示す。図中、●は塊状の平均値で、○は板状の平均値であり、-は最大値と最小値である。最小値はころがりまたはすべりの状態で塊状と板状の違いは落石径である。跳躍量は板状の方が若干大きくなる。

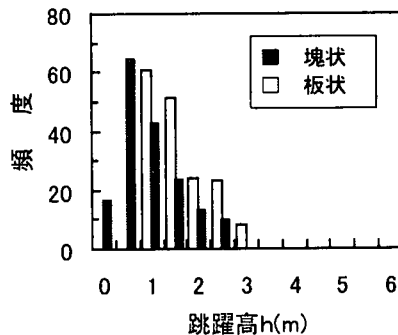
図-13 に落下高別に落石速度の分布範囲を示す。

図中、●は塊状の平均値で、○は板状の平均値であり、-は最大値と最小値である。平均値は塊状と板状ともほぼ一致するが、板状の速度分布幅が広がっている。

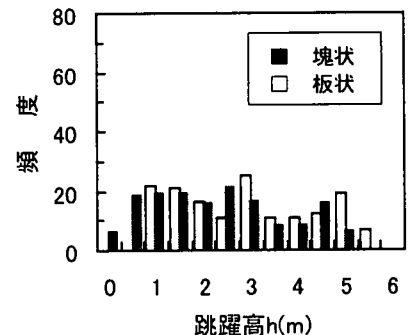
図-14(a)および(b)に塊状岩および板状岩の到達位置に対するエネルギーを示す。図中は全落石エネルギー、位置エネルギー、速度エネルギーおよび回転エネルギーの解析結果である。いずれも斜面への



(a) 落下高 H=15m

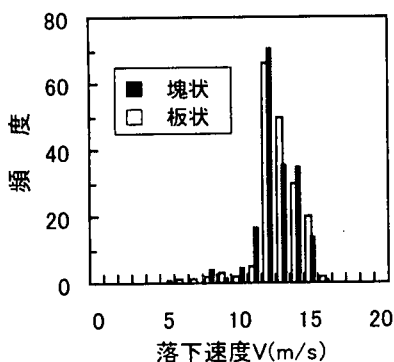


(b) 落下高 H=20m

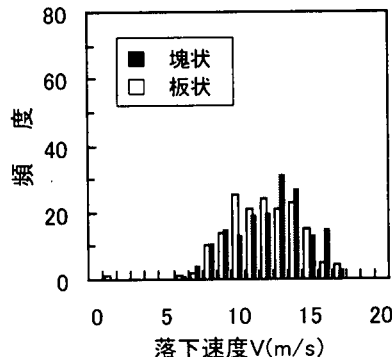


(c) 落下高 H=25m

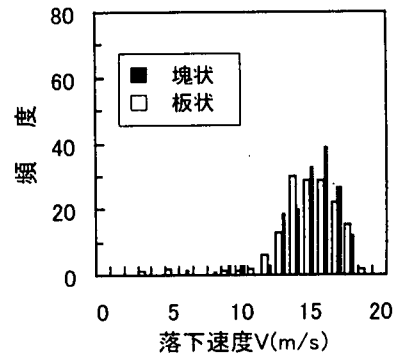
図-10 跳躍高の頻度分布



(a) 落下高 H=15m



(b) 落下高 H=20m



(c) 落下高 H=25m

図-11 落石速度の頻度分布

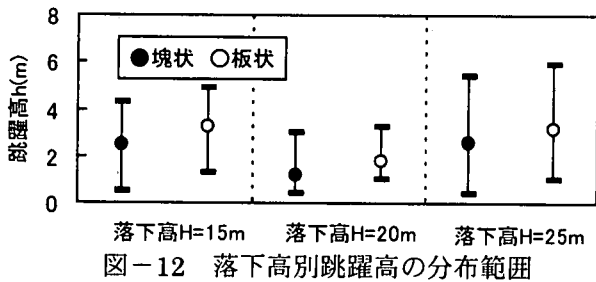


図-12 落下高別跳躍高の分布範囲

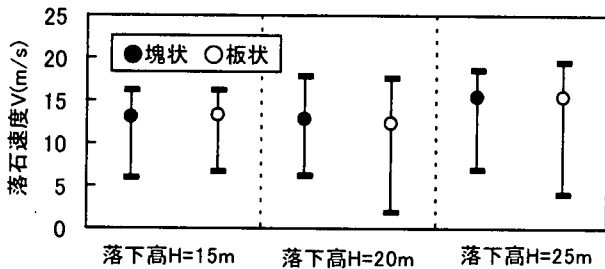
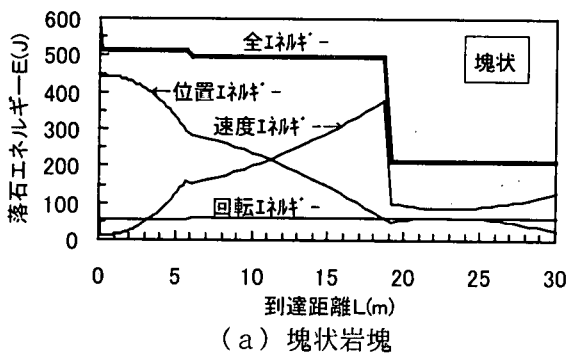
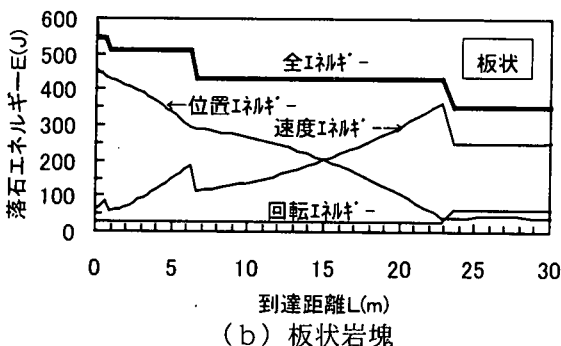


図-13 落下高別落石速度の分布



(a) 塊状岩塊



(b) 板状岩塊

図-14 落石の到達位置とエネルギー変化

衝突後の減衰を表現している。塊状に比べ、板状の方が斜面への衝突による速度の減衰が大きく、斜面下方の緩勾配斜面での衝突で回転エネルギーが増す。図-14より速度エネルギーが低下し、回転エネルギーに転化している傾向が分かる。

## 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、実斜面とモデル化に関する課題を提示し、その対処法を提案とともに一実験例を基にパラメー

タの設定と解析を行った。結果は次のとおりである。  
1) 実斜面とモデルとの相違については、落石衝突面の斜面補正にて実現現象に近似し、モンテカルロ法にて簡易的に不確定現象を表現することでより実用的な解析手法とすることができた。

2) パラメータの設定方法と考え方を提示した。設定方法は論理的であるが、一実験例では実用化に対してデータ不足である。反発係数および摩擦係数は斜面勾配や落石速度との関連について、さらに追究が必要である。また、斜面補正角については、斜面の凹凸と落石径を含めた物理的な定義が望まれる。  
3) 回転慣性と落石径を変化させることにより、塊状岩と板状岩を想定した解析事例を提示した。解析の結果からは形状による顕著な相違は見られないが、パラメータの与え方や実験値との比較等の検討により解析手法の実用化に対する機能の拡張性が期待できる。さらに、植生効果を考慮するなどの機能の向上も今後の課題である。

最後に、本研究は、「落石シミュレーション手法検討WG」において検討した解析を拡張したものです。委員各位には有意義な討論と助言を頂きました。また、建設省土木研究所に貴重な実験データを提供して頂きました。ここに、謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：落石対策便覧，1983.
- 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) 土木学会：軟岩-調査・設計・施工の基本と事例-，1991
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書V耐震設計編，1996.