

### Ⅲ－8 落石の反発係数に関する一考察

(株)第一コンサルタンツ 右城 猛・篠原昌二

#### 1. まえがき

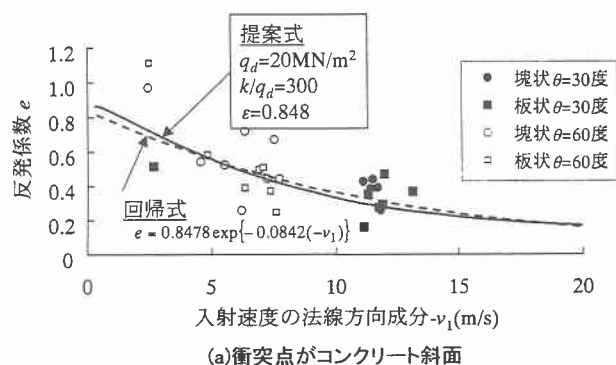
斜面を落下する落石の運動には滑り、転がり、跳躍、衝突があるが、衝突時の反発係数が軌跡や速度に対して最も大きな影響を及ぼす。従来、落石シミュレーション解析では、反発係数を地盤の特性値として取り扱われてきた。しかし、反発係数は地盤の変形特性以外に落石の衝突速度にも大きく依存すると考えられる。こうしたことから、著者は、地盤の荷重－変位関係を指数関数でモデル化し、エネルギー則を用いた反発係数の算定式を提案してきた<sup>1)</sup>。

本文では、建設省土木研究所が昭和55年に高松で行った落石実験<sup>2)</sup>をもとに、反発係数が速度と斜面ラフネスに大きく依存することを示す。また、提案式によるシミュレーション解析についても紹介する。

#### 2. 反発係数の提案式

反発係数  $e$  は式(1)で算出できる。記号の詳細は文献1)

$$\left. \begin{aligned} e &= \frac{1}{v_1} \sqrt{\frac{\varepsilon \cdot N^2}{MAk} - 2g\delta \cos\theta} \\ N &= q_d A \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{k}{q_d}\delta\right) \right\} \\ \delta &= \frac{q_d}{k} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{k}{q_d}\delta\right) \right\} - \frac{Mv_1^2}{2q_d A} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$



#### 3. 反発係数と斜面ラフネス

高松の落石実験斜面は、斜面勾配約  $60^\circ$  斜面長約 35m の切土法面で、地質は風化花崗岩である。表面は微小の窪みが存在するがほぼ一様勾配になっている。斜面上部にコンクリートを打設し(図3)、トラッククレーンで塊状および板状落石をコンクリート斜面に自由落下させ、軌跡を測定している。その中から 30 ケースを抽出し軌

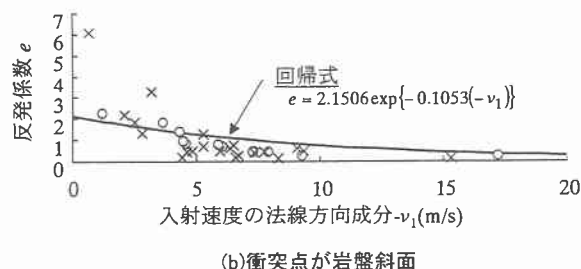


図1 反発係数

跡図から逆解析によって、反射速度、反発係数、減衰係数などを求めた。

図1に斜面衝突時の入射速度の法線方向成分と反発係数の関係を示す。両者の関係は、指数関数で近似される。法線方向速度の増加に伴い、反発係数は減少する。衝突速度が大きいほど地盤変形によるエネルギー損失が大きくなるためと考えられる。岩盤斜面は風化花崗岩であり、コンクリート斜面に比べて硬度が小さい。それにも関わらず反発係数が大きくなっている。岩盤斜面のラフネス、衝突時の地盤変形が原因で、実際よりも大きい見掛けの入射角が測量されたものと考えられる。

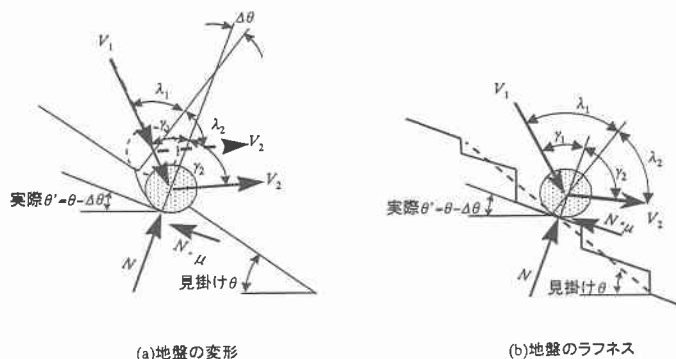


図2 落石の入射角と反射角

見掛けの入射角を  $\lambda_1$ 、反射角を  $\lambda_2$ 、見掛けの斜面傾斜角を  $\theta$ 、真の斜面傾斜角を  $\theta'$ 、真の反発係数を  $e'$  とすれば、斜面ラフネス  $\Delta\theta$  は式(2)で得られる。

$$\Delta\theta = \theta - \theta' = \tan^{-1} \frac{V_2 \cos \lambda_2 - e' V_1 \cos \lambda_1}{V_2 \sin \lambda_2 + e' V_1 \sin \lambda_1} \quad (2)$$

真の反発係数は不明であるので、コンクリート斜面から得られた回帰式を真としてラフネスを算定し、統計処理すると表 1 が得られる。シミュレーション解析に用いる衝突点の傾斜角 $\theta'$ を、正規分布とみなし、その確率密度関数の 95%信頼区間で乱数を発生させて決定する。

表1 斜面ラフネス $\Delta\theta$

| 斜面の種類                    | 平均値 $m$      | 標準偏差 $\sigma$ |
|--------------------------|--------------|---------------|
| コンクリート $\theta=30^\circ$ | $0.12\theta$ | $0.374\theta$ |
| コンクリート $\theta=60^\circ$ | 0.00         | $0.075\theta$ |
| 岩盤                       | $0.13\theta$ | $0.17\theta$  |

$$\theta' = \theta - \Delta\theta = \theta - m \pm 1.96\sigma$$

#### 4. シミュレーションの条件

斜面の断面および投石条件を図 3 に示す。地盤条件は、バネ定数  $k=6,000\text{MN/m}^3$ 、極限支持力度  $q_d=20\text{MN/m}^2$ 、除荷時地盤剛性硬化率  $\varepsilon=0.848$ 、摩擦係数はコンクリート斜面 $\mu=0.5$ 、岩盤斜面 $\mu=0.25$ とした。 $k$ と $q_d$ はコンクリート斜面から得られた反発係数の回帰式と近似させるように試行錯誤的に決定した(図 1(a))。

#### 5. シミュレーション結果

図 3 に衝突時入射速度分布を示す。シミュレーション結果は、限られた所にデータが集中しているが実験は広範囲に分散している。これは投石条件の違いにある。シミュレーションは投石位置を固定しているが、実験は 30 ケース全てで投石位置が異なるためである。このことを考慮すれば実験結果を精度よくシミュレートできているといえよう。

シミュレーション解析より得られた軌跡図を図 4(a)に示す。シミュレーションで得られた軌跡の包絡線を落石実験の軌跡図と比較すれば図 4(b)となる。解析で得られた包絡線は、実験軌跡をほぼ包絡している。

#### 6. あとがき

本文は、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：松尾治建設省土木研究所動土質研究室長)の会議用に作成した資料の一部である。

#### 参考文献

- 1) 右城猛, 松本洋一：落石シミュレーション解析における運動定数に関する考察, 土木学会四国支部講演概要集, 1999.
- 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.

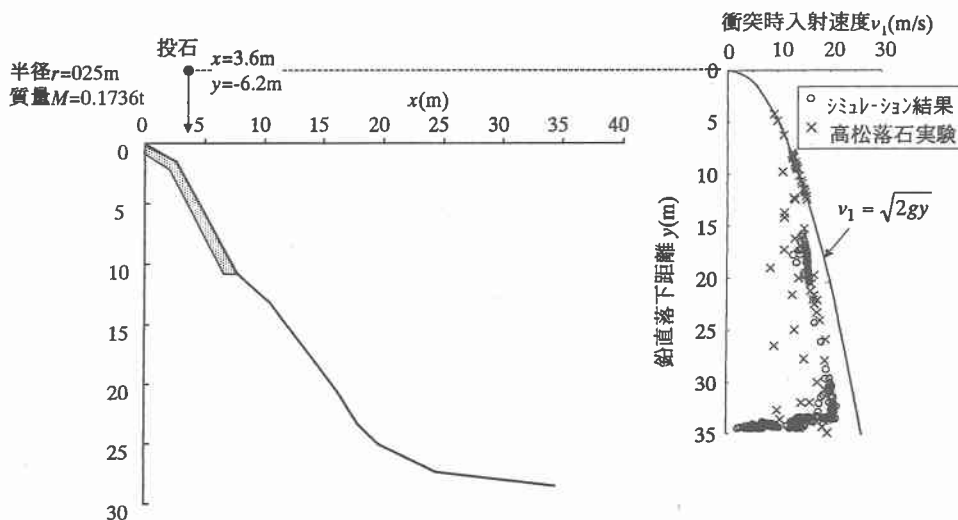


図3 シミュレーション斜面と入射速度分布

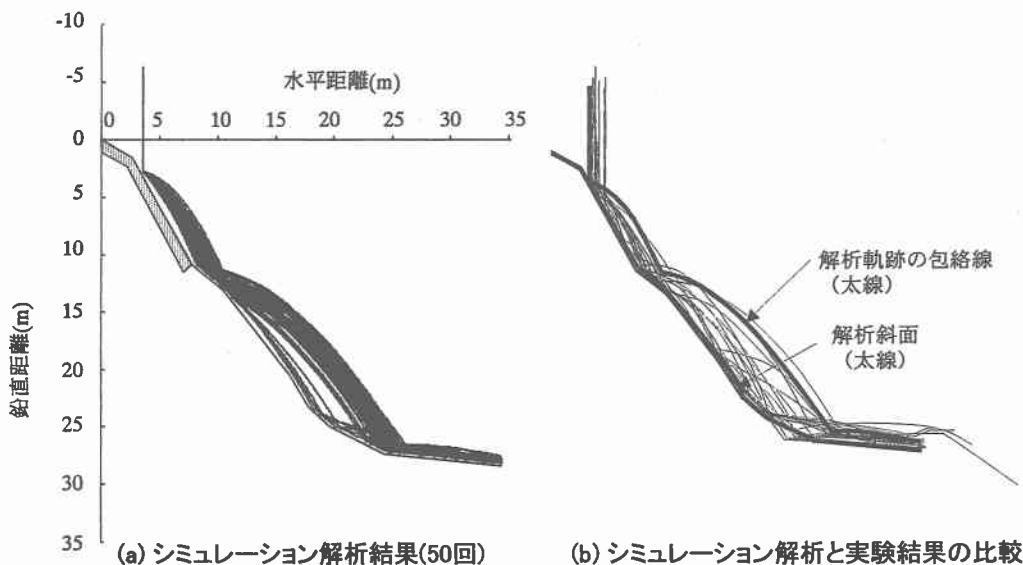


図4 シミュレーションによる軌跡図, 実験と解析との落石軌跡の比較(細線が実験)