

Ⅲ－9 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

(株)第一コンサルタント 正会員 右城 猛

(株)第一コンサルタント 正会員 松本洋一

1. まえがき

筆者らは、斜面を落下する落石の運動を予測する目的で、モンテカルロ法を用いたシミュレーション解析法を提案している。落石が斜面に衝突し再び跳躍する場合、衝突後の速度は反発係数 e と減衰係数 ρ で評価することにしているが、その力学的検討は行っていない。

本研究では、エネルギー理論を適用し e と ρ の定式化を試み、その提案式の妥当性を検証したものである。

2. 反発係数と減衰係数の定式化

落石が V_1 の速度で斜面へ衝突し、再び V_2 の速度で跳躍する様子を模式的に示せば図-1となる。

地盤の斜面垂直方向の荷重・変位関係を式(1)の指数関数で表されるものと仮定し、衝突前の斜面垂直方向運動エネルギーと地盤の変形エネルギーが等しいものと仮定すれば、式(2)が導かれる。

$$P = P_a \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{k}{P_a} \delta_\eta\right) \right\} \quad (1)$$

$$E_{\eta 1} = \int P d\delta_\eta = P_a^2 \left\{ \frac{\delta_\eta}{P_a} - \frac{1 - \exp\left(-\frac{k}{P_a} \delta_\eta\right)}{k} \right\} = \frac{1}{2} M V_{\eta 1}^2 \quad (2)$$

ここに、 P_a は地盤の支持力、 k は地盤のバネ定数、 M は落石の質量である。式(1)、式(2)より δ_η 、 P を決定することができる。

また、図-2(a)のcabの面積が回復エネルギーであるので、これが衝突後の斜面垂直方向運動エネルギーに等しいと仮定すれば、反発係数が式(3)のように導かれる。

$$e = \frac{V_{\eta 2}}{V_{\eta 1}} = \frac{P}{V_{\eta 1}} \sqrt{\frac{1}{Mk}} \quad (3)$$

一方、斜面方向の摩擦力 $P\mu$ と変位 δ_ξ の関係を図-2(b)のように仮定すると、衝突時に消費される斜面方向の運動エネルギー ΔE_ξ は式(4)で与えられるので、減衰係数は式(5)となる。なお、式(4)、(5)に ρ があるので、試行錯誤的に ρ を決定する必要がある。

$$\Delta E_\xi = \frac{1}{2} \delta_\xi P \mu = \frac{1}{2} \delta_\eta \frac{V_{\xi 1}}{V_{\eta 1}} \left(1 + \frac{\rho}{e} \right) P \mu < \frac{1}{2} M V_{\xi 1}^2 \quad (4)$$

$$\rho = \frac{V_{\xi 2}}{V_{\xi 1}} = \sqrt{1 - \frac{2\Delta E_\xi}{M V_{\xi 1}^2}} \quad \left(\because \frac{2\Delta E_\xi}{M V_{\xi 1}^2} < 1.0 \right) \quad (5)$$

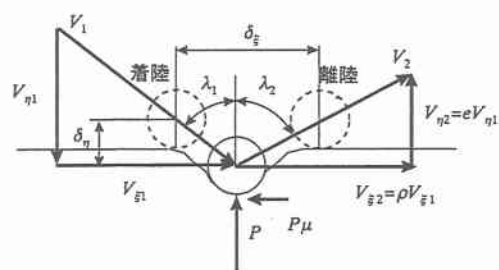


図-1 落石の衝突による地盤の変形

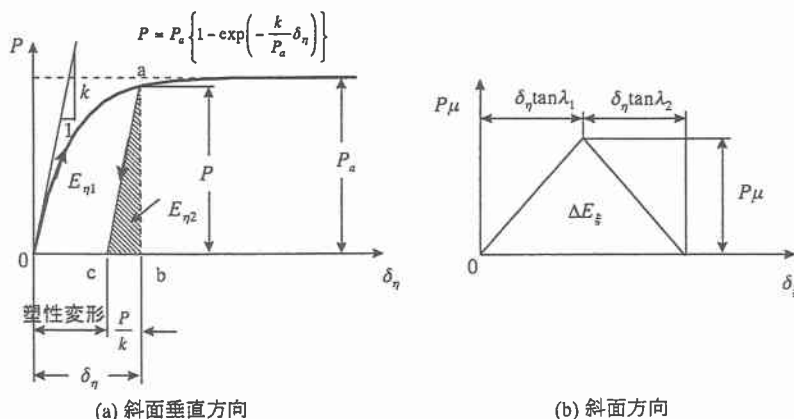


図-2 荷重変位関係

3. 試算

落石重量 $W=1\text{kN}$ ，質量 $M=0.102\text{t}$ ，地盤支持力 $P_a=100\text{kN}$ ，バネ定数 $k=4\text{MN/m}$ ，入射角 $\lambda_1=60\text{deg}$ の条件で試算した結果を図-3 に示す。

図-3(b)は入射速度の斜面垂直方向成分と反発係数の関係を，図-3(c)は入射速度の斜面方向成分と減衰係数の関係を計算した結果である。反発係数は速度が大きくなるにしたがって減少することが，減衰係数は逆に増大し一定値に収束することが分かる。

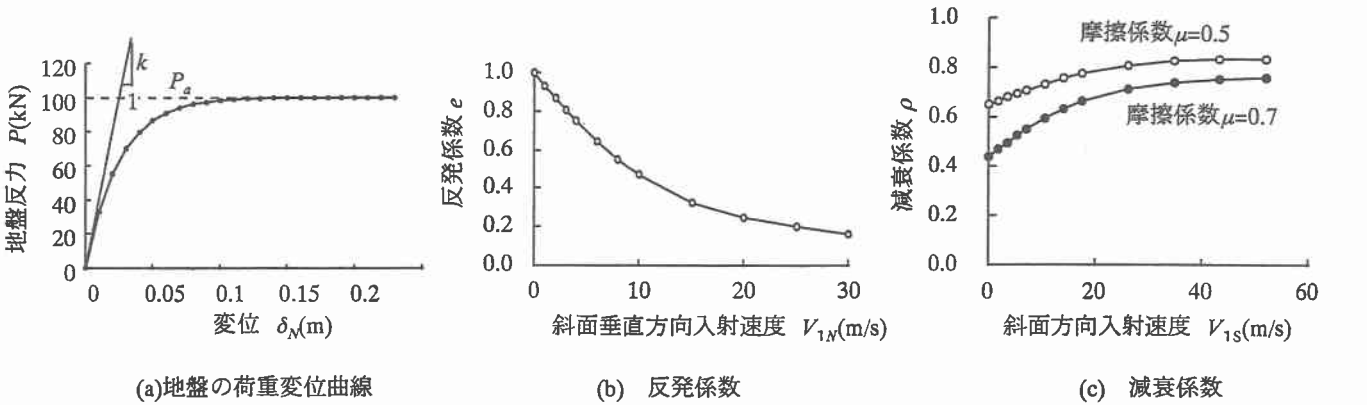


図-3 反発係数，減衰係数

図-4 は直径 0.5m の落石 ($M=0.17\text{t}$) と直径 1.0m の巨石 ($M=1.36\text{t}$) を凹凸のない傾斜角 45 度の様な斜面に 5m の高さから自由落下させた場合のシミュレーション結果を示したものである。地盤の支持力は $P_a=1.0\text{MN}$ ，バネ定数は $k=40\text{MN/m}$ ，摩擦係数 $\mu=0.7$ である。

直径 1.0m の巨石の跳躍量は，直径 0.5m の落石に比べておよそ 1/2 になっている。速度も小さくなっている。また，両者とも跳躍量は，落差が大きくなるにしたがって小さくなり，最終的に線運動へ移行することになる。

4. あとがき

既往の現場落石実験や室内模型実験などから，地盤が固いほど，落石径が小さいほど跳躍量や速度が大きくなること，跳躍量は落差と共に減衰することが明らかにされていたが，反発係数や減衰係数を斜面定数と見なした従来の解析モデルでは，こうした落石の運動をシミュレートすることができなかった。

本研究で提案したエネルギー理論に基づいた反発係数，減衰係数を適用すれば，実際の落石の運動を高い精度でシミュレートできる可能性が高い。今後は，模型実験，既往の落石実験に本シミュレーションを適用し，提案式の妥当性を更に詳細に検証するとともに，解析に用いる支持力，変形係数，摩擦係数の決定方法に関する研究も進めてゆく必要があると考えている。

