

地盤変形によるエネルギー吸収を考慮した落石シミュレーション

(株)第一コンサルタンツ ○筒井秀樹
 (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

筆者らは、斜面を落下する落石の運動を予測する目的で、質点系力学に基づいたシミュレーション解析法を提案している。このシミュレーションでは、落石が斜面へ衝突するときの反発係数 e (斜面垂直方向速度比) と減衰係数 ρ (斜面方向速度比) が大きく影響する。このため、反発係数と減衰係数の推定精度を高めるべくエネルギー理論による定式化の研究を行ってきた。

本論文では、建設省が高松で行った落石実験斜面について、提案式で求めた反発係数と減衰係数を用いたシミュレーション解析を行い、提案式の妥当性を検証する。

2. 反発係数と減衰係数の算定法

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すれば、地盤の変形エネルギー E_{M1} は式(2)となる。これが衝突前の斜面垂直方向運動エネルギー $1/2Mv_1^2$ に等しいとおけば、式(1)、式(2)より δ_N , N , E_{M1} を決定することができる。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。

$$N = P_a \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{k}{P_a} \delta_N\right) \right\} \quad (1)$$

$$E_{M1} = \int P d\delta_N = P_a \delta_N - \frac{P_a^2}{k} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{k}{P_a} \delta_N\right) \right\} \quad (2)$$

また、図-1(d)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 $1/2Mv_2^2$ に等しいと仮定すれば、反発係数 e が式(3)

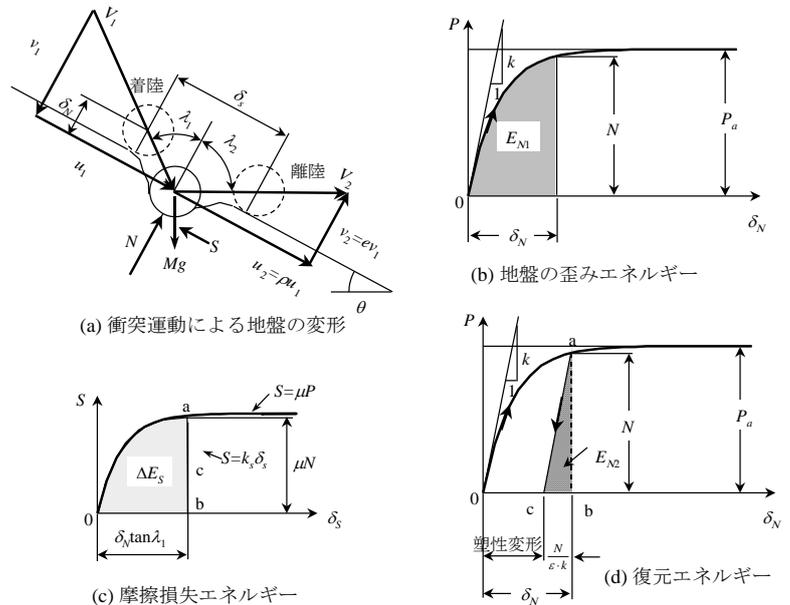


図-1 反発係数と減衰係数の算定法

$$e = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{v_1} \sqrt{\frac{\epsilon N^2}{kM} - 2\delta_N g \cos\theta} \quad (3)$$

一方、斜面方向の摩擦係数を μ とすれば、衝突時の圧縮期間に消費される斜面方向の運動エネルギー ΔE_s 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。

$$\Delta E_s = \mu P_a \left[\delta_N \tan\lambda_1 - \frac{P_a}{k} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{k}{P_a} \delta_N \tan\lambda_1\right) \right\} \right] \quad (4)$$

$$\rho = \frac{u_2}{u_1} = \sqrt{1 - \frac{2\Delta E_s}{Mu_1^2}} \quad (5)$$

3. シミュレーション結果

図-2 と図-3 は建設省が高松の切り取りのり面で行った落石実験結果である。2つの実験ともトラッククレーンで質量 0.47t の岩塊を斜面上から自由落下させたものである。

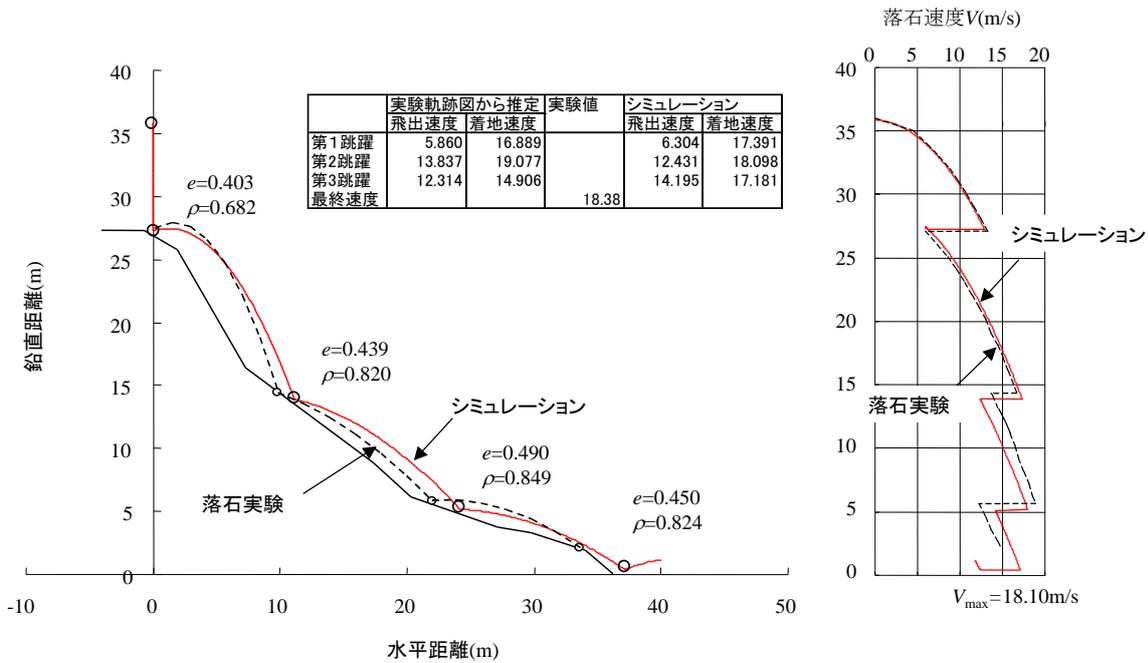


図-2 シミュレーション結果その1

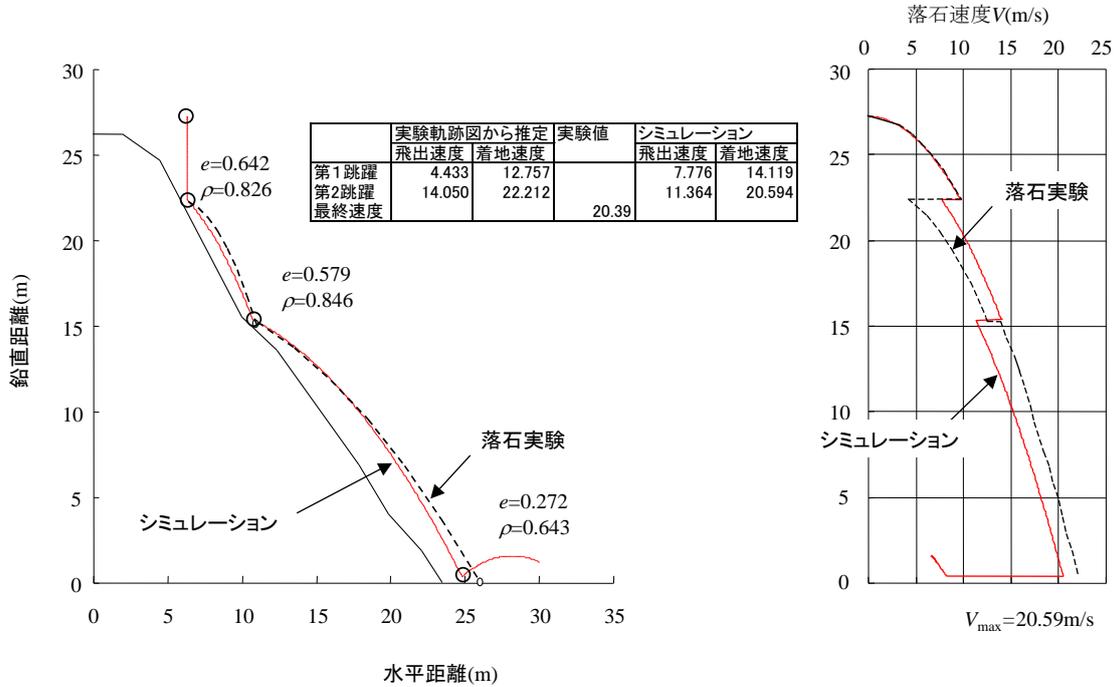


図-3 シミュレーション結果 その2

シミュレーションはいずれの断面に対しても、 $P_a=4MN$, $k=1000MN/m$, $\varepsilon=0.7$, $\mu=0.4$ の条件で行った。これらのパラメータは逆解析によって求めたものである。

適当なパラメータを与えれば、落石の跳躍軌跡、落下速度とも高い精度でシミュレートできることが明らかになった。

4.あとながき

本解析では落石の角速度が考慮されていない。衝突時に回転エネルギーが速度エネルギーに変換されることから、これを考慮した運動方程式に改良する必要がある。また、運動のパラメータを斜面の土質定数から推定する方法についても研究する必要があると考えている。さらに将来的には、衝突時のエネルギー散逸として地盤の塑性変形以外に波動によるエネルギー散逸も評価すべきと考えている。

