

落石運動に関する個別要素解析と室内簡易模型実験

鳥取大学大学院 精山 誉志

サンイン技術コンサルタント 谷口 洋二

鳥取大学工学部 木山 英郎 西村 強

1. はじめに

落石は、道路、鉄道、住宅地へ被害をもたらす斜面災害の中の1つである。落石の斜面上での挙動を予測することは落石対策上重要な問題である。これまでに経験則に基づく方法や数値シミュレーションによる方法などが研究されてきている¹⁾。

本研究では、斜面への球の落下反発実験と個別要素解析を実施した。反発係数 e とVoigtモデルの粘性係数 η の関係を示す式を用いて個別要素解析の係数決定に利用した。その結果、使用した e - η 関係式は有効であることさらに著者らが使用している個別要素プログラムは実験結果を表現できることがわかった。

2. 反発係数と粘性係数の関係

斜面と接触・非接触を繰り返しながら運動する質点の接触時の運動方程式を以下のように書く。

$$m\ddot{y} + \eta\dot{y} + Ky = mg \quad (1)$$

m ：質量， K ：剛性係数， g ：重力加速度

式(1)は、減衰振動を示し、図-1は解の一例を描いたものである。これは、 $t=0$ において $y=y_0$ ， $v_0=0$ の例であるが、 $t=t_1$ において、 $y=0$ ， $\dot{y}=v_1$ の条件を与えたとしても、 $t>t_1$ の解は図中のように得られる。そこで、 $y=0$ に接触平面を仮定して、質点が破線のような空中落下ののち、 $t=t_1$ で平面と接触を開始したとすれば、太線をたどり、 $t=t_2$ で非接触となる。そして、質点の斜面との接触時間は、 $dt=t_2-t_1=T_d/2=\pi/\omega_d$ すなわち減衰固有周期の1/2となることがわかる。速度に対する解は、 $\bar{t}=t-t_1=0$ で、 $y=0$ ， $\dot{y}=v_1$ とすれば、

$$\dot{y} = \left(\cos \omega_d \bar{t} - \frac{\beta v_1}{\omega_d} \sin \omega_d \bar{t} \right) v_1 \exp\left(-\beta \frac{\pi}{\omega_d}\right) \quad (2)$$

となる、 $t=t_2$ ($\bar{t}=t_2-t_1=\pi/\omega_d$) のときの速度は、

$$v_2 = -v_1 \exp\left(-\beta \frac{\pi}{\omega_d}\right) \quad (3)$$

となる。反発係数の定義より、

$$e = -\frac{v_2}{v_1} = \exp\left(-\beta \frac{\pi}{\omega_d}\right) \quad (4)$$

$$\beta = \eta/m, \omega_n = k/m, \omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \beta^2}, \eta_0 = 2\sqrt{mK}$$

さらに、 $\eta/\eta_0 = C$ として式(4)を簡単にすると、

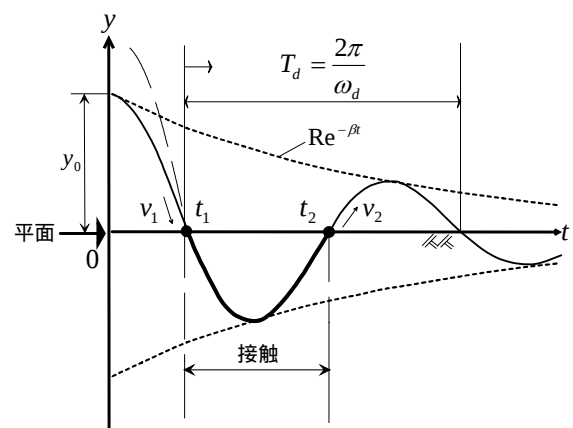


図-1 減衰振動曲線を用いた反発係数の算出

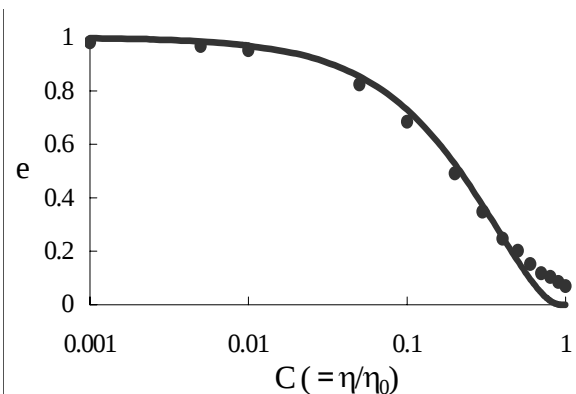


図-2 反発係数 e と粘性係数比 C の関係

Keywords: Rockfall, Distinct Element Method, Coefficient of Restitution.

連絡先；680-8552，鳥取市湖山町南4-101 鳥取大学工学部土木工学科，Tel：0857-31-5297

$$e = \exp\left(-\frac{C\pi}{\sqrt{1-C^2}}\right) \quad (5)$$

以上より，反発係数 e と粘性係数比 η/η_0 の関係を表すことが可能である．図-2には，式(5)と個別要素解析例の比較を示した．個別要素解析では，半径1.23cmの球に落下高さ $h_0=30\text{cm}$ を与えた例とした．この図をみれば， $e<0.2$ ($C>0.4$) では，両者に差異が見られるが，次章に述べる実験結果に対する適用範囲では一致している．

3. 室内模型実験結果と解析結果の比較

簡易な室内実験装置を用いて，落下反発試験を実施するとともに，その結果を個別要素解析と比較した．解析に際して，接触剛性係数 K はヤング率，ポアソン比を用いて弾性接触論により算出し²⁾，粘性係数は， $\eta_0 = 2\sqrt{mK}$ および図-2 を参照して決定している．

図-3 は，室内模型実験の概略を示している．実験では，斜面にモルタル板を用い，その表面に，ゴム板（厚さ 5mm），サンドペーパー（＃80 および＃40）を貼り付けて，計 4 種の条件を準備した．落石要素として，ガラス球及び鉄球を準備し，前述の斜面へ初期速度 0 で自由落下させた．初期落下高さ h_0 は，30，45，60cm の 3 例，斜面傾度 θ は，30° 45° 60° の 3 例を行っている．落石要素を，デジタルビデオカメラで撮影したのち，その映像の画像処理を行って，落石要素の運動を把握した．

図-4 および図-5 は，実験結果の一例と解析結果を示している．図は，斜面と落下要素の接触点を原点に，落下方向を Y 軸，水平方向を X 軸にして， $h_0=30\text{cm}$ ， $\theta=30^\circ$ の例である．表面の変化により斜面への衝突後の軌跡に差が見られるが，0.45~0.55 程度の反発係数が計測されている．この結果と表-2 から決定した η を用いた個別要素解析結果を図中に描いている．解析結果として，図には，粘性係数の値に対して表面摩擦角 ϕ を 30°，50° の 2 例を示している．これらの結果より，表-2 を定数の決定に用いた個別要素解析結果は，実験結果をほぼ表現していることがわかる．

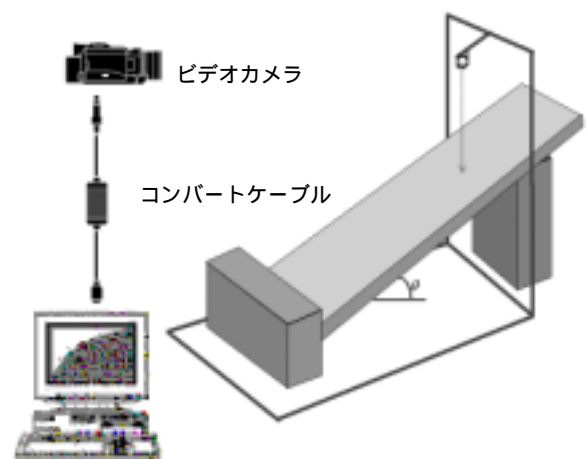


図-3 実験装置

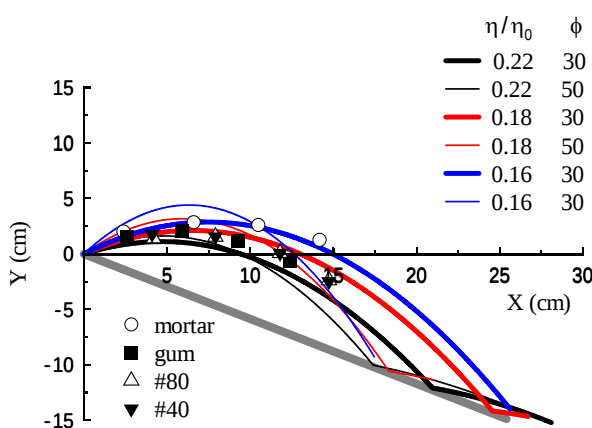


図-4 斜面への衝突後の軌跡（ガラス）

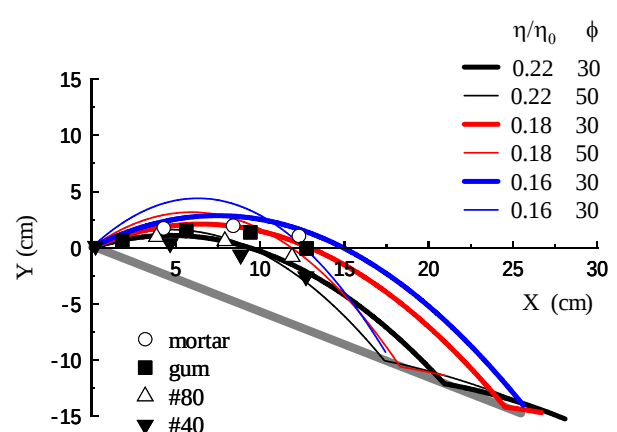


図-5 斜面への衝突後の軌跡（鉄）

参考文献：

- 1) 梶谷 浩他：土と基礎，Vol.50, No.4，pp.48-53，2002.
- 2) 木山英郎他：土木学会論文報告集，第 333 号，pp.137-146，1983．