

岩塊の斜面衝突時の速度変化に関する室内模型実験とその数値解析—岩石平板の場合—

鳥取大学大学院工学研究科	学生会員	○北迫 勝也
鳥取大学大学院工学研究科	正会員	河野 勝宣
鳥取大学技術部		池添 保雄
アサヒコンサルタント株式会社	正会員	土田 章仁
鳥取大学大学院工学研究科	フェロー会員	西村 強

1. はじめに

落石運動を考える上で、岩塊が斜面に衝突する時に生じるエネルギー損失は重要な指標であり、その指標は、一般に、法線方向および接線方向速度比  $R_n, R_t$  で表される(図-1)。衝突時の特性に関して、 $R_n$  に注目した研究例はあるが、 $R_t$  と摩擦に関する研究や、衝突前後のエネルギー比に関する研究は少ない。特に、 $R_t$  は、衝突入射角度と摩擦係数の影響を受けることが想像できるため、衝突後の並進運動と回転運動のエネルギー比にも関連する重要な指標である。本研究では、まず、高速度カメラ撮影画像から読み取った球体の平面への自由落下—反発運動の  $R_t$  と入射角度  $\alpha_1$  との関係の特徴についてまとめ、それが、みかけ上、摩擦係数の変化で説明できることを考察したうえで、衝突前後の速度変化を質点系軌跡解析におけるばね—ダッシュポット—スライダ系モデルで表現した。

2. 接線方向速度比の特徴と室内模型実験

質点と平面の衝突時に、摩擦則が成立すると仮定すれば、運動量と力積の関係より、 $R_n$  および  $R_t$  との間に式(1)の関係が成り立つ<sup>1)</sup>。

$$R_t = \frac{v_{t,t}}{v_{t,i}} = 1 - \mu(1 + R_n) \cot \alpha_1 \quad (1)$$

式(1)において、 $\tan \alpha_1 < \mu(1 + R_n)$  を満たす  $\alpha_1$  では、 $R_t < 0$  となり、質点は法線方向に対して入射側へ跳ね返ることになるが、実現象では考えにくい。つまり、式(1)において、 $R_n$  は一定とみなせる条件下で、接線方向速度成分の大きさに応じて、摩擦係数は静摩擦係数等の基準的な指標に対して低下している(動摩擦)と考えざるを得ない。

室内模型実験では、球体(メノウボールおよびアルミナボール：直径 10mm, 20mm, 30mm)を岩石平板(花崗岩)に向かって自由落下させ、かつ、その平板の傾斜角度  $\alpha_1$  を変化させることにより、平面衝突運動における入射角度  $\alpha_1$  の変化を表現した(図-1)。連続撮影した球体の運動を一枚の写真上に重ね描きした一例を図-1に示す。なお、室内模型実験の詳細については、北迫ら<sup>1)</sup>を参照されたい。

3. 数値解析に用いる速度比(実験値)と係数の決定の概要

後述する実験結果(図-2B)より、 $R_t$  については  $\alpha_1 \geq 25^\circ$  で増加傾向を示したことから、まず、 $\alpha_1 = 0 \sim 25^\circ$  における  $R_t$  の値を読み取り、次に、読み取った  $R_t$  と同じ  $\alpha_1$  における  $R_n$  の値を読み取った。ここでは、case-1 ( $R_{t,ave}$ )、case-2 ( $R_{t,max}$ ) および case-3 ( $R_{t,min}$ ) の3例(表-1)について解析を実施した。

法線方向および接線方向減衰定数  $\zeta_n, \zeta_t$  は、上記の実験値から読み取った  $R_n, R_t$  を用いて、式(2)、(3)より決定した。なお、式(2)、(3)の導出等の詳細については西村<sup>2)</sup>を参照されたい。

$$R_n = \exp\left(-\frac{\zeta_n \pi}{\sqrt{1 - \zeta_n^2}}\right) \quad (2) \quad R_t = (R_n)^{\frac{\zeta_t \sqrt{k_t}}{\zeta_n \sqrt{k_n}}} \left( \cos \frac{\omega_{dt}}{\omega_{dn}} \pi - \frac{\beta_t}{\omega_{dt}} \sin \frac{\omega_{dt}}{\omega_{dn}} \pi \right) \quad (3)$$

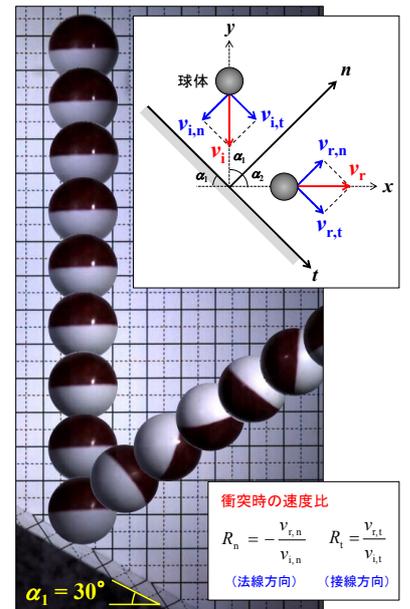


図-1 高速度カメラで撮影した落石運動軌跡

表-1 数値解析に用いたパラメータ

	case-1	case-2	case-3
$R_n, R_t$	0.97, 0.71	1.00, 0.76	0.97, 0.66
$k_n, N/m$	$1.0 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^{10}$	$1.0 \times 10^{10}$
$k_t, N/m$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^8$	$5.0 \times 10^8$
$\zeta_n, \zeta_t$	0.010, 0.047	0.001, 0.005	0.010, 0.095

キーワード 落石, 室内模型実験, 数値解析, 法線方向速度比, 接線方向速度比

連絡先 〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4丁目101 鳥取大学大学院工学研究科 TEL 0857-31-5297

ここで、 $\zeta = \eta/\eta_0$  (減衰定数,  $\eta_0 = 2\sqrt{mk}$ ),  $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}$ ,  $2\beta = \eta/m$ , 添え字  $n$  および  $t$  は法線および接線方向を表す.

#### 4. 室内模型実験結果と質点系解析結果とその比較

実験結果と解析結果との比較を図-2に示す. ここでは, メノウボール(直径 10mm)における結果を例に記述する. まず, 実験結果(図-2: 破線・点線)についてみると,  $R_n$ は,  $\alpha_1$ に依らず, 明確な傾向は観察されなかった(図-2A). 一方,  $R_t$ はおおよそ $\alpha_1=25^\circ$ を境に低角度側では減少傾向を, 高角度側では増加傾向を示した(図-2B). ここで, 式(1)を $\mu$ について変形し,  $\mu$ を $\mu'$ と書き換えることにより, 球体と平面との接点における摩擦係数 $\mu'$ を求める簡易式を図-2C中に示す. この式に実験結果( $R_n$ および $R_t$ )を用いたところ,  $\mu'$ はチルト試験から求まる静止摩擦係数 $\mu (= \tan\phi, \phi$ : 摩擦角)よりも小さく,  $\alpha_1$ とともに増大して,  $\mu$ に漸近する傾向を示している(図-2C). このことは, 第2章で述べた反射方向と摩擦係数に関する考察に対して整合的な結果である.

次に, 解析結果(図-2: 実線)についてみると,  $R_n$ の解析値は, いずれの解析ケースも, 実験結果をもとに仮定した $R_n$ のとおり一定である(図-2A). 一方,  $R_t$ の解析値は, いずれの解析ケースも,  $\alpha_1$ の増大とともに, 実験結果をもとに仮定した $R_t$ から増加傾向にあり,  $\alpha_1 \geq 25^\circ$ における傾向は実験値と同様である(図-2B). しかし, 解析結果の傾向は, 実験結果において観測される低角度側( $\alpha_1 \leq 25^\circ$ )での $R_t$ の減少傾向を表現していない(図-2B). これについては, 実験では, 衝突に伴い, 回転運動が生じるため, 衝突前の運動エネルギーの衝突後の並進運動エネルギーへの残存分が小さくなることによると考えられる. 本研究における数値解析モデルは, 質点の運動に基づいているので, この回転運動への変換分を表現していない. ここで, 衝突前後のエネルギー比 $R_{TE}$ と $\alpha_1$ との関係を図-2Dに示す. ここで, 図-2D中の式の $E_V$ は並進エネルギー,  $E_R$ は回転エネルギーであり, 添え字 $i$ および $r$ は入射および反射を表す. ただし,  $E_{R,i} = 0$ であり, また, 数値解析では $E_{R,r} = 0$ である. case-1およびcase-3の解析値と実験値(点線)に注目すると, 高角度側( $\alpha_1 \geq 25^\circ$ )では, 解析値と実験値は良好な対応を示すが, 低角度側では, 実験値をうまく表現できていない. なお, 図-2Cに示すように, 数値解析結果は実験結果の特徴をよく表現している.

以上のように, 実験結果と解析結果との比較について記述した. 衝突時の球体の運動を質点の運動と仮定して, また, 接触モデルとしてばね-ダッシュポット-スライダ系モデルを採用した数値解析を行った. ダッシュポットの粘性係数は減衰のある振動系の運動方程式の解を利用して, また, スライダの摩擦係数はチルト試験により決定した. 数値解析モデルを用いて $\alpha_1$ の変化による $R_t$ の変化を表現するとき, 低角度側では, 回転運動を考慮する必要があるものの, 高角度側については, 実験結果をうまく表現できた.

#### 参考文献

- 1) 北迫勝也, 河野勝宣, 西村 強, 池添保雄: 落石衝突時の並進速度変化と回転運動に関する室内模型実験, 第49回地盤工学研究発表会平成26年度発表講演集, pp.1869-1870, 2014.
- 2) 西村 強: 質点系落石軌跡解析法における接線方向減衰定数の決定法, 第39回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.340-345, 2010.

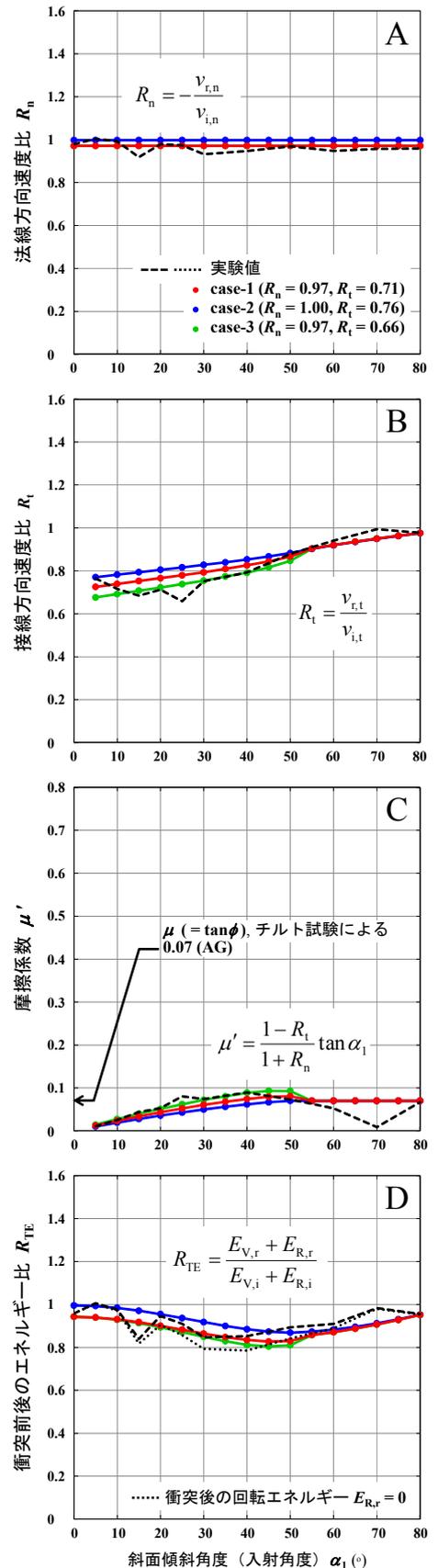


図-2 室内模型実験結果と質点系解析結果との比較