

表面の乾湿が落石岩塊の運動に与える影響

鳥取大学	正会員	○河野 勝宣
アサヒコンサルタント(株)	正会員	土田 章仁
鳥取大学	学生会員	北迫 勝也
鳥取大学		池添 保雄
鳥取大学	フェロー会員	西村 強

1. 緒言

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)。著者らは、高速度カメラを用いて、球体の岩石平面への自由落下-反発運動に関する室内模型実験を実施し、球体の平面衝突前後の法線方向および接線方向速度比、衝突時の摩擦係数、衝突前後の運動エネルギー比、衝突後の並進運動エネルギーと回転運動エネルギーとの比を求め、これらのパラメータと入射角度との関係の特徴についてまとめた¹⁾。本発表では、斜面表面の乾湿の違いと、球体の斜面衝突前の角速度の有無が、落石運動 (法線方向および接線方向速度比、角速度、衝突後の並進運動エネルギーと回転運動エネルギーとの比) に与える影響について検討した結果を報告する。

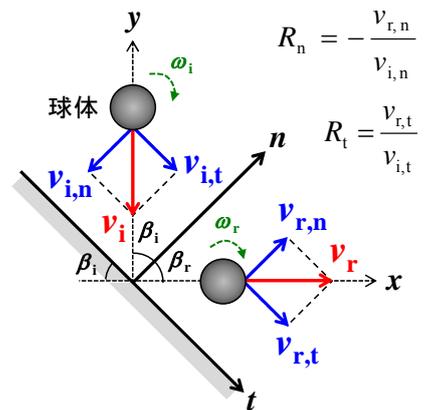


図-1 球体の斜面衝突運動

2. 室内模型実験の概要

室内模型実験では、球体 (メノウボール: 直径 10 mm, 密度 2.65 g/cm³) を岩石平板 (花崗岩, 密度 2.58 g/cm³) に向かって自由落下させ、かつ、その平板の傾斜角度 β_i 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 β_i の変化を表現した (図-1)。岩石平面は、岩石平板を自然乾燥したものを乾燥平面とし、72 時間浸水させたものを湿潤平面とした。球体の落下は、注射筒とシリコンチューブを用いて球体を吸引後、チューブ内の減圧状態から開放することで表現した。初期回転なしの場合は、球体の上面を吸引することで球体に回転を与えずに、初期回転ありの場合は、球体の側面を吸引することで球体に回転 (傾斜方向) を与えた。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、河野ほか¹⁾を参照されたい。

3. 室内模型実験結果

入射角度 β_i ($0^\circ \sim 80^\circ$) と各パラメータ (法線方向速度比 R_n , 接線方向速度比 R_t , 角速度 ω_r , ω_r' , 衝突後の並進運動エネルギーと回転運動エネルギーとの比 L , L') との関係を図-2 に示す。図中のプロットは、10 回以上の計測データのうちの 5 つの実験データの平均値である。5 つの実験データは全て、 R_n が平均値の $\pm 5\%$ 以内である。

(1) 初期回転なし (乾燥平面) の場合¹⁾ R_n は、 β_i の違いによる明確な傾向は観察されなかった (図-2A)。一方、 R_t については、 β_i の増大とともに、 $\beta_i = 25^\circ$ を境に、高角度側では増加傾向を、低角度側では減少傾向が観察された (図-2B)。 ω_r は、 β_i の増大とともに、増加傾向を示し、 $\beta_i = 40^\circ$ ($\omega_r = 195.2 \text{ rad/s}$) を境に減少傾向を示している (図-2C)。球体の平面衝突後のエネルギー比 L (回転運動エネルギー/並進運動エネルギー) についても、 β_i の増大とともに、 L は増加傾向を示し、 $\beta_i = 40^\circ$ を境に減少傾向を示している (図-2D)。ここで、球体と平面衝突時に接点ですべりが生じないと仮定 ($a\omega_r = v_i \sin \beta_i$, a : 球体の半径, v_i : 入射速度) して計算したエネルギー比 L' についてみると、 β_i の増大とともに、増加傾向を示し、 $\beta_i \leq 25^\circ$ では L とほぼ一致しているが、 $\beta_i \geq 25^\circ$ では減少することなく、増加傾向を示している (図-3D)。 $\beta_i \geq 25^\circ$ における L と L' の違いは、実験で観察される球体の運動において、 $\beta_i \geq 25^\circ$ では、 $a\omega_r = v_i \sin \beta_i$ の式が成立しない運動が起こったことを意味している。

(2) 初期回転なし (湿潤平面) の場合 R_n は、 β_i の違いによる明確な傾向は観察されなかった (図-3A)。一方、 R_t については、 β_i によらず、ほぼ 1.0 に近い値で推移している (図-3B)。□ 衝突前に球体が保有するのは並進運動

エネルギーのみである。接触点において平面平行方向成分が上限に達する（摩擦力）ことにより、回転運動への転換分も上限に達すれば、衝突後の並進運動エネルギーに保存される部分が大きくなり、結果として R_t が増大傾向を示すことになる。そして、衝突時には外部からのエネルギーの付加はないため、 R_t は 1.0 に漸近する結果となったと考えられる。 ω_r は、最大で 50.4 rad/s ($\beta_i = 40^\circ$) であり、 $\beta_i = 0^\circ$ を除き、すべての β_i において、初期回転なし（乾燥平面）の場合よりも小さい（図-3C）。 L は、初期回転なし（乾燥平面）の場合に比べて小さく、 β_i の違いによる傾向も観察できない（図-3D）。

(3) 初期回転あり（乾燥平面）の場合 R_n は、 β_i の違いによる明確な傾向は観察されなかった（図-3A）。一方、 R_t については、 β_i の増大とともに、 $\beta_i \leq 25^\circ$ では減少傾向のように見えるが、 $\beta_i \geq 25^\circ$ で増加傾向を示している（図-3B）。この傾向は初期回転なし（乾燥平面）の場合と同様である。また、 $\beta_i = 60^\circ, 70^\circ$ を除き、初期回転なし（乾燥平面）の場合と比べて R_t の値が大きい。

ここで、本実験において、入射時の角速度にばらつき ($\omega_i\text{-ave} = 25.7$ rad/s, 標準偏差 10.9 rad/s) が見られた。この入射時の角速度のばらつきが平面衝突後の角速度の値や傾向に影響を与えることが考えられるため、初期回転あり（乾燥平面）の場合の衝突後の角速度は、 $\omega'_r (= \omega_r - \omega_i)$ として計算した。 ω'_r は、初期回転なし（乾燥平面）の場合と同様に、増加・減少傾向を示したが、その最大値は 131.3 rad/s ($\beta_i = 25^\circ$) であり、初期回転なし（乾燥平面）の場合に比べて小さい（図-3C）。この傾向は、 L についても同様であり（図-3D）、また、 L および ω'_r のピーク値は、初期回転なし（乾燥平面）の場合の $\beta_i = 40^\circ$ に対して、 $\beta_i = 25^\circ$ と低角度であった。

初期回転を与えたことにより、初期回転あり（乾燥平面）の場合に比べて接触点での摩擦力が減少し、角速度が減少したと考えられる。その結果、初期回転なし（乾燥平面）の場合では回転エネルギーに配分されていた運動エネルギーが、初期回転あり（乾燥平面）の場合では並進エネルギーに分配され、 R_t が増加したと説明できる。

4. 結 言

斜面表面の乾湿の違いと、角速度の有無が、落石運動に与える影響について検討した結果をまとめると次のとおりである。(1) いずれの実験条件においても、 R_n は β_i の違いによる明確な傾向は観察されなかった。(2) 乾燥平面では、初期回転の有無に関わらず、 β_i の増大に伴い、 R_t は減少・増加傾向を示し、 $\beta_i = 60^\circ, 70^\circ$ を除き、初期回転ありの方が R_t の値は大きい。一方、湿潤平面における R_t の値はほぼ 1.0 に近い値で推移した。(3) L および ω_r, ω'_r は、湿潤平面では β_i の違いによる傾向は観察できないが、乾燥平面では増加・減少傾向を示し、ピーク値およびピーク値を示す β_i は初期回転ありの方が小さい。(4) 以上のことから、表面の乾湿の違いと、角速度の有無は落石運動のパラメータに影響を与えることがわかった。

引用文献 河野勝宣・北迫勝也・池添保雄・西村 強：土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.71, No.2, pp.81-91, 2015.

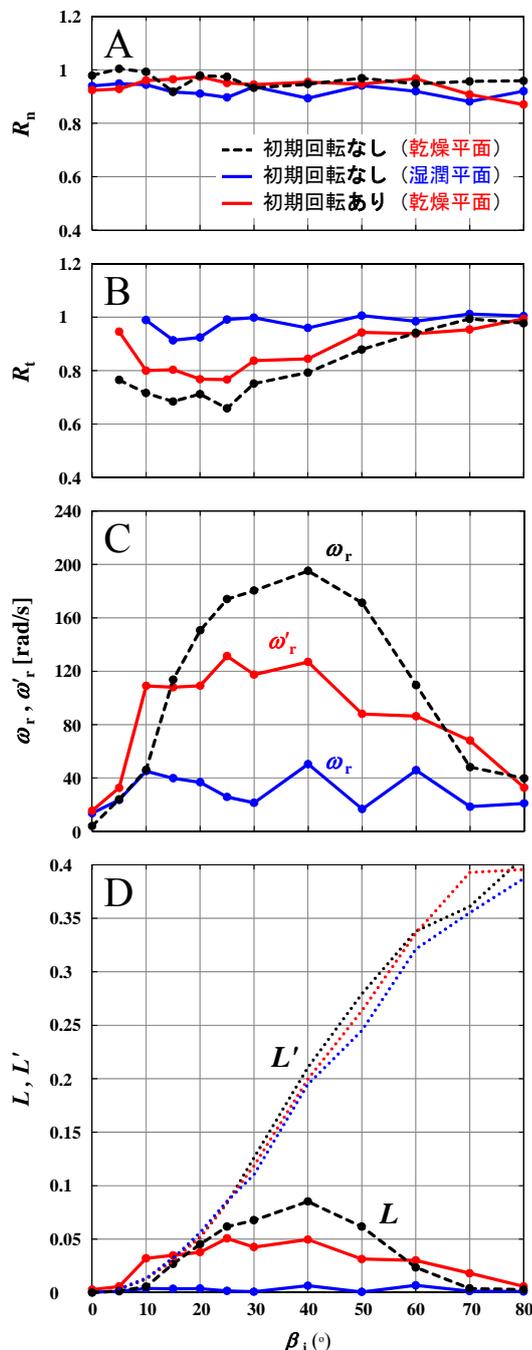


図-2 入射角度と実験結果との関係

キーワード 落石, 室内模型実験, 接線方向速度比

連絡先 〒680-8552 鳥取市湖山町南 4-101 TEL 0857-31-5297