

速度比に注目した落石の砂斜面衝突運動に関する室内模型実験

鳥取大学大学院	学生会員	○北迫 勝也, 檜本 一希
鳥取大学大学院	正会員	河野 勝宣, 池添 保雄
アサヒコンサルタント(株)	正会員	土田 章仁
鳥取大学大学院	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。 R_n, R_t に関して、岩石平板のように、球体と岩石平板衝突時の変形が極めて小さく、無視できる範囲内での球体自由落下-反発模型実験に関する研究例¹⁾はあるが、変形する粒状土斜面では、反射の定義づけが困難なためか、研究例²⁾が少ない。本研究では、岩塊を球体とし、砂平面への球体自由落下-反発模型実験を行い、高速度カメラを用いて球体の砂斜面衝突後の様子を追跡した(図-1)。そして、砂斜面衝突後の反射速度の計測時点の違いによる R_n, R_t および角速度 ω_r と入射角度 α_i との関係の特徴についてまとめ、それらの結果と岩石平板における実験結果¹⁾とを比較し、考察する。

2. 砂斜面への球体の衝突実験

球体の斜面衝突時における R_n, R_t は次式で表される。

$$R_n = -\frac{v_{r,n}}{v_{i,n}} \quad (1) \quad R_t = \frac{v_{r,t}}{v_{i,t}} \quad (2)$$

ここで、 v_i および v_r は入射および反射速度、添え字 n および t は法線および接線方向を表す。砂斜面に球体が衝突すると、球体は斜面中に潜り込み、それに続いて斜面下方の凸部を乗り越えるような運動を行う(図-1)。これは、岩石平板などを用いるときには、無視できる挙動である。砂斜面では、このような運動を伴うため、式(1)、(2)のような速度比を用いて、この運動を表現するときには、反射速度 v_r の読み取りが実験結果を左右するものとなる。そこで、本研究では、法線方向移動距離 L_n が最大となる時点(球体が砂斜面に最も貫入した時点： $L_{n,max}$)以降を反射の状態として捉えた(図-2A)。そして、反射後の速度、角速度は、反射の状態における次の3つの時点での計測値を用いて実験結果を整理した。① 法線方向加速度 a_n が最初に0となる時点($a_n = 0$ 時)、② 法線方向反射速度 $v_{r,n}$ が最大となる時点($v_{r,n}$ 最大時)、③ 接線方向反射速度 $v_{r,t}$ が最大となる時点($v_{r,t}$ 最大時)(図-2B,C)。入射速度は、文献2)と同じく、球体が斜面に衝突した(接した)

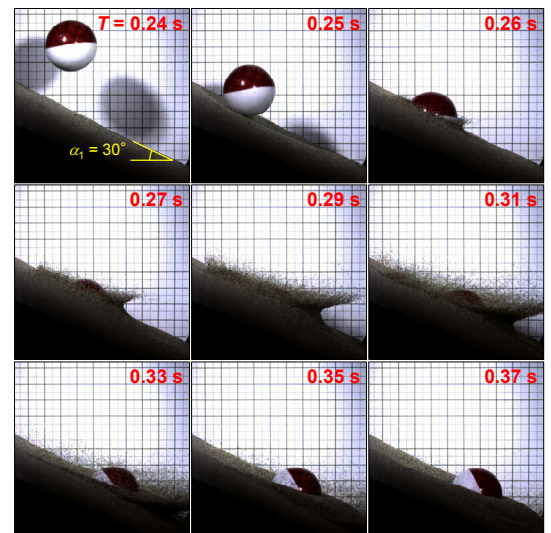
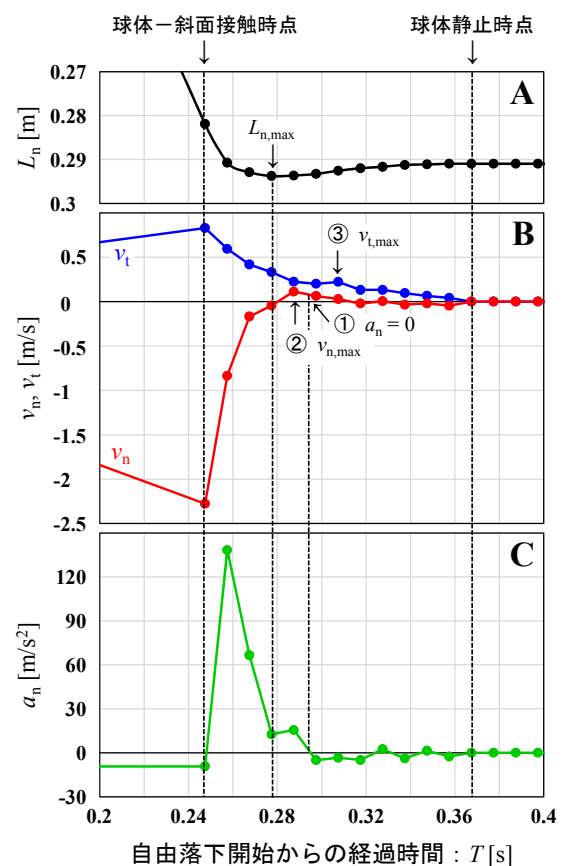


図-1 高速度カメラで撮影した落石運動軌跡

図-2 T と L_n, R_n, R_t, a_n (斜面傾斜角度 20° の例)

キーワード 落石, 室内模型実験, 法線方向速度比, 接線方向速度比, 砂斜面

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

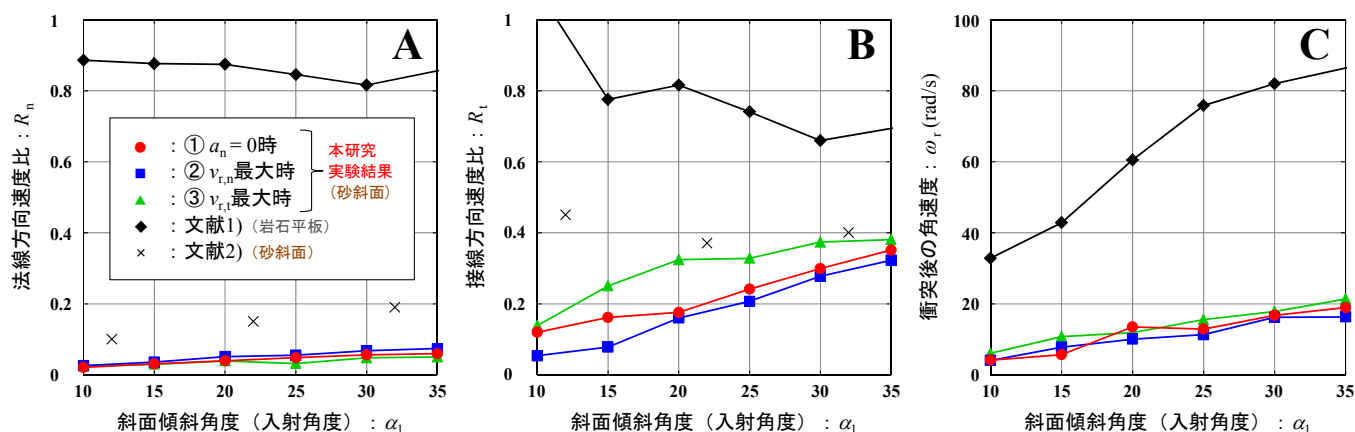


図-3 斜面傾斜角度（入射角度）と法線方向速度比(A), 接線方向速度比(B)および角速度(C)との関係

時点の速度とした。なお、文献2)では、①の法線方向加速度 a_n が 0 となる時点を超えて定義している。

室内模型実験では、球体（アルミナボール：直径 30mm）を砂斜面（鳥取砂丘砂：425 μ m ふり通過分かつ、250 μ m ふり残留分）に向かって自由落下させ、かつ、その平面の傾斜角度 α_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 α_1 の変化を表現した。鳥取砂丘砂については、バイブレーターを用いて締め固めた結果、相対密度 86 $\pm$ 1%に収まり、安息角は 36°であった。球体の落下高さは 30cm、斜面衝突時の傾斜角度（入射角度 α_1 ）は 0 $\sim$ 35°（5°間隔）とした。高速度カメラにより撮影・記録された画像により、球体の座標位置を読み取り、入射速度および反射速度を読み取った（図-1）。なお、室内模型実験の詳細については、北迫ら¹⁾を参照されたい。

3. 球体の砂斜面への自由落下－反発模型実験結果

図-3 に実験結果を示す。図中の各ケースのプロットは、各々、5 回の実験の平均値である。なお、 $\alpha_1 = 0, 5^\circ$ の実験では、法線方向の反射速度成分が正の法線方向となることがなかった。このため、図-3 には $\alpha_1 = 0, 5^\circ$ の実験結果を示していない。また、図-3 には文献 1)および文献 2)の実験結果も併せて示している。ただし、文献 1)の結果については、著者らの行った追加の実験データも含まれている。

まず、本研究のデータを 3 つの計測法の違いで比較する。入射角度 α_1 の増大に伴い R_n, R_t ともに増加傾向が見られるが、その増加率は R_t のほうが大きい（図-3A,B）。この R_n の傾向については、文献 2)と同様である。 R_t については、3 つの計測法の違いで、値に差はあるが、傾向は同様であった。また、 ω_r の傾向は速度比と同様である（図-3C）。次に、岩石平板における実験結果¹⁾との比較について記述する。 R_n, R_t, ω_r の値のいずれも、文献 1)の結果の方が大きい（図-3）。文献 1)における R_t の傾向は α_1 の増大に伴い、減少しているように見え、本実験（砂斜面）結果との傾向と異なる。これらの岩石平板での R_t の減少傾向と、砂斜面での R_t の増加傾向の違いは、斜面材料の違いが影響していると容易に想像できるが、詳細については今後の課題としたい。

4. おわりに

球体の砂斜面衝突時における R_n, R_t の値は、 α_1 の増大に伴い、増加する傾向があることがわかった。これらの速度比は、落石軌跡解析する上で重要な指標であるが、実務においては、斜面の状況の違いによる経験値により決定されることが多い。特に、砂斜面での R_t は、反射速度の読み取りの違いによって値が変わるため、落石軌跡解析等で、速度比を用いて落石運動を表現する場合には注意が必要である。

参考文献

- 1) 北迫勝也，河野勝宣，池添保雄，西村 強：斜面材料の違いが落石運動に与える影響に関する室内模型実験，公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集「地盤と建設」，Vol.32，No.1，pp.45-52，2014.
- 2) B. Heidenreich and V. Labiouse: Small-scale experimental study of rockfall impacts on granular slopes, *Rivista Italiana di Geotecnica*, Vol.38, No.2, pp.80-91, 2004.