

斜面材料の違いが落石運動に与える影響に関する実験的研究

鳥取大学 学生会員 ○北迫 勝也
鳥取大学 正会員 河野 勝宣
鳥取大学 フェロー会員 西村 強
鳥取大学 池添 保雄

1. はじめに

落石防災対策においては、落石運動の予測が重要である。落石運動を予測するために、落石と地表面の接触時の特性を把握することが重要であり、その特性を示すパラメーターとして落石の平面衝突前後の法線方向速度比 R_n および接線方向速度比 R_t に注目する。既往の研究では角速度が減少すると平面衝突後の速度が増加することが明らかにされている¹⁾。本研究では落石を球体と仮定し、高速度カメラを用いた室内模型実験を行った。衝突斜面の傾斜角度および材料の違いが、実験から得られた R_n および R_t 、エネルギー等を与える影響について報告する。

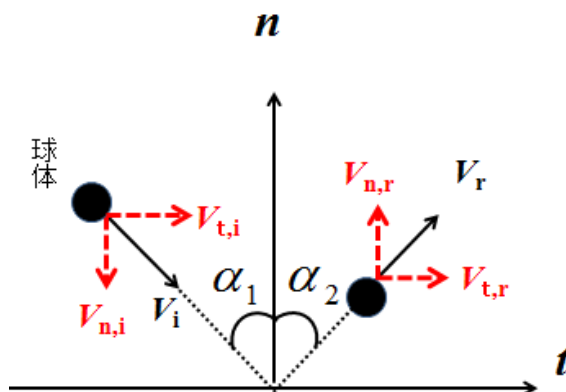


図-1 球体の平面衝突運動

2. 衝突前後速度比、角速度およびエネルギーの算出法

球体の平面衝突運動（図-1）における R_n および R_t は式(1)および(2)のように表される。

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

本研究は、傾斜角度 α_1 の斜面を用い、球体を一定の高さから斜面に向かって自由落下させることにより、入射角度 α_1 を有することのできる模型実験を行った（図-2, 3）。図-2 の添え字 1, 2, 3 は、球体の斜面衝突前、衝突時、衝突後を示す。x, y は座標、 θ は回転角度、t は落下開始からの経過時間を表す。また、ここで、岩石斜面衝突時の法線・接線方向の入射速度（ $V_{n,i}$ 、 $V_{t,i}$ ）および反射速度（ $V_{n,r}$ 、 $V_{t,r}$ ）は式(3)～(6)で算出される。

$$V_{n,i} = -\frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \sin \alpha_1 - \left\{ \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} + \frac{1}{2} g (t_2 - t_1) \right\} \cos \alpha_1 \quad (3)$$

$$V_{t,i} = \frac{x_2 - x_1}{t_2 - t_1} \cos \alpha_1 - \left\{ \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} + \frac{1}{2} g (t_2 - t_1) \right\} \sin \alpha_1 \quad (4)$$

$$V_{n,r} = -\frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} \sin \alpha_1 + \left\{ \frac{y_3 - y_2}{t_3 - t_2} - \frac{1}{2} g (t_3 - t_2) \right\} \cos \alpha_1 \quad (5)$$

$$V_{t,r} = \frac{x_3 - x_2}{t_3 - t_2} \cos \alpha_1 + \left\{ \frac{y_3 - y_2}{t_3 - t_2} - \frac{1}{2} g (t_3 - t_2) \right\} \sin \alpha_1 \quad (6)$$

衝突後の角速度 ω は式(7)で表される。

$$\omega = \frac{\theta_3 - \theta_2}{t_3 - t_2} - \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} \quad (7)$$

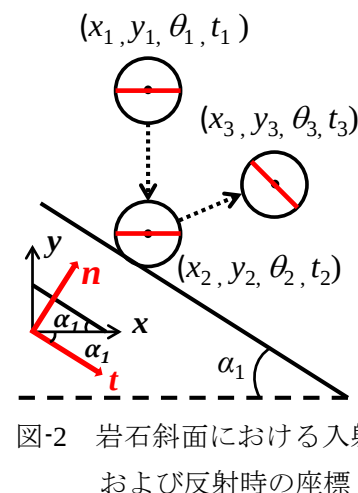


図-2 岩石斜面における入射および反射時の座標

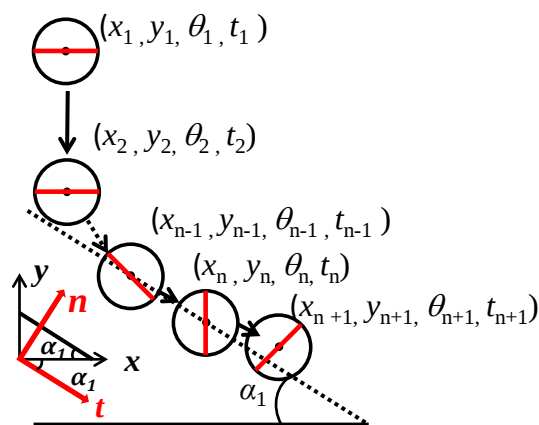


図-3 砂斜面における入射および反射時の座標

砂斜面における入射速度は式(3), (4)で表される。反射速度および角速度は、法線方向移動距離の最下点（図-4）における時刻以降の最大値を採用した。砂斜面の反射速度（ $V_{n,r}$, $V_{t,r}$ ）および角速度 ω は式(8)～(10)より算出される。

$$V_{n,r} = -\frac{x_n - x_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \sin \alpha_1 + \left\{ \frac{y_n - y_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} - \frac{1}{2} g(t_n - t_{n-1}) \right\} \cos \alpha_1 \quad (8)$$

$$V_{t,r} = \frac{x_n - x_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} \cos \alpha_1 + \left\{ \frac{y_n - y_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} - \frac{1}{2} g(t_n - t_{n-1}) \right\} \sin \alpha_1 \quad (9)$$

$$\omega = \frac{\theta_n - \theta_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} - \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} \quad (10)$$

球体にすべりが生じる場合の回転エネルギー E_R と並進エネルギー E_V との比 L およびすべりが生じない場合の回転エネルギー E'_R と並進エネルギー E'_V との比 L' は、式(11)および(12)で算出される。

$$L = \frac{E_R}{E_V} = \frac{I\omega^2}{mV_r^2} \quad (11) \quad L' = \frac{E'_R}{E'_V} = \frac{2}{5} \frac{\tan^2 \alpha_1}{R_n^2 + R_t^2 \tan^2 \alpha_1} \quad (12)$$

ここで、 I は慣性モーメント、 m は球体の質量である。

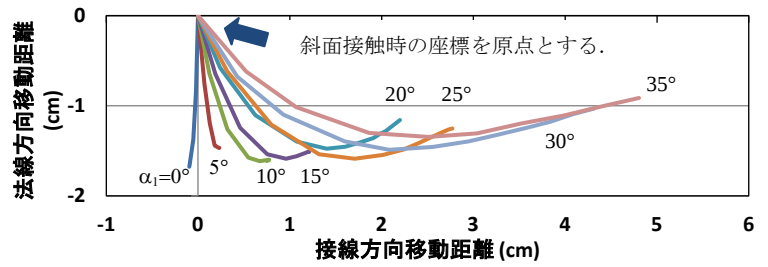


図-4 砂斜面衝突後の法線および接線方向移動距離の関係（アルミナボール直径 30mm）

3. 室内模型実験

室内模型実験では、球体を平面に自由落下させ、高速度カメラを用いて岩石および砂斜面衝突時の球体の挙動を撮影した（図-5A, B）。球体の材質はアルミナ（密度：3.75g/cm³）とメノウ（密度：2.68g/cm³）を使用し、球体の直径は 20mm と 30mm である（砂斜面の場合は直径 30mm のみを用いる）。また、衝突平面は花崗岩と鳥取砂丘砂（425 μ m ふり通過分かつ 250 μ m ふり残留分を使用し、相対密度は 86 $\pm$ 1%である。）を使用した。平面衝突時の傾斜角度（入射角度 α_1 ）は、岩石斜面の場合は 0°~70°（ $\alpha_1 \leq 20^\circ$ は 5°間隔、 $\alpha_1 \geq 30^\circ$ は 10°間隔）、砂斜面の場合は、実験に使用した砂の安息角が 36°のため、傾斜角度は 0°~35°（5°間隔）とした。本実験で使用した高速度カメラは 1/3000 秒のシャッタースピードを有している。CAD ソフトを用いて撮影画像より球体の移動距離、回転角度を読み取った（図-5A, B）。

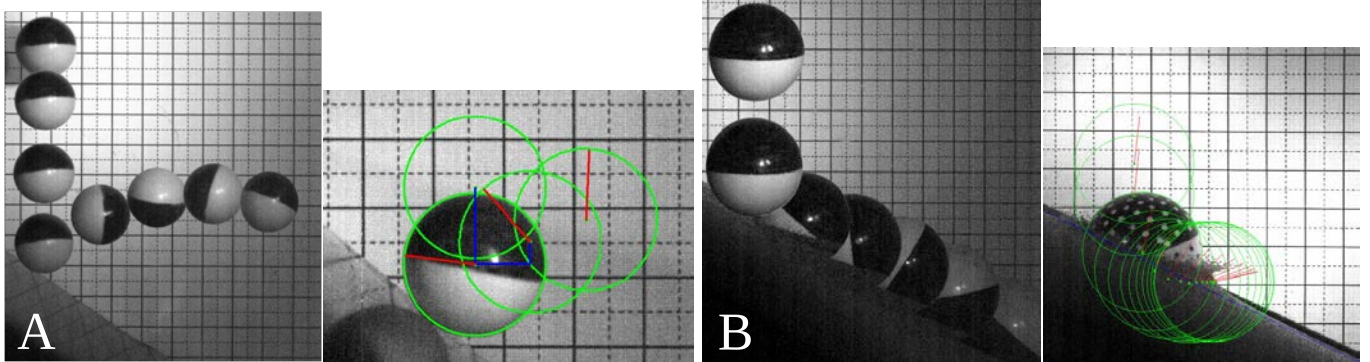


図-5 高速度カメラで撮影した落石運動軌跡と球体の座標および回転角度の読み取り方法（A：岩石斜面，B：砂斜面）（背景は 1cm 方眼紙を使用）

4. 球体と衝突平面との摩擦係数

衝突時の反力を f_n, f_t および接触時間を t_c として、衝突時に摩擦則が成立すると摩擦係数 μ は式(13)で表すことができる。

$$\mu = \frac{f_t}{f_n} = \frac{f_t t_c}{f_n t_c} = \frac{m(V_{t,r} - V_{t,i})}{m(V_{n,r} - V_{n,i})} \quad (13)$$

図-1 を参照しながら式(1), (2)を用いると次式を得る。

$$\mu = \frac{1 - R_t}{1 + R_n} \tan \alpha_1 \quad (14)$$

式(14)は計測値から求められるみかけの摩擦係数となる。

5. 実験結果

図-6,7 のプロットは 3 回行った実験の平均の値である。砂斜面の入射角度 $\alpha_1 = 0^\circ, 5^\circ$ の場合は、法線方向移動距離の最下点で球体が停止し（図-4）、反射速度が算出できなかったため、 $\alpha_1 = 10^\circ$ 以降を図-6,7 にプロットした。球体が岩石斜面に衝突した時の R_n は、入射角度を大きくしていくと一定傾向を示したが（図-6A1）、砂斜面の場合は増加傾向となり、Labouse の実験²⁾と同じ傾向を示した（図-6A2）。砂斜面の R_t は増加傾向を示し、岩石斜面の R_t は $\alpha_1 = 40^\circ \sim 50^\circ$ から増加傾向となった（図-6B）。岩石斜面の角速度は $\alpha_1 = 40^\circ \sim 50^\circ$ から減少したが、砂斜面は $\alpha_1 \leq 35^\circ$ までは増加傾向を示した（図-6C）。

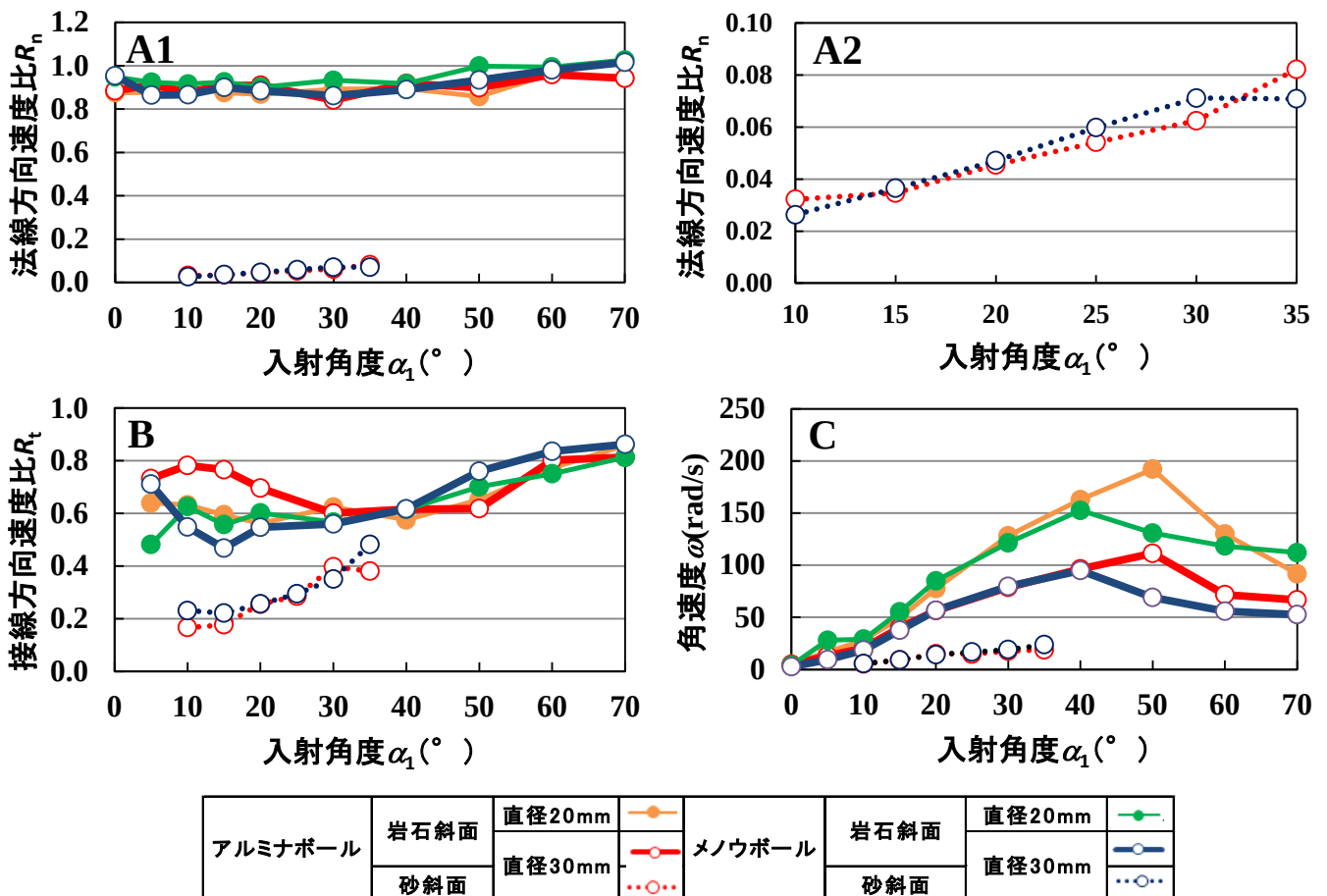


図-6 入射角度と法線・接線方向速度比、角速度の関係

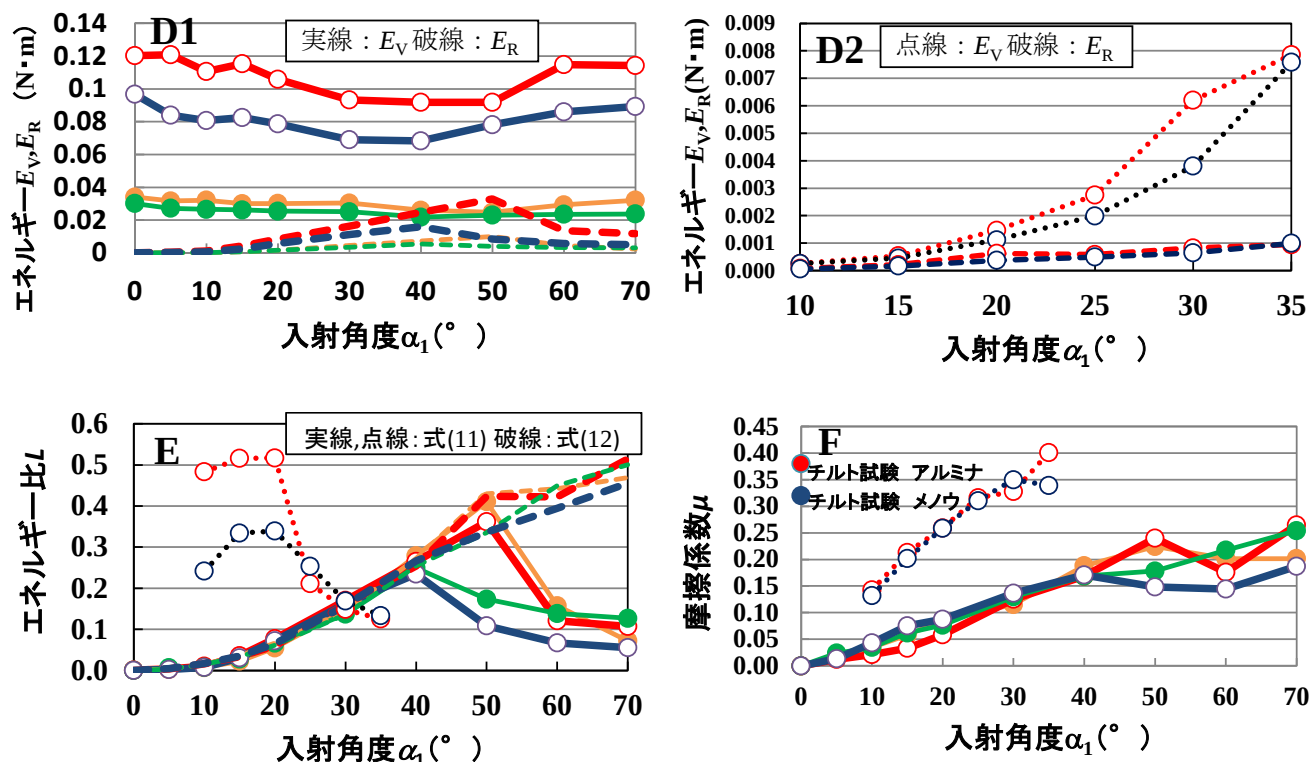


図-7 入射角度とエネルギー，エネルギー比，摩擦係数の関係（凡例は図-6 と同じ）

岩石斜面の並進エネルギーは回転エネルギーが減少する角度 ($\alpha_1=40^\circ\sim 50^\circ$) から増加したため，エネルギー比はこの角度から減少した（図-7D1,E）．砂斜面は， $\alpha_1=20^\circ$ からエネルギー比は減少し，増加傾向を示していた並進エネルギーの傾きに変化が生じた（図-7D2,E）．角速度の大きさは球体の直径 30mm に比べ 20mm の方が大きくなったが（図-6C），エネルギーの大きさは直径 20mm に比べ 30mm の方が大きくなった（図-7D1）．式(14)より算出した岩石斜面の摩擦係数はチルト試験によって求めた摩擦係数を上回ることにはなかった．また，砂斜面の摩擦係数は，岩石斜面の摩擦係数をどの入射角度でも上回っていた（図-7F）．

6. おわりに

本研究では，高速度カメラを用いた室内模型実験を行い，衝突平面の傾斜角度および材料の違いが，実験から得られた R_n および R_t ，エネルギー等に与える影響について検討した． R_n は，岩石斜面では一定の傾向となり，砂斜面では増加傾向を示した． R_t については，砂斜面は増加傾向を示したが，岩石斜面は，角速度が減少した角度から増加した．エネルギー比は入射角度を大きくすると，砂斜面では $\alpha_1=20^\circ$ から減少し，岩石斜面は $\alpha_1=40^\circ\sim 50^\circ$ から減少傾向を示した．また，エネルギー比が減少した角度から，並進および回転エネルギーの傾向が変化した．岩石斜面と砂斜面とでは R_n ， R_t ，角速度，エネルギーの値が異なっており，斜面材料の違いにより落石運動が変化することを室内模型実験より確認できた．

参考文献

- 1) K. T. Chau, R. H. C. Wong and J. J. Wu : Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 39, pp. 69-77, 2002.
- 2) V. Labiouse and B. Heidenreich : Half-scale experimental study of rockfall impacts on sandy slopes, *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9, pp. 1981-1993, 2009.