

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

Small-Scale Laboratory Test on Influence of Slope Materials on Rockfall Motion

北迫勝也	Katsuya KITASAKO	(鳥取大学大学院工学研究科)
河野勝宣	Masanori KOHNO	(鳥取大学大学院工学研究科)
池添保雄	Yasuo IKEZOE	(鳥取大学技術部)
西村 強	Tsuyoshi NISHIMURA	(鳥取大学大学院工学研究科)

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い、入射角度、球体の種類や大きさ、斜面材料が異なる場合の法線および接線方向速度比 (R_n , R_t)、角速度、エネルギー等の落石の運動特性を表すパラメーターの変化について検討した。実験結果より、速度比に注目すると、岩石斜面における R_n は入射角度 α_1 の違いによる明確な傾向は見られないが、 R_t は $\alpha_1=40\sim50^\circ$ より高角度側では増加傾向を示した。一方、砂斜面では α_1 の増大に伴い、 R_n および R_t ともに、増加傾向を示した。このように、斜面材料の違いは、落石の運動特性を表すパラメーターの変化に影響を与える要因の一つになると考えられる。

キーワード：落石、法線方向速度比、接線方向速度比、室内模型実験 (IGC : G14)

1. はじめに

国土の約4分の3が山地や丘陵地である我が国は、脆弱な地盤が広く分布しており、降雨や地震も多いことから落石が多数発生している。1989年福井県越前海岸岩盤崩落や1996年北海道豊浜トンネル岩盤崩落の例からもわかるように、落石は何の前触れなく発生することが多いため、道路を寸断することや、通行車両に当たるなど重大な事故につながる恐れがある。

近年、産業の発展とともに道路は急速に拡充・整備されてきたが、山間部を縫うように建設されているため、落石災害の危険箇所は少なくない。落石に対する危険予測や対策は極めて重要性が高いが、すべての危険箇所に防止対策を立てることは財政的に困難である。そこで、落石の危険度評価や防止対策の有効な手法の確立には、落石運動の予測が重要である。

落石運動を予測する上で、斜面地質・地形、落石の初期位置、落石の形状と質量、落石と地表面との接触時の特性や衝突前後の運動形態を把握することは重要である。本研究ではそれらのうち、落石と地表面の接触時の特性を把握するため、その特性を表すパラメーターとして落石の斜面衝突前後の法線および接線方向速度比に注目した。これらの速度比はエネルギー損失の指標として用いられ、落石運動を考える上で重要なパラメーターである。落石衝突時の速度比に関する研究は、Wu¹⁾をはじめ、さまざまな研究が行われており、概観すると以下のようなものである。接触時のモ

デルとして、バネーダシュボット系を仮定し、接線方向速度比からダシュボットの減衰を決定する研究²⁾、落石の平面衝突時における速度比や回転運動に注目した実験的研究³⁻⁵⁾などがある。落石運動をより理解するためには、落石と衝突平面との摩擦や、回転エネルギーと並進エネルギーとの関係性を知ることが重要であるが、これらに関する研究は多くない。また、落石の物理量や斜面材料は、落石運動に大きく寄与することから、さまざまな条件で実験を行うことが望まれる。

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い、入射角度、球体の種類や大きさ、斜面材料が異なる場合の法線方向速度比、接線方向速度比、角速度、エネルギー等の落石の運動特性を表すパラメーターの変化について検討した。

2. 球体の平面衝突時における並進運動と回転運動に関する実験

2.1 球体の平面衝突前後の接線方向速度比

球体が平面に衝突した様子を図-1に示す。 V は速度、 α_1 は入射角度、 α_2 は反射角度である。添え字の i と r は入射および反射、 n と t は法線および接線方向を表す。法線方向速度比 (反発係数) R_n および接線方向速度比 R_t は次式のように、それぞれの方向における入射速度に対する反射速度の比で定義されるのが一般的である。

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

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

いま，運動量と力積の関係は，質量を m ，衝突時の法線および接線方向の反力を f_n および f_t ，接触時間 t_c とすれば，

$$f_n t_c = m(V_{n,r} - V_{n,i}) = -m(1 + R_n)V_i \cos \alpha_1 \quad (3)$$

$$f_t t_c = m(V_{t,r} - V_{t,i}) \quad (4)$$

と表せる．ここで，衝突時に摩擦則が成立すると仮定すれば，摩擦係数 μ は，次式となる．

$$\mu = \frac{f_t}{f_n} = \frac{f_t t_c}{f_n t_c} = \frac{(V_{t,r} - V_{t,i})}{-(1 + R_n)V_i \cos \alpha_1} \quad (5)$$

式(5)は計測値から求められるみかけの摩擦係数となる．また，接線方向速度比 R_t は，式(1), (2), (5)より，次式で表せる．

$$R_t = \frac{V_{t,r}}{V_{t,i}} = 1 - \mu(1 + R_n) \cot \alpha_1 \quad (6)$$

式(6)より，法線方向速度比 R_n を一定と仮定すると，接線方向速度比 R_t は，摩擦係数 μ および入射角度 α_1 に依存する量となる．

2.2 入射速度，反射速度および角速度の算出法

入射速度 ($V_{n,i}$, $V_{t,i}$) および反射速度 ($V_{n,r}$, $V_{t,r}$) は，重力加速度 $g (= 9.8 \text{ m/s}^2)$ を考慮すると以下の式で算出される．

$$V_{n,i} = -\frac{X_1}{T_1} \sin \alpha_1 + \left(-\frac{Y_1}{T_1} + \frac{1}{2} g T_1 \right) \cos \alpha_1 \quad (7)$$

$$V_{t,i} = \frac{X_1}{T_1} \cos \alpha_1 + \left(-\frac{Y_1}{T_1} + \frac{1}{2} g T_1 \right) \sin \alpha_1 \quad (8)$$

$$V_{n,r} = -\frac{X_2}{T_2} \sin \alpha_1 + \left(\frac{Y_2}{T_2} - \frac{1}{2} g T_2 \right) \cos \alpha_1 \quad (9)$$

$$V_{t,r} = \frac{X_2}{T_2} \cos \alpha_1 + \left(\frac{Y_2}{T_2} - \frac{1}{2} g T_2 \right) \sin \alpha_1 \quad (10)$$

また，衝突後の角速度 ω は，以下の式より算出した．

$$\omega = \frac{\Theta_2}{T_2} - \frac{\Theta_1}{T_1} \quad (11)$$

式(7)~(11)における X , Y , T , Θ は，以下の式によって算出した．

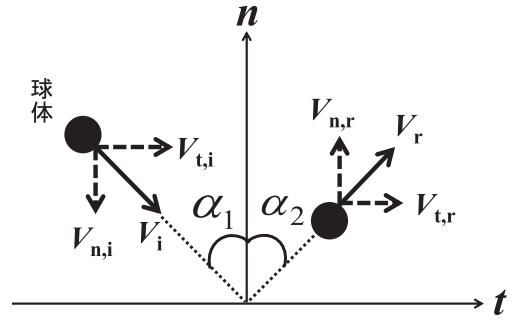


図-1 球体の平面衝突運動

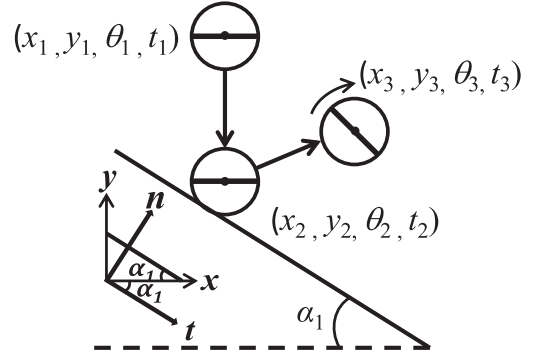


図-2 岩石斜面における入射および反射時の座標

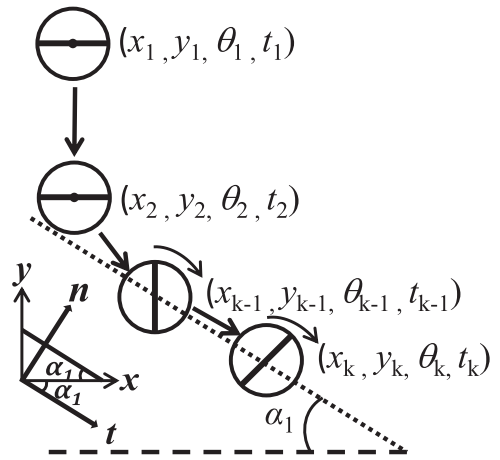


図-3 砂斜面における入射および反射時の座標

岩石斜面の場合：

$$\begin{aligned} X_1 &= x_2 - x_1 & X_2 &= x_3 - x_2 \\ Y_1 &= y_2 - y_1 & Y_2 &= y_3 - y_2 \\ T_1 &= t_2 - t_1 & T_2 &= t_3 - t_2 \\ \Theta_1 &= \theta_2 - \theta_1 & \Theta_2 &= \theta_3 - \theta_2 \end{aligned} \quad (12)$$

ここで， x , y は座標， θ は回転角度， t は落下開始からの経過時間であり，添え字 1, 2, 3 は，球体の斜面衝突前，衝突時，衝突後を表す．(図-2)．

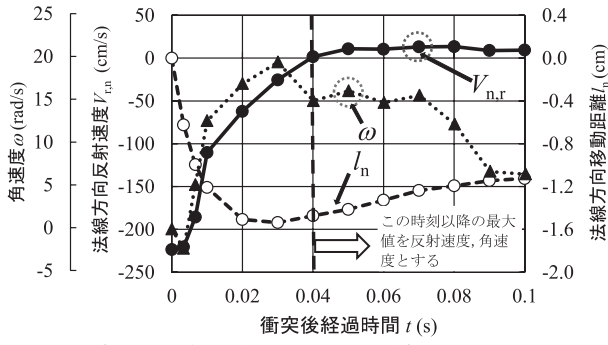


図-4 法線方向反射速度、角速度、法線方向移動距離と衝突後経過時間との関係図（例： $\alpha_1=25^\circ$ ）

砂斜面の場合：

$$\begin{aligned} X_1 &= x_2 - x_1 & X_2 &= x_k - x_{k-1} \\ Y_1 &= y_2 - y_1 & Y_2 &= y_k - y_{k-1} \\ T_1 &= t_2 - t_1 & T_2 &= t_k - t_{k-1} \\ \Theta_1 &= \theta_2 - \theta_1 & \Theta_2 &= \theta_k - \theta_{k-1} \end{aligned} \quad (13)$$

砂斜面では、球体と斜面の衝突時以降、逐次計算した（図-3）。本研究では、砂斜面における反射速度および角速度は、法線方向反射速度の値が上向きとなる時刻かつ法線方向移動距離の最大値となる時刻（球体が砂斜面に最も貫入した時刻）以降の最大値を、それぞれ採用した（図-4）。

2.3 球体の平面衝突前後のエネルギー

球体の運動エネルギーは、並進エネルギーと回転エネルギーの和である。球体の慣性モーメントを I とすると、並進エネルギー E_V 、回転エネルギー E_R は次式となる。

$$E_V = \frac{1}{2} m V_r^2 \quad (14)$$

$$E_R = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (15)$$

これらのエネルギー比 L は、次式となる。

$$L = \frac{E_R}{E_V} = \frac{I \omega^2}{m V_r^2} \quad (16)$$

球体と岩石斜面衝突時に接点ですべりが生じない場合のエネルギー比 L' の算出法を以下に示す（「 $\uparrow$ 」は球体と斜面との間にすべりが生じない場合を表す）。並進エネルギー E'_V は、

$$\begin{aligned} E'_V &= \frac{1}{2} m V_r^2 = \frac{1}{2} m (V_{n,r}^2 + V_{t,r}^2) \\ &= \frac{1}{2} m (R_n^2 \cos^2 \alpha_1 + R_t^2 \sin^2 \alpha_1) V_i^2 \end{aligned} \quad (17)$$

と表せる。一般に、剛体の円運動は次式で表される。

$$a\omega = V_i \sin \alpha_1 \quad (18)$$

式(18)を用いると、回転エネルギー E'_R は次式となる。

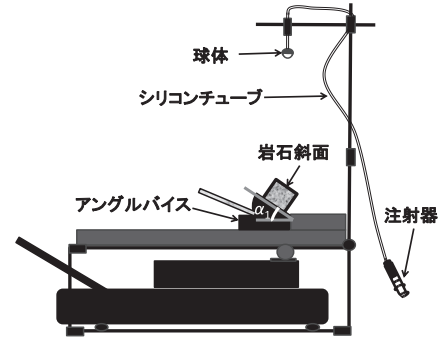


図-5 落石模型実験装置（岩石斜面）

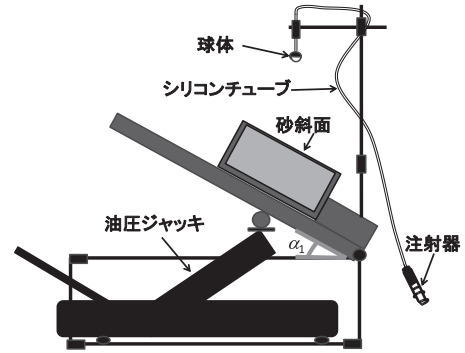


図-6 落石模型実験装置（砂斜面）

$$E'_R = \frac{1}{2} I \omega_r^2 = \frac{1}{5} m V_i^2 \sin^2 \alpha_1 \quad (19)$$

以上より、球体と岩石斜面衝突時に接点ですべりが生じない場合のエネルギー比 L' は、以下の式で求められる。

$$L' = \frac{E'_R}{E'_V} = \frac{2}{5} \frac{\tan^2 \alpha_1}{R_n^2 + R_t^2 \tan^2 \alpha_1} \quad (20)$$

2.4 落石模型実験装置と実験方法

落石模型実験をおこなうため、図-5、6のような装置を作製した。本装置はアングルバイスまたは油圧ジャッキを用いて入射角度を変化させることができ、球体の落下高さを自由に設定できる。球体の自由落下は、注射器を用いてシリコンチューブ内を減圧することにより、その先端に球体を吸引後、チューブ内を減圧状態から解放することによって表現した。落下球体は、アルミナボール（直径：19.47mm, 30.57mm, 密度：3.75g/cm³, 以下、「AL 球」と記述する。）とメノウボール（直径：20.13mm, 30.23mm, 密度：2.65g/cm³, 以下、「AG 球」と記述する。）を用いた。球体の衝突斜面は、岩石（花崗岩）と砂（鳥取砂丘砂）とした。砂斜面の作製には、425 μ m ふり通過分、かつ、250 μ m ふり残留分の砂を 110 $\pm$ 5 $^\circ$ C で炉乾燥し、パイプレータを用いて締固めた。その際の相対密度は 86 $\pm$ 1% である。



図-7 装置配置図 (砂斜面の例)

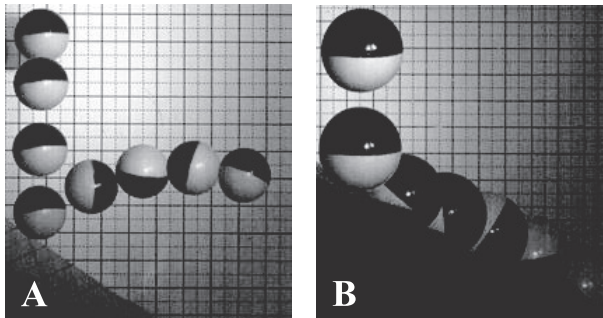


図-8 高速度カメラで撮影した落石運動の軌跡 (A: 岩石斜面, AL 球; B: 砂斜面, AL 球)

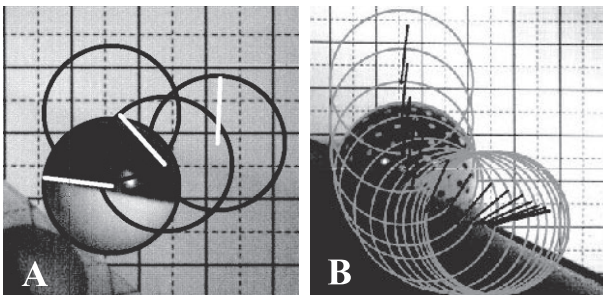


図-9 球体の座標(x, y)と回転角度(θ)の読み取り (A: 岩石斜面, AL 球; B: 砂斜面, AL 球)

球体の運動は、高速度カメラ（フोटロン製 FASTCAM-MAX120KC、カメラレンズ：ニコン製 AF Micro-Nikkor 105mmf/2.8D）を図-7のように配置し、撮影・記録の後、画像より球体の運動を追跡した（図-8）。球体の移動距離と回転角度は、パーソナルコンピュータ（jw-CAD ソフト使用）上で読み取った（図-9）。なお、本カメラは、1/3000 秒のシャッター速度を有している。

実験方法は、以下の通りである。

- (1) 接触斜面の傾斜角度を設定する。
- (2) シリコンチューブの先端に球体を吸引させ、自由落下させる。
- (3) 球体の斜面衝突前後の様子を高速度カメラで撮影する。
- (4) 記録された画像から球体の移動距離および回転角度を

表-1 実験項目

	花崗岩	鳥取砂丘砂
入射角度	0~20° (5°間隔) 30~70° (10°間隔)	0~35° (5°間隔)
落下高さ	30cm	30cm
使用球体	AL 球(直径 19.47mm) AL 球(直径 30.57mm) AG 球(直径 20.13mm) AG 球(直径 30.23mm)	AL 球(直径 30.57mm) AG 球(直径 30.23mm)

パーソナルコンピュータ上で読み取る。

実験項目を表-1 に示す。なお、砂斜面については、安息角が 36°であったので、 $\alpha_1=0\sim35^\circ$ について実験を行った。

3. 結果および考察

3.1 球体の岩石斜面衝突時における落石運動

岩石斜面における入射角度と実験結果の関係を図-10 に示す。本図は、同じ条件下で数回行った実験の中から 3 回の結果の平均値をプロットしたものである。

法線方向速度比 R_n は 0.8~1.0 の間にあり、入射角度 α_1 の違いによる明確な傾向は見られなかった（図-10A）。なお、本実験での 1 つのデータプロットにおける R_n の標準偏差は最大で 0.08 であった。一方、接線方向速度比 R_t は、 $\alpha_1=30\sim40^\circ$ よりも低角度側では、明確な傾向は見られないが、AL 球では $\alpha_1=50^\circ$ 、AG 球では $\alpha_1=40^\circ$ から、それぞれ、 R_t が増加傾向を示した（図-10B）。また、1 つのデータプロットにおける R_t の標準偏差は、 $\alpha_1=30\sim40^\circ$ よりも低角度側では最大で 0.27 とばらつきも多いが、 $\alpha_1=40^\circ$ 以降では最大で 0.04 であった。ここで、 R_t （図-10B、実線）とチルト試験により求めた球体と岩石斜面との摩擦係数 μ_f を式(6)に代入することにより求めた R_t （図-10B、破線）とを比較すると、 α_1 が増加するにつれて近似しているように見える。式(6)を μ について変形すると、

$$\mu' = \frac{1-R_t}{1+R_n} \tan \alpha_1 \quad (21)$$

を得る。式(21)より算出した μ' と μ_f を比較すると、 μ' は、 μ_f を上回ることにはなかった（図-10C）。この結果より、 μ_f は静止摩擦係数に対し、 μ' は動摩擦係数であると考えられる。角速度 ω は、AL 球は $\alpha_1=50^\circ$ 、AG 球は $\alpha_1=40^\circ$ から減少傾向となった（図-10D）。

次に、斜面衝突前後の球体エネルギーについて記述する。入射角度と並進および回転エネルギー（ E_V , E_R ）の関係図（図-10E）より、 E_R が減少を始めた角度から E_V が増加し

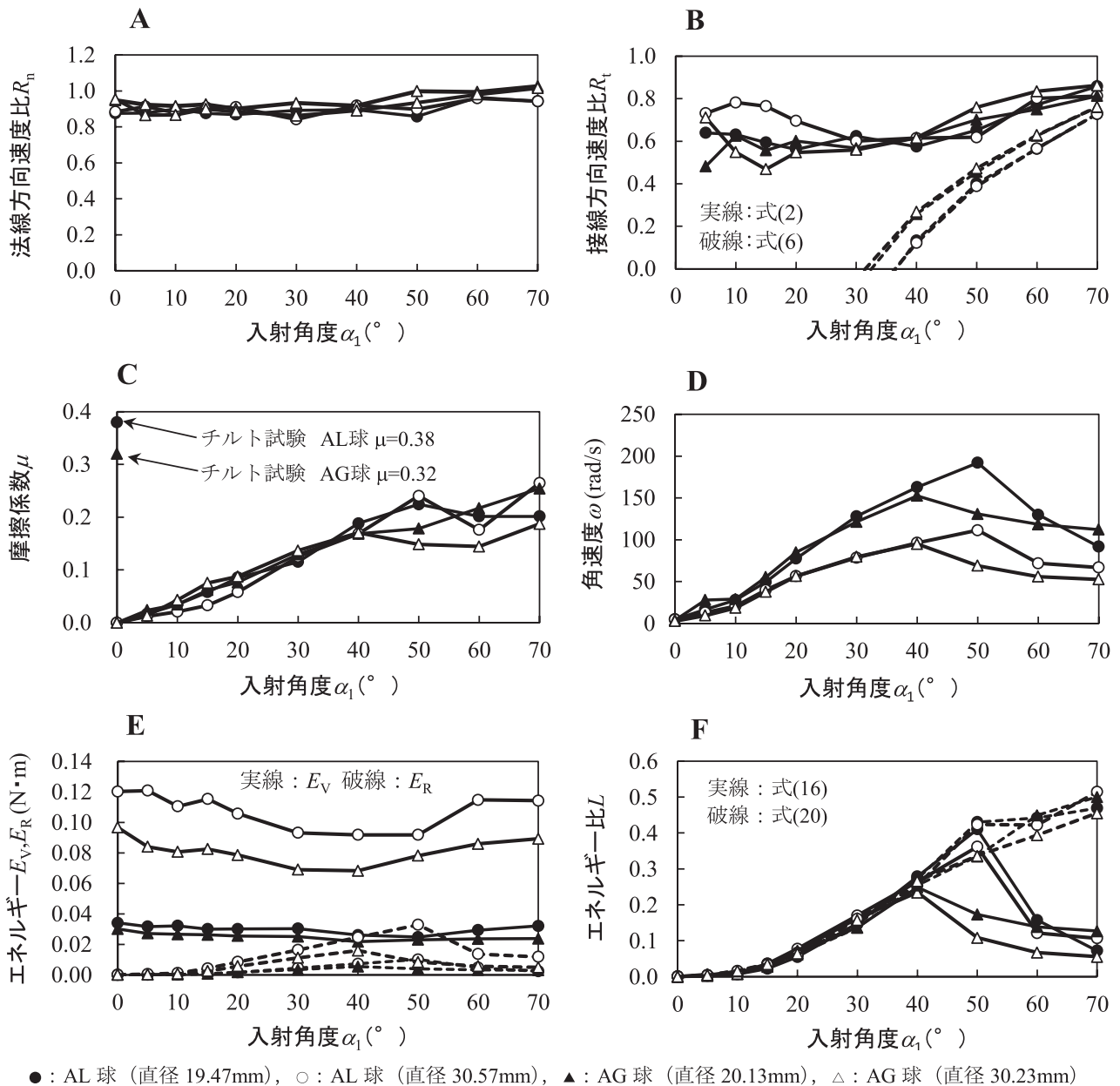


図-10 岩石斜面における入射角度と法線方向速度比(A), 接線方向速度比(B), 摩擦係数(C), 角速度(D), 並進および回転エネルギー(E), エネルギー比(F)との関係

始めたことがわかる。入射角度とエネルギー比の関係図(図-10F)より、 L と L' は、 α_1 の増大に伴い、ほぼ一致しながら増加しているが、 L については $\alpha_1=40^\circ$ または 50° を境に減少している。これは、 E_R の減少分が E_V に転換し始めた α_1 と一致する。よって、 $\alpha_1=40^\circ \sim 50^\circ$ から式(18)が成立しなくなり、すべりが生じ始め、この現象により、 ω が減少し、 R_t が増加したと考えられる。また、落石便覧⁶⁾によると、 E_R は E_V の40%程度まで達する場合もあるが、大半は10%とされている。本研究では、AL球およびAG球の L は、それぞれ、最大で40.9%および23.7%であった。

3.2 球体の砂斜面衝突時における落石運動

斜面衝突後の法線および接線方向移動距離の関係図(図

-11)より、AL球の方がAG球に比べ法線方向移動距離は長く、砂斜面に球体がもぐりこんでいることがわかる。そのため、AG球に比べて累計回転角の値が小さい(図-12)。また、AL球については、 $\alpha_1=15^\circ$ を境に法線方向距離は減少傾向と接線方向距離は増加傾向がみられる。ここで、本研究における累計回転角 θ とは、球体が斜面に接触してから停止するまでの回転量のことである。なお、 $\alpha_1 \geq 30^\circ$ では、球体が斜面衝突後に停止することがないため、パーソナルコンピュータ上で計測できるまでの回転量を累計回転角とした。

砂斜面における入射角度と実験結果の関係を図-13に示す。本図は、岩石斜面における実験と同様、3回の結果の平均値をプロットしたものである。なお、砂平面における

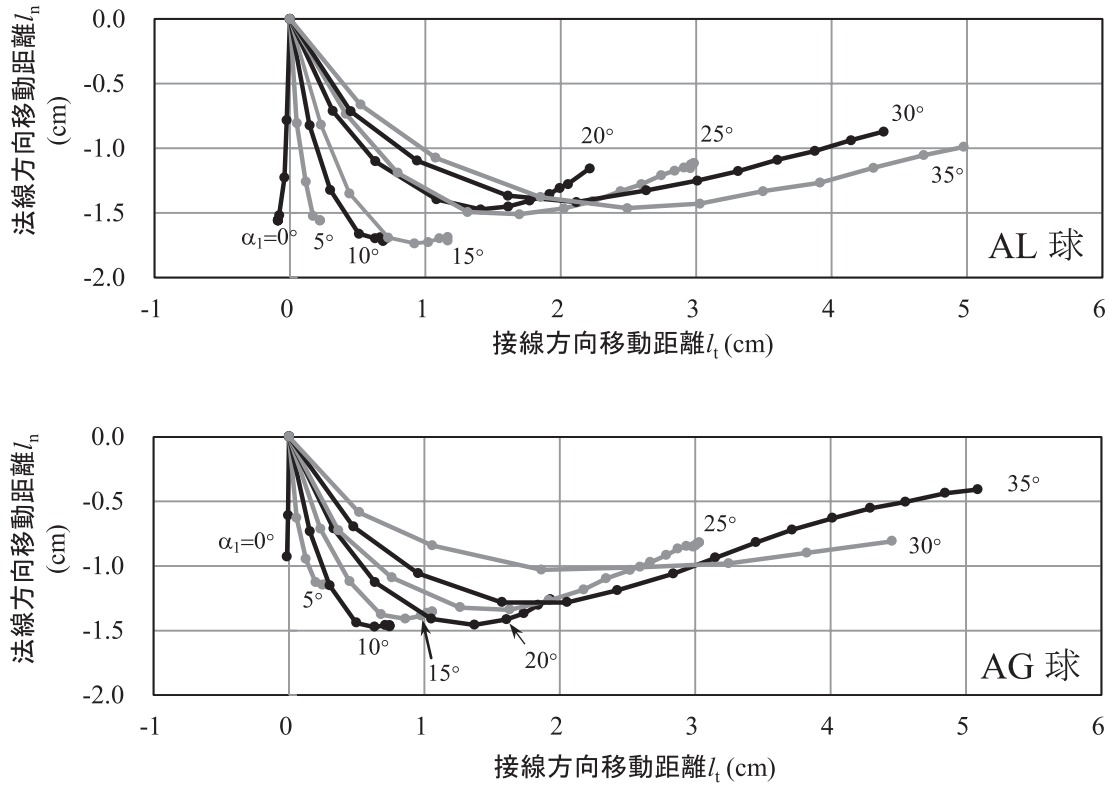


図-11 砂斜面における斜面衝突後の接線方向移動距離と法線方向移動距離との関係

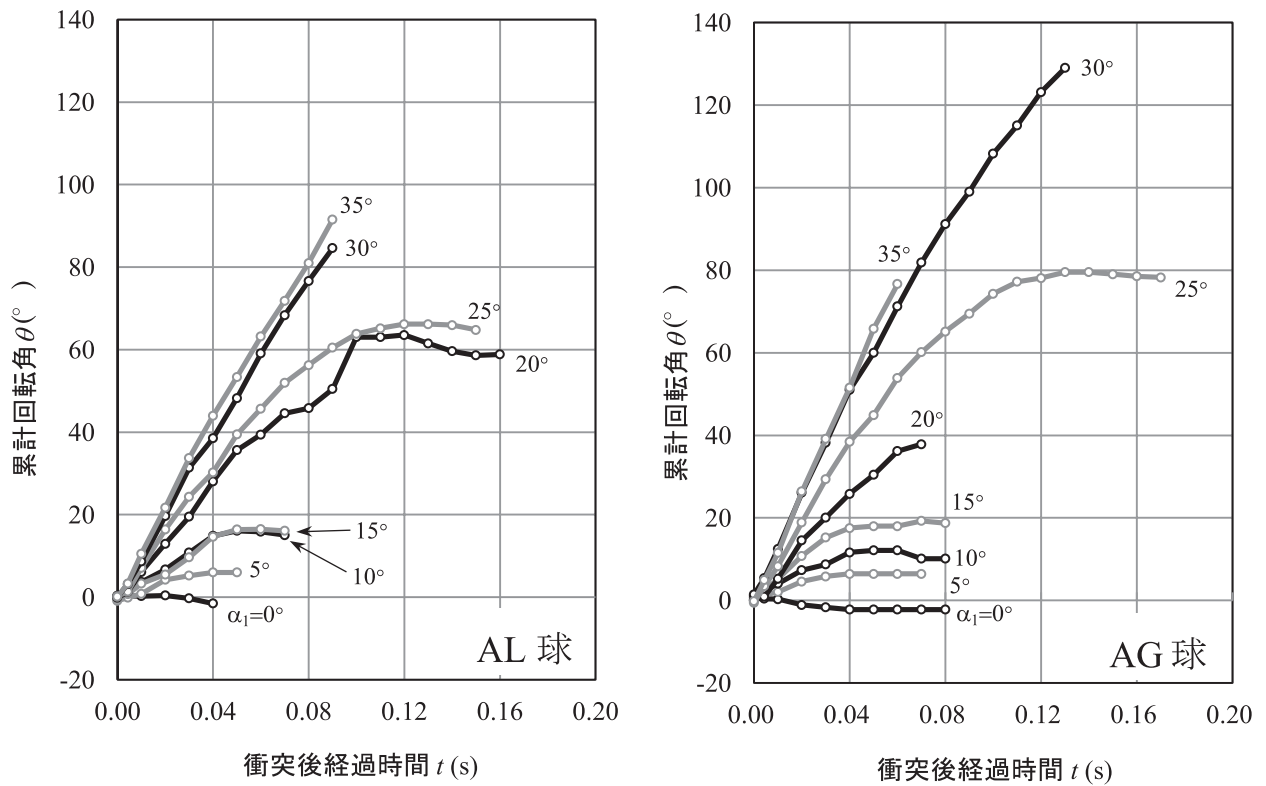


図-12 砂斜面における斜面衝突後の時間と累計回転角との関係

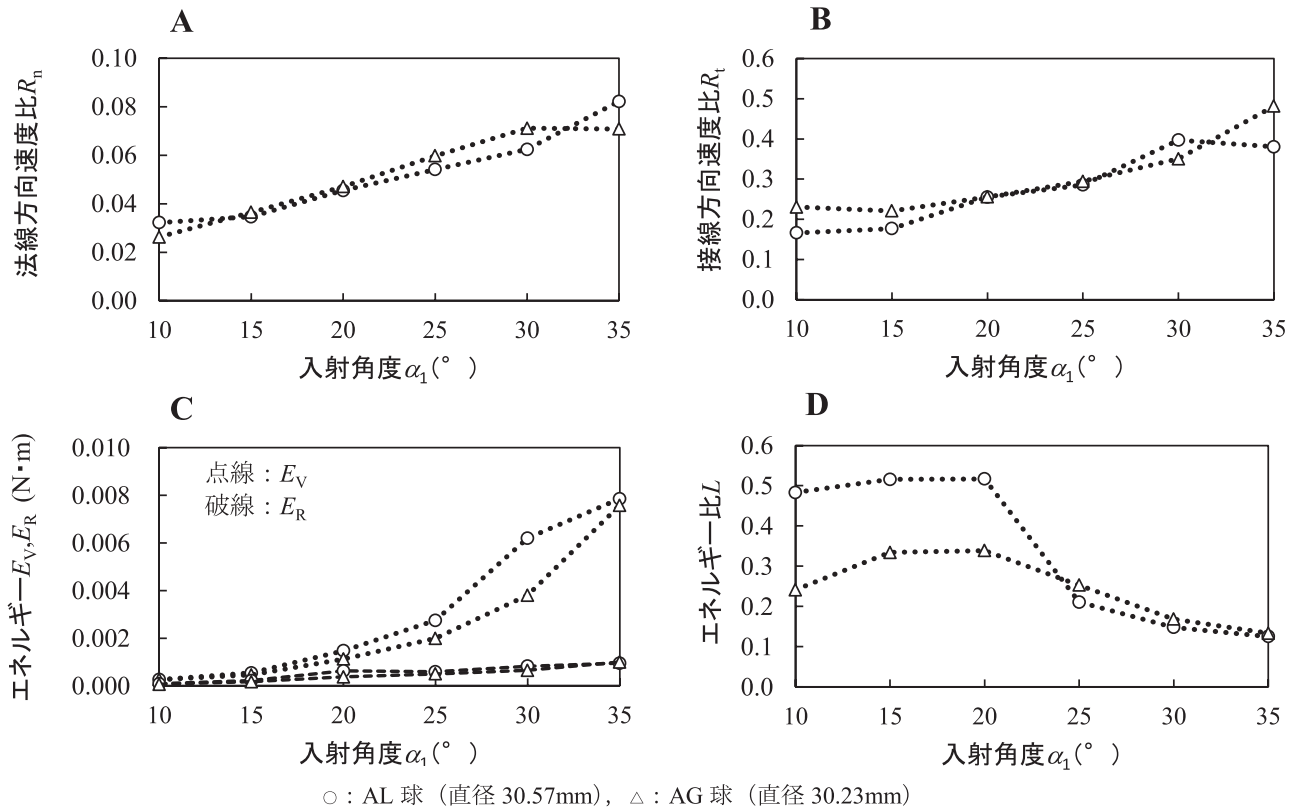


図-13 砂斜面における入射角度と法線速度方向比(A), 接線速度方向比(B), 並進および回転エネルギー(C), エネルギー比(D)との関係

実験では, $\alpha_1=0, 5^\circ$ におけるデータは, 上向きの方線方向反射速度 V_{nr} が測定できなかったため, 図-13 には示していない。

法線方向速度比 R_n および接線方向速度比 R_t は, 入射角度 α_1 の増大に伴い増加傾向にあり (図-13A, B), この結果の R_n については, Heidenreich and Labiouse の実験⁴⁾と同じ傾向を示した。また, α_1 の増大に伴い, E_R , E_v ともに増加傾向を示しているが (図-13C), $\alpha_1=20^\circ$ から E_v の変化率が大きくなり, L はその α_1 から減少傾向となった (図-13D)。

3.3 斜面材料の違いが落石運動に与える影響

岩石斜面における R_n は, α_1 の違いによる明確な傾向は見られなかったが, R_t については, $\alpha_1=40\sim50^\circ$ より高角度側では増加傾向を示した。一方, 砂斜面における R_n および R_t は, α_1 の増加に伴い, 増加傾向を示した。なお, どの α_1 においても, 砂斜面に比べて岩石斜面における R_n および R_t の方が大きい。また, L については, 両斜面において, 大きさは異なるものの, 岩石斜面では $\alpha_1=40^\circ$ または 50° を境に, 砂斜面では $\alpha_1=20^\circ$ を境に減少している。このことについては両斜面とも同じ傾向である。

岩石斜面は, 表面が堅固 (つまり, 衝突時の変形を球体および斜面とも無視できる) であるのに対し, 砂斜面は,

球体が斜面内にもぐりこむような材料である。そのため, 少なくとも, 衝突時のエネルギー損失や, 球体と斜面との摩擦などに違いが見られると考えられる。したがって, 斜面材料の違いは, 落石の運動特性を表すパラメーターの変化に影響を与える要因の一つになると考えられる。なお, これらの詳細については, 今後の検討課題である。

4. おわりに

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い, 入射角度, 球体の種類や大きさ, 斜面材料が異なる場合の法線および接線方向速度比 (R_n , R_t), 角速度 ω , エネルギー (E_v , E_R) 等の落石の運動特性を表すパラメーターの変化について検討した。以下に本研究で得られた結果をまとめる。

- (1) 入射角度 α_1 の違いによる岩石斜面における R_n は明確な傾向は見られなかった。それに対し, R_t は $\alpha_1=40\sim50^\circ$ から増加傾向を示した。
- (2) α_1 の増大に伴い, 摩擦係数 μ は増加傾向であったが, $\alpha_1=40\sim50^\circ$ よりも高角度側では明確な傾向は見られなかった。 μ はチルト試験より計測した摩擦係数 μ_t

を上回ることにはなかった.

- (3) 岩石斜面における角速度 ω は、 α_1 の増大に伴い、増加傾向を示していたが、 $\alpha_1=40\sim 50^\circ$ を境に減少傾向となった.
- (4) α_1 の増大に伴い、回転エネルギー E_R は増加傾向を示していたが、 $\alpha_1=40\sim 50^\circ$ を境に減少傾向を示し、その角度から、並進エネルギー E_V が増加した. また、 $\alpha_1=40\sim 50^\circ$ を境にエネルギー比 L が減少傾向となったのに対し、すべりが生じない場合のエネルギー比 L' は減少することなく増加した. この L' と L に差が生じた角度から球体と岩石斜面との間にすべりが生じたと考えられる.
- (5) 砂斜面衝突後のAL球とAG球の斜面上の移動距離はAL球の方が長く移動し、総回転角度はAG球の方が大きく、球種によって違いがみられた.
- (6) 砂斜面における R_n および R_t は、 α_1 の増大に伴い、増加傾向を示した. また、 L は $\alpha_1=20^\circ$ から減少傾向となった.
- (7) 岩石斜面と砂斜面とでは、衝突時のエネルギー損失や、球体と斜面との摩擦係数などの違いが生じた. したがって、斜面材料の違いは、落石の運動特性を表すパラメーターの変化に影響を与える要因の一つになると考えられる.

制度」(研究代表者:西村 強)の助成の一部を受けて実施したものである. 記して、謝意を表する.

参考文献

- 1) Wu S. S. : Rockfall evaluation by computer simulation, *Transportation Research Record*, Vol. 1031, pp. 1-5, 1985.
- 2) 日本道路協会: 落石対策便覧に関する参考試料ー落石シミュレーション手法の調査研究資料ー, 丸善出版株式会社, 448p., 2002.
- 3) 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.
- 4) B. Heidenreich and V. Labiouse: Small-scale experimental study of rockfall impacts on granular slopes, *Rivista Italiana di Geotecnica*, No. 2, pp. 80-91, 2004.
- 5) 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.
- 6) 日本道路協会: 落石対策便覧, 丸善出版株式会社, 422p., 2000.

謝辞

本研究は、一般社団法人中国建設弘済会「技術開発支援

(2014年6月23日 受付)