

空隙率・雰囲気圧の異なる付着性レゴリス層から受ける抵抗力の実験的推定

○櫻井諒太¹、中村昭子¹

¹神戸大学大学院理学研究科

背景と目的

粉粒体層への衝突・貫入挙動の解明は、小天体の表面レゴリス層への衝突・貫入挙動を理解するうえで重要である。この物理的メカニズムは未解明のものが多く、特に粉粒体から受ける抗力と粉粒体層の特性の関係は確立されていない。サブミリ～ミリサイズの粒子層に対してセンチサイズの円柱や球を弾丸として鉛直方向に 0～4 m/s の速さで衝突させた実験から、弾丸にはたらく貫入抵抗について、慣性力と深さ依存の抵抗力が独立して作用しているとし、内部摩擦角と関連付けた比例係数がそれぞれ導出されている[1]。しかし、付着性粉粒体の場合は構成粒子サイズによって空隙率が異なる。異なる雰囲気圧下で、数種類の異なる空隙率の 50 ミクロン以下の粉粒体に対してセンチサイズの球を鉛直方向に約 2.5 m/s の速さで衝突させた実験では、雰囲気圧や空隙率の違いによって最終貫入深さが大きく異なることが示されている[2][3]。以上より、抵抗力に粉体の内部摩擦角だけでなく、雰囲気圧や空隙率が影響する。そこで本研究では、大気圧下および真空下で、付着性粉粒体層に対して地球重力下で自由落下させたセンチサイズの弾丸が衝突・貫入する様子を観測し、粉粒体から受ける抗力を定める比例係数を推定した。

実験・解析手法

レゴリス模擬試料として 3 種類の粒径 (15,31,59 μm) のアルミナ粒子を上下が分離するテフロン容器に充填して、垂直応力を約 300 から 1000 Pa の間で変化させてせん断試験を行い、粉粒体層の内部摩擦角を導出した。また、上記のアルミナ粒子をアクリル容器に充填し (空隙率 52～62%)、様々な間隔で配置したコイル 5 つの内側に設置した。容器直径の 1/10 のネオジウム磁石円柱を弾丸として、初速度約 1.7 m/s (粒径 15 μm は 1.0, 3.0 m/s でも実施) で粒子層に貫入させ、磁石が各コイルを通過する際に発生する誘導起電力が弾丸の減速とともに小さくなる様子を大気圧下および真空下で記録した。さらに、フラッシュ X 線照射装置を用いて、同じ条件での貫入最中および貫入停止後の試料と弾丸をイメージングプレートに撮影し、貫入深さを測定した。粉粒体に弾丸が貫入する際の運動方程式[1]を壁の影響を考慮した Janssen の式を導入して変形した運動方程式

$$ma = -mg + \frac{C_D}{2} \pi a_p^2 \rho_g v^2 + \frac{k^* \pi a_p^2 \rho_g g D}{4 \mu_w K_a} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{4 \mu_w K_a}{D} |z|\right) \right\} \quad (1)$$

を用いて、初速度約 1.7 m/s で記録した誘導起電力を再現するよう磁石に作用する慣性力と深さ依存の抵抗力の無次元比例係数をそれぞれ C_D 、 k^* として求めた。

(m :弾丸質量, a :弾丸加速度, g :重力加速度, ρ_g :粒子バルク密度, v :弾丸速度, z :貫入深さ, a_p :弾丸半径, D :容器直径, ρ_g :粉粒体層バルク密度, K_a :垂直応力と水平応力の比 (内部摩擦係数に依存), μ_w :容器壁と粒子の摩擦係数)

内部摩擦角の推定

内部摩擦角は、粒径とともに増大した。40 μm のアルミナ粒子を用いて内部摩擦角を測定した[4]の結果と比較すると、本実験結果の方が内部摩擦角は小さい。これは[4]では垂直応力約 5000 Pa まで実験を行っているが、今回はそれよりも小さい垂直応力で実験を行っているため、粉粒体層がほとんど圧縮されず内部の粒子同士の接触が少ない分、内部摩擦角が小さいと考えられる。

観測貫入深さと計算による推定貫入深さの比較

すべての粒子層における大気圧下での貫入深さは、真空下での貫入深さの 1.5~2 倍程度であった。また、すべての粒子層で真空下での C_D 、 k^* は大気圧下の C_D 、 k^* の 2~3 倍程度であり、大気圧下、真空下ともに空隙率が減少するにしたがって、 C_D 、 k^* は増加傾向を示した。フラッシュ X 線画像から推定した貫入最中および貫入停止後の弾丸の深さと、推定した C_D 、 k^* を用いて運動方程式(1)を解いて導出した貫入深さを比較すると、大気圧下・真空下ともに概ね一致していた。また、初速度が 1.0、3.0 m/s の場合も同様にして貫入深さを比較すると、ばらつきは大きいものの、貫入最中および貫入停止後の弾丸の深さは概ね一致しており、運動方程式(1)によって観測した弾丸貫入深さを再現することができた。

サブミリ〜ミリサイズ粒子の実験との無次元比例係数の比較

[1]で導出された粉粒体の物質パラメータ依存性を用いて C_D 、 k^* を表し、今回推定した C_D 、 k^* と比較した。内部摩擦係数とともに増加する傾向を示す点は同じだが、今回推定した C_D 、 k^* の方が傾きは 2~3 倍程度大きい値を示す。[1]では弾丸が球形、今回は弾丸が円柱形であったため差が生じたと考えられるが、 C_D 、 k^* は[1]と同様に内部摩擦係数の関数として表せる可能性がある。

謝辞

本研究は、JAXA 宇宙科学研究所の超高速衝突実験施設の共同利用実験として行いました。

参考文献

- [1] H. Katsuragi and D. J. Durian, 2013, Physical Review E 87, 052208.
- [2] L. V. Clark and J. L. McCarty, 1963, Technical Note NASA D-1519.
- [3] J. R. Royer et al., 2011, EPL 93, 28008.
- [4] M. Kiuchi et al., 2023, Icarus 404, 115685.