

立命館大学理工学部 学生会員 ○大和田 和大
 立命館大学大学院 学生会員 牧本 祐樹
 立命館大学大学院 学生会員 黒岩 晃平
 立命館大学理工学部 フェロー 深川 良一

1. はじめに

人類は宇宙探査を現在までに幾度も実行してきており、特に探査対象となってきたのが月である。月面探査が再び世界から注目されるようになり、我が国に関しても月面探査の計画が進められている。探査目的の一つとして月面表層地盤の力学特性の把握が挙げられており、原位置試験などによる直接的観測が有力と考えられている。我々の研究チームは、スクリーオーガ掘削に焦点を当て、月面表層掘削時の抵抗を用いて力学特性を推定することを目指している。本研究では、スクリーオーガ掘削モデルを対象とし、掘削時に測定される抵抗値を用いて月面模擬土の地盤強度定数の逆推定手法に必要な先端掘削抵抗の分離手法の確立を試みた。

2. 掘削抵抗の分類

ここでスクリーオーガ掘削と呼ぶのは、図-1 に示すようなものであり、掘進に伴って中心軸回りに回転運動を行うものである。掘進を行う際には、破壊領域が形成される。この破壊領域の力のつり合いから求めた掘削力の総和を掘削時の抵抗値と呼ぶ。掘削抵抗力は Mackey と Ali の平刃掘削力学モデル¹⁾(図-2 参照)をベースに評価することができる。掘削試験において、検出される掘削抵抗は種々の抵抗より構成される。掘削中に発生する抵抗は以下の3種類に分類できる(図-3 参照)。すなわち1.オーガ上面土の自重(R_s)、2.排土抵抗(R_f)、3.先端掘削抵抗(R_t)である。さらに R_f は次の3種類に分類できる。2-a)オーガ刃側面と孔壁との摩擦、2-b)排土と孔壁との摩擦、2-c)オーガ刃上面と排土との摩擦である。逆推定に必要なものは先端掘削抵抗 R_t であり、 R_t の抽出を試みる。

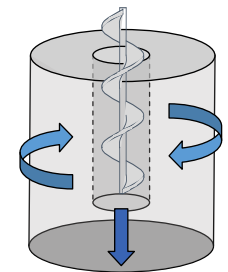
3. 回転継続試験

先端掘削抵抗を利用して逆推定を行うためには、任意の掘削段階で R_t の算定が可能である必要がある。本研究では、 R_t が常に出現する通常掘削状態と、 R_t が無視できる掘進を行わず回転掘削のみ行う回転継続状態に着目した。それぞれに対応する全抵抗を R_N 、 R_R とすると、それぞれの釣り合い状態は式(1)、(2)のように示される。

$$R_N = R_t + R_s + R_f \quad (1)$$

$$R_R = R_s + R_f \quad (2)$$

回転継続状態では、先端部分が新たな地盤と接触することはないので、 R_t は無視できる。 R_s ならびに R_f は、掘進速度や回転速度に依存せず、地盤条件が同じであれば掘削深さによってほぼ決定され、このときの掘削抵抗 R は実験的に評価できる。具体的評価方法としては、任意の目標掘削深さまで掘削を行い、到達した時点で掘進を停止させて、一定時間回転のみ継続させるというものである。この方法を回転継続試験と名付けた。試験は表-1 に示した試験条件の下で行なった。直径 200 mm、高さ 500 mm の円柱状のモデル土槽に月面模擬土(FJS-1)を詰めて行った。目標掘削深さを 100, 200, 300 mm とし、それぞれの掘削深さに到達した後回転継続試験を行った。



スクリーオーガ掘削

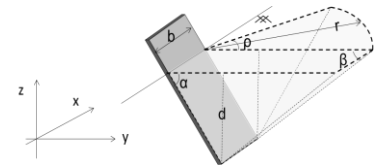


図-2. 平刃掘削力学モデル

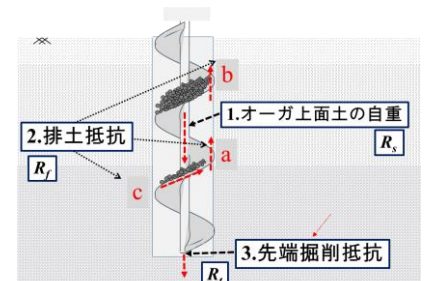


図-3. 抵抗値の分離

図-4 は、目標掘削深さ 200 mm に到達した際に掘進を一時停止させて回転継続させたときのトルクならびに鉛直掘削抵抗と変位，時間経過の関係を示している。掘進速度に関係なく，回転継続試験に移行した瞬間に回転掘削抵抗（トルク）も鉛直掘削抵抗もほぼ一定の値に収束していくことが分かった。以上の回転継続試験より、回転掘削のみを継続させた状態では、 R_s, R_f は、回転継続時間が 3 秒程度あれば、通常掘削での掘進速度に関わらず、ほぼ一定の値に収束するということが判明した。また、これらの傾向は、目標掘削深さ 100, 200 mm のケースでも確認することができた。結局、 R_s, R_f は実験的に評価することができて、 R_f は掘進深さ方向に比例的に増加し、 R_s は逆に反比例することが分かった

4. 先端掘削抵抗の分離の検討

回転継続試験の結果より，掘削深さと R_s および R_f との関係式を回転，鉛直方向それぞれについて得ることができた。この関数を式(3)，(4)に示す。

$$y = 0.0007x + 0.0096 \text{ (回転方向)} \quad (3)$$

$$y = -0.0336x + 4.274 \text{ (鉛直方向)} \quad (4)$$

x は掘削深さ (mm) であり， y は R_s, R_f の抵抗値の総和を示す。

上記関数における相関係数は非常に高い値を示しており（それぞれ 0.99, 0.99）、 R_s, R_f は掘削深さの関数として決定できることが分かった。これらの経験式を用いることにより，通常掘削状態においても掘削深さが特定できれば R_s, R_f を決定できる。したがって、地盤条件があまり変化しないならば、式(1)における全抵抗 R_N から式(2)の R_R を差し引くことによって R_t を決定できる。図-5 に 400 mm まで通常掘削したデータに対して $R_s + R_f$ を差し引き、 R_t のみ分離した結果を示す。鉛直方向に関しては掘削深さ 15-20 cm まで直線的に増加し、それ以降ではほぼ一定であることが分かる。回転方向に関しても同じことが言える。地盤条件が変化する場合でも、設定した深さで回転継続試験を行うことにより、 $R_N - R_R = R_t$ として先端掘削抵抗が抽出できる。

5. おわりに

検出される抵抗値を 3 つに分類した。また、スクリーオーガ掘削を用いて回転継続試験を行い，オーガ上面土の自重ならびに排土抵抗を実験的に評価し，先端掘削抵抗を分離抽出した。この手法が確立すれば、掘削深さを特定することによって先端掘削抵抗の分離を行える可能性が高い。今後はこれらの手法を用いて，様々な条件下の掘削試験より先端掘削抵抗を分離し，月面地盤強度定数の逆推定を行う予定である。

<参考文献>

- 1) McKyes, E. and Ali, O. S. : The cutting of soil by narrow blade, *Jour. Terramechanics*, Vol.14, No.2, pp.43-58, 1977.

表-1. 試験条件図-1.

掘進速度 (mm/s)	1.0, 4.5, 7.5
回転速度 (r.p.m.)	30
相対密度 D_r (%)	90

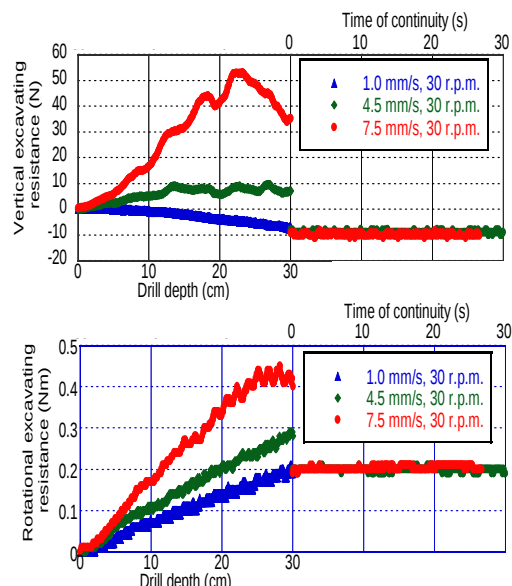


図-4. 回転継続試験結果(上：鉛直，下：回転)

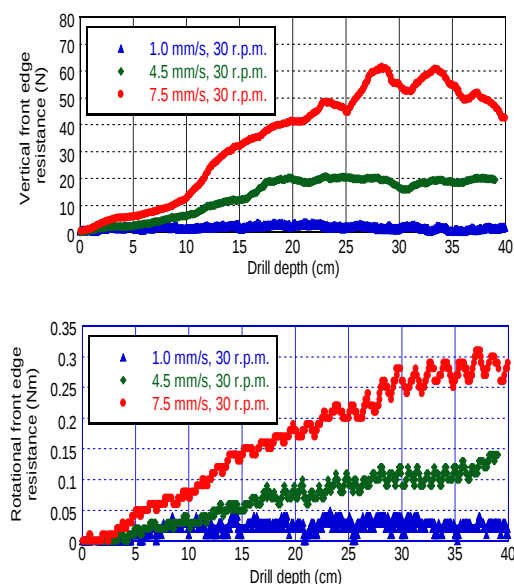


図-5. 先端掘削抵抗(上：鉛直，下：回転)