

立命館大学大学院 理工学研究科

学生員 ○田茂井 憲

立命館大学 理工学部

正会員 深川 良一

同上

学生員 小林 泰三

同上

学生員 渡邊 一慶

清水建設(株) 技術研究所

青木 滋

1. はじめに

現在、日本宇宙開発事業団等を中心に月面の探査計画が推進されている。将来の月面探査において、掘削作業は月の科学(鉱物・資源)探査に不可欠なことに加え、様々な観測機器の据付、構造物の建設、さらには資源利用のための原料採取などにおいて重要となる。月の表面は、隕石の衝突や昼夜の温度差で粉砕されたレゴリスという極めて細かい(直径 10~1000 ミクロン)粒子や岩の破片に覆われている。また、高真空、1/6G などといった点で地上とは異なる特徴を多く有しており、月地盤の掘削機構に関する特性を正確に把握するには留意すべき問題点が多い¹⁾。本研究はその基礎的研究として、月土壌の模擬材料と標準的な砂を対象に平刃による掘削模型実験を行い、掘削機構の解明を試みた。

2. 実験方法

実験に用いた装置の概略図を図-1に示した。フレームにステンレス製の掘削刃を固定し、掘削刃に対して土槽を移動させることで掘削を可能にした。また、掘削抵抗力の測定は、掘削刃の裏面に取り付けられた6軸力覚センサーで行った。掘削刃は刃幅 120 mm、刃厚 10 mm、逃げ角 45° のものを用い、すくい角を 0, 30° の 2 パターンに変化させた実験を行った。ここに、すくい角は鉛直方向と掘削刃のなす角である。また、掘削速度は 10 mm/s の一定速度である。

地盤材料としては、月土壌の模擬試料であるレゴリスシミュラントと豊浦砂の 2 種類を用いた。レゴリスシミュラントは、表-1に示した砂試料の物理特性から分かるように、豊浦砂と比べると土粒子密度が大きい。また、図-2に示したレゴリス粒子の拡大写真からも分かるように、レゴリスシミュラントは形状が複雑であるため密な状態になるとインターロッキング効果による見かけの粘着力を持つことが確認されている¹⁾。なお、いずれの試料も気乾燥状態のものを用いた。また、モデル地盤は相対密度 $D_r = 45, 65, 85\%$ となるように作製した。本実験では、掘削抵抗力の他に巻き取り式の変位計によって掘削距離を測定するとともに、地表面に掘り起こされる砂(以下ではこれを堆積砂と呼ぶ)の形状をレーザー変位計によって計測した。

3. 実験結果及び考察

図-3は密詰め地盤に対して、すくい角 30° で掘削を行った場合の掘削距離と水平抵抗力の関係を表したグラフである。この図から、豊浦砂とレゴリスシミュラントに共通して、掘削の進行に伴い水平掘削力が周期的な波形を示すことが確認できた。ただし、

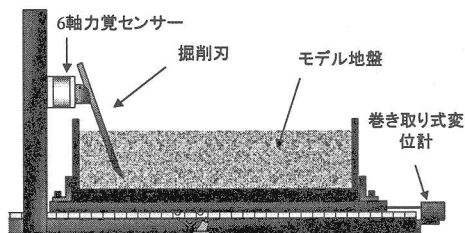


図-1 実験装置図

表-1 砂試料の物理特性

	$\rho_s (\text{g/cm}^3)$	$e_{\max}$	$e_{\min}$
豊浦砂	2.65	1.64	1.35
レゴリスシミュラント	2.76	2.01	1.49

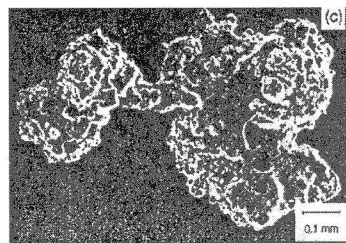


図-2 レゴリス粒子の拡大写真

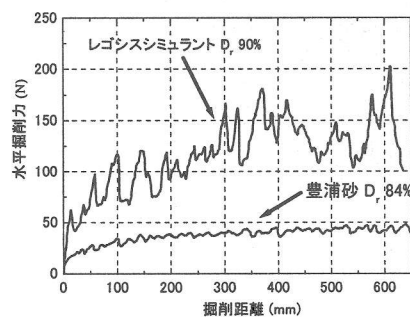


図-3 掘削距離と水平掘削力の関係

水平掘削力が示す波形の振れ幅と最大水平掘削力は、レゴリスシミュラントと豊浦砂では大きく異なる挙動を示している。図-4 は、 $D_r = 65\%$ の地盤におけるの最大水平掘削力の比較を表わしたものである。この図から、すくい角を 0° から 30° へと変化させると最大水平掘削力は、豊浦砂の場合に 50% 、レゴリスシミュラントの場合に 40% 程度低下することが判明した。また、異なる相対密度の場合においても、同様の傾向を示すことが確認された。

図-5 は、試料の相対密度と最大水平抵抗力の関係（実線）を表わしたものである。さらに、同図には相対密度と粘着力の関係（破線）も合わせて表示した。ここに、粘着力は、一面せん断試験のピーク強度から求めた値である。この図から、相対密度が 70% 前後以上においては、レゴリスシミュラントと豊浦砂の示す粘着力に著しい差異が生じ始めることが見てとれる。このとき、レゴリスシミュラントの最大水平掘削力の挙動が粘着力の増加傾向に沿うようにして増大していることが分かる。一方の豊浦砂に関しては、レゴリスシミュラントのような急激な増加現象は見られないが、この場合も豊浦砂の粘着力の増加傾向に沿った挙動を示している。このことから、掘削抵抗力は見かけ上の粘着力と比例関係にあり、レゴリスシミュラントのようにインターロッキング効果を発揮するような砂地盤では、見かけ上の粘着力の評価には注意が必要である。

図-6 は、レゴリスシミュラントにおける掘削距離と堆積砂の体積との関係を表したものである。この図から掘削の進行に伴い堆積砂量が収束する傾向のあることが分かる。また、図-3 から掘削の進行に伴って最大水平掘削力が収束していくことが見てとれるが、これは、図-6 に示されたように堆積砂が収束し、上載荷重がある程度の掘削距離以降では一定になることに起因するものと考えられる。

4. まとめ

1) すくい角を 0° から 30° に変化させると最大水平抵抗力は約 $40\sim 50\%$ 低減する。2) 水平掘削力は、見かけ上の粘着力と比例する関係にあり、レゴリスシミュラントのようにインターロッキング効果を発揮するような砂地盤では、見かけ上の粘着成分の評価には注意が必要である。3) 砂地盤の水平掘削力は、掘削刃の前面に堆積する砂の量にも大きく依存する。

参考文献

1) 宇宙開発事業団（2001）：月面ローバの研究，テラメカニクス研究分科会報告書，宇宙開発事業団。

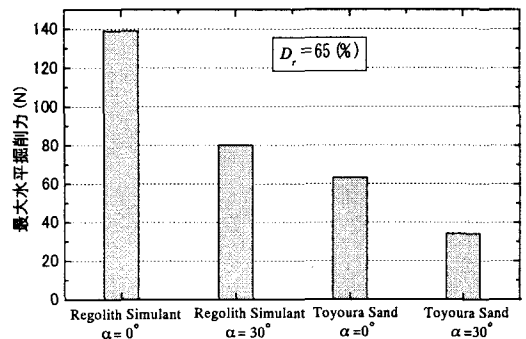


図-4 相対密度 65% の場合の最大掘削抵抗力

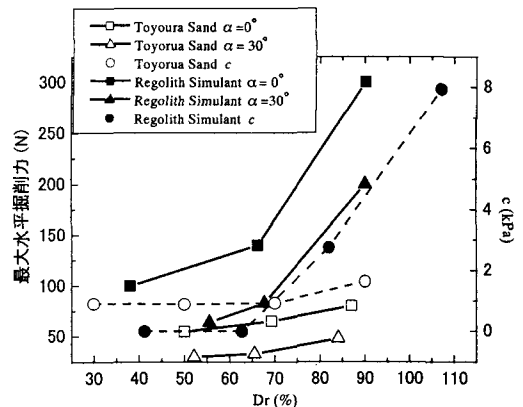


図-5 相対密度と最大水平掘削力、粘着力との関係

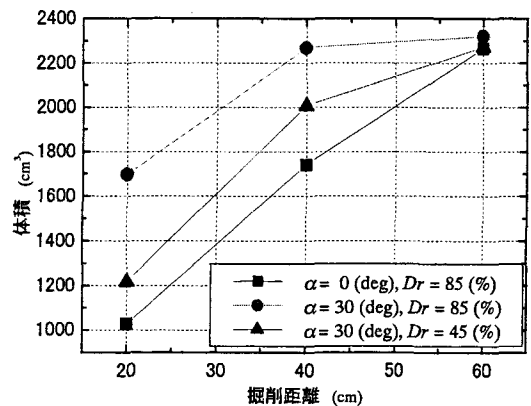


図-6 掘削距離と堆積砂の体積の関係