

月面模擬土の力学特性

九州大学工学部 学○陶山雄介
九州大学大学院 F 落合英俊 正 小林泰三

1. はじめに

2004年に米国の発表した新宇宙政策により、将来の有人探査を想定した月・惑星探査計画が具体化してきている。また、我が国の宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、2005年4月に向こう20年間の長期計画(JAXA長期ビジョン: JAXA2025)¹⁾を発表し、その中で月の探査・利用技術の確立を明確に示している。これを受けて、今後、月・惑星における宇宙利用計画およびそれに向けた各技術要素の研究開発が活発化すると予想される。著者らは、JAXAをはじめ、国内外の研究者と組織を組んで月面の地盤無人探査に関わる討議を重ねている。

将来の月面探査においては、表面を覆う砂(レゴリス)に関連する作業工程が数多く見込まれる。具体的には、ランダの着陸、探査ローバの走行、地盤の掘削・削孔、試料採取、基地・拠点系建設などが考えられるが、作業対象であるレゴリスの力学的挙動の事前把握はミッション遂行の成否の重要な鍵となる。月面は、低重力、高真空、砂粒子の特異性などといった点で、地上とは異なる条件を多く有しており、レゴリスの力学的挙動に及ぼすこれらの影響を十分に検討しておく必要がある。これらの実験的検討を行う上では実際のレゴリスを用いることは難しいため、それを模擬して製造された模擬土(シミュラントと呼ばれる)を用いて実験が行われるのが一般的である。その際、模擬土の強度・変形特性などのデータを蓄積することが基礎的研究として重要となる。本報では、清水建設(株)が製造した模擬土(FJS-1)²⁾を用いて種々の基礎的実験を行い、米国のアポロ計画やソ連のルナ計画で実際に得られたレゴリスのデータと比較するとともに、それらの力学的特異性について述べる。

2. 物理化学的特性

本実験に用いたシミュラント(FJS-1)は、玄武溶岩、チタン鉄鉱、橄欖(かんらん)石を粉砕し、化学成分や土粒子密度、粒度分布などを実際の月面土に模擬するように配合した砂質試料である。図-1に、粒径加積曲線を示す。なお、同図には、米国のアポロ計画によって持ち帰られたサンプル(以下、模擬土と区別して単に月面土と呼ぶ)のデータ³⁾も示している。この図から、模擬土は、月面土サンプルより若干細粒分が少なく、また、均等係数が小さくなる傾向があるが、分布傾向は月面土に類似しており、月面土が取り得る範囲にも入っていることが分かる。

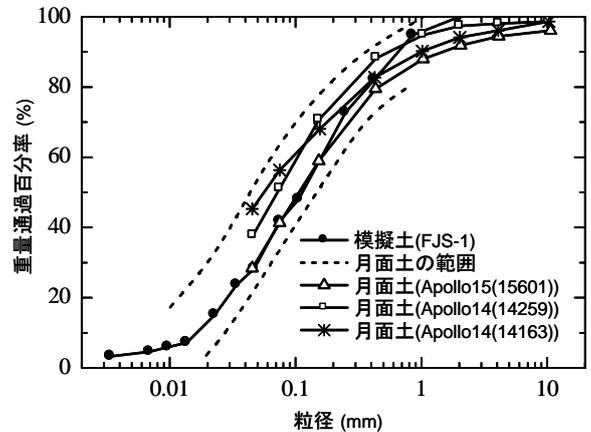


図-1 模擬土および月面土の粒径加積曲線

表-1は、月面土と模擬土の土粒子密度および最大・最小乾燥密度などの物理特性を示したものである。模擬土のかさ密度は、最大、最小ともに若干月面土に比べて大きいようである。一方の土粒子密度に関しては、アポロ14号ミッション時のデータとよい対応を見せている。他のミッションのデータでは $\gamma = 3.0 \text{ g/cm}^3$ を超えており、土粒子密度は、地上の一般の砂に比べて大きいことが分かる。これは、チタン鉄鉱、橄欖(かんらん)石などの比較的重い物質の含有率が地上の石英系の砂よりも多く含まれていることによるものと考えられる。

表-1 土粒子密度および最大・最小乾燥密度

ミッション	Sample No.	かさ密度		土粒子密度 $\gamma \text{ (g/cm}^3\text{)}$
		$\rho_{\min} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\rho_{\max} \text{ (g/cm}^3\text{)}$	
Apollo 11	10084.00	1.36	1.80	3.01
	10084, 68	1.26		
Apollo 12	12001, 19	1.30	1.93	
	12029, 3	1.15		
Apollo 14	14163, 133	1.10	1.55 ± 0.03	2.9 ± 0.1
	14163, 148	0.89 ± 0.03		2.90 ± 0.05
	14259, 3	0.87 ± 0.03		2.93 ± 0.05
Apollo 15	15031, 38	<1.30	1.89 ± 0.03	3.24 ± 0.05
	15601, 82	1.10 ± 0.03		
Luna 16		1.12	1.79	
Luna 20		1.1-1.2	1.7-1.8	
		1.04	1.80	

2. 力学的特性

図-2は、一次元のおエドメーター試験機を用いた圧縮試験の結果を示している。図中には、アポロ計画やルナ計画で持ち帰られた月面土で実施された実験結果も併せてプロットした。ルナ計画で実施された結果とは、異なる傾向が見られるが、本実験で用いた模擬土は、アポロ計画で実施された結果と類似した傾向を示している。月面には、水や風による砂の移動がないため、粒子同士の接触による磨耗等が起こりにくいため、粒子形状が非常にいびつである。模擬土も溶岩等を破碎して製造されているため、その粒子形状は、地上の一般の砂とは異なっている。これらは、後述するせん断特性だけでなく圧縮性にも大きな影響を及ぼすと考えられる。粒子がいびつであれば、かみ合わせによるインターロッキングが生じる可能性があり、低拘束条件下では、このインターロッキングによって非常に緩い状態でもある程度の骨格構造を保持して安定する可能性がある。とくに月面では、低重力となるため、非常にゆるい状態で堆積している可能性がある。ただし、粒子そのものが堅固でない限り、応力の増加によってかみ合わせ部が破碎し、大きな圧縮を生む可能性がある。図中のルナ計画のデータに見られる大きな圧縮は、このような要因によって生じたものと考えられる。

図-3は、乾燥状態の模擬土の三軸圧縮試験で得られたモール円である。この図から、破壊包絡線に非線形性が見られることが分かる。また、乾燥砂であるにもかかわらず、切片を持つことから、見かけの粘着力成分が発現していることが分かる。このような特異性は、火山灰質性のしらすのような土質と同様、インターロッキング効果によるものと考えられる。

図-4は、三軸圧縮試験の結果得られた強度定数を月面土や他の模擬土と比較したものである。ただし、強度定数を求めるにあたっては、上述の破壊包絡線の非線形性は考慮せず、近似直線の切片と勾配から粘着力 c と内部摩擦角 ϕ をそれぞれ求めた。この図から、模擬土には他の試料に比べて大きな見掛け粘着性成分を有することが分かる。これは、破壊包絡線を直線近似したことによるものかもしれないので、今後、月面の低重力を考慮して、超低拘束圧条件下での試験を行い、インターロッキング効果の及ぼす影響について検討する予定である。

3. まとめ

本報では、月面模擬土を用いて種々の基礎的実験を行い、米国のアポロ計画やソ連のルナ計画で実際に得られたレゴリスのデータと比較した。その結果、模擬土は月面土と類似した力学的特性を有していることを明らかにした。今後は、この模擬土を用いて、月面環境下での土-機械系(構造物系)の諸問題に取り組んでいく予定である。

- 1) JAXA, HP: http://www.jaxa.jp/2025/index_j.html
- 2) Shimizu Corporation (1997). Lunar resource utilization <Lunar soil simulant>, Booklet of Shimizu Corporation.
- 3) Heiken, G.H., Vaniman, D.T., French, B.M. editors (1991). Lunar Sourcebook, Cambridge University Press, 1991.

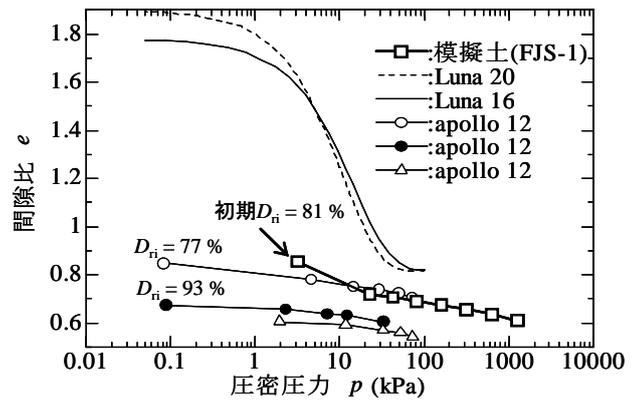


図-2 一次元圧縮試験の結果

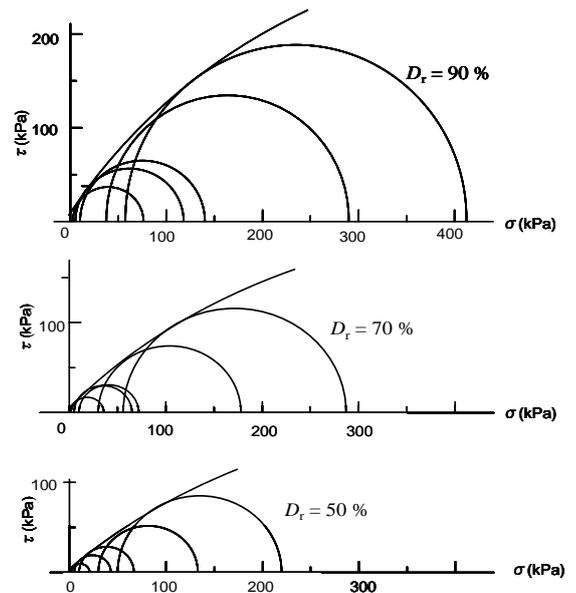


図-3 三軸圧縮試験で得られたモール円

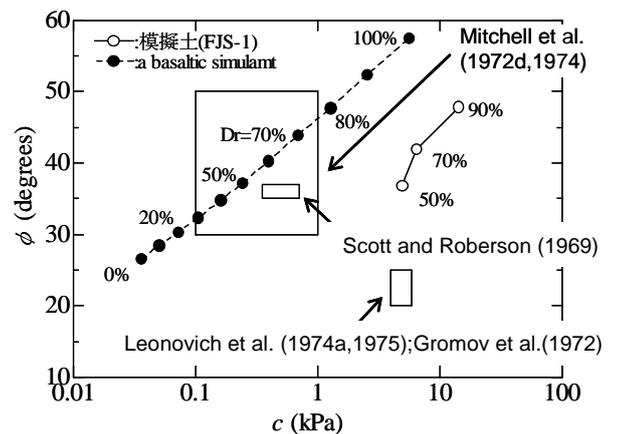


図-4 強度定数の比較