

月面模擬土の変形・強度特性

九州大学

学○藤原洋一郎・F 落合英俊・正 安福規之

正 大嶺 聖・正 小林泰三・学 陶山雄介

宇宙航空研究開発機構

松井 快・宮原 啓

清水建設 (株)

青木 滋

1. はじめに

2004年1月の米国ブッシュ大統領による新宇宙政策 (New Vision for Space Exploration) の発表以降、世界各国で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。このような中、宇宙航空研究開発機構 (JAXA) は、2005年4月、将来の我が国の宇宙開発をめぐる長期ビジョン (JAXA2025)¹⁾ を発表した。現在、2007年7月に月周回衛星「SELENE (セレーネ)」の打ち上げが予定されており、その達成の暁には、月探査計画に関連した研究が活発化すると予想される。将来の月探査では、月面への着陸、資源探査、拠点・基地建設など月面の地盤に関連するミッションやオペレーションが数多く見込まれるようになる。これらのプロセスの安定性や実現性を評価する上で、月面土 (レゴリス) - 機械系、あるいはレゴリス-構造物系の相互作用の事前評価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、レゴリス粒子の特異性などといった点で、地上とは異なる環境・条件を多く有しており、月面地盤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。そこで、本研究では、月面土を模擬して作られた模擬土を用いた三軸圧縮試験を行い、その変形・強度特性を調べた。

2. 月面模擬土 (レゴリスシミュラント)

一般に、月・惑星を覆う表層土壌のことをレゴリスと呼ぶ。月面は、度重なる流星物体の衝突により破碎された非常に細かい粒子からなるレゴリスで覆われている。また、水や風による土の移動がないため、粒子同士の接触による磨耗が起り難く、個々の粒子形状が不定形で非常にいびつである。月探査に関連する研究を行う上では、実際のレゴリスを用いることは難しいため、レゴリスを模擬して製造された模擬土 (レゴリスシミュラント) を用いて実験が行われることが多い。米国では、アポロ計画で持ち帰られたサンプルの化学組成や粒度分布、土粒子密度などを模擬して作られた Minnesota Lunar Soil Simulant (MLS-1)²⁾ や Johnson Space Center Lunar Soil Simulant (JSC-1)³⁾ がその代表例である。我が国では、清水建設(株)が製造した模擬土 (FJS-1) を用いた研究がしばしば行われており、本研究では主にこの FJS-1 を対象として試験を行った。

FJS-1 は、玄武溶岩、チタン鉄鉱、橄欖石 (かんらん石) などを粉碎し、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材料である。図1に月面土の拡大画像と模擬土の電子顕微鏡 (SEM) 画像を示す。本研究では FJS-1 と比較するための試料として、豊浦砂およびシルト質の熊本砂 (ここでは単に Silt と呼ぶ) を用いた。各試料の物理特性を表1に示す。一般に、米国のアポロ計画や旧ソ連のルナ計画で持ち帰られたサンプルから明らかとなった通り⁴⁾、月面土は土粒子密度が高く、また最小・最大間隙比のとりうる範囲が豊浦砂のような標準砂に比べて広い。また、前述の通り、粒子は細かく、分類上ではシルトが大半を占め、また粒度が良いのが特徴である。表1より、FJS-1 は、このような月面土の特徴を再現した材料であることを確認することができる。

3. 三軸圧縮試験

本研究では、試料の変形・強度特性を調べるために、炉乾燥後の試料を用いた排水三軸圧縮試験を行った。試料は相対密度を 95、80、65、50% に調整し、2.0~49.1 kPa の側圧条件下で載荷を行った。なお、試験は二重セル方式とし、体積変化を内セルと外セルの水位差 (差圧) から読み取って換算した。

実験で得られた密詰め状態の軸差応力 - 軸ひずみ関係および体積ひずみ - 軸ひずみ関係の一例を図2に示す。この図では、各試料において残留状態での軸差応力には大差は見られないものの、ピーク強度に関しては豊浦砂や Silt に比べて高い値を示している。すなわち、土粒子間のすべり摩擦に由来したせん断抵抗 (以下、これをすべり摩擦成分と呼ぶ) は類似したものといえるが、FJS-1 にはその他の要因に起因するせん断抵抗の加算増分が極めて大きいことが分かる。一般に、砂のせん断には、すべり摩擦成分の他に、ダイレイタンスーに起因する強度増分が考えられ、その関係を表現するためのダイレイタンスー補正式が数多く提案されている。本研究では、FJS-1 が既往のダイレイタンスー補正式に従うものなのかを調べた。

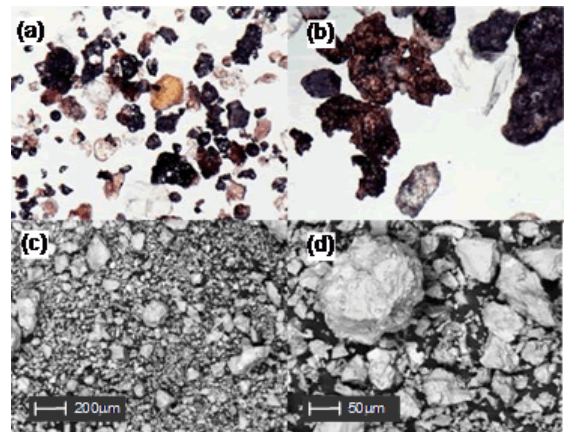


図1 月面土(a,b)および模擬土(FJS-1:c,d)のSEM画像

表1 各試料の物理特性

Soil property	FJS-1	Toyoura	Silt
最大密度, ρ_{max} (g/cm ³)	1.49	1.34	1.03
最小密度, ρ_{min} (g/cm ³)	2.02	1.64	1.56
最大間隙比, e_{max}	0.46	0.62	0.66
最小間隙比, e_{min}	0.98	0.98	1.54
土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	2.95	2.65	2.62
有効径, D_{10} (mm)	0.014	0.21	0.002
平均粒径, D_{50} (mm)	0.10	0.26	0.019
均等係数, U_c	11.43	1.33	11.50
曲率係数, U_c'	1.30	0.98	1.11

4. FJS-1 の強度成分

土のせん断時の強度発現メカニズムに関する研究は、Taylor⁵⁾以来、多くの研究者によって行われてきた。その基本となる考えは、前述の通り、土のせん断強度は、すべり内部摩擦による抵抗成分と、体積膨張が拘束圧力に対して行う仕事の成分からなるというものである。せん断が進行し、体積変化が見られなくなった時点、すなわち限界状態あるいは残留状態には、ダイレイタンシーに起因する強度成分は発現しないと考えられる。このときの残留強度から求められる摩擦角のことを ϕ_{cr} とすることにする。ただし、 ϕ_{cr} をはじめとする摩擦角は、Bolton⁶⁾の提唱する割線パラメータ (セカントアングル) によって算出するものとする。一方のダイレイタンシーに起因する摩擦角をダイレイタンシー角とみなして ψ とした場合、 ψ は、原理的に $\phi - \phi_{cr}$ で表せることになる。ここに、 ϕ は、任意のせん断過程における摩擦角である。先の Bolton の研究によれば、標準的な砂は、この関係には従わず、 $\phi = \phi_{cr} + 0.8\psi$ の関係にあることを実験的に明らかにしている。また、同論文では、モールのひずみ円から、ダイレイタンシー率 $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1$ を用いて ψ を表現することができるとしている。ただし、体積ひずみ増分を平面ひずみ条件 ($d\varepsilon_v = d\varepsilon_1 + d\varepsilon_3$) で考えるか三軸の軸対象条件 ($d\varepsilon_v = d\varepsilon_1 + 2d\varepsilon_3$) で考えるかでその関係は異なってくる。それぞれのケースについて、 ψ と $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1$ の関係を図4に示す。なお、この図以降、本文では、ピーク時の強度発現に限定して議論を進めることとする。図4には、豊浦砂の三軸試験によって得られた ψ_{max} と $(d\varepsilon_v/d\varepsilon_1)_{max}$ のデータおよびその近似式もプロットしている。実験値の示す値は、Boltonの理論式とは外れていることが分かるが、図中の近似式を用いることによって、豊浦砂のような標準的な砂の ψ を $d\varepsilon_v/d\varepsilon_1$ から精度よく求めることができるようになる。今、ピーク時に発揮される摩擦角を ϕ_{max} とした場合、標準的な砂では、 ϕ_{max} を ϕ_{cr} と ψ_{max} との重ね合わせと見なすことができる。すなわち、標準的な砂では、 ϕ_{max} と $(\phi_{cr} + \psi_{max})$ が一致するはずである。しかしながら、FJS-1 や Silt の結果を整理すると、 ϕ_{max} が $(\phi_{cr} + \psi_{max})$ を上回るようになることが分かった。両者の差分を η とし、FJS-1の実験で得られた各種パラメータを表2に示す。 η は、せん断強度において、すべり摩擦成分とダイレイタンシー成分以外にも強度発現成分を有することを意味することになる。表2の通り、かさ密度や拘束圧によって η のとりうる値が変化することが分かる。この表からは、緩詰めより密詰め、低拘束圧より高拘束の方がその値が大きくなる傾向のあることが分かる。すなわち、FJS-1は、このような条件の場合には、すべり摩擦成分とダイレイタンシー成分のみ、すなわち、既往のダイレイタンシー補正式では、強度を過小評価することとなることが判明した。このような挙動を示す原因として、粒子のインターロッキング効果による強度成分の発現が予想される。粒子のインターロッキング効果は、見かけの粘着力を生むものとして解釈されることがあるが、月面環境のような低重力場においても、粘着力成分として評価し得るものなのか検討する必要がある。今後は、 η の定量的評価方法と、それを用いた破壊・安定問題の解析への適用性について検討していく必要がある。

5. おわりに

本研究では、月面土を模擬して作られた模擬土 (FJS-1) をはじめ、種々の砂試料を用いた三軸圧縮試験を行い、その変形・強度特性を調べた。その結果、FJS-1には、すべり摩擦成分とダイレイタンシー成分以外にも強度増分を発現する特異性のあることが判明した。今後は、このような強度成分を定量的に表現できる関係式を導くとともに、FJS-1の特異性を考慮できる月面の土質力学の構築を目指す予定である。

[参考文献]

1) JAXA, HP: http://www.jaxa.jp/2025/index_j.html, 2) Weiblen, P. W. et al. : Preparation of simulants for lunar surface materials, *Proc. Space '90: Engrg., Constr., and Operations in Space II*, ASCE, pp.98-106, 1990, 3) McKay, D. S. et al. : JSC-1: A new lunar soil simulant, *Proc. 4th Int. Conf. Engrg., Constr., and Operations in Space*, ASCE, pp.857-866, 1994, 4) Carrier, W. D. III. Et al. : Physical properties of lunar surface, *Lunar Sourcebook*, Cambridge University press, New York., 475-567, 1991, 5) Taylor, D. W. : *Fundamentals of soil mechanics*, John Wiley, 1948, 6) Bolton M.D. : The strength and dilatancy of sands, *Geotechnique*, 36, No. 1, 65-78, 1986.

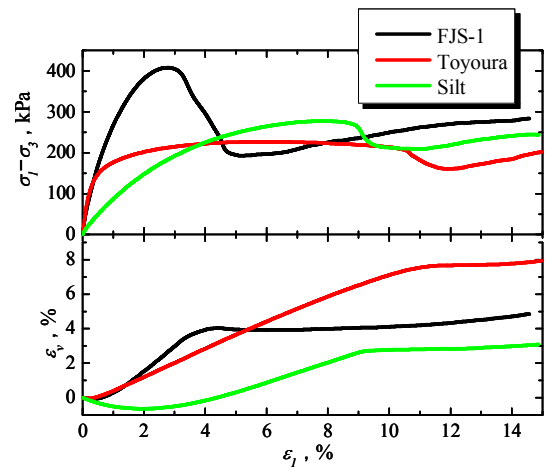


図3 軸差応力-軸ひずみ関係($D_r = 95\%$)の一例

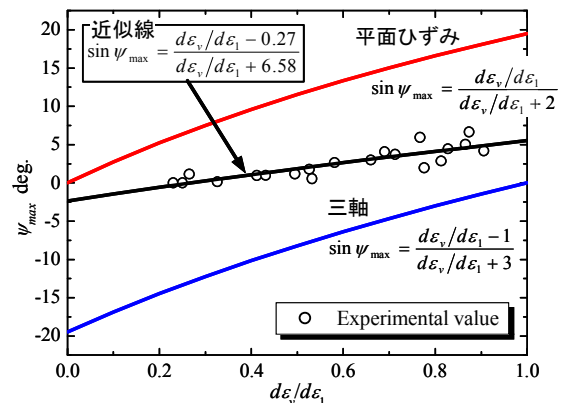


図4 豊浦砂におけるダイレイタンシー角とダイレイタンシー率の関係

表2 FJS-1 の強度成分

I_d	σ_3 kPa	$d\varepsilon_v/d\varepsilon_1$	ϕ_c deg	ϕ_{max} deg	ψ_{max} deg	η deg
0.65	49.1	0.49	41.3	43.5	1.78	0.33
	24.5	0.59	39.7	44.0	2.57	1.74
	11.8	0.44	42.5	46.3	1.38	2.38
	5.9	0.82	45.7	49.7	4.28	-0.23
	2.0	0.67	47.5	49.7	3.19	-0.99
0.95	49.1	1.48	41.5	54.0	8.61	3.85
	24.5	1.69	41.4	55.3	9.86	4.05
	11.8	2.02	44.3	58.3	11.7	2.28
	5.9	1.86	47.2	57.9	10.9	-0.20
	2.0	2.24	57.0	67.5	12.9	-2.38