火星模擬土(MMS-1)の強度特性に関する研究

藤川 拓朗* Timothy Newson** Aly Ahmed** Muhammad Safdar***

Research on the Mechanical Properties of Mojave Mars Simulant-1 (MMS-1) Soil

by

Takuro FUJIKAWA*, Timothy NEWSON **, Aly AHMED ** and Muhammad SAFDAR ***

According to the mission scenario of the International Space Exploration Collaboration Group (ISECG), a "Mars sample return plan" is underway to bring the soil of Mars back to Earth by 2030. In the near future, in order to efficiently perform various operations on Mars (filling, excavation, sampling, ground improvement, etc.), pre-simulation on Earth will be important. Therefore, there is an urgent need to develop an appropriate simulated soil and to understand its material and mechanical properties. Based on this background, the authors are investigating the physical and basic mechanical properties of Mojave Mars Simulant soil (MMS-1), which has been reported as a simulated soil for Mars. This study focused on the particle shape of MMS-1 and was conducted to investigate the effect of particle shape on shear strength and volume change. As a result, it was revealed that MMS-1 has a higher shear strength than Toyoura sand and has a clear peak as the relative density increases. Moreover, MMS-1 is a material that causes volume expansion during shearing even for low stress and density states compared with artificial soil, and it was revealed that this is due to the angularity of the MMS-1 particles.

Key words:

Mojave Martian Simulant-1 (MMS-1), Regoliths simulant, Stress-strain, Mars, Rover performance, Shearing, Soil-wheel interaction, Dilatancy

1 緒 言

現在、国際宇宙探査協働グループ (ISECG) のミッションナリオによると、2030 年までに火星の土を地球に持ち帰る“火星サンプルリターン計画”が進められている。2003 年に NASA が火星に送った探査ローバー (Spirit や Opportunity) は、砂地の走破に大変苦労したことが報告されている^{1), 2)}。これまでの火星軌道上の探査とは異なり、未知の大地に着陸して探査をするとなると、その大地を構成するレゴリスがどのように振舞うのかを予測し、探査機的设计や運用に活かしていくことがミッション達成において重要である。また、近い将来、火星における様々な作業 (掘削、試料採取、地盤改良や盛土の構築など) を遠隔で効率的に行うためには、地球上での事前シミュレーションが重要となり、そのためにも火星表層地盤を模擬した適切な模擬土の開発とその材料・力学特性の把握が急務である。このような背景の中、著者らは、火星模擬土の 1 つとして報告されている MMS(Mojave Mars Simulant) Soil³⁾を用いて、物理的性質や地盤工学的特性を明らかにすることを目的に、実験的な検討を行っている⁴⁾。また、せん断強度や体積変化については、粒子形状をはじめ、粒度、拘束圧、粒子表面粗度など多くの影響因子が考えられるが、地上砂の粒子形状に着目したせん断剛性率等の予測式⁵⁾が提案されてい

ることを踏まえ、今後、これらを火星模擬土 (以後、MMS-1) に応用することも視野に入れている。以上を踏まえ、本報告では MMS-1 の粒子形状に着目し、粒子形状がせん断強度や体積変化に及ぼす影響について検討した結果について報告する。

2 実験概要

2.1 実験に用いた試料

実験には、MMS-1、豊浦砂、模擬土の 3 試料を用いた。ここで模擬土とは、MMS-1 との粒子形状の違いがせん断特性に与える影響を把握する目的で、豊浦砂と珪砂粉 (シリカパウダー) を混合して粒度分布を MMS-1 に似せた試料のことであり、豊浦砂とシリカパウダーを質量比 2 : 1 で混合させて作製している。Table 1 に MMS-1、豊浦砂、シリカパウダー、模擬土の物理特性を示す。MMS-1 (Fig. 1) は、アメリカのカリフォルニア州にあるモハーベ砂漠から採取される玄武岩を粉砕したものであり、硫酸マグネシウム、石こう、塩化ナトリウム等を含み、火星の表層に堆積した地盤とよく似た化学組成を有している³⁾。

Fig. 2 に本研究で使用した試料の粒径加積曲線を示す。均等係数 U_c と曲率係数 U_c' (Table 1) より、MMS-1 は粒径幅が広い試料であることが分かる。また、ASTM D

† 原稿受理 令和 3 年 6 月 1 日 Received June 1, 2021 ©2022 The Society of Materials Science, Japan

* 福岡大学工学部社会デザイン工学科 〒814-0180 福岡市城南区七隈
Fukuoka University, Jonan-ku, Fukuoka 814-0180.

** University of Western Ontario, London, Ontario, Canada N6A 5B9.

*** University of Engineering and Technology (UET), Peshawar, Pakistan, 25120.

Table 1 Physical properties of samples.

	ρ_s (Mg/m ³)	e_{max}	e_{min}	D_{50} (mm)	U_c	U_c'
MMS-1	2.671	1.27	0.74	0.12	14.8	3.8
Toyoura sand	2.649	0.98	0.61	0.31	2.1	1.4
Silica flour	2.641	1.60	0.83	0.017	—	—
Artificial soil	2.646	0.88	0.36	0.26	30.1	2.07

Fig.1 Mojave Mars Simulant Soil (MMS-1).

Fig.2 Grain size distribution curves of samples.

Table 2 Program of direct shear tests for soil samples.

Sample	MMS soil	Toyoura sand	Artificial soil
w (%)	0	0	0
D_r (%)	20, 40, 60, 80	40, 60, 80	20, 80
σ_n (kPa)	10, 20, 50, 100, 200	50, 100, 200	10, 20, 50, 100, 200
Shear speed (mm/min)	0.2	0.2	0.2

Table 3 Relationship between relative density (D_r) and dry density.

Sample	D_r (%)	ρ_d (Mg/m ³)	Sample	D_r (%)	ρ_d (Mg/m ³)
MMS-1	20	1.23	Toyoura sand	20	1.40
	40	1.30		40	1.46
	60	1.37		60	1.52
	80	1.45		80	1.57
Artificial soil	20	1.49			
	40	1.58			
	60	1.69			
	80	1.81			

2487⁶⁾の統一土質分類体系 (USCS) によれば, シルト質砂に分類される。また, 豊浦砂とシリカパウダーを混合させて作製した模擬土は, MMS-1 と非常に似た粒度分布を持つことが分かる。

2.2 実験条件

各試料の相対密度や粒子形状が力学特性に与える影響を把握すべく, 定圧一面せん断試験 (ASTM D 3080⁷⁾)を行った。試料の含水比は, 火星の表層における土の堆積環境を考慮し, すべて絶乾状態のものを使用している。いずれの試験も矩形 60mm×60mm, 高さ 20mm のせん断箱に Table 2 に示す相対密度 $D_r = 20, 40, 60, 80\%$ の下, 試

料を空中落下法およびタンピング法を用いて充填した。垂直応力, せん断速度は表に示す通りであり, せん断変位が 9mm に達した時点で試験終了とした。Table 3 には参考までに実験に使用した 3 試料の相対密度 D_r と乾燥密度 ρ_d の関係を示している。

3 実験結果

Fig. 3 に, MMS-1, 豊浦砂, 模擬土を用いた $D_r=20\%$ および $D_r=80\%$ における一面せん断試験より得られたせん断応力とせん断変位の関係を示す。いずれも火星表層の状況を考慮し, $w=0\%$ の乾燥状態で行った結果である。 $D_r=20\%$ においては, 非常に緩い状態であり, 豊浦砂の供試体を作製することができなかったため MMS-1 と模擬土の結果のみ示している。なお, 参考までに, MMS-1 においては, 圧密段階終了時 (せん断開始前) の相対密度は, $\sigma_n=10\text{kPa}$ で $D_r=25.1\%$, $\sigma_n=200\text{kPa}$ で $D_r=52.3\%$ であった。いずれの試料の相対密度においても垂直応力の増加に伴いせん断応力が増加する傾向にあることが分かる。また, 垂直応力の増加に伴い初期剛性が増加しているが, 相対密度の違いによる影響は見られなかった。次に相対密度の違いに着目すると, 相対密度の増加に伴いせん断応力は増加し, いずれの試料も明確なピークを示す傾向にある。特に, MMS-1 と模擬土は最大せん断応力こそ異なるものの, 両者は非常によく似た挙動を示している。また, MMS-1 は豊浦砂や模擬土に比べて最も高いせん断応力を有しており, 相対密度の増加に伴い明確なピークを示す材料であることが分かる。これらの要因は, 豊浦砂に比べ MMS-1 の粒径幅が広いことに起因しているためと考えられる。また, 試料の粒子形状が異なることも要因の 1 つであると考えられる。Fig. 4 に垂直変位とせん断変位の関係を示す。なお, 垂直変位については, 体積圧縮を正(+), 体積膨張を負(-)と定義している。 $D_r=20\%$ において, MMS-1 と模擬土の体積変化は大きく異なっていることが分かる。MMS-1 のせん断挙動は明確なピークを示さず典型的な緩い砂に見られる挙動を示したにも関わらず, 体積変化については膨張する挙動を示した。これは, MMS-1 が玄武岩を人工的に破碎して作製されたものであり, 粒子形状が豊浦砂や模擬土に比べて角張っているためと考えられる。一方, 模擬土についてはせん断変位の増加に伴い体積は収縮し, 緩い砂に見られる負のダイレタンシーを呈していることが分かる。 $D_r=80\%$ においては, いずれの条件においてもせん断中に体積は膨張し, 密な砂の挙動に見られる正のダイレタンシーを呈している。また, MMS-1 と豊浦砂はいずれの垂直応力においても類似した体積挙動を有しており, レゴリスを対象とした先行研究⁸⁾と同様な結果が得られている。以上のことから, 相対密度が低い領域では, MMS-1 と模擬土は異なる体積変化特性を示すが, 相対密度が増加するにつれ両者は同様な体積変化特性を持つことが明らかとなった。このことは, 火星の表層の模擬土の検討を行う場合, 単に化学成分や粒度を模擬するだけでなく, 堆積状況や粒子形状の影響につ

(a) Dr=20%, MMS-1

(b) Dr=20%, Artificial soil

(c) Dr=80%, MMS-1 and Toyoura sand

(d) Dr=80%, Artificial soil

(a) Dr=20%, MMS-1

(b) Dr=20%, Artificial soil

(c) Dr=80%, MMS-1 and Toyoura sand

(d) Dr=80%, Artificial soil

Fig.3 Relationships between shear stress and shear strain of samples.

いても十分に検討しておくことが重要であることを示唆している。次に、一面せん断試験より得られた結果をもとに、MMS-1 と豊浦砂の各相対密度におけるせん断抵抗角と粘着力の関係を Table 4 に示す。MMS-1 は豊浦砂に比べてせん断抵抗角と粘着力は高い値を示すことが分かる。さらに、実験で得られたこれらの値と他の火星模擬土や実際の原位置試験で得られた材料定数との比較を行った。その結果、本研究で用いた MMS-1 のせん断抵抗角 (ϕ_{d_peak}) の取る範囲は $37.1^\circ \sim 46.0^\circ$ 、粘着力 (c_{d_peak}) の取る範囲は $3.8 \sim 15 \text{ kPa}$ であった。これらの

Fig.4 Relationships between vertical displacement & shear strain of samples.

値と他の模擬土や着陸地点の調査結果 (Table 5) と照らし合わせた結果、同程度の値をとることが判明した。

4 考察 (MMS-1 の粒子形状がせん断特性に及ぼす影響)

前章より、MMS-1 は $Dr=20\%$ においてもせん断中における体積膨張が他の試料と比べて顕著であることが明らかとなった。そこで、これらのダイラテンシー特性について、MMS-1 のピークせん断応力時のダイレーション角 (ψ_{max})¹²⁾ や粒子形状に着目して考察を行う。Fig. 5 は、ピークせん断応力時のダイレーション角 (ψ_{max})¹²⁾ について示したものであり、 ψ_{max} と強度のダイラテンシ

Table 4 Physical properties of the MMS-1 and Toyoura sand.

	Dr (%)	Bulk density (Mg/m ³)	Friction angle ϕ'_{d_peak} (°)	Friction angle ϕ'_{d_cs} (°)	Cohesion c_{d_peak} (kPa)	Cohesion c_{d_cs} (kPa)
MMS-1	20	1.23	37.1	37.1	6.3	2.5
	40	1.30	42.3	38.0	3.8	2.5
	60	1.37	45.2	39.7	10	1.2
	80	1.45	46.0	39.9	15	6.3
Toyouura sand	40	1.46	33.6	30.0	0	3.7
	60	1.52	36.7	30.5	2.5	5.0
	80	1.59	38.8	30.0	1.3	7.5
Artificial soil (Toyouura : Silica =2 : 1)	20	1.49	34.4	34.2	1.2	1.2
	80	1.81	36.8	35.3	7.5	3.7

Table 5 Physical properties of the different Martian landing sites and other simulant material.

MMS sand I ³⁾		1.38	38	0.81
MMS sand II ³⁾		1.34	39	1.96
MMS dust I ³⁾		1.08	31	0.38
MMS dust II ³⁾		0.91	30	0.53
JSC Mars-I ³⁾		0.84	47	1.91
JMSS-I ³⁾		1.45	40.6	0.33
Pathfinder ³⁾				
Drift material		1.29 to 1.52	34.3	0.21
Crusty material		1.42 to 1.64	37.0 ± 2.6	0.17 ± 0.18
Viking Landers ³⁾				
VL-1 drift material		1.15 ± 0.15	18 ± 2.4	1.6 ± 1.2
VL-1 blocky material		1.60 ± 0.4	30.8 ± 2.4	5.1 ± 2.7
VL-2 crusty material		1.40 ± 0.2	34.5 ± 4.7	1.1 ± 0.8
Spirit Rover ⁹⁾		1.20 to 1.50	20	1 to 15
Opportunity Rover ¹⁰⁾		1.30	20	1 to 5
Luna soil simulant (FJS-I) ¹¹⁾	60	1.77	41.6	1.44
	90	1.95	50.1	7.51
Toyouura sand ¹¹⁾	60	1.51	38.1	3.04
	90	1.61	42.7	3.04

一成分 ($\phi'_{peak}-\phi'_{cs}$) には相関関係があることが報告されている¹³⁾。そこで本実験においては、せん断時の体積変化が収縮から膨張に転じた際のピーク角度をダイレーション角と定義し、Fig. 6 に、Fig. 3 および Fig. 4 の結果を用いて MMS-1、豊浦砂、模擬土の ν_{max} を垂直応力 σ_n で整理した結果を示す。MMS-1 や豊浦砂はいずれの垂直応力においてもピークダイレーション角が模擬土と比べて大きいことが分かる。特に、Dr=80%における MMS-1 のピークダイレーション角は、豊浦砂と比べて僅かに大きな値を示しており、せん断中に最も膨張する傾向を呈したことが分かる。一方、Dr=80%における模擬土のピークダイレーション角は、MMS-1 や豊浦砂と比べて小さいことから体積変化は小さくなることが分かる。また Dr=20%における MMS-1 と同等のピークダイレーション角を有することから、両者の体積変化はともに膨張挙動を呈したと考えられる。このようにせん断特性が異なる要因の一つに MMS-1 の粒子形状が特異的であることが考えられる。火星の表面は塵などの微小粒子の衝撃粉砕、風、水、溶岩による物理的な侵食をはじめ、流体と酸化剤による化学的風化の複合作用によって生成

されたレゴリスに覆われていることから、月のレゴリスと同様に粒子表面は摩耗しておらず鋭利な状態のものを含んでいると考えられる。そこで、粒子形状の影響を定量的に評価すべく、円磨度-球形度印象図^{14), 15)}を用いて、粒子形状の相互比較を行った。Fig. 7 に MMS-1、豊浦砂、オタワ砂 (Barco49) の SEM 画像を示す。なお、オタワ砂は非常に丸みを帯びた試料であり、扁平な試料との粒子形状を比較するための参考試料として示している。これらの画像を用いて 11~12 個の粒子をランダムにピックアップ (Fig. 8 参照) し、円磨度 R (Roundness) と球形度 S (Sphericity)⁵⁾を求め、Fig. 9 に示すチャート上にこれらの結果をプロットした。ここで、円磨度 R とは粒子の輪郭の滑らかさや平面的な丸みの度合いを表し、凸部に内接する任意点の半径 r_i の平均を最大内接円の半径 r_{max-in} で除したものであり、球形度 S は粒子の真球の度合いを表し、粒子の最大内接円の半径 r_{max-in} を粒子の外接円の半径 $r_{min-cir}$ で除したものである。なお、図中の点線で示した斜線は、粒子の均質性 (Regularity) $\rho = (R+S)/2$ を表している。また、Fig. 10 には、得られた円磨度 R と真球形度 S の結果を棒グラフで示している。これらの結果

Fig. 5 Dilation angle at peak shear stress⁷⁾. Fig. 6 Relationship between peak dilation angle ψ_{max} and σ_n .

よりオタワ砂は円磨度 R や球形度 S の値が高いことから、丸みを帯びた粒子形状を呈していることが分かる。一方で、MMS-1 や豊浦砂はオタワ砂に比べ円磨度 R や球形度 S が低く、特に MMS-1 は 3 試料の中で最も低い値を示すことから、非常に角張った粒子形状を呈していることが分かる。

以上の結果、このような角張った粒子形状により、MMS-1 はインターロッキング効果が卓越し、豊浦砂や模擬土と比べて相対密度が低い領域においても高いせん断抵抗角を有したことを示唆している (Table 4)。その結果、相対密度の低い状況においても著しい体積膨張が生じたと考えられる。また、円磨度 R 、球形度 S 、均質性 ρ を用いたせん断剛性率 G_{max} の予測式⁵⁾なども提案されていることから、今後は、MMS-1 のせん断波速度 V_s の結果を用いて、これらの予測式が MMS-1 にも適用可能かどうかについて検討を行っていく予定である。一方、パラボリックフライトによる低重力環境下における月面模擬土の支持力実験から、豊浦砂の極限支持力は相対密度にかかわらず重力に依存しやすいが、月面模擬土の極限支持力は重力に依存しにくいことが明らかにされている¹⁰⁾。火星の重力場は地球の 1/3 であることを考慮すると、今後は、月面模擬土と同様に低重力環境下における火星模擬土の力学特性を明らかにしていくことも重要と考えられる。

5 結 言

本研究では、火星模擬土 (MMS-1) の力学特性を明らかにすべく、定圧一面せん断試験を行い、さらに粒子形状がせん断特性に及ぼす影響について検討を行った。実

Fig. 7 Scanning Electron Microscope (SEM) image of the samples ($\times 50$).

Fig. 8 Particle shape of each sample used to calculate roundness and sphericity.

(The numbers on the left shoulder of each particle size shown in the figure correspond to the numbers in Fig. 7.)

Fig. 9 Particle shape determination-sphericity S and roundness R chart (modified from Krumbein and Sloss 1963¹³⁾).

Fig.10 Measured particle sphericity and roundness of samples.

験によって得られた結果は、以下の通りである。

- 1) MMS-1 は、豊浦砂と比較して高いせん断強度を有し、相対密度が増加するにつれて明確なピークを持つ材料である。
- 2) MMS-1 は、模擬土と比べ低応力状態においてもせん断時に体積膨張を起こす材料であり、これは MMS-1 の粒子形状が起因していると考えられる。
- 3) MMS-1 のせん断抵抗角 (ϕ_{l_peak}) の範囲は 37.1° から 46.0° であり、粘着力 (c_{d_peak}) の範囲は 3.8 から 15 kPa であった。これらの値は、異なる火星模擬土を使用した既往の研究により得られた値をはじめ、着陸地点の調査結果と同程度の値をとることが判明した。
- 4) 相対密度の低い領域で惑星探査機の運動性能を評価する場合は、使用する模擬土によって体積変化が異なる可能性がある点について注意が必要である。また、火星の土の模擬土の検討を行う場合、単に化学成分や粒度を模擬するだけでなく、粒子形状について検討することも重要である。

以上の結果より、火星の土は風化による影響が支配的であると考えられるが、火星の土とよく似た物理・化学的な性質を有する岩石材料を人工的に砕いた試料を用いた模擬土の研究は、機械と土の相互力学関係(テラメカニクス)の観点から今後も重要である。

参考文献

- 1) M. P. Golombek, L. S. Crumpler, J. A. Grant, R. Greeley, N. A. Cabrol, T. Parker et al., "Geology of the Gusev cratered plains from the Spirit rover transverse", J Geophys Res, v. 111, 2156-2202 (2006).
- 2) R. E. Arvidson, J.F.I. Bell, P. Bellutta, N.A. Cabrol, J.G. Catalano, J. Cohen, et al., "Spirit mars rover mission: overview and selected results from the northern Home Plate Winter Haven to the side of Scamander crater", J Geophys Res, v. 115, E00F03 (2010).
- 3) G. H. Peters, A. William, G. H. Bearman, G. S. Mungas, J. A. Smith, R. C. Anderson, S. Douglas and L. W. Beegle, "Mojave Mars simulant—Characterization of a new geologic Mars analog", Icarus 197, 470-479 (2008).
- 4) T. Fujikawa, T. Newson, A. Ahmed and M. Safdar, "Assessment of the geo-mechanical properties of Mojave Mars simulant-1(MMS-1) soil", Proceedings of the XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE), 268-277 (2019).
- 5) G. C. Cho, J. Dodds, J. C. Santamarina, "Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength", Natural and Crushed Sands, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132 (5), 591-602 (2006).
- 6) ASTM D 2487-11: Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System). STM International, West Conshohocken, PA, USA.
- 7) ASTM D 3080: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. STM International, West Conshohocken, PA, USA.
- 8) J. Mitani, T. Kobayashi, M. Oki, H. Miyamoto and T. Niihara, "Strength characteristics of simulated lunar/planetary soils", The 55th Japan National Conference on Geotechnical Engineering, 21-1-5-05, (2020). (in Japanese)
- 9) C. Brunskill, N. Patel, TP. Gouache, GP Scott, CM. Saaj, M. Matthews and L. Cui, "Characterisation of Martian soil simulants for the ExoMars rover testbed", J Terramechanics 48(6): 419-438. doi: 10.1016/j.jterra.2011.10.001 (2011).
- 10) D. Gamal El-Dean, "Development of a new piezoelectric pulse testing device and soil characterization using shear waves", Doctoral dissertation, Université de Sherbrooke (2007).
- 11) T. Kobayashi, H. Ochiai, Y. Suyama, S. Aoki, N. Yasufuku and K. Omine, "Bearing capacity of shallow foundations in a low gravity environment", Soils and Foundations, Vol. 49, No. 1, 115-134 (2009).
- 12) R. Whitlow, "Basic soil mechanics fourth edition", p.216 (2001).
- 13) M. D. Bolton, "The strength and dilatancy of sand. Geotechnique", 36, No.1, 65-78 (1986).
- 14) W. C. Krumbein and L. L. Sloss, "Stratigraphy and sedimentation", 71(5), 401pp. LWW (1951).
- 15) W. C. Krumbein and L. L. Sloss, "Stratigraphy and sedimentation, 2nd Ed.", Freeman and Company, San Francisco (1963).