

月面模擬土の弾性波速度試験結果にもとづいた月表面地盤の速度分布の推定-その1-

秋田大学 学生会員 鈴木翔太 正会員 荻野俊寛 正会員 高橋貴之
 学生会員 近江谷一樹 正会員 及川洋
 福井大学 正会員 小林泰三 清水建設(株) 正会員 金森洋史

1. はじめに

宇宙航空研究開発機構(JAXA)は、2025年までに月面利用を目標とする計画「JAXA2025」¹⁾を公表しており、月面の地盤調査を盛り込んだSELENE-2というプロジェクトが進行中である。月表面はレゴリスと呼ばれる地球上とは全く異なる材料からなる砂質土で覆われている。従ってレゴリスの特性の把握は月表面におけるこれらの計画において重要な要素となる。本

報告は、地盤工学特性の中でも基本的な特性の一つである弾性波速度を三軸および一次元圧密状態でベンダーエレメント(BE)試験²⁾より測定し評価している。

2. 試験概要

実験に用いた月面模擬土は月面を覆う表層土の科学的組織や物性を再現するよう国内で製造されたFJS-1(レゴリスシミュラント)である。FJS-1の物性値は土粒子密度 $\rho_s=2.95\text{g/cm}^3$ 、最大間隙比 $e_{\max}=0.98$ 、最小間隙比 $e_{\min}=0.46$ 、平均粒径 $D_{50}=0.10\text{mm}$ 、均等係数 $d_{60}/d_{10}=11.43$ である¹⁾。本試験では、FJS-1に加えてガラスビーズ(粒径2mm, $\rho_s=2.49\text{g/cm}^3$)、アルミナビーズ(粒径2mm, $\rho_s=3.6\text{g/cm}^3$)、豊浦砂($\rho_s=2.65\text{g/cm}^3$)および粒度分布がFJS-1に比較的近い稲城砂($\rho_s=2.719\text{g/cm}^3$)を使用した。図-1は豊浦砂と稲城砂の粒径加積曲線を示している。FJS-1の粒度分布はアポロ計画によって持ち帰られた実際の月面土の粒度分布の範囲の平均的な粒度になるよう調整されている。図-2は粒度調整した試料の粒径加積曲線である。試験は、三軸試験装置および圧密容器による段階載荷の圧密試験である。三軸試験装置での実験の供試体寸法は直径50mm、高さ100mmである。供試体は等方あるいは異方応力状態において軸応力15, 25, 50, 100, 200kPaの圧密応力で段階的に圧密され、供試体高さの変化がなくなった時点で弾性波速度の測定を実施した。圧密容器での実験の供試体寸法は直径60mm、高さおよそ60mmである。10, 25, 50, 100, 200kPaの鉛直圧密応力で供試体を段階的に圧密し、各段階の圧密打ち切り時点で弾性波速度を測定した。図-3にベンダーエレメント試験より得られた代表的なP波S波の送受信波形を示す。得られた送受信波形のピーク点の時間差から波の伝播時間 Δt を求め、式(1)よりS波速度 V_s およびP波速度 V_p を求めた。また、式(2)よりせん断剛性率 G が求められる。

$$V_s = L / \Delta t_s \quad V_p = L / \Delta t_p \quad \text{式(1)} \quad G = \rho V_s^2 \quad \text{式(2)}$$

ここに、 L はBE間の距離、 Δt_s および Δt_p はそれぞれS波およびP波の伝播時間、 ρ は密度である。

3. 試験結果および考察

図-4からわかるように同一間隙比、同一圧密応力でFJS-1は豊浦砂や稲城砂よりも小さい速度を示している。図-5は間隙比とFJS-1の V_p および V_s の関係をあらわしている。ここで、一次元圧密と三軸試験の結果を図-5より比較すると V_p で

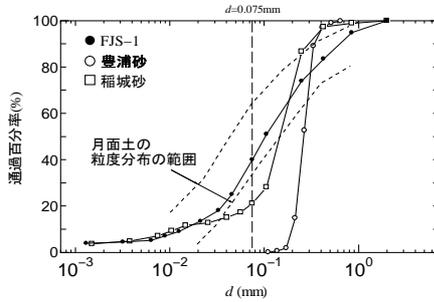


図-1 各試料の粒径加積曲線

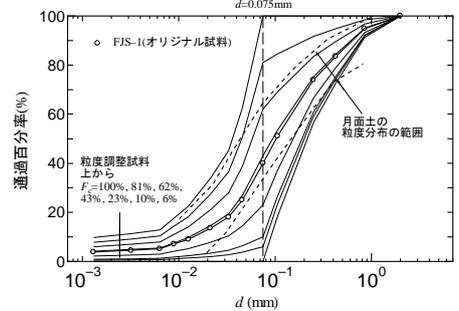


図-2 粒度調整したFJS-1の粒径加積曲線

表-1 月面土の主化学組成

主成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	FeO	MgO
含有率(%)	44.8	18.2	12.5	11.7	9.0

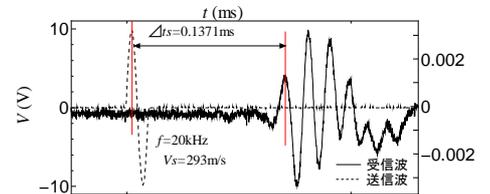
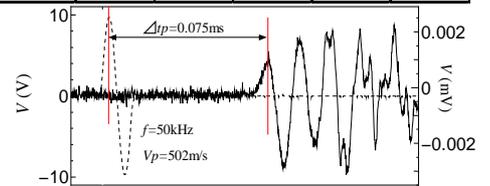


図-3 送受信波形図

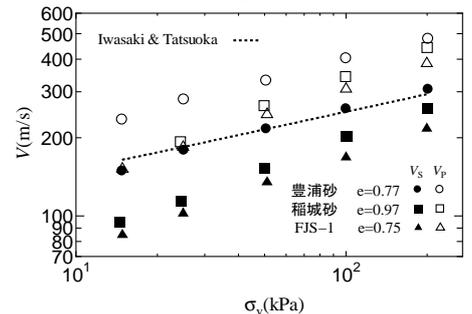


図-4 圧密応力と弾性波速度の関係

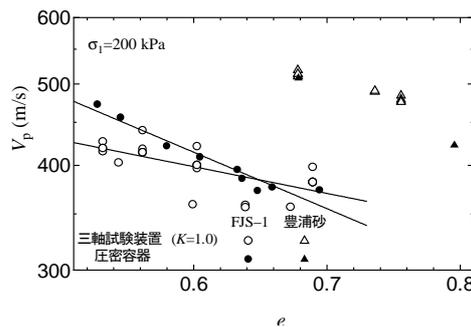
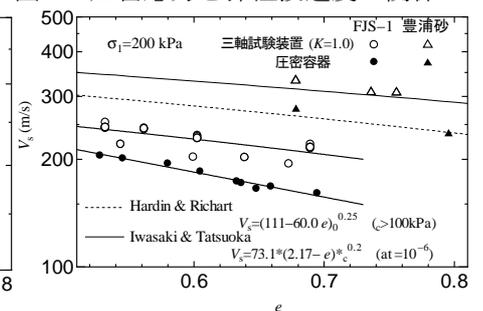


図-5 間隙比の弾性波速度への影響



はそれほど差は見られないが V_s では一次元圧密の結果が小さくなっており、 V_p に比べ V_s の方が側方応力の影響を強く受けているということがわかる。

ここで、FJS-1 の速度が小さい原因として考えられるものとして FJS-1 を構成する材料の影響、アグルチネートの影響、細粒分の影響が考えられる。図-6 は FJS-1 と豊浦砂、稲城砂、ガラスビーズ(粒径 2mm)、アルミナビーズ(2mm)の速度と間隙比の関係と比較したものである。豊浦砂にはガラスビーズと同じ成分が多く含まれており、弾性波速度が同じようなところに出ている。FJS-1 にはアルミナビーズと同じ成分が含まれているが弾性波速度には差が出ている。 V_s だけでなく V_p にも同様の結果が見られた。このことから材質の違いは弾性波速度にほとんど影響しないと考えられる。図-7 は FJS-1 とアグルチネートをそれぞれ 20%、40%含む FJS-1 の弾性波速度をほぼ同一の間隙比で測定したものである。またアグルチネート混入前後で細粒分は変化しない。アグルチネートとは月面への隕石の衝突エネルギーによって融かされた砂中の酸化鉄が還元し、その際に発生したガスによって多孔化されるとともに融けた成分が周囲の砂粒子を接着させていびつな形状をした微粒子ことで、月面土にはこれが 5~65%(平均で 30%)の割合で含まれている。比較してみると、多少の速度の動きは見られるがアグルチネート 0%とアグルチネート 20%、40%との差はみられなかった。このことからアグルチネートは V_s に大きく影響しないと考えられる。また、 V_p にも同様の結果が得られた。次に FJS-1 の弾性波速度が遅い理由として考えられるのは細粒分の影響である。図-8 は細粒分含有率が 0%、6%、10%、23%、42%、62%、81%、100%と粒度調整された FJS-1 の間隙比と弾性波速度の関係を示したものである。図中の実線は実験式でオリジナルの試料($F_c=42%$)の実験結果とよく一致しており、 $F_c=42%$ の実験結果ともよく一致している。また図中の点線は Iwasaki and Tatsuoka³⁾による豊浦砂の実験式である。それぞれ細粒分の異なる FJS-1 のすべてが豊浦砂の弾性波速度より小さく出ており、このことから FJS-1 の弾性波速度が小さいことが分かる。 $F_c=0\sim 100%$ の速度分布を実験式と比較してみると、傾きはほぼ等しいかやや大きく出ており $F_c=23%$ 以外は実験式よりも大きな速度分布を示している。また、細粒分含有率の変化だけで速度分布は大きな変化を示している。これらは V_s だけでなく V_p にもみられた。これらのことから細粒分含有率が弾性波速度に与える影響は大きいと考えられる。図-9 にオリジナルの試料の速度で正規化した F_c の間隙比への影響を示す。図-9 から V_s 、 V_p への細粒分の影響が、材質、アグルチネートの影響よりも大きいことがわかる。

4. 結論

本報告から得られる知見は以下の通りである。

1. FJS-1 の弾性波速度が豊浦砂と比べて低くすることは、FJS-1 に含まれる成分の材質に依存しない。
2. アグルチネートの含有率は FJS-1 の弾性波速度にほとんど影響しない。
3. 細粒分含有率による FJS-1 の弾性波速度への影響が大きく、 $F_c=20\sim 30%$ 間で最も小さくなり、 $F_c=0\%$ 、100%の場合、オリジナルの試料に比べそれぞれ 40%、65%程度大きな速度を示す。

【参考文献】

- 1)宇宙航空研究開発機構,JAXA 長期ビジョン-JAXA 2025-,2005.
- 2) Lings & Greening: A Novel Bender/Extender Element for Soil Testing, *Geotechnique*, Vol. 51, No. 8, pp. 713-717, 2001.
- 3)Iwasaki, T. and Tatsuoka, F.: Effect of Grain Size and Grading on Dynamic Shear Moduli of Sands, *Soils and Foundations*, Vol.17, No.3, pp.19-35, 1977.

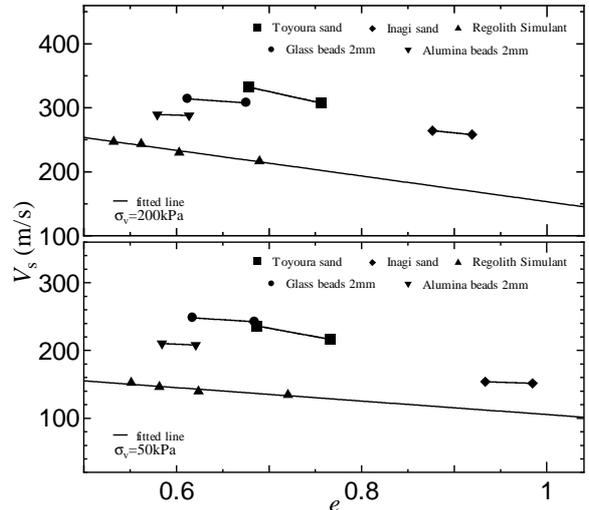


図-6 各試料の間隙比-弾性波速度

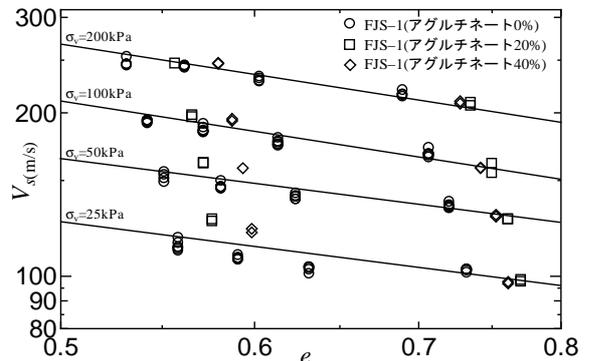


図-7 アグルチネートを含む FJS-1 弾性波速度

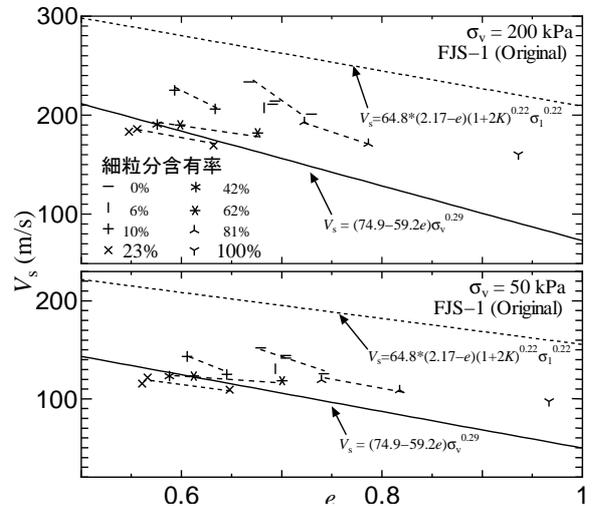


図-8 粒度調整された FJS-1 の間隙比-弾性波速度

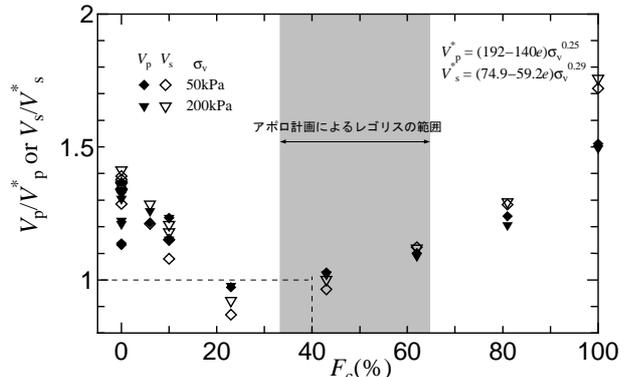


図-9 オリジナルの試料の速度で正規化した F_c の間隙比への影響