

三軸および一次元圧密された月面模擬土の弾性波速度評価

秋田大学 学生会員 近江谷一樹 正会員 荻野俊寛 正会員 高橋貴之
 非会員 長瀬靖佳 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」を発表しており、月面の地盤調査を盛り込んだ SELENE-2 によるプロジェクトが進行中である。月表面は過酷な環境にさらされており、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に加えて豊浦砂および粒度分布が FJS-1 に比較的近い稲城砂を使用した。図-1 は各試料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る本物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。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-2 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。

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

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 は湿潤密度である。

3. 試験結果および考察

図-3 は FJS-1 およびその他試料について三軸試験装置で等方圧密した場合の V_s および V_p と σ_v の関係を示している。 V_p および V_s は σ_v とともに増加しその傾きは試料によって大きな違いはないが、FJS-1 の V_p および V_s は豊浦砂に比べて著しく小さいことがわかる。図中の直線は式(3)に示す Iwasaki & Tatsuoka²⁾による豊浦砂の G の実験式から式(2)によって求めた V_s である。

$$G = 850 \times \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \times p^{0.44} \quad \text{式(3)}$$

ここに、 e は間隙比、 p は平均有効応力である。この計算値は豊浦砂の実験値とほぼ一致している。FJS-1 は豊浦砂と比べ非常に小さい値を示し V_p で約 0.7 倍、 V_s で約 0.6 倍となった。稲城砂の結果は豊浦砂と FJS-1 の中間に位置

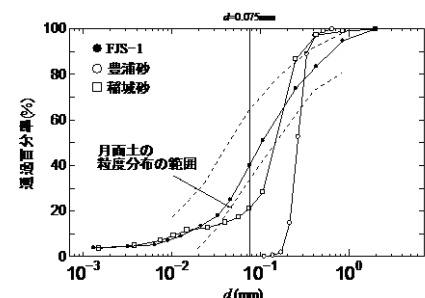


図-1 各試料の粒径加積曲線

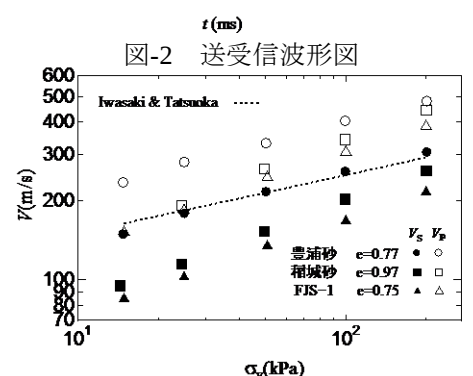
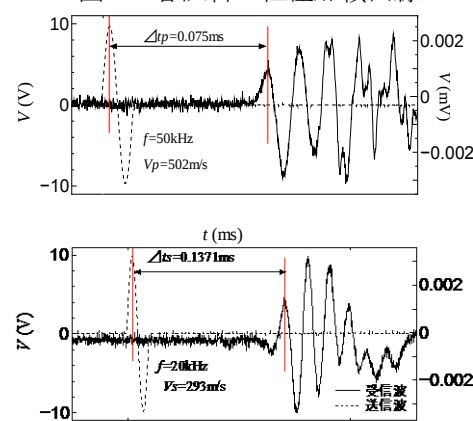


図-2 送受信波形図

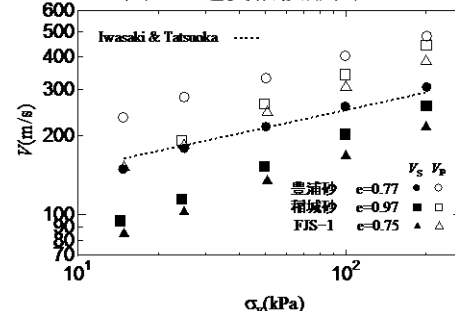


図-3 圧密応力と弾性波速度の関係

表-1 FJS-1 の V_p/V_s

	FJS-1(K=1.0)			
間隙比	0.69	0.6	0.56	0.53
V_p/V_s	1.80	1.81	1.76	1.70

している。図-4 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。豊浦砂に比べ速度の値は小さいが間隙比が大きくなるにつれ弾性波速度は減少しており、その傾きに試料による大きな差は見られない。図-3 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。さらに、一次元圧密と三軸試験

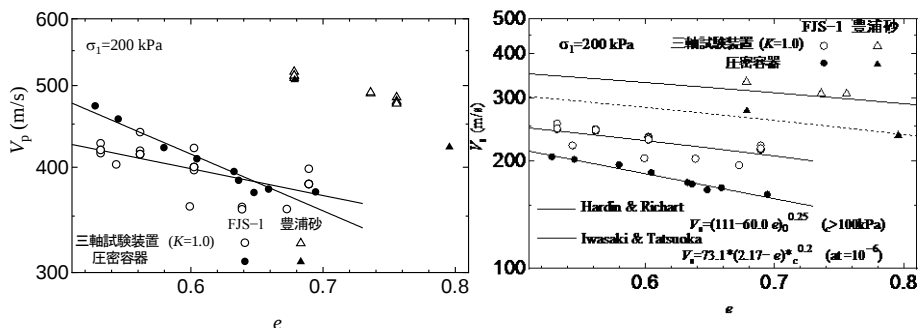


図-4 間隙比の弾性波速度への影響

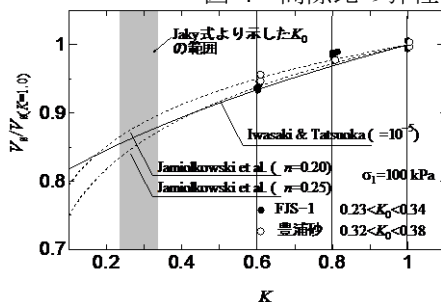


図-5 応力比 K と V_s

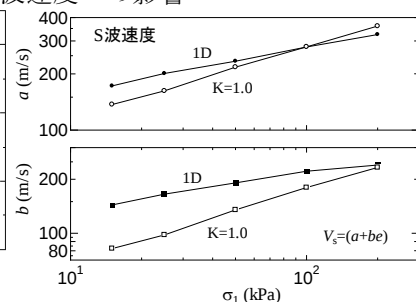


図-6 V_p および V_s 式の定数

の結果を図-4 より比較すると V_p で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。FJS-1 の V_p/V_s の値を表-1 に示す。 V_p/V_s は試料の飽和度によって大きく変化することが知られている。Conte ら³⁾によれば飽和度が40%以下の土では V_p/V_s はおよそ1.5~2.0程度となっており、FJS-1 の値もこの範囲にあることがわかる。図-5 は V_s におよぼす応力比 K の影響を示している。縦軸は $K=1.0$ の場合の速度で正規化している。 V_s は K 値が小さくなるにつれて緩やかに減少しており、豊浦砂でも同様の傾向が見られる。図中にある曲線は Iwasaki & Tatsuoka および Jamiolkowski et al.⁴⁾による G の実験式から導かれた V_s の予測値である。 V_s の減少はこの曲線と非常に近いことがわかる。また、Jaky の式を用いて計算した K_0 値の範囲が図中に示されている。この範囲と曲線から K_0 圧密状態の V_s を推定するとおよそ0.8倍となり、これは、一次元圧密の V_s の結果とほぼ一致している。従来、砂の V_s は拘束圧と間隙比関数の積として表される。図-6 は図-5 の近似線において傾きを a 、 $e=0$ における切片を b として、 a および b の圧密応力による変化を示している。傾きおよび切片はいずれも圧密応力の増加に伴って指数的に増加していることがわかる。これは、 V_p にも同様の傾向がみられた。従って FJS-1 の速度を式(4)のように表せば、最小二乗法によってそれぞれの定数は表-2 のように求められる。

表-2 式(4)のパラメーター

	三軸試験 $K=1$		$K=0.8$		$K=0.6$		圧密容器 $K=K_0$	
	V_s	V_p	V_s	V_p	V_s	V_p	V_s	V_p
a	55.0	96.9	67.9	123.7	56.3	104.7	74.9	191.4
b	31.4	47.4	57.6	94.5	42.2	54.9	59.5	140.1
n	0.35	0.33	0.34	0.33	0.35	0.32	0.29	0.25

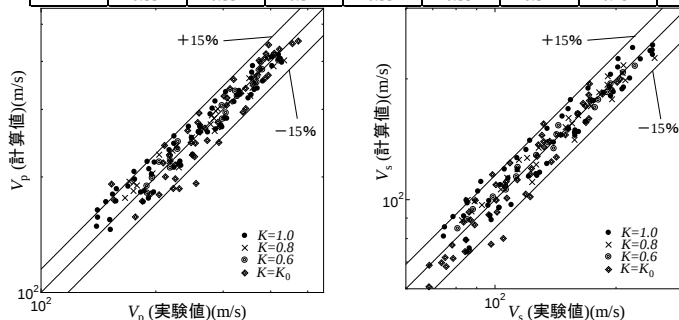


図-7 実験値と計算値の比較

$$V_p \text{ or } V_s = (a - be)\sigma_1^n \quad (4)$$

ここに、 V_p および V_s の単位は m/s、 σ_1 の単位は kPa である。図-7 は、 $K=0.6, 0.8, 1.0, K_0$ の実験値と計算値を比較したグラフである。 V_p, V_s ともにばらつきは見られるが、ほぼ15%の誤差におさまっており、おおむね実験値を表現できている。

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 の弾性波速度は豊浦砂に比べ小さく、同一圧密応力、同一間隙比で比較した場合、FJS-1 は S 波速度でおよそ38%、P 波速度でおよそ28%小さい。
2. FJS-1 の弾性波速度は拘束圧と間隙比を用いた式(4)より算出でき、 $K=0.6, 0.8, 1.0, K_0$ の場合の弾性波速度は式(4)のパラメーターを変えることでそれぞれ算出できる。

【参考文献】

- 1) Kobayashi et al.: Bearing Capacity of Shallow Foundations in a Low Gravity Environment, *Soils and Foundations*, Vol. 49, No. 1, pp. 115-134, 2009.
- 2) 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.
- 3) Conte et al.: Geotechnical Parameters From V_s And V_p In Unsaturated Soils, *Soils and Foundations*, Vol.49, No.5, pp.689-698, 2009.
- 4) Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. and Lo Presti, D.C.F.: Remarks on stiffness at small strains of six Italian clays, *Pre-failure Deformation of Geomaterials*; Shibuya, Mitachi and Miura eds., Balkema, Netherlands, pp.817-836, 1995.