

等方圧密された月面模擬土の弾性波速度評価

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

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、現在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。著者らは昨年、一次元圧密状態にある月面模擬土(レゴリスシミュラント)の弾性波速度をベンダーエレメント(BE)を用いて評価した。本報告は BE を組込んだ三軸試験装置によって等方圧密した月面模擬土の弾性波速度を測定している。

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 と呼ばれる月面模擬土(レゴリスシミュラント)である。これに加えて豊浦砂、稲城砂も測定する。月面模擬土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⁾。図-1 は各試料の粒径加積曲線を示している。相対密度もそれぞれ変えて測定を行った。試験は、三軸試験装置を使用した等方圧密および繰返し載荷試験で供試体寸法は直径 50mm, 高さ 100mm である。三軸試験装置のトップキャップおよびペDESTALには BE が組込まれており、鉛直方向に伝播する P 波および S 波速度を測定することができる。また、供試体の側面に取り付けた 2 対の BE によって水平方向に伝播する P 波および S 波速度も測定することができる(写真 1)。実験は $\sigma_1=15, 25, 50, 100, 200\text{kPa}$ と段階的に圧密し、供試体高さの変化がなくなった時点でベンダーエレメント試験を実施し、S 波、P 波速度を求めた。図-2 に代表的な送受信波形を示す。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)により S 波速度 V_s および P 波速度 V_p を求めた。

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

ここに、 L はベンダーエレメント間の距離、 Δt_s および Δt_p はそれぞれ S 波および P 波の伝播時間である。また、せん断弾性係数 G を式(2)から求めた。

$$G = \rho V_s^2 \quad \text{式(2)}$$

ここに、 ρ は湿潤密度である。さらに、200kPa の圧密終了時に繰返し載荷試験を行い、繰返し載荷試験による G を求めた。また、BE 試験の際、送信 sin 波の周波数を $f=5\text{k}, 10\text{k}, 20\text{k}, 30\text{k}, 40\text{k}, 50\text{kHz}$ として鉛直方向と水平方向(2 区間)で測定した。以下の結果は各周波数の実験値を平均したものである。

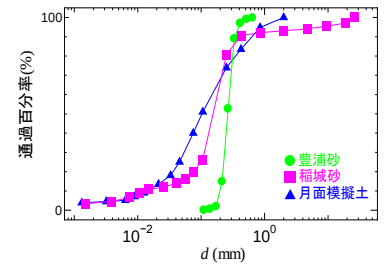


図 1 粒径加積曲線

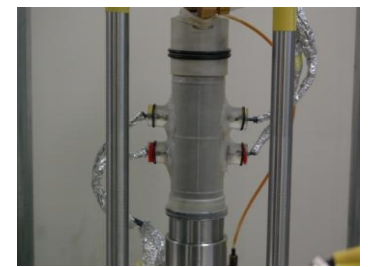


写真 1 BE を取り付けた供試体

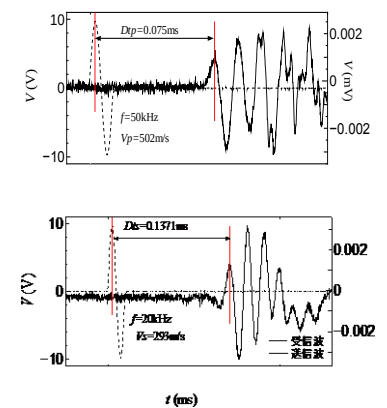


図 2 送信波と受信波および伝播時間の決定方法

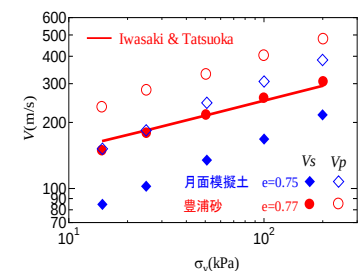


図 3 月面模擬土および豊浦砂の弾性波速度

キーワード 月面模擬土 レゴリスシミュラント ベンダーエレメント S 波速度 P 波速度

連絡先 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1 TEL

3. 試験結果および考察

図-3 は豊浦砂および月面模擬土について鉛直方向に伝播する 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、月面模擬土の 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。式(2)による計算値は豊浦砂では実験結果とほぼ一致しているが、月面模擬土では実験値が小さくなっており、間隙比および圧密応力の影響を考慮しても豊浦砂に比べて小さな V_s を示すことがわかる。また、 V_p と σ の関係は V_s - σ 関係とほぼ平行であり、おおよそ一定であることが分かる。各試料の V_p/V_s の値を表-1 に示す。試料によらず V_p/V_s は 1.6~1.8 程度となっている。 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、月面模擬土の値もこの範囲内にあることがわかる。

表 1 試験結果から得た V_p/V_s

	豊浦砂		月面模擬土				稲城砂	
相対密度 (%)	58.4	81.7	43.9	65.6	73.8	79.6	48.5	58.3
V_p/V_s	1.56	1.53	1.8	1.81	1.76	1.7	1.7	1.66

図-4 は各試料について鉛直方向に伝播する波と水平方向に伝播する波の速度を比較したものである。弾性波速度は本来波の進行方向に直交する面や振動面に作用する応力の影響を受けるが、本報告で行った実験はすべて等方圧密であることから、これらの違いによる顕著な影響は認められない。

図-5 は間隙比が比較的近い実験結果について月面模擬土、豊浦砂、稲城砂の各試料の V_p および V_s を比較している。図-3 に示したように月面模擬土の弾性波速度は豊浦砂に比べ小さいが、これは稲城砂の弾性波速度と近いことがわかる。

また、図-6 は σ と式(2)および繰返し載荷試験から求めた G との関係を示しており、図-5 に示す各試料に加えて粘土や高有機質土といった様々な試料について G を比較している。月面模擬土の σ - G 関係は豊浦砂と粘土の中間に位置しており、稲城砂の関係とほぼ等しくなっている。また、 V_s から求めた G は繰返し載荷試験から求めた G とほぼ一致している。 Iwasaki & Tatsuoka によれば、砂の G は粒度分布に大きく影響を受け、均等係数が大きいほど、また、細粒分含有率が大きいほど小さな値を示している。図-1 に示されるように月面模擬土および稲城砂は比較的近い粒度分布を示しており、豊浦砂に比べて均等係数、細粒分含有率とも非常に大きい。月面模擬土が示す小さな弾性波速度には、このような粒度特性が大きく関係していると考えられる。

4. 結論

本報告から得られる知見は以下の通りである。

1. 月面模擬土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、月面模擬土の方が S 波速度でおよそ 38%、P 波速度でおよそ 28% 小さい。
2. 月面模擬土の V_p/V_s はおよそ 1.77 となり、これまでに報告されている他の土の値と近い。

【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.

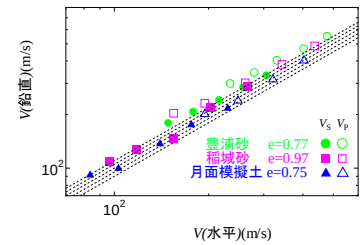


図 4 鉛直方向と水平方向の比較

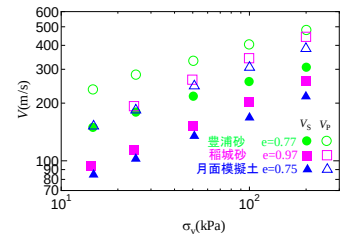


図 5 豊浦砂, 稲城砂, 月面模擬土の弾性波速度の比較

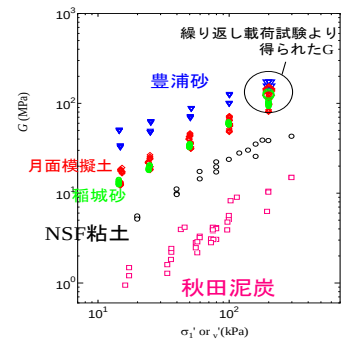


図 6 せん断弾性係数の比較