

BE 試験によって評価した一次元圧密状態における月面模擬土の弾性波速度

秋田大学 学生会員 岩田晃司
九州大学大学院 正会員 小林泰三
秋田大学 正会員 高橋貴之

秋田大学 正会員 荻野俊寛
清水建設(株) 正会員 金森洋史
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 2005 年, 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. このプロジェクトでは探査機の着陸, ローバーによる月面の走行, 月面地盤の穿孔・掘削などが計画されているが, 月表面を覆う月面土の土質工学的特性については試料が希少であること, 月面環境の再現が容易ではないことから未解明な点が多い. 本報告では月面土の基本的な特性の一つである弾性波速度について明らかにするため物性等を再現した模擬土を用いて, 室内弾性波試験によって V_s および V_p の評価を行い, 実験式を示している.

2. 実験概要

実験に用いた試料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)であり, 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 $e_{\min}=0.46$, 均等係数 $U_c=11.43$ である¹⁾. 実験は直径 60mm, 高さ 110mm 圧密容器内において圧密応力を $\sigma_v=10\text{kPa}$, 25kPa , 50kPa , 100kPa , 200kPa と段階的に圧密し, 供試体の高さに変化がなくなった時点で BE 試験によって sin 波を送り, 図-1 のような波形から波の伝播時間を求め, 式(1), および式(2)より弾性波速度を求めた.

$$V_s = L/\delta t_s \quad (1)$$

$$V_p = L/\delta t_p \quad (2)$$

ここに, L は BE 間距離, δt は波の到達時間を表す. BE は結線方法を変えることにより振動方向を変化させることで, S 波だけでなく P 波の測定も可能としており²⁾, BE 試験では二つの伝播速度を測定した. これらの実験を相対密度 $D_r=85\%$, 78% , 68% , 55% , 53% , 43% と密度の異なる供試体に対して行った.

3. 実験結果および考察

図-2 に各相対密度における鉛直圧密応力と弾性波速度 V_s , V_p の関係を示す. V_p は V_s に比べて速くそ

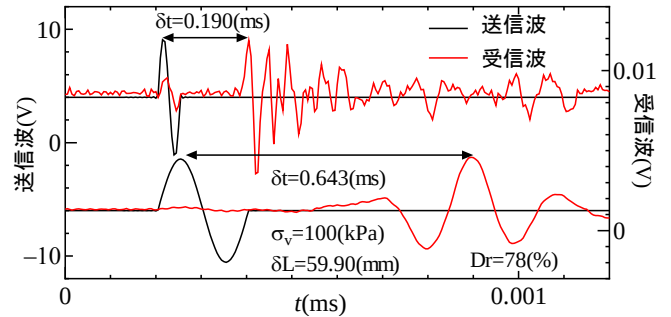


図-1 P 波, S 波の送受信波形

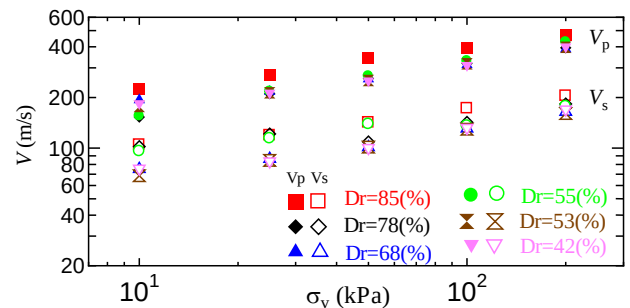


図-2 V と σ_v の関係図

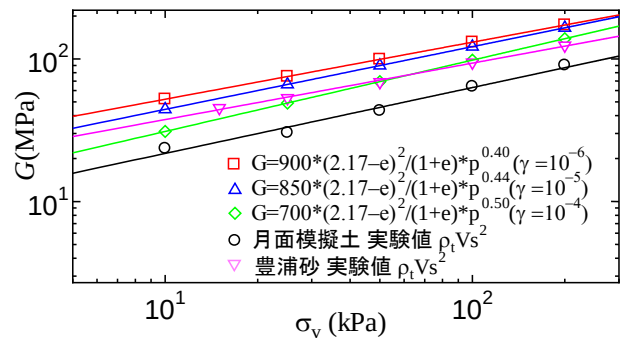


図-3 $D_r=85\%$ のせん断弾性係数比較図

の差は約 1.5 倍～2.7 倍であり, 応力が大きくなるにつれて V_p と V_s の差は約 2.4 倍に収束した.

ここで, $D_r=85\%$ の場合について月面模擬土の間隙比と鉛直圧密応力を Iwasaki&Tatsuoka²⁾ の豊浦砂の実験式に代入して計算したせん断弾性係数 G と実験値 V_s から $G = \rho_t V_s^2$ として求めたせん断弾性係数 G , および, $D_r=80\%$ の時の豊浦砂のせん断弾性係数 G を比較したものを図-3 へ示す.

ここに, $p = (\sigma_v + 2 \times \sigma_h)/3$ である. なお, σ_h は静止土圧係数 $K=0.5$ と仮定して計算により求めた.

これらを比較した結果、月面模擬土のせん断弾性係数 G は $\gamma=10^{-6}$, 10^{-5} , および 10^{-4} における豊浦砂の実験式および豊浦砂の実験値よりも小さい値となっており同一の圧密応力、間隙比で比較した場合、月面模擬土の G は豊浦砂の G よりも小さいことがわかる。また別の相対密度を同様に比較しても実験値は定式化された値よりも小さくなったことから月面模擬土は豊浦砂に比べて弾性波速度が遅いことがわかる。

一連の実験結果に基づき、月面模擬土を間隙比 e と圧密応力 σ_v で弾性波速度 V_s, V_p の定式化を試みる。定式の形を式(3)に示す。

$$V = A \times f(e) \times \sigma^\alpha \quad (3)$$

ここに A , α , は定数, $f(e)$ は間隙比関数を表す。Iwasaki&Tatsuoka によると豊浦砂の G は間隙比関数を $(2.17 - e)^2 / (1 + e)$ として表すことができる。この関数を月面模擬土にも適用すれば、絶乾状態の月面模擬土より $Sr=0$ から $\rho_t = \rho_s / (1 + e)$ なので、 $G = \rho_t V_s^2 = A' \times (2.17 - e)^2 / (1 + e) \times \sigma^{\alpha'}$ より、 V_s の間隙比関数 $f(e) = (2.17 - e)$ となる。間隙比関数、弾性波速度、圧密応力より図-4 のような近似線を描き、切片 $A=31.5$, 傾き $\alpha=0.231$ としてグラフから読み取ることができる。これらの値を式(3)にあてはめた結果 V_s は式 (4) となった。

$$V_s = 31.5 \times (2.17 - e) \times \sigma^{0.231} \quad (4)$$

また、 V_p は $v = [(V_s/V_p)^2 - 1] / \{2 \times [(V_s/V_p)^2] - 1\}$ より V_s と間隙比関数が同一なので V_s の計算式を求めた時と同様に V_p の計算式を求めることができ、式(5)のようになった。

$$V_p = 61.7 \times (2.17 - e) \times \sigma^{0.271} \quad (5)$$

(4)と(5)の計算式の弾性波速度と実験値の弾性波速度を比較したものを図-5, 図-6 へ示す。

V_p と V_s はおおむね実験結果をよくあらわしているが、図-5 と図-6 を比較すると V_s より V_p のほうが計算値と実験値に近い。これは圧密容器の側面が剛であるため、S 波が P 波よりも大きく反射の影響を受け、受信波が読みにくくなっている影響であると考えられる。また V_s の圧密応力が低いほどデータの誤差にばらつきがあるが、原因は圧密応力が小さい時 BE と供試体の密着が十分でないので弾性波速度が測りにくい傾向にあると考えられる。

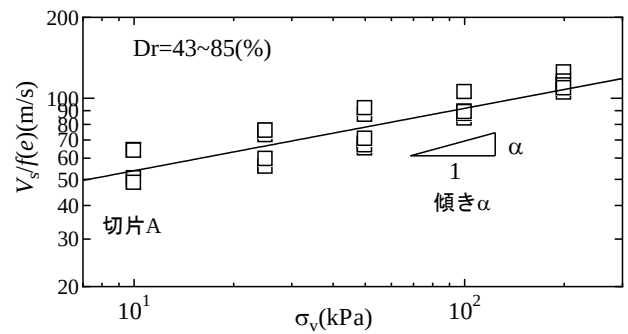


図-4 $V_s/f(e)$ と σ_v の関係図

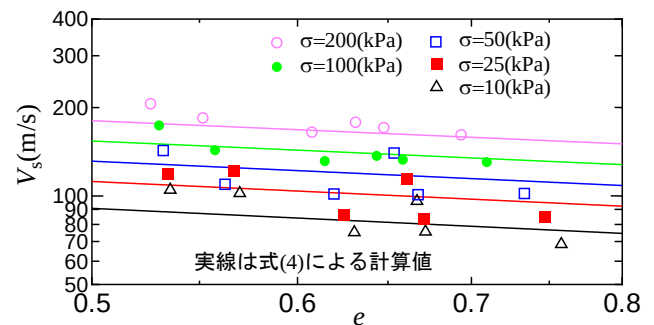


図-5 V_s の計算式と実験値の比較

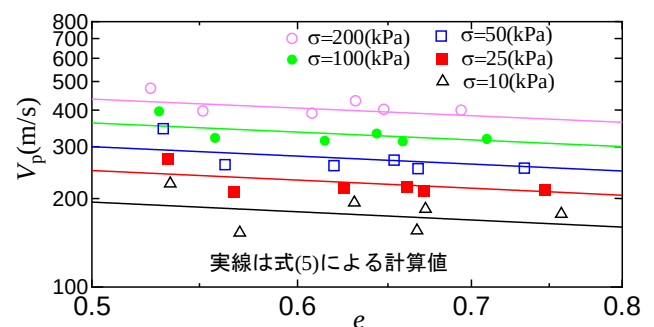


図-6 V_p の計算式と実験値の比較

4. 結論

本研究から得られた知見は以下の通りです。

- 月面模擬土の弾性波速度は豊浦砂の弾性波速度に比べて小さく、同一間隙比、同一圧密応力の場合 V_s で 21~40%, V_p で 1%~26% 小さい値となる。
- 豊浦砂の計算式と同様の間隙比関数を用いた場合、月面模擬土の弾性波速度は式(4)および式(5)で表される。

【参考文献】

- 1) Taizo Kobayashi, Hidetoshi Ochiai, Yusuke Suyama, Shigeru Aoki, Noriyuki Yasufuku, and Kiyoshi Omie : Bearing capacity of shallow foundations in a low gravity environment , Vol. 49, No. 1, pp115-134, 2009
- 2) Lings ML and Greening PD: A novel bender/extender Element for soil Testing, Geotechnique 518(8), pp. 713-717, 2001
- 3) Toshio Iwasaki, Fumio Tatsuoka : effects of size and grading on dynamic shear moduli of sands, soil and foundation, Vol.17, NO.3, pp19-35, 1977