

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2—

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 鈴木翔太 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. 研究目的

月面土の地盤工学的特性を把握するため、筆者らは月面模擬土を用いた室内弾性波試験から三軸および一次元圧密状態におけるS波速度 V_s およびP波速度 V_p を評価してきた。その結果、前報¹⁾で月面模擬土が一般的な砂質土に比べて小さい速度を示しており、この速度には細粒分含有率が大きく影響していると明らかにした。この結果にもとづいて本報告では、地球上の砂質土の研究結果にもとづいて月面模擬土の弾性波速度を推定する実験式を提案している。さらにこれまでに得られている月面の密度および土被り圧分布をもとに、これらの結果を土要素から月面地盤に発展させて適用することで、月表面層地盤における弾性波の速度分布を推定することを目的としている。

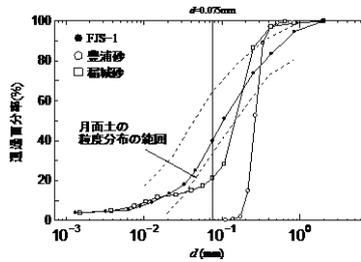


図-1 粒径加積曲線

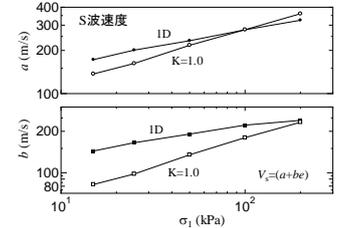


図-2 V_p および V_s 式の定数

2. 実験概要

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)および粒度調整したFJS-1である。また、比較のため、FJS-1に加えて一般的な砂や人工材料も用いた。図-1は、FJS-1、豊浦砂の粒径加積曲線である。粒径加積曲線の範囲から、実際の月面土では粒径 $75\mu\text{m}$ 以下の細粒分の含有率 F_c はおよそ $35\% < F_c < 65\%$ であり、オリジナル試料の粒径加積曲線 ($F_c \approx 40\%$) はその中間に位置していることがわかる。試験は、三軸試験装置および圧密容器による段階的荷重の圧密試験である。試料および実験条件についての詳細は前報¹⁾を参照されたい。

3. 実験結果および考察

3.1 圧密応力および間隙比による弾性波速度の定式化

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³⁾。図-2は間隙比-弾性波速度関係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。同様の傾向は V_p にもみられた。従って FJS-1 の速度を式(1)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-1のように求められる。

$$V_p \text{ or } V_s = (a - be)\sigma_1^n \quad (1)$$

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-3は、三軸試験 ($K=0.6, 0.8, 1.0, K_0$) および圧密容器による実験値と式(1)の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。

表-1 式(1)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

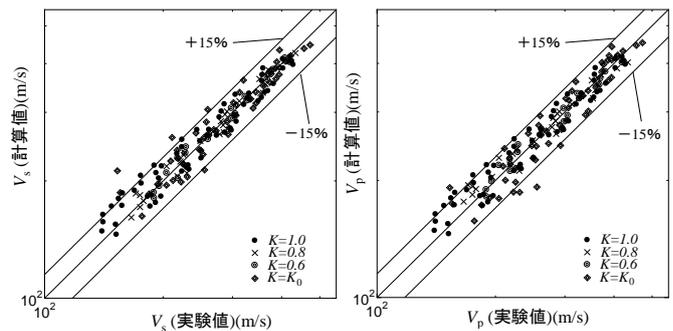


図-3 実験値と式(1)の計算値との比較

3.2 月地盤表層の弾性波速度分布の推定

図-4は、Lunar Source Book⁴⁾で報告されている実際の月面地盤の深度と密度の関係を示している。Apollo計画では月表面で月面土試料のサンプリングが多数実施されており、最大で深度 3m までの不かく乱試料が持ち帰られている。図中に示す曲線は持ち帰られた試料の分析結果から得られた近似式である。いずれの式も月表面部分ではおよそ $\rho=1.3\text{g/cm}^3$ 、深度 300cm でおおよそ $\rho=1.9\text{g/cm}^3$ であり、深度 3m までの平均的な密度として $\rho=1.68\text{g/cm}^3$ が提案されている。月の重力を 1.62m/s^2 として、上式を z で積分することにより土被り圧を求めることができる。図-5は、土被り圧 σ_v と z の関係を示している。図中の曲線は先に示した手順で算出した土被り圧であり、シンボルは Core Tube および Drill Tube から得られた実測値の結果である。これによれば、月面での土被り圧は 300cm 付近で $\sigma_v=8.8\text{kPa}$ 程度である。一方、水の密度を ρ_w 、飽和度を S_r として間隙比と密度の関係式 $\rho=(\rho_s/\rho_w+eS_r)\rho_w/(1+e)$ を用いれば、図-4 および $\rho_s=2.95\text{g/cm}^3$ 、 $S_r=0$ から実際の月面の $e-z$ 関係は式(2)、式(3)のようになる。

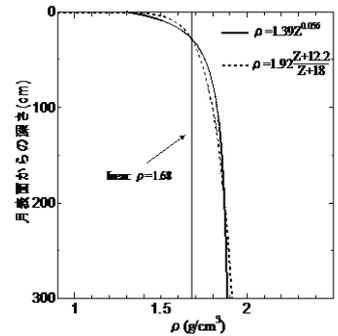


図-4 月面表層部の ρ -深度⁴⁾

$$e = \frac{2.95}{1.39z^{0.056}} - 1 \quad (2),$$

$$e = \frac{2.95(z+18)}{1.92(z+12.2)} \quad (3)$$

ここに、 z は月面地盤表層からの深度(cm)である。図-6は e と z の関係を示している。月面土の e は、月表面部分ではおよそ1.20と緩いが深度およそ50cmにかけて急激に密度が増加し、深度300cmではおよそ0.55と相対密度90%以上となっている。図-5の深度-土被り圧関係および図-6の深度-間隙比関係(式(2)あるいは式(3))を本報告で提案した弾性波速度の実験式である式(1)に代入することで V_s 、 V_p の深度分布を式(4)~式(7)として求めることができる。

$$V_s = 1.25(74.9 - 59.5(\frac{2.12}{z^{0.056}} - 1))z^{1.35} \quad (4), \quad V_p = 1.21(191.4 - 140.1(\frac{2.12}{z^{0.056}}))z^{1.31} \quad (5)$$

$$V_s = 1.15(1.92z + 0.62 \ln(18 + z))^{0.29} (74.9 - \frac{59.5(29.7 + 1.03z)}{23.4 + 1.92z}) \quad (6)$$

$$V_p = 1.13(1.92z + 0.62 \ln(18 + z))^{0.25} (191.4 - \frac{140.1(29.7 + 1.03z)}{23.4 + 1.92z}) \quad (7)$$

なお、実際の月面地盤と応力状態を等しくするため、式(1)のパラメーター a 、 b 、 n は、 K_0 状態のパラメーターを用いた。上式から推定したそれぞれの速度分布を図-7に示す。図-7中にシンボルで示したデータは数少ない月面における実測値であり、Laroseら⁵⁾によって報告された深度1000cmまでの V_s である。この実測値と式(1)より求めた推定値を比較すると、推定値は実測値と非常によく一致していることがわかる。また、 V_p についてもKovachら⁶⁾によって報告されている月面表層部の V_p の実測値を V_p -深度関係の図中に示している。Kovachら¹³⁾の実測値は、92~114m/sとなっており、その平均が105m/sと報告されている。図中には、得られた実測値の範囲および平均を示している。これらの値は深度8.5m以浅の代表値として導かれたものであるが、本報告で推定した V_p の分布曲線から求めた場合、その深度はおよそ60cm付近に相当し、Kovachら⁶⁾のデータとも整合していることがわかる。これらの推定値は粒度調整を行わない月面模擬土の実験結果に基づくものであるが、これまで持ち帰られた実際の月面土の粒度分布は同一ではなく、実際の月面土の細粒分にはおよそ35%~65%の幅があることを考慮すれば、前報¹⁾で示したように、月面土の弾性波速度はその含有率によって±10%程度の誤差を生じる可能性がある。図-8に弾性波速度分布におよぼす細粒分含有率の影響を示している。図中に示す赤線は細粒分含有率の違いによって生じる誤差を示しているが、その大きさは深度方向の速度変化と比べて小さいことから、これまでに得られている実際の月面土における細粒分含有率の幅の影響を考慮しても、深度方向の推定が可能であることがわかる。

4. 結論

本報告で得られた知見は次の通りである。

1. FJS-1の弾性波速度を拘束圧と間隙比の関数とした実験式として提案した。FJS-1の弾性波速度は式(1)で表され、 $K=0.6, 0.8, 1.0$ 、 K_0 の場合の弾性波速度は式(1)のパラメーターを変えることでそれぞれ算出できる。
2. 実際の月面地盤で得られている密度分布をもとに、月表面の弾性波速度分布を推定し、月地盤表層における弾性波速度の連続的な変化を求めた。得られた推定値はApollo計画によってこれまでに月面で実測された値と非常によく一致していた。

【参考文献】1) 鈴木ら：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、第48回

地盤工学研究発表会発表講演集, 2014, (CD-ROM)

2) Kobayashi et al.: Bearing Capacity of Shallow Foundations in a Low Gravity Environment, *Soils and Foundations*, Vol. 49, No. 1, pp. 115-134, 2009. 3) Hardin, B.O. and Richarts, Jr., F.E. (1963): Elastic Wave Velocities in Granular Soils, *Journal of Soil Mechanics and Foundations*, ASCE, Vol. 89, No. SM1, pp. 33-65. 4) Lunar Source Book, Chapter.9, pp. 475-694, 1991. 5) Larose et al.: Lunar Subsurface Investigated from Correlation of Seismic Noise, *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, No. 16, 2005. 6) Kovach et al.: Seismic investigation of the lunar regolith, *Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference*, Vol. 3, pp. 2561-2574, 1973.

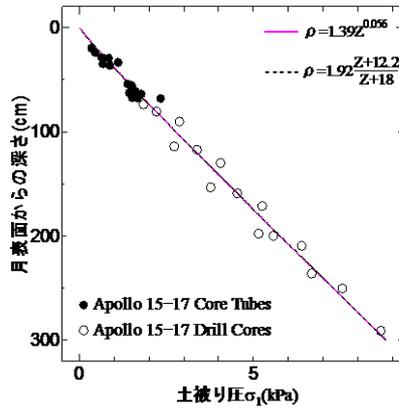


図-5 月面表層部の土被り圧-深度⁴⁾

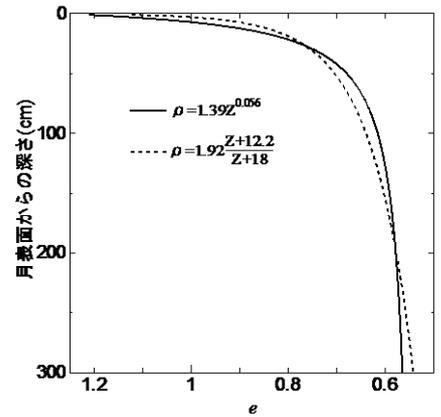


図-6 月面表層部の e -深度

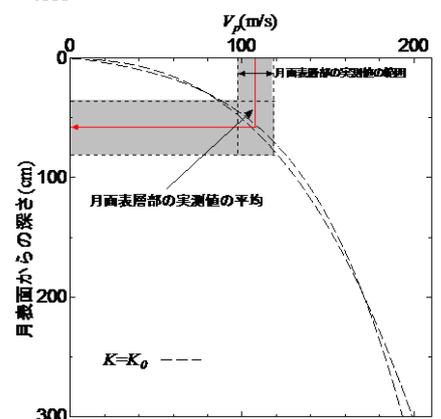
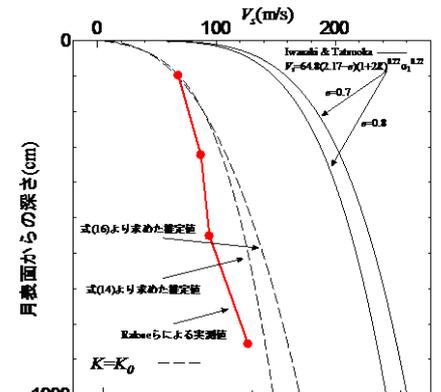


図-7 V_s 、 V_p の速度分布

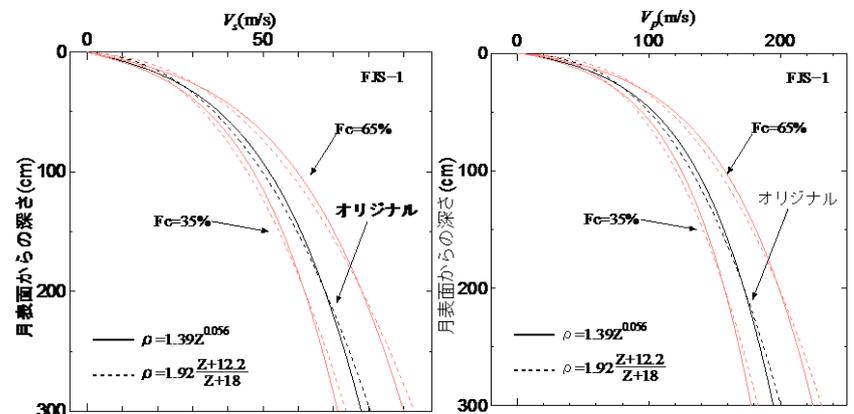


図-8 細粒分によって生じるFJS-1の弾性波速度の範囲