

秋田大学 学生会員 ○安部健太, 鈴木翔太  
正会員 荻野俊寛, 高橋貴之, 及川 洋

### 1. はじめに

著者らはこれまでに室内弾性波速度試験から月面模擬土の弾性波速度の応力および間隙比依存性について明らかにし、月地盤表層の密度分布をもとにS波速度の深度分布を推定した。月地盤表層の月面土の相対密度は地表付近では小さいが深度とともに急激に増加し、表層数十cm以深では90%以上になることが知られている。このような密度分布は月表面への隕石の衝突と月震が主な要因と考えられているが、密度分布は衝突の頻度やエネルギー、月震の大きさに依存すると考えられる。本報告ではこれらの影響を明らかにする端緒として、繰返しせん断応力履歴を受けた月面模擬土の間隙比変化を確かめる。

### 2. 試験の概要

実験に用いた試料は、月面を覆う表層土の科学的な組成、特性を再現するよう国内で製造されたFJS-1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 $e_{\min}=0.46$ 、平均粒形 $D_{50}=0.10\text{mm}$ である<sup>1)</sup>。実験は载荷板および底板にベンダーエレメントを組み込んだ一面せん断試験装置における定圧せん断試験および定圧繰返しせん断試験である。供試体寸法は直径60mm、高さおよそ20mmであり、通常定圧せん断試験では鉛直応力 $\sigma_v=50, 100, 150\text{kPa}$ 、せん断変位7mmまでせん断し、試料の強度定数 $c_d$ 、 $\phi_d$ を求めた。繰返しせん断試験では $\sigma_v=50\text{kPa}$ 、せん断速度 $0.02\text{mm/min}$ 、片振幅せん断変位 $0.1\text{mm}$ の両振りとし、月震による繰返しせん断応力履歴を模擬した。また、繰返しせん断中にはベンダーエレメント試験を実施し、S波速度の測定を行った。

### 3. 試験結果及び考察

図-1は密詰めおよびゆる詰め試料のせん断応力-せん断変位関係を示している。密詰め試料では $d=1\text{mm}$ 付近でピークを示した後、明瞭なひずみ軟化挙動が確認できる。図-2は対応するせん断中の応力経路であり、図-1に対応している。図から得られるFJS-1の強度定数( $c_d$ 、 $\phi_d$ )は密詰めで(12kPa, 46.9°)、ゆる詰めで(3kPa, 35°)であり、試料の相対密度によって $\phi_d$ が大きく異なっている。また、Kobayashi et al.<sup>1)</sup>による三軸試験の強度定数は密詰めで(5.1kPa, 46.9°)ゆる詰めで(3.5kPa, 40.2°)であり、 $\phi_d$ は本研究と近い値が得られている。この比較的大きな粘着力 $c$ はFJS-1の粒子形状に起因するインターロッキング効果によるものと考えられる。図-3は定圧せん断中の間隙比の変化を示している。密詰め試料ではせん断初期にわずかに間隙比が減少しているが、その後、正のダイレイタンスーによる間隙比の増加が確認できる。

図-4は繰返しせん断中の代表的なせん断応力とせん断変位関係を示しており、図-5は繰返しせん断に伴う間隙比の変化を示している。繰返しせん断中の応力振幅はおよそ30kPa程度であり、おおむね一定となってい

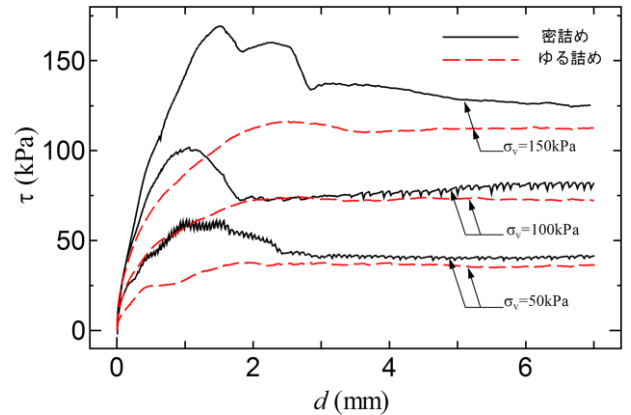


図-1 τとせん断変位の関係

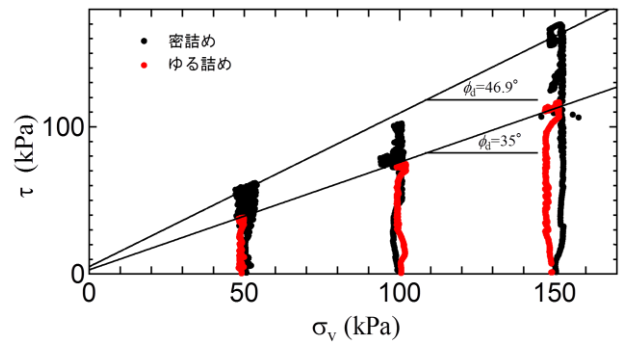


図-2 有効応力経路

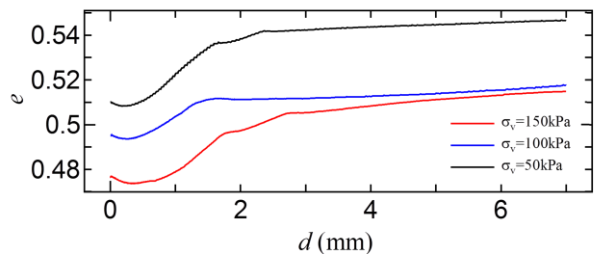
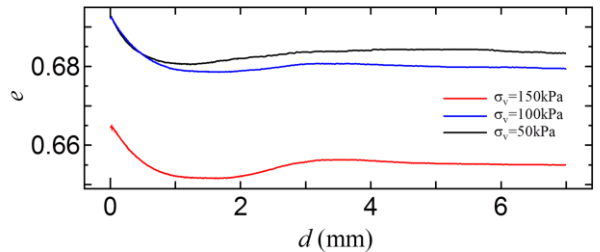


図-3 せん断中の間隙比の変化  
(上：ゆる詰め、下：密詰め)

る。図-3の密詰め試料のダイレイタンス挙動とは対照的に、供試体の間隙比はせん断前の相対密度の値によらずせん断に伴って減少し、負のダイレイタンスを示している。間隙比の減少率は相対密度が小さい供試体ほど大きく、累積せん断変位が増加するにつれ、一定値に収束する傾向を示している。\$D\_r=96\%\$の場合、間隙比の減少傾向は最小間隙比付近に至っても続いている。また、\$D\_r=100\%\$の場合、せん断中の間隙比は最小間隙比以下となっているが同様の減少傾向を示していることから、間隙比の収束値は最小間隙比と一致していない。これは、FJS-1が非常に角張った粒子形状を有しており、密実化しにくいいため、試験基準によって求めた最小間隙比が真の最小間隙比と一致しないためと考えられる。また、図中では密詰めの豊浦砂の実験結果も示しているが繰返しせん断に伴って間隙比は減少しており、定性的に同様の挙動を示している。海野ら<sup>2)</sup>は非排水三軸繰返しせん断試験結果から乾燥状態の豊浦砂の間隙比の変化が累積せん断ひずみによって表現できるとして、図-3と同様の結果を報告している。

図-6には繰返しせん断中に実施したベンダーエレメント試験の代表的な送受信波形を示している。得られた\$V\_s\$はm/sであり、これは著者ら<sup>3)</sup>が求めた一次元圧密状態のFJS-1の\$V\_s\$の実験式(式(1))の値とほぼ一致する。

$$V_s = (74.9 - 59.5e) \sigma_1^{0.29} \quad (1)$$

図-7は繰返しせん断中の間隙比と\$V\_s\$の関係を示している。\$V\_s\$は負のダイレイタンスによる間隙比の減少に伴い増加しており、\$V\_s\$の増加量は図中に示す式(1)による計算値とおおむね一致している。

#### 4. 結論

本報告から得られる知見は以下の通りである

1. 一面せん断試験によって月面模擬土FJS-1の強度定数を求めた。\$(c\_d, \phi\_d)\$は密詰め状態で(12kPa, 46.9°)、ゆる詰め状態で(3kPa, 35°)であった。
2. 繰返し一面せん断試験によって繰返しせん断応力履歴を受けるFJS-1の体積変化挙動を確かめた。FJS-1の間隙比は累積せん断変位の増加とともに減少、一定値に収束する傾向を示し、その値はインターロッキング効果から最小間隙比よりも小さな値となった。
3. 繰返し一面せん断中の間隙比減少によってFJS-1の\$V\_s\$は増加し、その増加量は著者らが過去に提案した実験式の値とおおむね一致した。

#### 【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) 海野寿康, 風間基樹, 渦岡良介, 仙頭紀明: 同一繰返しせん断における乾燥砂と飽和砂の体積収縮量の関係, 土木学会論文集 C, Vol. 62 No. 4 757-776, 2006. 3) 近江谷一樹, 荻野俊寛, 高橋貴之, 鈴木翔太, 及川 洋, 小林泰三, 金森洋史: 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—, 土木学会東北支部技術研究発表会, CD-ROM, 2015.

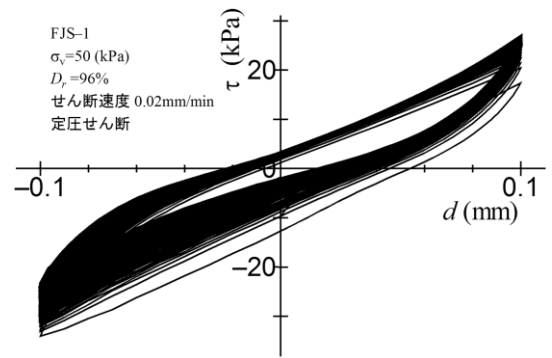


図-4 繰返し载荷中の $\tau-d$ 関係

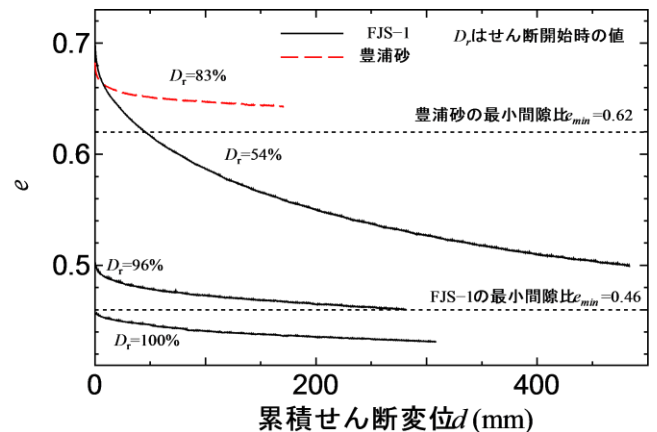


図-5 繰返しせん断中の間隙比の変化

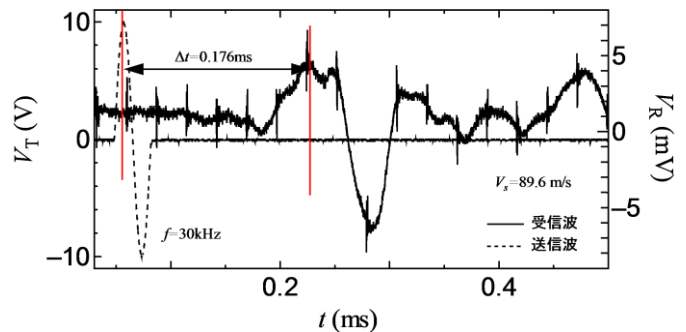


図-6 代表的な送受信波形

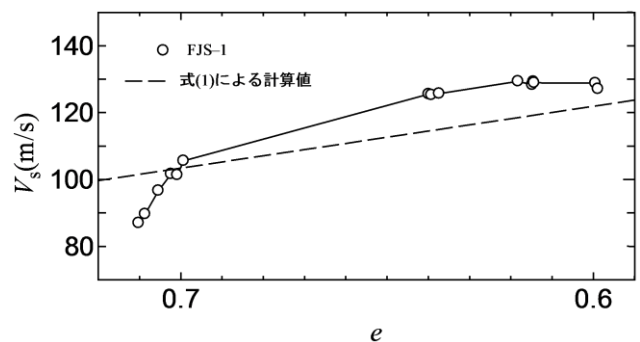


図-7 繰返しせん断中の間隙比と\$V\_s\$の変化