

# 数種類の土粒子密度を有する砂の液状化および液状化後の変形特性

九州工業大学 学生会員 ○増田雄太郎 岩本慎太郎  
九州工業大学 正会員 永瀬英生 廣岡明彦

## 1. はじめに

一般に、液状化発生の予測や液状化対策について検討する際、液状化強度という値が重要なパラメータとされており、液状化強度は相対密度と密接な関係があることが知られている。しかし、過去の研究をまとめてみると、産業廃棄物は相対密度が小さいにもかかわらず拘わらず、液状化強度比が大きいという結果が得られている。この結果を受け、産業廃棄物の土粒子密度  $\rho_s$  が他の試料よりも大きいことに着目し、物理的性質である土粒子密度が液状化強度に影響を及ぼすのではないかと考察した。そこで本研究では、数種類の異なる土粒子密度を有する試料を用いて、繰返し三軸試験により砂の液状化特性に及ぼす土粒子密度の影響を定量的に把握することを試みた。また、繰返し載荷後、静的単調載荷試験を行うことで液状化後の変形特性についても検討した。

## 2. 使用試料および試験方法

本研究で使用した試料の物理的性質を表1に示す。試料には、土粒子密度の大きい順に、鋳物廃砂、鋳滓、豊浦砂、ポリエチレン、PVC（塩化ビニル樹脂）を採用した。供試体は、直径 7.5cm、高さ 15cm の円柱形であり、水中落下法と水中振動法で作製した。水中振動法とは、水中落下させた試料に振動を加えて締め固めることで供試体を作製する方法である。これらの方法で相対密度  $D_r=45\%$ 、 $65\%$  の2通りに作製した供試体は、脱気水を通して飽和させた後、初期有効拘束圧  $\sigma'_0=49\text{kPa}$  にて等方圧密した。繰返し載荷は 0.1Hz の正弦波荷重にて行い、液状化判定基準は両振幅軸ひずみ  $DA=5\%$  としている。また、繰返し試験で繰返し回数 20 回載荷した後、静的単調載荷試験を行い、単調にひずみを増加させて（ひずみ速度 1%/min）、応力-ひずみ関係を調べた。具体的には、繰返し回数が 20 回のときのせん断応力比を液状化強度比  $R_{120}$ （液状化安全率  $F_L=1.0$ ）とし、それより大きい応力比（ $F_L<1.0$ ）、小さい応力比（ $F_L>1.0$ ）でそれぞれ 20 回載荷し、その後非排水状態を保ったまま静的単調載荷を行った。それにより  $F_L$  の値（液状化の程度）に応じたせん断剛性の低下度合いを求めた。

表1 用いた試料の物理的性質

試料名	土粒子密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	最大間隙比 $e_{\text{max}}$	最小間隙比 $e_{\text{min}}$	間隙比の幅 $e_{\text{max}}-e_{\text{min}}$
鋳物廃砂	3.721	0.780	0.506	0.274
鋳滓	3.167	1.436	0.888	0.548
豊浦砂	2.637	0.970	0.620	0.35
ポリエチレン	1.391	1.432	0.690	0.742
PVC	1.117	1.024	0.612	0.412

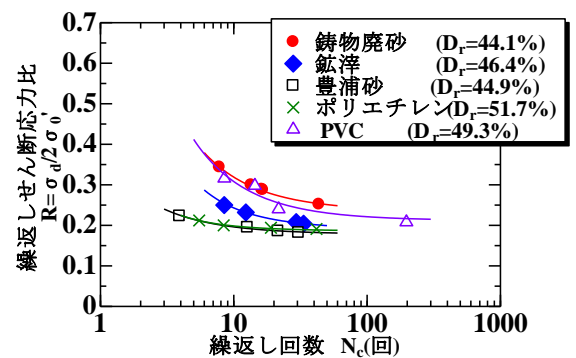


図1 R-Nc 曲線( $D_r=45\%$ )

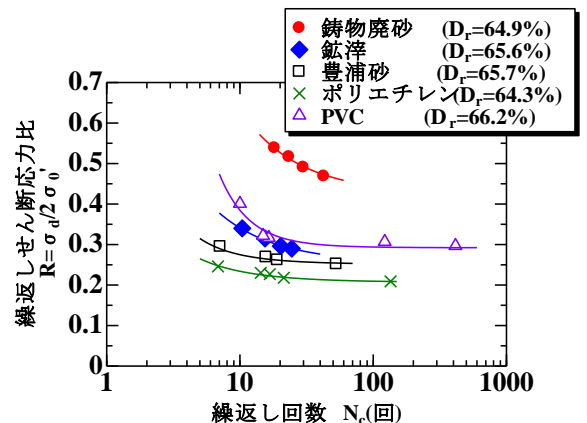


図2 R-Nc 曲線( $D_r=65\%$ )

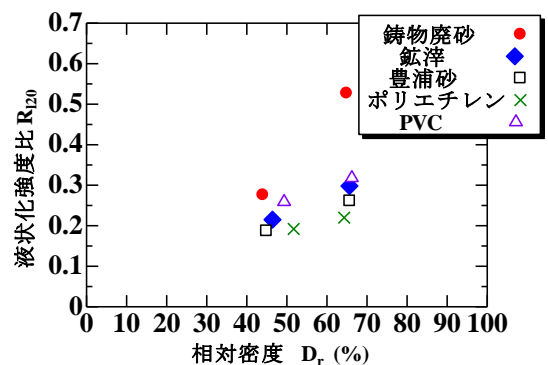


図3  $R_{120}-D_r$  関係

### 3. 繰返し試験結果

図 1, 2 に相対密度  $Dr \div 45\%$ ,  $65\%$  における各試料の繰返し応力比  $R$  と繰返し回数  $N_c$  の関係を示す。それぞれの試料の結果を比較すると、PVC を除いて土粒子密度の大きい試料ほど液状化強度曲線は高い位置にあることが確認できる。

また、図 3 に液状化強度比  $R_{120}$  と相対密度の関係について示す。この図からも同程度の相対密度で  $R_{120}$  の大きさを比較すると、上記の結果と同様に土粒子密度が大きいほど液状化強度比が大きい傾向にあることが分かる。

### 4. 繰返し载荷後の静的単調载荷試験結果

液状化後の変形特性を調べるため、各ケースにおいて繰返し試験後に静的単調载荷試験を行った。ここでは、例として豊浦砂 ( $Dr \div 45\%$ ) の試験結果を図 4 に示す。図中の static は単調载荷のみを受けた供試体の結果である。この結果から、液状化した供試体はある程度のひずみを経て剛性が急激に回復していることが分かる。また、その剛性が回復し始めるまでのひずみは液状化安全率  $F_L$  が小さいほど大きくなっている。この傾向はいずれのケースにおいても同様であった。

しかし、剛性が回復し始めた後の剛性の増加割合を比較すると試料によって異なることが確認できた。ここで、図 5 に剛性回復後の勾配を示すせん断剛性  $G_2$  と各試料の最大・最小間隙比の幅 ( $e_{max} - e_{min}$ ) の関係について示す。この結果から  $e_{max} - e_{min}$  の値が小さいものほど  $G_2$  の値が大きいことが見てとれる。

このことから、液状化後の変形特性には液状化の程度を示す液状化安全率や試料固有の性質である最大・最小間隙比の幅が大きく影響すると考えられる。

### 5. 剛性低下率 $G_1/G_{0,i}$ —液状化安全率 $F_L$

液状化によって供試体がどの程度剛性を失ったかを表す剛性低下率  $G_1/G_{0,i}$  と液状化の程度を表す液状化安全率  $F_L$  関係について図 6, 7 に示す。この結果を比較すると、PVC の結果を除いて同程度の相対密度において土粒子密度の小さい試料ほど剛性の低下が激しい傾向にあると見てとれる。このことから、液状化による剛性低下と土粒子密度の間には関係性があるのではないかと推察される。

### 6. まとめ

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- (1) PVC を除く鋳物廃砂、鉍滓、豊浦砂、ポリエチレンの 4 種類の試料の間には土粒子密度が大きいほど液状化強度が大きくなるという関係性を確認できた。
- (2) 液状化後の変形特性には液状化の程度を示す液状化安全率や試料固有の性質である最大・最小間隙比の幅が大きく影響すると考えられる。
- (3) 液状化による剛性低下と土粒子密度の間には関係性があるのではないかと推察される。

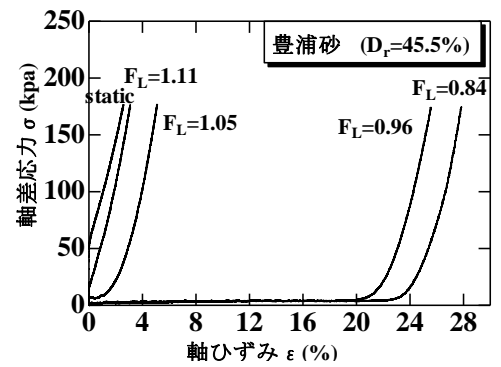


図 4 応力—ひずみ関係 (豊浦砂)

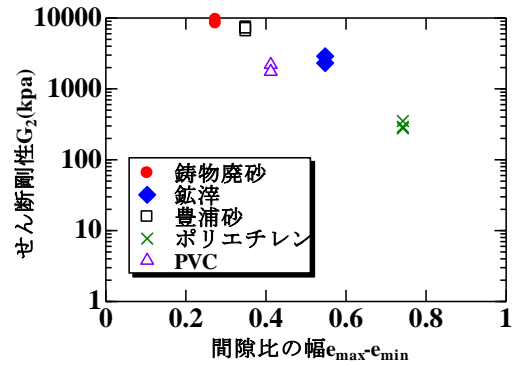


図 5  $G_2 - e_{max} - e_{min}$  関係

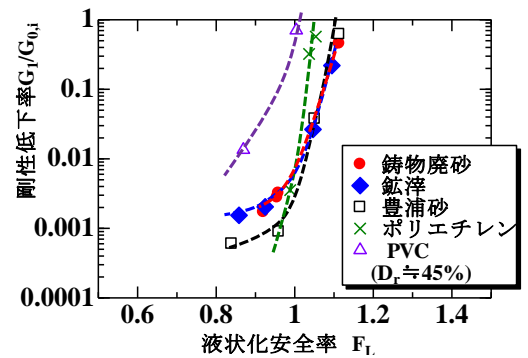


図 6  $G_1/G_{0,i} - F_L$  関係 ( $Dr \div 45\%$ )

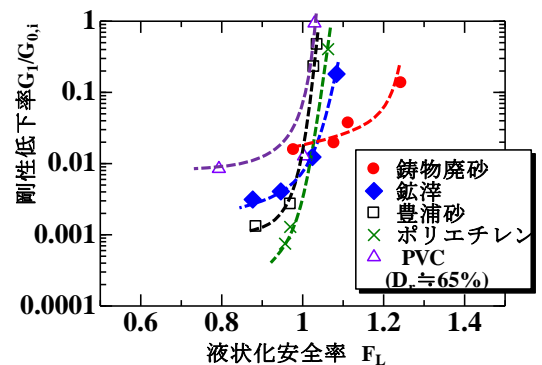


図 7  $G_1/G_{0,i} - F_L$  関係 ( $Dr \div 65\%$ )