

物理的性質の異なる砂の液状化特性および液状化後の変形特性

九州工業大学 学生会員 ○齊藤惣一郎 増田雄太郎
九州工業大学 正会員 永瀬英生 廣岡明彦

1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災にも代表されるように、地震による液状化の被害は跡を絶たないのが現状となっている。液状化の対策を考える上で重要なパラメーターとなる液状化強度は、過去の様々な知見から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、実際にその地盤を構成する土粒子自体が持つ物理的性質の違いに着目した液状化特性についてはあまり検討されていない。そこで本研究では、8種類の異なる物理的性質を有する試料を用いて、非排水繰返し三軸試験により砂の液状化特性、繰返し载荷後の静的単調载荷試験により液状化後の変形特性についてそれぞれ検討した。

2. 試料について

本研究で主に着目した各試料の物理的性質を表1に示す。試料はすべて非塑性であり、試料の物理的性質の違いに着目しているため、地盤材料としては使用されないポリエチレン、PVC(塩化ビニル樹脂)のような人工的な試料についても研究対象としている。なお、粒径加積曲線はすべて豊浦砂のものとはほぼ一致させている。

3. 液状化特性

砂の液状化特性を検討するため、水中落下法と水中振動法により作製した供試体を用いて非排水繰返し三軸試験を行った。供試体は、脱気水を通して飽和させた後、初期有効拘束圧 $\sigma'_0=49kPa$ にて等方圧密した。繰返し载荷は0.1Hzの正弦波荷重にて行い、液状化判断基準としては両振幅軸ひずみ $DA=5\%$ を採用した。供試体は相対密度 $D_r=50\%$ (緩詰め)、 65% (中密詰め)の2通りで作製した。図1, 2に $DA=5\%$ に達したときの各試料の繰返し応力比 R と繰返し回数 N_c の関係(液状化強度曲線)を示す。全体的に緩詰めの状態と比べて、中密詰めの状態では载荷回数が小さい範囲での液状化強度曲線の立ち上がり之急になっており、この傾向は特にクリンカアッシュA, Bにおいて顕著に見られる。この要因としては、クリンカアッシュの粒子表面が複雑な形状をしているため、大きい繰返しせん断応力が加わることで、土粒子同士のかみ合わせによるインターロッキング効果が発揮されたことが考えられる。

液状化強度曲線から読み取った液状化強度比 R_{120} の値は、相対密度が大きくなるほど大きな値を示すことが確認できた。これは、相対密度が大きくなることで、土粒子同士の隙間が狭くなり、より強固な骨格構造が構成されたためと考えられる。そこで、各ケースにおける供試体内部にどれだけの隙間が存在しているかを示す余裕隙間比 $e_f(e_f=e-e_{min})$ という観点から比較を行うため、 R_{120} と余裕隙間比の関係を図3に示す。ただし、この図には以前行った、相対密度 $D_r=80\%$ (密詰め)の試験の結果¹⁾も併せて示している。

表1 各試料の物理的性質

試料名	土粒子密度 $\rho_s(g/cm^3)$	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}	間隙比の幅 $e_{max}-e_{min}$
鑄物廃砂	3.721	0.780	0.506	0.274
釜漕	3.167	1.436	0.888	0.548
豊浦砂	2.637	0.970	0.620	0.350
ぼた	2.513	1.364	0.867	0.497
クリンカアッシュA	2.344	2.068	1.332	0.736
クリンカアッシュB	2.087	2.162	1.321	0.841
ポリエチレン	1.391	1.432	0.690	0.742
PVC	1.255	1.024	0.612	0.412

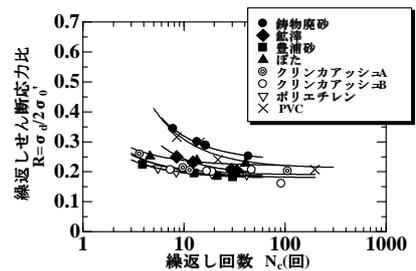


図1 $D_r=50\%$ (緩詰め)での $R-N_c$ 曲線

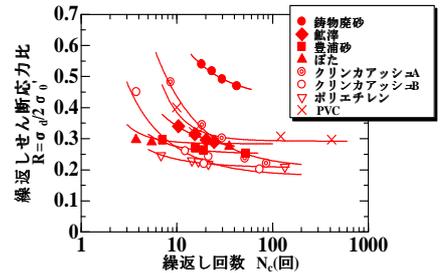


図2 $D_r=65\%$ (中密詰め)での $R-N_c$ 曲線

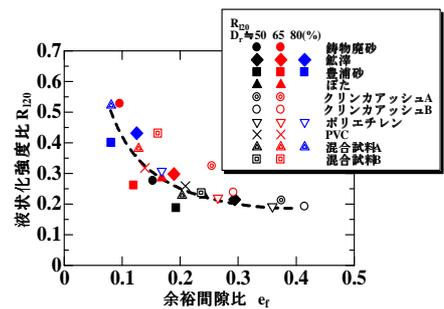


図3 $R_{120}-e_f$ 関係

キーワード：繰返し三軸試験 液状化強度 物理的性質 変形特性

連絡先：〒804-8550 北九州市戸畑区仙水町1-1 TEL：093-884-3111

この図より、余裕間隙比が大きいほど R_{120} は小さくなるような傾向にあることが見てとれる。この結果より、相対密度を一定にしても試料によって余裕間隙比は大きく異なるため、液状化に対する強度を考える際、余裕間隙比 e_f は一つの重要な指標になるのではないかと考えられる。

また、相対密度の増加に伴う液状化強度比の増加について、その増加率に試料による違いが確認できた。そこで、各試料の物理的性質である土粒子密度 ρ_s に対する R_{120} の増加率を図4にプロットしてみた。この図から土粒子密度が大きいほど液状化強度比の増加率は大きくなる傾向にあることが見てとれる。この傾向は、液状化時に繰返しせん断応力を受ける際、一度水中に浮いたような状態になった土粒子は、土粒子密度の大きい粒子ほど水中で構造を再構成する動きが素早いため、正のダイレイタンスーによって剛性を回復させる現象(サイクリックモビリティ)を顕著に発現させ、密な状態になるほどその影響が大きくなることが要因ではないかと考えられる。使用した試料の中でも $\rho_s=3.721$ と極めて土粒子密度の大きい鋳物廃砂は、このメカニズムを早期に発現するため、緩詰め ($D_r \approx 50\%$)、中密詰め ($D_r \approx 65\%$) どちらの状態においても他の試料より大きな液状化強度を示したのではないかと考えられる。

4. 液状化後の変形特性

繰返し載荷後に行った静的単調載荷試験から得られた、軸差応力-軸ひずみ関係の代表例として鋳物廃砂 ($D_r \approx 65\%$)、ポリエチレン ($D_r \approx 65\%$) の結果を図5, 6に示す。いずれのケースにおいても液状化した供試体は応力がほとんど増加せずにひずみだけが進行していく領域(微小抵抗領域)を経て剛性が急激に回復している。このように剛性が回復するのは、軸ひずみが大きくなると土粒子同士が乗り上げようとし、正のダイレイタンスー特性が発揮されるためと考えられる。また、この領域は液状化安全率 F_L が小さい程大きくなることから、激しく液状化した供試体ほど土粒子の骨格構造が壊されるため、剛性が回復するまでに生じる軸ひずみが大きくなると考えられる。

また、剛性回復後の応力の増加割合(せん断剛性 G_2) は試料によって大きく異なり、最大・最小間隙比の幅($e_{max}-e_{min}$)に起因しているのではないかとこの知見が得られた。図7にせん断剛性 G_2 と $e_{max}-e_{min}$ の関係を示す。この傾向は、 $e_{max}-e_{min}$ が小さい鋳物廃砂のような試料ほど土粒子同士が乗り上げようとする事による正のダイレイタンスー特性が顕著に現れ、ポリエチレンのように $e_{max}-e_{min}$ が大きい試料ほど正のダイレイタンスー特性を緩やかに発揮し、剛性を回復させるまで大きな軸ひずみを要することに起因していると考えられる。

5. 結論

- (1) 液状化強度特性には、粒子表面の形状や余裕間隙比 e_f 、土粒子密度 ρ_s が影響を及ぼすと考えられ、それらが相対密度以外の重要な指標になるのではないかと推察される。
- (2) 液状化後の変形特性は、液状化安全率 F_L によって異なり、 F_L が小さい程(液状化の程度が激しい程)剛性を回復させるまでに大きな軸ひずみを要し、剛性回復後の応力の増加割合(せん断剛性 G_2) には最大・最小間隙比の幅($e_{max}-e_{min}$) が影響を及ぼすという知見が得られた。

参考文献

1) 増田ら：数種類の土粒子密度を有する砂の液状化特性，第46回地盤工学研究発表会，pp417～418，2011。

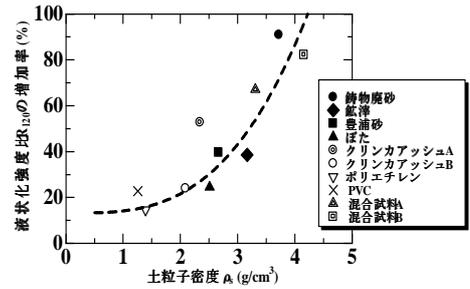


図4 R₁₂₀の増加率と ρ_s の関係

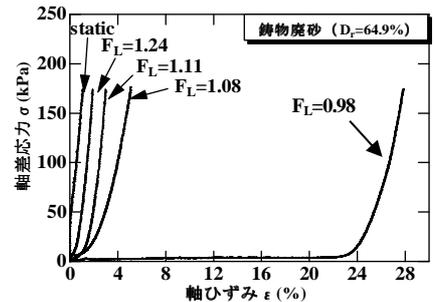


図5 応力-軸ひずみ関係 (鋳物廃砂)

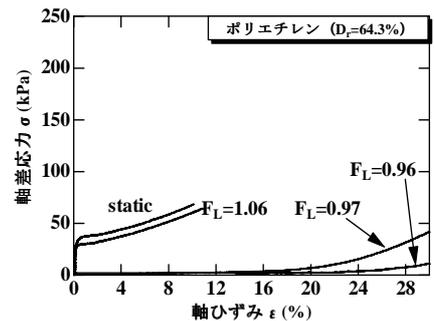


図6 応力-軸ひずみ関係 (ポリエチレン)

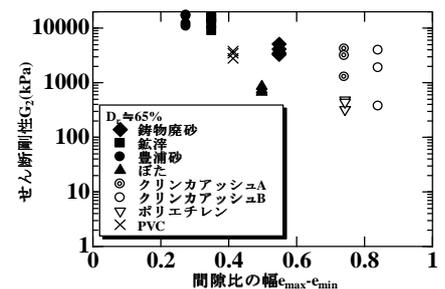


図7 $G_2-(e_{max}-e_{min})$ 関係 ($D_r \approx 65\%$)