

塑性を有する砂質土の繰返しせん断特性に関する研究

九州工業大学大学院 学生会員 ○川野 直哉 宮地 恵一郎
九州工業大学大学院 正会員 永瀬 英生 廣岡 明彦

1.はじめに

細粒分を多く含む地盤の液状化が報告されて以降、細粒分を含む砂質土の液状化に関する研究が数多く報告されている。しかしながら、細粒分含有率が高いが細粒分そのものは低塑性の場合や塑性が高くてもゆるく堆積している場合等、細粒分を含む砂の液状化特性や変形挙動について、未だ十分に解明されていない点が数多く存在する。したがって、液状化の可能性や液状化に伴う変形の適正な評価のために、塑性を有する砂質土地盤においても、液状化特性や液状化後の変形特性について調査をすることが重要である。本研究では、塑性指数 I_p や粘土分含有率 CC を変化させ、粘土分の液状化特性や液状化後の変形特性への影響を調べた。

2.試料および実験方法

本実験では、豊浦砂と DL クレー、ベントナイトを試料として用いた。今回は細粒分含有率 $FC=40\%$ で粘土分含有率 $CC=0, 5, 10\%$ で実験を行った。図 1 にそれぞれの試料の粒径加積曲線、表 1 にそれらの物理的性質を示す。また、 $CC=10\%$ の試料は塑性指数 $I_p=11.6$ 、 $CC=5\%$ の試料は $I_p=10.1$ であり塑性を有している。

本研究では、繰返し中空ねじりせん断試験装置を用いて実験を行った。供試体は外径 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の中空円筒形とし、乾燥試料を用いて空中落下法および軽い突固めにより、相対密度 $Dr=60\%$ 程度となるように作製した。供試体作製後、間隙圧係数 B 値が 0.95 以上となるまで脱気水を通水して供試体を飽和化し、初期有効拘束圧 $\sigma'_0=98\text{kPa}$ で等方圧密を行った。透水性が低く飽和までに時間がかかるため通水には二重負圧法を採用した。二重負圧法はセル水と供試体内部の両方に負圧を作用させ、膨張する気泡を通水によって排出させるものである。圧密終了後、非排水状態で載荷周波数 0.1Hz で繰返し載荷試験を行った。液状化発生の判断基準は、両振幅せん断ひずみ $DA=7.5\%$ の時点とした。繰返し載荷試験後、繰返し回数が 20 回の場合、非排水状態を保ったまま静的単調載荷試験を行った。静的単調載荷はひずみ制御方式で行い、載荷速度は $\dot{\gamma}=5\%/min$ とした。

3.液状化強度曲線

各ケースの供試体に正弦波荷重を与えた時の繰返し応力比 R と両振幅せん断ひずみ $DA=7.5\%$ に達するまでの繰返し回数 N_c の関係を図 2 に示す。また、繰返し回数 20 回の時の繰返し応力比 R を液状化強度比 R_{L20} とし、その値を表 2 に示す。豊浦砂のみの CaseA では $R_{L20}=0.172$ であるのに対し、DL クレーを加えた Case1 では $R_{L20}=0.088$ と値が非常に小さくなっている。ただし、ベントナイトを加えた Case2、3 では R_{L20} が 0.190 前後であり、Case1 と比べ R_{L20} が増大している。Case1 では、非塑性細粒分が噛み合っている砂粒子同士の隙間に入り、砂粒子間の摩擦力を減少させるのに対し、Case2、3 では塑性を有する粘土分が、砂あるいは細粒分との間で粘着力を発揮した

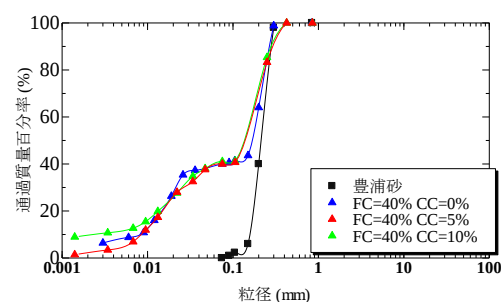
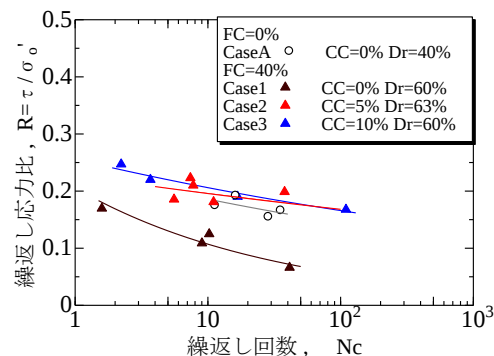


図 1 粒径加積曲線

表 1 混合試料の物理特性

	$\rho_s(\text{g/cm}^3)$	$\rho_{dmax}(\text{g/cm}^3)$	$\rho_{dmin}(\text{g/cm}^3)$	$W_L(\%)$	$W_p(\%)$	I_p
FC=40%, CC=0%	2.632	1.966	1.374	NP	NP	
FC=40%, CC=5%	2.65	1.895	1.384	20.2	10.1	10.1
FC=40%, CC=10%	2.584	1.792	1.303	29.4	17.8	11.6

図 2 R と N_c の関係

ためと考えられる。また、粘土分含有率 $CC=5\%$ の Case2 の R_{L20} は、 $CC=10\%$ である Case3 の R_{L20} と比較して、わずかに小さな値を示している。この結果は、粘土分の量が減少したことによって、粒子間で働く粘着力も減少したことによるものと考えられる。

4. 静的単調載荷試験

静的単調載荷試験の結果においては、繰返し応力比 R と液状化強度比 R_{L20} を用いた液状化安全率 $F_L (=R_{L20}/R)$ で試験条件を示している。液状化後の供試体の剛性が回復するまでに要する区間を微小抵抗領域とし、微小抵抗領域での曲線の傾きをせん断剛性 G_1 とした。また、static の曲線は静的単調載荷試験のみを行って得られた結果である。この static の曲線のせん断ひずみ 0.1% に対する割線勾配をせん断剛性 $G_{0,i}$ と定義し、 $G_1/G_{0,i}$ を剛性低下率とする¹⁾。せん断応力とせん断ひずみの関係を図3に示す。粘土分含有率 $CC=5, 10\%$ の Case2、3 の G_1 が $CC=0\%$ の Case1 のそれを大きく上回っている。このことから、粘土分が粒子間で粘着力を発揮すると、液状化後の剛性が失われにくくなると考えられる。また、Case2 と Case3 を比較すると G_0 、 G_1 および $G_1/G_{0,i}$ はおよそ同程度の値を示している。このことから、 CC が異なる場合でも、塑性指数 I_p が同程度であれば、液状化後のせん断剛性がおおよそ同等程度となると考えられる。

また、静的単調載荷試験によって得られたせん断剛性 G_1 を初期有効拘束圧 $\sigma'_0 = 98\text{kPa}$ で除した値を、液状化流動解析プログラム「ALID」で液状化強度比 R_{L20} と F_L から G_1 を推定する際、用いられている安田・稲垣の式(推定 G_1 式)にプロットを行うと図4のようになる。これより、プロットされた点における RL を読み取ると表3のようになる。豊浦砂のみの CaseA では推定 G_1 式は実際のせん断剛性 G_1 を過大評価し、Case1、2、3 では実際のせん断剛性 G_1 を過小評価するという結果が得られている。Case1、Case2 では RL/R_{L20} が 1.3 を超え、表3の4ケースの中では大きな値を示している。

表3 安田・稲垣式との比較の結果

	FC(%)	CC(%)	Dr(%)	実験値 R_{L20}	各点での RL	RL/R_{L20}
CaseA	0	0	40	0.172	0.15	0.87
Case1	40	0	60	0.088	0.12	1.36
Case2		5	63	0.187	0.25	1.34
Case3		10	60	0.193	0.23	1.19

5. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 細粒分含有率 $FC=40\%$ 、粘土分含有率 $CC=5\%$ の Case2 の液状化強度比 R_{L20} は同細粒分含有率 F_c 、相対密度 Dr で $CC=10\%$ の Case3 の値と比較しわずかに小さかった。
- 2) 液状化後の静的単調載荷試験より、Case2 と Case3 のせん断剛性 G_1 は同程度の値を示すが、推定 G_1 式と比較すると Case2 の方がよりせん断剛性 G_1 が過小評価される結果となった。

参考文献

- 1) 宮地恵一郎：高・低塑性細粒分を含む砂の液状化特性、九州工業大学卒業研究、2018。

表2 液状化強度比 R_{L20}

	CaseA	Case1	Case2	Case3
$F_c(\%)$	0	40		
$C_c(\%)$	0	0	5	10
$Dr(\%)$	40	60	63	60
R_{L20}	0.172	0.088	0.187	0.193

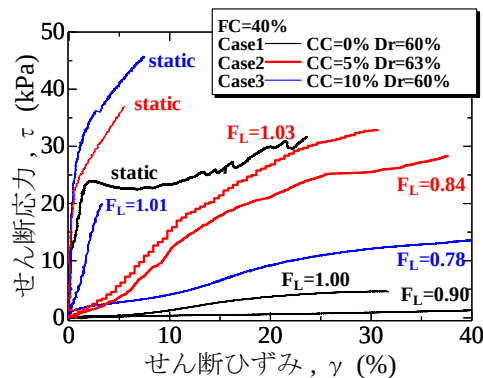


図3 τ と γ の関係

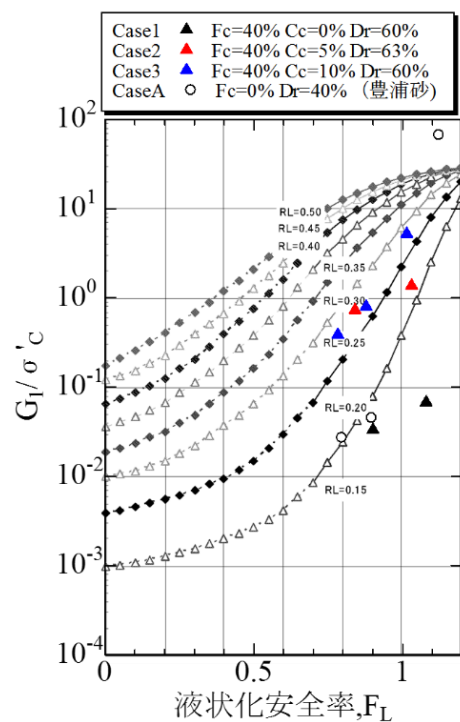


図4 安田・稲垣式との比較