

塑性指数の異なる細粒分含有砂の液状化特性

九州工業大学大学院 学生会員 川野 直哉

九州工業大学大学 非会員 チンフセル・バドゾリグ

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

細粒分を含む地盤の液状化が報告されて以降、細粒分を含む地盤に対しても液状化の研究の対象が広がっている。しかしながら、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。そのような地盤においては、道路橋示方書に示される液状化判定対象層に該当せずとも液状化や液状化に近い現象によって大きな被害を受ける可能性も指摘されている。

また、地盤変形量を算出する解析手法であるプログラム「ALID」では液状化強度比 R_{L20} と液状化安全率 F_L を用いて液状化後のせん断剛性 G_L を推定する安田・稲垣式が用いられているが、細粒分含有砂のようにそれらの関係が不明確な場合においては実現現象と解析結果が乖離するおそれがある。よって細粒分を含む地盤の液状化特性についての研究は今なお重要であるといえる。

表 1 混合試料の物理特性

	FC(%)	CC(%)	相対密度 Dr(%)	土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	ρ_{dmax} (g/cm^3)	ρ_{dmin} (g/cm^3)	液性限界 $W_L(\%)$	塑性限界 $W_P(\%)$	塑性指数 I_p
CaseA		0	60	2.632	1.966	1.374	NP	NP	-
Case1		2.5	62	2.659	1.922	1.405	19.2	15.8	3.4
Case2		5.0	63	2.650	1.895	1.384	20.2	10.1	10.1
Case3			60						
Case4		10.0	37	2.584	1.792	1.303	29.4	17.8	11.6
Case5		12.5	30	2.583	1.805	1.289	32.3	20.2	12.1
Case6		15.0	30	2.687	1.763	1.232	41.5	23.2	18.3
CaseB	20		55	2.606	1.811	1.329	30.5	21.0	9.5
Case7		10.0	73						
Case8	60		45	2.660	1.766	1.226	32.1	20.4	11.8

2. 試料および実験方法

本研究では、豊浦砂、DL クレー、ベントナイトを混合した試料を用いた。各ケースの物理特性については表 1 に示す。なお、Case6、8 に関しては豊浦砂の物理特性に近似する珪砂 7 号を使用した。また、相対密度 Dr は参考値として示している。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、空中落下法や湿潤突固め法により、各ケース相対密度を調整し作製した。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。圧密終了後、非排水状態で載荷周波数 0.1Hz、載荷回数 20 回にて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。ただし、この判断基準については、 $DA=15\%$ 時とした場合の検討も行っている。

3. 繰返し載荷試験

正弦波を用いた繰返しせん断試験により得られた、繰返し応力比 τ/σ'_0 、せん断ひずみ γ 、過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_0$ の代表的な経時変化を図 1 に示す。

図 1 より、せん断ひずみの経時変化を見ると 75s 付近で $DA=7.5\%$ に達しているが、過剰間隙水圧比に関しては、 $DA=7.5\%$ に達した後も上昇している。このことから、 $DA=7.5\%$ では完全な液状化に至っていないと考えられる。そこで液状化発生の判断基準を $DA=15\%$ にしてみると、105s 付近で $DA=15\%$ に達しており、過剰間隙水圧比もほぼ一定となっている。よって、 $DA=7.5\%$ に比べ、 $DA=15\%$ のほうがより液状化に近い状態であると考えられる。

また、Case6 は液状化判定対象外となる $I_p=15$ 以上であるが、 $DA=15\%$ に達し、過剰間隙水圧比は 0.8 付近の値を示しており、 $I_p=15$ 以上であっても緩い地盤の場合は液状化に近い現象が発生する可能性はあると考えられる。

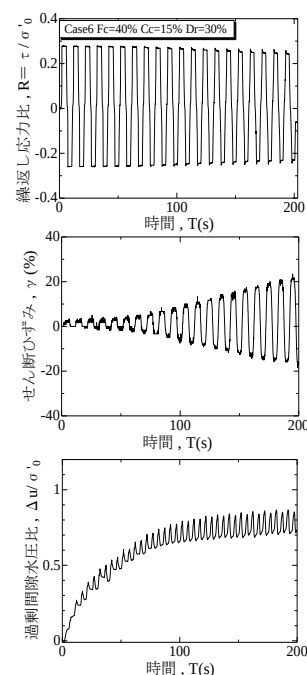


図 1 Case6 の時刻歴

次に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、各 Case の繰返し回数 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。CaseA、1、2、3 より、粘土分含有率 CC の増加によって液状化強度比 R_{L20} が増加することがわかる。粘土分含有率 $CC=15.0\%$ の Case6 の R_{L20} は 0.239 であり、 $CC=12.5\%$ である Case5 の $R_{L20}=0.128$ と比較して大きな値を示している。よって、 Dr の低い緩い供試体であっても、 CC の増加によって液状化強度は高くなると考えられる。また、Case2 と 4、Case3 と 5 は I_p が増加しているが R_{L20} は低下している。よって、粘土分含有率が増加し塑性指数 I_p が高くなると、強度も高くなるが、 Dr が低い緩い地盤など、強度が低下することもあると考えられる。

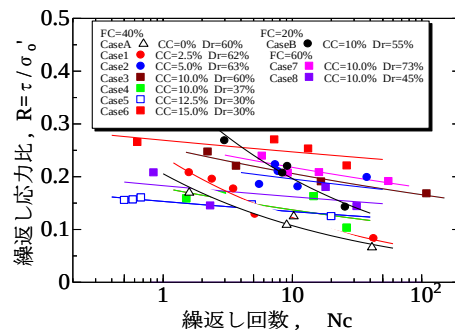


図2 液状化強度曲線

表2 液状化強度比 R_{L20}

	CaseB	CaseA	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6	Case7	Case8
FC(%)	20				40					60
CC(%)	10.0	0	2.5	5.0	10.0	12.5	15.0			10.0
Dr(%)	55	60	62	63	60	38	30	30	73	45
I_p (%)	9.5	-	3.4	10.1	11.6	12.1	18.3			11.8
R_{L20} ($DA=7.5\%$)	0.160	0.088	0.102	0.187	0.193	0.127	0.128	0.239	0.207	0.160
R_{L20} ($DA=15\%$)	0.188	0.091	0.110	0.196	-	0.153	-	0.243	0.212	0.162

4. 繰返し載荷後の変形特性

本研究においては繰返し載荷直後のせん断剛性 G_1 を繰返し載荷試験の最終の1サイクルでのせん断応力 τ とせん断ひずみ γ の関係より、 $\tau=0$ 、 $\gamma=0$ を示す4点の接線勾配を抽出しそのうち最小のものと定義した¹⁾。液状化安全率 F_L とは繰返し載荷時の応力比 R で液状化強度比 R_{L20} を除したもの ($F_L=R_{L20}/R$) である。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、「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・稲垣の式にプロットを行うと図3のようになり、プロットされた RL を読み取ると表3のようになる。また、プロットされた RL を実験値の R_{L20} で除したものを強度補正值 RL/R_{L20} と定義している。CaseA、1 のような I_p の小さいケースの場合、 RL/R_{L20} は 1.0 よりかなり大きな値となり、安田・稲垣式と異なる傾向を示している。 I_p の大きい Case2、3、7 の場合、 RL/R_{L20} は 1.0 に近い値となり、安田・稲垣式と同様の傾向を示している。 FC の小さい CaseB と Dr の小さい Case4、6、8 に関しては、 $DA=7.5\%$ の場合は RL/R_{L20} が 1.0 より大きな値を示しているが、 $DA=15\%$ の場合は RL/R_{L20} が 1.0 に近い値となった。よって、塑性が高い場合、液状化発生の判断基準が両振幅せん断ひずみ $DA=15\%$ のほうが安田・稲垣式と同様の傾向になる可能性があると考えられる。

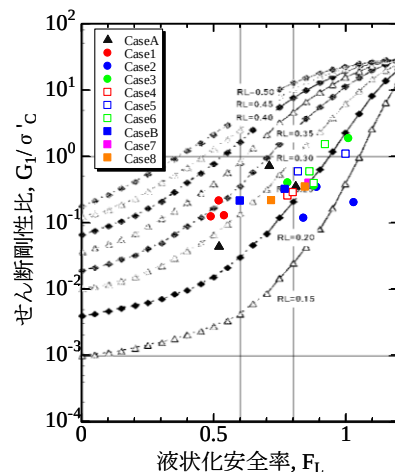


図3 安田・稲垣式との比較

表3 安田・稲垣式との比較の結果

	FC(%)	CC(%)	Dr(%)	I_p	実験値 R_{L20} ($DA=7.5\%$)	プロット された RL ($DA=7.5\%$)	RL/R_{L20} ($DA=7.5\%$)	RL/R_{L20} ($DA=15\%$)
CaseA		0	60	-	0.088	0.25	2.8	2.6
Case1		2.5	62	3.4	0.102	0.29	2.8	2.5
Case2		5.0	63	10.1	0.187	0.18	1.0	0.8
Case3		10.0	60	11.6	0.193	0.20	1.0	-
Case4			37		0.127	0.21	1.7	1.0
Case5		12.5	30	12.1	0.128	0.20	1.6	-
Case6		15.0	30	18.3	0.239	0.28	1.2	1.0
CaseB	20	10.0	55	9.5	0.160	0.25	1.6	1.1
Case7			73		0.207	0.18	0.9	0.8
Case8	60	10.0	45	11.8	0.160	0.23	1.5	1.2

5. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 液状化判定対象外となる $I_p=15$ 以上の Case6 は、両振幅せん断ひずみ $DA=15\%$ に達し、過剰間隙水圧比 0.9 付近の値を示しており、 $I_p=15$ 以上であっても緩い地盤の場合は液状化が発生する可能性がある。
- 2) 液状化発生の判断基準が $DA=15\%$ のほうが液状化後の変形特性において、安田・稲垣式と同様の傾向となった。

参考文献

- 1) 宮地恵一朗：塑性の変化が砂の繰返しせん断特性および変形特性に与える影響に関する研究、九州工業大学修士論文、2019。