

細粒分を含む砂の液状化強度に及ぼす初期せん断応力の影響についての三軸試験

中央大学
中央大学

正会員
学生会員

國生剛治
○井出智之 加藤亮

1. はじめに

地盤の液状化の評価の一つとして非排水三軸試験が用いられているが、多くは水平地盤を想定したものである。しかし、原地盤では地震波による繰返しせん断応力を受ける前に構造物や斜面のような場所において静的なせん断応力を受けている。この静的なせん断応力（初期せん断応力）は地震による繰返し荷重が加わる時に地盤の挙動に大きな影響を及ぼすため、初期せん断応力の加わる地盤の液状化の研究は重要である¹⁾。本研究では、三軸試験機を用いて初期せん断応力が加わった状態での砂の非排水繰返しせん断試験を初期せん断応力比 α 、細粒分含有率 F_c をパラメータに行い、初期せん断応力が液状化強度に及ぼす影響について検討した。

2. 試験方法と試験試料

図-1に本研究に用いた三軸試験機の概略を示す。供試体は直径50mm、高さ100mmである。試料は細粒分含有率 $F_c=0\%$ の千葉県富津砂に石粉細粒分を $F_c=0, 5, 10, 20\%$ になるように粒度調整したものである。図-2に粒径加積曲線、表-1に物理特性を示す。供試体は圧密後相対密度 D_r がほぼ30%になるよう、試料を5層に分けて締固めるドライタンピング法により作成した。脱気水通水後バックプレッシャーを196kPa、有効拘束圧を98kPaで等方圧密した後、軸圧 σ_1' ならびに側圧 σ_3' を $\sigma_1' > \sigma_3'$ に調整し、平均有効主応力 $\sigma_m' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$ を98kPaで一定に保ちながら初期せん断応力 $\tau_s = (\sigma_1' - \sigma_3')/2$ を加えた。なお、初期せん断応力の大きさは初期せん断応力比 $\alpha = (\sigma_1' - \sigma_3')/(\sigma_1' + \sigma_3')$ で定義するものとする。本研究では、 $\alpha = 0, 0.075, 0.15, 0.3$ の4種類のケースで実験を行った。圧密終了後、応力振幅 σ_d 、周波数 $f=0.05\text{Hz}$ で非排水繰返し载荷を行い両振幅軸ひずみ ε_{DA} が10%以上、または、軸ひずみのピーク値 ε_p が10%以上に達した所で試験を終了した。

3. 試験結果

図-3は相対密度 $D_r \approx 30\%$ の試料について、両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=5\%$ に達する応力比 $R_L = \sigma_d/2\sigma_c'$ と繰返し载荷回数 N_c の関係について初期せん断応力比 α 、細粒分含有率 F_c をパラメータとして示している。 $F_c=0, 5, 10, 20\%$ の $\alpha=0.15$ の一部分と $\alpha=0.3$ についての白抜きの点では応力反転が起きず軸ひずみが両振幅に出なかったため、 ε_{DA} ではなく $\varepsilon_p=5\%$ での値をとっている。応力反転とは、繰返しせん断応力の片振幅が初期せん断応力より小さいため、繰返しせん断応力が圧縮側から伸張側

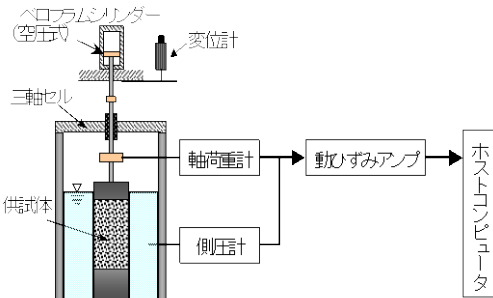


図-1 三軸試験機概略

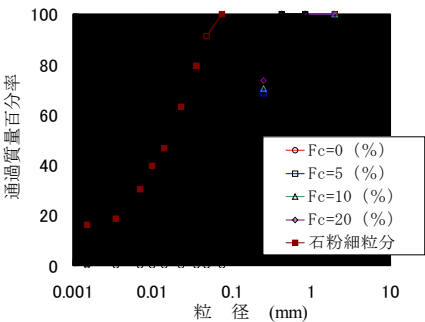


図-2 粒径加積曲線

表-1 物理特性					
F_c (%)	ρ_s (g/cm^3)	ρ_{dmax} (g/cm^3)	ρ_{dmin} (g/cm^3)	e_{max}	e_{min}
0	2.741	1.632	1.316	1.083	0.680
5	2.739	1.717	1.323	1.070	0.595
10	2.742	1.777	1.302	1.106	0.543
20	2.739	1.886	1.261	1.172	0.452

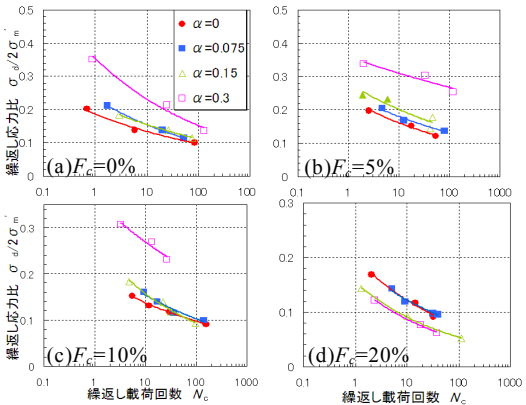


図-3 液状化強度曲線

に反転しないことである．また， $N_c=10$ 回での繰返し応力比を液状化抵抗値 R_{L10} と定義している． $F_c=0, 5\%$ では， α が増加するに従って液状化強度 R_L は大きくなる． $F_c=10\%$ では， $\alpha=0, 0.075, 0.15$ ではほぼ同程度の液状化強度 R_{L10} であり， $\alpha=0.3$ になると大きくなる． $F_c=20\%$ では， $\alpha=0, 0.075$ はほぼ等しいが， α が増加するにつれて液状化強度 R_{L10} は減少している．

図-4 は $D_r=30\%$ の液状化強度曲線から読み取った $N_c=10$ の液状化強度 R_L と α との関係を両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA}=1, 2, 5\%$ について示した．また，既往の研究と比較するために *Vaid* の結果についても示してある¹⁾．本実験においても， $F_c=5\%$ を除いた $F_c=0, 10\%$ では $\varepsilon_{DA}=1, 2\%$ の小さなひずみの範囲において α の増加とともに， R_{L10} はある点でピークを迎え，それ以降は強度が減少する同様の傾向となった．一方， $F_c=20\%$ では $\varepsilon_{DA}=1, 2\%, 5\%$ において， α の増加とともに強度が減少する傾向が見られた．また， $F_c=0, 5, 10\%$ では ε_{DA} ごとに若干の強度に差があるが， $F_c=20\%$ では差がほとんどみられない．これは液状化が起きてからひずみが急に卓越したためであり，細粒分の影響が大きいと考えられる．

ここで液状化評価をエネルギーの観点から評価するため，実験で得られた応力-ひずみ関係で囲まれる面積から液状化による損失エネルギーを算出し，整理を行った²⁾．図-5(a)(b)(c)(d)に累積損失エネルギーを拘束圧で基準化した $\Sigma \Delta W/\sigma'_c$ を横軸に，基準化過剰間隙水圧と，軸ひずみを縦軸にとり，細粒分別に示す． $\alpha=0, 0.075$ では過剰間隙水圧が拘束圧の 1.0 付近まで上昇すると，液状化が発生し急激にひずみが発生している．一方， $\alpha=0.15, 0.3$ では過剰間隙水圧が 1.0 まで上昇せず，完全液状化に至っていないが，軸ひずみは $F_c=0, 5, 10\%$ に関して繰返し载荷直後からゆっくりと発生しており， α が小さい場合と軸ひずみ，間隙水圧の挙動が異なる．しかし $F_c=20\%$ の場合， α の大きさに関わらず急激にひずみが発生していることがわかる．また， $F_c=0, 5, 10\%$ の $\varepsilon_{DA}=10\%$ に達するまでの累積基準化エネルギーは α の増加とともに大きくなっているが $F_c=20\%$ の場合， α の増加とともに小さくなっており，液状化強度曲線と同様の傾向となった．

4. まとめ

- $F_c=0, 5, 10\%$ では， α の増加に伴い液状化強度 R_L は増加傾向にある．しかし， $F_c=20\%$ においては α の増加に伴い，液状化強度 R_L は減少する．これは $F_c=20\%$ 以上で砂のせん断時の体積収縮性が增大するためと考えられる．
- $F_c=0, 10\%$ では小さなひずみの範囲において α の増加とともに R_{L10} はある点でピークを迎え，それ以降強度は減少する． $F_c=20\%$ ではひずみの大きさに関わらず減少傾向を示す．
- $F_c=0, 5, 10\%$ の場合， α が大きいほど軸ひずみ 10% に至るまでのエネルギーは大きくなるが， $F_c=20\%$ の場合 α が大きくなるほど，軸ひずみ 10% に至るまでのエネルギーは小さくなり，液状化強度曲線と同様の傾向を示す．

【参考文献】1) Y.P.Vaid and S.Sivathayalan: Static and cyclic liquefaction potential of Fraser Delta sand in simple shear and triaxial tests, Can. Geotech. J. 33: 281-289 (1996)

2) 風間基樹，累積損失エネルギーに基づく新たな液状化強度指標の提案，第 32 回地盤工学研究発表会，pp723-724，1997

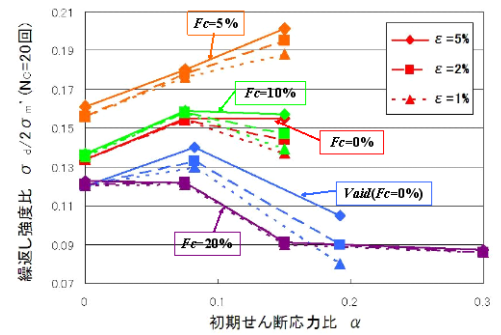


図-4 R_{L10} と α の関係

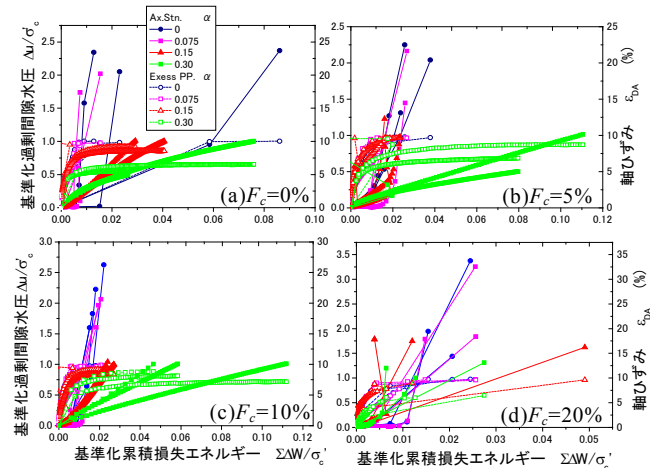


図-5 累積損失エネルギーと過剰間隙水圧、軸ひずみの関係