

広島大学大学院工学研究科 学生会員 ○仁科晴貴
 広島大学大学院工学研究科 正会員 一井康二
 応用地質株式会社コアラボ 正会員 三上武子
 広島大学大学院工学研究科 学生会員 植村一瑛

1. はじめに

緩く堆積した砂質地盤では地震により液状化が起こり，それに伴い流動破壊が発生する．液状化に伴う流動とは，液状化の発生に伴い，非常に大きな変位が発生する現象である．変位のオーダーは m 単位で，液状化層の平均的なせん断ひずみが数十%から 100%を超える事例も報告されている¹⁾．このような大きな変位が，地表面勾配が 1~2%以下でも生じることが流動破壊の特徴である．流動破壊では，せん断応力が一定値を取りながらひずみが累積する現象(定常状態：Steady State)が生じている可能性が高い．本研究では，液状化した地盤が Steady State に至るまでの応力経路，せん断応力 τ - せん断ひずみ γ の関係が，液状化の程度によってどのように変化するかを明らかにすることを目的とし，中空ねじりせん断試験機を用いた要素試験を行った．この結果より，河川堤防などの有効応力解析における解析精度の向上を目指す．

2. 実験方法

試料には緩く堆積した砂質地盤を再現するために，豊浦砂と細粒分として DL クレーを混合したものを用いた（細粒分含有率 $F_c=40\%$ ，相対密度 $D_r=30\%$ ）．供試体寸法は外径 7cm，内径 3cm，高さ 10cm である．本実験では，細粒分を多く含んだ試料を用いるため，均質な供試体の作製が可能な静的締固め法を用いて供試体の作製を行った．

载荷パターンとして，繰返しせん断载荷によって液状化を発生させた後，せん断ひずみ速度 1.0%/min で静的単調载荷を行うことによって，液状化発生地盤が流動に至るプロセスを検討した．特に本研究では，繰返し载荷を終了する過剰間隙水圧比の値を変化させることにより，液状化の程度を変えた場合に，流動発生プロセスがどのように変化するかを検討した．表-1 に実験ケースを示す．相対密度は 30%を想定して試料を作製したが，実際に作製した後に質量と含水比，体積を測り相対密度を求め直すと，想定していたものよりも大きくなった．これは，供試体作製の段階で必要量より多少多めに試料を用いたことに起因していると考えられる．

表-1 実験ケース

実験ケース	想定相対密度 $D_r(\%)$	実際の相対密度 $D_r'(\%)$	拘束圧 σ'_0 (kPa)	$F_c(\%)$	直前水圧比 $\Delta u/\sigma'_0$	繰返しせん断応力比 τ/σ'_0
D30-F40-S0.07-1	30	35.4	98	40	DLクレー	-
D30-F40-S0.07-2		30.8				0.07
D30-F40-S0.07-3		34.8				0.07
D30-F40-S0.07-4		33.0				0.07
D30-F40-S0.07-5		34.6				0.07
D30-F40-S0.07-6		30.8				0.07
拘束圧 60kN/m ² (過圧密比1.63)		38.9	98→60			-
拘束圧 60kN/m ²		33.0	60			-

3. 実験結果

Fig.4.11 に相対密度 $D_r=30\%$ ，細粒分含有率 $F_c=40\%$ の供試体における液状化強度曲線を示す．液状化発生の判断基準である「何をもちて液状化したと判断するか」にはさまざまな考え方があるが，本研究では，過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_0$ が 0.95 をはじめて超えた時点で液状化と定義した(図-1)．図-2 の液状化強度曲線では，

$R_{20}=0.061$ となる.

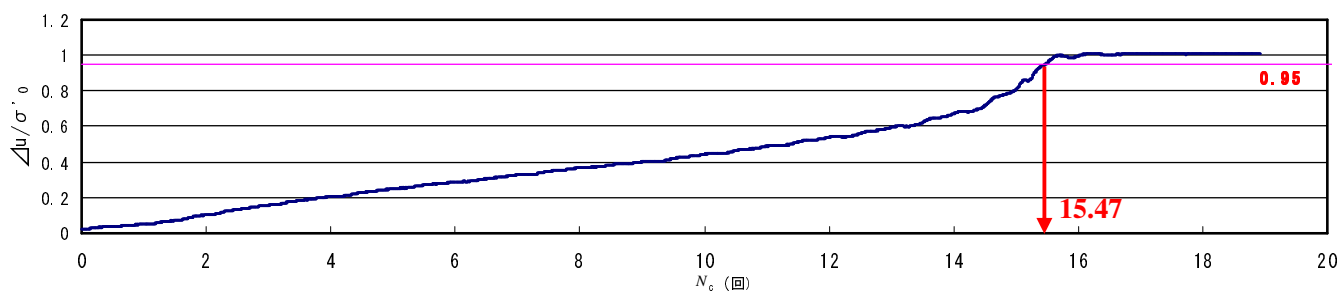


図-1 本研究における液状化の定義 (このケースでは $N_c=15.74$ で液状化)

図-3 に D30-F40-S0.07-4 (相対密度 $Dr=30\%$, 細粒分含有率 $F_c=40\%$, 繰返しせん断応力比 $\tau/\sigma'_0=0.07$, 直前水圧比 $\Delta u/\sigma'_0=0.6$) のケースにおけるせん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係図を示す. 単調載荷時には, せん断ひずみ γ の増加に伴い, せん断応力 τ が増加してゆくが, ピークを迎えた後に緩やかに減少し, ほぼ一定値に収束している. この状態が **Steady State** (流動が生じる定常状態) であり, このときのせん断応力の値を本研究では **Sus 値** と呼ぶ. **Steady State** 状態の途中でせん断応力が急激に減少している部分がある (図-1 中の破線で囲んだ部分). これは, 供試体にせん断面が発生したことによるものであると考えられる. 写真-1, 2 に載荷前後の供試体の写真を示す. 写真-2 のように, 単調載荷終了後の供試体は, 大きなひずみを生じている. このメンブレンのねじれに沿って供試体に斜めにせん断面が生じていると考えられる. この現象はすべてのケースで確認された. これにより, **Sus** 値が不安定になってしまうので, せん断応力の急激な減少が発生しないように, せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係のグラフを補正し, そのグラフからせん断ひずみ $\gamma=20\%$ 時のせん断応力の値を読み取って **Sus 値** と定義した. 図-4 に補正法を示す.

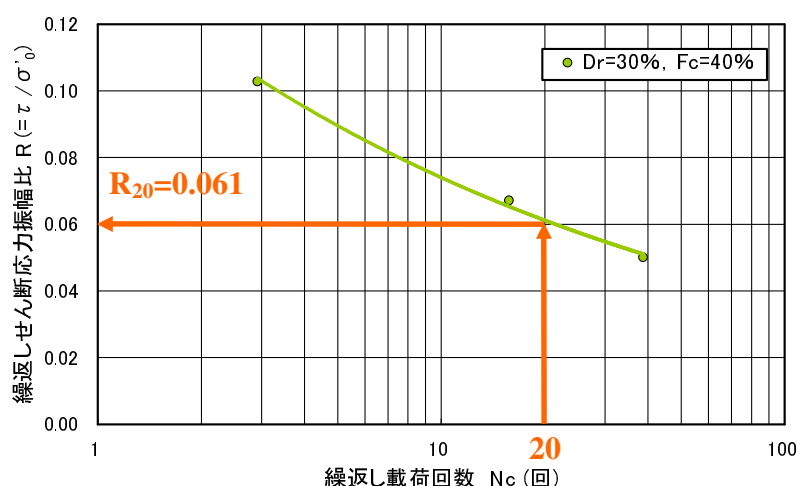


図-2 液状化強度曲線

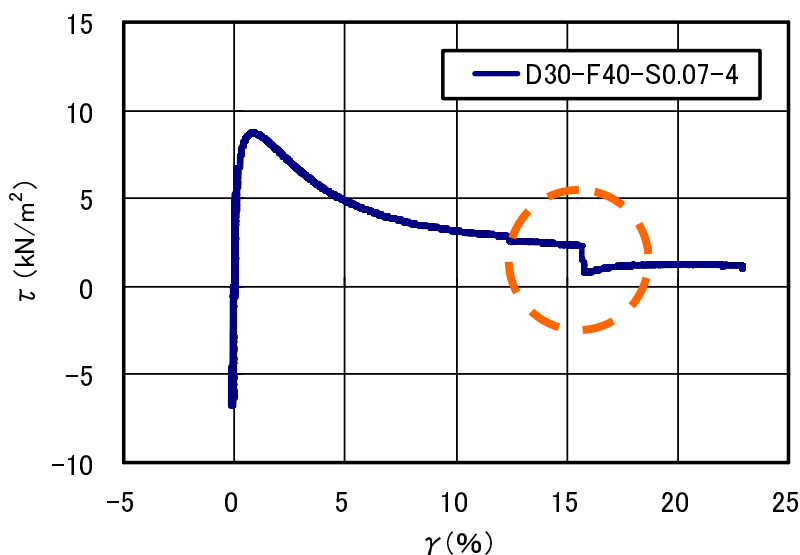


図-3 τ - γ 関係 (D30-F40-S0.07-4)

図-5 (a), (b)に試験より得られた応力経路，せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係のグラフを示す．このグラフは単調載荷部分のみの関係を抜き出したものである．また，せん断面の発生によるせん断応力の急激な減少はすべて補正してある．応力経路では，繰返しせん断により，過剰間隙水圧 Δu が上昇し，それに伴い単調載荷開始時の平均有効主応力 p' が減少していく．さらに，繰返し載荷回数が多くなるにつれて，単調載荷時のせん断応力 τ のピーク値，その時点での平均有効主応力 p' の値も，ともに減少していくことがわかる．せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係では，せん断ひずみ γ の増加に伴い，せん断応力 τ が増加してゆくが，ピークを迎えた後は緩やかに減少し，ほぼ一定値に収束している．繰返し載荷回数が多くなるにつれてせん断応力 τ のピークの値は減少しているが，せん断応力 τ がピークを迎えたときのせん断ひずみ γ の値は，すべてのケースでほぼ等しいことがわかる．また，どのケースでも Steady State 状態におけるせん断応力の値(Sus 値)はほぼ同じ値が得られた．これより，Sus 値は液状化の程度にはほとんど依存しないことがわかった．



写真-1 載荷前の供試体



写真-2 載荷後の供試体

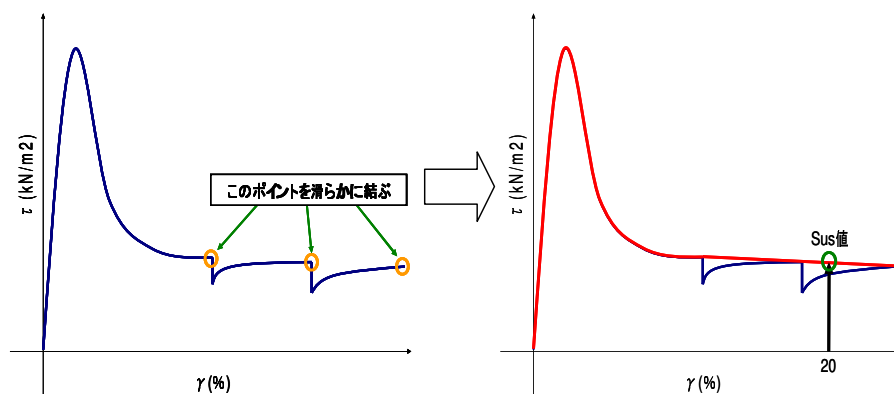


図-4 τ - γ 関係の補正

※せん断応力の低下が生じる直前の地点を，滑らかに結ぶ．

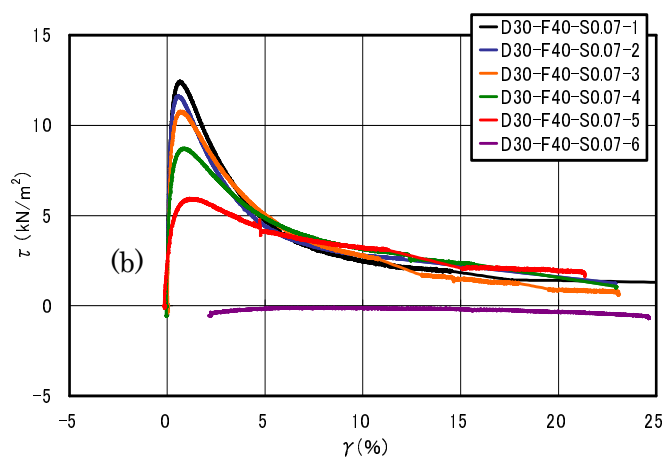
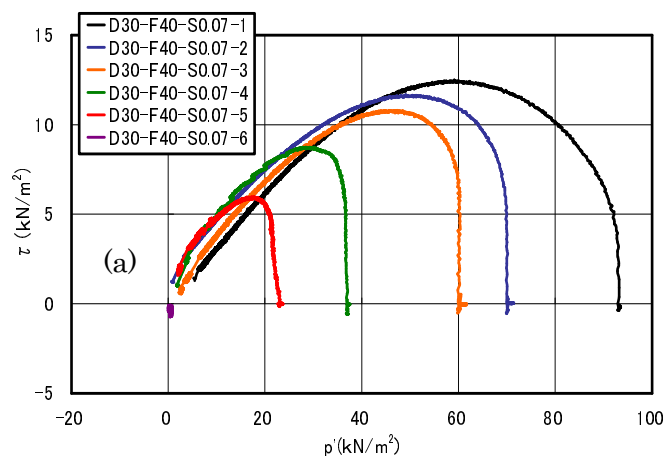


図-5 試験結果：(a) 応力経路；(b) せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係

以上の実験では、繰返しせん断载荷により、拘束圧が下がった状態から単調载荷を行う形になっている。例えば、D30-F40-S0.07-3（相対密度 $Dr=30\%$ ，細粒分含有率 $F_c=40\%$ ，繰返しせん断応力比 $\tau/\sigma'_0=0.07$ ，直前水圧比 $\Delta u/\sigma'_0=0.4$ ）のケースでは，過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_0$ が 0.4 になるまで繰返し载荷を行うので，平均有効主応力 p' が初期状態の 98kN/m^2 から 60kN/m^2 辺りまで減少した状態から単調载荷を行っている。そこで，初期状態の有効拘束圧（平均有効主応力 p' ）を 60kN/m^2 になるように圧密した後，単調载荷を行う場合と，さらには，過圧密状態（有効拘束圧 98kN/m^2 で圧密後，有効拘束圧を 60kN/m^2 に下げて圧密）の供試体に単調载荷を行う場合との比較を行った。結果を図-6 に示す。初期状態の有効拘束圧 60kN/m^2 の供試体では，単調载荷時の挙動を見ると，D30-F40-S0.07-3 のケースに比べ，せん断応力 τ のピーク値が低くなっている。これより，繰返し载荷によって地盤が軟化し，単調载荷時のせん断応力 τ のピーク値は減少するが，はじめから有効拘束圧が低い場合ほどピーク強度は低下しないことがわかる。また，過圧密状態の供試体では，単調载荷時の挙動は D30-F40-S0.07-3 のケースとほぼ等しくなっていることがわかる。これより，繰返し载荷によって軟化した状態の地盤は，過圧密状態の地盤状態とほぼ等しいことがわかる。以上より，せん断応力 τ のピーク値は，拘束圧と圧密降伏応力 P_c に依存する可能性があると考えられる。

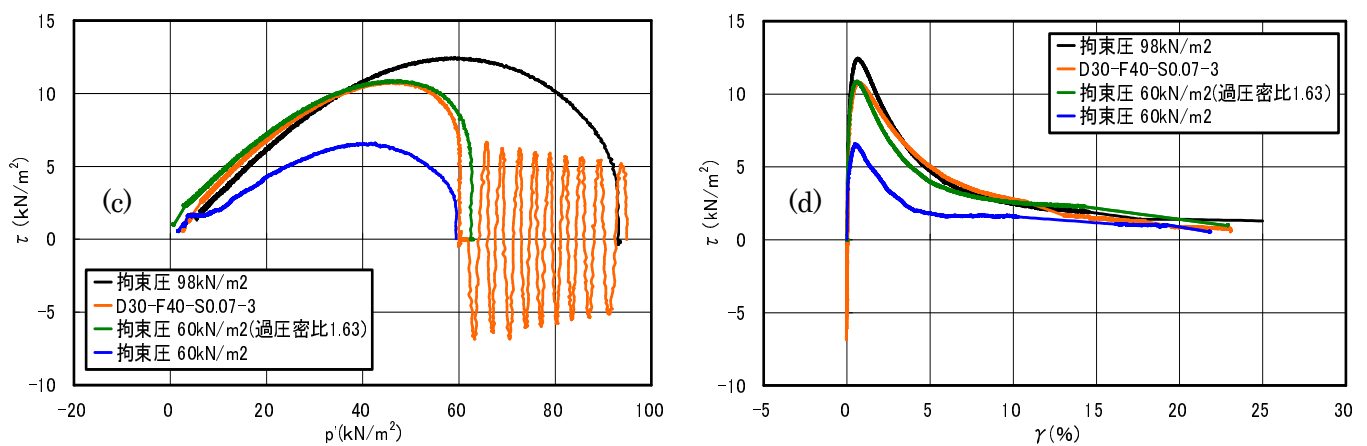


図-6 試験結果：(c) 応力経路；(d) せん断応力 τ -せん断ひずみ γ 関係

4. 結論

- 1) 繰返し载荷による液状化の程度が大きくなるにつれて，その後の単調载荷時でのせん断応力 τ が得るピーク値は減少していくことを示した。
- 2) 液状化の程度の変化に伴い，せん断応力 τ のピーク値は減少していくが，Sus 値（Steady State 状態のせん断応力の値）はほぼ一定値をとることを示した。
- 3) 単調载荷時のせん断応力 τ のピーク値は，拘束圧と圧密降伏応力 P_c に依存している可能性があることを示した。

今後の検討課題として，数多くの供試体に対し，過圧密状態の供試体での流動発生試験を行い，せん断応力 τ のピーク値が，圧密降伏応力 P_c に依存することをさらに検証する必要がある。

参考文献

- 1) 濱田政則，安田進，磯山龍二，恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察，土木学会論文集，No.376，Ⅲ-6，pp.211～220，1986。