

(6) 繰返しねじりせん断試験による液状化砂の強度・変形特性

九州工業大学 工学部 (正) 安田 進
 横浜国立大学 工学部 (正) 規矩大義
 東京電力(株) (正) 増田民夫
 九州工業大学大学院 (学) 板藤 繁

※はじめに※

液状化した砂地盤の強度・変形特性を知ることは、液状化後に発生する永久変位や、液状化に伴う構造物の沈下を推定する上でも非常に重要である。地震時に液状化が発生すると、地盤は液体のような性状を呈し、その強度や変形係数が大きく低下することは知られているが、それが完全なゼロでないことも事実である。

そうした液状化砂の強度・変形特性について、実験的、定量的に調べた研究に関しては、多くはなされていないのが現状である。筆者ら¹⁾はかつて、繰返しねじりせん断試験装置を用いて、液状化前後の供試体に対して静的単調荷重を行ない、液状化にともなう地盤の変形係数の変化について検討している。その結果、液状化に伴って地盤の変形係数は大きく低下し、完全液状化時には、液状化前の地盤剛性の約1/1000程度まで低下する事実を得ている。

本研究では、同様の手法を用いて、種々の条件下での液状化砂の強度・変形特性を調べ、さらにそれらに影響を与える要因についての検討を行った。以下に結果を報告する。

※実験方法と条件※

液状化砂の強度・変形特性を調べるために、室内試験で液状化を生じさせた供試体に対して、静的な単調荷重を行い、その強度特性ならびに変形特性を求める。具体的には、液状化前後の供試体への単調荷重で得られた応力～ひずみ関係(曲線)の比較を行い、液状化に伴って供試体(地盤)のせん断弾性定数がどの程度低下するかを検討する。さらに、密度を変えた実験や、完全液状化のみならず、中間液状化の状態や地盤に液状化が激しく生じた状態を想定した試験も行い、液状化の発生条件の影響についても検討を行う。

本実験には、静的荷重用の電動モーターを有する繰返しねじりせん断試験装置を使用した。また、試料としては豊浦標準砂を用いている。Fig. 1には、本実験の荷重のパターンを示す。空中落下法により所定の相対密度となるよう作成した、外径10cm、内径6cm、高さ10cmの中空供試体を、背圧 $\sigma_{vp} = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ 、有効拘束圧 $\sigma'_v = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ のもとで等方圧密した後、繰返し荷重を行った。繰返し荷重によって液状化が生じた(或いは所定の液状化程度に達した)供試体に対して、非排水状態のまま単調荷重を施し、その時のせん断力と回転角(ひずみ)、間隙水圧を連続的に測定することで、液状化にともなう供試体の剛性や応力～ひずみ関係の変化を調べた。尚、せん断力は三軸セル内に設置したトルクセル、回転角は、ギャップセンサー及びポテンシオメーターで測定した。繰返し荷重には、周波数 0.1 Hz の正弦波を用いて、各密度の実験シリーズ毎に、繰返し回数が $N_s = 20$ 回で液状化するような応力比を設定して荷重を行った。また、静的せん断はひずみ制御で行い、ひずみ速度を $\dot{\gamma} = 10\%/min.$ としている。

実験は、4種の相対密度に対して、過剰間隙水圧比を5段階、液状化に対する安全率を3段階に変えたケースについて実施した。Table. 1には、供試体条件および液状化の発生条件を示す。

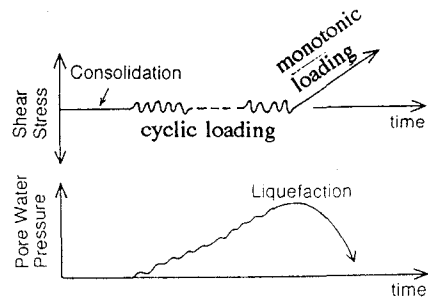


Fig. 1 実験の荷重パターン

Table. 1 供試体条件

相対密度	$D_r = 0, 30, 50, 70$ (%)
過剰間隙水圧比	$\Delta u / \sigma'_v = 0, 0.3, 0.6, 0.9, 1.0$
液状化安全率	$F_L = 1.0, 0.95, 0.9$

※密度の違いに関して※

Fig. 2には、4種類の密度の供試体に対して、繰返し載荷を行わず、単調載荷のみを施したケースでの、せん断応力～ひずみ関係と間隙水圧～ひずみ関係を示す。いずれのケースにおいても、せん断ひずみが1%程度に達するまでは、せん断応力が急増するが、それ以降の増加傾向は、相対密度が高いほど急で、密度が低くなるに従って緩やかな上昇曲線となる。さらに、 $D_r = -1.9\%$ の超緩詰めの場合では、単調載荷の過程で過剰間隙水圧が発生し、負のダイラテンシーが生じるため、せん断応力は減少してくる。さらにせん断が進むと、供試体は完全液状化に達してしまうことが見て取れる。

Fig. 3には、同じく4種類の密度の供試体に対して、液状化を生じさせた後に単調載荷試験を行った結果を示す。液状化した供試体は、非常に剛性が低く、せん断を開始しても暫くは、応力～ひずみ曲線の勾配が小さいまま、応力もほとんど発生していない。しかし、せん断ひずみが大きくなると、供試体の剛性は徐々に回復してくる。この剛性回復に要するせん断ひずみ量は、供試体の密度が小さい程、大きくなっている。

※液状化程度の違いに関して※

次に、液状化の程度 ($\Delta u/\sigma'_v$ 及び F_L) の異なるケースでの実験結果を示す。

Fig. 4は、相対密度が $D_r = 30, 50, 70\%$ の3種類の供試体に対して、過剰間隙水圧比ならびに液状化に対する安全率 F_L を変えたケースでの応力～ひずみ曲線である。液状化の程度の進行にともなって、応力～ひずみ曲線の勾配は徐々に小さくなっていく。さらに、 F_L が 1.0 を下回るケースでは、 F_L の値が小さいほど、せん断応力がほとんど発生しない低剛性の区間が大きくなっている。応力やひずみの絶対値こそ異なるが、この傾向はいずれの相対密度においても同じである。

Fig. 5(a)～(c)には、各実験ケースにおける応力～ひずみ曲線から接線（割線）勾配を読み取り、過剰間隙水圧比と剛性（せん断弾性係数）の低下率の関係を、相対密度毎に整理した結果である。図中の3種のプロットは、割線勾配を求めたひずみレベルが異なっている。液状化程度が進むにつれて、供試体の剛性は徐々に低くなっていき、完全液状化状態では液状化前のそれに比して約 1/1000 程度の剛性しか有していない。密度による違いでは、 $D_r = 30\%$ の場合には、液状化初期段階から剛性が大きく低下しているのに対して、相対密度が高いケースでは、液状化の初期段階では供試体が粘り性を発揮し、液状化程度がある程度進行しないと剛性低下が顕著に現れてこない。ただし、完全液状化に至った状態では、逆に供試体密度が高いほど、剛性低下率は大きくなっているが、これは密な供試体ほど初期の剛性が大きいため、低減率に大きく影響したものと考えられる。ひずみレベルによる違いに関しては、当然のことながら、割線を求めたひずみレベルが大きいかほど剛性低下率は大きい。

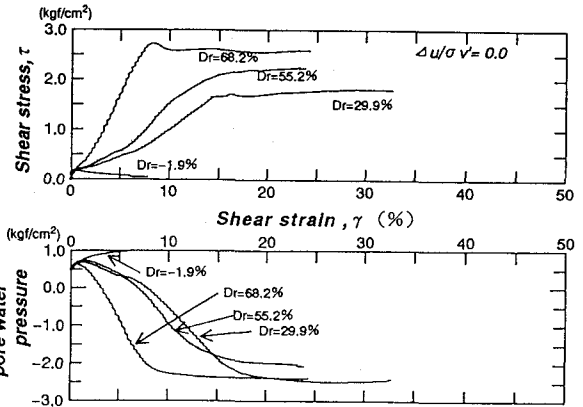


Fig. 2 単調載荷実験結果 (液状化していない供試体)

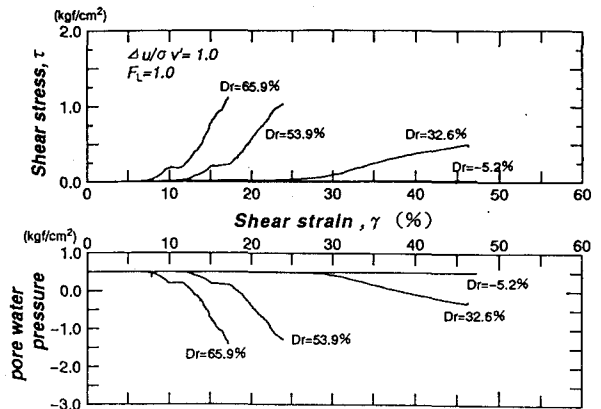


Fig. 3 単調載荷実験結果 (液状化を生じさせた供試体)

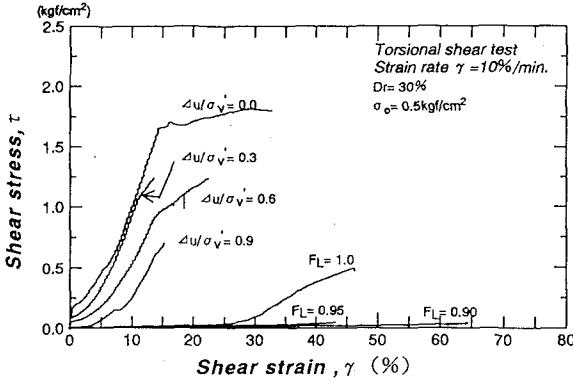


Fig. 4 (a) 応力～ひずみ関係 ($D_r = 30\%$)

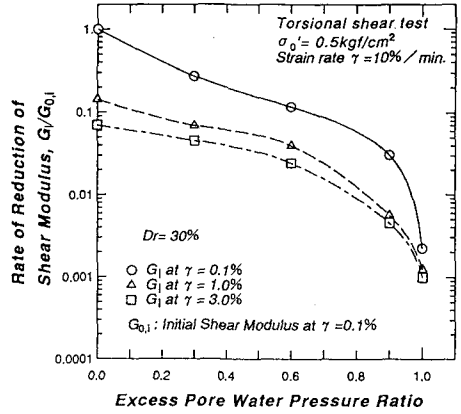


Fig. 5 (a) 液状化に伴う剛性低下 ($D_r = 30\%$)

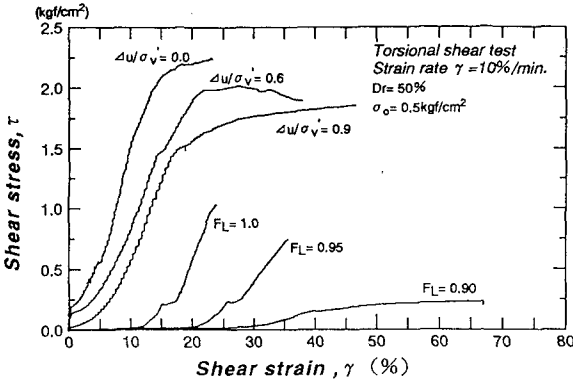


Fig. 4 (b) 応力～ひずみ関係 ($D_r = 50\%$)

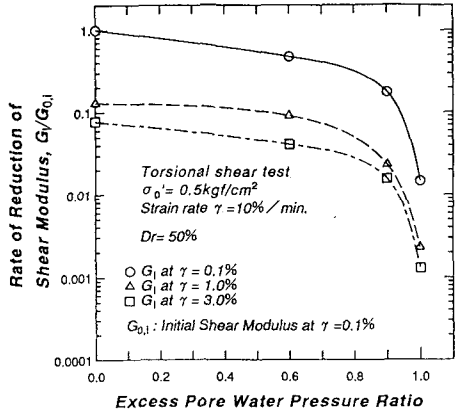


Fig. 5 (b) 液状化に伴う剛性低下 ($D_r = 50\%$)

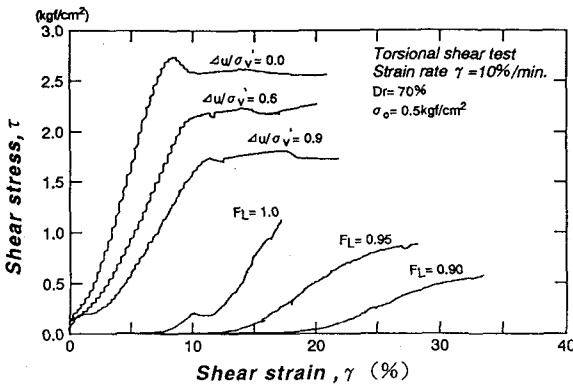


Fig. 4 (c) 応力～ひずみ関係 ($D_r = 70\%$)

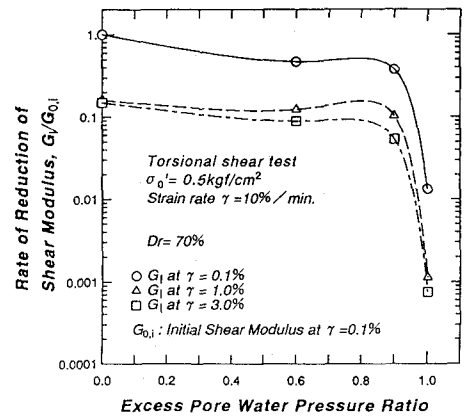


Fig. 5 (c) 液状化に伴う剛性低下 ($D_r = 70\%$)

Fig. 6 には、過剰間隙水圧比が1.0以下のデータも含めて、液状化に対する安全率 F_L と剛性低下率との関係を示す。 F_L が 1.0 に近づくにつれて供試体の剛性は急激に減少している。 F_L が 1.0 の時には、供試体の剛性が、およそ 1/1000から1/2000 程度にまで低下しており、さらに液状化の程度が激しくなると、剛性低下率は一層大きなものとなった。

次に、前述の応力～ひずみ関係のグラフのうち、液状化の発生後、剛性が回復するまでに要するひずみ量に着目する。この区間では、供試体は殆ど抵抗力を有していないことから、この区間を微小抵抗領域と呼ぶことにする。微小抵抗領域では、僅かなせん断力が働いても、ひずみが進行してゆき、大きなせん断変形が生じる。液状化した地盤で発生する永久変位も、微小抵抗領域の範囲内で生じている可能性が高い。

そこで、微小抵抗領域をFig. 7 に示すように定義し、相対密度 D_r と液状化に対する安全率 F_L で整理した結果をFig. 8 に示す。図からも分かるように、供試体の密度が低くなるほど微小抵抗領域は大きくなっていく。さらに、同じ相対密度の供試体でも、 F_L の値が小さく、液状化が激しく発生した供試体ほど微小抵抗領域は大きい。また、 F_L の違いが微小抵抗領域の大きさに与える影響は密度が低い供試体ほど顕著なようである。

※おわりに※

繰返しねじりせん断試験装置を用いて、液状化した地盤の変形係数の低下率を求めてみた。液状化した砂の供試体の剛性は、液状化以前の剛性に比べて大きく低下すること、液状化が激しく発生した場合には、その低下率は更に大きくなること等が判った。また、液状化した供試体では、抵抗力を殆ど有さない微小抵抗領域が存在し、その大きさは地盤密度が低いほど、 F_L の値が小さいほど大きくなる事実を得た。今後、細粒分を含んだ砂に対する実験や、排水条件等を変えた実験を行い、より多くのデータを蓄積して行く必要があると思われる。

※参考文献※

1) S. Yasuda, et. al : The Mechanism and A Simplified Procedure for the Analysis of Permanent Ground Displacement due to Liquefaction, Soils and Foundations, Vol. 32, No. 1, pp. 149~160, 1992.

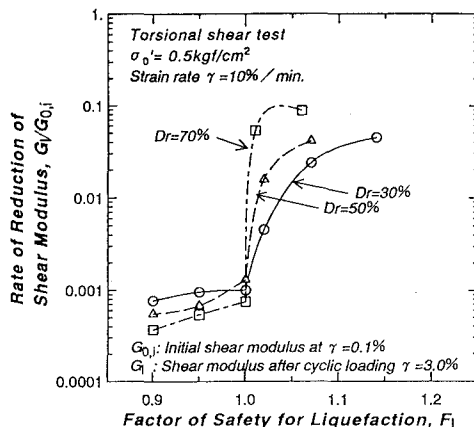


Fig. 6 液状化に対する安全率と剛性低下率の関係

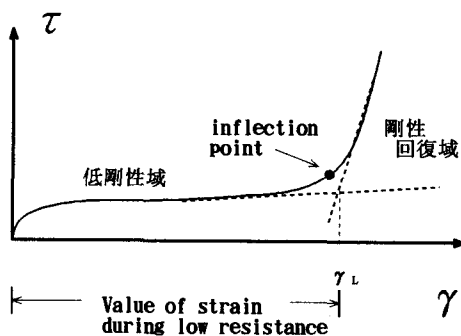


Fig. 7 微小抵抗領域の定義

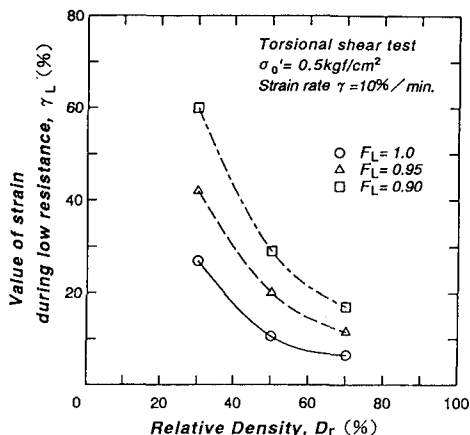


Fig. 8 供試体の密度と微小抵抗領域の関係