

二次液状化による変形係数の変化

液状化 変形係数 三軸試験

応用地質(株) 正会員 三上武子
東北学院大学 国際会員 吉田 望
ジャパンパイル(株) 正会員 小林恒一

1. はじめに

液状化には、地震による繰返し载荷によって有効応力が失われるものと、液状化した地盤からの過剰間隙水圧の伝播により有効応力が失われる二次液状化がある。液状化は、有効応力が 0 になり、地盤の剛性や強度が失われる現象と理解されているので、両者は同じく液状化として扱われているようである。たとえば、液状化対策として締固めによる地盤改良を行う場合には、二次液状化地盤のせん断強度は 0 として改良範囲を設計するようになっている¹⁾。また、杭の設計においても、液状化層より上層の砂層はすべて液状化層と評価して、地盤反力係数を低減させた設計が行われる場合もある。しかし、地盤の剛性や強度は変形挙動とともに論じる必要がある。たとえば、液状化後の変形挙動は载荷量によって変化する²⁾。このことは、液状化後の変形特性は過剰間隙水圧の値だけではなく、繰返し载荷による材料特性の劣化も考慮する必要があることを示唆している³⁾。とすれば、繰返し载荷で液状化に至らなかった地盤が、過剰間隙水圧の伝播による二次液状化で有効応力が 0 になったとしても、繰返し载荷で有効応力が 0 になった地盤とは、変形特性が異なるはずである。しかし、このような挙動を扱った研究は見あたらない。本論では、二次液状化地盤の変形特性を三軸圧縮試験で求めた結果を報告する。実験では、地震による振動および過剰間隙水圧の伝播をそれぞれ繰返し载荷、背圧付加により模擬し、両者を組み合わせて有効応力を 0 にして二次液状化地盤とした。

2. 実験方法

実験材料は豊浦砂 ($\rho_s=2.641\text{g/cm}^3$, $\rho_{\text{dmin}}=1.335\text{g/cm}^3$, $\rho_{\text{dmax}}=1.630\text{g/cm}^3$) で、空中落下法により相対密度 50% の供試体を作製した。圧密応力 100kPa で等方圧密した後、所定の過剰間隙水圧が発生するまで繰返し载荷を行い、さらに背圧を付加して有効応力を 0 にした後、非排水状態で単調载荷を行った。繰返し载荷周波数は 0.1Hz、単調载荷のひずみ速度は 0.1%/min である。また、背圧付加は 2 段階に分けて行った。まず、繰返し载荷終了後、非排水状態を保ったまま間隙水圧と背圧が等しくなるまで背圧を付加する。その後、排水バルブを開け、有効応力が 0 になるまで背圧を付加した。実験条件を表-1 に示す。ここで、case1 は非液状化地盤、case6 は繰返し载荷によって液状化した地盤、case2 ~ case5 は過剰間隙水圧の伝播によって二次液状化した地盤とみなすことができる。

3. 実験結果

case3 ~ case6 の繰返し载荷過程の波形記録を図-1 に示す。繰返し载荷による液状化で有効応力が 0 となった case6 では、繰返し载荷中に約 4% の両振幅軸ひずみが発生している。また、繰返し载荷終了後の残留軸ひずみは -0.8% であった。一方、二次液状化地盤を模擬した case3, 4, 5 の両振幅軸ひずみは、0.04, 0.05, 0.09%、背圧付加後の残留ひずみは -0.09, -0.11, -0.14% と極めて小さい。このように、繰返し载荷によって有効応力が 0 になった場合と背圧付加によって有効応力が 0 になった場合では、変形量が全く異なる。なお、背圧付加のみで有効応力を 0 にした

表-1 実験条件

() は過剰間隙水圧比

	繰返し载荷による 過剰間隙水圧 (kN/m ²)	背圧付加 (kN/m ²)
case1	-	-
case2	-	100 (0.1)
case3	20 (0.2)	80 (0.8)
case4	40 (0.4)	60 (0.6)
case5	60 (0.6)	40 (0.4)
case6	100 (1.0)	-

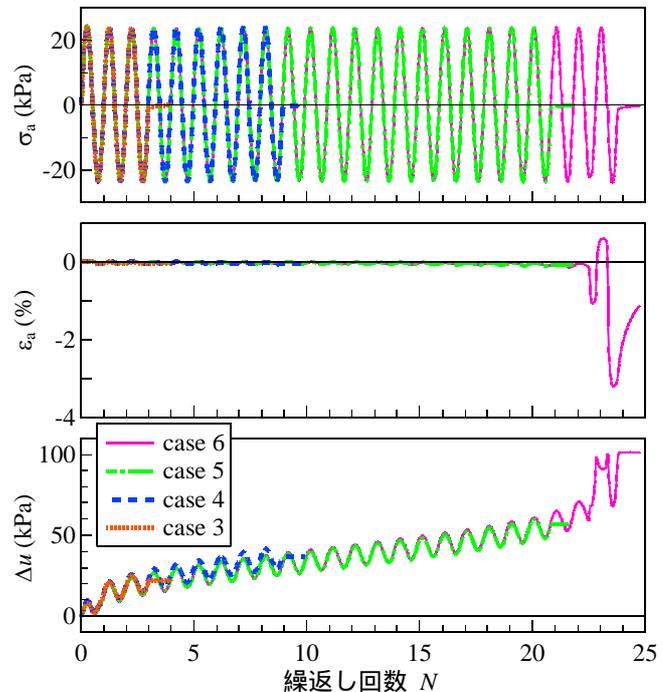


図-1 繰返し载荷過程の波形記録

case2の背圧付加後の残留ひずみは-0.09%であることから、背圧付加により有効応力が0になった場合には、実験条件にかかわらず変形量はあまり変わらない。

次に、単調載荷過程の応力 - ひずみ関係を図-2に、また、ひずみの小さい部分を拡大して図-3に示す。図より、3つのグループに分けることができる。すなわち、非液状化地盤を模擬した case1、液状化地盤を模擬した case6、二次液状化地盤を模擬した case2~5の3グループである。case1の応力 - ひずみ関係は上に凸の形状を示し、一番上方に位置する。一方、case6の応力 - ひずみ関係は下に凸の形状を示し、一番下方に位置する。case2~5の応力 - ひずみ関係は両者の中間に位置する。case4の応力が小さいのは、供試体作製時および圧密後の相対密度が他に比べて若干小さく、このことが原因のひとつとして考えられる。case6の応力 - ひずみ関係は、軸ひずみ1%程度まではほとんど勾配を持たないが、荷重の進行とともにゆるやかに勾配が大きくなり、軸ひずみ2%を超えたあたりから急激に強度が回復する。case2~5のグループの応力 - ひずみ関係は、荷重の初期段階から勾配を持っている。これはcase1に比べるとかなり小さいもののcase6に比べれば非常に大きい。case6と同様に荷重の進行とともに勾配は大きくなるが、変曲点は明瞭でない。

応力 - ひずみ関係から割線変形係数を求め、軸ひずみとの関係にまとめて図-4に示す。応力 - ひずみ関係と同様、変形係数 - 軸ひずみ関係も下に凸の形状を示す。軸ひずみ0.1%のとき、非液状化地盤のcase1の割線変形係数が58MPaであるのに対して、二次液状化地盤のcase2~5は2~4MPaであり、case1の3~7%に相当する。また、液状化地盤のcase6の割線変形係数は0.1MPaでcase1の0.2%に相当する。割線変形係数は軸ひずみによって変化するため、軸ひずみ毎にcase1に対する各ケースの変形係数の低下を求めて、図-5に示す。case2~5の変形係数は、軸ひずみ1%のとき約30%に低下するが、軸ひずみ2%のときは50%で、変形係数の低下は軸ひずみの増大とともに縮小する。

4. まとめ

二次液状化地盤の変形特性を調べるため、繰返し載荷と背圧付加により有効応力を0にして三軸圧縮試験を行った。その結果、以下のことがわかった。

繰返し載荷により液状化した地盤と間隙水圧の伝播により二次液状化した地盤では、変形挙動が異なる。

二次液状化地盤の剛性は、非液状化地盤に比べればかなり小さいが、液状化地盤に比べれば非常に大きい。

変形係数 - 軸ひずみ関係は下に凸な形状となるので、変形係数はひずみによって変化する。

参考文献

- 1) 沿岸開発技術研究センター(1997): 埋立地の液状化対策ハンドブック(改訂版)
- 2) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫(1999): 液状化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文集, No. 638/III-49, pp. 71-89
- 3) Yoshida, N., Yasuda, S. and Ohya, Y. (2005): Two Criteria for Liquefaction-induced Flow, Proc., Geotechnical Earthquake Engineering Satellite Conference, Osaka, Japan, pp. 109-116

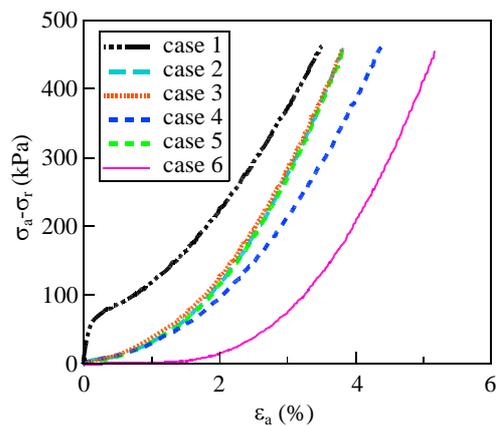


図-2 応力 - ひずみ関係

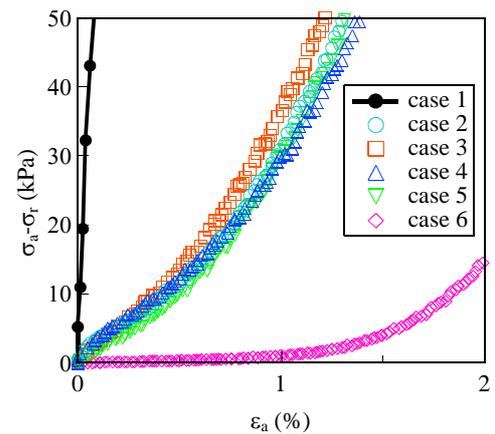


図-3 応力 - ひずみ関係 (拡大図)

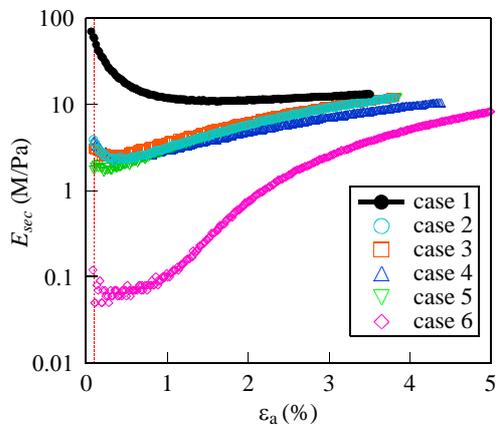


図-4 変形係数

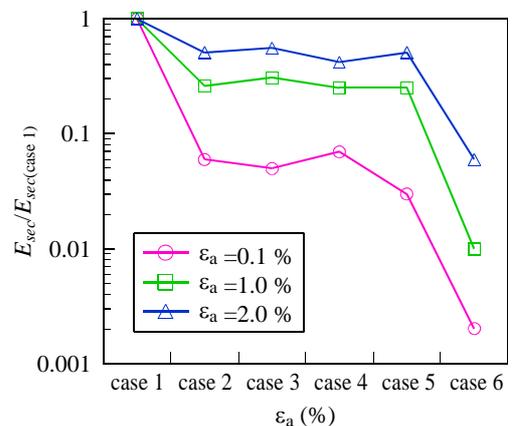


図-5 変形係数の低下