

二次液状化地盤の変形特性

正会員 ○小林 恒一*1
同 吉田 望*2
三上 武子*3

液状化 変形係数 三軸試験

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。例えば、図-1 に示す地盤モデルの透水性を考慮した有効応力解析結果(過剰間隙水圧比時刻歴波形)¹⁾を図-2 に示す。この図から、GL-9.0m 以深のシルト質細砂が液状化した場合、過剰間隙水圧の消散により細砂層の過剰間隙水圧は上昇する結果となることがわかる。このような解析結果から、杭の設計において、過剰間隙水圧比の程度に応じて地盤反力係数を低減する解析方法や設計法が提案されている。

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($\rho_s=2.641\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmin}=1.335\text{g/cm}^3$, $\rho_{dmax}=1.630\text{g/cm}^3$)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 100kN/m^2 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

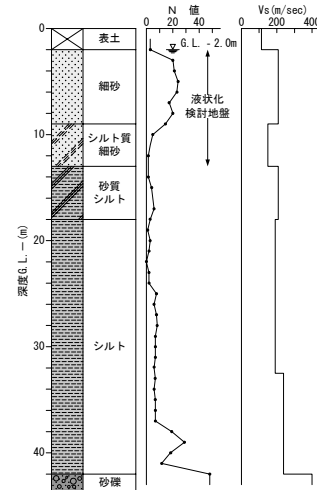


図-1 地盤モデル

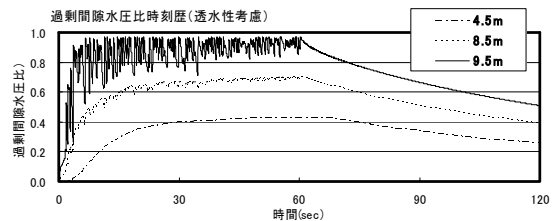


図-2 過剰間隙水圧比の時刻歴波形

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

実験結果であるが、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た。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。

図-3 に、単調載荷過程の応力-ひずみ関係を示す。図より、非液化化地盤を模擬した case1, 液化化地盤を模擬した case6, 二次液化化地盤を模擬した case2~5 の 3 グループに分けることができる。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、载荷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、载荷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。

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、非液化化地盤の case1 の割線変形係数が 58MN/m^2 であるのに対して、二次液化化地盤の case2~5 は $2\sim 4\text{MN/m}^2$ であり、case1 の 3~7%に相当する。また、液化化地盤の case6 の割線変形係数は 0.1MN/m^2 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

- ① 繰返し载荷により液化化した地盤と間隙水圧の伝播により二次液化化した地盤では、変形挙動が異なる。
- ② 二次液化化地盤の剛性は、非液化化地盤に比べれば小さくなるが、液化化地盤に比べれば非常に大きい。
- ③ 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) 小林恒一, 吉田望, 規矩大義 (2005): 液化化が上部非液化化層に及ぼす影響, 第 41 回地盤工学会研究発表会講演集, pp. 2045-2046
- 2) 安田進, 吉田望, 安達健司, 規矩大義, 五瀬伸吾, 増田民夫 (1999): 液化化に伴う流動の簡易評価法, 土木学会論文誌, 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

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)	—

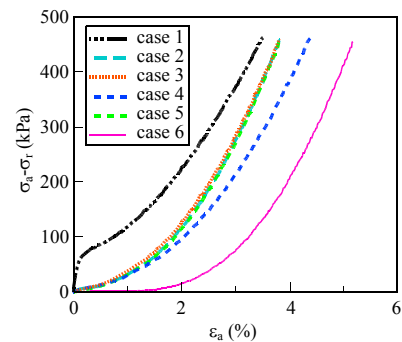


図-3 応力-ひずみ関係

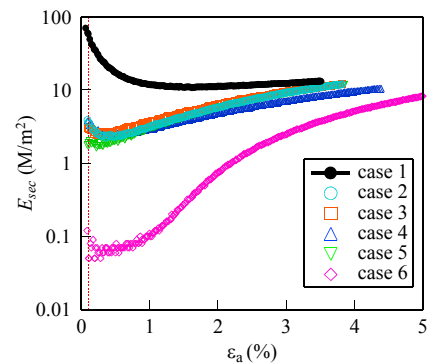


図-4 変形係数

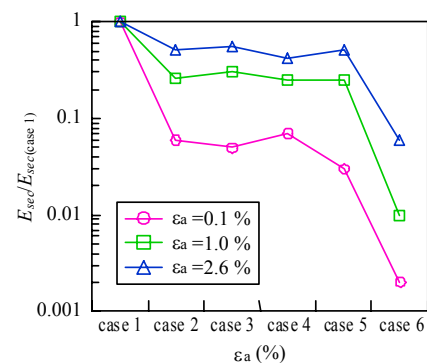


図-5 変形係数の低下

*1 ジャパンパイル
*2 東北学院大学
*3 応用地質

*1 Japanpile Corporation
*2 Tohoku Gakuin University
*3 OYO Corporation