

東京電機大学 学 ○門馬 宏典 安川 武志 正 安田 進
佐藤工業 (株) 正 規矩 大義

1. はじめに

側方流動の予測を目的とした液状化後の砂の強度・変形特性試験では、液状化の程度を表すために、過剰間隙水圧比 ($\Delta u/\sigma_v'$) や液状化に対する抵抗率 (F_L) を指標とした整理・解釈を行ってきた。一方、液状化の激しさの程度を表す F_L は、外力の大きさにも依存する指標であり、地震時の地盤の状態を一意的に表すものではない。そこで地震後の土の状態を表す指標として、繰返し載荷時のせん断ひずみの履歴に着目し、液状化後の剛性や微小抵抗領域の大きさ、回復域での剛性などが、繰返し載荷時に受けたせん断履歴とどのような関係にあるかについて検討を行ない、地震動の大きさや液状化の程度とその後の側方流動特性の関係をより定量的に評価することを試みる。本研究では、この目的の第一段階として、繰返し載荷時に受けたせん断ひずみの大きさと、液状化後の地盤の物性を示す幾つかのパラメータとの関係について実験を通じて検討を行ったので報告したい。

2. 実験方法

地盤の液状化後の強度・変形特性とひずみ履歴の関係を明らかにするため、予め決められた繰返しせん断ひずみを与えた供試体に対して静的載荷を行ない、その時の応力～ひずみ関係を、液状化前後と比較する。実験には、空圧を用いた応力制御の繰返し載荷装置とひずみ制御による静的載荷装置を備えた中空ねじりせん断試験装置を用いた。試料には豊浦標準砂を用い、外径 10cm、内径 6cm、高さ 10cm の中空供試体を目標相対密度が $Dr=30,50\%$ となるように作成した。

3. 実験結果及び考察

図 1 (a)、(b) には、それぞれのケースの応力～ひずみ関係を示す。緩詰めの場合には、繰返し過程の最大せん断ひずみに比べてかなり大きな微小抵抗領域が存在するのに対して、中密の場合には、単調載荷時の応力～ひずみ曲線は、繰返し載荷時の最終ループの形状とほぼ調和的で、剛性の回復も繰返し載荷時の履歴よりも小さなひずみ領域から始まっている。

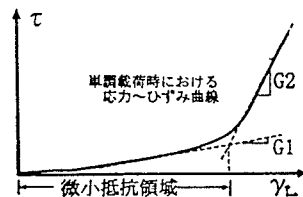
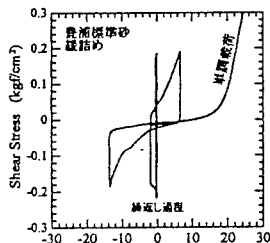


図 2 液状化後の剛性や微小抵抗領域の定義

(a) 緩詰め試料



(b) 中密試料

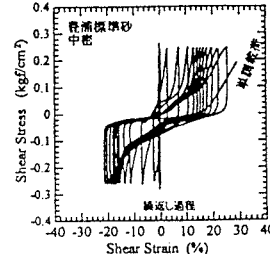


図 1 応力～ひずみ関係の例

また、全ての実験ケースを対象に、図 2 に示すような定義のもとで、結果の整理を行った。

図 3 には、繰返し載荷時の最大せん断ひずみと液状化後の単調載荷時における供試体の初期剛性 (G_1) との関係を示す。緩詰め、中密の 2 つの条件共に、繰返し載荷時の最大せん断ひずみが大きいほど、その後の剛性は低下している。供試体の最大せん断ひずみの大きさは、液状化の激しさを表す指標とも考えられるため、液状化の程度 (F_L) が激しいほど剛性の低下が大きいという、これまでの知見とも矛盾しない。

地震前の地盤との比較を行なうために、繰返し載荷を行わずに非排水状態のままで静的せん断を与える実験も行なった。この実験から求めた初期剛性 ($\gamma=0.1\%$ における割線剛性) と繰返し載荷後に単調載荷を行ったケースの初期剛性の比 (G_1/G_{0i}) を求めて剛性低下率とし、繰返し載荷時の最大せん断ひずみとの関係を示したのが図 4 である。

キーワード：液状化、側方流動、繰返し中空ねじり試験、ひずみ履歴、微小抵抗領域

連絡先：佐藤工業 (株) 中央技術研究所 (〒103 東京都中央区日本橋本町 4-12-20、TEL 03-3661-2298、FAX 03-3668-9481)

最大せん断ひずみが 1%に満たない領域では、供試体は完全な液状化には至っておらず、剛性低下の割合はさほど大きくはないが、ひずみ履歴が 1%前後を超えるあたりから、急激に供試体は劣化し、今回の実験で液状化判定を行った $\gamma=7.5\%$ 付近では、初期の剛性のおよそ 1/1000 まで低下している。さらに大きなせん断ひずみを受けた供試体では、剛性はさらに低下していることが伺える。剛性低下率を中密と緩詰めめで比較すると、中密の方が剛性低下率が幾分か大きくなっているが、これは液状化前の供試体の初期剛性の違いに起因する所が大きく、この結果のみから大小関係を判断できない。ただし、今回の実験条件のような $Dr=50\%$ 程度の地盤では、一旦液状化が発生すると、地盤の密度の影響は小さく、ほぼ同じ程度の初期剛性を示すようになることも考えられ、結果的に剛性低下率が大きくなることもあり得る。

一方、各ケースの応力～ひずみ関係を見ると、微小抵抗領域とその後の剛性回復時の過程では、中密と緩詰めで大きく異なっている。そこで、繰返し載荷過程で受けた最大せん断ひずみの大きさとその後の単調載荷時の微小抵抗領域の大きさの関係を整理した結果を図 5 に示す。

ばらつきの大きな結果ではあるが、中密のケースは、1:1 のライン付近にプロットが集まっており、繰返し載荷過程で受けたひずみの大きさと微小抵抗領域の大きさはほぼ一致する。すなわち、過去に受けたひずみレベル以上の流動性は示しておらず、単調載荷の過程も繰返し載荷過程に続く次の 1 サイクルの載荷の一部と考えることも出来る。

一方、緩詰めの場合には、殆どのケースで繰返し載荷過程で受けた最大せん断ひずみ以上の大きさの微小抵抗領域が見られ、供試体が攪乱を受けたことによって、大きな流動性を発揮したことが明確に示されている。ここに挙がっているデータからだけでは、微小抵抗領域の大きさが過去のひずみ履歴に対して比例的であるかは判断し難いが、過去に受けたひずみが大きいほど、より一大きな流動性を示すようである。

4. おわりに

これらのことから、以下のような推論が導かれる。中密の地盤では液状化に至っても、その骨格構造が崩れるか崩れないかの境界付近にあり、再びせん断を受けると粒子間力が復活して、それに抵抗しようとする。その際には、初期の骨格構造の影響を強く受けるので、ある意味では記憶性材料とも考えられる。一方、緩い地盤では骨格構造は完全に崩され、過去の履歴の影響は薄れてしまうので、せん断に対する抵抗は著しく低下する。

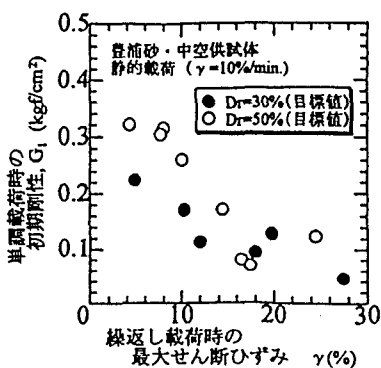


図 3 単調載荷時の初期剛性

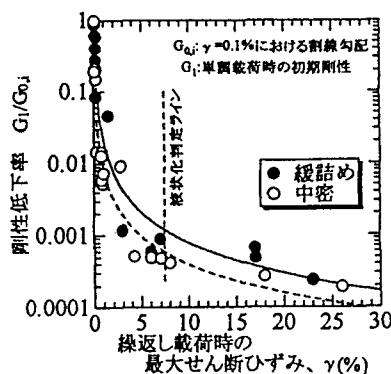


図 4 ひずみ履歴と剛性低下率の関係

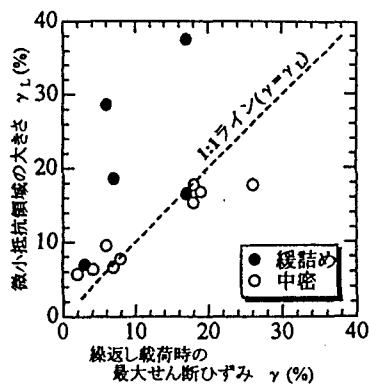


図 5 繰返し載荷時に受けたひずみの大きさと微小抵抗領域の関係

参考文献

- 1) Yasuda, S., et.al: The Mechanism and a Simplified Procedure for the Analysis of Permanent Ground Displacement due to Liquefaction, S & F, 32-1, pp.149-160, 1992
- 2) 規矩大義・他、「液状化した砂の強度変形特性に関するねじりせん断試験」、第 9 回日本地震工学シンポジウム発表論文集、Vol.1, pp.871-876, 1994.