

液状化後の体積ひずみ測定に及ぼす残留せん断ひずみの影響

The Effect of Residual Shear Strain for Volumetric Strain Measurement Following Liquefaction

仙頭 紀明 (せんとう のりあき)
日本大学 准教授

海野 寿康 (うんの としやす)
五洋建設機技術研究所 係長

1. はじめに

近年、土木構造物に対して性能設計が行われるようになってきた。さらに1995年の兵庫県南部地震以降、設計に用いる入力地震動が大きくなったため、レベル2地震を想定した設計では、地盤が液状化するような場合でも構造物の変形が許容値以下におさまることを確認しなければならない。そのためには、液状化した地盤の残留変形をある程度の精度で求めることが必要となっている。ここで地盤の残留変形とは、水平変位と鉛直変位(沈下)に大別できるが、本報告では沈下を取り扱うものとする。

液状化した地盤の沈下量予測は、実務設計では簡易法と詳細法が用いられている。簡易法では、Ishihara and Yoshimine の予測法¹⁾や建築基礎構造設計指針²⁾の方法がしばしば用いられている。詳細法ではサイトの増幅特性を考慮した地震動を入力する有効応力解析が用いられる。この有効応力解析を行うためには、解析モデルのパラメーターを決定しなければならない。そのために、原位置よりサンプリングした試料を用いた液状化試験がしばしば行われる。この液状化試験はほとんどの場合、「土の繰返し非排水三軸試験法 (JGS 0541-2009)」に準拠して行われる。この基準の方法と解説³⁾には、液状化強度の求め方とその利用に関する詳細な記述はあるものの、液状化後の沈下に関する知見は含まれていないのが現状である。

ここで液状化後の沈下を簡単に説明する。液状化後の沈下は、即時沈下(非排水変形)と圧密沈下に大別できる。本報告では圧密沈下を対象とする。即時沈下は液状化に伴う地盤の剛性低下によるせん断変形が原因で生じる沈下である。具体例として液状化地盤上の盛土が、基礎地盤の側方流動により沈下する現象に対応する。一方、圧密沈下は地震中の繰返し载荷により砂地盤に発生した過剰間隙水圧が地震後に消散することで、土骨格が収縮し密度が増加する現象である。ここでは、軟弱地盤で取り扱う圧密現象と区別するために液状化後の「再圧密」と呼ぶこととする。この沈下量を室内実験で求めるためには、非排水条件で実施する液状化試験の後に、供試体に通じるコックを開放することで過剰間隙水圧を消散させ、その時に計測された排水量より体積ひずみを求める。体積ひずみはこの排水量を液状化試験直前の体積で除して百分率表示したものである。

本報告では液状化後の再圧密試験の例を示した上で、体積ひずみを精度良く求めるための留意点を示すものである。

2. 試験結果の例

まず初めに、細粒分を含む砂質土の液状化試験とその後の再圧密試験の結果の一例を示す。ここで用いた試料は非塑性細粒分を含む砂質土であり、平均粒径0.12 mm、細粒分含有率35%である。非排水繰返し三軸試験では、等方圧密した後に軸力を正負交番载荷することで、供試体に圧縮・伸張の軸差応力が繰返し作用する。試料は液状化するとしばしば伸張側に伸びて破壊する。口絵写真-8は液状化試験前後の供試体の状況であり、液状化試験直後に供試体は軸方向に伸びて断面がくびれた状態になっていることが分かる。このことは試験終了時に軸差応力をゼロ付近に戻したとしても、伸張側に軸ひずみが残留することを示している。このひずみのことを残留軸ひずみまたは残留せん断ひずみと呼ぶこととする。ここで三軸試験の軸ひずみ(ϵ_a)とせん断ひずみ(γ)には非排水条件では、 $\gamma = 1.5\epsilon_a$ という関係が成り立つ。図-1には液状化試験における軸差応力と軸ひずみの時刻歴の例を示す。この試験では伸張側に約23%の軸ひずみが残留している。その後、供試体に通じるコックを解放して再圧密させた。再圧密時の体積ひずみの時刻歴を図-3に破線で示す。

もう一つのケースでは、図-2に示すように液状化試験直後に伸張側に残留した軸ひずみ(約18%)をほぼゼロとなるような処理を行った後に再圧密した。この時の再圧密時の体積ひずみの時刻歴を図-3に実線で示す。両試験の体積ひずみを比較すると、残留軸ひずみが大

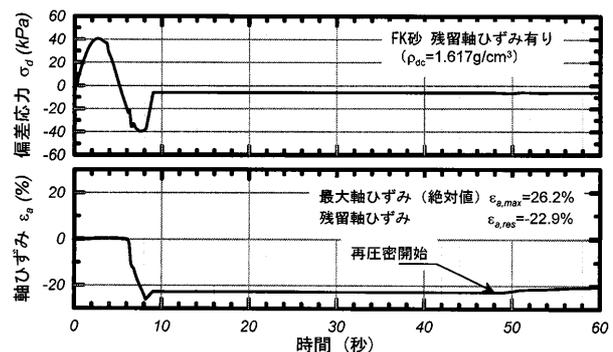


図-1 軸差応力と軸ひずみの時刻歴(残留軸ひずみ有り)

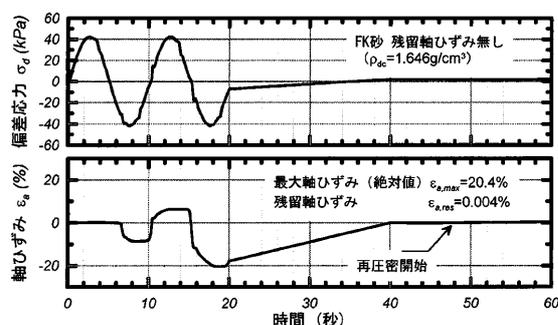


図-2 軸差応力と軸ひずみの時刻歴(残留軸ひずみ無し)

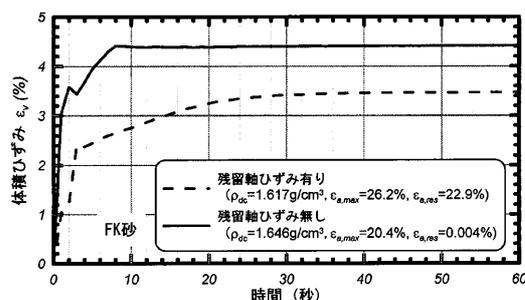


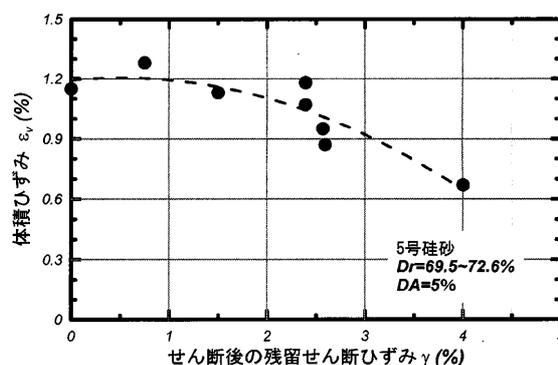
図-3 体積ひずみの時刻歴

きいまま再圧密させると体積ひずみがより小さくなった。これは両試験の試料の供試体密度に多少のばらつきはあるものの、繰返しせん断中の最大軸ひずみ ($\epsilon_{a,max}$) が大きいほど再圧密体積ひずみが大きくなるという既往の研究結果(例えば1))と相反する結果となった。このことから、残留軸ひずみの大きさが再圧密時の体積ひずみに影響していることが分かる。

海野⁴⁾は、残留せん断ひずみの大きさと再圧密体積ひずみの関係を中空ねじりせん断試験を用いて調べている。実験には細粒分を含まない中砂(5号珪砂)を試料として用いた。前述の繰返し三軸試験と同様に非排水繰返しせん断を行い供試体が液状化して両振幅せん断ひずみ(DA)が5%に達したら繰返しせん断载荷を終了した。その後せん断ひずみ制御に切り替えて、せん断応力をゼロに戻した。この過程において、残留せん断ひずみの大きさを意図的にゼロから約4%に変化させて与えた後に再圧密試験を行った。

図-4に体積ひずみと残留せん断ひずみの関係⁴⁾を示す。残留せん断ひずみがゼロの供試体は体積ひずみが約1.2%とほぼ最大となり、残留せん断ひずみが増加するにつれて体積ひずみは減少する傾向を示した。ただし減少傾向は残留せん断ひずみが小さい時には、体積ひずみはほとんど変化しないが、残留せん断ひずみが2%を超えたあたりから、体積ひずみが減少しはじめ、残留せん断ひずみが4%の供試体では、残留ひずみがゼロの時に比べて約半分となった。

以上の実験結果を踏まえて、沈下量評価のための再圧密試験の留意点をまとめることとする。まず前提として再圧密せん断試験の前の残留せん断ひずみ(又は残留軸ひずみ)の値を記録しておくことが必要である。その上で安全側の体積ひずみ、すなわち、大き目の体積ひずみ

図-4 体積ひずみと残留せん断ひずみの関係⁴⁾

が得られるように配慮しようとするれば、ある程度残留せん断ひずみが小さい状態から、再圧密試験を行うことが望ましい。この残留せん断ひずみは図-4の例では2%であったが、この値は供試体の相対密度や繰返しせん断中の最大せん断ひずみの大きさにより変化するものと思われる。すなわち、上記の例ではDAが5%で試験を終了したため、最大せん断ひずみは3%前後であることを踏まえれば、残留せん断ひずみが最大せん断ひずみの半分程度以下であれば、体積ひずみに及ぼす残留せん断ひずみの影響は小さいものと推察される。

一方、体積ひずみに影響があるような比較的大きなせん断ひずみが残留した場合、再圧密試験の前にせん断ひずみをゼロに戻すことが望ましいといえる。残留せん断ひずみをゼロ付近に戻す処理としては、前述の例のように1台の装置で応力制御とひずみ制御の両方が可能な場合には、液状化試験後にひずみ制御でせん断ひずみをゼロに戻すことは比較的容易である。一方、応力制御のみの機構を有する装置であれば、なんらかの方法(例えば手動等)で载荷ロッドを動かしてせん断ひずみを微調整することも考えられる。

3. まとめ

液状化後の地盤沈下量を求める際に必要な体積ひずみを求めるための再圧密試験に関する留意点を示した。地盤の残留変形解析を伴う性能設計には、今回紹介したような実験データの蓄積とそれに基づく解析手法のパフォーマンスの改善が不可欠である。本報告がそれらの取り組みの一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) Ishihara, K. and Yoshimine, M.: Evaluation of settlement in sand deposits following liquefaction during earthquakes, *Soils and Foundations*, Vol. 32, No. 1, pp. 173~188, 1992.
- 2) 日本建築学会, 建築基礎構造設計指針, pp. 66~68, 2001.
- 3) 地盤工学会, 地盤材料試験の方法と解説, pp. 730~749, 2009.
- 4) 海野寿康・仙頭紀明・小野大和・林健太郎: 繰返しせん断ひずみ履歴を用いた砂質土の液状化に伴う体積ひずみの評価法, *土木学会論文集 C*, Vol. 68, No. 4, pp. 680~694, 2012.

(原稿受理 2013.7.1)