

2.2.1

現行試験法の範囲で可能な試験法

Test method possible within scope of current test method

久保裕一*, 三上武子**, 山田眞一***

Yuichi KUBO, Takeko MIKAMI and Shinichi YAMADA

変形特性を求めるための繰返し試験は、試験法の中でいくつかの異なる試験方法が許容されているため、異なる試験条件が試験結果に影響を及ぼさないのか検討した。検証内容は、载荷中の排水条件、制御方法、载荷方法、試験方法、载荷周波数、データ整理方法、繰返し回数である。この結果、载荷中の排水条件の違いにより、せん断剛性率では差がないものの、ひずみの大きい領域での履歴減衰率が異なった。载荷方法の違いでは、ステージ载荷の方が過剰間隙水圧の影響により、フレッシュ载荷よりせん断剛性が大きくなった。さらに、試験方法の違いでは、ねじりせん断試験の方がひずみの小さい領域でせん断剛性が大きくなった。また、最終的な結論に至らなかった制御方法と、载荷周波数についても、異なる結果がでる可能性が高いことを示した。

キーワード：大ひずみ、繰返しせん断試験、繰返し変形特性

Large Strain, Cyclic share test, Cyclic deformation properties

1. はじめに

現在の試験法では、変形特性を求めるための繰返し試験は、繰返し三軸試験と繰返しねじりせん断試験の2種類が地盤工学会で標準化されている。この2種類の試験は、小さいひずみレベルにおける繰返し载荷のもとでの地盤の変形特性を求めることで、目的は同じであるが、試験に使用される供試体の違いや、作用する応力方向の違いにより、試験方法が大きく異なっている。そして、さらに試験法を詳細に見ていくと、繰返し三軸試験、繰返しねじりせん断試験、それぞれの試験法の中で制御方法や排水条件など、いくつかの異なる試験方法が認められている。これらの異なる試験方法で実施された試験結果は全て同じになるとは考えにくく、異なる試験値が出る可能性があるのではないだろうか。そこで、これらの試験法で認められている異なる試験条件をいくつか取り上げ、これらの条件の違いが結果にどのように影響するのか検討した。

1. 载荷中の排水条件
2. 制御方法
3. 载荷方法
4. 試験方法
5. 载荷周波数
6. データ整理方法
7. 繰返し回数

2. 载荷中の排水条件

試験法の中で許容されている異なる試験のひとつが、

排水条件である。三軸圧縮試験では、排水条件が異なるCD試験とCU試験では結果が大きく異なることが知られているが、繰返しせん断試験は排水と非排水のどちらかで試験を実施してもよいことになっている。排水条件で試験を実施した場合、繰返し载荷中に発生する過剰間隙水圧は瞬時に消散し、非排水条件で実施した場合は、ステージ中の過剰間隙水圧は消散しない。ただし、繰返しせん断試験では、ステージ終了後には必ず排水状態にして過剰間隙水圧を消散することになっているため、いずれにせよ、ステージ終了後は必ず過剰間隙水圧は消散される。図-1は繰返し中空せん断試験での排水試験と非排水試験を比較した試験結果を示したものである¹⁾。この図での逆载荷とは、通常三軸試験では圧縮側から载荷を開始するが、これを伸張側から载荷を始めたという意味である。

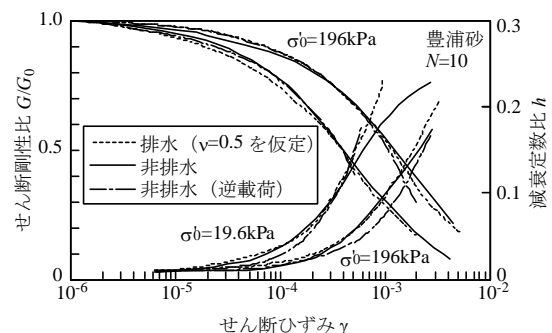


図-1 排水試験と非排水試験の違い¹⁾

図から、せん断剛性では、若干の違いはあるものの特

* 中部土質試験協同組合

** 応用地質株式会社

*** 基礎地盤コンサルタンツ株式会社

Chubu Soil Test Corporation

OYO Corporation

Kiso-jiban Consultants Co.Ltd

に大きなものではない。これに対し、履歴減衰率では、ひずみの小さい領域ではほとんど差は見られないものの、ひずみの大きい 10^{-3} 付近では排水条件の方が非排水条件より履歴減衰率が大きくなっている。これは、非排水条件で発生する繰返し载荷中の過剰間隙水圧が原因と考えられる。

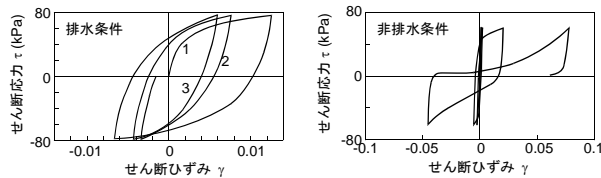


図-2 排水・非排水条件下におけるせん断応力-せん断ひずみ関係²⁾

なお、これらの排水条件と非排水条件では、挙動が全く異なっており、応力状態をみるとよくわかる。図-2は排水条件と非排水条件の応力-ひずみ関係を示した図であるが²⁾、排水条件では载荷を繰返していくたび排水するため、密な状態になり硬化現象をおこしている。これに対し、非排水条件では繰返すたびに過剰間隙水圧の発生により劣化現象をおこしている。このことから、排水条件が異なることにより、試験結果が異なると考えられる。

3. 制御方法

繰返しせん断試験では、応力制御方式とひずみ制御方式の2種類が試験法で認められている。ここで、応力制御方式とは、一定振幅で対称な繰返し軸荷重を加える試験方法である。これに対して、ひずみ制御方式は一定ひずみ振幅により軸ひずみを加えるものである。実務では、土の繰返し非排水三軸試験（液状化強度試験）と同じ試験機を使うことが多いため、一般的に応力制御方式で試験を行うことが多い。応力制御とひずみ制御の違いは、研究事例が少なく試験結果の違いについて直接比較することが難しいため、ここでは応力制御とひずみ制御の特徴や問題点にふれる。

応力制御方式は、先に述べたように荷重によりひずみを変化させていく方法で、試験法ではステージごとのひずみ増加は2倍程度としている。しかし、荷重によるひずみの増加量は、ある程度経験がないと予測は難しく、試験者により繰返すステージ回数に違いがでる。また、過剰間隙水圧の上昇が著しいせん断ひずみ 10^{-3} 付近では、繰返すたびにひずみが大きくなり、測定間隔が液状化により大きく離れてしまう。これらの現象が応力制御方式の欠点である。

一方、ひずみ制御方式では、ひずみ増加を直接設定することができるため、測定間隔を一定にすることが可能である。このため、試験者による測定間隔のバラツキをなくすことができる。しかし、先に述べたようにひずみ制御方式は液状化試験機と併用の場合、荷重制御方式から変位制御方式への切替え装置などの増設が必要となる。

このため、ひずみ制御方式が可能な試験機関は少ないのが現状である。

4. 载荷方法（ステージテストとフレッシュテスト）

ステージテストとは、せん断応力振幅を小さい方からステージごとに振幅を大きくしていくような試験方法をいい、フレッシュテストは常に新しい試料を用意する方法をいう。このように、ステージテストとフレッシュテストは試験方法が全く異なる。フレッシュテストの例としては、液状化強度試験がこれにあたる。

ステージテストは、ひとつの試料でひずみの小さい領域から、大きな領域までを計測することが可能であるので、実務では大変便利な試験法である。しかし、ステージテストは繰返し载荷中に発生した過剰間隙水圧をステージごとに排水しているため、ステージを繰返すごとに試料が密実化していくという欠点がある。

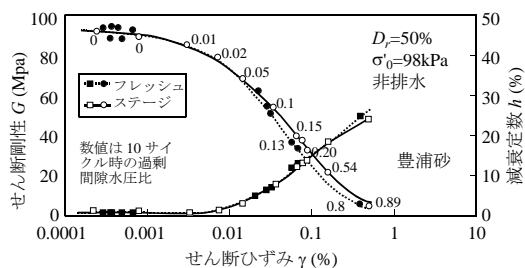


図-3 フレッシュテストとステージテストの比較³⁾

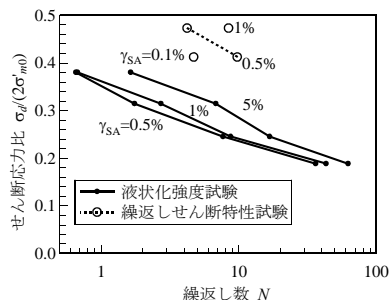


図-4 液状化試験と繰返しせん断試験の比較⁴⁾

図-3はステージテストとフレッシュテストを比較した例である³⁾。図中の数字は10サイクル時の過剰間隙水圧比を表している。図から、ステージテストとフレッシュテストともに、減衰定数ではどちらもほとんど差がないことがわかる。しかし、せん断剛性では、せん断ひずみが 0.01% 付近からステージテストの方がフレッシュテストより上に位置している。これは、過剰間隙水圧比の上昇と同期していることから、ステージテストではステージ間で排水される過剰間隙水圧の消散により、試料が密実化し剛性が高まったと考えられる。

この現象が表れている例を示す。図-4は繰返しせん断試験と液状化試験の結果を重ね合わせ、せん断ひずみ（片振幅）に対する等値線として表したものである⁴⁾。この図から、同じ繰返し数、せん断ひずみの応力をみると、液状化試験より繰返しせん断試験結果の方が大きくなっている。このことから、繰返しせん断試験はステージごとの排水の影響により、フレッシュテストの液状化試

験と結果が異なることがわかる。

5. 試験方法（繰返し三軸とねじりせん断）

繰返し三軸試験とねじりせん断試験は、どちらも $G-\gamma$ 関係を求める試験として利用されている。繰返し三軸試験とねじりせん断試験では、使用される供試体の形も試験方法も大きく異なるにもかかわらず、実務ではこれらから求められた $G-\gamma$ 関係は同じように扱われている。そもそも、繰返し三軸から計測されているひずみは軸ひずみであり、せん断ひずみではないので、求められるものは等価ヤング率と履歴減衰率である。これをポアソン比 0.5 と仮定し、 $G-\gamma$ 関係として表している場合が多い。

図-5 は繰返し三軸試験とねじりせん断試験での、等方圧密された供試体の結果を比較したものである⁵⁾。ただし、繰返し三軸試験とねじりせん断試験は、最大せん断応力方向などいくつかの異なる要因があるが、ここでは単純に試験結果のみを比較した。

図から、せん断剛性率ではひずみの小さい領域でねじりせん断試験の方が高い値となっているが、ひずみが大きくなるごとにその差は小さくなっていくように見える。履歴減衰率では、ひずみの小さい領域でねじりせん断の方が小さい値となっているが、ひずみが大きくなるごとにその差は小さくなり、せん断ひずみ 10^{-3} 付近では繰返し三軸試験より、ねじりせん断試験の方が大きくなっている。一般的に、ねじりせん断試験の方が実地盤に近い状態を再現しているが、試験機械の構造が複雑で試験費用が高いことや、試料整形が複雑で試料を乱してしまう可能性が高いなどの問題点もある。

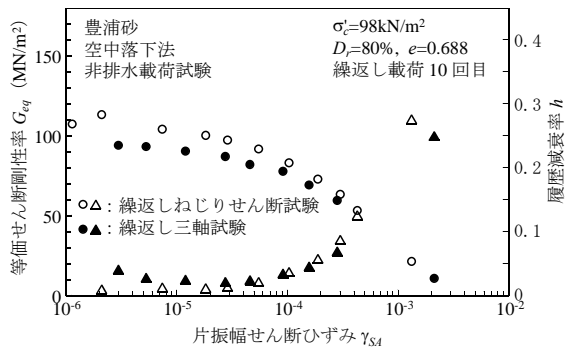


図-5 繰返し三軸試験と繰返しねじり試験の比較⁵⁾

6. 载荷周波数

現在の試験法では、载荷周波数は繰返し三軸試験、ねじりせん断試験共に、0.05~1.0Hz 間の試験が認められている。0.05~1.0Hz では 20 倍もの差があり、実に許容範囲が広い。実務では、通常 0.1Hz~0.2Hz 程度で実施されている試験データを見ることが多い。この理由は、周波数が遅い方が供試体から得られる信号を正確に受信することが可能になるため、試験精度は高い。しかし、試験時間が長くなる。逆に、周波数が早いと試験は早く終了するが、試験精度が悪くなる。これら両方のバランスが良いのが 0.1Hz~0.2Hz 程度の周波数なので、実務で多く使用されている。

図-6 は粘性土のせん断剛性の周波数依存性を示したものである⁶⁾。(図は振動数と表記)

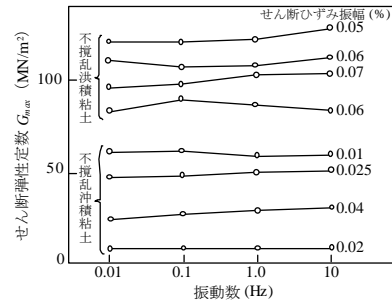


図-6 せん断剛性の周波数依存性⁶⁾

広範囲の周波数にわたって実験がされており、周波数による依存性がないことの根拠となっているようである。しかし、これはひずみの小さい領域であり、数%の大きいひずみはどうなるのかはこの図からはわからない。また、ひずみ速度で考えた場合、局部的に非常に早くなる可能性がある。ひずみ速度依存性はコンクリートやその他の構造材料にも一般的に見られる現象であり、土のみが例外とは考えにくいのではないだろうか。

7. データ整理方法

繰返しせん断試験の試験結果は、通常せん断ひずみが 10^{-3} 付近より少し大きいひずみで試験が終了していることが多い。これは、制御方法でも述べたように繰返すたびにひずみが大きくなり、これ以上試験を続けることが不可能になるためである。しかし、1%をこえるような大きなひずみまで計測されているデータも見ることがある。このような場合は、データが外挿されている可能性がないか注意する必要がある。

データの外挿は $G-\gamma$ 関係のグラフを延長して点を補間されている場合が多いと考えられ、補間された点は $G-\gamma$ 関係のグラフを見ているかぎり特に問題はないように見える。だが、これらの点を応力-ひずみ関係で表すと異常な点として気づく場合がある。これは、繰返しせん断試験ではせん断応力を大きくしながら試験を繰返すので、せん断応力が前の点より大きくなるはずであるが、補間が間違っている場合、前の点より小さくなっていることがある。このような場合、データの補間がされている可能性が高い。大ひずみ領域では、 G の値は絶対値として小さいので、実際はかなり大きい誤差があっても図では目立たないので注意が必要である。このような処理が常におこなわれているわけではないが、あまりに大きなひずみ領域までデータがある場合は留意する必要がある。

8. 繰返し回数

ここでは二つの観点から繰返し回数の影響を検討する。現在の繰返しせん断試験では、同一の繰返し応力（あるいはひずみ）を 11 サイクル载荷し、必要に応じて 2~10 サイクルの範囲での結果を報告することとしている。実務では、10 サイクル目のせん断剛性と履歴減衰率を報告

している。図-7は、1,2,10サイクル目のせん断剛性と履歴減衰率を示したもので⁷⁾、図中の数字は各ステージで発生した過剰間隙水圧比を表している。この図からわかるように、過剰間隙水圧が発生しはじめる 10^{-4} 付近からサイクル数が多くなるごとにせん断剛性や履歴減衰率が変化するようになる。この現象はせん断剛性率ではさほど大きくないものの、履歴減衰率ではひずみが大きくなるごとに変化が大きくなる。このことは、過剰間隙水圧の発生のない 10^{-4} 程度のひずみレベルでは、測定点の数が試験者によって変化しても結果大きく変化しないが、これ以降の大きいひずみレベルでは測定数により結果の違いが生じることを示唆している。

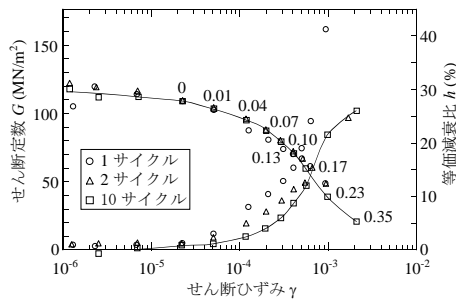


図-7 繰返し数によるせん断特性の違い⁷⁾

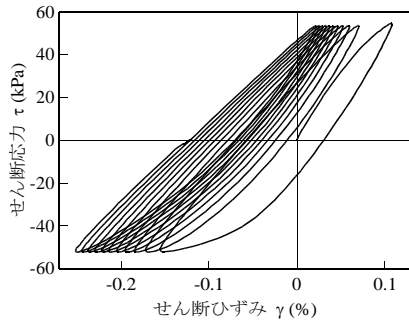


図-8 せん断ひずみ 10^{-3} 付近の応力-ひずみ関係⁸⁾

図-8には、せん断ひずみ 10^{-3} 付近の応力-ひずみ関係を示す⁸⁾。図から、荷重を繰り返すたびにひずみが伸張側に伸びていく様子が見て取れる。これらは、繰返し载荷中に発生する過剰間隙水圧の影響により材料が劣化するため、このような現象が発生すると考えられる。

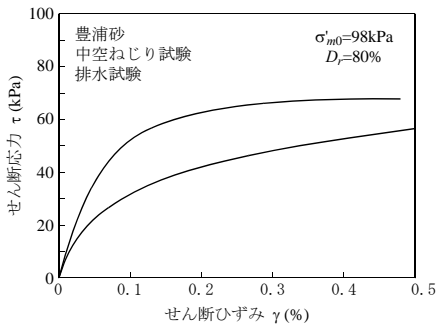


図-9 単調载荷と繰返し载荷試験の比較⁹⁾

このため、過剰間隙水圧の上昇が大きいひずみの大きい領域ほどこの現象は顕著に表れる。そして、砂質土ではこの後に液状化に至る。そして、もう一つはステージ

数による影響である。図-9には単調载荷試験と繰返し载荷試験の $G-\gamma$ 関係から求めた応力-ひずみ関係⁹⁾が比較されている。この図より、繰返し载荷試験は単調载荷試験より大きな応力になっている。これは、ステージ終了後の過剰間隙水圧の消散による材料の密実化の影響である。この現象は、ステージ数が試験者により異なる応力制御の場合、ステージ数が多いほど密実化の影響が大きくなるので注意が必要である。

9. まとめ

現在の試験法で許容されている計測条件の違いが試験結果に及ぼす影響について検討した結果、せん断剛性と履歴減衰率の両方に影響を及ぼすことがわかった。これらは、繰返し中に発生する過剰間隙水圧によるものが大きい。このため、ひずみが大きくなるに従い密実化などにより、差異が大きくなっている。これら過剰間隙水圧の影響を少なくするため、ステージ間では排水しない、制御はひずみ制御方式に設定する、などいくつかの試験法の改良が必要ではないだろうか。また、データシートの報告事項についても、過剰間隙水圧の情報を加えるべきではないだろうか。試験の適用限界については、過剰間隙水圧の影響により、砂質土では 10^{-3} を少し超えた付近、粘性土でもこれを少し超えた付近であると考えられる。

繰返しせん断試験が材料試験と位置づけられるのであれば、試験方法や試験者による影響がでない試験方法が定義されるべきではないだろうか。

参考文献

- 1) Kokusho, T. (1980): Cyclic Triaxial Test of Dynamic Soil Properties for Wide Strain Range, Soils and Foundations, Vol.20, No.2, pp. 45-60
- 2) Towhata, I. (1989): Models for cyclic loading, Mechanics of granular materials, Report of ISSMFE Technical Committee on Mechanics of Granular materials, ISSMFE, pp. 80-90
- 3) 安田進, 長瀬英生, 小田真也, 木辻浩二, (1994): ステージ载荷が動的変形特性に与える影響, 地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性-試験法・調査法および結果の適用-に関する国内シンポジウム発表論文集, pp.127~132
- 4) 吉田望, 三上武子, 沢田純男, 規矩大義, (2005): 地盤の地震応答解析のための土の動的変形特性試験の提案, 第40回地盤工学研究発表会
- 5) 地盤工学会 (2009): 地盤材料試験の方法と解説-二分冊の2-, 779pp.
- 6) 原昭夫 (1973): 地盤の動的性質とその応用 その1. 地盤の動的性質 (ストレン・レイト, レベルによる粘性土の力学的性質の変化), 第2回地盤振動シンポジウム資料集, 日本建築学会, pp.33-39
- 7) 山下聡 (1992): 砂の繰返し载荷試験に及ぼす諸因子の影響と試験結果の適用に関する研究, 北海道大学学位論文, 258pp
- 8) 吉田望 (2010): 地盤の地震応答解析, 75pp
- 9) 山下聡 (1992): 砂の繰返し载荷試験に及ぼす諸因子の影響と試験結果の適用に関する研究, 北海道大学学位論文, 258