

大ひずみ領域を考慮した 繰返しせん断試験方法の提案

三上 武子¹・吉田 望²

¹正会員 前田建設工業株式会社 技術研究所 (〒179-8914 東京都練馬区旭町 1-39-16)

E-mail: mikami.take@jcity.maeda.co.jp

²正会員 東北学院大学教授 工学部環境建設工学科 (〒985-8537 宮城県多賀城市中央 1-13-1)

E-mail: yoshidan@mail.tohoku-gakuin.ac.jp

最近の設計用地震動が大きくなる傾向を考慮して、大ひずみ領域 (0.1~3.75%) における土の地震時の挙動を表現するための繰返しせん断試験の統一化方法を提案した。まず、現行の指針で許容されている、排水・非排水、応力制御・ひずみ制御、繰返し数などの違いが繰返しせん断特性に与える影響を把握したところ、ひずみ 0.06%程度までは手法によらずあまり変化がないことが分かった。それより大きいひずみでは試験条件による差が現れること、また、試験者依存すること等を示した。これらを受け、試験者に依存せず、現行の解析法や構成モデルと整合性のよい方法として、非排水、ひずみ制御、3 サイクルの載荷を基本とする方法を提案した。さらに、その他の方法を用いる場合のデータ出力などにも言及した。

Key Words: cyclic shear test, deformation characteristics, earthquake response analysis, large strains

1. はじめに

地震時の地盤の挙動を調べるために、地震応答解析を実施する機会が増えている。実務では、パラメータの決定のしやすさや解析の安定性などの理由から SHAKE¹⁾に代表される等価線形化法が採用されることが多い。等価線形化手法の適用範囲は 0.1%を少し超えるところと考えられているが²⁾、1995 年兵庫県南部地震以降、入力地震動が大きくなったことから、大ひずみ領域での等価線形化法の適用性の是非について検討されている³⁾。これに伴って、地震応答解析に用いる変形特性を求めるための試験法においても、同様の議論がなされている⁴⁾。変形特性を求めるための試験法は、地盤工学会において基準化の検討が行われ、1995 年に JGS T 542-1995「地盤材料の変形特性を求めるための繰返し三軸試験方法」、JGS T 543-1995「土の変形特性を求めるための中空円筒供試体による繰返しせん断試験方法」の 2 種類の基準が新規制定された⁵⁾。その後、2000 年と 2009 年に構成の見直しや単位系の統一、書式の変更等のマイナーな改正を経て、現在の JGS 0542-2009 および JGS 0543-2009 に至っている (以下、現行法と記す)⁶⁾。現行法の適用範囲は明確には示されていないが、まえがきに「0.001%以下から 0.1%以上のひずみレベルの変形特性を、単一の供試体を用いて連続的に測定する方法を説明した。」と述べ

られていることから、少なくとも 0.1%までは適用できると考えられる。

ところで、現行法では複数の方法が許容されている。日本工業規格 (JIS) は内容的にある程度確立している必要があり、一つの試験方法の中で複数の方法を併記することは認められていない。一方、地盤工学会基準 (JGS) は内容的に確立している必要はなく、地盤材料は他の材料に比べて不均質性が大きく地域性もあることから特殊であるとの判断により、一つの試験方法の中で複数の方法が認められている。そのため、どの方法を採用するかをはじめとして試験者の裁量に任せられる部分が多い。現行法においても、載荷波形や制御方式、排水条件など試験の目的や使用する試験装置のスペックに応じて選択できる内容になっている。ここで、異なる方法でも同じ結果が得られるのかという疑問が生じる。また、試験者の裁量に任せるということは、試験者によって結果が異なる可能性も考えられる。現行法の解説文には、排水条件において「0.1%以下のひずみでは排水条件の差による試験結果の違いは認められない。」との記述がある。0.1%以上のひずみでは、試験方法の違いによって試験結果が変わるのであれば、なるべく試験方法を統一し、解析のニーズに合わせてより大きなひずみまで適用できる試験方法とすることが望まれる。

本論では、現行法の適用範囲の確認と課題を整理し、

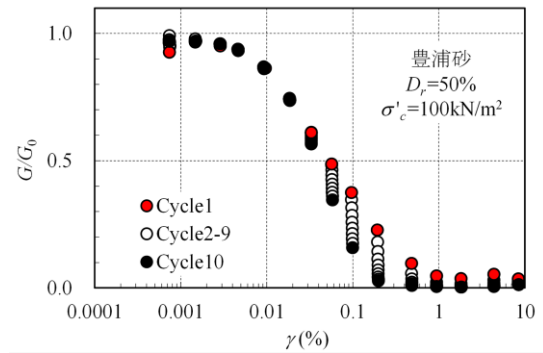
併せて、大ひずみ領域に適用できる試験法の提案を行う。なお、本論では、液状化の定義である両振幅軸ひずみ 5% (片振幅せん断ひずみでは 3.75%) を破壊ひずみと捉え、せん断ひずみ 0.1%~3.75%を大ひずみ領域と定義する。この定義は Ishihara²⁾によるものとほぼ同じである。

2. 現行法の課題

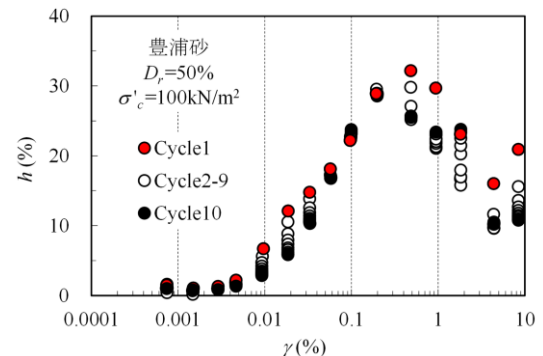
(1) 試料の密実化

現行法では、繰返し载荷中の排水条件は排水、非排水のどちらも許容されており、原地盤の状況に応じて使い分ける。地震時の変形特性の取得が目的である場合は非排水とすることが一般的であるが、この場合、次のステージに移る前に排水を行い、繰返し载荷中に発生した過剰間隙水圧を消散させることになっている。これは、各繰返し载荷レベルでの初期応力状態を所定の値に揃えておいた方が試験結果の解釈が容易になるとの理由による。しかし、ステージ間で排水が行なわれると、多くの構成モデルでは履歴を追いながら追跡することが困難となる。また、排水によって試料が密実化するため、材料特性が変化し、同じ材料による試験結果とは考えにくくなる。

ステージ間排水が変形特性に及ぼす影響として、豊浦砂 (土粒子の密度 $\rho_s=2.641\text{g/cm}^3$, 最小乾燥密度 $\rho_{d\min}=1.335\text{g/cm}^3$, 最大乾燥密度 $\rho_{d\max}=1.630\text{g/cm}^3$) の繰返しねじりせん断試験結果⁷⁾を図-1 に示す。本試験では大ひずみ領域の変形特性を検討するため、せん断ひずみ $\gamma=10\%$ まで繰返し载荷を行った。また、ひずみ制御 (ひずみ振幅一定) で载荷を行った。図には、全サイクルの結果をプロットしているが、(a)に示すせん断弾性係数の低下率 G/G_0 と γ の関係では 9 ステージ ($\gamma=0.1\%$) 以降、1 サイクル目のせん断弾性係数 G_1 が前ステージ 10 サイクル目の G_{10} より大きいことが観察される。すなわち、8 ステージ ($\gamma=0.06\%$) の载荷より、排水による密実化の影響が認められる。このときの相対密度 D_r の変化と過剰間隙水圧の上昇を図-2 および図-3 に示す。载荷初期の相対密度は 53%で、”やや緩い試料”と定義されるが、さきほどの 8 ステージ ($\gamma=0.06\%$) より相対密度が変化し始め、12 ステージ ($\gamma=1\%$) では $D_r=66\%$ 、15 ステージ ($\gamma=10\%$) では $D_r=82\%$ に増大する。 $D_r=66\%$ 、 82% はそれぞれ”やや密な試料”、”密な試料”に定義されるので、”やや緩い試料”が排水によって”やや密な試料”から”密な試料”へと変化し、初期とは全く異なる試料に変化する。そのため、図-1 は $D_r=53\%$ の変形特性を示しているとは言い難い。



(a) G/G_0 - γ 関係



(b) h - γ 関係

図-1 ステージ間排水が変形特性に及ぼす影響

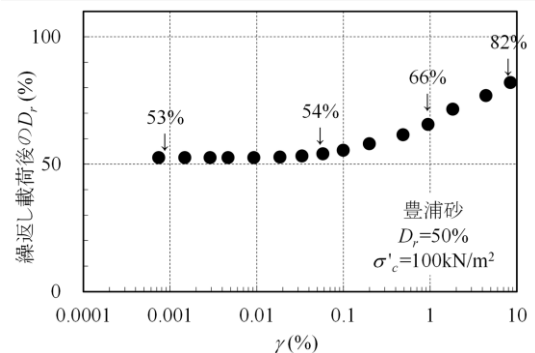


図-2 ステージ間排水による相対密度の変化

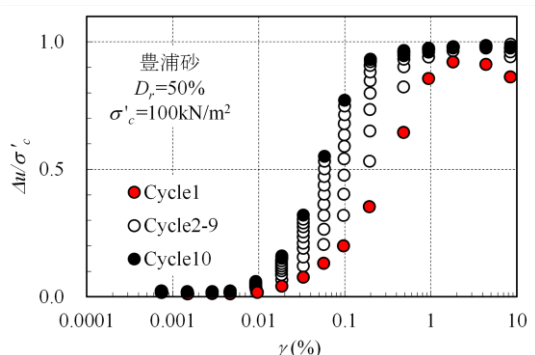


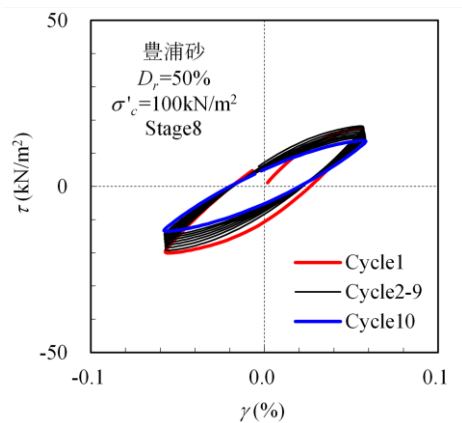
図-3 非排水载荷による過剰間隙水圧の上昇

(2) 履歴曲線の非定常化

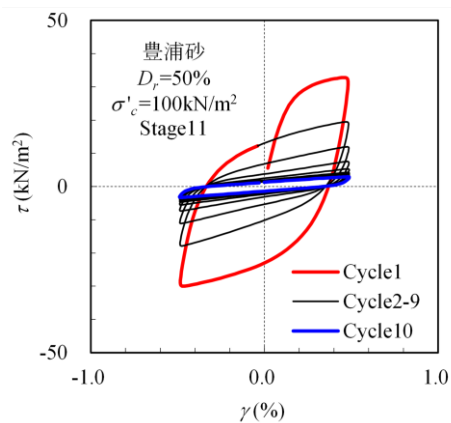
前節ではステージ間排水による影響について述べた。ここでは、非排水で繰返し载荷を行う影響について述べ

る。非排水で繰返し载荷を行うと、過剰間隙水圧 Δu の上昇により、履歴曲線が非正常となる。図-1を見ると、8ステージ($\gamma=0.06\%$)からサイクル数によって G が変化することがわかる。この8ステージは、図-2では相対密度が変化し始めるステージであった。図-3の過剰間隙水圧を見ると、8ステージでは約0.5の過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ が発生している。

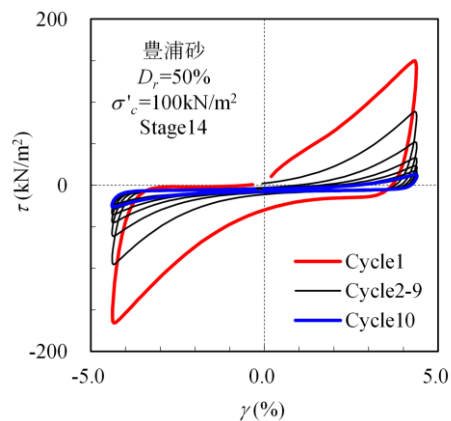
図-1の結果に対応する履歴曲線の一例を図-4に示す。



(a) 8ステージ ($\gamma=0.06\%$)



(b) 11ステージ ($\gamma=0.5\%$)



(c) 14ステージ ($\gamma=4.4\%$)

図-4 履歴曲線の一例

履歴曲線の非正常化が始まる8ステージ($\gamma=0.06\%$)、過剰間隙水圧比が0.95を超え、液状化に至る11ステージ($\gamma=0.5\%$)、サイクリックモビリティにより履歴曲線が逆S字型となる14ステージ($\gamma=4.4\%$)を示した。地震応答解析では、10サイクル目の履歴曲線を用いることが多い。図-4(a)の8ステージ($\gamma=0.06\%$)では非正常と言っても1サイクル目と10サイクル目の履歴曲線にそれほど大きな差はないが、(b)の11ステージ($\gamma=0.5\%$)、(c)の14ステージ($\gamma=4.4\%$)では1サイクル目と10サイクル目の履歴曲線は全く異なる。地震応答解析の結果として重要である最大加速度のような応答は、大きな波が来たときに発生することから、サイクルによって変形特性が変化すると最大値の評価に誤差が生じることになる⁴⁾。

(3) 繰返し载荷回数の妥当性

現行法では11サイクルの繰返し载荷を行い、5サイクル目と10サイクル目の結果を報告することになっている。前述のとおり、地震応答解析では10サイクル目の結果を採用することが多い。10サイクルで载荷終了としないのは、载荷終了時の応力あるいはひずみを载荷開始時のそれに完全に戻すためである。ところで、この10サイクルはマグニチュードの大きさや地震波の有効繰返し数などを考慮して決定されたものではない。試験機の性能によっては、微小ひずみ領域での制御が不安定となる場合があり、安定した結果を得るためには10サイクル程度の载荷が必要との判断による⁸⁾。また、排水繰返し载荷では、繰返し载荷回数の増加とともにせん断弾性係数 G は漸増し、履歴減衰率 h は減少する傾向にあるが、通常、10サイクル程度で収束することも根拠となっている⁹⁾。

等価線形化法では解析時間を通して力学特性は一定である。したがって、全解析時間を代表する変形特性を設定することが求められる。繰返し载荷回数を減じることによって過剰間隙水圧の上昇を抑え、ステージ内における G 、 h の変化を小さくすることができる。これにより、試験法が適用できるひずみの範囲の拡大が可能となる。また、過剰間隙水圧の蓄積量が小さければ、排水量も小さくなるため、密実化の影響も小さくなる。さらに、解析結果として最大値に着目するのであれば、最大ひずみ(ひずみ制御の場合は最大応力)は1サイクル目の载荷で生じるため、1サイクル目の情報が重要となる。これらを総合的に判断して、合理的な繰返し载荷回数の設定が必要と考える。

(4) 人的誤差

現行法での繰返し载荷は、応力制御(応力振幅が一定となるように応力を強制的に変化させる)、ひずみ制御

(ひずみ振幅が一定となるようにひずみを強制的に変化させる)のどちらを採用してもよい。制御方法が変形特性および過剰間隙水圧の上昇に及ぼす影響を見るため、図-1および図-3に応力制御の結果⁴⁾を追加して図-5、図-6に示す。煩雑になるため応力制御の7ステージ($\gamma=0.5\%$)、8ステージ($\gamma=5.1\%$)のみサイクル毎の結果をプロットし、その他は10サイクル目のみを示した。両制御ともひずみ増分が2倍程度となるように試験を行っているが、応力制御では過剰間隙水圧の上昇によりひずみが進行するため6ステージ($\gamma=0.02\%$)以降、ひずみ間隔が大きくかつ不揃いとなっている。特に8ステージ($\gamma=5.1\%$)では過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ が0.3を超えたあたりからひずみが急増し、10サイクルの载荷でひずみの大きさが約100倍変化している。もちろん、試験者

は過剰間隙水圧の上昇を予想しながら応力を設定しているが、わずかな応力の違いで発生するひずみの大きさは異なる。試験者の判断の良し悪しでひずみ間隔は異なり、必要とする情報が得られない場合もある。したがって、応力制御では試験者によって試験結果が異なることになる。人的誤差のない結果を得るためにはひずみ制御が有効である。ただし、試験機的能力によっては、微小ひずみ領域で安定した载荷が行えない可能性もあるため、応力制御とひずみ制御の併用も考えられる。

(5) データ整理法

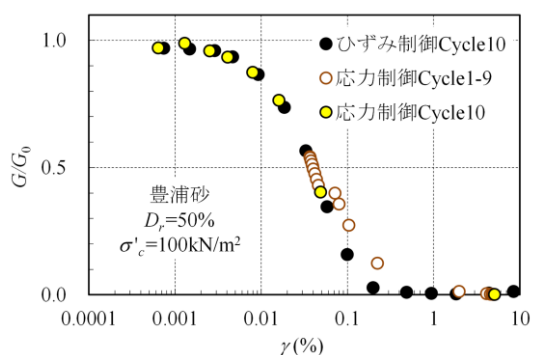
非排水载荷の場合、過剰間隙水圧の上昇の有無が履歴曲線の非定常化に影響を及ぼすため、過剰間隙水圧は重要な情報であるが、現行法では報告の対象にはなっていない。また、履歴曲線は、5サイクル目と10サイクル目を個別に報告するため、非定常化の判断が困難である。さらに、繰返し三軸試験では、等方応力状態で繰返し载荷を行うと履歴曲線が伸張側にドリフトするが、個別の表示法では原点のずれは意識しにくい。このように、現行法で規定されている試験結果の報告は、解析を行うにあたって十分な情報を提供しているとは言い難い。

3. 大ひずみ領域を考慮した試験法の提案

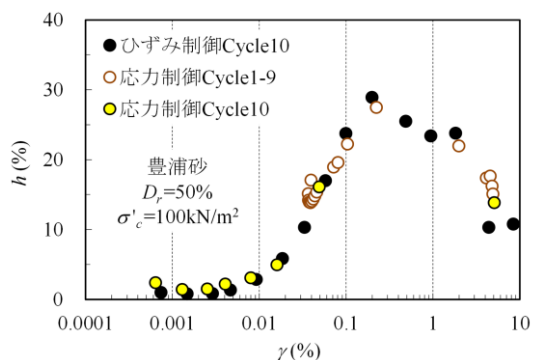
(1) 繰返し载荷回数

大ひずみ領域でも試験可能とするためには、試料の密実化や履歴曲線の非定常化を改善する必要がある。これらの現象が生じる主要因は過剰間隙水圧の上昇であることから、繰返し载荷回数やひずみ増分の大きさを見直すことで改善できると考えられる。各ステージ11回の载荷を行う理論的な背景はなく、実践的な観点から決定されている。現行法の制定後20年が経過し、試験機の性能が向上も期待できることから、より少ない载荷でも安定した結果が得られるものと予想される。そこで、繰返し载荷回数を減じることを提案する。ただし、どの程度の回数が適当かについては議論が必要である。ここでは、繰返し载荷回数を3とし、ひずみ増分を0.5桁とした事例(以下、3サイクル载荷と記す)を紹介する。試験結果⁴⁾を図-7に示す。

まず、試料の密実化について検討する。(a)の $G/G_0-\gamma$ 関係を見ると、8ステージ($\gamma=1\%$)以降で1サイクル目の G_1 が前サイクル3サイクル目の G_3 より大きいことが観察される。すなわち、7ステージ($\gamma=0.3\%$)の载荷より排水による密実化の影響が認められる。10サイクル载荷における密実化は8ステージ($\gamma=0.06\%$)から始まっていたため、3サイクル载荷にすることで試験可能なひずみを5倍程度大きくすることができる。図-7(c)より



(a) $G/G_0-\gamma$ 関係



(b) $h-\gamma$ 関係

図-5 制御方法の違いが変形特性に及ぼす影響

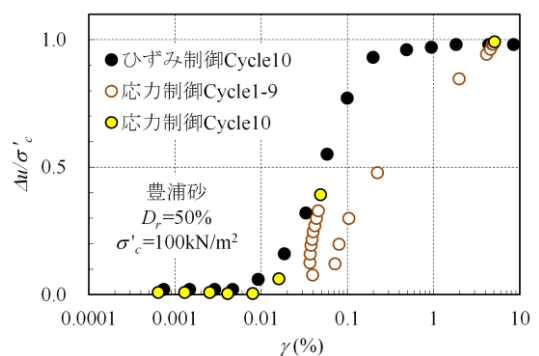
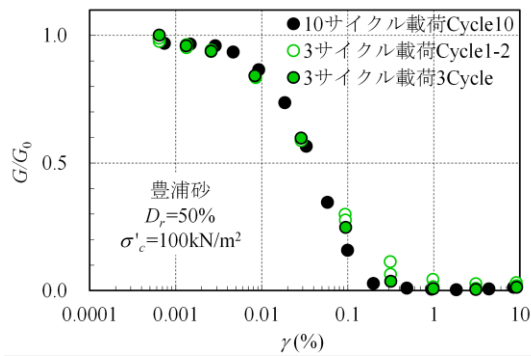
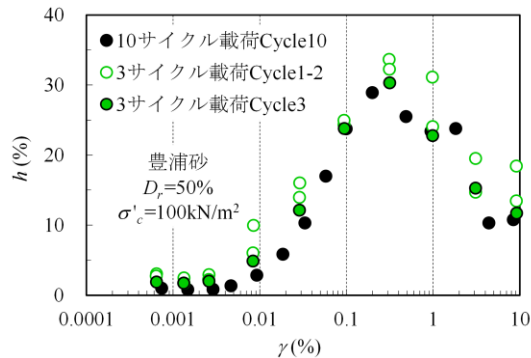


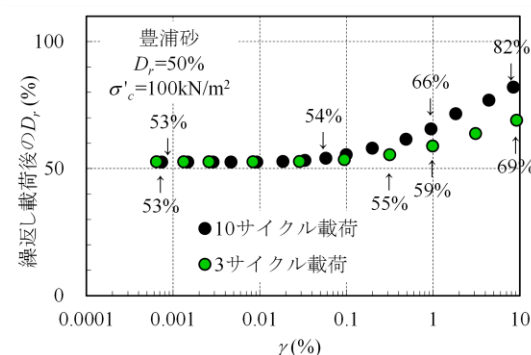
図-6 制御方法の違いが過剰間隙水圧の上昇に及ぼす影響



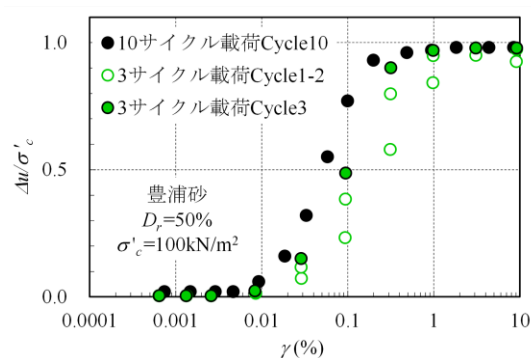
(a) G/G_0 - γ 関係



(b) h - γ 関係



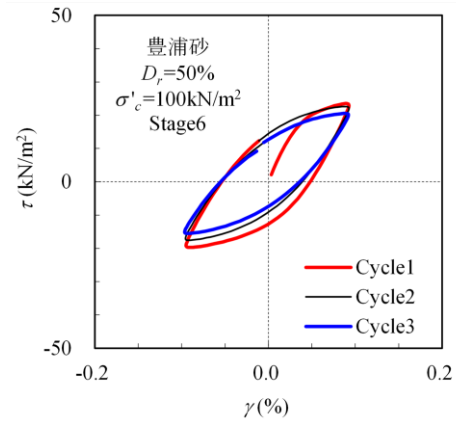
(c) 相対密度の変化



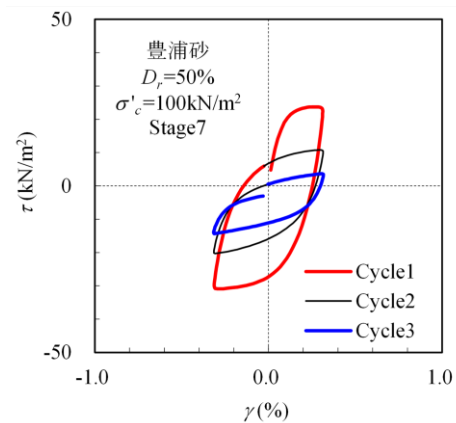
(d) 過剰間隙水圧の上昇

図-7 3サイクル載荷の試験結果

これらのステージの相対密度の変化は小さいが、図-7 (d)を見るといずれも過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ が 0.5 を超えている。これより、 $\Delta u/\sigma'_c=0.5$ が密実化の影響の目安とすることができる。



(a) 6 ステージ ($\gamma=0.1\%$)



(b) 7 ステージ ($\gamma=0.3\%$)

図-8 3サイクル載荷の履歴曲線の一例

次に、履歴曲線の非定常化について検討する。10 サイクル載荷では、図-1 (a)より 8 ステージ ($\gamma=0.06\%$) において非定常化が始まっていた。3 サイクル載荷の 6 ステージ ($\gamma=0.1\%$) および 7 ステージ ($\gamma=0.3\%$) の履歴曲線を図-8 に示す。図より、(a)の 6 ステージではほぼ定常、(b)の 7 ステージでは非定常であることが確認できる。図-7 (d)と併せて検討すると履歴曲線の非定常化においても $\Delta u/\sigma'_c=0.5$ が目安となる。

以上より、 $\Delta u/\sigma'_c$ が 0.5 以下であれば試料の密実化や履歴曲線の非定常化は生じないと考えられるので、なるべく過剰間隙水圧が発生しないように繰返し載荷回数やひずみ増分を調整すれば、より大きなひずみまで試験可能となる。

(2) 制御方法

制御方法については、計画的に試験が行え人的誤差のないひずみ制御を提案する。ただし、微小ひずみ領域においては制御方法の影響は小さいことから、試験機の性能や試験のやりやすさに応じて応力制御も採用してもよいと考える。この場合、どの時点で応力制御からひずみ制御に切り替えるかについては、ひずみの大きさで規定

する方法や（たとえば $\gamma=0.01\%$ ）， G の低下率で規定する方法（たとえば $G/G_0=0.5$ ），過剰間隙水圧で規定する方法（たとえば $\Delta u/\sigma'_c=0.3$ ）などが考えられる．これについては，今後の検討課題としたい．

(3) 試験結果の報告事項

これまで述べてきたように過剰間隙水圧が変形特性に及ぼす影響は大きく，試験結果を評価する際に非常に重要な情報となる．そこで，過剰間隙水圧の情報も報告事項に加えることを提案する．情報の示し方は時刻歴図でも良いし，本論で示したようにひずみとの関係にまとめても良い．整理に手間はかかるが，結果の評価はしやすくなる．

履歴曲線は，全サイクルを報告することを提案する．これにより，履歴曲線の定常・非定常が判断できるし，残留変位の有無も確認できる．

ステージ間排水に伴う排水量は現行法でも報告事項となっているが，ステージ毎にデータシートがわかれており全体を把握しづらい報告の仕方となっている．また，排水量のみの情報では，どの程度密度が変化したのかイメージしづらい．砂質土の場合，ステージ毎の相対密度を報告することが最良と考えられるが，実務では砂の最小密度・最大密度試験を実施するケースは多くないため，乾燥密度や間隙比を報告するのが現実的かもしれない．これらの物性値であれば粘性土にも対応できる．なお，報告の仕方については，変化の過程がわかるように一覧にまとめた方が良い．

4. まとめ

地震応答解析に用いる変形特性を求めるための現行法の適用範囲の確認と課題を整理し，大ひずみ領域に適用できる試験法について検討した．得られた知見を以下に示す．

- ・ 相対密度 $D_r=50\%$ ，拘束圧 $\sigma'_c=100\text{kN/m}^2$ の豊浦砂の実験結果では，せん断ひずみ $\gamma=0.06\%$ から試料の密実化および履歴曲線の非定常化現象が確認された．
- ・ 繰返し載荷回数を 3，ひずみ増分を 0.5 桁にすることで，試験可能なひずみを 5 倍程度大きくすることができる．
- ・ 過剰間隙水圧比 $\Delta u/\sigma'_c$ を試料の密実化および履歴曲線の非定常化の判断材料とすることができる．
- ・ 人的誤差の影響のない試験法としてひずみ制御が有効である．
- ・ 過剰間隙水圧，全サイクルの履歴曲線，密度の変化を報告事項に加えることで試験結果の合理的な評価が可能となる．

本論で採り上げた項目以外にもステージ間の排水条件や載荷速度など検討の必要な項目がある．これらについては今後の課題とし，より合理的な試験法の提案につなげたい．

参考文献

- 1) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE A Computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, Report No.EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972.
- 2) Ishihara, K.: Evaluation of soil properties for use in earthquake response analysis, Proc., 9th International Symposium on Numerical Models in Geomechanics, Zurich, pp.237-259, 1982.
- 3) 塩見忠彦，吉田洋之：1.2 解析の適用性を明らかにする必要性，大ひずみ領域を考慮した土の繰返しせん断特性に関するシンポジウム 発表論文集，地盤工学会，pp.8-9, 2013.
- 4) 吉田望，三上武子：時代の要請に応える土の繰返しせん断変形特性試験の確立を，地盤工学会誌，Vol.8，No.2，pp.1-5, 2010.
- 5) 地盤工学会：新規制定地盤工学会基準・同解説，pp.69-146, 1996.
- 6) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説―二分冊の 2―，pp.750-789, 2009.
- 7) 吉田望，三上武子，澤田純男，規矩大義：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講演集，pp.459-460, 2005.
- 8) 安田進博士との私信．

(2016. ?? . ?? 受付)

METHOD OF CYCLIC SHEAR TEST AT LARGE STRAINS TO DETERMINE DEFORMATION CHARACTERISTICS

Takeko MIKAMI and Nozomu YOSHIDA

A standard test method is proposed for the cyclic shear test considering the recent trend that design earthquake motions become large. At first, various test conditions that can be used in the current test specification is examined, which are drained and undrained, stress control and strain control, and number of loading cycles, etc. It is found that these conditions hardly affect the cyclic shear deformation charac-

teristics up to strain of 0.06 %, but results by different test conditions are different to each other at strains larger than 0.06 %. Cyclic shear deformation characteristics are also depends on operator's decision at large strains. A test method under the undrained condition, strain controlled amplitude, and three effective loading cycles is proposed as cyclic shear test considering previously discussed effects and matching with constitutive models. Finally, preferable data output are suggested when other test conditions are used.