

粘性土の変形特性を求めるための 高精度三軸試験装置・方法の開発

川口貴之¹・三田地利之²・澁谷啓³・佐野侑房⁴

¹正会員 工修 函館工業高等専門学校助手 環境都市工学科 (〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)

E-mail:kawa@hakodate-ct.ac.jp

²フェロー 工博 北海道大学大学院教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

³正会員 Ph.D. 北海道大学大学院助教授 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目)

⁴正会員 工修 函館工業高等専門学校教授 環境都市工学科 (〒042-8501 函館市戸倉町14番1号)

室内において、広範囲のひずみにおける粘性土供試体の変形挙動及び強度の測定が可能な高精度三軸試験システムを開発した。本試験システムでは、高精度位置決め機能を有するデジタルサーボモーターをパソコンを用いて自動制御することにより、供試体に作用する軸変形量あるいは軸応力を時間に対して自在に変化させることができる。加えて、拘束圧の制御及びデータ収録機能を完全自動化することにより、 K_0 圧密、単調載荷圧縮・伸張試験（強度試験）、繰返し載荷変形試験、等の近年に相次いで標準化された各種の土質試験が本装置一台で実施可能となった。本論文では、開発したシステムのメカニカルな部分の特徴を詳述するとともに、上述の各種試験を融合した試験例を示すことにより、本試験システムの多目的な性能の評価をしている。

Key Words: triaxial apparatus, clay, pre-failure deformation, elastic modulus, lateral strain, pore pressure, strain rate, drainage conditions

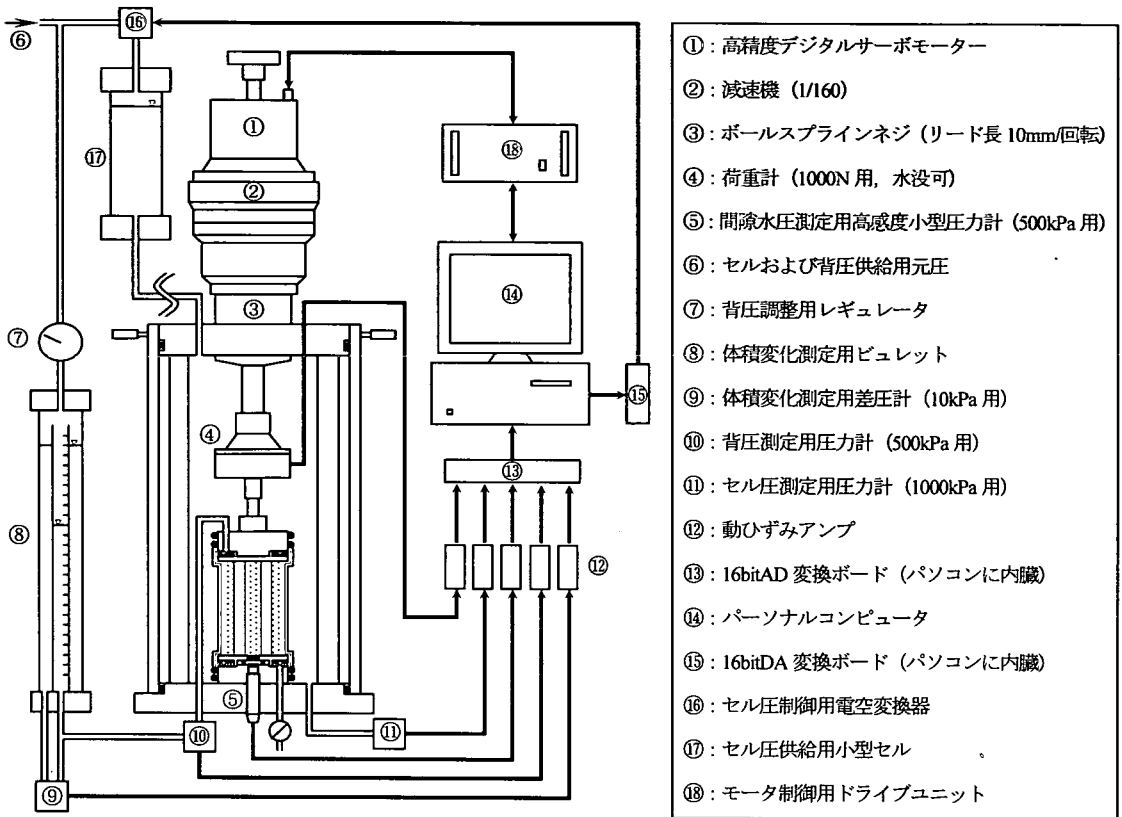
1. はじめに

最近、地盤工学会により、「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¹⁾」、「土の K_0 圧密非排水三軸圧縮試験方法²⁾」、「土の K_0 圧密非排水三軸伸張試験方法³⁾」などの試験諸基準が相次いで制定された。室内において、原地盤要素の応力・変形状態をできる限り忠実に再現し、現場の多様な荷重条件下での変形・強度を求めるための各種試験方法が確立された。同時に、土構造物および基礎地盤の限界状態設計法導入への環境整備が一步前進したと言えよう。

一方、これらの多様な試験に効率良く対応するためには、多機能・高精度な三軸試験装置の普及が望ましい。そのためには、上記の各種せん断試験が1台の試験機で実施可能であること、ならびに試験の完全自動化が必要である。一方、地盤材料が弾性的な挙動を示す小ひずみレベルでの変形挙動の把握が急務となっている⁴⁾。したがって、せん断剛性率 G の測定、ポアソン比を求めるための側方ひずみの測定等、必要に応じていくつかの物性値が付加的に測定可能であることが望ましい。

粘性土の試験に特徴的な問題点は3つある。まず、他の地盤材料に比べて剛性が低く、弾性的な挙動を示すひずみ域が極めて小さい。また、変形挙動におけるひずみ速度の影響が顕著である。さらに、透水係数が小さいため試験が長期化する傾向にある。よって、微小ひずみでの弾性変形係数の測定を含めた広範囲のひずみにおける変形特性のひずみレベル依存性ならびにひずみ速度依存性を観測するための試験（とりわけ長期間を有する排水条件下での試験）方法の確立が急務である。

澁谷ら^{5,6)}は、軸応力・軸変位の載荷に高分解能デジタルサーボモーターを用いた多機能・高精度三軸試験装置を試作した。本論文では、この試験装置にハード・ソフト両面での様々な改良を加え、粘性土の試験に特化した三軸試験システムを開発し、試験装置の特徴および性能について詳細に説明している。また、本試験装置の特徴・性能を生かした各種の試験例を紹介している。とりわけ、室内再構成粘性土の非排水・排水試験から得られた各種弾性係数、すなわち非排水弾性ヤング率 E_u 、排水弾性ヤング率 E_d およびせん断弾性波速度測定によるせん断剛性率 G の相互関係について議論している。



- ①：高精度デジタルサーボモーター
- ②：減速機 (1/160)
- ③：ボールスプラインネジ (リード長 10mm/回転)
- ④：荷重計 (1000N 用, 水没可)
- ⑤：間隙水圧測定用高感度小型圧力計 (500kPa 用)
- ⑥：セルおよび背圧供給用元圧
- ⑦：背圧調整用レギュレータ
- ⑧：体積変化測定用ビュレット
- ⑨：体積変化測定用差圧計 (10kPa 用)
- ⑩：背圧測定用圧力計 (500kPa 用)
- ⑪：セル圧測定用圧力計 (1000kPa 用)
- ⑫：動ひずみアンプ
- ⑬：16bitAD 変換ボード (パソコンに内臓)
- ⑭：パーソナルコンピュータ
- ⑮：16bitDA 変換ボード (パソコンに内臓)
- ⑯：セル圧制御用電空変換器
- ⑰：セル圧供給用小型セル
- ⑱：モータ制御用ドライブユニット

図-1 試験機システムの概要図

なお、本試験システムの性能を評価する上で使用した粘性土供試体 (直径: 5 cm, 高さ: 10 cm) は、粉末乾燥状態で市販されている NSF 粘土 ($w_L=55\%$, $I_p=26$) に、液性限界の 2 倍程度になるよう蒸留水を加えて十分に攪拌し、真空に近い状態に保った予圧密セル内で十分に脱気した後、鉛直応力 150 kPa で一次元圧密したものを用いた。

2. 試験装置の性能・特徴

(1) セルの構造

図-1 は本試験機システムの概要である。セル本体は、軸力の反力をセル内の支柱で支える構造となっており、装置外部の反力板が不要である。また、供試体セット時に供試体とトップキャップを剛結することができ、圧縮試験だけでなく伸張試験も容易に実施できる⁷⁾。さらに、4本の支柱 (径 33 mm) を設けることにより、セル本体のコンプライアンスを小さくするように工夫している。三軸セルの総質量はおよそ 40 kg であり、従来の同種の試験装置に比べてコンパクトかつ軽量である。

(2) 軸変位・軸応力の制御・測定システム

三軸セルの上部には、高精度デジタルサーボモーターが取り付けられている (図-1 参照)。所定の載荷速度を得るために、このモーターには減速機を取り付け、そこにボールスプラインネジを取り付けることによって、モーターの回転運動をスムーズな軸方向の上下運動に転換している。

このモーターは、専用のドライブユニット、RS232C 回線 (シリアルポート) を介してパソコンから所定のコマンドを送信することによって、モーターの駆動 (位置決め) が可能である。位置決め分解能 M_R は、一回転を 409600 分割するため 8.79×10^{-4} 度である。採用した減速機の減速比 R は 1/160、ボールスプラインネジのリード長 L は 10 mm/回転である。したがって、軸変位の分解能 M_A は式(1)となる。

$$M_A = M_R \cdot R \cdot L = (1/409600) \cdot (1/160) \cdot 10 = 1.525 \times 10^{-7} \text{ mm} \quad (1)$$

ドライブユニットは現在位置読み出し機能を有している。所定のコマンドを送信することにより、相対座標上の現在位置を読み出すことが可能である。なお、相対座

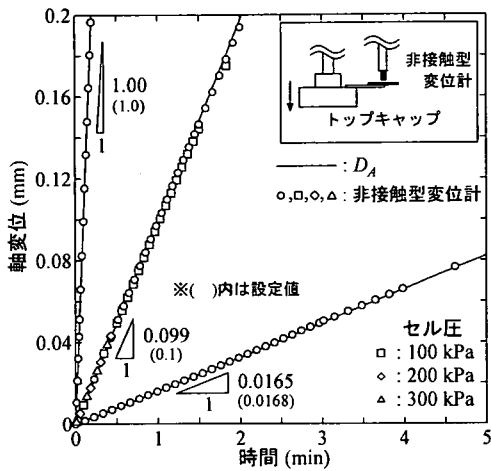


図-2 荷重速度およびセル圧が異なる際の D_A の検証

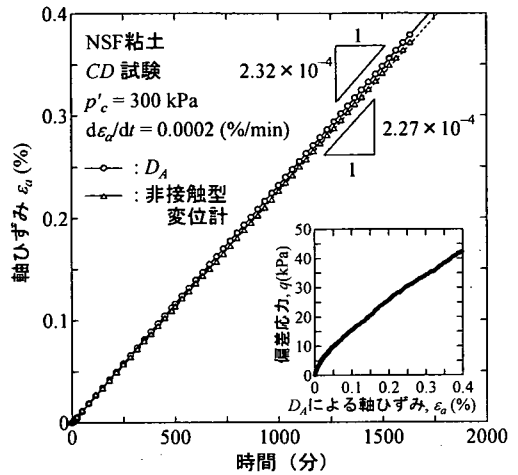


図-4 $(V_A)_{min}$ 以下の荷重速度による実験例

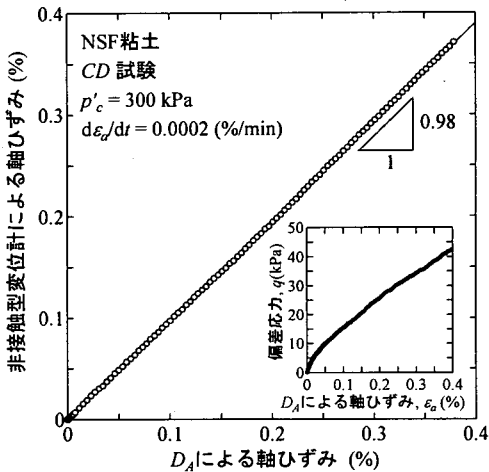


図-3 荷重試験中における D_A の検証

標は任意の時点でリセットとすることが可能であり、読み取り範囲は0~99999999(軸変位にしておよそ15.3 mmに相当)である。よって、本システムにおける軸変位の制御・計測分解能は M_A に等しい。

ここで、相対座標上の現在位置を X_R とすると、この機能により算出される軸変位 D_A は式(2)となる。

$$D_A = X_R \cdot M_A \quad (2)$$

図-2 は D_A の検証実験結果であり、軸変位速度およびセル圧が異なる際、非接触型変位計によるトップキャップの変位と D_A の比較である。 D_A は荷重(回転)速度、セル圧などの影響を受けず、精確であることが分かる。図-3 は NSF 粘土供試体を $p'_c = 300$ kPa で等方圧密した後、荷重速度 0.0002 %/min にて排水せん断した際の D_A とトップキャップ直上で非接触型変位計を用いて測定した軸ひずみの比較である。図中における線形近似線の傾きは

およそ 0.98 である。この違いを供試体のヤング率に換算しても 2 %程度であり、他の測定機器の精度を考慮すると、十分無視しうる範囲にあると考えられる。

また、粘性土の試験では、圧密時の軸圧縮ひずみが 1 %程度以上であれば軸変形量測定におけるベディングエラーの影響は無視できることが報告されている^{8),9)}。したがって、軟弱粘性土のせん断挙動を観察する上において、特別な軸変形測定機器を用いなくてもデジタルサーボモーターの情報のみによって微小ひずみ域から大ひずみ域までの供試体変形を極めて高い分解能で測定できることが分かる。

一方、軸変位速度の設定値が実際とほぼ等しいことは図-2 より伺える。モーターの回転速度は $0.0045 \sim 4.5$ rps の範囲を分解能 0.005 rps で設定可能である。よって、軸変位速度の最大値 $(V_A)_{max}$ および最小値 $(V_A)_{min}$ は式(3)によって計算できる。また、同様な計算を行えば、軸変位速度の分解能 D_V はおよそ 0.0003 mm/sec となる。

$$\begin{aligned} (V_A)_{max} &= 4.5 \cdot R \cdot L \approx 2.8 \times 10^{-1} \text{ mm/sec} \\ (V_A)_{min} &= 0.0045 \cdot R \cdot L \approx 2.8 \times 10^{-4} \text{ mm/sec} \end{aligned} \quad (3)$$

しかし、粘性土の排水せん断試験では $(V_A)_{min}$ よりもさらに小さい速度が要求される場合が多い。そこで、 $(V_A)_{min}$ 以下の荷重速度については、モーター制御のソフト面で工夫し、時間に対して微小変位を繰返し段階的に荷重することにより対処している。図-4 は図-3 に示した実験例における軸変位~時間関係である。非接触型変位計による軸変位から算出される荷重速度は D_A によるものと比べて 2 %程度小さいものの、その関係は実用上連続とみなして良いことがわかる。一段階の微小変位量およびその荷重時間間隔を調整することにより理論的には際限なく遅い荷重速度を設定することが可能である。

なお、 $(V_A)_{max}$ と $(V_A)_{min}$ の値は、試験の用途に応じて減

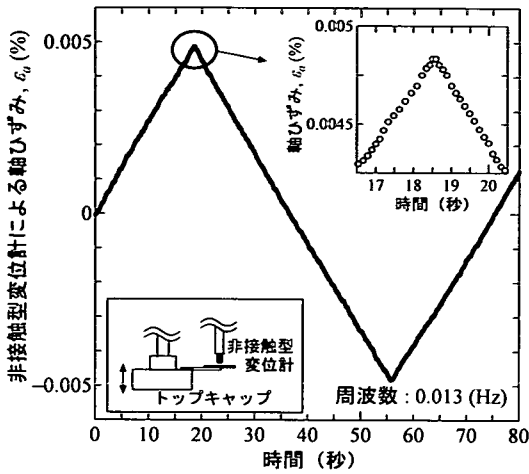


図-5(a) 繰返し載荷時における軸ひずみ～時間関係

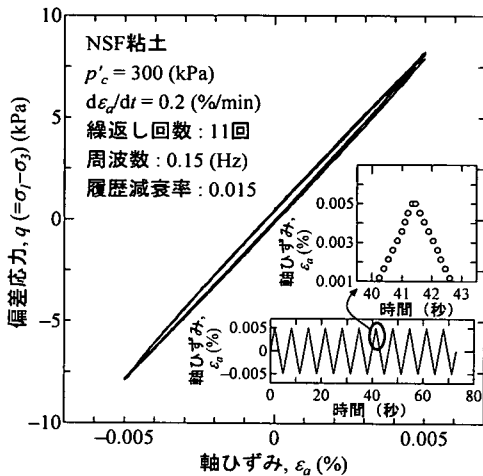


図-5(b) 繰返し載荷時における応力～ひずみ関係

速機の減速比 (R) およびボールスプラインネジのリード (L) を組み合わせることにより、変更することが可能である (式(3)参照)。

「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¹⁾」では、載荷反転時の軸ひずみ (あるいは軸応力) の経時変化の連続性を厳しく要求している。図-5(a) は非接触型変位計で測定した軸ひずみ制御繰返し載荷時 (周波数: 0.013 Hz) の軸ひずみ～時間関係である。本試験装置で使用している減速機ならびにスプラインボールネジは公称ゼロバックラッシュであるため、載荷方向反転時のバックラッシュは極めて小さいことが分かる。その結果、履歴ループのピークも明瞭に観察されている (図-5(b))。

軸応力は、荷重計の測定値をフィードバックしながら微小軸変位を調整することにより制御している。図-6 は、圧密条件ならびに物性の異なる2種類の粘土供試体を用いて、軸応力増加速度一定で所定の軸応力まで供試体を

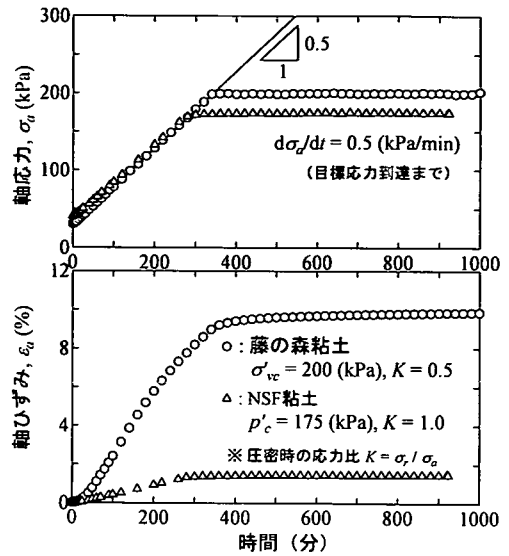


図-6 軸応力制御の実験例

表-1 本試験機における D_T のまとめ

| 測定機器 | 測定範囲 T_R | 測定分解能 D_T |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------|
| 軸力測定用 荷重計 | 1000 (N) | 0.02 (N) |
| 間隙水圧測定用 圧力計 | 500 (kPa) | 0.008 (kPa) |
| 背圧測定用 圧力計 | 300 (kPa) | 0.005 (kPa) |
| セル圧測定用 圧力計 | 800 (kPa) | 0.01 (kPa) |
| 体積変化測定用 差圧計 | 70 (cm ³) | 0.001 (cm ³) |
| 側方変位測定用 非接触型変位計 | 2 (mm) | 0.00003 (mm) |

※ 差圧計については、供試体の体積変化に換算して表示
※ ただし、ノイズ等による分解能の低下は考慮していない

圧密した試験における軸応力～軸ひずみ～時間関係である。応力制御による等方および異方圧密が高精度に実施できることが分かる。

(3) セル圧制御およびデータ収録システム

セル圧の制御は、各種測定機器より得られた物理量に基づくフィードバック方式により行っている。セル圧は、分解能16bitのDAボードを介して電空変換機で制御されており、およそ0.1kPaの精度で制御可能である。

モーター以外の各種測定機器からのデータは、増幅器を介してADボードに収録される (図-1参照)。ADボードの分解能 D_{AD} は16 bit ($=2^{16}$)、入力レンジは±10 Vである。したがって、アンプによって入力レンジ内で測定する物理変化量 (圧力、荷重、変位など) を T_R に調整した時、測定分解能 D_T は式(4)のように表現できる。

$$D_T = T_R / D_{AD} \quad (4)$$

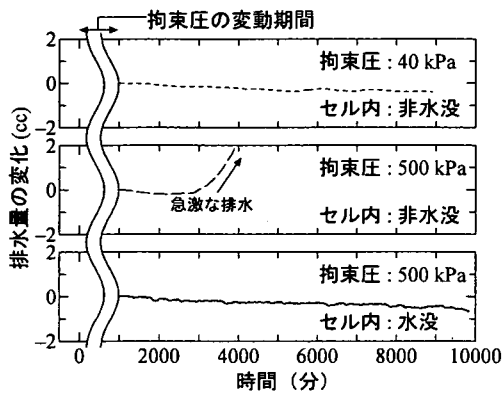


図-7 試験時間の長期化に伴う排水量の変化

しかし、AD ボードに収録される電圧にノイズが混入した場合、実質の測定分解能は式(4)によって計算されたものに比べて低下してしまう。そこで、本試験システムでは、実施する試験において生じる各種物理変化量を想定して T_R を随時調整し、できる限り高分解能な測定値が得られるようにしている。また、ノイズの低減処理を十分に試み、更には得られた測定値を平均化処理することなどによって可能な限り D_T に近づけるよう努力している。表-1 に目安として、ノイズ等による分解能の低下を考慮しない場合の本システムにおける各種測定装置の分解能 (D_T) をまとめている。

3. 試験方法に関する検討

(1) 試験時間について

ラテックス製のメンブレンを用いた三軸試験では、試験時間が長期化すると、セル水中に溶け込んだ空気がメンブレンを透過することが知られている。図-7 はアクリル製のダミー供試体を用いた検証実験の結果である。図中の点線および破線は異なる一定のセル圧 (40 kPa および 500 kPa) の下で、ともにセル水をトップキャップ直上に保った状態での結果である。一方、図中の実線はセル内を水で完全に満たし、小型セルを介してセル圧を供給した (図-1 参照) ときの結果 (セル圧 500 kPa) である。空気の進入に対する耐久時間は、拘束圧が小さいほど、また空気に触れ合う水面がメンブレンより遠いほど増すことが分かる。図中の実線の結果から、10000 分 (約 7 日) まではメンブレン内への空気の侵入に伴う急激な排水が生じないことを確認できる。なお、小田・三田地¹⁰⁾の研究では、同様なことを 20000 分 (約 14 日) まで確認している。

浅岡ら¹¹⁾ は水へ土連成解析から、通常の三軸試験で正確な変形挙動を得るためには 17 日程度の時間をかけて排水せん断する必要があるという例を示している。こ

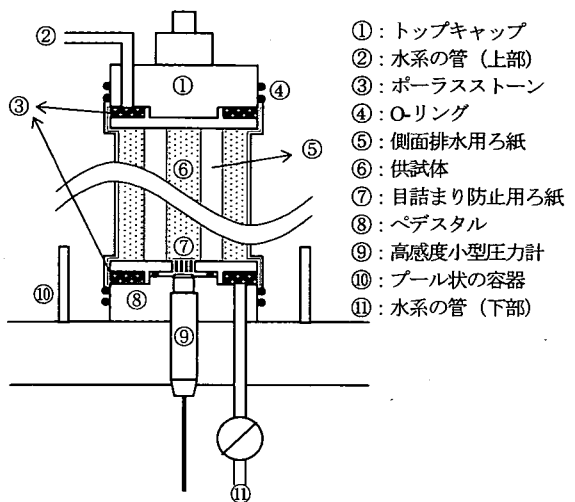


図-8 高感度小型間隙水圧計周辺の概要図

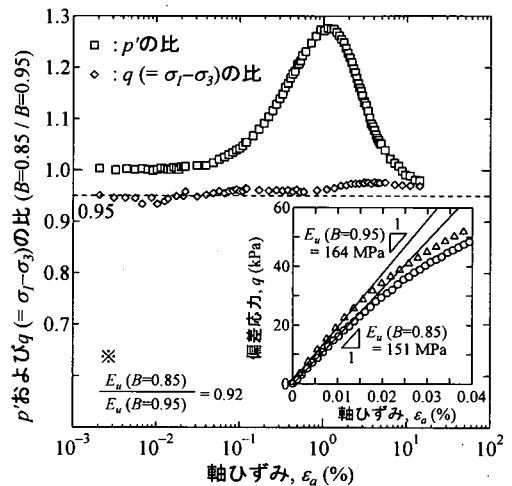


図-9 B 値の異なる試験結果における平均有効応力と偏差応力の比

のような観点からも試験時間の長期化への対処は重要である。

(2) 間隙水圧測定について

「土の繰返し非排水三軸試験方法¹²⁾」では、供試体の B 値を 0.95 以上に確保することを規定している。通常の三軸試験装置ではベDESTAL 中央部に水系の管路を設け、その延長上に圧力変換器を設置することによって間隙水圧を測定している。しかし、この方法では、管路内のフラッシングを試みても、空気がわずかに残留して十分な B 値が得られないことが多い。

図-8 は、供試体の給排水ルートの概要である。本試験装置では、ベDESTAL 中央部にフラット型の受圧ダイアフラムがむき出している高感度小型圧力計を設置し、圧力計に通じる管の体積および圧力計の体積変化を最小限

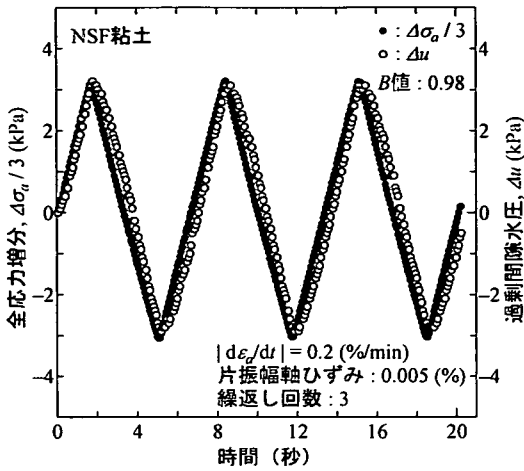


図-10 繰返し載荷試験時における全応力増分および過剰間隙水圧の推移

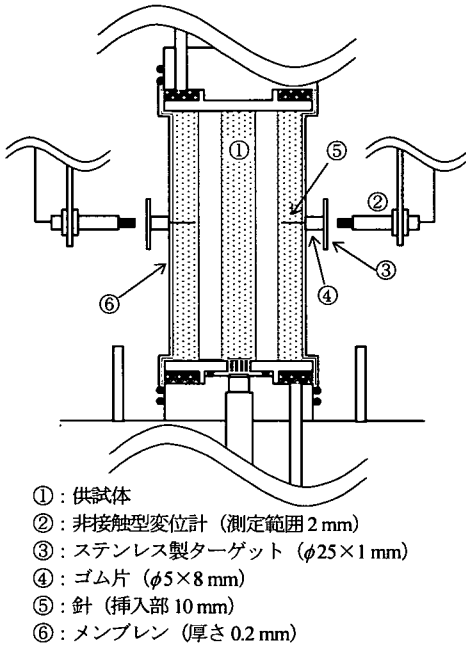


図-11 側方ひずみ測定システムの概要図

にした。圧力計周辺の飽和化は、試験前にペDESTAL周辺に設けられたプール状の容器内を水で満たし、セル内に負圧をかけることを行っている。その上で、ペDESTALとキャップ内のポーラスストーン部に設けられた水系の管(図-8中の②、⑩)において、いわゆる二重負圧法により供試体およびその周辺を飽和させている。これらの構造上および試験方法の工夫により、室内再構成、不攪乱試料を問わず、常に0.95以上のB値を確保することが可能となった。

図-9はB値の異なる同一の粘性土供試体を用いて、 $p'_c = 300$ kPaで等方圧密した後、軸ひずみ速度2%/min(一

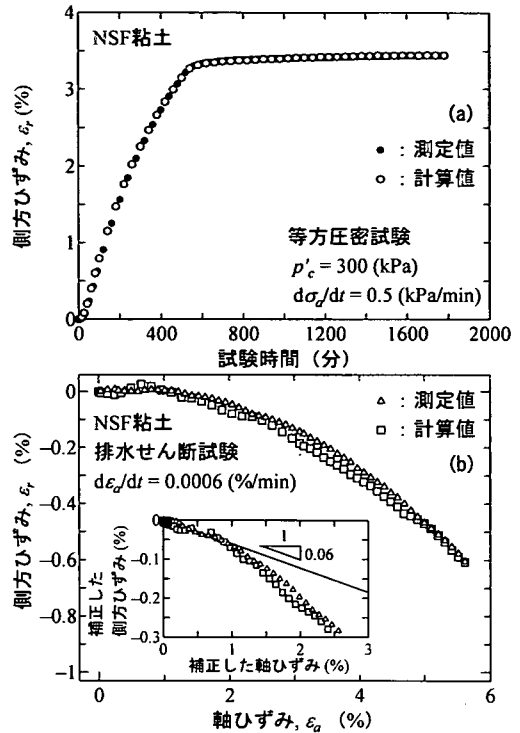


図-12 圧密および排水せん断時における側方ひずみの測定値と計算値の比較

定)で非排水圧縮せん断した試験の結果である。非排水せん断時の軸ひずみに対する p' と q のそれぞれの比を示している。偏差応力 q は、B値の小さい方(0.85程度)が全てのひずみ領域において5%程度過小評価するに過ぎない。一方、 p' は最大で30%程度も過大評価することが分かる。なお、微小ひずみ領域での応力~ひずみ関係から得られる非排水弾性ヤング率 E_u は、B値の小さい方(0.85程度)が8%程度過小評価しており、土岐ら¹³⁾の報告にほぼ一致している。

図-10は、非排水繰返し三軸試験時における小ひずみ領域での全応力および過剰間隙水圧の変化である。圧縮、伸張を問わず、0.01%程度以下の軸ひずみ領域において全応力の変化は過剰間隙水圧の変化にほぼ等しく、極めて弾性体に近い挙動を示していることが分かる。

(3) 側方ひずみ測定について

非接触型変位計を用いた測定方法は過去にも紹介されている¹⁴⁾が、例えばアルミ箔のターゲットをメンブレンに貼り付ける方法では、圧密時等の供試体の変形に伴い、ターゲットと変位計表面の平行性に問題が生じる。そこで、本試験機では図-11に示すように、平滑なステンレス製ターゲットに対して鉛直に針を取り付け、メンブレンを通過して供試体に差し込むことによってターゲットと変位計測定面の平行性を確保している。また、ゴム片

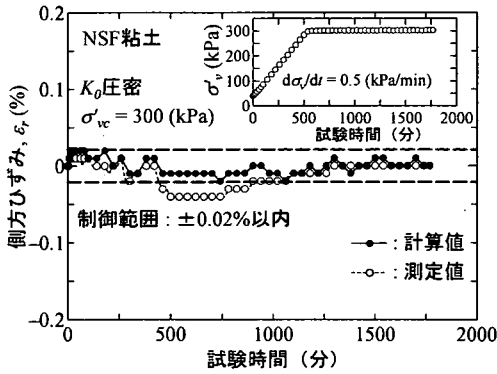


図-13 K_0 圧密時における側方ひずみの測定値と計算値の比較

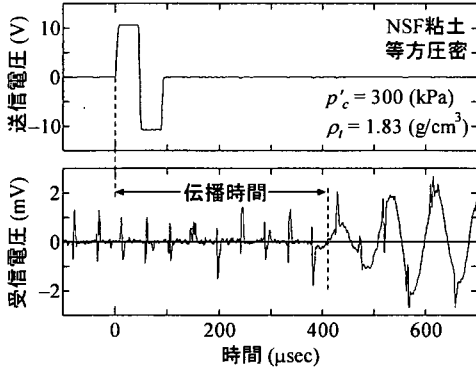


図-14 ベンダーエレメント試験例

をターゲットと供試体との間に挿入することにより、メンブレン内に進入する針の長さを常に一定にし、メンブレンとの間を瞬間接着剤にて接着させることで止水の役割を果たしている。測定箇所は供試体高さのほぼ中央とし、直径方向に対極な2箇所側方変形を測定している。

図-12は $p'_c = 300$ kPaまで等方圧密した後、軸ひずみ圧縮速度 0.0006 %/minで排水せん断した試験の結果である。排水量より紙の吸排水量を補正¹⁵⁾して計算された側方ひずみと図-11に示した方法で直接測定した側方ひずみを比較している。側方ひずみの計算値と測定値は圧密(図-12(a))、せん断中(図-12(b))を問わずほぼ一致している。

当初、このシステムはポアソン比を直接測定する目的で考案した。図-12(b)中の挿入図はせん断開始直前のクリープ変形がせん断中においても等しい速度で進行していると仮定し、その成分を差し引いた際の関係である。このような補正を行ったとしても、せん断開始直後の傾き(ポアソン比に相当)は非常に小さく、粘性土のポアソン比を正確に捕らえているとは考えにくい。この要因にはクリープ変形の評価方法の問題の他に、排水条件下における弾性的挙動領域が極めて微小な領域に限られ(4章(3),(4)参照)、測定分解能的にも困難であること、更には供試体の端部拘束の影響などが考えられる。

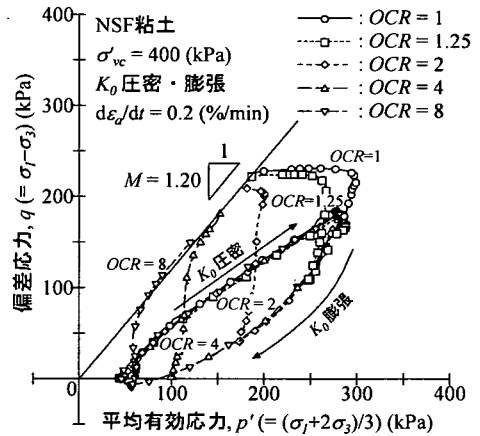


図-15 K_0 圧密・膨張試験時の応力経路

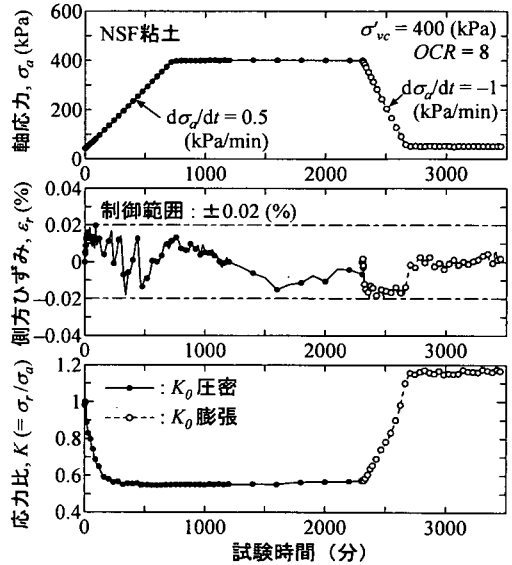


図-16 K_0 圧密・膨張試験時の軸応力、側方ひずみおよび K_0 値の推移

図-13は、排水量と軸変位に基づく側方ひずみの計算値を用いた K_0 圧密(側方ひずみの制御幅 ± 0.02 %)試験結果である。直接測定による側方ひずみの測定値と計算値とはほぼ一致しており、直接測定による側方ひずみを用いて K_0 圧密が可能であることが推定される。

このように、本側方ひずみ測定システムは、微小ひずみ領域での測定結果には問題があるものの、不飽和土の K_0 圧密制御など小〜大ひずみ領域における側方ひずみの直接測定方法として、十分に有用だと考えられる。

(4) ベンダーエレメント試験について

ベンダーエレメント(以下BE)が付属しているキャップおよびペダスタルを用いることにより、せん断弾性波速度測定によるせん断弾性剛性率 G の測定が可能であ

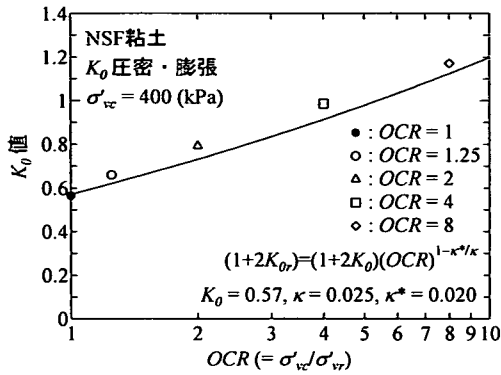


図-17 K_0 値～OCR関係

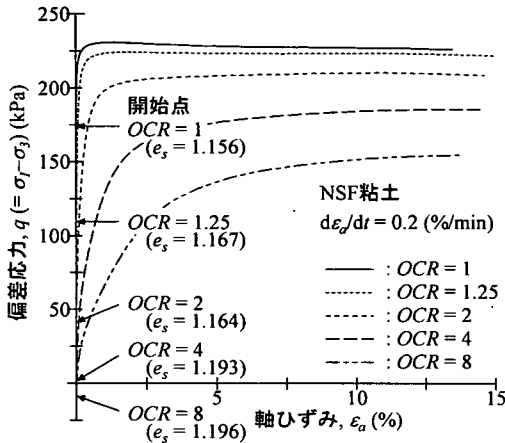


図-18 過圧密比が異なる際の応力～ひずみ関係

る¹⁶⁾。BEに対する電圧波形の設定・送信および送・受信波形の記録は、筆者らが開発したせん断弾性波速度測定システムを用いて実施している¹⁷⁾。なお、BEによるGの測定は三軸本体の制御とは独立している。

図-14は圧密終了時に行われた送・受信波形の一例である。せん断弾性波の伝播距離はBE先端間とし、伝播時間はnear-field effectを考慮した上で、送・受信波の発信・到達開始時を結ぶstart to startとしている¹⁷⁾。

4. 各種試験例および試験結果の考察

(1) K_0 圧密・膨張試験例

図-15は、一連の K_0 圧密非排水せん断試験の有効応力経路である。5つの供試体を共通に $\sigma'_{vc} = 400$ kPaまで圧密し、異なる過圧密比 $OCR (= 1, 1.25, 2, 4, 8)$ まで K_0 膨張させた後に軸ひずみ速度0.2 %/minで圧縮せん断している。一方、図-16は $OCR = 8$ の実験における K_0 圧密・膨張時の軸応力、側方ひずみおよび K_0 値の推移を示している。 K_0 圧密・膨張時の応力経路はほぼ同一曲線上を辿り、試験の再現性が極めて高いことが確認できる。また、正

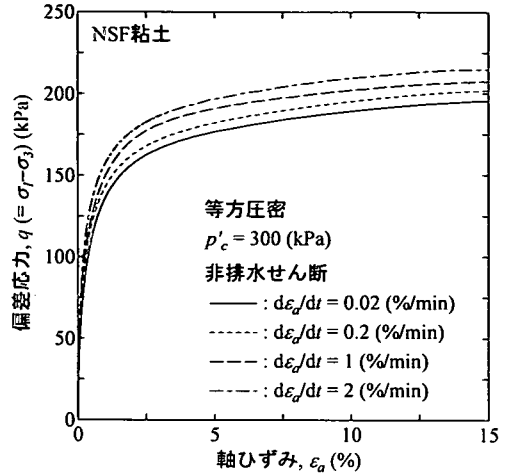


図-19 载荷速度が異なる際の応力～ひずみ関係 (非排水条件下)

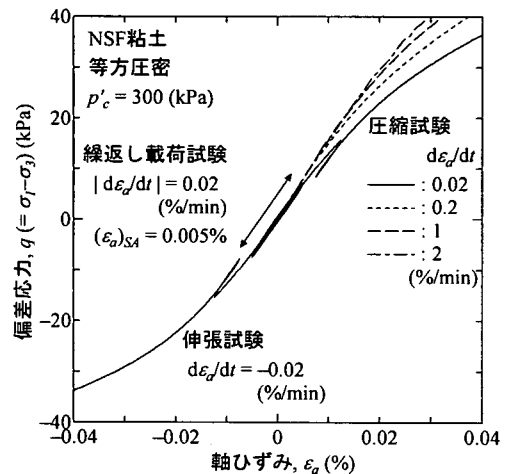


図-20 载荷パターンが異なる際の微小ひずみ領域における応力～ひずみ関係 (非排水条件下)

規圧密時における K_0 は一定であること、 OCR が大きくなるほど K_0 値も大きくなることを確認できる。図-17は K_0 値～ $\ln OCR$ 関係であり、図中には三田地ら¹⁸⁾が提案した関係式を示している。計算値は実測値よりもわずかに小さいが、その傾向を良く表している。

図-18は、非排水せん断の応力～ひずみ関係である。 OCR が大きくなるほど偏差応力の最大値は小さくなり、破壊に至るまでの変形挙動は延性的になることが分かる。なお、図中にはせん断開始時の間隙比 e_s も示しているが、供試体の初期間隙比に若干のバラツキがあるため、必ずしも e_s は OCR の順になっていない。

(2) 軸ひずみ速度の異なる非排水三軸試験例

図-19は、 $p'_c = 300$ kPaまで圧密した後、異なる軸ひずみ速度 ($d\varepsilon_d/dt = 0.02, 0.2, 1.0, 2.0$ %/min) で行われた一連

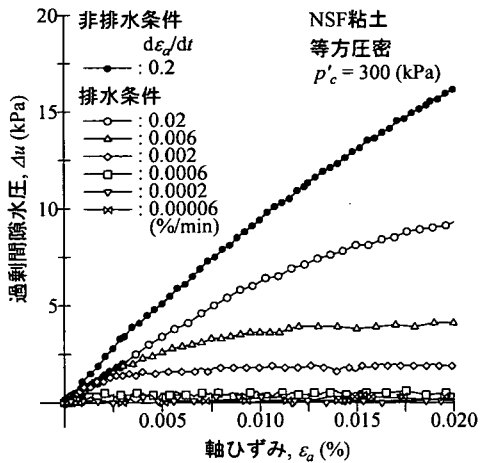


図-21 微小ひずみ領域における $\Delta u \sim \epsilon_a$ 関係 (排水条件下)

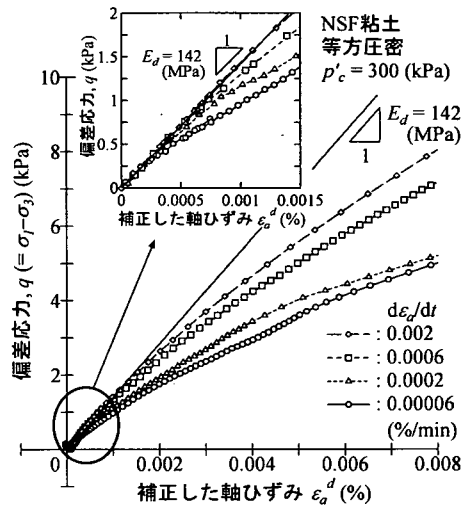


図-23 補正した軸ひずみを用いた応力～ひずみ関係 (排水条件下)

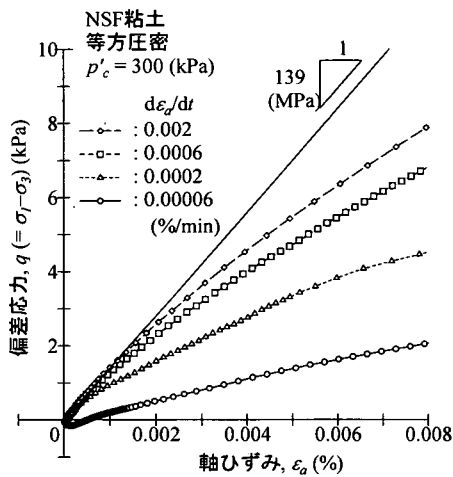


図-22 微小ひずみ領域における応力～ひずみ関係 (排水条件下)

の非排水三軸試験の応力～ひずみ関係の比較である。変形特性は速度依存性を有し、破壊状態に至るまで、載荷速度が大きいほど同一軸ひずみに対する偏差応力は大きいことが分かる。

図-20 は、微小ひずみ領域での応力～ひずみ関係である。図中には同一条件で圧密した後に実施された伸張試験および繰返し載荷試験結果も併せて示している。繰返し載荷試験におけるひずみ領域内ではほぼ弾性的な挙動を示し、また E_d は単調載荷速度や圧縮、伸張、繰返しといった載荷パターンによらないことが分かる。

(3) 軸ひずみ速度の異なる排水三軸試験例

図-21 は、 $p'_c = 300$ kPa まで圧密した供試体群を 4 オーダーの範囲にわたる一定で異なる軸ひずみ速度 ($d\epsilon_a/dt = 0.00006, 0.0002, 0.0006, 0.002, 0.006, 0.02$ %/min) を用いてせん断した試験での過剰間隙水圧～軸ひずみ関係である。いずれの試験においても排水ルートを開放した。0.02 お

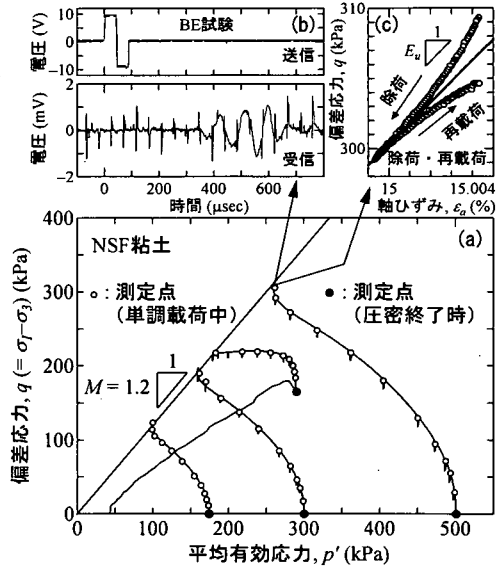


図-24 応力経路図および G, E_d の測定例

よび 0.006 %/min の載荷速度では、明らかに排水条件を満たしていないことが分かる。なお、図中には参考のため非排水条件下における試験結果も示している (図-21 中の●印)。また、排水方向は水平方向 (供試体径 5 cm) である。

図-22 は、排水条件をほぼ満たしている試験での微小ひずみ域での応力～ひずみ関係である。この領域における排水条件下の応力～ひずみ関係はきわめて高い速度依存性を有していることが分かる。また、せん断開始直前の軸ひずみの排水クリープ速度はおおよそ 0.00005 %/min であったためか、軸ひずみ速度 0.00006 %/min の試験時にはせん断初期においてほとんど q の増加が見られない現象が確認された。

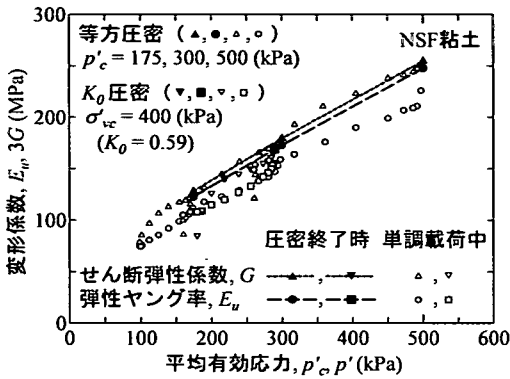


図-25 $E_n 3G \sim p'_c, p'$ 関係

そこで、排水条件下における弾性ヤング率 E_d の算出にあたって、せん断開始直前の軸方向のクリープ変形がせん断中においても等しい速度で進行していると仮定し、その成分を差し引いた軸ひずみ ϵ_d^d を用いて結果を再整理した¹⁹⁾。その結果、図-23に示すように全ての試験においてほぼ共通の E_d が観察された。しかしながら、載荷速度の影響を受けない軸ひずみ (図-23 中の拡大図より 0.00025%程度以下と判断) は、非排水条件下に比べてかなり小さい。これについては、非排水条件下では微小ひずみ領域において平均有効応力、間隙比ともほぼ一定である (図-10 参照) のに対し、排水条件下ではそのどちらも変化し得る状態であることや、クリープの影響も含めて排水条件下の方が速度依存性が大きいことなどが考えられるが、先に説明した仮定の妥当性も含めて、 E_d の評価方法については今後さらに検討する必要があると考えられる。

(4) 微小ひずみ域における各種変形係数の相関

図-24は、所定の圧密応力まで等方 ($p'_c = 175, 300, 500$ kPa) あるいは K_0 圧密 ($\sigma'_v = 400$ kPa) した後に、非排水条件下で単調載荷を行った試験群での有効応力経路の比較である。図-24(a)中に示すように、圧密終了時および単調載荷中の所定の軸ひずみ (0.01, 0.05, 0.1, 0.2, 0.5, 1, 2, 4, 8, 15%) において BE 試験 (図-24(b)) ならびに 0.005% の除荷・再載荷 (図-24(c)) を実施している。

図-25は図-24に示した実験より得られた圧密終了時および単調載荷中の E_u および $3G$ を、これらの変形係数を測定した時点の平均有効応力 p' に対してプロットしたものである。圧密終了時の E_u (図-25中の●, ■印) および G (図-25中の▲, ▼印) は等方、 K_0 といった圧密方法によらず圧密有効応力 p'_c の増加に従い、単調に増加していることが分かる。また、各応力点で測定された E_u と $3G$ は、ほぼ等しいことが分かる。なお、式(5)は等方弾性体仮定ならびに非排水条件下におけるポアソン比 ν_u を 0.5 と仮定した場合の E_u と G の関係式である。

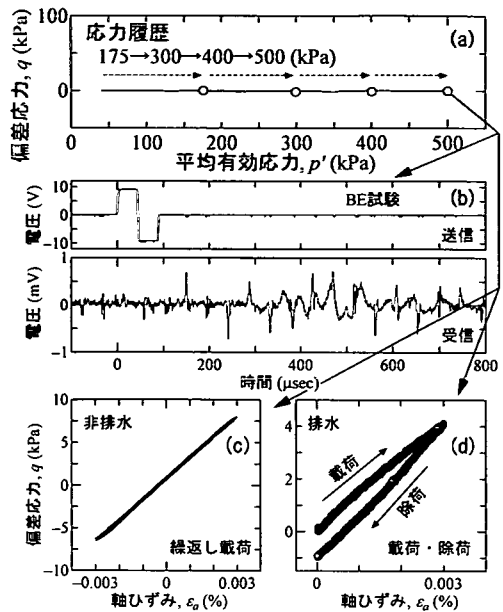


図-26 応力経路図および G, E_u, E_d の測定例

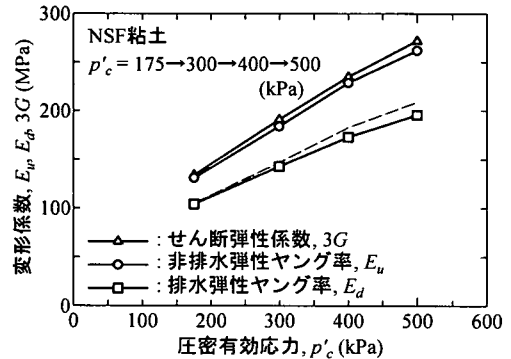


図-27 $G, E_u, E_d \sim p'_c$ 関係

$$E_u = 2(1 + \nu_u) \cdot G = 3G \quad (5)$$

K_0 圧密後の E_u と $3G$ においても両者の値がほぼ等しいことを考えると、式(5)に用いた仮定の妥当性が分かる。

単調載荷中の E_u (図-25中の○, □印) および G (図-25中の△, ▼印) は、 p' の減少とともに単調に減少している。中でも、単調載荷中に測定した $3G$ は、圧密終了時における E_u および $3G$ の関係とほぼ同様であることが分かる。一方、 E_u については同応力点における $3G$ よりも若干小さく測定されている。これについては、図-24(c)に示した除荷・再載荷時の応力～ひずみ関係による E_u 測定時のひずみレベルが、BE 試験による G 測定時のひずみレベルよりも若干大きいことが原因であろうと推測される。いずれにしても、圧密終了時および単調載荷中を問わず、両変形係数が p' に対してほぼ一義的な関係を示すことが分かった。

図-26は1つの供試体に対して段階的に等方圧密応力

を増加 ($p'_c = 175, 300, 400, 500 \text{ kPa}$) させた際の有効応力経路と、その各応力段階 (図-26 (a) 中の○印) において G, E_u, E_d を測定した際の例を示したものである。変形係数の測定については G, E_u, E_d の順で行い、 G は BE 試験 (図-26 (b)), E_u は片振幅軸ひずみ 0.003% 、繰返し回数 3 回での非排水繰返し載荷試験 (図-26 (c)), E_d は 0.003% での排水条件下における載荷・除荷 (図-26 (d)) によって測定した。圧密時における排水クリープの影響を统一的に解釈するため、各応力段階において所定の圧密応力に到達後、一定時間の排水クリープを許した後に各変形係数の測定を行った。また、載荷速度については、 $0.0006 \%/min$ とした。

図-27 は、 $3G, E_u$ および E_d の比較である。これら全ての変形係数は p'_c の増加にしたがって単調に増加している。また、図-25 と同様に、各 p'_c における $3G$ と E_u の値はほぼ等しい。式(6)は式(5)と同様に等方弾性体ならびに $\nu_u = 0.5$ と仮定した際の E_u と E_d の関係式である。

$$E_d = \frac{1+\nu_d}{1+\nu_u} \cdot E_u = \frac{2(1+\nu_d)}{3} \cdot E_u \quad (6)$$

図中の破線は式(6)において $\nu_d = 0.2$ と仮定し、 E_u の測定値によって算出した E_d の計算値である。 $p'_c = 175, 300 \text{ kPa}$ における E_d の測定値と計算値はほぼ等しく、 E_u および E_d の測定値から計算される ν_d はおよそ 0.2 程度である。この値は微小ひずみにおける砂質土の ν_d^{20} とほぼ等しい。

今後、上記のようなポアソン比の評価方法だけでなく、前章に示したような直接測定による方法についてもさらに検討し、室内試験結果に基づくポアソン比の評価方法の確立を目指したいと考えている。

5. まとめ

【試験機の性能・特徴について】

- 1) デジタルサーボモーターを用いることにより、極めて高分解能 (10^{-7} mm 程度) な軸変位の制御・計測が可能となり、試験機・荷重計の伸縮が小さい場合、変位計無しに微小ひずみから破壊に至るまでの広範囲なひずみレベルにおける変形挙動の把握が可能となった。
- 2) 本試験機のような変位制御型三軸試験装置においても、微小変位を載荷・除荷することにより、十分に正確な応力制御が可能であることが確認された。
- 3) モーターの回転速度の設定ならびにモーター制御のソフト面での工夫により、極めて広範囲な速度による載荷試験が可能となった。本文では $2.0 \%/min \sim 0.00006 \%/min$ (供試体高さ: 100 mm) での非排水・排水条件下での載荷試験例を示した。

【試験方法について】

- 1) フラット型のダイアフラムを用いた高感度小型圧力計の設置ならびに二重負圧法の導入による B 値の向上により、微小ひずみ領域におけるより正確な間隙水圧測定が可能となった。
- 2) 三軸セル内を水没させ、空圧から水圧に転換する境界を供試体から遠ざけることにより、 10000 分を越える試験時間においてもメンブレン内への空気の進入による悪影響が無いことを確認した。
- 3) 非接触型変位計のターゲットを供試体に差し込む方式により、微小ひずみ～大ひずみ領域においては供試体の側方変形を把握することが可能となった。
- 4) 本システムを開発し、ハード・ソフト両面での改良を行った結果、 K_0 圧密、単調圧縮・伸張試験 (強度試験)、繰返し変形試験等の、近年に相次いで標準化された各種の三軸試験が本装置一台で実施可能となった。

【微小ひずみでの粘性土の変形特性について】

- 1) 非排水条件下において、粘性土が弾性的な挙動を示す領域での弾性ヤング率 E_u は、載荷速度や圧縮と伸張、単調と繰返しといった載荷方法によらず一定である。
- 2) 等方、 K_0 といった圧密方法によらず、 E_u と $3G$ はほぼ等しく、繰返し粘土の微小ひずみ領域における両者の相関に関して等方弾性体および $\nu_u = 0.5$ とする仮定はほぼ妥当であることが確認された。
- 3) 等方圧密過程における E_u, E_d, G はそれぞれ応力依存性を有しており、 p' に対して一義的な関係を示した。また非排水せん断中の E_u と G はこれらの関係と同様であり、 p' に対して強く依存していることが分かった。

謝辞：本研究における実験に関して、当時北海道大学大学院工学研究科社会基盤専攻の学生であった古道知広氏 (現北海道旅客鉄道株式会社) ならびに同大学院生の佐藤信吾氏に多大な協力を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：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 0542-2000), 土質試験の方法と解説 第一回改訂版, 第7編, 第7章, pp.658-702, 2000.
- 2) 地盤工学会編：土の K_0 圧密非排水圧縮 ($K_0\overline{CUC}$) 試験方法 (JGS 0525-2000), 土質試験の方法と解説 第一回改訂版, 第7編, 第3章, pp.501-524, 2000.
- 3) 地盤工学会：土の K_0 圧密非排水伸張 ($K_0\overline{CUE}$) 試験方法 (JGS 0526-2000), 土質試験の方法と解説 第一回改訂版, 第7編, 第3章, pp.501-524, 2000.

- 4) 例えば, 龍岡文夫: 地盤材料の小ひずみでの非線形性と地盤変形問題への適用 1. 講座を始めるにあたって, 土と基礎, Vol.45, No.1, pp.61-63, 1997.
- 5) 澁谷啓, 三田地利之, 細見明彦, 小澤裕: 高性能デジタルサーボモーターを用いた多機能三軸試験装置, 地質と調査, No.1, pp.48-57, 1996.
- 6) Shibuya, S. and Mitachi, T.: Development of a fully digitized triaxial apparatus for testing soils and soft rocks, *Geotechnical Engineering Journal*, Vol.28, No.2, pp.183-207, 1997.
- 7) Tatsuoka, F.: Some recent developments in triaxial testing system for cohesionless soils, *Keynote Lecture, ASTM Special Technical Publication No.977*, pp.7-67, 1988.
- 8) Tatsuoka, F. and Kohata, Y.: Stiffness of hard soils and soft rocks in engineering applications, *Keynote Lecture, Proc. of Int. Symposium on Pre-failure Deformation of Geomaterials (Shibuya, e., Mitachi, T. and Miura, S eds)*, Balkema, Vol.2, pp.947-1063, 1995.
- 9) Shibuya, S., Mitachi, T., Tanaka, H., Kawaguchi, T. and Lee, I-M.: Measurement and application of quasi-elastic properties in geotechnical site characterization, Theme Lecture for Plenary Session 1, *Proc. of 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Balkema, Vol.2, pp.639-710, 2002.
- 10) Oda, Y. and Mitachi, T.: Stress relaxation characteristics of saturated clays, *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.69-80, 1988.
- 11) 浅岡顕, 金田一広, 豊原篤史: 構造を有する粘土の排水・非排水試験の一考察, 第 36 回地盤工学研究発表会概要集, Vol.1, pp.259-260, 2001.
- 12) 地盤工学会編: 土の繰返し非排水三軸試験方法 (JGS 0541-2000), 土質試験の方法と解説 第一回改訂版, 第 7 編, 第 6 章, pp.635-657, 2000.
- 13) Toki, S., Shibuya, S. and Yasmashita, S.: Standardization of laboratory test methods to determine the cyclic deformation properties of geomaterials in Japan, *Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Vol.2, pp.741-784, 1995.
- 14) 例えば, High, D.W., Gens, A. and Symes, M.J.: The development of a new hollow cylinder apparatus for investigating the effects of principal stress rotation in soils, *Geotechnique*, Vol.33, No.4, pp.355-384, 1983.
- 15) 三田地利之, 橋詰哲治, 福田文彦, 工藤豊: 自動制御による粘性土の三軸 K0 圧密試験方法について, 土質工学会北海道支部技術報告集, 第 35 号, pp.68-75, 1995.
- 16) 黄聖春, 三田地利之, 澁谷啓, 館市弘達: 微小ひずみレベルから破壊に至るまでの乱さない粘土の変形と非排水強度特性, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.305-319, 1998.
- 17) 川口貴之, 三田地利之, 澁谷啓, 佐野信房: 室内ベンダーエレメント試験によるせん断弾性係数 G の評価, 土木学会論文集, No.694/III-57, pp.195-207, 2001.
- 18) Mitachi, T. and Kitago, S.: Change in undrained shear strength characteristics of saturated remolded clay due to swelling, *Soils and Foundations*, Vol.16, No.1, pp.45-58, 1976.
- 19) 古道知広, 川口貴之, 三田地利之, 澁谷啓, 佐藤信吾: 三軸試験による粘性土の排水弾性ヤング率の測定とその評価, 第 36 回地盤工学研究発表会概要集, Vol.1, pp.319-320, 2001.
- 20) Hoque, E. Siddiquee, M.S.A., Kohata, Y. and Tatsuoka, F.: Cross-anisotropic elasticity of sands by large triaxial tests measuring local strains, 第 29 回地盤工学研究発表会, pp.693-694, 1994.

(2001. 8. 20 受付)

DEVELOPMENT OF AN ELABORATE TRIAXIAL TESTING SYSTEM FOR DEFORMATION OF CLAY

Takayuki KAWAGUCHI, Toshiyuki MITACHI, Satoru SHIBUYA and Yoshifusa SANŌ

An elaborate triaxial testing system has been newly developed to investigate deformation of clay over a wide strain range in the laboratory. In this system, a digital servo-motor having a high-resolution is driven by a personal-computer by which the axial deformation as well as the axial stress acting on the clay specimen can be altered with time over a wide range of strain rate. Since the control of confining pressure as well as the data acquisition is also fully automated, the capability of this triaxial testing system is grossly enhanced by enabling us to perform a wide range of tests such as K_0 -consolidation, monotonic compression/extension tests (strength tests), cyclic deformation test etc in a single apparatus. In this paper, the hardware of this system is in detail described, the capability of this system is also demonstrated by showing the results of various kinds of tests described above. In addition, the performance can be evaluated in an attempt to measure elastic Young's modulus of clay at very small strains by examining the effects of drainage conditions, stress history and strain rate.