

K₀ 圧密三軸圧縮・伸張強度特性に及ぼす試料の乱れの影響

Effect of sample disturbance on strength properties of clay measured by precision triaxial compression apparatus

正垣 孝晴*・丸山 仁和**・白川 修治**・茂籠 勇人*・木暮 敬二*

Takaharu Shogaki, Yoshikazu Maruyama, Syuji Shirakawa, Hayato Moro and Keiji Kogure

A precision triaxial compression apparatus using small size specimens was newly developed, and the strength properties of undisturbed Mito clay and its remolded clay are examined through CK₀CU and CK₀EU tests using this apparatus. The precision triaxial compression apparatus was able to evaluate the coefficient of earth pressure at rest (K_0) and the strength properties of triaxial compression and extension. The effect of sample disturbance on K_0 , effective stress path and rate of strength increase were small in the normal consolidation region.

Keywords: K_0 , sample disturbance, strength property, effective stress path, rate of strength increase, triaxial test

1. はじめに

自然堆積土の強度特性の解明と設計への適用を目的として、直径 d 15mm、高さ h 35mm の寸法の S 供試体を用いて、静止土圧係数 K_0 を制御した三軸圧縮・伸張強度特性が測定できる三軸圧縮試験機を新しく開発した¹⁾。本稿では乱さない水戸粘土とその練り返し土に対する一連の試験から、 K_0 圧密後の三軸圧縮・伸張強度特性に及ぼす試料の乱れの影響が定量的に検討される。

新しく開発した三軸圧縮試験機は、S 供試体の K_0 値や三軸圧縮・伸張強度特性を適正に評価できることが分かった。また、 K_0 値、有効応力挙動、強度増加率 c_u/p に及ぼす試料の乱れの影響は、特に過圧密領域で大きく、正規圧密領域で小さいことが分かった。

S 供試体は、我が国で多用されている内径 75mm の固定ピストン式シリンダー・チューブ・サンプラーを用いて採取した d 75mm、 h 50mm の試料片から 10 個の供試体が作成できる。したがって、新しく開発した三軸試験機によって、各種応力・ひずみ条件下の三軸圧縮強度特性が測定できるため、海洋構造物や人工島等の建設の安定問題に関する調査・設計精度の向上に直接的な寄与が期待される。

2. 小型精密三軸圧縮試験機の概要と特徴

図-1 に、新しく開発した小型精密三軸圧縮試験機の概要を示す。供試体寸法が d 15mm、 h 35mm と小さいため、内セルと荷重シリンダーの隙間の断面積は、内セル上端部で 1.07cm^2 と小さくしている。これによって微量な差圧変化量も測定できる。差圧計と排水

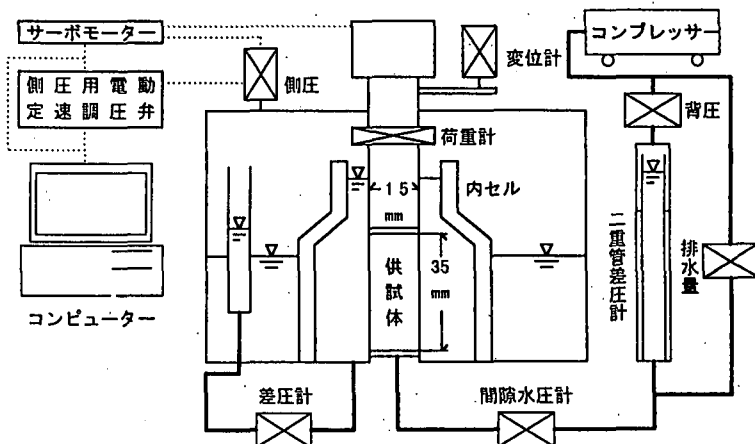


図-1 小型精密三軸試験機の概要

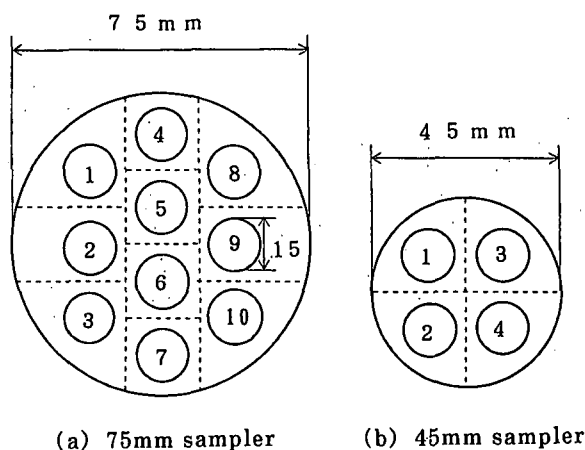


図-2 供試体の平面位置

* 正会員 防衛大学校 土木教室 (239 横須賀市走水 1-10-20)

** 学生員 防衛大学校理工学研究科

量計の最小読みはそれぞれ 0.0008ml, 0.0004ml であり、 d 15mm の 0.01% 程度の精度で側方変位を制御できる。

供試体の圧密は等方と K_0 圧密が行えるが、後者は軸圧 σ'_v を一定の速度で増加させ、側方変位をモニターしながら側圧 σ'_h を増減させる方法（両振り）と側圧 σ'_h を増加させる方法（片振り）の選択が可能である。 σ'_h は側圧用電動定速調圧弁とサーボモーターを介してコンピューターによって制御される。

伸張試験は、 σ'_v 一定で σ'_h を減少させる方法と σ'_h 一定で σ'_v を増加させる 2 つの方法が採用できる機能を有している。

小型精密三軸圧縮試験機の最大の特徴は、使用する供試体寸法が、 d 15mm、 h 35mm と小さいことである。図-2 は、内径 75mm の固定ピストン式ポンプ（75mmポンプ）と内径 45mm の小径倍圧型水圧ピストンポンプ（45mmポンプ）²⁾ によって採取した試料から成形する S 供試体の平面位置を示している。図-2 に示すように、75mmポンプから得た d 75mm、 h 100mm の試料片からは 20 個の S 供試体を、45mmポンプから得た d 45mm、 h 100mm の試料片からは 8 個の S 供試体を作成できる。

図-2 (a) の供試体 5、6 と周辺部の供試体の強度・変形特性に有為差がないことが分かっている³⁾。このことは、地盤へのチューブの押し込みとチューブからの試料の押し出しに起因する試料の乱れは、図-2 (a) に示す供試体位置に及んでいないことを意味する。また、図-2 (b) に示す供試体位置にも同様な乱れは及んでいないことを確認している²⁾。このことは、同じ指數的性質を持つ自然堆積土を用いた一連の三軸試験が可能であることを示している。特に、試料採取の困難な洪積粘土のような硬質土の三軸強度特性を測定する場合には小型精密三軸圧縮試験機は有効である。

3. 供試土と実験方法

供試土は、75mmポンプによって水戸市の沖積低地から採取した乱さない沖積海成粘性土である。その指數的性質を表-1 に示す。不攪乱試料の供試体の成形は、トリマーを用いた通常のトリミング法⁴⁾ によった。また、練り返し土は、含水比の変化がないようにビニール袋の中で十分に練り返した。その後、 d 15mm の円柱状に形を整え、S 供試体専用のマイターボックス⁴⁾ で h 35mm になるように両端を切断して成形した。

K_0 値の測定および K_0 圧密後の圧縮・伸張試験は、JGS T526-1995⁵⁾ に基づいて行った。供試体側面のドレーン・ペーパーは、幅約 2mm の伸縮性のあるもので、供

試体側面に鉛直方向に等間隔で 3 個所に設置した。ドレーン・ペーパーの被覆面積は供試体側面積の約 13% である。 d 35mm、 h 80mm の標準寸法の供試体のそれは約 50% であるが、その 1/4 程度とした。 d 15mm と供試体径が小さいため、13% 程度の被覆面積で十分な排水が行えると判断した。伸張試験後の供試体の断面がドレーンの位置に関係なく円形であったことから、この被覆面積は妥当であったと考えている。

供試体の飽和は、供試体と脱気水槽の水頭差に加え真空ポンプを用いた方法によった。等方圧密は、圧密圧力 10kPa で不攪乱試料の場合は約 40 分、練り返し土では約 120 分を行った。バック・レスチャーは、1 段階 50kPa で 200kPa まで載荷し、 B 値が 0.98 以上であることを確認して K_0 圧密に移行した。

K_0 圧密時のひずみ速度 $\dot{\epsilon}_r$ は、供試体の初期高さに対して 0.005%/min で行った。また、せん断時の $\dot{\epsilon}$ は、圧縮・伸張試験ともに K_0 圧密後の供試体高さに対して 0.05%/min とした。伸張試験は σ'_v 一定で σ'_h を減少させた。使用したメンブレンの厚さは 0.1mm であり、メンブレン張力の補正は福島ら⁶⁾ が提案している方法によった。

4. K_0 値に及ぼす試料の乱れの影響

小田・三田地⁷⁾ は、 d 50mm、 h 50mm の寸法の供試体を用いて両振りと片振りによる側圧の制御方法が K_0 値に及ぼす影響を検討している。それによると、4000min の測定時間内において、両制御方法で得た K_0 値に有為差がないことを報告している。本研究では、両振り試験を採用した。側方変位の増加、減少の両方を制御できるのが理由である。

図-3 は、両振り試験による圧密中の K_0 値を σ'_a/σ'_{v0} 値に対してプロットしたものである。ここで、 σ'_a は有効軸応力、 σ'_{v0} は有効土被り圧である。 σ'_a/σ'_{v0} 値は 1, 2, 3, 4 の 4 種類に設定した。 K_0 値は圧密の進行によって 1.0 から減少し、練り返し試料と不攪乱試料ともに $\sigma'_a/\sigma'_{v0} \approx 2$ で、約 0.4 の一定値に収束する。不攪乱土の K_0 値は、 $\sigma'_a/\sigma'_{v0} < 2$ の領域で 0.4 より小さくなっている。この領域で、応力解放や試料の乱れに起因して供試体が過圧密の状態にあるのが理由である。

図-4 は、不攪乱土 ($\sigma'_a/\sigma'_{v0}=4$) の K_0 圧密中の側方ひずみ ϵ_r を σ'_a/σ'_{v0} 値に対して整理したもの

表-1 供試土の指數的特性 ($z = - (10 \sim 10.8)$ m)

σ'_{v0} (kPa)	σ'_p (kPa)	w_n (%)	w_L (%)	I_p (%)	Silt (%)	Clay (%)
86	174	65	72	39	40	60

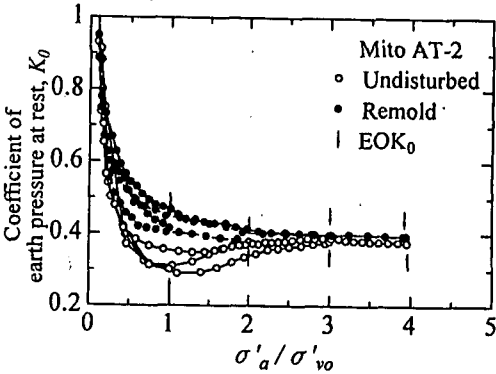


図-3 K_0 と σ'_a/σ'_{v0} の関係

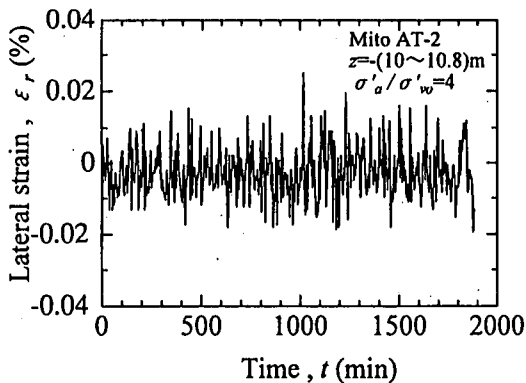


図-4 ε_r と σ'_a/σ'_{vo} の関係

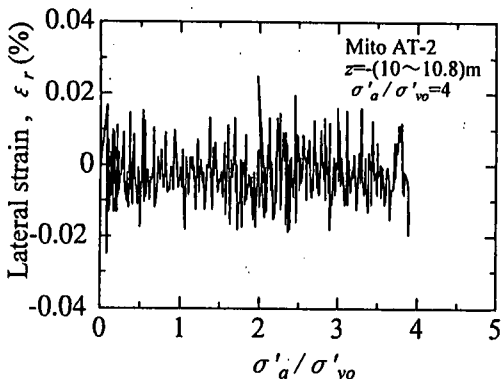


図-5 ε_r と t の関係

である。同様に図-5は時間 t に対して整理している。 ε_r は初期の供試体直径に対する側方変位量の百分率で定義している。側方ひずみは、供試体の体積変化量と軸方向変位量から式(1)によって計算した。

$$\varepsilon_r = \frac{(\Delta V - A_0 \times \Delta H)}{2V_0} \times 100 \quad \dots (1)$$

ここで、 V_0 : 初期供試体の体積、 ΔV : 供試体の体積変化量、 A_0 : 初期供試体の断面積、 ΔH : 軸方向変位量、である。

ε_r は σ'_a/σ'_{vo} や t に関係なく概ね0.01%以下で変動している。JGS T-526 1995⁵⁾は ε_r の目安として0.025%を提示している。図-4、5は、 ε_r が高精度で制御できたことを示しており図-3に示す K_0 値は適正に測定されていると判断される。

5. 強度特性に及ぼす試料の乱れの影響

図-6は、不攪乱試料の有効応力経路である。 $\sigma'_a/\sigma'_{vo}=1$ の供試体は、圧縮・伸張試験ともに、過圧密土に特有の挙動を示しているが、他は正規圧密粘土として相似的な有効応力の形状を示しており、これらは図-3で述べた結果と符合している。これらの有効応力経路は圧縮・伸張試験が適正に行われたことを示している。破壊包絡線は、主応力比が最大値 $(\sigma'_a/\sigma'_r)_{\max}$ の点を原点を通るように最小二乗法によって直線近似した。破壊包絡線の勾配から、圧縮側の有効内部摩擦角 $\phi' = 34.9^\circ$ 、伸張側の $\phi' = 26.4^\circ$

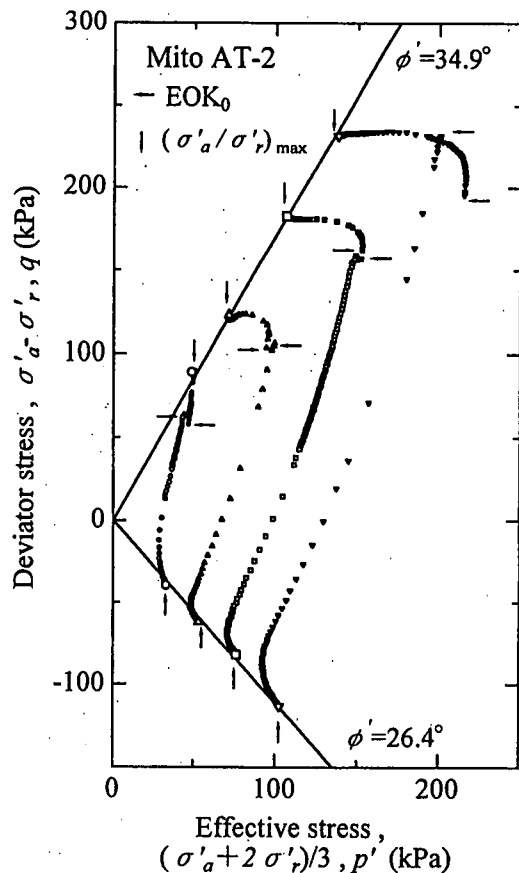


図-6 有効応力経路 (不攪乱試料)

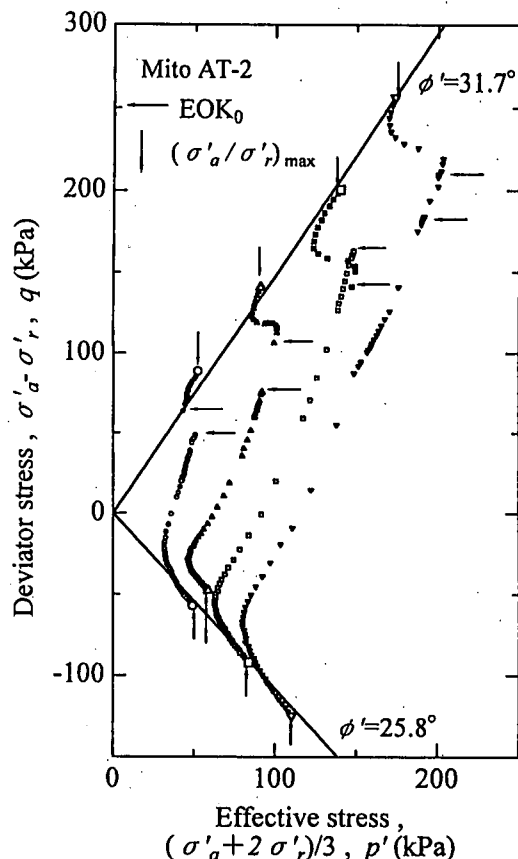


図-7 有効応力経路 (練り返し土)

を得る。

図-7は、同様に繰り返し土の有効応力経路である。 $\sigma'_a/\sigma'_{vo}=1$ の圧縮側の有効応力経路が過圧密的な挙動を示すが、他は圧縮・伸張試験ともに相似的な有効応力の形状を示している。破壊包絡線の勾配から、圧縮側の $\phi'=31.7^\circ$ 、伸張側の $\phi'=25.8^\circ$ を得る。繰り返し土の ϕ' は、圧縮・伸張試験ともに不攪乱試料のそれより若干小さいが、工学的な差は小さいと判断される。

図-8は、 K_0 値と ϕ' の関係である。中瀬らが、 $d35\text{mm}$ 、 $h80\text{mm}$ の寸法の供試体を用いて Imperial college 型の三軸圧縮試験機を用いて CKoU 条件で得た我が国の粘土に対する結果⁸⁾と水戸粘土に対する上述の不攪乱試料の結果に加え、Jaky⁹⁾が誘導した式($K_0=1-\sin \phi'$)を実線で示している。水戸粘土の K_0 と ϕ' の関係は、我が国の粘土に対する中瀬らの結果と同じ傾向であり、Jaky⁹⁾が示した関係でよく説明できることが分かる。

図-9は、主応力差 $\sigma'_a-\sigma'_r$ と軸ひずみ ϵ_a の関係である。主応力差の最大値 $(\sigma'_a-\sigma'_r)_{max}$ を破壊と定義し、その時の ϵ_a を破壊ひずみ ϵ_f とする。不攪乱土の ϵ_f は、 $\sigma'_a/\sigma'_{vo}=1,2,3,4$ の圧縮側で、それぞれ5.9%、1.8%、1.7%、0.9%、伸張側で9.5%、15.0%、13.9%、5.3%である。また、繰り返し土のそれは、ひずみ硬化に起因して圧縮側で総て15%、伸張側でそれぞれ12.2%、6.8%、8.7%、11.1%である。 $(\sigma'_a-\sigma'_r)_{max}$ 値は、圧縮・伸張試験ともに繰り返し土の値が大きい。

図-10は、図-9で示した圧縮試験の供試体に対する u と ϵ_a の関係である。ここで、 u は間隙水圧であり供試体下端で測定した。不攪乱試料、繰り返し土ともに σ'_a/σ'_{vo} が大きくなるにしたがい u 値は大きくなっている。不攪乱試料の u 値は ϵ_a の増大とともに増加している。繰り返し土の u 値はせん断途中で増加から減少に転じている。これは、後に示す

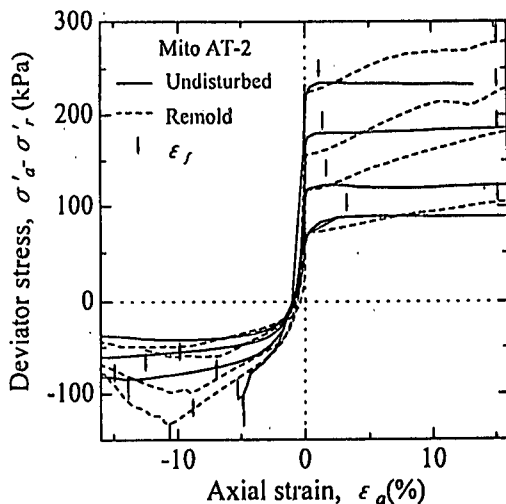


図-9 $\sigma'_a - \sigma'_r$ と ϵ_a の関係

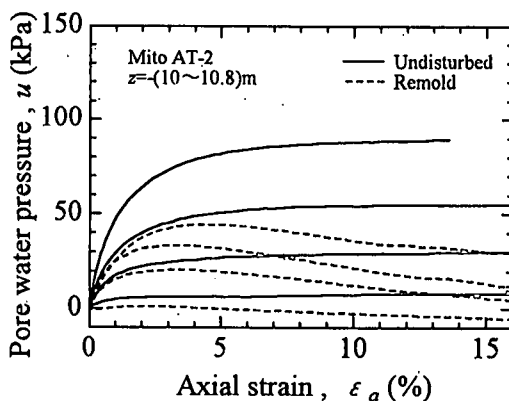


図-10 u と ϵ_a の関係

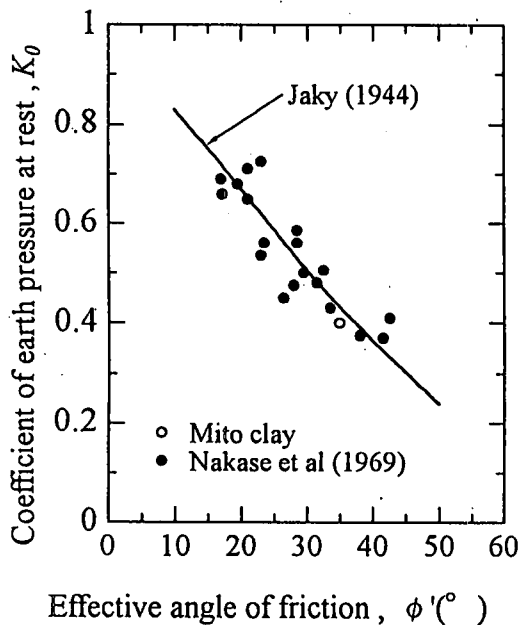


図-8 K_0 と ϕ' の関係

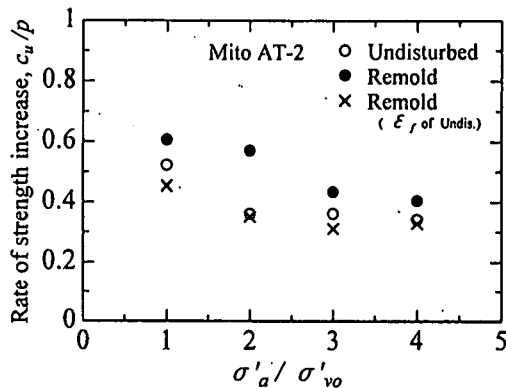


図-11 c_u/p と σ'_a/σ'_{vo} の関係

図-12で述べるように、繰り返し土の間隙比が不攪乱試料のそれより小さく、せん断途中で正のゲイリヤンシーが働くためである。

図-11は、 c_u/p を σ'_a/σ'_{vo} 値に対して7°ロットしたものである。ここで、 c_u は $(\sigma'_a-\sigma'_r)_{max}/2$ 、 p は σ'_r としている。不攪乱試料の c_u/p 値は、 $\sigma'_a/\sigma'_{vo} \approx 2$ で一定値となり約0.36である。また、繰り返し土の c_u/p 値は $\sigma'_a/\sigma'_{vo} \approx 3$ で約0.4の一定値と

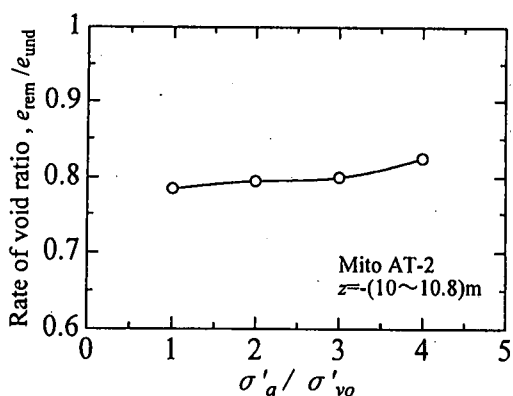


図-12 e_{rem}/e_{und} と σ'_a/σ'_{vo} の関係

なる。練り返し土の c_u/p 値が不攪乱試料のそれより大きいのは、図-9 で見たように練り返し土の c_u が不攪乱試料のそれより大きくなっているためである。図-11 には、×印の記号で示す不攪乱試料の ϵ_r に対応する ϵ_a で求めた練り返し土の c_u/p 値を併せてプロットしている。この c_u/p 値は、 $\sigma'_a/\sigma'_{vo} \approx 2$ で約 0.32 の一定値となり、不攪乱試料のそれより僅かに小さい。また、練り返し土と不攪乱試料の c_u/p 値の差は $\sigma'_a/\sigma'_{vo} > 2$ の正規圧密領域で小さくなっており、試料の乱れの影響は正規圧密領域で小さいことが分かる。

図-12 は、 σ'_a/σ'_{vo} 値に対する e_{rem}/e_{und} をプロットしたものである。ここで、 e_{und} は、不攪乱試料の K_0 圧密後の e 値であり、 e_{rem} は練り返し土の K_0 圧密後の e 値である。練り返し土の e 値は、不攪乱試料の e 値より約 20% 小さいが、この値は σ'_a/σ'_{vo} が小さくなると小さくなる傾向にある。図-9 と図-11 で、練り返し土の $\sigma'_a - \sigma'_r$ と c_u/p が不攪乱試料のそれより大きいのは、練り返し土の e 値が不攪乱試料のそれより小さいのが理由である。

5. おわりに

水戸粘土の試料の乱れに起因する K_0 条件下の圧縮・伸張強度特性が小型精密三軸試験機によって調べられた。主要な結論をまとめると以下のようである。

- 1) K_0 圧密時の側方ひずみは、 d 15mm に対して 0.01% 程度の精度で制御できた。この値は、地盤工学会の基準 (JGS T-526 1995) が提示している 0.025% の半分以下である。小型精密三軸試験機は、高精度の K_0 圧密が行えることが分かった。

- 2) K_0 値は $\sigma'_a/\sigma'_{vo} > 2$ 以上の正規圧密領域で不攪乱試料、練り返し土ともに約 0.4 の値であり、両者に有為差はなかった。
- 3) 圧縮・伸張試験時の有効応力経路は、不攪乱試料、練り返し土ともに、 $\sigma'_a/\sigma'_{vo} = 2 \sim 4$ の正規圧密領域で相似的な関係を示し新しく開発した小型精密三軸圧縮試験機は適正な試験が行えることが分かった。また、破壊包絡線から得た不攪乱試料の ϕ' は練り返し土のそれより圧縮側で約 3° 、伸張側で 0.6° 大きい、工学的な差は小さい。
- 4) K_0 と ϕ' の関係は、中瀬らが行った我が国の港湾地域の粘土に対する実験結果と同じ傾向であり、Jaky の示した式でよく説明できた。
- 5) 正規圧密領域の c_u/p 値は、不攪乱試料で 0.36、練り返し土で 0.4 であった。練り返し土の c_u/p 値が大きくなるのは、 K_0 圧密後の間隙比が練り返し土で 20% 程度小さくなるためである。

参考文献

- 1) 正垣ら：小型精密三軸試験機、第 24 回土木学会関東支部技術研究発表会、pp.354~355、1997。
- 2) 正垣・渡辺：小径倍圧型水圧ピストンサンプラーと試料の品質、土と基礎、Vol.44、No.11、pp.13~16、1996。
- 3) 正垣ら：固定ピストン式サンプラーで採取したチューブ内の土質データの統計的性質、基礎構造物の限界状態設計法に関するシンポジウム論文集、pp.193~200、1995。
- 4) 正垣：携帯型一軸圧縮試験機とその適用、第 40 回地盤工学シンポジウム論文集、pp.287~294、1995。
- 5) 地盤工学会、土の K_0 圧密非排水三軸圧縮試験方法 (JGS T-526 1995)、土と基礎、Vol.43、No.9、pp.82-86、1995。
- 6) Fukushima, S. and Tatsuoka, F.: Strength and deformation characteristics of saturated sand at extremely low pressures, Soils and Foundations, Vol.24, No.4, pp.30-48, 1984。
- 7) 小田・三田地：飽和粘性土の三軸 K_0 圧密試験方法について、土木学会論文集、No.448、/III-19、pp.45~52、1992。
- 8) 中瀬ら：圧密および膨張による飽和粘性土のせん断強度の変化、「港湾技術研究所報告」、Vol.8、No.4、pp.103~143、1969。
- 9) Jaky: Talajmechanika (Soil Mechanics in Hungarian), "J. Hungarian Arch. & Enos., Budapest, pp.355-358, 1944。