

平面ひずみ状態における粘性土のせん断特性について

池 浦 勲*

On the Shear Characteristics of Cohesive Soils in Plane Strain Tests

Isao IKEURA

要 旨

飽和粘性土の K_0 圧密平面ひずみ非排水試験を行なって応力-ひずみ特性を、等方圧密軸対称試験によるものと比較した。

Synopsis

The stress-strain characteristics of saturated clay in K_0 -consolidated plane strain undrained test are compared with those in isotropically consolidated axial symmetric shear test.

1. ま え が き

自然地盤の大部分は自重や地下水位の上下などによって、鉛直方向のみに一軸的に圧密され、それに伴って土の構造に異方性が生じていると考えられる。そのような地盤に盛土などのような長大構造物が築造された場合、長手方向に変位が許されないために地盤は平面変形状態となり、応力は 3 主応力が異なる状態 ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$) となる。従って長大構造物の安定を検討するためには、水平方向に変位を許さないように圧密 (K_0 圧密) した後に、平面ひずみ状態で応力を加えて、せん断強度や応力-ひずみの関係を知る必要がある。

既報¹⁾においては K_0 圧密が軸対称せん断挙動に及ぼす影響について報告したが、今回新たに設置された多能三軸変形装置によって、 K_0 圧密平面ひずみせん断試験を行なったので、少数例ながら結果を報告する。

2. 実 験 方 法

2-1 試料

実験に用いた試料は早来町安平から採取した自

然粘土で比重 $G_s = 2.54$ 、液性限界 $w_L = 59\%$ 、塑性指数 $I_p = 29\%$ である。この試料をソイルミキサーで泥水状にし、真空圧で直径 160 mm の大型圧密容器に引込み 80 kPa の鉛直応力で 1 週間予圧密を行なう。その後 $60 \times 44 \times 100 \text{ mm}$ の角柱試体を切り出した。

2-2 装置の概要

図-1 に今回の装置の概要を示す。角柱供試体の一對の側面に剛板をボルトで密着させて以後の変位を拘束しつつその側面への応力 σ_y は剛板内のゲイアフラム室の水圧で測定する。鉛直応力 σ_z は、圧密時はベロフラムシリンダー内の水圧を調圧弁で増減することにより、せん断時は供試体を多段変速モーターで上昇させることにより与えられる。拘束板のついていない側面はゴム膜を介して三軸室内の水と接しており、その面への応力 σ_x は三軸室内の水圧で測定される。今回の試験では供試体への 3 主応力は $\sigma_1 = \sigma_z$, $\sigma_2 = \sigma_y$, $\sigma_3 = \sigma_x$ ($\sigma_1 > \sigma_2 \geq \sigma_3$) となる。間ゲキ水圧 u は供試体下端部中心部 10 mm の部分のものを測定した。圧密中の排水は側面に二重巻きした切込み入りのろ紙を通して供試体上端のキャップからなされ、その量は差圧変換器で測定した。端面摩擦の影響を軽減するために、供試体上下面にはシリコングリー

* 助教授 土木工学科

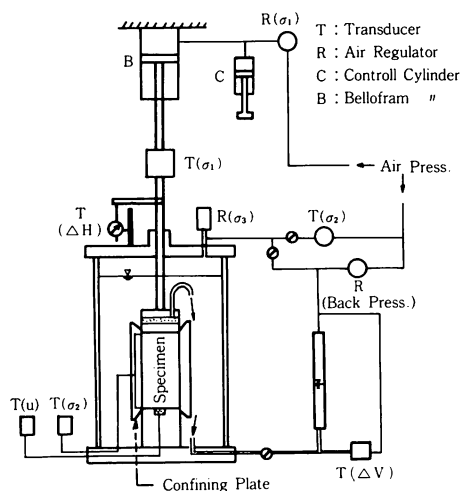


図-1 装置の概要

スを塗付したゴム膜とテフロンシートを、拘束板にはテフロンシートを張付けた。測定は全てひずみゲージ式検出器と多点デジタル計測器によった。

2-3 実験方法

実施した実験の種類は K_0 圧密平面ひずみ非排水せん断試験 (以下 K_0P と略記する) と、それとの比較での意味での等方圧密軸対称非排水せん断試験 (以下 IA と略記する) である。中間主応力や間ゲキ水圧は一定体積のもとでの水圧として測定されるから、正確な値を得るためには供試体や計測系への気泡の混入をできるだけ避けなければならない。そのため前述の方法で作成された供試体を、入念にフラッシングした装置に水中でセットした。水は純水を煮沸して空気に触ないように貯蔵してあるものを、貯蔵室内のバルーンによって押出して用いた。この過程において供試体の吸水膨張が懸念されるため、供試体のセット後に、予圧密時の平均主応力にほぼ等しい 50 kPa の等方応力で約 20 時間仮排水を行なった。 K_0P においては、仮排水後に所定の側圧 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) を与えてそれとほぼ等しい間ゲキ水圧 u が発生していることを確認しバルブを開けて圧密を開始した。圧密中は供試体の横変位 (収縮) が生じないようにエアレギュレーターで側圧 ($\sigma_2 = \sigma_3$) を制御し、同時に鉛直応力 σ_1 が初期値を保つようベロフラムシリンダー内の圧力を調節した。 σ_1 は 98, 196, 294, 382 kPa の 4 種であり、圧密中においても 98 kPa のバックプレッシャーを負荷した。約 24 時間圧密した後には平面ひずみせん断試験に移った。せん断は毎分

0.05 mm の軸変位を非排水状態で与えるものである。IA テストでは等方圧 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) で圧密し、せん断時には拘束板を用いないこと以外は K_0P の方法と同じである。なお IA における等方圧は 98, 154, 280, 381 kPa の 4 種類とした。

3. 実験結果と考察

3-1 K_0 圧密過程

圧密排水量を知るためには、応力増加によるろ紙からの排水量などの圧密とは無関係な部分を見かけの排水量から差引く必要がある。この初期補正の方法としては標準圧密試験 (いわゆるイードメーターテスト) で多用されている $\sqrt{t}$ 法を用いた。今回の K_0 圧密は変位が鉛直方向のみである点は標準圧密試験と同様であるが、排水が水平方向に成される点が異なる。従って Terzaghi の圧密理論に立脚した $\sqrt{t}$ 法を準用できる保証は無いにも拘らず、今回得られた排水量 ΔV 、軸変位量 ΔH は経過時間 t が小さいうちはその平方根と直線関係にあった。図-2 に K_0 圧密終了時の応力と間ゲキ比 e の関係を示す。応力としては平均主応力 $p_0 = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3)_0$ と最大主応力 σ_{10} を用いた。図によれば圧密応力の対数と e は直線関係にあり、かつその関係は図に併記した標準圧密試験によるものと等しい。すなわち K_0 圧密における間ゲキ比あるいは含水比と応力の関係は、より簡便に標準圧密試験によって求められる。これは既往の研究結果²⁾と一致している。ちなみに正規圧密部分の直

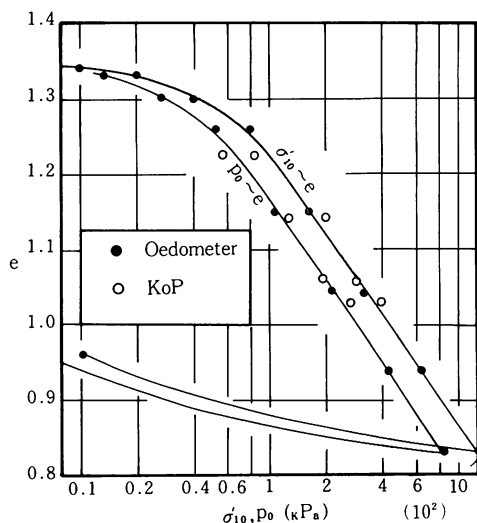


図-2 圧密応力と間隙比の関係

線の傾きとして定義される圧縮指数 C_c の値は 0.36 であり Skempton の経験式 $C_c = 0.009 (w_L - 10)$ で推定される $C_c = 0.44$ とは 20% 弱の差が見られた。等方圧密における関係は、含水比測定に不備があったため図には示していないが、在来の研究結果¹²⁾によれば等方圧密応力 $p_0 (= \sigma'_0)$ と $\log e$ は K_0 圧密や標準圧密によるものと等しい傾きをもつ直線関係にあるとみなされる。従って後述の応力-ひずみ式で多用されている係数 λ の値は $\lambda = \Delta e / \ln \Delta p_0 = 0.434 C_c = 0.155$ となる。

次に K_0 圧密終了時の有効応力比 σ'_{30} / σ'_0 について報告する。その値は土中壁のような横変位を許さない構造物への土圧係数 K_0 とみなされる。今回の結果によれば σ'_{30} / σ'_0 の値は応力の大きさに依らず 0.50 ± 0.05 の範囲にあった。

3-2 応力-ひずみ挙動

以下の考察においては中間主応力の影響を考慮に入れるため正八面体上での応力-ひずみ関係を考えるものとする。すなわち正八面体有効垂直応力 $p = \frac{1}{3} (\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)$ 、せん断応力、

$$\tau = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_3 - \sigma'_1)^2}, \quad \text{せん断}$$

$$\text{ひずみ } \gamma = \frac{2}{3} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2}$$

(自然ひずみ)を用いる。平面ひずみ試験 K_0P では

$$\varepsilon_2 = 0, \quad \varepsilon_v = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \text{ であるから } \gamma = \frac{2}{3} \cdot 6 \varepsilon_1$$

$$\text{であり、軸対称試験 IA では } \varepsilon_2 = \varepsilon_3, \quad \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

$$= 0, \quad \sigma_2 = \sigma_3 \text{ より } \gamma = 2 \varepsilon_1, \quad \tau = \sqrt{2}/3 (\sigma_1 - \sigma_3)$$

$$= \frac{2}{3} q \text{ となる。}$$

図-3 に応力比 $\eta = \tau/p$ と γ の関係を示す。 K_0P でのそれらは p の初期値 p_0 の大小によって 2 つに大別されるようである。 $p_0 = 55, 124 \text{ kPa}$ は図-2 で見れば過圧密もしくはそれに近い状態であるが、 γ が 10% ほどで η が一定値すなわち critical state となる。 p_0 の大きい他の 2 者は容易には critical state には至らずまた η の限界値 η_c も前者に比して小さい。Roscoe³⁾ らによれば応力径路 (p - τ 曲線) において等ひずみ線は原点を通る放射状のものとなることから図-3 は同一の曲線で表示されるはずである。この相異については p_0 の大きい範囲での実験を行なって確認する必要がある。IA においては $p_0 = 154 \text{ kPa}$ を除いてはほぼ同一の曲線とみなされ限界状態に至る γ (15~16%) や限界値 η_c (0.64) は K_0P の場合に比してやや大きい。

図-4 には $n = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ と γ の関係を示した。 n はせん断中の中間主応力の相対的な大きさを表わし八面体応力 τ の方向を規定する

ものであり 0.19~0.27 の値をとるとの報告⁴⁾がある。図によれば n の大きさは p_0 の値には影響されず、前述の限界状態付近 ($\gamma = 10 \sim 15\%$) では 0.22~0.27 とは文献 4) の範囲内に含まれる。しかしながら n がそれ以後もひずみの進行につれて増大を続ける点は注意を要する。これは $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の減少とせん断の終局に至るまで続く $(\sigma_2 - \sigma_3)$ の増加が相まった結果であるが、後者については拘束板と供試体との摩擦の影響も考えられ今後さらに検討を要しよう。

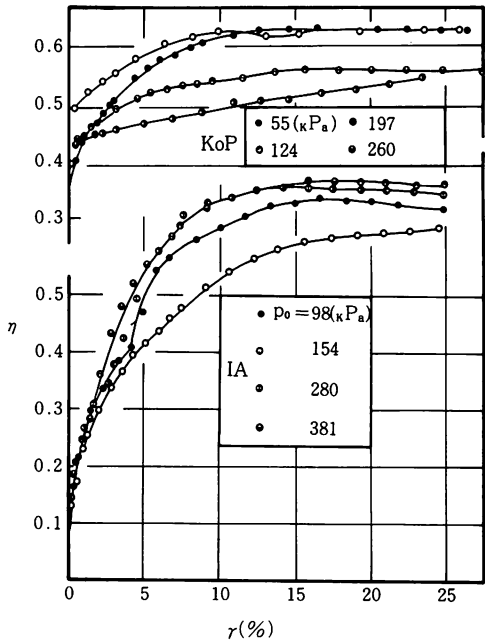


図-3 応力比とひずみの関係

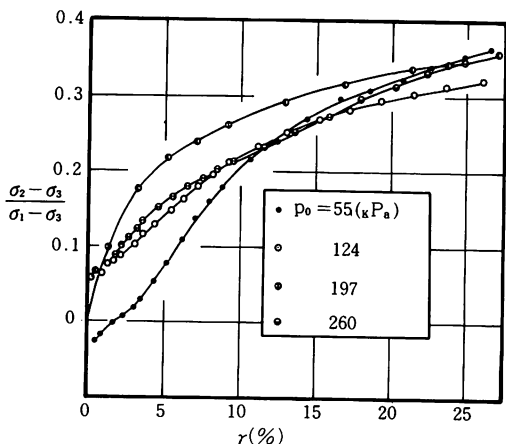


図-4 中間主応力とひずみの関係

弾性論によれば $K_0 = \sigma_3 / \sigma_1$ の K_0 と σ_2, σ_3 の間には次の関係式が成り立つ。

$$\sigma_2 / (\sigma_1 + \sigma_3) = K_0 / (1 + K_0) \quad \cdots \cdots (1)$$

K_0 値としてせん断開始前の値の 0.50 を代入すると前式右辺は 0.30 となる。左辺はひずみの影響を受けるので破壊時すなわち $(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}$ 時の値を採用すると 0.31, 0.30, 0.34, 0.29 となり右辺とは一致する。すなわち破壊時の σ_2 の大きさは (1) で推定できるのではないかと考えられる。

図-5 は間ゲキ水圧とひずみの関係を示す。Henkel によればせん断中に発生する間ゲキ水圧 Δu は p の変化 Δp による成分と τ の変化 $\Delta \tau$ によるものとに分けられ次式で表わされる⁵⁾。

$$\Delta u = \Delta p + a' \Delta \tau \quad \cdots \cdots (2)$$

ここでの a' は土の圧縮率とダイレタンシー特性によって決まる係数である。図-5 の Δu_s は $\Delta u - \Delta p$ の値であるから図の縦軸は係数 a' を示すことになる。図によれば IA では a' は p_0 の影響を受けず γ のみに支配され、しかも γ が 10% 以上では一定値となる。すなわち破壊付近の間ゲキ水圧は (2) 式で決められることを示す。しかしながら K_0P においてはそのような一義の関係は見られない。 $p_0 = 55 \text{ kPa}$ のものは過圧密状態であるから除外して考えても係数 a' は γ や p_0 の他の要因に影響を受けているようである。

3-3 強度増加率

試験で得られる非排水強度 S_u として $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の $1/2$ を、圧密圧力として σ'_0 を採用すると強度増加率 S_u / σ'_0 は IA の場合 0.48, 0.38, 0.43, 0.45 であり 0.38 を除いた平均値は 0.46 である。 K_0P の場合は 0.45, 0.41, 0.41, 0.38 であり過圧密状態のものを除くと平均値は 0.40 である。有効応力表示によるせん断角 ϕ' は IA で 35.0° , K_0P で 29.5° となった。いずれにせよ平面ひずみ試験による強度は軸対称によるものより小さくなるようである。この原因として、 P_0S では K_0 圧密中に粒子が σ'_1 と垂直な方向に配向し、いわゆる構造異方性を有することと、中間主応力の影響の 2 者が考えられる。前者については K_0 圧密軸対称試験の ϕ' は等方圧密軸対称試験の ϕ' より小さくなるとの報告⁶⁾と一致するが、後者については平面ひずみせん断試験の強度が軸対称試験のそれより大きくなるとの報告が多い⁴⁾。構造異方性と中間主応力の大きさの相乗効果については、今回の実験の他に

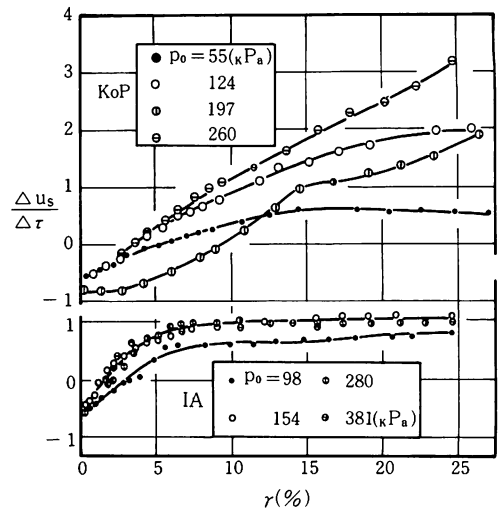


図-5 間げき水圧とひずみの関係

K_0 圧密軸対称試験などを行なって検討する必要がある。

3-4 応力径路

図-6 にせん断中の p と τ の関係すなわち応力径路を p の初期値 p_0 で無次元化して示した。平面ひずみ状態ではせん断初期に p と τ が共に増加していき、比較的早い時期に、共に減少に転じて限界状態に至る。これに対して軸対称せん断の場合には p の傾向は同じであるが、 τ は限界状態に至るまで増加の傾向にあることがわかる。

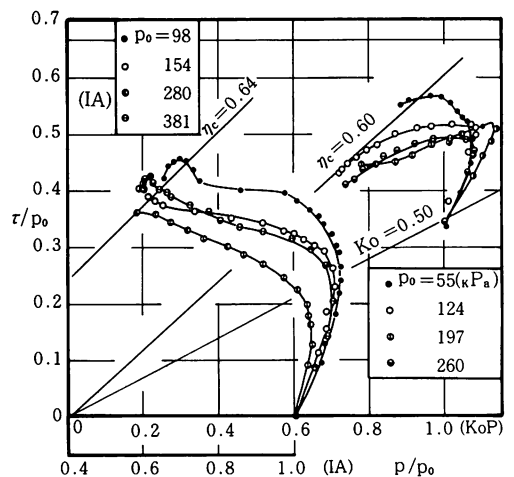


図-6 有効応力径路

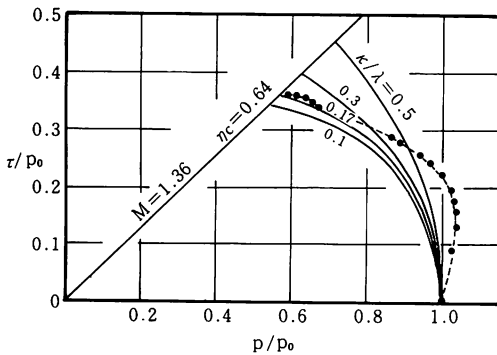


図-7 Cam Clay Theoryの応力径路

図-7には Roscoe らが提唱し、その後の土の応力-ひずみ関係すなわち構成式の研究の源流となった Cam clay Theory で計算される応力径路と、実験値として前図の $p_0=380\text{ kPa}$ のそれとを比較したものである。理論式は等方圧密軸対称試験の場合次式で示される。

$$P/P_0 = (M^2/M^2 + \eta^2)^{(1-K/\lambda)} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここで $\eta = q/p = 3(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + 2\sigma_3)$

M: 限界状態の η

λ : 図-2 を自然対数で表わしたときの傾き (=0.434 C_c)

κ : 図-2 の除荷部分の傾き

(3)式は塑性力学の概念を基に多くの仮定のもとに導かれたがそのなかで今回の報告に関連する部分のみを列挙すると次のようである。

- ① 図-2 は正規圧密部分においては直線である。除荷時の $e-\ln p_0$ 関係も直線である。
- ② 図-6 の IA の応力径路は p_0 の値によらず 1 本の曲線で表わされる。
- ③ 図-6 はある定常的な状態 (限界状態) に至りそこで止まる。

今回の実験では $M = (q/p)_c = 3/\sqrt{2} \eta_c$ であるから $\eta_c=0.65$ を代入して $M=1.36$ となる。同様に $\lambda=0.155$ である。 κ については除荷部分の系統的な実験を行っていないので不詳であるが図-2 の除荷曲線を直線とみなした場合の $\kappa=0.027$ より大きな値をとると考えられる。そこで前記の M を用い、 κ/λ を 0.1 から 0.5 の範囲に変えて (3)式を計算したものが図-7 である。図に見るように p の理論値はせん断につれて単調に減少していくが実験値はせん断初期に増加の傾向にあり、従ってどの κ/λ についても実験値と理論値は

初期部分においては一致しない。わずかに限界状態付近で $\kappa/\lambda=0.17$ の理論応力径路と実験値が一致するのみである。このような大きな隔たりは理論、実験の双方の難点によるものと思われる。前者については上述の仮定①~③が今回の実験結果からも概ね首肯できるものだけにそれ以外の仮定の問題である。後者については間ゲキ水圧を供試体下端で測定するまでの時間的遅れなどが考えられるが、この点については載荷速度をより遅くした実験等で検討する必要がある。

4. ま と め

これまで述べてきたことをまとめると次のようである。

- (1) K_0 圧密の $e-\log \sigma'_0$ 関係は載荷部においては標準圧密によるものと等しい。
- (2) K_0 圧密平面ひずみせん断試験で得られる限界応力比 η_c 、強度増加率 S_u/σ'_{0c} 、有効応力表示によるせん断抵抗角 ϕ' とともに、等方圧密軸対称せん断試験で得られる値より小さい。
- (3) 軸対称せん断における間ゲキ水圧のうちのダイレーション成分はせん断ひずみと正八面体応力の増分 $\Delta \tau$ と Δp により表わされる。
- (4) 平面ひずみ試験中に中間主応力 σ'_2 は増加を続けるが、破壊時におけるその値は弾性論で推定できる可能性がある。
- (5) 軸対称せん断における有効応力径路は Cam Clay Theory によるものとは大きく異なった。平面ひずみせん断時には正八面体せん断応力 τ は減少の傾向にある。

今回の報告で残された多くの問題点は、今後も方法や圧力範囲を変えた多くの実験により検討を進めていきたい。おわりに標準圧密試験の実施に御助力をいただいた柳谷豊技官に深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 池浦勲; 粘性土の異方圧密に関する実験的研究, 苫小牧工業高等専門学校紀要第 14 号, 昭和 54 年
- 2) 佐野信房, 北郷繁, 三田地利之ほか; 粘性土の強度特性におよぼす応力履歴の影響, 技術報告集, No.16, 昭和 51 年, 土質工学会北海道支部
- 3) K.H.Roscoe and J.B.Burland; On the Generalized Stress-Strain Behavior of 'Wet' Clay, Engineer Plasticity, 1968, Cambridge University Press

-
- 4) 北郷繁, 三田地利之, 三浦清一ほか; 平面ヒズミ状態における粘性土の強度特性について (第2報), 技術報告集, No.17, 昭和52年, 土質工学会道支部
- 5) 最上武雄編著; 土質力学, 昭和45年, 技報堂
- 6) 北郷繁, 三田地利之, 神谷光彦ほか; 伸張状態における異方圧密粘土の強度特性について, 技術報告集, No.17, 昭和52年, 土質工学会北海道支部 (昭和55年11月29日)