

長期圧密された飽和粘性土の非排水せん断特性

Undrained Shear Properties of Saturated Clay Consolidated during Long Periods

大河内保彦*・龍岡文夫**
Yasuhiko OH-KOCHI and Fumio TATSUOKA

1. はじめに

飽和軟弱粘性土では二次圧密が進むと応力履歴的には正規圧密でありながら圧密降伏応力は上載圧よりも大きい値を示すといういわゆる見かけの過圧密状態になることが知られている^{1)~7)}。このような過程において、強度、変形特性にその時間履歴の影響が出る事が考えられる。しかし、これまでにこのことに関する精度が高く入念な系統的な研究はあまり行われてきておらず、データが決定的に不足しているのが現状である。今回は、このような状態を室内実験で再現するため、三軸装置で長期圧密試験を行い、引き続き非排水せん断を行った。圧密は最長で120日間行った。圧密応力状態は(1)等方応力状態、(2)異方応力状態(圧密主応比一定)(3)水平地盤のように水平ひずみのない K_0 状態の3種類とした。その結果、長期圧密により K_0 圧密された供試体の水平応力は増加すること、また、圧密時間とともに非排水せん断強度、初期剛性は共に増加するが、 K_0 状態で長期圧密されると初期剛性の増加が特に大きくなる事が判明した。このことは、原位置の飽和軟弱粘性土の非排水せん断特性を室内実験によって推定するとき、時間的要因を考慮することが必要であることを示している。

2. 実験方法

試料は市販のカオリナイトを用いた。物理定数は、比重 $G_s=2.67$ 、液性限界 $LL=67.6\%$ 、塑性指数 $PI=30.8\%$ である。これをまず液性限界の2倍程度の含水比のスラリー状態とし、7~10日真空を加えておく、このようにして十分脱気し飽和化を図った後、予圧密圧力 0.5 kgf/cm^2 で3~5日間予圧密を行う。トリマーで直径 $5\text{ cm}\times$ 高さ 10 cm に成形した後、三軸セルにセットする。三軸装置は今回の研究のため新たに設計し、本研究所試作工場で製作したものである(写真1)。供試体を三軸セ

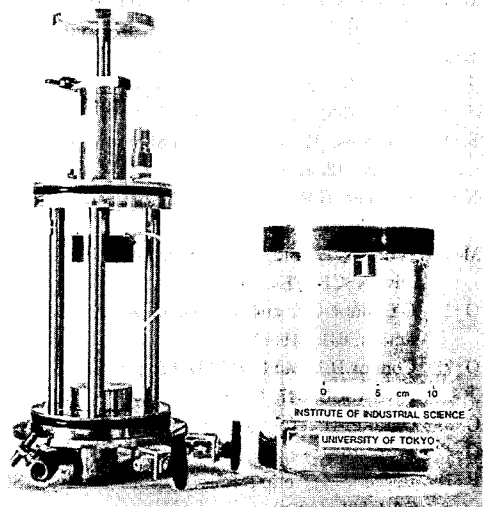


写真1 実験に用いた三軸セル

ルにセットする際、間隙水の径路は脱気水で満たしておき、供試体とメンブレンの間にも気泡が残らないように十分留意した。なお、長期圧密に備えてメンブレンは 0.3 mm 厚のものを二重とし、セル液は純粋グリセリンを用いた。端面はいわゆる Lubricated End を用いて摩擦を低減し、拘束のない端面ドレイン用としてトイレットペーパーを用いた。なお、メンブレンと Lubricant 用のゴムは圧力水に一週間以上浸したものを使用し、チューブは、シンフレックスグループ2(肉厚の厚いタイプ) $1/8\text{ inch}$ をすべての回路に使い、ジョイントは Swage-lock, バルブは Whity のバルブ開閉時に体積変化のないボールバルブを用いた。

セルにセットした後、供試体寸法を測定し、セル液を満たす。メンブレンを供試体に密着させるため、 0.2 kgf/cm^2 の初期拘束圧を加える。この有効拘束圧を維持しながら、バックプレッシャーを 2 kgf/cm^2 加える。この際は供試体の透水性が低いことを考慮し、40~60分かけて徐々に加える。この状態で48時間以上放置した。その結

* 基礎地盤コンサルタント

** 東京大学生産技術研究所 第5部

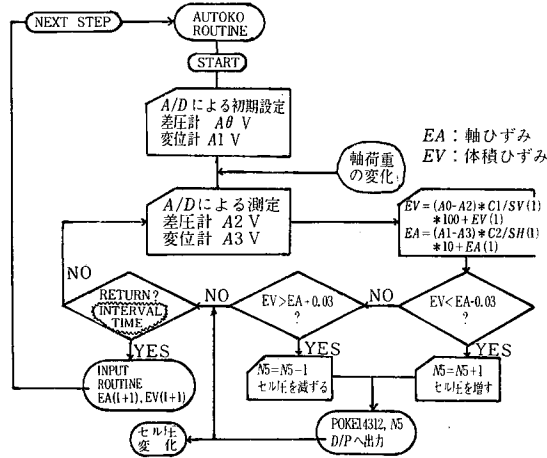
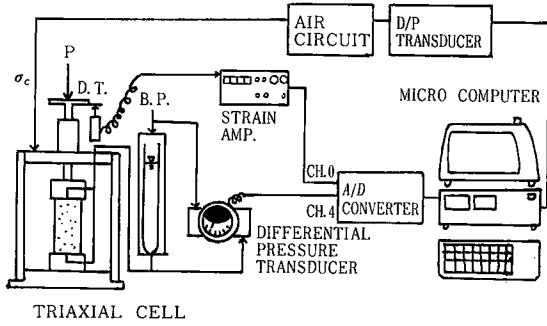


図1 試験システム図

果 B 値 1.0 を得ている。供試体の水平方向のひずみが生じないように供試体を圧密する K_0 圧密は、図-1 に示すようなシステムで行った。軸荷重をおもりで加え、軸変位と体積変化 (差圧計を用いて測定) から、刻々の供試体の体積変化を測定し、体積ひずみと軸ひずみとが同じ値になるようにマイクロコンピュータによってセル圧を自動制御する方法である。 K_0 圧密は、荷重ステップの間を 30 分かけて行った。30 分で一次圧密はほぼ終了した。所定の応力状態に達した後、側圧を通常のレギュレータによって制御する方式によるものに置き換え、長期 K_0 圧密試験を行った。圧密中、変形状態をチェックし、 K_0 状態が保たれるように応力状態を調整した。比較試験として等方状態での長期圧密試験と、一次の K_0 圧密が終了した時点における初期の K_0 値 (有効水平応力と有効軸方向応力の比) のまま圧密有効応力状態を一定に保った圧密試験も行った。なお、圧密期間は 0.5 時間 (一次圧密終了時)、20 日、50 日、80 日、120 日とした。供試体は、圧密終了後軸ひずみ速度 $4.4 \times 10^{-3} \%$ /min で非排水せん断を行った。なお、圧密中の排水と、せん断中の間隙水圧の測定は供試体上下両端面から行っている。

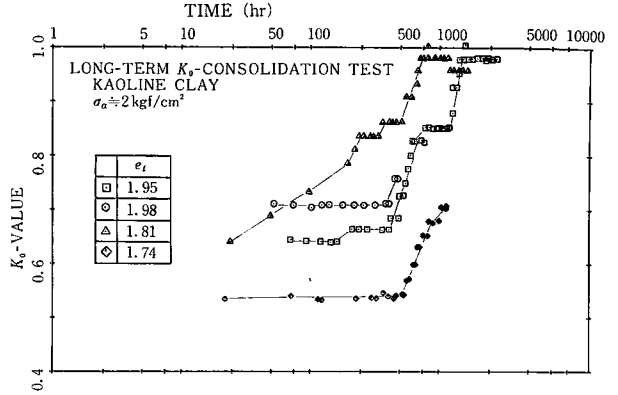


図2 長期 K_0 圧密中の K_0 値の変化の例

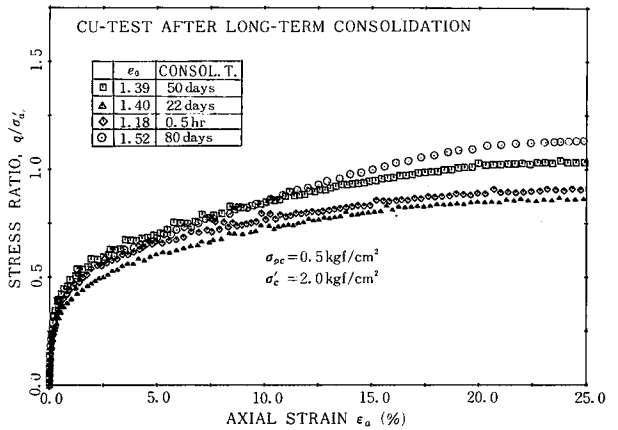


図3 長期等方圧密後の非排水せん断特性

圧密応力状態は、軸応力が約 2 kgf/cm^2 となるようにし、長期 K_0 圧密時も軸応力はほぼ一定に保った。なお実験は全て恒温恒湿室内 (22°C , 60%) で行った。

3. 実験結果

長期 K_0 圧密試験中の K_0 値の変化の 1 例を図-2 に示す。すべての実験結果は、この例と同様に K_0 値が増加してゆく傾向を示す。しかし実験の中には、若干供試体の径が収縮する方向にひずみを出してしまい、 K_0 値が大きくなりすぎた例もある。だが、大要としては、このような傾向を示すことは間違いないものと思われる。

非排水せん断強度については、最大偏差応力 $q_{\max} = (\sigma'_1 - \sigma'_3)_{\max}$ を圧密時の軸応力 σ'_{ac} で割ったものを強度評価のパラメータとして用いた。これは、原地盤では有効上載圧が比較的正確に知られるということに対応できると思われる。

まず、等方圧密で長期圧密後せん断試験を行った結果を図-3 に示す。この結果、22 日の圧密期間では強度増加

研究速報

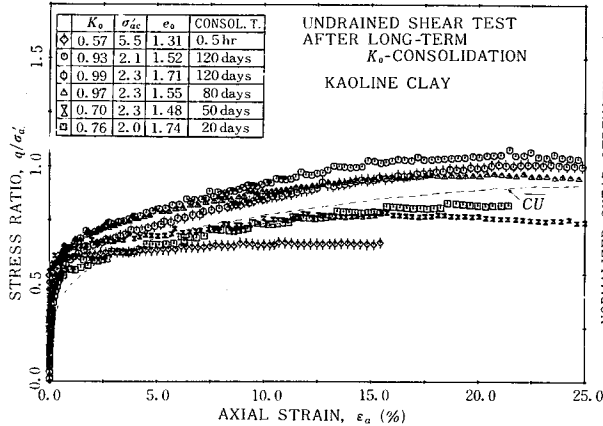


図4 長期 K_0 圧密後の非排水せん断特性

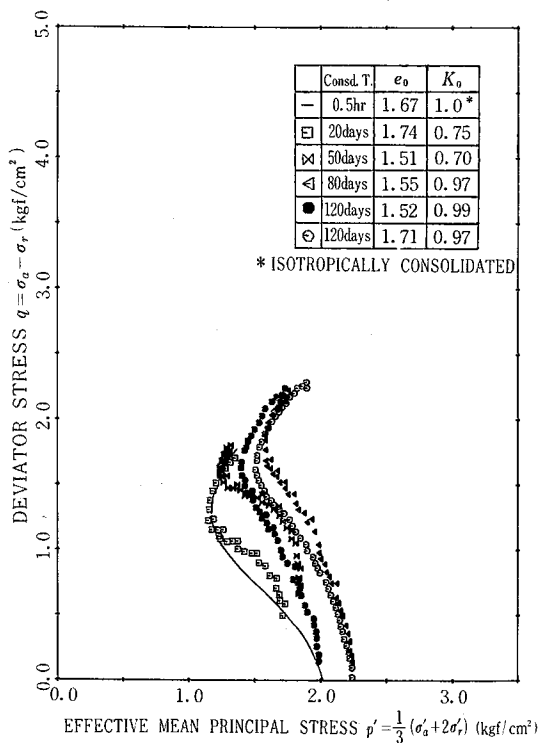


図5 長期 K_0 圧密後の非排水せん断における有効応力経路

は見られないが、50日、80日となるにつれてそれぞれ約10%、25%の強度増加が見られる。また図ではそれほど明確ではないが、初期せん断剛性がやはり増加している。このように、長期圧密の効果は同じ応力状態であれば、剛性の増加と強度の増加という2点で評価できると思われる。

次に図-4に長期 K_0 圧密後非排水せん断をした結果を示す。これを見ると、一次圧密終了後せん断したもの

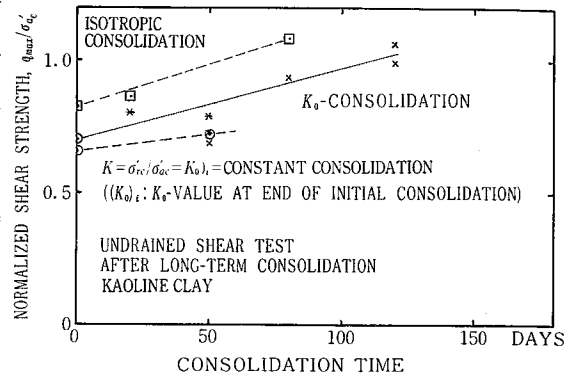


図6 長期圧密による非排水せん断強度の増加

に比べて120日圧密したものでは、強度が55%も増加している。これは長期圧密そのものの効果(時間効果)と、徐々に K_0 値が増加することによる強度増加の相乗効果のためである。なお、長期圧密によって K_0 値が増加しているため、比較のため、等方、の一次圧密終了時に非排水せん断を行ったデータも破線で示した。80日以上圧密を行ったものは、これよりもはるかに大きい強度を示しており、長期圧密の強度に対する影響が大きいことがわかる。

次に、図-4に示すデータのせん断中の有効応力経路を示す。これを見ると圧密後すぐにせん断を行った場合に比べて長期圧密後のデータは、全体に立っていることがわかる。これは特にせん断初期(偏差応力 $q = \sigma'_a - \sigma'_v$ が小さい部分)において間隙水圧の発生量が小さいためであり、長期圧密が、弾性的な挙動の応力限界、すなわち降伏曲面(yield locus)を拡大するような効果を持つのではないかと予想することができる。

次に図-6に長期圧密期間による強度増加の傾向をまとめて示す。バラツキはあるが、圧密時間に対してほぼ線型に強度が増加していることがわかる。しかし、この傾向はこのまま続くと考えられず、むしろ若干頭打ちの傾向になることが予想される。このことから考えると、圧密期間をもっと長くしたような実験もやってみる価値があると思われる。

次に長期圧密による初期剛性の増加を調べるために、軸ひずみ0.5%のときにおける接線係数($E_{0.5} = (q \text{ at } \epsilon_a = 0.5\%) / 0.005$)を圧密時の軸応力で正規化してプロットしたものが図-7である。この結果を見ても圧密時間が長くなるにつれて初期剛性ははっきりと増加してゆることがわかる。ことに長期 K_0 圧密の場合は、 K_0 が増加することそれ自体が、応力状態が弾性応力限界(yield locus)から離れてゆくことにつながるため、非常に剛性が増してくるものと思われる。

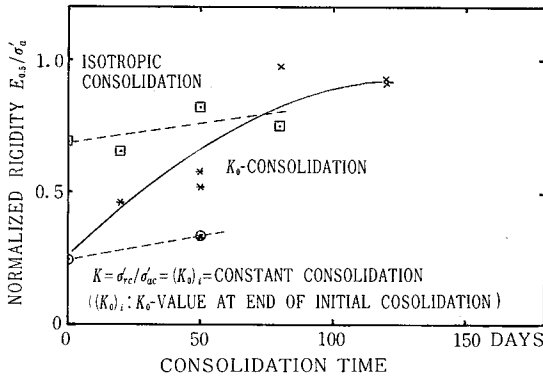


図 7 長期圧密による初期剛性の増加

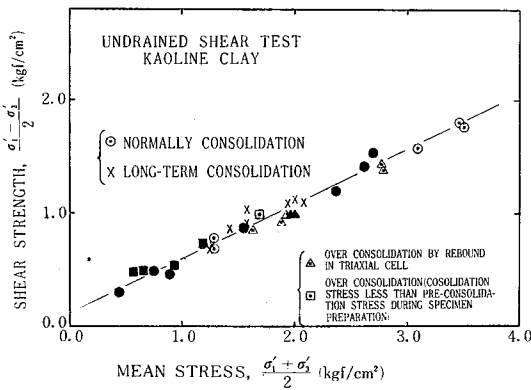


図 8 最大有効主応力比時の応力状態

最後に種々の履歴を受けた供試体に最大有効主応力比が生じたときの応力の値をプロットしたものが図-8である。この結果を見てわかるように、一本の有効破壊包絡線にすべての実験データポイントがほぼ乗り、 $c' = 0.05 \text{ kgf/cm}^2$, $\phi' = 29.1^\circ$ を得る。つまり、長期圧密は強度定数には影響を与えず、強度増加はせん断による過剰間隙水圧発生量の低下によるものと思われる。

4. 結 論

長期間粘性土を圧密すると K_0 値(有効水平方向応力)/(有効鉛直方向応力)は増加してゆく傾向がある。また、長期圧密により粘性土の非排水せん断強度および初

期剛性も増加する。特に、水平地盤内の応力ひずみ状態を再現した K_0 圧密を長期間行うことによる非排水せん断強度と初期剛性の増加は(1)長期圧密自体による部分と(2) K_0 値の増加による部分から成り立っている。

以上の事実は原位置での粘性土の強度変形状態を室内実験のデータを用いて推定しようとするとき、時間的要因の考慮が必須であることを示している。

5. 謝 辞

本研究では東京理科大学4年生河邊衛氏の多大な協力があつた。また、試験装置は、1981年度東京大学生産技術研究所選定研究費(土の静的および動的変形特性の時間変化についての実験的研究)によっている。また、三軸セルの設計については佐藤剛司氏の多大な協力と助言を得ている。三軸セルその他の実験部品は研究所内の試作工場で製作した。末筆ながら関係諸氏に感謝の意を表します。

(1982年3月8日受理)

参 考 文 献

- 1) Lacerda, W.A. (1977).: "Variation of K_0 during Drained One Dimensional Creep", Proc. of 9th International Conference on S.M.F.E., Tokyo, Vol. III, pp. 317-348
- 2) Bjerrum L. and Lo, K.Y. (1963).: "Effect of Aging on the Shear-Strength Properties of a Normally Consolidated Clay," Geotechnique, Vol. 13, No.2, pp. 147-157
- 3) 北郷繁, 三田地利之(1972), "粘性土の強度特性に及ぼす圧密時間の影響," 第7回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 197-200
- 4) 三田地利之, 北郷繁, 唐牛義夫(1973), "第8回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 299-302
- 5) Berre, T. and Bjerrum L. (1973), "Shear Strength of Normally Consolidated Clays," Proc. of 8th International Conference on S.M.F.E., Moscow, pp. 39-49
- 6) 三笠正人, 木下哲生, 高田直俊(1977), "粘性土の圧密時間とせん断強さについて(第2報)," 第12回土質工学研究発表会講演概要集, pp. 137-140
- 7) Hanzawa, H. and Kishida, T. (1981), "Fundamental Considerations on Undrained Shear Strength Characteristics of Alluvial Marine Clays," Soils and Foundations, Vol. 21, No. 1