文:

# 一次圧密過程における粘土の強度増加特性 一間隙水圧制御装置を用いた三軸圧縮試験一

Characteristics of Increased Shear Strength of Clay During Primary Consolidation —Triaxial Compression Test Apparatus with a Pore Water Pressure Controlling Device—

梅 崎 健 夫 (うめざき たけお) 信州大学助教授 工学部社会開発工学科 河村隆(かわむら たかし) 信州大学助手工学部社会開発工学科

# 1. はじめに

軟弱粘土地盤上の埋立てや盛土の施工などにおいて, 載荷重により地盤内に生じた過剰間隙水圧は長時間をか けて徐々に消散される。軟弱粘土地盤は過剰間隙水圧の 消散に伴い圧密を生じ、それに応じて地盤内のせん断強 度も徐々に増加する。一次圧密過程(過剰間隙水圧消散 過程)における軟弱粘土地盤内のせん断強度は、一様に 増加するのではなく,その増加量が場所的時間的に大き く異なることが指摘されている<sup>1)</sup>。これらのことは圧密 非排水三軸圧縮試験(CU)においても同様であり、飽 和粘土の圧密は供試体の内部で一様に進むのではなく、 排水面から始まって時間の経過とともに徐々に非排水面 に及ぶ。周面排水とした場合には、図-1(a)に示すよ うに、一次圧密過程においては供試体内に過剰間隙水圧  $(\Delta u_t)$ の分布が生じている。そのため、この時点にお ける粘土の強度増加特性を求めるためには供試体内の応 力とひずみを均一化する必要がある。従来の試験法では, せん断の開始前に非排水状態を一定時間保つことにより 過剰間隙水圧の均一化を行っている2)。しかし、既往の 研究によれば、図-1(b)に示すように、過剰間隙水圧



June, 2001

は通常1~2時間以内にB点(圧密打切り時点)よりも 大きな値のD点で収れんする<sup>2)</sup>。吉國<sup>3)</sup>は,このことを 有効応力の緩和現象として新しい圧密理論の中で説明し ているが,非排水状態での間隙水圧増加(再発生)に関 してはまだ不明な点も多い。

本研究では、一次圧密過程における軟弱粘土地盤内の 場所的時間的に異なる非排水せん断強度を実験的により 精度良く評価するために、供試体の間隙水圧を制御する 装置を新たに開発した。まず、開発した装置の原理につ いて説明し、次いで、カオリン粘土を試料とした圧密時 間の異なる非排水三軸圧縮試験(CU)の結果に基づい て、一次圧密過程における粘土の圧密度と非排水せん断 強度の増加特性について検討した。

### 2. 間隙水圧制御装置(PCD)の原理

間隙水圧制御装置(Pore Water Pressure Controlling Device, PCD)の原理を図—2に示す。粘土の通常の三軸試験においては、圧密過程において周面排水とした際に供試体周面の間隙水圧( $u_2$ )は直ちに背圧( $\sigma_B$ )に等しい値になり、過剰間隙水圧が完全に消散するまでの





論 文

過程においては供試体内の応力とひずみが均一ではない。 圧密過程における供試体の中心(非排水面)と周面の間 隙水圧の差をできるだけ小さくすることができれば,圧 密過程の供試体を近似的に要素(応力とひずみが均一) として評価できるものと考える。そのためには,供試体 周面に $\Delta u$ を生じさせる必要があり,簡便な方法として 供試体周面からの排水経路中に供試体と同程度の透水係 数(k)を持つ物質(厚さ(H),断面積(A))を挿入 することが考えられる。 $\Delta u$ の値は,k, HおよびAの 値に応じて変化する。本研究では挿入する物質としてセ ラミックディスク(透水係数 $k=2.08 \times 10^{-6}$  cm/sec, 厚さH=0.47 cm,直径2.31 cm,断面積A=4.19 cm<sup>2</sup>, 空気侵入値AEV=26.5 kPa)を採用した(口絵写真一 1参照)。

## 3. 試験方法

試料はカオリン ( $G_{\rm S}$ =2.759,  $w_{\rm L}$ =75.7%,  $I_{\rm p}$ =39.4) である。供試体には150%の含水比で練り返した試料を 予圧密圧力49.0 kPa で約2週間一次元圧密し,直径5 cm,高さ10 cm に成形したものを用いた。二重負圧法 により約12時間脱気した後,背圧196.0 kPa を約24時間 負荷した。まず, 圧密応力か=117.6 kPaのもとで PCD を介さずに通常の等方圧密を行い、3t 法により一 次圧密を終了させた。次いで圧密応力を $p_1=p_0+\Delta p=$ 294.0 kPa に増加させて PCD を用いた等方圧密を所定 の圧密時間まで行い、圧密打切り後直ちに非排水せん断 (ひずみ速度0.07%/min) を行った。間隙水圧の測定は 供試体の中心(u1)と周面(u2)で行った。供試体上 下端面にはルブリケーションを施した4)。メンブレンに は、長時間の耐久性を考慮して、厚さ0.3 mm のものを 使用して表面にはシリコングリースを塗布した。このほ か,試験の前に PCD を含めた排水管路を完全に飽和さ せておく必要がある。試験の詳細は文献1)を参照され たい。

## 4. 試験結果および考察

### 4.1 PCD を用いた等方圧密特性

図一3に PCD を用いた試験と通常の  $\overline{CU}$  試験の等方 圧密過程における間隙水圧比 ( $\Delta u/\Delta p$ ) および体積ひ ずみ ( $\varepsilon_v$ )の経時変化を示す。通常の  $\overline{CU}$  試験において は供試体の中心と周面の過剰間隙水圧 ( $\Delta u_1 \ge \Delta u_2$ ) に大きな差が生じているのに対し, PCD を用いた試験 ではその差はほんのわずかである。すなわち, PCD を 用いることにより供試体内の動水勾配は小さく制御され る。したがって,通常の試験法において,PCDを排水 経路に挿入するだけで,圧密過程における供試体を近似 的に要素として評価できる。ただし,通常の  $\overline{CU}$  試験 よりも過剰間隙水圧の消散が遅く,圧密時間は長期に及 ぶ。

図—4に PCD を用いた試験の圧密過程における間隙 比の減少量( $\Delta e$ ) と有効圧密応力(p')の関係を示す。 過剰間隙水圧  $\Delta u_1$  と  $\Delta u_2$  の差はほんのわずかであるが,



供試体内の間隙水圧を放物線分布と仮定し、 $\Delta \bar{u} = (2\Delta u_1 + \Delta u_2)/3$ として、有効圧密応力 $p_1' = p_1 - \Delta \bar{u}$ を算定した。今井ら<sup>5)</sup>は分割型一次元圧密試験機を用いて、圧密 過程の  $e \ge p'$ の関係が正規圧密線(NCL: e-log p')から上方に逸脱した経路をたどることを示している。 PCDを用いた本試験の結果も同様である。ただし、 PCDにより圧密過程のひずみ速度が小さく制御されているため、正規圧密線に近い経路となっている。

#### 4.2 非排水せん断強度特性

**図**-**5**に軸圧縮過程における有効応力経路を示す。*σ*<sub>1</sub>, *σ*<sub>3</sub>はそれぞれ,最大,最小主応力である。このときの

土と基礎, 49―6(521)

 $\Delta u_1$ は $\Delta u_2$ とほぼ等しいが,  $\sigma_1' = \sigma_1 - \Delta \bar{u}, \sigma_3' = \sigma_3$ - $\Delta \bar{u}$ として算定した。図中の破壊線は,軸差応力最大 (( $\sigma_1 - \sigma_3$ )<sub>max</sub>)時を基に求めたものである。有効応力 経路はすべて相似形であり,圧密打切り時に残留してい る過剰間隙水圧は有効応力経路に影響を及ぼさない。-次圧密過程における粘土の破壊線は圧密時間とは無関係 に一定である。このことは,図-6に示すモールの応力 円からも明らかである。すなわち,有効応力表示の強度 定数( $\phi', c' = 0$ )は圧密時間に関係なく一定である。

図-7に有効応力および体積ひずみに関する圧密度 ( $U_p$ および $U_e$ )と非排水せん断強度の増加量( $\Delta c_u$ ) の関係を示す。非排水せん断強度は $c_u = (\sigma_1 - \sigma_3)_{max}/2$ と定義した。一次圧密過程における粘土の $c_u$ の増加 は、 $U_p$ および $U_e$ のいずれの圧密度とも比例するのでは なく、圧密度よりも遅れて生じる。

図 — 8 に *e*-log *c*<sub>u</sub> および *e*-log  $\sigma_{mf}$  '関係を NCL (*e*-log *p*') とともに示す。ここで破壊時の平均有効主応力  $\sigma_{mf}' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')_f/3$  である。一次圧密過程における粘 土の *e*-log *c*<sub>u</sub> および *e*-log  $\sigma_{mf}$  '関係はともに NCL に平 行な直線であることが実験的に検証された。なお、文献 6),7)において、二次圧密を含むすべての圧密過程における粘土の *e*-log *c*<sub>u</sub> 関係が唯一の直線で表されることや、 すべての圧密過程における非排水せん断強度の定量的な 評価法が示されている。

5. まとめ

圧密過程の間隙水圧を制御する簡便な装置を開発し, これを用いた圧密時間の異なる一連の圧密非排水三軸圧 縮試験を実施した。主な結論は以下のとおりである。

- (1) 通常の試験方法において PCD を排水経路に挿入 するだけで, 圧密過程における供試体を近似的に要 素(応力とひずみが均一)として評価できる。
- (2) 一次圧密過程における粘土の有効応力表示の強度 定数(φ', c'=0)は圧密応力の大きさや圧密時間に 無関係に一定である。また,圧密打切り時の過剰間 隙水圧は有効応力経路に影響を及ぼさない。
- (3) 一次圧密過程における粘土の非排水せん断強度 (c<sub>u</sub>)の増加は、有効応力に関する圧密度(U<sub>p</sub>) およびひずみに関する圧密度(U<sub>e</sub>)のいずれの圧 密度とも比例するのではなく、圧密度よりも遅れて 生じる。
- (4) 一次圧密過程における粘土の e-log c<sub>u</sub> 関係は圧密 応力の大きさや圧密時間と無関係に正規圧密線に平 行な唯一の直線として評価できる。

#### 参考文献

- 1) 例えば,梅崎健夫: 圧密に伴う粘土の強度増加に関する 研究(九州大学学位請求論文),1995.
- Hirao, K. and Yasuhara, K.: Cyclic strength of underconsolidated clay, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 4,







pp. 180~186, 1991.

- Yoshikuni, H., Kusakabe, O. and Okada, M.: Mechanism of one-dimensional consolidation, Proc. of Int. Symp. on Compression and Consolidation of Clayey Soils, Vol. 1, pp. 497~504, 1995.
- 4) 土質工学会編:土質試験の方法と解説, p. 365, 1990.
- Imai, G.: A unified theory of one-dimensional consolidation with creep, Proc. of 12th IC SMFE, Vol. 1, pp. 57~ 60, 1989.
- 毎崎健夫・落合英俊・林 重徳:K<sub>0</sub> 圧密・平面ひずみ 状態における粘土の非排水強度特性,土木学会論文集, No. 505/III-29, pp. 257~265, 1994.
- 海崎健夫・落合英俊: 圧密過程における粘土の非排水強度の評価法, 土木学会論文集, No. 505/III-29, pp. 307~317, 1994.

(原稿受理 2001.2.2)

13