上総層群中部層シルト岩の強度・変形特性

細野高康*・中島雅之*・小泉和広*・杉田信隆*・小川正二**

Strength and Deformation Characteristics of the Neogene Siltstone, exampled from Middle Formation of Kazusa Group.

Takayasu HOSONO*, Masayuki NAKAJIMA*
Kazuhiro KOIZUMI*, Nobutaka SUGITA*
and Shohji OGAWA**

Key words : 堆積軟岩 sedimentary soft rock, 三軸圧縮試験 triaxial compression test, 強度・変形特性 strength and deformation characteristics, 先行履歴応力 preconsolidation stress

Abstract

The purpose of this paper is to investigate the strength and deformation characteristics of the Neogene siltstone sampled from middle formation of Kazusa group.

The following results are obtained by triaxial compression tests on the variable confining pressure changed for wide range under undrained (UU and $\overline{CU}$) and drained (CD) conditions.

- (1) The stress-strain curve in overconsolidation range shows clearly strain hardening-softening character regardless of undrained or drained conditions. And the curve shows strain hardening character under drained condition and strain hardening-softening character under undrained one in normal consolidation range.
- (2) Though the path of effective stress shows the peculiar behaviour of soft rock in overconsolidation range, the path is recognized the same tendency as alluvial clay in normal consolidation range.
- (3) It is recognized that most of failure is brittle type in overconsolidation range, and "cast shape" failure or shear failure unless volumetric change depend on undrained or drained conditions in normal consolidation range.
- (4) The preconsolidation stress of Kakinokidai formation is assumed from 35 kgf/cm² to 40 kgf/cm² by the results of triaxial compression test and constant strain rate consolidation test.

1. はじめに

最近, 大都市周辺における長大橋, 電力貯蔵施設, 大深度地下空間利用施設などの大規模な重要構造物の支持地盤として堆積性軟岩(以降, 軟岩と略記)が対象とな

ることが多くなっている。南関東地方においては, 第三紀鮮新世から前期更新世にかけて堆積した上総層群が, 多摩丘陵から東京湾および房総半島(上総堆積盆地)などに広く分布しており, 代表的な軟岩と言われている。したがって, これら重要構造物の建設に際しては, 上総層群の支持地盤としての力学特性を把握することが重要となってくる。

軟岩の強度・変形特性に関する既往の研究を見ると,

* (株)ダイヤコンサルタント Dia Consultants Co. Ltd.

** 長岡技術科学大学 Nagaoka University of Technology

静的力学特性に係わる研究が数多くなされているものの、上総層群の泥質岩の静的力学特性に関する研究例は極端に少なく、岩本ら¹⁾、星野ら²⁾、渋谷ら³⁾、小林正邦ら⁴⁾、小林和彦ら⁵⁾など数編の文献で代表される程度となっている。ここで、これらの研究概要を述べると以下のとおりである。

岩本ら¹⁾は、上総層群の固結シルトについて K_0 圧密三軸圧縮試験を実施し、除荷時の K_0 値 (K_{00c}) は、過圧密比と正規圧密領域の K_0 値 (K_{0NC}) のべき乗関係式で表現できることなど、軟岩の K_0 値について検討している。

星野ら²⁾は、上総層群の梅ヶ瀬層、黄和田層の両試料について、三軸圧縮試験を実施し、モール・クーロンの破壊包絡線により各層の強度定数を求めている。

また、渋谷ら³⁾、小林正邦ら⁴⁾、小林和彦ら⁵⁾は、上総層群の軟岩を用いて、排水および非排水条件などの三軸圧縮試験を行い、カムクレイ、修正カムクレイや足立らのべき乗型数式の破壊基準による検討を行っている。

本研究は、上総層群の中部層に属する柿ノ木台層と下部層に属する大田代層のシルト岩試料を用い、高圧三軸圧縮試験および高圧定ひずみ速度圧密試験を実施し、過圧密領域と正規圧密領域における強度・変形特性を対比検討するとともに、その破壊形態について巨視的、微視的な観察を行った結果を報告するものである。なお、微視的な観察は、過圧密領域および正規圧密領域下での三軸圧縮試験の破壊後供試体について、破断面近傍の微細片を走査型電子顕微鏡 (SEM) により観察する方法で行っている。

2. 実験方法

本研究においては、柿ノ木台層および大田代層について各々ブロックサンプルからコアを採取し、以下に示す実験を行った。

2.1 三軸圧縮試験の方法

三軸圧縮試験は、柿ノ木台層について8種類の圧密圧力 σ_c (側圧 σ_3) により圧密排水 (CD) 試験、圧密非排水 (CU) 試験および非圧密非排水 (UU) 試験を行った。また、大田代層について圧密非排水 (CU) 試験を実施した。なお、各試験条件の三軸圧縮試験を以降は CD 試験、CU 試験および UU 試験と略記して表示する。

低圧密圧力 ($\sigma_c < 50 \text{ kgf/cm}^2$) の試験は、図-1に示す中圧三軸圧縮試験装置 (最大軸荷重10 tf, 最大側圧 50 kgf/cm^2 , 電動サーボモータ方式) を、高圧密圧力

図-1 中圧三軸圧縮試験装置図

($\sigma_c \geq 50 \text{ kgf/cm}^2$) の試験は、図-2に示す高圧三軸圧縮試験装置 (最大軸荷重200 tf, 最大側圧 300 kgf/cm^2 , 電気油圧サーボ方式) を用いて実施した。なお、CD 試験では、ひずみ速度を $0.01\%/min$, CU 試験および UU 試験では、ひずみ速度を $0.02\%/min$ とし、バックプレッシャーは 4.0 kgf/cm^2 とした。ここで、設定した圧密圧力は次のとおりである。

$$\sigma_c = 2.5, 5.0, 10, 20, 40, 80, 160, 240 \text{ kgf/cm}^2$$

2.2 高圧定ひずみ速度圧密試験の方法

柿ノ木台層および大田代層の圧密降伏応力 p_c を求めることを目的に、図-3に示す軟岩の高圧定ひずみ速度圧密試験装置を用い、 $\phi 40 \text{ mm}$, $h 20 \text{ mm}$ の供試体により、ひずみ速度を $0.02\%/min$ として圧密試験を行った。

軟岩の定ひずみ速度圧密試験は、供試体に一定速度で強制的に変位を与えて圧密する試験法で、短期間に試験を終えることができる急速圧密試験法である。定ひずみ速度圧密試験に関する研究は、近年、沖積粘性土あるいは洪積土を対象として数多くなされている。軟岩への適用を行った研究例としては、小泉ら⁶⁾あるいは著者ら⁷⁾が洪積層、上総層群中部層などの軟岩を対象として研究を行っており、その有効性を論じている。

2.3 破壊形態の観察方法

破壊形態の観察は、三軸圧縮試験の破壊後供試体について、各圧密圧力別にスケッチ観察による巨視的な観察を行うとともに、代表的な圧密圧力時の破壊後供試体について、破断面近傍の微細片を用いて走査型電子顕微鏡で微視的な観察を行う方法で実施した。走査型電子顕微鏡による微視的な観察に供する微細片は、コアカッター等を用いて、約 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 程度の角柱に切り出し、液体窒素素内で凍結乾燥させた後破断した。なお、破断面は供試体の縦方向の面である。

図-2 高圧三軸圧縮試験装置図

図-3 軟岩用定ひずみ速度圧密試験装置図

3. 実験結果

3.1 試料の物理特性

柿ノ木台層および大田代層の物理特性は、表-1に示すように、ほとんど差が認められず、土粒子の密度 ρ_s が 2.67 g/cm^3 程度、自然含水比 w_n が28%程度、湿潤密度 ρ_t が 1.94 g/cm^3 となっている。コンシステンシー特性および粒度組成についても大きな差はなく、両者ともシルト分の卓越した試料である。

3.2 圧密特性

高圧定ひずみ速度圧密試験の結果によれば、柿ノ木台層は、圧密降伏応力 p_c が 83.2 kgf/cm^2 、また、大田代層の圧密降伏応力 p_c は 175 kgf/cm^2 となった。著者ら⁸⁾の既往の研究から見ると、柿ノ木台層は中部層全体のなかでも年代効果の発現が低い地層と推定でき、大田代層は地質学的な分類では下部層に分類されるが、下部層の平均的な圧密降伏応力 p_c よりかなり低めな値となっている。

これらの結果により、柿ノ木台層の正規圧密領域の確認できる圧密圧力 σ_c は、概ね 85 kgf/cm^2 以上と見積もられ、大田代層の場合には、少なくとも圧密圧力 σ_c が 180 kgf/cm^2 以上の領域でないと、正規圧密領域が確認できないものと推定される。柿ノ木台層および大田代層の間隙比 e と圧密圧力 p との関係($e \sim \log p$ 曲線)は、図-4のように、大田代層の方が明らかにセメンテーションに起因する年代効果の発現は顕著となっている。したがって、著者らの用いた高圧三軸圧縮試験装置では、大田代層の正規圧密領域における強度・変形挙動が十分

表-1 試料の物理特性

	土粒子の密度 $\rho_s (\text{g/cm}^3)$	自然含水比 $w_n (\%)$	湿潤密度 $\rho_t (\text{g/cm}^3)$	液性限界 $W_L (\%)$	塑性限界 $W_p (\%)$	塑性指数 I_p	砂分 (%)	シルト分 (%)	粘土分 (%)
上総層群中部層 柿ノ木台層	2.670	27.0	1.94	40.0	21.3	18.7	16.4	61.2	22.4
上総層群下部層 大田代層	2.678	28.1	1.94	51.9	33.6	18.3	20.3	56.6	23.1

図-4 柿ノ木台層および大田代層の $e - \log p$ 曲線

図-5 柿ノ木台層の軸差応力と軸ひずみとの関係 (UU 試験)

図-6 柿ノ木台層の軸差応力と軸ひずみとの関係 (CU 試験)

図-7 大田代層の軸差応力と軸ひずみとの関係 (CU 試験)

に評価できない可能性もあるため、以降、柿ノ木台層を中心にその挙動を対比検討する。

3.3 せん断応力下における強度・変形特性

3.3.1 応力～ひずみ特性

低圧力から高圧力領域の圧密圧力 σ_c で実施した柿ノ木台層の高圧三軸圧縮試験は、CU 試験および CD 試験を主体としているが、一部 UU 試験も行っている。強度・変形特性を論じるに当たって、排水・非排水状態における応力～ひずみ曲線の傾向を検討した。以下にその概要を述べる。

図-5に示す柿ノ木台層の UU 試験時の軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみ ε との関係を見ると、低側圧下においては、ひずみ硬化～軟化挙動が主体となっており、側圧 σ_3 が増加しても、ひずみ硬化型にはならない傾向を示した。また、ピーク時の軸差強度 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_f は 20～40 kgf/cm² 程度であり、概ね、側圧 σ_3 の増加に伴って軸差強度も多少増加する結果となった。

図-6に示す柿ノ木台層の CU 試験時の軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみ ε との関係は、240 kgf/cm² の圧密圧力 σ_c の領域まで、ひずみ硬化～軟化挙動の応力～ひずみ曲線を示しており、ひずみ硬化型の応力～ひずみ曲線に移行していない。なお、ピーク時の軸差強度 ($\sigma_1 - \sigma_3$)_f は、27～143 kgf/cm² となり、圧密圧力 σ_c が 80

kgf/cm² 以上での強度増加が大きくなっている。

図-7には大田代層の CU 試験時の軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみ ε との関係を示しているが、圧密圧力 σ_c が 240 kgf/cm² の領域まで、ひずみ硬化～軟化挙動を呈している。特に低い圧密圧力 σ_c 下においては、柿ノ木台層と比較するとぜい性的な挙動が支配的な結果となっている。これは、大田代層の圧密降伏応力 p_c が 175 kgf/cm² と大きく、広範囲に過圧密領域が存在することになり、明瞭なひずみ硬化～軟化型の挙動 (ぜい性破壊) を示すことになっているものと考えられる。

図-8には、柿ノ木台層の CD 試験時の軸差応力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) と軸ひずみ ε との関係を示すが、同図から見ると、圧密圧力 σ_c が 20 kgf/cm² 以下の応力レベルでは、ひずみ硬化～軟化型の挙動となっているものの、それ以上の圧密圧力 σ_c においてはひずみ硬化型の挙動が明瞭となった。このように、圧密排水状態においては、少なくとも、圧密降伏応力 p_c 以上の圧密圧力 σ_c 下で、明瞭なひずみ硬化型の応力～ひずみ曲線が認められることが判明した。なお、破壊ひずみ ε_f は 15% までで評価している。一方、圧密非排水状態においては、圧密降伏応力 p_c 以上の応力レベルでも、ひずみ軟化の程度が少なくなるものの、ひずみ硬化～軟化型の挙動が支配的となり、ひずみ硬化型の挙動が認められない結果となった。

図-8 柿ノ木台層の軸差応力と軸ひずみとの関係 (CD試験)

足立・小川⁹⁾は、大谷石を用いて拘束圧を0から200 kgf/cm²まで変化させた排水および非排水試験を行っており、非排水試験の結果で見ると、高拘束圧下においてもひずみ硬化～軟化挙動を確認している。また、排水試験でもひずみ軟化型の応力～ひずみ曲線となっている。足立らは、排水試験時に、軸ひずみ ε が25%程度まで試験を行って軟化の確認を行っているが、一般的に評価されている15%の軸ひずみ ε で見れば、ひずみ硬化型の応力～ひずみ曲線に近いとみなせる。このように、排水試験においては、測定可能な軸ひずみ ε の程度によって、ひずみ軟化や硬化の挙動が任意的に決定される可能性が生じる。

高い圧密圧力 σ_c 下における非排水試験時にひずみ硬化～軟化型の応力～ひずみ曲線が認められる理由は、間隙水圧の増加により有効圧密圧力 σ'_c が減少していくことに起因しているものと考えられ、完全に正規圧密領域の応力レベルに至っていない場合には、ひずみ硬化型の応力～ひずみ曲線とはならないと推定される。

3.3.2 強度・変形特性

図-9に圧密圧力 σ_c 、側圧 σ_3 (UU試験では、側圧 σ_3)と最大軸差強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ との関係を示す。図-9のUU試験結果を見ると側圧40 kgf/cm²以下の低圧力領域では、多少強度増加しているものの、側圧40 kgf/cm²以上の高圧力領域では明瞭な強度増加が見られず、ほぼ一定の値を示している。CD試験は、圧密圧力40 kgf/cm²以上の高圧力領域になると急激な強度増加を示しているが、直線的な一定増加傾向とはなっていない。 $\overline{CU}$ 試験は、せん断時の間隙水圧を考慮しない全応力と、間隙水圧を考慮して整理した有効応力の2種類を併せて示している。 $\overline{CU}$ 試験の全応力で示した結果を見ると、CD試験と同様に圧密圧力 σ_c が40 kgf/cm²以上の高圧力領域から徐々に増加し、下に凸の増加傾向を示している。この挙動は、足立・小川⁹⁾の大谷石による試験結果と同様であり、軟岩特有の高圧力領域における挙

図-9 柿ノ木台層の最大軸差強度と圧密圧力および側圧との関係

図-10 柿ノ木台層の変形係数と圧密圧力および側圧との関係

動と考えられる。また、有効応力で整理を行うと、全応力の挙動とは異なり、圧密圧力 σ_c が40 kgf/cm²以上になると急激な間隙水圧の発生が確認された。

図-10の圧密圧力 σ_c 、側圧 σ_3 と変形係数 E_{50} (変形係数 E_{50} は、最大軸差応力の1/2の応力における割線勾配)との関係を見ると、UU試験では強度増加を示した低圧力領域で、変形係数 E_{50} は側圧 σ_3 の増加とともに多少大きくなっている。しかし、強度がほぼ一定になっている高圧力領域では、ばらつきがあるものの側圧 σ_3 の影響はないと考えられる。CD試験の結果を見ると、変形係数 E_{50} は低圧力側ではほぼ一定値を示し、圧密圧力 σ_c が40 kgf/cm²、80 kgf/cm²では増加している。しかし、圧密圧力 σ_3 が160 kgf/cm²以降になると変形係数 E_{50} は低下している。これは、図-8に示したように軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ と軸ひずみ ε との関係が、明瞭なひずみ硬化型の応力～ひずみ曲線になっている場合、最大軸差強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を軸ひずみ ε が15%時で評価していることから、変形係数 E_{50} が低下する結果となる。 $\overline{CU}$ 試験における変形係数 E_{50} は、低圧力側で直線的に増加し、圧密降伏応力 p_c 以上の圧密圧力 σ_c 領域でも、応力

図-11 柿ノ木台層の圧密圧力で正規化した軸差強度と軸ひずみとの関係

図-12 柿ノ木台層の圧密圧力で正規化した間隙水圧と軸ひずみとの関係 (CU試験)

～ひずみ曲線がひずみ硬化～軟化型の挙動を示しているため、圧密圧力 σ_c の影響を大きく受け、急激に変形係数 E_{50} が増加することが確認された。

本研究においては、軟岩では比較的实施例が少ない高圧力領域までのCU試験実施している。ここでは、その結果に基づいて、圧密降伏応力 p_c を境とした場合の過圧密領域と正規圧密領域における強度・変形特性および間隙水圧特性について詳細に検討する。

図-11には、柿ノ木台層のCU試験によって得られた軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ を圧密圧力 σ_c で正規化した強度 $(\sigma_1 - \sigma_3) / \sigma_c$ と軸ひずみ ε との関係を示す。また、間隙水圧 u についても同様に圧密圧力 σ_c で正規化した間隙水圧 u / σ_c と軸ひずみ ε との関係を図-12に示す。図-11から圧密降伏応力 p_c が83 kgf/cm² 以下の過圧密領域における応力～ひずみ曲線を見ると、圧密圧力 σ_c が2.5 kgf/cm² の応力～ひずみ曲線は、軸ひずみ ε が1.7%近傍でピーク強度を示し、それ以降明瞭な軟化を示す非常にぜい性的な挙動となっている。しかし、圧密圧力 σ_c の増加とともに、ぜい性的な挙動は徐々に消失する傾向を示し、圧密圧力 σ_c が40 kgf/cm² 以上になると、応力～ひずみ曲線は、ほとんど同じ曲線となっている。この結果から、軟岩においても応力レベルは大きく異なる

図-13 柿ノ木台層の過圧密領域における有効応力経路

るが、正規圧密領域での強度・変形および間隙水圧特性は、沖積粘性土と同様の挙動を示していることが理解される。

図-12の間隙水圧 u の挙動を見ると、圧密圧力 σ_c が2.5から10 kgf/cm² までの領域は、破壊強度近傍あるいはそれ以前に間隙水圧 u のピークが認められる（ただし、圧密圧力 σ_c が2.5 kgf/cm² 時の間隙水圧は、破壊後の急激な負の間隙水圧 u の発生により圧力計の容量を越えたため、ひずみ3%以降の挙動が不自然となっている）。また、間隙水圧 u の収束値は、圧密圧力 σ_c の増加に伴い、圧密圧力 σ_c が40 kgf/cm² まで増加し、それ以降の圧密圧力 σ_c では応力～ひずみ曲線と同様に1本の曲線で示することができる。

図-13と図-14には、破壊後の間隙水圧 u の変化に着目して、圧密圧力 σ_c が20 kgf/cm² 以下の過圧密領域と40 kgf/cm² を含めた正規圧密領域におけるせん断応力 $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ と平均有効応力 $(\sigma_1' + \sigma_3') / 2$ で表される応力経路をそれぞれ示す。また、図には、せん断応力 $(\sigma_1 - \sigma_3) / 2$ と全応力表示の $(\sigma_1 + \sigma_3) / 2$ の応力経路を合わせて示している。図-13の過圧密領域の応力経路を見ると、圧密圧力 σ_c が2.5, 5, 10 kgf/cm² の供試体では、圧縮せん断開始後徐々に間隙水圧 u が上昇していき、破壊強度を示す手前で間隙水圧 u が負圧となり、供試体が破壊していることを示している。しかし、圧密圧力 σ_c が20 kgf/cm² の供試体では、間隙水圧 u の挙動は、破壊強度時に負圧とならずに破壊後も増加傾向にある。この間隙水圧 u の挙動は、一般的に沖積粘性土の正規圧密状態における挙動と同様である。したがって、圧密降伏応力 p_c 以下の過圧密領域においても間隙水圧 u に着目すると、圧密圧力 σ_c が20 kgf/cm² 近傍は正規圧密領域とも判断できる。

正規圧密状態における軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ および間隙水圧 u と軸ひずみ ε との関係は、図-11、図-12に示すように、ほぼ同一の曲線で表され、図-14のせん断

図-14 柿ノ木台層の正規圧密領域における有効応力経路

図-15 柿ノ木台層と大田代層の間隙水圧係数と圧密圧力比との関係

過程の応力経路では、圧密圧力 σ_c に関係なく応力経路が相似形となっている。

図-15には、柿ノ木台層と大田代層の破壊時の間隙水圧係数 $A_f [A_f = u/(\sigma_1 - \sigma_3)_f]$ と圧密降伏応力 p_c を圧密圧力 σ_c で正規化した圧密応力比 (p_c/σ_c) との関係を示す。図中の圧密応力比 (p_c/σ_c) が1を示す点は、圧密降伏応力 p_c を表し、過圧密領域と正規圧密領域との境になっており、その時点での間隙係数 A_f は0.8から1.0付近となっている。図を見ると間隙水圧係数 A_f は、圧密応力比 (p_c/σ_c) の値が5以上、すなわち低圧密圧力では、0から0.2の値を示し、圧密応力比 (p_c/σ_c) の減少（圧密圧力の増大）に伴って、若干の増加傾向を示している。圧密応力比 (p_c/σ_c) の値が5以下では、圧密応力比 (p_c/σ_c) の減少に伴い、間隙水圧係数 A_f の増加傾向は大きくなる。

3.3.3 破壊基準

図-16～図-18には、柿ノ木台層の各試験条件における破壊時のモールの応力円と破壊包絡線を示した。

UU試験では側圧の増加に伴う強度増加がほとんど見られないため、図-16に示す破壊包絡線から強度定数を求めると、粘着力 C_d が12.3 kgf/cm²、内部摩擦角 ϕ_u

図-16 柿ノ木台層のモール円と破壊包絡線 (UU試験)

図-17 柿ノ木台層のモール円と破壊包絡線 (CD試験)

が1.59°となった。また、図-17のCD試験における強度定数は、粘着力 C_d が7.86 kgf/cm² とかなり粘着力成分を有する結果となった。これは、圧密圧力 σ_c が2.5 kgf/cm² 時の供試体でも30 kgf/cm² 程度の軸差強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ を示しており、圧密圧力 σ_c が20 kgf/cm² 以下の低圧側で、軸差強度 $(\sigma_1 - \sigma_3)_f$ がほとんど変化しないことに起因している。図-18の(a), (b)に示すCU試験の全応力表示と有効応力表示でのモールの応力円と破壊包絡線を見ると、正規圧密領域と考えられる80 kgf/cm² 以上の圧密圧力 σ_c 下では、包絡線が直線的となるが、過圧密領域では非線形な包絡線となっている。また、非線形な破壊包絡線の垂直応力 σ は、有効応力表示の方が狭い範囲となっている。

各試験条件の破壊包絡線をまとめてみると、図-19に示すように垂直応力 σ が40 kgf/cm² 以下では、各種包絡線が比較的まとまっているものの、それ以上の垂直応力から各々差が生じてきている。

CU試験の破壊包絡線は、全応力表示および有効応力表示とも過圧密領域における包絡線と正規圧密領域の包絡線からなっている。全応力表示および有効応力表示の過圧密領域における包絡線と正規圧密領域の包絡線との交点を、それぞれ σ_y , σ'_y とすると、 σ_y が124 kgf/cm², σ'_y が44 kgf/cm² となっている。

大田代層のCU試験のモールの応力円を見ると、図-20に示すように柿ノ木台層ほど明確に過圧密領域と正規圧密領域を判断することができない。これは、大田代層が柿ノ木台層と比べて、圧密降伏応力 p_c が175 kgf/cm² と大きく、圧密圧力 σ_c が240 kgf/cm² においても明瞭な強度増加は認められないためと考えられる。ここ

(a) 全応力表示

(b) 有効応力表示

図-18 柿ノ木台層のモール円と破壊包絡線 (CU 試験)

図-19 各試験条件の破壊包絡線

では、圧密圧力 σ_c が 240 kgf/cm^2 を正規圧密領域として、過圧密領域と正規圧密領域の破壊包絡線を求めている。全応力表示の交点 σ_y と有効応力表示の交点 σ'_y は、 σ_y が 227 kgf/cm^2 、 σ'_y が 112 kgf/cm^2 と見積もられる。

図-21には、柿ノ木台層の過圧密領域の有効応力経路とべき乗関数表示による破壊基準線を示している。なお、図の縦軸は軸差強度 $q = (\sigma_1 - \sigma_3)$ とし、横軸は平均有効応力 $\sigma'_m = (\sigma'_1 + 2 \cdot \sigma'_3)/3$ としている。過圧密領域における挙動は、排水、非排水条件に係わらず、べき乗関数による破壊基準線で、良く表されている。また、正規圧密領域の有効応力経路とべき乗関数表示による破壊基準線を図-22に示すが、高圧力側で多少基準線との離れがあるものの、比較的良く対応している。

以上のように CD 試験および CU 試験結果を有効応力で整理してみると、前述の過圧密領域および正規圧密領域のべき乗関数の破壊基準線は、排水条件によらず、最

(a) 全応力表示

(b) 有効応力表示

図-20 大田代層のモール円と破壊包絡線 (UU 試験)

図-21 柿ノ木台層の過圧密領域におけるべき乗関数による破壊基準線

大強度ならびに残留強度を一意的に表していると言えよう。

足立・小川⁹⁾によれば、軟岩においては先行履歴応力が存在するとしており、平均有効応力の対数表示 $\log(\sigma'_m)$ と軸差強度の対数表示 $\log(q)$ との関係から求めることができるとしている。ここでは、過圧密領域の破壊基準線と正規圧密領域の破壊基準線との交点を先行履歴応力 p' とすれば、求められる p' は 40.5 kgf/cm^2 となる。

3.4 破壊形態の観察

3.4.1 巨視的観察

破壊形態の観察は、UU 試験、CU 試験、CD 試験の各側圧あるいは各圧密圧力 σ_c 下における破壊後供試体について破断状況を巨視的に観察した。図-23には、柿ノ木台層試料による UU 試験時の各側圧 σ_3 下における巨視的観察結果をまとめているが、以下にその破断状

図-22 柿ノ木台層の正規圧密領域におけるべき乗関数による破壊基準線

図-23 柿ノ木台層の供試体破壊後の観察 (UU 試験)

況を述べる。

UU 試験における供試体の破断状況は、部分的には、側圧 σ_3 が 80 kgf/cm² のように、破断面の発生よりも樽型変形挙動が卓越する供試体も認められているが、全般的な傾向としては、側圧 σ_3 の大きさに左右されず、明瞭な破断面が生じる結果となっている。

図-24に示す CU 試験時の破壊後観察によれば、3種類の破壊形態に分類された。圧密圧力 σ_c が 10 kgf/cm² までの低圧密圧力下では、明瞭な破断が認められ、圧密圧力 σ_c が 20~40 kgf/cm² 間では、樽型変形と不明瞭な破断面が共存する領域となり、さらに、圧密圧力 σ_c が 80 kgf/cm² 以上の領域では、破断面が形成されず樽型変形の挙動が主体となっている。これらの結果から判断すると、圧密圧力 σ_c が 80 kgf/cm² 以上において塑性的変形により、破断面が形成されない樽型変形挙動となるため、この付近の圧密圧力 σ_c からは、正規圧密領域と推定できるものと考えられる。

図-25に示す CD 試験時の破壊後観察によれば、圧密圧力 σ_c が 10 kgf/cm² までの低圧密圧力下において明瞭な破断面が認められ、圧密圧力 σ_c が 20 kgf/cm² 以降の圧密圧力 σ_c 下においては破断面が形成されず、樽型

■: SEMに供した サンプル位置

図-24 柿ノ木台層の供試体破壊後の観察 (CU 試験)

変形の挙動もほとんど認められない状況であった。

これらの要因は、足立・小川⁹⁾が述べているように、最大強度=残留強度の応力状態下にあることに起因しているため、この領域は、せん断変形が進行するものの、体積変化が生じない状態と考えられる。

大田代層試料による CU 試験における破壊形態の観察を図-26に示す。同図によれば、圧密圧力 σ_c が 80 kgf/cm² 以下の領域は、ぜい性破壊による明瞭な破断面が認められる。また、圧密圧力 σ_c が 240 kgf/cm² までは、不明瞭な破断面と樽型変形の共存する領域で、明瞭な樽型変形は認められない結果となっている。破壊観察による結果から見ると、この領域はまだ完全な正規圧密状態となっていないものと考えられる。

破壊形態については、吉中ら¹⁰⁾の研究がある。吉中ら¹⁰⁾は、新第三紀の富岡層のシルト岩試料を用いて圧密排水 (CD) 試験を行い、ひずみの進行に伴う内部破壊の進展状況を調べている。その結果は、低拘束圧ほど縦割れを伴うぜい性破壊を示し、拘束圧が高くなると、大きな軸ひずみを与えても供試体全体に塑性的な変形が進行してすべり面が認められないこと、また、両者の中間の領域では、一枚のシャープなすべり面が生じることを述べている。

本研究においても、吉中ら¹⁰⁾の研究と同様な傾向となっており、過圧密領域では明瞭なぜい性破壊による破断面が認められ、これがひずみ硬化~軟化型の応力~ひずみ曲線となって反映されることが判明した。さらに、CD 試験での正規圧密領域におけるひずみ硬化型の応力~ひずみ曲線は、CU 試験時の樽型変形挙動と異なり、ほとんど体積変化が生じない状態でせん断変形を生じるタイプとなることが確認された。

図-25 柿ノ木台層の供試体破壊後の観察 (CD 試験)

図-26 大田代層の供試体破壊後の観察 (CU 試験)

3.4.2 微視的観察

柿ノ木台層の代表的な破壊後供試体の中央部付近を横にスライスして、走査型電子顕微鏡 (SEM) に供するサンプルを作成した。観察に供した試料は、 $\overline{CU}$ 試験時の圧密圧力 σ_c が 10 kgf/cm², 240 kgf/cm² の試料である。なお、サンプルの位置は図-24に併記している。

写真-1 および写真-2 には、圧密圧力 σ_c が 10 kgf/cm² 時の供試体せん断中央部の500倍の走査型電子顕微鏡観察結果を示している。写真-1 は、せん断部を撮影したもので、写真の右上から左下の方にシャープな破断面の状況が反映されている。写真-2 は、写真-1 より数 mm 離れた部分であるが、粒子の配列が不規則で、写真-1 のような方向性は認められない。また、粒子の稜角が存在し、粒子間に空隙を確認することができる。

写真-3 には、圧密圧力 σ_c が 240 kgf/cm² 時の樽型供試体中央部の500倍の走査型電子顕微鏡結果を示しているが、シャープな破断面は認められず、写真-1 および写真-2 と比較すると全体的に凹凸がなく緩やかな曲面を有し、かなり密実な状態となっていることが確認できる。

柿ノ木台層の $\overline{CU}$ 試験時の応力～ひずみ曲線は、圧密圧力 σ_c が 240 kgf/cm² の領域まで、ひずみ硬化～軟化挙動を示しているが、前述したように、過圧密領域である圧密圧力 σ_c が 10 kgf/cm² の供試体では、破壊強度を示す手前から間隙水圧が減少し、ややぜい性的挙動を示している。写真-1 および写真-2 に示した観察結果は、これらのことを反映した結果であり、シャープな破断面を有し、破断した後においては、破断面以外の部分では粒子間を押し縮めるような変形は進行しないことを示している。写真-3 に示す圧密圧力 σ_c が 240 kgf/cm² の供試体では、圧密降伏応力 p_c を越えた高い圧密応力

σ_c に起因して、塑性的変形が卓越した結果を反映し、明瞭な破断面は存在せず、粒子間の空隙が押し縮められている。

以上のような結果は、今まで述べてきた内容と整合するものと考えられる。

3.5 先行履歴応力の推定

三軸圧縮試験結果は、先行履歴応力の影響を反映するものと考えられる。ここでは、今回実施した三軸圧縮試験から得られた強度・変形特性と破壊形態を基に、柿ノ木台層の先行履歴応力の推定を試みる。

すでに、三軸圧縮試験のせん断応力下の強度・変形特性と破壊形態について述べたが、強度・変形特性および破壊形態に変化が生じる圧密圧力 σ_c に注目すると、それらは 40 kgf/cm² に集中しており、破壊基準から求められる交点の垂直応力 σ'_y および p' とともに 40 kgf/cm² 付近となっている。したがって、40 kgf/cm² 付近ないしそれ以下の応力に履歴応力に起因する変曲点があると判断できる。

今回実施した定ひずみ速度圧密試験結果から先行圧密圧力 P_0 を想定したのが図-27である。筆者ら⁸⁾は、連続的に厚く堆積する上総層群では、年代効果の発現にかかわらず、高い圧力の正規圧密領域で $e \sim \log p$ 曲線がほぼ一致するとしている。この考えに基づいて、図中の圧密降伏応力以上の $e \sim \log p$ 曲線のうち、圧力の高い領域の直線部を延長して、過圧密領域の $e \sim \log p$ 曲線と交差する点を先行圧密圧力 P_0 とした。この結果によれば、先行圧密圧力 P_0 は 35 kgf/cm² と見積られた。

以上の結果から判断して、柿ノ木台層の先行履歴応力は、35～40 kgf/cm² 程度と推定できる。

×500

写真-1 供試体破壊後の走査型電子顕微鏡写真 (CU 試験, $\sigma_c = 10$ kgf/cm², せん断部)

×500

写真-2 供試体破壊後の走査型電子顕微鏡写真 (CU 試験, $\sigma_c = 10$ kgf/cm²)

×500

写真-3 供試体破壊後の走査型電子顕微鏡写真 (CU 試験, $\sigma_c = 240$ kgf/cm²) 図-27 柿ノ木台層の $e - \log p$ 曲線から推定される先行圧密圧力

4. ま と め

本研究は、上総層群の柿ノ木台層および大田代層試料を用いて、低圧から高圧領域までの排水、非排水状態の三軸圧縮試験ならびに高圧定ひずみ速度圧密試験などを実施して、強度・変形特性を論じるとともに、その破壊形態を巨視的観察と走査型電子顕微鏡による微視的観察によって総合的に検討を加えた。さらに、これらの結果から、先行履歴応力の推定を試みた。以下に本研究での知見を要約する。

(1) 応力～ひずみ特性では、排水条件によらず、低い圧密圧力 σ_c 下において、ぜい性破壊に起因するひずみ硬化～軟化型の応力～ひずみ曲線が顕著に認められた。

圧密排水状態では、少なくとも圧密降伏応力 p_c 以上の圧密圧力 σ_c 下で、明瞭なひずみ硬化型の応力～ひずみ曲線が認められた。しかし、圧密非排水状態の場合は、圧密降伏応力 p_c 以上の応力レベルでも軟化の程度が少なくなるものの、ひずみ硬化～軟化型の応力～ひずみ曲線となることがわかった。

(2) 正規圧密領域での強度・変形および間隙水圧特性は、応力レベルは大きく異なるが、沖積粘性土と同様の挙動を示すことがわかった。また、間隙水圧係数 A_f は、圧密圧力が、大きくなるに従って増加し、過圧密領域のある点から、増加傾向が大きくなる。

(3) 各試験条件のモールの破壊包絡線をまとめてみると、垂直応力 σ が 40 kgf/cm² 以下では、包絡線が比較的まとまっている。CD 試験および CU 試験結果を有効応力で整理すると、過圧密領域および正規圧密領域のべき乗関数の破壊基準線は、排水条件によらず、最大強度ならびに残留強度を一意的に表す結果となった。

(4) 破壊後供試体の巨視的観察で、柿ノ木台層の CU 試験において、3 区分の破壊形態が認められた。すなわちぜい性破壊主体の破壊と、不明瞭な破断面と構型変形挙動が共存する破壊、塑性的変形により構型変形となる破壊に区分できた。一方、CD 試験においては、低圧密圧力 σ_c ではぜい性破壊が主体となるが、圧密圧力 σ_c が大きくなると、破断面が形成されず構型変形挙動も認められない状況となった。

微視的観察の結果では、柿ノ木台層の $\overline{\text{CU}}$ 試験時の破壊後供試体を対象としたが、圧密圧力 σ_c が10 kgf/cm²時に明瞭な破断状況が認められるものの、圧密圧力 σ_c が240 kgf/cm²の供試体では、破断状況が不明瞭で明確な破断面は観察されず、巨視的観察と微視的観察との結果はほぼ調和的と判断された。

(5) 先行履歴応力の推定

軟岩の先行履歴応力は、三軸圧縮試験および圧密試験から推定することができ、上総層群の柿ノ木台層の先行履歴応力は、35~40 kgf/cm²程度と推定できた。

参 考 文 献

- 1) 岩本 健・斉藤英光・西田和範・田中荘一 (1990) : 過圧密な材料の K_0 圧密三軸試験について, 第22回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 331-335.
- 2) 星野一男・渡辺浩平・傳田 篤・釜井俊孝 (1990) : 房総半島における深部泥岩層の力学特性, 第25回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 1119-1120.
- 3) 渋谷政文・小松原徹・渡辺浩平・伊東亮治 (1990) : シルト岩の力学特性について, 第25回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 1065-1066.
- 4) 小林正邦・安食芳夫・渡辺浩平・菅沼義則・山本和義・河田孝志 (1991) : 高圧下における固結シルトの力学特性, 第26回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 1119-1120.
- 5) 小林和彦・石井利信・渡辺浩平・山本和義 (1992) : 上総層群上星川層の力学特性, 第27回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 1225-1226.
- 6) 小泉和広・細野高康・中島雅之・杉田信隆・水上純一 (1992) : 洪積粘土から第三紀堆積軟岩を対象とした定ひずみ速度圧密試験について, 第27回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 333-334.
- 7) 細野高康・小泉和広・小川正二 (1992) : 軟岩の定ひずみ速度圧密試験, 第27回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 1227-1230.
- 8) 細野高康・小泉和広・杉田信隆・小川正二 (1993) : 上総層群の高圧圧密特性, 応用地質, Vol. 34, No. 5, pp. 15-24.
- 9) 足立紀尚・小川豊和 (1980) : 堆積軟岩の力学特性と破壊基準, 土木学会論文報告集, 第295号, pp. 51-63.
- 10) 吉中龍之進・山辺 正・宮崎 勝・渡辺克己 (1982) : シルト質軟岩の破壊形態と応力~ひずみ曲線との関係, 第17回土質工学研究発表会発表講演集, pp. 605-608.

(1993年6月30日受付, 1993年9月22日受理)