

## 珪藻質軟岩の力学的特性

## MECHANICAL PROPERTIES OF DIATOMACEOUS SOFT ROCK

前川 晴 義\*・宮 北 啓\*\*

By Haruyoshi MAEKAWA and Kei MIYAKITA

## 1. 序 論

近年、土と岩との中間に位置する軟岩地盤を基礎とした大型重量構造物の施工例が多くなり、これに伴い軟岩分野の材料を対象とした研究<sup>1),2)</sup>も盛んに実施されるようになってきた。一般に軟岩とよばれる材料は一軸圧縮強度が 10~200 kgf/cm<sup>2</sup> (0.98~19.61 MPa) 程度の範囲であり、一部には間隙比が特に高く、固結性を有するなどの特徴を挙げることはできるが、定義としては明確なものがない。また生成過程からも堆積岩、風化岩、変質岩、熔結凝灰岩に大別されるとおり広範囲なものより成るため、挙動的には材料特性の相違から多様となり<sup>3),4)</sup>、特に力学的特性を表現できる統一的な理論、構成式などはいまだ明確にされていないのが現状である。

本報告で対象とする珪藻質軟岩は堆積岩に属し、軟岩分野の中にあっても、強度を支配する要因のうち、セメンテーション作用(膠結作用)で代表される固結成分の占める割合が高く、このため非常に多孔質な状態であるにもかかわらず安定した組織形態を有し、その圧縮強度は土に比べると高いが、岩の中では最も小さいグループに属する材料の一つである。著者らは本軟岩の強度、変形特性および各強度成分(固結力、組織構造力など)の定量的関係を究明する一方、スレーキング現象で問題となる固結成分の影響に着目し、実験を行っている。

本論は一連の研究過程の中で、三軸応力下における本軟岩の有する強度、変形特性について述べると同時に、他の材料では今までほとんど認められていなかったユニークな挙動関係より、次の2つの特性についても検討を行う。

すなわちその一つは排水試験結果をもとに、マクロ的な立場より降伏挙動に関する知見を現象論的に取り扱う

ものと、他の一つは材料組織の破壊挙動を新たにセメンテーション作用の影響を考慮に入れ、ミクロ的な見地から推論しようとしたものである。前者については設計、施工時に重要な弾、塑性域を区分する応力域およびその降伏曲線の決定に Roscoe らが提案する Cam-Clay モデルの降伏関数<sup>5)</sup>を引用し表現したが、排水試験で得られたせん断初期のきわめて明確な初期降伏特性と十分に近似するものであった。また後者についてはせん断過程での排水、非排水条件による応力~ひずみ関係および破壊規準での相違点を挙げ、従来から述べられている体積変化と間隙水圧の相関関係は必ずしもすべての応力範囲で適用できず、新たにセメンテーション成分の影響と側圧条件を考慮した解析が必要であることを指摘する。

## 2. 珪藻質軟岩の特性

珪藻質軟岩(一般に珪藻土、珪藻泥岩とよばれている)は珪藻の遺骸、粘土および火山灰などが堆積して形成されたもので、日本全域に点在している。今回の実験には石川県能登半島の、先端部に位置した珠洲地区に堆積している、第三紀中新世後期の飯塚珪藻泥岩層より採取したものをを用いた。なおこの層の厚さは最大が約 400 m、平均で約 100 m あり、地表に露出した箇所が多い。このような層は能登半島の全域で点在するように認められ、推定埋蔵量は 27 億トンといわれている。本軟岩は工業面からの利用価値が高く、高温での焼成により軽量でしかも断熱性、耐圧性に富んだ物性に変化するため、現在も窯業材に広く利用されている<sup>6)</sup>。

また基礎地盤としては、近年この地方の開発が進むにつれて、堆積場所が海岸付近に多いことより施工の対象となる場合が多く<sup>7)</sup>、このため特に力学的特性の解明が急がれている現状である。物性的には間隙比が約 2.6 ときわめて多孔質なため地下水面下での含水比は高いが、一軸圧縮強度は 19~22 kgf/cm<sup>2</sup> (1.86~2.16 MPa) を

\* 正会員 工修 金沢工業大学講師 土木工学科

\*\* 正会員 農博 金沢工業大学教授 土木工学科

示し、脆性的な破壊状況を呈する。しかしオーガーボーリングなどにより練返し作用が地盤に与えられると、乱れによる強度の低下をきたすと同時に、非常に粘りけの高い材料に一変し、このため工事が難行するケースが多い。

なお特筆すべきことは今回の試料はいずれも不かく乱および未風化の両条件とも満足しており、さらに材質の均一性も兼ね備えていることより、本報告におけるような固結性を有する材料を対象とした研究に対しては、まさに理想的なものと考えている。

### 3. 供試体および実験方法

試料は石川県珠洲市の採土横坑の切羽から、未風化ではほぼ飽和状態のものを堆積方向に留意して、一辺が 35 cm 程度のブロック状に切り出し、成形までの期間に乾

表-1 供試体の諸性質

比重 $G_s$	2.21
含水比 $w$	118.4%
湿潤密度 $\rho_t$	1.35 g/cm <sup>3</sup>
乾燥密度 $\rho_d$	0.62 g/cm <sup>3</sup>
間隙比 $e$	2.56

燥しないよう十分に注意した。供試体への成形はいったん角柱状に細分割し、金属加工用旋盤を用いて円柱状にした後、カッター、ガラス面で高さ約 10 cm、直径約 5 cm

に仕上げ、実験に使用するまでは恒温恒温室で水浸させた。なお供試体の物理的諸性質を表-1 に示す。

実験には中容量三軸圧縮試験機（最大側圧 80 kgf/cm<sup>2</sup>、7.85 MPa）を使用し、非圧密非排水試験（UU 試験）、圧密非排水試験（CU 試験）、圧密排水試験（CD 試験）を行った。供試体には両端面にテフロンシートを貼り、ペーパードレーンによる側方排水とし、予備圧密は等方圧 0.5 kgf/cm<sup>2</sup>（0.049 MPa）を与えた。圧密過程では所要の等方圧を負荷させ、間隙水圧の安定を確認し圧密を行った。せん断過程は非排水試験の場合、背圧として 5 kgf/cm<sup>2</sup>（0.49 MPa）を与えた後、圧縮速度が  $3.5 \times 10^{-3}$  mm/min を、また排水試験の場合は間隙水圧の発生を懸念し、 $8.8 \times 10^{-4}$  mm/min によるひずみ制御のもとで残留強度に達するまで実施したが、排水試験では一つの側圧条件を終了するまで約 1 か月を要した。なお排水量はダミービューレットにより、蒸発量の補正を行っている。また本実験では圧縮量が非常に大きく、工学的ひずみで表わすとその誤差が大きくなるため、ひずみ量の大きい排水試験などについては真ひずみで整理している。

### 4. 実験結果

#### (1) B 値

図-1 は等方圧条件のもとで供試体に作用する応力増

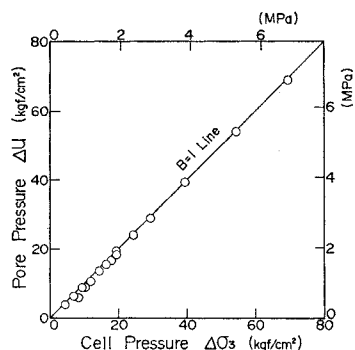


図-1 B 値の検討

分と、これにより発生する間隙水圧の関係を示している。図中の  $B=1$  線と比較し、 $\sigma_3=20$  kgf/cm<sup>2</sup>（1.96 MPa）以下の低側圧では若干減少の傾向を示すが、側圧の増大に伴い  $B=1$  線に漸近していることより、Terzaghi の有効応力解析を十分に適用し得ることが確認された。

#### (2) 等方圧密試験

本節ではせん断試験の圧密過程である等方圧下における応力～ひずみ関係について述べる。

図-2 は等方圧と体積ひずみを示しているが、圧密降伏応力  $p_c$  の 27 kgf/cm<sup>2</sup>（2.65 MPa）を境として急激な体積変化の増大を生ずる圧密曲線となる。特に、 $p_c$  付近の曲線の形状は鋭敏性の高い不かく乱粘土の挙動と類似した弓状となり<sup>2)</sup>、 $\sigma_3=30$  kgf/cm<sup>2</sup>（2.94 MPa）を越える等方圧のもとでは直線的な傾向を強める。また  $\sigma_3=20$ （1.96）、30（2.94）、40（3.92）kgf/cm<sup>2</sup>（MPa）

で圧密した後、それぞれを  $\sigma_3=5$  kgf/cm<sup>2</sup>（0.49 MPa）にまで除荷した場合の結果もあわせて示したが、回復ひずみは非常に小さい。以上のことより、圧密降伏応力  $p_c$  を越える等方圧のもとでは、既成の組織形態になんらかの破壊が生じているものと推定できる。一般に圧密曲線の  $p_c$  を境として、過去の応力履歴との関係よりそれぞれ過圧密、正規圧密領域に区分するが、本軟岩の場合には生成時における地質的背景からも、この  $p_c$  は過去の

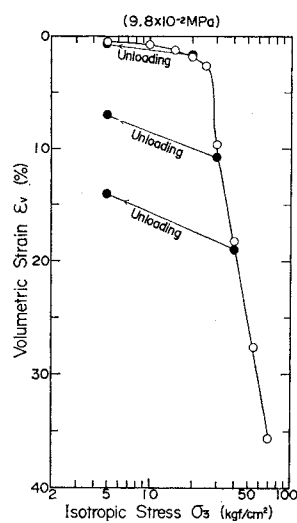


図-2 等方圧下の圧密曲線

有効土被り圧（現在の土被り厚さはせいぜい数 10 m にすぎない）に相当するものではなく、その固結成分の存在が多分に影響しているものと思われる。ただし、ここでは従来どおりにこの  $p_c$  を境とした側圧条件をそれぞれ過圧密領域および正規圧密領域とよぶことにする。

(3) 非圧密非排水試験 (UU 試験)

本試験は所要の側圧 10~70 kgf/cm<sup>2</sup> (0.98~6.86 MPa) の範囲で 6 個の側圧条件について実施した。最大軸差応力および残留応力は側圧の大きさに関係なくほぼ同一な値となり、せん断後の供試体にはすべて 60~65° の破壊面が認められた。図-3 は結果を Mohr 円で整理したもので、実線は最大せん断強度時 ( $\epsilon_1=2.3\sim2.6\%$ )、破線は残留強度時 ( $\epsilon_1=12\%$ ) を結ぶ破壊包絡線である。

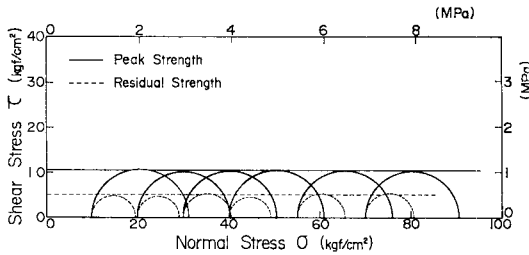


図-3 UU 試験の Mohr 円および破壊包絡線

これより最大せん断強度、残留強度はともに粘着成分のみで表わす  $\phi_u=0$  法が適用でき、それぞれの値は  $c_u=11$  kgf/cm<sup>2</sup> (1.08 MPa)、 $c_r=5$  kgf/cm<sup>2</sup> (0.49 MPa) であり、 $c_u$  は周知のように一軸圧縮強度  $q_u$  の約 1/2 に相当している。また試験中は間隙水圧の測定も行ったが、側圧の増大による有効応力の増加はまったく認められなかった。

(4) 圧密非排水試験 (CU 試験)

図-4 は側圧 5~70 kgf/cm<sup>2</sup> (0.49~6.86 MPa) の範囲で等方圧密した後側圧を一定に保ち、非排水条件でせん断を行った軸ひずみに対する軸差応力を、また図-5 は過剰間隙水圧との関係を与えている<sup>9)</sup>。応力~ひずみ曲線は典型的なひずみ硬化からピークに達しその後ひずみ軟化するが、側圧が過圧密領域の  $\sigma_3=5\sim20$  kgf/cm<sup>2</sup> (0.49~1.96 MPa) の場合、小さな軸ひずみできわめて明瞭なピークを示した後、いったん著しい強度の低下を生じ残留する。これに対して、正規圧密領域の  $\sigma_3=30\sim70$  kgf/cm<sup>2</sup> (2.94~6.86 MPa) のものでは、側圧の増大に伴いせん断初期の立ち上がり、および軸差応力の増分が顕著となる一方、ピーク時の軸ひずみは増大し、応力~ひずみ曲線は滑らかな形状へと移行する。ただし  $\sigma_3=25$  kgf/cm<sup>2</sup> (2.45 MPa) では過圧密の側圧条件であるにもかかわらず、正規圧密的な傾向を呈することが注目

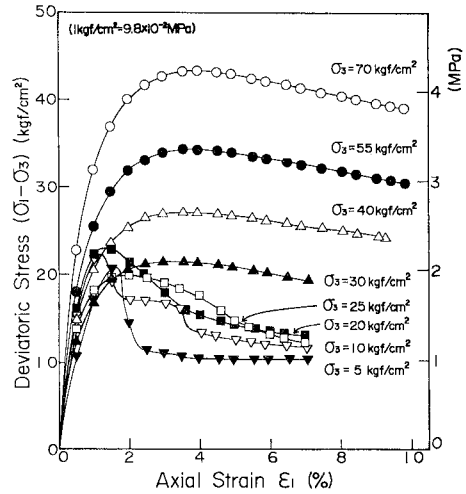


図-4 CU 試験における軸差応力~軸ひずみ曲線

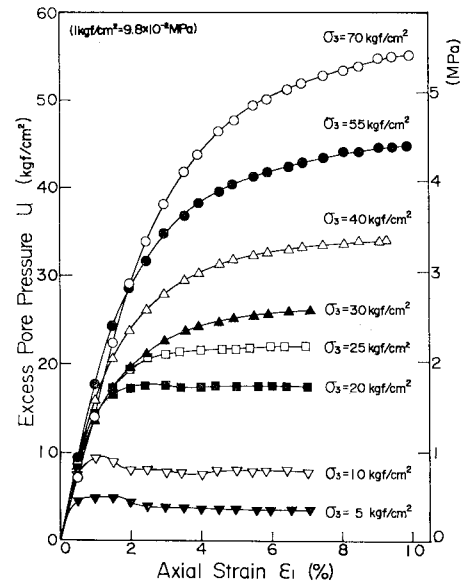


図-5 CU 試験における過剰間隙水圧~軸ひずみ曲線

きる。このような一連のパターンは不かく乱粘土の挙動によく類似するものである。この際  $\sigma_3=30$  kgf/cm<sup>2</sup> (2.94 MPa) の最大軸差応力は、 $\sigma_3=20$  kgf/cm<sup>2</sup> (1.96 MPa) のそれと比べ 1.4 kgf/cm<sup>2</sup> (0.14 MPa) 小さい値を得たが、これは  $\sigma_3=30$  kgf/cm<sup>2</sup> (2.94 MPa) の場合、等方圧密過程で既成の組織形態が破壊を起こすに必要な応力域 (27 kgf/cm<sup>2</sup>, 2.65 MPa) をわずかに越えた条件であり、かつ応力的には十分な組織の再生が行われなかったものと考えられる。このことはせん断後の供試体状況からも明白で、 $\sigma_3=30$  (2.94), 40 (3.92) kgf/cm<sup>2</sup> (MPa) では破壊面がまったく認められず、ややたる状に変形しただけであった。すなわちこの側圧条件により

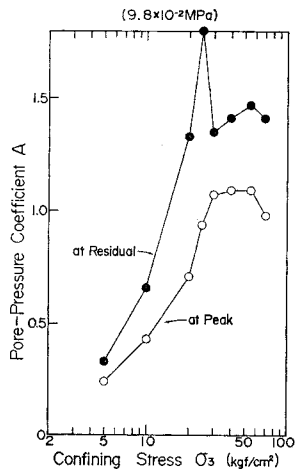


図-6 置A 値の検討

生じた組織形態は他の側圧条件のものとは比べ圧縮に対する変形が容易であったことを示唆している。

一方、過剰間隙水圧は軸差応力と同じく過圧密、正規圧密領域で区分される側圧条件で傾向を異にする。 $\sigma_3 = 20 \text{ kgf/cm}^2$  (1.96 MPa) では最大値を示した後一定となるが、 $\sigma_3 = 5$  (0.49),  $10$  (0.98)  $\text{kgf/cm}^2$  (MPa) は軸差応力の挙動とほぼ一致する。また  $\sigma_3 = 25 \text{ kgf/cm}^2$  (2.45 MPa) 以上のものについてはきわめて特徴的で、ひずみ軟化状態にあっても過剰間隙水圧は軸ひずみの増大に伴い顕著に増加する。これらの関係を間隙水圧係数のA値で表わしたのが図-6である。これによれば実験を行ったすべての側圧条件でA値は、残留応力時の方が最大軸差応力時の場合を上回る。正規圧密領域のものは最大軸差応力時で  $A_f = 1.0 \sim 1.1$  であるのに対し、残留応力時では  $A_f = 1.4 \sim 1.5$  となり、Skemptonの粘土に関する区分で表現すれば、正規圧密粘土から鋭敏な粘土へと移行したことになる<sup>10)</sup>。特に、この傾向は  $p_c$  前の  $\sigma_3 = 25 \text{ kgf/cm}^2$  (2.45 MPa) の場合に強く現われることが注目される。間隙水圧がこのように増大する要因としては前述のように、本軟岩が非常に多孔質な組織形態を有しており、最大軸差応力後も軸ひずみの増加で一層高密度化への進行が助長されるためである<sup>11)</sup>。

図-7 は本試験の結果を平均有効応力  $\sigma_m' = (\sigma_1' + 2\sigma_3')/3$  とせん断応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$  による有効応力径路を示しているが、図中の□印は最大せん断強度を、また■印は残留強度を示す。最大せん断強度を連ねた最大強度線(図が複雑になるため線は挿入していない、図-10を参照)より、過圧密、正規圧密領域を区分する明確な変移点として  $\sigma_m' = 13 \text{ kgf/cm}^2$  (1.27 MPa) が得られる。この応力付近の挙動は  $L_o$  ら<sup>12)</sup> による鋭敏性の高い不かく乱粘土を対象とした実験結果と同様に、最大せん断強度はいったん低下し、V型に近い最大強度線を作り出す。

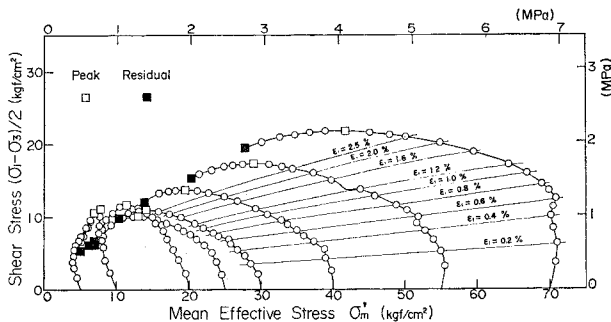


図-7 CU 試験の有効応力径路

このような現象は圧密降伏応力に対応する組織がもつ内部的な応力と、外的条件である側圧との関係によって生じる。すなわち(2)ですでに述べたように、等方圧が  $p_c$  を越えた時点で組織全体に破壊が起こり、より高密度な組織へと移行するが、リモールドした粘土、あるいは鋭敏性の低い粘土などにみられる圧密挙動とは異なり、この再組織化に移る過程では、組織的に不安定な応力域が過渡的に生じるものと思われる。これは鋭敏性の高い材料の特徴と考えられ、もし本軟岩が風化などの原因により組織の弱化(おもに固結成分)をきたすものとすれば、当然鋭敏性が低下するはずで、このような現象は生じないものと推定される。

(5) 圧密排水試験 (CD 試験)

圧密排水せん断試験は  $0.5 \sim 25 \text{ kgf/cm}^2$  (0.049~2.45 MPa) の過圧密領域の側圧範囲について行った。実験当初は  $5 \text{ kgf/cm}^2$  (0.49 MPa) の側圧間隔を予定していたが、以下に詳述するように非常に特異な結果を得たため、さらに細分化した側圧条件のもとに実施した<sup>13), 14)</sup>。

図-8, 9 は軸ひずみ~軸差応力および体積ひずみの関係を示している。図-8 の応力~ひずみ曲線は、非排水試験のものとは異なり非常に特徴的な形状を示してい

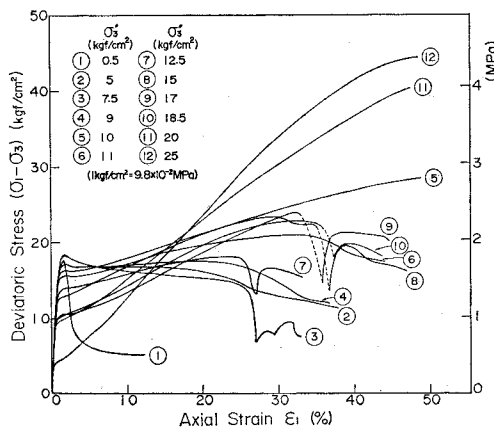


図-8 CD 試験における軸差応力~軸ひずみ曲線

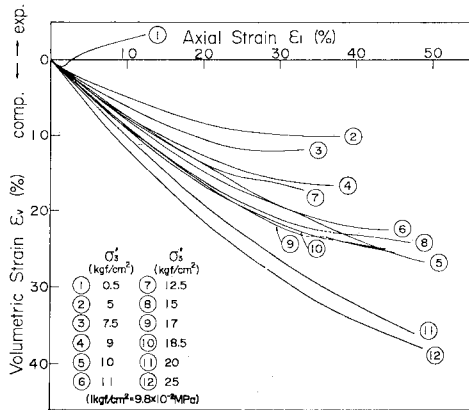
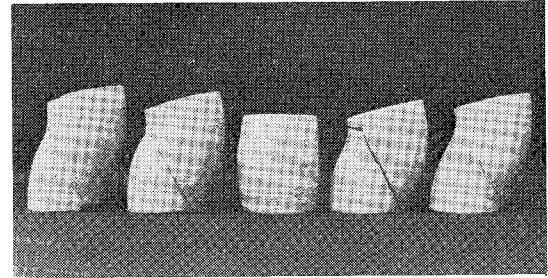


図-9 CD 試験における体積ひずみ～軸ひずみ曲線

る。すなわちせん断初期においては、初期降伏挙動（次章で詳述する）が側圧の増大に伴い比較的小さな軸ひずみ、軸差応力時で生ずる。また初期降伏後は、その後の軸ひずみの増大に伴い最大軸差応力に達した後ひずみ軟化により残留応力になるもの（ $\sigma'_3=0.5$  (0.049), 5 (0.49), 7.5 (0.74) kgf/cm<sup>2</sup> (MPa)）と、ひずみ硬化がきわめて大きな軸ひずみまで進行し、最大軸差応力を示した後残留応力に至るもの（ $\sigma'_3=9$  (0.88), 11 (1.08), 12.5 (1.23), 15 (1.47), 17 (1.67), 18.5 (1.81) kgf/cm<sup>2</sup> (MPa)）, さらに最大軸差応力＝残留応力に至るまでひずみ硬化が続くもの（ $\sigma'_3=10$  (0.98), 20 (1.96), 25 (2.45) kgf/cm<sup>2</sup> (MPa)）の3種類に大別することができる。また  $\sigma'_3=7.5$  (0.74), 12.5 (1.23), 15 (1.47), 17 (1.67), 18.5 (1.81) kgf/cm<sup>2</sup> (MPa) においては最大軸差応力後のひずみ軟化時で、突然破壊を起こし急激な応力低下を示すが、その後再び応力は回復し残留状態となる。なお図中の破線は破壊が夜間に起こり、このため測定できなかったものでこれらの場合の最低値は明確でない。特にこの図で注目すべき点は、最大軸差応力の一例として  $\sigma'_3=10$  kgf/cm<sup>2</sup> (0.98 MPa) の方が  $\sigma'_3=18.5$  kgf/cm<sup>2</sup> (1.81 MPa) に比較して大きな値を示しているように、側圧条件による最大軸差応力、残留応力間には単純な増分関係がまったく認められない。この特異な傾向を確認するため  $\sigma'_3=10$  (0.98), 20 (1.96), 25 (2.45) kgf/cm<sup>2</sup> (MPa) についてはそれぞれ2個の供試体で実験を行ったが、ほぼ同一な値であった。またせん断後の供試体も非常にユニークな状態を示した。すなわち全体に縦方向（ $\epsilon_1$  方向）の圧縮が著しく、最大軸差応力＝残留応力となる側圧条件のものには破壊面が認められないが、他の側圧条件では約60°のせん断面を有していた。なお写真-1は一例として、 $\sigma'_3=7.5\sim 12.5$  kgf/cm<sup>2</sup> (0.74～1.23 MPa) の供試体の破壊状態を示している。



(左より  $\sigma'_3=7.5(0.74)$ ,  $9(0.88)$ ,  $10(0.98)$ ,  $11(1.08)$ ,  $12.5(1.23)$ kgf/cm<sup>2</sup>(MPa))

写真-1 供試体の破壊状態

図-9に示したように軸ひずみ～体積ひずみ曲線については、予備圧密の側圧に相当する  $\sigma'_3=0.5$  kgf/cm<sup>2</sup> (0.049 MPa) で  $\epsilon_1=1.5\%$  を示した後膨張に転じた以外は、圧縮性が非常に顕著となり大きな軸ひずみに至るまで進行し、 $\sigma'_3=25$  kgf/cm<sup>2</sup> (2.45 MPa) においては  $\epsilon_v=38\%$  程度にまで達している。また側圧の高い  $\sigma'_3=20$  kgf/cm<sup>2</sup> (1.96 MPa) と  $\sigma'_3=25$  kgf/cm<sup>2</sup> (2.45 MPa) の曲線は近似した傾向となるが、これは正規圧密領域に近い側圧条件を与えたためである。これに対し、 $\sigma'_3=11\sim 18.5$  kgf/cm<sup>2</sup> (1.08～1.81 MPa) の範囲では側圧の増加による明確な相違性がなく、 $\sigma'_3=11$  (1.08), 15 (1.47), 17 (1.67), 18.5 (1.81) kgf/cm<sup>2</sup> (MPa) は  $\sigma'_3=10$  kgf/cm<sup>2</sup> (0.98 MPa) に、 $\sigma'_3=12.5$  kgf/cm<sup>2</sup> (1.23 MPa) は  $\sigma'_3=9$  kgf/cm<sup>2</sup> (0.88 MPa) の残留時の値にそれぞれが移行する傾向が認められた。

図-10は排水試験の有効応力径路を与えており、非排水試験で得られた図-7の最大せん断強度（□印）、残留強度（■印）もあわせて示している。排水試験の径路は1.5の勾配で立ち上がり、それぞれの線上の○印は最大せん断強度を、●印は残留強度を表わしている。図からも明らかなように最大強度線、残留強度線はともに不連続なパターンとなり、Mohr-Coulomb 式あるいは吉中ら<sup>2)</sup>が提案するべき関数など応力のみ関数ではすべての応力域を整理できない。また非排水試験の結

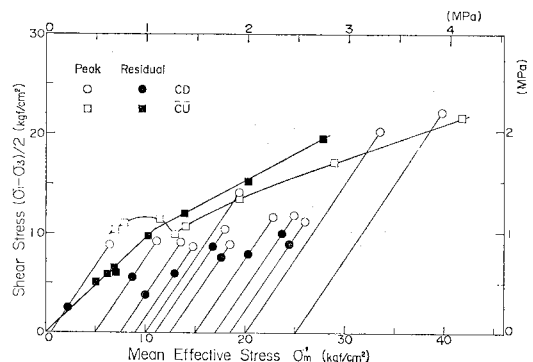


図-10 CD 試験の有効応力径路

果と対比した場合、 $\sigma'_m = 6 \sim 11 \text{ kgf/cm}^2$  (0.59~1.08 MPa),  $19.5 \text{ kgf/cm}^2$  (1.91 MPa) 付近,  $28 \text{ kgf/cm}^2$  (2.75 MPa) 以上では比較的近似した位置にはあるが、他の応力範囲ではまったく異なっている。

以上のように本節で得られた排水試験と先節の非排水試験との最大せん断強度、残留強度の状態が有効応力表示で一致していない。これに関しては写真-1で明らかのように、 $\sigma'_s = 10 \text{ kgf/cm}^2$  (0.98 MPa) を除く他の側圧条件での破壊後の供試体が、非一様性の強い状況になったためと考えられる。なお本試験では最大せん断強度、残留強度を得るために非常に大きな変形を与える必要があること、またこれに伴う断面補正について、さらには6. で一部考察する破壊挙動など、今後詳しく検討すべき問題と考えている。

5. 降伏特性に関する検討

軟岩を対象とした施工では粘性土などの場合と異なり、弾性域内あるいは微小変形のもとでのせん断特性の応答を把握することが特に重要となる。このため本章では前章の(5)の圧密排水試験での初期降伏挙動に着目し、本軟岩の弾、塑性域を区分する降伏曲線について、式(1)に示すRoscoeらのCam-Clayモデルの降伏関数<sup>9),16)</sup>を引用し、その適用性について検討する<sup>16)</sup>。

$$\frac{q}{p} + M \ln \frac{p}{p_0} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

なお  $q$  は軸差応力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ )、 $p$  は平均主応力 ( $\sigma'_m$ )、 $p_0$  はせん断直前の等方圧密応力、そして  $M$  は  $(q/p)_{critical state}$  を示しており、上式による降伏曲線の形状は図-11に与えている。

次に本軟岩が排水せん断試験によって得られる初期降伏挙動について述べる。図-12, 13は既述のように圧密排水試験での各側圧条件の応力~ひずみ関係(図-8, 9を参照)を、軸ひずみ2%まで軸差応力~体積ひずみ曲線に書き直したものであるが、明らかに各側圧による明瞭な降伏挙動が認められる。ここでは初期降伏応力を軸差応力~体積ひずみ曲線上で最大曲率となる部分の前後の直線部分を延長し、その交点の内角の2等分線が曲線

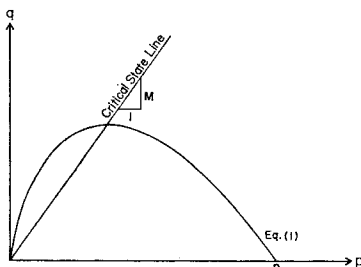


図-11 降伏曲線の形状

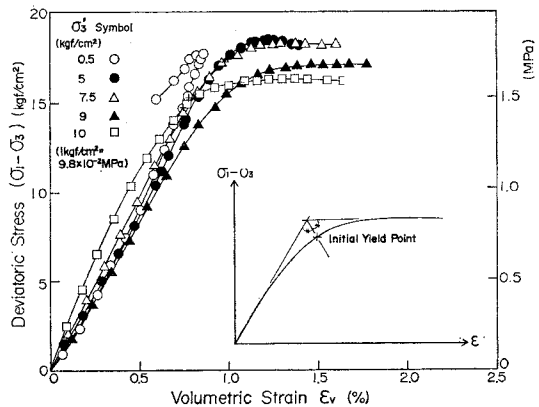


図-12  $\sigma'_s = 0.5 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$  (0.049~0.98 MPa) の  $\epsilon_1 = 2\%$  までにおける軸差応力~体積ひずみ曲線 (CD 試験)

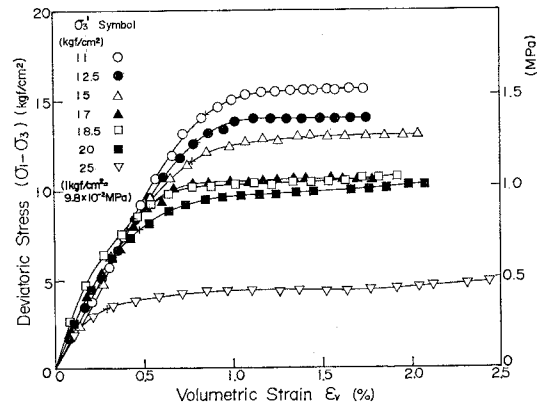


図-13  $\sigma'_s = 11 \sim 25 \text{ kgf/cm}^2$  (1.08~2.45 MPa) の  $\epsilon_1 = 2\%$  までにおける軸差応力~体積ひずみ曲線 (CD 試験)

と交わる箇所 (+ 印) と定義した (図-12 中の模式図を参照)。図-14 はこのようにして得られた各側圧の初期降伏応力 (数値は図中に示す) を排水条件の応力経路上に ○ 印で示している。また図中の曲線は前出の式

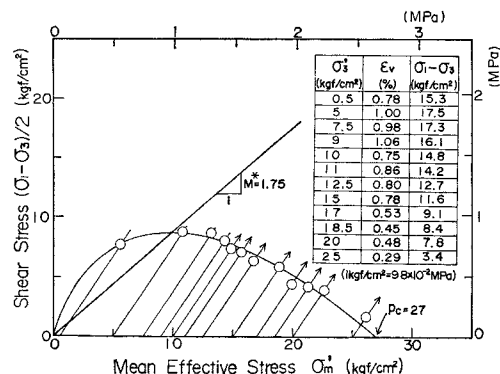


図-14 軸差応力~体積ひずみ関係からの初期降伏応力と降伏曲線

(1) を次の式 (2) に書き改めたものである。

$$\frac{q}{p} + M^* \ln \frac{p}{p_c} = 0 \dots\dots\dots (2)$$

すなわち等方圧密応力下での塑性体積ひずみ成分  $\epsilon_v^p$  =

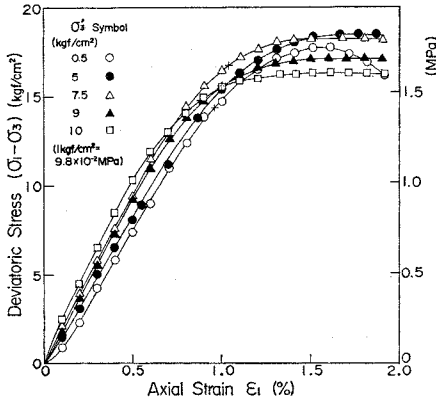


図-15  $\sigma_3' = 0.5 \sim 10 \text{ kgf/cm}^2$  (0.049~0.98 MPa) の  $\epsilon_1 = 2\%$  までにおける軸差応力~軸ひずみ曲線 (CD 試験)

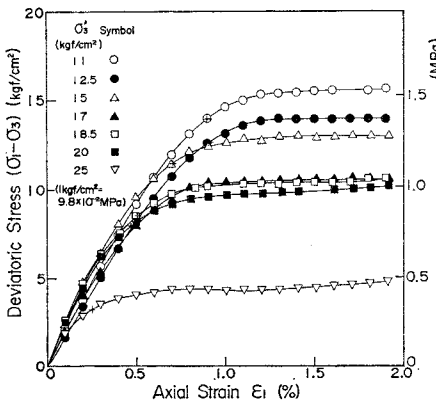


図-16  $\sigma_3' = 11 \sim 25 \text{ kgf/cm}^2$  (1.08~2.45 MPa) の  $\epsilon_1 = 2\%$  までにおける軸差応力~軸ひずみ曲線 (CD 試験)

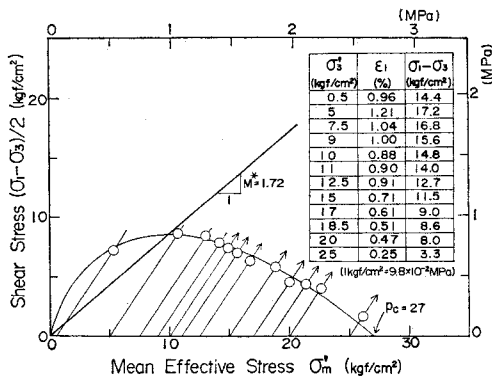


図-17 軸差応力~軸ひずみ関係からの初期降伏応力と降伏曲線

0 の限界条件は圧密降伏応力  $p_c$  に相当するものと仮定するならば  $p_0 = p_c$  となる。また先述の限界状態線の勾配の  $M$  に対し、ここでは各側圧条件の初期降伏応力を連ねたピークと原点を結ぶ直線の勾配  $M^*$  を与えており、これによって得られたそれぞれの値は  $p_c = 27 \text{ kgf/cm}^2$  (2.65 MPa),  $M^* = 1.75$  である。結果としては実験により得られた初期降伏応力を弾、塑性域を区分した式 (2) で、若干のばらつきはあるもののよく整理できることがわかった。このことは弾性域内で許容変形を対象とする応力域を決める際に重要な裏付けとなる。

図-15, 16 は軸差応力~軸ひずみ関係 (図-8 を参照) についても検討するため、軸ひずみ 2% までを拡大したものである。同様な方法で初期降伏応力を求め整理した図-17 中の降伏曲線は、実験結果をよく表現し、さらに図-14 の降伏曲線とも非常に近似することが確認された。

自然土の降伏曲線の形状を実験により明らかにしたケースはきわめて少なく、わずかに報告例とし鋭敏性の高い不かく乱粘土を対象とした Wong ら<sup>13)</sup>, Tavenas ら<sup>14)</sup> のものを挙げ得るにすぎない。しかし、ここで得られた本軟岩の降伏曲線は上記のものとはまったく異なる形状であり、これは実験方法、応力径路 (載荷条件) の相違に原因する以外に、それぞれの材料の組織形態が大きく影響していると考えられる。なお本軟岩の場合には乾燥および湿潤を繰り返すことにより、おもに固結成分が消失し、著しい強度低下をきたすが、この際の降伏曲線の特長については別の機会に発表する予定である。

### 6. 破壊挙動に関する一考察

既述のように排水試験より得られた特異な強度関係は、側圧がただ単に横方向への変形を拘束するだけではなく、同時に供試体内部における組織形態の変化に重要な影響を与える要因である点が特に注目される。したがって本章では排水試験における挙動を根拠として、組織形態の変化を仮定とした強度特性について、著者らの考え方を述べることにする。

一般に過圧密、正規圧密領域の区分点は、地盤が受けた応力履歴に代表される圧密降伏応力で表現される。このうち過圧密領域に相当する応力は大別すると、物性の異なる組織構成成分 (骨格構造、密度などに依存するもの) およびその粒子間に作用する固結成分とにより形成されるものとする。このことは体積変化を与える排水試験の場合、組織構成成分および固結成分の圧縮性の相違により、せん断初期では与えられた変形は最初に固結成分が分担するものとする。このため微小な変形のもとでは固結成分にまず破壊が起こり、その後変形が増大す

るにつれてその分担は逐次組織構成成分に移行するものと推測する。ただし移行条件としては、側圧条件（側圧の大きさ）と固結成分自体のもつ降伏応力との関係によって決定されるものであり、このことは組織構成成分が破壊し、さらに正規圧密領域に移行する場合にも同様なことが条件付けられる。換言すれば過圧密領域的な挙動を呈する応力域には、固結および組織構成成分に対応した降伏がそれぞれ存在することになる。なおこれらの現象は粘性土においては、強度に占める固結成分の割合が小さく、さらにサンプリングなどによる乱れあるいは応力開放の影響により、固結成分の応答が鋭敏に得られず、したがって組織構成成分のみが強く発現するものと考えられる。しかし、非排水試験の場合には体積変化の代用ともいふべき過剰間隙水圧が組織内で媒体的な役割を果たし、これがために排水試験のような一連の挙動を阻止するものと考えられる。

今後はさらに本軟岩の各強度成分（固結力、組織構造力など）の定量的な関係および応力域に対するモデル化、さらに非排水、排水条件下での破壊規準などに関して詳細に検討を行う予定である。

## 7. 結 論

本報告は固結性が高く非常に多孔質な材料である珪藻質軟岩を対象に、未風化ならびに不かく乱条件下での実験結果について検討した。今後さらに解明すべき問題点をも含め、これまでに明確にされた成果を列挙すれば以下のようである。

(1) 等方圧下での  $B$  値がほぼ 1 であることから、Terzaghi の有効応力による力学的挙動の解明が可能であり、非圧密非排水試験では  $\phi_u = 0$  法が適用できる。

(2) 圧密所要時間は圧密降伏応力を境とした過圧密、正規圧密領域でまったく異なる（本文では報告していない<sup>9)</sup>。また等方圧密曲線の形状は鋭敏性の高い粘性土のそれに類似し、圧密降伏応力を越える側圧条件では供試体内の組織形態に破壊が起こり、体積変化が急激に増大する。

(3) 圧密非排水試験の結果は鋭敏性の高い過圧密粘土の挙動に類似し、特に過剰間隙水圧の発生が特徴的である。また最大強度線は、圧密降伏応力付近の側圧に相当する  $\sigma_m' = 11 \sim 16 \text{ kgf/cm}^2$  ( $1.08 \sim 1.57 \text{ MPa}$ ) で V 型に落ち込み非線形関係を示すが、他の応力域および残留強度線は線形関係を示す。

(4) 過圧密領域の側圧条件の圧密排水試験では次の (5)、(6) で述べるように、せん断初期で明確な初期降伏を起こす。また最大強度線および残留強度線は非排水試験のものとはまったく異なり、不連続な  $\sigma_m' \sim \sigma_1 - \sigma_3$  関係

を得た。このため応力のみ的一次関数としては整理できず、固結力、体積変化および側圧条件を考慮に入れた破壊規準式を決定すべきである。

(5) 自然土ではきわめて報告例の少ない降伏挙動が排水試験で明確に得られ、これに基づく弾、塑性域を区分する応力域の表現は、Roscoe らの提案する Cam-Clay モデルの降伏関数を用いた式 (2) の降伏曲線で非常によく整理できることが明らかとなった。

(6) 最近特に重量構造物の基礎地盤の対象となることが多い軟岩の場合、変形をまったく考慮に入れずに極限状態を与える Mohr-Coulomb の破壊規準式を適用することには無理があり、(5) で述べた弾性的な挙動を示す応力域での設計、施工が工学的にも意義がある。

(7) 固結性を有する材料の破壊挙動を考察するには過圧密領域を互いに物性の異なる固結成分および組織構成成分とに区分し、検討することが重要と思われる。

この研究を遂行するにあたり、終始ご討議ならびにご助言をいただきました金沢大学工学部 関口秀雄助教授に厚くお礼を申し上げます。また実験などにご協力を得た (株) 日研技術 小川義厚氏および日本技術開発 (株) 宮本敏正君 (元院生)、本学の卒業生の諸君に謝意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 足立紀尚・小川豊和：堆積軟岩の力学特性と破壊規準，土木学会論文報告集，第 295 号，pp. 51~63，1980。
- 2) 吉中龍之進・山辺 正：軟岩の破壊規準に関する研究—べき関数破壊規準の誘導と、その岩石・岩盤への適用性—，埼玉大学建設系研究報告，第 9 号，pp. 77~119，1980。
- 3) 能戸 仟：調査法，岩の力学—軟岩を中心として—，土質工学会関西支部，pp. 29~52，1978。
- 4) 仲野良紀：軟岩をめぐる諸問題—泥岩の力学特性—，土と基礎，Vol. 28, No. 7, pp. 1~10，1980。
- 5) Roscoe, K.H., A.N. Schofield and A. Thurairajah: Yielding of clay in state wetter than critical, Géotechnique, Vol. 13, No. 3, pp. 211~240, 1963。
- 6) 石川県珪藻土利用研究会基礎部会編：能登半島珪藻土の基礎研究，石川県工業試験場，1966。
- 7) 柳原 等：能登島大橋における基礎構造とその施工，基礎工，Vol. 9, No. 8, pp. 108~116, 1981。
- 8) Terzaghi, K. and R.B. Peck: Soil mechanics in engineering practices 2nd edition, John Wiley & Sons, New York, 1967。
- 9) 前川晴義・宮北 啓・小川義厚：珪藻質軟岩の力学的特性，土木学会第 34 回年次学術講演会講演概要集，pp. 353~354, 1979。
- 10) Skempton, A.W.: The pore-pressure coefficients A and B, Géotechnique, Vol. 4, No. 4, pp. 143~147, 1954。
- 11) 吉中龍之進・山辺 正：珪藻質軟岩の力学的性質について，日本応用地質学会昭和 53 年度研究発表会講演要旨，pp. 46~49, 1978。
- 12) Lo, K.Y. and J.P. Morin: Strength anisotropy and time effects of two sensitive clays, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 9, pp. 261~277, 1972。



- 13) 宮北 啓・前川晴義・宮本敏正・小川義厚：三軸応力下における珪藻質軟岩の工学的特性，土質工学会第16回研究発表会講演集，pp. 1329~1332, 1981.
- 14) 宮本敏正・宮北 啓・前川晴義：排水条件下における珪藻質軟岩の強度特性(第2報)，土木学会第36回年次学術講演会講演概要集，pp. 270~271, 1981.
- 15) Schofield, A.N. and C.P. Wroth: Critical state soil mechanics, McGraw-Hill, London, 1968.
- 16) 宮北 啓・前川晴義・小川義厚：珪藻質軟岩の強度特性，土質工学会第17回研究発表会，投稿中
- 17) Wong, P.K. and R.J. Mitchell: Yielding and plastic flow of sensitive cemented clay, *Géotechnique*, Vol. 25, No. 4, pp. 763~782, 1975.
- 18) Tavenas, F. and S. Leroueil: Effects of stresses and time on yielding of clays, *Proc. 9th ICSMFE*, Tokyo, Vol. 1, pp. 319~326, 1977.

(1982.5.26・受付)

---