

# 泥質岩の力学的性質

埼玉大学 工学部 吉中 龍之進  
 埼玉大学 工学部 山辺 正

## 1 まえがき

堆積性の軟岩である泥岩、凝灰質泥岩、シルト岩、粘土質頁岩などの泥質岩は、一般の粘土と異なり、堆積以後の時間的経過がきわめて長く、埋没した深さも数100～数1,000 mに及ぶものもあり、また堆積後に自重応力のみでなく褶曲、断層を伴った種々の地質構造力を受け、また地熱による温度作用を強く受けているものが多い。特に我が国の地質条件は大陸地殻地域のそれと異なり新第三紀以降の地殻運動が極めて活発であったので地殻構造力、温度作用が堆積性軟岩に与えた影響は大きく、このためヨーロッパや北米で知られる堆積性軟岩に比べ非常に新しい時代（新第三紀以後）の堆積物が軟岩化しており、また国内においても経過した地質条件が地域によって異なるので、この影響が軟岩の物性に強く影響しているようである。

本文は、このような軟岩（特に泥質岩）の力学的性質を最近の実験結果を中心にして検討したものである。なお、神戸層泥岩の研究は本四連絡橋公団よりの受託研究として実施したものである。

## 2 試料採取および試験方法

泥質岩は含水比が高く、一般にはモンモリロナイトなどの湿潤度変化に鋭敏な粘土鉱物を含み、また非結晶質物質を含むセメンテーションが発達しているため、“自然状態”を保つためには含水比の変化は避けなければならない。

採取した試料は、いずれも地表附近の表層を剥いだ部分からブロック状で取出し、直ちにパラフィンでシールしたものである。モンモリロナイトが多くスレーキングが強い泥岩は樹木などの植生に覆われた環境のもとでは泥岩自体は、飽和を保っている。これはこの種泥岩中の水分は強い<sup>1)</sup>サクシオンで保持された水分であるから重力下での水の移動はない。一方、もし乾燥・湿潤を受けたならば、泥状に変化して、新鮮な岩石の状態を保っていない。したがって採取ごの乾燥さえ与えなければ、自然状態にある飽和泥岩の供試体をえることは容易である。この様な試料は、水浸させても吸水変化（膨張）はない。

しかし、トンネルの切羽などで急激な除荷を受けた泥岩は膨張により不飽和となっているので力学試験のため、飽和条件に調整するには慎重な取扱いが必要となる。

一方、モンモリロナイトが少なくスレーキングの性質が弱い泥質岩は地表近くでの、水分変化を受けても自然状態の組織を保っているため、不飽和の岩石が露出することができる。この様な岩石については、不飽和の岩塊から供試体を取り人工的に飽和させて、適切な供試体を準備することが

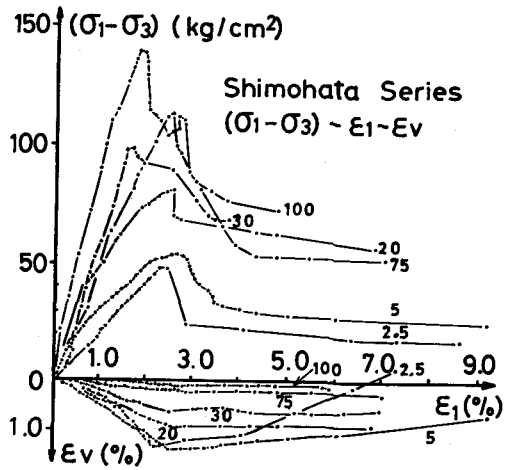


図1 圧密排水三軸圧縮試験による神戸層群（下畑地点）泥岩の応力-ひずみ関係、せん断速度、0.0025%/min

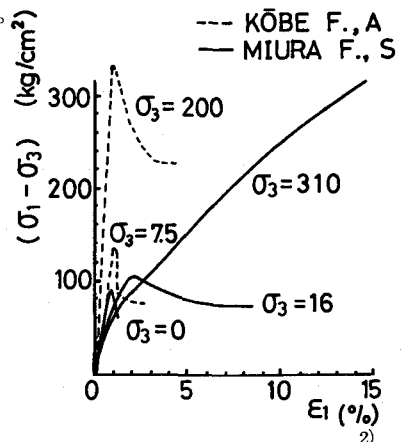


図2 泥岩の応力-ひずみ関係の2例（三浦層泥岩と神戸層名谷泥岩）

できた。

本研究で述べる力学試験は飽和供試体を用いた三軸圧縮試験によった。供試体はダイヤモンドビットと同ブレードを用い直径5.0mm長さ約1.0cmに成形したものを用いた。拘束圧は油圧により500Kg/cm<sup>2</sup>まで加圧が可能な装置を用いた。高圧試験では油の温度が上昇するので、油圧タンクに冷却装置を取付け定温(15℃)に保つた状態で試験を実施した。

試験は圧密排水条件とした。圧密時間は低圧では約12時間で終了したが高圧では230時間を越える場合も少なくない。圧密は一次圧密の終了で打切った。圧密度の進行の判定は試験と並行して時間・排水量を半対数紙上に図化しながら曲線の勾配の変化に基づいておこなった。

せん断速さの決定は0.01~0.0001%/分の間で異つた速さの試験をおこない排水量、強度の関係から必要最小限な最低速度を採用した。この結果、0.0025%/分を標準速度とした。

### 3 変形挙動

泥岩には飽和含水比で5~50%程度の水が含まれている。したがって変形挙動は排水条件と載荷速度で大きく異なる。

UUあるいはUDで0.1~0.05%/分程度のせん断速さでは多くの場合、側圧の効果は現われず一軸圧縮試験による変形挙動と同様になる。しかし十分な時間をかけて圧密せん断した場合は拘束圧の効果は顕著である。

図1は神戸層下畑泥岩(自然含水比約18%)のCD試験の結果である。拘束圧力の増大により変形係数の増大、せん断時体積ひずみの低下が著しい。

しかし全圧力域でひずみ軟化が生じ、また応力のピーク時ひずみは、ほぼ一定である。この

様な性質は、同じく神戸層泥岩で、一軸圧縮強さが約3倍( $q_u = 7.2 \text{ Kg/cm}^2$ )のものにも共通している。変形係数は拘束圧力の約0.3乗に比例して増加するようである。

この様な変形性を他の泥岩と比較したものが図2である。図中実線が三浦層泥岩(含水比4.5%)で点線が神戸層泥岩である。一軸圧縮強度は前者が約9.2Kg/cm<sup>2</sup>、後者が7.2Kg/cm<sup>2</sup>である。両者を

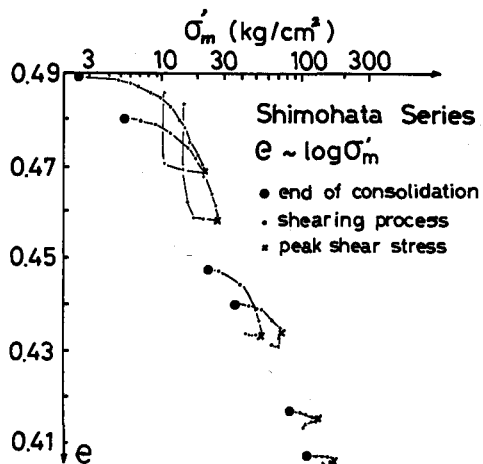


図3 せん断過程における泥岩の体積変化  
(神戸層下畑泥岩の場合)

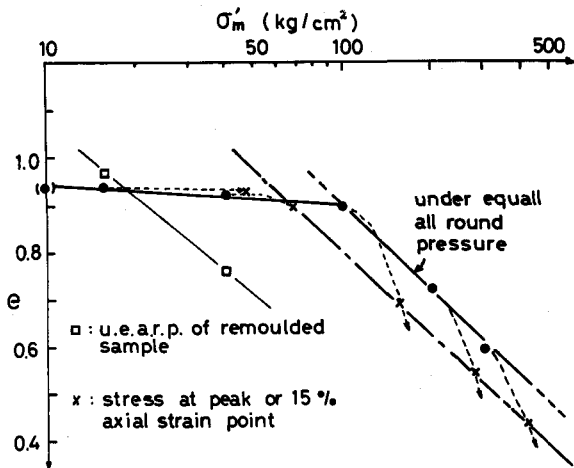


図4 等高圧密およびせん断過程における体積変化  
(三浦層泥岩、横須賀市佐野町地点)

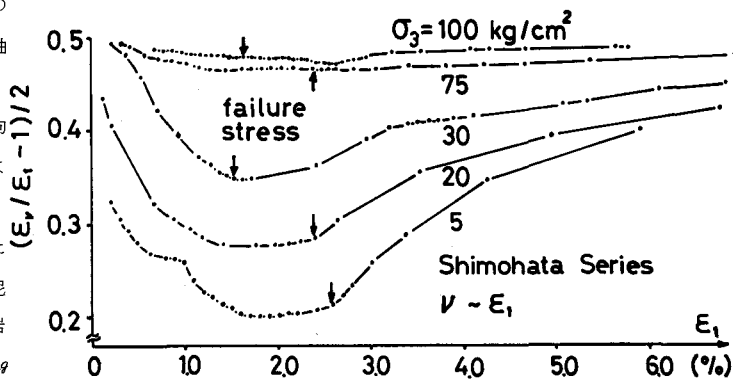


図5 "ポアソン比"と軸ひずみの関係(下畑泥岩)

比較した場合、前者は容易に softening に転ずること、また変形係数に対する拘束圧力の効果は全くない、あるいは逆に低下している現象がみられる。体積ひずみの進行は拘束圧力に比例して増大する。

せん断進行中に生じる体積変化（排水量より求めたもの）を詳細にみると両者の違いは顕著である。

図3, 4は神戸層および三浦層泥岩についてのせん断中の体積変化を平均主応力の対数と間隙比の関係で示したものである。

図中黒丸印は各供試体の圧密終了時点を示し、×印はピーク時、点線はせん断中の経路である。

神戸層泥岩は図1の応力-ひずみ関係でも全ての応力領域で、歪軟化を示したが体積ひずみにおいてもピーク応力時の体積ひずみは等方圧密曲線（黒丸を連ねた曲線）の右側に位置し、一方、三浦層泥岩では等方圧密曲線の明瞭な折点より荷重が大きい領域（右側）では、せん断の進行に伴う体積歪線が圧密曲線の下側に位置している。すなわち、前者の場合は、いずれの応力域においても“過圧密”の応力-ひずみ特性を示すのに対して、後者では圧密降伏荷重点を境にして“正規圧密”の特性をもつことが判る。

神戸層泥岩を  $300 \text{ Kg/cm}^2$  まで圧密したが正規粘土の特性を示すに至らなかった。しかし地質学的な埋没深度は  $500 \text{ m}$  前後と推定されており、これより予想される“圧密先行荷重”は  $60 \sim 80 \text{ Kg/cm}^2$  程度である。

体積ひずみから“ポアソン比”を計算し軸ひずみの進行に伴う変化を図5に示した。ピーク荷重時を矢印で示している。ピーク後は0.5に収束する傾向が明らかである。これは供試体の破壊機構を反映したものでありピーク後はせん断面をはさむ両側の岩体部分の剛体的なすべりが支配的になったことによるものと考えられる。

図6は種々の軟岩の体積圧縮性を総括的に示したものである。風化花こう岩、神戸層泥岩、London clay<sup>4)</sup>は圧力と伴により密になる性質が共通している。

一方、三浦層泥岩は任意の降伏点（組織の破壊が始まる応力）をもつ軟岩であるといえる。すなわち前者は除荷による影響を強く受けた軟岩であり、後者は骨格のセメンテーションが支配的な軟岩に属するものと云える。

この様に泥質岩の変形性は、間隙量とセメンテーションの強さによる所が大きく、これらは堆積以この地質構造力を含めた応力履歴と埋没時の温度上昇（堆積地点により地熱流量はかなり異なる）、さらに今日までの時間経過の長さが加わって形成されたものとみることができる。

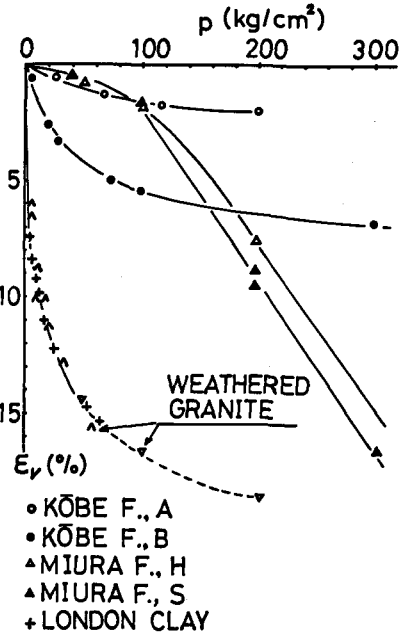


図6 等方圧縮応力による泥質岩の圧縮性

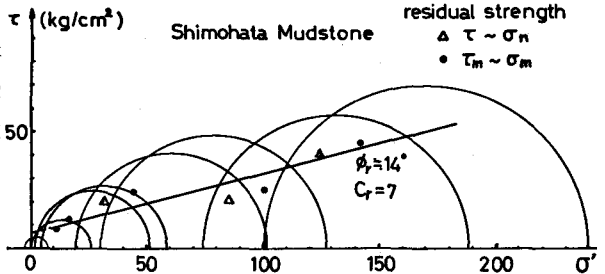


図7 顕著な放物線状の破壊包絡線（下畑泥岩）

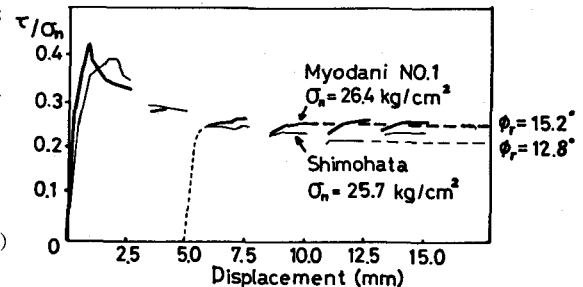


図8 泥岩分離面のせん断すべり量と抵抗力の変化（神戸層-下畑および名谷泥岩の例）

#### 4 強度特性

神戸層泥岩のモールの破壊応力円を図7に示す。モール円の包絡線は著しい曲線形である。図1に示した応力-ひずみ曲線から求まる残留強度を図中の点線で示した。三軸圧縮試験では、すべり面形成ごのせん断移動量を大きくすることが出来ないで、

一面せん断試験器を用いて、ダイヤモンドカッターで分離面を作成した泥岩試料について残留強度を測定した。せん断は多数回の反復せん断による。

試験結果を図8, 9に示した。これより残留摩擦角は $1^{\circ} \sim 1.6^{\circ}$  (平均 $1.4^{\circ}$ )となる。図7の残留値の粘着力は面上の凹凸性によるものであると思われる。

図7の包絡線の高圧域での勾配は、ほぼ残留摩擦角に達している。

モールの包絡線にみられる放物線形状はLondon clayのそれと非常に類似のものである。図10では強度特性を無次元化して、神戸層の2種類の泥岩、London clay, 三浦層泥岩を示している。神戸層の2種類の泥岩は同一特性を有すること、またLondon clayと類似性が強いこと、および三浦層泥岩と前2者とは異質のものであることが判る。

この様な関係は図1, 2の応力-ひずみ曲線にみられた神戸層のぜい性破壊傾向と三浦層のように低い拘束圧力で容易に塑性・ひずみ硬化する傾向と関連が深いようである。

破断面の角度を神戸層泥岩について調べたものが図11である。実測破断面角は拘束圧にかかわらず $6.5^{\circ}$  (最小主応力面から)で、一方、モールの包絡線、および残留摩擦角からモール・クーロンの破壊規準で予想した角度とは本質的に異なるものであることが示される。これはぜい性的性質によりもたらされるものと考えられ、この種泥岩の破壊はぜい性と塑性の両性質から考えなければならないものと思われる。

謝 辞

神戸層泥岩の研究に際しては本四連絡橋公団の駒田敬一課長、高橋幸蔵工事長、加島 聡の各氏に非常にお世話になった。また現地サンプリングに際しては基礎地盤コンサルタンツ能戸 仟氏のご協力をえた。実験に当つては界浩志、小泉英規の両君の多大の協力をえた。ここにこれらの方々へ厚くお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 吉中・安発 (1977) 「泥岩の保水性と力学的性質の関連」第5回岩の力学国内シンポジウム、
- 2) 吉中・山辺 (1977) 「泥岩の強度・変形特性」第32回土木学会年次講演会Ⅲ-196、
- 3) 吉中・永淵・長谷川 (1976) 「泥岩の圧密・排水せん断試験結果の例」第31回土木学会年次講演会Ⅲ-129、
- 4) Bishop, Webb and Lewin (1965) 「Undisturbed samples of London clay from the Ashford common shaft」Geotech, vol.15, No.1, 1~31

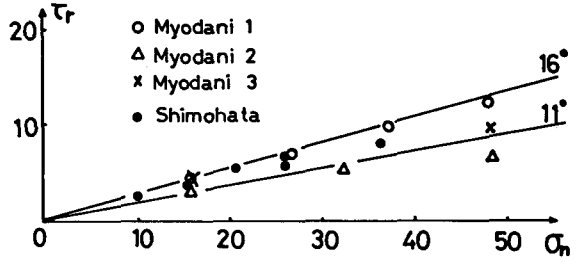


図9 泥岩分離面の残留強さ(神戸層泥岩)

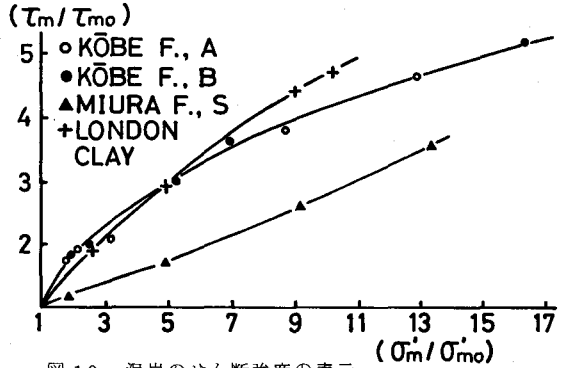


図10 泥岩のせん断強度の表示

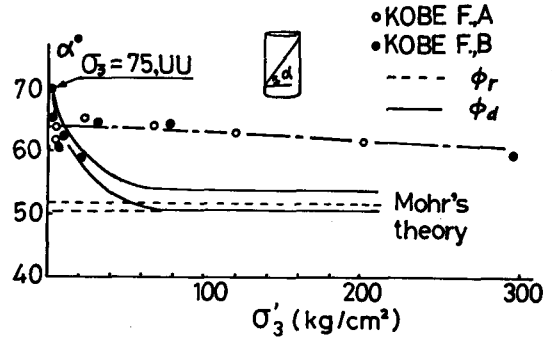


図11 破断面の角度

Mechanical properties of some Japanese mudstones obtained by  
C-D triaxial compression test

Saitama University, R. Yoshinaka  
Saitama University, T. Yamabe

Consolidated-drained triaxial compression tests were performed using Japanese tertiary mudstones. Size of specimens is 50 mm diameter and 100 mm length, shearing rate is about 0.0025 %/min., and applied confining pressure ranges from 2.5 kg/cm<sup>2</sup> to 200 kg/cm<sup>2</sup>.

Main results obtained are as follows;

- (1) Two types of stress-strain behaviour are recognized under consolidated-drained condition. The one is that deformation modulus is remarkably rised by increase of confining pressure as shown in Fig.1, and the other is that the modulus is not influenced by confining pressure, and the stress-strain curves show a remarkable case of conversion from strain-softening to strain-hardening as shown in Fig. 2, which may be due to breaking of cementation bonds.

Each mudstone classified into two types showed characteristic behaviour in volumetric strain. Figures 3 and 4 are relationship between void ratio and mean effective stress at the end of consolidation and at each step under shearing process. Figure 6 shows relationships between volumetric strain and consolidation pressure for Japanese mudstones, Londonclays (Bishop, 1965) and weathered granites.

- (2) Strength characteristics is compiled in Figure 10, which shows the relation of normalized shear strength ( $\tau_m / \tau_{m0}$ ) to mean normal stress ( $\sigma'_m / \sigma'_{m0}$ ) where  $\tau_{m0}$  and  $\sigma_{m0}$  are of unconfined compressive strength.

From Figure 10 it is seen that there are two types of strength relation, that is, parabolic and bi-linear, which correspond to the types of volumetric and stress-strain relation as shown in Figures 3-6 and 1-2, respectively.

The measured angles of sheared planes in Kobe mudstones are plotted in Figure 11, with relation to confining pressure, and predicted angles from Mohr's envelopes are also shown. It is clear that there is no-relation between both angles. From this relation and stress-strain relations, it seems that the disagreement shown in Fig.11 is due to the brittle nature of mudstones.