

III-A 341

軟岩の平面ひずみ圧縮試験法の開発

東京大学生産技術研究所 正 ○佐藤 剛司
 東京大学大学院 学 早野 公敏・真栄城 徳泰
 東京大学工学部 正 龍岡 文夫

はじめに： 筆者らは、平面ひずみ条件が変形・強度特性に及ぼす影響の評価と、せん断面（あるいは層）の応力・変形関係の詳細な観察のために、新たに平面ひずみ圧縮装置を製作し、装置と試験方法の妥当性を検討した。

試験装置： 砂用に開発した平面ひずみ圧縮試験装置¹⁾と同一の基本構造を持つが、強度・剛性の高い堆積軟岩の試験を行うために、次の点に留意した（図1、写真）。1) 100 kgf/cm²程度までの圧縮強度を想定して、軸荷重・中間主応力用ロードセル LC1, LC2 の容量を大きくし、平面ひずみ拘束板の剛性を上げ、4本の鋼のタイロッドの直径を1 cmにした。2) 供試体の σ_2 面の摩擦をDow高真空シリコングリースで低減し、かつ摩擦力をロードセル LC3, LC4 で測定して、その確認をした。3) せん断面ができるだけ自由に形成されるように、i) 三軸セル底盤とペダスタルの間にベアリングを介してペダスタルの σ_3 方向の動きを自由にし、ii) 拘束板もベアリングの上に乗せて、 σ_2 面の摩擦がせん断面形成後に分離した二つのブロックの反対方向への水平変位を拘束しないようにした。なお、i) の措置により軸荷重測定用の LC1 に横荷重が加わらない。4) ペディングエラーを含まない局所軸変形量を LDT で正確に測定し、三つの高さにセットした三対の非接触変位計（GAP）で拘束圧一定の下での試料の幅の変化を正確に測定した（図2 b）。また、これらの軸変形と供試体幅の直接測定により、せん断面が形成された後の ①一体化した部分の変形と ②せん断層の変形を分離して、連続的に求められる。図2のようにせん断層が形成された場合は、LDT1 と GAP1/GAP2 は上記①だけを測定し、LDT2 と GAP3/GAP4, GAP5/GAP6 は上記①と②の混合した量を測定している²⁾。5) せん断層の形成の様子を直接観察し写真撮影できるように、 σ_2 面の一面を鋼製のフレームで補強したアクリル製とした（図2 a）。

実験結果例： 相模原市の実験立坑内深さ48m からブロックサンプリングした試料を、高さ 12 cm、 σ_3 方向の幅 4 cm、長さ 6 cm に成形した。供試体の周辺に濾紙を巻いて、0.8 kgf/cm² の負圧により拘束圧 σ_3 を与えた。载荷ピストンの軸変位速度0.01%/minで圧縮した。図3に、典型的実験例を示す。载荷装置の剛性が不足したため、ピーク後に载荷装置の小さな弾性除荷変形が生じ、供試体のピーク後载荷速度が加速されて少ない数のデータ点しかサンプリング出来なかった。しかし、安定的な結果を記録できた。合計3つの試験を行ったが、いずれの試験でも綺麗に平面的なせん断層が一つだけ σ_2 方向に平行に形成された（図2 a 参照）。また、応力状態がほぼ一定となる残留状態が得られた（図3）。図3で、ピーク応力状態までは LDT1

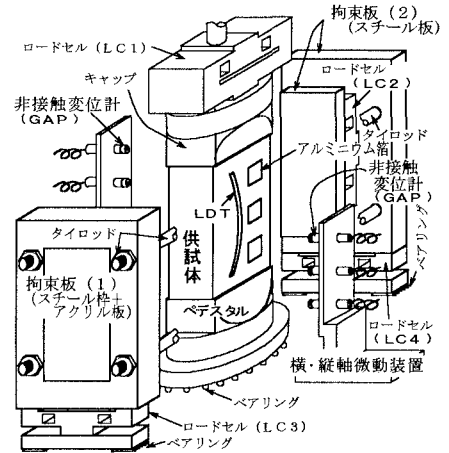


図1. 軟岩用平面ひずみ圧縮試験装置の概要

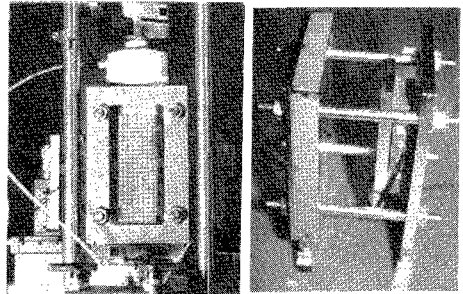


写真1. 軟岩用平面ひずみ圧縮試験装置 写真2. 平面ひずみ拘束装置

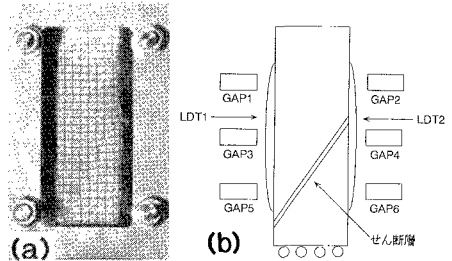


図2. 供試体の局所変形の測定法

図3で、ピーク応力状態までは LDT1

と LDT2 による軸ひずみ ϵ_1 同士と、GAP1/GAP2, GAP3/GAP4, GAP5/GAP6 から求めた供試体側方ひずみ ϵ_3 同士は若干相違するだけであるが、ピーク後は全く異なった変化を示す。すなわち、せん断層外の非破壊領域のひずみ ϵ_1 (LDT1) と ϵ_3 (GAP1, 2) の絶対値は減少しているが、これは弾性除荷変形と見なせる。図4に、ピーク前の LDT1 と LDT2 による平均軸ひずみ ϵ_1 (ave) から求めた接線

ヤング率 E_{tan} と微小な除荷・再載荷サイクルから求めた弾性ヤング率 E_e とピーク後の a→b 間の ϵ_1 (LDT1) の変化量から求めたヤング率 E' の値を、せん断応力レベル q に対してプロットしてある。 E' が E_e よりも若干しか小さくないことも、上記のことを裏付けている。これに対して、せん断層の変形をふくむひずみ ϵ_1 (LDT2) と ϵ_3 (GAP5, 6) の絶対値はピーク後に著しく増加している。なお、残留状態に入ってから載荷ピストンを上昇させた過程 b→c 間では、せん断層も除荷過程に入っており、 ϵ_1 (LDT2) と ϵ_3 (GAP5, 6) の絶対値は減少している²⁾。図5に、ロードセル LC3, LC4 で測定した拘束板の摩擦力を LC1 で測定した偏差荷重で除した値を ϵ_1 (ave) に対してプロットしてあるが、摩擦力は極めて小さい。この論文に示す偏差応力 q は、この摩擦力に対して補正してある。図6は、中間主応力係数 $b_{PSC} = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ と ϵ_1 (ave) の関係である。ピーク応力状態でも、 b_{PSC} は非常に小さく、この平面ひずみ圧縮試験でのひずみ状態²⁾は三軸圧縮試験

でのひずみ状態³⁾と大差ないことになる。これは、拘束板と供試体間のベディングエラーとタイロッドの変形が、供試体の剛性に比して大きすぎたことを示唆している。従って、 ϵ_2 / ϵ_3 をゼロに近い値にするためには、 σ_2 を自動的に制御する主動的平面ひずみ圧縮試験装置が必要である。

結論： 1) 供試体の応力・ひずみを正確に測定でき、せん断層をスムーズに形成させ、その変形を詳細に観察できる軟岩用の平面ひずみ圧縮試験装置を製作した。 2) ピーク応力後、せん断層外の非破壊領域は弾性的に軸ひずみと側方ひずみの絶対値が減少したが、せん断層は塑性変形が増加した。 3) σ_2 軸に平行な平面的せん断層を形成させる上で拘束板は有効に機能したが、この受動的平面ひずみ装置では ϵ_2 / ϵ_3 をゼロに近い値にすることは出来なかった。

参考文献 1) Tatsuoka, F., Sakamoto, M., Kawamura, T. and Fukushima, S. (1986): Strength and deformation characteristics of sand in plane strain compression at extremely low pressures, Soils and Foundations, 26-1, pp. 65-84. 2) 真栄城徳泰・早野公敏・佐藤剛司・龍岡文夫 (1996): 平面ひずみ圧縮試験による堆積軟岩の破壊時変形特性, 土木学会第51回年次学術講演会. 3) 早野公敏・亀田茂・小高猛司・龍岡文夫 (1996): 堆積軟岩の低ひずみ速度排水三軸圧縮試験における変形特性, 第31回地盤工学研究発表会.

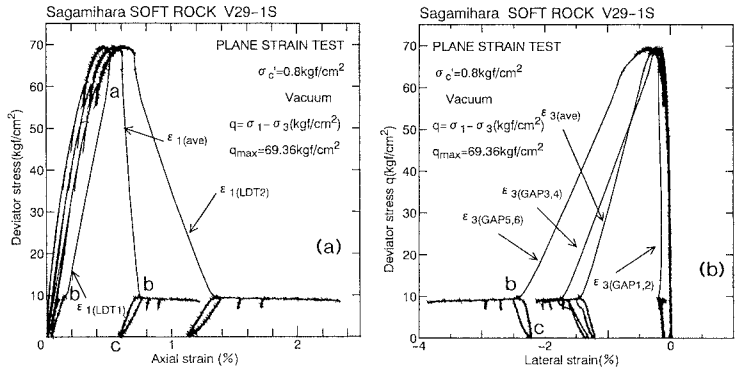


図3. 典型的実験例

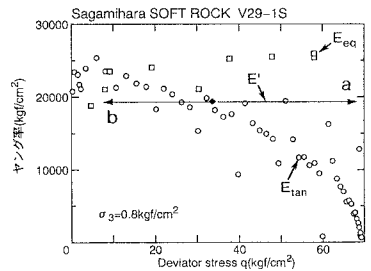


図4. ピーク前後でのヤング率の比較

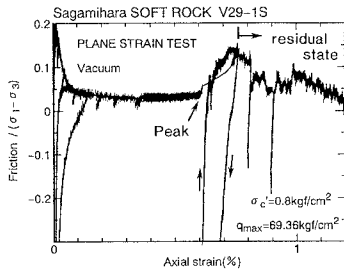


図5. 拘束板摩擦力/偏差荷重 ~ ϵ_1 (ave) 関係

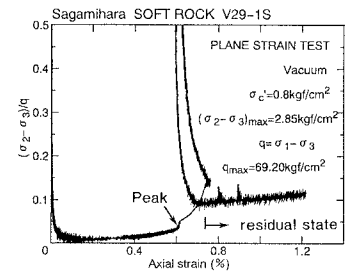


図6. $(\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ (ave) 関係