

CS 1-14〔Ⅲ〕

堆積軟岩の三軸圧縮試験におけるせん断層の発生

東京大学 大学院 学 金 有性
東京大学生産技術研究所 正 龍岡文夫

はじめに： 堆積軟岩は、拘束圧のある状態ではせん断層(Shear band)の発生と発達を伴ってせん断破壊する(図1)。拘束圧が圧縮強度程度以下では、拘束圧が小さいほどピーク後のひずみ軟化の程度が大きい。せん断層が発生してから供試体平均ひずみは供試体の大きさに依存するため、堆積軟岩のひずみ軟化を含む「応力～供試体平均ひずみ」をモデル化してもそれには一般性がない。このような挙動は、Laser speckling法で σ_c 面の局所的変形を測定した豊浦砂の平面ひずみ圧縮試験でも観察されている(中村ら、1987、吉田ら、1992)。即ち、ピーク強度後はせん断層に塑性せん断変形は集中し(strain localization)、せん断層以外の領域では除荷(unloading)に対応するせん断ひずみの減少とそれに対応する体積収縮が生じている(中村ら、1987、図5)。この減少は豊浦砂のねじり単純せん断試験でも観察されている(Pradhan et al., 1988, Fig.15)。また、Burland (1990)は、異方正規圧密カオリンの三軸圧縮試験で、図1のように Local gauge A, B を用いて供試体の側面で局所的に軸圧縮量を測定することにより正確な軸ひずみを測定していた三軸圧縮試験で、偶然せん断層を挟む Gauge A と挟まない Gauge B でせん断層の発生に伴って変形の進行と減少と言う全く異なる挙動が記録されたことを報告している。今回、堆積軟岩の圧密排水三軸圧縮試験でも同様な挙動が偶然記録されたので報告する。

実験方法： 神奈川県相模原市でコアボーリングにより採取された上総層群の堆積泥岩(通称土丹)の直径 5.5cm, 高さ 15cm の二つ供試体(A81, A86)を、原位置上載圧 6.4kgf/cm^2 (A86) と 10kgf/cm^2 (A81) で等方圧密した後、一定の拘束圧のもとで排水三軸圧縮試験(軸ひずみ速度 $0.1\%/min$) した(金ら、1992)。載荷ピストンの動きから求めた軸ひずみを ϵ_1 (EXTERNAL) と記し、図1、写真1に示すように供試体側面で二つの L.D.T. (Local Deformation Transducer, Goto et al., 1990) の測定値の平均値から求めた軸ひずみを ϵ_1 (LOCAL) と記す。それぞれのLDTは10cm離れた2点間の軸圧縮量を測定した。

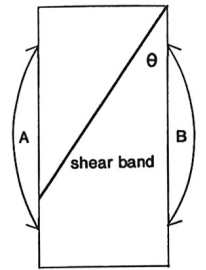


図1 二つの LDT(A, B) とせん断層の関係の模式図

実験結果： 図2～4に結果を示す。載荷の途中で何回かの小さい繰返し載荷を行っている。ベッディングエラーのため、通常の軸ひずみ測定法で求めた ϵ_1 (EXTERNAL) は全く信用できないことが分かる。また、載荷初期の 0.002% 以下の軸ひずみでは線形可逆(即ち線形弾性)であり、ヤング率 $E_{max} = 35,000\text{kgf/cm}^2$ である。二つの LDT とせん断層の位置関係は写真2, 3に示す。せん断層発生前は非常に多数のデータポイントが得られているが、ピーク後はデータポイントは非常に少ない。これは、軸ひずみ速度を一定にしたつもりでも載荷枠の剛性が小さかったため、ピーク後は載荷枠の弾性エネルギーが供試体のせん断層の変形に解放されて一気にせん断層の変形が進行したためである。このため、ロードセルに測定されなかった慣性力が存在して残留強度より小さい一時的極小点が表れたようである(図3)。

また、図4でピーク前でも LDT A, B の測定値は完全に一致していない。これは、供試体の全体的非一様変形の為であろう。

図3、4で共通して、ピーク直前で特に差が大きくなり始めている。これは、せん断層がピーク直前に表れ始めることを示唆している。更に、

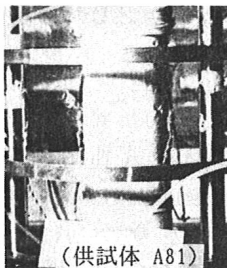
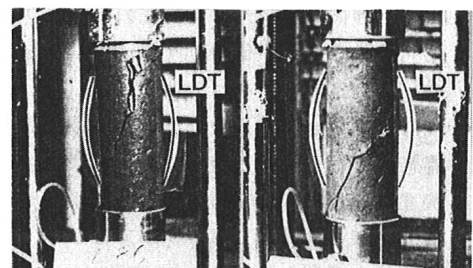


写真1 試験中の LDT の位置

写真2 (A86) 左
写真3 (A81) 右
LDT とせん断層
の位置関係



(供試体 A86)

(供試体 A81)

ピーク後は LDT A

では軸ひずみが進
行し LDT B では軸
ひずみが減少してい
る。即ち、せん断層
外の領域は軸方向に
伸びている。これは、
せん断層内部と外部
と変形の増減が逆に
なるピーク後に始め
てひずみの局所化が

明瞭になることを示している。以上の現象は、異方正規圧密粘土
と砂の場合と同じである。

ピーク後の「偏差応力～Gauge B は軸ひずみ関係」での接線ヤ
ング率 E_{max} の値は、ひずみの増加に伴う弾性係数の減少傾向を
考えると、载荷初期の E_{max} と微小繰返し载荷での E_{eq} の値と類
似である。これは、せん断層外の領域でのピーク強度の変形は供
試体上下端面に加える軸変位を減少させて軸荷重を減少させる除
荷(unloading)で生じる軸ひずみ変化と同様な弾性的除荷変位であ
ることを示している。

ピーク後は、Gauge A は せん断層に集中した塑性せん断変形+
せん断層外の領域の弾性的除荷変形 の合計を測定している(前者
は正、後者は負であることに注意)。また、観察されたせん断層
の方向は鉛直方向から $\theta = \arccos(1/1.17)$ の角度があり、LDT は
長さ 10cm 間の相対軸圧縮量を測定している。従って、せん断層
の横ズレ量 $\Delta_s = \{\varepsilon_s(LDT A) - \varepsilon_s(LDT B)\} (\%) \times 1.17$ (mm) で
ある(ピーク後は $\varepsilon_s(LDT B)$ 増分は負なので $-(\varepsilon_s(LDT B)$ 増分)
は正)。 Δ_s とせん断層平均せん断応力 $\tau = q(\sigma_1 - \sigma_3)/2 \cdot \sin$
(2θ) の関係を示したのが図5である。供試体 A86 でせん断開始
時から $\tau = 30 \text{ kgf/cm}^2$ 程度までの Δ_s の値は供試体の非一様変形
による見かけのものである。二つの供試体で共通して、わずか 0.
8mm 程度の横ズレ量でピーク強度から残留強度に達している。堆
積軟岩のひずみ軟化を考慮するいかなる数値解析法でも、この関
係を取り入れる必要がある。

あとがき： 三軸圧縮試験であったためと思われるが、生じたせん断層は平面ではなくすべりに直交する方
向に丸みを帯びていた。おそらく、矩形供試体を用いた平面ひずみ圧縮試験によってより純粋なせん断層の
「応力・横ズレ量関係」が得られるであろう。また、堆積軟岩のせん断面はすべり方向にも高さ 2 mm 程度
の凹凸があり、全体的にも平面とはいえない。従って、三軸圧縮試験・平面ひずみ圧縮試験から得られる図
5のような結果は、あくまでもせん断層全体の平均的物性と言える。

参考文献：1)Burland, J.B. (1990): On the compressibility and shear strength of natural clays, Geo-
technique 40, No. 3 329-378. 2)金・越智・龍岡(1992): 堆積軟岩の微小ひずみレベルでの変形特性、土質工
学会、高知。3)中村ら(1987): 砂の平面ひずみ圧縮試験におけるひずみ分布、同上、新潟。4)Pradhan et al.,
(1988): Simple shear testing on sand in a torsional shear apparatus, Soils and Foundations Vol. 28,
No. 2, 95-112. 5)吉田ら(1992): 砂の平面ひずみ圧縮試験におけるせん断層の観察、土質工学会、高知。

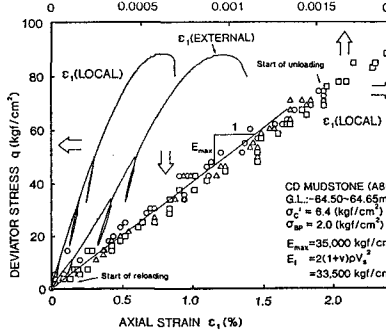


図2 ピーク前の応力・ひずみ関係

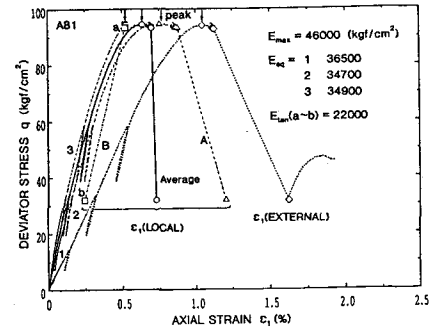
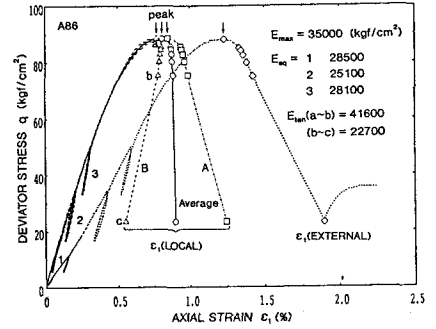


図3 (A86)、図4 (A81) 個々の LDT
による軸ひずみとその平均
 ε_s (LOCAL) と ε_s (EXTERNAL) の関係

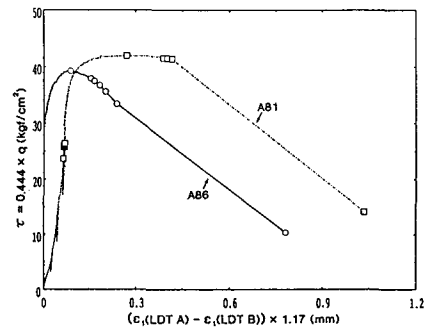


図5 せん断層に沿う横ズレ量と
平均せん断応力の関係