

硬質過圧密粘土のひずみ軟化挙動に関する考察

京都大学防災研究所 清水正喜

1. 諸論 本研究で対象としている硬質過圧密粘土とは、地質学的統成作用に基づくと考えられている結合力 (Diagenetic Bonds) を有する乱さない粘土であり、Terzaghi⁽¹⁾ の分類による Stiff Intact clay に属する。強度特性からみれば、ピークと残留強度に著しい差があり、破断形状からみれば明瞭なすべり面が現れるという特色がある。従来、この種の粘土に対する工学的興味は、主として強度特性に向けられており、土質材料の構成式の確立という問題においては、研究の遅れている対象である。本研究は、実験的に材料の弾塑性の性質を調べ、弾塑性ひずみ増分理論とひずみ軟化領域にも適用して硬化・軟化応力-ひずみ挙動を解明しようとするものである。

2. 試料および実験方法 試料は、大阪府高田林でブロック状で採取した、大阪湾積層群に属する(層準は不明)粘土である。小塊に切断した後、サクシオンと作用させ飽和度を高め、直径 3.5 cm、高さ 8.0 cm の円柱にナイフで成形した。バックプレッシャー σ_B を作用させつつ所定の等方応力状態で圧密した後、定軸ひずみ速度 $\dot{\epsilon} = 0.0048$ または、 0.0017% /min. で非排水せん断した。圧密中の排水は、周囲の口紙を介して上端から行い、間隙水圧は、下端面中央部で測定した。以下の議論は、軸対象三軸圧縮応力状態に限る。

3. 実験結果と考察 側圧 $\sigma_r = 4.0$, $\sigma_B = 2.0$ (kgf/cm²), $\dot{\epsilon}_1 = 0.0017$ (%/min) (Test OBI-CU-05) の結果を中心に述べる。図 1 に、主応力差: $\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$, および過剰間隙水圧: Δu と軸ひずみ ϵ_1 との関係と、図 2 に、 Δu と全平均主応力増分 $\Delta \sigma_m$ との関係とをそれぞれ示す。図 1 では、 $\sigma \sim \epsilon_1$ 関係は、応力緩和と開始点 ① まで直線的であるが、図 2 より、① 点以降ダイレタンシーが発生していることがわかる。応力緩和 (① → ②) 後の $\sigma \sim \epsilon_1$, $\Delta u \sim \epsilon_1$ 関係はほぼもとの関係からはずれ、とくに、応力緩和により減少した間隙水圧は、もとの値に回復するのさらに大きなひずみを要する。ピーク以後に応力緩和を行った他の試験においても同様の結果が見られた。つまり、ピーク点 ① から応力の落ち着く点 ④ までの軟化過程では、 σ の低下 (従って $\Delta \sigma_m$ の低下) とともに Δu も減少し、とくに ③ 点までは $\Delta \sigma_m$ の低下に比して Δu の低下が著しく、正のダイレタンシーが顕著になっている。④ → ⑤ → ⑥ の除荷・再載荷過程では、ヒステリシスループを描きつつも、初期の応力-ひずみの勾配に近い直線で変化している。再載荷時の間隙水圧挙動は、

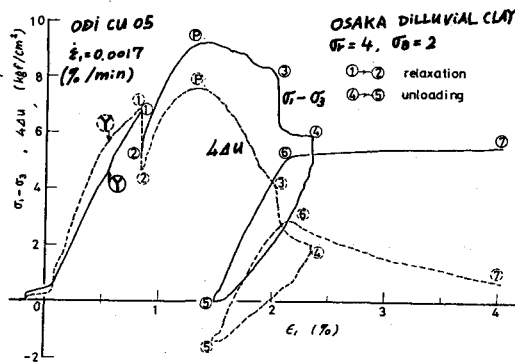


図1. $\sigma - \sigma_3, \Delta u \sim \epsilon_1$ 関係

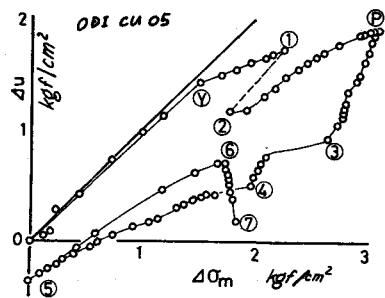
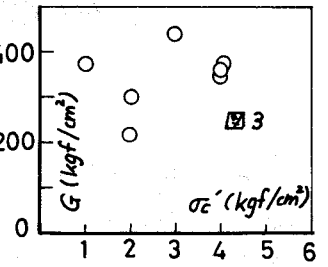


図2. $\Delta u \sim \Delta \sigma_m$ 関係

初期のそれに似ており、⑥点で急に折れ曲り、再び正のダイレタンシーが活発になつてゐる。⑥点の σ は、除荷開始点④の σ より小さく、反対に、⑥点の Δu は、④点の Δu の値よりも大きい。④と⑥における、 σ および Δu の差は、除荷開始点がどの程度残留状態に近いかに、ということに無関係でない。以上述べた傾向は、他の試験においても同様に見られる。さて、⑦点までの $\sigma \sim \epsilon$ 関係の直線勾配から、せん断弾性定数 G を決定でき、図3の結果が得られた。後で解析では、図3の G と、等方圧密過程の $e \sim \log(\sigma'_m)$ 関係(図省略)より得られる圧縮率 k は、膨潤指数 $k = -de/d \ln \sigma'_m (=0.0083)$ とを用いて、弾性ひずみ増分を計算している。4. 弾塑性理論による考察 等方硬(軟)化材料の降伏関数として(1)式や形を仮定する場合、塑性ひずみ増分は(2)式で与えられる⁽⁸⁾。塑性論に基づくひずみ硬化、軟化は、 $k > 0$, $k < 0$ でそれぞれ定義できる。その場合、(3)の条件を満たす負荷に対して、塑性ひずみ増分が生じる。 $df < 0$ の条件は、応力空間において k (塑性仕事 W^P の関数)を σ のメータにして降伏曲面が縮小することを意味する。つまり、実験結果に基づいて具体的な降伏関数を求めることを考える。図4は、ピークおよび残留状態で σ と σ'_m との関係を示している。先の考察から明らかのように、ピーク時は、塑性降伏状態にあり、従つてピーク時の σ と σ'_m の関係は、降伏曲面を表わす。図4の実線は式(4)で $k(W^P) = 0$ と仮定した曲線であり、結局、降伏関数を(4)式で近似的に表現できる。この場合、塑性仕事、せん断ひずみ増分はそれぞれ(5)、(6)式で与えられ、 dk/dW^P を評価できれば、塑性ひずみ増分を決定できる。図5は、(6)式を変形した(7)式を、図1の実験に適用して、緩和、除荷過程を除いた②→④→⑦について計算した dk/dW^P と W^P との関係を示したものである。ピーク以後、軟化過程に入ると、 dk/dW^P は正から負へ移り、 W^P の増加とともに(この例では定かではないが)残留状態に近づき、 dk/dW^P はゼロに近づいていく。図5の $dk/dW^P \sim W^P$ 関係の定式化は今後の課題としたい。

1) Terzaghi (1946) ISMFE, Vol. 1 2) 例題は足土函(1976) 京大防災年報 (米) Associated flow law を適用した場合、3) Prevost, Hoeg (1975) Géotechnique



$$F = f(\sigma'_m) - k(W^P) = 0 \quad (1)$$

$$dk = k \frac{df}{f} \quad (2)$$

$$dk = 1 / \left\{ \frac{dk}{dW^P} \frac{dW^P}{d\sigma'_m} \right\} \quad (3)$$

$$\text{硬化 } (k > 0) \quad F = 0, df > 0 \Rightarrow \alpha = 1$$

$$\text{軟化 } (k < 0) \quad F = 0, df < 0 \Rightarrow \alpha = -1$$

$$\text{その他 } df = 0 \Rightarrow \alpha = 0 \quad (4)$$

$$f - a(\sigma'_m - \sigma_e)^m - k(W^P) = 0 \quad (5)$$

$$a = 5.72, m = 0.415, \sigma_e = 0 \quad (6)$$

$$dW^P = d\epsilon'_m \frac{f}{\alpha} = k \left\{ -a m (\sigma'_m - \sigma_e)^{m-1} \right\} \quad (7)$$

$$\times df \quad (8)$$

$$d\epsilon'_m = d\epsilon'_m = k df \quad (9)$$

$$(e.g.; \text{偏差ひずみ})$$

$$\frac{dk}{dW^P} = \frac{df - a m (\sigma'_m - \sigma_e)^{m-1} d\sigma'_m}{(f - a m (\sigma'_m - \sigma_e)^{m-1} \sigma'_m)} \quad (10)$$

$$\times d\epsilon'_m \quad (11)$$

$$\text{--- (12)}$$

$$\text{--- (13)}$$

$$\text{--- (14)}$$

$$\text{--- (15)}$$

$$\text{--- (16)}$$

$$\text{--- (17)}$$

$$\text{--- (18)}$$

$$\text{--- (19)}$$

$$\text{--- (20)}$$

$$\text{--- (21)}$$

$$\text{--- (22)}$$

$$\text{--- (23)}$$

$$\text{--- (24)}$$

$$\text{--- (25)}$$

$$\text{--- (26)}$$

$$\text{--- (27)}$$

$$\text{--- (28)}$$

$$\text{--- (29)}$$

$$\text{--- (30)}$$

$$\text{--- (31)}$$

$$\text{--- (32)}$$