

コラプス現象を含む不飽和粘性土の変形・破壊挙動と解析

名古屋工業大学 正会員 松岡 元, 加藤 正司
 名古屋工業大学 学生会員 ○川田 善久, 滝脇 泰将
 名古屋工業大学 学生会員 加藤 正純

不飽和土では土粒子接点にメニスカスが存在し、見かけの粒子間付着力が生じる。この粒子間付着力により不飽和土は見かけの粘着力 c を有することとなる。本研究は、この粘着力 c を σ 軸上のボンド応力 σ_b として評価し、不飽和土の変形・破壊挙動を統一的に見ようとするものである。本報告では、等方圧縮条件下でのサクシオン減少により生じるコラプス現象 (σ_b の消失過程) とコラプス現象後のせん断挙動について実験結果に基づいて考察する。なお、有効応力は $\sigma' = \sigma - u_a$ (σ : 全応力, u_a : 間隙空気圧) で定義し、応力記号として平均有効主応力 $p = (\sigma_a' + 2\sigma_r')/3$ 、サクシオン $S = u_a - u_w$ (σ_a' : 軸圧および側圧, u_w : 間隙水圧) を用いる。また、拡張 SMP 上の垂直応力 $\hat{\sigma}_{SMP}$ 、せん断応力 $\hat{\tau}_{SMP}$ 、ひずみ相当量の垂直成分 $\hat{\epsilon}_{SMP}^*$ 、せん断成分 $\hat{\gamma}_{SMP}^*$ の定義については既報¹⁾と同様である。

1. 実験概要 気乾状態のカオリン粘土試料 ($G_s = 2.71$, $w_L = 40\%$, $I_p = 12.3$) を含水比調整後、締固めて直径 3.5 cm、高さ 8 cm の供試体 ($e_0 = 1.31$, $w_0 = 26\%$, $S_r = 54\%$) として実験に使用した。実験装置は不飽和土用に改造した三軸試験装置を用いた。実験時の応力経路は、図-1 中の点 A ($p = 20 \text{ kPa}$, $S = 50 \text{ kPa}$) から $S = 245 \text{ kPa}$ まで S を増加した後、 p を増加してから S を減少する経路 (図-1 中の $A \rightarrow C \rightarrow C_0 \rightarrow D_0$ 、 $A \rightarrow C \rightarrow C_1 \rightarrow D_1$ 、 $A \rightarrow C \rightarrow C_2 \rightarrow D_2$ の経路) と、点 A から $S = 0 \text{ kPa}$ まで S を減少した後、 p を増加する経路 (図-1 中の $A \rightarrow D \rightarrow D_1$ 、 D_2 の経路) の 2 種の経路を経た試料に対して、最終点 D_0 、 D_1 、 D_2 でそれぞれ S 、 p 一定の排水条件下で三軸圧縮試験を応力制御で行った。

2. 実験結果および考察 1) 等方圧縮条件下でのサクシオン減少時の挙動について 図-2 は、サクシオン減少過程 (図-1 中の $A \rightarrow D$ 、 $C_0 \rightarrow D_0$ 、 $C_1 \rightarrow D_1$ 、 $C_2 \rightarrow D_2$ の経路) における間隙比の減少状況を示している。標準圧密試験機を用いた過去の試験結果²⁾では低拘束圧下のサクシオン減少によって体積膨張を生じる例が見られるが、今回の結果では $p = 20 \text{ kPa}$ の低拘束圧下のサクシオン減少時 ($A \rightarrow D$ の経路) でもコラプス (体積圧縮) を生じていることがわかる。図-3、4 は $S = 0 \text{ kPa}$ に保ちながら p を増加する圧縮過程 ($D \rightarrow D_1$ 、 $D \rightarrow D_2$ の経路) と $S = 245 \text{ kPa}$ に保ちながら p を増加して圧縮後、 p 一定で $S = 0 \text{ kPa}$ まで S を減少する経路 ($C \rightarrow C_0 \rightarrow D_0$ 、 $C \rightarrow C_1 \rightarrow D_1$ 、 $C \rightarrow C_2 \rightarrow D_2$ の経路) での間隙比 e と飽和度 S_r の変化をそれぞれ示している。これら図で特徴的なことは、点 D_0 、

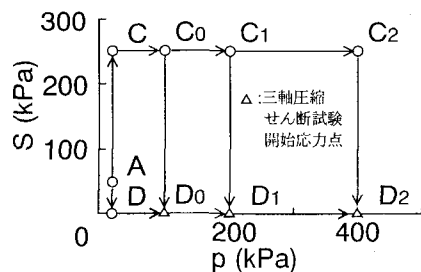


図-1 実験の応力経路

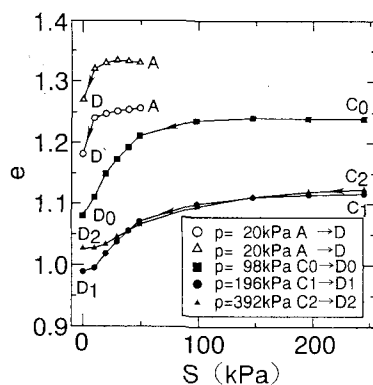


図-2 サクシオン減少時の間隙比

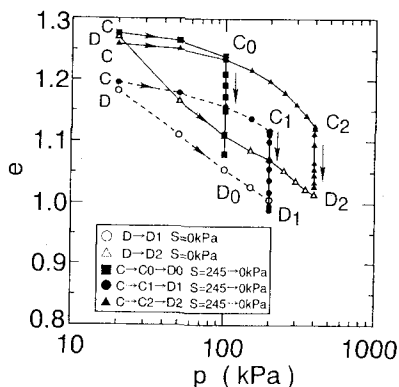


図-3 サクシオン減少時の $e \sim \log p$

D₁、D₂での間隙比、飽和度が2種の経路でほぼ等しくなっていることである。また、図-4に見られるようにD→D₁、D→D₂の経路では飽和度がS_r=90%程度になっており、ほぼ飽和していると考えられる。これらの結果より考えると、C₀→D₀、C₁→D₁、C₂→D₂の経路で生じるコラプス現象はボンド応力σ₀を消失して飽和状態へ移行する安定化過程と見ることができる。このボンド応力σ₀を消失する現象は、点C₁、C₂でのσ₀=60kPaであった(図省略)のに対して、点D₀、D₁、D₂でのσ₀=0kPa(図-6参照)であることから確認することができる。なお、図-3、4中において点C、Dの間隙比と飽和度にばらつきが見られるのは、供試体作製時に間隙比と含水比を完全に合わせ得ないためである。

2) コラプス後のせん断挙動について 図-5(a)はA→D→D₁経路(○印)とA→C→C₁→D₁経路(C₁→D₁はコラプス; ●印)の2種の(p, S)経路をたどった試料(p=196kPa, S=0kPa)の三軸圧縮試験結果の比較である。図-5(b)はA→D→D₂経路(△印)とA→C→C₂→D₂経路(C₂→D₂はコラプス; ▲印)の2種の(p, S)経路をたどった試料(p=392kPa, S=0kPa)の同様の結果を示したものである。これらの図より、2種の経路の応力比~ひずみ関係(○印と●印、△印と▲印)がそれぞれほぼ一致するのがみられ、両者の粒子構造にはあまり差異がないと推測される。また、両者の破壊時の応力比の大きさもほぼ等しいことがわかる。なお、ここでの応力比は、 $\hat{\sigma}_1 / \hat{\sigma}_3 = (\sigma_1 + \sigma_0) / (\sigma_3 + \sigma_0) = \sigma_1 / \sigma_3$ (∵ σ₀=0kPa)を意味している。図-6は、点D₀、D₁、D₂での破壊時のモール円を示している。両者の破壊時の応力比がほぼ等しいため点D₁、D₂でのモール円は2個重なって描かれており、計5個のモール円が書かれている。これらのことは、コラプス現象直後でも、飽和状態で圧密を受けた後でも、(p, S=0kPa)が同じであれば変形・強度特性は変わらないことを意味しており、興味深い。図-7は拡張SMP上の応力比 $\hat{\tau}_{SMP} / \hat{\sigma}_{SMP}$ とひずみ相当成分の増分比(-dε_{SMP}* / dγ_{SMP}*)との関係を示している。この図中に示す直線は傾きλ*=0.7、縦軸切片λ̂*=0.35の直線である。飽和状態での圧密後でも、コラプス直後でも同じ直線付近にプロットされる傾向を示している。

参考文献 1)加藤・松岡 他、第28回土質工学研究発表会講演概要集、NO.277, pp.721-724. 2)Barden, L. et al., ASCE, Vol.95(1), 1969, pp.33-51.

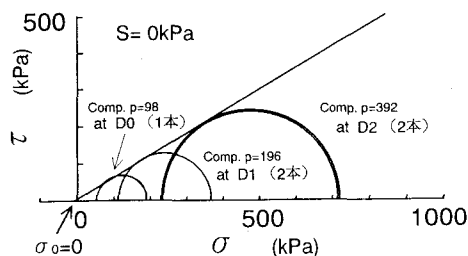


図-6 点D₀、D₁、D₂における破壊時のモール円

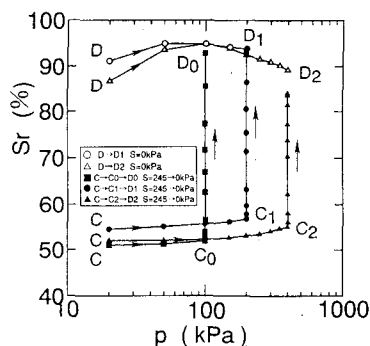


図-4 カサヨリ減少時のSr~log p

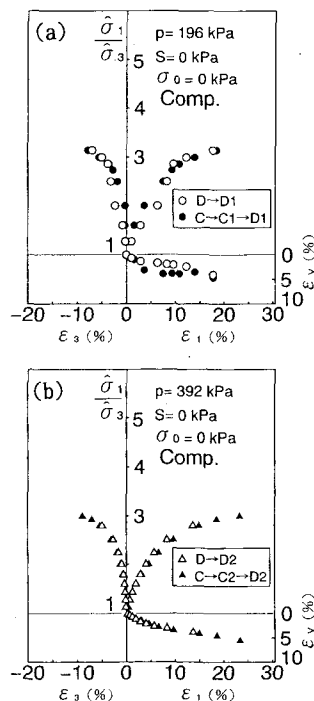


図-5 点D₁、D₂における $\hat{\sigma}_1 / \hat{\sigma}_3 \sim \epsilon_1, \epsilon_3 \sim \epsilon_v$ 関係

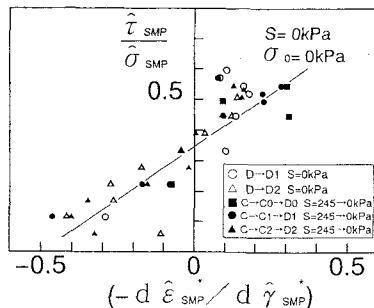


図-7 $\hat{\tau}_{SMP} / \hat{\sigma}_{SMP} \sim (-d\epsilon_{SMP}^* / d\gamma_{SMP}^*)$ 関係