

不飽和土の応力経路

信州大学工学部 正員

川上 浩

○ 阿部 広史

1. 目的 不飽和土に対して有効応力の原理を適用した場合, Jennings¹⁾により, その適用限界が存在するといわれ, この原理と矛盾する挙動も示してくる。そこで著者は, 不飽和土の土粒子骨格の構造性の差に着目し, せん断強さがこの構造性に依存すること示してきた²⁾。また不飽和土の体積変化は有効応力・サクション・土の構造・せん断応力という多数の要素に支配されることもあきらかにしてきた。今回は同様なる考えのもとに, 土の構造性の差による挙動と圧縮特性の面から考察してみる。特に, ある応力状態で soak させ, サクションを解放した時に生じてくる, collapse の現象を中心とし, この現象が生ずる限界, collapse 量の予測, 有効応力原理となぜ矛盾してくるかについて, 圧密試験結果から述べる。

2. 供試体条件及び試験方法 実験に用いた試料の物理的性質は, $LL = 39$, $PI = 9$, 比重 2.73, 最大粒径 2.0mm , 砂分 25%, シルト分 55%, 粘土分 20% をもち, 砂質シルトに属する。統一土質分類では ML となる。

供試体の突固めは, 三種類の方法により行なわれ, それぞれの突固め曲線が図-1に示してある。曲線Ⅰは標準の突固めにより得られたものであり, 曲線Ⅱはその半分の突固め効果(落下高さ 15cm)によるもの, 曲線Ⅲはハーバードタンパーを用いたものである。供試体は, Ⅰ・Ⅱについては, モールドから押し出されたものを切り出し, Ⅲは圧密リング内に直接突固めたものを用いた。図中の供試体番号 A は最適含水比, B が湿側側, C・D が乾燥側であることを示している。スラリーの圧密試験では, 液

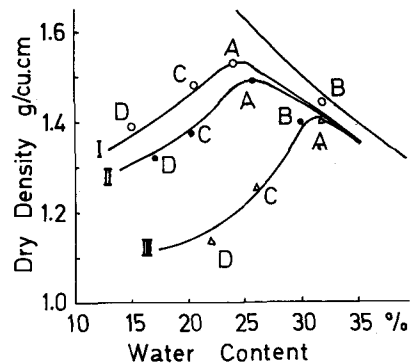


図 - 1

性限界程度にぬられた試料を圧密リング内に直接流し込んだものに載荷した。試験機は標準の固定リング型圧密試験機を用いたが, 不飽和土の載荷時には乾燥したポーラストーンに適當な湿気を与えたる紙を張り, 圧密容器周辺をぬれた布で被って試料の乾燥を防止した。実験は, 飽和度の高いもの(最大乾燥密度及び湿側側に相当する A と B)については, 初期荷重として 0.1 kg/cm^2 をかけた段階で soak し, 飽和土として行った。乾燥側に属する C 及び D については, 0.1 kg/cm^2 でサクションを解放したもの及び不飽和土のまま圧密し, $0.8, 3.2, 12.8\text{ kg/cm}^2$ のいずれかの荷重段階で soak し, サクションを解放させて collapse の現象を観察したものがある。サクションの解放は, できるだけ強制的な水圧をかけないようにつとめ, まずサクションによる土の吸引力のみで十分吸水させ, その後, 水位を供試体頂部までゆっくり上昇させた。なお各荷重段階で soak した場合にも, collapse による沈下が落着いたのち, 荷重は 12.8 kg/cm^2 までそれぞれ上昇させた。

3. スラリーの圧密試験結果 スラリーの状態にある土を圧密した場合の荷重沈下曲線が図-2中

に示されている。これは通常言われている処女圧密曲線となるべきもので、ゆゑくりとした弧を描いている。スラリーの状態で圧密を行うことは、試料が極端に軟らかいため、その初期状態が不安定となる。したがって、比較的大きな初期間げき比のパラッキを見たが、計6本の試験から妥当と思われる線を選び出した。

4. 湿潤側及び最適含水比の上の圧密試験 図-1中のI-A・B, II-A・B及びIII-Aに位置する土の荷重沈下曲線を図-2に示している。各線とともに、スラリーの線の下側にあり、次第にこの線に漸近する傾向を示す。

また突き固めによる効果が、圧密降伏応力と同様の効果を表わしている。

なお、最適含水比の土を、ある程度荷重が増加した段階でsoakした場合、soak中の二次圧密による効果と思われるごくわずかの沈下を示したが、collapseのような沈下は全く現われず、その後の荷重沈下曲線もスラリーの線に漸近する傾向を示し、特に大きな変化は生じなかった。以上により、これらの土はかなりよく似た土の構造的なものであるのではないかと考えられる。例えば、配向構造に近いものと推察される。

5. 乾燥側の土の圧密試験 soakingにより大きなCollapseを生じた例が図-3に示されている。これはIII-Dに相当するものであり、今回行った試験では最も不安定な構造をもつ土と考えられる。まず、 $0.1 \sim 0.8 \text{ kg/cm}^2$ まで、三本の供試体はともに不飽和土のまま圧密される。そして、 $0.8, 3.2, \text{及び} 12.8 \text{ kg/cm}^2$ のいずれかの荷重状態で沈下がおさまった後にsoakさせた。Collapseが生ずる場合は、一般にsoak後数分ないし30分位で急激に生じ、その後の沈下量はごくわずかである。 0.8 及び 3.2 kg/cm^2 でsoakされたものについては、その後、引き続き飽和土の圧密試験として、 12.8 kg/cm^2 まで載荷を行なった。soak lineとして図中に示したものは、これら三本の供試体と同じ条件のものに 0.1 kg/cm^2 の荷重状態でsoakし、その後、飽和土として圧密されたものである。不飽和土圧密の途中の段階でsoakした場合、このsoak lineに到達するようなcollapseを生じ、その後はこのsoak lineに沿った沈下を示す。

全応力で示した不飽和土の沈下曲線に對し、有効応力でこれを表わすと、一般に図-4のごとく示される。図中のA点でsoakするということは、有効応力で考えるとB点でsoakしたことになる、C点までサクションの開放による有効応力の減少と沈下が生ずる。

乾燥側で突き固められた土は不安定な構造(例えばラング

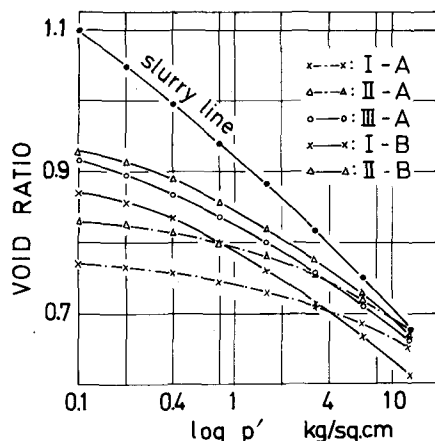


図 - 2

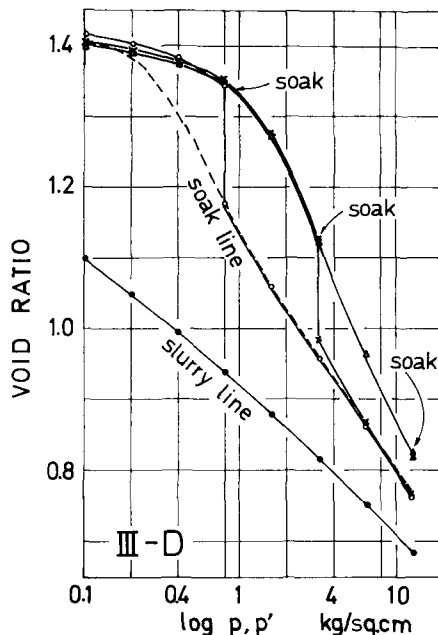


図 - 3

ム構造)をもっており、それはサクシオンによりでせえられている。この状態でサクシオンが解放されると、この不安定な構造はより安定なものへと変化しようとする。このとき構造の collapse を生ぜしめるに充分な荷重が働いていれば、collapse による沈下を生じ、soak line まで変化する。したがって、B 点から C 点へ至る間の沈下は土の構造が変化する(例えばランダム構造から不完全配向構造へ)ための沈下で、通常の有効応力の変化による膨張収縮とは性質を異にする。この沈下が C 点にとどまり、D 点に達しないことは collapse 後の構造がスラリーの構造とは異なる(例えば不完全配向構造と完全配向構造)と推測される。Collapse 量の比較的小さいものが、図-5 に示された。初期間げき比にバラツキはあるが、soak 後、同様の傾向が示される。

三種類の突固め状態における乾燥側のもののうち、0.1 kg/cm²で soak したものの(soak line)とまとめてみると、図-6 になる。この図が示すように、試料の初期状態には関係なく、荷重の大きい所で、soak line は相互に漸近して行く。しかし、この soak line はスラリーの沈下曲線とは一致せず、不飽和土特有の soak line が現われてくる。特別に大きな荷重での試験を行なえば、一致するようになるものと推測されるが、現状では一致しないとみてよい。

6. 強度差への影響。飽和度 95, 85 および 65 % で突固めした後 soak し、飽和した試料の三軸試験の結果、state surface が曲面となることを示した²⁾。これらの結果を σ' - τ 面に投影した破壊包絡線を図-7 に示す。飽和度 95 % のものは、圧密試験の性状より考えると、構造的により dense なものとなっていると推測され、また飽和度 65 % のものは、soak 後も slurry の線より上の、より loose な構造の状態にあると思われる。このことは、せん断による破壊包絡線において、95 % 飽和度の ϕ' が大きく、飽和度 65 % の ϕ' が小さいことと一致している。したがって、もし slurry 状試料の三軸試験を行なえば、図中に破線で示したように、95 % の ϕ' と 65 % ϕ' との中間の結果がえられるものと

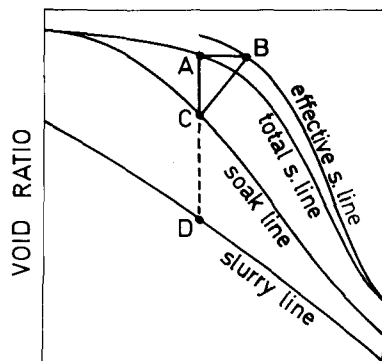


図 - 4

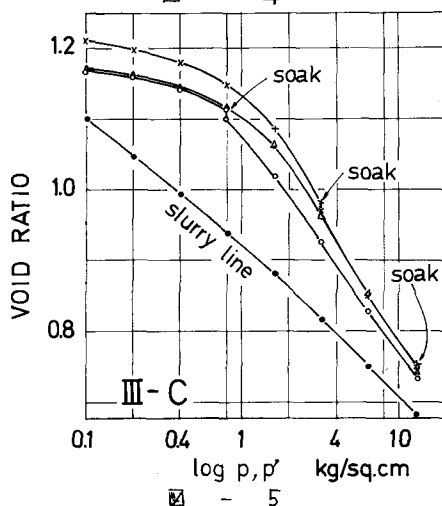


図 - 5

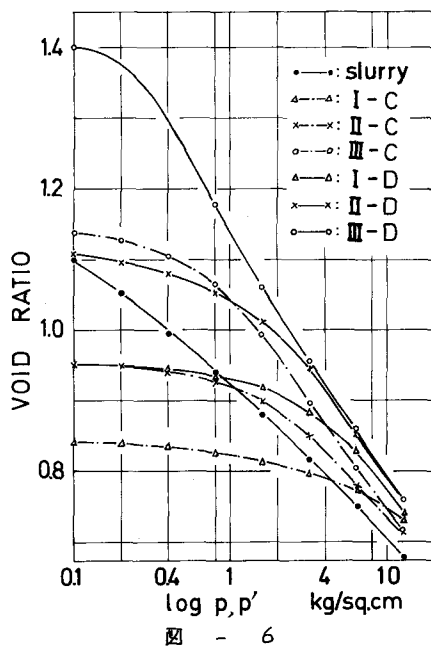


図 - 6

推測される。そして95%試料は、圧密の場合、荷重の大きなところで slurry の荷重沈下曲線に近づくように、三軸試験の破壊臭も応力の大きなところで、下降気味の傾向を示し、推測される slurry の破壊包絡線に近づくことを示していると考え。 (図-7の95-lineは最小自乗法の見地から直線で示したが、×印で示した破壊臭を見ると、この傾向をよく表わしている。) なお65%試料は、この程度の応力状態では、突固めエネルギーが比較的大きいため、Slurryの線に下側から近づく傾向を示していないが、

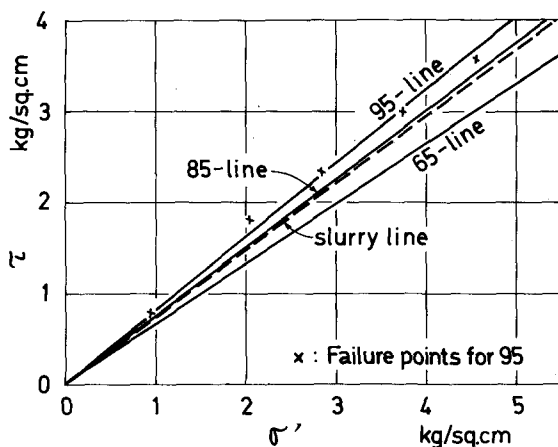


図 - 7

さらに大きな応力状態では、そのような傾向を示し、圧密試験の結果と一致してくるものと考え。

7. 結 論 1). 飽和度85~90%以上で得た突固め土の沈下曲線は、slurryの沈下曲線の下側(密度の大きな側)より slurry 線に漸近する。

2). 飽和度85%以下で得られた突固め土の沈下曲線は、特有の soak lineを有し、slurryの沈下曲線より上方(密度の小さな側)に位置する。

3). soak lineと不飽和土の(全応力で示した)沈下曲線とがキまれば、Collapseが生ずるか否か、あるいは Collapse量を予測できる。

4). ある荷重のもとで不飽和土を soak した時、構造の Collapseにより、この土の soak lineに達する沈下が生ずるが、soak lineと slurry線との不一致は collapse後の構造と slurryの試料の構造との差によるものと考えうる。

5). これら構造の差にもとづく、試料密度の差は、せん断時の破壊包絡線の差に傾向として一致している。

8. あとがき これらの実験にあたり、三井敏夫君(京王帝都電鉄)の助力を得た。また科学研究費の補助を受けた。記して深く感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) Jennings, J. E. and Burland, J. B. (1962) " Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils " Geotechnique, Vol.12, No.2
- 2) 川上・岡部 (1972) 「不飽和土せん断時の体積変化と Collapse」 土質工学会, 第7回 研究発表会