

土の一軸圧縮強度の意義

Mechanical meaning of unconfined compression strength for cohesive soils

まつ
松 おか
岡はじめ
元*

1. ま え が き

土の一軸圧縮試験は、粘性土の強度を決定するため実務では頻繁に行われているが、その土質力学的意義については不明確な点が多く注意を要するに思われる。一見、コンクリートの圧縮試験と同じようにみえるが、土は本来ばらばらの土粒子の集合体であり、拘束圧の変化の影響を敏感に受けるので、結果を単純に解釈することはできない。ここでは、一軸圧縮試験の意義、吸水による一軸圧縮強度の低下、強度増加率 c_u/p 値 (c_u : 非排水せん断強度, p : 圧密圧力) について私見を述べる。

2. 一軸圧縮試験の土質力学的意義

まず、一軸圧縮試験は裸の円柱形粘土供試体に対して行うが、早くせん断するので(軸ひずみ速度が毎分1%程度)、供試体内の水がぬけるひまがなく非排水条件下のせん断試験と考えられる。粘土の透水係数は一般に小さく水がぬけるのに時間がかかる。非排水条件とは、飽和土の場合せん断中に体積変化が起こらない条件に対応する。実際の粘土地盤の破壊は、一般に粘土塊の体積が大きく水がぬけにくいので非排水条件下で起こる場合が多いといわれている。

さて、図-1に示すように深さ z からサンプリングして地上へ取り出した試料を大気圧のもとで軸方向に圧縮してせん断させるのが一軸圧縮試験であるが、果たしてこの方法で深さ z の位置の地盤の強度を知ることができるのか。深さ z の地盤中で $\gamma'z$ (γ' : 地盤の有効単位体積

重量) なる土かぶり圧を受けていた試料は、大気圧のもとに置かれると拘束圧が急激に減少するので、図-2に示すような e (間隙比) $\sim \log p$ (圧密圧力の対数) 関係図の膨張曲線に沿って膨張するのではなからうか。そうすれば、その強度はもはや地盤中の強度とは別物になるのではなからうか、という疑問が浮かぶ。これは大変なことだと思ったのは、筆者が大学院生(京都大学防災研究所村山朔郎教授の研究室に在籍中)のときであった。

それで、いろいろ調べてみると図-2の膨張曲線は吸水膨張して得られるものであって、水がなければ膨張できないということが分かってきた。なるほど、標準圧密試験機の圧密リングは水の中に沈められている。一軸圧縮試験に対して明解な説明がなされている教科書は、筆者の知る限り、名古屋大学教授山口柏樹著の「土質力学」(技報堂)だけのようである。それから次のような記述を引用させていただく。

「地盤内の飽和粘土は土かぶりに等しい圧力 p_0 で圧密されているが、これを地上に取り出すと周圧が0となり膨張しようとする。しかし吸水は許されていないから毛管負圧が働いて負の間隙水圧 $-p_0$ が発生し、 $\sigma' = 0 - (-p_0) = p_0$ なる地中におけると同じ有効応力が作用することとなり体積変化が起こらないのである」

ここで、 $\sigma' = 0 - (-p_0)$ なる式は、飽和粘土のような土粒子と間隙水からなる二相混合体の場合、粘土塊に作用する全応力 σ は土粒子骨格にかかる有効応力 σ' と間隙水にかかる間隙水圧 u で受け持たれる ($\sigma = \sigma' + u$) という考え方に基づくものである。すなわち、有効応力 σ' は全応力である大気圧0と毛管負圧による間隙水圧 $-p_0$ の差で表されるということを意味している。有効応力が変わらなければ体積変化が起こらないというのは、「土の場合は全応力ではなくて、有効応力の変化がひずみを発生させる」という「有効応力の原理」に基づく考え方である。土粒子骨格に働く応力(=有効応力)が変化して初めて、土粒子骨格の変形が生じるというのは容易に理解される。水圧は全方向に等しい圧力であるので、間隙水圧は土粒子骨格の変形に直接的には寄与しない。

以上から、一軸圧縮試験は「毛管負圧」というデリケートな有効拘束圧(全応力の拘束圧は0)のもとでの試験であることが分かってきた。毛管負圧というのは、土粒子が

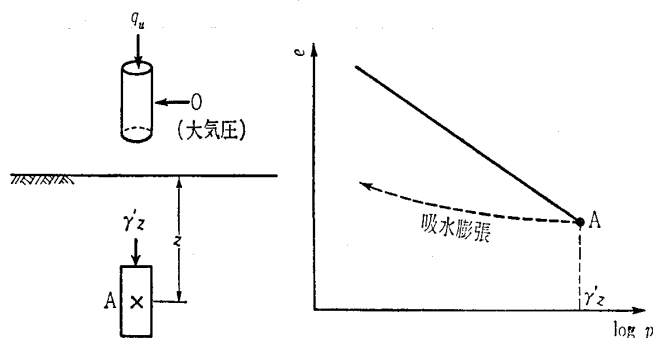


図-1 土中のA点から大気中へ取り出された一軸圧縮試験の供試体

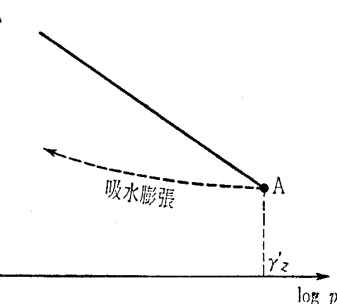


図-2 e - $\log p$ 関係図におけるA点からの吸水膨張曲線

*名古屋工業大学助教授 工学部土木工学科

資料-391

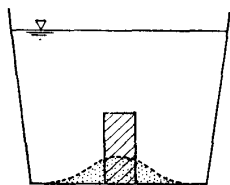


図-3 水中に置かれた一軸圧縮試験の供試体（1か月程ほうっておくと……）

親水性を示すので水の表面張力のために粘土の毛細管状の間隙に発生する負の水圧であるといわれている。実際には、地盤中の深い所から採取した軟弱粘土や砂っぽい粘性土、き裂のある粘性土などは水を与えなくても膨張するとのことである。ましてや、雨の中でサンプリングする場合には、吸水膨張させてしまう可能性が高いと覚悟しなければならない。試料が膨張すれば、当然有効応力も地盤中で受けていたものから変化していると考えられ、一軸圧縮試験を行ってももはや地盤中の強度を測定していることにはならない。地盤の一軸圧縮強度が非常にばらつくのは、必ずしも地盤の不均一性のためだけでなく、上述したような非常にデリケートな拘束圧のもとでの試験であることも関係しているのではないと思われる。水のはいったバケツの中に、土中から採取された裸の粘土試料を入れて、1か月程置いておけばどのようなになるであろうか。試料は形を保つことができず、ばらばらになって下にたまるであろう(図-3参照)。これが有効拘束圧も0の状態である。

3. 吸水による一軸圧縮強度の低下

前節では、サンプリング時や供試体作製時の試料の乱れが全くない場合でも、吸水を許せば試料は $e \sim \log p$ 関係の膨張曲線に沿って膨張し、一軸圧縮強度は低下することを述べた。ここでは、果たしてどれだけ強度が低下するものか実験結果を示そう。実験に用いた試料は、市販の粘土粉末に水を加えて含水比70%とし、48時間ソイル・ミキサーで練り返した後、大型圧密リング内で一次元的に再圧密したもの（鉛直圧密圧力 0.5 kgf/cm^2 ）で、通称藤の森粘土と呼んでいる。この試料は液性限界 $LL=41.0\%$ 、塑性限界 $PL=23.0\%$ 、比重 $G_s=2.68$ であり、三角座標による分類によればシルト質ローム（粘土分17%, シルト分53%, 砂分30%）となる。

図-4は鉛直圧密圧力 0.5 kgf/cm^2 のもとで一次元圧密させた藤の森粘土を試料として、水浸しない状態、10秒間水浸および1分間水浸した状態での一軸圧縮試験結果を示したものである。また図-5は圧密圧力 $p=7.0 \text{ kgf/cm}^2$ のもとで等方圧密させた藤の森粘土を試料として、水浸しない状態および5分間水浸した状態での一軸圧縮試験結果を示したものである。なお5分間の水浸による含水比の増加は1.1%であった。両図より、たとえ水浸時間が短くても、水を与えると一軸圧縮強度が著しく低下するのがみられる。水を吸いたいと思っている一軸圧縮試験の供試体に水を与えることは、麻薬患者に麻薬を与えるのと同じくらい危険であることを認識すべきである。例えば、試料の乾

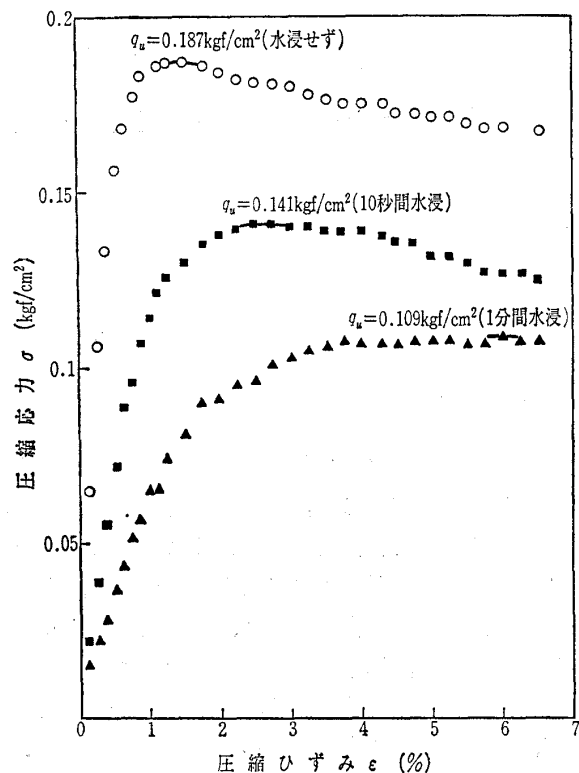


図-4 水浸による一軸圧縮強度の低下 (0.5 kgf/cm^2 で一次元圧密させた藤の森粘土)

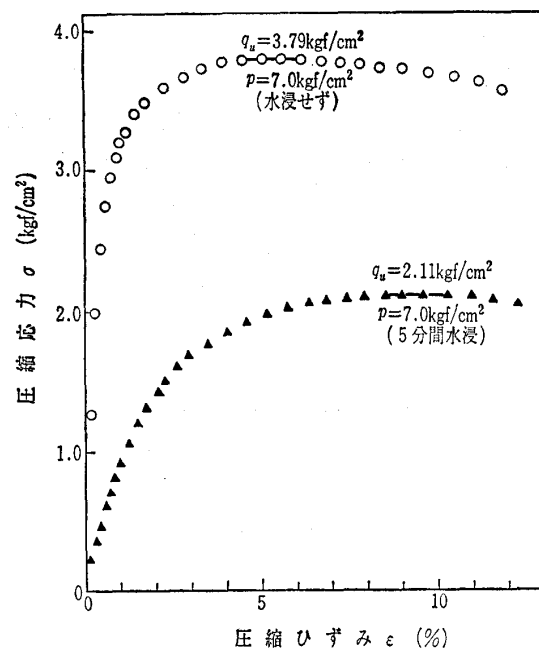
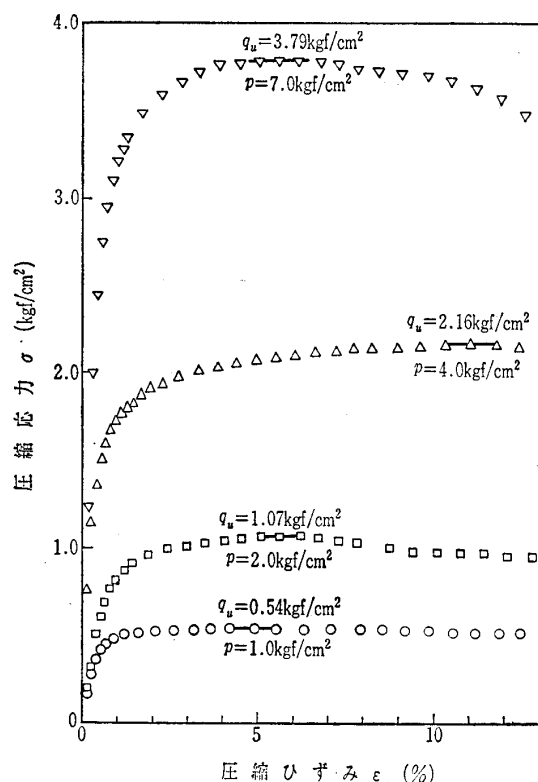


図-5 水浸による一軸圧縮強度の低下 (7.0 kgf/cm^2 で等方圧密させた藤の森粘土)

燥防止のために、濡れタオルをまくなどということは厳に慎まなければならない。

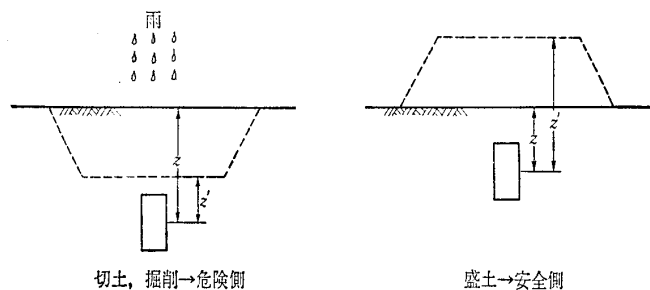
4. 強度増加率 c_u/p 値

図-6は圧密圧力 $p=1.0, 2.0, 4.0, 7.0 \text{ kgf/cm}^2$ のもとで等方圧密した藤の森粘土を試料とし、水を与えないように注意して行った一軸圧縮試験結果を示したものである。



図—6 各種の p のもとで等方圧密させた藤の森粘土の一軸圧縮強度 q_u

一軸圧縮強度 q_u より非排水せん断強度 $c_u (=q_u/2)$ を求め、それぞれの圧密圧力 p で割れば、すべての p に対して $c_u/p = 0.27$ を得る。例えば、 $p = 7 \text{ kgf/cm}^2$ というのは深さ70 m程度の地盤中の有効応力に対応すると考えられるが、そのような大きな拘束圧力から開放されても c_u/p 値が変化しないということは、毛管負圧が絶対圧ゼロ以下のかなり大きな圧力まで持ち得ることを意味している。しかし、この $p = 7 \text{ kgf/cm}^2$ のデータは図—5の水浸させない場合のデータと同じものであり、このように理想的に試料を取り扱った場合でも水を与えればたどころに強度が低下することを銘記しなければならない。なお、強度増加率 c_u/p の物理的意味は、i)拘束圧 p が大きい程、よく圧密されていて密に詰まるので、せん断強度 c_u が大きいと理解してもよいし、ii)拘束圧 p が大きい程、摩擦法則から考えても p に一定の摩擦係数をかけて得られるせん断強度 c_u が大きいと考えてもよい。すなわち、 c_u/p というのは、物理的にはせん断強度 τ_f を有効垂直応力 σ' で割ったもの (τ_f/σ') に対応して、 $\tan \phi'$ と近い意味を持つと考えられ、それゆえ一定値になると理解できる。



図—7 一軸圧縮強度の適用上の注意点

現場の所長さんから、切土、掘削の場合は崩壊しやすく、特に大雨の直後は要注意、といった話を聞いたことがある。この問題を図—7を参照して考えてみると、切土、掘削の場合には施工とともに土かぶり圧が減少し、雨の日もあるので地盤は吸水膨張を起こして、強度が減少するのには気が付く。なお、このとき吸水膨張現象は圧密収縮現象よりもはるかに早く起こることに注意すべきである。掘削斜面の安定解析は、掘削前の地盤からサンプリングされた試料についての強度試験結果に基づいて行われるであろうから、掘削とともに地盤の強度が減少していくことを考慮した設計をしていなければ、滑らせてしまうのは当然である。反対に、盛土の場合は、もし盛土によって地盤が破壊するような状況になれば、盛土の自重によって下の地盤は徐々に圧密され地盤の強度が増加していく方向にあるので、安全側の設計になると考えられる。 c_u/p = 一定で上載圧 p が大きくなるので、せん断強度 c_u も大きくなると理解してもよい。

5. あとがき

上述したように、一軸圧縮試験は一見簡単な試験のようにみえるが、なかなか複雑な種々の問題点を有する試験と考えねばならない。筆者の個人的な意見としては、このような不安定な拘束圧のもとでの試験は早くやめにして、少なくとも原位置の応力状態のもとで再圧密してからせん断する方法(CU, CD試験)を採用すべきであると考えます。

最後に、筆者が京都大学大学院生であった当時に、本テーマに関して適切な御助言をいただいた神戸大学軽部大蔵助教授、実験および図面作成に協力していただいた本学大学院生藤原幸一君、技官春木隆保君に感謝の意を表する次第である。

(原稿受理 1982.12.9)