

不飽和な砂質土の粒子間結合力について

岐阜大学工学部 正会員 ○神谷浩二 宇野尚雄
同 上 栗本隆司

1. まえがき 薬液注入に伴う地盤割裂の発生は、その圧入による引張り応力ゾーンの進行性に起因している。本報告は、その基礎的研究として、単純引張り試験による砂質土の引張り強度の測定から求める粒子間結合力について考察するとともに¹⁾、粒子間結合力と粒子形状などの土粒子物性との関係について述べる。

2. 測定方法及び試料 土の粒子間結合力の測定には、市販の粉体付着力測定装置EB-3300CH(島津製作所製)を用いた¹⁾。図-1に示すような上下部に分割できる円筒形セル(試料層断面積 $A=10\text{cm}^2$)に、試料層高さ $L(\text{cm})$ ($L=2\text{cm}$ 程度)になるように充填した土試料層を鉛直方向に引張ることにより、その試料層を破断させる。この装置では、試料層を破断するのに要した最大引張り力 $M(\text{gf})$ が表示され、この M を用いて最大引張り強度 $\sigma_z(\text{gf/cm}^2)$ が次式によって求められる。

$$\sigma_z = M/A \quad (1)$$

そして、粒子1接触点あたりの平均粒子間結合力 $F(\text{gf})$ が次式によって算出される²⁾。

$$F = \frac{\pi(D/10)^2}{N(1-n)} \sigma_z \quad (\text{Rumpf式}) \quad (2)$$

$$N = 13.8(1 - \sqrt{1.21n - 0.297}) \quad (\text{Ridgway-Tarbutck式}) \quad (3)$$

ここに、 D : 平均粒径($D=D_w=1/\sum(P_i/D_i)$), P_i : ある粒径範囲を代表する粒径 $D_i(\text{mm})$ が全試料に対して占める割合(mm), N : 粒子1個あたりの平均接触点数, n : 間隙率。

測定試料には、図-2に粒度を示す標準砂、ガラスビーズGB-AC、長良川シルト(以下、標準砂、GB-AC、シルトと称する)を用いて(図中には粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$ 、平均粒径 $D_w(\text{mm})$ をそれぞれ併記)、種々の飽和度に対しての平均粒子間結合力を測定した。

3. 測定結果 各試料についての飽和度 S_r による平均粒子間結合力 F の変化を図-3にそれぞれ示し、図-3(a)、(b)の標準砂、GB-ACに関しては、飽和度 S_r による透気係数 $k_a(\text{cm/s})$ の変化を重ね合わせて示した³⁾。なお、引張り強度 σ_z は、標準砂で $4.0 \sim 15.0(\text{gf/cm}^2)$ 、GB-ACで $3.0 \sim 12.0(\text{gf/cm}^2)$ 、シルトで $30.0 \sim 105.0(\text{gf/cm}^2)$ であり、シルトは標準砂やGB-ACの10倍程度の引張り強度を有する。一方、結合力 F は、標準砂で $1.0 \times 10^{-3} \sim 4.0 \times 10^{-3}(\text{gf})$ 、GB-ACで $0.5 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-3}(\text{gf})$ 、シルトで $0.8 \times 10^{-5} \sim 4.0 \times 10^{-5}(\text{gf})$ であり、シルトは標準砂やGB-ACの1/100程度の結合力となり、引張り強度のときとは大小逆転する。これは、式(2)のように結合力は粒径の2乗に比例するためである。さて、図-3において、いずれの試料についても中間的な飽和度で結合力は最大となり、低飽和度及び高飽和度で結合力は小さくなる傾向にある。また、試料による結合力を比較すると、粒径が小さくなるにつれて結合力は減少する。

4. 考察 図-3(a)、(b)によれば、透気係数 k_a は $S_r=0 \sim 10(\%)$ の低飽和度ではほとんど変化せず、その後、 S_r の増加に伴い k_a は減少し、 $S_r=80 \sim 90(\%)$ の高飽和度で $k_a=0(\text{cm/s})$ となる傾向にある。即ち、土中の

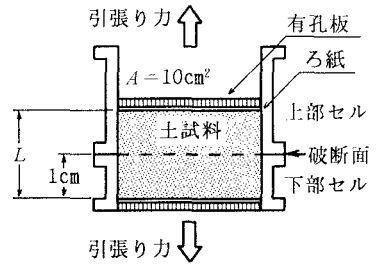
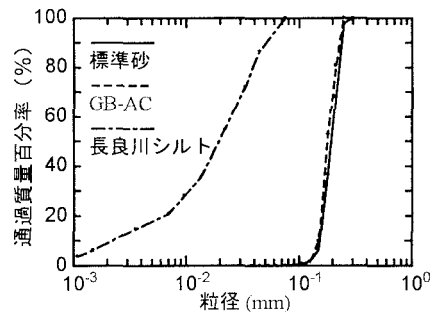


図-1 測定装置試料セル部



標準砂: $\rho_s=2.643\text{g/cm}^3$, $D_w=0.188\text{mm}$
GB-AC: $\rho_s=2.496\text{g/cm}^3$, $D_w=0.178\text{mm}$
長良川シルト: $\rho_s=2.678\text{g/cm}^3$, $D_w=0.00662\text{mm}$

図-2 測定試料の粒度

間隙水の存在状態は、低飽和度では、土の透気性にほとんど影響しないような粒子接触点付近や微細な粒子間隙に水分は保持され、飽和度の増加に伴い空気が流れるマクロな粒子間隙にまで水分が保持される。そして、高飽和度では、空気が流れる道すじは閉ざされ、気泡が部分的に存在する状態であることが予想される。一般に、低飽和度では、サクシオンによる粒子間作用力が大いいために結合力は最大になることが考えられる¹⁾。しかしながら、測定した結合力は見かけであると考えられ、低飽和度では、局部的に結合力は大きいものの微かなせん断歪に対して土試料全体が抵抗するのではなく、与える歪が試料内で局部的に進行するため、見かけ上の結合力は小さくなる。また、中間飽和度では、間隙水により粒子間が連結される部分が増加し、空気と水の気液界面が十分に存在することにより結合力が大きくなり、更に、高飽和度では、気泡が部分的に存在するように気液界面は減少し、サクシオンによる粒子間作用力が減少するため結合力は小さくなることが推察される。

次に、表-1には、各試料の空気透過法により測定した体積基準比表面積 $S_v(\text{cm}^2/\text{cm}^3)$ 、SEM写真により観察した粒子形状をそれぞれ示す⁴⁾。図-3(a)、(b)より、標準砂はGB-ACの約1.5倍の結合力を有している。しかしながら、標準砂の D_w はGB-ACの D_w の1.06倍であるため、先述の3.のように粒径だけが見かけの結合力に影響するものではないようである。表-1の比表面積や粒子形状を比較すると、間隙水の粒子への付着構造の違いや粒子同士のかみ合い効果によって、GB-ACより標準砂の結合力が大きくなることが考えられる。一方、図-3において、標準砂やGB-ACでは $S_r=0(\%)$ のとき $F=0(\text{gf})$ のようであるが、シルトでは $S_r=0(\%)$ のとき $F=0.8 \times 10^{-5}(\text{gf})$ であり、サクシオン以外の粒子間作用による結合力がある。シルトの比表面積は標準砂やGB-ACより約30倍大きく、また、粒子形状はかなり角張ってくる。即ち、シルトでは表面活性の増加による静電気的な粒子間作用や上述の間隙水付着構造や粒子のかみ合いなどが結合力にかなり影響していると推定される²⁾。

5. あとがき 本報告では、不飽和な砂質土の見かけの粒子間結合力を測定した結果、結合力は中間飽和度で最大となることを示し、また、結合力にはサクシオンによる粒子間作用以外に粒子のかみ合いや物理的な粒子間作用などが影響することを推定した。

〔参考文献〕 1) 神谷・宇野:土の粒子間結合力の測定について,土木学会第50回年次学術講演会講演概要集第3部, pp.2-3, 1995. 2) 日本粉体工業技術協会編:微粒子工学, 朝倉書店, pp.9-22, 1994. 3) 宇野・神谷・鬼頭・杉井:湿潤土の透気係数について, 第5回地盤工学シンポジウム論文集, pp.77-82, 1993. 4) 宇野・杉井・神谷:比表面積測定に基づく土粒子物性と透気性・透水性の考察, 土木学会論文集, No.469/III-23, pp.25-34, 1993.

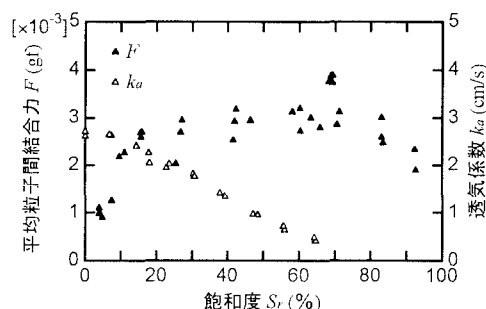


図-3(a) 飽和度による F 及び k_a の変化(標準砂)

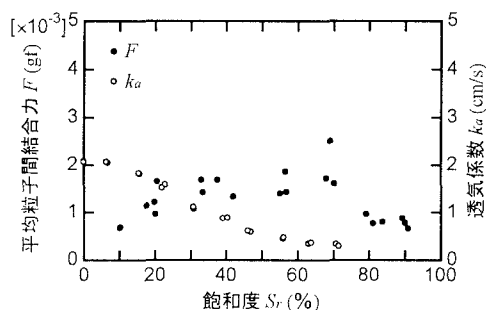


図-3(b) 飽和度による F 及び k_a の変化(GB-AC)

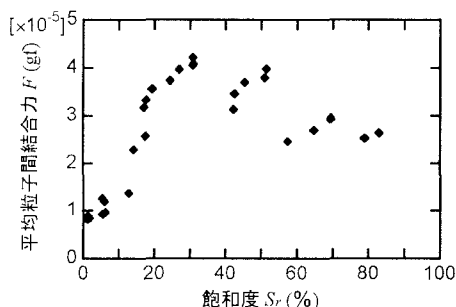


図-3(c) 飽和度による F の変化(シルト)

表-1 比表面積及び粒子形状

試料名称	GB-AC	標準砂	シルト
比表面積 S_v (cm^2/cm^3)	322	404	12293
粒子形状	球形	角形 小←角ばり→大	角形