

名古屋工業大学 学生会員 ○大橋 徹也

正会員 松岡 元

不飽和土では、間隙水はその表面張力によって土粒子間にメニスカスを形成する。この水の表面張力とそれによって生じるメニスカスのサクシオンによって土粒子間に粒子間付着力が働く。不飽和土の粘着力 c の源はこの水の表面張力に基づく粒子間付着力と考えられる¹⁾。本研究の目的は、単純化された土の2次元モデルとして水で濡らしたアルミ棒積層体を用い、その粘着力 c と水の表面張力に基づく粒子間付着力の関係を微視的観点から定量的に明らかにすることである^{2), 3)}。

1. 水の表面張力に基づく粒子間付着力に関する考察

水の表面張力を T 、サクシオンを $S = u_a - u_w$ (u_a : 間隙空気圧、 u_w : 間隙水圧) とすれば、図-1より単位奥行き当たりの等径2粒子間の粒子間付着力 P は次式で表される。

$$P = 2T \cdot \cos\{90^\circ - (\alpha + \delta)\} + (u_a - u_w) \cdot 2r \sin \alpha \quad (1)$$

ここで、右辺第1項は一对の水の表面張力の成分、第2項はサクシオン力 ($u_a - u_w$) $\times$ (断面積) を表している。

なお、 $u_a - u_w = T/R_1$ (R_1 : メニスカス半径)、図-1に示す幾何学的関係より $R_1 \cos(\alpha + \delta) = r(1 - \cos \alpha)$ が成り立つ。 α : 水の付着角、 δ : 粒子(アルミ棒)に対する水の接触角 ($\delta = 60^\circ$ ³⁾)、 T : 水の表面張力 ($T = 0.0745 \text{ gf/cm}$; 20°C) である。

次に等径3粒子の場合について考察する。図-2のようにメニスカスが独立している場合の1接点当たりの粒子間付着力 P は、等径2粒子の場合と同様に式(1)によって表される。また、図-3のように間隙が水で満たされた場合の粒子間付着力 P の合力 Q は次式で表される。

$$Q = 2T \cdot \cos\{90^\circ - (\alpha + \delta + 30^\circ)\} + (u_a - u_w) \cdot 2r \sin(\alpha + 30^\circ) \quad (2)$$

なお、図-4に示すような異径粒子がランダムに配置された場合でも、粒子間付着力の合力 Q は着目する粒子に働く一对の水の表面張力 T とサクシオン力 ($u_a - u_w$) $\times$ (断面積) (ここに、 $u_a - u_w = T/R_1$) のベクトル和として表される (なお、 $u_a - u_w$ は一連のメニスカス内では同じ値と考え、異径粒子間の R_1 については力のつり合いより、 $R_1 = (r_2 \sin \alpha_2 - r_1 \sin \alpha_1) / \{\sin(\alpha_1 + \delta) - \sin(\alpha_2 + \delta)\}$ と考えた)。各粒子接点での個々の粒子間付着力 P_i が必要な場合は、上記の合力 Q より力のつり合いによって求めればよい。等径2粒子、および等径3粒子の場合の粒子間付着力の式(式(1), (2))の妥当性を検討するために、等径3粒子として径3.0mmのアルミ丸棒を用い、鉛直上方向への引張試験と水平方向へ

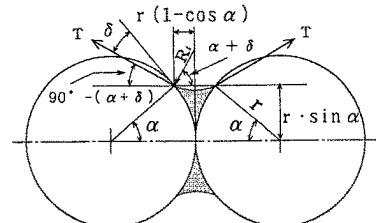


図-1 等径2粒子間の水のメニスカスと幾何学的関係

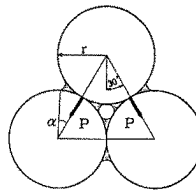


図-2 等径3粒子ーメニスカスが独立した場合

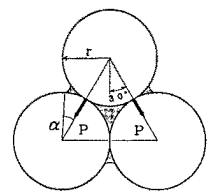


図-3 等径3粒子ー間隙が水で満たされた場合

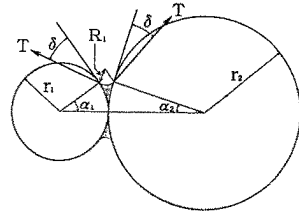


図-4 異径2粒子の場合

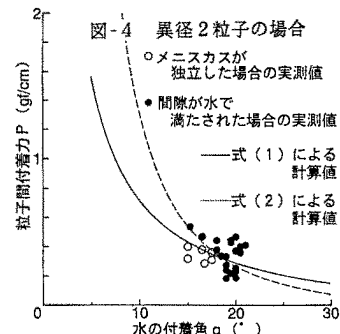


図-5 鉛直上方向および水平方向引張試験より得られた粒子間付着力の実測値と計算値の比較

の引張試験を行った。図-5はメニスカスが独立した場合の実測値(○印)と式(1)による計算値(実線)の比較、および間隙が水で満たされた場合の実測値(●印)と式(2)による計算値(点線)の比較を、それぞれ水の付着角 α に対して示したものである。なお、水平方向への引張試験の結果の解析には後述の式(4)も使用している。両図より式(1)、(2)の妥当性がほぼ検証されたと思われる。

2. 水の表面張力に基づく粒子間付着力 P による粘着力 c の解析 ランダム配置のアルミ棒積層体(径1.6, 3.0mm)に対して粘着力 c の解析を行う。後記の図-7において水平方向のせん断力を H 、鉛直力を V 、粒子間摩擦を発揮している粒子接点の平均粒子接点角を $\bar{\theta}$ 、その粒子接平面に垂直に作用する平均的な抗力を N 、その粒子接平面に作用する平均的な摩擦力を F 、せん断面上の粒子接点 i における水の表面張力に基づく粒子間付着力を P_i 、その粒子接点角を θ_i とする。

力のつり合いより、

$$\left. \begin{aligned} H + \sum P_i \sin \theta_i &= N \sin \bar{\theta} + F \cos \bar{\theta} \\ V + \sum P_i \cos \theta_i &= N \cos \bar{\theta} - F \sin \bar{\theta} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $F = N \tan \phi_\mu$ であるから式(3)より、

$$H = (V + \sum P_i \cos \theta_i) \tan(\bar{\theta} + \phi_\mu) - \sum P_i \sin \theta_i \quad (4)$$

式(4)の両辺を水平な断面積 A で割り、せん断破壊時には $\tau = \tau_c$ とすれば、

$$\tau_c = \sigma \tan(\bar{\theta} + \phi_\mu) + \sum P_i \cos \theta_i \tan(\bar{\theta} + \phi_\mu) / A - \sum P_i \sin \theta_i / A \quad (5)$$

式(5)より、水の表面張力に基づく粘着力 c は、粒子間付着力 P_i を用いて次式で表される。

$$c = \sum P_i \cos \theta_i \tan(\bar{\theta} + \phi_\mu) / A - \sum P_i \sin \theta_i / A \quad (6)$$

ここでは、異径粒子間での粒子間付着力 P_i も考慮して式(4)を検証するために、ランダム配置のアルミ棒積層体(径1.6, 3.0mm)を用いて図-6に示すような低拘束圧($\sigma = 0.5 \sim 2.0 \text{ gf/cm}^2$)下の一面せん断試験を行った。実験直前にアルミ棒積層体の断面の拡大写真(写真-1参照)を撮り、その写真より解析粒子接点を決めるとともに、水の付着角 α も測定した。この水の付着角 α を用いて、前記の方法により粒子間付着力の合力 Q を定め、図-7に示すように粒子間付着力 P_i を算定した。表-1はこのようにして求めた粒子間付着力 P_i に基づいて、式(4)により計算されたせん断力 H_{calc} と実測されたせん断力 H を5つのケースについて比較したものである。全てのケースについて実測値と計算値は近い値を示している。この結果より、粘着力 c と水の表面張力に基づく粒子間付着力の関係が定量的に明らかにされたと考えられる。

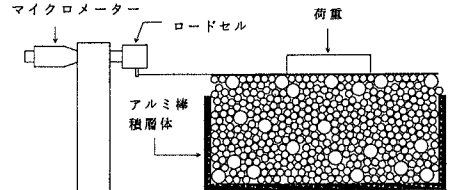


図-6 低拘束圧下での一面せん断試験の様子

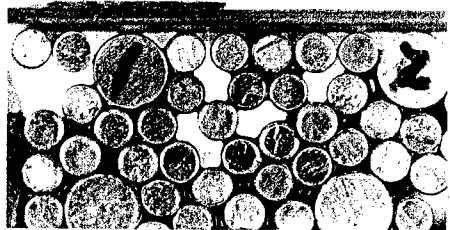
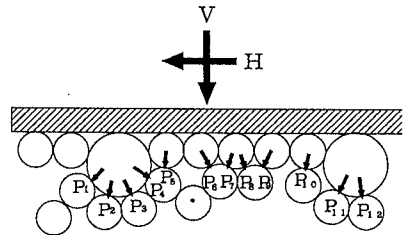


写真-1 解析に使用した写真の例



P_i : 粒子間付着力

図-7 アルミ丸棒に働く粒子間付着力の例(写真-1に対応)

表-1 せん断力の実測値と計算値の比較

試験 No.	垂直荷重 $V(\text{gf})$	実測された せん断力 $H(\text{gf})$	計算による せん断力 $H_{calc}(\text{gf})$
1	5.55	11.80	11.26
2	5.55	12.46	13.86
3	5.55	12.60	13.76
4	5.55	15.20	15.01
5	19.55	27.18	25.56

謝辞 実験に協力いただいた本学加藤正司助手に謝意を表します。

参考文献 1) 松岡他(1993):水で濡らしたアルミ棒積層体の低拘束圧下のせん断強度と斜面の安定解析への適用, 第28回土質工学研究発表会, 243, pp. 621-624.

2) 松岡他(1993):乾燥状態と水で濡らした状態のアルミ棒積層体の低拘束圧下のせん断強度の微視的考察, 土木学会第48回年次学術講演会, III-407, pp. 868-869.

3) 松岡・加藤(1993):水の表面張力によるアルミ棒積層体の粘着力の微視的考察, 粒状体の力学シンポジウム, 発表論文集, I-7, 土質工学会, pp. 25-28.