

メニスカス水の形状に着目した土の不飽和強度と飽和度の関係

前橋工科大学 学生会員 ○田中 燎
前橋工科大学 正会員 森 友宏

1. 研究の背景と目的

従来、不飽和土の強度は現場毎に試料を採取して力学試験を行ってきたが、飽和度により強度はさまざまであるため、設計に不飽和土の強度を組み込むことは難しかった。そこで本研究では、不飽和土に働くサクシジョンの強度発現メカニズムをミクロの視点から解明し、地盤の飽和度に応じた強度変化を設計に組み込むための基礎理論の構築を試みる。まず、単純化のために土粒子を球体と考え、飽和度に応じて粒子間に懸架するメニスカス水の形状とサクシジョンを理論的に算出する。一方、球状のガラスビーズを用いた不飽和三軸試験を行い、飽和度に応じた不飽和強度に寄与するサクシジョンの大きさの実測値と理論値（計算値）との比較を行い、妥当性の検証を行う。

2. 粒子間に働くサクシジョンの理論値の算出

不飽和土の土粒子間には、間隙水の表面張力によりサクシジョンが発生する。粒子間力は土粒子間の空隙に懸架するメニスカス水の曲率半径に影響を受ける。土粒子を球体と仮定した時、2粒子間に働くサクシジョンは、遠藤ら¹⁾の研究より（式1）で与えられる。この式では、土粒子と水との間の接触角は0度と仮定している。土粒子間に架橋するメニスカス水の模式図を図2に示す。

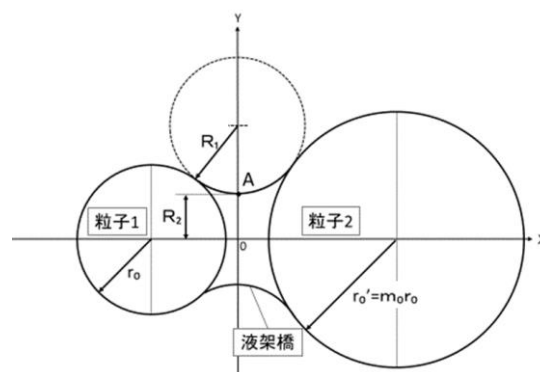


図2 異粒径粒子間に懸架するメニスカス水

$$F = 2\pi R_2 T_s + \pi T_s R_2^2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (\text{式 1})$$

F は表面張力による粒子間力、 R_1 はメニスカス水の曲率半径、 R_2 はメニスカス水の最狭部半径、 T_s は表面張力（水：72.75μN/m）である。

次に、AutoCAD を用いて球体と仮定した土粒子間に懸架するメニスカス水を作図し、（式1）中の R_1 、 R_2 を求める。作図を行う時は、土粒子4つが互いに接し、土粒子の中心同士を結ぶと四面体（三角錐）ができるような配置（最密充填状態）を最小単位とした。これにより、土粒子4つにより形成される空隙体積が定まることから、 R_1 、 R_2 を求めることでサクシジョンのみならず、飽和度も計算される。粒径 2.00, 1.00, 0.50, 0.25, 0.125 の異なる5種類の球を、重複を許して4つ組み合わせる。組み合わせは全70通り存在する。4つの球を1組とした時のサクシジョンを算出する。

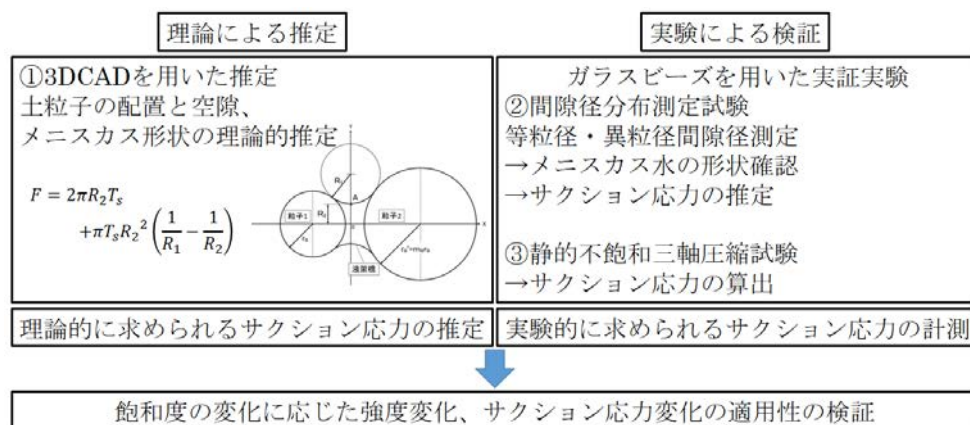


図1 本研究の流れ

キーワード 不飽和強度、メニスカス水、サクシジョン

連絡先 〒371-0816 群馬県前橋市上佐鳥町 460 番地 1 前橋工科大学 TEL：027-265-7308 E-mail：mori@maebashi-it.ac.jp

3. 粒子間に働くサクシジョンの実測値の計測

サクシジョンによる不飽和強度の変化を測定するため、飽和土の強度を基準とし、飽和度を変化させた時のサクシジョン応力増分を算出する。試験には、飽和・不飽和三軸圧縮試験を用いた。試料には粒径 0.1, 0.2, 0.4, 0.8mm のガラスビーズを用い、等粒径の試料を突き固めて供試体を作成した。供試体の初期飽和度は 100, 90, 80, 60%とした。紙面の都合上、ここでは粒径 0.2mm のガラスビーズ供試体（直径 5cm, 高さ 10cm, 飽和度 $S_r=100, 90, 80, 60\%$ ）の結果を抜粋して示す。4 ケースとも同条件の乾燥密度（ $\rho_d=1.56\text{g/cm}^3$, 充填率 62.5%）である。

まず、有効応力経路を図 3 に示す。4 ケースともほぼ同一の経路を辿っていることから、これらの試験は同一の材料、同一の密度、同一の条件で試験が行われており、飽和度に応じたサクシジョンの違いを論ずるに足るデータであることを示す。

次に、軸ひずみとせん断応力との関係を示す。図中には、平均有効主応力がある値になった時の点も併記した。軸ひずみが 0%から 2%へと増加するにつれ、せん断応力が生じるが、初期飽和度が小さいケース程、せん断応力は増加する。また、飽和試料と不飽和試料とのせん断応力の差は、軸ひずみ ε_a が 1.2%程度の時に最大となり、それぞれ、飽和度 80%で 5.2kN/m^2 （ $\varepsilon=1.10\%$ ）、飽和度 60%で 8.1kN/m^2 （ $\varepsilon=1.24\%$ ）である。それ以上に軸ひずみが増加すると、せん断応力の差は徐々に縮まり、軸ひずみが 4%程度でせん断応力の差は無くなる。

4. まとめ（粒子間に働くサクシジョンの理論値と実測値との整合性の検証）

飽和・不飽和三軸圧縮試験における圧縮により、供試体には水平面から $(45+\varphi/2)$ 度（ここで φ : 土の内部摩擦角）付近にせん断帯が生じる。ある幅でせん断帯が形成されていたとしても、すべりが生じる瞬間は最も強度の小さい「ある極めて薄い一断面」が壊れる。

本報文の 2 節の方法で、粒径 0.2mm の 4 粒子間において、飽和度 76%の時に 1つのメニスカス水に働くサクシジョンは $69.35\mu\text{N}$ である。飽和・不飽和三軸圧縮試験の供試体内部の粒子配置は体心立方格子（充填率 68%）に近いと、体心立方格子

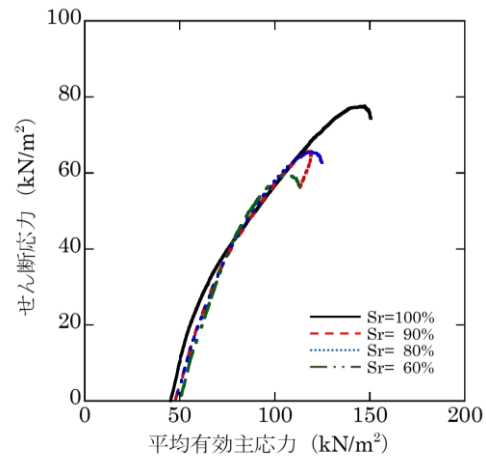


図 5 有効応力経路

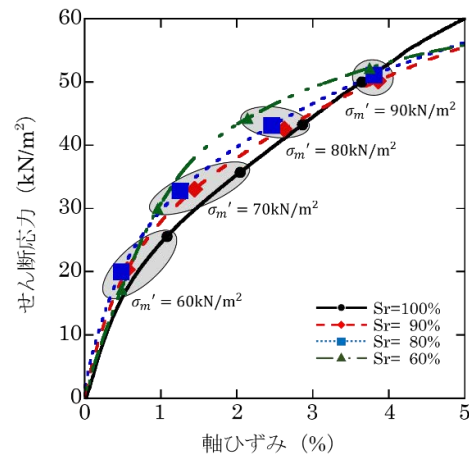


図 6 各平均有効主応力における

軸ひずみとせん断応力の関係（粒径 0.2mm）

を 1 ユニットとすると、1 ユニット内のメニスカス水は 8 つ、働くサクシジョンは $554.8\mu\text{N}$ である。 φ を 30 度として、供試体を水平面から 60 度で切った時の楕円型断面（ 39.27cm^2 ）上に分布する体心立方格子のユニット数は 49087.5 であるから、せん断によるすべりが、この楕円型断面上の薄い 1 ユニット（ 0.283mm ）で生じた時の、サクシジョンによる応力は 6.94kN/m^2 （飽和度 76%時）である。本報文 3 節の不飽和三軸圧縮試験の結果では、サクシジョン応力の増分は飽和度 80%で 5.2kN/m^2 、飽和度 60%で 8.1kN/m^2 であり、計算値と実測値は良い整合を見せた。

謝辞:本研究は、日本学術振興会・科研費・基盤研究 (C) JP17K06561 の助成を受けました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 遠藤禎行・向阪保雄・石井真由美：異径 2 粒子間に形成される液架橋現象とその付着力の解析，化学工学論文集，Vol.19, No.6, pp.1128-1135, 1993.