

京都大学工学部

学生員 ○江城 静順

京都大学大学院工学研究科 正会員 肥後 陽介

1. はじめに

水分特性曲線(以下 SWCC)は不飽和土の力学問題・浸透問題に用いられる重要な曲線である。現在頻繁に使用される SWCC モデルは van Genuchten モデル¹⁾などの現象論的モデルで、長期間かかる保水性試験を行う必要がある。そこで、粒径分布などから SWCC を推定する理論的モデルが開発されてきた。理論的モデルの内、特に土粒子構造に規則充填を仮定した規則充填モデルは構造が簡明で計算が容易という利点がある。

地盤や供試体には局所的に密度の高い箇所、低い箇所が存在する。これまで開発された規則充填モデル^{2), 3)}には、このような土粒子構造の密度不均一性をモデル化した例はない。そのため密度不均一性をどうモデル化すべきか、SWCC にどれだけの影響があるのか、といったことは従来議論されてこなかった。

よって本研究では、土粒子構造の密度不均一性を導入した規則充填モデル(以下不均一モデル)を開発し、密度均一な単一構造を仮定したモデル(以下単一モデル)と比較することで、密度不均一性が SWCC に与える影響を評価する。なお、本研究では SWCC のうち主排水曲線をモデル化する。

2. 理論的な SWCC モデルの構築

まず、土粒子構造を規則充填でモデル化する。規則充填は単位構造が3次元的に繰り返される構造である。本研究ではその単位構造に菱面体構造を採用する。菱面体構造は図1に示すように角度 θ によって構造や間隙比が連続的に変化する。 θ は $30^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ を動き、 $\theta = 30^\circ$ のとき六方最密充填構造(間隙比 0.35)、 $\theta = 45^\circ$ のとき単純立方体構造(間隙比 0.91)をとる。よって、角度 θ を変化させることで、密度の異なる局所的な構造を表現できる。単一モデルでは、供試体全体の密度に一致する単一の単位構造を取ると仮定する。不

均一モデルでは、単位構造がある存在分布を持つと仮定する。具体的な分布式は次章で述べる。

また、単位構造を構成する球の粒径が試料の粒径分布と同じ分布を持つと仮定することで、粒径の違いによる間隙の大小を表現する。単一モデルと不均一モデルの土粒子構造モデルを図2に示す。

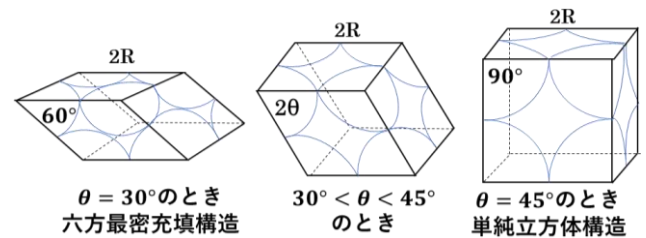


図1 本モデルで採用した菱面体構造

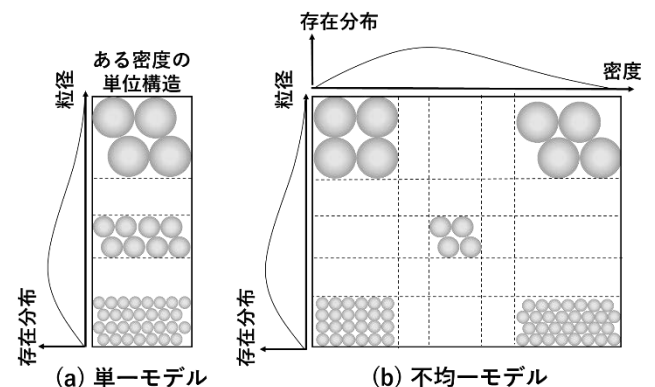


図2 土粒子構造モデル

次に土粒子構造に保持される含水量を計算する。不飽和土には間隙を満たすバルク水と粒子間に付着する液架橋が存在し、バルク水は飽和した間隙に、液架橋は不飽和の間隙に存在する。そこで、バルク水・液架橋の含水量を計算するために、間隙を飽和した間隙と不飽和の間隙に分ける。この分類には、hemisphere 理論⁴⁾という考えを採用する。これは、飽和した間隙にサクションがかかると単位構造の各面に気液界面が生じ、この曲面形状が半球状となるまでサクションが上昇した際に間隙に空気が侵入するという考えである。このとき、粒径が小さく密度が高い単位構造ほど空気侵入時のサクションが大きくなる。以上より、あるサ

クシヨンの時に飽和している間隙と不飽和の間隙を粒径と単位構造の密度によって分けることができる。

バルク水の含水量は飽和した間隙の体積を合計することで計算でき、液架橋の含水量は2粒子間の液架橋体積をすべて合計することで計算できる。バルク水と液架橋の含水量はどちらもサクシヨンの関数で表せるため、両者を足し合わせることで全体のサクシヨンの含水量関係を構築する。

3. 土粒子構造の密度不均一性のモデル化

本研究では、等球径ランダム充填の密度分布を導入することで土粒子構造の密度不均一性を表現する。Aste (2012)は等球径ランダム充填のVoronoi領域体積分布が式(1)のように表されることを示した⁵⁾。

$$f(V) = \frac{k^k}{\Gamma(k)} \frac{(V - V_{min})^{k-1}}{(\langle V \rangle - V_{min})^k} e^{-k \frac{V - V_{min}}{\langle V \rangle - V_{min}}} \quad (1)$$

V : Voronoi 領域体積, V_{min} : 最密充填時の体積

$\langle V \rangle$: 平均の Voronoi 体積, k : パラメータ

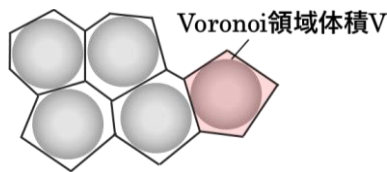


図3 Voronoi 領域体積V

V は図3に示す粒子中心のVoronoi領域の体積である。局所的な密度が低いほど V は大きくなるため、 $f(V)$ は密度分布を示す。よって、本モデルの粒子中心のVoronoi体積分布が $f(V)$ に従うと仮定することで、等球径ランダム充填の密度分布を導入できる。

ここで、規則充填では粒子中心のVoronoi領域と単位構造は体積が等しく、どちらに $f(V)$ を導入しても等価である。体積計算が容易であるため、ここでは単位構造体積が $f(V)$ に従うとして計算を行う。

4. モデルの適用結果

本モデルを粒径幅の狭いCase 1と粒径幅の広いCase 2に適用する。各ケースのパラメータを表1に示す。図4に各ケースでの単一モデル(実線)と不均一モデル(破線)のSWCCを示す。各ケースの実線と破線を比べると、不均一モデルは単一モデルよりも比水分容量が小さい。また、粒径幅の狭いCase 1では単一モデルと不均一モデルのSWCCに大きな差異があるが、Case 2では両モデルの差は小さい。

表1 用いたパラメータ

	e	k	D_{50} (μm)	$D_{84.13}$ (μm)
Case 1	0.637	12	187	200
Case 2	0.637	12	187	270

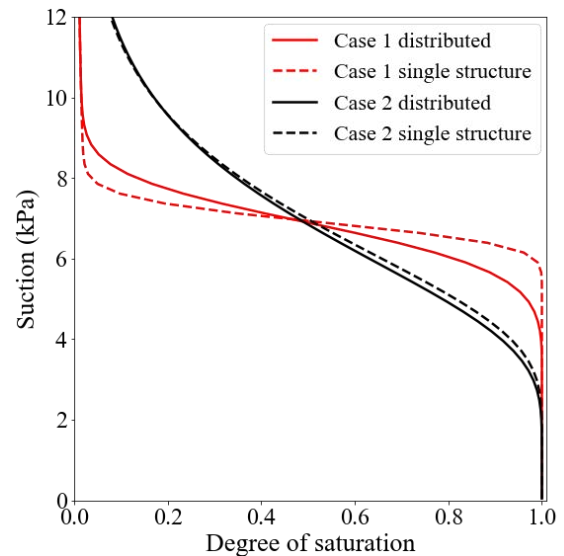


図4 SWCCモデルの適用結果

5. 結論と今後の課題

本研究では、等球径ランダム充填の密度分布を用いることで規則充填モデルに土粒子構造の密度不均一性を導入した。不均一モデルは単一モデルに比べて比水分容量が小さくなり、その効果は粒径幅の狭い試料ほど大きく、粒径幅の広い試料についてはほとんど影響がみられなかった。以上より、粒径幅の広い試料では、不均一性を考慮する必要性が実務上大きくないことが示唆される。

今後は、規則充填モデルでは先例のない走査曲線のモデル化を行う。

参考文献

- 1) van Genuchten, M.: *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 892-898, 1980.
- 2) Likos, W. J. and Jaafar, R.: *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, **139**(5), 724-737, 2013.
- 3) Alves, R. D., Gitirana, G. D. N. and Vanapalli, S. K.: *Computers and Geotechnics*, **127**, 2020.
- 4) Sweijen, T., Aslannejad, H. and Hassanizadeh, S. M.: *Advances in Water Resources*, **107**, 22-31, 2017.
- 5) Aste, T., Delaney, G. W. and Matteo, T. D.: *AIP Conference Proceedings*, **1227**, 157-166, 2010.