

低・高サクシオン域における水分特性曲線のハイブリッド型予測モデルの提案

九州大学大学院 学 ○前田 成美

九州大学大学院 正 Adel ALLOWAISY F 安福規之 正 石藏良平

1. はじめに

降雨による地盤安定性の評価には浸透挙動を把握することが重要である。浸透挙動の把握に重要なパラメータとして水分特性曲線がある。従来の水分特性測定法(加圧版法)では、試験期間が長いことや、また高サクシオン域の測定限界があった。そうした課題を克服するために、新手法として連続加圧方式(CPM)の検討をしている<sup>1)</sup>。これは、従来法と違い空気圧と水圧を同時に計測することで、精度を保ちつつ試験期間の短縮を図っている。しかし、この手法でも高サクシオン域(200kPa 以上)での精度良い測定には課題がある。一方、Sako<sup>2)</sup>らは粒度や間隙比から水分特性曲線を推定できる数値モデル(以下、Kita-Sako モデルと称す)を提案している。このモデルでは、全サクシオン域で推定が可能である。そこで、本研究では、低サクシオン域において連続加圧方式を、高サクシオン域においては Kita-Sako モデルを拡張することで、水分特性曲線のハイブリッド型予測モデルの提案を行った。

2. ハイブリッド型予測モデルの概要

2-1 連続加圧方式保水性試験の概要<sup>1)</sup>

図1に示す試験装置を用いて、試験装置内に空気圧を注入して土供試体を加圧し、供試体内に設置したマイクロテンシオメーターで水圧を測定することで、精度を確保しつつ比較的短期間で測定できる。

2-2 Kita-Sako モデルの概要<sup>2)</sup>

図2(a)は数個の土粒子からなる一要素を示しており、間隙部分を管径  $D$  と傾き  $\theta$  の円管とし、土粒子部分以外を不透水性の個体としてモデル化したものを素体積と称す。円管の複雑さを表現するため、管径  $D$  と傾き  $\theta$  を確率変数とし、確率的考察により式(1)~式(3)が得られる。

$$W_v = \frac{1}{1+e} \int_0^d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{V_p}{V_e - V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \tag{1}$$

$$P_d(d) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta_v D} \exp\left[-\frac{(\ln D - \lambda_v)^2}{2\zeta_v^2}\right] \tag{2}$$

$$S_u = \frac{4 \cdot T_s \cdot \cos \alpha}{d} \tag{3}$$

ここに、 $d$ :間隙水を保持する円管の最大管径,円管の傾き  $\theta$  の確率密度関数, $D_{cha}$ :素体積高さ( $D_{10}$ ), $\lambda_v$ :管径  $D$  の自然対数  $\ln D$  の平均, $\zeta_v$ :管径  $D$  の自然対数  $\ln D$  の標準偏差, $V_e$ :素体積の体積, $V_p$ :円管部分の体積

2-3 ハイブリッド型予測モデルの考え方

図3のように、サクシオンが 200kPa 以内においては、連続加圧方式、それ以上においては後述の拡張した Kita-Sako モデルを用いて推定し、全サクシオン域で水分特性曲線が連続的に繋がるよう排水過程での予測が行える仕組みの構築を試みている。

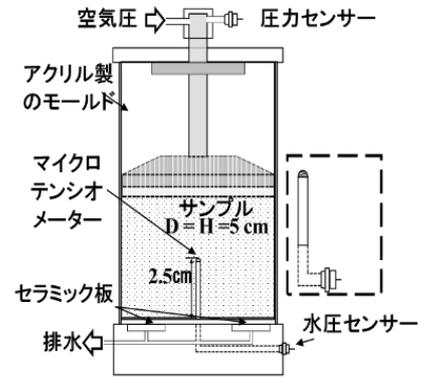


図1 連続加圧式保水性試験装

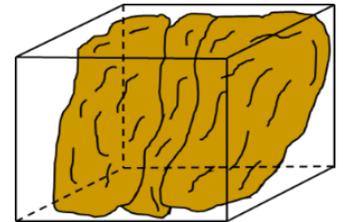


図2(a) 土粒子を含む微小要素

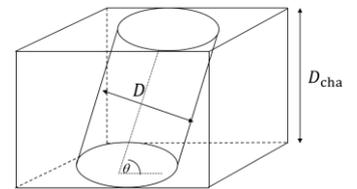


図2(b)モデル化された一要素(素体積)

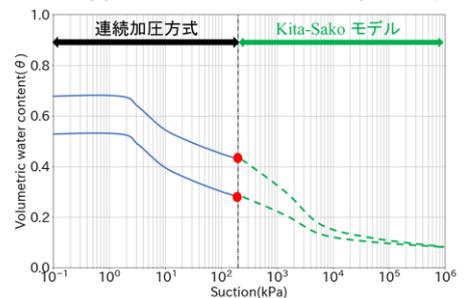


図3 ハイブリッド予測モデル概要

### 3. Kita-Sako モデルの拡張

#### 3-1 新たなパラメータ導入による体積含水率算定式の拡張

Kita-Sako モデル (図 4 に入力パラメータを示す) において、実験値と連続的となるような結果を予測できていない。ここでは連続加圧方式での実験値をもとに全サクシオン域で連続的な曲線を得るためモデル拡張を行う。まず、体積含水率算定式の拡張を行う。図 6 の点線部分が Kita-Sako モデルにおける推定値である。体積含水率において実験値と推定値が異なる。そこで、空気侵入値に着目し新たなパラメータ  $\alpha$  を導入する。付した式を示す。

$$W_v = \frac{1}{1+e} \int_0^d \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \frac{\alpha V_p}{V_e - \alpha V_p} \cdot P_d(D) \cdot P_c(\theta) d\theta dD \quad (4)$$

ここに、 $\alpha$ : 空気侵入値にて支配的な円管を決定するパラメータ  
 間隙部分の円管体積  $V_p$  において、モデルでは円管形を考えているが、実際の間隙部分は複雑である。 $\alpha$  は複雑さを補正するパラメータである。

#### 3-2 サクシオン算定式の拡張

図 6 から高サクシオン域にて実験値と推定値が異なる。そこで、高サクシオン域の挙動を表現するため新たなパラメータ  $\beta$  を導入する。付した式を示す。

ここに、 $\beta$ : 高サクシオン域で支配的な間隙径分布を決定するパラメータ

$$\beta = \frac{\lambda'_v}{\zeta'_v} \quad (5)$$

モデルにおいて、間隙径分布は対数正規分布と仮定している。この仮定において砂質土では則るが、粘性土では表現しきれない。これは、化学的作用等による。 $\beta$  はそのような複雑さを補正するパラメータである。式(5)を用いて確率密度関数を決定した結果を図 5 に示す。改良後に再度推定した結果を図 6 に示す。凡例の CF とは、遠心法(CF)での実験結果である。図 7 の  $act\_ \theta$ ,  $cal\_ \theta$  とは、それぞれ遠心法、ハイブリッド型予測モデルの同サクシオン値における体積含水率であり、ハイブリッド型予測モデルの予測可能性を示唆する結果となった。

### 5. まとめ

本研究では、連続加圧方式と Kita-Sako モデルを組み合わせたハイブリッド型予測モデルを用いて、広範なサクシオン域の水分特性曲線を描けた。連続加圧方式で得た実験結果をもとに、kita-Sako モデルで推定された円管体積や間隙径分布を高サクシオン域で表現できるように拡張することで、短期間で効率的に広範なサクシオン域の水分特性曲線が取得可能となることが期待される。最後に、モデルの提供を快く快諾して頂きました、北村氏 (鹿大名誉教授), 酒匂氏 (鹿大教授), 伊藤氏 (鹿大助教) に厚く御礼申し上げます、感謝の意を表します。また、共同で萌芽研究を行っている応用地質株式会社様や実験を手伝っていただいた九州大学の学生諸氏にも重ねて御礼を申し上げます。

### 参考文献

- 1) Alowaisy, A., Yasufuku, N., Ishikura, R., Hatakeyama, M., Kyono, S., 2020. Continuous pressurization method for a rapid determination of the soil water characteristics curve for remolded and undisturbed cohesionless soils. *Soils and Foundations*, 66(3): 634-647
- 2) K. Sako and R. Kitamura: A practical numerical model for seepage behavior of unsaturated soil, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.5, pp.595-604, 2006.

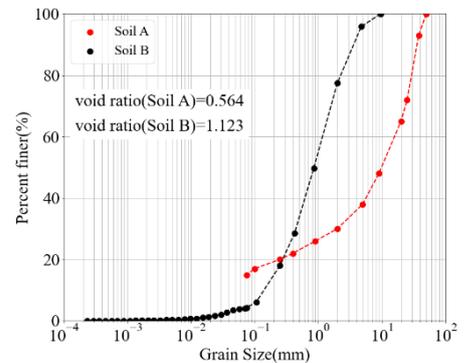


図 4 Kita-Sako モデル入力パラメータ

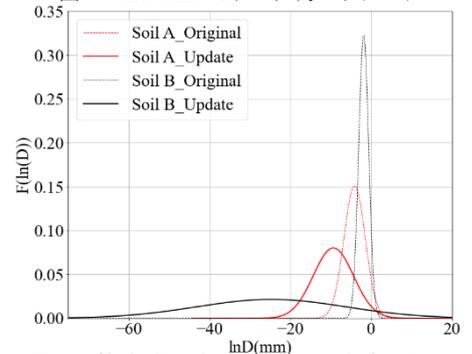


図 5 算定式改良前後の確率密度関数

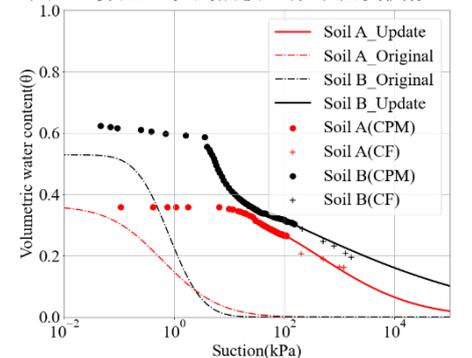


図 6 算定式拡張結果と試験結果

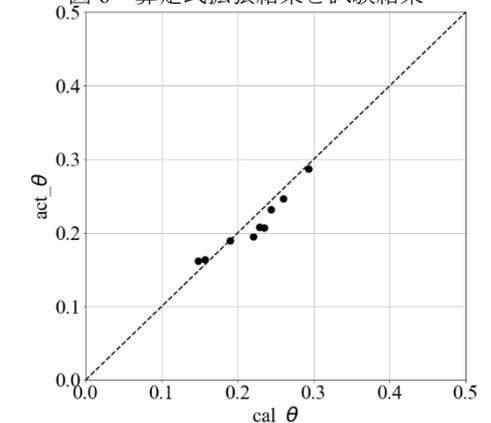


図 7 ハイブリッド型予測モデルの精度