

現地試験による小型インフィルトロメータを活かした斜面地盤における

不飽和浸透特性の予測法の提案

アロウイシー アデル¹, 石蔵良平²

^{1&2} 九州大学工学研究院 社会基盤部門

本研究では、MDI を用いて飽和透水係数の予測精度を向上することと新たな細粒分が少ない土質の水分特性曲線の予測手法を確立した。R. E. 方法でサクシオンは 2 cm 以上にする条件で Zhang 法より R. E. 法の方が精度が良いことを確認できた。また、MDI を用いて 3 点測定による新たな水分特性曲線の予測手法を確立した。豊浦砂を使った、連続加圧方式で得られた結果との比較によって精度が確認した。

1. はじめに

近年、気候変動に伴う降雨量の増加が予想されており、土構造物に対して甚大な影響を与えることが考えられる。雨による水は地盤に浸透するか、地表に流出する。浸透した水は間隙水圧や浸透力を増加させ、土のせん断強度に影響を与える。

一方、流出した水が浸食を引き起こすと、地盤の安定性の低下が懸念される。降雨による道路堤防の被害は、防止・軽減技術の進展にもかかわらず、九州地方で頻繁に報告されている（例えば、2017 年と 2020 年の降雨時）¹⁾。

浸透流・地表流、水圧の消散、そして関連する土質のせん断強度の変化は不飽和浸透特性に依存する。さらに、道路堤防や河川堤防は線状構造物であり、時間的・空間的な変動（バラツキ）が大きいいため、これらを評価するための基準を利用することも困難です²⁾。

実務的には、堤防の安定性に対して信頼性の高い評価を行うためには、不飽和浸透特性を正確に決定することが最も重要だと考えられる。具体的に、不飽和浸透特性は保持特性（SWCC）と不飽和透水係数（HCF）を用いて表される。従来の室内試験では、土質供試体を採取し、同じ密度で再度締固を行う（再成形サンプル）。

一方、原位置試験では、高度なツールと作業が複雑であることが課題である。従来の方法では、実験が複雑で長時間がかかるため、技術者は間接的な推定方法（例えば、単純な土質指標の使用）に頼らざるを得ず、時間的・空間的な変動を正確に把握することが難しいと考えられる^{3), 4)}。本研究では、テンションインフィルトロメータ手法⁵⁾（以下、TI 法と称する）を用いて、水分特性曲線と不飽和透水係数の時間的・空間的な変動を短時間で評価できる新しい原位置試験手法の開発を目指している。

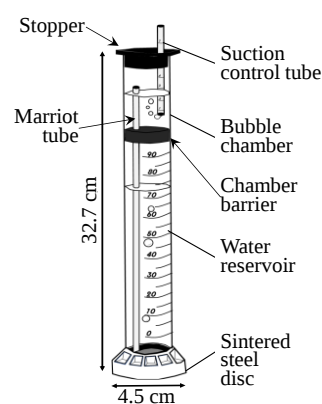


図 1 Mini Disk Infiltrometer の概要

2. 実験概要と試料

(1) テンションインフィルトロメータ概要

本研究では Mini Disk Infiltrometer（以降、MDI と称す）に着目する。MDI は上部チャンバーで負圧を調整（0.5 ～ 7cm）し、貯水タンクからデスクを通じて土壌に水を浸透させる。MDI の概要を図 1 に示す。地表面から浸透させた水は時間経過とともに記録され、飽和透水係数（ k_f ）を推定する。TI 法を用いて、飽和透水係数を予測するための試験を行う際には、地盤の飽和度に関係なく、短時間で 100 ml の水を使用するという特徴がある。

飽和透水係数の算出法として、Zhang 法⁶⁾や Reynolds and Elrick 法⁷⁾（以降、R.E.法）がある。Zhang 法は 1 回の測定と土区分で算出するのに対し、R.E.法は 2 回の測定から算出する。Zhang は浸透量と時間の関係を次式で表せると提案している⁶⁾。

$$I = C_1\sqrt{t} + C_2t \quad \text{式 1}$$

ただし、 I : 累積浸透(cm)、 t : 時間 (s)、 C_1 : 吸水率に関連するパラメータ (cm/ $\sqrt{s}$)、 C_2 : 透水係数に関連するパラメータ (cm/s)。

また、 C_2 は透水係数に関連するパラメータであるため、無次元定数、 A_2 を用いて、次のように表できる。

$$C_2 = A_2 k_f (h_0) \quad \text{式 2}$$

h_0 : MDI の圧力水頭値、 A_2 : 無次元定数、経験式として、土質区分によって予測できるパラメータです。

一方、R.E.法は図 2 に示すように縦軸に流量、横軸に負圧をとる。異なる 2 点のサクシヨン(ψ_1 、 ψ_2)で、定常流量 (Q_1 、 Q_2) を計測する。このときの切片が飽和透水係数 k_f を表す⁷⁾。

$$\ln Q_s = \alpha \psi_0 + \ln \left[\left(\frac{a}{G_d \alpha} + \pi a^2 \right) k_{fs} \right] \quad \text{式 3}$$

$$\alpha = \frac{\ln(Q_1/Q_2)}{(\psi_1 - \psi_2)} \quad \text{式 4}$$

Q_s : 定常流量 (ml/s)、 ψ_s : サクシヨン (cm)、 k_f : 飽和透水係数 (cm/s)、 G_d : ディスク形状定数、 α : 土特性パラメータ (1/cm)、 a : ディスク半径 (cm)。

(2) 試料と実験方法

図 3 に使用した試料の粒度分布を示す。土質特性を表 1 に示す。混合土は細粒分を含めるため、珪砂とカオリンを配合した。また、各試料で定水位透水試験を行い、飽和透水係数 k_f を求めた。また、各試料の水分特性曲線を連続加圧方式で求めた。図 4 に水分特性曲線を示す。供試体の作製には図 5 に示すようにアクリル製の立方体実験装置を使用した。初期飽和度 10%で

4 層に締め、水 (30 ml) が浸透する時間を計測した。

3. 飽和透水係数測定方法の最適化

MDI と定水位透水試験の比較から、MDI の使用に適する条件を検討した。試料は K4~K9、豊浦砂、まさ土、混合土①~③を使用した。

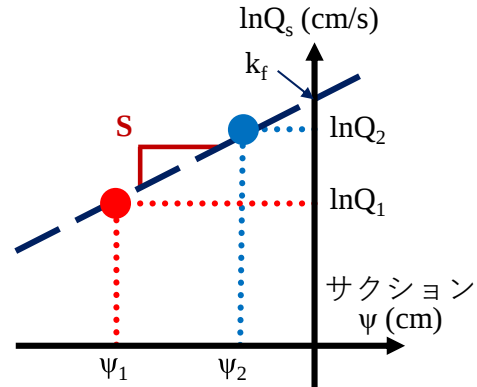


図 2 R.E 法の透水係数の予測法

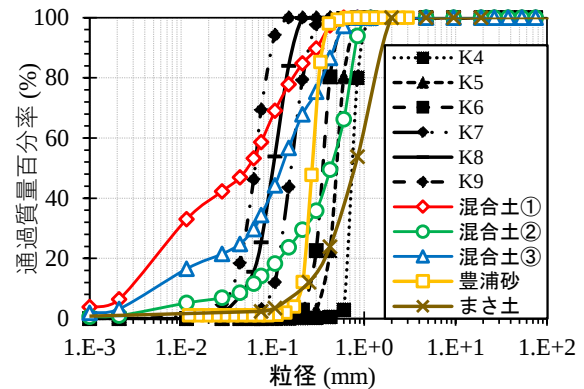


図 3 試料の粒度分布

表 1 試料の特性

	K4	K5	K6	K7	K8	K9	まさ土	混合土①	混合土②	混合土③	豊浦砂	堤体
D_{50} (mm)	0.74	0.502	0.355	0.161	1.39	0.0635	0.778	0.06	0.425	0.11	1.56	-
ρ_d (g/cm ³)	1.54	1.50	1.47	1.48	0.885	1.48	1.51	1.44	1.78	1.69	0.693	0.99
ρ_s (g/cm ³)	2.65	2.65	2.63	2.64	2.62	2.60	2.64	2.67	2.68	2.70	2.64	2.71
n	0.428	0.431	0.430	0.441	0.470	0.434	0.427	0.458	0.338	0.375	0.427	0.635
透水係数 k_s (cm/s)	2.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}	5.0×10^{-2}	1.0×10^{-2}	4.5×10^{-3}	2.2×10^{-3}	3.4×10^{-3}	1.0×10^{-5}	2.9×10^{-3}	5.0×10^{-5}	1.3×10^{-2}	-
Fc (%)	0	0	0	4	25	68	2	57	33	14	1	-

結果を正規化するため、MDI で算出した飽和透水係数を k_f 、定水位透水試験で計測した飽和透水係数を k_s として、透水係数比 k_f/k_s を用いた。MDI の測定時のサクション範囲と定水位透水試験の透水係数 k_s の関係に着目した。

図 6 に R.E.法で使用した二つのサクションの差 ($\Delta\psi$) ごとの透水係数比の比較を示す。横軸に透水係数比をとる。縦軸はヒストグラムの相対密度と、ヒストグラムをフィッティングした対数正規分布の確率密度をとる。 $\Delta\psi \geq 2 \text{ cm}$ で測定した場合に透水係数比のばらつきが小さくなった。要因として、 $\Delta\psi$ が小さいと R.E.法の土の特性パラメータ α の誤差が大きくなることが考えられる。図 2 に示すように、飽和透水係数は直線式の切片である。測定誤差がサクションによらず一定の場合、 $\Delta\psi$ が小さい方が傾きの変動が大きくなることから、飽和透水係数のばらつきが大きくなると考えられる。

また、Zhang 法は図 7 に示すようにサクションごとの透水係数比を評価する。MDI のマニュアルには $\psi = 2$ が推奨されていることから、各サクションで測定した透水係数を $0 < \psi < 2$ 、 $\psi = 2$ 、 $2 < \psi \leq 6$ の 3 つに分割し評価を行った。結果から、 $\psi = 2$ のばらつきが最も小さいと言える。よって、Zhang 法で透水係数を測定する場合は、 $\psi = 2$ に調整したうえで測定を行うことが望ましいと考える。

図 8 に R.E.法と Zhang 法の透水係数比の比較を示す。縦軸に透水係数比、横軸に粒度分布の D_{50} をとる。R.E.法は上記で得た結果から $\psi = -3$ 、 -6 cm を使用し、Zhang 法は $\psi = -2 \text{ cm}$ を利用した。試験から、最適なサクションで測定を行う場合、全体的に D_{50} によらず R.E.法の飽和透水係数 k_f の方が飽和透水係数 k_s の値に近くなることが確認された。

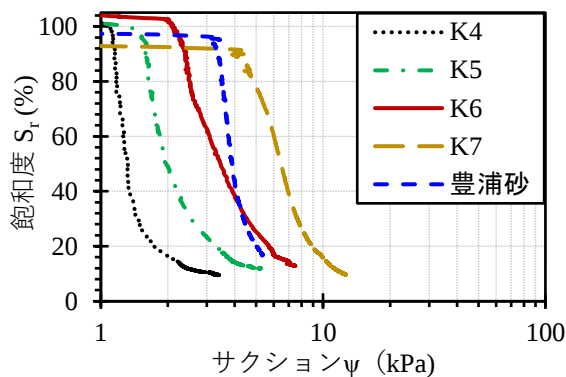


図 4 試料の水分特性曲線

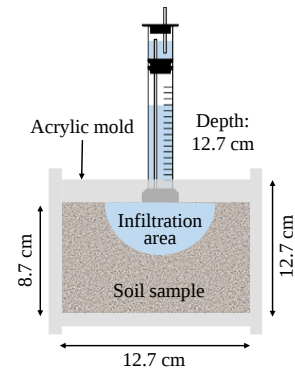


図 5 透水試験装置

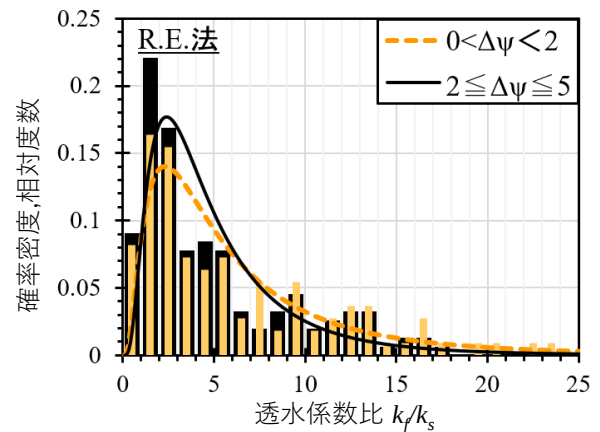


図 6 R.E.法の $\Delta\psi$ による透水係数比

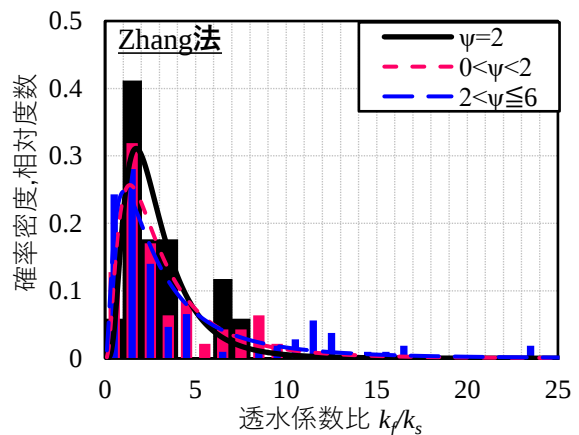


図 7 Zhang.法の ψ による透水係数比

また、いずれの方法も粒度 (D_{50}) が小さくなると、飽和透水係数 k_s から離れる傾向が確認された。以上から、R.E.法でサクションを 2 cm 以上に設定すると、 k_s をより精度良く推定できることを確認した。最後に、それぞれの最適な条件で行った試験の結果、R.E.法の方が定水位透水試験で測定した飽和透水係数 k_s に近い値であった。

4. 水分特性曲線の予測コンセプトと仮定

R.E.式は区分関数であり、傾き α がいくつかの部分区間に分割できることが報告されている⁸⁾。MDI からの浸透変化が地盤内の保持状態に依存すると仮定し、水分特性を推定するために区分関数を用いた新たな方法を提案した。この方法では、図 9 に示すように、同一土質面に対して、異なるサクシジョンの元で浸透を 3 回の試験を行い、区分図を構築するものである。

土の特性パラメータ α は、粒度が小さい試料で小さく算出される傾向がある。本研究では、細粒分が少ない土質を着目した。水分特性は細粒分含有率で傾向が大きく変わる。このことから、提案する予測モデルでは土の特性パラメータ $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ と水分特性曲線に関係づける。 α_3 はサクシジョンの最小値と最大値の勾配を表し、水分特性曲線の中央サクシジョン値の評価に適していると考えられる。 α_1, α_2 はサクシジョンの最大値・最小値と中点の勾配を表し、水分特性曲線の勾配の評価に適していると考えられる。本研究では、 $(\alpha_1 + \alpha_2) / 2$ として指標に用いる。

予測モデルの作成方法について述べる。まず、2 つの仮定を設ける。

- (1) 水分特性曲線は間隙分布に変換できる。
- (2) 間隙分布は対数正規分布に従う。

ここで、間隙分布とは土壤中で空気や水が占める間隙の分布を指し、飽和度 S_r と間隙径 d で表す。一方、水分特性曲線はサクシジョン ψ と体積含水率 θ (飽和度 S_r) で表す。水分特性曲線 (ψ, θ) に式 5、式 6 を適用することで間隙分布を算出する⁹⁾。

$$d = \frac{4T_s \cos \alpha}{\psi} \quad \text{式 5}$$

d : 間隙径 (μm)、 ψ : 土のサクシジョン (kPa)、 α : 毛細管と水の接触角 ($^\circ$)、 T_s : 表面張力 (N/m)。

$$S_r = \frac{\theta}{n} \times 100 \quad \text{式 6}$$

θ : 体積含水率、 n : 間隙率。

仮定 (2) より、間隙分布は対数正規分布であるとする。対数正規分布の式を式 7 に示す。

$$f(d; \lambda, \zeta) = S_r = \frac{1}{d\zeta\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln d - \lambda)^2}{2\zeta^2}\right) \quad \text{式 7}$$

λ : 平均、 ζ : 標準偏差。

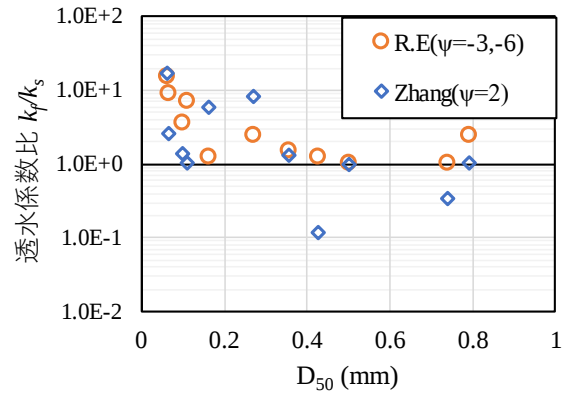


図 8 R.E.法と Zhang 法の透水係数の比較

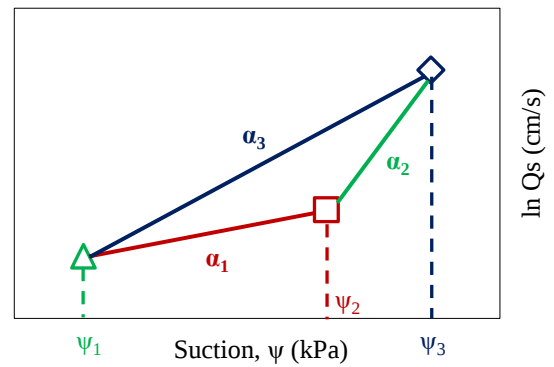


図 9 MDI の 3 点測定による SWCC の推定予測手法のイメージ

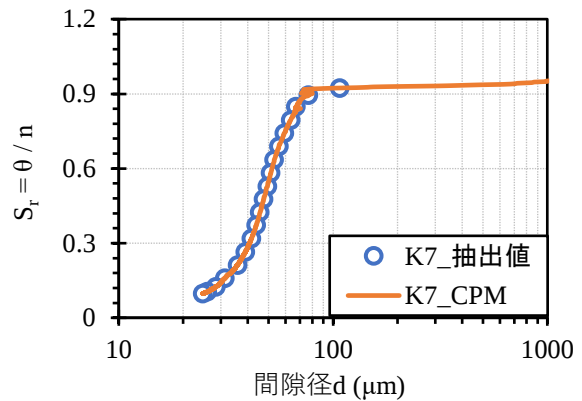


図 10 算出した間隙分布の例

以上から、式 7 の平均 λ ・標準偏差 ζ と土の特性パラメータ α_3 、 $(\alpha_1 + \alpha_2) / 2$ の関係式を作成することで、間隙分布が求まる。間隙分布の間隙径 d を式 5 でサクシジョン ψ に変換し、水分特性曲線 (ψ, S_r) が予測できる。また、式 6 で水分特性曲線 (ψ, θ) を算出できると考える。

5. 水分特性曲線の予測手法の提案

試験には表 1 に示す細粒分が少ない K4、K5、K6、K7 を使用した。精度を向上するため、R.E. 法でサクシオンを 2 cm 以上に設定し、MDI の浸透試験は 3 つの異なるサクシオン ($\psi=-1$ 、 -4 、 -6 cm) で行った。得られた結果を用いて、図 9 に示す関係を構築し、各土質のパラメーター α_1 、 α_2 、 α_3 を求めた。

一方、水分特性の計測には連続加圧方式を用いた³⁾。この技術を用いると水分特性曲線を連続的にかつ適切な精度で効率的に得られる。よって、間隙分布パラメータ (λ 、 ζ) を正確に決定できることを考えられる。連続加圧方式(CPM)での測定結果から算出した間隙分布 (K7) 例として図 10 を示している。

間隙分布の平均 λ と土の特性パラメータ α_3 の関係を図 11 に示す。また、間隙分布の標準偏差 ζ と土の特性パラメータ $(\alpha_1 + \alpha_2)/2$ の関係を図 12 に示す。得られた結果から、浸透パラメータと間隙分布パラメータとの間に強い相関関係があることが確認された。しかし、データを蓄積し精度を向上させる必要があると考えられる。この関係を表すには直線式が用いられ、フィッティング定数は図 11 と図 12 に示されている。土質のパラメーター (α_1 、 α_2 、 α_3) を用いて、 λ 及び ζ パラメータを推定するために以下の経験式が提案された：

$$\lambda = 3.84 [\alpha_3] + 3.27 \quad \text{式 8}$$

$$\zeta = 0.41 - 0.18 \left[\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2} \right] \quad \text{式 9}$$

このとき、 $\lambda > 0$; $\zeta > 0$; $1 > \alpha_3 > 0$; $1 > (\alpha_1 + \alpha_2)/2 > 0$ であり。

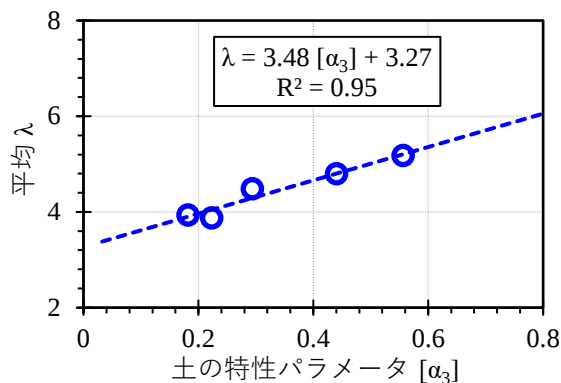


図 11 間隙分布平均の予測式「砂質土」

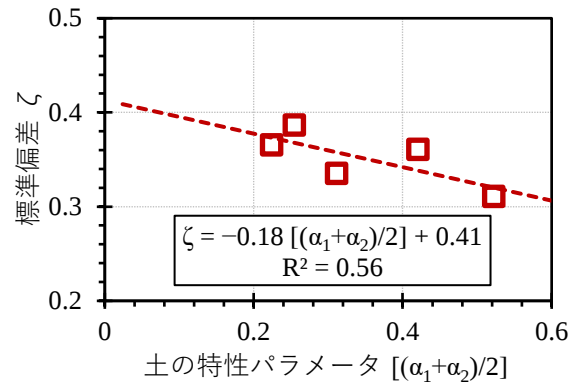


図 12 間隙分布標準偏差の予測式「砂質土」

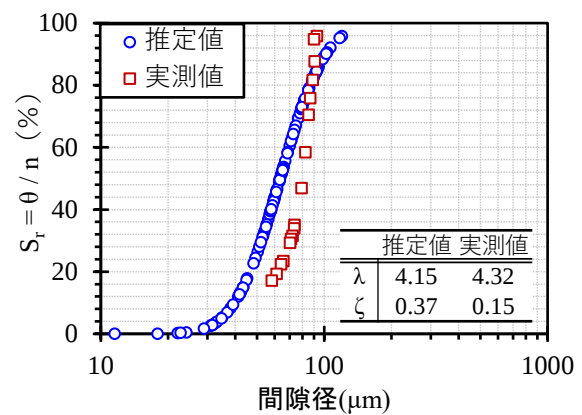


図 13 豊浦砂の間隙分布の予測結果

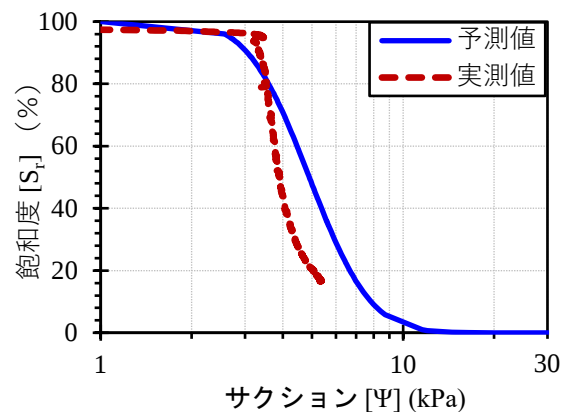


図 14 豊浦砂の水分特性曲線の予測結果

6. 予測式の適用と精度

予測式の精度を確認するため、豊浦砂で室内試験を行った。粒度分布を図 3、特性を表 1 に示す。まず、比較のため、連続加圧方式で水分

特性を測定し、間隙分布の予測値と連続加圧方式で測定した水分特性曲線から算出した間隙分布の比較を図 13 に示す。図中に示したの推定値は実測値を比較することで、提案した式 8 と式 9 の精度を確認できる。具体的には、中央サクシオン値を予測する平均 λ の傾向は一致したが、勾配を予測する標準偏差 ζ は実測値より大きくなった。

この間隙分布パラメーターを用いて、式 5 と式 6 から飽和度 S_r とサクシオン ψ の水分特性曲線に変換した。予測した水分特性曲線と実測曲線を図 14 に示す。得られた結果から、予測曲線は実測曲線と概ね一致していることが確認できる。しかし、結果には差が生じており、今後はサンプル数を増やすことで、提案した式の相関を向上させることができると考えられる。また、自然の土質を含む他の種類を使って、提案手法の精度を確認する必要がある。

7. まとめ

本研究では、MDI を用いて飽和透水係数 k_s の予測精度を向上することと新たな細粒分が少ない土質の水分特性曲線の予測手法を確立した。得られた知見を以下に示す。

- (1) R.E.方法でサクシオンは 2 cm 以上にすると飽和透水係数を測定精度は向上する。この条件で Zhang 法より R.E.法の方が精度が良い。
- (2) MDI を用いて 3 点測定による新たな水分特性曲線の予測手法を確立した。豊浦砂の結果から、予測曲線は実測曲線と概ね一致していることが確認できた。しかし、今後はサンプル数を増やすことで、提案した式の相関を向上させることができると考えられる。
- (3) 提案手法は現地試験として、実務的な観点から幅広い砂質土に対して短時間で SWCC を得られる可能性を示唆している。

最後に、自然の土質を含む他の種類を使って、提案手法の精度を確認する必要がある。また、今後提案された方法を、より細粒分を多く含む土質を考慮できるように拡張する必要がある。

8. 謝辞

本研究は、一般社団法人九州建設技術管理協会による令和 6 年度「建設技術研究開発助成」による助成金交付により遂行したものである。また、九州大学大学院の修士学生、梶田隼氏には実験の実施に尽力いただきました。ここに記して感謝の意を表します。

9. 参考文献

- 1) Yasufuku, N. and Alowiasy, A., Challenges and lessons learned from heavy rainfall-induced geodisasters over the last decade in Kyushu Island, Japan. In Progress in Landslide Research and Technology, 1(2), 123-132, 2023.
- 2) Le, T.M.H., Gallipoli, D., Sanchez, M. and Wheeler, S.J., Stochastic analysis of unsaturated seepage through randomly heterogeneous earth embankments. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 36(8), 1056-1076, 2012.
- 3) Alowaisy, A., Yasufuku, N., Ishikura, R., Hatakeyama, M. and Kyono, S. Continuous pressurization method for a rapid determination of the soil water characteristics curve for remolded and undisturbed cohesionless soils. Soils and Foundations, 60(3), 634-647, 2020.
- 4) Alowaisy, A., Yasufuku, N., Ishikura, R., Hatakeyama, M. and Kyono, S. Rapid determination of the unsaturated hydraulic conductivity for sandy soils utilizing the continuous pressurization method. In Proceedings of The 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ICSMGE, 1-5, 2022.
- 5) Wooding, R.A. Steady infiltration from a shallow circular pond. Water resources research, 4(6), 1259-1273, 1968.
- 6) Zhang, R. Determination of soil sorptivity and hydraulic conductivity from the disk infiltrometer. Soil Science Society of America Journal, 61(4), 1024-1030, 1997.
- 7) Reynolds, W.D. and Elrick, D.E.. Determination of hydraulic conductivity using a tension infiltrometer. Soil Science Society of America Journal, 55(3), 633-639, 1991.
- 8) Philip, J.R. Approximate analysis of the borehole permeameter in unsaturated soil. Water Resources Research, 21(7), 1025-1033, 1985.
- 9) 宮本裕二, 荒木功平, 酒匂一成, 阿部廣史, 北村良介. 不飽和土の粒子間力とサクシオンと有効応力の関係. 応用力学論文集, 10, 497-504, 2007.

受理日：令和7年5月8日