

学位論文の要旨

氏名	中島 亮輔
学位論文題目	不飽和浸透特性モデルにおける間隙径分布推定方法の改良とその改良効果の評価

本論文は、不飽和土中の浸透挙動の把握に必要な土の不飽和浸透特性（水分特性曲線、不飽和透水係数）を推定するための数理モデル（以下、間隙モデルと称す）における間隙径分布推定方法の改良とその改良効果の評価に関する研究成果をまとめたものである。

土の不飽和浸透特性は、土中水の浸透挙動を把握するための飽和-不飽和浸透流解析に必要な特性であり、土構造物の水の浸透に対する安全性照査や降雨時の地盤防災に役立てられる。しかし、不飽和浸透特性を得るための保水性試験や不飽和透水試験には、複雑な試験装置を扱うための高度な技術が必要であり、試験に非常に長い時間を要することから、それらをモデルによって推定する研究が数多く行われてきた。

本論文では、基礎的な物性値を基に土の不飽和浸透特性を推定する間隙モデルに着目している。間隙モデルは粒径加積曲線と間隙比を基に、間隙径分布を導出し、水分特性曲線と不飽和透水係数を計算するため、関数式モデルに比べてパラメータの決定が容易である。本論文では、間隙モデルの推定精度を向上させるために、モデルの間隙径分布の導出方法に関する改良を行った。その改良効果や推定精度について保水性試験を実施し、計算結果との比較により評価した。本論文の構成と得られた知見は、以下の通りである。

第1章では、本論文の研究背景、既往研究、研究目的を取り纏めた。

第2章では、本論文で対象としている間隙モデルの概要と計算過程を説明した。

第3章では、間隙径分布の導出方法の改良の一つ目の方法として、土中の間隙構造に着目した間隙径分布の導出方法について検討した。間隙モデルで推定された間隙径分布を、保水性試験結果から得られるサクシオンに寄与する間隙径分布に補正するために必要な平行移動指数 I_{pt} について再検討し、粒度特性値（細粒分含有率、均等係数）から平行移動指数を算出する導出式を提案した。加えて、サクシオンに寄与する間隙水の割合（寄与率）を保水性試験結果から求め、各サクシオンにおける寄与率と細粒分含有率の関係について考察した。その結果以下の知見が得られた。

- 3-1) 細粒分含有率や均等係数が大きい土質は平行移動指数も大きくなる傾向があることが明らかとなった。これは、細かい粒子が多い土質ほど、多くの間隙水がサクシオンに寄与していることを示唆している。また、その関係からそれぞれ線形回帰による導出式を提案した。
- 3-2) 各サクシオンにおける寄与率と細粒分含有率の関係について、低サクシオン域（高飽和度域）でサクシオンに寄与する間隙水が多いこと、細粒分含有率が多い土質ほど、各サクシオンにおける寄与率も大きくなる傾向にあることが明らかとなった。また、細粒分含有率と寄与率には強い相関があることが明らかとなった。

第4章では、間隙径分布の導出方法の改良の二つ目の方法として、モデルパラメータの素体積高さ D_{cha} に着目した間隙径分布の導出方法について検討した。間隙モデルにおいて素体積高さ D_{cha} は、その土を代表する粒径（代表粒径、特徴粒径）と定義されており、従来のモデルでは D_{10} （10%通過粒径）が用いられていた。しかし、サクシオンに寄与する間隙径分布を代表する粒径が土質ごとに存在すると考えられるため、素体積高さ D_{cha} を土質ごとに決定する式を提案した。提案手法によって、シラスを含む砂質土と砂質土の保水性試験結果から D_{cha} を算出し、 D_{cha} と式中のパラメータと粒度特性値との

関係について検討した。加えて、提案手法の適用範囲や保水性推定精度について議論した。以下に得られた知見を示す。

- 4-1) 粒径加積曲線の確率密度関数を用いた、素体積高さ D_{cha} の導出式を提案した結果、細粒分の個数の影響を過大に評価する傾向にあり、 D_{cha} のサイズが過小評価される傾向にある。それによって、間隙径分布は過小評価されるため水分特性曲線の計算結果は試験結果に対して過大に評価される。
- 4-2) D_{cha} の式が細粒分の粒子の個数に影響を受けることから、 D_{cha} の計算に用いる最小粒径 D_{α} を調節しながら D_{cha} のサイズを調節し、計算される間隙径分布を保水性試験から得られたサクシオンに寄与する間隙径分布にフィッティングすることで、最適な D_{cha} を決定する方法を提案した。また、粒度特性値（細粒分含有率、均等係数）と最小粒径 D_{α} 、 D_{cha} との関係性について検討した結果、特に $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$ の土質に対して、 $10^{-4} < D_{\alpha} \text{ (mm)} < 10^{-3}$ となる傾向にあることが明らかとなった。
- 4-3) 本検討で用いた $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$ の土質に対して $D_{\alpha} = 10^{-3} \text{ mm}$ 、 10^{-4} mm をそれぞれ代入したときの D_{cha} を用いて間隙径分布を導出し、水分特性曲線を再計算した際の推定精度について検討した。その結果、 $D_{\alpha} = 10^{-4} \text{ mm}$ と設定したときの D_{cha} から得られた水分特性曲線は、実験値に対して近い傾向となり、あるサクシオンに対する体積含水率の推定精度はおよそ $W_v \pm 0.1$ となる。また、 D_{α} を幾何平均値（ $D_{\alpha} = 2.6 \times 10^{-4} \text{ mm}$ ）とするとき、その精度は $W_v \pm 0.05$ となることが明らかとなった。

第5章では、第3章と第4章で提案した間隙径分布の導出手法の評価を行うために、粒度を調整した試料による保水性試験を実施した。まず、連続加圧型加圧板法の測定精度の向上や試験時間の短縮化を目的とした試験装置の改良を行い、その改良効果について述べた。その試験装置を用いた試験結果から粒度特性と土の保水性の関係について考察した。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 5-1) 連続加圧型加圧板法の試験において、間隙水圧の計測時間の遅れが課題になっていたが、間隙水圧測定部を底部から中央部に改良すること、供試体底部のセラミック板の排水性を向上させることが、間隙水圧の時間遅れの改善に効果的であることがわかった。
- 5-2) 東俣シラスの粒度を調整し、保水性試験を行い、粒度特性値の異なる保水性試験の結果を蓄積することができ、細粒分含有率が多い供試体ほど保水性が高くなる傾向を得た。

第6章では、第5章で得られた粒度の異なる保水性試験結果を用いて、第3章で提案した粒度特性値から平行移動指数を算出する導出式と第4章で提案した D_{α} (mm)を用いた D_{cha} の決定手法について評価した。また両者の提案手法の適用範囲について議論するとともに、両者の手法の推定精度について明らかにした。本章で得られた知見を以下にまとめる。

- 6-1) 第3章で提案した粒度特性値と平行移動指数の導出式の評価を行った結果、 $F_c = 16\%$ 、 20% の試料では、試験結果と近い計算結果を得られることが明らかとなり、あるサクシオンに対する体積含水率の推定精度は、およそ $W_v \pm 0.05$ の範囲となる。
- 6-2) $F_c = 30\%$ 、 40% の試料では、試験結果と計算結果が異なる傾向が明らかとなった。この要因としては、この範囲の土質のデータの不足していることや試料の団粒化などが考えられる。あるサクシオンに対する体積含水率の推定精度は、およそ $W_v \pm 0.1$ の範囲となった。
- 6-3) 第4章で提案した D_{α} (mm)を用いた D_{cha} の決定手法の評価を行った結果、 $F_c > 10\%$ かつ、 $25 < U_c < 100$ の $F_c = 30\%$ 、 40% の試料の試験結果は、 $D_{\alpha} = 10^{-4} \text{ mm}$ 、 10^{-3} mm の計算結果の範囲に収まる結果となった。また、 D_{α} の幾何平均値（ $= 2.6 \times 10^{-4} \text{ mm}$ ）から D_{cha} を決定することで、試験結果に近い水分特性曲線を得られること明らかとなり、そのときのあるサクシオンに対する体積含水率の推定精度は、およそ $W_v \pm 0.05$ の範囲となる。

第7章では、結論を述べるとともに今後の展望を示した。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Improvement of pore size distribution estimation method in unsaturated seepage property model and evaluation of its improvement effect

Name: Nakajima Ryosuke

This thesis deals with a research on improving estimation accuracy and practical application of a mathematical model for unsaturated seepage properties with probability statistics.

The soil-water characteristic curve (SWCC) and unsaturated hydraulic conductivity are essential parameters for controlling the seepage behavior of pore water in unsaturated soil. Various models have been proposed to estimate SWCCs and unsaturated hydraulic conductivity because water retention and unsaturated hydraulic conductivity tests are complicated and time-consuming. Many studies have proposed functional equation models to represent the unsaturated seepage behaviors (e.g., van Genuchten model and Mualem model). These models determine the parameters in the functional equation by curve fitting the results of the laboratory test. Therefore, in the absence of laboratory test results, it is difficult to determine the parameters of the functional equation. This study focuses on the mathematical model of unsaturated seepage behaviors using the statistical and probabilistic methods. The hydraulic properties of unsaturated soils are calculated using the pore size distribution, which is estimated from the grain size distribution and void ratio. In this paper, calculation methods of pore size distribution, (PSD) were studied to improve the estimation accuracy of water retention and permeability with the model. In addition, a determination method of model parameters for each soil type based on basic physical properties is proposed in order to increase the utility of the model.

Chapter 1, the background, and the objective of this study was clarified.

Chapter 2 provides an overview of mathematical model and the process of calculating the SWCC and unsaturated hydraulic conductivity.

In the Chapter 3 described a method for deriving the PSD focusing on the pore structure of the soil. The PSD contributing to suction and the parallel shift index, (I_{pt}) proposed in a previous study, which were obtained from the results of a soil-water retention test, were reviewed, and a derivation formula was proposed to calculate the parallel shift index from the grain size characteristic values (fine fraction content, (F_c) and uniformity coefficient, (U_c)). In addition, we proposed the contribution ratio, which is the ratio of pore water contributing to suction to each suction and discussed the relationship between the contribution ratio and the fine particle content in each suction. As a result, the following findings were obtained.

- 3-1) The results of water retention tests on 24 samples of volcanic sandy soils showed that soils with higher F_c and U_c tended to have larger I_{pt} . This suggests that the more fine particles a soil has, the more pore water contributes to suction. The equations derived by linear regression are proposed based on the relationship between the two.
- 3-2) The contribution ratio of porewater to each suction was proposed and its relationship to the F_c was examined. The results showed that porewater contributes more to suction in low suction areas (high saturation areas), and that the higher the F_c of the soil, the larger the contribution rate in each suction area. The relationships were also found to be strongly correlated.

In Chapter 4, the model parameter required to derive PSD characteristic length, D_{cha} was focused on, and an equation to calculate D_{cha} from grain size distribution was proposed. The validity of the equation was examined using 42 samples of volcanic sandy soils and sandy soils. In addition, focusing on the minimum grain size D_{α} when calculating D_{cha} from the grain size distribution, methods for estimating D_{cha} and D_{α} from the grain size characteristic values were examined. The results obtained in this chapter are shown below.

- 4-1) The proposed D_{cha} equation overestimates the effect of the number of fine grains, resulting in a smaller calculated D_{cha} size and underestimation of the PSD. Therefore, the SWCC is overestimated.
- 4-2) A method was proposed to estimate the optimal D_{cha} by restricting the minimum grain size D_{α} in the equation. The correlation between grain size characteristic values (F_c and U_c), minimum grain size (D_{α}), and D_{cha} was investigated. It was observed that the relationship typically falls within the range of $10^{-4} < D_{\alpha}$ (mm) $< 10^{-3}$, particularly for soils exhibiting F_c greater than 10% and U_c ranging from 25 to 100.
- 4-3) SWCCs were derived by employing D_{cha} with D_{α} values of 10^{-3} and 10^{-4} mm for soils exhibiting F_c greater than 10% and U_c ranging from 25 to 100, respectively, were compared with the test results. SWCCs obtained from D_{cha} with $D_{\alpha} = 10^{-4}$ mm were close to the experimental values, and the accuracy of the volumetric water content estimation for a given suction was approximately $W_v \pm 0.1$. When D_{α} is set to the geometric mean the accuracy is found to be $W_v \pm 0.05$.

In Chapter 5, soil water retention tests using continuous pressure plate methods were conducted on soils with several different grain sizes to evaluate the methods for PSDs proposed in Chapter 3 and 4. In addition, some modifications were made to the test apparatus to improve the measurement accuracy and shorten the test time, and the effects of these modifications are also described. The findings of this chapter are summarized as follows.

- 5-1) To improve the measurement accuracy and shorten the test time, it is effective to measure the pore water pressure at the center of the specimen and to improve the drainage at the bottom of the specimen.
- 5-2) Soil-water retention tests were conducted on volcanic sandy soils of different grain sizes, and the results showed that the higher the F_c , the higher the soil water retention.

In Chapter 6, using the test results obtained in Chapter 5, the equation for calculating the I_{pt} from grain size characteristic values (F_c and U_c) proposed in Chapter 3 and the method for determining D_{cha} using D_{α} (mm) proposed in Chapter 4 were evaluated. The scope of application of both proposed methods were discussed, and the estimation accuracy of both proposed methods were clarified. The findings of this chapter are summarized as follows.

- 6-1) The evaluation of the equation for calculating the I_{pt} from grain size characteristic values (F_c and U_c) proposed in Chapter 3 revealed that for samples with $F_c = 16\%$, and 20% , the calculated results were close to the test results. The accuracy of the volumetric water content estimation for a given suction was approximately $W_v \pm 0.05$.
- 6-2) For the samples with $F_c = 30\%$, and 40% , the tests and calculated results differed. This difference can be attributed to the lack of data for this range of soils and to the clumping of the samples. The accuracy of the volumetric water content estimation for a given suction was approximately $W_v \pm 0.1$.
- 6-3) The method for determining D_{cha} using D_{α} (mm) proposed in Chapter 4 was evaluated. For soils exhibiting F_c greater than 10% and U_c ranging from 25 to 100, the test results fell within the calculated range of $D_{\alpha} = 10^{-4}$ mm and 10^{-3} mm. The geometric mean of D_{α} can be used to determine D_{cha} to estimate the close SWCCs to the test results. The accuracy of the volumetric water content estimation for a given suction was approximately $W_v \pm 0.05$.

In Chapter 7, the findings of this study were concluded, and prospects of the research were summarized.