

学位論文の要旨

氏名

軸屋 雄太

学位論文題目

不飽和土の保水・浸透・蒸発特性の同時計測手法の開発に関する研究

降雨後の斜面安定性の評価において、地盤内の水分変動を定量化するためには、不飽和土の保水・浸透特性に加え、地表面での水分流束の境界条件である蒸発特性の把握が重要となる。そこで、土の基本的物理量から不飽和土の保水・浸透・蒸発特性を推定するための数理モデルの提案を試みてきたが、特に蒸発特性に関するモデルにおけるパラメータの物理的意味やその特性について考察するには、試験データが不足していることから、どのような値を示すか未解明であった。

これらの不飽和土の特性を解明するためには、保水・浸透・蒸発特性について、同一供試体から同時に計測した結果に基づいた考察が必要であるが、これまで保水・浸透・蒸発特性を同一供試体から同時に計測する手法は開発されていないのが現状である。

そこで、本研究では、蒸発量推定方法の一つであるバルク法に基づく蒸発特性の計測方法と保水・浸透特性の計測方法の一つである簡易蒸発法に着目した。これらの方法は供試体表面からの蒸発量に基づいて不飽和土の水理特性を評価するなど原理が似ていることから、両者を組み合わせることで不飽和土の保水・浸透・蒸発特性を同一供試体から同時に計測できると考え、バルク法に基づく蒸発特性の計測方法と簡易蒸発法を組み合わせた不飽和土の保水・浸透・蒸発特性（ここでは、水分特性曲線・不飽和透水係数の関数・蒸発効率の水分依存性）の同時計測手法の開発に取り組んだ。

第1章では、研究の背景を述べるとともに、本研究で取り扱う内容とその目的についてまとめた。

第2章では、土の基本的物理量から不飽和土の保水・浸透・蒸発特性を推定するための数理モデルにおける蒸発特性モデルの概要を述べた。蒸発特性モデルは、裸地表層地盤を対象にしたモデルであり、不飽和土の蒸発特性が土質条件に依存して変化する傾向を評価できるモデルである。以下に、本章の主なまとめを述べる。

- 1) 土中の間隙構造に基づいて間隙水の蒸発経路をモデル化し、間隙径分布～蒸発効率の水分依存性の関係式を提案した。式中のパラメータである水蒸気経路数の関数形を土質条件に応じて決定できれば、土の基本的物理量から不飽和土の蒸発特性を推定できる可能性を示した。
- 2) 水蒸気経路数の関数形について、その傾向が土中水分量と土中の間隙構造の関数に関連すると考えられることから、水分特性曲線と不飽和透水係数の関数に基づいて評価できる可能性を示した。

第3章では、不飽和土の蒸発特性の計測手法であるバルク法に基づく室内試験方法について既往方法における課題を整理し、その課題解決に向けた不飽和土の蒸発特性（蒸発効率の水分依存性）の試験方法の改良を行った。その結果、以下に示す成果が得られた。

- 1) 蒸発効率はその定義から1以下の範囲で値をとるが、自然対流下を対象とした既往方法では不安定な環境条件の影響から、試験初期の蒸発効率が1を過大に上回り算定される課題があった。室内試験結果の考察から、試験初期の不安定な環境条件の影響によるデータを定量的な基準に基づき除去する必要があること、地表面種類の違いによる表面温度や蒸発量の違いを考慮できる交換速度の算定方法を提案することが必要であることを明らかにした。
- 2) 試験初期の不安定な環境条件の影響によるデータを棄却するための定量的な基準について、水槽と土槽の表面温度の時系列変化に基づいた基準の提案を行い、試験の初期段階における不安定な環境条件の影響で蒸発効率が1を大きく上回る値を良好に棄却できていることが確認できた。
- 3) 交換速度の算定方法の影響から蒸発効率が1をわずかに上回って算定される課題について、自然対流下における交換速度の算定方法として、土と水の熱容量の違いを考慮した手法と顕熱輸送量の違いを考慮した手法を提案した。いずれの手法でも蒸発効率の算定結果の改善が見られたが、特に顕熱輸送量の違いを考慮した手法では、試験結果がより安定することが確認された。
- 4) 新たに提案した試験手順を用いて異なる種類の土試料による計測結果の蓄積を行い、その考察から、不飽和土の蒸発特性が、保水・浸透特性と同様に間隙水の保持形態（間隙径分布などの土の間隙構造）に基づき評価できる可能性が示唆された。

第4章では、不飽和土の保水・浸透・蒸発特性の同時計測手法として、3章で改良したバルク法に基づく室内試験方法と簡易蒸発法を組み合わせた方法を提案し、試験方法の概要、提案手法の実現可能性の確認を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 簡易蒸発法に基づく水分特性曲線と不飽和透水係数の関数の計測結果について、蒸発特性の試験に必要な供試体表面への熱量の供給が、計測結果に与える影響について検討した。その結果、水分特性曲線と不飽和透水係数の関数の計測結果には、熱量の供給の有無がほとんど影響しないことが確認でき、提案する手法の実現可能性が確認された。
- 2) 第3章で提案した試験手順と算定方法（試験初期の不安定な環境条件に影響を受けたデータを除去する手法と自然対流下における交換速度の算定方法（顕熱輸送量を考慮した手法））に則って同時計測を行った。その結果、同時計測手法で得られた水分特性曲線や不飽和透水係数、蒸発効率の水分依存性は、従来の簡易蒸発法やバルク法に基づく室内試験（第3章の試験手順）の結果とほぼ同程度の結果を得ることができていることが確認された。また、同一供試体から得られた水分特性曲線と蒸発効率の水分依存性を関係付けて考察できるようになり、蒸発効率の水分依存性の傾向が、水分特性曲線から得られる残留体積含水率で評価できる可能性が示された。
- 3) 蒸発効率の水分依存性について、供試体高さや表面積といった寸法が従来のバルク法に基づく試験法と異なるため、わずかではあるが蒸発効率が低下する体積含水率が供試体寸法の影響を受けている可能性が確認された。

第5章では、各章で得られた成果を総括するとともに、本研究の今後の展望を述べた。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Research on the development of simultaneous measurement method for water retention, seepage, and evaporation properties in unsaturated soil

Name: JIKUYA Yuta

To assess slope stability after rainfall, it is necessary to quantify the moisture variability in the soil. For this purpose, it is important to understand the evaporation characteristics of unsaturated soil in addition to its water retention and infiltration. Therefore, the authors have proposed a mathematical model to estimate the water retention, infiltration, and evaporation characteristics of unsaturated soil from the basic physical quantities of soil. However, the parameters of the model for estimating evaporation properties have not yet been clarified due to the lack of test data.

To elucidate the characteristics of these unsaturated soils, simultaneous measurements of water retention, infiltration, and evaporation properties from the same specimen are necessary. However, no method has been developed to simultaneously measure water retention, infiltration, and evaporation properties from the same specimen.

In this study, the development of a method for simultaneous measurement of water retention, infiltration, and evaporation characteristics of unsaturated soil by combining the bulk method-based method of measuring evaporation characteristics and the simple evaporation method was developed. The measurement method of evaporation characteristics based on the bulk method is one of the methods for estimating evaporation, and the simple evaporation method is one of the methods for measuring water retention and infiltration characteristics. By combining both methods, the water retention, infiltration, and evaporation properties of unsaturated soil can be measured simultaneously from the same specimen.

Chapter 1 describes the background of the study and summarizes the contents and objectives of the study.

Chapter 2 outlines the evaporation property model in a mathematical model for estimating the water retention, infiltration, and evaporation properties of unsaturated soils from the basic physical quantities of the soil. The evaporation property model is a model for bare surface soil, which can evaluate the tendency of the evaporation property of unsaturated soil to change depending on soil conditions. The main summary of this chapter is given below.

- 1) An equation for the moisture dependence of pore size distribution to evaporation efficiency considering the pore structure in soil was proposed. If the characteristics of the functional form of the number of water vapor paths, which is a parameter in the equation, for each soil type are known, it is possible to estimate the evaporation characteristics of unsaturated soils from the basic physical properties of the soil.

- 2) The functional form of the number of water vapor paths is considered to be related to the relationship between soil moisture content and soil pore structure. Thus, it could be evaluated on the basis of a function of the moisture property curve and the unsaturated hydraulic conductivity.

Chapter 3 deals with a laboratory test method based on the bulk method, which is a method for measuring the evaporative properties of unsaturated soil. An improved test method for the evaporative properties of unsaturated soils (moisture dependence of evaporative efficiency) is proposed. As a result, the following results were obtained.

- 1) Regarding the test results of evaporation efficiency, it was clarified that it is necessary to remove the data affected by unstable environmental conditions in the early stages of the test based on quantitative criteria and to propose a method for calculating the exchange rate that can account for differences in surface temperature and evaporation due to different types of ground surfaces.
- 2) The effects of unstable environmental conditions in the early stages of the test were improved by the use of criteria based on the surface temperatures of the water and soil tanks.
- 3) Two methods were proposed for calculating the exchange rate: one based on heat capacity and the other based on sensible heat transport. The method based on sensible heat transport showed a significant improvement in the test results.
- 4) Tests were conducted using the newly proposed test procedure. It was suggested that the evaporative properties of unsaturated soils could be evaluated based on pore size distribution.

Chapter 4 outlines the method for simultaneous measurement of water retention, infiltration, and evaporation characteristics of unsaturated soils and confirms its feasibility. The following is a summary of the findings obtained.

- 1) The influence of the simultaneous measurement system on the results of the measurement of moisture characteristic curves and unsaturated hydraulic conductivity functions based on the simple evaporation method was examined. The results showed that the heat supply had little effect on the test results.
- 2) The moisture characteristic curves, unsaturated hydraulic conductivity, and moisture dependence of evaporation efficiency obtained by the simultaneous measurement method were almost equivalent to those obtained by the conventional test method.
- 3) The test results on the moisture dependence of evaporation efficiency were affected by the dimensions of the specimen height and surface area.

In Chapter 5, the results obtained in the previous chapters are summarized, and the future subjects to be solved are described.