

平成23年3月31日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20360212

研究課題名（和文）不飽和浸透流におけるヒステリシスと間隙空気挙動の原位置評価方法の開発

研究課題名（英文）Development of field techniques for measuring hysteretic soil hydraulic properties and pore air pressure of unsaturated soils

研究代表者

竹下 祐二（TAKESHITA YUUJI）

岡山大学・大学院環境学研究科・教授

研究者番号：90188178

研究成果の概要（和文）：豪雨による斜面および河川堤防崩壊といった地盤災害問題の多くは、不飽和地盤で生じている。これらの地盤災害を防止するためには、不飽和地盤における地下水や水分状態の挙動や地盤の浸透特性値を精度良く計測する必要がある。本研究では、不飽和砂質土地盤での原位置透水試験方法および地中レーダを用いた土中水分動態の非破壊計測方法の開発を通じて、不飽和地盤の安全性照査に適用できる原位置試験方法の提案を行った。本研究の有用性は現場試験と数値シミュレーションによって検討した。

研究成果の概要（英文）：Typical geotechnical disasters, such as heavy rainfall induced slope failures and the levee failures caused by seepage, are caused in unsaturated ground. For the prevention of these geotechnical disasters, it is well noticed that in-situ measurement and evaluation of the soil hydraulic properties are essential to practical and accurate prediction of water movement in unsaturated soils. In this study, a new field experimental method of determining the soil hydraulic properties in the near surface of unsaturated sandy soils is proposed. Surface ground-penetrating radar was assessed as a non-destructive method to measure the temporal and spatial variability of unsaturated seepage flow on a homogeneous sandy soils. The in-situ tests for applying the safety investigation of unsaturated soils. The utility of our proposed methods was demonstrated by using numerical seepage flow numerical analysis and field infiltration experiments.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,300,000	1,590,000	6,890,000
2009年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	8,200,000	2,460,000	10,660,000

研究分野：土木工学

科研費の分科・細目：工学・地盤工学

キーワード：地盤工学，浸透，浸透特性，不飽和土，原位置試験，ヒステリシス，間隙空気

1. 研究開始当初の背景

近年，斜面および河川堤防の安全性，地盤の陥没や空洞の形成といった地盤災害問題の多くは，不飽和地盤で生じていることが広く認識されるようになってきた。しかし，従来の土質力学における研究対象は，そのほとんどが飽和土であり，不飽和土や不飽和地盤に関する研究は著しく遅れており，不飽和土の地盤工学的特性の解明はなおざりにされてきた感がある。また，不飽和地盤の調査・試験法も確立されていない。このような黎明期においては，精度の良い原位置計測データおよび原位置試験事実の蓄積が重要であると考えられる。

不飽和地盤での浸透挙動は不飽和土の土質特性を大きく支配することが知られているが，その評価における問題点は以下のようである。

- (1) 水が浸潤する過程と排水する過程におけるヒステリシス現象を計測できる原位置試験法は見あたらない。また，実際の浸潤過程では，間隙空気が封入されるために完全な飽和状態ではなく，それに近い疑似飽和状態（現場飽和状態）が発生するが，室内透水試験や保水性試験等の要素試験では，この現場飽和状態を考慮することができない。
- (2) 不飽和地盤の透気特性は不飽和浸透流に影響を与える重要な要因であるが，間隙空気と間隙水の挙動を連成させた不飽和浸透流解析の実施は容易でない。

そのため，原位置透水・透気試験を実施して，間隙空気挙動が不飽和浸透現象におよぼす影響を総合的に解釈した，より精度の高い不飽和浸透流のシミュレーションを実施する必要がある。

- (3) 不飽和浸透挙動の計測において，挿入型センサーを複数深度に多数設置することは容易ではなく，迅速な広域調査を可能にするための新しい現場計測方法の開発が必要である。

2. 研究の目的

不飽和地盤での原位置試験方法および土中水分動態の非破壊計測方法の開発を通じて，不飽和地盤のモデリング支援のための調査・試験システムの構築を検討してきた。その基本的なコンセプトは軽量コンパクトで可搬性に優れ，操作性のシンプルな原位置調査・試験方法の提案および実用化に向けての情報提供である。

本研究では，これらの研究成果をさらに進展させて，電磁波を利用した最新の非破壊計測方法を用いた原位置透気・透水試験方法を開発し，従来，明確にされていなかった不飽和浸透流のヒステリシス現象や間隙空気の影響を原位置計測事実によって解明し，不飽和地盤の安全性照査に適用できる原位置調査・試験方法の提案とそれらの基準化に貢献することを目的とする。

3. 研究の方法

- (1) 原位置透水試験装置の開発

不飽和地盤での原位置透水試験方法として、定水位透水試験方法（Guelph permeameter）をベースに、電磁波を利用した誘電率計測方法を用いた試験方法を提案する。本試験は不飽和地盤に数 cm 程度静的に貫入させた直径 10～20cm 程度の単一浸潤リングを用いて定水位浸透を生じさせる非常にシンプルな透試験法でありながら、従来の原位置透水試験方法に比較して以下の特徴を有している。

- ①浸潤リングの中心に 1 本の 4ch 型土中水分計を挿入設置しており、浸潤リング下部における局所的な土中水分量プロファイルの非定常計測を行うことが可能である。
- ②浸潤リングを中心とする地表面の測線上に、周波数 900MHz のアンテナを用いたコンパクトで解像度の高い地表型地中レーダを配置することにより、不飽和浅層領域での 3 次元探査が可能であり、地盤誘電率の測定・解析によって地盤構造や浸潤前線を可視化できる。
- ③同一試験地点において、定水位透水試験と排水試験を連続して実施可能であり、初期不飽和状態から現場飽和状態までの土中水分領域での不飽和浸透現象を計測することができる。

(2) 不飽和浸透流のヒステリシス現象の原位置測定

上記（1）で開発した原位置透水試験装置によって計測した浸潤過程及び排水過程での土中水分プロファイルの非定常挙動をシミュレートできる不飽和浸透特性の関数モデルを浸透流解析と非線形最小二乗法を用いた逆解析手法により同定する。ここで、算定されるヒステリシス現象を考慮した不飽和浸透特性値は、水分特性曲線であり、定水位透水試験により、初期

水分状態から現場飽和状態まで土中水分量が増加する浸潤走査曲線が算定され、その後、連続して実施される排水試験により、現場飽和状態から排水されて主排水曲線に近づいて行く排水走査曲線が算定されると考えられる。本研究で原位置計測されるこれらの水分特性曲線は、降雨浸透などの不飽和地盤表層部分における実際の浸透挙動に即応した水分特性曲線であり、従来、室内保水性試験によっては計測評価の困難であった不飽和浸透特性値である。

4. 研究成果

(1) 不飽和砂質土地盤の表層部分における飽和・不飽和浸透特性値を簡便かつ迅速に算定する原位置透水試験方法を提案した。挿入型土中水分計を用いた簡易な透水試験装置により定水位透水試験と排水試験を連続して実施して、定常浸透流量により現場飽和透水係数を測定し、土中水分量の非定常挙動により不飽和浸透特性値を測定した。提案した原位置透水試験装置に関しては、実務レベルにおいても実行可能とするために、対象地盤の透水性に応じた試験方法の提案として、浸潤リングの大きさや土中水分量の計測方法などを飽和・不飽和浸透流解析を用いて検討して、試験方法の完成度を高めると同時に簡便化を図った。

(2) 上記（1）で開発した原位置透水試験装置によって計測した浸潤過程及び排水過程での土中水分プロファイルの非定常挙動をシミュレートできる不飽和浸透特性の関数モデルを浸透流解析と非線形最小二乗法を用いた逆解析手法により同定し、従来、室内保水性試験によっては計測評価の困難であったヒステリシス現象を考慮した水分特性曲線を評価した。

(3) 砂質土地盤における浅層領域での不飽和浸透挙動および浸透特性値の計測方法として、地表設置型地中レーダ (GPR) を提案し、その適用性および有用性を吟味することを目的として、均質な砂丘砂地盤において原位置不飽和浸透試験を実施した。自然乾燥状態にある砂丘砂地盤において、散水を行って地盤内に断面 2 次元不飽和浸透流を発生させ、その浸潤前線の非定常挙動を GPR によるプロファイル測定によって地表面から非破壊状態で計測を行った。その結果、

① GPR によって測定された浸潤前線の非定常挙動の妥当性を浸透流解析手法による数値シミュレーションによって検討した結果、両者には良好な一致が認められた。

② 時間領域差分法による数値シミュレーションによって得られた電磁波反射波形は GPR プロファイル測定によって計測された電磁波反射波形と良好な一致が認められた。

(4) 不飽和地盤における現場飽和透水係数を測定する方法として、単一リングからの定水位浸潤理論にもとづくプレッシャーインフイルトロメータ法に着目し、細粒分をあまり含まない不飽和地盤を対象に原位置定水位浸透試験を模擬した飽和・不飽和浸透流解析を行い、土の不飽和浸透特性モデルとこれまでに推奨されてきた土の指数関数パラメータの値が現場飽和透水係数の算出に与える影響について検討した。

以上の研究成果をもとに簡便かつ迅速な原位置調査システムによる不飽和地盤の安全性照査指針の立案を行い、原位置試験方法としての基準化に対して提言を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 10 件)

① S. Nakafusa, K. Kobayashi, T. Morii, and Y. Takeshita, Estimation of water diversion provided by capillary barrier of soils, Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, 査読有, Vol.1, 2011, (in print)

② T. Morii, M. Inoue, G. Komatsu, R. Kadoguchi, and Y. Takeshita, Effective Water Harvesting Using Capillary Barrier of Unsaturated Soils, Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils, 査読有, Vol.1, 2011, (in print)

③ Y. TAKESHITA, S. MORIKAMI, T. YAMASHITA, S. KURODA, T. MORII and M. INOUE, Non-destructive measurements of unsaturated seepage flow by using surface ground-penetrating radar, Geotechnical special publication, Geo-shanghai, 査読有, 202 巻, 2010, pp.211-217

④ 竹下祐二, 森上慎也, 森田周三, 黒田清一郎, 井上光弘, 地中レーダを用いた砂質土地盤における不飽和浸透挙動の非破壊計測, 土木学会論文集 C, 査読有, 65 巻, 2009, pp.943-950

⑤ 森井俊広, 竹下祐二, 井上光弘, 松本 智, キャピラリー・バリア地盤における雨水浸潤挙動の現地計測と限界長の評価, 農業農村工学会論文集, 査読有, 263 巻, 2009, pp.91-97

⑥ T. MORII, Y. TAKESHITA, M. INOUE and S. MATSUMOTO, Alternatives measures for soil slope stability using capillary barrier of soil, Unsaturated Soils: Experimental Studies in Unsaturated Soils and Expansive Soils, 査読有, 1 巻, 2009, pp.319-324

⑦ K. Kamiya, Estimation of water characteristic curve based on the measurement of drying characteristic curve of unsaturated sandy soil, Proceedings of the 4th Asia Pacific Conference on

Unsaturated Soils, 査読有, 1巻, 2009, pp.799-804

⑧神谷浩二, 鳥取砂丘砂の乾燥特性曲線と水分特性曲線の関係, 日本砂丘学会誌査読有, 55巻, 2009, pp.143-152

⑨神谷浩二, 水分特性曲線を用いて不飽和土の透気係数と飽和度の関係を推定する関数モデルの考察, 土木学会論文集C, 査読有, 64巻, 2008, pp.650-661

⑩上原り香, 森井俊広, 河川堤防法面の小規模地すべり損傷事例にみる土質特性の影響, 新潟大学農学部研究報告, 査読無, 61巻, 2008, pp.111-117

[学会発表] (計19件)

①竹下祐二, 中村政文, 滝野康教, 安井海渡, 森井俊広, 飽和・不飽和浸透特性値の簡便な原位置計測方法に関する考察, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.8.19, 愛媛大学

②竹下祐二, 山下太久, 今北泰男, 黒田清一郎, 井上光弘, 地中レーダを用いた不飽和地盤の浸透特性値の調査方法, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.8.19, 愛媛大学

③杉井俊夫, 不飽和浸透特性評価のための浸潤試験装置の開発, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.8.19, 愛媛大学

④森井俊広, 小松元太, 井上光弘, 竹下祐二, 土の毛管障壁機能を利用した圃場規模の雨水ハーベスティング, 第45回地盤工学研究発表会, 2010.8.18, 愛媛大学

⑤杉井俊夫, 原位置不飽和浸透試験のための水分分布推定の試み, 土木学会中部支部研究発表会, 2011.3.4, 中部大学

⑥森井俊広, 小林 薫, 竹下祐二, 土のキャピラリー・バリア機能を利用した雨水資源化システムの構造設計, 日本地下水学会 2010年秋季講演会, 2010.11.12, 和歌山市

⑦杉井俊夫, 佐々郁哉, 原位置不飽和透水試

験装置の開発, 平成21年度土木学会中部支部研究発表会, 2010.3.1, 金沢工業大学

⑧竹下祐二, 中村政文, 小谷浩輔, 森井俊広, 土中水分量計測データに着目した不飽和地盤における原位置透水試験の解析方法, 第44回地盤工学研究発表会, 2009.8.20, 関東学院大学

⑨竹下祐二, 山下太久, 森上慎也, 黒田清一郎, 井上光弘, 地中レーダを用いた不飽和浸透試験方法の提案, 第44回地盤工学研究発表会, 2009.8.20, 関東学院大学

⑩森井俊広, 松本 智, 竹下祐二, 井上光弘, キャピラリー・バリア地盤における降雨浸潤挙動と限界長の現地計測, 第44回地盤工学研究発表会, 2009.8.20, 関東学院大学

⑪松本智, 森井俊広, 竹下祐二, 土のキャピラリー・バリアを利用した斜面減災工の開発研究, 土木学会第64回年次学術講演会(部門Ⅲ), 2009.9.4, 福岡大学

⑫Toshihiro MORII, Determination of divergence length of capillary barrier based on field measurement of rainfall infiltration in slope soil, The First Korea-Japan Joint Workshop on Unsaturated Soils, Yongin, Korea, 2009.9.11, 壇国大学(Yongin, Korea)

⑬Yuji Takeshita, Measurement of soil water content profile using ground-penetrating radar, The First Korea-Japan Joint Workshop on Unsaturated Soils, Yongin, Korea, 2009.9.11, 壇国大学(Yongin, Korea)

⑭杉井俊夫, 和田祐季, 花北 誠, Wind evaporation method による不飽和透水試験の検証, 土木学会中部支部研究発表会, 2009.3.3, 名城大学

⑮杉井俊夫, 岡本英朗, 鶴留修治, 団粒化構造による透水性保水型土系舗装の評価, 平成21年度土木学会中部支部研究発表会, 2010.3.1, 金沢工業大学

⑩森井俊広, 竹下祐二, 井上光弘, 松本智,
キャピラリー・バリアを利用した斜面減災技
術の開発研究, 第 43 回地盤工学研究発表会,
2008.7.11, 広島市

⑪杉井俊夫, 伊藤 隆, 土の保水性試験にお
ける体積変化の評価, 第 43 回地盤工学研究
発表会, 2008.7.11, 広島市

⑫竹下祐二, 森上慎也, 森田周三, 黒田清一
郎, 井上光弘, 地中レーダを用いた不飽和浸
透挙動の非破壊計測, 第 43 回地盤工学研究
発表会, 2008.7.11, 広島市

⑬竹下祐二, 井上光弘, 地中レーダを用いた
乾燥地における不飽和浸透挙動の原位置非
破壊計測方法に関する研究, 平成 20 年度鳥
取大学乾燥地研究センター共同研究発表会,
2008.12.5, 鳥取市

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹下 祐二 (TAKESHITA YUJI)
岡山大学・大学院環境学研究科・教授
研究者番号: 90188178

(2) 研究分担者

杉井 俊夫 (SUGII TOSHIO)
中部大学・工学部・教授
研究者番号: 90196709
森井 俊広 (MORII TOSHIHIRO)
新潟大学・大学院自然科学研究科・教授
研究者番号: 30231640
神谷 浩二 (KAMIYA KOUJI)
岐阜大学・工学部・准教授
研究者番号: 50252119

(3) 連携研究者

なし