

令和 2 年 5 月 28 日現在

機関番号：15301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00615

研究課題名（和文）有効間隙率と現場飽和状態を把握する2種類の溶液を使う新たなトレーサー試験法の開発

研究課題名（英文）Development of a novel tracer test using two solutions for measuring field saturation and effective porosity

研究代表者

小松 満（Komatsu, Mitsuru）

岡山大学・環境生命科学研究所・准教授

研究者番号：50325081

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：現在、斜面災害の予知に用いる土中水分量の閾値や土壌・地下水汚染における適切な物性値の設定が課題となっていることから、自然地盤において有効間隙率を原位置で簡便かつ迅速に求める試験法を提案するとともに、2種類の溶液を用いて擬似飽和状態や現場飽和状態を確認することを目的とした。トレーサー注入試験装置を試作して原位置試験を実施し、サンプリング試料に対する室内透水試験結果や現地をモデル化した降雨実験を行うことで原位置試験で得られた結果を評価した。その結果、原位置で測定した擬似飽和と現場飽和と体積含水率に対して室内試験結果が一定の整合性を確認したものの、用いるトレーサーの比重や装置の改良が課題となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した試験装置は、センサーの計測範囲のわずかな間隙に注入するだけで良いので、ごく短時間で試験を終了することができる。また、センサーをそのまま長期観測に用いることもできる。そのため、多点での試験が容易に実施でき、さらに注入条件を変化させた上で有効間隙率を定量的に把握することが可能となるため、降雨強度や地下水の上昇速度に応じた現場飽和状態の判断ができるようになる。本手法が広く実務で使われるようになると、透水係数に比べて測定事例の少ないパラメータであった有効間隙率が様々な土質に対してデータの蓄積が行われるようになり、現場飽和状態の指標を示すデータベースの構築につながるものと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Recently, setting thresholds for soil water content for predicting slope disasters and setting appropriate physical parameters for soil and groundwater pollution have become issues. The objectives of this study were to propose an easy-and-quick in-situ testing method to find the effective porosity in natural ground, and to apply the method to confirm the quasi-saturated state and the field saturated state using two solutions. An in-situ test was conducted using the developed prototype tracer injection device. The results of the in-situ test were evaluated based on the findings of laboratory permeability tests using specimens sampled on site as well as precipitation experiments using the site model. The quasi and field-saturated volumetric moisture content measured in the in-situ experiments were found generally consistent with the laboratory results. It was, however, suggested that further improvements on the specific gravity of tracers and the injection device have to be made.

研究分野：地盤工学

キーワード：体積含水率 有効間隙率 擬似飽和状態 現場飽和状態 原位置試験 土中水分計 トレーサー
エタノール水溶液

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

土壌・地下水汚染問題において近年、解析シミュレーション技術が発達し、汚染状況やその範囲が把握可能となっている。しかし、地盤内の物質移行や浸透特性に関わる物性値を測定する統一された試験法が確立されていないため、より正確な評価を行う上での障害となっている。特に、物質の移行特性に大きく関係するパラメータである有効間隙率は原位置で簡便かつ迅速に求める試験法がほとんど見られないことから、その測定方法の確立が求められている。一方、近年、豪雨時の土砂災害の発生予測を行う研究において土中水分計を用いる手法が提案されている。地盤が飽和に至る兆候を捉えようとする取り組みであるが、現地での土中水分量のピーク値は封入空気の影響のため完全な飽和状態を示す間隙率の値とはならないことが指摘されており、より実際の現象を把握する上では現場飽和状態の把握が必要である。つまり、不飽和地盤では、ほとんどの場合が飽和度 100%にはならず、土中水分量のピーク値を示す現場飽和状態は間隙の中で実際に水が占める割合を表すため、有効間隙率として評価される。

2. 研究の目的

既往の研究において、図-1 に示すような誘電率測定センサーを地盤に挿入した上で、そのセンサー周辺に水とは誘電率の異なる液体を注入し、誘電率の変化から有効間隙率を求める方法を提案した。具体的には、砂試料に対してエタノール溶液を注入して有効間隙率を算定するとともに、別途トレーサー試験を行った結果に基づき妥当性を評価した。ただし、これまでの研究は室内試験に留まっており、今回、実際に原位置で実施可能な注入システムの開発を目指し、主にトレーサー注入試験装置の試作と現場試験の実施、有効間隙率と現場飽和状態を判断する妥当性の検証を目的とした。

提案する原位置試験方法は、図-2 に示すように手動のオーガードリルや採土器を用いて地表面から数 m 程度の深度までの浅層地盤を対象としており、削孔後すぐに水分センサーとテンシオメーターを挿入した上で注入試験を開始でき、センサーの計測範囲のわずかな間隙に注入するだけで良いので、ごく短時間で試験を終了することができる。そのため、多点での試験が容易に実施でき、さらに注入条件を変化させた上で有効間隙率を定量的に把握することが可能となるため、降雨強度や地下水の上昇速度に応じた現場飽和状態の判断ができるようになる。なお、より一般的な市販の水分センサーとテンシオメーターを用いて簡便な試験装置として提案する。

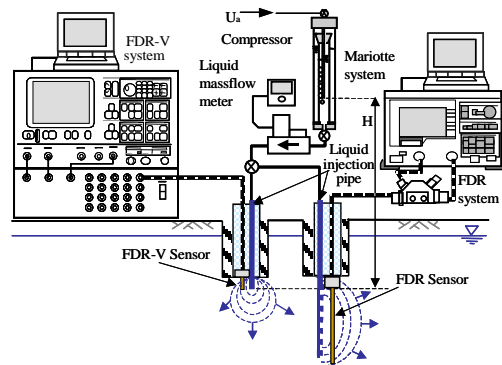


図-1 原位置トレーサー注入試験概略図

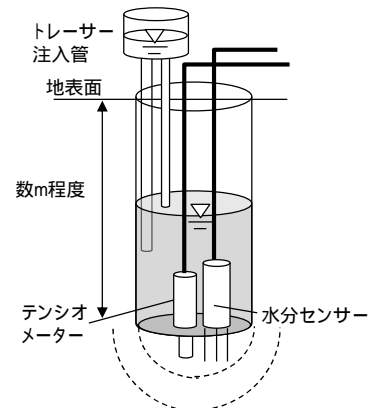


図-2 トレーサー注入試験装置の概念図

3. 研究の方法

自然地盤において有効間隙率を原位置で簡便かつ迅速に求める試験法を提案するとともに、この手法を応用して現場での飽和状態を確認することを目的としているが、まずは、現地トレーサー注入試験装置を試作し、室内の模擬地盤で適用性を確認する。その上で、斜面現場で原位置試験を実施するとともに、現地採取のサンプリング試料を用いて一次元カラムを用いたトレーサー試験結果により原位置試験結果の妥当性を検証する。また、室内での透水試験を実施し、有効間隙率と現場飽和状態の関係についてデータの解析と評価を行う。具体的な方法を以下にまとめる。

(1) トレーサー注入試験の試作

試験装置は水分センサーとテンシオメーターを組み込んだ形として、極力コンパクトな装置を設計する。ボーリング孔内に一定注水圧が確保できるようにマリョットタイプの注入管を用い、その注入範囲に設置した水分センサーで定常状態までの変化を測定するシステムを試作する。なお、水分センサーを直接挿入して設置することが困難な地盤には、ダミーセンサーを打撃することでセンサーよりもわずかに小さな孔を設けることとする。

(2) 室内模擬土槽試験

試験装置の有効性を検証するため、幅 1m × 奥行 1m × 高さ 1m の模擬土槽を現場から採取したまき土により製作し、試作したトレーサー注入試験装置でパラメータの測定を行い、適用性を検討する。

(3) 原位置試験

法面崩壊の予測に関する実証実験サイトの法面で実施する。注入するトレーサーの温度が影響するため、温度が極端に異なる場合は、測定結果に対する温度補正の方法を検討する。また、

透水係数の異なる地盤への適用を試みる。

(4) 現地地盤サンプリング及び透水試験

トレーサー注入試験を実施したボーリング孔底や周囲で鋼管を用いたサンプリングを行い、乱れの少ない試料を採取する。鋼管を回転させて先端の根切りを行い、鋼管を引き抜く形とする。なお、鋼管は静的挿入を計画しているが、挿入が困難な場合は打撃による方法を用い、引き抜きが困難な場合は周辺地盤を掘削して回収する。採取した試料を実験室内で背圧等を加えることで一度水分量を低下させた後に一次元で透水試験を実施する。なお、対象とする現象が降雨浸透か地下水上昇かにより、供試体の上部から注水する場合と下部から注水する場合と分けて原位置試験の挙動を検証する。また、透水試験における動水勾配は現地での注水圧と等しくなるように調整する。

(5) 室内トレーサー試験

試験装置の有効性を検証するため、鉛直一次元トレーサー試験装置を用いて有効間隙率を測定する。トレーサーは、単位体積重量を水と等しくしたエタノール調整水溶液を用い、パルス状に注入し、濃度変化は研究室所有のフラクションコレクターを使用する計画である。なお、有効間隙率の算定には、比濃度 $C/C_0=0.5$ となる時間を用いることとする。

4. 研究成果

(1) トレーサー注入試験装置の試作

トレーサー注入試験装置として、まずは水分センサーのみを組み込んだ装置として設計した(図-3)。ボーリング孔内に一定注水圧が確保できるようにマリオットタイプの注入管を用い、その注入範囲に設置した水分センサーで定常状態までの変化を測定するシステムを試作した。

(2) 室内模擬土槽試験

試験装置の有効性を検証するため、岡山県内のまさ土により模擬土槽を製作し、試作したトレーサー注入試験装置でパラメータの測定を行うことで適用性を検討した(図-4)。現場飽和状態の再現性を確認するとともに、擬似飽和状態の体積含水率の値と飽和状態からエタノール注入により求めた有効飽和度の値が概ね一致する結果を得ることができた。

一方、試作したトレーサー注入試験装置は地表面付近から削孔した深度 15cm 程度のボーリング孔を対象にしていることから、深度方向の値を求めるにはトレンチを開削する必要がある。この点を改善するために、新たに長さ約 1m の多深度土中水分計(6 深度)を用いた注水試験方法を実施した。具体的には、水分計の測定影響範囲を考慮したアルミ製の円筒を深度 1m まで打設してその中心部に土中水分計を設置し、円筒内に注水を行った際の水分量の経時変化を測定した。この方法により、一度の注水で深度方向の擬似飽和状態と現場飽和状態における体積含水率の値を評価することが可能となった。

(3) 原位置試験

法面崩壊の予測に関する実証実験サイトである盛土法面で原位置試験を実施した(図-5)。試験は水による注入のみとし、擬似飽和状態、現場飽和状態、飽和状態での体積含水率の値をそれぞれ散水及び注水による体積含水率の経時変化から求めることができた。また、粘性土の崩積土で構成される自然斜面を対象に新たな原位置試験も実施した。

なお、注水流量の制御に対応できるよう現場試験装置に定量ポンプを組み込んだ改良を行ったものの、当初計画に入れていたテンシオメータによるサクシヨンの変化と孔内水位の値を得る改良は適用するセンサの形状から実現は困難であった。

(4) 現地地盤サンプリング及び透水試験

現場から採取した乱れの少ない試料に対して、室内での飽和及び加圧型透水試験(図-6)等により測定した体積含水率と透水係数の関係と現場で測定した擬似飽和状態及び現場飽和状態の体積含水率の値が整合する結果が得られたことから、室内試験によりこれらのパラメータを推定することが可能であることが判明した。

また、現地をモデル化した鉛直一次元カラムによ

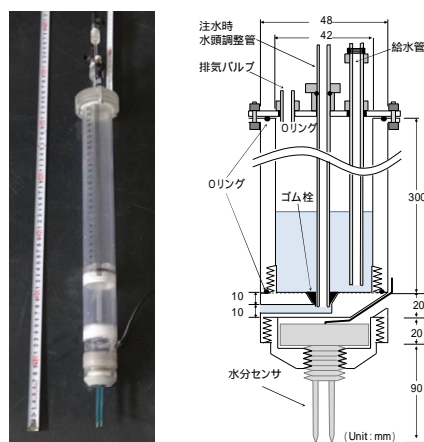


図-3 試作したトレーサー注入試験装置

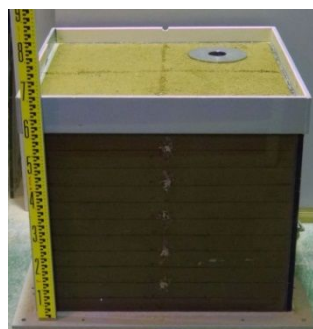


図-4 室内模擬土槽



図-5 原位置試験の様子

る降雨実験を実施した。実験は排気条件と非排気条件で実施したところ、両者の体積含水率の変化に大差が認められることが判明した。さらに、注水後の体積含水率の低下挙動において、現場観測結果とは異なる現象を確認した。

一方、粘性土の崩積土で構成される自然斜面を対象に、現場から採取した試料に対する不飽和透水試験を求めた上で原位置試験結果の評価を行った。その結果、再構成した試料に対する不飽和透水係数は低い値となる傾向があること、原位置試験で測定した現場飽和体積含水率とその時の透水係数を用いて不飽和透水係数モデルの修正を行うことで降雨量に応じた体積含水率の値を得ることができると判明した。

(5) 室内トレーサー試験

室内トレーサー試験により原位置試験の有効性を検証した(図-7)。その結果、破過曲線から求めた有効間隙率の値が体積含水率の値よりも低くなった。この理由としては、濃度を調整したエタノール水溶液が水の単位体積含水率よりも低くなったことが挙げられ、エタノール水溶液に混入する物質を改めて検討する必要があることが新たな課題となった。

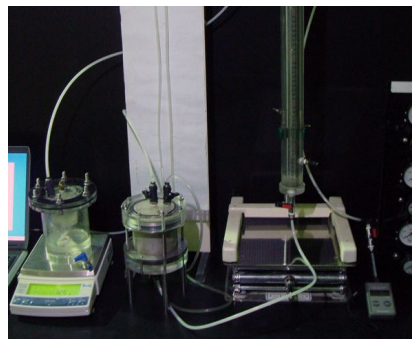


図-6 室内透水試験の様子

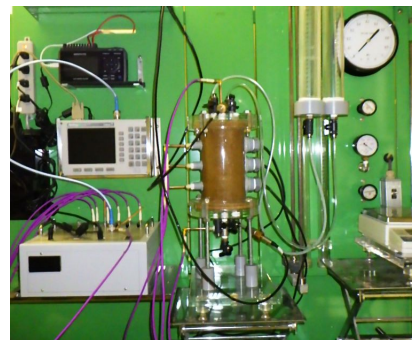


図-7 室内トレーサー試験の様子

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 2件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 K.Koizumi, K.Sakuradani, K.Oda, M.Komatsu, S.Itoh	4. 巻 Vol.13, NO.4
2. 論文標題 Relationship between quasi-saturated volumetric water content and rainfall-induced slope deformation based on a model slope experiment	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of GeoEngineering, Taiwan Geotechnical Society	6. 最初と最後の頁 179-186
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) http://dx.doi.org/10.6310/jog.201812_13(4).3	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 小松 満, 喜多 浩志, 小泉 圭吾	4. 巻 35
2. 論文標題 試験孔内での注水による現場飽和状態及び有効間隙率の測定方法に関する研究	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 公益社団法人地盤工学会中国支部論文報告集, 地盤と建設	6. 最初と最後の頁 225 ~ 232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 小泉 圭吾, 堤 浩志, 小田 和広, 伊藤 真一, 小松 満	4. 巻 -
2. 論文標題 擬似飽和体積含水率に着目した現場計測データに基づく豪雨時ののり面監視手法に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 287-291
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 岡崎 滉大, 小泉 圭吾, 小松 満, 小田 和広, 堤 浩志	4. 巻 -
2. 論文標題 擬似飽和現象に着目した現地観測結果の一考察	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム論文集105	6. 最初と最後の頁 105-108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 小松 満, 西村 美紀, 小泉 圭吾, 喜多 浩志
2. 発表標題 現場サンプリング試料を用いた室内試験による擬似飽和体積含水率の推定手法
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小泉 圭吾, 小松 満, 小田 和広, 伊藤 真一, 櫻谷 慶治
2. 発表標題 擬似飽和体積含水率に着目した雨水浸透挙動の解釈
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 喜多 浩志, 小泉 圭吾, 小松 満, 小田 和広, 櫻谷 慶治
2. 発表標題 原位置における初期擬似飽和体積含水率の測定手法に関する研究
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小松 満, 西村 美紀, 小泉 圭吾
2. 発表標題 不飽和透水係数から擬似飽和体積含水率を推定する手法の検証
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1 . 発表者名 M. Nishimura, H. Kita, M. Komatsu, K. Koizumi, K. Oda and K. Sakuradani
2 . 発表標題 Methods to measure the initial Quasi-saturated volumetric water content of soil
3 . 学会等名 8th Int. Conf. on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Kuala Lumpur, (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 T. Yamamoto, Y. Minamiguchi, K. Koizumi, M. Komatsu, K. Oda and A. Thohari:
2 . 発表標題 Fundamental study of the effect of water level lowering in the groundwater drainage work utilizing siphon
3 . 学会等名 Conf. on Geotechnique, Construction Materials and Environment, Kuala Lumpur, Malaysia (国際学会)
4 . 発表年 2018年

1 . 発表者名 H.Kita, K.Koizumi, K.Oda, M. Komatsu
2 . 発表標題 Effects of Water Spray Intensity and Grain Size Distribution on Initial Quasi-Saturated Volumetric Water Content
3 . 学会等名 Third International Conference on Science, Engineering & Environment (SEE-USQ 2017), GEOMATE International Society, (国際学会)
4 . 発表年 2017年

1 . 発表者名 小松 満, 西村 美紀, 小泉 圭吾, 喜多 浩志
2 . 発表標題 現場サンプリング試料を用いた室内試験による疑似飽和体積含水率の推定手法
3 . 学会等名 第53地盤工学研究発表会
4 . 発表年 2018年

1. 発表者名 喜多 浩志, 小泉 圭吾, 小松 満, 小田 和広, 櫻谷 慶治
2. 発表標題 原位置における初期擬似飽和体積含水率の測定手法に関する研究
3. 学会等名 第53地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小松 満, 西村 美紀, 小泉 圭吾
2. 発表標題 不飽和透水係数から擬似飽和体積含水率を推定する手法の検証
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小泉 圭吾, 山本 健史, 小松 満, 小田 和広, 堤 浩志
2. 発表標題 体積含水率に着目した斜面モニタリング手法の現場適用性に関する一考察
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松 満, 小泉 圭吾
2. 発表標題 粘性土斜面における擬似飽和体積含水率の推定結果に基づく現場計測データの検証
3. 学会等名 土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小泉 圭吾, 塚部 聡太, 小松 満, 堤 浩志
2. 発表標題 体積含水率からすべり面深度を予測する手法の検討
3. 学会等名 土木学会全国大会第75回年次学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 岡崎 滉大, 小泉 圭吾, 岩本 遼生, 小松 満, 堤 浩志
2. 発表標題 表層崩壊に着目したセンサ設置位置に関する基礎的研究
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 塚部 聡太, 小泉 圭吾, 小松 満
2. 発表標題 体積含水率からすべり面深度を予測するための基礎的研究
3. 学会等名 第55回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 小松 満 (分担執筆, 監修: 暮らしと人を見守る水センシング技術研究調査委員会)	4. 発行年 2019年
2. 出版社 シーエムシー出	5. 総ページ数 222
3. 書名 暮らしと人を見守る水センシング技術 (第3章, 3.6 土中水のセンシング技術)	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	小泉 圭吾 (Koizumi Keigo) (10362667)	大阪大学・工学研究科・助教 (14401)	