

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

A Basic Study on Measuring Field Saturated and Effective Porosity Using an Injection to Borehole

小松満 Mitsuru KOMATSU (岡山大学大学院環境生命科学研究科)
 喜多浩志 Hiroshi KITA (大阪大学大学院工学研究科)
 小泉圭吾 Keigo KOIZUMI (大阪大学大学院工学研究科)

表層崩壊の予測に向けて、土中水分量を指標とした取り組みが進められている。しかし、危険度判定の指標となる、現場飽和状態や有効飽和度をあらかじめ測定する手法は提案されていない。そこで本研究では、原位置における迅速かつ簡便な測定方法の確立に向けた基礎的な研究を行った。具体的には、ボーリング孔底に土中水分計を挿入した後、定量ポンプで所定の時間降雨に相当する一定量の注水を行うとともに、マリOTTタンクにより孔内を一定水位に保ちながら注水し、途中で水とは異なる誘電率の溶液に切り替える手法である。なお、開発した試験装置の適用性と得られた結果の妥当性は小型円筒容器と模擬地盤により検証し、実用化に向けた課題を抽出した。

キーワード：体積含水率，現場飽和状態，有効間隙率，擬似飽和状態，原位置試験，
土中水分計 (IGC : D04)

1. はじめに

近年、豪雨時の土砂災害の発生予測を行う研究¹⁾において土中水分計を用いる手法が提案されている²⁾。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にはならないことが指摘されており³⁾、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、ほとんどの場合で飽和度 100%にならず、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有効間隙率として評価される。

不飽和地盤の水分保持特性を示す水分特性曲線は不飽和浸透において重要な材料物性の一つであり、その計測手法や関数モデルは広く使われているものも多い⁴⁾。降雨浸透や地下水面の上昇により、不飽和領域内のある地点における負の圧力水頭は低下し、飽和度は水分特性曲線の湿潤走査曲線から主浸潤曲線に従いながら上昇する。湿潤過程において飽和度がある程度まで上昇すると空気が次第に連続でなくなってくるため、多少の水圧の変化では空気が流れず飽和度が増加しなくなる。地下水面がさらに上昇し、この着目地点に到達すると水分特性曲線上ではある飽和度の値に落ち着く。この値は Field-saturated⁵⁾あるいは現場飽和状態⁶⁾と呼ばれ、この時点では空気の一部が空隙内部で不連続となり残留した状態となっている。さらに地下水面下で水圧が上昇していくにつれて、飽和度が上昇していく現象⁷⁾が見られるが、この現象は未解明な部分が多い。

また、最近では、封入空気存在下において、降雨による水分の流入量と流出量が一定となる状態を擬似飽和

状態として定義する試みがなされている⁸⁾。具体的には、散水による小型模型斜面崩壊実験から、崩壊までに擬似飽和状態から飽和帯の上昇により体積含水率が再上昇し、その後、変形及び崩壊へと至ったことが確認されている。つまり、崩壊の発生予測を土中水分計により行う際には、現地で長期観測する前に、現場飽和状態に加え擬似飽和状態を事前に把握しておく必要がある。

一方、土壌・地下水汚染問題において、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の確立が遅れているため、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。

筆者などはこれまで図-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⁹⁾。具体的には、まず、あらかじめ間隙率を 0.4 程度に設定した飽和砂地盤に水分センサーを挿入した際に測定される誘電率の値から図-2 の縦軸に示すように間隙率の値を把握し（横軸：供試体の設定した間隙率）、次にエタノール溶液を注入して誘電率の差から有効間隙率を算定した。結果の妥当性については、図-3 に示すようなトレーサー試験（塩水注入による流出水の濃度変化を測定し、破過曲線から有効間隙率を求める方法）の結果により、図-4 のように誤差 10% 程度の結果を得ている。しかし、これらは手法の確認のみで留まっていることから、本研究では、実際に原位置で実施可能な注入システムの開発を目的に基礎的な研究を行った。

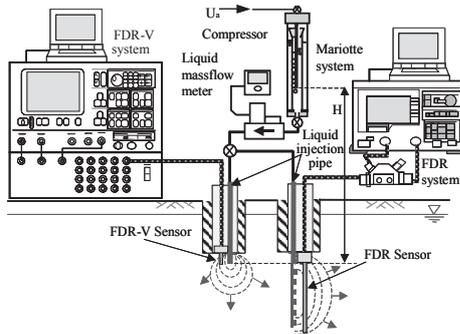


図-1 原位置トレーサー注入試験概略図⁹⁾

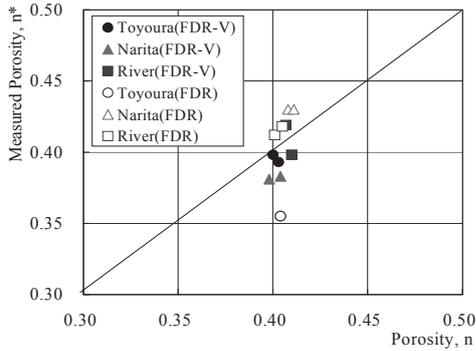


図-2 飽和砂供試体の間隙率の測定結果⁹⁾

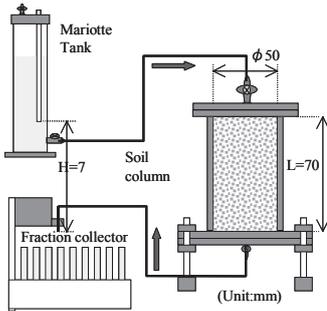


図-3 トレーサー試験装置⁹⁾

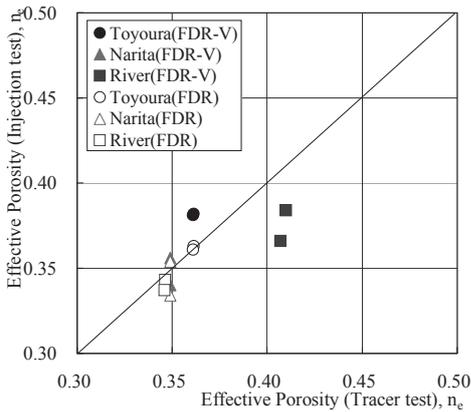


図-4 飽和砂供試体の有効間隙率の測定結果⁹⁾

2. 試験装置

2.1 測定原理

擬似飽和状態とは、雨水が地盤に浸透していく過程で水分の流入量と流出量が一定となる状態⁸⁾、つまり、降水量と地盤の不飽和透水係数に影響を受ける値であり、本手法では、水分センサー挿入後、直ちに任意の降

水量に相当する注水量を定量ポンプで与え、体積含水率が一定となった値で評価した。また、現場飽和状態⁶⁾とは、間隙部分の全てが水で満たされた完全飽和状態とは異なり、間隙内に残留空気が封入されている状態のことである。ここでは、ボーリング孔内をマリョットタンクで一定水位に保った状態で注水し、体積含水率が一定となった値で評価した。さらに、有効間隙率¹⁰⁾とは、水や汚染物質が流れる際、実際に流れる自由水のみを考慮した値であり、間隙率よりも小さくなる。ここでは、水とは誘電率の異なるエタノール溶液を注入することで、次式により有効間隙率を求めた¹¹⁾。

$$n_e = \frac{\epsilon_{ew} - \epsilon_{ee}}{\epsilon_w - \epsilon_{eth}} \quad (1)$$

ここで、水の誘電率 (ϵ_w) 及びエタノール溶液の誘電率 (ϵ_{eth})、注水時において誘電率センサーの値が上昇した際に得られるピーク値 (ϵ_{ew})、注水時から瞬時にエタノール溶液の注入に切り替えた後の誘電率センサーの値が低下した際に得られる平衡値 (ϵ_{ee}) である。なお、この値は地下水位変動に伴って不圧帯水層から排出される水量、または、浸透貯留により流入する水量である比産出率に等しいとされている。このことから、移動する水量と残留する空気の量に何らかの関係があれば、有効間隙率から現場飽和状態を評価することも可能となる。

2.2 プロトタイプ装置の製作

製作した注入試験装置を図-5に示す。内径φ50mmでのサンプリング後の孔内に設置可能なように外径をφ48mmとし、孔内を一定水位に保った上で注入流量を測定するマリョットタイプのタンクとなっている。ボーリング孔内に設置後、タンク内に注入あるいは排出することが出来るようにタンク上部に注入管と排気バルブを設置したことで、水注入後、速やかにエタノール等に置換した上で再注入を可能とした。ここでは、注入開始とともに孔内水位が調整できるように、空気注入管と流入出を制御するゴム栓を一体構造とした。孔内水位は、孔底から4cmの高さを空気注入管の引き上げ高さに加算することで設定した。また、タンク下部には市販の土壌水分計を取り付けた部品が接続されており、注入試験後は分離してそのまま長期観測に用いることが可能となる構造とした。水分センサーには電極長約5.5cm、厚さ約1.6mmの市販の静電容量センサーを用いた。測定範囲は、電極の厚さ方向に約1cm、面方向に約2cmである。

2.3 試料及び物理特性

試料には、岡山県産のまさ土を用い、事前に以下の物性試験を行った¹²⁾。

JIS A 1202 及び JIS A 1204 に準じて測定した各試料の土粒子密度と均等係数及び曲率係数を表-1に、粒径加積曲線を図-6にそれぞれ示す。次に、JIS A 1210 に準じて測定した突き固めによる土の締固め試験による締固め曲線を図-7に示す。

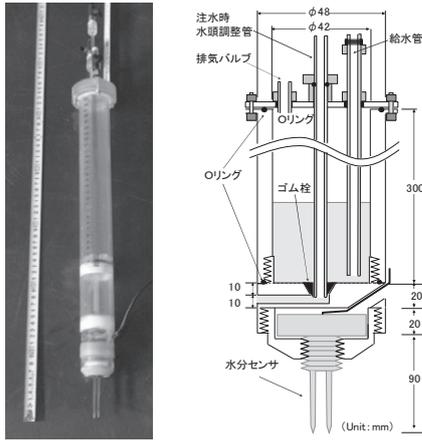


図-5 プロトタイプ注入試験装置

表-1 土粒子密度, 均等係数, 曲率係数, 透水係数

土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.630
均等係数 U_c	89.6
曲率係数 U_c'	4.9
透水係数 k_{T15} (cm/s)	9.67×10^{-4}

これらの結果から, 最適含水比 $w_{opt}=12.5\%$, 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.88\text{g/cm}^3$ が得られた. また, JIS A 1218 の変水位法に準じて室内透水試験を実施した. 供試体は含水比 12.0%, 乾燥密度 1.611g/cm^3 で突き固めて製作し, 下部より脱気水を通水して飽和度を高めた後に試験を実施した. 測定結果を表-1 に併せて示す.

2.4 保水性試験による静電容量センサーの校正

図-8 に示すような保水性試験装置により試料の水分特性曲線を求めるとともに, 静電容量センサーの校正を行った. 直径 10cm, 高さ 6cm のアクリル製カラムの底に飽和させた PTFE フィルターを取り付けるとともに, カラムの中心に静電容量センサーを設置した. なお, 事前に PTFE フィルターが試験に必要な空気浸入値を有することを確認した. 供試体は, 先の透水試験と同条件で突き固めて製作し, 下部から注水後, 水浸脱気により飽和度を高めた. 試験方法は, 最初に排水タンクを供試体中央高さになるように配置した後, 高さを段階的に増加させて供試体内に負圧を発生させる方式で行い, 排水量の経時変化を測定するとともに, 排水量に有意な差が見られなくなった時点での計測値を記録した.

図-9(a) に各高さでの排水量から求めた水分特性曲線, 図-9(b) に水分センサーの校正結果を示す. 図-9(b)には参考までにセンサーのメーカーが示している校正曲線(Mineral)を破線で併記した. 校正結果は実線のようになり, 水分量の高い領域で若干のばらつきが見られるものの, 3次式を適用することで, 概ね全水分量に対して一致している. なお, 図-9(a)における高さ 100cm で得られた体積含水率よりも低い測定値については, 別途, 含水比を調整した試料を同サイズの容器に締め固めて作製した供試体を測定することにより得た.

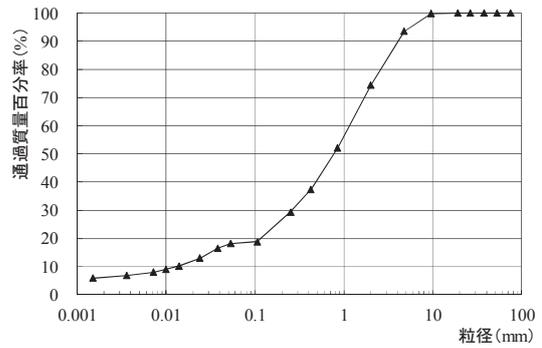


図-6 粒径加積曲線

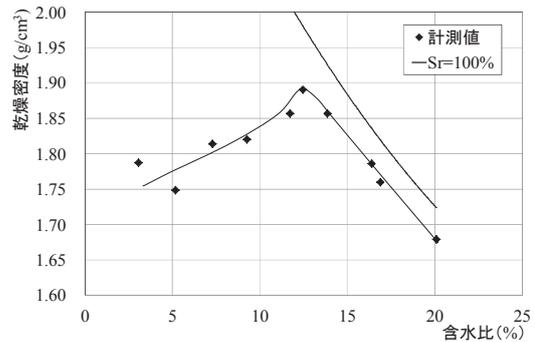


図-7 締め固め曲線

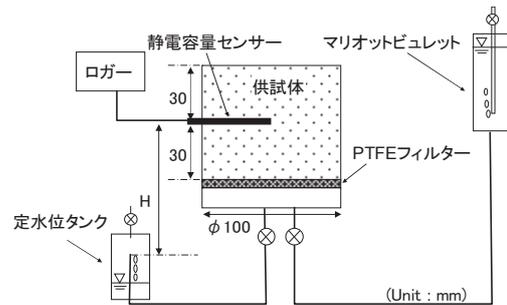
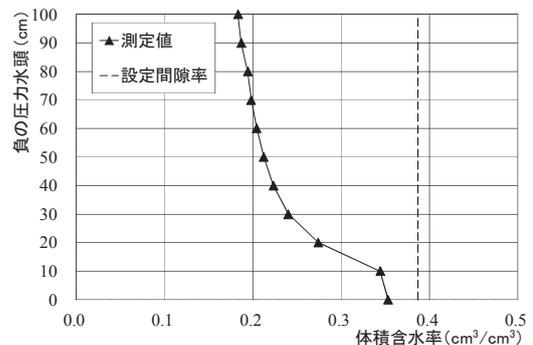
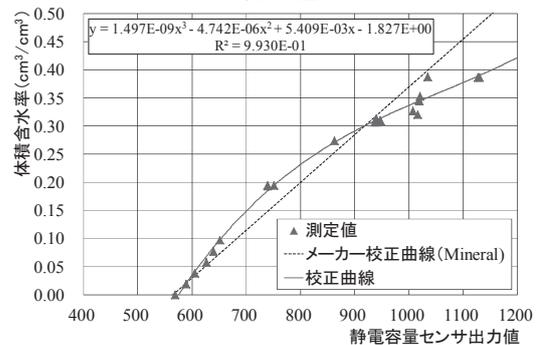


図-8 保水性試験(吸引法)装置概略図



(a) 水分特性曲線



(b) 校正曲線

図-9 保水性試験結果及び水分センサー校正結果

3. 注水試験方法の適用性検討

自然地盤における水分状態は時々刻々と変化するため、注入後の空気の残存率が初期条件の影響を受ける可能性が考えられる。また、孔内水位など注水試験条件により、現場飽和状態の値に変化が生じることも考えられることから、小型の円筒容器に条件の異なる供試体を作製し、種々の影響について検討した。

3.1 検討方法

小型円筒容器を用いた注入試験状況の概略図を図-10に示す。内径φ184mm、高さ250mmの亚克力製容器にあらかじめ水分調整したまき土を1層3cmで所定の乾燥密度になるように突き固めによって製作した。

製作した地盤表面の乱れを防止するプレートを取り付け、コアサンプラーを打設して密度測定容器（体積100cc）内の試料の乾燥密度と含水比から間隙率を求めた。その後、内径φ48mmのケーシングを打設した上で、孔内に堆積した切削試料を除去し、注入試験装置を設置した。注入試験装置を設置後、ゴム栓が閉まっていることを確認した上でマリョットタンク内に水を充填し、空気注入管を所定の孔内水位となるように引き上げると同時にタンク内の水位変化と水分計による測定を開始した。なお、試験終了は、注入流量の時間変化が一定となる定常状態を確認した上で、容器の底あるいは周囲の境界に浸透範囲が及ぶことによる流量変化が現れる時点とした。また、流量の経時変化から定常流量を読み取ることで、現場飽和透水係数をプレッシャーインフィルトローメータ法⁹⁾による算出式（式(2)）から求めた。

$$k = \frac{\alpha^* G Q_s}{a \alpha^* H + a + G \alpha^* \pi a^2}, G = 0.316 \frac{d}{a} + 0.184 \quad (2)$$

ここで、 Q_s : 定常流量 (m³/s), d : 鋼製リングの深さ(m), a : 試験孔の半径(m), H : 注水水頭(m), G : 形状関数, α^* : 土の不飽和透水係数を負水頭の指数関数で表した場合のべき指数(m⁻¹) (一般的な土の場合: 12) である。

3.2 検討内容

初期条件は表-2に示すように基本ケースを孔内水位: 6cm, 注入水: 水道水, ケーシング貫入深度: 1cm, 初期飽和度 50% (含水比 12%), 乾燥密度: 1.611g/cm³ (締固め度 $D_c=85\%$) に設定し、全 36 ケースを実施することで、表-3に示す 5 項目による影響を検証した。

- ①孔内水位(h): 1cm, 6cm, 11cm, 16cm
- ②注入水及び二酸化炭素充填: 水道水, 脱気水, 二酸化炭素充填+脱気水
- ③ケーシング貫入深度(d): 0cm (先端が孔底の位置), 1cm (ケーシングの刃先部分の挿入), 6cm (水分計の先端), 8cm (水分計の測定影響範囲)
- ④初期飽和度(S_0): 40% (含水比10%), 50%, 60% (含

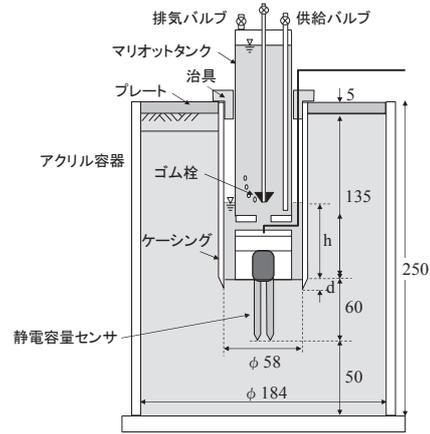


図-10 小型円筒容器及び試験装置設置状況概略図

表-2 基本検討ケース

現場飽和状態測定	孔内水位 h (cm)	6
	注入水	水道水
試験孔	ケーシング貫入深度 d (cm)	1
地盤条件	初期飽和度 S_0 (%)	50
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.611

表-3 検討項目

孔内水位 h (cm)	1, 6, 11, 16
注入水	水道水, 脱気水, 二酸化炭素充填+脱気水
ケーシング貫入深度 d (cm)	0, 1, 4, 6, 8
初期飽和度 S_0 (%)	40, 50, 60
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.516, 1.611, 1.706

水比 14%)

- ⑤乾燥密度 (ρ_d): 1.516g/cm³ ($D_c=80\%$), 1.611g/cm³ ($D_c=85\%$), 1.706g/cm³ ($D_c=90\%$)

3.3 検討結果

上記の検討項目についての結果を以下にまとめる。

- (1) 上記①の孔内水位(h)を変化させたケースの比較から、現場飽和状態の飽和度は孔内水位の上昇に伴い、90%程度から徐々に増加する傾向を示した(図-11)。また、注入水(水道水, 脱気水)と二酸化炭素の充填により飽和度は上昇し(図-12)、併せて透水係数も増加する傾向を示した(図-13)。
- (2) ケーシング先端の孔底からの貫入深度には明確な差異は認められなかった(図-14)。
- (3) 地盤条件について、初期飽和度を3段階に変化させた場合、ピーク時の飽和度に変化は認められなかった(図-15)。乾燥密度を3段階に変化させた場合、乾燥密度の上昇に伴って徐々に飽和度は増加する状況を示した(図-16)。

以上の結果より、ケーシングの深さを変化させた場合でも測定した最大値が変化しなかったことから、任意の貫入深度で実験可能であることが確認された。また、現場飽和状態の値の再現性を踏まえ、孔内水位は出来るだけ低くすることが必要であることが確認できた。

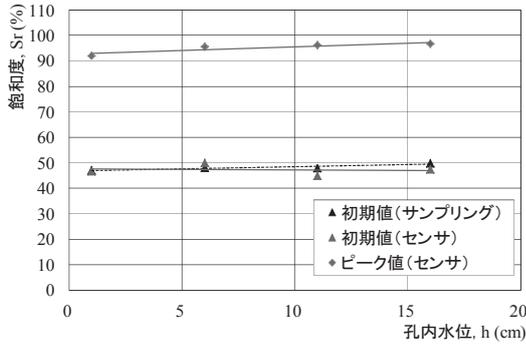


図-11 孔内水位と飽和度の関係

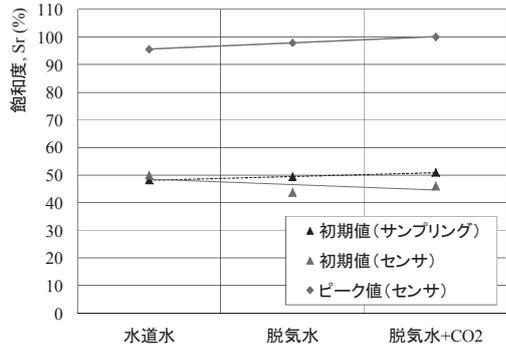


図-12 注入水と飽和度の関係

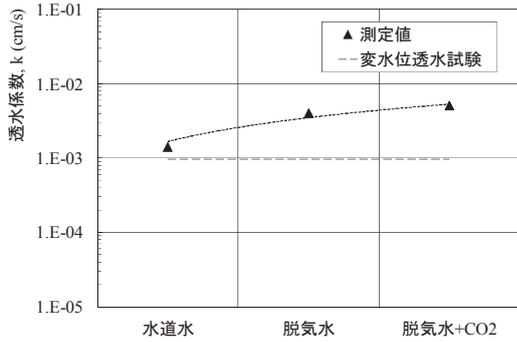


図-13 注入水と透水係数の関係

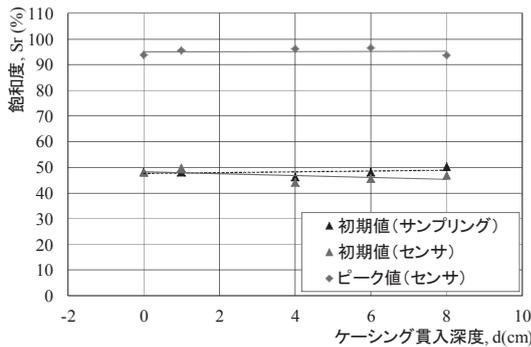


図-14 ケーシング貫入深度と飽和度の関係

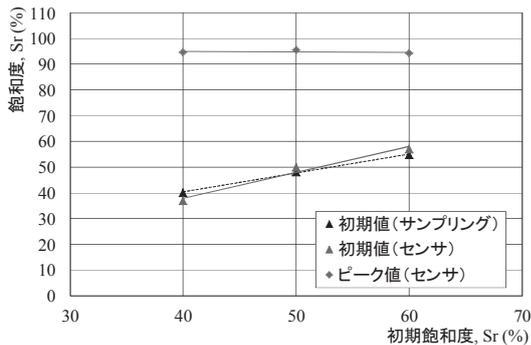


図-15 初期飽和度と飽和度の関係

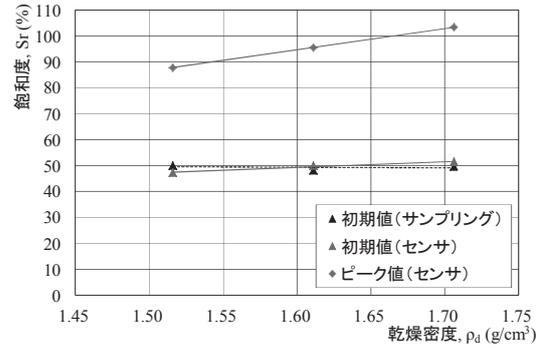


図-16 乾燥密度と飽和度の関係

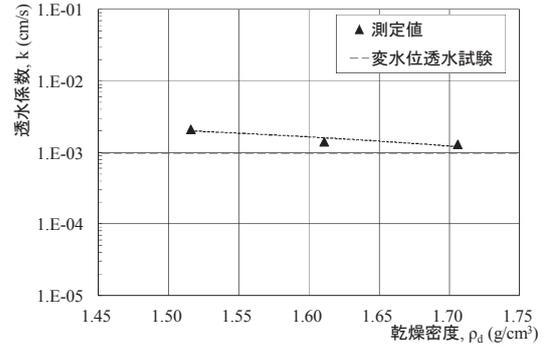


図-17 乾燥密度と透水係数の関係

3.4 考察

今回製作したプロトタイプ装置では、実現可能な最小の孔内水位が 6cm (1cm での実施は水分計と注水部分が分離した別の物を使用した) であるため、今後の課題として、6cm 以下の孔内水位が設定できるような装置の改良が挙げられる。また、注入水は、水道水を用いることで完全飽和状態に至らないことを確認した。さらに、地盤条件について、初期飽和度の違いでピーク値における違いは見られなかった。つまり、任意の初期飽和度条件で測定を行うことが出来ると考えられる。

乾燥密度に対する検討では、乾燥密度が高い場合にピーク値での飽和度が高くなる傾向が見られた。体積含水率は密度と影響していないが、よく締まっていることで、少しずつ浸透が進み、封入空気を残すことなく浸透していったことが考えられる。図-17 に示すような透水係数の違いからも同様のことが示唆される。つまり、乾燥密度が高いと、現場飽和状態が高くなることが考えられる。

なお、透水係数の算定において、注水に伴う浸透の影響範囲内に側面や底面が入ってしまい、十分な定常流量が得られていない可能性がある。地盤の透水係数に応じた影響範囲の検討は、数値解析により行うことが出来るが、現時点では実施していないために、図-17 はこれらの影響を含んでいる結果であることを追記しておく。

4. 模擬地盤での注水試験の実施

4.1 実施方法

模擬地盤は写真-1 に示す W70×D70×H60cm の PVC 製



写真-1 土槽に製作した模擬地盤

の土槽に、小型円筒容器による検討時と同様の条件（初期飽和度 50%，乾燥密度 1.611g/cm^3 ）で、高さ 5cm 毎の突き固めによる締固めにより製作した。ここでは、表-2 に示した基本ケースで以下の試験を実施した。

- (1) 試験装置から 5 分間の注水及び 10 分間の注水停止を 3 回繰り返して実施：現場飽和状態の再現性に対する測定（Case1）。
- (2) 定量ポンプにより 52.4mm/h の降雨に相当する注水の後、試験装置から一定注水を実施：擬似飽和状態と現場飽和状態の測定（Case2）。
- (3) 試験装置から注水後、装置の水が無くなる直前にエタノール溶液に切り替えて注入：現場飽和状態から有効間隙率の測定（Case3）。
- (4) あらかじめ試験孔底から二酸化炭素を充填しておく、試験装置から脱気水を注水後、装置の水が無くなる直前にエタノール溶液に切り替えて注入：飽和状態から有効間隙率の測定（Case4）。

4.2 測定結果

(1) Case1：現場飽和状態の再現性に対する測定

図-18 に体積含水率の経時変化、図-19 に飽和度と注水回数の関係を示す。結果として、1 回目に比べて 2 回目の飽和度は低下し、2 回目と 3 回目はほぼ同様の結果を示した。なお、模擬地盤の製作条件は飽和度 50% であるが、1 回目のセンサーの初期値は 40.6% となった。これは土槽製作後の重力排水により、試験開始時に模擬地盤上部の飽和度が低下していることを示している。

(2) Case2：擬似飽和状態と現場飽和状態の測定

図-20 に体積含水率の経時変化を示す。定量ポンプにより 52.4mm/h の降雨に相当する注水でのピーク値から $\theta_{qs}=0.247$ 、試験装置からの一定注水のピーク値から $\theta_{fs}=0.358$ を得た。なお、いずれもセンサーの校正値を用いて温度補正を行った。次に、図-21 に飽和度と注水条件の関係を示す。結果として、現場飽和状態の値は Case1 での 2 回目とほぼ同等の飽和度を示した。

(3) Case3：現場飽和状態から有効間隙率の測定

図-22 に体積含水率の経時変化を示す。10 分間の注水後、装置の注水栓を閉めて内部に残った水を抜き取り、直ちにエタノール溶液を満たして試験開始より 12 分後にエタノールの注入を開始した。なお、装置の注水栓閉

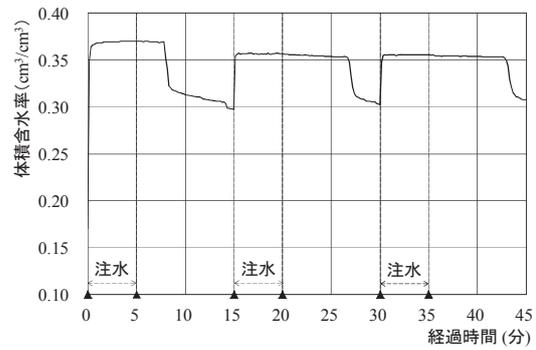


図-18 体積含水率の経時変化（Case1）

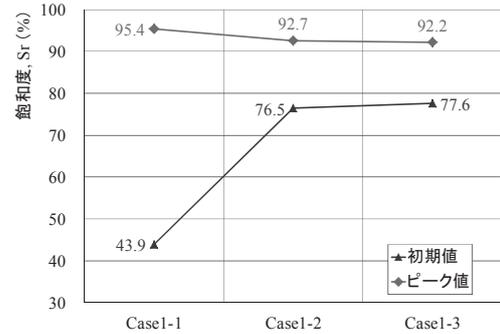


図-19 飽和度と注水回数の関係（Case1）

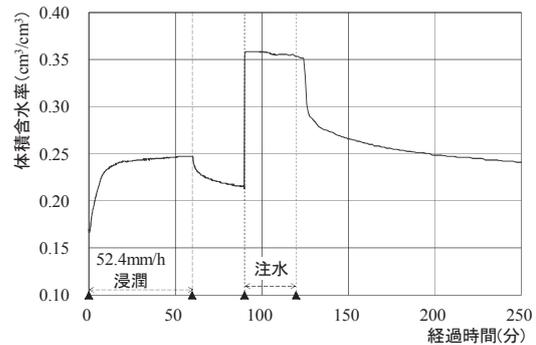


図-20 体積含水率の経時変化（Case2）

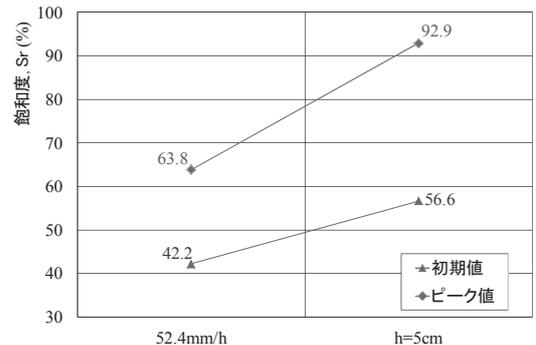


図-21 飽和度と注水条件の関係（Case2）

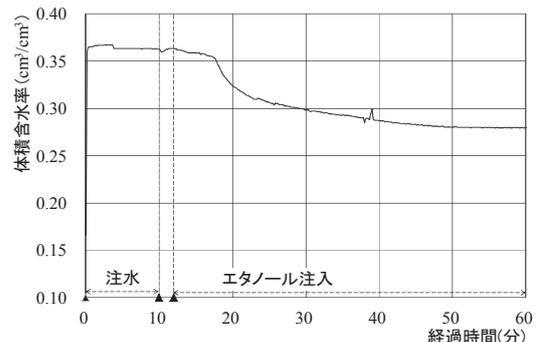


図-22 体積含水率の経時変化（Case3）

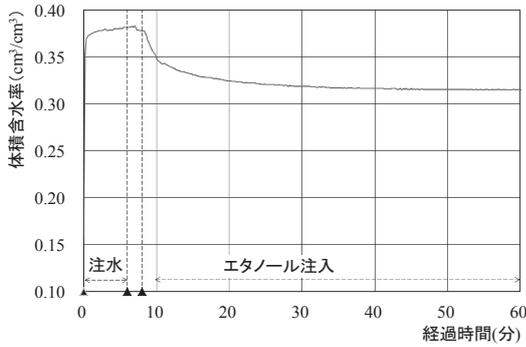


図-23 体積含水率の経時変化 (Case4)

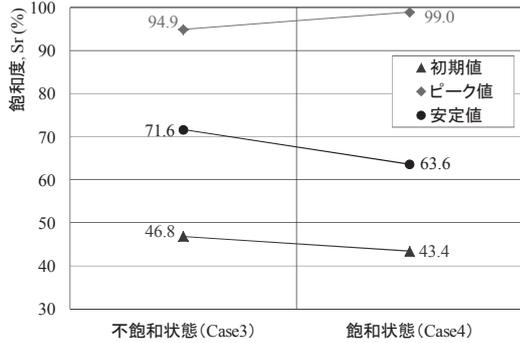


図-24 飽和度と試験条件の関係 (Case3, Case4)

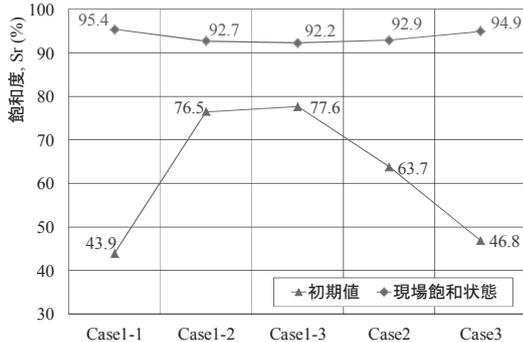


図-25 初期飽和度と現場飽和状態の関係

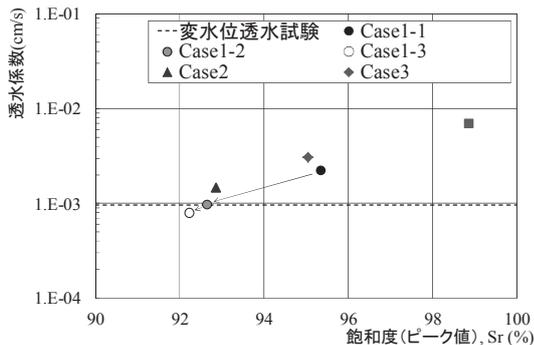


図-26 飽和度と透水係数の関係

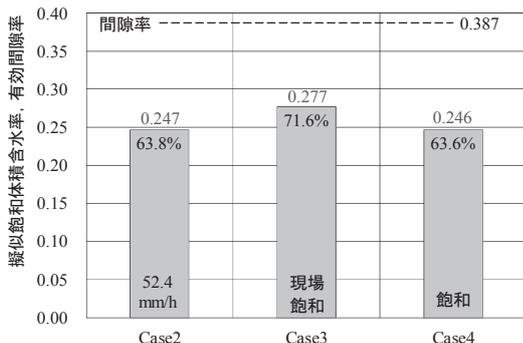


図-27 擬似飽和体積含水率と有効間隙率の値

塞の間は、定量ポンプで注水時の定常流量と等しい流量を与えることで水分量の低下を防いだ。結果として、エタノール注入後は徐々に値が低下する傾向を示した。

(4) Case4：飽和状態から有効間隙率の測定

図-23 に体積含水率の経時変化を示す。あらかじめ試験孔底から二酸化炭素を充填しておき、試験装置から脱気水を 6 分間注水後、装置の注水栓を閉めて内部に残った水を抜き取り、直ちにエタノール溶液を満たして試験開始より 8 分後にエタノールの注入を開始した。なお、装置の注水栓を閉めている間の操作は Case3 と同様である。結果として、エタノール注入後は Case3 と同様に徐々に値が低下する傾向を示した。

Case3 及び Case4 においてセンサーの初期値、ピーク値、エタノール溶液注入後の安定値をそれぞれ飽和度に換算した結果を図-24 に示す。注水による Case3 での現場飽和状態における飽和度は 94.9%、Case4 での飽和状態における飽和度は 99.0%を示した。また、エタノール注入後は、Case3 で 71.6%、Case4 で 63.6%となった。

4.3 考察

以下に各ケースの結果に対して考察を加える。

(1) 現場飽和状態の測定の再現性について

注水を 3 回繰り返し行った場合 (Case1) について、図-19 から 1 回目 (Case1-1) のみが高い値を示し、2 回目 (Case1-2) 及び 3 回目 (Case1-3) はほぼ同等の値となった。小型円筒容器による検証では、初期飽和度による違いは見られなかったことから、測定を繰り返した場合には別の要因が影響している可能性がある。一方、Case2 の図-21、Case3 の図-24 を基に初期飽和度の値とともに図-25 に整理する。Case3 の値は Case1-1、Case2 の値は Case1-2、Case1-3 と同等の値を示した。Case1-1 と Case3 は地盤モデル構築後の最初の注水であり、Case2 及び Case1-1、Case1-3 は 2 回目以降の注水である点が異なる。ここで、注水時の定常流量から透水係数を算定した結果を飽和度との関係として図-26 に示す。Case1-1 から Case1-2、Case1-3 では徐々に透水係数が低下する結果となった。これらの結果を踏まえ、現場飽和状態が示す飽和度が異なる要因として、水浸に伴うコーパスが推察される。つまり、注水に伴う間隙率の変化により、見掛けの飽和度が変化したものと考えられる。

(2) 擬似飽和体積含水率と有効飽和度について

図-27 に Case2~Case4 で得られた擬似飽和状態での体積含水率と有効飽和度を整理する。飽和状態におけるエタノール溶液注入について、砂試料における有効間隙率は間隙率に対して 85~93%との報告¹¹⁾があるが、今回のまさ土の結果は約 64%となり、砂試料よりは小さな結果となった。つまり、これらの違いは当然、土粒子径や密度、間隙の形状や大きさ、間隙の連続性等に依存していると言える。今回、この値の妥当性をトレーサー試験等により確認することは出来なかったため、今後は間隙率を変化させた場合の結果と併せて検証する必要

がある。一方、Case2 で実施した 52.4mm/h の降雨に相当する注水での結果は間隙率に対して約 64%となり、Case4 での有効間隙率の値とほぼ同等の値となった。また、現場飽和状態からの有効間隙率の結果は間隙率に対して約 72%となり、Case2 及び Case4 よりも高い値を示した。これは、現場飽和状態では残存空気が存在しているものの、エタノールで置換された自由水が多いことを示している。本来であれば、残存空気のみで飽和状態から測定した有効間隙率から低下するものと考えられるが、このメカニズムについては明らかには出来ていない。今後は、測定結果の蓄積により、これら擬似飽和状態での体積含水率と現場飽和状態から測定の有効間隙率、飽和状態から測定の有効間隙率の値についての関係性を明らかにする必要があることが課題として残った。

5. まとめ

本研究では、現場飽和状態や有効飽和度を原位置において迅速かつ簡便に測定する方法の確立を目的に試験装置を開発し、その適用性を小型円筒容器で検討した。さらに、現場を想定した注水試験を模擬地盤で実施した。以下に本研究で得られた知見についてまとめる。

- (1) マリオットタイプの注水装置と水分センサーが一体となった装置を試作した。
- (2) 小型円筒容器による検討により、孔内水位は出来るだけ低くする必要のあることが判明し、ケーシングの貫入深度については注入後の飽和度と透水係数ともに明確な違いは確認できなかった。また、二酸化炭素を充填した後に脱気水を注入することにより、ほぼ飽和状態になることが確認できた。
- (3) 初期飽和度の違いによる現場飽和状態での飽和度の差異は認められなかったことから、任意の初期水分量の条件で試験の実施が可能である。ただし、乾燥密度の違いから、間隙率が小さな地盤の方が間隙空気を容易に追い出すことから、現場飽和状態での飽和度が高い値を示すことが判明した。
- (4) 模擬地盤において現場飽和状態の測定の再現性を確認した結果、地盤モデル構築後の最初の注水により水浸コラプスが生じている可能性が示唆された。また、擬似飽和状態での体積含水率と有効飽和度を整理した結果から、現場飽和状態から測定した有効間隙率が最も高い結果を示した。

今後の課題としては、測定結果の蓄積により、擬似飽和状態での体積含水率と現場飽和状態から測定の有効間隙率、飽和状態から測定の有効間隙率の値についての関係性を明らかにするとともに、トレーサー試験等により、これらの値の妥当性を検証する必要がある。また、新たにサクションを測定する注入試験装置の改良と自然斜面現場でのデータの蓄積が必要である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費助成事業(基盤研究(C)、研究期間:平成29年度~31年度、研究代表者:小松満)の助成を受けて実施した。ここに記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 佐藤渉:斜面災害予測技術,地盤工学会誌,Vol.61, No.9, pp.10-13, 2013.
- 2) 西垣誠,小松満,龍満弘誠:豪雨時における斜面崩壊予測に関する基礎的研究,土と基礎,Vol.55, No.6, pp.24-26, 2007.
- 3) 小泉圭吾,櫻谷慶治,小田和広,伊藤真一,福田芳雄, Maria Q. FENG, 竹本将:降雨時の表層崩壊に対する高速道路通行規制基準の高度化に向けた基礎的研究,土木学会論文集C(地圏工学),Vol.73, No.1, pp.93-105, 2017.
- 4) 地盤工学会:不飽和地盤の挙動と調査, pp.27-45, 2004.
- 5) Reynolds, W. D., Elrick, D. E. and Topp, G. C. A Reexamination of the constant head well permeameter method and measuring saturated hydraulic conductivity above the water table. *Soil Science*, Vol. 136, No.4, pp 250 – 268, 1983.
- 6) 森井俊広,井上光弘,竹下祐二:プレッシャーインフィルトロメータ法を用いた土の原位置透水試験法,農業土木学会論文集, No.204, pp.149-158, 1999.
- 7) 榊利博,小松満:地下水水面下の不飽和領域における空気残留特性:冠水履歴を持つ砂質土の二次排水過程,地下水学会誌, Vol.56, No.1, pp.27-34, 2014.
- 8) 村上一馬,小泉圭吾,小田和広,松本修司,小西貴士,上出定幸:水分浸透挙動に着目した表層崩壊の発生メカニズムの検討,第49回地盤工学研究発表会(北九州), D-04-882, pp.1763-1764, 2014.
- 9) 西垣誠,小松満,金萬鎰:誘電率計測法を用いた地盤の有効間隙率の測定方法に関する基礎的研究,第38回地盤工学研究発表会, D-04-586, pp.1171-1172, 2003.
- 10) 地盤工学会:地盤工学用語辞典, p.128, 2006.
- 11) 金萬鎰:A Study on the determination of effective porosity of porous media using Frequency Domain Reflectometry system (FDR 法を用いた多孔質媒体中の有効間隙率の測定方法に関する研究), 135p., 岡山大学博士論文, 2004.
- 12) 地盤工学会:土質試験—基本と手引き—, pp.17-102, 2009.

(2017年6月19日 受付)