

注水圧力制御による原位置不飽和透水試験法

(株)奥村組 正会員 ○森田修二
 (株)奥村組 正会員 今泉和俊
 (株)奥村組 正会員 三澤孝史

1. まえがき

原位置での地盤の透水試験では、ボーリング孔を用いた揚水試験などが行われており、その試験方法はすでに確立されている。一方、原位置における不飽和領域の試験方法は幾つか提案されているが、いまだ確立されてはいない。これは、地下水位以下の飽和領域に比べて不飽和領域の流れがあまり注視されないことや測定が難しいことが原因と考えられる。しかし、東日本大震災では、自然由来の重金属類を含んだ津波堆積物による土壌汚染が報告¹⁾されており、今後、降雨などにより重金属物質が地下水汚染を引き起こす可能性もある。したがって、地表面付近の不飽和領域の地下水の流れを知ることが重要となる。今回、原位置における不飽和透水試験機を開発し、奥村組技術研究所の敷地内で試験機と試験方法のテストを行い、実証試験を震災ガレキ処理（破碎・選別等）現場で実施した。原位置において良好な試験結果が得られたので報告する。

2. 不飽和透水試験器と測定手順

原位置の不飽和透水試験では、例えば、地盤に注水しながら地中のサクションや体積含水率を測定して不飽和特性を確認する方法がとられる。竹下ら²⁾の提案するものは土の体積含水率のみを測定する簡易な方法であり、不飽和特性を表す VanGenuchten モデル（VG モデル）のパラメータの算定を目的としている。本研究では、竹下らの方法に改良を加え現地の透水性に応じて測定時間を短縮する測定装置を開発した。図-1 に装置の概要を示し、試験方法の手順を以下に示す。

- i) 地中に測定孔を削孔（径 $\phi=40\text{mm}$ 、深さ $L=1\text{m}$ ）
 - ii) 削孔深度の一定間隔（10cm など）に水ポテンシャルセンサーでサクションを測定（図-2 参照）
 - iii) 土壌水分計を測定孔に設置（センサーと孔壁間は削孔土で充填してよく締固める）
 - iv) 地表面に密閉蓋型給水装置を設置
 - v) 密閉蓋型給水装置に定量電動ポンプで給水し、バルブ調整と小型圧力計で圧力を一定に管理
 - vi) 測定中に段階的に圧力を増加
 - vii) 土壌水分計により深度ごとの含水率の変化を測定
 - viii) 数値解析により VG モデルの不飽和特性を同定
- なお、土壌水分計には Delta-T 社製のプロファイルプローブ PR2/6 を用いた。地表面から 10cm, 20cm, 30cm, 40cm, 60cm, 100cm の深度の土の体積含水率が測定できる。地中のサクション測定には水ポテンシャルセンサー（DECAGON 社 MPS-2 測定範囲 $-10\sim-500\text{kPa}$ ）を使用した。また、測定中は定量ポンプ（イワキ電磁定量ポンプ EHN-C36, 最大吐出圧 0.2MPa ）で定流量の真水を給水し、配管して給水タンクに循環させた。密閉蓋に取り付けた配管のバルブ調整で蓋内の圧力を一定に管理した。

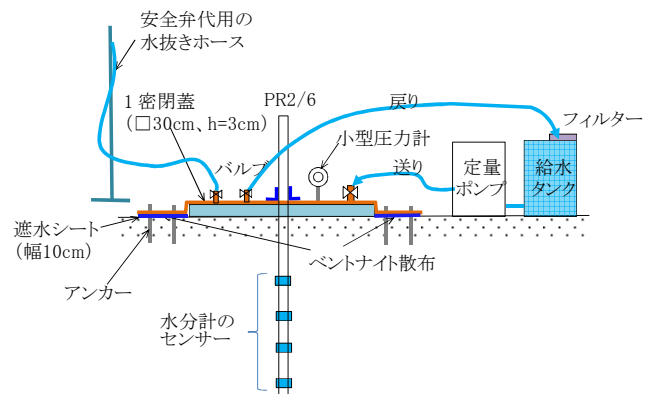


図-1 原位置不飽和透水試験装置の概要

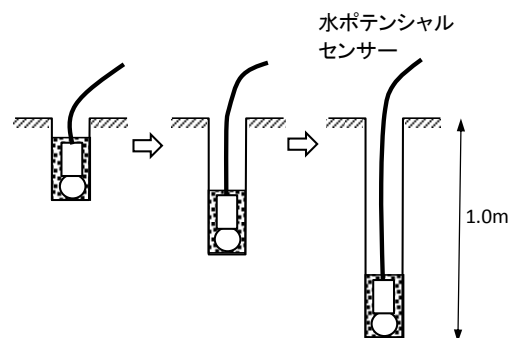


図-2 地中の深度ごとの初期サクション測定

キーワード：原位置、不飽和透水試験、注水圧力制御、VanGenuchten モデル

連絡先：〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2 (株)奥村組 森田修二 (TEL) 06-6625-3980 (FAX) 06-6621-9315

3. 不飽和透水パラメータの同定

本研究では、不飽和透水特性の評価に VG モデルを用いる。体積含水率とサクションや比透水係数の関係が式(1)と式(2)により表わされる。ここで、 α と m (又は n) に加えて飽和透水係数 k_0 を決定することで不飽和領域の透水性が評価できる。

飽和度: $S_e = \left\{1 + (\alpha\phi)^n\right\}^m \quad (m=1-1/n) \quad (1)$

比透水係数: $k_r = S_e^{1/2} \left\{1 - \left(1 - S_e^{1/m}\right)^n\right\}^2 \quad (2)$

図-3 にはパラメータの同定のフローを示した。先の試験手順に示したように、初期状態の地中のサクションを測定することで、体積含水率とサクションの関係 ($\theta-\phi$ の曲線) が求められるので、式(1)から α と m (または n) について一定の評価ができる。次に、数値解析モデルを用いて注水による体積含水率の時間変化をシミュレーションすることで飽和透水係数 k_0 と α と m (または n) が確定できる。また、注水圧を段階的に増加させることで一定圧の測定を複数回行うのと同様の試験が行えるのでシミュレーション解析の精度向上につながる。

4. 注水圧力制御による不飽和透水試験

奥村組技術研究所の敷地内で原位置不飽和透水試験の確認実験を実施した。実験を行った敷地内の表層の土質は粘性質の埋土である。写真-1 には測定した状況を示す。

図-4 には注水浸透による体積含水率の測定値とシミュレーション結果を示した。注水圧は 10.0 kPa の一定値で測定を行った。計測値は○と+印、解析値は実線と破線で示した。GL-30cm では5分後から含水率が上昇し、20分後にはほぼ飽和状態に達していると考えられる。GL-50cm では、10分後から徐々に含水率が上昇を始め、40分後にはほぼ飽和状態に達している。なお、土壤水分計はセンサー近傍の粒度分布によって飽和含水率に差が生じるものと考えられる。

表-1 にはシミュレーション結果から求められた VG パラメータ等を示す。シミュレーションによる含水率の上昇は、計測値に比べて GL-30cm ではやや早く、GL-50cm ではやや遅れているが、透水係数で見れば一定の範囲 ($4.2\sim8.5\times10^{-4}$ cm/s) に収まるので、ばらつきとしては小さいと言える。

5. あとがき

本報告では、原位置不飽和透水試験機と試験方法を開発し、基礎実験と現地での実証試験を行った。加圧型の試験機では難透水性の地盤でも測定が可能になり、計測精度の向上にもつながる。また、初期サクションの測定の併用により VG モデルのパラメータの同定が容易となる等、試験機と試験方法の適用性が確認できた。

[参考文献]

1) 駒井 武, 川辺能成, 原 淳子, 坂本靖英, 張 銘, 「東日本沿岸における津波堆積物の性状に関する緊急調査」, GSJ 地質ニュース, Vol.1, No.6, pp.181-184, 2012.6
2) 竹下祐二, 杉井俊夫, 「不飽和地盤における原位置透水試験」, 土と基礎, 54-5, pp.10-12, 2006.5

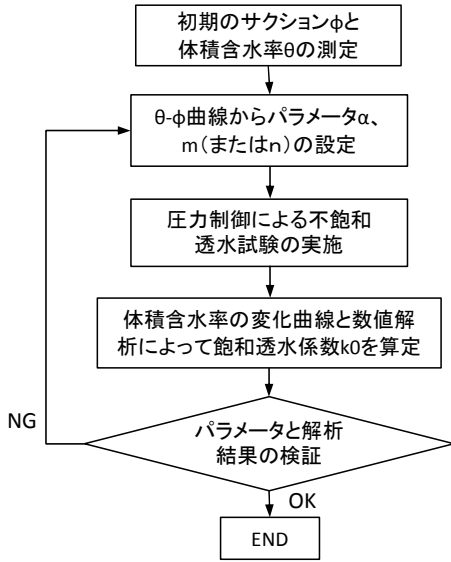


図-3 不飽和特性パラメータの同定フロー

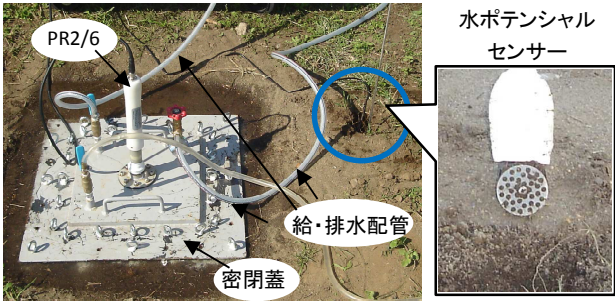


写真-1 原位置不飽和透水試験の状況

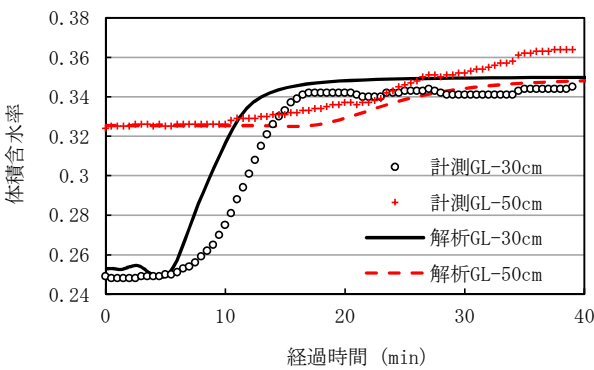


図-4 体積含水率の測定結果とシミュレーション

表-1 透水係数と不飽和透水パラメータ

透水係数 $k(\text{cm/s})$	残留体積 含水率 θ_r	飽和体積 含水率 θ_s	m	n	α
5.6×10^{-4}	0.20	0.35	0.93	15	0.75