

比抵抗値による体積含水率の測定に関する考察

岡山大学工学部 正会員 ○竹下祐二
 岡山大学大学院 学生員 小野忠正
 岡山大学工学部 正会員 河野伊一郎

1. はじめに

従来より地下水探査法として用いられてきた電気探査法は比抵抗インバージョンによるトモグラフィ手法により、地下水挙動のモニタリング手法の一つとして近年注目を集めている。浸透問題の分野では、青山ら¹⁾が不飽和浸透流挙動の把握を試みており、比抵抗変化率（飽和状態での比抵抗値に対する不飽和状態での比抵抗値の比）と体積含水率の関係が水分特性曲線（圧力水頭と体積含水率の関係）に類似していることから、不飽和浸透パラメータの計測方法としての検討を行っている。

電気探査法では地盤の状態を比抵抗値によって評価するために、定量的な評価手法として用いる際には、比抵抗値と調査対象とされる地盤物理定数の相関関係データの蓄積と関数式の確立が極めて重要である。本研究では電気探査法による飽和一不飽和地盤における浸透挙動の定量的な把握手法についての基礎的な検討として、標準砂を用いた室内不飽和浸透実験を行い、比抵抗値と体積含水率の相関関係について吟味した。

2. 室内における土の比抵抗測定

土の比抵抗測定装置として図-1の様に円筒型のモールドに試料を詰め、リング状の電極を試料中に配置する方法を採用した。供試体の比抵抗値 ρ の算出には、柱状導体の比抵抗値の算定式である次式を用いる。

$$\rho = \frac{A}{L} \cdot \frac{V}{I} \quad \text{----- (1)}$$

ここに、A：供試体の断面積、L：供試体長
 I：電流量、V：電位差

式(1)はその適用条件として供試体内に平行電流が生じていることが必要である。そこで、供試体および電極のサイズを決定するために、種々の試料形状において有限要素法による軸対称電位分布解析を行い、試料内のポテンシャルの状況を考察した。その結果、数値解析によって得られた試料内の電位分布を用いて、式(1)より計算した比抵抗を ρ_{FEM} とし、数値解析に入力データとして与えた比抵抗値 ρ_0 との比により図-2

のように整理した。これによれば、試料長 L_2 および電極幅 L_1 が長いほど、また、供試体の半径 r が小さいほど式(1)の適用性は高くなる。一方、 L_1/L_2 の比が等しい場合には L_2 の長さの影響をよく受けることがわかる。一般に、試料長さが長すぎるものは試料の均質性から不適当であり、供試体の半径は均質な締め固めの可能性、および原位置からのサンプリングによって得られる試料サイズから判断して2.5~5cm程度が妥当であると思われる。よって、本研究では供試体の半径5cm、電極幅2cm、電極間隔4cmにて実験を行った。

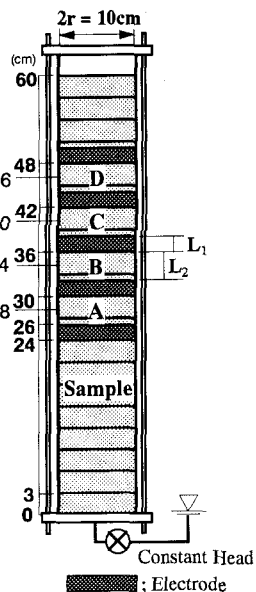


図-1 土の比抵抗測定装置

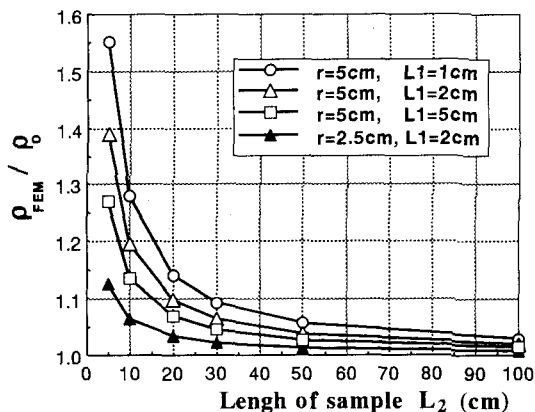


図-2 試料および電極サイズの影響

3. 標準砂による室内比抵抗測定実験

実験に用いた試験装置を図-1に示す。肉厚5mm、内径10cm、高さ3cmのアクリルカラムを積み重ね、連結部分を真空グリスとビニールテープでシールして作成した円筒モールドに標準砂を水中落下にて投入し、高さ60cmの飽和砂柱（飽和体積含水率0.42、飽和透水係数 2.19×10^{-2} cm/s）を作成した。電極は図-1に示す5箇所を設置し、A～Dの4区間の比抵抗を連続的に計測する。計測にはコンピュータ制御による自動電気探査装置²⁾を用い、飽和砂柱下部より定水位にて重力排水を開始後、各区分での比抵抗値の非定常変化を計測した。なお、1区分のスキニングに要する時間は約6秒である。本手法では比抵抗の測定に際して電位、電流電極を併用する2極法を用いるが、その送信電流としては分極効果を除去する目的で交替直流を用いた。また、電極には適度な硬度を有し、腐食に強いことからリン銅板（厚さ0.2mm）を加工したものを用いた。与えた電流量は0.5mAである。約120分排水を行った後、試料を解体し、A～Dの各区分での体積含水率を計測することにより、比抵抗値と体積含水率の関係を求めた。

図-3は本実験で得られた比抵抗値と体積含水率の関係を式(2)に示すArchieの式と比較したものである。データの蓄積が不十分であるために、関数式の評価は明確に行えないが、その傾向は類似しているとは言い難い。飽和近傍と低含水状態での精度に問題がありそうである。

$$\rho_{\text{unsat}} / \rho_{\text{sat}} = S r^{-m} \quad (2) \quad \rho_{\text{sat}}, \rho_{\text{unsat}}; \text{飽和、不飽和状態での比抵抗値、} \\ S r: \text{飽和度、} m: \text{実験定数}$$

参考までに水分特性曲線の関数モデルとしてvanGenuchtenが提案した関数モデルを修正して、次式に示す関数式を計測データに対してフィッティングを試みた。

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \{1 + |\alpha (\rho_{\text{unsat}} / \rho_{\text{sat}})|^n\}^{-1/m} \quad (3) \quad m = 1 - 1/n, n > 1, \alpha, n: \text{実験定数、} \\ \theta_s: \text{飽和体積含水率、} \theta_r: \text{最小容水量}$$

非線形最小二乗法により推定されたパラメータは $\alpha = 0.38$ 、 $n = 3.93$ 、 $\theta_r = 0.05$ である。式(3)の適用に際して物理的根拠が不明確な難点があるが、計測データを傾向的には表現できた結果となった。また、図-4は体積含水率の非定常挙動について、計測された比抵抗値から体積含水率への換算にArchie式($m = 2$)と式(3)をそれぞれ用いたデータと、有限要素法による飽和～不飽和浸透流解析結果とを比較したものである。比抵抗値による計測は、全般的に非定常不飽和浸透流挙動に対する定性的な追従性を満足していると考えられる。＜参考文献＞1) 青山千彰 他：電気探査法による不飽和浸透測定、第24回土質工学研究発表会、pp. 321-324、1991。2) 井上 誠：比抵抗法電気探査の地盤計測への適用例について、物理探査学会第82回学術講演論文集、pp. 243-246、1990。

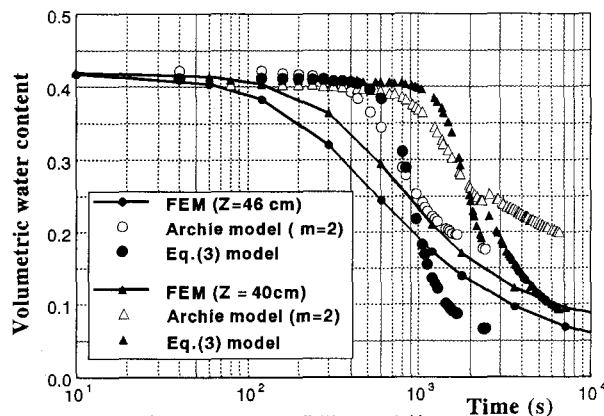


図-4 体積含水率の非定常挙動の比較

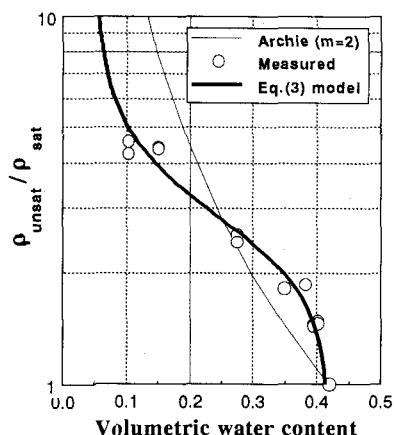


図-3 比抵抗値と体積含水率の関係