

比抵抗変化率による空気注入中の飽和度の推定

東亜建設工業(株) 正会員 居場 博之
(株)不動産テトラ 正会員 新川 直利
(株)ダイヤコンサルタント 山田 直之

東亜建設工業(株) 正会員 ○山根 信幸
オリエンタル白石(株) 大内 正敏
愛媛大学大学院 正会員 岡村 未対

1. はじめに

著者らは、既設構造物直下の地盤を対象にした安価な液状化対策として、地盤中に空気を注入することにより液状化抵抗を増大させる空気注入不飽和化工法(Air-des 工法)の開発に取り組んできた。これまでに行った実験により、空気注入時の不飽和化領域を特定するモニタリング技術として、比抵抗計測が有効であることを確認した¹⁾が、飽和度を定量的に評価するまでには至っていない。本稿では、比抵抗変化率を用いた空気注入中の飽和度推定の可能性について、室内実験と現場実験の結果を交えて検討した。

2. 比抵抗変化率を用いた飽和度の推定

粒状構造を持つ地盤の比抵抗値 ρ_t は、伝導性を有する粘土鉱物含有量や、地下水自体の比抵抗値 ρ_w 、地盤の間隙率 ϕ 、および飽和度 S_r が支配要因となっている。ただしこれらの関係は ρ_w が小さい場合、 ϕ と S_r の関係を用いた Archie の式にて、以下(1)式のとおりに説明できる²⁾。

$$\rho_t = a \cdot (\phi)^{-m} \cdot (S_r)^{-b} \cdot \rho_w \quad - (1) \text{式}$$

ここで、 a, m, b は地盤・地層に応じて決定される定数であり、 m は固結定数、 b は飽和指数である。

土粒子の骨格構造を変化させずに ϕ を一定として地盤中に空気を注入し、飽和度を S_{r1} (100%)から S_{r2} へと低下させると、比抵抗値も ρ_{t1} から ρ_{t2} へと変化する。この際、地下水の比抵抗値 ρ_w に変化がないとすれば、以下(2)式および(3)式のとおりに表現することができる。したがって、空気注入による不飽和化において、比抵抗比 ρ_{t2} / ρ_{t1} もしくは比抵抗変化率 $\Delta\rho_t$ と飽和度 S_{r2} の関係は、 b を設定することにより求められる。

$$(\rho_{t2} / \rho_{t1}) = S_{r2}^{-b} \quad - (2) \text{式}$$

$$\Delta\rho_t = \{S_{r2}^{-b} - 1\} \times 100 \quad - (3) \text{式}$$

従来より b を求めるための実験は数多く実施されており、砂の場合では1.0程度であることが報告されている^{3), 4)}。そこで、実験サイトの採取試料を用いて b を算出するキャリブレーション試験を実施した。表-1に試験条件を、図-1に試験装置概要をそれぞれ示す。

試験は用いた試料と同じ採取地から採水した比抵抗 $8\Omega\text{m}$ の地下水と $40\Omega\text{m}$ の水道水をそれぞれ用いて、間隙率0.4となるように試験体を作製した。各試験体の間隙率0.4を一定とした条件で S_r を3種類設定し、試験体両端面に設置した電流電極と内側に設置した電圧電極を用いて比抵抗を測定した。試験体寸法は直径100mm、高さ300mmである。試験結果を図-2に示す。この結果より、間隙水の比抵抗の違いによらず b は概ね1.0程度を示し、既往の知見と良く一致している。

表-1 キャリブレーション試験条件

case	間隙水	間隙率	飽和度 (%)
1	現地採取地下水 ($8\Omega\text{m}$)	0.4	90, 83, 70
2	水道水 ($40\Omega\text{m}$)	0.4	97, 89, 80

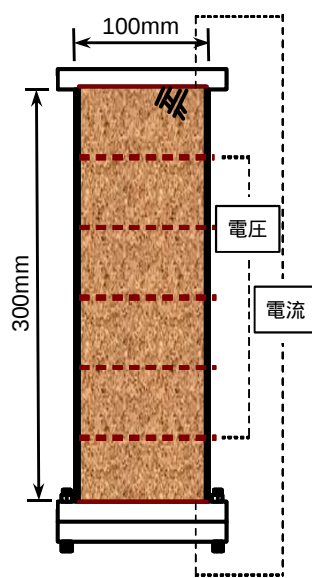


図-1 キャリブレーション試験概要

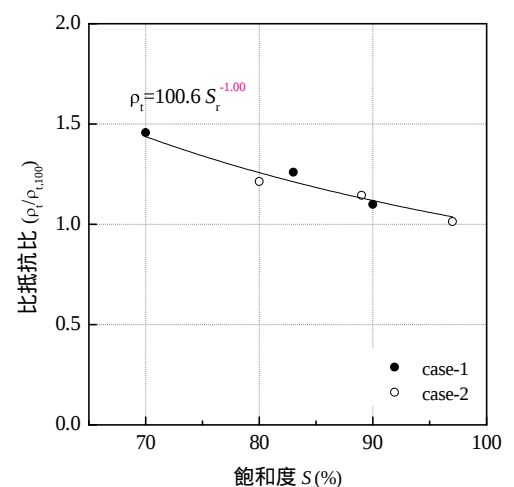


図-2 キャリブレーション試験結果

キーワード：空気注入不飽和化工法，液状化，飽和度，比抵抗変化率

連絡先 〒230-0035 横浜市鶴見区安善町1丁目3 東亜建設工業 技術研究開発センター TEL045-503-3741

3. 飽和度の換算結果

昨年実施した千葉県袖ヶ浦市の実験結果⁵⁾のうち、上述の関係を用いて比抵抗変化率から換算した飽和度 S_r の深度分布を図-3 に示す。比抵抗変化率は、空気注入直前の比抵抗値と注入開始から 1hr, 3hr, 5hr, 7hr がそれぞれ経過した時の比抵抗値との変化率を用い、 S_r を換算している。当結果から、注入孔から 1.0m 離れた位置での S_r は最も小さく、約 53% まで低下している。今回報告する換算方法によると、その他の地点においても、注入開始から 7hr 後の S_r が 70~90% 程度に低下していると推定される。

さらに、比抵抗変化率から換算した飽和度と気液二相流解析(Tough2)によって算出した飽和度⁶⁾の比較を行った。解析では、地盤条件を飽和透水係数 $k=2.1 \times 10^{-3}$ cm/s、間隙率 $n=0.39$ の単一地盤としている。図-4 はこれらの結果のうち、注入孔から 2.5m 離れた地点における注入開始から 7hr 後での飽和度の算出結果を示している。G.L.-5.0~6.0m 付近では両者の値はほぼ等しい結果となっている。一方、G.L.-5.0m 以浅および G.L.-6.0m 以深においては、換算値と解析値が乖離している傾向が見られた。これは、実験では G.L.-5.0m 付近に存在するシルト層のため、それ以浅への空気の拡がりが抑制されたことと、G.L.-6.0m 以深から N 値が 30 程度に急激に大きくなっているため、水平方向に比べ鉛直方向の透水性が小さく、鉛直下方への空気の拡がりが小さいことが解析値との乖離の要因の一つとして考えられる。また、比抵抗電極は、ボーリング孔内に設置した後、セメントベントナイト(CB)により空隙を充填している。飽和度が変化しないCB充填領域の影響により、実際の飽和度よりも比抵抗から算出した飽和度は大きめになる傾向があると考えられる。

4. おわりに

比抵抗変化率から空気注入中の飽和度の推定を試みた。その結果、比抵抗変化率から飽和度を定量的に評価できる可能性があることが分かった。空気注入中の飽和度が測定できれば、保水性試験結果を用いて注入後の残留飽和度を予測することも可能であり⁷⁾、対象地盤を確実に不飽和化することができる。比抵抗計測が飽和度を定量的に評価できるツールとして確立するには、今後も継続的にデータの蓄積を行うとともに、モニタリング精度の向上を図っていく必要があると考える。

【参考文献】1) 新川直利ら：空気注入不飽和化工法の開発 その4: 空気注入とモニタリング, 第67回土木学会年次学術講演会, pp.497-498, 2012. 2) Archie GE: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *A.I.M.E. Transactions*, 146, pp.54-62, 1942. 3) 窪田健二ら：土壌試料の比抵抗・弾性波速度と熱伝導率との関係 - 室内試験による検討 -, 社団法人 物理探査学会第120回学術講演会論文集, pp.63-66, 2009. 4) 朴三奎ら：土の比抵抗に関する基礎的研究, 物理探査, 52(4), pp.299-306, 1999. 5) 居場博之ら：空気注入不飽和化工法の開発 その1(現場実験) 第48回地盤工学研究発表会, 2013(投稿中). 6) 大石雅彦ら：空気注入不飽和化工法の開発 その2(事後解析), 第48回地盤工学研究発表会, 2013(投稿中). 7) 田村直登ら：保水性試験の吸水過程における吸水速度が残留飽和度に及ぼす影響, 第17回土木学会四国支部技術研究発表会, 2011.

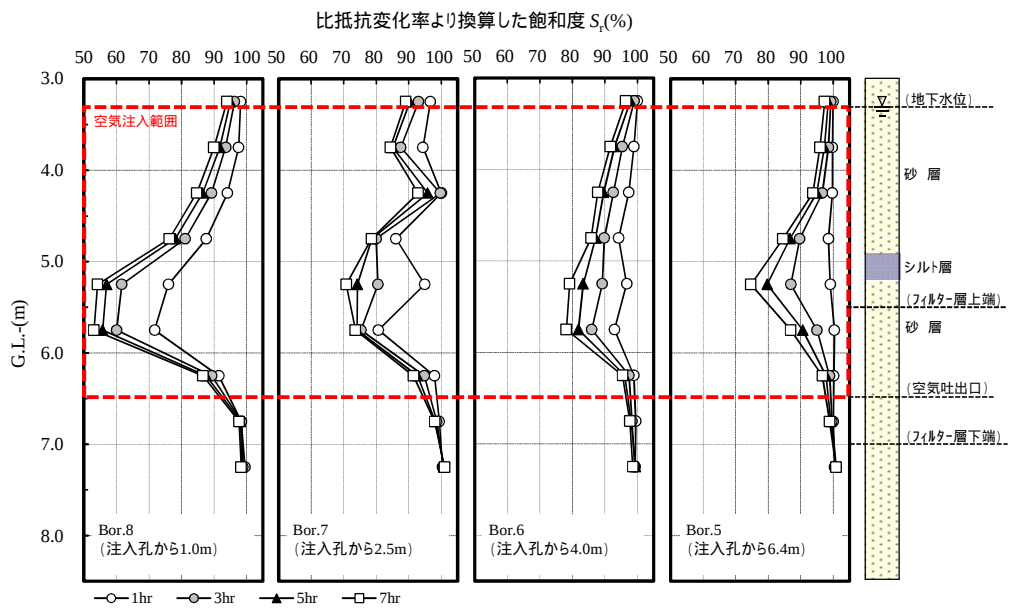


図-3 空気注入中の換算飽和度の深度分布

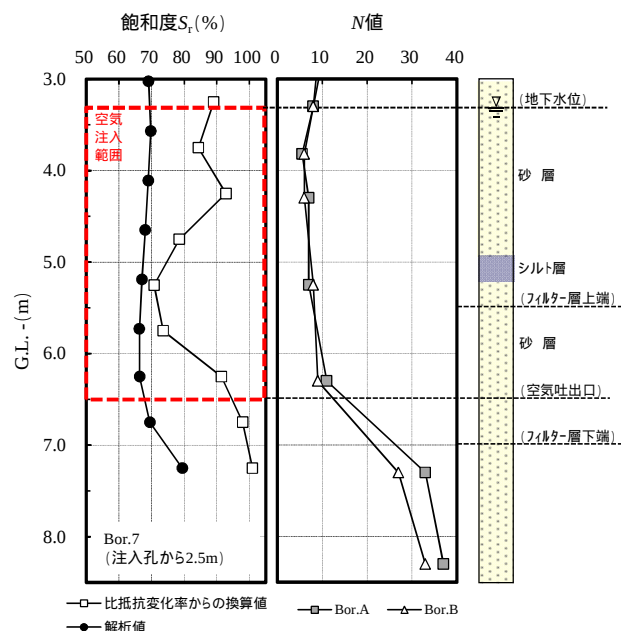


図-4 空気注入中の換算飽和度と解析値の比較