

# セメント系材料の注入における 不飽和電気比抵抗モデルを用いた改良範囲評価フローの提案

茨城大学大学院 学生会員 ○阿部聡

茨城大学 正会員 小峯秀雄 村上哲

## 1. 背景と目的

注入材の硬化状況を目視できない注入工法では、改良目標を満足した注入範囲、すなわち改良範囲を定量的に評価することが肝要である。現在、注入範囲は弾性波探査および電気検層などの物理探査により推定される場合がある<sup>1)</sup>。これまでも飽和砂層を対象とした改良範囲の確認方法はいくつか提案されているが(例えば<sup>2), 3)</sup>、非薬液系の注入材ならびに多様な粒度組成を有する不飽和地盤への適用には課題が残る。そこで著者らは、セメント系材料の注入により改良された不飽和地盤の電気伝導機構をモデル化し、改良効果の間接的な指標となる充填率を簡易的に算出する方法を提案した<sup>4), 5)</sup>。本研究では、注入前後の電気比抵抗の変化率と充填率との関係を明らかにし、改良範囲を評価する方法を提案する。

## 2. 注入前後の電気比抵抗の変化率と充填率との関係

セメント系固結土供試体を用いた室内試験により、充填率はセメント系固結土の電気比抵抗と良い相関性を有していることを示した<sup>4)</sup>。図1は対象とした試料の粒度分布である。文献5)では、電気比抵抗による充填率の評価が可能であると考え、不飽和状態におけるセメント系固結土の電気伝導機構をモデル化し、室内試験結果<sup>4)</sup>と比較した。不飽和固結土の電気伝導機構をモデル化した本方法は、精度の高い充填率評価が可能であることを示した。しかし、一般の地盤構造は複数の地層から構成されており、多くの埋設物も存在している。そのため、地盤中の各測定地点の比抵抗値に相違がみられることや注入後の比抵抗が注入前の比抵抗に影響を受けることが考えられる<sup>2)</sup>。したがって、注入前後における比抵抗の低下傾向に着目することで、改良範囲を評価する必要がある。そこで、改良範囲を評価するために、文献5)で述べた不飽和電気比抵抗モデルを用いて、注入前の比抵抗と注入後のそれを比で表示した $\rho_{sag}/\rho_{sa}$ と充填率 $\alpha$ の関係式を求める。以下に $\rho_{sag}/\rho_{sa}$ と $\alpha$ の関係式を記述する。

$$\frac{\rho_{sag}}{\rho_{sa}} = \frac{\frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{1}{1+e} + \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{e}{1+e}}{\frac{1}{\rho_{sags}} + \frac{\sigma}{\rho_{sagp}}} \dots \dots (1)$$

ただし、

$$\rho_{sags} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{1}{1+e} + \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right)} + \rho_g \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \frac{\alpha}{100} \dots \dots (2)$$

$$\rho_{sagp} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{1}{1+e} + \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{100}\right) + \frac{1}{\rho_g} \cdot \frac{e}{1+e} \cdot \frac{\alpha}{100}} \dots \dots (3)$$

$$\alpha = \frac{Q}{V \times \frac{n}{100}} \times 100 \dots \dots (4)$$

ここに、 $\rho_{sag}$ は注入後の地盤の電気比抵抗( $\Omega m$ )、 $\rho_{sa}$ は不飽和未固結土の電気比抵抗( $\Omega m$ )、 $\rho_{sags}$ は直列接続モデルにおける固結土の電気比抵抗( $\Omega m$ )、 $\rho_{sagp}$ は並列接続モデルにおける固結土の電気比抵抗( $\Omega m$ )、 $\sigma$ は固結土における並

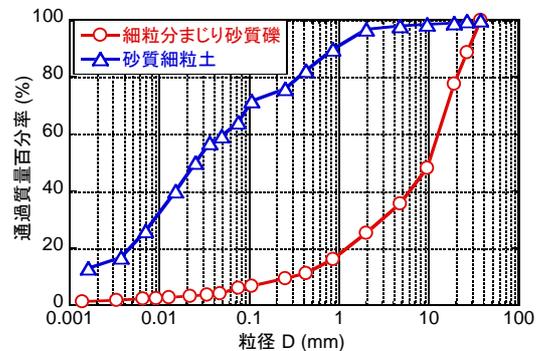


図1 対象とした試料の粒度分布

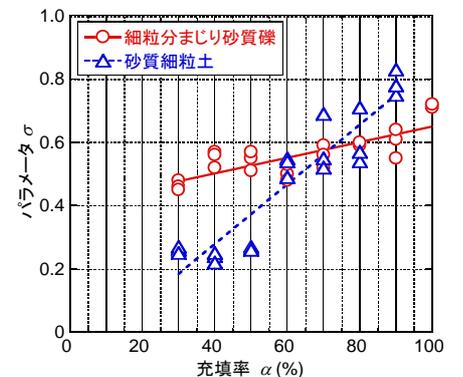


図2 パラメータ $\sigma$ と充填率 $\alpha$ との関係

キーワード 注入, 電気比抵抗, 不飽和土, 改良範囲, 充填率

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 TEL 0294-38-5163

列接続モデルの占める割合、 $\rho_s$ は土粒子の電気比抵抗( $\Omega m$ ),  $\rho_a$ は土の間隙空気の電気比抵抗( $\Omega m$ ),  $\rho_g$ は注入材の電気比抵抗( $\Omega m$ ),  $e$ は土の間隙比,  $\alpha$ は充填率(%),  $Q$ は改良対象地盤に対する注入量( $cm^3$ ),  $V$ は改良対象地盤の体積( $cm^3$ ),  $n$ は間隙率(%)である. また, 本モデルでは間隙水を考えないこととしている. 充填率とは土の間隙体積に占めるセメント硬化物の体積を百分率で表した物性値であり, 一軸圧縮強さおよび透水係数等に基づく改良効果ならびに電気比抵抗特性に影響を及ぼす<sup>4)</sup>. また, 式(1)中の $\sigma$ と $\alpha$ の関係は対象地盤の粒度組成に大きく依存し, 文献5)では対象地盤を想定して図2を示している. 以上の式に対して, 対象地盤の粒度組成, 間隙比, 土粒子の電気比抵抗, 土の間隙空気の電気比抵抗および注入材の電気比抵抗が得られれば,  $\rho_{sag}/\rho_{sa} \sim \alpha$ 曲線が求められる. 図3に対象とした試料の $\rho_{sag}/\rho_{sa} \sim \alpha$ 曲線を示す. 注入工事の事前調査では対象地盤の土質試料を採取しており<sup>6)</sup>, 式(1)中の物性値は測定可能である. 土の間隙空気の電気比抵抗 $\rho_a$ は $2.2 \times 10^{14} \Omega m$ とした<sup>5)</sup>. 土粒子の電気比抵抗 $\rho_s$ は, 間隙比を変化させた不飽和未固結土の電気比抵抗を用いて, 以下の式から算出した.

$$\rho_s = \frac{1}{\frac{1+e}{\rho_{sa}} - \frac{e}{\rho_a}} \dots (5)$$

### 3. 原位置における改良範囲評価フローの提案

不飽和電気比抵抗モデルから算出した注入前後の電気比抵抗の変化率と充填率との関係に基づき, 図4に改良範囲評価フローを示す. 本フローは, 対象地盤における注入前後の電気比抵抗の変化率を把握することにより, 原位置で改良範囲を評価できる. 具体的には第一に, 対象地盤の粒度分布を把握する. 第二に, 改良目標を満足する充填率 $\alpha_0$ を決定する. まず, 把握した粒度分布をもとに薬液固結土供試体を作製する. 次に, 薬液固結土供試体による土の一軸圧縮試験や土の透水試験を実施

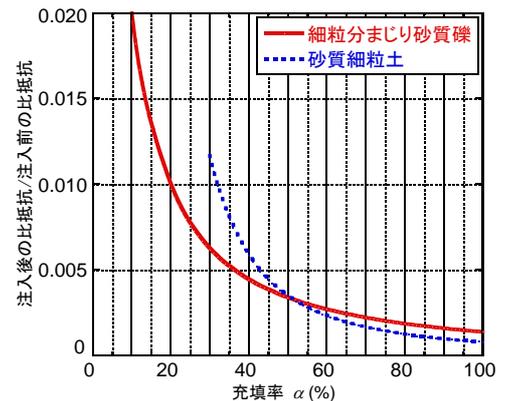


図3 対象とした試料の $\rho_{sag}/\rho_{sa} \sim \alpha$ 曲線

し, 一軸圧縮強さおよび透水係数に基づく改良効果と充填率との関係を把握する. その後, 改良目標を満足する充填率を決定する. 第三に,  $\rho_{sag}/\rho_{sa} \sim \alpha$ 曲線を用いて, 改良目標を満足する充填率における電気比抵抗の変化率を決定する. その後, 注入の実施ならびに比抵抗トモグラフィ等による注入前後の比抵抗分布を把握し, 変化率分布を算出する. 最後に, 原位置において測定した注入前後の比抵抗値の変化率分布の内, 既に $\rho_{sag}/\rho_{sa} \sim \alpha$ 曲線を用いて決定してある変化率以下の範囲を改良範囲と評価する.

### 4. 結論

注入前後の地盤に相当する不飽和未固結土およびセメント系固結土の電気比抵抗モデルから, 対象地盤における注入前の比抵抗と注入後のそれを比で表示した $\rho_{sag}/\rho_{sa}$ と充填率 $\alpha$ の関係式を誘導した. そして, この関係式から算出される $\rho_{sag}/\rho_{sa} \sim \alpha$ 曲線と薬液固結土供試体による各種室内試験結果を用いた改良範囲の評価方法を提案した. 今後は, 提案した本評価方法の有効性を検討していく.

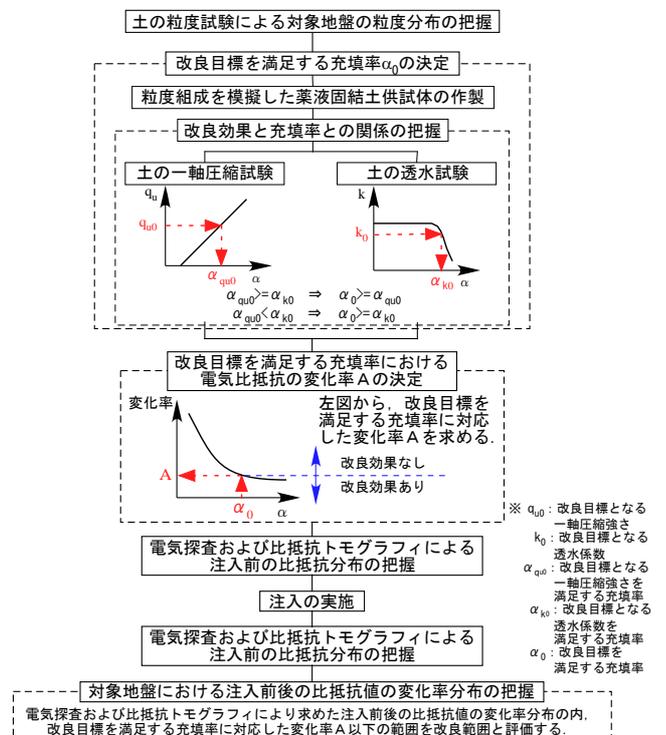


図4 改良範囲評価フロー

参考文献 1) 社団法人土質工学会: 薬液注入工法における注入効果の予測・確認手法に関する研究委員会報告, pp.100-144, 1993. 2) 小峯秀雄, 西好一, 後藤和生: 比抵抗トモグラフィを用いた薬液注入の改良範囲評価方法, 土木学会論文集 No.493/III-27, pp.137-146, 1994. 3) 山内淑人, 今西肇: 音響波トモグラフィ技術を用いた地盤改良効果の評価, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp.421-426, 2012. 4) 阿部聡, 小峯秀雄, 村上哲: セメント系薬液注入により改良された地盤の一軸圧縮強さおよび透水係数に基づく改良効果の評価と電気比抵抗との関係, 第10回地盤改良シンポジウム論文集, pp.367-372, 2012. 5) 阿部聡, 小峯秀雄, 村上哲: セメント系材料の注入により改良された不飽和地盤における電気比抵抗を用いた充填率の評価方法の提案, 第48回地盤工学研究発表会(投稿中). 6) 社団法人日本グラウト協会: 新訂 正しい薬液注入工法, pp.1-6, 2007.