

現場試験による比抵抗トモグラフィを利用した 薬液注入の改良範囲評価方法の実証

小峯秀雄¹・後藤和生²

¹正会員 工博 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 主任研究員 (〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646)

²正会員 工修 東京電力(株) 地中送変電建設所 次長 (〒108-0023 港区赤坂 8-5-32 赤坂山勝ビル 6階)

薬液注入工法は注入後の改良範囲や改良効果の確認が難しいという問題点を有している。この問題点を解決するため、著者らは比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法を既に提案した。本研究では、現場において試験的に薬液注入を実施し、比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法の適用を試み、その有用性について調査した。その結果、提案した方法により判定した改良範囲は、ボーリング調査により目視で改良が確認された範囲とほぼ一致していた。また、比抵抗の値から改良範囲が認められない場合、ボーリング調査でも改良部は確認されなかった。これらの結果から、比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法が実際の現場で有用であることが確かめられた。

Key Words : chemical grouting, electrical resistivity, resistivity tomography, improved region, field test

1. 序 論

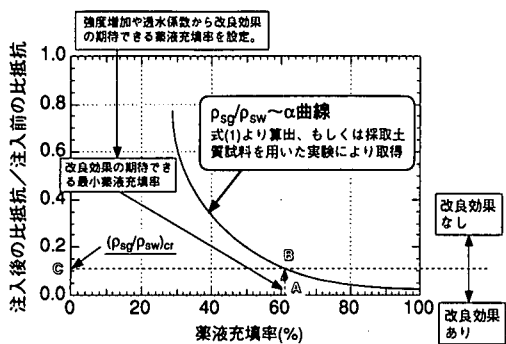
薬液注入工法は止水および地盤の強度増加を目的とする地盤改良工法として広く普及している。しかし、注入後の改良範囲の確認が難しいという問題点が指摘されており、このことが薬液注入工法の信頼性向上の障害となっている。この問題点を解決するため、著者らは比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲評価方法を既に提案してきた^{1),2)}。本評価方法は、砂質地盤の薬液注入工事で使用される水ガラス系薬液が地盤や地下水と比べて良好な導電性を有する点に着目したもので、注入前後の地盤の電気伝導特性をモデル化し^{3),4)}、それに基づいて改良範囲を評価する方法である。著者らは、模型実験によりその有用性と適用範囲について調査・研究してきた^{5),6)}。

本研究では、現場において試験的に薬液注入を行い、著者らの提案する比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法の適用を試みる。比抵抗トモグラフィによる改良範囲の評価結果と薬液注入後に実施したボーリング調査による地盤の改良・固結状況の調査結果とを比較・検討し、提案した改良範囲評価方法の有用性を確認することを目的としている。

2. 比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法の概要

著者らは、注入前後の地盤の電気伝導特性をモデル化し^{3),4)}、それに基づいて注入前後の比抵抗の変化比率 ρ_{sg}/ρ_{sw} と薬液充填率 α の関係式を誘導した^{1),2)}。さらに、その関係式を用いて改良範囲を評価する方法を提案した。図-1に本評価方法の具体的な手順を示す^{1),4)}。式の詳細な誘導については文献1)~4)を参照されたい。なお、薬液充填率とは土の間隙体積に対して薬液ゲルが置換した体積の割合である。

図-1に示した式(1)中の σ と薬液充填率 α の関係は、地盤の粒度分布や透水係数に依存し、文献3),4)では薬液注入の対象となる地盤を想定して、豊浦砂と三河珪砂3号および7号のデータから図-2を示している。ところで、図-2に示した σ - α の関係は前述のように粒度分布や透水係数等の地盤特性に大きく依存するので、対象地盤によっては図-2に示した3種類の σ - α 関係から使用するものを選定することが困難な場合がある。その場合には、事前調査等で採取した土質試料を用いて薬液固結砂を作製し比抵抗を測定することにより、直接、対象地盤の σ - α 関係を求めることもできる。薬液固結砂の作製方法および比



評価手順

(1)一軸圧縮強度や透水係数と薬液充填率の関係を調査し、改良効果の期待できる最小の薬液充填率Aを設定する(現行の設計では49~98kPa程度の粘着力の増加、改良後の透水係数として 10^{-5} cm/sec程度を目標としている)。

(2)注入前後の比抵抗の変化比率と薬液充填率の関係からAに対応するBを求める。

(3)Bに対応する注入前後の比抵抗の変化比率Cを求める。この値が改良部における比抵抗の比の上限值 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ になる。比抵抗トモグラフィより求めた注入前後の比抵抗分布の内、Cの値以下の比抵抗の比率を有する範囲を改良効果の期待できる範囲と評価する。

$\frac{\rho_{sg}}{\rho_{sw}} \sim \alpha$ の関係式

$$(1) \frac{\rho_{sg}}{\rho_{sw}} = \frac{1}{\frac{\rho_{sand}}{1+e} + \frac{1}{\frac{\rho_{water}}{1+e} + \frac{\sigma}{\rho_{sgs} + \rho_{sgp}}}}$$

ただし、

$$\rho_{sgs} = \frac{1}{\frac{1}{(1+e)\left(1 - \frac{\lambda}{100}\right)^2 \rho_{sand}} + \left(\frac{1}{1 - \frac{\lambda}{100}} - \frac{1}{(1+e)\left(1 - \frac{\lambda}{100}\right)^2}\right) \frac{1}{\rho_{water}}} + \frac{\lambda}{100} \rho_{grout}$$

$$(2) \rho_{sgp} = \frac{1}{\frac{1}{1+e} \frac{1}{\rho_{sand}} + \left(\frac{e}{1+e} - \frac{\lambda}{100}\right) \frac{1}{\rho_{water}} + \frac{\lambda}{100} \rho_{grout}}$$

ここに、 ρ_{sw} : 注入前の地盤の比抵抗、 ρ_{sg} : 注入後の地盤の比抵抗、 σ : 注入後の地盤における並列接続モデルの占める割合(図2より求める)、 ρ_{sgs} : 直列接続モデルで表示した場合の注入後の地盤の比抵抗、 ρ_{sgp} : 並列接続モデルで表示した場合の注入後の地盤の比抵抗、 ρ_{sand} : 砂粒子の比抵抗、 ρ_{water} : 間隙水の比抵抗、 ρ_{grout} : 薬液ゲルの比抵抗(以上、比抵抗の単位: $\Omega \cdot m$)、 e : 地盤の間隙比、 n : 地盤の間隙率(%), α : 薬液充填率(%), λ : 薬液の注入率(%)

図-1 比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲評価方法の具体的な手順

抵抗の測定方法、 σ - α 関係の求め方については、文献3),4)に詳述しているので参照されたい。

図-1中の式(1)に対して、対象地盤の粒度分布、間隙比 e 、砂粒子および間隙水の比抵抗、薬液ゲルの比抵抗が得られれば、 $\rho_{sg}/\rho_{sw} \sim \alpha$ 曲線が求められる。実際、薬液注入工事の事前調査において、対象地盤の土質試料や地下水を採取しており、式(1)中の物性値は測定可能である。

間隙水の比抵抗 ρ_{water} は、対象地盤の地下水のそれとほぼ同程度と考えられるので、採取した地下水の比抵抗を測定することにより得られる^{3),4)}。薬液ゲルの比抵抗 ρ_{grout} も、固化した薬液の供試体を用いて直接測定できる^{3),4)}。地下水や薬液ゲルの比抵抗測定方法は、文献1)~4)に詳述しているので参照されたい。

砂粒子の比抵抗 ρ_{sand} については、各種地盤材料や地盤構成物質の比抵抗の測定データ例^{3),4),7),8)}を参考

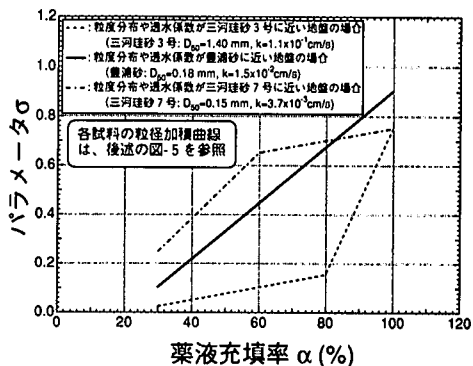


図-2 各地盤材料のパラメータ σ と薬液充填率 α との関係

表-1 地盤構成物質や各種地盤の比抵抗の測定データ例

地盤構成物質	比抵抗 ($\Omega \cdot m$)	地盤の種類	比抵抗 ($\Omega \cdot m$)	地下水等	比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
石英	$>10^9$	花崗岩	300~10 ⁴	地盤水	100~300
赤鉄鉱	500~10 ³	砂利	100~1000	地下水	20~80
褐鉄鉱	10 ³ ~10 ⁵	砂	1~1000	海水	0.3
方解石	$>10^9$	粘土	0.8~100		
岩塩	10 ⁴ ~10 ⁵	表土	200~1000		

にする。文献3),4)で測定された豊浦砂や三河珪砂の砂粒子の比抵抗は562~600 $\Omega \cdot m$ の範囲にある。表-1は文献7),8)に示されている測定データ例である。これらの測定データを参考に砂粒子の比抵抗 ρ_{sand} を設定する。具体的な設定は5章に後述する。また、注入を実施する前に比抵抗トモグラフィを実施し、注入前の地盤の比抵抗が詳細に分かっている場合には、著者の提案した注入前の地盤の電気伝導モデルから ρ_{sand} を算出することもできる。すなわち、注入前の地盤の比抵抗 ρ_{sw} は式(2)のように表され、この式を変換した式(2')に地盤の間隙比 e および間隙水の比抵抗 ρ_{water} を代入することにより、 ρ_{sand} が算出できる。

$$\rho_{sw} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{sand}} \frac{1}{1+e} - \frac{1}{\rho_{water}} \frac{e}{1+e}} \quad (2)$$

$$\rho_{sand} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{sw}} - \frac{e}{\rho_{water}}} \quad (2')$$

以上に述べた方法により $\rho_{sg}/\rho_{sw} \sim \alpha$ 曲線を求め、改良効果があるときの薬液充填率を一意に設定することができれば、改良部における比抵抗の比の上限值 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ が求められる(図-1参照)。比抵抗トモグラフィより求めた注入前後の地盤比抵抗分布の内、この上限值 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ 以下の比抵抗の比を有する範囲

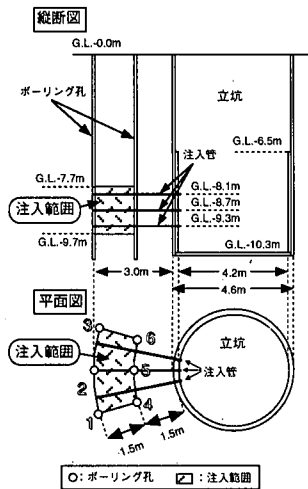


図-3 現場試験の実施場所の概要

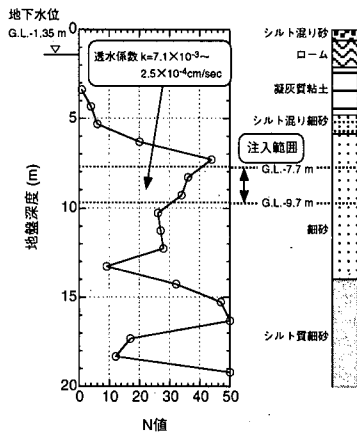


図-4 試験実施場所周辺の地盤状況

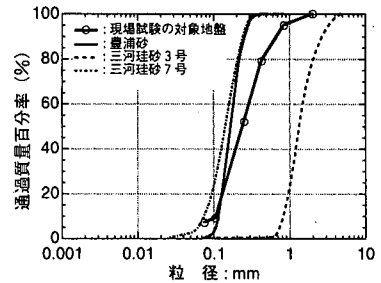


図-5 試験対象地盤の粒径加積曲線

表-2 使用した薬液の配合

主剤：特殊水ガラス	400リットル
硬化剤：グリセリントリアセテート	25リットル
水	575リットル
合計	1000リットル

(固化時間：30～40分)

を改良範囲と評価することができる。

3. 現場試験の概要

(1) 実施場所の概要

図-3 に現場試験を実施した場所の概要を、図-4 には試験実施場所周辺の標準貫入試験の結果および地質柱状図を示す。図-3 に示すように、現場試験における薬液注入は、地表面から G.L.-10.3m までに設置した立坑の側面部に注入管を地盤中に挿入し行われた。注入管を G.L.-8.1m, G.L.-8.7m, G.L.-9.3m の位置に挿入し、その周辺の地盤に対し薬液注入を行った。注入には、浸透注入を基本とするインナー工法を採用し、8リットル/分の注入速度で実施した。今回の試験で設定した注入範囲は図-3 に示すハッチ部であり、地盤深度は G.L.-7.7m～G.L.-9.7m に位置する。

一方、図-4 から分かるように、現場試験の対象とした地盤は N 値が 30～40 の範囲にある細砂である。その粒径加積曲線を図-5 に示す。比較のために、豊浦砂、三河珪砂 3 号および三河珪砂 7 号の粒径加積曲線も図-5 に併記した。また、湿潤密度は 1.81～2.19Mg/m³ の範囲に、現場透水係数は $7.1 \times 10^{-3} \sim 2.5 \times 10^{-4}$ cm/sec の範囲にあった。

現場試験を実施した場所周辺における注入前の地盤の比抵抗は、電気検層の結果から 50～75Ω・m の範囲にあった。また、電気検層の際に採取したボーリング孔内の地下水の比抵抗を測定したところ 15Ω・m であった。なお、ボーリング孔内の地下水位は G.L.-1.35m であり、試験実施場所周辺の地盤は飽和しているものと考えられる。

(2) 使用した薬液と比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法の適用性

使用した薬液は、固化時間が 30～40 分の溶液型水ガラス薬液であり pH が 12 程度のものである。特殊水ガラスを主剤としグリセリントリアセテートを硬化剤としたもので、標準的な配合を表-2 に示す。固化した薬液ゲルの比抵抗は 0.4Ω・m である。前節で述べたように、試験実施場所周辺の地下水の比抵抗は 15Ω・m であった。著者らの研究^{5),6)}から、薬液の比抵抗が地下水の 1/10 以下であれば、比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法が適用できることが明らかになっている。今回の現場試験においては、薬液ゲルと地下水の比抵抗の比率は 0.027 であり、十分適用できる範囲にある。

(3) 電極配置用のボーリング孔の設置

比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法を適用する場合、改良範囲の評価精度を低下させないように、工事の設計・計画の段階で設定された注入範囲に対して隣接する位置にボーリング孔を設け測定用電極を配置する必要がある^{5),6)}。したがって、本試験では図-3 の平面図に示したように、6 箇所のボーリング孔 (図-3 中の 1～6 の番号を付記した白丸印で示している) を注入範囲に隣接する位置に設け、測定用電極を配置した。ボーリング孔や電極の配置方法の詳細は 4 章に後述する。

4. 試験方法

(1) 比抵抗トモグラフィ測定・解析方法と改良範囲の評価方法

比抵抗トモグラフィの測定・解析は、薬液注入後

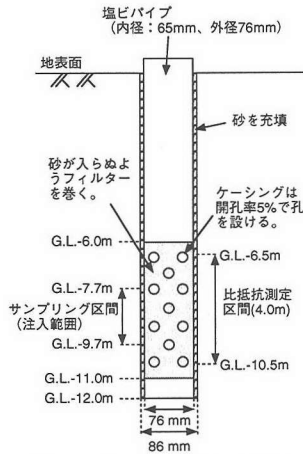


図-6 ボーリング孔の概要

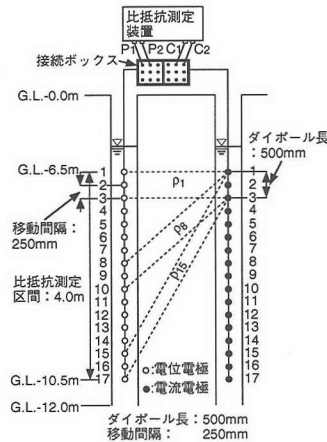


図-7 比抵抗の孔間測定の概要

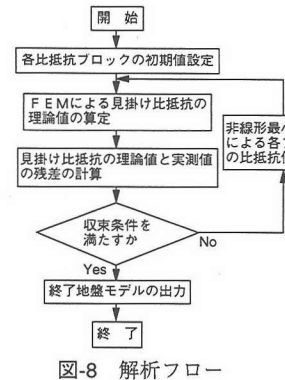


図-8 解析フロー

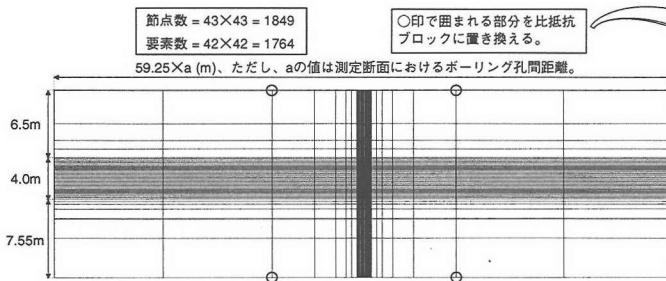


図-9 解析モデル

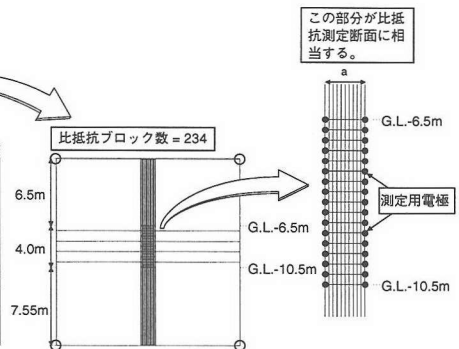


図-10 比抵抗ブロック

の地盤を対象に実施された。比抵抗測定には、図-3に示した6箇所のボーリング孔を利用した。ボーリング孔は次のように作製された。地盤に直径86mmの孔を掘削し、外径76mm、内径65mmの塩化ビニールパイプを挿入する。その際、地盤と塩化ビニールパイプの間に砂を充填した。塩化ビニールパイプには、G.L.-6.0m～G.L.-11.0mの範囲において、直径5mm程度の孔を3000個程度設け、孔の面積と塩化ビニールパイプの表面積の比率が5%になるよう開孔した。なお、砂が開孔部からパイプ内に入らないようにパイプ周辺にフィルターを巻いた。ボーリング孔の概要を図-6に示す。

比抵抗を測定した断面は各2箇所のボーリング孔からなる8断面(後述の図-12,13を参照)である。本試験では4個の電極を用いて測定するダイポール・ダイポール法⁷⁾により地盤の見掛け比抵抗を測定した。G.L.-6.5m～G.L.-10.5mの範囲を深度方向の測定区間とし、この範囲に1ボーリング孔当たり電極を250mm間隔で17個設置した。ダイポール長は電位電極、電流電極いずれも500mmとし、移動間隔は250mmとした。図-7に本試験での地盤の見掛け比抵抗の測定方法の概念を示した。具体的な測定方法は

次の通りである。

電流電極1-3間に一定の電流を流したときの電位電極1-3間、2-4間、3-5間～15-17間それぞれの電位差を測定する。次に、電流電極2-4間に一定電流を流し、同様に電位電極1-3間～15-17間の電位差を測定する。さらに、同じようにしてそれぞれ電流電極3-5間、4-6間～15-17間の場合の測定を行う。その測定結果に基づき各電極配置に応じた地盤の見掛け比抵抗を算出する。見掛け比抵抗の算出方法は文献1),7)を参照されたい。

次に、各電極配置に対応して得られた地盤の見掛け比抵抗データを用いて、有限要素法と非線形最小2乗法を組み合わせた2次元解析⁹⁾⁻¹¹⁾を実施し、薬液注入後の地盤の比抵抗分布を求めた。図-8に有限要素法と非線形最小2乗法を組み合わせた2次元解析のフローを示す。また、図-9に解析モデルを示す。本解析モデルは節点数1849、有限要素数1764より構成される。このモデル中に○印で囲まれる部分を図-10に示す234個の比抵抗ブロックに置き換えた。各ブロック内では比抵抗値は一定とする。解析における初期モデルの設定は図-11に示すように行った。

図-8に示すように、本解析は各電極配置における

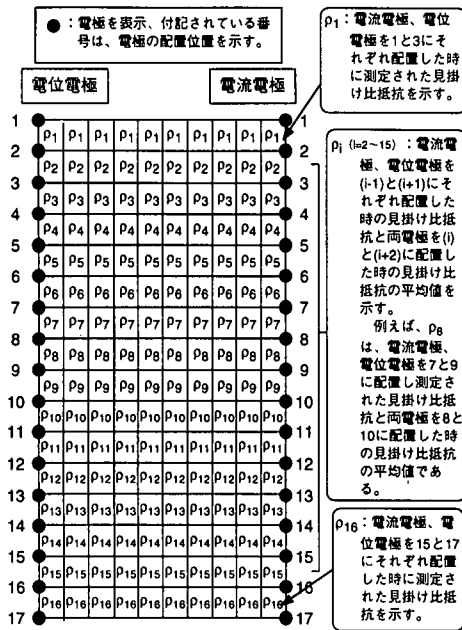


図-11 各比抵抗ブロックの初期値の設定方法

見掛け比抵抗の実測値と地盤の比抵抗モデルより計算される理論値との残差の2乗和が最小になるよう各ブロックの比抵抗値を非線形最小2乗法により逐次修正する⁹⁾¹¹⁾。残差の2乗和があらかじめ設定した値以下になるまで繰り返し計算を実施し、最適な地盤内の比抵抗分布を算定する。以上の方法により求められた薬液注入後の地盤の比抵抗分布に対し、2章で述べた方法を適用し、各測定断面における改良範囲の評価を行った。

(2)改良地盤のボーリング調査方法

本試験では、比抵抗測定を行うために掘削した6箇所のボーリング孔(図-3参照)の地盤の改良状況を調査し、比抵抗トモグラフィによる改良範囲の評価結果と比較・検討した。各ボーリング孔の掘削深度は12m、掘削径は86mmである。地盤の改良状況は、全てのボーリング孔においてG.L.-7.7m～G.L.-9.7mの範囲でエラスティックチューブ型サンブラー^{12),13)}を用いて試料の採取を行い、その固結状況を目視およびフェノールフタレイン溶液による着色により調査した。ここで用いたサンプリング方法は、薬液注入を施された改良地盤から乱さない試料を採取する方法として選定されているものである¹²⁾。使用した薬液のpHは12程度であり、フェノールフタレイン溶液はpHが9以上で桃色から赤色を示すので、フェノールフタレイン溶液による着色の程度から薬液が浸透固結している状況がおおよそ確認できる。

表-3 地盤、地下水および薬液の比抵抗

	比抵抗($\Omega \cdot m$)
地盤	50~75
地下水	15
薬液ゲル	0.4

注) 地盤の比抵抗は電気検層により、地下水については採水試料により測定した。薬液ゲルは室内で作製したホモゲルにより測定した。

5. 改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較・検討

(1)比抵抗による改良範囲の評価

図-12, 13は、比抵抗分布測定を実施した全断面(計8断面)における薬液注入後の比抵抗分布図を示す。図中の1~6の数字はボーリング孔を示し、その配置は図-3に示した通りである。●印は、測定に用いた電極の配置位置を示している。各測定断面と図-3に示した注入範囲(G.L.-7.7m~G.L.-9.7m)との位置関係は図中の凡例を参照されたい。

図-12, 13に示した薬液注入後の地盤の比抵抗分布に対し、2章で述べた改良範囲評価方法を適用し、改良部と判定される範囲を求める。

現場試験の対象地盤周辺の比抵抗、ボーリング孔内地下水および使用した薬液ゲルの比抵抗は表-3に示す通りである。2章で述べた改良範囲評価方法を利用するにあたり、対象地盤の間隙比が必要となる。本調査においては、3章で述べたように、湿潤密度(1.81~2.19Mg/m³)が測定されているので、以下の手順により間隙比を算出した。すなわち、地盤の間隙比e、含水比ω(%), 湿潤密度ρ_t(Mg/m³)は以下の関係にある。

$$e = \frac{\omega \rho_s}{S_r \rho_w} \quad (3)$$

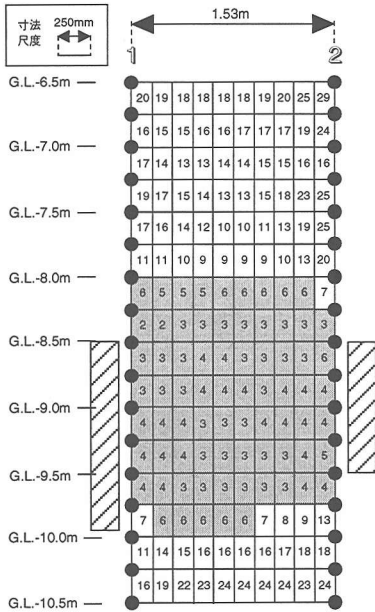
$$e = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 \quad (4)$$

$$\rho_d = \frac{\rho_t}{1 + \frac{\omega}{100}} \quad (5)$$

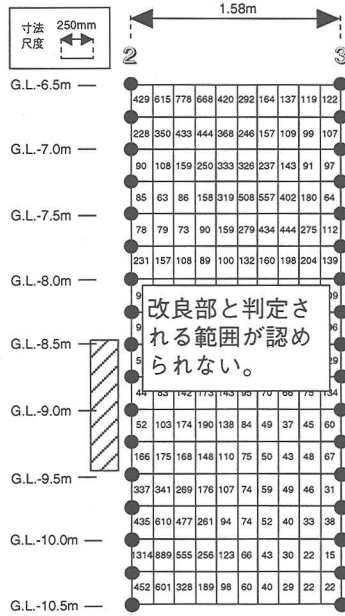
ここに、S_rは飽和度(%), ρ_s:土粒子の密度(Mg/m³), ρ_w:水の密度(Mg/m³), ρ_d:乾燥密度(Mg/m³)である。これらの式と、対象地盤が地下水位以下であることから飽和度S_r=100%と仮定することにより、式(6)が求められる。

$$e = \frac{\rho_s - \rho_t}{\rho_t - \rho_w} \quad (6)$$

式(6)に、一般的な土粒子の密度を想定して



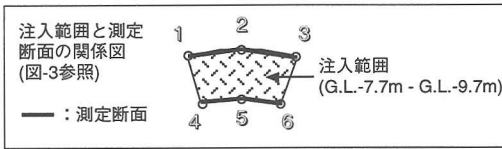
(a)改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較 (1-2断面)



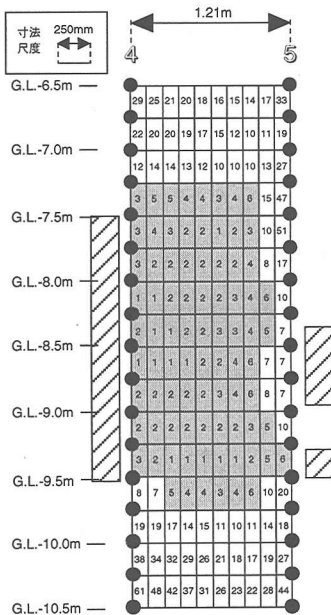
(b)改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較 (2-3断面)

No.3孔において固結した部分は目視では確認されなかった。また、フェノールフタレイン反応による着色部分も認められなかった。

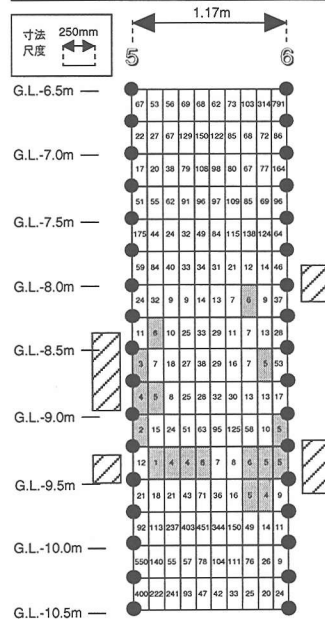
改良部と判定される範囲が認められない。



: 比抵抗値から評価された改良範囲
 : 各ボーリング採取試料の目視およびフェノールフタレインの着色反応から固結していると判定される範囲
 ブロック中の数値: 比抵抗 ($\text{Q} \cdot \text{m}$)

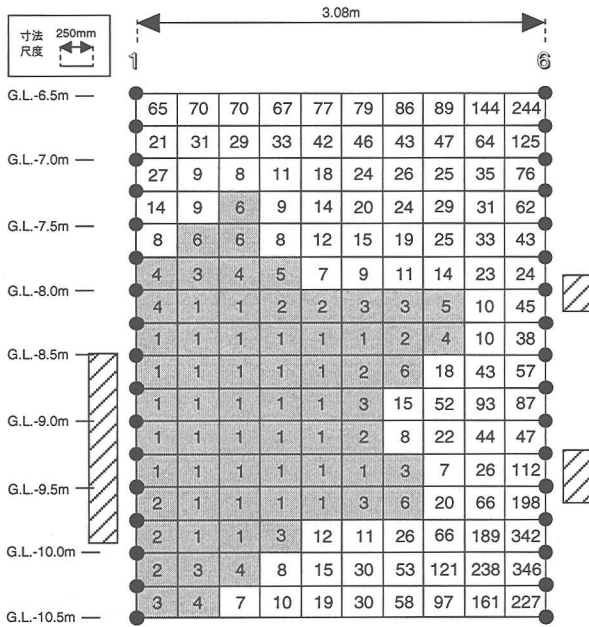


(c)改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較 (4-5断面)

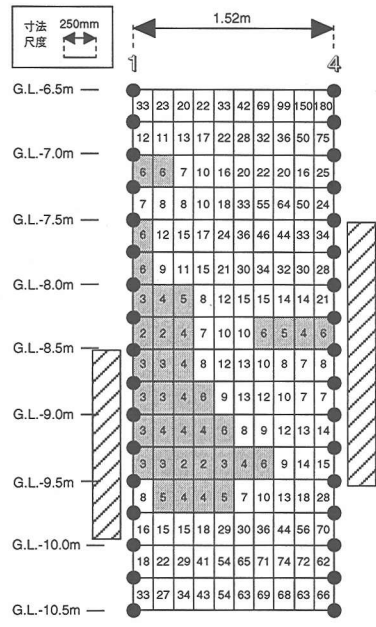


(d)改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較 (5-6断面)

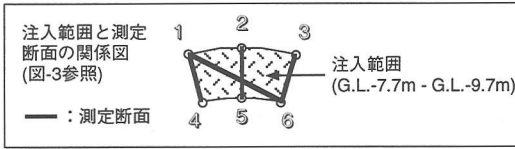
図-12 改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較 (その1)



(a)改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較 (1-6断面)



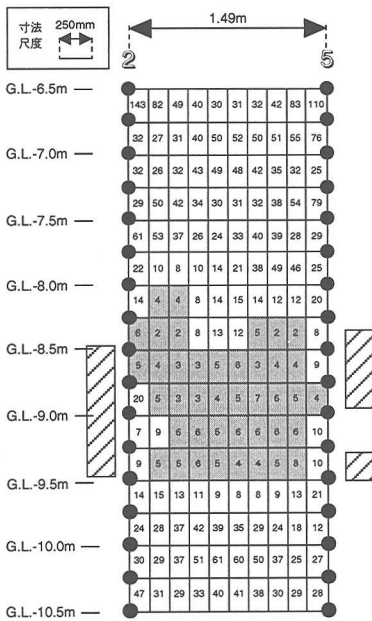
(b)改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較 (1-4断面)



■ : 比抵抗値から評価された改良範囲

▨ : 各ボーリング採取試料の目視およびフェノールフタレインの着色反応から固結していると判定される範囲

ブロック中の数値 : 比抵抗 (Ω・m)

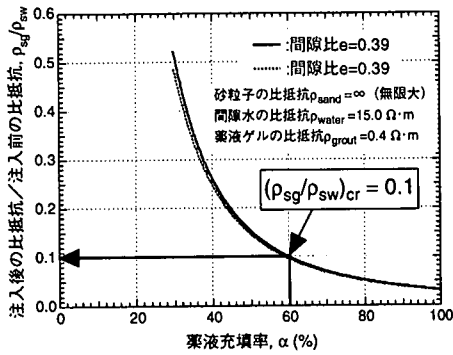


(c)改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較 (2-5断面)

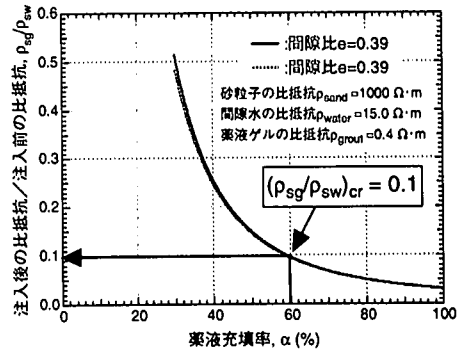


(d)改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較 (3-6断面)

図-13 改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較 (その2)



(a) 式(1)において、 $\rho_{sand} = \infty$ (無限大)として計算した場合



(b) 式(1)において、 $\rho_{sand} = 1000 \Omega \cdot m$ として計算した場合

図-14 改良範囲評価において用いた $\rho_{sg}/\rho_{sw} - \alpha$ 曲線

$\rho_s = 2.65 \text{Mg/m}^3$ と仮定し¹⁴⁾、水の密度 $\rho_w = 1.00 \text{Mg/m}^3$ を代入すると、湿潤密度 ρ_t が $1.81 \sim 2.19 \text{Mg/m}^3$ の範囲の場合、間隙比 e は $0.39 \sim 1.04$ の範囲と推定される。

上記の間隙比の推定値、表-3に示す地下水と薬液ゲルの比抵抗および後述の仮定を式(1)に適用すると、注入前後の地盤比抵抗の変化比率と薬液充填率の関係($\rho_{sg}/\rho_{sw} - \alpha$ 曲線)は図-14のように求められる。図-14を求めるに当たり必要となる $\sigma - \alpha$ 関係は、図-2の実線で示される関係を用いた。図-5に示すように、今回の対象地盤の粒径加積曲線は豊浦砂のそれとほぼ同じと考えられるので、豊浦砂のデータに基づく $\sigma - \alpha$ 関係を用いた。透水係数の観点から対象地盤は、むしろ三河珪砂7号に近いと考えられる。これは図-5に示すように透水係数に影響する10%粒径が三河珪砂7号のそれとほぼ同じであるためと思われる。しかし、粒径加積曲線の全体的な形状は、豊浦砂に近いので、上述のように $\sigma - \alpha$ 関係を設定した。

砂粒子の比抵抗 ρ_{sand} については、2章でも述べたように、注入前の地盤の比抵抗から求めることも可能である。しかし、今回の試験地点においては、表-3に示す電気検層による測定値のみが既知であり、詳細な地盤比抵抗の分布は分かっていない。そこで、表-1に示す各種の地盤構成物質の比抵抗の測定データや文献3),4)で測定された豊浦砂や三河珪砂の測定結果から、 $\rho_{sand} = \infty$ (無限大)および $\rho_{sand} = 1000 \Omega \cdot m$ の2種類を仮定した。表-1に示すように、砂粒子を構成する物質はほとんど絶縁体と考えられているので、 ρ_{sand} を無限大と仮定し、式(1)において $1/\rho_{sand} = 0$ として計算することとした。一方、水溶液中に砂粒子が存在する場合、砂粒子表面と水溶液間に電気二重層が形成され、この部分にイオンが存在し周囲の水と比べてイオン濃度が高く、電気を通しやすくなる。この砂粒子表面における電気二重層の形成により、砂粒子は見かけ上、比抵抗が小さくなると考えられている¹⁵⁾。このような観点から、表-1に示す砂

の比抵抗 ($1 \sim 1000 \Omega \cdot m$ 程度) および文献3),4)で測定された豊浦砂や三河珪砂の砂粒子の比抵抗 ($562 \sim 600 \Omega \cdot m$)を参考に、 $\rho_{sand} = 1000 \Omega \cdot m$ という値も仮定した。

砂粒子の比抵抗 $\rho_{sand} = 1000 \Omega \cdot m$ 、間隙比 $e = 0.39 \sim 1.04$ と仮定し、表-3の測定値から地下水の比抵抗 $\rho_{water} = 15 \Omega \cdot m$ 、薬液ゲルの比抵抗 $\rho_{groud} = 0.4 \Omega \cdot m$ の値を式(2)に代入し計算される注入前の地盤の比抵抗 ρ_{sw} の値は $\rho_{sw} = 29 \sim 52 \Omega \cdot m$ である。砂粒子の比抵抗 $\rho_{sand} = \infty$ (無限大)とすると $\rho_{sw} = 30 \sim 54 \Omega \cdot m$ となる。このことから砂粒子の比抵抗が $\rho_{sand} = 1000 \Omega \cdot m \sim \infty$ (無限大)の範囲では、注入前の地盤比抵抗 ρ_{sw} の値に大きな差異はない。また、上記で求めた ρ_{sw} の値は、表-3の電気検層により求めた注入前の地盤の比抵抗とほぼ同程度と考えられ、上記の仮定はほぼ妥当と考えられる。

次に、改良範囲を評価するためには、改良効果の期待できる薬液充填率を設定する必要がある。先にも述べたように、対象地盤の粒度分布は豊浦砂のそれとほぼ同じである。そこで、本研究では文献3),4)で行われた豊浦砂の実験結果に基づき、改良効果の期待できる薬液充填率を設定した。著者らの実験結果^{3),4)}によれば、豊浦砂の場合、60%以上の薬液充填率であれば、一軸圧縮強度は 98kPa 以上、透水係数も 10^{-5}cm/sec 以下であり、現行の設計目標値¹⁶⁾である $49 \sim 98 \text{kPa}$ 程度の粘着力の増加、 10^{-5}cm/sec 程度の透水係数を満足していた。そこで、改良効果の期待できる薬液充填率を60%以上と仮定し、図-14に示す $\rho_{sg}/\rho_{sw} - \alpha$ 曲線から、改良部における比抵抗の比の上限値 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ を求めた結果、図-14に示すように $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr} = 0.1$ となった。したがって、注入前の地盤比抵抗の $1/10$ 以下の比抵抗を示すブロックが改良部と判定される。表-3に示すように、注入前の地盤の比抵抗は $50 \sim 75 \Omega \cdot m$ であることから、図-12, 13に示す地盤の比抵抗分布の内、比抵抗が $6 \Omega \cdot m$ 以下の範

囲を改良範囲と評価した。上記の手順により評価された改良範囲を各測定断面ごとに図-12, 13 に網掛け部で示した。

(2)改良範囲の評価結果とボーリング調査結果の比較および改良範囲評価方法の有用性

図-12, 13 に示した各断面における比抵抗分布と改良範囲の評価結果およびボーリング調査の比較は以下の通りである。なお、地盤の改良状況については、ボーリングにより採取した試料から、薬液により固結していると判定される範囲を特定し、図-12, 13 に併記している。薬液による固結部の特定は、目視により固結が確認され、同時にフェノールフタレインによる着色反応が認められた部分とした。

1-2 断面 (図-12(a)) : 比抵抗の値から G.L.-8.0m 付近から G.L.-10.0m 付近まで改良部と判定される範囲がほぼ一様に分布している。ボーリング調査の結果から、No.1 孔において G.L.-8.5m~G.L.-9.8m の範囲に、No.2 孔においては G.L.-8.5m~G.L.-9.5m の範囲に固結部が確認されている。このことから、この断面における改良範囲の評価結果は、ボーリング調査の結果と整合していると思われる。また、1-2 断面における改良範囲の評価結果は、図-3 に示した注入範囲 (G.L.-7.7m~G.L.-9.7m) とほぼ一致しており、この断面においては比較的良好的な地盤改良が実施できたと判断される。

2-3 断面 (図-12(b)) : 比抵抗の値から改良部と判定される範囲は認められなかった。No.3 孔のボーリング調査においても、固結した部分は確認されてなく、改良範囲の評価結果とボーリング調査の結果は、整合していると言える。改良範囲の評価結果から、No.2 孔を境に No.1 孔側では良好的な改良が行われたが、No.3 孔側では良好的な改良が実施されなかったと推察される。

4-5 断面 (図-12(c)) : 比抵抗の値から G.L.-7.25m 付近から G.L.-9.75m 付近まで、改良部と判定される範囲が分布しているが、No.5 孔付近では、改良部と判定されるブロックの分布が小さくなっている。ボーリング調査の結果では、No.4 孔において G.L.-7.5m~G.L.-9.5m の範囲に固結部が確認されており、改良範囲の評価結果とも整合している。No.5 孔においては G.L.-8.3m~G.L.-9.5m の範囲に固結部が確認されているが、一部 G.L.-9.0m~9.3m の範囲で固結部が確認されていない。これは、No.5 孔付近で、改良部と判定されるブロックの分布が小さくなっていることと整合していると思われる。また、No.4 孔周辺の改良範囲は注入範囲 (G.L.-7.7m~G.L.-9.7m) とほぼ

一致しており、No.4 孔周辺においては比較的良好的な地盤改良が実施できたと判断される。

5-6 断面 (図-12(d)) : 比抵抗の値から G.L.-8.0m 付近から G.L.-9.75m 付近まで、改良部と判定されるブロックが点在した状態であり、広く一様な改良範囲は存在しないと判断される。ボーリング調査結果でも、No.5 孔では G.L.-8.3m~G.L.-9.0m と G.L.-9.3m~G.L.-9.5m の範囲に、No.6 孔では G.L.-7.8m~G.L.-8.2m と G.L.-9.2m~G.L.-9.65m の範囲に、それぞれ小さい固結部が確認されただけであり、改良範囲の評価結果と整合していると考えられる。

1-6 断面 (図-13(a)) : 比抵抗の値から、G.L.-7.25m 以深において断面の中央部付近から No.1 孔に向かって、改良範囲がほぼ一様に分布していると判断される。改良部と判定されるブロックの分布範囲と No.1 孔、No.6 孔における固結部の確認状況は整合しているものと思われる。すなわち、改良範囲が一様に広がっている No.1 孔のボーリング調査では、連続した固結部が確認されており、改良部が分布していない No.6 孔の固結部は連続してなく、良好的な改良が行われていなかった。また、No.1 孔周辺の改良範囲は注入範囲 (G.L.-7.7m~G.L.-9.7m) とおおよそ一致しており、No.1 孔周辺では比較的良好的な地盤改良が実施できたと判断される。

1-4 断面 (図-13(b)) : 比抵抗の値から、No.1 孔方向に改良範囲が分布していると考えられる。No.1 孔のボーリング調査では、改良範囲の評価結果とほぼ一致するように、固結部の確認がされている。一方、No.4 孔周辺では改良部と判定されるブロックはあまり分布していないが、ボーリング調査では連続した固結部が確認されている。図-12(c)の 4-5 断面の結果から、改良部は No.4 孔から No.5 孔に向かって分布していると推察される。No.4 孔から No.1 孔に向かって、改良部は一様な分布をしていないと推察され、このため上記のような結果になったものと考えられる。

2-5 断面 (図-13(c)) : G.L.-8.5m~G.L.-9.5m の範囲に、改良部と判定される比抵抗ブロックが一様に分布している。No.2 孔や No.5 孔のボーリング調査結果でも、上記の改良範囲の評価結果とほぼ一致する範囲において固結部が確認されている。

3-6 断面 (図-13(d)) : 比抵抗の値から、改良部と判定される範囲は認められなかった。実際、No.3 孔のボーリング調査において固結した部分は確認されていない。No.6 孔の調査でも、連続した固結部は確認されなかった。以上から、この断面における改良

範囲の評価結果とボーリング調査の結果は整合していると言える。

以上に述べた改良範囲の評価結果とボーリング調査結果との比較より、比抵抗から評価された改良範囲とボーリング調査により改良・固結が確認された範囲は、全測定断面において、ほぼ一致していたと言える。一方、改良範囲が認められなかった断面において、実際、ボーリング調査では改良・固結部は確認されなかった。これらの結果から、比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法は地盤中の改良・固結した範囲の評価に有効であり、現場において有用であることが確かめられた。

6. 結 論

今回の現場試験の結果から、以下の事項が明らかになった。

比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法により評価された改良範囲とボーリング調査により改良・固結が確認された範囲は、全測定断面において、ほぼ一致していた。一方、改良範囲が認められなかった断面において、実際、ボーリング調査では改良・固結部は確認されなかった。これらの結果から、比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法は地盤中の改良・固結した範囲の評価に有効であり、実際の現場において有用であることが確かめられた。

謝辞：本論文をまとめるにあたり(財)電力中央研究所西好一博士、田中幸久博士、楠建一郎博士に御指導賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 小峯秀雄, 西好一, 後藤和生: 比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲評価方法, 土木学会論文集, 第493号/III-27, pp.137-146, 1994.

- 2) 小峯秀雄, 田中幸久, 西好一, 鈴木浩一: 電気比抵抗による薬液注入改良効果の定量的評価方法(その2), 電中研報告 U93035, 1994.
- 3) 小峯秀雄: 電気比抵抗による薬液注入改良部の充填率の評価方法, 土木学会論文集, 第463号/III-22, pp.153-162, 1993.
- 4) 小峯秀雄: 電気比抵抗による薬液注入改良効果の定量的評価方法(その1), 電中研報告 U91066, 1992.
- 5) 小峯秀雄: 比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲評価方法の適用範囲, 土木学会論文集, 561号/III-38, pp.89-98, 1997.
- 6) 小峯秀雄: 電気比抵抗による薬液注入改良効果の定量的評価方法(その3)-比抵抗トモグラフィを利用した地盤改良範囲評価方法の適用性-電中研報告 U95026, 1996.
- 7) 物理探査学会: 図解物理探査, pp.192-197, 1989.
- 8) 井上 誠: 新しい土質調査法-比抵抗法による地盤計測-: 最近の土質・基礎に関する諸問題講習会講演資料, pp.39-55, 1990.
- 9) 佐々木裕: 比抵抗垂直探査における2次元構造の自動解析(I), 物理探査, Vol.34, No.5, pp.341-350, 1981.
- 10) 佐々木裕: 比抵抗垂直探査における2次元構造の自動解析(II), 物理探査, Vol.34, No.6, pp.422-434, 1981.
- 11) 佐々木裕: 比抵抗2次元インバージョンの改良, 物理探査, Vol.41, No.2, pp.111-115, 1988.
- 12) (社)地盤工学会: 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 委員会報告, pp.57-64, 1993.
- 13) (社)地盤工学会: 地盤調査法 第4編ボーリング, pp.107-110, 1995.
- 14) (社)地盤工学会: 土質試験の方法と解説, 第2編物理試験, 第1章土粒子の密度試験, pp.43-48, 1990.
- 15) Delima, O. A. L. and Sharma, M. M.: A grain conductivity approach to shaly sandstone, Geophysics, Vol.55, pp.1347-1356, 1990.
- 16) (社)日本薬液注入協会: 薬液注入工法の設計・施工指針, 1989.

(1997. 10. 30 受付)

VERIFICATION OF EVALUATION FOR CHEMICAL GROUTED REGION USING RESISTIVITY TOMOGRAPHY BY FIELD TEST

Hideo KOMINE and Kazuo GOTO

In chemical grouting, it is difficult to evaluate the improved region. To solve this problem, authors proposed the evaluation method of improved region by resistivity tomography. For a practical application of this method, this study shows the validity of proposed evaluation by chemical grouting test in field. The sodium-silicate grout was used in this test. The field test result showed that improved regions, which were evaluated by the proposed method using resistivity tomography, almost agreed with the solidified regions of boring samples. The test results described above ascertain the availability of the evaluation method of improved region by resistivity tomography in practical fields.