

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

小峯秀雄*・西 好一**・後藤和生***

薬液注入工法は注入後の改良範囲や改良効果の確認方法が確立していない。本研究では、薬液注入の改良範囲測定への比抵抗トモグラフィの適用性を室内模型実験により検討し、浸透注入や割裂浸透注入の場合に比較的良好な改良範囲の測定が可能であることを明らかにした。また、比抵抗トモグラフィにより測定される注入前後の地盤比抵抗から改良範囲を評価する方法を提案し、その有用性を示した。

Key Words : chemical grouting, electrical resistivity, resistivity tomography, improvement area

1. まえがき

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が、注入後の改良範囲や改良効果（薬液による地盤内間隙の充填、地盤の強度増加や止水性向上）の確認が難しいという問題点を有している。そして、この問題点が薬液注入工法の信頼性向上の障害となっている。近年、薬液注入工法は都市地下利用のための掘削工事において、地盤補強や止水対策として非常に重要な工法と考えられている。したがって、上記の問題点を解決することは、注入技術を合理化し信頼性を向上させ、今後の薬液注入工法の発展において大いに役立つものと考えられる。

筆者らは、砂質地盤の薬液注入工事で利用される水ガラス系薬液が地盤や地下水と比べて電気を通しやすい性質を有していることに着目し、電気比抵抗による薬液注入改良部の充填率の評価方法について検討してきた¹⁾。本研究は、その電気比抵抗を測定物理量とす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開発を目的としている。

電気探査比抵抗法による薬液注入の改良範囲の測定は、吉住らによる現場実験²⁾において検討されているが、実際の改良範囲と測定結果の比較が行われていない。比抵抗トモグラフィによる改良範囲の測定についても同様であり、現場実験により検討されている^{3),4)}けれども、実際の改良範囲と測定結果の比較が行われていないので、その信頼性が明確になっていない。改良範囲の測定における比抵抗トモグラフィの適用性を明確にするためには、実際の改良範囲を確認し測定結果と比較し検討す

ることが肝要である。

本研究では、改良範囲測定への比抵抗トモグラフィの適用性を明確にするために、室内模型実験により実際の改良範囲を確認し、比抵抗トモグラフィの測定結果と比較する。室内模型実験では、実験終了後に模型地盤を解体して実際の改良範囲が確認できるという利点がある。また、比抵抗トモグラフィにおいて測定される電気比抵抗は、物質固有の電気的性質を表示する物性値であり、土被り圧に相当する拘束圧に依存しない。したがって、模型実験において実施した比抵抗トモグラフィの測定結果は実地盤における結果と等しいと考えられ、模型実験により得られた知見を実地盤に適用できるという利点がある。以上の理由から、室内模型実験を行い、実際に確認される改良範囲と比抵抗トモグラフィの測定結果を比較することにより、その適用性を検討する。

ところで、実際の薬液注入では、対象地盤や注入条件により、薬液が地盤中に入っていく状況（以下、注入形態と記述する。）が異なる⁵⁾。一般に、地盤中の土粒子の配列を変化させずに薬液が浸透する注入形態（浸透注入）、注入圧により地盤内に割裂が生じ薬液の大部分がその割れ目沿いに集中して固結する注入形態（割裂注入）および地盤内に生じた割裂面から薬液が浸透する注入形態（割裂浸透注入）のいずれかを呈することが知られている⁵⁾。比抵抗トモグラフィの測定結果から改良範囲を評価する上で、この注入形態により評価精度が異なることが予想される。そこで本研究では比抵抗トモグラフィによる改良範囲の評価において、注入形態の影響を調べ、その適用性を検討する。さらに、既に提案した注入前後の地盤に相当する飽和未固結砂および薬液固結砂の電気伝導モデル¹⁾に基づき、比抵抗トモグラフィにより測定される注入前後の地盤比抵抗から改良範囲を評価する方法を提案する。

* 正会員 工博 (財)電力中央研究所 土質グループ
(〒270-11 千葉県我孫子市我孫子 1646 番地)

** 正会員 工博 (財)電力中央研究所 計画課長

*** 正会員 工修 東京電力(株)

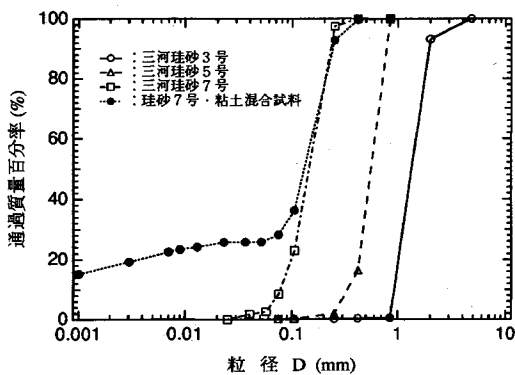


図-1 使用した地盤材料の粒度分布

表-1 使用した薬液の配合

| 主剤濃度 (%) | 配合 | |
|----------|----------------|----------------|
| | 主剤: 500 ml | 硬化剤: 500 ml |
| 35 | 3号水ガラス: 350 ml | グリオキザール: 50 ml |
| | 蒸留水: 150 ml | リン酸: 12 ml |
| | | 蒸留水: 438 ml |

(ゲル化時間: 25 ~ 30分)

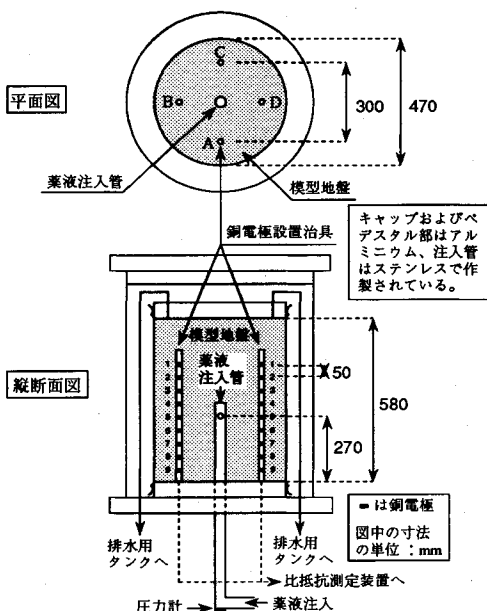


図-2 使用した実験装置の概要

2. 実験概要

(1) 使用した地盤材料および薬液

本実験で使用した地盤材料は、薬液注入工法の対象となる地盤を想定して、透水係数の異なる4種類の地盤材料を用いた。使用した地盤材料は三河珪砂3号(土粒子の密度=2.64 g/cm³:平均粒径 D₅₀=1.40 mm)、三河珪砂5号(土粒子の密度=2.64 g/cm³: D₅₀=0.55 mm)、三河珪砂7号(土粒子の密度=2.63 g/cm³: D₅₀=0.15 mm)、および三河珪砂7号と木節粘土をそれぞれ75%と25%の質量比で混合した材料(土粒子の密度=2.65 g/cm³: D₅₀=0.13 mm)(以下、珪砂7号・粘土混合試料と記述する。)である。これらの地盤材料の粒度分布を図-1に示す。透水係数については、後述の表-2に併記している。

また、本実験では、上記の地盤に対して一般に用いられている溶液型水ガラス薬液を使用した。使用した薬液は、表-1に示す主剤濃度が35%の溶液型水ガラス薬液である。この主剤濃度は、実際に現場で利用されている薬液の条件に合わせて設定した⁵⁾。

(2) 実験装置、方法および実験ケース

a) 実験装置

使用した実験装置の概要を図-2に示す。本装置は直径470 mm、高さ580 mmの円柱形の模型地盤を作製することが可能であり、作製した模型地盤中に薬液注入管(直径:30 mm、高さ300 mm)1本と銅電極を内蔵した円柱棒(直径:21 mm、高さ500 mm)4本を図示されている位置にそれぞれ設置することができる。1本の

円柱棒当りに銅電極は50 mm間隔で9個取り付けである。

b) 模型地盤の作製方法および実験ケース

図-2の実験装置にゴムメンブレンで覆われた直径470 mm、高さ580 mmの模型地盤を突き固めにより作製する。作製した模型地盤には、薬液注入管1本と銅電極を内蔵した円柱棒4本を所定の位置にそれぞれ設置している。そして、三軸セルを組み立て、0.3 kgf/cm²の拘束圧をゴムメンブレンを介して模型地盤に作用させ、地盤を飽和させるために地盤下部より通水を12時間行う。なお、実験終了時に模型地盤の5箇所から土を採取し含水比測定を行った結果、本実験で作製したすべての模型地盤の飽和度は100~109%の範囲にあり、測定精度を考えるとすべて飽和していると考えられる。通水完了後、模型地盤に背圧を1.0 kgf/cm²として、表-2に示す所定の有効拘束圧を作用させた。本実験で作製した地盤の乾燥密度は、地盤材料により若干違いはあるけれども、おおよそ1.47~1.58 g/cm³の範囲であった。本実験で実施した全ケースの実験条件を表-2に示す。

c) 薬液注入方法

本実験では、改良範囲の評価に及ぼす注入形態の影響を調べるために、注入形態の異なる数種類の改良部を模型地盤中に作製し、比抵抗トモグラフィにより改良範囲の測定を行う。注入形態の異なる改良部を作製するためには、目標とする注入形態が得られるように注入条件を設定する必要がある。そこで、溶液型水ガラス薬液の注入を行う前に、水を模型地盤中に注入する水注入実験を行う^{6),7)}。水注入実験では、1分間当たりの水注入量 q

表一 比抵抗トモグラフィの改良範囲評価への適用性に関する実験の全ケース一覧

| 実験ケース | 地盤材料 | 地盤の乾燥密度 ρ_d : g/cm ³ | 地盤の孔隙比 e | 透水係数 k : cm/sec | 間隙水の比抵抗 ρ_w : $\Omega \cdot m$ | 有効拘束圧 σ' : kgf/cm ² |
|-------|--------|--------------------------------------|------------|---|-------------------------------------|---------------------------------------|
| 1 | LK3-05 | 1.53 | 0.73 | 1.1×10^{-1} ($\rho_d=1.54g/cm^3$ の時) | 29.9 | 0.5 |
| 2 | LK3-10 | 1.54 | 0.72 | | 35.3 | 1.0 |
| 3 | LK3-20 | 1.56 | 0.69 | | 36.0 | 2.0 |
| 4 | LK3-30 | 1.57 | 0.69 | | 32.6 | 3.0 |
| 5 | LK5-05 | 1.54 | 0.71 | 3.6×10^{-2} ($\rho_d=1.55g/cm^3$ の時) | 48.4 | 0.5 |
| 6 | LK5-10 | 1.53 | 0.72 | | 42.9 | 1.0 |
| 7 | LK5-20 | 1.54 | 0.71 | | 39.4 | 2.0 |
| 8 | LK5-30 | 1.58 | 0.67 | | 39.8 | 3.0 |
| 9 | LK7-05 | 1.50 | 0.76 | 3.7×10^{-3} ($\rho_d=1.49g/cm^3$ の時) | 41.8 | 0.5 |
| 10 | LK7-10 | 1.47 | 0.79 | | 38.3 | 1.0 |
| 11 | LK7-15 | 1.49 | 0.76 | | 31.6 | 1.5 |
| 12 | LK7-20 | 1.49 | 0.76 | | 32.8 | 2.0 |
| 13 | LKC-05 | 1.55 | 0.71 | 2.0×10^{-4} ($\rho_d=1.56g/cm^3$ の時) | 27.3 | 0.5 |
| 14 | LKC-10 | 1.55 | 0.71 | | 31.3 | 1.0 |
| 15 | LKC-15 | 1.58 | 0.68 | | 29.0 | 1.5 |
| 16 | LKC-20 | 1.58 | 0.68 | | 28.6 | 2.0 |

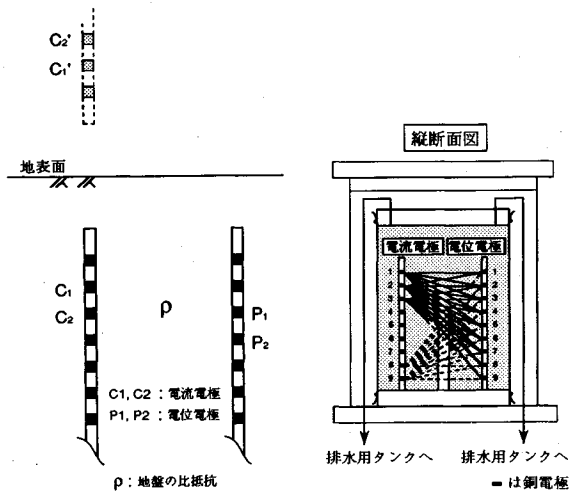
(リットル/分) (以下、注入速度と記述する。) を数種類設定し、各注入速度に対する有効注入圧 P' (kgf/cm²) を測定し $P' \sim q$ 曲線を得る。森ら⁶⁾は、この $P' \sim q$ 曲線に基づき、設定した注入速度に対する注入形態が予測できることを実験的に明らかにしている。なお、有効注入圧 P' とは、水注入時の注入圧力から模型地盤の背圧を差し引いた値である。水注入時の注入圧力の測定は注入管の底部で実施した。ここで測定される圧力には注入管内や流出部における抵抗圧力も含まれているので、注入管底部で測定された圧力から、この抵抗圧力を差し引いた値を注入圧力とした。なお、注入管内部や流出部における抵抗圧力は、各注入速度のもとで水を空气中に放出したときの圧力とした。

本実験においては、水注入実験終了後、再度、模型地盤を所定の有効拘束圧において圧密し、模型地盤の $P' \sim q$ 曲線に基づいて、目標とする注入形態が得られるように注入速度および注入量を設定し薬液注入を実施した。なお、水注入および薬液注入では、実際の薬液注入工事で使用されているポンプを使用した。このポンプは、吐出量を 0.5~12 リットル/分の範囲において連続的に変化することができる。

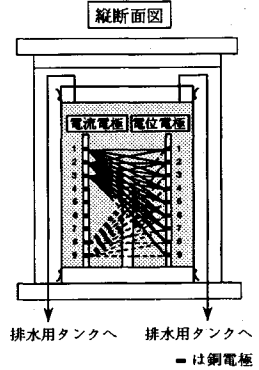
d) 地盤の比抵抗分布の測定方法

本実験では、先述の薬液注入方法により注入形態の異なる数種類の改良部を模型地盤中に作製し、比抵抗トモグラフィにより改良範囲の測定を行う。そして、実際に確認された改良範囲と比抵抗トモグラフィの測定結果を比較することにより、改良範囲の測定における薬液の注入形態の影響を調べ、比抵抗トモグラフィの適用性を検討する。

比抵抗トモグラフィではボーリング孔等を利用した孔間測定を行い、多数の見掛け比抵抗のデータを求める。本研究においても、ボーリング孔を利用した孔間測定を想定し、4つの電極を使用して測定する4極法⁸⁾⁻¹¹⁾を実施する。4極法は電気探査比抵抗法に用いられる測定方



図一 四極法による電気比抵抗の測定概念



図二 実験装置における見掛け比抵抗測定概念

法で、電流電極と電位電極を区別することによりそれぞれの電極の接地抵抗の影響が除去され、広がりのある連続媒質である地下構造の比抵抗が測定されるように考案された測定方法である⁸⁾。図一は、本実験において実施する比抵抗測定方法を示しており、4極法の一つであるダイポール・ダイポール法^{9),10)}の概念を示したものである。ここで実際に測定される物理量は2電流電極間に流れる電流と2電位電極間に生じる電位差である。測定された電流と電位差から式(1)および式(2)を用いて、地盤の見掛け比抵抗が求められる⁹⁾。

$$\rho_a = G \cdot \frac{V}{I} \dots \dots \dots (1)$$

$$G = 4\pi \cdot \left(\frac{1}{C_1 P_1} - \frac{1}{C_1 P_2} - \frac{1}{C_2 P_1} + \frac{1}{C_2 P_2} + \frac{1}{C_i P_i} - \frac{1}{C_i P_j} - \frac{1}{C_j P_i} + \frac{1}{C_j P_j} \right)^{-1} \dots \dots \dots (2)$$

ここに、

ρ_a : 地盤の見掛け比抵抗 ($\Omega \cdot m$)

I : 2電流電極 (C_1, C_2) 間に流れる電流 (A)

V : 2電位電極 (P_1, P_2) 間の電位差 (V)

G : 電極配置係数

$C_i P_j$: 2電極 C_i と P_j 間の距離 (m) (i, j は1または2とする)

$C_i P_j$: 鏡像点 C_i と電極 P_j 間の距離 (m) (ただし i, j は1または2とする)

薬液注入前後において、先述のダイポール・ダイポール法により地盤の見掛け比抵抗を求める。図一に、図二に示した実験装置における見掛け比抵抗測定概念を示した。具体的な測定方法は次の通りである。電流電極1-2間に一定の電流を流したときの電位電極1-2

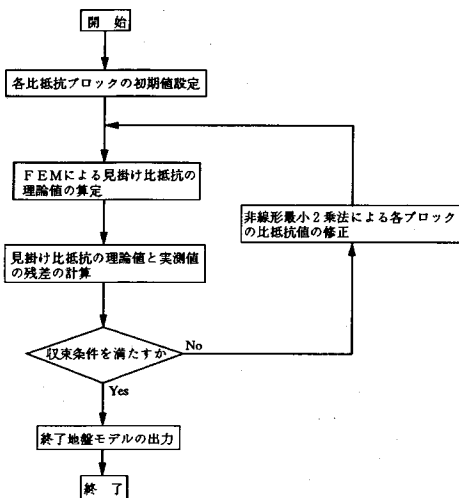


図-5 有限要素法と非線形最小2乗法を組み合わせた2次元構造解析フロー

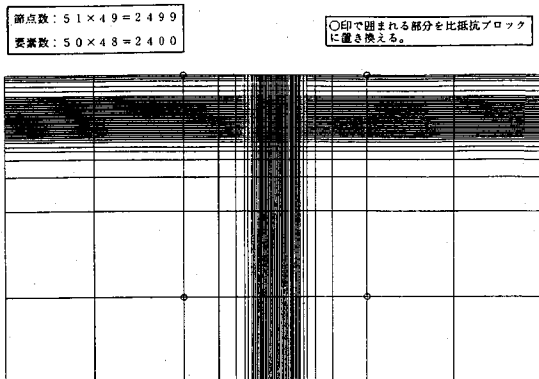


図-6 解析モデル

間、2-3間、...8-9間それぞれの電位差を測定する。次に、電流電極2-3間に一定電流を流し、同様に電位電極1-2間~8-9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3-4間、4-5間...8-9間の場合の測定を行う。こうして設定した各2電流電極と2電位電極に対応する地盤の見掛け比抵抗を式(1)および式(2)により算出する。なお、注入後の見掛け比抵抗の測定は、注入終了後2時間経過した後に実施する。本実験で使用した溶液型水ガラス薬液のゲル化時間は25~30分である。したがって、注入後の比抵抗測定時には水ガラス薬液はゲル化している。

さらに、得られた注入前後の地盤の見掛け比抵抗を用い、有限要素法と非線形最小2乗法を組み合わせた2次元構造解析^{12)~14)}を実施し注入前後の地盤の比抵抗分布を求める。そして、実験終了後、模型地盤を解体した時に確認される改良範囲と比較することにより、比抵抗トモグラフィの改良範囲評価への適用性を検討する。なお、模型地盤解体の際には、掘削あるいは水洗いにより未固

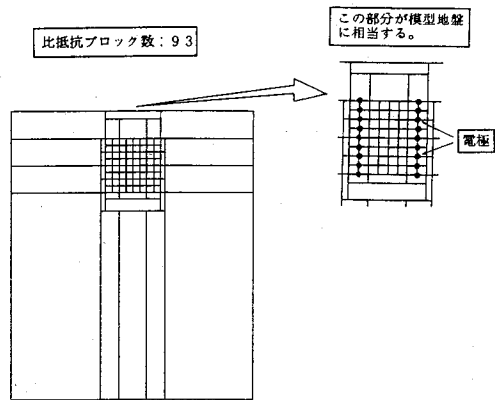


図-7 比抵抗ブロック

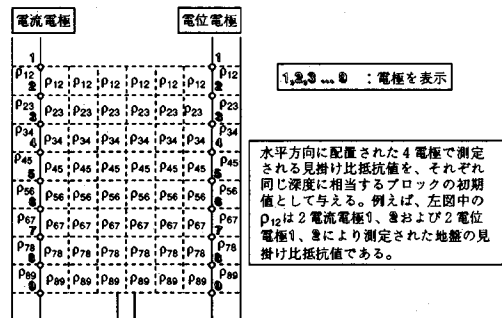


図-8 各比抵抗ブロックの初期値の設定方法

結部を除去して改良範囲を特定した。図-5に有限要素法と非線形最小2乗法を組み合わせた2次元構造解析のフローを示す。また、図-6に解析モデルを示す。本解析モデルは節点数2499、有限要素数2400より構成される。このモデル中の○印で囲まれる部分を図-7に示す93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-8に示すように水平方向に配置された4電極で測定される見掛け比抵抗値を、それぞれ同じ深度に相当するブロックの比抵抗値として与えた。図-5に示すように、本解析は各電極配置における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。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、最も真実に近い地盤内の比抵抗分布を算定する。

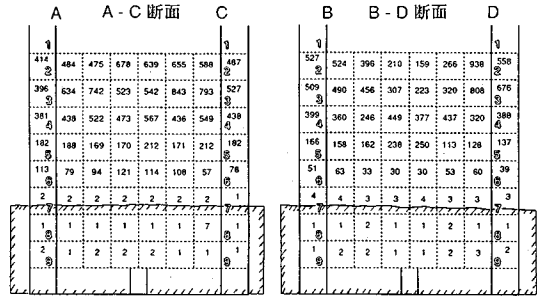
3. 薬液の注入形態に関する比抵抗トモグラフィの適用性

表-3に全実験ケースの薬液注入条件および実験終了後に確認された注入形態を示す。これらの実験において地下水に相当する間隙水の比抵抗は27.3~48.4 ($\Omega \cdot m$)の範囲にあり(表-2を参照)、実際の地下水と同程度

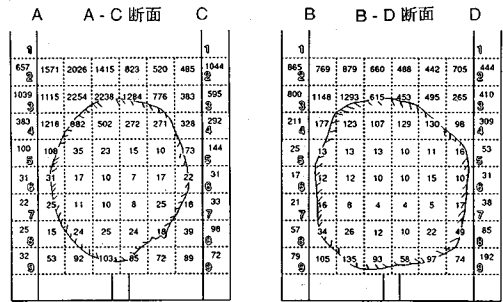
表—3 薬液注入条件と確認された注入形態

| 実験ケース | 注入開始時間：分 (ゲル化時間までの 時間で表示) | 注入速度 ：リットル/分 | 薬液注入量 Q：ml | 確認された 注入形態 | |
|-------|---------------------------------|-----------------|---------------|---------------|--------|
| 1 | LK3-05 | 1.7 | 6.4 | 794.0 | 浸透注入 |
| 2 | LK3-10 | 5 | 2.1 | 14.50 | |
| 3 | LK3-20 | 7 | 6.2 | 87.60 | |
| 4 | LK3-30 | 5 | 5.7 | 21.20 | |
| 5 | LK5-05 | 5 | 5.8 | 303.0 | 浸透注入 |
| 6 | LK5-10 | 8 | 6.0 | 531.0 | |
| 7 | LK5-20 | 1 | 4.7 | 53.0 | |
| 8 | LK5-30 | 4 | 5.8 | 437.0 | |
| 9 | LK7-05 | 2 | 9.8 | 314.0 | 割裂浸透注入 |
| 10 | LK7-10 | 5 | 5.1 | 824.0 | |
| 11 | LK7-15 | 3 | 2.1 | 341.0 | |
| 12 | LK7-20 | 4 | 6.2 | 145.0 | 割裂注入 |
| 13 | LKC-05 | 2 | 1.3 | 115.0 | |
| 14 | LKC-10 | 2 | 4.6 | 363.0 | |
| 15 | LKC-15 | 5 | 4.0 | 341.0 | |
| 16 | LKC-20 | 5 | 4.9 | 240.0 | |

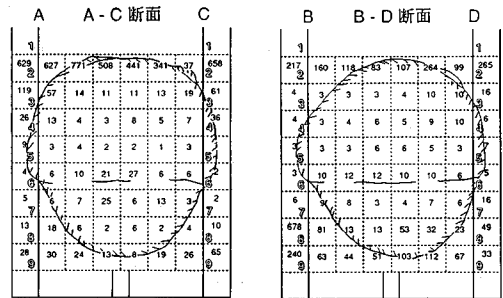
ハッチ部：確認した改良範囲
ブロック中の数値：比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
1, 2, 3...9: 電極



(a) 実験ケース：LK3-05、注入形態：浸透注入

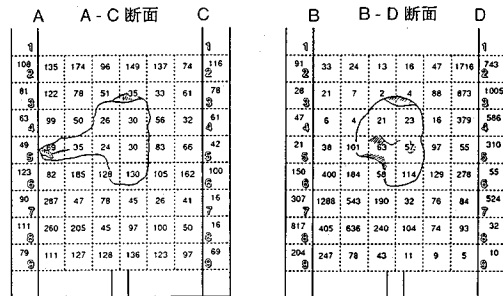


(b) 実験ケース：LK5-10、注入形態：浸透注入



(c) 実験ケース：LK7-10、注入形態：割裂浸透注入

ハッチ部：割裂脈が確認された範囲
ブロック中の数値：比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
1, 2, 3...9: 電極



(d) 実験ケース：LKC-10、注入形態：割裂注入

図—9 確認した改良範囲と比抵抗トモグラフィの結果の比較

であった¹⁵⁾。なお、間隙水の比抵抗は薬液注入の際に排出される水の比抵抗と同じと考え、排出水の比抵抗を測定したところ上記の値を得た。間隙水の比抵抗測定方法の詳細は、文献1)に記述しているので参照されたい。

本論文では、これらの実験の内、ケース1(LK3-05)、ケース6(LK5-10)、ケース10(LK7-10)およびケース14(LKC-10)を例示し考察する。

図—9は、上記の実験ケースの互いに直交するA-C断面とB-D断面における比抵抗トモグラフィにより得られた注入後の模型地盤の比抵抗分布と模型地盤解体時に確認された改良部を明示したものである。ハッチの付いた部分は、実験終了後、模型地盤を解体する際に確認した改良部のスケッチである。A, B, C, Dは電極を取り付けた円柱棒を示しており、また数字の1~9は電極を示している。各比抵抗ブロックに記述されている数値はトモグラフィ解析により得られた比抵抗値 ($\Omega \cdot m$)である。なお、図—9(a), (b)に示す実験の注入形態は浸透注入、図—9(c)に示す実験の注入形態は割裂浸透注入であり、図—9(d)は注入形態として割裂注入を示す実験結果の例である。また、実験結果をより詳細に考察するため、図—9のA-C断面の結果について、地盤深度と比抵抗の変化において整理した。具体的なデータ整理の方法は図—10に示す通りである。すなわち、模型地盤の中央部に位置する比抵抗ブロックを対象に、地盤深度を電極の位置で表示し注入前後の比抵抗の変化を示した。その結果を図—11に示す。

図—9(a), 11(a)は、三河珪砂3号を地盤材料とした模型地盤に薬液を注入した実験の結果である。この実験における薬液注入では、ゲル化時間の17分前に注入を開始し、2分程度で約8リットルの薬液を注入した。この場合、薬液のゲル化時間よりかなり前に注入が終了したのに加え、透水係数の大きい地盤にゲル化時間の長い緩結性薬液を注入したために、薬液と間隙水の比重差により薬液が下方に沈降し模型地盤下部において改良部

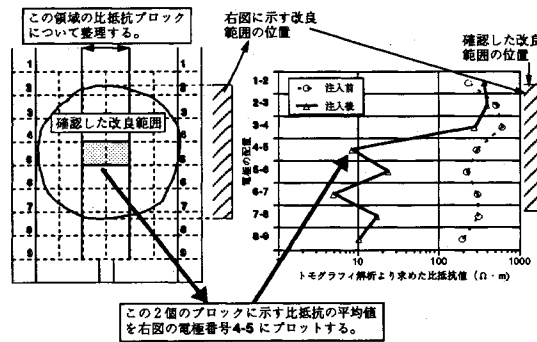


図-10 データ整理の説明図

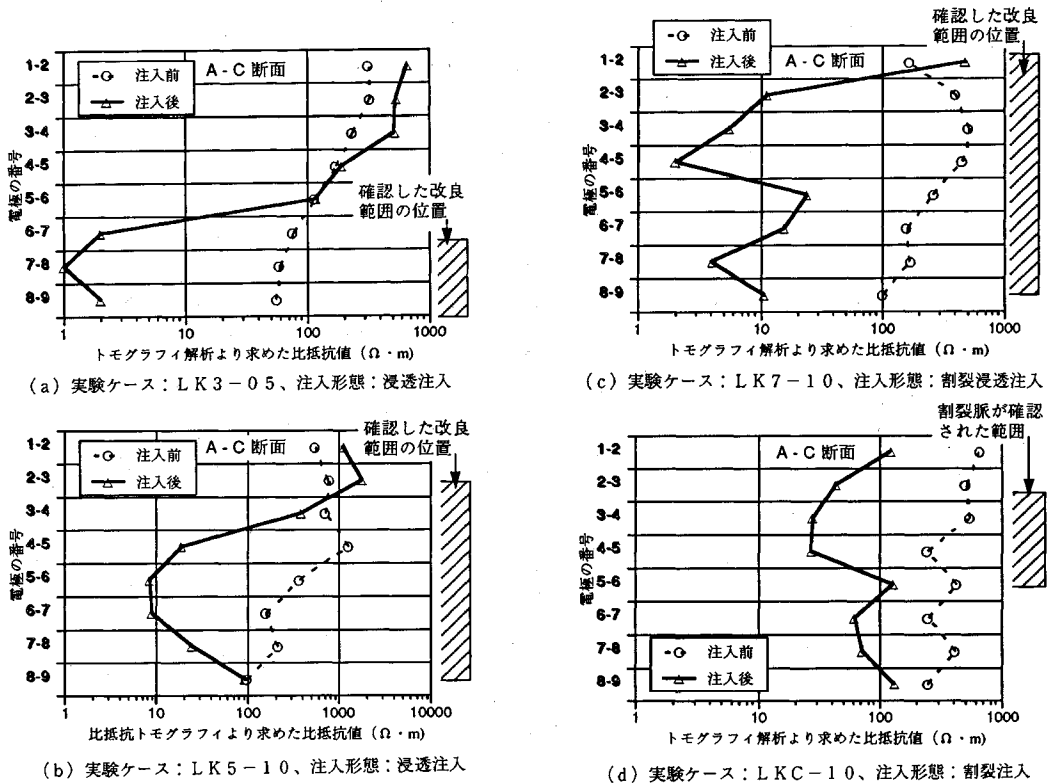


図-11 トモグラフィ解析より求めた注入前後における電気比抵抗の変化

が確認された。図-9 (a), 11 (a) から分かるように改良部の範囲と比抵抗が顕著に低下している範囲とはほぼ一致している。この実験は注入箇所から大きく離れた位置で薬液がゲル化した事例を模擬したものであり、この実験結果から改良部の位置が注入前後の地盤の比抵抗分布の変化から測定できるものと考えられる。

図-9 (b), 11 (b) は三河珪砂5号を、図-9 (c), 11 (c) は三河珪砂7号を地盤材料とした模型地盤に薬液注入を行った実験結果である。いずれも注入管周辺部にほぼ球状の改良部が得られている。そして、改良部が位置する範囲において比抵抗の低下が顕著に認められ

る。三河珪砂7号の場合、注入形態は割裂浸透注入であった。このような割裂浸透注入が生じた場合でも、一定の範囲を有した改良部が存在していれば、図-9 (c), 11 (c) に示したように比抵抗トモグラフィにより改良範囲の測定が可能と考えられる。ただし、細脈状に入った薬液ゲル部の把握は困難と考えられる。

図-9 (d), 11 (d) は割裂注入が生じた実験例を示している。先に示した浸透注入もしくは割裂浸透注入が生じた場合、改良部は地盤中に一定の範囲を有して存在している。この場合には、改良部に位置する範囲において比抵抗の低下が認められ、比較的良好に改良範囲の測

定が実施できることを示した。一方、図-9(d), 11(d)に示すような割裂注入が生じた場合、ゲル化した薬液は地盤に生じた割裂脈中に存在している。割裂脈は地盤中において局部的に存在しており、比抵抗トモグラフィにより求められる比抵抗分布の変化は不明瞭で局部的になる。したがって、このような割裂注入の場合は、詳細な注入状況を把握することは困難と考えられる。

4. 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提案

前章の結果から、地盤中に一定の範囲を有する改良部が存在している場合、比抵抗トモグラフィを用いて注入前後における地盤の比抵抗分布を測定し、その結果から改良範囲を評価できると考えられる。そこで、注入前後の地盤の比抵抗分布から改良範囲を具体的に評価する方法を提案する。

文献1)で既に提案した注入前後の地盤にそれぞれ相当する飽和未固結砂と薬液固結砂の電気伝導モデル¹⁾を用いて、改良効果の期待できる薬液充填率を一意的に求めることができれば改良部の比抵抗値が算定できる。この改良部の比抵抗値に基づいて比抵抗トモグラフィにより求めた地盤の比抵抗値から改良範囲の評価が可能と考えられる。

しかし、一般の地盤構造は複雑でいくつかの地層から構成されており、また、都市部の地盤には多くの埋設物も存在している。このような状況において、地盤各所により比抵抗が異なることや注入後の地盤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。したがって、注入前後における地盤比抵抗の低下傾向に着目すれば、より高い精度で改良範囲を評価できると考えられる。

そこで、文献1)で述べた飽和未固結砂と薬液固結砂の電気伝導モデルを用いて、注入後の比抵抗と注入前のそれを比で表示した ρ_{sq}/ρ_{sw} と薬液充填率 α の関係式を求め、それに基づいて改良範囲を評価する方法を提案する。以下に ρ_{sq}/ρ_{sw} と α の関係式を記述する。

$$\frac{\rho_{sq}}{\rho_{sw}} = \frac{\frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{1}{1+e} + \frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{e}{1+e}}{\frac{1-\sigma}{\rho_{sq}} + \frac{\sigma}{\rho_{sw}}} \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

$$\rho_{sq} = \frac{1}{\frac{1}{(1+e)\left(1-\frac{\lambda}{100}\right)^2} \cdot \frac{1}{\rho_s} + \left\{ \frac{1}{\left(1-\frac{\lambda}{100}\right)} - \frac{1}{(1+e)\left(1-\frac{\lambda}{100}\right)^2} \right\} \cdot \frac{1}{\rho_w} + \frac{\lambda}{100} \cdot \rho_g} \dots\dots\dots (a)$$

$$\rho_{sw} = \frac{1}{\frac{1}{1+e} \cdot \frac{1}{\rho_s} + \left(\frac{e}{1+e} - \frac{\lambda}{100} \right) \cdot \frac{1}{\rho_w} + \frac{\lambda}{100} \cdot \frac{1}{\rho_g}} \dots\dots\dots (b)$$

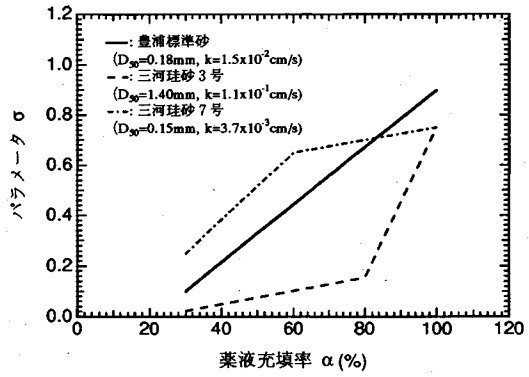


図-12 パラメータσと薬液充填率αとの関係

$$\lambda = \frac{n}{100} \cdot \frac{\alpha}{100} \times 100 \dots\dots\dots (c)$$

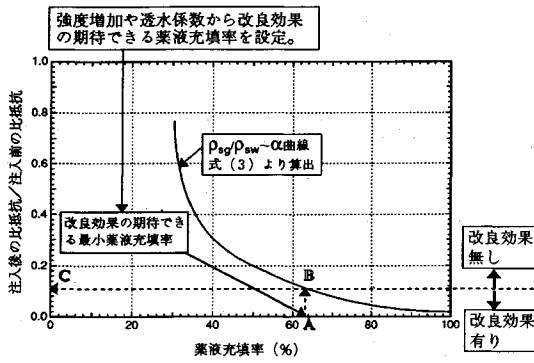
ここに、

- ρ_{sw} : 飽和未固結砂、すなわち注入前の地盤の電気比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
- ρ_{sq} : 薬液固結砂、すなわち注入後の地盤の電気比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
- σ : 薬液固結砂における並列接続モデルの占める割合
- ρ_{sq} : 直列接続モデルによる薬液固結砂の電気比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
- ρ_{sw} : 並列接続モデルによる薬液固結砂の電気比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
- ρ_s : 砂粒子の電気比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
- ρ_w : 間隙水の電気比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
- ρ_g : 薬液ゲルの電気比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
- 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 (%)

また、式(3)中のσと薬液充填率αの関係は、砂の粒度特性や透水係数に依存し、文献1)では、薬液注入の対象となる地盤を想定して図-12を示している。

以上の式に対して、対象地盤の粒度特性、間隙比e、砂粒子および間隙水の電気比抵抗、薬液ゲルの電気比抵抗が得られれば、 $\rho_{sq}/\rho_{sw} \sim \alpha$ 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(3)中の物性値は測定可能である。ただし、砂粒子の電気比抵抗 ρ_s については、飽和未固結砂の電気伝導モデルを用いて、注入前の地盤の電気比抵抗 ρ_{sw} 、地盤の間隙比eおよび間隙水の電気比抵抗 ρ_w が得られれば、式(4)より算出できる¹⁾。

$$\rho_s = \frac{1}{\frac{1}{1+e} \cdot \frac{e}{\rho_{sw}} - \frac{e}{\rho_w}} \dots\dots\dots (4)$$



- (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 α を設定する（現行の設計では0.5~1.0kgf/cm²程度の粘着力の増加、改良後の透水係数として10⁻⁵cm/sec程度を目標としている。）。
- (2) 注入前後の比抵抗値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値の変化比率Cを求め、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の値以下の電気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。

図-13 比抵抗トモグラフィを利用した薬液注入の改良範囲の評価手順

改良効果があるときの薬液充填率を一意的に求めることができれば、この式(3)を用いて、改良部における電気比抵抗の比の上限値 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ を求め、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、この上限値以下の電気比抵抗の比を有する範囲を改良範囲と評価することができる。図-13は、以上に述べた比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲の評価の手順を示す。

次に、先述した実験の内、地盤内に一定の範囲を有して改良部が得られた実験ケースであるケース1(LK3-05)、ケース6(LK5-10)およびケース10(LK7-10)を例に、改良範囲の評価を試み、供試体解体時に確認した改良範囲と比較することにより、上述の改良範囲の評価方法の有効性を検討する。

三河珪砂3号、5号および7号を地盤材料とし、表-2に示した各地盤材料の間隙比と間隙水の電気比抵抗の平均値を上記の関係式に代入し、さらに薬液ゲルの電気比抵抗を、実測値である0.62 $\Omega \cdot m$ とすることにより、それぞれの $\rho_{sg}/\rho_{sw} \sim \alpha$ 曲線を求めた。なお、パラメータ σ については、図-12に示すそれぞれの地盤材料の $\sigma \sim \alpha$ 関係を用いた。ただし、珪砂5号については、ほぼ同程度の粒度特性および透水係数を有する豊浦標準砂の $\sigma \sim \alpha$ 関係を用いた。また、砂粒子の電気比抵抗には、文献1)に示した珪砂3号の砂粒子の比抵抗である562.6 ($\Omega \cdot m$)を用いた。各地盤材料の $\rho_{sg}/\rho_{sw} \sim \alpha$ 曲線を図-14に示す。図-14に示した $\rho_{sg}/\rho_{sw} \sim \alpha$ 曲線を用いて、改良効果の期待できる最小の薬液充填率を設定す

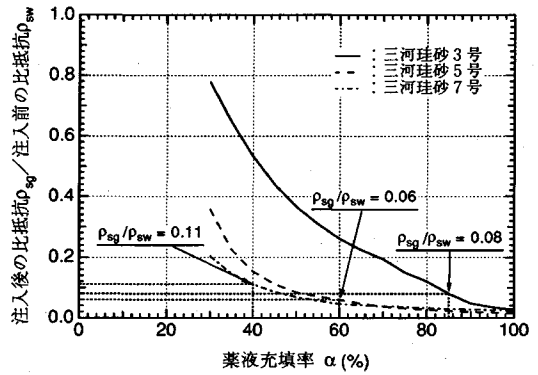


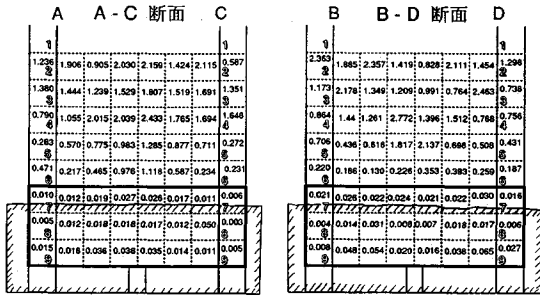
図-14 各地盤材料の $\rho_{sg}/\rho_{sw} \sim \alpha$ 曲線

れば、改良部における電気比抵抗の比の上限値 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ を求めることができ、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、この上限値以下の電気比抵抗の比を有する範囲を改良範囲と評価することができる。

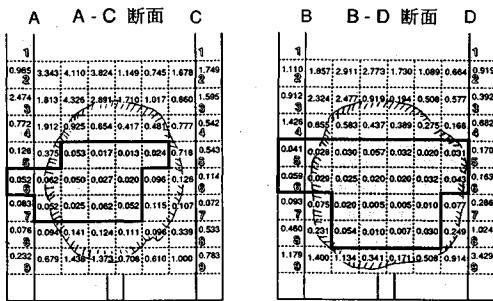
ところで、改良効果の期待できる薬液充填率とは、改良目的である強度増加や透水係数の低下により設定されるものである。ここでは、文献1)に記述した薬液固結砂の電気比抵抗特性および水中一軸圧縮実験の結果および川地らの現場実験結果¹⁶⁾を考え合わせて、改良効果の期待できる薬液充填率は、間隙中に存在する薬液ゲルの連続性が保たれる薬液充填率と考えた。文献1)では、薬液ゲルの連続性が保たれる薬液充填率は、三河珪砂3号においては85%以上、豊浦標準砂とほぼ等しい電気比抵抗特性を有する三河珪砂5号においては60%以上、三河珪砂7号においては40%以上となっている¹⁾。いずれの地盤材料の場合も、ここに示した薬液充填率以上であれば水中一軸圧縮強度¹⁷⁾は1 kgf/cm²以上であり、供試体解体時にも壊れずに固結体として確認できると考えられる¹⁸⁾。実際、得られた改良部から採取した試料の水中一軸圧縮強度は1.51~3.76 kgf/cm²、透水係数は $1.6 \times 10^{-6} \sim 2.9 \times 10^{-7}$ cm/sec (加圧定水位透水試験¹⁹⁾による測定値)であり、現行の設計目標値である0.5~1.0 kgf/cm²程度の粘着力の増加、10⁻⁵ cm/sec以下の透水係数を満足していた²⁰⁾。

したがって、ここに示した薬液充填率と $\rho_{sg}/\rho_{sw} \sim \alpha$ 曲線より、注入前後の地盤比抵抗の比の上限値 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ は、図-14に併記するように、それぞれ三河珪砂3号においては0.08、三河珪砂5号においては0.06、三河珪砂7号においては0.11となる。そして $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ 以下の電気比抵抗の比を有する比抵抗ブロックを改良範囲と評価できる。図-15は比抵抗トモグラフィにより求めた注入前後の地盤比抵抗分布を注入前後の比抵抗の比で表示したものである。図中のハッチの付いた部分は、実験終了後、模型地盤を解体する際に確認した改良部の

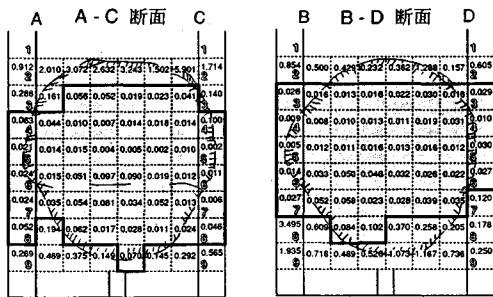
ハッチ部：確認した改良範囲
網掛け部：提案した改良範囲評価方法の結果



(a) 実験ケース：LK3-05



(b) 実験ケース：LK5-10



(c) 実験ケース：LK7-10

図一五 確認した改良範囲と提案した改良範囲評価方法の結果との比較

スケッチである。また、網掛け部は上記の上限値 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ に基づき評価した改良範囲である。これらの図から、供試体解体時に確認した改良範囲と式(3)から算出される上限値 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ に基づき評価した改良範囲は、概ね一致していると思われる。ただし、改良部と非改良部との境界部においては、評価結果と確認した結果とは必ずしも一致していない。これは、未固結のまま地盤中に残存した薬液や確認の際に改良部から剝離した固結部等によるものと考えられる。この点については、今後、大規模な模型実験や実地盤において検討する予定である。

以上のように、本研究では式(3)から算出される

$\rho_{sg}/\rho_{sw} \sim \alpha$ 曲線を用いて、改良部における電気比抵抗の比の上限値 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ を求め、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、この上限値以下の電気比抵抗の比を有する範囲を改良範囲と評価する方法を提案した。また、提案した評価方法の結果と実験で確認した改良範囲が概ね一致していることから、本改良範囲評価方法の有効性を明らかにした。

ところで、比抵抗トモグラフィでは地盤の比抵抗分布は比抵抗ブロックにより表示される。このブロックに与えられる比抵抗の値は、ブロック内の比抵抗の平均値に相当する。したがって、比抵抗ブロックの大きさを小さく設定すれば、より詳細な比抵抗分布が得られ、また改良部と非改良部の境界が明確になり、改良範囲の評価はより良好になると思われる。すなわち電極を数多く設置すれば、多数の見掛け比抵抗データが収集できると共に比抵抗ブロックも小さく設定できるので、より精度の高い改良範囲の評価ができる。それに反して、電極の設置数を少なくすると改良範囲評価の精度は低下する。

比抵抗トモグラフィによる薬液注入の改良範囲評価方法を実際の地盤に適用する場合、この点に配慮して、電極の設置数を決定することが肝要であると考ええる。本論文で述べた室内実験では、直径25cm程度の球状固結体の評価を行うのに、一辺5cmの比抵抗ブロックを用い、比較的良好的な評価が実施できた。すなわち改良部を鉛直方向に5分割、水平方向にも5分割するように比抵抗ブロックを設定すれば、比較的良好的な改良範囲の評価が実施できると考えられる。実際の地盤に適用する場合にも、工事の計画の段階で設計された注入範囲を鉛直および水平方向にそれぞれ5分割以上するように比抵抗ブロックを設定し、それに応じた数の電極を配置すれば、本実験と同程度の改良範囲の評価が行えると考えられる。

今後は、より大規模な模型実験や原位置実験により、本研究で提案した改良範囲評価方法の有効性を検討すると共に、その適用条件について明らかにする。

5. 結 論

(1) 地盤中に一定の範囲を有する改良部が得られる浸透注入や割裂浸透注入の場合には、比抵抗トモグラフィにより求められる注入前後の地盤の比抵抗分布の変化から、比較的良好的な改良範囲の測定が可能である。一方、割裂注入の場合は、詳細な注入状況を把握することは困難と考えられる。

(2) 注入前後の地盤にそれぞれ相当する飽和未固結砂と薬液固結砂の電気伝導モデルから、改良部の注入後の比抵抗と注入前のそれを比で表示した (ρ_{sg}/ρ_{sw}) と薬液充填率 α の関係式(3)を誘導した。そして、この関係式から算出される $\rho_{sg}/\rho_{sw} \sim \alpha$ 曲線を用いて、改

良部における電気比抵抗の比の上限値 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ を求め、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、この上限値以下の電気比抵抗の比を有する範囲を改良範囲と評価する方法を提案した。また、提案した評価方法の結果と実験で確認した改良範囲が概ね一致していることから、本改良範囲評価方法の有効性を明らかにした。

謝 辞

本研究を実施するに当たり、東京電力(株)送変電建設本部に多大な御支援を賜りました。比抵抗トモグラフィ解析に関しては、九州大学資源工学科の佐々木裕博士に御指導いただきました。また、(株)シー・アール・エスの田代勝浩氏、日本ソフトテクニカルの伊藤操氏、(株)コノマの忍田茂氏には、実験業務を援助して頂きました。末筆ながらここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小峯：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，No.463/Ⅲ-22，pp.153~162，1993.
- 2) 吉住・斉藤・菅野：薬液注入における注入範囲の電氣的測定，土と基礎，Vol.24，No.1，pp.43~50，1976.
- 3) 芝本・山本・中村・森：比抵抗トモグラフィによる実地盤での注入固結領域の調査研究，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集(Ⅲ)，pp.1096~1097，1992.
- 4) 芝本・山本・森山・森：比抵抗トモグラフィの砂質地盤における注入領域探査への適用，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シンポジウム発表論文集，pp.273~278，1993.
- 5) 土質工学会編：薬液注入工法の調査・設計から施工まで，1985.
- 6) 森・田村・平野：ゲル化時間の長い薬液の砂質地盤における注入形態とその支配条件，土木学会論文集，No.388/Ⅲ-8，pp.131~140，1987.
- 7) 森・田村・小峯・小川：薬液注入において浸透固結形を考慮した限界注入速度の決定方法，土質工学会論文報告集，Vol.33，No.3，pp.159~169，1993.
- 8) 吉住：地盤調査における比抵抗電気探査法について，土と基礎，Vol.24，No.3，pp.21~26，1976.
- 9) 物理探査学会：図解 物理探査，1989.
- 10) 萩原：物理探査法(第11章 比抵抗法)，現代工学社，pp.143~172，1951.
- 11) 石井：地殻の物理学，pp.110~112，1988.
- 12) 佐々木：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.
- 13) 佐々木：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.
- 14) 佐々木：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.
- 15) 井上：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.
- 16) 川地・喜田：薬液注入地盤における注入材の分布と注入効果，土と基礎，Vol.35，No.5，pp.45~50，1987.
- 17) 森・酒井・田村：水ガラス薬液による固結砂の強度に及ぼす負圧の影響，第40回土木学会年次学術講演会講演概要集(Ⅲ)，pp.619~620，1985.
- 18) 小峯：電気比抵抗による薬液注入改良効果の定量的評価法(その1)—薬液充填率の評価法の開発—，電力中央研究所報告，U91066，pp.16~17，1992.
- 19) 土質工学会編：土質試験法(第2回改訂版)，p.360，1979.
- 20) (社)日本薬液注入協会：薬液注入工法の設計・施工指針，1989.

(1993.8.17 受付)

EVALUATION METHOD OF AREA SOLIDIFIED BY CHEMICAL GROUTING USING RESISTIVITY TOMOGRAPHY

Hideo KOMINE, Koichi NISHI and Kazuo GOTO

Chemical grouting is used as an auxiliary method when underground structures are constructed in large cities. However, it is difficult to evaluate the grouted area by chemical grouting. To solve this problem, we note that electrical resistivity of chemical grout is much lower than the resistivities of ground and groundwater, and investigate the possibility of evaluation of grouted area by the resistivity tomography. In this study, the formula, which can express the relation between the resistivity changes before and after grouting and the grout/void ratio, was derived from the electrical-resistivity models of saturated sand and grouted sand that were already proposed. Furthermore, the evaluation method of grouted area by this formula was proposed. The validity of this method was shown by the comparison of the grouted area confirmed in model tests and the result of the evaluation proposed.