

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

小峯秀雄

正会員 工博 (財)電力中央研究所 地盤耐震部 主任研究員 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

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、筆者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。本研究では室内模型実験により、改良範囲と電極との相互位置関係および薬液と地下水の比抵抗値のコントラストの観点からその適用範囲を検討した。その結果、改良部が測定用電極に近いほど高精度に評価できることを明らかにし、工事の設計・計画段階で設定された注入範囲に対して隣接する位置に測定用電極を配置する必要性を示した。また、地下水と薬液の比抵抗については両者の比抵抗の間に明確な差異があるほど高精度の評価ができ、薬液の比抵抗が地下水の1/10以下程度であれば良好な評価が可能であることを明らかにした。

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

1. 序 論

薬液注入工法の信頼性向上のため、注入後の改良範囲の確認方法として、筆者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た¹⁾²⁾。本評価方法は、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。

ところで、地盤の比抵抗測定は電極配置の影響を受けることが指摘されており⁵⁾⁶⁾、提案した評価方法を適用するにあたっては、工事の設計・計画の段階で設定された注入範囲に対して精度を低下させないように電極を配置することが肝要である。また、本評価方法は薬液と地下水の比抵抗値のコントラストに基づくものであり、薬液と地下水の比抵抗に関する適用限界についても十分把握した上で適用しなければならない。

そこで本研究は、改良範囲と電極との相互位置関係および薬液と地下水の比抵抗値のコントラストの観点から提案した評価方法の適用範囲を明確にすることを目的としている。

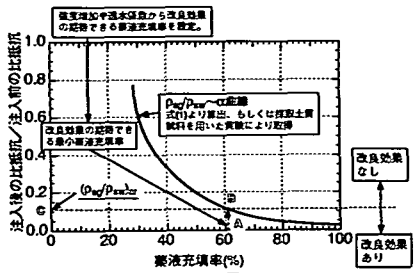
本研究では、上記の事項について室内模型実験により調査・検討を行う。室内模型実験は注入終了後に模型地盤を解体して実際の改良範囲が容易に確認できるという利点がある。また、比抵抗トモグラフィ

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る。ArchieやArulanandanらの研究⁷⁾⁸⁾によると砂質土の電気比抵抗は主に間隙率の影響を受け、その構造や拘束圧の影響は比較的小さい。したがって、実地盤と同程度の間隙率の模型地盤を作製し室内実験を行えば、そこで得られた比抵抗トモグラフィの測定結果は複雑なサイズ効果を考える必要がなく、室内模型実験により得られた知見を実地盤に適用できる。以上の理由から、室内模型実験により調査を行った。

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

本章では、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について概説する。筆者は、注入前後の地盤の電気伝導特性をモデル化し³⁾⁴⁾、それに基づき注入前後の電気比抵抗の変化比率 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評価方法を提案した。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を表示する物性値である。

図-1に示した式(1)中の σ と薬液充填率 α の関係は、地盤の粒度特性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図-2を示して



- 評価手順**
- (1) 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 Δ を決定する(現行の設計では49~98 kPa程度の粘着力の増加、改良後の透水係数をとして 10^{-6} cm/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 Δ に対応する σ を求める。
 - (3) Δ に対応する注入前後の比抵抗値の変化比率 σ を求める。この値が改良部における電気比抵抗の比の上限值 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_c$ 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、 σ の値以下の電気比抵抗の比を有する範囲を改良効果の期待できる範囲と評価する。

$\frac{\rho_{sg}}{\rho_{sw}} - \alpha$ の関係式 式(1)
$$\frac{\rho_{sg}}{\rho_{sw}} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{sw}} + \frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_g}}$$

ととし、

式(a)
$$\rho_{sw} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{sw}} + \frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_g}}$$

式(b)
$$\rho_{sw} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_{sw}} + \frac{1}{\rho_w} + \frac{1}{\rho_g}}$$
 式(c)
$$\lambda = \frac{\rho_{sg}}{100} \frac{\alpha}{100}$$

ここに、
 ρ_{sw} : 注入前の地盤の電気比抵抗、 ρ_{sg} : 注入後の地盤の電気比抵抗
 α : 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_{sg} : 並列接続モデルで表示した場合の注入後の地盤の電気比抵抗
 ρ_{sw} : 並列接続モデルで表示した場合の注入前の地盤の電気比抵抗
 ρ_g : 砂粒子の電気比抵抗、 ρ_w : 間隙水の電気比抵抗、 ρ_g : 薬液ゲルの電気比抵抗
 (電気比抵抗の単位: $\Omega \cdot m$)
 λ : 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

いる。すなわち、透水係数が 10^{-1} cm/secオーダーの地盤の場合には図-2中の破線で示される σ - α の関係を、透水係数が 10^{-2} cm/secオーダーの地盤では実線で示される σ - α の関係を用いる。透水係数が 10^{-3} cm/secオーダーの地盤の場合には、一点鎖線で示される σ - α の関係を用いる。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電気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電気比抵抗の測定方法、 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、 $\rho_{sg}/\rho_{sw} - \alpha$ 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

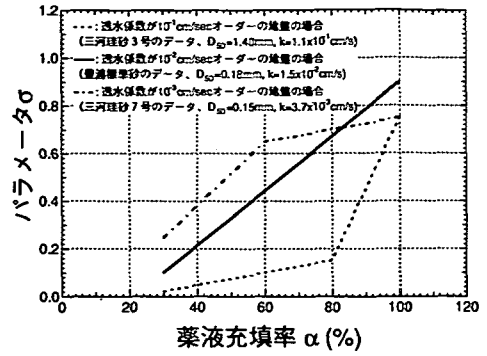


図-2 各地盤材料のパラメータ σ と薬液充填率 α との関係

を採取しており、式(1)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、筆者の提案した注入前の地盤の電気伝導モデルから、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 を用いて式(2)より算出できる。

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

以上に述べた方法により $\rho_{sg}/\rho_{sw} - \alpha$ 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、改良部における電気比抵抗の比の上限值 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_c$ 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、この上限値 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_c$ 以下の電気比抵抗の比を有する範囲を改良範囲と評価できる。

3. 実験概要

(1) 使用した地盤材料および薬液

薬液注入工法の対象となる地盤を想定して、三河珪砂5号(土粒子の密度=2.64Mg/m³、粒径範囲=0.074~2mm、平均粒径 D_{50} =0.55mm)を地盤材料として使用した。この材料の透水係数 k は、乾燥密度 ρ_d が1.55 Mg/m³のとき $k=3.6 \times 10^{-2}$ cm/secである。

注入薬液には主剤濃度が35%の溶液型水ガラス薬液および寒天溶液を使用した。表-1に溶液型水ガラス薬液の配合を示す。溶液型水ガラス薬液の主剤濃度は、実際に現場で利用される薬液の条件に合わせて設定した⁹⁾。

薬液と地下水の比抵抗値のコントラストに関する実験では、比抵抗の異なる数種類の寒天溶液を用いた。寒天溶液は熱可塑性物質であり温度調節するこ

表-1 使用した薬液

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

(固化時間: 25 ~ 30分)

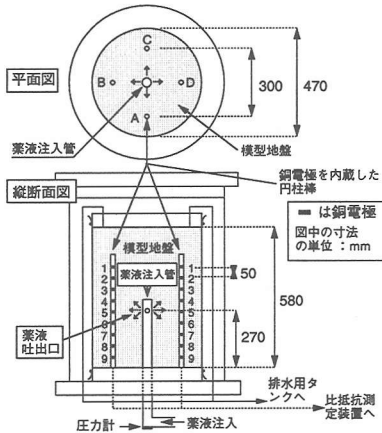


図-3 使用した実験装置の概要

とにより自由にゲル化させることができる¹⁰。また、寒天溶液を作製するときの溶媒(例えば、水)の電気比抵抗を調節することにより、自由に比抵抗値の異なる寒天溶液を作製することが可能である。本実験においては、微量の水ガラスを混入した数種類の水溶液を溶媒として用い、電気比抵抗が1~22Ω・mの範囲にある数種類の寒天溶液も薬液として使用した。

(2)実験装置および方法

実験装置の概要を図-3に示す。本装置に直径470mm、高さ580mmの円柱形の模型地盤を作製し、その地盤中に薬液注入管(直径30mm、高さ300mm)1本と銅電極を内蔵した円柱棒(直径2mm、高さ500mm)4本を図示した位置(円柱棒間隔300mm)にそれぞれ設置した。1本の円柱棒当たり銅電極は50mm間隔で9個取り付けた。

模型地盤の作製後、三軸セルを組み立て29.4kPa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、地盤下部より通水を12時間行い地盤を飽和させた。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、作製したすべての模型地盤の飽和度は98-105%の範囲にあった。通水完了後、模型地盤に背圧を98.1kPaとして、有効拘束圧98.1kPaを作用させて地盤の完成とした。薬液注入工法が頻繁に実施される地点は地盤深度10~40m程度であるので、本実験では深度10m相当の土

被り圧を想定し上記の値を採用した。模型地盤の乾燥密度は1.49~1.53Mg/m³であった。模型地盤の間隙水の比抵抗は注入の際に排出される水の比抵抗と同じと仮定し^{3),4)}、排出水の比抵抗を測定したところ30.6~47.1Ω・mであり、実際の地下水の比抵抗と同程度であった^{5),11)}。排出水の比抵抗測定方法は文献^{3),4)}に詳述しているので参照されたい。

その後、手押しポンプにより注入速度0.5~6.0リットル/分で注入を実施した。溶液型水ガラス薬液を注入する場合、表-1に示す薬液の主剤と硬化剤を混合し25~30分後に終了するように実施した。寒天溶液を注入する場合には、溶液を80℃以上に熱した後に実施した。各注入実験に用いた溶液型水ガラス薬液および寒天溶液の電気比抵抗を得るため、注入の際に残留した薬液および寒天溶液を二つ割モールド(内径50mm、高さ100mm)に投入・固化させて作製した供試体を用い、L.C.R.メータにより測定した。比抵抗測定方法は文献^{3),4)}に詳述しているので参照されたい。

(3)地盤の比抵抗分布の測定方法

注入前後において、模型地盤中に配置された電極を用いてダイポール・ダイポール法⁵⁾により地盤の見掛け比抵抗を測定した。図-4にその概念を示す。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。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),2)}を参照されたい。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した。使用した水ガラス薬液の固化時間は25~30分である。また、寒天溶液の固化時間も20℃一定室内において30分である。模型地盤中の温度が16~19℃の範囲にあることから、注入後の見掛け比抵抗の測定時には水ガラス薬液、寒天溶液とも固化していると考えられる。

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次元構造解析を実施することにより、注入前後の地盤の比抵抗分布を求めた。図-5に解析のフロー^{12~14)}を、図-6に解析モデルを示す。さらに解析モデル中の○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

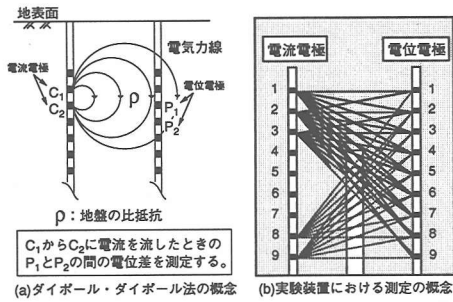


図-4 ダイポール・ダイポール法による測定の概念

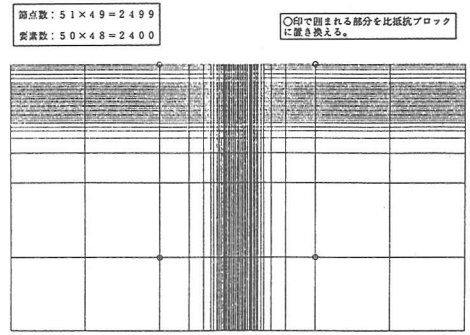


図-6 解析モデル

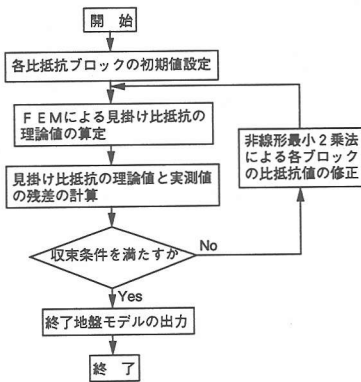


図-5 解析フロー

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。

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上記解析により求めた注入前後の地盤の比抵抗分布を比較することにより、比抵抗トモグラフィの改良範囲測定への適用性を検討した。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結部を除去して改良範囲を確認した。

4. 比抵抗測定における電極配置の検討

(1) 実験結果

表-2に各実験ケースの条件を示す。図-9には、表-2に示すケースの内、K5SS61, K5SS31, K5SS08の3ケースの実験結果を例示する。図-9に示す結果は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した改良部である。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は電極を内蔵した円柱棒を示しており、数字の1~9は各電極を示している。各比抵抗ブロッ

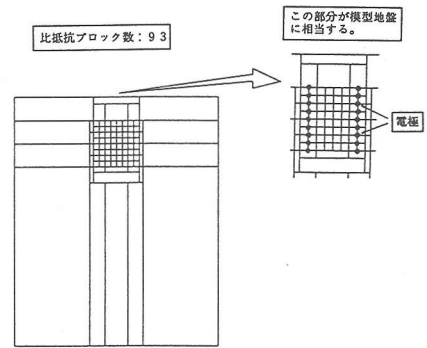


図-7 比抵抗ブロック

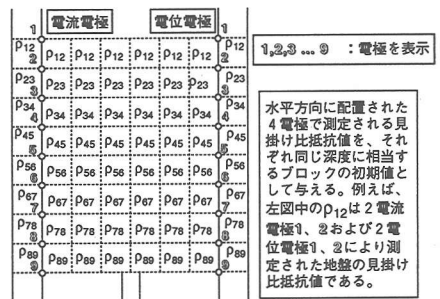


図-8 各比抵抗ブロックの初期値の設定方法

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である。なお、本節で述べるすべての実験において、模型地盤解体の際に確認した注入形態はすべて浸透注入(地盤中の土粒子の配列を変化させずに薬液が間隙中に浸透する注入形態)であった。実際には、注入圧により地盤内に割裂が生じ、その割れ目沿いに集中して薬液が固結する割裂注入等の注入形態も生じる。各種注入形態による本評価方法の適用性については、文献1),2)で述べているので参照されたい。本研究では、電極配置や薬液と地下水の比抵抗に関する適用性について調査することを目的とするので、注入形態をすべての実験ケースで統一し浸透注入になるように実施した。

図-9(a)は薬液注入量が最も大きい実験ケース

表-2 電極配置の検討に関する実験ケース

実験ケース	模型地盤の乾燥密度 ρ_d : Mg/m ³	模型地盤の間隙比: e	薬液注入量 Q: ml	間隙水の比抵抗 ρ_w : $\Omega \cdot m$	注入速度: リットル/分	
1	K5SS61	1.51	0.75	5762	31.2	1.6
2	K5SS51	1.53	0.72	5310	42.9	6.0
3	K5SS31	1.49	0.77	2862	31.2	1.4
4	K5SS22	1.53	0.73	2390	30.6	1.3
5	K5SS15	1.51	0.75	1431	31.9	0.8
6	K5SS16	1.51	0.75	1401	31.5	0.9
7	K5SS14	1.51	0.75	949	32.0	0.5
8	K5SS08	1.51	0.75	638	31.6	2.6

ハッチ部: 目視により確認した改良範囲
: 改良部に位置する比抵抗ブロック (図12参照)

ブロック中の数値: 比抵抗 ($\Omega \cdot m$)
 1, 2, 3, ... 9: 電極

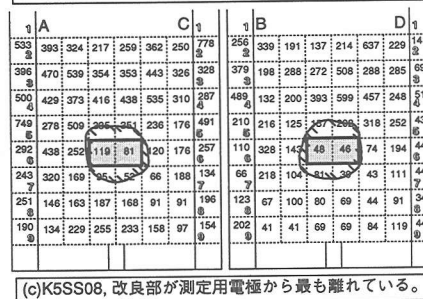
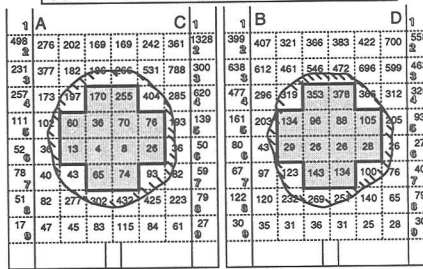
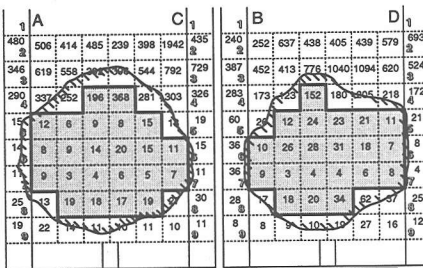


図-9 確認した改良範囲と比抵抗トモグラフィの結果の比較

K5SS61の結果である。このケースでは、注入管周辺部にほぼ球状に改良部が作製されている。図-9(a)から分かるように、改良部に位置する範囲において電気比抵抗が著しく小さくなっている。このケースの場合、改良部に位置する範囲の比抵抗は、周辺の未改良部分の1/20~1/100程度であり、その著しく小さい比抵抗値の分布から良好な精度を有して改

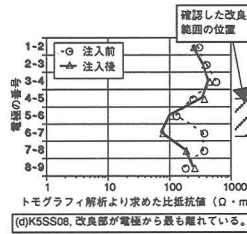
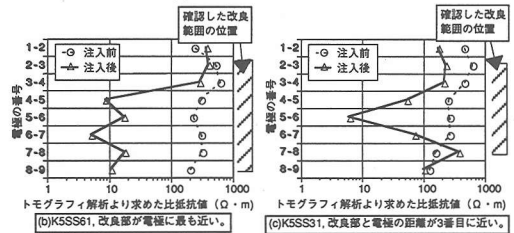
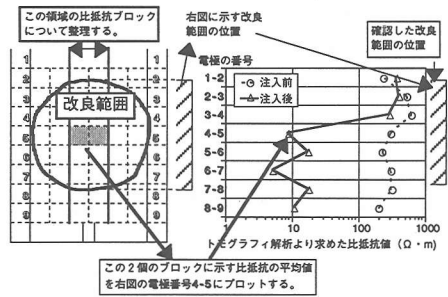


図-10 トモグラフィ解析より求めた注入前後における電気比抵抗の変化

良範囲を評価できると考えられる。一方、図-9(c)は、最も薬液注入量が少なく、最も小さい改良部が確認された実験ケースK5SS08の結果である。このケースでは、改良部に位置する範囲の比抵抗値は、周辺の未改良部の値とほとんど変わらない。したがって、このような場合には比抵抗トモグラフィにより改良範囲を評価するのは困難であると考えられる。

図-9に示す結果から、ボーリング孔を模擬した電極内蔵の円柱棒間の距離に対して改良部が大きくなるほど、改良部に位置する範囲の比抵抗値が小さくなる事が分かる。

図-10は、図-9に示した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ものである。データ整理方法は図-10(a)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。図-10(b)に示すように、改良部と電極が比較的接近していた実験ケースK5SS61の場合、確認した改良範囲の位置において比抵抗が著しく低下している。一方、図-10(c)(d)に示すように、改良部と電極の位置が離れるに従い、

表-3 各実験ケースの式(1)より得られる ρ_{sg}/ρ_{sw} の値

薬液 充填率 $\alpha(\%)$	式(1)より得られる ρ_{sg}/ρ_{sw} の値							
	K5SS61	K5SS51	K5SS31	K5SS22	K5SS15	K5SS16	K5SS14	K5SS08
40	0.21	0.15	0.20	0.21	0.20	0.20	0.20	0.20
50	0.12	0.08	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
60	0.08	0.06	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08
70	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
80	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
90	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
100	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02

注：本実験において、改良効果が期待できる薬液充填率の最小値と各実験ケースの $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ の値

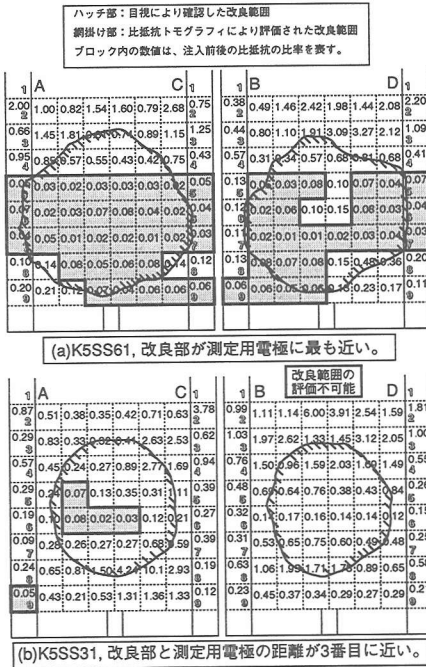


図-11 提案した方法により評価された改良範囲と確認された改良範囲の比較した改良範囲

確認した改良範囲の位置において比抵抗の低下は小さくなり、改良部と電極が最も離れた実験の結果では、解析で得られた比抵抗の変化は小さい。

(2)改良範囲の評価の試み

本節では、前節で述べた実験結果に対して、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、その有効性を検討する。

表-2に示した各実験ケースにおける地盤の間隙比、間隙水の電気比抵抗を式(1)に代入し、さらに薬液ゲルの電気比抵抗を、実測値である $0.62\Omega\cdot m$ とすることにより各実験ケースの注入前後の電気比抵抗の比率 ρ_{sg}/ρ_{sw} と薬液充填率 α の関係を求めた。その結果を表3に示す。なお、パラメータ σ については、今回使用した三河珪砂5号が豊浦標準砂とほぼ同程度の粒度特性および透水係数を有することから、図

-2の実線で示される σ - α 関係を用いた。砂粒子の電気比抵抗には、文献3)4)に示した三河珪砂3号の砂粒子の比抵抗である $562.6\Omega\cdot m$ を用いた。

改良範囲の評価を行うためには、図-1に示すように、改良効果があるときの薬液充填率を一意的に求めなければならない。薬液ゲルが断続的でなく連続し砂粒子間に十分浸透している状態であれば、現行の設計目標値¹⁵⁾である一軸圧縮強度 $98.1kPa$ 以上、透水係数 $10^{-5}cm/sec$ 以下を満足し十分に改良効果が期待できる^{1),2)}。三河珪砂5号の場合、薬液充填率が60%以上であれば一軸圧縮強度および透水係数とも上記の現行の設計目標値を満足し十分改良効果が期待できる^{1),2)}。したがって、文献1),2)で試みた改良範囲の評価と同様に、改良効果があるときの薬液充填率を60%とし改良範囲の評価を試みた。薬液充填率 α が60%のときの表-3に示す ρ_{sg}/ρ_{sw} の値(網掛け部)が改良部における電気比抵抗の変化比率の上限値 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ になる。そこで、先に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変化比率を有する範囲を改良範囲と評価した。その結果、 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ 以下の電気比抵抗の変化比率を有する範囲が一部でも認められた実験ケースはK5SS61, K5SS51, K5SS31およびK5SS22であり、その内、良好な改良範囲の評価はK5SS61とK5SS51で実施できた。それ以外の実験ケースでは、 $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ 以下の範囲は認められず、改良範囲の評価は不可能であった。

図-11にはK5SS61とK5SS31の評価結果を例示した。図-11(a)は、薬液による改良部と測定用電極が最も接近したK5SS61の場合の評価結果を示している。この場合、比抵抗トモグラフィによりおおよそ改良範囲の評価が可能と考えられる。しかし、図-11(b)に示すK5SS31の場合には、評価された改良範囲と目視により確認した改良範囲はほとんど一致せず良好な評価はできない。

(3)電極配置の検討結果

改良範囲の評価におよぼす電極配置の影響を調べるため、改良部に位置する範囲の注入前後の比抵抗の低下率に着目して実験結果を整理した。改良部に位置する範囲の各比抵抗ブロックにおいて、注入後と注入前の比抵抗の比を求め、それらの平均値を(注入後の比抵抗/注入前の比抵抗)と表示する。そして、各実験ケースの(注入後の比抵抗/注入前の比抵抗)を求め、後述する改良部の大きさを表すパラメータにおいて整理した。上記の改良部に位置する比抵抗ブロックは、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にほぼ内接する

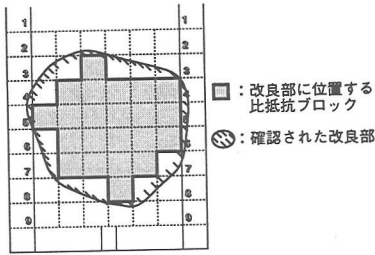


図-12 改良部に位置する比抵抗ブロックの設定方法

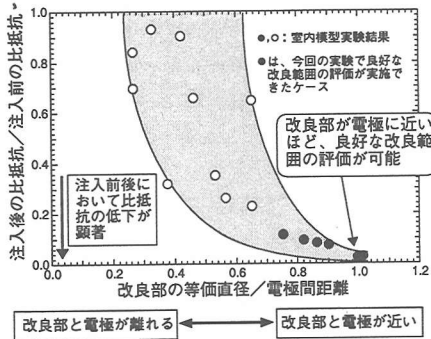


図-13 比抵抗測定における電極配置の検討結果

ブロックとした。図-12に改良部に位置する比抵抗ブロックの設定方法を示す。図-9には、改良部に位置する比抵抗ブロックを網掛け部で表示している。

改良部の大きさを表すパラメータは次の通りである。まず、改良部に位置する比抵抗ブロックの面積と等価な円を想定し、その直径を等価直径と定義する。この等価直径と測定に用いる2本の電極を内蔵した円柱棒間の距離、すなわちA-C間もしくはB-D間の距離(=300mm)の比を、改良部の大きさを表すパラメータとして用いた。以下、このパラメータを(改良部の等価直径/電極円柱棒間距離)と記述する。各実験で得られる改良部は、スケッチからも分かるように、ほぼ球状であり、改良部の実際の直径と等価直径はほぼ等しいものと考えられる。

以上のデータ整理より図-13が得られる。この図には、文献1,2)で報告した実験の内、浸透注入もしくは割裂浸透注入が生じ改良部が得られた実験結果についても同様のデータ整理を行い、その結果を併記している。なお、併記した文献1,2)の実験では、提案した評価方法によりすべて良好な改良範囲の評価が実施できた。この図より、(改良部の等価直径/電極円柱棒間距離)が1.0に近づくに従い、改良部に位置するブロックの比抵抗値が注入前後で著しく低下することが分かる。すなわち、改良部と電極が

近づくに従い注入前後の比抵抗の変化比率が大きくなるので、改良範囲の評価精度が向上すると考えられる。実際、図-13から分かるように、改良部と電極が近い場合に提案した方法により良好な改良範囲の評価が実施できた。今回実施した実験では、改良部の寸法が電極円柱棒間の距離の0.75倍以上を占有する場合に、比較的良好的な改良範囲の測定・評価が実施できた。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、また都市土木工事で対象となる地盤には多くの埋設物も存在している。このような状況から、可能な限り改良部と電極を接近させた条件で比抵抗測定を実施することが望ましい。実際には、工事の設計・計画の段階で設定し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、電極を配置すれば良好な測定ができる。

5. 薬液と地下水の比抵抗に関する適用限界

(1) 実験結果

表-4に実験ケースの条件を示す。図-14に、その内、K5KK51とK5KN51の2ケースの実験結果を例示する。図-14は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全体時に確認した改良部を比較したものであり、表示方法は図-9と同様である。また、本節で述べるすべての実験における注入形態もすべて浸透注入であった。

図-14の結果から、薬液と間隙水の比抵抗のコントラストが小さいと、改良部に位置する範囲の比抵抗値と周辺の未改良部分の値との差異が小さくなることが分かる。図-14(a)は、間隙水の比抵抗が $34.9 \Omega \cdot m$ である地盤に $1.23 \Omega \cdot m$ の比抵抗を有する寒天溶液を注入した実験の結果である。すなわち、薬液の比抵抗が間隙水の約 $1/30$ の場合の実験結果である。この場合、改良部に位置する範囲の比抵抗値は周辺の未改良部の $1/5 \sim 1/10$ 程度の値を示している。先の図-9(a)に示したK5SS61は、間隙水の比抵抗が $31.2 \Omega \cdot m$ である地盤に $0.62 \Omega \cdot m$ の比抵抗を有する溶液型水ガラス薬液を注入した実験であるが、この結果においても改良部に位置する範囲の比抵抗は周辺の未改良部分の $1/20 \sim 1/100$ 程度である。これらの場合、その著しく小さい比抵抗値の分布から良好な精度を有して改良範囲を評価できると考えられる。一方、図-14(b)は間隙水の比抵抗が $44.7 \Omega \cdot m$ である地盤に $21.17 \Omega \cdot m$ の比抵抗を有する寒天溶液を注入した実験の結果である。すなわち、薬液の比抵抗が間隙水の比抵抗の約 $1/2$ の場合の実験結果である。この場合、改良部に位置する範囲の比抵抗値は周辺の未改良部の値とほとんど変わらず、このような場

表-4 実験ケース一覧

実験ケース	横型地盤の軟化率 ρ_g/ρ_w	横型地盤の間隙比 e	薬液の種類	薬液注入量 C(ml)	薬液ゲルの比抵抗 $\rho_{sg} \cdot \Omega \cdot m$	間隙水の比抵抗 $\rho_w \cdot \Omega \cdot m$	ρ_g	注入速度 : $\mu m/s$
1 K5SS61	1.51	0.75	溶液型水ガラス薬液	5762	0.62	31.2	0.020	1.6
2 K5KK51	1.51	0.75	薬天溶液	4919	1.23	34.9	0.035	2.2
3 K5KL51	1.51	0.75	薬天溶液	5109	4.19	43.1	0.097	3.7
4 K5KP51	1.51	0.75	薬天溶液	5079	8.41	44.7	0.188	4.4
5 K5KM51	1.51	0.76	薬天溶液	5146	10.54	47.1	0.224	4.6
6 K5KG51	1.50	0.76	薬天溶液	4501	15.27	38.1	0.401	4.5
7 K5KN51	1.50	0.76	薬天溶液	4074	21.17	44.7	0.474	3.1

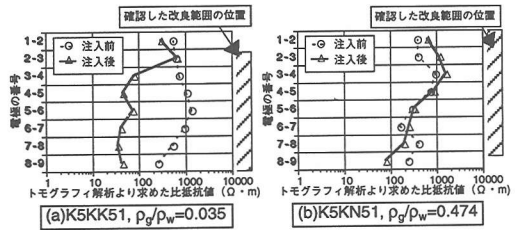


図-15 トモグラフィ解析より求めた注入前後における電気比抵抗の変化

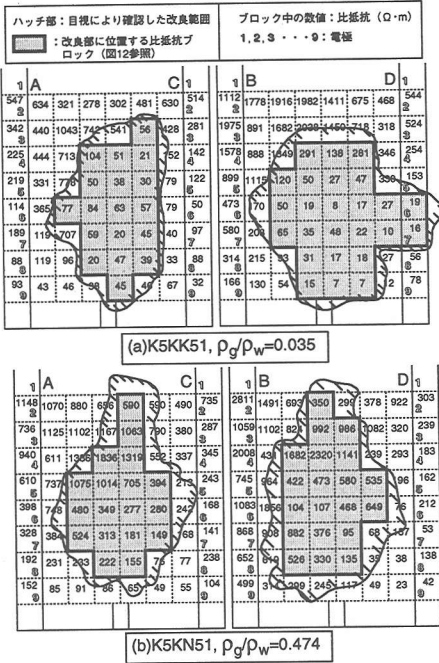


図-14 確認した改良範囲と比抵抗トモグラフィの結果の比較

合には改良範囲の評価は困難と考えられる。図-15は、図-14に示した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ものである。データ整理方法は図-10(a)に示した通りである。図-15(a)に示すように、薬液と間隙水の比抵抗のコントラストが比較的大きい実験ケースでは、確認した改良範囲の位置において比抵抗が著しく低下している。一方、図-15(b)に示すように、薬液と間隙水の比抵抗のコントラストが小さいと、確認した改良範囲の位置において比抵抗の低下は小さくなる。

(2)改良範囲の評価の試み

本節では、前節で述べた実験結果に対して、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、その有効性を検討する。

表-4に示した各実験ケースにおける地盤の間隙比、間隙水および注入薬液ゲルの電気比抵抗を式(1)に代入することにより各実験ケースの注入前後の電気比抵抗の比率 ρ_{sg}/ρ_w と薬液充填率 α の関係を求めた。その結果を表-5に示す。なお、パラメータ σ は、4章(2)と同様に、図-2の実線で示される σ - α 関係を用いた。砂粒子の電気比抵抗も、文献(3,4)に示した三河珪砂3号の値である $562.6 \Omega \cdot m$ を用いた。また、改良効果があるときの薬液充填率も、4章(2)と同様に60%とし、それに対応する表-5に示す ρ_{sg}/ρ_w の値(網掛け部)を $(\rho_{sg}/\rho_w)_{cr}$ とした。この値に基づき評価した結果を図-16に示す。

薬液と間隙水の比抵抗のコントラストが比較的大きい場合は、図-16(a)に示すように比抵抗トモグラフィによりおおよそ改良範囲の評価が可能と考えられる。薬液と間隙水の比抵抗のコントラストが最も大きいケースのK5SS61でも、図-11(a)に示したように、十分良好な改良範囲の評価が可能であった。しかし、薬液と間隙水の比抵抗のコントラストが小さいと、図-16(b)に示すように評価された改良範囲と目視により確認した改良範囲はほとんど一致せず良好な評価は不可能と考えられる。

(3)薬液と地下水の比抵抗に関する適用限界

改良範囲評価における薬液と地下水の比抵抗に関する適用限界を明らかにするため、改良部に位置する範囲の注入前後の比抵抗の低下に着目して実験結果を整理した。4章(3)と同様に、各実験結果において(注入後の比抵抗/注入前の比抵抗)を求め、薬液と間隙水の比抵抗の比(薬液ゲルの比抵抗/間隙水の比抵抗)において整理した。改良部に位置する比抵抗ブロックは図-12に示した方法により設定し、図-14に網掛け部で表示した。以上のデータ整理より図-17が得られる。

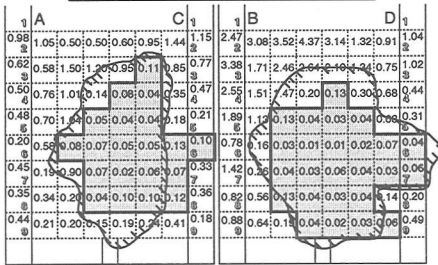
図-17より、(薬液ゲルの比抵抗/間隙水の比抵抗)の値が0.1以下であれば、すなわち薬液の比抵抗が間隙水の1/10以下であれば、改良部において注入

表-5 各実験ケースの式(1)より得られる ρ_{sg}/ρ_{sw} の値

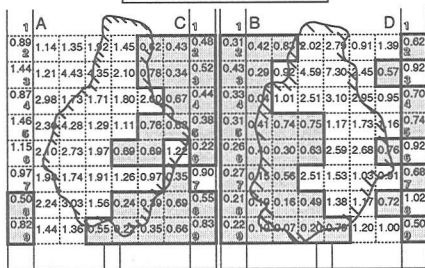
薬液 充填率 $\alpha(\%)$	式(1)より得られる ρ_{sg}/ρ_{sw} の値						
	KSSS61	KSKK51	KSKL51	KSKP51	KSKM51	KSKQ51	KSKN51
40	0.21	0.32	0.60	0.79	0.83	0.96	0.99
50	0.12	0.20	0.43	0.64	0.70	0.89	0.94
60	0.08	0.13	0.32	0.52	0.58	0.80	0.87
70	0.05	0.09	0.24	0.42	0.48	0.71	0.79
80	0.04	0.07	0.19	0.34	0.39	0.62	0.71
90	0.03	0.05	0.15	0.27	0.32	0.54	0.63
100	0.02	0.04	0.12	0.23	0.27	0.46	0.55

※: 本実験において、改良効果が期待できる薬液充填率の最小値と各実験ケースの $(\rho_{sg}/\rho_{sw})_{cr}$ の値

ハッチ部: 目視により確認した改良範囲
網掛け部: 比抵抗トモグラフィにより評価された改良範囲
ブロック内の数値は、注入前後の比抵抗の比率を表す。



(a)KSKK51, $\rho_g/\rho_w=0.035$



(b)KSKN51, $\rho_g/\rho_w=0.474$

図-16 確認した改良範囲と比抵抗トモグラフィの結果の比較

前後の比抵抗の低下が顕著になる。このような場合には、比抵抗トモグラフィにより良好な精度を有して改良範囲の評価が可能であると考えられる。一方、(薬液ゲルの比抵抗/間隙水の比抵抗)の値が0.1より大きい場合は、注入前後の比抵抗の低下は小さく、値のバラツキも大きくなり、良好な精度を有した改良範囲の評価は困難となる。実際、図-17から分かるように、(薬液ゲルの比抵抗/間隙水の比抵抗)の値が0.1以下の場合に提案した方法により良好な改良範囲の評価が実施できた。

表-6は砂質地盤の薬液注入で一般に使用されている溶液型水ガラス薬液、懸濁型LW薬液および無機溶液型シリカゾル系薬液の電気比抵抗の測定結果および地下水と海水の電気比抵抗の一般的な値を示す。これらの結果から、一般的な地下水の場合には(薬液ゲルの比抵抗/間隙水の比抵抗)の値が0.1以下と

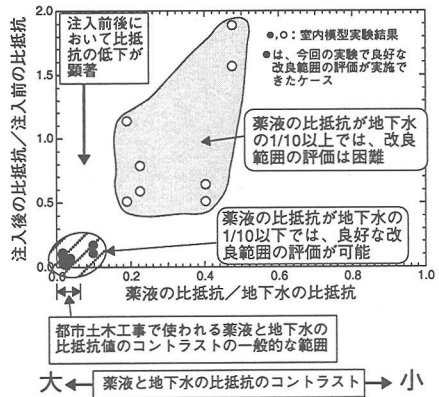


図-17 改良範囲評価における薬液と地下水の比抵抗値のコントラストの影響

表-6 各種薬液ゲルおよび地下水や海水の電気比抵抗

種類	電気比抵抗 : $\Omega \cdot m$	薬液の配合	
		主剤	硬化剤
溶液型水ガラス薬液	0.62	3号水ガラス:350ml 蒸留水:150ml	ゲル特-N:50ml リン酸:12ml 蒸留水:438ml
懸濁型LW薬液	1.30	3号水ガラス:250ml 蒸留水:250ml	セメント:200g 残り:蒸留水
無機溶液型 シリカゾル系薬液	0.40	シリカゾル:200ml	B1剤:0.8-1.2g K剤:6.0g 蒸留水:97.3-97.1ml
地下水	20-80	—	—
海水	0.3	—	—

なる。したがって、溶液型水ガラス薬液、懸濁型LW薬液および無機溶液型シリカゾル系薬液の場合、比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法は海水の影響を受ける地点を除くほとんどの地盤に対して適用可能であると考えられる。

以上に述べたように、比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法は改良部の電気比抵抗の低下に基づくものであるため、その適用限界を十分把握した上で実施しなければならない。すなわち、実地盤への適用に当たっては、使用する薬液の電気比抵抗と地盤条件、特に地下水の電気比抵抗について十分検討して利用しなければならない。実際、薬液注入工事の事前調査等で対象地盤の土質試料や地下水を採取している場合が多い。したがって、この時点で地下水と使用する薬液の電気比抵抗を測定しておけば、図-17を用いて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可能か否か判断できる。

6. 結論

本研究の主な結論は以下の通りである。

- (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において、薬液による改良部が測定用電極に近いほど改良範囲を高精度に測定・評価でき

ることを室内模型実験の結果から明らかにした。今回の室内模型実験では、改良部の寸法が測定用電極間の距離の0.75倍以上を占有する場合に、比較的良好的な改良範囲の測定・評価が実施できた。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、都市土木工事で対象となる地盤には多くの埋設物も存在している。このような状況から、可能な限り改良部と電極を接近させた条件で比抵抗測定を実施することが望ましい。このことから、工事の設計・計画の段階で設定し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性を示した。

(2)地下水と薬液の比抵抗については、両者の比抵抗の間に明確な差異があるほど精度良く改良範囲の評価ができ、薬液の比抵抗が地下水の1/10以下程度であれば、十分良好な評価が可能であることを明らかにした。そして、一般に使用される溶液型水ガラス薬液、懸濁型LW薬液および無機溶液型シリカ系薬液の場合、海水の影響を受ける地点を除くほとんどの地盤に対して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が適用できることが分かった。

(3)比抵抗トモグラフィを利用した改良範囲評価方法を地盤へ適用する際には、使用する薬液の電気比抵抗と地盤条件、特に地下水の電気比抵抗について十分検討して利用する必要性を示した。具体的には、薬液注入工事の事前調査等で採取した地下水と使用する薬液の電気比抵抗を測定しておけば、図-17を用いて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可能か否か判断できる。

謝辞：本論文をまとめるにあたり(財)電力中央研究所栗原千鶴子博士、田中幸久博士、楠健一郎博士に御指導賜りました。(株)CRSの田代勝浩氏、日本ワトケニカルの伊藤操氏には実験業務を援助して頂きました。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) 物理探査学会: 図解 物理探査, 1989.
- 6) 吉住永三郎, 菅野強: 電極配置の感度分布(I)地表電極配列, 物理探査, Vol.25, No.1, pp.27-33, 1972.
- 7) Archie, G.E.: The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics, *Transaction of AIME*, Vol.146, pp. 54-62, 1942.
- 8) Arulanandan, K. and Muraleetharan, K.K.: Level ground soil - Liquefaction analysis using in situ properties: I, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 114(7), pp. 753-770, 1988.
- 9) 土質工学会編: 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, 1985.
- 10) 桧垣貫司, Fretti, C., Morabito, P.: 液状寒天注入による乾燥砂の単位体積重量測定, 土質工学会昭和63年度サンプリングシンポジウム発表論文集, pp.75-82, 1989.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) (社)日本薬液注入協会: 薬液注入工法の設計・施工指針, 1989.

(1996. 2. 14 受付)

APPLICABILITY OF EVALUATION OF IMPROVED REGION BY RESISTIVITY TOMOGRAPHY IN CHEMICAL GROUTING

Hideo KOMINE

In chemical grouting, it is difficult to evaluate the improved region. To solve this problem, we proposed the evaluation method of improved region by resistivity tomography. In this study, the applicability of this method was investigated by a series of model tests in the laboratory from the viewpoints of the electrode arrangement and the resistivity contrast between grout and ground water. The test results showed that the evaluation was accurate if the electrodes and solidified region were close to each other. The electrodes must therefore be placed at the adjacent points to the grouting region designed. Furthermore, the test results showed that the improved region was evaluated accurately when the resistivity of the grout was less than one-tenth of the resistivity of the ground water.