

# 電気比抵抗による薬液注入改良部の充填率の評価方法

小峯秀雄\*

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。本研究では室内実験により、注入後の固結砂の電気比抵抗と改良効果の指標となる薬液充填率が良い相関性を有していることを示した。この実験事実から電気比抵抗による改良部の薬液充填率の評価が可能であると考え、固結砂の電気伝導機構をモデル化し、注入前後の電気比抵抗の変化から薬液充填率を簡易に精度良く求める方法を提案した。

**Keywords** : chemical grouting, electrical resistivity, void filling ratio, improvement effect, laboratory test

## 1. ま え が き

近年、都市機能の高度化が著しく進んでいるが、それに伴い、都市地上部の利用可能空間が減少している。このような現況において、地下空間の利用に関心が寄せられ、都市インフラストラクチャーの地下化が進んでいる。このような都市の地下構造物建設に際しては、シールド工事や開削工事が頻繁に行われる。しかし、都市部の地盤構造は非常に複雑であり、また、必ずしも必要な地盤強度や透水係数を有しているとは限らない。このような工事においては、薬液注入工法に代表される地盤改良工法を併用することが多い。

薬液注入工法は、地盤の強度増加や止水性向上を目的とし、シールド工事での切羽の安定、トンネル建設や開削工事の際の近接構造物の防護等のために用いられる。この工法は短期に、かつ狭いスペースで施工が可能であるなどの理由により頻繁に利用されているが、次のような問題点も有している。

- ① 薬液注入後の改良範囲や改良効果（地盤の強度増加や止水性向上）の評価方法が、確立していない。
- ② 地盤状況に応じた適切な注入条件（注入速度や注入圧）の決定が困難である。
- ③ 地盤の不均一性や改良後の地盤の工学的性質の不確定性などから、注入範囲は経験的に設定されるのが一般的であり、その設定方法についての理論的な裏付けが不明確である。

このうち、薬液注入後の改良範囲や改良効果の評価方法の開発は、薬液注入工事の施工管理において重要であり、急務と考えられている。これまでも薬液注入による改良範囲や改良効果の評価方法がいくつか提案されている<sup>1)~5)</sup>が、注入後の改良範囲や改良部の力学的な物性

値を定量的に評価できる方法には至っていない。

本研究では、砂質地盤での薬液注入工事で頻繁に利用される溶液型水ガラス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て、電気比抵抗による改良効果の評価について室内実験および検討を行った。特に、ここでは改良効果を示す物性値として、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示す薬液充填率を取り上げ、電気比抵抗から改良部の薬液充填率を評価する方法の提案を行った。

## 2. 実験方法

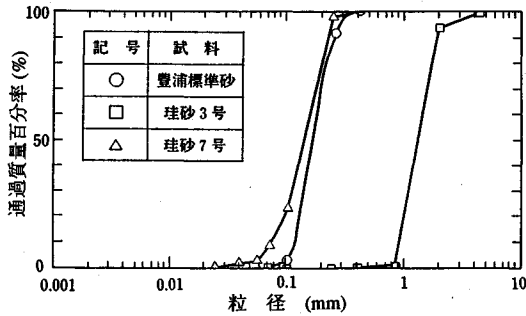
本実験は、電気比抵抗による評価方法の開発を念頭に置いて実施したものである。今回は薬液が浸透注入、すなわち土の間隙に薬液が浸透して間隙水を薬液で置換した状態が生じる場合を想定し、後述する方法により室内で作製した薬液固結砂を用いて実験を実施した。なお、浸透注入は砂質地盤を対象とした薬液注入において頻繁に生じる注入形態である。

注入後の改良部の品質を評価するためには、改良部ほどの程度薬液が注入されたか把握する必要がある。そこで、固結砂の電気比抵抗と薬液充填率との関係について室内実験により調査し、電気比抵抗により薬液充填率の評価が可能か検討する。

### (1) 使用した試料および薬液

本実験では浸透注入が可能な砂質地盤を想定して、粒度分布が異なる三種類の砂を用いた。使用した試料砂は豊浦標準砂（比重  $G_s=2.64$ ；平均粒径  $D_{50}=0.18$  mm）、三河珪砂 3号（比重  $G_s=2.64$ ；平均粒径  $D_{50}=1.40$  mm）および三河珪砂 7号（比重  $G_s=2.63$ ；平均粒径  $D_{50}=0.15$  mm）である。これらの試料砂の粒度分布を図-1に示す。また今回は、浸透注入が可能な砂地盤を想定しているので、このような地盤に一般に用いられている溶液型水ガラスを使用した。使用した薬液は主剤の濃度が

\*正会員 工修（財）電力中央研究所 土質研究室担当研究員  
（〒270-11 千葉県我孫子市我孫子 1646 番地）



図一 使用した試料砂の粒度分布

表一 使用した薬液の配合 (ゲルタイム：25～30分)

薬液	主剤濃度 (%)	配合			
		主剤 500ml		硬化剤 500ml	
Grout A	50	3号水ガラス 500ml	ケリキナー-A リン酸 蒸留水	50ml 12ml 438ml	
Grout B	35	3号水ガラス 350ml 蒸留水 150ml	ケリキナー-A リン酸 蒸留水	50ml 12ml 438ml	
Grout C	25	3号水ガラス 250ml 蒸留水 250ml	ケリキナー-A リン酸 蒸留水	50ml 12ml 438ml	

異なる三種類を用い、主剤濃度が50%の薬液をGrout A、35%の薬液をGrout B、そして25%の薬液をGrout Cとした。これらの主剤濃度は、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<sup>5)</sup>。それぞれの薬液の配合を表一に示す。

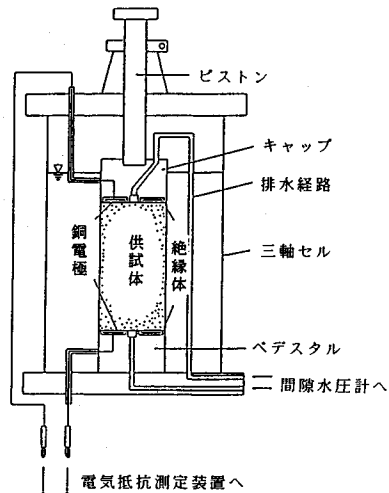
(2) 薬液による固結砂供試体の作製方法

310gの気乾状態の試料砂と目標とする薬液充填率相当量の薬液をビニール袋の中に投入し手で混合した後、二つ割モールド(直径5cm、高さ10cm)に投入し、さらにハンマーでモールドを叩くことにより振動を与えて所定の乾燥密度に締め固める。この方法により直径5cm、高さ10cmの円筒形の固結砂供試体を作製する。その後、二つ割モールドから脱型し、蒸留水中で一日養生し飽和させる。なお、後述する電気比抵抗測定を実施した後に含水比測定を行い、本実験で用いた全ての供試体の飽和度は100～107%の範囲にあり、測定精度を考えると全て飽和していると考えられる。固結砂の薬液充填率 $\alpha$ (%)は薬液の量を変えることにより変化させる。薬液充填率 $\alpha$ (%)は次式で計算される<sup>6)</sup>。

$$\alpha(\%) = \frac{V_g}{V \cdot (n/100) \cdot (1 + \beta)} \times 100 \dots\dots\dots (1)$$

- ここに、 $V_g$ ：供試体中の薬液ゲルの体積 (cm<sup>3</sup>)
- $V$ ：供試体体積 (cm<sup>3</sup>)
- $n$ ：間隙率 (%)
- $\beta$ ：損失係数

なお、損失係数 $\beta$ は、計画された改良範囲外に逸脱する薬液の割合を示す値であり、施工上の安全率として



図二 銅電極を内蔵した三軸圧縮試験装置

薬液充填率の中で経験的に考慮される値である。今回の室内実験では、所定量の薬液は確実に砂中に存在すると考えられるので、 $\beta$ を0としている。

(3) 電気比抵抗の測定方法

a) 飽和未固結砂の電気比抵抗測定方法

固結砂の電気比抵抗特性を調査する前に、注入前の地盤の電気比抵抗に相当する飽和未固結砂(地下水位以下の飽和した砂地盤を想定)の電気比抵抗特性を調査しておく必要がある。

飽和未固結砂の電気比抵抗の測定は、図二に示す電気比抵抗測定用の銅電極を内蔵した三軸圧縮試験装置を用いて行った。なお銅電極は装置本体から絶縁されているので、測定される電気比抵抗には、装置の比抵抗は影響しない。試料として豊浦標準砂と三河珪砂3号を用いた。供試体(直径5cm、高さ10cm)は、ゴムメンブレンを取り付けた成型モールド内で乾燥砂を突き固めることにより作製した。その後、供試体を飽和させるために、脱気水を用いて約1時間供試体中を通水する。飽和未固結砂の電気比抵抗は間隙水の電気比抵抗により変化すると考えられる。そこで、本実験では数種類の電気比抵抗の異なる脱気水を通水した後、飽和未固結砂の電気比抵抗と間隙水の比抵抗との関係を調査した。脱気水は、電気比抵抗の比較的低い水道水と比抵抗の高い蒸留水を所定の体積比で混合・脱気して作製した。通水後、供試体中に残った脱気水が飽和未固結砂の間隙水となる。しかし、通水の過程で脱気水の電気比抵抗の変化が考えられるので、供試体中を通過してきた水の比抵抗を間隙水の比抵抗とした。

通水後、供試体を拘束圧1.1 kgf/cm<sup>2</sup>、背圧0.1 kgf/cm<sup>2</sup>のもとで圧密を行い、圧密終了後に飽和未固結砂の電気比抵抗の測定を行う。電気比抵抗の測定はL. C. R.メー

タにより行う。測定には正弦波交流電圧を用い、その最大電圧を1V、周波数を1kHzとして実施した<sup>7)</sup>。なお、測定に用いた交流電圧が定電圧であることをオシロスコープにより確認している。測定終了後、供試体の含水比測定を行う。得られた飽和未固結砂の電気抵抗値  $R_{sw}$  ( $\Omega$ ) から式(2)により飽和未固結砂の電気比抵抗  $\rho_{sw}$  を求める<sup>8)</sup>。また、間隙水の比抵抗測定は図-3に示す水槽を用いた。この水槽はほぼ絶縁体と見なせるアクリルで作製している。この水槽を供試体中を通過してきた水で満たし、図中の銅電極間の電気抵抗  $R_w$  を測定する。電気抵抗の測定条件は飽和未固結砂の電気抵抗測定と同様である。この電気抵抗  $R_w$  から間隙水の電気比抵抗  $\rho_w$  を式(3)に基づき算出した。

$$\rho_{sw} = R_{sw} \cdot \frac{A_{sw}}{L_{sw}} (\Omega \cdot m) \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 $A_{sw}$  : 飽和未固結砂供試体の断面積 ( $m^2$ )  
 $L_{sw}$  : 飽和未固結砂供試体の高さ (m)

$$\rho_w = R_w \cdot \frac{W \times H}{L} (\Omega \cdot m) \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 $W$  : アクリル水槽の横幅 (=0.05013 m)  
 $H$  : アクリル水槽内の水の水深 (=0.05010 m)  
 $L$  : 銅電極間の距離 (=0.09863 m)  
 $R_w$  : アクリル水槽で測定される水の抵抗 ( $\Omega$ )

b) 薬液固結砂の電気比抵抗測定方法

薬液固結砂の電気比抵抗測定も図-2の装置を用いて実施する。先述した方法により作製、養生した薬液固結砂をゴムメンブレンで覆い、図-2の装置に設置した後、通水を行う。固結砂の場合は未固結砂と異なり、水の浸透が非常に困難であるため、本実験においてはフラッシング<sup>9),10)</sup>により飽和を行った。フラッシングとは供試体セット時に混入する気泡を除去するものである。その手順は次の通りである。まず気泡の混入しやすいポーラスストーンや供試体側面等に供試体下部から脱気水を送り込んで、供試体セットを行うと共に、気泡を洗い流す。さらに供試体セット後、ゴムメンブレンが膨らまない程度に脱気水を送り込み、供試体全体の残存気泡を洗い流す。フラッシングの後、供試体を拘束圧  $1.1 \text{ kgf/cm}^2$ 、背圧  $0.1 \text{ kgf/cm}^2$  のもとで圧密を行い、圧密終了後に薬液固結砂の電気抵抗の測定を行う。測定方法は a) と同様に行った。得られた固結砂の電気抵抗  $R_{sg}$  ( $\Omega$ ) から飽和未固結砂と同様に、式(4)により固結砂の電気比抵抗  $\rho_{sg}$  を求める。また、薬液固結砂の間隙水はフラッシング時に排水される脱気水とし、飽和未固結砂の場合と同様に、この脱気水を図-3の水槽に投入して得られた電気抵抗から式(3)に基づき間隙水の比抵抗  $\rho_w$  を算出した。

$$\rho_{sg} = R_{sg} \cdot \frac{A_{sg}}{L_{sg}} (\Omega \cdot m) \dots\dots\dots (4)$$

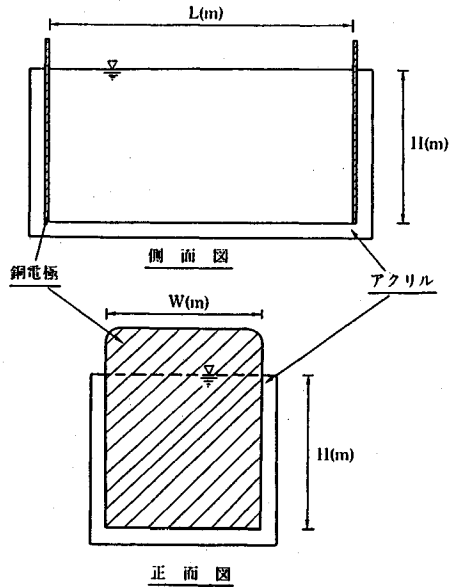


図-3 間隙水の電気抵抗測定用水槽

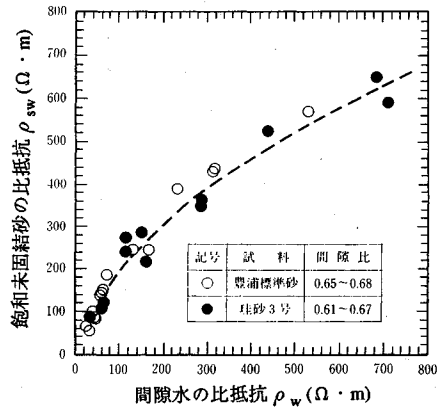


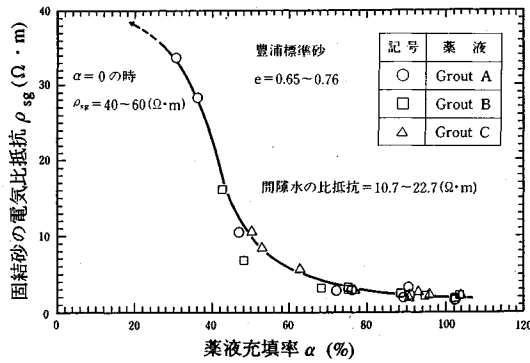
図-4 飽和未固結砂の電気比抵抗と間隙水の比抵抗の関係

ここに、 $A_{sg}$  : 薬液固結砂供試体の断面積 ( $m^2$ )  
 $L_{sg}$  : 薬液固結砂供試体の高さ (m)

3. 実験結果

(1) 飽和未固結砂の電気比抵抗測定結果

図-4に豊浦標準砂および珪砂3号を試料とした実験結果を飽和未固結砂の電気比抵抗と間隙水の比抵抗との関係として示す。なお豊浦標準砂の供試体乾燥密度  $\gamma_d$  は  $1.57 \sim 1.60 (\text{g/cm}^3)$ 、間隙比  $e$  は  $0.65 \sim 0.68$  である。一方、珪砂3号の供試体乾燥密度  $\gamma_d$  は  $1.58 \sim 1.64 (\text{g/cm}^3)$ 、間隙比  $e$  は  $0.61 \sim 0.67$  である。飽和未固結砂の電気比抵抗はその間隙水の比抵抗に大きく影響され、間隙水の比抵抗の増加に伴い飽和未固結砂の電気比抵抗は単調に増加する傾向が見られる。また、豊浦標準砂と珪砂3号の実験結果の比較から、両試料の粒度分布



図—5 固結砂の電気比抵抗と薬液充填率の関係（豊浦標準砂）

が異なるにもかかわらず、飽和未固結砂の電気比抵抗と間隙水の比抵抗の関係には顕著な違いは見られない。このことから、間隙比が同じであれば、飽和未固結砂の電気比抵抗と間隙水の比抵抗の関係は一義的であり、この関係に及ぼす試料砂の粒度分布の影響は小さいことが推察される。

(2) 薬液固結砂の電気比抵抗測定結果

図—5 は三種類の薬液により固結した豊浦標準砂の電気比抵抗と薬液充填率との関係を示したものである<sup>11)</sup>。図中の固結砂の間隙比は飽和未固結砂の間隙比と同じ定義であり、供試体作製時に使用した試料砂の質量と供試体体積および試料砂の比重より算出した。なお、式(1)で計算される薬液充填率は間隙比等の測定精度上100%を越える場合がある。また、ここで使用した供試体の間隙水の電気比抵抗は10.7~22.7(Ω·m)である。この図より、同一の試料砂であれば電気比抵抗と充填率はほぼ一義的な関係にあり、溶液型水ガラスを注入薬液とする固結砂の電気比抵抗は薬液充填率に大きく影響されるものと考えられる。そして、間隙水の電気比抵抗の影響は、先に示した10.7~22.7(Ω·m)の範囲においてはほとんどないものと考えられる。また、同図より溶液型水ガラスを注入薬液とする固結砂の電気比抵抗と薬液充填率との関係は、その主剤濃度にほとんど影響されないものと考えられる。この理由は表—2に示すように、今回使用した主剤濃度の範囲ではそのホモゲル(薬液が固化したもの)の比抵抗の値にほとんど差がなく、0.6~0.7(Ω·m)であるためと考えられる。

豊浦標準砂の場合、薬液充填率が60(%)以下において固結砂の電気比抵抗は充填率の増加と共に急激に減少し、充填率60(%)以上になるとその電気比抵抗は1.0~5.0(Ω·m)の間で安定している。この固結砂の電気比抵抗特性には土の間隙中に存在する薬液ゲルの連続性が影響していると考えられる。土中の薬液ゲルが連続していれば、固結砂全体の比抵抗は薬液ゲルの比抵抗に大きく支配されるが、薬液ゲルの不連続性の増加に伴い、

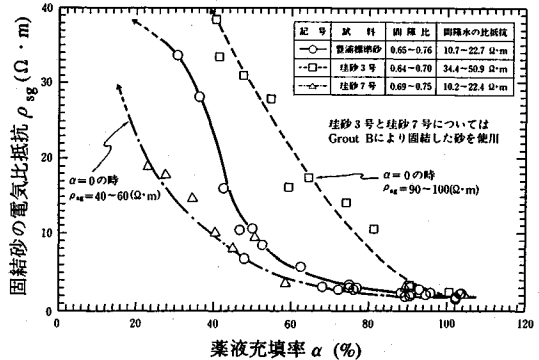
表—2 各薬液ホモゲルの電気比抵抗 表—3 試料の透水係数

薬液	電気比抵抗
Grout A	0.68
Grout B	0.62
Grout C	0.69

(単位: Ω·m)

試料	透水係数
豊浦標準砂	$1.5 \times 10^{-2}$
珪砂3号	$1.1 \times 10^{-1}$
珪砂7号	$3.7 \times 10^{-3}$

(単位: cm/sec)



図—6 固結砂の電気比抵抗と薬液充填率の関係（豊浦標準砂、珪砂3号および珪砂7号の比較）

薬液ゲルの比抵抗の影響は小さくなると考えられる。このことから豊浦標準砂の場合、充填率が60%以上では、薬液ゲルはほぼ連続しており、60%以下では、所々不連続状態になっていると考えられる。

次に、図—6に珪砂3号と珪砂7号を試料としGrout Bにより固結した砂の電気比抵抗と薬液充填率の関係を示す。同図には先に示した豊浦標準砂の結果も併記している。なお間隙水の電気比抵抗は珪砂3号の場合は34.4~50.9(Ω·m)、珪砂7号の場合は10.2~22.4(Ω·m)であり、豊浦標準砂と同様に、この範囲内での間隙水の比抵抗の影響は非常に小さいと考えられる。豊浦標準砂の実験結果と比較すると、珪砂3号の場合は、充填率が40%から90%の範囲において、同じ充填率の豊浦標準砂の固結砂と比べて大きい比抵抗を示している。そして充填率が100%付近においては、豊浦標準砂および珪砂3号のいずれもほぼ等しい値を示している。珪砂3号のように平均粒径が大きく、細粒分の少ない試料砂の場合は、間隙径も大きくなるために薬液充填率の低下にともない間隙中に存在する薬液ゲルが不連続になりやすいと考えられる。したがって、薬液充填率が40~90%において珪砂3号の場合は同じ薬液充填率、すなわち同じ薬液量が土中に存在しても間隙中に存在する薬液ゲルの不連続性は豊浦標準砂と比べて大きく、その結果、電気比抵抗も大きくなったものと考えられる。そして、充填率100%では、豊浦標準砂および珪砂3号いずれの場合も薬液ゲルの連続性が完全に保持されるために、両者はほぼ等しい電気比抵抗を示すものと考えられる。

また、珪砂7号の実験結果を珪砂3号の結果と同様に、豊浦標準砂の実験結果と比較すると、充填率が30~60%の範囲において同じ充填率の場合、珪砂7号の固結砂の方がやや低い電気比抵抗の値を示している。図-1に示すように珪砂7号は豊浦標準砂とほぼ等しい平均粒径を有しているが、有効径  $D_{10}$  は珪砂7号の方が小さい。事実、表-3に示す定水位透水実験により求められる透水係数を比較しても、珪砂7号の透水係数は豊浦標準砂と比べて小さくなっている。以上から、珪砂7号は小さい粒径の砂粒子を豊浦標準砂よりも多く含有しており、その間隙径もより小さくなると考えられる。そのため、珪砂7号の場合は間隙中の薬液ゲルの連続性が失われにくく、他の試料砂（豊浦標準砂、珪砂3号）の場合には比抵抗が大きくなっている薬液充填率においても、珪砂7号の固結砂の比抵抗は比較的小きな値を示したものと考えられる。

以上に述べた考察から、固結砂の電気比抵抗が薬液充填率の増加に伴い小さくなるのは、薬液充填率の増加に伴い、土中に存在する薬液ゲルの連続性が増加することにより生じると考えられる。また、薬液ゲルの連続性は砂の間隙径の大きさに影響を受け、間隙径の大きいものほど土中の薬液ゲルの連続性は低下しやすく、間隙径の小さいものほどその連続性は低下しにくいものと考えられる。

#### 4. 電気比抵抗による薬液充填率の評価方法

川地らは現場実験での結果を踏まえ、強度増加の効果が顕著に見られるのは薬液充填率が40%前後を越えたあたりからであると述べている<sup>12)</sup>。また、注入を行う際の目標値である  $10^{-5}$ cm/secのオーダーの透水係数とするには充填率は40%から50%以上が必要と述べている。すなわち、薬液注入による改良効果（地盤の強度増加や止水効果）は薬液充填率に大きく影響を受ける。したがって注入による固結部の薬液充填率を知ることは、薬液注入によりどの程度地盤の強度増加を達成したか、またどの程度地盤の止水性を向上できたかを知るための間接的な情報となり得る。前章で述べたように薬液充填率と電気比抵抗は良い相関性を有している。この実験事実に基づき、固結砂の電気伝導機構をモデル化し、固結砂の電気比抵抗から薬液充填率を簡易に精度良く評価する方法を提案する。

##### (1) 薬液充填率評価に関する既往の研究

最近、土の電気的性質から土の構造を評価する試み<sup>7),13)</sup>や土の電気的定数と土質定数との相関について調査した実験的研究<sup>14),15)</sup>が行われている。吉住らも比抵抗探査法により地盤構造の把握のみならず得られる比抵抗値から地盤物性を評価することを試みている<sup>16)-18)</sup>。しかし、これらの研究は現場実験であるために比抵抗値か

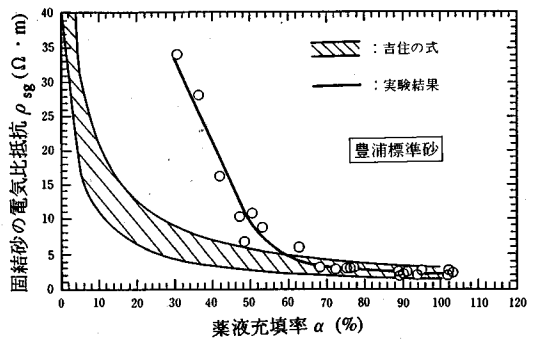


図-7 (a) 吉住の式による結果と実験結果の比較 (豊浦標準砂)

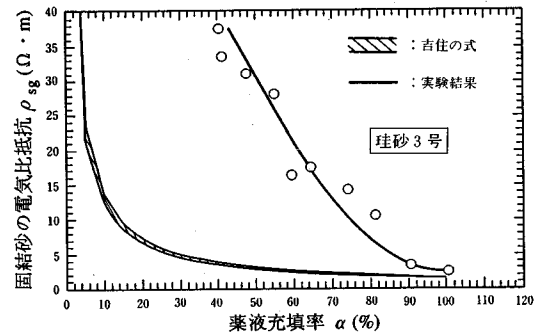


図-7 (b) 吉住の式による結果と実験結果の比較 (珪砂3号)

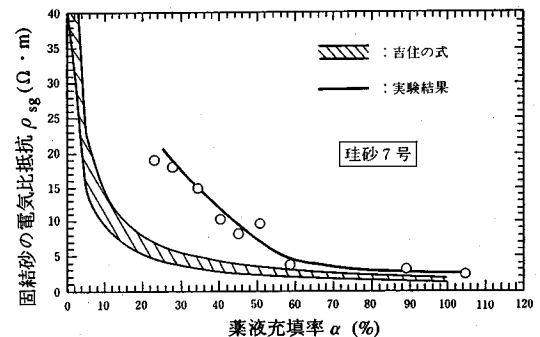


図-7 (c) 吉住の式による結果と実験結果の比較 (珪砂7号)

ら評価した薬液充填率と実際の薬液充填率とを比較してなく、その適用性について十分な検討がなされていない。図-7 (a)(b)(c)に本実験で得られた固結砂の電気比抵抗と充填率の関係と吉住らの提案する次式で示す比抵抗注入率  $\alpha_g$  の算定式<sup>16)18)</sup>の結果を比較している。

$$\alpha_g = \left( \frac{\rho_{sw} - \rho_{sg}}{\rho_{sg}} \right) / \left( \frac{\rho_w - \rho_g}{\rho_g} \right) \dots \dots \dots (5)$$

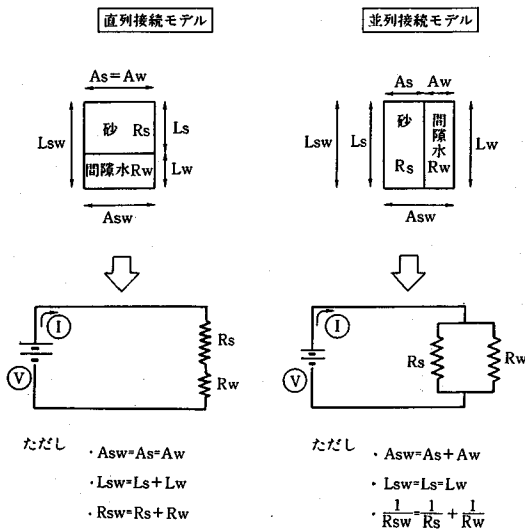
ここに、 $\rho_{sw}$ ：飽和未固結砂の電気比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho_{sg}$ ：薬液固結砂の電気比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho_w$ ：間隙水の電気比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )

$\rho_g$ ：薬液ゲルの電気比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )

なお、吉住らの式を適用するに当たっては、間隙水の比抵抗として実験で得られた値の平均値（豊浦標準砂：



図—8 飽和未固結砂の電気回路モデル

16.4 Ω・m, 珪砂 3号: 40.0 Ω・m, 珪砂 7号: 20.7 Ω・m) を用いている。また飽和未固結砂の比抵抗は、実験で得られた程度の比抵抗を有する間隙水の場合を想定して、図—4の結果から豊浦標準砂と珪砂 7号の場合には 40~60 (Ω・m) とし、珪砂 3号に対しては 90~100 (Ω・m) とした。薬液ゲルの電気比抵抗は表—2に示す値を用いた。これらの図より吉住らの提案式は、充填率が非常に高い場合にのみ適用が可能といえる。しかし、都市土木工事等で利用される薬液注入工法において、現場で頻繁に実測される充填率は 20~80% であるので<sup>12)</sup>、より高精度な薬液充填率の評価が必要となる。本研究では、精度の高い新しい薬液充填率評価法の提案を行う。

(2) 飽和未固結砂の電気比抵抗モデル

固結砂の電気伝導機構をモデル化する前に、注入前の地盤に相当する飽和未固結砂の電気伝導機構をモデル化する必要がある。飽和未固結砂は砂粒子と間隙水から構成されている。したがって、砂粒子と間隙水の比抵抗および砂粒子と間隙水の構成体積比が既知であれば、飽和未固結砂の比抵抗は、オームの法則に基づき算出できるものと考えられる。そこで、オームの法則に基づく飽和未固結砂の電気比抵抗モデルを次のように提案し、3章で述べた実験結果から提案モデルの検討を行う<sup>13)</sup>。

図—8にオームの法則に基づく飽和未固結砂の電気回路図を示す。また、モデルの構築において次の事項を仮定する。

モデル構築における仮定

- ①  $\rho_s$  は砂粒子の比抵抗とし、砂粒子の構成物質にのみ影響を受けると考える。
- ② 土中水、すなわち間隙に存在している水の比抵抗は土中では均一で一定値とする。

③ 対象とする土は完全飽和状態とし、土中の空気の使用は考えない。

上記の仮定①は、砂の比抵抗は砂粒子を構成する鉱物にのみ依存し、同じ鉱物組成であれば不変の値と考えている。また砂の比抵抗は砂粒子自身の保持する水分の影響を受けると考えられるが、本研究で使用した砂試料は石英が主な構成鉱物のものであり、その砂自身の保持する水分量は極めて微量であるので、砂粒子中に存在する水の影響は無視している。仮定②は比抵抗に影響を及ぼすと考えられる水中のイオン濃度分布は均一で変化しないという考えに基づいている。仮定③は、薬液注入の対象となる地盤は主に地下水位以下であるので、完全飽和状態と仮定することにより、実際をほぼ反映することができる。

飽和未固結砂の場合、砂粒子と間隙水の二相構造が考えられる。図—8に示すようにオームの法則に基づいて、砂粒子と間隙水で構成される直列接続と並列接続の二種類のモデルを考える。これらのモデルと飽和未固結砂の比抵抗  $\rho_{sw}=(Asw/Lsw) \cdot Rsw$  および間隙比  $e=(Aw \cdot Lw)/(As \cdot Ls)$  の関係式から誘導される飽和未固結砂の電気比抵抗評価式は次の通りである。

直列接続モデル

$$\rho_{sws} = \rho_s \cdot \frac{1}{1+e} + \rho_w \cdot \frac{e}{1+e} \dots \dots \dots (6)$$

並列接続モデル

$$\rho_{swp} = \frac{1}{\frac{1}{\rho_s} \cdot \frac{1}{1+e} + \frac{1}{\rho_w} \cdot \frac{e}{1+e}} \dots \dots \dots (7)$$

ここに、 $\rho_{sws}$ : 直列接続モデルによる飽和未固結砂の電気比抵抗 (Ω・m)

$\rho_{swp}$ : 並列接続モデルによる飽和未固結砂の電気比抵抗 (Ω・m)

$\rho_s$ : 砂粒子の電気比抵抗 (Ω・m)

$\rho_w$ : 間隙水の電気比抵抗 (Ω・m)

$e$ : 土の間隙比

しかし、式 (6), (7)により飽和未固結砂の電気比抵抗を評価する場合、既知量として砂粒子の比抵抗  $\rho_s$ , 間隙水の比抵抗  $\rho_w$  及び土の間隙比  $e$  が必要であるが、実際、 $\rho_s$  は未知数である。そこで  $\rho_s$  を次のようにして求めた。先述した仮定①に基づき、間隙水の比抵抗  $\rho_w$  が  $\rho_s$  と等しい値になるとき、飽和未固結砂は構造的には砂粒子と間隙水の二相構造をなしているけれども、電気的には単一構造と見なすことができる。以上から、 $\rho_w$  と  $\rho_s$  が等しいとき次の関係が成り立つ。

$$\rho_s = \rho_w = \rho_{sw} = \rho_{sws} = \rho_{swp} \dots \dots \dots (8)$$

そして図—9および図—10に描いたように飽和未固結砂の比抵抗  $\rho_{sw}$  ~ 間隙水の比抵抗  $\rho_w$  曲線と直線  $\rho_{sw} = \rho_w$  の

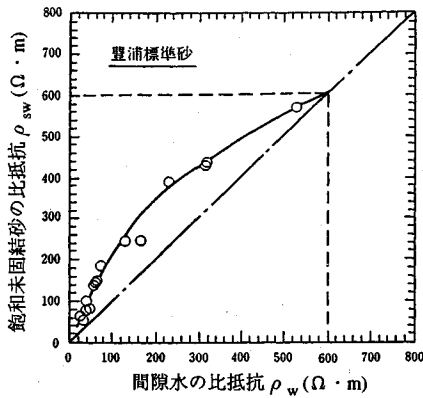


図-9 砂粒子の比抵抗を求める方法 (豊浦標準砂)

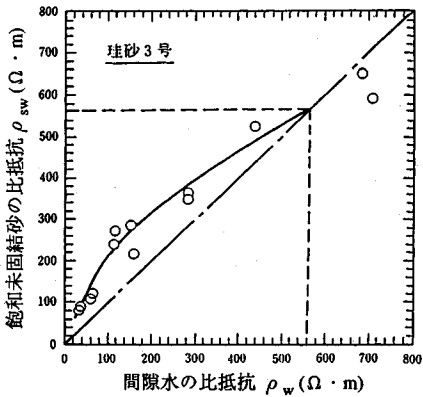


図-10 砂粒子の比抵抗を求める方法 (珪砂3号)

交点において式(8)が成り立つ。したがって  $\rho_s$  はそのときの間隙水の比抵抗と等しいことから求めることができる。このようにして求めた砂粒子の比抵抗  $\rho_s$  はそれぞれ次のような値となる。

豊浦標準砂 :  $\rho_s = 600.0 (\Omega \cdot m)$

珪砂3号 :  $\rho_s = 562.6 (\Omega \cdot m)$

上記のように得られた砂粒子の比抵抗  $\rho_s$  を用いて、豊浦標準砂および珪砂3号を試料とした室内実験から得られる飽和未固結砂の電気比抵抗と直列接続モデルの評価式(6)により求めた飽和未固結砂の電気比抵抗の関係を図-11に示す。また、室内実験から得られる飽和未固結砂の電気比抵抗と並列接続モデルの評価式(7)により求めた飽和未固結砂の電気比抵抗の関係を図-12に示す。これらの図より、並列接続モデルによる評価式(7)が非常に高い精度を有したものであることがわかる。したがって今回の乾燥密度の範囲では、飽和未固結砂の電気比抵抗特性は図-8に示す並列接続モデルではほぼ表現できると言える。

(3) 薬液固結砂の電気比抵抗モデルと薬液充填率の評価方法の提案

前節で述べた飽和未固結砂の電気比抵抗モデルの提案

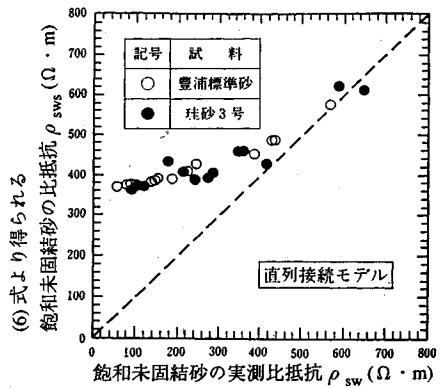


図-11 式(6)より得られる飽和未固結砂の比抵抗と実測の飽和未固結砂の比抵抗の比較

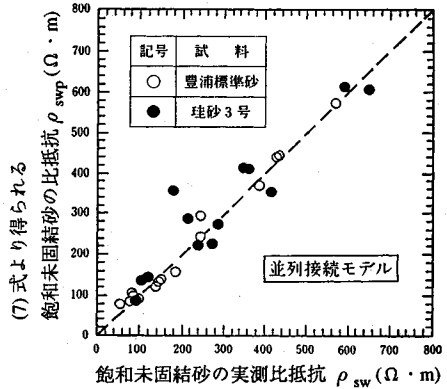


図-12 式(7)より得られる飽和未固結砂の比抵抗と実測の飽和未固結砂の比抵抗の比較

と同様に、薬液固結砂の電気比抵抗モデルの提案を3章で述べた室内実験結果に基づいて行う。飽和未固結砂の電気比抵抗特性は図-8に示す並列接続モデルではほぼ表現できるという実験的事実から、図-13に示す薬液固結砂の電気回路モデルを提案する。これらのモデルと薬液固結砂の比抵抗  $\rho_{sg} = (A_{sg}/L_{sg}) \cdot R_{sg}$ 、間隙比  $e = (A_w \cdot L_w + A_g \cdot L_g) / (A_s \cdot L_s)$  および薬液量  $Q = A_g \cdot L_g = e / (1 + e) \cdot (\alpha / 100) \cdot A_{sg} \cdot L_{sg}$  の関係式から導かれる薬液固結砂の電気比抵抗評価式は次に示す通りである。

直列接続モデル

$$\rho_{sgs} = \frac{1}{\frac{1}{(1+e)\left(1-\frac{\lambda}{100}\right)^2 \rho_s} + \left\{ \frac{1}{\left(1-\frac{\lambda}{100}\right)} \frac{1}{(1+e)\left(1-\frac{\lambda}{100}\right)^2} \right\} \cdot \frac{1}{\rho_w} + \frac{\lambda}{100} \rho_e} \quad (9)$$

並列接続モデル

$$\rho_{sgp} = \frac{1}{\frac{1}{1+e} \rho_s + \left( \frac{e}{1+e} - \frac{\lambda}{100} \right) \cdot \frac{1}{\rho_w} + \frac{\lambda}{100} \cdot \frac{1}{\rho_e}} \quad (10)$$

ただし、 $\lambda = (n/100) \cdot (\alpha/100) \times 100$

ここに、 $\rho_{sgs}$ : 直列接続モデルによる薬液固結砂の電気

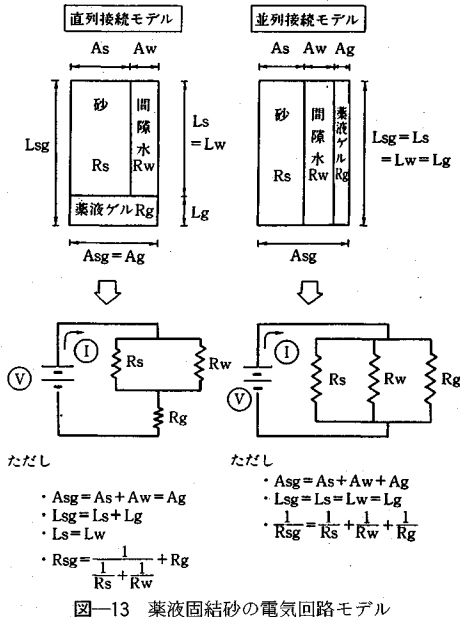


図-13 薬液固結砂の電気回路モデル

- 比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )
- $\rho_{sgp}$ : 並列接続モデルによる薬液固結砂の電気比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )
- $\rho_s$ : 砂粒子の電気比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )
- $\rho_w$ : 間隙水の電気比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )
- $\rho_g$ : 薬液ゲルの電気比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )
- $e$ : 土の間隙比
- $n$ : 土の間隙率 (%)
- $\alpha$ : 薬液の充填率 (%)
- $\lambda$ : 薬液の注入率 (%)

上記評価式に含まれる砂粒子の電気比抵抗  $\rho_s$  は飽和未固結砂の電気比抵抗が式(7)で表されることから、次の式(7)により求められる。

$$\rho_s = \frac{1}{\frac{1}{1+e} \frac{1}{\rho_{sw}} + \frac{e}{\rho_w}} \quad (7)$$

図-14に上記の薬液固結砂の電気比抵抗評価式の結果と実測の比抵抗の比較を示した。この図から、直列接続モデルより得られる固結砂の比抵抗は実測の比抵抗が30~40 ( $\Omega \cdot m$ ) の場合に実測値とよく一致することが分かる。一方、並列接続モデルより得られる固結砂の比抵抗は実測の比抵抗が4 ( $\Omega \cdot m$ ) 以下において、実測値とよく一致している。3章で述べた薬液固結砂の電気比抵抗特性に関する考察から、上記の結果は次のように説明できる。固結砂の比抵抗が30~40 ( $\Omega \cdot m$ ) の場合、薬液充填率は低く、間隙中の薬液ゲルの不連続性が卓越していると考えられる。直列接続モデルは薬液ゲルの不連続状態を表現しているモデルと考えられ、その適用性は薬液充填率の低い場合に大きいと考えられる。一方、

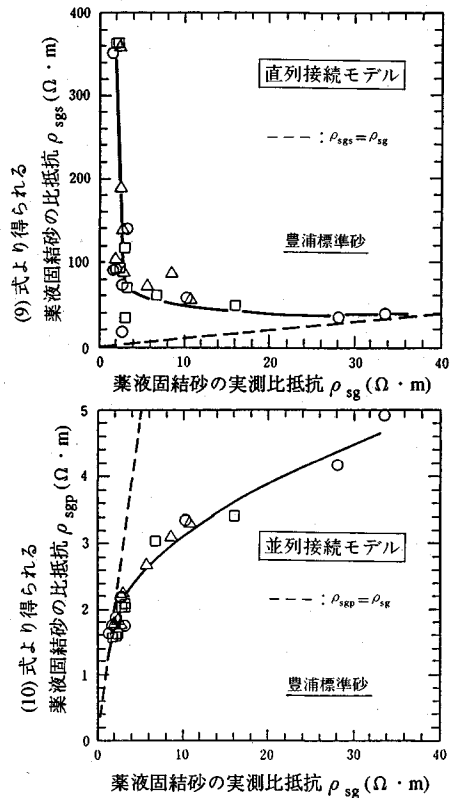


図-14 直列および並列接続モデルより得られる薬液固結砂の比抵抗と実測の薬液固結砂の比抵抗の比較

並列接続モデルは間隙中の薬液ゲルが完全に連続した状態を表現しているモデルと考えられ、固結砂の比抵抗が小さい、すなわち薬液充填率の高い場合に適用性が大きい。

これらの考察から、薬液固結砂の電気比抵抗特性のメカニズムは次のように考えられる。薬液充填率の高い場合、固結砂は並列接続モデルで表現できる構造を成している。しかし、充填率の低下に伴い、間隙中の薬液ゲルが不連続状態となる部分、つまり、直列接続モデルで表現される部分の割合が増加し、薬液ゲルが完全に不連続状態になると、固結砂は直列接続モデルで表現される。

以上から、薬液固結砂の電気比抵抗モデルとして、上記の直列および並列接続モデルの混合を考え、直列接続モデルと並列接続モデルがさらに直列に配列すると考える<sup>20)</sup>。もちろん、これらの2モデルを並列に配列することも考えられる。しかし、この場合、並列接続モデル中の薬液ゲルが、完全に連続した薬液ゲルを表してしまい、固結砂中の薬液ゲルの連続、不連続を表現する上で不適切と考え、2モデルを直列に配列する複合モデルを考えた。この複合モデルの概要を図-15に示す。また、この複合モデルによる薬液固結砂の電気比抵抗の評価式は次のようになる。



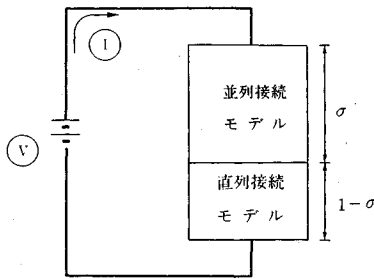


図-15 複合モデルの概要

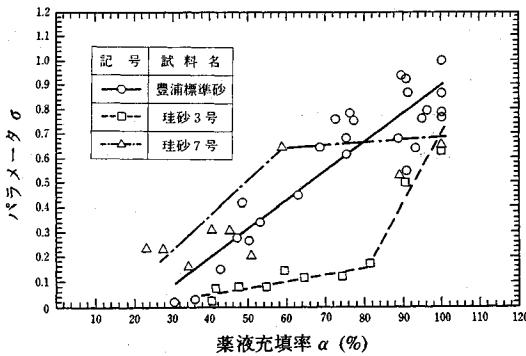


図-16 パラメータ  $\sigma$  と薬液充填率  $\alpha$  の関係

$$\rho_{sg} = \frac{1}{\frac{1-\sigma}{\rho_{sgs}} + \frac{\sigma}{\rho_{sgp}}} \quad (11)$$

ここに、 $\rho_{sg}$ ：複合モデルによる薬液固結砂の電気比抵抗 ( $\Omega \cdot m$ )

$\sigma$ ：複合モデルにおける並列接続モデルの占める割合

3章で述べた実験事実より、薬液の連続性は薬液充填率や砂粒子の粒度組成等に大きく影響されると考えられるので、式(11)の $\sigma$ は薬液充填率や砂の粒度分布等により変化するものと考えられる。そこで、3章で示した実験結果と式(9)~(11)とを比較することにより、各試料砂および薬液充填率と複合モデルにおける並列接続モデルの占める割合 $\sigma$ との関係が得られる。これらの関係を図-16に示す。なお、珪砂7号の $\rho_s$ は仮定①により珪砂3号の $\rho_s$ と同じ値とし、また薬液の比抵抗 $\rho_g$ は実験より得られた平均的な値(0.65  $\Omega \cdot m$ )を用いた。図-16中の実線は、豊浦標準砂の結果に基づく最小二乗法により求め、破線および一点鎖線はそれぞれ珪砂3号および珪砂7号の全データを可能な限り連結するように描いた。この図において、充填率が比較的高く $\sigma$ が大きい場合にプロットのバラツキが顕著になる。式(11)からも明らかなように $\sigma$ の値が大きくなると $\rho_{sg}$ の値は $\rho_{sgp}$ の影響を大きく受ける。しかし、図-14から分かるように $\rho_{sgp}$ の値の変動は充填率が比較的高い範囲すなわち固結砂の比抵抗が小さい範囲において非常に小さい。したがって、充填率の比較的高い範囲におい

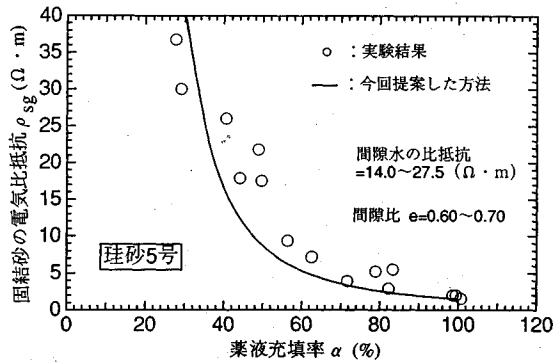


図-17 本研究で提案した方法による計算結果と実験結果の比較

て $\sigma$ ~ $\alpha$ の関係にバラツキが見られても式(11)より算出される $\rho_{sg}$ への影響は非常に小さいと考えられる。また、この図より土中において薬液ゲルの連続性が充填率の低下と共に減少するために、充填率の低下に伴い並列接続モデルの占める割合 $\sigma$ が減少しているものと考えられる。そして、粒径の大きい、すなわち間隙径の大きいものほど、充填率の低下に伴う $\sigma$ の減少の割合は大きい。先にも述べたが、これらの結果と固結砂の電気比抵抗特性を考え合わせれば、直列接続モデルと並列接続モデルは、それぞれ薬液ゲルが不連続になっている固結砂の部分と連続性を有している固結砂の部分を表しており、また、式(11)の $\sigma$ は固結砂における薬液ゲルの連続性を有している固結部分の体積率と考えることができる。

以上から、図-16に示した $\sigma$ ~ $\alpha$ 関係が得られれば、式(7)および式(9)~(11)により、注入前の地盤の電気比抵抗( $\rho_{sw}$ )、地下水の電気比抵抗( $\rho_w$ )、注入後の地盤の電気比抵抗( $\rho_{sg}$ )、薬液ゲルの電気比抵抗( $\rho_g$ )、そして地盤の間隙比から、その改良地盤の薬液充填率を求めることが可能である。

薬液注入工法の対象となる地盤が、本研究で用いた豊浦標準砂、珪砂3号もしくは珪砂7号の粒度分布にほぼ等しい場合には、図-16中にそれぞれ、実線(豊浦標準砂：透水係数 $k=1.5 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ )、破線(珪砂3号：透水係数 $k=1.1 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ )、および一点鎖線(珪砂7号：透水係数 $k=3.7 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$ )で示した $\sigma$ ~ $\alpha$ 関係を用いて、改良地盤の薬液充填率を求めることができる。図-17は、豊浦標準砂とほぼ同程度の粒度分布および透水係数を有する三河珪砂5号(比重 $G_s=2.64$ ：平均粒径 $D_{50}=0.55 \text{mm}$ ：透水係数 $k=3.6 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ )を例に、本方法による薬液固結砂の電気比抵抗と薬液充填率の関係の評価結果と実験で得られた結果を比較している。なお、ここでは図-16中の実線で示される豊浦標準砂の $\sigma$ ~ $\alpha$ 関係を用いた。この図から本方法により精度の高い薬液充填率評価が可能となる

と言える。また評価で必要となる間隙水の比抵抗  $\rho_w$  と間隙比  $e$  は、それぞれ実験で得られた値の平均値 21.6 ( $\Omega \cdot m$ ) と 0.65 を用いた。飽和未固結砂の比抵抗は上記の  $\rho_w$  を想定して図-4 より 60.0 ( $\Omega \cdot m$ ) とした。

本方法の現場での利用方法として、本研究で提案した充填率評価法を比抵抗トモグラフィーなど電気探査法と併用し、改良部の範囲を把握すると共に、その充填率分布を評価することが可能と考えられる。

## 5. 結 論

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

(1) 砂質地盤の薬液注入で利用される溶液型水ガラスにより固結された砂の電気比抵抗は薬液充填率に大きく影響を受け、充填率の増加に伴い固結砂の電気比抵抗は小さくなる。これは、充填率の増加に伴い、地盤の間隙中に存在する薬液ゲルの連続性が増加するためと考えられる。またこの固結砂の電気比抵抗と充填率の関係は、砂の間隙径の影響を受け、同じ充填率では間隙径の小さい砂ほど固結砂の電気比抵抗は小さい。

(2) 薬液充填率と固結砂の電気比抵抗が良い相関性を有していることから、固結砂の電気伝導機構をモデル化し、固結砂の電気比抵抗から薬液充填率を簡易に評価する方法を提案した。この関係を用いることにより、現場で比抵抗トモグラフィーのような電気探査法を実施して比抵抗分布を求めることにより、薬液注入による改良範囲とその薬液充填率分布を評価し、それより強度、止水性などに関する改良の程度を判定することが可能と考えられる。なお、比抵抗トモグラフィーの適用性については、さらに検討する必要がある。この点については模型実験等により検討する予定である。

## 参 考 文 献

- 川地・喜田：薬液注入工法における施工管理に関する研究(その8)：大林組技研報，No.36，pp.16～20，1988。
- 川地・喜田：薬液注入工法における施工管理に関する研究(その9)：大林組技研報，No.39，pp.16～20，1988。
- 鈴木：電気抵抗による薬液注入工法の固結形状の判定：土と基礎，35-5，pp.51～55，1987。
- 熊谷：薬液注入工法の実施例からみた注入効果の判定について：土と基礎，31-12，pp.51～56，1988。
- 吉田・下倉：薬液注入工法の注入範囲，改良強度の判定に関する研究：土と基礎，35-5，pp.57～62，1987。
- 土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで：pp.165～190，1985。
- Chien, L.K. and Li, J.C. : Electrical Conductivity for Evaluating Fabric and Mechanical Behavior of Granular Soils : Proc. 2nd Inter. Conf. on Recent Advances in Geotech. Earthquake Engrg. and Soil Dynamics, pp.137～140, 1991.
- 力武・山崎・田中：地球物理学—実験と演習—：(財)学会誌刊行センター，pp.126～131，1978。
- 清水：三軸試験供試体の飽和度の上げ方—フラッシングを用いる方法—：土と基礎，31-7，pp.61～62，1983。
- 松尾・唐沢・古賀：粘土の動的強度特性に関する繰返し三軸試験報告書：土研資料 第2160号，1985。
- 小峯・安藤：浸透注入した水ガラス固結砂の電気比抵抗特性：第26回土質工学研究発表会，pp.1949～1950，1991。
- 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，35-5，pp.45～50，1987。
- 鈴木・楠・藤光・大山・曾根：高密度電気探査法における2次元自動解析法の適用—第四紀層に覆われた断層の探査—：電中研報告 U90032，1990。
- Arulmoli, K., Arulanandan, K. and Seed, H.B. : New Method for Evaluating Liquefaction Potential : J. Geotech. Engrg., ASCE, 111-1, 1985.
- Arulanandan, K. and Muraleetharan, K.K. : Level Ground Soil-Liquefaction Analysis Using in Situ Properties : I : J. Geotech. Engrg., ASCE, 114-7, 1988.
- 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，24-1，pp.43～50，1976。
- 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，24-3，pp.21～26，1976。
- 吉住：地盤改良の測定：基礎工，5-9，pp.48～54，1977。
- 小峯・安藤：浸透注入した水ガラス固結砂の電気比抵抗モデルの提案：第26回土質工学研究発表会，pp.1951～1954，1991。
- 福田：非定常法による凍土の熱伝導率の測定：低温科学物理編34，pp.249～252，1976。

(1992.7.1 受付)

## EVALUATION METHOD OF VOID FILLING OF CHEMICAL GROUTING BY ELECTRICAL RESISTIVITY

Hideo KOMINE

Chemical grouting is used as an auxiliary method when underground structures are constructed in large cities. However, it is difficult to evaluate the qualities of solidified 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 void filling by electrical resistivity. In this study, a series of electrical resistivity tests were performed on some saturated sands and some grouted sands in the laboratory. And the electrical-resistivity models of saturated sand and grouted sand, and the evaluation of chemical grout void filling by electrical resistivity are proposed.