

# 薬液注入工法における施工管理に関する研究（その1）

——砂地盤における注入材の分布と注入効果——

川 地 武 喜 田 大 三

## Studies in Performance Control of Chemical Grouting (Part 1)

——Distribution of Grouting Material and Grouting Effect in Sandy Ground——

Takeshi Kawachi Daizo Kita

### Abstract

A method of estimating the amount of grouting material in ground was developed for improvement of design and performance control, and was reported in a previous paper. This method was applied to silicate-grouted sandy ground of alluvial and diluvial origin to clarify grouting material distribution and the relation between the distribution and grouting effect. The results obtained are as follows:

(1) The average of the grouting material ratio estimated from the grouting material content in soil is 15 to 20% and the deviation is in a range of 4 to 10%. Grouting material also escapes from the grouting zone in vertical and horizontal directions.

(2) The ground improvement effect of grout is related to grouting material content and the relation differs according to the properties of the ground and the grouting material.

(3) The simple method using coloring of phenolphthalein is not effective to detect grouting material distribution quantitatively.

### 概 要

薬液注入工法における設計、施工管理の合理化を図る一手法として、地盤中の注入材含有量の測定法を開発したことを前報で述べた。沖積砂層、洪積砂層に水ガラス系注入材を注入した4現場にこの方法を適用し、注入材の分布状況及びこれと注入効果との関係などについて検討した結果、以下の知見が得られた。(1) 注入材含有量の測定値から求めた実測注入率の平均値は15~20%となる現場が多く、注入率のパラツキは4~10%の範囲にある。注入材は垂直、水平両方向に逸出する。(2) 注入効果は実測注入率の増大と対応しているが、効果の程度は地盤やホモゲルの性状などによって異なる。(3) 注入材の分布状況をフェノールフタレインの呈色反応で簡便に判定する方法は適用範囲や精度が限定され、電導度による方法は適用性に乏しい。

## 1. はじめに

薬液注入工法における設計、施工をより合理的なものとするために各種の試みが行なわれている。特に、注入効果の簡便な判定法、注入材の地中での挙動の把握方法など広義の施工管理手法の開発が遅れており、最近の注入関係の学会発表の多くがこれに関連したものとなっているが、いまだに適切な方法は見出されていない。このように注入工法における施工管理手法の確立が困難となっている原因のひとつに、注入材の地盤中の分布を精度

よく測定する方法が確立されていないことがあげられる。特に、最近の薬液注入材の大半を占める水ガラス系薬液に関しては、ゲル化する成分であるケイ酸が地盤の構成成分でもあるため、注入地盤中の注入材含有量の測定が困難とされてきた。しかし、筆者らは前報<sup>1)</sup>で述べたように、自然界に存在するケイ酸と注入材に由来するケイ酸との形態の差異に着目し、注入材含有量を測定しうることを明らかにし、確立した方法が注入地盤に適用しうることを確認した。この方法は従来の中性子水分計や電気比抵抗による方法が間接法であるのに対し直接法であ

り、土中の注入材含有量を測定することにより、注入率、間隙充てん率を求めることが可能である。

本報告はこの方法を薬液注入によって改良した砂地盤に適用した結果を述べるとともに、注入材の分布状況と注入効果との関係について検討するものである。

## 2. 調査方法

### 2.1. 調査現場の概要

調査を行なったのは砂層を薬液注入工法によって改良したシールド工法及びメッセル工法のトンネル現場であり、沖積層を対象とする現場と洪積層を対象とする現場とに大別される。注入工の概要は表-1に示しているが、採用した工法は現場Dの一部を除き、いずれも瞬結二重

現場名	A	B	C	D
注入対象土質	洪積層砂	沖積層砂	沖積層砂	洪積層砂
主な注入目的	止水	強化、止水	強化	止水
注入工法	瞬結二重管式(各種)	左に同じ(DDS工法)	左に同じ(MT工法)	a.ダブルストレーナー式 b.瞬結二重管式(DDS工法)
注入材(硬化剤)	a.アルミン酸ソーダ b.シリカゾル c.重炭酸ソーダ、塩化カリ	シリカゾル	重炭酸ソーダ 硫酸マグネシウム	重炭酸ソーダ 塩化カリ
ゲルタイム	a.10~15秒 b.5~15秒 c.9~10秒	9~11秒	5~10秒	a.2~3分 b.9~10秒
注入圧	a.10~20kgf/cm <sup>2</sup> b.5~10kgf/cm <sup>2</sup> c.5~8kgf/cm <sup>2</sup>	5~8kgf/cm <sup>2</sup>	7~10kgf/cm <sup>2</sup>	a.10~15kgf/cm <sup>2</sup> b.15~20kgf/cm <sup>2</sup>
実施注入率	20%	31.3%	36.2%	40%
注入断面				

表-1 注入の概要

管式注入工法である。注入の目的は洪積層の現場 A, D では止水を主とし、沖積層の B, C ではゆるい砂層の強化が主たるものである。注入対象となった砂層の粒径分布は図-1のようなものであり、いずれも細粒分の少ない、比較的粒径のそろった砂である。注入材は現場Aの一部と現場Bでは中性領域でゲル化するといわれるタイプを、他はアルカリ性の溶液タイプのものを採用している。なお、現場 B, C では適切な注入率を設定するため

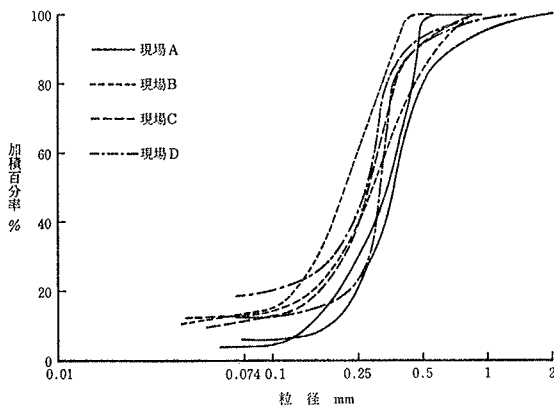


図-1 注入部の砂の粒径分布

に試験注入を行なっている。

### 2.2. 注入効果の判定

現場 A, D では掘削切羽の湧水状況によって注入効果を判定し、現場Dでは切羽でブロックサンプリングしたものについて室内透水試験を行なった。また、両現場ともにブロックの一軸圧縮試験を行なった。

現場 B, C では試験注入の際に標準貫入試験と現場透水試験を行ない注入効果を判定するとともに、本注入区間ではブロックサンプリングを行ない一軸圧縮試験を行なった。

### 2.3. 注入材分布の調査法

試験注入を行なった現場では標準貫入試験の際にレイモンドサンプラー内に採取される試料について、前報で述べた方法によって注入材含有量を測定し、この値から注入率を算出した。また、本注入の行なわれた後にトンネルの切羽でブロックサンプリングや坑内ボーリングを行ない、このサンプルについて実測注入率を求めた。いずれの試料についても、pH 及び電気伝導度の測定も併せて行なった。

## 3. 調査結果

### 3.1. 注入効果

止水効果の要求された現場 A, D ではともに効果は顕著に認められ、特に現場Dでは湧水量が注入前の1/40~1/500に低下した。ブロックサンプルの透水係数も当初の  $10^{-3}$  cm/sec のオーダーから平均  $10^{-5}$  cm/sec のオーダーへと低下している。また、現場 B, C では試験注入後の現場透水試験によれば、注入前の透水係数に比べて、それぞれ1/6, 1/10にまで低下しているが、やや低下程度が少ない。透水係数の低下順位は実施注入率の順位と一致している。

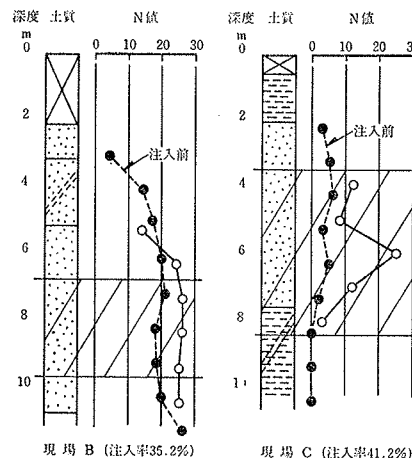


図-2 注入によるN値の増大(試験注入)

一方、標準貫入試験によるN値は、図-2に現場 B, C の注入率最大の場合を示すように、両現場ともに注入によるN値の増大は明らかであり、注入範囲

の深度では現場Bで5~6, 現場Cで4~20の増大が見られ, 所期の目標を達している。

また, ブロックサンプルの一軸圧縮強度は後述するようにサンプルの注入材含有量に支配されるものが多いが, 現場Bの場合には注入材が多量に含まれていても必ずしも強度が上昇しないものも見られた。洪積層の砂は注入前にもかなりの強度を有すが, 注入によってさらに強度が上昇する。なお, 3種の注入法を採用した現場Aでは注入法Cの区で均一かつ大きな強度上昇が見られた。

### 3.2. 注入材の分布

注入材の浸透状況を切羽やボーリング試料の肉眼観察によって推察した。浸透様式は脈状浸透と粒子間浸透とに大別され, 洪積砂層の現場A, Dでは前者が卓越し, 沖積砂層の現場B, Cでは後者が卓越している。それぞれの例を写真に示す。脈状浸透を主体とする現場Aの場合, 同じ瞬結注入でも注入法, 注入材の違いによって脈の連続性, 太さ, 密度などが異なり, 注入法のa, bの区で

ェノールフタレインによって赤紫色に呈色する。

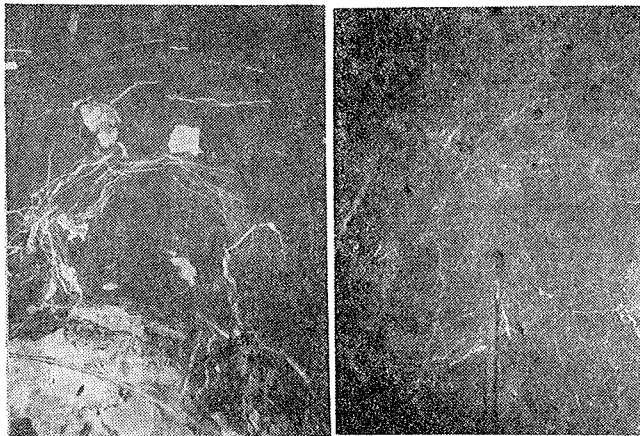
さて, 注入材の浸透状況を注入材の分布状況によって把握するために, 切羽から無作為にサンプリングした土の注入材含有量を測定し, この測定値から注入率を算出し, この結果を表-2に示した。現場Aの注入法aの区では平均注入率が低く, 注入法bの区ではバラツキが大きい。これらの区では脈状浸透が主体で注入効果も均一なものではなかったことと対応している。注入法Cの区は平均注入率が高く, バラツキも比較的小さく, 細脈の多い浸透状況を反映している。

	現場 A			現場B	現場D (ストレーナー 注入部)
	注入法a区	注入法b区	注入法c区		
試料数	11	13	12	11	12
実測注入率(x)	3.0~25.5%	1.4~30.9%	11.6~31.7%	0.7~23.1%	4.6~31.4%
平均実測注入率( $\bar{x}$ )	8.4%	15.2%	18.3%	14.8%	18.8%
バラツキ( $\sigma$ )	7.4%	8.8%	7.4%	7.4%	4.6%

表-2 実測注入率の分布状況

現場B, Dは実施注入率に比べて実測注入率の平均値が小さいが, この理由は後述するように, 注入範囲外への注入材の逸出に由来する。現場Dでは平均注入率が最大で, バラツキは最小であり, ストレーナー注入が一度のより高い注入法であることを示唆している。

次に注入材の垂直分布を図-3に示す。現場Bは1m角の4点注入を行なった際の中央部のボーリングサンプルについて注入率を実測したものであり, 設計注入率の差異が明瞭にあらわれている。特に設計注入率の低い区では実測値が著しく小さく, 最高注入率の区で実測値が15%前後となり, 上述の切羽における平均注入率に近くなる。低い設計値の区で極端に小さな値となったのは, ボーリングした中央部にまで浸透する注入材が少なかったことを示している。現場Cも同様な傾向であり, 最大の設計注入率の区で15%前後の実測注入率となっている。



現場A (注入法b)      現場B  
写真 切羽の注入脈の状況

は太い脈が長く連続するが脈の数は少ない。注入法Cでは細脈が多い。これらの差が注入効果の差をもたらしていると思われる。現場Dではダブルストレーナー式注入と瞬結二重管式注入が行なわれたが, 注入材の浸透状況は大差なく, 強いてあげれば瞬結注入部では脈がやや太くなる傾向にある。

一方, 粒子間浸透を主体とする現場B, Cでは写真にもあるような細脈が見られるものの, 脈の見られない所にも注入材が浸透し, アルカリ性注入材を使用した現場Cでは切羽の全面がフ

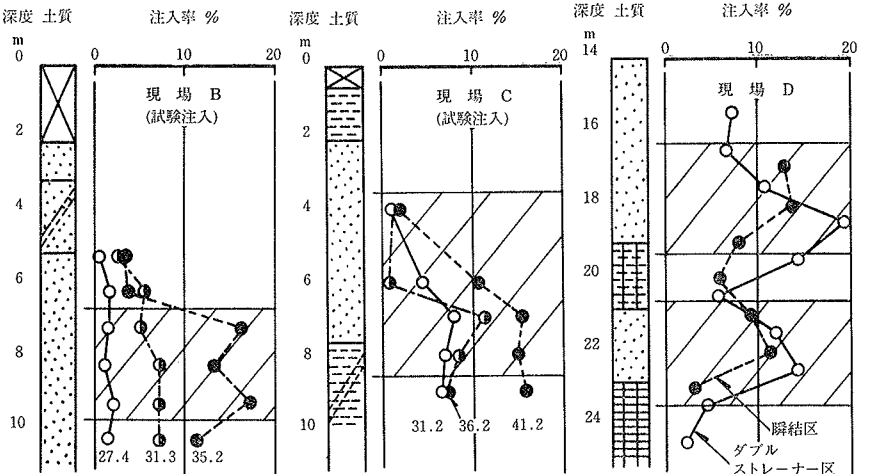


図-3 実測注入率の垂直分布(添字は設計注入率%, 斜線部は注入範囲)

これらの現場では注入材が注入範囲の外部、特に下部に逸出する傾向が見られ、設計注入率が高くなるにつれてこの傾向は顕著となる。また、現場Dでは本注入施工部のボーリング結果を示しているが、注入範囲の砂層では10~20%に実測値が分布し、注入範囲外の固結シルト層や固結粘土層でも6%前後の注入率となっており、これらの層にも注入材が逸出している。

一方、注入材の注入範囲外への逸出は水平方向にも生じる。切羽の観察結果でも脈状浸透の場合の脈の長さは水平あるいは斜めに2~3mに及ぶことが判明している。そこで、注入脈付近における注入材の分布を調査し、結果を図-4に示した。この結果によれば、瞬結注入の場

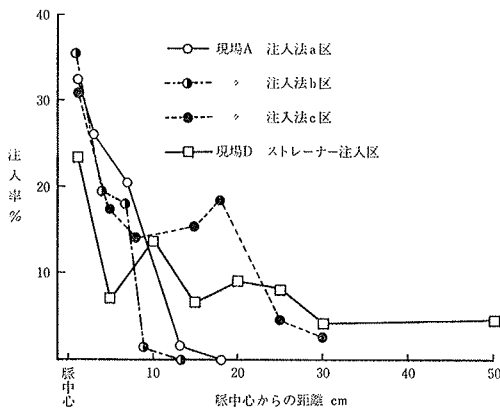


図-4 ホモゲル脈からの注入材の浸透状況

合10~30cm、ストレーナー注入の場合30~50cmの範囲まで注入材が脈を中心として浸透している。この結果は前報に述べた瞬結注入区とソレタンシュ注入区の場合の分布状況とも近似しており、ゲルタイムの長いものほど、脈を中心とした注入材の浸透範囲が広がる。注入脈の発生は注入範囲外でも観察されており、注入脈の延伸による注入材の逸出はかなり広範囲に及ぶと思われる。なお、図-4によれば、脈の近くでは実測注入率が30%を越える例が瞬結注入区で見られ、注入材の濃縮現象を示唆している。

#### 4. 考察

##### 4.1. 注入効果と注入材分布の関係

注入効果は当然のことながら注入材の分布状況や固結状況に支配されるが、これら相互の定量的な関係は十分に明らかにされていない。そこで、今回の調査で得られた結果を整理すると、透水係数と実測注入率との関係は図-5で示される。この図は、現場B、Cでは現場透水試験による透水係数と試験深度の土の実測注入率との関係を、現場Dではブロックサンプルの室内透水試験による透水係数とこのサンプルの実測注入率との関係を示している。図-5によれば、注入率が10%前後ではほぼ平

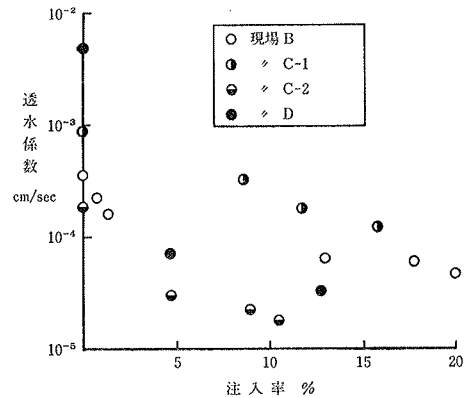


図-5 実測注入率と透水係数の関係

衡値に達し、現場Bでは当初の値の約1/6、現場Cでは約1/10に、現場Dで約1/150となる。

一方、固結土の強度と注入率との関係は図-6に示す。この図はブロックサンプルの一軸圧縮強度( $q_u$ )とサンプルの注入率との関係を示したものである。図によれば、現場A、C、Dでは $q_u$ と注入率はほぼ直線関係にあるが、直線のこう配、縦軸、横軸への切片がそれぞれ異なる。現場AとDは注入率がゼロでもそれぞれ0.3 kgf/cm<sup>2</sup>、0.7 kgf/cm<sup>2</sup>程度の $q_u$ を示し、洪積層の砂の特徴を示している。両現場の直線こう配の差はホモゲル強度や砂の間隙分布の差などにもとづくと思われる。現場Cでは注入率6%前後で強度測定が不能であり、沖積層のゆるい砂の特徴が見られる。ここではホモゲル強度の小さい注入材を用いたためにこのような結果となったものと思われる。

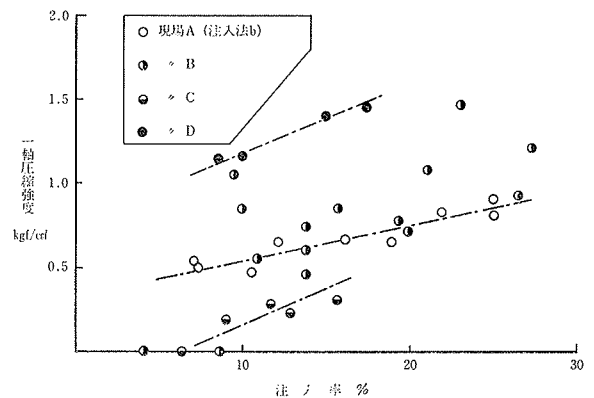


図-6 実測注入率と砂の強度との関係

なお、現場Bでは $q_u$ と注入率の関係に一定したものが見られず、注入率10%近くでもほとんど固結しないものと1 kgf/cm<sup>2</sup>近いものがある。このようなバラツキの原因は次のように考えられる。この現場では中性領域でゲル化するシリカゾルを硬化剤としているが、この注入材はアルカリ性ではゲル化不良を生じるといわれる。図-6の現場Bの試料のpHを見ると、同一注入率では強度の低いものほどpHが高くなることを確認しており、

qu と実測注入率の関係が不規則になる原因は注入材のゲル化不良であるといえる。したがって、中性薬液を用いる場合には、注入材の pH 管理を入念に行なう必要がある。また、現場 B では透水係数の低下が十分でないことを前述したが、この原因のひとつにも注入材のゲル化不良が考えられる。

4.2. 注入率の設定方法について

注入材の地盤内における挙動は地盤条件、注入材の特性、注入条件などに支配される。地盤条件には注入対象土の粒径分布、間隙特性、透水係数、間隙水圧などが、注入材の特性にはゲルタイム、粘度、地下水による希釈状況などが、注入条件には注入圧、注入速度、注入材の吐出機構などが含まれる。

今回の調査で判明した砂地盤における注入材分布の特徴は、実測注入率の平均値が15~20%に分布し、実施注入率に比べて低いことである。砂の間隙率は洪積層の現場 A, D で35.7~40.6%, 沖積層の現場 B, C では44.9~49.5%に分布しているため、注入材による間隙充てん率は50%前後にすぎない。この傾向は前報でも認められており、注入材の浸透しうる間隙は注入材によって容易に排除、置換されうる水で飽和された、いわゆる有効間隙率と呼ばれる間隙であることを示唆している。この有効間隙率は土質や地層によって異なるが、沖積砂層で15~20%, 洪積砂層で30%といわれており<sup>3)</sup>、これが地盤の注入材受け入れ能力と見なすことができよう。したがって、今回の調査結果の平均注入率の分布範囲は妥当なものと考えられる。

さて、薬液注入工法における注入率の設定は次式を用いている。β は注入時のリークなどによる注入材のロス

$$\lambda = n \cdot \alpha \cdot (1 + \beta) \quad \dots\dots(1)$$

λ: 注入率 (%)

n: 間隙率 (%)

α: 充てん率

β: 割増係数

や注入範囲外への逸出によるものである。今回の調査結果では注入材の逸出は垂直、水平両方向に生じており、限定注入といわれる瞬結二重管式注入においても、逸出は無視できない。上述のように、充てん率 (α) は0.5前後であるので、注入率 (λ) を増加させれば β が大きくなることになる。今回の調査結果から β を求めると、現場 A の注入法 b 区、注入法 c 区で0.2前後、現場 B, D で1.2前後となる。注入工法において、注入材が注入範囲外に逸出することは現状では完全に防止することは不可能であり、また注入範囲の付近に逸出するのであれば、注入効果を発現するうえで有効に作用するであろう。なお、礫層への試験注入結果から β を0.5~1.0とすべきであった事例<sup>3)</sup>や大型ピットを用いた砂への注入実験で充てん率 (α) は0.5~0.7となつた報告があり、今回の調査結果と類似した傾向となっている。

このような地盤中の注入材の挙動を考慮すれば、現行の注入率の設定法については改良の余地がある。すなわち、従来 (1) 式の α は0.7~0.9, β は0.2前後であったが、今回の調査結果では α は0.5前後, β は0.2~1.2となる。注入範囲を完全に制御することが困難な現状では、β の値がある程度高くなるのはやむを得ない。また、注入工法を設計する際に、注入材による砂の改良程度をサンドゲルの強度や透水係数で事前評価する。この場合、乾燥砂に注入したサンドゲルを用いるが、ここでは注入材による間隙充てん率は現場の注入砂よりはるかに高くなる。したがって、注入砂の改良効果を現場より過大に評価することになり、注意が必要である。

4.3. 注入材分布の簡易判定法

従来、注入材の浸透の有無をフェノールフタレインの呈色反応で確認していたが、この方法は過信できないこ

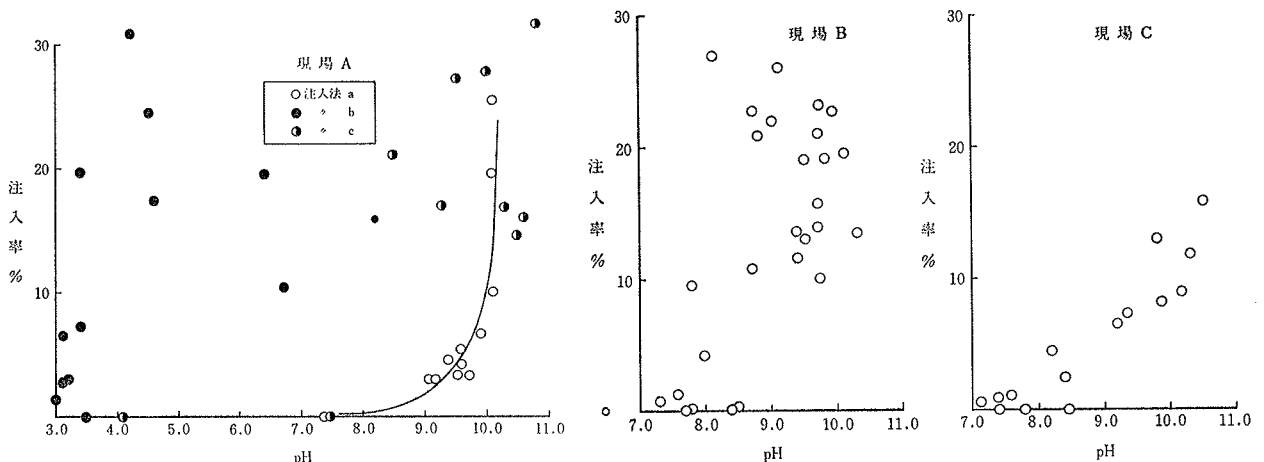
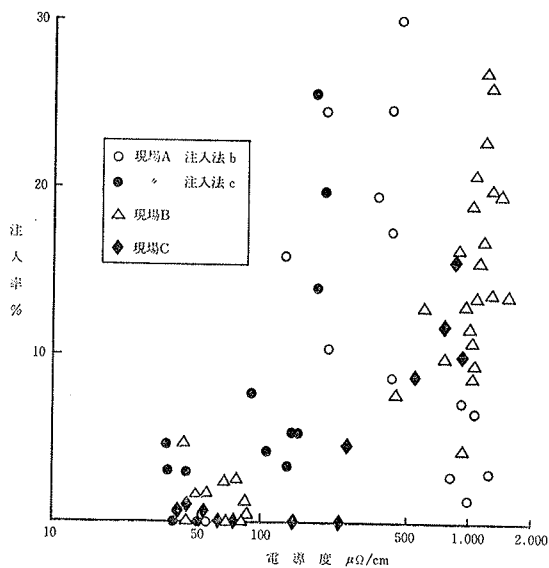


図-7 実測注入率と pH の関係

とを前報で述べた。今回の調査例のいくつかについて、pHと注入率を図一7にプロットした。現場Aの注入法bの区と現場Bは中性薬液を用いているので、相互の関係は見られず、またアルカリ系薬液を用いた現場Aの注入法Cの区でもpHと注入率の関係は明瞭ではない。また、図示していないが現場Dでも同様である。逆に、現場Aの注入法aの区や現場CではpHと注入率は一定の関係が見られる。しかし、フェノールフタレインの発色するpHは8.2以上であるので、注入率が2%前後で発色することとなり、注入効果を発揮する範囲だけでなく、注入材がわずかでも含まれていれば、その全体で呈色することになる。注入率がある値以上となる範囲のみで発色する指示薬が開発できれば、簡便法としてある種の現場には適用できよう。

一方、注入薬液が電気伝導性が高いことに着目して、土の電導度測定によって注入範囲や注入材の希釈状況を簡便に調査する方法がある。そこで、今回の調査例のいくつかについて、電導度と注入率とをプロットしたものが図一8である。この図では実測注入率がごくわずかでも電導度が著しく高くなる例が多く、双方に定量的な関係は認め難い。したがって、電導度測定による注入材分布の簡易判定は現状では難しい。



図一8 実測注入率と電導度の関係

## 5. おわりに

薬液注入工法における施工管理手法の改良、開発を図るためには、地盤中における注入材の挙動を明らかにする必要があると考え、水ガラス系薬液を注入した地盤の注入材含有量の測定法を開発し、その概要と適用性を前報に述べた。本報告では瞬結二重管式およびダブルストレーナー式の注入を行なった砂地盤にこの方法を適用した結果を紹介するとともに、注入材の分布状況と注入効

果との関係や注入設計上の留意点について検討した。以下に得られた知見を列挙する。

(1) 注入材の含有量測定値から求められる実測注入率はいずれの現場でも広範囲に分布し、その平均値は実測注入率の値によらず15~20%となる現場が多い。注入率のバラツキは地盤条件、施工法などによって変動するが4~10%の範囲にある。

(2) 注入材は注入対象範囲の外にも広く分布し、注入材が垂直、水平両方向に逸出しており、瞬結二重管式注入も必ずしも限定注入とはなっていない。注入材の浸透状況はいずれの現場でも脈状浸透が見られるが、沖積砂層の現場では粒子間浸透が卓越し、沖積砂層の現場では脈状浸透が卓越している。

(3) 注入による透水係数の低下程度は地盤によって異なるが、実測注入率が10%以上で低下効果が見られる。また、注入地盤の強度は注入材が完全にゲル化しておれば、実測注入率の増大につれて直線的に大きくなる。そのこう配などは地盤やホモゲル強度などによって異なる。

(4) 注入材分布の調査結果によれば、注入率設計の際の間隙充てん率( $\alpha$ )と補正係数( $\beta$ )のとり方は再考の余地があり、砂地盤では $\alpha$ は0.5前後を、 $\beta$ は1.0前後をとる方が現実的と考えられる。

(5) 注入材分布の簡便な判定法として従来用いられているフェノールフタレインによる方法は使用する注入材の種類、対象地盤によって適用性が限定され、注入効果との対応という点では他の方法の開発が望まれる。

これらの知見は砂層に主として瞬結二重管式注入を適用した現場におけるものであり、さらに地盤条件、注入施工法の異なる条件下における注入材分布について調査を重ねる所存である。そして、これらの結果をもとに、注入工法の設計、施工の合理化を図るとともに、施工管理手法の確立を図りたい。なお、末筆ながら、今回の調査でお世話になった工事現場の方々に深い謝意を献げるものである。

## 参考文献

- 1) 川地, 喜田: 無公害グラウトに関する研究(その4), 大林組技術研究所報, No. 25, (1982), pp. 80~84
- 2) 土木学会編: 水理公式集, 昭和46年版, p. 365
- 3) 菅原, 中村: 二重管ダブルパッカー注入工法による砂礫層の遮水に関する現地実験, 第17回土質工学研究発表会講演集, (昭和57. 6), pp. 2513~2516
- 4) 千田, 苗村, 武田: 大型ピットを用いた薬液注入工法の止水実験, 第15回土質工学研究発表会講演集, (昭和55. 6), pp. 1641~1644