

無公害グラウトに関する研究（その4）

——土中の注入材含有量測定法の開発とその適用例——

川 地 武 喜 田 大 三

Studies on Grout and Grouting with Regard to Groundwater Pollution (Part 4)

——Development of Estimating Method for Grout Content in Grouted Soil——

Takeshi Kawachi Daizo Kita

Abstract

Grouting is widely adopted in underground work and it is necessary to estimate distribution of grout in soil for design and control of grouting. Accordingly, a method for estimating grout distribution has been developed and applied to silicate-grouted soil. The results obtained are as follows: (1) This method consists of dissolution and determination of colloidal silica in grouted soil and the accuracy of this method is confirmed with experimentally grouted sand. (2) Distribution of grout in soil at a shield tunnel construction site is quantitatively estimated by this method. (3) It is possible to distinguish the influences of soil properties and the grouting method on the distribution and effect of grout by this method.

概 要

薬液注入工法は簡便かつ適用範囲の広い地盤改良工法として広く採用されているが、本工法の設計および施工管理を行なううえで、注入材の地盤内の挙動を把握する必要がある。このため、各種の物理探査法が開発されているが、いずれも間接的手法であり、また作業性に乏しい点に難がある。そこで、水ガラス系注入材を注入した地盤中の注入材の分布を化学的手法を用いて直接的に調査する方法を開発し、本方法の適用性を検討した結果、以下の知見が得られた。(1) 本方法は土のコロイドシリカを測定して注入材含有量を求めるものであり、結果は注入率として表示される。(2) 室内注入実験に本方法を適用したところ、注入条件、注入地盤などの差が注入材分布の差に反映する。(3) タイプの異なる注入を行なったシールド工事現場の切羽の注入材分布状況を調査し、注入条件による注入材分布の差異や注入材の浸透状況を把握するうえで本方法は有効であることが判明した。

1. はじめに

薬液注入工法はシールド工法などのトンネル掘削における切羽の安定、土留壁の背面補強、隣接構造物の防護などを目的とした補助工法として広く採用されている。本工法では注入材を地中に圧入するが、注入材の地中での挙動を適確に把握することが難しく、施工管理は注入圧や注入量を制御することによって行なわれている。このような方法で管理された場合、注入材が所定の位置に所定量注入されているかどうかは確認できない。注入材の分布を間接的に調査する方法には中性子水分計¹⁾やガンマ線密度計による方法や地盤の電気抵抗測定による方法²⁾などが開発されているが、精度、作業性あるいは適

用範囲などに改良の余地を残している。

一方、原位置の土質調査法により地盤改良の効果を判定する場合、標準貫入試験や透水試験が行なわれるが、試験に手間と時間及び作業スペースを必要とするため頻繁に行なうことはできない。そこで注入効果を簡便に調査する方法としてフェノールフタレインの発色反応を利用した方法が採用されているが、この方法は精度及び注入効果との対応という点で不十分である。

以上のように、注入工法では施工管理及び注入効果の判定を充分に行なうことが現状では難しい。しかし、注入材の地盤内の分布を適確に把握し、これと注入効果との関係を明らかにすることができれば、注入工法の設計施工管理はより合理的なものとなろう。そこで、土中の

注入材の含有量を化学的手法を用いて測定する方法を検討し、水ガラス系注入材を精度良く測定しうる方法を開発した。この方法を室内注入実験及びシールド現場の切羽調査に適用し、その有効性を確認したので以下に報告する。

2. 試験法の検討

2.1. 原理

現在用いられている注入材は一般には水ガラス系のものであり、水ガラス及び硬化剤を液状にして注入する。このため注入材あるいはその固結物にはケイ酸(シリカ)が必ず含有される。一方、地盤を構成する土の骨格はケイ酸アルミニウムであり、土のケイ酸含有量は50%前後に及ぶ。しかし、注入材に由来するケイ酸と土に本来含まれるケイ酸とは形態が異なるために、これらを分別することは可能であろう。そこで土中のコロイド状ケイ酸(コロイドシリカ)のみを測定する方法を適用したところ注入材に由来するシリカを定量的に測定しうる事が判明した。

2.2. 土および注入材のコロイドシリカ

本方法を用いて土及び注入材のコロイドシリカを測定した結果を表一に示す。表から明らかなように、注入材(ホモゲル)の含有するコロイドシリカは土のそれよりはるかに多く、注入地盤中のコロイドシリカを測定することによって注入材の含有量を求められよう。

(土)		(水ガラス系注入材)	
土の種類	コロイドシリカ mg/100g	硬化剤	コロイドシリカ mg/100g
標準砂	47.0	a 重炭酸カリウム	10011
川砂	222.0	b アルミン酸ソーダ	8700
沖積層砂	230.5	c 酸性珪酸カリ明ばん	5700
洪積層砂	381.9	d エチレンカーボネート	8790
シルトA	502.9	e グリオキサール	9000
シルトB	481.5	f トリアセチン	10400
土丹	642.0	g セメント	13050
火山灰	912.2	h 酸化マグネシウム 水酸化カルシウム他	9800

表一 土および注入材のコロイドシリカ含有量

2.3. 注入率の算出

湿潤土のコロイドシリカ含有量を測定すれば次式によって注入率を算出する。

$$y = \frac{x/r_1}{x/r_1 + (1-x)r_2} \times 100 \quad \dots\dots\dots(1)$$

$$x = a/a_1 - a_2/a_1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、y : 注入率 (%)
 x : 注入材含有率
 r₁ : 注入材の比重
 r₂ : 土の比重

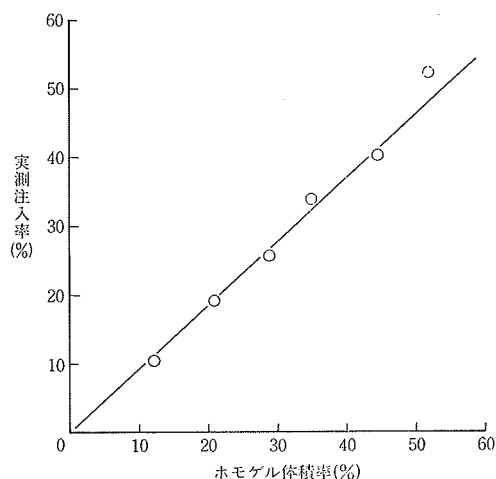
a : 注入土コロイドシリカ含有量 (mg/100 g)

a₁ : ホモゲルの

a₂ : 注入前の土の

ここで、注入率を求めるには採用した注入材ごとに r₁ 及び a₁ を、注入した地層ごとに r₂, a₂ を測定しておく必要がある。特に a₁, a₂ は変動が激しいので注意が必要である。

さて、本方法を川砂と表一の注入材 a との混合物に適用し注入率を算出したところ図一が得られた。この図によれば注入率はホモゲル体積率とほぼ直線の関係となり、ホモゲル体積率の90~95%を検出する。したがって本方法は注入率を実用上問題のない精度で測定しうるといえる。

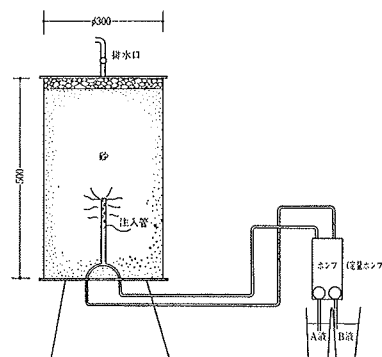


図一 検量線

3. 室内注入実験への適用

3.1. 注入供試体の作成

注入は川砂、標準砂に対して行ない、ゲルタイムの短いものを注入するように水ガラスと硬化剤は砂の中で合流する注入装置とした。注入装置を図二に、供試した砂の粒径分布を図三に示す。注入条件などは表二



図二 注入装置

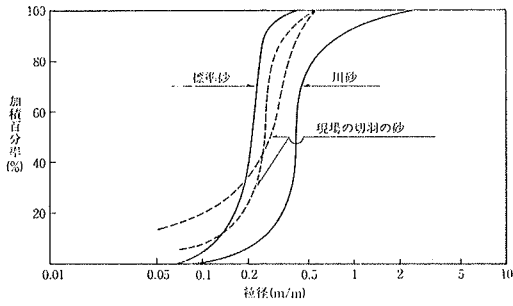


図-3 供試砂の粒径分布

NO.	A-1	A-3	C-8	D-12
対象砂	川砂	川砂	標準砂	川砂
間隙率	37.7%	37.1%	36.5%	37.6%
注入材	水ガラス 重炭酸ソーダ 塩化カリウム	左に同じ	左に同じ	水ガラス セメント
ゲルタイム	9.6秒	31.2秒	5.0秒	22.0秒
注入速度	2ℓ/min	2ℓ/min	2ℓ/min	2ℓ/min
注入圧	1.1kg/cm ²	1.2kg/cm ²	1.9kg/cm ²	6.0kg/cm ²
注入量(V ₁)	1,645 ℓ	1,745 ℓ	1,700 ℓ	0,555 ℓ
固結体積(V ₂)	6,450 ℓ	6,871 ℓ	6,209 ℓ	2,338 ℓ
固結倍率(V ₂ /V ₁)	3.91	3.95	3.70	4.22
実施注入率(V ₁ /V ₂)	25.5%	25.3%	27.0%	23.7%
固結状況	ホモゲル散在	均一浸透	脈状	脈状

表-2 室内注入実験概要

に示す。注入圧はゲルタイムの短いA-1, C-8でも現場で見られるほど高くはなく、セメントを硬化剤とするD-12では注入圧が急上昇したため注入途中で中止した。

実施注入率は注入量を固結体積で除したものであるがこの値は間隙率に比べてかなり低く、間隙の充てん率が小さいことを示している。固結体の外形、断面のスケッチを図-4に示すように、ゲルタイムが長く、溶液型の注入材を用いたA-3では注入材が均一に浸透している。これに対し、溶液型でもゲルタイムの短いA-1, C-8では脈状あるいはブロック状のホモゲルが見られ懸濁型注入材のD-12でも脈状浸透が見られる。

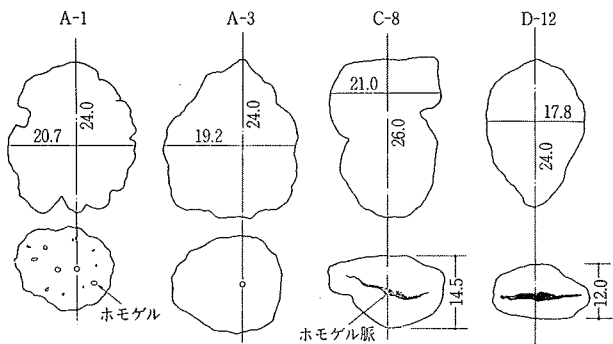


図-4 注入固結物の形状スケッチ (上:側面, 下:1/2切断面)

3.2. 注入材の分布

2.で述べた方法を適用して模型地盤中の注入材含有量を測定し、注入率を算出した。注入率の地盤内の分布は図-5に示しているが、いずれの区でも注入管の2cm前後で注入率が特に高く、さらに離れた所で比較的安定した値となり、固結範囲の外では注入率が10%以下の低い値となる。別に測定したpHや電気伝導度ではこのように明瞭な分布は見られず、特にpHは全体が8.5以上のアルカリ性となり、固結範囲との関係は明瞭ではない。懸濁型注入材を用いたD-12では注入材に近接した所で注入率が40%を超えるが、高い注入圧で注入材が濃縮されているものと思われる。

なお、川砂における実測した注入率は注入孔近傍を除く固結範囲で20%前後であり、間隙率37%の約50%であり、前述した実施注入率から見た間隙充てんの不十分な現象と一致している。

3.3. 本法の適用性

試験例について表-3に実測注入率と実施注入率を比較した。川砂に注入したA-1, A-3では実測注入率の平均値が実施注入率の60~80%であり、ややズレが大きい。標準砂ではこの値が95%をうまわり注入された薬液のほぼ全量を検出している。川砂で低い値となったのは薬液が固結体の上部や下部へ未固結の形で逸出したのかも知れない。また、表-3には標準偏差を示しているが、脈状浸透の見られたC-8, D-12で大きく、他の場合は比較的小きな値となる。このように、今回開発した方法は注入材の分布をかなり適確に調査することが

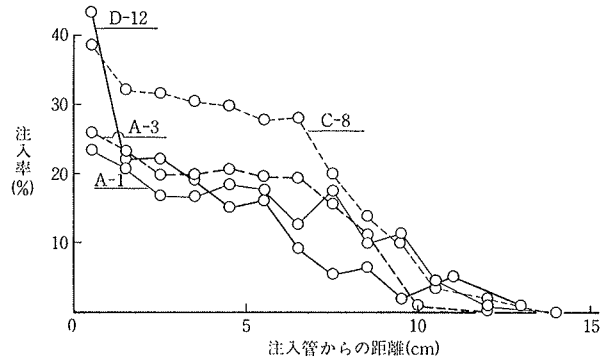


図-5 注入実験における注入率の分布

試験 NO.	A-1	A-3	C-8	D-12
固結部の実測注入率	9.9~23.4%	11.2~25.8%	10.0~38.4%	5.5~43.5%
平均実測注入率(\bar{x})	16.4%	19.4%	26.1%	19.1%
標準偏差(σ)	3.9%	3.9%	8.3%	10.6%
実施注入率(x)	25.5%	25.3%	27.0%	23.7%
\bar{x}/x	0.643	0.766	0.966	0.805

表-3 測定結果総括表

できる。したがって、この調査結果にもとづいて注入が計画通りに行なわれているかどうかのチェックや、注入材の浸透様式の把握ができると考えられる。

4. 注入現場への適用

4.1. 現場の概要

調査を行なったのは東京都内のシールド工事現場であり、図-6に示す軟弱な砂層を掘削するに当たり、切羽の安定を目的として注入が行なわれた。注入の対象となった砂層の粒径分布の一例を図-2に併記している。注入は瞬結二重管式のものと同レタンシュ式の浸透型のものが表-4に示すように行なわれた。浸透型の注入は重要構造物の下を通過する時だけ行なわれ、大半は瞬結型の注入が行なわれている。

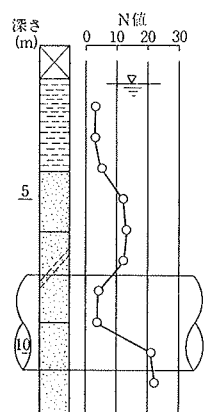


図-6 土質柱状図

注入型	瞬結型	浸透型
目的	止水、強化	止水、強化
注入方法	二重管式	ソレタンシュ式
注入位置	路上	路上
注入断面	門型	全断面
注入材	水ガラス 酸性沈積	水ガラス トリアセチン
ゲルタイム	5~10秒	40分前後
注入圧	3~6kg/cm ²	15~25kg/cm ²
注入量	12ℓ/min	8~9ℓ/min

表-4 注入工概要

4.2. 調査方法

調査は注入後1カ月以上経過した切羽の露出時に行なった。切羽の状況を観察するとともに図-7に示す位置の土を採取した。その際、注入効果は浸透注入区でより明確に認められ切羽の全面が十分に固結し、採取した土の圧縮強度は3~6 kgf/cm²であった。一方の瞬結注入区は切羽を囲むように門型に注入されたこともあって切羽の改良は必ずしも充分ではなく、また注入材の脈が所

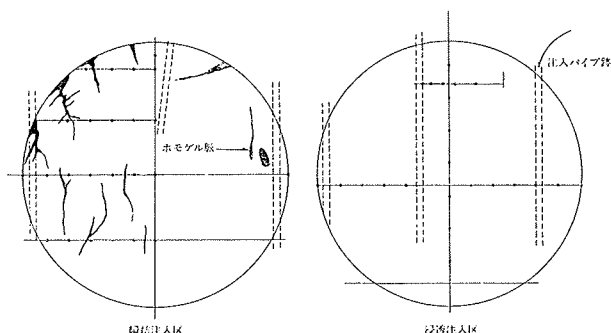


図-7 切羽の状況と試料採取位置

所に見られるものの脈の入っていない所はかなり軟弱であった。

採取した土はビニール袋に保存し、注入材含有量、pH電気伝導度、含水比などを測定した。これらの測定は注入の行なわれない砂層及びホモゲルについても行ない、前出(1), (2)式の r_1 , r_2 及び a_1 , a_2 を求めた。

4.3. 適用結果

図-8に注入材含有量から求めた実測注入率の分布を示すように、瞬結注入区では注入率の分布範囲が広く、注入率10%以下の度数が多い。これに対して浸透注入区では注入率の分布範囲がせまく、20~30%の注入率を示す試料も多い。この結果を統計処理したものが表-5である。この表によれば、平均注入率は瞬結注入区の方がやや高いが、これは70%以上の注入率を示すホモゲルの脈が寄与している。標準偏差は浸透注入区の方がかなり小さく、この区ではより均一な注入が行なわれていることを示しており、上述の観察結果と一致している。なおいずれの区も平均注入率は目標とした注入率に比べて低く、注入材が注入対象範囲の外へ逸出していることを示唆している。

次に注入のパターンすなわち脈状浸透や粒子間浸透がどのように生じているかを知るためにホモゲル脈あるいは注入孔付近の注入材の分布を図-9に示した。瞬結注入区では脈状のホモゲルが見られるものの、脈から10cm離れると注入材はほとんど見られず、いわゆる粒子間浸透は顕著ではない。一方、浸透注入区ではホモゲルの脈は見られないが、注入孔から40cm離れてもかなり高い注入率となり、粒子間浸透が顕著である。

なお、瞬結二重管式注入では注入孔付近にタマネギ状

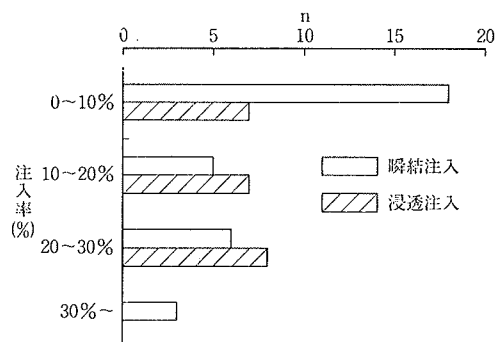


図-8 切羽における実測注入率の分布

注入方法	瞬結注入	浸透注入
試料数 (n)	31	22
注入率範囲	1.9~77.7%	1.6~30.9%
平均注入率 (\bar{x})	16.3%	15.1%
標準偏差 (σ)	21.1%	8.3%

表-5 調査結果総括表

の土質改良部が出現するといわれるが³⁾、今回の調査では注入材の分布から見てもそのような実態は確認できなかった。

ところで、今回の調査では注入率が平均で15%前後であり、前述の室内注入実験でも平均注入率は25%前後と測定された。注入の設計をする際には次式がよく用いられ、注入率が注入地盤の間隙率に比べてかなり小さな値を示したことは、充てん率が小さかったことを示唆し

$$\lambda = n \cdot \alpha \cdot (1 + \beta) \quad \dots\dots\dots(3)$$

λ : 注入率 (%) n : 間隙率 (%)

α : 充てん率 β : 割増係数

ている。地盤の間隙のうち注入材が地下水を排除して置換しうる間隙は容易に移動しうる水すなわち重力水で飽和された間隙と考えられ、この有効間隙率は土質によって異なるが間隙率の40~70%であるという⁴⁾。今回の実験、調査で間隙率に比べて低い注入率になったのは、注入材が有効間隙率に相当する間隙しか浸透しえず、間隙の充てん率が低いことを示している。

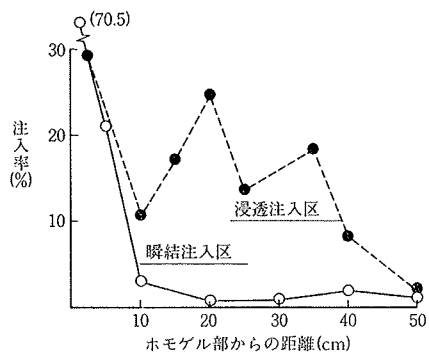


図-9 注入孔，注入脈付近の注入材分布

瞬結注入区	注入率 %	16.1	10.1	3.4	4.9	18.5	1.0
	PH	9.1	9.2	8.6	8.9	9.3	8.7
電導度 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1025	225	271	900	2030	305	
含水比 %	37.4	35.0	29.9	30.9	37.5	30.2	
浸透注入区	注入率 %	2.5	14.1	8.6	28.0	21.3	9.7
	PH	8.6	10.0	9.3	10.2	9.9	9.2
	電導度 $\mu\text{S}/\text{cm}$	1200	1700	1100	1400	1700	1400
	含水比 %	29.2	27.2	28.3	26.4	28.9	25.9

表-6 採取試料の分析結果例

採取土の注入率以外の分析結果を表-6に例示する。pHは8.1から10.5までに分布し、後述するように注入率との相関性は乏しい。電導度は200から2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ に分布するが注入率との相関は見られない。また、含水比の分布範囲はかなり狭いが、やはり注入率との相関は見られない。注入現場では注入材が浸透しているか否かをフェノールフタレインの発色反応を利用して判断する方法が採用される。そこで、pHと注入率との関係を図-10

に示したが、注入率の上昇につれてpHも高くなる傾向は見られるもののバラツキの幅が大きく、pH値から注入率を求めることは困難である。また、フェノールフタレインはpHが8.2以上で赤紫色に変色するが、この図では注入率が2%未満でもpHは8.2以上となる例もあり、フェノールフタレインの発色によって注入範囲を推定することはかなり危険である。

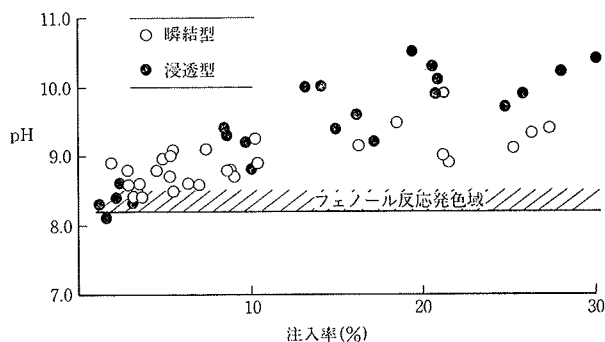


図-10 注入率と pH の関係

5. おわりに

薬液注入工法において注入材の浸透固結状況を直接的に把握しうる方法の確立が望まれている。ここで述べた化学的手法を用いた土中の注入材含有量の測定方法は室内注入実験で得られた固結体及び砂地盤に注入した現場の注入材分布をかなりの精度で調査しうる事が判明した。この方法は従来のpHや電導度測定による方法と異なり、注入地盤の注入率を定量的に把握しうる点に特長がある。したがって、透水性や強度などの注入効果を数値化できる指標との対応を図ることが可能となり、さらに、注入材の地盤内の挙動を解析する手法として本方法を活用することもできる。これらのデータを蓄積することにより、地盤や注入目的に応じた注入方法、注入材料の選択、計画注入率の決定など注入工法の設計をより合理的なものとする事ができよう。また、注入が計画通りに行なわれたかどうかを事後のボーリングの際のコアや掘削土についてチェックすることも可能であり、注入施工の管理にも有効である。このような本方法の活用については現在データを蓄積中であり、その結果については後日紹介する所存である。

参考文献

- 1) 有泉, 他: 第4回土質工学研究発表会講演集, (1969), pp. 387~390
- 2) 吉住, 斎藤, 菅野: 土と基礎, Vol. 24, No. 1, (1976), pp. 43~50
- 3) 三木, 佐藤, 佐野: 第14回土質工学研究発表会講演集, (1979), pp. 1589~1592
- 4) 土木学会編: 水理公式集, 昭和46年度改訂版, (1977), p. 365