

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。本工法では地盤内の注入材の挙動を適確に把握することが難しく、間接的な方法として中性子水分計やガンマ線密度計による方法、地盤の電気抵抗測定による方法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。他にもフェノールフタレインの呈色反応を利用した方法が簡便法として採用されるが、注入効果との対応が必ずしも充分とはいえない。注入地盤中の注入材の含有量、分布を直接的に測定する手法が開発できれば、注入効果を予測することが可能となるだけでなく、注入工法の設計、施工の合理化に寄与しうると考えられる。そこで、化学的手法を用いた地盤中の注入材含有量の測定法を検討し、室内実験及び注入現場に適用したところ良好な結果を得たので報告する。

2. 測定方法の検討

2.1 測定原理 現在わが国で用いられている注入薬液は一般には水ガラス系のものである。したがって、注入材あるいは注入地盤にはケイ酸が必ず含有される。一方、地盤を構成する土の骨格成分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、これらを分別することが可能である。注入材に由来するケイ酸は主としてコロイド状ケイ酸であることが判明したので、土のコロイド状ケイ酸を測定すれば、注入材の含有量を求めることができる。

2.2 測定方法 注入地盤から採取した土のコロイド状ケイ酸を抽出し、抽出液中のケイ酸を比色法によって測定する。別に注入前の土および使用した注入材のホモゲルのコロイド状ケイ酸を測定し、計算によって注入土中の注入材含有量を求める。さらに、ホモゲルおよび土の密度を用いて、ホモゲルの体積割合を算出し、これを実測注入率とする。この方法をホモゲル含有土に適用し、十分な精度を有することを確認した。

3. 適用例

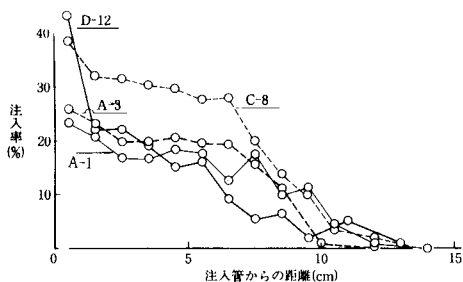
3.1 室内注入実験

注入は川砂、標準砂に対して行ない、ゲルタイムの短い注入材も注入しうるように、2液が土中で合流する注入装置を用いた。注入条件等については表-1に示した。セメントを硬化剤とする懸濁型の注入材は注入圧が急上昇したため注入途中で中止した。表中の実施注入率は砂の間隙率よりかなり小さく、充てん率が低いことを示している。固結砂の断面を観察すると、ゲルタイムの長い溶液型のA-3では均一な浸透が見られるのに対し、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

表-1 注入実験概要

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 塩化カルウム	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)	1.645ℓ	1.745ℓ	1.700ℓ	0.555ℓ
固結体積(V ₂)	6.450ℓ	6.871ℓ	6.209ℓ	2.338ℓ
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

られ、また懸濁型注入材のD-12でも脈状浸透が見られる。上述の測定方法をこの実験に適用し、注入材の分布を測定した結果を図-1に示す。いずれの区でも注入管の付近で注入率が特に高く、離れるにつれて



図－１ 模型地盤の注入率分布

表－２ 注入率分布状況（室内実験）

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

注入率が低下し、固結範囲の外では注入率が10%以下となる。別に測定したPHや電気伝導度ではこのような明瞭な分布は見られず、特にPHは全体が8.5以上となり、フェノールフタレインの発色が見られる。実験例について、実験注入率と実測値とを表－2に示す。実測注入率の平均値は20%前後であり、間隙の約 $\frac{1}{2}$ が注入材によって充てんされている。標準砂（C-8）では実測値が実施注入率の95%をうわまわることが、川砂では60～80%であり、注入材が上部や下部へ逸出していることを示している。

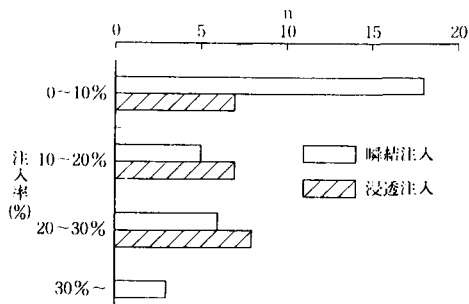
3.2 注入現場調査

調査を行なったのはシールド工事現場であり、ルーズな砂層の強化と止水を目的として、瞬結二重管式およびダブルストレーナー式の注入が行なわれた。実施注入率はいずれも34.4%である。注入後約1ヶ月経過してから切羽の状況を観察するとともに、コパン目状に土を採取し、注入率、PH、電気伝導度などを測定した。切羽の状況は瞬結タイプの区では脈状を、浸透タイプの区では均一な粒子間浸透を示し、注入効果は後者で顕著に見られた。

実測注入率の分布は図－2に示すように、瞬結注入区より浸透注入区の方が均一性の大きな注入が行なわれたことを示している。また、表－3では、両区ともに15%近い平均注入率であるが、注入の均一性が浸透注入区ですぐれていることが明確に示されている。切羽内の実測平均注入率は実施注入率の約半分であり、注入材が注入対象の外へ逸出していることを示している。このように、化学的手法による注入材の測定法は現場における注入効果の判定や工法比較に有効であるといえる。なお、採取土のPHと実測注入率の関係は図－3に示す。図より明かなように、PHは注入率の増大につれて上昇するが、ばらつきも大きく、注入率推定の手段とはならない。また、フェノールフタレインの発色はごく僅かな注入材の含有によっても見られる。

4. おわりに

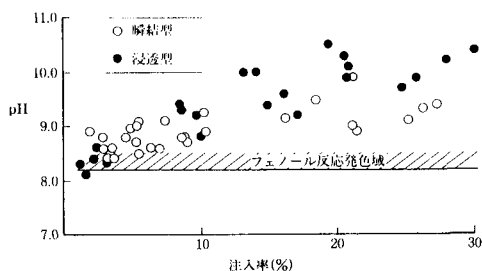
注入工法による地盤改良を行なう際に、地盤中の注入材の挙動を直接的に把握する方法として化学的手法による測定法を採用し、注入地盤への適用性を検討し、本方法の有効性を確認した。今後さらにデータの蓄積を図ることにより、注入工法の設計、施工、施工管理の合理化に寄与することができれば幸いである。



図－２ 切羽の注入率分布(1)

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－３ 切羽の注入率分布(2)



図－３ 採取土のPHと注入率の関係