

# 薬液注入工法における施工管理に関する研究（その9）

——温度測定による注入効果推定に関する現場実験——

川 地 武 喜 田 大 三

## Studies on Performance Control of Chemical Grouting (Part 9)

——Field Investigation on Estimation Method of Ground Improvement by Temperature Measurement——

Takeshi Kawachi Daizo Kita

### Abstract

Development of a method of estimating improvement of ground when chemical grouting is performed has been called for. As described in previous papers, the authors discovered the phenomenon of a silicate solution generating heat on reaction with hardener and gelling. This phenomenon was thought to be useful for estimating improvement of ground. The authors then tried to make clear the applicability of this method to a grouting site. As a result, ground temperature was observed to rise on grouting and the degree of temperature rise was useful in estimating the ratio of filling of voids by the grouting material.

### 概 要

土木・建築の地下掘削工事の補助工法として普及している薬液注入工法では注入による地盤改良効果を適切に判定する手法が望まれている。筆者らは地中温度測定による注入効果判定法を開発し、すでに現場にも試験的に適用している。この報告は砂れき、シルト、細砂の互層地盤に二重管ダブルパッカー注入および二重管単相注入を行ない、温度計測により注入材の浸透状況を推定するとともに固結体を掘り出して注入材の浸透状況を調査し、本法の妥当性を検討したものである。その結果、温度変化のパターンにより注入材の浸透形態を推定でき、粒子間の浸透注入の場合には上昇温度からてん充率の推定も可能であることなどが明らかになった。

## 1. はじめに

シールド工事やピルの根切り工事などの地下掘削では地盤強化、止水を図るため補助工法として薬液注入工法が普及している。掘削を確実にこなすためには注入による地盤改良効果、改良範囲を的確に予測、判定する必要があるが、適切な方法がないため、必要に応じて事後に調査ボーリングを行なっているのが現状である。このためのコスト、工期も無視できず、簡便かつ精度の高い改良効果の予測、判定方法の確立が望まれている。筆者らは注入材に用いられる水ガラスがゲル化、硬化する際に反応熱を生じることに着目し、地中温度測定による注入効果の推定方法を考案し、基礎実験を行なうとともに現場にも試験的に適用してきた。また、推定の精度の向上を図るため土槽実験を行ない前報<sup>1)</sup>で結果を報告した。

この報告では、これらの結果をふまえ、現場の成層地盤に注入した際の注入材の浸透、固結状況を固結体を掘り出して確認し温度測定による推定結果と対比することによって、この方法の有効性を検証するとともに適用上の問題点を検討した。

## 2. 実験方法

### 2.1. 実験現場の概要

現場は開削工事の現場であり、すでにGL-10 mまで掘削が進行し注入はこの面から行なった。注入深度はGL-12 m～17 mであり、土質は上部から砂れき、シルト、シルトまじり細砂で構成される。これらの土質性状の概略を表-1に示す。地下水位は注入作業面から2 m程度下がっており、注入の際には約10 m離れて掘削が進行していた。なお、注入位置の土留壁からの最近接距離は2 mであった。

深度	土質	N値	粒 径 分 布			透水係数 cm/sec
			<74 $\mu$	>4.76mm	D <sub>10</sub>	
-11.0～ -14.0m	砂れき	50	4.5%	61.5%	0.39mm	9.6×10 <sup>-2</sup>
-14.0～ -14.9m	シルト	3～7	97.8%	0	—	—
-14.9～ -17.0m	シルト混り 細砂	10～17	14.0%	14.0%	0.04mm	2.2×10 <sup>-5</sup>

表-1 注入対象土

### 2.2. 実験区の設定

実験は注入材の浸透形態が異なると考えられる二つの

注入方式(二重管単相注入, 二重管ダブルパッカー注入)を採用し, 注入方式によって実験区を設定した。それぞれの実験区の注入諸元を表-2 に示す。

工 区	スリーブ注入区	LAG注入区
工 法	二重管ダブルパッカー方式	二重管単相注入方式
注 入 材	一次注入:セメントミルク(CB) 二次注入:溶液型(CW-3)	溶液型(LB-1)
ゲルタイム	50~60分	~5秒
注 入 率	35% (CB:10% CW-3:25%)	35%
注入速度	10ℓ/分	12ℓ/分
ステップ	33.3cm	25cm

表-2 注入諸元

### 2.3. 注入孔, 計測孔の配置

図-1 に示すように, 各実験区ともに千鳥型に10本の注入孔を配置し, それぞれの間隔は1mとした。また, 固結予定範囲の内部, 端部, 外部に温度計測孔を各区6本ずつ配置した。温度計測孔は注入に先立ってボーリングし, ここに熱電対をセットし, 土砂を埋戻している。

なお, 実験区相互は8m離れている。

### 2.4. 温度計測

埋設センサーには熱電対 (C. C) を用い, 地上でひずみ測定器により変換, 記録し, 温度変化の様子は CRT 画面に刻々と表示されるようにした。温度の計測は注入開始前から終了後3日までの14日にわたって行なった。

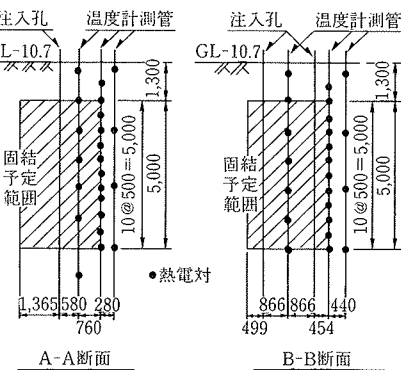
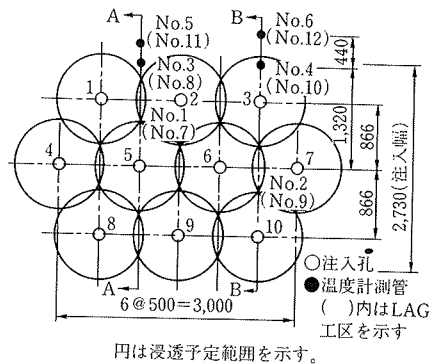


図-1 注入孔およびセンサーの配置

### 2.5. 地盤改良効果の調査

(1) 現場透水試験 注入2日後に各注入区の中央でボーリングを行ない, 変水位法による透水試験を行なった。

(2) 標準貫入試験 注入2日後に中央部で実施。

(3) 固結状態 注入終了30日後から固結部を残して周囲を掘削除去し固結体を掘り出し, 薬液の浸透・固結状態を観察した。掘削は高さ2mずつ3回に分けて行なったが, 上部の砂れき層と下部の細砂層では薬液浸透部の確認ができたが, シルト層では薬液の浸透による固結部の確認が困難であった。掘り出した固結部からブロック試料を採取し強度試験などを行なった。

(4) てん充率 標準貫入試験で得られる試料, 固結体掘り出しの際に得られる試料などについて化学分析を行ない薬液による間隙てん充率を求めた。

### 3. 実験結果

#### 3.1. 注入状況

注入はLAG注入, スリーブ注入(一次注入, 二次注入)の順に合計8日間で行なった。注入速度は前者で12ℓ/分, 後者で一次, 二次ともに10ℓ/分であり, いずれも下部から上部へのステップ注入とした。注入時の圧力変化の例を図-2 に示す。スリーブ注入では上部の砂れき層での注入圧が高く, 注入管の周りの地盤の抵抗の大きさを示唆している。一方, LAG注入では全層を通じてほぼ一定の圧力を示し, 注入圧が瞬間的にゲル化するホモゲルの割裂抵抗(強度)に支配されていることを示唆する。スリーブ注入における粗間隙充てんのための一次注入の際にCB(セメントミルク)の地上への逸走, リークが著しく, 10m程度離れた中間杭(H鋼)の周りなどから注入材が吹き出すことがあった。二次注入の際にはこのような現象は見られなかった。LAG注入の際には注入管の周りから若干のリークが見られるとともに, 地盤の隆起が生じ, 全体の注入が終了した時点の最大隆起量は30cmにも及んだ。土被りが1m程度と極端に少な

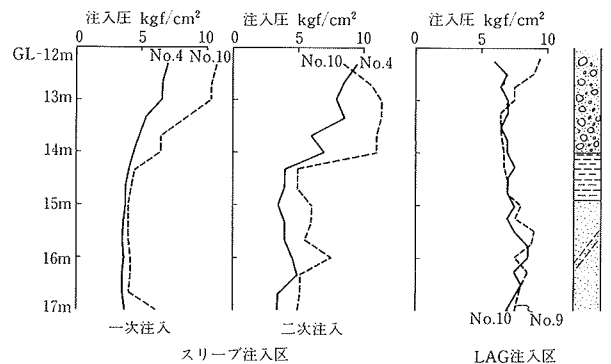


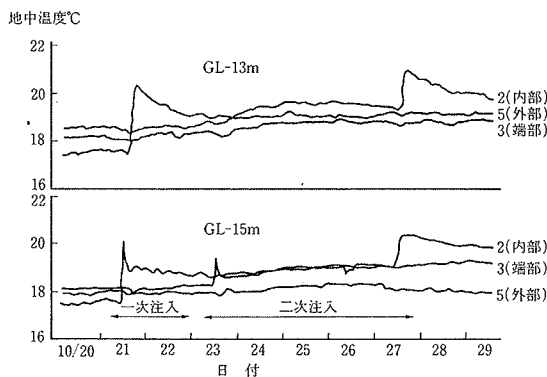
図-2 注入圧の分布

いための現象であるが、瞬結性の薬液のため、脈状注入（割裂注入）であることを示す。

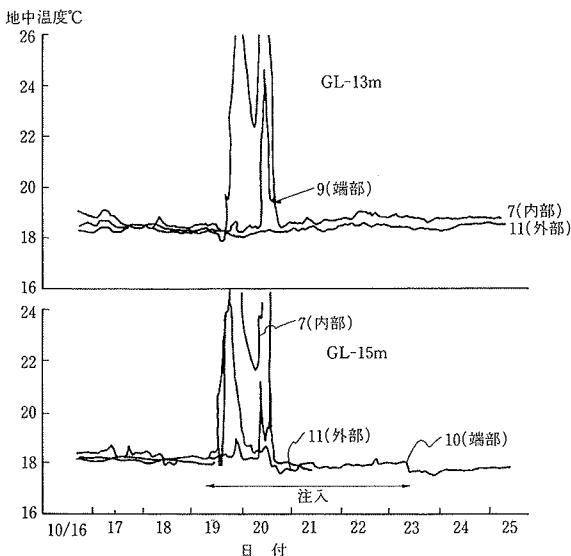
### 3.2. 温度変化

注入に伴うスリーブ注入区の地中温度の変化の例を図一3に示す。注入による薬液の推定浸透範囲の内部のセンサーはGL-13m, 15mともに二次注入の終り頃に明瞭な温度上昇を示し、上昇した温度は急速には低下しない。一方、推定浸透範囲の端部のセンサーはGL-13mでは全く温度上昇を示さないのに対し、GL-15mでは一次注入の初期に温度上昇を示し、長期にわたってこの温度を維持する。さらに、浸透範囲の外部のセンサーはGL-13mでは一次注入時に温度上昇するものと、全く変化のないものがある。このように、浸透範囲内部のセンサーは二次注入の際に温度上昇を示すが、それ以外では一次注入のCBの影響と思われる温度上昇を示すことがある。これは、CBが注入孔からかなり離れた位置でリークしていたように、遠方まで走った脈状のCBや後述するように、センサー周りにリークしたCBを検知したといえる。

一方、LAG注入の場合には図一4に示すように予定



図一3 地中温度変化の例（スリーブ注入圧）



図一4 地中温度変化の例（LAG注入圧）

浸透範囲の内部および端部で時々瞬間的な温度上昇が見られるが、温度はすぐに以前の状態に戻る。温度上昇が見られる10月19日は注入孔No. 4, 5 10月20日はNo. 1, 8の注入を行っており、温度計測孔までの距離は2m以上に及ぶものもある。また、浸透予定範囲の外部ではGL-15mのセンサーで同様の温度変化が見られた。以上の結果はLAG注入の区では注入材の浸透範囲が当初の予定値の注入管から60cmよりかなり広いことを示す。なお、温度記録が途中で取れなくなるセンサーが何本かあったが、後述するように、地中（シルト層）で断線していた。

### 3.3. 地盤改良効果

注入後の透水係数などを表一3に示す。砂れきの透水係数はスリーブ注入区で $10^{-6}$  cm/secのオーダーとなり著しく改良されているのに対し、LAG注入区では $10^{-4}$  cm/secのオーダーで注入前に比べればやや改良はされているが、スリーブ注入区より劣っている。N値については注入前後の差は明瞭ではない。また、固結体掘り出しの際に採取した細砂層の一軸圧縮強度の平均値はスリーブ区でやや大きい。以上のように、止水性、強度ともにスリーブ注入区で優れた改良効果が認められた。

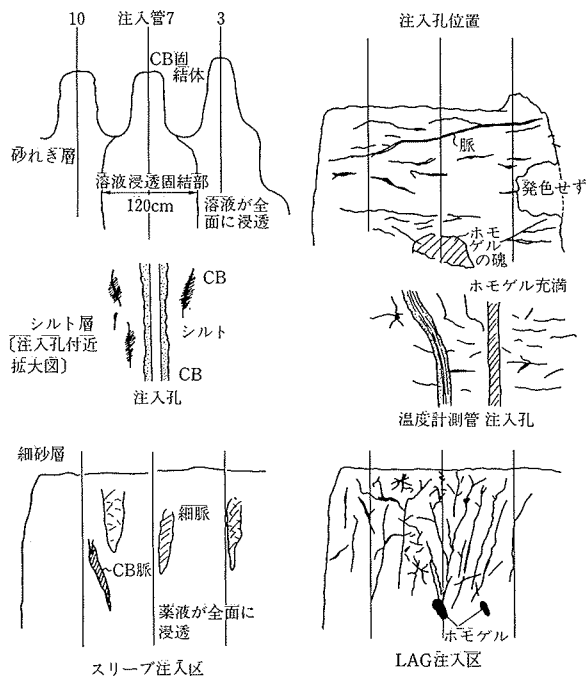
### 3.4. 固結状況

注入地盤周辺の掘削の進行に合わせて上から三回に分けて固結体の掘り出しを行なった。図一5にスケッチを示すように、砂れき層ではスリーブ注入区で薬液は均一に浸透しているようで、全体的にフェノールフタレインの反応が見られた。浸透固結範囲は端部の注入管で半径が約60cmであった。なお、図示したように注入管の回

		スリーブ注入区	LAG注入区
透水係数 (砂れき層)		$1.9 \times 10^{-6}$ cm/sec	$2.3 \times 10^{-4}$ cm/sec
N値	砂れき	50以上	20~40
	シルト	3~8	7
	細砂	12~45	8~14
一軸圧縮強度 (細砂層)		0.8~2.9 kgf/cm <sup>2</sup> $\bar{x}$ : 1.31 $\sigma$ : 0.54	0.4~1.2 kgf/cm <sup>2</sup> $\bar{x}$ : 0.82 $\sigma$ : 0.23

表一3 注入後の土質調査結果

りには柱状にCBの硬化物が見られる。一方、LAG注入区では所どころにホモゲルの脈が見られ、太い脈を中心に枝分かかれし、フェノール反応は脈の周辺で見られる。しかし、一部に全く発色しない部分があり、ここでは砂れきは固結していない。シルト層ではスリーブ区、LAG区ともに薬液の固結範囲が不明瞭であり、フェノールの発色反応も全面的ではない。スリーブ区では所どころにCB固結体の縦のきれつが見られるのに対し、LAG区で



図一5 注入材の浸透固結状況スケッチ

は注入孔の付近に大小の脈が見られ、塊状のホモゲルも見られた。なお、No. 9の計測孔はGL-14 m付近で約20 cm程度曲がり、熱電対が切断されていた。注入時に隣接して掘削が行なわれていたため注入圧によって地盤が側方に移動したものである。このようなセンサーは他にも見られた。また、細砂層ではスリーブ区で全面的にフェノール反応が見られ、その範囲は注入管から40~60 cmである。所どころにCBの固結物が縦きれつを形成し、温度計測管の回りで固結している例が見られた。LAG区では多数のきれつが縦横に走っているが、端部での固結範囲は注入管から30 cm前後である。

なお、スリーブ区ではいくつかのセンサーがCB固結体に埋まっていた。一次注入の際にCBを強引に注入したため、温度計測孔にCBがリークし、センサー回りの埋め戻し土が固結化したものである。

### 3.5. てん充率の分布

固結範囲の中央部で行なった貫入試験で採取した試料の化学分析によるてん充率の分布を図一6に示す。スリーブ区、LAG区ともに砂れきでのてん充率は50~80%であり、十分な浸透と見られるが、シルト層での値はともに低い。また、細砂層ではスリーブ区でのてん充率が50~60%と安定しているが、LAG区では全体的に低い。

## 4. 考察

### 4.1. 温度変化パターン

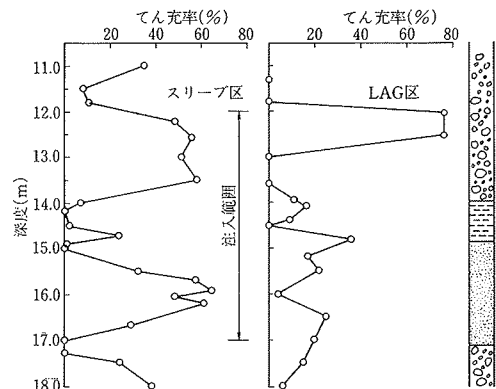
前報でスリーブ注入を用いた土槽実験で得られた温度変化パターンを分類したが、今回の二重管単相注入

(LAG注入)の場合の脈状注入を含めて改めてパターンの分類を行なった。表一4に示すように、大別すれば四つの基本パターンとなり、それぞれのパターンが複合する場合も見られる。今回の現場実験ではスリーブ区でパターンA、LAG区でパターンCが卓越した。このように注入方式によってパターンが異なる現象は他の現場調査<sup>2,3)</sup>でも確認されており、ゲルタイムの長い薬液を用いて浸透注入を図るスリーブ注入ではパターンAが、瞬結性薬液を用いて脈状注入(割裂注入)を図る二重管単相注入ではパターンCとなる場合が多い。

薬液の地中での浸透拡散の挙動は注入材のゲルタイムばかりでなく、ホモゲルの強度、地盤の透水性、注入管付近の土のせん断強さなどによって異なり、事前に予測することは困難である。今回の実験で得られたように、地中温度を計測すればその変化パターンを解析することにより注入材の浸透形態などを推定することが可能になる。なお、ゲルタイムの異なる二種の薬液を併用する複合注入の場合、これらとは異なるパターンとなることも考えられるが、この点については今後の検討課題である。

区分	パターン	注入材の浸透状態
A	温度  時間	・注入材が粒子間に均一に浸透(浸透注入)
B	 時間	・注入材が何回かに分れて浸透注入 [一次注入、二次注入に分れる場合を含む。]
C	 時間	・注入材が脈状に浸透(脈状注入、割裂注入)
D	 時間	・注入材浸透部からの伝熱による(固結体近傍)

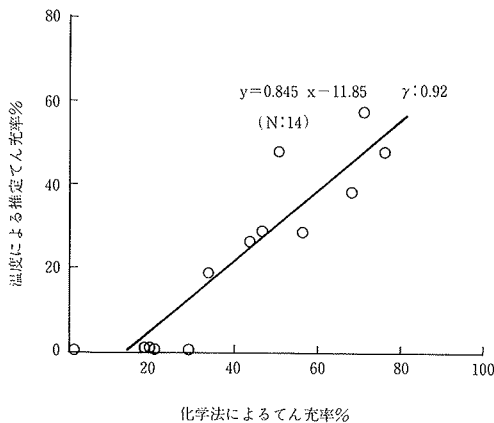
表一4 温度変化パターンの分類と推定される浸透形状



図一6 化学分析によるてん充率の分布

#### 4.2. 温度上昇量とてん充率との関係

土粒子間に薬液が均一に浸透する浸透注入の場合、温度上昇量から注入材による間隙てん充率を推定しうることが前報<sup>1)</sup>で述べた。そこで、今回の実験のスリーブ注入区で上述の温度変化パターンが A あるいは B を示し、CB による妨害を受けていない測点について、温度上昇量から前報に述べた式を用いててん充率を求めた。これとセンサー埋設点の付近で採取した試料の化学分析によるてん充率をプロットして図一七に示す。点数が少ないが、両者には一応の相関が見られ、温度からの推定てん充率がやや小さくなる。これは、てん充率算出の際に注入材からの発熱量が周辺への伝熱によって奪われることを考慮していないためと考えられる。



図一七 化学法と温度法によるてん充率の相関

#### 4.3. 本法の現場適用上の留意点など

この方法は注入予定地盤あるいはその周辺に予め温度センサーを埋設し、注入時の温度変化から注入材の地中での挙動を推定するものである。今回の現場実験の結果、LAG注入のような二重管単相注入方式ではパルス状の温度変化が見られ、これは脈状に浸透する注入材を検知していることが判明した。このような場合、温度計測は薬液のセンサー埋設地点への到達の有無、到達時間およびこれらを総合することにより注入材の拡散範囲などを推定するのに有効である。ただし、この場合には薬液が均等に分布するのではないので、センサー埋設部分で薬液の浸透が推定されても、その周辺にも薬液が浸透、分布するとはいえないことに留意する必要がある。

一方、ゲルタイムの長い薬液を浸透注入させるスリーブ注入などの二重管ダブルパッカー注入方式では温度変化パターンが A タイプになることが多く、この場合には温度上昇量からてん充率を推定することが可能である。注入による地盤改良効果はてん充率に支配される所が多い<sup>4)</sup>ので、温度上昇量は地盤改良効果の判定に有力な根拠を与えることになる。ただし、二重管ダブルパッカー注入では粗間隙を充填するために、溶液の注入に先立って CB による一次注入を行なうが、地盤の受け入れ能力以上の CB を強引に注入すると温度センサー埋設部にリークし、センサーが無効になることがあるので注意が必要である。

#### 5. おわりに

薬液注入工法における地盤改良効果を注入時に簡便に判定することはこの工法の施工管理の有効な手段となると考え、温度計測による方法を開発し一連の実験、調査を行なってきた。この報告では現場注入試験を行ない、この方法による推定結果の妥当性を固結体の掘り出しによって確認するとともに今後の課題を明らかにした。さらに適用例を積み上げ、より精度の高い管理手法とする所存である。なお、この報告は東京電力(株)からの受託研究を取纏めたものである。ご指導を得た関係者の方々に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 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), 大林組技術研究所報, No. 36, (1988), pp. 16~20
- 2) 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 7), 大林組技術研究所報, No. 32, (1986), pp. 72~76
- 3) 川地, 喜田: 温度計測による注入効果の推定—現場適用結果一, 第23回土質工学研究発表会講演集, (1988), pp. 2087~2088
- 4) 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, Vol. 35, No. 5, (1987), pp. 45~50