

薬液注入工法における施工管理に関する研究 (その7)

—温度測定による注入効果推定に関する現場適用調査—

川 地 武 喜 田 大 三

Studies on Performance Control of Chemical Grouting (Part 7)

—Field Survey on Estimation Method of
Underground Improvement by Temperature Measurement—

Takeshi Kawachi Daizo Kita

Abstract

In the previous paper the authors introduced a method of checking the ground improvement effect of chemical injection. This method is based on measurement of ground temperature rise induced by reaction between the injected sodium silicate and hardener. The method was since applied to a project where silicate was injected by the double tube-double packer method and the results obtained are as follows: (1) Ground temperature rises about 1 to 3°C when injection of silicate is begun and this temperature change is sharp. (2) The ratio of void filled by grout obtained from temperature rise is consistent with the one obtained by chemical analysis. (3) The ratio of voids filled by grout was 52.1 percent in average and standard deviation was 12.1 percent. These data mean high uniformity of ground improvement by injection in this project.

概 要

薬液注入工法における注入効果推定法の一手法として、水ガラス系注入材の反応熱に着目した温度測定による方法を開発し、前報ではその原理、室内実験結果などを述べた。ここでは、この方法を二重管ダブルパッカー工法により地盤改良を行なった現場へ適用し、以下の結果を得た。(1) 注入予定範囲に埋込んだ温度計は注入が行なわれると1~3°Cの温度上昇を示し、その変化は急激である。(2) 温度上昇量から注入材による間隙てん充率を求めることができ、このてん充率は採取試料土の化学分析によるてん充率に比べてやや低い値となるが、相関性は高い。(3) この現場での平均てん充率は温度測定による方法で40.0%、化学分析による方法で52.1%であり、標準偏差は約12%である。これらの値は別に行なった透水試験、標準貫入試験により確認された優れた地盤改良効果を裏付けている。

1. はじめに

薬液注入工法による地盤改良効果を推定する手法の開発は長年の課題として各方面で検討されている。現在、強度や透水係数を現位置で調査するものを除き、注入薬液の浸透範囲や固結範囲を推定する手法として開発されているものは表-1のように多種ある。これらの手法を精度、簡便さ、迅速性などで評価すると、現状では満足すべきものはなく、実用的な手法の開発が望まれている。筆者らは水ガラス系注入材がゲル化、硬化する際に反応熱を発生することを見だし、この現象を利用すること

によって注入薬液の浸透状況を推定しうることを前報¹⁾で述べた。前報では室内の小規模な注入実験の結果であったため、温度測定の方法、測定結果の解析など現場スケールに拡張する際にさらに検討すべき問題が残されていた。そこで、地中障害物撤去のために薬液注入工法による地盤改良が実施された現場において、温度測定による注入効果推定法の適用性を検討した。その結果、測定結果の解釈などにさらに検討の余地を残すものの、この手法は注入作業中に注入材の浸透状態を予測するうえで有効であり、予測結果は地盤掘削の際に採取した土の分析結果とも比較的良く一致した。以下に調査の概要を紹介

検査法	測定原理	精度	簡便さ	即時性	総合評価	
速度検査	弾性波動	N値と対応定性的	比較的簡単	事後調査用	概略調査	
PS検査	P波、S波の伝播速度	*	*	*	*	
反射検査	音波の反射	固結形状推定 接近距離1.5m以内	*	*	固結形状推定	
電気検査	比抵抗法	電気抵抗	てん充率推定可 塩分の妨害あり	電極の埋込みが必要	*	広域探索も可
	抵抗法	電気抵抗	浸透範囲検出	電極管理込	注入中に推定可	浸透形状推定
RI検査	密度・含水率	水ガラス注入では低精度	放射線簿必要	事後調査用	汎用性乏しい	

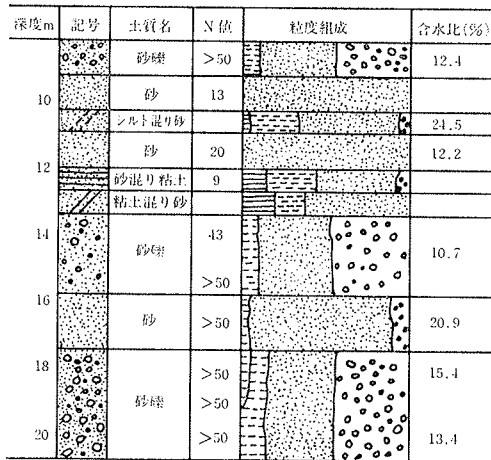
表一 既存の注入効果推定法の評価
(文献2を参考に整理)

介する。

2. 調査方法

2.1. 調査現場の概要

工事はシールド工法による下水道管渠工事を行なうもので、掘削径は3.8m、掘削形式は泥水加圧式である。掘進途中の地中障害物を撤去するために、一時的に手掘り式とし、その区間は薬液注入工法による地盤改良を行なった。改良対象とした地盤は図一1に示すように、砂、砂礫を主体とする。地盤の透水係数は $4.9 \times 10^{-3} \sim 4.5 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ であり、地下水位はGL-2.5mに位置する。



図一1 土質性状図

2.2. 注入工事

注入は主として止水性の向上を目的とし、均一な地盤改良が可能とされる二重管ダブルパッカー工法が採用された。詳細はつぎのとおりである。

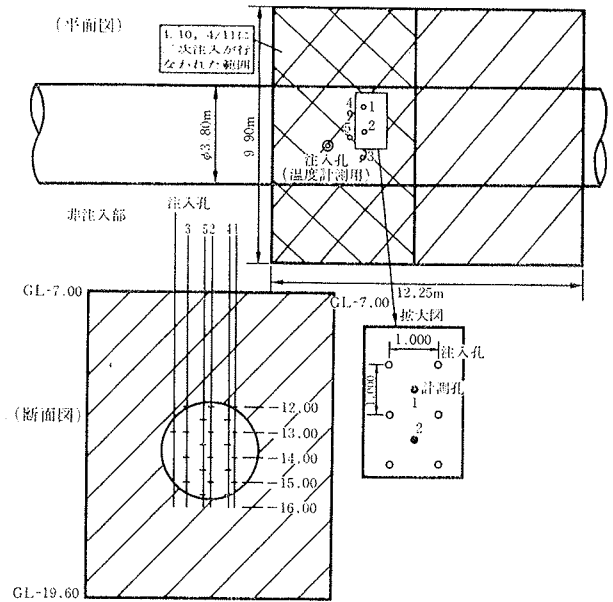
注入深度 GL-7.00～-19.60m

改良土量 1159m³

注入率 一次注入(CB:セメントベントナイト) 5%

二次注入(有機系水ガラス溶液) 37%

ゲルタイム 有機系水ガラス溶液で約60分



図一2 注入範囲と温度測定位置

注入管ピッチ 1m

注入ステップ 3ステップ/1m

注入速度 同時に5本を並行して注入

注入範囲の平面図、断面図を図一2に示す。この注入工法では、①削孔、注入管の設置、②一次注入(CB)③二次注入(溶液)の順に、別の日に行なわれる。

2.3. 温度測定

温度は地中、注入プラント、大気中で測定し、地中温度はさらに注入管、注入範囲内、注入範囲外に分け、合計21点の測定を行なった。センサーには熱電対(CC)を用い、各熱電対の配置は図一2に示した。注入範囲内では注入薬液の浸透量が最少と思われる、注入孔で囲まれた中心部で温度測定を行なった。また、熱電対の深度はシールド掘削の際に試料土の採取が可能な場所とし、熱電対を所定の深度にセットした後にボーリング孔は掘削土砂で埋め戻している。

2.4. 注入による地盤改良効果と注入材含有量

改良効果を確認するために注入範囲内で事後のボーリングを行ない、現場透水試験および標準貫入試験を行なった。また、注入材の分布状態を把握するために、ボーリングによるサンプリング試料および障害物撤去の際に切羽から採取した試料について、既報⁹⁾の化学分析による方法によって注入材含有量を測定し、てん充率として表示した。

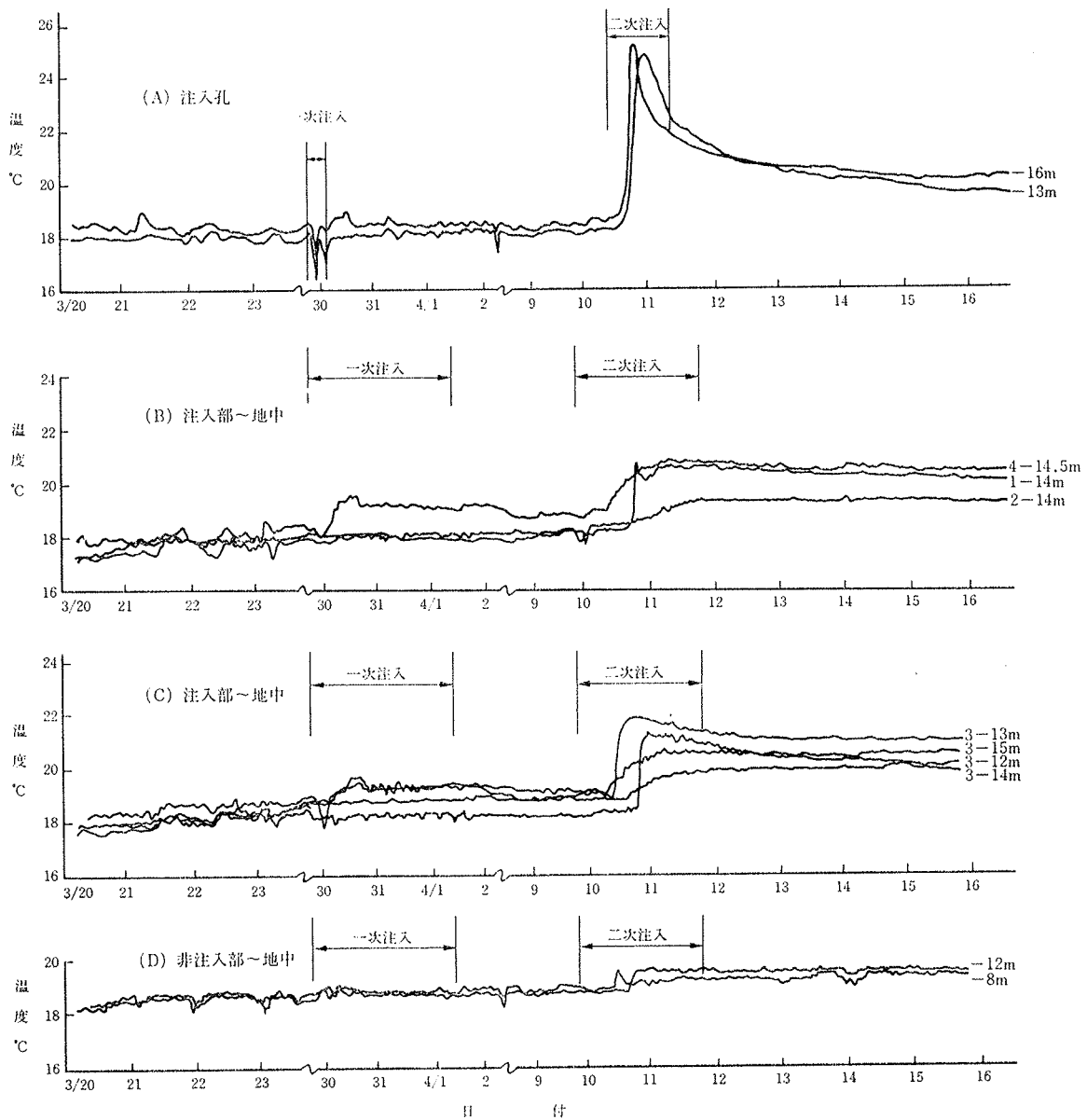
3. 調査結果

3.1. 地中温度

地中温度の測定結果を図一3に示す。(A)は注入管に貼り付けた熱電対の温度変化を示している。二点の測点

はいずれも注入前には18°C前後を示すが、一次注入で若干の、二次注入で顕著な変化を示す。すなわち、この注入孔は3月30日に一次注入、4月10日夜間に二次注入が行なわれたが、3月30日には1.5°C前後の一時的な温度低下が見られ、これは一次注入時にシールグラウトの割裂に用いられる圧力水の水温の影響と思われる。一方、二次注入では両測点とも約6°Cの温度上昇が見られ、注入管内のホモゲルの発熱を示している。また、温度上昇のピークがGL-16mの方が約4時間早く見られるが、これは注入が下部から上部へ進むことと対応している。ピークに達した後の温度降下は他の測点に比べて急であるが、注入後5日では当初の地温より高い20°C前後に落ち着く。

(B)、(C)は注入範囲内の地中温度の変化を示す。(B)は深度14m付近の変化であり、注入前はいずれも18°C前後で、0.5°C前後の小刻みな変動が見られる。この変動は注入に先行する削孔の際の、削孔水の影響を示すと考えられる。一次注入の際にNo. 4孔の測定(4-14.5m)で約1°Cの温度上昇が見られ、この点にはCBが浸透していることを示す。一度上昇した地温は急激に下がることはなく、10日後でも注入前の温度まで回復しない。二次注入が始まるといずれの測点でも温度が上昇するが、上昇開始時刻、温度上昇こう配、温度上昇量はそれぞれ異なる。これらの差異は測点付近の注入薬液の浸透量や浸透速度が異なることを示唆している。このように上昇した温度は急速に低下することはない。



図—3 地中温度の変化

(C) は同一のボーリング孔の深度が異なる測点についての温度変化である。(B) と同様に一次注入の前に若干の温度変動が見られ、一次注入の際には 13 m と 15 m の点で 1°C 近い温度上昇が見られる。二次注入の際には各深度ともに温度上昇が見られるが、温度上昇開始時刻、温度上昇量などは深度によって異なる。これには、深度による土質の差異、個々の測点と注入孔の距離も掘孔精度の差によって微妙に異なることなどが影響していると思われる。

(D) は非注入部の温度変化である。2 深度で測定しているが、いずれも注入前の温度が他の測点に比べてやや高い。注入範囲から 8.6 m 離れているので注入材の浸透はないと予想していたが、実際には二次注入の際に 1°C 弱の温度上昇が見られ、溶液系注入材が浸透してきたことを示唆している。

これら各点の温度上昇量のうち、注入範囲内の地中温度の最大値は表-2 のようにまとめられ、その範囲は、1.1~3.1°C である。

深度	孔No. 1	2	3	孔No. 4	5
12m	-	-	1.1°C	-	2.2°C
13m	-	1.5°C	3.1°C	2.3°C	2.1°C
14m	2.3°C	1.6°C	2.8°C	2.0°C	2.0°C
15m	-	0.5°C	1.6°C	2.3°C	1.8°C

表-2 各測点の温度上昇量

3.2. 地盤改良効果と注入材の分布

地盤改良効果を確認するために注入範囲内の 2 箇所ではボーリングを行なった。透水試験は GL-13.5, 16.5 m で行ない、透水係数はそれぞれ 1.0×10^{-5} cm/sec, 5.6×10^{-6} cm/sec が得られた。これらの値は注入前の値の約 1/1000 であり、十分な止水効果を示している。標準貫入試験では砂礫層は注入前でも $N > 50$ のため正確な比較はできないが、砂層では N 値が 10~40 のものが 2 倍以上の値となり、強度的にも充分な改良効果を示している。

ボーリング試料についての注入材含有量から求めた注

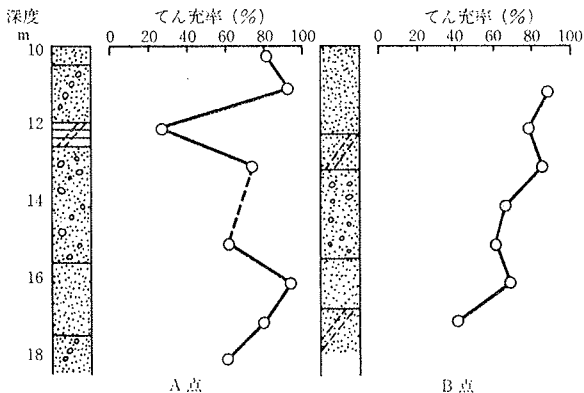


図-4 ボーリング試料のてん充率 (化学法)

入材による間隙てん充率は図-4 に示すように、砂層、砂礫層で 60~90% と高い値を示す。また、シールド掘削の際に切羽から採取した試料についても化学法によるてん充率を測定した。その結果、土質はいずれも砂あるいは砂礫であり、てん充率は大半が 50% 以上を示し、平均値 52.1%、標準偏差 12.1% と同種の工法を砂礫地盤に適用した実績⁴⁾ に比べても均一性の高い注入が行なわれている。

4. 考察

前報では温度測定結果から注入材てん充率を推定するためのおおまかな近似式を提案したが、ここでは、推定の精度を向上させるために、つぎのように考える。すなわち、飽和度 100% の土に注入材が浸透すると、注入土は土粒子、注入材 (ホモゲル)、水で構成される。それぞれの比熱を C_s, C_g, C_w 、密度を G_s, γ_g, γ_w とし、注入範囲の内部では土の境界は断熱されていると仮定すると、熱量の釣合いは次式で示される。

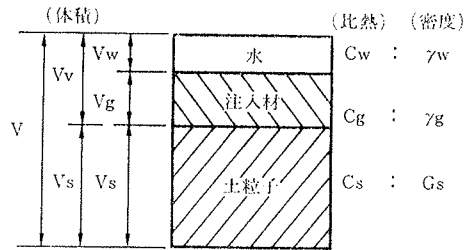


図-5 土の構成図

$$(T_g - T_1) \cdot V_g \cdot C_g \cdot \gamma_g = (T_1 - T_s) (V_s \cdot C_s \cdot G_s + V_w \cdot C_w \cdot \gamma_w) \dots\dots(1)$$

ここで、 T_g : ホモゲル硬化後の温度 (°C)

T_s : 注入前の地中温度 (°C)

T_1 : 注入後の地中温度 (°C)

間隙率 n , てん充率 λ はそれぞれ(2)式, (3)式で与えられる。

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_g + V_w}{V_s + V_g + V_w} \dots\dots(2)$$

$$\lambda = \frac{V_g}{V_v} = \frac{V_g}{V_g + V_w} \dots\dots(3)$$

(2)式より

$$V_s = \frac{1-n}{n} (V_g + V_w) \dots\dots(4)$$

$$V_w = \frac{1-\lambda}{\lambda} \cdot V_g \dots\dots(5)$$

(4), (5)式を(1)式へ代入すると

$$(T_g - T_1) C_g \cdot \gamma_g = (T_1 - T_s) \left\{ \frac{1-n}{n} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot G_s \cdot C_s + \frac{1-\lambda}{\lambda} C_w \cdot \gamma_w \right\} \dots\dots(6)$$

ここで $C_g=C_w=1 \text{ cal/g}\cdot^\circ\text{C}$

$$\gamma_g=\gamma_w=1 \text{ g/cm}^3$$

と仮定すると、

$$\lambda=\frac{T_1-T_s}{T_g-T_s}\left(\frac{1-n}{n}G_s\cdot C_s+1\right) \dots\dots\dots(7)$$

(7)式によって、 T_g 、 T_1 、 T_s の測定結果からてん充率 λ を求めることができる。

そこで、 T_g として注入プラントで測定した注入材の温度、 T_s を 18°C 、 n を0.35、 G_s を2.6、 C_s を0.20とし、今回の地中温度測定値からてん充率を計算した。その結果、てん充率 λ は0.151~0.638、平均値0.400、標準偏差0.127となった。

ところで、今回の調査では温度測定を行なった点の近くで試料土を採取し、この試料の化学分析によるてん充率を求めている。その結果は前述のとおりであるが、これと上述の温度測定値から求めたてん充率を比較することができる。両者の対応関係を示したものが図-6である。図中には、温度法によるてん充率と化学分析によるてん充率を示しており、両者の測定位置が一致しないものも示している。これらのうち、測定位置が近接するものが9点あるが、近接したものについて両者を比較すると、化学法に比べて温度法の値がてん充率で10%前後低くなるが、ほぼ直線的な関係となる。両者の回帰式は次式のようになる。

$$y=0.842x+0.910 \dots\dots\dots(8)$$

$$r=0.865$$

ここに、 x : 化学法によるてん充率 (%)

y : 温度法によるてん充率 (%)

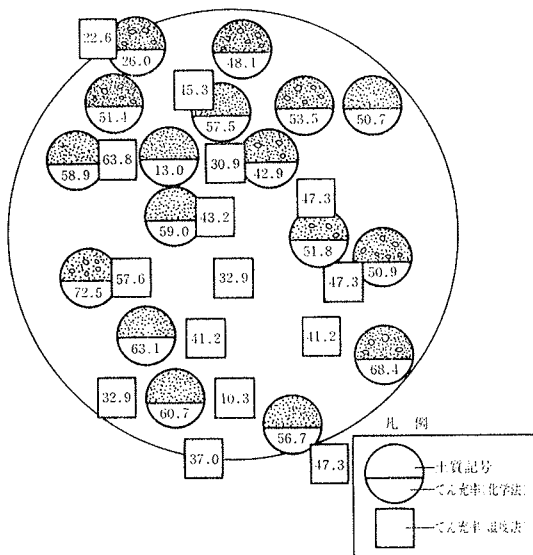


図-6 切羽のてん充率分布 (数字はてん充率%)

温度法によるてん充率が低くなる理由としては注入材の発生する熱量が注入材を送るホースから外気へ、また地中の注入範囲外の地盤へ損失することなどが考えられる。いずれにせよ、温度測定によりてん充率を推定することは不可能ではないといえよう。

なお、注入効果推定手法の実用化に必要な条件には、精度以外に即時性、簡便さがあるが、温度測定による方法は即時性は満足しうる。すなわち、3.1.で述べたように温度変化は注入作業中に表われ、ある測点への注入材の浸透の有無を時間単位で推定することが可能である。

また、簡便さについては温度センサーを多数埋め込む必要がある点、注入作業の際にリード線を断線しないように注意が必要なため作業能率がやや低下するかも知れないなどが問題となろう。

5. おわりに

薬液注入工法における注入効果推定手法の一つとして前報でその原理、室内実験結果を紹介した温度測定による方法について現場への適用例を述べた。その結果、この手法は注入材の浸透状況を推定する手法として有効であり、精度、即時性、簡便さのいずれの点からも一応満足しうることが判明した。この手法は注入材による間隙てん充率を推定することが可能なため、地盤改良効果の推定へ結びつけやすいと考えられ、この意味でも注入効果推定手法として有効であろう。今後は、地盤条件、注入工法、注入材料などを考慮した本手法の適用方法を検討するとともに、得られた測定結果の解析手法を充実するなどが課題となろう。

なお、この報告をまとめるにあたり、上野孝之 副主任研究員から貴重な助言を得た。末筆ながら深く感謝の意を表します。

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6), 大林組技術研究所報, No. 31, (1985), pp. 119~123
- 2) 土質工学会編: 薬液注入工法の調査・設計から施工まで, (1985), pp. 165~190
- 3) 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
- 4) 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4), 大林組技術研究所報, No. 29, (1984), pp. 134~139