

薬液注入工法における施工管理に関する研究（その8）

——温度測定による注入効果推定に関する土槽実験の結果——

川 地 武 喜 田 大 三

Studies on Performance Control of Chemical Grouting (Part 8)

——Modeling Experiment on Estimation Method of Underground Improvement
by Temperature Measurement——

Takeshi Kawachi Daizo Kita

Abstract

In a previous paper the authors described a method of checking the ground improvement effect of chemical injection and the results of application in the field. This method is based on measurement of underground temperature rise induced by reaction between sodium silicate and hardener. In this paper, the authors report on how it was attempted to make clear the significance of the pattern and degree of temperature change obtained in model experiments using artificial ground. The results obtained were as follows: (1) The pattern of temperature change shows the characteristics of penetration of injected grout. (2) The estimated ratio of voids filled by grout based on the degree of temperature rise has good correlation with the ratio according to chemical analysis.

概 要

薬液注入工法における地盤改良効果を迅速かつ簡便に推定する方法の確立が望まれているが、筆者らは水ガラス系注入材の硬化に伴う反応熱に着目した地中温度による方法を開発し、すでに基礎実験の結果や現場への適用例を報告している。本報では、この方法による推定結果の妥当性を検証するために行なった、実規模に近い注入実験の結果を述べている。実験は土槽（2 m×4 m、深さ2 m）に造成した砂地盤に有機系溶液型注入材を注入し、注入前後の地中温度を測定するとともに、掘り出した固結体の形状、化学分析による注入材の間隙てん充率を測定した。その結果、温度変化のパターンから注入材の浸透状態や固結体までの距離などが推定でき、温度上昇量から推定されるてん充率は化学分析によるてん充率とよい相関関係にあることが判明した。

1. はじめに

土木工事や建築工事の際の地下掘削では薬液注入工法を補助工法として採用する機会が多いが、確実な施工を行なうためには、薬液注入工法による地盤改良効果の確認が必要である。このために、試験注入や土質調査ボーリングが行なわれるが、そのためのコストや工期も無視できず、これらに代わる迅速かつ簡便な効果の推定方法の確立が望まれている。このため、電気抵抗の変化やトレーサーを用いる方法などが開発されているものの、推定の精度や簡便さに難点があり、現場で実用に供しうる方法の開発が望まれている。そこで、筆者らは水ガラス

系注入材がゲル化する際に発生するわずかな反応熱に着目して、地中温度測定による注入材の浸透状態の推定方法を考案した。前報では基礎実験の結果や現場への適用結果から、この方法が地盤改良効果を支配する注入材による間隙てん充率の推定に有効であることを述べた。ここでは、この方法による推定の精度を確認するとともに、その運用方法を検討することを目的として、大林組技術研究所構内の長大土槽を用いて現場と同程度の試験注入を行なった。その結果、この方法がてん充率の推定に有効であるだけでなく、注入材の地中での挙動に関する貴重な情報を提供しうるということが判明した。以下に、実験の経過と結果について概要を述べる。

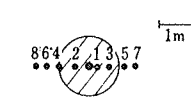
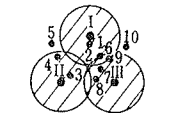
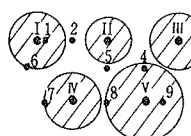
2. 実験方法

2.1. 実験装置と地盤の作成

注入実験は土質実験棟の長大土槽の一部（2 m×4 m、深さ 2 m）を用いて行なった。この土槽に川砂（鬼怒川産）をまき出し、30 cm ごとにソイルコンパクターで転圧して間隙率を40%前後とした。その後、底部から注水し水位が作業床から 25 cm になるように調節した。

2.2. 注入

実験は表一に示すように3ケースについて行なった。注入工法はスリーブ注入工法を、注入材には有機系溶液型水ガラス（ゲルタイム：15分前後）を採用した。注入範囲は深さ 50 cm から 180 cm を想定し、注入材の吐出口は 25 cm ピッチ、注入速度は 6 l/min、注入は下部から上部へと行なった。注入量はケース 1, 2 では各孔 300 l、ケース 3 では 100 l~450 l とした。

ケース	注入管と温度測点の位置	注入量
1		300 l
2		各孔 300 l 合計 900 l
3		I : 250 l II : 100 l III, VI : 200 l V : 450 l 合計 1200 l

表一 注入実験概要

2.3. 固結体の掘り出し

原則として注入の翌日、固結体を掘り出した。まず、地下水を底部の排水口から自然排水し、真空吸引式の排土装置によって非固結部を排出した。

2.4. 測定項目と方法

(1) 注入圧力：自記圧力計によって注入ポンプの吐出圧を記録した。

(2) 地中温度：地盤造成の際に温度センサー（熱電対：CC）を表一1の所定の位置にセットし、カセット式データレコーダーによって測定した。

(3) 固結体の形状：掘り出した固結体の寸法を測定した。

(4) 固結体内のてん充率分布：固結体の各部から試料を採取し、化学分析による方法²⁾によって注入材の含有量を測定し、間隙てん充率として表示した。

(5) 固結砂の圧縮強度、透水係数：強度は直径 5cm、長さ 10 cm に成型し、土質工学会法により試験した。透水係数は同様の寸法の供試体にゴムスリーブをかぶせ、周面からの透水を防ぎ、水圧を 1 kgf/cm² として試験した。

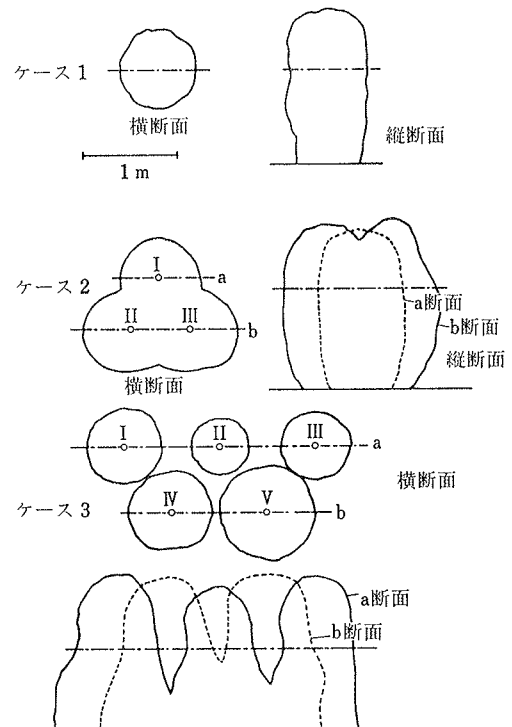
3. 実験結果

3.1. 固結体の形状

固結体の形状をスケッチして図一に示す。ケース 1 では直径が約 80 cm のほぼ円柱状の固結体となり、その体積は約 0.99 m³ であった。注入材の脈はほとんど見られず、ほぼ均等な浸透注入が行なわれている。

ケース 2 では注入管の間隔を 75 cm としているため、固結体は相互に連結した形状となる。最初に注入した、注入管 I の周りにはほぼ円柱状の固結体が形成されているが、注入管 II, III の周りの固結体はややいびつな形状となる。ゲルタイムを15分としているので、注入管 II, III の注入を行なう時には、すでに注入された注入管 I からの注入材はゲル化しているので、これが障害となって、注入材は外部に押しやられるのであろう。なお、注入材の脈は注入管の周り以外には見られず、浸透注入を主体としている。

ケース 3 では上部はそれぞれ独立した円柱状の固結体であるが下部では連結しており、注入材がやや下部に垂れ下がった状態でゲル化している。固結体全体の体積は 4.4 m³ であった。固結体の深さ 110 cm の点における各



図一1 固結体の形状

注入管周りの直径は 72 cm から 88 cm であり、注入量の順位と一致する。このケースでも浸透注入が卓越する注入となっている。

3.2. 地中温度の変化

注入前後の地中温度（深度 1 m あるいは 1.25 m）の変化の例を図-2 に示す。ケース 1 では 1 本の注入管の周りの温度変化を示す。測点 1 は注入管から 10 cm の位置にあるので、注入開始とともに急激な温度上昇を示し、ピークの温度上昇量は 5.4℃ に及び、測点 2 でも同様なパターンとなる。測点 3 は注入管から 30 cm であり、やや上昇勾配は低下する。測点 4 は固結体に接するような位置にあり、温度上昇量はわずかである。また、測点 6 は注入管から 60 cm の位置にセットされており、固結体の外部になる。このため、注入時にはほとんど温度上昇は見られないが、注入後に徐々にわずかながら上昇する。この傾向は測点 7, 8 でも同様である。

ケース 2 では、時間をずらして 3 本の注入管から注入

しているが、まず注入管 I の注入によって測点 1 にシャープな温度上昇が見られるが、他の測点ではほとんど温度変化がない。つづいて注入管 II の注入が始まると、測点 3 に急激な温度上昇が、測点 8 にわずかな温度上昇が見られる。測点 8 は注入管 II, III の影響を受けて温度上昇が二段階に分かれて生じる。固結体の外部の測点 5 には温度上昇ピークが見られない。

ケース 3 では、注入量を変え、時間をずらして 5 本の注入管を用いて注入した。この場合の温度変化のパターンはいずれもケース 1, 2 に見られたものである。測点 10 は注入管 V から 1.8 m 離れており、この場合には温度上昇は全く見られない。

次に温度上昇量の深度分布を図-3 に示す。ここでは、注入中の温度上昇のみに着目してピーク温度から上昇量を算出しており、何回かに分けて上昇したものは、その累計を取っている。いずれの固結体でも上昇量の分布は類似しており、固結体の中心部では上部から下部のい

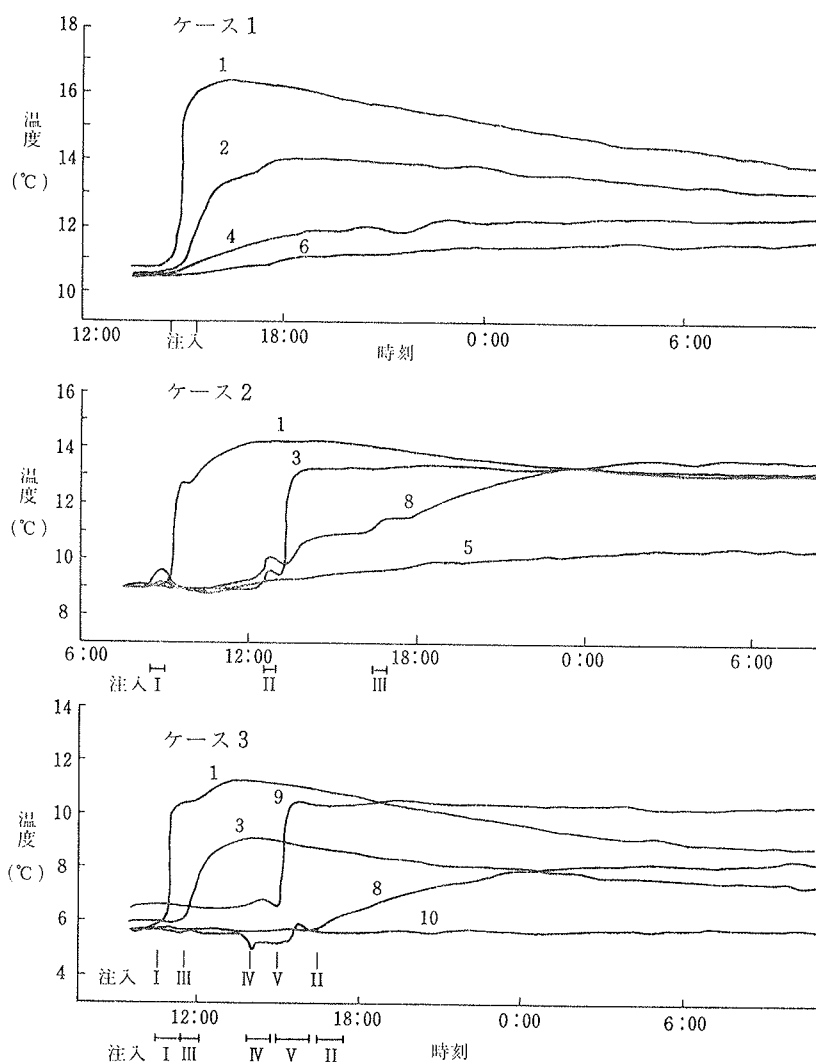


図-2 注入前後の地中温度の変化

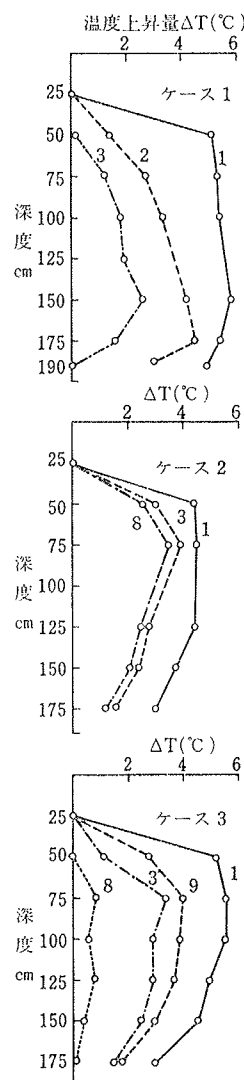


図-3 温度上昇量の深度分布

れの点でも温度上昇量は大きく、当然ながら固結体の端部では上昇量は少ない。なお、ケース 2, 3 では下部でやや上昇量が少ない傾向がある。

3.3. 化学分析によるてん充率の分布など

固結体の温度センサーの埋設された位置から試料を採取して化学分析を行なった。その結果の一例をコンター図にして図-4 に示す。中心部の近くではてん充率が80%を超え、最大88%に及ぶ。固結体の端部に行くにつれててん充率は低下し、その低下勾配は固結体内部ではゆるやかであるが、端部では急激である。これは、注入材が浸透過程で間隙水と混合することなく、間隙水を排除していることを示すものであろう。なお、固結部のてん充率の最低値は約40%であり、一方、非固結部のてん充率はほとんどが10%以下である。

固結体から採取したブロックの一軸圧縮強度は 1.9~5.8 kgf/cm² に分布し、平均値は 2.8 kgf/cm² であった。また、透水係数は 3.8×10⁻⁷~1.2×10⁻⁶ cm/sec の範囲にあり、大部分が 10⁻⁷ cm/sec のオーダーであった。

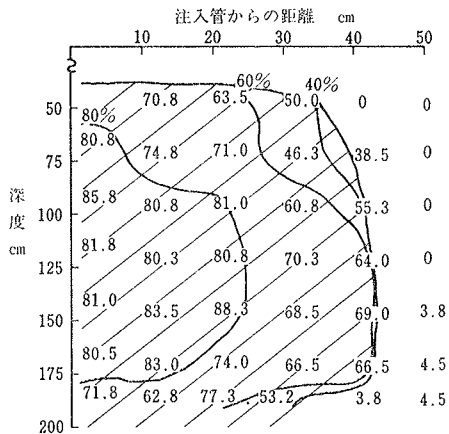


図-4 固結体内のてん充率分布（ケース1）
（斜線部が固結部）

4. 考察

4.1. 温度変化パターンの意味

今回の実験では図-2に見られたように、測定点によって色々な温度変化を示す。そこで、これらを整理し、いくつかの温度変化パターンに分類したものが表-2である。ここでは6タイプに分類しているが、実際にはこれらの中間あるいは混合したものもあり、極めて単純化したものであることをことわっておきたい。表には固結体の掘り出し結果と照合させて、浸透状態を推定している。また、対応する今回の実験の測点を示しているが、同じ測点でも上部あるいは下部では異なるタイプになることもある。

さてタイプAは注入管の近くで典型的に見られるパターンであり、注入開始の直後に急激な温度上昇を生じる。

タイプ	温度変化パターン	今回の実験の測点	推定される浸透状態
A		ケース1 : 1, 2, 3 2 : 1, 3, 6 3 : 1, 3, 4, 9	固結部の内部
B		ケース1 : 4 2 : 10 3 : 8	浸透固結部の端部
C		ケース1 2 3 : 5	脈状にわずかな浸透があるのみ
D		ケース1 : 5, 6 2 : 5 3 : 2, 6, 7	固結部からの伝熱による温度上昇。近くまで浸透している。
E		ケース1 : 2 : 2, 4, 7, 8 3 :	何回かにわたって注入材が浸透
F		ケース1 : 7, 8 2 : 3 : 10	固結部からは50cm以上離れている

表-2 温度変化パターンによる推定

ここでは注入材が間隙水を排除して浸透しており、理想的な浸透形態である。タイプBは固結体の端部で見られるもので温度上昇の速度は1~2℃/Hr程度である。注入材が間隙水と接しつつ浸透する部分といえよう。

タイプCは今回の実験では多くは見られなかったが、一時的な温度上昇は見られるものの、すぐに低下し、センサーの周り全体に注入材が浸透するのではなく、部分的に浸透していて、このタイプは脈状注入が卓越するゲルタイプの短い薬液の場合にはしばしば見られる。タイプDは固結体の端から近い所で見られ、注入終了後に徐々に温度が上昇する。

タイプEはケース2で見られたタイプで、段階的に温度が上昇する。時間をずらして、複数の注入管から影響を受けることを示すものである。タイプFは固結体からの温度伝導の影響を受けないほど離れた位置にある場合であり、今回の場合 50 cm 以上離れている測点で見られた。

ところで、タイプ B, D, F は温度上昇の勾配から固結体までの距離を推定しうることを示唆している。そこで、温度上昇勾配を固結体端部からの距離に対してプロット

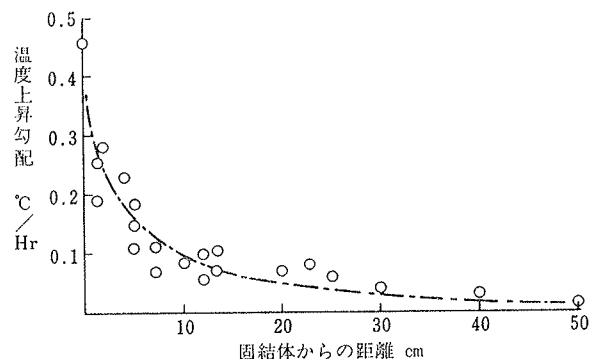


図-5 非固結部の温度上昇勾配

すると図-5が得られる。ばらつきはあるが、温度上昇の勾配は、固結体までの距離によって支配されている。なお、両者の関係は使用する薬液の発熱特性や土質によって変化するものであろう。

4.2. てん充率の推定

前報で述べたように、温度測定の結果から注入材による間隙てん充率を推定することができる。すなわち、次式によって地中温度の上昇量(ΔT_s)を実測すれば、てん充率の近似値が計算により求められる。

$$\alpha = \frac{\Delta T_s}{\Delta T_h} \left(\frac{1-n}{n} \cdot G_s \cdot C_s + 1 \right) \dots\dots\dots(1)$$

ここに、α: 間隙てん充率

ΔT_s: 地中温度の上昇量(°C)

ΔT_h: ホモゲルの温度上昇量(°C)

n: 土の間隙率

G_s: 土粒子の比重(g/cm³)

C_s: 土粒子の比熱(cal/g・°C)

ΔT_hを別に測定した結果10.7°Cであり、n, G_s, C_sは既知である。この方法によるてん充率の分布の例を図-6に示す。固結体の中心部で80%以上であり、先に示した化学分析によるてん充率の分布と類似の傾向を示すが、端部では30%前後の値となり、化学分析による値より低くなる。

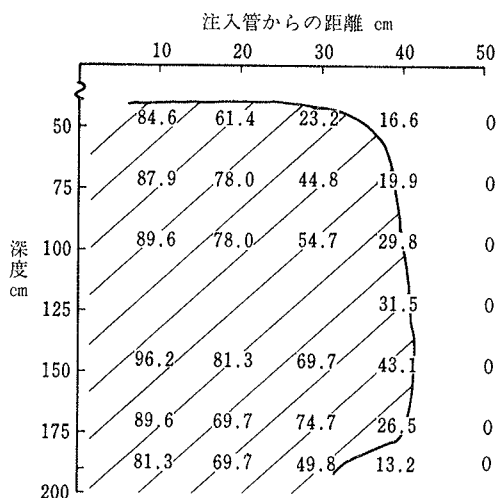


図-6 温度による推定てん充率の分布(ケース1)
(斜線部が固結部)

次に、温度によるてん充率と化学分析による値が同一の点で測定できたケース1, 2について、両者の相関を見たものが図-7である。相関係数は0.92と高く、回帰式は(2)式で示され、温度による推定てん充率は化学分析によるてん充率よりやや低くなる。

$$y = 0.862x + 0.667 \dots\dots\dots(2)$$

この回帰式による推定値の誤差はプラスマイナス13.1%であるが、図中に印したように、温度変化パターンが表

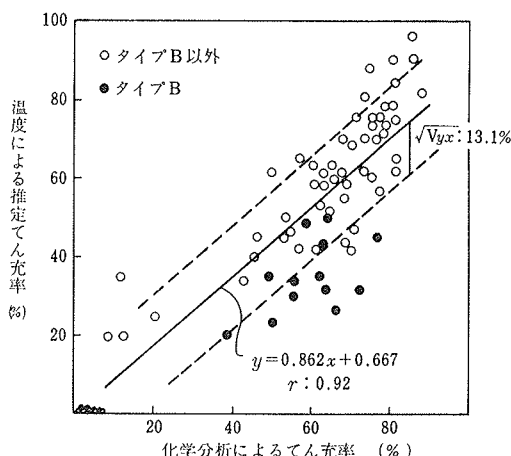


図-7 温度法と化学法でのん充率の相関性

一2のタイプBのもので回帰式からのズレが大きい。これらの測点は固結体の端部にあり、温度伝導によるピーク温度の低下によって、温度による推定てん充率が低くなるものと思われる。これらを補正することができれば、推定の精度はさらに高くなろう。この点については今後理論的な考察を含めてさらに検討したい。

5. おわりに

薬液注入工法における地盤改良効果の推定手法のひとつとして開発した地中温度の測定による方法について、実規模に近い固結体を造成する注入実験を行ない、温度変化から得られる知見を整理するとともに、推定てん充率の妥当性を検証した。その結果、温度変化のパターンからその測点における注入材の浸透状態あるいは固結体までの距離が推定しうることが判明した。また、温度上昇量から求められる推定てん充率は化学分析によるてん充率とよい相関関係にあるが、固結体の端部では特に後者に比べて低い値を示すことが分かった。

これらの結果は均質な砂地盤における、ゲルタイムの比較的長い薬液を用いた実験によるものであり、土質および薬液の種類によっては別の傾向もありうると思われる。さらに多くの事例について調査を重ねることにより推定の精度を高める所存である。

なお、本研究は東京電力(株)送変電建設本部からの委託により実施したものである。ご指導、助言をいただいた関係の方々には深く感謝致します。

参考文献

- 1) 川地, 喜田: 薬液注入工法の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
- 2) 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