

薬液注入工法における施工管理に関する研究 (その6)

——温度計測による注入効果推定に関する基礎実験——

川 地 武 喜 田 大 三

Studies on Performance Control of Chemical Grouting (Part 6)

——Fundamental Experiments on Estimation Method of
Underground Improvement by Temperature Measurement——

Takeshi Kawachi Daizo Kita

Abstract

In order to develop an estimation method on underground improvement by chemical grouting, fundamental experiments were carried out on a method based on temperature measurement of grouted soil. The results obtained were as follows:

(1) On gelation or hardening of chemical grout containing sodium silicate there is generation of reaction heat of 50 to 220 J/g.

(2) The temperature of wet sand rises on penetration of chemical grout and the degree of rise is higher at the center of the hardened zone.

(3) An equation to calculate grouting material content by temperature rise was proposed and the calculated value was compared with the grouting material content according to the chemical method.

At the central part of the grouted zone, the results of the two methods agree fairly well, but at the outer part the value obtained by the temperature method is lower than the value by the chemical method.

概 要

薬液注入工法における注入効果判定の一手法として注入地盤中の注入材の分布を注入作業中に簡便に推定する手法の開発を意図して温度測定による方法に関し基礎実験を行なった。その結果判明したことを以下に列記する。(1) 水ガラス系注入材をゲル化、硬化の際に50~220J/gの発熱を伴い、これは4~16°Cの温度上昇に相当する。(2) 注入材が浸透すると砂の温度が上昇し、注入固結体の中心ほど温度上昇が著しい。(3) 砂の温度上昇量から注入材による間隙てん充率を推定する式を提案し、温度計測によるてん充率と化学分析によるてん充率との対応関係は固結体中心部では十分に認められるが、固結体の周辺部ではズレてくる。

1. はじめに

薬液注入工法における注入効果の判定手法の確立は依然として重要な課題であり、各方面で研究が進められているが、いまだに信頼性、施工性、経済性を満足しうる手法は見出されていない。筆者らは有効な手法を確立するうえで注入地盤の注入材の分布状況を確実に把握することが不可欠と考え、化学分析による注入材含有量の測定法を開発し¹⁾、試験注入や本注入の行なわれた地盤における注入材による間隙てん充率の実態を調査してきた^{2),3)}。これらの結果によれば、実測したてん充率は注

入効果の推定に有効であり、注入工法の比較や設計注入率の妥当性を評価するのにも有効であることが判明している。

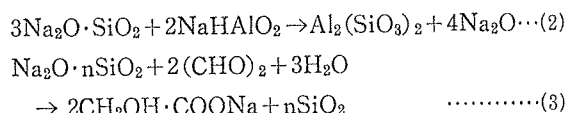
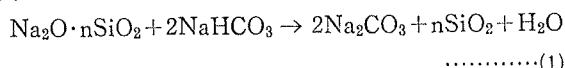
ところが、化学分析による方法は操作が繁雑で現場での適用性に乏しく、結果が判明するのが注入後のボーリングあるいは試料採取をしてからになるため、注入施工の管理手法としては使えないという難点がある。そこで、簡便で注入中あるいは注入直後にてん充率の分布を推定しうる方法を検討した。その際、水ガラス系注入材のゲル化、硬化現象に伴う発熱現象に着目し、各種ホモゲルの発熱量を測定した。その結果、注入材の反応に伴う温

度上昇は硬化剤によって異なるが10°C前後に及ぶことが判明した。また、これら水ガラス系注入材が浸透した地盤でも検出可能な温度変化が見られ、これらを精度よく計測することにより、各点の注入材による間隙てん充率の概略値を把握しうることが判明した。以下に、温度計測によるてん充率推定の基礎実験の概要を紹介する。

2. 温度計測による方法の原理

2.1. 水ガラス系注入材の反応熱

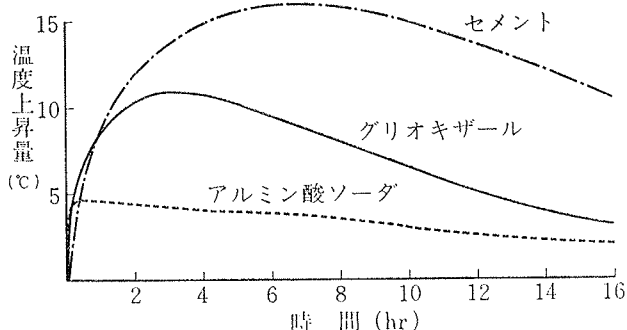
水ガラス系注入材のゲル化は次式のような化学式で示されている。これらの式中、(1)は酸性塩による中和反応、



(2)は金属塩によるケイ酸塩の形成、(3)は有機系硬化剤による中和反応を伴うケイ酸ゲルの不溶化である。これらの反応のうち、(1)、(3)は水ガラスに含まれる酸化ナトリウムの中和が生じるので中和熱の発生が予想される。アルカリの中和熱はモル当り 50~60 kJ (キロジュール)の値といわれ⁴⁾、これによればかなりの温度上昇を伴うと思われる。他に、水ガラス液と硬化剤水溶液の混合の際の希釈熱やケイ酸ゲルの重合熱なども温度上昇因子と考えられる。

2.2. 反応熱の実測例

水ガラス系注入材の反応熱を実測するために、断熱容器内で水ガラス溶液と硬化剤を反応させて温度上昇量を測定した。その例を図一に示しているが、いずれの硬化剤の場合にも温度上昇が見られ、その際の温度のピーク時間、ピーク温度ともに硬化剤によって異なる。図中、セメントは特に発熱量が大きく、セメント自体の水和による温度上昇が寄与していることを示唆しているが、実測された値はセメント単独の温度上昇量を大きく上まわ



図一 昇温曲線の例 (添字は硬化剤)

種別	硬化剤	水ガラス換算発熱量 J/g	アルカリ換算発熱量 J/g
無機系	セメント	215.4	2267
	酸化アルミ・消石灰他	102.2	1075
	アルミン酸ソーダ	66.8	703
	NaHCO ₃ ·KCl	87.2	917
	NaHSO ₄	53.1	559
有機系	グリオキザール・リン酸	163.6	1722
	グリオキザールトリアセチン	100.9	1062
	トリアセチン	47.7	502
	炭酸エチレン・リン酸	58.6	616

表一 水ガラス系注入材の反応熱 (18°C)

る。また、ピークの発現時間もセメント単独では15時間後であるのに対し、水ガラスとセメントの反応では図示したように約7時間後である。

図示したものを含め、各種硬化剤と水ガラスの反応熱を表一に示す。硬化剤によって大幅に異なるが、水ガラス中の酸化ナトリウムが完全に中和したと仮定して求めた反応熱は約 1,400 J/g であり、大半のものはこの値より小さい。したがって、重炭酸ソーダ (NaHCO₃) や重硫酸ソーダ (NaHSO₄)、トリアセチンなどを硬化剤とする場合には水ガラスの中和反応は完了しておらず、未反応の水ガラスが残留していることになる。

なお、発熱ピークの発現する時間は溶液型無機系硬化剤では1時間以内、有機系硬化剤では2~4時間後のものが多く、ゲルタイムの長短とは余り関係がないようである。

2.3. 温度計測によるてん充率の推定

間隙を有する砂などに発熱性の注入材が浸透した場合、熱伝導などによる温度変化を考慮しなければ、次式が成立すると思われる。

$$\Delta H = \lambda \cdot \Delta T_0 = C_s \cdot \Delta T_s \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\alpha = \frac{\lambda}{n} \times 100 \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 λ: 注入材の体積割合

α: てん充率

n: 注入前の土の間隙率

ΔH: 発熱量

ΔT₀: ホモゲルの温度上昇量

ΔT_s: 土の温度上昇量

C_s: 土の比熱

したがって、ΔT₀の既知な注入材を注入して ΔT_sを 実測すれば注入率(λ)、てん充率(α)を求めることができる。なお、土の比熱(C_s)については含水比などによって変化するが、飽和砂では 0.72、飽和粘土では 0.82 という

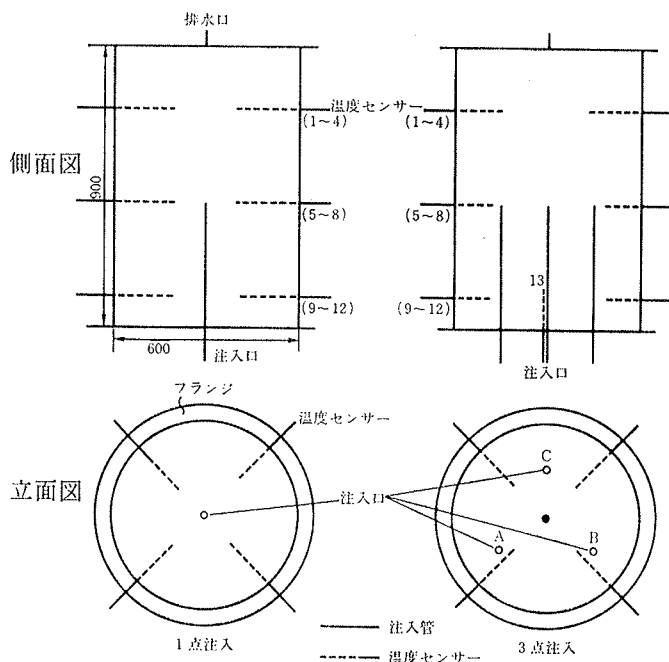


図-2 注入管とセンサーの配置

値が報告されている⁵⁾。

3. 室内模型実験

3.1. 注入材の浸透に伴う温度上昇

模型実験では図-2に示す反転可能な注入実験槽（径60 cm, 高さ90 cm）を用い、川砂を均一に締め固め（間隙率37.8%）、水分飽和条件で注入を行なった。注入条件を以下に示す。

- 注入孔の配置：底部の1点あるいは3点
- 注入速度：平均 3 l/min
- 注入材：水ガラス+グリオキザール
- ゲルタイム：15~20 min
- 注入量：40~50 l
- 温度センサー：白金測温抵抗体（精度 0.1°C）
- センサーの位置：図-2に示す

図-3に中段センサーの注入中および注入後の温度変化の例を示す。1点注入の場合、注入孔に近接したNo. 8のセンサーは注入直後に4°C以上の温度上昇を示し、以後はほとんど変化しない。これに対し、No. 6, No. 7のセンサーは徐々に温度上昇を示し、No. 5では注入後1時間までは僅かな温度上昇であるが、その後徐々に上昇する。これらから、No. 8のセンサーには注入直後に注入材が浸透し、No. 6, 7では注入の進行につれて徐々に注入材が間隙水と置換していると思われる。一方、ゲルタイムを越えてから温度が徐々に上昇するNo. 5では固結体からの熱伝導によってみかけ上の温度上昇が生じたものと思われる。

3点注入の場合、注入順序はA, B, Cの順とした。注入孔Aに近接したNo. 8のセンサーは注入開始直後に顕著な温度上昇を示し、A孔の注入が終ると温度低下を始めるが、C孔の注入後に再び温度上昇を示す。これはC孔注入時に再び注入材が浸透してきたことを示唆するものと思われる。No. 13は中心部に配置したセンサーであるが、温度は上昇を続け、最終的な温度上昇量は最大である。これは3孔の注入のいずれからの影響も受けていることを示唆している。また、B孔に近いNo. 7はB孔の注入開始とともに温度が上昇しはじめ、C孔に近いNo. 5はC孔の注入直後に温度上昇を始め、最終的な温度上昇量はほぼ等しくなる。

なお、1点注入、3点注入ともに注入開始後4時間までのデータしか示していないが、これ以後は温度が低下し始め、約50時間後には注入前の温度となる。

3.2. 固結体内の温度分布

固結体内の温度センサーがピーク温度に達してから注入槽を横転し、断面を削り出し、固結体のセンサー位置（上, 中, 下段）の断面の温度分布を観察、計測した。温度分布の観察には断面からの放射熱赤外線量を計測するサーモグラフィー（日本アビオニクス製）を用いた。この装置は温度分布をブラウン管上に画像として表示するものであり、同時にカーソル上の温度をグラフ表示する機能をも備えている。そこで、サーモグラフィーによる温度と埋込んだ温度センサーによる温度との対応を見たところ、図-4に示すような対応関係が得られた。これによれば、サーモグラフィーによる温度は温度センサーによる温度とほぼ対応しているが、±0.5°C程度の誤差がある。

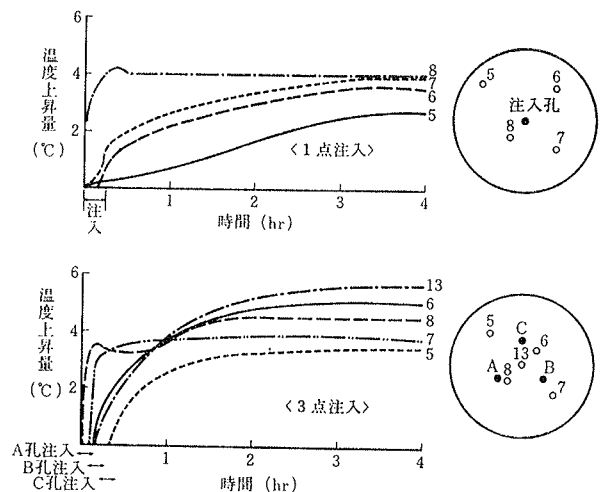


図-3 注入後の温度変化の例（中段）

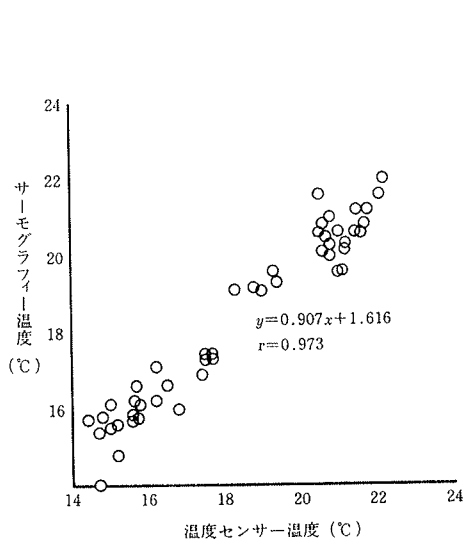


図-4 測定法による温度の相関性

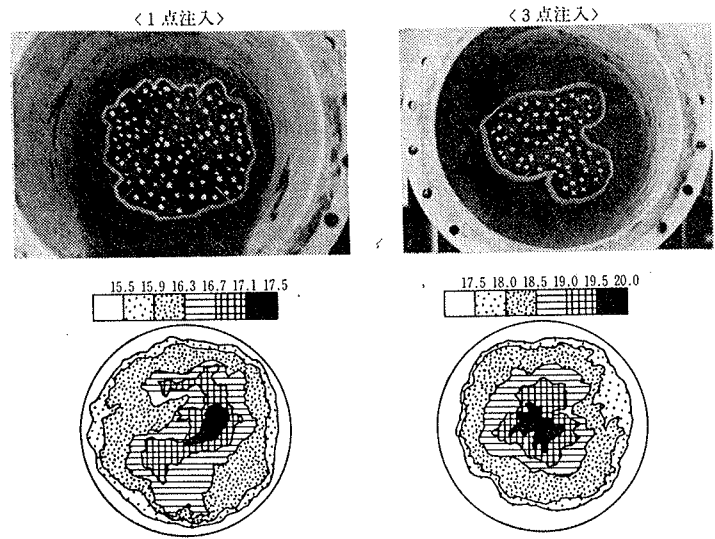


写真-1 注入断面の写真（フェノールフタレイン発色後）とサーモグラフィー写真模写図（中段）

写真-1にサーモグラフィー画像を示す。本来はカラー表示されているので温度差は鮮明に表われ、注入管の付近は赤から白の暖色系、外周部は黄色から緑の色調となり、注入材の浸透部では高温帯を形成していることがよくわかる。この傾向は写真上の温度グラフからも判読でき、高温部と低温部の差は1点注入系で2.0℃前後、3点注入系では1.5～3.0℃に及ぶ。なお、高温部の形状は写真上のフェノールフタレイン発色部の形状とほぼ対応している。したがって、例えばシールド工事などで切羽が露出するような場合には、注入直後に切羽のサーモグラフィー画像が撮影することができれば注入材の浸透範囲を定性的に把握することは可能かと思われる。

3.3. 化学法によるてん充率の測定

温度計測によりてん充率を推定するに当たり、まず化学分析法によるてん充率の測定を行なった。横転した注入槽内の砂を5cmメッシュにサンプリングし、てん充率を測定し、その結果は図-5に示す。上段には注入材はほとんど浸透せず、注入管の直上のみに僅かに注入材が見られる。中段では注入管のまわりにてん充率75%以上の部分が見られ、周辺に行くにつれててん充率が低下し、外周部には全く注入材が見られない。固結体の中心は注入管よりズレている傾向にある。下段ではてん充率75%以上の部分がさらに広くなり、固結体の

形状が注入口を中心とする球状のものではなく、下部にふくれた形をしていることを示唆している。なお、断面を削り出す時の切削抵抗から考えると、てん充率50%以上の部分が固結物と考えられる。

3.4. 温度によるてん充率の推定

注入槽内にセットした温度センサーの注入後の最高温度を読み取り、この値を用いて前出の(4)、(5)式によってCsを0.72としててん充率を算出した。その際のホモゲルの温度上昇量は注入槽内に注入した時に同一条件下で別に測定した。計算によって求められたてん充率を図-6のAに示す。ここには併せて化学分析によるてん充率も示しているが、注入孔に近い固結体の中心部では温度による方法は化学法による値と近似している。中間部では両方法の差が外縁部に近づくにつれて大きくなり、外縁部ではさらに差が著しくなる。両方法の相関性に注目して作成したものが図-6のBである。両方法のズレは中間部で10～20%、外縁部で30～40%となり、温度法のほうが低いてん充率となる。なお、化学法によるてん充

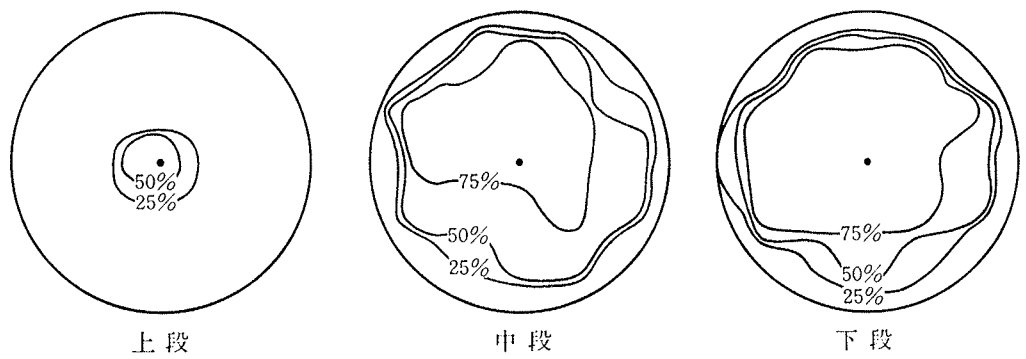


図-5 てん充率コンター図（化学法，1点注入）

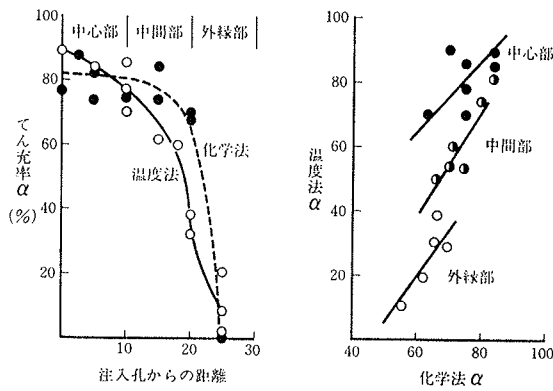


図-6 化学法と温度法の関係

率がゼロの非固結部でも温度法でのてん充率が20%近くに計算される部分も生じる。これらの両方法のズレは温度計測による方法の欠陥を示している。すなわち、注入された発熱体の熱が熱伝導によって固結体の周辺に伝播するため、固結体の外縁部では温度上昇が少なく、逆に非固結部では注入材が浸透していないのに温度が上昇するといえ、これがてん充率の計算値に誤差を生じる原因となっているものと思われる。

4. 考察

水ガラス系注入材の硬化時の発熱現象に着目し、地盤内の注入材の浸透状況を地中温度計測によって推定する可能性を検討した。模型実験の規模が小さいために、周辺温度の影響を無視できず、発熱性の固結体からの熱伝導による固結体周辺部の温度低下がかなり大きいことが判明した。実際の注入現場での温度計測の結果を待たねばならないが、注入範囲の外縁部では実験と同様の現象が生じるものと思われる。したがって、前出の(4)、(5)式を用いててん充率を算出する場合、場所によっては熱伝導を考慮した扱いが必要となろう。これ以外の注入範囲の中心部ではかなり精度よくてん充率が推定できそうであり、注入効果推定の有効な手掛りを与えるものと思われる。今後は注入現場での温度計測の方法、センサーの配置、セットの方法、温度変化パターンの解析方法などについて詳細な検討を行なう必要がある。また、注入材の発熱特性の制御についても課題となろう。これらの課題を解決することができれば注入工法の永年の課題であった実用に耐える注入効果推定法の確立の第一歩を踏み出すことが可能となろう。

5. おわりに

簡便で高精度な注入効果推定法の確立を図る一手法として、水ガラス系注入材のゲル化、硬化の際に発生する反応熱に着目して室内基礎実験を行なった。その結果、判明したことを以下に列挙する。

(1) 水ガラス系注入材の反応熱は硬化剤の種類によって異なるが、いずれも発熱反応であり、熱量は50~220 J/gである。

(2) 水ガラス系注入材を砂に浸透させると検出可能な温度変化が見られ、この温度上昇量は固結砂の中心部ほど大きい。温度変化のパターンは注入材の浸透の様子を反映する。

(3) 温度上昇量から注入材による間隙てん充率を推定するため、熱伝導を無視した式(4)、(5)を提案し、これによるてん充率と化学分析によるてん充率との対応性を検討した。その結果、固結体中心部では両方法のてん充率はほぼ一致する。

(4) 固結体の周辺部では両方法のズレが見られ、温度計測によるてん充率のほうが低い値を示す。逆に、固結体の近くの非固結部では温度法による値のほうが大きくなる。

今回の基礎実験によって温度計測によるてん充率の推定は改良の余地はあるものの、簡便かつ注入作業中あるいは直後に注入効果を推定する手法として有望であることが判明した。今後は現場での計測例について検討するとともに解析手法の改良を行ないたい。

参考文献

- 1) 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
- 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5), 大林組技術研究所報, No. 30, (1985), pp. 117~122
- 3) 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
- 4) 日本化学会編: 化学便覧(基礎編II), (1975), p. 949
- 5) Jumikis, A. R.: Thermal Geotechnics, Rutgers University Press