

無公害グラウトに関する研究（その3）

——水ガラス系グラウト注入砂の耐久性と溶出性——

喜 田 大 三 川 地 武

Studies on Grout and Grouting with Regard to Groundwater Pollution (Part 3)

——Durability and Solubility of Silicate Grouted Sand——

Daizo Kita Takeshi Kawachi

Abstract

To prevent groundwater pollution accompanying grouting, it is necessary to pay attention to improvement of stability of grouted soil. But little is known about durability of grouted soil and dissolution of grout components. Experiments were therefore carried out to clarify time-dependencies of strength and permeability of silicate-grouted sand, and quality of curing or permeated water. The results obtained were as follows. The durability of grouted sand depends on the kind of grout, ratio between silicate and hardener, and the property emphasized, whether strength or permeability, but most grouted sand show sufficient durabilities for practical purposes. The greater part of dissolved substances is derived from unreacted components and unsolidified material, with dissolution completed in a short period of time.

概 要

注入工法における地下水汚染の防止を図るうえで、耐久性の高い注入固結体を得ることが不可欠であるが、固結体の耐久性や注入材成分の溶出については未知なところが多い。そこで、水ガラス系注入材の固結砂を水中浸漬および連続透水し、強度および透水係数の経時変化を調査するとともに水質変化を追跡した。その結果、注入効果の持続性は注入材の種類、配合比、着目する性能によって異なるが、概して無機系硬化剤の注入材で耐久性にすぐれ、有機系硬化剤のものはやや耐久性に劣るが、一部の例外を除いて、大部分の固結砂は長期の水浸、浸透の後にも実用上は十分な強度、止水性を維持することが判明した。また、溶出する成分の大半は未反応成分や非固結成分であり、比較的短期間に溶出は終了し、以後の溶出はわずかである。いずれの注入材でも硬化剤の多い配合の固結砂ほど耐久性が向上し、注入材成分の溶出も少なくなる。

1. まえがき

薬液注入工事における地下水汚染の防止を図るために、この数年来注入材料の限定、注入管理、環境監視などが義務づけられている。また、最近では瞬結二重管式の工法¹⁾や中性領域でゲル化する水ガラス系注入材²⁾などが開発され、注入工法の改良が進められている。これらの技術開発の成果は当社の工事現場でも採用される傾向にあるが、その際、これら技術の適切な評価および運用が必要とされる。筆者らは先に社内アンケートを行ない注入工事現場の実情を調査したが、その結果、注入工法の

選定、注入効果の評価、注入効果の持続性などに関する課題の解明が要望されていることが判明した。また、注入固結体からの注入材成分の溶出に配慮が必要とされることが指摘されている³⁾。そこで、本報では注入効果の持続性に関連して固結砂の耐久性および注入材成分の溶出について室内実験を行ない、注入工法、注入材料の選定、注入効果の評価あるいは注入固結砂からの成分の溶出状況などについて考察した。なお、今回の室内実験は現象をより明確に把握できるように、現場の条件に比べて過酷な実験条件を設定して行なっているので、得られた結果がそのまま実施工の際の設計値となるものではな

い。

2. 実験方法

2.1. 固結砂の作成

標準砂を内径 5 cm, 長さ 30 cm の注入用 モールドに詰め, 注入ポンプにより 3 l/min 前後の注入速度で薬液を注入した。注入材はいずれも水ガラス系のものであり, 注入材 a, b, c は無機系硬化剤, 注入材 d~g は有機系硬化剤のものである。なお, 注入材 b は当社で開発した GS グラウトである。これらのうち, 注入材 a, b は懸濁型注入材のため標準砂には注入できなかったため, 砂を川砂 (0.5~2 mm) とし, モールド内径を 10 cm とした。注入材の配合は現場における使用例を参考に決定し, 水ガラス濃度は 25% とした。ゲルタイムは標準配合すなわち A 液 (水ガラス) と B 液 (硬化剤) の比が 1:1 の場合で 1 分から 4 分となっていた。

注入の終わった固結砂は注入翌日に脱型し, 長さ 10~15 cm に切断し, 浸漬試験および連続透水試験に供した。連続透水試験用の供試体は固結砂の中央に垂直に径 5~10 mm の穴をくり抜いている。

2.2. 水中浸漬試験

固結砂を密閉容器内で約 2 カ月間水中養生し, その間, 浸漬 1, 2, 4, 8 週後に養生水を水道水ととり替えた。そして, 養生水をとり替える際に, 浸漬水の水质と固結砂の物性を測定した。なお, 固結砂と養生水の体積比は, 1:2 としている。

2.3. 連続透水試験

固結砂を圧力容器内に入れ, 0.5~1.5 kg/cm² の水压を作用させて中央の中空部から浸透水を流出させ, この透水を 3~6 カ月間連続して行ない, 浸透水の水质と固結砂の透水係数の経時変化を追跡した。

2.4. 測定項目と方法

強度: 土の一軸圧縮試験法に準じて一軸圧縮強度を測定し, あわせて含水比, 湿潤密度を測定した。

透水係数: 2.3. に述べた中空円筒法による連続透水試験によって測定した。

水质: 浸漬水および浸透水について, pH, 溶解性ケイ酸 (SiO₂), 化学的酸素要求量 (COD), カルシウム (Ca) を測定した。測定方法は JIS K 0102 に準じ, ケイ酸はモリブデンブルー法による比色法により測定した。なお, 使用した水の COD は 1 ppm 以下, pH は 6.5~7.5, 溶解性ケイ酸は 4~6 ppm であった。

3. 実験結果

3.1. 固結砂の耐久性

固結砂を浸漬養生した際の強度の経時変化を図-1 に

示す。脱型直後の強度は注入材 a で高く, 他の無機系硬化剤の注入材 b, c で低く, 有機系硬化剤の注入材 d~g はこれらの中間の値となる。このような固結砂を水中に浸漬すると注入材 a 以外はいずれも強度が低下し, 特に注入材 c では養生 2 週にして原型を保つことができなくなる。他の固結砂では浸漬 8 週後には当初の強度の 50% 前後になるが, 強度としては 2 kg/cm² 前後の値を維持している。その後の状況については詳細には追跡していないが, 例えば注入材 d では 6 カ月後にも 1.8 kg/cm² の強度を示し, 強度低下は緩慢になるようである。

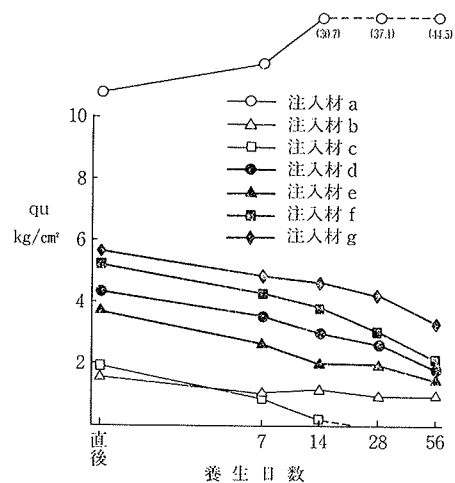


図-1 浸漬養生中の固結砂の強度

図示していないが, 各固結砂は注入材 a を除いていずれも浸漬養生に伴い含水比の増大, 湿潤密度の低下が見られ, 特に注入材 c で顕著である。この現象は固結砂の中の注入材固結成分であるケイ酸ゲルが吸水, 膨張していることを示唆しているが, 実際注入地盤の中では自由膨張が抑制されるため, 今回の実験結果に見られるほどの吸水, 膨張はなく, したがって強度低下も低減されるものと考えられる。なお, 注入材 a は他のものとは逆に水中浸漬により強度が向上するが, これは硬化剤であるセメントの水和, 硬化の進行にもとづくものと考えられる。また, 注入材 b は当初の強度は低いが, 強度低下が少なく前報りで述べた結果とも対応している。

一方, 連続透水による透水係数の変化は図-2 に示すように, 透水係数の低下するものと上昇するものとに分けられる。前者に属するものは無機系硬化剤の注入材 a, b, c であり, 当初の値の 1/10~1/20 になる。ここで注目されるのは注入材 c は水中浸漬の際には 2 週後に原型を失ない崩壊したのに対し, 連続透水の際には原型を維持するだけでなく止水性が向上する点である。これは試験条件の差にもとづくものであり, 連続透水では単に,

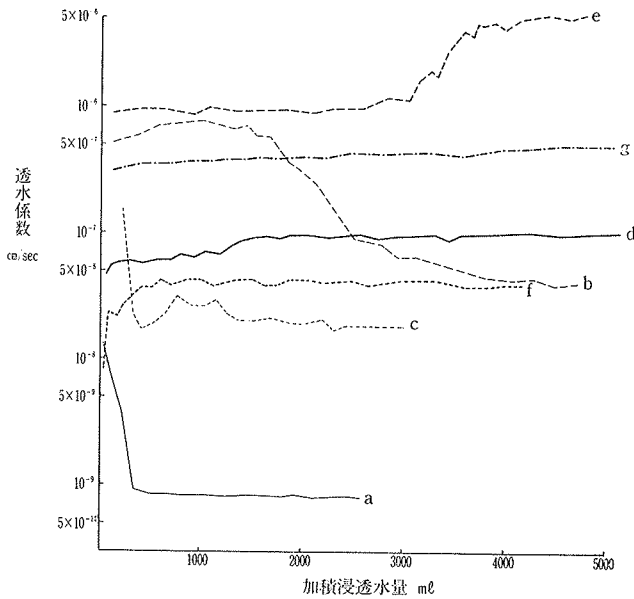


図-2 連続透水における固結砂の透水係数の変化

0.5 kg/cm² 以上の水圧を作用させるため固結砂中の注入材成分の膨張が抑制されるために固結砂は崩壊することなく、止水性が向上したものと考えられる。

一方、有機系硬化剤の注入材 d~g に関しては透水係数がやや上昇する傾向にあり、これは後述するように固結砂に含まれる注入材中の未反応成分および反応生成物(ケイ酸ゲル)の溶出にもとづくと考えられる。なお、透水係数は上昇するものの注入材 e を除いて 10⁻⁸~10⁻⁷ cm/sec のオーダーにあり、止水上の欠陥を生じるほどのものではない。

3.2. 固結砂からの溶出成分

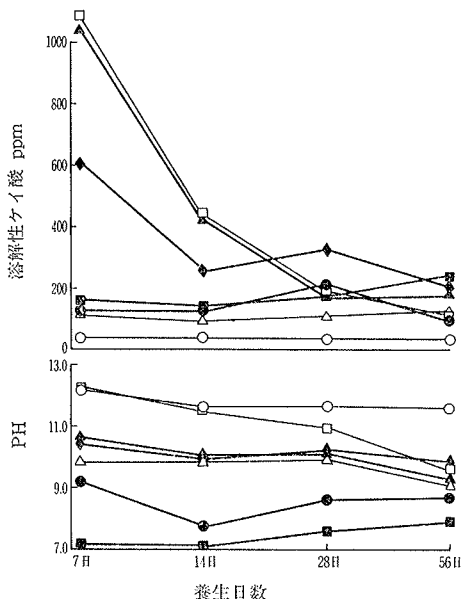


図-3 浸漬養生水の水質変化 (記号は図-1 と同様)

水中浸漬試験の際の浸漬水の水質を図-3 に示す。試験では採水分析の際に浸漬水を新しい水道水と入れ替えているため、pH, 溶解性ケイ酸ともに養生日数の経過とともに低下していく例が多い。pH は無機系硬化剤の a, c で高く、有機系硬化剤の d~g では比較的低い。無機系硬化剤では b が比較的低い。一方溶解性ケイ酸は初期に溶出量の多いものもあり (c, e, q), これらは固結砂中の未反応の水ガラスの溶出を示唆している。他のものは初期から安定した値を示しており、100~200 ppm のものが多い。注入材 a は溶出量が著しく少ない。なお、溶出するケイ酸の合計は最大のものでも注入量の10%未満である。

次に、連続透水試験における浸透水の水質を図-4 に示す。pH は注入材 f を除いて初期には高いが浸透の進行について低下する傾向にあり、注入材 a 以外は pH 8 前後にまで低下する。溶解性ケイ酸は当初かなり高濃度であるが、浸透量 1,000 ml 以下で急速に低下する。これは COD の傾向とも一致し、固結砂中に未反応の状態 で残留した水ガラスの溶出と見られる。その後のケイ酸濃度は 100 ppm 前後のレベルを維持しているが、これは固結成分の再溶出かも知れない。COD は当初高濃度であるが急速に低下し、以後はほとんど検出されない。COD は有機系硬化剤の有機成分に由来するが、この成分は固結することはないので、浸透に伴い急速に溶出する。なお、水中浸漬試験でも浸漬水の COD を測定したが、やはり浸漬当初に COD が高くなるものの以後は検出されなくなる。

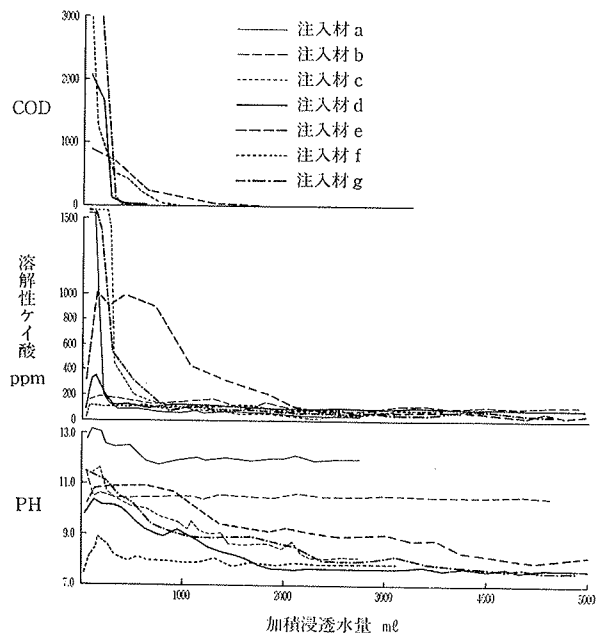


図-4 連続透水時の浸透水の水質

3.3. A液, B液の比の影響

注入工法では一般にA液とB液を混合してゲル化させ、その際の2液の比は通常1:1である。しかし、注入機材の磨耗や取扱いの不備などによって、その比が変動することがある。そこで、このような場合の耐久性や溶出性への影響を検討した。なお、2液の比が大きく、すなわち水ガラス量が多くなるとゲルタイムが長くなり、2液の比が小さくなるとゲルタイムは短くなる。図-5に2液の比と水中浸漬に伴う強度低下および連続透水にの比には関係なく、一方は強度が増大し、一方は低下する。それ以外のもののうち、注入材f以外はA液が多くなるにつれて浸漬に伴う強度低下率が大きくなり、注入材fのみは逆の傾向となる。一方、連続透水前後の透水係数の変化は注入材b以外は類似しており、A液(水ガラス)が多くなるにつれて連続透水後の止水性低下が著しくなりこの傾向は特に注入材aおよびeで顕著であ

はないが、溶解性ケイ酸は100 ppm 前後、pH は7~8のものが大半である。また、注入材中の非固結成分であるCOD はほとんど検出されず、2液の比に関係なく浸透初期に溶出することを示している。なお、無機系硬化剤のa, bについては浸透水中のカルシウムを測定しているが、いずれも微量であり、注入材aのセメント、注入材bの石こうが安定な形態となっていることを示唆している。

4. 考察

本実験で得られた結果を考察するにあたり、今回の実験条件と実施工の際の現場条件との差、供試体の寸法が小さいことによる制約について考慮する必要がある。すなわち、固結砂を水中浸漬した際の強度低下には注入材成分の吸水膨張による要因も関与しているが、実際の注入地盤は周辺を拘束されているため、このような膨張にもとづく強度低下は抑制されよう。また、固結砂から

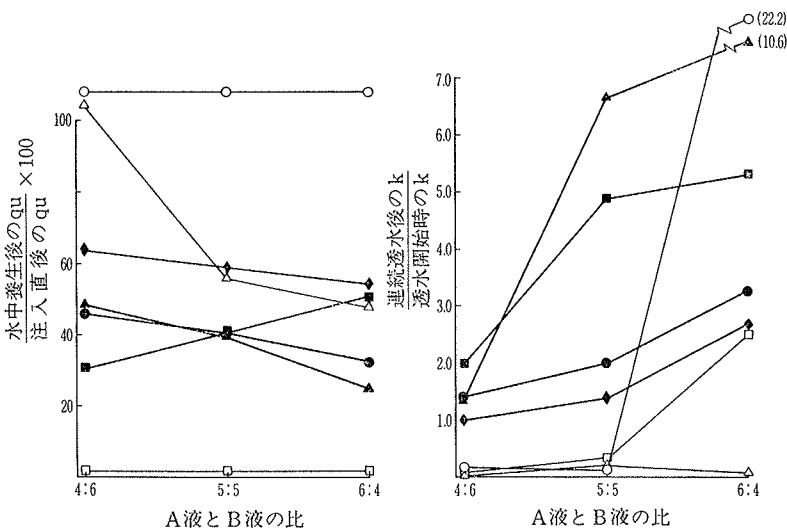


図-5 2液の比と強度, 透水係数の変化との関係 (記号は図-1と同様)

る。注入材bでは2液の比に関係なく連続透水に伴い透水係数は低下する。このように、いくつかの例外はあるが全体的には水ガラスが硬化剤に比べて多くなると耐久性が低下する傾向にあり、また、この傾向は固結砂の止水性により顕著に見られる。

次に溶出成分の変化の一例を表-1に示す。この表は連続透水量が5,000 mlの時点の浸透水の水質を示したものである。A液とB液の比は4:6から6:4まで変化に伴う止水性の変化との関係を示す。注入材a, cは2液させているが、この範囲では硬化剤が無機系のa, b, cではA液すなわち水ガラスが多くなるにつれて溶解性のケイ酸が多くなる傾向にあり、特に注入材aで顕著である。pHは2液の比によって余り変化しない。一方、有機系硬化剤のものでは2液の比と水質との関係は明瞭で

注入材	PH	溶解性ケイ酸 ppm	COD, CaO ppm
a	12.1	11	3.2
	12.0	45	0
	11.9	539	0
b	10.4	120	3.2
	9.5	103	1.2
	10.6	180	2.6
c	10.2	46	0
	7.5	40	
	7.6	86	
d	8.5	95	0
	7.6	100	0
	8.3	121	0
e	8.1	107	0.3
	7.8	101	0
	—	—	—
f	7.6	114	0
	7.8	120	0
	7.7	101	0.5
g	8.4	103	1.1
	7.6	104	0.6
	7.6	101	1.5

各欄の上, 中, 下段はそれぞれ2液の比が 4:6, 5:5, 6:4 に対応する

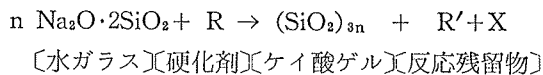
表-1 連続透水5,000 ml時点の浸透水の水質

の成分の溶出には地下水との接触面積の割合が大きく作用するが、実際の注入地盤では固結体の体積に比べて地下水との接触表面積は少なくなるため、実験結果に見られたような急速な成分の溶出は抑制され、また溶出量も低減されると思われる。したがって、今回の実験結果は固結砂の耐久性, 溶出性に関する定性的な傾向を示すものとして理解する必要がある。

さて、注入材によって改良された地盤の強度, 止水性がどの程度の持続性を有するかは注入工法の用途, 使用目的をも左右する重要な課題であり、また持続性は固結成分の溶出とも関係するため地下水汚染の防止という観点からも解明を求められる課題であろう。今回の実験に

よれば、一般に使用されている配合の注入材の耐久性は材料によってかなり差があり、概して無機系硬化剤の注入材で耐久性が高く、有機系硬化剤の注入材はやや耐久性に劣ることが判明した。しかし、かなり過酷な実験条件である水中浸漬、連続透水を長期にわたって行なった後も、有機系硬化剤の固結砂でも一軸圧縮強度で 3 kg/cm²、透水係数で 10⁻⁸~10⁻⁷ cm/sec のオーダーを維持するものが大半であり、実用上はかなり高い耐久性を有するものと考えることができる。

一方、固結砂からの溶出は未反応成分、非固結成分、固結成分の溶出に分けられ、水ガラス系注入材のゲル化を示す次式では反応側および生成側の双方から溶出成分が生じる。例えば有機硬化剤の注入材 d~g における浸



漬水や浸透水の COD は上式の R' に由来する非固結成分であり、溶解性ケイ酸は未反応の水ガラスおよび生成物のケイ酸ゲルの再溶出物に由来する。実験結果では浸漬初期、浸透初期に COD, pH, 溶解性ケイ酸ともに高くなる例が多く、これは非固結成分や未反応の水ガラスに由来しており、これらの溶出は比較的短期間に終了する。これらの成分は固結砂の強度や止水性には関係していないと考えられるので、初期におけるこれらの成分の溶出は固結砂の耐久性を低下させる要因とは考えにくい。ところが、有機系硬化剤の注入材による固結砂の一部にはかなり長期にわたって 100 ppm 前後のレベルのケイ酸を溶出するものがあり、これはあるいは固結したケイ酸ゲルが再溶出しているものとも考えられ、このため固結砂の耐久性がやや乏しくなったと思われる。したがって、固結砂からの溶出が促進されるような場合、例えば周辺地下水が豊富で流れているような場合には注意を要する。

また、水ガラスと硬化剤の比率は注入の目的、所要ゲルタイム、注入方式などによって決定されるが、今回の実験では B 液すなわち硬化剤の多い固結砂の方が耐久性にすぐれている場合が多いことが判明した。B 液を多く

すればゲルタイムは短くなるので、一般ロッド方式の注入では困難となることもあろうが、最近では瞬結ゲルを注入する二重管方式も開発されているので、この方式を採用することも一つの方法であろう。

さて、当社で開発した石膏を硬化剤とする注入材(GS グラウト)は一連の試験結果から判断して耐久性にすぐれ、また pH の上昇やケイ酸の溶出も他の無機系硬化剤のもの(a, c)に比べて少ないので無公害グラウトとしての性能を有しているが、固結砂の初期強度がやや低いので、この点を改良することが今後の検討課題であろう。

5. あとがき

注入工法における地下水汚染の防止は注入時だけでなく注入後にも留意する必要がある。注入後の固結砂からの注入成分の溶出は固結砂の耐久性とも関連すると考え、水中浸漬および連続透水という現場条件と比べて過酷な条件を設定した室内実験を行なった。その結果によれば固結砂の耐久性や溶出性は注入材料や配合比、着目する性能や成分によって異なるものの、一部の例外を除き、固結砂の耐久性は実用上支障を生じるほど低いものではなく、溶出に関しても固結成分の再溶出はわずかであることが判明した。今後は耐久性および溶出性に関し実際の注入現場について実態を追跡調査するとともに、これらの実態を踏まえて注入工法の設計、施工管理に有用な知見の蓄積を図る所存である。

参考文献

- 1) 石毛, 所: 限定注入工法の現況, 基礎工, Vol. 7, No. 3, (1979), pp. 22~29
- 2) 三木, 柴崎, 下田: 水ガラスを主材料とした薬液の開発研究, 土と基礎, Vol. 25, No. 5, (1977), pp. 35~42
- 3) 大島, 蒔田: 薬液の種類と取扱い上の注意, 土と基礎, Vol. 26, No. 8, (1978), pp. 7~12
- 4) 喜田, 川地: 無公害グラウトに関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 15, (1977), pp. 117~121