

無公害グラウトに関する研究 (その1)

—GSグラウトの注入効果と水質保全特性—

喜田大三
川地武

Studies on Grout and Grouting with Regard to Ground Water Pollution (Part 1) —Basic Properties of New Grout and Its Capacity to Prevent Water Pollution—

Daizo Kita
Takeshi Kawachi

Abstract

Recently, pollution of ground water by grout has frequently occurred, and therefore, only grouts of sodium silicate base are now permitted to be used in Japan. However, these grouts are not always effective and not necessarily free of ground water pollution. A grout containing sodium silicate and gypsum was thus developed and named GS Grout. The basic properties of this grout and water pollution by it were tested and the following results were obtained:

- (1) The gelation time and strength of this grout is governed by the concentrations of silicate and gypsum, and strength of a homo-gel is 0.3 to 1.5 kg/cm².
- (2) The water permeability of grouted sand is 10⁻⁶ to 10⁻⁷ cm/sec, and the groutability is the same as ordinary cement silicate grout.
- (3) During and after grouting, the pH of ground water is under 9.0 and the concentration of soluble silicate is under 200 ppm.

These data suggest that this grout is much more effective in preventing ground water pollution than previous grouts.

概 要

薬液注入工法における注入薬液(グラウト)による地下水汚染が問題となり、現在使用しうるグラウトは水ガラス系のものだけに限定されている。ところが、従来の水ガラス系グラウトのみでは注入効果に限界があり、また、新たな地下水汚染も問題となっている。そして、より効果のすぐれ、さらに無公害のグラウトの開発が望まれている。そこで、産業廃棄物として多量に産出する石こうを硬化剤とする水ガラス系グラウトを開発し、GSグラウトと命名した。GSグラウトの注入特性および地下水汚染性について検討し、以下の結果を得た。(1)GSグラウトの強度、ゲルタイムは2水石こう、ケイ酸濃度に支配され、ホモゲルは0.3~1.5kg/cm²の強度を示す。(2)止水性は高く、サンドゲルの透水係数は10⁻⁶~10⁻⁷cm/secのオーダーであり、浸透性はLWと同程度である。(3)注入中および注入固結後の地下水のpHは大部分9以下、ケイ酸濃度は200ppm以下であり、同時に実験したLWに比べて地下水汚染の程度が著しく少ない。

1. はじめに

注入工法はトンネル、シールドなどの土木工事における湧水の防止や切羽の安定に、また建築工事の地下掘削におけるボイリング、ヒービングの防止に補助工法として広く採用されている。ところが、この工法による注入材(グラウト)が周辺の地下水に混入し、この地下水を生活用水としていた周辺住民に被害を生ずるという事故が発生したのを契機に、注入工法に使用しうる注入材が大幅に制限され、またその扱いにも充分

な対策を求められるようになった¹⁾。すなわち、使用しうるグラウトは劇物を含まない水ガラス系のグラウトに限られ、また注入工事現場周辺の地下水の水質保全に厳しい監視体制が求められるに至った。しかし、使用が許可されているグラウトだけでは充分な注入効果を期待できないものも多く、また、地下水汚染防止の面で問題を残しているものもある。したがって、注入効果がすぐれ、かつ地下水汚染性のない注入材の開発が求められ、薬剤メーカーや注入業者を中心に無公害な注入材や施工法の研究が進められているが、いま

だ万全というものは見られない。

ところで、これまでの注入工法における注入材の開発の経緯を見ると、注入効果は強調されるが、その毒性や地下水汚染性についてはほとんど無視され、また注入工法の設計および施工が、注入材が地中で100%硬化する、すなわち反応するという前提のもとに行なわれている。さらに、地下に注入されてゲル化した注入材の硬化後の挙動、例えば硬化物からの成分の再溶出などについてはほとんど考慮されていない。今後の注入材あるいは注入工法の開発はこれらの点について十分な配慮が必要とされよう。

さて、筆者らは在来の水ガラス系グラウトの挙動すなわち水ガラス中のケイ酸の反応、硬化物からの成分の溶出などについて基礎的な検討を行なう過程で、産業廃棄物である石こうが水ガラスの硬化剤として有効であることを見出し、この石こう・水ガラス混合物が在来の注入材に劣らない注入効果を示すだけでなく、水質汚染性が少なく、長期安定性にすぐれていることを確認し、この注入材をGSグラウトと命名し、特許出願を行なっている。本報では、このGSグラウトの基本的性状および大型模型実験の結果について述べる。

なお、GSグラウトに使用する石こうは火力発電所や化学工場など重油を燃料とする工場において発生する排煙脱硫石こう（排脱石こう）や肥料工業や金属工業で得られる化学石こうなど各種の製造業における産業廃棄物である。したがって、GSグラウトを使用した注入工法は産業廃棄物処理工法としても有効と考えられる。

2. 室内実験

2.1. GSグラウトの基本的特性

室内実験では三種の石こうを用いた。表-1に供試石こうの性状を、図-1に粒径分布を示す。また、実験にはJIS 3号品の水ガラスを使用した。図-2にはゲルタイムを示しているが、いずれの石こうもゲル化材として有効であり、石こうの配合量が多いほどゲルタイムは短くなる。ゲルタイムは石こうの種類によっても異なる。図示しないが、ゲルタイムには水ガラス濃度や温度も関係し、水ガラス濃度が高いほど、また温度が高いほどゲルタイムが短くなる。次に、図-

種別	最大粒径mm	含水比%	真比重	純分%
A	0.3	36.5	2.30	97.2
B	0.4	36.0	2.31	96.8
C	2.0	40.8	2.35	97.4

表-1 供試した石こう

3にホモゲルの強度を示しているが、強度には水ガラス濃度の影響が大きい。ま

た、石こうの濃度も影響するが、石こうの種類による強度差の方が著しい。

また、グラウトには止水性が要求されるが、 $3.6 \times 10^{-1} \text{cm/sec}$ の透水係数の砂礫にGSグラウトを注入し、サンドゲルの透水係数を測定したところ、 $10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/sec}$ のオーダーの透水係数が得られた。したがって、GSグラウトは十分な止水性を有するといえる。

さて、石こうと水ガラスの配合物はグラウトとして必要とされる範囲のゲルタイム、強度、止水性を示すが、ゲルタイムや強度を薬品によって調節する必要も生じよう。そ

ここで、薬品添加の効果を試験したところゲルタイムの遅延に顕著な効果があり、さらに強度をも上昇せしめる薬品を見出した。

ところで、注入材には地盤への浸透性が要求される。この浸透性にはグラウトの流動特性、すなわち粘度、降伏値などや懸濁物質の粒径分布が関係する。そこでGSグラウトの粘度をB型粘度計で測定したところ、

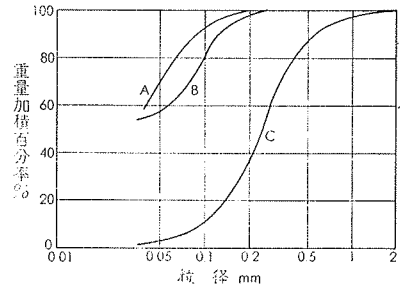


図-1 供試石こうの粒径加積曲線

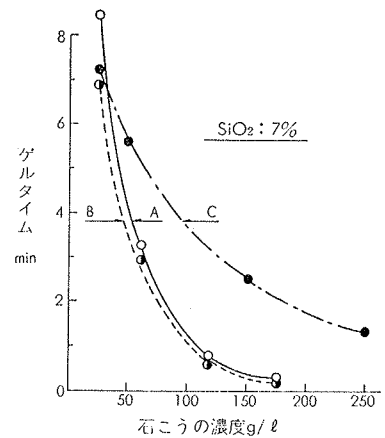


図-2 ゲルタイムと石こう配合量の関係

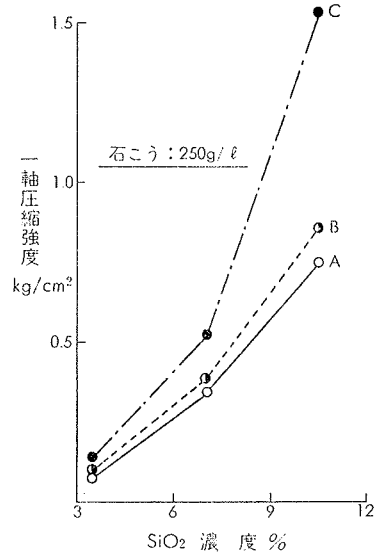


図-3 ホモゲルの強度

5~20cp の範囲にあり、ゲル化とともに急激に高くなる。また、グラウトの降伏値は配合によって異なるが1~5dyne/cm² の値を示している。一方、懸濁物質の粒径分布は当然ながら石こうのそれに支配される。懸濁液グラウトの注入限界粒径は例えば次式で与えられる³⁾。したがって、例えば石こうAを用いたグラウト

$$D_{10}/D_{95} \geq 8$$

D₁₀: 地盤の10%粒径mm
D₉₅: グラウトの95%粒径mm

では、D₉₅ が 0.11mm であるので、D₁₀ が 0.88mm 以上の地盤には注入が可能と考えられる。この注入限界粒径はセメント系グラウトの値に近似している。そこで、各種粒径の地盤におけるGSグラウトとLWの標準的な配合のものの浸透距離を測定したところ、GSグラウトはLWと同程度の浸透性を有すると判明した。

2.2. 水質汚染性および安定性

GSグラウトは従来の水ガラス系グラウトと同程度の効果を有することが判明した。そこで、ホモゲルを5倍容積の水中に養生し、養生水の水質変化を調査した。ここでは水質の指標としてpHとケイ酸を採用し、前者はガラス電極法、後者のうち溶解性ケイ酸はモリブデン比色法、全ケイ酸は重量法によって求めた。

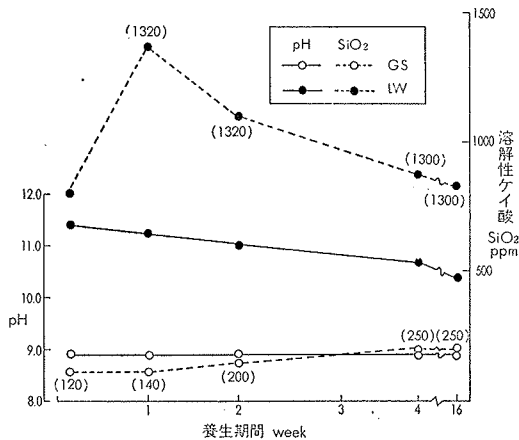


図-4 ホモゲル養生水の水質変化 (カッコ内は全ケイ酸濃度 ppm)

図-4に示すように、GSグラウトでは養生水のpHは当初の8.9からほとんど変化することなく、また溶出するケイ酸も250ppm以下であり、全ケイ酸濃度と溶解性ケイ酸濃度はほぼ一致し、コロイド状のケイ酸は発生していない。一方、LWではpHは10以上となり、ケイ酸濃度は溶解性ケイ酸で800ppm以上、全ケイ酸に至っては1300ppmにも達し、養生期間につれてコロイド状ケイ酸が増大していることを示している。なお、有機系硬化剤を使用する水ガラス系グラウトのなかには、表-2に示すようにpH、溶出ケイ酸濃度と

もに低いものがあるが、硬化剤自身が水溶性であるために、養生水のCODやBODを高くするため、地下水の水質保全上は問題が残る。したがって、地下水汚染防止の観点から総合的に評価した場合、GSグラウトの優位性は明らかであろう。

次に、ホモゲルの水中安定性を表-2に示す。この結果によれば、GSグラウトは28日後の強度低下が比較的大きく、この点改善の余地があるが、体積変化は

注入材の種類	強度低下率 %	体積減少率 %	水質				
			PH	SiO ₂	COD	BOD	
無機	GS	22.0	5.4	8.9	150	—	—
	LW	—	3.0	10.2	820	—	—
有機	A	—	7.2	7.7	100	12800	6100
	B	69.7	27.0	9.9	840	6600	3900

表-2 28日水中養生後のホモゲルの変化と養生水の水質

僅かである。また、表示してないが、約6ヶ月養生しても強度、体積ともに28日養生の値と変わらず、平衡状態を維持している。なお、表-2に示した有機系硬化剤Bによるホモゲルは強度低下、体積減少ともに著しく、また水質汚染も激しいものがあり、その適用範囲は大幅に限定されるであろう。

3. 大型模型実験

3.1. 実験概要

実験は当技術研究所の野外実験場で行なわれ、1M³水槽中の模型地盤に注入を行なった。使用した土は砂と砂礫を混合して調整したもので、最大粒径20mm、10%粒径0.4mmの土であり、透水係数は3.6×10⁻¹cm/secで、実験は水分飽和状態で行なった。一方、グラウトの配合は表-3に示すように、GSグラウト2種、LWの合計3種とした。GSグラウトには前出の石こうAを使用した。注入に際し、I液、II液を別に作成し、これを等量注入できるように調整した比例注入ポンプによって注入した。注入速度は8~10l/minとし、注入圧は、1kg/cm²前後となっていた。なお、模型地盤中には強度試験用の供試体を得る目的で多孔

実験番号	No.1	No.2	No.3
I液	ケイ酸19.6%	ケイ酸19.6%	ケイ酸14%
	石こう30.6% 調整剤0.5%	石こう30.6%	セメント3% 調整剤0.2%
ゲルタイム	70sec	25sec	103sec
ホモゲル強度	0.97kg/cm ²	0.59kg/cm ²	0.82kg/cm ²

表-3 模型実験におけるグラウトの配合

3.2. 注入固結状況

GSグラウトの注入はスムーズに行なわれ、グラウトが注入パイプ周辺から溢出するまで注入された。そ

モールドを埋め込み、また間隙水の水質を測定するための多孔採水パイプをそう入した。

の結果、注入実績は表-4 に示す値が得られた。すなわち、注入量は 50 l 前後となり、固結体の体積は 200 l 前後となった。注入量と固結土量の比 (V_G/V_S) は 0.3 前後となり、当初の模型地盤の間隙率は約 45% であるので、注入

実験番号	No.1	No.2	No.3
注入量 V_G	68 l	42 l	64 l
固結土量 V_S	212 l	151 l	64 l
V_G/V_S	0.32	0.28	1.00
浸透距離	最大	38cm	33cm
	最小	25cm	15cm

表-4 注入実績

充てん率は 75% 前後となる。ゲルタイムの長い No. 1 の方が充てん率がやや大きい。グラウトの浸透距離は図-8 のスケッチから求められるが、位置によって差があり、15~38cm の範囲となっている。ここでもゲルタイムの長い No. 1 の方が浸透距離が大である。今回の実験では土被りが少ないため注入圧を大きくできなかったが、実際には注入圧がもっと大きくなるので浸透距離はさらに拡大できるであろう。

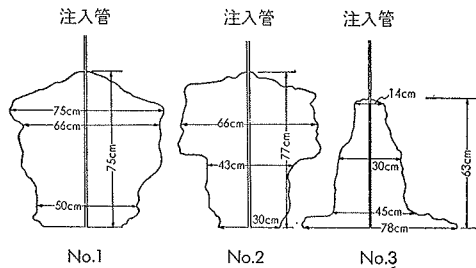


図-5 注入固結体の形状スケッチ

一方、LWではグラウトの溢出もなくスムーズに注入ができたが、排水の pH が異常に高くなり、グラウトが水中に溶解していると判断されたため、注入量 64 l の時点で中止した。一夜後、固結体を掘り出したところ固結土量は GS グラウトの半分以下であり、特に上部での固結状態が悪く、下部にはセメント分が濃縮されて固結化していた。そして、水槽の底部にもセメント分や弱い水ガラスのゲルが 5~10cm の厚さで堆積していた。これは、注入中における水ガラスとセメントの分離を示唆している。

次に、固結物の強度分布を表-5 に示す。表中の q_c は携帯式の土壌硬度計によって測定した値であり、 q_u

実験番号	No.1		No.2		No.3	
	周辺	中心	周辺	中心	周辺	中心
q_u kg/cm ²	上部	0.50	1.20	0.73	1.0	—
	中部	0.86	0.83	0.74	1.20	0.36
	下部	0.62	1.12	0.68	1.26	0.82
q_c kg/cm ²	上部	5.0, 6.0	16	5.5, 6.0	22	7.0, 8.0
	中部	6.0, 8.0	20	3.9, 3.8	30	6, 13
	下部	5.0, 7.0	16	6.2, 7.5	28	4.5, 12

表-5 固結物の強度分布

は埋込んだモールド掘り出して、モールド内の固結体について測定した値である。表示した結果によれば、GS グラウト、LWともに、周辺部より中心部で強度は大きく、垂直方向の強度分布には顕著な差は見られない。GS グラウトの固結物の q_u は 1 kg/cm² 前後であり、ホモゲルの値よりやや大きい傾向にあり、また q_c は 20 kg/cm² 前後で q_u から考えられる値よりかなり大きい。 q_c 測定の際にコーンの先端が礫に当たることがあるので、実際の値より大きく表われることも一因と考えられよう。

3.3. 水質変化

注入の進行に伴ない溢出水口からは注入液量に等しい水が溢出してくる。その水質変化を図-6 に示す。GS グラウト (No. 1, No. 2) では溢出水の pH は 7~8 の範囲にあり、当初の水の pH に比べて変化はわずかである。同様に溢出水の溶解性ケイ酸もわずかな濃度上昇にとどまり、GS グラウト注入時の水質汚染はわずかである。これに対し、LW注入の場合には注

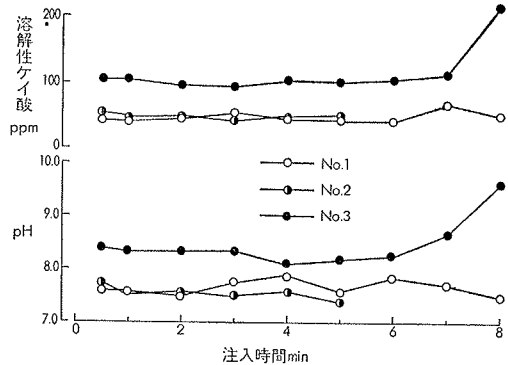
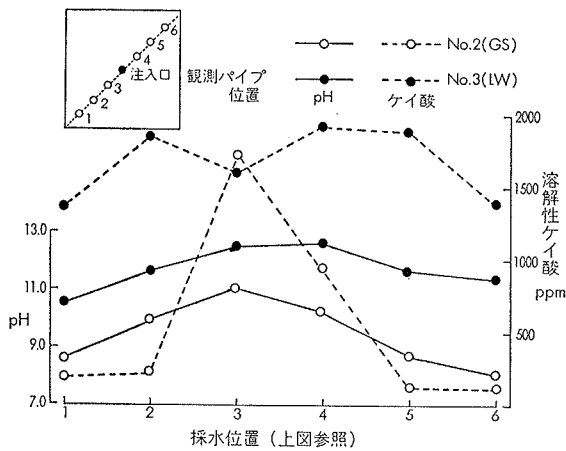


図-6 注入時の溢出水の水質変化

入開始とともに pH は 8 以上となり、8 分後には 10 近い pH 値を示すようになる。これに対応して溶解性ケイ酸の濃度も注入当初ですでに 100ppm 前後を示し pH の上昇する時点では 200ppm を越えるようになる。このように LW の場合、注入作業中にも相当の成分が地下水に溶出することを示しており、GS グラウトの場合にはこの溶出がわずかである。

一方、間隙水の水質はあらかじめ地盤中にセットした採用水用パイプから採取した水の分析によって検討した。図-7 に注入後 16 時間の間隙水 pH とケイ酸の濃度の分布を示した。GS グラウト注入の場合、注入口の近くでは pH は 10~11 を示し、溶解性ケイ酸濃度も高いが、周辺部では pH は 9 以下となり、ケイ酸濃度も 200ppm 以下となる。これは、GS グラウトの浸透固結範囲における水は汚染されるものの、それ以外の



図一七 間隙水の水質分布 (24時間後)

範囲では水質汚染が少ないことを示している。

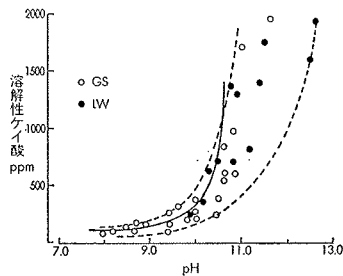
これに対し、LWではいずれの採水位置においても pH は 10~12 の範囲にあり、溶解性ケイ酸の濃度は 1000~2000ppm となり、間隙水の汚染が著しい。これは、LW注入の場合には、前述のようにかなりの未固結が発生し、これが注入パイプから離れた所にも拡散していることを示している。このように、GSグラウトとLWとでは固結後の地下水の汚染の程度および範囲に大きな差異があり、GSグラウトはLWに比べて地下汚染性の少ないグラウトといえる。

なお、間隙水の pH と溶解性ケイ酸濃度とをプロットすると図一八が得られ、かなりのバラツキがあるものの、ケイ酸濃度は pH の上昇とともに高くなり、各 pH におけるケイ酸濃度の最大値は純系で得られているケイ酸の溶解度⁴⁾

の結果とほぼ一致している。この結果によれば、浸透固結範囲の近くで pH が 10 以上になると、固結したグラウトからケイ酸が溶出することも考

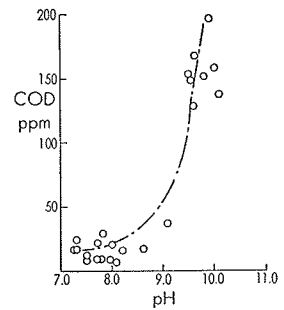
えられる。したがって、水ガラス系注入材を使用する場合には、固結範囲の近くでも水質を監視し、pH が 10 以上とならないように管理する必要がある。

また、地下水のアルカリ化は単にケイ酸の溶出だけでなく、土中の有機物の可溶化をも生じるので、地下水の褐色化、BOD、COD の上昇をも招く。図一九は有機物を含まない水ガラス系グラウト (LW) を使用した某工事現場における、観測井水の pH と COD と



図一八 間水隙の pH と溶解性ケイ酸

の関係を示したものである。この図では、pH が 9.5 を越えると地下水の COD すなわち有機物量が著しく増大することを示している。そして、このような地下水は褐色を呈している。この原因は、土中の有機物がアルカリ条件下で可溶化し、地下水中に溶解したものと考えられる。したがって、地下水の有機物による汚染を防ぐためにも、地下水のアルカリ化を防止する必要がある、GSグラウトはこの必要性にかなり応えうるグラウトであるといえる。



図一九 某注入現場における地下水の pH と COD の関係

4. おわりに

薬液注入工法に関する暫定指針が通達されてすでに 3 年が経過しようとしており、各工事現場ではこの指針にもとづいて注入工法が施工されている。しかし、使用が許可されている薬液のみでは十分な注入効果が得られないことや、許可された薬液を使用しても地下水汚染を生じることもあるようであり、有効かつ無公害の注入材および注入工法の開発が切望されている。本報で明らかにした石こうを硬化材とする GS グラウトは注入効果の点で従来のものに匹敵し、地下水汚染性は従来のものに比べて少ないことを特徴とし、さらに産業廃棄物の有効利用をも志向したものである。現在 GS グラウトの使用が工事現場で計画されておりこの計画が実施されるならば、本グラウトの効果および問題点が明らかになるであろう。この点については別の機会に報告する予定である。

また、各地で注入工事に伴う地下水汚染や人体への影響が論議されているが、これらの実態についても詳細な調査が必要であり、これらの調査結果や室内における研究が真に無公害なグラウトおよび注入工法の開発につながることを期待される。

参考文献

- 1) 建設省：薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針について、(1974)
- 2) 例えば、今村ら：土木学会第30回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-446、(1975)
- 3) 藤井：土と基礎 12-4、(1964)、p. 25
- 4) Ralph K. Iler: The Colloid Chemistry of Silica and Silicate, Cornell Univ. Press, (1955) p. 12