

無公害グラウトに関する研究（その2）

——注入に伴う地下水の褐色化の発生機構——

喜 田 大 三
川 地 武

Studies on Grout and Grouting with Regard to Groundwater Pollution (Part 2)

——Brown Coloring of Groundwater on Grouting——

Daizo Kita
Takeshi Kawachi

Abstract

Recently, grouting has been carried out considering prevention of groundwater pollution. However, groundwater pollution sometimes occurs on grouting. Consequently, brown coloring of groundwater on grouting was studied by field investigations and laboratory experiments, and the following results were obtained. (1) Brown coloring and increase of COD of groundwater were observed on two projects, adopting alkaline and neutral grouts consisting of sodium silicate and hardener. (2) Using organic soil as a filtering bed, seven kinds of grout consisting of sodium silicate and hardener were filtered, and filtrate was colored brown except in the case of GS grout. The brown coloring was marked when using cement or sodium aluminate as hardener. (3) Not only with organic soil, but also with inorganic soil, coloring occurs and is marked the higher the pH of grout, but occurs with neutral grout also.

概 要

注入工法における地下水汚染の防止を図るために建設省より暫定指針が出され、現在ではこの指針にもとづいて工事が行なわれ、また地下水汚染性の低い注入材の開発、工法の改善が行なわれているが、現状では注入に伴う地下水汚染が完全に解消したとは言えない。本報では注入に伴う地下水の褐色化現象に着目し現場調査、室内実験を行ない、以下の結果を得た。(1)土質の異なる二現場でアルカリ性、中性の水ガラス系注入材を注入したところ、観測井の水が褐色化し、CODが高くなった。この水質の悪化は1ヶ月以上持続した。(2)有機質土に7種の水ガラス系注入材（無機系硬化剤4種、有機系硬化剤3種）を浸透させた際の浸透水はGSグラウトを除き褐色化した。褐色化の程度は強アルカリ性注入材（LW, MI）で著しく、また浸透水のCODと対応する。(3)有機質土だけでなく、わずかな有機物を含む無機質の沖積粘性土においても地下水の褐色化は生じうる。また、注入材のpHは高いほど褐色化が著しいが、中性のものでも褐色化が生じる。

1. はじめに

薬液注入工法は土木・建築における地下掘削の際の補助工法として広く採用されており、特に最近では下水道整備事業における下水幹線、枝線工事のシールド工事等には不可欠となっている。一方、数年来、注入材による地下水の汚染が問題となっており、注入薬液の選定、注入中の地下水の水質保全などについて建設省より暫定指針¹⁾が出され、この指針に基づいて工事が行なわれている。そこで、最近では無公害注入薬液の開発や注入技術

の改善が行なわれており、筆者らも前報で無公害グラウトとしての“GSグラウト”について、その概要を報告している²⁾。

さて、前述の指針に沿って注人工事を行っていた現場のいくつかで、観測井の水質に注入によるものと考えられる変化すなわち井水の褐色化が認められた。そこでこれらの現場の水質を詳細に調査するとともに室内実験を行ない、地下水褐色化現象の原因を考察した。

2. 現場調査例

2.1. 現場概要

調査を行なった二つの現場はいずれも下水道工事の補助工法として注入工法を採用した現場で、現場Aは推進工法による枝線工事、現場Bはシールド工法による幹線工事である。両現場の土質は図-1に示す。現場Aの注入目的は発達立抗周辺の地盤のゆるみの防止、現場Bでは切羽の湧水、崩壊の防止である。

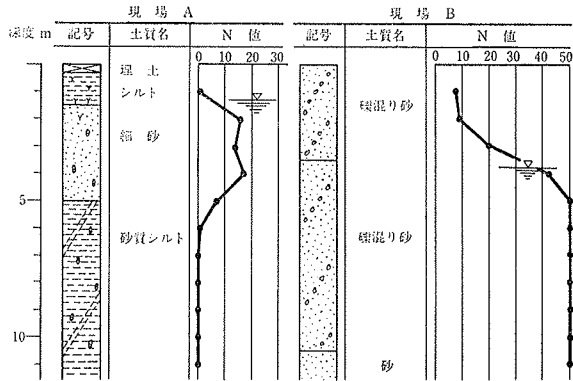


図-1 調査現場の土質

2.2. 注入管理

採用した注入材はいずれも水ガラス系で、現場Aでは LW-1 (水ガラス, セメント懸濁液)。現場Bでは LW-1 と中性の溶液型薬液 (後出の表-1 中の薬液 d) とであった。注入は 1.5 ショットのロッド注入方式で行なわれ、注入時には注入圧と流量とが管理された。

地下水汚染を監視するために注入孔の周辺に観測井を設けた。観測井は現場Aでは注入範囲から 50 cm, 1.5, 4.5, 8.5 m の位置に、現場Bではシールド路線上の注入範囲からの最近接距離が約 10 m の位置に 5 本設置された。また、現場Bでは必要に応じ民家の井戸水の水質もチェックした。これらの井水は比較的良質な地下水であるが飲用には供されていない。水質試験の項目には、pH および COD を採用した。COD はいずれの注入材も有機成分を含んでいないので、暫定指針では試験が義務付けられてはいないが、地下水の褐色化が見られたので試験を行なった。なお、pH はガラス電極法、COD は過マンガン酸カリウム法によって試験した。

2.3. 調査結果

現場Aにおける注入孔から 50 cm 離れた位置の観測井の水質変化を図-2に示す。この井水は注入前に pH が 7.1, COD が 10.2 ppm であり、やや黄味を帯びていたが注入翌日から着色し、その色調はウイスキー状であった。その状態は注入後10週を経過しても変わらず、一時は醬油状を呈した。pH は注入直後で 9.5 であり、COD は 100 ppm を越え、この褐色化が土中の有機物に由来する

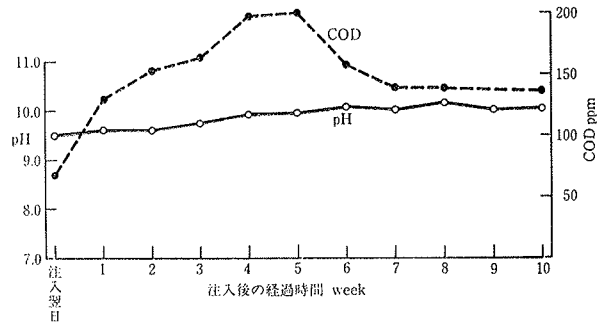


図-2 井水の水質変化の例 (現場A)

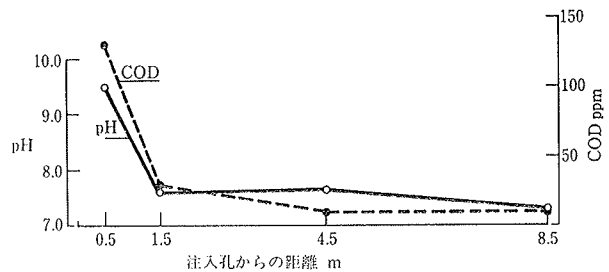


図-3 各観測井水の水質分布(現場A, 注入直後)

ことが判明した。しかし、この汚染は注入孔から 4.5 m 離れるとほとんど見られず、汚染範囲はかなり限定されている。一方、汚染の持続期間は10週以上に及び、井水の揚水を行っていないことと地盤の透水性が低いことが原因であろうが、汚染期間の長いことに留意する必要がある。

次に、現場Bの水質変化に関しては図-4、図-5に示しているが、図-4は LW注入時の例である。この場合は観測井は注入孔から約 10 m 以上離れているが、pH, COD の上昇が著るしい。注入中から pH は 10~11 にまで上昇し、一方、COD は 500 ppm にも及んでいる。そ

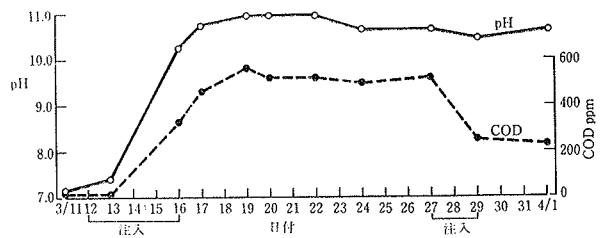


図-4 井水の水質変化の例 (現場B)

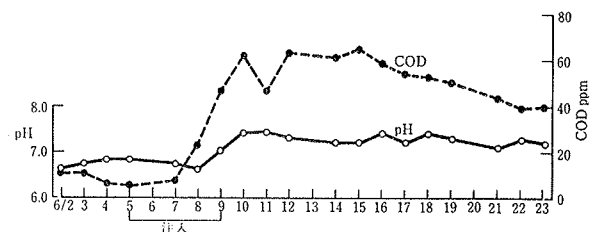


図-5 井水の水質変化の例 (現場B)

の際の色度は1000度を越え、醬油状を呈している。この観測井の近くの民家の井水も類似の水質変化を示していたのでポンプ揚水を行なったが、井水がほぼ無色になったのは注入後約6週を経過してからであり、その際の揚水量は約800 m³に及んでいる。

一方、中性領域でゲル化させる薬液を採用した際の観測井の水質変化を図-5に示しているが、この場合にも地下水の褐色化が生じた。その程度はLW採用個所に比べて低く、色度の最大値は約200度であり、CODの最大値は60 ppmに達する。pHはほぼ中性の値を示している。この事例から判るように、地下水の褐色化は必ずしもpHの上昇とは対応していない。なお、この観測井は揚水を行なわなかったが、井水の色度が低下し注入前の状態に戻ったのは、注入後約60日を経過してからであった。

3. 室内実験

3.1. 注入薬液浸透水の褐色化

3.1.1. 供試材料 使用した注入薬液は市販の6種と当社で開発したGSグラウトの合計7種の水ガラス系のものであり、その硬化剤は表-1に示す。表中、a~dは無機系の硬化剤であり、e~gは有機物を含む硬化剤である。また、主剤の水ガラスはJIS 3号品を使用した。なお、注入材を浸透させる際に、標準配合のそれではゲルタイムが短かく浸透ができないため、いずれの注入液も水で10倍に希釈して用いた。一方、希釈注入材を浸透させる土は関東ローム表土の黒土であり、浸透性を向上させるためにガラス玉を混合して用いた。

記号	硬化剤	pH
a	セメント、ベントナイト	12.8
b	アルミン酸ソーダ	12.7
c	二水石こう	10.5
d	硫酸水素ナトリウム、リン酸ナトリウム、酸化マグネシウム、塩化ナトリウム	7.4
e	重炭酸ナトリウム、トリアセチン	11.0
f	グリオキザール、リン酸	10.7
g	エチレンカーボネート、重炭酸カリウム	10.8

表-1 供試した水ガラス系グラウト剤の硬化剤とグラウトのpH

3.1.2. 注入薬液の浸透方法 上記のローム、ガラス玉の混合物を直径12.5cm、長さ50cmの濾過円筒に20cmの厚さに突き固め、この上に希釈した注入材を加え、圧力1~2 kg/cm²で加圧浸透させた。浸透水は50~100 mlごとに採水し、水質(pH, COD, 吸光度)を測定した。吸光度を測定する際の波長は、420 m μ 、619 m μ とした。ここで、CODは有機物含有量の指標であり、COD値の約2倍が有機物含有量であり、吸光度は褐色化の程度

目安であり、この値から色度を求めた。

3.1.3. 浸透水の性状 図-6に浸透水の吸光度を示す。この結果によれば、吸光度の増大すなわち褐色化の

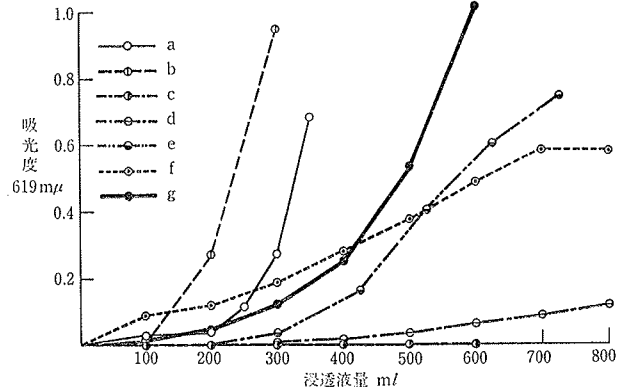


図-6 有機質土浸透液の吸光度

著しいのは無機系のa, bの注入材であり、ほとんど着色しないのはGSグラウトである。中性領域でゲル化する注入材dは着色程度は少ないものの、やはり褐色化が認められる。一方、有機物を含む硬化剤のe, f, gの注入材では前述のa, bとc, dとの中間の着色状況である。

次に、浸透水が500 mlになった際の浸透水の水質を表-2に示す。これによれば、吸光度、色度は上述の傾向にあるが、pHは興味深い結果を示している。すなわ

グラウト剤	吸光度	色度	pH	CODppm
a	>1.00	>1500°	7.0	620
b	>1.00	>1500°	7.2	850
c	0.01	12°	7.1	24
d	0.04	140°	7.1	130
e	0.34	1020°	8.6	890
f	0.38	1100°	9.8	40100
g	0.53	>1500°	7.1	1380

表-2 有機質土浸透液の外観と水質

ち、注入材a, bは注入前のpHが強アルカリ性の値(12.8, 12.7)を示すのに、浸透水は7.0, 7.2と中性の値となっている。また、c, e, f, gでも程度の差はあるが同様な傾向にある。この現象は関東ロームの高い緩衝能や有機物との中和反応によるものと考えられる。一方、浸透水のCODは注入材e~gを除けば着色程度と対応している。有機系硬化材の注入材では硬化剤中の有機物の一部がCOD値として測定されるので、CODが高くなっている。無機系硬化剤の場合に見られる着色状況とCODが対応する傾向は、注入薬液浸透液の着色化が注入材による土中の有機物の溶出にもとづくものであることを示している。

供試土	有機物含有量%	色度	COD ppm
沖積層シルト(東京)	3.5	>1000*	114
沖積層粘土質シルト(東京)	3.2	290*	81.2
沖積層シルト質粘土(大阪)	4.3	>1000*	166
沖積層砂質シルト(大阪)	2.5	170*	47.2
関東ローム黒土(清瀬)	15.9	>1000*	2130

表—3 各種の土のアルカリ抽出液の性状

3.2. 地下水褐色化の要因

3.2.1. 土の種類 上述の浸透実験は有機物含有量の多い関東ローム表土におけるものであったが、他の土、特に有機物の多くない土について検討した。表—3には東京、大阪の沖積土を水ガラスの10倍液で抽出した際の抽出液の水質を示す。この結果によれば、関東ローム以外の土の場合にも抽出液は褐色化し、CODは100ppm前後に及ぶ。いずれの土も2~5%の有機物を含んでいるので、これらの有機物が強アルカリ性の水ガラス溶液で可溶化するものと思われ、CODから計算される溶出有機物の全有機物に対する割合は、関東ロームで約50%

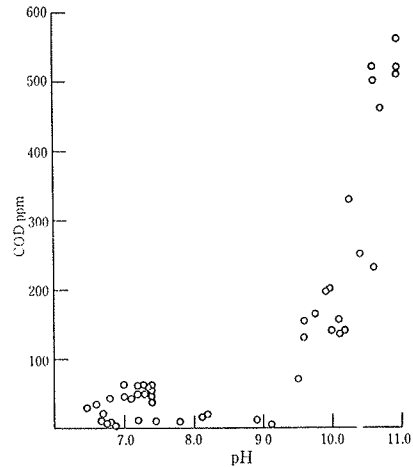
硬化剤	色度	COD ppm	pH
a	230*	160	12.5
b	>1000*	850	12.2
c	75*	26	6.7
d	>1000*	970	0.9
e	440*	422	7.8
f	>1000*	40100	1.9
g	30*	1760	7.1
水	10*	5.6	6.7

表—4 硬化剤のみによる関東ローム抽出液の水質

他の沖積土で10%前後である。この実験結果は、いわゆる有機質土、例えば泥炭層などに注入する場合だけでなく、一般の無機質土における注入の場合にも地下水の褐色化に対して注意を払う必要があることを示している。

3.2.2. 硬化剤の種類 水ガラス系注入材では主剤は水ガラス、硬化剤として各種の薬品が用いられる。注入の際には、時に二液の混合が不十分で水ガラスと硬化剤液とが別個に注入されることがある。そこで、硬化剤のみで関東ロームを抽出したところ、表—4の結果が得られた。この結果によれば、抽出液の褐色化の著しいのは硬化剤b, d, e, fである。特にpHが低く強酸性を示すd, fでも褐色化が生じることは興味深い。土中の有機物の一部が酸性下で溶出することは土壌学の分野

で知られており³⁾、酸性の硬化剤を用いる場合には主剤と硬化剤の混合が充分に行なわれるように注意する必要がある。一方、硬化剤aではpHが極めて高いにもかかわらず色度が比較的小さい。これは土中の有機物が硬化剤aのセメント懸濁液中のカルシウムイオン(Ca⁺⁺)によって不溶化することによるものといえる。ところが、前述のように硬化剤aと水ガラス溶液とを混合した注入



図—7 観測井水のCODとpHの関係

材の希釈液では関東ロームの浸透液が著るしく褐色化する。これは、水ガラスとセメントとの反応によって生成する水酸化ナトリウムによって、土中の有機物が溶出するものと理解できる。

ところで、CODは抽出液中の有機物量の指標であるが、硬化剤e, f, gでは着色程度に比べてCODが高い。これは、硬化剤自体が有機物を含有しているためである。

3.2.3. pH すでに述べたように、土中の有機物の溶出による地下水の褐色化の程度は単にpHのみによって決る訳ではない。すなわち、pHが高くてもCa⁺⁺が含まれる薬液では有機物は溶出しないし、酸性の著るしい薬液でも有機物の一部は可溶化して褐色化が見られる。しかし、主材と硬化剤が充分に反応した条件下では浸透水あるいは抽出水の褐色化の程度はpHと比較的対応しており、現場の地下水の場合には図—7のような関係となる。図—7では地下水のCODとpHとをプロットしているが、全般的傾向としてはpHが9以上でCODが著るしく高くなる。しかし、中性領域でもCODが比較的高い例も見られる。これは、一度可溶化した有機物はたとえpHが中性域になっても完全には不溶化することなく、溶解性の形で存在しうることによるものである。したがって、完全に反応すれば中性になる注入薬液を用いる場合でも、局部的なアルカリ条件の下で溶出す

る有機物が地下水の褐色化の原因となりうるので注意が必要であろう。

また、従来は無機系の硬化剤を用いた水ガラス系注入剤を採用する場合、地下水の水質監視項目は pH のみであったが、このような注入材でも地下水を有機物によって汚染させることがあるので、何らかの対策が必要と考えられる。現状では、できるだけ中性に近い注入材を選定することや、注入材の混合、反応を充分に行なわせるような施工方法を採用することなどが対策として考えられよう。

4. おわりに

薬液注入工法における地下水汚染の防止方法が各方面で検討されているが、地下水汚染の実態が適確に把握されているとは必ずしも言えない現状である。そこで、本報では注入に伴う地下水の褐色化現象を取り上げ、現場での調査例と室内実験結果について述べた。その結果を以下に列挙する。

- (1) 沖積粘性土、礫混り砂の土質の現場で水ガラス系注入材を注入したところ、付近の観測井の水が醬油状に褐色化し、CODが高くなっていた。アルカリ性、中性のいずれの注入材を採用してもこの現象が認められた。この水は COD が高く、注入材は有機物を含まないで、土中の有機物が溶出したものである。
- (2) 地下水汚染は粘性土地盤で注入後10週以上(非揚水)礫混り砂の地盤で約6週間(揚水)持続し、有機物汚染の継続期間は相当長期にわたる。

(3) 有機質土に各種注入材の希釈液を浸透させたところ、無機系硬化剤のもの(LW, MI など)、有機系硬化剤のものいずれにおいても浸透水が着色化する。着色状況は pH の高いものほど著しいが、pH が低くても着色化する。しかし、GS グラウトではこのような現象は見られない。

(4) 東京、大阪の沖積粘性土を水ガラス溶液で抽出したところ、いずれの土においても抽出液の褐色化が認められ、土中の有機物の溶出による地下水の褐色化は有機質土だけではなく、無機質土においても発生しうる。

(5) 以上の結果によれば、建設省の暫定指針により有機系硬化剤を含まない水ガラス系注入材を採用する場合には、地下水の水質監視項目として pH のみが義務付けられているが、併せて COD をも監視することが望ましいと考えられる。

なお、本報告の中の現場調査に関しては現場職員の方方に大変お世話になった。ここに記して深い謝意を表する次第である。

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) 喜田，川地：大林組技術研究所報，No. 15，(1977)，pp. 117～121
- 3) M.M.コノノワ（菅野，他訳）：土壤有機物，農文協，(1976)，pp. 26～43