〈論 文〉

懸濁液型水ガラス系注入剤を用いたトンネル工事 排水の水量・水質特性

Characteristics of waste water discharged from tunnel construction site using chemical grouting of water glass and colloidal cement

宮 根 正 樹*
Masaki MIYANE

丸 山 俊 朗**
Toshiro MARUYAMA

平 石 博 忠*
Hirotada HIRAISHI

Abstract

The characteristics of waste water discharged from an under tunnel construction site using chemical grouting of water glass and colloidal cement has been studied in order to develop a guideline of design the waste water treatment plant.

The characteristics of waste water was examined at excavating, grouting and pausing stage of the construction. The results obtained by this study can be summerized as follows.

- (1) Amount of the waste water discharged in a day was observed maximum in the excavation stage. It was about ten fold of the minimum discharged volume.
- (2) Daily average value of pH and turbidity in a day were 11.3 ± 0.9 and 2020 ± 1110 TU respectively.
- (3) Daily average concentration of soluble silicate and calcium ion were $114 \pm 61 \text{ mg SiO}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ and $58 \pm 33 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ respectively.
- (4) Daily average value of P-alkalinity and electric conductivity in a day were observed to be $140 \pm 180 \text{ mg CaCO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$ and $390 \pm 473 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (25°C) respectively.
- (5) A guideline for designing waste water treatment plant in the construction site could be recommended as follows: Allowable amount of discharge is to be 2.5 times of the daily average in excavation stage; pH, turbidity and soluble silicate are 11.3, 3100 TU and $230 \text{ mg SiO}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ respectively.

Key words: tunnel construction, chemical grouting, waste water, water quality, guideline

1. はじめに

トンネル等の建設工事で特に湧水量の多い場合に、止水あるいは地盤強度の改善を目的として、水ガラスを主剤とした薬液注入工法が採用される例がある。使用される薬液は、暫定指針(建設省)¹⁾において水ガラス系薬液(主剤をケイ酸ナトリウムとする薬液)に限定されており、セメントを反応剤とする懸濁液型水ガラス系薬液注入工法(以下、慣用されている「LW工法」と略す。)が採用される例が多い²⁾。

薬液注入工法を用いた工事排水の水量と水質は注入材料、注入方法、作業内容および湧水量などによって著しく変化することが予想される。放流水の水質基準は暫定指針によれば、 $\text{pH} < 8.6$ と $\text{COD} < 160 \text{ ppm}$ の2

項目のみである。しかし、一般には放流水域ごとに設定される上乗せ基準を遵守する必要がある。一方、水ガラスを含む懸濁液の凝集処理が容易でないこと³⁾や水ガラスが魚毒性を示すこと⁴⁾が明らかとなってきた。このため安定な処理を行うには、排水量の変動、排水の成分と濃度およびその変動の特性を把握した上で、目標処理水質に応じた処理方法と装置規模を決定しなければならない。

薬液注入工事排水や一般土木工事排水の水質データは多少見られる^{5),6),7)}が、工事内容あるいは土木材料と結びつけた詳細なデータはほとんど見い出されない。排水処理設備の設計および安定した水処理には、水量と水質の特性に関する資料の集積が急務と考える。

* 佐藤工業株式会社 〒243-02 神奈川県厚木市三田47-3, Sato Kogyo Co., LTD., Santa 47-3, Atsugi City, Kanagawa 243-02

** 東京水産大学 〒108 東京都港区港南4-5-7, Tokyo University of Fisheries, Konan 4-5-7, Minato, Tokyo 108

そこで本研究はLW工法を採用し、しかも工事内容と使用材料が明らかな現場を対象として、排水の水量と水質の特性を調べ、処理施設の設計値の目安を得ることを目的とした。

本調査結果は1現場について行われたもので、当然のこととして他の条件の異なるLW注入工事排水に適用できる訳ではないが、LW工法はほぼ同様の工程で工事が進められているところから、他所においても有効な知見になると考えられる。

2. 現場の状況

調査したトンネルは本トンネル建設の補助のための立坑であり、主に地下水の止水を目的としてLW工法が採用された現場である。調査対象とした立坑の直径は8m、切羽は1つである。工事は約1カ月ごとに、掘削工程（掘削—コンクリート打設—カバースロックの建設）と注入工程（注入のための削孔、薬液注入）の繰り返しを行い、昼夜連続作業が行われていた。この間に度々工事が行われない期間が断続的に散在した。注入材は水ガラス（3号ケイ酸ナトリウム）とセメント（主として高炉コロイドセメント）である。排水は坑底に設けられたポンプにより断続的に揚水されていた。

調査開始時の立坑深さは地上より—100m、調査終了時は—180mであった。なお、調査現場は薬液注入作業などの施工管理が注意深く行われていた。

3. 調査方法

調査は約8カ月間連続して行った。この間掘削工程3回、注入工程3回であった。排水の水質を検討するにあたって、工事作業内容を、「掘削工程」・「注入工程」・「無作業」の3つに区分した。各工程は、1日のうちの主な作業内容に基づいて掘削工程と注入工程を区分し、休日や工事の都合上掘削や注入工事をしていない時を「無作業」とした。作業を区分した理由は、作業内容によって水質や水量が異なることが予想されるためである。

日間の測定項目は、排水量、pH、濁度、カルシウムイオン（以下、 Ca^{2+} と略す）濃度、および溶解性シリカ（以下 S.SiO_2 と略す。主として単分子状シリカである。）濃度の5項目とした。なお本工事排水は無機性の排水であるため、有機物量の指標となるCOD等の測定はしなかった。1日の測定回数は、pHおよび濁度は掘削工程で4回（9:00, 13:00, 17:00, 21:00）、注入工程で6回（1:00, 5:00, 9:00, 13:00, 17:00, 21:00）とし、 Ca^{2+} と S.SiO_2 濃度は原則として工程の区別なく3回（9:00, 13:00, 17:00）とした。

pH、濁度 Ca^{2+} 濃度および S.SiO_2 濃度の測定値は測定回数が異なるので若干問題ではあるが日平均値として、排水量は1日の積算量で整理した。

上記調査期間以降、掘削およびコンクリート打設時の電気伝導度(EC)とPアルカリ度(Phenolphthalein alkalinity)を約2カ月間にわたって測定した。

pHはガラス電極法、濁度は透過光測定法、 Ca^{2+} 濃度はキレート滴定法、 S.SiO_2 濃度はモリブデン黄法によった^{8),9)}。 Ca^{2+} と S.SiO_2 はろ液(東洋ろ紙No.6でろ過)を用いた。濁度は精製カオリン $1\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ に相当する光学的特性値を1濁度単位(Turbidity Unit: TU)として表した。ECは電気伝導度計、Pアルカリ度は硫酸滴定法(pH8.3)によった⁸⁾。

4. 結果および考察

測定結果の全容をTable 1に示した。ECとPアルカリ度は調査時期が他の測定項目の場合と異なるが、Table 1に加えた。

4.1 排水量

Table 1から、全期間を通した日排水量は $40\sim 2730\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ の広範囲にわたり、平均値($\bar{x}$)は 947 ± 560 (標準偏差: σ) $\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ であった。次に全排水量データをもとに作業内容で区分したヒストグラムをFig. 1に示す。Fig. 1より、度数のピークは $539.5\pm 100\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ と $1739.5\pm 100\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ にみられる。日最大排水量は日最小排水量の68倍に達し、日最大排水量と平均排水量の比は2.9である。排水量は3工程のうち掘削工程が最も多くなる傾向がうかがえる。この理由を明らかにするため、工事の進捗に伴うトンネルの深さと排水量の関係をFig. 2のように整理した。

掘削工程はすでに注入して固結したゾーン（以下、注入ゾーン）を掘削し、湧水量が多くなると注入工程に切換えるため、共通して掘削工程の終了付近になると排水量が異常に多くなっている。したがって、掘削工程の初期の排水量と掘削工程終了時期の排水量に大差があり、全体としてバラツキも大きい。しかし、掘削工程から注入工程に切換える時期が早ければ排水量のバラツキは小さくなる傾向のあることがわかる。

掘削工程における排水量の範囲は $260\sim 2730\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ となり、平均値は $971\pm 594\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ (変数係数0.61)であった(Table 1)。Fig. 1から、 $539.5\pm 100\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ と $1939.5\pm 100\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ に2つのピークがみられ、掘削時期別にみると第1回と第2回目の掘削時は排水量の分布が広範囲にわたった(Fig. 2)。このような傾向となった原因として、前工程の注入による止水が十分でなかったことが考えられる。しかし、第3回目の掘削時においてはほぼ $500\sim 1000\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ の間で一定してい

Table 1 Analytical results of waste water discharged from tunnel construction site using chemical grouting of water glass and colloidal cement

Item	construction stage	total observed value		daily average						Range in a day**		
		minimum	maximum	minimum	maximum	average	standard deviation	coefficient of variation	n *	minimum	maximum	average
volume of waste water ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	total stage	—	—	40	2730	947	560	0.59	230	—	—	—
	excavating	—	—	260	2730	971	594	0.61	98	—	—	—
	grouting	—	—	160	2050	951	513	0.54	81	—	—	—
	pausing	—	—	40	2340	813	587	0.72	51	—	—	—
pH (-)	total stage	7.3	13.8	7.5	13.2	10.5	1.2	0.11	216	0.2	4.9	1.9
	excavating	8.4	13.8	8.6	13.2	11.3	0.9	0.08	97	0.3	4.9	1.9
	grouting	7.9	13.0	8.7	11.6	10.2	0.8	0.08	81	0.4	4.7	1.9
	pausing	7.3	9.8	7.5	9.6	8.8	0.5	0.06	38	0.2	1.3	0.5
Turbidity (TU)	total stage	10	14000	11	5000	1390	1090	0.78	213	0.0	13000	2175
	excavating	10	14000	23	5000	2020	1110	0.55	97	10	13000	2673
	grouting	10	5500	14	3100	1300	680	0.52	78	15	5050	2640
	pausing	10	300	11	130	31	27	0.88	38	0.0	250	25
Ca^{2+} ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	total stage	4.3	495	6.1	192	49.7	36.9	0.74	85	1.5	379	42.7
	excavating	4.3	495	6.1	192	46.7	33.9	0.73	67	1.5	54.9	18.7
	grouting	11.1	329	24.7	159	58.0	32.8	0.57	18	2.2	379	120
SiO_2 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	total stage	2.2	436	10.2	270	64.6	38.8	0.60	86	3.0	480	75.1
	excavating	2.2	120	10.2	108	50.7	13.9	0.27	68	3.3	480	18.7
	grouting	31.2	436	41.8	270	114	60.6	0.53	18	3.0	265	59.8
EC ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) (25°C)	total stage	155	6600	158	3017	392	473	1.21	56	0.0	5400	385
P alkalinity ($\text{mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$)	total stage	5	2350	10	877	139	183	1.32	54	3.0	2339	236

* Number of daily average data

** difference between the highest and the lowest value in a day

Fig. 1 Histogram of daily average volume of waste water discharged from tunnel construction site at its different working stages.

n : sample number of waste water volume in a day; $\bar{x}$: daily average; σ : standard deviation; b : modal interval

た。このことは他の掘削時と異なり、前工程における止水がかなり良好に行われていたためと考えられる。掘削工程の排水量は注入による止水状態によって著しく変動し、3回の掘削工程を通した日最大排水量は日最小排水量の約10倍であった。

注入工程における排水量の範囲は160~2050 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ となり、平均値は掘削工程に近い951±513 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ であった (Table 1)。Fig. 1によると、度数分布のピー

Fig. 2 Relationship between vertical tunnel depth and daily volume of waste water discharged at excavating and grouting stage.

クは排水量739.5±200 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ および1539.5±200 $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ の2カ所みられ、第1~第3回注入時期別の変化傾向 (Fig. 2) は、第1、第2、第3回の順に排水量が増加する傾向にあった。この変化傾向は、注入工程に用いる工事用水量は各工程ともほぼ同量であるので、す

でコンクリート打設した区間からの漏水（漏水箇所が増加と水圧の増加）によると考えられる。

「無作業」における排水量の範囲は $40 \sim 2340 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ と変化が大きく、平均値は $813 \pm 587 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ （変動係数0.72）であった。排水量のピークが2つになることも前2工程と同様であった。無作業期においてもなお高い排水量を示すのは漏水によるものであるが、何らかの対策を講じた上で「無作業」状態に入るので、他の2工程の場合よりも若干低くなっている。

以上の3工程の日排水量の検討から、LW工法における排水量の特徴は、いずれの工程においても排水量に2つのピークがあり、日最大排水量と日最小排水量の比は10～70倍と大きい。しかし、日最大排水量と平均排水量の比は2.2～2.9のほぼ一定値と試算される。

設計排水量は次のように考えられる。注入工法を採用せざるを得ないトンネル立坑工事の排水量を最初から予測することは極めて困難である。しかし、慎重に注入工法が施工されている場合には工事の進行に伴って、流量が増加する傾向にある（Fig. 2）。完成距離が長くなるに伴って漏水箇所が増え、かつ水圧が高くなるためである。このような傾向は立坑の特徴とみられるが、横坑（本坑）で水圧が上昇しなくても漏水箇所が増えるので同様の傾向になると思われる。

沈殿池の設計は、処理法から得られる水面積負荷率に基づいて排水量に対応して沈殿池容量が決まる。沈殿池の目的からすれば、時間最大排水量時にも水面積負荷率が確保されねばならない。しかし、経済性や調整池の設置により日最大排水量を基本にする程度で良いと思われる。日最大排水量は全工程、掘削工程、注入工程および無作業時で平均排水量のそれぞれ2.9, 2.8, 2.2, および2.9倍と試算される。また、 $(\bar{x} + 2\sigma) / (\bar{x})$ は全工程、掘削工程、注入工程および無作業時にそれぞれ2.2, 2.2, 2.1, 2.4と試算される。沈殿池設計排水量は平均排水量の2.5倍または $(\bar{x} + 2\sigma)$ 程度と見てよいと思われる。平均値の2.5倍は、 $(\bar{x} + 2\sigma)$ の1～1.2倍にあたる。全日排水量のうち2.3%が平均排水量の2.5倍を超える。

実際の処理装置の設計は、まず他工事の例などから平均排水量を予測し、その2.5倍量を設計流量とする。工事開始後、排水量データを蓄積し、排水量の増加傾向を勘案しつつ、平均値の2.5倍量を目安に処理施設を拡充していく方法が適当と思われる。

4.2 pH

pHが高いことは建設工事排水の重要な特徴の一つである。

全工程における日平均pHは7.5～13.2と広範囲にわたっており、その平均値は 10.5 ± 1.2 であった

（Table 1）。Fig. 3より、pH 11.2付近にピークがあり、平均値はこのピークより若干低かった。また、平均値は無作業、注入工程、掘削工程の順に高くなることが明らかである。全測定pH値の最小値と最大値はそれぞれpH7.3, 13.8であった。

次に1日の測定値の最大値と最小値の差をR（Range：範囲）として工程別に日平均pHとRの関係をまとめるとFig. 4が得られた。全工程におけるRの最大、最小および平均値はそれぞれ4.9, 0.2, 1.9となった。排水のpH範囲は1日のうちで日平均pH±

Fig. 3 Histogram of daily average pH and its range at different working stages.

Fig. 4 Relationship between daily average pH and its range at different working stages.

Range: difference between the highest and the lowest value of pH in a day

2.5のような大きな変動から日平均 $\text{pH} \pm 0.1$ のような一定したものまでばらつく。中でも掘削工程の平均 pH 、変動係数および R が最も大きい。(Table 1, Fig. 4) LW 排水の pH が弱アルカリ性から強アルカリ性を呈する原因は、注入とコンクリート打設の影響による。注入剤は、ケイ酸ナトリウムとセメントミルクを混合したものであり、この固化反応は次の3つよりなると考えられている¹⁰⁾。

(1)セメントの水和反応。

(2)セメント起因の Ca^{2+} がケイ酸ナトリウムの Na^+ と置換し、架橋して大きな分子となる反応。

(3)ケイ酸ナトリウムの Si-OH 結合から H_2O を放出し、 O-Si-O と連結し高分子化して三次元網目構造を作る反応。

(1), (2)の反応により Ca(OH)_2 と NaOH が放出され、未反応のケイ酸ナトリウムも溶出することが pH を上昇させる原因となっている。また pH のバラツキの大きさは、作業内容の変化によると考えられる。

測定値には $\text{pH}13$ を超える例があるが、筆者らのホモゲルを水道水中に浸漬した実験において、浸漬液の pH がしばしば13を超えるところから、本調査において測定値が13を超えても不合理ではないと思われる。工程別の特徴は次のようである。

掘削工程における日平均 pH は、 $\text{pH}11.0 \sim 12.0$ の間に約50%があり (Fig. 3)、3工程のうち最も高い。高 pH となる原因は、注入ゾーンの掘削によりセメント・水ガラスの固結物と未固結物が排水に混入したことや、コンクリート打設によりセメント粒子が排水に混合しアルカリ成分が溶出したためである。

注入工程における日平均 pH は、約65%が $\text{pH}9.5 \sim 11.0$ の間にあった。注入工程の pH の平均値は掘削工程に比べ $\text{pH}1.1$ 低く、全工程の平均値より0.3低くなった。注入材のリーク時および注入器材の洗浄時において SiO_2 濃度が掘削時よりも高いにもかかわらず、掘削工程のように $\text{pH}12$ 以上にはならなかった。このことは掘削時に比して注入時には排水へのセメント粒子の混入量が少なく水ガラスが多いため、水ガラスによる pH 緩衝作用(アルカリ性でケイ酸イオンのケイ素の配位数は水酸基が加わることに増加するため¹¹⁾) によると推察される。

無作業時の日平均 pH は約63%が $\text{pH}8.5 \sim 8.9$ の間にあった。強アルカリ性の出現頻度は非常に低い。一部高アルカリ性を呈する原因は、前日の作業(掘削、注入等)の影響が残っていたことによると考えられる。

pH 調整とその装置において配慮すべきことは次のように考えられる。酸消費量は懸濁液の pH のみでできず、懸濁液に含有するセメント粒子やセメント・

水ガラス反応固結物などのアルカリ発現粒子濃度にも配慮する必要がある。たとえばセメント粒子のみが混在する場合の pH は最大12.8であるが、酸所要量はセメント粒子の濃度によって増加するので、アルカリ発現物質の濃度が酸貯留槽と酸供給装置の算定に重要な要素となるからである。アルカリ発現固形物が混在する排水の pH 調整のための酸所要量の算定には固形物が入るだけ不確定要素が増えることになる。したがって、高アルカリ性でかつアルカリ発現粒子が混在する排水の処理法としては、酸消費量およびその pH 調整の困難さから、少しでもアルカリ発現粒子を除去した後に pH 調整するようにすべきである。どのような酸で pH 調整するにしても、排水を最初に pH 調整しようとするればその方法と装置は掘削工程の最高 $\text{pH}13.8$ に対応できる能力が必要である。しかし、その頻度は小さく、 $\text{pH}13.1$ より大きい頻度は2.1%であるため掘削時の $\bar{x} + 2\sigma$ の $\text{pH}13.1$ に対応できる程度で良いのではないかと思われる。なお2.1%については、施工管理と一時的な対応策に配慮しなければならない。また排水処理施設の運転管理における pH 調整は掘削時に最も注意が必要であり、無作業時には前工程の影響を少なくすれば多くは無処理でよいことがわかる。

4.3 濁度

Table 1によると、全工程における日平均濁度は11~5000TUの広範囲にわたっており、平均値は $1390 \pm 1090\text{TU}$ を得た。濁度のピークは、濁度 $210.5 \pm 200\text{TU}$ の間(全体の約27%)と $1410.5 \pm 200\text{TU}$ の間(全体の14%)にみられた (Fig. 5)。低濁度で度数が多いのは主に無作業の場合で、掘削および注入工程においては高濁度となっている。1日の測定値の中での濁度の範囲(R)は、平均値が大きいほど大きくなる傾向があった (Fig. 6)。工程別の特徴は次のようである。

掘削工程における平均濁度は $2020 \pm 1110\text{TU}$ であり、約50%が濁度1000~2500TUの間にあった。平均値は、全工程の平均値より630TU高く、掘削工程においては高濁の排水となることがわかる。濁質は主に掘削後のズリ出しに伴う注入固結物および土砂であった。掘削工程における大きな濁度のバラツキは、作業内容の激しい変化によると考えられる。

注入工程における平均濁度は $1300 \pm 680\text{TU}$ であった。注入工程における濁質は主に水ガラスとセメント中の成分との反応生成物(ケイ酸カルシウム等で、水ガラスとセメントとのバランスで反応生成物量が変わる)、セメント粒子、水ガラスゲル、および土砂であり、排水は乳白色になることが多かった。

無作業においては、他の工程に比して極度に低濁度であり、日平均濁度はすべて130TU以下となり、特に

Fig. 5 Histogram of daily average turbidity of waste water at different working stages. TU: Turbidity unit

Fig. 6 Relationship between daily average turbidity and its range at different working stages.

Range: difference between the highest and the lowest value of turbidity in a day

30TU 以下が約80%を占めた。

建設工事排水の処理においては着実な除濁が最も重要な条件の一つである。処理施設設計のための原水の濁度は、掘削工程の $\bar{x} + \sigma$ (約68%値) である約3100TU程度が適当と思われる。高濁度 (3000~5000TU) の排水については、アルミニウムの凝集処理であれば一般にわずかのアルミニウム量で対応できると思われる。

また低濁時、特に無作業時には多くの排水が無処理でよいことが示唆された。

4.4 Ca^{2+} 濃度

セメントを材料としている場合には排水中の Ca^{2+} 濃度が高いと考えられ、空気中の炭酸ガスとの反応によって CaCO_3 起源の白濁の可能性があるため Ca^{2+} 濃度を調査対象とした。

Fig. 7 は日平均 Ca^{2+} 濃度のヒストグラムである。全工程における日平均 Ca^{2+} 濃度範囲は $6.1 \sim 192 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であり、平均 Ca^{2+} 濃度は $49.7 \pm 36.9 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。日平均 Ca^{2+} 濃度は低濃度に偏った分布 (Fig. 7) を示し、 $66 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下が約80%を占めた。また全測定値の範囲は $4.3 \sim 495 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。

地下水の Ca^{2+} 濃度は、各地の地層によりバラツキがあるが、一例として $20 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 前後¹²⁾ とのデータがある。本工事における排水中の Ca^{2+} 濃度が地下水に比べ遙かに高い例があることは、打設コンクリートや注入材に用いるセメントに起因し、 Ca^{2+} 濃度は湧水量の他にセメントの量、種類、および水ガラスとの反応状態によって変化するためと考えられる。工程別の特徴は次のようである。

掘削工程の日平均 Ca^{2+} 濃度は、全頻度の約70%が $66 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下に偏った分布を示した。掘削工程で Ca^{2+} 濃度が高い原因は、注入ゾーンの掘削やコンクリート打設により Ca^{2+} が多く溶出するためと考えられる。

注入工程における日平均 Ca^{2+} 濃度は $24.7 \sim 159 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ となり、その平均 Ca^{2+} 濃度は $58.0 \pm 32.8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。注入工程は掘削工程と同様に $66 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 以下に偏った度数分布 (この間で全体の67%) を示したが、掘削工程に比べ平均値で $11.3 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ 高い Ca^{2+} 濃度

Fig. 7 Histogram of daily average concentration of calcium ion in the waste water at different working stages.

となり (Table 1), 濃度範囲が狭く, バラツキが小さかった。

高炉コロイドセメントの CaO 含有率は約54wt%である。 CaO の溶解度は約 $890\text{mgCa}^{2+}\cdot\text{l}^{-1}$ (20°C) であることからみると, 突発的に $495\text{mgCa}^{2+}\cdot\text{l}^{-1}$ が検出されているものの, いずれの工程においても比較的低濃度である。また最小濃度 (測定値最小 $4.3\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) は一般的に考えられる地下水の Ca^{2+} 濃度 $20\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ よりもかなり低い。この原因として, 排水中の Ca^{2+} が炭酸カルシウムやケイ酸カルシウムなどとして沈殿したことが考えられる。

どのような処理法が採用されるにしても, Ca^{2+} が除濁に対しマイナスに働くことは少ないだろう。しかし, 高 pH 下で Ca^{2+} が約 $80\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ を超えると, 空気中からの CO_2 供給が十分であれば pH 7 でも CaCO_3 起源の白濁が残る¹³⁾ 可能性がある。しかし, この白濁は Al 塩で容易に沈殿除去できよう。

4.5 S.SiO₂濃度

S.SiO₂ は, 硫酸アルミニウムを用いたカオリンの凝集に著しい阻害を与え, $200\sim 300\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 以上で魚毒性を示すことから調査対象とした。

全工程における日平均 S.SiO₂ 濃度は $10.2\sim 270\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ と広範囲にわたっており, その平均値は $64.6\pm 38.8\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。日平均 S.SiO₂ 濃度のバラツキをみると, $40\sim 70\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の間の出現頻度が高く全体の約63%を占め, 低濃度に偏った分布 (Fig. 8) を示した。また全測定値の範囲は $2.2\sim 436\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。

ケイ酸は自然界に多量に存在し, 水中のケイ酸は単分子状の溶解性シリカとコロイド状シリカに分けられ

るが, 主に溶解性シリカとして存在する。したがって, S.SiO₂ 量は Ca^{2+} と同様地下の各地の地層によりバラツキがあるが, その濃度はおおよそ数十 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 程度¹²⁾ とされている。

本工事において, 注入剤として水ガラスを用いているため排水中の S.SiO₂ 濃度が高くなることが予想された。極低濃度から高濃度まで変動するのは, 水ガラスがセメントと反応するため, 両者の量的バランスに起因すると考えられる。たとえばセメントが多い場合, S.SiO₂ 濃度は Ca-Si 化合物の析出 (LW の基本反応) により地下水よりも低くなることも考えられる。工程別の特徴は次のようである。

掘削工程における日平均 S.SiO₂ 濃度範囲は $10.2\sim 108\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ となり, 平均値は全工程平均値に比べ約 $14\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ 低い $50.7\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ であった。また, 日平均 S.SiO₂ 濃度は約76%が $30\sim 66\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の間にあった。大部分の排水は注入工程よりも低濃度で安定している。掘削工程では, すでに水ガラスとセメントが反応している注入ゾーンを掘削するためである。しかし, 一部 S.SiO₂ 濃度に高低のバラツキがみられることは既存注入ゾーンに未反応水ガラスが若干残留していたために高くなったり, コンクリート打設等で用いたセメントと排水中の S.SiO₂ が反応して低くなったりしたためと考えられる。

注入工程では掘削工程よりも日平均 S.SiO₂ 濃度範囲は広く, 平均値は掘削工程の2.25倍であった。特に, 注入中の水ガラスのリークおよび作業後の水ガラス容器ならびに機器の洗浄時に高くなる傾向がみられた。注入工程における最大 S.SiO₂ 濃度は $436\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (Table 1) に達した。

排水中の S.SiO₂ 濃度は注入工程における水ガラスのリークや器具の洗浄等において十分な管理を行えば低濃度におさえ得ることが示唆された。また突発的な高濃度を除けばニジマスに対する急性毒性を示すような濃度 ($96\text{h LC}_{50}=281\pm 19\text{mg S.SiO}_2\cdot\text{l}^{-1}$ とされている⁴⁾) に達しないと予想される。しかし, 全工程の平均値 $64.6\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ あるいは注入工程の平均値 $114\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ の混入は, 硫酸アルミニウムによる凝集の至適 pH 範囲を低下させ, 硫酸アルミニウム所要量を増加させることになる。そこで設計 S.SiO₂ 濃度は注入工程を基本に $\bar{x}+2\sigma=230\text{mg S.SiO}_2\cdot\text{l}^{-1}$ を一つの目安とするのが適当と思われる。

4.6 EC と P アルカリ度

EC は農業用水 (水稻) の目安としての値が $300\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (25°C)¹⁴⁾ であり, P アルカリ度は pH 調整のための酸所用量を求めるために調査対象とした。

EC と P アルカリ度のデータは上述の調査期間と作

Fig. 8 Histogram of daily average concentration of soluble silicate in the waste water at different working stages.

業内容も異なっていたのでこれまでのデータと対応させて比較はできないが、水質管理に対する知見は得られると思う。

ECは $\bar{x} + \sigma$ で $865 \mu S \cdot cm^{-1}$ (25℃)となり、56個の測定値の最大値と最小値はそれぞれ 6600 と $155 \mu S \cdot cm^{-1}$ (25℃)であった。農業用水(水稻)の目安としてのEC値より高いものが高頻度で出現することがわかる。

Pアルカリ度の大きさは中和剤の所要量の目安になる。Pアルカリ度の $\bar{x}$ は $139 mg CaCO_3 \cdot l^{-1}$ 、日平均値の最大値は平均値の6.3倍、測定値の最大値は平均値の16.9倍に達した。中和は着実に行わなければならないので、酸供給設備は $\bar{x} + 2\sigma$ として $505 mg CaCO_3 \cdot l^{-1}$ を中和する能力を有することが適当と思われる。 $\bar{x} + 2\sigma$ を超えるものは5.6%であった。5.6%の高Pアルカリ度については、pHの場合と同様に配慮が必要である。

ECとPアルカリ度の全測定値の最大値はそれぞれ $6600 \mu S \cdot cm^{-1}$ (25℃)、 $2350 mg CaCO_3 \cdot l^{-1}$ と大きく、工程管理に重大な配慮が必要であることが理解される。

4.7 各測定項目間の関係

本排水の特徴をみるため各測定項目間の関係をみたところ、pHと濁度の間に相関(相関係数0.7)がみられ、他の組み合わせ(排水量とpH、pHと Ca^{2+} など)では相関係数は0.3以下と低かった。そこで、pHと濁度の関係と、相関係数は0.3以下であったが特に工程の特徴をみるため Ca^{2+} 濃度とS.SiO₂濃度の関係をみた。

4.7.1 日平均 pH と日平均濁度の関係

本工事は、セメントおよび水ガラスのように高アルカリ性物質を注入し、注入ゾーンを掘削するため、排水中にセメント、水ガラスおよびそれらの反応物が混入する。したがって、濁度の上昇に伴うpHの上昇がみられるのではないかと予想した。その結果、Fig. 9に示すような正の相関がうかがえたが、相互の相関関係は低かった。

Fig. 9にみられるように、本工事排水の場合、高濁度・高pHおよび低濁度・低pHと幅広い分布を示したが、特に日平均pH10以上で日平均濁度1000TU以上となる排水が多く、全体の約50%を占めた。

次に各工程別にみると、掘削工程における排水は、一般に高pH(日平均pH10~12)・高濁度(日平均濁度1000~2500TU)となり、特に掘削中には、日平均pH12付近で日平均濁度4000~5000TUとなることがあった。注入工程における排水は、掘削工程に比べpHおよび濁度とも若干低く、日平均pHは10、日平均濁度は1500TU付近が多い。無作業の場合、日平均pHは7.5~9.6とバラツキがみられたが、日平均濁度は130TU以下と低い値であった。

4.7.2 日平均 Ca^{2+} 濃度と日平均 S.SiO₂ 濃度の関係

Fig. 9 Relationship between daily average value of pH and turbidity in the waste water at different working stages.

注入工事はCa-Siの反応を利用するため、各工程ごとにCaとSiの関係に特徴が見い出されることが予想された。工程別のCa-Si濃度の関係(Fig. 10)によると弱い負の相関がみられ、工事内容を表す傾向がうかがえた。すなわち掘削工程の場合、 Ca^{2+} 濃度と平均S.SiO₂濃度が同時に高くなることはなかった。これは一部コンクリート打設等による Ca^{2+} 濃度の上昇が考

Fig. 10 Relationship between daily average concentration of calcium ion and soluble silicate in the waste water at excavating and grouting stages.

Table 2 A guideline recommended from the results of this study for designing the waste water treatment plant in tunnel construction using chemical grouting of water glass and cement

Item	Construction Stage	Recommended guideline
volume of waste water	excavating	2.5 times of average of discharged waste water
pH	excavating	13.1 ($\bar{x} + 2\sigma$)
Turbidity	excavating	3100 TU ($\bar{x} + \sigma$)
Ca ²⁺	grouting	—
S.SiO ₂	grouting	230 mg SiO ₂ · l ⁻¹ ($\bar{x} + 2\sigma$)
Electric Conductivity	Total stage	870 μ S · cm ⁻¹ (25°C) ($\bar{x} + \sigma$)
P Alkalinity	Total stage	500 mg CaCO ₃ l ⁻¹ ($\bar{x} + 2\sigma$)

$\bar{x}$ = average

σ = standard deviation

えられる場合でも、S.SiO₂はCa²⁺と反応して不溶性のカルシウム塩となるため、その濃度は非常に低い濃度となる。一方、注入工程においては排水中に未反応水ガラスが混入するため、S.SiO₂濃度が高く、Ca²⁺濃度が低い排水となる傾向があった。Fig. 10 から、排水は高Ca²⁺濃度で高S.SiO₂濃度となることはなく、特に平均Ca²⁺濃度100mg · l⁻¹以下でS.SiO₂濃度80mg · l⁻¹以下となる頻度が高かった。このような現象は、日平均のCa²⁺とS.SiO₂濃度がセメントと水ガラスの使用量と反応状態に左右されるためと考えられる。

4.8 処理施設の設計条件の目安

以上の調査結果から、処理施設設計において対象とすべき工程と、その水量特性と水質はTable 2 のようにまとめられた。

5. ま と め

LW工法を採用しているトンネル工事の現場排水について、掘削工程、注入工程および無作業時にわけて水量と水質を調査した。それらの特徴と処理施設設計の条件について次の知見が得られた。

- (1) 水量、pH、濁度、Ca²⁺、S.SiO₂、ECおよびPアルカリ度の調査結果はTable 1に示した通りであった。
- (2) 各工程の日最大排水量は平均排水量の2.2~2.9倍のほぼ一定値を示した。3工程のうち、掘削工程における日最大および平均排水量が最も大きく、設計流量は掘削工程における平均値($\bar{x}$)の2.5倍または($\bar{x} + 2\sigma$)程度が一つの目安と考えられる。
- (3) 全工程における日平均pHは7.5~13.2であり、その平均値は10.5±1.2、最高頻度は11.2付近であった。3工程のうち掘削工程の平均pHが最も高く(11.3±

0.9)、変動も最大である。設計pHは掘削工程のpHをとり $\bar{x} + 2\sigma$ とすると、pH13.1程度が適当と考えられる。

(4) 全工程における日平均濁度の範囲は11~5000 TU、その平均値は1390±1090TUであり、3工程のうち掘削工程の濁度が最も大きく、2020±1110TUであった。適当な処理装置設計濁度は掘削工程の $\bar{x} + \sigma$ をとると約3100TUと考えられた。

(5) 全工程における日平均Ca²⁺濃度は6.1~192mg · l⁻¹、その平均値は49.7±36.9mg · l⁻¹であり、掘削工程で最も高い。

(6) 全工程における平均S.SiO₂濃度は64.6±38.8 mg · l⁻¹であり、注入工程で最も高い。設計・維持管理において考慮すべきS.SiO₂濃度は注入工程の $\bar{x} + 2\sigma = 230$ mg · l⁻¹が適当と考えられる。

(7) ECとPアルカリ度の平均値はそれぞれ400±470 μ S · cm⁻¹(25°C)、140±180mgCaCO₃ · l⁻¹程度とみられ、変動が著しく大きい。

(8) 排水処理施設設計の水量と水質はTable 2に示した値が1つの目安と考えられた。

(9) 工程ごとに水量と水質に特徴があり、それに適応した処理装置の運転維持管理が望ましいことが明らかとなった。

本研究は、一つの工事現場での調査結果であり、今後類似の工事排水調査によるデータの集積が必要である。

(原稿受理 昭和63年5月7日)

引用文献

- 1) 建設省官技発第160号(1974)。
- 2) 坪井直道(1982)薬液注入工法の実例、鹿島出版、36-41、東京。
- 3) 丸山俊朗、宮根正樹、平石博忠(1988)水ガラスを含むカオリン懸濁液の硫酸アルミニウムによる凝集特性、水質汚濁研究、11、381-389。
- 4) 丸山俊朗、隆島史夫、吉田多摩夫(1983)ニジマスに及ぼすケイ酸ソーダの急性毒性と排水処理法について、第17回水質汚濁学会講演集、331-332。
- 5) 社団法人日本トンネル技術協会(1980)上越新幹線建設に伴うトンネル湧水対策に関する調査報告書、151。
- 6) 社団法人日本建設機械化協会(1985)建設工事に伴う湧水対策ハンドブック、159-188。
- 7) 小林勲、岩崎光美、今野昭三(1978)建設工事における湧水・泥水の処理方法、鹿島出版、28-29、東京。
- 8) 日本規格協会(1966)工業用水試験方法 (JIS K0101)。
- 9) 日本規格協会(1981)工場排水試験方法 (JIS K0102)。
- 10) 社団法人日本トンネル技術協会(1980)上越新幹線建設に伴うトンネル湧水対策に関する調査報告書、135-136。
- 11) G. Alexander、井上勝也訳(1971)シリカと私、東京化学同人、84、東京。
- 12) 山本莊毅(1983)地下水調査法、古今書院、381-395、東京。
- 13) 丸山俊朗(1981)土木工事に伴う排水処理、土木学会北海道支部、121。
- 14) 農業水利研究会(1980)日本の農業用水、地球社、135-138、東京。

懸濁液型水ガラス系注入剤を用いたトンネル工事排水の水量・水質特性

宮根 正樹* 丸山 俊朗** 平石 博忠*

* 佐藤工業株式会社 ** 東京水産大学

〈水質汚濁研究 Vol.11 No.7 (1988) pp.442～450〉

懸濁液型水ガラス系薬液注入工法を採用している工事現場排水の水量と水質の特性を掘削工程，注入工程，および無作業時について調査し，排水処理施設設計の計画排水量と水質について次の知見が得られた。①日最大排水量は掘削工程で出現し，日最小排水量の約10倍に達した。②pHと濁度は掘削工程で最も高く，日平均値±標準偏差はそれぞれ 11.3 ± 0.9 ， 2020 ± 1110 濁度単位であった。溶解性シリカとカルシウムイオンは注入工程で最も高く，それぞれ $114 \pm 60.6 \text{ mgSiO}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ ， $58.0 \pm 32.8 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ であった。③全工程におけるP・アルカリ度と電気伝導度はそれぞれ $139 \pm 183 \text{ mgCaCO}_3 \cdot \text{l}^{-1}$ ， $392 \pm 473 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ (25°C)に近いと推測された。④無作業時の排水はpH調整のみで放流できる。⑤排水処理施設の設計基準値として，排水量は掘削工程の日平均排水量の2.5倍，pHは11.3，濁度は3100濁度単位，溶解性シリカは $230 \text{ mgSiO}_2 \cdot \text{l}^{-1}$ が適当と考えられた。

散気性能測定におけるガス収支法と亜硫酸ソーダ法との比較

笠倉 忠夫* 水野 朝夫*

* 日本ガイシ株式会社エンジニアリング事業本部開発部

〈水質汚濁研究 Vol.11 No.7 (1988) pp.451～456〉

非定常下の標準的散気性能測定法である「亜硫酸ソーダ法」の測定過程で，「ガス収支法」の手法を適用することによって，通気排ガス中の酸素濃度変化を測定することができる。亜硫酸ソーダ法測定の初期段階では，液中の溶存酸素濃度が急速に零に達するのに対して，排ガス中の酸素濃度はゆっくり減少して最低値に達する。総括酸素移動容量係数 KL_a ，または溶存酸素濃度 $C = 0$ における酸素溶解効率 η_0 を，この最低酸素濃度 z_m から導くことができるのである。

磁器製散気板の散気性能測定実験を行い，実験結果から得られた同一条件下のガス収支および亜硫酸ソーダ両法の値を比較し，統計学的検定の結果両者が一致することがわかった。実操業下の性能測定法としては現実的にはガス収支法しかないので，ここに得られた結論は実際のエアレーションタンクでの測定に対して大きな意味をもつと考えられる。