

薬液注入工法における施工管理に関する研究（その5）

——注入材分布から見た注入工法の比較——

川 地 武 喜 田 大 三

Studies on Performance Control of Chemical Grouting (Part 5)

——Comparison of Grouting Methods Based on Distribution of Grouting Material——

Takeshi Kawachi Daizo Kita

Abstract

Test grouting was carried out at a shield tunnel construction site to determine a suitable chemical grouting method. The results obtained were as follows. (1) For a silty sand layer, the “Limit Area Grout (LAG)” method is effective for consolidation, and the SOLETANCHE method is effective for both consolidation and reduction of permeability. For coarse sand and sand-gravel layers, an alternating injection grouting method and a multi-tube grouting method (SIMULSION method) are effective from both standpoints, but a single tube method is inadequate. (2) Vertical distributions of grouting materials are shown to vary considerably with the single tube and LAG methods, but indicate a fairly homogeneous pattern with the SOLETANCHE method. With the alternating injection grouting and SIMULSION methods, the variations are considerable in a sand-gravel layer. (3) Springing occurred at a part of the area of full-fledged grouting by the SIMULSION method, and the cause of this was found to be insufficient penetration of grouting material.

概 要

土質、施工条件が複雑に変化するシールド工事において適切な注入工法の選定が望まれた。そこで、5種の注入工法について試験注入を行ない、各工法の効果を確認するだけでなく注入材の分布性状を調査した。また、本注入区間の一部で発生した湧水の原因について検討し以下の結果を得た。(1)シルト混り砂を対象とした二重管瞬結工法は強度増加に有効であり、ソレタンシュ工法はさらに止水性向上にも有効である。粗砂、砂礫を対象とした3種工法のうち、交互注入工法、複合注入工法は強度、止水性ともに向上させるが、単管ロッド工法はいずれの効果も不十分である。(2)各工法の注入材の垂直方向の分布は単管ロッド、瞬結の工法ではバラツキが大きいが、ソレタンシュ工法では均一な分布を示す。交互注入、複合注入の各工法は粗砂層にはかなり均一だが砂礫層ではバラツキが大きくなる。(3)本注入で採用した4工法のうち、複合注入の区間の一部で湧水が発生し、その原因は切羽の一部に生じた薬液の浸透不良と推察された。

1. はじめに

薬液注入工法による地盤改良は広く普及しているが、その効果の予測方法は現在各方面で検討されている。筆者らはこの数年、注入工法の設計、施工を合理化するうえで、注入した薬液の地盤内における挙動を明らかにすることが不可欠と考え、注入地盤内の注入材の分布状況を調査してきた^{1),2)}。先般、シールド工法の補助工法として薬液注入工法が採用される現場において、施工条件、土質に応じて注入工法を選択することになった。その際、最新の工法も含まれることもあって試験注入を行ない、各種注入工法の地盤改良効果だけでなく、地盤内の注入

材分布状況を調査した。また、シールド掘削中の掘削切羽の安定、湧水の状況を調査するとともに切羽における注入材の分布との関連を検討した。これらの結果は今後の注入工法の設計あるいは施工管理に貴重と思われるものを含んでいるので、以下に調査の概要を紹介する。

2. 工事現場の概要

2.1. 工事と注入の目的

工事は下水幹線管渠をシールド工法によって建設するもので、その諸元は次の通りである。

シールド延長 733 m

掘削径 2.2 m, 仕上り径 1.5 m

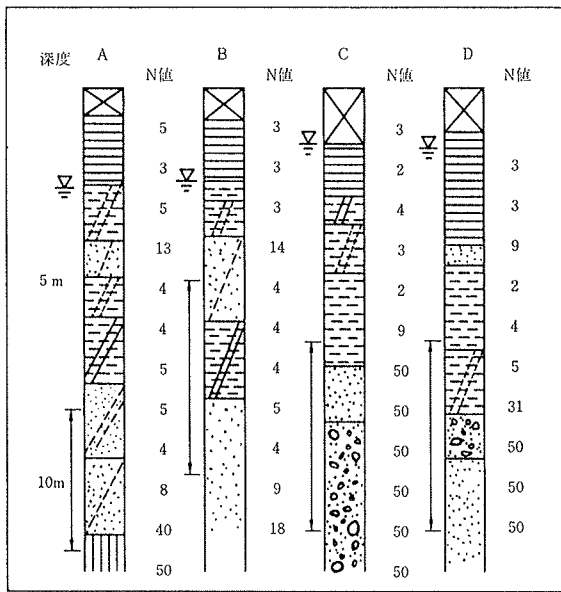
土被り 8~10 m

掘削形成式 手掘り(低圧気併用)

路線は地下鉄、県道、河川などを横断し、また地上部には民家が密集しているため、構造物の防護、地表沈下の防止は不可欠の課題とされた。土質は後述のように透水性の大きい洪積砂層を主体とし、湧水の防止が必要とされた。これらを考慮して、砂層、砂礫層掘削区間では止水性の向上、シルト質土層掘削区間では強度増加を主目的として注入工法を採用した。

2.2. 土質

土質は注入区間約 280 m のうちでかなり変動し、上に示す土質柱状図の A から D へと変化する。注入区間の当



図一 土質柱状図 (矢印は注入範囲)

初はシールド切羽の土質は沖積層のシルト質砂、砂であり N 値は低く、強度増加が求められる。注入区間の中盤以後は柱状図の C, D となり、洪積層の砂、砂礫が掘削の対象となる。これらの層は透水係数が 10^{-3} cm/sec のオーダーにあり、滞水層を形成している。

2.3. 注入工法

当現場の土質、施工条件の多様性、経済性等を考慮して、以下に示す 4 種の注入工法の採用を考えた。各注入区間で採用する注入工法の種類は試験注入の結果を見て判断することとした。

A. 二重管式瞬結工法 (LAG 工法)

B. 二重管式ダブルパッカー工法(ソレタンシュ工法)

C. 二重管式交互注入工法(瞬結性薬液 (S) と緩結性薬液 (L) を 1 ステップごとに交互に注入する工法)

D. 多重管式同時複合注入工法(注入ロッドの上部吐出口から瞬結性薬液 (S), 下部吐出口から緩結性薬液 (L) を同時に注入する工法)

3. 試験注入

3.1. 注入計画

試験注入の概要を表一に示す。表中にあるように、上述の 4 工法と比較するため単管ロッド注入も行なっている。注入率は 38% を中心にしている。注入孔は 4 孔あるいは 5 孔で、中心に貫入試験等を行なう調査孔を設けている。交互注入工法、複合注入工法ではコアボーリング孔も配している。なお、複合注入工法は瞬結性薬液と緩結性薬液の比を任意に設設できるが、今回の試験注入では 1:1 および 3:2 を採用した。

3.2. 注入施工

注入時の圧力チャートの例を図二に示す。二重管瞬結工法では注入深度と無関係にほぼ 10 kgf/cm^2 の圧力を示すのに対し、交互注入、複合注入、単管ロッド注入の各工法ではステップアップするにつれて注入圧が減少し、土被りの影響を強く受けている。ソレタンシュ工法では各ステップ内、ステップ間の圧力差が大きく、スリーブグラウトおよび先行して注入した一次注入の CB(セメントベントナイトミルク) の硬化体を割裂するのに高圧を必要としていることを示している。なお、注入は 4 孔あるいは 5 孔で行なっているため、当初の注入孔と最

注入工法	二重管瞬結工法	ソレタンシュ工法	交互注入工法	複合注入工法	単管ロッド工法
注入材	PG-3 (GT:3秒前後)	CB RSG-III (GT:60分前後)	エヌタイト 5S-1 (GT:5秒前後) エヌタイト 1 (GT:3~6分)	サイマル 1号 (GT:5秒) サイマル 1号 (GT:3~10分)	エヌタイト 3号 (GT2~3分)
注入率	35, 38, 41%	CB 5% RSG III 38%	35, 38, 41%	35, 38, 41%	41%
注入速度	12 l/min	10 l/min	15 l/min	瞬結 8 l/min 緩結 8 l/min	20 l/min
1ステップ長	連続回転(8rpm)	33.3cm	50cm	25cm	50cm
注入範囲	GL -8.0~10.7m	GL -4.856~9.600m	GL -6.3~11.044m	GL -6.3~11.044m	GL -6.3~11.044m
注入対象土	沖積砂層(細砂)		洪積砂層(粗砂), 砂礫層		
注入孔配管 ● 調査孔 ○ コアボーリング孔	1,000 1,000	1,000	1,000 1,000	1,000 1,000	1,000 1,000

表一 試験注入一覧表

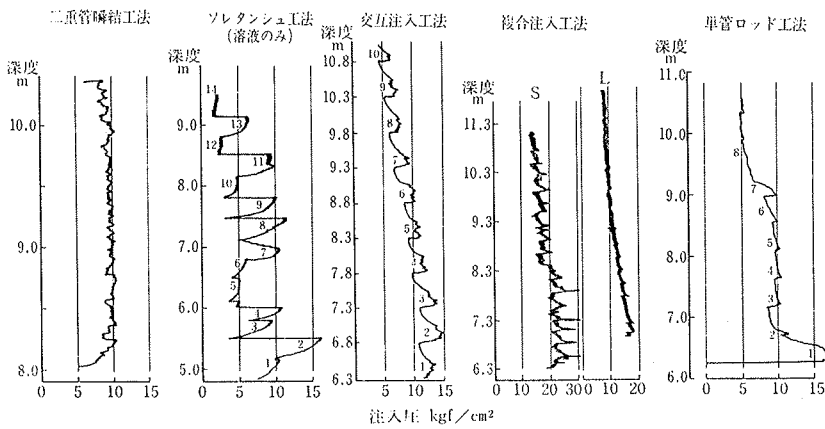


図-2 各注入工法の圧力チャートの例 (チャートの添字はステップ数)

終の注入孔では圧力パターンが変化するとと思われるが、このような現象が認められたのは交互注入、複合注入、単管ロッド注入工法である。これらの工法では後行の注入孔では先行のものより注入圧が高くなり、隣接注入孔から薬液が浸透してきていることを示している。

3.3. 注入効果

(1) 標準貫入試験 表一2に注入効果をまとめて示している。貫入試験によるN値は注入対象土の土質が工法によって異なるので全工法を比較することはできないが、シルト質砂に対しては二重管瞬結工法、ソレタンシュ工法が効果があり、特に後者ですぐれている。砂質シルトに対しては交互注入工法、複合注入工法とも余り効果的とは言えない。洪積層の粗砂、砂礫は注入前からN値が50以上であるが、換算N値で示せば各工法とも効果があり、特に複合注入工法の効果がすぐれている。各工法ともに、注入効果と注入率との関係は必ずしも明瞭ではない。

(2) 土質試験 注入前の土質試験データが砂を主体とするため得られないが、 qu は 0.2 kgf/cm^2 以下と思われる。これに対し、注入後はいずれの工法でもかなりの値を示し、特に高い値を示すのが複合注入工法、低い値を示すのが単管ロッド工法である。また、三軸圧縮試験の粘着力 C は $0.12 \sim 0.95 \text{ kgf/cm}^2$ と広く分布し、 qu/C は粗砂で $2.9 \sim 3.9$ に分布し、平均 3.3 である。内部摩擦角 ϕ は粗砂で 30° 前後のものが多い。

(3) 現場透水試験 試験はシルト混り砂、粗砂、砂礫

の各層で行なった。シルト混り砂は当初から 10^{-4} cm/sec のオーダーにあるが、二重管瞬結工法では必ずしも十分な効果は得られず、これに対し、ソレタンシュ工法では十分な値となる。粗砂に対する注入効果はいずれの工法でも認められるが、単管ロッド工法では目標の 10^{-5} cm/sec オーダーには及ばない。また、砂礫に対しても半分以上の区で 10^{-5} cm/sec オーダーまでの低下が見られる。これらの止水効果と注入率の関係は必ずしも明瞭ではない。

以上の注入効果を総合的に考えると、沖積砂層の改良を目的に設定した二重管瞬結工法とソレタンシュ工法では後者の方がすぐれ、粗砂、砂礫の改良を目的とした交互注入工法と複合注入工法では、やや後者の方がすぐれているといえる。なお、複合注入工法で強度増大効果が特にすぐれている理由には、本工法ではホモゲル強度の大きい注入材を用いていることがあげられる。また、複合注入工法では瞬結性薬液(S)と緩結性薬液(L)の比率の影響も検討しているが、 $1:1$ と $3:2$ では効果に有意な差は認められない。

3.4. 薬液の浸透状況

今回の試験注入では交互注入、複合注入の区ではコアボーリングを行ない、各土層における薬液の浸透状況を観察することができた。すなわち、得られたコアを二つ割りして内部への脈の入り具合、フェノールフタレイン

工 法	注入区	設定注入率	標準貫入試験 N値	現場透水試験		土 質 試 験				備 考	
				土 質	透水係数 cm/sec	土 質	$qu \text{ kgf/cm}^2$	$C \text{ kgf/cm}^2$	ϕ		$\gamma \text{ g/cm}^3$
注入前			シルト質砂 4~5 砂質シルト 5 砂礫、粗砂 $N > 50(75)$	砂礫 粗砂	3.9×10^{-3} 3.9×10^{-3} 5.3×10^{-4} 8.6×10^{-4}	シルト混り砂				1.75	
二重管瞬結工法	A-1	35.6%	シルト質砂 9	シルト混り砂	1.0×10^{-4}	シルト質砂	0.76	0.35	12.3°	1.72	
	-2	38.6%	シルト質砂 7	シルト混り砂	4.2×10^{-5}	シルト質砂	1.37	0.44	25.1°	1.74	
	-3	41.7%	シルト質砂 7	シルト質砂	1.2×10^{-4}	砂質シルト	1.05	0.44	9.2°	1.73	
ソレタンシュ工法	B	43.1%	シルト質砂 13	シルト混り砂	4.0×10^{-5}	シルト混り砂	1.65	0.55	22.9°	1.84	
交互注入工法	C-1	35.0%	砂質シルト 効果なし 砂礫、粗砂 187	砂礫 粗砂	5.2×10^{-5} 4.1×10^{-4}	粗砂	1.03	0.35	30.2°	1.95	
	-2	38.0%	砂質シルト 効果なし 砂礫、粗砂 100	砂礫 粗砂	8.9×10^{-4} 9.4×10^{-5}	"	0.94	0.32	28.9°	1.93	
	-3	41.0%	砂質シルト 10 砂礫、粗砂 166	粗砂	5.5×10^{-4} 7.8×10^{-5}	"	1.21	0.41	30.2°	1.99	
	S-1	35.0%	砂質シルト 7 砂礫、粗砂 89	砂礫 粗砂	3.2×10^{-5} 6.0×10^{-4}	粗砂	2.03	0.58	32.1°	2.00	瞬結(S)と緩結(L)の比1:1
	S2-1	38.0%	砂質シルト 20 砂礫、粗砂 169	粗砂	5.2×10^{-5} 9.0×10^{-5}	"	2.86	0.79	31.5°	2.10	1:1
	-2	38.0%	砂質シルト 効果なし 砂礫、粗砂 125	砂礫 粗砂	2.2×10^{-4} 4.6×10^{-5}	"	3.16	0.82	31.1°	2.10	3:2
複合注入工法	S3-1	41.0%	砂質シルト 9 砂礫、粗砂 112	砂礫 粗砂	1.3×10^{-5} 6.2×10^{-5}	"	3.00	0.85	32.0°	2.16	1:1
	-2	41.0%	砂質シルト 効果なし 砂礫、粗砂 165	砂礫 粗砂	3.4×10^{-5} 3.8×10^{-5}	"	3.72	0.95	32.2°	2.13	3:2
	単管ロッド工法	41.0%	粗砂 88	粗砂	5.3×10^{-4}	粗砂	0.36	0.12	20.3°	1.90	

表一2 注入効果総括表

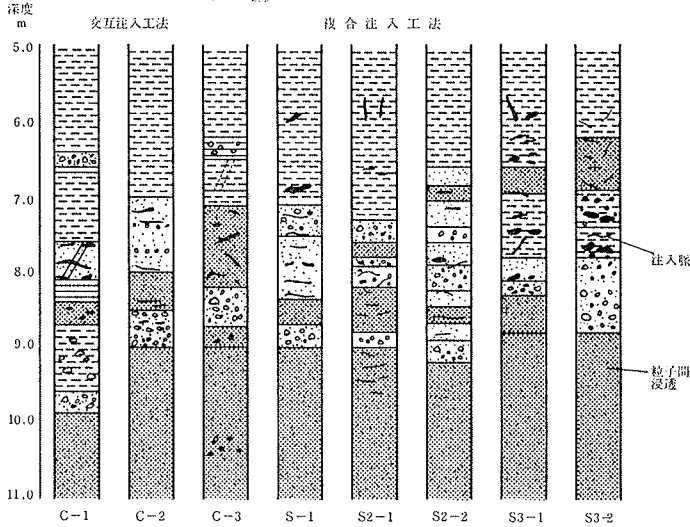


図-3 コアのスケッチ

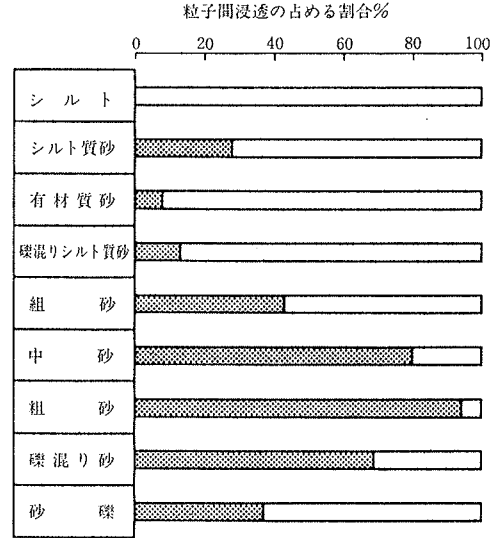


図-4 各土層の浸透様式

反応による薬液の粒子間浸透の有無を観察し、図-3のようなスケッチを得た。また、各土層で脈状浸透（割製注入を含む）と粒子間浸透の割合を求めて図-4に示した。これらによれば、粗砂、中砂では粒子間浸透を主体とするが、砂礫、細砂では両者が平行し、やや脈状浸透がまさる。シルト質あるいは有機質の砂では脈状浸透を主体としている。脈状浸透を主体とする土層の脈の厚みは1~15 m/mと幅が広いが、シルト、有機質のもので3 m/m以上のものが大半を占めるのに対し、細砂、砂礫では3 m/m以下のものを主体とする。

3.5. 薬液てん充率の分布

図-5に各区のてん充率の垂直分布を示す。瞬結工法とソレタンシュ工法は前出（図-1）の柱状図A、Bの土質を示すが、前者の工法ではてん充率のバラツキが著しいのに対し、後者のソレタンシュ工法では50%前後の安定したてん充率分布を示す。単管ロッド工法では土質は柱状図Dに近いが、全般的にてん充率の値が低く粘性土層以外でもバラツキが大きい。交互注入と複合注入の

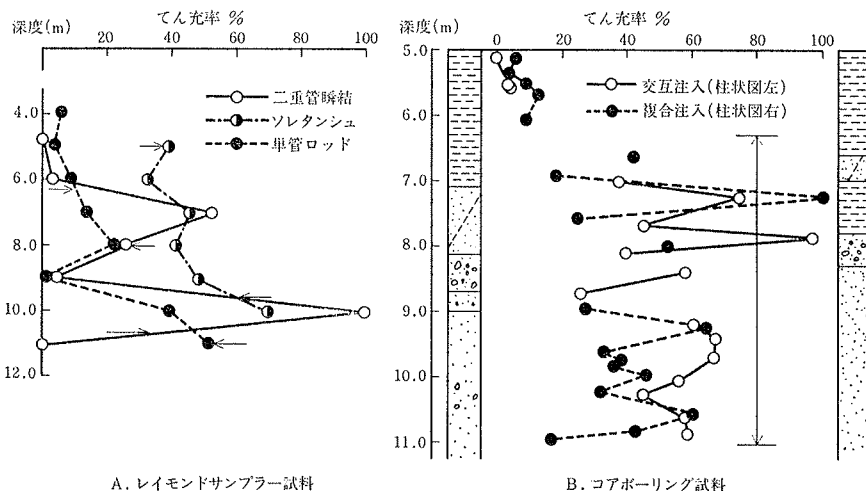
区ではボーリングコアについての分析結果を示しているが、いずれの工法でもGL-7~8.5 m付近でのてん充率のバラツキが大きく、この範囲では脈状浸透を主体としている観察結果と対応している。下部の粗砂層では交互注入区で平均てん充率が50.8%、複合注入区で40.1%であり、変動係数はそれぞれ13.5%、33.1%であり、交互注入区でより安定した分布を示す。なお、各工法とも注入範囲の上部にも注入材がかなり検出され、上部への逸失を示している。

4. シールド掘進部の注入効果

4.1. 注入区の設定

本注入は注入区間を土質、施工条件、近接構造物の重要度などによって5区に分け、それぞれの区に応じて工法を選定した。切羽の湧水の懸念されない粘性土の区間（A工区）では二重管瞬結工法、地下鉄の直上を横断する区間（B工区）ではソレタンシュ工法を採用した。また、住宅密集地の下を通過する区間（C-1工区）では沈下防止のためCCPと交互注入工法を併用し、河川横断部とその前後（C-2、D、E工区）では複合注入工法を採用した。各注入区の注入断面は後出の表-3に示す。注入率は各区とも38%としている。

4.2. シールド掘削時の切羽の状況
シールド掘削の際の切羽の観察結果を表-3に示す。瞬結工法区では切羽より上部に注入されているが、薬液の脈が切羽にも見られ、注入効果が認められる。ソレタンシュ工法区では切羽は均等に改良され、試験注入の結果とも一致する。複合注入



A. レイモンドサンプラー試料 B. コアボーリング試料

図-5 てん充率の垂直分布の例

工法区では瞬結性薬液と緩結性薬液の比を1:1で注入しているが、一部区間で予想をうわまわる湧水があり、その原因と対策を検討した。

4.3. 湧水の発生とその原因

図-6に示すように、C-2工区の後半から当初の予想湧水量（3~4l/min）をうわまわり、何ヶ所かでは湧水だけでなく土砂の流出を招くに至った。切羽の土質は粗砂、砂礫が頻りに現われ、変動が著しい。湧水は切羽の端部の固結度の低い所から発生しており、このような部分は何リングか連続して発生する。これらに対する処置として、湧水の激しい所では坑内から瞬結性薬液を補足注入した。

湧水発生区間の切羽から採取したブロックについて薬液てん充率を求めた結果を図-6に併記しているが、同一の切羽の中でてん充率の高低差が激しく、一部では20%以下となる。このような所では注入効果も乏しく、砂は固結化していない。このような未固結部は何リングか連続する傾向にあった。したがって、湧水の発生原因は薬液の浸透不良にもとづく未固結部の発生といえる。

5. 考察

5.1. 注入材の浸透限界

交互注入工法、複合注入工法の区ではボーリングコアについて浸透形態の観察を行ない、その結果を3.4.に述べた。水ガラス系薬液の浸透限界については各種の文献で紹介されているが³⁾、瞬結性薬液と結緩性薬液を併用する工法では調査例が少ない。そこで、浸透形態と各土層の粒径分布を図-7に示す。図中の粒径分布曲線は注入後の土砂から薬液を抽出除去して求めたもので、10%粒径(D₁₀)が0.005m/m以上の中砂、粗砂では粒子間浸透が主体となる。砂礫はD₁₀が大きいにもかかわらず脈状浸透の割合も高くなるのは砂礫中のマトリックス部分(例えば2m/m以下)でのD₁₀はかなり小さくなるからと思われる。一方、細粒分(<74μ)が40%以上のシルト質砂、砂質シルトなどでは脈状浸透を主体とする。

工区	注入工法	注入断面	土質	注入効果と注入材の浸透状況
A	二重管瞬結工法		シルト 砂 土丹	シルト、砂層では割裂脈状注入、層境に太い脈、湧水、土砂崩落見られず。
B	ソレクタンシュ工法		砂質シルト 砂礫	砂質シルト層では細脈が高密度に入る。砂礫層では脈状注入と粒子間浸透が並行。切羽からの湧水、土砂崩落は全く見られない。
C-1	交互注入工法		シルト 砂から砂礫	シルト層では細脈中心の脈状注入。砂、砂礫層では粒子間浸透。切羽からの湧水、土砂崩落は見られない。
C-2 D E	複合注入工法		粗砂 後半砂礫	同一切羽内で固結状況に変化。固結部と非固結部が見られ、固結部は高強度であるが、非固結部から最大120l/minの湧水。

表-3 各注入区の掘削切羽の状況

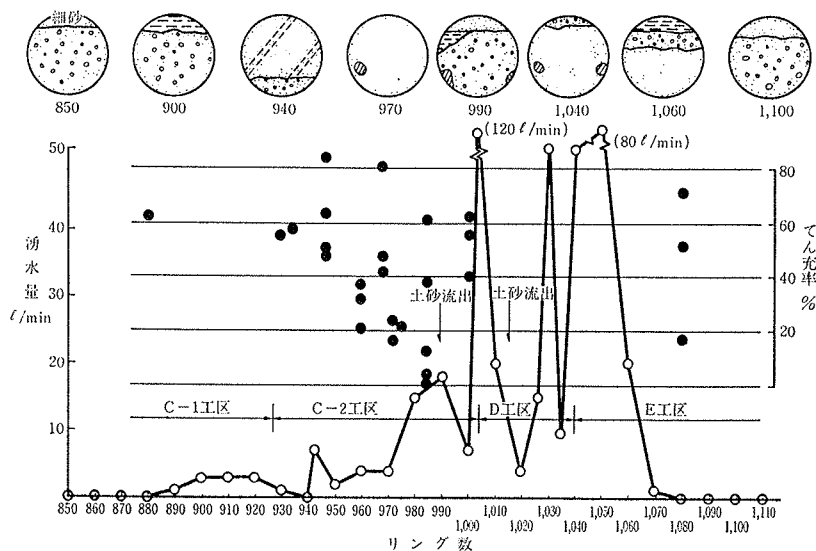


図-6 後半部の湧水量と切羽の土質および薬液てん充率

5.2. 注入材の分布と注入効果

注入材の分布と注入効果の関係については図-8に試験注入の砂層における結果を示す。透水係数とてん充率の関係は注入工法の種類を問わず共通しており、透水係数を10⁻⁵cm/secのオーダーとするのに必要なてん充率は40%前後である。これは、既報の現場調査、室内実験⁴⁾で得られた結果に比べるとやや低い値であり、粗砂層が

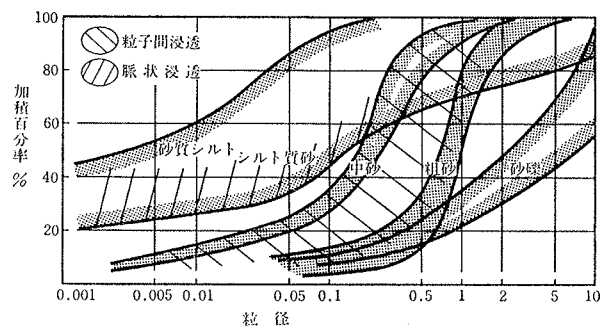


図-7 各土層の浸透様式と粒径分布

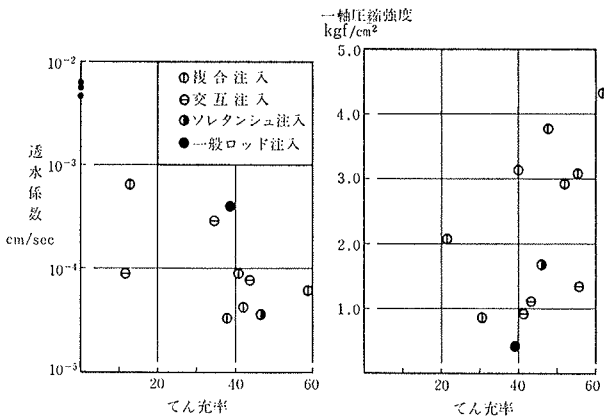


図-8 注入効果とてん充率の関係 (試験注入)

均質に改良されたことを示唆している。

一方、強度については土層の共通した交互注入工法、複合注入工法では同一てん充率では複合注入工法の方が3倍近い値となる。これは、複合注入工法では水ガラス濃度が他工法の1.5倍とした高強度薬液を用いていることにも由来する。

表-4にはシールド切羽(複合注入工法区)からのブロックサンプルの物性とてん充率を示す。これによれば、定水位法で求めたブロックの透水係数は $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/secと低く、試験注入時の現場揚水試験による値の1/10から1/100となっている。一方、強度はてん充率が50%以上のものでも1 kgf/cm²前後と試験注入時の値に比べてかなり低い。なお、てん充率が25%未満では砂は固結状態を維持できない。

5.3. 複合注入工法への適切な対応

当現場では全注入区間の約半分に複合注入工法を適用し、ほぼ満足できる結果を得たが、一部に薬液の浸透不良部が発生した。複合注入工法では緩結性薬液(L)と瞬結性薬液(S)の割合が任意に調節しうるが、ここではS/Lを1:1として施工した。そこで注入した土砂のS/Lを化学分析によって求め、てん充率との関係を求めたのが図-9である。

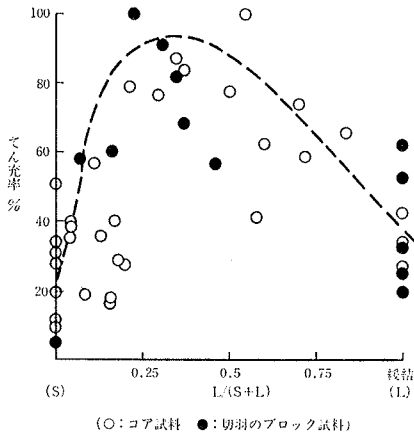


図-9 注入土のてん充率とS/Lの関係

リング数	一軸圧縮強度 kgf/cm ²	透水係数 cm/sec	てん充率 %
947	1.02	4.6×10^{-7}	64.4
947	1.76	—	52.6
957	0.83	—	32.4
965	1.15	—	80.9
975	自立せず	—	20.9
985	"	—	16.2
988	1.14	8.6×10^{-7}	58.7
1,000	0.57	6.3×10^{-7}	38.7
1,080	4.41	1.4×10^{-6}	67.2

表-4 切羽の砂の物性と薬液てん充率

在し、この値は土質等と異なると思われるが、当現場では3:1前後が妥当であったと推察される。

なお、固結砂のS/Lが計画通りになっていない理由としては、先行注入されるSのホモゲル強度が高すぎて、後に注入されるLがSによる固結土を割裂浸透しないで、Sの少ない所へ逸出して浸透していることが考えられる。したがって、Sのホモゲル強度を低下させることも有効と思われる。

6. あとがき

土質、施工条件、近接構造物の種類等が複雑に変化するシールド工事において、これら諸条件を考慮した注入工法の選定が望まれた。そこで、5種の注入工法について試験注入を行ない、各工法の注入効果を確認するだけでなく注入材の分布性状を調査した。また、本注入を行なった区間で生じた湧水事故の原因を調査し、複合注入工法採用に当たっての留意点を明らかにした。ここで明らかにした結果および手法が広く利用されることを期待するものである。

末筆ながら、調査に多大な御協力を頂いた横浜支店笹下JV工事事務所 坂村卓司所長に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 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2), 大林組技術研究所報, No. 27, (1983), pp. 82~86
- 2) 川地, 喜田: 1)と同題目(その4), 大林組技術研究所報, No. 29, (1984), pp. 134~139
- 3) 鳥田: 薬液注入の設計と施工上の問題点とその考え方, 基礎工, 10月増刊号, (1983), pp. 32~44
- 4) 川地, 喜田: 1)と同題目(その3), 大林組技術研究所報, No. 28, (1984), pp. 103~107