

薬液注入工法における施工管理に関する研究 (その4)

——滞水性砂礫地盤における薬液注入の効果——

川 地 武 喜 田 大 三

Studies on Performance Control of Chemical Grouting (Part 4)

——Effect of Grouting on Water-bearing Gravelly Ground——

Takeshi Kawachi Daizo Kita

Abstract

The adoption of grouting by the double tube-double packer method was planned in order to excavate water-bearing gravelly ground by the shield tunneling method. Thereupon, test grouting to confirm the effect of grouting and improve details of design was carried out utilizing a vertical shaft. As a result, it was clarified that a satisfactory effect is obtained on this ground by the double tube-double packer method, and that it would be appropriate for grouting ratio of CB (cement-bentonite slurry) to be 10% and that of silicate 23.6%. Regular grouting was carried out based on the results of the test grouting, and it was confirmed that permeability of ground was lowered from 10^{-2} cm/sec to 10^{-5} cm/sec and grout content at the tunnel face was more than 50% by volume of soil voids. Therefore, excavation of the shield tunnel proceeded without water springing or cave-ins.

概 要

滞水性砂礫層を無圧気・手掘り式のシールド工法で掘削するため二重管ダブルパッカー工法による薬液注入が計画された。そこで、注入効果と最適な注入設計の確認を目的として竖坑を利用した試験注入を行なった。その際、調査項目として標準貫入試験、透水試験だけでなく、原位置引張り試験、固結率、てん充率の測定などを採用した。その結果、二重管ダブルパッカー工法により十分な効果が得られること、注入率はCBを10%、溶液型水ガラスを23.6%とすればよいことが判明し、本注入の設計、施工管理に有益な知見を得た。試験注入の結果を踏まえ本注入を行なった。その結果、チェックボーリングで 10^{-5} cm/secの透水係数が安定して得られ、シールド掘削の際にも大半の区間では湧水、崩壊もなく、切羽には薬液が十分に浸透し、平均てん充率は50%以上であった。なお、一部区間で湧水、崩壊が見られたが、砂礫層中にブロック状に分布した砂への薬液の浸透不良によると判定され、対策として砂に瞬結性薬液を補足注入した。

1. はじめに

薬液注入工法による地盤改良では注入効果の予測方法あるいは判定法の確立が切望されており、そのための研究が各方面で行なわれているが、実用に耐えうるものはいまだ確立されていない。このため、薬液注入を計画、設計する際には現地地盤で試験注入を行ない、適正な注入率、材料の決定、注入効果の確認などを行なっている。筆者らは注入工法の設計、施工管理をより適切なものにするためには地盤内の注入材の分布を把握する必要があると考え、化学的手法による注入材分布の調査法を開発し、いくつかの適用例を報告している^{1),2),3)}。先頃、滞

水性砂礫層のシールド掘削の補助工法として二重管ダブルパッカー工法による全断面薬液注入工法が採用され、効果確認のための試験注入とこれにもとづく本注入による地盤改良が行なわれ、工事は成功裏に終了した。この工事では試験注入の際に従来から採用されている現場透水試験、標準貫入試験だけでなく、原位置引張り試験や固結体の掘り出しによる固結率の測定、注入材分布の調査などを行ない、これらの結果を本注入に反映させている。そして、シールド掘削の段階では定期的に切羽の注入材の含有量、すなわちてん充率を計測し、注入効果が不良の際の対策立案の参考とした。この事例は、砂礫層への二重管ダブルパッカー工法の適用を計画する際に有益

な示唆を与えていると思われるので以下に紹介する。

2. 工事概要

2.1. シールド工事

工事は兵庫県揖保川流域下水道の管渠築造工事であり、一次覆工は無気圧・手掘り式のシールド工法により行なわれる。シールド掘削の規模は径 2.64 m, 延長 593 m であり、土被りは 13.5~14.5 m である。この工事では掘削対象が滞水性砂礫層のため止水性確保を主目的とした薬液注入工法による地盤改良が計画された。

2.2. 土質

工事区域は兵庫県姫路市の揖保川河口に位置し、その土質構成は図-1 に示すように、沖積層は砂層、シルト層、砂礫層で構成され、シールド掘削対象はすべて沖積砂礫層である。この砂礫層は細粒分が少なく、透水係数は 10^{-2} cm/sec のオーダーであり、かつ被圧滞水層を形成しているため崩壊性が大きい。そこで、シールド掘削を安全に行なうために透水係数を 10^{-5} cm/sec のオーダーまで低下させ、また切羽を自立しうる程度に強化することが改良目標とされた。

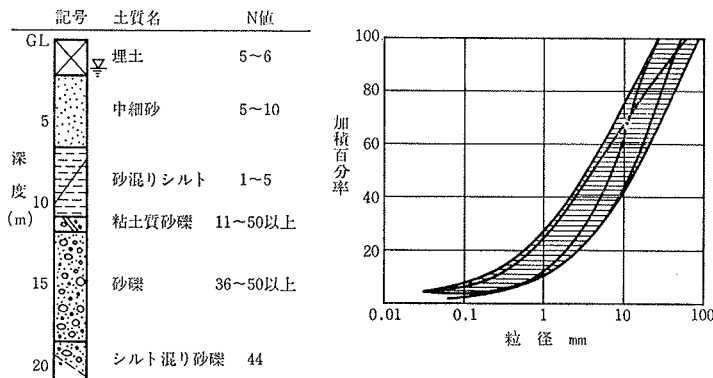


図-1 土質柱状図と砂礫の粒径分布

3. 試験注入

3.1. 調査計画

試験注入は発進竖坑予定地で行なわれた。その際、注入区を注入薬液の種類（施工会社）によって二分し、A, Bブロックとし、さらに注入深度 GL-11.5 m~17.5 m を二分し、上部, 下部とで CB の注入率を変えている。試験で設定した注入率を表-1 に示す。調査, 試験の項目は各施工段階を追って次のようなものを採用した。

(1) 注入作業中

注入圧力, 注入量（流量）, 観測井水の pH, COD

(2) 注入作業後（掘削前）

現場透水試験, 標準貫入試験, 観測井水の水質

(3) 竖坑掘削時

	A ブ ロ ッ ク		B ブ ロ ッ ク	
	CB	コンソリダー-SG	CB	RSG-IV
上部	5%	23.6%	15%	23.6%
下部	10%	23.6%	10%	23.6%

表-1 設定注入率

原位置引張り試験, 一軸圧縮試験, 簡易透水試験, 固結率, てん充率測定

このうち、原位置引張り試験は後出の図-3 に示すように、切梁を支点としてチェーンブロックで径 30~40 cm の固結体を引張り、最大荷重と供試体の自重との差を求め、引張り強度を計算した。また、一軸圧縮試験も径 30~40 cm の供試体について行なった。固結率は固結体積を実測し、これと注入薬液量の比で表示した。てん充率は採取上の化学分析によって得た注入材含有量から計算によって求めている。

3.2. 注入経過

図-2 に示すように各ブロック12本の注入孔を千鳥状に配置し、注入孔の削孔, シールグラウト (CB) の充てん, 養生, CB による一次注入, 溶液型注入材による二次注入の順で作業を行なった。注入速度は 10 l/min とし、33.3 cm を1ステップとして18ステップを連続的にステップアップする方式で注入した。

注入圧は一次注入で 1.5~15 kgf/cm², 二次注入で 2.0~50 kgf/cm² と特に二次注入で広範囲に分布した。これはシールグラウトの厚さ, 養生日数, 一次注入の CB の強度のバラッキなどを反映するものと思われる。

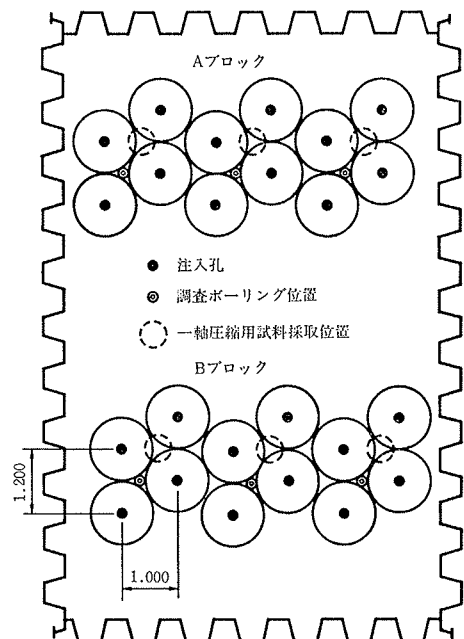


図-2 試験注入平面図

注入時の観測井（注入位置からの最近接距離 15 m, 合計 4 本）の水質変化はほとんど見られなかった。すなわち、浅層地下水の pH, COD はそれぞれ 7.3~7.4, 14.5~16.2 ppm, 砂礫層内の地下水は 7.5~7.7, 7.6~8.9 ppm の範囲にあり、注入前の水質に比べて有意な変化は認められなかった。

3.3. 注入効果

注入効果の試験のうち、掘削前のもは注入後 3 日以後に、掘削時のもは注入後 30~45 日に行なった。これらの結果は表-2 に一括して示す。

試験項目	Aブロック		Bブロック		
	上部	下部	上部	下部	
透水係数 cm/sec	1.6×10 ⁻²		3.5×10 ⁻²		
	ボーリング法	1.7×10 ⁻⁵	4.8×10 ⁻⁵	8.2×10 ⁻⁵	6.2×10 ⁻⁵
	簡易試験法	1.7×10 ⁻⁵	4.6×10 ⁻⁶	5.5×10 ⁻⁶	2.8×10 ⁻⁶
平均 N値	注入前	39	86	21	44
	注入後	153	169	86	133
一軸圧縮強度 tf/m ²	6.8	2.3	4.4	5.8	
引張り強度 tf/m ²	0.25	0.5	0.46	0.15	

表-2 注入効果一覧表

止水効果は注入前に 10⁻² cm/sec のオーダーの透水係数が注入後には 10⁻⁵ cm/sec あるいは 10⁻⁶ cm/sec のオーダーとなり十分に認められる。ボーリングによる透水試験は各部 3 箇所ずつ、合計 12 箇所で行なったが、A, B ブロックともに上部で 1 箇所ずつ止水効果の不十分な値が得られている。これらは共に端部で得られた値であり、注入範囲を代表する値とは思われず、大多数のデータが示す 10⁻⁵ cm/sec のオーダーが注入範囲の透水係数といえよう。なお、簡易透水試験は掘削時に固結部に深さ 40 cm 前後の穴を掘り、注水試験を行なったものであるが、一桁低い値が得られている。これは、ボーリング法では回復法、簡易透水試験法では注水法で行なっているが、一般に後者で目づまりの影響によって小さな値が得られるといわれており、今回の試験でも簡易試験の際の孔内水はかなり濁りが残留しており、この影響は無視できない。

強化効果のうち、N 値については平均値が注入前に比べて 2~4 倍に増大している。玉石混りの砂礫層の N 値については必ずしも信頼性は高くないが、このような N 値の増大は充分な強化効果を示すものと考えてよい。また、一軸圧縮強度は 2.3~6.8 tf/m² の範囲であり、N 値から考えて著しく低く、また掘削時の供試体の整形にプレーカーを用いなければならなかったことを考えてもこの値は低い。これは砂礫への薬液の浸透に不均一性があり、同一供試体内でも固結程度に差があるため、試験の

際には弱い所で破壊が先行する。その結果、一軸圧縮強度は予想外に小さな値となっており、これは注入地盤の圧縮強度を過少に評価していると思われる。さらに、引張り強度は 0.5 tf/m² 以下と著しく低い。引張り試験の際のひずみ曲線を図-3 に示しているように、引張りの過程で時々引張り力が低下し、局部的に破壊が進行することを示唆している。そして、この引張り力を供試体の全断面積で除しているために極めて小さな値となっていると思われる。したがって、当現場の地盤のように不均一な地盤に、引張り試験を適用するには改良の余地を残しているといえよう。

以上、止水効果、強化効果ともに各注入区間に共通した差異は認められず、CB の注入率の差は注入効果には顕著な差をもたらしていないと考えられる。

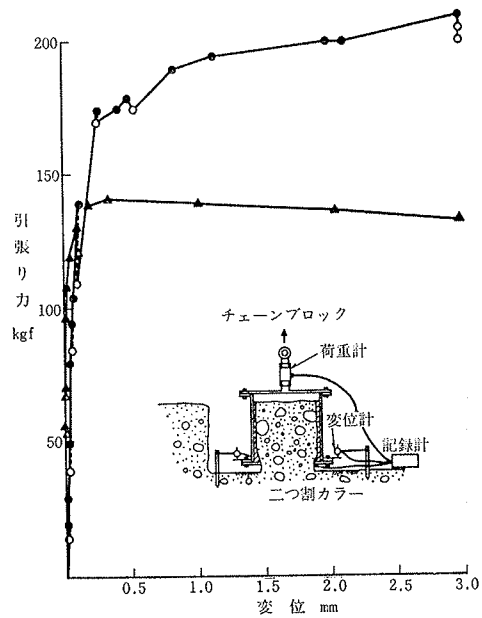


図-3 引張り試験方法と試験結果

3.4. 固結効果

堅坑の掘削時に薬液の固結状況を調査した。調査は 3 回に分けて行ない、第 5 次掘削に 1 回目、第 6 次掘削に 2 回目、第 7 次掘削に 3 回目の調査を行なっている。注入区間に入ると小型ブルドーザーのみによる掘削が困難となり、プレーカーを用いて砂礫をほぐしながら掘削するようになった。そこで、高さ 50 cm 程度に自立する範囲を掘り残し固結範囲とした。その状況を写真に示す。このようにして求めた固結範囲は図-4 に示すように、A ブロックでは上部で固結面積が小さく、下部で大きくなるのに対し、B ブロックでは上部、下部の差が見られない。これらの値を用いて求めた固結体積を注入薬液量で除して得た固結率は表-3 に示すように、CB の注入率が 5% の A ブロックの上部で低くなる。

次に、固結範囲から外周への薬液の浸透状況を示す薬

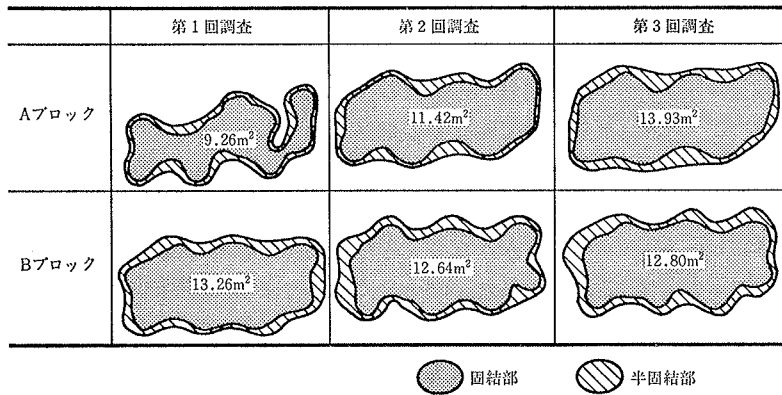


図-4 掘削時の固結範囲

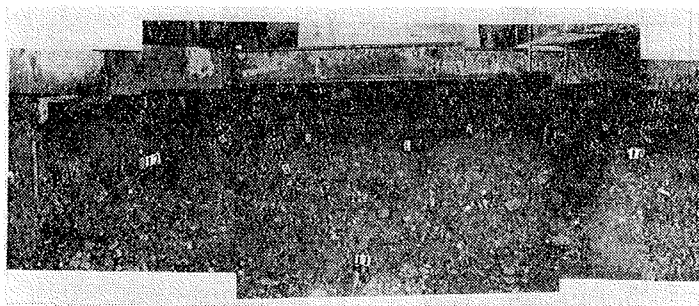


写真 Aブロック固結部 (第2回調査)

液てん充率の分布を図-5に示す。てん充は上部すなわち5次掘削では注入孔の付近では60%前後のものが、注入孔から離れるにつれて急激に低下するのに対し、下部(7次掘削)では注入孔から2m離れても40%前後の値であり、広い範囲に比較的均一に薬液が分布する。各区の固結範囲の平均てん充率を表-3に示しているが、二重管ダブルパッカー工法でもてん充率にはかなりのバラツキがあることを考慮する必要がある。

3.5. 本注入への反映

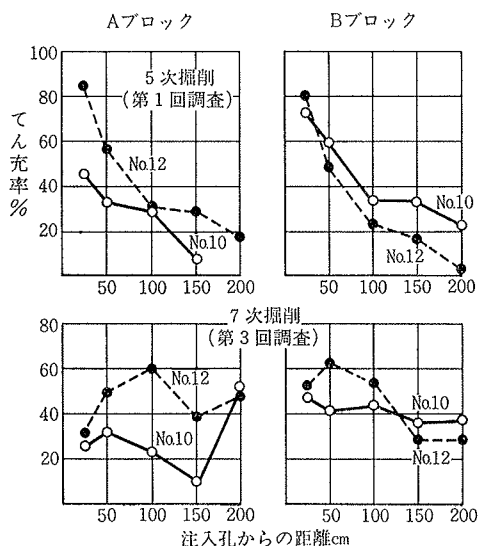


図-5 掘削時の注入材の分布

測定項目	Aブロック		Bブロック	
	上部	下部	上部	下部
固結率	2.57	3.62	3.61	3.53
平均てん充率%	53.1	44.1	57.2	51.0

表-3 固結状況一覧表

試験注入の結果、二重管ダブルパッカー工法によって当現場の砂礫層は目標の 10^{-5} cm/secのオーダーの透水係数まで低下させることが可能であり、強化効果についてもN値および堅坑掘削抵抗から判断して充分と考えられる。検討した一次注入(CB)の注入率の差異は薬液の固結率の差として表われ、CBが10%以上ならば3.5前後の固結率となることが判明した。そこで、本注入ではCBを10%、溶液を23.6%の注入率を採用することにした。

次に、注入地盤の注入効果は図-6に示すようにおおまかな傾向として地盤内の薬液てん充率に支配されている。図-6(1)は本注入部の値もプロットしているが、透水係数が 10^{-5} cm/secのオーダーを安定して確保するにはてん充率が50%以上を必要とする。また、図-6(2)の固結程度もてん充率が50%以上では大半が固結している。したがって、注入範囲内がてん充率で50%以上となるように注入する必要がある、シールド掘削の際には掘削切羽の土砂について薬液てん充率を定期的に測定、チェックすることにした。

なお、当初計画では本注入の注入断面は切羽部には注入せず、この周囲に注入することになっていた。これは薬液の浸透が1m以上に及び、切羽の側部、上部に注入した薬液が浸透することを期待している。試験注入の結果でも図-5に示されるように、浸透範囲は2mに及んでいる。したがって、当初計画の注入断面でも切羽で

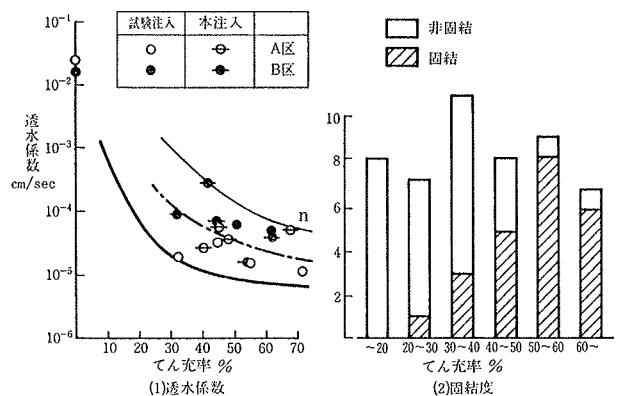


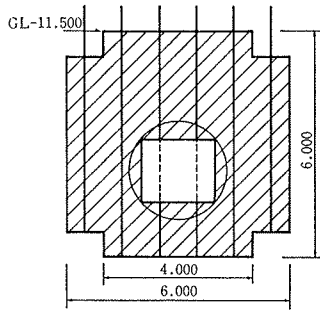
図-6 注入効果とてん充率の関係

の注入効果は十分に期待しうると判断した。

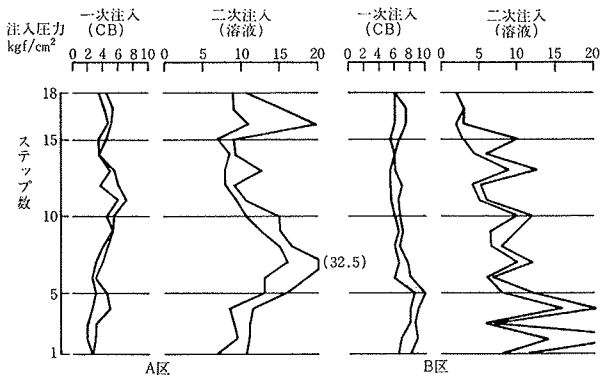
4. シールド掘進部の地盤改良効果

4.1. 注入工事

管路部の注入は試験注入の結果を踏まえ、注入率はCB 10%、溶液23.6%とし、全区間を二区に分け、A区でコンソリダー SG、B区でRSG-IVを溶液型注入材として使用した。注入断面は図一七に示すタイプとし、施工手順などは試験注入と同様としたが、シールドグラウトの養生日数は2日以上とした。注入圧は図一八に例示するように、試験注入の場合と同様にバラツキが大きく、特に二次注入の変動範囲が大きい。注入圧とステップとの関係も一様でなく、下部で高くなる孔や途中で高い圧力になる孔がある。周辺の観測井の水質はpHが7.6~7.7、CODが7.8~8.7 ppmの範囲で注入前の値と変らなかった。



図一七 薬液注入断面



図一八 注入圧変化の例 (最大値と最小値)

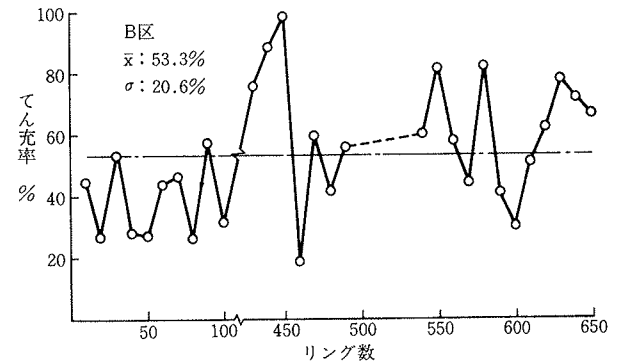
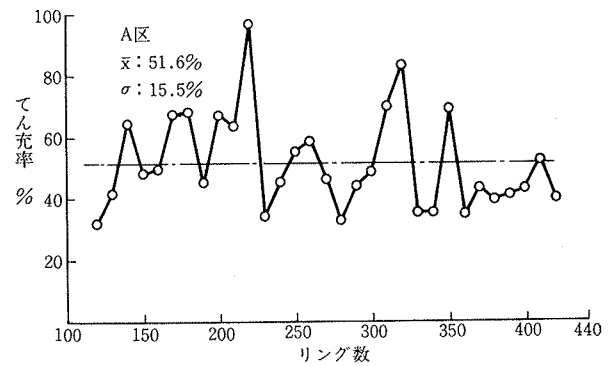
4.2. 注入効果の確認と掘削

注入後の掘削に先行して50mに1本の割合でチェックボーリングを行ない、深度13.5~16.5mの範囲で現場透水試験を行なった。その結果、土質はシールド掘削の対象となるGL-13.5~16.2mで砂礫を主体とし、透水係数は大部分が 10^{-5} cm/secのオーダーにあり、1例のみ 3.4×10^{-4} cm/secとなった。そこで透水係数が目標値に達しなかった部分については溶液タイプの補足注入を行なった。

シールド掘削は一部を除いて順調に進行した。すなわち、切羽からの湧水は2~3 l/minと少なく、透水係数から予測される湧水量と近似、また強度も硬すぎない程

度に充分であり、切羽には注入した薬液のホモゲルが隙間に散在していた。

掘削土砂内の薬液の含有量を求め、これから注入材による間隙てん充率の推移を見たものが図一九である。図中に示したように、A区、B区ともに平均てん充率は50%をうわまわり、当初の目標値を満足している。しかしバラツキがかなり大きく、所々に極めて低い値も見られる。ともあれ、図一七に示したように切羽には直接注入はしていないにも拘らず、注入効果の発現にほぼ十分な薬液が切羽に浸透している。これは、ゲルタイムの長い注入材を用いる二重管ダブルパッカー工法の選定が当地盤では適切であったことを示している。



図一九 掘削中の切羽土砂のてん充率

4.3. 切羽崩壊事故の原因と対策

上述のように掘削は大半の区間で順調に進行したが、一部区間約30mの間で局部的な湧水および3回の切羽崩壊を生じた。原因として土質の急変、注入時の削孔精度の不良、薬液の硬化不良などが考えられた。土質については図一十に切羽のスケッチを示すように、それまでと異なり、砂礫を基調とするもの、砂および粘性土塊を含み、しかもこれらは成層せずブロック状に入っている。そして、このうち砂の一部が未固結であり、薬液てん充率も砂礫の部分は50%前後であるのに対し、未固結砂では20%未満であった。これらの砂、砂礫の粒径分布を図一十一に示す。同じような粒径分布の砂でも固結した砂もあるが、砂が砂礫に比べて薬液が浸透しにくいことは事実であろう。しかも、当現場では切羽には直接注

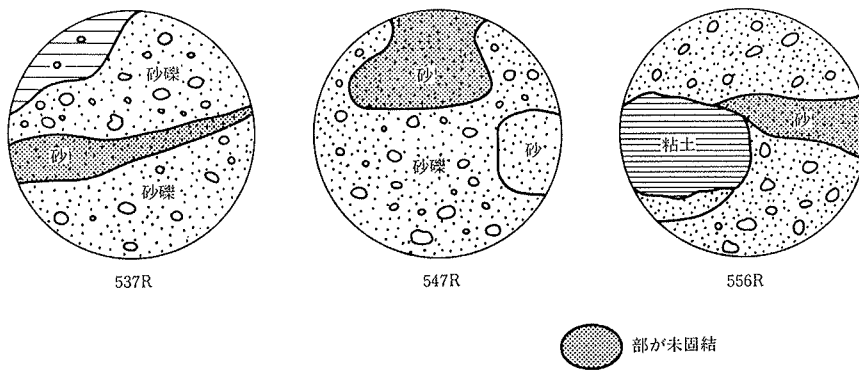


図-10 崩壊部の切羽のスケッチ

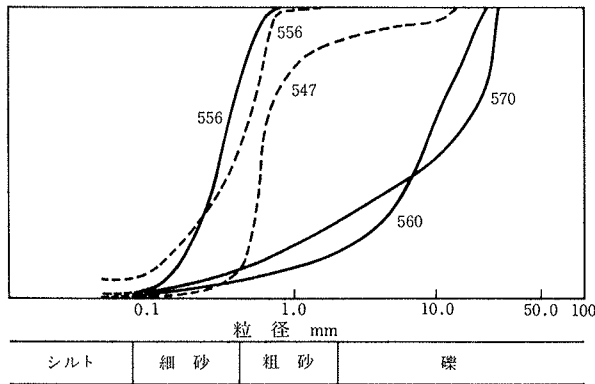


図-11 崩壊部の切羽土の粒径分布
(点線は図-10の未固結砂)

入をしていないため、砂への薬液の浸透が阻害されたものであろう。

他の原因として考えられた薬液の硬化不良については砂でも薬液含有量の多い、すなわちてん充率の高いものは固結状であることから否定される。また、削孔精度については試験注入の際の調査でGL-16 m、付近で最大50 cmのズレを示すことから、削孔精度不良が重なると局部的に改良効果不良を生じることはありうるが、薬液の浸透性が良好なため、今回のようなポケット状の未固結欠陥部は生じにくいと考えられる。

以上のような検討結果にもとづき、他の区間と異なり砂にブロック状に含む切羽には路上あるいは坑内から瞬

結性の薬液を補足注入した。これは、ゲルタイムの長い薬液では浸透性の高い砂礫層へ薬液が逸走するため、逸走する前にゲル化させるためには瞬結性薬液の方が有利との判断によるものである。その結果、湧水、崩壊ともに再発することなく掘削工事は終了した。

5. おわりに

水滞性砂礫層のシールド掘削の補助工法として、二重管ダブルパッカー工法による全断面薬注を採用した事例について、試験注入および本注入の経過と地盤改良効果を紹介した。結果的には二重ダブルパッカー工法の適用が成功したといえるが、当初予期せぬ土質の急変区間の事故の防止法の確立など改良の余地もある。そのためには、注入効果の予測が不可欠であり、完全なものでもなく、例えば5 m、10 m前方の注入効果を確実に推定することができれば、事故を未然に防止することも可能と思われ、何らかの手法の開発は急務といえる。

最後に、本研究の遂行にあたり、終始、御指導、御鞭達下さいました兵庫県姫路土木事務所の野口寿二主査はじめ関係各位、現地調査に御協力下さいました当社網干工事事務所の山内英治前所長以下現場の方々へ厚く謝意を表します。

参考文献

- 1) 川地，喜田：無公害グラウトに関する研究(その4)，大林組技術研究所報，No. 25，(1982)，pp. 80～84
- 2) 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1)，大林組技術研究所報，No. 26，(1983)，pp. 120～125
- 3) 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