

薬液注入工法における施工管理に関する研究（その2）

——試験注入時の注入材の分布と注入効果——

川 地 武 喜 田 大 三

Studies on Performance Control of Chemical Grouting (Part 2)

——Distribution of Grouting Material and Grouting Effect in Test Grouting——

Takeshi Kawachi Daizo Kita

Abstract

Field tests are usually carried out for chemical grouting. At that time, ground improvement effects are judged by means such as the standard penetration test and permeability test, but the distribution of the grouted material is seldom clarified. Therefore, the estimation method reported in the previous paper was applied to four sites grouted with silicate of short gelation time. The results obtained are as follows: (1) The ratio of voids filled by grout estimated by this method changes according to kind of grout, designed grouting ratio, soil property and so on, and this value ranges from 5 to 82%. (2) At the interparticle penetration zone, satisfactory reduction of permeability may be expected when the value is higher than 50%, while in case of the vein penetration zone this effect varies. (3) Consolidation effect may be expected at a relatively low value of filling rate, and also, vein penetration zone.

概 要

薬液注入工法においては注入計画を最適なものとするために、本注入に先立って試験注入が行なわれることが多い。その際、N値や透水係数の試験によって注入効果が判定されるが、注入効果を左右する注入材の分布、浸透形態などは調査されていない。そこで、前報で紹介した地盤中の注入材含有量の測定法を用いて、水ガラス系注入材を瞬結二重管式注入工法で試験注入した4現場の注入材分布を調査するとともに注入効果との関係を検討した。その結果、以下に列挙する知見が得られた。(1) 注入材含有量から求めたてん充率は注入率、注入材の種類、土質などによって異なり、5~82%と広範囲に分布する。(2) 注入材が粒子間浸透を主体とし、てん充率が50%以上の場合には十分な止水効果が見られ、脈状浸透の場合にはてん充率が高くても止水効果にバラツキを生じる。(3) 注入材による強化効果は比較的低いてん充率でも、また脈状浸透を主体とする場合にも認められる。

1. はじめに

薬液注入工法は簡便かつ適用範囲の広い地盤改良法として広く採用されているが、その信頼性は必ずしも十分とはいえない状態にあり、信頼性を向上させるために施工法の改良、適切な施工管理手法の開発が課題となっている。本工法を用いた地盤改良を計画する場合、現状では試験注入を行ない注入効果を確認し注入設計に反映する場合が多い。その際、効果判定手法として標準貫入試験、現場透水試験などが採用されるが、注入効果を左

右する注入材の分布、浸透形態などは適切な調査方法が開発されていないこともあり、十分に解明されない状態にある。

筆者らは化学的手法を用いて地盤中の注入材含有量を測定する方法を開発し¹⁾、前報では注入を行なったシールド工事現場などにこの方法を適用し、その有効性を確認するとともに注入材の分布状況と注入設計上の留意点について考察した²⁾。そこで、この方法を試験注入を行なった現場に適用し、注入効果判定手法のひとつとしての意義を確認するとともに、他の判定結果との関係を検

討した。以下に調査の概要と結果について述べる。

2. 調査方法

2.1. 試験注入

調査を行なったのはシールド工法による管路工事の現場であり、発進部、河川や道路の横断部などに注入工法による地盤改良が計画された。そこで、注入設計の妥当性を確認し、本施工を円滑に行なうために表-1に示すように、試験注入が行なわれた。

現場記号	A	B	C	D
対象土質	碎石、砂	砂礫、砂	砂 (洪積層)	砂 (沖積層)
注入目的	強化	止水	止水	止水、強化
注入方法	瞬結二重管(LAG)	瞬結二重管(LAG)	瞬結二重管(DDS)	瞬結二重管(DDS)
注入材料	無機系溶液型、懸濁型	無機系溶液型、懸濁型	無機系溶液型	無機系溶液型
注入率	32、36、40%	32、36%	17、21、25%	27.4、31.3、35.2%
注入深度	GL-8.2~20.7m	GL-10.0~14.35m	GL-16.1~19.1m	GL-6.6~9.6m
注入孔配置とピッチ				
効果判定法*	N値、k	k、チェック注入圧	N値、k	N値、k

*N値：標準貫入試験 k：現場透水試験

表-1 試験注入の概要

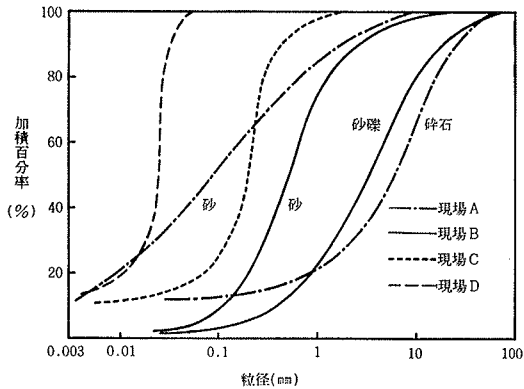


図-1 注入対象土の粒径分布

注入対象の土質は現場A、Bでは碎石あるいは砂礫を主体とし、下部に砂層が存在する。現場C、Dでは砂を主体とする。図-1に対象土の粒径分布を示す。注入目的は現場によって異なるが、現場Aでは地下水位が低いために強化を主目的としている。

採用した工法は最近では主流となっておりつつある瞬結二重管式の工法であり、使用薬液はいずれも水ガラス系注入材である。またゲルタイムは現場A、Bでは3~6秒、現場C、Dでは10~20秒である。注入孔は表-1に示す配置で

あり、これらの中央付近に効果判定試験のための調査孔およびチェック注入孔を配した。

2.2. 注入効果の判定

効果判定試験として標準貫入試験および現場透水試験を採用した。現場Bでは別の調査孔を用いてチェック注入を行ない、その際の注入圧によって効果を推定する方法を併用した。

2.3. 注入材分布の測定

2.2.で述べた効果判定のためのボーリングの際にレイ

モンドサンプラーに採取される試料を用いて注入材に由来するケイ酸を化学分析によって測定し、試料土中の注入材含有量を求めた。注入前の土質試験によって間隙率が既知であるので、注入材含有量から注入材により占められている間隙割合を求め、てん充率として表示した。このてん充率は注入率(λ)を次式により求める際に用いられる値である。

$$\lambda = n \cdot \alpha \cdot \beta$$

ここに、n：間隙率

α ：てん充率

β ：割増し率

3. 調査結果

3.1. 注入状況

注入時にはいずれの現場でも注入圧、注入流量が自記記録された。流量は一定として注入されるので、注入地盤の状況や注入材の浸透、ゲル化の状況などは間接的に注入圧に反映されよう。そこで、注入圧の変動状況を記録紙から読み取り図-2に示した。現場Aでは各区3点注入を行なったが最終孔の注入圧を図示している。溶液

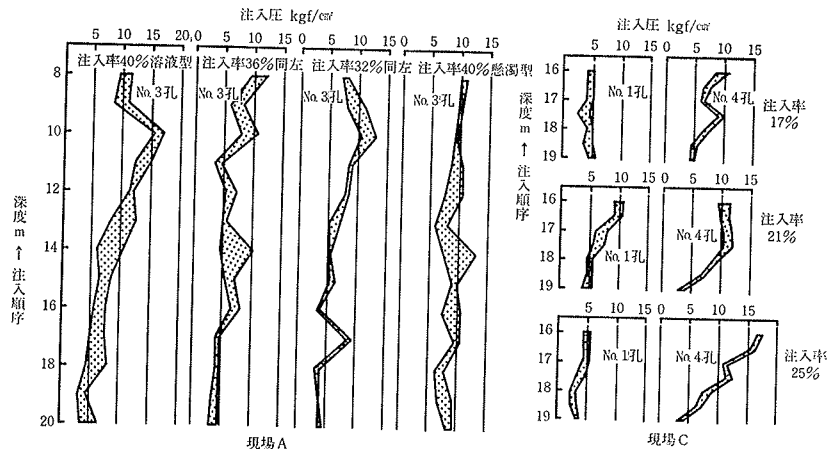


図-2 注入圧の分布

型の場合、注入率が高い区ほど注入圧が高く、かつ圧力の高低差が大きくなる。また、下部から上部へ注入が進行してくるにつれて注入圧が大きくなり、そのこう配は注入率の高い区で大きい。懸濁型の場合は注入圧は溶液型より高く分布するが、下部から上部への注入圧の増大はわずかである。なお、深度約 16 m を境に上部は砕石層、下部は砂層であるが注入圧分布の差は判然としない。

次に現場 C の例では各区の最初の注入孔 (No. 1) と最終の注入孔 (No. 4) の注入圧を示している。No. 1 孔では注入の進行に伴う注入圧の上昇が見られないのに対し、No. 4 孔では注入圧の上昇が顕著となり、先行注入の影響すなわち浸透した注入材が干渉し合っていることを示している。このような現象は現場 A ではほとんど見られない。

図示しないが、現場 B では溶液型の区では 4~22 kgf/cm² の注入圧を示し、注入率の高い区でやや高圧となる。また、懸濁型では 2~18 kgf/cm² の注入圧を示す。いずれも先行注入孔と後行注入孔との圧力差は明瞭ではない。

現場	止水効果	強化効果
A	砕石層では試験せず	砕石層では懸濁型の効果大 溶液型では注入率32%の効果が劣る
	砂層では10 ⁻³ cm/secが1/2~1/3に 懸濁型では効果少ない	砂層では注入率40%の区で効果大 (Nが10 から20へ増大)
B	砂礫層では10 ⁻¹ cm/secが10 ⁻⁴ ~10 ⁻⁶ cm/secへ 注入率32%の区はバラツキが大	試験せず
	砂層では効果のバラツキが大	
C	10 ⁻³ cm/secに近い砂が10 ⁻⁶ cm/secまで低下 止水効果は注入率の順と一致する	注入前でも N 値は50以上 換算 N 値は注入率が高い区でやや低下する
D	10 ⁻⁴ cm/secの砂層は注入後も大差なし	20前後の N 値が25~30に増大

表一 注入効果の概要

3.2. 注入効果

(1) 透水試験

注入効果判定試験結果を表一 2 に示す。止水効果が明瞭に認められるのは現場 B の砂礫層と現場 C である。現場 B では透水係数が $4 \times 10^{-1} \sim 9 \times 10^{-1}$ cm/sec の砂礫層が湧水量も多く、この層の止水化が不可欠であったが、溶液型、懸濁型のいずれの注入材によっても $10^{-4} \sim 10^{-5}$ cm/sec のオーダーとなり、特に注入率36%では効果が顕著である。砂礫層の下部の砂層は N 値が 30~50 の良く締った火山灰質の砂で構成され、透水係数は $10^{-2} \sim 10^{-1}$ cm/sec のオーダーであるが、この層では注入後の値が $10^{-5} \sim 10^{-2}$ cm/sec とバ

ラツキが大きく、均一な止水効果が得られない。また、現場 C では N 値 50 以上の砂層が 10^{-3} cm/sec に近い透水係数であったが、他の現場に比べて低い注入率であるにもかかわらず 10^{-5} cm/sec 前後となり十分な効果が得られた。

現場 A、D では止水効果は明確ではない。現場 A では 10^{-3} cm/sec のオーダーの砂層で試験をしているが、溶液型で 1/10 前後に低下し、懸濁型では全く効果が認められない。また、現場 D では低下率の大きい区でも 1/5 までの低下であり、有意な効果とはいいがたい。

(2) 標準貫入試験

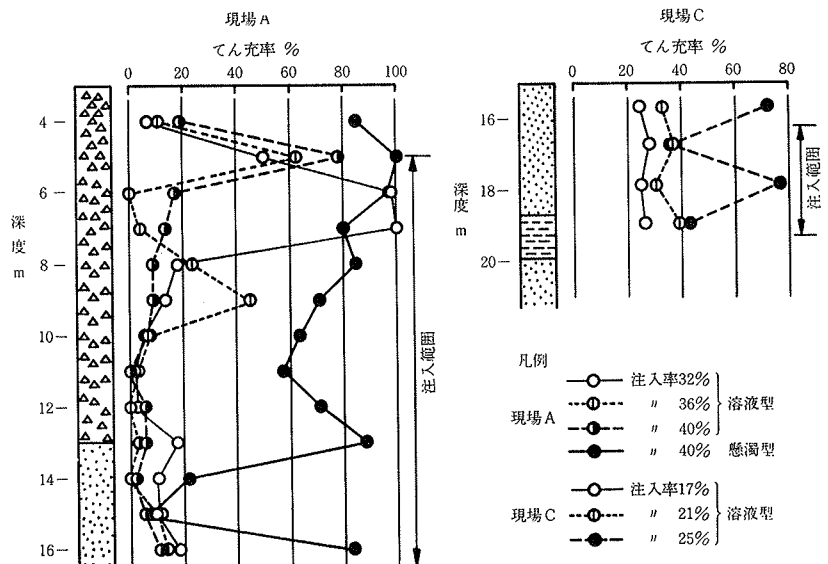
表一 2 に示したように N 値の増大の著しい現場は A である。ここでは、砕石層、砂層ともに懸濁型の効果が著るしく、ホモゲル強度の大きな注入材の特徴が表われている。溶液型でも注入率の高い区では N 値の増大が顕著である。

現場 D では比較的ゆるい砂層であるが、平均的に 5~10 の N 値の増大が認められる。また、現場 C では注入前でも 50 以上の N 値を示すので、注入によりさらに強化を

図る必要はないが、参考までに貫入試験を行なったところ、注入率 17%、21% の区では換算 N 値が増大するものの、25% の区ではやや低下する現象が見られた。

なお、現場 B では注入 1 週後にチェック注入を行なった。その際の注入圧は先行注入の注入圧に比べて必ずしも高くはなく、注入率 36% の区のみが先行注入に比べやや高くなった。

3.3. 注入材でん充率の分布



図一 3 ボーリング試料のてん充率分布

てん充率の測定例を図一3に示す。現場Aでは溶液型と懸濁型とで分布が異なり、懸濁型のてん充率は碎石層で80%前後、砂層では5~82%と変動幅が大きい。溶液型は碎石層の所々で高い値を示すものの、全体的には10%以下の値が多く、砂層でも10%前後である。てん充率が70%以上のものは試料にホモゲルの脈が見られ、脈状浸透が生じていることを示している。現場Cでは注入率の順にてん充率も高くなり、注入率17%の区で22~27%、注入率25%の区で35~78%となる。てん充率が60%以上の試料にはホモゲルの細片が見られる。

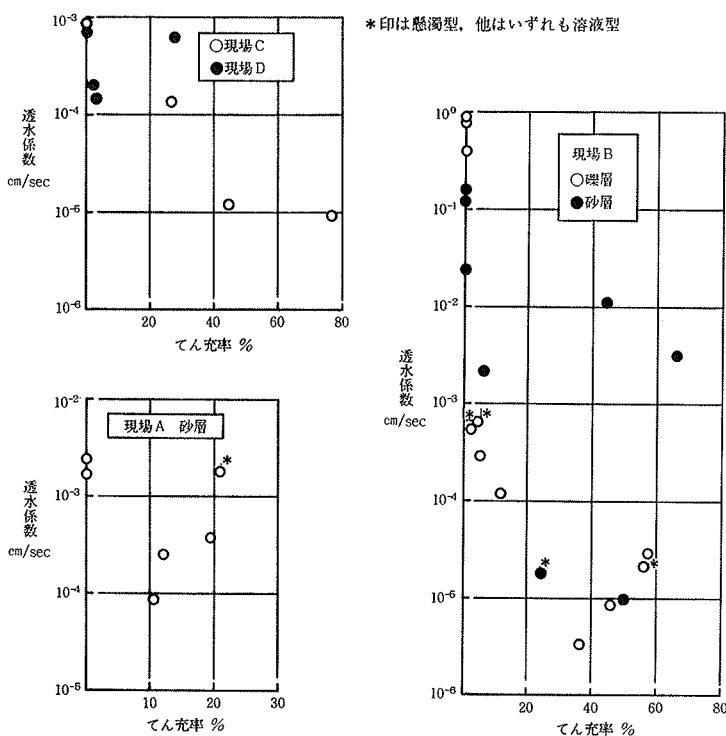
一方、図示しないが現場Bでは砂礫層でてん充率が50%前後の区と10%前後の区とがあり、懸濁型では5%以下の所もある。また、砂層ではてん充率が6~67%と広い範囲に分布している。さらに、現場Dでは全体的にてん充率が低く1~26%の範囲である。

4. 考察

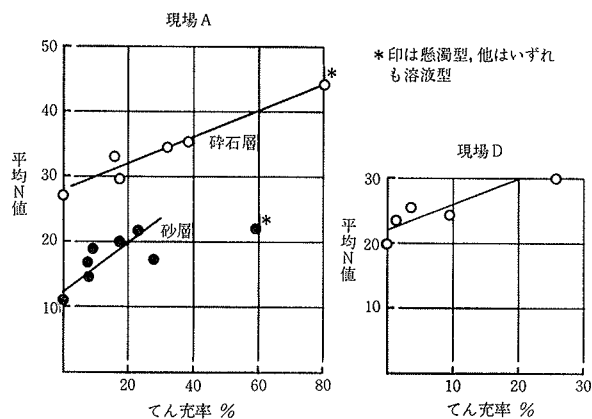
4.1. 注入効果とてん充率の関係

図一4に各現場の透水試験結果とてん充率をプロットした。図中、てん充率がゼロの値は注入前の透水係数である。また、てん充率は透水試験を行なった深度の値を採用している。てん充率の増大につれて透水係数が低下するのは現場Bの砂礫層と現場Cである。現場Bの砂礫層は注入前の透水係数も大きい、わずかなてん充率でも 10^{-4} cm/sec 程度までは低下し、てん充率が50%前後となると 10^{-5} cm/sec 前後となる。てん充率は注入孔から最も離れた位置の値であり、瞬結注入材で見られる注入孔を中心とする改良土柱が相互に連続していない場合にはてん充率は低くなるが、透水係数は周辺の改良土柱の影響によりある程度は低下するものと思われる。てん充率が50%を越える区では改良土柱は相互に連続し、その結果低い透水係数を示しているのであろう。なお、後述するように、砂礫層の改良土柱の内部と見られる位置ではてん充率は70%以上となる。現場Bの砂層ではてん充率が高くても透水係数の高い例が見られるが、脈状浸透のため均一な止水化が行なわれていないことを示す。

現場Cでは良く締った砂層であるが、てん充率が50%以上で 10^{-5} cm/sec 以下の透水係数となることを示している。ここでは先のてん充率の分布からも、また後述する本注入後の切羽の観察からも粒子間浸透が主体であり、50%以上のてん充率の区では改良土柱が連続していると思われる。



図一4 てん充率と透水係数との関係



図一5 てん充率とN値の関係

現場A及びDでは透水係数とてん充率の関係は明瞭ではない。現場A、Dともにてん充率が30%未満であり、改良固結土柱は連続していないと思われる。このような状態では透水係数の低下は十分には期待できず、またバラツキも多いと思われる。

これら4現場の調査例によれば、粒子間浸透を主体とする場合にはてん充率が50%を越えればかなりの止水効果が期待でき、これ以下のてん充率では十分な止水効果は得られないといえよう。また、脈状浸透を主体とする場合にはてん充率が高くても透水係数のバラツキが大きくなるといえる。

次にN値とてん充率の関係を図一5に示す。図中、N値は各層の平均値を採用し、てん充率も平均値を採って

いる。現場Aでは砕石層、砂層ともにN値とてん充率とは直線関係にあり、てん充率は懸濁型を除いて低いにもかかわらずN値の増大が見られる。現場Dでも測定点数は少ないが同様の傾向にある。

注入材による砂質土の強度の増大は注入前の砂の密度、注入材自体の強度、浸透形態、注入圧など種々の因子に支配されるが、無機系溶液型の水ガラス系注入材のようにホモゲル強度の低い注入材ではてん充率を高くするだけでは常に強度が増大するとは考えられない。むしろ、粒子間の構造を乱すことなく強度上の弱点を注入材によって補強、てん充すれば、特に高いてん充率や均一な粒子間浸透は必要としないと考えられる。今回の調査結果はこの考えを裏付けるものであり、3.2.で述べた現場Cにおける高注入区でのN値の低下もこれに対応している。

4.2. 本注入への反映

試験注入の結果を参考に本注入を計測、実施した。注入率は表-3に示す値を採用し、薬液はいずれも溶液型

てん充率、損失係数などから注入率及び注入量を算出している。その際、てん充率は60~90%の値を採用しているが、今回の調査ではかなり低いてん充率が実測値として得られた。すなわち、砂層の現場C、Dはともに30%前後のてん充率であり、また、現場A、Bでも砕石層、礫層では80%に及ぶ所もあるが砂層では約30%となる。このようにてん充率が低いということは注入材が上部あるいは水平方向に逸出していることを示しており、今回の調査でも図-3に示しているように注入材が注入範囲より上部にもかなり見出されている。水平方向への逸出状況については詳細は不明であるが、脈状浸透が生じた場合の脈の水平距離が注入孔から2~3mに及ぶことがあることを確認しており、水平方向の逸出も無視できない。このような逸出による改良範囲の拡大も全体としての注入効果の発現に寄与していると考えられ、これらの点をふまえた注入設計についても検討の余地があろう。

現場	注入材	注入率	注入効果	浸透形態	てん充率	
					範囲	平均値
A	溶液型	36%	強化効果大	脈状浸透	砕石層 27.5~48.7%	41.3%
					砂層 17.8~34.7%	26.6%
B	"	36%	礫層では湧水ないが、砂層で一部湧水あり	礫層 粒子間浸透	63~88%	72.2%
				砂層 脈状浸透	13~92%	28.2%
C	"	21%	止水効果大	粒子間浸透	30.2~35.4%	32.8%
D	"	31.3%	一部で湧水激しく補足注入を行なう	脈状浸透	5~86%	29.2%

表-3 本注入部の施工結果

のものとした。シールド掘進時に全断面注入部の切羽を観察するとともに試料土を採取し、てん充率を測定した。その結果を表-3に示す。

現場Aでは比較的低いてん充率であったが注入効果は十分に認められ、浸透形態は脈状を主体としていた。現場Bでは砂礫層での止水効果は十分であり、粒子間浸透部のてん充率は70%前後に及んでいた。しかし、脈状浸透部の砂層ではてん充率の低い所で局部的な湧水が見られた。また、現場Cはほぼ均一な粒子間浸透が見られ、てん充率がやや低いにもかかわらず止水効果は十分であった。さらに、現場Dでは試験注入の結果からも湧水の発生が懸念されたが、やはり一部で湧水があり、この部分ではてん充率が10%未満であった。ここでは注入率の不足と判断し補足注入を行なった。

4.3. 注入材の逸出

薬液注入工法の設計では改良範囲を決定し、間隙率、

5. おわりに

試験注入を行なった4現場について注入効果と注入材の分布状況を調査し、注入材の浸透及び注入効果の発現に関して若干の考察を行なった。その結果によれば、注入効果は地盤の性状、注入方法、注入材、注入率などによって異なるが、その発現は地盤内間隙の注入材によるてん充状況に支配される。注入効果のうち止水性が十分な値となるのはてん充率が50%以上で粒子間浸透の場合であり、強度に関しては比較的低いてん充率で脈状浸透の場合でもある程度の効果が期待できる。したがって、注入の目的、地盤条件を考慮した注入の設計が必要であるといえる。また、その際、改良範囲の設定、注入材の逸出による改良範囲の拡大についても考慮する必要があると思われるが、これらの点に関してはデータの集積が必要であり、今後さらに調査事例を積み重ねる所存である。

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