

薬液注入工法における施工管理に関する研究 (その3)

——注入固結体の物性とてん充特性の関係——

川 地 武 喜 田 大 三

Studies on Performance Control of Chemical Grouting (Part 3)

—Relations Between Engineering Properties
and Void-filling Properties of Grouted Sand—

Takeshi Kawachi Daizo Kita

Abstract

As reported in the previous paper, it was inferred by the field survey on the grouted site that the improvement effect of grout depended on the distribution of the injected grout. Laboratory tests were then carried out to quantitatively clarify the relation between improvement effect and distribution of grout. The results obtained were the following: (1) Compressive strength (q_u) of silicate-injected sand varies from 0.2 to 4.5 kgf/cm² and permeability (k) from 10^{-4} to 10^{-8} cm/sec. These properties depend on concentration of silicate, gelation time, kind of sand, etc. (2) The value of q_u increases with grout concentration in voids while k decreases. The relation between q_u and grout concentration in voids is expressed as $y=ax^b$ ($a>0$, $b>1$). (3) Using these relations, the necessary ratio of voids filled by grout can be assumed to satisfy the desirable degrees of strength and permeability.

概 要

薬液注入工法における適切な施工管理手法確立の一助とするため、既報のように注入地盤における注入材の分布状況を調査してきた。その結果、注入効果が注入材による間隙てん充率に支配される所が大きいたことが判明している。そこで、これを確認し、両者の関係をより定量的に把握するために砂を用いた室内注入実験を行なった。その結果、以下に列挙する知見が得られた。

(1) 水ガラス系注入材による固結砂の一軸圧縮強度 (q_u) の範囲は 0.2~4.5 kgf/cm²、透水係数 (k) は 10^{-4} ~ 10^{-8} cm/sec オーダーの範囲にあったが、これらの値は水ガラス濃度、注入材の種類、砂の種類などによって変化する。(2) q_u はてん充濃度の増大につれて大きくなり、固結砂とホモゲルの強度比 (y) はてん充濃度 (x) と $y=ax^b$ ($a>0$, $b>1$) の式で表示できる。 k は浸透注入の生じている場合にはてん充濃度の増大につれて低下する。(3) これらの関係から、 q_u , k の期待値に対応する必要なてん充率を推定することができる。

1. はじめに

薬液注入工法は簡便な地盤改良法として広く採用されているが、効果の確実性、持続性に疑問の余地を残すとされている。その理由のひとつとして、薬液注入工法の施工管理手法として適切なものが確立されていないことがあげられ、現在各方面で施工管理手法の確立を目的とした研究、調査が行なわれている。筆者らは注入地盤における注入材の分布状況を把握することにより、適切な施工管理手法確立の手掛りとするため、注入地盤中の

注入材含有量測定法を確立する¹⁾とともに、この方法を注入現場に適用した。その結果、注入材含有量実測値から求めたてん充率の分布の一端を明らかにするとともに、注入効果との関係についても有効なデータを得ている^{2),3)}。この中で、注入効果を発現させるのに必要なてん充率が存在し、これは地盤条件、注入方法、注入材などによって異なることが推察された。そこで、この点をより明確にするために室内実験を行ない興味ある結果を得たので報告する。なお、今回の実験では地盤は細粒分の少ない未固結の砂地盤を想定している。

2. 実験方法

2.1. 供試材料

(1) 砂 鬼怒川産の川砂及び珪砂 (L6号) を用いた。その粒径分布は図-1 に示す。

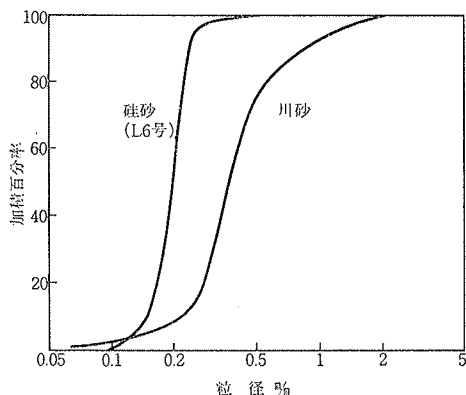


図-1 粒径加積曲線

(2) 注入材 ゲルタイムが5~10秒及び8~10分の水ガラス系溶液型の薬液を使用した。文中、前者を瞬結性、後者を緩結性の注入材と呼んでいる。なお、注入材の水ガラス濃度は50%を標準とし、より希釈した水ガラスも用いているが、その際は硬化剤の濃度によってゲルタイムを調節している。

2.2. 供試体の作成

既報¹⁾の注入実験槽 (φ 30 cm, h 50 cm, アクリル製) に砂を水締めし、所定の間隙率 (川砂: 32.1%, 珪砂: 37.5%) となるように木槌で打撃した。この飽和砂に薬液を定量ポンプで注入し、注入翌日に脱型後、固結体を取出した。この固結体から試験用供試体 (φ 5 cm, l 10 cm) を切り出し、ビニール袋に保存した。

2.3. 試験項目と方法

- (1) 一軸圧縮試験 土質工学会法に準じて行なった。
- (2) 三軸圧縮試験 (UU) 側圧を 0.5, 1.0, 2.0 kgf/cm² とし、ひずみ制御式で行ない、粘着力及び内部摩擦角を求めた。

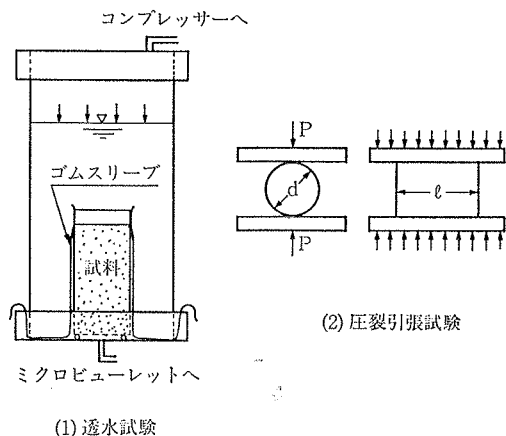


図-2 試験法概略図

(3) 圧裂引張り試験 固結体の引張り強度を求めるためコンクリート分野で用いられている JIS A1113 の圧裂法による試験を行なった。試験の概要を図-2 に示す。

(4) 透水試験 図-2 に示す方法で圧力を 1 kgf/cm² に設定し、流出水量を測定し、透水係数を算出した。

(5) 注入材含有量試験 各種の試験を行なった後の試料を粉碎し、既報の方法によって注入材含有量を測定した。砂の間隙率とこの値から注入材による間隙でん充濃度を求めた。この値は含有する注入材が標準配合の薬液 (水ガラス濃度50%) に由来するとして求めた値である。

3. 実験結果

3.1. 固結砂の物性

(1) 強化特性 固結砂の圧縮試験の際の応力・ひずみ曲線を図-3 に示す。図-3 には一軸圧縮試験及び三軸圧縮試験の両方の結果を示している。曲線は注入材によってやや形状が異なり、瞬結ゲルの固結体ではピークが一軸圧縮の場合以外では不明瞭であるのに対し、緩結ゲルではピークの異なる二つの曲線を合成したような曲線が得られた。この曲線の形状は砂の種類によって大きな差はない。また、一軸圧縮試験における破壊ひずみは1~1.2%であるのに対し側圧条件下では7%以上と著しく大きくなる。この現象は注入材によって固結させた砂の変形係数あるいは弾性係数を、一軸圧縮試験のみから

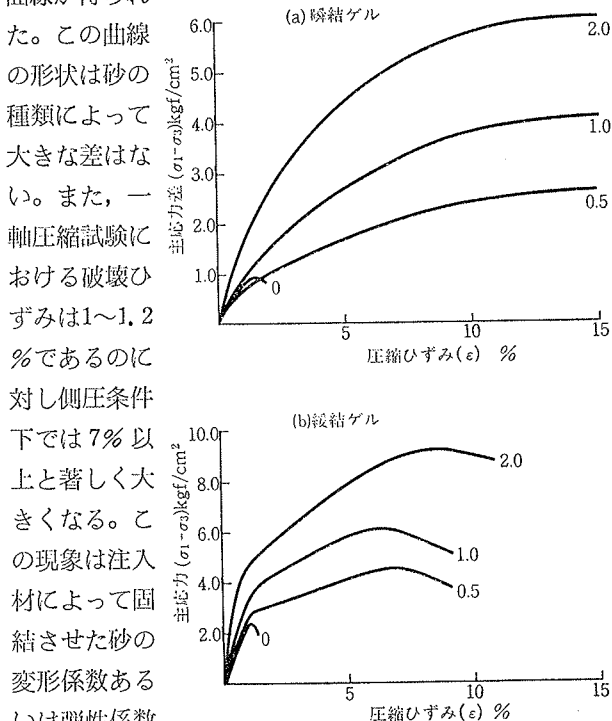


図-3 固結砂の三軸圧縮試験時の変形性状 (添字は側圧 kgf/cm²)

論じるのは危険であることを示唆している。また、ホモゲル強度が比較的大きい緩結性注入材の固結砂は変形特性の異なる砂とホモゲルから成る複合材と見なすことができよう。

水ガラス濃度50%の固結砂についての強化特性値を表-1 にまとめて示す。表中、緩結ゲルの固結砂は粘着

	川 砂		珪 砂		
	瞬 結	緩 結	瞬 結	緩 結	
一軸圧縮試験	圧縮強度 qu kgf/cm ²	1.60	1.80	1.75	4.23
	破壊ヒズミ ϵ %	1.2	1.1	1.4	0.8
	変形係数 E_s kgf/cm ²	118	310	295	547
試三軸圧縮試験	粘着力 C kgf/cm ²	0.33	0.1~1.1	0.33~0.57	0.33~0.70
	内部摩擦角 ϕ	34°~41°50'	42°10'~49°50'	34°20'~41°50'	41°50'~52°30'
	圧裂引張強度 σ_T kgf/cm ²	0.45	0.46	0.25	0.46
	注入前の間隙率	32.1%		37.5%	

表-1

力、内部摩擦角ともに変動が著しいが、瞬結ゲルに比べて内部摩擦角が大きい点に特徴がある。また、表には引張り強度を示しており、0.25~0.7 kgf/cm²の範囲にあるが、水ガラス濃度が低くなると0.1 kgf/cm²程度まで低下する。

次に、固結砂の一軸圧縮強度と注入材の水ガラス濃度との関係を図-4に示す。いずれの場合も水ガラス濃度の増大につれて強度が上昇するが、強度のバラツキが特に瞬結ゲルにおいて著しい。これは、後述するように同じ水ガラス濃度でもてん充率に幅があることや、瞬結ゲルでは脈状の注入が行なわれる所があることなどに起因するものであろう。なお、いずれの場合にも固結砂はホモゲル強度より大きな強度を示す。

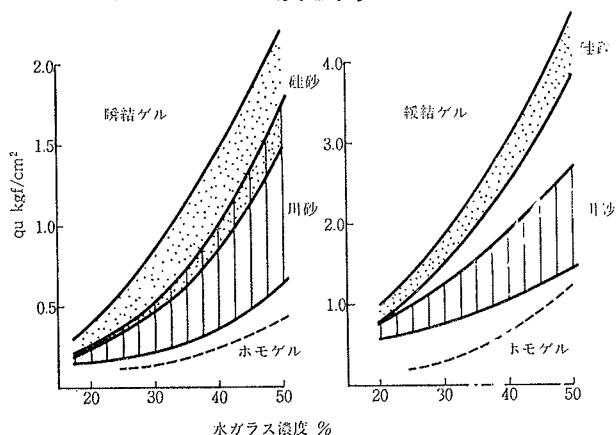


図-4 固結砂の一軸圧縮強度

さて、強度は瞬結ゲルに比べて緩結ゲルの固結砂が2倍前後の値になり、また珪砂の方が川砂に比べて高強度となり、バラツキも少ない傾向を示す。このような傾向が見られる主な理由はホモゲル自体が高強度を有することおよび緩結ゲルの方が砂の粒子配列を乱すことなく注入されることなどにあると思われ、珪砂と川砂の差は注入材のてん充特性の差をも反映していると考えられる。

(2) 止水性 供試した川砂、珪砂は前述の間隙率となるように締め固めた状態でそれぞれ 2.3×10^{-2} cm/sec, $1.6 \sim 10^{-2}$ cm/sec の透水係数であった。この砂に注入した固結砂は $10^{-4} \sim 10^{-8}$ cm/sec の幅広い範囲に

分布し、図-5に示すように、注入材の種類、砂の種類によって分布範囲がやや異なる。すなわち、瞬結ゲルによる固結砂は川砂で $10^{-4} \sim 10^{-6}$ cm/sec のオーダー、珪砂では $10^{-5} \sim 10^{-7}$ cm/sec のオーダーとなり、同一の水ガラス濃度でも100倍近い差を生じる。一方、緩結ゲルによる固結砂は

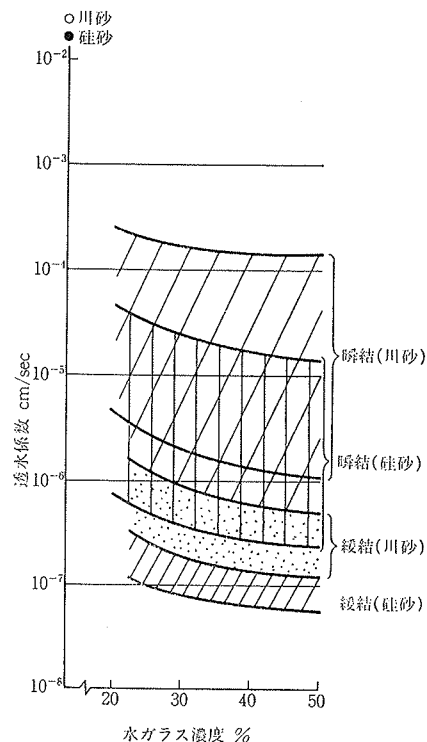


図-5 固結砂の透水係数

川砂で $10^{-6} \sim 10^{-7}$ cm/sec, 珪砂で $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/sec のオーダーに分布しており、瞬結ゲルに比べて分布範囲がせまく、透水係数も低い。このような透水係数の分布の差は後述するようなてん充率分布の差だけでなく、注入材の浸透パターン之差にも由来すると思われる、瞬結ゲルの固結砂でホモゲルの脈が走っているもので特に透水係数が高くなることが確認された。

3.2. 固結砂のてん充濃度の分布

固結砂の注入材に由来するケイ酸含有量を測定し、この値から間隙てん充濃度を求めた。その結果を図-6に示しているが、瞬結ゲル、緩結ゲルともに水ガラス濃度の増大につれててん充濃度が高くなる。てん充濃度の範囲は瞬結ゲルのほうが幅広く、間隙のてん充が不均一に

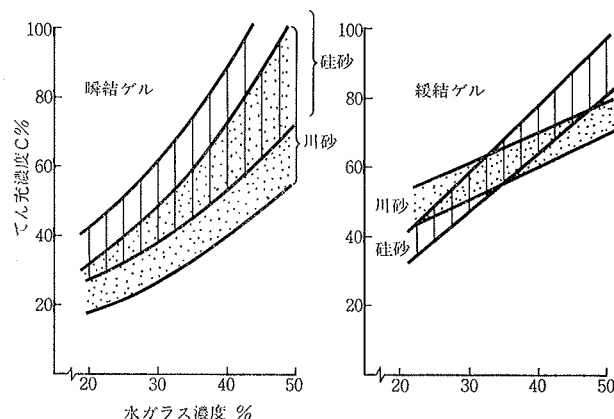


図-6 固結砂のてん充率

進行することを示している。なお、図中、てん充濃度が100%を越える所が見られるが、ここでは明瞭な脈状注入が行なわれている。

一方、川砂と珪砂を比べると珪砂のほうでてん充率が高くなる傾向が見られ、珪砂の方が薬液が浸透しやすいことを示唆している。

4. 考察

4.1. 各物性値の相互関係

3. で述べた固結砂の物性値を相互に比較するために、図-7、図-8を示す。図-7では引張り強度(σ_T)を q_u に対してプロットしているが、バラツキはあるものの一定の相関性が認められる。

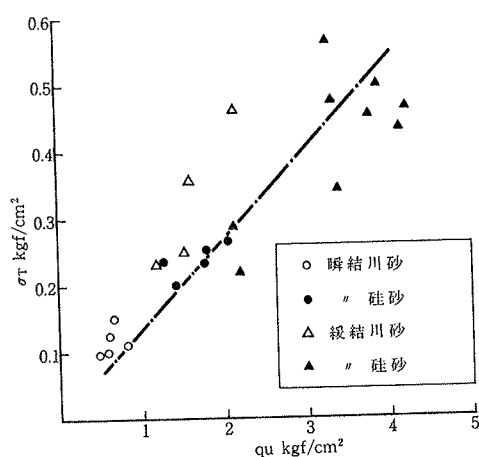


図-7 引張り強度(σ_T)と圧縮強度(q_u)の関係

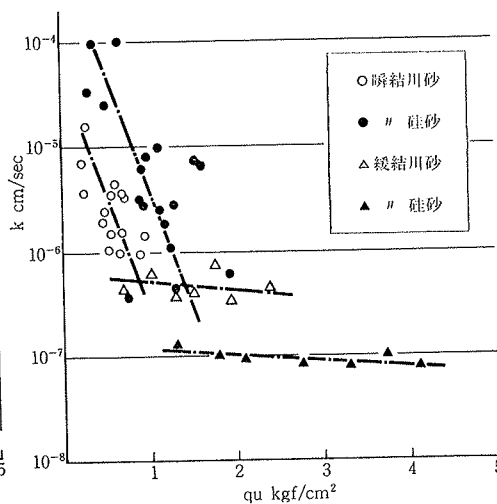


図-8 透水係数(k)と圧縮強度(q_u)の関係

σ_T は三軸圧縮試験の粘着力(C)が試験が繁雑かつCの値の再現性が低いために、Cの代用として採用したが、固結砂の q_u から大まかな値が推定しうる可能性がある。薬液注入工法の設計の際、固結土のCを用いて注入範囲等を決定することがあるが、その際、Cを精度良く測定することは容易ではない。そこで、Cの代用として σ_T を採用することがあるが、 σ_T は上述のように q_u から推定しうるよう、さらに両者の関係について検討を深める価値があろう。

次に、図-8には固結体の透水係数と q_u の関係を示す。ここでは両者の関係は固結砂の組成すなわち注入材、砂の種類によって異なる。緩結ゲルではkは q_u の大小によって余り変化しないのに対し、瞬結ゲルでは q_u の減少によって急激にkが増大する。いずれの場合も q_u が増大すればkは低下するので、目標とする透水係数が設定できれば、そのため

に必要な q_u の下限を決定することができる。

なお、図-8は固結砂のうち、脈状注入ではなく浸透注入と見なしうるものについてのみ図示したものである。脈状注入になるものではkと q_u の関係は図-8のような単純な関係では表わせない。

4.2. 固結砂の物性とてん充率関係

固結砂の物性は一般的には注入前の砂の間隙率、細粒分含有量、注入材によるてん充率、注入材の物性、注入条件、養生環境など多くの条件に支配される。今回の実験ではてん充濃度を実測しているの、これと強度及び透水係数の関係を見た。強度についてはホモゲルの強度の異なる注入材を用いるため、絶対値の比較が難しい。そこで、固結砂の q_u と標準調合(水ガラス50%)のホ

モゲルの q_u の比(S/H)を求め、これとてん充濃度の関係を図-9に示した。珪砂、川砂ともに $y=ax^b$ の形で示すことができ、特に珪砂では相関係数が高くなる。また、てん充濃度が同一の場合には川砂の方がS/Hが小さくなる。

いずれの場合にも固結砂の強度がホモゲルのそれをうわまわる点、すなわち、 $S/H \geq 1$ となる点

のてん充濃度を計算によって求めることが可能であり、その値は、川砂で47.7%、珪砂で38.7%である。このように、砂の強度をホモゲルの強度以上の値とするためにはてん充濃度で40%前後を越える必要があり、この値は注入設計あるいは注入地盤の事後調査などの際のひとつ

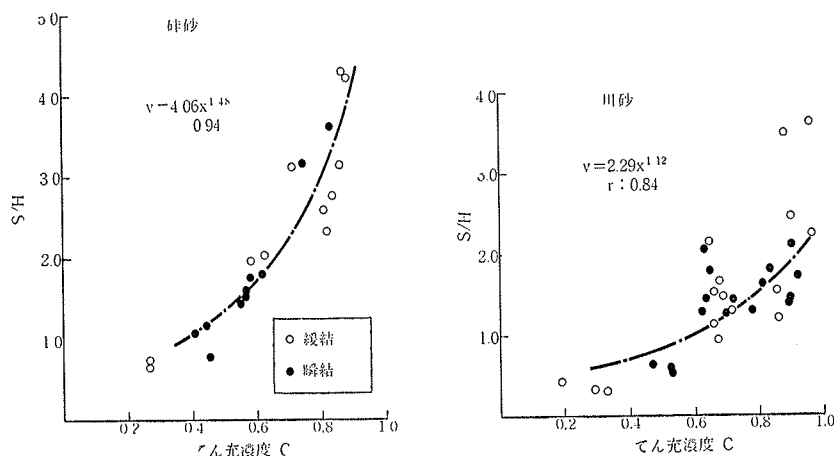


図-9 固結砂・ホモゲル強度比(S/H)とてん充率の関係

の目安となる。

次に、透水係数とてん充濃度との関係は図-10に示す。ここでは、瞬結ゲルの場合には脈状注入の生じている所と浸透注入をみなし得る所とでは両者の関係が異なる。すなわち、脈状注入の生じている箱囲ではてん充濃度が80~100%、あるいはそれ以上でもkは $10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/secのオーダーとなり、止水性は充分と

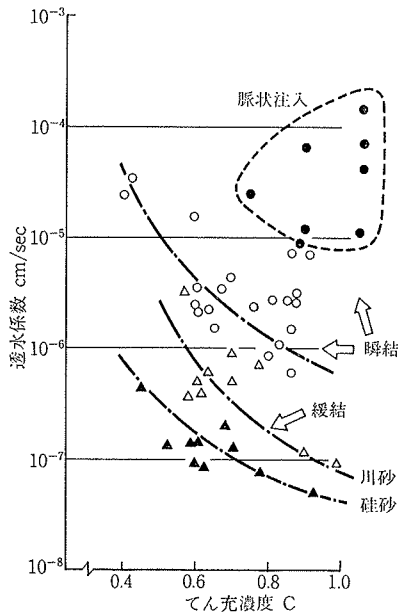


図-10 透水係数とてん充率の関係

言えない。これに対し、特に印をしてないが浸透注入の所ではkはてん充濃度(C)の増大につれて低下する。

一方、緩結ゲルの場合には脈状注入は生じないので、kはCの増大につれて低下する一方であり、川砂に比べて珪砂のkがやや低い。これらの結果から、砂を止水化する際の透水係数の目安である 10^{-5} cm/sec以下とするのに必要なてん充濃度を求めると、瞬結ゲルで55%以上、緩結ゲルではデータが少ないので不正確だが40%以上と推定される。なお、瞬結ゲルで脈状注入が生じる場合にはてん充濃度が100%以上でもkを 10^{-5} cm/sec以下とすることは困難である。

ところで、注入現場でてん充率と透水係数との関係を検討した例³⁾では、脈状注入の生じる場合には透水係数のバラッキが大きく、浸透注入と見られる場合で止水性が充分となるのはてん充率が50%以上であった。今回の実験結果は傾向としては現場調査の結果と一致している。

以上述べたように、注入効果とてん充濃度との関係から浸透注入を主体とする場合には、目標とする強度、透水係数を設定すれば、必要なてん充率を推定することができよう。実際の設計に当っては地盤条件、施工条件などに内在する各種の不確実要素を加味する必要があるため、ここで得られる必要なてん充率は一応の目安と考えることができる。

また、脈状注入を主体とする場合には止水性の向上が必ずしも充分ではないことが判明した。しかし、この場合にも強度上昇効果は期待することができるので、注入目的に応じた工法の選定が必要となる。

5. おわりに

薬液注入工法における施工管理手法確立の手掛かりを得るため、注入地盤の注入材の分布と注入効果について現場調査を行ってきた。その中で、注入効果がてん充濃度と密接な関係にあることが判明した。そこで、室内実験によってこの点を確認し、両者の関係を定量化することを試みた。また、瞬結性あるいは緩結性の水ガラス系注入材を注入した固結砂の物性についても若干の検討を行なった。得られた結果は次のようにまとめることができる。

(1) 固結砂の一軸圧縮強度は $0.2 \sim 4.5$ kgf/cm²、破壊ひずみは1%前後であり、三軸圧縮試験では注入材によって応力ひずみ曲線の形状が異なり、また粘着力、内部摩擦角の変動幅が大きい。引張り強度は $0.1 \sim 0.6$ kgf/cm²に分布する。透水係数は砂の種類、注入材の種類によって大幅に変化し、 10^{-4} cm/secから 10^{-8} cm/secのオーダーとなるが、緩結性注入材では $10^{-7} \sim 10^{-8}$ cm/secと特に低くなる。

(2) 固結砂の一軸圧縮強度はてん充濃度の増大につれて増大する。固結砂とホモゲルの強度の比(S/H)はてん充濃度(C)と $y = ax^b$ ($a > 0, b > 1$)の式で表わすことができ、砂の種類によって係数a, bが異なる。この式によれば、固結砂の強度がホモゲルのそれをうまわるのは、Cが40%前後以上の場合である。

(3) 固結砂の透水係数は瞬結ゲルで脈状注入の生じている場合を除き、てん充濃度の増大につれて低下する。同一てん充濃度の場合には緩結ゲルの方が透水係数が1オーダー低くなる。止水化を図る際の透水係数の目標値である 10^{-5} cm/sec以下とするには、Cは瞬結ゲルで55%以上、緩結ゲルでは40%以上とする必要がある。瞬結ゲルで脈状注入の生じる場合には 10^{-5} cm/secを確保することは難しい。

以上の結果は川砂、珪砂を用いた室内実験の結果から導いたものであり、実際の注入設計、施工管理にあたってはさらに各種の要因についての配慮が必要であるが、注入効果を得るために必要なてん充率の目安を与えたもので、今後さらに現場調査などによって検証したいと考えている。

参考文献

- 1) 川地, 喜田: 無公害グラフトに関する研究(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