

(56) 高浸透性グラウトによる空隙質地盤の
注入特性と改良性

GROUTABILITY AND HYDRAULIC IMPROVEMENT OF A HIGH GRADE PERMEABLE
SUSPENSION GROUT INJECTED INTO CAVERNOUS SOIL AND ROCK

寺戸康隆*・寺本勝三**・松井健一***・増田修一***・小菅啓一****
Yasutaka TERADO, Katsuzo TERAMOTO, Kenichi MATSUI, Shuichi MASUDA and
Keiichi KOSUGE

Authors developed a new durable high grade permeable non-cement suspension grout i.e. Silica lime which is composed of silica fume and slaked lime manufactured by using both physical and chemical high grade dispersion method. We prosecuted in situ grouting test of it into the Kanto Loam i.e. a weathered deluvial volcanic ash and cavernous volcanic sandstone. It is proved that Silica lime grout permeates very smoothly into and fills the voids of the above-mentioned formation and the effect results in reducing the permeability. According to the in situ test, it is confirmed that permeability depends on groutability ratio regarding the size of formation particles or its effective porosity and grout grains (not initial grains but slurry aggregation grains).

1. まえがき

注入工法はダム、トンネルおよび都市構造物のインフラ開発（あるいはメンテ）、地震の液状化対策等において地盤・岩盤の遮水性の改良を主目的にした主ないし補助工法として位置づけられている。特に大深度地下の作業環境においては不可欠の補助工法である。今日、直面する地質の多様性、新規性、環境アセスメント等に対処する新たな設計要求から、材料および施工法が見直される時期にある。

筆者らは長期安定性のある高浸透性注入材のニーズに応じて、歴史のある無機系懸濁型材料のうちでシリカフュームと消石灰を選び、高浸透化のための高分散化技術の研究成果を適用して新材料（シリカライムと呼称）を開発した^{1)・2)}。これまでの室内模型砂地盤の注入試験結果を踏まえ^{1)・2)}、空隙質地盤・岩盤を選んで注入試験を実施し、現位置レベルの注入特性と改良性を確認した。

この結果から、小空隙を対象にした懸濁型グラウトの浸透性（浸透能）はグラウトスラリーの粒度と地盤・岩盤の間隙の関係、すなわちグラウトビリティ比に大きく左右されることがあらためて分かった。本論ではこれらの結果を述べ、あわせて注入材料および施工法について提案している。

* 正会員 日本基礎技術(株)技術本部

** 正会員 西松建設(株)技術部

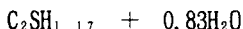
*** 正会員 西松建設(株)技術研究所

**** 電気化学工業(株)特殊混和材部

2. シリカライムの特性

シリカライムは超微粒非晶質二酸化珪素（シリカ）であるシリカフェームと微粒の水酸化カルシウム（消石灰）の混合物を解砕・分散して、かつ高性能分散剤を前後で添加して製造した高分散化低粘性超微粒子グラウトである。

シリカフェームと水酸化カルシウムの反応はフライアッシュなどのボゾランと同様であり、化学量論的には下記に示す化学反応式で表されカルシウムシリケート水和物が生成される³⁾。これがグラウトの硬化体である。



ここに、C=CaO, S=SiO₂, H=H₂O

シリカフェーム中の非晶質SiO₂量が大きい方が水酸化カルシウムの反応量が高い⁴⁾。表-1は使用したシリカフェームの化学成分と物理的性質である。純度は94%である。表-2は使用した消石灰の物理的性質である。平均粒径は5.4 μmである。

表-3は分散化後の水比300%のシリカライムスラリーの標準的物性である。

スラリーの平均粒径が10 μm未滿、粘度が10cP未滿であり、ブリージングが非常に小さい。硬化後のホモゲルの圧縮強度は4週で10kgf/cm²(1MPa)前後であり、軟岩の強度に匹敵する。

表-1 シリカフェームの化学成分と物理的性質

製品名	化学成分 (%)				物理的性質		
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	igloss	比重	2.20	
Elkem 940-U	92.1	0.5	0.6	2.6	ブレーション値	20 m ² /g	
					粒	G ₅₀	0.10 μm
						G ₈₅	0.15 μm
						G ₉₅	0.20 μm

表-2 消石灰の物理的性質

比重	2.24	
純度	74 %	
ブレーション値	3 m ² /g	
粒	G ₅₀	5.4 μm
	G ₈₅	20 μm
	G ₉₅	40 μm

表-3 シリカライムスラリーの標準的物理的性質 (水比300%)

スラリー密度	1.16	
粘度	5 ~ 7 cP	
スラリー 粒度	G ₅₀	5 ~ 7 μm
	G ₈₅	11 ~ 14 μm
	G ₉₅	15 ~ 20 μm
ブリージ ング 率	24時間後	0 %
	硬化時	5 ~ 15 %

3. 関東ローム層への注入試験

東京都町田市の南部、武蔵野段丘に相当する洪積台地を形成する関東ローム層（このうち上部の立川ローム層）を選び、シリカライムの注入試験を行った。1次ロームであり、堆積後の木根痕の分布等によりむし多孔隙で比較的透水性である（透水係数 $k = 5 \times 10^{-4} \sim 5 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ）。注入方法は単孔パターンで（単）ステージ法、ロッド引き抜き法および二重管ダブルパッカー法の3通りを実施した。水比は300%とし、注入圧力と注入速度については、それぞれステージ注入孔では0.1kgf/cm²(0.01MPa)と5 l/minで、二重管ダブルパッカー注入孔では1kgf/cm²前後(0.1MPa)(0.5~1.5kgf/cm²)と5 l/minで安定した注入状況を示した。単位注入量はいくらかでも入る状況にあったが、二重管ダブルパッカー注入孔では704 l/33cm長あるいは204

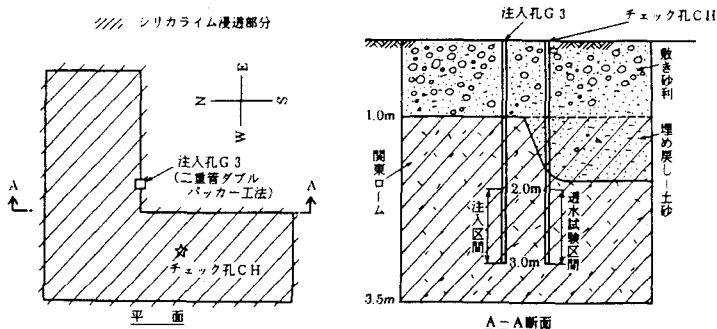


図-1 関東ロームの注入後のはぎとり結果

kg/33cm長を見届けた。図-1は二重管ダブルパッカー注入孔周辺の注入後はぎとり結果を示す。下端の2つのバルブのみを注入したが、グラウトはローム中に分散した木根痕等の空隙を充填するようにほぼ均等に万遍なく注入されており、注入されたグラウトの有効半径は確実に1.5m以上、2.0m近くまでであった。

4. 空隙質火山軟岩

図-2は鮮新世の火山活動で生成した火山砂岩を対象にして行ったシリカライムの注入試験パターンを示す。細かな地質状態は図-3で示される。

火山砂岩は水平に近い角度で堆積し、20cmから1mの厚さで中粒部と粗粒部が互層していた。透水性は現場での有効圧レベル⁵⁾の測定結果では200~800ルジオン(透水係数では $k=10^{-3}$ cm/s)オーダーであった。

ボーリングコアの室内透水試験では $k=3.25 \times 10^{-3}$ cm/s(水頭差 $\Delta H=2.0$ m, 動水勾配 $i=32.57$)が示され、現場透水試験結果と整合した。

注入方法はステージ法(ステージ長3.0m)を選択し、グラウトスラリーの水比は300%とした。注入圧力と注入速度はそれぞれ 5kgf/cm^2 (0.5MPa)、 5 l/min を標準としたが、圧力は 7.5 kgf/cm^2 、注入速度は 7.5 l/min まで与えたステージもある。注入機器のレイアウトは図-4に示す。連続分散機の解砕速度は5ないし 10 l/min で行い、 3 m^3 のタンクにスラリーを仮置きした。注入に供したスラリーのブリージン率は24時間では0%、硬化後(1週間後)で5~10%程度、粘性は6cP前後にあった。

ホモゲルの一軸圧縮強度(4週)は 10kgf/cm^2 (1MPa)、変形係数は $1,300\text{ kgf/cm}^2$ 程度であった。

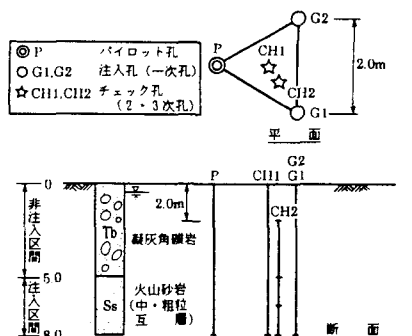


図-2 試験パターン

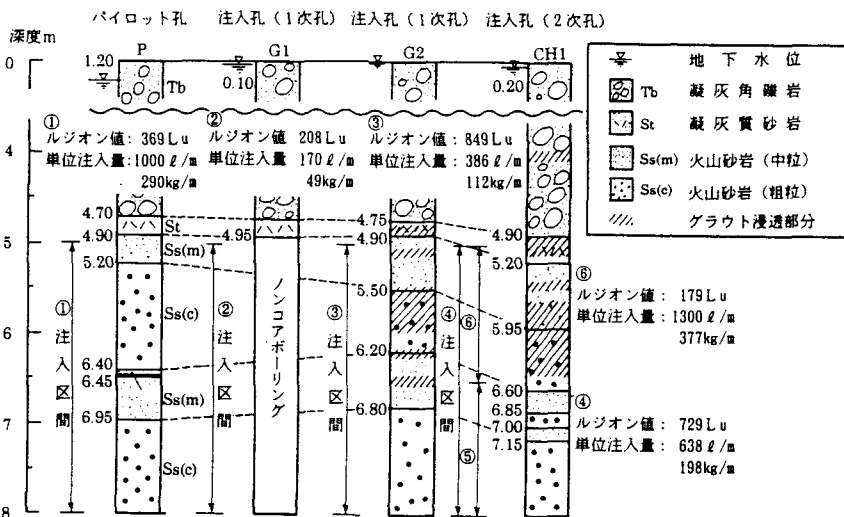


図-3 地質柱状図, 注入実績およびグラウト浸透部分の対比

単位注入量は 170～1,300 l/mあるいは49～377 kg/mの範囲で平均値は640 l/mあるいは185 kg/mであり、この種の岩盤では非常に多い注入量であった。(図-2参照)

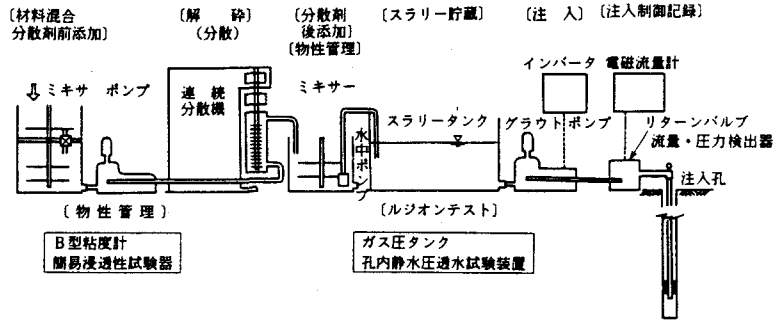


図-4 グラウチングシステムのレイアウト (分散プラント方式)

グラウトの注入形態と改良効果についてはルジオンテスト、はぎとり調査およびボーリングコアの室内透水試験結果から知ることができる。図-3にはボーリングコアによるグラウトの浸透部分を示す。図-5はパイロット孔からチェック孔 (一般的には2次孔ないし3次孔に相当) までのp-q曲線の推移を示す。

シリカライムはコアからも岩の基質の間隙に浸透注入していることが確認された。しかし、全区間の浸透でなく、未浸透部 (未改良部) が歯抜け状に残された。これは中粒部と粗粒部の互層のうちグラウトは粗粒部に浸透しにくかったことが主な理由である。

(粗粒部は堆積時の分級が悪く細粒分も含まれるため有効間隙率が中粒部に比べ小さいことのようにである)。中粒部が多くを占めるチェック孔CH1孔 (2次孔相当) のステージ上半部だけにパッカーをセットして行ったルジオンテストでは、ルジオン値は100Lu 台まで低下した。また、上半部と粗粒部の多い下半部を分けて行ったチェック孔の注入では両部分とも1,000 l/m以上の単位注入量が示され、まだ注入できる余地が認められた。追加チェック孔CH2孔 (変則的だが3次孔に相当) のルジオンテストでは上半部は17.1ルジオンが示され、シリカライムの浸透領域の拡張につれてルジオン値が低下した。

チェック孔CH1孔のステージ上半部のグラウトの浸透が見られた部分のボーリングコアの室内透水試験では動水勾配が $i=50$ 以下では透水係数は $k=1 \times 10^{-5}$ cm/s以下が示された (図-6)。

以上の結果を考察すると、当該火山砂岩は基質の間隙性が異なる中粒部と粗粒部が20cmから1mの厚さで互層するため、確実に浸透注入させるためには注入区間長を短く、例えば1m単位にする必要がある。シリカライムは硬化が遅く、24時間以内はほとんど初期の物性が変わらないので、短区間を同時ないしは引き続き

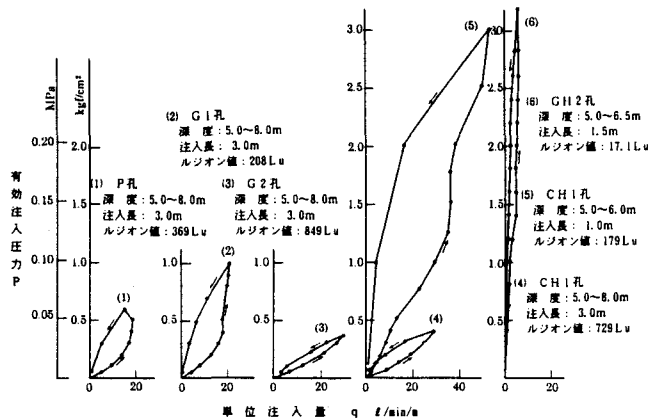


図-5 パイロット孔からチェック孔 (2~3次孔) までのP-q曲線の推移

行う施工法を工夫すれば適度の孔間隔と通常のステージ工法に近い時間帯で各ステージの十分な改良が期待される（通常の材料と工法では改良不能）。図-7ははぎとり断面を示す。シリカライムの浸透部分はボーリングコアと整合し、中粒部と粗粒部の浸透の難易度が反映されている。

4. むすび

シリカライムグラウトを関東ローム層と空隙質火山砂岩に試験注入した結果、次のようなことが分かった。

- (1) 均等に有効空隙をもつ地盤・岩盤には浸透注入によって均等に万遍なくグラウトが注入される。
- (2) しかし、注入区間に間隙性ないしは透水性の異なる部分が複数で介在する場合は、注入されやすい方にグラウトが偏る傾向があり、区間全体の改良効果を図るには工夫が必要である。
- (3) 上記の場合、シリカライムのように長時間スラリーの分散性と粘性が変わらないグラウトであれば、短区間を連続的に同時ないしは引き続き行う施工法を工夫することで歯抜けのない全区間の改良が可能と考える。
- (4) シリカライムグラウトが薬液に近い性質をもつ無機質高分散化低粘性の超微粒子グラウトであり、高浸透性であることが示された。

[参考文献]

- 1) 寺戸, 松井, 原田, 小菅(1995): グラウトスラリーの高分散化/高浸透性のための解砕と分散剤添加の方法, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 1-5.
- 2) 寺戸, 松井, 原田, 小菅(1995): 新しいグラウト材の研究開発(その4) —シリカライム注入試験— 土木学会第50回年次学術講演会概要集, pp. 568-569.
- 3) 近藤連一(1979): スラッグのセメントへの利用, 近藤連一先生追悼記念誌 pp. 15-21.
- 4) 日本学術振興会, 建設材料第76委員会, 第279 回会議(1991): 高性能コンクリート, pp. 8-15.
- 5) 寺戸康隆(1992): 孔内静水圧試験法(多段階孔内定水位試験法)を用いたルジオンテストの適用性について, 応用地質 Vol. 33, No. 5, pp. 1-10.

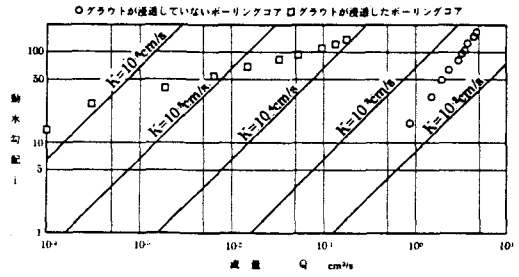


図-6 ボーリングコアの室内透水試験結果

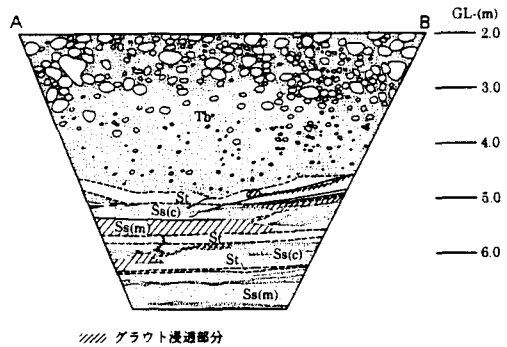


図-7 火山砂岩への注入後の下流側はぎとり断面