

注入材「シリカライム」を用いた注入工法の研究開発 Study and Development of High Grade Suspension Grouting “Silica Lime Method”

増田 修一*
Shuichi Masuda

松井 健一*
Ken-ichi Matsui

佐藤 幸三*
Kozo Sato

原田 耕司*
Koji Harada

寺本 勝三**
Shozo Teramoto

要 約

近年、ジオフロントやウォーターフロントの開発が進んでいる。それに伴い、防災上の観点から、地盤の強度増加や液状化防止などを目的として、信頼性の高い注入材料が求められている。

そこで、地盤・岩盤注入におけるグラウト材として、従来にない浸透性と長期耐久性に優れた懸濁型注入材を用いた注入工法を開発した。コンクリート分野で高耐久性コンクリートの混和材として注目されている超微粒非晶質二酸化珪素（シリカフェーム）に着目し、これに硬化剤として微粒子の消石灰を混合することにより、高浸透性のグラウト材を得た。本論では新しく開発した注入工法の特徴およびこの注入工法を用いた模型地盤への注入試験並びに多孔質火山砂岩層への施工実験の結果について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. シリカライムの基本的性状
- § 3. 室内注入試験
- § 4. 地盤注入施工実験
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

地質的に改良が難しいダム等の基礎処理や、都市部で恒久的要素が伴う注入方式地盤改良等では、優れた浸透

性と耐久性が要求される。

一般に薬液（例えば水ガラス系）は浸透性に優れているが、耐久性（安定性）や環境保全等に関して問題がある。一方、これに代わる材料として超微粒子セメントを使用した懸濁型グラウトが施工されているが、この材料は耐久性に優れているものの、薬液に比較して浸透性やブリーディングの面で不利な点もみられる。そこで優れた浸透性と耐久性を併せ持つ超微粒子懸濁型グラウトの開発が望まれていた。

このような状況下において、コンクリートの分野で注目されている超微粒非晶質二酸化珪素を主成分とするシリカフェームに着目し、これに反応材として特殊処理された消石灰（水酸化カルシウム）を混合することにより、

* 技術研究所地質研究課

** 技術部

浸透性に優れた超微粒子グラウトの製造が可能になった。シリカフェームは、金属シリコンやフェロシリコンなどの珪素合金をアーク式電気炉で製造する際に発生する廃ガス中のダストを集塵して得られる。

しかし、シリカフェームは粒子が多数凝集した状態で存在しており、従来の方法では十分な分散が難しく、超微粒子としての特性を生かすことができなかった。そこで、本工法では微粒子の分散・攪拌方法として、分散剤による化学的分散方法と、解砕機を用いての物理的分散方法を併用することによって浸透性に優れた超微粒子グラウトスラリーの製造を行い、これを生かした注入工法を開発した。

§ 2. シリカライムの基本的性状

シリカフェームとこれに硬化材としての水酸化カルシウムの微粒子を混合したスラリー状のグラウト材を「シリカライム」と名付けた。

2-1 使用材料

シリカフェームは、二酸化珪素の含有率が90%以上のポゾラン材料であり、一次粒子の平均径が0.1 μm程度の超微粒子で、比表面積は200,000cm²/gである。

シリカライムと超微粒子セメントを用いたグラウトを比較するため、使用材料を表-1に、各々の化学・物理的性質を表-2、表-3に示す¹⁾。

なお、分散剤Aは凝集体を分散させる効果、分散剤Mはシリカライムの粘性を下げる効果および粒子の再凝集を抑制する効果を有している。

表-1 使用材料

工法	使用材料
シリカライム工法	シリカフェーム 水酸化カルシウム 分散剤A (アミン系) 分散剤M (メラミン系) 水
従来工法	超微粒子セメント ナフタレン系分散剤 水

表-2 シリカフェームの化学・物理的性質

化学成分 (%)				物理的性質		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ig.loss	比重	比表面積 (cm ² /g)	平均粒径 (μm)
92.1	0.5	0.6	2.6	2.20	200,000	0.1

表-3 超微粒子セメントの化学・物理的性質

化学成分 (%)				物理的性質	
SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	ig.loss	比重	比表面積 (cm ² /g)
30.1	13.2	48.3	1.7	2.98	9190

2-2 解砕方法

シリカフェームは粒子が多数凝集した状態で存在しており、このような状態では地盤への浸透性が悪く、シリカフェームの超微粒子としての特性を生かすことが出来ない。したがって、スラリーの高浸透性を確保するため、シリカフェームの凝集体を分散させるために混合し、攪拌する方法が必要である。本材料は、図-1に示すようなミルを使用しなければ高分散化が図れないことが判った。これはシリカフェームスラリーの凝集体を、容器内でボール（ビーズ）と攪拌することで解砕し、粒子を分散させる方法である。さらに分散剤を併用し、粒子の表面に電荷をもたせ、電気的な反発力を利用して分散性を高める方法を採用した²⁾。

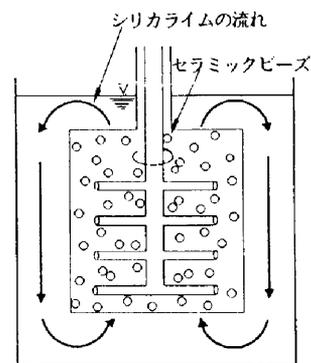
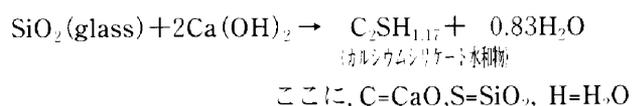


図-1 解砕機の攪拌部の構造

2-3 固化反応

シリカフェームの主成分は、アルカリ溶液中で可溶性の非晶質二酸化珪素である。また、シリカフェーム中の非晶質SiO₂量の多い方が、水酸化カルシウムとの反応が高いという結果が報告されている³⁾。

シリカフェームと硬化材である水酸化カルシウムの固化反応は、フライアッシュなどのポゾランと同様であり、以下に示す化学反応式により表され、カルシウムシリケート水和物を生成する⁴⁾。



§ 3. 室内注入試験

3-1 試験手順

試験のフローを図-2に示す。

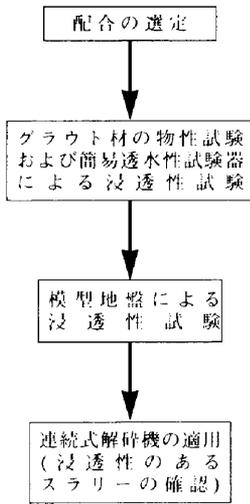


図-2 室内試験フロー

3-2 配合および混合撈拌

スラリーの配合はシリカフェウム (SF) と消石灰 (CH) を等重量とし、水比を300%、200%、100%の3種類とした。

グラウトの解砕には三井鉱山製のミルHM-5型 (5.5kw, 900rpm, セラミックボール: ϕ 3mm-7.7kg) を使用した。

シリカライム製造における混合撈拌時の材料投入順序を図-3に示す。

解砕機による分散効率を高めるには、スラリーの粘性が高い方が効果的である。しかし、粘性があまり高すぎると混練効果が低減するため、粘性が高い配合では解砕時前後に分散剤Mを添加した。

試験に使用したグラウト材の配合を表-4に示す。

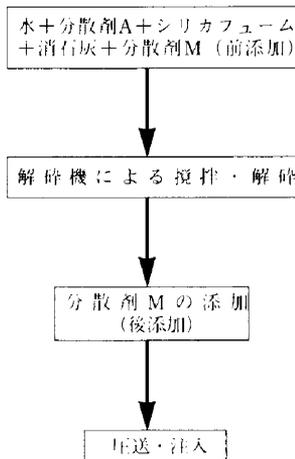


図-3 試験用グラウト材の配合

表-4 試験用グラウト材の配合

ケース	W/(SF+CH) (%)	SF/CH (%)	分散剤A (%)	分散剤M(%)	
				前添加	後添加
シリカライム300	300	1/1	0.25	—	4
シリカライム200	200	1/1	0.25	2	2
シリカライム100	100	1/1	0.25	2	2

3-3 グラウト材の物性試験

解砕したグラウト材について、以下の項目で物性試験を行った。

(1) 比重の測定

比重はマッドバランスを使用して測定した。

(2) 粘性の測定

粘性はB型回転粘度計で測定した。

(3) 平均粒径の測定

レーザ回折式/散乱式粒度分布測定装置を用いた。

(4) 浸透性試験

浸透性試験は図-4に示すような簡易浸透性試験器を使用した。

標準砂250gを ϕ 50mm、 l =300mmの容器に投入し、水締めを行った土槽を作成し、スラリーを自然浸透させて、浸透距離、浸透時間、浸透速度を測定した。

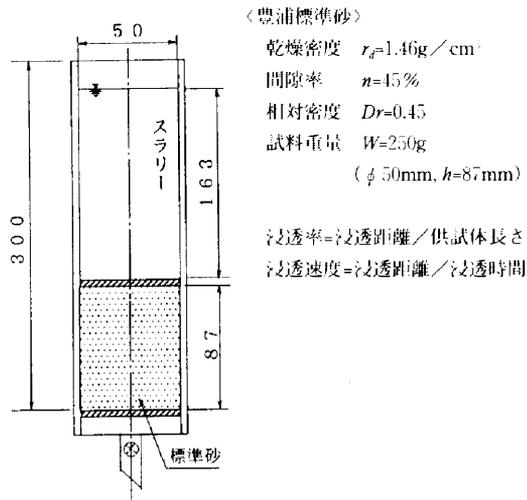


図-4 簡易浸透性試験器

3-4 模型地盤による浸透性試験

実施工を想定し、標準砂で地盤を模擬した模型装置を用いて、グラウトの注入試験を行い、浸透性を確認した。グラウトの注入式浸透性試験装置を図-5に示す。

注入用模型地盤は ϕ 300mm、高さ400mmの亚克力製容器に豊浦標準砂を充填して作成した。また、スラリーはエア圧力により模型地盤に注入した。(5) (6) (7) (8)

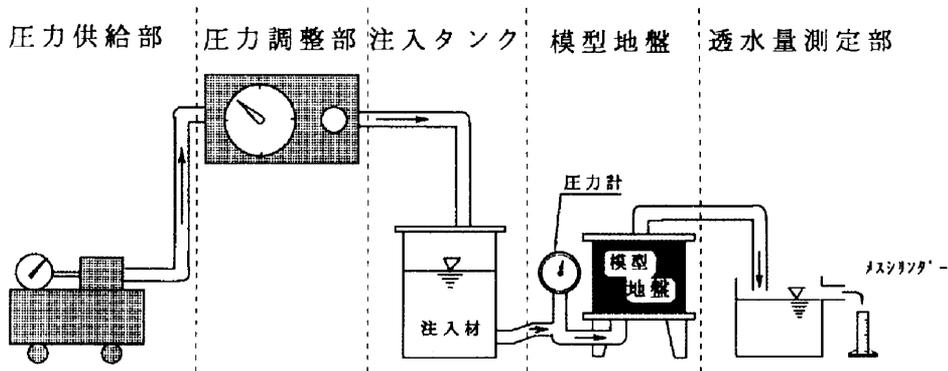


図-5 注入試験装置の概要

3-5 連続式解砕機の適用の検討

バッチ式ミキサを用いてグラウトスラリーを製造する場合、実施工における連続供給能力に問題がある。そこで、実機レベルの連続式解砕機として連続供給が可能な三井鉱山製のVM-5型(22kw)の適用について検討した。

3-6 試験結果

(1) 解砕時間について

水比300%のシリカライムについて、解砕時間と平均粒径の関係を図-6に示す。平均粒径を小さくするには、ミキサの解砕に時間を掛ければ、可能であることが判る。

(2) 簡易浸透試験器による浸透性試験

試験結果を表-5に示す。平均粒径(D_{50})が $7\mu\text{m}$ 程度以下で、かつ粘性が6cP程度以下になるとグラウトが標準砂層を完全に浸透することを確認した。

(3) 模型地盤による浸透性試験

模型地盤用の注入スラリーは解砕時間が比較的短い水比300と水比200を使用することとした。浸透性試験の有効注入圧力は 0.05kgf/cm^2 (0.005MPa)、グラウトの有効注入圧力は 0.2kgf/cm^2 (0.02MPa)で行った。

$\phi 300\text{mm}$ の模型地盤のシリカライムの注入試験結果を表-6に示す。今回の試験結果では、スラリーの粘性(B型粘度計測定)が6cP程度で、かつ平均粒径(D_{50})が $6\mu\text{m}$ 程度のシリカライムは透水係数が $1.6\sim 1.9\times 10^{-2}\text{cm/s}$ の砂地盤に対して浸透性が優れていることを確認した。

(4) 連続式解砕機の検討

水比を200%で一定とし、スラリーの毎分当たりの製造量を、11 ℓ 、6 ℓ 、3 ℓ の3段階に設定した。

製造したグラウト材の平均粒径および粘性を測定した。また、簡易浸透性試験器を用いて浸透性試験を行った。試験結果を表-7に示す。

製造量が毎分3 ℓ の場合、粘性が42cPとなり、砂

地盤への浸透率が悪かったので、後添加で分散剤の量を2%追加し、粘性を下げたら100%浸透した。

試験の結果、連続式解砕機(三井鉱山製VM-5型22kw)を使用することにより、浸透性に優れたグラウトを毎分6 ℓ 程度製造できることが確認できた。

以上の結果から、解砕機と分散剤の併用により砂地盤への高浸透が図れる高分散化低粘性の超微粒子グラウトスラリーの製造および注入が実現された。

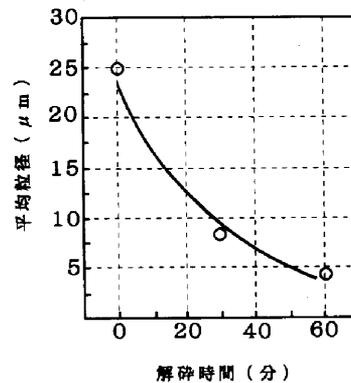


図-6 シリカライムの解砕時間と平均粒径の関係

表-5 シリカライムの浸透性試験結果

ケース	水比%	解砕時間分	スラリーの物性値			水の浸透性		スラリーの浸透性	
			比重	粘性cP	粒径 D_{50} μm	時間分秒	浸透速度 cm/s	時間分秒	浸透率
1	300	10	1.16	10.6	※ 6.85	2-04	6.7×10^{-2}	—	17%
2	300	30	1.16	5.5	6.30	1-56	7.5×10^{-2}	1-07	100%
3-1	200	30	1.23	—	7.71	1-39	8.8×10^{-2}	1-19	100%
3-2	200	30	1.23	6.4	7.84	2-06	6.9×10^{-2}	—	89%
4	200	45	1.23	6.0	6.84	2-03	7.1×10^{-2}	3-28	100%
5-1	100	10	1.37	—	10.69	2-10	6.7×10^{-2}	—	0%
5-2	100	10	1.37	—	8.49	2-09	6.7×10^{-2}	—	40%
6	100	60	1.37	—	6.74	2-02	7.1×10^{-2}	—	100%

<備考> ※前添加なし

表一六 シリカライムの注入試験結果 (模型地盤)

ケース	水比 W %	解砕時間 t 分	スラリーの物性値			模型地盤の透水性				スラリーの注入実績		
			比重 γ_s	粘性 η cP	粒径 D_{50} μ m	間隔率 n % 相対密度 Dr	有効 注入 圧力 kgf/cm ²	単位流量 q /分	透水係数 k cm/s	有効 注入 圧力 kgf/cm ²	到達時間 終了時間 分-秒	平均注入速度 最終注入速度 q /分 累計量 Q
1	300	30	1.16	5.5	6.30	39.2 0.89	0.05	2.23	1.9×10^{-2}	0.20	3-00 24分経過後終了	3.89 0.13 10.60
2	200	45	1.23	6.0	6.82	40.9 0.77	0.50	1.84	1.6×10^{-2}	0.20	3-30 22-20	1.66 0 8.45

[備考] [模型地盤] 豊浦標準砂 : 試料重量=20.4kg
 試料高さ h : ケース1 $h=18.0$ cm, ケース2 $h=18.5$ cm
 乾燥密度 ρ_d : ケース1 $\rho_d=1.60$ g/cm³, ケース2 $\rho_d=1.56$ g/cm³

表一七 連続解砕によるシリカライムの浸透性試験結果

ケース	水比 W %	製造量 Q /分	スラリーの物性値				水の浸透性		スラリーの浸透性	
			液温	比重	粘性	粒径 D_{50}	時間	浸透速度	時間	浸透率
			°C		cP	μ m	分-秒	v cm/s	分-秒	%
1	200	11	22	1.22	8.3	6.73	1-51	7.8×10^{-2}	—	43
2	200	6	26	—	9.5	6.53	1-40	8.7×10^{-2}	2-20	100
3	200	3	29	—	12.0	4.68	1-50	7.9×10^{-2}	—	76
3'	200	3	—	—	9.6※	—	1-44	8.4×10^{-2}	1-46	100

[備考] [解砕機] 三井鉱山VM-5型(22kw,900rpm)
 ただし※では分散剤Mをさらに2.0%追加。

表一八 実験内容及び数量

孔番	孔径	孔数	コアリング	深度	透水試験区間	注入区間
パイロット孔P孔	66mm	1孔	有	8.00m	5.00~8.00m	5.00~8.00m
一般孔G1,G2孔	66mm	2孔	G2有	8.00m	5.00~8.00m	5.00~8.00m
チェック孔CH1孔	66mm	1孔	有	8.00m	5.00~8.00m	6.50~8.00m
					5.00~8.00m	5.00~6.50m
追加 チェック孔CH2孔	66mm	1孔	有	6.00m	3.00~4.50m	—
					4.50~6.00m	—
					3.00~6.00m	—
計	—	5孔	—	延38m	延8回	延5回

§ 4. 地盤注入施工実験

4-1 実験概要

(1) 対象地盤

多孔質(スコリア質)火山砂岩(SS②層)

(2) 実験パターン

三点法(孔間隔2.0m, パイロット孔1孔, 一般孔2孔, チェック孔1孔)

深度5.00~8.00m (3.00m区間)

実験注入パターンを図一七に示す。

(3) 効果確認法

①グラウチング前後のルジオンテスト

(孔内静水圧透水試験)

②バックホウによるはぎ取り調査

③ボーリングコアの室内透水性試験

(4) 実験内容

施工実験の注入孔名称および施工量を表一八に示す。

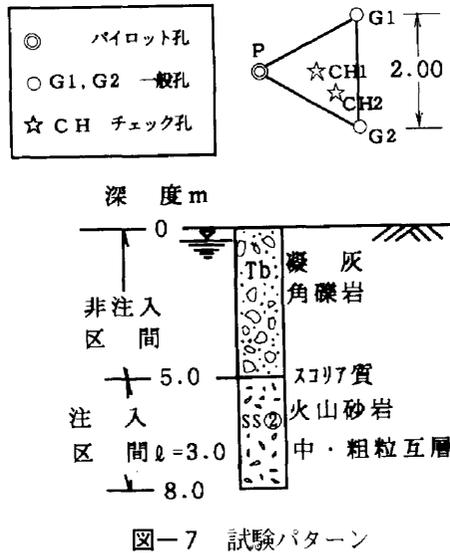
4-2 注入対象地質の性状

グラウト注入実験地の地質を図一八に示す。

基盤の地質は、新第三紀鮮新世の、主に安山岩溶岩、同質凝灰角礫岩および火山礫岩から成り、凝灰質砂岩、

凝灰岩、スコリア質中~粗粒砂岩等を伴って、複雑な堆積環境にある。深度2.75m付近まで灰黄色軟~中硬質凝灰質砂岩がある。これ以深はボーリング深度8.0mまで暗褐色灰色粗鬆の低固結スコリア質中~粗粒砂岩であり、粒径数mmの亜角礫の安山岩、スコリア等から構成される。

施工実験の対象地盤において、透水特性はパイロット孔の深度3.0~8.0m間のルジオンテスト結果によれば、限界圧力は3.0kgf/cm² (0.3MPa)、透水係数は $k=7.3 \times 10^{-1}$ cm/sであった。透水性については、水は通るが懸濁型グラウトはかなり浸透しにくいといえる。



火山砂岩は水平に近い角度で堆積し、20cm~1mの厚さで中粒部と粗粒部が互層を呈している。透水性は現場での有効圧レベル⁹⁾の測定結果では200~800ルジオン(透水係数では $k=10^{-3}$ cm/s程度)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ていた。注入方法はステージ法(ステージ長3.0m)を採用し、注入圧力と注入速度はそれぞれ5kgf/cm²(0.5MPa)、5ℓ/minを標準としたが、圧力は7.5kgf/cm²(0.74MPa)、注入速度は7.5ℓ/minまで与えたステージもある。

連続分散機の解砕速度は5~10ℓ/minで行い、3m³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粘性は6cP程度であり、ブリーディング率は24時間後では0%、1週間後で5~10%であった。

ホモゲルの一軸圧縮強度(4週)は10kgf/cm²(1MPa)、変形係数は1,300kgf/cm²(127MPa)程度であった。

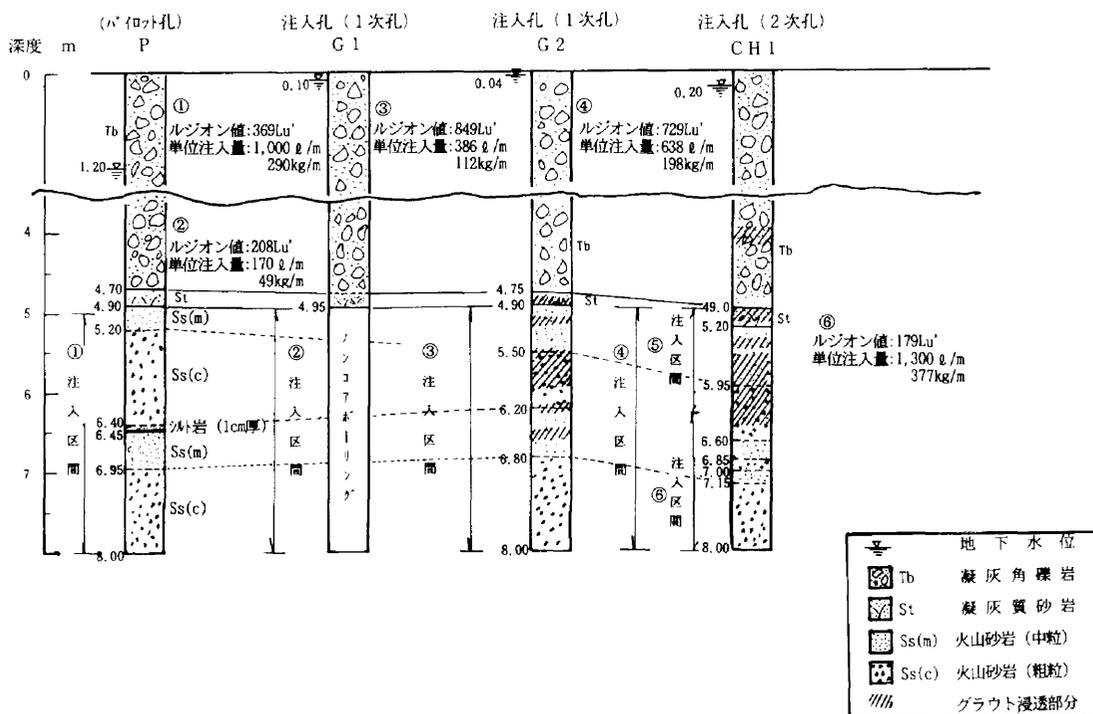
単位注入量は170~1,300ℓ/m(49~377kg/m)であり、この岩盤としては非常に多い注入量であった。

グラウトの注入状況と改良効果についてはルジオンテスト、はざとり調査およびボーリングコアの室内透水試験結果により確認した。ルジオンテストの結果およびボーリングコアの目視によるグラウトの浸透状態を図-8に示す。

4-3 注入材料および配合

- (1) 主材 シリカフェーム(粉体)
- (2) 反応材 消石灰(粉体—平均粒径5.4μm)
- (3) 混合比 シリカフェーム/消石灰=1(重量比)
- (4) 分散剤 A剤:0.25%前添加
M剤:1%前添加, 3.25~3.5%後添加
(シリカフェーム+消石灰の重量に対する%)
- (5) 水比 水/(シリカフェーム+消石灰)=3
- (6) 解砕速度 5~10ℓ/min

4-4 試験結果



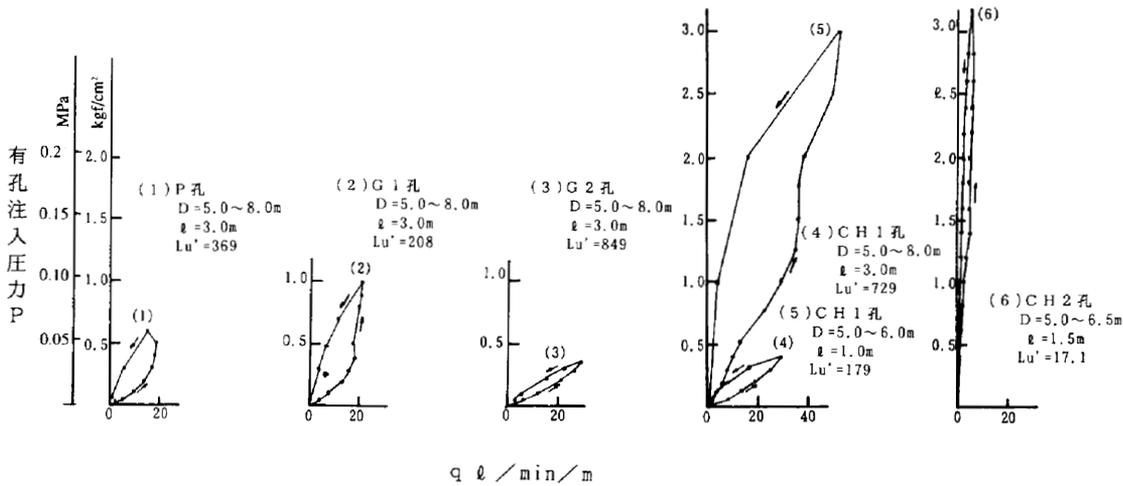


図-9 パイロット孔からチェック孔までの p~q 曲線の推移

ルジオンテストによる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 曲線の推移を図-9 に示す。

中粒部が多くを占めるチェック孔CH1孔のステージ上半部のみには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。また、はぎ取り調査による、はぎとり断面のグラウトの浸透状態を図-10に示す。

はぎ取り調査とコアの観察からもシリカライムは岩の基質の間隙に浸透していることが確認された。しかし、中粒部と粗粒部の互層では、粗粒部に一部未浸透部が見られた。これは、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ためと思われる。チェック孔（CH1）のステージ上半部で、グラウトの浸透状態を確認した部分のボーリングコアの室内透水試験において、動水勾配が $i=50$ 以下では、注入前の透水係数は $k=1 \times 10^{-2} \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ であったが、注入後の測定では、透水係数は $k=1 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$ 以下に改善された。（図-11）

以上の結果を考察すると、当該火山砂岩は基質の間隙の性状が異なる中粒部との粗粒部が20cmから1mの厚さで互層になっているため、確実に浸透注入させるためには注入区域長を短く、例えば1m単位に区切る必要がある。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変わらないので、短い区間を同時ないしは引き続き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。

4-5 考察

シリカライムグラウトを空隙質火山砂岩に試験注入した結果、次のようなことが判った。

- (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グラウトが注入された。
- (2) 注入範囲に間隙の性状ないしは透水性の異なる部分

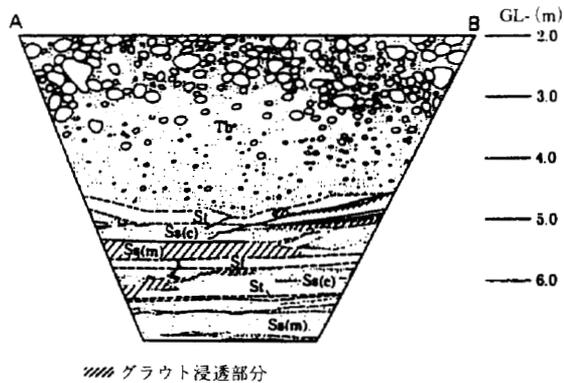


図-10 火山砂岩への注入後の下流側はぎ取り断面

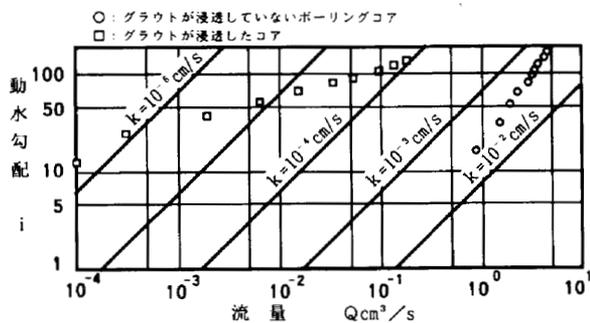


図-11 ボーリングコアの室内透水試験結果

が複数で介在する場合は、注入されやすい方に偏る傾向があり、区間全体の改良効果を期待するには工夫が必要である。

- (3) シリカライムのように、スラリーの分散性と粘性が長時間に渡って変わらないグラウトであれば、短い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持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¹⁰⁾。

§ 5. おわりに

「シリカライム工法」の特徴を以下に示す。

- (1) 非水ガラス系かつ非セメント系の高分散化低粘性超微粒子グラウト工法である。
 - (2) 本工法における懸濁型グラウトは、ブリーディングが少なく、薬液に似た性状を持つ。
 - (3) スラリーの貯蔵安定性に優れ、硬化までの物性変化が少ない。
 - (4) 本工法によって改良された地盤は、水ガラス系と異なり、長期安定性と耐久性に優れる。
 - (5) グラウト材は軟岩と同程度の強度特性を持つ。
- したがって、以下の要求項目に対しての適用が考えられる。

- ①透水性軟岩の遮水性の改良
- ②液状化地盤の固化対策
- ③土構造物の補修
- ④従来の懸濁型グラウトでは注入困難とされる微小間隙への注入

また、今後の課題として以下が挙げられる。

- (1) 地盤注入を連続して行うためのスラリー連続供給解砕機の製作 (100ℓ/min程度以上)
- (2) 硬化時間を調整できる助剤の検討
- (3) 異なる種類の地盤注入の実績およびより効果的な施工方法の検討

以上の課題を踏まえて、本工法に適した地盤の注入実

験を重ねることで、実績の蓄積と、より一層の改善をしていきたいと考えている。

なお、本工法は日本基礎技術㈱および電気化学工業㈱との共同開発である。

参考文献

- 1) 松井健一、原田耕司、寺戸康隆、寺村 悟、小菅啓一：新しい注入材料『シリカライム』の研究開発、第30回土質工学研究会,pp.2111-2114,1995.7
- 2) 原田耕司、寺本勝三、寺戸康隆：新しいグラウト材の研究開発(その1)、土木学会第47回年次学術講演会, pp.404-405,1992.9
- 3) 日本学術振興協会、建設材料第76委員会、第279回会議高性能コンクリート,pp.8-15,1991
- 4) 近藤連一：スラグセメントへの利用：近藤連一先生追悼記念誌,pp.15-21,1979
- 5) 寺戸康隆、寺本勝三、玉井章友、柏 忠信：新しいグラウト材の研究開発(その2)、土木学会第48回年次学術講演会,pp.102-103,1993.9
- 6) 寺戸康隆、寺本勝三、寺村 悟、真居正信：新しいグラウト材の研究開発(その3)、土木学会第49回年次学術講演会,pp.90-91,1994.9
- 7) 寺戸康隆、松井健一、原田耕司、小菅啓一：新しいグラウト材の研究開発(その4)、土木学会第50回年次学術講演会,pp.568-569,1995.9
- 8) 寺戸康隆、松井健一、原田耕司、小菅啓一：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.1-5,1995.1
- 9) 寺戸康隆：孔内静水圧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.1-10,1992
- 10) 寺戸康隆、寺本勝三、松井健一、増田修一、小菅啓一：浸透性グラウトによる空隙質地盤の注入特性と改良性、第27回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集,pp.271-275,1996.2