

# シリカシールド工法の実用化に関する研究

齋藤 優<sup>1</sup>・山田 清臣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社銭高組 技術本部技術研究所 主席研究員 (〒102-8678 東京都千代田区一番町 31)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 日本大学教授 理工学部土木工学科 (〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

泥土圧シールド工法は幅広い土質で適用が可能なものの、地盤の状態によっては排土機構ゲート部での地下水の噴発や機械負荷の増大が生じて掘進の中断を招く場合も多く、安定した掘進を維持するためにその対策が必要であった。シリカシールド工法は、これら課題の解決を目的として、添加材としてシリカゼリーを適用する新しいタイプの泥土圧シールド工法である。

本研究は、シリカシールド工法の開発および実用化に関して研究を行ったもので、本報ではシリカゼリーによる掘削礫質土の土性改良効果を中心に、添加材注入率の定量化および安全性等について検討した。

*Key Words : earth pressure shield, gravelly soil, silica jelly, simulation experiments, soil*

## 1. はじめに

シールド工法は、地下空間の建設技術として発展し、近年においては様々な技術開発が行われている。

また、シールド工法発展の要因のひとつに、1980年代の土圧系シールド工法<sup>1)</sup>(現在の泥土圧シールド工法)の開発と普及があげられる。

土圧系シールド工法は、図-1に示す切羽(カッター位置)またはチャンパー内に添加材を注入し、掘削土砂の土性を改善して、同工法の対象とする地盤領域を拡大したことが最大の特長となっている。

しかし、現在ではシールド施工の長距離化や大深度化に起因して、全路線にわたって均一な土質は少なく、特に地下水が豊富な砂や砂礫層、崩壊性の砂、互層中の巨礫、複合地層等では安定した掘進を維持することが大きな課題となっている。

著者らは、「泥土圧シールド工法における掘削礫質土の土性改良」に関する研究で、滞水砂礫地盤に対して鉱物系添加材と気泡を混合した複合添加材の優位性を確認し報告<sup>2)</sup>した。

しかし、実施工<sup>3)</sup>ではプラント設備の重複によるコスト増加や発生土処分に問題が残り、ペントナイトを主体とする鉱物系添加材を採用しない方向で、新工法の実用化が望まれているのが現状である。

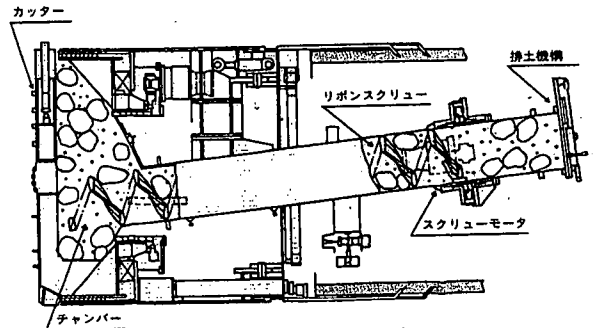


図-1 泥土圧シールド

## 2. 研究の目的

シリカシールド工法は、切羽から排土機構までの掘削礫質土の難透水性と塑性流動性を保持するため、添加材としてコロイダルシリカ<sup>4)</sup>のゲル化物(以下シリカゼリーという)を切羽に注入し、安定した掘進を維持することを目的とする新しいタイプの泥土圧シールド工法である。

本研究は、当工法の開発・実用化を目的にシリカゼリーによる掘削礫質土の土性改良効果を把握する。

また、付着特性等について従来の添加材と比較して考察を加え、現場適用することで施工性の向上について検証し、実用性について検討するものである。

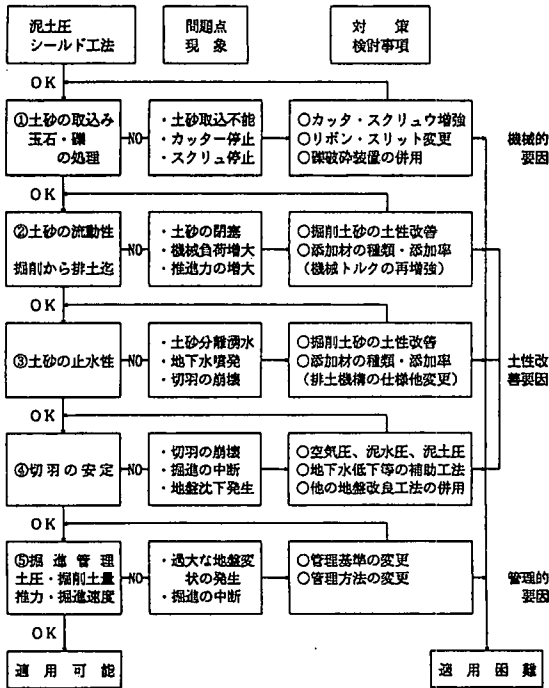
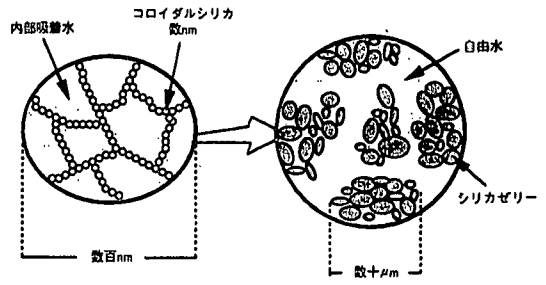


図-2 泥土圧シールド適用フロー (砂礫地盤)



シリカゼリー 添加材シリカ  
図-3 コロイダルシリカと添加材シリカ

やや硬いゲル状のシリカゼリーを水に分散させ、高いせん断力を加えて粉碎して緩い集合体のペースト状のゾルにしたものである。

コロイダルシリカとシリカゼリー、さらに添加材としてのシリカ (以下、添加材シリカまたはシリカという) の関係を図-3に示す。

### (3) 添加材シリカの特徴

鉱物系添加材と比較して添加材シリカの特徴を下記に示す。

- ①主材(コロイダルシリカ)、助材とも液体で混合性が高い。
- ②比重が1.02~1.03のゾルで水に希釈されにくい。
- ③完全無機質で乾燥後は白色粉末となる。また、鉱物系材料にみる水の吸収、再膨潤がない。
- ④pHは6~8の中性を示す。

## 4. 実験概要

### (1) 実験の目的と試験項目

実験は、当工法の開発で重要となるシリカの添加材としての性能を把握することを目的とする。

泥土圧シールド工法でのシリカの適用は、シリカの新規性や上記の特徴から判断して、実用化に際して下記の条件を設定した。

- ①従来、鉱物系添加材で土性改良が難しい礫率の高い砂礫層での土性改良が可能なこと。
- ②機械負荷低減および施工性向上に寄与すること。
- ③掘削処分土の泥状化防止が可能で安全性が高いこと。

このため、実験は礫質土の土性改良に関する要素実験と、機械負荷低減や施工性向上等に関する適用性確認実験に大別して行った。

シリカと掘削混合土の基本特性として、流動性および止水性に対する土性改良効果を把握し、その後、実施工を想定して滑動試験、付着抵抗測定試験等を実施した。表-1に試験項目を示す。

## 3. 添加材シリカ

### (1) 切羽安定と添加材の役割<sup>5)</sup>

図-2に砂礫地盤における泥土圧シールド工法適用フローを示す。

図に示す機械的要因は、地盤の粒度組成に応じて掘削能力を向上させ礫破砕装置等を装備する。

また、礫取込みの面盤開口率の設定や、礫搬出に有利なりボンスクリューの採用が主体となる。

しかし、施工開始後は機械的対応や機種の変更が難しく、添加材による対応と的確な土圧管理に因って掘進の安定を維持する。即ち、添加材によって掘削土砂の土性を改良し、土砂の流動性および止水性を向上させることが切羽安定の条件となっている。

### (2) 添加材シリカ

二酸化ケイ素 (SiO<sub>2</sub>; silicon dioxide) は、その存在状態 (結晶、ガラス状、コロイド状、溶液等) に係わらず、一般に慣用としてシリカ (Silica) と呼ばれ、岩石の主要構成成分として広く存在している。

シリカゼリーは、粒子の大きさが1~100nmの安定的に分散したコロイダルシリカを主材とし、無機塩類を助材として鎖状に制御されたネットワークで構成される。添加材としてのシリカは、シリカゼリーに添加材として不可欠な「切羽までの圧送性」や「地盤へ浸透性」等の特性を持たせたもので、寒天状の

表-1 試験項目

No.	試験名	試験目的	試験から求める値	種別
1	スランプ試験	混合土の塑性流動性	スランプ (cm) JIS A1115に準拠	土性改良に関する要素実験
2	透水試験	混合土の止水性	透水係数 (cm/sec) JIS A1218に準拠	
3	三軸圧縮試験	混合土の土性改良	粘着力Cおよび内部摩擦各φ	
4	滑動試験	添加材の摩擦抵抗性	静止摩擦係数 $\alpha$ $\alpha = P/W$ P:活動開始荷重(gf) W:測定器の自重(gf)	施工性向上に関する適用実験
5	付着抵抗測定試験	混合土の付着特性	最大付着応力 $\tau$ $\tau = P/A$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) P:引上げ荷重 (kgf) A:付着周面積 (cm <sup>2</sup> )	
6	急性毒性経口投与試験他	シリカの魚毒他の毒性調査	LD50 LC50	安全性に関する確認実験
7	分析試験	シリカの有害物質含有調査	土壌の環境基準および排水基準による分析値	

表-2 モデル地盤特性

	モデル-I	モデル-II	モデル-III
60%粒径	5.0 mm	8.0 mm	14.0 mm
30%粒径	0.4 mm	2.0 mm	6.1 mm
10%粒径	0.03 mm	0.19 mm	1.00 mm
最大粒径	19.1 mm	25.4 mm	25.4 mm
均等係数 $U_c$	166.7	42.1	14.0
曲率係数 $U_c'$	1.1	2.6	2.7
湿潤密度	1.98 g/cm <sup>3</sup>	2.15 g/cm <sup>3</sup>	2.06 g/cm <sup>3</sup>
礫分・粒径 2 mm以上	52%	70%	85%
砂分・2~0.074 mm	32%	26%	15%
細粒分・0.074 mm以下	16%	4%	0%

ここに、全土粒子（重量比）に対して  
 礫分率：粒径が2mm以上の礫の占める割合  
 砂分率：0.074mm～2mm迄の砂の占める割合  
 細粒分率：0.074mm以下の細粒土の占める割合

(3) モデル地盤の作成手順

モデル地盤の作成は、粒径毎に準備した乾燥状態の礫、砂および細粒土（土木用粘土）を、一回の試験につき16kgをモデル別に計量した。

また、各モデルは細粒土の含有量で吸収率が異なるため、各試料は含水比で5%に統一して散水し24時間以上養生した。その後、20ℓ用コンクリートミキサーに試料を投入して1分間空練りし、順次添加材を加えて3分間混練した。

(4) 添加材

実験で採用した添加材は、添加材としての実用化が目的のシリカと、比較対象となる鉱物系添加材および複合添加材<sup>9)</sup>（鉱物系添加材+気泡）とした。

ここで採用した気泡は、起泡剤グルフォーム<sup>10)</sup>を水との混合で10倍にしたものを起泡材として、発泡装置にて発泡倍率（気泡体積/起泡材体積）を25倍として、気泡の密度を40g/ℓ程度とした。

また、添加材の注入率（以下添加率という）は、土性改良に必要な添加材の注入量で、モデル別の土量を添加材無添加時の湿潤密度を基準に体積換算し体積換算した土量に対する添加材の割合（体積）をいう。要素実験の添加率は、湿潤状態のモデル地盤に体積比で10%から、モデル-II地盤の間隙率に相当する30%までに設定した。

採用した添加材の配合および特性を表-3に示す。表-3に示す添加材シリカは、主材のコロイダルシリカに助材の無機塩類を投入し攪拌、混合することで、コロイダルシリカの持つ表面電荷バランスが崩れゲル化する。また、作成したゲル（シリカゼリー）を添加材として仕上げるため、追加して投入する水との均一性を確保する目的で、安定剤としてナトリウム塩を用いる。

シリカの作成および練り混ぜ手順を図-5に示す。

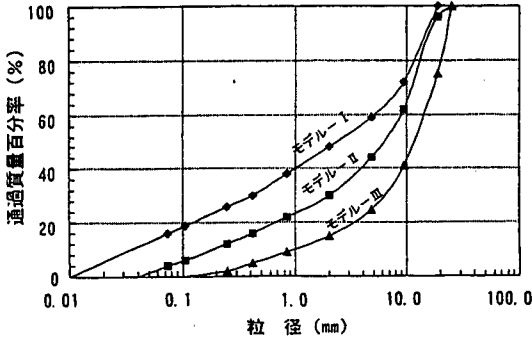


図-4 モデル地盤の粒径加積曲線

(2) モデル地盤の粒度組成

実験で採用したモデル地盤は、気泡シールド工法で他の補助工法が必要<sup>6)</sup>とされている、施工難易性の高い礫率70%の砂礫層を中心に作成した。

図-4に示すモデル地盤の粒度組成は、昭和56年にトンネル技術協会主催のシンポジウム「土工系シールドの現状と問題点」で分類<sup>7)</sup>された、泥漿シールド<sup>8)</sup>の適用土質に対応させたもので、礫分率が52%および70%、85%の地盤を対象に各々モデル-I、モデル-II、モデル-IIIとした。また、試料土の最大粒径を25.4mmとして川砂利、川砂および土木用粘土を用いて作成した。

表-2に各モデル地盤の特性を示す。

表-3 各添加材の特性

添加材(呼称)	標準配合	比重	粘性*
シリカゼリー (シリカ)	主材 コイソル 47.0 ℓ/㎡ 助材 無機塩類 105.0 ℓ/㎡ 安定剤 3.8 ℓ/㎡ 水 844.2 ℓ/㎡	1.02	400cp
鉍物系添加材 (加泥材)	ベツト付 250# 175.0kg/㎡ 粉末粘土ミル 425.0kg/㎡ 水 1000.0kg/㎡	1.29	1750cp
複合添加材 (複合材)	上記の鉍物系添加材に対して 同体積の気泡を混合攪拌する。 (加泥材:気泡=1:1)	0.65	—

以下、鉍物系添加材を加泥材とし複合添加材を複合材とする。  
\*); ビスコテスタによる

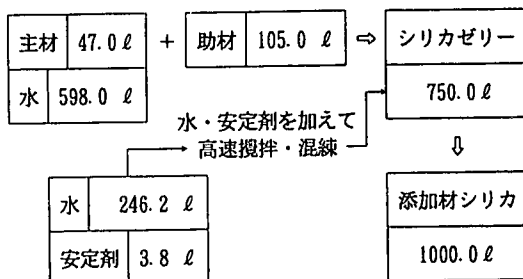


図-5 シリカの作成(練り混ぜ手順)

### 5. 土性改良に関する要素実験と考察

実験は表-1 に示す各種試験を行い、図-4 の各モデル地盤と表-3 に示す添加材の組み合わせを基本とした。また、大気中の実験であることから試験の種類によっては気泡を用いる複合材を除外した。

#### (1) 塑性流動性の改善(スランプ試験)

土砂の塑性流動性の指標の一つとして、実施工での適用性も考慮してスランプ試験を採用した。

図-6 にモデル-ⅡおよびⅢの添加材の種別による添加率とスランプの関係を示す。

モデル-Ⅰでは、いずれの添加材も添加率の増加に伴いスランプ値は増加し、各モデル地盤とも地盤に応じて流動性が改善される結果となった。

しかし、添加率が一定以下(例としてモデル地盤Ⅱのシリカ10%、複合材10%)では、土粒子間の連結力が強まりスランプは0cmに近く自立している。

また、礫率70%のモデル-Ⅱに対する加泥材による土性改良は、添加率20%では改良に限界を示しスランプも23cmと大きく泥状化状態であった。

さらに、添加率を30%まで増加すると、粒径2mm以上の礫に対して砂および細粒土(モデル地盤と加泥材の細粒分)が絡まることなく、加泥材の「水」とともに分離した。このとき、礫だけがスランプ20~21cmとして残存した。

このため、混合土砂の分離現象は、試料土の空隙に対する砂および細粒土の不足、あるいは添加率の増加に伴う単位水量の増大に起因する<sup>11)</sup>ものと考え、各モデルの土性改良は「スランプが20cmより大きい場合を泥状化および分離」と評価した。

また、礫率85%のモデル-Ⅲでは、加泥材の全添加率で分離が認められ、当該モデルの加泥材による

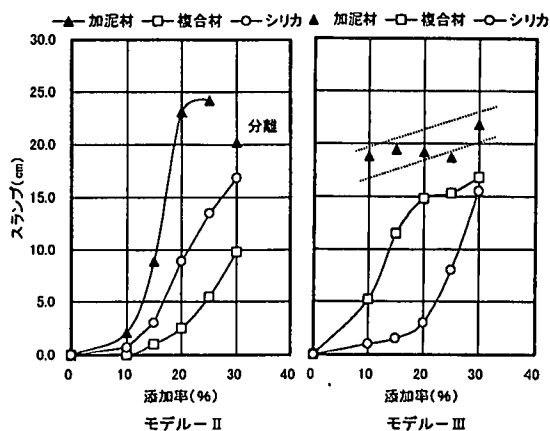


図-6 改良土の添加率とスランプ

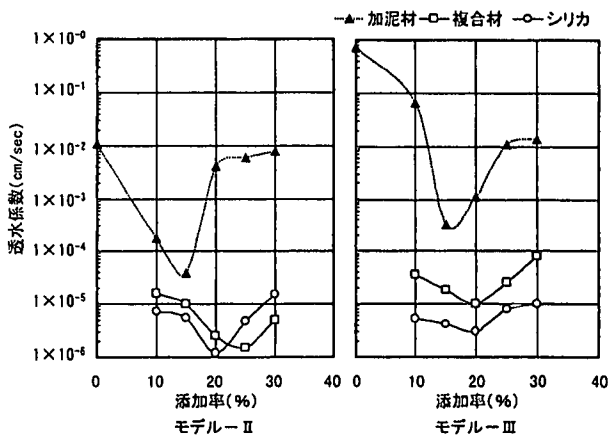


図-7 改良土の添加率と透水係数

土性改良は困難であった。

これに対して、複合材およびシリカではモデル-Ⅲのように礫率が高い地盤でも、スランプ20cm以下で十分な流動性を有する土性改良が可能であった。



写真-1 シリカによる土性改良  
(モデル-III 添加率15%)



写真-2 加泥材による土性改良  
(モデル-III 添加率20%)

写真-1 および写真-2 に薬率 85% のモデル-III 地盤でのスランブ試験結果を示す。

## (2) 止水性の改善 (透水試験)

一般に砂礫層は透水性が大きく、チャンバー内のスクリー制御による土圧保持効果だけでは十分な止水性が得られずゲート部で地下水の噴発が生じる。

このため、混合土は難透水性の土砂に土性改良することが望ましく、シリカ混合土の透水性を把握するため変水位透水試験を行った。図-7 にモデル-II および III の添加率と透水係数の関係を示す。

原地盤の透水係数はモデル-I および II で  $10^{-2}$  ~  $10^{-3}$  cm/sec のオーダーが得られているものであり、モデル-III は定水位透水試験によって  $7.18 \times 10^{-1}$  cm/sec であった。

また、複合材による止水性の改善は気泡の消泡によって透水性が異なるため、混合土の不飽和による変水位透水試験を実施し  $1 \times 10^{-5}$  ~  $10^{-6}$  cm/sec のオーダーの難透水性土砂への改良状態を確認した。

シリカ混合土の透水性の改善は、モデル-I では加泥材と比較してほぼ同様な結果となったが、モデル-II および III では加泥材と比較して最小値で  $10^{-1}$  ~  $10^{-2}$  cm/sec オーダーの違いがあり、加泥材より透水性改善効果が高いことが判明した。

## (3) 土性値の改善 (三軸圧縮試験)

三軸圧縮試験においては、添加率に応じた改良土の内部摩擦角と粘着力の改善効果に着目した。

当試験は、砂礫土を対象<sup>12)</sup>とし掘削から排土まで掘削改良土が密閉状態の中を流動することを考慮して、非圧密非排水試験(ひずみ制御法)により、

ひずみ速度を 0.25%/min として試験した。

採用したモデルは、スランブ試験でその違いが明確となり、かつ三軸室内で試料が自立し試験終了まで正常な変形を継続する試料として、薬率 70% のモデル-II を選定した。

試験結果を表-4 に示し、無添加およびシリカ添加時の垂直応力とせん断応力の関係例を図-8~9 に示す。

三軸圧縮試験におけるせん断応力と内部摩擦角および粘着力との関係は次式で与えられる。

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

ここに、 $C$  : 粘着力  $\sigma$  : 垂直応力

$\phi$  : 内部摩擦角

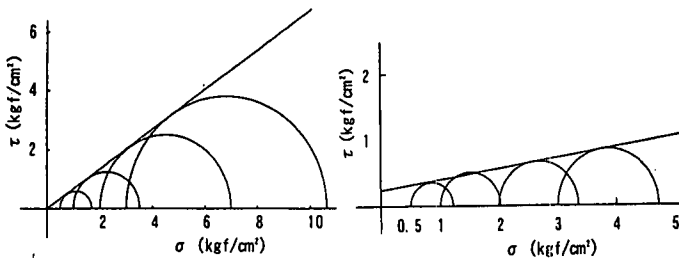
次に、スランブと粘着力および内部摩擦角の関係を図-10 に示す。ただし、スランブ 10cm 以上の改良土は三軸室内での自立が難しく試験が不可能であった。

薬率 70% のモデル-II 地盤は、シリカの添加で内部摩擦角が大幅に低減した。シリカは添加率が増加してもスランブは 3cm 程度で、粘着力が増加して自立性も高く、礫質土から良質の泥土に改良された。

## (4) 考察

複合材による流動性の改善は、気泡のベアリング効果<sup>6)</sup>と、細粒分と地盤の礫とを結びつけるクッション材的な伸縮性の効果が複合材としての効果を十分に果たしたものと考える。

また、目視によると加泥材と同体積比率で混合された気泡は、加泥材に閉じこめられた状態で地盤の間隙に介在する。このため、複合材による止水性の改善は、加泥材を半減することで改良土の分離につながる単位水量の増大を防止し、気泡が地盤間隙の飽和度を低くすることの役割を担い、透水係数を



(礫 70%, 無添加)

図-8 せん断応力

(礫 70%, シリカ添加率 15)

図-9 せん断応力

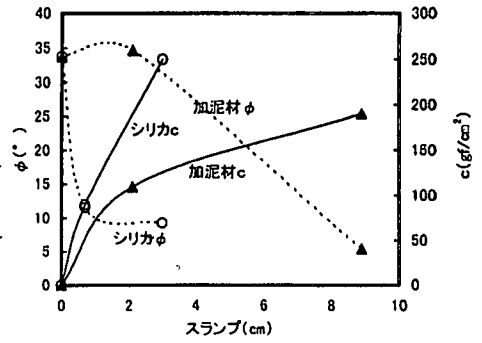


図-10 スランプとC, φ

表-4 三軸圧縮試験結果

添加材	添加率 (%)	湿潤密度 (g/cm³)	スランプ (cm)	粘着力 C (kgf/cm²)	内部摩擦角 φ (度)
無添加	0	1.90	0.0	0.00	33.81
シリカ	10	2.24	0.7	0.09	11.60
	15	2.29	3.0	0.25	9.27
加泥材	10	2.22	2.1	0.15	34.68
	15	2.27	8.9	0.19	5.39

小さくできるものとする。

これに対して、添加材シリカの見掛けは「ゾル状」であるが、全体の 70%以上が地盤の砂分に相当する 0.074mm のフルイでの回収が可能なシリカ粒である。

さらに、コンクリートミキサーによる 3 分間の混練でシリカゼリーの微細化が進み、チクソトロピックなペーストに変化する。このため、微細なシリカが地盤の間隙に容易に浸透し、吸着力や付着力が増加して、細粒分が無いモデルⅢでも難透水性の高い一体感のある土砂に改良されている。

三軸試験による加泥材とシリカの比較は、加泥材の添加率 10% では内部摩擦低減効果は乏しく、逆に細粒分の増加で粘着力が増大するのに対して、シリカ改良土は同一添加率で内部摩擦角 φ を 1/3 程度以下とした。これは、シリカが従来の添加材と同様に地盤の粒度組成に適した添加材の量の対応で、土砂の流動性の改善が可能であるものと判断できる。

また、添加率 15% の場合も同様な結果となった。

これに対して、加泥材の添加率 15% では内部摩擦角が急激に低減してスランプが 10cm 程度となった。

著者らが既に行っている研究<sup>11)</sup>では、加泥材の添加（添加率の増加）に伴う単位水量の増大とスランプの増大は、直接的に関連して比例関係にあり、

必要以上の単位水量の増大は即座に改良土の泥状化および分離につながった。

このため、当試験における加泥材による内部摩擦角の低減は、逆に添加率の増加に伴うスランプの増加に起因するものと考えられる。

この結果、加泥材による礫質土の改良状態から判断して、実施工における高礫率の滞水砂礫層では土砂の分離、地下水の噴発を招くものと推察できる。

止水性の改善に関して、モデルⅢの加泥材による改良は、地盤の砂・細粒分含有率（全土粒子中の砂分および細粒分の占める重量割合）の低下に伴い透水係数が増加する<sup>11)</sup>のに対して、シリカの場合はいずれの添加率でも  $10^{-6}$  cm/sec のオーダーとなった。

これは、添加材シリカが微細なシリカ粒の集合で水に希釈されにくい特性を持つこと、さらに混合土は添加率が増加しても分離しにくい状態に土性改良されているもので、実施工における高礫率の滞水砂礫層でも土性改良に寄与できるものと考察できる。

## 6. 施工性向上に関する適用実験と考察

### (1) 滑動試験

表-4 に示すように、添加材としてシリカの適用はスランプが小さくても地盤の内部摩擦角を低減し、分離の無い良質な泥土に改良できることが判明した。

ただし、土性改良に伴う粘着力の増加は、地盤と掘進機との付着による推進抵抗の増大が懸念された。

当試験は、実施工の掘削時において添加材の注入によって混練された「泥土」の掘進機外周への廻り込みを想定して推進抵抗を検討するもので、添加材そのものや礫を除いたペースト状の泥土が、掘進機スキンプレートと地盤との狭い空間に介在している状態を模擬した。

試験装置は、図-11 に示す洗出しコンクリート板上に添加材または砂と添加材の容積比を変化させた混合物をほぼ均一に 5mm 程度に塗布し、その上に

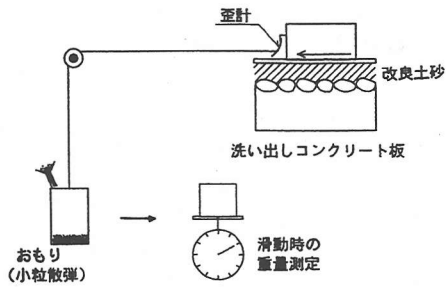


図-11 滑動試験概要

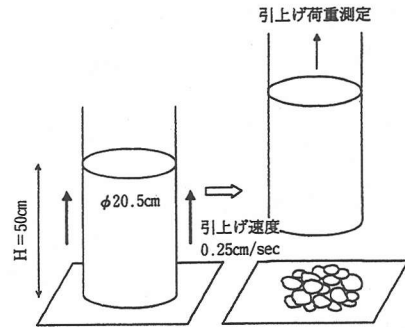


図-13 付着抵抗測定試験概要

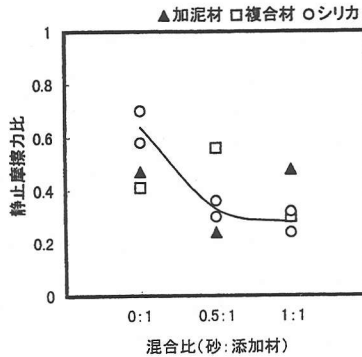


図-12 混合比(砂:添加材)と静止摩擦力比

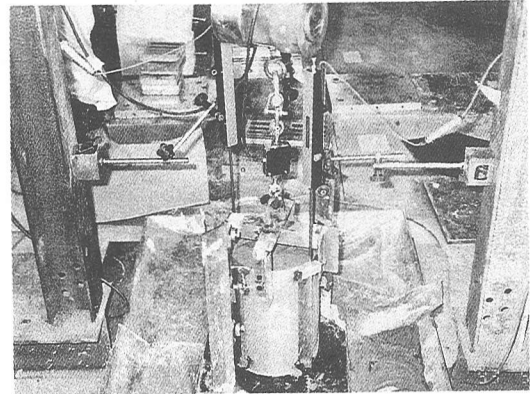


写真-3 試験状況

測定器を載せて滑動特性を調査した。測定器は矩形(幅80mm×長さ100mm×高さ32mm)のコンクリートブロックにバネ状の歪計を取り付け、治具を含めた全重量が1050gfのものを採用した。

添加材による摩擦低減効果の把握は、測定器の滑動直前の荷重を歪計にて測定して最大静止摩擦力とし、無添加時を基準に静止摩擦力比として評価した。

図-12に砂と添加材の混合比に対する静止摩擦力比の関係を示す。

図-12では、全般に各添加材とも同様な傾向を示した。シリカ単独による静止摩擦力比は0.6~0.7と高いが、砂との混合で他の添加材と同様に同程度の摩擦低減効果があることが判明した。

また、加泥材と複合材の場合は混合比によらず、全体として概ね無添加時の1/2~1/3程度まで静止摩擦力比の低減を確認できるが、複合材は同一試験条件においても加泥材と気泡の混合後(混合時間1分)の状態が若干異なり、結果にバラツキが生じた。

## (2) 付着抵抗測定試験

当試験は、掘削から排土までの掘進機内部での、掘削改良土と鋼材との付着特性について把握するもので、試験概要を図-13に示す。

試験は、円筒状鉄管内(φ20.5cm, H=50.0cm)

に混合土をスランブ試験と同要領で詰め、一定速度(0.25cm/sec)で円筒状鉄管を引き上げた時の力を測定して付着力とした。

図-14に添加率と最大付着応力の関係を示し、図-15にスランブと最大付着応力の関係を示す。

ここに、最大付着応力は引き上げ力の最大値を円筒状鉄管の内面接触面積で除したものとした。

写真-3に付着抵抗測定試験状況を示す。

図-14では各モデル地盤とも添加率の増加に伴い最大付着応力は減少する傾向にあり、添加率が20%および30%の時に最小値となっている。

この時の最大付着応力は、無添加時と比較して1/2~1/3程度まで低減されることを確認した。

図-15に示すスランブと最大付着応力の関係では、全般にスランブの増加に伴い付着応力は低下する。

これは、地盤および添加材の種類によらずスランブ5cm以上で同一傾向となっている。

ただし、加泥材で材料分離を生じたモデルⅢの地盤(△)では、土砂の塑性流動化が難しく、付着応力とスランブとの相関は認められなかった。(写真-2参照)また、同一モデルでのシリカの適用は、土砂が改良状態を示し、無添加時と比較して約50%の最大付着応力の低減が図れた。

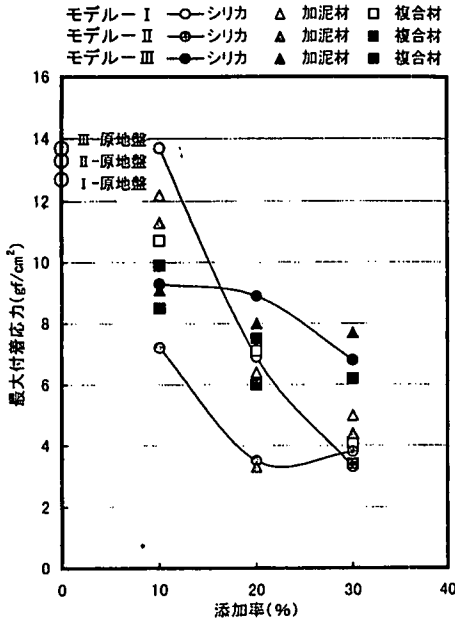


図-14 添加率と最大付着応力

### (3) その他の施工性向上に関する実験

その他の施工性向上に関する実験として、シリカの圧送実験を実施した。実験は、2インチの中圧ホースにて50ℓ/min送液時の、モノポンプ(4NM40)の圧送圧力(元圧)をシミュレーションした。

その結果、2000mまでの長距離を6 kgf/cm<sup>2</sup>以下の元圧で圧送が可能であることを確認している。

### (4) 考察

滑動試験および付着抵抗測定試験による実験結果から判断して、シリカによる土性改良は他の鉱物系添加材や複合添加材と比較して遜色はなく、添加材として推進抵抗や機械負荷の低減に十分に寄与できるものとする。

滑動試験では、砂との混合がない場合、シリカの静止摩擦係数は無添加時の0.6程度で、他の添加材と比較して大きくなった。これは、シリカのチクソトロピックなペーストは均一性が高く、測定器との接触面が大きいため、摩擦係数が大きく滑動しにくい状態になったものと推察できる。

しかし、シリカ単独の静止摩擦係数は推進の抵抗になるものではなく、砂と混合した場合は、既に実績がある他の添加材と同程度の摩擦低減効果を確認した。これは、他の添加材と同様に推進抵抗の低減や機械負荷の低減に、寄与できるものと考察できる。

付着抵抗測定試験では、各モデルとも無添加時には、12.7~13.7gf/cm<sup>2</sup>のほぼ同一の付着応力を示すことから、無添加時の付着応力は骨材の土圧(壁圧)のみに対する摩擦抵抗力と考えられる。しかし

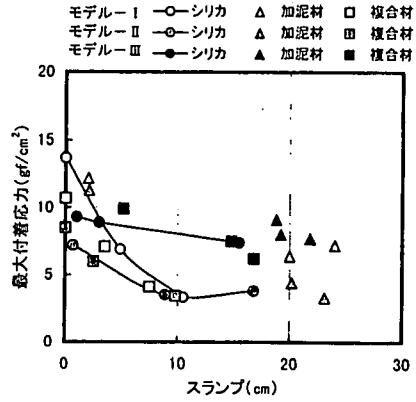


図-15 スランプと最大付着応力

添加材を加えることで各々の特性により流動性(すべり効果)が増加して摩擦抵抗力は低減される。

特に細粒分の多いモデル地盤ほど、添加材による付着応力の低減効果は高く、モデルIでは原地盤に対して25%(シリカ)~40%(加泥材)程度まで付着応力を低減させた。

また、細粒分が無く礫率の高いモデルIIIでは、最大付着応力の測定から添加材の種類による差異は明確にならなかった。しかし、加泥材による付着応力の低減は、土砂の分離に起因するもので、添加率の対応による土性改良効果とは異なるものであった。

さらに、スランプと最大付着応力との関係で、分離がなく土性改良が可能な土砂は、添加率の増加が単位水量を増加させスランプの値を大きくすることで付着応力を低減させる。シリカおよび複合材による土性改良では加泥材と比較して、スランプが小さくても最大付着応力が小さい傾向にあり、図-10に示す土性値の改善におけるスランプと内部摩擦角の低減の関係と同様な傾向を示すことを確認した。

以上の各種試験から、泥土圧シールド工法におけるシリカの適用は、実施工における掘削土砂の流動性および止水性を改善するとともに、シールド機のカッタートルクなどの機械負荷の軽減効果、チャンパー内、排土スクリー内の摩擦抵抗力、付着抵抗力に低減効果をもたらすものとする。

## 7. シリカの添加率に関する検討

### (1) 間隙率の算定

砂礫地盤におけるシリカの適用は、添加材として地盤中の間隙水を排除することが要求される。

また、注入率の算定は砂礫地盤の土性改良の他に機械負荷低減および付着防止等に寄与する「量」を考慮する必要がある。



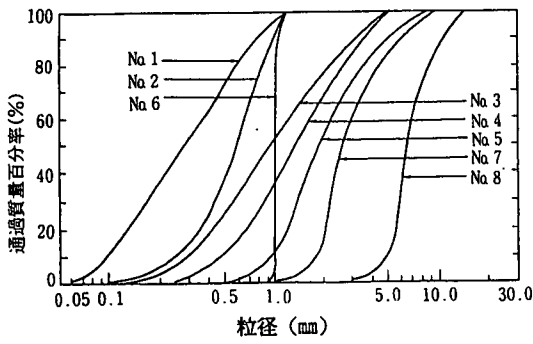


図-16 試料の粒度組成

著者らの研究<sup>13)</sup>によると、地盤中の間隙水の一定割合が添加材と置き換わって、添加率の最小値は有効間隙率の1.3~1.5倍に相当し、最大値は間隙率以下であることを確認している。

さらに、砂および砂礫地盤については松尾らの研究<sup>14)</sup>によって、間隙率と有効間隙率が関係づけられている。このことから、シリカの添加率は地盤の間隙率を算定し有効間隙率を推定することで、決定できるものとする。

間隙率は一般に下記の式(2)で表わされる。

$$\begin{aligned} \text{乾燥密度 } \rho_d &= \rho_s / (1 + w/100) \\ \text{間隙比 } e &= (\rho_s / \rho_t)(1 + w/100) - 1 \\ &= (\rho_s / \rho_d) - 1 \\ \text{間隙率 } n &= 1 - (\rho_d / \rho_s) \quad (2) \\ &= e / (1 + e) \end{aligned}$$

ここに、

$\rho_t$  ; 湿潤密度 (g/cm<sup>3</sup>)     $w$  ; 含水比 (%)  
 $\rho_s$  ; 土粒子の密度 (g/cm<sup>3</sup>)

(2) 添加率の算定

松尾らの実験の地盤試料の粒度組成を図-16に示し、それらに対する間隙率と有効間隙率の関係を図-17に示す。シリカの添加率の算定は、土質調査等で既知のデータとして得られた粒径加積曲線を図-16に照合して類似モデルを判定する。

ただし、類似モデルが得られない場合は、表-5に示す適用粒度の判定から10%毎の通過質量百分率に対してモデル曲線 (No1~No8) を選定する。

表-5に示す「評価範囲」は、施工を対象とする地盤の通過質量百分率毎の粒径に対する範囲を設定するもので、粒径による各モデル曲線との関連づけ(以下、フィッティングという)を行うものである。また、表-5の「選定曲線」は、評価範囲で位置づけられた地盤の粒径に対して粒径的に最も近い値を持つ、図-16に示す選定可能なモデル曲線を意味する。表-6に図-16のモデル曲線の近似式を示す。

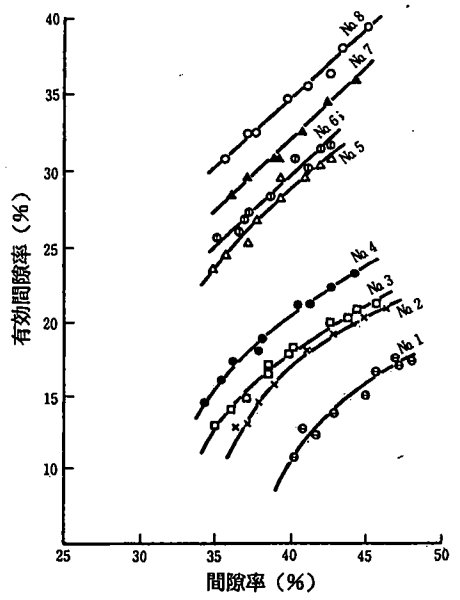


図-17 間隙率と有効間隙率

表-5 適用粒度の判定

粒径	適用粒度	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
10%	評価範囲	0.18	0.29	0.40	0.21	0.97	1.41		
	選定曲線	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
20%	評価範囲	0.25	0.40	0.56	0.84	1.12	1.65		
	選定曲線	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
30%	評価範囲	0.31	0.51	0.72	0.94	1.21	1.81		
	選定曲線	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
40%	評価範囲	0.37	0.63	0.88	1.05	1.36	2.02		
	選定曲線	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
50%	評価範囲	0.44	0.77	0.98	1.18	1.63	2.27		
	選定曲線	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
60%	評価範囲	0.52	0.83	1.12	1.46	1.98	2.60		
	選定曲線	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
70%	評価範囲	0.61	0.88	1.33	1.87	2.43	3.13		
	選定曲線	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
80%	評価範囲	0.72	0.93	1.63	2.48	3.11	3.94		
	選定曲線	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8
90%	評価範囲	0.87	1.01	2.14	3.39	4.24	5.46		
	選定曲線	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7	No.8

表-6の算定近似式は、図-17に示すNo1~No8の各モデル曲線の間隙率と有効間隙率の関係を示す。以上から、式(3)にシリカの添加率算定式を示す。

$$\text{シリカ添加率 } A(\%) = 130 \times \sum \beta_i \cdot \gamma_i / \sum \gamma_i \quad (3)$$

表-6 算定近似式

選定曲線	算定近似式	重み
Na 1	$\beta_1 = 0.369 \ell_n(n) + 0.450$	2.97
Na 2	$\beta_2 = 0.352 \ell_n(n) + 0.487$	2.40
Na 3	$\beta_3 = 0.327 \ell_n(n) + 0.477$	2.28
Na 4	$\beta_4 = 0.363 \ell_n(n) + 0.534$	2.04
Na 5	$\beta_5 = 0.368 \ell_n(n) + 0.625$	1.41
Na 6	$\beta_6 = 0.336 \ell_n(n) + 0.605$	1.36
Na 7	$\beta_7 = 0.368 \ell_n(n) + 0.658$	1.25
Na 8	$\beta_8 = 0.351 \ell_n(n) + 0.670$	1.15

ここに、

$\Sigma \beta_i$  ; 10%毎 ( $i=1\sim 8$ ) の通過質量百分率に対する有効間隙率の累計を示す。

$\gamma_i$  ; 添加率算定上の粒度に対する「重み」の累計。算定近似式で有効間隙率/間隙率=1.0 を基準とした時の、各モデルの間隙率  $n$  (平均値) と有効間隙率  $\beta$  との逆比に相当。

130 ; 有効間隙率の1.3倍とする係数で、添加率の最小値をパーセント(%)で表示したもの。

### (3) 添加率算定例

シリカ添加率の算定は、実施工での適用地盤を参照として図-18に施工地盤例を示す。

また、地盤条件を下記とする。

礫率 ; 70%                      湿潤密度 ;  $\rho t=2.1 \text{ g/cm}^3$   
 含水比 ;  $w=12.5 \%$       間隙比 ;  $e=0.42$   
 間隙率 ;  $n=0.296 \approx 30\%$

添加率の選定は、図-18 および表-5 に示す適用粒度判定から、施工地盤とモデル地盤とのフィッティングを行い、選定曲線を判定する。

また、通過質量百分率 10%毎 (○印) の有効間隙率を、選定曲線毎に表-6 の近似式から算定する。

10% ; 曲線 No1  $\beta_1 = 0.369 \ell_n(0.3) + 0.450 = 0.0057$

20% ; 曲線 No3  $\beta_3 = 0.327 \ell_n(0.3) + 0.477 = 0.083$

30% ; 曲線 No7  $\beta_7 = 0.368 \ell_n(0.3) + 0.658 = 0.215$

40% ; 曲線 No8  $\beta_8 = 0.351 \ell_n(0.3) + 0.670 = 0.247$

50% ; 曲線 No8  $\beta_8 = 0.351 \ell_n(0.3) + 0.670 = 0.247$

60% ; 曲線 No8  $\beta_8 = 0.351 \ell_n(0.3) + 0.670 = 0.247$

70% ; 曲線 No8  $\beta_8 = 0.351 \ell_n(0.3) + 0.670 = 0.247$

80% ; 曲線 No8  $\beta_8 = 0.351 \ell_n(0.3) + 0.670 = 0.247$

90% ; 曲線 No8  $\beta_8 = 0.351 \ell_n(0.3) + 0.670 = 0.247$

上記の値に「重み」を考慮して、式 (3) によって添加率を算定する。

$$\begin{aligned} \text{添加率} : A &= 130 (0.0057 \times 2.97 + 0.083 \times 2.28 \\ &\quad + 0.215 \times 1.25 + 6 \times 0.247 \times 1.15) \\ &\quad \div (2.97 + 2.28 + 1.25 + 6 \times 1.15) \\ &= 21.2(\%) \end{aligned}$$

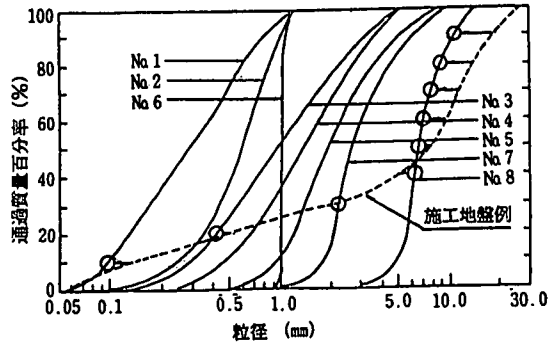


図-18 施工地盤とモデル地盤のフィッティング

以上の結果、施工地盤例でのシリカ添加率は21.2%を基準とし、注入量 (または添加量) は掘進速度に応じて式 (4) のように決定する。

$$\begin{aligned} \text{注入量 (l/min)} &= 1/10 \times \text{シールド断面積 (m}^2) \\ &\quad \times \text{掘進速度 (cm/min)} \times A (\%) \end{aligned} \quad (4)$$

## 8. シリカの安全性に関する検討

シリカの安全性については、生物に対する安全性試験と環境に対する有害物質分析試験に大別して実施した。

### (1) 生物に対する安全性試験

生物に対する安全性試験は、マウスによる急性経口毒性試験およびヒメダカによる急性毒性試験 (魚毒試験) を実施した。

試験生物のマウスは、投与時 5.5 週齢の雄マウス (体重範囲 : 24.2~27.5g) を 1 群当り 5 匹用いた。

また、試験方法は被験物質をマウスを一夜絶食後に 1 回強制経口投与して死亡数、死亡時期および臨床症状の観察、体重測定、並びに肉眼病理検査を実施した。ヒメダカによる急性毒性試験は、農林省通達 (40 農政 B 第 2735 号) の「魚類に対する毒性試験法」に準じるもので、ヒメダカは成魚で平均全長 3.1cm、平均体重 0.33g で一濃度当り 10 匹を用いた。

試験結果を下記に示す。

①マウスの経口急性毒性試験 LD50 > 20,000mg/kg

②ヒメダカの急性毒性試験 Lc50 > 30,000ppm

ここに、

LD50 : 各投与量群の試験終了時の死亡率より算出した半数致死量。LD50 は 50% Lethal Dose の略で実験動物群の半数が死亡すると計算される被験物質の投与量を示す。また、実験動物の体重 1kg 当りの被験物質の mg 量で、死亡

表-7 シリカの分析試験結果

計量の対象(mg/l)	シリカ	土壌環境基準	排水基準	下限値
アルキル水銀化合物	不検出	検出されない	検出されない	0.0005
水銀又はその化合物	不検出	0.0005	0.005	0.0005
砒素又はその化合物	不検出	0.01	0.1	0.005
鉛又はその化合物	不検出	0.01	0.1	0.01
有機燐化合物	不検出	検出されない	1	0.05
六価クロム化合物	不検出	0.05	0.5	0.01
砒素又はその化合物	不検出	0.01	0.1	0.005
シアン化合物	不検出	検出されない	1	0.05
PCB	不検出	検出されない	0.003	0.0005
トリカブチン	不検出	0.03	0.3	0.003
テトラカブチン	不検出	0.01	0.1	0.001
ジカブチン	不検出	0.02	0.2	0.002
四塩化炭素	不検出	0.002	0.02	0.0002
チウラム	不検出	0.006	0.06	0.0006
シマジン	不検出	0.003	0.03	0.0003
チオベンカルブ	不検出	0.02	0.2	0.002
ベンゼン	不検出	0.01	0.1	0.001
セリウム又はその化合物	不検出	0.01	0.1	0.01
銅又はその化合物	不検出	—	3	0.01
亜鉛又はその化合物	不検出	—	5	0.01
ふっ化物	不検出	—	15	0.2
水系イオン濃度	7.8	—	5.8~8.6	0~14

下限値：試験可能な測定下限値

例の認められない最高投与量を示す。

Lc50：各投与量群の投与後 24, 48, 72 および 96 時間目の死亡率より算出した半数致死濃度。

Lc50 は 50% Lethal Concentration の略で実験動物群の半数が死亡すると計算される被験物質の ppm 濃度を示す。

上記の試験結果から、シリカに関して特記すべき毒性変化は無かった。

### (2) 環境に対する有害物質分析試験

環境庁告示第 25 号 (平成 6 年 2 月) の土壌の汚染に係わる環境基準に基づき実施した、有害物質の分析試験結果を表-7 に示す。

表-7 の分析結果から、その他溶出試験を含めて添加材シリカは土壌の環境基準、排水基準ともに有害物質は不検出であり安全性が高いことを確認した。

## 9. 結論

シリカシールド工法の実用化に関して、本研究で得られた結論は下記のとおりである。

土性改良に関する要素実験から

- (1) 添加材シリカは、礫や砂との混合でチクソトロピックなペーストに変化する。シリカと礫率 70% のモデル-Ⅱ地盤との混合は、一体感のある良質な泥土に改善され、透水係数で  $1 \times 10^{-5} \sim 10^{-6}$  cm/sec オーダの難透水性土砂に改良が可能であった。また、モデル-Ⅲも同様な結果となった。

- (2) モデル-Ⅱのシリカ改良土の三軸試験は、スランプ値が 0~3 cm と小さくても内部摩擦角の低減効果は高く、添加率が 10% でも加泥材による改良土の 1/3 程度まで低減した。このため、シリカは礫質土の流動性改善効果が高いものと評価できる。

また、加泥材による内部摩擦角の低減は、添加率の増加に伴う単位水量およびスランプの増加に起因するもので、高礫率の滞水砂礫層では地盤の分離・地下水の噴発を招くものと考察した。

施工性の向上に関する要素実験から

- (3) 滑動試験では、シリカは砂との混合によって静止摩擦力が無添加時の 30~40% に低減した。

これは、地盤と掘進機の間で「滑材」としての役割を果たすもので、推進抵抗の低減や掘進機の磨耗低減に寄与できるものと考えられる。

- (4) 付着抵抗測定試験では、添加率 10% 以上で土砂と鋼材 (シールド) の付着を無添加時の 1/2~1/3 程度まで低減した。スランプと最大付着応力との関係で、加泥材によって土性改良が可能な土砂は添加率の増加で単位水量およびスランプを増大<sup>11)</sup>させて最大付着応力を低減させる。

シリカは、改良土のスランプが 5 cm 程度と小さい場合でも最大付着応力は小さい。これは、内部摩擦角の低減に起因するものとする。

シリカの添加率および安全性に関する検討から

- (5) 添加率の最小値は、有効間隙率の 1.3~1.5 倍である<sup>12)</sup>ことを基本に既往の間隙率と有効間隙率の関係から「重み」を考慮し、適用粒度の判定からモデル曲線とフィッティングさせる方式を考案した。シリカ添加率は下記式により算定できる。

$$\text{添加率} : A (\%) = 130 \times \sum \beta_i \cdot \gamma_i / \sum \gamma_i$$

ここに、 $\sum \beta_i$  : 粒径毎の有効間隙率の累計

$\sum \gamma_i$  : 粒度に対する「重み」の累計

- (6) マウスによる急性経口毒性試験およびヒメダカによる急性毒性試験 (魚毒試験) 結果から、シリカは普通物として判定できる。

また、環境庁告示第 25 号の土壌の汚染に係わる環境基準および有害物質の分析試験結果から、シリカは土壌の環境基準、排水基準ともに有害物質は不検出であり安全性が高いことを確認した。

以上のことから、シリカシールド工法の実用化に関する研究では①高礫率の地盤に対して流動性および止水性の土性改良が可能である、②機械負荷を低減し施工性の向上に寄与できる、③有効間隙率に着目し添加率の基準が算定できる、④安全性が高く土壌環境基準に適合している、等が確認できたことで今後ひろく実施工において現場適用していきたいと考えている。

謝辞：最後にシリカシールド工法の実用化に関する研究に際し、日産化学工業㈱北川部長、同中央研究所堀主任研究員、武藤主任研究員に多大なご協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 佐々木道雄：土圧系シールド工法, pp.8-14, 鹿島出版会, 1982.7.
- 2) 齋藤優, 山田清臣：泥土圧シールド工法における掘削礫質土の土性改良, 土木学会論文集, VI-38, 1998.3.
- 3) 松村公雄, 石川邦寛, 齋藤優：滞水砂礫層を気泡シールドで貫く(山梨県釜無川流域下水道), pp. 37-44, トンネルと地下, 1969.7.
- 4) 化学工業日報社：12394 の化学商品, pp.95(Colloidal silica), 1994.1.
- 5) 土木学会：トンネル標準示方書(シールド工法編)・同解説, pp.170-171, 1996.7.
- 6) 気泡シールド工法協会：気泡シールド工法技術・積算資料第2版, pp.1-3, 1991.8.
- 7) トンネル技術協会：土圧系シールドの現状と問題点(シンポジウム資料), 1981.2.
- 8) 日立造船㈱：小口径泥漿シールド工法技術資料(施工編), pp.64-67, 1984.1.
- 9) 下釜卓, 齋藤優：礫率85%での気泡(泥漿併用)シールド工法(京都府木津川流域下水道向島③管渠工事), 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, III-40, pp.116-117, 1990.9.
- 10) フォリエント 化学㈱：特殊蛋白系起泡剤(グ\*ルフォーム)資料, p.9
- 11) 齋藤優, 山田清臣：泥土圧シールド工法における掘削礫質土の土性改良, 土木学会論文集, VI-38, pp.77-80, 1998.3.
- 12) 越川茂雄, 中村憲治：まだ固まらないコンクリートの三軸圧縮試験方法について, 土木学会第30回年次学術講演会講演概要集, V-38, pp.77-79, 1975.10.
- 13) 齋藤優, 山田清臣：泥土圧シールド工法における掘削礫質土の土性改良, 土木学会論文集, VI-38, pp.83-86, 1998.3.
- 14) 松尾新一郎, 小暮敬二：砂礫の有効間隙率に関する実験的研究, pp.19-25, 土と基礎, 1969.7.

(1997. 9. 5 受付)

## STUDY ON THE UTILIZATION OF SILICA JELLY TO THE EARTH PRESSURE SHIELD METHOD

Masaru SAITO and Kiyoomi YAMADA

The earth pressure shield method can be applied to various kinds of soil, but a certain countermeasure is needed to prevent the gush of water at the gate of soil removal with excavating some types of soils such as granular soil.

The "Silica shield method" uses silica jelly as an additive to solve the above mentioned problem.

This report describes the various effects of silica jelly such as improvement of fluidity of excavated granular soil, the optimum mixing ratio of silica jelly and the safety features.