

# 泥土圧シールド工法における 掘削礫質土の土性改良

齋藤 優<sup>1</sup>・山田 清臣<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社錢高組 技術本部技術研究所 主任研究員 (〒102 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 東京都千代田区神田駿河台 1-8)

最近のシールド工法では、全線にわたって均一な土質を対象にすることは少なく、特に地下水が豊富な砂や砂礫層、崩壊性の砂、互層中の滯水砂や巨礫層などの地層では施工に困難を伴う場合が多い。

本研究では、泥土圧シールド工法<sup>1)</sup>における掘削礫質土の塑性流動化を目的として要素実験および模型実験を実施し、土性改良メカニズムの解明と定量的評価を行った。また、添加材の種類による対応と注入量を提案して実施工への適用性について検討したものである。

**KeyWords :** earth pressure shield, gravelly soil, the improved fluidity, simulation experiments

## 1. 現状と課題

泥土圧シールド工法は、密閉型シールドの土圧式に分類されるもので、掘削土砂を土圧室（以下チャンバーと称する）内に詰め込み、緩み土圧に対抗して土圧を保持しながら切羽を安定させる。その後、スクリューコンベアを回転させゲートを開いて、掘削土砂を排出しながら掘進を行う。これがすべての土圧式シールドの基本原理<sup>2)</sup>となっている。

また、泥土圧シールド工法は一般に加泥材、作泥土材と呼ばれる粘性付与材（添加材と称する）を切羽またはチャンバー内に注入することで、本工法の適用を対象とする地盤領域の拡大を図ったもので、添加材の役割として下記のことがあげられる。

- ①掘削土砂と混練して止水性を改善する。
- ②地盤に不足する細粒分を補い流動性を改善する。
- ③掘削土と掘進機の付着を防止する。

即ち、添加材を適用しない土圧シールドで砂、砂礫層を掘進すると掘削土砂の流動性がわるく、カッターおよびスクリュー等の抵抗が大きく、機械負荷が増大し掘進の中止を招くことになる。

このため、添加材によって掘削土砂の土性を改善し安定した掘進を維持することが、泥土圧シールドにおける添加材注入の目的であり特長となっている。

しかし、当工法は添加材を用いても地盤の粒度組成や地下水の状態によっては、掘削土砂の土性改良

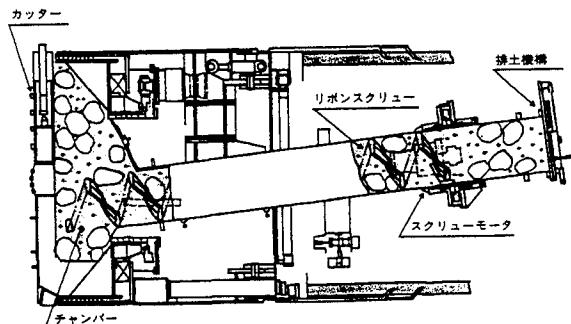


図-1 泥土圧シールド

状態が異なり、図-1 の掘進機のように排土機構にシャフトのないリボンスクリューを採用した場合は、スクリュー径の 2/3 までの巨礫搬出には有利なもの土砂と接する面が少なく、土砂の運搬能力や対抗土圧を発生させる機能も悪いものとなっている。

特に、地下水が豊富な砂や礫率の高い砂礫層、複合地層等においては、掘進中に地下水を噴発させ切羽の崩壊や掘進の中止を招く場合が多く、その対策を講じることが大きな課題となっている。

## 2. 研究の目的

泥土圧シールド工法で、滯水砂礫層を対象に切羽の崩壊を防止し安定した掘進を行うためには、①掘

表-1 添加材の分類

添加材	鉱物系（加泥材、作泥土材、泥漿他）
	界面活性剤系（起泡剤他）
	樹脂系（高分子吸収剤他）
	樹脂系（液体合成高分子他）
	その他

進機による機械的要因、②掘削土砂の土性改良要因、③掘進管理要因に大別されるが、掘進中は機械的対応や機種の変更が難しいため添加材による対応と的確な土圧管理によるところが大きい。

本研究は、添加材による掘削土砂の流動性および止水性の改善が切羽安定に重要な要因と考え、掘削礫質土の土性改良メカニズムの解明と定量的評価を行うことを目的とした。また、要素実験および模型実験を行い、添加材の種類と注入量を提案して実施工への適用性を検討するものである。

要素実験：土性改良が必要と考えられる3種類の地盤に対して、類似したモデル地盤を作成して、スランプ試験にて流動性改善効果を確認し、変水位透水試験にて止水性改善効果を確認する。

模型実験：礫率70%の砂礫地盤を対象に、縮尺1/3の泥土圧シールド模型機を使用し、圧力条件下の土性改良効果について検討する。また、添加材注入量と間隙水移動量から、実施工における注入率の検討を加える。

### 3. 使用材料

#### (1) 添加材

##### a) 添加材の種類

添加材の主材による分類を表-1に示す。

添加材は鉱物系添加材が幅広く採用され、その他主材を中心に研究・開発されたもので起泡剤、高分子吸収剤等があり各種工法が実用化されている。

鉱物系添加材は、一般にベントナイト、粘土、水で作液し、掘削土砂との混合で原地盤を掘削した土砂に塑性流動性をもたらす、土砂の流動性および止水性を改善する。

当材料は採取地や製造過程によって性状が異なる。界面活性剤系添加材は、起泡剤をエアードで発泡させ気泡を切羽に投入するもので、気泡のもつベアリング効果によって掘削土砂の流動性を改善し、気泡と地下水の置換により止水性を向上させる。

しかし、気泡シールド工法<sup>3)</sup>では礫率が70%以上の地盤に対して他の補助工法が必要とされ、気泡単独での施工が難しい地盤領域となっている。

表-2 加泥材の配合

種類	加泥材 I	加泥材 II
水 kg	1000	1000
ベントナイト kg	175	175
粉末粘土 kg	425	425
砂 kg	—	300
比重	理論値 1.31	1.42
G <sub>m</sub>	実測値 1.28	1.46
粘性 Sec	31.2	59.0

ペントナイト（群馬産 250#） 粉末粘土（SCP-B）

粘性測定（Pロート）

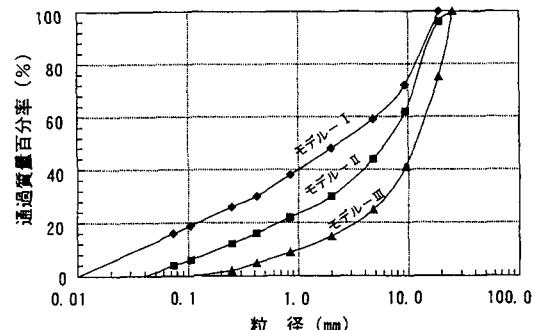


図-2 モデル地盤の粒径加積曲線

高吸水性樹脂は、多数の高分子電解質で短時間で数百倍（重量比）の水を吸水して、弾性的な挙動により流動性改善効果を高める。また、液体合成高分子は粘土分の凝集効果が高く、少量で高粘度を得て添加量の調整で土砂の団粒化も可能である。

#### b) 添加材の配合

要素実験で使用した添加材は、一般に普及している鉱物系添加材（以下加泥材という）を選定した。

加泥材は、ベントナイトおよび粉末粘土を主体とする加泥材I（比重1.28）と、粒度組成の観点から地山に不足する砂分を補足する目的で、加泥材Iに「砂」を投入した加泥材II（比重1.46）の2種類を採用した。

加泥材の配合と性状を表-2に示す。

また、加泥材の作成は使用時の24時間以上前とし、充分膨潤したものをモデル地盤に投入した。

#### (2) モデル地盤

図-2に示すモデル地盤の粒度組成は、図-3に示す泥漿シールドの適応土質<sup>4)</sup>に対応させたもので、モデル-IはC領域に近いB領域とし、モデル-IIおよびモデル-IIIを各々Cライン、Dラインとした。また、骨材の最大粒径を25.4mmとし川砂利、川砂、土木用粘土を用いた。表-3にモデル地盤特性を示す。

表-3 モデル地盤特性

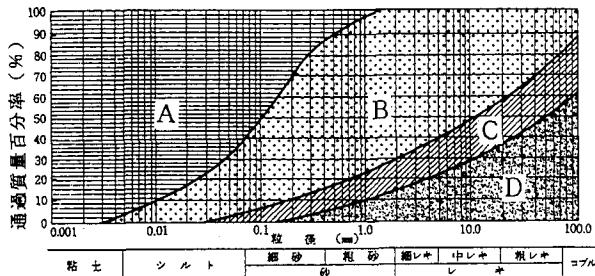
	モデルーI	モデルーII	モデルーIII
60%粒径	5.0 mm	8.0 mm	14.0 mm
30%粒径	0.4 mm	2.0 mm	6.1 mm
10%粒径	0.03 mm	0.19 mm	1.00 mm
最大粒径	19.1 mm	25.4 mm	25.4 mm
均等係数 $U_c$	166.7	42.1	14.0
曲率係数 $U_c'$	1.1	2.6	2.7
礫分・粒径 2 mm以上	52%	70%	85%
砂分・2~0.074 mm	32%	26%	15%
細粒分・0.074 mm以下	16%	4%	0%

ここに、全土粒子（重量比）に対して

礫分率：粒径が 2 mm以上の礫の占める割合

砂分率：0.074 mm~2 mm迄の砂の占める割合

細粒分率：0.074 mm以下の細粒土の占める割合



#### 4. 要素実験

##### (1) 実験方法

要素実験は、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 16 kg をモデル別に計量した。また、各モデルは細粒分率によって吸水率が異なるため、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。

添加材の注入量は、地山の湿潤密度から体積換算して、体積比率での注入量を添加材注入率（以下添加率という）とした。また、要素実験では地下水の押し出しを考慮しないため、添加率を 10~30% 程度迄に設定してスランプ試験、透水試験を実施した。

##### (2) 実験結果

###### a) 流動性の改善

###### ① 添加率とスランプの関係

スランプ試験にて流動性改善効果を把握した。

図-5 に各モデル地盤の改良土の添加率とスランプの関係を示す。

礫率 52% のモデルーI は、比較的良好な相関で比重 1.31 の加泥材 I で充分な土性改良が可能であった。

しかし、礫率 70% のモデルーII は添加率 15% 程度で改良に限界を示し泥状化および分離状態となった。

これは、2 mm 以上の礫分に対して砂分および細粒分（モデル地盤と加泥材の細粒分）が分離するもので、加泥材 I の添加率を増加しても砂および細粒分は礫と絡まることなく水とともに分離した。このため「礫」だけがスランプ 22~23 cm として残存した。

また、同モデルを比重 1.42 の加泥材 II で混練すると添加率 25% まで改良範囲が拡大した。

ただし、加泥材 II による改良で添加率が 20~25% 時は、礫分と砂分および細粒分の絡まりは良好で、上述の分離状態ではないもののスランプは 23

	A	B	C	D
内 容	$N < 15$ が良好 $N > 15$ では注水と混練が必要	土圧系シールド 的確な掘進・排出ができる	泥漿の注入・混練を必要とする $G_m = 12 \sim 13$	モルタル泥漿の注入・混練が必要 $G_m = 14 \sim 15$
泥漿	不要 $N > 15$ では注水	原則として不要	必要 粘土ベースト泥漿	必要 粘土モルタル泥漿

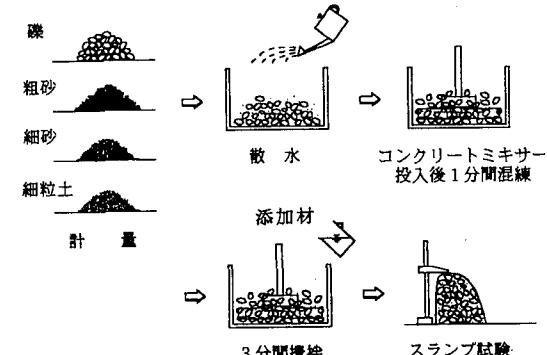
図-3 泥漿シールドの適応土質<sup>4)</sup>

図-4 混練手順

~25 cm と大きく、泥状化直前の状態であった。

このため、各モデルの土性改良は「スランプが 20 cm より大きい時は泥状化および分離」と評価できる。

モデルーIII は加泥材 I、加泥材 II ともスランプは 18 cm~20 cm に集約されているが、すべての添加率で土砂は分離し流動性の改善は不可能であった。

また、モデルーI、II の加泥材無添加時のスランプ値が 0 cm であることから、当実験のスランプによる流動性改善効果の範囲は 5~20 cm と推察した。

###### ② スランプと含水比および単位水量の関係

図-7 にモデルーI、II 地盤の改良土の単位水量とスランプの関係を示し、表-4 にスランプが 5~20 cm の範囲で土性改良された時の含水比と単位水量を示す。ここに、単位水量は改良土の単位土量 ( $1 m^3$ ) に対する水分含有量 ( $\ell$ ) で、測定した含水比から換算して単位水量を算定した。

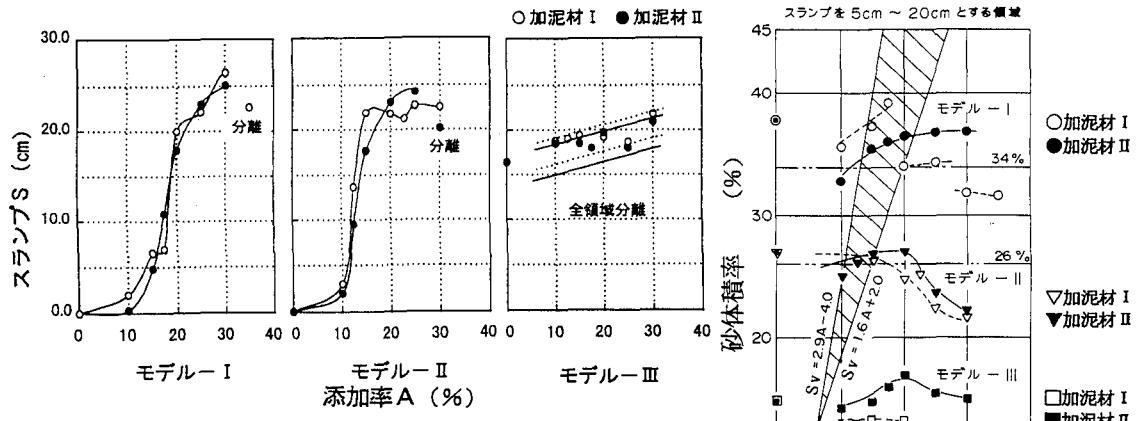


図-5 スランプと添加率の関係

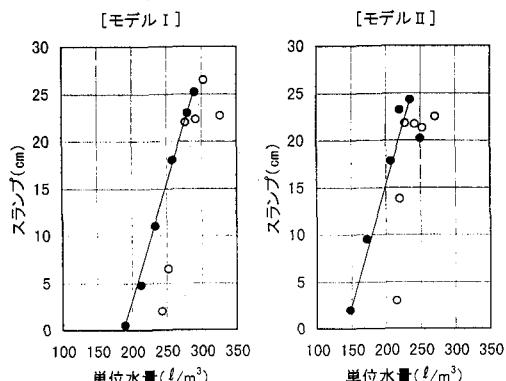


図-7 単位水量とスランプ

図-7 に示すように、加泥材 I を適用した場合にスランプが 5~20 cm の範囲で土性改良に寄与する単位水量は、モデルー I でほぼ 260 l/m<sup>3</sup> 程度となり、モデルー II で 220 l/m<sup>3</sup> 程度の狭い範囲に限定される。

加泥材 I は添加率が増加し単位水量がこの範囲を超えると、即座に泥状化し分離状態となった。

これに対して「砂」を投入した加泥材 II は、土性改良に寄与する単位水量の範囲が広く、添加率の対応で土性改良が可能と言える。

図-7 から、加泥材 II でスランプが 5~20 cm の範囲で土性改良が可能な場合のスランプと単位水量との関係を下記に示す。

$$\text{モデルー I} ; S = 0.26M - 48.77 \quad (1)$$

$$\text{モデルー II} ; S = 0.26M - 35.45 \quad (2)$$

ここに、S : スランプ (cm)

M : 単位水量 (l/m<sup>3</sup>)

ただし、礫率 85% のモデルー III では加泥材 I, II のいずれの添加材でも土性改良が難しく、分離したため単位水量による相関は確認できなかった。

③スランプと砂体積率 (S<sub>v</sub>) の関係

改良土の砂分と流動性改善の関係に着目して、改

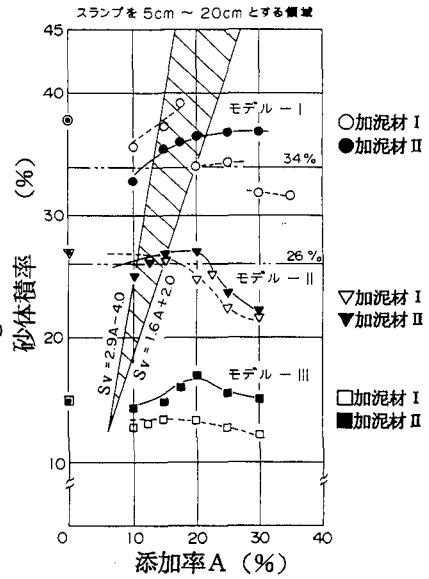


図-6 流動性確保の領域

表-4 加泥材と含水比、単位水量

地盤	加泥材	スランプが 5~20 cm の範囲	
		含水比 W (%)	単位水量 M (l/m <sup>3</sup> )
モデルー I	I	12.4~13.5	250~270
	II	10.6~12.7	207~265
モデルー II	I	10.4~10.5	220
	II	7.6~9.8	156~213
モデルー III	I	—	—
	II	—	—

良土のふるい分け試験結果から、添加率と砂体積率の関係を把握した。（図-6 参照）

加泥材 II による改良土は、全般に砂体積率が高くバラツキが少ない。また、スランプで 5 cm~20 cm の流動性を確保するためには、次式の関係が得られた。

$$2.9A - 4.0 \geq S_v \geq 1.6A + 2.0 \quad (3)$$

ここに、A : 添加率 (%)

S<sub>v</sub> : 砂体積率 (%)

本文中の砂体積率は、土質上の粒度組成における 0.074 mm~2 mm までの砂と 2 mm 以上の礫との体積比率であり、下記の式で表すものとした。

$$\text{砂体積率} = \frac{\text{砂の体積}}{\text{砂の体積} + \text{礫の体積}} \times 100 (\%) \quad (4)$$

図-6 に示す斜線の部分は、スランプが 5~20 cm の範囲に土性改良されたもので、砂体積率が式(3)に示す 2.9A - 4.0 より大きい場合は、スランプも 0 cm に近く改良も不充分で、土砂は突固めによって固い状態を示した。

また、式(3)の 1.6A + 2.0 より小さい場合は泥状化または分離状態を示し、モデルー III では添加材の種類、添加率に因らずバラケから分離状態であった。

○加泥材 I ●加泥材 II

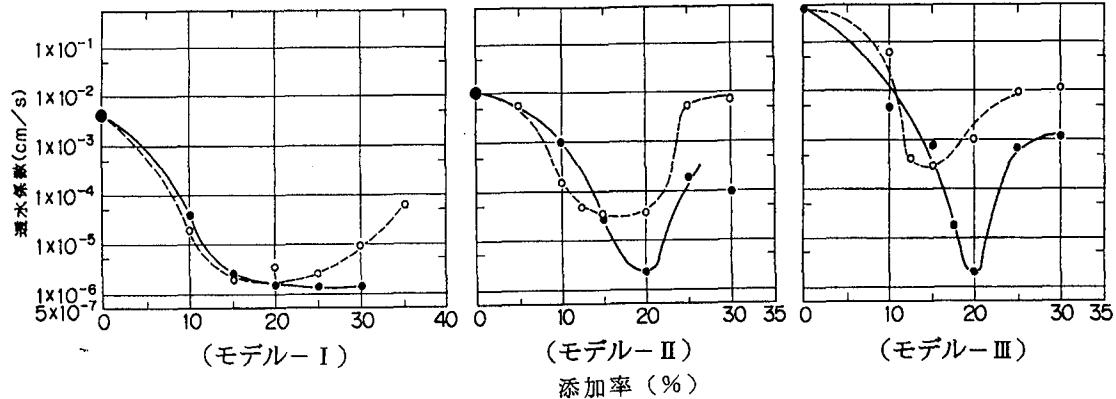


図-8 止水性改善領域（透水係数と添加率）

### b) 止水性の改善

変水位透水試験にて止水性改善効果を把握した。図-8に各モデルの添加率と透水係数の関係を示す。

#### ① 添加率と透水係数の関係

加泥材の添加でモデル地盤の止水性は大幅に改善された。表-5に原地盤と改良後の透水係数を示す。

図-8および表-5では、各モデルのほとんどの添加率で加泥材IIの優位性が確認でき、加泥材Iと比較して透水係数で $10^{-6} \sim 10^{-2}$ オーダーの違いが見られる。

さらに、モデルI, II, IIIの順で改良可能な添加率の範囲が限定されることが判明した。

また、スランプ試験で分離状態を示すモデルIIIでも、加泥材IIによって添加率20%の時に $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/secオーダーの土砂に改良が可能であった。

以上のことから、止水性の改善も地盤の粒度組成および加泥材の種類（砂分および細粒分含有量）の違いによって改善効果が異なることを確認した。

#### ② 砂・細粒分率と透水係数の関係

図-9に砂・細粒分率と透水係数の関係を示す。

各モデルとも砂・細粒分率の増加に伴い透水係数は比例関係で小さくなり止水性は向上する。ただし、砂を含有しない加泥材Iは各モデルの礫率の増加に伴い改良程度の絶対値は低下し、モデルIIIで $10^{-4}$ cm/secオーダーとなった。

ここに、砂・細粒分率は砂と細粒土（0.074 mm以下の土粒子）の合計量を、礫と砂および細粒土の全土粒子との絶対容積比として百分率で表示した。

#### ③ 透水係数と含水比、単位水量

表-6に、排水が「わずか」とされる $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-7}$ cm/secの範囲の、各モデルの含水比および単位水量の測定結果を示す。

表-6では、各モデルの礫率の増加に伴い止水性的改善に必要な水分量（単位水量M）が限定された。

表-5 透水係数の改善（最小値）

地盤	無添加	加泥材 I		加泥材 II	
	透水係数 (cm/sec)	透水係数 (cm/sec)	添加率 (%)	透水係数 (cm/sec)	添加率 (%)
モデル I	$3.89 \times 10^{-3}$	$2.07 \times 10^{-6}$	15	$1.41 \times 10^{-6}$	25
モデル II	$1.09 \times 10^{-2}$	$3.39 \times 10^{-6}$	15	$2.72 \times 10^{-6}$	20
モデル III	$7.18 \times 10^{-1}$	$3.25 \times 10^{-4}$	15	$2.53 \times 10^{-6}$	20

表-6 改良土の含水比、単位水量

地盤	加泥材	透水係数が $10^{-5} \sim 10^{-6}$ cm/secの範囲	
		含水比 W (%)	単位水量 M (l/m <sup>3</sup> )
モデル I	I	10.6~17.1	229~322
	II	7.9~16.4	171~310
モデル II	I	10.2~12.2	217~253
	II	8.8~11.7	188~246
モデル III	I	—	—
	II	9.4~10.9	195~222

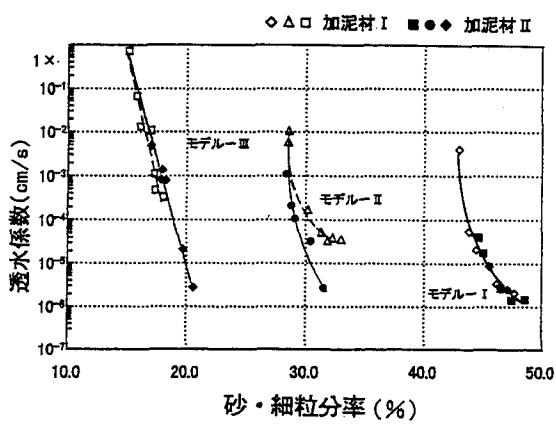


図-9 透水係数と砂・細粒分率

### (3) 考察

要素実験結果から、次のことが考察される。

礫質土の流動性改善は、加泥材Ⅱによる土性改良効果が高い。これは、加泥材Ⅱが強制的に砂分を増加したことに起因して、砂分によって地盤の礫分と細粒分を結びつける効果が得られたと考えられる。

特に、この現象はモデルーⅡの礫率70%の地盤で顕著であり、モデルーⅠは原地盤に砂分が多いため、またモデルーⅢは砂分が極端に少ないため、その効果が明確になっていない。

図-6に示すように、スランプが5~20cmの範囲で流動性改善に必要な改良土の砂体積率の最小値は、モデルーⅠで34%，モデルーⅡで26%程度であった。

砂を加えた加泥材Ⅱは、各モデルで砂体積率の増加が確認できる。しかし、添加率の増加は単位水量が増加し、砂礫地盤では含有する砂および細粒分が分離して流出することにより、土性改良に寄与する砂体積率は減少するものと考えられる。

止水性の改善についても、表-6では各モデルの礫率の増加に伴い単位水量が限定されることがうかがえ、加泥材Ⅱの優位性が明確になった。

また、図-6に示す砂体積率を最大とする添加率と、図-8に示す透水係数を最小にする添加率が同一であることが判明した。このため、流動性および止水性の改善において、流動性の改善が可能な地盤領域では止水性の改善も可能と言える。これは、表-4および表-6から流動性の改善を可能とする単位水量が、止水性改善の単位水量に含まれることによる。

要素実験結果から、礫質土の流動性および止水性の改善は、改良土の砂体積率、砂・細粒分率、単位水量に密接な関係があり、必要以上の加泥材の添加は「水分」の増加につながり、礫分との分離を促進し流動性および止水性は低下する。

したがって、実施工では加泥材の種類および添加率に着目した対応が要求される。この意味で、モデルーⅢの礫率85%の地盤でも、砂体積率が26%以上になるように、または表-3のモデルーⅡ地盤と同等の砂分を投入し、単位水量を減少することで土性改良は可能と考える。

しかし、現実的には加泥材の圧送性の観点から、加泥材Ⅱでも砂分が沈澱する傾向にあり、加泥材の比重から勘案して必要以上に砂分を増加させることは難しく、水1m<sup>3</sup>当たり砂300kgの添加が上限であると考えられ、下記課題の対応が必要となった。

- ①砂の代わりに礫と細粒分を結びつける材料の選定
- ②圧力条件下で単位水量を最小にする添加率の決定

以上、圧力条件下での土性改良効果の把握は、実施工での適用<sup>6)</sup>を前提として模型実験を実施した。

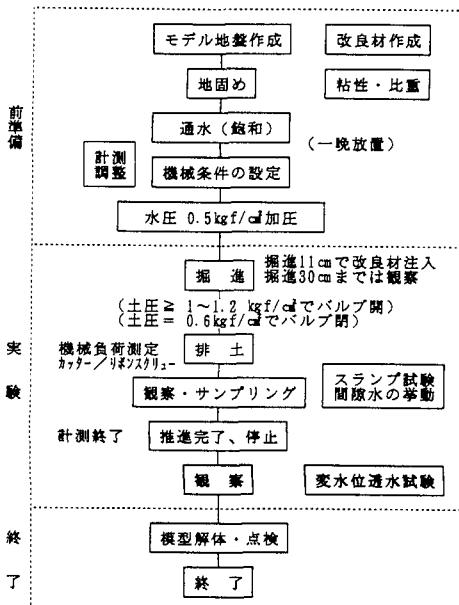


図-10 模型実験フロー

## 5. 模型実験

### (1) 実験方法

#### a) 実験フロー

模型実験は、Φ1.5mの1/3縮尺モデルの泥土圧シールド模型機を使用して、添加材をチャンバーに注入しながらカッターで地盤を切削し掘削を行った。

図-10に実験フロー、図-11に実験装置を示す。

模型実験は、地下水の状態を模擬して水圧タンクで水圧を0.5kgf/cm<sup>2</sup>に設定し、チャンバー内での管理土圧を0.7~1.0kgf/cm<sup>2</sup>とした。

また、土性改良メカニズム解明のため、地盤間隙中の水と添加材が置換できるよう間に隙水を水圧タンク側(切羽側)に押し出せる構造とし、間隙水の挙動調査によって添加率を検証した。

#### b) 添加材

模型実験では加泥材Ⅰと複合添加材を採用した。

加泥材Ⅰは、要素実験では土性改良が不充分であったが、添加材として実工事での採用実績も多く一般的であるため、模型実験では比較の対象とした。

複合添加材は、要素実験の考察で提案した「砂の代わりに礫と細粒分を結びつける材料」として0.1~1.0mmの粒径を持つ気泡を選定し、加泥材Ⅰと体積比で1:1の割合で混合したものである。

起泡剤は、界面活性剤系材料より泡膜強度<sup>7)</sup>が強い動物性蛋白質を主成分とする起泡剤グロフォームを採用し、水との混合で10倍にしたものを起泡材として、コンプレッサーによって発泡装置で発泡倍

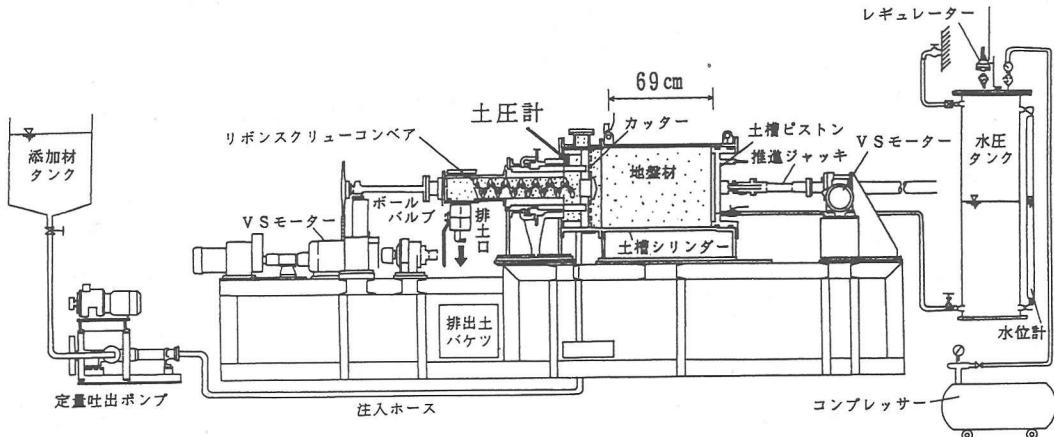


図-11 シールド模型実験装置

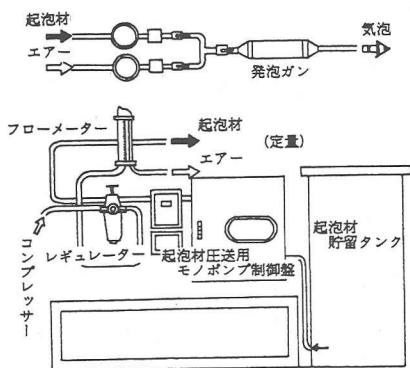


図-12 発泡装置

表-7 機械的条件の設定

項目	設定値		トルク・推進力
カッター	回転数	5 rpm	5 kgf·m
スクリュー	回転数	5 rpm	1 kgf·m
推進ジャッキ	速度	1 cm/min	10 tf

率（気泡体積／起泡材体積）25倍の気泡を作成した。

また、添加率はモデル地盤の間隙率が29.6%であるため、地下水の押し出しを考慮して30%を中心とし、20~40%の範囲とした。図-12に発泡装置を示し、表-7に機械的条件の設定値を示す。

### c) モデル地盤

模型実験のモデル地盤は、要素実験で土性改良の違いが明確になった礫率70%のモードル-IIの地盤を採用した。各材料（細粒土、細砂、粗砂、細礫、粗礫）をミキサーで充分に混練して水を加え、締め固めに適した含水比（w=3~5%）に調整した。

これを土槽シリンダー（φ50cm, L=69cm）で4層各15回の突き固めを行い、試験結果から乾燥密

表-8 排出土砂の状態の評価

添加率	20%	25%	30%	35%	40%
複合添加材	○	○	○	○	△
加泥材 I	○	○	△	×	-

○ 良好（透水試験可能）

△ 分離気味・泥状化（透水試験不可）

× 添加材と地盤が分離（透水試験不可）

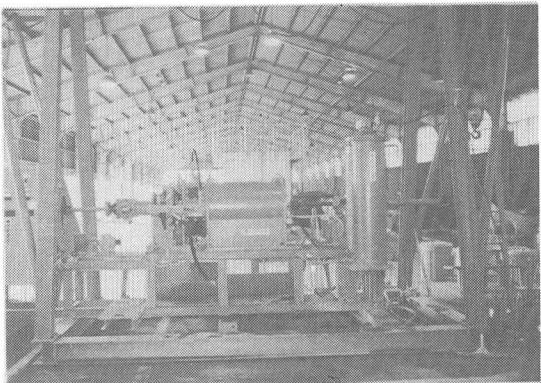


写真-1 実験装置全景

度を1.92t/m<sup>3</sup>として締固め密度を2.0t/m<sup>3</sup>とした。

次に土槽シリンダーをチャンバー部に接続し、水圧タンクの水を水頭差（差圧）で通水した。その状態で一晩（12時間以上）放置し、モデル地盤を充分に飽和させて実験を開始した。

### (2) 実験結果

#### a) 観察・サンプリング

排出土砂の観察状態は、添加材の種類および添加率によって表-8に示すように評価した。分離気味と分離の評価は難しいが、礫と細粒分の絡まり程度で判定し、礫が洗われた状態を分離と判断した。

実験装置全体を写真-1に示す。

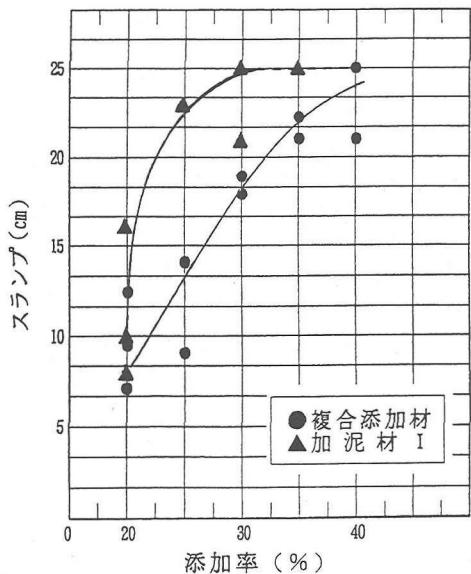


図-13 排出土砂の流動性（スランプ）

土性改良が良好で安定した掘進状況でのチャンバー内および排土状況を写真-2、写真-4に示す。また、土性改良が不充分で土槽解体時に地盤が崩壊した状況を写真-3に示し、排土の分離、閉塞状況を写真-5に示す。

#### b) 流動性の改善

図-13に模型実験における、複合添加材と加泥材Iの違いによる排出土砂のスランプ試験結果を示す。

図-13に示す●は複合添加材、▲は加泥材Iによるスランプ値を示し、試料は掘進長が30~50cmの間で2回採取した。

複合添加材および加泥材Iとともに添加率を増すと流動性は増大する。また、加泥材Iは添加率20%で良好な改良状態を示すが、25%で泥状化して30%では掘進30cm前後で土砂の混練が不充分で分離した。

これに対して、複合添加材は20~35%までは順次スランプ値は大きくなり、施工的に充分な土性改良がなされた。ただし、添加率40%では掘進35cmの位置から分離ぎみの傾向を示し土砂は泥状化した。

#### c) 止水性の改善

図-14に各添加率毎の排出土砂の透水係数を示す。モデル地盤の添加材無添加時の透水係数は、定水位透水試験により  $1.43 \times 10^{-2} \text{ cm/sec}$  であった。

また、複合添加材の変水位透水試験は、改良土が飽和状態で土性値が異なるため、すべて不飽和で試験した。このため、試験結果の評価は異なるが表-8で改良状態が良好と判断した土砂は  $1 \times 10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ cm/sec}$  オーダに改善され、要素実験で考察した「流動

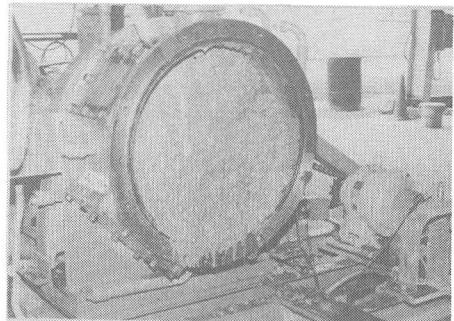


写真-2 混練が良好の場合（複合添加材 25%）

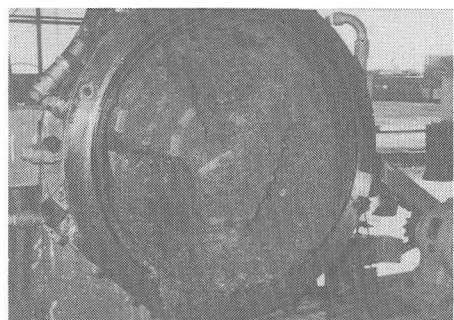


写真-3 混練が不良の場合（加泥材 I 30%）

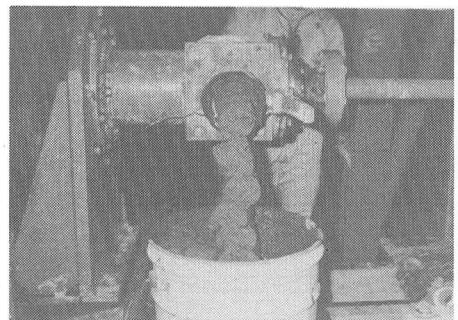


写真-4 排出土砂の状況／良好（複合添加材 25%）

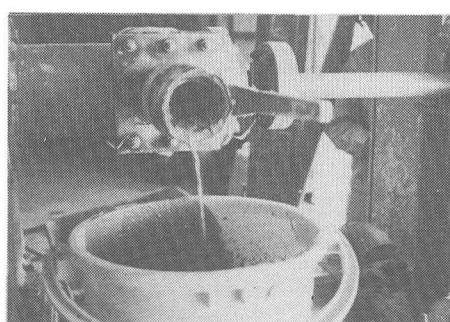


写真-5 混練が不良の場合／分離・閉塞（加泥材 I 30%）

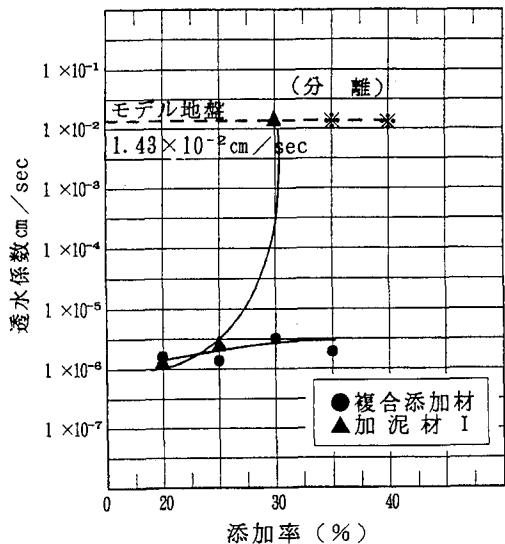


図-14 排出土砂の止水性（透水係数）

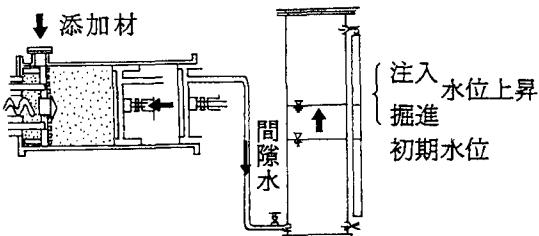


図-15 模型装置の間隙水移動原理

性の改善が可能な地盤領域では止水性の改善も可能である」ことを裏付けるものとなった。

また、加泥材 I の添加率 30%以上と複合添加材の 40%以上の土性改良は、地盤の間隙と添加量が見合はず、添加量が飽和以上になり排出土砂が分離した。この時の流動性、止水性の改善は困難であった。

#### d) 地下水の挙動

図-15 に示す模型装置は、添加材を注入して土性改良し、土圧を保持して掘進（地盤全体が速度 1 cm/min で左方向に移動）することで、地盤中の間隙水は右側の水圧タンク側に移動する。

逆に、止水性が確保できない状態では、間隙水は排土口側に流出して水圧タンクの水位は下降する。

ここで、安定掘進時に下記の式が成立する。

$$Q = \gamma + \beta \quad (5)$$

ここに、 $Q$  : 添加材注入量 ( $\ell/\text{min}$ )

$\gamma$  : 間隙水移動量 ( $\ell/\text{min}$ )

$\beta$  : 土性改良寄与量 ( $\ell/\text{min}$ )

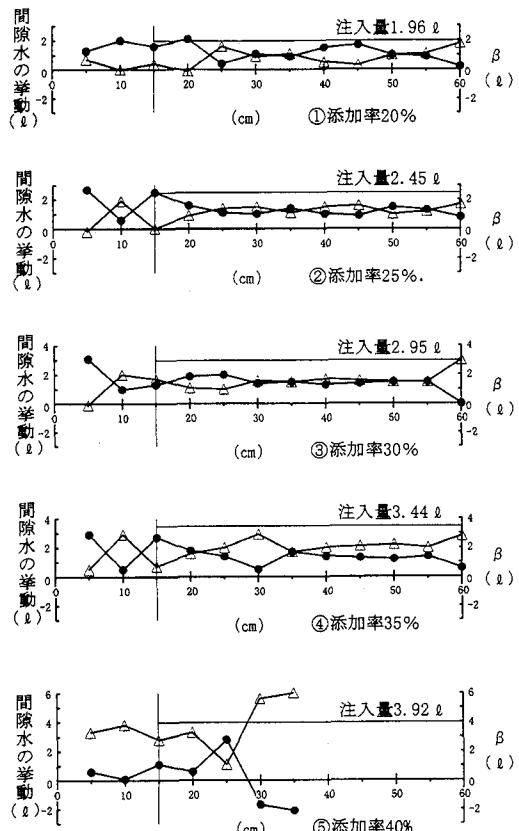


図-16 複合添加材による間隙水の移動

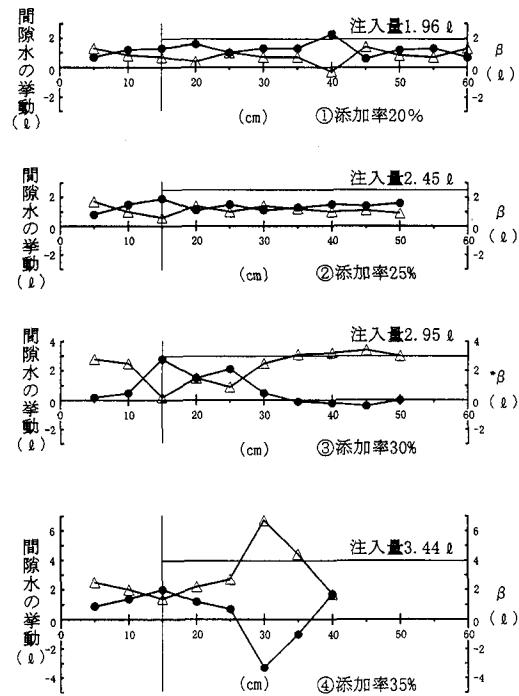


図-17 加泥材 I による間隙水の移動

図-16 および図-17 に添加材の違いによる、掘進 5 cm 毎の地盤間隙水の移動量  $\gamma$  を (●) で示し、土性改良寄与量  $\beta$  を (△) で示す。

図-16 に示す複合添加材の添加率 20~35% では、 $\gamma$  はほぼ一定であり  $\beta$  も安定して、土砂の流動性および止水性について充分な改善効果を確認した。

ただし、図に示す添加率 40% では掘進後 30 cm の位置で掘進が中断した。

これは、当実験のチャンバー内の管理土圧 0.7~1.0 kgf/cm<sup>2</sup> の範囲において、混合比の等しい複合添加材でも必要以上の添加は注入過多に起因して、土砂が分離気味になり、改良が不充分な土砂が添加材と分離した状態で排土口に流出した。

この結果、チャンバー内の土圧が保持できず切羽の地下水を呼び込み掘進が中断した。

図-17 に示す加泥材 I の添加率 20% では  $\gamma$ 、 $\beta$  ともに一定の値を示すが、掘進 40 cm 付近で  $\beta < 0$  となり、注入口の目詰まりが原因で改良に寄与する添加量が不足した。

また、添加率 25% では安定掘進を行ったが、複合添加材と比較して間隙水移動量がわずか大きく、逆に土性改良寄与量が小さいことから、機械負荷が増加し、掘進 50 cm でカッターが停止した。

さらに、添加率 30% 以上では間隙水が排土側に流出し  $\beta > Q$  となって、土性改良が不充分（地下水噴発）で掘進は中断した。

### (3) 考察

流動性改善について、複合添加材は添加率に幅を持たせて充分な土性改良が可能であった。これは、加泥材 I のように単位水量の増加で流動性の改善を行うのではなく、気泡のペアリング効果とクッシション材的な伸縮性の効果が、複合添加材としての役割を充分に果たしたものと考える。

止水性改善のメカニズムは、基本的に添加材が地盤の間隙水を押しだし、間隙を充満することで土性改良がなされると考えるが、複合添加材はエントラップドエア効果が大きいものと考察できる。

加泥材 I と混合された気泡は、加泥材に閉じ込められた状態で地盤の間隙に存在して、加泥量は半分になるが気泡が地盤間隙の飽和度を低くすることの役割を担い、透水係数を小さくできるものと考える。

次に、図-16 および図-17 の結果から土性改良と地下水（地盤間隙水）の挙動、さらに掘進の安定性は直接的に関係し、下記のタイプに大別される。

①  $\beta < 0$

添加材注入量 (Q) より間隙水移動量 ( $\gamma$ ) が多い場合で、土性改良に寄与する添加材の量が不足し

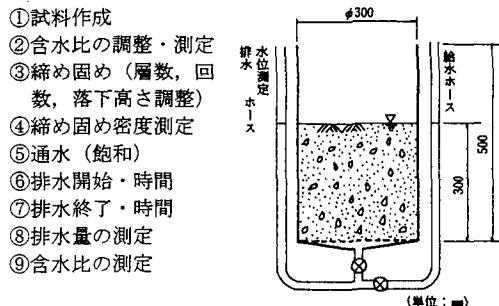


図-18 有効間隙率測定装置

安定した掘進の維持が難しい。現象としては考え難いが、添加材の量が不足して「閉塞」を意味する。

②  $0 \leq \beta \leq Q$

添加材と間隙水移動量がバランスを保ち、土性改良効果も高く止水性も確保されている状態を示す。

$\beta$  は、チャンバーやスクリュー内に残留し、土砂の流動性改善に寄与しながら一緒に排土される。

③  $Q < \beta$

対象地盤に対して添加材注入量が過多で、単位水量が増加し改良が不充分で止水性が保持できない。

現象は土砂の分離、地下水の噴発を意味する。

以上のことから、上記②の状態になるように添加材の量的対応（添加率で評価）が要求される。

## 6. 添加率に関する考察

### (1) 有効間隙率の算定

図-13~14 に示す模型実験結果から、添加材の種類による対応のほか添加率の対応によって、土性改良効果が大幅に異なることが判明した。

ここで、礫質土の土性改良に添加率としての有効間隙率の考え方を導入して考察を加えるものとした。

ここに有効間隙率  $n'$  とは、地盤の体積に対して重力で排除できる間隙中の水量（自由水）の割合を定義するもので、添加材の注入により排除（置換）可能な間隙水の部分と考えた。

モデル地盤の有効間隙率の測定は、図-18 に示す試験装置を作成し、下記の手順で締め密度を変えた十数回試験した。

図-19 にモデル地盤の粒度組成を示し、図-20~21 に試験結果を示す。

また、図-19 の No.1~8 は松尾氏らの研究<sup>8)</sup>によつて行われた実験モデルで、以下、当実験結果と比較検討することで適用した地盤の位置づけと有効間隙率の検証を行うものとした。

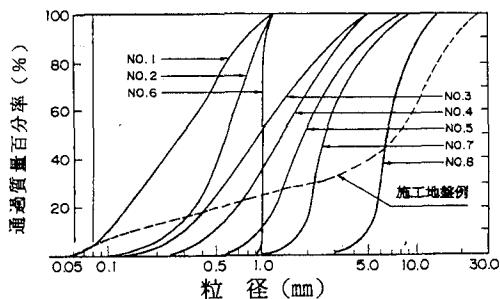


図-19 地盤試料の粒度分布

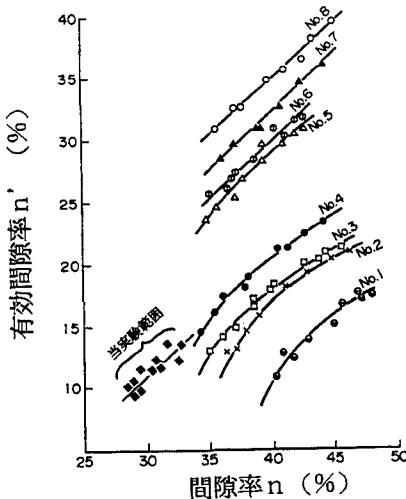


図-22 間隙率と有効間隙率  $n'$  の関係<sup>8)</sup>

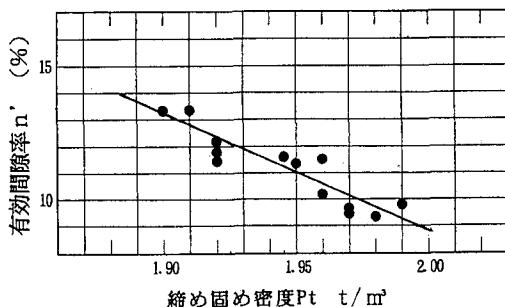


図-20 締固め密度－有効間隙率

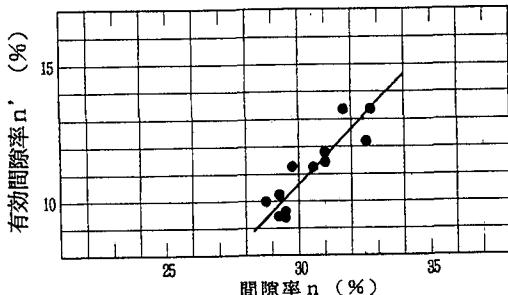


図-21 間隙率－有効間隙率

模型実験のモデル地盤は、モデル-II地盤の含水比を3~5%に調整し、目標とする締固め密度を2.0 t/m<sup>3</sup>として4層に分け突き固めて作成した。

この時、モデル地盤の締固め密度は実測値で1.99~2.10 t/m<sup>3</sup>の範囲に収まり、含水比の測定から間隙率は28~30%となった。

このため、図-20~21に示す締固め密度と有効間隙率、間隙率と有効間隙率の測定結果に照合すると、模型実験で適用した締固め密度1.99 t/m<sup>3</sup>、間隙率29%のモデル-II地盤の標準モデルで、有効間隙率は9%程度と推定できる。

また、有効間隙率は粒度分布によって大幅に異なるもので、当実験範囲は間隙率と有効間隙率の関係において図-22のように位置づけられる。

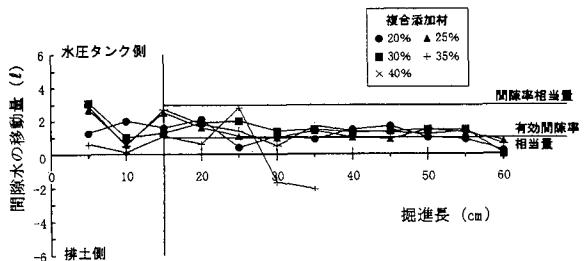


図-23 掘進5cm毎の間隙水の移動量(複合添加材)

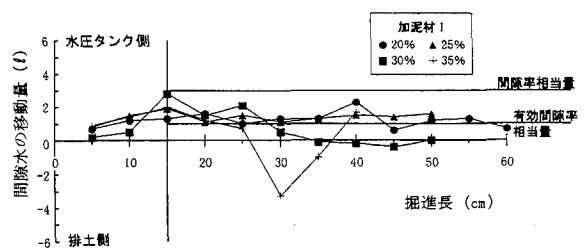


図-24 掘進5cm毎の間隙水の移動量(加泥材I)

## (2) 有効間隙率と間隙水の挙動

図-23~24にモデル地盤の間隙率および有効間隙率に相当する水分量( $l$ )（以下、間隙率相当量および有効間隙率相当量とする）と掘進5cm毎の水圧タンクへの間隙水の移動量( $l$ )を示す。

また、掘進15cmの位置から5cm毎の移動量の実測平均値を間隙水移動量( $\gamma$ )として表-9~10に示す。

表-9 間隙水の平均移動量（複合添加材）

添加率 (%)	注入量 (l)	$\gamma$ : 間隙水移動量(l)		$\beta$ ; 土性改善寄与量(l)
		$\delta$ ; 有効間隙率相当量	$\alpha$ ; 地盤浸透量	
20	1.96	0.88	0.25	0.83
25	2.45	0.88	0.41	1.16
30	2.95	0.88	0.48	1.59
35	3.44	0.88	0.50	2.06

表-10 間隙水の平均移動量（加泥材 I）

添加率 (%)	注入量 (l)	$\gamma$ : 間隙水移動量(l)		$\beta$ ; 土性改善寄与量(l)
		$\delta$ ; 有効間隙率相当量	$\alpha$ ; 地盤浸透量	
20	1.96	0.88	0.35	0.73
25	2.45	0.88	0.53	1.04

土性改良が良好に行われた場合、地盤の間隙水の挙動は図-23～24に示す間隙率相当量と有効間隙率相当量の間に収まりバランスされている。

地盤の単位体積中の有効間隙率相当量 ( $\delta$ ) を一定とした時、それ以上に切羽側に押し戻された水量 ( $\alpha$  ; 地盤浸透量とする) は、添加材の注入圧や管理土圧により余剰に切羽に浸透した量と考えられる。

以上のことから、式(5)に示す間隙水移動量 ( $\gamma$ ) は下記のように置き換えることができる。

$$\text{間隙水移動量} (\gamma) = \text{有効間隙率相当量} (\delta)$$

$$+ \text{地盤浸透量} (\alpha) \quad (6)$$

このため、式(5)、(6)およびチャンバー内での掘削土砂土性改良寄与量 ( $\beta$ ) と添加材注入量 (Q) との関係から、図-25および図-26が得られた。

図-25に示す複合添加材は、注入量が多く  $\alpha$  値が限界を示しても、常に一定の間隙水移動量を保持し、 $\beta$  が増加してスランプ値は増大するものの、地下水の呼び込みがなく添加材が土砂を包括した状態であった。これは、気泡のペアリング効果や伸縮性、細粒分と礫分を結ぶ効果に起因すると考えられる。

逆に、図-26に示す加泥材Iは、 $\beta$  の増加に伴い単位水量も増加して土砂の分離を促進し、地下水を噴発させ機械負荷の増大を招いて掘進を中断した。

### (3) 有効間隙率と添加率

掘削礫質土の土性改良のメカニズムは、地盤間隙水の切羽への押し出しが条件で、地下水の呼び込みを防いで流動性の改善を行うことが不可欠となる。

模型実験における掘進 5 cm 每の間隙水の挙動で、水圧タンク側に押し出された地下水 ( $\gamma$  ; 間隙水移動量) は、有効間隙率相当量 ( $\delta = 0.88 l$ ) と地盤浸透量 ( $\alpha$ ) を併せた水量となり、添加材注入量と

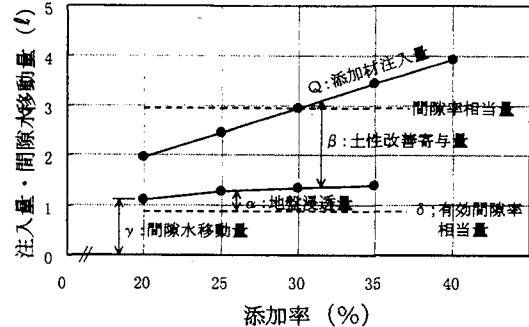


図-25 添加率と間隙水移動量（複合添加材）

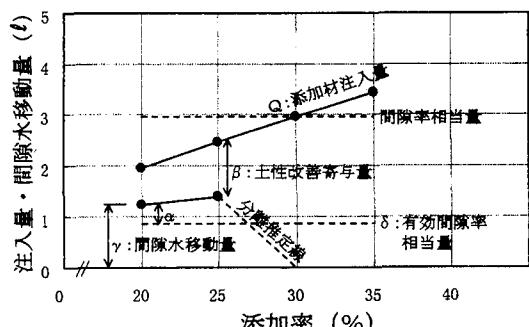


図-26 添加率と間隙水移動量（加泥材 I）

間隙水移動量との差が土性改良寄与量 ( $\beta$ ) となる。

このため、表-9に示す複合添加材の添加率 20% 時の地盤浸透量  $\alpha$  は、実測値の間隙水移動量  $\gamma$  と一定値である  $\delta$  の差分から  $0.25 l$  の値が得られる。

したがって、複合添加材の間隙水移動量は有効間隙率相当量の  $0.88 l$  を規準にした時、添加率 20% で 1.28 倍 ( $0.88 + 0.25 / 0.88$ ) となり、添加率 35% では 1.57 倍 ( $0.88 + 0.50 / 0.88$ ) となった。

これは『地下水の押し出し』が土性改良の最低条件と考えると、間隙水移動量  $\gamma$  が添加率の最小値に相当するものと考えられる。

また、図-13に示す排出土砂の流動性改善において、複合添加材の添加率 35% ではスランプ値が 20 cm を越えるため、添加率の最大値は 30% 程度あり、この時の添加率は当該地盤の間隙率 28～30% とほぼ一致する。

しかし、加泥材Iの場合は図-26に示すように間隙率相当の添加率ではすでに分離して、添加率 25% でもスランプは 23 cm となった。

このため、図-26に示すように加泥材Iによる土性改良において添加材注入量の最大値は、間隙率相当量より小さく、有効間隙率相当量の 2.5 倍程度が上限となった。

## 7. 結論

泥土圧シールド工法における掘削礫質土の土性改良について、また実施工への適用性について本研究で得られた結論は以下のとおりである。

要素実験から、

(1) 加泥材によって充分な土性改良が可能な、礫質土の砂体積率 ( $S_v$ ) は 34%以上で、それ以下の砂体積率では単位水量( $M$ )に制約を受け、改良領域では下記の式を満足させる必要がある。

$$0.16M + 1.25 \geq S_v \geq 0.16M - 9.21$$

(2) スランプ値で 5~20 cm に流動性の改善が可能な地盤領域では、止水性の改善も可能で透水係数で  $10^{-5} \sim 10^{-6}$  cm/sec のオーダを得た。また、加泥材 I, II とも砂体積率を最大とする添加率と透水係数を最小にする添加率は同一であった。

これは、模型実験でも同様な結果となった。

(3) 添加材に「砂」を投入した加泥材 II は、地盤の礫と細粒分を結びつける効果が高く、各モデルの添加率で土性改良の優位性が明確となった。

しかし、水  $1\text{m}^3$  に対して砂 300 kg を投入した加泥材 II の砂は沈殿するため投入量の上限と考え、実施工を考慮すると砂の代わりに「気泡」が提案できる。

模型実験から、

(4) 気泡を混合した複合添加材の土性改良効果は高く、その要因として ①添加材そのものの単位水量が減らせる、②気泡が地盤の礫と細粒分を結びつける効果が高い、③地下水との置換でエントラップドエアーの役割を果たす、等があげられる。

(5) 添加材注入量は間隙水移動量 ( $\gamma$ ) と土性改良寄与量 ( $\beta$ ) に大別され、双方のバランスをとることで流動性および止水性は改善される。

また、必要以上の添加率増加は単位水量を増大し、地盤の礫との分離を促進し、土砂の流動性および止水性は低下する。

(6) 模型実験で適用したモデル地盤の有効間隙率は、松尾氏らの研究と比較検討して、有効間隙率 9% の妥当性を検証することができた。

(7) 複合添加材による間隙水移動量はほぼ一定で、有効間隙率の約 1.3~1.5 倍であった。

これは、添加率の最小値と考えられ、最大値は当地盤の間隙率に相当するものと考えられる。

以上のことから、掘削礫質土の土性改良メカニズムは、添加材によって地盤間隙の自由水を切羽に押し出し、地下水の呼び込みがない状態で流動性の改善を行う必要がある。

この状態を可能にするには「砂分（相当）を補う」こと、さらに有効間隙率を検討し「単位水量を最小にする」ことであり、地盤の粒度構成に応じて添加材の種類と量（添加率）を決定することが最も重要となる。

## 参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書（シールド編）・同解説, pp. 17~19, 1988. 6.
- 2) 佐々木道雄：土圧系シールド工法, pp. 8~14, 鹿島出版会, 1982. 7.
- 3) 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. 2~3, 1991. 8.
- 4) 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.
- 5) 松尾新一郎, 河野伊一郎：地下水位低下工法, p. 20, 鹿島出版会, 1970. 2.
- 6) 松村公雄, 石川邦寛, 斎藤優：滯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, 1989. 1.
- 7) サンエント 化学㈱：特殊蛋白系起泡剤（グルフォーム）資料, p. 9
- 8) 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.

(1996. 11. 11 受付)

## STUDY ON IMPROVED FLUIDITY OF EXCAVATED GRAVELLY SOILS FOR EARTH PRESSURE TYPE SHIELD Masaru SAITO and Kiyoomi YAMADA

Collapses of cutting faces and air blow are reported to have occurred during tunneling earth pressure shield method in sand beds and gravel beds with high permeability.

The purposes of this study were to find the improved fluidity of excavated soils in which earth pressure type shields are applicable and to clarify the scope of conditions in which this type of shield is usable.

As a result, it was learned that the admixed materials mixing ratio on the soil properties has a high possibility of being actually used in tunnels.