

# 泥水シールド工法における泥水に関する研究（その3）

——泥水の品質管理および処理の実績——

喜田大三 炭田光輝  
辻博和

## Studies on Slurry in Slurry Shield Tunneling System (Part 3)

——Field Research on Properties of Slurry and Treatment——

Daizo Kita Mitsuteru Sumida  
Hirokazu Tsuji

### Abstract

Slurry plays an important part in stabilizing the tunnel face and in transporting excavated soil in a slurry shield tunneling system. To maintain these functions it is necessary to control the slurry. This report describes circulating flow of slurry, equipment used, slurry materials, amounts of slurry used, and results of control and treatment of slurry.

### 概要

泥水シールド工法では、泥水は切羽の安定、掘削土砂の運搬分離に重要な役割を果たし、その機能を保持するために泥水の品質管理および処理を行なっている。この報告では、泥水シールド工法の泥水フローと使用する泥水装置、泥水材料、泥水の作成量、泥水比重・造壁性・流動特性・砂分率の泥水品質、余剰泥水の発生量、余剰泥水処理に最も多用されているフィルタープレスの設置規模および処理状況についての実績を紹介している。

#### 1. まえがき

泥水シールド工法は昭和40年に始めて施工され、現在はシールド工事の約3分の1が、この工法で施工されている。

当社の施工実績も既に40例を越え、対象とした地盤は粘性土、砂質、砂礫など各種さまざまであり、掘削径でもこの工法における世界で最大の11.22mの大きさの実績を有している。

さて、泥水シールド工法では、泥水圧で切羽を安定させて掘削し、掘削土砂はスラリー輸送して土砂分離装置で分離する。そして、土砂分離後の泥水は再度循環利用する。このとき、分離しきれない細粒分は余剰泥水として処理している。

上述のように、泥水シールド工法で使用する泥水は切羽の安定、掘削土砂の運搬・分離に適合する性能を有する必要がある、工事を安全・確実・経済的に施工するた

めには泥水の品質管理および処理を適切に行なう必要がある。

この報告では、各種地盤における現場調査実績に基づいて循環経路における泥水の品質管理およびフィルタープレスによる余剰泥水処理などの実施状況を紹介する。

#### 2. 泥水フローと装置

泥水シールド工法の基本的泥水フローは図一1に示すとおりである。すなわち、調整槽から切羽に送泥し、切羽水圧を保ち切羽を安定させながら掘削する。そして、掘削土砂を伴った排泥水は掘削土砂の分離（一次処理）装置に送り、ここで荒砕きの土砂・礫・砂を分離する。分離した土砂は場外に搬出し、処分する。一方、土砂分離後の泥水は調整槽に送り再度循環利用する。このとき、解膠された細粒分によって泥水比重が増大する場合にはポンプ負荷の増大や掘削効率の低下を防ぐために余剰の細粒分を除去する余剰泥水の処理（二次処理）を行な

う。その際発生する分離水は混練水として利用するかあるいは必要に応じて pH などを調整（三次処理）して放流する。なお、逸泥などによって泥水量が減少する場合には作泥プラントから泥水を補給する。

さて、上述の泥水フローの中で使用している代表的な装置は図-2 に示すとおりである。掘削土砂の分離では、ロータリー分級機、振動スクリーン、サイクロンなどを組合わせて使用し、最近の工事ではスクリーンとサイクロンを組合わせたユニットを使用する機会が多い。

余剰泥水の処理では、フィルタプレス、シクナーあるいは造粒円筒スクリーンとロールプレスの組合わせなどを使用しているが、フィルタプレスのみで処理する機会が多い。

### 3. 泥水循環システムの泥水

#### 3.1. 泥水材料と作泥量

泥水シールド工法で使用する泥水は、ベントナイト、一般粘土、CMC などをミキサーで混練して作泥してい

る。

ベントナイトは比較的少量で高い粘度・良好な造壁性が得られ、20~100 kg/m<sup>3</sup> の範囲で使用されている。

一般粘土は、主に泥水比重を調整するために100~350 kg/m<sup>3</sup> の範囲で、CMC は造壁性の改良、粘度の増大などのために 1 kg/m<sup>3</sup> 程度で使用されている。

分散剤は裏込め材などの注入薬液が混入し、泥水が劣化した場合などに 0.1 %程度添加されている。

ところで、泥水の作成は発進時のほか、掘進に伴って地中に浸透する（逸泥）量、土砂分離の際に土砂に付随して持ち出される（持ち出し）量、配管などの際にロスする（ロス）量を補給しなければならないので掘進時にも必要である。当然、この量は地盤条件、掘削条件、土砂分離の方法、泥水の品質によって違うけれども、掘削径が 3~5 m の工事における地盤の透水係数と泥水作成量（必要量）の実績は図-3 に示す通りであった。図から明らかなように、透水係数が高い地盤ほど逸泥、持ち出しなどによって作泥量が多くなっていった。特にベントナイト・一般粘土・CMC で調合する通常の泥水では作泥量は多い。そこで、当社では透水係数が高い地盤では当社の開発したゲル化泥水<sup>①</sup>を使用して作泥量を半減することに成功している。

#### 3.2. 泥水品質

泥水シールド工法の泥水には切羽の安定、掘削土砂の運搬・分離に適合する性能が要求される。そのため、泥水は良好な泥壁形成能、適切な流動特性、適切な比重である必要があり、それぞれ「造壁性」、「粘度」、「比重」を測定し、評価している。

ところで、掘進に伴って掘削土砂、裏込め注入材などの混入によって泥水品質は変化するので、泥水の処理、補給を行なって品質を保持している。ここでは、泥水品質の管理実績を紹介する。

##### 3.2.1. 泥水比重 泥水比重は泥水中の

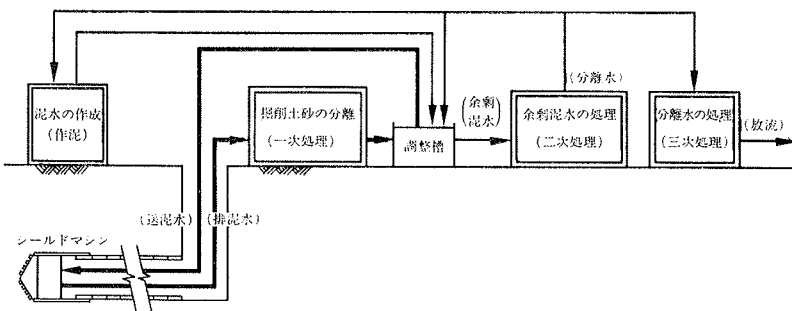


図-1 泥水シールド工法の基本的泥水フロー

泥水の作成	掘削土砂の分離	余剰泥水の処理	分離水の処理
作泥用 ミキサープラント	回転スクリーン	フィルタプレスのみ	炭酸ガスによる中和
	ロータリー分級機	洗砂機 (バケット揚上式) ①ロールプレス	
	サイクロン		酸による中和
	スクリーン & サイクロン	造粒円筒スクリーン①ロールプレス	

図-2 泥水シールド工法の代表的泥水処理装置

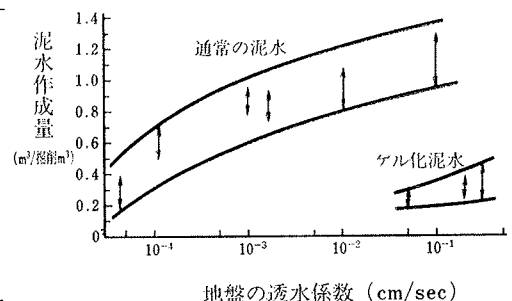


図-3 泥水作成量の実績

固形分の指標を与えるだけでなく切羽の安定、土砂の輸送・分離に係る造壁性、流動特性とも関係が深いので入念に管理している。

図-4 に砂礫地盤の一例を示すように、砂礫地盤あるいは砂地盤では1.1~1.25の範囲が多い。粘性土地盤では1.05~1.35の範囲が多い。

さて、一般に泥水比重が大きいほど切羽は安定するが、後述する造壁性、流動特性が適切であり切羽水圧が地盤に有効に伝達されれば切羽は安定すると考えられる。この造壁性、流動特性を確保するうえで必要な泥水比重は1.05~1.15であり、この値を泥水比重の下限値に設定している。一方、上限値は土砂の輸送・分離のポンプの能力でほぼ決まり、一般に1.35程度である。

3.2.2. 造壁性 造壁性は切羽の安定に必要な泥膜を形成する性質および泥膜の止水性の目安を与えるものであり、切羽の安定、逸泥防止に寄与する重要な性質である。また、造壁性のよい泥水は安定性(分散性)がよく槽管などで固液分離を起こしにくい。

当社では造壁性を大林式造壁性試験方法(減圧法)で測定し、脱水量を ml で表示する。大林式の脱水量は、API 規格の加圧過法の汙液量の概ね 8 分の 1 である。

さて、図-5 は砂地盤を想定したモデル地盤での造壁性と逸泥量の関係を示すものである。図から明らかなように、造壁性が数 ml までは逸泥量はほとんど変化しないが、それ以上造壁性が悪くなると逸泥が多くなる。この結果および実績から当社では造壁性は 6 ml 以下で管理している。

図-6 は砂礫地盤における造壁性の一例を示すものであり、入念な品質管理の結果、泥水の造壁性は 4~5 ml に維持されている。

ところで、粘性土地盤では、一般に余剰泥水の処理の量を調整して泥水品質を保持している。

図-7 は粘性土地盤掘削時の比重1.15~1.20の泥水を希釈あるいは濃縮によって比重調整して造壁性を調べた結果である。図から明らかなように、地盤によって比重

と造壁性との関係は異なるが、比重が大きいほど造壁性はよく、粘性土地盤の場合、泥水比重が1.15~1.25の範囲が多いので 2~7 ml が多い。なお、粘性土地盤の場合、切羽の安定の観点からは造壁

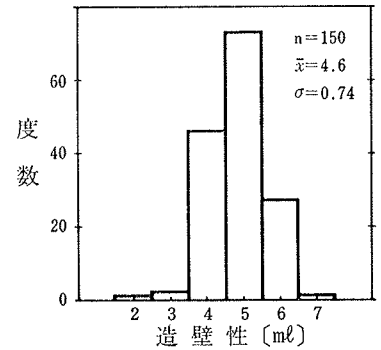


図-6 造壁性の一例

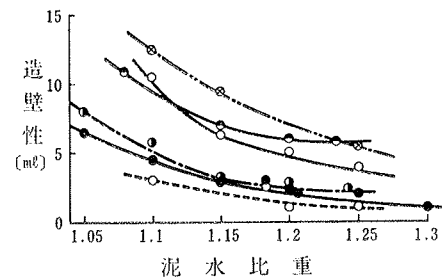


図-7 地山粘性土による泥水比重と造壁性

性はさほど気にする必要はない。

3.2.3. 流動特性 流動特性は逸泥防止、掘削土砂の運搬・分離に左右する。一般に現場では流動特性はファンネル粘度で管理している。

図-8 は粘性土地盤掘削時の泥水比重とファンネル粘度の関係を示すものである。図示するように、泥水比重とファンネル粘度の関係は現場の粘性土によって違うが上限値は35秒で管理している。

ところで、逸泥を防止するためには降伏値を適切に管理すればよいことは前報<sup>1)</sup>で述べた通りである。

図-9 はゲル化泥水を使用した現場におけるファンネル粘度と降伏値の関係を示すものである。図から明らかなように現場では同じ材料による同じ泥水種でもファンネル粘度と降伏値の相関は小さい。これは地山の影響や泥水品質を保持するために種々の配合で混練した泥水を補給するためと考えられる。それゆえ、当社では透水性

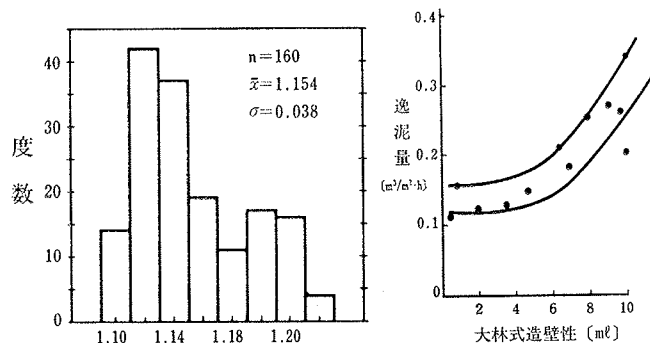


図-5 造壁性と逸泥量の室内試験結果

図-4 泥水比重の一例

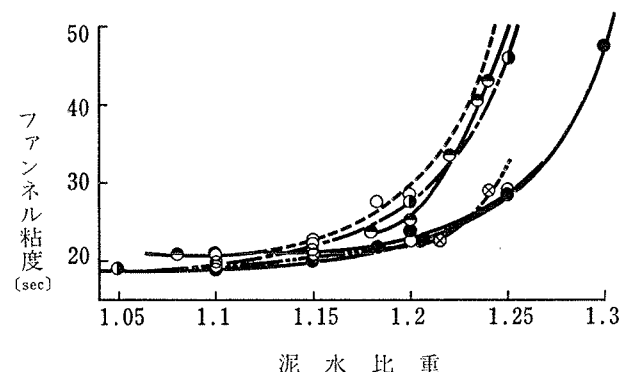


図-8 地山粘性土による泥水比重とファンネル粘度

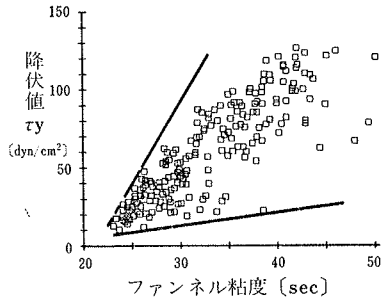
の大きい地盤では回転粘度計で流動特性を測定し、管理している。その際の基準値は前報<sup>1)</sup>で報告したとおりである。

### 3.2.4. 砂分率

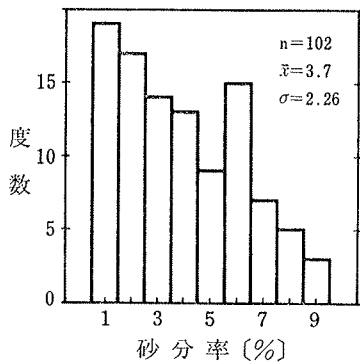
泥水シールド工法では地中連続壁工法のように掘削後コンクリートの打設を行わないので多少砂分率が多くても問題はない。しかし、あまり多い場合には槽・管などで沈積し支障をきたすので、砂分は適切に除去する必要がある、この土砂分離状況の指標として砂分率を管理している。

図一10は砂地盤における砂分率の一例を示すものである。泥水中には砂分率として数%の砂を含有するので、このことを考慮して、泥水比重、粘度などを設定する必要がある。なお、砂分率は掘削終了直後には20%を越えるようなこともある。このような場合には、バイパス運転を十分に行なって砂を除去している。

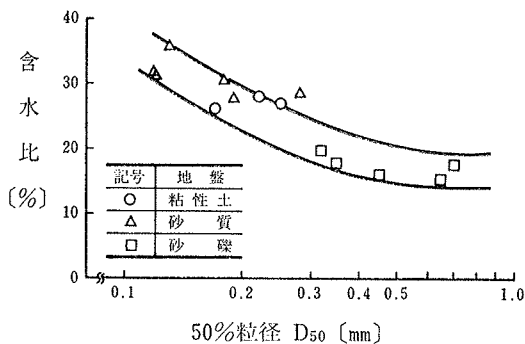
ところで、一般に、砂分はサイクロンで分級後振動篩で脱水して搬出している。図一11はこの土砂の50%粒径と含水比の関係を示すものである。図示するように、土砂の含水比は砂礫地盤の場合15~20%、砂質・粘性土地盤の場合には25~30%である。なお、均等係数の小さい砂地盤の場合には30~35%である。



図一9 ファンネル粘度と降伏値の実績



図一10 砂地盤掘削時の調整槽の砂分率の一例



図一11 サイクロン脱水土砂の50%粒径と含水比

## 4. 余剰泥水の処理

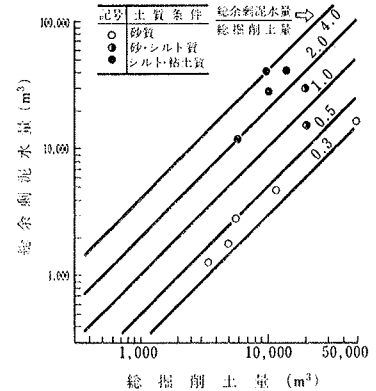
### 4.1. 発生量

図一12は掘削土量と余剰泥水量の関係の実績を示すものである。当然、粘性土では発生量が多く、掘削  $m^3$  当り、2~4  $m^3$  の余剰泥水が発生する。

### 4.2. フィルタープレスの設置規模

余剰泥水はフィルタープレスで処理することが多い。

このフィルタープレスの設置規模は地盤条件(粒度、コンシステンシーなど)、土砂分離条件(含水比、持ち出し)、掘進条件(作業サイクル)などを考慮して決めている。図一13は粘性土地盤における掘削径とフィルタープレスの全戸過面積の



図一12 掘削量と余剰泥水量

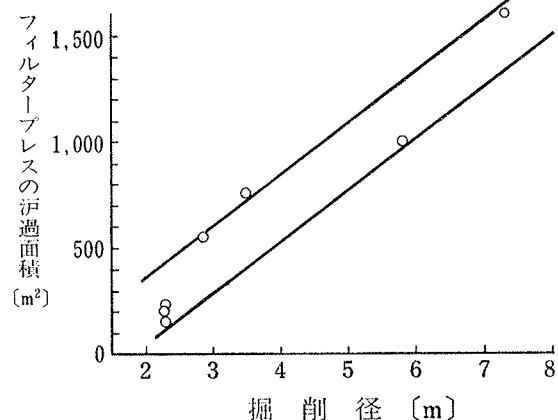
関係を示すものであり、当然、掘削径が大きいほど大きな規模の装置を設置している。

なお、図一13に示した規模でも順調に掘進が進んだ場合には余剰泥水処理が追いつかず、工事の進捗に影響を及ぼすことがあったことを付記しておく。

### 4.3. フィルタープレスの処理実績

4.3.1. 凝集剤 余剰泥水は微粒子であり、一般に難戸過性のため、凝集処理を行なって戸過性を高めたのち脱水している。凝集剤は無機凝集剤と高分子凝集剤を併用することがあるが、無機凝集剤単独の場合が多くなっており、PACが多用されている。

凝集剤の添加量は泥水中の固形分当たりで管理しており、20~40 kg/d-stが多い。



図一13 フィルタープレスの設置規模

4.3.2. 稼働状況 フィルタープレスの操作は送泥→開枠準備→ケーキの取出し→送泥準備→送泥の繰り返しであり、送泥およびその他に大別される。ここではこれらの作業時間の実績を紹介する。

(1) 送泥時間 送泥時間は泥水比重、泥水中の固形分の粒度と塑性指数、凝集剤添加量などに影響される<sup>2)</sup>。

図-14は泥水比重1.15~1.25の泥水にPACを40 kg/d-st 添加したときの実績を示すものである。送泥時間は40~120分の範囲にあり、60分程度が多い。

ところで、この現場では当初PACを20 kg/d-st 添加して処理していた。この時の送泥時間は60~180分であり、凝集剤量が適切でない場合送泥時間が長くなる。

(2) その他の時間

開枠準備時間および送泥準備時間はいずれも5分程度である。一方、ケーキの取出し時間は図-15に一例を示すように20~30分程度である。したがって、送泥以外のその他の時間は30~40分である。

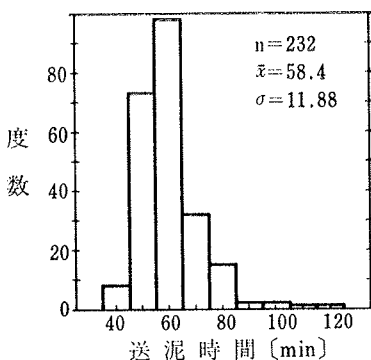


図-14 送泥時間の一例

(3) 稼働率 フィルタープレスは帆布の洗浄などで機械が止まることがある。掘削の最盛期の稼働率は70~80%である。

4.3.3. ケーキの性状

フィルタープレスのケーキは一般にダンプトラックで図-15 ケーキの取出し時間の一例搬出され、処分されている。この搬出に必要な一軸圧縮強さは0.3 kgf/cm<sup>2</sup>といわれている<sup>3)</sup>。現場では表-1に示すように、0.5~2 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲にあり、安全側で搬出している。

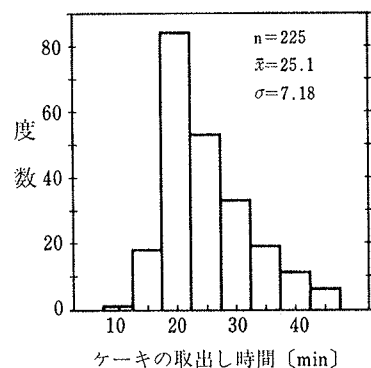


図-15 ケーキの取出し時間の一例

4.3.4. 処理能力

4.3. 2., 4.3.3. の実績からフィルタープレスの処理能力は5~11d-skg/m<sup>2</sup>/hである。

これに稼働率の70~80%を考慮すると4~9 kg/m<sup>2</sup>/hである。

含水比	50~100%
液性指数	0.5~0.8
一軸圧縮強さ	0.5~2.0kgf/cm <sup>2</sup>

表-1 ケーキの性状

5. あとがき

泥水シールド工法では泥水の品質管理は重要である。泥水の品質は、一般に、砂、砂礫地盤では泥水を補給することによって、一方粘性土地盤では適切に余剰泥水を処理することによって維持管理している。

この報告では、泥水品質、余剰泥水処理の実態を紹介した。

泥水の品質管理は、現在、主に手動で計測され、経験豊富な現場技術者が対策の決定を行っており、省力化などから自動化が要望されている。著者らは、これらについて開発中であり、別報<sup>4)</sup>で自動計測装置を紹介している。

また、泥水をより効率的に処理することが望まれており、これについてはスクリュードカンターを組み合わせたシステムを適用して成果を上げている。これについては後日報告する予定である。

参考文献

- 1) 喜田, 炭田, 辻, 川地: 泥水シールド工法における泥水に関する研究(その2) 一砂礫地盤における泥水の品質管理一, 大林組技術研究所報, No. 29, (1984), pp. 140~144
- 2) 喜田, 辻, 炭田: 土工事における余剰泥水処理に関する研究一泥水シールド工法における余剰泥水処理に関する検討一, 大林組技術研究所報, No. 29, (1984), pp. 145~149
- 3) 喜田, 久保, 漆原: 軟弱粘性土のトラック運搬における固化処理の適用, (社) 日本材料学会・土質安定材料委員会, 土質安定材料に関する講演会, (1980)
- 4) 辻, 喜田, 炭田: 泥水工法における泥水の品質管理の自動化(その1) 一粘度および比重の自動計測装置の開発一, 大林組技術研究所報, No. 33, (1986), pp. 22~26