

総論

泥水式推進工法入門

にしだ ひろはる
西田 広治

機動建設工業(株)
土木本部技術統括顧問



1 はじめに

我が国の都市インフラは1960～80年代の高度経済成長期に整備され、推進工法は下水道を中心に都市基盤の構築の一翼を担ってきました。現在は維持・管理の時代に入っていますが、近年の豪雨・台風・猛暑などによって、従来の設計思想を超える異常気象への対応も求められ、災害に強く早期復旧が可能な「強靱化」が重要な課題となっています。特に排水能力の強化は喫緊の課題であり、大中口径管推進工法は、大口徑雨水幹線や地下調節池への導水管、浸水対策バイパス管など都市強靱化を支える中核技術として期待されています。

現在の大中口径管推進工法は、密閉型の泥水式、土圧（泥土圧）式、泥濃式の3工法を主体に施工されており、本誌では、推進工法「きほんのき」として3号にわたりその基礎が特集されます。本特集号の泥水式では、泥水処理プラント、泥水ポンプ、作泥材と泥水管理、掘削技術、掘進機の変遷、土量管理、施工例などが紹介されます。本稿はその導入として、(公社)日本推進技術協会発行の「推進工法体系I」¹⁾をベースに、泥水式推進工法の成り立ちから基本原理、主要設備、施工管理の要点を、これから推進工事にかかわる方々にも分かりやすく概説したいと思います。

2 泥水式推進工法の誕生と切羽安定の考え方

現在の都市インフラ整備では密閉型の推進工法やシールド工法が多く用いられていますが、1960年代初頭までは、地盤条件が良い場合に半機械掘り式やブラインド式が一部で用いられたものの、多くは開放型（手掘り）による施工でした。そのため、帯水砂層や軟弱地盤では地下水位低下や薬液注入、圧気工法などの補助工法が必要となり、コスト増や環境への影響、作業者の健康問題が顕在化していました。

泥水式推進工法は、こうした背景から1964年の実験施工、1965年の東京都での本施工を経て、シールド工法に先立って実用化された、長い歴史を持つ工法です。開発の動機は、都市トンネル工法としての地位を確立するため、施工技術思想の転換と機械化の導入にあったと述べられています²⁾。切羽安定については、泥水による安定化とカッターヘッドによる機械的抑えの両面から検討が進められましたが、現在では泥水の働きは「切羽面から地盤に浸透し粘着性を与える」「切羽面に泥膜を作り、泥水圧で土圧・地下水圧に対抗する」と整理されています（図-1）。

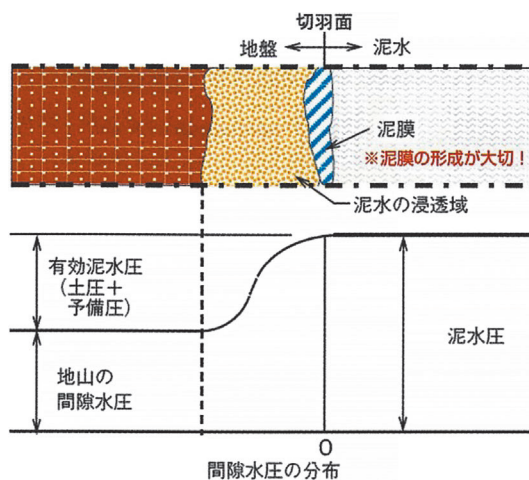


図-1 泥水の働き

3.1 掘進機

掘進機は、標準機と礫用機に大別され、地盤条件に応じて使用されます（写真-1、2）。



写真-1 標準機

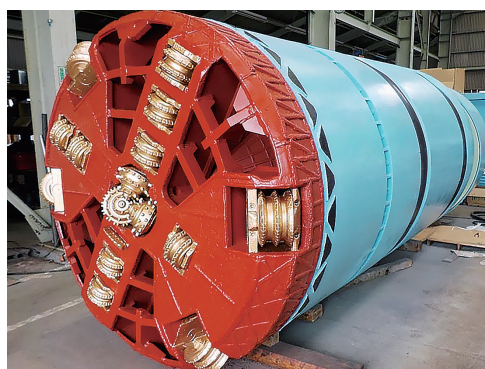


写真-2 礫用機

3 泥水式推進工法の基本概念と泥水式推進工法を構成する設備

泥水式推進工法は、切羽の安定確保と掘削土砂の循環搬出を泥水によって同時に実現する工法です。切羽に泥水圧を作用させて地盤を安定させつつ、カッタヘッドで掘削し、推進ジャッキ（元押・中押）で推進工法用管を圧入して管路を構築します。掘削土砂は泥水とともに搬送し、地上の処理設備で分離・再利用されます。この「掘削」と「土砂搬出」が一体の循環システムとして成立していることが、泥水式推進工法の大きな特徴です。

泥水式推進工法を構成する主な設備をおよび各設備の機能・役割を概説します。

3-1では掘進機（1）標準機、（2）礫用機）、3-2では元押推進設備）、3-3では泥水輸送設備（①調整槽、②送泥ポンプ、③排泥ポンプ、④中継ポンプ、⑤送泥管・排泥管、⑥機内バイパス、⑦立坑バイパス、⑧電磁流量計・密度計）、3-4では泥水処理設備（（1）一次処理設備、（2）二次処理設備、（3）三次処理設備）、3-5では滑剤注入設備、3-6では裏込め注入設備について説明いたします（図-2）。

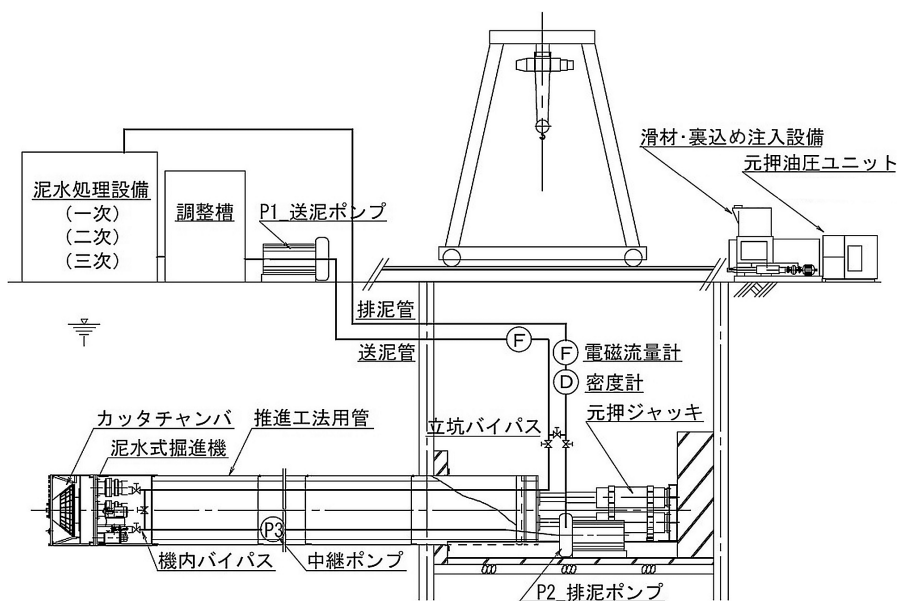


図-2 泥水式推進工法を構成する主な設備

(1) 標準機

標準機は主に粘性土層や砂質土層で用いられ、面板形式のカッタヘッドが一般的です。カッタビット(主ビット・外周ビット・先行ビットなど)で切削した土砂は、面板のカッタスリットからカッタチャンバへ取り込まれます。

【面板開口率の考え方】

掘進中のみならず、掘進停止時にも、面板は切羽安定に寄与すると考えられており、面板開口率(=カッタスリット開口面積/面板断面積)は、掘進条件や地盤・地下水状況に応じて10～30%程度で調整します。

砂質土層(帯水砂層)

開口率を小さくし、取り込み量を抑制します。

粘性土層(粘土層)

開口率を大きくし、かつ付着防止のためカッタビットを高くして攪拌効果を高めて取り込みやすくします(写真-3)。

(2) 礫用機

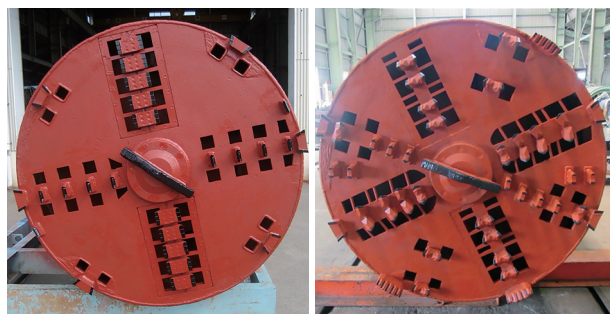
礫用機では、掘削土砂を流体輸送するため、粗石・

巨石を排泥管の閉塞を生じさせない大きさに破碎する必要があります。次のような破碎・分離方式が使用されます。

【隔壁前で破碎する方式】

①ローラカッタ方式は、カッタヘッド前面で直接破碎するもので、他の方式の一次破碎としても使用されます(図-3)。

②機内クラッシャ(コーン)方式は、隔壁前で破碎するもので、礫混り地盤に一般的に用いられています(図-4)。ただし、硬質粘土層に変化する場合は閉塞の恐れがあり対策が必要になります。



砂質土用：開口率10.0%

砂質粘性土用：開口率19.7%

写真-3 面板開口率の対比 (同一カッタヘッド)

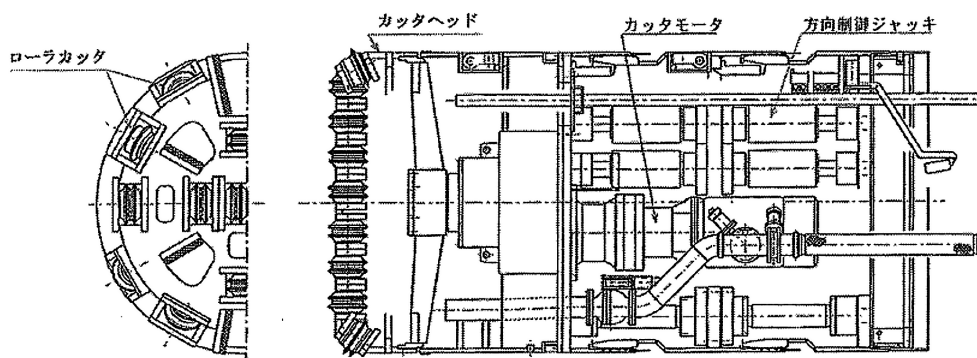


図-3 ローラカッタ方式

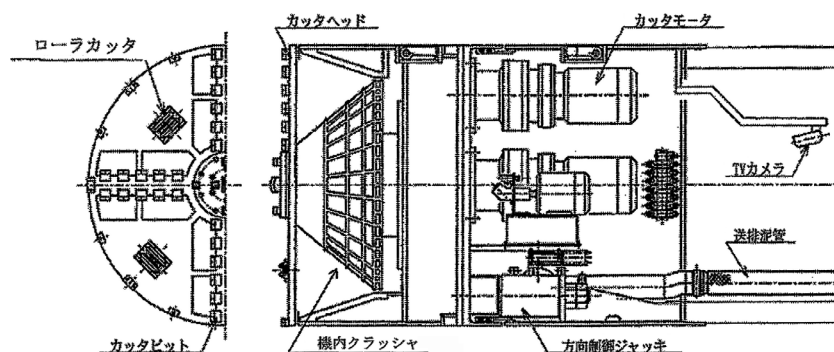


図-4 機内クラッシャ方式

【隔壁後で破碎・分離する方式】

- ③ラインクラッシャ方式は、固定刃や回転刃を備えた連続破碎機で、隔壁後の排泥管路に設置します(図-5)。
- ④排泥管内分離(礫取り箱)方式は、礫が少量の場合に適用するもので、隔壁後で礫を分離・貯留し満杯になると回収します(図-6)。

3.2 元押推進設備

密閉型推進工法では、掘削と推進を同時に行うため、推進管1本分(2.43m)を一度に押し切ることができる多段式ジャッキが用いられます。また、泥水式推進工法ではストラット入れ替え時のパイパス運転切り替えが不要になるという利点もあります。

多段式ジャッキの油圧ユニットにはインバータが装備され、掘進状況に応じて最適な推進速度に制御できます。

3.3 泥水輸送設備

泥水式推進工法では、泥水の循環を安定して行うため、次のような流体輸送設備が用いられます。

①調整槽

分離後の泥水を貯留し、送泥量・排泥量の変動を吸収して泥水の循環を安定化させます

②送泥ポンプ

調整槽からカットチャンバへ泥水を圧送し、切羽の土圧・水圧に対抗します

③排泥ポンプ

推進速度や掘削量に応じて流量を調整し、カットチャンバ内の排泥を地上の処理設備へ搬出します

④中継ポンプ

長距離推進時に圧力損失を補助し、安定した泥水の循環を確保します

⑤送泥管・排泥管

必要流量と実用的な管内流速(限界沈降流速以上)を基準に管径を選定します

⑥機内バイパス

掘進開始時の環流確立や停止前の流量調整に使用し、排泥管内の残留土砂を排出し閉塞を防止します

⑦立坑バイパス

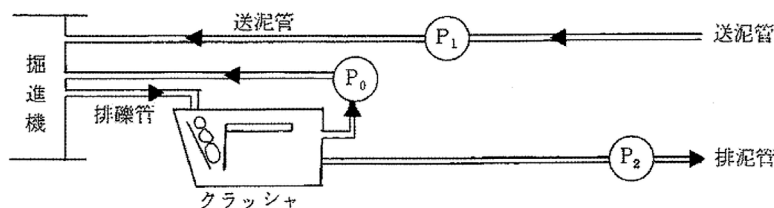


図-5 ラインクラッシャ方式

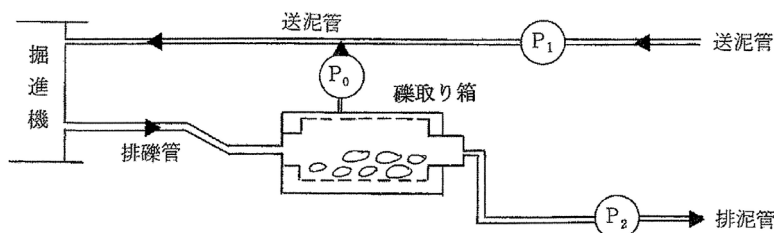


図-6 排泥管内分離方式

推進工法用管の継ぎ足し時の泥水循環維持に使用されます

⑧電磁流量計・密度計

流量・密度・固形分濃度をリアルタイム計測し、掘削量把握やチャンバ内圧管理、処理設備制御に不可欠です。

3.4 泥水処理設備

泥水処理設備は、排泥水から土砂を段階的に分離・除去し、再利用可能な泥水を回収するため、一次・二次・三次処理で構成されています(図-7)。

(1) 一次処理設備(土砂分離)

掘削土砂から礫・砂・塊状土砂などの粗粒分を除去し、後段設備の保護と安定運転を確保、分離後の泥水は調整槽で比重・粘性を整え、切羽へ再循環されます。

都市部では沈殿池の設置が難しいため、振動篩とサイクロンによる機械的強制分離が一般的です(写真-4)。

(2) 二次処理設備(脱水処理)

一次処理で除去できない75 μ m未満の微細粒子(シルト・粘土・コロイド)に凝集剤を添加してフロック化し、凝集沈殿や圧縮脱水で泥分と水分に分離、環流泥水の比重・粘性を適正に維持します。

主にフィルタプレスが用いられますが、スクリュデカンタ(遠心分離)が採用される場合もあります(写真-4)。

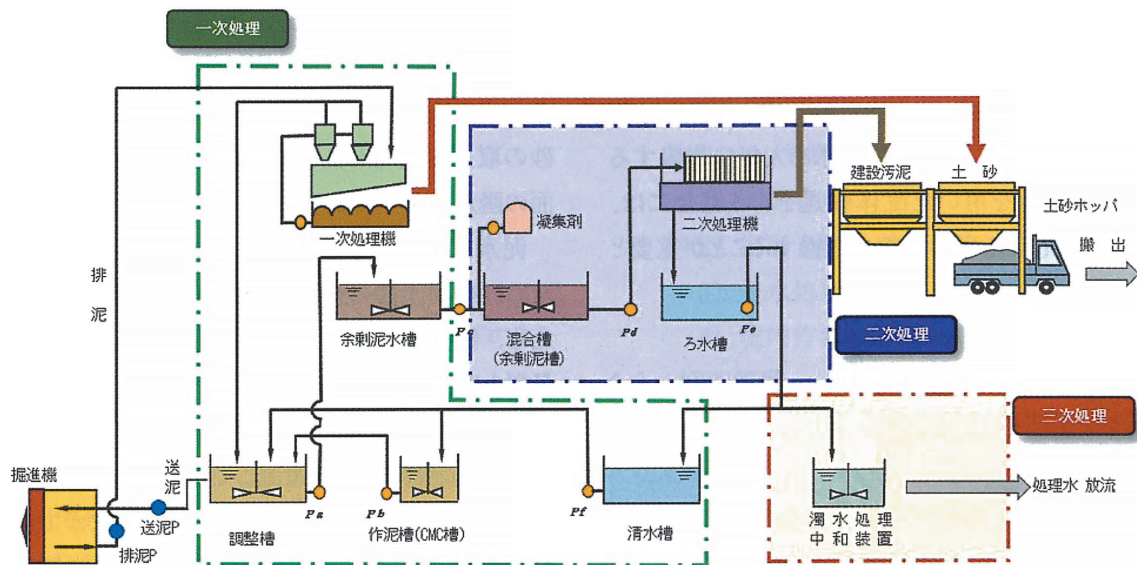


図-7 泥水処理設備（三次処理フロー）



写真-4 フィルタープレス（左）と振動篩（右）

(3) 三次処理設備（濁水・中和処理）

二次処理で生じた余剰水を、河川・下水道の放流基準に適合させるための濁度低減と中和処理を行うもので、シックナー（沈降濃縮装置）で沈殿処理し、沈殿物は二次処理へ戻します。

上澄水は炭酸ガスや希硫酸溶液で中和し、水質基準を確認して放流します。

3.5 滑材注入設備

滑材注入の目的は推進管と地盤の周面抵抗力を低減し、地盤の緩みや空洞化を防ぎ沈下を抑制することで、特に泥水式は長距離施工が多いため、周面抵抗力低減の方式選定が重要です。

主な方式として、①一次・二次滑材注入方式②滑材・地山混合層形成方式③二層滑材形成方式④機械

式テールボイド再拡幅・修復方式があります。

3.6 裏込め注入設備

裏込め注入は推進完了後に推進管と地山の空隙を充填し、地山の緩み防止や止水性確保、地下水の流入防止に寄与します。

4 泥水式推進工法固有の管理項目

泥水式推進工法は、掘削と排土が泥水の循環系で連続的に処理されるため、安定した長距離施工が可能になります。また、遠隔操作という利点もありますが、土圧式や泥濃式のような掘削土砂の目視ができないため、泥水の性状・流量・圧力などをリアルタイムに計測し、総合的に管理することが不可欠になります。

管理の中心は「流体輸送計算（泥水をどう流すか）」と「物質収支計算・バランスシート（掘削土量が適正かの判断）」であり、計画値と実測値を照合しながら最適な施工状態を維持します。

4.1 流体輸送計算

流体輸送計算は、泥水が「調整槽→送泥ポンプ→送泥管→掘進機→排泥管→排泥ポンプ→処理設備→調整槽」と循環する際の必要流量・圧力損失・ポンプ能力・配管径・限界沈降流速を設定するための基礎計算です。推進前の計画だけでなく、施工中も流量・流

速が計画値から逸脱していないかを確認しますが、特に重要なのは次の2点です。

①切羽泥水压の維持（送泥）

切羽が崩れないよう一定の泥水压を供給し続ける。

②掘削土砂の搬出（排泥）

掘削土砂を泥水に混ぜ排泥管で地上へ搬出する。

この両者は相互に密接に関連しており、ポンプの回転数を調整して流量・圧力を制御します。

【限界沈殿流速】

排泥管内で土砂を沈ませずに搬送するには、限界沈殿流速以上の流速を確保する必要があります。この最

小流速はDurandの公式により、管径・粒子比重・泥水比重・粒径などから求めます。

配管径は必要流量と適切な流速から選定します。また、圧力損失とポンプ能力の計算においては、粘性が高いと圧力損失が増え、ポンプ負荷が上昇して流量が低下し、排泥不良となるため、粘性管理と余裕のあるポンプ選定が重要です。

4.2 物質収支計算とバランスシート

泥水式推進工法における物質収支計算は、掘削対象地盤の土質条件および掘進機の外径、掘進速度、送泥流量、送泥水比重などの施工条件をもとに、掘削に伴う発生土量および必要な泥水量を理論的に算出するものです。この計算結果を、表形式やフロー図として体系的に整理したものが物質収支バランスシート（以下、バランスシート）です（図-8）。

バランスシートは、主に次の二つの目的で活用されます。

①泥水処理設備の設計

泥水処理設備が十分な能力を持つためには、掘削で発生する理論上の土砂量と循環泥水量を正確に把握することが不可欠です。バランスシートによって、沈殿槽容量、脱水設備（フィルタプレス等）の処理能力、シックナー（沈降濃縮措置）容量など、必要な設備仕様の算定に用いる基礎データが得られます。

②掘削健全性の確認と施工管理

バランスシートで得られた掘削で発生する理論上の土砂量（理論値＝掘削断面積×推進延長）と、排泥として回収される実測の土砂量（実測値＝排泥流量×排泥比重）を比較することで、掘削が計画通りに行われているかどうかをリアルタイムで確認できます。

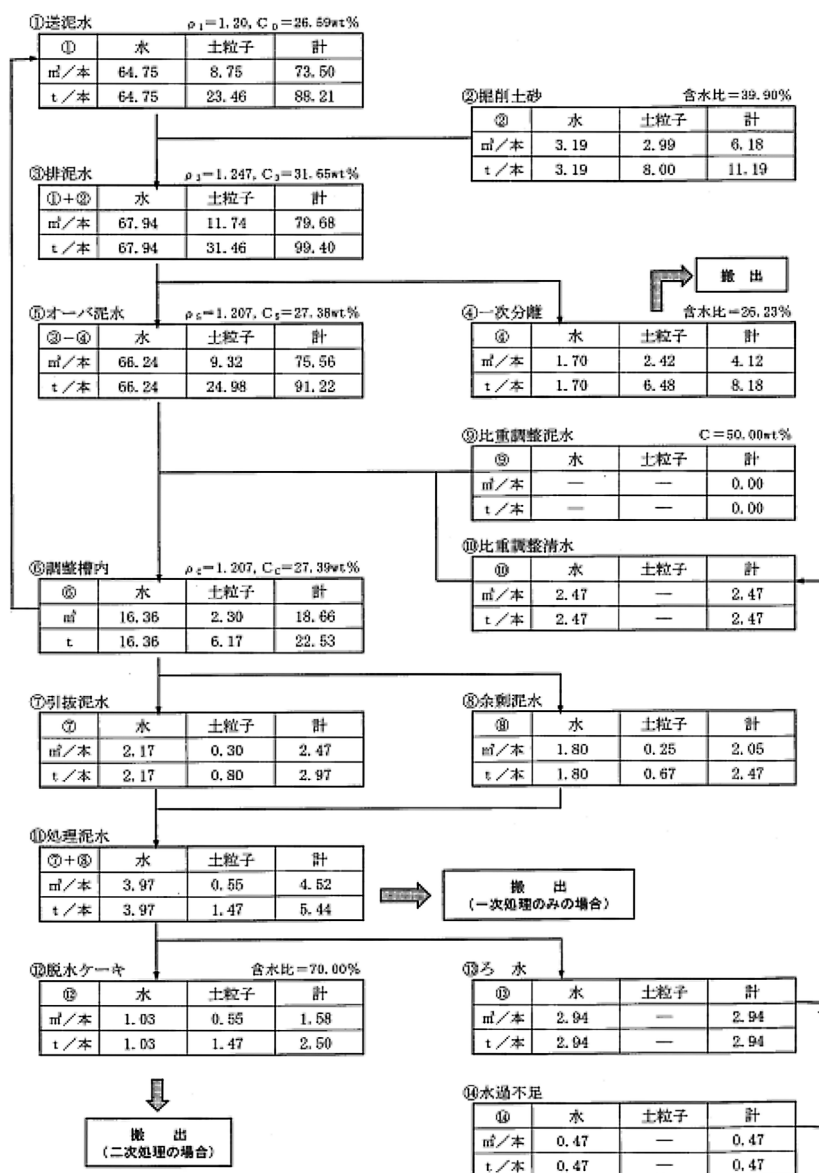


図-8 物質収支バランスシート

異常の兆候としては次のようなものがあります。

- ・ 実測値<理論値
→土砂滞留や閉塞の恐れ
- ・ 実測値>理論値
→取り込みすぎや地山崩壊のリスク

掘進においては、こうした異常の兆候を早期に把握することが重要になります。

4.3 泥水(作泥材)の性状管理

泥水管理では、特に比重と粘性(ファンネル粘性)が重要です。

比重は切羽の安定に直結し、比重が高すぎるとポンプ負荷が増大し、送排泥が困難になります。比重が低すぎると土粒子が沈みやすく、切羽が不安定になります。

測定には一般的にマッドバランスを使用します(写真-5)。



写真-5 マッドバランス

粘性は掘削を安定させるための重要項目で、カッタチャンバ内で土粒子の沈降を防ぎ、切羽から泥水が地山へ逃げるのを抑え、搬送中の土砂沈降や泥水分離を防ぎます。現場では簡易測定が可能なファンネル粘度計(ファンネル粘性)が広く用いられています(写真-6)。



写真-6
ファンネル粘度計

泥水管理の基準値として、砂質土の場合(比重1.10～1.20、ファンネル粘性25～35s) 砂礫・砂礫混り土の場合(比重1.20～1.30 ファンネル粘性35～60s)とされています。

【地盤中の塩分や鉄分の影響】

泥水は、海水やセメント分の混入、塩分・鉄分の影響によって凝集し、泥膜形成能力や流動性が低下することがあります。

塩分はベントナイトの膨潤を阻害し、粘度・ゲル強度・泥膜形成能力を低下させ、切羽保持力を弱めます。

鉄分はベントナイトを凝集させ、粘性上昇・流動性低下・排泥不良を招き、進行すると閉塞や掘進不能につながります。そのため、これらの地盤では、通常以上に厳密な泥水性状管理(比重・粘性・pH・添加剤管理)が不可欠であり、適切な添加剤調整や希釈を迅速に行うことで、泥膜の健全性を維持し、排泥不良や閉塞の発生を防止する必要があります。

5 おわりに

泥水式推進工法は、掘削・送泥・排泥を一体で制御する高度な流体輸送システムを備えた、総合的な地下施工技術で、泥水の流れを通じて掘削状況をリアルタイムに把握できるという特長を持っています。この「流体でつながった施工システム」は、遠隔操作との相性が非常に良いという強みがあり、すでに掘進機の操作や泥水管理を離れた場所から(例えば海外の現場を国内から)行う取り組みが始まっています。近い将来には、複数の施工現場をオフィスで一括して遠隔操作・管理するといった新しい施工スタイルが当たり前になるのかもしれない。

本稿が、これから推進工事にかかわる方々の「泥水式推進工法の基本の理解」の一助になれば幸いです。

【参考文献】

- 1) 「推進工法体系I推進工法技術編 2023年版」(公社)日本推進技術協会
- 2) 「泥水式推進工法の開発にあたって」大西一行、月刊推進技術、Vol.1 No.4 (1987年12月)

○お問い合わせ先

機動建設工業(株) 土木本部

〒553-0003 大阪市福島区福島4-6-31

Tel : 06-6458-5461 Fax : 06-6454-0274

E-mail : h.nishida@kidoh.exeo.co.jp

<http://www.kidoh.co.jp>