

解説

泥水式推進工法の解説と施工事例



よしだ けいそう
吉田 桂三
機動建設工業(株)
技術本部部長

1 はじめに

推進工法は地表を掘削せずに管路を埋設する非開削工法のひとつとして、我が国のインフラ整備に大きく貢献してきました。特に都市部の下水道整備事業で長年にわたり多用され、国内の推進技術は短期間で飛躍的な進歩を遂げたと言われています。しかしながら下水道整備事業もひと段落し、事業予算も平成10年をピークに右肩下がりに減少し、平成22年にはピーク時の1/3以下にまで落ち込み、ほぼ横這いのまま現在に至ります。また国内の下水道処理人口普及率が80%に達したことで下水道事業を取り巻く環境は「建設から維持管理」に方針転換され、推進工法の需要が薄れつつあると言われて久しくありません。

しかしながら筆者は推進工法の需要が衰退の一途を辿っているとは感じておりません。国土交通省が開示した「令和3年度下水道事業の予算概要」には国土強靱化基本計画のなかで、局地的な大雨の発生頻度の増加や、都市化の進展に伴う雨水の流出量の増加に伴い、都市型の浸水被害（内水氾濫）のリスクが高まっているため、新たに都市浸水対策強化のために雨水管の交付対象範囲を拡大する方針を記しています。また下水道事業以外でも電気、ガス、水道などの新設管路や再生エネルギー施設の導水

路など、さまざまな分野の埋設管路構築事業に推進工法が採用されています。さらに国外に目を向けるとインフラ整備が遅れている諸外国は数多くあり、下水道分野の国際展開を図るための「水インフラ輸出の促進」について国が推進しており、推進技術の海外展開に目が向けられています。

近年の推進業界に携わる企業は更なる新規技術の開発に尽力されており、これから新たに推進技術を学ぼうとする方々は次世代の担い手となるために、まずは基礎的な知識を習得しなければなりません。

本稿では大口径管推進工法（泥水式）の概要と特徴について施工事例を交えながら解説したいと思います。

2 大口径管推進工法（泥水式）の分類

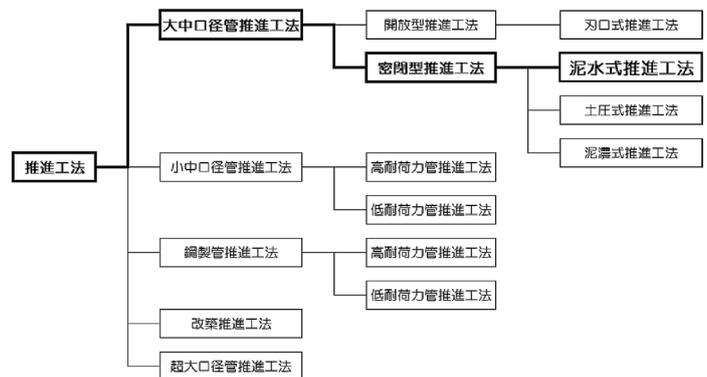


図-1 推進工法の分類¹⁾

推進工法の分類(図-1)は「大口径管推進工法」「小口径管推進工法」・・・に大別され、今回解説する「大口径管推進工法」はさらに「開放型推進工法」と「密閉型推進工法」に分類されます。「密閉型推進工法」とは主に機械式掘進機を用いる工法の部類で「泥水式推進工法」はその中のひとつです。

3 泥水式推進工法の概要

泥水式推進工法の概要を解説します。

3.1 切羽安定の原理

泥水式推進工法は切羽の土圧および水圧に対して、掘進機のカッタチャンパ内に満たされた泥水の圧力で対抗させて切羽の安定を図ります。その際に切羽面からある程度の範囲に泥水が浸透して切羽付近の地山に粘着性を与えて泥膜を形成します(図-2)。泥膜形成は泥水圧を有効に切羽面に作用させて土圧および地下水圧に対抗させるため、泥水式では特に適正な泥水の品質管理が重要です。

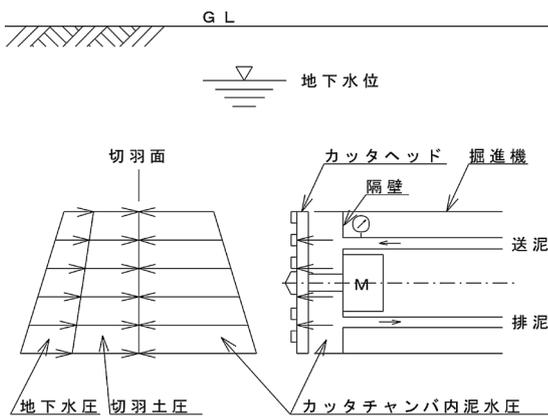


図-2 泥水式の切羽管理方法¹⁾

3.2 還流機構(泥水輸送機構)

次に切羽を安定させるための泥水圧力をどのように発生させるかについて解説します。

泥水式では泥水圧力を切羽に発生させるために、推進中は「泥水ポンプ」で管路内部に設置した流体管(送排泥管)と泥水処理プラントを介して泥水を還流させま

す。泥水ポンプには「送泥ポンプ」と、切羽(掘進機)から後方に設置して処理プラントまで送る「排泥ポンプ」があります。切羽を加圧する際は送泥ポンプの回転数を上げて送泥圧力を高め、減圧したい場合は排泥ポンプの回転数を上げるのが基本です。ポンプを操作する際は、管内で土砂が沈降しないための一定流速(沈殿限界流速)を確保するように注意し操作しなければなりません。

また還流機構には泥水圧を一定に保持する以外に、もうひとつ重要な役割があります。それは掘削した土砂を泥水と混合して、坑外に設置した処理プラントまで排出することです(循環式排土方式)。土砂と混合された泥水は坑外に設置した処理プラントで掘削残土と篩分けされ、再び送泥水として再利用するため、推進中に加泥材を切羽に注入する必要はありません(図-3)。

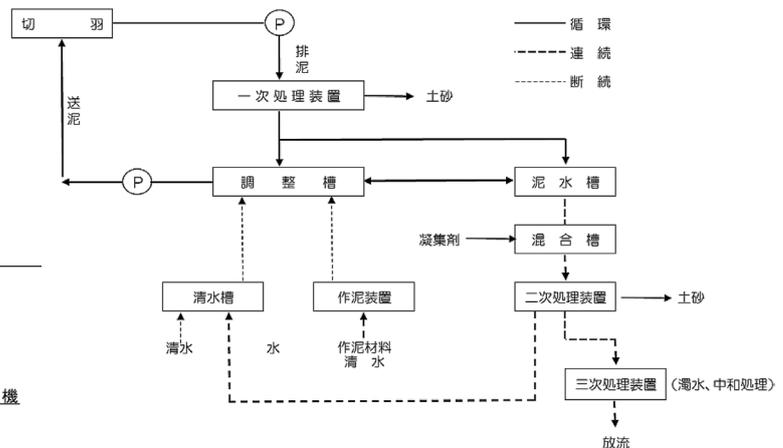


図-3 泥水処理フローシート¹⁾

3.3 泥水処理設備

掘削土砂と泥水を分離する方法は一次処理(土砂分離)、二次処理(脱水処理)、三次処理(濁水処理、中和処理)があり、どこまで処理するのかについては土質条件や現場環境、経済的な観点など総合的に判断して決定します。

【一次処理(土砂分離)】

機械式方式、沈殿処理方式(簡易処理方式)があり、機械方式が一般的です。

【二次処理(脱水処理)】

対象土質が一次処理で分離できない微細な粒子を多

く含む場合に適用され、二次処理設備を設置するプラント用地を確保する必要があります。処理方法は加圧脱水方式と遠心分離方式が一般的である。

【三次処理(濁水中和装置)】

二次処理の脱水処理過程で生じる余剰水が放流基準に適合しない場合(濁水、PH濃度等)などにより導入します。

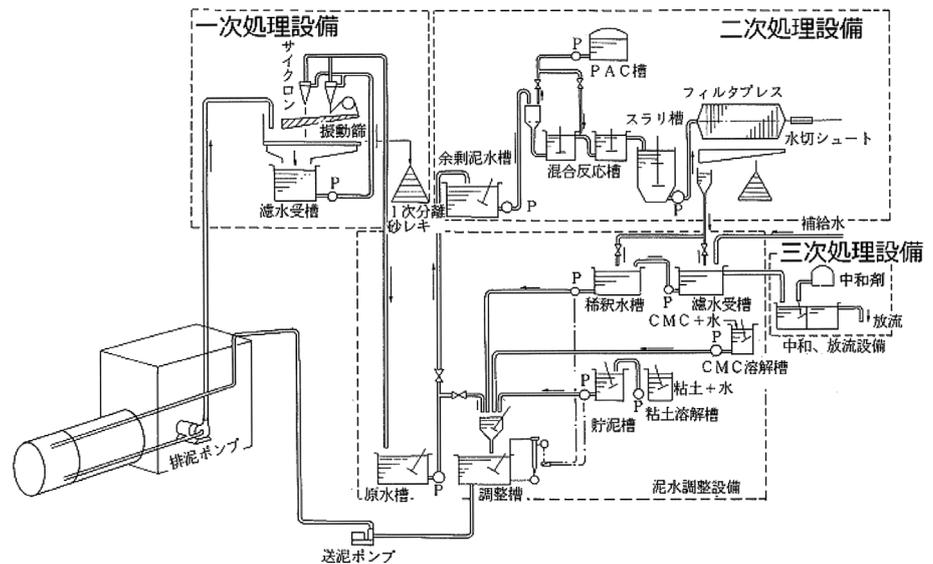


図-4 泥水式推進工法概要図¹⁾



写真-1 一次処理機(機械式:坑外直接排土状況)



写真-2 二次処理機(加圧脱水式:脱水ケーキ排土状況)



写真-3 三次処理(中和装置)

4 泥水式の特徴

次に3項の概要説明を踏まえて泥水式に「適した条件」と「適さない条件」を解説します。

(1) 切羽安定の原理

泥水式は、泥水ポンプの操作で切羽全体を一定の圧力に保持することが容易にできることが特徴です。そのため自然水圧の変動が予測される現場や自然水圧が高い現場などに適しています。

しかしながら切羽安定の原理を構築できない土質も存在します。泥水式は切羽圧力を保持するために還流できることが前提になります。そのため透水係数大きい土質条件の場合は、泥膜形成が間に合わずに送泥水が地山に浸透し泥水圧力のバランスが保持できないケースがあります(逸泥)。そのような土質条件では一般的に泥水式に適さないとされています。

【適した条件】

①切羽圧力の変動が予想される施工条件

- ・ 潮の満ち引き、地下水位の変動がある河川下などの場合
- ・ 計画管路の高低差が大きい縦断曲線を含む場合



【推進制御室(発進立坑)】
ポンプ回転数操作で、
掘進機切羽圧力を容易に調整

写真-4 推進制御室（発進立坑）

【適さない条件】

①切羽安定の原理を構築できない土質条件

- ・透水系数が大きく、マットフィルムの形成が困難な場合（※一般的に、 $K=1 \times 10^{-4} \text{m/s}$ 程度以上が不適用土質）

(2) 還流機構（泥水輸送設備）

泥水式は泥水輸送方式を採用しているため掘削土砂を推進管路内部で排土せず、「直接坑外へ排出することができる」ことが特徴です。そのため自然水圧が高い条件でも掘削土砂を排出する際に噴発させることはありません。

また泥水式は切羽付近の作業がないので掘進機は遠隔で操作するのが一般的です。したがって「管路内部の無人化を図ることができる」ため、人体に有害な物質が含まれている土質や可燃性ガスが溶存しているなどの特殊な土質条件下で施工する場合掘削土が多くなる大口径に適した工法です。さらに長距離推進の場合も管内の移動が少なく比較的「作業効率が良い」に加え「排土効率が良い」管に適しています。

しかしながら土圧式や泥濃式は、掘進機の排土管を通過する大きさであれば人力で回収して坑外へ運ぶ出すことができますが、泥水輸送方式の場合は流体ポンプを通過する大きさでなければ閉塞してしまいます。礫や玉石は機内クラッシャ、排泥ラインクラッシャ、カット前面破碎等の3方式で確立されていますが、想定外の異物が埋まっている場合は流体管の閉塞トラブルを発生させる懸念があります。

【適した条件】

①直接坑外へ排出できることに適した条件

- ・高水圧下（被圧水が高い）での施工の場合
- #### ②推進管路内部の無人化作業が好ましい条件
- ・人体に有害な物質が土質に含まれる施工の場合（硫化水素、ヒ素等）
 - ・爆発の恐れがある可燃性ガスなどが地中に溶存している場合（防爆対策、酸素欠乏対策）
- #### ③作業効率や排土効率による影響が大きい施工条件
- ・管内移動距離が負担となる長距離推進や管路勾配が大きい条件
 - ・呼び径が比較的大きい推進管（1本あたりの掘削土量が多い場合）
 - ・発進立坑が深く、掘削土砂の坑外搬出が大変な施工の場合

【適さない条件】

①異物が地中に残存している場合（廃材等の埋め立て地、構造物の基礎、アースアンカなど）

(3) 泥水処理設備

泥水式の排泥処理に多くの場合比較的広い用地が必要となる、機械式が採用されます。そのため処理機を設置する用地を確保する必要があり、また民家が密集している作業環境では処理機から発生する騒音や振動の対策（防音パネル、防振架台等）が必要となる場合があります。

しかしながら適切な用地を確保することができれば、泥水式は流体輸送方式（泥水の再利用）を採用していることから加泥材を注入する必要がないため、掘削残土や余剰泥水を固化した脱水ケーキの処分量が掘進速度によって増減することはありません。そのため掘進速度が極端に低下する岩盤や硬質土も比較的適した工法といえます。

【適した条件】

①掘進速度が低下する土質条件

- ・岩盤や硬質土地盤の場合

【適さない条件】

①処理設備の用地が確保できない場合や騒音・振動に制約のある作業環境の条件

- ・民家が密集し、防音・防振対策を講じても環境条件をクリアできない場合

5 施工事例

5.1 Case1 円弧推進工事²⁾

当該工事は「河川横断部の縦断曲線施工」と題して、Vol.30 No.7（平成2016年7月号）で紹介した施工事例です。施工概要は次に示すとおりで、河川横断時に支障となる「護岸鋼矢板」を回避するために急勾配の縦断曲線で計画されました（図-5）。

管呼び径：1350

推進延長：L=259m

曲線：[縦断] R=550、380m

[平面] R=2,000m

土質条件：砂質シルト～粘土～砂質シルト

土被り：3.9～16.8m

管路勾配：[発進側] 下り11.3°

[到達側] 上り16.8°

【泥水式が選定された理由】

- ・ 下り急勾配：高低差があっても影響しない安定した排土効率
- ・ 縦断曲線：変化する自然水圧に対して容易に対応が可能

- ・ 河川横断：高水圧下における施工
- ・ 管内無人化対策：作業効率の簡素化。万が一にも水没等が発生した際の安全性確保
- ・ コスト縮減：発進および到達立坑を浅くできることでコスト縮減

【掘進機選定のポイント】

- ・ 土質調査結果より普通土対応の掘進機を選定
- ・ 管内無人化を図るため、遠隔操作方式の掘進機

【切羽の安定と掘削土量の管理方法】

- ・ 送泥管および排泥管に流量計を設置して偏差流量を監視
- ・ 一次処理機から排出した、みかけ土量の監視

【泥水プラント設備の防音・防振対策】

- ・ 作業環境から必要なし

【大土被り、高水圧下での管理方法】

- ・ 切羽水圧の変化に応じた泥水圧力の調整

【予期せぬトラブルへの対応】

- ・ 予期せぬ推進管路継手部からの出水や流体管路の破損等による管内泥水流出に備えて、掘進機後方にセフティーバルクヘッド（隔壁筒）を装備して掘進機の水没対策を実施（写真-5）

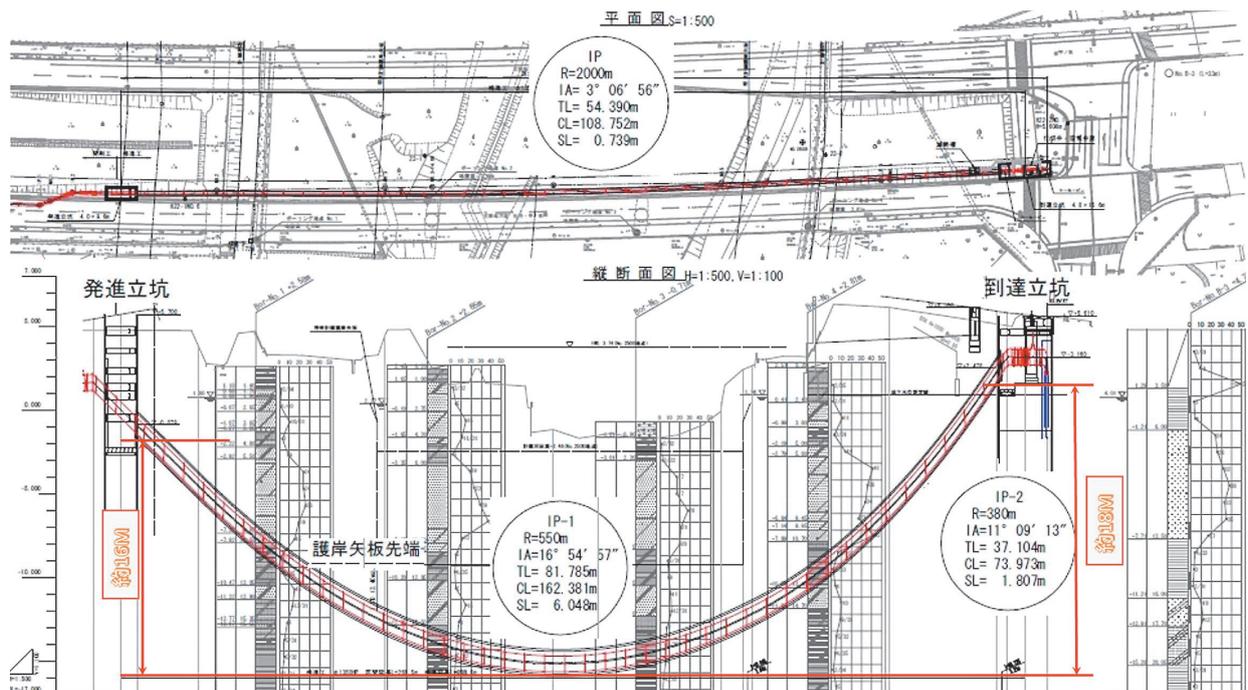


図-5 計画平面・縦断面図



写真-5 セーフティバルクヘッド



写真-6 到達状況

○対策を講じたことの評価

リアルタイムに掘削機の姿勢を把握するためにジャイロコンパスと液圧差レベル検出装置を機内に搭載し、安全性を重視し極力管内無人化を図るために管内測量は自動測量システムを導入しました。施工は計画通りの日進量を確保し、高精度、低推進力で到達しました。懸念していた出水トラブル等はありませんでしたが、掘削機後方にセーフティバルクヘッドを導入したことで安心して施工管理に集中できました（写真-6、7）。

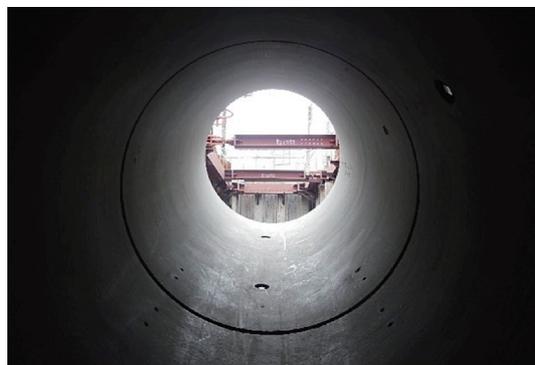


写真-7 掘削管内から見た坑外

5.2 Case2 岩盤推進工事³⁾

当該工事は「変化する岩盤層を急曲線で掘削」と題して、Vol.31 No.7（平成2017年7月号）で紹介した施工事例です。施工概要は次に示すとおりで、高水圧下の岩盤層を急曲線で計画されました。

管呼び径：2200

推進延長：L=198.3m

曲線：【平面】R=60、30m

土質条件：砂岩・礫岩～砂質頁岩

土被り：18.6～18.9m

【泥水式が選定された理由】

- ・ 岩盤推進：泥水流体輸送方式を採用しているため、推進速度の遅い岩盤層でも掘削土砂量（残土）が増加しない
- ・ 高水圧下推進：切羽に発生する高い被圧水に対抗できる

【掘削機選定のポイント】

- ・ R=30m急曲線の曲線造成能力を有する2段中折れ方式の掘削機を選定
- ・ 頁岩層における面板閉塞が懸念されたため、面板

正面から送泥水を吐出できる機構を有した掘削機に改造

- ・ 岩盤層を切削できるトルクを有し、比較的面板の周速が速い掘削機
- ・ 急曲線施工時は目地が開口しておりローリングを防止する反力が期待できないため、掘削機後方にローリング防止筒を製作して装備

【切羽の安定と掘削土量の管理方法】

- ・ 一次処理機から排出した、みかけ土量の監視

【泥水プラント設備の防音・防振対策】

- ・ 施工場所は民家が密集する地域であったため、一次処理機を防音パネルで囲う対策を講じる

【大土被り、高水圧下での管理方法】

- ・ 切羽水圧に応じた泥水圧の調整

【予期せぬトラブルへの対応】

- ・ 計画時のローラビット摩耗量の検討結果では「ビット交換の必要なし」との結果であったが、過去の施工事例で岩盤推進ではビットの予期せぬ異常摩耗（岩盤の石英分含有率などが影響）が発生す

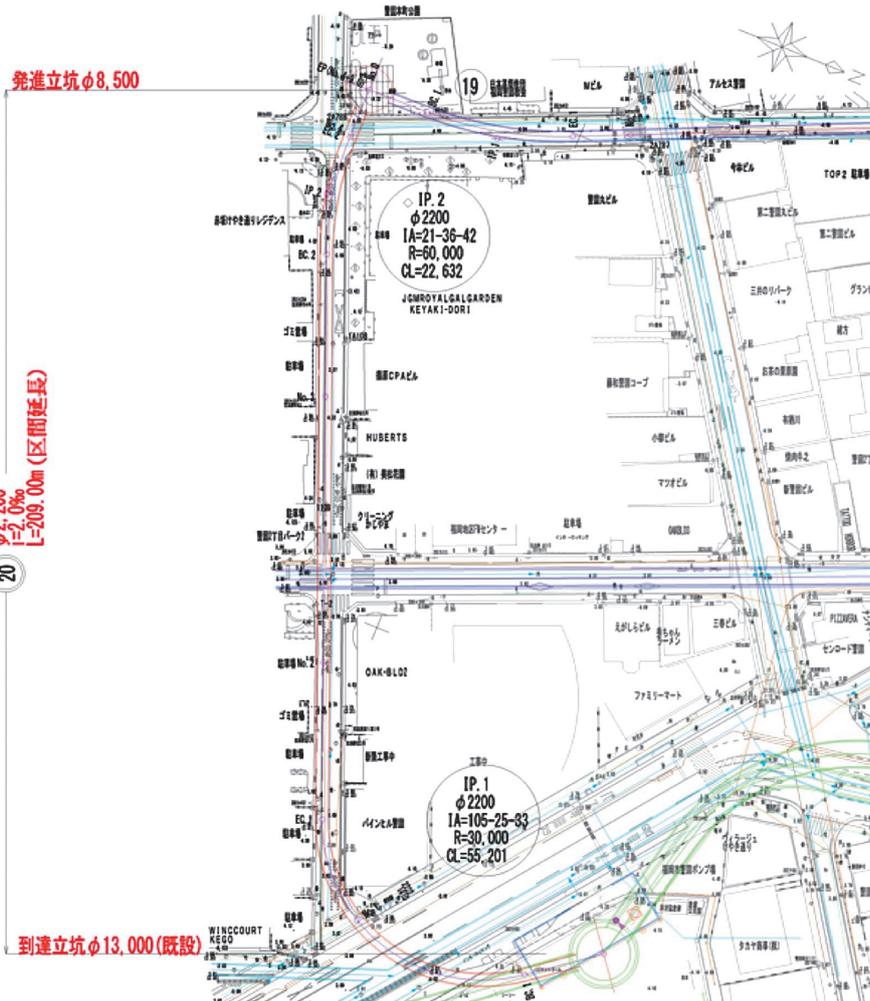


図-6 平面図

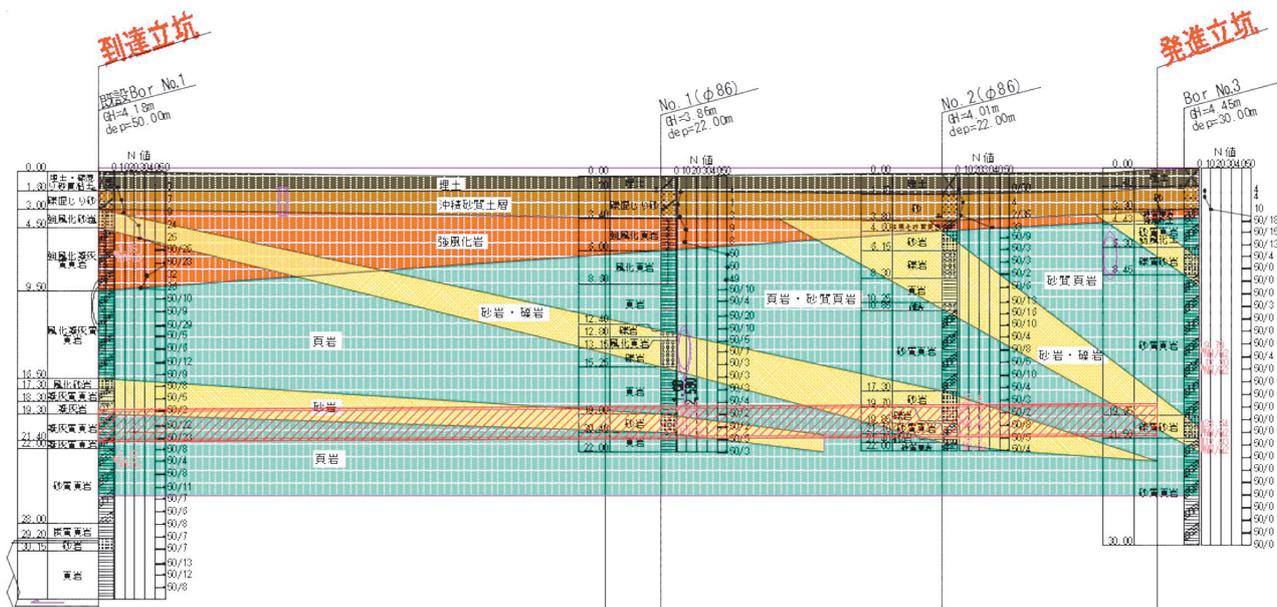


図-7 縦断面図

るケースも散見されたため、機内からのビット交換ができる掘進機を製作

- ・岩盤の急曲線施工のため予期せぬ推進力の上昇に対応するため急曲線区間を通過できる特殊構造の中押設備を導入

○対策を講じたことの評価

掘進作業中は面板送水ラインを併用していたことが功を奏したのか、懸念されていた面板閉塞は発生せず、推進力も計画時の45%程度で到達しました。日進量も安定しており高い精度で到達することができました（写真-8）。



写真-8 到達状況

5.3 Case3 防爆推進工事⁴⁾

当該工事は「可燃性ガスが溶存する地盤における推進工事事例」と題して、Vol.34 No.7(平成2020年7月号)でご紹介した施工事例です。施工概要は次に示すとおりで、事前の土質調査で濃度の高い可燃性ガスが確認されたため防爆対策を講じた泥水式で計画されました。

管呼び径：1000

推進延長：L=425.9m

曲線：[平面] R=800、300m

[縦断] R=500m (2か所)

土質条件：シルト混り砂層

【泥水式が選定された理由】

- ・地中に高濃度可燃性ガスが溶存：メタンガスの特性より管内で土砂を外気に晒すと水に溶けたメタンガスが気化し、濃度を高めて爆発する恐れがあるため坑外へ直接排土できる泥水式を採用
- ・管内の無人化促進：推進管路周囲は可燃性ガスが地中に溶存する特殊な作業環境下のため、掘進中は管内に人が入る必要がない泥水式を検討

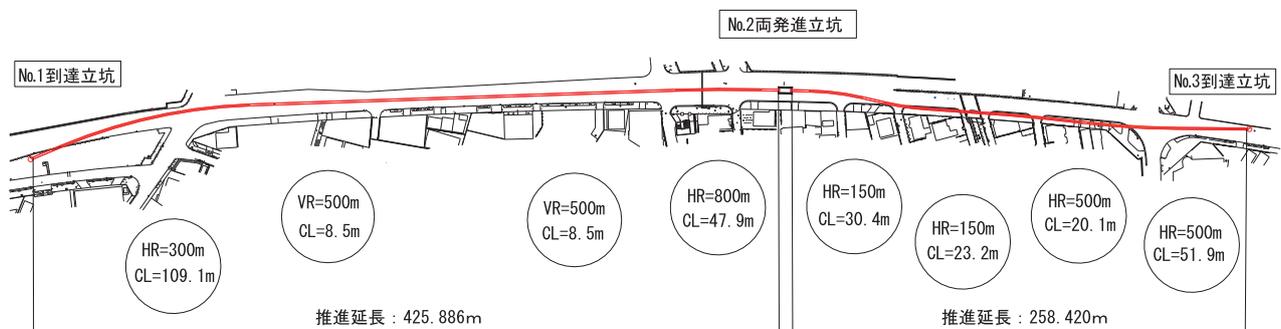


図-8 平面図

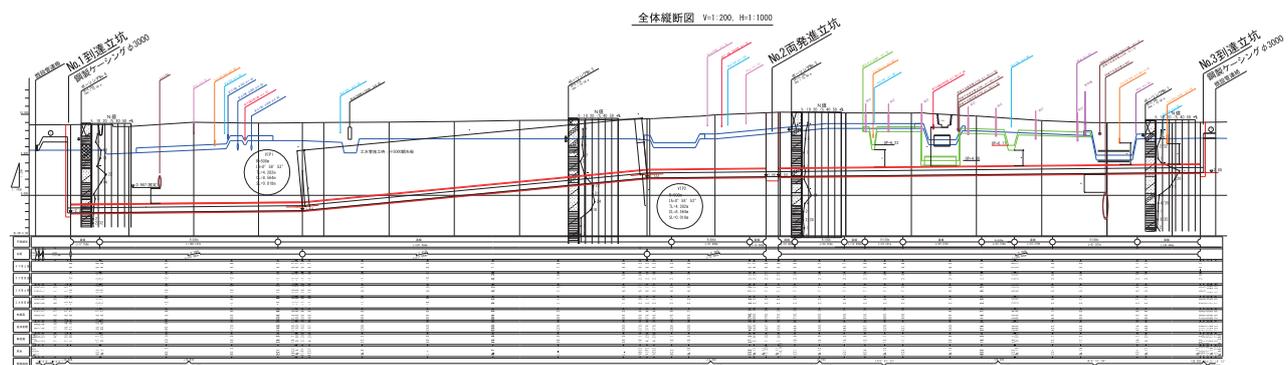


図-9 縦断面図

【掘進機選定のポイント】

- ・土質調査結果より普通土対応の掘進機を選定
- ・アルティミット防爆型推進工法は可燃性ガス対策を講じている（防爆仕様）。掘進機と推進管継手箇所気密性を有するTSシール材を塗布

【切羽の安定と掘削土量の管理方法】

- ・一次処理機から排出した、みかけ土量の監視

【予期せぬトラブルへの対応】

- ・推進力上昇を懸念し、アルティミット滑材注入システムのURIS二系統方式を導入。さらに注入間隔を縮めて使用（注入箇所を通常の倍の数に増設）

○対策を講じたことの評価

防爆対策を講じたことにより推進中に可燃性ガスは管内から検知されませんでした。また懸念された推進力も計画を大きく下回る低推進力で到達しました。

6 おわりに

筆者はこれまで主に大中口径管推進工法の現場で長年施工管理をしてきましたが、密閉式推進の3工法はいずれも長所と短所を合わせ持つものだと考えています。そのため現場の条件に適した工法を選定することが重要ですが、さらに大事なことは何故その工法が適しているのか、または適していないのか（問題となる理由）を理解することだと思います。理解ができていれば事前に施工上の課題を抽出することができ、ひとりで対処できない場合は熟練者や経験者に相談して事前に対策を講じることができるからです。

本稿では新任職員の方々の参考となるように、大中口径管推進工法の泥水式に着目して基礎的知識を解説しましたが、密閉式推進工法の難しいところは推進管の周囲の状況や掘削面を直接見て判断することができないことだと思います。そのため排出後の土砂の性状や推進中の計測機器の動きなどを監視し何が起きているのかを想像し、問題があれば早めに対策を講じる必要があります。そのような場面に現場で直面した時でも、慌てず落ち着いて対応できるようになるために、まずは基礎知識を理解し、そして現場で経験を積み重ねていただきたいと思っています。

本稿内容がこれから推進工事を勉強される方々の一助となれば幸いです。



写真-9 泥水式掘進機



写真-10 気密性シール材

【参考文献】

- 1) 「推進工法体系I推進工法技術編2019年版」(公社)日本推進技術協会(2019年5月)
- 2) 「河川横断部の縦断曲線施工(円弧推進)」原田水胤・犬窪和晃、月刊推進技術 Vol.30 No.7 (2016年7月)
- 3) 「変化する岩盤層を急曲線で掘進」小関純・藤原敏之、月刊推進技術 Vol.31 No.7 (2017年7月)
- 4) 「卓越した技術で難工事に挑むアルティミット工法～可燃性ガスが溶存する地盤における推進工事事例～」宇田達也・北村博文・岩原剛人、月刊推進技術 Vol.34 No.7 (2020年7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: 06-6458-6183 Fax: 06-6454-0274

[関東支店]

〒101-005 東京都千代田区神田紺屋町38

エスポワールビル6階

Tel: 03-3289-4771 Fax: 03-5294-1281

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