

泥水式推進工法の 開発にあたって



大西 一行

(株)奥村組
取締役技術研究所長

1. 開発の動機

当社が泥水式推進工法の開発に着手した30年代後半は東京オリンピックや東海道新幹線などの国家的事業が推進されるとともに、日本全国で高速道路や湾港など産業基盤の整備・各種の生産設備の拡充など国土開発が活発に行なわれた時期であった。また、都市への人口集中に起因する生活関連施設の整備、拡充のニーズが急速に高まるとともに、地下鉄や通信用とう道など交通、通信施設や下水道などのための都市トンネル工事が急増したのもこの時期である。

都市トンネルの工事量の増大とともに、シールド工法や推進工法などの都市トンネル工法に関する建設技術の向上は、われわれ建設技術者にとって欠かすことのできない命題であった。これは建設業のみにとどまらず、機械化、省力化など生産性向上を図るための技術革新が産業界全体に求められていたことも要因の一つであった。

当時の推進工法はほとんどが手掘り式であり、次のような難点があるため、道路横断などの特殊用途に用いられるにすぎず、管路の埋設は主に開削工法によらざるをえない状況であった。

① 切羽が解放されているので、地下水があると

ころでは崩壊しやすい。

② 掘削土の搬出を人手作業によるもので、施工能率が低い。

③ 推進距離が長くなれば施工能率が極度に低下するので、長距離施工には向かない。

④ 狭い坑内での作業条件は過酷である。また、解放された切羽での掘削作業には危険を伴う。

推進工法が都市トンネル工法としてのステータスを得るにはまず施工技術思想を変えることが必要であった。このためには施工の機械化を導入することから始めるべきと考えられ、これが泥水式推進工法の開発動機となった。

推進工法に「泥水掘削」をとり入れることには次のような利点がある。

① 泥水の圧力で切羽の安定をはかるので、安全性が高い。

② 掘削方式は機械掘りとなるので、施工速度が高い。

③ 掘削土の排出はスラリー輸送方式なので、能率的である。

なかでもスラリー輸送方式によれば、過酷な坑内作業から解放され、また、測量などのための坑内スペースを広くとれるなど、中小口径の多い推

進工法にとってとりわけ高いメリットを得ることができる。

以上の考えから泥水式推進工法の開発に取り組むことにした。

2. 工法開発への挑戦

泥水式推進工法はこのような状況のなかで開発方向を決めて行った。当時は泥水を用いて掘削することはリバーササーキュレーションドリルの例にみられるように、縦方向の掘削のみであり、切羽を掘削することに関しては未知の領域であった。いくつかの外国文献に関連技術がみられたものの、実用的な技術としては皆無であったため工法開発にあたっては基礎研究から始めねばならなかった。主な研究項目は切羽の安定に関するものであり、泥水の品質と土質の相互関係を知るための実験的研究により基礎技術の検証に力を注いだ。

(1) 基礎実験

切羽の掘削においては、泥水による切羽の壁面防護作用と切削刃による切羽の破壊作用が同時に繰返される。これらは切羽の安定にとっては相反する作用であるため、この2つの作用の相対的な関係が切羽安定の要素になると考えられていた。このことは技術者にとっては大変興味深いことであり、われわれ担当者は多くの論議を交わすところであったが、模型実験などを通じてしだいに明らかになるにつれて確かな知見を見いだすことができるようになり、工法化への自信を深めることができた。

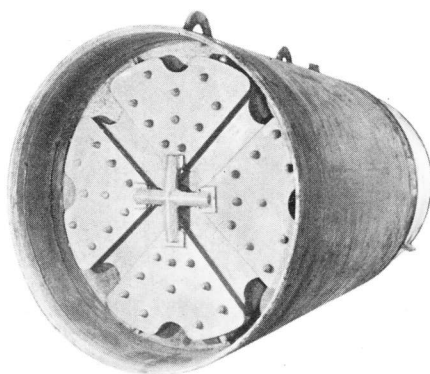
基礎実験では次のような項目について調べた。

- ① 切羽安定に関する水槽実験
- ② 泥水の品質と地盤への浸透性の関係を探るための浸透実験
- ③ 模型シールド実験装置による泥水中での掘削実験
- ④ 推進管の推進反力低減のため管外側に注入する滑材の配合実験

(2) 施工実験

基礎研究により泥水掘削の基本技術について実用化の可能性を見通せたものの、施工法の確立や実用化には距離があり、数多くの施工実験を必要とした。

施工実験では次の項目が主要な研究事項であっ



た。

(a) 施工設備の開発

工法化にとって必要な主要機器はシールド機および圧入装置であった。シールド機については、泥水中では切羽は密閉された構造にする必要があるため、全断面を掘削できる1軸式カッターヘッドをもち、掘削と同時にシールド機を前進させて切羽の進行に合わせるようにした(写真-1参照)。

カッターヘッドの役割は、土を切削することと、切削された土と環流泥水とを混合してスラリー化することである。この2つの役割に泥水の流れをいかに組み合わせるかが技術的ポイントであった。

シールド機内にはシールド工法のシールド機と同様にジャッキを設けた。推進工法ではこのジャッキで機体を推進する必要はないが、掘進計画線に近づけるための機体の方向制御を容易で確実に行うために設けたものである。

つぎに圧入装置について、推進管の当棒と圧入用ジャッキが一体となり、推進とともに移動するジャッキ台車を開発した。

従来の圧入方法は、「尺角」と呼ばれる木製のストラットを反力材として用いるもので、1本の管を推進するのに、9回に分けて推進とストラット挿入の作業を繰返す必要があるため施工能率が低い。この装置により機械掘りによる施工の急速性と調和させたものである。

これらの機器の設計においては、その構造や仕様の設定に難しい点があったが、他の建設機械のデータを頼りに手さぐりで計画を行なった。

(b) 施工管理方法および施工計画手法の確立

基礎実験により、施工設備の構造、仕様を決めるための必要なデータを得て、内径1200mm用の施工設備を製作した。この設備を用いて昭和39年に自社構内で実験施工を行い次のことを調べた。

① 施工設備の構造の妥当性および、能力や性能の確認

② 施工の方法、機械の運転方法などの修得

泥水式推進工法では、シールド機、圧入装置、スラリー輸送ポンプ、潤滑材注入ポンプなどの機器が作動し、それらの状態を掘削に適するように維持しなければならない。いいかえればハード技術とソフト技術の双方の技術が必要であった。

この施工実験により施工技术と計画技術を一応マスターし、泥水式推進工法の原形ができあがった。

3. 普及への努力

昭和39年の実験施工により当工法の実用性が確認され、同40年には東京都内の水道輸管工事において当工法が採用された。最初に直面した課題は、土質条件に対する適用範囲を広げることである。シルト地盤においては好成果を得られたが、砂などの崩壊性地盤には切羽の安定面で不安があった。

そこで、切羽安定に関しては、泥水による切羽安定とシールド機のカッターヘッドによる切羽安定の二面からこの問題の解決に取り組み、研究所における室内実験と現場施工の繰返しにより、徐々に当工法の信頼性が高められた。

切羽安定と掘削の問題解決に次いで、泥水処理への挑戦であった。これはコスト面に与える影響が大であるため、積極的に研究投資をした。

以上のようなハード技術面の改良に引続き、施工技术の標準化や施工管理技術の向上といったソフト面の改良に取り組んだ。

泥水推進工法では、シールド機、圧入装置、スラリー輸送ポンプ、滑材注入ポンプ、泥水設備などが連係しながら運転操作をしなければならない。そこで、シールド掘削、推進管の圧入、掘削土の搬送、滑材注入の各作業状態を最適状態に維持するための運転管理のシステム作りが行われていた。

昭和50年代に入ると工事量が増加し、一時的に技術者不足を招くことがあった。当工法の技術の習熟には一定期間を要するため、技術者不足は工

事の品質低下の恐れがある。この問題はその後、集中管理装置を用いた運転管理システムの開発により解消することができた。

当工法の普及の最大の障害は、今日でも同様であるが、新しい開発技術を工事仕様に組み入れた工事発注が難しいことにある。これは日本の公入札制度における業者側からみた泣き所でもある。

この問題を克服して工事を受注するため、普通推進の工事受注後に自費負担の工法変更により実績作りをしたり、全国規模のPRをするなど多額の投資をし、工法の普及に努めた。これは発注者側の積算基準が作られた昭和50年代初期まで続いた。このような先行投資による実績作りは、実績を重視する発注者側の信用を得るために非常に役立つ結果となった。

近年、土圧系推進工法が登場してきたが、泥水式推進工法は土質適応性が高く評価されて超小口径の領域まで普及しており、外国からも注目されだしたことは非常に喜ばしいことである。

4. 技術の進展

実績の積み重ねにより徐々に施工技术が向上していった。また、工法の普及にとともに厳しい施工条件にも徐々に遭遇することになり、新たな適応がせまられるようになった。

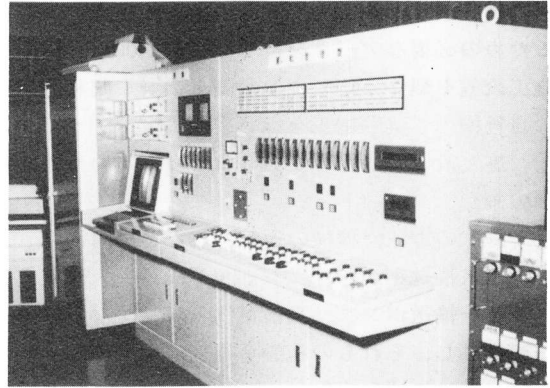
施工条件の多様化は次の要素にわけられる。

- ① 大径化、小径化など口径の二極化。
- ② 礫地盤など対象土質の適応範囲の拡大。
- ③ 可能推進距離の延伸、曲線推進などの路線形の多様化。
- ④ 施工管理に関する技術の高度化。

下水道普及率の向上とともに下水道工事の舞台はしだいに中小都市が多くなり、工事条件や土質条件が多様化した。すなわち、中小都市の一般的特長として小口径であること、地形的特質により土質は変化に富み、礫などを含む地盤の多いことなどがあげられる。これらの特長は小口径の多い泥水式推進工法にとっては厳しい条件であった。

(1) 遠隔操作式の開発

泥水式推進工法では、坑内作業によりシールド機の運転や測量などを行う。そのための空間として最小800mmの内径を必要とし、これ以下の小口径に対応するには坑内の無人化が必要となる。



昭和52年にシールド機のリモートコントロール技術を開発し、地上で全ての機器操作が可能になった。この技術は、シールド機の自動測量装置の開発によって成り立つものであり、コンパクトな測定器の開発にかなりの労力を要した。

この工法は、後に最小口径が $\phi 250\text{mm}$ の管を埋設できる超小口径推進工法の開発に結びついた。

(2) 礫地盤用の開発

礫を含む地盤では、礫がシールド機内やスラリーパイプに詰まって掘削不能になるので、事前の土質調査で判断しなければならないが、礫の存在はこの調査では確実に予想できないため、しばしば掘削不能に陥った。この対策は過大なものにならないざるをえない場合が多く、現場にとっては過酷な状況に陥りがちになる。したがって、「礫対策」が小径化にともなう必須の技術課題になった。

昭和57年に礫破砕式の泥水式推進工法の開発をした。シールド機内にジョークラッシャを内蔵したもので、機内にとり込んだ礫を小割りしてスラリーパイプに送る構造をもっている。この開発における技術的ポイントは、機械設計面の要請からクラッシャをほぼ水平に設置した構造としたことに対する礫の通過性と、クラッシャを油圧駆動にしたいことに対する処理能力であった。これらについて、地上での模型実験により性能を確認して機械設計に組み入れた。この工法では先に述べたリモコン技術を取り入れ、ワンマンコントロール方式が標準的なものになっている。

(3) 全自動操作方式の開発

全自動操作方式は、遠隔操作方式の延長として

昭和57年に開発したもので、一本の推進管の推進工程における機器操作を、コンピュータにより全て自動的に行うことができる。技術者は運転管理にともなう注意力の集中を要する作業から解放される。この方式は“3. 普及への努力”で述べた技術者不足や、個人差によるバラツキに伴う掘進の品質安定性の低下に対処するために開発したもので、将来性のある技術として育てていきたいと考えている。この方式はすでに約3 kmの掘進実績をもち、技術的にはほぼ完成の域にあるが、コンピュータシステムのコストダウンが進めば競争力が高くなり、長距離推進、曲線推進など難度の高い工事では一層その長所が生かせると思われる。

(4) 曲線推進工法の開発

推進工法は元来、直線の掘進路線に適した工法である。しかし、道路線形に合わせて計画される路線形は、推進距離の長距離化にともなって直線の組み合わせでは難しい場合があるので、線形の一部に曲線を取り入れることが試みられるようになった。

曲線推進では、シールド機に接続されて推進される推進管の接続部では片開きが生じ、このため推進管に均等な推進力をかけることができない。したがって、接続部には適当な部材を挿入して均等化を図る必要がある。また、曲線部では測量作業が非常に煩雑となり、多数の測量員と作業時間を要している。この接続部の処理と測量が曲線推進における技術的課題である。

これらの課題については、現在研究中であり近い将来実用化される見通しである。

(5) 管被膜工法の開発

管被膜工法は、推進管の外側に止水性をもつシートを被覆して、管路の止水性の向上を図るものである。膜はシールド機の後部に接続された格納管に折りたたんで収納されており、推進とともに膜が引き出されて推進管を覆う。膜の内側には潤滑材が注入され、膜と推進管との摩擦を減じるとともにクリアランスを保つ働きをする。被膜はまた潤滑材の確実な注入をもたらすので、潤滑効果が向上し推進距離の長大化に役立つことになる。

この工法は、施工条件の多様化に関する技術ではなく、推進工法の付加価値の向上に関するものである。この技術が今後普及していくには発注者のご理解を得て、施工計画の段階で組み入れていただくことが必要であろう。

今日、泥水式推進工法の普及が進み、下水道など管路埋設工事の施工法の1つとして、確かな地歩

を築いている。この工法に関心をもち、当初から研究開発に関与してきたものとしてこの工法の発展をみると、いささか感慨をおぼえるところである。泥水式推進工法およびその関連技術を開発経緯に沿って思いおこすままに述べたが、技術領域は意外な広さをもち、今後この工法がさらに発展するにはまだ残された技術開発の余地は多いと感じられる。

最近の新聞などの情報では、建設省が中心となって人工知能(AI)を使った小口径管渠掘削推進システムの開発に着手される方針である。このような高度化技術はわれわれにとっても大に関心のあるところであり、研究開発の官民協力が押し進められることが期待される。今後も幅広い研究交流を通じて推進工法の発展にいささかの寄与ができれば幸いである。

