

総論

進化し続ける推進技術

なかの まさあき
中野 正明

機動建設工業㈱
代表取締役社長
(公社)日本推進技術協会会長
・本誌編集参与



1 はじめに

我が国の推進技術は70年超の歴史を経て、目覚ましい進化を遂げ、近年では社会資本とりわけ地下インフラの整備には欠かせない技術となっています。今後も国内外においてその活躍の場は、ますます広がっていくものと期待しています。そのためには、技術の進歩発展が不可欠であり、社会のニーズを正確に汲みとって、必要とされる技術を開発し提案していくことが求められます。

本稿においては、現状における最新の推進技術を概観するとともに、現状あるいは今後のニーズを探っていきたいと思います。

2 最新の推進技術

最近提案されている新しい推進技術を大まかにみると、ふたつのテーマがあるように思われます。ひとつは特殊な地盤や困難な施工条件を克服するというものであり、特殊地盤対応技術や地中障害物対応技術などが該当します。もうひとつはこれまでの適応範囲を脱却して市場の拡大を目指すもので、矩形函きょ推進技術や改築推進技術などが考えられます。これらのテーマはそれぞれ別個のものではなく、社会のニーズを汲みとって開発し提案された技術であり、今後改善したり融合したりして、さらに発展することが期待されます。

以下に最新の推進技術を各テーマ別に大まかにご紹介いたします。

2.1 特殊地盤対応技術

推進工法はもともと下水道、水道、電気、都市ガスなど、都市のインフラ整備の普及に伴って進化してきました。このような都市は主に平地（沖積平野、洪積台地など）に多くあり、埋設管路の深度はそう深くはありませんでした。そのため、推進工法が対象とする地盤はおのずと沖積層や洪積層で、粘性土から砂あるいは砂礫土でした。しかし、近年では石油やガスのパイプライン、鉄道および道路トンネルの付帯設備、海水の取放水管などにも推進工法が適用され、これまではほとんど対象外であった、大深度の硬質土や山岳地および海底なども掘進しなければならなくなりました。そのため、そのような特殊な地盤も掘進できる特殊な掘進機をはじめとして、高水圧に対するバックリング防止、高トルクに対するローリング防止、ビットの摩耗に対する機内ビット交換技術、掘進機の海底回収に対する水中分離技術などが開発されています。

また、反対に腐植土などの軟弱地盤に対しても、掘進機の沈下防止、管路の浮上防止および軟弱地盤における方向制御技術などが開発されています。

2.2 地中障害物対応技術

近年の推進工事におけるトラブルで最も多く見受けられるのは、障害物による推進の停滞や遅延およびそれ

に伴う推進力の増大や掘進機の損傷などです。刃口式推進工法主流の時代には大きな問題ではなかったのですが、機械式密閉型の推進工法で既設埋設物が輻輳する都市部での施工を行う場合、大きな問題になってきています。そのため支障物の材質や埋設状態によっては、掘進機での直接切削や機内からの撤去方法が提案されています。掘進機による切削はウォータージェットを併用するパターンと掘進機のビットで直接切削するパターンがあります。機内からの撤去は掘進機の隔壁に取り付けた点検窓などを利用して作業員がチャンバ内に入って支障物を撤去する方法です。隔壁を開放しての作業が必要なので支障物撤去作業時には前面切羽が自立している必要があり、事前の薬液注入による地盤改良や圧気工法が併用されたりします。どちらの方法でも注意点は支障物の形状、位置の把握であり、最近では機内から電磁波で測定する方法が確実になっています。

2.3 構造物直接到達、発進技術

通常の推進工法は発進立坑および到達立坑を築造し、発進立坑から先導体と後続の管列を推進して、到達立坑で先導体を回収して管路を敷設します。発進立坑と到達立坑にはその用途に応じてマンホールなどの構造物を築造して、最後に立坑は埋戻し撤去します。つまり立坑は推進工事を行うための仮設物であり、場合によってはマンホールなどの構造物から直接発進したり、到達したりする場合があります。主には発進、到達立坑の築造が困難あるいは不可能な場合に行われますが、近年では意図的に仮設を省略して、工費の削減や工期の短縮のために設計されるケースが多くなっています。その場合の掘進機は、面板、隔壁、胴殻などを分割して回収でき、組立再使用が可能な構造になっています。

2.4 矩形函きょ推進技術

矩形きょ（ボックスカルバート）を使用する推進工は、刃口式推進の時代から水路や地下道の建設に適用されてきました。刃口式推進では距離は50～100mが限界で、線形は直線が基本でしたが、最近では長距離や曲線施工も可能にする機械式密閉型の矩形きょ推進技術が開発されています。この技術にはふたつの流れがあり、ひとつは推進管がそのまま水路や地下道になるよう、コンクリート製の函きょを使用する方法と、もうひとつは鋼製

函きょを使用して長距離、曲線施工を行うものです。通常鋼製函きょ単体は比較的小さく（＜3m程度）、仮設として縦横に複数連結して配置し、前者より大断面を構築することが可能です。今後はますます地下空間の利用が必要になってくると思われますので、矩形函きょ推進技術の進歩によって、大規模地下空間の構築が可能になることが望まれます。

2.5 特殊小口径管推進技術

小口径管推進工法は一時期数えきれないくらいの工法が提案され、工法ごとの特徴や適用範囲などが明確でなく、設計や施工に対して戸惑う場面がありました。現在では高耐荷力管推進工法、低耐荷力管推進工法の2つの分野に整理され、その適応範囲が明確になっています。その中で数多く施工されているのは、それぞれの分野で特徴のある3～4工法に絞られてきているようです。高耐荷力管推進工法においては長距離施工、曲線施工、硬質土への対応などがポイントで、低耐荷力管推進工法においては高耐食性管（塩化ビニル管）を使用して簡便で安価な施工がポイントのようです。また、近年では高耐荷力管推進工法で粗石や岩盤などの特殊な地盤にも対応可能な技術、低耐荷力管推進工法で長距離、曲線施工が可能な技術、鋼製管推進工法でより長距離施工が可能な技術などが開発されています。

2.6 改築推進技術

既設老朽管対策として、現状ではそのほとんどが内面補修による管更生工法で行われています。損傷程度が軽微であれば管更生での対応が適正ですが、変形や損傷程度がはなはだしく更生では対応できない場合は、更新（管路の入れ替え）を行わなければなりません。そのような条件に対しては推進技術での改築更新を提案して普及させなければなりません、未だ広く普及とまでは至っていません。しかし、いくつかの新技術が提案され実績ができています。ひとつは既設管を先導体で切削しながら新設管を推進するもので、もうひとつは仮管（鋼管）を削進して既設管に被せて撤去し、新設管を仮管内に挿入するものです。いずれにしても既設管は管種、管径、埋設状態など様々な条件があるため、改築推進はひとつの工法（技術）だけでは完成しないものですので、今後いろいろな方法が開発され提案さ

れることが期待されます。

3 推進工法を支える最新の周辺技術

推進工は一般土木の一工程である土工、型枠工、鉄筋工、鳶工、コンクリート工などと違い、PC工や隧道工などと同様にひとつの工事として完結する工種です。そのため使用する材料をはじめ立坑、設備などの仮設や測量、制御なども推進工法を支える重要な技術です。

それらの周辺技術について大まかにご紹介いたします。

3.1 測量・制御技術

推進工法の成果物としての管路の精度、品質を確保するために欠かせない技術として、測量および制御技術があります。測量に関しては長距離施工や曲線施工では測量時間の短縮のために自動測量システムの導入やジャイロの併用などが行われています。最近ではそのような目的以外に省力化や人為的ミスの排除のために使用されるケースがあります。機器およびシステムの傾向としては、より速く正確にまた高耐久性でメンテナンスフリーを目指した技術が紹介されています。また近年では測量データだけでなく、時々刻々の掘削土量、ジャッキスピード、掘進機トルク、各注入量などを自動的に記録し保存する遠隔監視システムを導入するケースが増加しています。この目的は推進管理データを解析することによってより正確な推進管理を行うためと、事後の品質エビデンスとして瑕疵責任を明確にするためでもあります。

3.2 立坑築造工

推進工法で使用する立坑は鋼矢板、ライナープレート、鋼製ケーシング、H鋼横矢板、地中連続壁などがありますが、大深度（大土被り）の施工が増加するにつれて現場打ちケーソン圧入やセグメント圧入による立坑築造が増加しています。いずれも大深度（大土被り）、高水圧の推進施工の場合に採用されますが、発進および到達部の部材には直接切削可能な部材を使用して、高水圧下の発進到達を掘進機による土留め壁の直接切削によって安全に行うケースがあります。基本的にはこのケースでは発進到達部の地盤改良は必要ありませんが、発進直後の掘進機の姿勢制御や到達部の止水のために補助的に地盤改良を行うこともあります。また、小口径

管推進では鋼製ケーシング立坑が多いようですが、ケーシングをマンホール躯体に転用するためにコンクリートケーシングを使用するケースがあります。この方法であれば鋼製ケーシングの残置はなくなります。

3.3 補助工法（地盤改良工）

推進工法における補助工法は、立坑底版のヒービングやボイリングを防止するためのものと、発進到達の鏡切りを安全に行うために坑口部の自立を確保するためのものがほとんどです。ごくまれには極端にルーズな地盤の目詰めや互層地盤の掘進や姿勢制御を目的としたものもあります。いずれも現在は薬液注入による地盤改良が一般的で、大深度（大土被り）においては噴射攪拌杭（置換工法）が多く用いられます。近年では噴射攪拌径をより大きくして本来の削孔位置に埋設物があってもアンラップ部がないように工夫したり、水平方向に施工したりできるような工法も開発されています。薬液注入においても、緩結タイプと瞬結タイプを組み合わせるより確実な改良効果を期待したり、ごくまれに地下水位低下工法と組み合わせるより効率的な成果を目指したりするケースがあります。

3.4 推進管材

推進工法の成果物（管路）の品質に最も影響を与えるものは管材材料です。そのため以前から推進管メーカは推進施工業者と協力して、推進工法に適した高品質な推進管の開発を行ってきました。長距離推進には高強度管、曲線施工には許容目地開きが大きい短尺管、高水圧施工には高水密管、過酷な条件下の施工にはガラス繊維補強管や鋼・コンクリート合成管などが提案されています。また推進以外の埋設状況や使用状況からくるニーズについては、下水道における硫化水素による腐食に対しては防食高耐久管、基礎地盤の不等沈下に対しては可とう管なども提案されています。近年ではそれらに加えて内圧のかかる条件に対しては内圧管が提案され、0.2MPaを超える水圧に対しても0.4MPa以上の超高水密管が提案されています。小口径管においては軽量、高耐久性などの点で推進用塩化ビニル管の使用が多くなっています。また、防食機能に優れた高耐荷力管としてレジンコンクリート管が開発され使用されるケースもあります。

3.5 推進設備

推進工法はその施工条件にあわせた設備を選択する必要がありますが、特に技術困難な施工に対してはその条件にあった特殊な設備が必要です。例えば立坑と地山との境界にあって常時推進管が通過していく発達坑口（到達坑口）は、地山の土砂や地下水の立坑内への噴出を防止する最後の砦ですが、特に高水圧の施工においては高機能の坑口が提案されています。ゴムパッキンをL字型に加工したものや、坑口内にエアチューブを装備して空気圧で止水性を保持するものなどです。また、高水圧施工に特有の現象であるバックリングを防止する装置については、推進管インサート方式、坑口バンド締め付け方式、油圧ジャッキ押し付け方式など様々な工夫がなされています。また、省面積を目的とした濃縮サイクロンや簡易推進管ストックシステム、元押装置の工夫なども新しい流れになっています。その他推進技術そのものではありませんが、大深度立坑の昇降の困難さを解決するために簡易エレベータなども提案されています。

4 求められる推進技術（キーワード）

ここまで最新の推進技術を概観してきましたが、その内容は多岐にわたってそれぞれの分野の技術者が社会のニーズにあわせて工夫したり新規開発をして、いろいろな提案がなされていることがわかります。もちろん社会のニーズを受けとめることは重要ですが、一方我々推進技術に関連する立場から今後の方向性を専門家の立場として提案することも重要になるのではないかと思います。そこでこれまでご紹介した事例を参考にしつつ、現状抱えている課題も加味して求められる推進技術のキーワードを考えてみます。

4.1 安全

建設業界の人手不足、後継者不足は深刻で、推進業界においてもまず解決しなければならない喫緊の課題です。そのためには推進工法が安全で快適な環境を保証するものでなければならないと考え、第1のキーワードは「安全」です。建設現場において安全がすべてに優先することは皆さん周知のことと思いますが、まだまだ推進工の施工現場では過酷な作業環境が見受けられま

す。危険で過酷な作業環境では人手不足や後継者不足は解決しません。前項でご紹介した大深度（大土被り）立坑での簡易エレベータや坑内の有害ガス遠隔監視システムなどは提案されていますが、さらに坑内無人化を目指した自動運転システムなどの技術が要望されていると思います。少なくとも、平成24年（2012）に発生した高知市における死亡事故を受けて愛媛労働局から通達された項目にあるように、坑内を作業員が歩いて移動できない径の隧道工事においては地上から遠隔操作が可能な推進機を選定して、掘進中は坑内無人化できる技術が必要です。

4.2 品質

建設業界ではありませんが、昨年の自動車、製鉄、重機械工業など文字どおり「技術大国日本」をけん引してきた大企業による試験データの改ざんが日本の技術の信用を揺るがせたことは、我々技術に依拠する推進業界としても真摯に受け止めなければならないことです。建設業においては発注者に引き渡す成果品としての構造物は、寸法、強度、耐久性、止水性などの品質が設計図書（図面、仕様書など）に記載された品質どおり、あるいはそれを上回るものであることは当然のことですので、第2のキーワードは「品質」です。人為的ミスを排除するための自動測量システムや推進データの遠隔自動記録システムなどがありますが、さらに大量の掘進データの蓄積、解析によって正確な施工を保証する自動化などが実現されていくものと期待しています。

4.3 効率化

前にも述べましたが建設業界における人手不足は深刻であり、解決する一手段として施工の効率化による省力化（少数の技能作業員での施工）があり、第3のキーワードは「効率化」です。掘進機の性能向上、元押中押設備の高機能化、自動測量システムの導入などによって日進量の増大や、はりつけ人員の削減などの効率化が図られています。今後は推進工前後の仮設備撤去工などのプレキャスト化、コンパクト化、システム化、自動化などの技術が期待され、推進工の着手から竣工までが効率化されることが望めます。

4.4 改築

下水道をはじめとする国内の地下インフラは、建設当

時想定されていた耐久年数をはるかに超えて、老朽化が懸念されるものが多くあります。地上部の道路や建物の密集、他の近接埋設物の輻輳などの環境変化で非開削による改築更新が強く要望されていますので、第4のキーワードは「改築」です。改築更新すべき老朽管はヒューム管が圧倒的に多いと思われますが、特に古い管路では陶管、比較的新しい管路では塩化ビニル管もその対象と考えなければなりません。塩化ビニル管の場合はまだ耐久年数までは至ってはいませんが、その埋設状態（外荷重の載荷状況）によっては変形（たわみ）が多く発生して、不明水の原因のひとつになっています。また不明水の原因の多くが幹線管路への取付管にあることは周知の事実ですが、これを解消してマンホールにサービス管を介して取付管を接続するとともに、拠点マンホールを設けて管路の情報を一括管理する「管路マネジメントシステム」の構築のためにも改築推進技術の進

歩普及が望まれます。

5 おわりに

進化し続ける推進技術の総論として、最新の推進技術（周辺技術）を大まかにご紹介するとともに、現在あるいは今後推進技術に求められる方向性を私なりにキーワードで解説してみました。それぞれの分野での最新技術の具体例などの詳細につきましては、後続の解説で記載していただきます。推進工法の技術革新は今後も永続的続くことは間違いありませんが、その方向性は社会のニーズを正確に汲みとるとともに、我々推進工法に携わる側からそのあるべき方向を提案していく必要もあると思います。そのことによって初めて推進技術が、ユーザである国民とサプライヤーである我々双方に利益をもたらす、真に価値ある技術になると思います。