

解説

曲線推進技術の成り立ち

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

筆者が入社したとき（1976年）の研修資料（図-1）に、曲線推進について次のような記述がありました。「推進工事は直線または勾配埋設が本来の定則であるが、推進方向の修正をする方向制御刃口の操作を利用して容易に曲線埋設ができるのである。然し、管周潤滑工法で述べたように長距離の曲線推進になると強大な曲線抵抗が作用して管の破壊を生ずることがあるので、推進力を分割するため中押装置を数管毎に配置して施工する方法である。中押装置の配置箇所が多くなると人力に

よる作業能率が低下するので、超高圧電磁弁を組込んだ連動式中押装置とし、自動的に前方から順次に作動させ目的の曲線が得られるような機構になっている。」

当時は中押を使った長距離の刃口式推進が主流でしたが、入社後、自動連動中押の技術指導に同行させてもらった現場が曲線推進で施工されていたこともあり、曲線推進が特別な技術だという認識はありませんでした。ただし、曲線半径が比較的大きかったことや切羽を薬液注入工法、地下水位低下工法、圧気工法などで自立させて、刃先に出現するチェックボーリングを頼りに目地開口長をチェックしながら掘進するという、現在の掘進機による曲線推進に比べると日進量もわずかで、施工管理面では比較的ゆとりのある曲線施工でした。

それから40年以上が経過し、曲線推進は普通のように実施されるようになりました。また、急曲線施工や複数の曲線区間を含む施工も増えていますが、曲線推進に関する研究や理論的な裏付けも進み、次に記す（1）掘進方法（曲線造成方法）の検討、（2）推進管列（曲線線形の保持）の検討、などを適切に行うことで、安全で確実な施工ができるようになってきています。

（1）掘進方法（曲線造成方法）の検討内容

- ①掘進機の最大折れ角の検討
- ②拡幅掘削（余掘り）の検討
- ③地盤補強の検討
- ④測量方法の検討

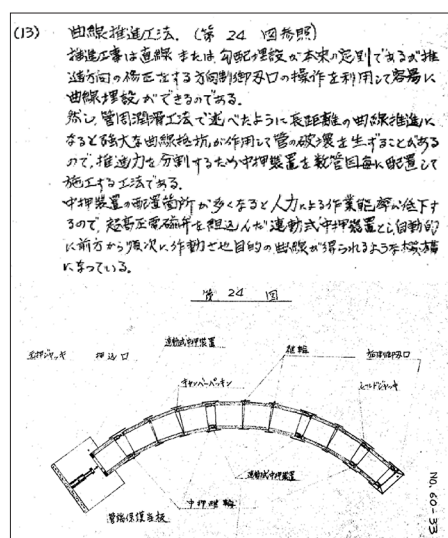


図-1 入社時の研修資料

(2) 推進管列(曲線線形の保持)の検討内容

- ⑤推進抵抗力の計算
- ⑥推進工法用管の選定(管材・管種・管長)
- ⑦推進力伝達材の選定(材質・形状・厚さ)
- ⑧推進工法用管の強度の検証
 - 1) 側方地盤反力に対する管の強度
 - 2) 軸方向力に対する管の強度
- ⑨継手止水性能の確認(許容開口長)

この計画・検討の手順(曲線推進の設計手法)は先人の永きにわたるご尽力によって確立されたものですが、本稿ではこの設計手法を中心に、曲線推進技術の変遷(成り立ち)について社内に残る記録などを参考に記したいと考えます。

2 曲線推進の進展

2.1 最初の曲線推進

設計段階から曲線推進として計画された最初の施工は、1965年に熊本市で実施されました¹⁾。その内容は、内径1,200mmのヒューム管を5スパン計221.5m推進する工事において、電話地中線のマンホールがあるスパンがあり、このマンホールを横に約1m回避するために、発進から到達立坑間の推進ライン(延長約25m)を曲線半径79mの円弧状に推進したものでした(図-2)。このときの曲線の造成と曲線の保持の考え方は次のとおりです。

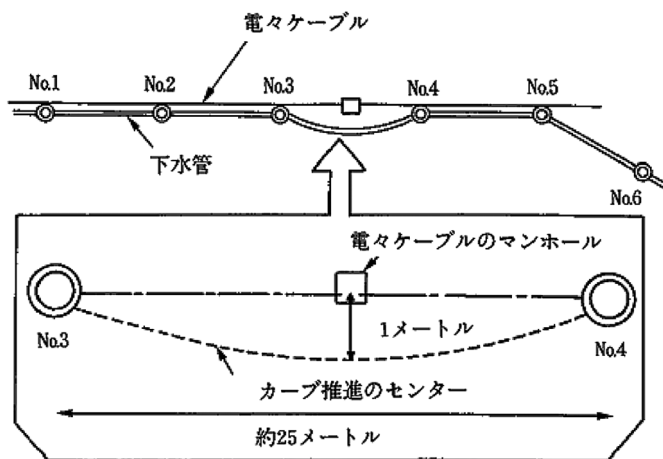


図-2 最初の曲線推進

(1) 曲線の造成

曲線の造成の考え方は時代をさかのぼり、直線推進の方向修正に用いた技術に基いています。初期の推進工法は、軌道・道路下を貫通すれば、さや管としての機能を果たすことができるため、埋設精度は問題とされていませんでしたが、1950年代に入ると下水道本管の敷設に採用されるようになりました。日本の下水道は自然流下方式が基本であるため、設計勾配の確保が必須ですが、推進工法では施工時の埋設精度がそのまま管渠としての出来形(勾配)になるため、埋設精度が許容範囲を超えた場合は管を一旦引き抜き再度押し直すといったことが行われていました。このような中で、1954年10月に大阪市内で施工された内径800mmの下水道用ヒューム管を24.3m推進埋設する工事で、刃口を傾けて方向制御を行う方法が試みられました。具体的には、推進管の軌道が曲がったときに、推進管の先端に装着した刃口にパッキングを噛ませ傾けることで、刃口の側面が偏土圧を受け推進管を修正していくというものでした(図-3)。この方法がなぜ画期的であったかという点、それまでの方向修正は先掘りで行っており、必ずしも思うような効果が得られなかったからです。前述の刃口を傾ける方法は予想以上の成功を収め、その後の刃口式推進工法における方向制御の主流になり、熊本市の曲線造成もこの方法で施工されました。また、刃口の側面が偏土圧を受け推進管を修正していくという考え方は、現在の曲線推進における掘進機の方角制御の基本的な考え方につながっています。

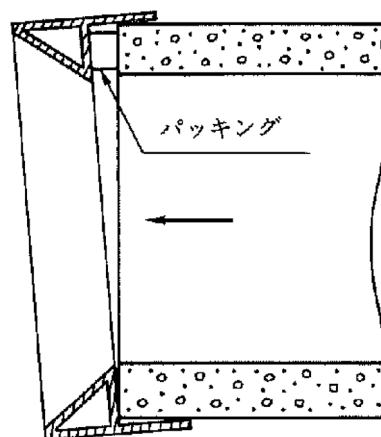


図-3 パッキングを噛ませた刃口

(2) 曲線の保持

曲線の保持については、全く初めての試みでしたが、熊本市の工事では発進から到達まで単一円弧上の推進であったため、曲線半径に合わせて推進管の羽根板の左右の厚みに36mmの差をつけて施工されました。当時は推進工法用管の規格は無く、推進には両端部に段落ち部の無いヒューム管を用い、接続には、カラー部を外に出した外継輪または内側にした内継輪が用いられ、この継輪が前後に移動することを防止するために、4から10枚程度の羽根板と呼ぶ鉄板が溶接されていました。(図-4)

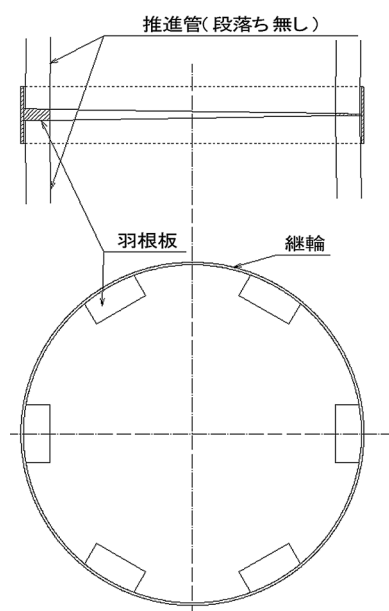


図-4 外継輪と羽根板

熊本市の現場では、この方法で所定通りの円弧状の推進を完了し、その後の曲線推進でも推進管の接続部にキャンパー等を挿入して施工する事例が増え、左右の目地開きの差を適切に保持することによって折れ線形状の曲線を形成できることが分かりました。

2.2 曲線推進の理論化

下水道本管としての曲線推進の施工は、関東方面では1968年に東京都三鷹市で管内径1,800mm、推進延長116.6m(直線48.3m+曲線半径700m、曲線長20m+直線48.3m)、関西方面では1971年に大阪府箕面市で管内径1,650mm、推進延長150m(曲線半径200m、曲線長75m、S字曲線)をかわきりに、昭和50

年初頭までに刃口式で20箇所程度の施工実績ができました。

そこで、これらの実績を基に発注者に向けての曲線推進に関する説明書が記されました。その一つに「機動技術シリーズNo.1ヒューム管の曲線推進の理論と実際(1976年7月)」があります。その内容は、1.最小曲線半径はどこまでとれるか、2.曲線はどうして造成されるか、3.曲線における推進抵抗、4.曲線推進の実際、5.測設、6.曲線推進実施例の諸元、で構成されています。

その概要を原文や原図から記します。

「1. 最小曲線半径はどこまでとれるか」については、(1) 曲線中に在る管は、その目地が曲線の外側部分が開くことになるが、これがどの程度まで許容されるか、(2) 鋼製カラーのクリアランスの制限(図-5)、の2項目から検討されています。現在の推進工法用管は埋込形カラーであり継手部の止水性能で許容開口長を規定していますが、当時は推進完了後に目地部を加工し充填止水を行っていました。そこで、(1)の管目地開口長は鋼製カラーの幅に対する抜け出し長で制限する、(2)のクリアランスは継ぎ輪の精度(当時の継ぎ輪は、管とは別に普通の町工場で製作していました)で制限する、という考え方で、曲線半径については、通常の管長(2.43m)の場合100m以上あればおおむね支障はないとしていました。また、それ以下とする場合には、推進路線上の曲線区間の位置も考慮して1/2管または1/3管の使用を検討するとしていました。このときに示された開口長の計算式は、前記1.(2)⑨継手止水性能の確認(許容開口長)に応用されています。

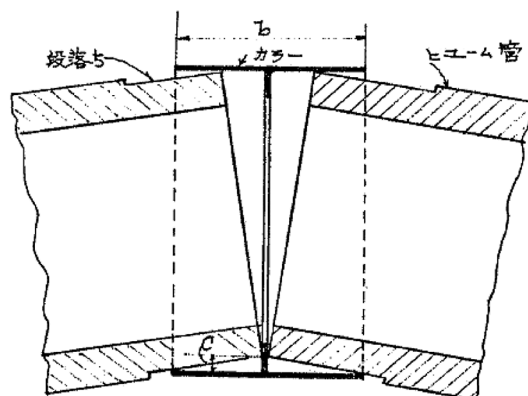


図-5 鋼製カラーのクリアランス

「2. 曲線はどうして造成されるか」については、(1) 拡幅掘削、(2) 曲線推進に伴う目地開口長の造成と保持、の2項目から検討されています。(1) の拡幅掘削では管が曲線中を推進される場合地盤は管外径Dより水平方向に広く掘削しなければ管が通過できない、として前記1. (1) ②拡幅掘削（余掘り）の検討の計算手法（算定式）が示されています。

また、(2) の目地開口長の造成と保持では、開口長の造成は刃口を傾けることによって発生する地盤反力Nによる先頭管への偏向運動によって得られますが、刃口部分の推進力Pが内側部分の目地に集中負荷され、刃口抵抗や管周マサツ（摩擦）抵抗等の地盤反力Fとで生ずる偶力が、回転力Mとして先頭管を直線に戻そうとすることを解説しています（図-6）。開口長を保持するためにはジャッキの装備が必須で、前記1. (1) ①掘進機の最大折れ角の検討における方向制御ジャッキ、曲線造成補助ジャッキの機能に関する考え方を示すものになっています。

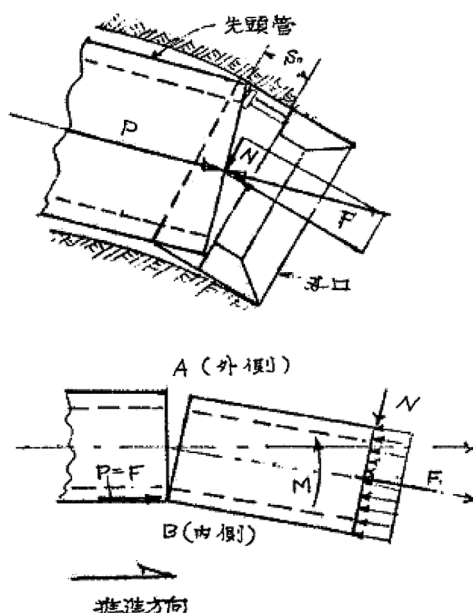


図-6 曲線推進によって刃口と管に作用する力

ただし、第2管以降に生ずる目地開口長の造成と保持については「先頭管ほどデリケートでなく、おおむね先頭管が通過した軌跡を通して進行する。しかし曲線形成の保持および推力分散の必要上、曲線外側に生ずる管目地開口部には必要厚さのパッキンを逐次挿入す

る」と記されているだけで、推進力の伝達方法についてまでは考えられていませんでした。

「3. 曲線における推進抵抗」では、(1) 土質が安定している場合、(2) 土質の安定が悪い場合、に分けて曲線推進における推進抵抗の計算方法が示されています。(1) の土質が安定している場合は、曲線推進においては直線推進における推進抵抗のほかに管後方からの推力の分力しか前方管の推力として働かないこと、また、管後方からの推力の管壁（外周）方向への分力による管壁面とのマサツ（摩擦）抵抗が余分に負荷されるので、それだけ所要ジャッキ推力は余計に必要となる、として現在の曲線施工における推進力算定式（前記1. (2) ⑤）に誘導する計算手法が示されています。また、(2) の土質の安定が悪い場合については、曲線の拡幅部分が推進中に押出されたり崩壊したりして縮小すれば、推進管はそれを再び押し広げて通らなければならないため、前記1. (1) ③地盤補強の検討のような、何らかの土質安定措置をとる必要があるとされています。

なお、曲線施工の推進力算定式は汎用的に用いられていましたが、曲線区間の管本数が変わるたびに（例えば管長2.43m、1.2mや区間長の変更）、再計算が必要になるという煩雑な面もありました。その中で、1994年に代数学的算定式²⁾が提案されました。この提案式は、ハンドブレーキの制動力やベルトコンベヤプーリーの理論式からヒントを得られたとのことですが、(1) とほぼ同じ計算結果が得られ、計算式がシンプルで管長が未定の場合でも計算できるため、現在の曲線推進のシミュレーションにおいて広く活用されています。

「4. 曲線推進の実際」では、(1) 適用の仕方、(2) 施工計画の実例、が示されています。(1) の適用の仕方は、曲線の挿入位置についての一般的な考え方（直線と曲線の合成の場合には押込口側が直線となるようにした方がやり易い）ですが、(2) の施工計画の実例では、実施工、内径1,120mm、外径1,390mm、推進延長81m（曲線半径150m、曲線長56m、砂レキ：全断面薬注、中押4段設置）においての、計画した推進力と実際の推進力を対比し曲線推進力の算定式の妥当性の検証が行われています。

「5. 測設」では、推進の進行に伴って管自体が次第に移動して行き測設した点が固定されないことおよび狭い管内で種々の制約のもとに行う工夫が必要である、として、(1) 偏角による測設、(2) 偏位量による測設、(3) 目地開口長による測設、の各測設手法が示されています。また、刃口式推進であることから、(4) 測設の誤差と検証では、測設の大誤差または過誤を生じない用心のために、予め地表中心線から適宜ボーリングを下し推進深さまで目印をつけておく方法が提案されています。私自身も刃口式推進の現場では、通常推進管1本おきに実施するチェックボーリングまでの曲線管理手段として、目地開口長による測設（計測）をおおいに活用しました。

3 密閉型掘進機による曲線施工

社内記録に残っている最初の密閉型掘進機による曲線推進は、1980年に埼玉県浦和市（現在のさいたま市）で実施された、呼び径800、推進延長200m（振分で、曲線半径80m・曲線長64m、曲線半径500m、曲線長35mの2スパン）の泥水式推進工事です。この施工結果が良好であったことから、泥水加圧式セミシールド工法と銘打って曲線推進の施工を増やしていきました。

推進工法におけるエポックとしては、1970年代からの小口径管推進工法の開発がありますが、1980年代に開発された泥濃式工法のオーバカットと安定液充填の概念は、掘進機を使用した曲線施工を飛躍的に増大させました。また、この時期に減摩効果の高い滑材材料と滑材注入技術の開発も大きく進展しました。

3.1 オーバカット

1980年当時、初めて設計した掘進機の説明で発注先の担当者を訪問した際、「テールボイドをゼロにして欲しい」と要望されたことを鮮明に覚えています。その発注先ではシールド工法における施工後の地盤沈下が問題になっており、推進工法は余掘りが小さいため地盤沈下を抑制できるという考え方があったかと思いますが、方向制御や滑材注入を考慮するとゼロにはできないため最小限の値（直径で10mm程度）としました。その後、泥水式（当時の工法名は泥水加圧）や土圧式（泥土加圧の他に土圧バランス、泥漿などの工法名称がありま

した）セミシールド工法が広く活用されるようになりましたが、掘進機外径は管外径より20mm程度大きくするのが一般的な仕様でした。

そのような中で、1981年に超泥水加圧工法が佐賀県で初めて採用され、その後、泥濃式推進工法（当時の工法名は、超泥水加圧、高濃度密封式、超流動性（現在の超流バランスセミシールド）など）は、着実に実績を伸ばしていきました。泥濃式の特徴である、「基本的に管外径よりも片側25mmオーバカットしてテールボイドを造成しそこに高濃度泥水と掘削土との攪拌混合物を安定液として充填する」というメカニズムが周面抵抗力（所要推進力）を大幅に低減し、長距離推進や曲線推進の需要に合致したからであると考えます。

3.2 滑材と滑材注入システム

泥濃式の実績を受け、泥水式や土圧式推進工法でも、「ある程度余掘りし造成したテールボイドに、良質の滑材を充填・注入することで周面抵抗力を低減する」という考えでさまざまなシステムが開発されました。滑材注入への取り組みは、1960年代の末には始まっていましたが、当時は潤滑材（Lubricant）に関する研究や資料が国内はもちろん国外にもほとんど無く、ベントナイトを主成分として水、油等を配合したものが標準滑材として使用されました。1980年代には鉱物類をベースとしたさまざまな一液性滑材が開発されました。これらの一液性滑材は、大口径管推進工法、小口径管推進工法を問わず現在の推進工法用滑材の主流になっています。また、二液型固形滑材も古くから開発されていましたが、泥濃式の可塑性としてテールボイドを保持する目的に使用されてから活用が広まり、現在は泥濃式以外の推進工法でも地盤条件によっては、一次滑材として使用されています。

このような良質な滑材による周面抵抗力の低減は、曲線中の管列に発生する水平方向の分力を小さくすることができるため、曲線推進の施工性の改善に大きく貢献しました。理解しやすい例として、所要推進力算定の目安である管外周表面積当たりの摩擦抵抗力の推移を、刃口推進の頃と比較してみます。前述の2.2 曲線推進の理論化―「4. 曲線推進の実際」の検証では、周面抵抗力は約 2tf/m^2 （ 20kN/m^2 ）で計画し、実績でそ

の妥当性が検証されました。刃口式推進では滑材が切羽から流入するので滑材注入の効果はそれほど期待できないため大きな数値になっていますが、密閉型掘進機によるセミシールド工法が盛んに用いられたときでも、周面抵抗力は約 1tf/m^2 (10kN/m^2) 程度で計画され、実施工でもその程度の負荷が加わっていたように記憶しています。しかし、現在の施工では $0.1\sim 0.3\text{tf/m}^2$ ($1\sim 3\text{kN/m}^2$) 程度、すなわち周面抵抗力が当時の $1/3\sim 1/10$ で推進完了できる現場も多くなっており、滑材注入システムの技術開発には目を見張るものがあります。

4 推進力伝達材の変遷

密閉型掘進機による曲線推進が増える中で、推進管列の推進力伝達は、管継手部に、①クサビを入れる、②ジャッキを設置して開口を調整する、③上下2点にヒンジ構造にした部材を設置するなどの方法が実施されていました。ただし、クサビは部分的に推進力が負荷されるために管の破損を招くことが多く、目地部に急結モルタルを充填するなどの対策をとることも多々ありました。また、開口調整ジャッキやヒンジ構造は装置の設置のために長い継輪が必要になることや到達後に撤去しなければならないことから主要な推進力伝達方法にはなりませんでした。

4.1 埋め込みカラー型推進工法用管

前述の状況の中で、1980年代に継輪を管後端部に埋め込んだ「埋め込みカラー方式の推進工法用管」が開発され曲線推進に使用されました。この管は、それまでの継ぎ輪にあった鋼製のフランジ部分がなく当初はコンクリート端面同士を直接接触させていました。このため局部的な損傷が多発し、その後、緩衝材として合板が用いられるようになりました。合板は圧縮変形しても推進管端面に引っ張り力が発生しないため、目地開口差の保持および推進力の伝達という点では理想的で、その後の曲線施工において管の破損を防止できることが実証されました。ただし、合板は理想的な推力伝達材でしたが腐食することが懸念され、管きよを構成する材料としては問題

が残りました。

4.2 センプラカーブシステム

合板を用いた曲線推進は着実に施工実績を増やしていきましたが、当社では、1985年に新潟県の信濃川下流域下水道工事、呼び径800、推進延長116m（曲線半径120m）、推進延長97.4m（曲線半径120m）の2つの曲線推進区間で、低発泡のスチレンフォームを利用して推進力を伝達する方法で施工しました。低発泡スチレンフォームは、塑性領域が広く、発泡倍率を変えることにより弾性限界を変化させることができるという特性を持っています（図-7）。この性質を利用して継手部に上下に配置すると、推進力の伝達中心を管の中心に近づけることができるため、管を直線に押し戻そうとする回転力を小さくでき、推進力の伝達と曲線管列の保持が容易になります。

前述の工事が成功裏に完了した後も、低発泡のスチレンフォームを用いた曲線施工の実績を積み重ね、センプラカーブシステムと名付けました（センプラは、Center Plastic Buffer Curve System の略称）。

その後、1992年にセンプラカーブ推進研究会を設立、特許を100社以上に無償開放し曲線推進工法の普及を図りました。また、センプラカーブシステムは1994年3月に技術審査証明を取得、No-Dig'94 AWARDも受賞しました。

センプラカーブ推進研究会は2006年に発展的解散しその活動を終えましたが、センプラシミュレーションプログラム（CPS、図-8）等の中核技術は、アルティミット工法協会に引き継がれ、改良が図られています。

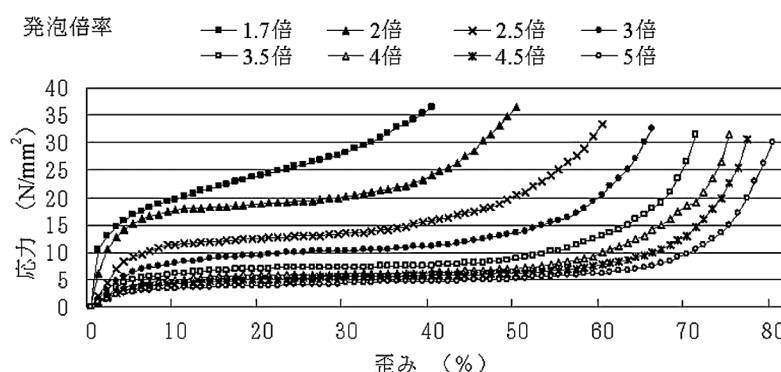


図-7 センプラリングの応力-ひずみ曲線

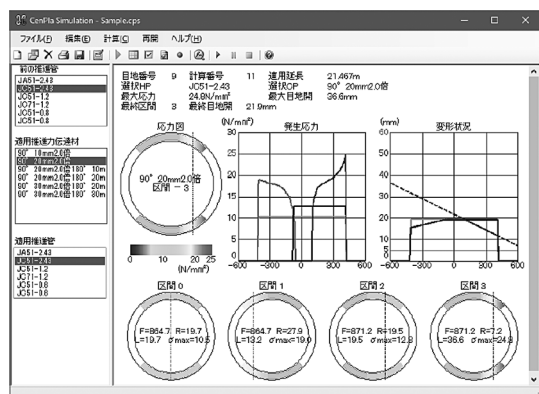


図-8 CPSシミュレーション結果例

5 曲線推進を支える計測技術の変遷

曲線推進には他にもさまざまな技術が活用されていますが、その中から計測（測量）に関連する技術の変遷について記します。

5.1 ジャイロコンパスの搭載

推進工法用のメカニカルジャイロコンパス（株東京計器製）は、1986年、東京都田無市（合併後は西東京市）の呼び径1200、推進延長139.5m（曲線半径100m、中押3段）、推進延長70.6m（曲線半径100m、中押2段）の泥水式掘進機に初めて搭載し、続けて同年に、熊本市の呼び径800、推進延長199.2m（曲線半径200m、中押2段）の泥水式掘進機に搭載しました。2つの工事結果から、精度上からも十分使用できることを確認しました。その後ジャイロコンパスは曲線施工における精度管理に必須のアイテムになりました。

なお、メカニカルジャイロコンパスは、精度は良好ですが取扱いやメンテナンスにセンシティブな面があったのですが、近年は光ファイバージャイロコンパスが実用化され、ハンドリングやメンテナンスが楽になっています。

5.2 液圧差レベル計

液圧差レベル計は、掘進機の鉛直方向の位置計測として、1997年に大阪高槻市の呼び径1500、推進延長241.4m（曲線半径R=50、120m）の施工で初めて使用されました。

5.3 自動測量

推進工法用の自動測量システムは、1997年頃から（株

ソーキによって開発が始まり、当社は、1999年に大阪府高槻市で施工された呼び径1800、推進延長470.3m（曲線半径R=15、50、80、100m）、推進延長89.9m（R=16m）のアルティミット泥水式推進工法で初めて使用しました。この工事は、通常の長さの管（2,430mm）以外に、400mm、800mm、1,200mmの合成鋼管やヒューム管、特殊中押600t（6,000kN）2箇所、普通中押800tf（8,000kN）を使用するといった難易度の高い施工でした、

一般的な管内トラバース測量の場合、光波トランシットの盛り替えもあり90分程度を要すると考えられましたが、ソーキ式自動測量システムを10台設置することで30分程度に短縮することができました。管内の温度差による屈折に対し3mm範囲の誤差があったようですが、システム計算によって誤差を補正することで問題なく施工することができたようです。自動測量システムは、その後改良が重ねられ、測量に要する時間がさらに短縮されていますが、何よりも狭小な管内での人力による作業の軽減や省人化の効果が大きいと考えます。

6 おわりに

本稿では、薄れつつある記憶を社内に残る記録や文献を頼りに、曲線推進技術の変遷（成り立ち）として記しました。その中で、推進工法が飛躍・発展した背景には、従来の概念にとらわれない新たな発想が起点になっていることを再認識いたしました。

もうすでに取り組みされている方々や機関があるかもしれませんが、ドローンを使った計測や管理、AIを使った自動制御など、異なる分野の手法を取り入れることで、推進工法のまた新たな飛躍につながるのだと思います。この解説文がそのきっかけの一助になれば幸いです。

【参考文献】

- 1) 「曲線推進工法の現状と課題」木村宏一、月刊推進技術、Vol.2 No.10（1988年9月号）
- 2) 「推進工法における曲線部の推力について」植松勝之・三島亨介、月刊推進技術、Vol.8 No.10（1994年10月号）