

推進工法 1 kmの時代に向けて

— $\phi 1350$ 、 $L = 1010.05\text{m}$ 国内最長距離の施工 —

いわなが まこと
岩永 信

丸岩推工株式会社
常務取締役 工事部長



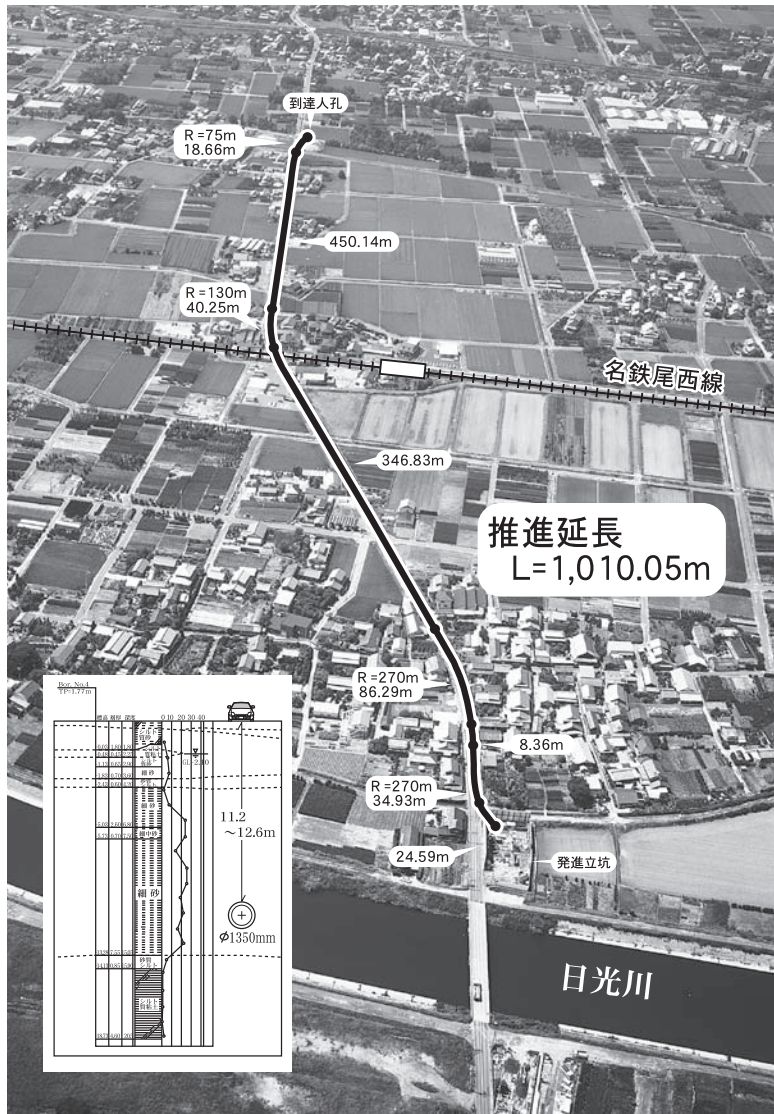
1. まえがき

これまでの推進工法の工事実績において、1 スパンあたりの推進延長としては国内最長と思われる推進延長 $L = 1010.05\text{m}$ の施工をこのたび完了いたしました。工場製作された管を発進立坑から順次圧入していく推進工法は、距離が延びるとともに、管外周と地山の摩擦抵抗等による推進力が増大していくことになるため、掘進機後部に順次セグメントを組立てていく、施工延長に実質制限のないシールド工法とは違い、推進管の耐荷力等に対して推進延長は制限されることとなります。国内での推進工法の歴史は約50年と思われませんが、初期に考えられていた推進施工の延長は数十メートルであったでしょうし、我々が推進工法に携わった頃には数百メートル程度でまで延びてきていました。つい10年前では夢であったと思われる推進延長 1 km 以上の施工を実現できたことは、推進工法を信頼して設計計画いただいた発注者・設計者のご尽力に感謝することはもちろんのことではありますが、推進設備の能力の拡大、資

機材等の改良、長距離や複数曲線施工の確立、制御や計測の自動化等の多様な推進工法の技術開発が行われてきた結果であり、推進工法業界全体の成果であるとも考えます。この国内最長距離施工を当社が担当できたことは、好運なめぐり合わせであったと考えており、さらなる推進工法の発展のために、本工事の施工実績を紹介させていただこうと思います。

2. 工事概要

現場は愛知県西部、名古屋市の北西約15km中島郡祖父江町内の日光川付近に位置します。日光川右岸の発進立坑からS字曲線($R=270\text{m}$)をもって主要県道下を掘進します。ちょうど中間地点で名鉄尾西線下部を横断して、3回目の曲線部($R=130\text{m}$)、最終で4回目の曲線($R=75\text{m}$)をもって到達立坑($2.1 \times 3.0\text{m}$)で掘進機を解体し、既設人孔($2.0 \times 2.5\text{m}$)に連絡します。土被り12mの管布設位置は砂質土で、地下水圧により崩壊性のある土質となっています。



写真－1 現場を一望する航空写真

工 事 名；日光川上流流域下水道事業管きょ
布設工事(三丸渕工区)

工 事 場 所；愛知県中島郡祖父江町大字三丸渕
及び甲新田地内

請 負 金 額；¥420,000,000－

発 注 者；愛知県

元 請 会 社；(株)イチテック

推進工事会社；丸岩推工(株)

管 種・管 径；内径1350mm推進工法用鉄筋コン

クリート管 50Nおよび70N管

推 進 延 長；L = 1010.05m

(区間延長 L = 1018.54m)

線 形；曲線 270R～270R～130R～75R、
勾配 +0.6‰

土 被 り；11.2～12.6m

地 下 水 位；G L -1.2～2.0m

土 質；砂～シルト混じり砂 N=8～29

推 進 工 法；泥水式推進工法&推力低減システム

3. 工事状況

施工にあたっては、管材・掘進機・元押装置・泥水処理・泥水環流・滑材注入・測量・位置検知・姿勢検知・換気・照明・電気・作業時間・施工サイクル・人員配置等の多岐わたって 1 kmの施工を成功させるべく検討を行いました。

推進工事はシールド工事に対して、工期およびコスト面で圧倒的優位である反面、仮設については、十二分な配備を行うシールド工事とは異なり、推進工事は基本的に最低限必要なレベルで考えられているため、限られた工事費のなかで、未知の 1 km 施工の安全性を確保するためにどこまでの配備を行うかが課題でありました。十分な検討のうえに施工計画をして、数々の工夫をしましたが、特に目新しい手法はとっておらず、これまでに開発されてきた推進技術の中から、施工方法を策定しました。当社のみならず、工法協会や機械・材料メーカー会社等の多くの方々にご協力いただきました。今回の 1 kmの推進施工に関して最も注目されるべきことは、「推進力」と「精度」であると思われます。この 2 点に関して、どのような方法で施工し、結果がどうであったかを以下に述べたいと思います。

3. 1. 推進力

推進工法において、最も重要な検討項目は推進力です。

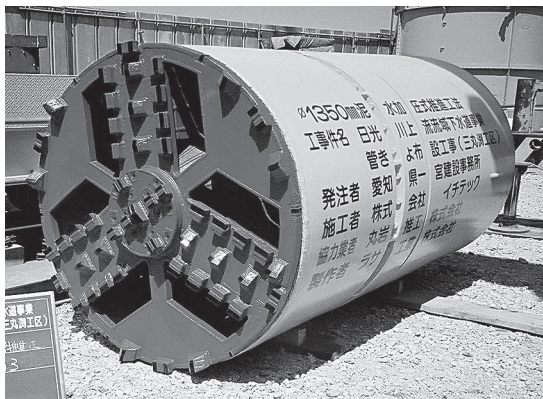
管推進工は、管を地中に無理やり押し込むので

はなく、何らかの掘削工法で管の断面積分の土を過不足なく取り込みながら管を推進します。この際に外力として働くのが、先端抵抗、管外周の土の摩擦・せん断抵抗、管の自重による摩擦抵抗、管と土の付着力で、この総和が推進力です。大きくいえば、推進力は先端抵抗と管の外周に負荷される抵抗力であり、主には延長に比例して増大する管の外周面抵抗力が推進力のほとんどを占めます。

ここで、推進力のスケールを理解いただくために、大きく概して述べると、主に土質定数から基本式により算定される単位面積あたりの管の外周面抵抗力； f 値は $f=10\text{kN/m}^2$ (1.0t/m^2) 程度となります。もっとも汎用的に用いられる推進工法用ヒューム管に対して考えれば、許容耐荷力は $\phi 1350$ ヒューム管(外径 1.60m)では 6239kN で、これを管外周面積分の抵抗力で除せば、約 120m しか推進できないことになります。しかし、滑材注入等が行われる実状を反映した泥水・土圧式推進工法の修正された算定式では、この外周面抵抗値は $f=5\text{kN/m}^2$ (0.5t/m^2) 程度と考えられており、これで $\phi 1350$ ヒューム管を約 250m 推進できることになります。これ以上の推進延長に対しては、管の強度を上げるとか、中押し工法(連結された管の途中にジャッキを 1～4 カ所配備して、シャクトリ虫のように推進区間を分割して前に進む工法)により延長を延ばしてきました。しかしながら管の強度や推進設備、反力となる支圧壁には限度があることや、中押し工法の施工は作業効率が



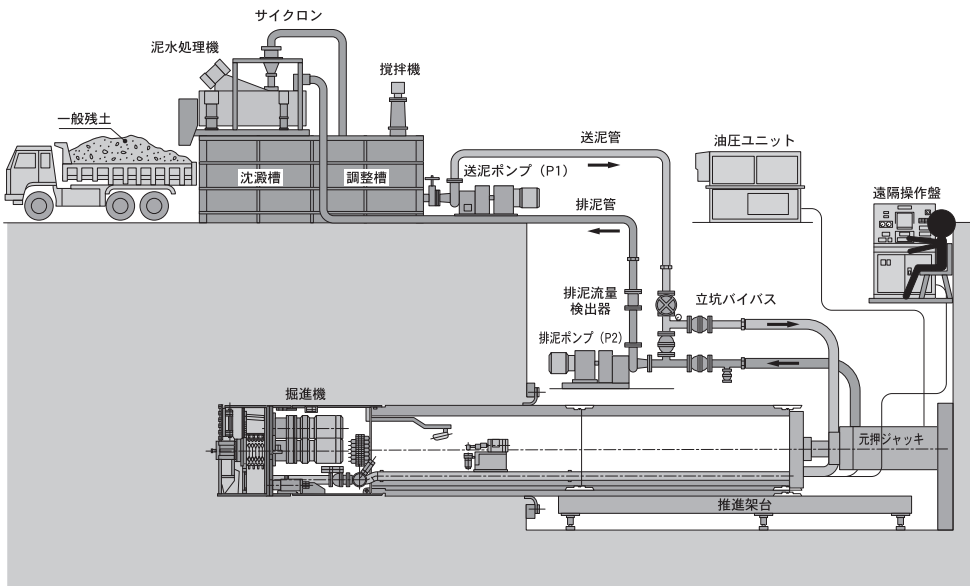
写真一 推進基地の全景



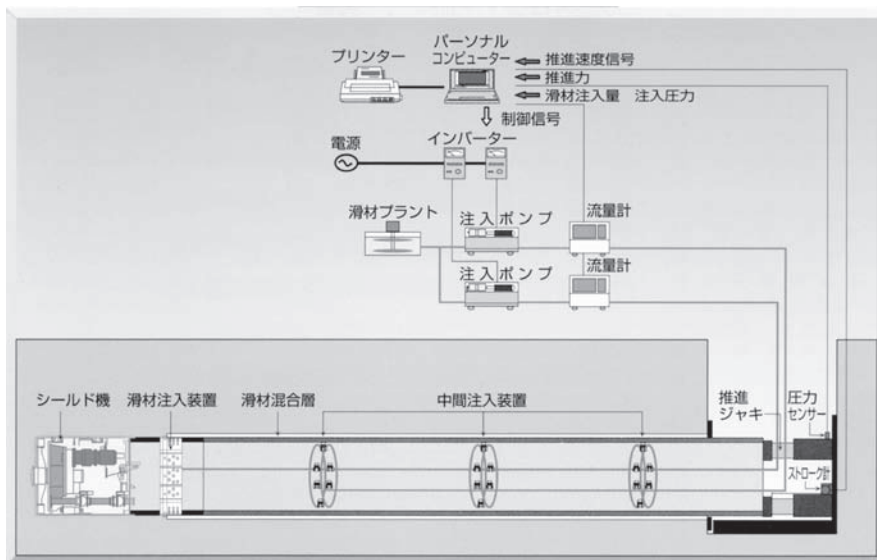
写真二 使用掘進機はユニコーンDH〜ラサ工業(株)

悪く、著しく日進量がおちるため経済的にも不利になることから、これらの手段で1 kmまで延長を延ばすことは考えられませんでした。そこで、ここ十数年で、許容推進延長を延ばすために、何らかの方法により外周面抵抗力； f 値を小さくすることが考えられるようになりました。それが独

自のテールボイド安定理論による泥濃式工法の開発であり、また泥水式・土圧式・泥濃式の基本工法に付帯して、滑材を自動注入して管外周面抵抗を低減させる推力低減システムが開発されてきました。これらの方法で管外周抵抗力は、 $f = 1 \sim 2 \text{ kN/m}^2$ ($0.1 \sim 0.2 \text{ t/m}^2$) と考えられ、それが実



図ー１ 泥水式推進工法のシステム図



図ー２ 管周混合推進工法のシステム図

現されています。これであれば $\phi 1350$ ヒューム管で約600m～1 km以上を推進できることになるわけです。

施工の話に戻りますが、本工区の基本工法は「泥水式推進工法」としました。完全密閉された泥水圧により切羽を制御できることが、高い地下水圧による崩壊性の地山に対して最も安全であり、掘削排土を流体輸送で行うことが、長距離施工に対して効率が落ちることなく最も有利となります。

そして1 kmを達成するための推力低減システムとして「管周混合推進工法」を付帯することになりました。

管周混合推進工法は、掘進機のすぐ後に配置する先端滑材注入装置($\phi 1350$ にて注入孔12カ所)から管外周に滑材をまんべんなく注入すると同時に、地山と滑材を攪拌混合し、管外周の地山を2～3 cmの厚さで均等にせん断抵抗の小さな土質に改良します。また100m間隔に推進管を多孔管($\phi 1350$ にて注入孔4カ所)とした中間注入装置を設置して、さらに管外周にまんべんなく滑材を注入することにより低い推進力を維持できるとする工法です。滑材注入は推進速度と自動的に連動して行われ、注入圧力に対しても自動的に制御されます。本工区においては、鋼・コンクリート合成管に注入孔・攪拌装置を装備して先端注入装置とし、中間装置を9カ所設けて滑材注入を行うこととしました。

計画推進力については、工法算定式に基づき、管外周面抵抗値 $f = 2 \text{ kN/m}^2$ として、曲線抵抗を加味して総推力12,182kNと算定しました。これに対し、区間後部は70N/mm²管(耐荷力8,399kN)を使用し、元押し設備11,760kN、中押し設備490kN×1段を配備しました。しかし、推進力の管理目標は、管外周面抵抗値 $f = 1 \text{ kN/m}^2$ 以下を目指し、計算推進力の50%である総推力6,000kNで、中押しを作動させることなく、元押しのみで到達させることを目標としました。

そして結果は、図に示すように、掘進中の最大推進力は到達直前で4,533kN (462t)、掘進機回収時には4,778kN (488t)となり、計算値の約

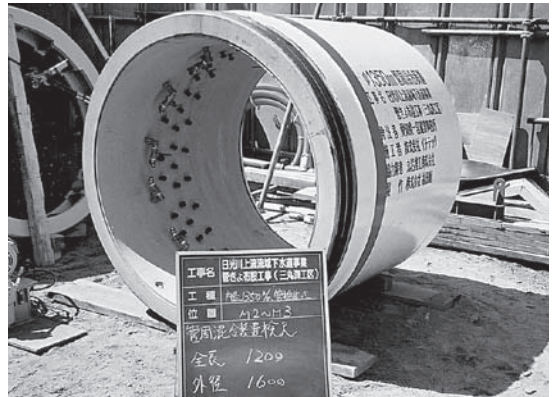


写真-4 掘進機のすぐ後に配置する先端滑材注入装置

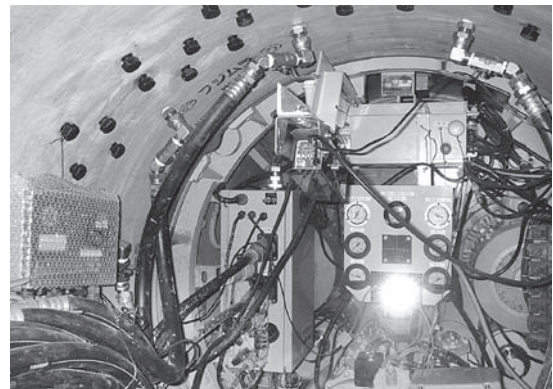


写真-5 先端注入装置の内部、滑材を注入し、ピンで地山と滑材を攪拌・混合する。

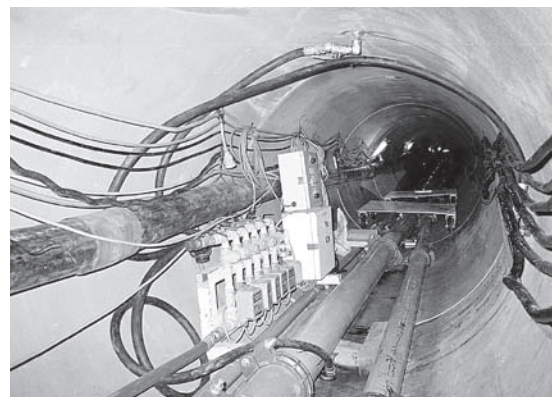
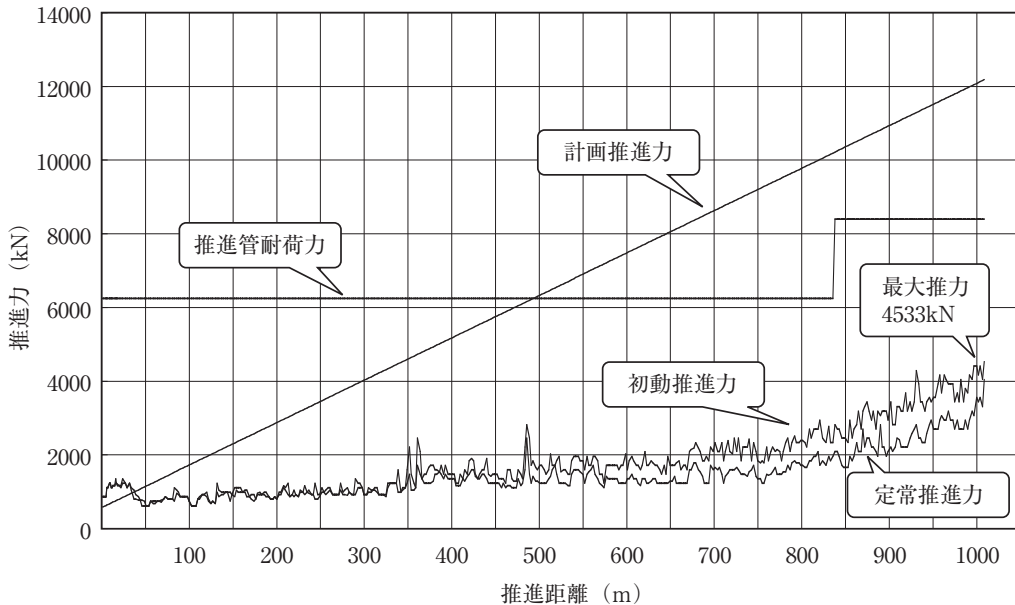


写真-6 中間注入装置、多孔管から滑材を管外周にまんべんなく注入する。



図－3 推進力の実績グラフ

40%にて管理目標を達成できました。外周面抵抗値に直せば、 $f=0.9\text{kN/m}^2$ であり、最終の急曲線に入る前は、 $f=0.5\text{kN/m}^2$ を維持し、極めて低い推進力を実現できました。

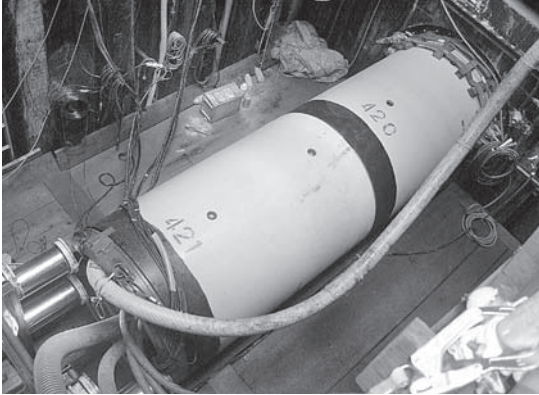
推進力の変動は、後半500m以降から、管据付後(2.43m/本)の推進開始時の初動推進力と定常推進力の値には徐々に差が生じてきて、始動した初動推進力から30～40%減少して定常推進力となっていました。しかし、前日の作業終了後に対する翌日の作業開始時の、いわゆる縁切りの推進力が大きく増大することはなく、推進期間中の日曜日はほとんどを休工としており、日曜日を休工してもこれが大きく変わることはありませんでした。土中の流木に遭遇して、推進力が一時的に増大したことはありましたが、1 kmの施工において最も大きな課題とされた推進力が施工中に危惧されることはありませんでした。

また、推進力の増大防止においては、切羽を安定させて掘進することも重要であり、軟弱土で掘削抵抗はほとんどありませんでしたが、切羽の安定を損なえば地山が崩壊し、管外周のテールボイド(余堀部)が安定維持されず推進力増大が起こる

ため、安定液である泥水の管理と取り込み土量の管理も十分に行いました。

注入する滑材材料については、摩擦低減効果に優れ、かつ管周混合推進工法に対応すべく、滑材と土砂の混合物での摩擦低減効果にも優れ、また1 kmの施工に対して圧送性に優れることが要求されましたので、一液タイプの粒状滑材を使用しました。

滑材注入量は、先端装置から $\phi 1350$ 管の標準滑材注入量である推進延長1 mあたり101リットルを、中間装置からは1 mあたり51リットルを9カ所からそれぞれ推進速度に応じて注入する計画で、ほぼ計画通りの累計320 m^3 の総注入量となりました。滑材はやみくもに大量に注入すればいいのではなく、掘進直後からただちに注入し、管外周および延長方向にまんべんなく注入することが必要だと考えます。これを実行するには、1 kmの施工において人為的に行うことは不可能であるため、管周混合推進工法をはじめとする自動的な推力低減システムが必要であり、低推力を維持できるとする、その推力低減効果は本工区の施工で実証できたと思います。



写真一七 発進立坑の推進状況



写真一八 複数の注入装置により滑材を注入



写真一九 使用滑材はネオモール21〜松村石油(株)



写真一〇 遠隔操作による掘進機の操作

3.2. 精度

管渠はその機能のために、所定の方向、勾配および高さを保って築造されなければなりません。

管推進工では、推進管が仕上がりとなるので、二次覆工が行われるシールド工法より、むしろ高い施工精度が要求されるともいえます。シールド工法の精度管理は、リアルタイムの姿勢検知および位置検知システムが標準で装備されますが、推進工法においては、施工延長および工期が短いことから、管理システムを導入した場合にそのコスト比が大きくなってしまったため、通常はシールド工法と同程度の精度管理システムが投入されることはありません。

推進工法の一般的な精度管理は、姿勢検知は掘進機に装備されたピッチ角とロール角の検知器で行い、方位角を示す装置は通常装備されません。

また位置検知は200mまでの直線であれば、発進立坑に据え付けたレーザーセオドライトから、計画方向・勾配をもったレーザー光線を掘進機のターゲットに照射して位置検知をします。曲線施工の場合は、レーザー光線が照射できないので、見通し可能な任意の位置にトータルステーション・レベルを設置して人力にて計測し、ポケットコンピューター等で座標計算を行って、計画方向線とのズレを計算します。推進工法においては、管が順次押し進められて動くため、管内に基準点を設けることができず、管1本(2.43m)に1回〜3回行われる測量は、その度に基線が設けられている発進立坑から計測をすることになり、時間と手間がかかります。また測量の補正をするために、シールド工法のように、地上からセグメントに貫通する観測孔を設置することはできません。

掘進機は十分な方向修正機能を備えるため、今回の1 kmの施工に關しての課題は、姿勢検知と位置検知をいかに行うかにありました。推進工法の一般的な精度管理方法では、4回の曲線部を含む1 kmの施工に対しては明らかに不十分です。姿勢検知については、掘進機に裝備されるピッチ角とロール角の検知に加え、ジャイロによる姿勢検出装置を設置し、方位角の検知を行い、掘進機の姿勢制御を行いました。

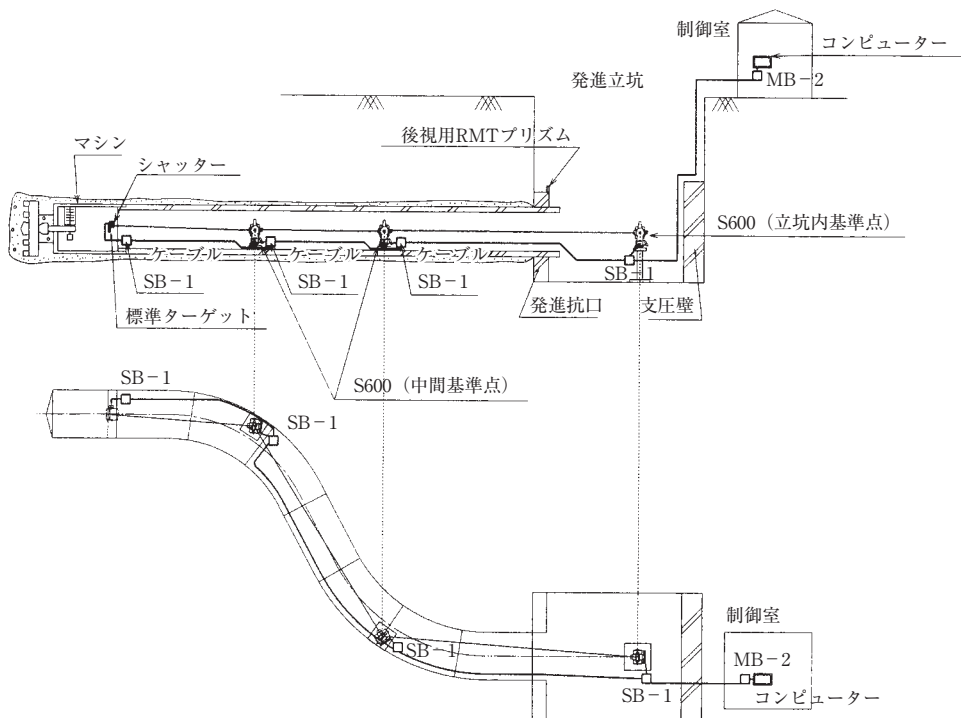
位置検知については、1 km施工において、人力による測量では、その労力・所要時間(1～2時間)を考えればそれに頼ることは難しく、推進工法用に開発された推進自動測量システムを投入することにしました。推進自動測量システムは、管内の見通し可能範囲をつなぐ位置に自動追尾式トータルステーションを配置し、互いの位置を自動計測して、それらのデータをパソコンで演算することで掘進機位置の座標(x,y,z)を短時間(10分程度)

で算出し、計画位置とのズレを表示するシステムです。

自動測量システムによる測量を管1本(2.43m)に1回～3回の頻度にて行い、これに対し1日に1回の頻度にて人力による測量により確認をし、さらに推進期間中に2回、第三者である測量会社によりジャイロコンパスを利用する坑内測量による照査を行うことにしました。

精度管理目標は、レベル鉛直方向・センター水平方向とも誤差を50mm以内としました。さらにレベルについては、リアルタイムで検知を行い、水圧差による水レベル検出装置にてレベル変化を計測しました。

推進自動測量システムによる測量結果は十分信頼できるものであり、人力による確認測量結果との差は十分許容できるものでありました。自動測量システムの信頼性を確認できたため、後半は人力による確認測量の頻度を減らしました。到達手



図一 4 自動測量システムの概念図～(株)ソーキ

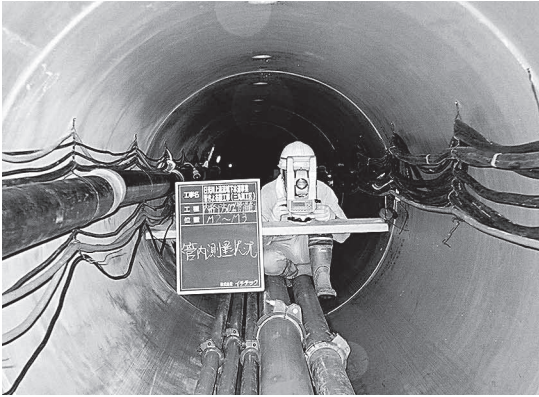


写真-11 人力による坑内測量

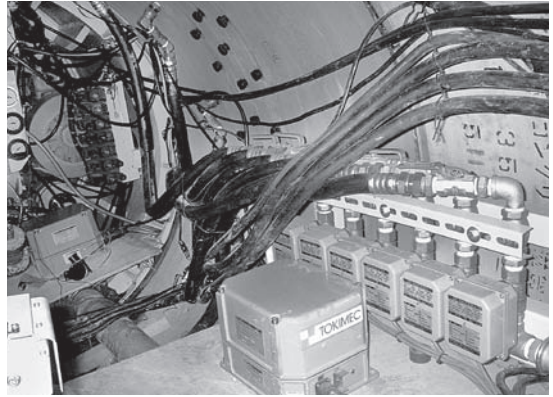


写真-12 掘進機に配置されるジャイロ姿勢検出装置
TMG-12BS～(株)トキメック

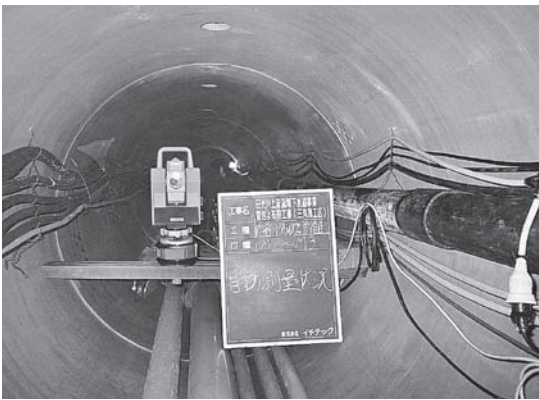


写真-13 管内に設置された自動追尾の
トータルステーション



写真-14 パソコンにより測量結果は短時間に演算される

前15m付近で行った測量結果の照査では、自動測量システムと確認測量の結果の差は、水平・鉛直方向とも10mm以内でした。

到達時の管内測量結果は、レベル鉛直方向のズレ35mm・センター水平方向のズレ31mmでした。そして掘進機を解体して既設人孔に連絡した最終成果は、レベル鉛直方向のズレ27mm・センター水平方向のズレ175mmとなりました。レベルは十分な結果となりましたが、センター水平方向は残念ながら大きな誤差となってしまいました。この誤差による人孔での既設管との連絡には問題がなく、長距離施工のやむを得ない誤差として許容いただきましたが、この誤差の要因を分析したところ、管内測量には問題がなく、到達位置が曲線区間中であることによる掘進機の屈曲姿勢のズレ

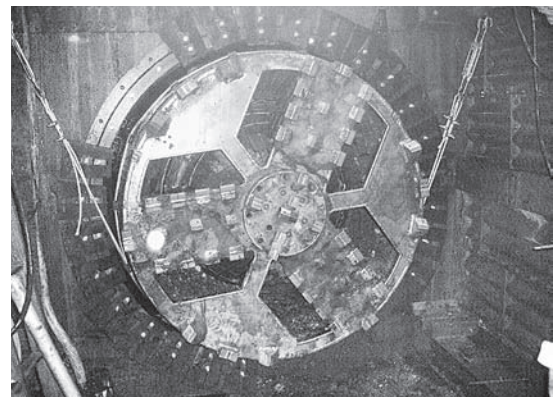


写真-15 到達した掘進機

と基本測量の中のほんのわずかな誤差(角度にして20°程度)により生じたものと分析し、今後の課題となりました。精度管理については、推進工

事費の1割以上の費用を投入し、推進工法の現状で考えられるできるかぎりの配備をして、必要な品質は何とか確保できたと考えています。

施工データ

推進施工期間；平成15年5月～8月
掘進期間；平成15年6月4日～8月8日
掘進日数；60日 昼夜2交代施工
平均日進量；16.8m
最終推進力；4,533KN (462t)
到達精度；レベル+27mm、
センター左175mm

4. まとめ

推進工法の発展より、遂に1 kmの推進工は達成され、今後も1 kmを超える長距離の推進工事の実績は積み重ねられていくと思われます。ただし施工については、問題意識をもって、今後考えられなければならないことも多くあると思います。先にも述べましたが、推進工事はシールド工事に対して、工期およびコスト面で圧倒的優位である反面、管理方法等は最低限必要なレベルで考えられています。シールド工事現場と推進工事現場の両方をご覧になったことのある方は同感されると思います。一般的な推進工事については問題ありませんが、シールド工法に匹敵する長距離化に対しては、さらなる施工方法の向上が必要だと思っています。

姿勢検知・位置検知システムを標準化するなど、シールド工法の精度管理レベルに追いついていくべきであり、作業環境の向上についても考えていく必要があると思います。マシンの遠隔操作・測定の自動化をしても、機械点検・測量確認・曲線造成の開口調整のための管内作業は避けられず、長距離化により、その労力は厳しくなっていくま

す。管径の選択においては、管渠の必要機能だけでなく、作業性が考慮された口径にするべきで、1kmの施工は良好な管内の作業性が確保されるφ1350以上で行うべきだと実感しました。

推進とシールドの最も大きな違いは、推進の場合はマシンが自分では前へ進めないことです。発進立坑から順次に連結される管に押されなければならず、推進力の増大が起これば前へ進めなくなる。これが推進工法のリスクです。推進力の相手は、地下自然界の一定であることのない土や石や水であるため、推進力は積み重ねられた研究・経験をふまえて算出されてはいるものの、あくまでも推測値であり、重力のように完全に把握されたものではないのです。この推進力をもっと完全にコントロールすることができれば、長距離施工の安全性がさらに向上されるでしょうし、1 kmどころかさらに延長が延びて、ひょっとしたら10年後には2 kmの話をしているかもしれません。今は難しいと思われますが、2 kmを施工できる技術を目指していけば、1 kmを施工することに対しては安全率が2となって、安心して施工ができることになるでしょう。

推進工法は、ここ十数年でめざましい発展を遂げて長距離化し、1 kmまで施工可能となりました。今後はシールド工法に追いつき追い越していくためにも、作業環境に配慮して、安心して施工ができるように、リスクに対して十分に安全率をもつ、施工の安全性を重視した推進工法の研究・開発・計画・施工がなされていくことを望み、推進工法の発展に寄与していきたいと思っています。

最後に施工にあたって多大なご指導・ご協力を頂き、今後の推進工法発展のために、この1 kmの施工を実例をもって紹介させていただいた発注者である愛知県、元請会社である(株)イチテック(伊貝星治社長、丹羽豊所長)には、心から感謝の意を表します。

○問合わせ先 丸岩推工(株)<http://www.mriwa.com>