

10. 小口径長距離曲線推進工法（マイクロ工法）の開発

木村 巨宏

村上 譲二

要 旨

近年、小口径推進工法の採用が飛躍的に増加しており、様々な新工法が開発されている。しかし、小口径では管内に入がって測量等の作業を行うことができないため、今までの技術では小口径曲線推進の施工はできないとされてきた。

この問題を解決するため、曲線対応掘進機、曲線誘導機、自動測量システム等からなる小口径推進工法で長距離急曲線施工を精度よく行うことができる新工法「マイクロ工法」を開発した。

本報告では、その開発概要と実証実験結果について述べる。

キーワード

小口径推進／長距離推進／曲線推進／自動測量

目 次

1. はじめに
2. 工法の概要
3. 施工手順
4. 実証実験
5. あとがき

10. DEVELOPMENT OF SMALL APERTURE PIPE JACKING METHOD FOR CURVED LONG SECTIONS (M.I.C.L.O.METHOD)

Nobuhiro Kimura

Joji Murakami

Abstract

As there has recently been a dramatic increase of adoption of small aperture pipe jacking method, various new construction methods are being developed. With the conventional technology, however, small aperture curve pipe jacking was considered inapplicable because small aperture pipes make it impossible for operators to work inside for surveying and other purposes.

Striving to solve this problem, we developed a new method called M.I.C.L.O. Method (micro tunnel, curve long) which consists of a curve tunneling machine, curve guidance machine and an automatic survey system that manages precise small aperture pipe jacking operation over curved long sections.

In this paper, we outline the method and report verification test results.

1. はじめに

近年、ライフラインの整備が大都市から中小都市へとその比重を移していく中、小口径推進工事へのニーズは大きく増してきているが、交通・環境の問題もあって、年々、立坑用地を確保するのが困難となり、いきおい長距離推進を可能とする工法開発への期待が高まってきた。さらに曲がりくねった道路線形や輻輳した地下埋設物等への対応から曲線推進を可能とする工法の実現も要望されてきている。しかし、今まで小口径管を精度良く長距離曲線施工できる工法は全くなかったといってよく、長距離あるいは曲線施工を必要とする場合には、作業員が推進管内で作業できる限界である口径 $\phi 800\text{mm}$ 以上での施工が一般的であり、経済性よりも施工性を重視して行われているのが現状である。

今回、これらの問題を解消するため、小口径で長距離曲線施工を精度よく行うことのできる推進工法「マイクロ工法」を開発した。以下、このマイクロ工法の概要と機器・システムの構成、および実証実験の結果について紹介する。

2. ミクロ工法の概要

2.1 ミクロ工法の概要

本工法は、小口径管を対象にした泥水2工程方式の推進工法であり、最長300mまでの長距離と最小曲率半径30mの急曲線施工を可能とする工法である。

図-1にその工法概要図を示すが、この工法は、マイクロ工法掘進機、誘導機（強制・自在型）、走行計測ロボット等の開発によって小口径管曲線施工を可能としたものであり、新型滑材注入装置と流体輸送を補助するポンプを装備したポンプ筒を開発したことによって長距離施工を可能とした。

また、掘進機のオーバーカット量を最小限に抑える工夫を加えたことで、従来の長距離曲線推進工法と比べ、地盤の沈下量を最小限に止めている。

本工法の施工は2工程方式で行う。一工程目では掘進機の後部にポンプ筒や誘導機を順次接続して到達立坑まで掘進する。立坑に到達すると、二工程目にマイクロ工法用推進管を接続推進し、誘導機と置換して推進管を設置する方式を採用している。

掘進時の方向制御は、走行計測ロボットで計測した測量結果をモニターで確認しながら掘進機・ポンプ筒・強制型誘導機に装備しているジャッキを遠隔操作して行う。

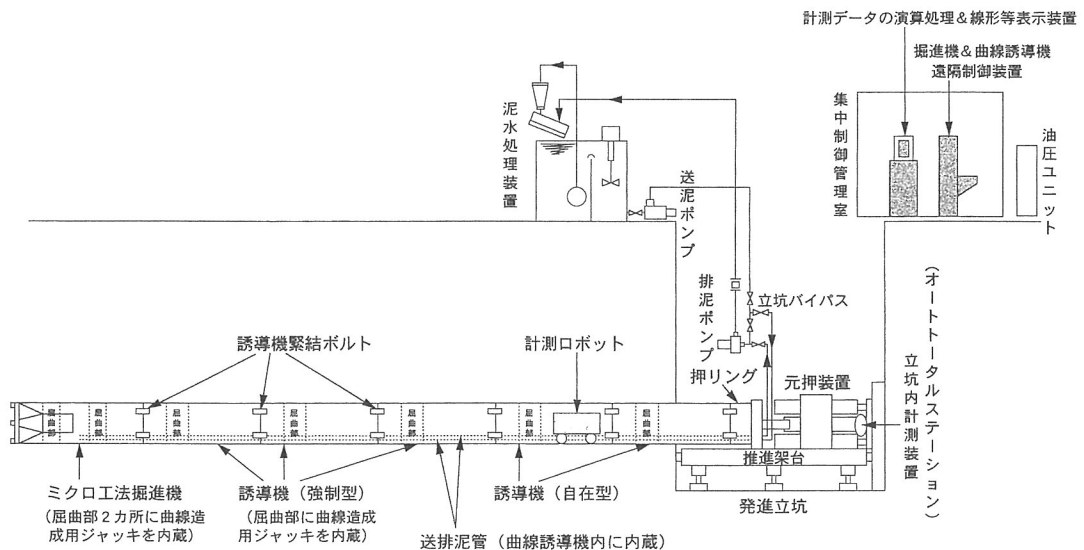


図-1 工法概要図

2.2 工法を構成する機器

(1) ミクロ工法掘進機

本機は偏心式クラシャーヘッドを備えており、コーンクラシャーでマシン外径の1/3以下の礫を連続的に破碎することのできる、かつ効率的なスラリー輸送が可能な掘進機である。

また、本機は機器の前方に方向制御ジャッキを、後方に曲線造成ジャッキを装備しており急曲線に対応できる構造である。

表－1 にその仕様を、図－2 にその構成図を示す。
写真－1 は掘進機の全容を示す。

表－1 掘進機の仕様

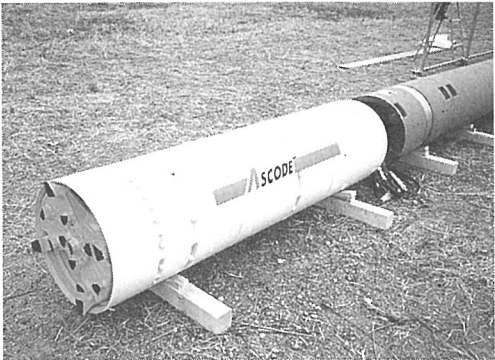
呼び	径 (mm)	400
外	径 (mm)	560
機	長 (mm)	2,193
ヘッド関係	動力 (KW)	3.7
	回転トルク (tf/mm)	50HZ 0.84 60HZ 0.70
	回転数 (r.p.m)	50HZ 3.6 60HZ 4.3
	偏心回転数 (r.p.m)	50HZ 86 60HZ 103
	礫破碎方式	前面破碎方式
	取込最大礫径 (mm)	180
	ジャッキ推力×本数 (tf/本)	12tf×2本×2ヶ所
	制御角 (度)	上下1.2° 左右2.3°
方向制御	方向姿勢	平衡棒式指示計 (角度表示)
電源	動力系	AC400/440, 50/60HZ
	操 作 系	AC100/110, 50/60HZ

(2) ポンプ筒

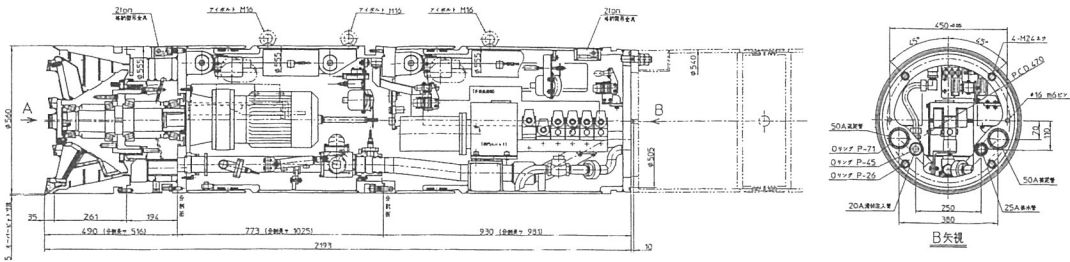
ポンプ筒には、排泥を流体輸送する補助ポンプと、誘導機と土の間の摩擦抵抗を減らすための滑材注入装置 (管周混合装置) を装備している。推進距離が概ね100m以上となる場合に掘進機の直後に配置する。表－2 にその仕様を、写真－2 にポンプ筒の全容を示す。

表－2 ポンプ筒の仕様

ポンプ関係		方向制御関係	
口 径 (mm)	50	ジャッキ推力	tf 本 屈曲部 12×2×2
揚 程 (mm)	19		
揚 水 量 (mm)	300	屈曲角 (度)	上下 1.2 左右 2.3
動 力 (1/min)	400V-9kw	ジャッキ圧力	140kgf/cm ²
周波数 (HZ)	50 60		
回転数 (r.p.m)	1450 1740		



写真－1 掘進機



図－2 掘進機の構成図

(3)誘導機

誘導機は、曲線推進に対応できるように上下をピン構造で支持される中折れ機構を有し、配管部分は屈曲部で曲がるよう伸縮スライド機構を採用している。誘導機には強制型と自在型の2種類がある。強制型は屈曲部の左右にジャッキを装備しており、強制的に屈曲させたい計画平面線形を設定、保持し、また修正する



写真-2 ポンプ筒

表-3 誘導機の仕様

呼 び 径 (mm)	400	
	強 制 型	自 在 型
外 径 (mm)	540	540
機 長 (mm)	2,400	2,400
油圧ジャッキ	5t×2本	—
送泥管径 (mm)	50	50
排泥管径 (mm)	50	50
滑材注入管 (mm)	50	50
排水管径 (mm)	50	50
屈曲角度 (度)	Max=2.5	Max=2.5

ことが可能である。自在型は、強制型のようにジャッキを装備していないが屈曲できるため、掘進機および強制型誘導機の掘削軌跡に追従して推進する。表-3にそれぞれの誘導機の仕様を、写真-3に強制型誘導機の内部の状況を、写真-4に誘導機の外観を示す。また図-3に強制型誘導機の構成図を示す。

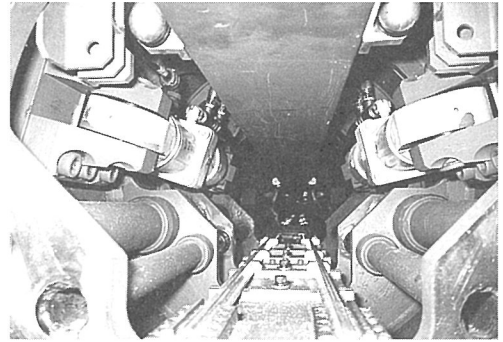


写真-3 強制型誘導機の内観



写真-4 誘導機の外観

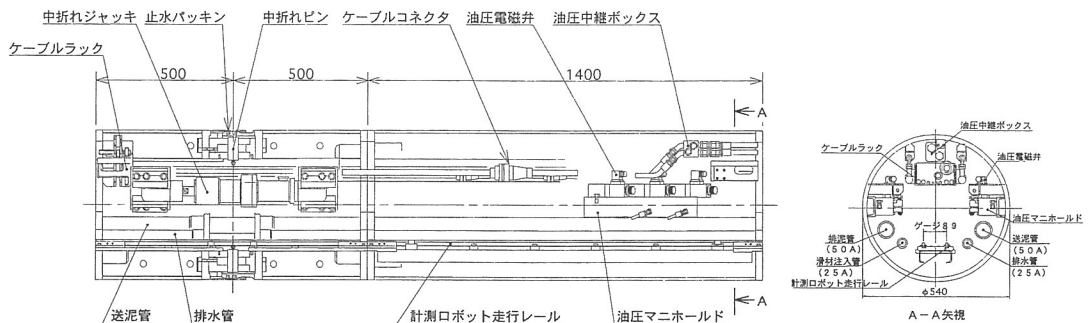


図-3 強制型誘導機の構成図

(4) ミクロ工法用推進管

推進管は急曲線施工であっても十分な止水性を保持できる機構を保有している。急曲線施工の際、推進管の継手部分に生じる内目地の開きに対応できるよう独自の内カラー方式を採用しており、滑らか通水断面の確保を可能としている。図-4に推進管の寸法と形状を、図-5に継手部の内カラーの詳細を示す。

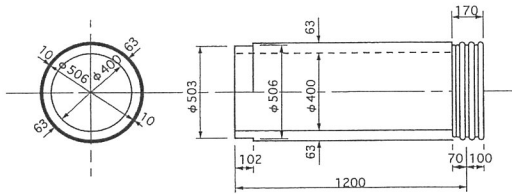


図-4 推進管の寸法と形状

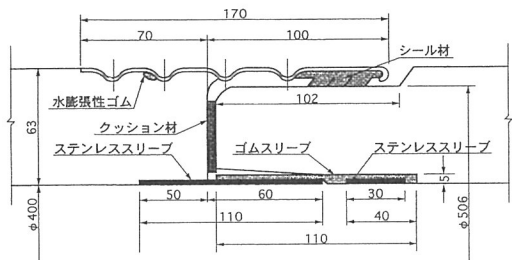


図-5 継手部の内カラー詳細図

2.3 自動測量システム

本工法の測量システムは、一工程目において、誘導機一本を推進完了する毎に行う「本測量」と、推進中リアルタイムに測量する「リアルタイム測量」の2方式の採用によって、掘進機と誘導機の位置姿勢を自動計測するシステムである。立坑部、走行部、掘進部で計測を行い、それぞれ得られたデータは通信によって地上の中央制御室へ伝送され、その演算結果をモニターに表示する。本システムの概要を図-6に示す。

平面計測はジャイロセンサー、加速度計等を搭載した計測ロボットによる走行計測データおよび立坑に据え付けたトータルステーションからの起点計測データならびに掘進機、誘導機のジャッキストロークなどからの掘進部計測データをもとに、掘進機と強制型誘導機の位置座標、姿勢を演算処理し、結果を表示、出力する。

縦断計測は水盛り式水位計を用いて測定し、掘進機等の位置姿勢は平面計測と同様にジャッキストロークなどから演算処理し、結果を表示、出力する。

①立坑計測部

発進立坑において、計測ロボットの初期方位角及び位置を測定するために、トータルステーションにより計測ロボットに取り付けたミラー、プリズムを視準し、トータルステーションの十字線がミラーに写った十字線と正対した時の基準点からの角度と、トータルステ-

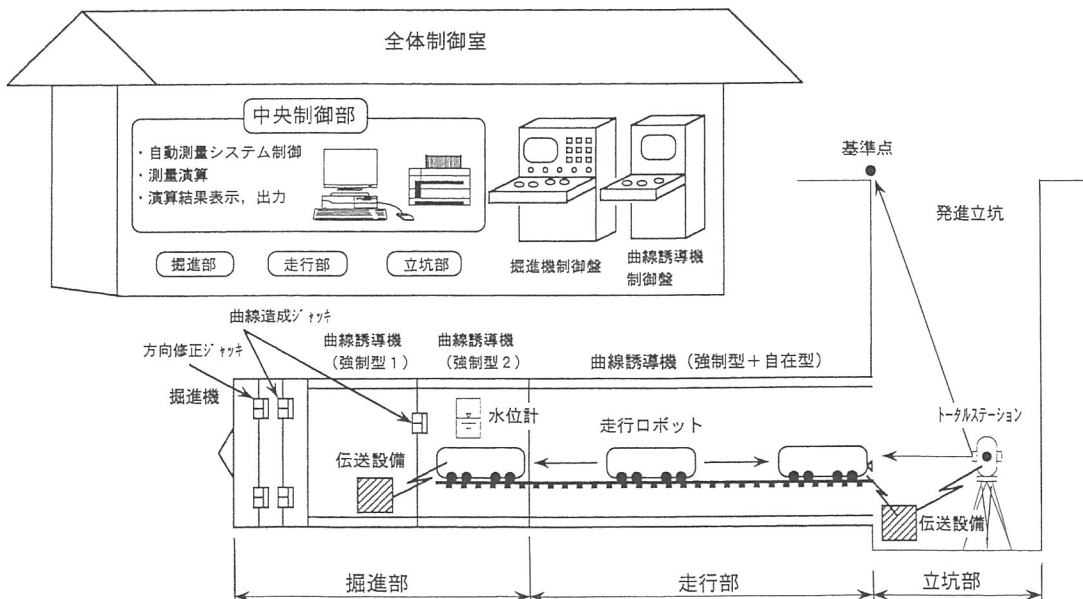


図-6 測量システム概要図

ションからプリズムまでの距離を計測する。計測した角度と距離は通信によって自動的に中央制御部に伝送される。

②走行計測部

立坑部停止位置から掘進部停止位置までの相対位置を求めるため、高精度方位計、加速度計、高精度距離計等を搭載した計測ロボットを誘導機内の軌条上を自動走行させ、距離と方位角を連続計測して走行した軌跡を計測する。図-7に計測ロボットの構成図を、写真-5に計測ロボットを示す。

方位角の検出は超高精度のリングレーザージャイロを採用し、距離計にはロータリーエンコーダーを使用している。また、距離計測はどのような走行条件であっても一定の精度が確保できるようにと、軌条上に一定間隔に設置したマグネット磁石間の距離を磁気センサーで読みとることで、定点補正ができるようにしている。

③掘進計測部

掘進部停止位置での計測ロボットの方位角・座標から掘進機の位置姿勢を求めるため、機内に設置してあるジャッキストローク計、ピッチング計、ローリング計等で計測したデータを演算処理する。

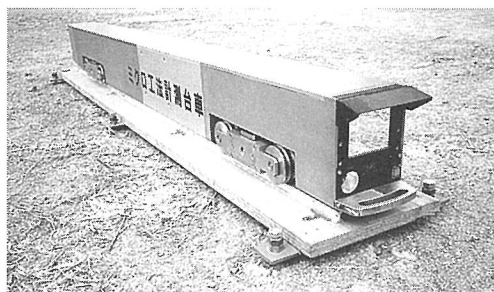


写真-5 計測ロボット

2.4 工法の特長

本工法は以下①～⑥にあげる特長を持つ。

①300mの長距離推進

耐荷力の大きい鋼製の誘導機と、掘進機後部に新型滑材注入装置を取り付けることで、周辺土との摩擦抵抗を減らし、1スパン300mの長距離推進を可能としている。

②半径30mまでの急曲線施工

ジャッキによって屈曲角のコントロールが可能な強制型誘導機が先行して曲線を造成し、これらに続いてピン構造を有する自在型の誘導機が先行機に追従する方式を採用しているため、半径30mまでの急曲線施工が可能である。

③平面誤差が50mm以内の高精度施工

高性能ジャイロを搭載した計測ロボットが、誘導機内の軌条を走行して推進方向の軌跡を求めることができるので、急曲線・長距離であっても短時間で高精度の測量が行える。掘進中も計測ロボットで掘進機の方や移動距離をリアルタイムに測量しているため、測量結果と計画値とのズレを画面上で確認することができる。掘進機と強制型誘導機によって屈曲角をコントロールできるため、推進距離300mに対して誤差が50mm以内という高精度の施工が可能である。

④縦断誤差が30mm以内の高精度施工

水位計によって、水頭差を感知できるため、どのような線形でも高精度の計測と、高精度な施工が可能である。

⑤測量作業の省力化

自動測量システムによって、測量が短時間で行え(300mで30分以内)、また一人で管理できるので省力化が図れる。

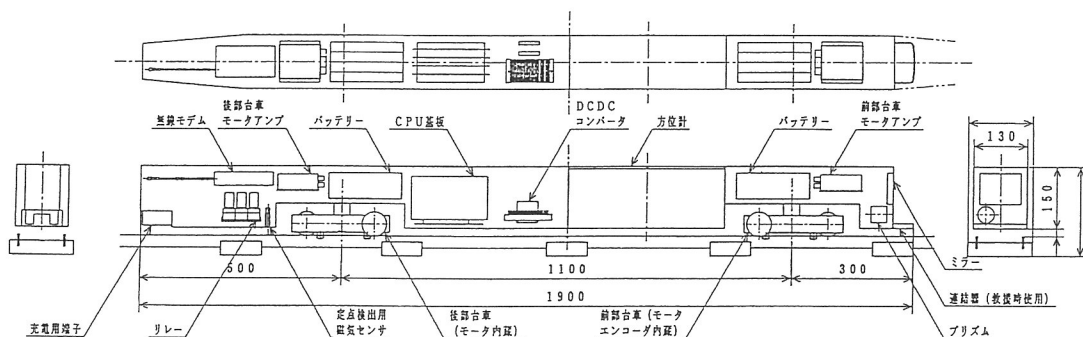
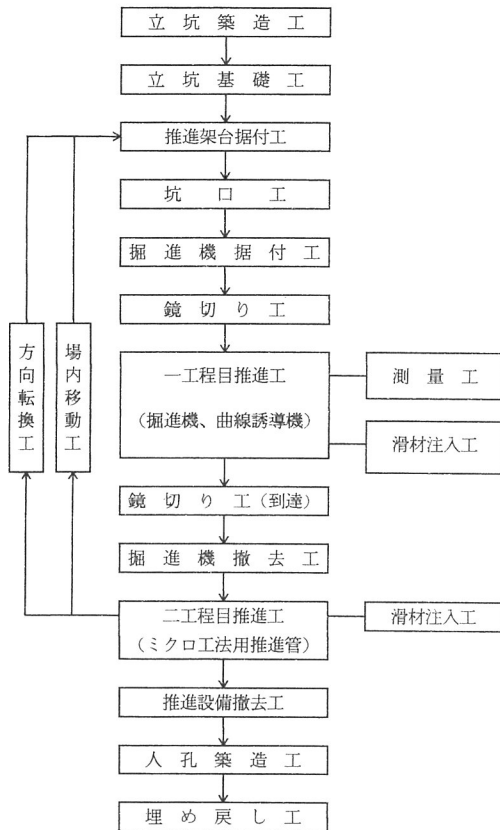


図-7 計測ロボット構成図

⑥ 確実な止水性と滑らかな通水面の確保

継手部にはゴムスリーブを管内からステンレス製のバンドで圧着する「内カラー方式」を採用しているため、確実な止水性と急曲線部での滑らかな通水面が確保できる。

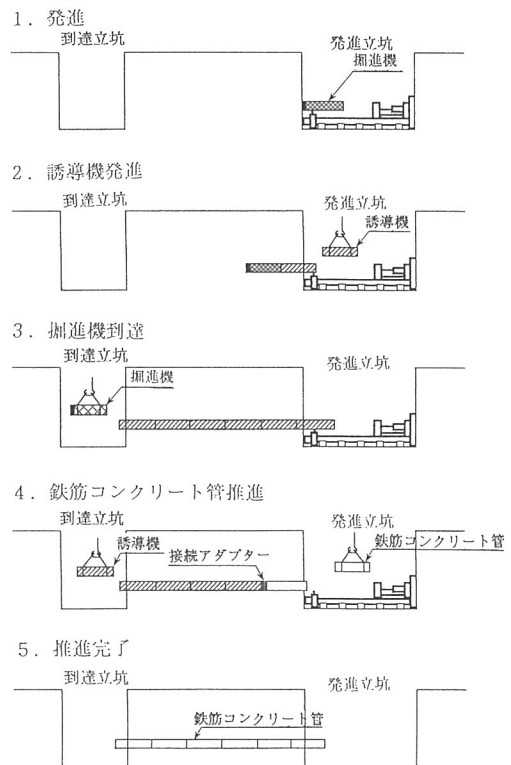


図－８ 施工フロー図

3. 施工手順

本工法は図－８に示す施工フロー、図－９に示す施工概略図に従い施工する。

- ①掘進機を発進立坑に設置し掘進を開始する。
- ②自動測量システムによって掘進機の位置姿勢を計測し、方向修正を行いながら、誘導機を接続し掘進する。
- ③掘進機が立坑に到達後、機器を回収する。
- ④誘導機の後ろに接続アダプターを取り付け、マイクロ工法用推進管を圧入する。
- ⑤マイクロ工法用推進管を１本圧入する毎に誘導機を回収する。先頭の推進管が立坑に到達して工事が完了する。



図－９ 施工概略図

4. 実証実験

4.1 目的

今回の実証実験は、 $R=30\text{m}$ の曲線推進施工が可能かどうかを検証するのが目的である。

掘進機の制御状況、曲線誘導機の操作追従状況、ミクロ工法用推進管の推進状況が要求仕様通りの曲線推進を実現できるかについて確認を行った。同時に測量システムが、仕様通りに作動し所定の精度で測量出来ているかを検証した。今回は推進精度と測量精度について述べる。

4.2 概要

(1)期間

平成8年3月～7月

(2)場所

(株)浅沼組技術研究所に隣接の高槻スーパー堤防用地

(3)路線

推進延長 : $L=60.0\text{m}$

縦断線形 : $s=7\text{‰}$ (上り)

平均土被り : $h=3.0\text{m}$

図-10にその路線計画図を示す。

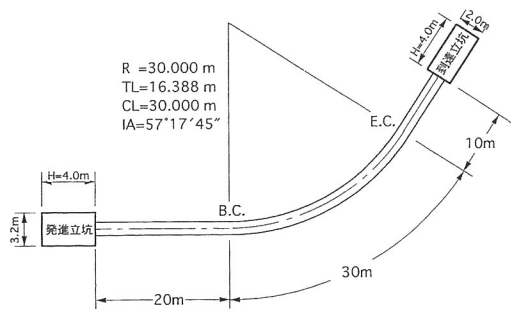


図-10 路線計画図

表-4 到達精度

変位測定値	ロボット計測値	人力測量 (確認)	誤差
水平方向	右 10mm	左 5mm	15mm
縦断方向	上 6mm	上 13mm	7mm

(4)土質

マサ土（埋戻し土、砂礫混じり）

N値 = 9

内部摩擦角 $\phi=18^\circ$

粘着力 $C=0.3\text{kgf/cm}^2$

透水係数 $K=2.8\times 10^{-4}\text{cm/s}$

地下水位 GL-15.0m

4.3 実験結果とまとめ

(1)現地確認

推進距離60mでの到達精度を表-4に示す。数値は掘進機が到達立坑に到達した時の掘進機のセンターを人力によって測量した値とロボットが計測演算した値の計画線からのズレ量である。

図-11は推進精度（平面）を示す。掘進中にロボットが計測演算した値と、掘進後に開削し人力によって測量して得られた値を示す。計画路線を0とし、右側の値を+、左側を-で表す。また、図-12は同様に推進精度（縦断）を示したものである。写真-6に推進完了後開削した時の状況を示す。



写真-6 開削状況

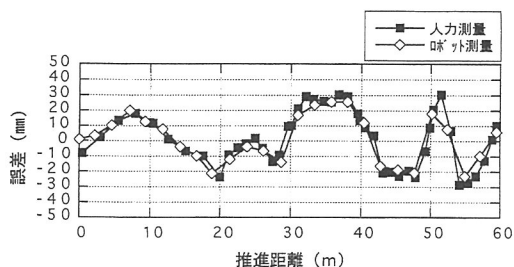


図-11 平面誤差

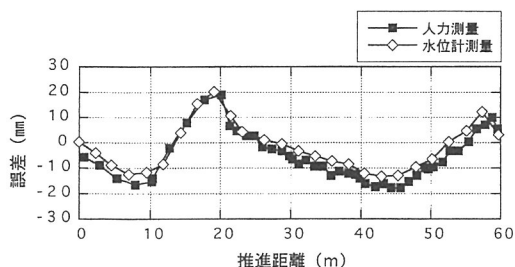


図-12 縦断誤差

(2)まとめ

推進完了後、開削によってその推進精度を測量した結果、ロボット測量によって得られた値と人力測量によって確認した値の差は最大で平面誤差30mm、縦断誤差20mm程度であった。また、推進距離60mでの推進精度（到達精度）は、平面方向15mm、縦断方向7mmであり、開発目標である平面誤差±50mm以内、縦断誤差±30mm以内に収まっていることを確認した。

また掘進機、誘導機、および推進管が正常に機能されていることも確認された。

5. あとがき

今回、 $R=30\text{m}$ の曲線施工を実証実験した結果、施工機器、計測システムとも特に問題となるものは見られず、施工精度は良好であり効率的な施工を行えることを確認した。

今後、ソフト面、ハード面の改善、改良を行うことで、マイクロ工法の完成度が高められるものと考えます。

なお、このマイクロ工法は、測量や建設工事における自動化技術の開発を目的として設立された自動測量研究会（ASCODE）において、ゼネコン14社とメーカー3社との共同研究により開発したものである。