

スーパーマイクロ工法の開発

本社 中村憲司
 本社 笹間和也
 本社 高橋弘樹

概要：平成8年に小口径で長距離曲線推進施工が可能な「マイクロ工法」を開発し、16kmを超える施工実績を積み重ね、社会のニーズである小口径推進の長距離曲線化に应运きた。しかしながら、社会情勢は[工費縮減]という流れとなり、より経済的な技術を求められるようになった。そこで再び、より汎用性・経済性を求めた「スーパーマイクロ工法」を平成14年に共同開発した。

キーワード：スーパーマイクロ工法，小口径推進，長距離推進，曲線推進（カーブ推進），泥水推進，ジャイロ，測量ロボット，自動化測量，高精度，スーパーマイクロ工法用推進管

1. スーパーマイクロ工法の概要

(1) 開発経緯

前述したとおり、社会情勢は[工費縮減]の流れから、施工単価のより経済的な工法が必要とされてきた。マイクロ工法は二工程式であるため、一工程式に比べると少々割高である。その為、マイクロ工法を一工程式にすることで、施工単価を大幅に引き下げられるのは明らかであった。そこで、マイクロ工法を一工程式にバージョンアップしたものがスーパーマイクロ工法である。このために、測量を行う方位センサーを小型化し、推進管内に投入する開発を進めた。それと同時に、長距離推進に必要なヒューム管から滑材を注入できる推進管の開発にも着手した。以上より、マイクロ工法の技術をベースに、より安い施工単価を第一目標に開発を進め、ここにスーパーマイクロ工法が誕生した。

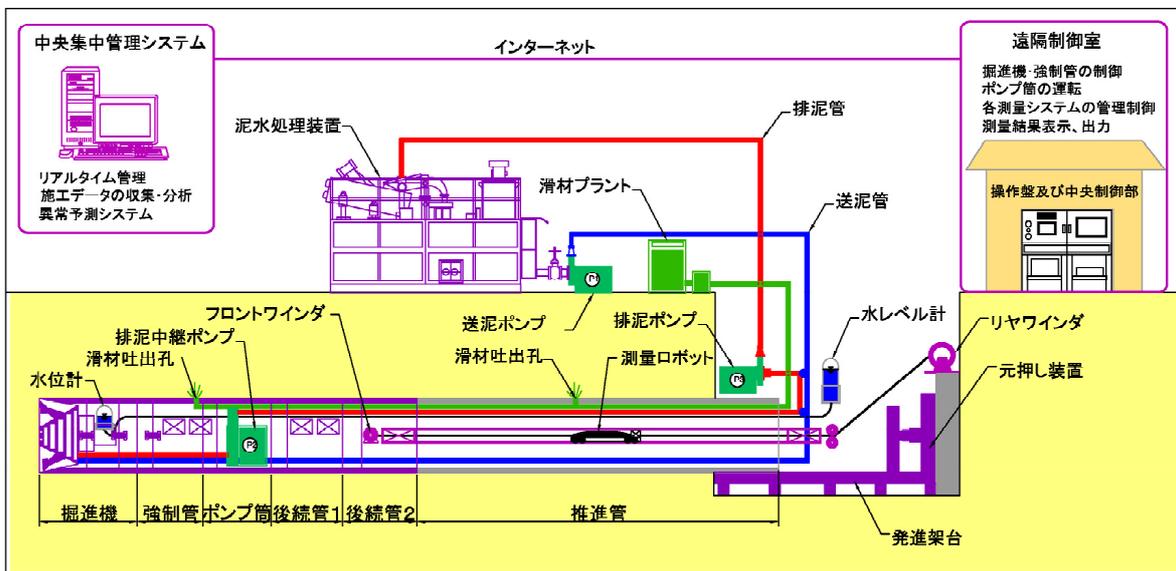


図 - 1 システム概要



中村 憲司
 技術本部
 土木技術第二部



笹間 和也
 技術本部
 土木技術第二部



高橋 弘樹
 技術本部
 土木技術第二部

(2) 工法概要

本工法は、呼び径400, 500, 600の小口径管を対象にした泥水方式一工式の推進工法で、長距離(300m)・急曲線(60m)を高精度に施工可能とした工法である。この工法は、工法用掘進機、強制管、後続管、測量ロボット等の開発により曲線施工を可能とし、ポンプ筒および滑材注入管の開発により長距離施工を可能としている。

また、掘進機のオーバーカット量を最小限に抑えることにより、従来の長距離曲線推進工法と比較して、地盤の沈下量は小さなものになっている。

(3) 施工手順

施工は以下の手順により、管路を構築する。

掘進機を発進立坑に投入し、推進する。

- 1 曲線造成用のジャッキ、滑材注入装置を装備した強制管を掘進機に接続し、推進する。
- 2 流体輸送を補助する中継ポンプを装備したポンプ筒を強制管に接続し、推進する。
- 3 測量ロボットを牽引走行させる装置等を装備した後続管1および後続管2をポンプ筒に接続し、推進する。

-1 地上にて、測量ロボットの走行管、送排泥管をユニット化したインナーユニットを推進管内に挿入し、順次接続して到達立坑まで推進する。

-2 掘進時の方向制御は、測量ロボット等による自動測量システムの測量結果を操作盤の画面で確認しながら、掘進機・強制管に装備した方向制御・修正ジャッキを遠隔操作する方法で制御を行う。

到達後、掘進機から後続管までは到達立坑から回収する。

推進管内部に挿入しているインナーユニットは発進立坑から引き抜き、推進を完了する。

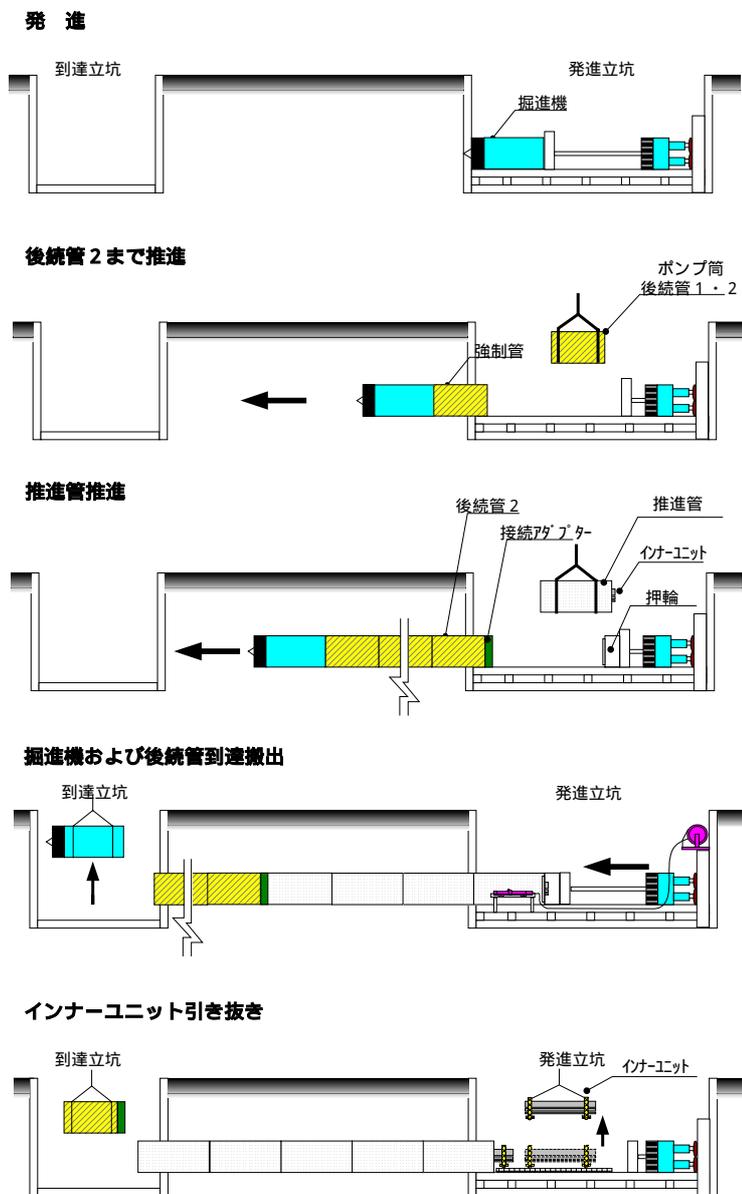


図 - 2 施工手順

(4) 施工機械・機器

a) 掘進機

掘進機には、標準型掘進機、礫対応型掘進機、岩盤対応型掘進機の3種類があり、掘進機タイプを選択することによって広範囲の土質に対応している。掘進機から後続管に至るまで新規開発を実施したため、構造が簡単で、操作・取扱い・メンテナンスが容易である。

標準型機は、機械前面のスポーク型カッタで地山を掘削し、コーンロータの偏心回転運動により、外側コーンとコーンロータから構成されるクラッシャで、掘進機外径の1/3もの大礫を連続的に破壊しながら、効率的なスラリー搬送ができる掘進機である。また本機は、ヘッド、ミドル、テールの3体からなり、2箇所での屈曲部を有する。その屈曲部には、それぞれ方向修正用ジャッキおよび曲線造成用ジャッキを装備し、急曲線(60mR)でも正確な運転操作ができる。

礫対応型掘進機については、軟岩、転石、玉石を含む地盤およびこれらの土質に砂質土、粘性土を含む互層地盤の場合に使用される。また、岩盤対応型掘進機は礫対応型掘進機で対応が難しい岩や転石、玉石混じり砂礫地盤の場合に使用される。面盤にはローラーカッタおよびディスクカッタを装着したカッタヘッドを切羽に圧着させ、同心円の切込みを描きながら回転することで、岩盤を圧砕する構造となっている。

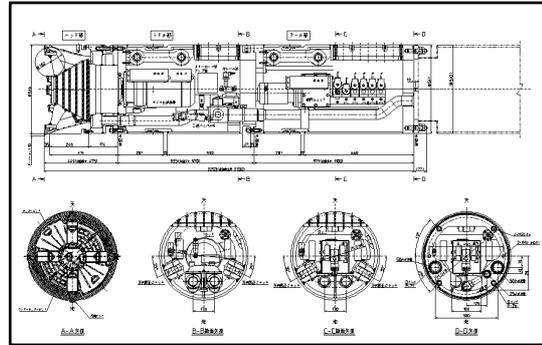


写真 - 1 標準型掘進機

図 - 3 標準型掘進機構造図

表 - 1 掘進機仕様

掘進機種別	標準型			礫対応型・岩盤対応型		
	型式	S400	S500	S600	S400S	S500S
外径(mm)	546	660	780	556	670	800
長さ(mm)	2,253	2,790	2,780	3,450	3,450	3,520
重量(t)	1.4	2.4	3.5	2.3	3.4	5.3
動力	400V/440V 3.7kw-1台	400V/440V 5.5kw-1台	400V/440V 7.5kw-1台	400V/440V 7.5kw-1台	400V/440V 11.0kw-1台	400V/440V 18.5kw-1台

b) 強制管

強制管は、掘進機の次に接続して推力を伝達する機械である。本機は高強度の鋼製で、屈曲部の上下がピン構造となっており、しかも107kNの曲線造成ジャッキを装備することにより、掘進機と共に屈曲角を正確に維持することが可能である。

また、強制管には滑材注入装置が装備されており、管外周から滑材を注入する。これにより、周辺地山に均等に滑材を注入させることが可能となり、推進管と土との摩擦抵抗を低減させることができた。

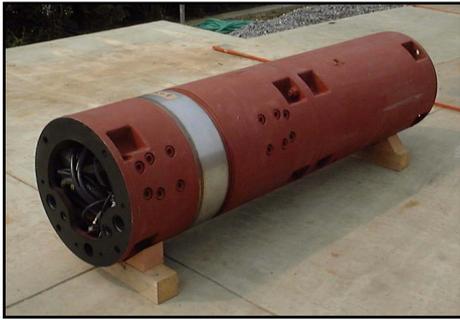


写真 - 2 強制管

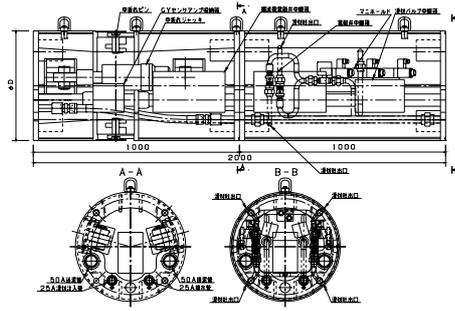


図 - 4 強制管構造図

c)ポンプ筒

ポンプ筒は、長距離推進時に掘進機・強制管の次に接続して推力を伝達する機械である。本機は高強度の鋼製で、屈曲部の上下がピン構造となっており、曲線推進のスムーズな追従を可能としている。また、新規に開発した排泥の流体輸送を補助する管内設置型小型ポンプを装備しており、長距離推進を可能とした。排泥パイプラインには、長距離推進時に対応（ポンプ筒に接続）するための電磁弁を使用している。排泥のための補助としてポンプ筒が必要となるのは推進距離が概ね 100～150m 以上の場合である。



写真 - 3 ポンプ筒

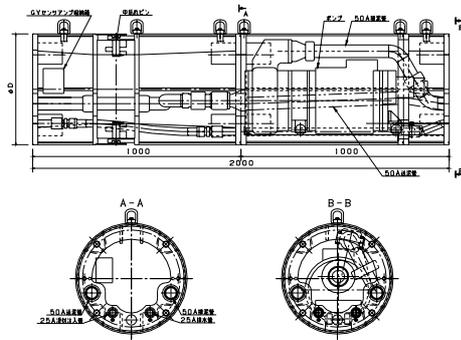


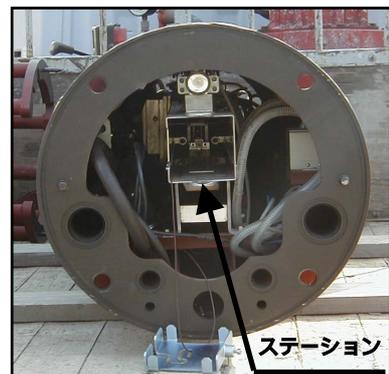
図 - 5 ポンプ筒構造図

表 - 2 標準型ポンプ筒仕様（予定）

呼び径(mm)	400		500		600	
口径(mm)	50		65		80	
周波数(Hz)	50	60	50	60	50	60
回転数(r.p.m)	1,450	1,740	1,450	1,740	1,450	1,740
揚程(m)	23		23		23	
揚水量(l/min)	300		600		800	
動力	400V/440V-11kw		400V/440V-15kw		400V/440V-22kw	
ポンプ筒総重量(t)	0.8		1.2		1.7	

d)後続管

後続管は、強制管（長距離推進時はポンプ筒）の次に接続して推力を伝達する機械である。本機は高強度の鋼製で、屈曲部の上下がピン構造となっており、ポンプ筒と同様に曲線推進のスムーズな追従を可能としている。また、後続管には、後続管 1 及び後続管 2 の 2 種類がある。後続管 1 には掘進機等の機械関係および測量データなどを中央制御へ送るための電装品を装備している。後続管 2 には測量ロボットを牽引走行させるフロントワインダー、及び測量ロボットを停止させ正確に計測するためのステーションを装備している。写真 - 4 後続管 2



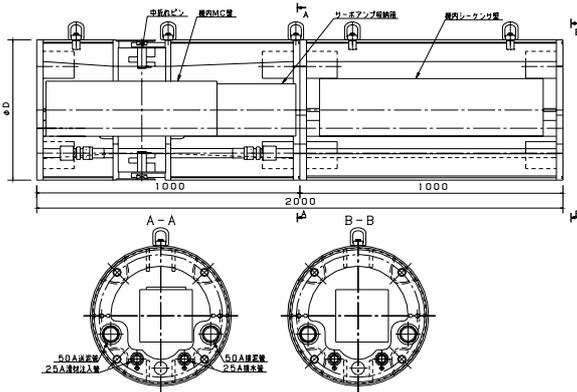


図 - 6 後続管 1

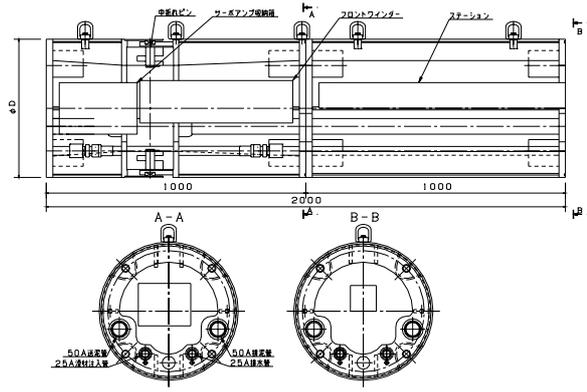


図 - 7 後続管 2

表 - 3 強制管・後続管仕様 (予定)

型 式	S 4 0 0	S 5 0 0	S 6 0 0
推進管外径 (mm)	526	640	760
外 径 (mm)	536	650	770
長 さ (mm)	2,000	2,000	2,000
重 量 (kg/本)	816 (622)	1,224 (938)	1,754 (1,336)
油圧ジャッキ	107kN-2 本 (-)	130kN-2 本 (-)	154kN-2 本 (-)
排泥管径 (mm)	50A	80A	80A
送泥管径 (mm)	50A	80A	80A
滑材注入管径 (mm)	25A	25A	25A
排水管径 (mm)	25A	25A	25A
屈曲角度 (°)	Max = 2.7	Max = 2.7	Max = 2.7

() は後続管を示す。

e) 測量口ポット

測量口ポットは、掘進中の施工線形、掘進機先端の位置計測を人力に変わって行うための装置であり、インナーユニットの走行管内をフロントウィンダのワイヤーまたはリアウィンダのケーブルにより最速で 6km/h のスピードで牽引走行する。発進立坑で計測した初期方位および初期座標と、坑内を走行することによって取得した距離および角度変化のデータを逐次演算することにより、掘進機先端の位置と近似施工線形を求めることができる。また、測量口ポットは方位計にファイバージャイロを使用しており、高精度の測量が可能である。しかも小型の方位計を開発したことによって、測量口ポットも小型化となり一工程での計測を可能とした。

表 - 4 測量口ポット仕様

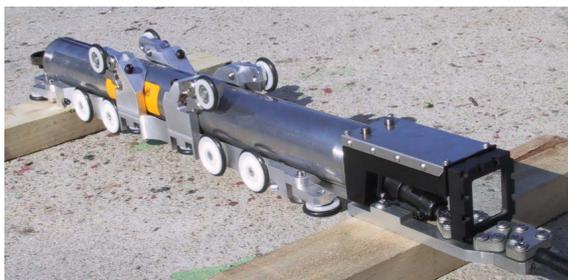


写真 5 測量口ポット

形 式	ワインダー牽引式
重 量	13kg
寸 法	90(w) × 95.6(H) × 915(L)(mm)
構 成 品	<ul style="list-style-type: none"> ・方位計 ・ポットコンピュータ ・台車シャーシ ・磁気センサ ・連結器 ・ロータリエンコーダ ・測距用プリズム ・視準ミラー ・DCDCコンバータ

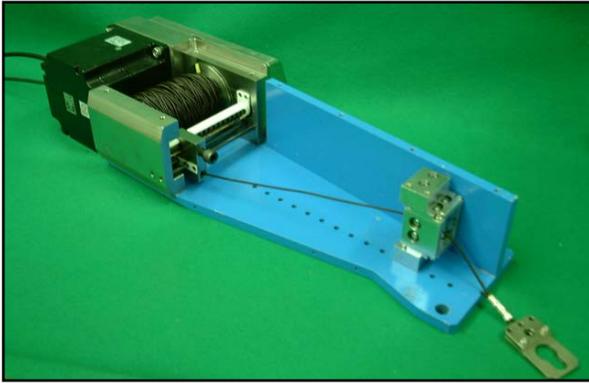


写真 - 6 フロントワインダ



写真 - 7 リアワインダ

f) インナーユニット

インナーユニットは、推進管内に設置する2インチ(50mm)、または3インチ(80mm)の送泥・排泥管、電気ケーブルトレイ、測量口ボットの走行管をユニット化し、挿入接続することによって施工性の向上を図っている。また、このユニットによって、正確な測量を可能としている。ユニットには滑材注入ホース、排水ホース等も付加している。



写真 - 8 インナーユニット

g) スーパーマイクロ工法用管

スーパーマイクロ工法により小口径長距離曲線推進を施工するため、新たに開発した推進管(S型)であり、標準管および滑材吐出管の大きく2種類で構成されている。

管継手は60mRにおいても十分な止水性を確保するために、伸縮可撓性に優れた継手構造を採用している。

なお、推進距離・地山状態によって掘進機先端から任意の間隔(砂質土の場合概ね75m)で3箇所スーパーマイクロ工法用吐出管を設置し、滑材を追加注入することが可能である。そのため、工法用管と土との摩擦抵抗を低減させることができた。

工法用管種は滑材を送るためのシングル・ダブル・トリプル管があり、滑材吐出用のシングル吐出管・ダブル吐出管、トリプル吐出管がある。



写真 - 9 スーパーマイクロ工法用管(トリプル管)

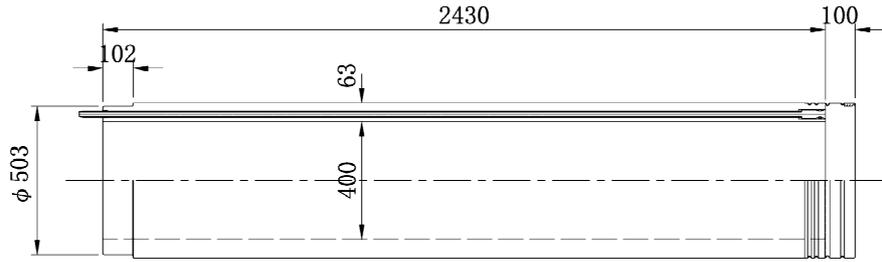


図 - 8 スーパーマイクロ工法用推進管 (S型) (400)

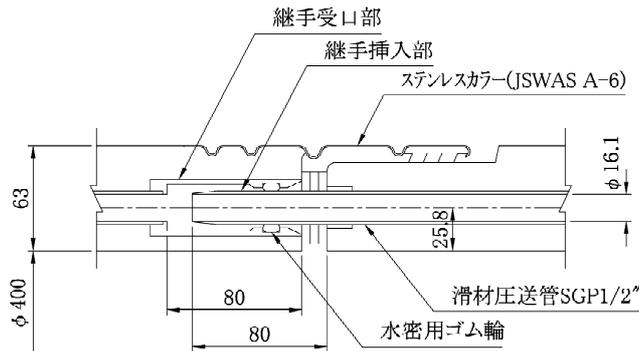


図 - 9 継ぎ手部詳細図

表 - 5 スーパーマイクロ工法用推進管 (S型) 一覧表

推進機種		S 4 0 0	S 5 0 0	S 6 0 0
呼び径		400	500	600
管外径 B c(mm)		526	640	760
管内径 D(mm)		400	500	600
管厚 t(mm)		63	70	80
有効外径 D ₁ (mm)		503	617	731
カラー受口深さ L _{C2} (mm)		100	100	110
耐荷力 F _{R2} (kN)	類(M 5)	950	1,334	1,780
	類(M 7)	1,278	1,796	2,396
外圧強さ (kN/m)	ひび割れ荷重	39.3	44.2	46.1
	破壊荷重	58.9	66.7	69.7
参考質量W(kg)	管長 L=2.43m	548	749	1,030

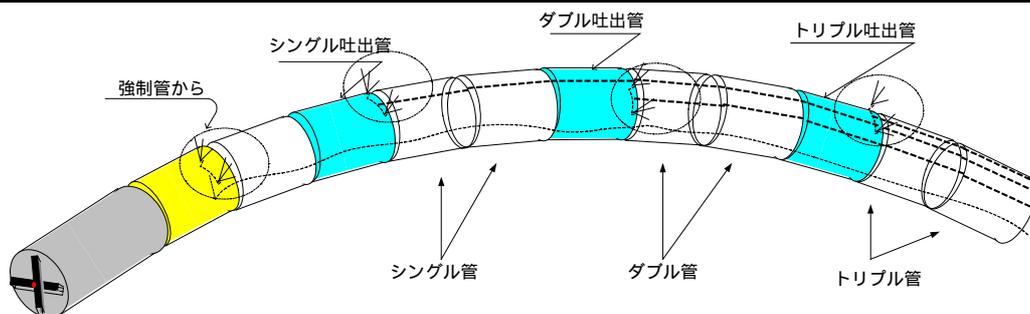


図 - 10 スーパーマイクロ工法用推進管配置図

h)制御システム

スーパーマイクロ工法では、掘進作業および立坑部で行う測量ロボットの初期方位および初期座標の計測作業以外は制御システムで行う。制御システムは、掘進機・ポンプ筒・強制管の操作盤、測量ロボットの制御・結果表示用操作盤で構成されている。測量ロボットと水位計から得られた測量結果を表示用操作盤で確認しながら掘進機、強制管、ポンプ筒を操作盤で操作する。また、インターネットによる中央集中管理システムを採用することにより、リアルタイムに施工データを収集し異常予測システムで分析を行うことにより安全な施工を実現している。

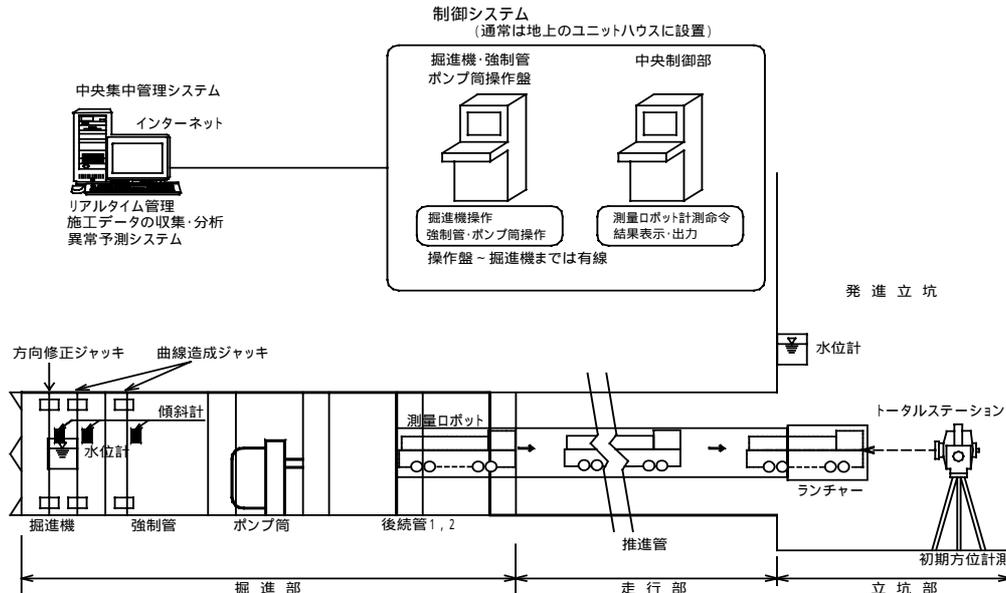


図 - 1 1 制御システムおよび施工機械の関連図

(5) 測量のしくみ

a)概要

本システムは、平面計測と縦断計測の二部構成となっている。

平面計測は、推進管一本推進完了ごと(本測量),また推進中はリアルタイム(リアルタイム測量)に掘進機および強制管の位置姿勢を自動計測するシステムである。計測方法は、立坑部、走行部、掘進部の各計測部からそれぞれ得られたデータを地上の中央制御部にて集積・演算処理を行い、結果を表示、出力するように構成されている。また縦断計測は、掘進中、リアルタイムに掘進機の位置姿勢を自動計測するシステムである。計測は水位計と掘進部からそれぞれ得られたデータを、平面計測と同様に地上の中央制御部で演算処理を行い、結果を表示・出力する。

b)立坑部

測量ロボットの初期方位角および位置を測定する。測量ロボットは、掘進が完了した後に、ランチャー(立坑部における測量ロボット格納庫)を走行管に接合することでセットできるようになっている。ランチャー接合後に、トータルステーションにより測量ロボットに取り付けた視準ミラー、ランチャーに取り付けた測距用プリズムを視準し、トータルステーションの十字線が視準ミラーに写った十字線と正対したときの基準点からの角度とトータルステーションから測距プリズムまでの距離を計測する。

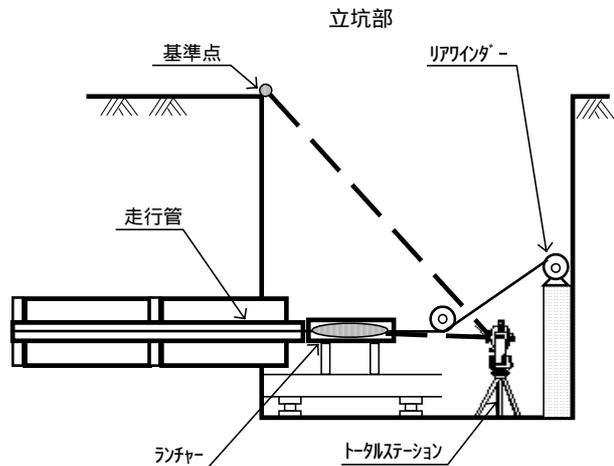


図 - 1 2 立坑部計測概要側面図

c) 走行部

立坑部停止位置から掘進部停止位置までの相対位置を測定する。

高精度方位計を搭載した測量ロボットをインナーユニットの走行管内に走行させる。立坑部と掘進部との間を6 km/h(最速)で自動走行させ、方位角と距離の変化量を連続検出した走行の軌跡を計測する。

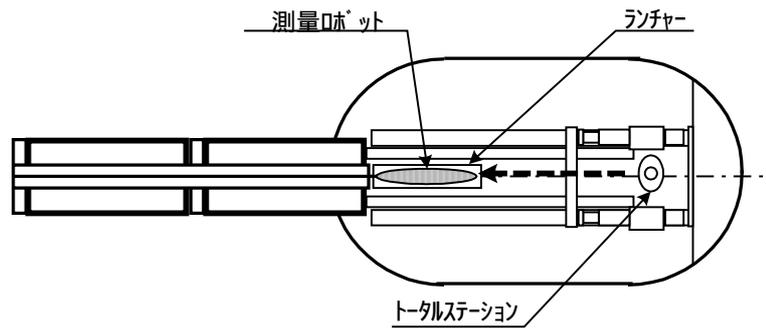


図 - 1 3 立坑部計測概要平面図

d) 掘進部

掘進機の位置および方向は、以下に示す計測結果を演算処理して求める。

測量ロボットの方位角・座標および水位計の計測

ジャッキストローク計の計測

e) 水位計

立坑内に設置した水位計と掘進機の水頭差を差圧計で検出し、高低差を計測する。

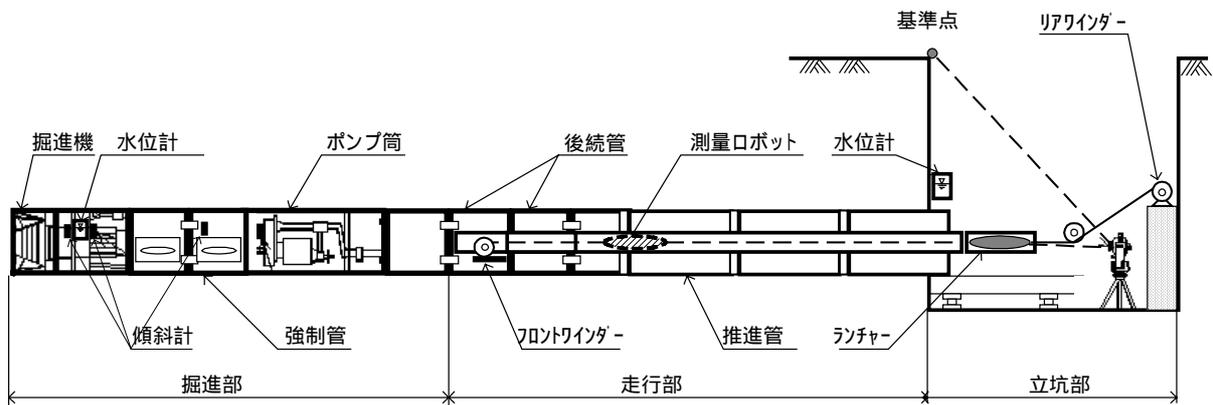


図 - 1 4 水位計計測概要図

3. ミクロ工法とスーパーミクロ工法の概要

(1) 性能比較

従来のミクロ工法とスーパーミクロ工法の性能をレーダ図にまとめたところ以下の通りとなる。

施工単価については、スーパーミクロ工法はミクロ工法に比べて3割程度経済的である。測量や推進システムに関する技術は他工法に比べてもかなり高水準と思われる。1スパン当たりの最大推進延長や曲率半径はミクロ工法に比べてやや見劣りするが他工法と比較した場合は多分に勝っていると思われる。日進量に関しては一工程分早くなっている。

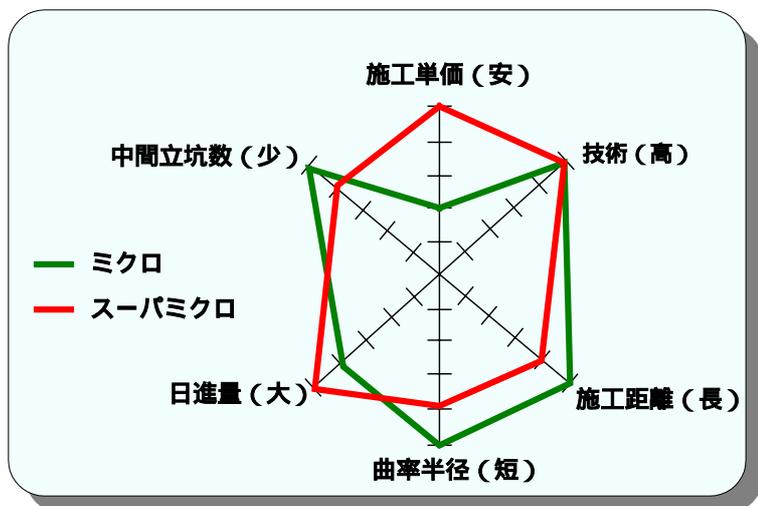


図 - 1 5 性能比較レーダ図

(2) システム比較

表 - 6 システム比較一覧表

内 容		スーパーマイクロ工法	マイクロ工法
方 式		泥水方式1工程式	泥水方式2工程式
呼 び 径		400・500・600	250～500
可能推進延長		300m	400m
最初曲線半径		60R	30R
最大土被り		制限無し	制限無し
測 量 方 法		自動計測システム	自動計測システム
今後の展開		一般の市場をターゲット	施工条件の厳しい市場をターゲット
掘 進 機	修正ジャッキ力(前・中)	120kN・155kN	120kN・120kN
	掘進機外径(オーバーカット径)	546mm(10mm)	560mm(10mm)
	最大分割長	1,000mm	930mm
強 制 管	滑材の吐出口	強制管	ポンプ筒
	修正ジャッキ力	107kN	53kN
	最大分割長	1,000mm	1,400mm
ポンプ筒	ポンプ揚程(kw)	23m(11kw)	19m(9kw)
	修正ジャッキ	-	搭載
	最大分割長	1,000mm	1,048mm
後 続 管	修正ジャッキ	-	搭載
	最大分割長	1,000mm	1,400mm
測 量 口 部	動力(走行速度)	ワインダによる牽引式(6km/h)	自走式(2km/h)
	ジャイロセンサ(通信)	ファイバージャイロ(有線)	リングレーザージャイロ(無線伝送)
	概略寸法	90×95.6×915mm	142×173×1,986mm
	鏡寸法	40mm	80mm

両工法の断面を使用してシステムの違いを以下に示す。

マイクロ工法は、曲線誘導機に送排泥管が固定されて設置しているが、スーパーマイクロ工法はインナーユニットに装備され、移動や取り外しが簡単にできる構造となっている。測量方法は、マイクロ工法は計測口ポットが自走することで実施するが、スーパーマイクロ工法ではワインダによる牽引で測量口ポットを走行させ測量する。

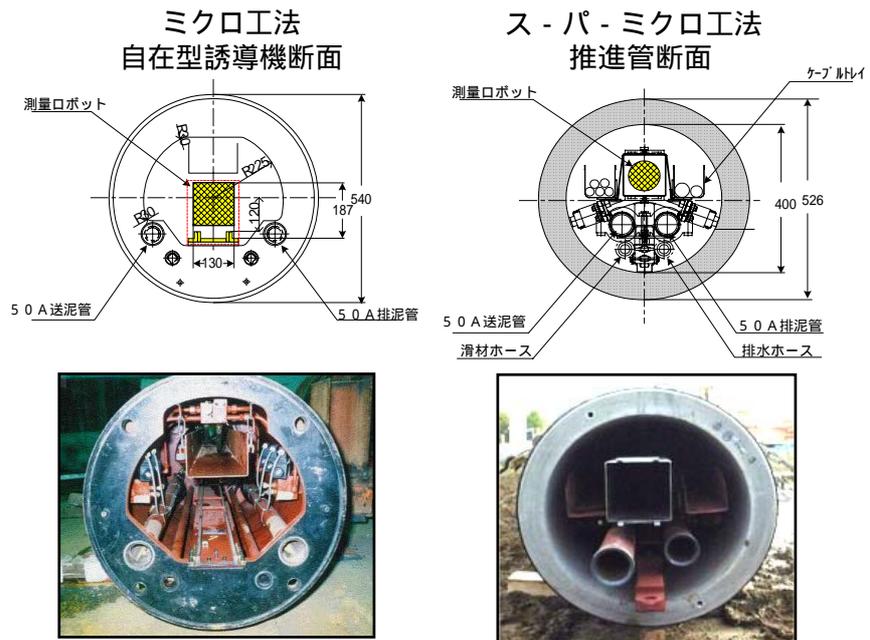


図 16 システム比較図

4. 実証実験

(1) 実験概要

スーパーマイクロ工法の掘削実証実験を平成14年6月初旬から実施し、6月11日に無事完了することができた。実証実験の概要を以下に示す。

工事名：スーパーマイクロ工法
実証実験工事

実験場所：株式会社青木建設
技術研究所
(茨城県つくば市)

呼び径：400mm
推進延長：100m
曲率半径：60m
土質：粘性土
地下水位：無し
縦断勾配：3.0‰
土被り：2.2~2.5m

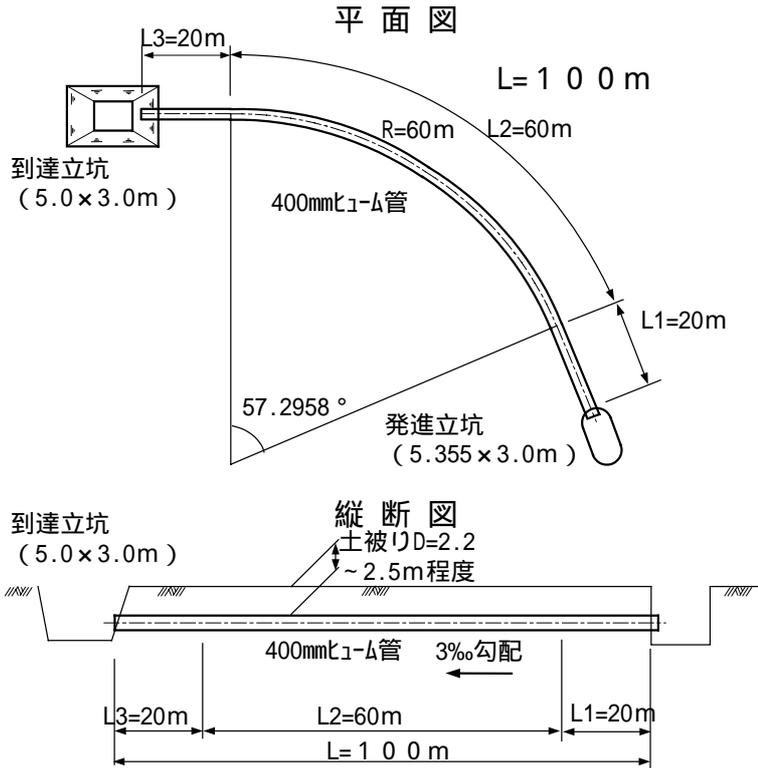


図 17 実証実験平面・縦断図

(2) 計測結果

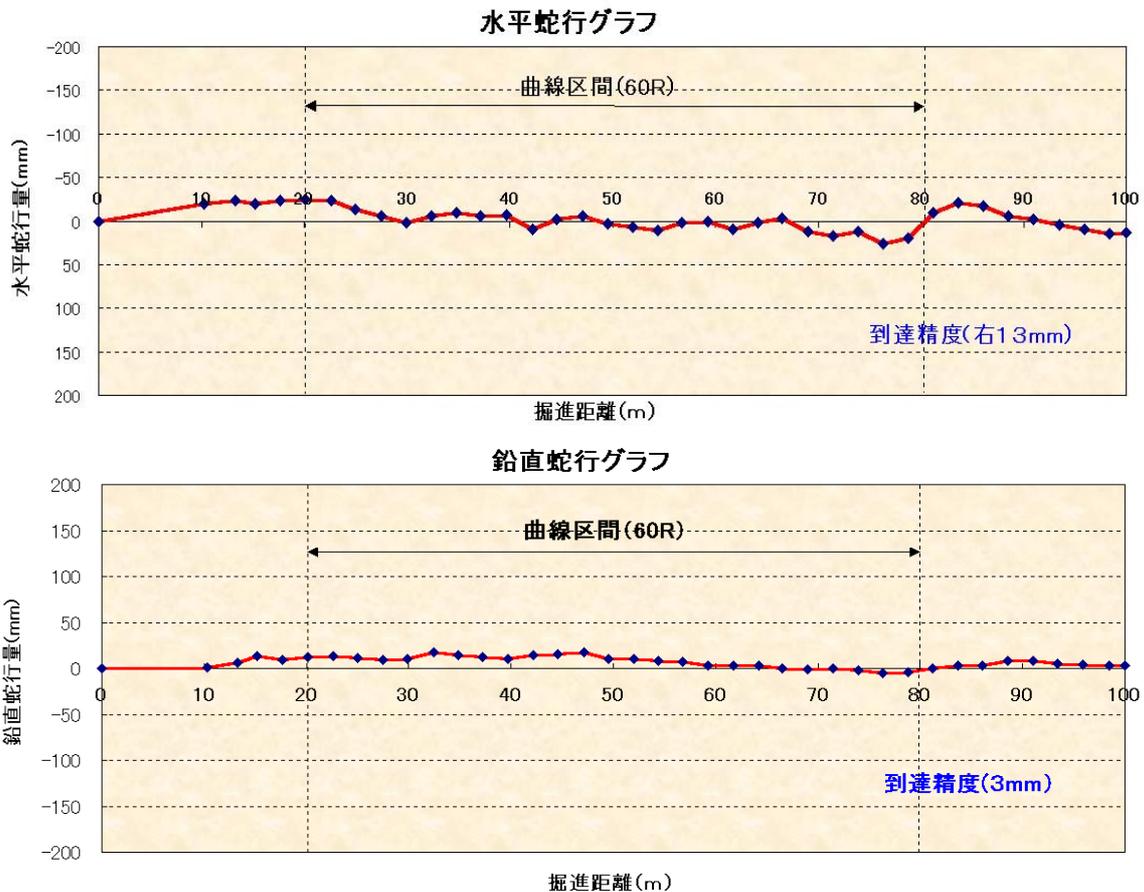


図 - 18 計測結果

上のグラフは、水平方向のずれを表示したもので、データは掘進機先端の軌跡を表示したものである。X軸は平面線形の中心線を示すもので、0が発進立坑の坑口で軸に表示されている数字は発進坑口よりの距離である。実際の線形は曲線が含まれているが、グラフはあくまでも設計中心線的位置に対してずれが分かるようにしている。掘進中は、最大25mmのずれがあったが、到達位置におけるずれは13mmであった。下のグラフは、鉛直方向のずれを表示したもので、データは掘進機先端の軌跡を表示したものである。実際の管路は到達に向けて上り3 μ mの勾配であるが、グラフは設計値に対してずれが分かるようにしている。掘進中は最大17mmのずれがあったが、到達位置におけるずれは3mmであった。以上の実験により、スーパーマイクロ工法はマイクロ工法に劣ることのない高精度の測量技術、自動化測量による省力化と時間短縮、及び安全性が実証された。



写真 - 10 実証実験状況 (推進管掘進状況)



写真 - 11 実証実験状況 (測量状況)



写真 - 12 実証実験状況 (測量ポイントとランチャー)



写真 - 13 実証実験状況 (管路構築完了 R=60m)

5. スーパーマイクロ工法の特徴

スーパーマイクロ工法の特徴をまとめると以下のようなになる。

泥水方式一工程式の採用

最大300mの長距離推進が可能

曲率半径R = 60mまでの急曲線施工が可能

呼び径 400・500・600に対応

広範囲な土質に対応

曲線造成のための地盤改良はほとんど不要

スーパーマイクロ工法用推進管を使用した中間滑材注入による推進延長の長距離化

謝辞

最後に、今後も開発及び改良を進め、経済性・施工性・信頼性を高めるべく努力して参りますので、関係各位におかれましては従来と変わらぬご理解とご指導、ご鞭撻を切にお願いいたします。

なお、スーパーマイクロ工法は、自動測量研究会(ゼネコン10社, メーカー1社)で共同研究及び開発したものです。