

曲線パイプを活用した非開削大断面地下空間構築技術

A non-open cut technique using curved pipes for constructing large-section underground spaces

粕谷太郎*, 吉川 正**, 田辺 清***, 竹内 卓****

Taro KASUYA*, Tadashi YOSHIKAWA**, Kiyoshi TANABE***, Takashi TAKEUCHI****

There has been an ever increasing demand for improved traffic systems and minimized environmental impact in urban districts. As a solution, loop and radial roads, and railway structures have been constructed underground in many locations.

Tunneling with shield machines is currently the main method used for such construction projects since it has less impact upon the structures and traffic systems on the surface and underground facilities and infrastructure than other methods.

Underground road branches and junctions, and subway stations have been conventionally constructed by the cut-and-cover method. However, in response to the changing social environment, more and more needs have been recognized for development of non-open cut techniques for constructing underground structures.

Aimed at meeting these needs, a technique using curved pipes has been developed and subjected to various full-scale tests for application to actual projects.

This paper discusses the results of this research and development.

「keywords」 Non-open-cut methods, underground space, curved boring method, Section width,
Curved pipe Underground road branches and junctions

1. まえがき

近年、都市域において交通機能の向上や環境負荷の軽減等が求められており、環状道路や放射道路あるいは鉄道施設等を地下に構築する計画が各所で進められている。

これらの建設に際しては、地上の構造物あるいは地上交通、地下埋設物への影響の少ないシールド工法を用いてトンネルを構築することが主力となっている。

この中で、道路の分岐・合流部あるいは地下鉄道駅等の施設は、開削工法により構築されてきた。しかしながら、社会環境の変化のなかで、非開削工法により地中に構造物を構築する技術の開発ニーズが高まってきた。

これらニーズに対応するために開発を進めてきた曲線パイプを活用した技術は、実施工に向け、各種実大モデルの実証実験を行っており、本稿では、その成果を報告する。

キーワード：非開削工法、地下空間、曲線ボーリング工法、断面拡幅、曲線管、地下道路分岐合流

* フェロー 鉄建建設(株) 土木本部

** 正会員 鹿島建設(株) 土木管理本部

*** 正会員 大成建設(株) 東京支店土木部

**** コマツ地下建機(株)

2. 太径曲線パイプルーフ工法による非開削大断面地下空間構築工法

2.1 開発の背景

現状の非開削工法としては、小口径の鋼製曲線管を施工済みのシールドから掘進設置し、その曲線管を利用して地中に凍土、あるいは同様に薬液注入による地盤改良ゾーンを造成して、内部を山岳トンネル工法で切り拓ける工法がある。しかしながら、トンネル切拓げ部の大断面化、大深度化、高水圧に対応するためには地盤改良だけの土留め止水では信頼性、安全性に課題が残るケースも出ることが予測される。そこで、図-1 に示すように、大口径の鋼製曲線パイプルーフをシールドトンネルのセグメントを切削してトンネル間にアーチ状に設置し、土圧水圧に抵抗させてその内部に大空間を構築する工法が最適と考え、開発を進めてきた。また、図-2 に示すように山岳トンネルにおける非開削地下大空間構築への適用も可能である。

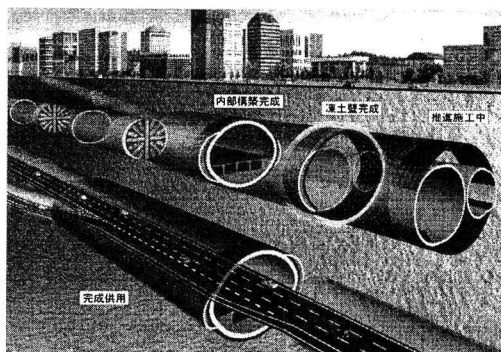


図-1 シールドトンネルにおける非開削地下大空間構築

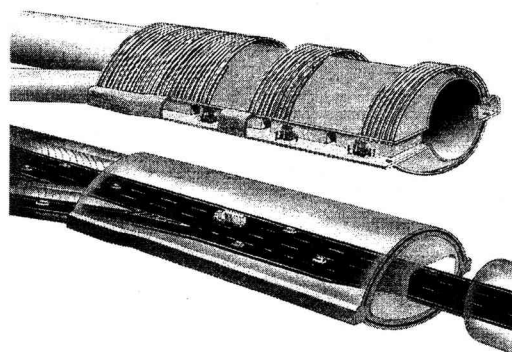


図-2 山岳トンネルにおける非開削地下大空間構築

2.2 太径曲線パイプルーフ工法の概要

本工法は、図-1 に示すように長手方向のトンネルと直方向に掘進する太径曲線パイプルーフを組み合わせ、大深度地下でも土圧水圧に鋼製の構造体として抵抗できる信頼性の高い覆工構造を構築するものである。パイプルーフ間に残る部分の土留め止水には、凍結工法を用いるが、凍結範囲が狭く、主として止水機能を期待すればよく、凍上、凍着切れなどの凍結工法のリスクと考えられる要因の低減を図ることができる。

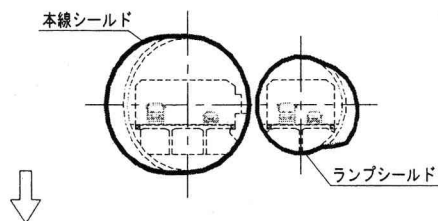
以下に本工法の特徴を示す。

- ①太径曲線パイプルーフで土圧・水圧を支保し、凍土で完全止水することで、大断面地下空間を非開削で構築可能である。
- ②太径曲線パイプルーフは、施工済みのシールドトンネル、山岳トンネルから円形あるいは矩形のリターン回収型の推進機で覆工を貫通する一方向からの施工も可能である。
- ③太径曲線パイプルーフ管としては、円形あるいは矩形の鋼管を用い、任意の半径・断面寸法に対応でき、かつ曲率半径も自由に選定可能である。
- ④太径曲線鋼管の間の地盤凍結は、鋼管内に任意の数と位置に配置した凍結管で止水に必要な所定の厚さの凍土を確実に造成可能である。

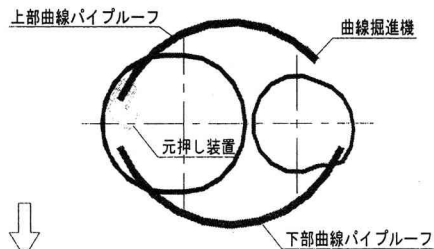
2.3 太径曲線パイプルーフ工法施工手順

太径曲線パイプルーフ工法の施工手順を図-3 に示す。

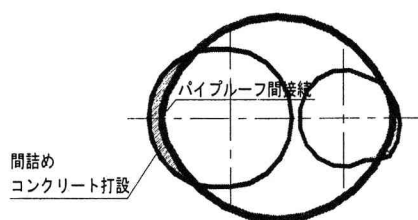
＜ステップ0＞本線シールド・ランプシールド施工



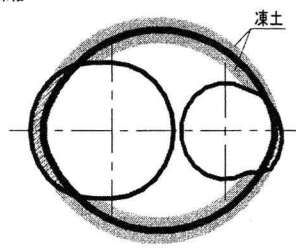
＜ステップ1＞上・下曲線パイプルーフ施工



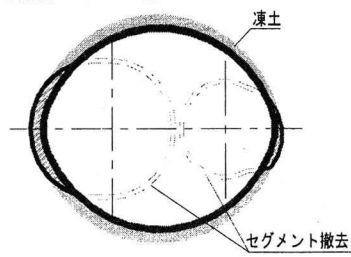
＜ステップ2＞パイプルーフセグメント間接続・間詰めコンクリート打設



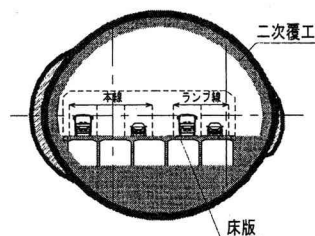
＜ステップ3＞凍結



＜ステップ4＞内部掘削・セグメント撤去



＜ステップ5＞内部構築完成



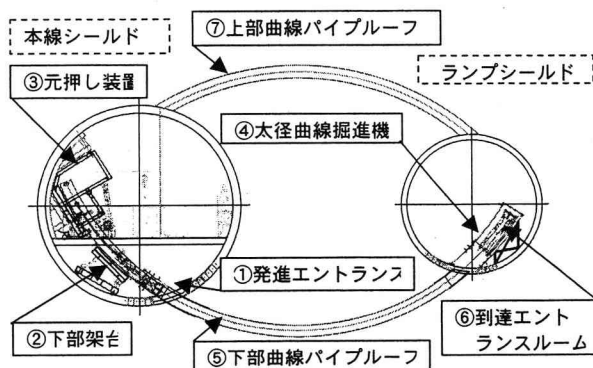
図－3 太径曲線パイプルーフ工法の施工手順

2.4 太径曲線パイプルーフ工法の装置と施工方法

図－4に太径曲線パイプルーフ工法のシールド坑内での施工状況を示す。

セグメント組立て済みのシールド坑内において、さらに前方のシールド掘進に必要なスペースを除いた部分で、枕木の下部に①発進エントランス、②下部架台(パイプ固定・位置制御装置)枕木の上部に③元押し装置(掘削機およびパイプルーフを正規の位置にセットし、推進させる装置)を設置し、④太径曲線掘削機、⑤下部パイプルーフ(数mの長さ分割)を押し出し、掘進・接続を繰り返し、ランプシールドの⑥到達エントランスルームに到達させる。到達エントランスでは、パイプルーフにセット済みのチューブシールなどで止水後、掘削機を到達部から、あるいはリターンして発進側から回収する。

上向きの施工時も同様である。



図－4 太径曲線パイプルーフの施工状況図

3. 実大規模実証実験(全体概要とサイクルタイム)

3.1 実験目的

本実験では、太径曲線掘進機を使った「太径曲線パイプルーフ工法」における技術的課題の抽出と解決を目的に、実物大モデルでの実証実験を行ない、大規模道路トンネルの主としてランプ合流部、非常駐車帯など非開削での切り拡げ工事に同工法を適用するための基盤技術を確立することを目的とした。

3.2 実証実験の概要

同工法の適用例(図-5)の施工条件を模擬した実物大モデルでの下部曲線パイプルーフの実証実験を行った。

実験場所：八王子実験ヤード

工法：泥水式曲線推進工法

鋼管径：外径φ812.8mm

推進長： $L=21\text{m/列}$ (3m鋼管×7本継ぎ)

鋼管曲率半径： $R=16\text{m}$

施工列数：5列(施工ピッチ 1.2m)

元押し装置仕様：ジャッキ総推力 1,470kN×2台

ジャッキストローク

1,785mm×2段階

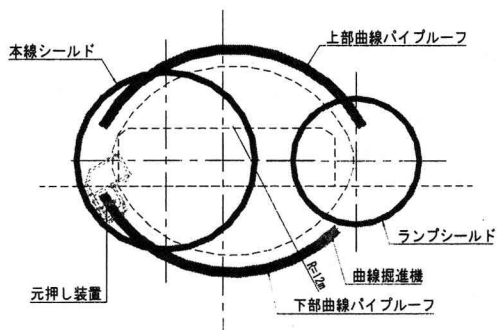


図-5 施工イメージ図

3.3 実験装置について

実験装置は、図-6に示すように発進立坑部には、鋼管をセットする押し輪や押し輪を押し込む推進ジャッキ等から構成される元押し装置、掘進機・鋼管の位置調整および固定を目的とした下部架台、さらに発進坑口部のエントランスで構成される。エントランスは、坑口部の止水を目的とするため、ワイヤーブラシ式とゴムパッキン(押え金物つき)を併用した。また、掘進時の反力は、元押し装置背面の反力受け架台で受けることとした。掘進手順は、発進立坑から掘進機、鋼管を順次接続し、元押し装置で推進、到達する。

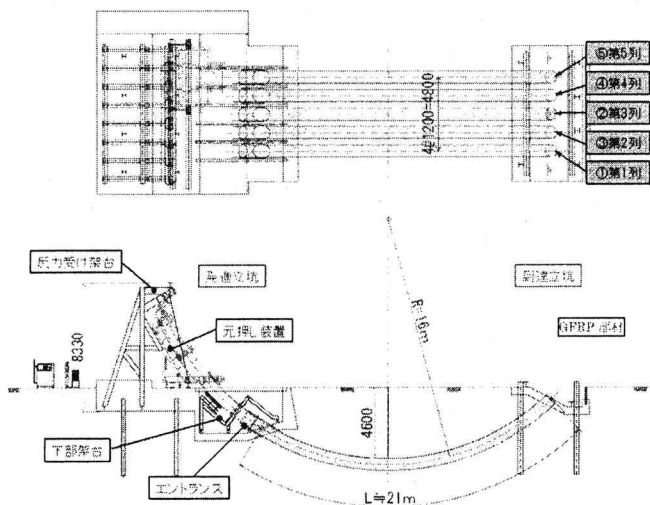


図-6 実験装置図

3.4 施工状況

図-7に施工予定現場の完成イメージを示す。また、発進立坑上部に設置された元押し装置の正面を写真-1に、側面を写真-2に、曲線管の吊り込み状況を写真-3に、接合の完了状況と曲線鋼管のセット状況を写真-4に、推進完了状況を写真-5に示す。さらに、発進部の設備状況を写真-6、写真-7、写真-8にそれぞれ示す。

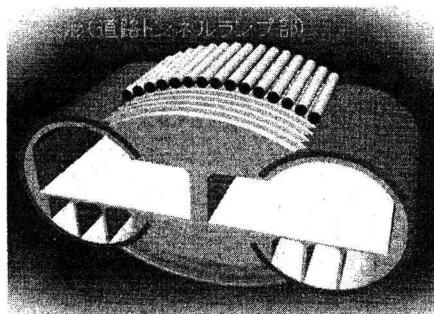


図-7 施工予定現場完成イメージ

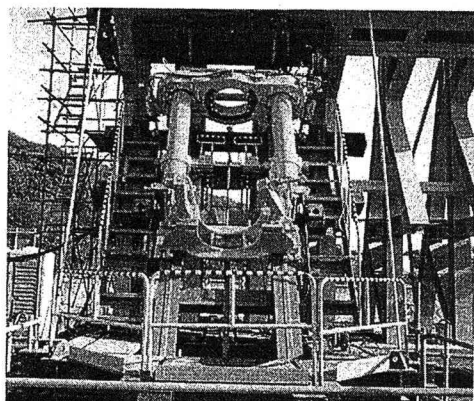


写真-1 元押し装置正面

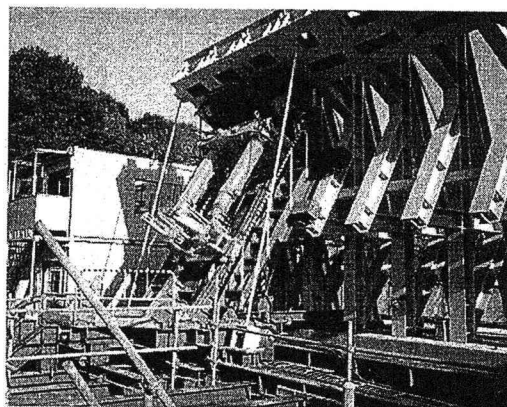


写真-2 元押し装置側面



写真-3 曲線管吊り込み状況



写真-4 推進状況

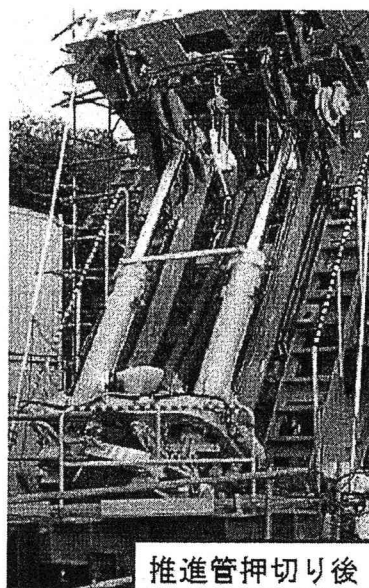


写真-5 推進完了状



写真-6 下部架台

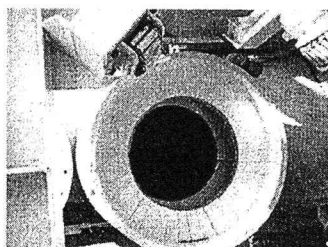


写真-7 エントランス

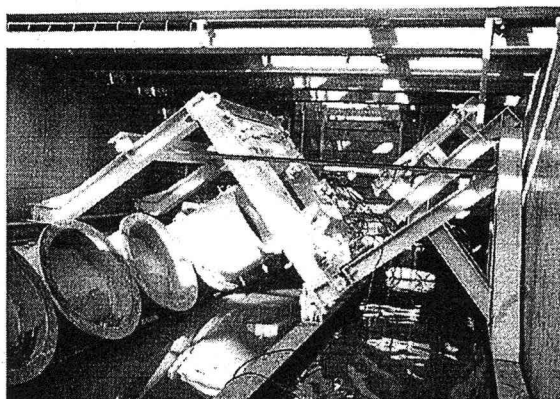


写真-8 推進設備状況

3.5 実験内容と運転実績

本実験では、表-1 に示す手順で太径曲線パイプルーフの施工を行った。

掘進スピードを図-7 に示す。地山掘削時は掘進精度の確保を目的とし、20～30 mm/min の範囲で制御した。

また、発進部のモルタルおよび到達部に設置した GFRP 部材の切削時は、掘進スピードを約 3 mm/min で制御した。ジャッキ総推力とカッタートルクの実績を図-8 に示す。ジャッキ総推力は 300～500kN の間を、カッタートルクは 10～15kN・m の間で推移した。

表-1 施工手順

施工順序	施工列	パイプルーフ側部の条件	実験条件
1 本目	第 1 列	両側未施工	方向制御なし
2 本目	第 3 列	両側未施工	方向制御あり
3 本目	第 2 列	両側施工済み	方向制御・引戻しあり
4 本目	第 4 列	片側施工済み	方向制御・引戻しあり
5 本目	第 5 列	片側施工済み	方向制御・引戻しあり

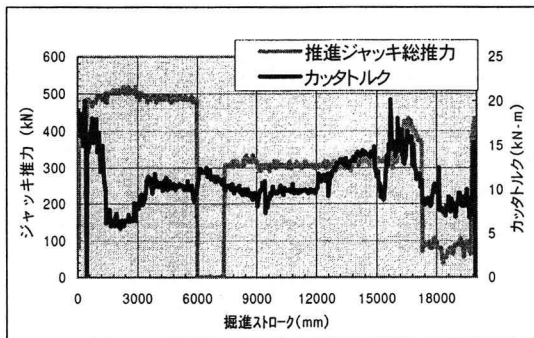


図-7 掘進スピード

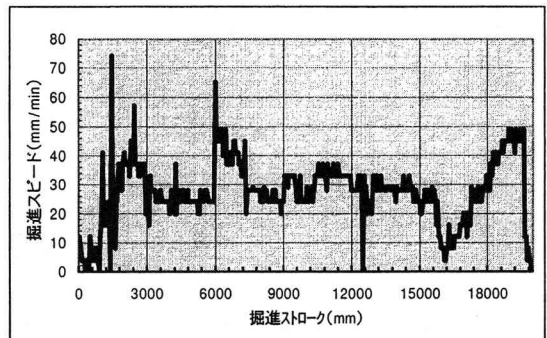


図-8 ジャッキ総推力とカッタートルク

3.6 サイクルタイム

表-2 に施工サイクルタイムの実績を示す。施工本数ごとに、作業手順の見直しやマシン・装置・設備の改良等を実施し、作業の効率化およびサイクルタイムの短縮を図った。その結果、3 本目以降では目標とした所要日数を満足する結果が得られた。

表-2 サイクルタイム実績

	1 本目実績	2 本目実績	3 本目実績	4 本目実績	5 本目実績	目標
推進・鋼管接続	14 日	10 日	8 日	7 日	8.5 日	7 日
掘進機・治具回収	2.5 日	2 日	1 日	1.5 日	1 日	1 日
その他	1.5 日 (地盤改良)	1 日 (切削実験)	1 日 (引戻し)	4 日 (引戻し)	0.5 日 (切削実験)	—

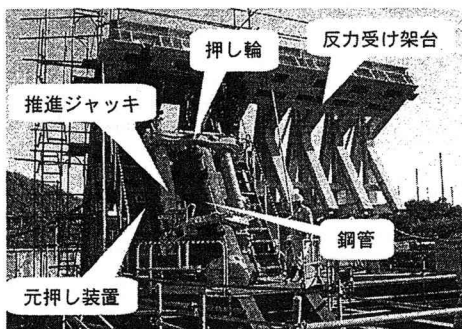


写真-1 地上部設備

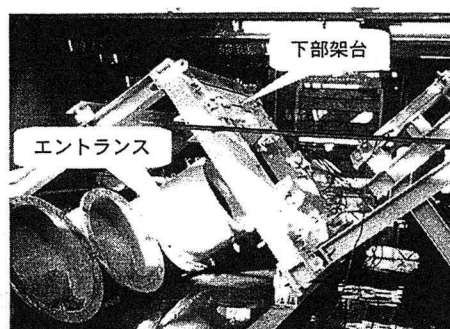


写真-2 発進立坑設備

4. 実大規模実証実験(計測手法と掘進制御実績)

4.1 計測概要

以下に、並行する 2 本のトンネル間を、トンネルに直交するアーチ状のパイプルーフで上下を接合し、2 本のトンネルを切抜けて構築する非開削地下大空間構築工法の主要技術となる「太径曲線パイプルーフ工法」の実証実験における計測手法と掘進制御に関する結果を示す。

4.2 掘進位置の計測手法と適用性

本工法における重要管理項目のひとつとして、パイプルーフ掘進機(写真-3)の姿勢および位置の把握が挙げられる。これらをより高精度に計測して計画線形を確保することが本工法の成否を左右するものと考えられることから、目的に合わせて種々の計測手法を試行し、それぞれの適用性を比較検討した。

4.2.1 姿勢計測

土中における掘進機の姿勢を計測する目的で、推進工法やシールド工法において一般的に採用されている「傾斜計」および「ローリング計」を掘進機の前導管中折れ部の後方に装備した。

4.2.2 位置計測

土中における掘進機の位置を計測する手法として、以下に示す計器・方法を試行し、その性能・効果を評価した。

①ジャイロ計測システム(写真-4)

パイプルーフ内に設けた計測管にレートジャイロを挿入して、角速度を検出・積分処理してパイプルーフの線形を 3 次元計測する方法である。計器設置スペースの関係上、計測頻度は 3m 毎(鋼管 1 本押し切り後)となる。

②水レベル計

発進立坑側に基準タンクを設け、掘進機内に設置した圧力計(写真-3)で検出される液圧から鉛直方向の相対変位を計測する方法である。

③レーザ&ミラー方式

掘進機内にレーザ照射器(写真-4)、パイプルーフ内に反射ミラーを設置し、直進するレーザ光を反射させて発進側の元押し装置後方まで導くことで掘進機の水平変位を計測する方法である。

4.2.3 適用性

当初試行したジャイロ計測では運転制御に活かせるリアルタイムの計測結果が得られなかった。そこで、水平方向をレーザ&ミラー方式、鉛直方向を水レベル計による計測手法に変更した結果、計測精度の向上に加えてリアルタイム計測も可能となり、前述の姿勢計測と併用することで掘進機先端での挙動予測およびパイプルーフの線形管理を迅速かつ高精度に行うことが可能となった。

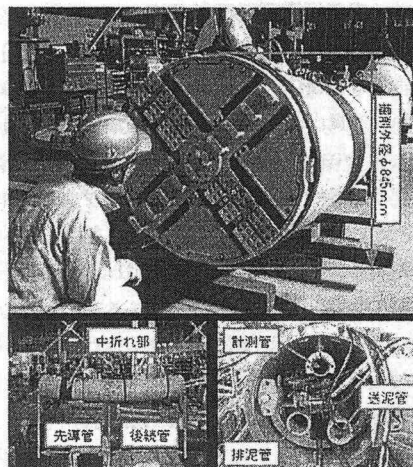


写真-3 パイプルーフ掘進機

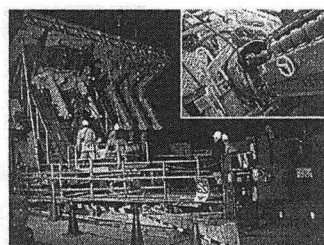
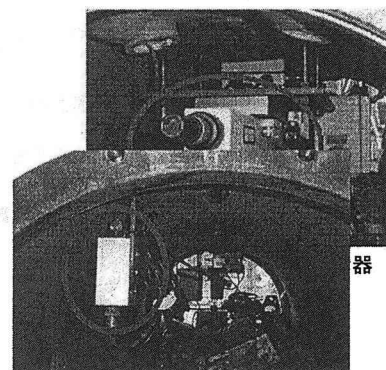


写真-4 ジャイロ計測



器

4.3 掘進制御と到達精度実績

本実験では、パイプルーフの目標到達精度を水平方向で $\pm 50\text{mm}$ 、鉛直方向で $\pm 100\text{mm}$ とした。これを満足するための掘進制御方法として、①下部架台の方向制御装置およびローリング防止装置②掘進機の中折れ機構(全方向 $\pm 3^\circ$)による姿勢制御③鋼管引き戻し・再掘削を複合的に組み合わせた。

鋼管2本(掘削長6m)程度までの掘進初期時には、①を主体に用いることで地山貫入部での線形確保・蛇行抑制が可能であるが、それ以降の掘進では同様の効果は得られず、②および③の手法を用いたローリング修正並びに蛇行修正を行って、計画線形および目標到達精度を確保することができた。特に掘進機のローリングは、計測精度や線形に大きく影響を及ぼすため、線形を確保する上でこれを抑制・修正する掘進制御および掘進管理が重要であるとの知見が得られた。掘進精度の実績結果を図-9、到達精度の実績結果を表-3、到達状況を写真-7に示す。

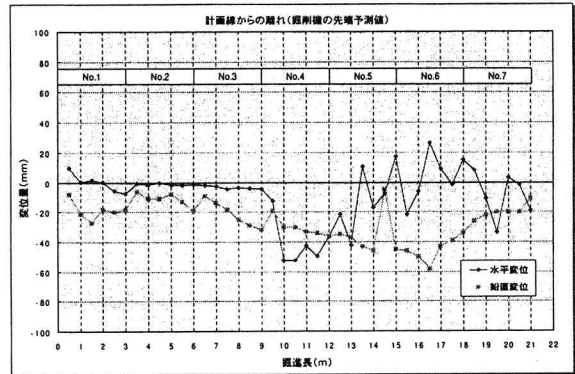


図-9 掘進精度実績 (第5列)

表-3 到達精度実績

	水平方向 (右: +, 左: -)	鉛直方向 (上: +, 下: -)	結 果
①第1列	-9.0 mm 【ジャイロ計測】	-2.2 mm 【ジャイロ計測】	水平・鉛直方向ともNG
②第3列	-2.5 mm 【ジャイロ計測】	+3.0 mm 【水レベル計】	水平方向: NG, 鉛直方向: OK
③第2列	-1.1 mm 【レーザー&ミラー方式】	-5 mm 【水レベル計】	水平・鉛直方向ともOK
④第4列	-2.2 mm 【レーザー&ミラー方式】	-3.5 mm 【水レベル計】	水平・鉛直方向ともOK
⑤第5列	-1.9 mm 【レーザー&ミラー方式】	-4.7 mm 【水レベル計】	水平・鉛直方向ともOK
目標精度	$\pm 50\text{ mm}$	$\pm 100\text{ mm}$	—

5. おわりに

本工法については、先ずシールド工法における適用範囲を前提として、図-4に示す下向き施工の①~⑤について実大規模の実験でほぼその施工法、計測制御方法を実証し、実工事への展開を目指す状況である。

また、本実験により、発進到達方法の妥当性の評価、掘進時の運転方法に関するノウハウ、施工時の作業効率、および施工サイクルタイムなど実施工に活用できる知見を得ることができた。

さらに、実験により「太径曲線パイプルーフ工法」の実用化に向けた計測方法と掘進制御に関する様々な知見を得ることができた。

引き続き、施工性・安全性・確実性に優れた工法技術として確立すべく、技術開発を推進する所存である。

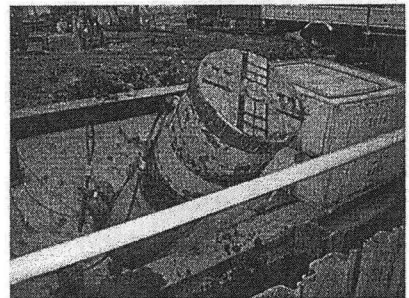


写真-7 到達状況

参考文献

- 1) 吉川正, 加藤誠, 粕谷太郎他: 太径曲線パイプルーフ工法による非開削大断面地下空間構築工法 (その1)
土木学会第59回年次学術講演会 2004.9
- 2) 鶴田浩一, 小野大我, 松井健司 他: 太径曲線パイプルーフ工法による非開削大断面地下空間構築工法 (その2) ~実大規模実証実験 (全体概要とサイクルタイム) ~
土木学会第59回年次学術講演会, 2004.9
- 3) 岩下善一郎, 神尾正博, 十二正義他: 太径曲線パイプルーフ工法による非断面地下空間構築工法 (その3) ~実大規模実証実験 (計測方法と掘進制御実績) ~
土木学会第59回年次学術講演会, 2004.9