## 太径曲線パイプルーフ工法上向き実証実験工事

前田 智宏\*1·中村征史\*2

## 概 要

近年,都市再生事業の一環として,環状道路の計画・整備が進められている。これらの建設に際しては、地上交通あるいは地下埋設物への影響が少ないシールド工法でトンネルを構築する傾向にある。一方、地上へつながるランプトンネルのうち、特に本線トンネルとの接合部の施工には、一般的に開削工法が用いられているが、地上交通や地下埋設物などへの影響が大きく、非開削切り広げ工法の開発が強く求められてきた。そこで、大口径の曲線鋼管を連続して敷設し土圧・水圧に抵抗できる土留め構造を構築し、非開削で大空間の構築を可能とする「太径曲線パイプルーフ工法」の開発が望まれた。

これまでに、下向き曲線パイプルーフ工法については実大規模実験を経て、実際の現場に採用され、すでに施工は終了している。しかし、上向き曲線パイプルーフ工法については、現在まで未施工であり、下向き施工の実績を始め、これまでに蓄積されたノウハウを取り込み、さらに次の段階として、上向き施工に対応する改良を加え、今回実物大で実証実験を行い、その有効性を確認した。

キーワード:太径曲線パイプルーフ, NEW TULIP 工法, ワイヤーリンク方式計測システム

# DEMONSTRATION TEST OF THE UPWARD PRACTICE FOR LARGE-DIAMETER CURVED PIPE ROOFS

Tomohiro MAEDA\*1, Seishi NAKAMURA\*2

## Abstract

Loop roads have been planned and constructed in the scope of urban regeneration projects. The trend is that tunnels for loop roads are constructed by the shield method, which exerts little impact upon the traffic on the ground and underground facilities. Portions joining with through lanes are usually constructed by the open cut method. However, the open cut work significantly affects the traffic on the ground and underground facilities. Therefore, there has been a keen demand for an effective non-open cut technique. It is in these circumstances that development of the "large diameter curved pipe roof method" has been preferred. In this method, large-diameter curved steel pipes are continuously placed to construct an earth retaining structure that can withstand earth and water pressures, thereby enabling non-open cut construction of large underground spaces.

The downward curved pipe roof method has been already subjected to actual-scale experiments, and applied in a construction project and the project has been completed. However, the upward curved pipe roof has not been constructed. Utilizing accumulated know-how of the downward practice and others, aimed at further development, actual scale demonstration tests were conducted, with improvements made to the technique so that it would be suitable for upward work, in order to confirm effectiveness of this method.

Keywords: large-diameter curved pipe roof, New TULIP method, wire-link measuring system

<sup>\*1</sup> Planning Group, Technology Planning Department, Engineering Division

<sup>\*2</sup> Construction Technology Group, Construction Technology Center, Engineering Division

## 太径曲線パイプルーフ工法上向き実証実験工事

前田 智宏\*1·中村征史\*2

## 1. はじめに

本工法は**図-1**に示すように、トンネルに対して直角方向に掘進する太径曲線パイプルーフと止水のための凍結あるいは地盤改良工法を組み合わせて、大深度地下でも土圧・水圧に対抗できる土留め構造を構築し、非開削で大空間の構築を可能とするものである。

図-2に示すように開発はまずフェーズ I として最初に下向き工法の確立を目指した。 ATS (自動追尾トータルステーション方式) による高精度の計測方法の実大規模実験などで、多くの課題をクリアし下向き工法を確立した。その後、下向き曲線パイプルーフを φ 800mm 曲率 16mで実現場にて施工し、2006 年

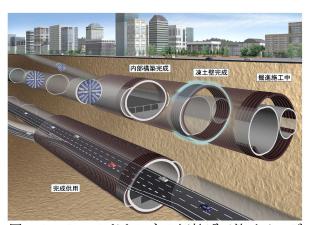


図-1 シールドトンネル切拡げ工法イメージ

10 月に全 76 本を無事完了した。次にフェーズIIとして、上向き曲線パイプルーフ工法の施工方法の確立を目指し、施工時の作業性の検証、掘進制御・施工精度の検証、掘進機位置計測(ワイヤーリンク方式)の検証、計測機器の使用環境影響の検証を図るため 2006年9月より、(社)日本建設機械化協会・施工技術総合研究所の模擬トンネルにて実証実験を行なった。

## 2. 実験概要

今回の実験は、下向き施工の実績を始め、これまでに蓄積されたノウハウを取り込み、改良を加えて実験計画を作成した。実験設備の標準断面図を図-3に、設備全景を写真-1に示す。

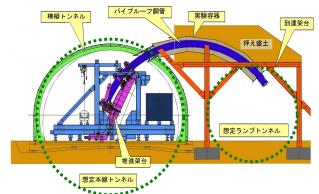


図-3 標準断面図

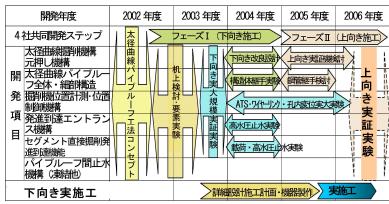


図-2 太径曲線パイプルーフ工法開発経緯



写真-1 実験設備全景

- \*1 エンジニアリング本部 技術企画部 企画グループ
- \*2 エンジニアリング本部 建設技術総合センター 研究開発部 施工技術グループ

実験は、大深度での洪積粘性土地盤を想定し、掘進のための人工模擬地盤を設けることとした。今回使用する掘進機が泥水式であり、上向き実験における切羽水圧保持を確実に行うために、鋼管に流動化処理土(一軸圧縮強度は2.0N/mm²)を注入して人工的に模擬地盤を構築した。模擬地盤への発進坑口(エントランス)は下向き施工での実績を参考に、ワイヤブラシ2段+簡易フラッパーによるものとした(写真-3)。また到達坑口に当たる部分は、掘進機で切削可能な、ガラス長繊維強化プラスチック発泡体で製作された円盤(写真-4)を設置した。掘進距離は円弧長で10.246mとし、実験は3本施工して精度等の確認を行うこととした(写真-2)。



写真-2 到達側(正面)





写真-3 発進坑口

写真-4 切削可能部材

## 3. 専用掘進機と推進設備

今回の実験では、模擬トンネルの強度条件より、推進架台を同架して支持する発進架台からのすべての反力を、インバートに伝達するよう構造設計を行った。また全体の転倒に対するカウンターウェイトの水槽  $(40 \,\mathrm{m}^3)$  と、滑動防止用のピースをインバートにアンカーで固定し全体構造の安定を図った (写真-5)。推進架台 (写真-6, 表-1) は、下向き実

施工と基本的な構造は同様で上下対称となっているが、曲線鋼管の曲げ応力を分散し、推力を鋼管軸方向へ伝達するための鋼管ガイドを今回新たに追加している。また、写真-7に専用掘進機を、その仕様を表-2に示す。



写真-5 推進架台・発進架台



写真-6 推進架台

表-1 推進架台仕様

女 工		
項目	細目	仕様
最大総推力		686kN
推進ジャッキ	推力×st×本数	343kN×1785mm×2本
押し板ストローク		3533mm
適合鋼管	外形×厚さ	$\phi$ 609.6 × 16mm
適合鋼管長		2800mm
適合曲率半径		R=8.0m
重量(概算)		17t

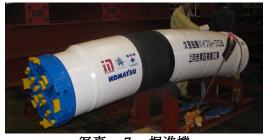


写真-7 掘進機

表-2 掘進機仕様

項目	細目	仕様
寸法	外形×全長	$\phi$ 625 × 3000mm
適合曲率半径		R=8.0m
重量(概算)		2.7t
掘削方式		泥水式
排土方式	流体輸送	送排泥方式
方向修正装置	前胴揺胴	±2.6°(全方向)
カッター回転方向		左右両方回転
回転速度		~12.5rpm
カッタートルク		19.6kNm
α値		74.7

泥水処理設備は、粒径を調整した模擬地盤 (流動化処理土) 内の掘削であること、全掘 削土量が約 11 m³と少ないこと等を勘案して、 通常の泥水プラント設備に採用される一次分 離機を使用しない設備とした。流体輸送は、 掘進作業がプラントより高い位置で行われる ため、排泥負荷設備(写真-8)を設置し配 管抵抗を増すことで流速を安定させ、掘削管 理システムモニターと流体中央操作盤(写真 -9)で管理した。



写真-8 泥水処理設備



写真-9 掘進管理システムと流体中央操作盤

## 4. 計測システム (ワイヤーリンク方式)

下向き実施工ではブランコ上の架台上に載ったトータルステーションを複数台設置し計測する,ATS自動追尾トータルステーション方式が採用されていた。しかし今回,鋼管径を φ 600mm としたため,トータルステーションを鋼管内に設置することがスペース的に不可能となったため,新しくワイヤーリンク方式計測システムを導入した。本計測システムは,基点部と先端部およびその中間に設置されたワイヤー変位測定器とワイヤー(テグス)で構成され,見通しの効かない推進管(曲線パイプルーフ)の中間位置および先端位置をリアルタイムに計測するものである。今回

の実証実験では、実施工をイメージし4リンク(基点側〜鋼管センサー1〜鋼管センサー2〜鋼管センサー3〜後胴部センサー)構成で実際の鋼管内に設置し、掘削機の位置(カッター中心)を計測した。また、到達時に外部測量と比較し、計測精度の検証も行った。図ー4に実証実験での装置構成を示す。後胴部センサーは先端掘削機との接続部となるマシン受け部材にマグネットで吸着させる。テグスをこの後胴部センサーから鋼管センサー3、2、1、スライドセンサーの順で通過させ、各センサー間のテグス長とテグス通過位置(Y、Z)、さらにマシンデータ(揺動角等)から掘削機先端位置を演算・解析するものである。

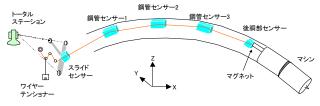


図-4 4リンク構成図

## 5. 実験結果

実験は施工手順等を修正しながら実施した。 到達時の出来形を図-5に示す。1列目は「安 全性」「施工性」「ワイヤーリンク方式計測」 などを数多く検証しながらの施工であり, ま た問題があれば改良・改善を行ないながら実 験を進めた。推進ジャッキスピードも 20~ 30mm/min 程度で慎重に掘進した。外部からの チェック測量も参考に方向制御 (揺動操作) を行なうが、掘進機の挙動が敏感過ぎ、最終 的には目標の±50mmの到達精度にはは達成で きなかった。掘進長が短いことも,制御距離 を減らすことになった。2列目は施工内容・ 作業手順に改善を加えた効果により, 施工期 間は大幅に短縮できた。揺動操作角は1列目 より少なめに、ローリング値を観察しながら 慎重に行った。精度は上がったものの目標に は至らなかった。また2列目では掘進機ロー リング値と水平方向の姿勢が揺動操作に関係

が深いことが明らかとなった。3列目は外部 計測孔も追加し掘進機の位置確認を行いなが ら揺動操作を行なった。1,2列目で発進時 は掘進機自重で先端が下がる傾向にあったた め,少し上向き姿勢で掘進作業に入った。ま た,左右揺動操作もより細かく操作頻度を上 げることで,目標の到達精度内に到達させる ことができた。但し,今回目標到達精度が確 保できた要因として,前に実施した下向き曲 線パイプルーフ施工の経験者による作業であ り,慣れによる習熟の効果が挙げられる。

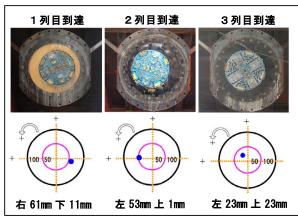


図-5 出来形

また,泥水プラントと掘削作業箇所の位置 関係上,切羽圧の調整が難しくなったため, 掘進管理上,データ収集と推進架台・掘進機・ 流体設備(中央操作盤)の操作の簡素化を図 った結果,操作性が改善された。



写真-10 到達状

## 6. 考察

## 6. 1 掘進機及び推進装置について

掘進機及び推進装置は下向き実施工での改 善点をフィードバックし、上向き実証実験用 に新規に設計製作したものである。このため 今回の実験中には掘進機の大きなトラブルは なく,現時点で掘進機本体は実施工に十分対 応できる基本性能を有していると考える。

掘進機の姿勢制御については下向きのみの 実績で臨んだため、初期段階は手探り状態で あったが、外部測量や下向き実施工時のノウ ハウを取り入れ、大きな蛇行や制御不能とい った事態に陥ることなく制御できた。掘進速 度についても当初、20~30mm/minを想定して いたがカッター回転数を調整することで、40 ~50mm/min 程度まで可能であった。切羽水圧 は排泥負荷設備を設置したこともあり、排泥 側圧力が安定し、切羽水圧も0.07Mpa 前後を 保持しながら最後まで掘進することができた。

## 6. 2 摇動操作(方向制御)

水平揺動操作について, 揺動操作を行った 直後は揺動修正と同じ方向をローリング値は 示すが、揺動修正効果が現れると、ローリン グ値は反対方向を示す傾向があることが確認 された。このため、早目の揺動操作・揺動戻 し操作が要求された。垂直揺動操作について は、掘進機自重・余掘り量・掘進機の形状等 の影響で, 先端が下がる傾向が強かった。結 果として、据付外部測量値を参考に、発進時 から上向き姿勢で掘進を開始することが効果 的であった。揺動操作全体を通して,パイプ ルーフの鋼管径がφ600mm, R=8 mと下向き での実績 (φ800mm, R=16m) に比し小さいこ ともあり、揺動操作による掘進機の動きが非 常に敏感であった。本実験の施工条件で、高 精度で方向制御を行う必要条件は, 計測シス テムで正確な位置情報を得た上で, 掘進機に 搭載されたローリング計で掘進機の姿勢の変 化を確認しながら, こまめに揺動操作を行う ことがポイントと言える。また,管径と曲率 が方向制御に与える影響は予想以上に大きい と考えられる。

#### 6.3 曲率半径について

曲率半径が小さくなると推進反力により鋼管に過大な曲げ応力が発生する。今回は鋼管

ガイド(写真-6)を装備することで解決できたが、この場合でも最大推力載荷時には、ローラと鋼管の接触部で鋼管に局部座屈が発生する。このため今回の実験では鋼管の肉厚は施工時の条件から決めた。従って施工条件(曲率・管径)に応じてガイド方法、ガイド数及び鋼管の肉厚を適宜検討する必要がある。

## 6. 4 作業性・安全性について

作業性について、上向き推進であるため、 重力に逆らった作業(鋼管接続・押板盛り替え等)が中心となり、固定・バックリング防 止措置といった手順が全工程に追加され、施 工性の低下が懸念された。しかし、作業員の 慣れや設備の改良、手順の明確化を行えば、 施工性の低下はないと考えられる。細かな改 善点はあったが、安全面・作業面とも概ね当 初の計画通りであった。施工サイクルタイム についても、1本目から3本目にかけて徐々 に短縮された。

## 6. 5 計測システムについて

ワイヤーリンク方式計測システムとのマッチングについて,数十秒で計測データが更新されるため,リアルタイムに計測データをオペレーターが確認できる点は非常に有効であった。計測データと掘進機の位置(Rに対し

てどの位置にいるか)を同時に視覚的にモニターに表示できれば、掘進機にどのように外力が作用しているかもイメージでき、操作性を向上させることが出来るのではなかと考える。また、本計測システムで、φ600mmの鋼管に対し、システムの引き抜きや挿入など、メンテナンスが可能であることも確認できた。

#### 7. まとめ

曲線施工は「曲率半径・掘進長・鋼管剛性・ 勾配・泥水性状・切羽圧・地質」など常に変 化する複雑な条件により敏感に影響を受ける。 今回の実証実験を含め、これまで蓄積した知 見を元に実施工に備え整理しておきたい。

最後に、本実験に際して多大なご協力を頂いた(社)日本建設機械化協会・施工技術総合研究所に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 滝本邦彦ほか: 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10~12), 土木学会第62回年次学術講演 会講演概要集,6-013,6-014,6-233
- 2) 4 社共同開発事務所(鹿島・大成・鉄建・ コマツ):「太径曲線パイプルーフ工法上向 き実証実験」共同開発報告書,2007.3