

様々な制約条件下における曲線パイプルーフ工法の実物大による適用性検討

大成建設(株) 正会員 大石 憲寛
大成建設(株) 正会員 ○大西 亮平
大成建設(株) 正会員 伊藤 潤
大成建設(株) 正会員 亀岡 廉

1. はじめに

都市部における道路トンネルの分岐合流部では地上への影響を低減するため、併設シールドの非開削切掘り工法を採用する事例が増加傾向にある。当社では国内最大級の2本のシールドトンネルを非開削切掘り工法により掘削し、分岐合流部を構築する工事（以下、本工事と称す）を計画しており、施工時における地山の支保方法として「曲線パイプルーフ工法」を採用している。曲線パイプルーフ工法は切掘り時に必要な支保構造をトンネル内より構築するもので、円弧形状をした曲線鋼管をトンネル軸方向に対して直角に上向きおよび下向きに一定間隔に連続して設置する工法である。本工事の曲線パイプルーフはランプシールドトンネル内から発進し本線シールドトンネルに到達させるもので、掘進長は最長で約15mであり、許容到達施工誤差は掘進長の約1/100程度と高精度での到達が求められている。また、「地盤改良体（砂礫層）掘進」、「直径400mm以上の玉石混じり地盤」、「曲率半径R=10m以下の曲線施工」、「掘進機引戻しが必須」といった条件が複合しており、曲線パイプルーフ工法の適用性を確認する必要がある。

本文は本工事における曲線パイプルーフ工法の適用性を図るために、実物大の掘進機や曲線鋼管を用いて実証実験を行った結果について示すものである。

2. 実物大掘進機を用いた掘削実験

(1) 掘削地盤

本工事の対象地盤は江戸川層の砂礫地盤（Edg：N値50以上、Eds：N値19）の高压噴射攪拌工法による全面改良体であり、最大径450mm程度の玉石が存在する。実証実験では本工事の地盤条件に近づけるため、地盤改良体の一軸圧縮強度および比重を模擬した充填材と玉石を用いて土槽を作成し、掘削地盤とした。掘削地盤造成状況を図1に示す。掘削地盤は延長12.0m×幅8.4m×高さ5.9mであり、玉石は曲線パイプルーフの計画線形に合わせて配置し、体積含有率を約50%とした。また、玉石が存在しないレーンも設け、玉石の有無による施工性の比較ができるようにした。

(2) 曲線パイプルーフ鋼管

掘削に用いる曲線パイプルーフ鋼管は本工事と同様の仕様とし、実物大で製作を行った。鋼管仕様を表1に示す。鋼管は径508mm～516mmに対し厚さ22mm～26mmの厚肉鋼管となっている。掘進機は掘削終了後に到達側の本線シールドトンネルにて回収できないことから、鋼管内部を通じて発進側へ引戻す必要があり、鋼管の継手部分内面をできるだけ平滑にする必要があった。実験では上向きと下向きにて2種類の継手方式を試みた。上向きでは寸切りの鋼管と裏あて金を用いる裏あて金方式、下向きではオス継手（凸側）とメス継手（凹側）により鋼管内面を平滑化できるインロー方式（図2）を採用し、掘進機引戻しの施工性について比較を行った。



図1 掘削地盤造成状況

表1 鋼管仕様

	単位	上向き	下向き
鋼管径	mm	508	516
鋼管厚	mm	22	26
曲げ半径	mm	8500	8500
継手方式		裏あて金方式	インロー方式



図2 インロー継手

キーワード 曲線パイプルーフ工法, 溶接ひずみ計測, インロー継手, 小型ジャイロ

連絡先 〒163-6008 東京都新宿区西新宿 6-8-1（新宿オークトワー）大成建設株式会社 東京支店 TEL03-3348-1111

(3) 施工概要

a) 掘進機および施工概要

実験の掘削イメージ図を図3に示す。掘削は掘削地盤に隣接した西立坑から発進し東立坑へ到達させ、到達後に掘進機引戻しを行う。上向き掘進は、本工事において玉石が存在する層が確認されていることから玉石有区間と玉石無区間の2スパン、下向きは玉石無区間のみ実施した。

上向きの掘進機および下向きの掘進機を図4、図5に示す。掘進機は曲線パイプルフ鋼管の内側へセットし、鋼管を元押し装置で押すことにより掘削を行う。掘進機は泥水式を採用し、切羽に泥水を充満加圧させ、カッター室で掘削土砂と攪拌・混合させることで流動性の良い混合体を作り上げ、切羽の安定を図りながら掘進を行う。掘削した土砂は泥水処理機へ流体輸送して土砂分や礫を分離する。掘進機は到達後カッター一部を格納し、その後内管ロッドを利用して掘進機全体を回収する。

b) 鋼管の溶接ひずみモニタリングおよび溶接方法の考案

本工事での曲線パイプルフ鋼管の接続は溶接により行う。継手面において溶接熱により発生する変形が極端に不均等であった場合、継手部の曲率半径が変化することで掘進機の引戻しを行う際に必要な内空断面を侵す可能性があり、鋼管の変形許容面差は3mm以内とする必要があった。そこでパイプルフ鋼管溶接時の熱ひずみ量をリアルタイムで計測できる脱着式のモニタリング治具を開発し、鋼管の継手部に発生する溶接変形を確認しながら行うこととした。モニタリング治具の写真を図6に、計測システム概要を図7に示す。変位計測結果をリアルタイムに表示できるようにすることで、溶接中に許容変位量を超える可能性がある場合、溶接の中断および変形対策を可能とした。

溶接モニタリングに加え、溶接作業は左右半円ずつに分けて2人1組で対角同時に施工を行うことで、溶接熱による変形が鋼管断面に均等に生じるような対策を行った。

c) 掘進中による鋼管のひずみモニタリング

地盤改良体・玉石地盤内での急曲線推進という特殊条件であることから、鋼管にひずみ計を設置しリアルタイムに計測することで、周面摩擦の影響や方向修正時の鋼管の挙動を把握することとした。ひずみゲージの設置は鋼管の内面側とし、引戻しの際に掘進機と接触しない位置とした。ひずみゲージの設置位置を図8に示す。

d) 小型ジャイロを用いた線形管理

パイプルフ鋼管は径が小さく、人が入れないことから人為測量による掘進管理ができないため、掘進機の後方に小型ジャイロを搭載し掘進機の後端位置・方向をリアルタイムに座標計測した。計測結果は常にモニターに表示し、現在位置および到達時の予測位置を把握することで、方向修正を行いながら掘進管理を行い高精度の到達を試みた。

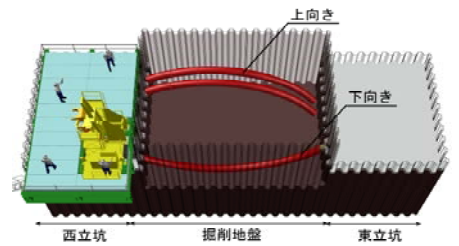


図3 掘削イメージ

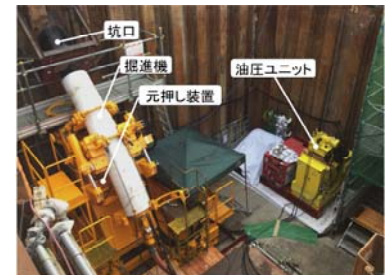


図4 上向き掘進機



図5 下向き掘進機



図6 モニタリング治具

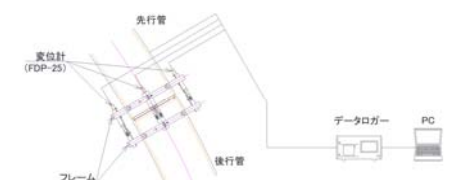


図7 モニタリングシステム概要

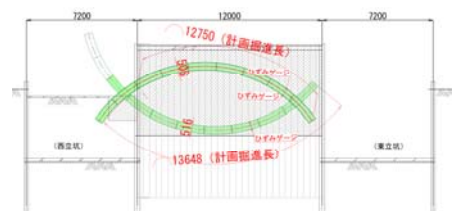


図8 鋼管ひずみ計測位置

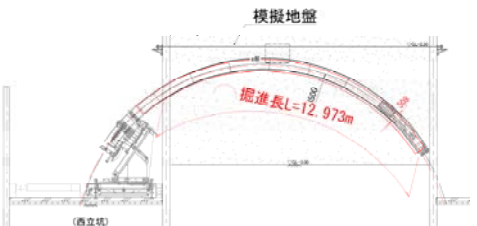
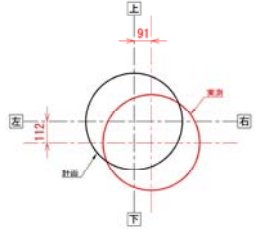
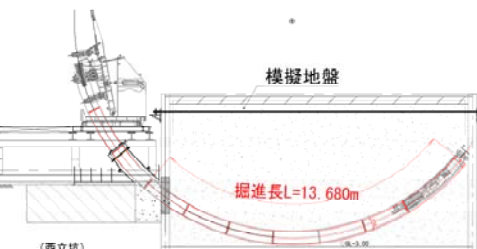
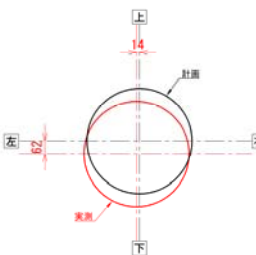
3. 実験結果

(1) 掘進結果

a) 到達精度

上向きおよび下向き曲線パイプルーフの到達精度図および到達状況を表 2 に示す。掘進中は模擬地盤充填材や玉石に対し排出礫寸法は 20mm 以下であり、送排泥管の閉塞もなく安定的に掘進が可能であった。目標到達精度である上下左右 130mm(掘進長の 1/100)に対し、上向きおよび下向き曲線パイプルーフ工ともに目標到達精度を満足する結果が得られた。掘進が始まると掘進機の位置は測量が不可となるため、ジャイロが示す現在位置および到達予測位置を確認しながら、掘進の初期段階において方向修正をしたことにより高精度の到達が可能となった。

表 2 到達精度および到達状況写真

対象	到達精度図（黒：計画 赤：実績）	到達状況
上向き	  上下: 1/115 左右: 1/142	
下向き	  上下: 1/220 左右: 1/977	

b) 掘進推力および鋼管ひずみ

鋼管のひずみ計測結果および掘進機の推力測定結果を図 9 および図 10 に示す。推力は上向きおよび下向き曲線パイプルーフ工ともに 20~30tf 以下で推移したが、掘進機が頂点を越え進行方向が切り替わると上昇する傾向がみられた。推力上昇時の鋼管に発生する応力状態を確認すると、上向きでは鋼管上側の圧縮力が増加し下側の圧縮力が減少していることから、推力の方向と掘進機の進行方向が異なることで、鋼管と地山が競るような現象が発生し推力が上昇していると考えられる。下向きでも同様の現象が発生していると考えられるが、ひずみ計の設置位置が上向き時より後方にあり、先端付近の鋼管が地山と競り、ひずみ計設置位置付近の鋼管が内側に曲げられるような変形を受けたことにより、管上側に圧縮力が発生していると考えられる。

元押し装置の装備推力 50tf に対し 80%以下の推力で掘進を完了させたが、下向きにおいては次第に推力が上昇傾向にあることや本工事における地山の不均一性による周面摩擦の増加が考えられることから、追加補助ジャッキ等の対策により装備推力の補強が必要であることが分かった。

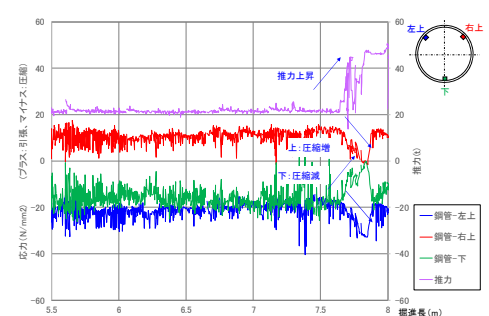


図 9 掘進長と鋼管発生応力（上向き）

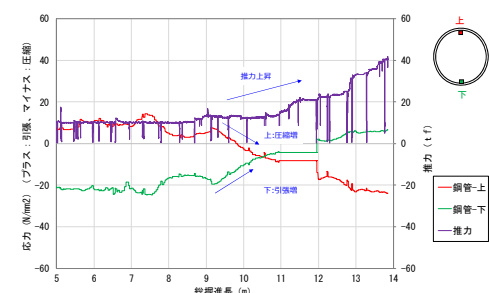


図 10 掘進長と鋼管発生応力（下向き）

(2) 鋼管の溶接

溶接により鋼管継手部に発生した最大の変位量および変位量の経過時間推移を図 10 および図 11 に示す。図中の上下左右は鋼管を坑口側から見た位置関係である。図中の点は継手面が溶接熱により変形した方向を示す。全継手において、鋼管継手部の変位量は 3mm 以下で最大 1.3mm 程度であった。溶接終了後も余熱により多少の変形は見られたが、0.1mm～0.2mm であり終了後 30 分程度で変形はほとんどしなくなった。溶接ひずみモニタリング治具を鋼管溶接時に設置することで、溶接に伴う鋼管の変位方向をリアルタイムで表示し、溶接時の挙動を把握可能であることを確認できた。また、厚肉鋼管に対し、2 名 1 組として対角同時に溶接することで、鋼管溶接時に発生する変形差を最大 1.3mm に抑えることが可能であることが確認できた。

(3) 掘進機引戻し

a) 上向き掘進時

上向き掘進機の到達後の引抜き概要図を図 12、上向き掘進機引き抜き状況を図 13 に示す。掘進機引戻し時に、先端のカッター部が裏当て金に引掛かり鋼管が滑動する現象を確認した。引戻し作業を継続することで裏当て金に変形し、引戻し不可となる可能性があったため、引掛かりが生じる度に奥へ戻し段差を乗り越えるように低速で慎重に引戻しを実施した。

b) 下向き掘進時

下向き掘進機引き抜き状況を図 14 に示す。鋼管にインロー継手を採用したことで、内面の平滑性が保たれ掘進機は一度も引掛かることなく引戻すことができた。本工事では施工本数が多いため裏当て金により引戻し不可となるリスクを回避することを目的として、インロー継手を採用することとした。

4. まとめ

本工事における「地盤改良体（礫層）掘進」、「直径 450mm 以上の玉石混じり地盤」、「曲率半径 R=10m 以下の曲線施工」、「掘進機引戻しが必須」といった複合した条件下における曲線パイプルーフ工法の適用性を図るために、実物大の掘進実験を行った。その結果を以下に示す。

- ① 砂礫地盤の改良体相当の掘削地盤および玉石を破碎しながらの掘進を泥水式の円形掘削機を採用することで問題なく施工できることを確認した。
- ② 小型ジャイロによる掘進管理および鋼管の溶接精度を確認しながらの接続を行うことで、線形を逸脱することなく掘進長の 1/100 以下の高精度の到達を可能とし、掘進を完了した。
- ③ 鋼管継手部にインロー継手構造を採用することで、引戻し不可となるリスクを排除することができた。
- ④ 溶接ひずみをリアルタイムでモニタリングできる治具を開発し、溶接による変形量を管理しながらの鋼管接続を可能とした。また 2 人 1 組による溶接実施により、許容溶接変形量以下とすることができ、掘進精度を満足させた上、引戻しを問題なく完了させた。

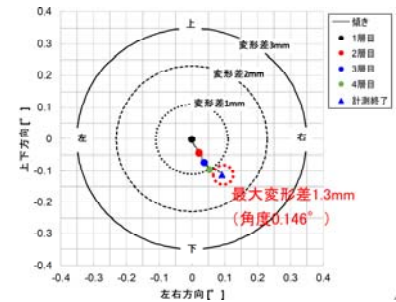


図 10 鋼管継手部の最大溶接変位量

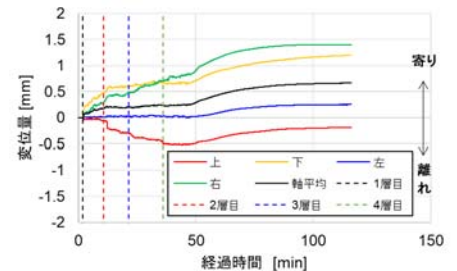


図 11 鋼管継手部の変位量推移

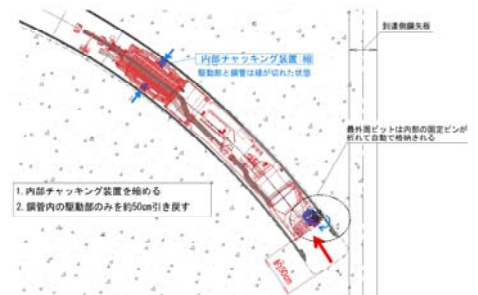


図 12 掘進機引抜き概要図



図 13 掘進機引抜き状況（上向き）



図 14 掘進機引抜き状況（下向き）