

解説

曲線鋼管推進で大断面トンネルの地中接合と 高速道路の分岐合流部を築造

佐藤 栄徳

NEW TULIP 工法研究会



1. はじめに

都市部における環状道路や放射状道路あるいは鉄道施設は、交通機能の向上や環境負荷の軽減ニーズを背景として、地下化する計画が多くなっている。そして、これらの地下構造物の建設は、地下構造物や地上交通、地下埋設物などへの影響の少ないシールド工法が主に採用されている。しかし道路の分岐合流や地下駅部などの施設は、主に開削工法によって施工されるため、施工中地下構造物や地上交通機能の阻害要因となっている。さらに地下空間有効利用の観点から、道路や鉄道施設の大深度化の方向性もあり、また従来の開削工法では不経済であると地中埋設物などへの技術的対応が困難であることにより、非開削工法を用いて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ている。

このような状況を背景に、限られた地下空間から曲線鋼管を円弧状に地中に配置することにより、地下空間の掘削補助工法とする技術である曲線ボーリング工法、曲線パイプルーフ工法が開発された。その技術を使用した施工事例を以下に述

べるものである。なおNEW TULIP工法研究会では鋼管径 ϕ 500mm以上を太径曲線パイプルーフと定義している。このため本稿においても、同様の呼称で記載する。

2. 施工事例の紹介

2.1 施工事例1

(1) 工事概要

工 事 名：神戸市交通局地下鉄工事に伴う

NTT既設洞道移設工事

施工場所：兵庫県神戸市中央区

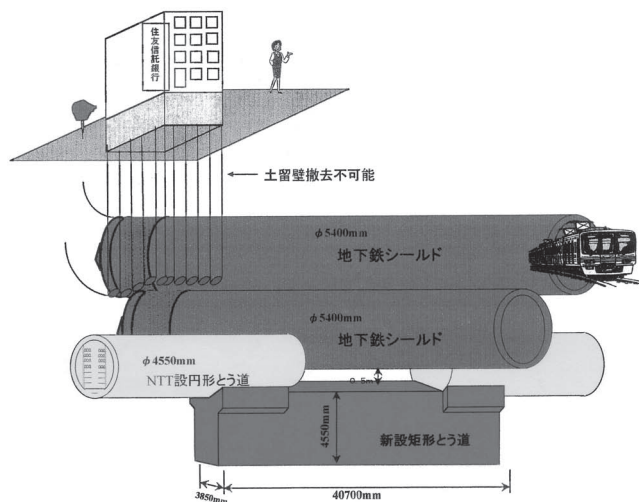
施工時期：平成9年3月～平成11年1月

(曲線ボーリングから凍土解凍まで)

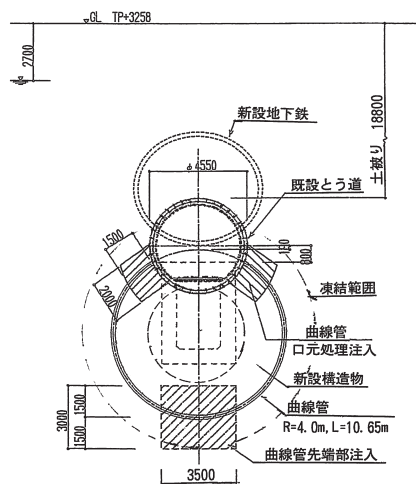
①施工概要

本工事は、神戸市交通局が建設する地下鉄海岸線の工事に伴い、NTTの通信用洞道が支障するため、洞道の一部を撤去しその直下に洞道を新設するものである(図-1)。

洞道は昭和56年にシールド工法により構築された円形洞道で、セグメント外径4550mmで内部には重要な現用ケーブルが収容されていた。



図ー1 洞道イメージ図



図ー2 曲線鋼管配置図

表ー1 洞道数量

項 目	既設洞道	新設洞道
構築方法	シールドトンネル	凍結工法による非開削切掘り
構造寸法	セグメント外径φ = 4550mm	内寸法 2.05 × 3.45 m
1次覆工	スチールセグメント	—
二次覆工	無筋コンクリート (厚さ300mm)	鉄筋コンクリート (厚さ700mm)
今回施工延長	20.7m (撤去延長)	40.7m (新設延長)

直下に構築する洞道の掘削補助工法として凍結工法を採用することとしたが、凍結管を地表から放射状に配置すると、既設洞道直下部分に未凍結部が残るため既設洞道から曲線鋼管を配置し鋼管内に凍結管を敷設することにより、凍土を造成した。その後掘削を行い、躯体構築を行ったものである（図ー2、表ー1）。

②土質概要

当該工事場所は沖積低地に位置し、その表層は砂質土が主体であり、古海岸（縄文海岸線）の海側に位置している。神戸市街地の表層地質は基盤岩類（花崗岩類、神戸層群）新第三紀世～第四紀更新世の大阪層群や洪積層、さらに沖積層に区分され基盤岩類と大阪層群は山地部から山麓斜面の台地に、洪積層は台地、丘陵地から沖積平野への変換点付近にそれぞれ分布している。地下水位はGL－3.7m付近であり地表面よりGL－9m付近

までは砂を主体とした沖積層である。GL－9m以深の洪積層はGL－46m付近まで砂層が優勢な砂、粘土の互層状態となる。

曲線ボーリングを行うGL－20～30m間の土質状況を図ー3に示す。

(2) 施工順序

施工順序は以下のとおりである（図ー4、5）。

- ①曲線ボーリングにて既設洞道から鋼管を設置する。
- ②曲線鋼管内に凍結管を設置し、凍土を造成する。
- ③凍土の造成が完了したら、既設洞道直下を掘削する。
- ④掘削完了後、鉄筋・型枠を組立て、コンクリートを打設し躯体を構築する。
- ⑤躯体完了後、既設洞道部の埋戻しを行う。
- ⑥既設洞道撤去部の凍土造成を確認しセグメントを撤去する。

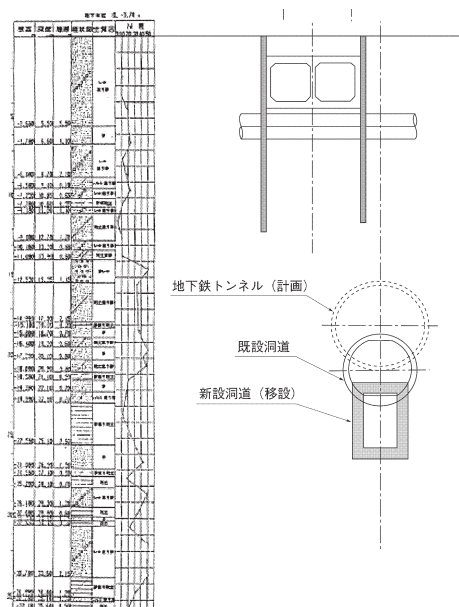


圖-3 地質圖

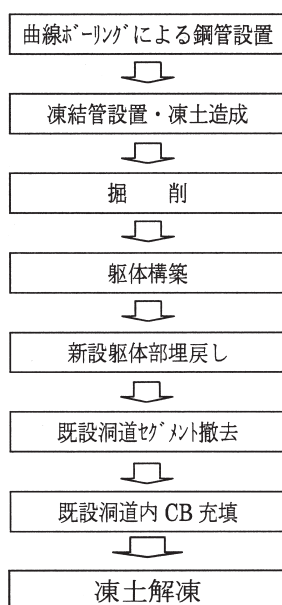


図-4 施工フロー図

表-2 曲線ボーリング施工数量

項 目	単 位	数 量	備 考
施工本数	本	106	銅管仕様：管外径 267.4 mm 材質 SK 400 曲率半径 R = 4.0 m
1 本当り削孔長	m / 本	11.05	
延べ推進長	m	1171.3	

⑦セグメント撤去後、既設洞道内をCBで
充填する。

⑧凍土を解凍する。

(3) 曲線ホボーリングの施工

曲線ボーリングは土被り19mの地中で、非常に狭隘な箇所における施工であることを考慮し施工計画を立案した。曲線ボーリング施工数量と鋼管仕様を表-2に示す。

1) 材料および配置計画

鋼管の種類、配置計画は以下のとおりとした。

・鋼管径

ボーリング機の先端装置を改良したため、標準仕様の8B（外径216.3mm）から10B（外径267.4mm）とした。

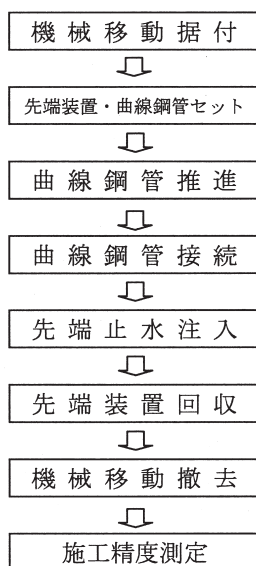
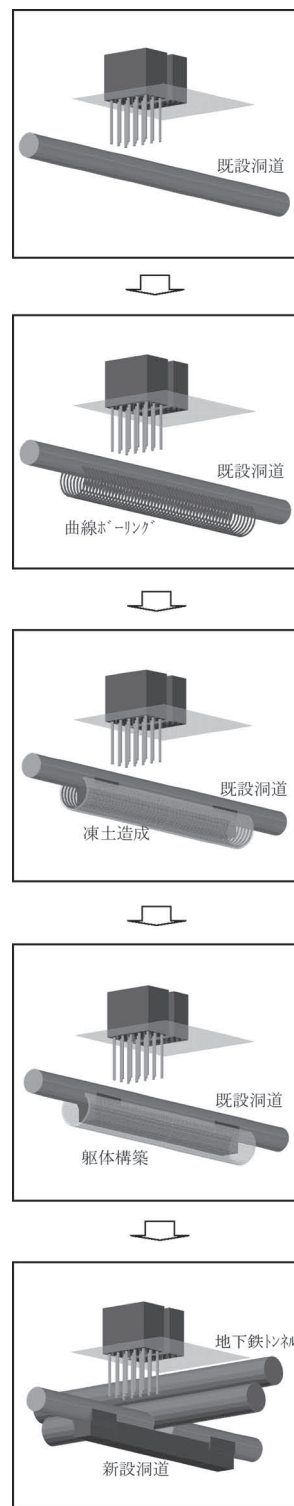


図-6 曲線ボーリング施工フロー図



圖一5 施工順序圖

- ・曲率半径

掘削、躯体構築作業に必要なスペースを考慮した結果、曲率半径を4mとした。

- ・鋼管配置間隔

鋼管の配置は既設洞道のセグメント主桁を切断しないよう主桁間隔に合わせ、900～750mmとした。

- ・ボーリング長

曲線鋼管を設置するにあたり、施工精度、工期等を勘案し既設洞道の両側から180度ボーリングし、先端部をラップさせる方法を選定した。

2) 補助工法の計画および施工

曲線ボーリングの施工箇所は孔口部で地下水位GL-21.6m、先端部でGL-29mに位置するため、坑口付けのセグメント切断時およびボーリング終了後、機械の回収の際、水圧による土砂の噴出が考えられた。このため坑口部およびボーリング先端部に薬液注入による止水工を施工した。

3) 曲線ボーリング施工順序

曲線ボーリングの作業フローを図-5に示す。

①機械移設据付

洞道内に複線レールを敷設するとともに、反力用油圧ジャッキを4本取り付けた。

②先端装置・曲線鋼管セット接続

曲線鋼管同士の接続は一般的には電気溶接方式が用いられるが、今回は狭隘な箇所での施工であることから、鋼管1ピース長が1.3mと短く、180度1本の鋼管を施工するための接続作業が8箇所となり、接続作業に4時間を要することとなる。

このため、接続時間の短縮を目的に加締ジョイント方式を採用した。

この結果、接続に要する時間は1時間程度まで短縮できた。

③曲線鋼管推進（写真-1）

掘進に伴う掘削土の排出方式を二重管の間隙からバキュームで吸引する方式から排泥管を通して吸引する方式に変更した。

この改善によりスライムの沈降による閉塞トラブルを軽減することができた。

④ボーリング精度測定

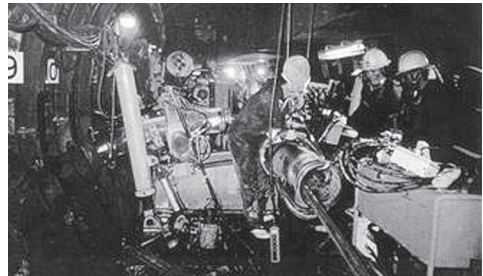


写真-1 曲線ボーリング施工中

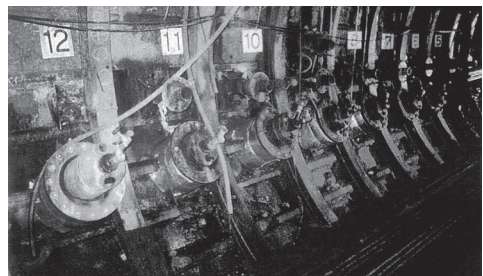


写真-2 曲線鋼管配置

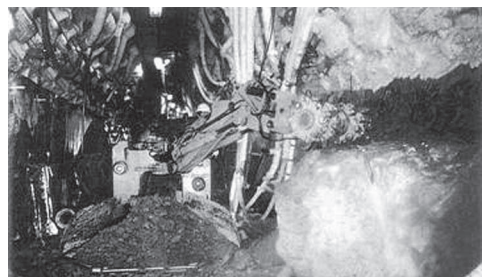


写真-3 掘削状況

掘進完了後、曲線鋼管が許容誤差内（1/30）に設置されているかを確認するため、三次元で位置測定が可能な、小型慣性装置TMGジャイロ孔芯計測器を使用した。

測定の結果、所定の精度を確保することができた。

4) 施工の結果と効果

曲線ボーリング施工完了後、鋼管内に凍結外管（SGP90A）および内管（SGP25A）を挿入し凍土造成を行った。なお、内管と外管の間隙はセメント・ベントナイト混合液にて充填した（写真-2）。

その後、掘削機にて内部掘削を実施したが、凍土の土留としての機能に問題はなく、掘削終了後躯体を構築した（写真-3～5）。



写真-4 掘削全景



写真-5 掘削完了

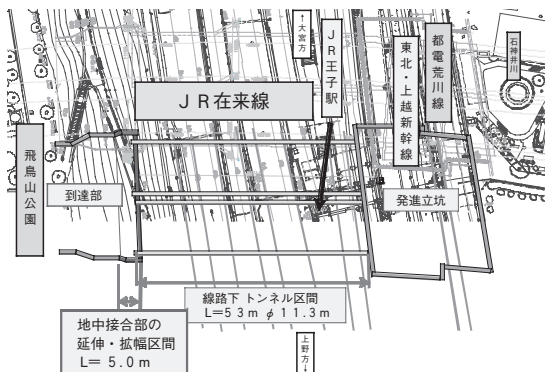


図-7 位置平面図

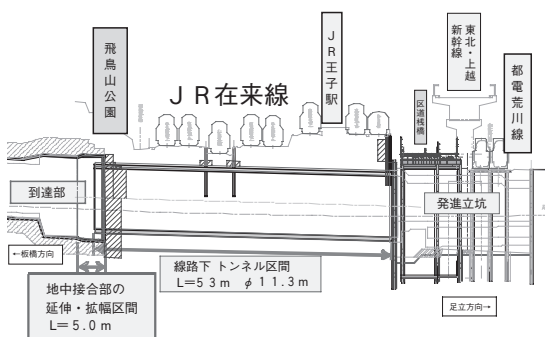


図-8 縦断面図

2.2 施工事例2

(1) 工事概要

工 事 名：東北本線王子駅構内首都高速道路新設他工事

工事場所：東京都北区王子一丁目～堀船一丁目
JR王子駅構内

施工時期：平成12年8月～10月
(曲線ボーリング施工期間)

①施工概要

首都高速道路中央環状王子線（江北JCT～板橋JCT、全長7.1km）中央環状線の北側に位置し、都心環状線の渋滞緩和、主要高速道路への利便性の向上、所要時間の短縮を目的として計画された路線である。本工事は中央環状王子線とJR線との交差部（JR王子駅構内）のトンネルをアンダーパス（HEP & JES工法）で構築する

ものである。アンダーパス施工基地として、既設NATMを地中拡幅するために先行支保とする鋼管を曲線ボーリングにて敷設した。

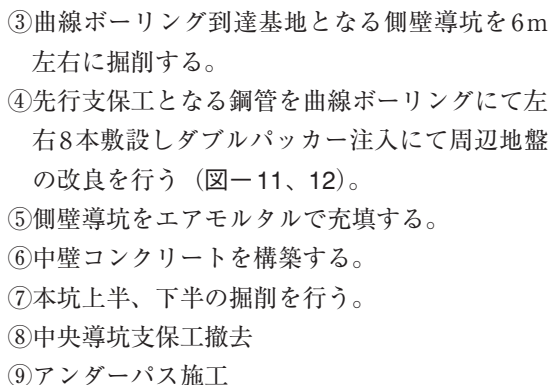
②地質概要

曲線ボーリングを施工する周辺の地盤は第三紀鮮新世から第四紀更新世（洪積世）前期にかけて堆積した上総層群を基盤に、その上位には江戸川層、東京礫層、東京層が堆積する。台地部では東京層の上位に本郷層が堆積し、その上位には関東ローム層が分布する。また低地部では東京層の上位に直接軟弱な沖積層が分布している（図-9）。

(2) 施工順序

施工順序は以下の通りである。（図-10）

- ①掘削前面を薬液注入工（ダブルパッカー工法）により地盤強化する。
- ②曲線ボーリング発進基地となる中央導坑を7m掘削する。



地中拡幅を施工する箇所の上部は、



- ・トンネル掘削部の地質がN値の低い砂質土である。
- ・地上部には石積擁壁、樹木が点在している。
- ・最小土被りが3mと薄いうえ、JR営業線まで7mと接近している。

表－3 曲線ボーリング施工数量表

項 目	単 位	数 量	備 考
施工本数	本	16	鋼管仕様：管外径267.4mm 材質SK400 曲率半径R = 8.0m
1本当り削孔長	m/本	17.79（平均）	
延べ推進延長	m	284.6	

といった厳しい環境であったため、掘削時の地山の崩落、緩みを抑止し周辺環境に与える影響を極力少なくするため、曲線ボーリングによる先行支保工を採用した（図－12）。

曲線ボーリングの施工数量および曲線鋼管の仕様を表－3に示す。

1) 施工計画および留意点

①曲線鋼管の配置および仕様

曲線鋼管は支保工としての機能と、薬液注入工の改良ゾーンを考慮し60cm間隔とした。

また鋼管の径は先端装置および施工性を考慮し外径267.4mmとした。

曲率半径はアンダーパスの施工に支障のない作業スペースが確保できるようR = 8.0mとした。

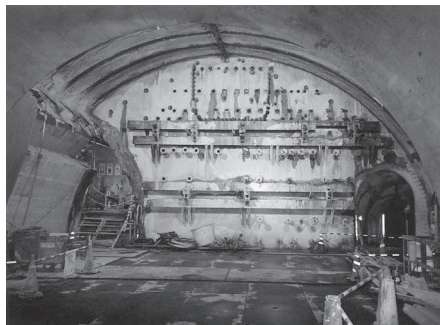
②曲線ボーリングの施工

曲線ボーリングを施工する地山には、切羽防護工としての高圧噴射攪拌工法（ロジンジェット工法）による改良体と薬液注入工による改良体が混在し、推進時支障物となり、鋼管の引き戻し、再掘進の恐れがあった。このため仮管をして先行して推進し、到達後本管と入れ替える方法をとった（写真－6、7）。

③薬液注入工

本管に予め33cm間隔で加工した薬液注入用孔を使用し、ダブルパッカー工法（スリーブ注入工法）により地盤強化を目的に薬液注入を行った（写真－8）。注入対象土量は1,534.3m³であり、対象土質は砂層、粘性土、砂礫層が混在していた。このため土質ごとに注入率を設定して注入量、注入率を決定した。平均注入率は32%となった。

注入材は一次注入材としてセメント・ベントナイト混合液、二次注入材として水ガラス系無機シリカゾル注入材を使用した。



写真－6 導坑掘削完了



写真－7 曲線ボーリング施工中



写真－8 薬液注入工



写真-9 本坑上半掘削

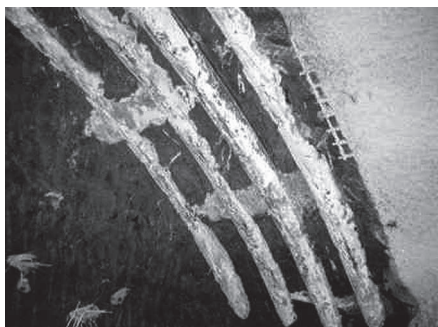


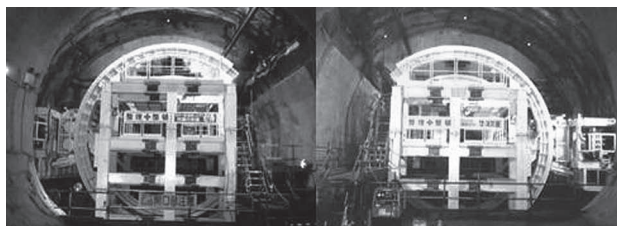
写真-10 鋼管露出



写真-11 本坑下半掘削

2) 曲線ボーリング施工結果

曲線ボーリング施工完了後、掘削を行い（写真-9～11）、吹付コンクリートにて一次覆工を行ったが、坑内変位、軌道変位とも許容値内で終了することができ、特に問題なくアンダーパスの施工を行うことができた（写真-12）。



足立方面

板橋方面

写真-12 線路下アンダーパス施工状況

2.3 施工事例3

(1) 工事概要

工 事 名：首都高中央環状新宿線SJ22工区
(2-1) 富ヶ谷出入口トンネル工事

工事場所：東京都渋谷区富ヶ谷一丁目、
二丁目、上原一丁目

施工時期：全体工期：平成15年8月

～平成21年9月

太径パイプルーフ施工期間：

平成17年11月

～平成18年10月

①施工概要

首都高中央環状新宿線は環状6号線（山手通り）の地下に内回り、外回りの2本のトンネル構造で建設されている。本工事は本線トンネルと地上部を連絡する富ヶ谷出入口の一部である160m区間を非開削工法で構築するものである。

出入口部は併設された2本のシールドトンネル間を掘削し切広げるため、上部支保材として直線パイプルーフを、下部支保材として太径曲線パイプルーフを施工した。

工事区間は3つに大別され工区中央に立坑部、新宿側非開削部（延長46m）そして大橋側非開削部（延長84m）があり、非開削部に直線パイプルーフ、太径曲線パイプルーフを施工した（図-13、14）。

(2) 施工順序

1) 新宿側非開削部（図-15）

①掘削断面の上部は直線パイプルーフ（1016mm、
L = 46m × 15本）にて上載荷重を支保し、下

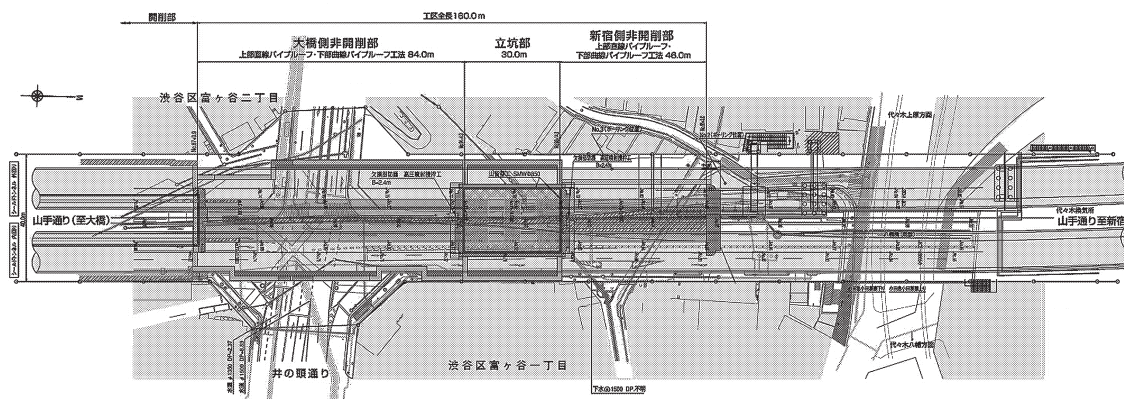


図-13 施工位置平面図

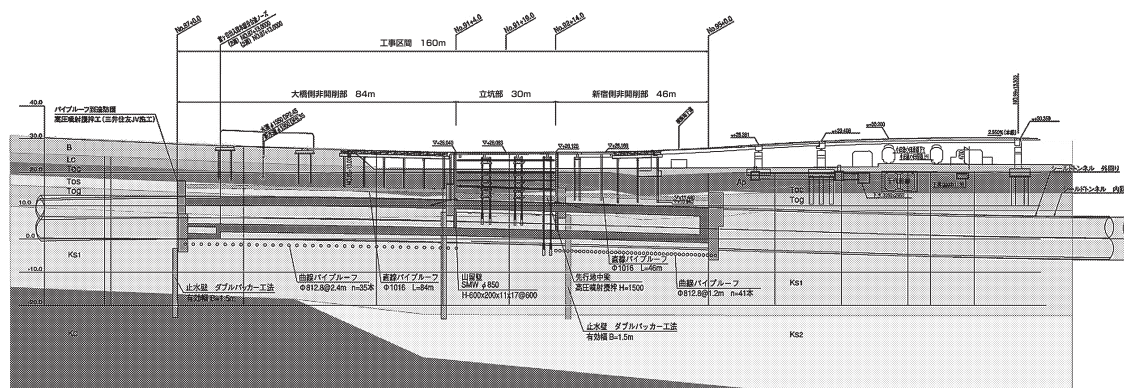


図-14 地質縦断面図

部は太径曲線パイプ工法（812.8mm、 $t=18\sim22\text{mm}$ ）により地盤反力および水圧を支承する構造である。

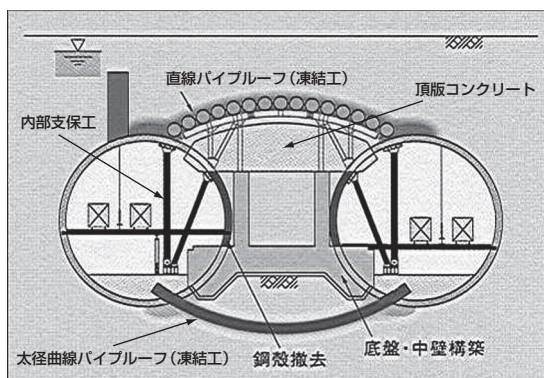


図-15 新宿側構造図

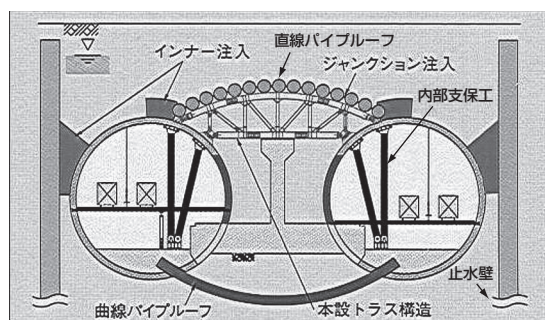
- ②太径曲線パイプ工法は泥水式密閉型掘進工法により、片方のシールドトンネル内からもう一方のトンネルに向かって発進させる。曲線パイプ工法鋼管は1ピース長3.06mの鋼管を現場溶接にて接続しながら掘進し、到達した推進機を回収する。推進機は立坑を経由して発進側トンネルに移動し、次のスパンを推進する。これを1.2m間隔で所定のスパン数を繰り返す。
- ③トンネル間の掘削時の止水として、スチールセグメントとパイプ工法部に凍結管を設置し凍結工法により、隣接する鋼管の間を止水する。
- ④スチールセグメントと太径曲線パイプ工法の接続部は、インバートコンクリート（鉄筋コンクリート構造）で一体化させる。
- ⑤シールド通過前に東京礫層（Tog層）における

地下水の流速を低下させ、凍結工をより効率よく行うため、流水防護壁を薬液注入工（二重管ストレーナー工法）により構築する。

- ⑥掘削に先立ちシールドトンネル内部に補強材として内部支保工を設置する。
- ⑦トンネル間の掘削は、本設躯体頂版を設置する上半部分を先行する。上半掘削に併行して、上部のパイプルーフを支保するための仮設トラス部材を1.2m間隔で設置し、上半掘削完了後、鉄筋コンクリートの頂版を構築する。
- ⑧トンネル間の下半を掘削し、底盤、中壁コンクリートからなる躯体を構築し、内部支保工を撤去する。

2) 大橋側非開削部（図－16）

- ①トンネルの両側に薬液注入による止水壁を構築し、掘削部に浸入する水量を低減する。
- ②掘削断面の上部・下部は、新宿側非開削部と同様に直線及び太径曲線パイプルーフを施工する。
- ③トンネル周辺の地下水位を低下させ、下部からの水圧の作用をなくすことにより、下部の太径曲線パイプルーフの設置間隔を2.4mと大きくした。



図－16 大橋側構造図

- ④上部直線パイプルーフ部の止水は凍結工によらず薬液注入工にて行う。

- ⑤頂版の本設躯体構造は以下の理由により、鋼製トラス構造とした。

- (a) 切広げ区間が長いことから構築が早期にでき工程上有利となる。
- (b) 直線パイプルーフの支保工を兼用でき、合理的となる。

(3) 太径曲線パイプルーフの施工

1) 施工計画および実証実験

太径曲線パイプルーフは併設トンネル下部でインバートにより剛に接続し、下部支保工とし上部アーチ支保工で囲まれた安定した構造体を形成することでトンネル間掘削が可能となる。また新宿側は掘削盤下方からの水圧に対する防護として凍結工法を併用する。

掘進は片側のトンネルから下方に向けて発進し、半径16mの円弧を描きながら反対側のトンネルのセグメントの主桁間に到達させる。鋼管は外径812.8mm、厚さ18～22mmを使用した（写真－13）。太径曲線パイプルーフの施工数量を表－4に示す。またφ800という大口径の曲線パイプルーフ施工は業界初の試みであることから、施



写真－13 曲線鋼管（φ800）

表－4 太径曲線パイプルーフ施工数量表

項 目	単 位	数 量	備 考
施工本数	本	76	鋼管仕様：管外径812.8mm 材質SKK 490 曲率半径R = 16.0m
1本当り削孔長	m/本	19.2	
延べ推進延長	m	1,482	

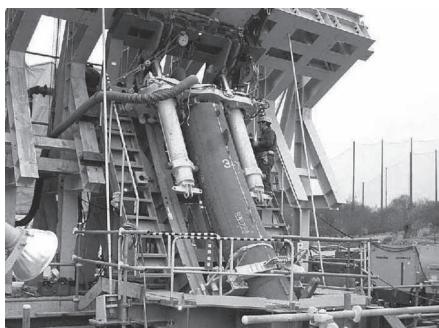
工精度、操作性また施工性を確認するため、本工事に先立ち実証実験を行い実施工に臨んだ（写真－14、15）。

掘削工法は泥水式の機械式推進工法で推進機も曲線形状となっている（写真－16）。セグメントの発進、到達部分はガラス繊維強化プラスチック

パネルを予め組み込んだセグメントとし、掘進機が直接切削することで坑口部の止水注入工を不要とした。

2) 施工結果

太径曲線パイプルーフ施工後、トンネル内部の補強、トンネル間の掘削、セグメント撤去を行ったが、土砂崩壊、地表沈下等の大きなトラブルが発生することなく、その後躯体構築を行うことができた（写真－17～22）。



写真－14 実証実験状況（推進前）



写真－15 実証実験状況（推進機到達）



写真－16 泥水式推進機



写真－17 曲線パイプルーフ掘進



写真－18 曲線パイプルーフ推進機到達



写真－19 シールドトンネル内部支保工



写真-20 シールドトンネル間掘削完了



写真-21 躯体構築状況



写真-22 躯体構築全景

3. 曲線ボーリング工法 太径曲線パイプルーフ工法の今後の展望

今回紹介した事例のうち事例1は凍結工法を合理的に行うための鞘管としての機能であり、事例2は薬液注入を施工する注入管の機能とともに、鋼管支保工として地山を保持する機能を有する。また事例3については非常に厳しい環境下で土留

仮設構造物として機能している。このように非開削で地下空間を構築する場合、曲線ボーリング工法、太径曲線パイプルーフ工法を採用することにより、安全かつ合理的な施工が可能となる。

この技術をさらに高めることにより、大断面トンネルの地中接合、高速道路の分岐合流部また既設地下空間の拡幅等の適用事例が増加するものと考ええる。

【参考文献】

- 1) 1995土木学会誌：土木学会
曲線ボーリング工法（TULIP工法）の開発：亀岡美友、粕谷太郎
- 2) 1998地下シンポジウム論文・報告集：土木学会／曲線ボーリング（TULIP工法）を利用した凍結管の設置／鎌田敏正、鈴江利康、柴田敏幸、藤澤伸行
- 3) NEW TULIP工法技術資料：NEW TULIP工法研究会
- 4) 首都高速中央環状新宿線SJ22工区（2-1）富ヶ谷出入口トンネル工事パンフレット
- 5) 2007土木学会誌：土木学会
地下空間を開拓！新しい道路トンネル分合流部構築技術－太径曲線パイプルーフ工法の開発と首都高速中央環状新宿線への適用：土橋浩、吉川正、田辺清、斎藤雅春、山本善久

○お問い合わせ先

NEW TULIP工法研究会

〒101-8366 東京都千代田区三崎町2-5-3

鉄建建設㈱土木本部内

Tel：03-3221-2104

Fax：03-3265-3776

執筆者紹介

佐藤 栄徳（さとう よしのり）

鉄建建設㈱土木本部土木企画部担当部長

技術士（建設部門）