

地下 40m の高被圧地下水下において 非開削工法によるポンプ室築造工事

Non-open cut construction of a pumping station at a depth of 40m
under highly pressurized groundwater

辻 雅行¹・村松 泰²・梶山雅生³・森崎泰隆⁴

Masayuki TSUJI・Yasushi MURAMATSU・Masao KAJIYAMA・Yasutaka MORISAKI

Tokyo Metro Co., Ltd. is constructing the No.13 subway line 8.9km long between Ikebukuro and Shibuya. This project includes a section 1,245m long between Zoshigaya station and Nishi-Waseda station(tentative station names),where two single-track shield tunnels of 6,600mm in segment outer diameter will be constructed in parallel. Since this section crosses a river ,the longitudinal alignment is V shaped ,requiring construction of a pumping station at a depth of 40m under highly pressurized groundwater.

This paper discusses the construction plan of the pumping station by the non-open cut method with auxiliary reinforcing techniques installing for example curved steel pipes from the shield tunnel.

Key Words: shield tunnel ,pumping station ,non-open cut construction ,curved steel pipes

1. はじめに

東京メトロでは、現在、地下鉄 13 号線池袋～渋谷間 8.9km を建設中である。このうち、雑司ヶ谷駅と西早稲田駅（駅名はいずれも仮称）間のトンネルは、単線用シールドトンネルを並列により施工する。

当該区間は、都道明治通り下に位置しており、道路内にある、東電洞導、NTT とう道等、大型埋設物を避けるためトンネルの土被りは大きく、また、中間地点で河川（神田川）を横断する。このため、トンネル縦断線形は V 字型となり、トンネルは中間地点付近が最深部となることから、ポンプ室を設置する必要がある。

ポンプ室設置にあたり、当該地は、交通量が激しい都道部の交差点に近接し、作業帯の設置が難しく、また、地下部は輻輳する大型埋設物が支障となり、地表からの開削工事ができない施工条件から、シールドトンネル内より非開削工法によるポンプ室築造を選択した。

中間ポンプ室は、地下約 40m 付近が床付けとなるため、高被圧地下水を受けた非開削工事となり、種々の課題を検討し施工計画を行った。本文は、その結果について報告するものである。

キーワード：シールド工法、ポンプ室、非開削工法、曲がり鋼管、地盤改良工、FEM 解析

¹正会員 東京地下鉄（株） 建設部 早稲田工事事務所 所長

²正会員 東京地下鉄（株） 建設部 早稲田工事事務所 技術課長

³正会員 （株）熊谷組 首都圏支店 13 号線西早稲田作業所 副所長

⁴正会員 （株）熊谷組 土木事業本部 トンネル技術部 副長

2. 工事概要

(1) 現場位置

地下鉄13号線は東京有楽町線新線池袋駅を起点とし、都道435号（通称：グリーン大通り）、都市計画道路環五ノ1号線の下を通過後、明治通りを南下し、新宿三丁目、明治神宮前を経由して渋谷に至る延長8.9kmの路線である（図-1 参照）。その内、高田A線工区（図中矢印線）は、雑司ヶ谷駅と西早稲田駅間に位置している。この間のトンネルは、延長1,245m、セグメント外径6,600mmの単線シールドを並列で施工する計画である。また、縦断面図に示す通り、トンネル縦断線形はV字型となり、区間中間部付近がトンネル最深部（図中丸印）となることから、ポンプ室が計画されている。

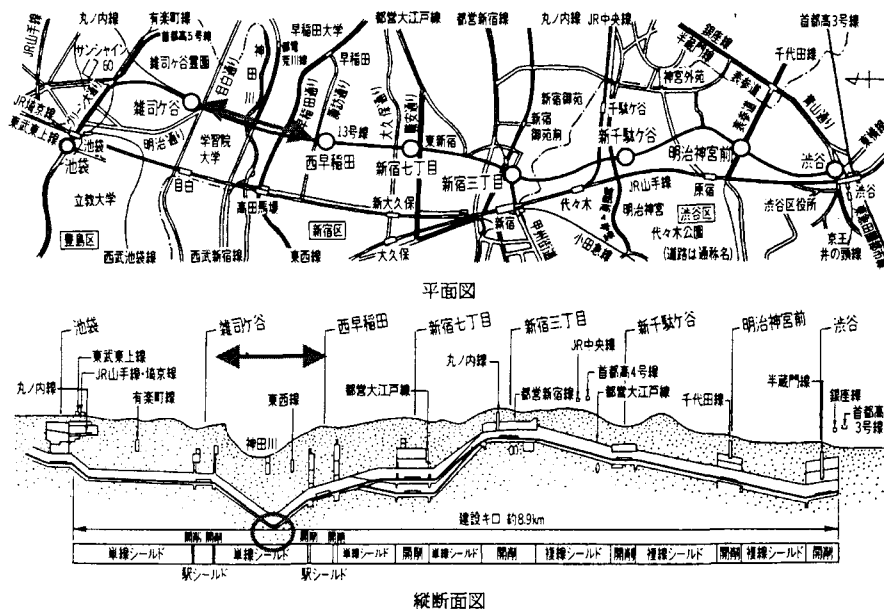


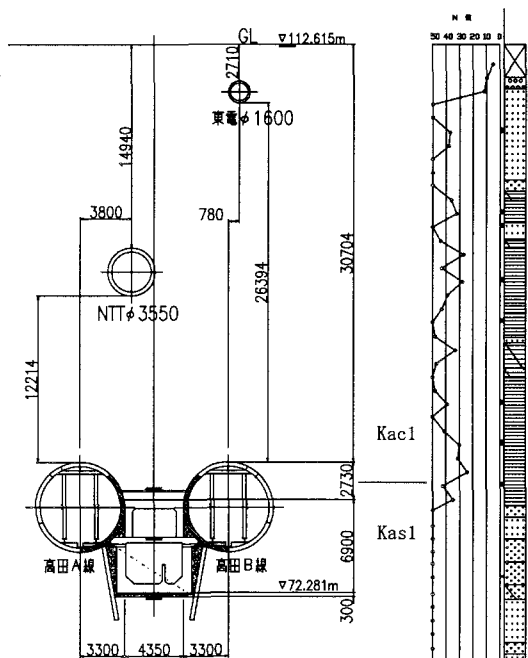
図-1 地下鉄13号線路線平面・縦断面図 1)に加工

(2) 地質概要

中間ポンプ室は、交通量が多い明治通り直下（土被り32.7m）の土砂地山（第4紀更新世洪積層上総層群粘性土・砂質土）中に築造される。また、地中では、上部にNTTとう道や東電シールドが線路方向に併走している（図-2 参照）。よって、中間ポンプ室は、非開削工法を採用することとした。施工箇所の土質は、上部に上総層粘性土（Kac1）、下部に上総層砂質土（Kas1）であり、土被りは約32.7m、地下水は被圧され掘削底版で約0.32MPaである。各層の物性値を表-1に示す。

表-2 地盤物性値一覧表

項目	単位	上総層粘性土 (Kac1)	上総層砂質土 (Kas1)
N値	—	30～50	50以上
単位体積重量	kN/m ³	17	18
粘着力	kN/m ²	260	0
内部摩擦角	°	0	42
変形係数	kN/m ²	54,400	75,300
透水係数	cm/sec	—	1×10 ⁻³



4. 施工方法および施工手順

(1) 曲がり鋼管の施工方法²⁾

曲がり鋼管の施工方法は、金沢外環状道路の涌波トンネルで実績のある PSS-Arch 工法を採用する。PSS-Arch 工法は、曲線ボーリングを用いて曲線鋼管を地山に挿入設置していく工法で、めがねトンネルにおいて本線トンネルの掘削に先立ち、中央導坑から事前にトンネル支保工を設置することができる。また、鋼管を用いて薬液注入を行うことにより、注入式長尺先受け工と同程度以上の地盤改良が可能である。さらに、鋼管内をモルタル充填することにより、剛性の非常に高いトンネル支保工を掘削作業前のはるか先方に連続して設置することができる。

工法の特徴としては、あらかじめ設置された支保工の中を掘削するため、地山の先行変位の抑制効果が大い。そのため、周辺地山への影響を減少させる事ができ、切羽崩落に対する安全性も向上する。涌波トンネルの工法概念図を図-4 に、PSS-Arch 工法を採用した場合の中間ポンプ室の概念図を図-5 に示す。

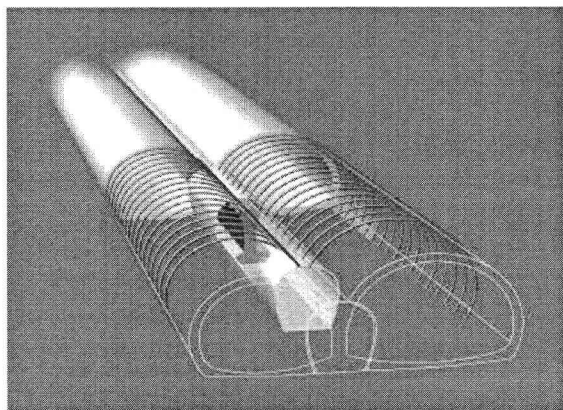


図-4 涌波トンネル PSS-Arch 工法概念図

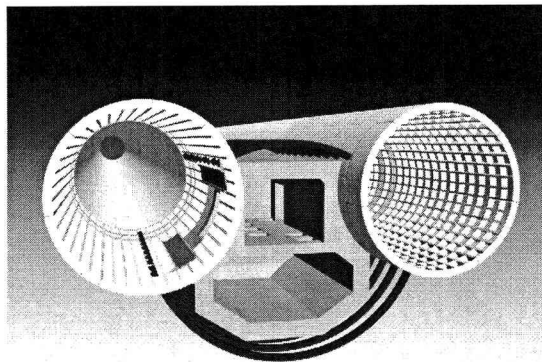


図-5 東京メトロ地下鉄 13 号線中間ポンプ室概念図

涌波トンネルにおける施工手順を図-6 に示す。

- ①中央導坑の支保部材である吹付けコンクリートを先行削孔。
- ②後述する推進機構を用いて $L=3\text{m}$ /ピースの曲線鋼管を溶接等で接続しながら所定の長さまで設置する。
- ③地山と鋼管の間を充填する一次注入を行い、さらに二次注入として浸透性のある水ガラス系溶液型注入材により地山改良を行う。
- ④先行支保としての鋼管の剛性向上のため、鋼管内にモルタルを充填する。

地下鉄 13 号線の中間ポンプ室の施工に当たり、現在、涌波トンネルにおける曲がり鋼管の施工を参考に図-7 に示すような推進機を用いて曲がり鋼管の施工を計画している。

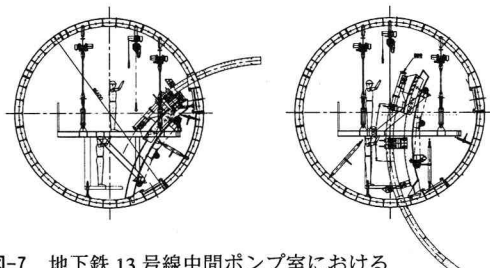


図-7 地下鉄 13 号線中間ポンプ室における曲がり鋼管設置概念図

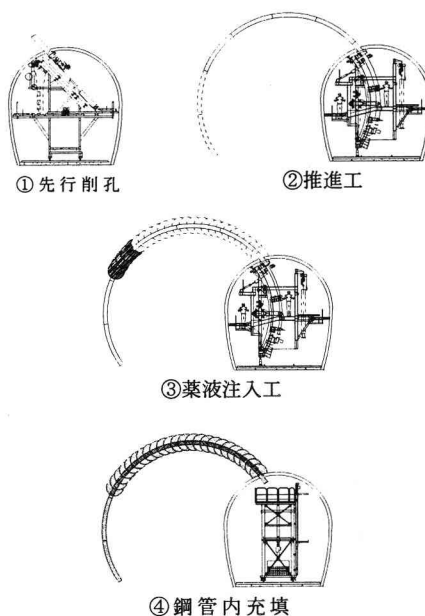


図-6 涌波トンネルにおける PSS-Arch 工法施工手順

(2) 掘削機構

涌波トンネルにおける、曲線鋼管推進のための掘削機構は、従来の回転式の推進機を使用した方法とは異なり、新たに開発した「先端に取り付けた刃口とウォータージェット及び圧縮空気の併用で、刃口を圧入させながら掘削を行う非回転式方法」であり、泥水の排出は中央の排泥管（内管）からバキュームポンプにより吸引するものであり、涌波トンネルにおいて開発された新しい工法である。（図-8、写真-1）涌波トンネルにおける地山は砂質土であり、地下鉄13号線の中間ポンプ室の施工においても基本的な掘進機構は、同様なもので施工可能であると考えているが、ウォータージェットの圧力等々粘性土への適用に関して試験等を行った上で中間ポンプ室の施工にあたる予定としている。ウォータージェットでの掘削機構のため鋼管の形状は四角でも可能である。

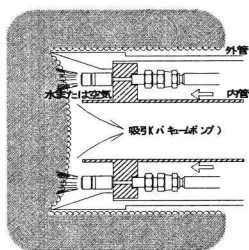


図-8 削孔システム

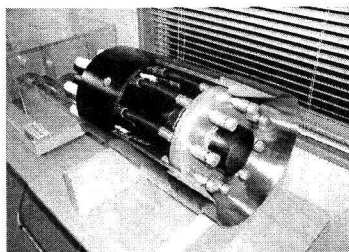


写真-1 刃口と先端ノズル

(3) 中間ポンプ室の施工手順

表-3 中間ポンプ室施工手順

	1. 地盤改良 2. 地下水位低下工法（ウェルポイント） 3. 上部土留め工（曲がり鋼管挿入） 4. 下部土留め工（曲がり鋼管挿入） 5. 掘削切羽補強工（縫地ボルト挿入） 6. セグメント開口部補強桁設置		12. 上半二次掘削 13. 中床下部均しコンクリート 14. 中床版コンクリート（かまち梁・中央部作業開口確保） 15. B1 階側壁コンクリート 16. B1 階側壁接合部無収縮コンクリート
	7. 棲部背面地山補強工 8. セグメント変形防止工（トンネル内：鉛直・水平方向）		17. 下半掘削・曲がり鋼管部吹付け 18. 下半防水工基礎コンクリート
	9. 上半一次掘削（導坑より切掘け）曲がり鋼管部吹付 10. 上部防水工 11. 上床版コンクリート		19. 下床版コンクリート 20. B2 階下ハンチ部コンクリート 21. B2 階側壁上部コンクリート 22. B2 階側壁接合部無収縮コンクリート 23. 中床版コンクリート（施工開口部）

5. 先行支保および内部支保工の検討

先行支保および内部支保工の検討は、FEM 解析および骨組み構造解析により行う。その内、FEM 解析により検討した結果を以下に示す。

(1) FEM 解析モデル

二次元 FEM 解析における地山と部材は表-4 のようにモデル化する。

表-4 地山および部材のモデル化

構成要素	要素モデル
地山	面要素
吹付けコンクリート	面要素
ポンプ室躯体	面要素
セグメント	梁要素
鋼管	梁要素
H形鋼	梁要素

(2) 解析領域

解析領域は、図-9 の通り設定した。また、上方境界については、Terzaghi の緩み高さにより算定した値とした。

(3) 解析モデル

解析モデルを図-9 に示す。境界条件は、モデル下端が X 方向、Y 方向とも固定で、モデル右、左端が X 方向固定、Y 方向自由とした。

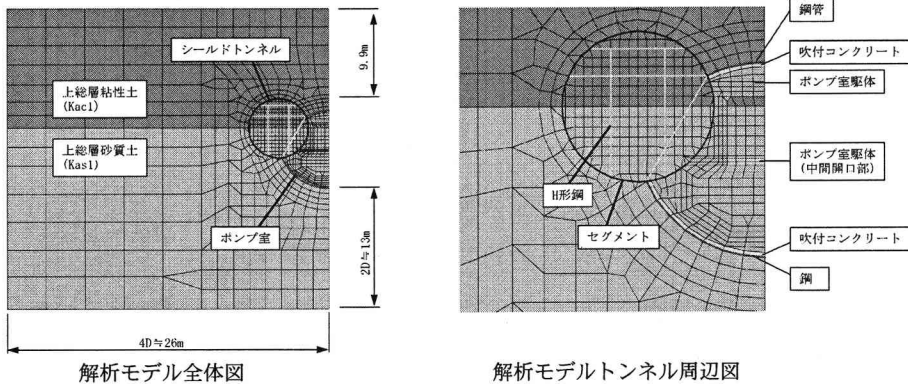


図-9 解析モデル図

(4) 部材の物性値

セグメント、吹付けコンクリート、ポンプ室躯体、H 形鋼および鋼管(合成断面)の物性値を表-5 に示す。H 形鋼および鋼管は 1.2m ピッチの配置とした。

表-5 入力物性値

部 材	変形係数 (kN/m^2)	ポアソン 比	断面積 (m^2)	断面係数 (外) (m^3)	断面係数 (内) (m^3)	断面二次M (m^4)	摘要
セグメント	2.1×10^8	0.2	2.53×10^{-2}	1.98×10^{-4}	2.06×10^{-3}	1.14×10^{-3}	1リング当り
吹付けコンクリート	3.4×10^6	0.2	-	-	-	-	
ポンプ室躯体	2.5×10^7	0.2	-	-	-	-	
ポンプ室躯体(中床版開口部)	3.7×10^6	0.2	-	-	-	-	
H形鋼 (250H)	2.1×10^8	0.3	9.1×10^{-3}	8.6×10^{-4}	-	1.1×10^{-4}	1本当り
鋼管(□250合成断面)	4.6×10^7	0.3	6.3×10^{-2}	6.5×10^{-4}	-	3.7×10^{-4}	1本当り

(5) 解析結果

各部材の応力値を図-10 (1) (2) に示す。各部材とも、発生した応力値は許容応力度以内となっている。

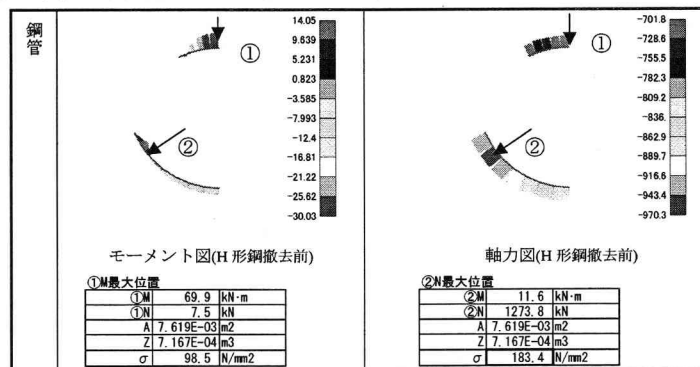


図-10 (1) 解析結果(鋼管の応力値)

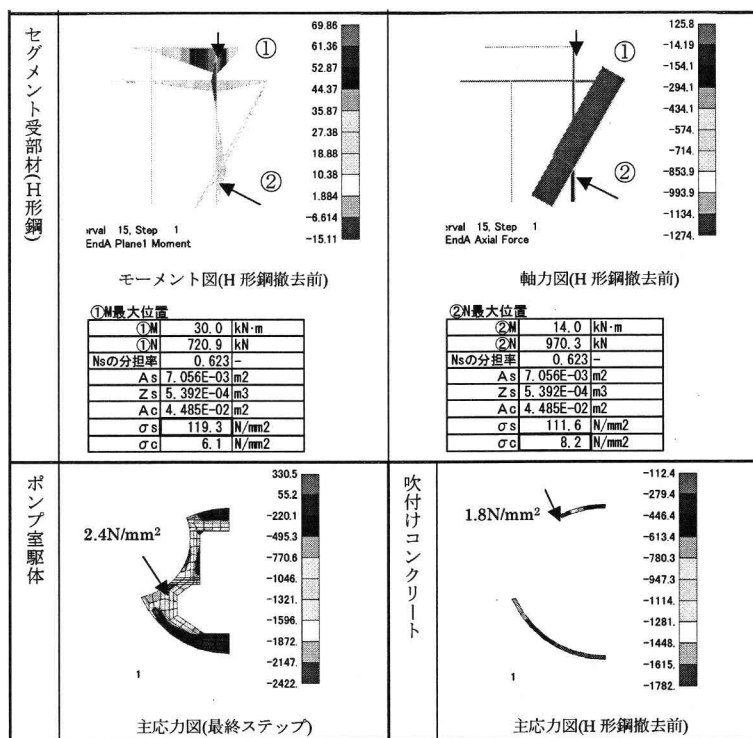


図-10(2) 解析結果 (鋼管, セグメント受け部材, ポンプ室躯体, 吹付けコンクリート)

(7) 検討結果

検討の結果, 表-6 に示す部材を用いて施工計画を行っている.

表-6 検討結果

部 材	仕 様
曲がり鋼管(上部)	四角鋼管(250×250モルタル充填)1.2mピッチ
曲がり鋼管(下部)	四角鋼管(250×250モルタル充填)1.2mピッチ
セグメント受け部材	H250×250 1.2mピッチ

6. セグメントの検討

セグメントは鋼製とし, 9R 連続のはりばねモデルを用いて, 施工時と完成時の検討を行う.

(1) 検討対象

解析検討対象の中間ポンプ室の概要を図-11 に示す.

(2) 検討ケース

施工ステップに合せた検討ケースとして以下の施工時 3 ケース, 及び完成時の合計 4 ケース設定する (表-7). ポンプ室はトンネル軸方向に 9.4m の長さがあり, 掘削時にはセグメントに大きな偏荷重が作用するため, 施工ステップ毎に解析を行なう.

(3) はりばねモデル

中間ポンプ室が位置する 7R とその両端部を含めた 9R は, 開口部を有するなど各々が異なった構造となるため, 9R の連続モデルとしてはりばねモデルで解析を行う (図-12).

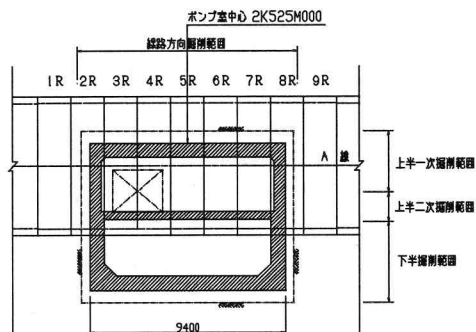
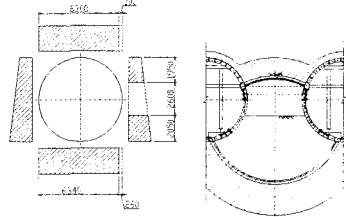
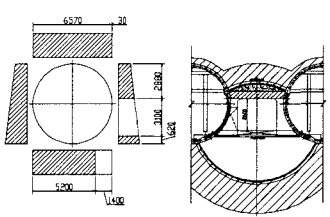
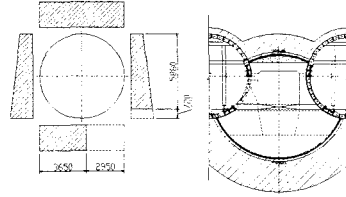
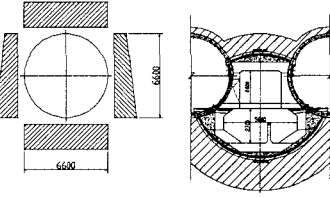


図-11 中間ポンプ室の概要 (縦断図)

表-7 検討ケース

1. 施工時① 【上半一次掘削（上床版打設前）】	2. 施工時② 【上半二次掘削（中床版・B1F 壁打設前）】
	
3. 施工時③【下半掘削】	4. 完成時
	

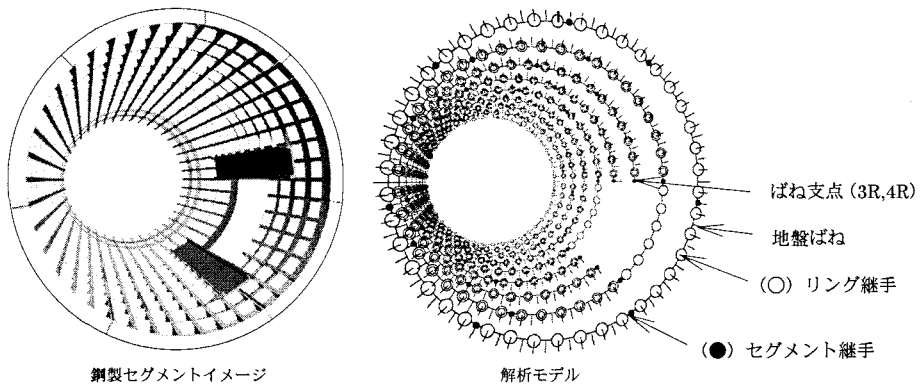


図-12 はりーばねモデル概要（施工時②におけるモデル）

(7) 検討結果

検討の結果，表-8 に示す部材を用いて計画を行っている。

表-8 検討結果

部材	仕様	部材	仕様
セグメント幅	1600 mm	主桁厚（3本主桁）	22 mm
セグメント高さ	270 mm	スキムプレート厚	9 mm

7. おわりに

地下鉄 13 号線の高田 A 工区の間ポンプ室を曲がり鋼管による先受け工と薬液注入および地下水低下工法を併用した施工計画と概略設計について記述した。施工時は，セグメントの応力，変位等の計測を行い，設計時の予測と比較することにより，設計・施工の妥当性を評価しながら進めていくことが重要である。今回の工法は，高被圧地下水下における非開削工法を安全で効率的に施工するためのものであり，他への応用が非常に期待される工法であると考えている。今後，詳細についての検討をさらに進め，施工を安全に進めていきたいと考えている。

参考文献

- 岡田龍二，小山浩史：総重量 5,000tf の地下鉄丸の内線を受ける，トンネルと地下，pp.67-75，vol.36，no.9，2005。
- 高橋裕之，宮田正弘，原 守哉，稲田正毅，松本壮太郎：曲線鋼管を用いた先行アーチ支保工によるめがねトンネルの施工，土木学会トンネル工学研究論文・報告集，第 13 巻，pp.231-236，2003。