

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・岩崎 肇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。

中間ポンプ室設置の工法選定に当たっては、計画箇所が交通量の激しい都道部交差点直下であること、地下部に大型埋設物が輻輳すること、床付深度が約40mで且つ地下水圧が高いことなどを勘案し、地表からの開削工事を避け、シールドトンネル内からの曲がり鋼管先行支保工（PSS-Arch工法）による非開削工法を採用することとした。同工法は山岳トンネル工事での実績があり、その技術的優位性が証明されているが、都市部における地下鉄建設現場での適用は今回が初めてとなる。

本文はその施工結果について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、PSS-Arch工法、スイング式ノズル

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 首都圏支店 13号線西早稲田作業所 工事課長

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。

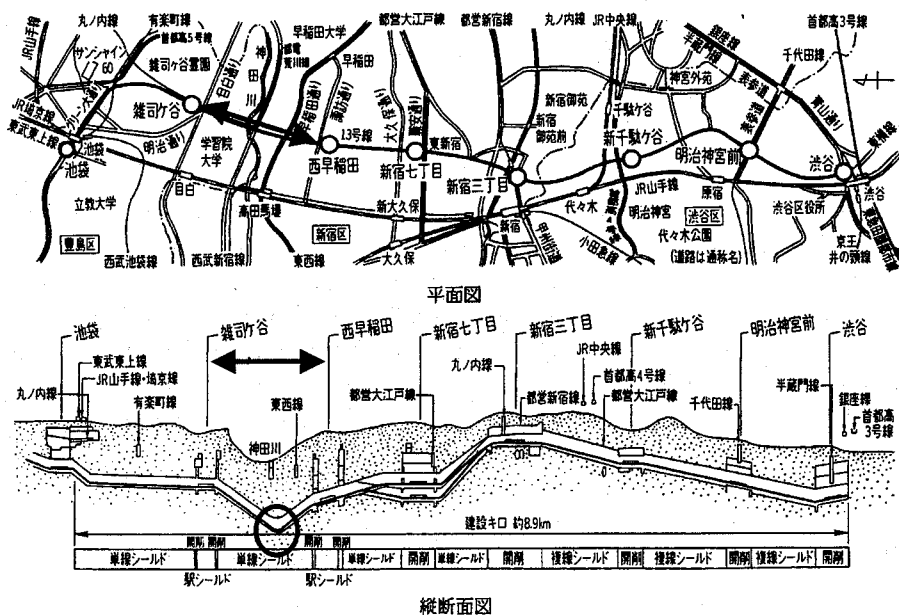


図-1 地下鉄13号線路線平面・縦断面図1)に加筆

(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-1 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

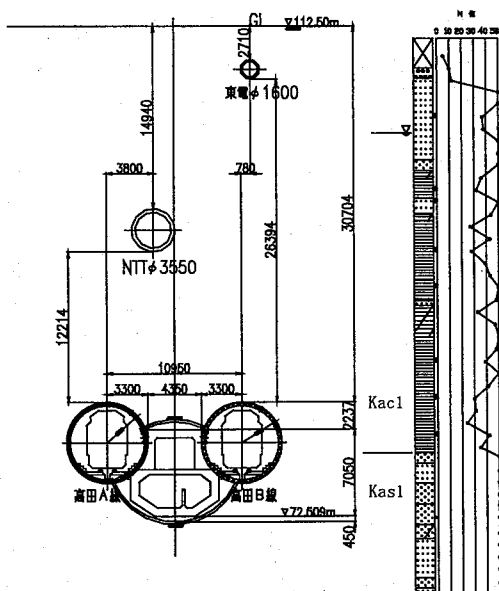


図-2 中間ポンプ室周辺の地質および近接構造物

4. 曲がり鋼管の施工方法

(1) 曲がり鋼管の採用²⁾

本工事に採用する曲がり鋼管は金沢外環状道路の涌波トンネルで実績のある PSS-Arch 工法を基本とした。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、先行施工した単線シールドトンネル内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。

本工法の特徴は、あらかじめ設置された支保工の中を掘削するので、地山の先行変位の抑制効果が大きい。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-6 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-7 に示す。

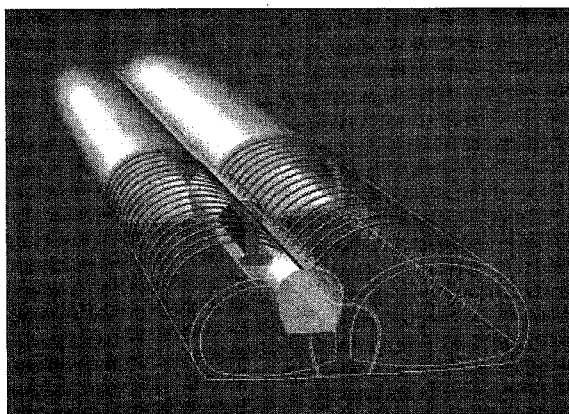


図-6 涌波トンネル PSS-Arch 工法概念図

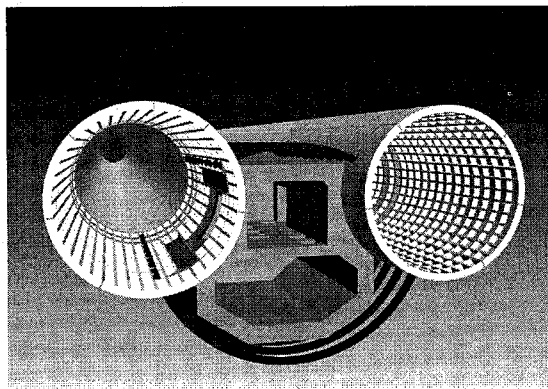


図-7 東京メトロ地下鉄13号線中間ポンプ室概念図

(2) 施工手順

地下鉄13号線中間ポンプ室における施工手順を図-8 に示す。

- ① 推進機を所定の位置に据え付け、先頭管をセットする。
- ② 円弧状のガイドレールに沿って推進させ、所定の長さまで挿入する。
- ③ 2本目の曲がり鋼管をセットし、先頭管の端部と溶接接合にて一体化し、②と同様に推進を行う。
(3本目以降、相手方のトンネルに到達するまで同作業の繰り返し。)

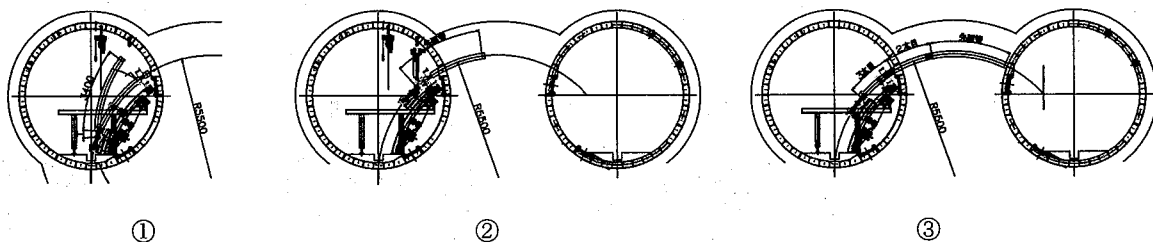


図-8 地下鉄13号線中間ポンプ室における曲がり鋼管設置概念図

(3) 曲がり鋼管の形状

中間ポンプ室工事では涌波トンネルにおける曲がり鋼管の形状（円形、 $\phi 250\text{mm}$ ）を改善した角型形状にすることにより施工精度の向上および、同工法の適用性の拡大を図り、以下のとおりとした。

- ・ 基本部材：角型鋼管（ $\square - 250 \times 250 \times 9$ ）
- ・ 曲線半径：5,500mm
- ・ 部材長：先頭管=3,400mm（刃先部分除く、写真-1）
2本目以降=1,900mm

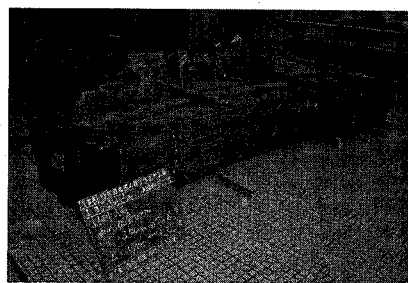


写真-1 曲がり鋼管

5. 試験施工の実施

(1) 掘削機構の検討

涌波トンネルに採用された、曲線鋼管推進のための掘削機構は、「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った。（図-9、写真-2）しかし、涌波トンネルにおける地山は砂質土であり、本工事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たが、ウォータージェットの圧力等、粘性土への対応や角型への適用に関して検討を行う必要があった。

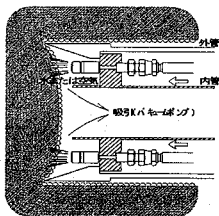


図-9 削孔システム

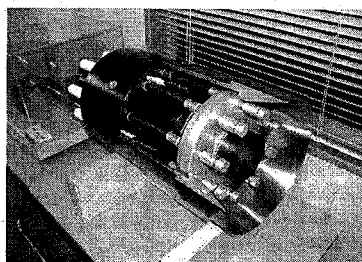


写真-2 刃口と先端ノズル

(2) ウォータージェット試験

粘性土への適用を考える上で、ウォータージェット（以下WJ）による地山の崩壊状態を事前に確認しておく必要がある。そこで、WJの圧力、ノズル形状の違いによるそれぞれの掘削状況を比較した。

施工条件：ノズル形状=直射、平射 15° 、平射 25° の3パターン

圧力=5Mpa、10Mpaの2パターン

（粘性土を想定し、流動化処理土にて実施）

試験結果を写真-3に示す。ノズル形状の違いが噴射跡に顕著に現れたが、いずれのパターンにおいても、地山が崩れることなく穴が自立した。また、圧力による大きな差異はみられなかった。

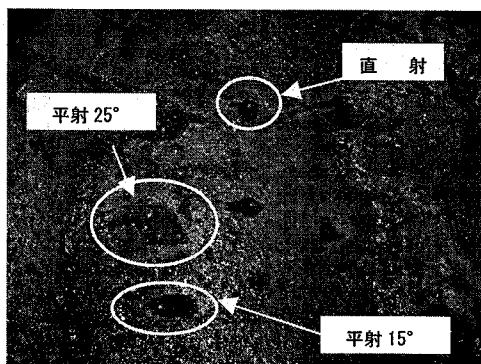


写真-3 WJ掘削状況

(3) スイング式ノズルによる推進試験

前述の試験結果を踏まえ、WJにて粘性土を掘削していくには、角型断面に対してムラ無く、一様にWJを噴射させる必要がある。そこで、写真-4に示す装置を製作した。本装置はノズルを一系列に配置したバーをスイングさせることで上述の条件を満たす動作が可能となる。

この装置を用いて、鉛直方向への推進試験を実施した。試験概要図を図-10に示す。

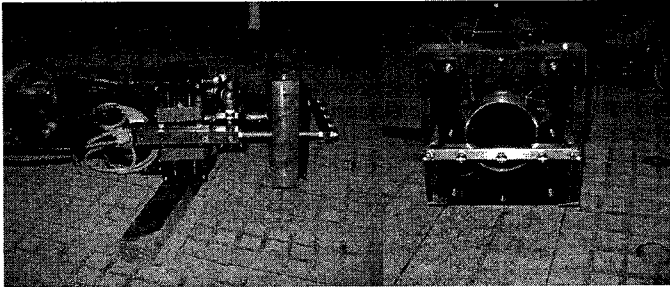


写真-4 スイング式ノズル装置

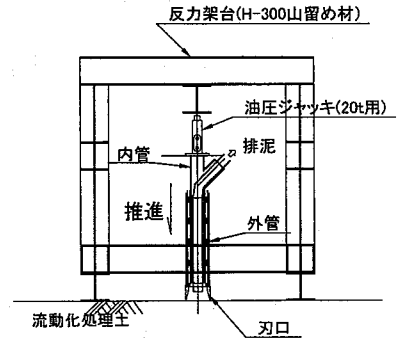


図-10 推進試験装置

スイング式ノズルからのWJ噴射状況および掘削後の地山状況を写真-5、写真-6に示す。

試験では約30cmの推進を行ったが、平均掘進速度は2.5cm/分であった。また、荷重計による推進力の計測結果では最大でも約2.4kNであった。この試験結果から、本装置の粘性土および角型断面への適応が可能であると判断した。



写真-5 スイング式ノズル装置からの噴射状況

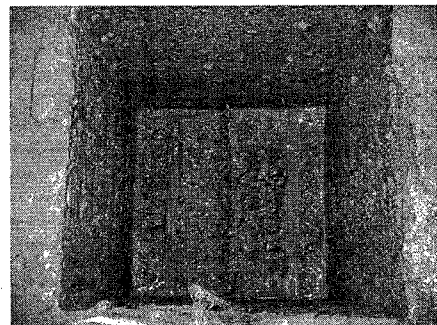


写真-6 掘削後の切羽状況

(4) 曲がり鋼管推進試験（本施工モデル）

鉛直方向への推進能力を確認できた次のステップとして、本施工用の推進機（詳細は後述）と曲がり鋼管（ $\square$ -250 $\times$ 250 $\times$ 9, R=5.5m）を用いて下向きへの推進試験を実施した。試験概要図および試験状況を図-11、写真-7に示す。

曲がり鋼管の全長は12.84mであり、L=2.0mのピース部材計7本を溶接で接合しながら推進を行った。平均掘進速度は1.4cm/分となり、前述の試験結果に較べて約6割程度となった。特に掘進の向きが上向きとなった時に掘進速度の低下が顕著であった。

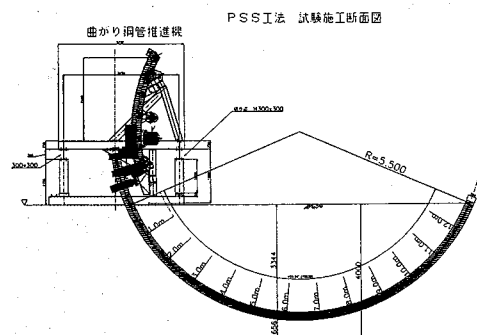


図-11 曲がり鋼管推進試験概要図

また、到達地点での施工精度としては、想定した箇所からのズレが、全掘進長に対して延長方向に約1/60、左方向に約1/35程度生じた。延長方向にズレが生じた原因としては、推進力のベクトルと曲線形に沿って随時変化する先端部のベクトルに差異が常に生じていることが大きく影響しているものと考ええる。また、左右方向のズレに関しては、推進機に曲がり鋼管をセットする際の精度が大きく起因しており、実施工時にはこの精度を上げることによってズレを抑制することは可能である。

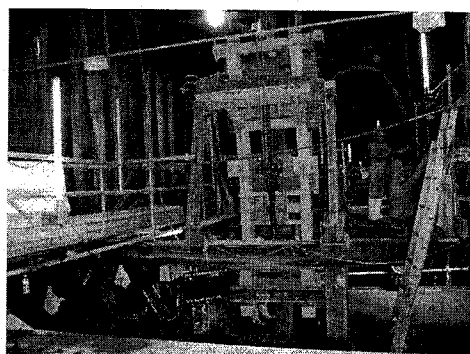


写真-7 試験状況

6. 曲がり鋼管の本工事への適用

(1) 推進機の概要

- a) 推進機的主要仕様は下記のとおりである。
 推進管サイズ: □-250×250
 推進曲管半径: 5.50m
 推進力: 80kN (Max)
 駆動源: 油圧モーター 最高使用圧力 28Mpa
 概要図を図-12 に示す。

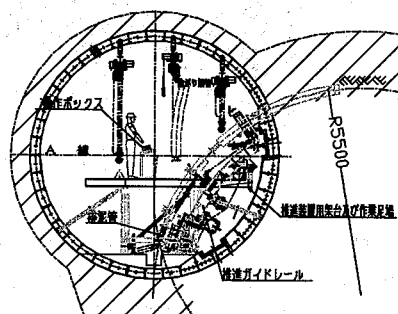


図-12 推進機概要図

- b) スイング式ノズルの仕様

試験施工では噴射角 65° のWJノズルを一行に5個配置したが、本施工では6個とした。また、WJの圧力は25～30Mpaとした。

- c) バキュームの仕様

吸引能力 20m³/分 (200V, 45kw), ホース口径は4"とした。

(2) 曲がり鋼管支保工の配置

標準断面図を図-13 に示す。曲がり鋼管支保は上部 (L=5.02m), 下部 (L=12.67m) 各10本が1.20m ピッチで配置されている。(図-14) PSS-Arch の施工はすべてA線側から行う。

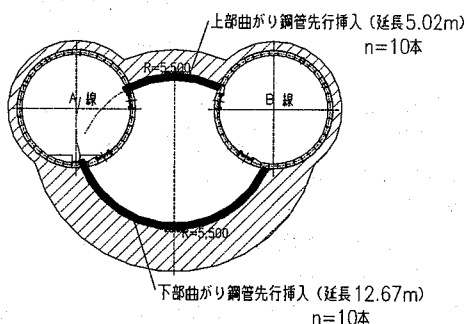


図-13 曲がり鋼管支保工断面図

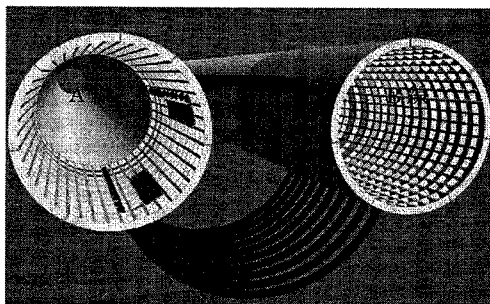


図-14 曲がり鋼管支保工設置イメージ

(3) 施工結果

a) 上部の施工

上部の地質は粘性土のため、WJによる掘削によって土粒子が溶け出してくるイメージを持って臨んだが、実際には最大10cm程度の塊状ではく離してきた。そのため、その塊がバキューム吸引口(内管の先端部)に詰まってしまう、排泥不能という事態が頻繁に起こった。上部施工の平均掘進速度としては1.1cm/分 (Max2.0cm/分) という結果であった。

b) 下部の施工 (写真-8)

下部の地質は N 値 50 以上の良く締まった砂層である。しかし掘進区間のなかでも堅さにばらつきがあり、場所によっては圧力 30Mpa の WJ によっても、崩すことが困難となることが懸念された。特に堅固な砂層はスイング式ノズルから刃先付きの先端装置 (固定ノズル 12 個、写真-9) に交換して掘進を行った。下部施工の平均掘進速度は 1.6cm/分であったが、比較的軟らかい箇所では 10cm/分で掘進することができた。

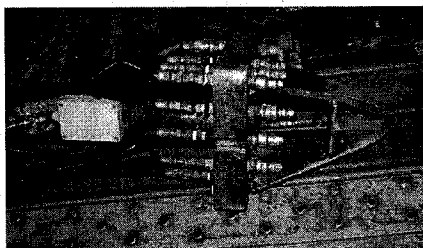


写真-9 刃先付き先端装置

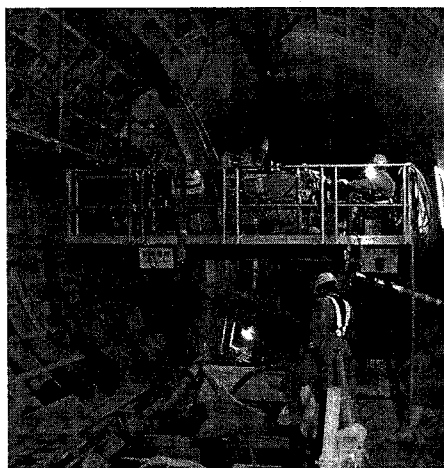


写真-8 下部施工状況

c) 施工精度

施工精度の計測は下部の曲がり鋼管のうち 1 本について行った。本施工では曲がり鋼管の先端が相手方トンネルのセグメントに到達した時点で完了となる。したがって、施工中に到達位置の正確な把握はできない。そこで、先端装置に傾斜計を取り付けて、曲線状の掘進軌跡を 1.0m ごとに計測することにした。その結果、到達部での掘進方向の誤差は全掘進長に対して約 1/250 であり、試験施工時に較べると大幅に精度が向上した。左右方向については、掘削時に検証する予定である。

(4) 裏込め注入および鋼管内部充填

PSS-Arch 工法による曲がり鋼管支保の設置後、鋼管と地山との間に C/B 注入を実施した。注入は鋼管内に専用のパッカー (写真-10) を挿入して行った。また、鋼管内部にはモルタルを充填して閉塞を行った。

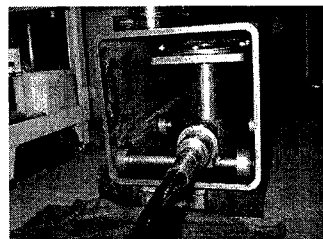


写真-10 注入用パッカー

7. おわりに

地下鉄 13 号線高田 A 線工区の間中ポンプ室を非開削工法で施工するにあたり、今回初めて PSS-Arch 工法を都市部の地下鉄工事で採用し、その施工結果について報告した。今回の施工ではスイング式ノズルの開発によって、これまでの施工実績に無かった『粘性土への適用』、『角型断面への適用』、『下向き施工への適用』を実証することができた。同工法は、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。現在、本工事は順調に推移しており、シールドトンネル内からの上半掘削を行っている。今後の工事工程において本工法採用の効果が発揮される。

最後に、本施工結果を基に更なる詳細検討を重ねることによって、都市部における地下空間開発技術の向上に貢献できるものと考えている。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.