

神田川との交差部における中央環状新宿線のトンネル工事 Tunnel Construction for Central Circular Shinjuku Route in Tokyo Metropolitan Expressway under the Kanda River

並川賢治¹・蔵治賢太郎²・吉田祥二²・田代晃一³

Kenji Namikawa・Kentaro Kuraji・Shoji Yoshida・Koichi Tashiro

In this paper a unique tunnel construction for Central Circular Shinjuku Route is summarized, which was constructed at a cross point of the Kanda River and Loop Road No.6 in Tokyo (Yamate Dori).

A technical feature of the work is close construction of a new tunnel under the Kanda River and over the subway Oedo Line (minimum offset distance is 1.8m). An underpinning by pipe roof method is applied for the construction at the point as the most appropriate one taking account of safety and influence for other infrastructures.

To examine an influence of the construction method for the subway, FEM analysis was implemented and the displacement of the subway was forecast.

As a result, it was possible to reduce the influence within a limit value of 5mm/10m for relative displacement of the subway rail.

Key Words : Underpinning, Pipe roof method, Adjacent construction , Steel pipe joint by bonding

1. はじめに

本論文で述べる工事は、神田川と都道環状6号線（通称山手通り）が交差する場所において建設を進めている首都高速道路中央環状新宿線のトンネル新設工事である（図-1に施工位置を示す）。

この工事での施工技術上のポイントは、神田川をパイプルーフ工法によりアンダーピニングしながら掘削することであり、課題は建設箇所下方に最小離隔1.8mで近接している供用中の地下鉄大江戸線への影響を小さくすることであった。

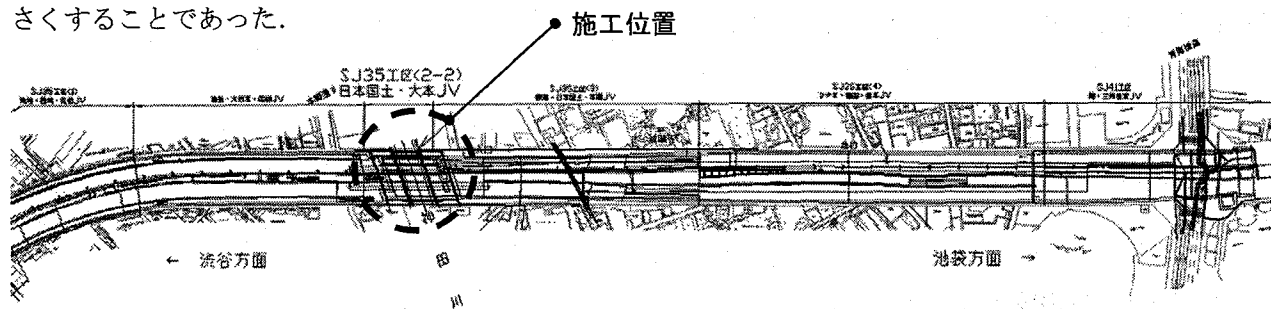


図-1 施工位置図

キーワード：アンダーピニング，パイプルーフ工法，近接施工，鋼管接着継手

¹ 正会員 首都高速道路㈱東京建設局 設計第一グループ

² 非会員 首都高速道路㈱東京建設局 設計第一グループ

³ 正会員 日本国土開発株式会社 土木統轄本部技術部

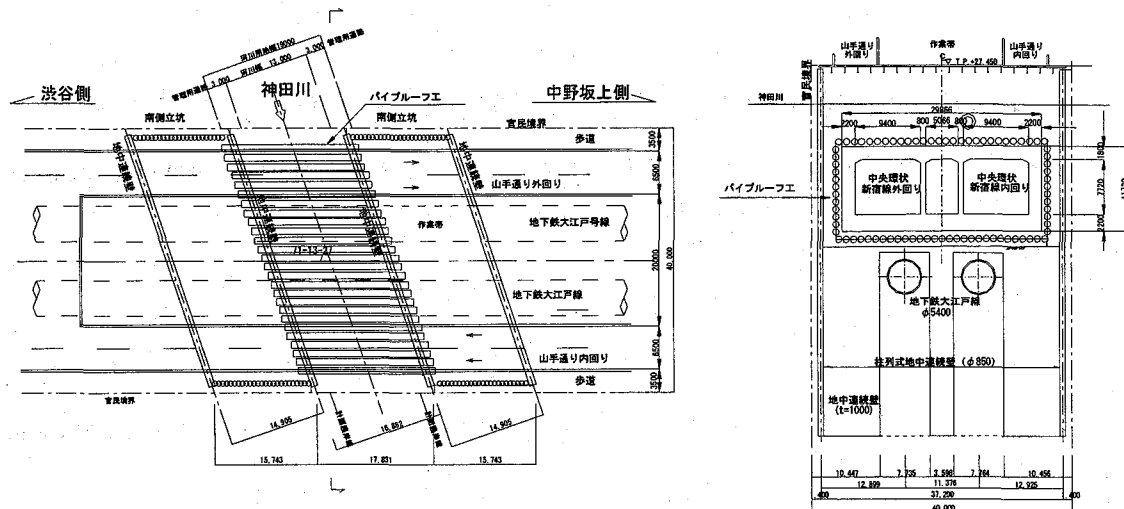


図-2 施工平面図および断面図

そのため神田川との交差部においては、トンネル上方の河川および下方の地下鉄への影響を考慮し、躯体施工範囲の全周をパイプルーフで施工した後に掘削する計画となっていた。図-2に平面・断面図を示す。施工では、全周パイプルーフにより上部の神田川をアンダーピニングしながら、その上部荷重を仮設支柱により下部パイプルーフに伝達し、掘削に伴う地下鉄への影響（リバウンド）を小さくする。即ちアンダーピニング荷重をリバウンド抑制作用として利用することで2つの近接構造物への影響を小さくすることがポイントであった。

本論文では、設計段階におけるパイプルーフ・地下鉄の変位予測などの検討に関すること、施工段階におけるパイプルーフ・地下鉄の挙動計測結果を中心に述べるが、施工上発生した問題点も併せて報告する。

2. 工事の概要

- ・工事名 (高関) SJ35 工区 (2-2) トンネル工事
- ・工期 平成 14 年 1 月 25 日～平成 17 年 3 月 31 日
- ・工事場所 東京都中野区本町一丁目、二丁目、弥生町一丁目
- ・主要工事数量

工事延長	50m
土工	約 35,000 m ³
躯体工 (コンクリート)	約 9,000 m ³
躯体工 (鉄筋工)	約 1,200 t
仮設工 (切梁・腹起工)	約 2,000 t
パイプルーフ工 (Φ1000×21m)	74 本
パイプルーフ工 (Φ900×21m)	4 本

3. パイプルーフの設計について

(1) パイプルーフ剛性の設定と変位予測解析

パイプルーフ内掘削部の上下に近接構造物があることから、施工時における影響検討を事前に実施し、パイプルーフ剛性の設定および施工方法を十分に検討しておくことが重要であった。

特に下方に位置する地下鉄軌道に対しては、相対変位で5mm/10mと厳しい制限が設けられていた。そのためパイプルーフ4周のうち、下部パイプルーフは下方の変位抑制のために最も重要な部材であった。

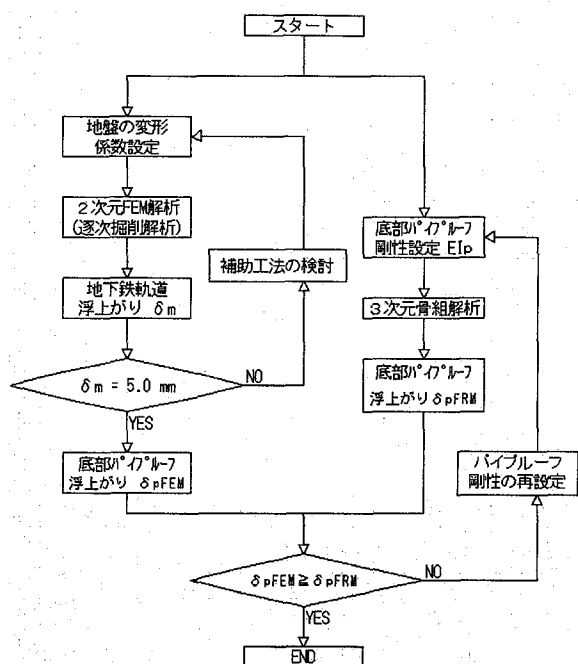


図-3 パイプルーフ設計のフロー図

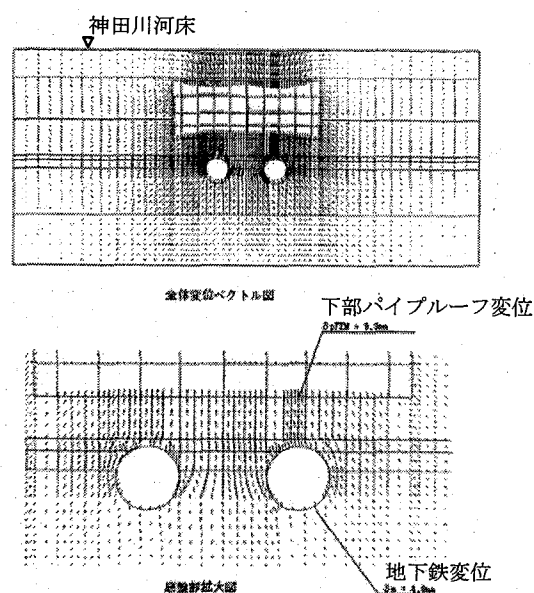


図-4 2次元逐次掘削解析結果 (変位ベクトル図)

また、それに次いで上下の荷重伝達を担う支柱とその荷重と上方の神田川を含む上載荷重を受ける上部パイプルーフも重要であった。

図-3にパイプルーフ設計のフローを示す。

フロー図の左側のパートでは、2次元FEM解析（逐次掘削解析）を用いて、地下鉄軌道部での浮き上がり量とパイプルーフの変位量（ $\delta pFEM$ ）を求めた。

解析結果を図-4に示す。それによると、地下鉄軌道部の浮き上がり量は許容値 δm (5.0mm) とほぼ同等の4.8mmとなり、パイプルーフ変位量（ $\delta pFEM$ ）は9.3mmとなった。

フロー図の右側のパートでは、3次元骨組み解析を用いて、パイプルーフの剛性を検討した。

3次元骨組み解析では、ビーム要素を用いたパイプルーフと支保工部材の間をトラス要素で結合したものでモデル化した。その解析モデルを図-5に示す。

検討の結果、鋼管外径1000mm(鋼管厚22mm)を使用する設計となった。また、パイプルーフの端部を自由端から固定端にすることで変位を小さく抑えることができることが分かった。

従って、パイプルーフと躯体との接合部の施工についてはパイプルーフの埋め込みを長くする設計とした（固定端とするために埋め込み長をパイプルーフ径の1D以上とした）。

さらに、パイプルーフ内にコンクリートを充填することでパイプルーフ中央部での変位を約7mmに抑えられることから、地下鉄軌道への影響をさらに低減するにはコンクリート充填が有効であることが分かった。

(2) パイプルーフ接着継手の設計について

通常、パイプルーフ工法の鋼管継手は溶接で施工されるが、溶接継手の場合、全体工程に占める溶接時間の割合が大きいこと、溶接の作業条件が天候などに左右されること等の課題がある。

また、両側立坑の上部開口部の大きさに制約があり、投入できる鋼管長さが3.5mに制限され、1サイクルあたり7本の鋼管を溶接しなければならなかった。さらに、3次元骨組み解析結果から鋼管厚が22mmと厚肉を使用するため、溶接の工程について不利な状況にあった。

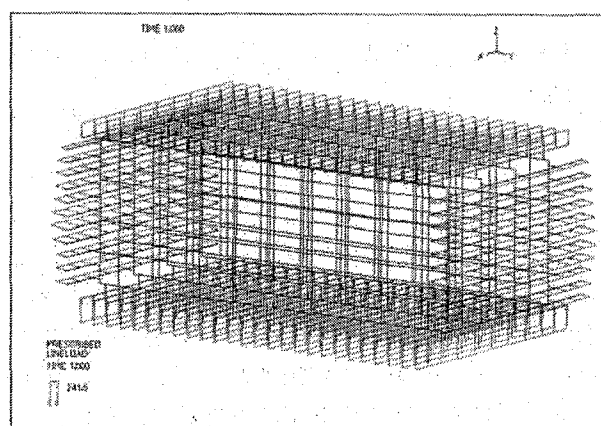


図-5 3次元骨組み解析モデル化図

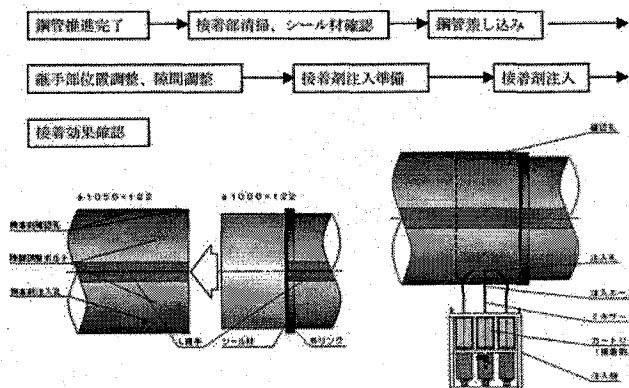


図-6 異形式鋼管接着継手工法の手順と概要

そこで、工程を短縮するために、図-6に示す接着継手工法（異径鋼管を用いた異形式鋼管接着継手工法）を採用することとなった。

鋼管接着工法のパイプルーフ工法への採用（すなわち、水平方向施工への適用）は他に例がなかったため、載荷試験を実施して継手部の耐荷性能等の設計データを収集した。

試験の結果を踏まえ、外径1000mm鋼管の必要継手長は500mmに設定した¹⁾。

4. パイプルーフの施工について

パイプルーフ工法は、30年以上もの歴史を持つ工法で、カッター付きアースオーガーで掘削しながら鋼管を地中に圧入するものである。本工事では、神田川北側（中野坂上側）を発進立坑とし、上部・側部・下部パイプルーフの順に立坑掘削と並行しながら施工を進めた。

写真-1に立坑内での施工状況を示す。なお、パイプルーフ掘進機は2セットで施工した。

鋼管接着工法の品質管理については、鋼管継手部の隙間の管理および接着剤の強度管理が重要であった。鋼管継手部の隙間管理は、鋼管納入前に全ての管に番号を付け、接着面の隙間を事前に測定し、基準値の5mmを超す管が有る場合は鋼管の組み合わせを替えるか、油圧ジャッキを用いて変形を修正した。

また、現場では円周方向6箇所に配置した隙間調整ボルトを使用して1～5mm以内に調整した。

接着剤（アクリル系）の注入には、専用の3連装カートリッジを使用し、専用のコントロールボックスにより空気圧で注入した。注入は鋼管下面より行い、上部確認孔より注入剤がオーバーフローしたことで完了確認した。

接着効果の確認は、注入時に採取した硬度測定用サンプルの接着剤の硬さを硬度計で測定することで確認した。規定硬度に達する時間は、夏期で約10分、冬期で約15分であった。

パイプルーフ施工上の問題点としては、推力超過が挙げられる。計算上の推進抵抗は100t以下であるが、実際には200tを超える推力が必要となる箇所があった。

これは、鋼管径の違いによる鋼管の蛇行が原因であると考えられる。すなわち、ジャンクションの外表面を同一にすると、細管箇所ではジャンクションの隙間が大きくなってしまう。

そして、鋼管はジャンクションに沿って推進するが、既設管が細管の箇所では先施工の管に寄る傾向を示す。そのため鋼管が蛇行し、側面抵抗が大きくなる現象が生じたと考える（図-7参照）。

接着継手工法の採用については、溶接では2時間程度を必要とするところを約30分にまで短縮することができ、効果があったと判断できる。

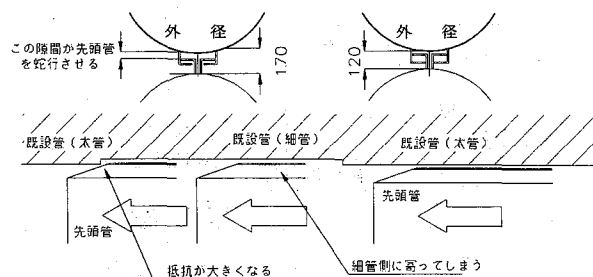


図-7 推力超過の原因

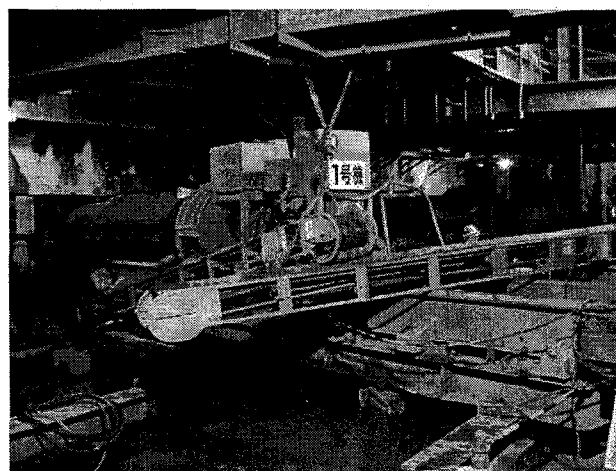


写真-1 パイプルーフ施工状況

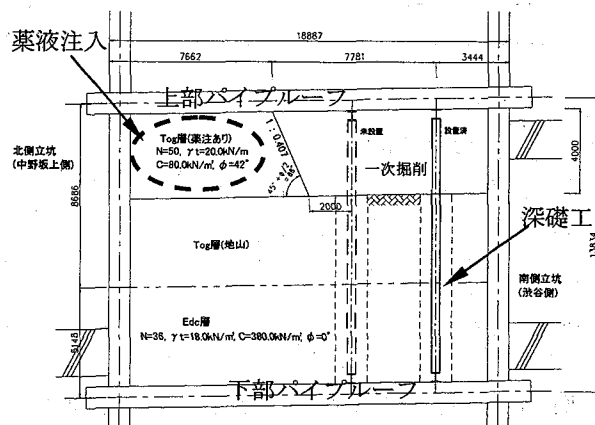


図-8 一次掘削時における上部パイプルーフ支持スパン

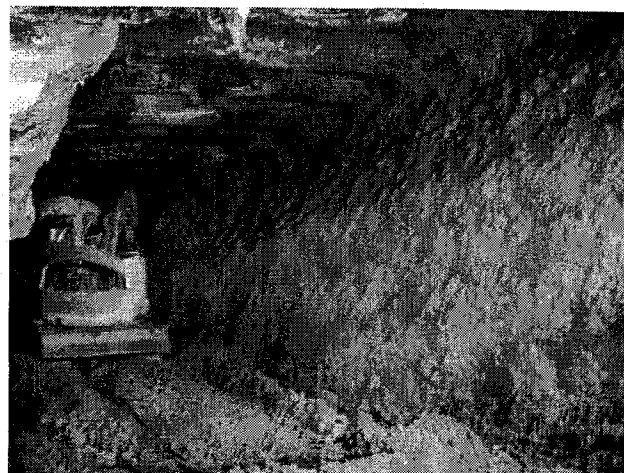


写真-2 アンダーピニング部における掘削状況

5. パイプルーフ内の掘削について

パイプルーフ内の掘削における重要な留意点は、アンダーピニング荷重を速やかに下部パイプルーフに伝達することであった。

そのために掘削範囲を最小限にとどめ、深礎工法により支柱を先行的に設置するようにした。

また、支柱設置前までの上部パイプルーフの初期変位を小さくし、ゆるみを抑えるために、掘削勾配を大きくする必要があった。

一方、一次掘削範囲の地盤は東京礫層 (Tog) であり、上部パイプルーフ反力を考慮した斜面安定計算の結果、勾配を30°以下にしても安全率1.0を確保できないことが分かった。

また、斜面勾配が緩くなると、上部パイプルーフの支持スパンが長くなり許容応力を超過する結果となった。

そのため、一次掘削範囲 (高さ 4.0m) に対して薬液注入工法による地盤改良を実施して、斜面安定確保とパイプルーフ支持スパンの最小化を実現させた。

図-8に一次掘削2列目支柱施工時の図を示す。

パイプルーフ内の施工は南側立坑 (渋谷側) にステージを設け、そこから連壁を一部撤去し、掘削を開始した。一次掘削の高さは掘削機械の作業性から4mとし、支柱を1列ごとに設置しながら掘削を進めた。一次掘削は約3ヶ月、二次掘削から床付けまでは約2ヶ月を要した。

写真-2に1列目のアンダーピニング部の掘削状況を示す。

図-9に上部パイプルーフの支柱設置位置1,3列目における鉛直変位計測結果を示す。横断面での測定位置は中央付近である。これによると一次掘削施工中 (すなわち支柱設置施工中) では、各計測点とも鉛直下向き変位が増加している。

一方、支柱設置が完了した後の二次掘削～床付けの期間中は変位が上向きに転じており、各列とも2mm程度回復している。これは、掘削によるリバウンドの影響であり、上下パイプルーフにより荷重伝達が確実に行なわれたと考えられる。

また、図中には骨組み計算で求めた各列の変位予測値を示している。これによると、1,3列目の変位量は予測より小さい結果となっている。変位量を小さく抑制できたのは、掘削時にパイプルーフの支持点となる斜面を地盤改良 (薬液注入) し、法肩を強化しておいたためであると考えられる。

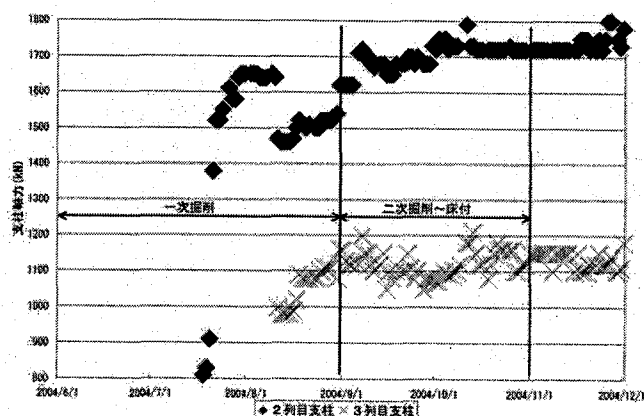


図-9 上部パイプルーフ鉛直変位計測結果

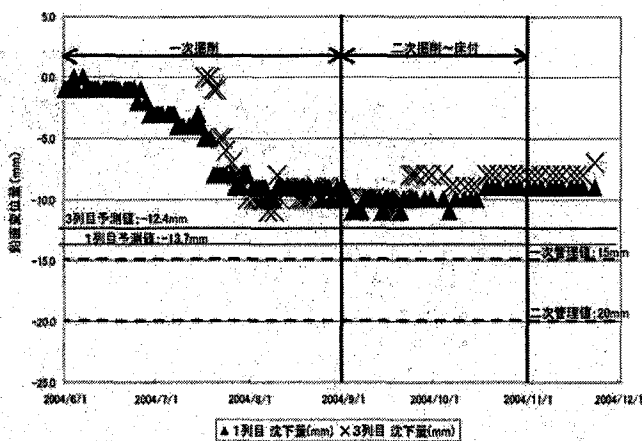


図-10 支柱軸力計測結果

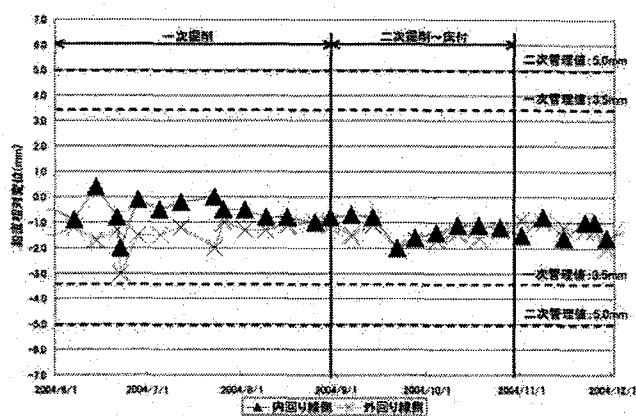


図-11 大江戸線軌道変位計測結果（鉛直相対変位）

図-10に2, 3列目の支柱軸力計測結果を示す。これによると、測定値にばらつきはみられるものの、掘削が進行する間では軸力が増加した傾向が見られる。これは、図-9と同様に掘削によるリバウンドの影響と考えられる。ただし、2列目は骨組み計算から求めた支柱軸力予測値の約70%、3列目は約50%という測定結果になっており想定を下回った。

図-11に大江戸線の軌道変位計測結果（鉛直相対変位）を示す。測定位置は、掘削直下のほぼ中央にあたる箇所である。これによると、掘削期間中の軌道相対変位は3mm程度の幅で小刻みに変動しており、掘削の進行との相関は小さいと言える。変動幅が小刻みに変動している原因は、連壁撤去、隣接工区の掘削等の影響があるものと考えられる。

なお、管理値は相対変位で5mm/10mであり、掘削期間中に外回り側の測定値が一次管理値3.5mm/10mに近く箇所（2004年6月21日頃）があったが、最終的には管理値内に収まった。

掘削部より上方の神田川への影響については、河床の変位計測では沈下がなく、河床コンクリートのひび割れなどの変状も見られなかった。施工上の観点からは、掘削時にパイプルーフジャンクション部からの漏水はほとんどなく、問題がなかったと言える。

6. まとめ

神田川と地下鉄大江戸線に挟まれた空間に道路トンネルを構築する厳しい条件であったが、結果として地下鉄への影響を二次管理値内に収めることができ、また神田川への影響はほとんど見られず、目的を達成したと考える。

鋼管接着継手工法については、初の水平方向施工への適用であったが、鋼管継手部における接着材の注入効果に問題はなかった。また、工程短縮にも貢献できたと言える。

一方、パイプルーフ施工における問題点として、異径鋼管継手に起因したパイプルーフ圧入時の蛇行および推力超過が挙げられる。これについては、同径鋼管を使用すること、パイプルーフの施工性向上のために密閉型の推進機を使用することなどの対策が考えられ、既に他現場へフィードバックが図られている²⁾。

今後の展望・工法の発展として、管直角方向の継手剛性が期待できる角型函体の使用が挙げられる。函体連結部の継手剛性が期待できれば、掘削内部の支保部材のスペックダウンや支柱設置本数の減により、コストダウンや作業性向上の可能性はある。今後の類似事例における参考にしていただければ幸いである。

参考文献

- 1) 並川賢治, 大場新哉, 栗原敏夫, 川端規之: 異形式鋼管接着継手を有するパイプルーフ工法, 土木学会第57回年次学術講演会, VI-271, 2002. 9.
- 2) 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パンフレット p5