

副都心線東新宿駅交差点直下の パイプルーフ施工

Pipe roof construction for Higashi Shinjuku Station
of Tokyo Metro Fukutoshin Line directly below intersection

辻雅行¹・岡功²・角野叔昭³・藤沼愛¹

Masayuki Tsuji, Isao Oka, Sumino Toshiaki, Ai Fujinuma

¹正会員 工修 東京地下鉄株式会社 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目19-6)

E-mail: m.tsuji@tokyometro.jp

² 東京地下鉄株式会社 (〒110-8614 東京都台東区東上野三丁目19-6)

³正会員 鴻池・青木あすなろ・オリエンタル白石建設工事共同企業体新宿七丁目工事事務所
(〒169-0072 東京都新宿区大久保二丁目5-23)

Higashi Shinjuku Station was constructed across Okubo Intersection on Meiji Street and Okubo Street. There was a large-scale lifeline directly below the intersection. These utilities were potential obstructions that would have made it impossible to secure space for construction of shoring walls. To deal with this problem, the cut-and-cover method was employed on the Ikebukuro and Shibuya sides excluding the intersection. For the work directly below the intersection, the underpinning method was employed, in which the weight of the intersection was supported by a pipe roof. This report describes the construction of the pipe roof in the course of the underpinning below the intersection.

Key Words : *Fukutoshin Line, underpinning, pipe-roof method, measuring data*

1. はじめに

平成20年6月に開業した副都心線の東新宿駅は、都内でも有数の交通量を誇る明治通りの直下に建設された。当該駅は、急行運転による追越し可能な駅構造とする必要があり、狭い道路幅を考慮してホームを上下2層構造とした。掘削深さ約40m、掘削延長約407m、掘削幅約16.5mの範囲に4層2径間、3層2径間および2層2径間の開削トンネルとなっている。

このうち、明治通りと大久保通りが交差する大久保交差点の延長約20mの範囲には、N T Tとう道2本(φ4400mmおよびφ2850mm)・東京電力洞道および下水幹線(φ4050mm)等の大型ライフラインが埋設されている。このため、これらの地下埋設物が支障となり土留め壁の施工スペースが確保できないことから、交差点を除く池袋方と渋谷方は開削工法で施工し、交差点部直下は非開削工法としたうえでパイプルーフにて交差点重量を仮受け

するアンダーピニング工法により下部掘削施工することとした。

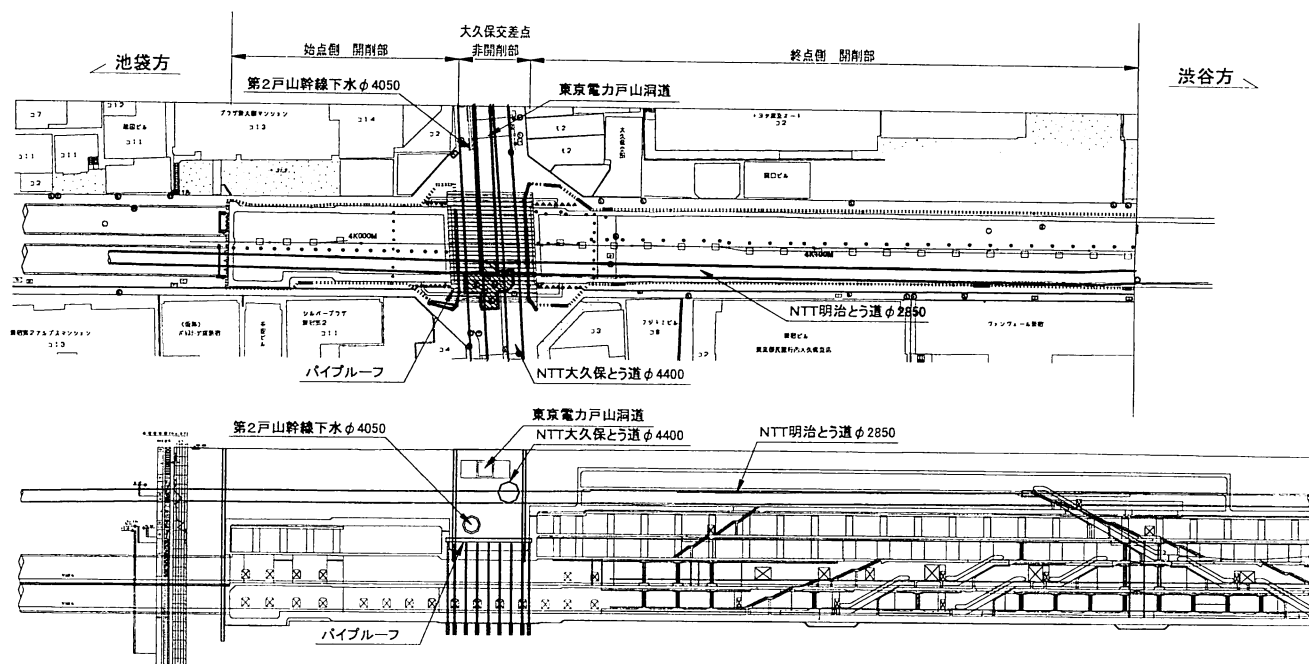
本報告は、この交差点部直下のアンダーピニング工法に伴うパイプルーフの施工について報告するものである。

2. 工事概要

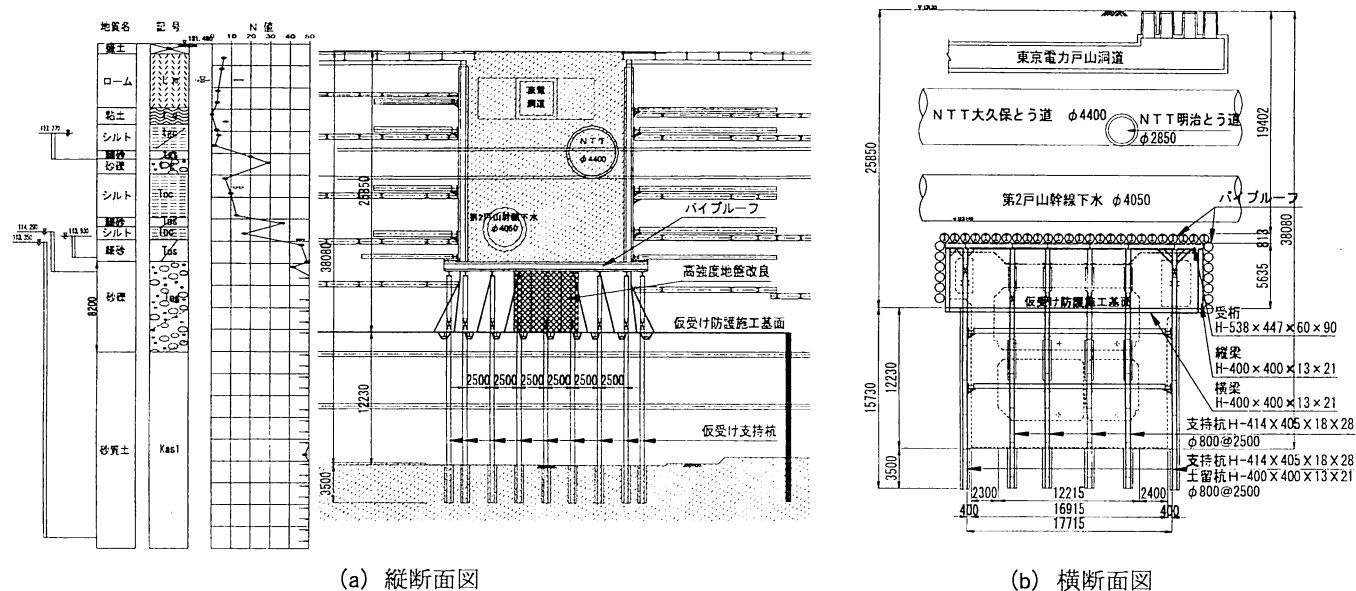
(1) 交差点付近施工概要

図-1に全体平面図および縦断面図を、図-2にパイプルーフ施工箇所概要図を示す。

当該箇所の施工にあたっては、まず大久保交差点両側を開削工法により掘削し、これらをパイプルーフ施工基地となる立坑とした。パイプルーフ施工にともなう掘進は大久保交差点両側から行うことを基本としたが、立坑部には路面覆工を支持する中間杭が存在したため、中間杭が支障する箇所については到達立坑側に抜き出せない



図ー1 全体平面図および縦断面図



(a) 縦断面図

(b) 横断面図

図ー2 パイプルーフ施工箇所概要図

ことから、到達後に掘進機を発進立坑側から引抜き回収することとした。

この両側立坑から、土被り約19～25mの位置にパイプルーフを門型になるように配列し、水平パイプルーフ26本および垂直パイプルーフ13本を打設した。パイプルーフ施工後、パイプルーフ防護のための作業空間を確保するためパイプルーフ下部を5.6m、奥行き2.7mのブロックに分けて立坑両側から順次掘削した。掘削にともない路下にて仮受け杭(TBH杭)の打設、受け桁設置およびジャッキアップを行ってパイプルーフ上部全体の荷重を支持させた。

仮受け完了後、仮受け杭とあわせて打設した土留め杭を利用して、山留め支保工を順次架設して床付けまで掘削を行った。

床付け掘削完了後、駅舎部本体構築を順巻きにて施工した。構築とパイプルーフの空隙には発泡モルタルを充填し、本受け工とした。

(2) 地質概要

当該工事区域は豊島台に位置し、表土より関東ローム層(Lm, tc), 段丘礫層(tg), 東京層(Toc, Tos, Tog), 上総層群(Kas1)が分布し、関東ローム層から上総層群にかけて

N値が大きくなっている。粘性土は硬く、砂質土は極めてよく締まっている。

また、地下水状況は、段丘礫層からなる被圧第一帯水層、東京層砂質土および東京礫層からなる被圧第二帯水層が存在し、掘削底面付近は上総層群砂質土からなる被圧第三帯水層が分布する。

3. 施工上の問題点とその対策

(1) パイプルーフ施工方法の選定

工法選定にあたっては、重要地下埋設物直下で帯水量の豊富な東京砂礫層にパイプルーフを施工するため、掘進時の地山崩壊による地下埋設物の変状や路面沈下等の影響が懸念された。また、パイプルーフ掘進時の地下水の坑内流入も想定されたため、これらの施工箇所の土質条件や地表面への影響および施工条件を満たすことに留意した。以下、その検討詳細について示す。

施工箇所の土質条件は、水平パイプルーフを施工する東京砂質土層(Tos)が、層厚2m前後で、N値>40のシルト混じり細砂～細砂よりなる洪積層であり、垂直パイプルーフを施工する東京礫層は、層厚8m前後で、直径250mm程度の礫を有する砂礫層であった。水量が豊富な帯水層を掘進するため、施工方法は高水圧・被圧地下水における噴発や地下水の流入への対策と土砂の取り込みが可能である必要があった。

また、施工箇所上部の重要大型埋設物への影響を極力抑えるために地盤の緩みを起こさずに掘進する必要があった。特に立坑部に存在する路面覆工を支持するための中間杭が支障する部分では、掘進機を発進側から引抜き回収する必要があったが、立坑内には掘進設備用地(プラント)を設置するための十分なスペースを確保することができなかったため、地上まで掘削土砂を運搬することができ、かつ地上用地も限られているため、設備がコンパクトな工法である必要があった。

以上の施工条件を満たし、かつ地盤のゆるみ範囲を最小限に抑えつつ地下水流入防止可能な工法として、泥濃式推進工法に分類される「超流バランスセミシールド工法」を採用した。

パイプルーフ掘進の発達・到達防護については、立坑内から先行して止水注入を行っていたが、さらにパイプルーフ掘進による埋設部への影響を低減することを目的として、掘進箇所にも同様に薬液注入を行うこととした。

(2) 超流バランスセミシールド工法

本工法は、泥土圧式推進工法と泥水加圧式推進工法の中間的な理論にて成り立っている。半液性(安定液理論)

の延長でカッター形式からくる流動体の造壁性を有効利用して、地下水圧や土圧に対抗して切羽の安定、地盤の緩みを防止する。間欠排土を行いながら、強制的排出機構を所有しないことで、切羽圧力の上昇において初めて排土を行う方式であり、地盤の緩み範囲を最小限に抑える機構となっている。オーバーカット部には、固結型滑材を注入して管外周の周辺摩擦力の低減と空隙充填を行い、地盤の緩みを防止した。

実際の本施工では、土質や回収方法に応じて3本の掘進機の使い分けを行った。表-1に使用した掘進機の概要を示す。

表-1 使用掘進機概要

掘進機	カッタートルク	適用箇所	カッター形状
標準取込型	9.43kN・m	水平一般部	
リターン回収型	11.8kN・m	水平リターン部	
破砕型	13.6kN・m	垂直部(砂礫)	

(3) パイプルーフ部材

下部掘削にあたっては、防護部の掘削時に発生するパイプルーフの変位による埋設物への影響が懸念された。そのため、埋設物への影響を最小限に抑えるように事前解析を行った。

本工事の設計では、パイプルーフをはり、地盤を弾性床、仮受け杭を弾性支承とする弾塑性はり-ばねモデルに埋設物の存在を考慮した上載荷重を作用させて掘削順序および地盤の塑性化を考慮した逐次応力解析を行い、パイプルーフ変位および仮受け杭の作用軸力を算出した。図-3に解析モデルを示す。なお、支保工のばね定数は $9.38 \times 10^4 \text{ kN/m}$ 、地盤の鉛直ばね定数は、両端の薬液注入部が $4.07 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ 、中央の高強度薬液注入部が $5.82 \times 10^5 \text{ kN/m}^3$ とした。

計算の結果、パイプルーフ部材を「φ812.8mm, t=22mm,

モルタル充填+芯材H-488×300」とすることにより、掘削時の変位が8.5mmとなり埋設物への影響も解析上許容値内となった。

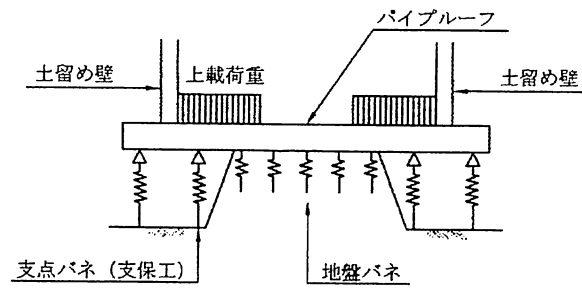


図-3 解析モデル

4. パイプルーフ施工方法¹⁾²⁾³⁾

(1) パイプルーフ施工方法の概要

図-4にフローチャート、図-5に掘進施工順序図を示す。

施工を管理するにあたり、土圧については地盤のゆりを最小限に抑えるために切羽圧力を操作盤にて自然水压+0.02MPaで管理した。ただし、地下水位の流入が多少なりとも生じた場合は+0.04Paに変更した。また、透水性がよい地盤であるがために逸泥が生じて切羽管理圧が保持できない場合は排土操作を行わないことにより対応した。

裏込注入工は、掘進完了後ただちに地山の空隙充填と地山の沈下を防止する目的で実施した。標準として、管の外側に $t=20\text{mm}$ のテールボイドを生じるものと考え、施工箇所的重要埋設物に変状を与えないように裏込注入量の管理を行った。

(2) 防護注入工

パイプルーフ掘進の発進・到達防護として立坑内から先行して止水注入を行った。また、パイプルーフ掘進による埋設物への影響を低減することを目的として、掘進箇所にも同様に薬液注入を行った。図-6に防護注入工図を示す。

(3) 水平パイプルーフの施工

基準管であるNO. 12は渋谷側から池袋側に向けて掘進を行い、全体の精度に影響を及ぼすため慎重に施工を行った。掘進後の基準管精度は、下方方向に12mm、側方に7mmであった。

基準管施工後は、図-7に示すようにA線側とB線側に向

かって2機の掘進機を使用して、渋谷側および池袋側の両側から施工を行うことで、工程短縮を図ることができた。中間杭が支障となる箇所については、リターン回収型の掘進機を使用して、到達完了後、掘進機内部と外管の固定を解除し、元押架台に設置したウインチにて掘進機内部をけん引し、外管は到達側から細かく切断を行いながら撤去した。

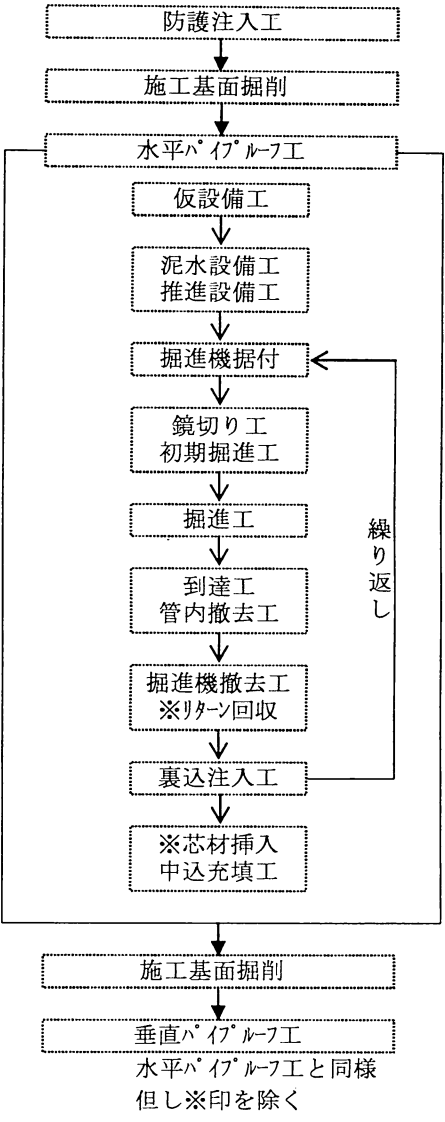


図-4 フローチャート

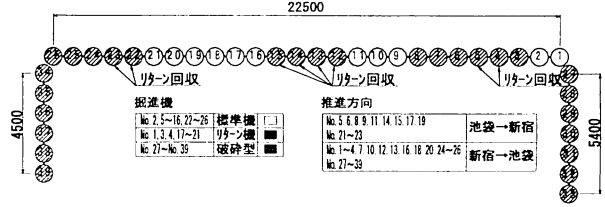


図-5 掘削施工順序図

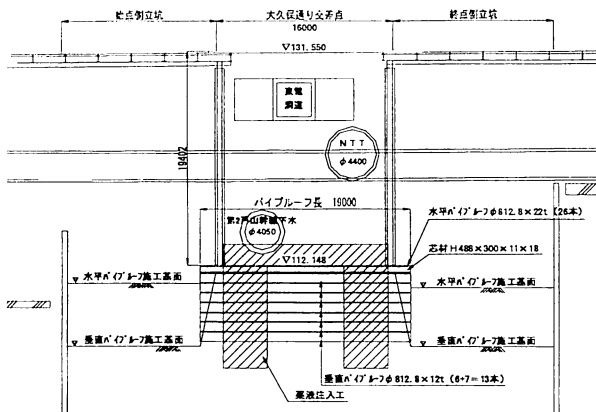


図-6 防護注入図

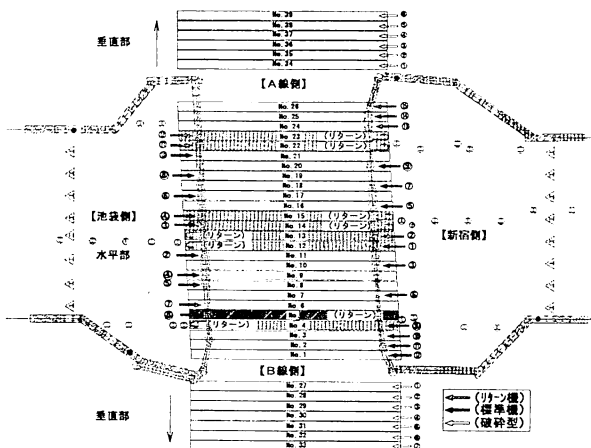


図-7 掘進機位置図

(4) 垂直パイプルーフの施工

水平パイプルーフ掘進時、地上プラントまでの排土揚程が厳しくなっていたため、垂直部施工時には渋谷側立坑内逆巻きスラブ上に中継ポンプを設置し、揚程に対する問題に対処した。掘進機を砂礫対応としたことで、礫径の大きい層であったにもかかわらず問題なく掘進を完了することができた。

(5) 仮受け杭の施工

図-8にフローチャート、図-9に仮受け施工概要図および図-10に掘削とプレロードの施工順序を示す。なお、パイプルーフに作用する全体荷重が約130,000kNであり、支持杭(φ800, H-414×405)1本あたりの最大分担荷重が仮受け時で5,000kN、仮受け完了後で3,000kNと大きな荷重となるため、確実に支持が可能な仮受け杭の施工法が要求されたため、TBH杭を採用することで支持力を確実に確保し、荷重の低減を図った。

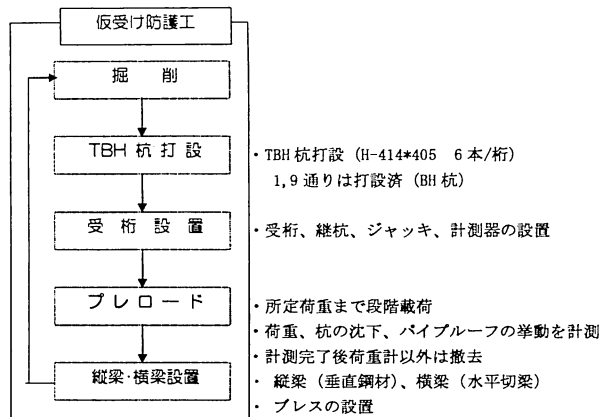


図-8 フローチャート

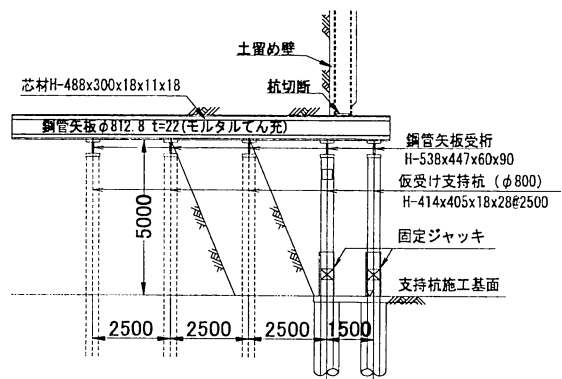
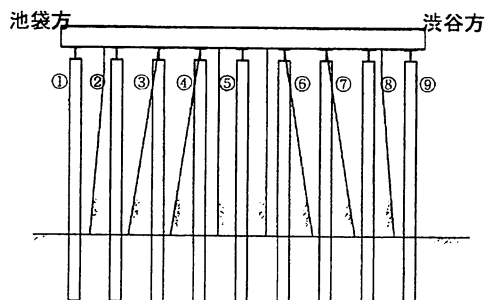


図-9 仮受け施工概要図



- STEP1: ①通り, ⑨通りプレロード
 STEP2: ⑧通り掘削
 STEP3: ⑧通り支保工架設, プレロード
 STEP4: ⑦通り, ②通り掘削
 STEP5: ②通り支保工架設, プレロード
 STEP6: ③通り掘削
 STEP7: ⑦通り支保工架設, プレロード
 STEP8: ⑥通り掘削
 STEP9: ③通り支保工架設, プレロード
 STEP10: ④通り掘削
 STEP11: ⑥通り支保工架設, プレロード
 STEP12: ④通り支保工架設, プレロード
 STEP13: ⑤通り掘削
 STEP14: ⑤通り支保工架設, プレロード

図-10 掘削とプレロードの施工順序

(6) 仮受け杭の軸力導入方法

仮受け杭は施工時および仮受け完了時において確実にパイプルーフ上部の荷重を支持させる必要があるため、受け桁1列設置ごとにあらかじめ載荷(初期プレロード)を行い、仮受け杭設置完了後に全体の荷重調整(調整プレロード)を行うこととした。

a) 初期プレロード

各列の受け桁設置後、将来作用する荷重を履歴荷重として段階的に載荷を行い、杭の沈下量、パイプルーフの挙動に異常がないかを確認した後、プレロード荷重まで除荷することとした。ここで、履歴荷重とは事前解析により求められた各杭の最大作用荷重(P1)と各杭の分担面積により受け持つ上部荷重の120%の値(P2)のうち大きい値を示す。なお、載荷にあたってはジャッキの安全ナットは締めずに、荷重の計測を施工中に監視できるようにした。図-11に初期プレロード載荷ステップを示す。

b) 調整プレロード

すべての受け桁設置後、既に初期プレロードが載荷されている受け桁の荷重にばらつきが生じていたため、荷重バランスの調整を行い各仮受け杭に作用する荷重の均等化を図った。

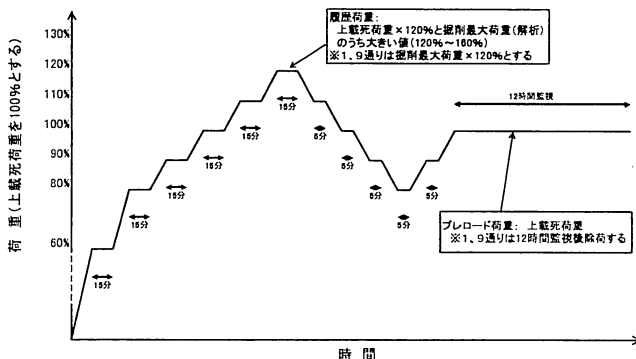


図-11 初期プレロード載荷ステップ図

(7) 掘削時の支持力確保

仮受け杭の施工にあたっては、掘削により減少する周面摩擦抵抗力が杭根入れ部に移行して沈下が生じると考えられた。そのため、打設した杭を用いて鉛直載荷試験を行い、杭の支持力および周面摩擦抵抗の分布状況を確認し、杭根入れ部へ移行する増加荷重を推定した。

a) 支持力特性

多サイクル試験により、最大6,000kNの荷重を載荷した結果、5,000kN以上の荷重に対して若干の変化がみられたが、第1限界抵抗力には至っていないと考えられたため、極限支持力はおおむね6,000kN以上、許容支持力は

5,000kN以上期待できるものと判断した。

b) 周面摩擦抵抗力

杭に設置したひずみ計により軸力を測定した結果を図-12に示す。ひずみ計分布状況から考察すると、仮受け完了後の設計荷重3,000kNを載荷した時点で、床付け付近において2,500kN程度の荷重が伝達されており、床付け掘削による根入れ部の増加荷重は500kNと推定された。

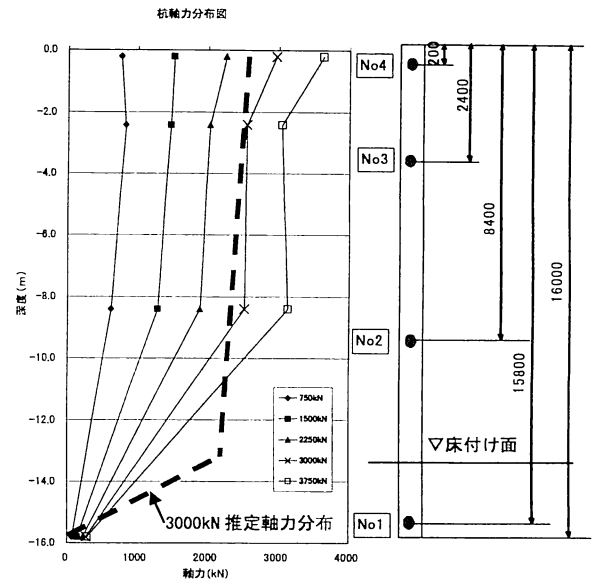


図-12 杭軸力分布図

(8) 計測管理

施工中に各埋設物および仮受け防護部材の変状を把握するために、各種計測器を設置し、リアルタイムで埋設管のひずみ状態を計測し、予測値との比較を行いながら施工を行った。計測管理項目を表-2に示す。

表-2 計測管理項目

対象	計測項目	計測方法
埋設物	NTT大久保とう道 明治とう道	ひずみおよび内空変位 とう道内に光ファイバーによるひずみ計を設置
	第2戸山幹線下水	沈下 下水管に沈下棒を設置し、路上において下水管天端変位量を水準測量
	東京電力戸山洞道	沈下 洞道内に入坑し、下床高さを水準測量
仮受け防護	水平パイプルーフ	沈下 パイプルーフ鋼管内に圧力式沈下計を設置
	支持杭ジャッキ	ジャッキ圧力 ジャッキの油圧ケーブルに圧力変換器を設置
	支持杭	軸力 支持杭にひずみ計を設置し計測されたひずみを軸力に換算 沈下 支持杭に電子スタッフを設置して自動レベルによる水準測量

5. 施工から得られた結果

(1) 各埋設物の計測結果

表-2の計測管理項目について計測を行った結果、パイプルーフ施工時にわずかな影響が認められたものの、その後の仮受け時および床付け掘削時には、パイプルーフなどの防護工が有効に作用した結果、埋設物に影響を与えることなく、管理値内で掘削を完了することができた。

(2) パイプルーフの沈下量

a) パイプルーフ仮受け掘削時

実測値と解析値との比較は、特徴的な傾向が顕著にあらわれたパイプルーフ下の地山が比較的残っている段階と、パイプルーフ下の掘削や支保工の架設が進み、地山の中央部のみが残っている段階および掘削を完了した段階について述べる。

図-13は両端部それぞれ2本の仮受け杭にプレロードをかけた状態でパイプルーフ下の地山が比較的残っている段階における変位分布図である。この段階においては、実測値と解析値とが比較的一致していることがわかる。端部より中央部の方が小さい変位を生じている。これより、モデルの適合性がわかる。

図-14はパイプルーフ下の掘削を進め、地山の中央部のみが残っている段階における変位分布図である。この段階においては、中央部において実測値と解析値とがあまり一致していないことがわかる。両端部の変位が比較的大きいのは、引き続き確認できる。しかし、地山が残っている中央部では実測値では最も大きく変位しているのに対して、解析値では最も変位が小さい。これは、解析値において地盤反力を過大に評価していることによると考えられる。

図-15は掘削を完了した段階における変位分布図である。この段階においては、実測値と解析値とが比較的一致していることがわかる。8.5mmの最大沈下予測値に対して最大約9mmの沈下を示した。地山がなくなったことで、端部より中央部の方が大きい変位を生じている。以上のことから、今回用いている弾性有限要素法解析を用いたモデルによるパイプルーフの解析にあたっては、施工条件に応じた地盤反力の低減などを踏まえた解析が必要であるということがわかる。^{5) 6)}なお、最終プレロード完了時には最大約4mmであった。

b) 床付け掘削時

図-16にパイプルーフ圧力式沈下計および支持杭電子スタッフの経時変化グラフを示す。パイプルーフの床付け掘削時の沈下量は、5mm程度の沈下増分予測値に対して約2mmの増加を示し、最終沈下量の最大値は約6mmであった。

(3) 支持杭の沈下量

図-16に示した支持杭の計測結果は、パイプルーフの沈下と類似した動きを示した。最終プレロード完了時を初期値とした場合床付け掘削においては、5mm程度の沈下増分予測値に対して約2mmの増加を示した。

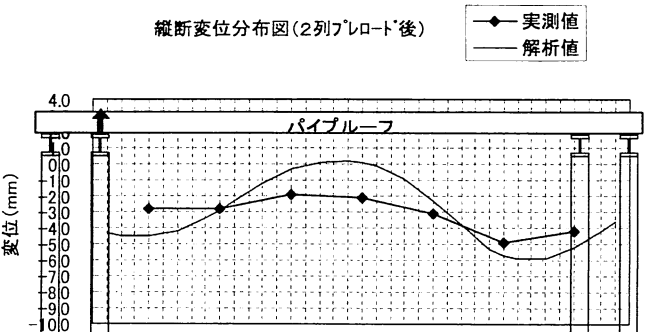


図-13 パイプルーフ防護部掘削時沈下量(初期)

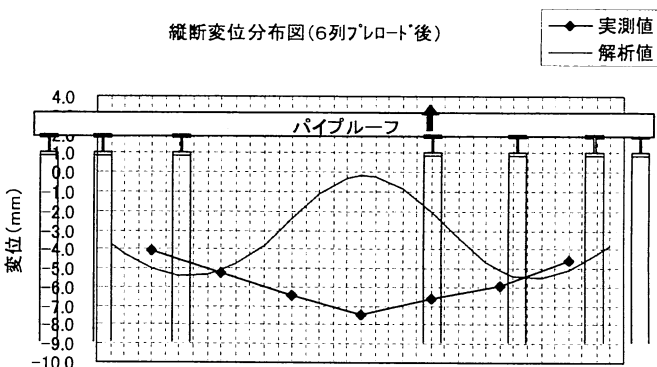


図-14 パイプルーフ防護部掘削時沈下量(中間)

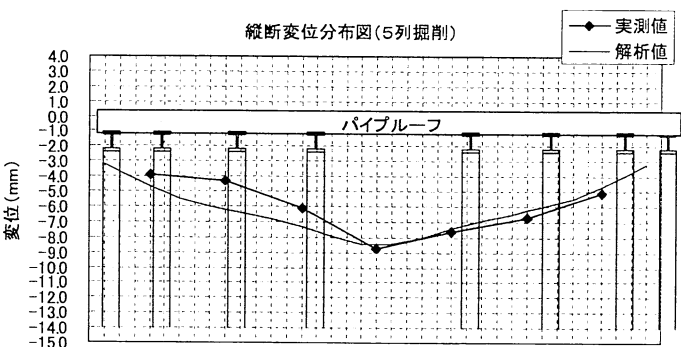
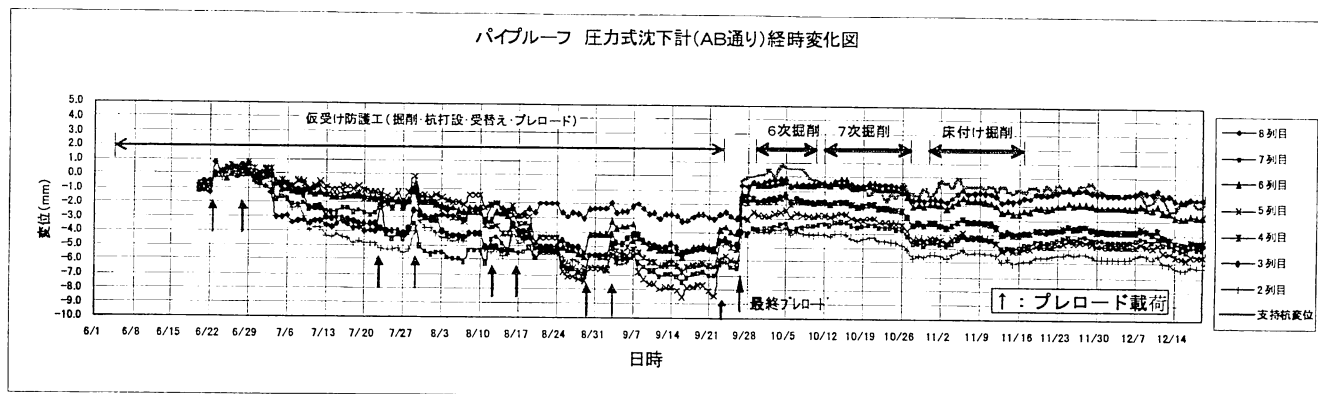


図-15 パイプルーフ防護部掘削時沈下量(後期)



6. おわりに

副都心線は、都心部に放射状に展開した既設の地下鉄ネットワークを環状に結ぶ路線であり、その大半が明治通り直下に建設した路線であったため、様々な既設構造物のアンダーピニングを実施しており、本工事は、そのうちのひとつである。

このようなアンダーピニングの挙動を予測する手法については、一般的に複数用いられているが必ずしも解析モデルと実測値がよい整合を示すとは限らず、本解析モデルについても構造物本体や地盤の変形特性などの評価方法にまだ課題があると思われる。引き続き、計測結果等を用いて検討を進めていきたい。

今回紹介した都市部交差点直下の大深度におけるパイプルーフを用いた非開削工法が、今後の大深度地下構造物の施工に際しての参考になれば幸いである。

謝辞：本報告をまとめるにあたり、貴重な施工データを提供いただき、ご意見をいただいた(株)鴻池組角野叔昭氏に深謝申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 辻雅行, 川上和孝, 角野叔昭：交差点部直下のパイプルーフ施工, 土木施工, pp078～083, 2005.10
- 2) 辻雅行, 岡功, 森信雄, 角野叔昭：パイプルーフで交差点直下13万kNの土荷重を支える, トンネルと地下, pp025～031, 2007.07
- 3) 亀山信, 角野叔昭, 辻雅行, 岡功：地下鉄駅舎部におけるパイプルーフによる大深度非開削工事について, 土木建設シンポジウム, 2007.08
- 4) 鴻池・青木あすなろ・白石建設工事共同企業体：13号線新宿七丁目一工区, パイプルーフ仮受け防護検討, 2004.10

- 5) 矢萩秀一, 大石敬司, 藤木育雄, 清水幸範, 小泉淳：アンダーピニング工事における構造物の挙動, トンネル工学報告集第16巻, pp447～454, 2006.11
- 6) 新アンダーピニング工法等研究会：アンダーピニング設計・施工マニュアル, 2007.05