

# 都心部における非開削工法の適用事例 —東京メトロ丸ノ内線 淡路町駅エレベータ新設工事報告—

## The Application Example of the Non-Open Cut Method in the Center of Tokyo

亀川 信\*1                      山田 浩幸\*1                      高橋 信二\*2  
Makoto Kamekawa      Hiroyuki Yamada      Shinji Takahashi  
森田 晃弘\*2                      山下 省二\*2  
Akihiro Morita                      Shouji Yamashita

### 要旨

本報告は、丸ノ内線淡路町駅において、既存構築と連絡する地下通路およびエレベータシャフトを交通量の非常に多い淡路町交差点直下に新設するものである。当初計画は、路面覆工による開削工法により築造する計画であったが、掘削範囲には大口径下水渠等埋設物が輻輳し、しかも想定よりも浅い位置に埋設されていたことから、山岳工法を利用した非開削工法を採用し、地下埋設物への影響もなく工期の短縮を図った事例の紹介である。

非開削工法の採用にあたっては、事前検討において、数値解析（FEM）により、施工時の挙動予測や安定性の検証を行うとともに、安定対策として採用したパイプルーフや薬液注入による地盤改良の効果についても確認した。

さらに、非開削工法（山岳工法）施工時には、綿密な計測管理により、既設構造物や地表面の挙動および新設トンネル自体の変位量を監視することにより安全管理を実施した。

キーワード：都市トンネル 山岳トンネル 近接施工 数値解析 計測管理

## 1. はじめに

淡路町駅エレベータ新設工事は、東京地下鉄株式会社が進めている「高齢者・障害者等の移動の円滑化の促進に関する法律（バリアフリー新法）」を目的とした垂直移動設備整備の一環として、丸ノ内線淡路町駅におけるエレベータ新設工事である。本工事では、当初、路面覆工による開削工法により既存構築と連絡する地下通路（幅 3.3m、高さ 3.4m）およびエレベータシャフトを築造する計画であったが、掘削範囲に大口径下水渠等が存在し、想定よりも浅い位置に埋設されていたことから、一部山岳工法を利用した非開削工法を採用することとなった。山岳工法の採用に当たっては、FEM 解析による事前検討を行い、施工手順や施工時の安定性、大口径下水渠への影響および地表面への影響に関して確認を行った。本報告では、数値解析（FEM）による事前検討結果を示すとともに施工結果に基づく非開削工法採用の有効性に関して述べる。

## 2. 工事概要

当工事は、都道 405 号外濠環状線（外堀通り）と都道 302 号新宿両国線（靖国通り）が交差する淡路町交差点での施

工であり、交通量調査の結果より平日の自動車交通量は、約 52,000 台、歩行者・自転車交通量は約 18,000 人・台と非常に交通量の多い場所であった。したがって、工事にあたっては、既存通行車両や歩行者への安全確保が最大の課題となっていた。

表 1 に本工事の概要を示す。

表 1 工事概要

工事名称	淡路町駅エレベーター設置に伴う土木工事	
工事場所	東京都千代田区神田淡路町1丁目3番地先	
工期	平成20年4月28日～平成23年5月23日	
発注者	東京地下鉄株式会社	
施工者	株式会社 鴻池組	
工事内容	工事対象	淡路町駅エレベータシャフト およびエレベータ通路 施工延長L=19.5m
	トンネル断面	幅3.3m、高さ3.4m A=11.22㎡
	施工法	開削工法および非開削工法(山岳工法)
	主要工種	せん孔鋼杭打ち工:L=62.5m 路面覆工:14㎡ 掘削工:(開削部)266.1m <sup>3</sup> (トンネル部) 106.7m <sup>3</sup> 鉄筋コンクリート工:109.9m <sup>3</sup> 鉄筋コンクリートこわし:9.0m <sup>3</sup> 埋戻し工:127.9m <sup>3</sup>
トンネル部補助工法	パイプルーフ工:189.1m(φ114.3mm、t=5.5mm) 薬液注入工:(開削部)V=106.1KL (トンネル部)V=96.6KL	

\*1 土木事業本部 技術部 \*2 東京本店 土木部

### 3. 非開削工法採用経緯

工事発注後に実施した埋設台帳調査および試掘調査結果より、昭和初期に築造された大口径馬蹄形下水道があり、車道部にはNTT人孔(昌平橋 No. 5MH)が浅層埋設され、その管路が下水道を上越して防護コンクリートのあることが確認された。当該人孔は工事予定箇所5方向に分岐されており、この中の約半分が光ケーブル主要幹線である事から人孔の移設や改造および下水道がある事から切り下げもできず、またNTT人孔および管路が浅層埋設されていることから、現状のままでも路面覆工を架設すると現道との摺り付けが広範囲に及び道路交通への影響が懸念された(図1)。

交差点の特性から考えると、全面開削工法での施工は交差点部での道路交通に与える影響が大きく、嵩上げ舗装範囲(路面覆工架設および擦り付け舗装部)を最小限とする施工方法の検討が必要となった。

以上のことより、工法変更を含む種々仮設方法を検討した結果、路面覆工範囲を最小限として本線との連絡通路部を非開削工法(都市型 NATM)に変更することで、道路交通および各種埋設管への影響を低減することが可能であると判断した(図2)。

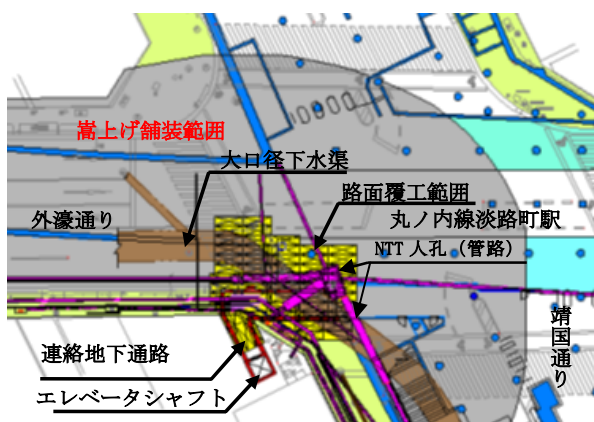


図1 施工位置および嵩上げ舗装範囲図

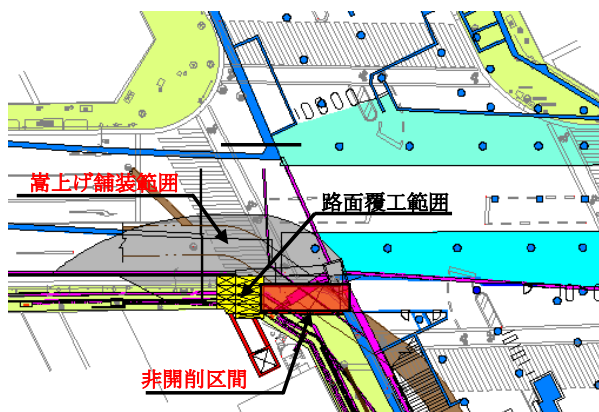


図2 嵩上げ舗装範囲縮小検討図

### 4. 事前検討

#### 4.1 検討目的

検討目的は、丸ノ内線淡路町駅エレベーター設置に伴い、トンネル掘削を実施した際に周辺の既設構造物にどの程度影響を及ぼすのか定量的に検討を行うものである。解析手法は非線形解析を採用し、電中研方式を用いた。

#### 4.2 検討条件

##### (1) 解析モデルと解析領域

以下に解析モデルを示す。図3は、補助工法を実施し、補助ピース(支保工の一部)接続部をピン結合とした解析モデルを示している。図4に解析領域および境界条件について示す。

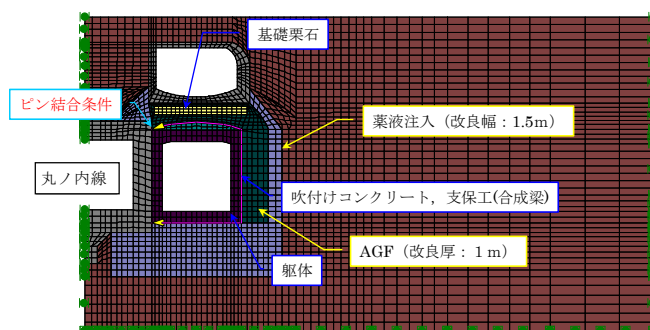


図3 解析モデル

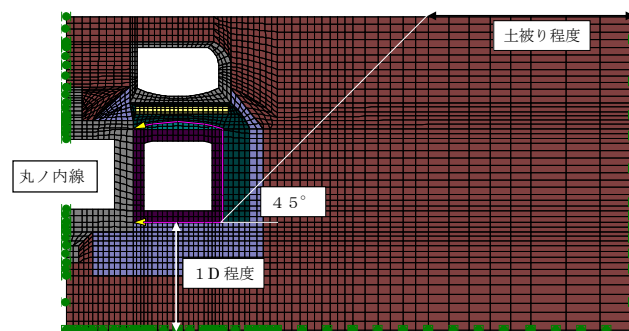


図4 解析領域および境界条件

##### (2) 解析物性値(基本物性)

地盤は、表2の標準値を参考にN値10~30相当の物性値を与えている。パイプルーフは旧日本道路公団、数値解析マニュアルを参考にヤング率  $E=900\text{MN/m}^2$ 、薬液注入の領域には、地盤のヤング率の5倍に相当する  $E=100\text{MN/m}^2$  とした。

なお、地山物性値に関しては、予測結果に大きな影響を与えることとなるため、山岳トンネル施工過程において、薬液注入後の実際の地山における原位置での物性値を確認し、フィードバックする計画とした。

表2 地山等級に応じた標準物性値

計算上の地山等級	単位体積重量 γ <sub>s</sub> (kN/m <sup>3</sup> ) {t/m <sup>3</sup> }	初期変形係数 D <sub>s</sub> (MPa) {kgf/cm <sup>2</sup> }	粘着力 C (MPa) {kgf/cm <sup>2</sup> }	内部摩擦角 φ (°)	初期ポアソン比 ν <sub>s</sub>	弾性限界 R <sub>EL</sub>	非線形性パラメータ n	備考
軟弱地山	S <sub>1</sub> {1.6}	20 {200}	0.02 {0.2}	30	0.35	1.0	2	N値10~30相当
	S <sub>2</sub> {1.8}	50 {500}	0.02 {0.2}	35	0.35	1.0	2	N値30~50相当
	S <sub>3</sub> {2.0}	100 {1,000}	0.02 {0.2}	40	0.35	1.0	2	N値50以上相当
軟岩	R <sub>1</sub> {1.9}	50 {500}	0.07 {0.7}	25	0.30	0.3	4	軟岩・中硬岩Ⅰ <sub>s</sub> 相当
	R <sub>2</sub> {2.0}	100 {1,000}	0.15 {1.5}	30	0.30	0.3	4	軟岩・中硬岩Ⅱ <sub>s</sub> 相当
	R <sub>3</sub> {2.1}	200 {2,000}	0.30 {3.0}	35	0.30	0.3	4	軟岩・中硬岩Ⅲ <sub>s</sub> 相当
	R <sub>4</sub> {2.2}	500 {5,000}	0.50 {5.0}	40	0.30	0.3	4	中硬岩Ⅳ <sub>s</sub> 相当
	R <sub>5</sub> {2.3}	1,000 {10,000}	1.0 {10}	45	0.30	0.3	4	中硬岩Ⅴ <sub>s</sub> 相当
	R <sub>6</sub> {2.4}	2,000 {20,000}	2.0 {20}	50	0.25	0.2	6	硬岩Ⅵ <sub>s</sub> 相当
硬岩	R <sub>7</sub> {2.5}	5,000 {50,000}	4.0 {40}	55	0.25	0.2	6	硬岩Ⅶ <sub>s</sub> 相当
	R <sub>8</sub> {2.6}	10,000 {100,000}	6.0 {60}	55	0.25	0.2	6	硬岩Ⅷ <sub>s</sub> 以上相当

表3に解析に用いる支保（合成梁）の物性値を示す。鋼製支保工はH-100、吹付け厚は10cmとして算出している。

表3 支保物性値

材料名	梁ヤング率	ポアソン比	2次モーメント	断面積
合成梁	8,534,000 kN/m <sup>2</sup>	0.30	9.3017E-05 m <sup>4</sup>	1.0000E-01 m <sup>2</sup>

(3) 解析ステップ

解析ステップは施工手順を考慮して以下のとおり考えた。

【ステップ1：自重解析、大口径下水道管渠内水重量載荷】



【ステップ2：パイプルーフ、薬液注入による地盤改良、上半掘削（掘削解放率40%）】



【ステップ3：上半支保設置：吹付けコンクリート・鋼製支保工の合成梁としてモデル化（掘削解放率60%）】



【ステップ4：下半掘削（掘削解放率40%）】



【ステップ5：下半支保設置：吹付けコンクリート・鋼製支保工の合成梁としてモデル化（掘削解放率60%）】



【ステップ6：躯体設置】

4.3 解析結果の整理

(1) 緩み領域（破壊領域）の確認

以下の基準に基づき非線形性の判定により緩み領域（破壊領域）の確認を行った。

なお、緩み領域の判定に関しては、旧日本道路公団の数値解析マニュアル<sup>3)</sup>に準ずることとした。

【非線形性の判定】

$$\text{緩み係数}^2) : R = \frac{k \times d_{\min}}{\sigma_t - \sigma_m}$$

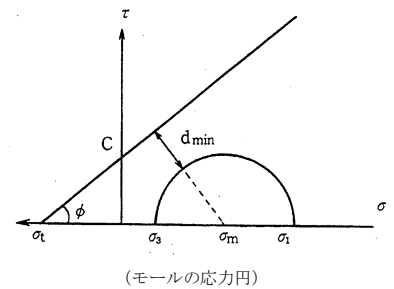
- ・ Rは緩み係数、kは定数で、弾性限界を表すパラメータ
- ・ R ≤ 0：破壊領域（モールの応力円が破壊包絡線を越える）
- ・ 0 < R < 1.0：非線形領域（d<sub>min</sub>が小さい場合）
- ・ R ≥ 1.0：弾性領域（d<sub>min</sub>が大きい場合）

【ゆるみ領域の判定】

なお、旧日本道路公団数値解析マニュアル<sup>3)</sup>においては、

- ・ 破壊領域：R ≤ 0 の範囲
- ・ ゆるみ領域：0 < R ≤ 1 の範囲
- ・ 弾性領域：R > 1.0 の範囲

と呼んでいる。



(2) 解析結果の評価

① 変位量

図5に示す着目点についてトンネル掘削部分およびその上部にある既設構造物周辺の変位量についてまとめた。

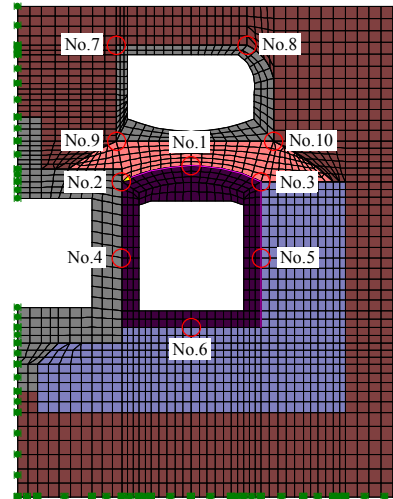


図5 変位抽出ポイント

② 地表面沈下量

地表面沈下量に関しては、各ステップにおける沈下量をトンネルからの水平距離分布としてまとめた。

③ 支保工応力

施工時に発生する支保工応力に関して、吹付けコンクリートおよび鋼製支保工の応力を照査した。

#### 4.4 検討結果のまとめ

表4に事前検討の検討ケースと結果をまとめ、図6および図7に解析結果の一例を示す。

検討結果からは、トンネル周辺地山を事前に薬注により地山改良した上で、トンネル施工時に補助工法としてパイプルーフを用いることにより、既設構造物（暗渠）や地表面への影響を最小限にして施工することが可能と判断できる。しかしながら、FEMによる数値解析では、事前に挙動を予測することは可能であるが、解析モデルや採用する地山物性によっては変位量等の絶対値が異なることも想定されたため、施工時の検討方針として以下のとおり考えた。

- ①解析結果に大きく影響を与える地山物性に関しては、開削部分の薬注改良部分のうち、深度的にトンネルの位置に相当するところで、実際の改良地山を観察することで薬注による改良効果を判断する。（改良度合いによっては改良効果を考慮する）
- ②改良地山からコアを採取して室内試験により再度地山の物性を確認するとともに、解析条件の確認を行う。予測解析で用いた地山物性値と大きな相違がある場合には再度修正解析を実施する。
- ③施工時には地表面沈下や先行変位および支保工、パイプルーフ等の監視を計画した。

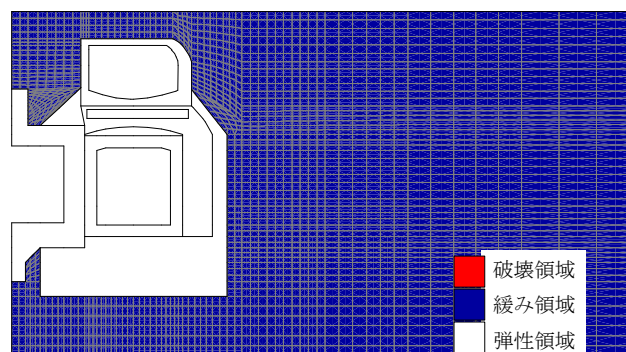


図6 緩み域分布(検討ケースV、ステップ6)

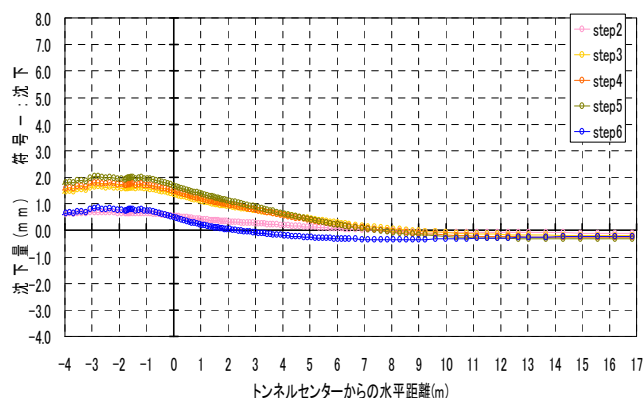


図7 沈下分布(検討ケースV)

表4 検討結果一覧

検討ケース	解析条件	検討結果	備考
I	基本条件① ・未固結土(20Mpa) ・薬注(t=2.0m、下部無し) 改良効果(地山E:5倍) ・補助工法無し	暗渠沈下量(最大):5.99mm 地表面沈下量(最大):8.4mm 支保応力(吹付け)0.29Mpa (支保工)135.91Mpa	トンネル工法で施工可能かどうかの照査
II	基本条件② ・未固結土(20Mp) ・薬注(t=2.0m、下部2.0m) 改良効果(地山E:5倍) ・補助工法(天端パイプルーフ)	暗渠沈下量(最大):0.86mm 地表面沈下量(最大)0.75mm 支保応力(吹付け)0.32Mpa (支保工)66.39Mpa	支保工と躯体の結合条件をピン、剛結と変化しても解析結果に変化無し。
III	基本条件③ (解析モデル変更) ・薬注範囲1.5mに変更	暗渠沈下量(最大):0.48mm 地表面沈下量(最大)0.4mm 支保応力(吹付け)0.46Mpa (支保工)82.65Mpa	メトロの基準で側方の改良範囲は1.5mとの規定
IV	基本条件④ (解析モデル変更) ・薬注改良効果 (地山E:2倍)	暗渠沈下量(最大):1.09mm 地表面沈下量(最大)0.9mm 支保応力(吹付け)0.47Mpa (支保工)109.65Mpa	薬注の改良効果を低減
V	基本条件⑤ (解析モデル変更) ・薬注改良効果 (地山E:3軸試験除荷時)	暗渠沈下量(最大):0.36mm 地表面沈下量(最大)0.3mm 支保応力(吹付け)0.46Mpa (支保工)75.63Mpa	薬注改良効果 現位置での資料を用いた三軸伸張試験結果(除荷時)の値を使用



## 5. 施工法の検討

### 5.1 非開削部施工計画

山岳工法の適用範囲は図8に示すとおり約8.0mであり、FEM解析による事前検討結果をふまえた上で、現場状況を勘案して補助工法を含め以下のとおり計画した。

- ①対象地山は、N値5～30程度の砂質土および粘性土からなる互層であり、地下水位がGL-5.8mであることから、施工中の安全確保に最も重要である内部空間の保持および切羽の安定のため、薬液注入を行う(図9)。
- ②土被りは約4.1mであるが、トンネル天端では大口径下水道との離隔が0.6mと近接し、掘削による地山の応力解放に伴い大口径下水道への影響や掘削中の地山肌落ちが懸念されるため、鋼管(φ114, 3mm)をトンネル断面周辺に挿入し、パイプルーフによる地山の先受けを実施する。
- ③施工中は表5に示す計測管理(自動計測)を行い、地表面およびトンネル内空断面の水平・鉛直方向の変位計測およびパイプルーフの鋼管たわみ測定を実施して挙動を把握する。
- ④丸ノ内線構築側部における近接掘削となるため、天端部分の鋼製支保工部材をアーチ状に形成する。また、丸ノ内線構築側壁を支保工部材として利用することとし、接合にあたっては構築に影響を与えないよう留意する(図8)。
- ⑤交差点直下での施工であり、実作業時間に制約があると同時に狭隘な作業スペースのため、人力を主体とした掘削となることを勘案し、日当たり施工延長は、断面を上半・下半に分割掘削して各々1.0mとする。なお、日当たりの施工サイクルを図10、施工手順図を図11に示す。

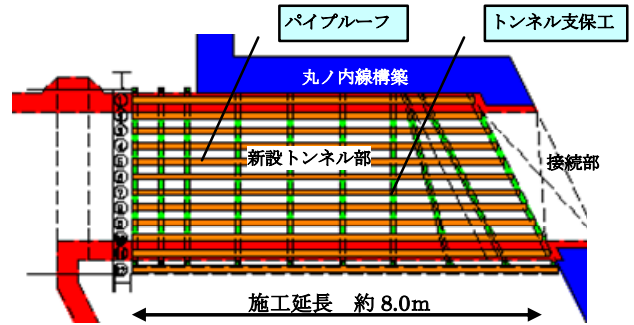


図8 平面図

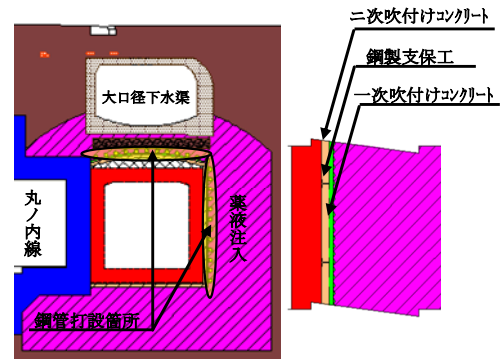


図9 非開削工法断面図

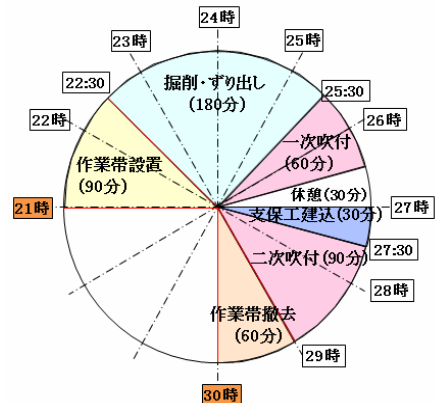


図10 施工サイクルタイム

表5 計測項目一覧

計測項目	使用計測器	得られる事象	着目点
地表面沈下測定	・ノンプリズム自動追尾トータルステーション ・レベル	地表面沈下量 (mm)	地表面の沈下量をリアルタイムに計測し、車両や歩行者が往来する道路および地表付近の各埋設物の健全性を監視する。
天端・脚部沈下測定 内空変位測定	・レベル ・内空変位計	坑内変位量 (mm)	新設トンネルの坑内変位を計測し、トンネルの安定性確認や、変形モードなどを把握し、施工の妥当性を検証する。
パイプルーフ 鋼管たわみ測定	・坑内水平傾斜計	鋼管傾斜角 たわみ変位量	パイプルーフ鋼管のたわみ量(先行変位)を把握し、補助工法の効果の検証や、共下がりの有無などを確認する

## 5.2 施工結果

開削部分の掘削完了後、図 11 に示すとおり、薬液注入の完了後、鋼管打設の施工を開始したが、天端部分の鋼管打設時に支障物の遭遇により、所定の鋼管挿入が不可能な状態となった。実際に鋼管が打設できた範囲を図 12 に示す。

未挿入範囲の対策工を検討する上で、実際の地山状態を把握する目的で、鋼管挿入ができた範囲の掘削を行った。

掘削は当初計画した上半の掘削をさらに 2 分割して行い、速やかに下半も掘削して鋼製支保工設置を行った。なお、この掘削による地山の変位はほとんどなかった。掘削した地山は、切羽を含め施工に十分な自立状態を維持できるとともに、懸念された湧水についても薬液注入の効果によって問題がないことが確認できた。

このことから、地山の挙動に留意しながら、支障物撤去と並行して掘削を行うことが可能と判断し、掘削を再開した。なお、掘削中の湧水および切羽の不安定状態、新たな支障物が判明した場合は、安全確保のため直ちに鏡面を含めた吹付けコンクリートの対応ができる体制をとった。

再開した施工状況を写真 1 に示す。掘削内への新たな支障物も発生し、狭隘な条件下での掘削となり施工効率の低下も若干あったものの、昼夜掘削により速やかな鋼製支保工の設置を行って、掘削を確実に進めた。結果的には、計画で 20 日間の掘削を予定し施工を開始したが、鋼管打設が一部不可能になるという不測の事態もあったものの実際の地山状態を確認した上で迅速な対応策を講じることができ、27 日間で完了することができた。また、鋼製支保工設置は、当初 10 基の計画が、図 13 に示すとおり 13 基の設置となったが、周辺地山への影響を与えることなく掘削を完了できた。なお、RC 躯体の施工においては、打込みが吹上げ方式となるため、高流動コンクリートを採用することで狭い作業ヤードの中で品質確保を図った。

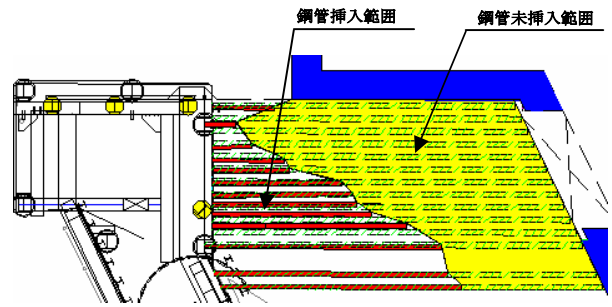


図 12 鋼管挿入範囲平面図



写真 1 掘削状況

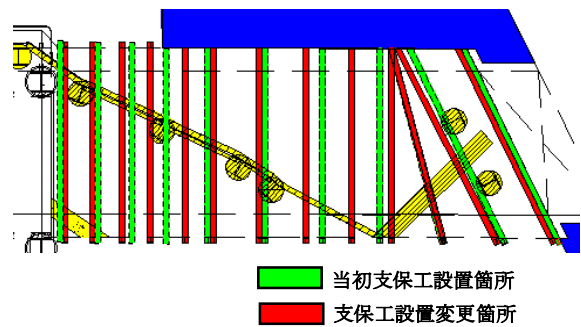


図 13 鋼製支保工設置平面図

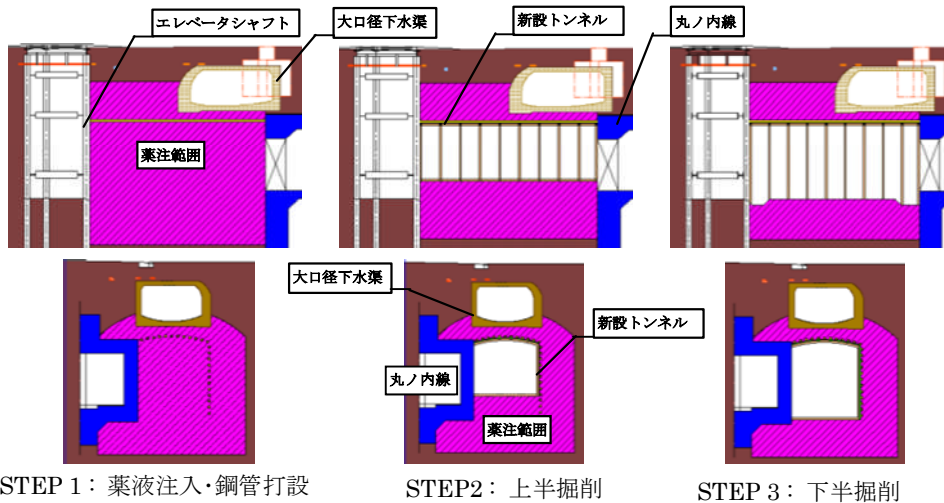


図 11 施工手順概要図



連絡通路完了後の連絡通路と丸ノ内線構築側部の接続に関しては、写真2～5に示すとおり、ワイヤーソーにより壁面をブロック状に分割（平成24年4月より、新基準では切断後アングルで固定するよう改訂）し、各ブロックをチェーンブロックにより吊り出し移動した後、接続部をハツリ仕上げにより接続を完了した。

接続箇所の施工においては、運転中の地下鉄丸ノ内線の構築部での施工ということもあり、慎重な施工が必要となったが、営業線に支障なく施工を完了した。

施工時の安全管理の一環として、

- ①通行車両や歩行者など第三者の安全確保
- ②ライフラインや周辺構造物への施工影響監視
- ③具体的施工法の有効性、妥当性の検証
- ④データのフィードバックによる安全性、経済性の向上

といった目的から、綿密な計測管理を実施したが、特に地表面沈下測定に関しては写真6に示すノンプリズム自動追尾トータルステーションにより自動計測を行い昼夜の監視を行った。写真7に既設構造物での測点設置状況を示す。

計測結果としては、事前検討ではトンネルの内空変位0.79mm、沈下0.3mmが想定されていたが、実際の施工結果では、内空変位が最大1.7mm、沈下が最大1.0mmとなり、管理基準値内で収まった。



写真4 ハツリ仕上げ状況



写真5 接続部施工完了状況

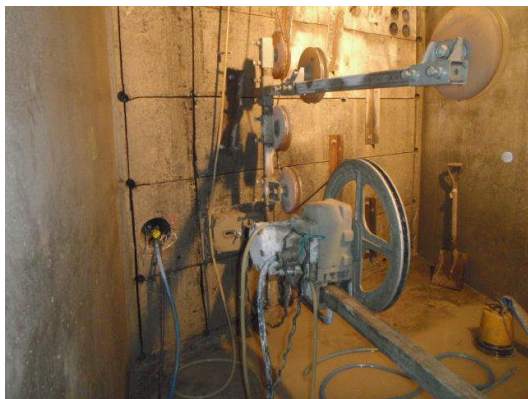


写真2 ワイヤーソー切断状況



写真6 地表面沈下測定状況

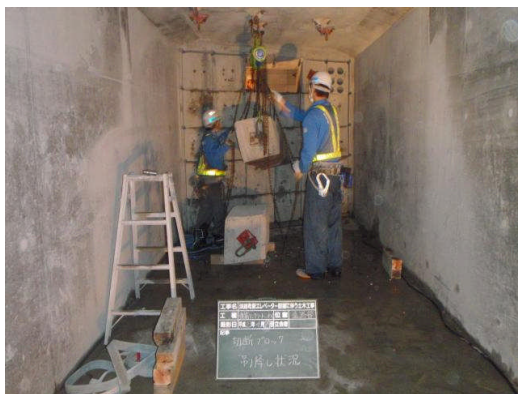


写真3 コンクリートブロック搬出状況



写真7 既設構造物測点設置状況

## 6. おわりに

今回報告した工事箇所付近は、靖国通りと外堀通りの交差点という都内でも交通量の多い箇所である上、地表面直下には、電気・ガス・水道などのライフラインが密集し、さらには大口径下水道が直上に斜交するといった条件が重なり、非常に厳しい条件下での施工となった（写真8）。

その中で、既設の構造物（NTT 人孔や管路）が浅層埋設されていることが判明し、路面覆工を架設すると現道との摺り付けが広範囲に及び道路交通への影響が懸念された。

このことから、数値解析（FEM）による事前検討により、施工時の挙動予測や安定性の検証を行い、非開削工法を採用することにより、事前協議の縮小が図れ、全体工程の短縮が可能となった。

また、施工時には、支障物の発生により、難航する場面も見られたが、対策工としての薬液注入による地山改良の効果が見られ、十分な切羽自立が得られたことから加背を分割し、支保の早期施工により、問題なく施工を完了できた。さらに、既設の丸ノ内線構築との接続においても、ワイヤーソーによるブロック切断と吊り出しにより、既設の壁に対する影響を最小限に収めることができた。

非開削工法（山岳工法）施工時には、綿密な計測管理により、既設構造物や地表面の挙動および新設トンネル自体の変位量を監視することにより、施工時の安全性も確保することができた。

今後、高齢者・障害者等の移動の円滑化の促進といった観点から、都心部での同種工事の計画が進むことが想定される。とりわけ都心部においては、通行車両や歩行者が多く、一旦不測の事態が発生すれば、その影響は計り知れないものとなる。

今回の施工実績が今後、同種工事の参考になれば幸いである。最後に、非開削工法の検討、採用にあたっては、東京地下鉄株式会社の関係者の方々のご理解とご指導をいただいたことに対して、紙面を借りて深く感謝します。

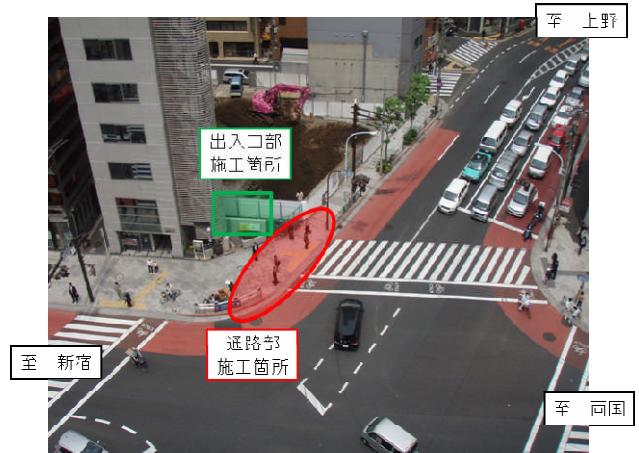


写真8 工事箇所現況

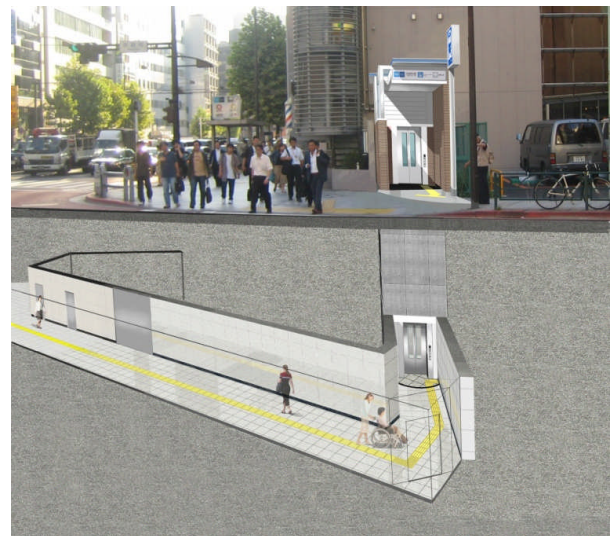


写真9 完成予想図

### 参考文献

- 1) 西野 建、瀧賀昇太、高橋信二：山岳トンネルを適用した都心部での非開削工法、土木学会第 66 回年次学術講演概要集、pp. 739-740、2011. 9
- 2) 日本鉄道建設公団：NATM 設計・施工指針、pp. 390-393、1996. 2
- 3) 日本道路公団：トンネル数値解析マニュアル、pp. 32-35、1998. 10