

軟弱地盤下における営業線地下鉄トンネルの 拡幅に伴う下床版築造方法の確立

岡ノ谷圭亮¹・橋口弘明²・坂田聡³・大塚努⁴・伊藤聡⁵・大石敬司⁶

¹正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: k.okanoya.y7b@tokyometro.jp

²正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: h.hashiguchi@tokyometro.jp

³正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: s.sakata@tokyometro.jp

⁴正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: tsu.ootsuka@tokyometro.jp

⁵正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: sato.itou@tokyometro.jp

⁶正会員 東京地下鉄株式会社 改良建設部 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: k.oishi@tokyometro.jp

本工事は、地下鉄駅（以下、「当駅」とする。）の通勤ラッシュ時の混雑緩和および列車遅延を解消するため、供用中の既設構造物の外側に新たな構造物を接合して空間を拡げ、現在の1面2線を2面3線化する駅改良工事である。工事は開削工法にて行い、拡幅部の下床版は供用中の既設構造物直下に築造するものである。当駅は、建設当時運河だった場所に潜函工法で築造しており、周辺の土質はN値がほぼ0の超軟弱な沖積粘性土層であるため、全ての工種に対して周辺地盤および既設構造物の変位抑制対策を検討する必要がある。本稿では、既設構造物直下に新設下床版を築造するにあたり、既設構造物の変位抑制対策を目的とした事前検討結果と施工結果を比較検討し、既設トンネル構造物の拡幅に伴う下床版の築造方法を確立した経緯について述べる。

Key Words: subway, soft ground, cut-and-cover method, expand an operating subway tunnel, lower floor slab

1. はじめに

一般に、既設の地下鉄トンネル（以下、「既設構築」という。）を拡幅する目的には、乗降人員の増加に伴う混雑緩和対策および輸送改善施策等によるものがあげられる。混雑緩和対策では、既設のホーム、コンコース、通路や出入口の新設・増設を、輸送改善施策では、線路の増設を行う。最近では、駅と駅を結ぶトンネル部において周辺の大規模開発に合わせた新駅の設置も行われている。ここでいうトンネルの拡幅形式の例をあげると、**図-1(a)**に示す既設構築を**図-1(b)**のように既設構築の側壁を撤去しコの字にて新設構築を築造するもの、**図-1(c)**のように既設構築を包囲する形でコの字にて新設構築を築

造するものがある。

一方で、トンネルを拡幅するには、鉄道特有の課題として、既設の営業線の運行を日々確保しながら、工事を安全に進める必要がある。拡幅工事の多くの工種は、営業線に近接した作業となるため、周辺地盤や既設構築の変位抑制対策はもちろんのこと、作業時間が非常に制約されることも特徴である。本稿では、**図-1(c)**のように既設構築をコの字にて大断面拡幅を行った東京メトロ東西線南砂町駅改良工事（以下「本工事」とする。）のうち、既設構築直下に位置する新設下床版を築造するにあたり、既設構築の変位抑制対策を目的とした事前検討結果と施工結果を比較検討し、既設構築の拡幅に伴う下床版の築造方法について報告する。

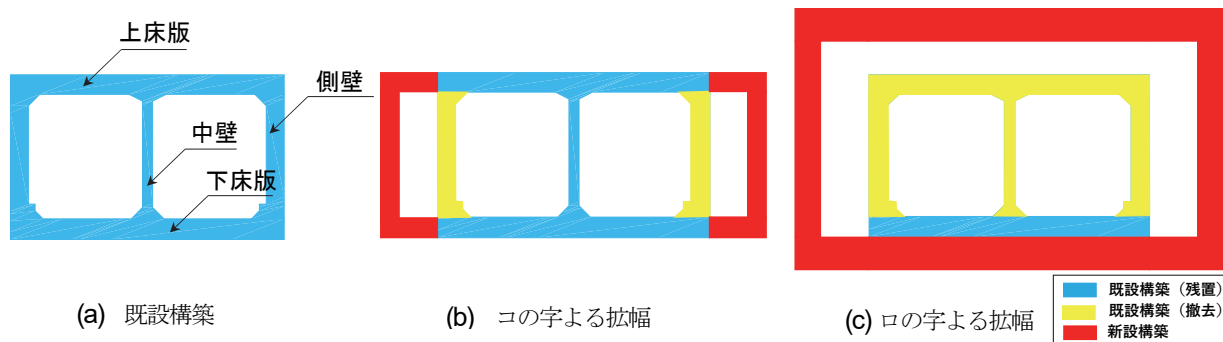


図-1 地下鉄トンネル拡幅の例

2. 東西線南砂町駅改良工事

(1) 改良計画

東西線南砂町駅は、昭和 44 年の開業以来、近隣の大規模商業施設やマンションなどの建設により沿線住民が増加し、通勤ラッシュの時間帯におけるホーム上のお客様の混雑が問題となっている。また混雑の影響で、列車への乗降に時間を要するため慢性的な列車遅延が生じているのが現状である。

そのため、西船橋駅方面から中野駅方面へ向かう都心方向への列車の遅延防止を目的として、現状の島式ホーム 1 面 2 線の駅構造から、ホームを南側に 1 面増設すると共に、中野方面の線路を 1 線増設して 2 面 3 線化することで列車の交互発着を可能とし、東西線の列車遅延を当駅で吸収することを計画した。

さらに南砂町駅の抜本的な混雑緩和対策として、既設ホームの拡幅や駅諸施設の配置変更、エレベーター・エスカレーター・出入口を増設することを計画した¹⁾。

(2) 施工ステップ

南砂町駅における現況・計画平面図および断面図を図-2に示す。工事範囲としては全長約430mであり、全面に開削工法を適用する。

写真-1に示す建設当時の南砂町駅の状況から、南砂町駅は洲崎川と呼ばれる当時運河であった場所に潜函工法にて築造されたため、駅周辺は今なおN値0~1と超軟弱地盤となっている²⁾。

終端部工区における施工ステップを図-3に示す。まず工事範囲が運河の埋立て地であったため、路上からコンクリートガラや松杭等の地中障害物撤去を行い、本体利用の地下連続壁を含む土留め工、杭打ち工を実施する。次に、先行地中梁とヒーピング対策を目的とした地盤改良を実施したのち、順次既設構築上部や側部の掘削を進め、既設構築のまわりを囲うような形で下床版、上床版の順で築造しながら、既設構築を撤去する。最後に線形切替を実施し、2面3線化を実現させる。

(3) 本工事における技術的課題

図-3のSTEP3に示す下床版築造においては、新設する下床版が既設下床版の直下に位置しているため、図-2 (b)B-B 断面に示す既設構築下面と地盤改良体との間を高さ約 2mの導坑をトンネル横断方向に掘削することとなり、既設構築および周辺地盤への影響が課題となった。

工事を進めるにあたり、(1)トンネル横断方向導坑掘削における掘削幅、(2)掘削ブロックの施工順序、(3)下床版コンクリートの打設方法に関する検討を行った。

3. 下床版築造方法の確立

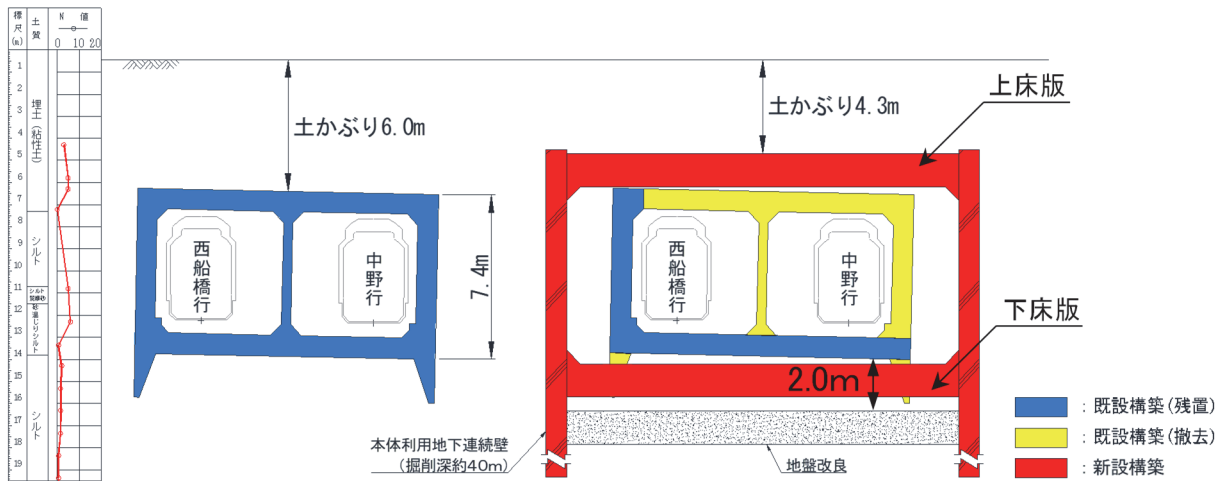
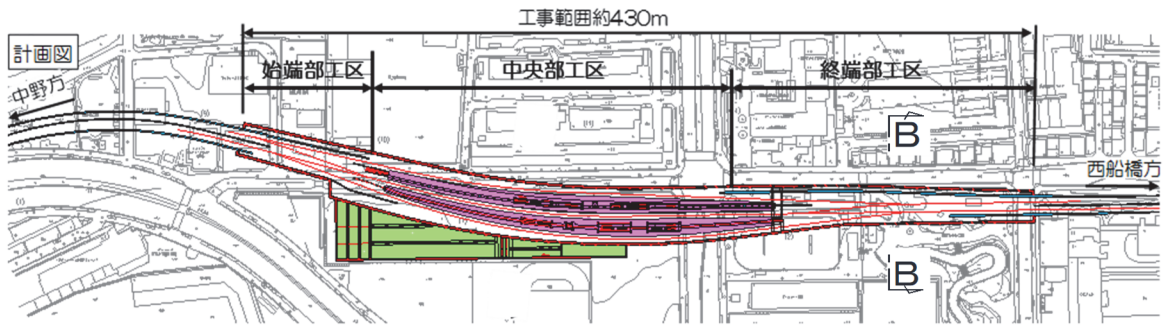
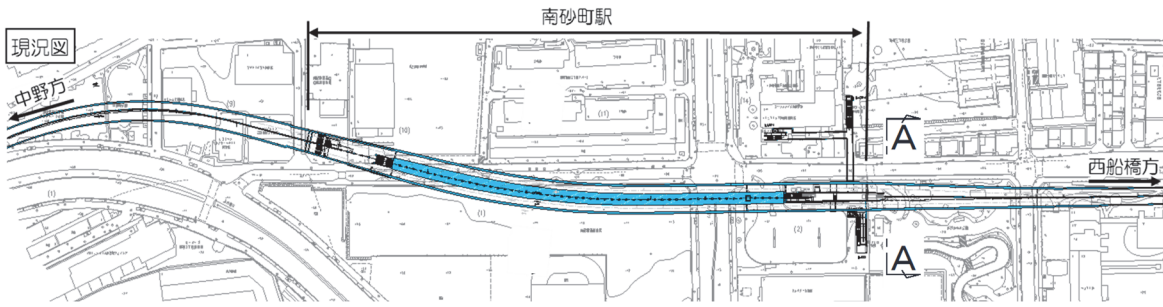
(1) 事前検討

a) 掘削幅の検討

導坑掘削が既設構築に与える影響を検討するため、三次元 FEM (使用ソフト:Soil Plus) による影響解析と既設構築に発生する応力度の照査を行った。解析における諸元を表-1に、解析モデルを図-4に示す。解析ステップは図-5に示すとおり、全6ステップとし、Step6では後行掘削時における列車荷重を考慮した。応力度照査は、図-6に示す Step6 の後行掘削時 (列車荷重を考慮) の解析結果をもとに算出を行い、横断方向の応力度は $\sigma_{sa}=95.3 \text{ N/mm}^2$ 、縦断方向の応力度は $\sigma_{sa}=149.5 \text{ N/mm}^2$ となり、ともに許容応力度 $\sigma_s=160 \text{ N/mm}^2$ 以内に収まる結果となった。以上から、トンネル横断方向の掘削幅は 1 ブロックあたり 6.5m 以下の全 23 ブロックとすることで、既設構築に与える影響を抑制することとした。

b) 掘削ブロックの施工順序

掘削ブロックは、既設構築への変位を抑制するため図-7に示すとおり、1 ブロックあたり 6.5m 以下となるよう全 23 ブロックとし、先行ブロックと後行ブロックを交互に配置した。また、施工時は、掘削箇所 2 ブロック、鉄筋組立箇所 2 ブロックの計 4 ブロックを最大施工箇所としたため、隣接する施工ブロックが未掘削もしくは下床版の築造が完了していることを前提として施工ブロッ



(a) A-A断面

(b) B-B断面

図-2 南砂町駅改良平面・断面図（現況および計画）

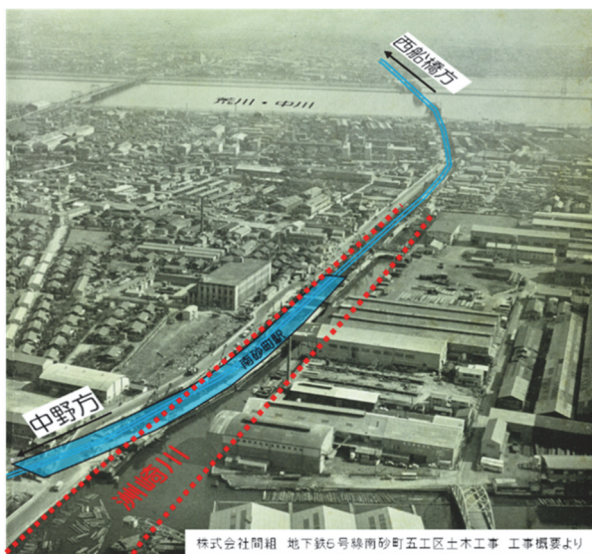


写真-1 南砂町駅築造当時の周辺状況

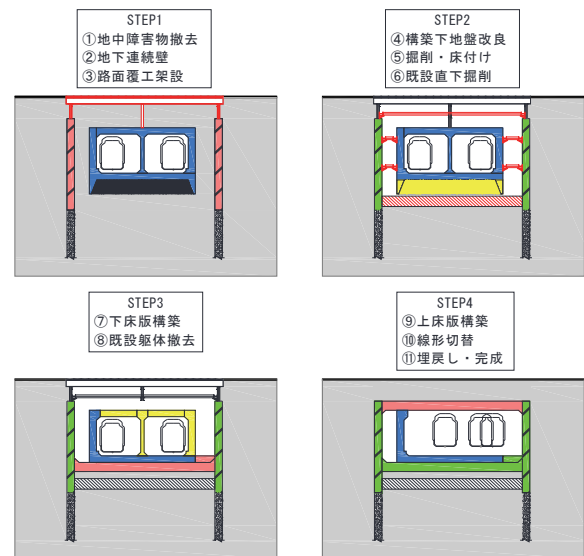


図-3 施工ステップ

表-1 三次元FEM解析諸元

| 要素構成 | 層厚 (m) | N値 | 単重 (kN/m ³) | ポアソン比 | 粘着力 (N/mm ²) | 内部摩擦角 (度) | 変形係数 (kN/m ²) | |
|---------|--------|-------|-------------------------|-------|--------------------------|-----------|---------------------------|---------------------|
| 埋土 | B | 6.42 | 4.3 | 18.0 | 0.45 | 26.9 | - | 3,000 |
| 有楽町層粘性土 | Yuc | 3.40 | 0.0 | 15.3 | 0.45 | 17.0 | - | 450 |
| 有楽町層砂質土 | Yus | 0.80 | 5.0 | 18.8 | 0.40 | - | 25 | 1,000 |
| 有楽町層粘性土 | Ylc | 27.00 | 1.0 | 15.1 | 0.45 | 78.0 | - | 6,600 |
| 七号地層粘性土 | Nac | 1.30 | 5.0 | 16.0 | 0.45 | 31.3 | - | 3,500 |
| 七号地層互層 | Nasc1 | 13.70 | 7.1 | 17.0 | 0.45 | 44.4 | - | 5,000 |
| 七号地層砂質土 | Nas | 7.30 | 49.1 | 19.0 | 0.30 | - | 46 | 34,400 |
| 既設躯体 | - | - | - | 25.0 | 0.20 | - | - | 2.5×10 ⁷ |
| 新設躯体 | - | - | - | 25.0 | 0.20 | - | - | 2.7×10 ⁷ |
| 地盤改良 | - | 1.50 | - | 地山相当 | 地山相当 | 300 | - | 1.0×10 ⁵ |

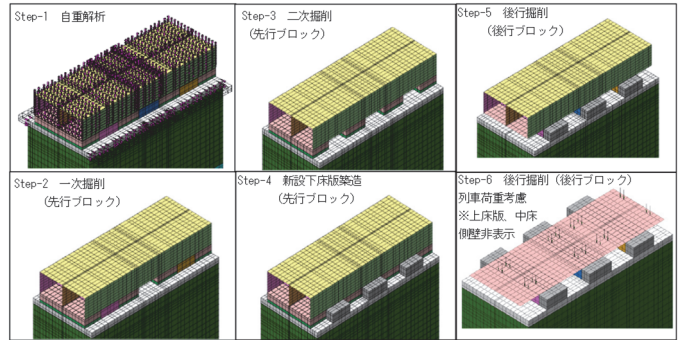


図-5 解析ステップ

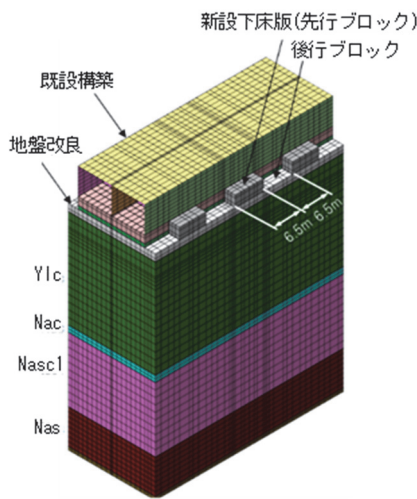


図-4 三次元FEM解析モデル

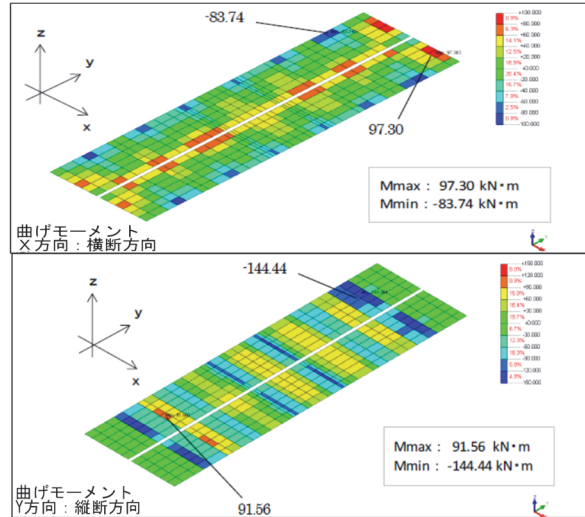


図-6 解析結果 (Step6)

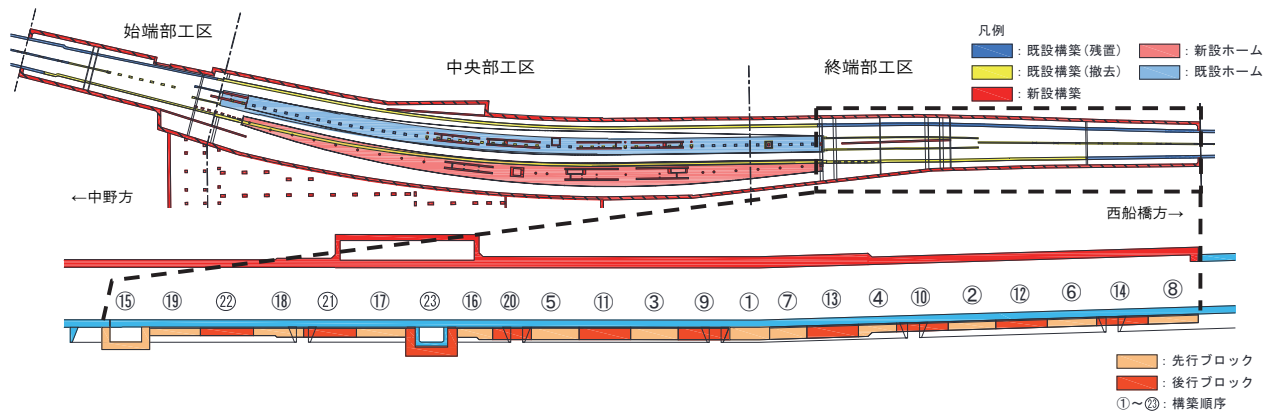


図-7 全体平面図および新設下床版打設ブロック割縦断面図

クを配置した。また、当該掘削に伴う既設構築の変位・変形が懸念されたため、自動計測機器（沈下計、傾斜計、ひずみ計、ケーソン継目計）を設置し常時計測を行うとともに、軌道への影響については軌道検測を実施することで確認することとした。

c) 下床版コンクリートの打設方法

下床版の築造は、当初、普通コンクリートと無収縮モルタルの併用で計画していたが、既設構築直下におけるコンクリートの締固め作業が困難であること、コンクリ

ート打設後に無収縮モルタルを充填することに伴う工程の長期化などが懸念された。

そこで、コンクリート打設方法について、施工性および経済性を考慮して再検討し、高流動無収縮コンクリート（設計基準強度：24 N/mm²，スランプフロー値：65cm）を採用することで、コンクリートの締固めの作業と無収縮モルタル充填作業を不要とし、1回で打設を完了する方法を考えた。

一方で、当該施工箇所はコンクリート打設時に不測の

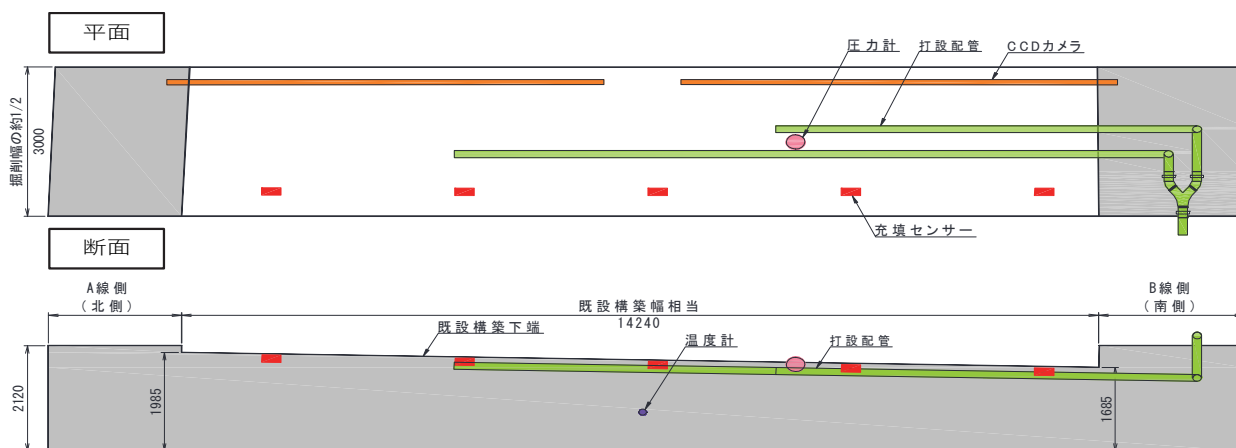


図-8 試験施工概要図

事態が発生した場合、補修等の手当てが現実的には不可能であることから、本方法による打設が可能かどうか確認するため、高流動無収縮コンクリートの充填性や打設時のトラブル対応について試験施工を実施することとした。

(2) 試験施工

試験施工は、現場状況と同じ既設構築下を模擬した実物大の1/2モデルを製作して実施した。実施にあたり、コンクリートの打設配管の閉塞およびコンクリート未充填部発生リスクに着目し、コンクリート打設配管は2系統配置するとともに、コンクリートの充填性については充填センサーを設置して確認することとした(図-8)。

充填センサーは「電圧式」、「圧力式」、「振動式」の3種類を候補とし、充填センサーの感度や精度について試験施工で検証することとした。

さらに、型枠材は写真-2に示すとおり、コンクリートの充填状況を確かかつ正確に確認するためにクリアパネルを使用した。

試験施工において、当初の配管位置では打設範囲の北側(図-8左側)と南側(図-8右側)でコンクリートの充填速度に相違が発生したため配管位置を調整したが、調整後は良好な打設状態を確保するとともに、「振動式」の充填センサーが充填状況を最も適切に確認できることが分かり、高流動無収縮コンクリートによる新設下床版の適切な施工方法を決定することができた(写真-3)³⁾。

(3) 実施工

a) 下床版施工順序

下床版の施工は、図-9に示すように、先に説明した先行ブロックに対して、(1)導坑掘削→(2)鉄筋・型枠組立→(3)コンクリート打設の順に行い、引き続き後行ブロックに対して、(1)導坑掘削→(2)鉄筋組立→(3)コンクリート打設の順に行った。



写真-2 試験施工用型枠 (クリアパネル)



写真-3 高流動無収縮コンクリート出来形

b) 施工結果

1) 導坑掘削

導坑掘削は、図-2 (b)B-B断面に示す既設構築下面と地盤改良体との間にある高さ約2mの範囲でケーソン刃口の撤去およびその大部分を占める中詰めコンクリートの撤去を行った。中詰めコンクリートの撤去については、撤去量が多く工程にも大きく影響を及ぼすため、その方法については入念な検討を重ね、その結果、コア削孔とブレーカーによる撤去の併用がもっとも効率的であった(写真-4)。

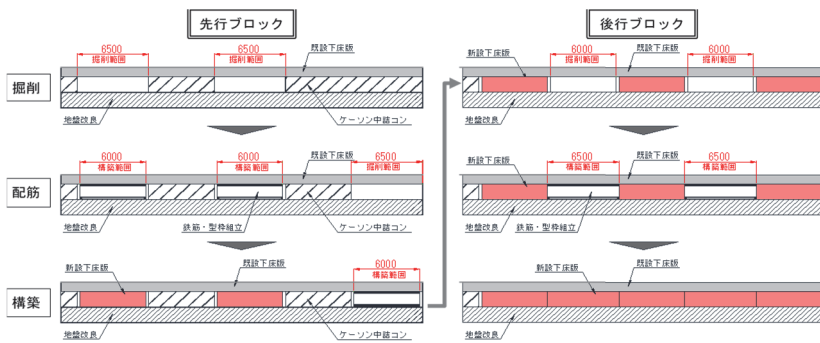


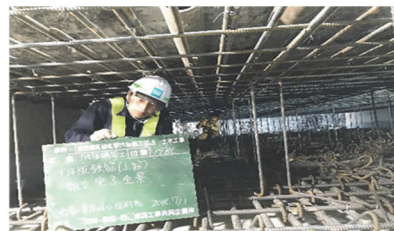
図-9 下床版築造ステップ



写真4 導坑掘削状況



コンクリート配管設置



鉄筋組立(上下筋)



鉄筋組立(肋筋)



コンクリート打設



型枠脱型、充填確認

図-10 下床版築造施工状況

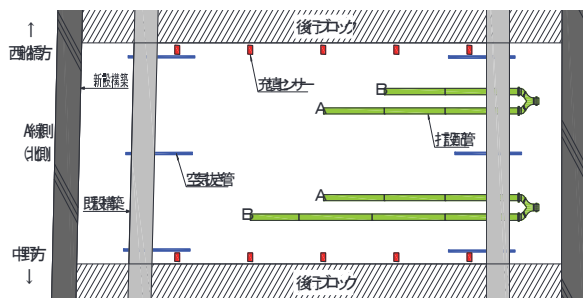


図-11 打設時設備・機器配置平面図

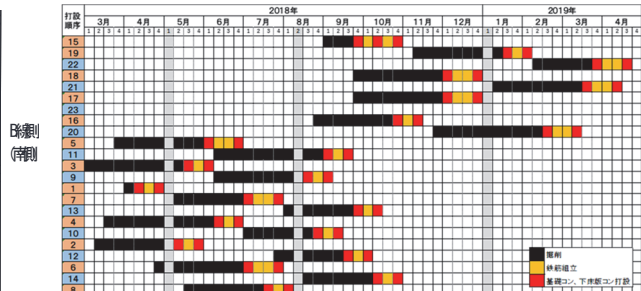


図-12 下床版築造工程

2) 鉄筋組立

図-10 に示すとおり、鉄筋組立における施工スペースが非常に狭隘であったことから、鉄筋長は一般的な長さのものを短尺に加工して搬入した。また、先行ブロックと後行ブロックの配筋筋の接続については、構造物の一体性を確保するため、あらかじめ先行ブロックの配筋筋に機械式継手を設置し、後行ブロックの配筋筋と接続することによって連続性を確保した。

3) コンクリート打設

コンクリート打設は、既設構築及び列車運行への影響を考慮し、全 23 ブロックのうち最初の 2 ブロックは終車から始発までの営業時間外で行い、影響が無いことを確認して残りの 21 ブロックは昼夜間で行った。

1 ブロック分のコンクリート打設に必要な設備等の配置については、図-11 に示すとおりとし、試験施工結果を踏まえて、充填センサーを含む計測機器も複数配置した。

コンクリート打設は主に配管 A で行ったが、計測機器の反応を確認しながら状況によって配管 B も使用することで、良好な充填状態を確保することができた(図-10)。

また、コンクリート打設に起因した既設構築の沈下や隆起の挙動を計測機器により常時監視するとともに、軌道の変状計測をき電停止時間内に日々行い、軌道への影響の有無も確認した。

4) 施工サイクル

下床版 1 ブロックあたりの施工サイクルは図-12 に示すとおり、掘削が約 2 か月、基礎コンクリート打設・鉄筋組立・下床版コンクリート打設が約 1 か月であり、1 ブロックの合計としては約 3 か月となり、全 23 ブロックにおける施工期間は、全体で 14 か月となった。なお、導坑掘削とは言いつつも、実態としては中詰めコンクリートの撤去が作業の大部分を占めたため、掘削の工程は約 2 か月と想定以上の時間を要した。

c) 既設構築の計測管理方法

既設構築の挙動に関する計測は、図-13 に示す水盛式沈下計、傾斜計、鉄筋ひずみ計およびケーソン継目計を図-14 のとおりに設置し、施工による異常値発生の有無を管理した。計測データは、専用のパソコン及びタブレット端末に送信することで常時監視できるようにした。

d) 計測結果

既設構築の沈下量計測結果を図-15 に示す。ここで、沈下量については下床版掘削開始直前を0.0mmとしている。図-15 に示す沈下計 (A27・28, B27・28) と掘削ブロックの位置関係は図-14 のとおりである。沈下量は最大6.9mmを記録し、事前予測解析における最大沈下量6.6mmと大凡等しく、管理基準値内であった。なお、工事着手と同時に路上の掘削が開始されたことによる上載荷重の減少により6.3mmの隆起が発生していたため、工事着手前を0.0mmとした場合、沈下量は0.6mmとなった。軌道の変状計測については、き電停止時間内に、施工箇所とのケーソンと両隣のケーソンに及ぶ範囲で日々行

ったが、特記するような異常は確認されなかった⁴⁵⁾。

4. まとめ

本工事では、既設構築直下に新設下床版を築造するにあたり、既設構築の変位抑制対策を目的とした事前検討結果と施工結果を比較検討した。これらにより得られた知見を以下に示す。

- (1) 既設構築の変位・変形については、三次元 FEM 解析結果と概ね同様の挙動となり、軌道変位についても特記するような異常は確認されなかった。
- (2) 実施工における下床版コンクリートの充填状況については、試験施工の結果から、充填センサーをはじめとした計測機器を用いることにより良好であることを確認できた。

以上より、軟弱地盤下における営業線地下鉄トンネルの拡幅に伴う下床版築造方法を確立できたと考える。

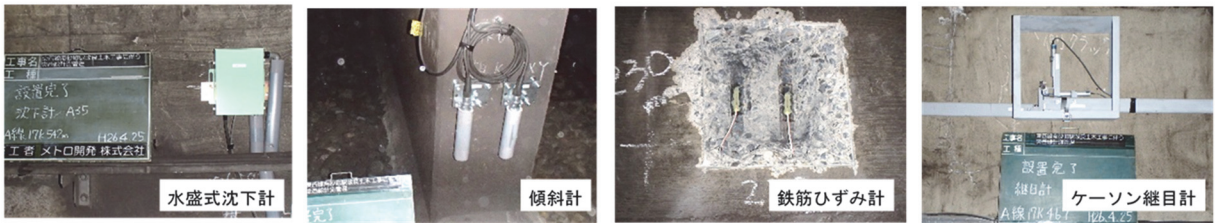


図-13 計測機器

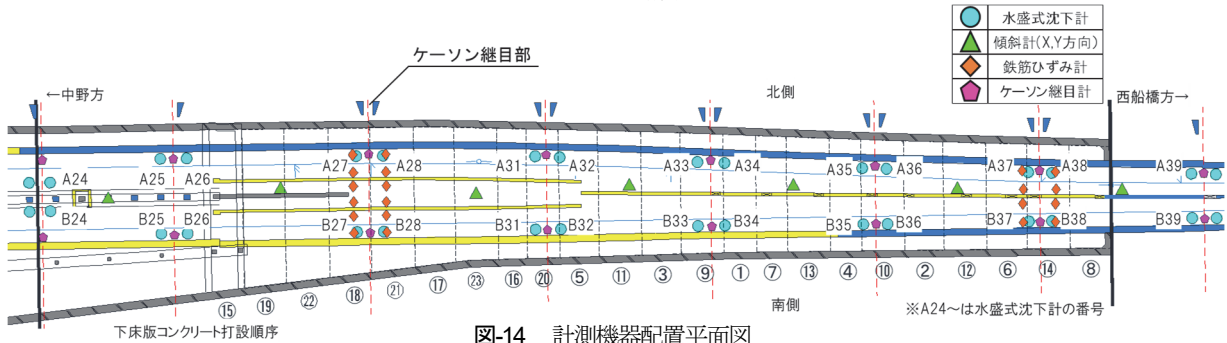
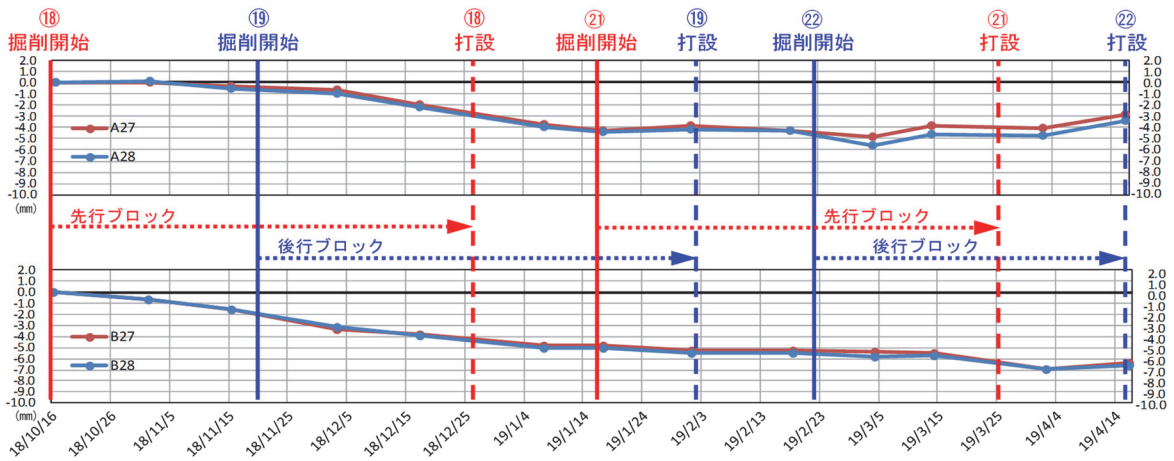


図-14 計測機器配置平面図



※ブロック番号は図-14参照

図-15 既設構築の沈下量計測結果 (沈下計 AB27~28)

参考文献

- 1) 岡ノ谷圭亮, 柳迫久, 山中耕太郎: 東西線南砂町駅 2 面 3 線化計画について, 土木学会第 67 回年次学術講演会, VI-580, P 1159-1160, 2012.9
- 2) 岡ノ谷圭亮, 坂井裕一, 西青木光則, 西村唯史: ケーソンで築造された地下駅の大規模断面拡幅に挑む, トンネルと地下, P 49-60, 第 50 巻 9 号, 2019.9
- 3) 新井泰, 吉田裕介, 渡辺慎一: 既設構築直下へのコンクリート打設に関する試験施工, 令和元年度土木学会第 74 回年次学術講演会, VI-421, 2019.9
- 4) 工藤昂一郎, 福田隆二, 渡辺慎一: 既設構築直下での新設下床版築造工事, 令和 2 年度土木学会第 75 回年次学術講演会, VI-162, 2020.9
- 5) K. Okanoya, Y. Arai, T. Otsuka, T. Nishimura, and S. Watanabe, The project which uses an innovative construction method to expand an operating subway tunnel built by the caisson method under the soft ground, P 297-302, ITA-AITES World Tunnel Congress, WTC2020 and 46th General Assembly Kuala Lumpur, Malaysia 11-17 September 2020

(2022. 8. 26 受付)

ESTABLISHMENT OF A METHOD FOR CONSTRUCTING THE LOWER FLOOR SLAB FOR EXPAND AN OPERATING SUBWAY TUNNELS IN SOFT GROUND

Keisuke OKANOYA, Hiroaki HASHIGUCHI, Satoshi SAKATA, Tsutomu OTSUKA
Satoshi ITO and Keiji OISHI

This renovation work is to widen the space by joining a new structure outside of the existing structure in service, by converting a single island platform with two tracks into two island platforms with three tracks in order to alleviate congestion and train delays during rush hours at subway stations. The construction work was performed using the cut-and-cover method, and the lower floor slab of the widened section was built directly under the existing structure in service. The subway station was constructed in a former canal using a submerged tunnel method, and the surrounding alluvial clay layer is very soft with an N value of almost zero. This paper describes the process of establishing a method for constructing a new lower floor slab directly under the existing structure in conjunction with the widening of the existing tunnel structure, based on a comparison of the results of preliminary investigations and construction results aimed at displacement control measures for the existing structure.