

# 営業中の地下鉄シールドトンネルにおける補強工事の効率化 -東京メトロ千代田線北千住駅・町屋駅間B線シールドトンネル補強・補修工事- Streamlining of Shield Tunnel Reinforcement Work while Service is Going

|                    |                |                   |
|--------------------|----------------|-------------------|
| 亀山 博通*1            | 三倉 靖*1         | 松村 恵佑*1           |
| Hiromichi Kameyama | Yasushi Mikura | Keisuke Matsumura |
| 澤田 和希*1            | 加藤 卓男*2        | 佐々木 雄亮*2          |
| Kazuki Sawada      | Takuo Katoh    | Yusuke Sasaki     |

## 要旨

本工事は、東京メトロ千代田線北千住駅・町屋駅間B線シールドトンネルにおいて、トンネル変形の防止を目的とした二次覆工による補強対策と、漏水の抑制、継手ボルトおよび鉄筋の発錆抑制を目的とした補修対策を実施するものである。

当該トンネルは地下鉄営業中のトンネルであるため、作業時間は夜間の列車運行停止時間帯に限られる。そのため作業時間に厳しい制約のある中で、効率的な施工を計画・実施することが課題であった。本稿では、二次覆工による補強対策において作業方法や施工設備を工夫することで効率化に繋げた事例について報告する。

キーワード：シールドトンネル トンネル変形 天端補強 側部補強 3D レーザスキャナ 建築限界測定

## 1. はじめに

昭和30年代終盤、東京地下鉄株式会社（以下「東京メトロ」という）は綾瀬～代々木上原間23.0キロ（建設キロ）の建設計画を決定し、昭和41年から建設工事に着手した。また、完成後は、JR常磐線（旧国鉄）および小田急線と、それぞれ列車の相互直通運転を行っている<sup>1)</sup>。

東京メトロ千代田線の綾瀬～代々木上原間の23.0キロのうち、19.0キロは地下部であり、そのうち北千住駅と町屋駅間を結ぶ1.5kmの隅田川単線並列シールドトンネル（φ6,750）は、1リング8分割の中子形鉄筋コンクリート製セグメント（以下「中子形セグメント（図1）」という）を使用し、昭和40年代前半に建設された。中子形セグメントは継手金物はなく、長ボルトでセグメント間を締結するという特徴を有しており、当時の鉄道トンネルで数多く採用された<sup>2)</sup>。近年、建設から40年以上経ち、当該部においてセグメントのトンネルの変形が判明した。

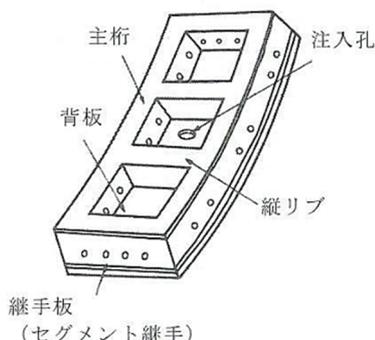


図1 中子形セグメント

本稿では、隅田川単線シールドトンネルのB線（トンネルの変形）の補強対策と施工時の取組みについて報告する。

## 2. 工事の概要

本工事は、地下鉄営業中のトンネルにおいて、トンネル変形の進行防止を目的とした二次覆工による補強対策と、漏水の抑制、継手ボルトおよび鉄筋の発錆抑制を目的とした補修対策を実施するものである。

表1に工事概要、図2に施工位置図を示す。

補強対策の検討をするにあたり、セグメントの変形状況を把握し、補強範囲の詳細を決定するため、軌道移動型レーザー計測システムによる測定が行われた。その結果、複数の区間でトンネル断面が水平方向に広がり、鉛直方向には縮む変形をしていることが分かった。なお、トンネル変形の直接的な原因を特定することはできないが、民地部の建物の増加、河川内の盛土などによる上載荷重の増加、トンネル直下を他のシールドトンネルが通過した近接施工の影響や地下水位の変動による粘性土地盤の圧密沈下、さらには、継手の締付力不足など様々な影響が推察された。

補強構造形式は、埋設型枠工法による二次覆工構造である（以下、側部補強という）。側部補強を行う範囲は、3区間でそれぞれ177.6m、64.0m、67.2mの合計308.8mである。さらに、変形量の大きい一部区間（18リング）においては、

\*1 東京本店 土木部 \*2 技術本部 土木技術部



図2 施工位置図

側部補強に加えて鋼材による引張補強部材を天端部分に設置した(以下、天端補強という)。図3に補強範囲を示す<sup>3)</sup>。

なお、補強対策を実施する前に、セメント系急結材や高弾性のコーキング材を用いてセグメント継手部の止水対策や目地処理といった補修を行った。

表1 工事概要

|      |  |
|------|--|
| 工事名  | 千代田線北千住駅・町屋駅間B線シールドトンネル補強・補修工事                                 |
| 工事場所 | 千代田線B線北千住駅～町屋駅間延長 L=661.1m<br>(うち補強延長 L=308.8m, 補修延長 L=649.9m) |
| 工事内容 | 天端補強工、側部補強工、止水工、目地処理工  |

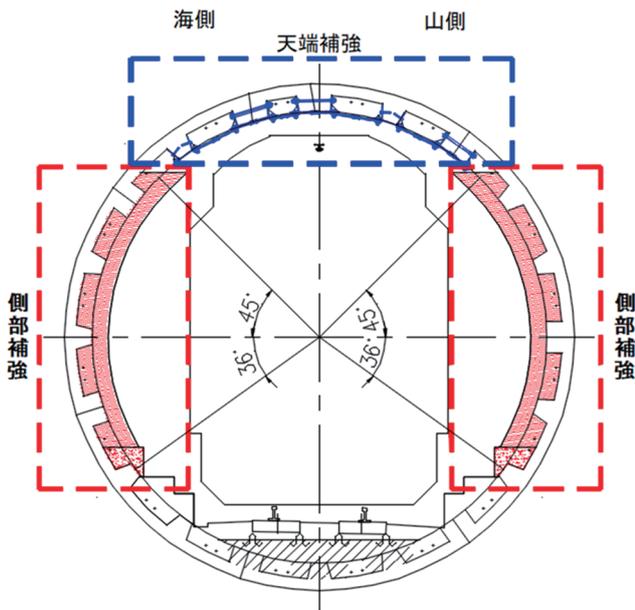


図3 補強範囲図

### 3. トンネル補強対策

#### 3.1 側部補強

側部補強は、セグメントに発生している負曲げの圧縮力に対しトンネル断面の側部に補強コンクリート(最小巻厚200mmまたは250mm)を打設し、トンネル内覆工で補強するものである。補強コンクリートの型枠には、打設後の型枠解体作業が不要な埋設型枠を採用した。また、補強コンクリートの材料は、中子部への充填性に優れ、高い流動性や現場練りに対応した材料としてプレミックスタイプの無収縮モルタルを用いることとした。

また、側部補強工は、構造検討により最小巻厚を確保する範囲を以下のように設定されていた。

- ① 既設セグメント中心より上方向へ45°までの範囲
- ② 既設セグメント中心より下方向へ36°までの範囲

特に①の条件は、調整コンクリートの高さが計画よりも低い場合は条件を満たすことができなくなるため、調整コンクリートの打設には高い精度が求められた。

なお、当初計画ではセグメントボルトを抜き取り、支柱調整金物を両側に挟み込む方法だったが、試験施工においてボルトの抜き取りに時間がかかったため、ボルトを抜かず突っ張り棒で支柱調整金物を固定する方法に変更した。

以下に、側部補強の施工順序について示す。また、図4に側部補強構造図、図5に施工順序を示す。

- ① 中子部に支柱調整金物を突っ張り棒で固定する。
- ② 補強コンクリート打設予定箇所と既設側道コンクリートとの取り合い部に調整コンクリートを打設し、高さを調節する。
- ③ 調整コンクリートを高さの基準として固定支持金物を設置し、固定支持金物を支柱調整金物に取り付ける。支柱調整金物には、固定支持金物を前後にスライドできる金具がついており、これで設置位

置を調節することで所定の覆工巻厚を確保できるようにした。

- ④ 固定支持金物にパネル状の埋設型枠を下から順番に設置し、型枠支保工材で固定する。
- ⑤ 坑内でモルタルを練り、モルタルポンプにて無収縮モルタルを打設する。

### 3.2 天端補強

天端補強は、剛体架線や建築限界からの離隔を確保することや中子部を埋めてはいけないことが条件であった。そのため、セグメントの天端部分に発生している正曲げの引張力に対し、中子形セグメントの縦リブと継手部に加工した鋼板を取り付け、鋼板同士を鋼棒で連結することでセグメントを補強した<sup>3)</sup>。

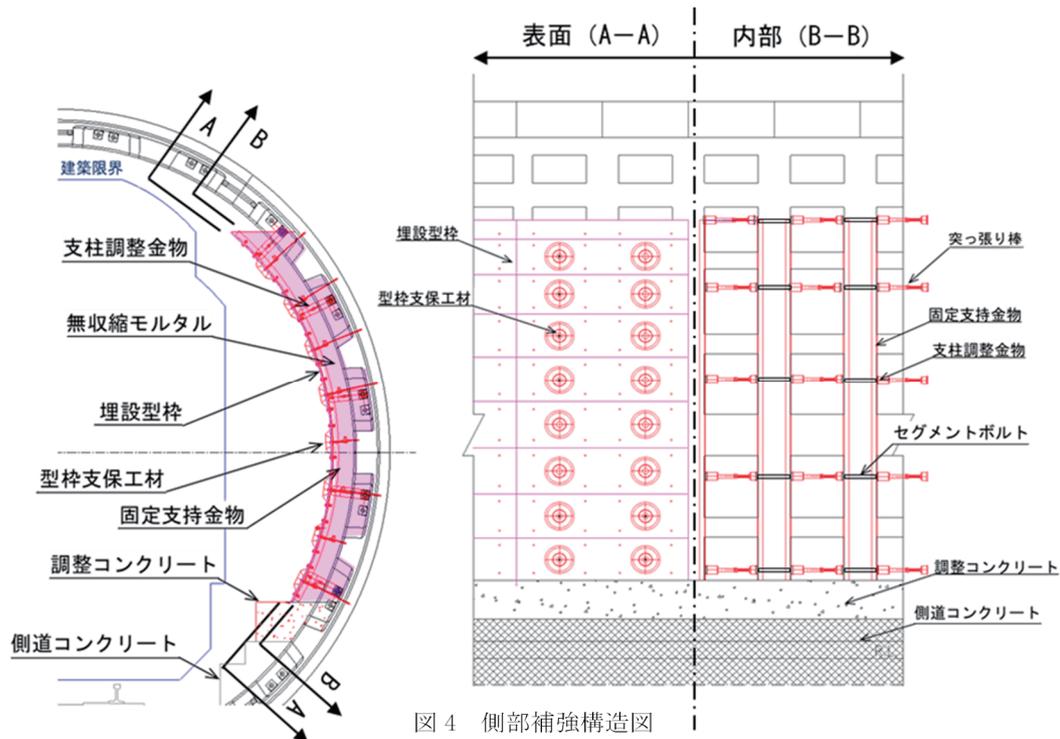


図4 側部補強構造図

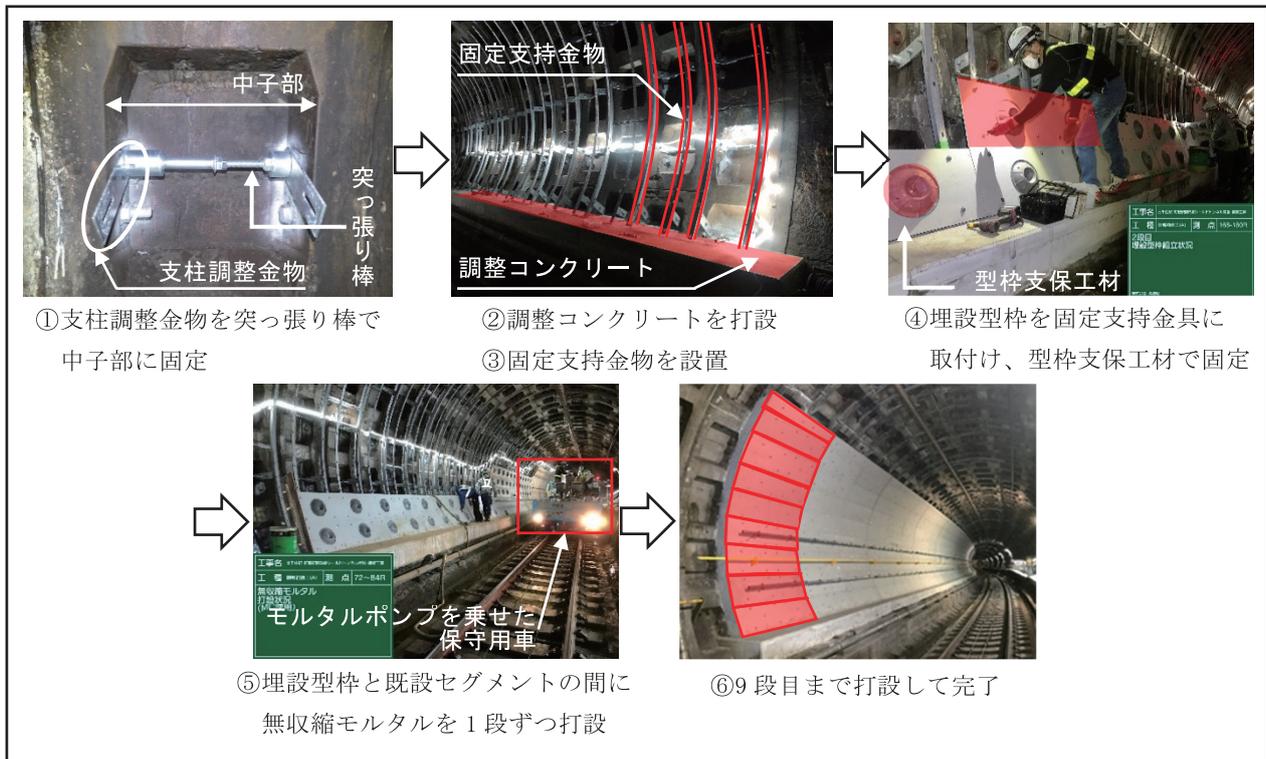


図5 側部補強施工順序

以下に、天端補強の施工順序について示す。また、図 6 に天端補強構造図、図 7 に施工順序を示す<sup>4)</sup>。

- ① 継手部は、セグメントボルト引抜き後、新しいボルトに交換し、L型固定補強板を取り付ける。
- ② 縦リブ部は、あと施工アンカーを縦リブ部に打設し、継手部と同様にL型固定補強板を取り付ける。
- ③ 縦リブ部のL型固定補強板を繋ぎ板でつなぐ。
- ④ L型固定補強板の間に羽子板を継手部、中子部の順に設置し、羽子板間をカプラーで締め付ける。
- ⑤ 剛体架線に近接するため、羽子板やカプラーに絶縁材を塗布する。

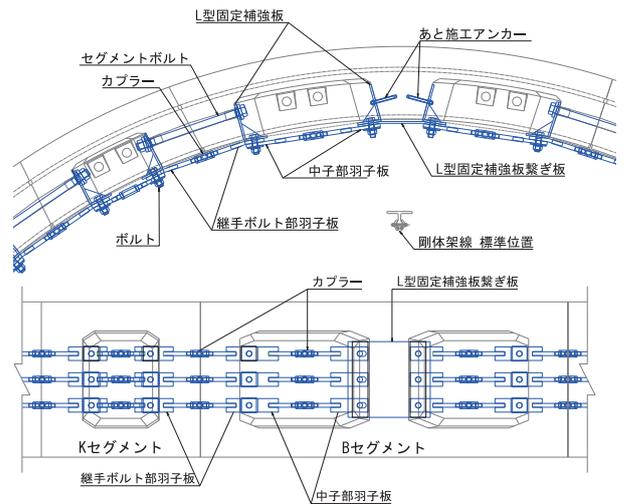


図 6 天端補強構造図

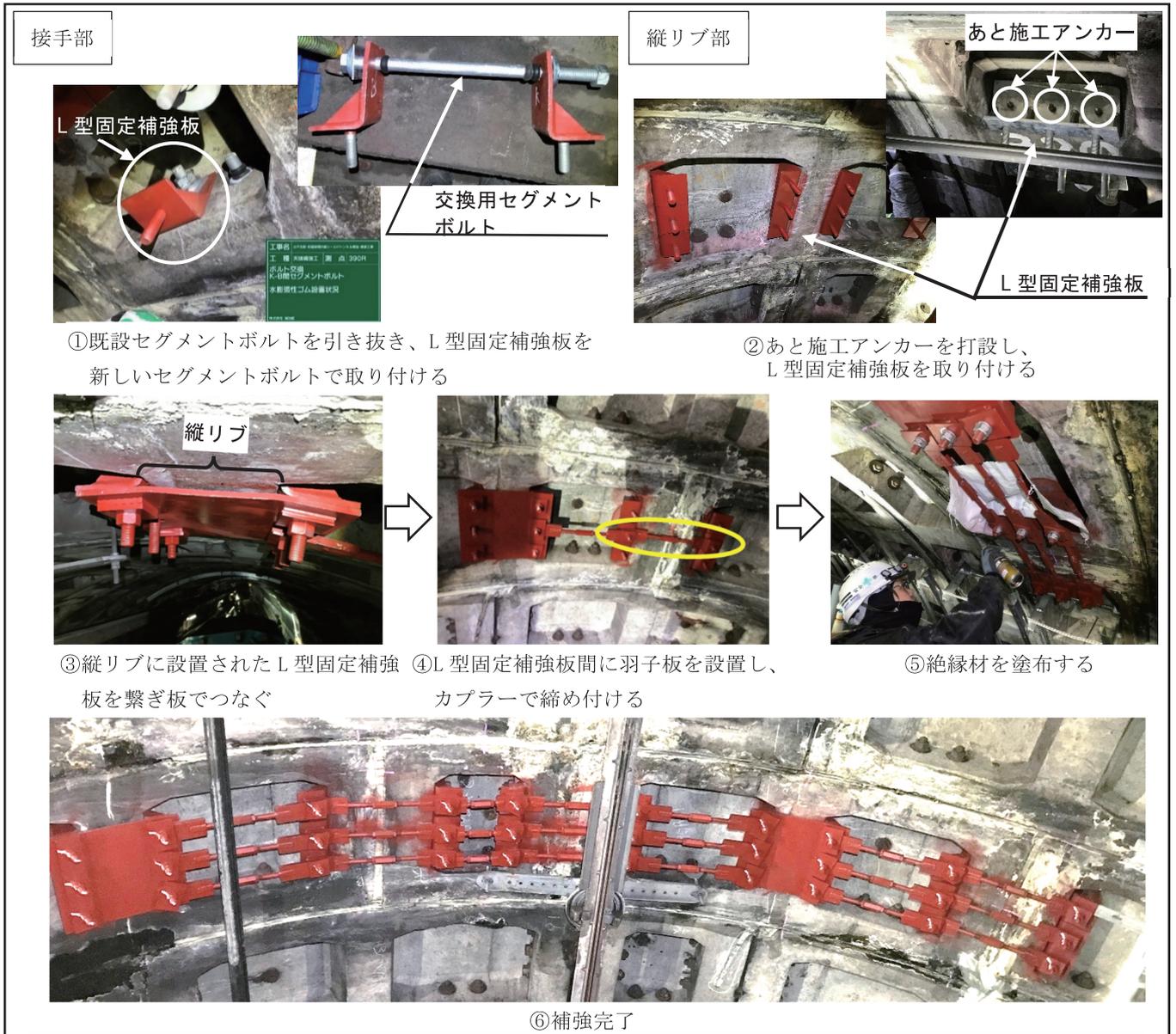


図 7 天端補強の施工順序

## 4. 工事における課題

営業中の地下鉄トンネル内での工事であり、限られた時間での施工となることと、日々の作業終了時の建築限界の正確な計測が最重要課題であった。そのほかに、出来形の精度確保、品質の確保、施工中の構造安全性の確保が主な課題であった。

### 4.1 坑内断面の現状把握

側部補強や天端補強の施工を計画するには、308.8mの補強区間の詳細な内空断面形状を把握する必要があった。しかし、坑内断面が中子形セグメントで複雑かつ線形もカーブ区間であるため、通常の水準測量や内空断面測量では、詳細な施工計画を立てるうえで必要なトンネル断面の細部データが不足してしまうことが懸念された。

### 4.2 本作業の時間の確保

補修・補強作業は高所作業が多く、足場の設置が不可欠であった。千代田線の綾瀬駅～湯島駅間は、相互直通運転を行っている JR 線のき電停止時間後に作業開始するため、き電停止の時間が他路線より 15 分遅くなり、列車運行停止時間のうち、坑内に立ち入ることができるのは午前 1 時 15 分から 3 時 45 分までの 150 分である。さらに、その時間帯には現場への移動や他の通常保守作業の保守用車 (MC : モーターカー) の通過待ちにかかる時間も含まれるため、1 日あたりの作業可能時間はおよそ 60 分となった (図 8)。当初、作業足場にはローリングタワー (写真 1) やメトロステージ (写真 2) といった枠組み足場を使用しており、坑内の組立・解体作業時間には合計 40 分を要し、本作業の時間は 20 分しか確保できなかったため、準備作業にかかる時間を短縮することが課題となった。



写真 1 ローリングタワー



写真 2 メトロステージ

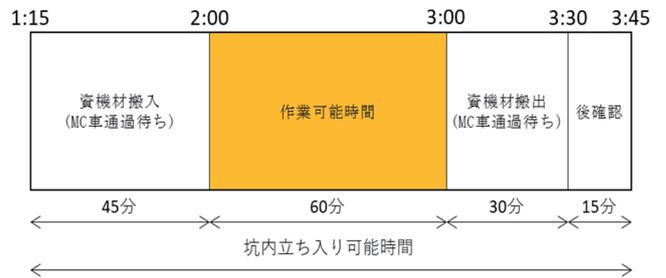


図 8 作業時間

### 4.3 劣化したセグメントの施工中の構造安全性の確保

天端補強工において、L 型固定補強板を設置するためにセグメントボルトを抜く必要があるが、セグメントの劣化やトンネル断面の変形が生じている中で抜いてしまうとセグメントリング全体の変形を進行させる恐れがあった。

### 4.4 側部補強工の出来形確保

側部補強工の固定支持金物は調整コンクリートの上に直接設置するため、固定支持金物の設置精度は調整コンクリートの天端高さの仕上がり精度に依存していた。しかし、調整コンクリートはトンネル縦断勾配に合わせて設計されており、コンクリートの材料には無収縮モルタルを採用していたため、打設の際に下流側にモルタルが流れてしまい、設計通りの勾配を確保することが難しかった。これにより、固定支持金物を設置する位置の高さもずれてしまい、コンクリート表面をはつることで設置高さを調節するといった手戻り作業が発生していた。

### 4.5 側部補強工のモルタルの品質確保

補強工事を行うにあたって、営業線の運行に支障を来すことはあってはならない。しかし、モルタル打設から始発列車が打設部を走行するまでの時間は 2 時間半程度と短く、列車の走行による振動や風圧によりモルタルが妻型枠

から漏れて触車することが懸念された。また、中子形セグメントの形状上、モルタル打設を行う際にエア溜りが発生し、モルタルの充填を確実なものにできないことが懸念された。

#### 4.6 補強作業後の建築限界の確認

補強物の設置には建築限界を侵してはならず、1日の作業終了時に建築限界余裕量を確認することが求められた。しかし、作業時間が限られている中で本作業の時間を確保するため、確認作業を効率化する必要があった。

### 5. 課題に対する取組みについて

#### 5.1 坑内事前測量の効率化

トンネル断面の変形量や建築限界までの余裕量といったセグメントの状態を正確に定量的に把握するために3Dレーザスキャナ測量を実施した(写真3)。

取得した点群データを図9、図10に示す。

連続したデータを採取し、これをCad図面上に取り込み、設計図と比較することで変形状況を見える化した(図11)。この結果、補強区間における任意の断面において、細部データを把握することができ、建築限界や補強範囲の詳細位置の測定に応用することができた(図12)。細部データを施工計画に活かした具体的な事例として、天端補強を現況

のセグメントに沿って設置する必要があるため、変形が大きいセグメントに対しては、テーパ座金と調整座金の使用枚数やそれに伴うボルト長さの調整を事前に計画した(図13)。

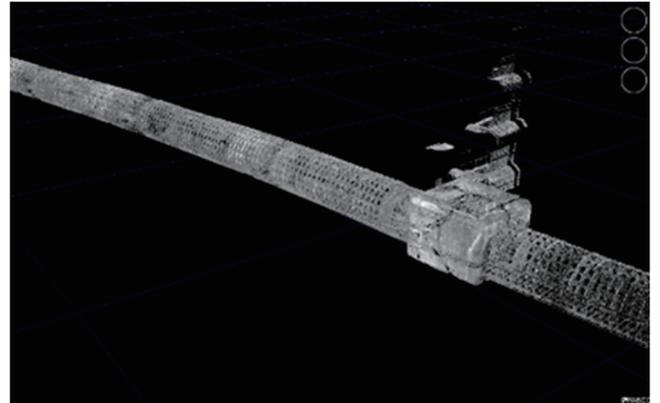


図10 点群データ(鳥瞰図)

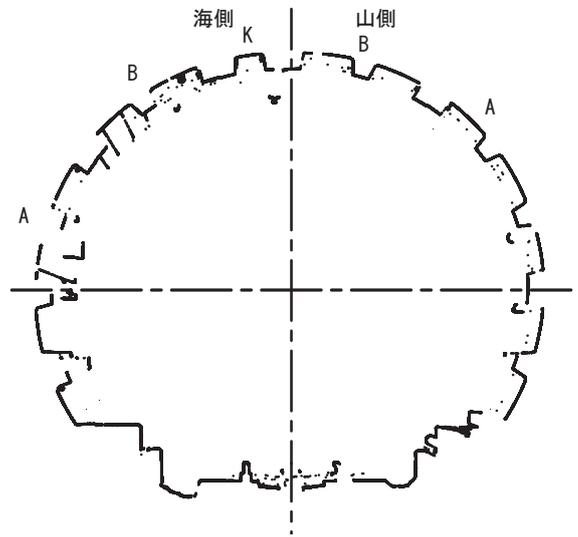


図11 点群データのCad化

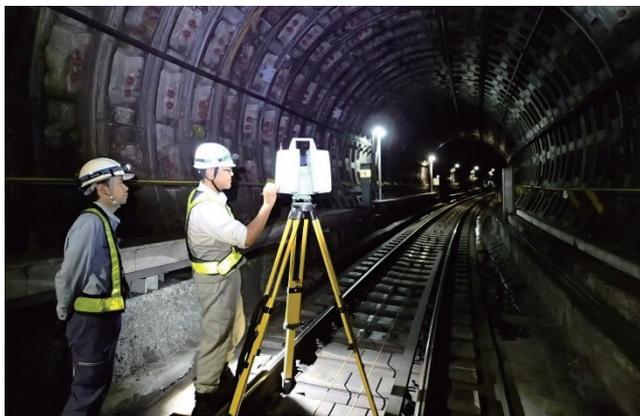


写真3 3Dレーザスキャナ測量

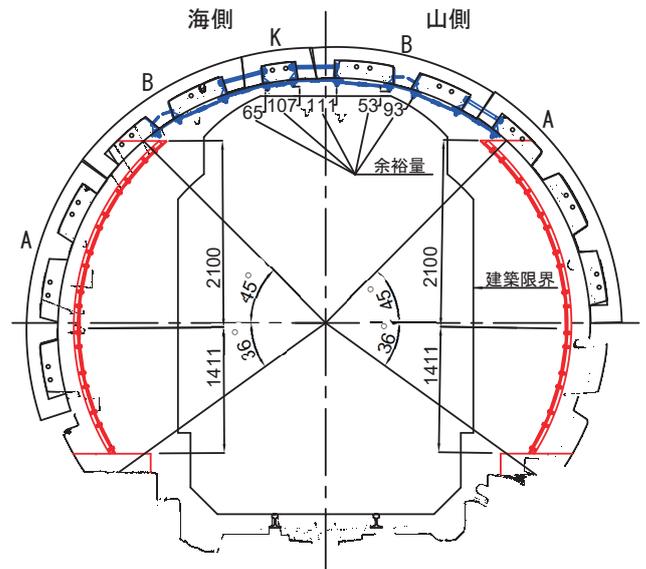


図12 天端・側部補強計画



図9 点群データ(拡大図)

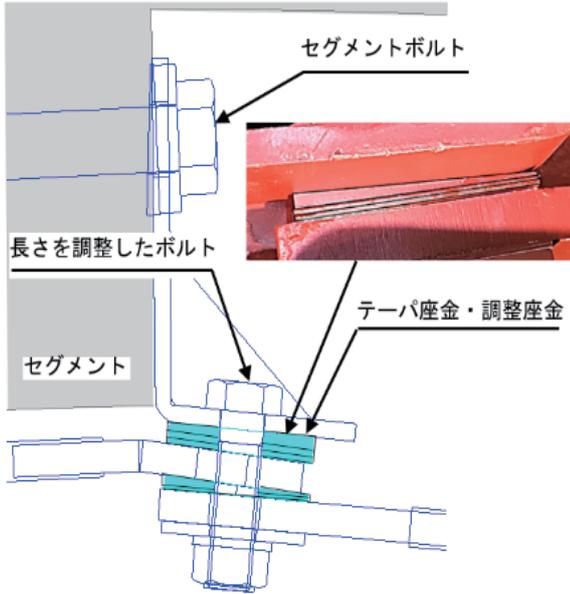


図 13 天端補強座金部

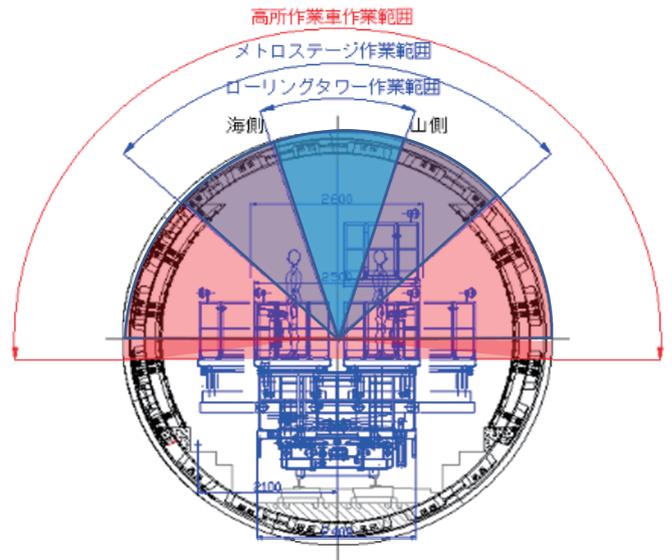


図 14 作業範囲対比図

## 5.2 高所作業車導入と仕様改造による効率化

東京メトロが保有する既存の高所作業車を枠組み足場として使用できるよう、東京メトロから承諾を得て、現場の特性に合わせて改造した（写真 4）。以下に、改造した事項について示す。

- ① 左右デッキの張り出し範囲の拡幅
- ② デッキ上の有効スペースを確保するため左右デッキ操作盤を移動
- ③ 150Lx 以上の照度を確保するため左右デッキ他の照明灯の LED 化と増設

これらの改造は、軌道を中心とした位置にしか設置することができない高所作業車を枠組み足場と同等の作業範囲を確保することが主な目的である（図 14）。

この結果、組立と解体作業にかかる時間を大幅に削減することができ、本作業の時間が 30 分長く確保できることとなった（図 15）。

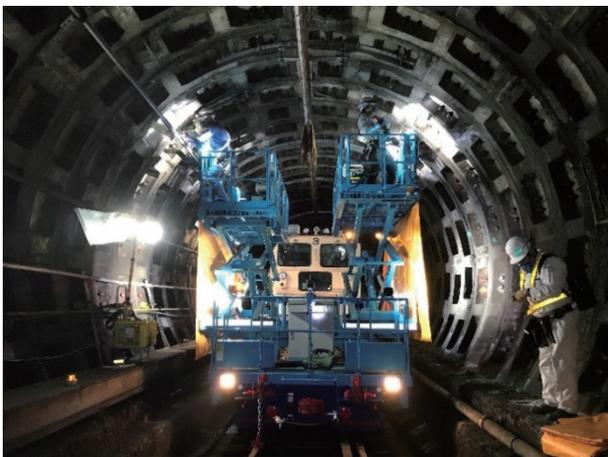


写真 4 高所作業車

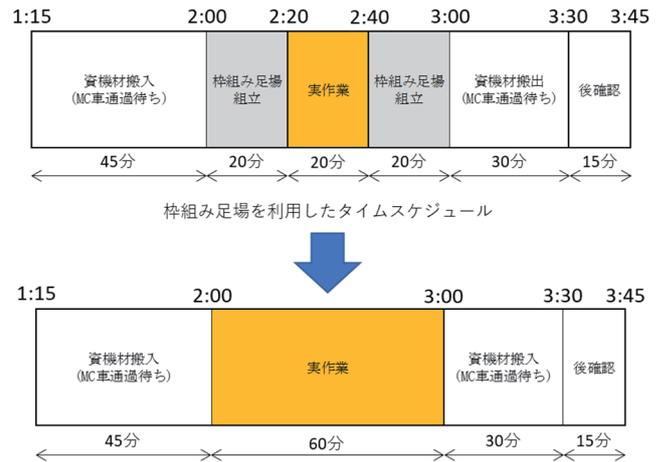


図 15 タイムスケジュールの比較

## 5.3 天端補強作業時のセグメントの安全確認

補強作業に先立ち、補強区間のセグメントに発生しているひび割れ幅や目違い量を測定した。ひび割れ幅は 0.05mm 単位で計測できる CM ゲージを用い、目違い量は差し金で測定した。

作業中のセグメント変状観察は、セグメント継手間に速乾性のセメントを塗り付け、作業中にクラックの発生など目開きや目違いの発生がないか目視監視した。

## 5.4 専用の受け架台による固定支持金物の精度確保

調整コンクリートの天端精度の確保が困難なため、調整コンクリートの代わりに高さ調整が可能な鋼製架台を利用して固定支持金物を設置することとした。

セグメント6リング(4.8m分)を1ブロックとし、鋼製架台に固定支持金物を設置する方法を示す。

- ① 鋼製プレートの四隅に設置した長ボルトで高さを調整し固定。
- ② 鋼製プレートの上にトンネル横断方向のH型鋼と、この上に固定支持金物を乗せるトンネル縦断方向のH型鋼を、いずれもブルマンで固定。
- ③ ①②で構成されたものを鋼製架台とし、ブロック両端に計2つ設置。
- ④ トンネル縦断方向のH形鋼上に固定支持金物を必要巻厚を確認しながらブロック両端に設置。
- ⑤ ブロック両端の固定支持金物の上下端に角鋼管を仮設置。
- ⑥ 仮設置した角鋼管を定規として中間部の固定支持金物を設置。
- ⑦ 1ブロック分の固定支持金物設置後、鋼製架台を撤去して側部補強の基礎兼底型枠として調整コンクリートを打設。

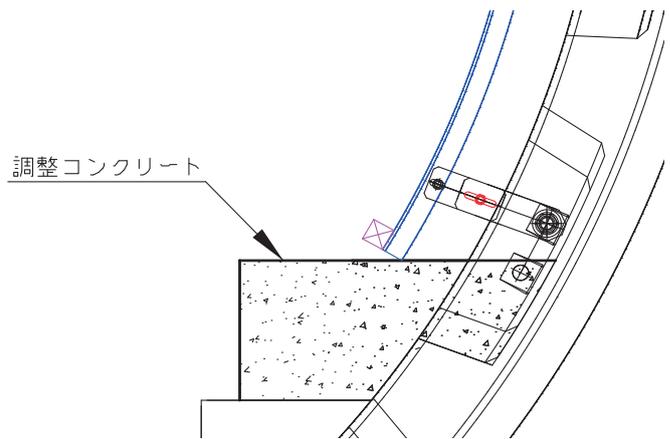


図 17 調整コンクリート

このように、固定支持金物を高さの微調整が完了した鋼製架台上に設置するため、計画通りに固定支持金物の設置が可能となった。また、変更前は調整コンクリートを打設するまで固定支持金物を設置することができなかったが、変更後は固定支持金物を先行して設置していきことができるようになったため、作業効率が飛躍的に向上した。

鋼製架台を用いた固定支持金物の設置図面を図 16、鋼製架台を撤去したのちに調整コンクリートを打設した図面を図 17、鋼製架台の上に固定支持金物を設置した状況を写真 5、鋼製架台を写真 6 に示す。

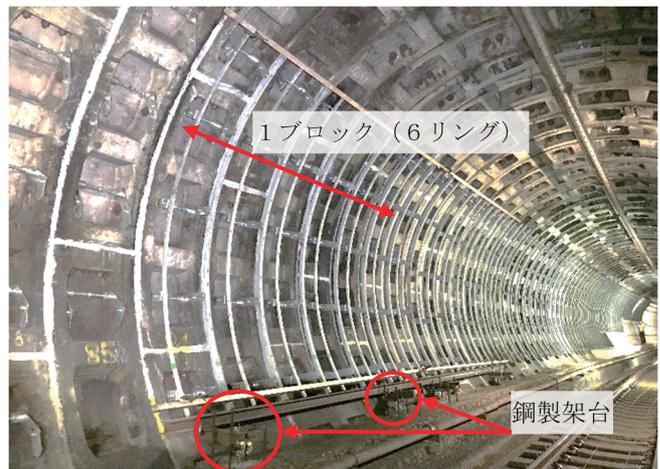


写真 5 固定支持金物設置状況

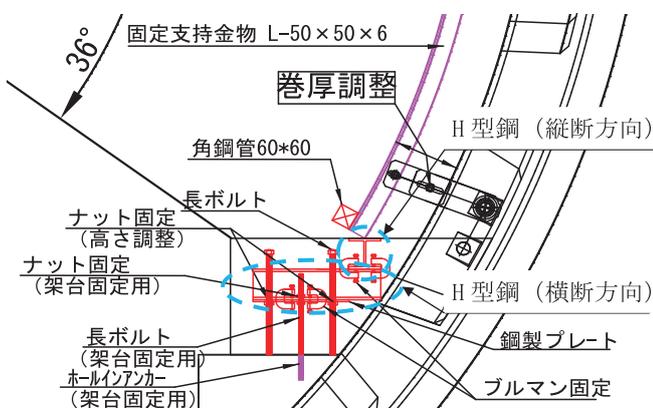


図 16 鋼製架台を用いた固定支持金物の設置方法

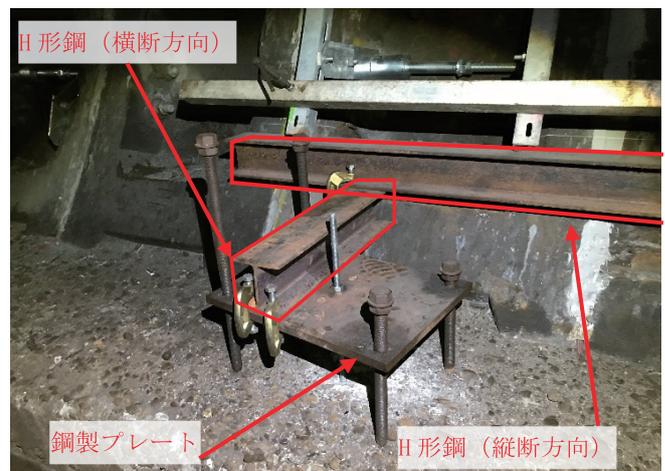


写真 6 鋼製架台

### 5.5 モルタル材の変更による早期強度発現と充填性の確保

側部補強のモルタルの材料は一般タイプの無収縮モルタルではなく、速硬タイプの無収縮モルタルを用いることとした。速硬タイプでは約2時間半で硬化することを事前に確認した<sup>3)</sup>。使用した速硬タイプのモルタルの物性値を表2に示す。

側部補強の中子部に発生するエアーストリートについては、モルタルを打設する際にあらかじめ注入ホースを設置し、後注入により確実に充填した(図18、写真7)。

表2 モルタル材の物性値

| 試験項目             | 単位    | 試験結果              |      |
|------------------|-------|-------------------|------|
| 単位容積質量           | kg/ℓ  | 2.30              |      |
| フロー値             | mm    | 178               |      |
| コンシステンシー(J14ロート) | 秒     | 8.2               |      |
| 凝結               | 始発    | 時一分               | 0-19 |
|                  | 終結    | 時一分               | 0-23 |
| 圧縮強度             | 材齢3時間 | N/mm <sup>2</sup> | 23.8 |
|                  | 材齢28日 | N/mm <sup>2</sup> | 70.6 |
| ブリーディング          | %     | 0                 |      |
| 膨張収縮             | %     | 0                 |      |

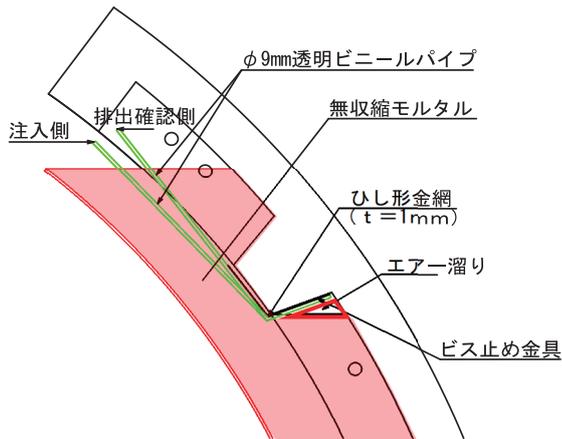


図18 エアーストリート部後注入状況



写真7 エアーストリート部注入ホース設置状況

### 5.6 建築限界の確認作業の効率化

補強作業後の建築限界の余裕量は、トンネル断面を上半と下半に分けて確認した。

上半の確認には、軌条に設置するトンネル断面/建築限界測定器 LMD300A を使用した(写真8)。この測定器は設置した箇所における建築限界から補強物やトンネル断面までの最小離隔量を瞬時に計測することができる(図19、写真9)。

下半の確認には千代田線専用の建築限界確認定規を使用した。軌条に取り付けるだけで建築限界の余裕量を直接目視確認することができる(写真10)。

以上のような方法で上部・下部の建築限界の余裕量を瞬時に測定することで、本作業の時間を十分に確保したうえで作業終了時の坑内の安全を確保することができた。



写真8 建築限界確認状況(上半)

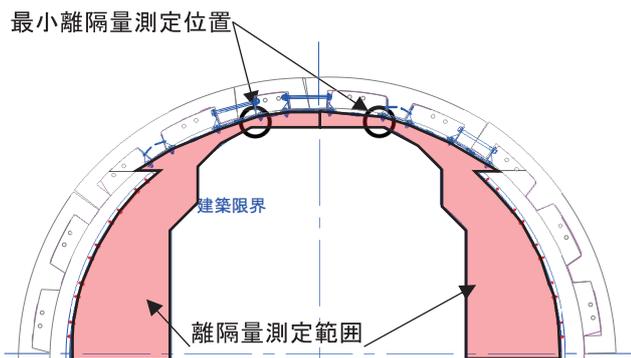


図 19 建築限界確認状況（上半）

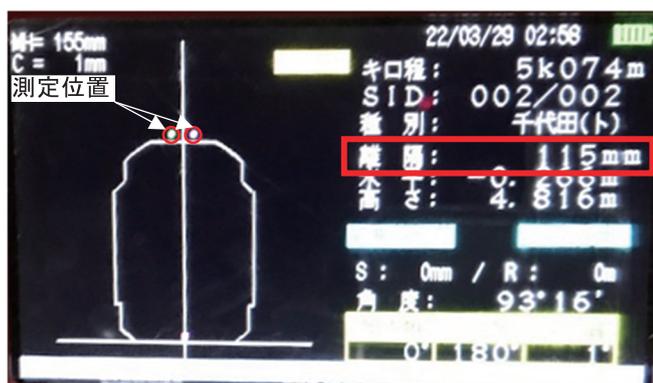


写真 9 建築限界測定器のモニター



写真 10 建築限界確認状況（下半）

## 6. まとめ

本工事は、2018年7月に着手して以降、山側（図3）を先行して補強を進めている。引き続き、より効率的かつ安全な施工方法を検討しながら、早期の工事完成を目指して行く所存である。

最後に、東京地下鉄株式会社をはじめとする関係者の皆様方の多大なるご協力ならびにご指導、ご鞭撻をいただいたことに心より御礼申し上げます。また、本工事が同種施工条件の計画・設計・施工の一助となれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 帝都高速度交通営団：東京地下鉄千代田線建設史
- 2) 公益社団法人土木学会：「トンネル標準示方書 [共通編]・同解説/[シールド工法編]・同解説」、pp.349、2016
- 3) 野本 一美ほか：軟弱地盤下に築造されたシールドトンネルの補強・補修工事における施工方法の効率化、日本トンネル技術協会 第89回（都市）施工体験発表会、PP.17-23、2021
- 4) 桶川 宏司ほか：3D レーザスキャナ測量等によるシールドトンネル補強工事の効率化、2022年度（令和4年度）土木学会全国大会第77回年次学術講演会、2022.9