

施工

泥土圧シールドによる上下線間連絡通路の建設 —中国寧波地下鉄試験工事—

寧波大学軌道交通・地下空間技術研究センター主任兼教授

朱 瑶 宏

(株)地域地盤環境研究所代表取締役会長

橋 本 正

(株)地域地盤環境研究所技師長

小野田 浩 二

寧波用躬科技有限公司副總工程師

董 子 博

1はじめに

中国においては、地下鉄駅間の距離は一般的におおむね約1km程度であり、その間に法令などに規定された間隔で上下線併設本線トンネルを連結する連絡通路が設けられている。この連絡通路は車両火災など緊急時の救急・消防および乗客の避難退避に使用される。

連絡通路には車両荷重のような大きな活荷重は作用しないが、その設計・施工には種々の課題が存在する。とくに開口接続部の構造および地下水漏水などが本線トンネル本体に与える影響などに十分な配慮が必要となる。

中国・寧波市軌道交通集団有限公司では、地下鉄連絡通路建設にシールドトンネル工法を適用する技術研究開発を進め、このほど試験工事において、その課題を克服する十分な成果を得た(図-1)。本稿では、開発経緯と試験工事結果について、その概要を報告する。

2従来工法

中国では一般的に、軟弱地盤における連絡通路建設には、主に凍結工併用掘削工法などの地盤改良工法が適用されている^{1)~4)}。この工法は、凍結工によって地山補強を行ったのちに山岳工法により掘削を行うものである。

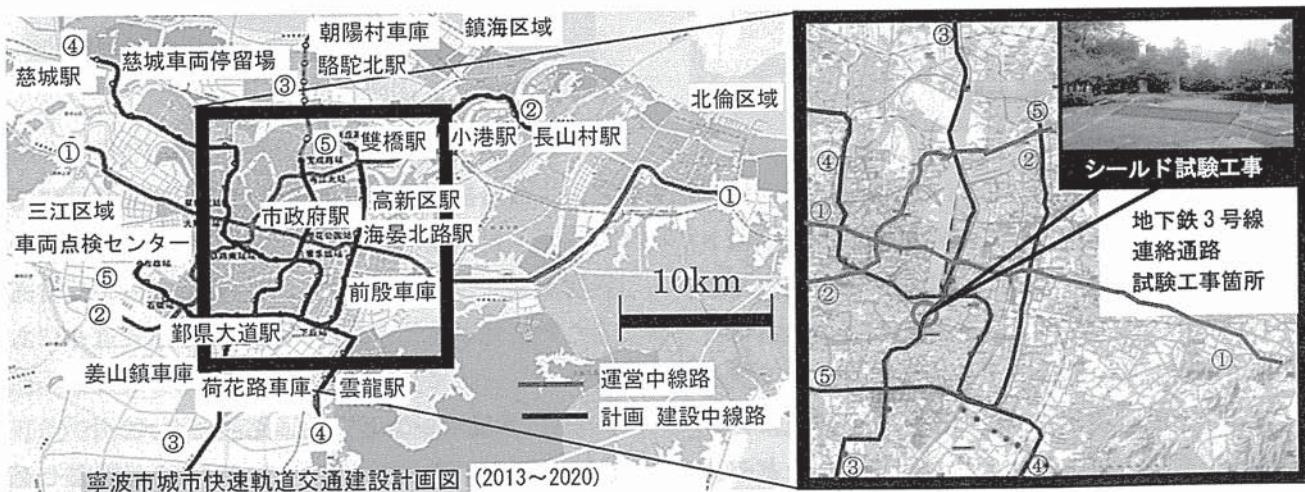


図-1 試験工事位置図

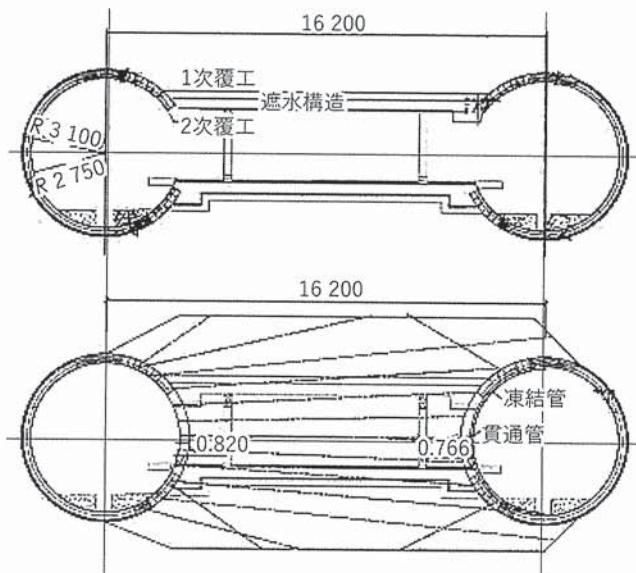


図-2 凍結管打設図



写真-1 凍結管削孔

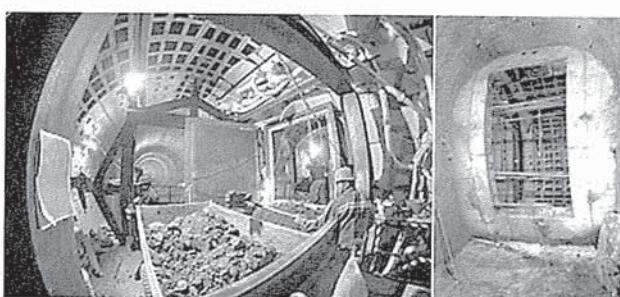


写真-2 連絡通路部掘削状況

凍結工法は、シールドの発進・到達、その他トンネル施工の多くの場面で広く適用されており、凍土が高い強度と確実な遮水性を有し、地上を占有しないなど多くのメリットを持つ反面、工期が長いこと、施工費が高いことや凍上や解凍による地盤沈下や周辺構造物の変状を招くことなどデメリットもある(図-2、写真1,2)。

3 寧波地下鉄3号線連絡通路試験工事

3-1 工事概要

現在、寧波の地下連結通路は凍結工法による建設が基本となっているが、その施工は安全性が劣り2次的な沈下が生じるなど、品質リスクや施工費用などの問題がある。また、凍結工法以外の地盤改良工法を用いる場合は軟弱地盤では安全面に対する技術的リスクがより高くなる。

密閉式シールドによる連結通路建設工法の開発には、経済性、安全性などを前提に、発進・到達時の本線トンネルへの影響抑制、漏水・土砂流入などによる周辺地盤の沈下・陥没防止、完成後の止水性・耐震性確保など、多くの技術難題の解決が必要である。寧波軌道交通有限公司では、シールド工法による「T」字連絡坑技術の研究開発を展開し、この試験工事を実施し無事に竣工した(図-3)。

なお、試験工事に先立って、種々の切削セグメントの試作と切削実験、本線トンネルの載荷試験と解析、実物大のシールド掘進機製作と地上での発進・到達実験をくり返して、2017年より本試験工事の設計・施工に至った。

工事名称：寧波市軌道交通3号線1期工事

工事場所：中国浙江省寧波市鄞州区

工事内容：円形シールドトンネル工円形断面

外径3,150mm、内径2,650mm

RCセグメント

$t = 250\text{mm}$, $b = 550\text{mm}$ 5分割

延長 $L = 12.1\text{m}$

当該地盤の連絡通路の土かぶりは約17mであり、主たる掘削地盤は沖積層の軟弱な鋭敏性に富むシルト質粘土層であるため工事に伴う周辺への影響が懸念される。また、この地域は低平地であるため、地下水位が高く、ほとんど地表近くにある。

3-1-1 本線トンネル連絡通路部セグメント

連絡通路の位置には3リングの1.5m幅広セグメントを採用し、開口部周囲は鋼・コンクリート

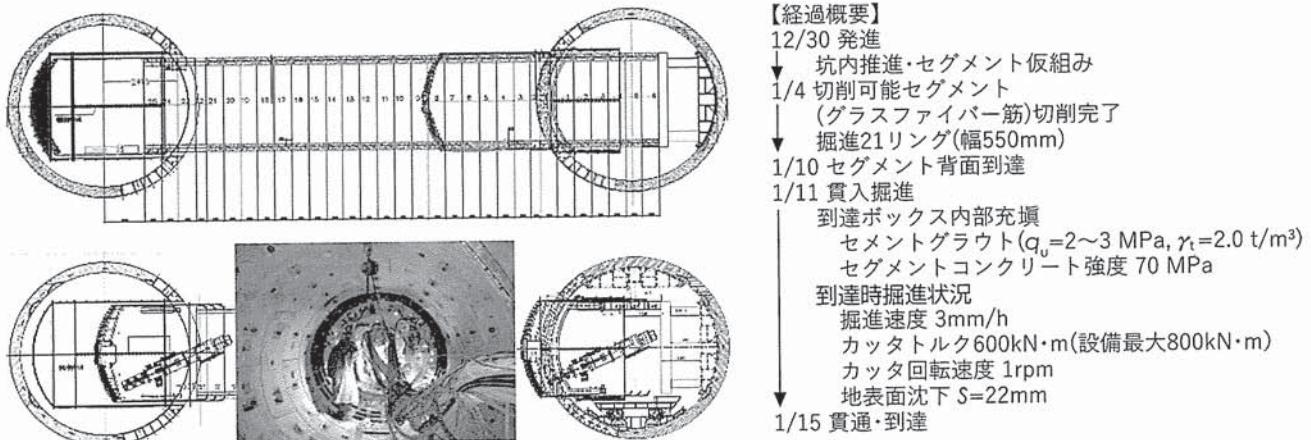


図-3 連絡通路建設工法概要図

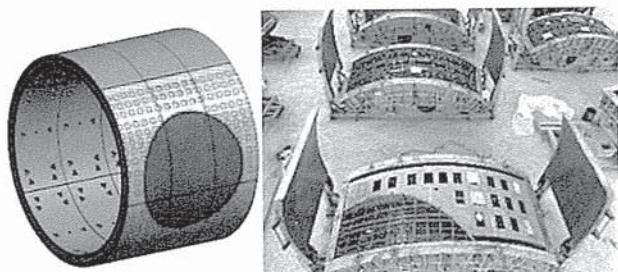


写真-3 本線トンネル開口部(青色部)および切削可能セグメント製造型枠状況



写真-4 シールド

合成構造で、開口部はシールドカッタによる切削が可能なガラス繊維筋を用いたRC複合セグメントを採用した(写真-3).

3-1-2 掘進設備

シールドは、カッタ、セグメントエレクタ、掘削土改良および排土システムをコンピュータ制御可能である。掘進機は外径3,280mm、掘削径3,290mm、総重量60tであり、油圧駆動を採用している(写真-4)。

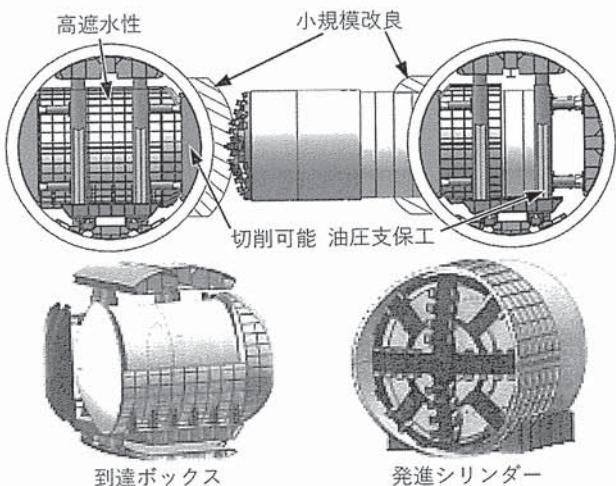


図-4 連絡通路建設概念図

カッタは、軟弱地盤用の設計とともに、コンクリートを効率的に切削するためのビット群を追加している。同時に、カッタヘッド形状はドーム形とし、発進部の本線トンネルセグメントの形状に近似させている。

発進・到達設備面では、発進シリンダーおよび到達ボックスとして一体化し、本線トンネル内に収めることで技術的難題である装備の空間的集約を実現した(図-4)。

後方システムは、計5台の台車設備となる。第1、2台車は電気、循環水、油圧システムと主調整室を設け、第4台車は泥漿注入設備および搬送設備である(図-5)。

第3、5台車はシールドの発進・到達時の架台および油圧作動による内部支保工となっている。シールドの発進・到達時や掘進時の推進反力を、7か所の油圧ジャッキによって本線トンネルセグ

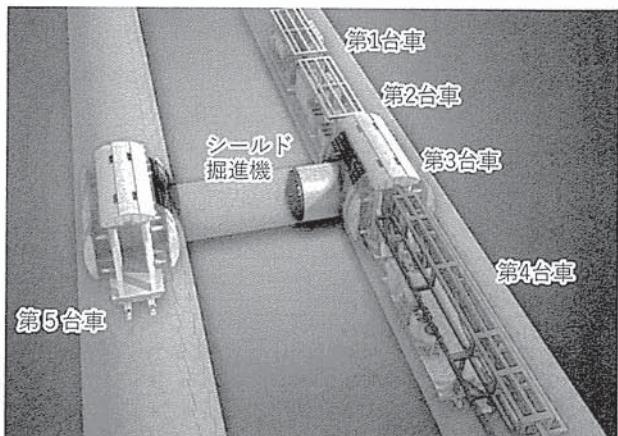


図-5 後方システム台車設備概念図

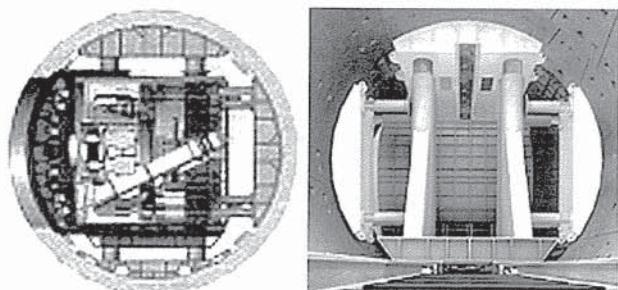


図-6 掘進機置据付状況および内部支保工

メントに平均的に載荷し、セグメントの安全性を確保している(図-6)。

3-1-3 施工順序

(1) 準備工事

地上において設備・システムの調整後、台車群を連絡通路位置に搬入する(写真-5)。シールド掘進機の組立て据付けに先立ち、事前に設置した注入孔より開口部範囲内地山に止水用薬液注入を行う。

(2) 発進シリンダー

シールドをシリンダー内に据付け、第3台車を微調整して正確な位置に設置する。事前に溶接して取り付けた鋼製坑口リング内にシールドを推進し、正規位置に設置されたあとに油圧支保工システムによって本線トンネルセグメントに反力をとる。その後、シールブラシにグリースを充填し水密性を確認して掘進を開始する(写真-6, 図-7)。

(3) シールドによるセグメント直接切削

カッタ回転数とジャッキ推力を制御しつつ、カッタの正逆回転運転によって、開口部範囲のセグメントの直接切削を開始する。セグメント本体

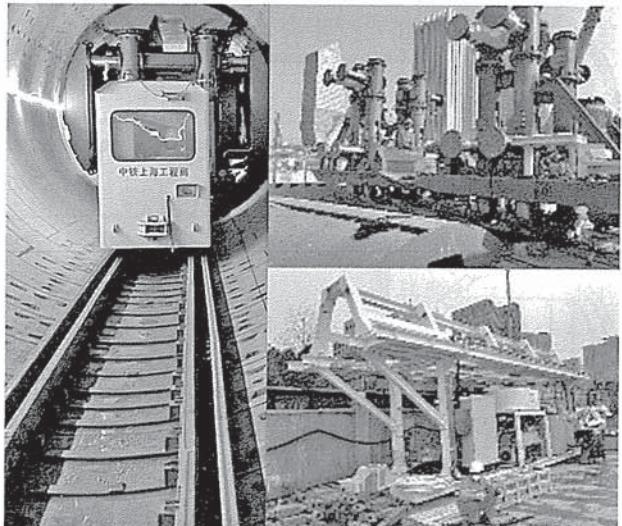


写真-5 地上設備および坑内設備搬入状況

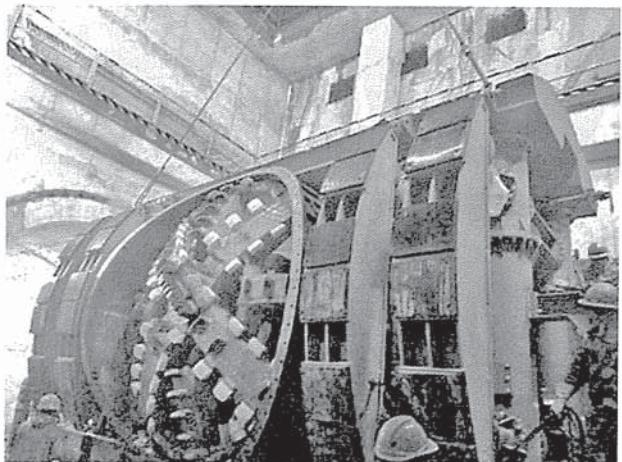


写真-6 発進状況(工場仮組立て)

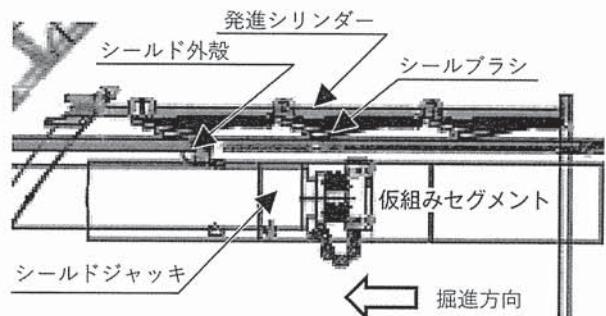


図-7 発進部止水シール部

コンクリートおよびガラス繊維筋は切削屑となり排出される(写真-7, 8)。

(4) シールド掘進

本線トンネル施工時の掘進データなどから適切な切羽圧力管理値を設定した。また、裏込め注入作業は坑内発進が可能なコンパクトなシールドであることから、同時注入装置の装備は望めず、テー



写真-7 セグメント切削実験結果

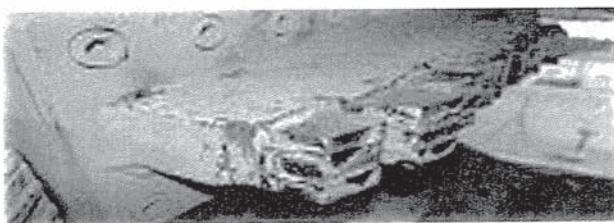


写真-8 切削実験時のカッタビット

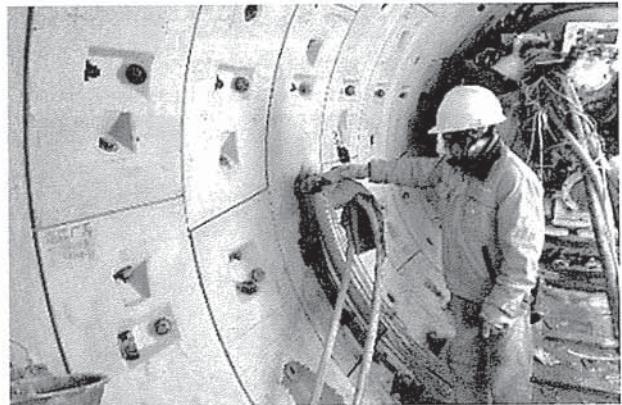


写真-10 裏込め注入状況



写真-9 掘進時坑内状況

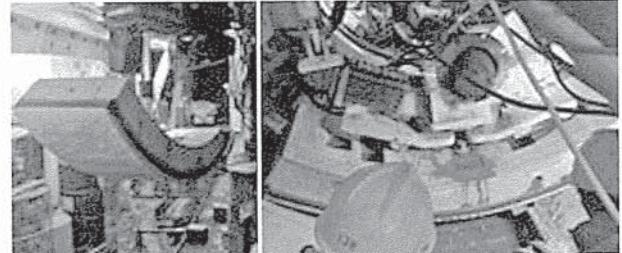


写真-11 セグメント組立て状況

ルから2～3リング後方でのグラウトホールからの注入とした(写真-9～11)。

(5) 到達ボックス

到達側の台車は事前に設置されており、到達ボックス内はベントナイト流動化処理固化土で充填されている。

シールドが到達側本線トンネルセグメントに達する前に、セグメント背面地山に対して薬液注入改良を行うとともに、油圧内部支保工システムを制御してセグメントを内側から均等に支持し、到達切削荷重に対して安全を確保する。セグメントを切削開口後、到達ボックスに貫入して所定距離まで掘進を継続する(図-8)。

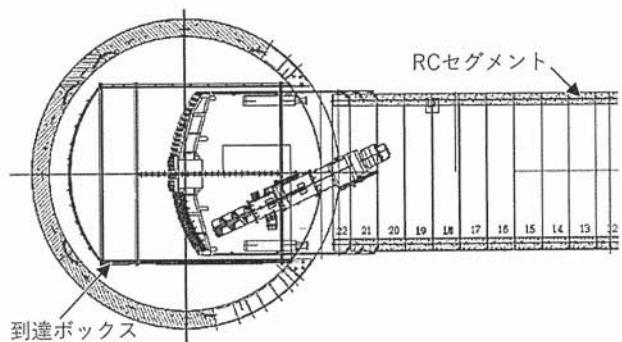


図-8 到達・貫通状況概念図

(6) シールド撤去

開口部範囲に対し、2次止水注入を行い、探査孔から漏水がないか止水効果の確認を行う。その後、発進シリンダーおよび到達ボックスを解体し、

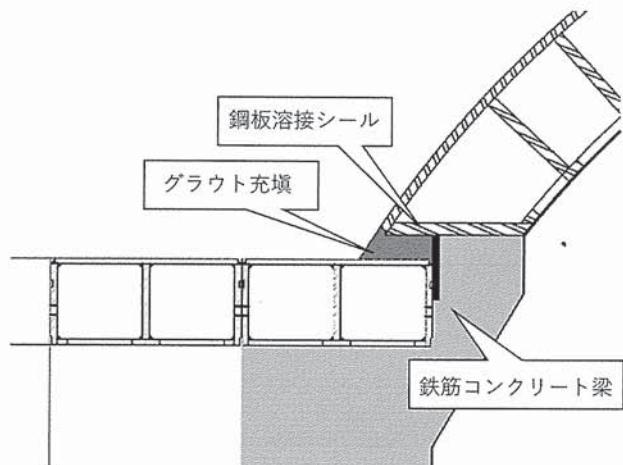


図-9 接合部止水構造

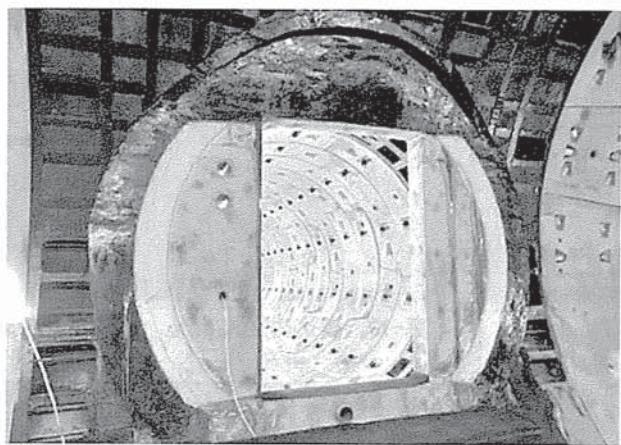


写真-12 連絡通路接合部完成状況

セグメント構造の変位が安定したあとに、シールド本体を撤去する(図-9、写真-12)。

開口部の止水構造は、鋼板溶接とコンクリート打設によって接続する。

3-2 施工技術の特徴

コンパクトなシールド・後方設備を使用し、発進シリンダーと到達ボックスによる発進・到達技術およびRCセグメント切削技術などを開発し、効率的で低コストのシールド工法による連絡通路建設技術を確立した。

試験工事過程では、一体化油圧支保工による確実な補強システムによって、本線トンネルセグメントの目開き量を0.33～0.65mm、内空水平変位4mm以下で許容値内に制御できた。また、開口部のシールドとのギャップは、小規模な地盤改良補強のみによって、良好な止水状況が得られた。総施工期間は約1か月、そのうち掘進期間は18日間で

あった。

密閉式シールド工法による連絡通路建設技術は、本線トンネル内に設置した坑内軌道設備を使用し、台車に搭載された連絡通路用シールドを側面方向に据付け、トンネル壁を切削して発進し、並行する本線トンネルまでの連絡通路を掘削・構築するものである。この方法では、シールド掘進に従ってRCセグメントリングを組み立てることで、掘削、支保、覆工、目地止水、分岐部仕上げまでの建設作業を短期間で実施できる。

この連絡通路用の小径シールドは本線トンネル掘進時に得られた地盤性状情報にもとづいて検討・選定され、コンパクト構造であり、本線トンネル断面内に十分に収まる。また、到達側の本線トンネル内で容易に分解でき、移動して別箇所の連絡通路施工にくり返し使用することが可能である。

4 シールドによる連絡通路建設工法の利点と応用性

このシールドによる連絡通路建設工法の利点および将来の応用性に関してまとめると以下のようである。

(1) 地質・地下水状況

2本の本線トンネル掘進時に得られた地盤情報から、連絡通路用の小径シールドの適切なカッタヘッド形状や掘削システムを検討・選定できる。したがって、連絡通路建設は、岩盤・土砂の性状や地下水位などの状況にかかわらず、確実な施工が可能となる。

(2) 大深度・高水圧施工

大深度・高水圧下においては、凍結工法などの地盤改良による施工法では多くの技術的な課題があり、信頼性が低く工期や費用がかかることになる。大深度施工にはシールド工法が適している。

(3) 地上状況

多くの都市部では、地盤沈下や近接構造物への沈下が厳しく制限されている場合が多いが、シールド工法による連絡通路建設は、このようなりスクを最小限にすることができる。今回の試験工事

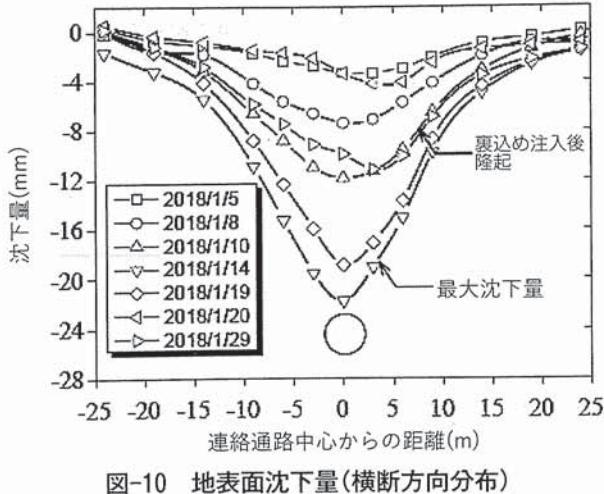


図-10 地表面沈下量(横断方向分布)

における地表面(掘進延長中間地点)沈下量測定結果を図-10に示す。シールドが本線セグメントに到達した時点(2018年1月14日)で最大値22mmを示し、その後の裏込め2次注入の施工により隆起が生じている。

(4) 地下鉄以外への適用

この技術は、地下鉄の連絡通路のみならず、シールド工法で構築された地下道路の避難通路や共同溝、上下水道などの分岐・合流や管理用立坑、大深度トンネル間の接続など地下空間構築工事において広範囲に適用することが可能である。

5 おわりに

中国では現在、軌道交通地下鉄の総延長は5,000kmとなり、その中で連絡通路が数千箇所設置されている。今後ますますその建設需要が高まることが予想される。

構築された並列トンネル間に連絡通路を建設する技術に関して、在来の凍結などの地盤改良工法

を用いた掘削工法の課題を踏まえ、シールド工法による連絡通路構築技術を研究開発し、その良好な機能を試験施工で実証した。

この技術は、地下鉄トンネルの連絡通路のみならず、地下道路の避難通路や大深度トンネル間の接続など、地下空間構築に広範囲に適用することが可能で、普及価値がきわめて高いものである。今後、装備、設計、施工といった一連の開発成果をもとに、更なる技術開発を進めることで、この連絡通路建設技術が都市の地下施設ネットワーク構築に向け大きく貢献することが期待される。

なお、当技術開発および試験工事は、日本・韓国・中国の専門家・有識者で構成される中国寧波市軌道交通連絡通路新技術開発国際諮問委員会(委員長:橋本正)による工学的な検討・諮詢・提言を得て進められた。ここに感謝の意を表すものである。

参考資料

- 1) 王洪水・朱海軍:凍結工法を適用した滯水砂層における長距離地下鉄連絡通路施工技術, 中建3局基礎施設建設投資有限会社, 2018.9.7.
- 2) 王延波・徐林有・苏長毅: 経典解析法を適用した地下鉄連絡通路の凍結工法による補強効果の評価, 武漢理工大学土木建築学院, 中建3局基礎施設建設投資有限会社, 2018.9.5.
- 3) 都市軌道公社無錫地下鉄3号線, 初の連絡通路が無事貫通, 鉄道建設新聞, 2018.1.5.
- 4) 胡向東・王国一: 中国における軟弱地盤中の連絡通路トンネル構築工法, ICETCE, 2011.
- 5) 橋本正・朱瑠宏・朱雁飛・早川清: 中国における扁平大断面矩形シールドの開発と試験施工, 寧波市地下鉄3号線引込み線, トンネルと地下, Vol.47, No.6, pp.49-58, 2016.6.