

鉄道新線建設プロジェクト 国際空港と首都台北を結ぶ

台湾初の DOT 工法による鉄道シールドトンネル工事

西川 泰司

台湾では空の玄関となる桃園国際空港と首都台北市を結ぶ MRT 方式による鉄道新線（延長 51.5 km）の建設工事が進められてきた。そのうち、台北駅に近接する河川横断区間は、台湾では初めてとなる DOT シールド工法が採用された。本稿は高精度なローリング管理が要求される DOT シールド工法によるシールドトンネル工事について、その施工実績を報告するものである。

キーワード：DOT シールド工法、ローリング

1. はじめに

台湾の空の玄関となる桃園国際空港は 1979 年の開港以降、台北市へのアクセスは高速道路が主たる手段である。毎年 2,000 万人以上が利用する空港としては交通アクセスの点で脆弱であると言える。そのため 2005 年に基幹の交通手段となり得る MRT 方式による鉄道新線（延長 51.5 km）の建設が決定された。当社が担当した工事区間は、最も台北駅側の 3.5 km の区間である。施工区分としては①シールドトンネル区間、②開削区間、③高架橋区間に区分される。

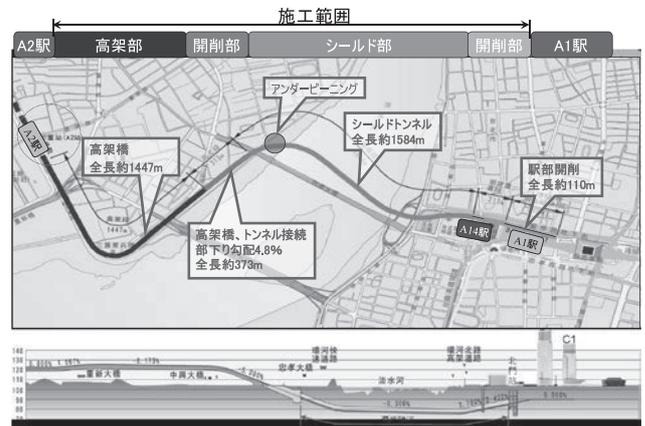


図-2 施工区分

2. 工事概要

工事概要を下記に示す。

- ① DOT シールド機外径 6.42 m × 11.62 m, 延長 1,585 m
土被り最小 7.6 m ~ 最大 26.0 m

最小曲率半径 R=280m 最大勾配 4.9%。

- ② アンダーピニング工事 1 箇所
- ③ 高架橋工事 延長 1,456 m
- ④ 開削工事 481 m

図-1 に計画路線と施工位置、図-2 に施工区分を示す。施工起点は台北市と隣接する三重市に位置し、到達地点は台北駅付近である。

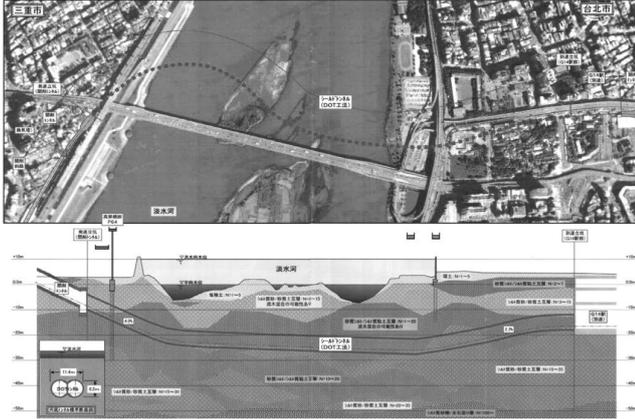
3. 地質概要

本工区は台北の盆地に位置し、かつては湖底であった。よって、土質は軟弱な沖積層が大部分を占め、その厚さは 40 m ~ 60 m に達する。トンネル掘削部は全線にわたり N 値 10 以下であり、シルト質細砂や砂質シルトが大部分を占め極めて軟弱であった（図-3）。



図-1 計画路線と施工位置

3.3 台北地下鉄・空港線CA450A工区(シールドトンネル部)・地質縦断面図

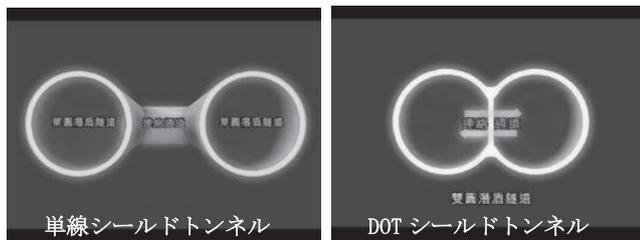


図一三 土質概要図

4. DOT シールド工法の選定理由

日本では、占有面積が最小化できるという有利性を根拠として DOT 工法が採用されることが多い。

台湾では一般的に、鉄道シールドトンネル工事は単線で施工され、そのトンネル間を接続する連絡通路を一定の間隔で設置する。しかしながら、連絡通路設置工事は安全性・施工性の点で課題が多い。さらに本工事では、軟弱な粘性土層、かつ河川横断という厳しい施工条件を有しているため、確実に連絡通路が設置できる優位性を考慮し、DOT 工法が採用された(図一4)。



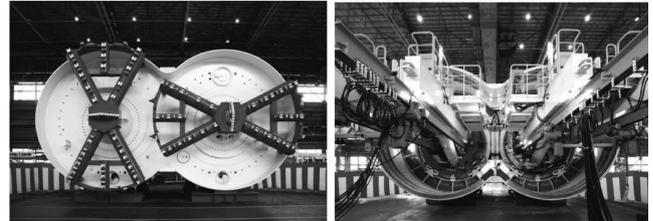
図一四 DOT シールド工法の優位性

5. DOT シールド機

シールド機は、DOT シールド機の製作実績が最も多いメーカーにより愛知県内の工場にて製作された(写真一1)。12カ月の製作期間を経て、台湾へ海上輸送された。

6. DOT シールド工法の技術的課題

DOT シールド工法は通常の水平方向、垂直方向の方向制御に加えてシールド機のローリングの制御が重要となる。ローリングが過度に進行すると、建築限界



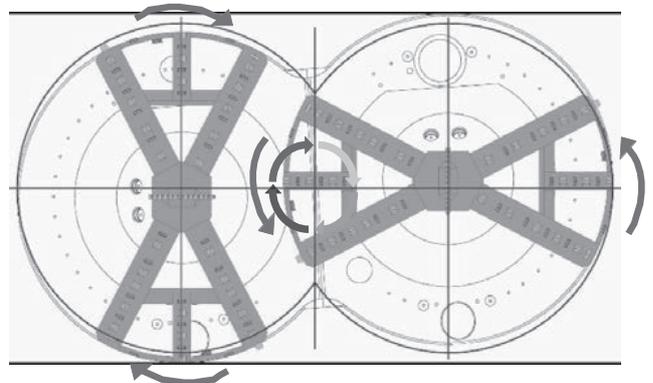
写真一1 DOT シールド機

に影響を与え、さらに過大に進行すると掘進不能となることも考えられる。本工事のトンネル線形には、最大勾配4.9%の縦断曲線と最小半径280mの平面曲線の三次元複合曲線が存在する。このような線形条件では幾何学的にローリングが発生するため、シールドトンネルのローリング制御が最も重要な管理項目であった。

7. シールド機のローリング制御方法

(1) カッタスポーク回転方向

ローリングが微小である場合、カッタスポークの回転方向により、ローリングを制御することができる。カッタスポークをシールド機中心位置で下方向に回転させた場合、シールド機には右回転のモーメントが発生する。カッタスポークをシールド機中心位置で上方向に回転させると、シールド機に左回転のモーメントが発生する(図一5)。



図一五 カッターの回転により機体にかかるモーメント

(2) ローリング修正ジャッキ

本 DOT シールド機には、左右に4本ずつトンネル円周方向にスライド機構を有するジャッキを装備している。左右各4本のローリング修正ジャッキを相反する方向にスライドさせ、シールド機に回転モーメントを発生させローリングを制御する。

シールド機を右回転に制御する場合、右側ローリング修正ジャッキを上側にスライドさせ、左側ローリング修正ジャッキを下側にスライドさせシールド機に右回転のモーメントを発生させる (図-6)。

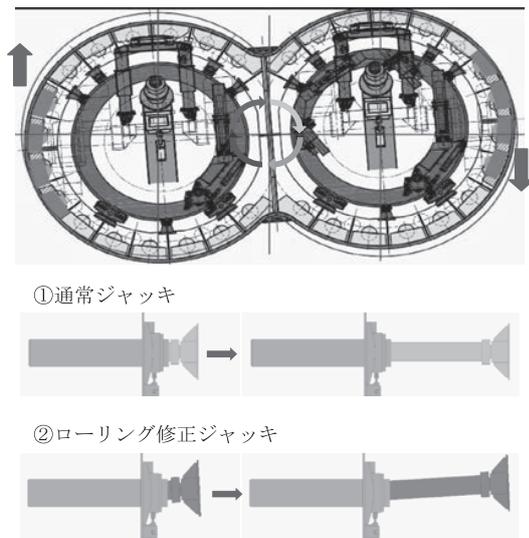


図-6 ローリング修正ジャッキ

(3) コピーカッタによる制御

コピーカッタを使用し、シールド機構造中心を原点とした点対称に余掘りする。シールド機外殻を余掘り部 (図-7) に誘導しローリングを制御する。

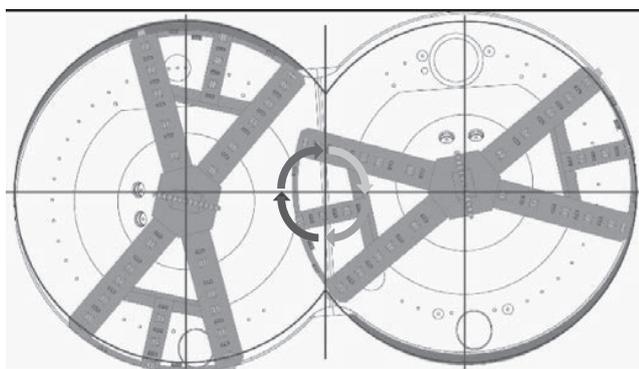


図-7 ローリング制御時の余掘り部

(4) 点対称ジャッキパターン

シールド機構造中心を原点とした、点対称なジャッキパターンを選択することにより、シールド機に回転モーメントを発生させローリングを制御する (図-8)。

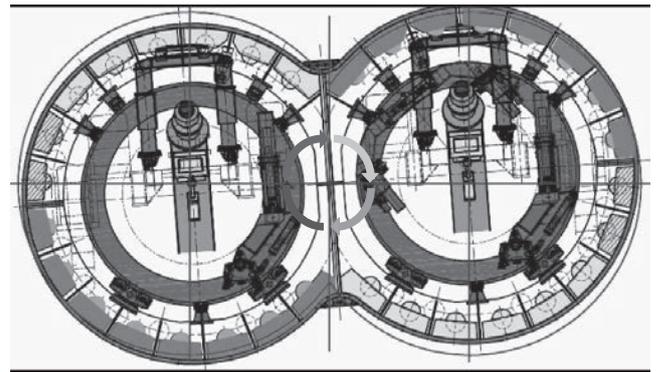


図-8 ジャッキパターンによるローリング修正

(5) ローリング制御実績

本工事におけるローリング制御は、その発生量の程度により、前述した4つの方法を組み合わせて対応した。

図-9にシールド機およびセグメントの発生ローリング量実績を併せて示す。

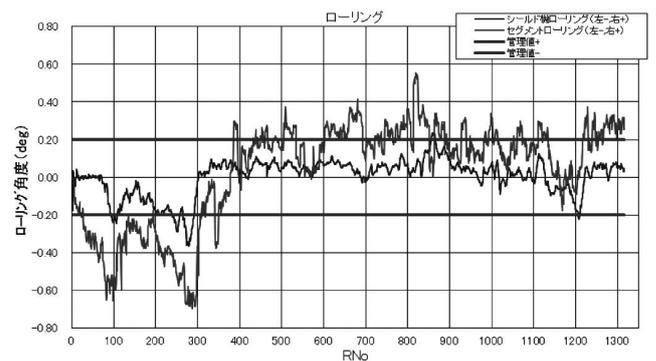


図-9 ローリング発生量実績

8. セグメントのローリング制御

シールド機のローリング制御は十分に可能であったが、懸念していた三次元複合曲線区間では、セグメントのローリングが発生した。そのため、以下対策を検討、実施した。

(1) リング間ボルト孔を2mm 拡径

リング間ボルト孔を2mm 拡径した。このとき生じる「遊び」を利用し、ローリングを修正する向きに1ピースごとに調整して組立てることにより、ローリングを修正した (図-10)。

(2) 裏込即時注入

セグメントに回転モーメントが発生するようにグラウホールからの即時注入方式に切り替えた (図-11)。

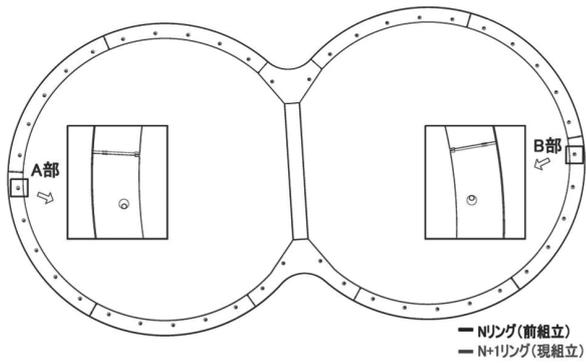


図-10 ローリング修正リング

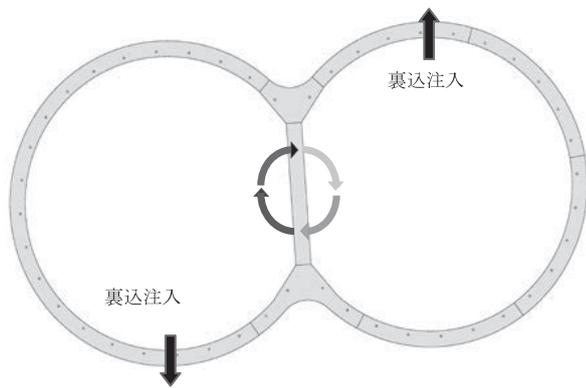


図-11 裏込即時注入

9. DOT シールド工法のセグメント

セグメント A 型×8 個, B 型, C 型, D 型各 1 ピースの計 11 ピースで構成される (図-12)。セグメントの組立手順を図-13 に示す。中柱組立は専用のエレクターを使用する。

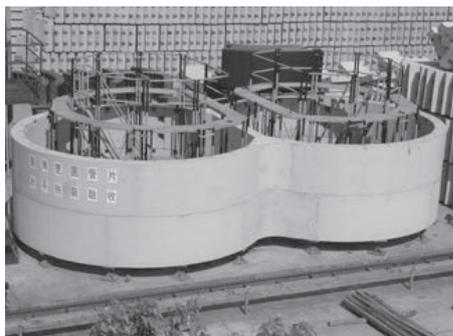
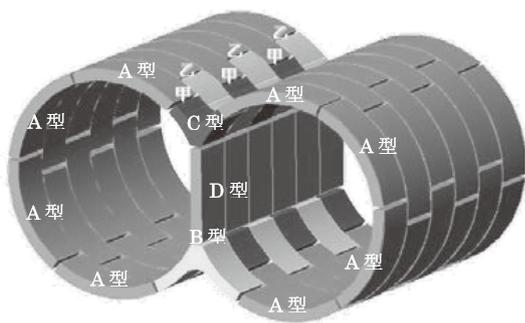


図-12 セグメント構成ピースと仮組状況

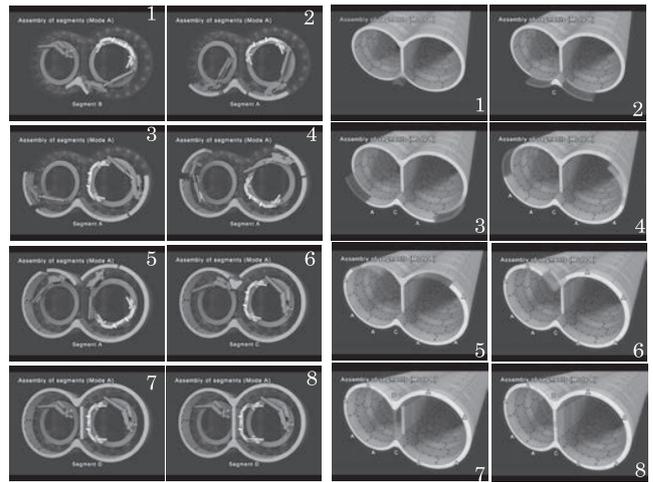


図-13 エレクター動作・セグメント組立手順

10. 仮設備

(1) 発進基地・発進立坑

発進基地用地面積は、2,100 m² 程度であった。発進立坑口には河川横断を考慮して遮水壁を設置した (写真-2)。



写真-2 発進基地および発進立坑口全景

(2) シールド発進架台

縦断線形は起点位置より 4.9% の下り勾配である。しかし、発進架台に勾配があるとシールド機の組み立てが困難である。よって発進架台は最初に水平の状態を設置し、シールド機組立を行った。

組立完了後にシールド機と発進架台上部をジャッキアップして、予め計画していた後発進架台の支柱のコマ材を取り外し、シールド機、発進架台上部を所定の勾配に再設置した (図-14)。

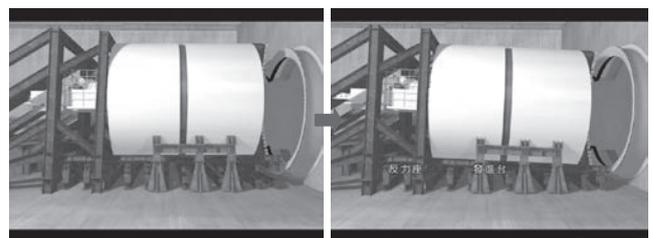
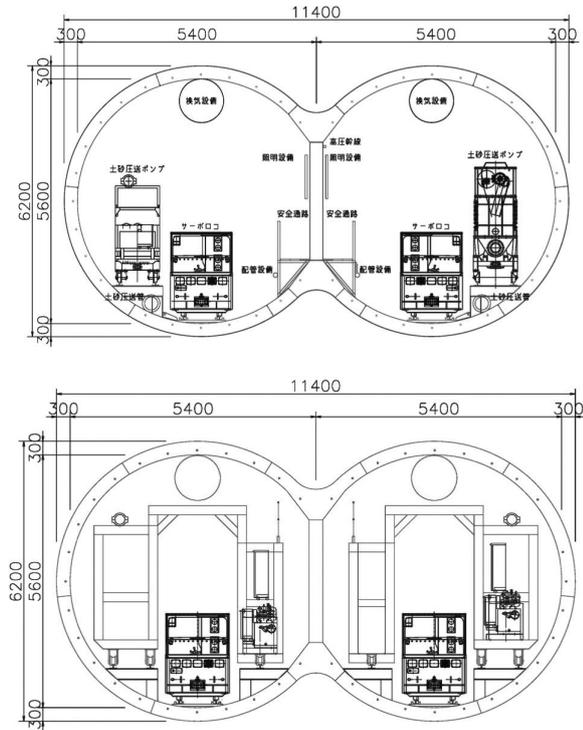


図-14 発進架台

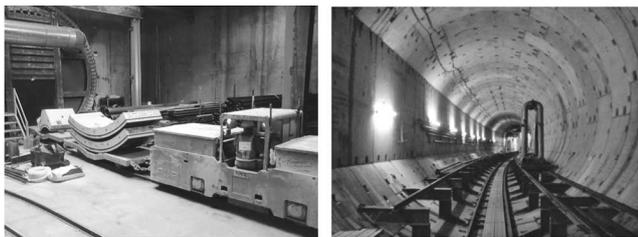
(3) バッテリーロコ・軌条設備

バッテリーロコについては、下り勾配区間の安全性を考慮して、制動能力の評価が高い日本製の12tサーボロコを採用した。

坑内標準断面を図一15、坑内軌条設備の設置状況を写真一3に示す。軌条は単線で枕木を設置せずインバートに直接敷設する方式とした。



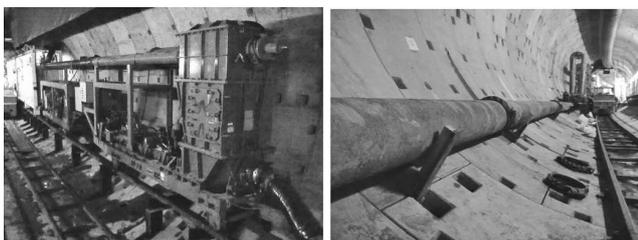
図一15 坑内標準断面図



写真一3 坑内軌条設備

(4) 土砂搬送設備

立坑スペースが狭小であったため、ずり鋼車方式では対応不可能であった。そのために本工事では、土砂



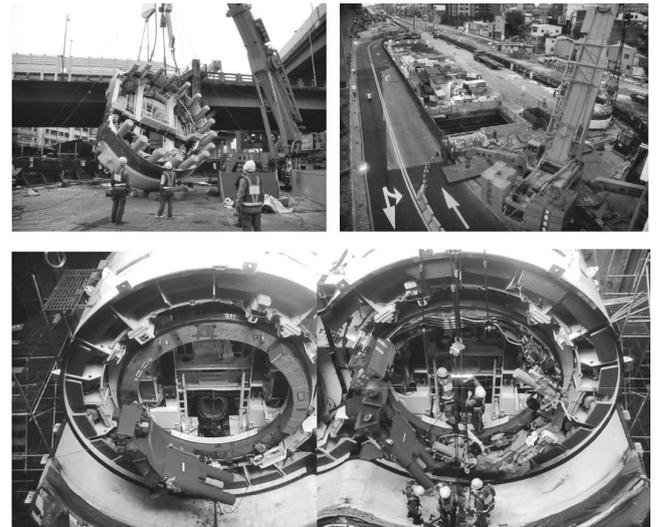
写真一4 土砂圧送設備

圧送方式を採用した。土砂圧送ポンプは片線ごとに4台ずつ、最大時で合計8台設置した(写真一4)。

11. 施工状況

(1) シールド機組立

シールド機は6分割で搬入した。最大重量部材は前胴カッタブロックで1基74tであった。組立には500tクレーンを使用し、順次立坑へ投入した(写真一5)。



写真一5 シールド機組立状況

(2) シールド初期・本掘進

初期掘進開始時の進捗量は4R/日程度であった。構造が複雑なDOTシールド工法ならではの事象であるが、当初セグメントの組立に1リングあたり2時間程度費やした。ただしセグメント組立習熟後は8R/日程度可能となった。

本掘進の施工サイクルは、1リングの掘進時間が50分程度(掘進速度30mm/分)、セグメントの組立時間は70分程度で、1サイクル2時間程度であった。その結果、昼夜稼働での標準施工能力は10R/日であった(最大日進量は11R/日)。また掘削土は、加泥注入率5%以下でも排土状況が液状に近い状態が続くため、土砂圧送には最適であった(写真一6)。



写真一6 残土搬出状況とシールド発進状況

写真一七に本掘進切羽状況、写真一八にトンネル坑内全景を示す。



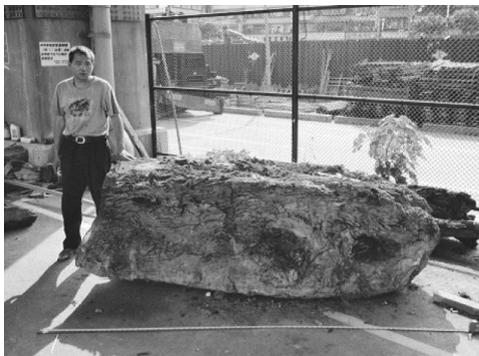
写真一七 本掘進切羽状況



写真一八 本掘進坑内状況

(a) 流木対策

河川下でかつ中洲の下での施工においては、流木の出現が予想され、掘進不能となる事態が懸念された。立坑掘削時に発見された流木を写真一九に示す。

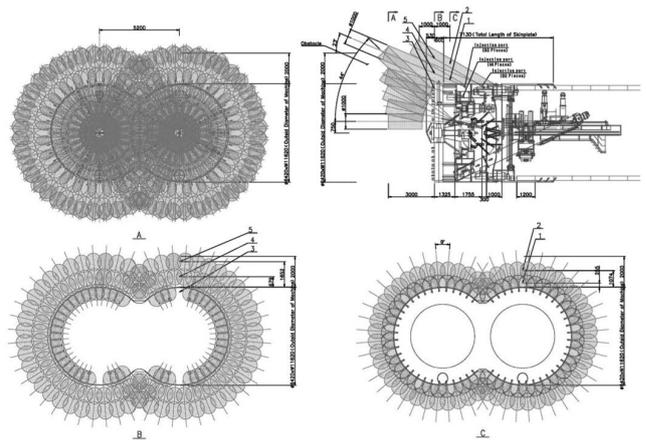


写真一九 立坑掘削時に発見した流木

対策としてシールド機内より、トンネル断面の全範囲を薬液注入可能な機構を装備した(図一六)。この薬液注入は切羽内への人の立ち入りを可能としているのではなく、流木ごと地山を固化させ切削可能な状況にすることを目的としている。実施工では、巨大な流木に遭遇することはなかったが、細かく裁断された流木により、土砂圧送ポンプのスクリーンが閉塞する事態が多発した(写真一十)。しかしながら人力での除去は可能であったので、清掃の頻度を上げる等の対応により、掘進の進捗には影響を及ぼさなかった。

(b) 近接施工

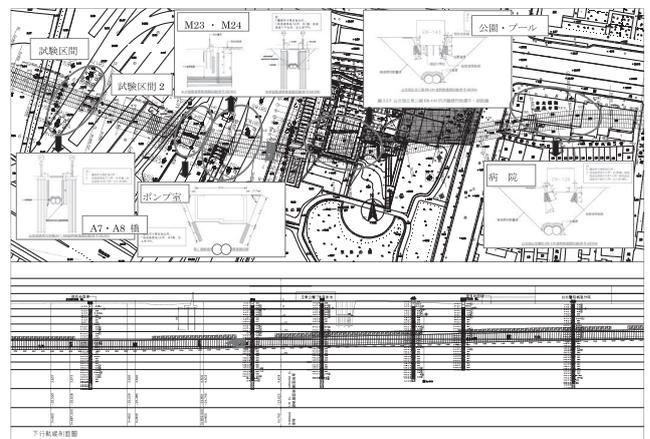
シールド路線には様々な近接構造物が存在した。図一七に近接施工箇所概要図を示す。



図一六 機内注入管および注入可能範囲



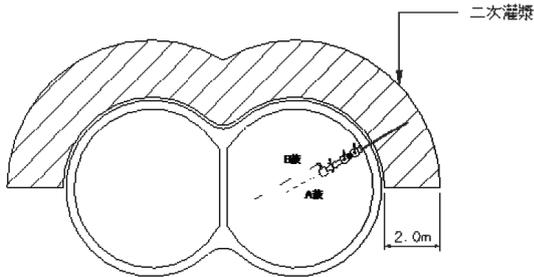
写真一十 スクリーンの閉塞状況



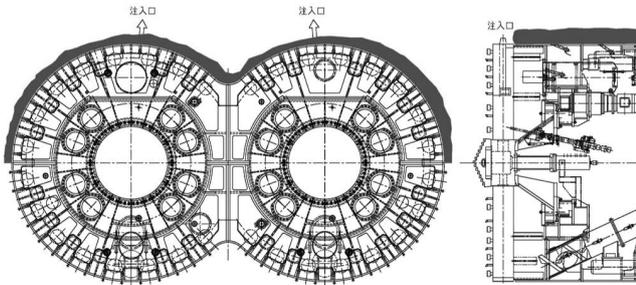
図一七 近接施工箇所概要

原設計では「FEM解析等による近接施工の影響検討は実施せず、近接構造物への影響はセグメントのグラウトホールから注入(二次注入と称する)により抑制する」というのが基本的な考え方である(図一八)。

しかしながら、シールド掘進にともなう地表面沈下は、切羽面が通過することによる先行沈下に起因するため、二次注入に十分な効果は期待できないと判断した。施工に先立ち、各所について地盤変状FEM解析を行ったところ、最大6 cm程度の変状が想定された。



図一18 二次注入（原設計）概要図



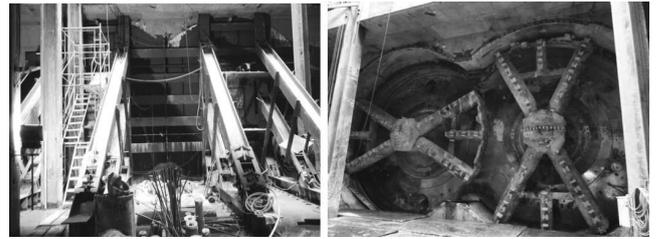
図一19 可塑性材充填概要図

しかしながら、大規模な防護工への設計変更は不可能な現状であり、別途既設構造物への影響を最小限とするための補助工法として、機内より可塑性充填材を注入する方法を選定、検討した。図一19に可塑性充填材の注入概念を示す。

事前にトライアル区間を設定し、充填材の配合・注入量や管理土圧を変更しながら地表面の変位を計測し、一定の効果を確認した後、近接施工箇所での採用を決定した。実施工では変状を管理値以内に抑制することができ、効果が実証された。

(3) 到達工～貫通

到達坑口は深度が30m程度あり、かつ土層が砂質土と粘性土の互層であった。地盤改良の效果に懸念があるため遮水壁を設置した。到達部の箱抜形状は、国内同種工事の施工例では長方形が多い。しかしながら本工事では一律シールド機外径+150mmの形状で



写真一11 シールド機到達状況

あった。

到達時には地盤改良区間の中で高精度な線形管理が要求されたが、所定の精度で無事到達した（写真一11）。到達完了後約3ヶ月後にマシン解体が完了しトンネルは無事貫通した。

12. おわりに

本工事は、DOTシールド工法としては困難さが予見される三次元複合曲線、河川横断および軟弱な粘性土層等の複数の懸念事項があり、予測がつかない困難さが特徴であった。このような状況下で思ったことは「いかに失敗せずにこの業務を完遂させるか」の一念のみであった。そのため、事前にあらゆるリスクを想定して施工に挑んだ。施工に着手してから約2年半に渡ったが、幸いなことに大きなトラブルもなく、比較的順調に施工を完了することができたと考えている。

ここで改めて、献身的に困難な業務に立ち向かってくれた現場のスタッフ、そして日本および台湾の協力会社各位に感謝の意を表して本稿を終える。

JCMA

【筆者紹介】

西川 泰司（にしかわ やすし）
清水建設㈱
北陸支店土木部 九頭竜川シールド作業所
現場代理人・監理技術者

