# 鋼繊維を混合した高流動コンクリートによる二次覆工の施工実績
# Installation of secondary tunnel lining using with self-compacting concrete mixed with steel fiber

中原　智裕*　　岡本　義洋**
Tomohiro Nakahara　　Yoshihiro Okamoto

**要　　約**

本工事はシンガポールでの下水幹線工事であり，一次覆工のセグメント仕上り内径は 6.0 m，4.0 m，3.5 m の 3 タイプで，内側に二次覆工コンクリートを現場打ちする構造である．二次覆工には 100 年以上の長期耐久性が企業先から求められたため，硫酸劣化抵抗性が高く，かつ鋼繊維を混合したコンクリートを使用した．また二次覆工の断面内には，供用後にトンネル変形量を測定するための光ファイバーケーブルを敷設し，覆工表面は樹脂製の腐食防護シートで被覆する仕様である．当工事では，二次覆工作業の工程短縮のため，鋼製型枠の移動手順を工夫し，ワーカビリティと材料分離抵抗性に優れた高流動コンクリート配合を採用することで，計画した工期内で施工完了できた．

目　次

§1. はじめに
§2. 工事概要
§3. 施工計画
§4. 施工時の問題点および対応策
§5. 施工実績
§6. おわりに

## §1. はじめに

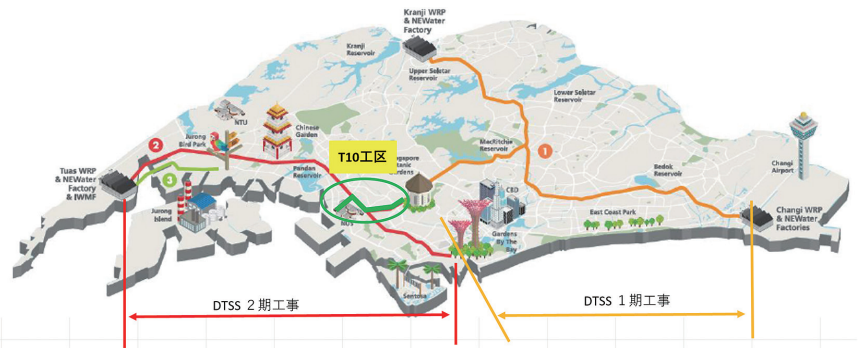
シンガポール公益事業庁（Public Utility Board）発注の大深度地下下水幹線建設工事は，シンガポールの水処理・供給および国土利用の改善向上を目的とした国家プロジェクトである．島内東部での第一期工事に続き，島内南西部を対象としている．第二期工事では，総延長 100 km の下水トンネルの築造および下水処理場を建設する（**図―1**）．この内，本工事の T10 工区は，延長 7.5 km のトンネルおよび 9 か所に人孔用立坑 14 本構築する．

二次覆工コンクリートは，高炉スラグ微粉末の置換率が 80％と高く，鋼繊維 33 kg/m$^3$ を混合するため，ワーカビリティや材料分離抵抗性に配慮する必要があった．また，二次覆工断面内には光ファイバーケーブルを敷設するため，覆工打設中のケーブル切断に対する配慮も必要となった．本稿では工事での対策と結果について述べる．

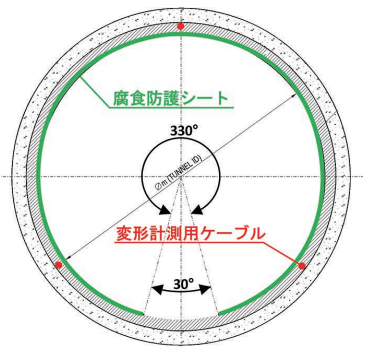
## §2. 工事概要

### 2―1　概要

供用中の第一期工事トンネルでは，腐食防護シートの破損箇所でコンクリートの劣化が想定以上に進行していた．このため，当第二期工事では二次覆工コンクリートに対する要求性能として，下水環境下（硫化水素濃度 100 ppm 以上）での耐用年数 100 年以上が設定され，これを満たす配合を用いた[1)]．また，トンネルの断面構造




図―1　当該工区位置図




図―2　トンネル標準断面図

* 国際事業本部クイーンズタウン（出）（現：国際事業本部ジュロンイースト（出））
** 国際事業本部クイーンズタウン（出）（現：国際事業本部タンピネス工事事務所）

（**図―2**）は，供用後のコンクリート劣化挙動を常時観測するための光ファイバーケーブルが断面内に敷設され，さらに常時帯水域となるインバート 30 度以外は HDPE 製の腐食防護シートで被覆する仕様となっている．

## 2―2　各トンネルの仕様・施工数量

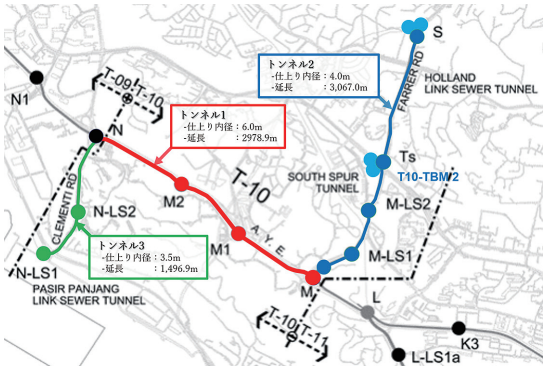
**図―3** にトンネル線形および立坑・中間立坑の位置図，**表―1** に二次覆工の仕様と施工数量を示す．一次覆工を完了した内径 3.5 m，6.0 m，4.0 m のトンネル順に二次覆工の施工を行った．

## 2―3　コンクリート仕様

**表―2** および**表―3** に二次覆工コンクリートの要求性能および配合を示す．鋼繊維は，**表―4** の要求性能に従い材料選定した（**図―4**）．鋼繊維を混合したコンクリートは，生コン工場で製造し，現場まで運搬した．

## 2―4　主要設備

**図―5** に二次覆工施工設備の坑内配置図，**表―5** に主要設備を示す．アジテーターカーが腐食防護シート設置台車内を通過できないため，コンクリートポンプは，鋼製型枠から最大 40 m 離れた位置に設置した．




図―3　トンネル線形・立坑位置

図―4　鋼繊維

表―1　各トンネル仕様および施工数量

| 項目 | トンネル 1 | トンネル 2 | トンネル 3 |
|---|---|---|---|
| 二次覆工内径（m） | 6.0 | 4.0 | 3.5 |
| トンネル延長（m） | 2,978.9 | 3,067.0 | 1,496.9 |
| 覆工巻厚（mm） | 250 | 250 | 250 |
| コンクリート（$m^3$） | 14,519 | 10,192 | 4,386 |
| 鋼繊維（t） | 508 | 357 | 154 |
| 腐食防護シート（$m^2$） | 51,063 | 35,131 | 14,988 |
| 最小曲線（m） | 150 | 150 | 150 |

表―2　コンクリートの要求性能

| 項目 | 要求性能 |
|---|---|
| 一軸圧縮強度 | 60 $N/mm^2$ |
| ワーカビリティ | スランプフロー値　700 mm 以上 |
| 結合材 | 500 $kg/m^3$（内，高炉スラグ微粉末 400 $kg/m^3$） |
| 水結合材比 | 0.28 |
| 鋼繊維添加量 | 33 $kg/m^3$ |
| フロー値（4 時間） | 600 ± 100 mm |
| 脱型強度（18 時間） | 10.0 $N/mm^2$ |

表―3　コンクリート配合表

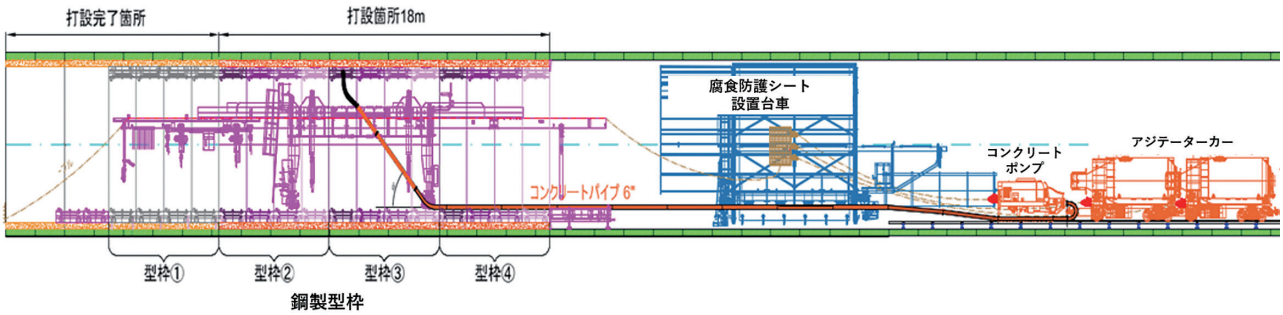
| W/B（%） | 単位量（$kg/m^3$） | | | | | | （$l/m^3$） | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | W | B | | S | G | SF | SP | PB | RT |
| | | C | BFS | | | | | | |
| 29.0 | 145 | 100 | 400 | 726 | 970 | 33 | 9.75 | 1.50 | 1.00 |
| W（水），C（普通ポルトランドセメント），BFS（高炉スラグ微粉末），S（細骨材），G（粗骨材），SF（鋼繊維），SP（高性能 AE 減水剤），PB（透水性低減剤），RT（遅延剤） | | | | | | | | | |

表―4　鋼繊維の要求性能

| 項目 | 規格 |
|---|---|
| 供給業者 | BS EN ISO9001 または同等の要求事項を満たす |
| 性　能 | EN14889-1 に準拠 |
| 形　状 | 断面が丸く，両端がフック状 |
| 長　さ | 50 mm 以上 |
| 縦横比 | 50-80 |
| 引張強度 | 1300 MPa |

表―5　二次覆工施工のための主要設備

| 設備 | 仕様 | トンネル | | |
|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 門型クレーン | 30 ton | 1 | 1 | - |
| クローラクレーン | 90 ton | 1 | 1 | 1 |
| ロコ | 30 ton | 4 | 4 | 2 |
| アジテーターカー | 8.5-10 $m^3$ | 6 | 6 | 3 |
| 鋼製型枠台車 | テレスコピック式 | 6 | 8 | 3 |
| 腐食防護シート設置台車 | - | 2 | 2 | 1 |
| コンクリートポンプ | 30 $m^3/h$ | 2 | 2 | 1 |




図―5　各設備の坑内配置図

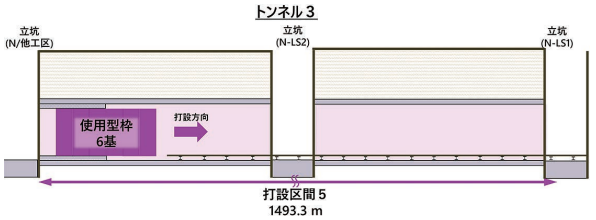
## §3. 施工計画

当初計画では，鋼製型枠 6 基（計 30 m 長）を用いて 2 日に 1 回の頻度で打設する計画であった．しかし，先行して二次覆工を打設していたトンネル 3 の施工サイクル実績（**表―6**，**図―6**）から，工程上，クリティカルとなる．そこでトンネル 1 と 2 では，計画を大幅に見直すこととした．

トンネル 3 における計画と実績の乖離は，主にコンクリートの脱型強度に起因しており，1 回の打設延長 30 m とした場合，後半 12 m 区間におけるコンクリートの強度発現が脱型のタイミングに間に合わない．そこで，トンネル 1 および 2 では，1 箇所あたりの鋼製型枠数を減らし（**表―7**），かつトンネル両端部からの両押し施工とした（**図―7**）．

表―6　二次覆工施工サイクルの比較（トンネル 3）

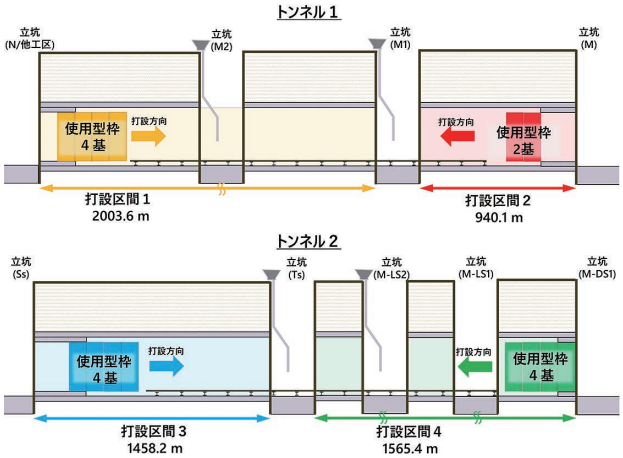
| 項目 | 計画（時間） | 実績（時間） |
|---|---|---|
| 打設前清掃 | 13.0 | 29.1 |
| 鋼製型枠設置 | 18.0 | 27.1 |
| 打設準備 | 4.0 | 12.1 |
| 打設 | 12.0 | 15.1 |
| その他 | 1.0 | 0.7 |
| 計 | 48 .0 | 84.0 |




図―6　鋼製型枠の配置図（トンネル 3）

表―7　鋼製型枠の配置数

| トンネル | 打設区間 | 配置型枠数 | 打設延長（m） |
|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 4 | 2,003.6 |
| | 2 | 2 | 940.1 |
| 2 | 3 | 4 | 1,458.2 |
| | 4 | 4 | 1,565.4 |

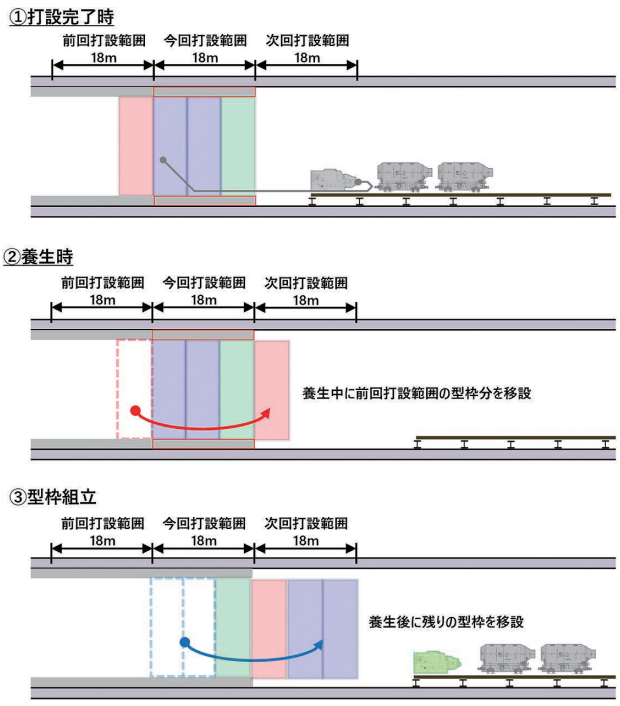



図―7　鋼製型枠の配置計画（トンネル 1,2）

### 3―1　鋼製型枠

鋼製型枠は，折りたたむことで坑内移動が可能となるテレスコピック型を使用した（岐阜工業製，**写真―1**）．また，最小曲率半径 R＝150 m に対応させるため，一基あたりの鋼製型枠延長を 6 m とした．型枠 4 基を配置した区間は，施工進行方向の前から 3 基を打設用とし，前回打設範囲の 1 基を今回打設範囲の養生期間中に次回打設範囲で組立を行うこととした（**図―8**）．これにより，鋼製型枠 4 基全てを打設に使用した場合と比較して，サイクル時間の短縮が期待された．

写真―1　テレスコピック型鋼製型枠




図―8　鋼製型枠の移動手順

### 3―2　腐食防護シート設置

二次覆工コンクリートは，コンクリート自体で高い耐腐食性を有しているが，フェールセーフの思想から，二次覆工内面に腐食防護シートの設置が義務付けられていた．シート表面には，コンクリートとの一体性を確保するための突起物を設けられている（**写真―2**）．シートの設置手順は，ロール状に巻いた状態（**写真―3**）でシート設置台車まで運搬し，電動ウィンチによりシートを円

周状に広げ，鋼製型枠台車方向にスライドさせ，鋼製型枠外周円状に設置が可能となる（**図―9**）．

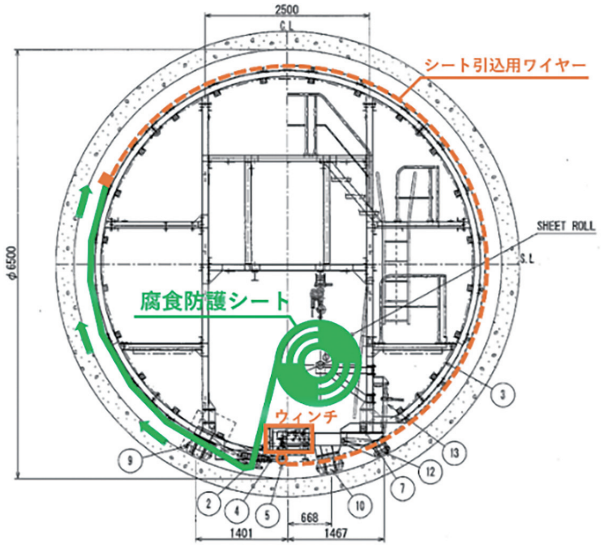
### 3―3　コンクリート打設

現場に搬入されたコンクリートは，立坑上部のホッパーで受け，鋼管（10 インチ径）にて立坑下のアジテーターカーへ投入された後，打設箇所まで運搬される（**図―10**）．立坑でのコンクリートの最大落下高さは 60 m あり，材料分離の懸念があったため，立坑深度方向中間部に曲がり部を設け，アジテーターカーで再攪拌を行った．

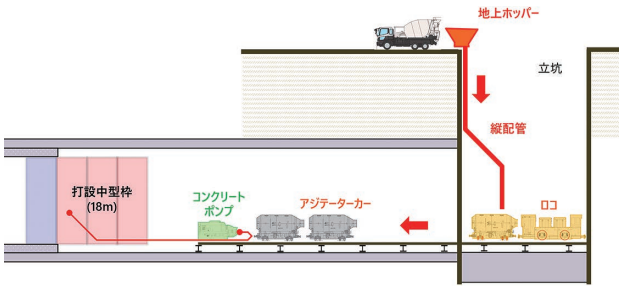
鋼製型枠仕様における設計上の左右の打設高さの許容差が 500 mm 以内であるため（施工時は 400 mm 以内で管理），左右にコンクリートを振り分けることができる配管分流設備を設置した．頂部の打設は充填不足に配慮し，トンネル延長方向 6 m 毎に打設孔を使用した．頂部以外の打設については，既打設側 3 箇所の打設孔のみを使用し，18 m 間を片押しする計画とした．打設孔の使用計画を**図―11** に示す．

写真―2　腐食防護シート表面（コンクリート面側）

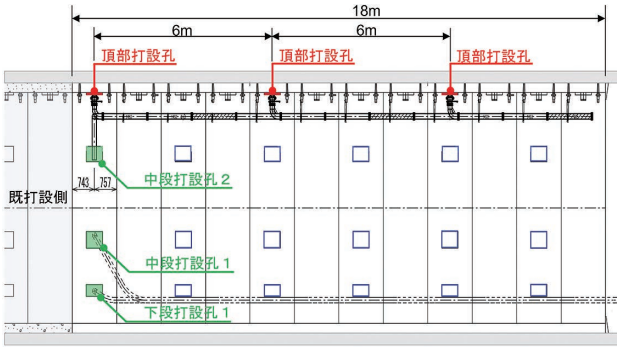
写真―3　シート運搬時荷姿




図―9　シート仕込み手順




図―10　コンクリート坑内運搬手順



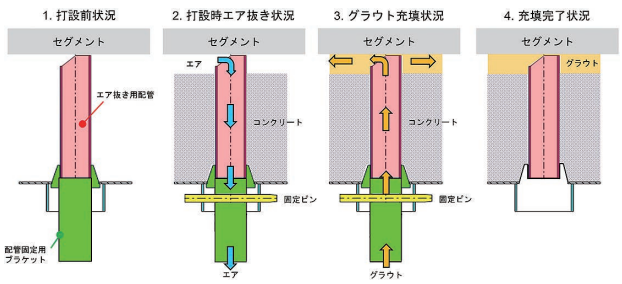

図―11　打設孔使用計画

## §4.　施工時の問題点および対応策

本工事の二次覆工コンクリートは，高炉スラグ微粉末が高含有され，鋼繊維も添加されており，通常のコンクリート以上に覆工頂部の充填不足や配管閉塞といったリスクが懸念された．また，二次覆工断面内に設置される光ケーブルとの接触による損傷リスクに配慮した計画とする必要があった．本章では，これらへの対応策およびその実績について述べる．

### 4―1　頂部充填性

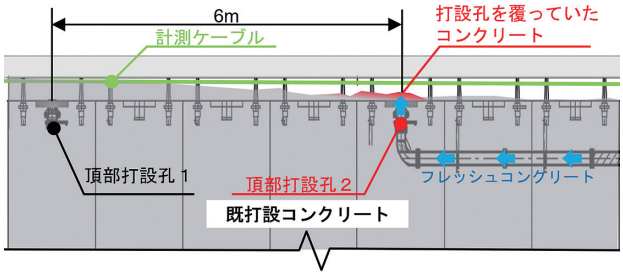
覆工頂部での充填性を確保するため，鋼製型枠天端にエア抜きおよびグラウト兼用パイプをトンネル延長方向 6 m 間隔で設置し，コンクリート打設完了後にグラウト材で頂部充填を行った．2 インチの配管は断面内に残置するため，腐食防護シートと同じ材質のものを使用した．充填はコンクリートの養生中に行い，コンクリートと同強度の無収縮モルタルを注入圧が 2.0 bar となるまで行った．充填に関する手順を**図―12** に示す．




図―12　頂部充填手順

### 4—2　トンネル変位計測ケーブルの切断

頂部打設初期において，コンクリートはトンネル周長方向に流れるが，終盤ではトンネル延長方向に流れ 6 m 先の頂部打設孔に到達する．その後，打設孔を 6 m 手前に切り替え，打設を行った際，フレッシュなコンクリートが打設孔を覆っていた自己流動性が低下したコンクリート塊を押し，計測ケーブルおよび固定金具に力が掛かりケーブルを切断する事象が発生した（**図—13**）．




**図—13　ケーブル切断状況**

本事象に対し，以下の対応策を実施した．

① 50 cm 間隔でケーブル固定金物を配置していたが，ケーブル断線のリスクが高い左右の打設孔付近及び頂部のケーブルにおいては，ケーブル固定金物を 10 cm 毎に設置する（**写真—4**）．

② 頂部のケーブルは骨材との接触を防止するため，ケーブル下部に径 4 mm のワイヤーを設置する．

③ 頂部打設孔を切り替える際，打設孔を覆っている流動性の低下したコンクリートを撤去する．

上記の対策を講じた後，同様のケーブル切断は発生しなかった．なお，初期のケーブル損傷箇所は専門業者による再接続を行い，計測管理に影響はない．

**写真—4　光ケーブル設置状況**

### 4—3　鋼繊維に起因するトラブル

鋼繊維は，コンクリート製造中に専用機を用いて均一に投入されるが，現場搬入時には一部の繊維同士が絡まり，直径 15～20 cm ほどの塊が 4 $m^3$ に 1 個程度の頻度で発生した（**写真—5**）．また，一定時間以上の打設中断をした際，比重の大きい鋼繊維がポンプ配管内で沈降して閉塞する場合があった．

**写真—5　ファイバーボール**

この対策として，以下の対応策を実施した．

① 立坑上部のホッパーに金網（5 cm ピッチ）を設置し，ファイバーボールを撤去する．

② コンクリート圧送の中断時間が 5 分を超過した場合，ポンプ配管内のコンクリートを全て排出し管内の清掃を行う．

上記の対策を講じた結果，以降の施工では鋼繊維による配管の閉塞は発生しなかった．

## §5. 施工実績

### 5—1　進捗実績

先行して二次覆工の打設を行っていたトンネル 3 で作業工程の遅延が発生したため，工程的にクリティカルとなるトンネル 1 および 2 では以下の作業見直しを行った．

① 打設区間・鋼製型枠配置

**図—8** のとおり，打設区間を各トンネル 2 区間とし，鋼製型枠の配置見直しを行った．

② 軌条設備

トンネル 3 ではトンネル全線単線であったのに対し，トンネル 1，2 では立坑およびトンネル内に部分的に複線箇所を設けた．これにより，アジテーターカーが離合することでコンクリートの運搬時間を短縮することが可能となり，打設時間の削減を図った．

③ 機材の運用方法

1 打設箇所あたり 3 台使用するアジテーターカーのうち 1 台をコンクリートポンプに常時接続させ，残りの 2 台で坑内運搬した．これにより，打設箇所でコンクリートが攪拌可能となり，4—3 章で述べた打設箇所におけるコンクリートに混合された鋼繊維の沈降防止を図った．

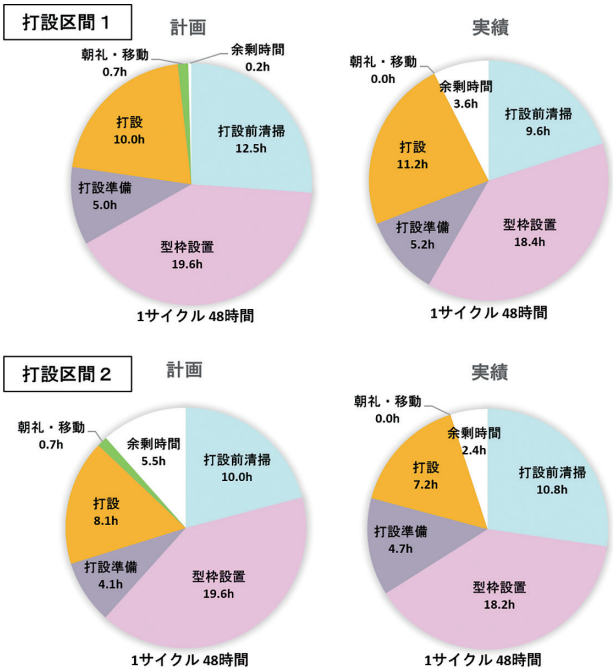
以上の見直しにより，トンネル 1 および 2 においては，トンネル 3 と比較し大幅にサイクルが改善され，計画より短い工期で施工を完了した（**表—8**）．トンネル 1 の施工実績について，**表—9**，**図—14** に，トンネル 2 は**表—10**，**図—15** にそれぞれ示す．なお，計画では 2 日に 1 度の打設をサイクルとしており，設定した余剰時間は，作業中に発生するであろうトラブル等を考慮している．これに対し施工時は打設完了後，次サイクルに移行するため，その分工期を短縮している．

表―8　トンネル１・２　施工進捗比較

| トンネル | 打設区間 | 打設延長 m | 型枠数 | 計画 | | 実績 | | 日数差 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 施工日数 | 月進 m/月 | 施工日数 | 月進 m/月 | |
| 1 | 1 | 2,003.6 | 4 | 303 | 201 | 292 | 209 | -11 |
| | 2 | 940.1 | 2 | 206 | 139 | 200 | 143 | -6 |
| 2 | 3 | 1,458.2 | 4 | 201 | 221 | 180 | 246 | -21 |
| | 4 | 1,565.4 | 4 | 222 | 215 | 220 | 216 | -2 |

表―9　トンネル１　施工サイクル比較

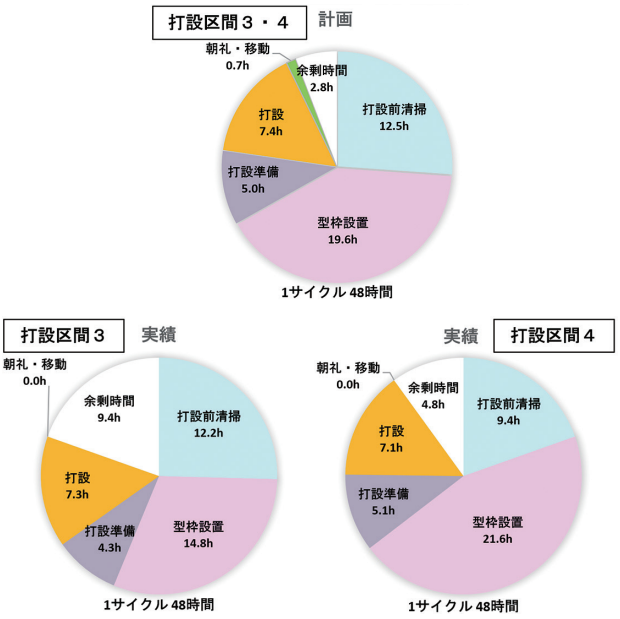
| トンネル１ | 打設区間１（配置型枠数　4 基） | | 打設区間２（配置型枠数　2 基） | |
|---|---|---|---|---|
| 項目 | 計画（時間） | 実績（時間） | 計画（時間） | 実績（時間） |
| 打設前清掃 | 12.5 | 9.6 | 10.0 | 13.1 |
| 型枠設置 | 19.6 | 18.4 | 19.6 | 18.6 |
| 打設準備 | 5.0 | 5.2 | 4.1 | 6.3 |
| 打設 | 10.0 | 11.2 | 8.1 | 7.6 |
| 朝礼・移動 | 0.7 | 0.0 | 0.7 | 0.0 |
| 余剰時間 | 0.2 | 3.6 | 5.5 | 2.4 |
| 合計 | 48.0 | 48.0 | 48.0 | 48.0 |




図―14　トンネル１　計画・実績サイクル比較

表―10　トンネル２　施工サイクル比較

| トンネル２ | 打設区間３（配置型枠数　4 基） | | 打設区間４（配置型枠数　4 基） | |
|---|---|---|---|---|
| 項目 | 計画（時間） | 実績（時間） | 計画（時間） | 実績（時間） |
| 打設前清掃 | 12.5 | 12.2 | 12.5 | 9.4 |
| 型枠設置 | 19.6 | 14.8 | 19.6 | 21.6 |
| 打設準備 | 5.0 | 4.3 | 5.0 | 5.1 |
| 打設 | 7.4 | 7.3 | 7.4 | 7.1 |
| 朝礼・移動 | 0.7 | 0.0 | 0.7 | 0.0 |
| 余剰時間 | 2.8 | 9.4 | 2.8 | 4.8 |
| 合計 | 48.0 | 48.0 | 48.0 | 48.0 |




図―15　トンネル２　計画・実績サイクル比較

## 5―2　コンクリートロス

計画時には想定していなかった以下の理由により，コンクリートのロス率は計画（2%）に対して大幅に増加した（**表―11**）．

① 高流動コンクリートに起因する型枠隙間からのコンクリートの漏れ
② アジテーターカー内から排出できない残コンクリートの廃棄
③ コンクリート圧送の中断時間が超過した場合のコンクリートの廃棄

表―11　コンクリートロス率

| トンネル | 打設延長（m） | 設計打設量（$m^3$） | 実績打設量（$m^3$） | ロス率 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 2,944 | 14,601 | 16,111 | 10.3% |
| 2 | 3,024 | 10,105 | 11,505 | 13.9% |
| 3 | 1,493 | 4,398 | 4,883 | 11.0% |

## 5―3　二次覆工コンクリートの仕上り

二次覆工コンクリートは，腐食防護シートの損傷もなく，良好な仕上りで完成した（**写真―6**）．

写真―6　二次覆工コンクリートの仕上がり

## §6. おわりに

粉体系高流動コンクリートに鋼繊維を混合した二次覆工コンクリートの打設は，当社では初となる経験であった．計画当初からポンプ圧送や配管閉塞といった問題点が指摘されてきたが，技術研究所，シールド委員会のご指導のお陰を持ち，無事に完了することができた．この実績が，今後の類似工事の参考になれば幸いである．最後に，本工事を進めるに際し，ご指導，ご協力を頂きました関係者各位様に深く感謝の意を表します．

**参考文献**

1）吉田吉孝他：高炉スラグを高含有した下水シールド二次覆工コンクリートの耐腐食性評価，西松建設技報 45 号（2022）．