

長距離トンネルから分岐する取水用横坑における二次覆工の施工 Construction of Secondary Lining Concrete in the adits branched off from Long Tunnel

内林 聡* 遠藤 充泰*
Satoru Uchibayashi Michiyasu Endo

要 約

本工事は、豪雨時に発生する市街地の洪水対策として計画された雨水排水用のトンネル工事である。延長 10.6 km の本坑に接続された 32 箇所の取水立坑と横坑を通じて集水し、直接海に排水する。

本稿では、TBM で掘削した本坑から分岐する総延長 7,909 m の取水用横坑の二次覆工工事の施工計画と実績を報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 本工事の特徴と基本計画
- § 4. 施工実績
- § 5. おわりに

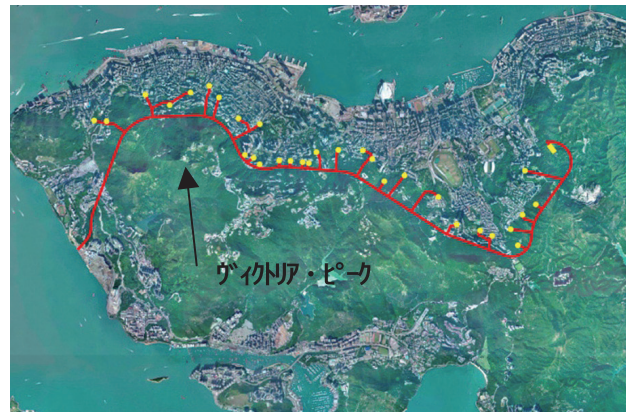
§ 1. はじめに

香港島西雨水トンネル工事は、市街地の洪水対策として計画された雨水排水トンネル建設工事である。工事全体平面図を図一1に示す。また、トンネル一般図を図二に示す。

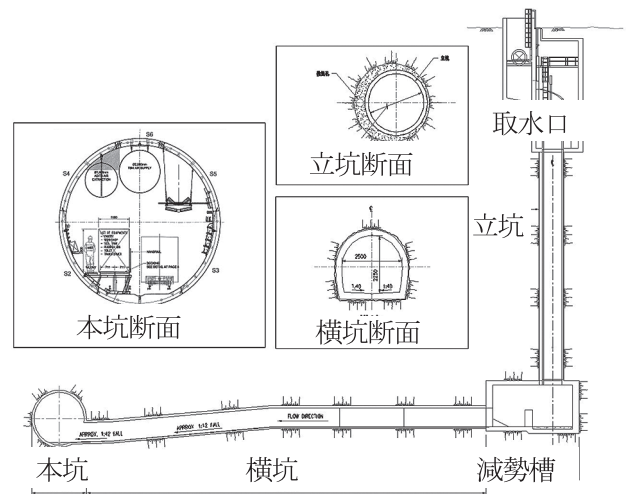
延長 10.6 km の本坑には 2 台のダブルシールド型 TBM を採用した。また 32 箇所の取水立坑は、市街地の狭隘部や急峻な沢部に位置し、岩線が浅いためレイズボーリング工法で掘削した。本坑と取水立坑とを接続する横坑は、発破工法を用いて本坑の TBM 掘削と同時進行で掘削および二次覆工を行った。

§ 2. 工事概要

工事件名：香港島西雨水トンネル工事
 発注者：香港特別行政府 渠務署
 工事場所：香港特別行政区 香港島 タイハン～サイバーク
 期：自 2007 年 11 月 30 日至 2012 年 6 月 30 日
 請負金額：当初 2,388,305,050 香港ドル（約 350 億円）
 変更 3,112,000,000 香港ドル（約 460 億円）
 （入手時レート 14.81 円 / 香港ドル）



図一1 工事全体平面図



図一2 トンネル一般図

* 海外（支）西港線地下鉄（出）

本 坑：総延長 10,574 m
 横 坑：32 箇所、総延長 7,909 m（各延長 14～800 m）
 断面形状：馬蹄形、7.7 m²、覆工厚 200 mm
 掘削方式：発破掘削（タイヤおよびレール工法）
 取水口および立坑：32 箇所、総延長 2,325 m
 （深度 16.4～175 m）

なお、本坑は東西両坑口から 2 台の TBM で掘削したため、本坑以外の横坑についても東側と西側に別れて施工した。各トンネルの数量を表-1 に示す。

§3. 本工事の特徴と基本計画

3-1 本工事の特徴

(1) 作業時間の制限

香港における建設工事では、夜間の騒音作業についての許可を環境保護署から取得しなくてはならない。また、坑口及び取水口は住宅地に位置しているため、近隣からの苦情により騒音が規制値以内であっても作業停止になる場合もある。当現場では坑口に防音ハウス（写真-1 参照）を設置することにより、24 時間坑内作業許可を取得した。しかし、坑外作業は 7 時から 19 時までには制限されており、特に坑内へのコンクリート供給が制限された。西側トンネルでは、坑内にコンクリート貯蔵用アジテータを設置することにより夜間打設を行った。

(2) 競合作業

本工事では横坑の二次覆工の他に多くの作業がトンネル内で並行して行われ、特に覆工着手時期には競合作業が多発した。

主な競合作業としては、本坑 TBM 解体・搬出、横坑掘削、取水口・立坑掘削ならびに構築、両坑口構築が挙げられる。横坑掘削完了後は横坑覆工作業を、立坑の掘削・構築作業と並行して行う必要があり、各々の作業への影響を最小限に抑えるため多くの調整を必要とした。

(3) 本坑内の資機材運搬

トンネル内の資機材の搬入・搬出は東側および西側の両坑口から本坑に設置したレールを利用して行った（写真-2 参照）。

ロコは充電設備の不要なディーゼルタイプ（写真-3 参照）を採用し、西側トンネルで 7 台、東側トンネルで 4 台使用した。

制限速度は本線部で毎時 15 km、横坑入り口前後では毎時 5 km とした。両坑口から東西トンネル交点部の横坑 W0 までの所要時間を表-2 に示す。

(4) 横坑内の資機材運搬方法

一部の長距離横坑に対してはレール工法を採用し、本坑から直接ロコにより材料運搬を行った。レール工法による横坑の状況を写真-4 に示す。その他の横坑にはタイヤ工法を適用した。タイヤ工法の場合、資機材は本坑内をロコにて運搬後、横坑坑口で積み替え、横坑内に

表-1 トンネル数量表

項 目	西側トンネル	東側トンネル
本坑掘削外径	8,295 m	7,195 m
本坑延長	6,579 m	3,955 m
取水立坑	23 箇所	9 箇所
横坑延長	5,711 m	2,198 m
横坑二次覆工コンクリート	25,000 m ³	10,000 m ³



写真-1 坑口の防音ハウス



写真-2 本坑レール配置状況



写真-3 ディーゼル・ロコ

運搬した。二次覆工工事におけるレール工法、タイヤ工法の特徴を表-3 に示す。

3-2 コンクリート打設計画

(1) コンクリートの運搬

コンクリートは坑口に配置されたコンクリートポンプにより、本坑内に設置したアジテーターまで圧送される。アジテータからミキサー台車 (MUHLHAUSER 社製) に積み替え後、本坑内をロコにて運搬する。西側トンネル内では一時貯蔵用アジテータ容量 25 m³ を 3 基、12 m³ を 1 基を配置した。ミキサー台車は 11 m³ 積みと 12 m³ 積みの 2 タイプがあり、モータにてドラムを回転させることにより攪拌・荷卸しが可能となる構造である。東トンネルで 4 台、西トンネルで 8 台を使用した。

ミキサー台車の最大連結可能台数は 5 台である。本工事では坑口からの運搬距離が 4,000 m を超える横坑においては最大 2 連結を適用した。荷卸し箇所に着後先頭車両の後部ハッチを開放し連結器を格納させ、2 台目を 1 台目に連結させることにより、2 台分の 20 m³ のコンクリートを連続打設することができる。連結状況を写真-5 に示す。

(2) 凝結遅延剤と初期硬化時間

コンクリートの設計強度は 40 MPa (セメント量 450 kg/m³)、スランブを 175 mm とした。コンクリートの配合を表-4 に示す。

本工事ではコンクリートの坑内運搬時間が長いことと、長時間の貯蔵により夜間の打設を可能にするため、練り混ぜから打設完了までの時間を規定の 2 時間以上にする必要があった。そのため、凝結遅延剤 (TAM 社製 TamCem HCA) を使用し、試験練りによってスランブ保持が 4 時間と 8 時間が可能な 2 種類の配合を用意した (表-5 参照)。凝結遅延剤の使用は、脱型必要強度の発現に影響するため、必要なスランブ保持を得た後に短時間で初期強度が得られる配合が必要とされた。

凝結遅延剤の添加は、コンクリートが現場に到着した直後にミキサー車へ投入・攪拌した。その後、コンクリートは坑内のアジテータで貯蔵し、夜間打設で使用した。

昼夜打設で計画した西側トンネルにおいては、最終午後 19 時に到着したコンクリートを最長午前 2 時までで打設した。

夜間の打設に何らかのトラブル等で余剰コンクリートが発生した場合は、ミキサー台車内でコンクリートの硬化を防ぐために常備してある軽油を 1% 程度の割合で添加し、翌朝廃棄した。

(3) コンクリートポンプ・配管

坑外に設置したコンクリートポンプは通常の定置式を採用した。坑内用については通常の定置式ポンプを圧送距離に応じて、低圧、高圧に使い分けた。実際に使用したコンクリートポンプおよび圧送距離を表-6 に示す。

坑内用のポンプは、軌道上を走行できるよう車輪付きの台車に組み込み、必要に応じて各横坑へ移動 (写真-6 参照)、レール工法では横坑内打設箇所に、タイヤ工法では横坑入口に配置した。

表-2 ロコによるトンネル内移動所要時間

運行区間	牽引物	所要時間	運行距離
西坑口から 横坑 W0	人車	45 分	6.5 km
	ミキサー台車	1.5~2 時間	
東坑口から 横坑 W0	人車	15 分	4.0 km
	ミキサー台車	30 分~1 時間	



写真-4 レール工法横坑の様子

表-3 レール工法とタイヤ工法の比較

工法	利点	欠点
レール	コンクリートポンプを打設箇所近くに配置できるため長距離配管が不要。	・レールの保守、点検、レール設置撤去作業が必要。 ・レールが支障し、敷設箇所での作業が限定される。
タイヤ	掘削後レール撤去を待たずに覆工作業が開始できる。	・本坑軌道上にタイヤ機械作業足場が必要。 ・中継ポンプ、長距離配管が必要。



写真-5 ミキサー台車連結状況

表-4 コンクリート配合

単位量 kg/m ³					
水	セメント	PFA (*1)	細骨材	粗骨材	混和剤 (*2)
175	336	112	1050	660	5.6

(*1) Pulverized Fuel Ash (微粉燃焼灰)

(*2) 高性能 AE 減水剤：グレース社、ADVA108

また、ポンプホッパー清掃のため、台車にはポンプ本体を傾斜させるための油圧ジャッキを設置した。

コンクリート配管については、長距離圧送を考慮して二種類の配管を使用した。使用したコンクリートパイプの一覧を示す(表一七)。留意すべき点は、配管のジョイントが、配管清掃水送りにより作用する水圧に耐えられることである。長距離配管に伴い、高水圧が作用する場合はZX管(ブツマイスター社特許製品)を使用した。

3-3 型枠使用計画

(1) 横坑の断面形状

横坑の内空仕上り断面は、縦2.3m横2.5mの馬蹄形である。土被りの少ない箇所を除き排水トンネルとして設計されており、覆工背面の地下水をトンネル内に導水するため、3m毎に導水マット(ABG社製Cavidrain)と導水孔を設置した。また、クラック誘発目地を3m毎に配置した。図一三に横坑標準断面図を示す。

(2) 型枠の種類と台数

型枠の設計と製作は、中国天津に工場を持つ北京の型枠製造会社(LIANDO社)を採用した(写真一八参照)。覆工用型枠製造経験の少ない会社であるため、定期的に職員が工場に出向き詳細部の構造等について直接指導を行った。

型枠は、3mの中折れ標準タイプと急曲線部(R=30m以下)施工用の1.5m中折れタイプを用意した。1打設長は9mを基本とし、直線で長距離の場合は12m、急曲線部においては6m以下で計画した。

型枠台数は、工程・コンクリートの供給能力・施工サイクルから転用計画を作成し決定した。使用した覆工用型枠の種類及び数量を表一八に示す。施工中型枠転用計画を見直し、型枠内作業スペースを改善したガントリ着脱式型枠と木製型枠を追加した。

§4. 施工実績

4-1 コンクリート1日あたりの打設量

計画工程に基づいた1日あたりの最大打設量は、西側トンネルは昼夜打設で400m³、東側トンネルは昼間のみの打設で200m³とし、実際の打設量は計画の8割程度であった。

4-2 各横坑覆工の施工日数

(1) コンクリート打設サイクル

1横坑の実績施工日数を打設箇所数で割った平均コンクリート打設サイクルは短距離横坑で3.5日に1回打設、長距離横坑では2日に1回打設となった。延べ施工日数には、型枠の組立・解体も含まれており、各々の所要日数は片番で約7日であった。長距離横坑の場合、複数型枠での同時施工が可能であり、施工日数は短距離横坑に比べ短くなった。

表一五 遅延材の添加量

HCA添加量	スランプ保持時間	適用箇所
0.25%	4時間	東トンネル
0.50%	8時間	西トンネル

表一六 コンクリートポンプ諸元

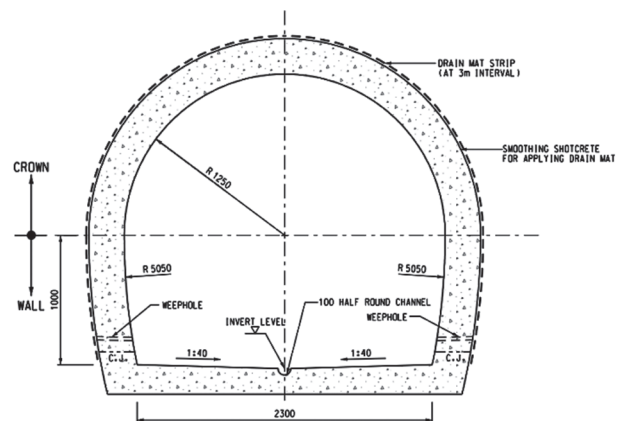
名称	吐出圧 Bar	吐出量 m ³ /hr	実圧送距離
Puz-BSA 1405 E	71	55	約200m
Puz-BSA 1005 E	55	59	約200m
Schwing BP3000	135	46	約500m
Syntec MKW-35 SVH	41.2	35	240mまで
Syntec MKW-35 SVH II	60.8	35	240m-350m



写真一六 坑内用コンクリートポンプ

表一七 コンクリートパイプ一覧

管種	適用条件
5インチS管	配管延長<300m
5インチZX管	配管延長>300m, 立坑縦配管



図一三 横坑標準断面

横坑延長と型枠台数ならびに平均打設サイクル一覧を表一九に示す。

(2) 施工方法とサイクル

当初計画では、インバート打設後に直接型枠を設置し

覆工コンクリートを打設する手順であった。一部の横坑では、工程促進のためにインバート上に先行壁を施工し、その後に覆工コンクリートを施工する方法を採用した。

図一4にそれぞれの施工方法概念図を示す。

① 当初計画の施工方法

型枠移動後、導水パイプの設置と最下部のメタル取付けを行い、メタルとインバートに間詰めを設置した後にコンクリート打設する。コンクリート打設後最下部のメタルを解体した後にジャッキダウンを行う。直線部において最短で2日に1回の打設となった。

② 工程促進用の施工法

あらかじめインバート上に導水パイプを設置し、先行壁を構築する。型枠は最下部のメタルが不要となるため、セット時および脱型時は、メタルの脱着の必要はない。直線部では1日1回の打設が可能であった。ただし、曲線部では先行壁の施工が困難となるため本施工法は適さない。また、先行壁を施工するためある程度の施工スペースが必要となり、別途大工が必要となるため労務費用が増加した。打設サイクルの比較を表一10に示す。



写真一7 型枠工場検査 (天津工場にて)

表一8 覆工用型枠種類・数量

種類	西側トンネル	東側トンネル
鋼製標準型枠	L=9 m, 7基	L=9 m, 2基 L=12 m, 1基
鋼製ガントリ着脱式型枠	無し	L=6 m, 2基
木製型枠	L=24 m	L=6 m

4-3 長距離横坑の施工

本工事の横坑は、合計32本のうち5本が延長400mを超える長距離小断面である。これらの長距離小断面横坑の施工は作業性が悪く時間を要した。小断面であるために掘削中と他工種の並行作業は困難であり、覆工工程短縮のためにはそれぞれの横坑の条件に合わせて特別な検討を必要とした。型枠基数、コンクリート供給方法、優先順位等様々な可能性について検討が必要であった。各トンネルにおける代表的な施工実績を下記に示す。

(1) 長距離圧送、複数型枠使用による横坑E5Aの覆工 (東側トンネル)

延長585mの横坑にて、直線部が多いため工程促進の打設方法を採用した。中継ポンプ2台を横坑内拡幅部に配置し、型枠3基にて同時施工した。型枠長さは直線部で15mおよび12mを採用し、曲線部で3mとした。

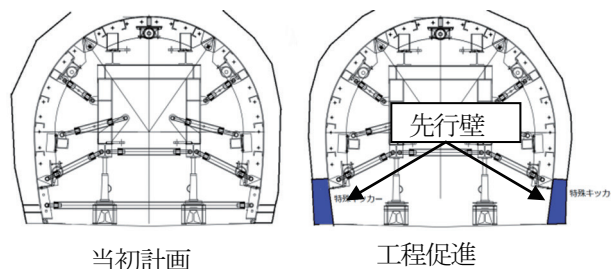
アーチ部については平均1.1日/スパンにて打設し、合計50日で完了した。(図一5)

(2) 長距離圧送、立坑W0から横坑を經由しての本坑へのコンクリート供給 (西側トンネル)

西側トンネルは本坑延長が6kmを超え、横坑の数も多いため、西坑口からのコンクリート供給だけではピーク時の供給不足が懸念されていた。そこで、西側トンネル終点部の横坑W0(立坑深さ30m、横坑延長440m)を追加のコンクリート供給口とした。地上に設置したコンクリートポンプによって坑内のミキサー台車まで直接圧送し、1日最大70m³のコンクリートを供給した。(図一6)

表一9 横坑延長、型枠台数、平均打設サイクル一覧

横坑延長	型枠使用基数(基)	平均打設サイクル (日/スパン)
100 m以下	1	3.5
100 m~400 m	1	2.3
	2	1.4
	3	1.5
400 m以上	1	2.3
	3	1.1



図一4 施工方法概念図

表一10 打設サイクルの比較 (直線部) (単位: 時間)

作業内容	当初計画	工期促進
型枠セット	11	6
打設	4	4
養生	14	14
交代時間	7 (昼夜)	0 (昼のみ)
合計	36	24

(3) 本坑と立坑からコンクリートを供給，複数型枠使用による横坑 P5 の覆工（西側トンネル）

本工事における最も長い横坑 P5 は、本坑からの延長が約 800 m あり、取水立坑計 2 箇所と一部断面の大きな横坑 150 m を含んでいる。工期と打設量の関係から、本坑からのコンクリート供給では間に合わないため、取水立坑 W10 を利用し 2 箇所からコンクリートを供給した。コンクリートポンプ 3 台と型枠 3 台を同時に用い、アーチ部の施工を完了した。（図一七）

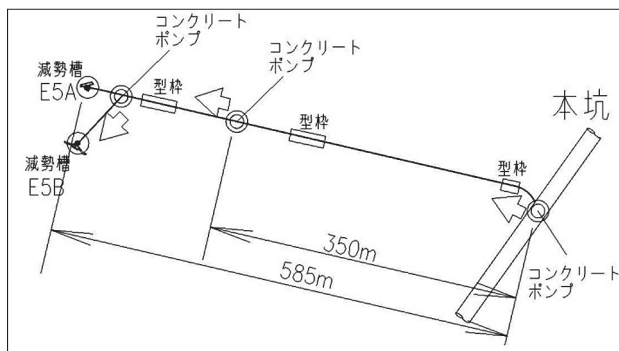
§5. おわりに

本工事の施工を終えて、直面した様々な問題を振り返り、今後同様の工事の計画・施工の際に検討すべき事項を以下に述べる。

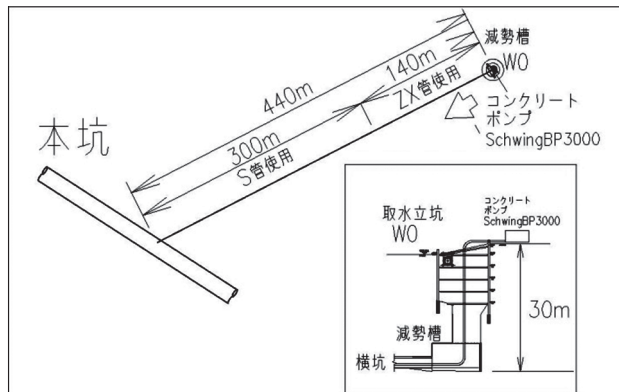
- ・本坑坑口のみではなく、取水立坑を利用した資材搬入出計画。
- ・横坑内運搬方式の決定。タイヤ工法またはレール工法。
- ・夜間のコンクリート打設作業を可能にする仮設備計画。
- ・コンクリート運搬時間に応じた、凝結遅延剤適用の使用ならびにその添加量の決定。
- ・複数横坑同時施工のために必要な型枠転用計画。
- ・急曲線に対応する中折れタイプ型枠の適用。
- ・工程促進用の施工法の検討。
- ・施工中における型枠転用計画の見直しと対応策の早期対応。
- ・長距離横坑覆工方法の検討。コンクリート供給方法、コンクリートポンプおよび配管タイプの選定。

現在の香港は同時に複数の大規模工事が進行するいわゆる建設ラッシュである。このため労務者、協力業者が極端に不足しており、トンネル工事においては直営にて施工せざるを得ないのが現状である。工期も非常に厳しく、安全かつ急速施工が要求される。

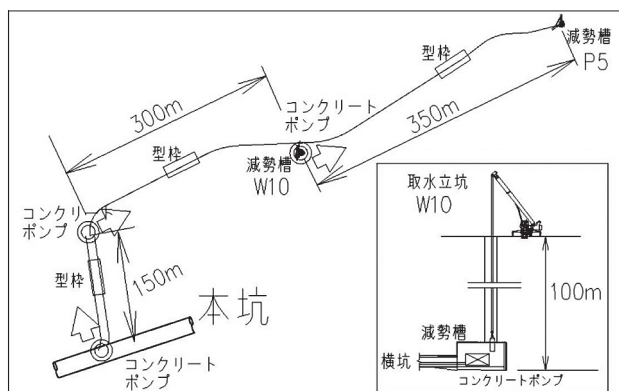
本報告が、今後同様な工事の参考になれば幸いである。最後になりましたが、本工事を進めるにあたりご指導、ご協力頂いた関係者各位に深く感謝の意を表します。



図一五 横坑 E5A の覆工



図一六 立坑 W0 からのコンクリート供給



図一七 横坑 P5 の覆工