

# 香港島西雨水トンネル工事におけるレイズボーリング工法による大深度立坑の施工

## Construction of deep shaft by Raise Boring Method in Hong Kong West Drainage Tunnel Project

植竹 弘\*  
Hiroshi Uetake

清水 達郎\*  
Tatsuro Shimizu

### 要 約

香港島西雨水トンネル工事は、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。延長約 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雨水を集水し、直接海へ排出するものである。23 箇所の取水立坑の掘削は、市街地での施工となるため施工時の騒音や振動等を考慮してレイズボーリング工法を採用した。立坑の掘削延長は 2,094 m で、計 4 台のレイズボーリングマシンを使用した。本稿ではレイズボーリングによる取水立坑の掘削および覆工工事について報告する。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 取水立坑の掘削
- § 4. 立坑の覆工
- § 5. まとめ

#### § 1. はじめに

香港島西雨水トンネル工事は、香港島北西部に位置し、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。

延長約 10.6 km の本坑掘削には 2 台のダブルシールド型 TBM を採用し、本坑と立坑を接続する計 32 本の横坑は発破工法によって掘削した。

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ているため、騒音や振動等を考慮して機械掘削を採用した。そのうち、23 箇所についてはレイズボーリング工法を採用し、その他については RCD 工法や深礎工法によって掘削した。

本稿ではレイズボーリング工法による立坑掘削の施工実績およびプレキャストリングを使用した覆工工事の実績について報告する。

#### § 2. 工事概要

##### 2-1 工事内容

工事件名：香港島西雨水トンネル工事

発注者：香港特別行政政府 渠務署

工事場所：香港特別行政政府 香港島 タイハン～サイバーポート

工 期：自 2007 年 11 月 30 日至 2012 年 6 月 30 日

本 坑：総延長 10,574 m, 掘削径 7.2 m および 8.3 m

横 坑：32 箇所, 掘削断面積 7.7 m<sup>2</sup>, 総延長 7,909 m (各延長 14～800 m)

取水口および立坑：32 箇所, 掘削径 2.4 m および 3.2 m, 総延長 2,325 m, 深度 16.4～175 m

工事全体平面図を図—1 に、トンネル断面一般図を図—2 に示す。

##### 2-2 地形・地質概要

本坑区間は、香港島北西部の市街化区域の南側の山腹に沿って位置する。最大土被り約 300 m を有し、主な地質は凝灰岩および花崗岩であった。

一軸圧縮強度は凝灰岩で 150～270MPa、花崗岩で 120～220MPa であった。また、香港では全体的に岩線が浅く、本工事の立坑施工箇所においては、地表から 10～20 m で堅固な岩盤が出現している。

\* 海外（支）香港西（出）

§3. 取水立坑の掘削

3-1 立坑掘削

本工事には合計 32 箇所の取水立坑があり、立坑下部から横坑を通じて本坑に接続している。立坑の深さは、16～175 m で深度と地形・地質状況により掘削方法を決定した。その結果、23 箇所についてレイズボーリング工法を採用し、その他については RCD もしくは深礎工法によって掘削した。

3-2 レイズボーリング工法

レイズボーリング工法は、地上部に設置した機械でパイロットホールを削孔した後、下部のトンネル内からリーマーを設置して立坑を切り上げていく工法である。

掘削ずりは下部のトンネル内で処理し、地上では小型機械が動くだけで騒音も小さく、本工事のような市街地での作業には最適の工法である。

本工事では、オーストラリアの専門業者 MACMAHON により、計 4 台のレイズボーリングマシンを使用し、総延長 2,094 m の掘削を行った。

(1) 施工フロー

本工事では、レイズボーリング掘削を本坑の TBM 掘削と並行して実施した。地上部では岩盤までの山留め掘削を行い、レイズボーリングマシン設置のための作業構台を施工する。地下では横坑接続位置を TBM の通過後直ちに掘削を開始し、横坑の掘削が終了した時点でレイズボーリングのパイロット孔の削孔を開始した。パイロット孔の精度を確認した後に、本坑から横坑内にリーマーを搬入し（写真-1）ロッドに接続した後にリーミング掘削を開始した（写真-2）。

掘削時のずりは横坑内に落下・堆積させ、そこからロードホウルダンプもしくはヘグローダーを使用して本坑から坑外へ搬出した。

なお、市街地における施工のため地上部のレイズボーリング掘削は昼間の 7 時から 19 時までには制限され、ずり出しは掘削を停止した夜間に行った。

図-3 に施工フローを示す。

(2) 事前止水注入

香港における地下工事では、掘削に伴う地下水位の低下は厳しく制限される。立坑の掘削においても、掘削後の湧水が立坑 100 m 当たり 10 l/分を超えないことと規定されていた。レイズボーリングによる立坑掘削において施工途中で止水グラウトを行うことは難しいので、地質調査の結果に基づき、地表面から立坑周辺に事前止水注入を行った。図-4 に事前止水注入のパターン図を示す。

止水注入にはマイクロセメントを使用し、仕様書に基づき最大注入圧 80 bar のグラウトポンプを使用して高圧注入を行った。最終的に、14 箇所の立坑において地表面から最大 35 m 深さまでの範囲に合計 58 m<sup>3</sup> の止水注入を行った。

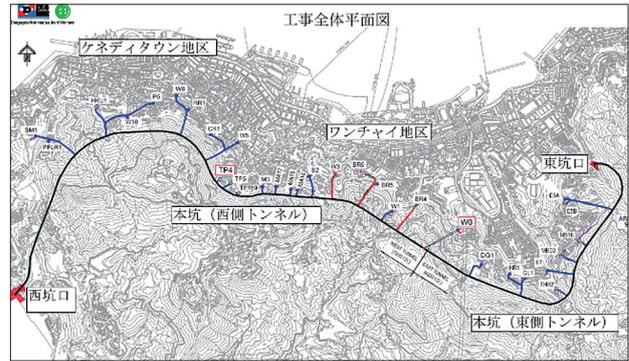


図-1 工事全体平面図

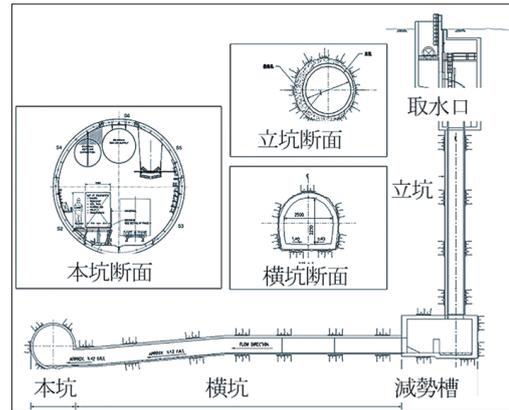


図-2 トンネル断面一般図

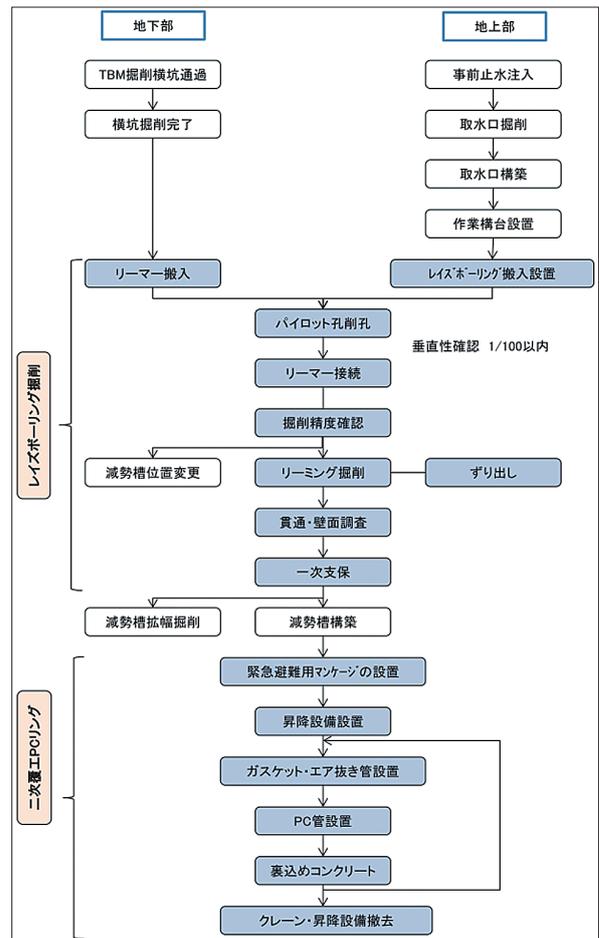


図-3 取水立坑施工フロー

(3) 掘削機械設備

レイズボーリング施工箇所は、市街地の狭隘かつ急峻な場所が多く、施工機械を取水口の掘削後に設置する作業構台の上にコンパクトにまとめる必要があった(写真-3)。

機械配置平面図と断面図を図-5 および図-6 に示す。

レイズボーリングの運転に必要な電源は、施工箇所が点在するため、650 kVA の発電機を使用した。また、取水口下部には貫通後直ちに掘削孔を閉鎖するための鋼製の開閉式扉を設置した。この扉をあらかじめ設置しておくことによって、貫通後の立坑開口部を直ちに閉鎖し、機械解体搬出を安全に速やかに行うことができた。

本工事で使用したレイズボーリングマシンの仕様を表-1 に示す。今回2社の機械を使用したが、どちらもロッドチェンジャー機構を有しており、安全にロッドを交換することができた。

(4) リーマー搬入

パイロット孔の削孔が完了し垂直精度を確認した後に、リーマーを搬入して接続した。リーマーの搬入は、TBM掘削中の本坑坑口から台車に乗せてロコモティブで横坑分岐部まで運搬し、スキッドに載せ換えて横坑内終点部まで運搬した。運搬後は地上部のレイズボーリングマシンのロッドでリーマーを引き起こし、専用の組立工台に乗せてロッドの接続を行う(写真-4)。リーミング掘削完了後は、地上部からリーマーを搬出する。

本工事では、合計23回のリーマー搬入を行ったが、TBM掘削、横坑掘削と並行しての作業でもあり、小断面横坑内へのリーマー運搬が、当工事において最も苦勞した点の一つであった。

図-7にリーマー搬入状況図を示す。

(5) 掘削実績

パイロット孔の垂直精度は、立坑の掘削精度を左右する。したがって、慎重な削孔を行い、削孔速度は1.5 m/hr以下とした。パイロットビットにはセメントカーバイドボタンを有するレイズボーリング用の349 mm トリコンビットを使用した。

垂直精度は仕様書で1%以内と規定されており、計23箇所のうち1箇所を除いては1回の削孔で規定内に収まった。規定内に収まらなかった箇所については、コンクリートにより埋め戻しを行った後、再削孔した。全体の平均垂直精度は0.6%であった。

リーミング掘削は、外径2.441 mもしくは3.154 mの二種類のリーマーを使用し、カッターにはチップインサート型ローラーカッターを使用した。掘削は、スラスト力がカッターの許容荷重を超えないように2,700 kNを上限とした。掘削速度は、硬岩部においては平均0.6 m/hrで、一部の軟岩部では2 m/hrを超える箇所もあった。掘削作業は昼間のみで、1日の平均掘削進行は4.3 m/dayであった。

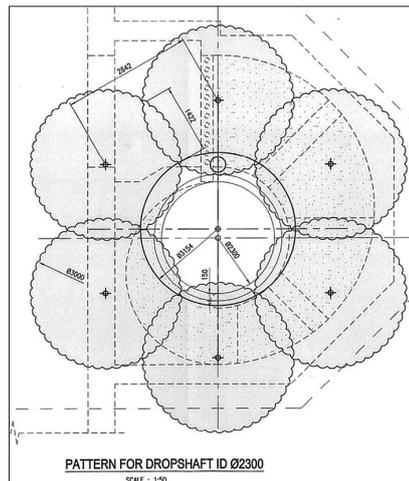


図-4 事前止水注入パターン図



写真-1 リーマー搬入状況



写真-2 リーミング



写真-3 レイズボーリング施工状況



写真-4 リーマー接続状況



写真-5 CCTVによる検査



写真-6 マンケージ

3-3 一次覆工

レイズボーリング工法では、基本的には掘削途中で掘削面の支保を行うことはできないので、掘削完了後掘削機を撤去してから行うことになる。本工事では、貫通後にCCTVによる掘削壁面の検査(写真-5)を行った後に、地質担当エンジニアがマンケージに乗り掘削面の切羽観察を行った(写真-6)。その後Qシステムに基づいて必要な支保を決定し、ロックボルト(鋼管膨張型1.6m)や金網、吹付けコンクリートを立坑上部から下部に向けて順次施工した。

(1) 高強度ポリマーセメント吹付け材

吹付けコンクリートについては当初は乾式を採用したが、粉塵が多く狭隘な立坑内での作業が非常に困難であったため、南アフリカの鉱山現場で多用されている、トンネルガード®というプレミックスタイプのファイバー入り高強度ポリマーセメント吹付け材料に変更した。

このトンネルガード®は、塗料吹き付けのような小型機械で施工可能で、リバウンドはほとんどない。圧縮強度は7日強度で120Mpaに達し、多少の湧水のある箇所でも施工可能である。材料は高価であるが、設計上25mmの吹付けコンクリートが6mmのトンネルガード®に置き換わるので、吹付け面積当たりの材料費はほぼ同等となった。

(2) リーミング時における地表面付近の崩落対策

一部の立坑掘削においては、リーミング掘削時に地表面付近の弱層部で壁面の崩落が発生した。その場合には、緊急対策としてリーミング掘削を中断し、リーマーを崩落部下部まで一時下ろして、リーマー上から崩落部への吹付けコンクリートを施工した。

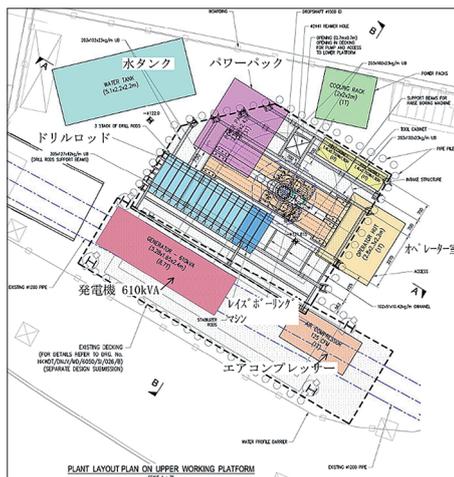


図-5 機械配置平面図

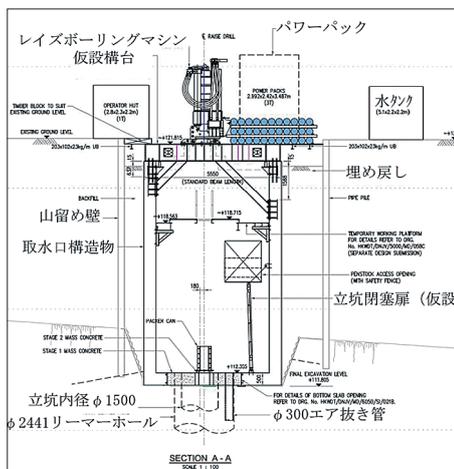


図-6 機械配置断面図

表-1 レイズボーリングマシンの仕様

メーカー	Atlas Copco 社	Sandvik 社
型 式	73RH	RHINO
メインドライブ	油圧	電動
リーミング速度	0-12.5 rpm	0-10 rpm
トルク	250 kNm	250 kNm
スラスト	5,000 kN	5,000 kN
ストローク	2,057 mm	2,057 mm

§ 4. 立坑の覆工

4-1 施工方法

取水立坑の覆工工法では、スリップフォームによる現場打ちコンクリートとプレキャスト RC ライニング (PC管) 組立て方式を比較検討した。その結果、現場へのコンクリートの搬入の難しさや、100mを超す立坑内への投入の問題等を考慮してプレキャストの採用により、現場でのコンクリート打設を極力減らすこととした。PC管は立坑に応じて3種類の内径を採用、現場へのアクセス道路の重量制限に応じて長さを調整した。

立坑の掘削が完了した後に横坑内の減勢槽の構築を行い、上部のPC管の設置を開始する。ただし、減勢槽の形状が立坑の掘削施工誤差1%を許容できる設計になっていないため、立坑の深さと精度によっては減勢槽の位置を変更する必要があった。その場合には減勢槽内で追加の掘削を行ってから構築を開始した。

PC管の設置には、特別に製作した建込み時の微調整用電動ホイストとCCTVカメラを備えた吊り金具を使用した。

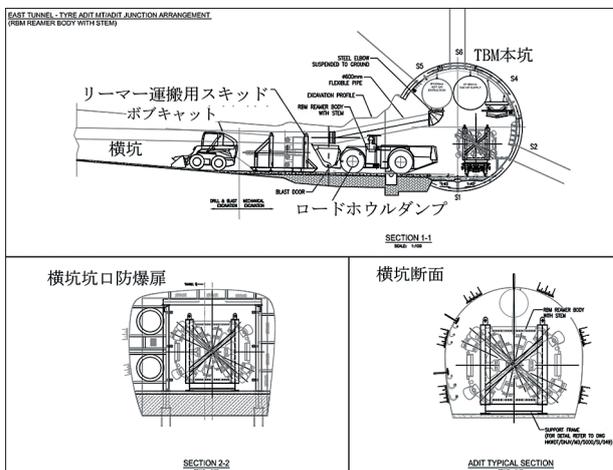


図-7 リーマー搬入状況図

PC管が設置済みライニング近くまで吊り下げられたのを確認後、電動ホイストを使用してPC管の設置・調整を行った(写真-7)。PC管背面には径300mmのエア抜き孔用の塩ビ管を接続し、貧配合コンクリート(設計強度5MPa)による裏込め充填を行った(写真-8)。PC管の設置は、一日平均で約6mの進捗であった。

4-2 施工設備

PC管の設置工は小口径の立坑内での作業となるため、施工設備の計画にあたっては、特に安全性について十分な検討を行った。

PC管の設置時には、作業員が退避するための昇降式避難用デッキを製作し、万一PC管が落下した場合にもPC管の落下に耐えられる強度の防護屋根をデッキ上部に設置した。この退避用デッキはPC管の中にあらかじめ設置したレールに沿ってクレーンで昇降させ、所定の位置でロックシステムにより固定される構造になっている(図-8)。また、退避用デッキの下部には避難用マンケージを用意した。これによって、例えばPC管吊り込み時にクレーンが故障して地上へ退避できない場合でも、別のクレーンを使用して避難用マンケージで立坑下部に退避することが可能である。幸いにも実際にこの装置を使用することはなかった。

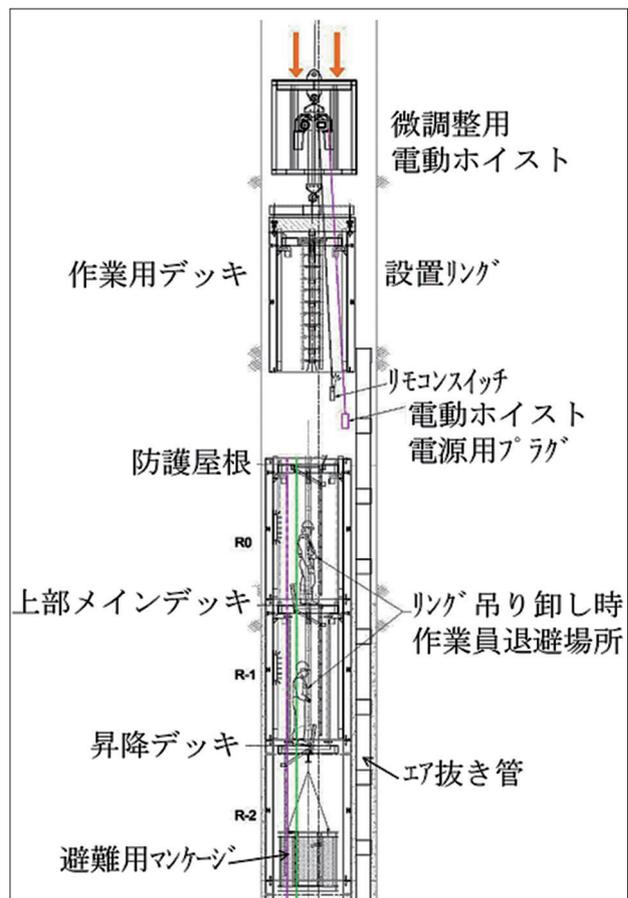


図-8 PC管設置状況図

§5. まとめ

本工事は、雨水排水トンネルの23箇所の立坑をレイズボーリング工法で施工するという過去に例の無い特殊工事であった。香港特有の岩線が浅く良好な岩盤という地質条件があつてこそこの工法ではあるが、市街地での複雑・困難な条件のもとで無事故・無災害で工事を完成することができた。今回のレイズボーリング工法には、海外メーカーの掘削機械を採用したが、著者の経験では日本メーカーのものに比べ全体的に洗練されており技術的にも進んでいると感じられた。レイズボーリング機以外の削孔技術等でも海外技術のほうが進んでいるものがまだ数多くあり、国内において海外の優れた技術を取り入れることによって、同時に国内の技術を発展させていく機会もまだあると感じられる。

本トンネルは2012年8月22日に通水式が行われた後、現在も香港島の洪水対策に寄与している。

最後に、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。

参考文献

- 1) 清水達郎：香港島西雨水トンネル工事における硬岩TBMおよび大深度取水立坑の施工，電力土木，2013 No. 363



写真-7 PC管吊込み



写真-8 裏込め完了