

硬岩 TBM における 事前高圧止水注入について

清水 達郎* 高橋 克典*
Tatsuro Shimizu Katsunori Takahashi

1 はじめに

香港島西雨水トンネル工事は、香港島において豪雨時に発生する市街地の洪水対策として計画されている雨水排水トンネルで、延長約 10 km の本坑と 32 箇所の取水立坑および立坑から本坑への横坑を築造するものである。本坑掘削は 2 台の硬岩用ダブルシールド TBM を採用した。掘削時は全線にわたり湧水を確認するための探査ボーリングを実施し、湧水量が規定量を超えている場合には、マイクロセメントによる事前高圧止水注入を実施することが要求されていた。

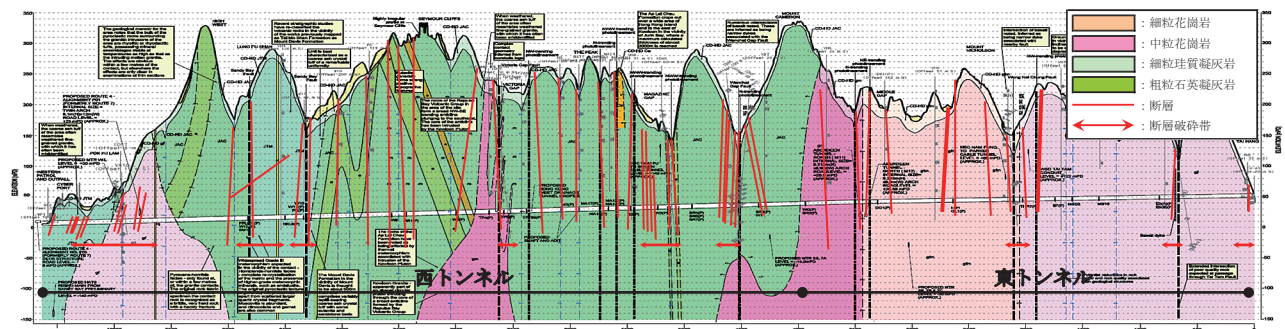
本稿では高圧止水注入の施工記録について報告する。

2. 工事概要

工 事 名：香港島西雨水トンネル
 発 注 者：香港特別行政政府 渠務署（下水道局）
 工事場所：香港特別行政政府 香港島西部
 工 期：2007 年 11 月 30 日～2012 年 6 月 30 日
 工事内容：本坑総延長 10,534 m
 TBM 掘削延長 9,360 m
 西側 TBM φ 8.28 m，東側 TBM φ 7.21 m
 取水口および立坑 32 箇所，総延長 2,325 m
 横坑 32 箇所，総延長 7,851 m

3. 地形・地質概要

本坑区間は、香港島北西部の都市化地域の南側の山腹に沿って位置し、最大土被りは約 300 m である。この地



図一 地質縦断面図

域は、切り立った岩肌や急傾斜区域で、概ね北側約 20°～30°に傾斜している。

主な地質は、凝灰岩および花崗岩である。事前調査によると、密な凝灰岩は 1 軸圧縮強度が 280～390 Mpa である。9 箇所断層破碎帯が想定されており、高圧の湧水が懸念されていた（図一）。

4. 高圧止水注入

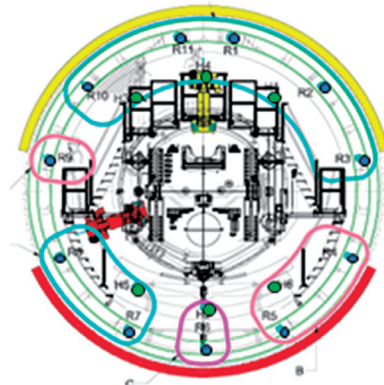
(1) 目的

TBM での掘削に伴う大量の湧水発生は、地下水位低下の原因となり、高層住宅地等の地盤沈下や、国立自然公園内の水源枯渇による動植物の生態系への影響が懸念される。そこで掘削に先行し前方探査孔にて湧水の有無を確認し、止水注入にて湧水量を削孔延長 1メートル当たり 0.2 ℓ/min 以下に抑える制限が設けられていた。

(2) TBM からの削孔

本工事は大規模な断層破碎帯の通過を考慮してダブルシールド型 TBM を採用した。ダブルシールド機は一般シールド機に比べ機械設備が輻輳しているため、後胴部からの削孔位置が制限される。

本工事ではトンネル線形に対し放射状に 11 箇所、切羽の正面に 6 箇所の削孔口を設けた（図二）。ただし、止水注入は放射状の 10 箇所から常時実施し、岩盤により削孔ロッドが途中で回収できない危険性がある切羽正面の 6 箇所と、インバートセグメントを撤去する必要のある 6 時方向の放射孔は、緊急時のみの使用とした。



図二 TBM の削孔口位置図

* 海外（支）香港西（出）

放射状の削孔口からの削孔角度は、止水の影響範囲を絞るため出来るだけ小さくなるように5度とした。

削孔には上下半用に1機ずつ計2機のドリフタ (Montabert社製 HC80R, 170 kg 級) を使用した。ラックアンドピニオン式のドリフタガイドセルをメインビーム外周に配置した。削孔はTBM前胴のテレスコ部を移動して岩盤を露出させ、ロッドを固定するための台座を用いることで削孔角度5という浅い角度でも削孔出来るようにした。削孔径はφ64 mmで削孔長は当初は止水効果が得られる切羽前方30 mまでとしたが、その後、実証を重ね60 mまで延長している。

(3) 注入ポンプ設備

削孔・注入作業はTBM掘進を休止して行うので、短時間にしかも限られた箇所から最大限の注入効果を発揮させることが重要となる。そこで注入ポンプの最大注入圧を12 MPaまで対応できる高圧注入式とし、かつ3箇所同時に注入ができるものとした。フランスのテック (TEC) 社製の電動油圧駆動式ピストンポンプ (2機種) を採用した。また、パッカーは15 MPaに対応できるトルコのスター (Star) 社製の膨張式ゴムパッカーを採用した。ミキサーポンプは切羽より150 m後方の台車に設置し、切羽近傍の制御盤により送り・停止の遠隔操作を行なった。

表一 ポンプ機械諸元

ポンプ名	PH2X5	PH15
最大注入圧	9 MPa	12 MPa
最大突出量	24 ℓ/min	70 ℓ/min
ピストン数	2系統	1系統

(4) 注入材

注入材は微細亀裂性岩盤に広範囲に浸透させる必要があることから北欧諸国の環境配慮型トンネルで主流である超微粒子セメントによるグラウトとした。注入材は150 m後方の台車で練り混ぜを行うため、その圧送距離を考慮しゲルタイムを30分、フローを39秒に調整した。

表二 配合計画

水セメント比	1.5 : 1
ブリージング率	1%
ゲルタイム	30分
フロー	39秒
超微粒子セメント	ブレン値 6,500 cm ² /g
凝結遅延剤	Tam社の TamCem HCA C×0.5%

(5) 施工方法

湧水量は切羽より探査孔にて60 m前方の各5 m区間で測定し、1 ℓ/min/5 m (0.2 ℓ/min/m) 以上の湧水が測定された場合、次の手順にて止水作業を行う。

(探査孔)

探査孔にて切羽より60 m前方の岩盤の湧水量を削孔

長5 m毎に湧水量を測定する。(1/10本)

(ルーティン1)

探査孔にて切羽より25 m前方の各5 m区間で1 ℓ/min以上の湧水が測定された場合、新たに25 m3本の注入孔を削孔し計4本の止水注入を行う。その後、25 mの確認孔 (I) を削孔し各5 m区間の湧水量を測定する。(5/10本)

(ルーティン2)

確認孔 (I) にて切羽より25 m前方の各5 m区間で1 ℓ/min以上の湧水が測定された場合、新たに25 m2本の注入孔を削孔し、計3本の止水注入を行う。その後、25 mの確認孔 (II) にて湧水量を測定する。(8/10本)

(ルーティン3)

確認孔 (II) にて切羽より25 m前方の各5 m区間で1 ℓ/min以上の湧水が測定された場合、新たに25 m2本の注入孔を削孔し、計3本の止水注入を行う。(10/10本)

各手順の探査孔、確認孔において切羽より25 m前方までの区間で湧水量が1 ℓ/min/5 m以下の場合、TBM掘削を継続もしくは再開する。

(6) 施工実績

西トンネルの岩質は主に凝灰岩で、TBM掘削延長5,975 m中3,463 m (掘削延長の58%) に対してグラウトを施工した。総注入量は5,451 m³で、注入対象地山368,192 m³に対して注入率は1.48%であった。

東トンネルの岩質は主に花崗岩で、TBM掘削延長3,385 m中1,407 m (掘削延長の42%) に対してグラウトを施工した。総注入量は387 m³で、注入対象地山135,391 m³に対して注入率は0.29%であった。

表三 施工実績

	西トンネル	東トンネル
TBM掘削延長(m)	5,975	3,385
グラウト注入実施延長(m)	3,463	1,407
グラウト注入対象地山(m ³) ^{注1)}	368,192	135,391
グラウト総注入量(m ³)	5,451	387
注入率(%)	1.48	0.29
削孔総延長(m)	33,800	8,500
削孔・注入回数(回)	178	81
削孔・注入施工時間(hr)	3,709	1,123

注1) 注入対象はTBM外周3 mと仮定する。

5. おわりに

2011年1月17日に本坑TBMトンネルは貫通し、坑内にてTBMの解体を行った。

現在は横坑覆工工事が最盛期を迎え、2012年6月末の引渡し検査を無事受けられるよう、鋭意努力している。

今後この施工報告が当社の類似工事の施工において一助となれば幸いである。