

# 香港地下鉄西港線 704 工区工事

## 市街地における岩盤地下空洞の掘削及び構築

岩田 修・清水 達郎

香港地下鉄西港線工事は、既設の港島線の西側終点駅である上環駅から香港島中西地区の市街地であるケネディタウンまでを結ぶ新設三駅を含む総延長約 3.3 km の地下鉄延伸工事である。このうち土木工事は主要三工区に分割して発注されており、当 704 工区は中間部に位置する延長 1.6 km の工区である。本工事には二つの新設地下空洞駅舎、単線トンネルの地下鉄本線上下線 4 本、連絡地下道および換気横坑、乗客出入口の建設が含まれている。

地下駅およびトンネルの掘削は発破工法を採用し、市街地の直下での施工のため作業時間や振動に対して厳しい規制下での施工である。一部の土砂地山区間では凍結工法を採用している。

キーワード：香港、パートナーリング、地下鉄、地下空洞、凍結工法

### 1. はじめに

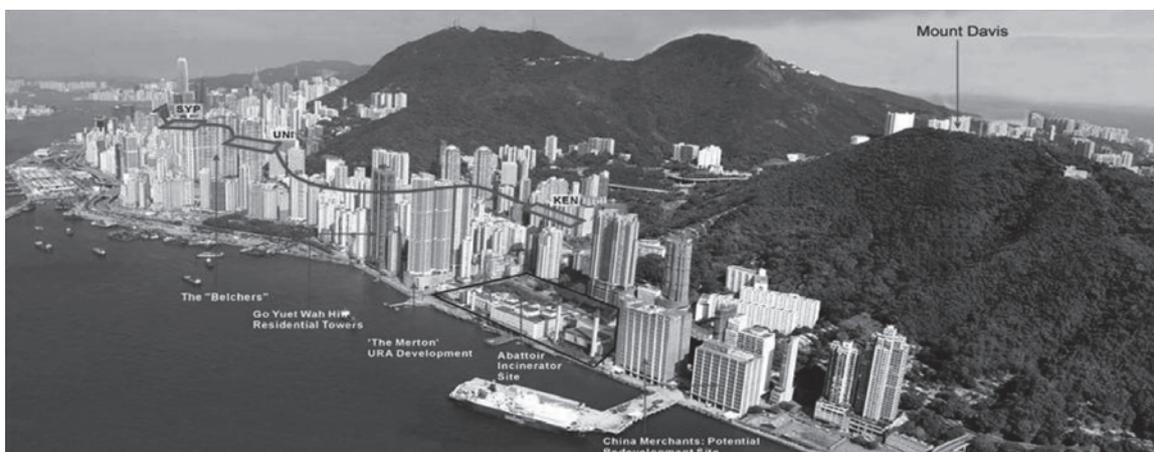
中華人民共和国の特別行政区である香港では、経済繁栄と雇用機会創出のため、総額 2,500 億香港ドルに及ぶ 10 大インフラプロジェクトが 2009 年から実施されており、その他にも地下鉄網の整備として、西港線、南港線、観塘延伸線工事等の大型工事が施工中である。

香港地下鉄西港線工事は、既設の港島線の西側終点駅である上環駅から香港島中西地区の市街地であるケネディタウンまでを結ぶ新設三駅を含む総延長約 3.3 km の地下鉄延伸工事である。土木工事は主要三工区に分割して発注されており、704 工区は中間部に位置する延長 1.6 km の工区である。本工事には二つの新設地下空洞駅舎、単線トンネルの地下鉄本線上下

線 4 本、連絡地下道および換気横坑、乗客出入口、換気塔の建設が含まれている。

地下駅およびトンネルの掘削は発破工法を採用し、市街地の直下での施工のため作業時間や振動、騒音に対して厳しい規制下での施工である。トンネル掘削のずり出しはベルトコンベアを採用し、トンネル内に設置した 2 台のクラッシャーから水平ベルトコンベアを経由し、立坑内に設置した高さ 46 m の垂直ベルトコンベアから郊外に搬出し、さらに岸壁のバージングポイントまで合計 1330 m をベルトコンベアで搬出した。

本工事は 2010 年 3 月に着工し、作業横坑の掘削を 2010 年 9 月に開始し、駅部の掘削は 2012 年 8 月に完了した。現在は駅舎および横坑その他の構築工事と一部横坑の掘削を行っている。一部の横坑の土砂地山区



写真—1 香港地下鉄西港線沿線風景



図一 1 香港地下鉄西港線 704 工区全体平面図

表一 1 西港線 704 工区工事概要

工事名称	香港地下鉄西港線西營盤(サイインブン)駅・香港大学駅およびトンネル工事
工事場所	香港特別行政区 香港島西部 ケネディタウン地区
工期	2010年3月10日～2014年6月30日 52ヵ月
発注者	香港鐵路有限公司 (MTRC)
施工者	ギャモン 50%, 西松建設 50% 共同企業体
工事金額	548億円
契約方式	ターゲットコスト方式
工事内容	<b>駅舎</b> 西營盤駅 掘削断面積：329 m <sup>2</sup> 延長：187 m 掘削方式：発破掘削 掘削数量：62,028 m <sup>3</sup> コンクリート：11,681 m <sup>3</sup> 香港大学駅 掘削断面積：324 m <sup>2</sup> 延長：230 m 掘削方式：発破掘削 掘削数量：74,475 m <sup>3</sup> コンクリート：13,464 m <sup>3</sup>
	<b>トンネル</b> ケネディタウン駅～香港大学駅上下線 断面積：31 m <sup>2</sup> 延長：469 m × 2本 複線断面 90 m 香港大学駅～西營盤駅上下線 断面積：31 m <sup>2</sup> 延長：564 m × 2本
	<b>横坑</b> 15箇所 総延長 3,322 m 掘削断面積：35～83 m <sup>2</sup> , 馬蹄形 覆工厚：300～1000 mm 機械掘削及び発破掘削
	<b>エントランスおよび換気立坑</b> 9箇所 掘削：108,475 m <sup>3</sup> コンクリート：58,328 m <sup>3</sup>

## 2. 地形・地質概要

本工事は香港島西部の沿岸部に位置し、最大土被りは80 mで地下空洞駅舎の土被りは15～60 mである。香港島は山地が全体に広がり、平野部が少なくビクトリア湾沿いの狭い沿岸部に市街地が位置している。そのため、市街地においても地下20～30 mで岩盤が出現する。本工区の地質は、大部分が堅固な花崗岩(一軸圧縮強度100～200 MPa)が占め、工区の西側には凝灰岩が出現する。また、乗客出入口付近の低土被り箇所には含水比の高い土砂地山が存在する。

## 3. パートナリング

本工事の契約は、パートナリングによるターゲットコスト契約形式が採用されている。パートナリングとは、複数の利害相反する人々がチーム構成員となって、プロジェクトの目的達成に向かって協同行動をするプロジェクトマネジメントの手法である。建設産業では1990年代後半に英国で取り入れられ、香港では2000年初期から一部の政府関係発注工事や民間工事に導入されている。

パートナリングにおいては、工事発注前から、発注者と請負者が共同で入札作業を行う。着工後はオープンブックと言う思想に基づき、下請け発注や材料発注ならびに原価管理について発注者と請負者が共通の管理システムを使用し、協同で工事予算を管理するシステムが採用されている。

本工事の入札時には2段階に分割されて入札作業が行われた。ステージ1では、主に請負者側の組織・スタッフ構成・マネジメントスタッフの能力ならびにそれらに係る経費および請負者側の一般管理費および

間では施工延長80 mの凍結工法を採用している。  
 本工事の沿線風景を写真一1に、全体平面図を図一1に示す。また、工事概要を表一1に示す。

現場荒利益の率等を企業先に提出した（経費・一般管理費・荒利益などの間接費をフィーと呼び、固定費として発注後は請負側の自由裁量で管理される）。

ステージ1の入札後、企業先は2グループに絞り込み、ステージ2の入札が2グループに対して実施される。ステージ2の入札では、ステージ1とは異なり直接工事費（材・労・外・機械・工事仮設・電力など）をターゲットコストとして積算する。この積算作業期間中には、ワークショップと称するミーティングが適宜開催され、企業先に対してどのような工法を採用して施工を行うのかプレゼンテーションを行う。それによって、企業先と請負者側で双方の理解を深めて納得した施工方法に基づいてターゲットコストを積算することになる。

その後、ステージ1で合意したフィーを加えた全体工事費を提出することになる。2グループからの選択は、最終の技術的なプレゼンテーションの後に、工事費ならびに技術面の両面が評価され1グループに発注される。

#### 4. 掘削工事

##### (1) 発破工法

香港島の市街地では、地表面から深くないところで風化していない堅固な岩盤が出現するため、市街地でも発破工法によって掘削を行う場合が多い。本工事では、駅舎と本線トンネルの他、連絡地下道および換気トンネルを建設するため、断面の大きさ・形状が多岐多様に亘っている。また、TBMによる施工では掘削時の連続的な騒音や振動が夜間において問題になることが多く、むしろ騒音公害が発生しやすいという観点から、制御発破による発破掘削を採用している。

工事場所が市街地の直下であることから、発破を行う地表面付近には一般のビルに限らず、水道・電気等の埋設ライフラインや法面・擁壁、道路高架橋、歴史的建造物など、数千を数える多くの振動受信体が存在しており、発破振動の制限を受ける。

発破箇所での1段当たりの許容火薬装填量は、香港の経験式であるLi & Ng'sによる発破振動予測式を用いて、受信体毎にそれぞれ設定された許容振動値と、受信体から発破箇所までの距離から逆算し、全ての受信体の中で最小の火薬装填量を選択することで決定する。

$$MIC = (D / (K / PPVa))^{(1/B)^{0.5}}$$

ここで、

MIC：Maximum Instantaneous Charge、1段当たりの許容火薬装填量

D：振動受信体から発破箇所までの距離（m）

K：現場定数、香港鉱山局推奨値（84%信頼度曲線）644

PPVa：Allowable Peak Particle Velocity、許容振動値（mm/秒）

B：現場定数、香港鉱山局推奨値（84%信頼度曲線）1.22

上記の式を用いて、香港大学駅舎では発破箇所により1.2～4.4 kg、西營盤駅舎では0.96～2.2 kgとして発破の計画を行った。ここで、KとBは現場定数であるため、実際の振動計測値から随時回帰分析を行って見直しを行うことが出来る。当該工事では鉱山局の合意を得て継続的に回帰分析を行い、ある程度土被りの有る両駅舎では最小値をそれぞれ2.82 kg、2.14 kgまで引き上げ、一発破進行長を延ばすことが出来た。

一方、土被りの浅い区間、すなわち受信体と発破箇所の距離が近い場所では、振動計測値の振れ幅が大きくなり、回帰分析を行うと許容火薬装填量が減少する方向に働く。このため、土被りが低く許容火薬装填量の低い区間の通路トンネルでは、秒時差精度の高い電子雷管を使用し、デッキ装薬によって振動を抑えながら一発破進行長を延ばすという試みを行った。

図-2に示すように、デッキ装薬とは1つの装薬孔内に親ダイと込めものを複数配置し、自由面側のデッキ（Deck A）から孔底側のデッキ（Deck B）に向かって順次起爆するもので、当工事で試みたダブルデッキでは一度の発破で2倍の発破進行長を得ることが出来る。

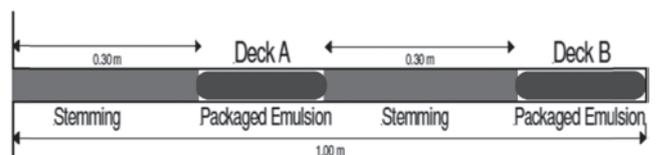


図-2 デッキ装薬試験施工装薬例

本工事の2箇所の通路トンネルにて計5回の試験発破を行った結果では、一発破進行長はほぼ予定通り確保でき、電子雷管の使用により振動値は通常発破と同様に抑えられ、回帰分析によって装薬量を増やせることが確認された。また、当初は装薬に時間が掛かったが、作業員の慣れと共に作業時間も短縮し、通常発破とあまり変わらないサイクルで施工することができた（写真-2, 3）。

##### (2) 地下空洞の掘削

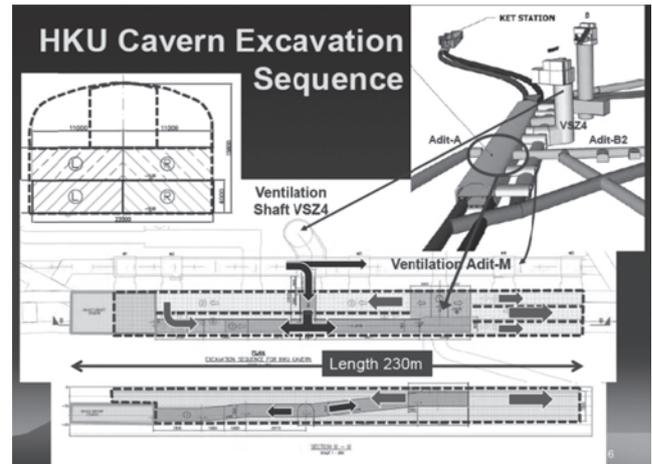
当該工事では、掘削断面高さ16 m × 幅22 m × 長さ230 mの香港大学駅と、同長さ187 mの西營盤駅



写真一 2 ダブルデッキ装束後



写真一 3 ダブルデッキ発破後



図一 3 香港大学駅舎 施工順序図



写真一 4 香港大学駅掘削状況 (上半西向 半分割)

の2つの駅舎地下空洞を施工している。

地下鉄駅舎はトラック（プラットフォーム）レベルとコンコースレベルの2階建て構造になっており、鉄道トンネルは地下空洞の下部のトラックレベルに、各通路トンネルは2階部分に当たる駅舎上部のコンコースレベルに連結する。また、地下空洞下部の掘削時は通路トンネルからのアクセスは遮断され、トラックレベルからアクセスする必要がある。このため、加背割り・掘削手順と工程は、地山状況を考慮しながら地下空洞及び同時に施工される周辺トンネルへのアクセスを重視して決定した。

香港大学駅舎の掘削は、当初は通路トンネルから掘削する計画としていたが、駅舎に平行するトラックレベルの換気トンネルの駅舎との接続部からアクセスした方が早く駅舎掘削を開始出来る結果となったため、この接続部より上半盤まで駆け上がる導坑を掘削し、そこから切り抜けを行うことに変更した。施工手順図を図一3に示す。

上半の切り抜けの後、東側は地山状況が余り好ましくないと想定されたため、頂設導坑先行の3分割掘削を行った。

中段・下段ベンチ各4mの掘削に当たっては、A通路トンネルへのアクセスを残すため、切り抜け部分

の岩盤は残し、最後に撤去することとした(写真一4)。このため、西側では水平孔で発破掘削を行ったが、この岩盤と駅舎東端の間は鉛直孔で発破を行っている。

### (3) ずり出し工法

前述の通り、本工事の地下工事は狭い沿岸部に密集した市街地の直下における工事であることから、トンネルへのアクセスは限られた公共遊休地を使用することになる。このため、計画段階から駐車場・公園等に設置した2箇所の作業立坑から、作業横坑を通じてのトンネル施工であった。このため、立坑からのずり出し速度が掘削工程を決定する。

作業立坑は住宅・商業・病院等のビルに囲まれており、騒音・粉塵抑制のために防音パネルを使用した防音建屋で立坑を囲うことが不可欠である。各立坑の大きさ（直径14m×深さ46m、矩形12.2m×30m×深さ18m）と立坑上のスペースからの機械・材料の投入・搬出方法のほか、一般道路を経由したトラックによる二次搬出方法等を考慮して立坑からのずり出し工法を検討した結果、20tから30tのガントリークレーンを防音建屋内に設置し、10m<sup>3</sup>のずりバケット

を使用してずり出しを行うこととした。

一方、14 m 径の立坑は荷役港と 6 車線道路を挟んで海岸線近くに立地しているため、ある程度掘削が進んだのちにベルトコンベアを設置して直接荷役港までずりを運び、荷役船に載せて搬出することでずり出し速度の向上を図った。コンベアは防音建屋から荷役船に至るまで、すべて防音囲いで覆っている。図—4 にコンベア設備配置図を示す。

コンベアの計画は、掘削可能切羽の数と掘削手順から日当たりの最大ずり処理量を 4,700 t と設定し、ベルトコンベア及びクラッシャーの能力と配置、経路の選定を行った。ずりを破碎するためのクラッシャーは、ずり仮置きスペースとアクセスを確保するため 2 箇所を設置することとし、時間当たり処理量 250 t と 200 t の 2 台のクラッシャーを選定した。クラッシャーは香港大学と西營盤側からの掘削ずりを主に処理するものとし、香港大学駅西端と東端に設置した。また、立坑内でずりを垂直に運ぶ垂直コンベアの能力には余裕を持たせ、時間当たり 800 t とした。写真—5 に垂直コンベアを示す。

結果としては、各コンベアの能力は十分であったが、各クラッシャーの生産能力はそれぞれ時間当たり約 160～200 t 程度と計画を下回った。主な理由としては、



写真—5 垂直コンベア

花崗岩の破碎ずりが扁平的に成り易く、ジョープレート抜けてホッパーの目詰まりやベルトコンベアの破損を生じさせることから、計画のプレート幅 150 mm を 115 mm 程度まで下げたためである。このため、バックアップとして用意していたクレーンとバケットによるずり出しを併用して、能力不足を補うこととなった。

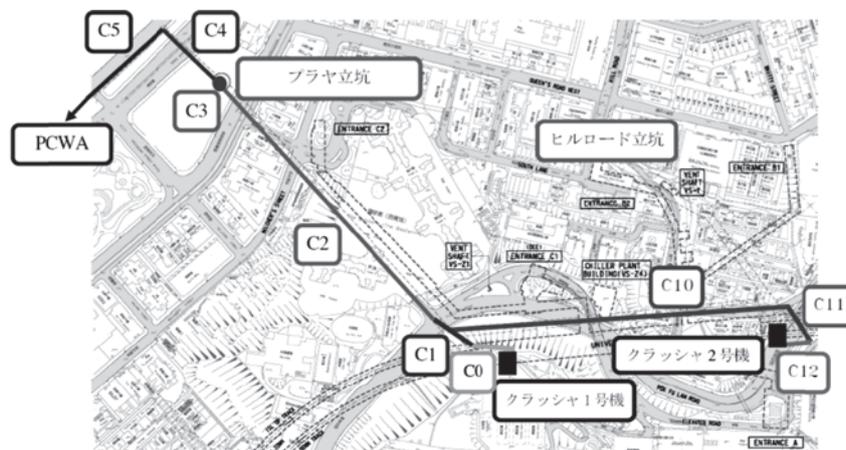
### 5. 覆工工事

トンネルおよび駅部地下空洞の掘削が完了した区間から二次覆工工事を行う。本工事は、地下駅部と本線トンネル、連絡横坑でそれぞれ断面が異なるため、合計 19 断面、28 基のセトルを使用している。二次覆工は場所によって排水（ドレイン）トンネルもしくは非排水（アンドレイン）トンネルで設計されており、インバートから上部については全面に防水シートを施工している。非排水トンネル部分はインバート下部についても防水シートを施工する。コンクリートは地上から立坑を経由してポンプ圧送で運搬し、1 日 500 m<sup>3</sup> 前後のコンクリートをほぼ毎日打設している。

#### (1) 駅舎部構築

駅舎部はベーススラブ、側壁および中壁、柱、コンコーススラブ、アーチ部からなり、それ以外に機械室等の隔壁やプラットフォームを施工する。両駅とも排水構造のトンネルであり、トンネル周辺の地下水は防水シート背面に設置したジオテキスタイルを通り、ベーススラブ下部に設置した排水パイプで集水する。ベーススラブ下部には排水層となる砂利を敷き詰め、柱と側壁の下部は岩着となる。駅部の標準断面図を図—5 に示す。

側壁（高さ 6.6 m）は、防水シートを施工した後に鉄筋を組み立て、セパレーター不要のシステム型枠（図



図—4 コンベア設備配置図

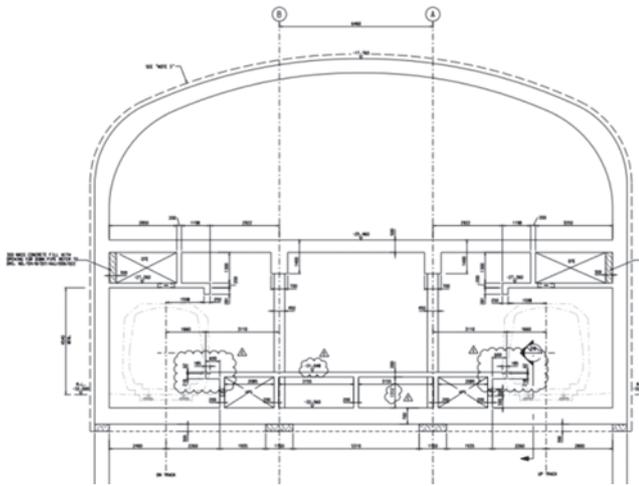


図-5 駅舎部標準断面図

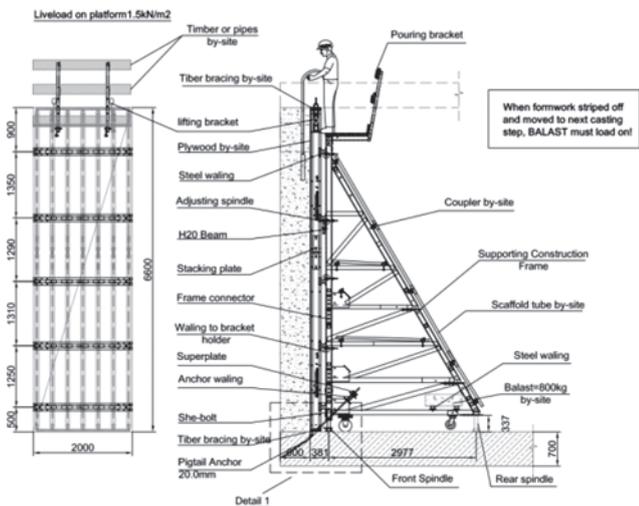


図-6 駅舎部側壁用システム型枠

—6) を使ってコンクリートを打設した。

コンコーススラブを打設した後は、アーチ部に防水シートを設置し、鉄筋を組み立てた後に、セントルを使用してコンクリートを打設する(写真-6)。セントルの長さはコンクリートの打設量(約170m<sup>3</sup>)から6mとし、それぞれの駅で2基ずつ使用している。香港大学駅で45ブロック、サイインブン駅で33ブロックの打設である。



写真-6 駅舎部セントル

### (2) コンクリート長距離圧送

コンクリートは地上部に設置したコンクリートポンプで地下の打設箇所までポンプ圧送し、圧送距離は最大で1100mである。圧送距離が500mを超える場合には中継ポンプを設置し、2台のポンプで打設箇所まで圧送している。

## 6. 凍結工法

一部の連絡地下道の土砂地山掘削区間については、地上建物の沈下防止のためにトンネル掘削の補助工法として地盤凍結工法を採用している。凍結区間は乗客出入口となる立坑間の掘削断面積33m<sup>2</sup>の横坑掘削部分で、80mと20mの2箇所である。凍結区間の全体平面図を図-7に示す。

凍結工法は、立坑内から削孔した水平孔に三重管の凍結管を挿入し、冷却したブラインを循環させて掘削周囲の地盤を凍結させるものである。所要の凍結期間を経て掘削時に必要な厚さの凍土が生成された後に立坑側からNATM工法にて掘削を開始する。掘削はツインヘッダーを使用してマイクロベンチカットを行い、鋼製支保工と吹付けコンクリートにて早期に断面を閉合する。

本稿執筆時点の4月中旬では、水平削孔が80%完了し、6月中旬から凍結を開始し、9月から掘削を開始する予定である。

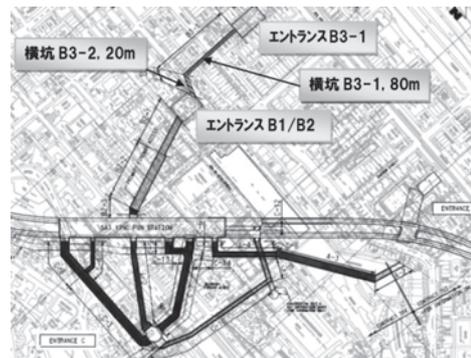
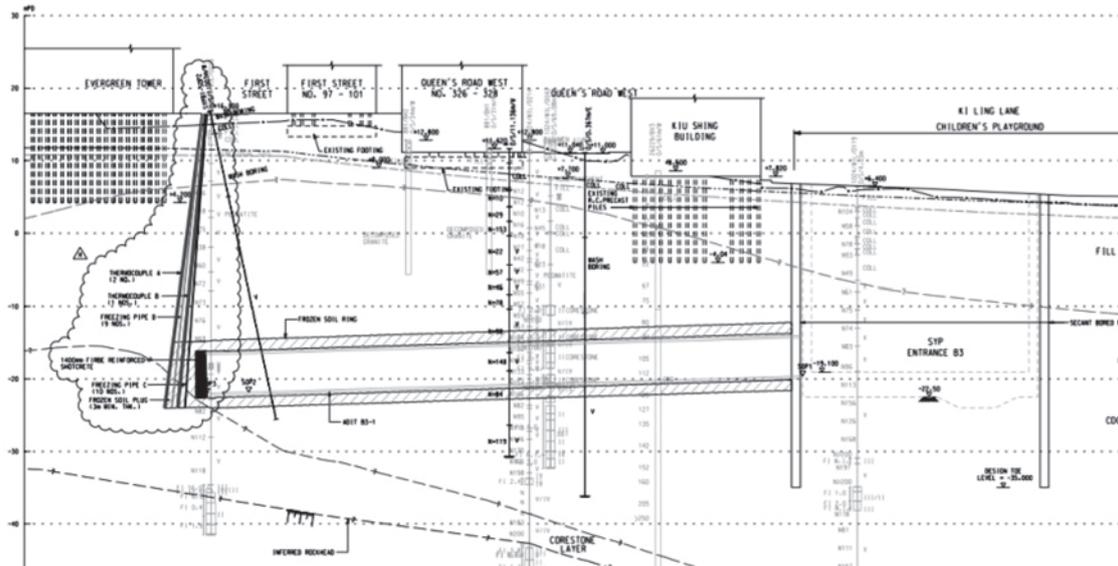


図-7 サイインブン駅横坑地盤凍結工法区間

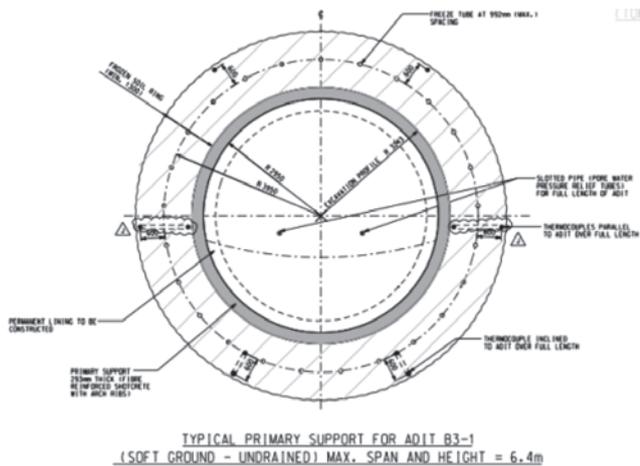
### (1) 凍結工法

本工事の地盤凍結工法にはブライン方式を採用している。初期地中温度は24℃と仮定し、凍結管に循環するブライン温度(冷却温度)は-25°、凍土は-10°を想定している。

凍結管は掘削面から700mmのトンネル外周に25本、孔間隔993mmで配置し、さらに凍土生成時の温度管理のために6本の検温孔を設置する。また、水平区間の終点部は凍結区間の閉塞のための鉛直凍結管が



図一八 横坑 B3 凍結区間縦断面図



図一九 凍結区間断面図



写真一七 凍結機防音室

20本と検温孔3本を配置している。凍結区間の縦断面図を図一八に、断面図を図一九に示す。

-10°で造成された凍土の力学的特性は、一軸圧縮強度：4.5 MN/m<sup>2</sup>、曲げ引張り 2.7 MN/m<sup>2</sup>、せん断強度 1.8 MN/m<sup>2</sup>と仮定しており、掘削に必要な凍土厚を1.3mとしている。凍結に必要な期間は削孔精度次第であるが、孔曲りがゼロで設計通りに削孔できた場合には64日、削孔間隔が10cm大きくなるごとに凍結期間は約二週間増加する。そのため、削孔後の孔曲りを測定し、必要な場合には追加孔を設置して凍結期間が最小になるようにしている。

凍結に使用する主な機械は、冷凍機（冷凍能力260 kW）3台と、冷却塔（凝縮能力453 kW）3台で、凍結機は24時間稼働する必要があるため、防音壁内に設置している。

当該工事箇所は市街地に位置するため、夜間の騒音は60 dB以下に抑える必要があり40 dB程度の低減効

果のある防音パネルを設置している（写真一七）。

## (2) 水平コントロールボーリング

前述のように凍結所要期間は削孔精度によって大きく変わるため、削孔には高精度が要求される。本工事では、84mの水平削孔を高精度で削孔するために、米国のToro社のステアラブルマッドモーター（図一十）とINROCK社のPARATRACK<sup>®</sup>システムを使用してMWD（Measurement While Drilling）によって方向制御を行いながら削孔した。

削孔は、孔曲りを制御することと山留め壁からの地下水の流出を防ぐためことから、ケーシングによる削孔は使用できない。そのため、削孔口元に防噴装置（Blowout Preventer, BOP）を設置して、ベントナイ

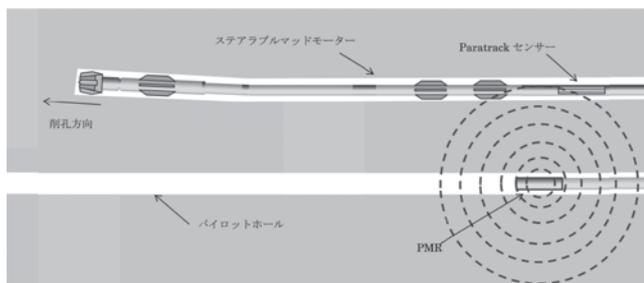


図一十 ステアラブルマッドモーター概念図

ト泥水を加圧充填しながら裸孔にて削孔を行った。削孔後は孔壁保護のために塩ビ管を挿入し、塩ビ管と地山の間にシールグラウトを充填する。

ステアラブルマッドモーターはロッドを回転させることなく、泥水の送水圧によってビットのみを回転させることのできる機械で、ビットが取り付けられたヘッド部のベントサブを傾斜させることによってビットを任意の方向に傾斜させたまま削孔ができる。ベントサブは事前に0.3～3℃まで角度を変えることができるが、角度を変えるためにはマッドモーターを引き抜いてから行う必要がある。従って通常は一度設定した角度を途中で変えずに、ロッドを回転させずにビットの回転のみで削孔するスライディングモードとロッドを回転させるローテーティングモードの二つのモードを切り替えながら削孔向きを制御する。ローテーティングモードの場合は、マッドモーターは振れ回りのような状態で回転し、拡径しながら直線で削孔できることになる。

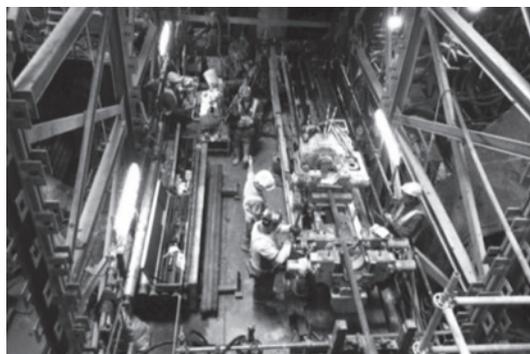
このマッドモーターに削孔位置をリアルタイムで計測するためのセンサーを組み込んでおくことによって、削孔の軌跡が分かり、方向制御が可能になる。今回使用した計測システムは、あらかじめ削孔して孔曲り計測を行ったガイドホールに強い磁気を発生する装置PMR (Passive Magnet Ranging) を削孔に追従させて挿入し、マッドモーターに組み込んだParatrack<sup>®</sup>センサーによって、削孔深度、傾斜角、方位角を読み取り削孔位置を計測するものである。このシステムの利点は、今回のような地中ケーブルや既設杭の多い都市部や山留めに多くの鋼材が使用されている立坑からの施工においても、磁性の影響を受けずに計測が行えることである。MWDによる方向制御を行う削孔は、HDD (Horizontal Directional Drilling) と呼ばれ、石油掘削の分野で多く使われている技術であるが、土木分野での国内の実績はまだ少ない。今回 Paratrack<sup>®</sup> システムの使用にあたっては、英国の専門の計測会社から計測器とともに、計測専用のガイダンスエンジニアを香港に呼び入れて施工を行った。図一11に Paratrack<sup>®</sup>



図一11 Paratrack<sup>®</sup>システムによる HDD 概念図

システムによる HDD の概念図を示す。

実際の削孔精度は、地山の状態や転石の有無にもよって左右されるが、均質な地山の場合には、84 mm で± 300 前後 (0.4%) で削孔することができた (写真一8)。



写真一8 HDD 施工状況

## 7. おわりに

本工事は2010年3月の着工以来3年を経過し、二次覆工の最盛期を迎えている。今後は軌道工事や内装工事が輻輳して行われ、多くの業者が同じ地下で作業を進めていくことになる。一方、今回紹介した凍結工法による掘削等の難易度の高い工事箇所も残っており、工事完了まで安全で合理的かつ経済的な施工管理が必要とされる。

最後に、西港線が香港島住民の足として活躍し、香港の経済発展に寄与することを期待して本稿の結びとしたい。

JICMA

### 【参考文献】

- 1) 岩田, 亀山, R. Stevens ほか: Double Deck Blasting for Rapid Tunnel Advance in Hong Kong, International Society of Explosives Engineer Conference 2013
- 2) 長縄成美, 「最新の坑井掘削技術 (その2)」, 石油開発時報 NO.149

### 【筆者紹介】

岩田 修 (いわた おさむ)  
西松建設株  
海外支社 香港支店 観塘延伸線工事事務所  
副課長



清水 達郎 (しみず たつろう)  
西松建設株  
海外支社 香港支店 西港線出張所  
副所長

