

# 香港地下鉄観塘延伸線トンネル及び何文田駅新設工事 市街地における大規模オープン掘削と明かり発破

岩田 修

香港地下鉄観塘延伸線工事は、香港九龍地区を東西に走る既設の観塘線の西側終点である油麻地駅から黄埔地区までを結ぶ、総延長 2.1 km の地下鉄延伸工事である。当工事では、そのすべてのトンネルと、香港地下鉄で最大の駅舎となる何文田駅の新設を行っている。

幹線道路に隣接する市街地での施工でありながら、地下駅舎を発破・開削工法で掘削している。土被りの浅いトンネル発破掘削と共に、地表面沈下や飛石、騒音・振動に対する、厳しい制約下で施工を行っている。

当稿では、本工事のうち特徴的な工種である、大規模オープン掘削と明かり発破について報告する。

キーワード：香港，地下鉄，大規模オープン掘削，明かり発破，電子雷管

## 1. はじめに

香港では、経済発展、雇用の創出を目的とし、中国への返還 10 周年となる 2007 年の施政方針演説において、総額 3 兆円を超える 10 大インフラプロジェクトが打ち出された。これらのプロジェクトは中国本土との地理的・文化的結び付きを強化するという側面を持ち、2009 年頃から実現化し始めたが、香港特別行政区域内におけるその他複数の地下鉄網、道路網整備等の大型土木工事や再開発事業も相まって、現在の香港建設市場は過熱とも言える活況の様相を呈している。

2011 年 6 月に着工された観塘延伸線工事は、香港九龍地区を東西に走る既設の観塘線の西側終点駅である油麻地 (YMT) 駅から黄埔 (WHA) 地区までを結ぶ、総延長 2.1 km の地下鉄延伸工事であり、発注者は香港鐵路有限公司である。このうち、主要土木工事は二工区に分割して発注されており、当工事 (1001 工区) では新規ターミナルとなる黄埔駅を除くすべてのトンネル及び何文田 (HOM) 駅の新設を行っている。また、本工事には既設油麻地駅の改造やトンネル避難及び換気立坑の新設のほか、近隣住宅地から何文田駅へのアクセスを提供する屋根付き歩道橋や連絡地下道、バス停留施設等も含まれる。

何文田駅は、観塘延伸 (KTE) 線と現在施工中の沙田・中環 (SCL) 線との乗換駅であることから、約 230 m の駅舎が十字に交差する二層構造となっており、香港地下鉄では最大の駅舎となる。市街地の地下

駅ながら、下層 (KTE 線) 駅両端のトンネル接続部でそれぞれ約 330 m<sup>2</sup> × 80 m の地下空洞となっている部分を除き、最深部 65 m、約 70 万 m<sup>3</sup> を発破・開削工法で掘削し、掘削床から地表まで 7 階建の駅舎を構築する。また、駅舎直上は将来建物建設用地として活用されることから、駅舎はその基礎を兼ねており、壁厚が 1.5 m、スラブ厚が 1 m と非常に重厚な構造となっている。

トンネル工事は、テニスコート、公園等の公共地内に設置した 2 箇所の立坑から、住宅・商業ビルや鉄道営業線・幹線道路の直下を通る複線断面を、それぞれ東西両方向に掘削した。一部の機械掘削区間を除いては発破工法によって掘削を行うが、最小土被りが 15 m 程度と非常に小さいことから、発生騒音・振動の周辺環境への影響が懸念されるため、全線で制御発破を行う必要があった。また、すべての掘削ずりは立坑からクレーンとずりバケットで搬出したが、重機・爆薬等すべての掘削資機材の搬出入に加え、掘削切羽と同時施工となる覆工の資機材供給も立坑から行っており、アクセスが非常に限られた中での工事となった。

本稿執筆時点の 2016 年 2 月には、駅舎工事、トンネル工事とも掘削、構築工事を完了しており、床・壁タイルや天井版などの仕上げ工事及び駅舎周辺の外構工事を急ピッチで進めている。トンネルでは既に電車の試運転も開始され、2016 年第 3 または第 4 四半期の開通に向け、消防局や鉄道局の検査が開始されたところである。

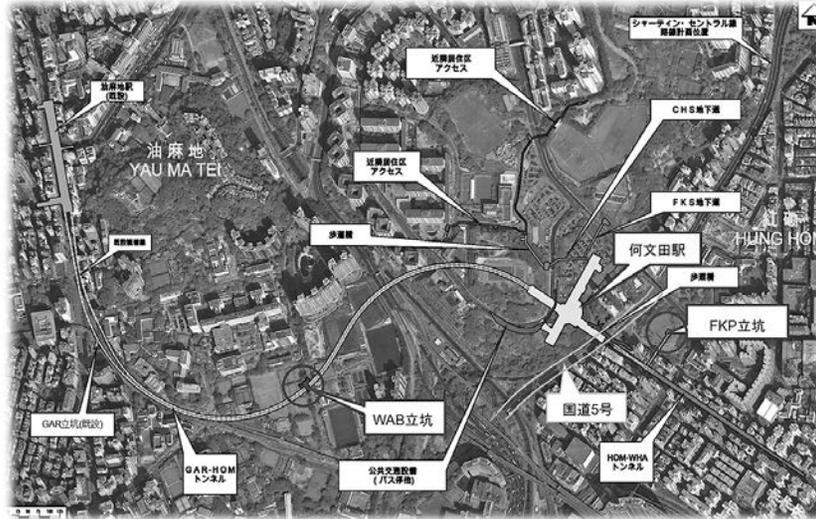


写真-1 全体平面写真

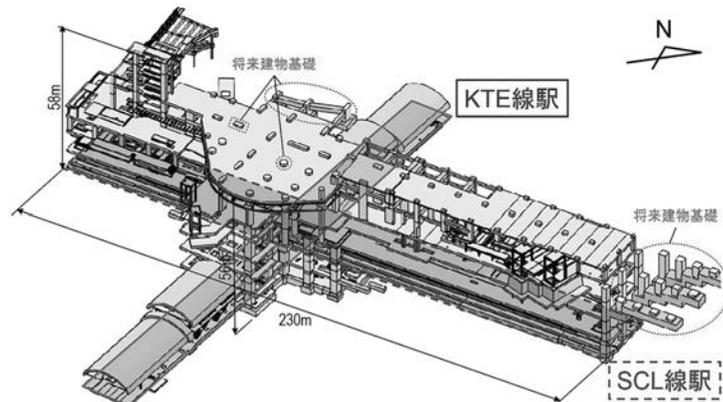


図-1 何文田駅舎 鳥瞰図

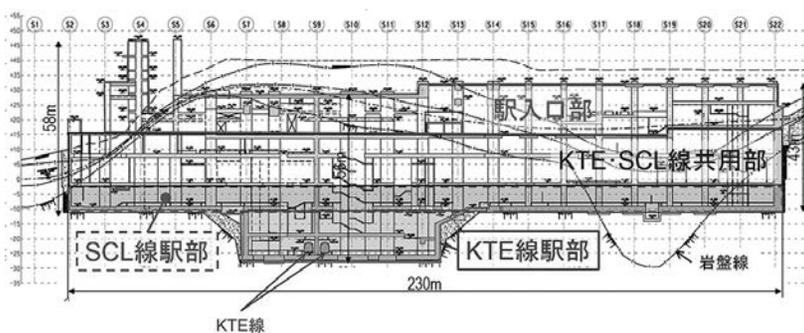


図-2 何文田駅舎 KTE線断面図 (SCL線縦断面図)

本工事の全体平面写真を写真-1に、何文田駅舎鳥瞰図とKTE線駅断面図を図-1, 2に示す。

## 2. 地形・地質概要

図-3に地質平面図を示す。本工事は香港九龍半島西に位置し、全体としては堅硬な花崗岩で覆われた地域であるが、何文田駅南側は沿岸部の埋め立て地となっている。このため、海に注ぎ込んでいた沢状地形

が旧来の海岸線に沿って散見され、図-2にも示した通り、駅舎北側には岩盤線が大きく落ち込んだ谷部が存在する。駅舎は西から東に向かって下る傾斜地に建設され、岩盤線までの土層は、表層盛土、CDG(完全風化花崗岩)、HDG(強風化花崗岩)から構成されている。

何文田駅から黄埔駅までのトンネルは本来の海岸線とほぼ並行に走っており、土被りが非常に浅い。油麻地駅から何文田駅においても、トンネル線形に沿って



図一三 地質平面図

20 余りの断層破碎帯が横断していることから、90 m 程度となる最大土被り部分においても岩盤線がトンネル天端付近まで落ち込んでいる区間が存在する。

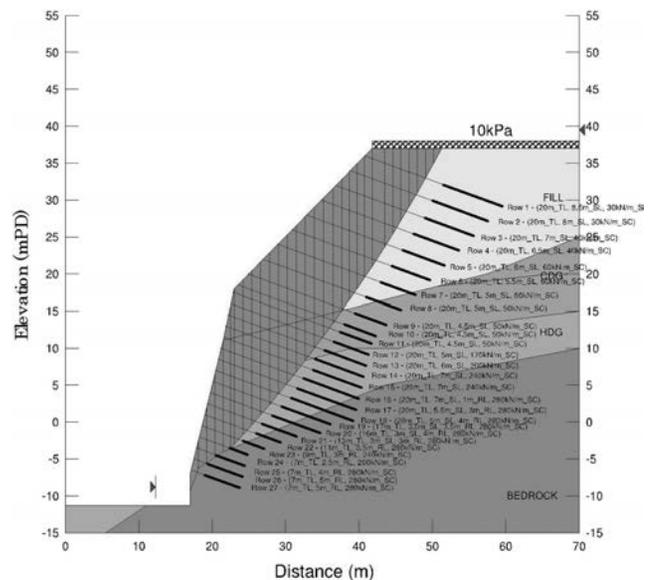
### 3. 何文田駅舎北側 大規模オープン掘削

#### (1) 土留め支保工の検討

前述の通り、駅舎北側には岩盤線が大きく落ち込んだ谷部が存在しており、発注者は鋼管土留支保工による掘削計画を行っていた。この工法は地下水位低下のコントロールに優位性はあるものの、掘削時の支保設置に時間が掛かることから工程上不利となり、かつ構造物施工時にも切梁腹起し・中間杭の撤去・盛換が必要となることから、打設割付への制約や更なるタイムロスが発生する。一方、一般的な勾配での法面開削掘削では、土工数量が増大するための工程ロスが大きく、また市街地における施工のため工事現場範囲に限りがあることから、実施が不可能である。

このため、事前調査や現地踏査を踏まえ、安定計算や変動予測解析による検討を重ねた結果、グラウト遮水壁を構築したのち、吹きつけコンクリートとソイルネイルを法面補強材として使用した、最大勾配 75 度の急勾配法面で掘削を行うこととした。

ソイルネイルの標準的な配置は 2.0 m × 2.0 m で、法面安定解析の結果により 7 ~ 20 m の長さを用いている。将来建物基礎との競合を避けるため、一部では材料に GFRP を使用した。変動予測との整合性を確認するため、自動計測を含めた総合的な計測計画を立案し、傾斜計、地下水位計、ソイルネイルひずみ計、法面変位計、地表面沈下計等を実施し、観察計測により慎重に掘削を行った。また、掘削中には、計測結果をフィードバックし、逆解析により設計パラメータの確認を行った。図一四に、ソイルネイルの配置断面図を示す。



図一四 ソイルネイル配置断面図 (西側法面)

#### (2) 大規模オープン掘削

写真一 2 に、掘削状況写真を示す。掘削にはブレッカーおよびバックホウ計 16 台を使用し、ピーク時で約 2,000 m<sup>3</sup>/日の土砂・軟岩掘削を行った。掘削残土は 15 トンダンプロックで指定土捨場まで搬出しており、掘削が進むに連れ、一番レベルの高い西側一般道 (写真向って右) より北側一般道 (写真手前)、東側の幹線道路 (国道 5 号, 写真奥) へとアクセスを切り替えながら施工を行った。

工事現場範囲が限られていることから、このアクセスは駅舎北側のオープン掘削部分だけでなく、駅舎南側の発破掘削部分 (写真奥) への共通アクセスとなる。このため、アクセス切換え時期は両施工箇所が進捗によって左右されるが、後述するように発破掘削の初期に遅延が発生したことから、掘削工程の短縮効果は縮小することとなってしまった。一方、支保方式の変更と土工数量増の最小化による所定のコストダウン効果



写真一2 何文田駅舎 オープン掘削状況 (北側より望む)

は得られており、構造物の構築でも自由度の高い施工を達成した。

計測においては、図一4における45度法面掘削中に、一時計測値が急激に増加する現象が見られた。降雨量や地下水位との相関は見られず、エア掘り・ケーシング無しで実施していたソイルネイルの削孔による過剰排土が原因と考えられたことから、泡削孔・ケーシングを併用して以深の変位発生を抑制した。また、変位が急激に増加した箇所では追加ソイルネイルの打設により、斜面の安定を保持した。

#### 4. 何文田駅舎南側 明かり発破掘削

##### (1) 市街地における明かり発破の適用と発破防護工

駅舎南側は岩盤線が高くなっているため、駅舎北側と同様に上層の土砂・軟岩部分を機械掘削したのち、明かり発破掘削で施工する計画であった。しかし、香港における過去の明かり発破は、採石場の採掘や造成工事など、比較的郊外に位置し居住者の少ない地域での施工に限られており、当工事のように幹線道路に隣接するような市街部では例が無い。このため、関係省庁への発破許可申請の過程は困難を極めた。

市街地での明かり発破による最大の懸念は飛石による事故であり、万に一つの可能性も排さなければならない。このため、飛石リスクによって発破ステージを後述する通り二分劃し、それぞれ発破防護工の検討を行うことによって関係省庁の合意を得るに至った。

最大飛石距離については、香港の過去の明かり発破工事で使用された次式を用いて推定を行っている。

$$L_{\text{Max}} = (k^2/g) \times (\sqrt{m}/SH)^{26}$$

ここで、 $L_{\text{Max}}$ ：最大飛石距離 (m)

$g$ ：重力加速度

$m$ ：単位長さ当り装薬量 (kg/m)

$SH$ ：込め物長 (m)

この式を用いて発破対象範囲内をグリッドに分割

し、各地点・掘削レベルにおいて想定火薬装填量と込め物長を用いた感度分析 (Sensitivity Analysis) を行い、さらに掘削レベルによる距離補正を行って、発破防護工が無い場合の最大飛石距離を検討した。

この結果、殆どの地点において44 m以内に収まるという結果が得られたため、駅のすぐ南に位置する幹線道路 (国道5号) より掘削レベルが高い+5 mPD以上をステージ1とし、幹線道路から44 m以内を発破禁止区域とした。一方、幹線道路より掘削レベルが低く、飛石発生の可能性が非常に低い道路レベル以深をステージ2とし、幹線道路から44 m以内は追加の飛石防止対策を条件として発破を可能とした。

##### (a) ステージ1 (幹線道路レベルより上) 発破防護工

香港の明かり発破で標準的に使用される発破防護工は、一次防護として発破部分をワイヤメッシュ付きの鉄カゴで覆い、二次防護として12 m高さのワイヤメッシュスクリーンで周りを囲ったケージ&スクリーン方式である (写真一3)。しかしながら、当工事ではそれ以上に強固な発破防護工を要求され、最終的に鉄カゴを更に大型の鉄カゴで覆ったダブルケージとすることで発破許可を得た (写真一4)。

内側の鉄カゴは、6 m × 8 m × 3 m高さを2連で設置し、二次防護となる外側の鉄カゴは12.5 m ×



写真一3 標準的な発破防護工 (ケージ&amp;スクリーン方式)



写真一4 ステージ1 発破防護工 (ダブルケージ方式)

16.5 m × 5 m 高さとした。

(b) ステージ2 (幹線道路レベル以深) 発破防護工掘削レベルが幹線道路以深は、坪掘りとなるために飛石のリスクが低下する一方、作業エリアが更に狭まり、鉄カゴの移動・設置が非常に困難となる。そこで、二次防護として発破エリア全体をワイヤーメッシュで覆うルーフオーバー方式を提案した (写真-5)。また、一次防護についてはブラストマット (裁断したタイヤをワイヤーで編み込んだもの) を自由面及び装薬後のベンチ上面に設置し、さらにワイヤーメッシュ及び防爆シートで覆って飛石対策を行った。



写真-5 ステージ2 発破防護工 (ルーフオーバー方式)

## (2) 発破の制約条件

振動・騒音に対する規制に加え、万に一つの飛石の可能性も排するよう、発破の方向や発破設計にも厳しい制約が要求された。以下に、制約条件を述べる。

### (a) 振動規制

駅舎は一般のビルに限らず、水道・ガス・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、約700を数える振動受信体に囲まれている。高度に都市化が進んだ香港における発破は、明かり・トンネルを問わず、常に全発破孔に秒時差をつけた制御発破となる。

個々の発破箇所での1段当り許容火薬装填量は、香港の経験式である Li & Ng's による発破振動予測式を変形し、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。

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

ここで、MIC : Maximum Instantaneous Charge,

1段当り許容火薬装填量 (kg)

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

表-1 代表的な許容振動値

項目	許容振動値 (mm/sec)	備考
水道管, ガス管, 高圧線	25	
高圧線接合部	13	
一般ビルディング	13 ~ 25	各建物の調査結果による
法面・擁壁	5 ~ 25	安定解析による
歴史的建造物	5 ~ 13	考古局の規定による

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、1段当り許容火薬装填量を増加させることが出来る。但し、当工事のように受信体と発破箇所の距離が近い場合、振動計測値の振れ幅が大きくなって回帰式の信頼度が低くなることから、許容火薬装填量の増加が困難となり、反対に減少する方向に働く場合もある。

### (b) 騒音規制

発破時騒音は、地域や時間帯によって定められる通常の工事騒音規制値とは別個に規制され、一般に工事現場境界において 120 dBL 以下であることが求められている。当工事でも同様の規制が求められたことから、発破音圧レベルを下記の一般式によって推定している。推定値の評価に当っては、この式で考慮されていないブラストマットや防音シート等による音圧低減効果も含めて判断する。

なお、この推定式から1段当り許容火薬装填量 (MIC) を求めることも可能だが、実際に計測される発破音圧レベルは周辺環境等によって大きく左右されるため、この式の位置付けは前述の振動規制値による算出式より下位となっており、音圧推定値が規制値を超える場合でも、音圧低減対策工の追加や、実火薬装填量の低減等、「対策を行う」までに留めている。

$$\text{AOP} = 164 - (24 \times \text{Log}_{10} (D / W^{1/3}))$$

ここで、AOP : Air Over Pressure, 発破音圧 (dBL)

D : 工事現場境界から発破箇所までの距離 (m)

W : 1段当り実火薬装填量 (kg)

### (c) 火薬類の制約

爆薬には日本で通常使用されているカートリッジ (薬包) 爆薬も使用するが、一般的には経済的に有利で、火薬類取締法の適用を受けない現地混合・ゲル状のバルクエマルジョンを使用するケースが多い。しか

し、破碎効果が高いことから飛石のリスクに配慮し、ステージ1はカートリッジ爆薬のみの使用となった。ステージ2ではバルクエマルジョンを使用しているが、幹線道路付近で飛石のリスクが高い部分(44m以内)は、カートリッジ爆薬に限定している。

香港では電気式雷管の使用が禁止されていることから、非電気式雷管(導火管付き雷管)を採用している。但し、ステージ2においては、装薬面に直接ブラストマット等の重量物を設置することから、養生は行うものの脚線/導火管を損傷するリスクを回避出来ない。このため、不可視状態でも発破回路の健全性を電氣的に確認できるよう、電子式雷管を採用することとした。

#### (d) 発破方向の制約

発破の投石方向(ベンチ自由面の方向)は、比較的道路レベルの低い幹線道路側となる東向きまたは南向きが禁止された。これによりベンチ掘削の順序に制約を受け、ベンチレベル毎に北西から南東へ、順次発破を行うこととなった。

また、坪掘りとなる道路レベル以深では、ベンチレベルが下がる度に最初のベンチ自由面を形成するための盤下げが必要となるが、理論上投石方向が上向きとなることから、追加防護措置の有無に係わらず、リスクを鑑み発破掘削は禁止された。

#### (e) 発破設計の制約

その他、発破設計においても、表—2の通り、細かな制約が課されている。

1段当り許容火薬装填量に限りがあることから、1つの装薬孔に親ダイと込め物を複数配置するデッキ装薬(1孔当り多段装薬)を行った。3段以上のデッキ装薬についても提案を行ったが、今回の工事では関係省庁の合意を得ることが出来なかった。

### (3) ステージ1掘削

ステージ1ではベンチ高さが3~5.5m、44回の発破で約16,300m<sup>3</sup>の岩盤掘削を行った。振動受信体に

近く、1段当り許容火薬装填量が凡そ1.0~2.0kgと小さいことから、全発破でデッキ装薬を行っている。表面にブラストマットを設置した外側の鉄カゴは40トン近くとなったため、その移動・設置には300トンの大型クレーンを使用した。

発破防護がダブルケージ方式であることから、発破可能エリアは内側の鉄カゴの大きさにより決定されてしまう。内側の鉄カゴは、施工範囲の制約により重量・大きさに限界のある外側の鉄カゴよりさらにひと回り小さくなってしまふことから、1回当り発破量は平均して370m<sup>2</sup>程度に限られることとなった。また、発破ベンチから自由面側に突き出す形で設置する外側の鉄カゴにはコンクリートブロックによる仮受けが必要で、その移動・設置に非常に時間が掛かることから、発破回数は6回/月程度、最大9回/月と、3~4日に1回のサイクルに限られてしまい、工程上大きなインパクトを受ける結果となった。

進捗改善策として、別セットの防護工を製作し並行作業を行うことも考慮したが、施工範囲上の制約から別セット防護工の仮置場所確保が困難であり、かつ投石方向の制約によって複数個所で発破準備作業を行うのが困難であることから断念した。

また、1回当りの発破可能範囲に限りがあるため、進捗を上げるにはベンチ高さを高くする必要があるが、デッキ数が最大2と決まっていることから、振動計測結果の回帰分析による装薬量の増大が必要となる。しかし、前述の通り振動受信体と距離が近いことから1段当り許容火薬装填量がほとんど増大せず、また火薬原単位量(1m<sup>3</sup>当り火薬量)他の発破設計にも厳しい制約が課されていることから、工程上のメリットが得られないと判断し、回帰分析による現場定数の見直しは協議しなかった。

このため、機械掘削を併用して掘削全体の進捗を改善し、発破可能エリアに自由度の高いステージ2への早期移行を図った。

表—2 発破設計の制約

項目	制約条件	備考
火薬原単位量 (kg/m <sup>3</sup> )	0.45 kg/m <sup>3</sup> 以下	
抵抗線長・孔間隔 (m)	削孔径の25倍以上 または薬径の40倍以上	1.15m ~ (カートリッジ) 1.85m ~ (バルクエマルジョン)
込め物長 (m)	最小抵抗線長・孔間隔以上	
発破列数 (自由面から)	8列以下 (ステージ1) 10列以下 (ステージ2)	
ベンチ高さ	2.0 ~ 5.5m (カートリッジ) 4.5 ~ 10.5m (バルクエマルジョン)	
デッキ (多段装薬) 数	最大2段	



写真一六 ステージ1 発破防護工設置状況

#### (4) ステージ2 掘削

ステージ2では、ベンチ高さが3～7m、146回の発破で約129,200 m<sup>3</sup>の岩盤掘削を行った。ステージの発破開始直後の初期発破を除き、全てデッキ装薬を行っている。発破回数は13回/月程度、最大17回/月と、2日に1回を確保した上で連日の発破も達成しており、ステージ1に比しサイクルは飛躍的に改善している。また、1回当り最大発破量は2,240 m<sup>3</sup>となり、平均でも855 m<sup>3</sup>とステージ1の2.4倍となっていることから、掘削進捗率としては4倍以上の改善を達成した。

坪掘り部分で次のレベルのベンチに移る際の自由面の形成は、ダウンザホールで250 mm径の孔を約1 m間隔で削孔したのち、ブレイカー掘削を行った。掘削面が下がりアクセスが取れなくなったのちは、ルーフオーバーに開閉式の開口を6箇所設置し、400トンクレーン1台、250トンクレーン2台と、底開き式6.5～10 m<sup>3</sup>ずりバケットを使用してずり搬出を行った。これにより、地山勘算で約700 m<sup>3</sup>/日のずり搬出を行っている。

電子雷管には、南アフリカの火薬製造業者であるAfrican Explosives Limited社のSmartShotを採用した。当雷管は発破箇所では装薬後に1 ms単位の任意の秒時差設定が可能であるほか、比較的脚線の耐摩耗性



写真一七 ステージ3 発破防護工設置状況

が高く、明かりベンチ発破に適した製品である。

秒時誤差の精度の高さから、振動計測ではステージ1に比べて振れ幅が小さく安定した結果が得られたが、騒音計測では、プラストマットが発破中にめくれた等原因が明らかな場合以外に、程度は小さいものの音圧が規制値を超過する現象が発生した。発破毎の諸条件に違いが多過ぎるため、今回の工事でその関連を一意に結論付けるには至らなかったが、岩盤壁面での反響や岩盤内の伝播のほか、風向きや曇天等の気象条件によって到達距離や反響が左右されたものと考察される。

飛石を発生させなかったことは勿論であるが、騒音・振動に若干の規定値超過はあったものの、このような市街地で苦情を1件も受けることなく発破作業を完了したことは、特筆に値する。

## 5. おわりに

本工事では、本稿で報告した大規模オープン掘削や明かり発破の他にも、トンネル工事における振動制御下での芯抜き発破先行による急速施工の試みや、駅周辺整備工事における合計8車線の幹線道路を横断する既設コンクリート歩道橋撤去・鋼製橋架設など、市街地での工事で技術的に特徴のある工法を採用している。法令や慣習の違いもあり、これらの技術が直ちに日本を含む他国で適用できるものではないが、安全で経済的な施工を目指すという共通目的の参考となれば幸いである。

年内に開通する観塘延伸線が周辺住民の足となり、香港の発展に寄与することを期待して、本稿の結びとする。

JCM/A

#### 《参考文献》

- 1) 杵築, 上田: ソイルネイルを使用した大規模オープン掘削工法の設計・施工と計測結果, 土木学会 土木建設技術発表会 2015, セッション III No.12
- 2) A. Pillay, 岩田: Electronic Detonators: Delivering the Advance in Hong Kong, The Journal of Explosives Engineering, Volume 32 Number 3, May/ June 2015, p28 - 37
- 3) 亀山, 岩田ほか: 発破振動制御下におけるトンネル急速施工, 土木学会 第24回トンネル工学研究発表会, 報告 I-37

#### 【筆者紹介】

岩田 修 (いわた おさむ)

西松建設株

国際事業本部 香港支店 観塘延伸線工事事務所

課長

