

ホームティン立坑工事：内径 21m, 深さ 107m の大深度立坑工事と 1.3 km の長尺水平方向制御コアボーリング

Ho Man Tin Access Shaft Construction: Construction of 21m diameter, 107m deep shaft and 1.3 km long Horizontal Directional Core Boring

岩田 修*

Osamu Iwata

要 約

ホームティン立坑工事は、内径 21 m, 深さ 107 m の大深度立坑の建設工事であり、地表面から 45~65 m 深さまでが埋土と土砂、風化岩で構成されていることから、円形の土留連続地中壁の構築が必要であった。地中壁工事開始直後にスラリーの急激な逸泥が発生したことから、逸泥防止効果を確認しながら地山改良工事を行い、無事立坑を完成させることが出来た。また、本工事ではトンネル工事の地質調査として日本でほとんど実績のない最長 1.3 km の長尺水平方向制御コアボーリングを実施しており、この施工実績も併せて紹介する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 大深度立坑
- § 3. 長尺水平方向制御コアボーリング
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

本工事は、香港九龍地区の西九龍公路と九龍湾（旧カイトック空港跡地再開発区）を結ぶ、上下片側 3 車線、全長 4.7 km のセントラルカオルーン幹線道路新設工事のうち、ホームティン立坑工区である。セントラルカオルーン幹線道路は、九龍湾よりさらに東に向かって伸びる T2 トンネル、將軍澳-藍田トンネルと共に、6 号幹線を構成することとなる。

道路は両端を除く 3.7 km がそれぞれ 3 車線の並列トンネル区間となっており、ホームティン立坑はそのほぼ中央に位置する、内径 21 m, 深さ 107 m の立坑である。同立坑はトンネル工区施工時には主要アクセスとなると共に、道路供用時は換気立坑として使用される。

工事にはトンネル工区の地質調査も含まれており、最長 1.3 km の長尺水平方向制御コアボーリング 5 本と、斜めボーリング 5 本を含む従来工法による地質調査コアボーリング 47 本を施工している。工事概要を表-1 に示す。

トンネル工事の支保工は施工業者の設計・施工契約となることが多いが、工期が短く、並行してトンネル部分の設計を継続するという背景から、企業先コンサルタントの設計による、施工のみの契約となっている。

表-1 工事概要

工事件名	Contract No.HY/2014/09, Central Kowloon Route, Ho Man Tin Access Shaft
発注者	香港政庁 路政署
設計・監理	ARUP・Mott MacDonald JV
施工者	西松建設 単独
施工場所	香港 九龍 ホームティン地区
工期	2017 年 12 月 8 日~2019 年 6 月 9 日 (当初) ~2019 年 9 月 19 日 (最終)
請負金額	29 億 3 千万円 (当初) 45 億 5 千万円 (最終)

§ 2. 大深度立坑

当該立坑の地質構造は、そのほぼ上半分が埋土及び風化花崗岩であり、下半分が強固な岩盤となっていた。円形連続地中壁設置ののち、前者は機械掘削を、後者は発破掘削を行い、吹付けコンクリート・ロックボルトで支保を行う。

入札前の調査ボーリングに基づく企業先設計では、地中壁深さは 48.4~52.3 m として計画されていた。地中連続壁施工に先立つ岩盤線確認のための調査ボーリングの

* 国際事業本部香港（支）CKR 立坑（出）
（現：国際事業本部土木部）

結果、断層の影響により岩盤線には非常に大きな落ち込みがあることが判明し、連続壁深さは 46.0~65.7 m となった。図-1 に入札時および施工時の立坑地質断面図を示す。図中の斜線部分が発破掘削となる。

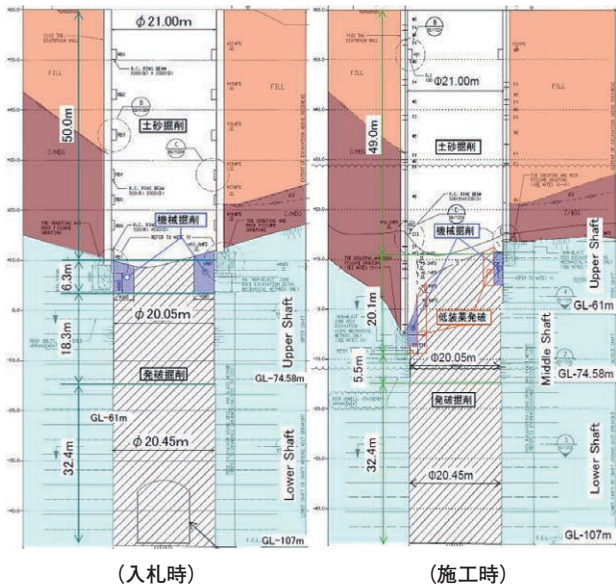


図-1 立坑地質断面図

2-1 地山改良工事

(1) 逸泥の発生と試験掘削

円形連続地中壁は 1.5 m 厚さで、2.8 m 幅の開口パネル 3 箇所と 3.6 m 幅の標準および閉口パネルにより、計 22 枚の直線パネルで構成される。

ガイドウォール設置ののち、開口パネル P1 の掘削を開始したが、地下水位と同等レベルの 23 m 深度まで掘削したところで掘削溝内を満たしていたスラリーの急激な逸泥が発生した。スラリーの追加では全く泥水位の回復が見られないことから、一旦掘削土およびモルタルにより 3 m 程度の埋戻しを行い、1 日養生をおいたのち再度掘削を試みた。泥水位低下速度が早まった場合はスラリーにセメントを加え、養生期間をおきながら掘削を行ったが、26.5 m 深度に達したところで急激な逸泥が発生し、5 m 程度の埋戻しを行った。緊急資材として貧配合コンクリートを準備し掘削を再開したが、埋戻し土の撤去後、27.2 m 深度に達したところで再度逸泥が発生したため、掘削を断念し完全に埋戻しを行った。

引き続き、連続地中壁全体の施工可否の判断と地盤内の逸泥層の広がりを確認するため、残り 2 箇所の開口パネル (P9, P16) と他 2 パネル (P13, P19) で試験掘削を行ったが、全てのパネルにおいて、4.5~24 m と幅広い深さで急激な逸泥が発生した。写真-1 に逸泥状況写真を、図-2 に逸泥発生箇所位置図を示す。

(2) 逸泥対策工の検討

現地は 1960 年代まで採石場として使用されたのちに埋戻しが行われており、工事着手前は駐車場として長く使用されていたことから一定の圧密効果も期待されてい



写真-1 逸泥状況写真

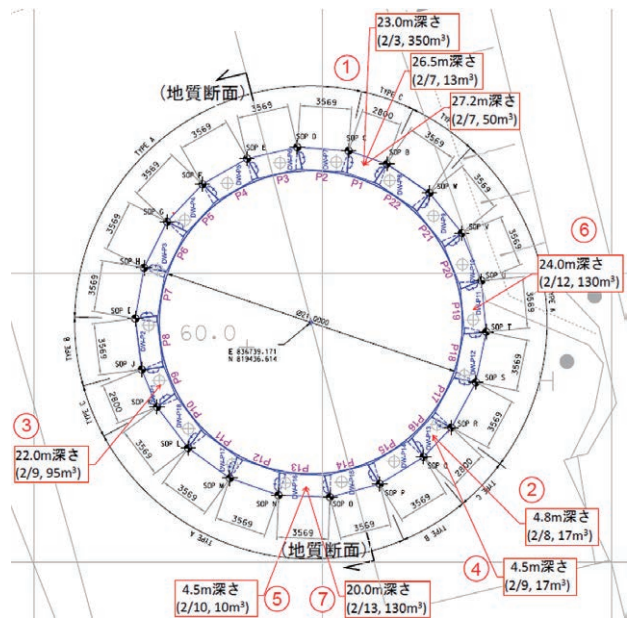


図-2 逸泥発生箇所位置図



写真-2 立坑付近空撮写真 (1963 年)

た。写真-2 に採石場当時の空撮写真を示す。中央の円が立坑の位置を示し、写真中では撒き出された掘削土砂の法尻に当たっている。

上述した試験掘削の結果より、当地は適切な管理がなされないまま埋戻し工事が行われたため、転石が不規則かつ広範囲に存在し、さらに岩盤線確認調査ボーリング時の削孔水や試験掘削時のスラリーによって細粒分の移動・流出が引き起こされ、逸泥層が更なる連結性を保持

するに至ったと推定された。この不規則性から、改良を元々の地山（強風化岩）までの埋土全体、約 40 m 深さまで行うものとした。また、逸泥層の広がり不明であることから、連続地中壁近傍に限定注入を行う計画とし、グラウト孔を連続地中壁の内外に 1 m 間隔に配置し、セメント・水ガラス懸濁液による注入を行うこととした。この地山改良工事は完全な遮水壁の構築を目指すのではなく、あくまで間隙を間詰めし、スラリーによる掘削壁面の保持を可能にする、正常な埋土性状への回復を目指すものである。図-3 にグラウト孔配置平面図を示す。

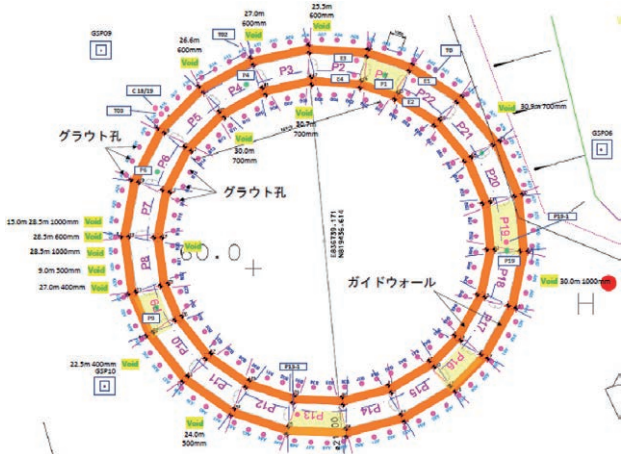


図-3 グラウト孔配置平面図

(3) 地山改良工事の施工

工期への影響を最小限に収めるため、また既に乱された埋土地山の改良を早期に完了するため、グラウト孔の削孔にはロータリーパーカッションドリル機を採用し、注入ロッドを建て込んで孔底より 500 mm 毎にステップ注入を行うこととした。注入手順は外周を先行し、外周 82 孔、内周 60 孔をそれぞれ 7 孔程度のグループに分け、奇数孔を 1 次孔、偶数孔を 2 次孔として注入を行った。グラウト配合表を表-2 に示す。セメント量は当初 125 kg で施工を開始したが、注入圧が上がらない状況を考慮して 170 kg に配合を変更した。

表-2 グラウト配合表 (1,000 L 当り)

A 液	セメント 170 kg + 水 445 L
B 液	水ガラス 250 L + 水 250 L
初期硬化時間	45~90 秒
注入基準	初期圧 +1 bar かつ 200 L/0.5 m ステップ 若しくは 400 L/0.5 m ステップ

削孔中にはロッドが数百 mm~最大 1 m 程度の範囲で落下する現象が見られ、推定した地山状況の裏付けとなった。また、施工期間を通して削孔水によると考えられる地盤沈下が見られたが、グラウトの進捗に伴い沈下速度は低減され、最終的に隣接する 6 車線道路路肩において 6 mm に抑えることができ、工事用地外部に影響を及ぼすことなく施工を完了した。

(4) 地山改良効果の確認

グラウト工事へのフィードバックと地山改良効果の確認のため、注入完了箇所付近において、随時スラリー保持試験を行った。これは試験孔を削孔したのち孔内のロッドをスラリーで満たし、ロッド継ぎ目間隔の 1.5 m 毎にスラリー低下速度を確認する比較的簡便な試験である。グラウト工事開始当初は、地表面から 20~30 m 程度で 1 m/分程度の急速な低下も見られたが、地山改良の進捗と共に 200 mm /分程度まで減少した。

最終的には地中壁内各所に試験孔を設け、スラリー低下速度の確認を行った。ここでも深度によっては低下速度が速くなる場合が散見されたが、1 m³ 当り 10 kg のセメント、10 kg のおがくずを添加した特殊配合に変更することにより低下速度の軽減が確認されたことから、スラリーによる壁面保持は可能と判断し、地中連続壁の施工を開始した。

(5) 実際の地山改良効果

地中連続壁工事は上述のセメントおよびおがくずを使用した特殊配合で施工を開始し、2 パネル目途中より標準配合に切り替えて施工を行った。最終的に一度も逸泥を起こすことなく、無事連続地中壁の施工を完了した。立坑掘削時には、注入孔から立坑内の土砂へ、最大 5 m 程度のグラウトの浸透が確認された。立坑掘削中に確認された固化グラウトを、写真-3 に示す。



写真-3 固化グラウト (青黒い部分)

2-2 連続地中壁工事

地中連続壁の掘削の進捗は、転石および岩盤根入れ部分の進捗に支配される。既に地山改良工事による工程遅延が発生していたが、その原因である地中の大量の転石の存在により、連続地中壁の掘削においてもさらなる遅延が発生することが容易に予想された。このため、スペース的に非常に狭隘であるものの、当初計画していたカッター 1 台 + クラムシェル 1 台 + クレーン 1 台に、クラムシェル 1 台を追加して施工を再開するものとした。写真-4 にコンクリートポンプ打設時の地中連続壁施工状況を示す。



写真-4 連続地中壁施工状況（ポンプ打設時）

上記クラムシェルの追加以外に取った主な対策としては、以下の通りである。

- クラムクレーンオペ・機械工の増員
- 法定内での掘削稼働時間の延長（9 時間 → 11 時間）
- コンクリートブームポンプ使用による、打設と他複数パネルの並行掘削

表-3 に示すとおり、最終的に転石・軟岩の掘削量は実に 7.5 倍、岩盤根入れ量も 2 倍となったが、連続地中壁の再開前より事態を想定し、導入したこれらの対策により、影響を最小限に抑えることが出来た。

表-3 連続地中壁の進捗

項目	当初見込み	実績
土砂	4,985 m ³	3,065 m ³
転石・軟岩	343 m ³	2,577 m ³
岩盤根入れ	33 m ³	68 m ³
総掘削量	5,361 m ³	5,690 m ³
稼働日数	128 日	183 日
日当り進捗	41 m ³ /日	31 m ³ /日

2-3 立坑掘削工事

(1) 仮設備

夜間作業を可能にし、同時に岩盤掘削時には発破防護工とするため、立坑上部は防音性能が高く堅固な防音建屋で囲う必要があった。工程短縮を図るため、防音建屋は土砂掘削と並行して設置するものとし、これを可能に

するため側壁はプレキャストコンクリートパネルとし、上部を防音パネルで覆う構造とした。この防音建屋は試験の結果 51 dBL と非常に高い騒音低減性能を発揮し、のちの岩盤掘削時に 24 時間作業の許認可を取得するに当たって大きな力となった。

ずり出し設備については防音建屋横にずりピットを設置し、写真-3 で示したずりバケットをピット上部の転倒設備に引っ掛け、転倒させてピット内にずりを仮置きした。ピット脇には積み込み構台を設置し、バックホウにてダンプトラックへの積み込みを行った。写真-5 に岩盤掘削時の坑外仮設備全景を示す。



写真-5 立坑掘削坑外仮設備全景（岩盤掘削時）

(2) 土砂掘削

土砂を主とする地表面から 10 m 深さまでの土砂掘削は、25 ton バックホウ 2 台で行った。うち 1 台は地上に設置して立坑下から直接ずりを取り込み、ダンプトラックへの積み込みを行った。

この間に並行してずりピットと積み込み構台の設置を完了し、49 m 深さまでは 30 ton バックホウおよび油圧ブレイカーを搭載した 22 ton バックホウで掘削、ずりバケットと 300 ton クローラークレーンの組み合わせで坑内からのズリ出しを行った。

掘削の進捗は転石量に大きく左右され、特に 20~30 m 深さでは僅か 50 m³/日に落ち込む場合もあった。上述の通り土砂掘削は防音建屋建方との並行作業であり、また 1,880 m³ の転石とそれに伴う立会検査を行いながらとなったが、49 m 深さまで 310 m³/日の平均進捗を達成した。

(3) 岩盤掘削

立坑内の一部が岩盤線に到達したのち、部分発破併用掘削を開始した。図-1 に示したとおり、コンクリートパネル防護のため、その近傍は非発破範囲としている。

企業先設計ではコンクリートの許容振動値 150 mm/秒に対し、許容総薬量を 1.0 kg/段として、パネルより 4 m の非発破範囲を設けていた。この部分は機械掘削となり、掘削のサイクルを支配してしまうことから、非発破範囲を最小化するため、パネルから 4~2.1 m を段階的に 0.8~0.4 kg/段の低装薬発破範囲として、発破許認可機関

である鉱山局に提案し承認を得た。これにより、部分発破併用掘削区間長は 6.3 m から 20 m と大幅に増大したにも関わらず、機械掘削量を当初見込みの 1,277 m³ から 957 m³ に低減した。この結果、当初計画の 5 日サイクルを 4 日サイクルに短縮し、制限装薬範囲が狭くなった時点ではさらに 3 日サイクルに短縮した。

69 m 深さまで 20 m 区間の部分発破併用掘削を完了したのち、全断面発破掘削を開始した。現地では一般的に導火管付き雷管が使用されているが、発破回路を簡素化するため、デュアルディレイ雷管を採用した。この雷管は 1 セットに 2 つの雷管が付いており、切羽側雷管が発破孔間に 17^{ms} の秒時差を付けて発破回路全体を起爆したのち、それぞれの孔底側雷管が切羽側雷管の 9,000^{ms} 秒後に起爆するものである。また、破碎効果を損うこと無く孔数を減らしサイクルを短縮するため、発破孔径は 51 mm とし、バルクエマルジョン爆薬を使用した。写真-6 に装薬状況を示す。

また、高性能の防音建屋によって、仮設備延伸等の軽作業だけではなく、削孔・ロックボルト打設やこそく、吹付けコンクリート等の騒音作業も 24 時間行うことが可能となった。この利点を最大限に生かせるよう、昼間にしか出来ない装薬・発破・ズリだし作業を除くこれら作業を夜間に集約するものとした。これらの方策により 1 m/2 日サイクルの当初計画を 1.8 m/3 日サイクルに変更し、当初計画のおよそ 120% の進捗を達成した。



写真-6 装薬状況

§3. 長尺水平方向制御コアボーリング

トンネルの地質調査における水平コアボーリングの有意性は、従来の地表面からの鉛直・斜めボーリングによる「点」での調査方法に対して、トンネルの線形に沿って「線」での調査が出来ることに加え、鉛直・斜めボーリングの併用により、より立体的に地質情報が把握出来る点である。

その方向制御には種々の方式が存在するが、磁界の影響を受けるため鋼製ケーシングが使用出来ない、地表面

から数十 m 範囲しか探知出来ない、電磁波の発生する市街地では方向角を正しく検知出来ない、ガイド孔や事前測量が必要、ジャイロ等の技術により戦略的機器として輸出入が厳格に管理されるなど、限られた条件下でしか適合しない、あるいは追加コストや特別な配慮が必要なものが大勢を占めている。

当工事で採用したノルウェー Devico 社の方向制御技術は、これらの制約にとらわれず採用が可能であり、香港政庁工事の長距離トンネルで多くの採用実績を持っている。

3-1 概要

長尺水平方向制御コアボーリングでは、設計線形から一定の半径枠内におけるコア採取を求められた。当工事では半径 5 m 枠を基本とし、地下鉄営業線近傍に限り半径 2 m 枠の高精度を要求されていた。この枠内を進んでいる限り方向を制御する必要はなく、むしろ曲線が多くなると摩擦負荷が大きくなることから、実際の施工では孔位置・方位角・傾斜を測定しながら水平直線ボーリングを行い、必要な時だけ方向を調整する直線と曲線の組み合わせによるボーリング方式である。

工事は比較的広い施工用地を必要とするため、地表面から斜めボーリングを行い、目標レベルでトンネル勾配となるよう縦断勾配を制御する。当初は立坑の南 100~150 m の位置から両坑口に向かって東西方向へ各 1 本、その間の空白を埋める 1 本の計 3 本が予定されていたが、立坑より東区間の地質状況をより詳細に把握するため東向きボーリングが 2 本並列となり、さらに西側坑口付近の地質調査のため 1 本が追加され、計 5 本となった。図-4 に長尺水平方向制御コアボーリング平面図を示す。

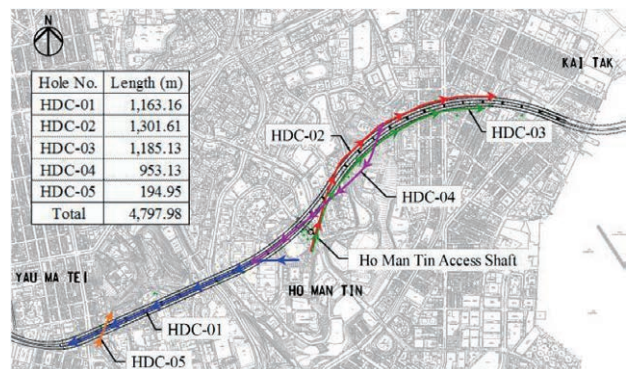


図-4 長尺水平方向制御コアボーリング平面図

3-2 方向制御技術

Devico 社の方向制御技術は、もともと建設業界における地質調査ではなく、鉱山やエネルギー業界における鉱脈・油脈の探査において、1 本の長尺ボーリング孔から指向性ボーリングによって複数の分岐孔を設け、効率的な探査を行う目的から開発された技術である。

ボーリング工法は一般的なワイヤーライン方式であり、ロッド・ビットを孔内に残したまま標準 6 m のインナ

ーチューブを回収しコアを採取する。Devico 社の方向制御技術は、このインナーチューブの削孔角度を調整出来るコアバレルと計測器に特徴があり、長尺削孔を可能にするトルクとパワーがあれば、削孔機の機種・メーカーを問わないという汎用性がある。

コアバレルの OUTER チューブ内部、中央付近には、偏心した開口を持つ円盤状プレートが設置されており、この開口内に同じく偏心した開口を持つプレートが設置されている。これらプレートの相対角度を変更することにより、開口の位置が二重円の中心から円端部に向かって偏心する。これによってインナーチューブの中央を偏心させ、チューブを曲線形状にするとともに OUTER チューブをパッカーで孔壁に固定することで、指向性ボーリングを可能にしている。このため、曲線部のコアの径は 31 mm と直線部の 49 mm に比べて小さくなり、若干曲がったコアが採取されることとなる。図-5 に指向性ボーリング模式図を示す。

指向性ボーリングは反力を必要とするため、方向制御は岩盤内でしか行えない。短距離で大きく方向転換するとその後のボーリングに大きな負荷となることから、最大 30 m で 9 度程度の方向制御が推奨されている。

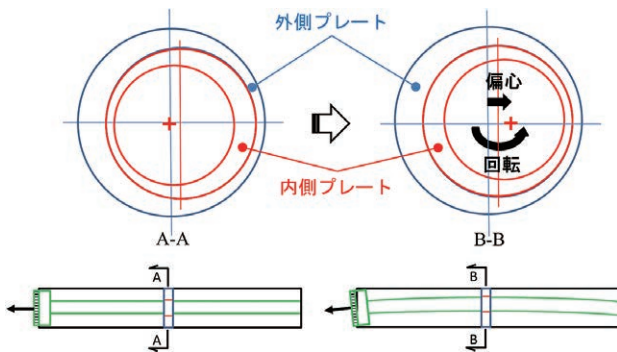


図-5 指向性ボーリング模式図

孔内の方位角・傾斜を計測する測量機器には磁気式と光学式の 2 種類の方式があり、通常はボーリングロッドを 5 m 程度引き戻すだけで磁気の影響を排除出来ることから、短時間で計測が可能な磁気式を使用する。光学式は建物基礎や地下鉄等、鋼材や電磁波による影響が発生する場合に使用するが、ボーリングロッドの引き抜きが必要となるため時間を要する。

3-3 コアボーリング工事

削孔機を所定の入射角度に設置し、ボーリングロッドを同角度に仮受けする構台を組み立てて削孔を行う。写真-7 にボーリング状況を示す。土砂内は負荷を最小限に抑えるよう順次口径を小さくしながらケーシング掘りを行い、岩盤内に到達してから方向制御を行う。

指向性ボーリングの継続中はコアバレルを回収する必要はないが、偏心角度の設定は地上で行うため回収が必要となる。同様の地質状況に基づく角度設定を行っても場所によって反応にバラツキがあり、曲がらなかつたり



写真-7 ボーリング状況（削孔機は構台右端）

曲がり過ぎたりという結果が発生したことから、偏心角度の再設定によるコアバレル・ボーリングロッドの回収や、曲がり過ぎた孔のリーミングにより、時間をロスするケースも発生した。同様の理由や岩盤線の低下により予定位置で方向制御を行うことが出来なかった場合は、過度にボーリング負荷が大きにならない範囲で軌道修正を行い、その都度企業先と合意した。

地質状況や原位置試験など様々な要因により異なるが、ボーリング実績はおおよそ直線部で 30 m/日、曲線部で 6 m/日の進捗となった。精度は、断層のためほとんど反力が取れず、方向制御ができなかった HDC-05 を除き、半径枠に全長の 90% を収めることが出来た。東向きボーリング孔 HDC-02 は 1,301.6 m の長さとなり、香港における長尺水平方向制御コアボーリングの最長記録を達成した。

§ 4. おわりに

当工事では、工事開始当初のスラリー逸泥とこれに伴う地山改良工事、さらには転石掘削量の大幅な増加も相まって、1 年 6 ヶ月と言う短い工期に対し、工程促進策を実施しても 5 ヶ月以上遅延する状況となった。しかし、最終的に 3 ヶ月まで圧縮し、かつ当地では希有な全工期無事故無災害を達成したことから、企業先より非常に高い評価を受け、工事評価点は路政署の全工事において最高となる 79.8 点という高得点を得るに至った。同時期のトンネル工区の評価点はわずか 53 点台に過ぎないことから、その高評価は明白であろう。

本工事の施工においては多くの問題が発生したが、その解決に当たり迅速にご対応頂いたライト工業様、ご指導、ご協力を賜りました土木事業本部、国際事業本部、香港支店を始めとする関係者の皆様、そして何より日本人職員が一人という現場で、共に悩み、汗を流し、支えてくれた 25 名の現地ローカルスタッフに、心より感謝申し上げます。