

香港における土砂化した風化花崗岩中の凍結工法による延長 100 m の横坑掘削

Total 100 m length of tunnel excavation in completely decomposed granite by ground freezing method in Hong Kong

若尾 政克*

Masakatsu Wakao

齋藤 禎二郎*

Teijiro Saito

清水 達郎*

Tatsuro Shimizu

要 約

香港西港線地下鉄工事 704 工区では、土砂地山区間に位置する延長 100 m の掘削に凍結工法を採用している。凍結工法を用いた横坑掘削では過去に例のない長距離である。本報告では凍結工法に採用した水平コントロールボーリングの紹介と、施工中の 80 m 区間の横坑掘削の概要を述べる。

目 次

1. はじめに
2. 削孔工
3. 凍結工
4. 掘削工
5. まとめ

§ 1. はじめに

香港地下鉄西港線工事は、既存の港島線の西側終点駅である上環駅から香港中西地区の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 (469 m×2 本, 564 m×2 本)、連絡地下道および換気横坑 (総延長 3,320 m)、乗客出入口、換気塔 (9 箇所) の建設が含まれている。本工事の全体平面図を図一に示す。

地下駅およびトンネルの掘削は発破工法を採用したが、土砂地山区間の B3 横坑では延長 100 m の横坑掘削の補助工法として凍結工法を採用した。

本稿は執筆時点で進捗 50% の凍結工法を使用した横坑掘削の概要と、施工実績を報告するものである。

1-1 工事概要

発注者：香港鐵路有限公司 (MTRC)

工事名：香港地下鉄西港線西營盤(サイインブン)駅・



図一1 西港線地下鉄工事平面図

香港大学駅およびトンネル工事

工事場所：香港特别行政区 香港島西部
ケネディタウン地区

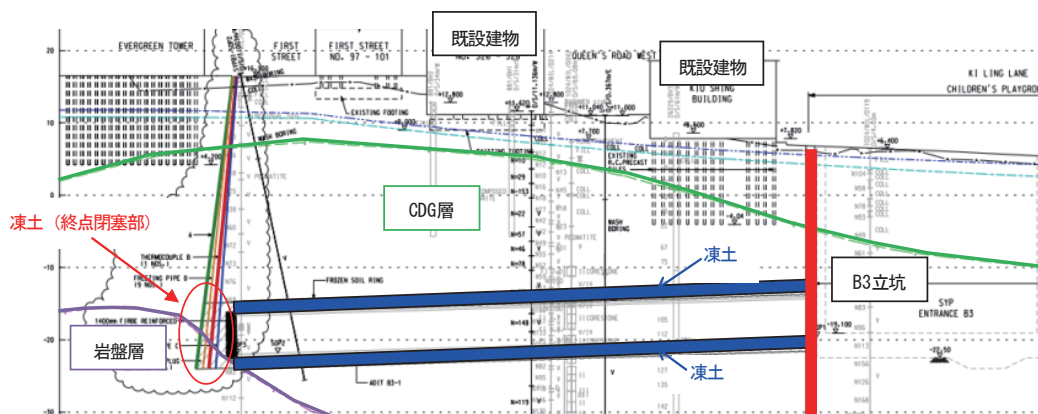
工 期：2010 年 3 月 10 日～2014 年 6 月 30 日

1-2 地形・地質概要

掘削箇所は香港島北西部の市街地に位置し、最大土被りは 32.6 m、地下水位は GL-5 m である。トンネル直上には、直接基礎および摩擦杭を基礎とする古い住宅ビルや公道がある。地質は砂礫を含む土砂化した風化花崗岩であり、香港では CDG (Completely Decomposed Granite) と分類される。地山の物性値は、単位体積重量 $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ 、粘着力 $C' = 5 \text{ kPa}$ 、内部摩擦角 $\phi' = 35 \sim 39^\circ$ 、標準貫入試験 $\text{SPT} = 3 \sim 200$ (平均 105)、透水係数 $k = 1.0 \times 10^{-5} \text{ m/sec}$ である。図二に掘削箇所の縦断面図を示す。

以上の条件から、横坑掘削時の地下水位低下に伴う地表面沈下によるトンネル直上の構造物への影響が懸念された。このため、トンネル掘削中の坑内への地下水流出を確実に防止でき、切羽の安定を図ることが可能な凍結工法を補助工法として採用した。

* 海外 (支) 西港線地下鉄 (出)



図一2 凍結横坑 B3 縦断面図

1-3 トンネルの概要

凍結および掘削は、トンネルの線形から、B3-1 (80 m) および B3-2 (20 m) と呼ぶ2箇所に分割して施工を行っている(図-3 平面図参照)。トンネル掘削断面は円形で、一次支保は鋼製支保工と鋼繊維補強吹付けコンクリートで構成され、掘削を開始してから、吹付けコンクリートの強度が発現されるまではトンネル外周部に造成された凍土により支保される。凍土造成には、トンネル掘削面から外周 700 mm の位置に 1.0 m 間隔で水平凍結管を 25 本、凍土の状況を確認するための測温管を 6 本配置した(図-4)。B3 立坑から施工する B3-1 では、トンネル終点を凍土で閉塞し、終点部の切羽の安定と止水を行っている。閉塞部の凍土造成には、地上部からの鉛直削孔により、凍結管 19 本および測温管 3 本を配置した(図-5)。

凍土の造成は、 -25°C 以下に冷却したブライン(塩化カルシウム水溶液)の循環により行う。凍土の設計平均温度は -10°C 、設計強度は圧縮強度 4.5 MPa、曲げ強度 2.7 MPa、せん断強度 1.8 MPa であり、必要とする凍土厚は 1.3 m である。

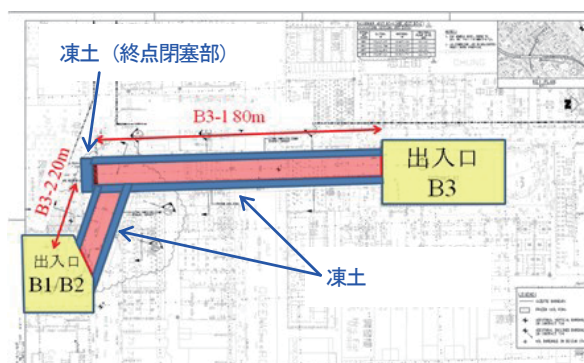
§2. 削孔工

2-1 水平コントロールボーリング

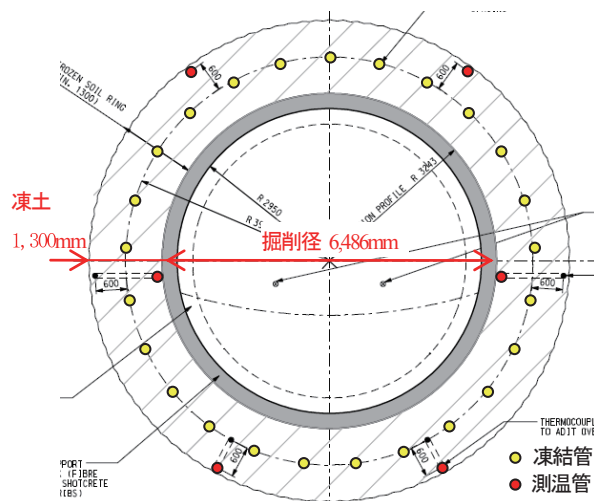
(1) 施工方法

B3-1 の凍結管および測温管は B3 立坑から延長 84 m の水平削孔を行い配置する。周辺部の凍土の造成期間は凍結管の配置に依存し、凍結管の間隔が設計から 10 cm 増えるごとに 2 週間増加するとされた。このため、凍結管を設置するための削孔には高い精度が要求された。本工事では、84 m を高精度で水平削孔するために、米国の Toro 社のステアラブルマッドモーターと INROCK 社の Paratrack® 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。

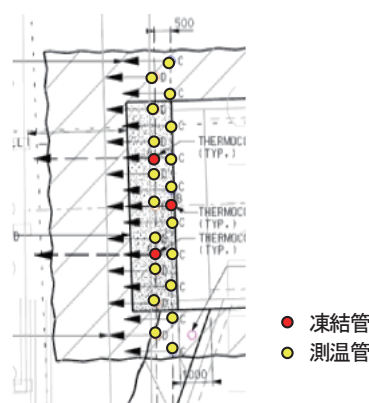
削孔は、孔曲りを制御することと山留め壁からの地下水の流出を防ぐため、ケーシングによる削孔は使用できない。このため、削孔口元に BOP (Blowout Preventer) と呼ばれる防噴装置を設置して、ベントナイト泥水を加



図一3 凍結横坑 B3 平面図



図一4 凍結横坑 B3 掘削断面図



図一5 B3-1 閉塞部平面図

圧充填しながら裸孔にて削孔を行った。1本の削孔が終了した後、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した。塩ビ管を使用することにより、電気式方位センサーを使用する Paratrack® システムによる計測に影響を与えずに近接する孔の削孔を継続することができる。

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、拡張しながら直線で削孔することになる。

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、削孔の軌跡がリアルタイムで分かり、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® 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® 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、計測専門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-6 に Paratrack® システムによる HDD の概念図、写真-1 に施工状況を示す。

(2) 削孔結果

前述した Paratrack® センサーによる削孔記録をもとに 5 m 毎の削孔出来形図を作成した。

この出来形図面から各凍結管間隔を確認し、凍土造成期間の延伸の原因となる箇所を追加削孔を行った。最終的に 84 m を 4 箇所、40 m を 1 箇所の合計 5 箇所の追加削孔を行った。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 m で ±300 mm 前後 (0.4%) で削孔することができた。

今回の水平削孔は目標精度を ±450 mm として行った。

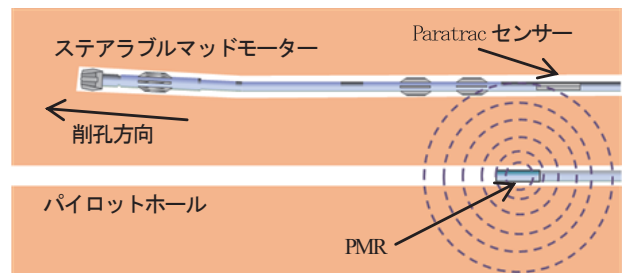


図-6 Paratrack® システム概念図

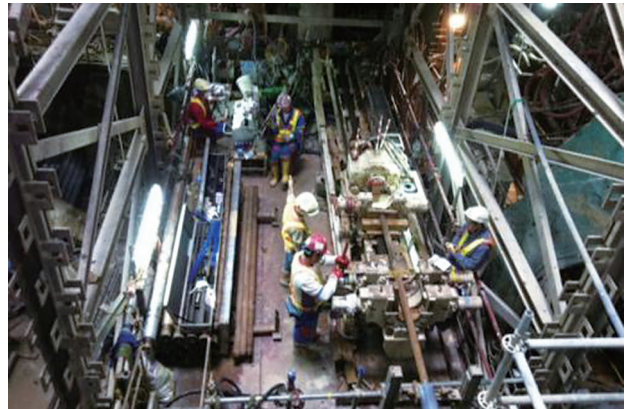


写真-1 水平コントロールボーリング施工状況



写真-2 冷凍機

表-1 凍結使用機械

使用機器の種類	諸 元
冷凍機 200 型	冷 凍 能 力 : 259,500 W 電動機 公称出力: 150 kW 凝縮器 最高使用圧力: 1.6 MPaG ブライン冷却器 最高使用圧力: 1.3 MPaG
冷 却 塔 SKB-100S	凝縮能力: 453,400 W 冷却水出入口温度: 37℃-32℃ 湿球温度: 27℃ 標準水量: 1,300 l /min
ブライン循環ポンプ (塩化カルシウム溶液用)	吐 出 量: 1,500 l /min モーター: 200 V×3 φ×30.0 kW
冷却水循環ポンプ	片吸込渦巻ポンプ JOV100X80X4-57.5C 吐 出 量: 2,000 l /min モーター: 200 V×3 φ×7.5 kW

※ B3-13 セット／閉塞部 2 セット

Paratrack® センサーによる、リアルタイム計測は削孔中の精度確認を可能とする。このため、削孔完了後の孔曲がり測量で精度確認を行う方法と異なり、目標精度からの逸脱による削孔中止、再削孔の判断を削孔中に行うことで、追加削孔を最小限に抑えることが可能であった。

§ 3. 凍結工

3-1 使用機械

凍結工事に使用する主な機械は冷凍機（写真－2）と冷却塔であり、凍土造成開始後は 24 時間継続しての運転を行う。B3-1 の凍土造成には冷凍機（冷却能力 260 kW）3 台及び冷却塔（凝集能力 453 kW）3 台、トンネル終点閉塞部の造成に冷凍機 2 台、冷却塔 2 台を使用した。

凍結に使用した機械の一覧を表－1 に示す。

また、本施工箇所は市街地に位置するため、夜間の騒音を 60 dB 以内に低減することが要求される。このため上述する機械を 40 dB 程度の騒音低減効果を有する防音ハウス（写真－3）内に設置し、機械への給排気は設計上必要な大きさの開口を設け、サイレンサーを通して行った。

3-2 凍結方法

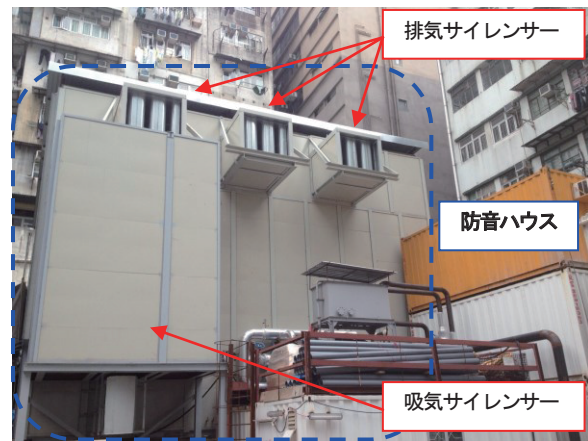
今回使用したブライン方式は凝固点を下げるため、比重 $1.26 \sim 1.29 \text{ g/cm}^3$ に調整された塩化カルシウム水溶液を使用する。ブラインは冷凍機にて、 -25°C 未満に冷却され凍結管を介し地盤を冷却する。冷凍機内ではブライン冷却を冷媒の気化により行い、この冷媒は圧縮および冷却塔からの循環水で冷却することで再液化され循環される。凍土造成の過程で地盤の熱はブライン及び冷凍機内での計 3 回の熱交換を経て、冷却塔により大気へ放出される。凍結工のフローを図－7 に示す。

3-3 凍土造成確認

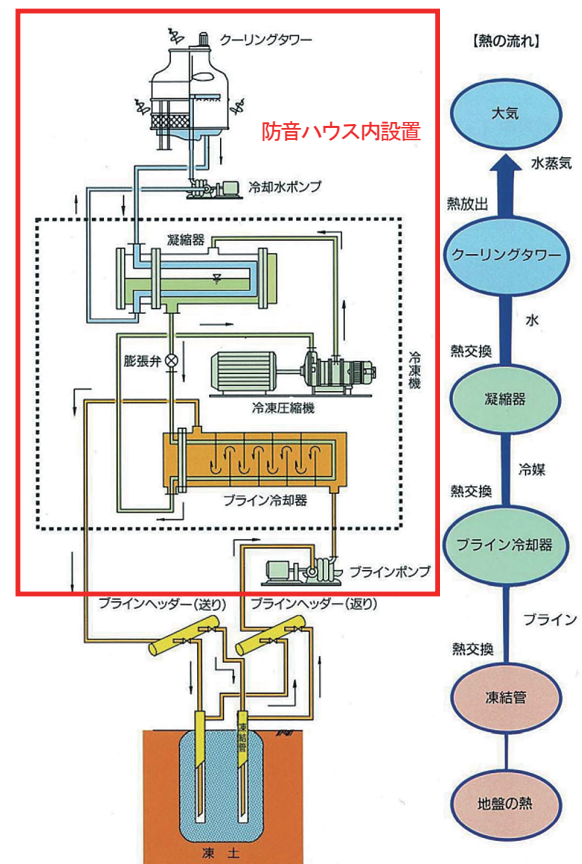
凍土の状態は測温管による地中温度測定により確認される。図－8 に温度測定グラフの一例を示す。地中温度測定は毎分自動計測、記録されるとともに、管理基準温度に達すると自動で警報を配信するシステムとなっている。管理基準温度は温度分布解析により平均凍土温度 -11°C 、 -10.5°C 、 -10°C における各測温点位置での解析値とし、設計平均温度 -10°C を維持する目的で設定した。

掘削開始に必要な凍土厚の確認は、地中温度測定データ、ブライン温度履歴、および削孔出来形図による凍結管位置から解析した凍土予想図を延長 5 m ごとに作成し、凍土成長状況のシミュレーションにより行った。この凍土予想図により凍土厚の確認を行い、掘削開始の判定を行った。図－9 に予想図の一例を示す。

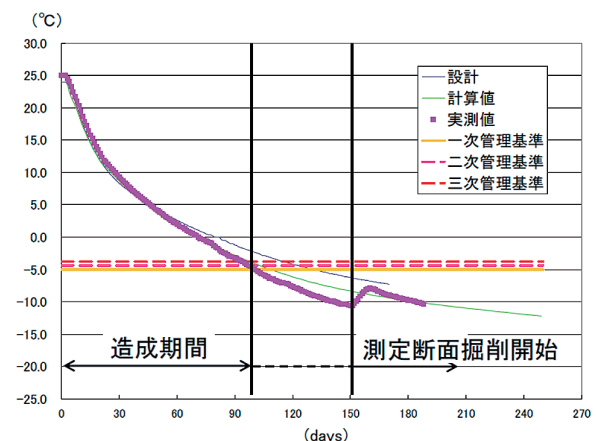
また、トンネル外周および終点部の凍土の閉塞を確認するために、凍土リング内の水圧のモニタリングを行った。トンネル断面内にトンネル延長の半分の 40 m の水抜き管を 2 本設置し、口元に水圧計と自動開閉バルブを設置



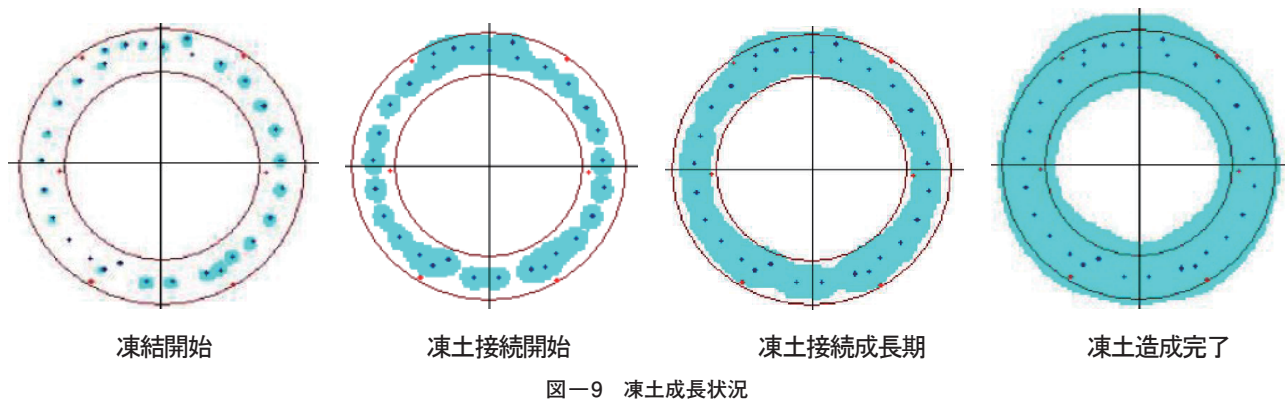
写真－3 防音ハウス



図－7 凍結工フロー



図－8 地中温度測定グラフ



した。これにより、坑口(0 m)および 40 m の地点での凍土造成に伴う掘削断面部の間隙水圧の上昇を確認しながら、段階的に排水を繰り返し、凍土の閉塞の確認を行った。観測された水圧および累計排水量のグラフを図－10 に示す。

3-4 凍土造成結果

凍結機械、凍結管の設置完了後、2013 年 7 月中旬より凍土造成を開始した。削孔記録による凍結管位置からの想定では凍土造成期間は 64 日間と算定されていたが、凍土造成完了まで 107 日間を要した。この原因は以下と考えられる。

(1) 外気による影響

凍土造成開始時期は高温多湿である夏季であった。このため冷却塔の能力低下が見られた。

(2) 防音ハウスによる影響

サイレンサーの吸気抵抗により、防音ハウス内の冷却塔への外気の供給が不足した。このため、冷却塔の十分な冷却能力が得られず、冷凍機的能力が制御された。特に防音扉を閉めた状態での運転を強いられる夜間の能力低下が顕著であった。この問題に対し、強制的に外部から空気を供給するとともに、防音壁内部の空気の循環を改善するために送風機を設置した。また、冷却塔のモーターをトルクの高いタイプに交換し、ファンの角度を調整することで冷却塔への供給空気を増加させる対策を行い多少の改善は見られた。しかし、冷凍機負荷が高い凍土造成初期のブライン冷却に遅れが生じた。

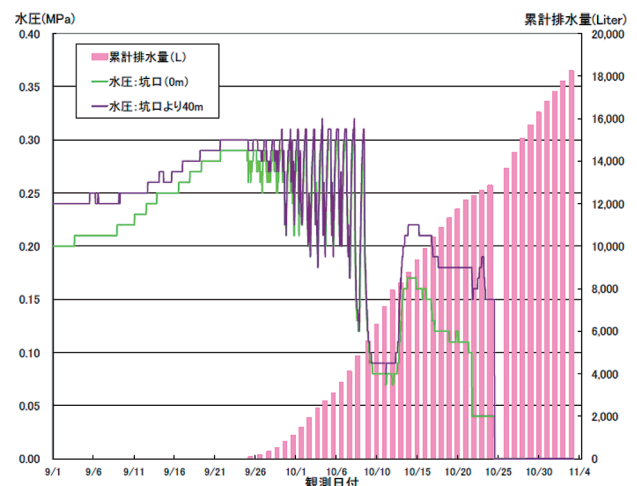
(3) 坑口付近の凍土造成

凍土造成の遅れが顕著であったのは、場所打ち柱列壁背面の坑口付近である。外気が直接場所打ち柱列壁と接するため、掘削準備工による比較的温度の高い外気の影響を受けたと考えられる。また、凍結運転開始初期には、場所打ち柱列壁からの漏水があり、背面の地下水に多少の流れが発生していたと考えられる。対策として坑口前面にビニール製のシートを設置し、外気が直接場所打ち柱列壁に接することを防止するとともに、止水を行った。

§ 4. 掘削工

4-1 施工手順

横坑 B3-1 は凍土造成完了後凍土リング内の機械掘削



写真－4 ツインヘッダーによる掘削

工程	時間																											
	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	1	2	3	4	5	6	7				
⑨2次吹付けコンクリート																												
①上半掘削(油圧ブレイカー)																												
②ザリ搬出																												
③上半掘削(ツインヘッダー)																												
④1次吹付けコンクリート																												
⑤鋼製支保工設置(上半)																												
⑥下半掘削(ツインヘッダー)																												
⑦ザリ搬出																												
⑧鋼製支保工設置(下半)																												

注) ①～⑨は施工手順を示す。

図－11 施工サイクルの一例

を開始し、現在進行中である。掘削はマイクロベンチカットにより行い、1.0 m 毎に鋼製支保工（H-203×203）を設置し、厚さ 293 mm の鋼繊維補強吹付けコンクリートを施工する。吹付けコンクリートは 7 日圧縮強度 25 MPa が要求され、掘削完了後、凍土への付着性の確保および低温下での強度発現の遅延を防止する目的として一次吹付けを行い、鋼製支保工を設置したのち二次吹付けを行う。一次覆工は上半掘削を開始した後、1 週間以内に断面を閉合させる必要がある。凍土厚 1.3 m を維持するため凍結運転を継続したまま上記サイクルを繰り返し、終端部に 1.4 m 厚の一次覆工と同配合の吹付けコンクリートを施工、所定の強度発現の後、凍結運転を停止する手順である。

4-2 実施工

掘削を開始するにあたり、坑口の場所打ち柱列壁の撤去を行った。掘削断面部のみ撤去を行うため、掘削断面外周部に $\phi 100$ mm のコア抜きを行い、場所打ち柱列壁を切断した。このコア抜きは、前述の水圧モニタリング結果と、凍土モニタリングより凍土の閉塞を確認した後、掘削に先行して行われた。コア抜きによる柱列壁切断完了後、所定の厚さまで凍土が成長した段階で、油圧ブレーカーにより掘削断面部の場所打ち柱列壁を撤去した。

機械掘削は全断面ツインヘッダー（写真-4）を使用する計画であったが、掘削が進むにつれ、掘削全断面にまで成長し硬化した凍土が堅固であったため、掘削速度が低下した。このため、中央部を油圧ブレーカーにより破碎し、凍土部の余掘り防止のため掘削に精度が要求される外周部のみツインヘッダーを使用することで、掘削時間の短縮を図っている。現在掘削中の B3-1 の施工サイクルを図-11 に示す。夜間のコンクリート搬入が騒音規制のため不可能であることから、昼間作業は吹付けコンクリートから開始、上半掘削を完了させ、夜間に上半鋼製支保工の設置、下半掘削、下半鋼製支保工の設置を行うサイクルとしている。

現在までの掘削では凍土面および切羽は非常に安定した状態である。また凍土内の湧水も見られず、安全な掘削を行うことができていると言える。写真-5 に油圧ブレーカーによる掘削状況、写真-6 に切羽状況を示す。

§5 まとめ

本工事では土砂地山区域での掘削に、地下水位低下および地表面の沈下を防止するため、凍結工法を使用した横坑掘削が採用された。凍結工法では凍土造成時に地山の膨張に伴い地表面が隆起する凍上が予測され、凍土解凍時に沈下が発生する。凍土内の掘削中の本稿執筆時点では、凍土造成時に顕著な凍上は観測されず、掘削最中にも大きな地表面の変状は観測されていない。引き続き今後の掘削、および解凍期間の挙動を確認し、今後への



写真-5 油圧ブレーカーによる掘削



写真-6 切羽状況

参考として記録を継続する。今回の凍結工事では、水平コントロールボーリングを行い高い精度での削孔を可能にした。凍土の厚さを地中温度測定により間接的に確認する方法を用いる凍結工法では、削孔出来形データが凍土の状況をシミュレーションするために重要なパラメータとなる。このため、今後同種の長距離水平凍結工を採用する場合には、今回使用した高い精度での削孔と同時に孔曲がり測定を可能にする施工方法は極めて有効である。

また、香港での厳しい騒音規制のためではあるが、凍結機器の設置箇所による遅れが発生した。大気環境に依存する凍結機器を設置するにあたっては、適切な出力の機器選定、また騒音対策との関係をより詳細に検討する必要があると感じられた。

今後、B3-1 完了後、B3-2 の施工に着手する。現在までに露見した課題を解決し、より効率の良い施工を実現するとともに、引き続き安全な施工を行う所存である。

参考文献

- 1) 岩田、清水：香港地下鉄西港線 704 工区工事，建設機械施工 Vol. 65, 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,