

シンガポール地下鉄トンネル工事における圧気作業

久保田 祥 一

現在シンガポールでは地下鉄新設路線の建設ラッシュである。そして全ての工区のTBM(トンネルボーリングマシン)に圧気作業の行える設備の搭載, また一定区間毎(当工区で言えば約200m毎)に圧気作業によるチャンバー内のカッター等の検査・交換をすることになっている。本稿ではシンガポールのトンネル工事における圧気設備とその作業の流れ, 安全管理のシステムについて報告するものである。

キーワード: シンガポール, シールド工法, 圧気作業, 安全管理

1. はじめに

当工区(ダウンタウンライン3 C932工区)は駅部(MATTAR駅)を開削工法, 路線部をシールド工法で施工するものである。シールド工事はセグメント外径6,350mm, 延長1,350mの上下線を2台の土圧式シールド機(TBM)にて施工する。地質はN値100以上の硬い粘土と砂からなる洪積世堆積土(オールダルヴィウム)と軟弱粘土と非常にルーズな砂層からなる沖積土(カランプォーメーション)という異なった地層を掘削するのが大きな特徴の一つである。

TBMカッター等の点検・交換時は作業員がTBMチャンバー内に入り作業する。その際に作業員の安全を確保するためコンプレッサーにて圧縮空気(圧気)をチャンバー内(圧気作業空間)に送り込み, 土水圧に抵抗させることで湧水の浸入, 地山の崩落を防止する。

日本ではあまり多く採用されない圧気作業であるが, シンガポールでは地山が複雑に変化するとともに非常に硬質な層も多いことからカッターの摩耗, 設備の破損が懸念される。そのため場所を問わず頻繁にチャンバー内に入り点検・作業する必要がある, 簡易な設備で様々な状況下での作業の可能な圧気作業が一般的となっている。

圧気作業における危険性については, 多数の工事経験からむしろシンガポールの方が熟知しており, 安全性を確保するため非常に細かく法律で規定されている。

シンガポールのトンネル工事における圧気作業設備の一般的な概要・流れ, 作業・管理方法, 作業中の安

全性の確保について当工区の設備を例にとって述べるものとする。

2. 圧気作業設備の概要・流れ

一般的にシンガポールでのトンネル工事における圧気作業設備は次のものが挙げられる。

- ・コンプレッサー
圧縮空気をチャンバー内に送り込む設備。
- ・マンロック
バルクヘッド上部に搭載し, 作業員が圧気されたチャンバー内に入るために体を慣らすための圧力調整室。圧気作業終了後, 作業員の減圧を行い, 外へ出るための調整にも用いる。
- ・マスコントローラー(チャンバー用, 写真-1)
チャンバー内の圧力を一定に保つための圧力調整装置

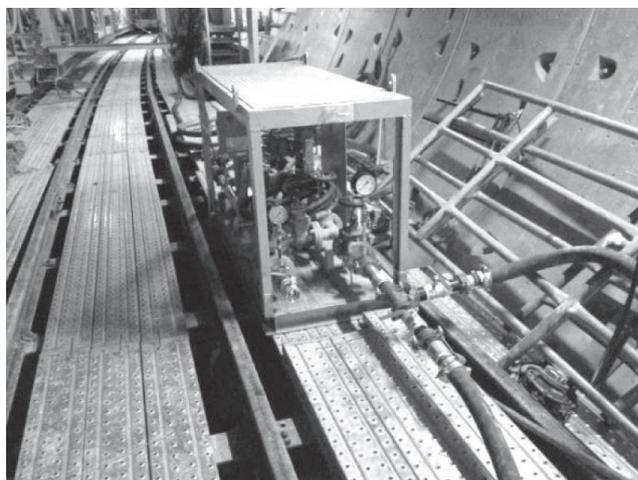
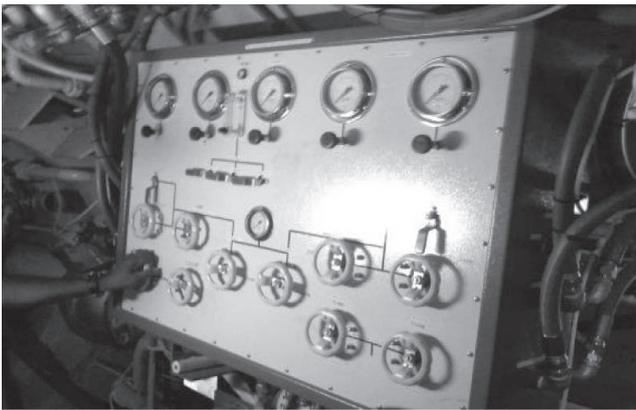


写真-1 マスコントローラー(チャンバー用)

置。内蔵された圧力計で設定圧力を指定し、チャンバー内の圧力を自動でコントロールする。圧力のコントロールはチャンバー内の圧力に応じて送気バルブを自動開閉し、送気量を調整することで行う。送気量の調整と圧力コントロールの関係は後述する(3)参照)。

・マスコントローラー (マンロック用, 写真—2)

マンロック内の圧力調整装置。圧力コントロール原理はチャンバー用と同様であるが、コントロールは自動ではなく専用のオペレーターが内部の状況を確認しつつ手動で行う。



写真—2 マスコントローラー (マンロック用)

・送気管

一般的に配管破裂等のトラブルを避けるため、鋼管を用いる。当工区では4インチ鋼管を用いた。

・メディカルロック (写真—3)

圧気作業時に発症する減圧症等を治療するための圧力調整室。ここには減圧治療用の圧力容器と共に酸素吸入器等の治療設備も設置されている。作業場所になるべく近い所に設置されるのが良いとされ、当工区では発進立坑側に設置した。圧気作業時は専用のオペレーターが常駐し、緊急時の作業員の治療を行う。またマンロックと電話をつなぎ、常時連絡を取り合える

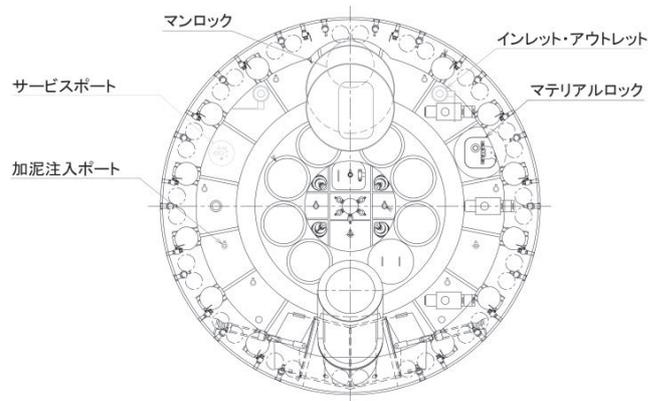


写真—3 メディカルロック

ことが義務付けられている。

・インレット・アウトレット (送排気) バルブ

バルクヘッドに設けられた送気・排気用バルブ (図—1)。基本的に圧気作業時のみ開放される。当工区ではインレット (送気) に5インチ, アウトレット (排気) に2インチバルブを用いた。



図—1 バルクヘッド側圧気設備

・クーリングユニット

圧縮空気の発熱を冷却するための装置。

コンプレッサーから送気される圧縮空気温度は 50~60℃に達する (外気温 30℃の場合)。シンガポールでの圧気作業環境基準は 29℃以下であるため、クーリングユニットの設置は必須である。また、このユニットには圧縮空気内の塵や水分を除去するフィルターも含まれている。通常、コンプレッサーの側に設置される。

・レシーバタンク

定量の圧縮空気をストックする圧力容器。圧気作業時に何らかの理由で送気が不能になり、チャンバー内圧力のコントロールが出来なくなった場合、作業員は直ちに作業を中止しマンロックで減圧調整を行い室外へ退避しなければならない。その退避用圧気供給に用いる。当工区では地上コンプレッサー側に 10 m³, 後続台車内に 1 m³ のレシーバタンクを設置した。

・マンライダー, マンケージ

圧気作業後の作業員を坑外まで搬送する設備。シンガポールでは圧気作業後の作業員個人による徒歩での坑外への退避を認めていない。作業員は圧気作業終了後、安全担当の指示に従い全員集合し、マンライダー (人車), マンケージ (ゴンドラ) に乗り込み坑外まで搬送され、メディカルロックにて健康診断を受けなければならない。当工区では、セグメント台車を加工してマンライダーを作り、バッテリーロコにて立坑まで搬送、15人乗りのマンケージを門型クレーンで吊上

げて作業員を坑外まで搬送した。

・サービスポート

圧気状況下のチャンバー内において清掃、ガス切断、溶接作業を行う際、そのままホース・ケーブル等を機内からチャンバー内まで延長することは出来ない(密閉された空間であるため)。そのためバルクヘッドにサービスポートを設け、使用が予想されるホースやケーブルをあらかじめ埋め込んでおく。サービスポートは通常チャンバー内側で蓋をされており、圧気作業時に作業員がチャンバー内で蓋を取り外しサービスポートからケーブル、ホースを取り出して使用する。

・マテリアルロック

材料をチャンバー内に搬送するための圧力容器。マテリアルロックの前後にはバルブ付扉があり、バルクヘッド内外において作業員がバルブを開けてマテリアルロック内の圧力を各々の側の圧力と合わせて扉を開けることで材料の出入れを行う。当工区ではバルクヘッド右側のスプリングライン上部の位置に設けた。

(1) 圧気設備の選定

設備の選定においては、設計時の事前地質調査結果を基に圧気作業箇所の必要圧力を算定し、決定する。

当工区は採用している切羽土圧等から圧気作業では2.0~3.0 bar (1 bar=0.1 MPa) の圧力をかける必要があると判断された。

その結果、当工区では元圧 7.0 bar、送気量 11.5 m³/min 容量 75 kW の電動コンプレッサーを選定した。また、それに付随してクーリングユニットは大容量の 1,800 m³/h を選定した。

(2) 圧気設備検討の留意点

圧気設備の検討において最も重要なのはチャンバー内の環境管理である。作業員が中に入って作業する以上、チャンバー内の排熱も含めた十分な換気を行わねばならない。またチャンバーからの排水ラインも確保しなければならない。密閉された高圧空間であるチャンバー内においてファンによる換気は出来ない。同様にポンプによる排水も出来ない。また突発的な漏気によるトラブルを防ぐため圧気作業中はスクリュウコンベアは使用出来ない。

これらの留意点を検討して当工区で採用した方法を次項に述べる。

(3) 圧気設備検討例 (C932 工区)

当工区で採用したチャンバー内の環境管理方法は圧縮空気を送気しながらチャンバーから定量の排気を行

い管理するというものである。排気のポートはバルクヘッドに円周状に設置された注入ポート (2 インチ) を用いる。

チャンバー内の容積は 30 m³ である。これを考慮して圧気作業の前段階として半分の 15 m³ 程度の土砂を排出した後、天端付近の注入ポートを開放し、チャンバー内の換気を行う。排気されたエアの酸素濃度、有毒ガスの有無をチェックした上で作業員が中に入りチャンバー内の状況をチェックする。チャンバー内に入った作業員はチャンバー内土量レベルを確認し、排水ポートとして利用するのに最も適した位置の注入ポートを選定し、開放して圧気圧を利用して排水する。この状態を保持した上で、作業員は作業場所をチャンバー上半部と限定し、例えばカッター交換であれば上半部のカッター交換が終了した後、カッターヘッドを半回転させて残りのカッター交換を上半部で行う。

この送排気方法について最も留意しなければならないのは、チャンバー内圧気圧の保持である。風船をイメージしてもらうと理解し易いが、風船を膨らまして口を閉じ、その状態を保持すること(圧気圧を保持する)は容易い。しかし穴の開いた風船を膨らませ、絶えず送気することで風船の状態を保持することは難しい。当工区では圧気作業の 12 時間前からチャンバー内送排気(圧気)を行い、チャンバー内空気の循環を図るとともにチャンバー内圧力を安定させる送排気のパランスをはかった。排気ライン側にマスコントローラーを設け圧力自動調整も考えたが、水・土砂の侵入する恐れのある排気・排水ラインにマスコントローラーを取り付けることは出来ない。そのため排気・排水ホースの口には手動バルブを設け、マスコントローラーのオペレーターが手動によるバルブ開閉により圧力調整を行った。この措置により当工区では圧気圧を一定に保持しながら圧気作業を行うことが出来た。また微妙な圧力調整は送気のマスコントローラーよりもむしろ排気バルブでの調整で行う方がコントロールし易いことも確認できた。

3. 実務における圧気作業の流れ (例: C932 工区)

シンガポールでは、トンネルでの圧気作業を行う作業員は 1 チーム最低 3 名 (以上) と規定されている。

1 名は必ずマンロックに残り、作業状況の確認と外部への連絡、そしてアクシデントが起こった際の救助作業を行う役割とする。

残り 2 名 (以上) がチャンバー内に入り 1 名を主、

もう1名を補助作業員とし、補助作業員は主作業員がアクシデントに遭った際の救助任務も兼ねる。作業員はこの役割を交代しながら規定時間内でチャンバー内圧気作業を行う。当工区ではメイン圧気作業が Cutter 交換という重量物作業であることを考慮し、1チーム3～4人とし、24時間体制で作業を行った。

圧気作業時のチャンバー内設定圧力は作業前の切羽状況チェックにて決定される。最初に地質調査結果から選定された設定圧力で、技術者を含む3人1チームでチャンバーに入り地山状況（地山の強度、土質、湧水の有無等）をチェックする。

切羽状況のレポートをコンサルタントに送り良好と判断されれば、0.5 bar ずつ圧を下げ、チェック・報告・許認可を繰り返す（写真—4）。

最終的な設定圧力は現場にて決定し、圧気作業を開始する。

設定圧力が低いほど作業員に掛かる負担は軽くなるが、作業空間の安全も考慮しながら慎重に判断した。



写真—4 チャンバー内切羽状況チェック

1チーム当りの作業時間はチャンバー内の設定圧力によって細かく定められている。海軍の定める Black Pool Table（圧力別圧気作業時間表）を用いて作業時間と Decompression Time（減圧調整時間）を決定する（例：設定圧力2.0 bar で3時間作業するのであれば、減圧調整時間は1時間46分）。

作業時間の記録はマンロックアテンダント（オペレーター）が行い、マンロックでの加圧調整時から作業時間としてカウントする。また作業終了15分前にチャンバー内作業員に連絡し、作業終了準備と減圧調整準備を促す。

減圧調整を終えた作業員はマンロックから出た後、マンライダー・マンケージ（写真—5）にて坑外に搬

送され、メディカルロックにて健康診断を受ける。そしてそのチームの作業は終了となり、24時間の休息を取る（シンガポールでは法で規定されている）。次チームは前チームの退出後、速やかにマンロックに入室し加圧調整を受け、チャンバーでの圧気作業を再開する。この流れを作業終了まで続けることとした。



写真—5 マンケージ（立坑内作業員搬送用ゴンドラ）

4. 圧気作業における安全管理

圧気作業における安全管理についてはシンガポールの安全法により厳しく規定される。

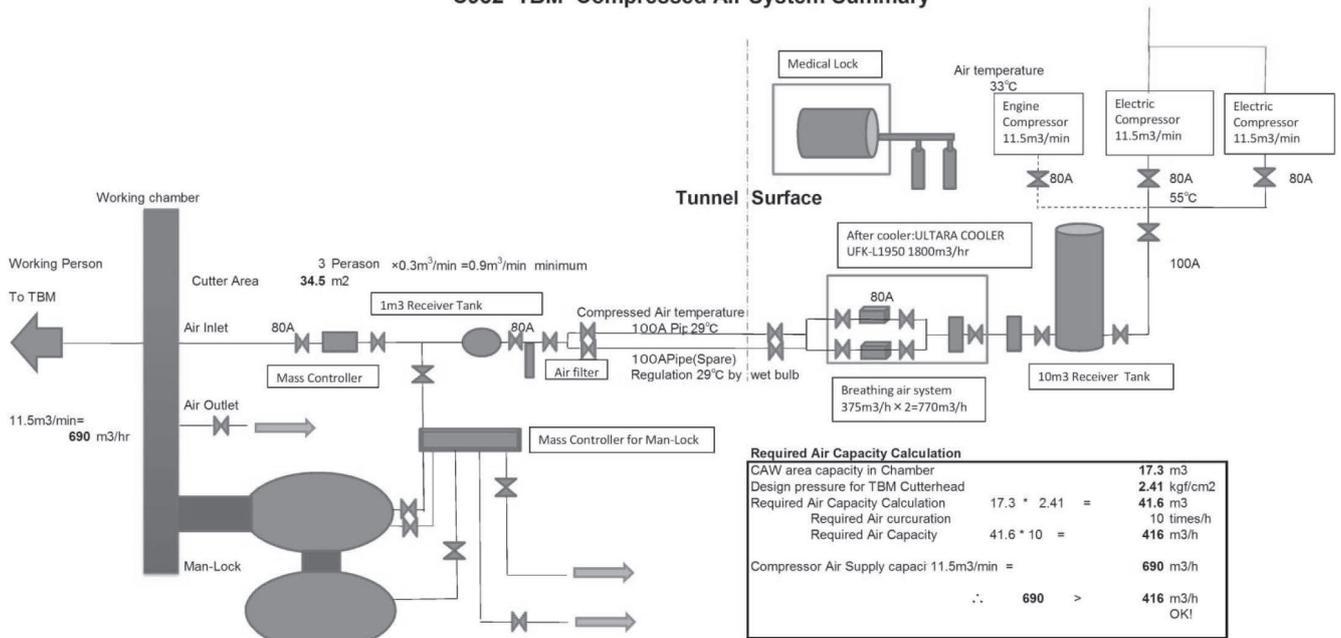
圧気作業設備計画時に発注者の指定する圧気作業の有識者による第三者機関のチェックを受け、圧気設備の承認を受けねばならない。最も指摘されるものはアクシデント時の緊急用予備設備の設置である。この指摘を受け当工区では送気コンプレッサーは3台設置（電動2台、エンジン式1台）した（図—2）。

通常、圧気作業時は電動コンプレッサー2台を稼働させ、片方のコンプレッサーが故障した際も、他方が引き続き送気供給を維持できるようにした。また、停電等のトラブルにより2台共コンプレッサーが停止した場合の緊急措置として、速やかにエンジンコンプレッサーを稼働し圧気作業環境を維持させることとした。

送気管については本管と緊急用予備管（共に4インチ）の2系統を坑内配管し、配管破裂等のトラブルが起こった際に速やかに配管を切替え、チャンバー作業環境を保持するようにした。

また、圧気作業に従事する作業員についても厳しい基準がある。圧気作業に従事する作業員は、事前に圧気専門の病院に赴き、健康診断及び専門検査（耳抜き、肺活量、採血等）を行い医師の承諾を得た者だけが1

C932 TBM Compressed Air System Summary



図一 2 C932 工区で最終的に決定した圧気設備概要図

年間の圧気作業資格を得る。

その後、現場メディカルロックを用いて圧気作業資質検査を行う。

これは 0.5 bar の加圧状況下で耳鳴り、めまい、頭痛等の症状を起こさないか確認する検査であり、これに合格した者のみが圧気作業資格を得る。さらに圧気作業直前には専門の医師による最終健康診断を行い、これに合格した者のみが 2 週間の圧気作業許可を得る。

この時風邪等の体調不良を訴える者に作業は許可されない（圧気作業中に 2 週間を過ぎた場合は特例として当該作業終了までの延長が可能）。

圧気作業中の圧気圧管理については、TBM 掘進管理装置土圧計、マスコントローラー（チャンバー用）圧力計、マスコントローラー（マンロック用）圧力計を用いて管理する。

最も精度の高い TBM に装備されている圧力計のデータをモニタで監視するとともにそのグラフを作成し記録する。

各計器には専任の監視員が付き、常時チャンバー圧気圧をチェックする。マンロックアテンダント・メディカルロックアテンダント（オペレーター）については専門の資格が必要であり、当工区では専門業者と契約し、圧気作業時の安全管理を行った。

マンロックアテンダントは随時作業員の健康管理記録をチェックし、作業不可と判断した者については作業許可を出さない。

また、アクシデント時に自力で歩けない者を担架に



写真一 6 圧気作業時の専用通路（マンロック側）

乗せて速やかにマンロックからマンライダーまで運ぶために、当工区では圧気作業ごとに TBM 機内に専用

通路を設けた（写真—6）。

連絡体制については、圧気作業担当責任者を選任し、圧気作業中は常時現場状況全体を管理する。万が一TBMやトンネル坑内において火災等発生し、圧気作業の継続が困難と圧気作業担当責任者が判断した場合には直ちに作業を中止し、作業員をマンロックにて減圧調整後、避難させる。その際の外部への連絡（発注者・現場・病院等）も圧気作業担当責任者が行うこととした。

これを徹底することにより圧気作業中の速やかな連絡・指示・対応・記録を行うことが出来た。

5. おわりに

今回C932工区での圧気作業を終えて感じたことは、シンガポールは圧気作業をよく研究し、その危険要素を出来るだけ排除することで一般的な作業にまで普及させているということである。

シンガポールは国土が狭い。地上は道路と建築物でひしめき合っている。そして地下は配管・配線・補強杭等埋設物で隙間も無い。このような状況でTBM機外へ出てカッター交換等の作業を行わねばならない時、圧気作業は有効である。

シンガポールでは、安全管理システムを整備・徹底することにより圧気作業をより安全なものに変えた。

今回の作業に当たり、シンガポールでの労働安全衛生法や専門業者からも話を聞き、この国における圧気作業方法を学んだが、総じて圧気作業における安全管

理システムについては日本以上に整備され、良く出来ていると感じた。

日本では圧気作業を避けるために地盤改良や凍結工法、中間立坑等の圧気の代替案とも言える技術を発達させてきた。しかしこれらの工法は施工の場所を選ぶこと、コスト、そして設備に時間が掛かることがネックになっている。近年の大量の地下埋設物の中をすり抜けるように掘削しなければならない地下掘削工事の現況を考えると、圧気作業を行わねば対応できない状況は多々あると考える。

少なくとも圧気作業は危険でさえ無ければ簡易な設備で汎用性も高く、メリットの多い工法である。安全管理システムを整えることで日本でも圧気作業を再認識させることが出来るのではないか？ そのような事を考えさせられた今回の工事であった。

最後に今回の圧気作業に当たり、様々な情報を提供して下さった全てのシンガポール関係者の方、厳しい圧気環境下でのカッター交換に全力を尽くしてくれた全ての作業員に感謝の言葉を送ります。

JICMA

【筆者紹介】

久保田 祥一（くぼた しょういち）
佐藤工業㈱ シンガポール支店
C932 工区担当

