

延長 34.6 km, 高土被り 1,246 m の TBM トンネルでの高温岩盤掘削とその対策

Total 34.6 km Length TBM Tunneling with High Rock Temperature under Max 1,246 m Earth Covering

大橋 健司*
Kenji Ohashi

要 約

延長 34.6 km, 最大土被り 1,246 m の長距離トンネル工事において、掘削外径 ϕ 5.2 m の硬岩 TBM による掘進時に最大 56°C の岩盤温度、温水出水を観測した。このような高岩盤温度、大量高温湧水のモニタリング結果、及びこれらに対応した切羽作業の労働環境改善対策、並びにその効果について報告する。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 地形・地質概要
- § 3. 高土被りと高温化による諸問題
- § 4. 対策工
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

本プロジェクトは、JICA（(独)国際協力機構）が資金供与する円借款工事である。マレーシアの首都クアラルンプール（セランゴール州）の生活・工業用水を確保するため、隣接するパハン州より日量 189 万 m³ の導水能力を持つ、延長 44.6 km, 掘削外径 5.2 m の導水トンネルを建設する工事である。トンネルは 8 工区に分かれているが、その内 3 工区間、延長 34.6 km は 3 台の硬岩 TBM で、4 工区間、延長 9.1 km は NATM 工法で、残り 1 工区 0.9 km を開削工法で施工するものである。TBM 区間のそれぞれの延長距離は、TBM-1 工区および TBM-2 工区が L=11.6 km, TBM-3 工区が L=11.2 km であった。また、TBM 工区の最大土被りは 1,246 m で、土被り 1,000 m 以上の区間は延長約 5 km に達した（図-1、図-2 参照）。

本稿では、TBM-2 工区で遭遇した高温度岩盤並びに高温出水の状況と、その対策について報告する。

§ 2. 地形・地質概要

本トンネルの位置する周辺地形は、標高 50~1,300 m 程度の山岳地形である。地質はペルム紀（約 2 億 9,900 万年~約 2 億 5,100 万年前）から三疊紀（約 2 億 5,100 万年~約 1 億 9,960 万年前）の硬質な花崗岩（細粒花崗岩~粗粒花崗岩）がほぼ大半を占めるが、起点側工区である NATM-1, NATM-2 工区（延長 3.1 km）には堆積岩が分布する。また、本トンネル施工区間には、6 箇所の断層と 17 箇所のリニアメント（地質的線状模様）が確認されていた。



図-1 現場位置図

* 海外（支）パハン（出）

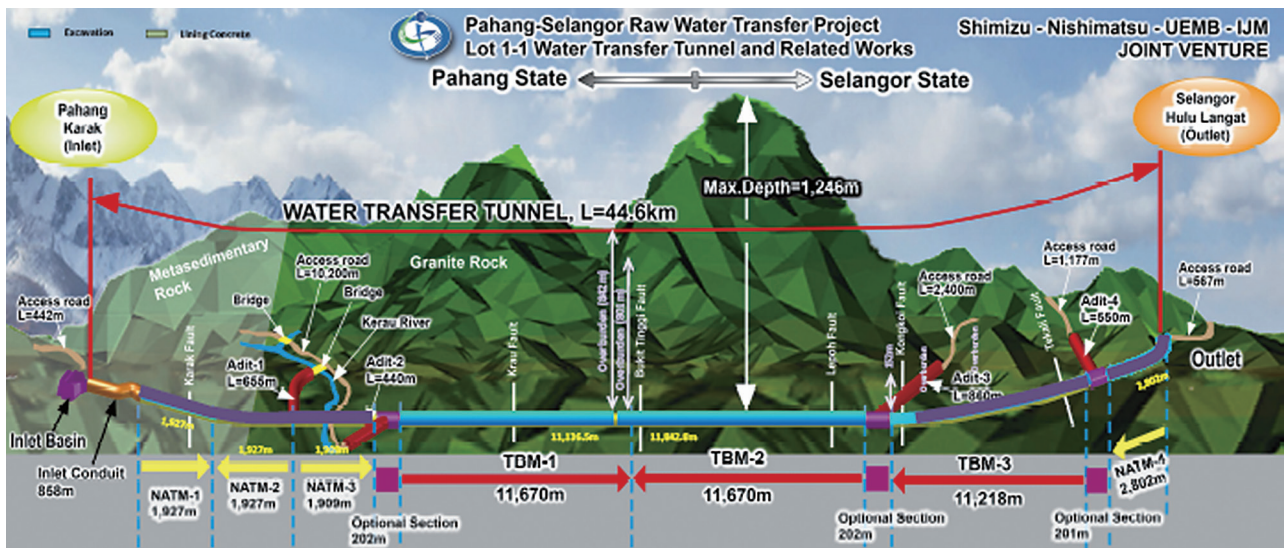


図-2 プロジェクト概要鳥瞰図

§ 3. 高土被りと高温化による諸問題

3-1 小規模山はね現象を生じた高土被り

TBM 工区の最大土被りが 1,246 m に達する上に、1,000 m 以上の土被り区間が延長 5 km にも及ぶことが特徴である。表-1 に示すように、世界でも 8 番目の高土被りトンネルのひとつである。

土被りが約 1,000 m の掘進地点では、側壁に鱗片状の岩片の突出が断続的に確認された。地山の一軸圧縮強度は 100~200MPa と高く、高土被り区間での掘進中、側壁部および切羽で小規模な山はねが発生した。TBM-2 工区における山はね発生区間の延長は 1,800 m にも及んだ。この山はね現象により大きく割れた掘削ズリが、コンベアホッパー部での閉塞を起こし、さらにベルトコンベアの損傷を引き起こしてトンネル進行を妨げる原因となった。

山はねの危険性を確認するため土被り 1,130 m 地点での地山初期地圧を測定した結果、トンネル側面での応力集中は 82.9 MPa であった。このことより大規模な山はねは発生しないと推定されたが、実際にその後は二次山はねは発生しなかった。

表-1 トンネル土被り世界ランキング

トンネル名称	国名	土被り (m)	目的
1 Grottharrd Base Tunnel	スイス	2,500	鉄道
2 Jinping II Hydro, Headrace Tunnel	中国	2,500	導水
3 Olmos Trans-Andean Tunnel	ペルー	2,000	導水
4 Zhongnanshu Tunnel	中国	1,640	道路
5 Furka Base Tunnel	スイス	1,500	鉄道
6 Vereina Tunnel	スイス	1,500	鉄道
7 Dai-Shimizu Tunnel	日本	1,300	鉄道
8 Pahang Selangor Raw Water Transfer Tunnel	マレーシア	1,200	導水
9 Shin-Shimizu Tunnel	日本	1,200	鉄道
10 Kanetsu Tunnel	日本	1,190	道路
11 Lotscheberg Base tunnel	スイス	1,190	鉄道
12 Kerman Water Supply Tunnel	イラン	1,160	導水
13 Pir Panjal Railway Tunnel	インド	1,140	鉄道
14 Hida Tunnel	日本	1,024	道路



写真-1 山はね状況 (側壁部)



写真-2 山はね状況 (切羽)

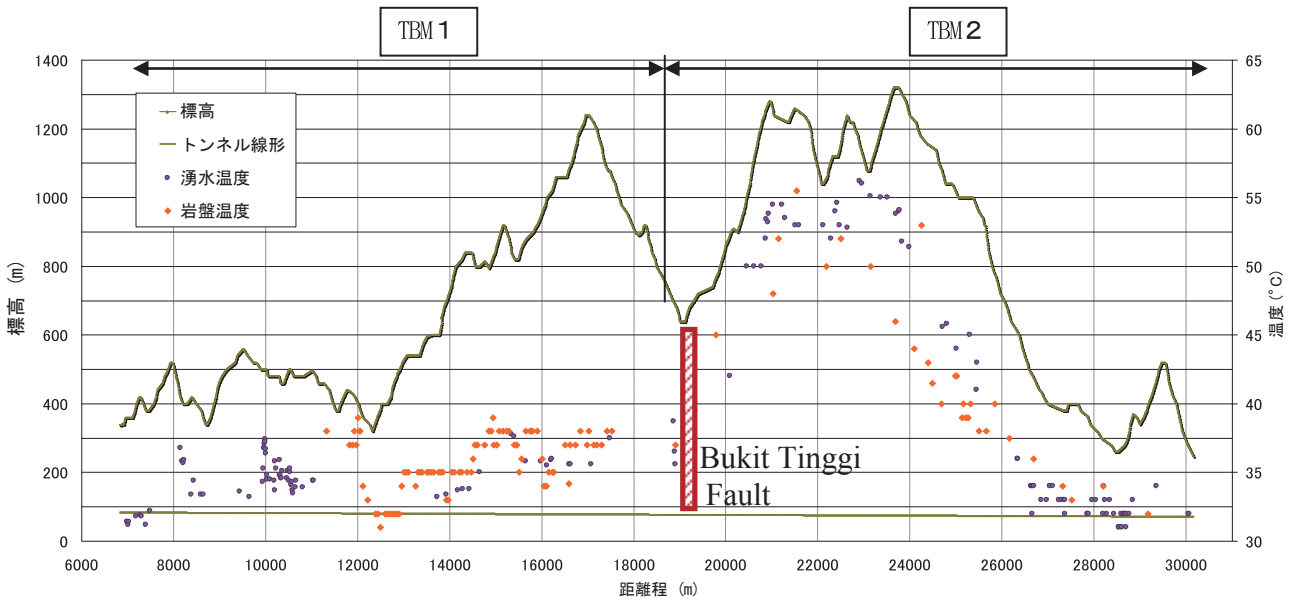


図-3 土被りと岩盤温度、湧水温度の関係

3-2 高温岩盤状況

TBM-2 工区では掘削延長 4 km を越えた地点から坑内温度上昇が顕著となり、掘削延長 11 km まで継続したが、岩盤温度と湧水温度の両方で同様な温度上昇が確認された。どちらも最大 56℃ と非常に高く、坑内での作業環境を大きく悪化させた。一方、図-3 に示すように TBM-1 工区でも土被りが 1,100 m を超える区間を掘削したが、土被り増加に伴う温度上昇は観測されず、最高岩盤温度は 38℃ 程度であった。

図-4 に TBM-1,2 工区での土被りと岩盤温度の関係を示す。TBM-2 工区での土被りに対する温度勾配は 0.029℃/m であった。

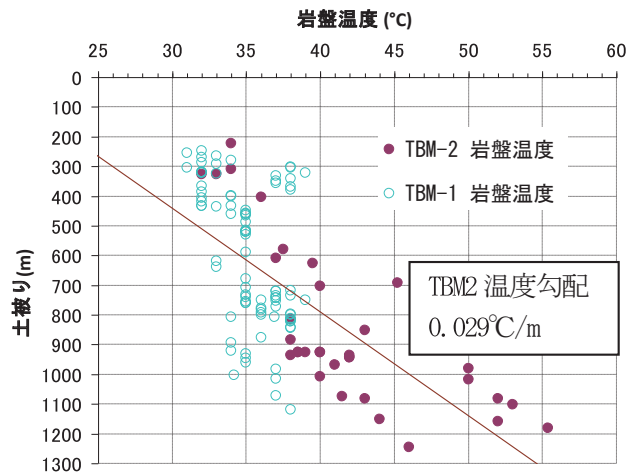


図-4 土被りと岩盤温度の関係

図-5 に TBM-1,2 工区の土被りと湧水温度の関係を示すが、TBM-2 工区での高温湧水に比べ、TBM-1 工区では 1,100 m 以上の土被り地点でも湧水温度は 38℃ 程度であった。

図-6 に TBM-1 工区の湧水量を示す。トンネル全体で坑内に流入する湧水量が 11 km 掘進時に約 15 m³/min と極めて多い。これは地表面から亀裂を通して流入する地下水量が多いため、地山が冷却されたものと考えられる。

これに対して TBM-2 工区では、11 km 掘進時に約 5 m³/min と少なく、特に高土被り区間では湧水量が少ない。地表面からの亀裂の入り方も影響し、TBM 区間の断層 (Bukit Tinggi Fault) を境として、湧水量の減少と高温岩盤温度の出現が生じたと考えられる。また、この断層を境として高温水が地表に湧き出る場所 (温泉) は、TBM-2 工区側に限られている。

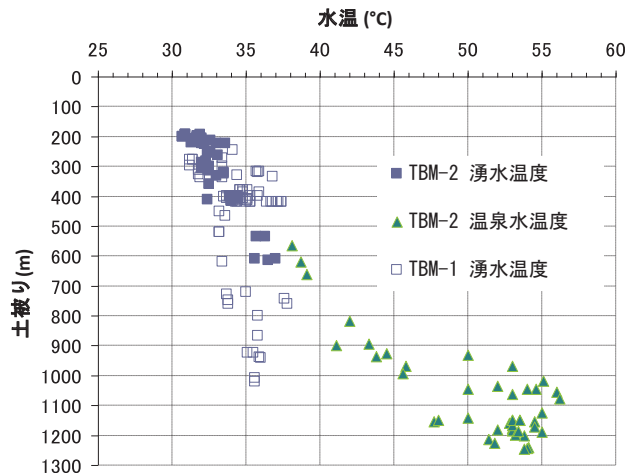
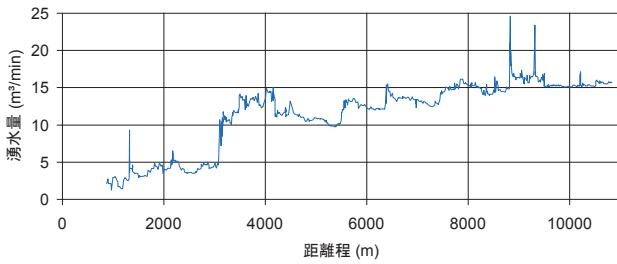


図-5 土被りと湧水温度の関係

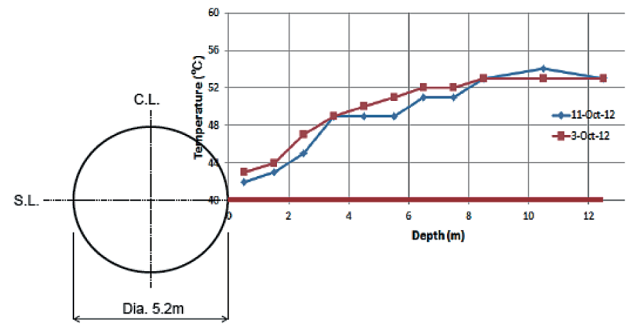


図一六 TBM-1 工区の湧水量

3-3 岩盤内部温度測定

TBM-2 工区の CH24,252 m 地点 (土被り約 1,100 m) で、トンネル中心から水平削孔して岩盤内部温度を計測した。図一七に計測結果を示す。なお、削孔位置は出来るだけ切羽に近く、水平削孔が可能な後方台車前方 (切羽から 35 m) にて行った。

この時の岩盤内部温度は最大で 53℃ を計測した。TBM 切削壁面から 8.0 m 以深で一定した温度となっている。これは掘削進行に伴い、坑内換気および切羽冷却設備によりトンネル坑内が冷やされていることを示している。



図一七 岩盤温度分布測定結果 (TBM-2 工区 CH24,252 m)

3-4 坑内作業環境悪化問題

高温地山掘削による坑内温度上昇のため、以下の問題が生じた。

- (1) 集中力, 作業効率の低下
- (2) 給水温度上昇のため機械冷却効率が低下し, TBM 掘削が停止
- (3) TBM 後方台車に設置した冷房設備の能力低下
- (4) 坑内全線でのメンテナンス作業が困難

§ 4. 対策工

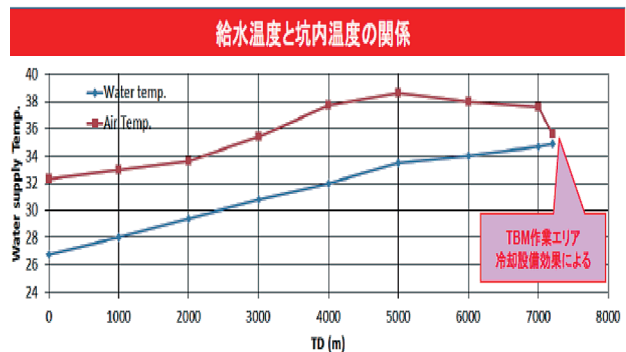
4-1 当初設備計画

工事計画時の岩盤温度は 30~32℃ 程度を想定していたため、坑内の冷房設備能力としては TBM 後方台車に設置する 450 kW の冷房装置だけであった。これは TBM 掘削時に、総出力約 3,000 kW の TBM から発熱される熱量のみを考慮し、主作業場所である後方台車内を 28℃ 以下に保つための計画であった。1つのトンネル延長 11 km という長距離掘進のため、配管材等の経済性を考慮して、TBM への給水は 6 インチ鋼管 1 系統で計画していた。

換気方式は送気方式とし、契約仕様書にある坑内風速 0.3 m/s を上回る 0.5 m/s で計画した。風量 1,158 m³/min (風圧 4.542 kPa, 90 kW モータ×2 台) のコントラファンを坑口に設置し、風管は径 1.6 m のビニール風管を採用した。表一に TBM 工区の主要設備仕様を示す。

表一 主要設備仕様

名称	型式	位置
TBM	ロビンス (米国) 5.2 m 径	
カッターモータ	330 kW × 7 = 2,310 kW	
カッターディスク	19" × 27 ケ, 17" × 8 ケ (センター)	
推進ジャッキ	3,500 kN × 4 = 14,000 kN	
	1.8 m ストローク	
電動機容量	約 3,000 kW	
連続コンベヤ	ロビンス (米国) 400 t/hr	発進基地
ベルト速度	3.0 m/秒	
コンベヤベルト	幅 610 mm 鋼ワイヤ入	
ベルトストレージ	ストック量 640 m	発進基地
メインドライブ	188 kW × 2 台	
中間ブースタ	375 kW × 1 台	
ディーゼルロコ	GIA 10 t 56 kW エンジン	軌条
コントラファン	GIA 90 kW × 2 連	坑口
坑内風管	GIA 径 1.6 m 1 条	坑内
冷房設備	WAT 450 kW	後方台車
給水配管	6 インチ鉄管 1 系統	坑内



図一八 給水温度と坑内温度の関係

4-2 対策工

切羽作業環境の改善及び坑内作業における局所冷却に絞って計画し、TBM 掘削の中断を伴わないで施工可能な対策工法とした。

(1) 切羽冷房装置増設

TBM 後方台車内に 450 kW 能力の冷房装置を 1 台増設して合計 2 台とし、作業エリアの環境改善を図った。この冷却装置には 1 台当たり約 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ の給水が必要のため、2 台で $2 \text{ m}^3/\text{min}$ の供給が必要となる。掘削時における TBM 作動油他の冷却用や吹付作業等に必要約 $1 \text{ m}^3/\text{min}$ を考慮し、冷房装置用と合わせて $3 \text{ m}^3/\text{min}$ の低温度水を TBM まで供給するための設備も必要となった。

(2) 給水冷却化と給水能力増加

冷房装置を 2 台同時運転させるため、新たに地上給水タンクに水冷却設備を設置した。80 kW 能力×3 台、150 kW 能力×3 台の水冷却設備を設置し、給水タンク内の水を約 25°C に冷却して送水した。しかし図-8 に示すように、切羽へ到達するまでに坑内の熱によって約 10°C 上昇したため、管末での水温は 35°C に達した。

6 インチ鉄管 1 条の給水管では約 $2 \text{ m}^3/\text{min}$ 程度しか送水できないため、断熱材で被覆した配管を坑内全線にもう 1 条増設し、給水の温度上昇を抑えるとともに給水量を 2 倍に増大した。

(3) 移動式局所冷房装置

坑内全線における軌条等の坑内設備メンテナンス作業の際に使用する、移動式冷房装置を製作した。2 台の 5 kW 能力エアコンを移動用平台車に設置し、18 kW ファンで送風する局所冷房装置である。ただし、冷房能力が小さいため、作業場所はテント等で締め切って冷却効果の向上を計り、高圧線を延伸する際に行うケーブルジョイント作業等で使用した。給水量の倍増後は、220 kW 能力のエアコンを移動平台車に据えた局所冷房装置により、坑内測量や複線設置作業など広範囲作業を行った。

(4) 冷却ベスト

下記に示すような 3 種類の市販冷却ベストを使用し、坑内でのメンテナンス作業の効率向上を図った。

- ① 圧縮空気から低温空気を取り出し、ベスト内に送風する方式
- ② 電池駆動ポンプにより、氷水をベスト内に循環する方式
- ③ 予め冷却したパックをベスト内に挿入する方式

上記の内、①は圧縮空気を常時供給する必要があるため、ホースを常に接続する必要があり作業性が悪い。また高湿度下ではエアコンプレッサー故障が多く発生するため、使用できなかった。②は氷水ボトルと電池を交

換すれば連続使用が可能であった。③は約 20 分毎のパック交換を要するが、最も作業性に優れていた。しかし、3 つの方式全てにおいて全身冷房は不可能であり、15 分ほどで休憩が必要となるため、作業効率の向上にはほとんど繋がらなかった。



写真-3 後方台車冷房装置



写真-4 移動式局所冷房装置



写真-5 冷却ベスト



写真-6 エアコン搭載人車

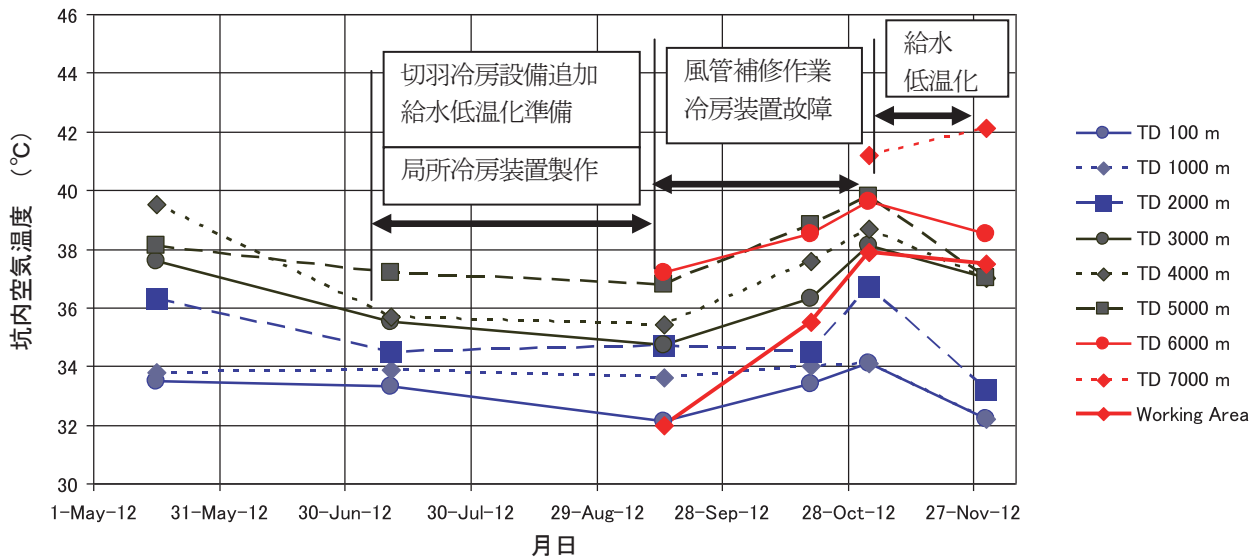


図-9 坑内温度改善効果

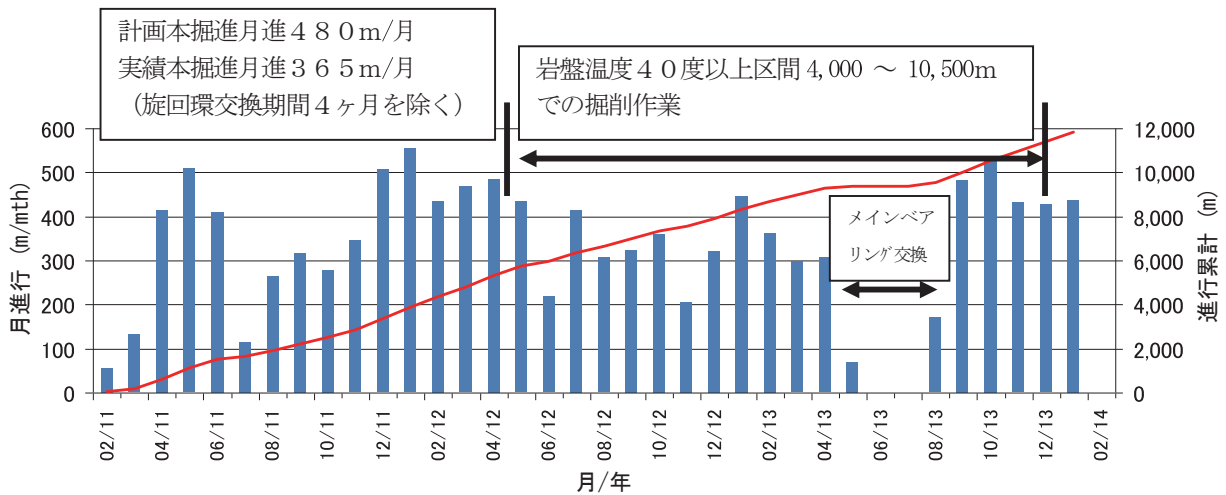


図-10 TBM2 掘削実績

(5) エアコン搭載人車

掘削終盤では延長距離が 11 km 以上となるため、ディーゼルロコでの移動時間に片道 60 分を要した。移動中の作業環境維持のため、水冷式エアコンを人車に設置するとともに、人車の鋼製車体内側には断熱材を貼り、アクリル板で囲むことで密封性を向上させた。水冷式エアコンは予備 1 台を含めて 2 台搭載したが、このエアコン用として 9 m³ 水タンクと 50 kVA 発電機を平台車に搭載した。

§5. おわりに

図-9 に対策工を行う前後の温度状況を示す。TBM 故障時等の掘削停止中においてのみ追加配管の設置を行ったことより、設備稼働までに 1 年以上を費やし、切羽冷房装置を 2 台同時運転するまでには約 1 年間を要した。

給水冷却対策以降も給水量不足から、掘削停止時のみ 2 台同時運転となったものの、故障時には予備設備に即時切替え可能となり、切羽作業の環境維持を可能にした。また、対策工を行う前はメンテナンス作業時に風に当た

るために、作業員が意図的に風管を傷つけ、坑内風速が 0.5 m/s 以下に低下していた。配管設置時に風管修復作業も同時に行なうことで、坑内全体で 1~2℃ の低減効果があった。TD7,000 での温度が若干上昇しているが、これは切羽冷房装置が効率よく稼働した結果、冷房装置から排水される温水によって坑内温度が上昇したためである。冷房装置の前後では、3~4 度の温度差が生じていた。

図-10 に月毎の進行実績を示す。機械故障や地質条件に起因する遅れもあるため、高岩盤温度の影響のみを進行結果から明確に関連付けることは出来ないが、局所的に切羽作業の環境維持を目的とした対策としては十分な結果が得られたと考える。この報告が、今後の同種工事の一助となれば幸いである。

2014 年 5 月末の竣工に向け、最後の山場を迎えている。

参考文献

河田孝史・仲野義邦・水戸聡

「全長 44.6 km, 最大土かぶり 1,246 m でマレー半島を貫く」トンネルと地下 第 44 巻 1 号 2013 年 1 月 pp. 33-44