

貫通 東南アジア最長 44.6 km : パハン・セランゴール導水トンネル

河田 孝志・仲野 義邦・岩野 健

マレーシア国パハン・セランゴール導水トンネルは東南アジア最長のトンネルである。導水路トンネルは、3つのTBM工区（延長34.6 km）と4つのNATM工区（延長9.1 km）および1つの開削工区（延長0.9 km）の計8つの工区に分けて施工し、そのうちTBM工区は3台のTBM（Tunnel Boring Machine）で掘削施工した。本プロジェクトは2009年6月1日に開始し、2014年2月19日に、東南アジア最長44.6 kmのトンネルが貫通した。TBM施工区間では、想定を超える大量突発湧水、大土被り区間での高温岩体および山はね、TBMのメインベアリングの損傷等の困難に遭遇した。本稿では、これら困難を克服した成果について述べる。

キーワード：TBM、海外工事、大土被りトンネル、高温岩体、山はね、大量突発湧水

1. はじめに

本プロジェクトは、JICA（独立行政法人 国際協力機構）が資金貸与する円借款工事であり、マレーシアの首都クアラルンプールおよびセランゴール州の生活・工業用水を確保する為、隣接するパハン州より日量189万 m³を導水する延長44.6 kmの導水トンネルを建設するものである。

本トンネルは完成すると世界で11番目の長さに、東南アジアでは最長となる。現場位置図を、図-1に、プロジェクト概要図を図-2に示す。



図-1 現場位置図

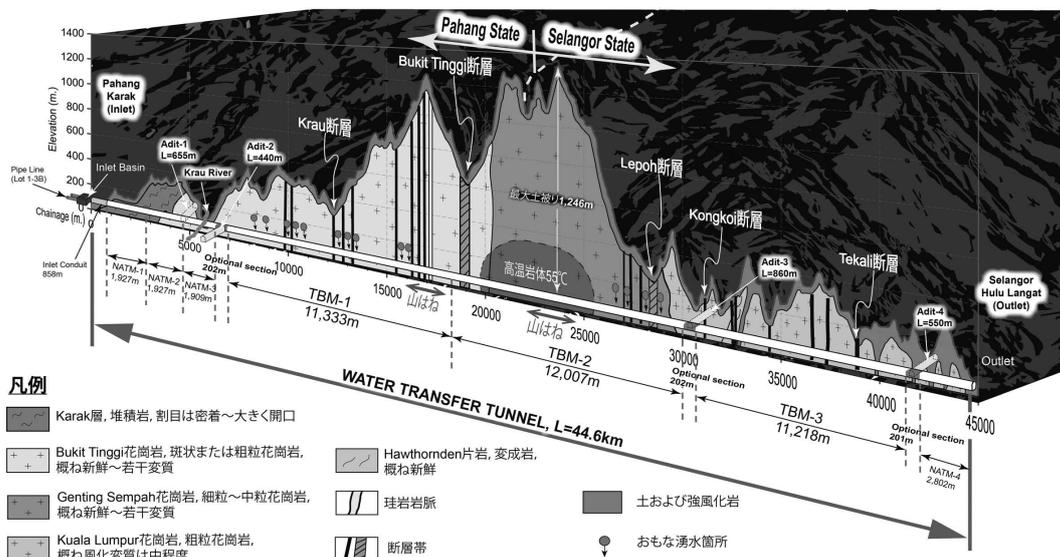


図-2 プロジェクト概要図

2. 工事契約概要

発注者：マレーシア政府，エネルギー・環境技術・水資源省
 施工管理：東電設計・SMEC（豪州）・SMHB（マレーシア）JV
 施工：清水建設・西松建設・UEMB・IJM JV（UEMB, IJM はマレーシアのゼネコン）
 工期：2009年6月1日～2014年9月5日(1,922日)
 工事金額：384億円（2009年5月1日レート換算）
 資金：JICA 75%，マレーシア政府 25%
 契約約款：FIDIC（1987年第4版，1992年修正版が基本）
 契約方式：BOQ方式



写真-1 TBM 全景

3. TBM仕様

TBMは、最大一軸圧縮強度 250 MPa の岩の掘削に対応できるように高スラスト，高トルクを基本とするオープンタイプ TBM である。ディスクカッタ径は，シングルカッタが 19 インチでセンターカッタは 17 インチであり，ディスクカッタ数は 35 個である。掘削径は，導水能力を確保するのに必要な内空断面から $\phi 5.2$ m である。TBM 全景を写真-1 に TBM の主要諸元を表-1 に示す。

表-1 TBM 主要諸元

項目	仕様	
掘削径・型式	5.2 m, オープンタイプ	
全長・総重量	205 m, 420 トン	
掘進ストローク	1.8 m	
電源	AC11,000 V, 3 相, 50 Hz	
カッターモーター出力	2,310 kW (7 × 330 kW, 690 V)	
ディスクカッタ径	19 インチ (483mm)	
カッタ 個数	シングルカッタ	27 個 (19 インチ)
	センターカッタ	8 個 (19 インチ)
	計	35 個
カッター最大荷重	312 kN (19 インチ)	
総推力	14,000 kN (= 3,500 kN × 4 個)	
装備カッタトルク	4,054 kN・m (回転数 5.4 rpm)	
カッターヘッド回転速度	0 ~ 12 rpm	
ベルト コンベヤ	幅	914 mm
	容量	895 m ³ /時間

4. TBM掘削実績

TBM 掘進実績を図-3 に示す。各工区別の進行の一覧は，表-2 の通りである。

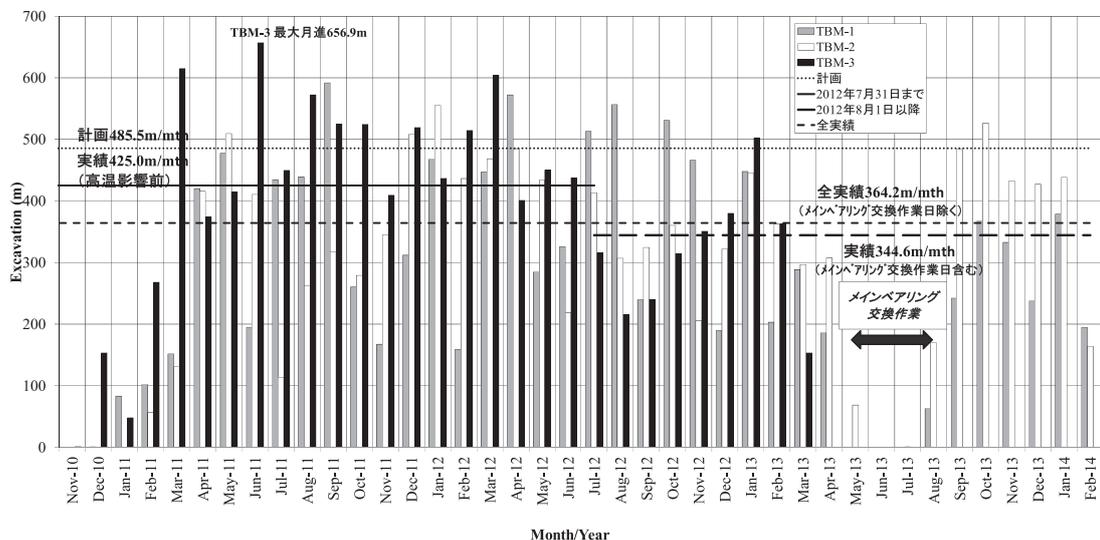


図-3 TBM 掘削実績

表一 2 TBM 工区別進行

		TBM-1 工区	TBM-2 工区	TBM-3 工区
初期掘進開始日	計画	2011 年 4 月 16 日	2011 年 4 月 1 日	2011 年 2 月 17 日
	実績	2010 年 12 月 29 日	2011 年 2 月 16 日	2010 年 11 月 29 日
掘削完了日	計画	2013 年 5 月 7 日	2013 年 6 月 14 日	2013 年 3 月 29 日
	実績	2014 年 2 月 19 日	2014 年 2 月 19 日	2013 年 3 月 22 日
平均月進行 (本掘進)	計画	509.8 m	472.5 m	475.4 m
	実績	322.6 m 37%低下	350.4 m 26%低下	433.7 m 9%低下
最大日進行実績		40.0 m	45.6 m	48.5 m
最大週進行実績		173.0 m	176.0 m	197.9 m
最大月進行実績		591.6 m	555.2 m	656.9 m

5. TBM 掘削施工における困難

3 台の TBM で、34.6 km のトンネルを掘削するにあたっては、様々な困難に遭遇した。そのうち、主なものを、以下に記す。

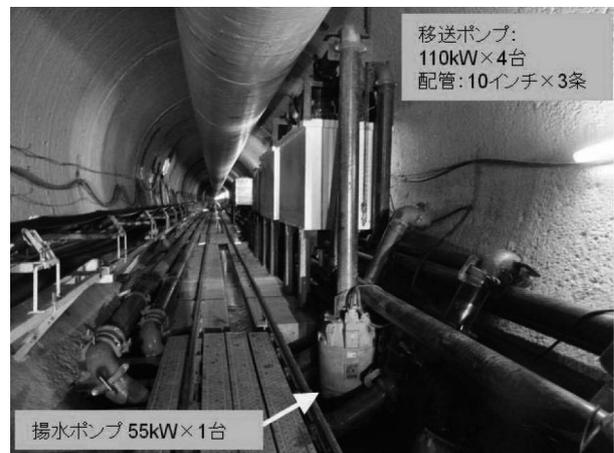
(1) 大量突発湧水

施工計画段階から、大量突発湧水は当プロジェクトの最も大きなリスクであった。その対策としてスペックで想定された坑内湧水量 10 t/分の倍の 20 t/分の排水設備を設置した。最上流 TBM-1 工区は下り勾配 (1/1,900) での TBM 掘削であるため、排水設備の重要度は非常に大きい。トンネル掘削延長と坑内湧水量の関係を図一 4 に示す。TBM 先端での突発湧水状況 (湧水量 9.8 t/分) を写真一 2 に示す。

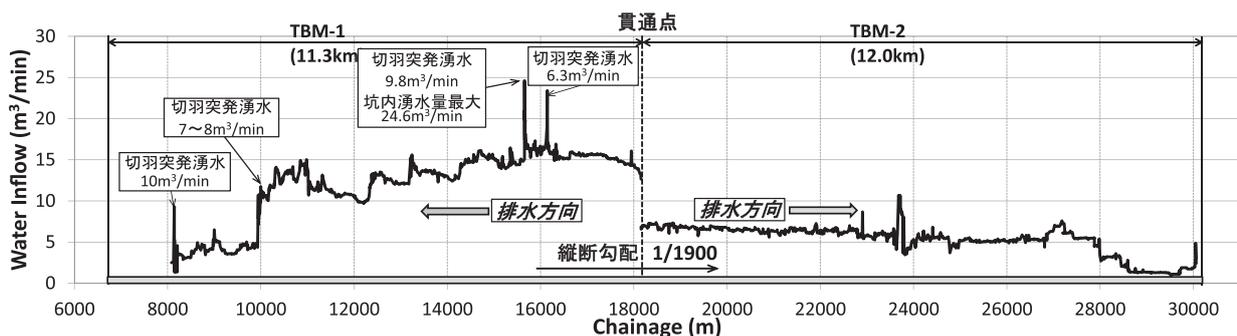
突発湧水発生後の顕著な坑内湧水量の減少傾向が見られず、坑内湧水量が 15 t/分と最大排水能力 20 t/分に近づいたため、地形図に突発湧水発生箇所をマッピングして分析した。その結果から、今後も突発湧水が発生することが予測されたため、排水能力を 31.5 t/分 (写真一 3) に増強した。この対策により、最終的に TBM-1 工区は大量突発湧水を克服した。



写真一 2 TBM-1 突発湧水状況 (TBM カッタヘッド部)



写真一 3 TBM-1 坑内排水設備



図一 4 TBM-1 と TBM-2 の坑内湧水量

(2) 大土被り区間の高温岩体

TBM-2 工区の土被りが 900 m を超える付近から土被り増に伴い、岩盤温度および湧水温度が上昇した(図一5)。岩盤温度最大は 55 度、湧水温度最大は 56 度と非常に高く、作業環境、および作動油および潤滑油温度上昇等の TBM 掘削に影響を及ぼした。

TBM-2 工区において岩盤温度が 50 度以上の区間は約 5 km にも及ぶ。

高温対策として下記の対策を実施し、作業環境改善に努めた。

- ① TBM 本体および後方台車区間への冷却設備の増設 (増設後冷房能力 450 kW × 2 セット) し作業箇所の温度低下を図る (写真一4)
- ② TBM 先端作業水温度低下を図る為、水温の低い水源の確保、作業水温度上昇抑制の為の配管断熱材の設置、作業水量増量
- ③ 作業員坑内移動車への冷却装置の設置 (水冷式 3.7 kW エアコン、冷却水搭載用 9 m³ 水槽、50 kVA 発電機) (写真一5)
- ④ 後方メンテナンス作業箇所への移動式特殊冷却設備の配置 (冷房能力 230 kW、可搬型エアコン)

TBM-1 工区では、大量湧水が岩盤温度上昇を抑制していると推察され、土被りの増加に伴う岩盤温度の上昇する顕著な現象は見られなかった。

(3) 大土被り区間の山はね

本トンネルの最大土被りは 1,246 m であり、1,000 m 以上の土被り区間が 5 km と長いことが特徴である。土被り約 1,000 m 掘進地点で山はねが発生し、側壁に鱗片状の岩片の突出が断続的に確認された。山はねの発生直後の状況を写真一6、7に示す。山はね発生後の2次山はねは発生していないため、早期のファイバーモルタル吹付施工 (t = 3 cm, 全周施工) により山はねによる飛石災害を防止した。この対策により、



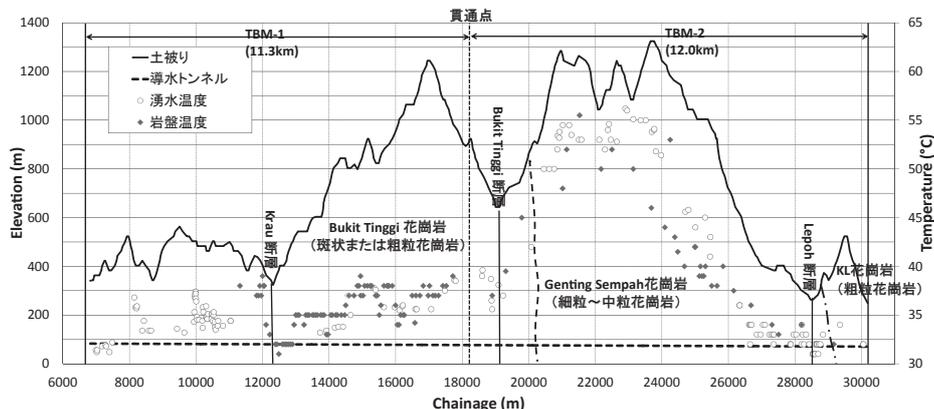
写真一4 TBM 後続 冷却設備搭載 (右側の設備)



写真一5 作業員坑内移動車への冷却設備搭載 (奥がエアコン)



写真一6 TBM-2 山はね発生状況 (切羽部)



図一5 TBM-1 工区と TBM-2 工区の岩盤温度と坑内湧水温度の分布



写真一七 TBM-1 山はね発生状況 (左側壁部)

無災害で山はね区間の TBM 施工ができた。TBM-2 工区における山はね発生区間は 2,695 m にも及んだ。

(4) TBM メインベアリングの損傷

2013 年 4 月下旬, TBM-1 が 9,514 m, TBM-2 が 9,363 m 掘削したところで, メインベアリングの損傷が確認され, 掘削停止を余儀なくされた。損傷状況を写真一八に示す。損傷時のカッタヘッド回転数を表一三に示す。計画段階のリスク検討においてメインベアリング破損を考慮し, 2 個の予備メインベアリングを TBM メーカー側で準備させていたため, メインベアリング交換作業は TBM-1 では 2.5 ヶ月, TBM-2 では 2 ヶ月で完了することができた (写真一九)。



写真一八 TBM-2 メインベアリング損傷状況

表一三 カッタヘッド回転数実績

	TBM-1	TBM-2	TBM-3
TBM 先端位置	9,514.1 m	9,363.1 m	11,217.6 m (掘削完了)
カッタヘッド 累積回転数	5,060,985 rev	4,722,845 rev	4,172,829 rev
平均カッタ 貫入量	1.9 mm/rev	2.0 mm/rev	2.7 mm/rev
メインベアリン グ損傷の有無	有	有	無



写真一九 TBM-2 メインベアリング交換状況

6. TBM 坑内解体 (TBM-1, TBM-2)

TBM-1 工区と TBM-2 工区の貫通点は, TBM 坑土の貫通と非常に稀なケースで, 2 台の TBM 解体は TBM 坑内貫通点での作業となる (TBM-3 工区は TBM-2 工区の TBM 発進基地での貫通となるため, TBM 解体は TBM-2 工区の TBM 発進基地での作業となる)。TBM 坑内解体の制約条件として以下の事項が挙げられる。

- ① TBM-1 工区の坑内湧水量は 12 t/分と多く, かつ下り勾配であるため, TBM-1 工区の排水設備の撤去は TBM-2 工区の吹付ライニング作業完了後となる。排水設備存置のままでの TBM-1 の解体搬出をする場合は, 坑内での解体分割数が多くなり時間を要する。
- ② TBM 解体作業場所の坑内温度は 42℃, 坑内湿度は 98% と作業環境が非常に厳しく作業効率が悪い。よって坑内解体作業を少なくする必要がある。以上の制約条件のもと, 以下に示す解体計画を立てた。

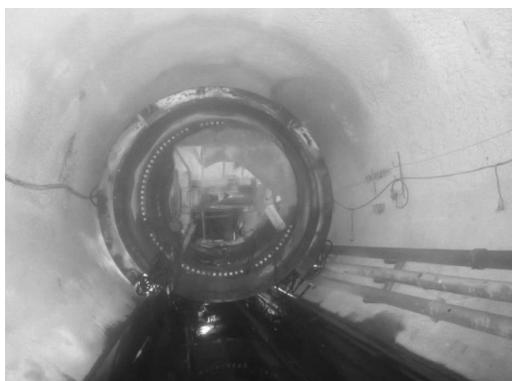
- ① TBM-1 と TBM-2 の両機体は TBM-2 発進基地側へ搬出する。
- ② TBM 解体場所拡張掘削は, TBM カッタヘッド解体のための最小拡張断面とする。
- ③ TBM 坑内解体作業を最小限にするため, TBM カッタヘッド, ルーフサポート, サイドサポートおよびバーチカルサポートのみ坑内解体とし, TBM カッタヘッドサポート, メインビームおよびメイングリッパ等の主要部は自走式移動台車を

設置して一体のまま TBM 発進基地へ自走搬出する。

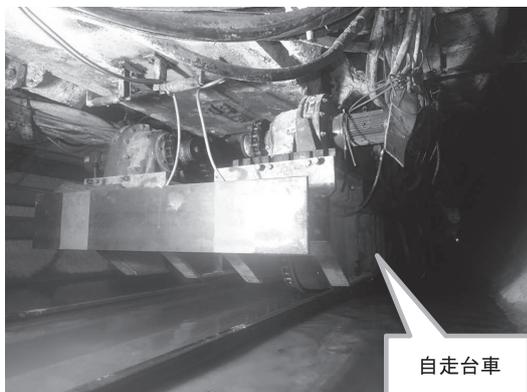
- ④ TBM 後続台車は 1 台ごと連結を切り離して、ディーゼル機関車にて一体のまま TBM 発進基地へ牽引搬出する。

TBM 発進基地から坑外搬出に関しては、TBM 発進基地にて TBM 本体を 12 軸の多軸式台車に載せ替えて、坑外へ牽引搬出した。TBM 解体・搬出状況を写真一 10～13 に示す。

- これにより、
- ① 坑内解体作業数量の削減および坑内火気作業削減による安全性の向上。無事故で TBM 坑内解体を



写真一 10 TBM-1 坑内移動状況



写真一 11 TBM-1 坑内移動用台車取付状況 (カッタヘッド側)



写真一 12 TBM-2 発進基地到達状況

完了。

- ② 坑内 TBM 自走移動実績：923 m/日
- ③ TBM2 台の解体所要月数：5.5 ヶ月
- ④ TBM-1 工区側での吹付ライニングの早期開始が可能となった。

7. おわりに

2009 年 6 月の着工以来、数々の困難に遭遇しながらも、現場スタッフおよび作業員が一体となって困難に正面から立ち向かい、工夫改善により困難を克服し、2014 年 2 月 19 日に東南アジア最長となる延長 44.6 km のトンネルを 47 ヶ月で掘削することができた。(写真一 14)。2015 年 2 月下旬現在、TBM-2、TBM-3 工区の坑内作業は終了、TBM-1 工区は坑内設備撤去作業を進めており、工事完遂に向け現場一丸となって竣工に向け、最終段階である。

謝 辞

本工事の施工にあたり、マレーシア政府、エネルギー・環境技術・水資源省、ならびに東電設計・SMEC・SMHB、JICA、在マレーシア日本大使館の皆様から御指導、御支援を賜りましたことに深く謝意を表します。



写真一 13 TBM-2 坑外搬出状況 (多軸台車にて)



写真一 14 最終貫通状況

《参考文献》

- 1) 河田孝志, 仲野義邦, 水戸 聰: 全長 44.6 km, 最大土かぶり 1,246 m でマレー半島を貫く—マレーシア パハン・セランゴール導水トンネル, トンネルと地下, 巻: 44, 号: 1, ページ: 33-44 2013
- 2) 河田孝志, 仲野義邦, 水戸 聰: 大量湧水や高温岩体を伴う花崗岩大土かぶり部 35 km を TBM で突破, マレーシア パハン・セランゴール導水トンネル, トンネルと地下, 巻: 45, 号: 8, ページ: 27-38 2014
- 3) 水戸 聰: 東南アジア最長 44.6 km を TBM で貫通, マレーシア パハン・セランゴール導水トンネル, 土木施工, 巻: 55 号: 12 ページ: 50-53 2014
- 4) T. Kawata, Y. Nakano, T. Matsumoto, A. Mito, F. Pittard, Y. Honda : Challenge in High-speed TBM Excavation of Long-Distance Water Transfer Tunnel, Pahang-Selangor Raw Water Transfer Tunnel, Malaysia, World Tunnel Congress 2013 Geneva Page 1-8

【筆者紹介】

河田 孝志 (かわた たかし)
 清水建設㈱ 執行役員 土木技術本部
 本部長
 (前) 清水建設㈱ 西松建設㈱ UEMB IJM 共同企業体
 所長



仲野 義邦 (なかの よしくに)
 清水建設㈱ 西松建設㈱ UEMB IJM 共同企業体
 副所長



岩野 健 (いわの たけし)
 清水建設㈱ 土木技術本部 機械技術部

