

# 長距離 TBM トンネル施工での前方探査 —マレーシア パハン・セランゴール導水トンネル—

清水建設(株)	正会員	中島 穰
清水建設(株)	正会員	水戸 聡
清水建設(株)	正会員	松本 高之

## 1. はじめに

マレーシア パハン・セランゴール導水トンネルは延長 44.6km におよぶ東南アジア最長のトンネルである。導水トンネル本体は、3 つの TBM 工区 (全長 34.6km)、4 つの NATM 工区 (全長 9.1km)、1 つの開削トンネル工区 (全長 0.9km) の計 8 工区で施工された。主となる TBM 工区では、TBM の最大特徴である高速施工性を生かすことが要求された。そこで TSP (Tunnel Seismic Prediction)、水抜きを兼ねた探り削孔による前方探査により、不良地山を事前に把握し、対策及び準備を前もって進めながら TBM 掘削を行った。

本稿では、本工事で実施された前方探査の結果について報告する。

## 2. 地形・地質概要

パハン・セランゴール導水トンネルはマレーシア半島を南北に縦断するティティワンサ山脈、標高 50 m~1300m 程度を東西に横断する。山地構成体は、ペルム紀 (約 2 億 9,900 万年前~約 2 億 5,100 万年前) から三畳紀 (約 2 億 5,100 万年前~約 1 億 9,960 万年前) に形成された硬質な花崗岩 (細粒花崗岩~粗粒花崗岩) がほぼ全体を占め、起点側に堆積岩が分布する。本トンネル施工区間には、事前に 6 か所の断層と 17 か所のリニアメントが確認されていた。

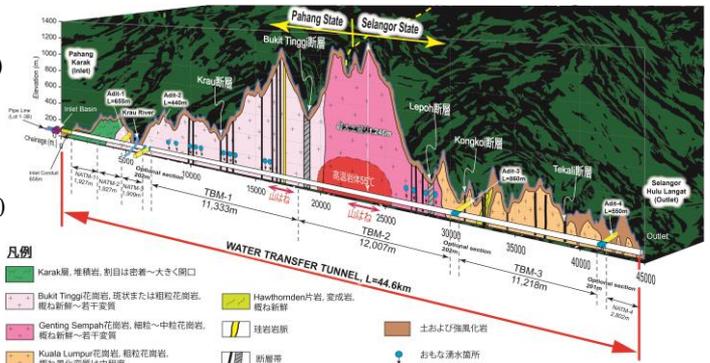


図-1 地形・地質概要図

## 3. TSP(Tunnel Seismic Prediction)による地山評価

TSP は発破の震源から発生した地震波が切羽前方の岩盤中の弱層部 (不良地山) に当たって反射してきた反射波を受振して、起震から受振までの時間および地震波の速度から弱層部の位置を求める手法である。本工事では、3 成分 (トンネル軸方向、トンネル鉛直方向、トンネル直交方向) の反射波データを用いて切羽前方の地質状況を三次元的に推定できるトンネル地山探査システム TSP203 用いた。



写真-1 天端部崩落状況

3 つの TBM 工区のうち最初に施工が開始された TBM-3 工区で、本掘進開始直後に掘削延長 201~206m 地点で写真-1 に示す崩落 (崩落規模: 推定高さ 3.9m, 推定崩落体積 12m³) が発生した。この区間の花崗岩は茶色~茶褐色に変色し、風化は長石に起因するものであった。

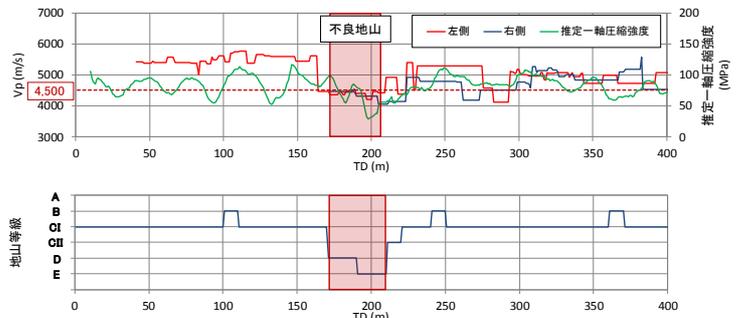


図-2 TSP 結果 (TBM-3)

花崗岩類の風化に関する文献資料 1)によると、崩落部の花崗岩の変質は段階 2 であり、この変

キーワード: 長距離 TBM トンネル, 花崗岩, TSP, 探り削孔

連絡先: 東京都中央区京橋 2 丁目 16-1, Tel. 03-3561-3891, Fax. 03-3561-8672

段階2での弾性波速度  $V_p$  は 3.0~4.5km/s としている。事前実施された図-2 に示す TSP の結果と照合すると崩落部および近傍の弾性波速度  $V_p$  は 4.5km/s 以下であることから文献資料と符合した。図-2 に示す推定一軸圧縮強度は、TBM 機械データから計算される掘削エネルギーを一軸圧縮強度に換算したものである。以降、TSP では弾性波速度  $V_p \leq 4.5\text{km/s}$  を弱層部判定の指標とした。

3つのTBM工区で実施したTSPの結果より得られた、地山等級別の弾性波速度  $V_p$  測定結果を図-3 に示す。

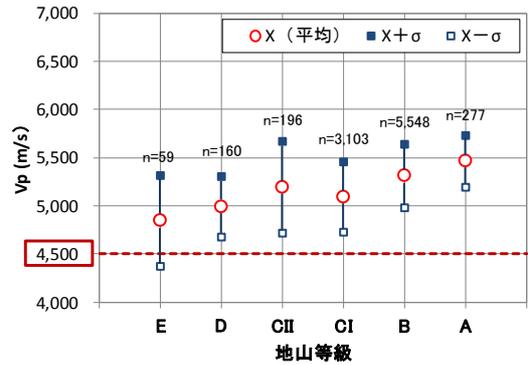


図-3 地山等級別の  $V_p$  測定結果

4. 探り削孔による地山評価

探り削孔は、前述のTSPとは異なりTBM切羽前方の地山状況を直に把握できる手法である。探り削孔はTBM本体に搭載された削岩機により行うことができるため何時でも実施可能であり、探り削孔が水抜き孔を兼ねる利点がある。探り削孔概略図を図-4に、探り削孔評価項目を表-1に示す。

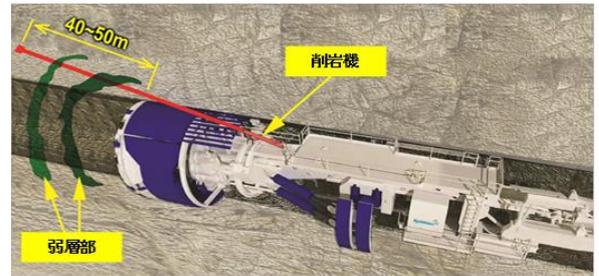


図-4 探り削孔概略図

表-1 探り削孔評価項目

項目	評価例	
穿孔速度	硬質 遅←(速度)→速 軟質	
削孔スライム	粒度	硬質 細←(粒度)→粗 軟質
	形状	細かく尖っている→亀裂少ない 礫状が多い→亀裂発達
	色	灰色→新鮮な花崗岩 茶色混じり→風化花崗岩混在 白色混じり→強風化花崗岩混在
孔内湧水量	—	

探り削孔時の穿孔速度とシュミットハンマーによる一軸圧縮強度の関係を図-5に示す。削岩機性能曲線はTBM搭載削岩機能力の70%の曲線(ビット径76mm)を示し、実績と符合している。風化花崗岩(変質段階2の花崗岩)での平均穿孔速度は132cm/minであり、一軸圧縮強度は27MPaであった。亀裂が発達し、かつ湧水が発生した花崗岩での平均穿孔速度は122cm/minであり、推定一軸圧縮強度は49MPaであった。以上より、探り削孔による地山判評価は、削孔スライムの目視観察と合わせて、穿孔速度120cm/min以上を弱層部判定の指標とした。

5. まとめと考察

TBM-3 工区において最初の不良地山での崩落が発生したが、この箇所で行ったTSPの結果と実際の地山が非常に良く一致していたことからTSPの信頼性が得られ、同時に弱層部判定の指標を得られた。TSPと探り削孔による前方探査結果と、坑壁観察等による地山評価をフィードバックにより前方地質の予測精度を高めたことにより、地山不良部を事前に把握することが可能となり、事前の支保部材の準備、地山性状に応じたTBMオペレーションの指示を行うことができた。表-2に3つのTBM工区で実施したTSPと探り削孔の実施延長を示す。

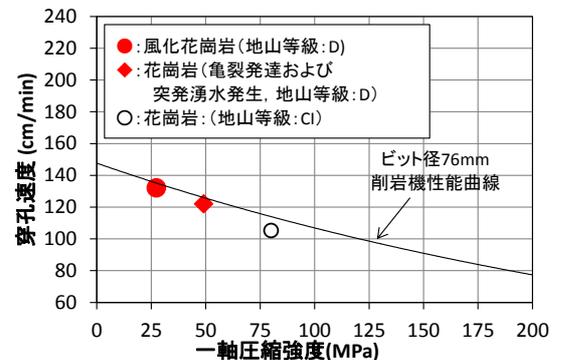


図-5 穿孔速度と一軸圧縮強度の関係

表-2 前方探査実施延長

TBM工区	トンネル延長(m)	TSP(切羽前方探査)			探り削孔		
		測定回数	探査延長(m)	実施率(%)	実施回数	実施延長(m)	実施率(%)
TBM-1	11,333	14	1,680	14.8	82	2,734	24.1
TBM-2	12,007	24	2,880	24	23	937	7.8
TBM-3	11,218	29	3,480	31	40	1,441	12.8
計	34,558	67	8,040	23.3	145	5,112	14.9

参考文献

- 1)九里尚一ほか：花崗岩類の風化に関する研究（I），物理探鉱，第24巻 第1号，pp.6-17，1970
- 2)河田孝志ほか：TBMにおける長大トンネルの施工，弱層部におけるTBM掘進管理，第13回岩の力学国内シンポジウム&第6回日韓ジョイントシンポジウム 講演論文集，pp.449-452，2013