

# 特殊地山条件下でのTBM施工

水戸 聡<sup>1</sup>・松本 高之<sup>2</sup>・河田 孝志<sup>3</sup>

<sup>1</sup>正会員 清水建設株式会社 土木技術本部地下空間統括部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目1-16)

E-mail:a-mito@shimz.co.jp

<sup>2</sup>正会員 清水建設株式会社 国際支店マレーシア営業所

(12-3, 12th Floor, Faber Imperial Court Jalan Sultan Ismail, 50250 Kuala Lumpur, Malaysia)

E-mail:t\_matsumoto@shimz.co.jp

<sup>3</sup>正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目1-16)

E-mail:t-kawata@shimz.co.jp

マレーシア パハン・セランゴール導水トンネルはマレーシアの首都クアラルンプール圏内の将来の生活・工業用水不足に対応すべく、水源豊富なパハン州より189万m<sup>3</sup>/日の水をクアラルンプール圏内に導水する東南アジア最長44.6kmのトンネルである。本トンネルは、最大土被りが1 246mに達し、土被りが1 000m以上の区間が5kmを占めた。また大土被り区間では、断続的な山はねの発生、土被り増に伴う岩盤温度上昇（最大岩盤温度55℃、岩盤温度50℃以上の区間が5km）という現象が確認された。トンネル全長44.6kmのうち34.6kmは3台のTBM (Tunnel Boring Machine) で施工され、そのうちの中央のTBM-2工区では、大土被り高温岩体という特殊地山条件下でのTBM施工であった。ここでは、日本国内では例の少ない、大土被り高温岩体という特殊地山条件下でのTBM施工で得られた知見について報告する。

**Key Words :** Tunnel Boring Machine, high overburden, hot rock, rock burst, TBM boring energy

## 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、マレーシアの首都クアラルンプール圏内の将来の生活・工業用水不足に対応すべく、水源豊富なパハン州より189万m<sup>3</sup>/日の水をクアラルンプール圏内に導水するものである。トンネル延長は44.6kmにおよび東南アジア最長のトンネルである(図-1)。本工事は、3つのTBM工区(φ5.2m, 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工区で大規模な導水トンネルを建設する非常に珍しいプロジェクトである。主となるTBM工区では、最大土被りが1 246mに達し、土被りが1 000m以上の区間が5kmを占めた。大土被り区間では、断続的な山はねの発生、土被り増に伴う岩盤温度上昇(最大岩盤温度55℃、岩盤温度50℃以上の区間が5km)という現象が確認された。

ここでは、大土被り高温岩体と山はね発生という特殊地山条件下でのTBM施工で得られた知見について報告する。

## 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の標高50m～1 300m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)がほぼ全体を占めるが、起点側工区のNATM-1, 2工区(延長3.1km)には堆積岩が分布する。本トンネル施工区間には、6か所の断層と21か所のリニアメントが確認されている。地質縦断実績を図-2に示す。



図-1 トンネル位置図

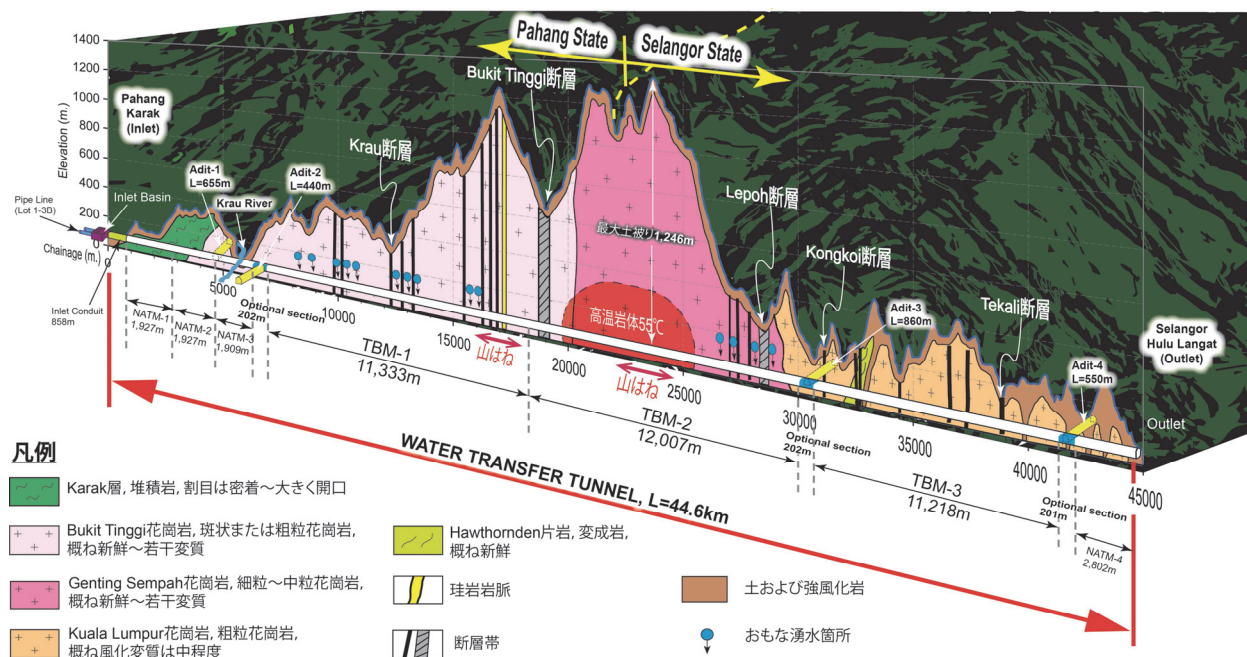


図-2 地質縦断実績図

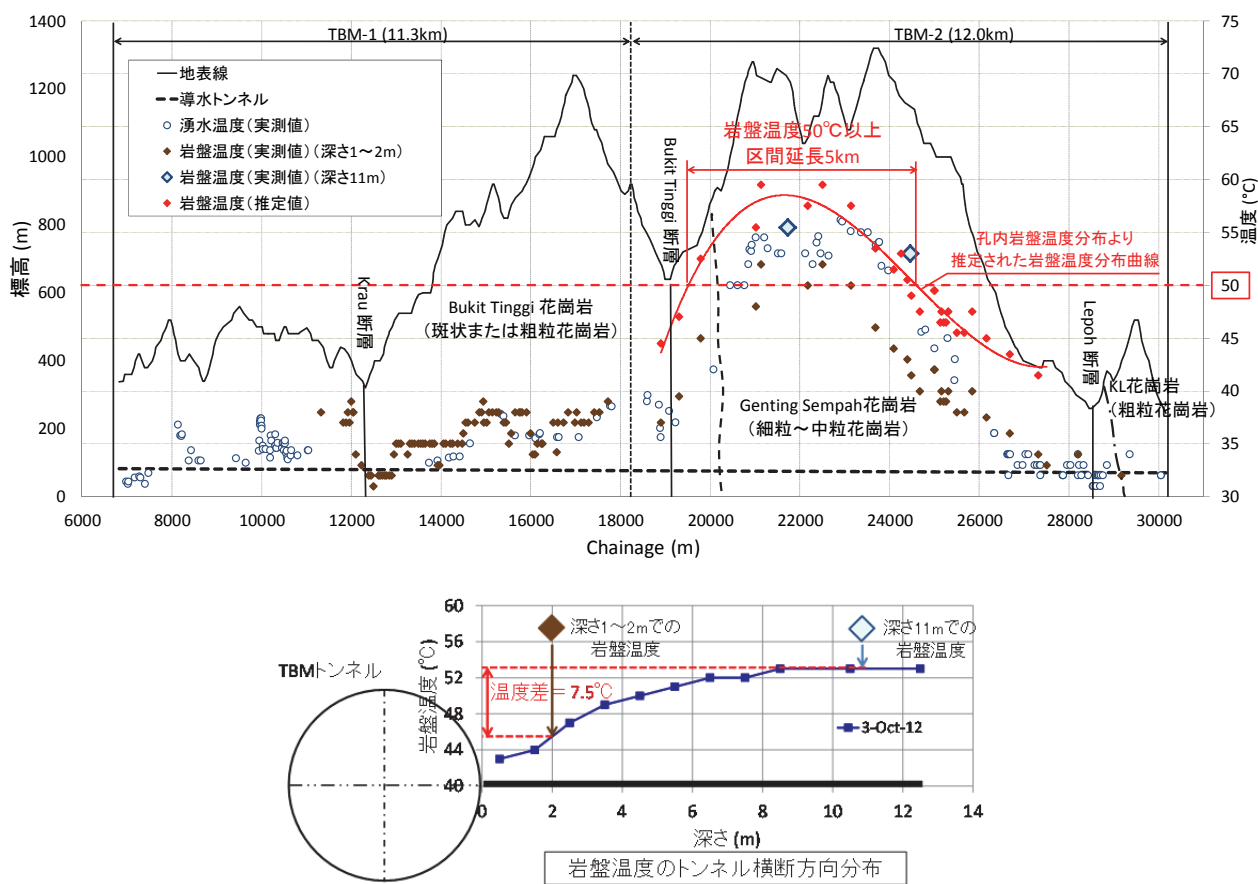


図-3 岩盤温度と湧水温度の分布

### 3. 大土被り区間下での高温岩体

細粒～中粒花崗岩が占めるTBM - 2工区では、土被り増に伴い、岩盤温度も上昇し最大岩盤温度は55℃に達した(図-3)。地温勾配は、事前地質鉛直ボーリング調査(地表より深度300mまで)では地温勾配は1.5℃/100mであったが、実際には図-4に示すように2.4℃/100mであった。この値は、火山など熱異常の原因となるものがない一般の場所での地温勾配3℃/100mよりも小さい。斑状または粗粒花崗岩が示すTBM-1工区では、土被り増に伴う岩盤温度上昇という顕著な現象は生じなかった。これは、TBM-1工区における大量湧水が岩盤温度上昇を抑制していたとも推察される。

高温岩体区間では、坑内最大温度が43℃、湿度が100%という劣悪な作業環境であった。高温環境下では、人間にはもちろんのこと、電気機器、作動油と潤滑油の温度上昇により機械にも悪影響をおよぼした。高温岩体区間延長は長く、坑内全体を冷却することは困難であったため、経済的かつ効果的な冷却対策についての検討が必要となった。

### 4. 高温岩体におけるTBM施工

TBM掘削開始当初よりTBMに水冷式冷却設備を設置していたが、TBM掘削時の岩盤とカッタの摩擦による発熱(TBMカッタヘッド内部温度約50℃)と、TBMへの給水温度の上昇(トンネル延長1kmあたり1.1℃上昇)により、当初の冷却設備能力では作業員および機械電気設備への負担が大きくなりTBM掘削進捗が著しく低下した。トンネル全体を35℃に冷却するためには合計3500kWの冷却設備が必要となるが、これによる機械費の大幅な増加、給水設備の大幅な増設が必要となる。そこで本工事では、高温対策として以下の事項を実施した。

- TBM作業場所であるTBM後続台車間の冷却を目的とした、TBM後続台車搭載水冷式冷却設備の増設(450kW×1台→450kW×2台)(写真-1)
- 水冷式冷却設備増設に伴う給水管の増設(1.5m<sup>3</sup>/分→3.0m<sup>3</sup>/分)
- 坑外作業水冷却設備による給水温度の低下
- 給水管に断熱材を設置してTBM先端までの給水温度上昇を抑制
- 坑内人車と機関車運転室への水冷式冷房設備の設置(写真-2～3)
- 坑内軌条保守点検作業等は前記の坑内人車を休憩台車として使用し、2班による交替作業にて行った

(作業時間：10～15分、休憩時間：45～50分)。坑内温度43℃地点での坑内人車内温度は31℃。

上記対策の実施により、高温岩体区間でのTBM掘削平均月進行324.1mであった。

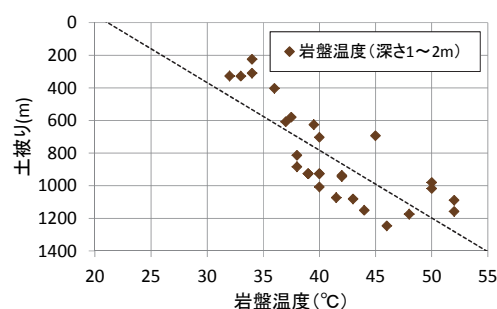


図-4 地温勾配 (TBM-2工区)



写真-1 TBM水冷式冷却設備



写真-2 水冷式冷房搭載人車



写真-3 水冷式冷房搭載人車内部

## 5. 大土被り区間下での山はね

山はねは、TBM-1 工区で土被りが 800m 以上、TBM-2 工区で土被りが 1 000m 以上の区間で断続的に発生した（写真-4）。山はねの発生は、切羽から 1D 以内の範囲での発生がほとんどであったが、一部切羽後方 400m の位置で発生した。山はね発生合計延長は 311m で、発生頻度は対象区間の 6～7%であった。大土被り下（土被り 1 130m）で実施した円錐孔底ひずみ法による初期地圧測定結果を図-5 に示す。

## 6. 山はね発生区間におけるTBM施工

山はねの発生位置を特定することは困難であり、山はねによる飛石が人に当たり怪我をする危険があることから、以下に示す対策を実施した。

- TBMルーフサポート後端でファイバーモルタル吹付けを全周実施（厚さ $t=30\text{mm}$ ）し、飛石ならびにそれによる災害発生を防止する（写真-5）。
- TBM掘進停止直後のTBMカッタヘッド内部への立ち入りを禁止し、カッタ交換は約30分後にTBMカッタヘッド前面の山はねが収まってから行う。

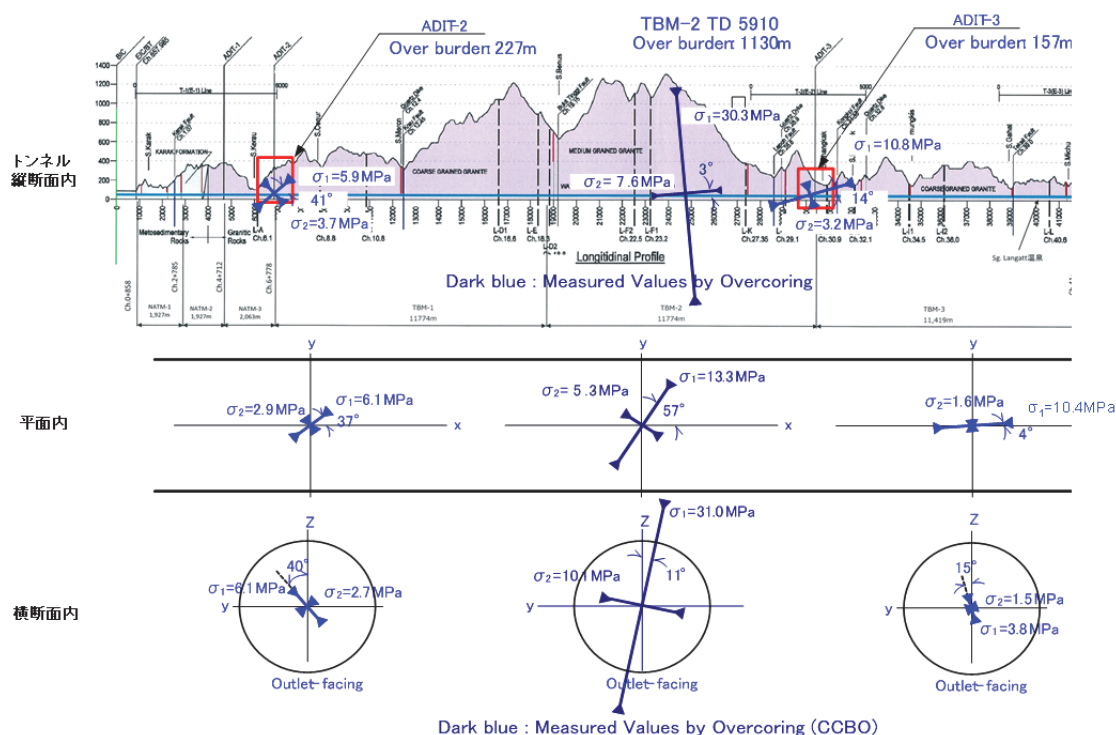


図-5 初期地圧測定結果

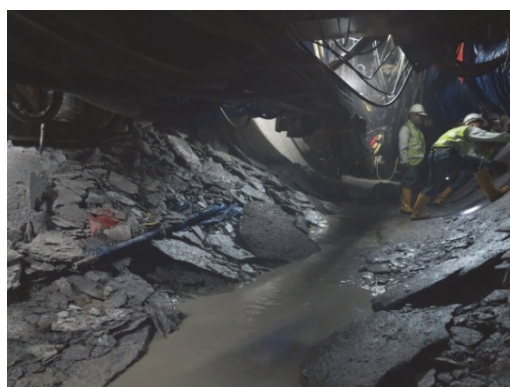


写真-4 山はね発生状況



写真-5 吹付けによる山はね飛石防止

以上の対策を実施したことと、ほとんどの山はねが、TBMルーフサポートとサイドサポート（切羽から1D以内）の範囲で発生したことにより、山はね区間掘削時に作業員が飛石によって怪我をすることもなく、無事山はね区間を突破することができた。

## 7. TBM機械データと山はね発生区分の検証

TBMは連続して掘削することから、TBM機械データ（TBMスラスト力、カッタヘッドトルク、カッタヘッド回転数、掘進速度）から計算される掘削エネルギー（E）<sup>1)</sup>から一軸圧縮強度（ $\sigma_c$ ）の指標が連続して得られる。そこで、初期地圧測定から得られた最大主応力 $\sigma_1$ と最大接線応力 $\sigma_\theta$ 、山はね発生位置でのTBM機械データから換算した推定一軸圧縮強度 $\sigma_c$ （図-6）をもとに山はね発生区分の検討を行った。また、図-6に示す関係は当社施工他TBM工事でも同様の結果が得られていることから、掘削エネルギーが一軸圧縮強度を表す指標として有用であることがわかった。

掘削エネルギー（E）は式（1）で表される。

$$E = \{1000 \times F + 2\pi \times (N \times 1000 \times 1000 \times T) / V\} / A \quad (1)$$

ここに、

E：掘削エネルギー(N/mm<sup>2</sup>)

F：スラスト力(kN)

N：カッタヘッド回転速度(rpm)

T：カッタヘッドトルク(kN・m)

V：純掘進速度(mm/min)

A：掘削断面積(mm<sup>2</sup>)

山はね発生区間での $\sigma_c / \sigma_1$ の範囲は、1.6～5.2であり、 $\sigma_\theta / \sigma_c$ の範囲は、0.5～1.7であった（図-7）。

TBM先端部5m間はルーフサポートとサイドサポートに覆われており、地山が確認できるのはルーフサポートとサイドサポート通過後となる。現場では、ルーフサポートとサイドサポート内での鱗片状のはく離と山はねの明確な区別が不可能であった。しかし、鱗片状のはく離も山はね現象であることから山はねとして区分した。本トンネルでの山はね発生は、Bartonによる山はね発生区分<sup>2)</sup>（表-1）と符合していることがわかる。

以上より、大土被り下での初期地圧が事前にわかれば、TBM機械データから換算した推定一軸圧縮強度 $\sigma_c$ より山はね発生を予測できることがわかる。

## 8. まとめ

大土被り高温岩体区間と山はね発生区間でのTBM掘削工事で得られた知見を以下に示す。

- 高温岩体影響前のTBM掘削平均月進行は415.1mであり、高温岩体区間での高温対策実施後のTBM掘削平均月進行は324.1mと、TBM掘削進捗低下は22%に抑えることができた。
- 坑内人車に水冷式冷却設備を設置して坑内作業用休憩台車として活用させたため、坑内軌条保守点検作業を行うことができた。
- 高温対策による作業員への負担軽減により、重大災害ゼロ件で高温岩体区間のTBM掘削工事を完了させた。
- ファイバーモルタル吹付けは、山はねの飛石防止に有用な対策の一つである。
- 事前に初期地圧がわかれば、TBM機械データにより、TBM掘削時の山はね発生の予測が可能である。

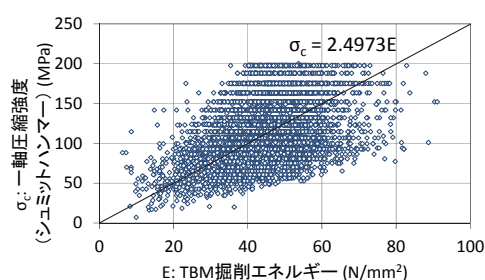


図-6 一軸圧縮強度と掘削エネルギーの関係

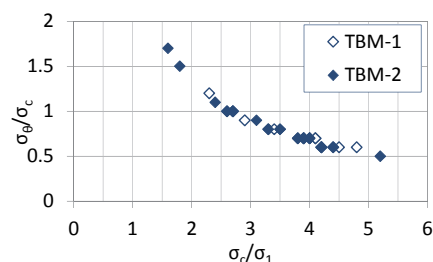


図-7 山はね発生箇所での $\sigma_\theta / \sigma_c$ と $\sigma_1 / \sigma_c$ の関係

表-1 Bartonによる山はね発生区分

| 主な岩盤、岩盤応力の問題                                                                                                   | $\sigma_c / \sigma_1$ | $\sigma_\theta / \sigma_c$ |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 【原文】Moderate slabbing after >1 hour in massive rock<br>強固な岩盤で、1時間以上経過後に、中程度の鱗片状のはく離が生じる                        | 5-3                   | 0.5-0.65                   |
| 【原文】Slabbing and rock burst after a few minutes in massive rock<br>強固な岩盤で、数分後に、鱗片状のはく離と山はねが生じる                 | 3-2                   | 0.65-1                     |
| 【原文】Heavy rock burst (strain burst) and immediate dynamic deformations in massive rock<br>強固な岩盤で、すぐに激しい山はねが生じる | < 2                   | > 1                        |

#### 参考文献

- 1) 河田孝志, 水戸 聡, 多川博章, 仲野義邦: TBM における長大トンネルの施工—弱層部における TBM 掘削管理—, 第 13 回岩と力学国内シンポジウム, pp.449-452, 2013.
- 2) *INTRODUCTION OF Q-SYSTEM OF ROCK MASS CHARACTERIZATION, WITH EXAMPLES OF THE PARAMETER RATINGS*, 2013 Tunnelling Association of Canada Workshop, Barton Workshop Introduction, 2013 (2016. 8. 5 受付)

## TBM EXCAVATION UNDER SPECIAL GROUND CONDITION

Akira MITO, Takashi KAWATA and Takayuki MATSUMOTO

Pahang-Selangor Raw Water Transfer Tunnel is the longest tunnel in South-East Asia. The maximum overburden of this tunnel is 1 246m, and the overburden exceeding depth of 1 000m extended 5km. Under these high overburden area, hot rock with temperature exceeding 50 deg.C (max. 55 deg.C) was encountered and rock burst phenomenon which occurred intermittently was recorded. Out of 44.6km length of tunnel, 34.6km was excavated by 3 numbers of TBM. This special ground condition where hot rock and rock burst phenomenon occurred at middle part of TBM section. Similar example of TBM excavation under such conditions are unusual in Japan. This paper aims to share the knowledge and experience acquired.