

トンネル坑内の温熱環境予測手法の開発と検証

清水建設(株) 正会員 ○本多 真・鈴木圭一・松本高之・河田孝志

1. はじめに

放射性廃棄物処分施設や南アルプスを横断する鉄道トンネルなど、土被りの大きなトンネルの建設が計画されている。このようなトンネルでは地温勾配に起因して岩盤の温度が高く、坑内の温度も非常に高くなる可能性があり、建設時の労働環境や供用後の保守や構造保全などの観点から、効率的な換気設備の計画が必要となる。換気設備等の容量を見積もるためには、実用的な温熱環境予測手法が必要であり、加えて限られた調査データから、岩盤温度や熱物性値、地下水流動などの境界条件を適切に設定する手法を確立する必要がある。

予測手法の開発および検証のために、マレーシアで建設中のパハンセランゴール導水路トンネルにおいて、温熱環境を測定して、開発した予測手法によりトンネルの掘削当初からの温度変化の予測を行い、実測値と比較・検証した。

2. トンネルと温熱計測の概要

マレーシアで建設中のパハンセランゴール導水路トンネルは、都市化が進む首都クアラルンプールの将来の水不足を解消するため、隣接するパハン州より河川水を取水し、セランゴール州の上水処理場まで 189 万 $\text{m}^3/\text{日}$ の導水をする利水事業である。本工事は延長 44.6km の導水トンネルを建設するもので、主な工区は NATM が 4 工区 (9.1km)、TBM が 2 工区 (34.6km) であり、2014 年 2 月に全区間貫通して東南アジアでは最長のトンネルとなった(図 1)。

今回、解析の対象とした区間は、最大土被り 1,200m の TBM-2 (11.7km) であり、岩盤温度が 55°C 以上となるため、掘削中は風管により外気を切羽付近まで送気し、さらに冷房を TBM に設置して冷却することで、坑内温度を下げて作業環境の改善を図った。トンネル内の温熱環境を予測する解析手法を開発することを目的として、坑内に温度計、湿度計および風速計を設置して掘削中の坑内環境を測定した(図 1)。またアクセス坑から 8630m の地点(以下、TD8630)には岩盤内を 11m 穿孔して、9 点の熱電対を埋め込み岩盤内の温度も測定した(図 2 の Section A)。また TD500, TD4000, TD8000 においても坑内温度に加えて、岩盤内 3m 深さまでの温度を測定した(図 2 の Section B)。TD5250~7500 までの 8 箇所では坑内温度と壁面温度を測定した(図 2 の Section C)。風速は TD500 の 1 カ所で測定した。また地質は TBM-2 の全区間で花崗岩が主体であり、TD8630 地点のコア試験から、熱伝導率 ($2.8\text{W}/\text{m}/\text{K}$)、比熱 ($0.69\text{kJ}/\text{kg}/\text{K}$)、密度 ($2.703\text{g}/\text{cm}^3$) と測定された。

坑内温度の測定値および岩盤温度の推定値を示したグラフが、図 3 である。図中の緑色実線が計測された坑内温度である。解析の境界条件となる深部の岩盤温度は、まず TD8630 の 11m の深さで岩盤内の温度を測定しているのこ

これを岩盤温度とみなす。他に岩盤表面温度を測定した記録があるが、採掘から時間が経過しており、深部の岩盤温度よりも低くなっていると考えられる。そこで湧水温度の測定記録があり、岩盤深部の温度を表していると考えられることから、土被り深さとの相関関係から、トンネル延長方向の岩盤

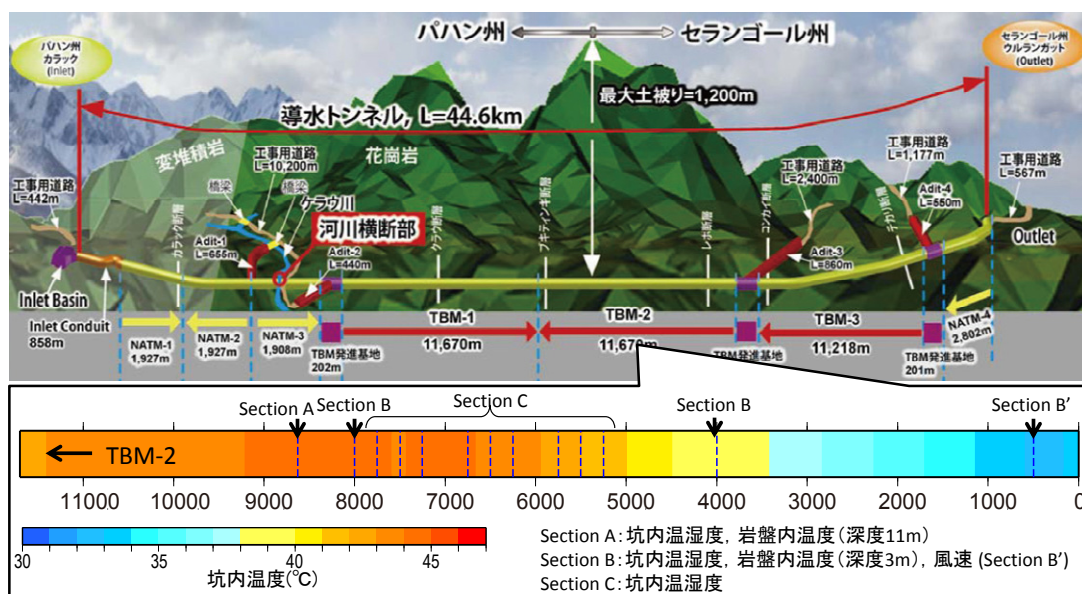


図 1 トンネル全体図および計測内容

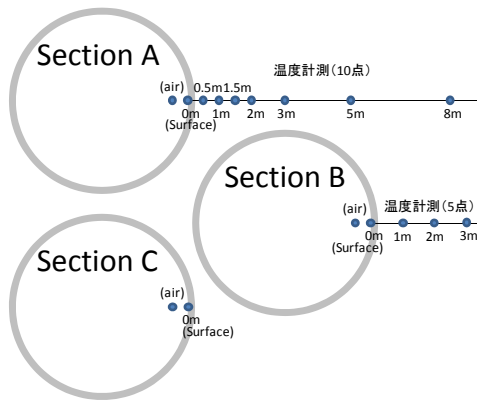


図2 温度測定断面

温度分布を推定するモデルを作成し、対象区間における岩盤温度を図3の赤線のように推定した。

3. 温熱解析手法の概要

温熱解析では図4のように坑内軸方向に100m毎に分割し、それぞれの移流による熱の移動、風管、壁との伝熱を考慮し、温度を非定常で計算する。岩盤内は(円筒系)非定常1次元熱伝導方程式により温度を計算し、坑内温度と連成する。今回の検討では掘削開始からTD9500m付近まで月進約400mの一定速度で切羽が進行するとして、100m毎に領域を追加しながら約3年間の温度履歴を解析した。追加された領域の坑内温度と岩盤の初期温度は図3で示した岩盤温度推定値とする。換気は外気を坑口側から風管により送気して先端の領域で吹き出し、先端からは坑口に向かって流れるとし、その風速は実測をもとに1.2m/sとした。風管内の温度は、入口では実測値(約32℃)で、先端に運ばれるまでに風管と坑内との熱伝達により温度が変化する。坑内温度の計算は、岩盤および風管との熱伝達、さらにTBM領域は発熱と冷房装置による冷却を考慮した。

4. 実測値との比較検証

坑内温度の解析値と実測値の比較を図5に示す。解析値の方が最大で約2℃高い。またTD8630mにおける岩盤内部温度の解析値と実測値の比較を図6に示す。表面付近では解析値の方が約1℃大きい。概ね傾向は捉えている。現状では切羽進行速度、換気ファンの制御、冷房の制御の詳細な履歴を考慮していないため、これらの誤差は、ある程度やむを得ないものと考えている。

5. おわりに

今回は計測された湧水温度を岩盤内温度と見なし地温勾配を考慮して、境界条件となる深部の岩盤温度分布を推定したが、この境界条件が結果に及ぼす影響は大きい。今後は坑内温度変化の実測値を用いることで、境界条件となる岩盤温度をより精度良く推定する手法を検討していきたい。

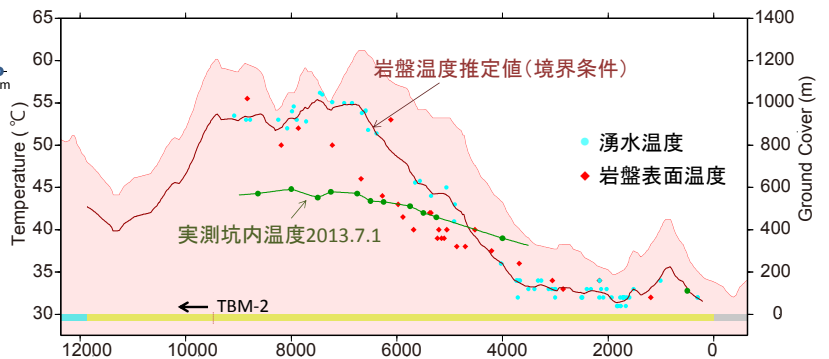


図3 坑内温度と岩盤温度の測定値

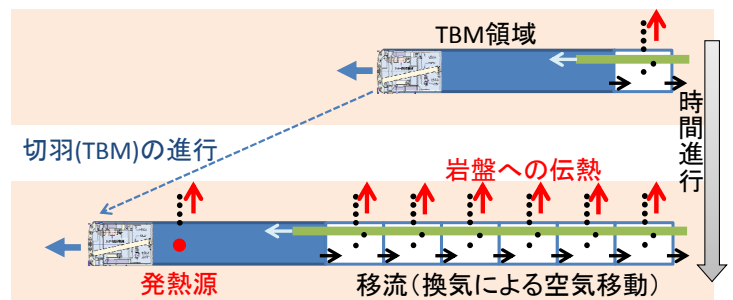


図4 解析モデルの概要

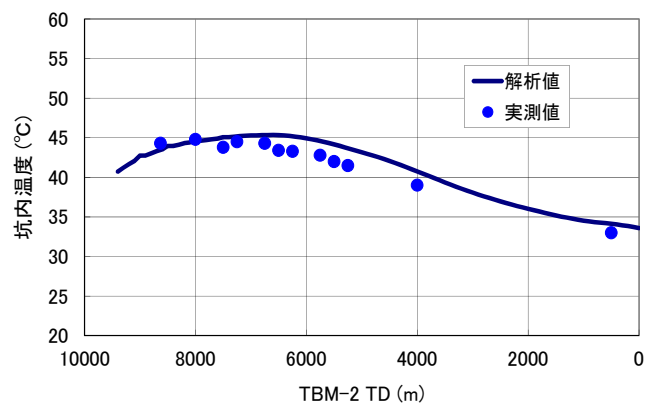


図5 坑内温度の解析値と実測値の比較

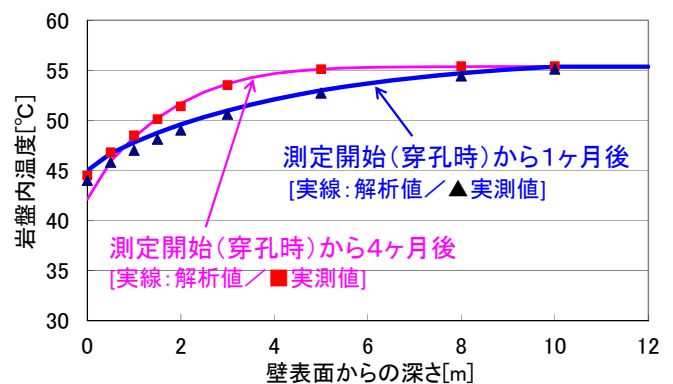


図6 岩盤内温度の解析値と実測値の比較