

NATM による河川直下の横断 Crossing under the River in applying NATM

大橋 勇気*
Yuki Ohashi

本多 康成*
Yasunari Honda

要 約

本工事では、NATMによる導水トンネルの掘削において、小土被りの河川直下を発破工法にて施工した。河川横断部は、河川流量：約 5.0t/sec、横断部延長：約 15m、河川中央部における土被りは 13m（岩盤部は約 1.4m）と非常に小さく、その施工にあたっては湧水対策とトンネル断面の安定を主な課題とした入念な現地調査と施工方法の検討が求められた。また、予測されるリスクへの対応策、綿密な施工管理体制の確立が必要とされた。

実施工においては、トンネル上部の難透水性の粘土層を有効に活用することで、大規模な注入工法を必要とすることなく、発破掘削によって無事河川横断部を通過した。

本稿では、当該横断部で実施した地質調査、施工方法の検討、施工時のリスク対策及び施工管理体制について報告する。

目 次

- § 1. 工事概要
- § 2. 地質調査
- § 3. 施工方法の検討およびリスク対策
- § 4. 実施工における施工管理
- § 5. まとめ

§ 1. 工事概要

本プロジェクトは、マレーシアの首都であるクアラルンプールにおける将来の水不足を解消するため、パハン州のセマタン川から河川水を取水し、セランゴール州ウルランガット地域の上水処理場まで導水する利水事業である。本工事は、このうち約 44.6 km の導水トンネルを建設するもので、NATM による 4 工区 (9.1 km) と TBM による 3 工区 (34.6 km) の掘削工、開削による 1 工区 (0.9 km) の掘削工から構成されている（図-1 参照）。

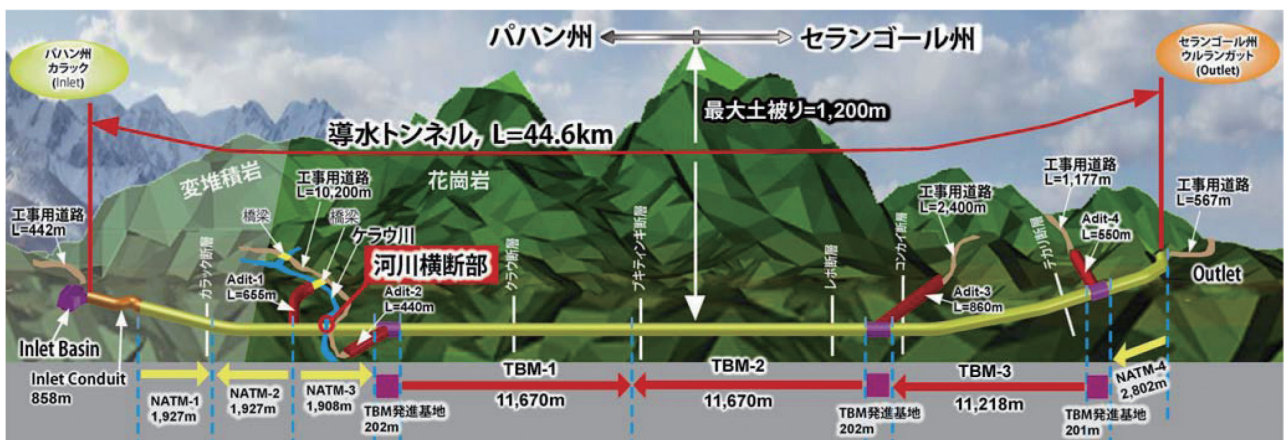


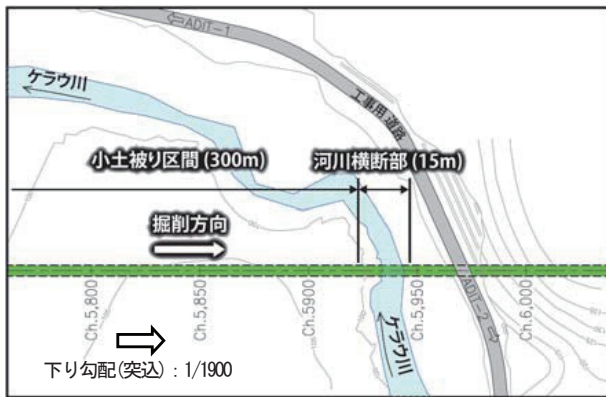
図-1 トンネル全体図

* 海外（支）パハン（出）

【工事概要】

工 事 名：パハン・セランゴール導水トンネル工事
 Lot1-1
 発 注 者：マレーシア政府 エネルギー・環境技術・水省
 工 期：2009年6月1日～2014年5月31日
 (5年, 1,825日)
 請負金額：384億円(2009年5月1日レート換算)
 施工形態：清水(30%)・西松(30%)・UEMB(20%)・IJM(20%) JV

河川横断部は、上流より約4.7kmを起点とするNATM-3工区(延長1,908m)内に位置する。横断部の延長は約15m、土被りは13～15mであるが、その上流約300m区間は土被り約20mの小土被り区間である(図一1, 2, 写真一1参照)。



図一2 河川横断部平面図



写真一1 河川横断部

§2. 地質調査

2-1 ボーリング調査

(1) 既往調査の概要

本工事に関しては、2000年の概略設計時に調査ボーリングが行われており、入札図書にこの地質情報も含まれていた。本河川横断部(河川横断部手前の小土被り部を

含む)についても13本のボーリングコア写真、ボーリング記録が含まれ、その地質概要はある程度予想されていた。河川直下横断部のトンネル掘削には、突発湧水と最悪の場合にはトンネル上部崩落による河川部の地表陥没等の危険性が想定された。

当該トンネル施工区間は、中生代三畳紀の花崗岩が分布しており、土被りのうち岩盤部は概ね5m程度で風化作用による劣化が想定されていた。その上部には砂礫・シルトからなる河床堆積物および沖積層が存在し、大量の湧水対策と、トンネル断面の安定対策の二つの側面から施工方法の検討が求められた。しかしながら、ボーリング調査のサンプリングコアは現存しておらず、また、コア写真からはコア採取時の流出が多かったと推測されるため、実施における計画立案のためには、さらに詳細な情報が必要であった。

(2) 追加調査の概要

工事着工直後より、トンネル全線形における追加調査ボーリングを開始し、河川横断部においても既往調査ボーリングを補間するべく5本を追加で実施した。その結果、小土被り区間の一部において、土被りの岩盤が1～3mしか存在しないこと、また、その岩盤は著しく圧砕・風化され、トンネル天端部に粘土もしくは土砂の存在も確認された。また、河川近傍における透水試験ではトンネルのインバートレベルにおいて、一部で高いルジオン値を示した。これらの結果から、詳細なトンネル横断方向の地質状況の把握と湧水量の予測を目的として、さらに10本の追加調査ボーリングを実施した。これらの追加調査と既往調査を合わせた全28本のボーリング調査結果を河川横断部と小土被り区間の検討資料とした。

(3) ルジオン試験(加圧透水試験)の結果

トンネルレベルにおける亀裂性岩盤の透水性を把握するために、調査ボーリング孔でルジオン試験を実施し、ルジオンマップを作成した(図一3参照)。

河川近傍のトンネルインバートレベルにおいては一部で高いルジオン値50～135 Luが確認された。一方で、当該施工区間の土被りは20m程度であるため、トンネルレベルにおいては高い水圧が作用することは考えにくいと判断した。

(4) 湧水圧試験(JFT)の結果

トンネル直上から地表面までの地山の透水性の把握には、5孔のボーリング孔内における湧水圧試験(JFT)を実施した。その結果、土被り部の透水係数は概ね 10^{-6} ～ 10^{-8} (m/sec)であり、シルト・微細砂及び粘土から構成される難透水層であることが分かった。

2-2 弾性波探査および高密度電気探査

既往調査では、河川直下の地質性状を把握するために斜めボーリングが行われたがその情報量は少なかった。また、追加調査の実施時においても、現場の諸条件から河川直下のボーリングは困難であった。

一方、企業先（エネルギー・環境技術・水省）主導のもと地元のマレーシア工科大学により、教育研究の目的で弾性波探査および高密度電気探査が河川横断部にて実施された。弾性波探査の結果から、小土被り区間において、トンネルレベルの地質は強風化岩、トンネル直上部分が低密度層であることが確認された（図-4参照）。また、高密度電気探査の結果からは、比抵抗値の違い

より河川直下横断部にやや硬質な岩盤とその直上に比較的低い透水性の粘土層が存在すると予想された（図-5参照）。

これらの結果から、河川横断部の直下では、透水性よりもむしろトンネルアーチ部の安定性が問題となると判断した。

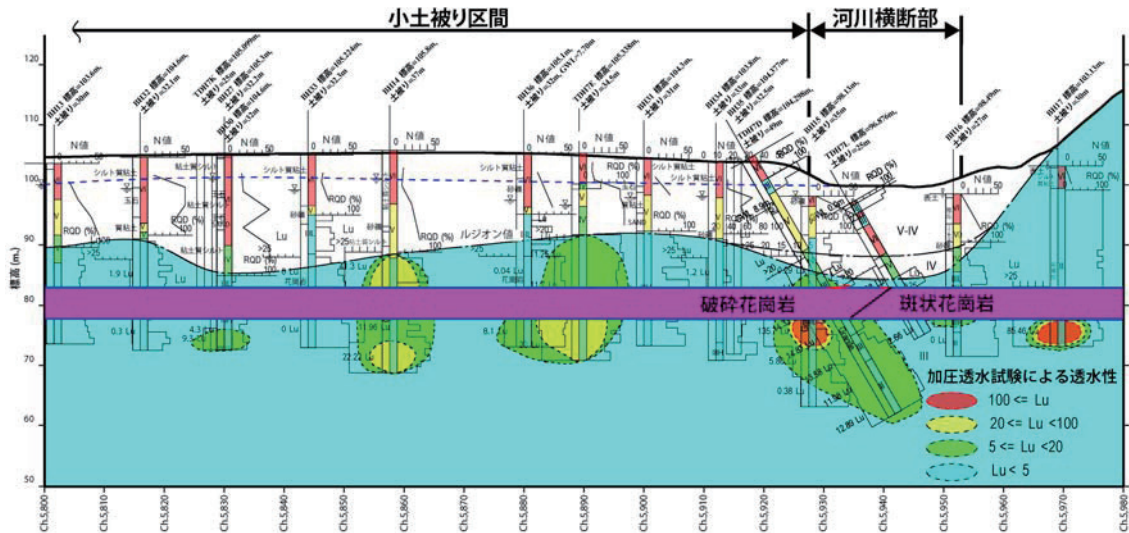


図-3 ルジオンマップ

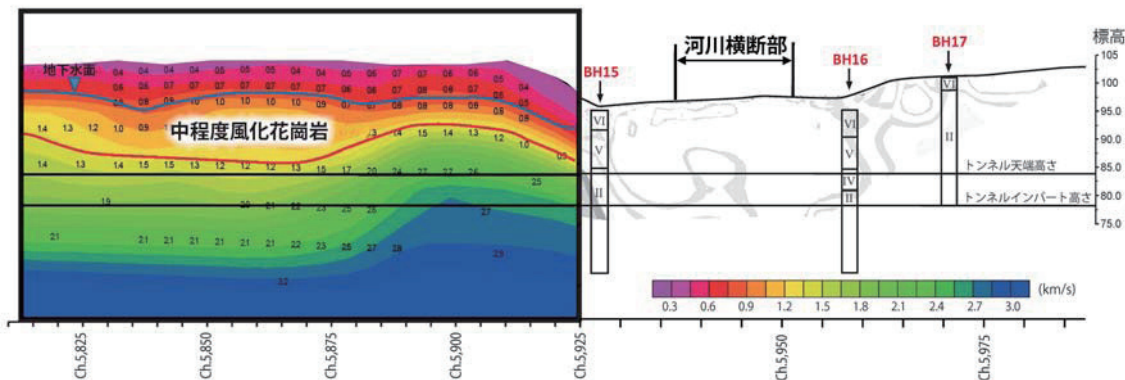


図-4 弾性波探査結果

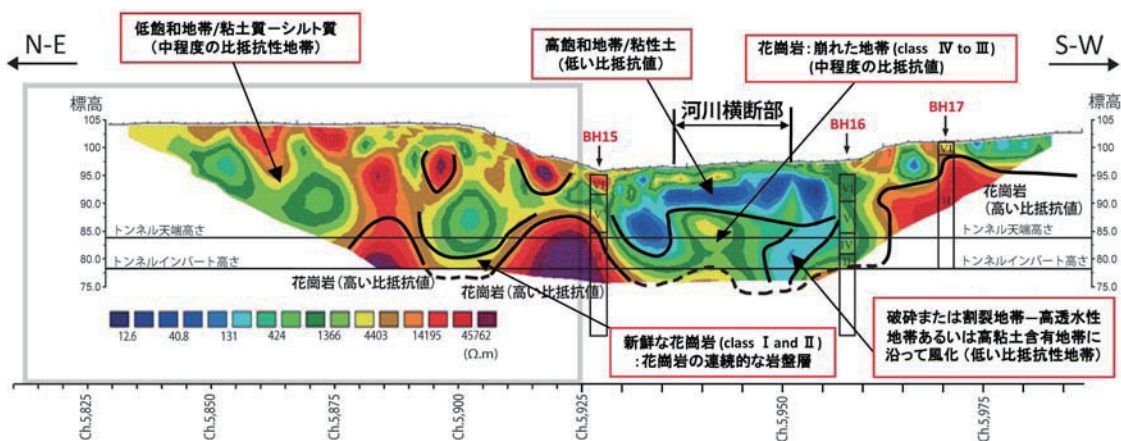


図-5 高密度電気探査結果

§3. 施工方法の検討およびリスク対策

3-1 施工方法の検討

(1) 掘削工法および掘削方式の検討

掘削工法は、小土被り、トンネル上部における不良地山の存在および突発湧水等が予測されるものの、トンネル掘削断面が岩盤内にあることと、トンネル断面の大きさが比較的小規模であることから全断面掘削工法とした。ただし、補助工法を併用することと、不良地山に遭遇した場合にはミニベンチカット工法へ変更して対応することとした。

河川横断部上流の小土被り区間の掘削方式は、土被り部に概ね5mの岩盤厚さがあることから発破掘削とした。河川横断部については、岩盤部が約1.4mと小さいことから、外周孔はスリッターによる連続孔の削孔を併用し割岩による掘削も検討した。しかし、掘削延長が15mと短いこと、トンネル下半は比較的新鮮な岩盤が予想されること、特殊機械のコスト面の問題から、補助工法を検討することで発破掘削とした。1発破進行長は1mを基本とし、外周孔には大口径(φ=102mm)の空孔を200mmピッチでSL上部に配置することで発破時の周辺地山への影響を軽減できると判断した。

(2) トンネル補助工法の検討

1) グラウトによる地山改良の検討

当初より最も懸念されたのが、トンネル掘削時に河水をトンネル内に流入させてしまうことであった。この事前対応策の一案として、地表からのグラウトにより遮水層を構築することを検討した。当該工法は、土被りが小さく削孔延長が比較的小さいことや、トンネル掘削前に先行施工できるため、トンネル坑内からのグラウト工に比較して工程面で有利であった。しかし、前述の透水試験の結果を用いた浸透流解析により、トンネル掘削時の湧水量は最大で8.9Litter/min/mと予測された。この結果から、トンネル上部にある難透水性の粘土層によってトンネル掘削時の湧水量は大きな問題にならないと判断し、地表から止水目的のグラウトは施工しないこととした。

2) 注入式フォアポーリングの検討

トンネル上部の地山安定を目的として、注入式フォアポーリングの施工を検討した。注入式フォアポーリングは、φ25mmの鋼管を使用し、先端部の注入孔からウレタン系注入材を注入するもので、亀裂性地山および未固結地山において注入材の割裂・浸透注入により地山の接着効果を期待した。施工範囲はトンネルアーチ部120°の範囲(河川直下横断部は180°)とし、先受け工の長さはL=6mとして、トンネル掘削3m毎に施工することとした。当該工法の特徴を以下に示す。

① 注入材の強度発現が早く、注入後直ちに掘削が可能である。

- ② 限定注入が可能で注入材の逸走やリークが少ない。
- ③ 注入作業時間が比較的早く、トンネル掘削サイクルタイムに組み込むことができる。

注入材料は、切羽からの湧水量が少ないと予測されたこと、また経済性を考慮してシリカレジンを採用した。ただし、突発的な出水に対してはウレタンを緊急資材として準備した。河川横断部の標準支保パターンを図-6に示す。

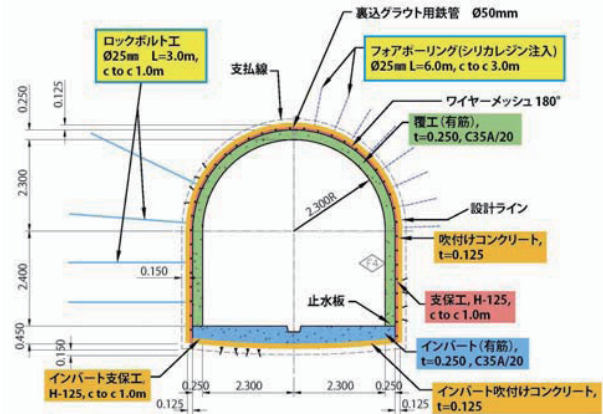


図-6 河川横断部の標準支保パターン

3) 長尺鋼管フォアパイリングの検討

河川横断部では、土被りの岩盤部が約1.4mと非常に小さいため、注入式フォアポーリングに加えて長尺鋼管フォアパイリングの施工を検討した。また、小土被り区間においても一部岩盤厚さが小さく粘土や土砂の存在が確認された箇所について適用することとした。当該工法は、φ114.3mmの鋼管を使用し、前述のフォアポーリングと同様の注入材による地山の接着効果に加え、鋼管自身の剛性による力学的なトンネルアーチの補強を期待した。施工範囲はトンネルアーチ部120°の範囲とし、1シフト長は標準L=12.5mでトンネル掘削9m毎に施工することとした。

ただし、河川横断部においては、トンネル上部の水を鋼管打設孔からトンネル内に引き込む可能性を考慮し、打設延長をL=25mとして、横断部直下を1シフトで施工した(超長尺鋼管フォアパイリング)。当該工法におい

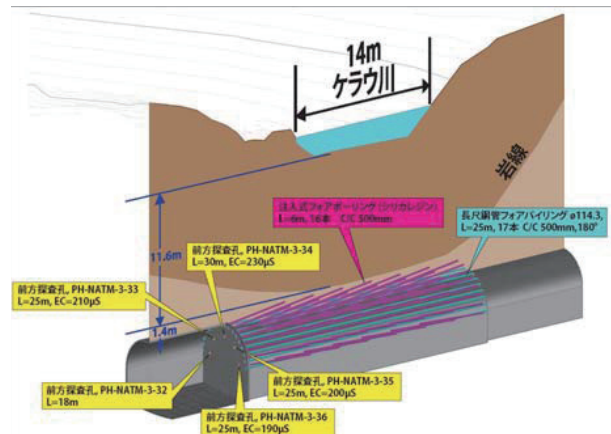


図-7 河川横断部の鳥瞰図

ては、打設角度をつけることなくトンネルとほぼ並行に施工することとした。これにより、鋼管打設実施箇所を拡幅することとなったが、河川横断中での先受鋼管のラップを無くすことで切羽崩壊の危険性を低減することができた。河川横断部の鳥瞰図を図一7に示す。

3-2 リスク対策

地質調査および浸透流解析結果から、トンネル掘削時に予測される湧水量が少ないと評価されたため、施工方法の検討ではトンネル断面の安定確保を主題として施工方法の検討を行った。しかしながら、局所的な不良地山による突発的な出水や、河川直下でのトンネル天端崩落など、トンネル坑内に大量の河川水を引き込む最悪のケースに備えることはリスク管理上の必須課題であった。

Adit-1 交点 (図一1 参照) における排水能力は 10 t/min を装備していたが、突発的な出水 (20 t/min を想定) に対して主要掘削機械の退避、追加排水設備の設置時間確保のため、交点部の NATM-3 側にストップログを設置した。これによる NATM-3 内での貯水量は約 12,000 t となり、20 t/min の出水に対して約 10 時間の猶予時間を確保できることとした。また、Adit-1 坑口の仮設ヤードでは、大容量排水ポンプ (55 kw) と発電機をトラックに搭載して待機させ、8 インチおよび 10 インチの排水管を緊急時に敷設できるよう準備した。河川直下における発破時には、天端崩落による河川地表部の陥没、河川水の直接的な流入も考えられるため、発破作業者を除く全員を坑外退避とした。また、発破作業時は、河川地表部の監視員と発破作業員との密な連絡により、発破直後における河川の異常がないことを確認してから入坑を行うこととした。さらに、河川横断部掘削期間中は、河川地表部にバックホウ (0.7 m³ 級) を待機させ、トンネル天端崩落等による河川地表部の陥没などが発生した場合は、あらかじめ準備したトンネル掘削ズリで埋め戻すこととした。

§4. 実施工における施工管理

4-1 前方探査孔による坑内湧水の把握

小土被り区間 (河川横断上流の 300 m 区間) の掘削を開始してからは、トンネル掘削約 27 m 毎に切羽前方の河川側に穿孔探査 (L=30 m, $\phi=76$ mm) を実施した。本探査によって、切羽前方の地質状況を再確認するとともに、探査孔内からの湧水量、湧水の電気伝導度を測定した。電気伝導度の測定は、湧水が地山からの地下水であるのか、地表および河川からの表面水であるのかを判断する目安とした。事前に測定した河川水の電気伝導度は 10~20 μ S/cm であるのに対し、トンネル坑内の湧水は 200~400 μ S/cm と 1 オーダーの違いが確認されていた。探査孔内からの湧水の電気伝導度が 50 μ S/cm 以下で、かつルジオン値が 4 Lu を超える場合は、その湧水量を考慮した上でトンネル坑内からセメントによるグラウ

トを検討することとした。実施工においては、河川横断部上流 100 m の地点で電気伝導度 50 μ S/cm を測定した。この地点は河川までの平面距離が約 70 m であり、前述の地質調査により土被りの岩盤厚さが 1~3 m と小さく、トンネル天端に粘土もしくは土砂が確認されていたため、河川水の混入ではなく地表水の混入と判断した。また、探査孔からの湧水量は 17 liter/min 程度であったため前述したグラウトの施工までには至らなかった。

4-2 超長尺鋼管フォアパイリングの施工

河川横断部においては、その掘削に先立ち超長尺鋼管フォアパイリング (L=25 m) を施工した。施工範囲はアーチ部 180° (SL 上部) で、500 mm ピッチに合計 17 本を施工した。河川幅は約 15 m であるが、その前後 5 m の範囲を考慮して 25 m を 1 シフトでトンネルと平行に施工した。このため、施工開始位置の手前 9 m 区間をトンネル半径方向に 350 mm 拡幅掘削した。

本工事では、NATM トンネル用の削岩機として Atlas copco 社のコンピュータージャンボ (L2C) を導入した。河川横断部の超長尺鋼管フォアパイリングの施工においても、コンピュータージャンボに削孔パターンを入力し、削孔角度を管理することで高い打設精度を実現した (写真一2 参照)。また、風化岩ではあるものの延長 L=25 m の削孔を 1 シフトで行うため、鋼管の先頭に取り付けるリングビットは岩盤対応のものを特別発注した。

実施工では、超長尺鋼管フォアパイリングの削孔状況から、河川直下の一部区間において、強風化岩と新鮮な花崗岩の境界を確認した (写真一3 参照)。削孔後に確



写真一2 コンピュータージャンボによる削孔



写真一3 強風化岩と新鮮な花崗岩の境界

認した湧水量は最大で鋼管1本当たり40 Litter/minであり、全体では約80 Litter/minであった。また、電気伝導度は210～310 $\mu\text{s}/\text{cm}$ であった。よって、河川水のトンネル坑内への流入ではないと判断した。シリカレジンの注入量は、合計約4.5tで設計量の約83%であった。

4-3 制御発破

(1) 制御発破の検討と実施

河川直下横断部の掘削では、発破時における周辺地山のゆるみを最小限とすることが要求され、1発破進行長は1m（削孔長1.2m）とした。

アーチ外周孔180°範囲には、大口徑（ $\phi=102\text{mm}$ ）ビットによる空孔を200mmピッチに配置した。削孔徑は45mm、装薬孔間隔を600mm、最小抵抗線を500mmとし、単位孔長当たり装薬量は0.36kg/mで良好な結果を得た（写真-4、5参照）。

心抜きは1発破進行長が1mではあるものの、シリンダーカット（平行心抜き）とし、雷管の段数を多くして斉発薬量を5kg以下とした。



写真-4 発破前



写真-5 発破後

(2) 発破振動の管理

河川直下での発破振動については、家屋に対する振動速度の制限値を参考にして、 $V=35\text{mm}/\text{sec}$ を規制値とした。これにより発破における装薬量は、斉発薬量（1段当たりの薬量）を5kg以下にすることとした。河川横

断部の掘削中は、河川地表部の対岸側定点にて発破振動の計測を行った。河川横断中に行った25回の発破について、測定値をもとに河床での推定振動値を解析した結果、いづれの発破においても振動速度は $V=24\text{mm}/\text{sec}$ 以下であったことを確認した。当該区間の全ての発破直後において、河川地表部およびトンネル切羽・アーチ部の目視点検を行ったが、異常は確認されなかった。

4-4 計測管理

(1) トンネルA計測結果

内空変位測定は、河川横断部上流では10m間隔で測定を行い、河川直下は5m間隔とした。それぞれ内空変位3測線と天端沈下について1回/日の頻度で行った。また、地表面沈下についても河川横断部上流で5m間隔、4点の測定を行った。測定結果から、内空変位は最大5.3mm、天端沈下は最大3.2mmといづれも掘削管理基準値以内であり、支保部材の安定性は確保されているため補強等の必要はないと判断した。地表面での測定についても沈下はほぼ確認されなかった。

(2) トンネルB計測結果

河川横断部上流と河川直下の2箇所において、吹付けコンクリートの応力度と鋼製支保工の応力度について計測を行った。測定結果から、掘削によるトンネル天端のゆるみ高さは4m以内であり、施工した支保パターンは妥当であると評価した。

§5. まとめ

当該工事の入手時において、河川横断部の施工は、不確定要素が多く、大きなリスクを伴う工種であった。

しかしながら、当該区間の施工開始の半年も前から、企業先や関係各社と念密な議論を重ねることができたため、入念に調査や検討を行うことができた。これによって、適切なトンネル掘削工法・掘削方式および補助工法を選定し、万全の施工管理体制を備えることができた。また、工事に対するリスクを明確化し、適切にその管理・対応を行うことができた。

実施に際しては、当該区間の施工状況から、トンネル掘削時の湧水が非常に少なかったこと、計測結果から、トンネルの変形が小さかったこと、および、切羽の安定性を保持できたことから、本工事で採用した施工方法は適切であったと考えられる。

最後に本工事での施工実績が、今後の同様な厳しい現場条件下での工事において、何らかの一助になれば幸いである。

謝辞：本工事の施工にあたり、企業先のマレーシア政府エネルギー・環境技術・水省の工事事務所、マレーシア工科大学、エンジニアであるTEPSCO・SMEC・SMHB、ならびにJVそれぞれの本支社各部署の方々からの御指導、御支援を賜りましたことに深く謝意を表します。