

海外工事における安全管理

マレーシア・パハンセランゴール導水トンネル

河田 孝志

本プロジェクトは、JICA（独国際協力機構）が75%資金供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（セランゴール州）の生活・工業用水を確保するため、隣接するパハン州より日量189万 m^3 の導水能力を持つ、延長44.6km、直径5.2mの導水トンネル（図-1）を清水建設・西松建設・UEMB・IJM JVが建設するものである。

2008年4月28日開札、2009年4月28日発注内示書、5月25日契約調印式が執り行われ、6月1日に着工した。

大規模山岳トンネル工事における安全管理について紹介する。

キーワード：海外工事、NATM、TBM、長大トンネル、高土被りトンネル、高熱、大量湧水

1. プロジェクトの概要

本プロジェクトは5工区15.8kmの工事用道路、4工区2.5kmの作業トンネル、導水トンネル本体は、44.6kmのトンネルを8工区に分け、3工区34.6kmをTBM（Tunnel Boring Machine）、4工区9.1kmをNATM（New Austrian Tunneling Method）、1工区0.9kmを開削工法で施工する（図-2）。

工期：2009年6月1日～2014年5月30日（1,825日）

発注者：マレーシア政府、エネルギー・環境技術・

水資源省、水道供給局

設計・施工管理：東電設計・SMEC（豪州）・SMHB

（マレーシア）

施工：清水・西松・UEMB・IJM JV（UEMB、IJMはマレーシアのゼネコン）



図-1 現場位置図

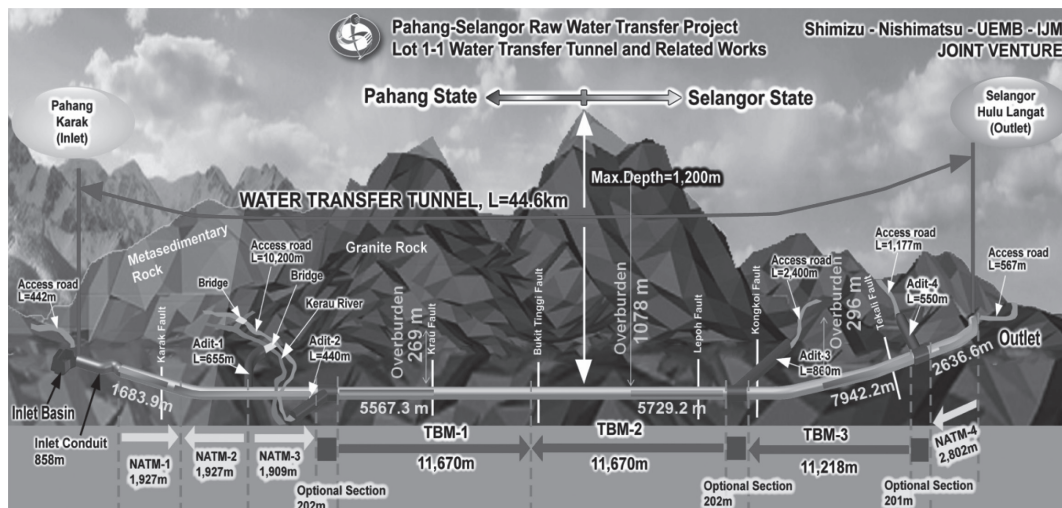


図-2 現場概要ならびに2012年5月末現在進捗状況

工事金額：384 億円（2009 年 5 月 1 日レート換算）
 資金：JICA75%，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：BQ 方式

2. 工事の特徴

①工事規模が大きい

直線距離では施工延長 44.6 km であるが，トンネル
 坑口間を繋ぐと 184 km の延長である。

トンネル掘削 111 万 m³，切土 120 万 m³，コンクリー

ト 25 万 m³，工事機械合計 1,094 台，最大需要電力
 10,303 kW，消費電力 9,163 万 kWh 延べ労働時間 950
 万時間

②トンネル延長距離が長い

全延長 L = 44.6 km，TBM-1，TBM-2 は 11.7 km，
 TBM-3 工区は 11.2 km

完成すると全長では世界で 11 番目の長さとなる（表
 一 1）。

③土被りが大きい

最大土被りは 1,200 m，1,000 m 以上の土被り区間
 が 5 km

完成すると世界で 8 番目の土被りとなる（表一 2）。

表一 1 トンネル延長世界ランキング

	Name	Location	Length (m)	Type
1	Delaware Aqueduct	New York state, United States	137,000	Water supply
2	Päijänne Water Tunnel	Southern Finland, Finland	120,000	Water supply
3	Dahuofang Water Tunnel	Liaoning Province, China	85,320	Water supply
4	Orange-Fish River Tunnel	South Africa	82,800	Water supply
5	Bolmen Water Tunnel	Kronoberg/Scania, Sweden	82,000	Water supply
6	Gothard Base Tunnel	Leopontine Alps/Switzerland	57,072	Railway
7	Seikan Tunnel	Tsugaru Strait, Japan	53,850	Railway
8	Želivka Water Tunnel	Czech Republic	51,075	Water supply
9	Channel Tunnel	English Channel, UK/France	50,450	Railway
10	Seoul Subway: Line 5	Seoul, South Korea	47,600	Metro
11	Pahang Selangor Raw Water Transfer Tunnel	Pahang, Selangor, Malaysia	44,600	Water supply
12	Aitufvevo-Bulvar Dmitriya Donskogo	Moscow Metro, Russia	41,500	Metro
13	Metro Madrid L-12:	Madrid, Spain	40,900	Metro
14	Tocho-mae-Shiodome-Hikarigaoka (Toei Oedo Line)	Tokyo, Japan	40,700	Metro
15	Kárahnjúkar Hydroelectric Power plant	Austurland, Iceland	39,700	Hydro electric

表一 2 トンネル土被り世界ランキング

	Name	Location	Overburden (m)	Type
1	Gotthard Base Tunnel	Switzerland	2,500	Rail
2	Jinping II Hydro, Headrace Tunnel	China	2,500	Waterway
3	Olmos Trans-Andean Tunnel	Peru	2,000	Waterway
4	Zhongnanshu Tunnel	China	1,640	Road
5	Furka Base Tunnel	Switzerland	1,500	Rail
6	Vereina Tunnel	Switzerland	1,500	Rail
7	Dai-Shimizu Tunnel	Japan	1,300	Rail
8	Pahang Selangor Raw Water Transfer Tunnel	Malaysia	1,200	Waterway
9	Shin-Shimizu Tunnel	Japan	1,200	Rail
10	Kanetsu Tunnel	Japan	1,190	Road
11	Lotscheberg Base tunnel	Switzerland	1,190	Rail
12	Kerman Water Supply Tunnel	Iran	1,160	Waterway
13	Pir Panjal Railway Tunnel	India	1,140	Rail
14	Hida Tunnel	Japan	1,024	Road

④高速掘進が要求される

全体工程が5年間である。工事用道路、作業トンネルの施工完了後、本坑トンネルの施工を行うため、TBM工区で480m/月、NATMで126m/月の進行が要求される。

3. 工事の進捗状況

2009年6月に着工以来、工事用道路の建設、坑口仮設準備を行い、2009年12月には最初の作業トンネル(Adit-4)の掘削をNATMで開始した。

2012年5月末現在、出来高:57.0%(予定54.6%)、延べ労働時間:636万時間。工事用道路を含む明かり工事95%、作業トンネル4工区 L=3.1km(完了)、本坑NATM L=8.1km、TBM L=19.0kmの掘削が完了している(図-2)。

4. 安全管理の基本

(1) 施工体制

5月末現在、現場の施工体制は、スタッフ126名(日本人職員20名、うち昨年度新入社員2名、スーパーバイザー1名、6ヶ国)、作業員823名(12ヶ国)(図-3)で構成される。

マレーシアは建築、土工事、一般土木構造物を施工するサブコンの技術力は高く、多数存在するが、トンネル工事量が少ないこともあり、トンネル工事のサブコンは少ない。当現場では、明かり工事、一般土木構造物はサブコン契約、トンネル工事は作業トンネル4本中、3本がサブコン契約、本坑トンネル7本中3本サブコン契約、残り5本が直庸工事である。この内トンネル作業員は、清水建設が1996年から2003年に施工したインドネシア MUSI 地下発電所のインドネシア人が大多数を占め、インドネシア人トンネルエンジ

ニアとともに、現場での大きな戦力となっている。

(2) 勤務形態

トンネル工事の内 NATM は2班2交代制で、2週間に1度昼夜勤が交代する際休みとなる。TBM は3班2交代制で6日働くと2日休みとし、基本的に365日稼働する。但し、イスラムの断食明けの休日、チャイニーズニューイヤー、正月を合計5日間現場休日とした。

(3) 現場方針の徹底

様々な国籍、宗教、生活感、経験を持ったスタッフ、作業員に共通の認識を持たせる目的で、現場開始当初から以下の現場運営の方針を事務所、作業箇所に掲げ現場管理を行っている(写真-1, 2)。



写真-1 作業トンネル坑口看板



写真-2 TBM 発進基地

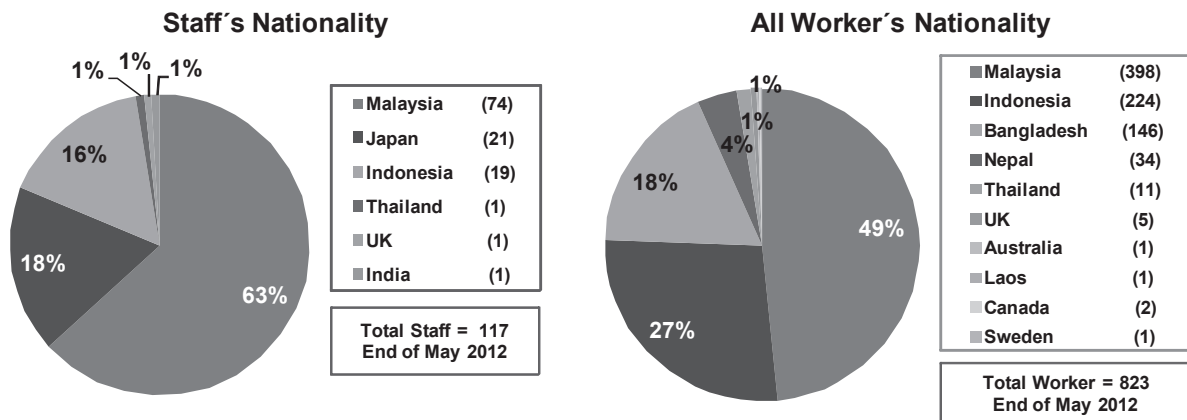


図-3 スタッフ、作業員の国籍

1.Greeting 2.Punctuality 3.Clean up 4.Keep rules and agreements 5.Have a target 6.Cooperate 7.Improve always 8.Don't hide 9.Be cheerful 10.Be active

現場での挨拶，ゴミ一つない現場環境は着実に定着しつつある。特にスタッフの意識改革として，1回/月の現場ならびに事務所周辺のゴミ拾いを全員参加で行っている（写真—3）。



写真—3 現場周辺のゴミ拾い

(4) 安全朝礼と Tool Box Meeting

現場では安全朝礼の充実を図っている。各トンネル坑口部において朝6:45、夕方18:45からのラジオ体操に始まり，当日の作業，安全指示を作業員全員出席の下行っている。各現場の担当者はもちろんのこと，筆者もトンネル7ヶ所，明り工事1ヶ所の安全朝礼に順次1回/2週間の出席をしている。朝礼での基本的な言語は英語であるが，インドネシア人，マレーシア人が殆どの工区もあり，そこではマレー語（インドネ



写真—4 朝礼状況



写真—5 図面入り安全教育

シア語も8割近くは同じ）で行われている。朝礼時に出席の際は必ず，一言挨拶をマレーシア語交じり英語で行うが，真剣に話を聞いてくれている（写真—4）。

朝礼後，各グループ分かれ Tool Box Meeting（日本におけるKY活動）を行っているが，Meetingシートは解りやすく絵入りで行っている（写真—5）。

(5) 事故発生時の対応と緊急避難訓練

救急医療の資格を有する看護師と救急車を昼夜，上流側工区と下流側工区へ配置している。また，坑内における火災，爆発，水没災害発生を想定した緊急避難訓練を1回/半年実施している（写真—6，7）。



写真—6 救急車の配置



写真—7 緊急避難訓練

(6) 勉強会

現場では安全，技術の安全勉強会はもちろんのこと， Dengue熱，マラリアなどの風土病対策。さらにはHIV



写真—8 HIV防止キャンペーン

対策を行っている。特に HIV については BOQ の項目にも挙げられており、勉強会の実施を含む、HIV 防止キャンペーンが義務付けられている（写真—8）。

5. NATM 工事

施工開始当初からトンネル工事における 2 大災害である、切羽災害、重機車両災害の防止に取り組んできた。

(1) 切羽災害防止の取り組み

①専門の地質スタッフによる切羽の観察、関係各者への通知

イギリス人の地質エンジニアをチーフとする総勢 7 名の地質チームにより、前方探査、探り削孔の結果ならびに切羽毎の詳細な地質スケッチと写真が発注者側と施工監理の地質スタッフ、エンジニアに私も含め関係者へ速やかにメールにて送付され、地質状況の共通認識を持つことにより、支保の変更、補助工法の採用が迅速に行えている。

②適切な補助工法の採用

海外工事において問題となるのが、地山不良時の対策工法の採用、施工である。対策工の実施については①で述べたように、発注者、施工監理エンジニアと連絡を密に取り、速やかな対応が行えているが、資材についてはマレーシア国内で調達できるものが殆どないため、注文してから現場到着まで、航空便で 1 週間、船便で 1 ヶ月を要す。そのため最低限必要と考えられる補助工法資材については現場でストックしている。

NATM 工区における最大のリスクであった NATM—3 工区における低土被り (L = 11.4 m) で河川横断部は上半 180 度範囲を長尺先受け工法 (L = 25 m) とフォアパイリング (L = 6 m) を採用し、制御発破を併用し無事通過することができた（写真—9）。

③コンピュータジャンボ、吹付けロボットの採用

切羽に作業員を近づかせないため、切羽の削孔に使



写真—9 NATM-3 河川横断長尺先受け工法施工状況

用する油圧削岩機は、発破のマーキングを必要としないコンピュータジャンボを採用している（写真—10）。また、日本国内では当り前ではあるが、吹付けコンクリートの施工は吹付けロボット（リモートコントロール制御方式）を採用している（写真—11）。



写真—10 コンピュータージャンボ



写真—11 吹付け状況

④照明の確保

切羽状況が良く確認できるよう、切羽の照明確保には全力を尽くしている。

⑤非電気式雷管の採用

マレーシアは世界で 2 番目に雷の発生が多い国で、パハンプロジェクト施工位置のパハン州、セランゴール州もその例外ではない。雷による誘導爆発を防ぐ目的で非電気式雷管を使用している。

(2) 坑内重機車両災害防止の取り組み

①シャフローダーと前後進対応型 20 t ダンプトラック（ツイステアリング）の採用

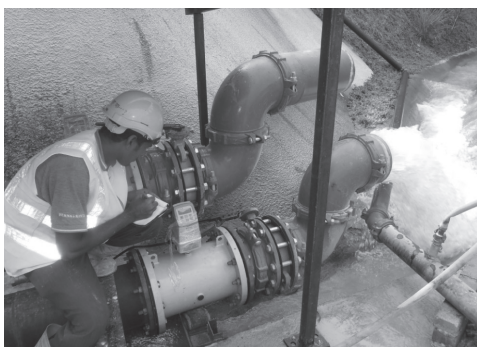
坑内において車両バック時の災害の危険性は高く、日本国内においても度々災害が発生している。特にズリ出し時のホイールローダーとダンプトラックは走行頻度も高く危険性が最も高い。NATM トンネルは幅が 6 m と狭いことを考慮し、ズリ出しにはシャフローダーとキャビン内部に前後 2 つのステアリングを有する、前後進対応型 20 t ダンプトラックを採用した（写真—12）。

②湧水対策

TBM-1において最大突発湧水 10 t/min, 最大坑内湧水量 15 t/min を記録している (図—5)。現在は 12 t/min。TBM-1 は下り勾配 (1/1900), TBM-2,3 は上り勾配であるが, いずれの TBM も斜坑底からの掘進であり, 坑内湧水は全て斜坑底から作業坑口まで排水する必要がある。TBM 掘進計画において各 TBM とも 20 t/min の排水設備を設けた計画としていたが, 唯一下り勾配の TBM-1 において最大湧水量 15 t/min を記録したため, 坑内において 30 t/min, 斜坑底において 36 t/min の排水能力を備えた設備に増強した (写真—14, 15)。



写真—14 TBM-1 坑内排水設備



写真—15 TBM-1 坑外への排水状況 (12インチ排水管)

③電力供給不備対策

パハンププロジェクトでは, TBM-1 が 3,500 kW (現在, 排水設備の増強に伴い 4,000 kW に増設予定), TBM-2,3 が各 3,300 kW の受電を行っている。電力供給不備対策として

(a) 非常用発電機の設置, 容量については坑内の換気, 照明, 排水設備が稼働できる大きさとして, TBM-1 が 4,000 KVA, TBM-2 が 1,500 KVA, TBM-3 が 1,000 KVA とした。

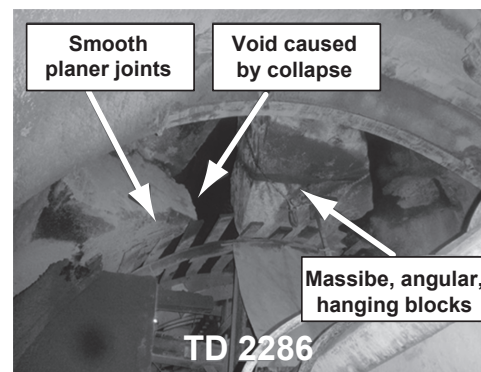
(b) 排水設備への 2 系列の送電

TBM-1 は下り勾配であることから, 坑内に 1,000 m ピッチで排水設備を設置している。排水設備への電力供給は TBM マシンとは別系統で行っているが, 電力供給不備が発生すると水没するため, 電力供給ライ

ンを 1 系統予備系統として増設した。また, 坑内変電設備についても予備機を斜坑底にスタンバイさせ, 故障時の対策としている。

④適切な支保

パハンププロジェクトでの地山等級選定基準は NEXCO 新切羽評価点方式を採用している。各 TBM には地質技術者が配置され坑壁面の観察記録を毎日行い, 施工監理エンジニアの地質技術者ととも地山等級を判定している。この判定のもと支保パターンを選定している (写真—16, 17)。



写真—16 TBM-2 レボ断層区間の地質状況



写真—17 TBM 鋼製支保工設置, ファイバーモルタル吹付け状況

TBM 支保設置位置は TBM カッタヘッドから 6 m (約 1D) 後方であるため, TBM 掘進時の切羽状況の目視確認は不可能である。そこで支保判定補助データとして以下に示すデータを採用している。これにより地山状況を早期把握し早期支保判断を可能とし TBM 掘進の最大特徴である高速施工を活かしている。

支保判定補助データは以下の通りである。

a) 掘削エネルギー (E)

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

ここに,

E: 掘削エネルギー (N/mm²)

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 (mm²)

例) 掘削エネルギーが 10 N/mm² 以下では坑壁の自立度が低く地山等級 D または E に相当し、鋼リング支保工設置が必要となる。

b) 掘削ズリ形状 (扁平状, 角礫状, 土砂状等)

⑤掘進データの管理

TBM 機械データは TBM 運転席モニタおよび現場事務所モニタにて同時モニタリングを実施している (写真—18)。TBM 機械データは、5 秒毎および 20 mm 毎に採取され全てのデータが PC に保存されている。



写真—18 TBM モニタリングシステム

TBM ベルトコンベヤ要所にはモニターカメラが設置され TBM 掘削ズリ形状および取込量を TBM 運転席および現場事務所にて監視している。

TBM 運転席から坑外現場詰所までのデータ伝送は伝送速度およびデータ伝送容量確保のため光ファイバーケーブルを使用している。これにより、施工担当者は地山性状の早期把握および機械トラブルの早期把握が可能となっている。

⑥前方探査, 探り削孔

1) 前方探査 (TSP)

TBM 施工区間には事前地質調査の結果をもとに TSP による前方探査が計画されている。TSP 前方予測可能範囲は TBM カッタヘッド先端より 100m ~ 最大 200m である。TSP で予測された弱層または不良地山と掘削後の地山性状の対比およびフィードバックを行い、精度向上を図っている。

なお、TSP 準備作業 (受信孔削孔, 受信機設置, 発信孔削孔) TBM 掘進作業と同時併行で行い、TBM 機械メンテナンス作業時 (カッタ交換等) に TSP 本作業 (発破, データ受信) を行っている。TSP 本作業の実作業時間は 2 時間程度であり、TBM 掘進サイ

クルに影響は与えていない。

2) 探り削孔

前述の前方探査 (TSP) にて弱層および不良地山が予想された場合、または地山急変時の場合は TBM 搭載の削岩機にて探り削孔 (最大 50 m 程度) を行っている。探り削孔は水抜き孔を兼ねている。

この探り削孔作業も TSP 作業と同様に TBM メンテナンス作業時に行うことを基本としている。

探り削孔データ項目を以下に示す。

a) 削孔速度

b) 削孔スライム (形状, 色等)

c) 孔内湧水量

d) 削孔状況 (ビット, ロッドの地山捕捉)

7. おわりに

工事着手から 3 年が経過した。工事着手当初からのスタートダッシュが幸いし、TBM 工事は 2—5 ヶ月当初計画から前倒しで掘進を開始することができたが、TBM-1 における坑内湧水、TBM-2 における地山不良ならびに、岩盤温度、湧水温度上昇に伴う坑内環境の悪化に伴う進行の遅れにより、4 月末現在当初計画とほぼ同じ工程となっている。

東南アジアにおける最大規模のインフラ整備事業であることもあり、マレーシア国内、日本をはじめ世界各国の見学者、大学生のインターンシップを受け入れ、開かれた現場を目指している。日本から来られた見学者からは「日本の現場と遜色ありませんね。また、作業員の挨拶が素晴らしい」とのお言葉をいただいている。

2010 年 4 月 6 日には本坑掘削開始に先立ち、パハン州国王、マレーシア政府関係者、堀江大使、JICA 鈴木所長の他関係者、地元住民 1,500 名が出席する起工式が執り行われた (写真—19)。

現場においてトンネル着工、各節目、貫通において



写真—19 起工式 (中央がパハン州国王)



写真-20 NATM-2月進283m達成



写真-23 NATM-3貫通

式典ならびにお祝い会を実施している。NATMでは月進日本記録283mを2010年8月に達成した(写真-20)。

2010年11月10日にはTBMの掘進開始に先立ち、環境、エネルギー、水資源省ピーター・チン大臣ら300名が出席して発進式が執り行われた(写真-21, 22)。



写真-21 TBM発進式清め(中央が筆者)



写真-22 発進式記念撮影

2011年12月には最初の貫通である、NATM-3の貫通式を、ルー事務次官の貫通発破により、100名が出席し行った(写真-23)。



写真-24 2011年マレーシア「安全衛生最優秀賞」受賞

こういった式典を開催する事により、スタッフ、作業員に本プロジェクトの位置付けを理解させること、また、世界的なプロジェクトに参画していることの誇りを持ってもらう事に一役かっている。

着工以来の現場の安全管理への取り組みが評価され2011年度のマレーシアにおける「安全衛生最優秀賞」を受賞した(写真-24)。

劣悪な作業環境の改善に全力を尽くしているところであるが、この様な環境の中においても、現場で笑顔での挨拶を交わしてくれる作業員には感謝している。着工以来大きな事故も発生せず3年が過ぎた。竣工まで残り2年となったが、スタッフ、作業員が「生き生きと働ける現場」を目指して全員一丸となって頑張る所存である。

JCMMA

[筆者紹介]

河田 孝志(かわた たかし)
清水建設・西松建設・UEMB・IJM JV
清水建設㈱
国際支店 パハム導水トンネル建設所
所長

