

台湾における分水路トンネルの施工実績

国谷 光弘¹・浜田 裕文²
Mitsuhiro Kuniya and Hirofumi Hamada
平 和男³・安永 豊彦⁴
Kazuo Taira and Toyohiko Yasunaga

¹正会員 鹿島建設(株)海外事業本部・基隆河分水路トンネル出張所次長 (中華民国台北縣瑞芳鎮濱二路55號)

E-mail:kuniya@kajima.com.tw

²同 上 所長 (同上)

³正会員 同 上 副所長 (同上)

⁴同 上 工事課長 (同上)

Keelung River Yuanshantzu Flood-Diversion Tunnel project is located in about 30-km eastside of Taipei City, the Republic of China (Taiwan). Its purpose is to divert flood-water in Keelung River to the East Sea. This Project comprises water intake facilities on the Keelung River, a drainage NATM tunnel, and facilities that discharge flood-water into the sea. This project adopts "Design-and-Build" contract, and contractor was selected through "Open Tender with Technical Proposal" method. Therefore, the contractor is required to make its detailed design with consideration of actual site conditions, and to satisfy construction period by adopting accelerated construction method. This paper briefly introduces its construction records.

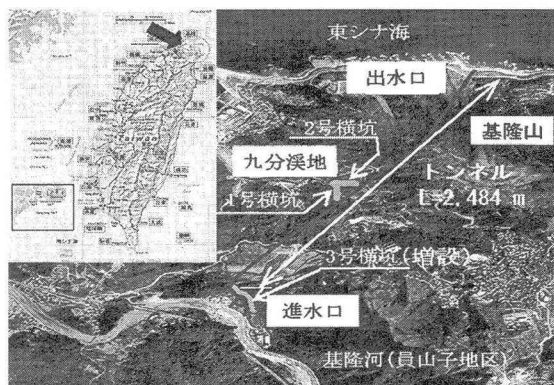
Key Words : Diversion Tunnel, NATM, Bench Cut Method, Drill and Blasting, Rock Excavation

1. はじめに

本工事は、基隆河洪水対策事業の最重要部分であり、200年確率の洪水ピーク流量1,620cms (m³/s)のうち、1,310cmsをトンネル内に分水するものである。台北市・台北県流域に大災害をもたらした象神台風(2000年)・納莉台風(2001年)により実施時期が一気に早まり、事業主体である經濟部水利署及び住民ともに早期完成を強く望む状況となった。

そのため、早期着工(2002年6月)、早期完成(2004年10月)の方針を打ち出し、工事金額だけでなく工期厳守及び技術力を重視した水利署初の最有利票方式による設計・施工一括請負が採用された。したがって、多様な工種に対応した設計及び急速施工技術を駆使し、工期厳守が我々の使命となっている。

そこで本論文では、主体工事である山岳トンネルの急速施工対策、及び低土被り部、進水坑口側変断面部、予想外に出現した褶曲構造を呈した地質区間など特殊部の施工実績について報告する。



写真—1 工事範囲全景

2. 工事概要

(1) 工事概要

工 事 名：基隆河分水路トンネル工事

発 注 者：中華民国經濟部水利署

工 事 場 所：台北県瑞芳鎮員山子～瑞濱地区

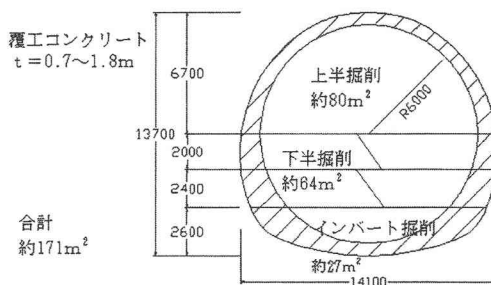
契 約 工 期：2002(H. 14). 6. 5～2004(H. 16). 10. 4

入 札 形 式：技術提案型一般競争入札

主要工事内容：

トンネル工（NATM工法）

- 掘削延長：2,484m（1号：1152、2号：1332）
 - 掘削量：約42.5万m³、覆工コンクリート量：約11.6万m³
 - 標準掘削断面積：約171m²（図—1参照）
掘削径14m、仕上り内径12m、縦断勾配1%
 - 掘削工法：ベンチカット工法、発破掘削
 - 覆工仕様：厚さ0.7（アーチ）～1.8m（インバート）
コンクリート設計強度450kgf/cm²、複鉄筋
- ※取付横坑3本：総延長641m



図—1 トンネル標準断面図

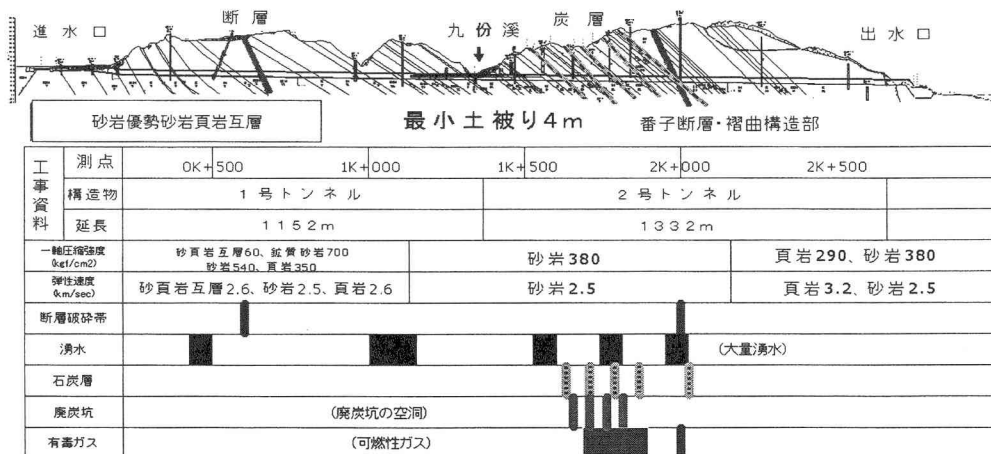
については一部で一次警戒基準である5%LELを超えたが、3,000m³/minの大量換気により十分対応可能であった。また高圧湧水も最大で1t/minと、予想されていた10t/minを大きく下回った。全体として、地質は予測より良好であった。同じく断層破碎帯についても明確なものが現れなかったが、2号トンネル側の当該位置付近で、褶曲構造を呈した地質年代の若いと思われる地山区間に遭遇した。区間長は1k+980～2k+050の70mで、土被りは約120mであった。これは、切羽面に写真—2のような波形の地層が確認で

(2) 地質概要

トンネル部は、図—2に示すように全体的に砂岩優勢の砂岩頁岩互層であり、進水口から出水口に向かって層理面が傾斜していた。また、トンネル通過位置付近には、断層破碎帯、石炭層、旧炭坑跡があり、掘削中の大量湧水、可燃性ガスの発生や空洞出現等が懸念されていた。実際に石炭層は厚さ50cm程度のものが予想通り現れた。廃炭坑は、埋戻されていて空洞ではなかったが、湧水とともに土砂、木片等が流出してきた。可燃性ガス



写真—2 切羽面波形地層状況



図—2 地質縦断図

きたことから推定したものである。東側にある基隆山からの安山岩の進入に対し、手前に存在した一軸強度400～500kgf/cm²の堅固な砂岩が壁になり当該部分の砂岩や頁岩が揉まれて褶曲構造が形成されたのではないかと考えられた。切羽観察の結果、この部分の砂岩の一軸強度は100kgf/cm²程度と推定された。ただ強度が低くても、くさび状になっているわけでもなく、岩そのものは破碎されていなかったもので、切羽は十分自立した。そこで、突然の落盤等は考えにくかったため、計測値を見ながら変位対策を実施していくことにした。

3. トンネル施工上の特徴と問題点

(1) 工程面の特徴と問題点

- ① 大規模分水路工事でありながら契約工期が28ヶ月間と短く、準備工を除けば3本の横坑も含めて実質工期は2年足らずである。
- ② 設計施工一括請負工事のため、工期厳守だけでなく、多様な工種に対応した設計や急速施工技術が要求される。
- ③ 地元住民との協調のため、騒音、振動及び車両通行時間等について多くの制約を受けた。夜間の発破ができずサイクル調整が必要となった。
- ④ 断面形状は、高さ14mと縦長で掘削断面積は170m²あり、3車線で横長の第2東名に近い大きさである。
- ⑤ 支保パターンは、吹付けが比較的厚く、すべてに鋼製支保工や金網が入るなど日本に比べて剛であり、サイクルに影響を及ぼす。

(図—3)

(2) 特殊部の特徴と問題点

- ① 工区のほぼ中央に位置する九份溪谷横断部は、4～10mの低土被り区間である。(図—4)
- ② 進水側坑口部には、高さ20m、幅19mの卵型大断面(328m²)から円形標準断面に急激に変化する区間がある。(図—5)
- ③ 地質概要でも述べたが、延長70m、土被り120mの褶曲構造を呈する地質が出現した。掘削時の切羽は十分自立するが、変位が収束せず困難を極めた。

4. 具体的な対策

(1) 急速施工対策

発破時間の制限、大断面、さらに日本に比べて剛な支保パターンなど、サイクルに影響を及ぼす問題だけでも多数存在した。そこで設計施工一括の利点を生かし、次のような急速施工対策を実施していった。

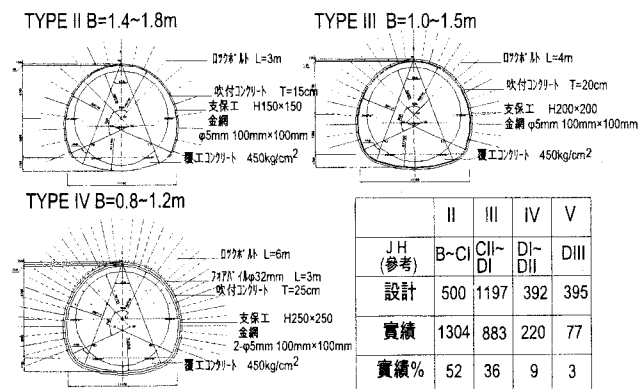
a) 第3の横坑増設と切羽数

- ① 当初設計では、取付横坑は九份溪谷部の2箇所だけであった。しかし、進水側については、約10万m³の坑口掘削、漸変区間の掘削及び進水口工事の工程確保を考慮し、写真—1のように第3横坑を増設する。これにより、本坑掘削の早期着手と困難が予想される漸変区間の同時掘削を可能にした。
- ② 第3横坑を増設したことで出水口と合わせて7箇所の切羽面をたてることができるようになったので、上半については最大6切羽の同時掘削を行うことにした。また下半についても4切羽とする。

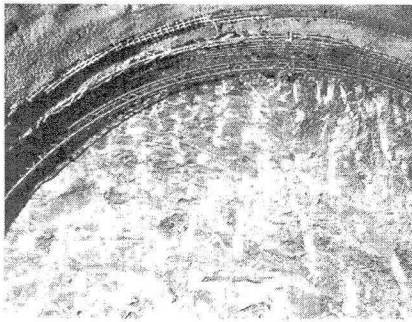
b) 支保パターンと加背割

支保の安全を前提とした上で、サイクルを可能な限り短縮するため、次のように計画した。

- ① 図—3に示すように掘進長に幅をもたせて、実施工はできるだけ各パターンの最大長で行う。
- ② パターン毎の内空変位の傾向を確認しながら、極力軽いパターンで施工する。



図—3 支保パターン



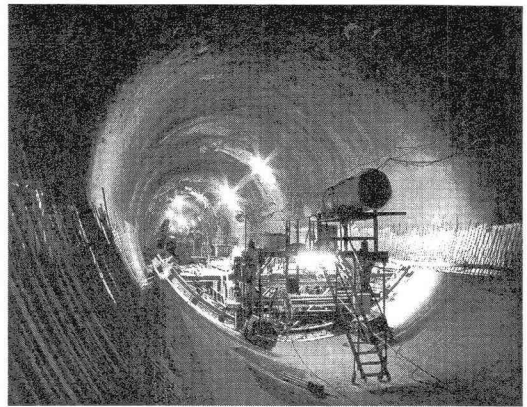
写真—3 桁型支保工設置状況

- ③ H型支保工は特殊部のみとし、写真—3のような重量の軽い桁型支保工を採用する。
- ④ 高さが4.4mもある下半の加背割については、次の点を考慮して、図—1のように2mと2.4mの2段に分割した。
 - ・ 斜路造成がサイクルに影響する。
 - ・ 転落災害など安全面の問題がある。
 - ・ 上半貫通後は、明り工事との関係で掘削残土を工区中央の横坑から搬出しなければならず、斜路の勾配や路面の良否がずり出しサイクルに大きく影響する。
 - ・ 一般的に、多段ベンチの方が安定性が高く変位も小さくなる。

c) 覆工

図—1に示すように、内径12m、厚さ0.7～1.8mと非常に大断面であり、鉄筋もダブルで入る覆工である。掘削同様に膨大な時間を要するため以下のように計画した。

- ① コンクリートの設計強度が450Kgf/cm²と富配合なため、温度ひび割れ対策として、セメントを高炉スラグで45%置換える。さらに、ひび割れ防止筋代わりのワイヤーメッシュ（φ5*100*100mm）を覆工の厚いSLから下部に入れる。
- ② 覆工断面積が46m²/mもあるため、セントル長は9mとし、1回当りの打設量をインバートで約180m³、アーチは300m³程度にする。
- ③ インバートに関しては、円形断面であるためスチールフォームを使用する。これに伴い、日曜の夜勤も含めて昼夜体制で施工しても、1回/2日打設が限度である。そこで、セントルはアーチ、インバート共3台投入する。それぞれの施工状況を写真—4、5に示す。



写真—4 インバート覆工施工状況



写真—5 アーチ覆工施工状況

(2) 特殊部施工対策

a) 九份溪低土被り（4～10m）区間

工区のほぼ中央に位置する九份溪の横断部は、土被りが4～10mと薄い。はじめに3本のボーリングを実施し、上から2m以深の岩盤が比較的新鮮で堅固であることを確認した。そこでグラウンドアーチ形成部の止水と改良を行えば切羽は自立すると考え、この30m区間については渇水期を利用した上部からの止水と切羽での補助工法による改良の2段階で施工することにした。上部からの止水に先立ちルジオン値を測定した。直交する溪流沿いに、トンネル中心から上下流各3本の計6本行い、0.2～20であった。これをもとに、台湾国内での施工実績から10未満の部分の水ガラス系止水材で直接注入する。また亀裂が比較的大きい10以上の部分については、止水効果を高めるため大部分をセメント系固結材で一次充填後、再削孔

して水ガラス系を注入し止水した。日本においてコンクリートダムコンソリデーショングラウチングの改良目標値は5ルジオンが一般的であり、10であれば改良が必要となり亀裂があるとみなされる。この点を考慮すれば、10ルジオン以上は比較的亀裂が大きいので、水ガラス系より粒子の粗いセメント系で一次充填するというのは妥当であると判断した。次に、掘削時はウレタン系による注入式フォアパイリングで先受けを実施しながら慎重に施工を進めた。さらに、改良しても被りが薄いため十分なアーチが形成できないと考え、せん断強度も高いH-200の鋼製支保工を1.0～1.2mピッチで入れた。その結果、無事掘削を完了することができ、湧水も1 t/分程度、内空変位も2 cm以内に収まった。改良の概略を図—4に示す。

b) 進水側坑口部変断面区間

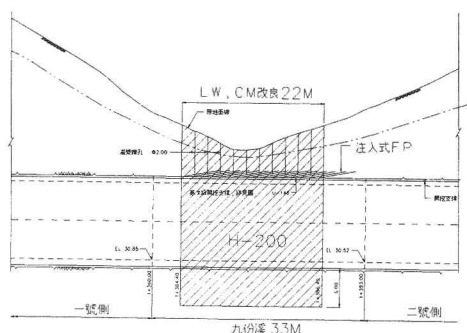
当該部は、高さ20m、幅19mの卵形大断面（図—5、写真—6）から標準断面（図—1）まで、延長30mで漸変する区間である。最大面積328m²と約300m²の石油地下備蓄なみの大断面なため、掘削は4段ベンチとした。これは、地山が良好であったこととトンネル上部をグラウンドアンカーで締め付けていたので、通常のベンチカットで掘削可能と判断したためである。そこで、支保パターンを吹付30cm、H-250相当桁型支保工の一番剛なタイプにするとともに、通常のFPで先受けを行いながら掘削した。その結果、天端沈下も10mm以下とほとんど変形は生じなかった。

c) 石炭層、廃炭坑、褶曲構造部

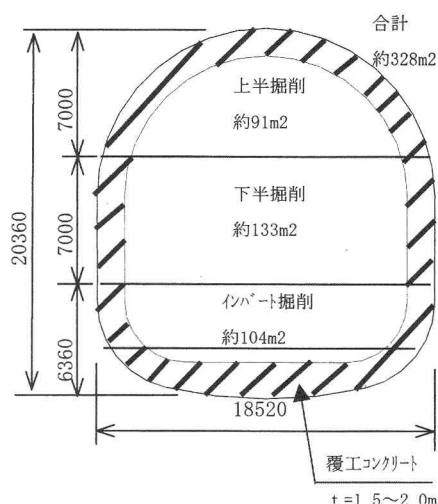
5つの石炭層、多数の廃炭坑については、土砂や木片等が出てきたが、切羽状況に応じた1次吹付やウレタン系の注入により、無事上半掘削を完了し内空変位は最大30mm程度であった。

しかしながら地質概要でも述べたが、延長70m程度の褶曲構造を呈する区間（土被り120m）は、岩盤は良好で切羽も自立するが、変位がなかなか収束しなかった。ここは番子断層の存在が予想されていたため、地質調査と前方探査を兼ねて切羽から水平コアボーリングを実施した。さらに、掘削の進行に合わせてTSP、ドリルジャンボを使用したさぐり削孔を実施したが、コア同様に把握することは出来なかった。

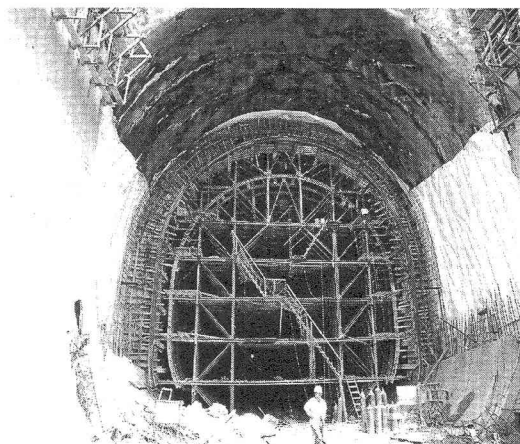
このような状況下で掘削を進めていたため、褶曲構造という認識は無く切羽も自立していたことから、支保パターンはTYPEⅢと判断していた。



図—4 九段溪横断面部改良概略図



図—5 進水側坑口部変断面区間



写真—6 進水側坑口部アーチ覆工施工状況

ところが、掘削の進行に伴い吹付に亀裂や剥落が発生し、図—7に示すように変位も急激に増加し始めた。また、切羽面にも波形の地層が確認できるようになり変位も大きくなってきたのでTYPEIVに変更した。当工事における各支保パターンが耐えうる変形量、すなわち設計上の変形余裕量はTYPEIIIで12cmであった。そこで、自主管理基準として、注意レベルをその60%、警戒レベルを80%と決めていたが、TYPEIIIで施工していた区間は、天端沈下・内空変位とも10cm以上の警戒レベルまで達した。そのため、応急対策としての増吹や支保工下の根吹きを実施し、当該区間通過後に、切羽後方で増ボルト（6m、9m）・ウレタン系注入の恒久対策を施工していった。これにより上半での沈下は概ね収束した。しかし、m当りの注入量は、計画では10～20kgを想定していたが、実績では3～4kgと極端に少なかった。これは、岩盤に亀裂や空隙が少なく、注入による改良を施工しても、十分な効果が期待できないと考えるしかない状況であった。

そこで、下半及びインバート掘削後の最終変形量をFEMにより予測することにした。解析を簡略化するため、上半の計測値から岩盤物性を逆解析し、高さ4.4mの下半、2.5mのインバートともそれぞれ1段で掘削する条件として求めた。下半については実施工と異なる加背割での解析であったため大きめの値がでると考えていたが、目安としての天端沈下量は約30cmとなった。

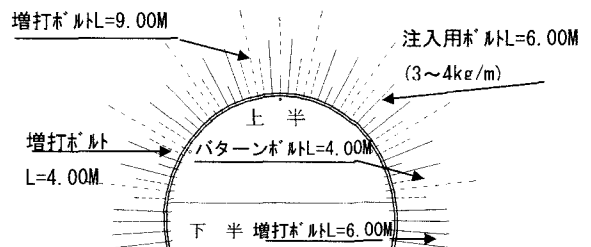
また設計上の変形余裕量として、TYPEIIIで12cm、IVで20cmを見込んでいた。鋼製支保工をその分大きく製作していたことと上げ越しを10cm近くしていたので、最終変位を20cm以内に収めれば断面を侵すことは無いと考えた。

変位対策として、注入は効果があまり期待できないため、下半については当初計画通りの4分割での加背割、掘進長を2.4mに短縮、増ボルト、吹付仮閉合等の施工上の工夫はすべて実施することにした。その補強実績を図—6に示す。それでも変位は収束しないと予測していたので、高張力のPC鋼棒打設か、厚巻で高強度のインバートコンクリートによる早期閉合かを考えた。ただしPC鋼棒の場合、別途に機械を調達しなければならず、工程上不利となる。そこで、インバート早期閉合を第一に考え、PC鋼棒は変位が20cmを大きく超えそうな場合のみとすることにした。

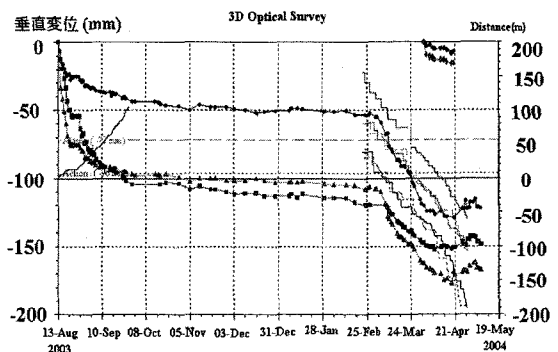
その結果、図—7に示すように最終変位をすべて20cm以内に収めることができた。当該区間で7箇所の計測点を設けたが、12～18cmの範囲であった。

5. おわりに

断層破碎帯の規模、湧水、可燃性ガス及び空洞については予想を下回ったが、事前の地質調査や前方探査でも把握できなかった褶曲構造を呈する地質に遭遇した。この区間は変位が収束せず掘削に困難を極めたが、計測データに基づく補強、事前の変形予測、施工上の工夫を含めた変位対策などの技術を駆使し、変位を許容値内に収めた。また、漸変区間や低土被り部は適切な補助工法によりほとんど変位なしで施工し、延長2,484mの上半掘削を10ヶ月で貫通させることができた。さらに、3本の横坑、下半、インバート掘削、及び厚巻きの円形覆工を含めて22ヶ月で完成させた。



図—6 ロックボルト補強実績図



図—7 鉛直変位図