

新愛本水力発電所長大導水路トンネルの急速施工

RAPID CONSTRUCTION OF A LONG HEADRACE TUNNEL OF SHINAIMOTO HYDRO-ELECTRIC POWER STATION

杉 木 清*・吉 川 太**

By Kiyoshi SUGIKI and Tohru YOSHIKAWA

まえがき

関西電力(株)では、電源の多様化、純国産エネルギーの有効活用の観点から、昭和60年夏の営業運転開始を目的に黒部川水系に新愛本水力発電所を建設中である¹⁾。黒部ダムで調整される流況を利用し、最大出力124000kW、年間発生電力量約4億kWhの水力エネルギーを得る計画で、黒部峡谷の急峻な地形と厳しい気象条件の下で黒四発電所建設以来の難工事となっている。なかでも、長さ5735mの長大な4号導水路トンネルは全体工程のクリティカルパスであったため、計画、設計、施工面において種々の改良を行い、全断面長孔発破工法²⁾、トンネルボーリングマシン(以下TBMという)工法³⁾、掘削と覆工の併進、プレストレストコンクリート(以下PCという)覆工⁴⁾等の新技術を積極的に導入し、工期短縮に努めてきた。昭和57年9月の本格着工以来2年余りを経過し、画期的な急速施工の実績をあげ、60年の降雪期到来を前に工事完了の見通しを得た。

以下に、本工事について報告する。

1. 長大導水路トンネルの急速施工の概要

(1) 新愛本水力発電所建設工事の概要

当発電所計画の主要な工作物は、高さ76.7mの重力

式ダム、長さ10.8kmの圧力導水路トンネル、調圧水槽、水圧鉄管、半地下式発電所および長さ1.8kmの放水路トンネルである。最大使用水量74m³/s、有効落差193.5mのダム水路式で、最近ではまれに見る大規模水力開発となっている。黒部川流域のもつ豊富な流量、大きい河川勾配といった水力電源としての適性は、多雨、豪雪、急峻な地形の恩恵ではあるが、工事施工の面からは、工事可能日数が少ない、工事用敷地が狭い等の困難さをも意味するものであり、ダムから放水路まで全ての工事に種々の工夫をこらしている。

当計画地点の地質は、古生代末—中生代初頭に生成した飛騨変成岩と、これらと密接な関係をもつ深成岩類、第三系の新期火山岩類および第四系の堆積物から構成されている。導水路トンネル経過地には、変成岩に属する結晶質石灰岩と深成岩類に属するアグマタイト質閃緑岩が分布し、破砕帯はトンネルに平行に走る一群と、これに大きな角度で交差する他の一群が卓越している。

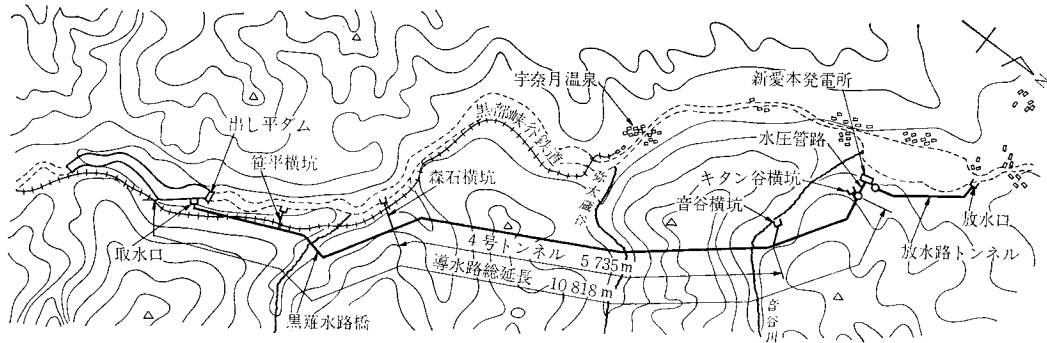
(2) 長大トンネルの急速施工の必要性

導水路トンネルは、当初上流から笹平、森石、弥太蔵谷、音谷、キタン谷に工事用の横坑を設けて施工する計画であったが、このうち弥太蔵谷横坑については

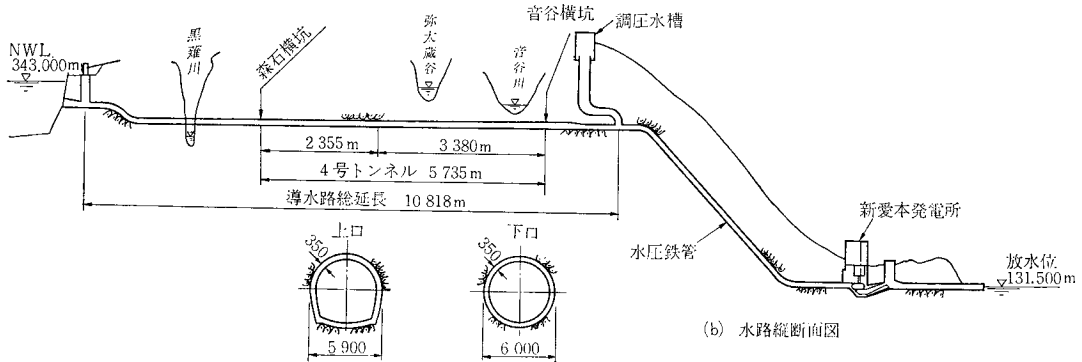
- ① 断崖に位置し工事用道路等による土砂流出、水質汚濁、景観破壊が免れない。
- ② 年間80万人の観光客がくる宇奈月温泉の対岸であり、地元の同意取得に困難を来している。
- ③ 豪雪・雪崩地域であり、冬期休止期間が長い、等の問題が多く、断念せざるを得なかった。また、宇奈月温泉から上流の笹平、森石は、資材輸送手段の黒部峡谷鉄道が運休する冬期は作業を中断するという制約もあ

* 正会員 関西電力(株) 新愛本水力発電所建設所長

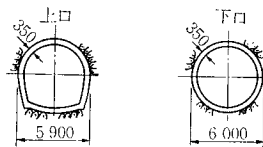
** 正会員 関西電力(株) 建設部課長(元新愛本水力発電所建設所 第二工区長)
(〒530/大阪市北区中之島 3-3-22)



(a) 水路一般平面図



(b) 水路縦断面図



(c) 水路横断面図

図-1 新愛本水力発電所計画概要図

った。このため、上流森石横坑と下流音谷横坑との間(以下4号トンネルと言う)の延長約6kmの長大トンネルが、全体工程のクリティカルパスとなったのである。

建設中利子の節減と、電力の安定供給に資するため、クリティカルパスの工期は1日でも短縮しなければならず、4号トンネルの工事には、施工の急速化を目的として種々の方策を検討し導入することとした。

(3) 長大トンネルの急速施工

4号トンネルの工期短縮について、計画・設計面から水路ルート、横坑配置の検討を行うとともに、施工面から次の3点について検討を行った。

- ① 全断面長孔発破工法による NATM の掘削速度の向上、
- ② 飛躍的な高速掘削性能を持つ TBM の採用、
- ③ 掘削と覆工との併進。

こうした検討により決定した工事計画は、表-1 に示すとおり、全長 5,735 m の上流 2,355 m を全断面長孔発破工法、下流 3,380 m をパイロットリーミング(導坑切掛け)方式 TBM 工法で掘削し、それぞれ覆工を掘削に併進させるといったものである。また、TBM 掘削区間の地山破りが薄い部分の漏水防止に PC 覆工を採用した。

表-1 4号トンネルの工事計画概要

区 分	上流(森石)側	下流(音谷)側
施 工	4号トンネル 2355 (1:500 下り)	3380 (1:392 上り)
関 連 工 事	(3号トンネル) 1456 (1:1000 上り)	(5号トンネル上口) 420 (1:830 下り)
長 横 坑 (m)	森石横坑 512、枝坑 51 ざり出し斜坑 158 (1:4)	音谷横坑 206 ざり出しバイパス 262
掘 削	形状・寸法 (m) 標準馬蹄形 直径 5.90 (余掘 0.28 含まず)	円形パイロット掘削 3.60 リーミング掘削 3.60~6.10 (余掘 0.05 含む)
施 工 方 法	全断面長孔発破工法	パイロットリーミング方式 TBM 工法
覆 工	内空形状・寸法 (m) 標準馬蹄形 直径 5.20	円 形 直径 5.30
設 計 巻 厚 (m)	0.35	0.35
工 施 工 方 法	1スパン 12m アーチ先行 インバート後追併進	1スパン 12m インバート先行 (リーミングと同調) アーチ後追併進

2. 4号トンネル上流側の急速施工

(1) 施工計画

a) 全断面長孔発破掘削

圧力導水路トンネルを NATM で掘削することは、岩盤に密着した覆工ができる点で鋼アーチ支保工を使用する従来工法よりも優れているが、掘削速度が速いという訳ではない。このため今回は特に急速施工を目指した NATM を全断面長孔発破工法によって実現しようと考えた。長孔発破はわが国では数少ないが、当工事の目標達成に必要な月進 200 m を確保するため、1 発破進行を 4 m、1 日発破数を 3 回として計画した。

穿孔は 4.5 m 穿孔可能な HD 100 級型油圧式削岩機 5 ブームガントリージャンボ (1 ブームはロックボルト孔穿孔専用) によって行う。発破は 図-2 に示すように、φ 100 mm パーン孔 2 孔と装薬孔を平行穿孔するパーンカット方式で、SB スラリー火薬によるスムーズプラスチックとした。ずりは、1.8 m³ サイドダンプ式クローラショベルで積み込み、5 両編成 6 m³ 鋼車を用いてレール方式で搬出する。吹付けコンクリートはロボットによる遠隔吹付けとし、ロックボルトは φ 25 mm、長さ 2 ~ 3 m の異形鉄筋を発泡式で全面接着する。

当工事の最大の特徴は、これらの作業を 図-3 のようにスライディングフローと呼ばれる移動式作業床の上で行うことである。その狙いは次の 2 点である。

- ① 穿孔、ずり積み、支保工を作業性の良い床上で能率的に行い、サイクルタイムを短縮する、
- ② ガントリージャンボの足元を安定させ、精度の高い穿孔を行い、発破効率 (進行長 ÷ 穿孔長) をあげる。

b) コンクリート覆工の掘削との併進

アーチコンクリートは、掘削の後方約 250 m で長さ 12 m のセトルを用い、吹上げ方式で打込むこととした。

インバートコンクリートの施工は坑内レールの撤去を伴うため、通常は掘削完了後、坑奥から坑口に向かって行い、掘削あるいはアーチコンクリートとの併進は行わない。しかし、当工事では 5 か月の工期短縮を狙い、スライドブリッジを用いて併進することとした。インバート

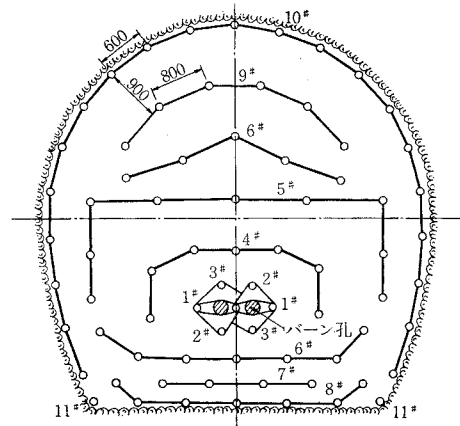


図-2 長孔発破標準穿孔パターン

コンクリートの作業区間 30 m を跨ぐ移動式の桁 (スライドブリッジ) を架け、坑奥作業の車両を通行させ、インバートコンクリートを施工するものである。

(2) 施工実績

a) 工事経過

昭和 57 年 11 月の森石横坑掘削後、4 号導水路を約 120 m 掘り進み、ガントリージャンボとスライディングフロアを組立て、翌年の雪解け後に本格的な全断面長孔発破掘削を開始した。覆工は計画どおり 6 月から開始した。当初計画では、冬期は工事を中断する予定であったが、資材確保と安全管理体制確立ができたため、昭和 59 年冬期は掘削とインバートコンクリートの施工を継続した。

掘削は、長孔発破の効かない石灰岩や突発出水、断層破碎帯に遭遇したが、比較的順調に進捗し昭和 59 年 3 月下旬側の TBM パイロット坑に到達し貫通した。覆工は同年 9 月に完了した。

b) 施工速度の実績

施工速度の実績を表-2 に示す。掘削、アーチコンク

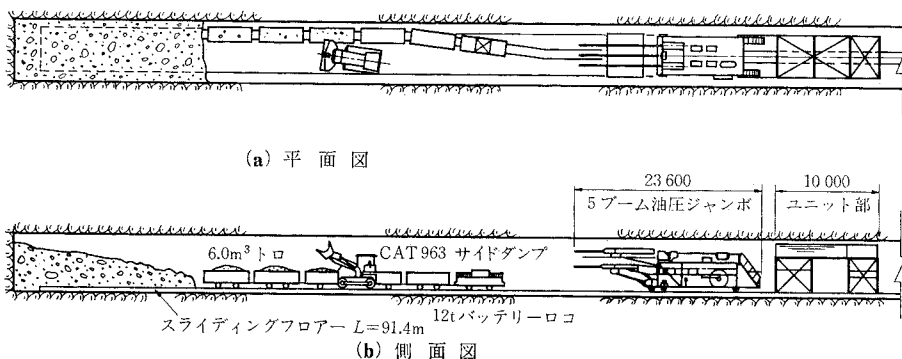


図-3 スライディングフロー概要図

リートは、施工条件の良い時期には目標どおりであった。インバートコンクリートは、車両通行の確保を最優先としたためスライドブリッジの盛替えが予想以上に制約され、掘削とアーチコンクリート施工時は計画進行より遅れた。しかし、昭和59年冬期は掘削と競合するだけであり、全く問題がなかった。

(3) 掘削速度の分析

a) 一発破進行長

トンネル長 2355 m のうち 2208 m を長孔発破設備によって掘削した。岩質別の一発破進行長は表-3のとおりである。4.5 m 穿孔 4 m 進行の計画に対し、閃緑岩では進行 4.22 m (発破効率 94%)、片麻岩では 3.87 m (同 86%) で、ほぼ狙いどおりであった。石灰岩およびア



写真-1 TBM パイロット坑と全断面長孔発破の貫通

表-2 4号トンネル上流側の施工実績 (単位: m)

区 分		実 績		計 画	
掘	月	最 大		258.6	—
		平 均	好 条 件 下	200.7	
			全 期 間	160.3	
掘	日	最 大		17.5	—
		平 均		7.0	
コ	ア	平	最 大	264.0	—
			掘 削 併 進 時	207.4	
	均	全 期 間	222.8	228.0	
			(58.6~59.9)		
ン	バ	平	最 大	303.0	—
			掘 削 アーチコンクリート併進時	129.6	
				全 期 間	
バ	均	全 期 間	(58.8~59.9)	228.0	

注：() 内の期間は算出対象期間 (昭和年月)。

表-3 岩種別にみた発破進行長 (単位: m)

穿孔長 (m)	4.50	4.00	3.50	3.00	2.50以下	平均	掘削延長
花 崗 岩	3.58	3.29	3.06	3.00		3.48	341.4
閃 緑 岩	4.22					4.22	443.2
片 麻 岩	3.87	3.23				3.77	305.5
アグマタイト質閃緑岩	3.36	2.89	2.72	2.41		2.94	396.5
石 灰 岩	3.26	3.22	2.54	2.48	1.97	2.31	610.6
そ の 他 (破砕帯等)				2.66	1.92	1.98	111.1
平 均	3.81	3.18	2.72	2.48	1.95	2.99	—
掘 削 延 長	1195.2	143.1	224.0	297.9	348.1	—	2208.3

グマタイト質閃緑岩では進行長は不十分であったが、これは、一般に「しわい」と評される石灰岩で長さ 1~1.5 m の孔尻が残ったからである。石灰岩には、穿孔長 2.5 m 程度のVカット工法を用いる等の対策を行った。なお、貫通後 TBM パイロット坑を長孔発破拡張する試験施工 (4.5 m 穿孔 21 回, 6 m 2 回, 9.5 m 1 回) を行ったが、地質は石灰岩混り閃緑岩一片麻岩、電研式岩盤分類のB級でも、90% 以上の発破効率を得た。岩級と発破効率の関係は図-4のとおりで、発破効率はC_L級で90~95%、C_M級で80~90% となっている。C_H級で低いが、これは石灰岩の影響が大きかったためである。

b) サイクルタイム

サイクルタイムの実績は表-4に示すとおり、積雪のないフル稼働期はほぼ予定どおりであった。計画と比較

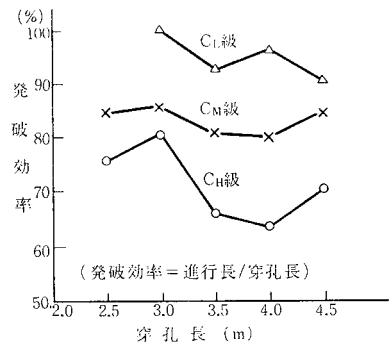
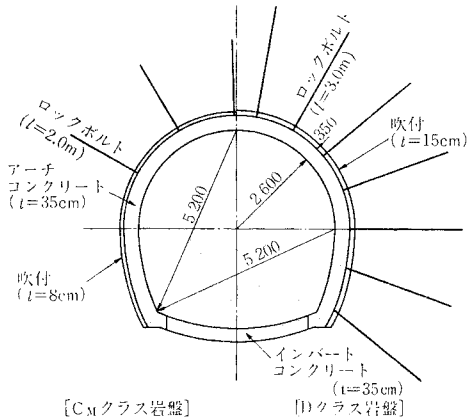


図-4 岩級別発破効率

表-4 全断面長孔発破工法のサイクルタイム実績

区 分		計 画	総 合 (昭和57年12月~59年3月)	掘削最盛期 (昭和58年5月~58年11月)
穿 孔 準 備		25	18	16
穿 孔		70	112	120
装 束		35	55	59
退 避 発 破 換 気		30	24	22
ず り 出 し		205	151	140
フ ロ ア ー 送 り		15	50	47
吹 付 け コ ン ク リ ー ト		73	87	60
そ の 他		27	37	29
計		480	539	493



図一五 全断面長孔発破掘削標準断面

すると、装薬量が増えたため、穿孔・装薬時間が増加した。また、スライディングフロアの移動時間が増加し、ずり搬出時間が減少した。

c) 支保工

支保工は特に安全確保の面から次の点に配慮した。

- ① 肌落ち災害防止のため、発破ごとに吹付けを先行させ、ロックボルトは後打ちとする。
- ② ロックボルトは、図一五のようにD級地山でシステムボルティングとし、状況によっては切羽前方へ長さ 3~5m の斜めボルティングを行う。
- ③ 地山は三方節理系の硬岩であるため、C_M 級以上では、節理、亀裂、粘土層等の状況に応じたランダムボルティングを行う。
- ④ 坑内点筈と内空変位観測の結果、増支保が必要になった場合は、主に吹付けを用いる。ロックボルトは穿孔時の振動と削孔水により肌落ちを誘発しやすいからである。

3. 4号トンネル下流側の急速施工

(1) TBM 工法の導入

TBM 工法は、昭和 40 年代にが国でも採用されたが⁵⁾、硬岩での掘削能力不足、断層破砕帯における難渋で撤退した例が多く、複雑な地質のわが国には適さないという認識があった。しかし、一般論としては、掘削速度が速い、坑壁が安定で少ない支保工ですむ、余掘りがない、等の利点が認められている。また、導水路トンネルとしては、覆工のコンクリート量、鉄筋量およびグラウト量が節減できる。

TBM 工法の掘削方式には、所定断面(当工事の場合、30m²)を一気に掘削する全断面方式と、導坑掘削後に所定断面に拡幅するパイロットリーミング方式があ

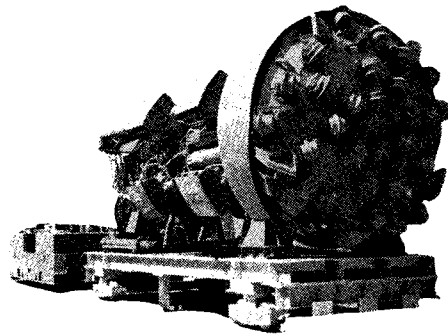
る。両者を比較すると後者は二度掘りとなるため工期が長く、機械費、施工費とも割高であるが、破砕帯では小断面パイロット坑なら掘削しやすく、パイロット掘削後に手当を行えば大断面リーミング掘削も確実に施工できる利点がある。また、閃緑岩等の硬岩を大断面を全断面方式で TBM 掘削した実績は数少ない。よって、より確実に掘削できるという点ではパイロットリーミング方式の方が優れている。

関西電力では、月進数 100m の高速掘削性能と、導水路トンネルに適用した場合のメリット、複雑な地質条件下における信頼性を総合的に判断し、パイロットリーミング方式 TBM 工法を導入することに決めた。機械は、工事のリスクと納期を勘案し、関西電力が西ドイツヴェルト社より購入し施工業者に貸与することとした。

(2) 施工計画

a) パイロットリーミング方式 TBM 掘削

パイロット掘削のストローク長は 1.1m で、作業フ



写真一2 TBM パイロット機

表一5 TBM の諸元

区 分	パイロット機・TB II 360 H	リーミング機・TBE IIS-360/800 H
設計対象岩石、総掘進速度	(圧縮強度 2500 kg/cm ² 以下、引張強度 150 kg/cm ² 以下、ミネラル含有容積比率 40% 以下の岩を 2.5 m/h)	
直 径 (m)	3.6	6.1
全 長 (m)	約 40.5	約 44.5
本 体 機 長 (m)	約 7.5	約 14.0
推進装置ストローク (m)	1.2 (無段階変速)	1.5 (無段階変速)
最大スラスト (t)	440	866
カッターヘッド回転数 (rpm)	0~10 (無段階変速)	0~5.2 (無段階変速)
総 重 量 (tf)	約 130	約 350
電 動 機 出 力 (kW)	約 460	約 1100
センターカッター (個)	ディスク 6	—
カッター (個)	1 枚刃ディスク 28	1 枚刃ディスク 52
バケツ (個)	5	6
グリッパー最大推力 (tf)	1130	2740
グリッパー面積	78 cm × 82.5 cm × 8 個 = 51 480 cm ²	95 cm × 165 cm × 8 個 = 125 400 cm ²
操向装置(フロント)	上下 2 個の油圧シリンダー	上下 2 個、左右 1 個の油圧シリンダー
操向装置(リア)	上下 2 個、左右 1 個の油圧シリンダー	上下 2 個の油圧シリンダー
最小曲率半径 (m)	150	150

注：後退防止装置を取付ければ斜坑掘削可能。

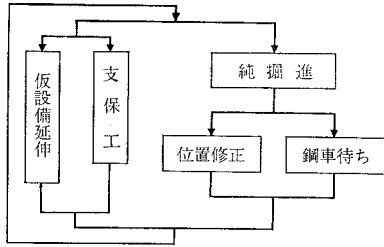


図-6 TBM 掘削作業フロー図

ローは 図-6 のとおりである。純掘進は、カッターヘッドを切羽に押付けて回転させ、岩盤を剪断破碎する作業であり、当機械の純掘進速度は硬岩に対しても毎時 2.5 m となっている。純掘進中は、機械は坑壁に押付けた 8 個のグリッパーで支えられ、ずりはトレンコンベアで連続的に鋼車に積み込まれる。1 ストロークの純掘進が終るとカッターヘッドを停止させ、次のストロークの位置修正 (グリッパーの盛替え) と鋼車待ちを行う。1 ストロークに要する時間は、純掘進 27 分、位置修正 10 分およびその他で計 40 分程度である。そのほかの作業としては、支保工 (吹付け、ロックボルト) と仮設備延伸を行う。また、シフトごとに機械とカッターの点検・修理が必要である。すべての作業時間に対する純掘進時間の割合が稼働率であるが、純掘進速度と稼働率を向上させて、日進 30~40 m の高速掘削が可能となる。

トンネル掘削では、どの工法であろうと破碎帯との遭

遇が最も重大な問題であるが、とりわけ TBM 工法では、突発的湧水、土砂流出、崩壊によって機械の水没あるいは埋没を招くと致命的である。このため、TBM 運転室前方にボーリング機を搭載し、先進ボーリングで破碎帯、湧水量を予知するとともに、場合によっては、薬液注入により止水または地盤改良を行うこととした。

リーミング掘削の 1 ストローク長は 1.4 m で、作業サイクルの考え方はパイロット掘削と全く同じである。

b) コンクリート覆工の掘削との併進

工期短縮のため覆工をリーミング掘削に併進するが、図-7 に示すとおり、トレンコンベアの下でインパートコンクリートを先に打込むという方法である。コンクリートの 1 スパン長は 12 m で、1 日に 2 スパン施工すればリーミング掘削に追従できる。このため、大型トレンコンベアを用いて、岩盤清掃、鉄筋組立て、コンクリート打込み、養生およびレール敷設を同時に行うこととした。また、アーチコンクリートは、トレンコンベアの後方 400 m で 2 組のセントルを用いて、1 日 2 スパン施工する。

c) PC 覆工による地山被りの薄い谷の部漏水防止

導水路トンネルは常時 $5.5 \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{cm}^2$ の内水圧が働くが、覆工コンクリートはオッター・フライ・ベアーの式に基づき設計しているので、内水圧による引張クラックが発生することを前提としている。TBM 掘削する弥太蔵谷と音谷川の下部では地山被りが薄く、水路からの漏

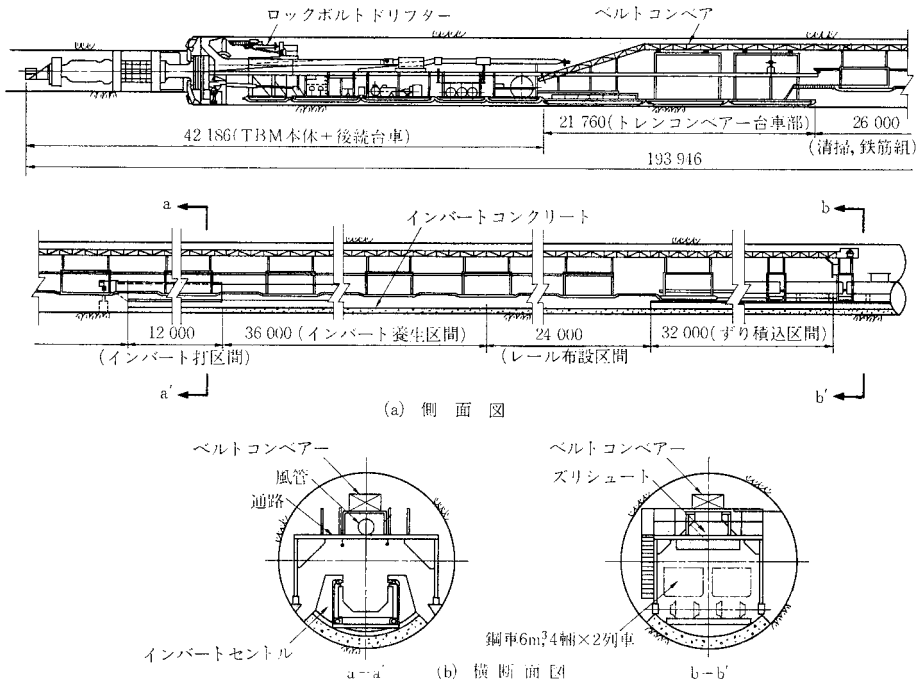


図-7 リーミング掘削・インパートコンクリート作業次第図

水を防止することが望ましい。このような対策に、通常は内張鉄管が用いられるが、当工事では、TBM 掘削された円形断面を活かし、ポストテンション方式プレストレスト工法でコンクリートの引張クラックを防止することとした。設計および施工上の特色は

- ① 1本の PC ケーブルでリングを形成し、自己バランス型で緊張する。
- ② 定着部を箱抜きとし、PC ケーブルの内空側への偏心による曲げモーメントを緩和するとともに、内空側に流水を阻害する突起を作らない。
- ③ 2本のケーブルをペアにして同時緊張する。
- ④ 定着部をトンネルの左右交互に配置して、プレストレスを均等化する。

等である。施工手順は 図-8 に示すとおりで、地山被りが十分な区間と同様にコンクリートを打込み、後日緊張する。その結果、弥太蔵谷下部 174 m、音谷川下部 156 m で施工し、他の工法に比べ約 5 か月の工期が短縮される。

(3) 施工実績

a) 工事経過

パイロット掘削は、昭和 57 年 4 月横坑内で機械を組立て、長さ 200 m、半径 150 m の円弧状の横坑を掘削し、直線の導水路本坑から本格施工した。TD 700 m 付近でトンネルに併走する破砕帯に遭遇し、掘進は難渋を極めた。グラスファイバー入りセメントペースト吹付け

を新しく導入するなど崩落の防止に努め、翌年 5 月これを突破したが、軟弱層の長さはトンネル延長で 500 m に及び、工程遅延は 4 か月に達した。その後は、湧水地帯や小規模破砕帯もあったが、大半は硬岩で TBM の高速掘削性能が発揮され、工程を 2 か月挽回して昭和 58 年 11 月に完了した⁷⁾。

リーミング機の組立ては横坑にずり出しバイパスを併設し、パイロット掘削中に行い、リーミング掘削はパイロット機搬出後ただちに昭和 59 年 1 月から本格施工を始めた⁷⁾。後述のように順調に進捗し、昭和 59 年 11 月中旬に完了した。

覆工は計画どおり、リーミング掘削と併進して施工し、10 月には音谷川下部の PC を緊張するとともに、覆工との併進によるグラウチングを開始した。

b) 施工速度の実績

掘削および覆工の急速施工実績を表-6 に示す。ここでは、長い軟弱層のため計画値を下回ったが、総体的には掘削、覆工ともかなりの平均月進が達成でき、硬岩掘削時には平均月進 400 m 前後の画期的な進行となっている。

(4) 施工実績の分析

a) TBM の純掘進速度と稼働率

TBM 掘削の純掘進速度と稼働率を岩級別に示したものが表-7 である。パイロット掘削では純掘進速度が計画値より大きく下回り、これを補う形で稼働率が高くな

手順	1	2	3	4
作業	インバート部の鉄筋組立 シース取付 グラウトパイプの取付	インバート部型枠掘付 コンクリート打込み 型枠取外し	PCケーブル固定用アンカー設置 アーチ部の外側鉄筋組立	PCケーブル引き込み シース内 PC グラウト
断面形状				
手順	5	6	7	8
作業	アーチ部の内側鉄筋組立 グラウトパイプ取付	定着部箱抜き型枠、アーチ部型枠掘付、コンクリート打込み 型枠取外し	養生 裏込め注入 緊張	定着部填充 填充グラウト コンソリデーショングラウト
断面形状				

図-8 PC 覆工施工手順

表一6 4号トンネル下流側の施工実績 (単位:m)

区 分	パイロット		リーミング		
	実績	計画	実績	計画	
掘月	最大	460.2	—	414.0	—
	平均	420.1 (58.6~10)	286.0	389.7 (59.6~10)	336.0
	好条件下 全期間	225.3		314.9	
掘日	最大	37.6	—	33.6	—
	平均	9.9	—	12.9	—
コンクリート	アーチ進	最大	480.0		—
		掘削併進時	393.6 (59.6~10)		400.0
	平均	310.5 (59.3~10)			
	インバート進	最大	408.0		—
掘削アーチコンクリート併進時		386.4 (59.6~10)		336.0	
平均	310.7 (59.1~10)				

注：() 内の期間は算出対象期間 (昭和年月)。

表一7 TBM の純掘進速度と稼働率

岩 級	パイロット掘削				リーミング掘削					
	純掘進速度 (m/h)		稼働率 (%)		純掘進速度 (m/h)		稼働率 (%)			
	実績	計画	実績	計画	実績	計画	実績	計画		
B	0.99	2.50	45.2	23.3	2.10	2.00	33.4	24.7		
C _H	1.46		34.0		2.23		31.6			
C _M	1.70		23.3		2.62		24.0		21.0	
C _L	1.84		16.7		18.8		2.28		14.6	18.7
D	1.35		8.4		7.0		2.15		9.1	9.3
破砕帯	1.32		9.3		2.2		1.66		8.3	7.4
総合	1.41	2.50	24.0	13.4	2.32	2.23	23.6	21.4		

表一8 硬岩でのパイロット掘削純掘進速度

TD (m)	岩 質 岩 級	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	石英含有率 (%)	カッター押付力 (tf)	純掘進速度 (m/h)
2137	花崗岩	1226	274	39.8	210	0.17
	B	1564				
2193 2200	片閃緑岩	1865	186	28.1	180	0.69
	B	1492				

っている。リーミング掘削では、ともに計画値をやや上回る実績となっている。

パイロット掘削の純掘進速度低下は次の理由である。

- ① アグマタイト質閃緑岩は種々の岩種から構成される混成岩で、切羽の地質は不均一なため、カッターヘッドの負荷変動が激しく、スラストを控えた。
- ② 一般に、引張強度、石英含有率の高い岩質は TBM 掘削がしにくいと言われるが、表一8 のとおり

基盤には非常に掘削しにくい岩質が分布していた。

- ③ 軟弱層ではカッターの押付けによって切羽が崩落し、大塊・大量のずりがバケットやベルトコンベアのトラブルを起こすため、スラストを控えた。

一方、同じ地質条件のもとでリーミング掘削の純掘進速度が高い理由は、次のとおりである。

- ④ 機械そのものを硬岩用の特別仕様とし、1軌跡2カッター配置およびトルク、スラスト倍増である、
- ⑤ パイロット坑の芯抜き効果がある、
- ⑥ パイロット坑のドレーン効果と後で述べる長尺ロックボルトによる予備支保工の効果で切羽崩落が少なく、軟岩でもスラストを控える必要がなかった。

b) 破砕帯における崩落防止対策

パイロット掘削中に大小様々な破砕帯に遭遇し、D級以下の軟弱層の累計長は 300 m に及ぶ。TBM 工法は断面が円形でかつ発破衝撃がなく安定性が良く、湧水のない小規模破砕帯は問題なく掘削できた。しかし、TD 700~1200 m では、粘土質または砂礫状の強破砕帯がトンネルに併走して断続的に現われ、また、中硬岩でも節理に粘土を挟んでおり、湧水も多く、崩落が発生した。TBM 運転技術面では、グリッパー操作法を改善し、グリッパー押付けによる崩落の防止を図った。先進ボーリングは、湧水の予測と切羽からの水抜きのため積極的にを行った。葉液注入等は、地質が激しく変化し予知が困難なため、確実な効果が期待できず全く実施しなかった。

支保工は、掘削開始以来レジン吹付けを使用していたが、湧水箇所では付着が悪く、また、コンクリート吹付けは、TBM に空間が占領されているため作業性が悪かった。TBM が崩落土の下に埋まり、崩落土除去と崩落防止対策で掘削停止が余儀なくされた。このため、関西電力が推進している TQC (全社品質管理) 活動の重要テーマとして取り上げ、要因分析と対策の展開にあたった⁹⁾。

破砕帯における崩落手当時間が長い原因を図一9により分析し、重要要因と判断された吹付け工法の材料、機械、方法について要求性能を決定し、適性評価を行った。表一9 は吹付け材料としてファイコン (ガラスファイバー入りセメントペースト) を選定した過程を示している。吹付け機は、同様な手法で小型・軽便なスプレーガン式を選定した。また、ファイコン吹付けが硬化するまでの即効的な支持力を得るため、FRP 製板型リング支保工を開発した。これらの新しい支保工も当初は扱いが不慣れであったが、改善を重ね、破砕帯に突入当時掘進 1 m に 10

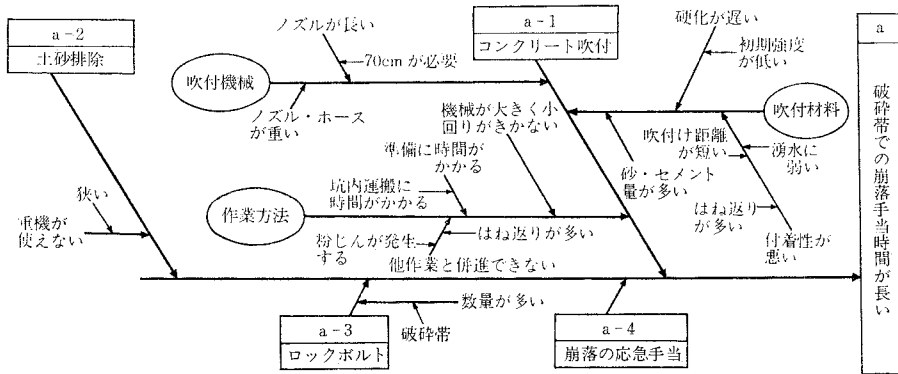


図-9 崩落手当時間特性要因図

表-9 新吹付け材料に関する検討

要 因	要 求 性 能	対 象 材 料				
		レ ジ ン	急結剤入り モルタル	クラスファ イバー入り ペースト	SEC	
○ 効果大	初期強度 (kg/cm ²)	80 (3h)	30 (3h)	50 (3h)	20 (3h)	
△ 効果小	付着限界湧水量 (l/分/m ²)	0	5	10	5	
	最短吹付距離 (cm)	10	100	10	100	
	凝結開始時間 (s)	2400	50~70	15~60	180	
	吹付け厚さ (mm)	5	30	20	50	
		(TBM 掘削への適応性評価)				
◎ 硬化が遅い	初期強度が低い	3時間強度 40 kg/cm ² 以上	○	×	○	×
⑩ 付着性が悪い	湧水に弱い	水中付着性 10 l/分/m ² 以上	×	△	○	△
	吹付距離が短い	必要最短吹付け距離 30 cm 以下	○	×	○	×
	はねかえりが多い	凝結開始時間 60 秒以内	×	○	○	×
◎ セメント量が多い	吹付け厚が厚い	吹付け厚さ 3 cm 以下	○	×	○	×
総 合	評 価		×	×	○	×

時間以上要していたのを5時間程度まで短縮した。

一方、リーミング掘削用の予備支保工は、坑内弾性波探査による緩み深さの測定と、横坑リーミング掘削時の効果確認試験により、図-10のような長尺ロックボルト工法を採用した。素材のFRP(強化プラスチック)はTBMカッターで切削可能で、狭い坑内で施工できるよ可撓性のより線加工(φ7mm×8本)とした。リーミング掘削時は、ファイコン吹付けと補足的な鋼製ロックボルトで済んだ。ただ、粘土層が厚い場合は、粘土層に沿う崩落が発生した。

e) TBM の稼働状況

パイロット機、リーミング機とも堅牢で、綿密かつ周到な日常の点検・保守により、硬岩と破砕帯が混在する複雑な地質条件下の過酷な使用に十分耐えた。駆動はすべて油圧式であるため、地質の不均一に起因する激しい負荷変動にも応答が滑らかであった。パイロット機では、負荷変動に伴いトルクリミッターが作動してカッターヘッドが停止するため純掘進速度低下の要因となったが、トルクリミッターの設定値を上げて対処した。

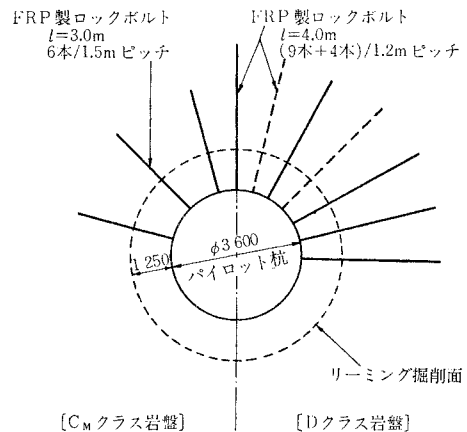


図-10 長尺ロックボルトによるリーミング掘削予備支保工

機械の点検・修理・改造のため掘削停止した主なトラブルは、ベルトコンベアの故障、後続台車を前方へ引寄せる引張シリンダーの牽引力不足、バケットの摩耗、アウターケリー摺動板の摩耗、およびパイロット機カッタ

ヘッドカバーと坑壁との接触であった。カッターは硬岩用の一枚刃ディスクカッターを使用した³⁾が、掘削 1 m³の消費量はパイロット掘削で、0.0167個 (カッタータイプ 200 m)、リーミング掘削 0.0095 個 (同 288 m) であった。

4. 長大導水路トンネルの急速施工に関する考察

(1) 4号トンネルの急速施工についての評価

4号トンネルの急速施工の実績を評価すると次のとおりである。

- ① 全断面長孔発破掘削は石灰岩を除き目標どおりであった。インパルトコンクリートの併進は計画値の60%程度であった。
- ② TBM パイロット掘削は予期せぬ長い破砕帯と硬岩を克服することができ、総体的には飛躍的な高速掘削ができた。リーミング掘削は長尺ロックボルト等の諸対策により、パイロット掘削より順調であった。覆工は計画どおりリーミングと併進することができた。
- ③ 長大トンネルを急速施工する場合に問題となるのは労働災害である。4号トンネルでは、上・下流の工区とも労働大臣への施工計画の提出と事前審査を受けて着手した。施工業者の現場組織内には専任安全衛生管理者を置き、教育と巡視を徹底した。安全確保を第一として長大トンネルを急速施工することも十分に可能であった。

(2) トンネルの急速掘削に対する考察

当工事の実績から今後の課題を次のように展望している。

- ① 欧米では、長孔発破工法、TBM 工法が一般化しているが、わが国ではまだ使われていない。これらの工法は、当工事でも見られたように NATM を使うことによって初めて可能になる面があり、今後、NATM が定着すれば普及するものと考えられる。
- ② TBM 工法は硬岩や破砕帯に弱いという認識があるが、当工事によって、これは克服できることが実証された。長い破砕帯で工程遅延を来したが、発破工法であったとしても何らかの遅れはあったと考えられ、一概に TBM の弱点とは言い切れない。むしろ、硬岩での高速掘削能力が評価されるべきものと考えられる。
- ③ 最近、複雑な地質条件を克服するため全地質型 TBM が開発されている。この点から見ると、当工事の機械は硬岩用である。このような機械で破砕帯

が掘削できたのはパイロットリーミング方式を選択したことにもあるが、パイロット掘削における水抜きボーリング、新規導入したファイコン吹付け、長尺ロックボルト等の諸対策に負うところが大きい。TBM 工法の適用可能範囲拡大には、機械の改良とともにこうした周辺技術の改善も不可欠である。

- ④ 覆工の併進は、実用的な工法であり、急速施工を行う場合には大いに活用できるものと考えられる。

あとがき

昭和 55 年から、新愛本水力発電所計画実現の最大の技術的課題として 4号導水路トンネルの急速施工について検討を行い、全断面長孔発破工法、TBM 工法、覆工の併進をそれぞれ計画し実行した。今までに述べたとおり、予期しない困難もあったが、所期の目標をほぼ達成できた。

新愛本計画地点は、日本列島の基本的な変成帯の一つである飛騨変成帯の東端域にあたり、複雑な変成作用を受けた地質であるが、このような条件下で急速施工の実績が得られたことは、これらの技術が広く活用可能であることを実証したものと理解できる。掘削が完了してまだ日が浅く、資料の分析や問題点の追究が不十分なためにごく表面的な報告にとどまったが、われわれが得た経験がトンネル工事に携わる技術者諸兄のご参考になれば幸いと思い、紹介させて頂いた次第である。

終りにあたり、当工事の施工において、日夜分かたね努力を惜しまれなかった大成・清水・日本国土開発・三井共同企業体、間・銭高・大豊共同企業体、ならびに破砕帯における TBM 掘削に貴重なご助言を賜った日本トンネル技術協会の方々には心より謝意を表する。

参考文献

- 1) 杉本 清ほか：新愛本水力発電所の計画概要，電力土木，No. 180，1982年9月。
- 2) 谷口八朗：黒部に10.8キロの導水路を掘る，トンネルと地下，第14巻8号，1983年8月。
- 3) 杉本 清ほか：新愛本水力発電所導水路工事における TBM 掘削計画，建設の機械化，No. 387，1982年5月。
- 4) 手塚昌信ほか：PC 圧力トンネルの設計と施工，コンクリート工学，Vol. 23，No. 1，1985年1月。
- 5) 土木学会編：わが国におけるトンネル掘進機の実績と展望，1976年10月。
- 6) 杉本 清ほか：新愛本水力発電所導水路の TBM パイロット掘削，電力土木，No. 190，1984年5月。
- 7) 杉本 清ほか：新愛本水力発電所導水路トンネルにおける TBM 施工の現状，建設の機械化，No. 416，1984年10月。
- 8) 手塚昌信：トンネル・ボーリング・マシン (TBM) 掘削における軟弱地質の吹付工法の改善，品質管理，Vol. 35，11月臨時増刊号，1984年11月。

(1984.12.20・受付)