

小断面トンネルで硬質岩盤を機械掘削により施工 —名護導水路トンネル—

田中清隆* 安藤方克* 供田英一* 牧原雅和* 森崎泰隆**

名護導水路トンネルは、発進立坑より両側に約 1km、合計で 1,997m のトンネルを施工する工事である。トンネルの掘削断面積は 5.4m² の小断面で硬質の岩盤を機械掘削方式で施工した。本文は、名護導水路トンネルにおける 1) 仮設備および施工機械、2) 掘削実績、3) 河川横断部の施工法、4) 充填工の施工法について報告するものである。

キーワード：トンネル、小断面、機械掘削、河川下横断、薬液注入

1. はじめに

西系列水源開発事業は、沖縄県本島北西部の 13 河川から豊水時に取水し、これを大保ダムと倉敷ダムに貯留したのち、安定的に供給する事業である。本工事は、名護市字田井等から名護市字許田に至る約 8.9km の名護導水路ルートの内、数久田立坑から許田方に 1,071m、世富慶方に 926m のトンネルを施工するものである。Fig. 1 に名護導水路の位置図を示す。

トンネルは掘削断面積が 5.4m² の小断面トンネルである。また、地山は硬質の粘板岩あるいは石英安山岩であり、トンネル全線を機械掘削で施工した。地山の軸圧縮強度は 40~100N/mm² のため通常は発破掘削で施工するが、発破によるトンネル周辺地山の緩みを低減し、地下水への影響を抑制する目的で設計段階から機械掘削が採用されていた。本文は、名護導水路トンネルにおける施工結果を報告するものである。



Fig. 1 現場位置図

* 首都圏支店 名護導水路数久田作業所
** 土木事業本部トンネル技術部

2. 工事概要

工事名：西系列幹線導水施設名護導水工事
(第一工区)その2

発注者：沖縄県企業局

施工者：(株)熊谷組・(株)武国建設・(株)久高組特定建設企業体

施工場所：沖縄県名護市数久田～許田、数久田～世富慶

工期：平成 14 年 9 月～平成 20 年 5 月

トンネル延長：1997.65m (数久田～許田方:1071.05m,
数久田～世富慶:926.6m)

掘削内空断面：5.4m²

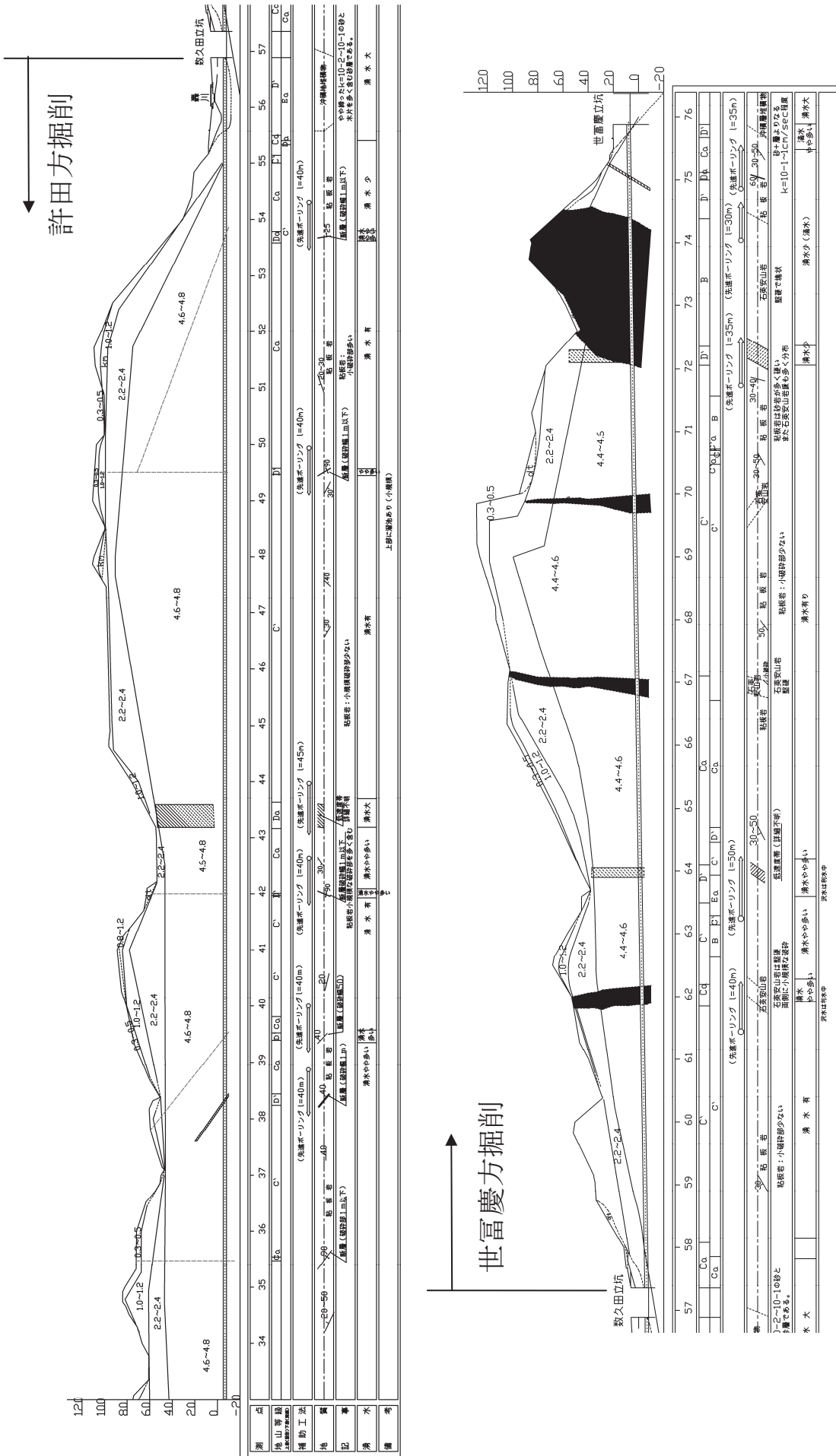
施工法：矢板工法（一部、河川下は NATM）

掘削方式：機械掘削方式

3. 地形および地質概要

本工事は数久田立坑から許田方および世富慶方の両方向にトンネルを施工するものである。許田方の地形は、海岸に沿った E.L. 30~60m の台地が広がっている。また、北西に流下する小規模な沢が 2 条あり、蛇行と支沢の発達により凹凸の多い地形である。2 条のうち、轟川は二級河川で水道その他の用途で取水している。また、数久田立坑の近辺を通過しており、本トンネルは河川下を約 60° の角度で横断している。河川下横断部は河床から約 7.3m の土被りでトンネル施工による河川の枯渇が懸念されていた。世富慶方の地形は、北西-南東の山稜で峻険な山地をなす。この山稜は E.L. 130~150m で、小規模な沢が多数発達している。沢の水源付近である E.L. 80~100m までは非常に急な河谷であり、その上は穏やかな谷で湿地化している箇所が多い。

Fig. 2 に地質縦断図を示す。基盤岩は国頭層群の名護層に属する粘板岩とこれを貫く石英安山岩である。基盤の粘板岩は軸圧縮強度が $q_u=40\sim80\text{N/mm}^2$ で、石英安山岩は 108N/mm^2 である。石英安山岩は Fig. 2 の着色部のように延長で 150m 以上出現すると想定されていたが、実績では図中の B 等級地山区間で、67.5m であった。



4. 施工機械と仮設備

Fig. 3 にトンネル掘削時の機械の配置と主な仮設備を示す。本トンネルでは掘削方式の選定にあたり、本来は発破掘削を採用する地山強度であるものの、周辺環境への配慮、名護市との協議および地質から想定される岩盤強度など総合的な判断のもと機械掘削方式が選定された。掘削機械は、トンネル掘削断面が 5.4m^2 の小断面トンネルであることや想定される岩盤強度などを考慮してミゼットマイナー (90kW 級) を用いた。掘削したずりは後方のベルトコンベアによりずり鋼車 (2m^3) に積み込む。ずり鋼車は2両連結とし6t バッテリー機関車で牽引して立坑まで運搬した。トンネル内空幅は Fig. 4 の通り標準部で 2.2m のため、ずり鋼車の入れ替えができずトンネル延長 350m 毎に断面を拡幅した (Fig. 4(b))。立坑へ運搬したずりは門型クレーンで地上へ吊上げ土砂ピットへ投入した。土砂ピットからバックホウでダンプトラックに積み込み土捨て場へ運搬した。



Photo. 1 トンネル掘削機械
(ミゼットマイナー90kW 級)

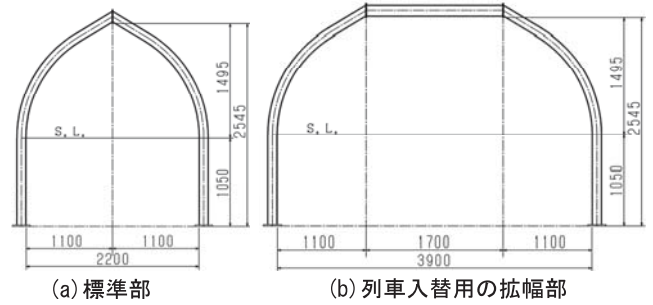


Fig. 4 トンネル標準断面

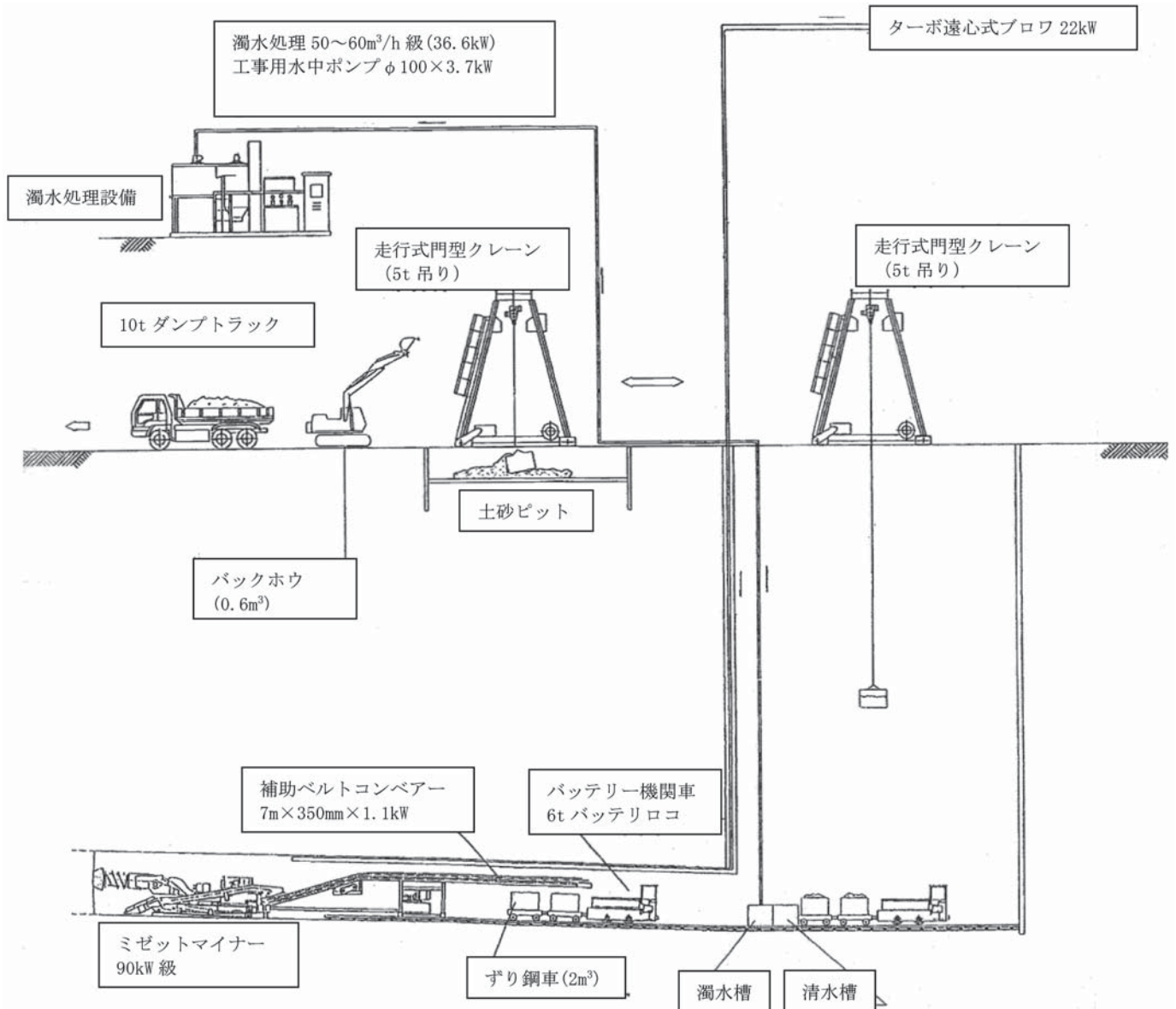


Fig. 3 掘削機械および主な仮設備

5. トンネル掘削実績

5.1 トンネル進行

トンネル掘削に要した作業日は世富慶方と許田方を合わせて452日であった。掘削実績は、日平均掘進長4.4m/日、ビット使用量0.202個/m³であった。パターン別掘削実績およびビット使用量をTable1に示す。

5.1.1 掘削実績

(1) 世富慶方の掘削実績

世富慶方の地山は主に粘板岩が多く全体の約88%を占めている。粘板岩は一軸圧縮強度が40~80N/mm²で、そのうちC Iパターンの延長が646.8mで約70%となっている。粘板岩を主体としたC IおよびC IIパターンにおける平均掘進長が4.9~5.0m/日であるのに対して石英安山岩を主体としたBパターンでは日平均掘進長が1.3m/日と約26%に減少した。石英安山岩の一軸圧縮強度は約108N/mm²であり、100N/mm²を超える強度ではミゼットマイナーの掘削能力が著しく低下することを示している。

(2) 許田方の掘削実績

許田方の地山は主に粘板岩が多く全体の約93%を占めている。粘板岩は一軸圧縮強度が44~54N/mm²で、そのうちC Iパターンの延長が874.8mで約81%となっている。粘板岩を主体としたC IおよびC IIパターンにおける平均掘進長は5.5~6.1m/日であった。

5.1.2 ビット使用実績

(1) 世富慶方のビット使用実績

主体である粘板岩地山において地山1m³掘削当りのビット使用量はC Iパターンで0.156個/m³、C IIパターンで0.129個/m³であった。これに対して石英安山岩が主体のBパターンにおいては0.271個/m³であり、C Iパターンの約1.7倍の使用量であった。

(2) 許田方のビット使用実績

主体である粘板岩地山において地山1m³掘削当りのビット使用量はC Iパターンで0.263個/m³、C IIパターンで0.244個/m³であった。許田方の粘板岩は世富慶方の粘板岩と比較して一軸圧縮応力に大差がないにもかかわらず、1m³当りのビット使用量がC Iパターンで1.7倍、C IIパターンで1.9倍となっている。これは、地山自体の強度は同様であったが、許田方の地山が比較的亀裂が少なかったことに因っていると考えられる。

5.1.3 施工実績との掘削能力の比較

国内での自由断面掘削機による施工実績との掘削能力の比較をFig.5に示す。図中の点線は90kW級の機械を用いて地山のRQD100の条件における掘削能力を示している。点線の場合と比較して今回の施工実績では、掘削能力が若干大きな値を示している。これは、地山のRQDが一部の破碎帯区間を除いて70~100程度であったため、点線と比較して大きな値になったと考えられる。

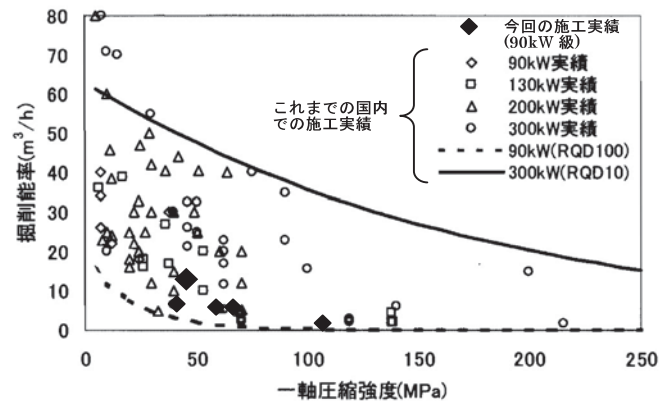


Fig.5 既往の施工実績との掘削能力の比較 ²⁾に加筆

Table 1 トンネル掘削実績

位置	地山等級	区間長(m)	作業日(日)	平均掘進長(m/日)	掘削土量(m ³)	地山強度(N/mm ²)	使用ビット数(個)	m ³ 当りビット使用量(個/m ³)	純掘削時間(h)	時間当り掘削量(m ³ /h)	岩種
世富慶方	B	67.5	54	1.3	490.4	107.8	133	0.271	690	0.7	石英安山岩
	C I	646.8	132	4.9	4107.5	57~79.2	641	0.156	898	4.6	粘板岩
	C II	158.4	32	5.0	961.8	41.7	124	0.129	176	5.5	粘板岩
	D I	13.5	5.5	2.5	120.3	—	—	—	—	—	粘板岩
	E II	40.5	15.5	2.6	245	—	16	0.065	—	—	沖積堆積物
小計		926.7	239	3.9	5925	—	914	0.154	—	—	—
許田方	C I	874.8	158	5.5	5758.7	54.3	1515	0.263	1215	4.7	粘板岩
	C II	122.75	20	6.1	746.1	44.7	182	0.244	68	11.0	粘板岩
	D I	3.6	2	1.8	21.8	—	—	—	—	—	粘板岩
	E II	74.7	33	2.3	451.9	—	—	—	—	—	沖積堆積物
小計		1075.85	213	5.1	6978.5	—	1697	0.243	—	—	—
世富慶+許田 総合計		2002.55	452	4.4	12903.5	—	2611	0.202	—	—	—

6. 河川横断部の施工

6.1 概要

本トンネルは、数久田立坑から許田方に約 40m の位置で轟川の下を約 60 度の角度で横断している。轟川とトンネルの位置を Fig.6 に示す。轟川の川幅は約 18m で河床から約 7.3m の土被りでトンネルが横断している。轟川沿線の水利用に影響を及ぼさないよう薬液注入による止水対策が計画されていた。また、当該区間の周辺地盤は N 値が 10 以下の軟弱な沖積層が比較的厚く堆積しており、掘削に当たっては止水対策のみならず、切羽の安定性の確保や地山のゆるみ抑制対策を講じる必要があった。

6.2 薬液注入工の施工

河川横断部の薬液注入工は Fig.6 に示す通り、一次注入として河川下の延長 57.3 m 間で施工した。一次注入はトンネル断面の外側 2 m 間の範囲に二重管バブルパッカー工法で施工した (Fig.7)。注入材はハイブリッドシリカで計画注入率は、試験施工の結果 43.5% とした。ゲル強度は 2~3N/mm² であり、切羽の安定性向上にも寄与する。

数久田立坑から掘削を開始して No.56+20 の切羽より多量の湧水が発生し、河川からの水が坑内へ入った。そこで、対策として二次注入を実施した。二次注入の施工区間は、Fig.6 に示す 42.3 m 間で、注入範囲は一次注入の注入範囲から外側に 1 m 増加した (下部は 1.5 m)。

また、No.56+20 から約 14.9m 区間をトンネル内から水平に施工し、その後の延長 27.4m 区間は地上から鉛直に施工した。二次注入における注入材は腐植土層との相性を考慮して二重管ストレーナ工法で、水ガラス系半懸濁型薬液 (エスタイト GS) を注入した。計画注入率は一次注入と同様に 43.5% とした。一次注入および二次注入の実施注入率を Table2 に示す。計画注入率 (43.5%) に対して一次注入では 40.5%、二次注入で 42.5% であった。

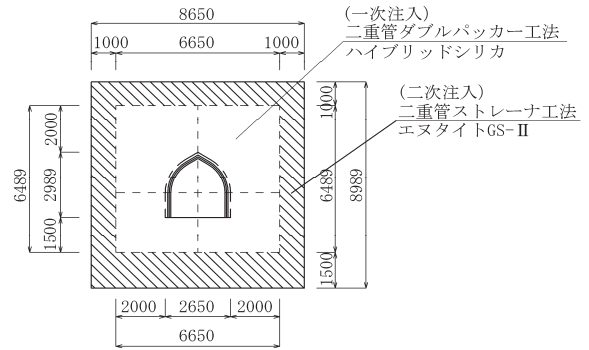


Fig.7 薬液注入工の施工範

Table 2 充填用材料の配合

区分	対象土量 (m ³)	注入量 (リットル)	注入率 (%)
一次注入	2472.6	1,001,294	40.5
二次注入	1352.3	574,276	42.5

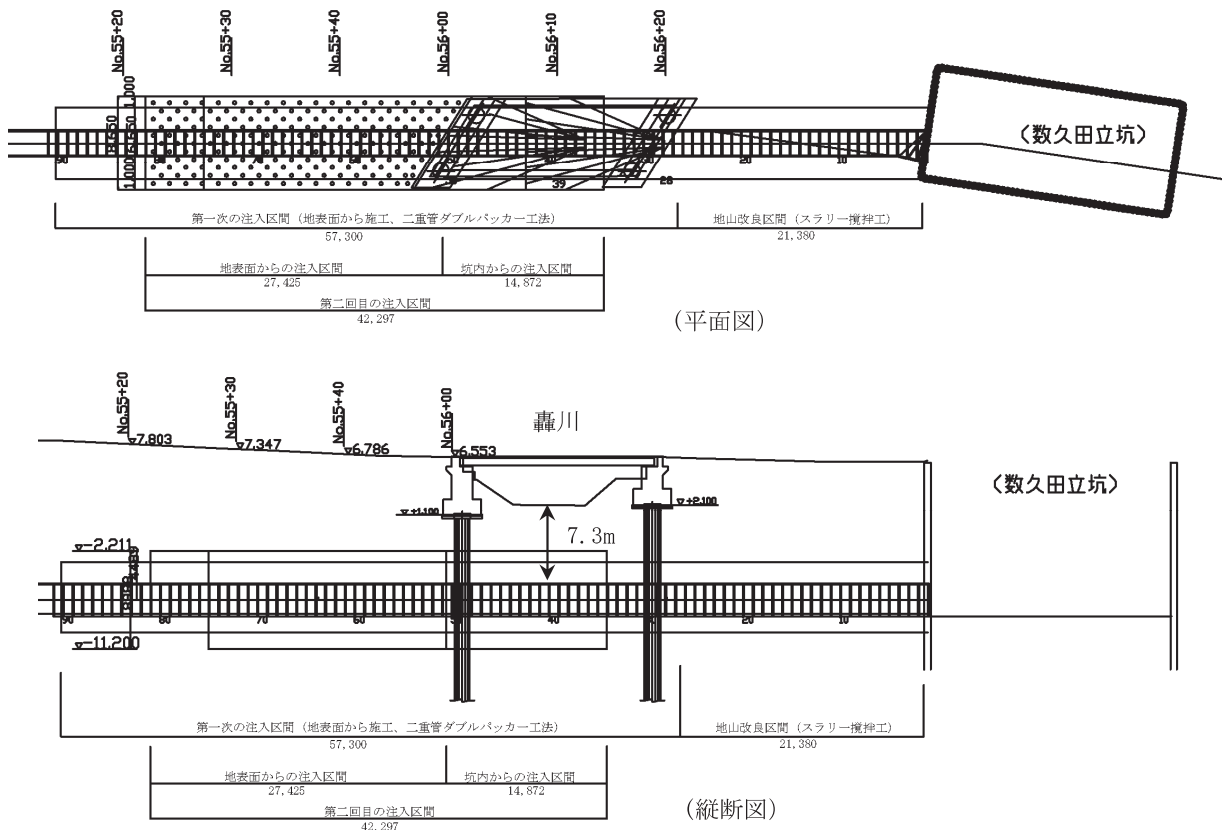


Fig.6 河川横断部の平面図、縦断面図

6.3 吹付コンクリートの採用

河川横断部は薬液注入による止水工を実施するもののN値が10以下の沖積層が分布しているためトンネル掘削による周辺地山の緩みを抑制することが重要である。このため、河川横断部は標準部の矢板工法に変更して、鋼製支保工を施工した後、直ちに吹付コンクリートを施工した。これにより掘削直後、速やかに地山の支保ができるため、トンネル周辺地山の変位を抑制することが可能となる。

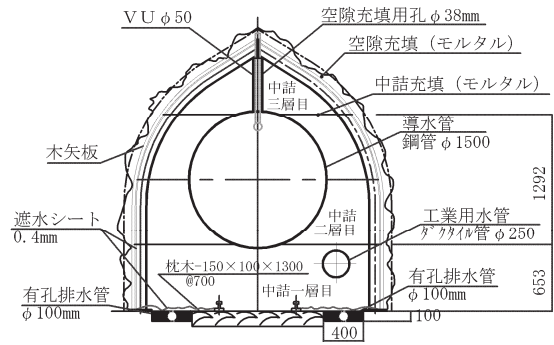


Fig. 8 充填工断面図

7. 充填工の施工

7.1 概要

トンネル掘削完了後、Fig. 8 の通り坑内に導水管(φ1500)および工業用水管(φ250)を布設し、空隙をモルタルで充填する。ここで、管の布設工事は他の業者が施工を行い、管の布設完了後に充填工を施工した。

7.2 施工方法

充填工は、遮水シートと鋼管外側部分の中詰充填、遮水シートと地山間の空隙充填に分けて施工した。中詰充填は、モルタル打設中の浮力による鋼管への影響を考慮して3層に分けて施工した。また、鋼管3本分にあたる延長27mを1施工区間としFig. 9に示す手順で施工した。中詰充填と空隙充填の材料の配合をTable3に示す。

7.3 河川横断部の充填工

河川横断部の地山は、沖積層で腐植土も含んでおりトンネル掘削にも時間がかかった。この区間は、地山が軟弱であり、将来的な安定性を確保するために、充填材料を強度が高く水中不分離性も有する SP コンクリート¹⁾を採用した。SP コンクリートの配合をTable4に示す。施工は、ベースコンクリートの入った生コン車に現場で高性能増粘剤A剤を添加して高速で90秒攪拌し、次に高性能増粘剤B剤を添加して高速で120秒攪拌した後ポンプ車で圧送した。

Table 3 充填用材料の配合

(単位: kg, 1m³当り)

種類	主材			可塑性A		可塑性B	
	セメント	フライアッシュ	水	CG1000	水	CG2000	水
中詰充填(水中分離抑制モルタル)	500	200	600	3	147	—	—
空隙充填(可塑性モルタル)	400	400	492	3	97	15	95

Table 4 充填用材料の配合 (河川横断部)

(単位: kg, 1m³当り)

種類	設計強度 (MPa)	スランプフロー値 (mm)	主材				高性能減水剤	高性能増粘剤 (ヒューストップ)	
			セメント (C)	水 (W)	細骨材 (海砂: 砕砂 = 6:4)	粗骨材 (砕石 G _{max} 20mm)	C×1.5%	A剤 W×4%	B剤 W×4%
SP コンクリート	35	650	475	190	645	996	7.125	7.6	7.6

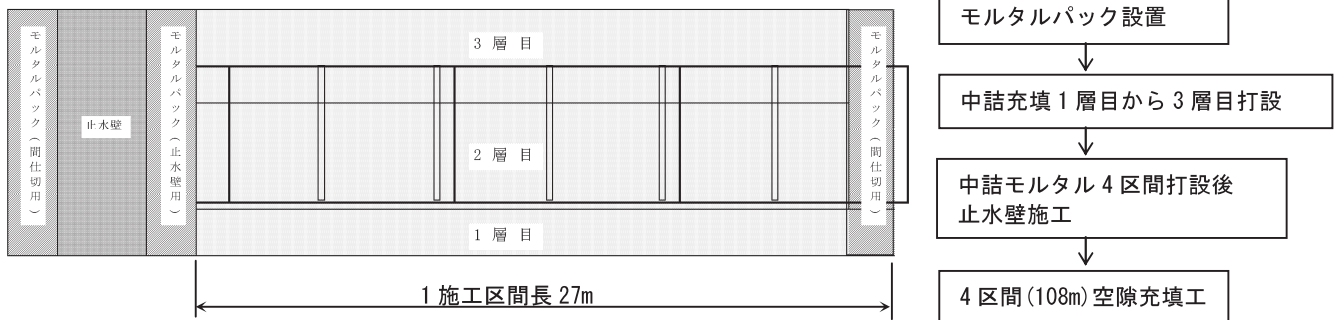


Fig. 9 充填工施工手順

8. おわりに

小断面、長距離の条件下における硬岩の機械掘削を適正な機械および設備を選定することにより工期内に完了することができた。また、河川下横断部の施工は水により難渋したものの無事に突破することができた。

本報告が今後に行われる同種工事の参考となれば幸いである。

謝辞

本工事は、平成 14 年 9 月から平成 18 年 12 月までの 1 期工事、平成 18 年 12 月から平成 19 年 3 月までの 2 期工事そして平成 19 年 4 月から平成 20 年 5 月までの 3 期工事と合計約 5 年半にわたる工事となった。無事に工事を

完了することができたのも沖縄県企業局の皆様をはじめ関係者各位の御指導、御助言の賜物であり、ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 金森誠治, 佐藤幸一, 野中英: スーパーパフォーマンスコンクリートの基礎物性とポンプ圧送性に関する研究, 熊谷組技術研究報告, No. 64, pp. 5-10, 2005.
- 2) ジェオフロンテ研究会: 割岩工法便覧 割岩工法に関する技術資料, pp. 205, 2006.

Mechanical excavation of a hard rock tunnel in a small cross section

Kiyotaka TANAKA, Masakatsu ANDOU, Eiichi TOMODA, Masakazu MAKIHARA
and Yasutaka MORISAKI

Abstract

Nago waterway tunnel is 1,997m long. This tunnel has a small cross section (5.4m²), and was constructed by the mechanical excavation in hard rock. In this paper, the author reports the results of construction of this tunnel, 1) temporary facility and machine of the excavation, 2) the results of the excavation, 3) method of the digging crossing under the river, 4) method of the filling around the pipes which were laid in the tunnel.

Keywords: Tunnel, Small cross section, Mechanical excavation, Digging crossing under the river, Chemical grouting
