

超大型自由断面掘削機と制御補助発破併用による 硬岩地山のトンネル掘削

For Combination of Ultra-Large Free Cross-Sectional Excavator and Control Auxiliary
Testing Tunneling of Hard Rock Mountains

宇都宮 基 宏^{※1} 能 田 浩 文^{※1} 瀧 間 優 作^{※1}
Motohiro Utsunomiya Hirofumi Noda Yuusaku Takigiku

福 山 一 世^{※1} 青 山 智 樹^{※1}
Issei Fukuyama Toshiki Aoyama

【キーワード】 制御補助発破 超大型自由断面掘削機 騒音 振動

1. はじめに

名護東道路の事業は、那覇空港、那覇港等の中南部の各拠点間とのアクセス向上、名護市内の交通混雑の緩和及び交通安全の向上、北部地域における地域活性化の支援を目的としている。事業整備区間は名護市内の伊差川～数久田間の6.8kmで4車線で計画され、平成23年度には伊差川IC～世富慶IC間が暫定2車線で開通している(図-1)。



図-1 トンネル位置図

施工を担当する名護東道路4号トンネル工事は最も那覇市側に位置し、数久田地内側に至るトンネル延長L=1,021mを建設するものである。出口側坑口付近とトンネル直上部には民家が点在しており、施工前より発破による騒音と振動に対する苦情が懸念されていた。そこで、掘削機の高性能大型化による発破を使用しない施工方法を検討し導入した。しかしながら、それでも施工が困難な状況になり、制御補助発破を併用した近隣住民への対応を考慮した新たな施工方法で掘削を行うこととなった。本工事を通じて、制御補助発破併用大型機械施工に至るまでのプロセスや施工結果に基づく騒音と振動の低減効果について検証したので報告する。

1 九州支店 名護東トンネル作業所

2. 工事概要

工事名：平成30年度名護東道路4号トンネル工事
発注者：内閣府沖縄総合事務局 北部国道事務局
施工者：飛島建設・太名嘉組特定建設工事
共同企業体 名護東トンネル作業所
施工場所：沖縄県名護市数久田地内
工期：2018年10月11日～2020年11月30日
トンネル掘削延長：1021.0m
掘削断面積：79.1～103.3m²(非常駐車帯)
掘削方式：NATM(制御発破併用機械掘削方式)
ずり運搬方法：連続ベルトコンベヤー方式

3. 地形・地質概要

本トンネルの位置する山体は、轟川左岸から南南西方向へ2km程延びる山地で標高100～120mのやや平坦な尾根を形成している。この尾根の平坦面は、国頭礫層が点在して赤褐色土に覆われている。また、山地の北と南側の斜面は急斜面を形成し、断層破砕帯などを素因とする破砕帯性土すべりの発生が認められる地域となっている。世富慶川や轟川の方向は、上流から下流へ南東-北西方向へと延びる流路をつくり、幅のせまい侵食谷地形を形成している。この北西-南東方向の谷地形は、沖縄本島中北部山地に特有の地形であり、この谷沿いには必ず大規模な断層破砕帯が存在し、この岩石の破壊された断層破砕帯に沿って浸食谷が形成されたことを示している。そのため、この世富慶川や轟川周辺には北西-南東方向の断層破砕帯が存在し、それと同方向の中・小規模の破砕帯が山地中に分布する可能性がある。

トンネル全域にわたっては、黒色千枚岩を主体とする国頭層群名護層が基盤岩として分布し、一部には砂岩を挟んだ互層状の地山と予想された。事前の調査ボーリング結果では岩相は硬質な棒状コアを主体としたが、片理面や亀裂沿いに褶曲した区間では岩体の変質が顕著に見られ、極薄に細粒化が進んでいた(図-2)。

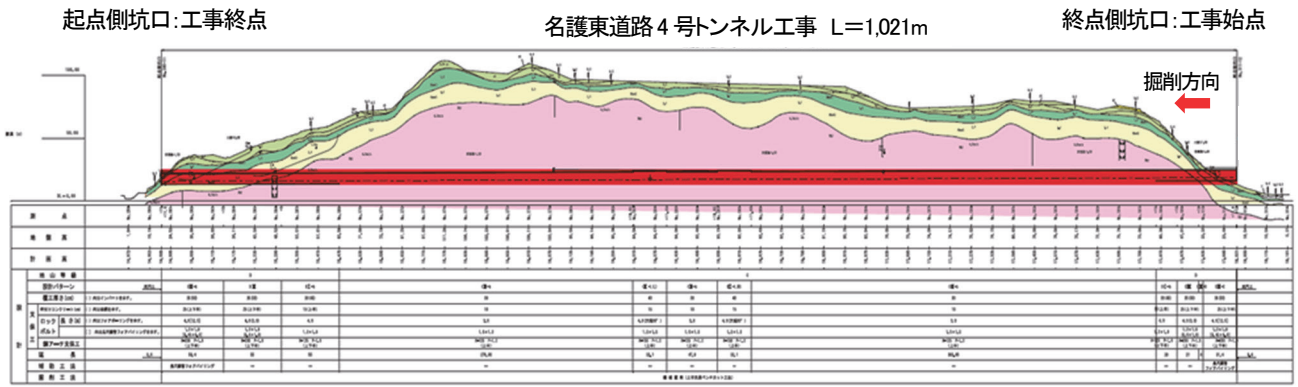


図-2 地質縦断面

4. 硬質な地山による掘削への影響

設計計画段階では、機械掘削工法の選択条件である「トンネルの大半の部分(=90%以上)がD級地山であること」に関して、「76%を占めるCIIは亀裂が発達した地山で機械掘削が可能」とされていた。しかし、追加調査ボーリングを行った結果、地山の一軸圧縮強度 q_u が 31.4MN/m^2 、 43.8MN/m^2 、 64.7MN/m^2 である千枚岩からなる地山が坑口から41.3m~43.75m付近で測定され(点荷試験による測定: 100.0MN/m^2 以上)、機械掘削の効率的な切削可能な上限値とされる 49MN/m^2 を上回る一軸圧縮強度が確認された。円柱状コアの多くはハンマー軽打で片理面沿いに割れ(片理面の方向はほぼ一定)、割れ目の面は平滑で鏡肌状を示すものがある。一方で、石英脈や砂岩層を挟在するコアはハンマー打撃で金属音を発し、 50MN/m^2 以上の一軸圧縮強度が想定された(写真-1)。



写真-1 追加調査ボーリングによるコア採取

地山弾性波速度については、 4.2km/s が観測されており、地山区分がDI~CI、支保パターンはDI-b、CII-bで設計されている。さらに坑奥に進むと、地山弾性波速度は、 4.2km/s から、 5.0km/s と増加することから、掘削対象地山の強度は機械掘削での限界を超える強度になる可能性が高いことが予想された。当初坑口部では、油圧式トンネル切削機を導入していたが、地山の硬質化が想定位置よりも手前で発生したため掘削が困難になり、掘削サイクルタイムが延長してしまうケースが生じた。

5. 施工機械・方法の再検討

5.1 掘削機の大型化

硬質な地山に対して、標準の200KW級自由断面掘削機では限界を迎える可能性が高いと考えられ、工程遅延の影響が懸念された。このため、類似の条件下でのトンネル施工実績を踏まえて、施工機械の再検討を行うこととした。

沖縄本島北部に位置する、座津武トンネル¹⁾の掘削工では、本工事と同様の千枚岩質の地山に対し300KW級の自由断面掘削機が採用されていたが、想定より硬質な地山が出現したため、掘削途中より補助発破併用機械掘削方式、および発破工法への変更を余儀なくされていた。この実績から、300KW級の掘削機を用いた場合でも難航することが予想されたため、本工事ではさらに能力の高い350KW級を選定した(表-1)。

表-1 座津武トンネルの当初と実績の対比と名護4号トンネルでの考え方

トンネル	支保パターン	弾性波速度(km/s)	掘削工法	掘削機械
座津武(当初)	CI	4.0~4.2	・機械掘削	自由断面掘削機
座津武(実績)	CII-b		・発破掘削 ・補助発破併用機械掘削	自由断面掘削機 300KW級
座津武(当初)	CII-b	2.2	・機械掘削	自由断面掘削機
座津武(実績)	CII-b		・発破掘削	

名護4号(当初)	CII-b	4.2~5.0	・機械掘削	自由断面掘削機 200KW級
名護4号(施工)	CII-b		・機械掘削 (補助発破併用機械掘削)	自由断面掘削機 350KW級

なお、自由断面掘削機は沖縄本島内では調達できない機械であり、本土より海上輸送をかけることとなる。そのため、掘削能力の高い機械への段取り替えを段階的に実施すると、よりコスト増になることが懸念されたことから、掘削開始当初より高性能機械を配備する方針とした。以上より、本工事の硬岩地山の機械掘削には、350KW級自由断面掘削機(メーカー：(株)三井三池製作所、SLB-350S型)を当初より導入した。

5.2 大型掘削機の施工上の問題点

自由断面掘削機 (SLB-350S 型) による掘削で(写真-2)、坑口から約 80m (No.307+11.8m) 付近の切羽にて、千枚岩の中に多くの砂岩が出現した(写真-3)。これは、千枚岩に砂岩が挟有している互層構造で、砂岩の強度は 101MN/m²、千枚岩は 37MN/m² であった。互層状態でも強度の高い砂岩の占める割合が多く、掘削にかかるサイクルタイムが大幅に延長した。さらに、掘削機械ブームヘッド本体ヘッド部分のビットの損耗が激しく、トンネル掘削はわずか 2.4m/日までに低下した(図-3)。さらに、自由断面掘削機の本体にまで損傷が発生し(写真-4)、トンネル掘削が困難を極める状況が発生した。



写真-2 搬入時の掘削機(ヘッド)

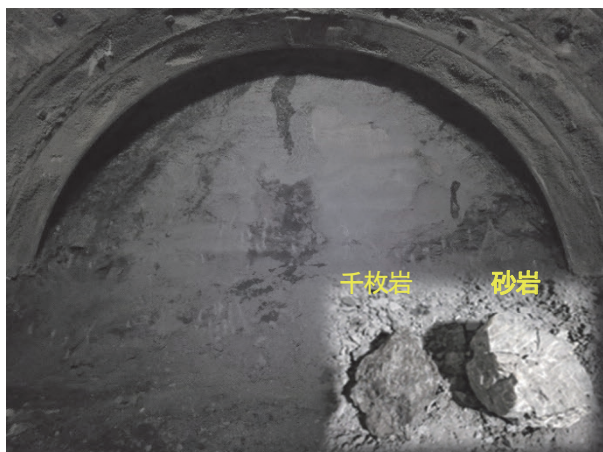


写真-3 No.307+11.8 付近切羽状況

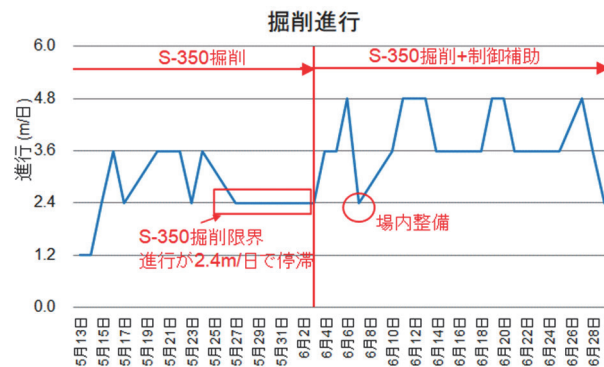


図-3 掘削進行経時変化グラフ

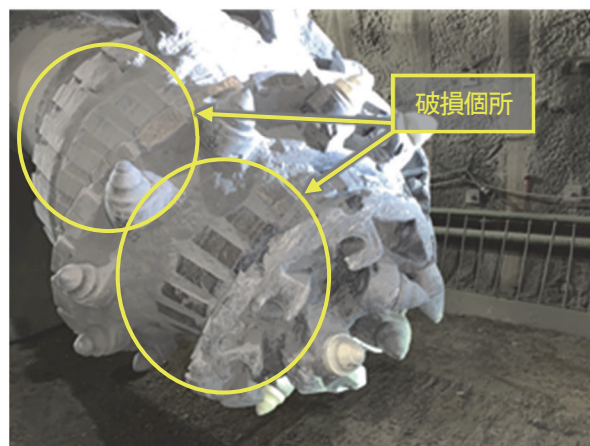


写真-4 掘削機(ヘッド)破損

5.3 制御補助発破を併用した機械掘削

前項で示したとおり、大型機械での掘削のみの場合には、工事工程に大きく支障を来すことが半明したため、トンネル機械掘削に制御補助発破を併用する工法へ変更することを検討した。検討するうえで、隣接の同 3 号トンネルの掘削において、発破工法により掘削し、数久田集落に隣接する箇所において、騒音と振動の影響が大きくなったことによる苦情があり、掘削方法の変更等を余儀なくされて工事が一時中止となり、工期遅延が生じた例があった。このため、集落へ向かって掘り進める 4 号トンネルの掘削においては、集落に近づいてしまった地点では発破の使用ができない可能性が高く、特に終盤 300m 以降の掘削は集落に徐々に近づいていくため発破の使用については慎重になる必要があった。すなわち、騒音、振動を監視しながら、場合によっては発破を中止する必要があった。

以上の検討条件を踏まえ、以下に示す留意事項に配慮して、トンネル機械掘削に制御補助発破を併用した工法に変更することとした。

- ① 牛舎や建物については、発破振動が 0.1 カイン以下になるように火薬の使用量を制御しながら施工する。
- ② 地すべり箇所においては、地すべり動態観測の計

測結果に基づき安定性を確認しながら補助制御発破を使用する。

- ③ すべり対策工（グラウンドアンカー工）完了後にトンネル掘削を行う。
- ④ 起点側集落の住民に対して、トンネル発破時の騒音・振動測定を行い、管理値以下であることを確認し、住民同意のもとで施工を行う（図-4）。

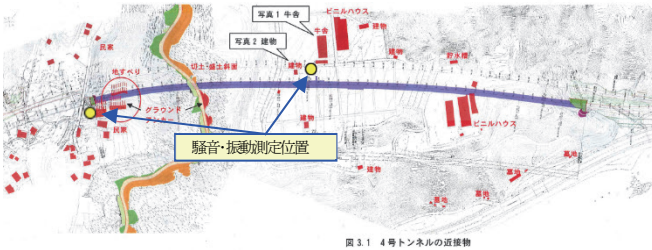


図-4 名護東4号トンネル周辺図

6. 提案手法による施工

6.1 制御補助発破併用機械掘削による施工

制御補助発破併用機械掘削に変更後は、制御補助発破によって芯抜きし、払いまわりを掘削機械により掘削することで、掘削サイクルタイムを 3hr/m から 1.5hr/m に短縮することができた（図-5）。

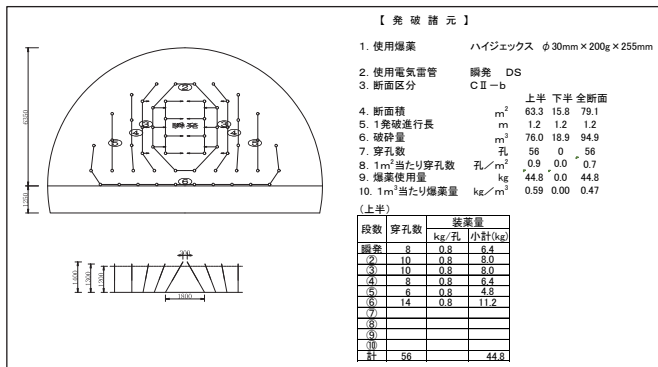


図-5 制御補助発破設計画図

また、掘削機械のビットも 2.52 個/m から 1.33 個/m に低減できた。トンネル掘削の進行は、結果として日進 4m を確保することが可能となり、かつ、掘削機械のビットの損耗を緩和させることで、ビットの付け替え等の手間やビットの運搬コストを低減することができた（表-2）。

表-2 SLB-350S 型ロードヘッダー消耗品実績

項目	進行 (m)	消耗品				消耗頻度			備考
		ビット(個)	アダプタ(個)	ドラム(回)	ビット(個/m)	アダプタ(個/m)	ドラム(回/m)		
全体集計	977	1518	20	18	1.55	0.02	0.018	45mからの掘削	
発破区間	739	1055	14	12	1.33	0.018	0.015	発破併用区間	
発破無し	184	463	6	6	2.52	0.033	0.033		

6.2 発破による騒音と振動の影響

制御補助発破による近隣集落への影響を表-3、4に示す。

す。なお、騒音・振動測定は、その都度現地へ行き、手動測定にて行った（図-4参照）。

騒音については、測定値が暗騒音よりも小さい値であったため、影響のほとんどない状態であった。振動については、牛舎直下位置付近では、目標である 0.1kine 以下に対して 0.073kine に抑えることにより、補助発破併用機械掘削による牛舎等への弊害はなかった。起点側近隣集落においては、振動を 0.1kine 以下に抑えつつ、近隣民家との離隔、および地山の安定状態を確認しながら施工を進めた。結果として、約 130m 手前にて制御発破併用掘削は終了した。これらにより近隣からの苦情もなく、地山の安定状態を確保してトンネル掘削工事を進めることができた。

表-3 牛舎付近トンネル発破時における騒音・振動測定

測点	日付	振動レベル (dB)	心抜き総重量 (kg)	振動速度目標 0.1(kine)以下	牛舎までの離隔距離 (m)	騒音レベル (dB)	備考
No. 303 + 20	R1.7.2	32	4.5	0.0028	395	47	暗騒音
No. 302 + 12	R1.7.9	36.2	12	0.0046	368	52	風の音
No. 301 + 8.2	R1.7.17	38.9	9.1	0.0062	344	61	騒音は牛の声
No. 300 + 16	R1.7.23	42.9	6.4	0.0099	333	57	風の音
No. 300 + 4.2	R1.7.31	40	3.3	0.0071	321	63	騒音は牛の声
No. 299 + 0.2	R1.8.7	45.1	8	0.0127	298	54	
No. 298 + 4.6	R1.8.20	45.5	10.8	0.0133	283	50	
No. 296 + 18	R1.8.27	49.6	6.4	0.0214	258	58	
No. 296 + 9.8	R1.9.5	51.7	4.8	0.0272	250	60	騒音は牛の声
No. 294 + 9	R1.9.12	51.1	12.8	0.0254	212	56	
No. 293 + 3.8	R1.9.18	50.5	8	0.0237	189	54	
No. 291 + 16	R1.9.25	52.1	12	0.0285	165	46	
No. 290 + 13	R1.10.2	55.1	14.4	0.0403	146	54	
No. 289 + 6.8	R1.10.9	57.2	12	0.0513	125	51	
No. 287 + 13	R1.10.18	59.6	8	0.0676	104	52	
No. 286 + 16	R1.10.27	61.1	8	0.0804	96	55	
No. 285 + 11	R1.11.4	60.2	8	0.0724	89	55	
No. 284 + 19	R1.11.7	60.3	8	0.0733	88	53	牛舎直下位置付近

表-4 近隣集落近接時トンネル発破時における騒音・振動測定

計測日	測点	振動Lv (dB)	心抜き総重量 (kg)	振動速度 (kine)	離隔距離 (m)	騒音Lv (dB)
R2.01.28	No. 274 + 00.1	54	6	0.0355	246	56
R2.01.31	No. 273 + 04.5	45	4	0.0126	232	60
R2.02.03	No. 272 + 19.7	50	4	0.0224	227	58
R2.02.04	No. 272 + 11.3	52	4	0.0282	219	59
R2.02.05	No. 272 + 05.3	55	5	0.0398	214	62
R2.02.06	No. 271 + 19.3	56	10	0.0447	208	58
R2.02.11	No. 271 + 07.3	54	4	0.0355	197	59
R2.02.12	No. 271 + 03.7	55	5	0.0398	194	65
R2.02.12	No. 270 + 15.3	58	4	0.0562	186	61
R2.02.14	No. 270 + 08.1	58	5	0.0562	180	68
R2.02.18	No. 269 + 12.5	57	5	0.0501	166	58
R2.02.20	No. 269 + 04.1	58	4	0.0562	158	71
R2.02.20	No. 269 + 00.5	59	5	0.0631	155	53
R2.02.21	No. 268 + 16.5	60	3	0.0708	152	76
R2.02.21	No. 268 + 14.5	61	5	0.0794	150	56
R2.02.25	No. 268 + 06.5	60	5	0.0708	143	70
R2.02.28	No. 267 + 13.5	60	4	0.0708	132	48
R2.03.03	No. 267 + 07.5	61	6	0.0794	127	56

7. おわりに

本工事において、当初計画段階で標準である 200KW 級自由断面掘削機では掘削が困難になることが想定され、硬質地山でも効率的に掘削できる 350KW 級超大型自由断面掘削機に変更した。しかしながら、掘削が進み硬質の砂岩等が出現したことにより、掘削サイクルの延長、掘削機械のビット交換による手間とコスト増が発生し、施工に苦慮することとなった。

これらの対策として、現場状況を加味した最適な方法

である「制御補助発破併用」を採用することとした。採用検討時には近接工区の発破使用時の事例等を参考とし、近隣住民の合意を得ながら施工を進めた結果、掘削サイクルタイムの短縮、掘削機械のビット交換の頻度を減らすことによるコスト低減に成功することができた。

以上のことから、発破掘削が困難な硬質地山のトンネル現場においても、掘削機械の高性能・大型化と制御発破を併用することにより、発破掘削と同等のトンネル施工を実施できることが実証されたといえる。今後、同様な地山条件のトンネル施工に対して、有効な手段の一つであると考えられる。

謝辞: 本工事の施工にあたり沖縄総合事務局 北部国道事務所の皆様をはじめ、多くの関係者の方々からのご指導、ご支援を受け賜りましたことに深く謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 石垣弘規, 新垣康明, 田代信一: 工事報告書 平成20年度座津武トンネル工事, 臨床トンネル工学 Vol.9, No.1, 2013.

