

# 山岳トンネルにおける全断面機械掘削工法による変位抑制と新技術を用いた施工環境改善の取組

## 中部横断自動車道八之尻トンネル

真下 義章・前田 全規

中部横断自動車道八之尻トンネルでは、国内初の本格的実績となる大型自由断面掘削機を用いた全断面掘削工法により閉合距離を短縮し、軟弱地山における変位抑制を図っている。本稿では機械掘削による全断面掘削工法の概要に加え、新換気システムの開発による坑内作業環境の改善や、新たな省エネルギー技術を用いた地球環境負荷低減の取組について報告するものである。

キーワード：全断面掘削工法，自由断面掘削機，早期閉合，換気システム，バイオディーゼル

### 1. はじめに

機械掘削によるトンネルの掘削工法としては上半先進工法が標準的に採用されている。しかし、軟弱地山等においては閉合時期の遅れにより過大なトンネル変位の発生が懸念される。その結果、変位抑制対策工や縫返し等に多大なコストが必要になるケースも発生している。そこで、中部横断自動車道・八之尻トンネル工事では大型自由断面掘削機を用いた全断面掘削工法を採用し閉合距離短縮による変位抑制を試みた。

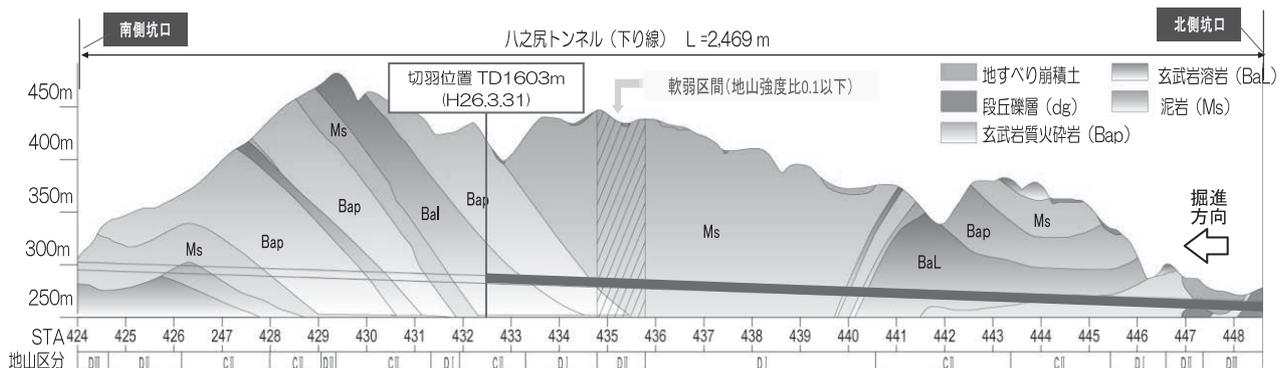
また、大型自由断面掘削機の採用により掘削時に多量の掘削粉じんの発生が予想されるが、従来の換気方式では集じん機より前方（切羽より50m以内）の作業エリアにて作業員が大量の粉じんに曝露されることや集じん機による捕集率の改善が課題であった。この対策として、効率的に切羽直近で粉じんを回収する送気・吸引捕集式に基づく新換気システムを開発し、採用した。加えて現場で採用した地球環境負荷低減技術についても併せて報告する。

### 2. 工事概要

中部横断自動車道（静岡・山梨区間）は、新東名・新清水JCTから中央道・双葉JCTに至る延長74kmの高速道路である。八之尻トンネルは、増穂IC～六



図一 八之尻トンネル位置図



図二 八之尻トンネル地質縦断面図

郷 IC 間に位置する延長 2,469 m、内空断面積 71.3 m<sup>2</sup> の 2 車線道路トンネルである (図-1)。

八之尻トンネル工事の概要を以下に示す。またトンネルの地質縦断図と H26.3.31 現在の切羽位置を図-2 に示す。

- 工事名：中部横断自動車道 八之尻トンネル工事
- 工期：平成 21 年 12 月 15 日～平成 27 年 1 月 17 日
- 発注者：中日本高速道路(株)東京支社
- 施工者：清水建設(株)・岩田地崎建設(株)共同企業体
- 掘削断面：標準部 82 m<sup>2</sup>、非常駐車帯部 104 m<sup>2</sup>
- 工事延長：総延長 3,430 m(トンネル区間 2,469 m、土工区間 961 m)

本トンネルの地質は軟弱な泥岩が主体となっている。中でもトンネル中央部の区間では地山強度比 < 0.1 の超軟弱区間となっている。また、坑口部分には大規模な地滑り崩積土地帯が存在するため施工時の変位抑制とともに地滑りに対する影響を考慮した施工が求められていた。一方、泥岩の前後に分布する玄武岩溶岩は軟岩～中硬岩に区分され、トンネルの安定性は良好であると判断された。

### 3. 大型自由断面掘削機による全断面掘削工法

#### (1) 早期閉合による変位抑制

本工事では前述の地質状況より、軟弱地山での変位抑制が最大の課題であった。しかし、当初は標準工法である 200 kW 級掘削機を用いた上半先進工法で計画されていたため最終閉合距離が切羽から 100 m 以上後方となり内空変位の収束の遅れが懸念された。このため、大型自由断面掘削機 (ブームヘッダ RH-10J-SS) を用いた全断面掘削工法を採用し (図-3)、トンネル支保の全断面早期閉合 (図-4) による変位抑制を試みた。採用した掘削機の諸元を表-1 に、掘削能力を図-5 に示す。

インバート部の施工は当初は切羽より 9 m 離れた時点で 3 m 分 (切羽より 6 m まで) 行ったが、その後さらに閉合距離を縮めて 6 m 離れた時点で 3 m

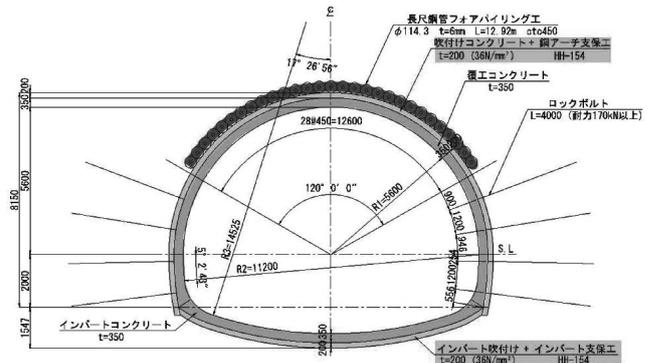


図-4 早期閉合支保パターン (D III c-2-K)

表-1 ブームヘッダ (RH10J-SS) 仕様

機体寸法	高さ 4.9 m × 幅 4.2 m × 長さ 22.2 m	
切削寸法	高さ 8.75 m × 幅 9.5 m	
機体質量	120 t	
切削部	電動機	330 kW × 4 P × 400 V
	回転数	50/29min <sup>-1</sup> (50 Hz)
	カッターヘッド径	φ 1,120 mm
	伸縮ストローク	850 mm
	カッター押付力	343 kN
	ビット個数	50 ケ
	ビット仕様	ラウンド型 直径：φ 110 mm
	チップ仕様	材質：E5 直径：φ 38 mm

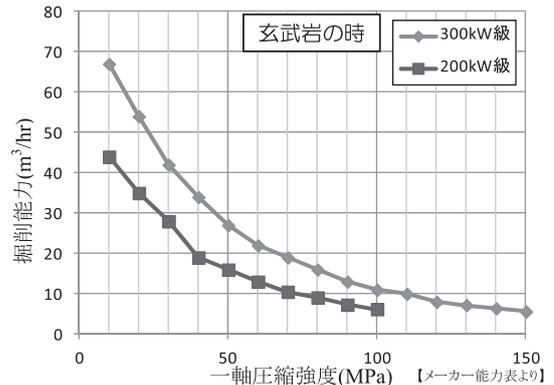


図-5 掘削能力比較

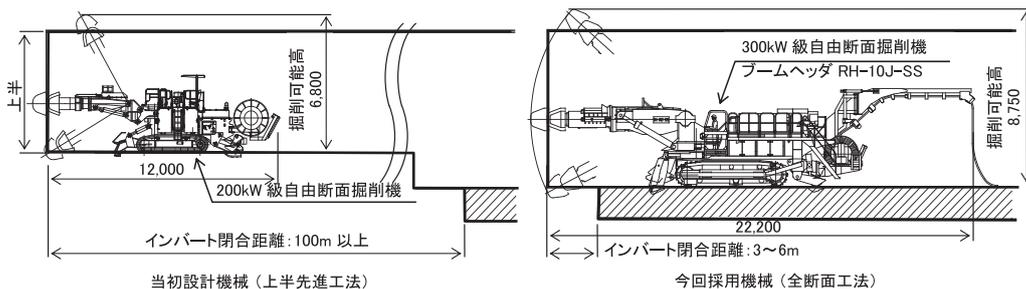


図-3 自由断面掘削機および掘削工法比較

分（切羽より3mまで）とした。今回施工した全断面掘削状況を写真一1に、インバート部の早期閉合状況を写真二に示す。

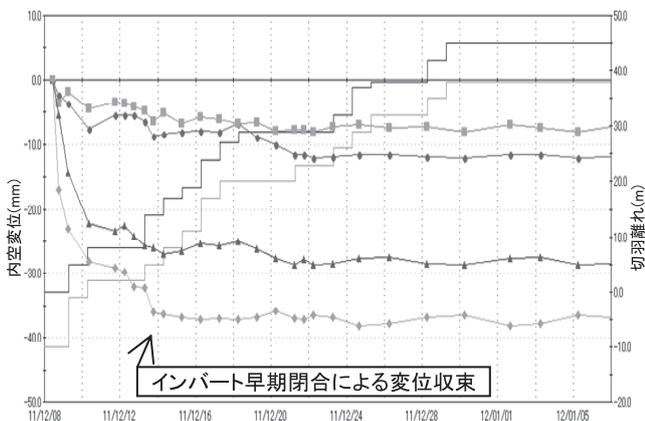
坑口部の地滑り崩積土地帯における内空変位計測結果を図一6に示す。この結果より、全断面掘削直後は初期変位速度が23mm/日を示すが、インバート部の早期閉合を行った後に変位が急速に収束する傾向を示した。これにより早期閉合による変位収束効果が確認できた。



写真一1 大型自由断面掘削機による掘削状況



写真二 早期閉合状況



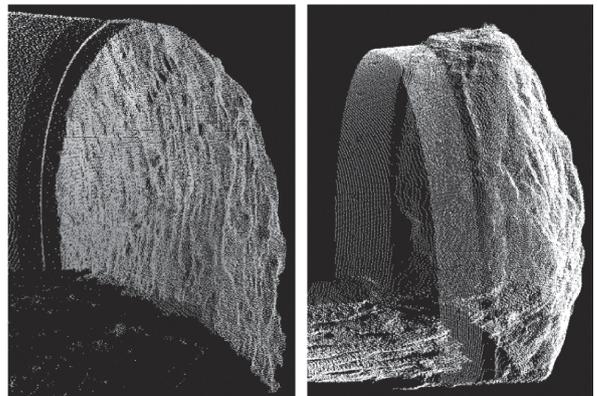
図一6 内空変位計測結果

## (2) 曲面切羽による鏡面安定化対策

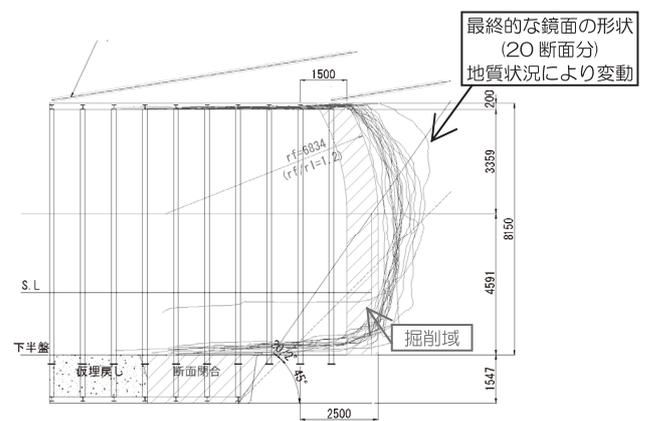
全断面掘削は早期閉合の効果の反面、上半先進工法よりも加背が大きくなり、切羽高さが増加するため、鏡面の安定性が低下して切羽崩壊が発生しやすくなる。そこで、鏡面の安定化対策として鏡面の形状をドーム状に掘削する曲面(球面)切羽を採用した。これは、切羽前方にドーム状のグランドアーチが形成され、その内側部の地山は切羽の安定には寄与せず掘削の影響により崩落を起こしやすいことに着目し、切羽を曲面形状に掘削することで不安定部を取り除き、切羽崩壊のリスクを低減する効果を得るものである。

曲面切羽の形状を評価するために3D スキャナを用いた三次元計測を行い切羽の地質性状に応じた鏡面の適切な安定形状を確認した(図一7)。当計測は専用の機器を使いノンプリズムで切羽形状の点群座標を記録するものである。据付から計測終了まで数分程度の中に数万~数十万点の点群を計測できるため、掘削作業の支障にならないほか、計測のために崩落の危険がある切羽に立ち入る必要が無いことが大きな利点である。

図一8は坑口地すべり崩積土区間の曲面切羽形状(縦断形状)を20断面分重ね合わせたものである。図



図一7 三次元計測結果



図一8 曲面切羽掘削後の最終安定形状

より曲面切羽の効果的な形状(曲率)は地質状況によってバラつくことが判明した。この区間では、曲面切羽の効果により当初設計であった鏡ボルト等の補助工法を用いることなく鏡面の安定性が確保できた。

**(3) 中硬岩における掘削効率**

TD491 m ~ 879 m 区間では、一軸圧縮強度 50 MPa 以上の玄武岩溶岩が出現した。300 kW 級大型自由断面掘削機による当該区間の掘削能力実績を 図-9 に示す。当初は平均 40 ~ 50 m<sup>3</sup>/hr の掘削能力が確保されていたが、徐々に能力が低下し 433+00 付近では一軸圧縮強度 60 MPa 程度の地山に対して 15 m<sup>3</sup>/hr 程度の掘削能力となった。その後、3 t 級大型ブレーカを併用して掘削能力の改善を図ったが 441+00 付近では 5 m<sup>3</sup>/hr 程度まで低下したため、その後の 50 m 区間は発破掘削により施工を行った。

本トンネルで得られたデータは中硬岩地山における自由断面掘削機の適用性に対し貴重な実績として活用されることが期待できる。

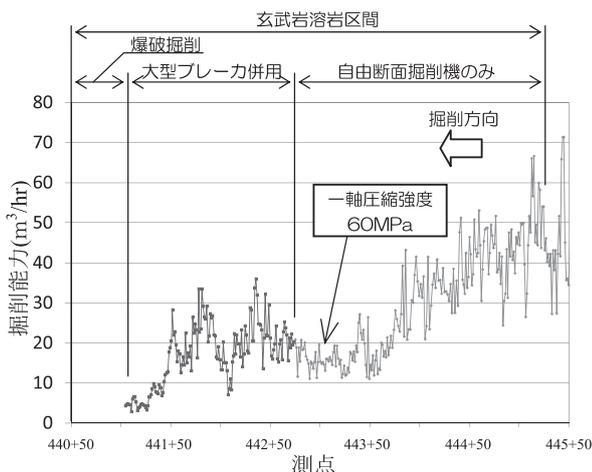


図-9 実掘削能力 (玄武岩溶岩区間)

**4. 新技術を用いた施工環境の改善**

**(1) 新換気システムによる粉じん対策**

本工事では大型自由断面掘削機による掘削粉じんに対し 図-10 の換気システムを新規開発し、実証試験を実施した。開発の目標は掘削オペレータの作業位置(切羽から 10 m 地点)における粉じん濃度を 3 mg/m<sup>3</sup> 以下とした。

切羽で発生した大量の掘削粉じんに対し目標を達成するためには、切羽直近に良質で強固なエアカーテンを形成し、発生粉じんを希釈することなく封じ込めることが有効であると考え、エアカーテンの形成に必要な要素、管理項目を定量的に把握することを目的とし

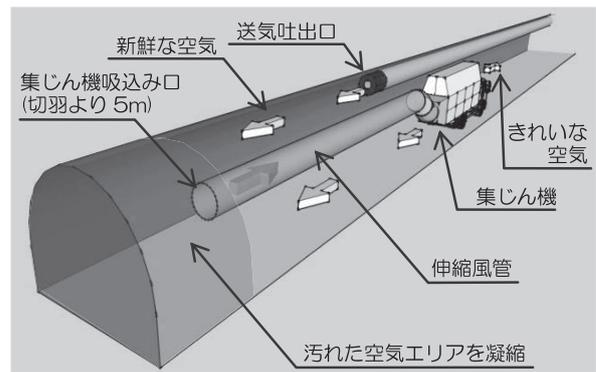


図-10 新換気システムレイアウト図

た模擬粉じんによる現場実証試験を行った。模擬粉じんは実際にトンネルで回収した粉じんを圧縮空気にて拡散させることで 100 mg/m<sup>3</sup> 以上の粉じん環境を再現したものである。実証試験では各地点(切羽から 0 m, 10 m, 30 m, 50 m, 100 m)での空気の流れと粉じん濃度を測定し、以下の知見を得た。

- ・エアカーテンの形成には空気の流れが整流になることが必要である。
- ・空気の流れが整流になるためには、80 m<sup>2</sup> 程度のトンネル断面では送気吐出口と集じん機吸込み口間の離れを 80 m 以上確保する必要がある。
- ・送気量と排気量の量的バランスがエアカーテン形成に与える影響は小さい。

また、送気吐出口と集じん機吸込み口間の離れが 80 m 以下の場合には送気風管先端から吐出する空気の流れの勢いが強く切羽で発生する粉じんを拡散させ、エアカーテンの形成を阻害する現象が問題となった。そこで本システムでは、この送気流の勢いを適切に減衰させ、切羽への送気の流れが均一にトンネル断面全体に行き渡るようにし、粉じんの拡散を抑えるために特殊噴出ダクト(写真-3)を開発した。この特殊噴出ダクトは側面に多数の穴が開いており先端は開口の面積を絞っているため送気はこの穴からトンネルの軸方向とは直角に吐出される仕組みである。

現場実証試験では、送気吐出口と集じん機吸込み口



写真-3 特殊噴出ダクト

間の離れが 80 m 以下の場合においても特殊噴出ダクトを装備することで空気の流れが整流され良質なエアカーテンの形成が確認できた。

実験結果を基に本現場にて新換気システムを使用して機械掘削時の粉じん濃度測定を行い以下の結果を得た（測定条件：送気風量 = 1,000 m<sup>3</sup>/min, 吸込み風量 = 2,000 m<sup>3</sup>/min, 送気口・吸込み口距離 = 80 m）。

- ・切羽掘削に伴う発生粉じんは切羽より 5 m 地点で 145 mg/m<sup>3</sup>であった。
- ・切羽から 10 m 地点の掘削オペレータの位置では 0.2 ~ 2.4 mg/m<sup>3</sup>であった。

これより実掘削時においても本システムの有効性が実証できた。実掘削時の粉じんの封じ込め状況を写真—4 に示す。



写真—4 実掘削時の粉じん封じ込め状況

## (2) 地球環境負荷低減設備

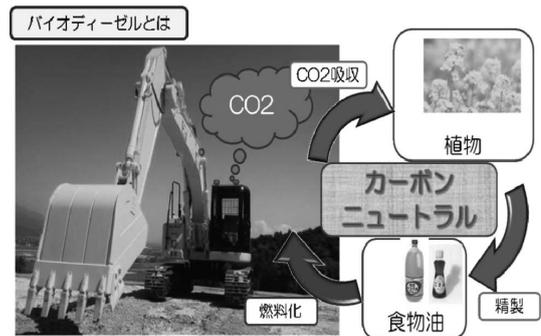
その他、当現場では地球環境負荷の低減を目指して様々な取り組みを行っている（表—2）。以下ではこの取り組みの中からバイオディーゼルとスマートサイトシステムの活用について報告する。

表—2 地球環境負荷低減の取組

項目	概要	
省エネルギー	LED 照明	坑内の照明を水銀灯から LED 照明に変更し 88%の電力削減
	インバータ送風機	高効率のインバータ式送風機により 65%の電力削減
	集じん機自動運転	集じん機をダストセンサーにより自動運転し 40%の電力削減
	スマートサイトシステム	各機器のエネルギー利用状態の一括管理でムダを省く
	ハイブリッドバックホウ	旋回時ブレーキの回生エネルギーを利用して燃料消費を削減
再生エネルギー	バイオディーゼル	廃植物油からリサイクルした燃料を使用したカーボンニュートラルにより CO <sub>2</sub> 削減

## (a) バイオディーゼル

当現場では一部の重機、車両の燃料に軽油ではなく廃棄天ぷら油をリサイクルして精製したバイオディーゼルを使用している。バイオディーゼルは大気中の CO<sub>2</sub> を吸収した植物の油から作られているため、使用しても大気中の CO<sub>2</sub> 総量は増加しないカーボンニュートラルの概念が適用されるクリーンなエネルギーとして注目されている（図—11）。



図—11 バイオディーゼルによるカーボンニュートラルの概念



図—12 バイオディーゼル精製の流れ

本工事では平成 26 年 3 月末現在で 38,950 L のバイオディーゼルを使用しており、これによる CO<sub>2</sub> の削減量は、杉の木（50 年生）が 1 年間に吸収する 7,233 本/年に相当する。また、バイオディーゼルの精製に当たっては、地元の社会福祉施設に精製機を貸与して、油の回収、精製、運搬業務を委託しており、障害者自立支援の一助となる社会貢献活動の一環としての側面も持ち合わせる（図—12）。

## (b) スマートサイトシステム

当現場では省エネ技術の統合管理を可能とするスマートサイトシステムを導入してエネルギーの管理を行っている。図—13 に概念図を示す。掘削機械や送風機、照明、連続ベルコン、集じん機などの電力設備に取り付けた電力計から現場の LAN を介して電力使用状況を一括管理し、ムダを見つけて省エネルギーに向けたアクションを起こすことによって電力削減によ



図一 13 スマートサイトシステム概念図

る環境負荷低減に努めている。これまでにスマートサイトシステムの効果により削減された電力量は合計で172,800 kWhとなりこれによるCO<sub>2</sub>の削減量は、杉の木（50年生）が1年間に吸収する4,184本／年に相当する。

## 5. おわりに

当現場では大型自由断面掘削機を用いた機械掘削による全断面工法を採用し、坑口部地滑り崩積土地帯、中硬岩に区分される玄武岩溶岩、軟弱泥岩層等を対象にTD1,600 mまで掘削を進めてきた。途中、L = 50 mの発破掘削区間を除き当工法の有効性が確認できたと考えている。残すところ1/3となったが、貫通

に向けて鋭意掘削を進め新たな実績を重ねていく所存である。また、施工環境改善技術についても他現場への展開を含めて環境技術の普及に貢献したいと考える。

J C M A

### 《参考文献》

- 1) 佐藤淳・細野泰生・楠本太, D II地山における切羽の安定形状, 土木学会第67回年次学術講演会, 第VI部門, 2012.
- 2) 佐藤淳・細野泰生・真下義章・木村厚之, 曲面切羽で低強度地山の全断面掘削に挑戦, トンネルと地下, vol.43 no.7, p13, 2012.
- 3) 今田徹, 変化するトンネル技術 NATM後の動向, JICE REPORT, vol.14 /8, p74, 2012.
- 4) 垣見康介, 高耐力支保による早期閉合で押出し性地山に挑む, トンネルと地下, vol.41 no.1, p15, 2010.
- 5) 前田全規・真下義章・田中誠・酒井健二, トンネル換気システム改善への取組, 土木学会土木建設技術発表会 2013, 2013.

### 【筆者紹介】

真下 義章 (ましも よしあき)  
清水建設㈱  
関東支店 土木部  
工事長



前田 全規 (まえだ まさき)  
清水建設㈱  
土木技術本部 機械技術部  
技師

