

山岳トンネルにおける自由断面掘進機の自動化

AUTOMATION OF HEADING MACHINE IN MOUNTAIN TUNNEL

名越次郎¹⁾・小林由委²⁾・宮内政男³⁾・佐藤 晃⁴⁾

Jiro NAGOSHI, Yoshitsugu KOBAYASHI, Masao MIYAUCHI and Akira SATO

We developed and put to use such a system as enabling a heading machine to excavate a mountain tunnel quite automatically. The machine's position and attitude angle are changed by its cutter's reaction during excavation. But the system has made it possible to cut a cross-section along a designed linear shape in high accuracy and efficiency, as the machine itself in operation is always measured and compensation is momentarily done. Further, our machine has greatly heightened its work safety. It was used for the length of about 3,000m in Kindaichi Tunnel's south work zone. Its actual use results are herein reported.

Key Words : tunnel ,excavation by machine , automation , high accuracy , improvement of safety

1. はじめに

近年自由断面掘進機は、機械掘削方式の採用増加と共に多く使用されるようになり、且つ高性能化してきている。この方式のトンネル施工では、全作業サイクルの中で機械掘削作業が経済性・品質・安全性等と与える影響が非常に大きい。依然として機械を運転する熟練工の技量に頼った掘削を行っているのが現状である。しかし、作業の苦渋等から今後は熟練した運転手の不足が予測され、トンネル掘削作業の省力化・効率化を図る必要が生じている。

それらの課題に対応すべく、今回金田一トンネル(南)工事では、自由断面掘進機の自動掘削システムを開発・運用し良好な結果を残すことができたが、本文ではその稼働実績と同システム適用の可能性を記述する。

2. 工事概要

金田一トンネルは東北新幹線工事の盛岡から八戸間に位置し、岩手県二戸市を入口とし、青森県名川町に至る延長 8,740m の長大山岳トンネルである。金田一トンネル(南)工区は、そのうち県境までの岩手県側 4,300m を機械掘削方式の NATM で施工する工事である。

当工区のうち、比較的安定した砂岩、泥岩よりなる軟岩地山区間を対象として、自動掘削システムを搭載した自由断面掘進機の自動化を検証しつつ併せて安全性の向上も確保して施工を行った。

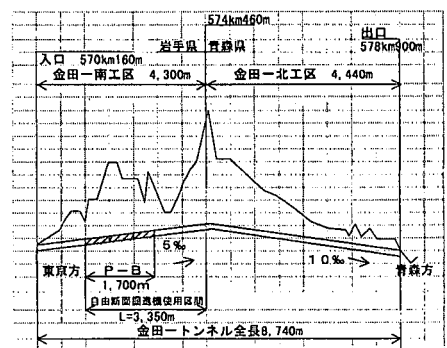


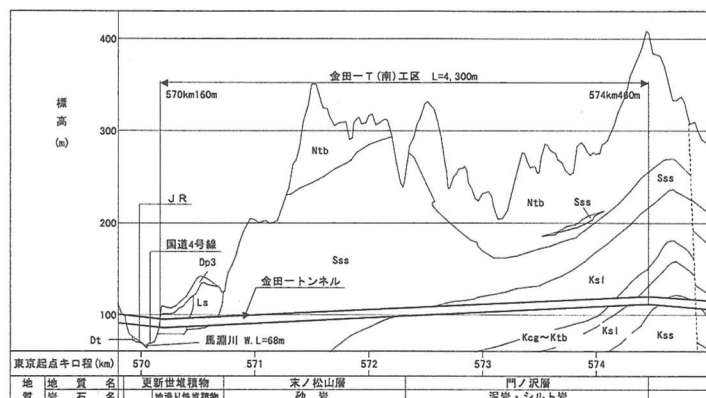
図-1 トンネル全体図

- 1) 正会員 日本鉄道建設公団 東京支社
- 2) 正会員 戸田建設(株)名古屋支店 土木部
- 3) 正会員 戸田建設(株)名古屋支店 土木部
- 4) 正会員 戸田建設(株)東北支店 土木部

3. 地形地質

金田一トンネル（南）工区の地形は、坑口側約 600m 間は、土被り 30m 以下の地すべり性堆積地形をなしており、以後、工区境の名久井岳東部稜線に至るまでは標高 250m ～ 400m の比較的急峻な山岳地域である。なお、地表は坑口付近のリンゴ畑を除き広葉樹、針葉樹で形成される森林地帯である。

トンネル部分の地質は、坑口より第四紀洪積世の地すべり性堆積物、第三紀中新世の末ノ松山層砂岩、門ノ沢層泥岩、シルト岩により構成されている。土被りは坑口部以奥で、約 100m ～ 300m となっている。また、砂岩、泥岩の一軸圧縮強度は 10 ～ 30MPa 程度である。地質縦断面図を図－2 に示す。



図－2 地質縦断面図

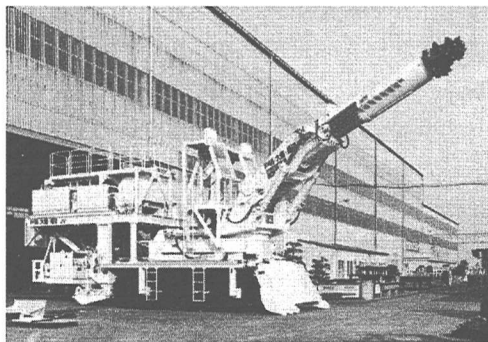
4. 自動掘進機採用の経緯

当工区は、自由断面掘進機で効率的に掘削できる地質が全体の 70%程度で、且つ機械掘削時の目印になる鋼製支保工が無い支保パターンが 1000m 以上と想定された。このようなトンネル工事では、掘削の精度を上げることが特に要求されるが、従来の方式では運転手の技量に頼る部分が多く、熟練運転手であっても大きな余掘が発生するため、掘削精度の向上要求に応えられない事も予想された。そこで、そのような課題に対応すべく当工区では、掘削精度の高い自動掘削システム搭載の自由断面掘進機の適否を検討し、開発・採用に至った。

5. 自動掘削システム搭載自由断面掘進機の概要

本システムは、自由断面掘進機の掘削を自動化することにより、掘削前測量、掘削目印（マーキング）や掘削進行長確認等が省略され、運転手の熟練度に係わらず、設定した線形上のトンネル断面を簡単な操作で高能率・高精度に自動掘削できる機能がある。

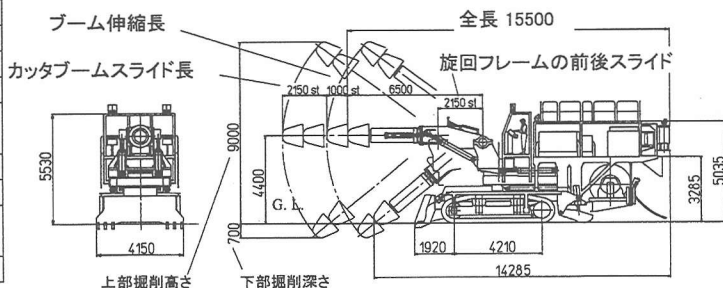
本機械は、各可動部に位置検出器を取り付け、制御用演算装置等により掘削装置を自動制御する構造の本体とトンネル線に対する掘進機本体の位置・姿勢角を自動測量するシステムからなり、常時連携している。



写真－1 自由断面掘進機

Figure 1: Schematic diagram of the automatic measurement system. The diagram is divided into two parts: a top-down '平面図' (Plan View) and a side '側面図' (Side View). In the Plan View, a tunnel boring machine (TBM) is shown on the left, emitting a laser beam (光波測距測角) through a prism (プリズム) and an LED target (LEDターゲット) to a target station (自動追従式ターゲットステーション) on the right. The target station is equipped with a CCD camera (CCDカメラ) and a distance measurement device (自動測距装置). The system is connected via a wireless LAN (無線LAN) to a control device (自動測量制御装置). The side view shows the TBM's automatic measurement system (自動測距システム部) and the target station, with labels for the prism (プリズム), LED target (LEDターゲット), and the target station (自動追従式ターゲットステーション). The TBM is labeled as a self-aligning TBM (自動制御付き) model RH-250-MB-SL-A.

諸 元		
機 体 寸 法	高5.53m×巾4.15m×長15.5m	
掘 削 範 囲	高9.0m×巾9.0m	
機 体 質 量	約102t	
切 削 部	電 動 機	250kW,4P,400/440V
	回 転 数	50/29rpm(50Hz) 60/36rpm(60Hz)
	カッタヘッド径	φ 1000mm
	ブーム伸縮長	1000mm
	旋回フレーム 前後スライド長	2150mm
	カッタ押付力	225kN



- 353 -

(2) 自動測量システム

i) 概要

図-5に示すように、掘進機本体上部の規定位置に設置された光波測量用のプリズムと画像認識用の3個のLEDターゲットを後方30m～200mに取り付けたCCDカメラ付きトータルステーションで自動追尾し、常時掘進機の位置・姿勢角を自動測量する。

その測量結果は、リアルタイムにトンネル掘進機側へ無線で送られ、掘進機のコンピュータで掘削すべきトンネル断面と機械の位置姿勢関係を演算し補正しながら連続切削を可能とするシステムである。

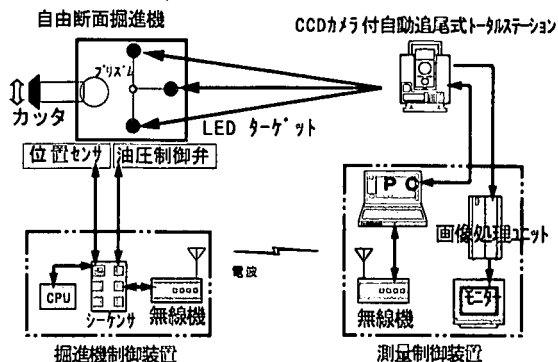


図-5 自動測量システムブロック図

ii) 測量方法

CCDカメラ付きトータルステーションで、掘進機本体上部の規定位置に取り付けたプリズムと3個のLEDターゲットを自動追尾し、位置を測量する。なお、カメラで同時に捉えた複数のターゲットの位置関係を画像処理して演算する。

その原理を図-6に示す。図中の左側図のようにターゲットを取り付けた場合、後方でのカメラ画像は、右側図のように元位置に対して変化があれば各ターゲットの位置関係が変わる。これを各姿勢角度等に計算することにより、瞬時に姿勢角が計測できる。

また、ターゲットがカメラ画面からはずれる前にトータルステーションは自動追尾するため、ターゲットを常時捕捉することができ、掘削中停止することなく自動測量ができる。

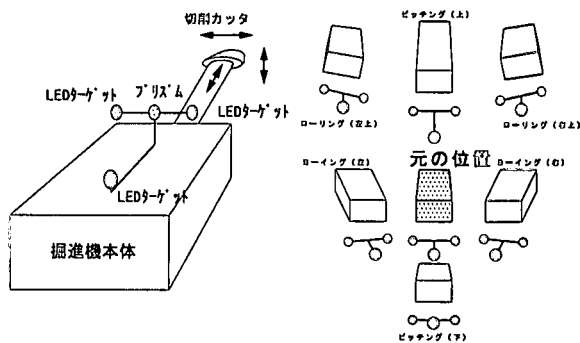


図-6 画像による測量原理図

6. 施工実績

自動掘削システム搭載自由断面掘進機は、金田一トンネル(南)工区のうち、坑口部と貫通点部を除く約3,000m間の区間で採用した(図-1に示す区間)。

特に自動化が重要となったのは、当区間のうち鋼製支保工が無く、一掘進長が1.5mと長い支保パターンP-Bであり(図-7)、その延長は約1,700mである。この区間の実績に基づき、本自動掘削システムと手動掘削との精度や効率性等の比較を行った。

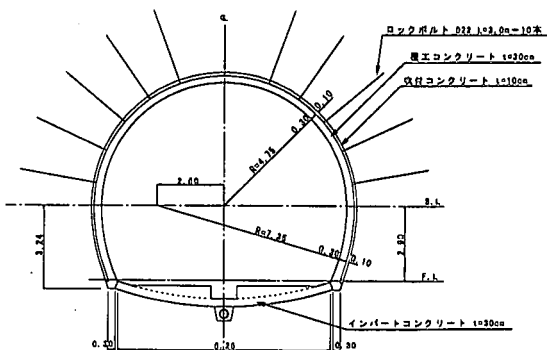


図-7 P-Bパターン(一掘進長1.5m)

(1) 自動掘削

掘進機を据え付け後、オペレータのタッチパネル操作にて自動掘削を開始し、後方の自動測量システムと

リアルタイムで連携しながら、計画通りのトンネル断面を掘削することができた。掘削中は自動測量システムが有効に機能し、掘削時に機体の姿勢変化が生じて、即時に掘進機側コンピュータに取り込み補正するので、連続して高精度に自動掘削ができた。

また、掘進機本体の移動についても、最初に掘削する片側半分の断面の1回、並びに反対断面への1回の移動の計2回だけで、所定の1サイクルのミニベンチ掘削ができた。自動測量システムの盛り換えについては、通信能力、掘削精度等による計測の有効範囲が150m間程度であり、1回/月の頻度でよい。

(2) 掘削精度

自動掘削システム搭載に先立ち、手動掘削で施工した結果では、掘削仕上がり形状は、掘削設定線に対して平均20cmの余掘が発生し、かつ凸凹の激しいものであった。

これに対し、自動掘削システムを搭載後に実証掘削を行った結果、平均余掘量を約8cmにすることができた。(なお、設定掘削面は設計半径+5cmとした)

以下に、手動及び自動掘削時の余掘量の比較を図-8に示す。

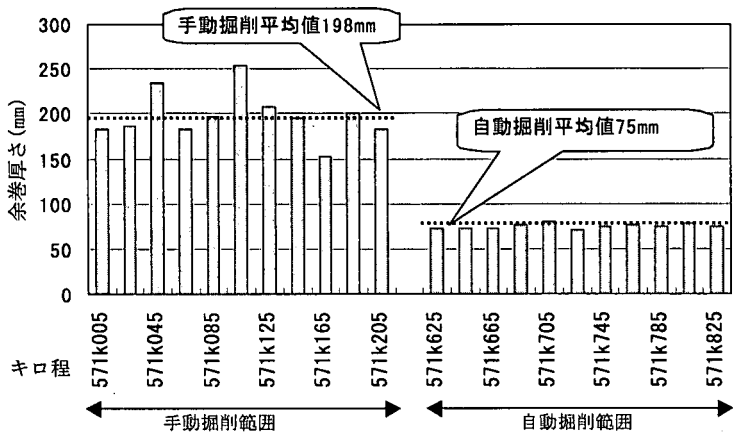


図-8 手動掘削と自動掘削の余掘比較

(3) 掘削作業の効率化および安全性向上

当掘進機を用いて手動掘削を実施した場合に比べ、自動掘削を行った場合は、切削〜ズリ積み込み時間が短縮され、作業が効率化した。主因は、手動掘削では必要不可欠な作業が自動掘削により不要になったためと考えられる。自動掘削により不要となった作業のうち主なものを表-1に示す。

表-1 自動掘削により不要となった掘削補助作業と時間

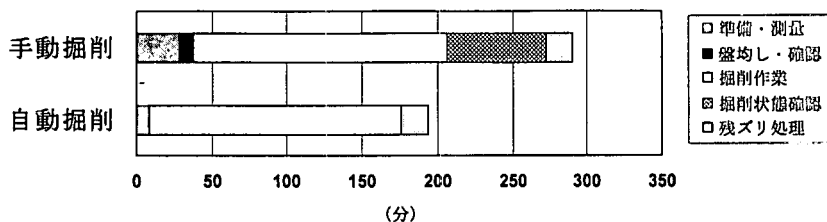
作業内容	時間 (分)		
	左側断面	右側断面	左右共通
①掘削前の測量及びマーキング作業			20
②下半盤均し掘削 (ズリに埋もれて確認できない下盤を露出する)	5		
③下半掘削進行長の確認とトンネル外周囲の整形掘削	6		
④下半設計断面確保の確認	7		
⑤上半掘削進行長の確認とトンネル外周囲の整形掘削	12		
⑥上半設計断面確保の確認	8		
左側断面 合計	38		
⑦右側断面 上記 ②〜⑥と同じ		38	
1サイクル当たり自動掘削により短縮できた時間		96	

なお、この表中の作業①・④・⑥は切羽面の近傍、また未掘工の素掘り面下での作業であり非常に危険を伴う作業である。しかし、自動掘削システムでは、これらの作業が不要となり安全性もより向上した。

※ P-B パターンを同一掘進機での手動掘削施工時補助作業実績との比較

図－9 は P-B パターンの自動掘削作業サイクルと従来の手動掘削作業サイクルを比較したものである。

主に掘削カット出力で能力が決まる実掘削作業時間は同じであるが、自動掘削作業では他の補助作業が効率化されたことにより、掘削作業全体の時間は、手動時の約 290 分から 194 分に短縮され、トンネル施工速度が上がった。



図－9 手動掘削と自動掘削の掘削作業サイクル

7. まとめ

このシステムにより、掘進機は自動測量システムからの路線距離情報と掘進機姿勢情報をもとに、掘削すべき断面をコンピュータで演算し、カットヘッドを目標とする掘削線に沿ってトレースすることを可能とした。また、掘削中は自動測量システムからの位置・姿勢角情報と常時掘進機制御装置は連携しており、掘進機に掘削反力の振動や姿勢変化が生じて、即時に掘進機側制御装置のコンピュータで補正するため、連続して高精度に自動掘削することが実証された。なお、本システムでは、掘削振動に敏感な計測機器等を掘削機本体に搭載していないため、掘削時の振動等に対してシステムは十分な耐久性があった。

掘削精度については、当該掘進機を用いて実施した手動掘削時の精度と、自動掘削時の精度との比較により余掘量を 40%以下にすることができた。

さらに、作業の効率化については、自動掘削を採用したことにより、手動掘削時には必要なマーキング作業等が不要となった。その結果、掘削作業時間に対する掘進機稼働時間の比率が高くなり効率化が図られ、掘削作業は 70%以下の時間に短縮された。また、トンネル作業において、最も危険な作業の一つである掘削確認作業等が排除できたことにより、安全性を一段と向上させるという目的が達成された。

以上の成果を残せたことから、当該システムは機械掘削方式のトンネルについて、広く適用できるものであると考えている。しかしながら、今回の実施工において、切削粉じんの発生量が多い場合には、CCD カメラの視認性が低下し、支障をきたすことが確認された。この対策として、本トンネルではカットからの高圧ジェット散水設備の増設並びに換気設備の強化で乗り切ることができた。しかし、粉じん濃度がより高くなる場合では、粉じんを発生源付近で集じんする設備、切羽カット付近に粉じんを隔離する設備などの検討が必要である。

最後に、今後他のトンネル作業機械も自動化され、遠隔監視等で施工できれば、切羽の苦渋作業から作業員が解放される。このようなトンネルの完全自動化のための一つのシステムになるよう、本システムも改良を重ねる必要がある。

参考文献

(社) 日本建設機械化協会：建設機械化技術・技術審査証明 報告書

『自動掘削システム搭載自由断面トンネル掘進機』2000.7