

トンネル掘進機の余掘防止システム (NARAI 掘削) による施工実績

横屋 和 興・芳 賀 宏・高 橋 望

山形県発注の一般国道112号加茂坂トンネル工事において、軟岩用トンネル掘進機の余掘防止システム「NARAI 掘削システム」が入札時VE提案として採用された。本システムは株式会社熊谷組を含む6団体で共同開発したものであり、これまでに3箇所のトンネルでの稼働実績があったがいずれも試験施工的で短期稼働であった。加茂坂トンネル(L=776.4m)では、トンネル全線をこのNARAI 掘削システムで施工した。ここにその工事実績を総括して報告する。

キーワード：トンネル掘進機、余掘防止装置、レーザマーキング、NARAI 掘削システム

1. はじめに

NATM (New Austrian Tunneling Method) 工法による機械掘削方式でのトンネル施工では掘削の精度が工事の採算に大きな影響を持つクリティカルな要素である。

ところが掘削精度は、掘削機械の操作技能の熟練度に依存していることから、オペレータに多大の精神的、肉体的負担を与えるものとなっている。大型化による普及が著しいトンネル掘進機においても、オペレータは作業において掘削精度確保のため技量や集中力を求められ、更に振動、騒音、粉塵の発生による劣悪な作業環境に曝されている。

今後熟練したオペレータが不足してくることは必至であり、オペレータの技量にとらわれず掘削精度を確保できるようなシステムが是非とも必要となってくる。

本余掘防止システム(NARAI 掘削)*はトンネル掘削作業における「合理化システム」として、オペレータの熟練度に左右されることなく計画的に最適な掘削及び余掘を最小にするための仕上げ

精度を確保して掘削できるシステムとして開発された。平成5年頃より模擬岩盤掘削試験を行い、システムの掘削精度目標(±50mm)をクリアし、実際のトンネル現場で試験を行い掘削精度の確認を行った。その後3箇所のトンネル現場で試験施工を行いシステムの適用性を検証、いずれのトンネルにおいても高精度で掘削出来形が得られることを確認した。

加茂坂トンネル(L=776.4m)においては坑口部を除いたトンネル全長に本システムを採用した。掘削延長及び連続稼働期間共にこれまでの最長のケースである。本報文ではその稼働状況、掘削精度の実績を総括して報告する。

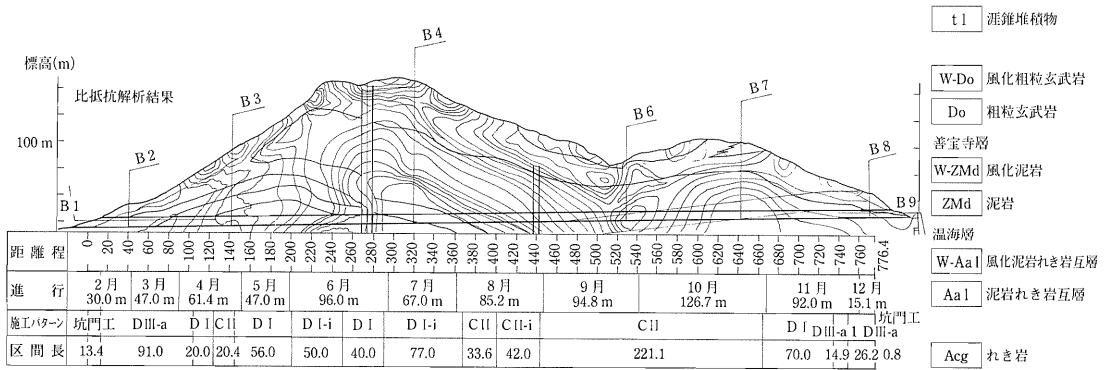
2. 工事概要

加茂坂トンネルの施工概要を以下に示す。

- ・工事名称：一般国道112号加茂坂バイパス道路改築事業道路改良(加茂坂トンネル)工事
- ・工事場所：山形県鶴岡市大字菱津地内～同加茂地内
- ・発注者：山形県
- ・施工：熊谷・東急・佐藤工務共同企業体
- ・工期：平成11年10月～平成14年3月
- ・工事内容：トンネル延長 776.4m, NATM工法
上半ショートベンチ
機械掘削掘削断面積 86～123m²

* このシステムは、トンネル掘進機を数値制御(NCシステム)して余掘を防止する仕組みである。NC工作機械の「いい加工」をイメージし、共同開発の愛称として「NARAI 掘削システム」と命名した。

当時の建設省関東地方建設局千葉国道工事事務所、財団法人先端建設技術センター、株式会社熊谷組、東急建設株式会社、株式会社間組、株式会社三井三池製作所による共同開発である。



図一 地質縦断面図

(2) 地質

加茂坂トンネルはいわゆる「グリーンタフ地域」に位置しており、路線周辺には新第三紀中新世の堆積岩類、火成岩類が広く分布している。このうち掘削対象となる地質は、泥岩、凝灰岩、礫岩とこれらに貫入した安山岩、粗粒玄武岩である。泥岩、凝灰岩、礫岩の強度はおおむね 15~35 MPa であり、比較的機械掘削に適した岩質であった (図一参照)。

3. システム導入の経緯

前述のように加茂坂トンネル工事は、山形県発注の入札時 VE (Value Engineering) 方式の試行工事であった。VE 提案を求める範囲は、設計図書又は入札説明書に参考として示された図面及び標準仕様書の工事内容全般である。募集される VE 提案は、これと異なる施工方法等に関してコスト縮減が可能となるものであり、工事目的物の変更を伴わないものとされていた。そこで NARAI 掘削システムが余掘防止対策として採用された。

入札前のヒアリングでは、このシステムを採用することにより機械掘削による積算基準の余掘量 13 cm のうち 2 cm 程度は低減可能であることと、システム導入費用を別途考慮する必要があることを確認した。

4. システム概要

(1) NARAI 掘削システム

日本の地山は、岩質の変化もさることながら層

理や亀裂等、非常に変化に富んでおり、トンネル掘進機の画一的な自動制御では地山状況に合った効率的な掘削を行うことができないのが実状である。

そこで、本システムは、トンネル断面外周部のみ NARAI 掘削システムによる自動制御を作用させ、断面中央部はオペレータの総合判断に基づいた従来通りの手動掘削という仕組みを採った。これにより検証を行ったいずれのトンネルにおいても高精度で掘削出来形が得られることが確認された。

本システムの仕組みは、トンネル掘進機本体に取付けた 2 個のターゲットをあらかじめ坑内に設置された独立した 2 台のトータルステーションによる自動追尾装置で検出し、その計測値と掘進機内の相対座標である切削ブームの姿勢計測値を外座標系の絶対座標に変換し切削ブームを数値制御 (NC システム) するものである。

切削ブームの各動作量は数値データにより得られていて、追尾装置からのデータとあらかじめ入力したトンネルデータとから設定した掘削断面に対する切削ドラムの位置をリアルタイムに認識し、その結果を掘進機と坑内ステーションのディスプレイに表示する。

万一、切削ドラムが設定掘削断面を越えようとする (「余掘」の掘削領域に入ろうとすると)、油圧回路に信号を出力し余掘方向へのドラム送りを自動的に停止させる。設定掘削断面中央部内へのみブームの操作が可能となる (図二参照)。

掘進機のオペレータにとっては、何の違和感もなく、設定掘削断面に沿った高精度な掘削ができるのがこのシステムの最大の特徴である。

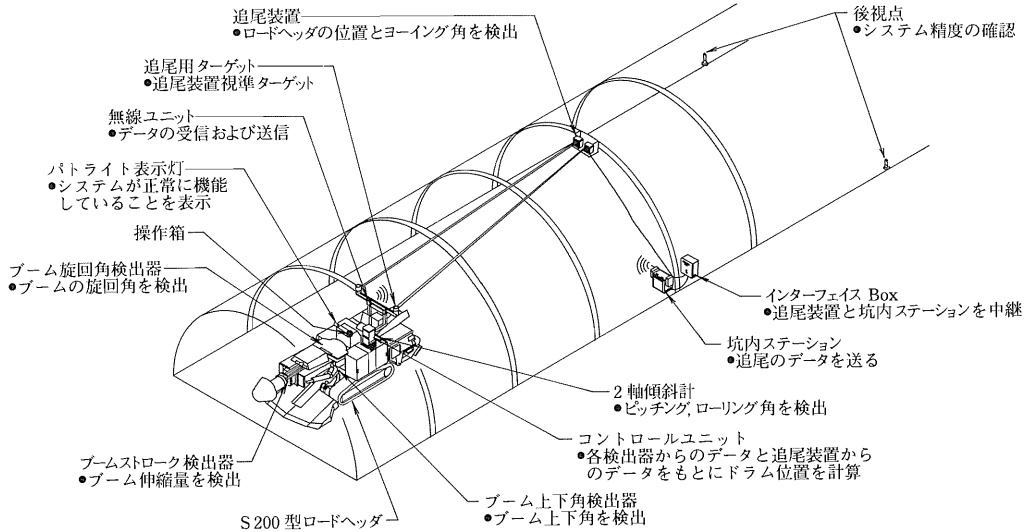


図-2 システム概念図

(2) レーザマーキング機能の追加

自動追尾装置として使用しているトータルステーションにレーザー光線によるマーキング機能を追加した。これにより掘削終了後、トータルステーションは、鋼製支保工建込み時の基準レーザー照射用としても使用できるようになった。

本工事においては、トンネル全線にわたって鋼製支保工が設置される支保パターンで設計されて

いたため、トータルステーションをNARAI掘削システム用自動追尾と、レーザーマーキングのどちらにも切替えられるようにする事で、機器の稼働率アップと集約化、コストの削減に寄与でき、非常に合理的なシステムとして完成させることができた。

図-3 にNARAI掘削システムのフローを示す。

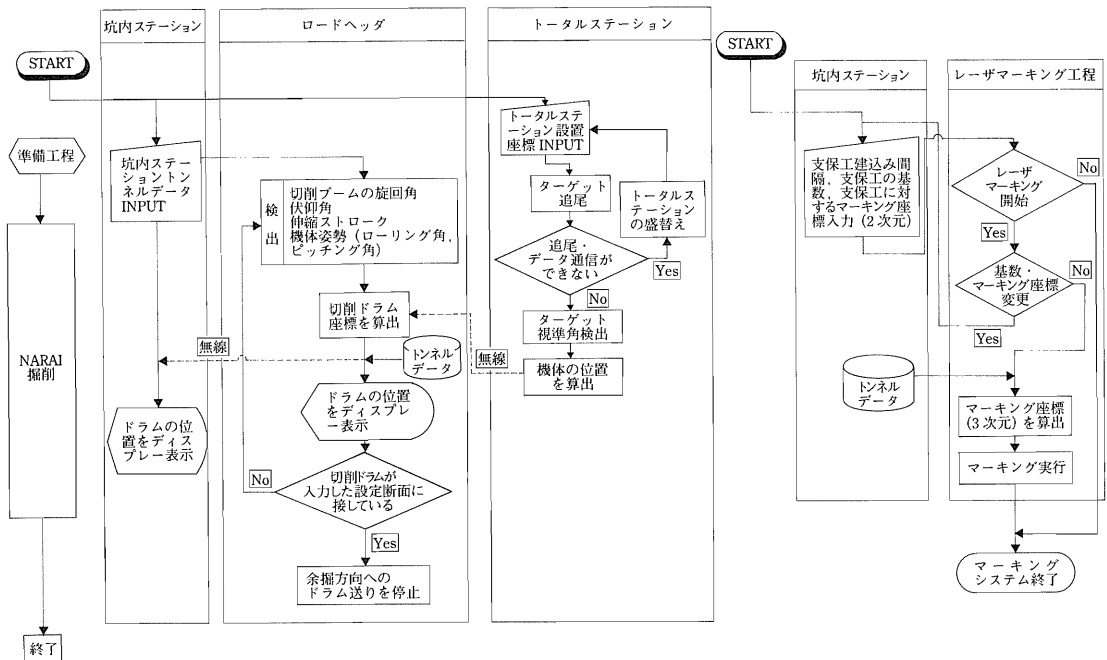


図-3 NARAI掘削システムフロー

5. 稼働実績

前述のように加茂坂トンネルの地山は、新第三紀の泥岩、凝灰岩が主体となっており、起点坑口部を除けば全体的に亀裂はあまり発達していない。支保パターンはCII, DI, DIIIでトンネル全線にわたって鋼製支保工を設置した。

(1) 掘削精度

鋼製支保工が設置されないCIパターンでの施工区間があればNARAIシステムの効果をもっと顕著に実証できたと思うが、CIIパターンでのデータで比較考察した。CIIパターン（掘進長1.2m、鋼製支保工あり）における掘削断面出来形を、マニュアル掘削時とNARAIシステムを使用した場合とで支保工外面と掘削出来形との差を比較すると表-1のようであった。

表-1 掘削モードによる差

掘削モード	支保工外面と出来形の差	
	平均値	標準偏差
マニュアル掘削時	6.1 cm	3.2 cm
NARAI掘削システム	3.8 cm	2.2 cm

図-4と図-5からNARAI掘削システムを使用した方が平均値、ばらつきともに優れていることがわかる。なお、鋼製支保工は、沈下、内空変

位、施工誤差等に対処するため5cm大きく製作している。掘削出来形の寸法については、支保工の建込み余裕と余掘寸法を加えたものである。

図-5によると、NARAI掘削システム時はどの部位についてもばらつきは少なく平均化しているが、マニュアル掘削時については、オペレータの目の位置から確認しづらい天端付近での余掘寸法が大きくなる傾向にある。

1.2mごとに鋼製支保工が設置され、それを定規として掘削した場合以上の掘削精度がこの施工を通して確認でき、余掘および吹付け材料の低減にも寄与できた。

(2) システム稼働状況について

本工事で、全長をNARAIシステムにより掘削して、それまで顕在化していなかったシステムの幾つかの不具合点を洗出し、改良した。

① 切削時の振動や粉塵による悪影響を回避する防震や防塵対策。

② 通信制御ソフト上の不具合点改良。

しかし、ターゲットロスト（自動追尾装置がターゲットを見失ってしまう現象）による制御不能時間を極力なくすことと、トータルステーションの盛替え（切羽側へ移動）の省力化という問題については今後の課題として考えていかなければならない（写真-1、写真-2、写真-3参照）。

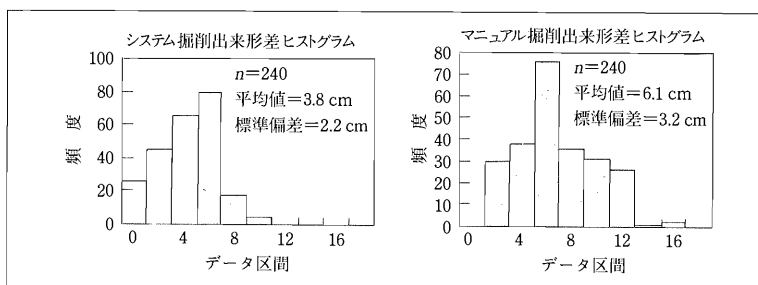


図-4 掘削出来形ヒストグラム

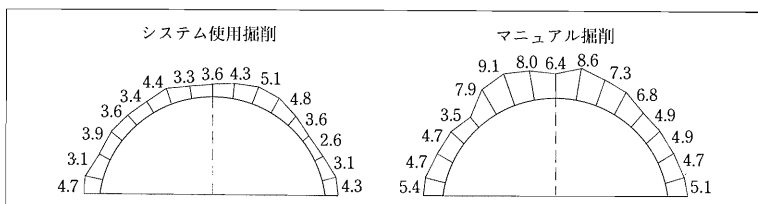
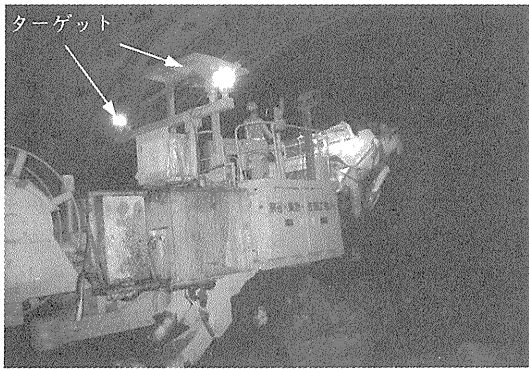


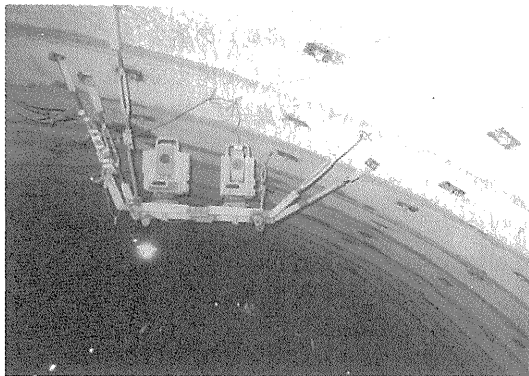
図-5 掘削出来形形状図



写真一 NARAI 掘削システムによる施工状況



写真二 モニタ画面



写真三 トータルステーション設置状況

切削粉塵が多い時は自動追尾可能距離が約 100 m と短くなってしまい、システムの盛替えは 2 週間以下の短いサイクルで行わざるを得ない状況で

あった。

(3) ターゲットロストについて

岩質が硬いと切削時に高濃度粉塵が発生し、視界不良のために、ターゲットロストがたびたび起こった。切削時の粉塵をトンネル掘進機のドラムからの散水だけで、低濃度に抑えることは不可能であり、コンパクトで大容量の集塵機により粉塵発生源の直近で集塵するなど、粉塵対策は、作業環境の面からも改善していかなければならない非常に重要な課題である。

またトンネルの機械掘削では、上半先進ショートベンチ掘削を上下半同時併進で行うことが多い。本工事においても上下半同時併進のため下半掘削の重機が自動追尾を遮ってしまうことが頻発、また上半掘削作業後半にずり出しを併行して開始すると、ずり出しの積込み機が自動追尾を遮ってしまうこともあった。

トンネル掘進機そのものはあまり頻繁に移動する機械ではないが、ターゲットを見失っている時、切削時の振動で機体の位置が微妙にずれてしまった場合は制御への影響は避けられない(図-6 参照)。

対策として、

- ① 自動追尾装置の設置位置をできるだけターゲットロストの確率が少ない位置にすること。
- ② 上半盤を長めにとって掘進機からできるだけ離れた位置でずりを積込むようにすること。

などで、ターゲットロスト時間を最小限にしていこう工夫が考えられる。

また、掘進機に取付けているターゲット取付け位置をもう少し高くし、掘進機の中央寄りとして 2 つのターゲットを前後に配置すること等の対策も効果的であると思われる。

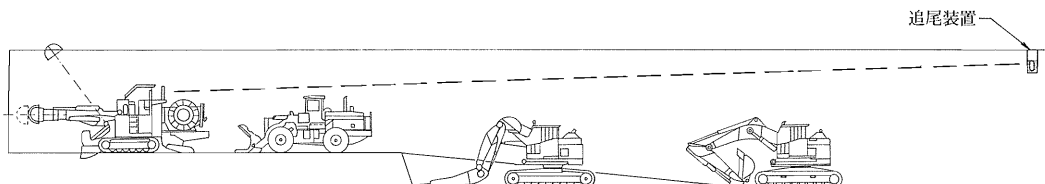


図-6 切羽機械配置図

(4) 追尾装置盛替えの省力化について

追尾装置と坑内ステーションは、切羽の進行に伴い概ね2週間に1回程度の移設が必要となってくる。システムを切羽側へ移動する盛替えには、2人で1日を要するため掘削作業の休止日に行った。

今後、機器類の軽量化、集約化を図って、作業サイクルの中で移設をスムーズにできるようにしていかなければならない。また、メンテナンス時には、そのつど高所作業車を使用してトンネル天端に設置してある追尾装置へ手をかけなくてはならず、高所作業車を使用しなくても作業可能なような遠隔操作化などの改良も必要である。

6. ま と め

導入初期においてレーザマーキング機能を追加したこともあって、追尾からレーザへの切替え時のソフト面でのトラブルや、開発当初からの機器をそのまま使用したため機器の老朽化によるトラブルも多発した。しかし、それらを改良し乗り越えてきたことによってシステム全体が成熟したものになったと確信している。

一方、ターゲットロストの最大の原因となる切削時の粉塵については、引続き改善していかなくてはならない大きな問題といえる。

NARAI掘削システムを使用して特に大きな効果を発揮できるのは、

- ① 無支保工区間において、1掘進長がより長くなる時、
- ② オペレータの目の位置から掘削仕上げ面がより遠くなる時、
- ③ 上半先進ショートベンチ掘削よりも全断面

掘削における時、
というような場合である。

今回得られたノウハウを生かして、2車線道路トンネルクラスの全断面掘削で、1クラス大きなトンネル掘進機にNARAI掘削システムを搭載してその効果を実証できる機会を心待ちにしている。

謝 辞

本システムの稼動にあたっては、株式会社三井三池製作所の方々に多大な御協力をいただきました。ここに謝意を表します。

J C M A

《参考文献》

- 1) 神山英雄他：「NARAI掘削システム」、土木学会第54回学術講演会講演集、1999.9

【筆者紹介】

横屋 和興（よこや かずよ）
山形県庄内総合支庁
建設部
道路計画課
技術補佐



芳賀 宏（はが ひろし）
株式会社態谷組
東北支店
加茂坂トンネル作業所
所長



高橋 望（たかはし のぞむ）
株式会社態谷組
東北支店
加茂坂トンネル作業所
主任

