

トンネル掘削機の自動掘進システムの開発

Development of Auto-driving System of Tunnel Boring Machine

清水建設（株）	○河野 重行*
清水建設（株）	木内 勉**
清水建設（株）	岩根 保男***
清水建設（株）	木村 厚之****
清水建設（株）	高崎 英邦*****

By Shigeyuki KOHNO, Tutomu KIUCHI, Yasuo IWANE, Atsuyuki KIMURA and Hidekuni TAKASAKI

若年労働者の建設業離れや熟練工の高齢化による労働力不足が問われて久しく、建設業においては各種の自動化・機械化が開発、導入されている。山岳トンネルにおいても、今後のさらなる生産性の向上、作業環境の向上、安全性の向上の必要性に対し、自動化の推進は不可欠である。

昨今、トンネル掘削機（TBM）を用いた山岳トンネル掘削工事が増加しているが、シールド工事と異なり、亀裂や破碎帯の存在など必ずしも均質でない岩盤の掘削においては、掘削精度の確保が難しく、熟練オペレータに頼っているのが現状である。

今回、筆者らは、トンネル掘削機の自動方向制御システムを開発し、実際の山岳トンネル掘削工事において、その効果を検証した。実証の結果、トンネル掘削機が高精度で自動制御されることが確認できた。

[キーワード] トンネル掘削機、山岳トンネル、自動方向制御

1. はじめに

若年労働者の建設業離れや熟練工の高齢化による労働力不足が問われて久しく、建設業においては各種の自動化・機械化が開発、導入されている。山岳トンネル掘削工事においても、今後のさらなる生産性の向上、作業環境の向上、安全性の向上の必要性に対し、自動化の推進は不可欠である。

今回、筆者らは、トンネル掘削機（以下TBMと呼ぶ）を用いた山岳トンネル掘削工事において、自動方向制御システムを開発し、実現場において、その効果を検証した〔1〕ので、その概要を報告する。

*土木本部技術開発部 03-5441-0518

**土木本部技術第2部 03-5441-0566

***東北支店 二井宿トンネル 0238-52-1352

****土木本部技術第2部 03-5441-0566

*****土木本部技術企画部 03-5441-0552

2. TBMの概要

TBMは、前胴、中胴、後胴から構成される。前胴には4本のフロントグリッパジャッキ(FGJ)、前胴と中胴の間には中胴を通して4本の方向制御ジャッキ(DCJ)、前胴と後胴の間には4本のスラストジャッキ(THJ)、後胴には左右2本のメイングリッパジャッキ(MGJ)が設けられている。(図-1および図-2参照)

掘削は、以下の手順で行われる。(図-3参照)

① メイングリッパジャッキを掘削壁面に押し当て、壁面に反力をとる。

② カッターの回転とともに、スラストジャッキの伸長により前胴を前進させ、スラストジャッキが一定のストローク量が伸長した地点で、掘削を終了する。

③ 前胴部の4本のフロントグリッパジャッキを高圧にし、メイングリッパジャッキを引く。

④ フロントグリッパジャッキを壁面に押しつけることにより摩擦で反力を取りながらスラストジャッキを縮め、後胴を引きよせる。

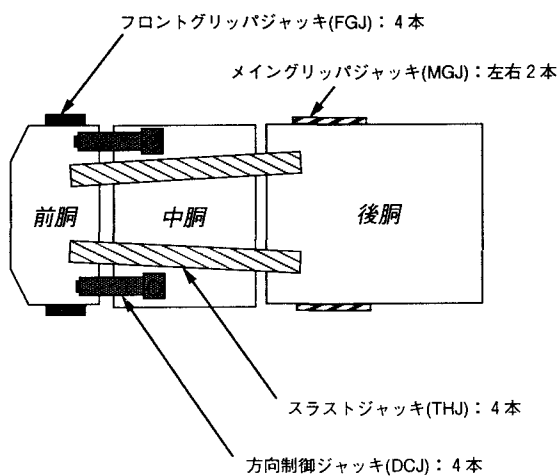


図-1 TBMのジャッキ構成

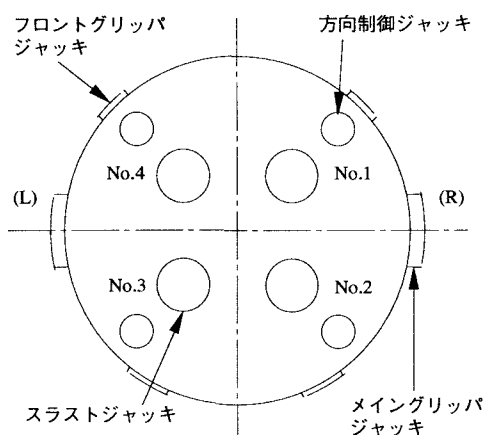
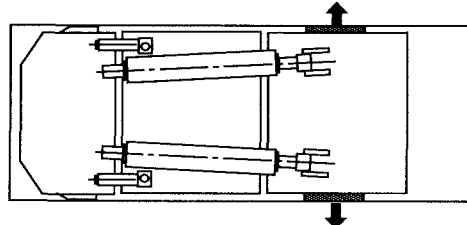


図-2 TBMのジャッキ配置図

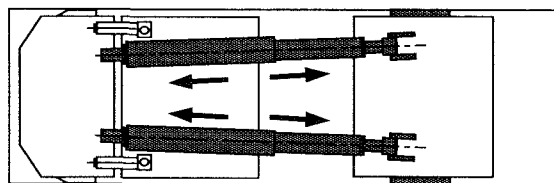
著者らが、開発し、現在、稼働中であるシールドの自動方向制御システムと比較して、TBMの制御には、以下のような特徴がある。

- 1) シールドは通常、ジャッキの選択のみにより、姿勢制御するのに対し、TBMでは、4本のスラストジャッキの選択、4本のフロントグリッパジャッキのストローク差、4本の方制御ジャッキのストローク差、2本のメイングリッパジャッキのストローク差によって、姿勢制御するため非常に制御が複雑である。
- 2) シールドは、既設置のセグメントを反力に進進するため、シールドジャッキの伸長による掘進中に後退しないが、TBMはメイングリッパと地山の間にす

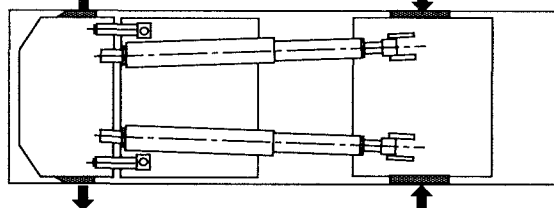
①メイングリッパジャッキ押し



②カッターヘッド回転、スラストジャッキにて掘進



③フロントグリッパジャッキ押し、メイングリッパジャッキ引き



④スラストジャッキによる後胴引き寄せ

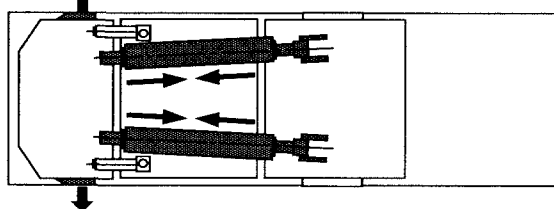


図-3 TBMの掘削手順

べりが生じる可能性があり、その結果、TBMがすべりを起こすことがある。したがって、スラストジャッキの伸長をもとにした掘進距離の算出の精度に問題が生じる。

以上のような特徴を踏まえて、筆者らはTBMの自動方向制御システムの開発を行った。

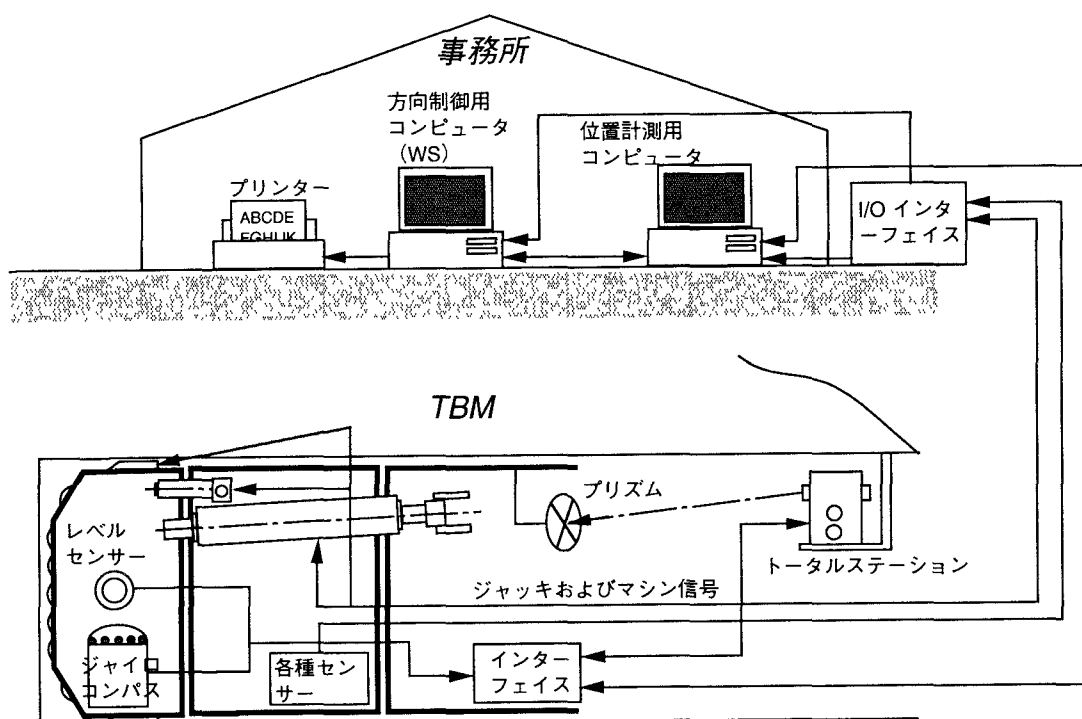


図-4 システム構成図

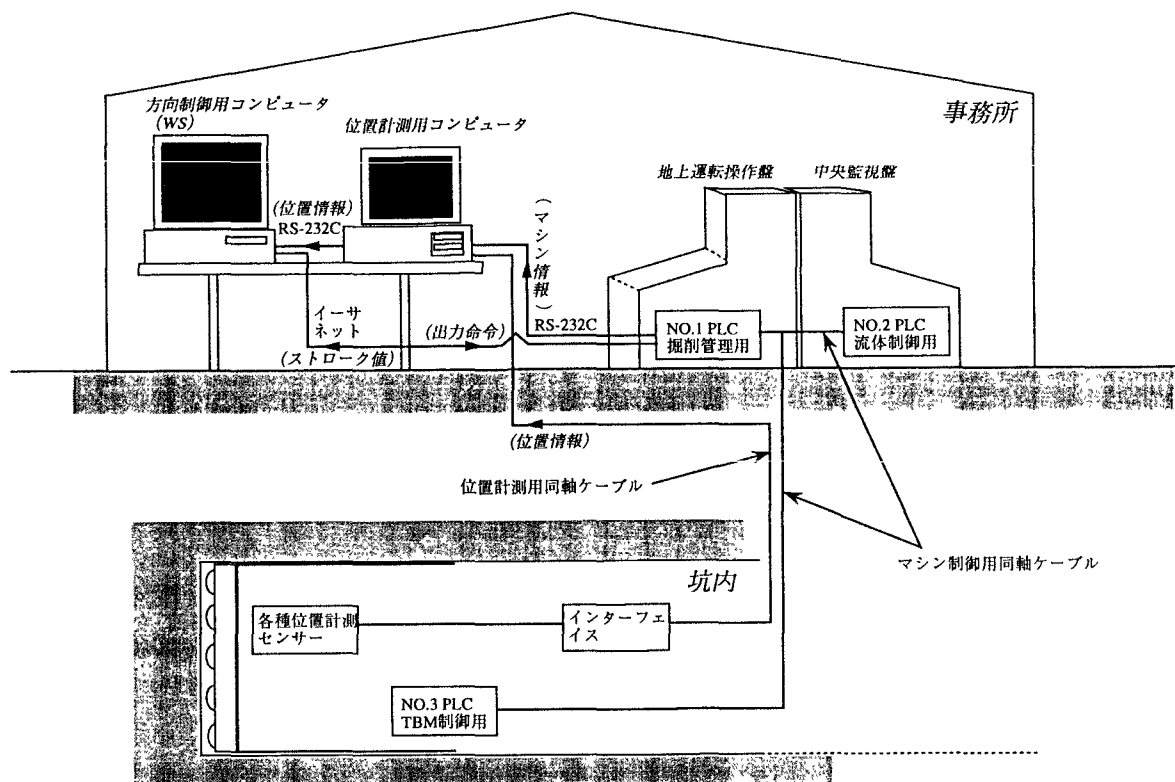


図-5 ハードウェア構成図

3. システムの概要

本システムの構成図を図-4に、ハードウェア構成図を図-5に、システムフローを図-6に示す。本システムは、位置計測システムと方向制御システムから構成される。

まず、位置計測システムは、前胴に設置されたジャイロコンパス、レベル計、ピッチング計、ローリング計および各ジャッキのストローク計および前胴の絶対掘進距離を計測するための自動追尾式トータルステーションにより、TBMの絶対位置をリアルタイムで計測する。

4. システムの詳細

(1) 位置計測システム

TBMの現在位置から急激に計画線に戻すことは線形上好ましくないため、各ストロークの掘削開始時において、TBMの現在位置から計画線に対し、事前に設定した一定のすりつけ長さをもつ目標掘進線を自動的に設定する（図-7参照）。掘削開始後は、スラストジャッキのストロークが40mm伸びる毎に、位置計測システムにおいて、水平および鉛直方向に関し、この目標掘進線からの離れ量（水平方向のずれ量、ずれ量の変化量、目標方位の偏差角、偏差角の変化量、鉛直方向のずれ量、ずれ量の変化量、目標方向とのピッチング偏差、ピッチング偏差の変化量）が自動算出され、これらの情報が方向制御システムに送られる。

TBMの掘進は岩盤にメイングリッパジャッキを押しつけて、その摩擦力を反力に前胴を前進させる。その上、約100mにもおよぶ後続台車は前胴部に連結されており、TBMの総推力および後続台車の牽引力が岩盤とメイングリッパジャッキの間の摩擦力と対抗する。したがって、粘土成分の多い岩盤など岩盤表面の状態により、岩盤とメイングリッパジャッキの間にすべりが発生する可能性がある。すべりが発生した場合、スラストジャッキの伸び量ほどは前胴は前進しておらず、その結果、ジャイロコンパスとスラストジャッキのストローク量をもとにした。TBMの位置計測は誤差を生じる。特に、後述する本適用例のような急勾配の場合、掘進距離の誤差は鉛直方向の位置計測に大きな誤差を生む可能性があり、したがって、リアルタイムでの正確な掘進距離の把握は非常に重要である。

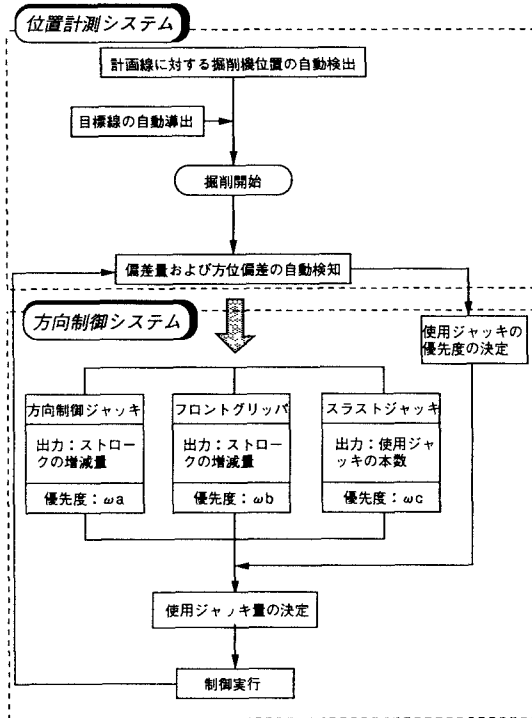


図-6 システムフロー

ムに自動計測し、計画掘進線および目標掘進線（計画掘進線に戻すためのすりつけ線）に対するTBMの相対位置を計算・出力する。

方向制御システムは、位置計測システムにより出力された計画線および目標掘進線に対するTBMの相対位置情報にもとづき、シールド掘削機を目標掘進線にのせるように4本のスラストジャッキのジャッキパターン、4本のフロントグリッパジャッキの各ストローク量および4本の方向制御ジャッキの各ストローク量をファジ理論（[2]、[3]、[4]）を用いて自動選択、出力するものである。ここでは、もり替え後の掘進中のTBMの姿勢を制御することを目的としたため、もり替え中の2本のメイングリッパのストロークの制御は本システムから除外した。

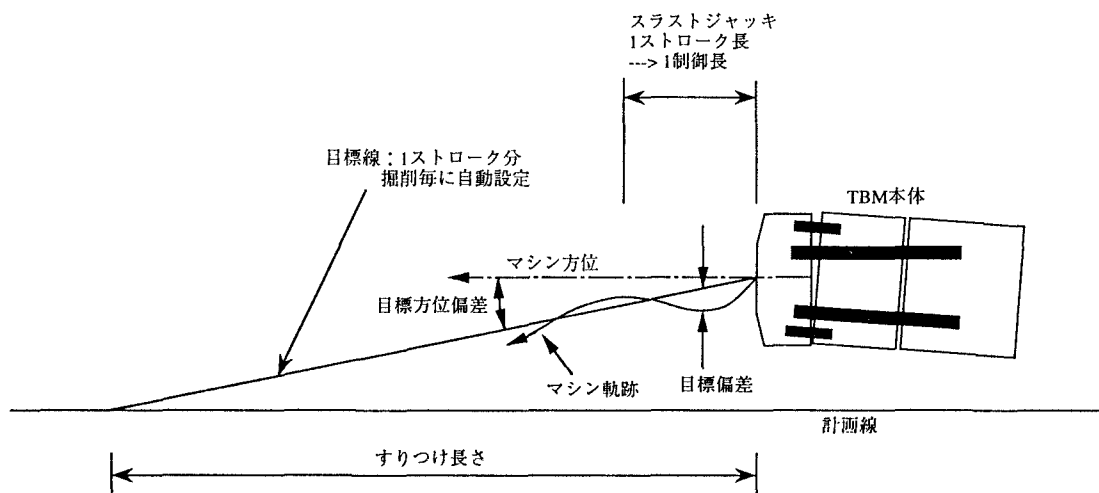


図-7 目標掘進線の設定

本システムにおいては、図-4に示すように、既掘削部の壁面の既知点に自動追尾式トータルステーションを設置し、後胴の既知点にプリズムを設置した。自動追尾式トータルステーションは常時、プリズムを自動照準しており、トータルステーションとプリズム間の距離は自動測定される。そして、この測定された距離に、後胴の既知点のプリズムから前胴の管理点までの距離とスラストジャッキのストロークを加算することにより、前胴の絶対位置（距離）が計算され、この値がジャイロコンパスの計測値とともに、位置計測システムに入力される。

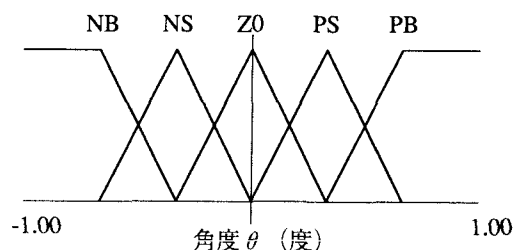


図-8(a) ファジィ集合の例（方位偏差）

(2) 方向制御システム

ジャッキパターの制御は、スラストジャッキが120mm（可変）伸びる毎に行われる。すなわち、40mm毎に計測されるTBMの位置情報が3組収集された段階で、その平均値が入力値として、ジャッキの決定のための推論に用いられる。

本自動制御システムにおいては、ジャッキの決定のための前提条件として、以下のルールに従う。

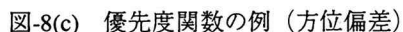
- 1) 方向制御ジャッキは各々のジャッキのストローク量を増減させることにより、前胴部を屈伸させ、姿勢制御を行う。
- 2) 方向制御ジャッキの操作前には、前胴を曲げる側の反対側にあるフロントグリッパジャッキを抜き、前胴を曲げやすくする。前胴の屈曲後、フロントグリッパジャッキを低圧にて、ストロークが一定になるまで伸長する。

		偏差量 δ				
		NB	NS	ZO	PS	PB
方位偏差 θ	NB	PB	PB	PS	PS	ZO
	NS	PB	PS	PS	ZO	ZO
	ZO	PS	PS	ZO	ZO	NS
	PS	PS	ZO	ZO	NS	NB
	PB	ZO	ZO	NS	NB	NB

PB: 非常に+側に大きい
 PS: ちょっと+側に大きい
 ZO: ほとんどゼロ
 NS: ちょっと-側に大きい
 NB: 非常に-側に大きい

例) 偏差量が非常に+側に大きく(PB)、方位偏差がほとんどゼロの時(ZO)、方向制御ジャッキのストロークをちょっと-側に(減少)させる(NS)

図-8(b) プロダクションルールの例



4) 方向制御ジャッキとフロントグリッパジャッキの組み合わせを規定する優先度関数を設定し、TBMの計画線からの離れ量の大小によって、両ジャッキの優先度を変える。すなわち、離れが小さい場合は、フロントグリッパジャッキのみを操作し、離れが大きいときはフロントグリッパジャッキと方向制御ジャッキを併用する。

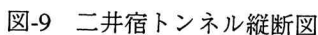
① 位置計測システムからの位置情報（目標掘進線からの離れ量：水平方向のずれ量、ずれ量の変化量、目標方位の偏差角、偏差角の変化量、鉛直方向のずれ量、ずれ量の変化量、目標方向とのピッチング偏差、ピッチング偏差の変化量）にもとづき、フロントグリッパジャッキの現状に対するストローク増減量をファジィ推論により計算する。

とづき、方向制御ジャッキの現状に対するストローク増減量をファジィ推論により計算する。参考例として、方位偏差のファジィ集合を図-8(a)、水平方向の目標掘進線からのずれ量および方位偏差に対する方向制御ジャッキのストローク増減量についてのプロダクションルールを図-8(b)に示す。

④ スラストジャッキのジャッキパターンの選択に関しては、過去数ストロークに対するTBMの制御状況（方位偏差およびピッチング偏差の変化量）を回帰分析などの統計処理を行い、ジャッキのきき具合を自動的に学習する。

すなわち、制御状況（きき具合）に対応して、ラストジャッキのパターンは4本押し、3本押し+1本追従、3本押し（追従なし）、2本押し+2本追従、2本押し（追従なし）を選択する。この場合、使用ジャッキの減少に起因する制御のききすぎを防止するため、算出された方向制御ジャッキおよびフロントグリッパジャッキのストロークの増減量を抑さえぎみに補正する。

⑤ フロントグリッパジャッキおよび方向制御ジャッキの出力すべきストローク量が計算される。また、スラストジャッキのジャッキパターンが決定される。



5. 実際への適用

本システムは、山形県に位置する二井宿トンネルに導入され、その効果が確認された。当トンネルは、掘削外形が $\phi 2300\text{mm}$ および延長が 1020.6m で、掘進方向に12%の上り勾配である（図-9参照）。掘削ズリは勾配を利用して、排泥管を通し、自然流下方式で坑外に搬出される〔5〕。自然流下においては管の閉塞は掘削工程に大きな影響を及ぼすため、常時、流出状況の監視が必要である。また、狭い坑内では、TBMの掘削管理だけでなく流体処理設備の管理や資材管理などを集中的に行うことは困難である。以上より、地上に集中監視室が設けられ、遠隔集中制御システムとともに本システムが導入された。

導入当初は、方向制御システムの調整において、手動掘進時に熟練オペレータが培った制御のノウハウをシステムに取り込むのに苦労した。また、岩質が凝灰角礫岩の部分においては、当初の予想以上にTBM本体のすべりが観測された。

制御においては、極力、各ストロークに急激な変化が生じないように調整し、目標掘進線に従い、なめらかにTBMが推進するようにした。参考として、図-10に825ストロークの、図-11に832ストロークの自動方向制御による掘進の結果を示す。上が水平方向、下が鉛直方向のTBMの管理点（ここではカッター面の中央）の、目標掘進線および計画線に対する推移を示す。水平方向に比べ、鉛直方向のデータがばらついている理由は、ひとつには掘削ズリが全て排除しきれずにスキンプレート下に溜まった上に前中後胴が乗ったために、管理点が鉛直方向に移動し、この動きを目標掘進線に沿うよう制御が行われた結果であると推測される。また、TBMの振動により、水盛り式レベル計の表示が影響されたことも原因であろう。しかしながら、両図とも目標掘進線にそってTBMが精度良く自動制御されていることがわかる。

写真-1に中央制御室、写真-2に本システムの表示画面を示す。表示画面において、TBMの計画線および目標掘進線に対する位置情報、現在の使用ジャッキ情報、過去の掘進履歴および掘削ズリの搬出状況監視が把握できる。

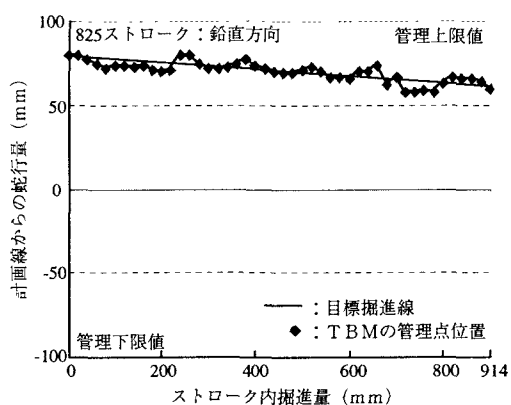
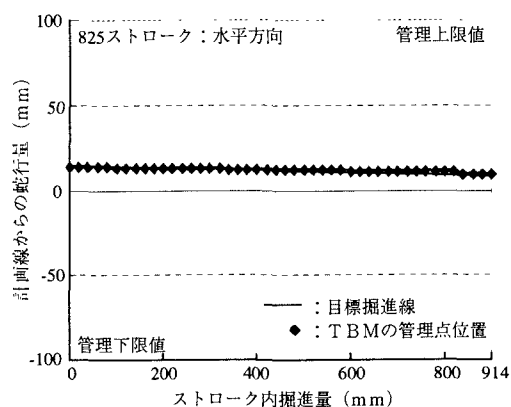


図-10 自動掘進結果（825ストローク）

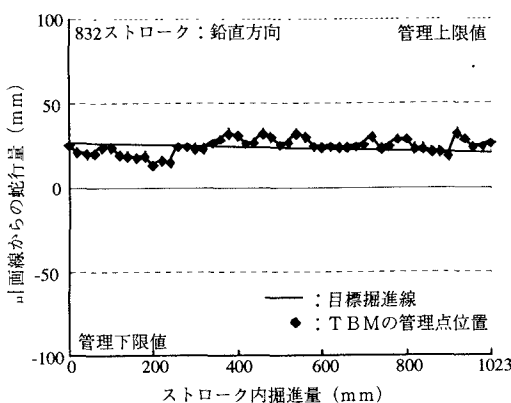
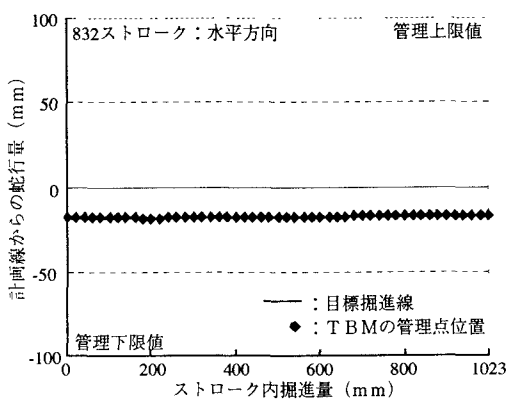


図-11 自動掘進結果（832ストローク）

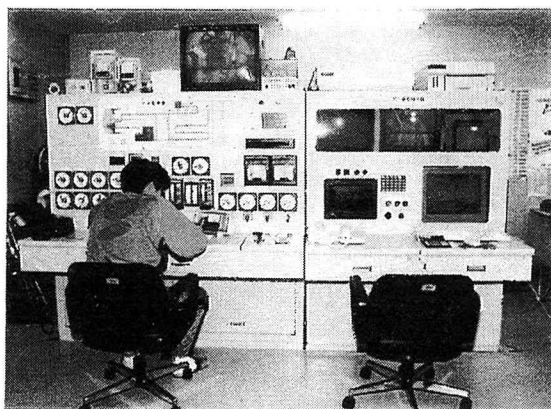


写真-1 中央制御室

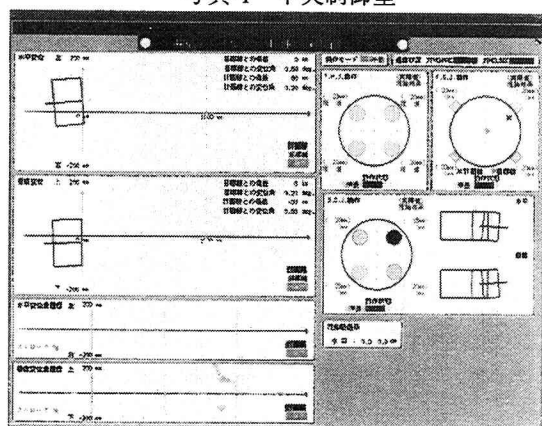


写真-2 システム表示画面

6. おわりに

筆者らが、新規開発したTBMの自動掘進システムを実現場において実証を行った結果、高精度で自動掘進をできることが確認できた。特に、急勾配掘削におけるTBMのすべり対策を自動掘進システムに取り込み、TBMの現在位置をリアルタイムに精度よく把握できたことは、種々の地山および施工条件に対する本システムの高い適用性が期待できる。

今回、開発したTBMにおける自動掘進を可能にする本システムは、今後の熟練工不足やより複雑な条件下での施工などの、環境の変化に対しその意義は大きいと言える。今後は、地山評価などの情報をリアルタイムに取り入れることによって総合的な掘削管理・制御を行う、より実用的なシステムの構築を目指すものである。

参考文献

- [1] 木村厚之、河野重行 他、トンネル掘削機の自動掘進システムの開発およびその実証、土木学会第50回年次学術講演会、1995年9月
- [2] 廣田薫、わかりやすいファジィシステム、株式会社テクノシステム、1989年
- [3] 三矢直城、田中一男、C言語による実用ファジィブック、ラッセル社、1989年
- [4] 菅野道夫、ファジィ制御、日刊工業新聞社、1988年
- [5] 土田 充、吉野進 他、重力式流体輸送による掘削ブリの搬出、土木学会第50回年次学術講演会、1995年9月

Development of Auto-driving System of Tunnel Boring Machine

Due to the decrease of the labour resulting in the unpopularity of the construction industry among the young engineers and aging of the skilled workers, robotization and automation have been developed and introduced into the construction industry. As one of the effective methods for excavating the tunnel in the hard rock, tunnel boring machine has been widely used and corresponding automating technologies have been advanced.

The authors have newly developed the auto-driving system of the tunnel boring machine so that it could run along the planned line automatically using the jacks selected based upon the location of the machine. The validity of the system has been confirmed through the actual use in the tunnel construction project.