

シリーズ第4回

「小口径管推進工法の高度化に関する研究」 ファジィによる方向制御事例 3

*高津 知司

建設省土木研究所
機械施工部
機械研究室
研究員

**花本 忠幸

KOMATSU研究本部
産業機械開発研究室
地下建機グループ
主任研究員

***加藤 豊

KOMATSU研究本部
産業機械開発研究室
地下建機グループ
研究員

****高橋 典夫

KOMATSU研究本部
産業機械開発研究室
地下建機グループ
研究員

1. 圧入式二工程方式の概要

TP80アイアンモール仮管併用推進工法(以下、本工法)の圧入式タイプは二工程方式であり、一工程目に圧密によりパイロット管推進を行い、二工程目に拡孔掘削しながらヒューム管推進を行う。また、適応土質は一般的にN値が20以下のローム・シルト・砂質土であり、礫は含まれないのが前提である。

本方式において高精度な管路の敷設のためには、高精度なパイロット管推進が重要である。パイロット管の先端にフレキシブルに連結されたパイロットヘッドには、二次元揺動式パイロットジャッキによる方向修正機構と、複板式レーザターゲット・傾斜計等の高精度な位置・姿勢センサが装備されている。

2. 本工法の運転支援システム開発の必要性

一般に本工法における施工精度は、一工程目のパイロット管推進時におけるパイロットジャッキによる方向修正操作の善し悪しによって決定される。パイロットヘッドの方向修正原理を図2-1に示す。基本操作としては、揺動操作は変位量よりも計画線に対するパイロットヘッドの傾きを重視して行う。変位量をすぐにゼロにしようとして揺動操作を行うと結果として蛇行するケースが多いので、変位量の大きい場合は数メートル先で変位量がゼロになるようにパイロットヘッドの傾きを調整する必要がある。また、過去の施工データより土質の変化や方向修正特性の変化等を的確にとらえて操作に生かさなければならない。さらに、施工上の不具合が生じた場合、その原因を的

*略歴

高津 知司(たかつ・ともじ)／昭和62年3月京都芸芸繊維大学工学部研究科修了(工学修士)。同年4月建設省土木研究所研究員。現在に至る。

**略歴

花本 忠幸(はなもと・ただゆき)／昭和56年3月東京大学工学部研究科産業機械修了(工学修士)。同年4月(株)小松製作所入社。現在に至る。

***略歴

加藤 豊(かとう・ゆたか)／昭和50年4月(株)小松製作所入社。現在に至る。

****略歴

高橋 典夫(たかはし・のりお)／昭和60年3月東京工業大学工学部生産機械工学科卒業。同年4月(株)小松製作所入社。現在に至る。

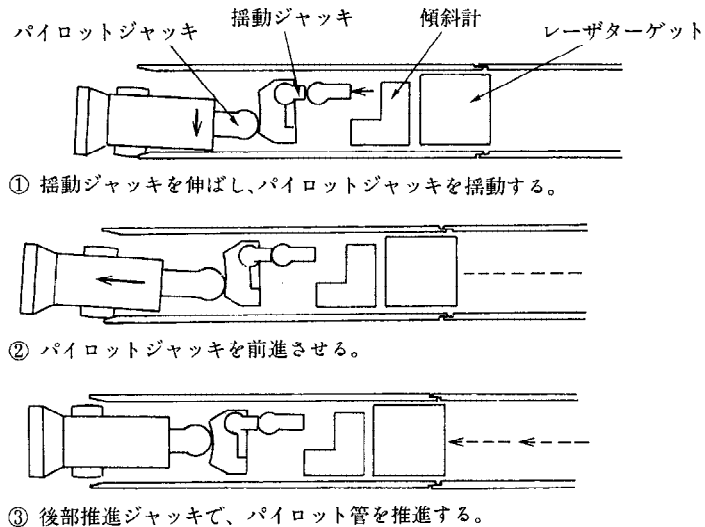


図2.1 パイロットヘッドの方向修正原理

確に判断して早めに対策を打つことにより、より安全で確実な施工が実現される。

従来、施工ノウハウを修得した熟練オペレータは、上記のような本工法における方向修正原理を正しく把握し、実施工における経験を積み重ねることによってのみ育成されてきた。しかし、近年の建設業の人手不足等から熟練オペレータ不足が問題となりつつあるとともに、最近の小口径管推進工法による下水道管理設工事は著しい伸びを示しており、今後の工事需要に対応できなくなる恐れがある。

よって、本工法におけるいわゆる未熟練な作業者でも熟練オペレータと同等な高精度な施工が行えるようにすることで、上記問題点を解決する必要があると判断し、本工法において一工程目のパイロット管推進時における運転支援システムを開発した。

3. 運転支援システムの概要

3.1 運転支援システムの構築

前項で述べたように、未熟練なオペレータでも高精度な施工が行えるためには、一工程目のパイロット管推進時における操作が重要なので、次に示す機能を有することが必要である。

1) パイロットジャッキによる方向修正操作方

法を的確でタイムリにオペレータにアドバイスする。

2) 施工上の不具合を各センサによる信号から的確に判断し、早めにオペレータに警告と対策案をアドバイスする。

3.2 運転支援システムの構成

図3.1に示すように、このシステムは、従来の油圧コントローラの上部に表示記録装置と入力装置を搭載し、油圧コントローラの収納部にはコンピュータを設置している。

図3.2に示すように、表示記録装置はカラーディスプレイとICカードライダであり、入力装置は表面にタッチスイッチを配置した操作パネルである。

図3.3に示すように、コンピュータは下記ののような各センサの信号を計測・処理して上記表示記録装置に表示および記録を行う。

a. 圧力センサ：

パイロットジャッキ圧・後部推進ジャッキ圧の計測(容量500kgf/cm²、精度±1.0%FS、定格出力1～5V、2個)

b. 傾斜計：

パイロットヘッドの傾斜角の計測
(計測範囲-30～+30%、精度±1%、定格出力-

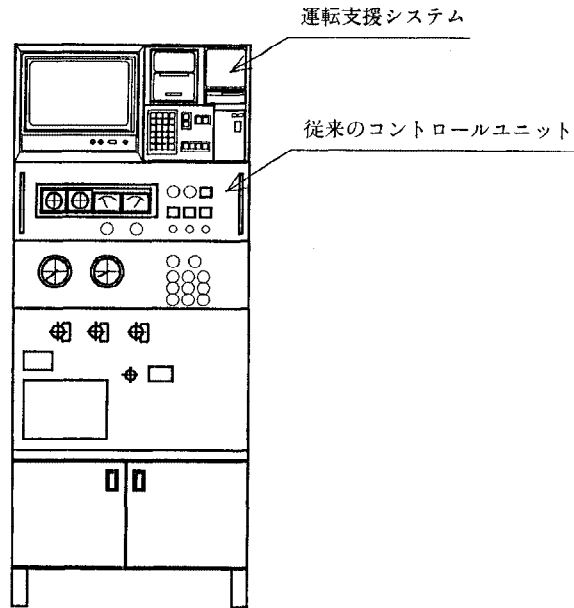


図3.1 運転支援システム全体図

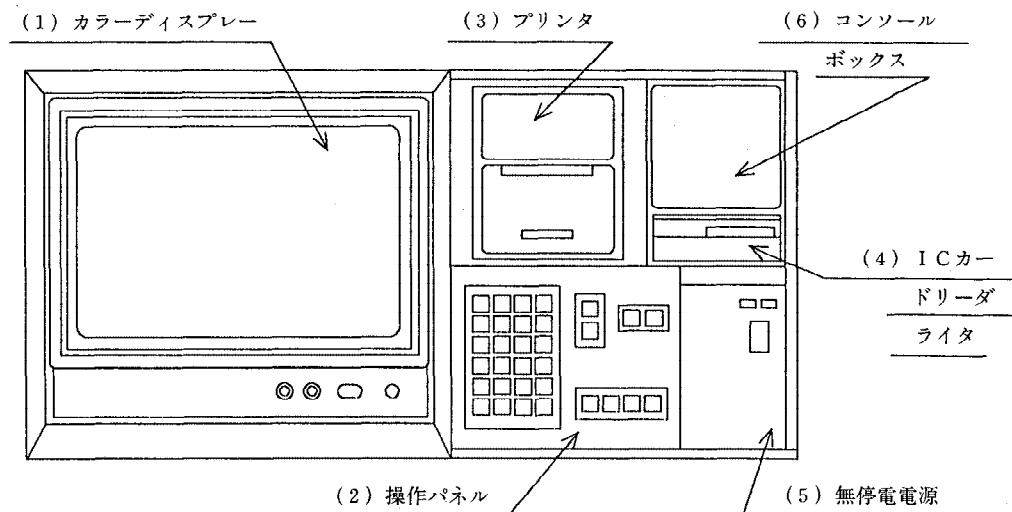


図3.2 運転支援システム各装置図

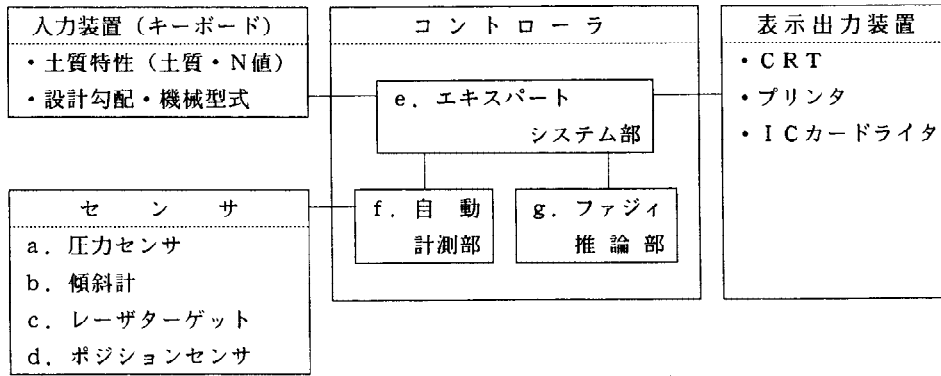


図3.3 運転支援システム構成図

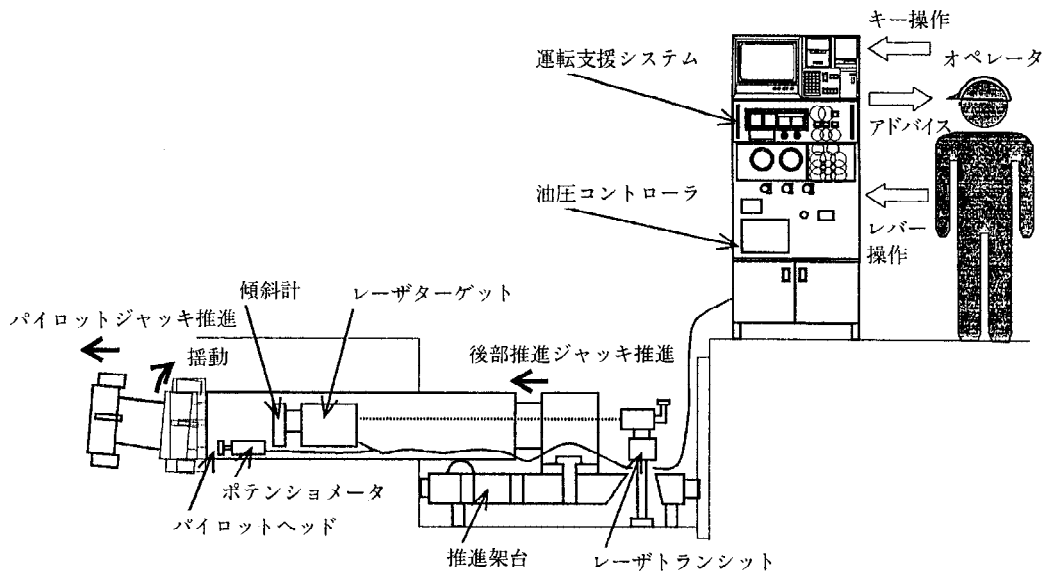


図3.4 運転支援システムの使用方法

3 ～ + 3 V、1 個)

c. レーザターゲット：

パイロットヘッドの計画線に対する変位量・姿勢角の計測(計測範囲－40～+40mm、－25～+25‰、精度±1.5mm、±2‰、RS-232C出力、1 個)

d. ポジションセンサ：

方向修正操作量の計測(計測範囲－3～+3 度、精度±0.4‰、定格出力－5～+5 V、2 個)

また、ソフトウェアの構成は、下記のような 3 つの部分より成っている。

e. エキスパートシステム部：

施工上の不具合・対応策のアドバイス等(警告内容18件、対策内容 8 件)

f. 自動計測部：

施工中の各信号の計測処理(変位量、姿勢角、方向修正操作量、ジャッキ圧)

g. ファジィ推論部：

方向修正アドバイスのための計算処理(21ルール、MIN-MAX法)

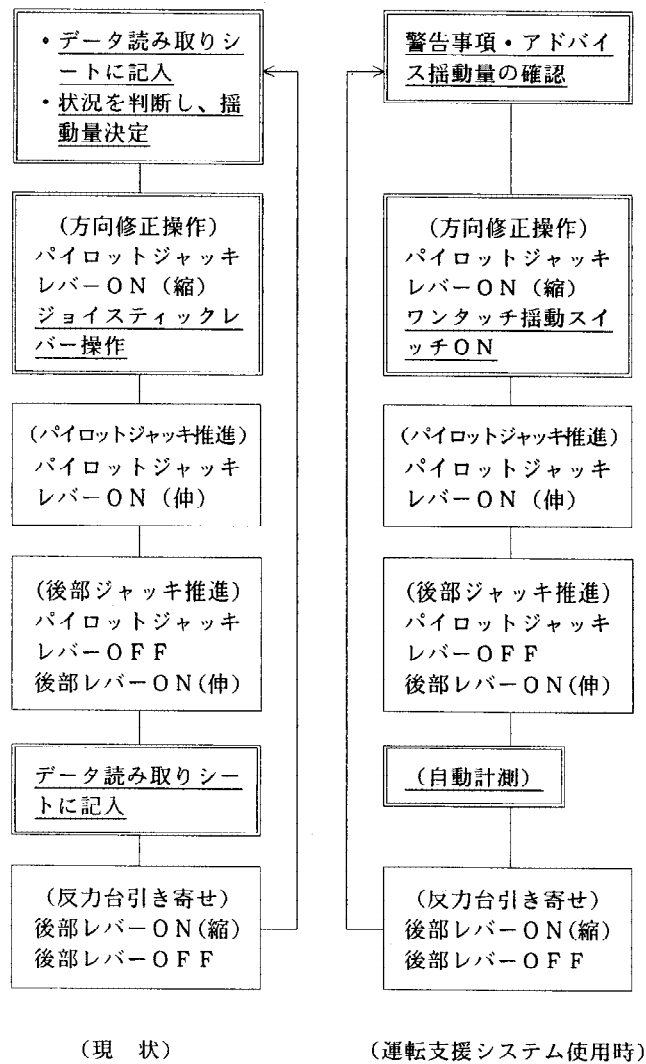


図3.5 従来の操作と運転支援システム使用時の操作手順の比較

3.3 運転支援システムの使用方法

図3.4に運転支援システムの使用方法を示す。オペレータはシステムのアドバイスなど画面表示内容を確認し、タッチスイッチ操作・レバー操作を行う。図3.5に従来の操作手順と運転支援システムを使用した時の操作手順との比較を示す。

従来の操作では、計測データに基づき方向修正のための揺動量をオペレータが経験則に基づき決定しているが、運転支援システム使用時は方向修正量のアドバイスが画面上に表示されるので、オ

ペレータはアドバイス通りの方向修正を行う事で熟練者でなくても高精度な施工が可能になる。

3.4 運転支援システムの特長

開発したシステムの特長は、下記のとおりである。

- 1) ファジィ推論を利用した方向修正のアドバイス機能により、熟練オペレータでなくても高精度な推進が可能になる。写真3.1にアドバイス画面を示す。
- 2) 推進中の施工履歴により方向修正の効き具

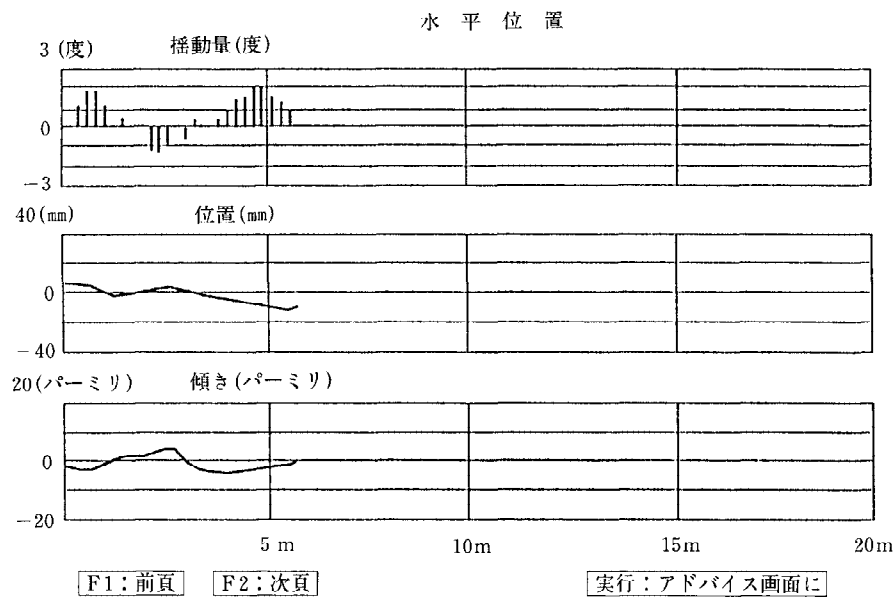
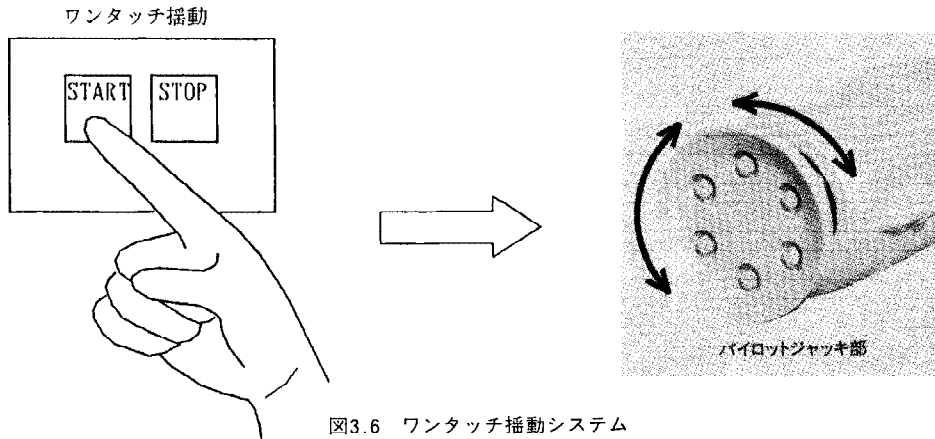


図3.7 履歴グラフ表示

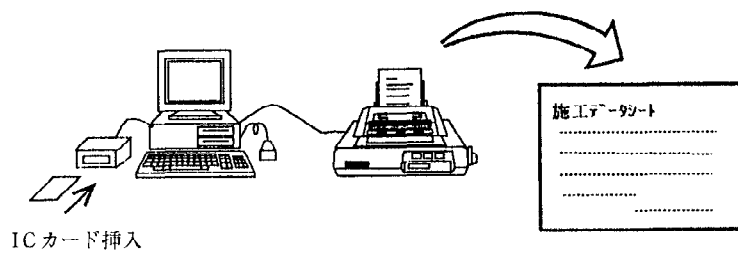


図3.8 プリント出力システム

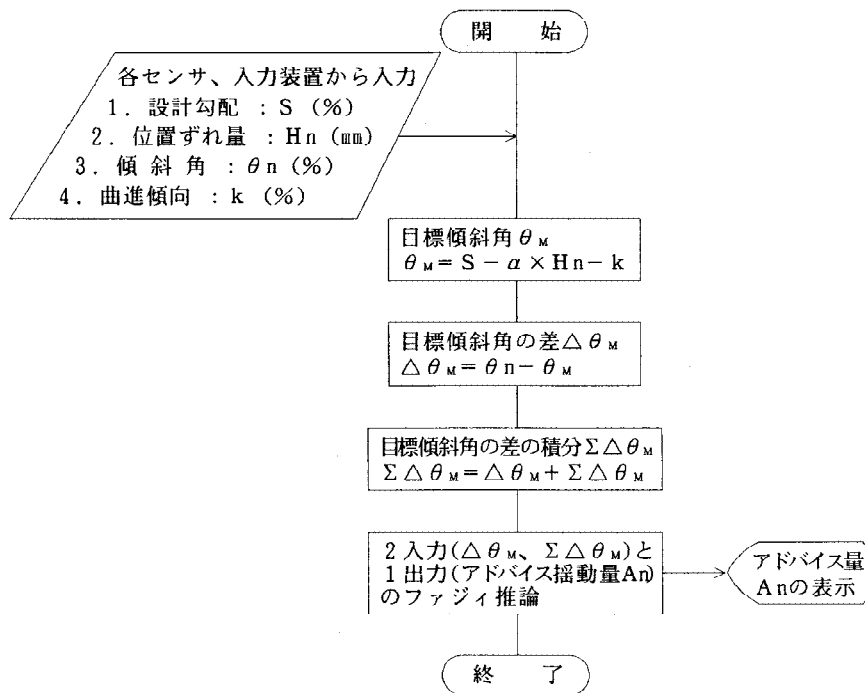


図 3.9 垂直方向のアドバイス揺動量決定アルゴリズム

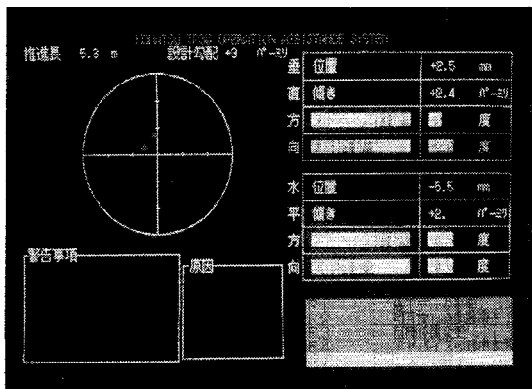


写真 3.1 システム画面例(アドバイス画面)

合や、進行方向とヘッドの姿勢角との間の特徴を検知して方向修正量を自動修正するので土質条件など現場毎に異なる状況に対応する事ができる。
3) ワンタッチで方向修正量をセット出来るため、従来に比べ操作が非常に簡単になる。(図 3.6 参照)

現状では、方向修正のため揺動量をセットする時に 2 本のジョイスティックレバー操作で行っているが、土質の影響で垂直方向と水平方向の 2 本のレバーの複合操作が必要になる場合があり、その操作は熟練していないとかなり複雑で手間がかかる。

4) 警告アドバイス機能により、常時、施工状況を監視し不具合の発生を予知し警告するので、ミスを防ぎ確実な施工をサポートする。また、レーザターゲットのエラー信号や重複したセンサの出力(レーザターゲットの垂直方向の傾きの出力と傾斜計の出力)を用いてセンサの出力自体の信頼度もチェックしており信頼度が低い時は警告を出し、オペレータに具体的な対応を促す。

5) 自動計測・記録機能と履歴表示機能(図 3.7)により、オペレータが施工データを推進中にシートへ記録する必要がなくなり、施工を管理する事が容易になるので、確実な施工をサポートする。

6) ICカードに施工履歴を記録し、事務所のパ

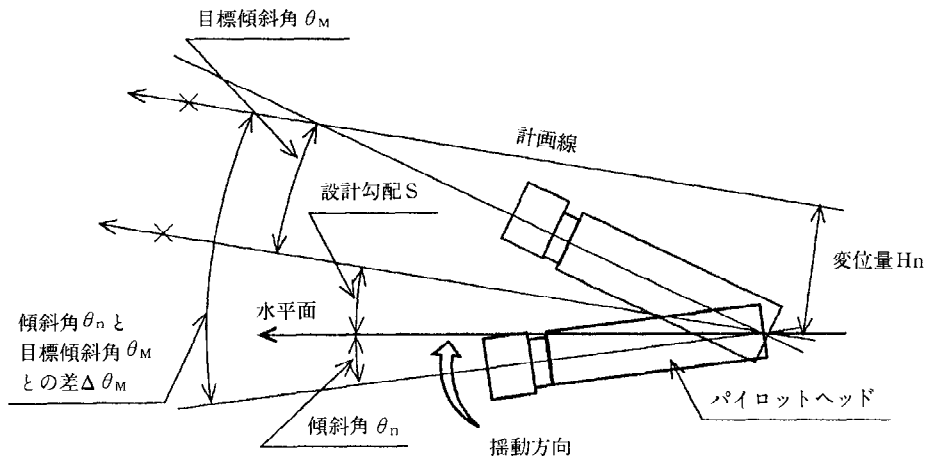


図3.10 パイロットヘッドの目標傾斜角、傾斜角と変位置

表3.1 ファジィ制御側

アドバイス揺動量		目標傾斜角 $\Delta\theta_M$						
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
積分値 $\Sigma\Delta\theta_M$	SM	PM	PS	ZO	ZO	ZO	NS	NM
	MM	PB	PM	PS	ZO	NS	NM	NB
	LA	PB	PB	PM	ZO	NM	NB	NB

ソコンにて発注者提出用の書式でプリント出力できるので、報告書作成の時間を節約できる。(図3.8参照)

上記の特長を持ったシステムで、推進工法に熟練していないオペレータだけでなく、熟練オペレータにとっても確実にスピーディな施工を強力にサポートすることをめざしている。

3.4 方向修正アドバイスのアルゴリズム

運転支援システムにおいて、熟練オペレータへのヒアリングや過去の施工データ記録等の調査を実施し、熟練オペレータの操作方法のモデル化を行い、方向修正アドバイスのアルゴリズムを構築した。図3.9に垂直方向の方向修正のためのアドバイス揺動量決定のアルゴリズムを示している。また、図3.10に各変数の定義を示す。下記にアルゴリズムについて説明する。

目標傾斜角 θ_M /(目標とするパイロットヘッドの傾き)は次のようになる。

$$\theta_M = S - \alpha \times H_n - k \quad (\text{式3.1})$$

ここで $S(\%)$ を設計勾配、 $H_n(\text{mm})$ を変位置、 $k(\%)$ を曲進傾向とする。 α は係数である。

傾斜角 $\theta_n(\%)$ と目標傾斜角 $\theta_M(\%)$ との差 $\Delta\theta_M$ (目標傾斜角の差)は、次のようになる。

$$\Delta\theta_M = \theta_M - \theta_n \quad (\text{式3.2})$$

この $\Delta\theta_M$ と $\Delta\theta_M$ の積分値 $\Sigma\Delta\theta_M$ を2入力としてファジィ推論によりアドバイス揺動量 A_n を求める。つまり、ファジィ推論の制御則は下記のように示される。

if X is θ_M and Y is $\Sigma\Delta\theta_M$ then Z is A_n (式3.3)

入力変数のパラメータ数が、目標傾斜角 θ_M が7つであり、目標傾斜角の積分値 $\Sigma\Delta\theta_M$ が3つであ

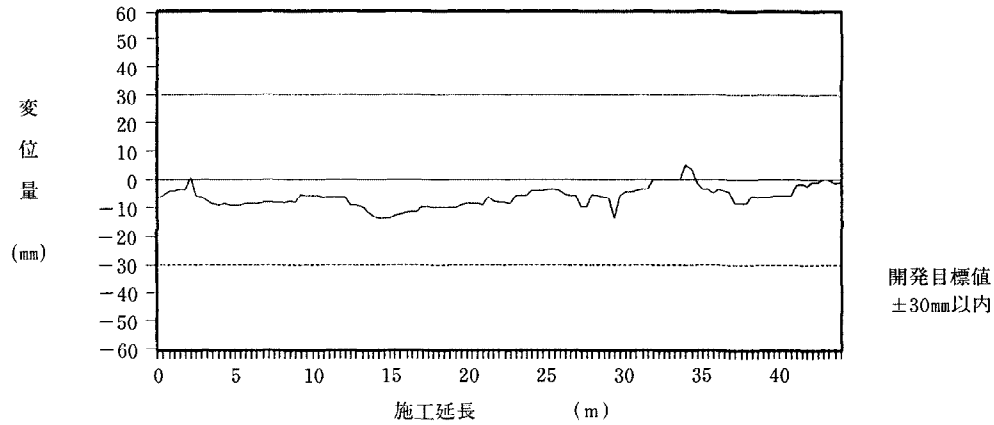


図4.1 運転支援システムを使用した場合の垂直方向の施工結果

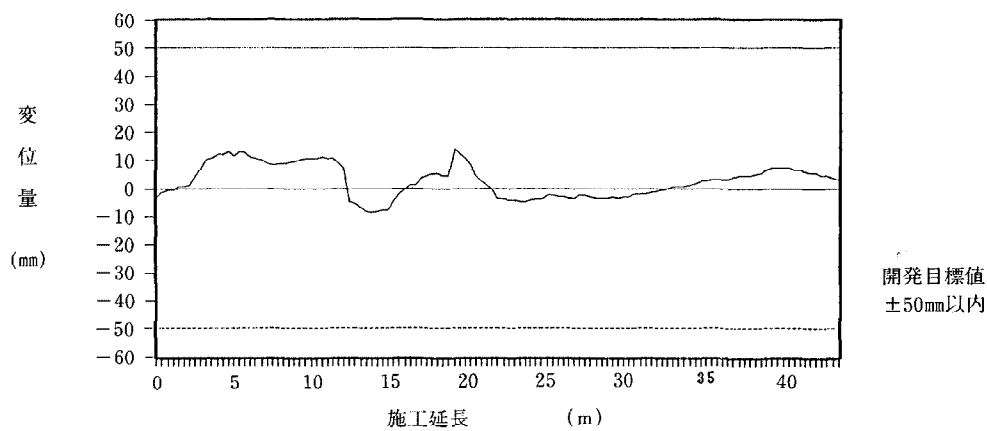


図4.2 運転支援システムを使用した場合の水平方向の施工結果

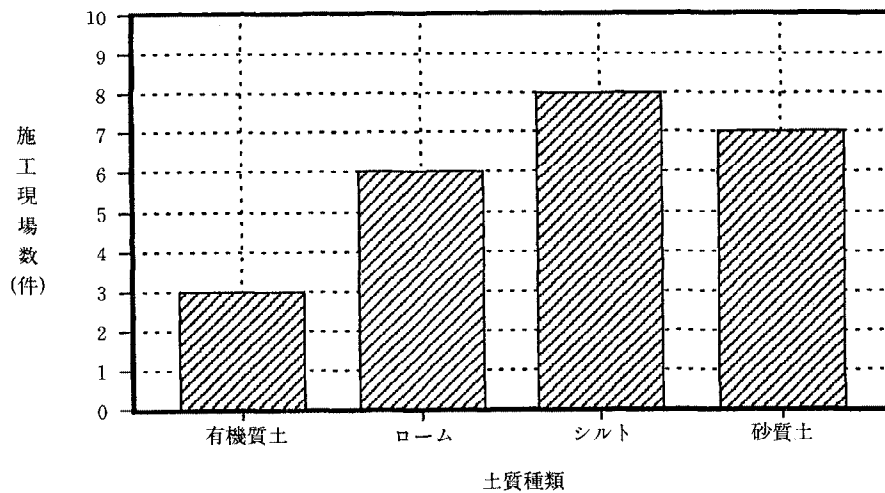


図4.3 各土質ごとの性能確認施工実績

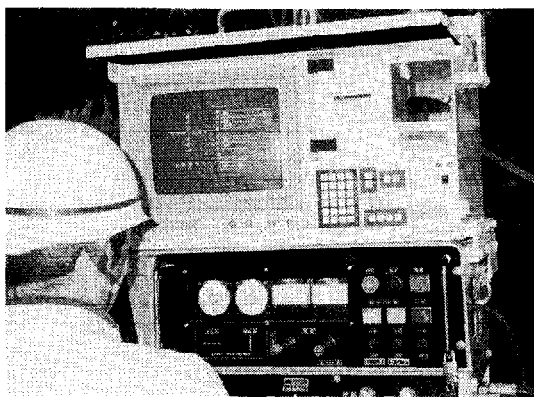


写真4.1 運転支援システム稼働状況

るので、計21ルールの制御則を設けた。各々の組み合わせを表3.1に示す。

このアドバイス揺動量は1ピッチ(40cm)毎に垂直および水平方向の各々について計算・表示される。

4. 性能確認施工結果

開発した運転支援システムの性能確認を行うために、本工法の適用可能な種々な土質において、全スパンをアドバイスどおりの方向修正操作を行いながらパイロット管を推進した。下記にその一例を示す様に、垂直方向 $\pm 30\text{mm}$ 、水平方向 $\pm 50\text{mm}$ 以内の位置ずれ量という開発目標値を達成した。図4.1、図4.2に施工データを示す。また写真4.1にシステム稼働状況を表す。

(1) 施工条件

- ① 土質条件…ローム、N値4～6、地下水は推進線上に無し。
- ② 施工距離…44m
- ③ オペレータのレベル…平均レベルのオペレータ(経験年数3年)

(2) 施工結果

- ① 垂直方向変位量… $-14.0\text{mm} \sim +5\text{mm}$
(計画線からのずれ量)
- ② 水平方向変位量… $-9.0\text{mm} \sim +14\text{mm}$

また、これまで計26回の実際の施工現場における性能確認を行った。図4.3にその各土質ごとの施工実績数を示す。

これらから、本システムを用いると平均レベル

のオペレータでも熟練者並みの施工が可能となることから、一通りの機械操作ができる未熟練オペレータでも良質な施工が可能になると思われる。

5. おわりに

本工法において、開発した運転支援システムの性能確認施工を行い、本工法の適用可能な種々な土質において十分な性能を発揮することを確認した。また、性能確認施工時に本システムを使用したオペレータより、システムの特長として挙げている各機能についても良好な評価を得た。

以上から、未熟練オペレータでも高精度な施工ができることをねらいとして開発した本システムが、十分に実用性のあることが確認できた。

本システムは、今春より一般工事でも利用できるようになる。

参考文献

1. 大沢 肇：アイアンモール工法とその後の技術開発、第8回「最近の推進工法」技術講習会テキスト、'84.6、pp.70～83
2. 杉山 篤、高津 知司、中島 実、花本 忠幸、高橋 典夫：小口径推進工法の施工支援エキスパートシステム、アーバンインフラ・テクノロジー推進会議 第2回技術研究発表論文集、'90.10、pp.413～418
3. 杉山 篤、高津 知司、中島 実、花本 忠幸、高橋 典夫：小口径推進工法の運転支援システム、平成2年度 建設機械と施工法シンポジウム論文集、'90.11、pp.174～177
4. 杉山 篤、高津 知司、中島 実、花本 忠幸、高橋 典夫：小口径推進工法の運転支援システム、ROBOTEC'91講演会論文集、'91.6、pp.469～472
5. 杉山 篤、高津 知司、中島 実、花本 忠幸、高橋 典夫：小口径推進工法の運転支援システム、第2回建設ロボットシンポジウム論文集、'91.7、pp.229～234
6. 杉山 篤、高津 知司、中島 実、花本 忠幸、高橋 典夫：小口径推進工法の運転支援システム、第2回非開削技術研究発表会論文集、'91.10、pp.1～4