

技術情報

シリーズ第5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 4

* 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

** 桑原 資孝

西松建設(株)
施工本部
機材部機械課長

*** 小西 保

西松建設(株)
施工本部
機材部機械課副課長

**** 渡辺 徹

西松建設(株)
技術研究所
主任研究員

1. 泥水式推進工法の概要と自動制御化

泥水方式は、推進管または誘導管の先端に泥水式掘進機を装備し、カッターの回転により掘削する。この際泥水圧で切羽の安定をはかり、掘削した土砂は泥水と混合してスラリー状にして流体輸送し、地上の泥水処理設備で土砂と泥水を分離する方式であり、軟弱土、滞水性砂質土など広い範囲の土質で採用されている。

方向修正は、掘進機に設けたターゲットまたはインジケータを常時監視しながら方向修正ジャッキを遠隔で操作している。

泥水式推進工法も他の工法と同様に、機械操作において経験と勘に頼ることが多い。また、小口径管の場合、方向修正は微調整で行うことが必要であるが、方向修正ジャッキ制御を行っている現状の油圧系統およびストローク計の精度では、1

mmのストローク差制御は困難が伴う。

自動化にあたっては、ファジィ理論によって、定量的な操作手順を必ずしも持っているものではない熟練オペレータ操作のノウハウ(運転規則)が、コンピューターに取り入れることができることからファジィ制御を採用した。操作手順のモデル化は、熟練オペレーターへのヒアリング結果に基づいて行った。

また、方向修正ジャッキ操作についても自動化によって微細な調整が可能であることから、本システムは推進機の位置姿勢測量から方向修正ジャッキ操作までを自動化したものである。

2. ファジィ方向制御システム

(1) システムの概要

システムの構成を図-1に示す。全体システムは、推進機位置姿勢自動計測システムとファジィ

* 略歴

高津知司(たかつ・ともじ)/昭和62年3月京都工芸繊維大学大学院工学研究科修了(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

桑原資孝(くわばら・よしとか)/昭和41年3月日本大学機械工学科卒業、同年4月西松建設入社、現在に至る。

*** 略歴

小西 保(こにし・たもつ)/昭和46年3月立命館大学基礎工学科卒業、同年4月西松建設入社、現在に至る。

**** 略歴

渡辺 徹(わたなべ・とおる)/昭和46年3月法政大学土木工学科卒業、同年4月西松建設入社、現在に至る。

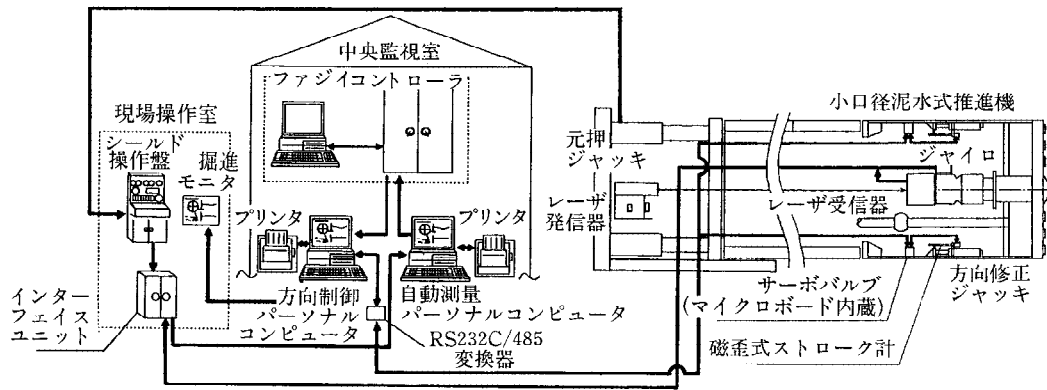


図-1 全体システム

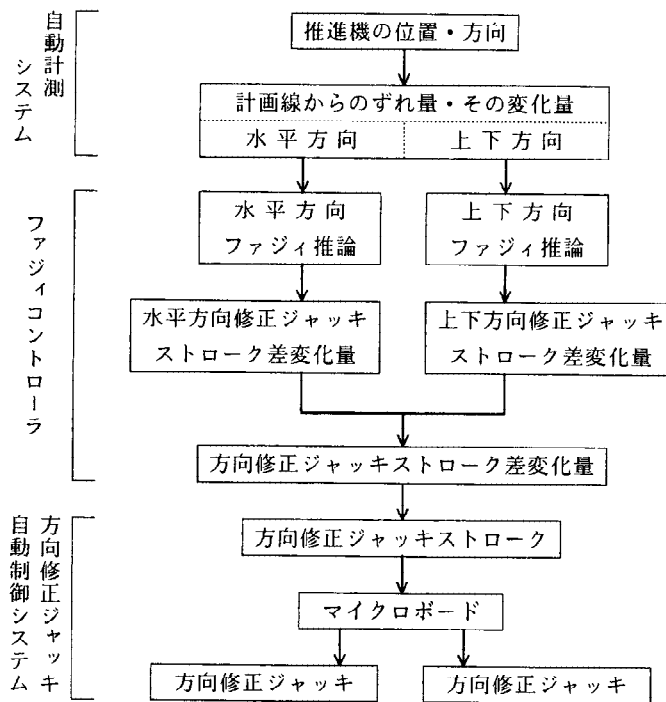


図-2 ファジ方向制御フロー

方向制御システムから成る。図-2に制御アルゴリズムを示す。

各システム概要を以下に説明する。

1) 推進機位置姿勢自動計測システム

推進機位置姿勢自動計測システムは、推進機の

位置を検出するためのレーザートランシットと推進機内に設置したレーザーターゲット、方位角を検出するジャイロコンパス、ピッチ角とロール角を検出する傾斜計および制御用パソコンから構成され、リアルタイムに計測する。

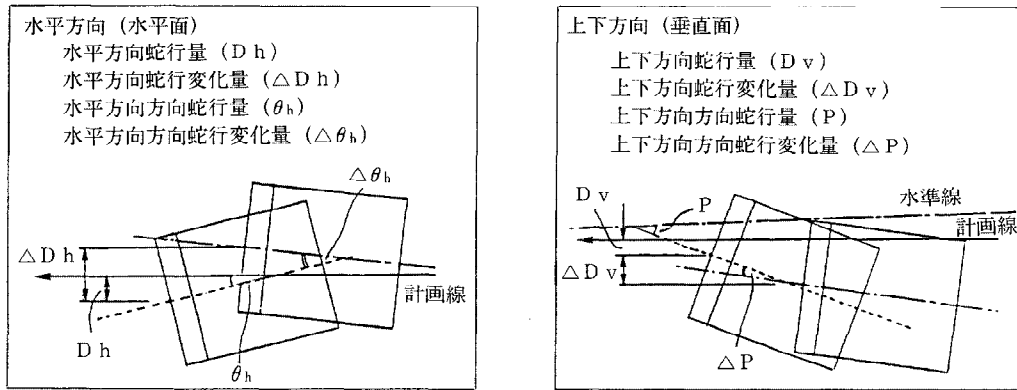
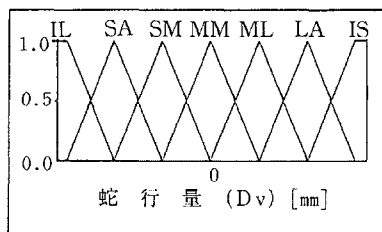


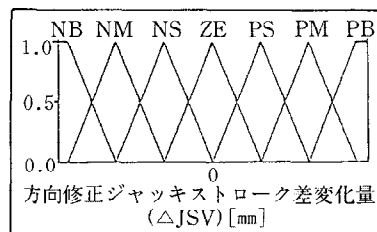
図-3 入力変数

入力メンバーシップ関数(上下方向蛇行量)



IL : INVERSE LARGE
 SA : SMALL
 SM : SMALL MEDIUM
 MM : MEDIUM
 ML : MEDIUM LARGE
 LA : LARGE
 IS : INVERSE SMALL

出力メンバーシップ関数



NB : NEGATIVE BIG
 NM : NEGATIVE MEDIUM
 NS : NEGATIVE SMALL
 ZE : ZERO
 PS : POSITIVE SMALL
 PM : POSITIVE MEDIUM
 PB : POSITIVE BIG

図-4 入・出力変数メンバーシップ関数(掘進上下方向)

ΔJS_v		蛇行変化量 (ΔD_v)						
		IL	SA	SM	MM	ML	LA	IS
蛇 行 量 (D_v)	IL	NB	NB	NB	NB	NB	NB	ZE
	SA	NB	NM	NM	NS	NB	NS	ZE
	SM	NM	NM	NS	NS	NB	NS	PS
	MM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	ML	NS	PS	PB	PS	PS	PM	PM
	LA	ZE	PS	PB	PS	PM	PM	PB
	IS	ZE	PB	PB	PB	PB	PB	PB

ΔJS_v		ピッチング変化量 (ΔP)						
		IL	SA	SM	MM	ML	LA	IS
ピ ッ チ ン グ (P)	IL	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
	SA	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
	SM	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
	MM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
	ML	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
	LA	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
	IS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

図-5 ファジィ規則(掘進上下方向)

また、推進距離計測は、推進中は元押しジャッキのストローク計からのストローク信号をインターフェースユニットを介してリアルタイムにパソコンに送られ、推進管一本ごとの推進終了時は推進管長が自動入力され累計距離が算出される。

測定されたデータは、10秒ごとかつ推進10cmごとに自動測量用パソコンに送られる。自動測量用パソコンは、あらかじめ入力している計画線データと測量値とによりずれ量、ずれ量の変化量、方向角、方向角変化量を求め、推進10cmごとの情報をファジィコントローラに送る。

2) ファジィ方向制御システム

ファジィ方向制御システムは、ファジィ推論と方向修正ジャッキ操作制御を行う。

ファジィ推論部は、計測システムからのデータによりファジィ推論を行い、その出力結果である修正ジャッキストローク差変化量を自動運転制御用パソコンに送るファジィコントローラとファジィ規則・メンバーシップ関数を登録・変更するパソコンから成る。

方向修正ジャッキ制御部は、ストローク信号を出力する自動運転制御用パソコンおよびフィードバック制御を行うマイクロボード内蔵のサーボバルブと測定精度が $\pm 0.05\text{mm}$ の磁歪式ストローク計から成り、ストロークを 0.1mm 単位で制御する。

(2) ファジィコントローラの設計

1) 熟練オペレータへのヒアリング

入・出力変数とファジィ規則および入・出力変数のメンバーシップ関数は、熟練オペレータに対してヒアリングを行い、その結果から設定した。

2) 入力変数および出力変数

入力変数は、図-3に示すように推進機の水平および上下方向の「蛇行量および蛇行変化量」、「方向蛇行量および方向蛇行変化量」のそれぞれ4変数とした。

入力変数のメンバーシップ関数の形状は図-4とし、入力変数のファジィ変数は、IL(INVERSE LARGE), SA(SMALL), SM(SMALL MEDIUM), MM(MEDIUM), ML(MEDIUM LARGE), LA(LARGE), IS(INVERSE SMALL)の7種類である。それぞれに属する割合

(所属度)は、0～1の数値で表され、1に近ければファジィ変数に属する度合いが高いことを意味する。例えば、蛇行量のML(MEDIUM LARGE)を上 5mm とした時に蛇行量が上 3mm の場合、MM(MEDIUM)の度合いが0.4、ML(MEDIUM LARGE)の度合いが0.6となる。

推論結果である出力変数は、「方向修正ジャッキストローク差変化量」である。メンバーシップ関数の形状・所属度を示す値は、入力変数と同様だが、ファジィ変数は、NB(NEGATIVE BIG), NM(NEGATIVE MEDIUM), NS(NEGATIVE SMALL), ZE(ZERO), PS(POSITIVE SMALL), PM(POSITIVE MEDIUM), PB(POSITIVE BIG)の7種類である。

3) ファジィ規則

ファジィ規則は、2つの入力変数メンバーシップ関数と出力変数メンバーシップ関数との操作の関係を表したものである。ヒアリングの結果から、水平および上下方向それぞれで推進機の位置または方向のどちらか一方に注目しているので、位置に注目した規則と方向に注目した規則に分けて作成した。そのうち上下方向のファジィ規則を図-5に示す。この表で、蛇行量に注目した部分の第1列第1行は、「 D_v (蛇行量)がIL(INVERSE LARGE)で、かつ ΔD_v (蛇行変化量)がIL(INVERSE LARGE)ならば、 ΔJS_v (上下方向の修正ジャッキストローク差変化量)はNB(NEGATIVE BIG)にしろ」を意味する。

4) 推論

推論は、Max-Product法を用いて、水平、上下方向ごとにファジィ規則により行う。操作量は重心法によって決定する。推論の概要を図-6に示す。

入力の計測値は、メンバーシップ関数からファジィ変数とそれぞれの所属度が求められる。ファジィ規則から2つの入力変数間のファジィ変数の制御規則を選びだし、出力の修正ジャッキストローク差変化量のファジィ変数と入力部の所属度に相当する出力部の所属度を求める。この所属度の求め方は、2つの入力部の小さい方の所属度を採用。操作量は、各規則ごとの所属度を頂点とする三角形のファジィ集合を合計し、その重心が求

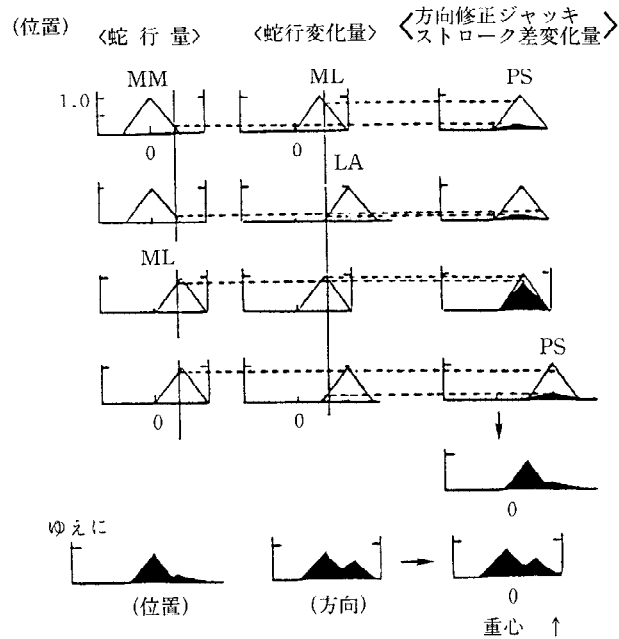


図-6 推論方法

めるジャッキストローク差変化量となる。

ファジィ推論と修正ジャッキストローク操作は、推進10cmごとに実施することとした。

(3) ジャッキストローク制御

小口径推進機の方​​向制御は、方向修正ジャッキにストローク差をつけることにより行っている。従来の手動操作ではオペレータが、方向修正ジャッキに取付けたストローク計(ワイヤー式)を見ながら油圧バルブを開閉し1～3mm程度のストローク調整を行っているが、現状の油圧系統およびストローク計の精度では1mmのストローク差制御は難しいといえる。

本システムではファジィ推論に対応する自動化および高精度化として、マイクロボード内蔵のサーボバルブと測定精度が $\pm 0.05\text{mm}$ の磁歪式ストローク計を採用した。各方向修正ジャッキのサーボバルブに内蔵しているマイクロボードは、姿勢制御用パソコンから送られたストローク差信号、磁歪式ストローク計からのストローク信号をフィードバックしながら、0.1mm単位で方向修正ジャッキを自動制御する。

3. 施工事例

(1) 工事および地質概要

開発した制御システムを、下水道推進工事(4スパン)のうち1スパンで適用して推進を行った。下水道推進工事の概要を次に示す。

工事内容：管 径：管内径 $\phi 800\text{mm}$
 管 種：ヒューム管
 工 法：泥水式推進工法
 推進延長：398.7m(4スパン)
 土 被 り：7.4～7.6m
 平面線形：直進
 勾 配：0.9‰
 発進立坑：2カ所
 到達立坑：3カ所

なお、今回の管径は800mmであり小口径管(800mm未満)ではなかったが、熟練オペレータに対するヒアリングにより、700mmと800mmとの推進機の動特性および方向修正制御方法がほぼ同じであるとの結果を得ている。そこで口径700mmの推進データをもとにシミュレーションを行い有効性を確認したシステムが800mmに適用できると判断した。

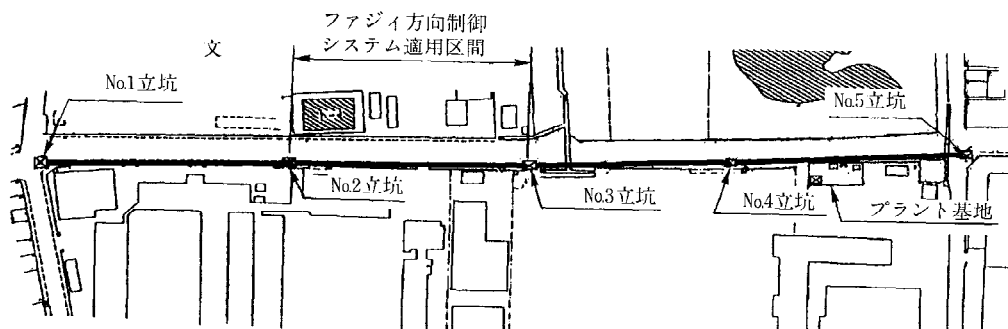


図-7 実験位置図

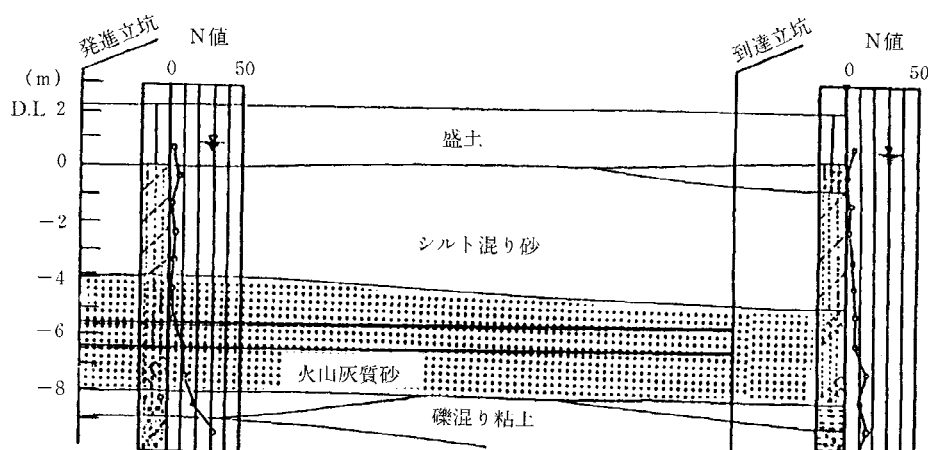


図-8 土質柱状図

実験位置を図-7に示す。本システムを適用して施工した区間は、立坑No.2～No.3の推進スパン107.9mである。

各立坑付近の調査ボーリング結果による地質柱状図を図-8に示し、土質条件を表-1に示す。

地質は、上部より盛土層、沖積の第1砂質土層、沖積の火山灰質砂層、沖積の第2粘性土層、沖積の第2砂質土層となっている。推進対象地盤は、火山灰質砂である。砂は微砂を主体とし粒子は均一であり、 $\phi 2 \sim 5$ mm程度の細礫が点在している。N値は10～20を示し、部分的に10以下を示している。

(2) 適用方法

推進1スパン目の立坑No.4～No.5区間で、従

表-1 土質条件

土粒子の真比重	G_s	2.430
地山の含水比	W	63.20%
地山の見掛け比重	γ_t	1.564
粒度構成	レキ	0%
	砂	28%
	シルト	54%
	粘土	18%

来の手動操作による推進を行い、蛇行量、制御操作量などデータを推進距離10cmごとに記録した。この収集したデータを基に、オペレータによる推進機の計画線へのすり付け修正区間を選びだし、ファジィ推論によるシミュレーションを行い、オ

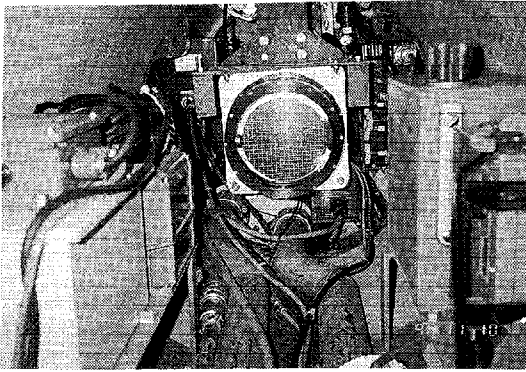
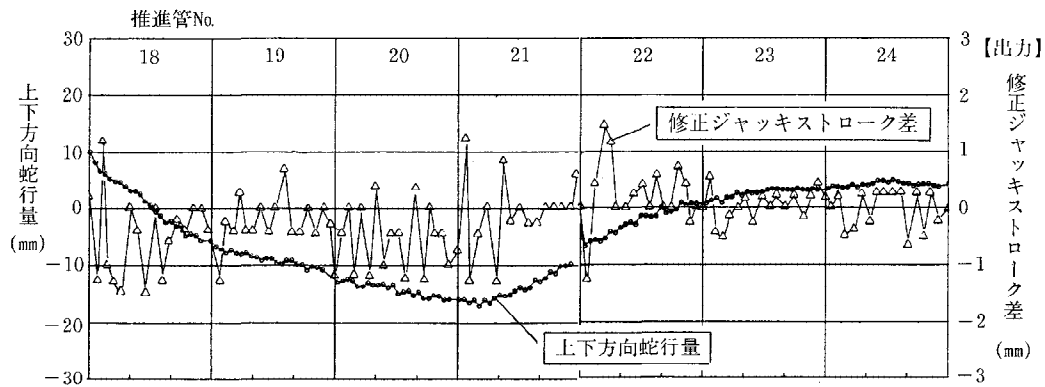
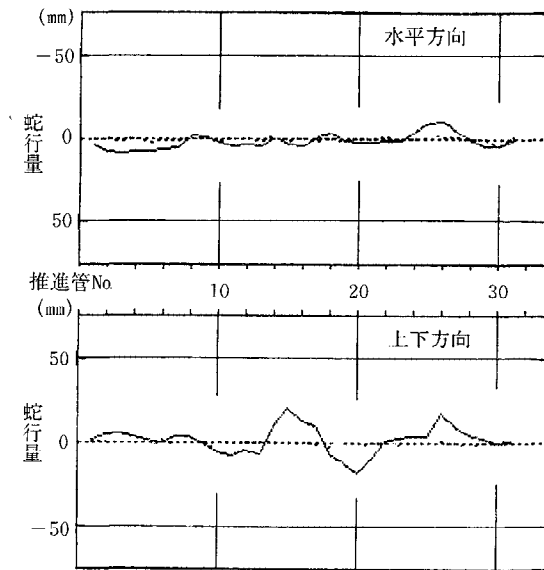


写真-1 計測システム推進機内取付状況



上下方向推進トレンド (管No.18~24)

図-9 推進ヒストリカルトレンド

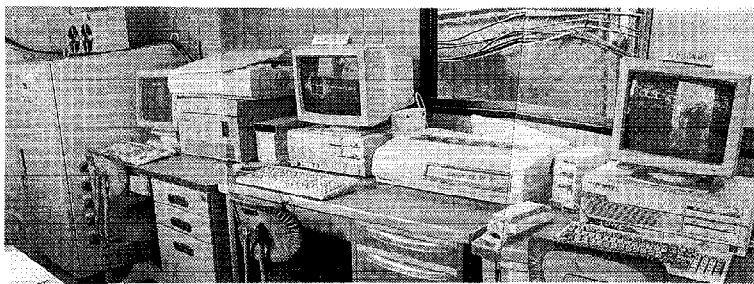


写真-2 中央管理室制御パソコン設置

ペレータ操作と比較し各メンバーシップ関数およびファジィ規則の適正を確認した。

次に推進3スパン目の立坑No.2～3区間で、ファジィ自動方向制御システムによる推進を行った。計測システム機器(レーザターゲットおよびジャイロユニット)を写真-1に示すように推進機内に取付けている。また、ファジィコントローラと各制御用パソコンは、地上の作業基地内の中央監視室に配置した(写真-2)。

(3) 適用結果

ファジィ自動姿勢制御による推進結果を図-9に示す。

蛇行量のトレンド結果は、開発目標値として設定した施工計画線からの偏位管理基準値「上下±30mm、左右±50mm」に対し、上下方向は±20mm以内、左右方向は±10mm以内と、熟練オペレータと同等の良好な制御推進結果が得られた。

18本目～24本目の区間で、蛇行とファジィ推論結果である修正ジャッキストローク差をみると、蛇行の修正に修正ジャッキをこまめに変更し、計画線に戻している。

なお、蛇行修正の場合、上下方向での推進機の動きは、重量の影響か上方から下方への移動は容易であり、計画線に対しオーバーシュートしやすい結果となった。

4. あとがき

今回開発したファジィ自動方向制御システムは、所定の推進性能を得られファジィ制御の有効性が確認できたが、さらに自動化として種々の土質に適用できるようにメンバーシップ関数を自動的に変更する学習機能が必要であると考えている。

5. 謝 辞

本研究を進めるにあたり、有用な助言を与えて下さった永田伸之日本大学教授、竹下貞雄立命館大学教授に感謝いたします。

また、研究に対し種々の協力をして下さった建設省土木研究所および西松建設の諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 杉山 篤、高津知司、小西 保、渡辺 徹：小口径推進機ファジィ方向制御システムの開発、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、pp.399～404、平成2年10月
- 2) 坪井広美、桑原資孝、磯 陽夫、渡辺 徹：小口径推進機ファジィ方向制御システムの開発、土木学会第46回年次学術講演会、第VI部、pp.198～199、平成3年9月

地下埋設施設の保全および事故防止対策

◎シートパイル打設による管路の損傷事例

状況

管路が2列以上になっていた、またはトラフの埋設位置が変わっていたため、一部だけ確認してパイル打ちを行いケーブルを損傷した。

要望事項

1. パイル打ちの場合は管路直埋式ケーブルなどを掘削してあらわし、箱抜き(ケーシング)して打込むのが望ましい。
2. 直埋式の場合は特に埋設位置が変化している場合が多いので、試掘をできるだけ多く行う。
3. 杭打ちは、管路および直埋式ケーブルから3cm以上離す。

