

掘削推進工法における方向制御の研究

金森 康継¹・根津 紀久雄²

¹正会員 博(工) 酒井重工業株式会社 技術研究所 (〒349-11 埼玉県北葛飾郡栗橋町大字高柳2626)

²工博 群馬大学教授 工学部機械工学科 (〒376 群馬県桐生市天神町1-5-1)

方向制御メカニズムに即したシミュレータによって自動制御の検討を行うことは有用である。本研究では、方向制御に関する1つの解析モデルを提案し、このモデルを基に開発したシミュレータを利用して、システム同定モデルとの比較、検討を行う。また、方向修正の自動制御システムとしてシーケンス、ファジィ、ニューラルネット駆動型ファジィ各制御方式を、シミュレーションを通じて比較する。

Key Words: *sequence control, neural network, fuzzy control, steering control system, small-diameter pipe excavation-thrust method*

1. はじめに

下水道は、従来は開削工法で布設されていたが、昨今の騒音、振動などの環境問題や交通障害などの社会情勢から推進工法の採用が多くなってきた¹⁾。

小口径管推進工法は、呼び径700 mm以下の埋設管に用いられる工法で、遠隔操作により方向制御を行いつつ掘削、推進して、管を布設する工法である。方向修正は、先導体と呼ばれる掘削装置の先端で行われる。

小口径管推進工法において、正確な掘削を行うためには、土質や推進機の状態に合わせた高度で複雑な機械操作を必要とするが、現状ではこの操作は熟練オペレータによる長年の経験と勘に頼っている。しかし、作業環境複雑化に伴うオペレータ育成の困難化、さらに熟練オペレータの高齢化による不足から、これからの下水道事業に対応できなくなる可能性も考えられる。このため、熟練していなくても方向修正を行える自動制御システムの開発が行われている。しかし、自動制御システムの開発においては実施工による確認試験を行うため、多大の工数と費用がかかるのが実状である。また、実施工において方向制御を行うと、必ず多少は管の蛇行が生じ、特に推進力に影響を及ぼしているはずであるが、土質のあいまいさ等を理由に方向制御についての検討が

なされていない。したがって、実施工前に実際の方向制御メカニズムに即したシミュレータによる自動制御方式の比較、あるいは検討を行えることは非常に有用である。

方向制御のシミュレータでは、システム同定によるもの^{2),3)}が提案されているが、この方式では多くの実施工データを用意してモデルの検討を行わないと、実際の管の挙動を再現することはかなり困難と考えられる。

本研究は、制御メカニズムを考慮した単純な解析モデルを基にシミュレータを開発し、システム同定モデルによる結果との比較を行うと同時に、方向修正における自動制御システムとして、シーケンス、ファジィ、ニューラルネット駆動型ファジィの各制御方式を、シミュレーションによって比較するものである。

2. 解析モデルによるシミュレーション

(1) 方向制御の概要

小口径管推進工法における二工程方式の概要を図-1に、先導体の概要を図-2にそれぞれ示す。

小口径管推進工法における二工程方式は、発進立坑内に設置した発進台で、キャリッジに固定された押し輪に、まず先導体を取り付け、推進シリンダー

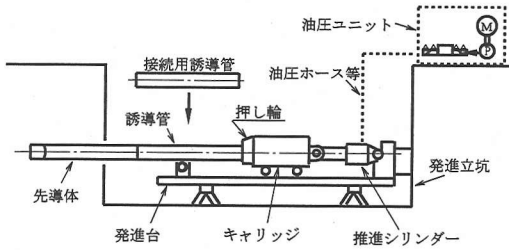


図-1 二工程方式の概要

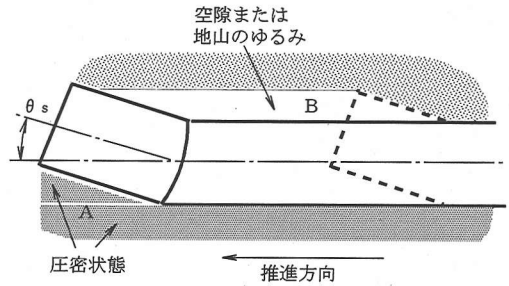


図-3 先導体周りの地盤状態

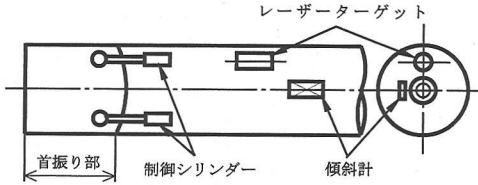


図-2 先導体の概要

を前方に伸ばして土中に埋設する。さらに誘導管を先導体と押し輪の間に取り付けて推進，同様に誘導管を継ぎ足していけば，たとえば数10 m先の到達立坑まで鋼管が埋設される。次に，ヒューム管を同様にして次々に押し込み，到達立坑で先導体，誘導管を回収すれば推進管路はヒューム管に埋め変わる。

先導体は，先端に取り付けられたカッターフードを球形座面で滑動支持する修正機構を有し，上下，左右各一对の複動油圧シリンダーにより方向修正をする。先導体が目標に向かって正確に掘進するために，レーザーターゲットと傾斜計により，それぞれ計測される先導体の位置と姿勢，すなわちずれ量とピッチングを確認しながら方向修正を行う。

(2) 解析モデルについて

a) 方向制御をかけてから方向変化が起きるまでの管の挙動

小口径管推進工法で，安定した地山において方向制御をかけた場合，その効果すなわち特になずれ量に変化が表れるのは，制御をかけ始めてから 2～4 m 推進後であることも多い。このような施工時の特徴的挙動を説明するために，以下に示すモデルを考えた。

1) 上向きに制御をかけた場合

今，先導体の首振り部を上向きに θ_s 傾ける方向制御をかけたとする。この状態で推進すると，図-3に示す空隙あるいは地山の緩みが先導体および後続管の上部に生じるはずである。この空隙部の長さ

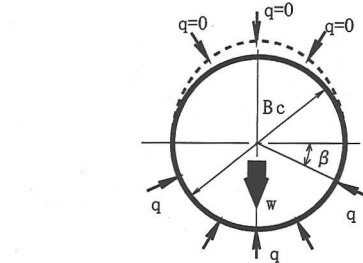


図-4 管にかかる等分布荷重

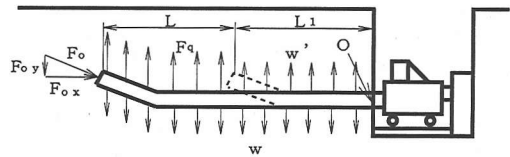


図-5 解析モデル (上方向制御)

える。この上向きの力は，図-4に示す管にかかる土圧による等分布加重 q の上下アンバランスにより生じるものとする。図-4において管の半径と直径をそれぞれ r , B_c とすると，単位長さあたりの管にかかる鉛直上向きの力 F_q は，

$$F_q = \int_0^\pi q r \sin \beta \, d\beta = 2rq$$

したがって， $F_q = B_c q$ となる。

方向変化に関係していると考えられる力を図-5の上向きに制御をかけた場合の解析モデルに示す。

ここに， w は単位長さあたりの管重量， w' は管自重に対する上向き支持力 ($w' = w$)， F は管が地盤に推進していくときに管の先端面に働く力 (貫入抵抗) であり， $F_{o,x}$ ， $F_{o,y}$ はその水平方向成分と鉛直方向成分である。

厳密には，首振り部は推進方向に対して θ_s だけ傾いているので，この部分における F_q は等分布荷重とは言えないが，首振り制御角 θ_s は最大で 3 度程度なので等分布荷重とみなす。

L_1 は制御をかけるまでに推進した距離で、 L_1 の部分では、管自重に対する上向き支持力、管自重、支持土圧による摩擦力と管周りの付着力による時計回りモーメントと反時計回りのモーメントがバランスしているものとする。 L を制御をかけ始めてから制御が効き始める(変位が生じる)までに推進した距離とすれば、 F_{qx} 、 F_{oy} によるO点まわりのモーメントが、 w 、 F_{oy} のO点まわりのモーメントに打ち勝つとき管は上がり始めることになり、次式が成り立つ。

$$F_q L \left[\frac{L}{2} + L_1 \right] - w L \left[\frac{L}{2} + L_1 \right] + F_{ox} \ell_o \sin \theta_s - F_{oy} (L_1 + L) = 0$$

変形して、

$$(F_q - w) L \left[\frac{L}{2} + L_1 \right] + F_{ox} \ell_o \sin \theta_s - F_{oy} (L_1 + L) = 0 \quad (1)$$

ここに、 ℓ_o : 首振り部の長さ

二工程方式と呼ばれる工法においては、先導体とこれに続く誘導管および誘導管どうしがボルト結合されており、最後部の管は管を押すための押し輪と結合されて発進台の上に乗せてある。この方式において推進距離が短い場合は、押し輪との結合部に反時計回りの支持モーメントが存在するため、モーメントの中心はこの結合部にある。しかし、推進距離が長くなると、坑口からある距離までの管周りの十分な支持力によって、モーメントの中心は移動するものと考えられる。本論文では、距離 L を求めるためのモーメントの中心を簡単のために坑口にあるとした。

2) 下向きに制御をかけた場合

下向きに制御をかけたときの解析モデルを図-6に示す。この場合も、上向きの場合と同様にモーメントのつりあいから次式で表せる。

$$F_q L \left[\frac{L}{2} + L_1 \right] + w L \left[\frac{L}{2} + L_1 \right] + F_{ox} \ell_o \sin \theta_s - F_{oy} (L_1 + L) = 0$$

変形して、

$$(F_q + w) L \left[\frac{L}{2} + L_1 \right] + F_{ox} \ell_o \sin \theta_s - F_{oy} (L_1 + L) = 0 \quad (2)$$

式(1)、(2)より、制御をかけてから効き始めるまでの推進距離 L を求めることができる。

図-7に制御をかけ始めてから方向変化が起こるまでの管の挙動すなわち、 dx だけ推進する間の挙動を示す。

図-7において、制御をかけてから方向変化が起こるまでの管の挙動として、距離 dx だけ推進したときのピッチング角変化量 $d\theta_p$ 、ずれ変化量 dy は次式

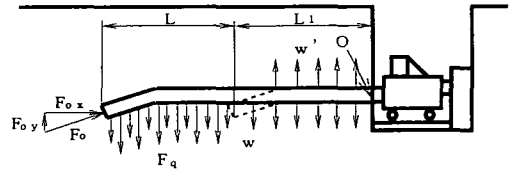


図-6 解析モデル(下方向制御)

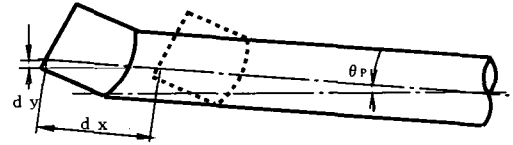


図-7 方向変化が起こるまでの管の挙動

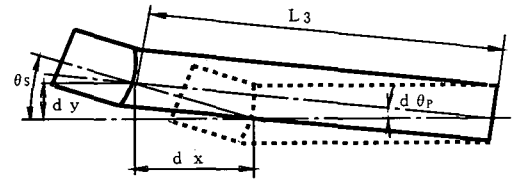


図-8 制御が効き始めてからの管の挙動

で表せる。

$$d\theta_p = 0 \quad (3)$$

$$dy = dx \sin \theta_p \quad (4)$$

ここに、 θ_p はピッチング角である。

b) 制御が効き始めてからの管の挙動

制御が効き始めてからの管の挙動、すなわち制御をかけてから L だけ推進した後の挙動を次のように考える。

図-3において、推進方向前面のA部が推進により圧密された状態となり、首振り部後方のB部は空隙または地山の緩みが生じて管が拘束されない状態となっているため、上部地盤にくい込んだ先導体首振り部は、首振り方向に進み始めるものとする。

図-8において、制御が効き始めると管は制御方向に進むようになるから、 dx 推進したときのずれ変化量 dy 、ピッチング角変化量 $d\theta_p$ は次式で表せる。

$$dy = dx \tan \theta_s \quad (5)$$

$$d\theta_p = \sin^{-1} \frac{dy}{L_3} \quad (6)$$

ここに、 L_3 は首振り中心から先導体最後部すなわち先導体と誘導管の結合部までの距離である。

図-9に首振り部が全て地盤に入り込み、制御が効き始めてからの挙動が終了した状態を示す。

図-9において、先導体首振り部より後方の部分の方が上方の地盤によって拘束されると考えられるため

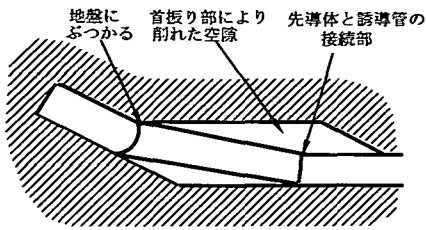


図-9 制御が効き始めてからの挙動が終了した状態

制御が効き始めてからの挙動は、制御角 θ_s の方向に首振り部が全て地盤に入り込んだとき終了するものとする。

ここで、制御が効き始めてからの距離 L_3 をどこからにするか、言い換えると制御が効き始めてから管はどこから曲がるのかという問題が生じる。もし、制御が効き始めてからの曲がり始める点を、a) 節で述べた方向制御をかけてから方向変化が起こるまでの管の挙動の中心すなわち、モーメントの中心 (O 点) として解析を行うと次の問題点が生じる。

i) 同じ首振り角度で同じ距離の推進を行ったとき、推進距離が大きくなるほどピッチング角度は小さくなることになるが、これでは実施工における事象と異なってしまう。

ii) L_1 の部分は等分布荷重により拘束されているので O 点から曲がり始めるとするモデルでの解析には問題がある。

iii) 先導体や誘導管は、それら自身には相当な剛性があり、それらをたわませるだけの固定モーメントを地盤が受け持つとは考えにくい。一方、管同士はボルトで接続されており、ここでの曲がりの蓄積が推進軌道の曲がりを生じさせていると考えるのが妥当であろう。したがって、先導体と誘導管の接続部を曲がり始めの点とした。

(3) シミュレーションの方法

解析によるシミュレーションでは、方向制御後に次に示す2つの状態が交互に現れると考えられる。

- ① 制御をかけてから制御が効き始めるまでの挙動
- ② 制御が効き始めてからの挙動

①の状態は制御をかけた地点から式(1)または式(2)で得られる L だけ推進しているときに現れる。 L 推進し終わると、②の状態に移る。②の状態は図-9に示したように、首振り部がすべて地盤に食い込んだときにこの状態が終了するとしたから、①のあと l 。(首振り部の長さ)だけ推進する過程を言う。ここで、首振り部の長さは $l = 0.4\text{m}$ とす

る。 0.4m 推進し終わると①の状態に移る。この状態変化を繰り返すものとする。この状態変化則と、①、②それぞれのずれ量とピッチングの差分方程式によりシミュレーションが可能になる。

(4) 差分方程式の導出⁴⁾

a) ①の状態における差分方程式の導出

①の状態でのずれ量とピッチングの差分方程式を求める。

1) ずれ量について

式(4)より推進距離 x において、

$$dy = dx \sin \theta_p(x)$$

k をサンプリングの回数として上式を差分化すると

$$y(k+1) - y(k) = \Delta x \sin \theta_p(k) \quad (7)$$

ここに、 Δx : サンプルングの間に推進する距離
また、ピッチング角 θ_p (rad) とピッチング p (%) には式(8)に示す関係がある。

$$p = 1000 \tan \theta_p \quad (8)$$

したがって、

$$\theta_p(k) = \tan^{-1} \frac{p(k)}{1000}$$

$$y(k+1) = y(k) + \Delta x \sin \left\{ \tan^{-1} \frac{p(k)}{1000} \right\} \quad (9)$$

2) ピッチングについて

式(3)により $d\theta_p = 0$

すなわち、ピッチングは変化しないので、

$$p(k+1) = p(k) \quad (10)$$

b) ②の状態における差分方程式の導出

②の状態でのずれ量とピッチングを計算するための差分方程式を求める。

1) ずれ量について

式(5)より、 $dy = dx \tan \theta_s$ 、

これを差分化すると

$$y(k+1) - y(k) = \Delta x \tan \{ \xi_s(k) \} \quad (11)$$

ここに、

$s(k)$: サンプルング回数 k のときの制御量

ξ : 制御量 (制御シリンダーのストローク) を制御角に変換するための係数

式(11)はピッチングがない状態で考えているが実際にはピッチングが存在しているため、ピッチングによるずれ量変化も考慮しなければならない。

したがって、制御をかけてからの全ずれ量は、式

(7) と式(11)の右辺を加えて式(12)となる。

$$y(k+1) = y(k) + \Delta x \tan \{ \xi_s(k) \} + \Delta x \sin \left\{ \tan^{-1} \frac{p(k)}{1000} \right\} \quad (12)$$

2) ピッチングについて

式 (5), (6) より,

$$d\theta_p = \sin^{-1} \frac{dx \tan \theta_s}{L_3}$$

これを差分化すると,

$$\theta_p(k+1) - \theta_p(k) = \sin^{-1} \frac{\Delta x \tan \{\xi_s(k)\}}{L_3}$$

したがって,

$$\theta_p(k+1) = \theta_p(k) + \sin^{-1} \frac{\Delta x \tan \{\xi_s(k)\}}{L_3} \quad (13)$$

$$p(k+1) = 1000 \tan \theta_p(k+1) \quad (14)$$

$$p(k) = 1000 \tan \theta_p(k) \quad (15)$$

となる。

c) 制御量の変化によるピッチングの変化について

②の状態にあるとき、ピッチングとずれ量はサンプリングごとに変化するの、当然制御量も変化する。首振り部以外の先導体の地山 (図-3におけるB部) が緩んでいると、制御量に変化しときにピッチングおよび、ずれ量も変化すると考えられる。この影響を考慮することにする。

図-10は、制御量の変化に伴うピッチング角の変化を先導体における中心線の移動で表したものである。

図-10において、首振り部 $\overline{CC_1}$ の一部が地盤に食い込んだ状態で制御量を $d\theta_s$ 変化させると、管は $C \rightarrow D$ に動き、首振り部は $\overline{DD_1}$ に移動するため O_0 を中心に $d\theta_p$ だけピッチング角が変化する。

$d\theta_s$, $d\theta_p$ ともに小さいと仮定し、制御量を変化させたときの中心を首振り部中央とする。

そうすると,

$$\overline{CD} = \frac{l_0}{2} d\theta_s$$

$$\overline{CD} = L_3 d\theta_p$$

より,

$$d\theta_p = \frac{l_0}{2L_3} d\theta_s \quad (16)$$

式 (16) を差分化すると,

$$d\theta_p(k) = \frac{\xi l_0}{2L_3} \{s(k-1) - s(k)\} \quad (17)$$

したがって、制御量の変化に伴うピッチングの変化を考慮すると、ずれ量の差分方程式は次式のようになる。

$$y(k+1) = y(k) + \Delta x \tan \{\xi_s(k)\} + \Delta x \sin \left[\tan^{-1} \frac{p(k) + \Delta p(k)}{1000} \right] \quad (18)$$

ここに,

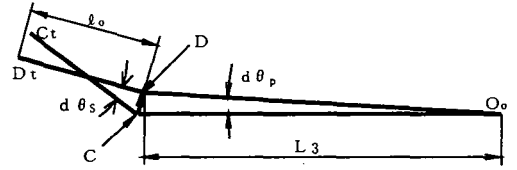


図-10 制御量の変化に伴うピッチング角の変化

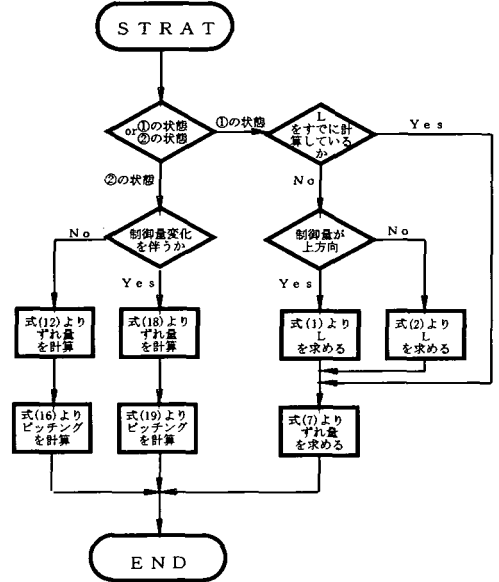


図-11 シミュレーション手順のフローチャート

$$\Delta p(k) = 1000 \tan \left[\frac{\xi l_0}{2L_3} \{s(k-1) - s(k)\} \right]$$

また、ピッチング角の差分方程式は次式となる。

$$\theta_p(k+1) = \theta_p(k) + \frac{\xi l_0}{2L_3} \{s(k-1) - s(k)\} + \sin^{-1} \frac{\Delta x \tan \{\xi_s(k)\}}{L_3} \quad (19)$$

(5) シミュレーションの手順

推進シミュレーションの手順を、図-11に示す。ただし、図中の①、②は次の状態をいう。

- ① 制御をかけてから制御が効き始めるまでの挙動
- ② 制御が効き始めてからの挙動

3. システム同定によるシミュレーション²⁾

実際の施工データから求めた制御角とピッチング変化量の関係を調べると、推進中の制御角とピッチング変化量には相関関係がない。このため、小口径管推進工法の方角制御にはこの他のさまざまなパラメータを使い総合的に制御量を判断する熟練オペレ

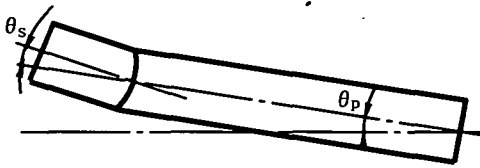


図-12 ピッチング角と制御角の定義

ータが必要であり、方向制御の自動化を困難にしている。熟練オペレータが制御の際に使うパラメータはさまざまあるが、ピッチング変化量の時系列項と制御角の時系列項に着目し、この時系列項を含めた動的モデルの同定を行う。制御角 θ_s 、ピッチング角 θ_p の定義を図-12に示す。

ピッチング角変化量 $\Delta\theta_p(k)$ はサンプリング回数を k とすると次のようになる。

$$\Delta\theta_p(k) = \theta_p(k) - \theta_p(k-1) \quad (20)$$

これを用いて動的モデルをつくると

$$\begin{aligned} \Delta\theta_p(k) + a_1\Delta\theta_p(k-1) + \dots + a_n\Delta\theta_p(k-n) \\ = b_0\theta_s(k) + b_1\theta_s(k-1) + \dots + b_n\theta_s(k-n) + e(k) \end{aligned} \quad (21)$$

ここに、 $\theta_s(k-n)$: 制御角

n : モデルの次数

$e(k)$: 残差

$a_1, \dots, a_n, b_0, \dots, b_n$: 係数

(1) 最小二乗法による係数の決定⁵⁾

式(21)の $\{\theta_s(i)\}$ 、 $\{\Delta\theta_p(i)\}$ ($i=0, 1, 2, \dots, M$) を観測して $a_1, \dots, a_n, b_0, \dots, b_n$ を決定する。ただし、 N はデータ数である。 $\{e(k)\}$ を測定されない観測雑音と考えると、これを除いた方程式が観測された入・出力信号に対してできる限り成り立つように係数を決定する。すなわち、これらの係数は最小二乗法を用いて次式により求める。

$$\alpha = [\Omega^T \Omega]^{-1} \Omega^T \Delta \theta \quad (22)$$

ここに、

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= [\Delta\theta_p(n), \Delta\theta_p(n+1), \dots, \Delta\theta_p(N)]^T \\ \alpha &= [-a_1, -a_2, \dots, -a_n, b_0, b_1, \dots, b_n]^T \\ \Omega &= \begin{bmatrix} \Delta\theta_p(n-1) & \Delta\theta_p(n-2) & \dots & \Delta\theta_p(0) & \theta_s(n) & \theta_s(n-1) & \dots & \theta_s(0) \\ \Delta\theta_p(n) & \Delta\theta_p(n-1) & \dots & \Delta\theta_p(1) & \theta_s(n+1) & \theta_s(n) & \dots & \theta_s(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta\theta_p(N-1) & \Delta\theta_p(N-2) & \dots & \Delta\theta_p(N-n) & \theta_s(N) & \theta_s(N-1) & \dots & \theta_s(N-n) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(2) 残差について

残差 $e(k)$ を次のように定義する。

$$e(k) = \Delta\theta_p'(k) - \Delta\theta_p(k) \quad (23)$$

ここに、 $\Delta\theta_p'$: 実施工によるピッチング角変化量
残差は、土質の不均一さや、突発的な土質の変化により生じるものと考えられる。

表-1 係数推定値

土質	細砂1	細砂2	シルト
a_1	-0.242	-0.089	-0.586
a_2	-0.017	-0.089	-0.050
a_3	-0.216	-0.070	-0.104
b_0	-0.079	-0.037	-0.019
b_1	-0.069	-0.071	-0.059
b_2	-0.064	-0.009	-0.014
b_3	-0.037	-0.005	-0.054
$e(k)$	$N(0, 0.00267)$	$N(0, 0.00108)$	$N(0, 0.00209)$

表-2 各土質の施工条件

土質	細砂1	細砂2	シルト
管径	$\phi 250$	$\phi 250$	$\phi 250$
N値	1	15	3
勾配	-3‰	3‰	-3‰
土被り	2.6m	3.5m	3.3m
推進距離	56.1m	36.4m	25.8m

シミュレーションにおけるモデルの次数を3とし式(22)から3種類の実施工データより係数を推定すると表-1のようになった。

表-1の $e(k)$ は、求めた係数を式(21)に代入して $\Delta\theta_p(k)$ を求め、さらに式(23)より求めた $e(k)$ の分布図を、 σ を標準偏差とする標準正規分布 $N(0, \sigma)$ に近似したものである。各土質の施工条件を表-2に示す。

(3) シミュレーションの手順

1 サンプリング後のピッチング、ずれ量はそれぞれ次式で示される。

$$\theta_p(k) = \theta_p(k-1) + \Delta\theta_p(k) \quad (24)$$

$$y(k) = y(k-1) + \Delta x \sin\{\theta_p(k)\} \quad (25)$$

ここに、 $y(k)$ はサンプリング回数 k 番目のときのずれ量であり、 $\Delta\theta_p(k)$ は式(21)より求める。

式(24)、(25)から、それぞれ1サンプリング後のピッチング角、ずれ量が計算できるのでシミュレーションが可能となる。

4. 制御システム

(1) 手動制御

手動制御の場合、掘進中先導体が目標に向かって正確に掘進するためには、コンピュータ画面に表示される先導体の位置と姿勢、すなわちずれ量とピッチングを連続的に確認しながら方向修正を行う。

表-3 ずれ量と制御量の関係

ずれ量 $Z (10^{-3}m)$	制御量 S
$Z < -12$	$S = 1$
$-12 \leq Z < -8$	$S = 3/4$
$-8 \leq Z < -4$	$S = 1/2$
$-4 \leq Z < -2$	$S = 1/4$
$-2 \leq Z < 2$	$S = 0$
$2 \leq Z < 4$	$S = -1/4$
$4 \leq Z < 8$	$S = -1/2$
$8 \leq Z < 12$	$S = -3/4$
$12 < Z$	$S = -1$

(2) シーケンス制御

シーケンス制御方式は、上下、左右のずれ量より修正量を判断し、上下と左右の方向修正シリンダーにおける修正量を、1/4, 1/2, 3/4, 4/4の4通りの制御量として出力させるものである。

シーケンス制御方式における上下、左右のずれ量と制御量の関係を表-3に示す。

(3) ファジィ制御^{9),7)}

ファジィ制御方式では、方向制御の判断部分をファジィ推論で行う。具体的には、方向制御に関する専門家の知識や経験をルールの形で記述して、コンピュータが人間のエキスパートのように推論して結論を得る方式であり、推論演算にはMax-Min 論理積出力決定には重心法を用いた。

熟練オペレータへのアンケートの結果、制御量を定める際のパラメータには、上下方向についてはずれ量とピッチングの値とし、これらをもとにメンバーシップ関数 (M. F.) と規則表を作成した。

本シミュレーションでは、図-13, 14, 15 および表-4を用いた。ただし、NL, NM, NS, ZR, PS, PM, PLはそれぞれ、Negative Large, Negative Medium, Negative Small, Zero, Positive Small, Positive Medium, Positive Largeを意味する。推論演算の過程を図-16に示す。

今、ルール R_1 : if ずれ量 = NS and ピッチング = NL, then 制御量 = PMで、ルール R_2 : if ずれ量 = NL and ピッチング = NS, then 制御量 = PL (ただし、表-4では if ずれ量 = NL and ピッチング = NS, then 制御量 = PMである) とする。

図-16におけるルール R_1 においてずれ量= X_1^0 かつピッチング= X_2^0 なる入力が入ってきたとすると、 X_1^0 のグレードとNS集合のグレードとの論理積、 X_2^0 のグレードとNL集合のグレードとの論理積をとる。さらに、ずれ量とピッチングとの論理積

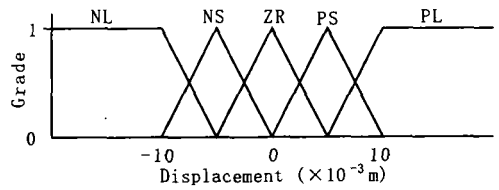


図-13 上下のずれ量についてのM. F.

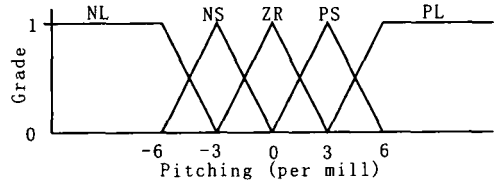


図-14 ピッチングについてのM. F.

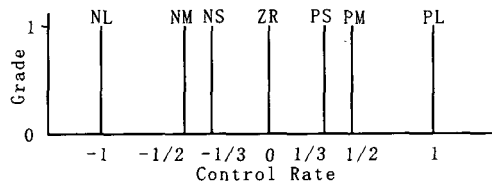


図-15 上下方向の制御量についてのM. F.

表-4 上下方向の制御規則

	ピッチング					
	NL	NS	ZR	PS	PL	
ずれ量	NL	PL	PM	PS	ZR	ZR
	NS	PM	PS	PS	ZR	ZR
	ZR	PM	PS	ZR	NS	NM
	PS	PS	ZR	NS	NS	NM
上下	PL	PS	ZR	NS	NM	NL

をとると、PM'が決まる。ルール R_2 においても同様にPL'が決まる。これらの論理和をとって合成すると、制御量は図に示すようになる。これを重心法によって非ファジィ化すると、制御量の出力 y^0 が決まる。

(4) ニューラルネット駆動型ファジィ制御^{9),9)}

ファジィ推論にはチューニングの問題がある。ニューラルネットワークの学習機能を駆動させることによりチューニングが可能なニューラルネット駆動型ファジィ推論が提案されている。ニューラルネット駆動型ファジィ制御は、ファジィ制御で用いるif ..., then...形式の推論ルールによりモデルを構成するため熟練オペレータの経験則を取り入れることができ、かつ学習性を用いることでより適応土質の

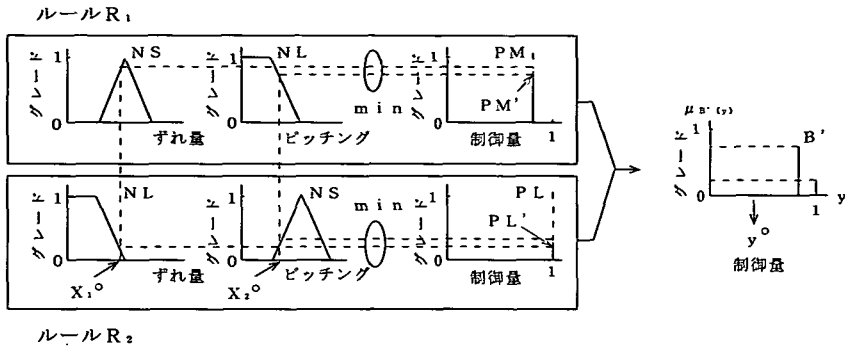


図-16 上下方向制御における推論演算の過程

広がる可能性がある。本制御方式において、上下の場合の入力は、上下ずれ量とピッチングの2変数とし、左右の場合、左右ずれ量の1変数とした。上下方向の場合、実施工データにおけるずれ量とピッチングに対する制御量を調べると、ずれ量とピッチングがともに正、ずれ量とピッチングがともに負のときの制御出力が多いため、ずれ量とピッチングに対する制御量の入出力データを2分割した。このときずれ量とピッチングに対する入力変数を x_{11} , x_{12} に、これらに対する出力を y に設定して前件部の同定を行った。また、前件部のファジィ数のメンバーシップ値は誤差伝播学習モデル3層 [2×2×2] すなわち、入力層2、中間層2、出力層2の各ユニット数を用いて決定した。制御量の推定値 y_i^* は入力データ x_{11} , x_{12} に対する学習後の推定値 $e y_i$ より、シングルトンの式(2.6)で求めた。

$$y_i^* = \frac{\sum_{s=1}^M \mu_{A_s}(x_{11}, x_{12}) x e y_{is}}{\sum_{s=1}^M \mu_{A_s}(x_{11}, x_{12})} \quad (i=1, \dots, M) \quad (2.6)$$

ただし、 μ_{A_s} : 各推論ルールにおけるメンバーシップ値
 $e y_{is}$: 後件部の推定値

5. シミュレーションの結果と考察

(1) シミュレーションの結果

解析モデルに用いた土質条件は、土の単位体積重量: 1.8tf/m³, 土の粘着力: 0.5 tf/m², 土の内部摩擦角: 20° のシルト層とし、土被り: 6m の位置に外径 360mmの管を推進するものとして、この時の管にかかる等分布荷重1.0tf/m²をテルツァギーの土荷重の式等により計算して用いた^{10), 11), 12), 13), 14)}。

シミュレーションは2章、3章でそれぞれ導いた解析モデルとシステム同定モデルによる上下方向の

シミュレータを用い、制御方式は、4章で示したファジィ、ニューラルネット駆動型ファジィ、およびシーケンスによる3種類の自動制御で行い、さらに解析モデルでは実際の施工に携わっている熟練オペレータによる手動制御も行った。

どちらのモデルでも、初期条件として、ずれ量 = -15mm, ピッチング = 0%とし、各制御方式におけるサンプリングは0.1mごとに行なった。

解析モデルによるシルト層でのシミュレーション結果を図-17~20に、同定モデルによるシルト層でのシミュレーション結果を図-21~23に示す。また、同定モデルによる細砂1でのファジィ制御によるシミュレーション結果を図-24に、ニューラルネット駆動型ファジィ制御によるシミュレーション結果を図-25に示す。

図中の制御量とは制御角を無次元化した値で、1および-1でそれぞれ上方向、下方向に最大の制御をかけることを意味する。また、図中のN.F.はニューラルネット駆動型ファジィ制御(neural network driven fuzzy control)の略号である。

解析モデルにおけるずれ量、ピッチングおよび制御量の分散値を表-5に示す。

(2) 考察

a) 解析モデルにおける制御方式の比較

図-20に示す手動制御の場合、熟練オペレータは下15mmという大きなずれ量に対してできるだけ早く計画線に戻したいため、初めから大きく制御をかける、戻り始めたのを確認して、今度は蛇行を生じさせないため、徐々に制御量を小さくしているが、それでも4mm程度計画線より上に行き過ぎを生じさせていることが分かる。

図-19におけるシーケンス制御の場合、手動制御と比較すると、大きいずれ量に対して大きな制御をかけすぎる傾向があり、このため手動制御よりも

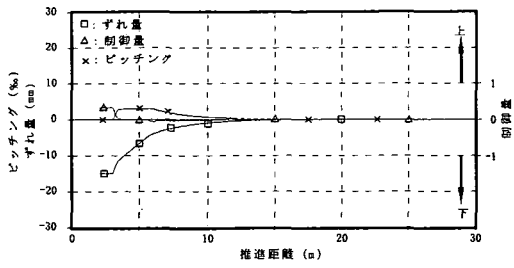


図-17 解析モデルのファジィ制御によるシミュレーション結果 (シルト)

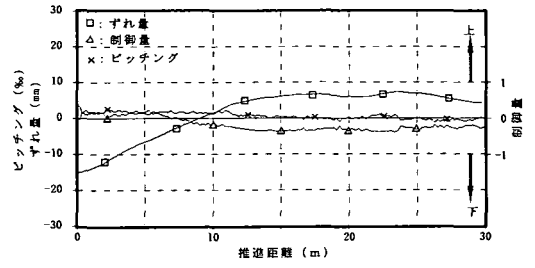


図-21 同定モデルのファジィ制御によるシミュレーション結果 (シルト)

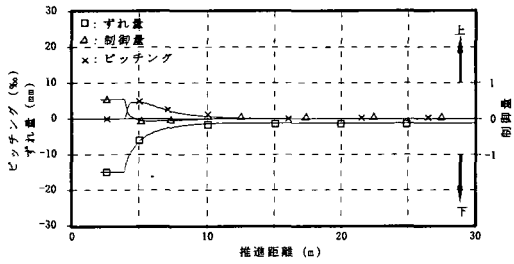


図-18 解析モデルのN.F.制御によるシミュレーション結果 (シルト)

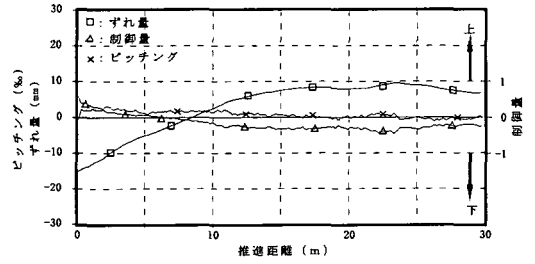


図-22 同定モデルのN.F.制御によるシミュレーション結果 (シルト)

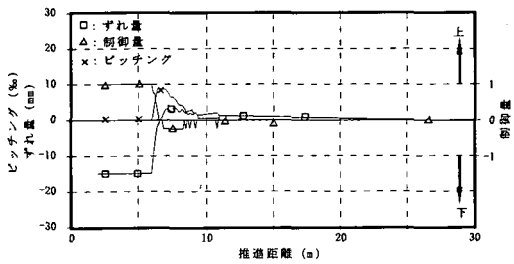


図-19 解析モデルのシーケンス制御によるシミュレーション結果 (シルト)

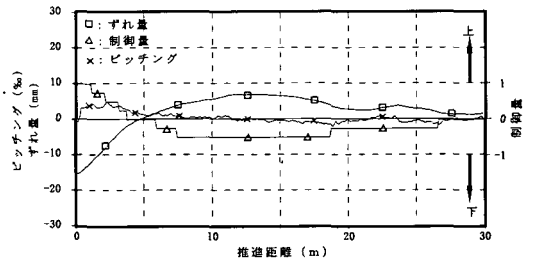


図-23 同定モデルのシーケンス制御によるシミュレーション結果 (シルト)

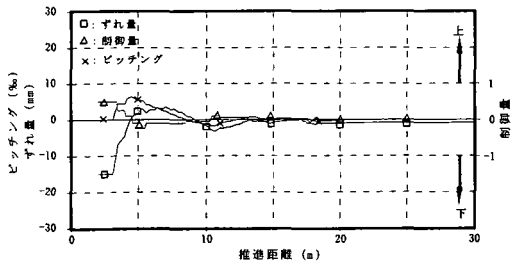


図-20 解析モデルの手動制御によるシミュレーション結果 (シルト)

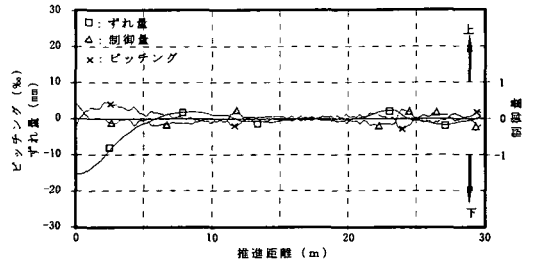


図-24 同定モデルのファジィ制御によるシミュレーション結果 (細砂1)

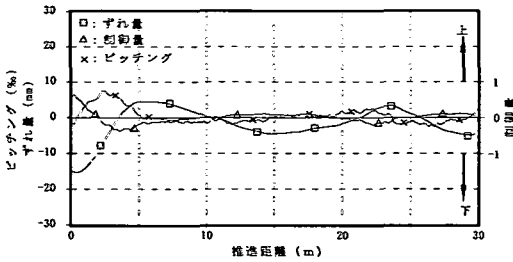


図-25 同定モデルのN.F.制御によるシミュレーション結果(細砂1)

表-5 解析モデルの分散値

制御方式	ずれ量	ピッチング	制御量
ファジィ	10.1	0.944	0.025
N. F.	8.08	1.53	0.010
シーケンス	31.98	3.61	0.137
手動	12.1	2.7	0.017

急激に上に戻ると同時に、ピッチングにも急激な変化が生じてしまうため、良好な施工品質とは言えない。これらの理由からシーケンス制御は、蛇行を生じやすい制御方式と考えられる。図-17, 18におけるファジィ制御、ニューラルネット駆動型ファジィ制御では、行き過ぎ量が少なく良好に制御されている。特に、表-5において、両方式ともずれ量およびピッチングの分散が小さく、良好な施工品質と言える。また、ファジィ制御、ニューラルネット駆動型ファジィ制御では、行き過ぎ量が少なく、10m付近までにゆるやかに計画線に戻ることから、シーケンス制御と比較して蛇行を生じにくい制御方式であると考えられる。

b) 同定モデルにおける制御方式の比較

解析モデルと同じシルト層の場合、図-21, 22, 23における、ファジィ制御、ニューラルネット駆動型ファジィ制御、シーケンス制御は同じような傾向で収束した。ニューラルネット駆動型ファジィ制御はずれ量がやや大きい、ピッチングの変化が小さいので施工品質には悪影響を及ぼさないと考えられる。

細砂1の場合、図-25に示すニューラルネット駆動型ファジィ制御は、図-24に示すファジィ制御と比較すると推進距離5m付近と14.5mで上下方向にそれぞれ約5mmのずれを生じており、ファジィ制御が推進距離8.6mと22.4mで上へ2mmしかずれていないのと比べて若干ずれが大きい、両方式とも良好な制御出力と言える。

細砂2の場合、すべての制御方式で発散してしまい、制御不能となった。特に、シーケンス制御の場

合は土質が砂になると他方式に比べて極端に発散してしまった。

c) 解析モデルの検討

制御をかけてから制御が効き始めるまでの遅れは考慮することができた。また、シミュレーションによって各制御方式の特徴を表すことができた。このことより、管重量、貫入抵抗、管にかかるモーメントの釣り合いを基にした解析モデルはシミュレータのモデルとして使用できると考えられる。今回は単純なモデルを用いたが、より厳密なモデルを作成し土質の不均一さや突発的な土質の変化を考慮できれば実施工により近いシミュレータを作成することができると考えられる。

d) 同定モデルの検討

砂層あるいは滞水砂層では、切羽部の取り込みすぎにより生じた空隙、または水による浮力が原因で制御不能となることもあり、一般にシルト層の方が細砂より制御しやすい。シルトではファジィ制御、ニューラルネット駆動型ファジィ制御およびシーケンス制御が同じような施工品質になることから、本論文で用いた同定モデルはこの一般的傾向を表しており、ある程度地盤中における管の挙動を表現していると考えられる。

問題点は以下ようになる。

本シミュレーションにおける動的モデルのずれ量は式(25)より、

$$y(k+1) = y(k) + \Delta x \sin\{\theta_p(k)\}$$

すなわち、ピッチングが正の時にはずれ量が常に増加する。ところが、実施工ではピッチングが正にもかかわらずずれ量が増加しないことや、ピッチングが負にもかかわらずずれ量が減少しないこともよく見られる現象である。これはおもに先導体周りの土圧バランスによると考えられるが、この特徴をこのモデルでは表せない。また、同定に用いるデータ数もモデルの精度に影響する。以上の理由から、同定モデルで実際の地盤をシミュレートすることはかなり困難であると考えられる。

e) 解析モデルと同定モデルの比較

一般に、小口径推進工法においては、上下方向±30mm、左右方向±50mmの精度が要求される。この精度を確保するため先導体の先端において方向制御を行うが、安定した地盤での実施工においては管の周囲が土圧で拘束されていること等から、方向制御をかけてから効き始めるまでに遅れを生じる。すなわち、方向制御をかけても現在のピッチング角とずれ量を保ったままある距離進みその後方向修正した方向に変位し始める。

この点に着目すると、図-17~20からわかる

ように解析モデルはこの現象を考慮することができる。一方、同定モデルでは式(25)より、方向制御によりピッチング角が変化すると同時にずれ量も変化するので、この現象を表現するのはかなり困難だと考えられる。

f) 各制御方式の検討

シーケンス制御は、ある程度特定の土質に関しては良い施工品質を期待できるが、突発的な土質の変化に対応できない可能性がある。したがって、かなり狭い範囲の土質にしか対応できない。以上の結果を総合的に判断して、本研究の土質条件においては実施工に適用した際に良い施工品質が期待できる方式は、ファジィ制御とニューラルネット駆動型ファジィ制御であると考えられる。

6. 結論

(1) 解析モデルは実施工における現象を考慮でき、小口径推進工法における方向制御のシミュレータとして用いることが可能である。

(2) 今回は単純な解析モデルを用いたが、土質の変化を考慮したより厳密なモデルを作成できれば、実施工により近いシミュレータを作成できると考えられる。

(3) 小口径推進工法の方向制御において、本研究の土質条件においては、実施工に適用した際に良い施工品質が期待できる制御方式は、ファジィ制御とニューラルネット駆動型ファジィ推論を用いた制御であることが確認された。

参考文献

1) (社団法人)日本下水道協会:下水道協会誌, Vol. 30, No. 351, pp. 4~17, 1993年2月.

- 2) 青島, 藪田, 武村: 小口径トンネルロボットのダイナミックモデル推定, 第7回日本ロボット学会学術講演会, 1989年11月.
- 3) 青島, 武田, 藪田: 小口径トンネルロボットのファジィ方向制御, 第8回日本ロボット学会学術講演会, 1990年11月.
- 4) 森下, 上野: デジタル制御工学, オーム社, pp. 57~70, 1991年4月.
- 5) 相良, 秋月, 中溝, 片山: システム同定, 計測自動制御学会, pp. 75~79, 1983年8月.
- 6) 本多, 大里: ファジィ工学入門, 海文堂, pp. 136~166, 1991年4月.
- 7) 林, 桑原, 蔵持, 竹内, 背野: 土木施工技術へのファジィ理論の応用—トンネル掘削機の制御を中心に—, 日本ファジィ学会誌, Vol. 2, No. 3, pp. 340~351, 1990年8月.
- 8) 八名, 鈴木: ニューロ情報処理技術, 海文堂, 1992年4月.
- 9) 林, 野村, 若見: ニューラルネット駆動型ファジィ推論による推論ルールの獲得, 日本ファジィ学会誌, 1990年11月.
- 10) 日本推進工法協会編: 推進工法講座, 日本推進工法協会, 1988年.
- 11) 最上武雄監修, 松尾稔, 富永眞生: 土圧, 鹿島出版会, pp. 111~124, 1975年.
- 12) Brooker, E. W. and Ireland, H. O.: Earth pressure at rest related to stress history, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 1~15, Feb., 1965.
- 13) 石原研而: 土質力学, 丸善, pp. 231~253, 1988年.
- 14) 箭内寛治, 浅川美利: 土質工学, 彰国社, pp. 202~206, 1991年.

(1994. 9. 27受付)

A STUDY OF AUTO STEERING CONTROL METHOD IN THE SMALL-DIAMETER PIPE EXCAVATION-THRUST METHOD

Yasutsugu KANAMORI and Kikuo NEZU

In the small-diameter pipe excavation-thrust method, the judgement in the operation is dependent on the experience of skilled operators. Therefore, it is necessary to improve the control system and to examine the auto steering control method. The purposes of this study are, to propose a simple analysis model according to direction control mechanism, to compare this analysis model with system identification for time-series model and to examine on accuracy the auto steering control methods, the sequence, the fuzzy, and the neural network driven fuzzy controls by means of the simulation.