土木学会論文集 No. 459／I-22, pp. 139~148, 1993. 1

異なる地盤条件におけるシールド機の方向制御モデルとその適用結果

酒井邦登*・星谷　勝**

シールド機の方向制御には，地中を掘進するシールド機の挙動に関する適切なモデル化が重要となる．著者らは，シールド機の挙動予測には時系列データに用いる自己回帰式を用い，偏心モーメントとシールド機の方向変化の物理的関係には回帰式を用いたモデル化を提案した．異なる地盤条件でのシールド機の挙動計測結果をもとに，挙動予測モデルと制御モデルとのパラメータ同定結果と地盤条件の関係を検討した結果，挙動進行および制御量ともに地盤条件と良い相関を示すことが分かった．

Keywords : *driving shields, ground condition, feedback prediction control, modelling, Kalman filtering theory*

1. まえがき

シールド機を誘導するためには，測量結果より計画路線からの偏差を求め，この偏差を無くすようなシールド機の方向制御が必要となる．方向制御にあたっては，シールドジャッキを不均等に使用し，偏心モーメントを発生させる方法が一般的である．曲線部では，コピーカッタ等により余掘りすることで，計画路線に強制的に誘導することが多い．最近では，シールド機本体が数分割され，中折れ機構により本体を折り曲げて，曲線部での掘進能力および精度を向上させるものが使用されている．この方式では，中折れ角度の調節が重要な制御要因となる[1]．しかし，リアルタイムに制御できるのは，ジャッキパターンによる偏心モーメントだけであることから，本論文では，ジャッキパターンによる偏心モーメントを受けるシールド機の挙動について考察するものとし，他の要因による挙動は除外するものとした．

シールド機の制御のように実際の問題には対象システムのモデル化が必要である．実際の現象に近づけるにはモデルの複雑化，操作性の向上にはモデルの簡単化が同時に要求されるため，基本的にはモデルの複雑さと簡単さとを考慮して適切にモデル化することが肝要である．

目的に応じた適切なモデルを構築するためには，2つのアプローチがある[2]．その1つは，システムの内部構造を理論的裏付けのもとに作る物理モデルあるいは機械論的モデルである．もう1つは，システムの構造が大規模かつ複雑で理論的根拠が明らかでない時は理論的アプローチが不可能であるため，システムの入力と出力のみの関係から，構造をブラックボックスとして使用する統計的モデル[3]である．

上述のモデル化の考え方によれば，シールド機の挙動は単純なシールド機の挙動予測モデルと偏心モーメントを与えた時のシールド機の方向制御モデルの2つのシステムに分けるのが適切である．著者らは，シールド機の挙動予測を時系列データに用いる自己回帰モデルにより行い[4]，方向制御は偏心モーメントとシールド機の方向変化の物理的関係を用いてモデル化した[5]．実際には，両モデルのパラメータを時々刻々と得られる計測データに基づいて逐次修正する必要があるため，シーケンシャルにデータを取込みながら，その最適推定値を逐次修正することのできる近代制御理論の1つであるカルマン・フィルタ理論[6,7,8,9]を適用して高速，高精度に処理している．したがって，システムの同定と制御を同時に実施し，システムの制御性能を逐次改善できる適応制御となっている[10,11,12]．

両モデルとも確定論的に精密なモデルとはかぎらないが，実用に供して問題なく制御が行われている．これは，予測と制御を短時間のうちに繰返し実行することを前提としており，短いインタバルで繰返し使用されるモデルは複雑でなくても十分に要求に応えてくれるためであろう．このようなことから，未だに実際の挙動計測結果をもとにしたモデルの評価がなされておらず，モデル化についての追求が進んでいない．実際には既に数多くのシールド自動制御の例があるため，地盤工学的見地からもモデルについて検討を進めることができると考えられる．

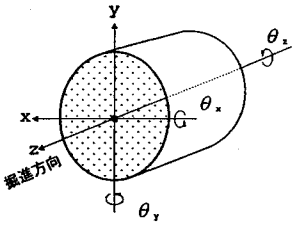
そこで，本論文では，異なる地盤条件のもとで施工されたシールド工事の挙動計測結果をもとに，シールド機の挙動予測モデルおよび偏心モーメントによる制御モデルの妥当性を検証した．また，システムのパラメータ同定結果と地盤条件とを考慮して，比較・検討した．

その結果，シールド機の挙動は時々刻々と得られる計測データより自己回帰モデルを用いて精度良く予測でき，

*正会員 東急建設株式会社技術本部土木技術部
（〒150 東京都渋谷区渋谷1-15-21 ポーラ渋谷ビル8F）
**正会員 Ph. D. 武蔵工業大学工学部土木工学科教授

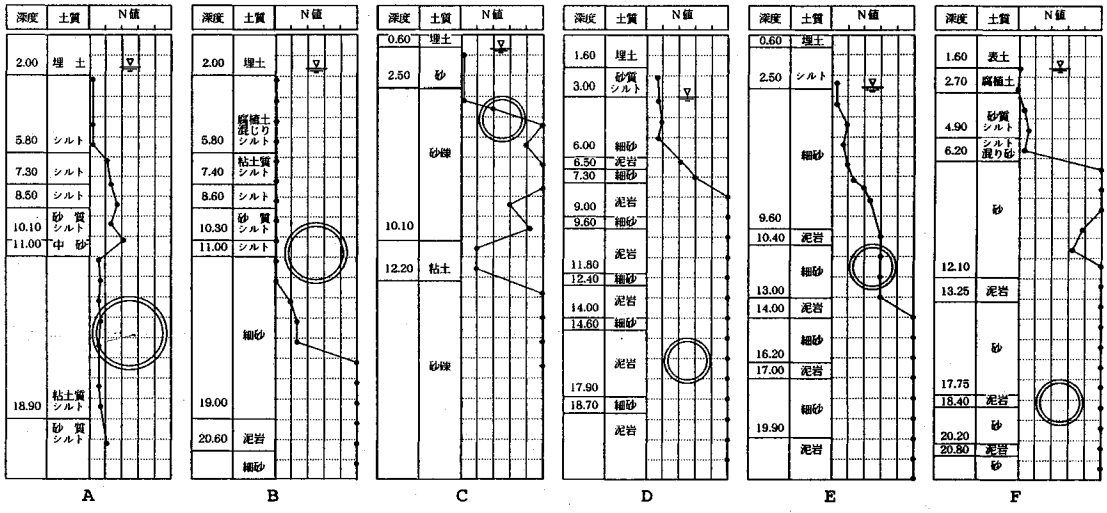
表－1 現場条件一覧表

計測現場			A	B	C	D	E	F
トンネル用途			下水道（汚水幹線）	下水道（汚水幹線）	下水道（雨水幹線）	下水道（汚水幹線）	下水道（汚水幹線）	上水道
マシン	シールド機種		土圧式	土圧式	土圧式	土圧式	土圧式	泥水式
	中折れ装置		有	有	有	有	無	無
	ジャッキ	(本)	12	12	8	8	8	8
断面	マシン外径	(mm)	3,680	3,080	2,280	2,130	2,130	2,130
	マシン全長	(mm)	5,175	4,990	4,305	4,050	4,000	4,080
	セグメント外径	(mm)	3,550	2,950	2,150	2,000	2,000	2,000
	セグメント内径	(mm)	3,250	2,700	1,844	1,844	1,844	1,850
線形	延長	(m)	877.3	851.1	868.9	899.9	895.2	1207.0
	勾配	(‰)	－1.20	－1.00	－1.30	－5.00	－1.40	24.47



x：水平位置偏差
y：鉛直位置偏差
z：掘進距離
θ_x：ピッチング
θ_y：ヨーイング
θ_z：ローリング

図－1 シールド機の位置・姿勢



図－2 シールド機の挙動計測地盤条件

挙動の進行状況は切羽地盤のN値や変形係数と非常に良い相関を示すことが分かった．

また，ジャッキパターンによる偏心モーメントを受けた時のシールド機の挙動についても，偏心モーメントと方向変化量との変換係数は切羽地盤のN値や変形係数と良い相関を示すことが分かった．

2. 施工条件

(1) 現場計測概要

シールド自動制御の実測データは，昭和61年以降に施工された比較的小口径で，できるだけ異なる地盤条件で収集された6現場分を整理して用いるものとした．シールド機の位置・姿勢は図－1に示すように6成分からなっており，自動制御のためには，これらすべてを計測する必要がある．

水平偏差に関してはジャイロコンパスによる角度変化とジャッキストロークによる掘進距離を乗じて算出し，鉛直偏差については，差圧式沈下計を用いて計測した．計測器の分解能としては，ジャイロコンパスで0.01度，ジャッキストロークで1mm，差圧式沈下計で0.5mmであった．また，ピッチングとローリングは重力加速度計を用いて計測し，その分解能は0.05度であった．

(2) 地盤条件

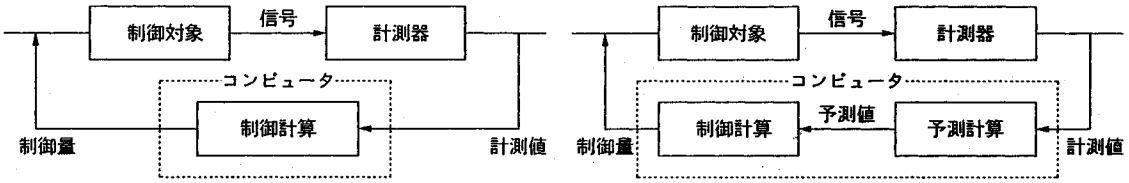
現場条件の一覧を表－1に示す．計測のインタバルは掘進5cmにつき1回とした．制御手法は，直線・曲線の線形を問わず適用可能であるが，曲線部についてはジャッキパターン以外にも方向を制御する要素が多い．本論文では，ジャッキパターンによる方向制御のみを扱うため，全路線について実施した挙動計測結果のうち曲線部は除外し，直線区間だけを検討材料とした．

シールド機の方向制御を実施した地盤柱状図を図－2に示す．地盤の柱状図は，計測区間での標準的断面とした．

3. シールド位置の予測結果

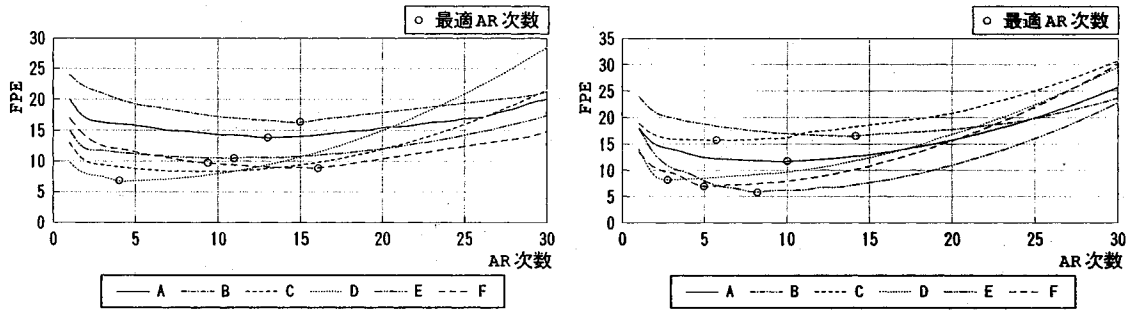
(1) 予測の必要性

シールド機の挙動のように複雑で大規模なシステムを取扱う場合，効率的な制御系の設計が重要となる．計測結果をもとにした制御によるシールド機の自動誘導のた



(a) フィードバック制御　　(b) フィードバック予測制御

図－3 制御の基本形



(a) 水平偏差のFPE　　(b) 鉛直偏差のFPE

図－4 FPE計算結果

めには，外乱のもとでも安定性の高いフィードバック制御が効果的と考えられる．しかし，フィードバック制御は目標値の変化に対しては，どうしても応答が遅れる欠点がある．現実には路線線形に関しては，計測結果に基づいて制御計算を行い，実際に制御の動作に至るには相当の時間を要するため，リアルタイムにシールド機の位置・姿勢を認識するだけで，シールドの掘進に制御が追随できていないことが多い．

そこで，シールド機の位置・姿勢を定量的に予測すれば，予測結果に基いた制御ができるようになり，制御の動作に至るまでの時間を見かけ上，短縮することで制御遅れを解消できる．このような制御をフィードバック予測制御と呼んでいるが，シールドトンネルの線形精度を向上させるためには，シールド機の挙動予測が前提条件として要求される．

図－3にコンピュータを用いた制御の基本形を示す．

(2) 予測モデル

シールド位置の計画線形からの偏差を水平および鉛直座標に分離して，掘進距離を時間軸とする時系列データとして扱い，統計的予測を行うこととした．

統計的予測にはAR(autoregressive：自己回帰)モデルを数式モデルに採用し，基本式は式(1)，(2)に表現される．

$$x_t=\sum_{i=1}^{F}\alpha_i\cdot x_{t-i} \quad \cdots\cdots(1)$$

$$y_t=\sum_{i=1}^{F}\beta_i\cdot y_{t-i} \quad \cdots\cdots(2)$$

ここに，$x_t(y_t)$：掘進距離t(mm)での計画路線からの水平(鉛直)方向偏差(mm)，$\alpha_i(\beta_i)$：水平(鉛直)方向AR係数，F：自己回帰モデルの次数である．

(3) 最適AR次数と地盤条件

自己回帰モデルの適用にあたっては，最適の自己回帰モデルの次数を選ぶ必要がある．次数決定については，赤池の提案したFPE(Final Prediction Error：最終予測誤差)を最小にする方法[13]が実際的で，一般によく用いられている．そこで，本論文においても現場計測データをもとに最適AR次数を調べるため，水平偏差・鉛直偏差に分けて，FPEの計算を行い，図－4に示した．

水平方向より鉛直方向のFPEがいずれの現場においても大きくなっており，逆に鉛直方向の最適AR次数が小さくなっている．これは，水平方向に比較して鉛直方向の挙動が細かい変動をしていることを示しており，水平方向よりも数多くのジャッキパターンの変更による制御を実施しているものと考えられる．高さの基準の厳しい下水道工事が多いことを考えると妥当な結果であろう．

AR次数に対するFPEの分布は，当然最適AR次数で最も低くなるが，最適AR次数付近ではFPEの計算結果はあまり変わらない．これは，最適AR次数に近い次数を選択できれば予測の精度にはあまり影響を及ぼさないことを示している．

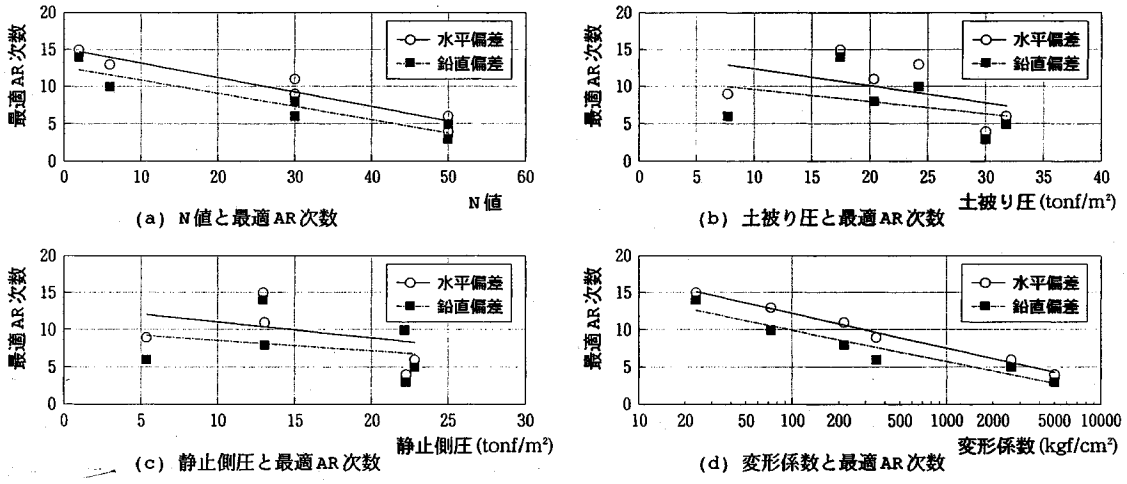
FPEを最小にする最適AR次数はシールド機の位置偏差の挙動進行を最も精度良く表現できることから，最適AR次数と実際に施工した6現場の地盤条件とを比較検討するものとした．

異なる地盤条件における差異を検討するため，地盤定数を表－2に示した．地盤定数の算定にあたっては，N値については，シールド機の切羽の上端から下端での平均N値を使用し，土被り圧と静止側圧については，切羽中心

表－2 地盤定数一覧表

計測現場		A	B	C	D	E	F
マクロ的な土質		シルト	シルト	砂礫	泥岩	砂	砂・泥岩
マクロ的なN値		6	2	30	50以上	30~50	50以上
土被り圧※1)	(tonf/m²)	24.26	17.48	7.74	30.02	20.4	31.8
静止側圧※2)	(tonf/m²)	22.15	12.96	5.37	22.25	13.07	22.8
主働土圧※3)	(tonf/m²)	14.87	8.76	4.72		11.48	
受働土圧※4)	(tonf/m²)	35.44	32.29	18.88	181.35	61.43	135.42
変形係数※5)	(kgf/cm²)	73.0	23.6	353.0	5000.0	218.0	2632.0

※1)：有効土圧と水圧の和
※2)：静止土圧係数はJarky式を用いて，粘性土は土水一体，砂質土は土水分離として計算
※3)：Rankine-Resal式
※4)：Rankine-Resal式
※5)：3軸試験結果（シルト，泥岩）およびSchultze-Menzenbach式（砂，砂礫），ただし，互層については，層の厚さを考慮した平均値を採用した．



(a) N値と最適AR次数　(b) 土被り圧と最適AR次数　(c) 静止側圧と最適AR次数　(d) 変形係数と最適AR次数

図－5 地盤条件と最適AR係数

位置を対象とした．変形係数については，シルト，泥岩は3軸試験結果を使用し，3軸試験結果のない砂，砂礫はSchultze-Menzenbach式を用いてN値より決定した．

図－5に，最適AR次数と地盤定数の関係を示した．

a）N値と最適AR次数

最適AR次数とN値の関係を直線で最小2乗近似すると，次式となる．

$F_x=-0.195\cdot N+15.1$　（相関係数 $r=-0.96$）

$F_y=-0.178\cdot N+12.6$　（相関係数 $r=-0.93$）

ここに，$F_x(F_y)$：水平（鉛直）最適AR次数，N：N値である．

N値と最適AR次数の関係をみると，水平偏差・鉛直偏差ともにN値が大きくなるにつれて最適AR次数が小さくなっており，相関係数も大きく明らかな相関が見られる．これは，N値が小さい程，シールド機の挙動が滑らかであることを示しているものと推察される．

b）土被り圧と最適AR次数

土被り圧 P_v(tonf/m²) と最適AR次数の関係を直線で最小2乗近似すると，次式となる．

$F_x=-0.231\cdot P_v+14.7$　（相関係数 $r=-0.49$）

$F_y=-0.163\cdot P_v+11.2$　（相関係数 $r=-0.37$）

土被り圧と最適AR次数の関係は，土被り圧および静止側圧の増大に伴って最適AR次数が小さくなる負の相関傾向が若干見られる．しかし，相関分析によると，相関係数が小さく，定量的に評価できないことが分かる．

c）静止側圧と最適AR次数

静止側圧 P_o(tonf/m²) と最適AR次数の関係を直線で最小2乗近似すると，次式となる．

$F_x=-0.209\cdot P_o+13.1$　（相関係数 $r=-0.36$）

$F_y=-0.140\cdot P_o+10.0$　（相関係数 $r=-0.25$）

静止側圧と最適AR次数の関係は，土被り圧と同様であり，定量的には判断できないものと考えられる．

d）変形係数と最適AR次数

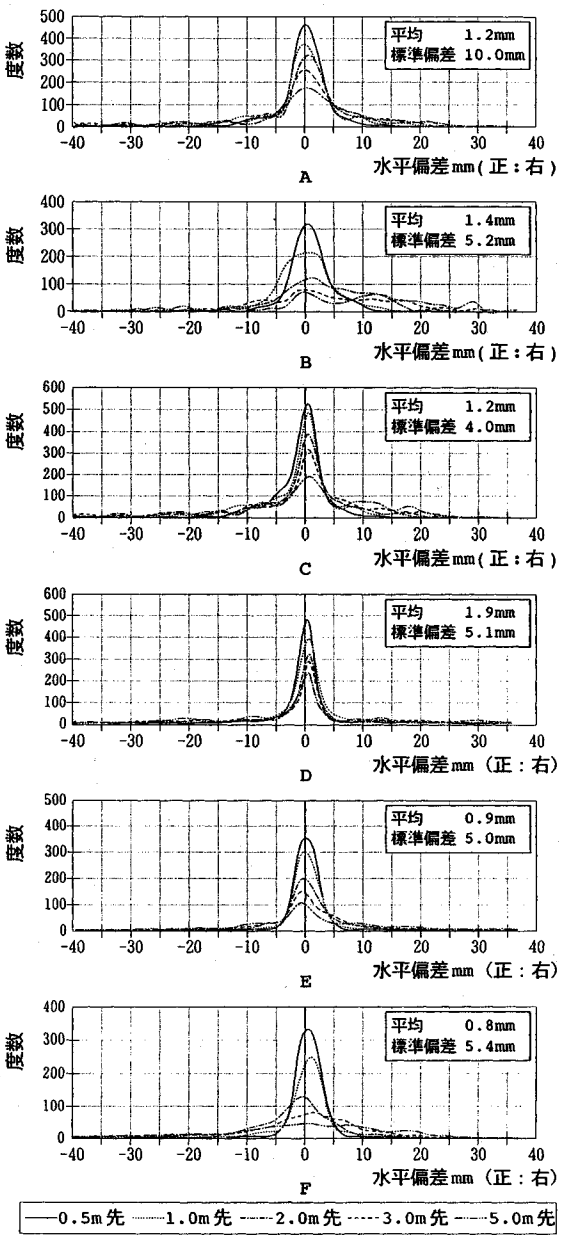
変形係数 E_s(kgf/cm²) と最適AR次数の関係を直線で最小2乗近似すると，次式となる．

$F_x=-4.66\cdot \log E_s+21.5$　（相関係数 $r=-0.99$）

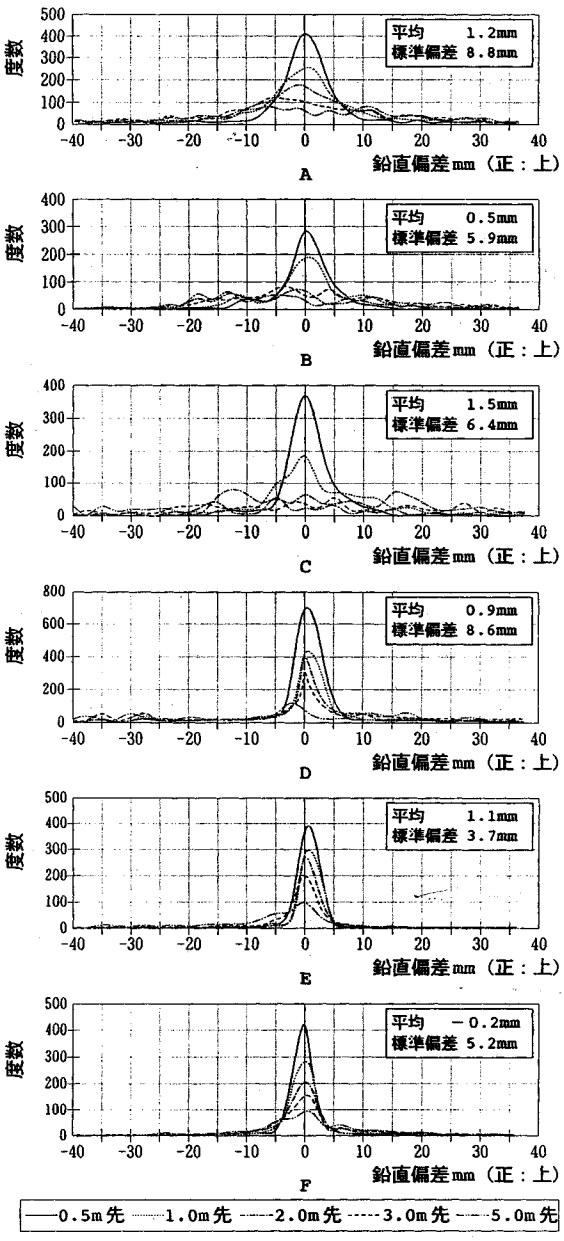
$F_y=-4.22\cdot \log E_s+18.4$　（相関係数 $r=-0.96$）

変形係数と最適AR次数の関係については，片対数グラフに記したが，非常に良い相関が見られ，変形係数の増大に伴ってAR次数が小さくなることが明らかである．

以上のことから，シールド機の挙動は地盤の応力によって決まるのではなくて，地盤の変形係数やN値のような地盤の硬さを表現する地盤定数によって支配されることが分かる．したがって，異なる地盤条件のもとでのシールド機の挙動の相違は地盤の塑性的性質より，弾性的性質を用いて説明するのが妥当であろう．実際の制御にあたっては，事前にAR次数を選択する必要があるが，N値および変形係数を目安に決定しても問題ないことを示す



図－6 水平偏差予測誤差分布



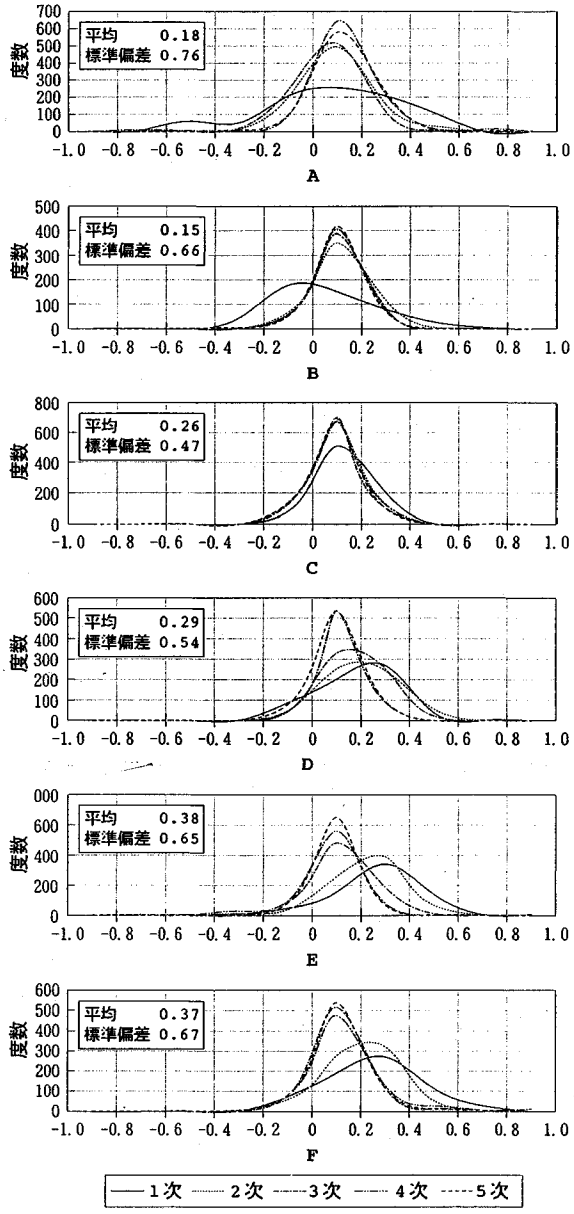
図－7 鉛直偏差予測誤差分布

ものと考えられる．

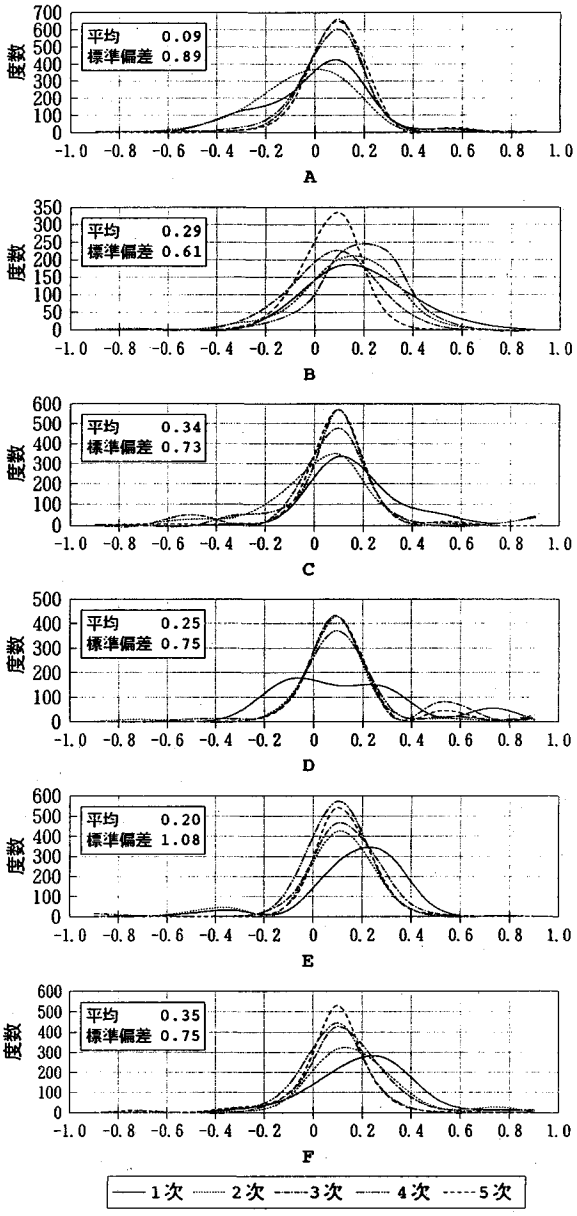
ただし，シールド機の挙動に影響を与える要因は，シールド機のジャッキ圧やジャッキ速度等の掘進状況および切羽安定状況のように他にも数多く考えられるが，今回の検討においては考慮していないため，今後より多くの計測データをもとに系統的に考察する必要があろう．

(4) 予測誤差

自己回帰モデルを用いたシールド位置偏差の予測にあたっては，最適の自己回帰モデルの次数を選ぶ必要がある．しかし，事前に最適AR係数を決定できないため，予測にあたっては，各現場ともに10次の自己回帰モデルを使用した．実測した6現場の水平偏差，鉛直偏差をもとに自己回帰モデルを用いて0.5，1，2，3，5m先の将来位置を予測し，その予測結果と実際に到達したシールド機の位置との偏差を予測誤差とした．予測誤差を掘進距離に応じて示すと，膨大な資料となるため，計測現場毎の予測誤差を2.5mm刻みで頻度処理して比較するものとした．頻度処理結果は，通常，ヒストグラムを用いて表示されるが，重ね書きができないため，ヒストグラムの頂上をスプライン関数で連結して，図－6，7に示した．また，図中には0.5m先の予測誤差について，データ数，平均および標準偏差を合わせて示した．



図－8 同定AR係数分布（水平）



図－9 同定AR係数分布（鉛直）

すべてのデータは予測先までの距離が近い程，予測誤差の分布幅が小さくなり，予測精度が高くなっている．また，0.5m先の予測誤差に関しては，平均値はほぼ0mmを示し，標準偏差も小さい．実用にあたっては，制御遅れを解消するため，5cm先の予測結果に対して制御していることから，予測手法は妥当であるものと考える．

現場毎の予測誤差分布を観察すると，地盤の軟弱なA,B現場に対して，地盤の良好なD,E,F現場の予測精度が高いことがうかがえる．

(5) 同定AR係数

ARモデルを用いたシールド位置偏差の予測にあたっては，計測データに応じて最適のAR係数を同定することが重要である．そこで，カルマン・フィルタ理論を応用して，時々刻々と得られる計測データをもとにAR係数を高速・高精度に逐次同定している．同定AR係数を掘進距離に応じて示すと膨大な資料となるため，計測現場毎のAR係数を頻度処理して比較するものとした．頻度処理結果のヒストグラムは予測誤差と同様にスプライン関数で頂上を連結して重ね書きし，図－8，9 に表示した．

ARモデルは予測誤差の検討と同じ10次のARモデルを使用したが，6-10次のAR係数は変動が大きく定量的な判断資料にならないため，紙面の都合からも省略し，1~5

次のAR係数のみを示した．

最適AR次数が高いA,B現場は1次のAR係数の平均値が小さく，最適AR次数が低いD,E,F現場は1次のAR係数の平均値が大きい．これは，A,B現場は地盤が軟弱で，D,E,F現場は地盤が硬いことに対応している．

4. シールド機の方向制御結果

(1) 方向制御

シールド位置の予測には，システムの入力と出力のみの関係である自己回帰モデルを使用したが，計測データをもとにシールド位置の制御を行うためには，シールドジャッキの操作状況とシールド位置偏差の物理的意味を考慮に入れた関係式の誘導が必要となる．シールド方向の計画とのずれをそのままジャッキストローク，ジャッキ圧力，コピーカッタ等の原因によるモーメントに結びつけることは不可能であるため，シールド方向の計画とのずれを掘進距離で微分した方向ずれの変化率を，観測データとして取扱うこととする．

シールド位置の制御に必要な量は偏心モーメントであるが，これは観測不可能であるため，これをジャッキパターンに線型に関連づけて観測されるジャッキパターンを制御量として取扱うものとする．

実際には制御したい偏心モーメントが求まれば，この偏心モーメントに適合するジャッキパターンを探索すれば良い．

(2) 制御モデル

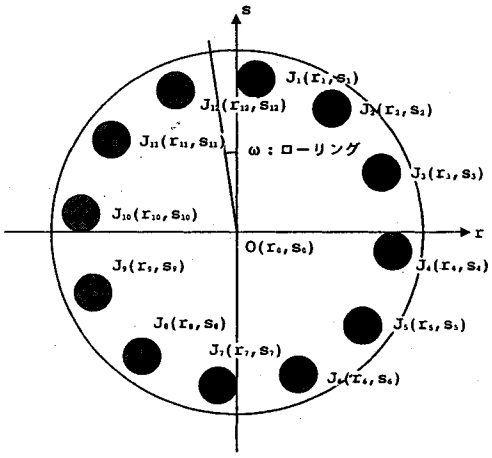
シールド方向のずれの掘進距離に対する変化率が，シールド機に作用させるモーメントに比例するものとして，その関係を水平方向，鉛直方向に分離して示すと次のように書ける．

$$\frac{d\theta_t}{dt} \propto M_x \qquad \cdots\cdots (3)$$

$$\frac{d\phi_t}{dt} \propto M_y \qquad \cdots\cdots (4)$$

ここに，$\theta_t(\phi_t)$：シールド機の水平（鉛直）方向ずれ（°），t：掘進距離（m），$M_x(M_y)$：水平（鉛直）方向偏心モーメント（tonf・m）である．

次に，ジャッキパターンを物理量に変換し，偏心モーメントとの関係を考える．ただし，ジャッキパターンを偏心モーメントに変換するには，シールド機の図心まわりに偏心モーメントを考える必要がある．つまり，シールド機の図心からジャッキの加圧点までの距離に各々のジャッキ推力を乗じたものの総和がシールド機の偏心力であると考える．ただし，掘進する地盤には硬軟等の不均質性だけでなく，ジャッキ各々に癖を有しているが，シールド機全体について考えることにした．したがって，方向ずれの変化率と偏心モーメントの変換係数はシールド機の図心に関する全体的なものと考えた．また，シールド機は常にいくらかのローリングを生じており，ジャッキの作用位置に関する座標はローリングを考慮する必要がある．



図－10 シールドジャッキパターン図

シールドジャッキパターンを図－10に示す．

図心Oに対するジャッキによるモーメントは，式(5)，(6)で表現される．

$$M_x=\sum_{i=1}^{m}\frac{P}{n}\cdot(r_i-r_0)\cdot S_i \qquad \cdots\cdots (5)$$

$$M_y=\sum_{i=1}^{m}\frac{P}{n}\cdot(s_i-s_0)\cdot S_i \qquad \cdots\cdots (6)$$

ここに，m：使用ジャッキ総数，n：使用ジャッキ数，$O(r_0, s_0)$：図心座標（m），P：全推力（tonf），$J_i(r_i, s_i)$：ジャッキ作用点座標（m），S_i：ジャッキの使用状況（有のとき1，無のとき0）である．

以上より，シールド方向ずれの変化率を，ジャッキ各々に関して設定した変換係数により，観測される油圧およびジャッキパターンから決まる偏心モーメントに関連させると，式(5)，(6)から，式(7)，(8)で表現される．

$$a_t=K_x\cdot M_x \qquad \cdots\cdots (7)$$

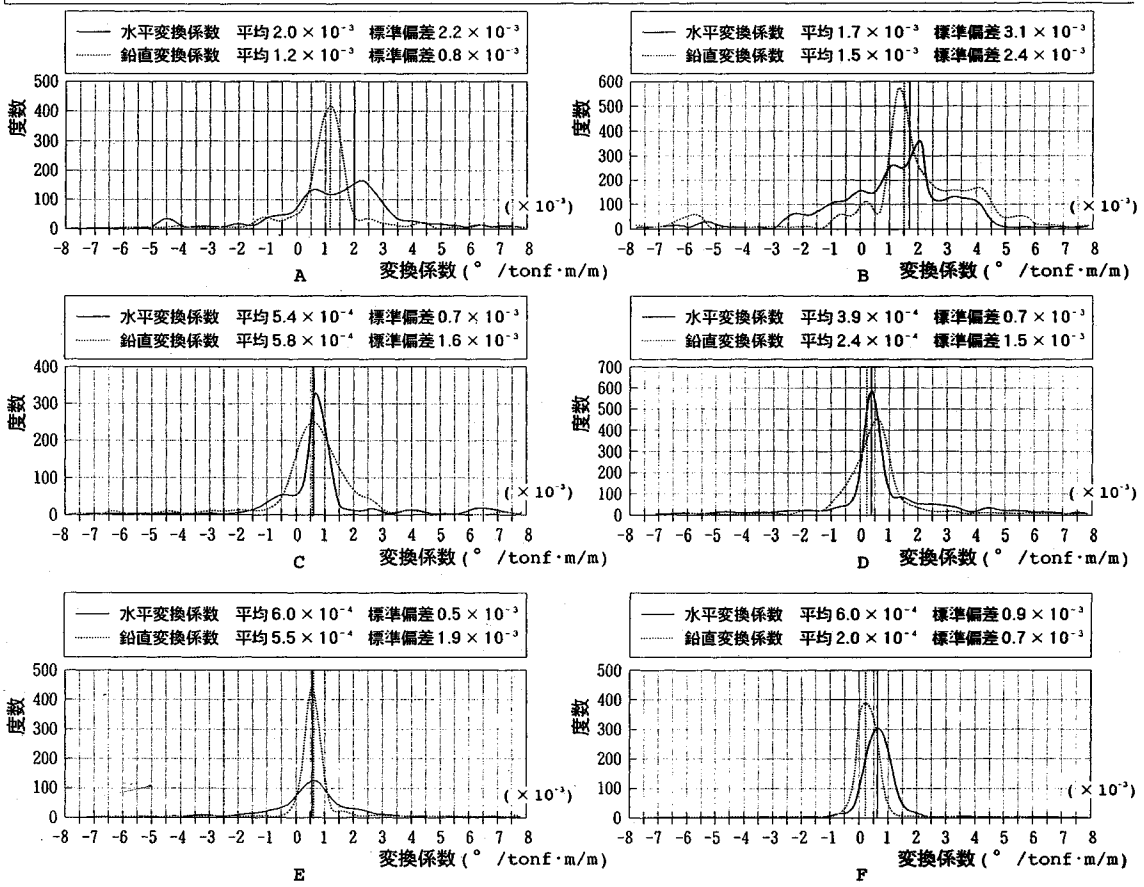
$$b_t=K_y\cdot M_y \qquad \cdots\cdots (8)$$

ここに，$a_t(b_t)$：水平（鉛直）方向ずれの変化率（°/m），$K_x(K_y)$：水平（鉛直）方向ずれの変化率とモーメントの変換係数（°/tonf・m/m）である．

(3) シールド機の最適制御量の算出

制御量の算出には，設定した目標到達点に必要な方向ずれとカルマン・フィルタにより逐次求まる最適変換係数から制御量の偏心モーメントを算出し，この偏心モーメントに見合う最適ジャッキパターンを決定する．

さて，現在シールドの方向ずれを(θ_t, ϕ_t)，すりつけ点のj点先の目標点でのシールドの方向ずれを$(\theta_{t+j}, \phi_{t+j})$，計測インタバルを$\Delta t$とする．そのとき，シールド方向ずれの



図－11 変換係数分布

掘進距離に対する変化率は，定常に推移するものと仮定すれば，式(9)，(10)で表現される．

$$a_{t+j}=\frac{\theta_{t+j}-\theta_t}{j\cdot\Delta t} \quad \cdots\cdots(9)$$

$$b_{t+j}=\frac{\phi_{t+j}-\phi_t}{j\cdot\Delta t} \quad \cdots\cdots(10)$$

ここで，我々が制御したい方向ずれ変化率は，式(9)，(10)により式(11)，(12)のように既知量だけで表現される．

$$K_x\cdot M_x=a_{t+j}=\frac{\theta_{t+j}-\theta_t}{j\cdot\Delta t} \quad \cdots\cdots(11)$$

$$K_y\cdot M_y=b_{t+j}=\frac{\phi_{t+j}-\phi_t}{j\cdot\Delta t} \quad \cdots\cdots(12)$$

次に，求まったシールドの方向ずれから，最適なジャッキパターンを決定する．最適ジャッキパターンは，以下のように制御に必要な方向変化率と可能ジャッキパターンによる方向ずれ変化率の自乗誤差Gを最小にすることで求められる．

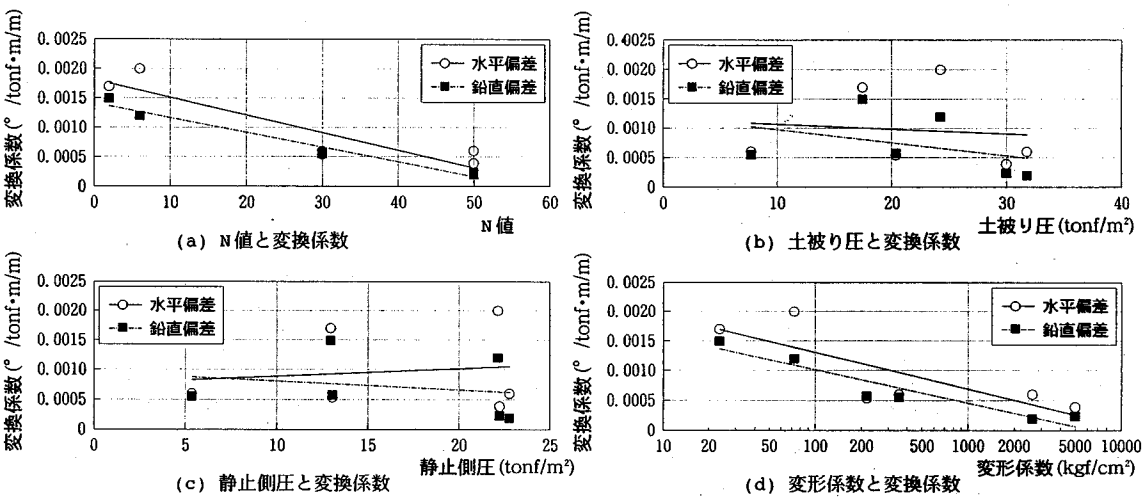
$$G=\sqrt{\left(K_x\cdot M_x-a_{t+j}\right)^2+\left(K_y\cdot M_y-b_{t+j}\right)^2} \rightarrow \text{Minimum} \quad \cdots\cdots(13)$$

(4) 変換係数

計測5cmに1回のインタバルで計測される方向ずれの変化率は非常に微小なものであり，ジャイロコンパスを用いて精度良く検出することは困難である．そこで，最新の方向と1.0m手前で計測された方向との差を方向ずれの変化率として扱うことで，検知する方向ずれを大きく取り，変換係数の精度を向上させた．

変換係数を掘進距離に応じて時系列データとして示すと膨大な資料となるため，実際に施工した現場(A-F)で水平方向と鉛直方向に分けて，逐次計算された変換係数を0.25×10⁻³(°/tonf·m/m)刻みで頻度処理して比較するものとした．頻度処理結果は，通常，ヒストグラムを用いて表示されるが，複数データの重ね書きができないため，ヒストグラムの頂上をスプライン関数で連結して，図－11に示した．また，図中には水平方向・鉛直方向の変換係数について，データ数，平均および標準偏差を合わせて示した．

変換係数は掘進距離1.0mあたりの方向ずれの変化率と偏心モーメントの比を示すもので，地盤の不均一性や掘進状況のばらつき等により大きく変化する．実際に計測された変換係数の分布状況はかなりばらついており，中



(a) N値と変換係数　(b) 土被り圧と変換係数　(c) 静止側圧と変換係数　(d) 変形係数と変換係数

図－12 地盤条件と変換係数

でも地盤の軟弱なA,B現場のばらつきが激しい．しかし，C,D,E,F現場における変換係数はなだらかな形状を示していることから，平均値を用いて地盤条件等との関係を論じても良いものと考えられる．鉛直方向の変換係数は水平方向より小さくなっているが，C現場だけ逆の関係を示している．これはC現場だけ土被りが小さいことに起因しているものと考えられる．

(5) 変換係数と地盤条件

偏心モーメントを受けるシールド機の挙動と地盤条件との関係を検討するため，図－12に変換係数の平均値(°/tonf・m/m)と地盤定数の関係を示した．

a) N値と変換係数

変換係数の平均値とN値の関係を直線で最小2乗近似すると，次式となる．

$\overline{K_x}=(-3.0\cdot N+181)\times 10^{-5}$　(相関係数 $r=-0.90$)

$\overline{K_y}=(-2.5\cdot N+141)\times 10^{-5}$　(相関係数 $r=-0.98$)

ここに，$\overline{K_x}(\overline{K_y})$：水平(鉛直)変換係数である．

N値と変換係数の関係をみると，水平偏差・鉛直偏差ともにN値が大きくなるにつれて変換係数は小さくなっており，相関係数も高く明らかな相関が見られる．これは，N値が小さい程，シールド機はジャッキパターンにより曲がりやすく，逆にN値が大きい程，曲がりにくいことに対応するものと考えられる．水平・鉛直方向ともにN値が50-60程度になると，変換係数は0となり，ジャッキパターンでは方向を制御できないことを示している．

b) 土被り圧と変換係数

変換係数の平均値と土被り圧の関係を直線で最小2乗近似すると，次式となる．

$\overline{K_x}=(-0.84\cdot P_v-116)\times 10^{-5}$　(相関係数 $r=-0.11$)

$\overline{K_y}=(-2.23\cdot P_v-120)\times 10^{-5}$　(相関係数 $r=-0.37$)

土被り圧と変換係数の関係については，相関は見られない．

c) 静止側圧と変換係数

変換係数の平均値と地盤定数の関係を直線で最小2乗近似すると，次式となる．

$\overline{K_x}=(1.25\cdot P_o+77)\times 10^{-5}$　(相関係数 $r=0.13$)

$\overline{K_y}=(-1.47\cdot P_o+95)\times 10^{-5}$　(相関係数 $r=-0.20$)

静止側圧と変換係数の関係は，土被り圧と同様に相関は見られない．

d) 変形係数と変換係数

変換係数の平均値と変形係数の対数を取ったものとの関係を直線で最小2乗近似すると，次式となる．

$\overline{K_x}=(-62\cdot \log E_s+254)\times 10^{-5}$　(相関係数 $r=-0.80$)

$\overline{K_y}=(-56\cdot \log E_s+213)\times 10^{-5}$　(相関係数 $r=-0.95$)

変形係数と変換係数の関係については，変形係数の増大に伴って変換係数が小さくなる負の相関が顕著に見られる．水平，鉛直方向の変形係数が12000，6000(kgf/cm²)程度になると，ジャッキパターンによる偏心モーメントでは方向を制御できないことを示している．

相関分析の結果より，変換係数と相関の高い地盤定数はN値と変形係数であることが分かった．したがって，シールド機の挙動は地盤の応力によって決まるのではなくて，地盤の変形係数やN値のような地盤の硬さを表現する地盤定数に支配されることが分かる．

また，地盤の変形係数やN値が非常に大きくなると，シールド機の方向はジャッキパターンによる偏心モーメントでは制御不可能となり，他の制御方法を考えなければならないことが分かる．

ただし，シールド機の偏心モーメントによる方向変化に影響を与える要因は，シールド機のジャッキ速度等の掘進状況および切羽安定状況等数多く考えられるが，今回の検討においては考慮していない．

5. あとがき

本研究は，フィードバック予測制御によるシールド機の方向制御モデルの妥当性を地盤工学的に明らかにすることを目的として，異なる地盤条件のもとで施工されたシールド工事の挙動計測結果（6現場）のもとに挙動予測モデルおよび回帰式のパラメータと地盤条件との関係を検討したものである．

その結果，以下のことが分かった．

1）シールド機の位置・姿勢は過去に得られた計測データより自己回帰モデルを用いて精度良く予測できたため，モデルの妥当性が検証された．

2）挙動予測モデルのパラメータであるAR係数は切羽地盤のN値および変形係数と非常に高い相関を有するが，土被り圧や静止側圧にはあまり関係がない．

3）ジャッキパターンによる偏心モーメントを受けた時のシールド機の制御モデルを回帰式で表現し，ばらつきはあるものの平均では妥当な変換係数を示したため，モデルの妥当性が検証された．

4）ジャッキパターンによる偏心モーメントとシールド機の方向変化量との比を示す変換係数は切羽地盤のN値および変形係数と非常に高い相関を有する．また，切羽地盤のN値および変形係数が非常に大きくなると，ジャッキパターンによる偏心モーメントでは，シールド機の方向を制御できなくなる．

今回の検討においては，シールド機の方向変化に影響を与える要因として，シールド機のジャッキパターンによる偏心モーメントのみを考えた．この他にもシールド機の大きさや掘進状況および切羽安定状況等の要因が考えられるが，質・量ともに満足するデータが得られていないことから，検討できなかった．今後，より精度の高い計測機器の開発を待って，多くの計測データをもとに検討する必要があろう．

参考文献

1）シールド工法自動化システム編集幹事会：シールド工法の自動化システム(1)，第1章自動化システムの現況，トンネルと地下，vol.17-5，1986.

2）P. C. Young, C. H. Shellswell and C. G. Neethling : A Recursive Approach to Time-series Analysis, *CUED/B - Control/TR16, University of Cambridge, Department of Engineering*, 1971.

3）赤池弘次・中川東一郎：ダイナミックシステムの統計的解析と制御，サイエンス社，1972.

4）星谷勝・酒井邦登：拡張カルマン・フィルタを援用したシールド位置予測，土木学会第41回年次学術講演会概要集，VI-25，1986.

5）星谷勝・酒井邦登：カルマン・フィルタを用いたシールド位置の制御手法，土木学会第42回年次学術講演会概要集，VI-65，1987.

6）Jazwinski, A. H. : Stochastic Processes and Filtering Theory, *Academic Press*, 1970.

7）Kalman, R.E. : A new approach to linear filtering and prediction problems, *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol.82, pp.35-45, 1960.

8）Kalman, R.E. and R.S. Bucy : New result in linear filtering and prediction theory, *Trans. ASME, Journal of Basic Engineering*, Vol.83, pp.95-108, 1961.

9）片山徹：応用カルマンフィルタ，朝倉書店，1983.

10）酒井邦登・星谷勝：カルマン・フィルタを用いたシールド位置の予測と制御，土木学会論文集第385号／VI-7，pp.69-78，1987.

11）星谷勝・酒井邦登：カルマン・フィルタを用いたシールド自動誘導システム，土木学会第43回年次学術講演会概要集，VI-105，1988.

12）Sakai, K. and Hoshiya, M. : Automatic conduction method of behaviors on driving shields using Kalman filtering theory, *Proceeding of 2nd East-Asia Pacific Conference Structural Engineering and Construction*, 1989.

13）Akaike, H. : Statistical predictor identification, *Ann. Inst. Statist. Math.*, Vol.22, pp.203-217.1970.

(1992.3.25 受付)

DIRECTION CONTROL METHOD OF SHIELD TUNNELLING MACHINES AND ITS OBSERVED BEHAVIOURS IN SOME VARIOUS GROUND CONDITIONS

Kunito SAKAI and Masaru HOSHIYA

In order to control the direction of shield tunnelling machine effectively, system modelling has become more important. The direction control model based on predicted behaviours of shield tunnelling machine, the feedback prediction control model, was developed by applying autoregressive model to the prediction, and by applying regression model to the control utilizing the relationship between the machine's direction and biased moment by jack pattern. The feedback prediction control model has been verified to control the direction accurately based on the observed behaviours in some various ground conditions. As the results of corelation analysis between identified parameters and ground conditions, the behaviours of shield tunnelling machine have been certified to be highly related to the stiffness such as N-value and elastic modulus of ground characters.