

加泥型土圧式シールドにおける掘削管理，土圧制御システム

Control System of Earth-pressure Balanced Shield and its Application

七浦 浩*
Hiroshi Nanaura

平松 清和**
Kiyokazu Hiramatsu

要 約

第2次味鋤雨水幹線下水道工事において，加泥型土圧式シールド掘進機の掘削管理・土圧制御システムにPIパラメータ調整技法を織り込んだファジィ理論を応用し，従来自動運転が困難とされていた巨礫を有する滞水礫層の掘削に良好な結果を得た。

このシステムは，シールド掘進機の掘削運転状況の監視，掘削データの編集，解析及び切羽制御を可能としたものであり，将来の全自動化シールド掘進機開発のワンステップとなるものである。

目 次

- §1. まえがき
- §2. 全体工事概要
- §3. 掘削管理，土圧制御システム
- §4. あとがき

§1. まえがき

60年代は，情報化，ロボット化の時代と言われているが，シールド掘進機の分野における技術開発も，ゼネコン，メーカーが一体となって努力を重ねた結果，ハードの部分はほぼ完成の域に近づいていると言っても過言ではない。一方，ソフト面での運転管理及び制御をどのようにシステム化し，施工管理の確立を図るかが今後の課題であり，その動向が注目されている。

近年マイクロエレクトロニクスの急速な発展に伴ない，多くの産業がコンピュータ等の活用によって生産性の向上を図っていることは衆知の事実である。

当現場においても施工管理の確立化を進めるため，パソコンを利用した新たな技法に基づく運転管理，土圧制御システムの開発によって，巨礫を含む滞水礫層の自動掘削に実用化の目処をつけた。

現在市場に供されている掘削管理，土圧制御のシステム概念は，一般的に Fig. 1 に示すように，制御に必要な

各要素についてモードを設定し，この流れの中でフィードバックをかけながらPI制御（比例，積分制御）を行う方式が主流である。

しかしながらこのシステムの問題点は，地質・地山性状の変化及び掘削土の噴発現象など，外乱要因によって正常運転の継続が困難になった場合，システムの基本となっているモードの変更に，非常に困難さを伴うことである。特に礫層の掘削管理，土圧制御にその傾向が強い。

現実の問題として，現時点でのシールドの掘削管理においては，熟練オペレータの運転操作に勝るものはないと言っても過言ではない。従って，今回開発のシステムは基本的にはスクリーコンベヤ回転数，つまり排土量を操作量とするPIフィードバック制御であるが，オペレータが最適と判断した掘削状態を基本に考え，その状態での前回掘削リングの収集運転データをもとに，PIパラメータ技法を織り込んだファジィ理論により最適制御パラメータを算出することによって土質の変化に柔軟な対応を行なえるようにしたものである。

以下に，システムの概要，解析結果並びに問題点について報告を行う。

§2. 全体工事概要

2-1 工事概要

工事件名 第2次味鋤雨水幹線下水道築造工事

工 期 自昭和61年8月22日～至昭和62年10月6日

*中部(支)味鋤(出)
**中部(支)味鋤(出)所長

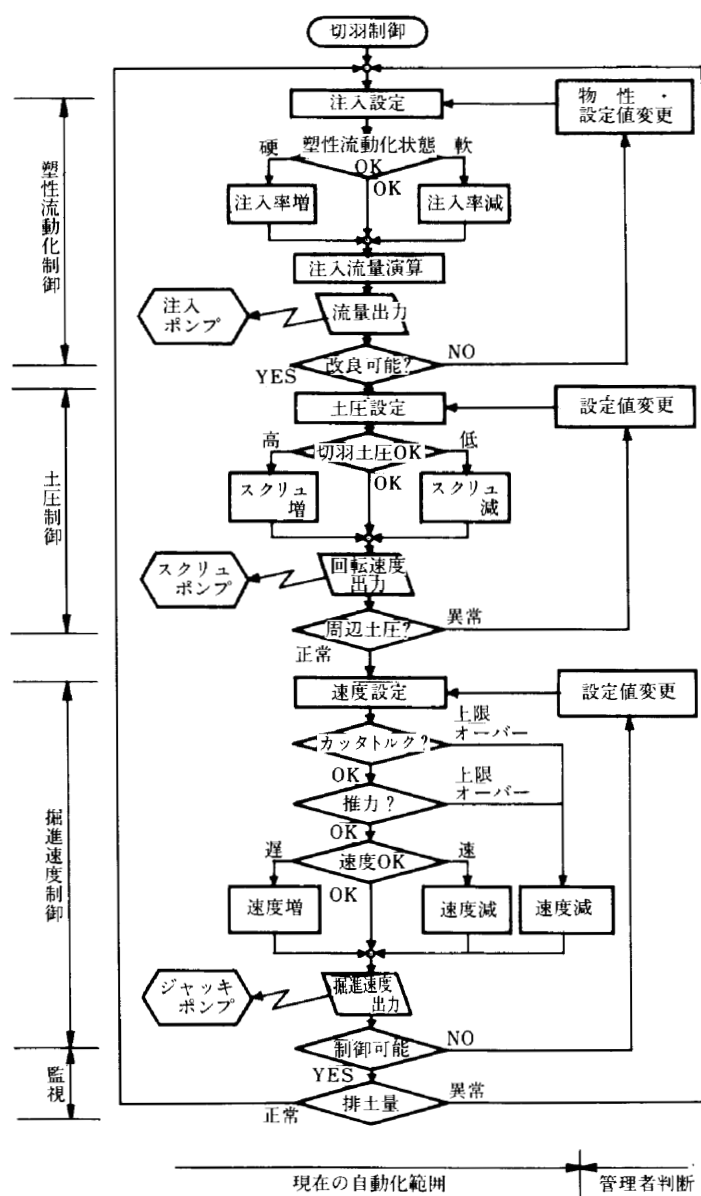


Fig.1 切羽制御システム

掘削延長 1237m
 曲率半径 $R=100\text{m}$ (最小半径)
 土 破 り 平均5.0m
 仕上り内径 2800mm
 セグメント外径 3550mm
 立 坑 2ヶ所 (発進立坑, 中間立坑)

2-2 地質概要

地形的には、木曾川によって形成された起伏の少ない沖積低平地上に位置し、施工場所の南側には庄内川及び天田川が西流している。施工場所の周辺は、後背湿地性の低平地と自然堤防帯と思われる微高地の組合せて構成されている。

シールドが通過する地層は、発進立坑 (T_2) から西へ

約300mまでは、 N 値10以下の洪積層粘性土 (D_c) と洪積層砂質土 (D_g) を主体とした地層であり、玉石の混入率も高く、最大径は200～400mmの硬質礫が混入している。

全線に亘って地下水が豊富で、地下水位は $GL-1 \sim 3\text{m}$ と浅く、庄内川に隣接した地域であるため、流動地下水の存在も考えられた。

Fig. 2 に地質概要を示す。

§3. 掘削管理、土圧制御システム

3-1 システムの構成

3-1-1 システムの概要

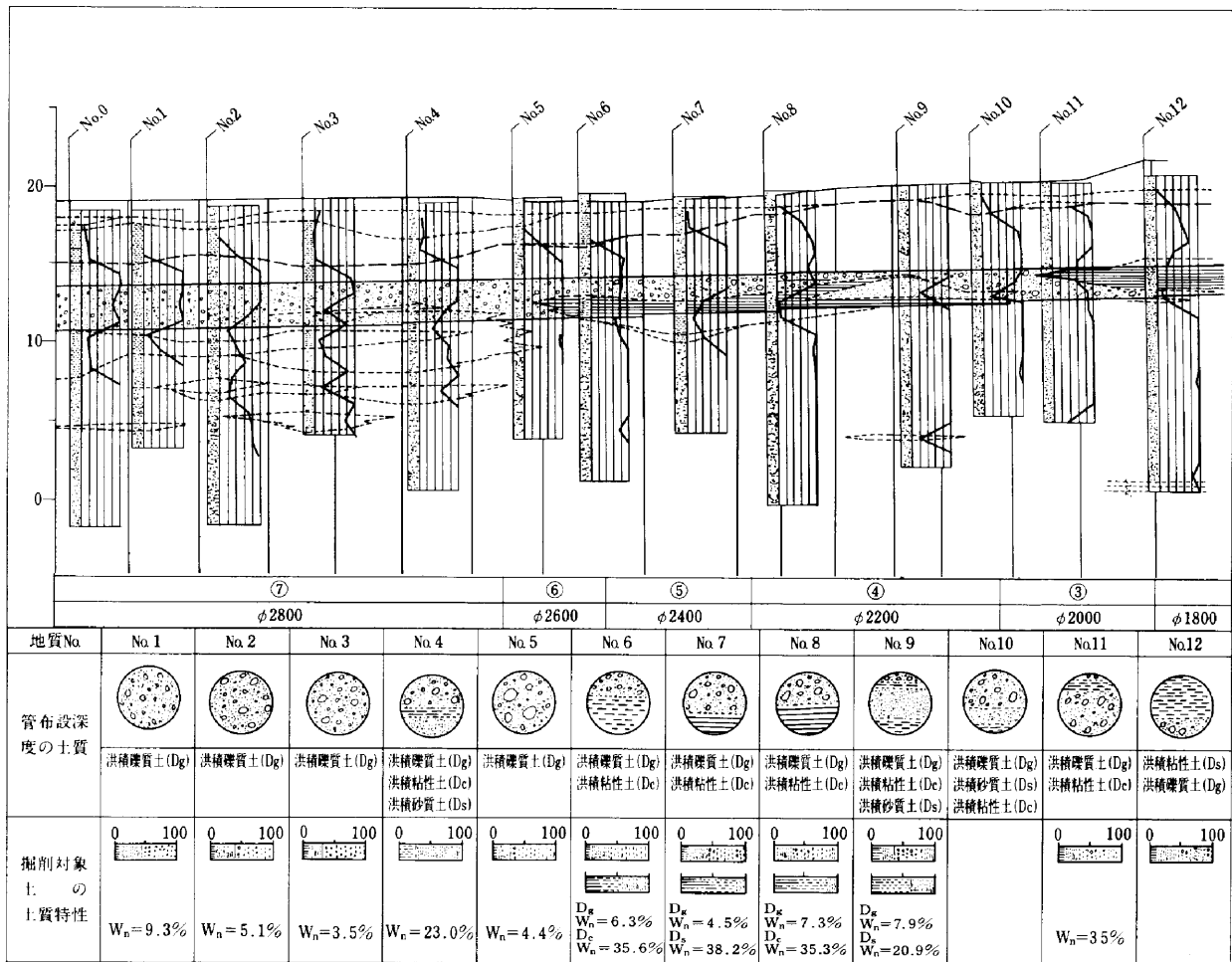


Fig.2 地質概要

本システムは、掘進運転中における土圧制御・運転状況監視とリング組立中における土圧制御用パラメータの変更処理、掘削時の各種データのトレンド表示・掘削リング報・掘削日報などのレポート処理並びに各種統計処理・解析を行うものである。

土圧制御に対する各種設定値（管理土圧、スクリーコンベヤ／ロータリディスチャージャ回転数比等）の変更は、坑内シールド運転室及び坑外中央管理室にて行い、計算機制御と手動制御の切替は坑内シールド運転室にて行う。ハードウェアの構成を Fig. 3 に、ソフトウェアの構成を Fig. 4 に示す。

3-1-2 機能

本システムは、大別して下記に示す3機能を備えており、運転監視用、土圧制御用、運転管理用の3台のパソコンを連動させることにより機能させる。

- ① 自動運転機能
- ② 運転監視機能
- ③ 掘削データ処理機能

運転監視用及び土圧制御用パソコンは坑内シールド運転室に、運転監視パソコンは坑外中央管理室に設置し、オペレータ及びシステム管理者により操作する。

3-1-3 自動運転機能

システムの自動運転は切羽の安定を目的としており、その操作対象はスクリーコンベヤ回転数（以下 S.C. 回転数と称す）・ロータリディスチャージャ回転数（以下 R.D. 回転数と称す）・シールドジャッキ速度（以下 S.J. 速度と称す）及び加泥材注入量であり、それぞれ独立して手動及び自動運転の切り替えが可能である。以下に各操作対象の機能について示す。

(1) S.C. 回転数の設定

S.C. の回転数を操作することにより PI 制御にてバルクヘッド土圧（以下 B.H. 土圧と称す）を管理設定値内に保つように運転する。

(2) R.D. 回転数の設定

R.D. の自動運転は、地山の土質に応じた良好な塑性流動化状態を保つことを目的としており、運転状況の判断

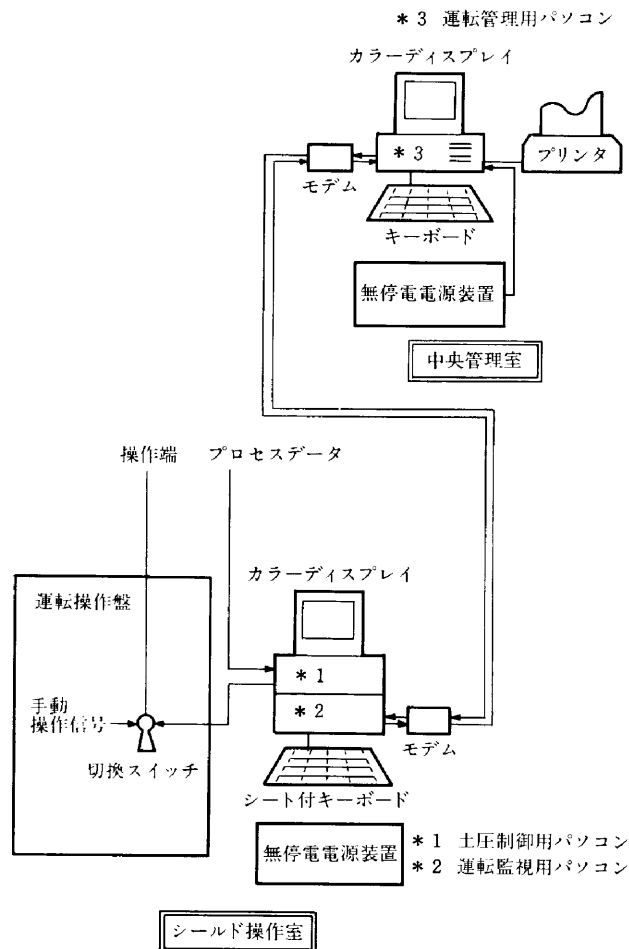


Fig.3 ハードウェアの構成

はオペレータにゆだねられる。

設定には連続運転と間欠運転の2つのモードがあり、坑内シールド運転室の運転監視用パソコンでその切り替えを行う。

連続運転モードでは、R.D.が自動運転に切り替えられた時のR.D.とS.C.の回転数比の状態を保持しながら運転を行う。すなわち、オペレータが最適な排土状態と判断した時点で自動運転モードに切り替えると、その時点の排土状態を保ちながら運転が継続される。

また、R.D./S.C.回転数比をあらかじめ設定して運転を行うことも可能である。

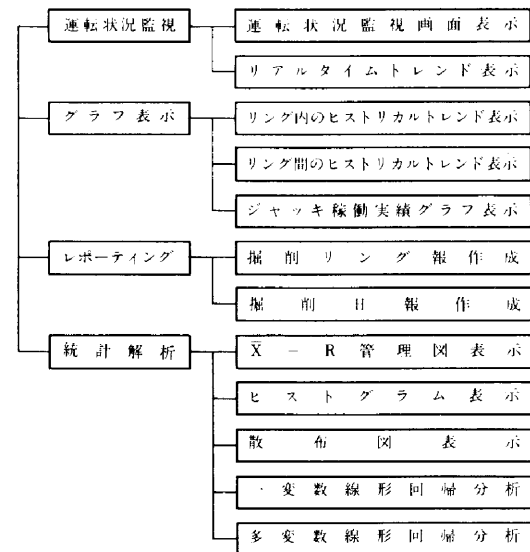
R.D.の自動運転時の操作出力は、下記に示すように設定される。

$$\Delta RD = R.D./S.J.比 \times \Delta SJ$$

ΔRD : R.D.回転数操作出力の前回値との偏差

ΔSJ : S.J.速度操作出力の前回値との偏差

運転状況監視・掘削データ編集・解析



土圧制御・最適制御パラメータ算出

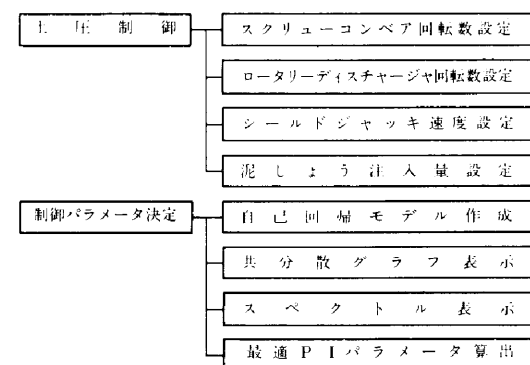


Fig.4 ソフトウェアの構成

R.D.自動運転及び後述する加泥材注入自動運転時の操作出力値の算出に用いるR.D./S.C.比、加泥注入比は、下記のように定義される。

$$R.D./S.C.比 = \frac{RD_s - 1}{SC_s - 1}$$

R.D.とS.C.の回転数比は次に示す式で表される。

$$\frac{R.D.回転数}{S.C.回転数} = \frac{RD_h}{SC_h} \times R.D./S.C.比$$

RD_s (SC_s) : R.D. (S.C.) の回転数設定出力

RD_h (SC_h) : 操作出力5V時のR.D. (S.C.) 回転数

(3) 加泥材注入量の設定

前述のR.D.回転数設定（連続モード）と同様に、加泥ポンプが自動運転に切り替えられた時の加泥材注入量を保つようにS.J.速度の比を保ちながら運転が行われる。すなわち、自動運転に切り替えられた時の加泥材注入率で運転される。

カッタ圧の異常処理時に、S.J.速度の減速操作にもかかわらず、カッタ圧力が回復しない場合は加泥注入率を上げる。

また、設定注入率をあらかじめ決めておくことも可能である。

加泥材注入の自動運転時の操作出力は、下記のように設定される。

$$\Delta \text{加泥} = (\text{加泥比}) \times \Delta S_C$$

$\Delta \text{加泥}$: 加泥材注入量操作出力の前回値との偏差

ΔS_J : S.J.速度操作出力の前回値との偏差

加泥比は、下記のように定義される。

$$\text{加泥比} = \frac{KD_S - 1}{S_J - 1}$$

また、加泥材注入率は下記の式で表される。

$$\text{加泥材注入率} = \text{加泥比} \times \frac{S_{JH} \times DI_A}{KD_H}$$

S_{JH} : S.J.速度設定出力値

KD_S : 加泥材注入量設定出力値

S_{JH} : 操作出力 5 V 時の S.J.速度

KD_H : 操作出力 5 V 時の加泥材注入量

DI_A : シールド断面積

(4) S.J.速度の設定

基本的には、S.J.自動運転に切り替えられた時点の速度を保ちながら運転を行うが、下記の状態が生じた場合に加速減速操作をとる。

(a) 加速操作

① S.C.回転数が設定値より小さい場合。

(b) 減速操作

① カッタ圧力が設定値を越えた場合 (カッタ圧力異常)

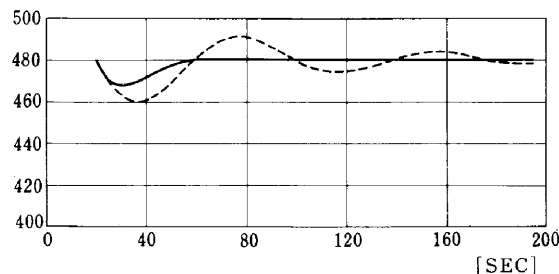
② S.C.回転数が設定値より大きい場合 (S.D.過負荷)

減速操作後、カッタ圧力及び S.D.回転数が回復すると、S.J.速度を元の速度まで徐々に戻す操作をとる。

(5) 最適制御パラメータの算出

掘削地山の土質の変化により制御精度が悪化することもある。この場合、掘削中にサンプリングされた時系列データを用いて最適 PI パラメータ値を PI パラメータ調整技法を織り込んだファジィ理論 (あいまい理論) により算出し、現在パラメータと最適パラメータのそれぞれを使用した場合の外乱応答などをシステム管理者若しくはオペレータに示し、パラメータの変更をうながす。Fig. 5 にその変更画面を示す。

この処理は「制御不良」と判断された場合、つまり S.C.自動運転中の制御エラー回数 (制御土圧と土圧設定値



PI パラメータ
初期値 KP=0.5 TI=3
修正値 KP=2.56711 TI=12.3221
グラフのスケールを変更しますか? (Y or N)N
PIパラメータを変更しますか? (Y or N)

Fig.5 PIパラメータ変更画面

との偏差が許容範囲を越えた回数) が設定回数を越えた場合に、そのリングの掘削完了直後に自動的に行われる。

PIパラメータの算出処理は、2秒周期でサンプリングされた B.H.土圧と S.C.回転数の時系列データを用いて、プロセスを下記に示す自己回帰モデルにより同定した後、モデル上でシミュレーションを行い最適値を求める。

$$Y_n(n) = \sum_{m=1}^M [a_1(m) Y(n-m) + a_2(m) U(n-m)] + \xi(n) + \text{Const}$$

$Y(n)$: 時刻 n における土圧

$U(n)$: 時刻 n における S.C.土圧

$\xi(n)$: 時刻 n におけるノイズ

Const : 定数

解析されたリングの B.H.土圧と S.C.回転数について、自己相関係数・相互相関関数グラフ及びパワースペクトルグラフの表示を行う。

3-1-3 運転監視機能

掘削中の各種データをサンプリングし、グラフィック画面上に監視画面とリアルタイムトレンド画面の2画面を表示する。

(1) 監視画面

Fig. 6 に示す画面について 8 秒毎にグラフィック表示する。

(2) リアルタイムトレンド画面

掘削中の各リングデータを 1 cm 毎に表示する 14 項目のメニュー方式である。

3-1-4 掘削データ処理機能

既に掘削済みリングのサンプリングデータに基づいて、Fig. 4 の運転管理システムフローに示すような各種グラフ表示・レポート及び統計解析処理を行う。

(1) グラフ表示

① ヒストリカルトレンド

リング内における各サンプリングデータの変化につ

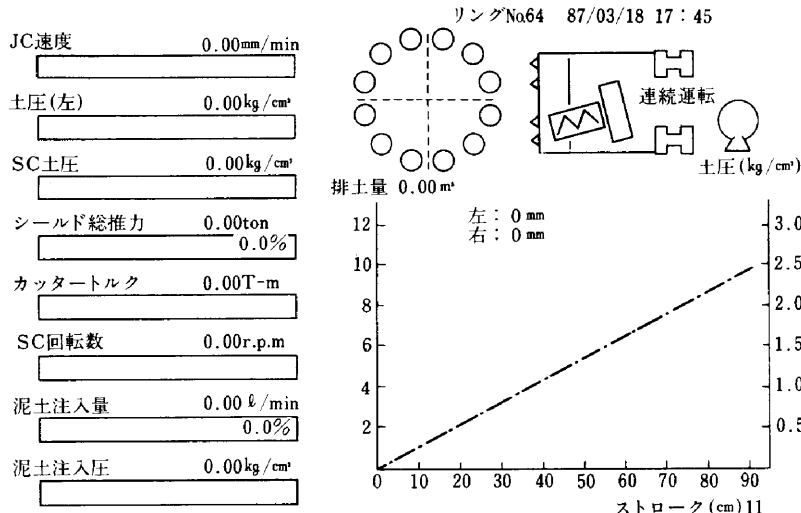


Fig.6 監視画面

いて折れ線グラフで表したものであり、1段表示と2段表示の2種類が可能である。

② リング間変化グラフ

リング間におけるデータの推移を示す。

③ シールドジャッキ稼動実績グラフ

リング毎の稼動ジャッキの記録をストローク表示したものである。

(2) レポートング

① リング出力

リング毎の掘削データをプリンタに出力する。

② 日報出力

シフト毎の掘削データをプリンタ出力する。

(3) 統計解析

① $\bar{X}-R$ 管理図

管理の良否をデータのバラツキ度合で判断することにより、各データの管理状態を把握する。

$\bar{X}-R$ 管理図は、群管理を行うため本システムにおいては、1シフトを1つの群、各リングのデータの平

均を群に含まれる1つのデータとして扱っている。

② ヒストグラム

各8秒周期のサンプリングデータの度数分布をリング毎に表示するものと、各リングのデータの平均値分布の2種類を表示する。

③ 散布図

2つの変数の関係を平面上にプロットし、相関関係を表示する。8秒周期のサンプリングデータについてプロットするものと、各リングのデータの平均値をプロットする2種類がある。メニューはアトランダムに選択が可能である。

④ 一変数線形回帰分析

最小自乗法を用いて、2つの変数の関係を直線で示したものである。8秒周期のサンプリングデータ、各リングのデータの平均値の2種類がある。

⑤ 多変数線形回帰分析

最小自乗法を用いて、複数変数の関係を

$$Y = a + bX_1 + cX_2 + dX_3 + eX_4 + fX_5 + gX_6$$

Table 1 自動運転機能

No.	制御の目的	操作量	検出/測定量	制御方法
1	土圧を設定値に保つ	S.C.回転数	B.H.土圧	PIフィードバック制御
2	最適な排土状態を保つ	R.D.回転数	S.C.回転数	比例制御
3	土圧制御が可能な範囲で最大掘進速度を得る	S.J.速度	S.C.回転数	S.C.回転数が「能力を超える」/「能力に余裕がある」場合にS.J.速度をステップ状に減速/増速操作を行なう
4	カッターの保護	S.J.速度	カッター圧	カッター圧が設定値を越える場合S.J.速度を減速する
5	S.J.速度に応じた加泥注入を行なう	加泥注入量	S.J.速度	比例制御

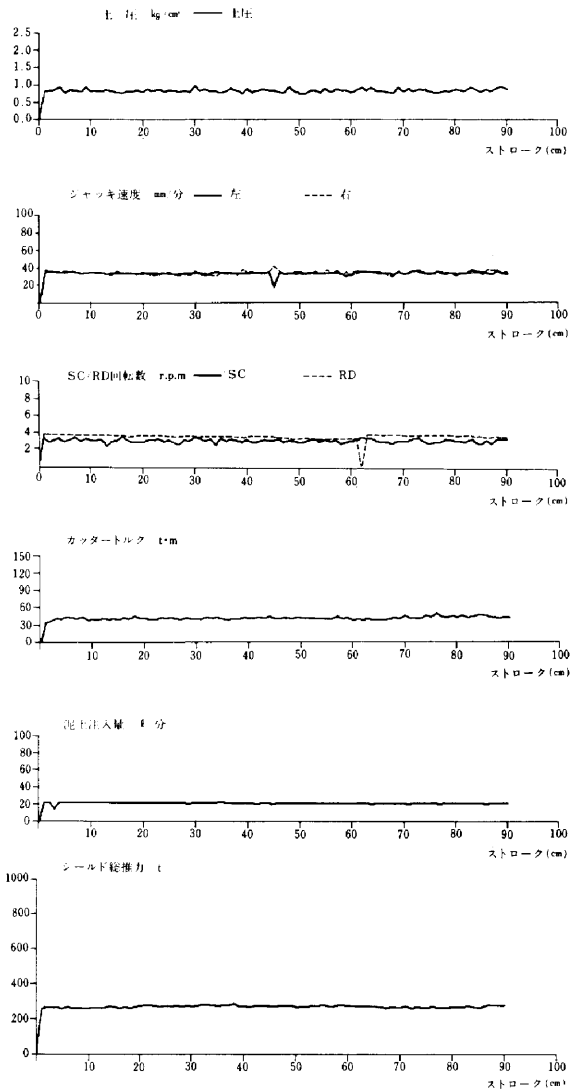


Fig.7 リングNo.391での動作状況

a, b, c, d, e, f, g : 定数の式で表わしたものである。

変数 Y に対して、どの変数 X_n が大きな変化を与えるかが判定される。 X 変数は最大6個まで選択され、8秒周期のサンプリングデータ、各リングの平均値の2種類について分析される。

3-2 システムによる稼働実績

昭和62年2月末から掘削を開始したが、180リングまでは粘着性に富んだシルト層がシールド全断面に出現した。当初の計画ではこの区間を含めて自動運転を行う予定であったが、粘着性が予想以上に大きく、R.D.のバケット内の付着現象によって排土不良の状態となり、B.H.土圧とS.C.回転数及びR.D.回転数相互の制御が不安定となった。従って、この区間はS.C.への注水を行ない、大半をスコップにより閉塞を解除しながらの手動運転を余儀なくされた。

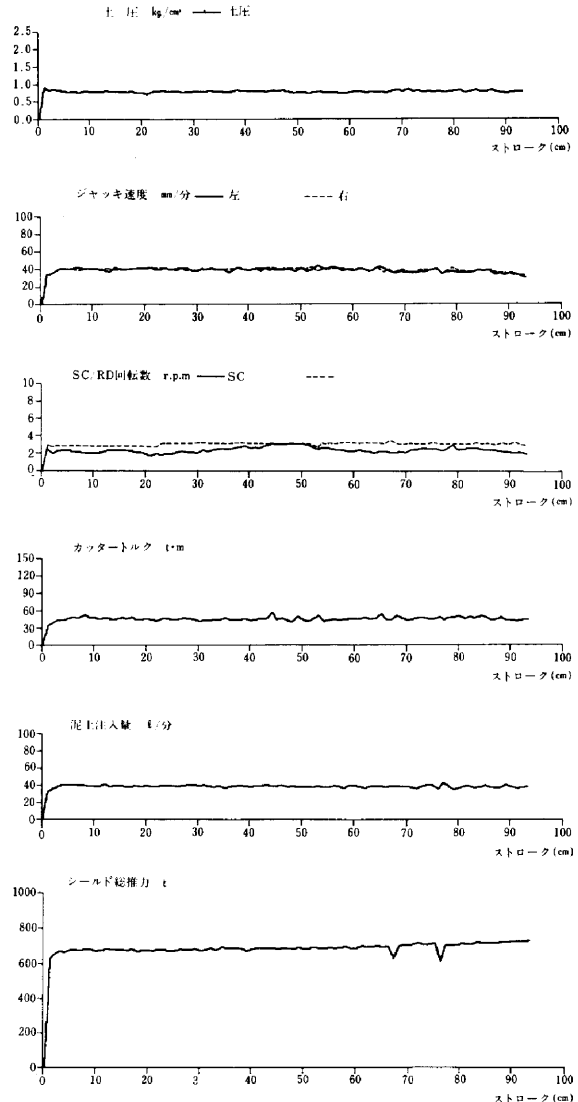


Fig.8 リングNo.470での操作状況

180リング以降は、通過断面に砂礫が一部混入し始めたので、注水の併用によって掘削土の塑性流動化を図りながら自動運転に入った。その後、砂・砂礫の比率が増加し、200リング地点では砂礫が50%、400リング以降は全断面が最大礫径400mm程度を含む砂礫層となり、R.D.への付着が無くなったため掘削は安定した。

180リング以降430リング付近までは、上述のごとく地山土質が砂礫層へ変化したことで安定した掘削であったが、430リング以降シールドの推力が徐々に増加する傾向を示した。その原因として、礫層の掘削によるカッタービットの摩耗・欠損、加泥材注入量の異常、チャンバー内閉塞、障害物の出現等が考えられた。データの解析からカッタービットの欠損・摩耗の影響が大であると判断し、605リングで欠損した面板の一部がS.C.から排出されたこともあり、カッタービットの交換に踏み切った。

その後840リング付近までは、シールド推力がカッター

トルクと共に比較的順調に推移したが、その後、カッタビットを交換した605リング以前と同様な傾向を示したため、902リングでカッタビットの欠損・摩耗と判断し、再度交換に踏み切った。以後、到達までは順調に掘削でき無事貫通することができた。本システムにより収集した掘削データのグラフ表示及び統計解析結果が異常検知とその原因解明に役立ったと言える。

本システムの操作対象は S.C.回転数, R.D.回転数, S.J.速度, 加泥注入量であり、操作量と検出/測定量及び制御方法は Table 1 に示すとおりである。例として安定した掘削状態での391リング及び不安定掘削状態での470リングにおける各操作対象量の自動運転機能の動作状況を Fig. 7 および Fig. 8 に示す。

図から解るように掘削状態が安定或いは不安定にかかわらず各操作対象は、プログラムどおりの動作をし、自動掘削が計画どおり行なわれていることを示している。391リングと470リングを比較してみるとトルク値は不安定状態の470リングが大きく、これに比例して泥土注入量も20ℓ/min から40ℓ/min に増加し、トルクの減少方向にコントロールされている。

S.C.回転数と B.H.土圧の関係においても、B.H.土圧を管理限界内に保持するために S.C.回転が追従し有効に作動していることがうかがえる。

一方、シールド推力はカッタビットの欠損・摩耗によって250tf から650tf に大幅な増加を示しているが、S.J.速度は B.H.土圧を管理限界内に収めるように制御されている。

B.H.土圧を一定に保つための S.C.回転数・BH 土圧の PI フィードバック制御は、PI パラメータの初期値が適切な場合は B.H.土圧は安定した状態で運転され、オペレータ側より S.C.の運転状態が不安定と連絡があった場合にのみ KP・PI 値の変更を行なった。

なお、自動運転の各操作対象の運転率は、加泥注入：36%，S.J.速度：51%，R.D.：19%，S.J.：71%であった。

R.D.の自動運転率が低いのは、礫層での掘削が主であったため R.D.への石の噛み込みが多く、手動運転で正逆転を行った結果に起因するものである。加泥注入操作については、自動運転に入った時点の設定量が大き過ぎると、Fig.9 に示したようにチャンバー内の土砂が流動化し、S.C.の回転を止めても R.D.から噴発するという現象が見られたため、注入量の設定について手動操作が主となった。掘削全断面が礫層の区間においては、30～35%の加泥注入率をとっても噴発現象は起こらなかった。

3-3 解析結果

シールド工事全般のデータ解析は膨大な量となるため、その一部について報告する。

システムの稼働実績の項で記したように、605リング、902リング及びシールド回転立坑の計3箇所でのビットの交換を含む面板などの修理を行っているが、605リングでの交換時までを代表例として、350リング～450リングの安定した掘削領域と450～550リングの不安定掘削領域を比較し、解析の結果を以下に記す。

(1) シールド総推力のリング間変化

Fig. 10, 11 に示すように435リングまでは総推力は300～350tf と一定した値で推移しているが435リング以降、急激に600～700tf まで増加している。これはカッタビットの欠損・摩耗の影響がこの付近から表れ、カッタヘッドの切削性能が悪化し、その結果掘削土のチャンバー内への取込みが少なくなったことを示すものである。

(2) B.H.土圧のリング間変化及びチャンバー内土圧のヒストグラム

Fig. 12, 13 に示すように350～400リング付近までは B.H.土圧がほぼ一定の0.8kgf/cm²付近で安定した値

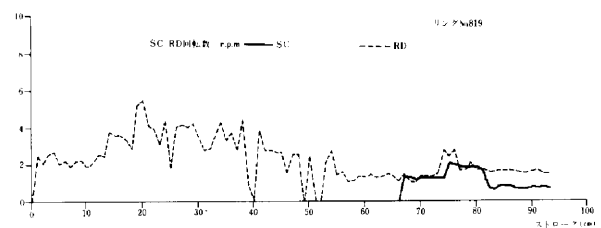


Fig.9 S.C./R.D.回転数

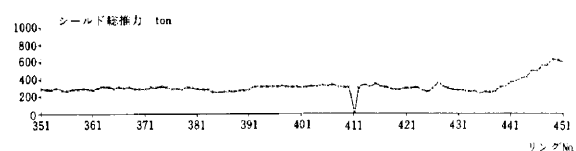


Fig.10 シールド総推力 (350～450R)

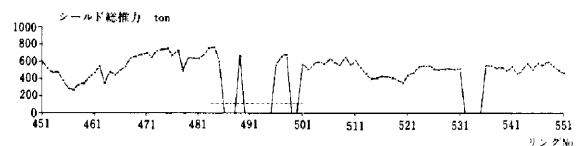


Fig.11 シールド総推力 (450～550R)

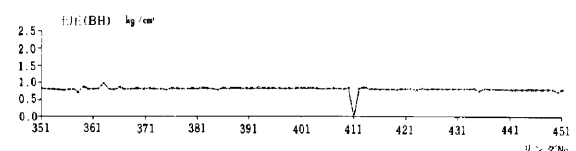


Fig.12 B.H.土圧 (350～450R)

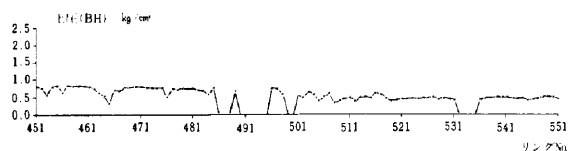


Fig.13 B.H.土圧(450～550R)

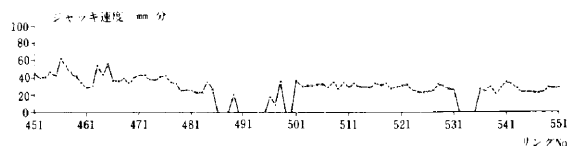


Fig.19 ジャッキ速度(450～550R)

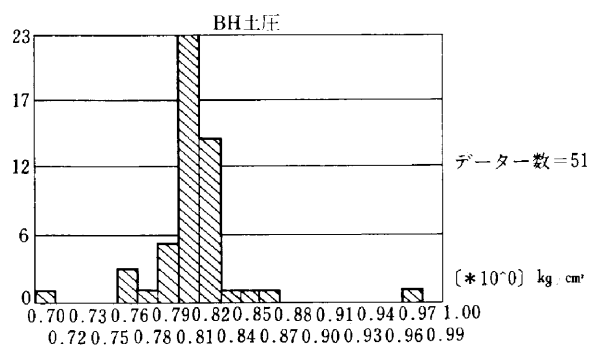


Fig.14 B.H.土圧ヒストグラム(350～400R)

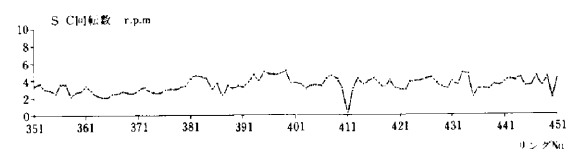


Fig.20 S.C.回転数(350～450R)

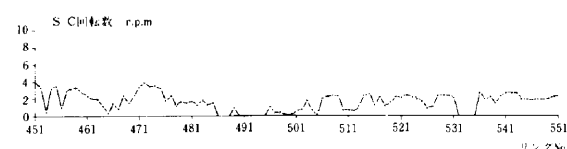


Fig.21 S.C.回転数(450～550R)

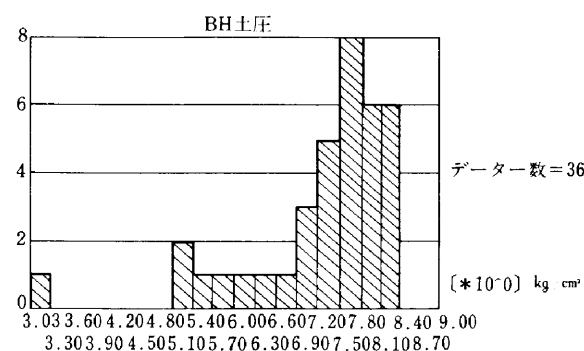


Fig.15 B.H.土圧ヒストグラム(450～485R)

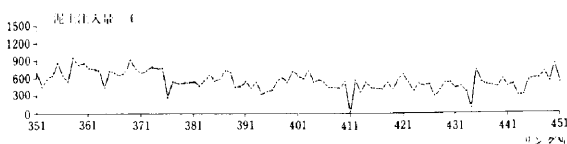


Fig.22 泥土注入量(350～450R)

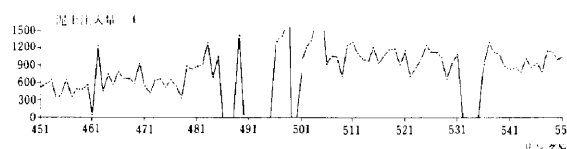


Fig.23 泥土注入量(450～550R)

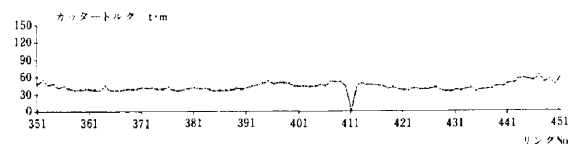


Fig.16 カッタートルク(350～450R)

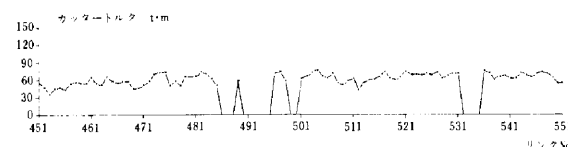


Fig.17 カッタートルク(450～550R)

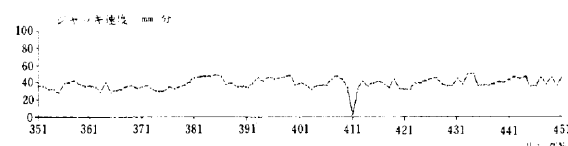


Fig.18 ジャッキ速度(350～450R)

を保っているが、450リング以降リング間の土圧が不安定な状態となっている。

また、Fig.14,15のヒストグラムに示すように、安定掘削領域ではB.H.土圧は精度良く一定管理巾の中に保たれているが、不安定掘削領域ではバラツキが目立っている状態がうかがえる。この原因はカッタービットの欠損・摩耗により掘削土の取込みが少なく、バルクヘッド内の土圧保持が困難となったことを示すものである。

3) カッタートルクのリング間変化

Fig.16,17に示すように、カッタートルクの値は435リングまでは45tf・m付近で推移しているが、それ以降増加傾向にある。この原因は前述の理由によるものである。

4) その他のリング間変化

Fig.18,19のジャッキ速度、Fig.20,21のS.C.

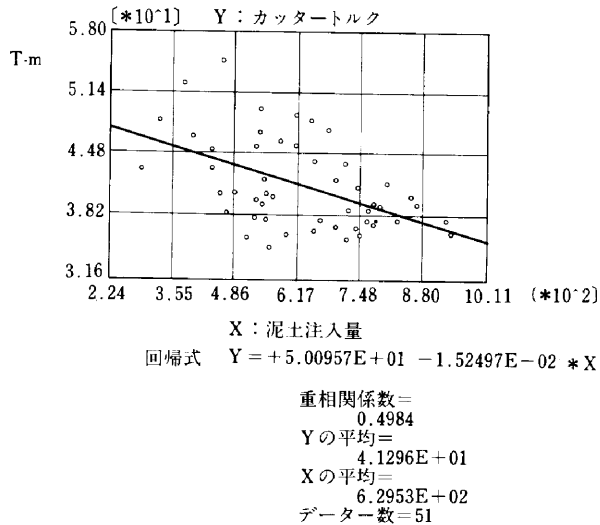


Fig.24 カッタートルクー泥土注入量 (350～400R)

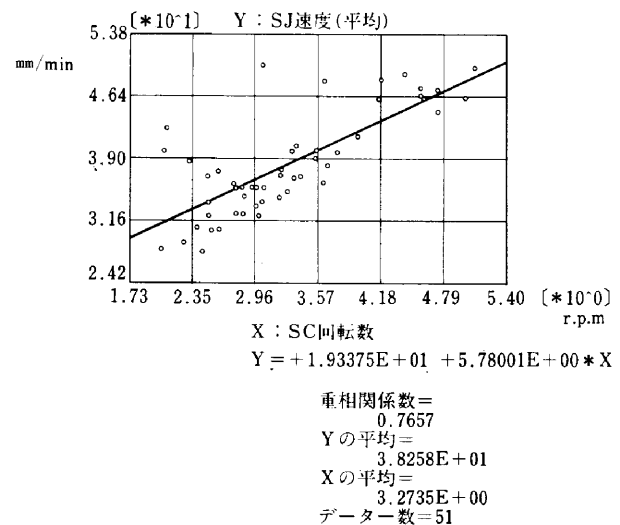


Fig.26 S.T.速度ーS.C.回転数 (350～400R)

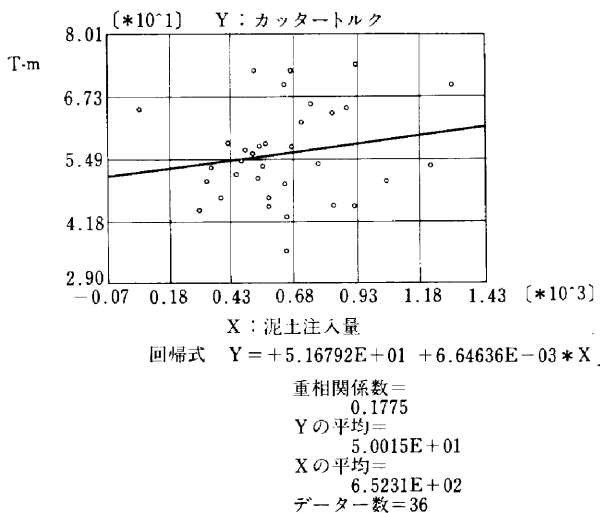


Fig.25 カッタートルクー泥土注入量 (450～485R)

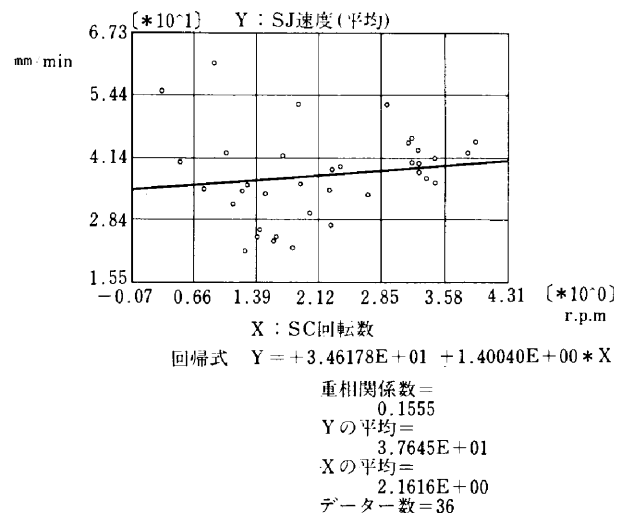


Fig.27 S.T.速度ーS.C.回転数 (450～480R)

回転数, Fig. 22, 23 の泥土注入量について, 不安定領域でのデータの乱れが見られる。

5) 1次変数線形回帰分析

① カッタートルクと泥土注入量

カッター圧力が設定値を超えた場合, S.J.速度が減速すると共に S.J.速度に応じた泥土注入を行う比例制御方式を採用しているが, Fig. 24, 25 に示すように安定掘削領域での重相関係数は0.4984であるが, 不安定掘削領域では0.1775と低い値を示し, 相互の相関が無くコントロールの困難さを表している。

② S.J.速度と S.C.回転数

S.C.回転数が「能力を超える/能力に余裕がある」という場合に S.J.速度をステップ状に減速/増速を行うステップ制御を採用しているが, Fig. 26, 27 に示す

ように, 安定掘削領域での相関係数は0.7657と高いが, 不安定掘削領域では0.155と低く, 両者の間に相関が見られない。

次に, 自動運転が行われた391リング(安定掘削), 470リング(不安定掘削)について, 自動に関する各操作対象量について一変数線形回帰分析の解析結果について以下に記す。

① B.H.土圧と S.C.回転数

B.H.土圧を設定値に保つように, S.C.回転数を操作量として PI フィードバック制御を行っているため, 制御が良好な状態であれば相互の重相関係数は, 低い値を示すのが理想である。

Fig. 28, 29 に示すように, 安定, 不安定掘削領域にかかわらず重相関係数の値は低い。このことは制御

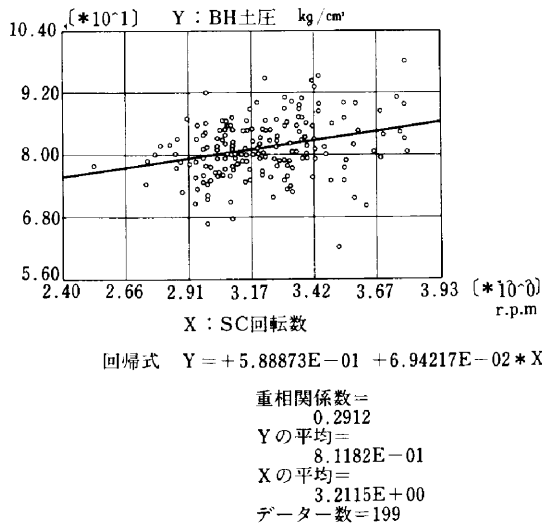


Fig.28 B.H.土圧-S.C.回転数(391R)

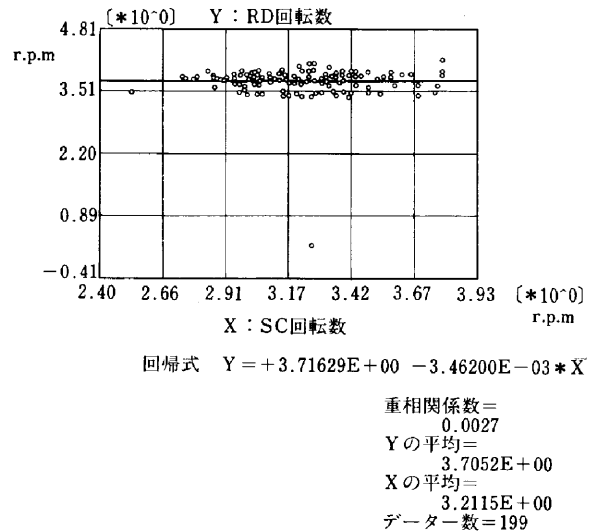


Fig.30 R.D.回転数-S.C.回転数(391R)

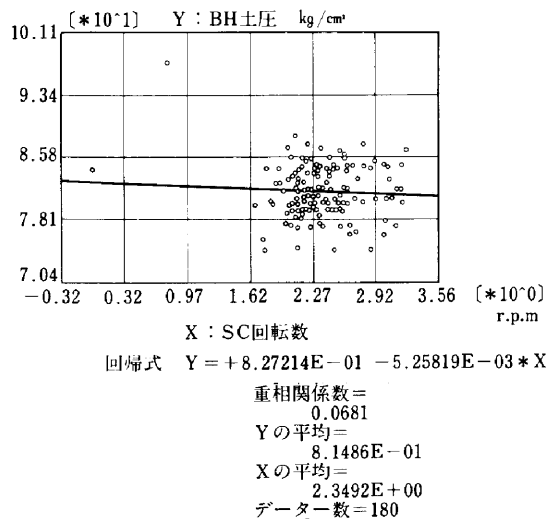


Fig.29 B.H.土圧-S.C.回転数(470R)

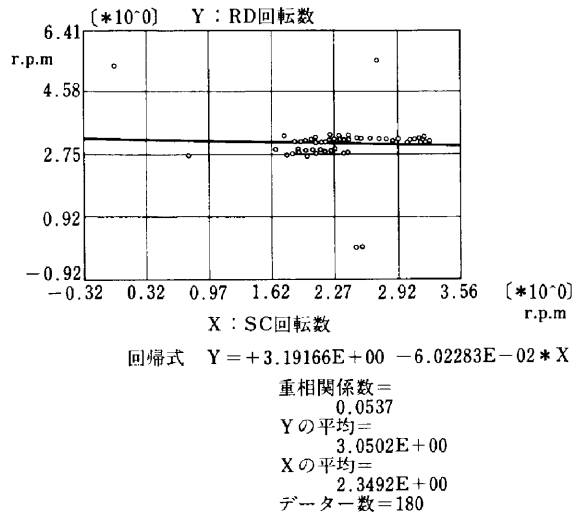


Fig.31 R.D.回転数-S.C.回転数(470R)

が理論通り良好におこなわれていることを示している。一方、S.C.回転数について見ると、安定掘削領域では2.9～3.4rpmの回転範囲にあるが、不安定領域では掘削土の取込みが不足のため、1.6～2.9rpmと低い回転範囲にあり掘削状況の違いを反映している。

② R.D.回転数とS.C.回転数

最適な排土状態を保つように、S.C.回転数とR.D.回転数を比例制御としている。制御が良好であれば重相関係数は、高い値を示すことになるがFig. 30, 31ではR.D.回転数の制御を手動操作としているため、重相関係数は0に近い値となっている。

③ S.J.速度とS.C.回転数

B.H.土圧制御が可能な範囲内で最大掘進速度が得られるようにステップ制御方式で減速、増速操作が行われ、掘削状態の変化にかかわらず重相関係数が高い値を示すほど良好なコントロール状態にあると判断さ

れるものである。

Fig. 32, 33に示すように、重相関係数は比較的高い値を示している。安定掘削領域ではS.C.の回転数範囲は2.9～3.5rpm付近に集中しているが、不安定領域では、1.6～2.9rpmと回転数範囲は低いところにあり、掘削状況の違いを示している。

④ S.J.速度とカッタトルク

カッタビット及び面板の保護のため、カッタ圧力が設定値を超えた場合にS.J.速度を減速する制御方式を採用しているが、安定掘削領域ではトルクは設定値内で管理されるためS.J.速度の減速操作回数は少なくなる。従って重相関係数も低い値を示す。一方、不安定掘削領域ではトルクが設定値を超える回数が増加するため、S.J.速度とカッタトルクの間に相関を生じることになる。

Fig. 34, 35に示すように、安定掘削領域では重相

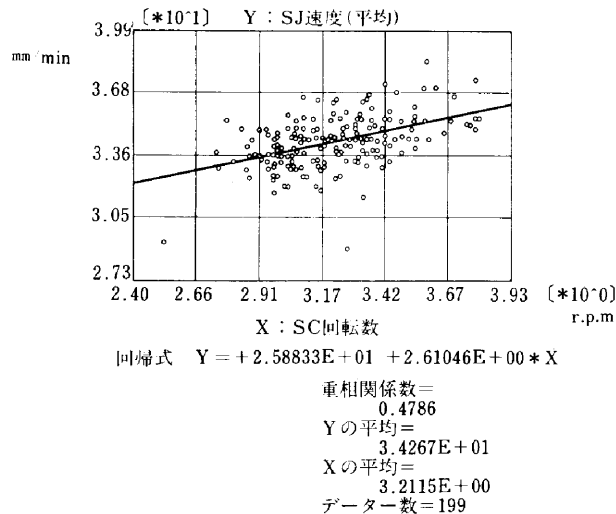


Fig.32 S.T.速度－S.C.回転数 (391R)

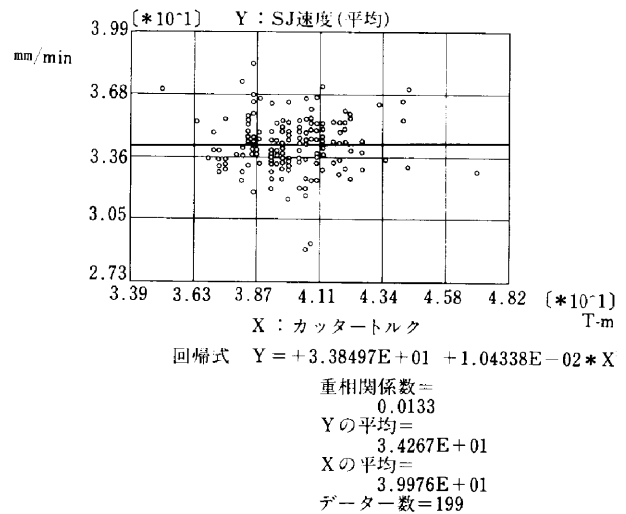


Fig.34 S.J.速度－カッタートルク (391R)

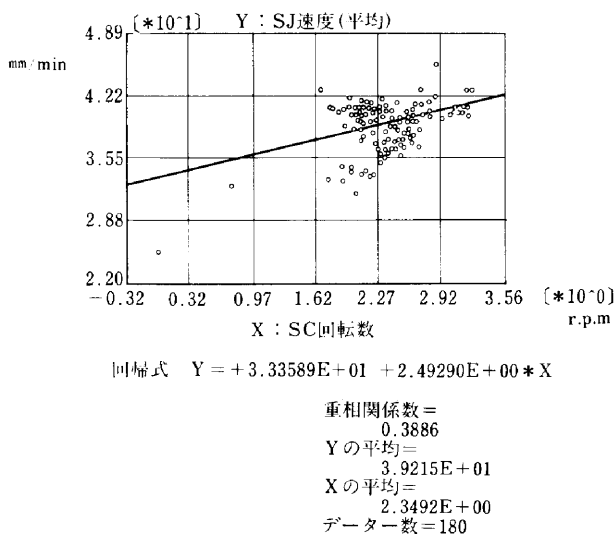


Fig.33 S.T.速度－S.C.回転数 (470R)

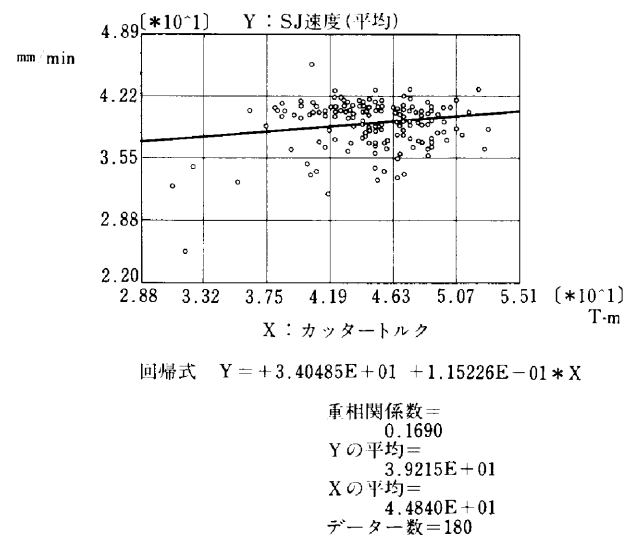


Fig.35 S.T.速度－カッタートルク (470R)

関係数は0に近く、トルク値も36～43tmで運転されているが、不安定掘削領域での重相関係数は0.169と少し高い値を示すと共に、トルク値は37.5～50.7tmと高くなっていることが判る。

⑤ S.J.速度と加泥注入量

S.J.速度に応じた加泥注入を行う比例制御方式を採用している。S.J.速度はS.C.回転数、カッタ圧力に関係するステップ制御が基本であり、S.J.速度とカッタトルク間の考え方と同じである。従って、安定掘削領域ではS.J.速度を減速する操作回数が少ないため、重相関係数は低い値を示し、不安定掘削領域では高い値を示すことになる。Fig.36,37はその傾向を示している。

(6) 多変数線形回帰分析

B.H.土圧に対し各自動制御操作対象量、つまりS.C.回転数、カッタトルク、S.J.速度、泥土注入量のどの操作量がどの程度の影響を与えているかを分析する。

Fig.38に示すように、安定掘削領域ではB.H.土圧に対して影響を与えている操作量の順位は、S.C.回転数、泥土注入量、カッタトルク、S.J.速度となっている。

一方、不安定掘削領域での操作量順位は、カッタトルク、S.C.回転数、泥土注入量、S.J.速度となっている。不安定な掘削状態では450～550リングのトルクヒストリカルトレンドに見られるようにトルク値がカッタビットの欠損、摩耗によって急激な増加を示している。このトルク値の増加が直接B.H.土圧に影響を与えるものではないが、制御フローの中で間接的に関与している。

3-4 システムの問題点

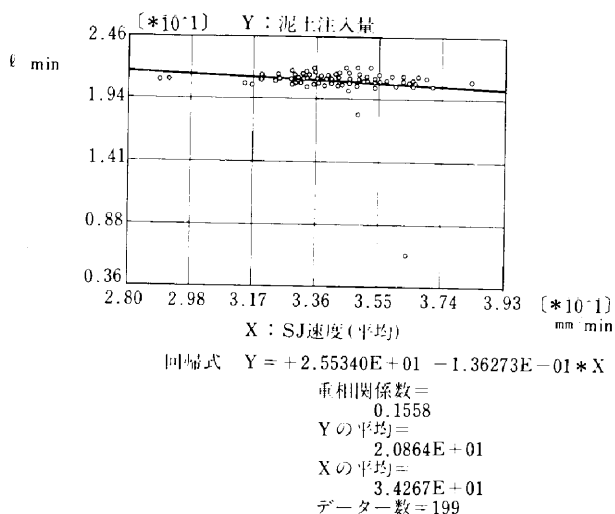


Fig.36 S.J.速度-泥土注入量 (391R)

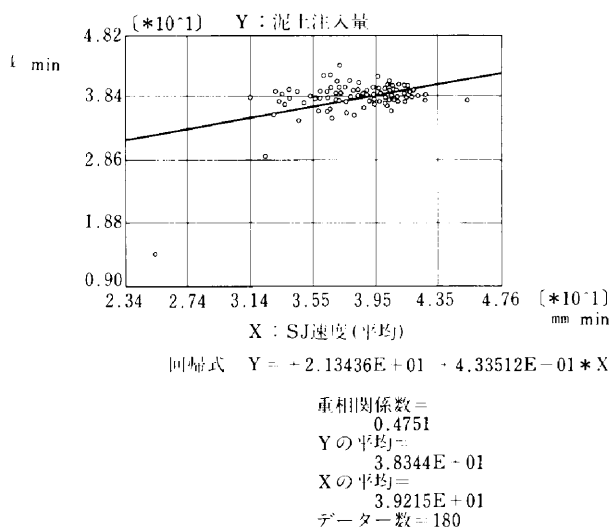


Fig.37 S.J.速度-泥土注入量 (470R)

今回、新たな技法に基づく掘削管理、土圧制御システムを採用したが、システムの稼働結果から見て以下に記す問題点があり、今後これらに対する対応が必要である。

(1) 加泥注入量のコントロールシステム

今回の工事において、加泥注入量が原因と見られる噴発現象の事例があった。噴発原因は一概に加泥量だけの単純な要因ではなく、地山の粒度構成、自立性、地下水などの複合要因によって起こるものであるが、当現場では、主な要因が過大な加泥量によるものと判断した。加泥注入量は自動運転に切り替えられた時点の注入量とS.J.速度の比を保持しながら制御する以外に、カット圧力が異常な場合に注入率を増すシステムとなっている。

従って、不安定掘削領域では、カット圧力が設定値を超える頻度が多いため、注入率が自動的に増加する。その結果としてチャンバー内の掘削土砂が流動化を生じ、S.C.が回転しないのかかわらず噴発を誘発したものと

想定した。

従って、システムとしてS.J.速度との比例制御、あるいはカットトルクとのステップ制御で対応することには限界があり、B.H.土圧制御と同様な制御システムで、泥土注入量数リング分のサンプリングされた時系列データを用いて最適PIパラメータ値を求めるコントロール系の開発と共に、機械的な対応としてS.C.逆転操作でチャンバー内充填による噴発防止の自動機構を合わせて考える必要がある。

(2) 掘削土の土量管理

加泥型シールドにおける地山圧力と切羽土圧との圧力差と取込み量の関係を、森¹⁾は詳細な実験により明らかにしている。それによると切羽崩壊を発生させない取込み量の許容変化量は、理論体積の2.8%程度であり、取込み土量の変化で切羽制御を行う場合は、掘削体積を少なくとも1%以内の精度で計測しなければならない。しかし、実際の計測精度では少なくとも数%の誤差があり、取込み土量で切羽を制御するのは困難であるとしている。

一方、施工管理の側から考えると、制御の問題は別としても、地山崩壊の判断管理基準として、実排土量を把握する必要がある。今回のシステムでは、スクリーンの断面積・回転数及び充填率から排土量を理論計算する従来の方式でグラフィック表示しているが、今回の施工の結果では、スランプ14~18cmの排土状態で、ズリトロ台数換算土量と比較して誤差率5%程度であった。

従って、今後はリアルタイムで応答する土量計測システムの開発が早急に望まれる。

(3) その他

制御システムとの直接的な関連はないが、礫層の掘削ではR.D.への礫の噛み込みが多く、R.D.停止の事例が多発した。そのため大半のリングを手動で操作せざるを得なかった経緯がある。今後、礫層の掘削に際しては、R.D.の自動逆転あるいはインチング操作を機械的に織り込んだものを考える必要がある。

次にデータ解析について、解析結果を実際の施工管理にどのようにフィードバックしていくかがこれからの問題であり、単なるデータの収録にならないように留意すべきである。

3-5 将来展望について

従来困難視されていた滞水巨礫層のシールド掘削に、PIパラメータ調整技法を織り込んだ掘削管理、土圧制御システムを採用し、実際の施工を行ったが、カットビットの異常摩耗・欠損という状況にもかかわらず、一応実用化の方向付けがなされた。

今後、改良あるいは新たな対応を必要とする点もあるが、システムの根源にかかわる問題点は見当らず、今後このシステムでの実績を積み重ね、ソフト及びハードの改良を加えれば、システムとしての完成度は高くなるものと考えている。

今回報告したものは制御の一部にファジィ理論を応用した土圧制御システムであるが、将来的にはジャイロコンパス、レーザーなどを利用した位置計測システムとファジィ理論を基本とした姿勢制御システムの組合せによって、シールドの全自動化システムへと展開されるものであろう。

§ 4 . あとがき

当工事は、1237mの掘削を終えて2次巻を施工中である。今回採用したシステムは、今後一部の改良を加えて広く土圧式シールド現場に採用されるものと思われる。

最後に、当システムの採用に当ってご協力をいただいた本社機材部に感謝します。

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(3)、トンネルと地下、Vol. 17, No.7, pp. 61-71, 1986