

# シールド掘進機用遠隔自動制御システムの開発

## Development of Remote and Automatic Control System for Shield Machines

日立建機株式会社では、軟弱地盤下のトンネル施工に使われる密閉加圧式シールド機械で、切羽の安定と施工精度の向上、オペレータの安全確保と負担の軽減などを目標とした遠隔自動制御システム“HIRAC”を開発した。このシステムは、土圧検出表示装置、切羽安定制御装置、遠隔制御装置、全自動掘進制御機構及び掘進方向表示装置より構成されている。特に切羽安定制御装置は、密閉加圧式シールド機械で掘進する際に地盤の隆起や沈下を生じない土圧を保ちながら自動掘進を行なうためのもので、これにより安定した施工が可能になった。また、全操作を押しボタンによる遠隔操作とし、かつ掘進中のすべての動作を自動化することによりオペレータの安全性向上と負担の軽減が叶えられ所期の目的を満足するシステムが実現した。

小野耕三\* Ono Kôzô  
 須田正男\* Suda Masao  
 水谷 努\* Mizutani Tsutomu

### 1 緒 言

最近、軟弱地盤下のトンネル施工が増大している。軟弱地盤施工の問題点は、切羽からの湧水を止めながら軟弱な地盤に対し隆起も陥没もさせずに掘削するという点にある。このため、空気圧によって止水を行なう圧気工法や、地盤凝固剤を用いる薬液注入（以下、薬注と略す）工法を補助的に用いてきたが、主として環境問題に関連してその使用が徐々に制約されつつある。そこで圧気や薬注の使用を最小限にできる工法として、**図1**に示すような回転カッタによって掘削した土砂

を、密閉されたチャンバ内に充満させて加圧状態を保ちながら、チャンバ内の土砂をスクリーコンベヤなどの排土機構で排土するタイプのシールド機械が注目されている。このような一連のシールド機械を密閉加圧式シールド機械と呼ぶことにする。

日立建機株式会社では、この密閉加圧式シールド機械に対して、

- (1) チャンバ内の土圧を直接計測し管理することにより切羽

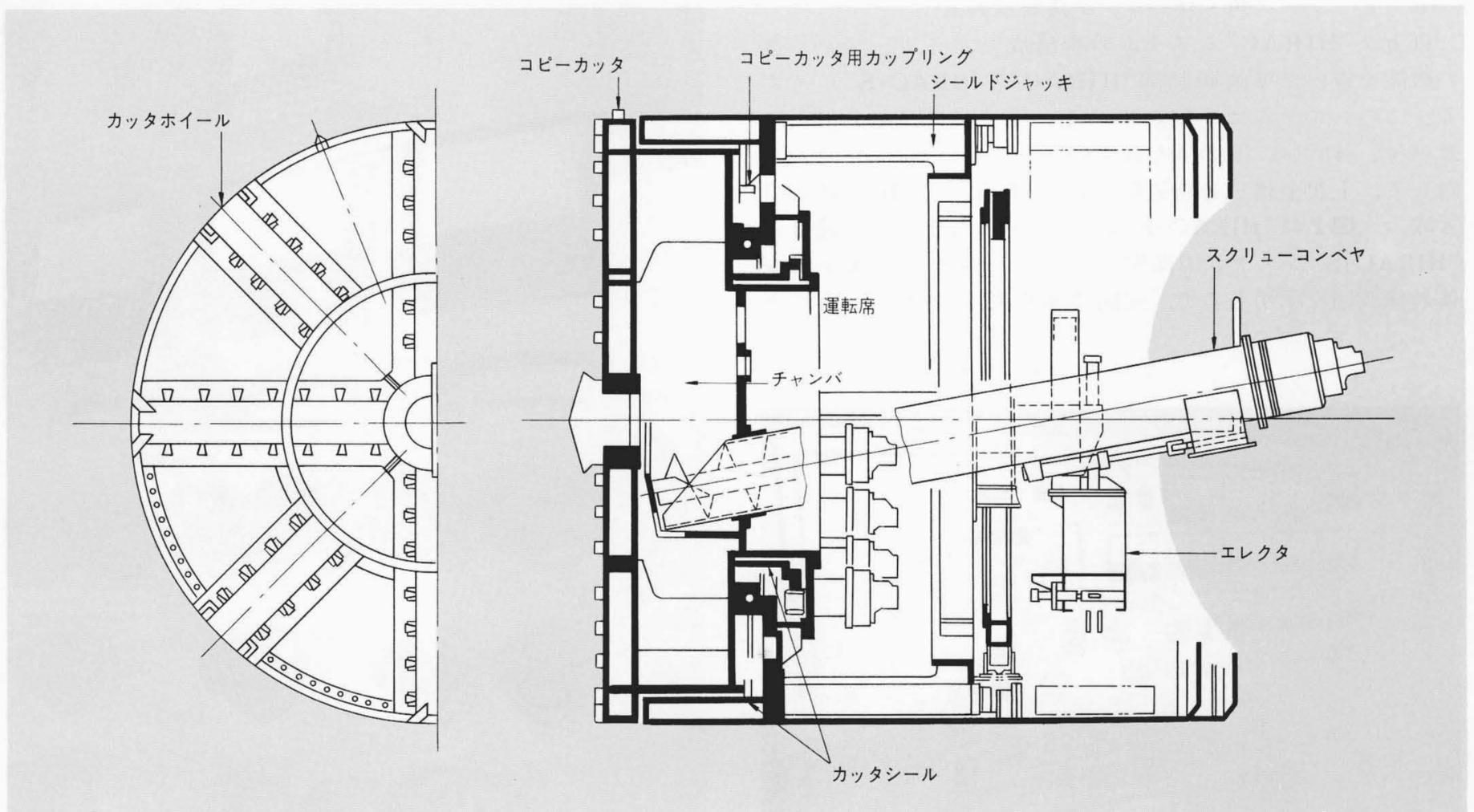


図1 密閉加圧式シールド機械 カッタで切削した土砂をチャンバ内に充満し、スクリーコンベヤでチャンバ内を加圧状態に保ちながら排土する。

\* 日立建機株式会社土浦工場

の崩壊を防ぐ(土圧計測・制御)。

(2) 掘進中の操作を極力自動化してオペレータの負担を軽減し、同時に操作の信頼性を向上させる(自動運転)。

(3) オペレータの居住性・安全性向上のため、より良い環境条件の場所で全操作を行なえるようにする(遠隔表示及び制御)。

などの特長を付与し、同種シールド機の性能を飛躍的に向上させることを目的とした遠隔自動制御システム、Hitachi Remote and Automatic Control System(以下、“HIRAC”システムと略す)を完成し、既に実機に適用してすべての実施例で満足すべき性能と信頼性を確認したので、本稿はそのシステムの概要について報告する。

## 2 “HIRAC”システムの構成と概要

“HIRAC”システムは次に述べる各装置、機構から構成されている。

- (1) 土圧検出表示装置
- (2) 切羽安定制御装置
- (3) 遠隔制御装置
  - (a) ポンプ吐出し量遠隔制御機構
  - (b) 方向切換弁遠隔制御機構
  - (c) 運転状態遠隔表示
- (4) 全自動掘進制御機構
  - (a) スクリューコンベヤ回転自動制御機構〔上記(2)に含まれる〕
  - (b) 掘進速度自動制御機構
  - (c) ローリング角自動修正機構
- (5) 掘進方向表示装置
  - (a) ストローク表示装置
  - (b) ピッチング角・ローリング角表示装置

以上が“HIRAC”システムの全構成であるが、その一部の機能を省いた準遠隔制御“HIRAC”(“HIRAC-S”)もある。このシステムは上記の中の(1)、(2)を基本とし、(3)の(a)及び(c)、(4)の(a)、(5)の(a)だけを付加したものである。これに対して、上記全構成を全遠隔制御“HIRAC”(“HIRAC-F”)と呼ぶ。図2に“HIRAC-F”システム用操作盤面を、図3に“HIRAC-S”システム用操作盤面を示す。図4はシステム全体の構成図を示すもので、同図中\*印部分を省いたものが

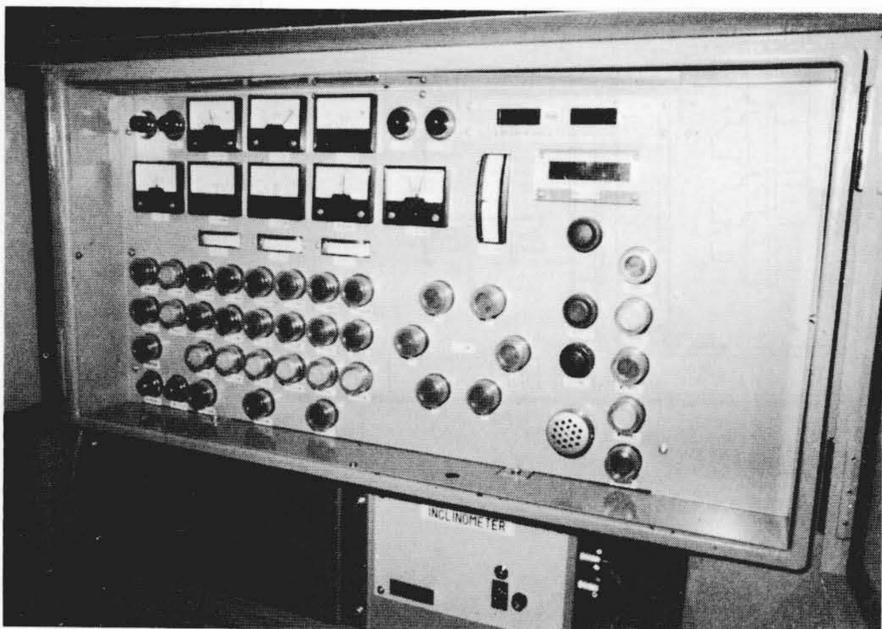


図2 “HIRAC-F”システムの操作盤面 このパネルよりすべての作動状況が分かると同時に、すべての操作が押しボタンにより可能である。

“HIRAC-S”システムである。

“HIRAC-F”システムでは全遠隔制御のため、図5に示すように、後方台車の任意の位置に操作盤、制御盤を設置することにより、その場所ですべてのシールドの掘進制御が可能である。また“HIRAC-S”では油圧方向切換弁の操作が、従来のメカニカルシールドと同じ本体内での直接手動操作のため、操作盤だけを本体内に設置する必要がある。他の部分は任意の位置に設置が可能である。

なおこの遠隔自動制御システム“HIRAC”を装備した日立建機株式会社の密閉加圧シールドを、特にControlled Soil Pressure Shield(CPシールドと略す)と呼んでいる。

## 3 土圧検出表示装置

土圧検出表示装置は、図5に示した土圧検出器、動ひずみ計及び操作盤面上の土圧表示計より構成されている。この中で特に重要なものは、土圧検出器である。ほとんどの市販の土圧計は、土木工学上の要求より静止又はごくわずかな変動しかしない地盤の土圧測定用として設計されているので、土砂と土圧計との相対すべり速度が毎分数メートル以上の状態の土圧を計測しなければならない本システム用土圧計としては市販品が使えなかった。そこで、次のような特長をもった土圧計を開発する必要があった。

- (1) 土砂の横方向のすべり運動があっても正確に垂直圧力が検出できること。
- (2) 長期にわたる土砂との摩擦により表面が摩耗しても性能



図3 “HIRAC-S”システムの操作盤面 このパネルと近くに設けられた方向切換弁の操作とにより、すべての操作が可能である。“HIRAC-F”に比べて表示される計器は少なくなっている。

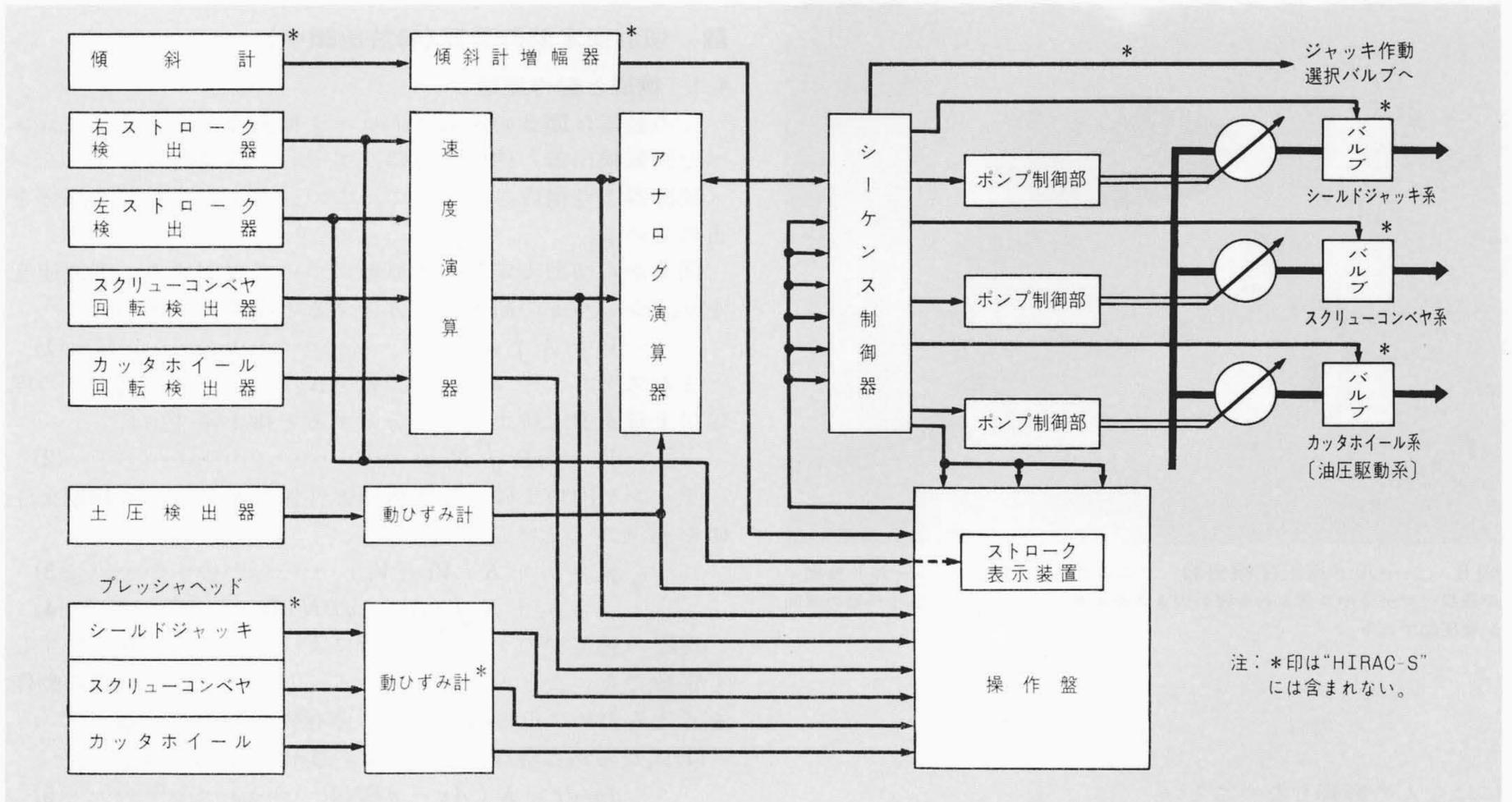


図4 “HIRAC”システムの全体構成図 左側の各検出器の出力をそれぞれの変換・増幅器を介して一定のレベルの出力にし、操作盤の計器に表示する。一部の出力はアナログ演算器を経由してシーケンス制御器に入り、自動制御用の信号となる。

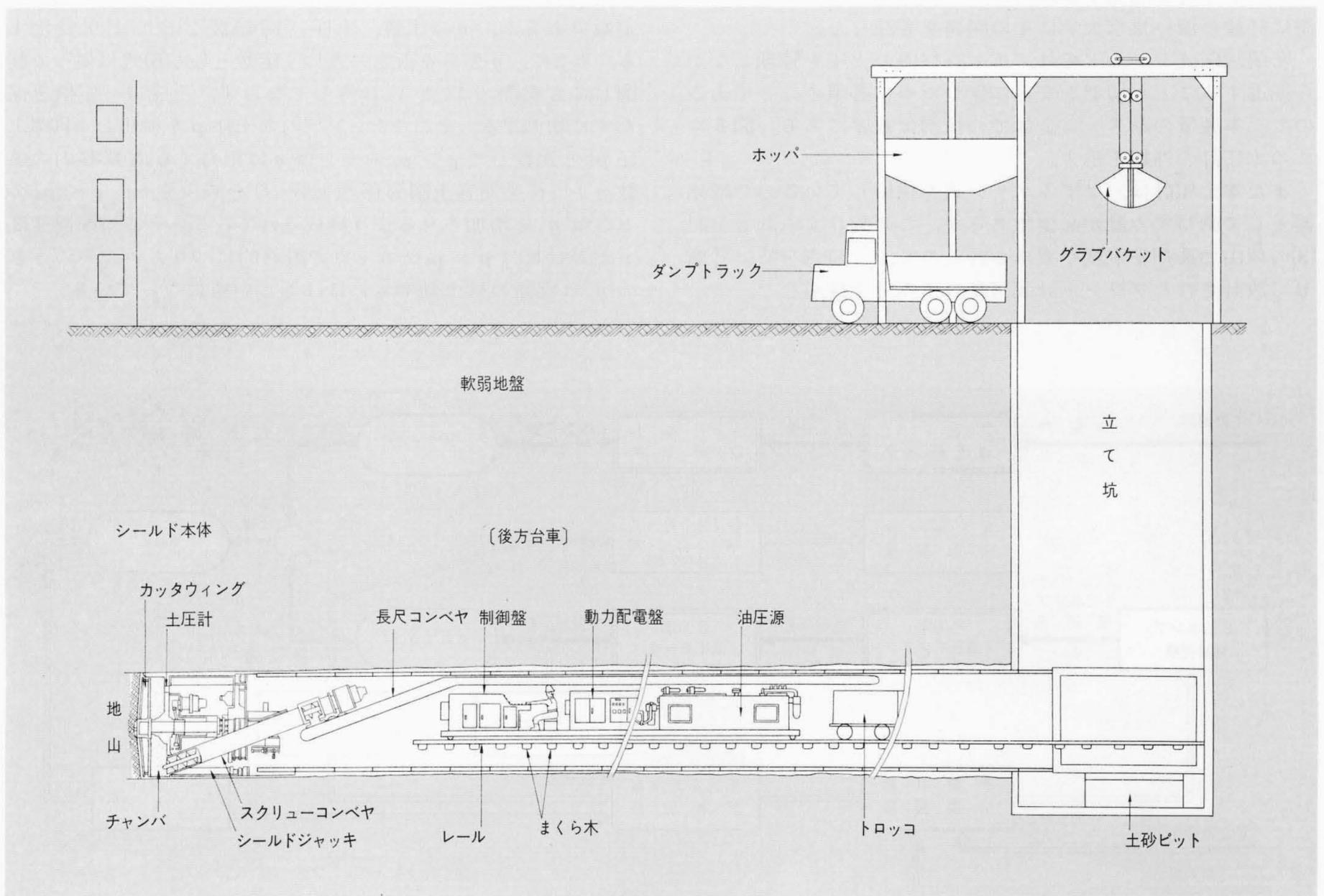


図5 密閉加圧シールド工法 スクリューコンベヤから排土された土砂は、長尺コンベヤ、トロッコを介して立て坑より坑外のホッパに蓄積され、ダンプにより運ばれる。この図例では、操作盤と制御盤が一体になっている。

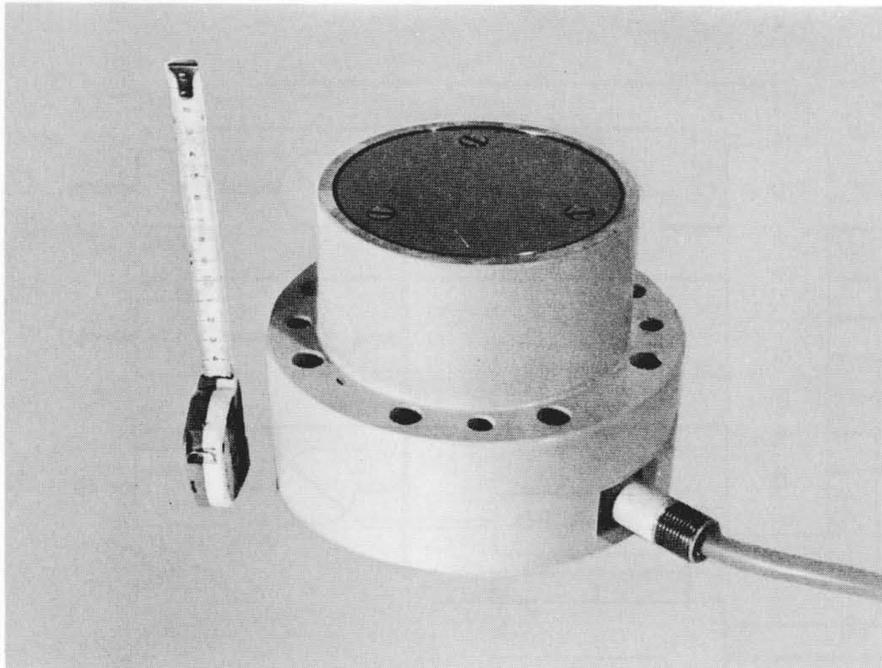


図6 シールド用土圧検出器 この土圧計の寸法は、シールド機械での取扱いや土砂中に含まれる礫の大きさを考慮して決められた。小径部の端面が受圧面である。

にはなんの影響もないこと。

(3) 掘進を始めると土圧計への荷重は除去できないので、長期間安定した特性であること。

(4) 防水性や機械的強度がシールドの現場環境に適合したものであること。

この土圧計を開発するに当たり、こうした条件での土圧計測に経験の深い東京大学にその開発を委託した。

密閉加圧式シールドでは、チャンバ内の土圧を管理しながら掘進することが切羽を安定に保つために必須のことであるので、本装置のシステム全体での役割は重要である。図6にこの土圧計の外観を示す。

また本土圧計は、ひずみゲージ式を採用しているので増幅器として動ひずみ計が必要であるが、この動ひずみ計も上記(3)の理由で長期安定度が要求されるので、この点を特に考慮して設計されたプラント計装用動ひずみ計を採用した。

#### 4 切羽安定制御装置(特許出願中)

##### 4.1 構成と動作原理

この装置は図5の左右ストローク検出器、スクリューコンベヤ回転検出器、速度演算器、アナログ演算器及びシーケンス制御器より構成されていて、このシステムの主要な部分を占めている。

図7から切羽安定制御の原理について説明する。掘進速度を  $v$ 、シールドの断面積を  $A$  とすると掘進土量  $V_1$  は、

$$V_1 = A \int v dt \dots\dots\dots(1)$$

またスクリューコンベヤ回転を  $N$ 、その一回転当たりの理論排土量を  $B$ 、排土効率を  $\eta$  とすると排土量  $V_2$  は、

$$V_2 = \eta B \int N dt \dots\dots\dots(2)$$

チャンバ内の土砂の等価体積弾性係数を  $K$  とし、初期土圧値を  $p_i$  とすると土圧  $p$  は、

$$p = p_i + K (V_1 - V_2) \dots\dots\dots(3)$$

$$= p_i + K \int (Av - \eta BN) dt \dots\dots\dots(4)$$

実際の施工中のデータの解析によって、(4)式の  $K$  は必ずしも定数でないことが分かっている。しかし、この制御の動作を考えるための近似式として十分有効なものである。

(4)式からある時点での土圧  $p$  の変化率  $dp/dt$  は、

$$dp/dt = K (Av - \eta BN) \dots\dots\dots(5)$$

そこで掘進速度  $v$  が与えられたときに  $N$  を次式の

$$N = \frac{A}{\eta B} v \dots\dots\dots(6)$$

に従って制御すれば土圧変化率  $dp/dt$  は0となり、土圧  $p$  を一定に保つことができる。  $A$ 、  $B$  は機体の設計により定まる定数であるが、  $\eta$  は土質、土圧、回転数などにより変化する。そこで、  $\eta$  をある仮定に基づく定数として(6)式に従って制御しても実際の  $V_1$  と  $V_2$  は等しくならず、土圧は一定値を保たずに増減する。そこでチャンバ内の土圧  $p$  を検出し、目標土圧  $p_0$  と比較して  $p > p_0$  のときは  $\eta$  に相当する演算器内の係数  $\eta'$  (これを便宜上制御係数と呼ぶ)を減少させ、  $p < p_0$  のときは  $\eta'$  を増加させるよう構成されている。そこで掘進速度  $v$  と  $N$  は真に  $p = p_0$  となる点で最終的につりあい、そのときの  $\eta'$  は実際の排土効率  $\eta$  にほぼ等しい値になっている。

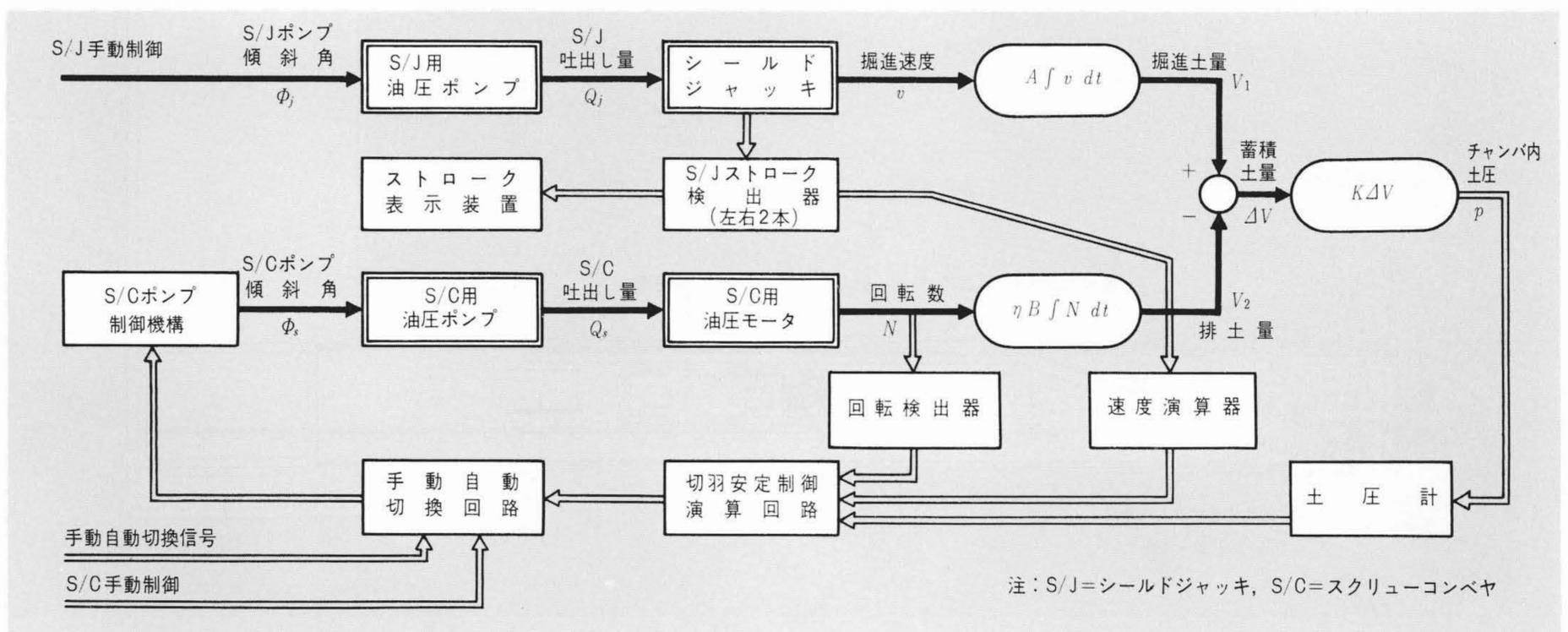


図7 切羽安定制御系統図 黒矢印で結ばれた部分が、本体の駆動系統及びそれによって生ずる各パラメータの関係を示し、白矢印で結ばれた部分が、本制御装置に含まれる部分である。

## 4.2 特徴

この制御の本質的に良い点は、 $\eta$ の変化、定数 $A$ や $B$ の設定誤差などがあっても、チャンバ内土圧 $p$ が $p_0$ に等しくなるように $\eta'$ の修正という形で補正するので、誤差が集積していくという欠点が全くない点である。そこで、 $p_0$ として切羽より土砂を掘進量に見合った量だけ過不足なく取り出している地山の静止土圧に設定しておけば、種々のパラメータの影響を受けずに切羽を常に安定に保ち続けることができる。

また、排土量測定や地盤測量だけによって排土量を修正する方法と比較すると、数リング(1リングの長さは約90cm)掘進して初めて修正されるのに対して、この制御では数ミリメートル掘進する間に $p$ の変化としてフィードバックがかかり、自動的に排土量が修正されるので切羽を安定に保つという点では格段の感度と精度をもっており、今までの施工例でもそれが実証されている。

## 4.3 施工データの例

図8、9は切羽安定制御による自動掘進のデータの一例を示すものである。いずれの場合も掘進速度 $v$ の変化に対して、スクリーコンベヤ回転 $N$ が自動追従し、土圧 $p$ がほぼ一定に保たれていることが分かる。図9で掘進速度 $v$ の立上りに対して約30秒ほど遅れてスクリーコンベヤ回転 $N$ が立ち上がり、その間に土圧 $p$ が上昇しているが、これは掘進停止中に土圧 $p$ が目標値より低下しているため、これが回復するまで手動でジャッキだけを作動させて土圧を上昇させ、その後で自動に入れているためである。

## 5 遠隔制御装置

シールド掘進中の全操作を、本体内で直接操作するのではなく、後方台車上の任意の位置に設置された操作盤より操作可能にしたのが本装置であって、先の図2に示したようにすべてのデータが同一パネル面に表示され、それぞれの作動がその場で制御可能になっている。次に具体的に各装置や機構について説明する。

### 5.1 ポンプ吐出し量遠隔制御機構

シールドジャッキ、スクリーコンベヤ、カッタホイール各系統のポンプ吐出し量を電氣的に遠隔制御するもので、各ポンプの最大吐出し量に対する現在の吐出し量比率をパーセントで操作盤面に表示し、かつその増減が押しボタンで行なえるようにしたものである。これはオペレータが従来のメカニカルシールドで、後方台車のパワーユニットまで行ってポンプ流量調節を行っていたのに比べると操作が非常に楽になり、かつ微妙な調整が可能になった。

### 5.2 方向制御弁遠隔制御機構

各バルブを電磁弁として、それらの遠隔制御を可能にした。これらの作動は、自動制御、手動制御いずれの場合のオン、オフ状態をもシーケンス制御器内で判別され、適切に作動するようになっている。また仮段取中の初期掘進中で、制御盤を含む後方台車の接続が不可能な場合とか、制御系統の万一の故障などに備えて、従来どおり本体内で直接手動バルブを操作する直接手動操作も可能になっている。この場合、ポンプ吐出し量調整も手動で直接操作もできる。

### 5.3 運転状態遠隔表示

“HIRAC”システムでは、すべての操作が電氣的に制御されるので、それらの作動状態を操作盤面上の計器などに表示することができる。そこで図2に示したように、チャンバ内土圧、掘進速度、スクリーコンベヤ回転、カッタホイール回転、各ポンプの吐出し量比率、各ポンプの油圧、ローリン

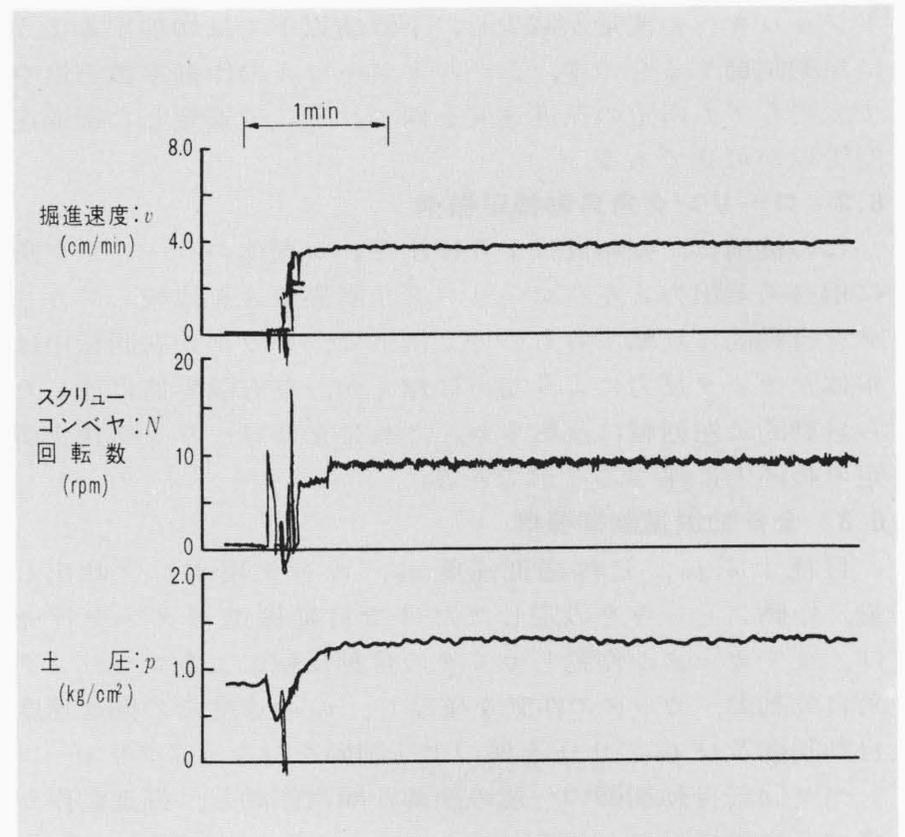


図8 自動掘進のデータ例(1) 昭和51年12月東京都葛飾区でのシールド外径2.44mの実機稼働記録である。

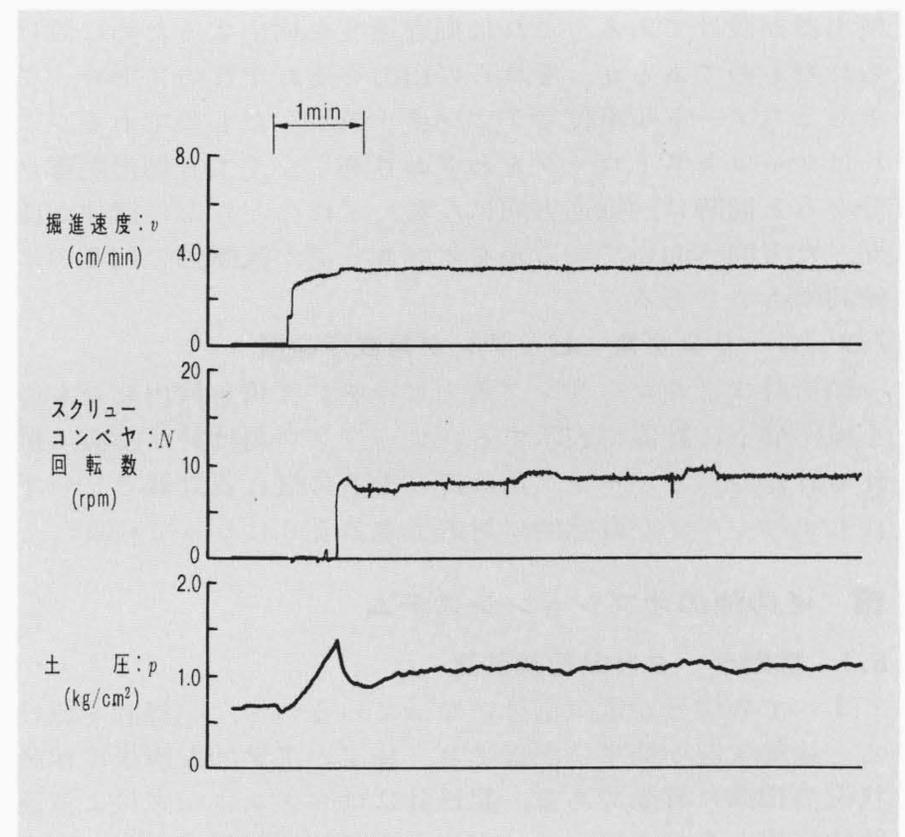


図9 自動掘進のデータ例(2) 昭和52年8月東京都足立区でのシールド外径4.41mの実機稼働記録である。

グ角、ピッチング角、左右ジャッキストローク、スクリーコンベヤ累積回転などが表示され、すべての作動状況が一目で分かるようになっている。

## 6 全自動掘進制御機構

前述の切羽安定制御装置に組み込まれたスクリーコンベヤ回転の自動制御機構に加え、次に述べるような自動制御機構を設け、それらをシーケンシャルに作動させることにより全自動掘進制御するのがこの機構である。

### 6.1 掘進速度自動制御機構

この機構は、掘進速度が設定した上限値以上になるとシール

ドジャッキへの流量が減少し、下限値以下では増加するように自動制御するもので、シールドジャッキの作動本数を途中で変更しても所定の掘進速度を保つ。そこで安定した掘進速度管理が可能である。

## 6.2 ローリング角自動修正機構

この機構は、傾斜計により検出された機体のローリング角に相当する出力と左右ローリング角限界値とを比較してカッタを自動的に反転するもので、例えば、カッタが右回転中は本体がカッタ反力により左方に傾くが、左方限界値に達したら自動的に左回転に反転する。これによりローリング角を所定の範囲内に保つことができる。

## 6.3 全自動掘進制御機構

目標土圧  $p_0$ 、目標掘進速度  $v_0$ 、カッタ用ポンプ吐出量、作動ジャッキを設定しただけで自動掘進ボタンを押せば、まずカッタが作動しカッタの自動反転によるローリング角自動制御、カッタの作動を確認し、 $v_0$ の速度での掘進速度自動制御及び  $p_0$ の土圧を保つ土圧制御を行なうスクリーコンベヤ回転自動制御の一連の制御が順次作動し、掘進動作がすべて自動で行なわれる。

## 7 掘進方向表示装置

### 7.1 ストローク表示装置

シールドジャッキの左右のそれぞれ1本ずつにストローク検出器が設けてある。これは掘進速度を検出するために設けられたものであるが、それらの出力をそれぞれのストロークとしミリメートル単位でデジタル表示したものである。これはジャッキストロークをわざわざ測らなくても掘進距離が分かると同時に、掘進方向に左右いずれへどれだけ機体が曲がった方向へ向いているかをオペレータが直感的に知るのに便利なものである。

### 7.2 ローリング角・ピッチング角表示装置

傾斜計によりローリング角・ピッチング角を検出したものを操作盤上に計器で表示する。ローリング角は針が左右に振れる計器で、ピッチング角は針が上下に振れる計器としいずれもオペレータが直感的に対応できるようになっている。

## 8 その他のオプションシステム

### 8.1 稼働データ自動記録装置

すべての信号が電気信号になっているので、記録計を設けると稼働状況が簡単に記録でき、施工の工学的な解析や稼働状況の把握に有効である。記録計にはペンレコーダによる連続的記録と6打点式レコーダによる断続的記録があり、注文に応じてそれぞれのチャンネル数は増減が可能である。

### 8.2 地上遠隔制御システム

遠隔制御が可能な“HIRAC-F”システムのすべての信号ケーブルを伸ばしさえすれば、地上の現場事務所内からでも制御が可能になる。しかし、数多くの信号ケーブルのすべてを最終的には1km近くも伸ばしていくことには実用上大いなる問題がある。

そこで、最近急速に発達してきたワイヤシェアリングシステムによるデータ多重通信<sup>1)</sup>を行なうことにより、わずか1本の同軸ケーブルだけですべての信号伝達が可能になった。こうした地上遠隔“HIRAC”システムも供給が可能である。

## 9 “HIRAC”システムによる効果

### 9.1 切羽の安定と施工精度の向上

(1) 切羽土圧を地山の静止土圧に保つことにより、地盤の隆

起や沈下の度合いを最小にすることができる。

(2) 左右ストローク、ピッチング角を常時表示してあるので、掘進方向の管理の精度が向上する。

(3) 自動運転や各種の安全機構により、誤操作による施工ミスが防げる。

### 9.2 オペレータの安全確保と負担軽減

(1) シールド機械の運転は、特に小口径になると狭い本体内で油圧機器や配管に囲まれた高温・高湿の悪条件のもとで行なわれているが、このシステムによって任意の場所で操作が可能になったため、より良い条件の所で運転ができる。

(2) 自動運転、各種インターロック機構により余計な神経を使う必要がなくなった。

(3) ジャッキストローク測定、ポンプ吐出量量の調整など、わざわざその場所まで出向く必要がなくなった。

### 9.3 データ収録及び稼働状況管理が容易

(1) すべての信号が電気信号になっているので、適切な記録計があれば稼働データが容易にとれ、施工の工学的解析が可能である。

(2) 稼働データ自動記録装置(オプション)を設けると、稼働状況の管理が容易、かつ的確に行なえる。

(3) 地上遠隔制御システム(オプション)によれば、地上の事務所内の操作盤面上にすべてのデータが表示されるので、関係者全員が常に切羽の状況を把握できる。

## 10 結 言

今後とも増大していくであろうと思われる軟弱地盤トンネル施工に対し、有効な工法として認められつつある一連の密閉加圧式シールド機械用制御システムとして開発した遠隔自動制御システム“HIRAC”システムについて、その構成、機能及び効果をまとめて述べた。

このシステムの実用化によって、幾多の効果があることは前述したとおりであるが、従来、悪環境条件のもとで勘に頼って作業する面が多かったトンネル施工が、このシステムにより作業環境条件の向上及び科学的な施工管理が可能になった。今後は、このシステムの改良を積み重ねていくと同時に、真にシールド工事の合理化を図るためには掘進作業以外の作業、例えば、セグメント組立、裏込剤注入、排土搬出処理などの合理化の問題が多く残されていることを肝に銘じ、今後の開発の指針としたい。

このシステムに用いた土圧計の基本部分は、東京大学で開発されたものであるが、その改良研究及び土質工学上の技術指導の面で同大学工学部 工学博士 千々岩教授、工学博士 畑村助教授及び竹内助手の各位から一方ならぬ御尽力と御指導をいただいた。ここに厚く謝意を表わす次第である。

また、本システムの1号機は大豊建設株式会社に納入され東京都葛飾区青戸地区で昭和51年12月に施工した泥土加圧シールドに搭載、採用された。当時、稼働実績のなかったこの新しい制御システムを積極的に採用された上に、数々の有益な御助言をいただいたことは、本システム開発上大きな支えとなった。同社の関係各位に対し、心から謝意を表わす次第である。

## 参考文献

1) 特集;ワイヤ・シェアリング・システムとその応用, オートメーション, 22, 8, 9 (昭52-8)