

## 36. シールド掘進機用遠隔自動制御システムの開発

日立建機 小野耕三

### 1. まえがき

最近軟弱地のトンネル施工が増大している。軟弱地施工の問題点は切羽からの湧水を止めながら軟弱地盤を隆起も陥没もさせずに掘る点にある。このため圧気や薬注が補助工法として併用されて来たが、主として環境問題に関連してその使用が段々に制約されつつある。そこでそれら補助工法の使用を最小限に出来る工法として図1に示すような回転カッタにより掘削した土砂を密閉されたチャンバ内に充填させ加圧状態を保ちつつチャンバ内の土砂をスクリーコンベア等の排土機構で排土するタイプのシールド機が注目されている。こうした一連のシールド機を密閉加圧式シールド機械と総称することにする。日立建機では密閉加圧式シールドに対し、

- (1) チャンバ内土圧を直接計測し管理する事により切羽の崩壊を防ぐ。(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) より良い環境条件の場所で全操作が可能にする事によりオペレータの居住性・安全性を改善する。(遠隔制御)
- 等の特長を附与し、同種シールドの性能を飛躍的に向上させる事を目的とした遠隔自動制御システム「ハイラック」

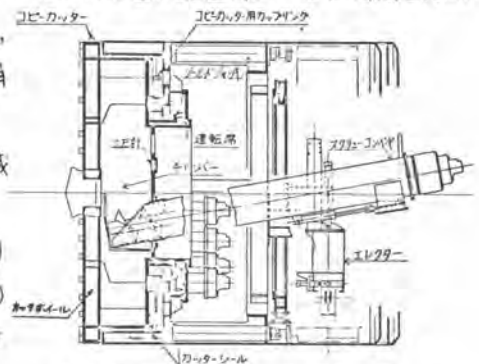


図1 密閉加圧式シールドの一例

(HIRAC; Hitachi Remote and Automatic Control System)を完成し、既に実機に適用し全ての実施例に於て満足すべき性能と信頼性を確認したので、ここにそのシステムの概要を報告する。

### 2. HIRACシステムの構成と概要

HIRACシステムは次の各装置、機構より構成されている。

- (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
- (4) 全自動掘進制御機構
- (5) 掘進方向表示装置

以上がHIRACシステムの全構成であり

その操作盤面を図2に、システム全体の構成を図3に示す。このシステムを全遠隔制御ハイラック(HIRAC-F)、図3の\*印部分を省略した上記(1)(2)を基本とし(3)(4)(5)の一部の機能を付したものを準遠隔制御ハイラック(HIRAC-S)と呼ぶ。

HIRAC-Fシステムでは全遠隔制御のため後方台車の任意の場所に操作盤、制御盤を設置する事によ

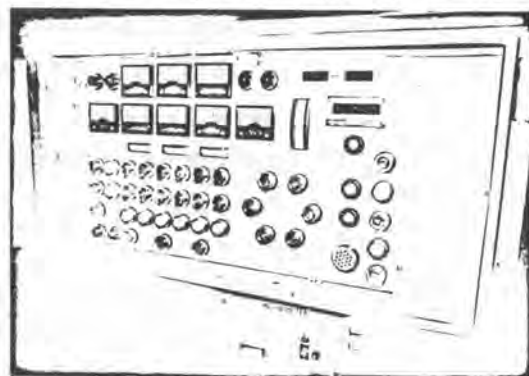


図2  
ハイラック  
システムの  
操作盤面  
(HIRAC-F)

り、その場所で全てのシールドの掘進動作が可能である。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様本体内部に於ける直接手動操作のため操作盤のみ本体内部に設置する必要がある。他の部分は任意の位置に設置可能である。

なおこの遠隔自動制御システムHIRACを装備した当社の密肉加圧シールドを特にCPシールド(Controlled Soil Pressure Shield)と呼ぶ。

### 3. 土圧検出表示装置

本装置は図3の土圧検出器、動歪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。市販の土圧計はほとんど土木工学上の要求から、静止又は極くわずかな変動しかしない地中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数%以上の状態の土圧をしかも長期にわたって測定せね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。そこで次のような土圧計の開発が必要であった。

- (1)土砂の種方向のすべり運動があっても正確に垂直応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磨耗しても性能に何らの影響もないこと。



図4 土圧検出器

- (3)掘進を開始したら土圧計への荷重は除去出来ない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したものであること。

本土圧計は、上記の条件に於ける土圧計測に経験の深い東京大学にその開発を委託した。

密肉加圧式シールドではチャンバ内土圧を適正に管理しながら掘進することが切羽を安定に保つるに必須の事なのでシステム全体に占めるこの役割は大きい。図4に本土圧計の外観を示す。

本土圧計は歪ゲージ式を採用しており増圧器として動歪計が必要だが、これにも(3)の理由で長期安定度が要求される。この点を特に考慮して設計されたプラント計装用動歪計を採用している。

### 4. 切羽安定制御装置(特許出願中)

本装置は図3の左右ストローク検出器、スクリュコンベア回転検出器、速度演算器、アナログ演算器、シーケンス制御器より構成され本システムの主要部を占めている。

図5により切羽安定制御の原理を説明する。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、

$$V_1 = A \int v dt \quad \text{---(1)}$$

スクリュコンベア回転を $N$ 、その一回転当りの理論排土量を $B$ 、排土効率を $\eta$ とすると排土量 $V_2$ は

$$V_2 = \eta B \int N dt \quad \text{---(2)}$$

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 $P_0$ とするとチャンバ内土圧 $p$ は、

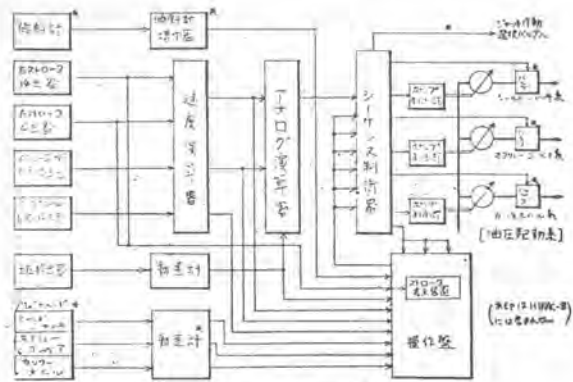


図3 HIRACシステム全体構成図

$$P = P_0 + K(\bar{V} - \bar{V}_0) \quad \text{---- (3)}$$

$$= P_0 + K(A\bar{V} - \eta BN) dt \quad \text{---- (4)}$$

実際の施工中のデータの解析によって、(3)式のKは必ずしも定数でない事がわかってゐる。しかしながら本制御の動作を考える為の近似式として充分有効なものである。

(4)式よりある時点での土圧Pの変化分を、  

$$\Delta P = K(A\bar{V} - \eta BN) \quad \text{---- (5)}$$

そこでVが与えられたときにNを式  

$$N = (A/\eta B)V \quad \text{---- (6)}$$

に従って制御すれば土圧変化分は0となり土圧Pを一定に保つ事が出来る。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 $\eta$ を定数として(6)式に従って制御しても実際の $\bar{V}$ と $\bar{V}_0$ は等しくならず土圧は一定値を保たず増減する。そこでチャンバ内土圧 $P$ を検出し、目標土圧 $P_0$ と比較し $P > P_0$ のときは $\eta$ に相当する演算器内の係数 $\eta'$ (これを便宜土制御係数と呼ぶ)を減少させ、 $P < P_0$ のときは $\eta'$ を増加させるように構成されている。そのため掘進速度 $v$ とスクリュコンベア回転 $N$ は $P = P_0$ となる時点で最終的に釣り合い、そのときの制御係数 $\eta'$ は実際の排土効率 $\eta$ にほぼ等しくなっている。

本制御の本質的に良い点は、 $\eta$ の変化や定数A, Bの設定誤差等があつても、眞の土圧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、誤差が累積して行くという欠点がない点である。

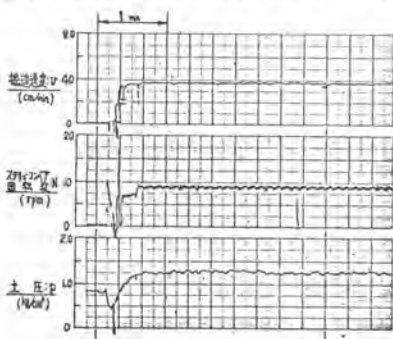


図6 自動掘進データ例

そこで $P_0$ として掘進量に見合った分だけ切羽より土砂を過不足なく取り出している状態の地山の静止土圧に設定しておけば、種々の外乱の影響を全く受けずに切羽を常に安定に保つ事が出来る。また排土量測定や地盤の測定のみによつて排土量を修正する方法と比較すると数リング掘進して初めて修正されるのに対して、本制御では数mm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持っており今迄の施工例でもそれが実証されている。

図6は切羽安定制御による自動掘進データの一例で、掘進速度 $v$ の変化に対してスクリュコンベア回転 $N$ が自動追従し、土圧 $P$ が停止時の値より目標値へ変化しその後一定に保たれている。

### 5. 遠隔制御装置

シールド掘進中の全ての操作を、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出来るようにしたものが本装置である。図2に示すようにチャンバ内土圧, 掘進速度, スクリュコンベア回転, カッタ回転, 各ポンプの吐出量比率, 各ポンプ油圧, ローリング角, ピッチング角, 左右ジャッキストローク, スクリュコンベア累積回転などが表示され、全ての操作が押ボタンによる遠隔操作が可能になっている。各ポンプ吐出量は電氣的にコントロールモードにて調節可

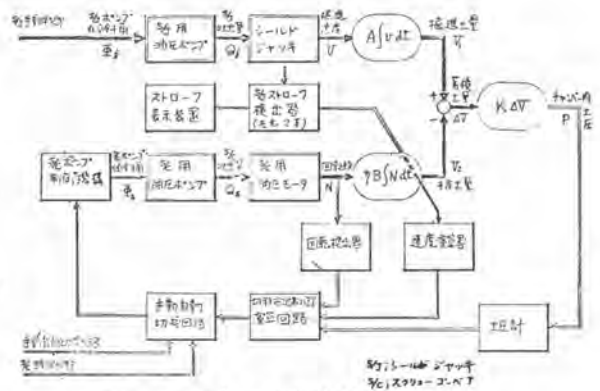


図5 切羽安定制御系統図

能になっており、各油圧切換弁は電磁弁操作になっている。万一の制御系の故障に備えて以上の全ての操作は手動による従来通りの直接操作も可能なように考慮されている。

#### 6. 全自動掘進制御機構

前述の切羽安定制御ではチャンバ内土圧を一定に保つべくスクリュコンバア回転の自動制御を行っている。これに加えて掘進速度を所定の一定値に保つ掘進速度自動制御機構、カッタの回転方向をローリング角の限界値にて自動反転させローリング角を一定範囲内に保持するローリング角自動修正機構を設け、以上三つの自動制御系に相互に必要なインタロック機構を設けた上で順序立てて運転制御するのが全自動掘進制御機構である。このシステムでは目標土圧、目標掘進速度、カッタ用ホニア吐出量、作動ジャッキを設定し自動掘進ボタンを押すだけで上記全ての自動機構がシーケンシャルに作動し、所定の土圧を保ちながら掘進した分だけ排土制御し、ジャッキ作動本数も途中で変えても一定の掘進速度を保持し、所定範囲内のローリング角を保つ自動運転が行なわれる。

#### 7. その他の附属装置

今述べた以外には掘進方向や機体の姿勢を表示する掘進方向表示装置がある。それは左右のシールドジャッキストロークをmm単位でデジタルで表示するストローク表示装置、ピッチング角、ローリング角表示装置より構成されている。ストローク表示装置は左右の差が一目でわかり掘進方位角が直感的にわかるようになっている。

また稼働データをペンレコーダや打突式レコーダにて自動記録する自動記録システムを設けることにより施工の工学的解析を行ったり、稼働状況管理が適確に行なえる。その他、地上の現場事務所より今述べた全ての操作や自動制御が可能な地上遠隔制御システムもある。これら二つのシステムはオプション仕様である。

#### 8. HIRACシステムの特長

- (1)切羽の安定施工とその施工精度の飛躍的向上。
- (2)自動運転や各種安全機構によりオペレータへの負担が軽減され操作の信頼性が向上した。
- (3)それに加えてより良い作業環境で楽な操作が可能となり、オペレータの居残性・安全性が向上。
- (4)施工の信頼性向上と掘進方向の適確な修正が可能となり、施工の迅速化が可能となった。
- (5)全ての信号が電気信号なので稼働データが簡単にとれ、施工の工学的解析と稼働状況管理が容易となる。

#### 9. あとがき

本システムの実用化により従来比較的小悪環境条件で感に頼って作業する面が多かったシールドの施工が作業環境条件の向上と科学的な施工管理が可能となった。本システムをより一層改良し、シールド施工に携わる関係各位の要望に応えるべく、今後も努力を重ねていく所存である。

末筆ながら土匠計の南隆と土質工学上の技術指導の面で絶大なる御尽力と御指導を東京大学工学部千々岩教授、畑村助教、竹内助手の皆様より賜りました。ここに心から謝意を表する次第です。

また本システムの納入を積極的に御持用いただき、数々の有益な御助言を賜りました大豊建設殿関係各位に厚く謝意を表する次第です。