

## 小断面シールド掘削を対象とした集中自動制御システム の設計とその試験結果

### DESIGN OF COMPUTER CONTROLLED SYSTEM FOR SMALL DIAMETER SHIELD METHOD AND RESULT OF ITS EXPERIMENTS

山岸康利\*・鶴田秀典\*\*・杉本禎男\*\*\*・阿南修平\*\*\*\*

By Yasutoshi YAMAGISHI, Hidenori TSURUDA, Sadao SUGIMOTO  
and Shuhei ANAN

A shield tunneling method has been applied more year by year according to society's demands. NTT requires a long and small diameter tunnel for installation of fiber cables.

To construct a long tunnel with 1 200 mm inside diameter, new tunneling system different from conventional ones had to be developed. Fully automated tunneling and cast in situ lining system using quick setting resin mortar have been studied since 1975.

New tunneling method controlled by computer was developed in 1984. Field trial results show that constructed tunnels are reliable to install telecommunication cables.

#### まえがき

電気通信ケーブルを収容する管路設備は、道路下に埋設されており、その築造は通常道路表面を掘削し管路等を掘削溝内に布設する方法で行われている。しかしながら、地下埋設物の輻輳化に伴い開削工法による管路工事の困難性が高まり、非開削工法が増加してきている。そこで、市街地での管路布設工事を効率的に行うために内径 1 200 mm の小断面シールド工法の開発を行ってきた。本工法の開発にあたり、第一段階として掘進長 150 m、ヒューム管をライニングとし、機械的制御による小断面シールド工法 (M-1) を研究し実用化を図ってきたが、本工法では掘進長、曲線施工、適用土質等に制限があるとこ

ろから適用領域が限られるという問題点が生じてきた。そこで第二段階として、都市部における立坑用地の制約条件や中継間隔の長い光ファイバケーブルの導入に対応するため、道路線形なりに長距離、曲線施工が可能でかつ湧水を伴う自立性、非自立性の両地盤に対応できるシールド機の開発を行うこととし、小断面シールド工法 (D 1200-M2, 以下 M-2 工法と言う) の開発に着手した。M-2 工法の開発目標を達成するためには、トンネル坑内が狭く、掘削長が長距離となるために坑内作業を無人化する必要が生じ、コンピュータによる掘削作業の集中制御技術が是非とも必要になってきた。M-2 工法に要求される制御技術を整理すると以下のとおりである。

- ① 湧水を伴う自立性、非自立性地盤での掘削、排土が可能で装置とセンサーを含めた制御技術や計画線に十分な追従性機能を持たせるための方向制御技術。
- ② 従来のヒューム管推進工法とは全く異なったシールド機内でのライニング築造技術と制御方法。
- ③ 掘削土、ライニング材料のトンネル坑内での運搬が可能で自動運搬技術。
- ④ 全システムを制御する集中制御システム。

以上の制御技術を開発するために多くの基礎検討を繰り返し、以下に列挙する種々の方策を採用することとした。

\* 正会員 日本電信電話(株)茨城電気通信研究所 通信土木研究室長

(〒319-11/茨城県那珂郡東海村白方白根 162)

\*\* 正会員 日本電信電話(株) 登戸電報電話局長

(〒214/神奈川県川崎市多摩区登戸 1754-1)

\*\*\* 正会員 日本電信電話(株)茨城電気通信研究所 研究専門調査員

(〒319-11/茨城県那珂郡東海村白方白根 162)

\*\*\*\* 正会員 工修 日本電信電話(株)国際企画室調査員 (同上)

- ① 掘削状況監視センサーによる自動掘削方式
- ② ジャイロ計測によるシールド機姿勢に基づく使用ジャッキ自動選択方式
- ③ 早強性レジン材料を用いた現場打設ライニング方式
- ④ 無軌道、自走式坑内運搬方式
- ⑤ 制御機能を集中したユニット式運転室からの自動遠隔制御方式

M-2 システムでは、各工程の制御に必要なセンサー、アクチュエーター、装置類を開発するとともに、これらをコントロールする制御システムを検討し、それらを実際に試作した。また、M-2 システムの機能を確認するために、実際の地盤で2度にわたり試験工事を実施した。その結果、集中制御システムを採用したM-2工法は長距離、曲線施工におけるトンネル築造制御技術として十分満足するものであり、実用に供しうるものであることが判明した。

本工法はトンネル掘削の主要工程である掘削、ライニング、材料等の搬入、搬出を完全に自動化するものであり、作業のメカトロニクス化を図ったものである。これにより、従来から行われてきた技術者の勘と経験に頼る方法から大きく進歩するとともに、長距離で曲線部のトンネル掘削の自動化が可能となった。

本文は、M-2工法の集中制御システムの設計内容と試験工事の制御結果について述べるものである。

## 1. 開発方針

内径1200mmの小口径トンネルにおいて長距離・曲線施工・適用土質の拡大を実現するにあたって、以下のような開発目標を設定した。

- ① 適用土質として湧水を含んだ砂、砂礫、粘性土地盤
- ② 掘進長は都市での適用を考慮して最大500mとする
- ③ 曲率半径は道路線形をふまえて200mの曲線掘削を考える
- ④ 掘削深度は埋設物の下越しを考慮して10m以内
- ⑤ トンネル内径は通信ケーブルの管路を最大40条として1200mmに設定

上記開発目標を実現するために、トンネル坑内作業の自動化に適したシールドシステムと各種工程のコンピューター制御による集中制御システムの設計方針を定めた

### (1) シールドシステム

従来のシールド機構造をそのまま小断面シールド機に適用することは空間が限られているために困難と判断し

種々の工程を自動化するためにシールド工法のシステム全般にわたり検討を行い以下のような設計方針を定めた

- ① 収容機器が多いため内径1200mmでは長いシールド機となり方向制御特性に問題を生じるため多分割構造とする。
- ② 油圧配管を集中し、装置の小型化をはかり油圧駆動源をスキンプレートに直接固定する方式とし中央部のスペースを確保すると共にオイルタンクの放熱を効果的なものとする。
- ③ 制御機器の保護、配線の集約のため電気機器、制御機器は一個所に集中させ、機内スペース確保のため、機能別に分割しスキンプレート内壁に固定設置する。
- ④ 掘削方式においては、湧水を含む軟弱な地盤の土質変化に対応するため間欠運転機能を有した土砂取り込み装置を前面密閉型バルクヘッドに装着する。
- ⑤ トンネル内径が一般のシールドトンネルに比較して非常に小さいため方向制御に必要な計測はジャイロスコープで行う。
- ⑥ ライニング方式においては、長距離、曲線掘進のため現場打設によるライニングとしシールド機内最後部にライニング部を設置する。
- ⑦ 狭いトンネル坑内での掘削土、ライニング材料の搬出入は坑内無人化のためレール布設や手動運転を不用とする自動走行式坑内運搬車により行う。

### (2) 集中制御システム

各工程の自動化に適したシールドシステムをコンピューターにより集中制御するため、制御システムおよび制御アルゴリズムの設計方針を次のように定めた。

(a) 制御システム：システムの運用において最適な制御システムとするため以下のようにシステム設計を行った。

- ① 一人のオペレーターにより同一場所で全システムを操作できる方式とする。
- ② 1つのスイッチ操作で1つの工程(掘削等)が起動されるように、操作を容易にするとともに、CRTや指示計パネルランプ等により状態把握を容易にして、オペレーターのバックアップを行う。
- ③ 操作卓において各種機器の動作点検が可能な機能を持たせる。
- ④ センター装置は一ユニットとし、立坑内外どこでも設置可能なものとする。
- ⑤ 制御室のコンピューターやCRT等の制御装置の耐環境性を持たせるため、操作室側とセンター装置側は隔壁により分離し、空調により対処する。
- ⑥ 制御プログラムはすべてセンターコンピューター

ーに収容することにより維持管理を容易にする。

⑦ プログラムには、オペレーターの誤動作を防止するため、インターロック機能を施す。

⑧ 施工条件や機器の部分故障にフレキシブルに対処し、システムダウンを防ぐためプログラムに冗長性を持たせる。

⑨ 端末機器は機内配線の複雑化を避けるため、デジタル化しコンパクト化、インテリジェント化を行う。

⑩ シールド機内の狭い空間環境において、制御機器、センサー、ケーブル等の保守、点検の容易なシステムとする。

⑪ 坑内ケーブルを少なくするため、制御信号はデジタル化し、伝送路は一本の同軸ケーブルとする。

(b) 制御アルゴリズム：従来人間の判断により運転していた掘削、ライニング、材料等の運搬をコンピューターにより自動制御するために基本的なアルゴリズムを以下のように設定した。

① 掘削については、砂、粘土、砂礫、湧水等に適用でき、カッターのかみこみ等による掘進不能を防止できるものとする。

② ライニングについては、モルタル特性が変化しても一定品質で一定量のレジンモルタルが打設でき、打設時における異常状態に際しては打設機の保護処理ができるものとする。

③ 運搬車については、一定の速度、姿勢角度を保持しながら自動走行を行い、所定の位置に自動停止でき、安全対策としてシステム外から非常停止が可能なものとする。

## 2. シールドシステムの設計

シールドシステムはトンネル築造プロセスの完全なる自動化を目的として、掘削地盤に最適な掘削方法および計画線に沿った方向制御、早強性材料によるシールド機内での自動現場打設ライニング方法、無軌道で自走可能な坑内運搬車によるライニング材料の運搬、供給および掘削土の搬出ができるシールドシステムの開発を目指したものである。

### (1) シールド機の構成

シールド機本体は4分割構造になっており、それぞれは先端で土を掘削する掘削部、シールド機系の制御機器を取りつけた制御部、駆動源である油圧発生装置を取りつけたパワーユニット部、レジンライニングを築造するライニング部の4つである。図-1にシールド機の概要を示す。

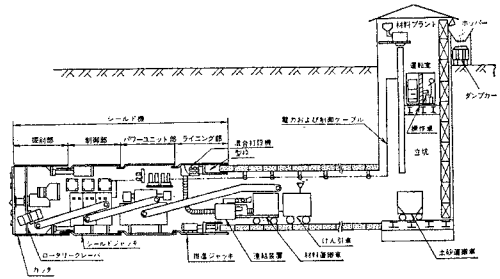


図-1 M-2 工法システム構成

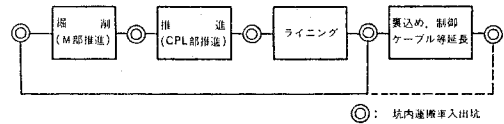


図-2 施工方法

### (2) 施工プロセス

レジントンネルは 50 cm ごとのシールド機の前進およびライニングの繰り返しにより築造できるように設計されている。図-2に施工プロセスを示す。

(a) 掘削：シールドジャッキを伸ばしながらカッターにより土を切削し、排土装置により機内に取り込み、ベルトコンベアにのせライニング部後方で土砂運搬車に積み込みトンネル坑外へ搬出する。掘削中は排土装置、シールドジャッキの ON-OFF により取り込み量を管理する掘削制御を行うとともに、シールドジャッキ等の選択により掘削部の方向制御を行い、あらかじめ投入した計画線に自動的に追従させる。

(b) 推進：掘削後、シールドジャッキを縮めてから推進ジャッキを伸ばし制御部、パワーユニット部、ライニング部を前進させ、次に推進ジャッキを縮め、型枠内をレジンモルタル充填可能な状態にする。

(c) ライニング：材料運搬車により、レジンモルタル材料をトンネル坑内に搬入し、ライニング部の固定連結装置と材料運搬車の先端にある連結機を自動的に接続し、ライニング部に固定した混合打設機に材料を空気圧送する。混合打設機内では、硬化液とレジンモルタルを混合し型枠内に押し出すが、硬化液とレジンモルタルの重量比が一定となるように送給制御を行うと共に充填量の管理を行う。

(d) 裏込め：地山と築造されたレジントンネルとの空隙に材料運搬車により搬入された裏込材を充填する。

### (3) 制御装置とのインタフェース

各アクチュエーターと制御装置とのインタフェースは以下の機構によりコンピューターからの制御信号でアク

チュエーターを動作させることができる。

① ミニチュアリレーは動作電流が小さいので制御信号に対応したトランジスタアンプで直接動作する

② 油圧は電動モーターを用いて発生させているが、電動モータはミニチュアリレーで動作するマグネットスイッチにより起動、停止する。

③ シールド機は油圧駆動方式を採用しておりアクチュエーターは電磁弁により作動する。

### 3. 制御システムの設計

制御システムの設計にあたっては、システム全体の集中制御と各工程ごとの制御について以下のように設計を行った。

#### (1) 集中制御

(a) ソフトウェア：システム全体を起動させるためには、各センサー、アクチュエーター等の状態を常に監視し必要のつど制御信号を送信し制御を行う。このためにプログラムの複雑化をさけ、製作・保守を容易にするとともに、ミニコンを最適な方法により使用する必要があるソフトウェアの構成を、タスク化されたプログラムと共通データをストアするコモンテーブルに区分した。またこれらのソフトウェアの作成にあたり、次のことに留意した。

① 制御信号はすべてコンピューターにより管理するとともに誤動作危険防止のため、ソフトウェアによるインターロック機能を持たせる。

② 制御工程中の機器動作を直接または間接的に常時監視し、必要のつど異常処理、アラーム通報を行いオペレーターをバックアップする。

③ 土質条件、レジシモルタルの状態に対応した制御を可能とするため、各種パラメーターの設定スイッチを設けるとともに、キーボードから制御定数変更可能なようにプログラムにフレキシビリティを持たせる

④ オペレーターによる安全確認の必要な制御工程はディスプレイによるガイドメッセージに対し、2段階の確認動作により対応する。

⑤ パワーユニット、シールドジャッキ伸縮等を単一の半自動スイッチで起動させ、必要のつど全自動制御から手動操作も可能なものとする。

⑥各工程を自動制御で行う直前に装置類の状況を確認するため点検工程を設ける。

⑦各端末からのデータの処理は、各端末に設置されているマイコンにより行い、センターミニコンの負荷を軽減させる。

図-3 にソフトウェアの構成を示す。

(b) ハードウェア：制御装置の設計に際しては、次の3つの機能についてそれぞれ列挙する内容を考慮した。

#### ① 制御機能

i) センサー信号の統一を図り、A/D変換装置の共通化を行うため、センサー電源、出力電圧を同一とする。

ii) センターコンピューターへの入力信号は、インタフェース装置を介して入出力を行うが、信号系統はシールド機系、運搬車系、操作卓系、立坑監視系の4つに分け信号系統の明確化を図る。

iii) センター装置に信号モニターと個別の機器に対応したテストスイッチを設置し、故障個所の判別を容易なものとする。

#### ② 伝達機能

i) 信号伝送はトンネル内ケーブルの小型化、伝送距離および耐雑音性を考慮してデジタル信号伝送方式とする。

ii) 伝送路としては、シールド系には同軸ケーブルとし、坑内運搬車は移動するため無線とする。

#### ③ 端末機能

i) 保守点検を容易にするため、機内配線を集約する分岐ボックスを各部に設けるとともに、制御端末には信号モニターを設置し、動作状態の目視点検を可能なものとする。

ii) 坑内機器の耐環境性については、高価格化、大型化を避けるため、防滴構造により対応する。

図-4 は集中制御システムの構成を示したものである。本システムにおけるハードウェアは、シールド機内のシールド機端末装置、自走車に設置されている自走車端末装置、運転室センター装置側のミニコン、シールド機入出力装置、自走車入出力装置、立坑入出力装置、操作卓入出力装置、シールド機伝送装置、自走車系伝送装置、無線供用分配装置、シールド系 MODEM 等から構成されている。

また運転室操作卓側には、シールド機内等の状況を監視するモニター TV、各工程の状況をオペレーターに示すディスプレイ、表示部、ミニコンに制御入力を行う操作卓、キーボードさらにデータの出力としてプリンター保守点検のためのスイッチボックス等により構成されている。

本システムにおけるシールド機系の監視信号、制御信号の流れを図-5 に示す。

(c) センサ技術：M-2 システムの制御や施工状況

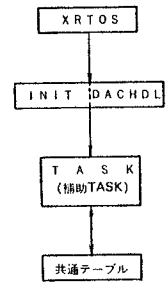


図-3 ソフトウェア構成

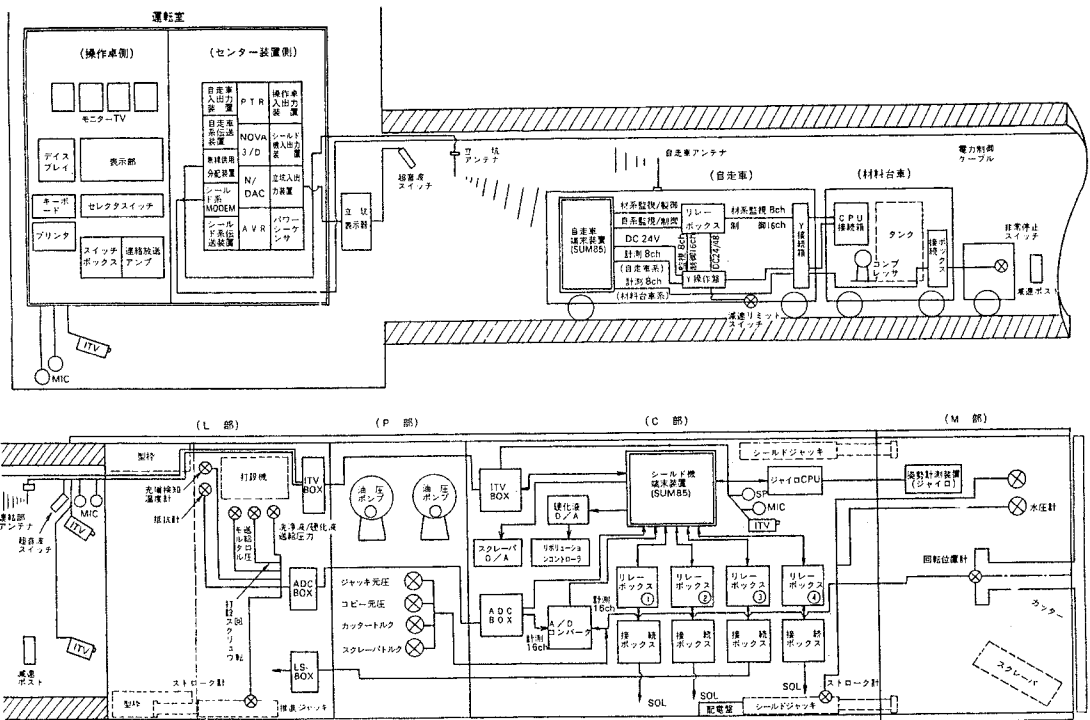


図-4 集中制御システム構成

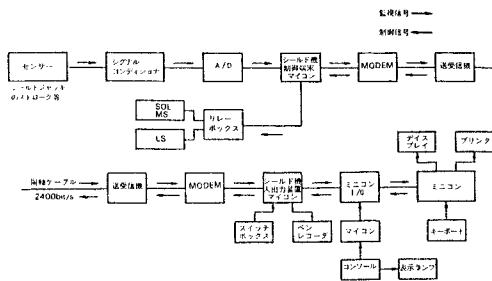


図-5 シールド機系(例)

の把握を自動化するために、次に列挙する各種センサを開発した。

- ① 掘削土砂の弱い押しつけ力 (1~2kg) で作動するバネ機構式掘削チャンパー内土砂レベル計
- ② カッター軸に直接取付可能で、回転角度入力に対し出力電圧を直線的に変化するコピーカッター回転位置計
- ③ ストローク長最大1000mm 精度 ±1mm で直接検出する φ0.3mm のステンレスワイヤー巻き取り式ジャッキストローク計
- ④ ヒーターで検出温度を一定に保ち、レジソルタルが接触した時の微小な温度降下 (0.2~0.4°C/s) を検出する型枠内レジソルタル充填レベル計
- ⑤ 信号出力範囲を ±10V で統一可能な歪ゲージ

式変換器用シグナルコンディショナー

- ⑥ ロードセルの筐体内にシグナルコンディショナーを内蔵し、耐環境性を高めたアンプ内臓型ロードセル
- ⑦ ジャイロスコープおよびアクセロメーターの出力を直接演算処理を行うマイコン実装式姿勢計測装置

(2) 掘進工程

掘進工程におけるアルゴリズムと制御方法についてまとめると以下のとおりである。

(a) アルゴリズム：シールド機先端のカッターにより地山を掘削する場合、掘削スピードや排土量を管理しなければ地表面の沈下や、シールド機前面の閉塞、シールド機内への土砂の噴発を生じる恐れがあるため適切な掘削制御を行うことが必要である。さらに、掘削部は前進に伴い、地山の影響を受け姿勢が変化し計画線からそれる場合が考えられるため、シールドジャッキを用いて計画線にそわせる方向制御を行うことも重要である。そのために、以下の5項目について考慮した。

- ① カッターを回転させて土を切削しながらシールドジャッキを伸ばすことにより掘削部本体を前進させる。
- ② 切削した土砂は排土装置、ベルトコンベアを作動させることにより後方のズリトロッコに積み込む。

③ 土質が軟らかく崩壊する場合、チャンパー内のパルクヘッドに設けたレベルスイッチによりチャンパー土砂レベルを検出し、土砂レベルに対応して排土装置を ON-OFF させることにより排土の制御を行う。

④ 土砂等による前進不能を防止するためカッタートルク、ジャッキ推力等を常時監視し、異常処理を行う。

⑤ 方位角、傾斜角、回転角をジャイロスコープ、アクセルメーターにより検出し、前もって設定された計画姿勢と常時比較監視を行う。

(b) 掘進制御：掘進制御には、掘削制御と方向制御の2つがある。

掘削制御については、シールド機のパルクヘッドに図-6に示すように各種センサーを設置し、地盤条件により掘削モードをⅠ、Ⅱ、Ⅲに分け、シールドジャッキ、スクレーパの起動条件を定め自動掘削が可能なものとした。表-1に掘削モード、表-2にシールドジャッキとスクレーパの起動条件を示す。図-7は本システムで設定した掘削制御の流れ図である。

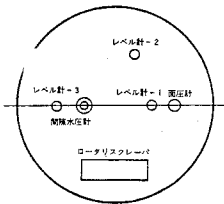


図-6 各種センサーの設置状況

表-2 シールドジャッキ、スクレーパ起動条件

条件	モード	モード Ⅰ	モード Ⅱ	モード Ⅲ
シールドジャッキ	OFF-伸び	1. カッタートルク $\leq 140$ kg/cm <sup>2</sup>	1. 土砂レベル計1または3: OFFかつカッタートルク $\leq 100$ kg/cm <sup>2</sup>	1. カッタートルク $\leq 100$ kg/cm <sup>2</sup> 2. 土砂レベル計2: OFF
	伸び-OFF	2. カッタートルク $\geq 170$ kg/cm <sup>2</sup>	1. 土砂レベル計1: ON 2. " 2: ON 3. " 3: ON	1. カッタートルク $\geq 170$ kg/cm <sup>2</sup> かつ土砂レベル計2: ON
スクレーパ	OFF-ON	---	1. 土砂レベル計1: ON 2. " 2: ON 3. " 3: ON 4. カッタートルク $\geq 170$ kg/cm <sup>2</sup>	1. 土砂レベル計2: ON 2. カッタートルク $\geq 150$ kg/cm <sup>2</sup>
	ON-OFF	---	1. 土砂レベル計1または3: OFFかつカッタートルク $\leq 100$ kg/cm <sup>2</sup>	1. カッタートルク $\leq 100$ kg/cm <sup>2</sup>

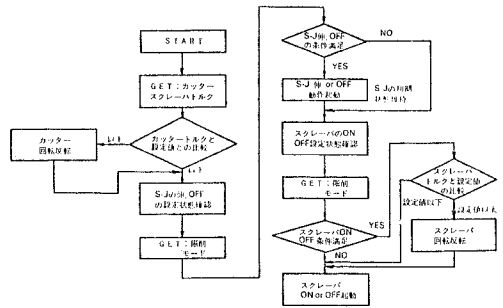


図-7 掘削制御のフローチャート

一方、方向制御については、トンネル坑内が狭いためにレーザー等による自動測量が不可能であることが判明した。その結果、シールド機姿勢をジャイロスコープ、アクセルメーターにより計測し、掘進方向を定める方式を採用した。すなわち、計画線に対応する姿勢目標値、計画位置をキーボードから入力しその値と姿勢計測値を比較するとともに、その差とあらかじめ設定されたしきい値の大小関係により図-8に示すようなジャッキパターンから最適なものを選択し方向制御を行う方法であ

表-1 掘削制御

掘削モード	対象地盤	内容
Ⅰ	自立性地盤 (粘土, シルト)	ロータリスクレーパを常時回転し、チャンパー内に空にするように土砂を取り込む。
Ⅱ	非自立性地盤 (砂, 砂質粘土, 湧水)	チャンパー内の土砂量をレベル計により監視し、一定量の土砂をチャンパー内に溜めるようにロータリスクレーパを間欠運転して土砂をとりこむ。
Ⅲ	非自立性地盤 (砂 礫)	カッタートルクの増減を監視しながら、土砂をチャンパー内に溜めるように、ロータリスクレーパを間欠運転して土砂を取り込む。

る。方向制御の流れ図を図-9に、また掘進工程のディスプレイ表示状況を図-10に示す。

(3) ライニング工程

ライニング工程におけるアルゴリズムおよび工程制御については、以下に示すとおりである。

(a) アルゴリズム：本シールド機によるライニングは、まえがきでも述べたように、レジシモルタルの現場打設方式を採用している。レジシモルタル材料は高粘度であるため直接的な流量測定が困難であるとともに、型枠は密閉された構造であるため容量以上の送給は型枠を

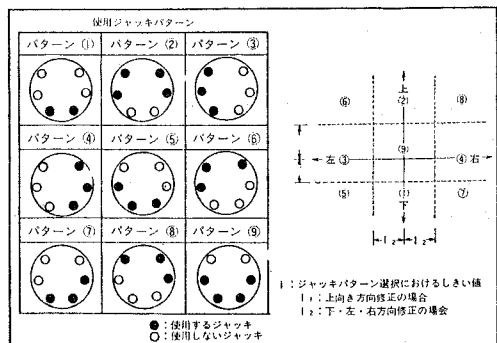


図-8 シールドジャッキ使用パターンによる方向制御

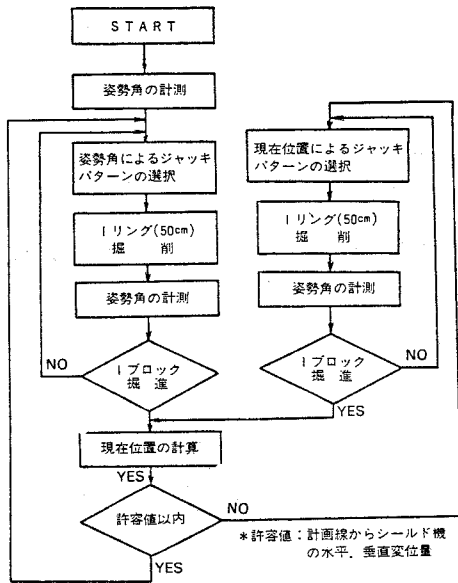


図-9 方向制御フローチャート

が行われるが、そのためにフィードバック制御方法を採用している。充填検知制御では、充填検知センサーが誤充填の検知を行わないように、単位時間当たりの温度低下率とその継続時間のプログラム上の制御値を最適なものに設定した。図-11 に打設における流れ図を、図-12 にディスプレイ表示状況を示す。

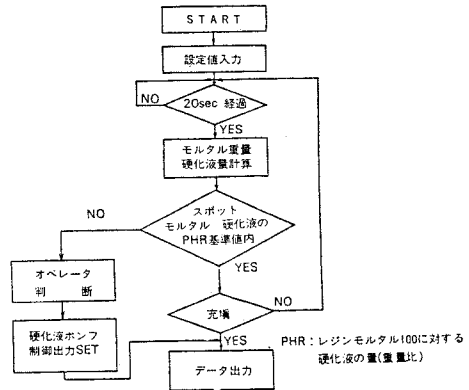


図-11 打設フローチャート

タックジョウタイ		クックジョウタイ				
タックモード	2	1	2	3	4	g( $\times 10$ )
シールド	1	2	3	4	5	
	6	7	8	9	10	
	11	12	13	14	15	
	16	17	18	19	20	
cm/MIN	4	8	12	16	20	
kg/cw				2		( $\times 100$ )
カッター				2		( $\times 100$ )
スクレーバ		1		2		( $\times 100$ )
ドアップ		2	4	6	8	10( $\times 10$ )
スイアツ		1	2	3	4	5( $\times 10$ )
ハイモルタル				2		( $\times 100$ )

図-10 掘削状態

ジョウジョウタイ		タンケンソウキョウコフ				
タックモード	12	1	2	3	4	5( $\times 100$ )
モルタル	kg	1	2	3	4	5( $\times 100$ )
	kg/MN	2	4	6	8	10( $\times 100$ )
	kg/cw	2	4	6	8	10
コウカホキ	cc	1	2	3	4	5( $\times 1000$ )
	cc/MN	1	2	3	4	5( $\times 100$ )
	PHR	1	2	3	4	5
スクリー	R.P.M	2	4	6	8	10( $\times 100$ )
	kg/cw	1		2		( $\times 100$ )
モトアツ	kg/cw	1		2		( $\times 100$ )
ジョウタン	DEG	2	4	6	8	10( $\times 10$ )

図-12 打設状態

破損する恐れがある。そこで、アルゴリズムの作成にあたっては、以下の3項目について考慮した。

① 打設開始タイミングはレジンモルタルの圧送を開始した後、混合打設機入口付近にレジンモルタルが到達した時とする。

② 混合打設機を起動した後、レジンモルタル量と硬化液を最適な混合となるように比例制御を行いながら混合し型枠内に送給する。レジンモルタル流量はタンクの重量変化により検出し、硬化液の吐出量を変化させる。

③ 打設終了タイミングはレジンモルタルの型枠内のレベルに到達した時とする。

(b) ライニング制御：信頼性の高いレジンモルタルライニングでトンネルを築造するために、レジンモルタルと硬化液を一定の比率で混合する必要がある。レジンモルタルの送給量はタンク重量の変化量で検出し、送給量に応じて硬化液量は一定の比率になるように比例制御

#### (4) 坑内運搬車走行

坑内運搬車走行工程におけるアルゴリズムと制御については以下のとおりである。

(a) アルゴリズム：狭いトンネル坑内には、制御ケーブル、風管等が設置されており空間が制約されているため坑内運搬車が無軌道で自動走行するには適切な制御が必要である。次の2項目について考慮した。

① 坑内運搬車制御方式は、センター装置からの指令により発進させた後、運搬車自身のローカル制御により速度制御、ローリング制御を行いながら停止位置近くまで進んで減速した後、センター装置からの停止指令により停止する。

② 停止位置に対するオーバーランを防止するため距離計による停止位置の検出を行う。

(b) 坑内運搬車走行制御：坑内運搬車の走行には、ローリング角を操蛇機構により一定の角度内に抑制する

とともに、無線により信号伝送を行い、無線の届かない区間 (15 m) 以上では、運搬車のローカル制御により速度、走行制御を行う機構を採用した。

自動走行の流れ図を 図-13 にディスプレイの表示状態を 図-14 に示す。

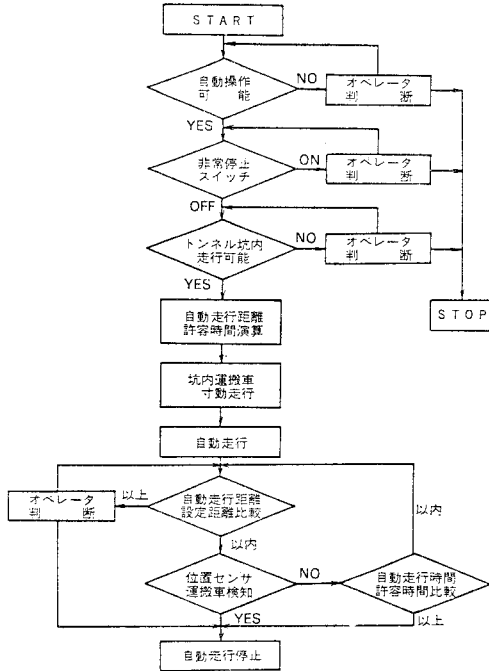


図-13 自動走行フローチャート

		イドワシャジョウタイ				
イドワシャ	km/h	1	2	3	4	5
	DEG	(-) 10	5	0	5	10(+)
	MINUTE	5	10	15	20	25

図-14 移動車状態

#### 4. 試験工事によるシステムの検証

本システムで開発した各種の機能を実際の現場で検証

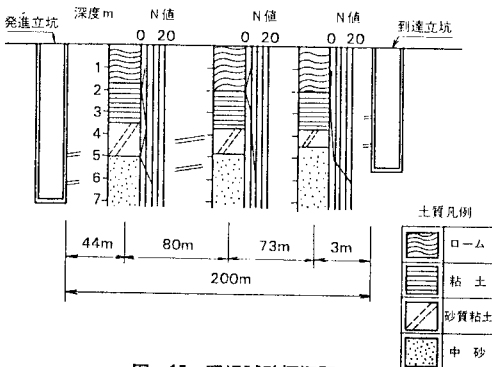


図-15 現場試験概況図

するために、昭和 58 年 4 月より 59 年 3 月にわたって、200 m の掘進工事を行い本システムの機能確認を行った

#### (1) 工事試験概要

本試験工事の概要を 図-15 に試験条件を表-3 に示す。当該試験工事区間は、 $N$  値 5 以下の湧水砂質、粘性土であり非常に軟弱な地盤である。このような地盤での掘進は初めての試みであり、各種制御技術の機能確認を行うには最適な地盤条件であると言える。

表-3 試験条件

項目	条件
掘進長	200 m
線形	曲率半径 $R=200$ m
	縦断勾配 0.5, 1.0, 2.0%
地盤	湧水砂質、粘性土
地下水圧	0.3 kg/cm <sup>2</sup>

#### (2) 掘進技術

(a) 掘削制御：掘削モード II における自動掘削制御の状況を 図-16 に示す。カッターおよびシールドジャッキはロータリースクレーパーのストップ時には負荷がかかるとともに、ロータリースクレーパーの作動時にはカッターおよびシールドジャッキの負荷は軽減されているのが分かる。掘削モード II における掘削、土砂取り込み装置が土砂レベル計の ON-OFF により間欠運転をしており掘削制御が非常にうまく行われた。排土量の管理については、1 リングごとの掘削土量をロードセルで測定した結果、シールドジャッキを 50 cm 伸ばした時の理論的排土量 1.40 t に対して平均値で 1.37 t でありオーバーカットはなく十分な排土管理制御が行われた。

(b) 方向制御：あらかじめ設定された計画線にシールド機が沿うように、方向制御がシールドジャッキの自動選択により行われる。図-17 に 200 m の掘進軌跡と計画線の比較を示す。

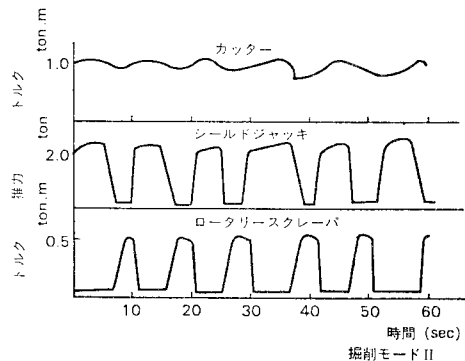


図-16 自動掘削(例)



掘進当初は、計画線の設定値誤入力により、平面線形は急激な曲率半径 ( $R=100\text{m}$  以下) を描くこととなった。その後は正確に目標である  $200\text{R}$  を描いていった様子がよくわかる。後半では、非常に軟弱な地盤での掘進のためマシンの横送り現象が生じ、計画線から大幅にそれる結果 (約  $60\text{cm}$ ) となった。今後の検討課題の1つである。

縦断勾配においては、地盤が軟弱のため当初計画した縦断勾配が得られず、地盤により計画線の値を入力するにあたり補正した数値をインプットすることとし、しきい値の幅をせばめる必要があることが判明した。曲率半径 ( $R=200\text{m}$ ) を描くための方向制御結果について 図-18、使用ジャッキパターンによる制御結果について 図-19 に示す。これらにより左右カーブの目標値に対して方向制御を行っていることが分かり、十分な方向制御機能を有していることが確認された。

(3) ライニング技術

ライニング制御については、レジンモルタル量に比例した硬化液量をレボリューションコントローラーの自動遠

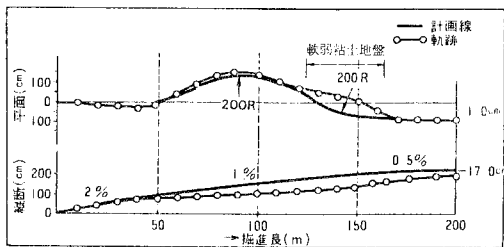


図-17 掘進軌跡

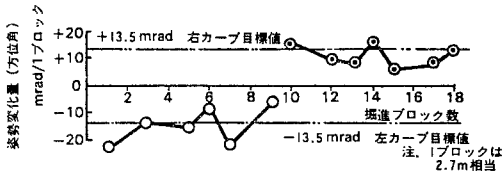


図-18 曲線部における方向制御結果 (その1)

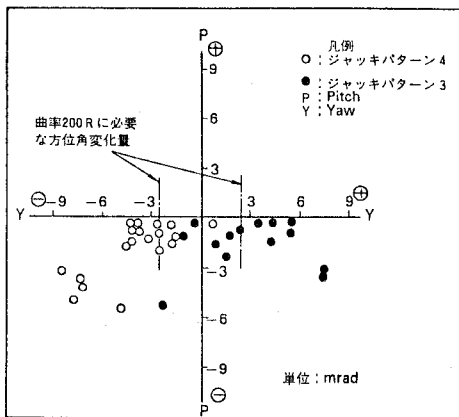


図-19 曲線部における方向制御結果 (その2)

隔制御により変化させており、混合比を目標値  $3.0 \pm 1.0$  PHR (重量比) の範囲に押さえる制御を行うものである。

図-20 に硬化液制御状況を 図-21 に1リング打設における各スポットの PHR の状況を示す。これらの結果により、硬化液量は  $3.0 \pm 1.0$  PHR の範囲に制御されており十分信頼性の高いレジントンネルが築造されている。また充填検知制御においては、単位時間当たりの温度低下率とその継続時間をそれぞれ  $0, 2^\circ\text{C}$ 、3秒とすることにより電気的ノイズ等による誤充填を防止することができた。

(4) 坑内運搬車走行技術

無軌道のレジントンネルを坑内運搬車が走行した状況

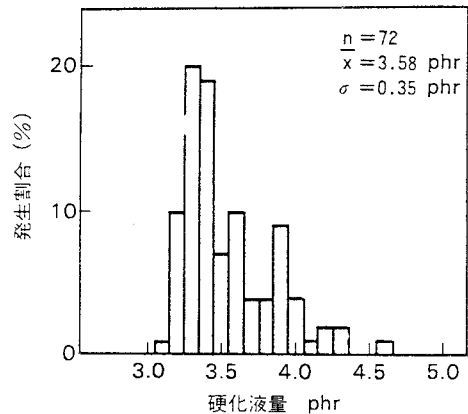


図-20 硬化液量制御状況

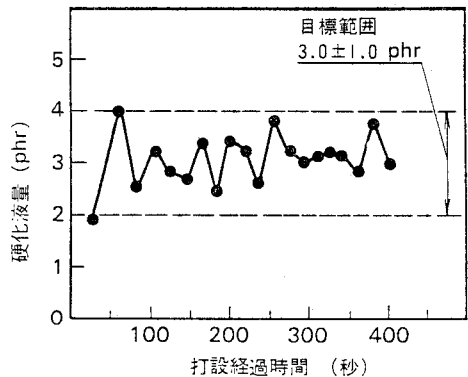


図-21 硬化液量の制御変化

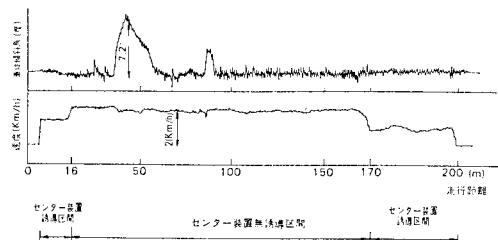


図-22 走行制御状況

を 図-22 に示す。

走行制御状況においては、許容車体傾斜角 10 度を下回るもので操蛇機構は十分機能している。さらに一定位置で速度自動切り替えがなされているとともに定速度制御が行われていることも確認された。

#### (5) システムの信頼性

各工程を自動制御するにあたり、多数のセンサー、アクチュエーターを苛酷な環境下で使用するためにシステムの信頼性が重要である。図-23 に掘進試験工事中における装置類の調整状況を示す。

点検項目	MCP部	L部	坑内運搬車	打設機	材料プラント	その他
割合(%)	11	32	24	15	3	15

図-22 点検状況

掘削、排土工程における装置類の調整は少ないが、ライニング工程に必要な型枠機構、打設機系統においては、高粘性のレジモルタルと接触するために、レジモルタル、硬化状のレジモルタル破片のつまりによる開閉弁の不調による調整が発生した。耐久性をもち保守、点検の容易な装置にする必要があることが判明した。

## 5. 評価

M-2 工法による集中自動制御システムは、曲線区間をもつ長距離のトンネル自動築造工法の確立を目指したものである。そのために、シールド機、坑内運搬車をセンターのコンピューターにより制御し、掘削、ライニング、掘削土・ライニング材料等のトンネル坑内の搬出入作業の無人化を図った。実地盤におけるレジモルタル築造試験の結果、本集中制御システムについて以下のことが言える。

- ① トンネル坑内での作業では、遠隔自動制御により行えるため、狭いトンネル坑内での危険な作業が無くなり、小人数で安全な作業が可能である。
- ② オペレーターの判断による操作とは異なり、コンピューターにより制御を行っているため、多種多様な装置類の状況が常時コンピューターにより監視され、オペレーターの作業負担が大幅に軽減されてお

り、ワンマンコントロールが可能である。

③ 地盤状況やレジモルタルの送給特性の変化に追従可能なように、コンピューターにより制御しているため施工品質の向上が図れる。

④ 従来のヒューム管推進工法とは異なり、小口径のシールド機による自動掘進作業がライニング工程を含めて可能であることは、大断面のシールド機においても本システムの制御技術の適用によりトンネル坑内作業の自動化が可能である。

## あとがき

コンピューター制御によるシールド工法の自動化の開発にあたり、シールド機の設計からソフトウェアを含めたトータルシステムの技術開発は一般のシールド工法ではあまりなされておらず、本論文で述べたシステムの開発にあたり非常に労力と時間を要したところである。

今後、建設業においては、労働市場の高齢化、高学歴化および作業環境の悪化に対処するため、メカトロニクス技術の導入が進展してくるものと思われ、本システムの制御技術が意味を持つものと予想される。

本システムは、高度にメカトロニクス化されているが、何分初めての試みであるため制御状況を確認するため多様な装置類を装備しており、また高価なレジモルタルを使用しているため従来の工法と比較して若干割高になっている。これからは、施工スピード、信頼性の向上、低廉なライニング材料の開発、システムの簡素化が重要な課題である。

最後に M-2 システムの開発にあたり長年にわたって助言を頂いた茨城電気通信研究所の福富所長、小島線路部長、ならびに内田統括役に深謝するものであります。

## 参考文献

- 1) 奈良慎一・杉本禎男：小断面シールド工法(M-2)における集中制御方法の検討，土木学会年次学術講演会概要集，1982年。
- 2) 鶴田秀典・杉本禎男：コンピューター制御によるレジモルタル自動築造工法，土木学会第8回電算機利用に関するシンポジウム講演概要集，1983年。
- 3) 鶴田秀典・杉本禎男・高塚外志夫・阿南修平：レジモルタル自動築造技術の開発，土木学会誌 Vol. 69, No. 4, pp. 2~8, 1984年4月。

(1984.11.26・受付)

## ●ご案内●

土木学会論文編集委員会第VI小委員会

『土木学会論文集・第VI部門』は年2回(3月, 9月)の発行です。別掲の投稿要項等をご覧のうえ、多数の論文をお寄せ下さい。

なお、不詳点等は事務局編集課(電話 03-355-3441 番, 内線 156)あてをお願いします。