

泥土圧シールド工法における全自動掘進への試み

TRIAL OF FULL AUTOMATIC DRIVING FOR MUD PRESSURIZED SHIELD METHOD

名 倉 浩*

Hiroshi NAGURA

Pumping transport of excavated soil in mud pressurized shield method makes the tunnel driving work force less and possible under high water pressurized underground conditions. This report describes a study of automatic driving for mud pressurized shield method applying pumping transport. Main elements of this study are 1. Face control system by plunger pump, 2. Measurement system of excavated soil volume, 3. automatic pump driving system, 4. Central supervising system of overall tunnel driving. Effectiveness of such system were proved by field experiment in three construction project.

Keywords: mud pressurized shield method, pumping transport, automatic driving system, face control

1. はじめに

過密化した大都市の高度利用を目指して、ジオフロントに大きな期待が寄せられている。その中でシールド工法は都市部の地下インフラ建設の基盤技術であり、大深度、大断面、長距離化といったより厳しい条件下における工事の実現に向けて、自動化・ロボット化などによる施工技術の高度化が重要課題とされている。

一方、泥土圧シールド工法は、泥水シールドとともに代表的なシールド工法として広く普及し、高い切羽安定性、適用地盤の広さ、簡単な後方設備などを特長としている。しかしながら、泥水シールド工法と比較した場合、高水圧への適応性、掘進管理の集中化、土砂搬送の自動化・省力化などの点で劣るとされている。

そこで本報では、泥水シールドなみの高度な施工システムを実現するために、高水圧への適応性、自動化・省力化に優れた土砂圧送方式を対象とした自動化システムの開発について報告する。

2. 泥土圧シールド工法の問題点と自動掘進への課題

本工法は、添加材の注入とチャンパ内での強制混練による掘削土砂の泥土化、チャンパ内の泥土の充満・加圧による泥土圧を利用した切羽安定、スクリュによる土砂の排出と土圧制御、および、ベルコン・ズリ鋼車などによる土砂搬送といった機能から構成される。自動化が進化した泥水シールド工法と本工法を比べると、①スクリュによる土圧制御は高水圧に不向き、②掘削土量の計測方法が未確立、③掘進管理の集中化が困難、④土砂搬送が非効率的といった問題点があげられる。

まず、切羽安定に関しては、媒体が泥土と泥水と異なるが基本的な山留め原理は同一であり、その制御方法や自動化は両者ともに実現している。しかしながら、スクリュ、排土ゲートおよびその中に充満した土砂による止水能力は、密閉配管による泥水シールドに比べ劣る。そのため、高水圧下での施工では、大量な添加材注

* 正会員 株式会社 間 組 土木本部設計部

入による土砂の改良や、2次スクリュといった圧力低減または遮断装置を設ける事例が多い。しかし、これらの方法にも限界があり、約1.5kgf/cm²以上の水圧には慎重な対応が必要である。

次に、切羽管理上で重要な指標である掘削土量の測定は、泥水シールドでは流量、密度計を応用したシステムで行われている。一方、泥土圧シールドでは、ズリ鋼車の重量やベルトスケール等による土砂の重量、体積の測定装置が開発されてきたが、リアルタイム性や精度、耐環境性などに問題があり、未だ確立されていない。

また、泥水シールドの掘進管理は、その施工システムが切羽水圧制御、泥水輸送、泥水処理および掘進から構成された連続したラインであるため、早期から集中管理・制御方式を導入する必要があった。一方、泥土圧シールドでは、掘進と土圧制御以外は連続性に乏しいため、集中的な掘進管理は一般的に採用されていない。しかしながら、大口径化、長距離化などで施工が高度化するにつれ、一元的な掘進管理が求められている。

さらに、ズリ鋼車を中心とした泥土圧シールドのバッチ処理的な輸送方式は、連続輸送が可能な泥水シールドに比べ、施工性、効率、輸送能力の面で劣る。そこで、最近はコンクリート用の圧送ポンプを直列に配置した圧送方式を採用する事例が増加している¹⁾。この方式は、①掘削と土砂搬出が並行し作業能率が高い、②占用面積が小さい、③水平、鉛直搬送が連続化できる、④安全性に優れ、坑内の汚れも少ない、⑤自動化、省力化が可能など多くの特長がある。また、スクリュの排土ゲートに直接圧送ポンプを取り付ける方式(圧送直結方式)によって密閉回路が形成され、高水圧下での施工を可能にしている。しかし、現状では自動化が実現されておらず、各ポンプにはオペレータが必要である。

以上の検討から、全自動掘進システムの構築にあたり土砂圧送方式を対象とした。添加材注入制御、自動測量、方向制御、裏込注入制御の自動化システムは既に開発済みであったため²⁾、本開発の課題は、①圧送直結方式の土圧制御、②圧送方式での掘削土量測定、③圧送ポンプの自動化、④掘進管理の集中化であった。

3. 全自動掘進システム

本システム構築にあたり、泥水シールドで実用化した統合型シールド施工管理システムを応用した³⁾。その特長は、地上の中央施工管理盤から掘削、測量・方向制御、切羽制御、土砂搬出、裏込注入といった主要作業の監視・操作・制御ができる点にある。そして、このシステム上で前述の課題を対象とした開発を行った。

3.1 統合型シールド施工管理システム

本システムは、現場に分散配置され各作業の自動化を担当する多数のローカルコンピュータ、掘進全体の集中管理を行う中央施工管理盤(写真-1)、多数のコンピュータ間を結ぶ高速・大容量データ通信網(シールドLAN)から構成される。そして、掘削から裏込注入に至る一連の自動化システムの統合化によ

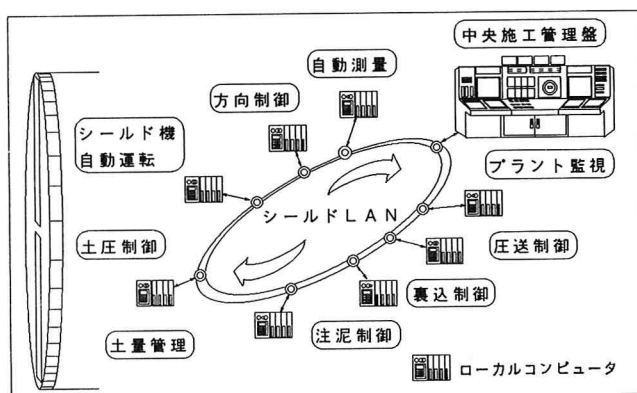


図-1 統合型シールド施工管理システム概念

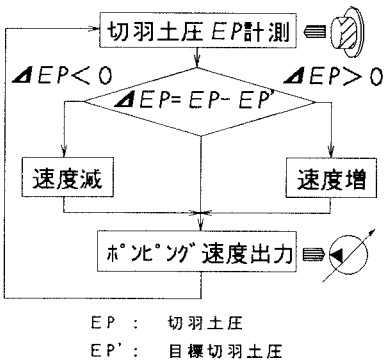


写真-1 中央施工管理盤

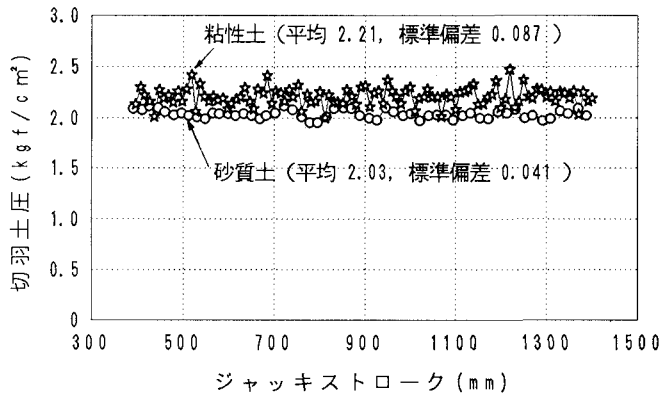
り、掘進工程の全自動化を可能とし、施工管理の一元化を実現できるシステムとなっており、その概念図を図－１に示す。

3・2 圧送ポンプにおける土圧制御システム

高水圧に対抗するために複胴式ピストンポンプによる圧送直結方式における土圧制御として、スクリュによる土圧制御と同様に切羽土圧の信号をポンピング速度にフィードバックして制御するシステム（図－２参照）を作成した。スクリュはチャンバから圧送ポンプまでの土砂の搬送装置と圧送による圧力変動を吸収するダンパーとして機能し、その回転数は一定となる。図－３が示すように制御結果は良好であったが、粘着力が大きい粘性土の場合、圧力の変動が多少大きくなるといった傾向が見られた。なお、制御にはコンピュータを内蔵したデジタル調節計を使用している。さらに最適な泥土を得るため、添加材の自動注入制御を併用している。



図－２ 土圧制御フロー



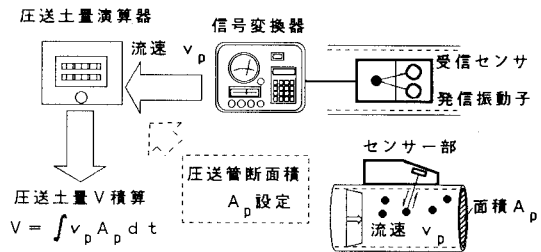
図－３ 土圧制御状況

3・3 圧送方式における土量測定

圧送配管内の土量（圧送土量）のリアルタイムな測定方法として、①ドップラ流速計による管内流速の測定、②ポンピング回数の２方式を採用し、掘削土量は添加材注入量を圧送土量から減ずることによって求める。さらに土量データにはバラツキがあるため、過去の実績や土質データなどと比較し、管理値の決定や異常の有無の判定を行うこととしている。

(a) ドップラ式流速計による管内流速の測定（図－４参照）

泥土化した土砂などビンガム流体では管内の流速分布が台形状となる（栓状流れ）。そこで、中心部の流速をドップラ式流速計で測定し、それに管径から決まる面積を乗じ、時間積分することによって圧送土量が求まるが、脈状の流速波形をしているため、演算には高速スキャン可能なデジタル演算器を使用している。ただし、管内に土砂が沈降し有効面積が減少した場合や、土質や含水率の変化によって管内の流速分布が台形状でなくなった場合などには測定精度に問題がある。



図－４ ドップラ式流速計による圧送土量測定

(b) ポンピング回数

圧送ポンプのポンピング回数と１回当たりのシリンダー内の体積を乗ずることによって圧送土量を求める。土質やポンプ自体の摩耗などによって圧送効率が変化するため、演算の際これらを考慮する必要がある。

3・4 圧送ポンプの自動運転（図－５参照）

一時的に土砂を貯留する圧送ポンプのホッパ内の土砂のレベルを測定し、このレベルの上・下限により自動的にポンプの運転／停止を行い、圧送を自動化している。レベル測定はホッパ底部に取り付けた土圧計によって行う。また、自動運転は各ポンプに設置されたローカルコンピュータによって行われ、さらに、これらのコンピュータはシールドLANに接続され、中央施工管理盤から運転状況の監視や遠隔操作ができる。そして、圧送ライン上で重大な異常が生じた場合、自動的に掘進を停止するといったインタロック機能も装備している。

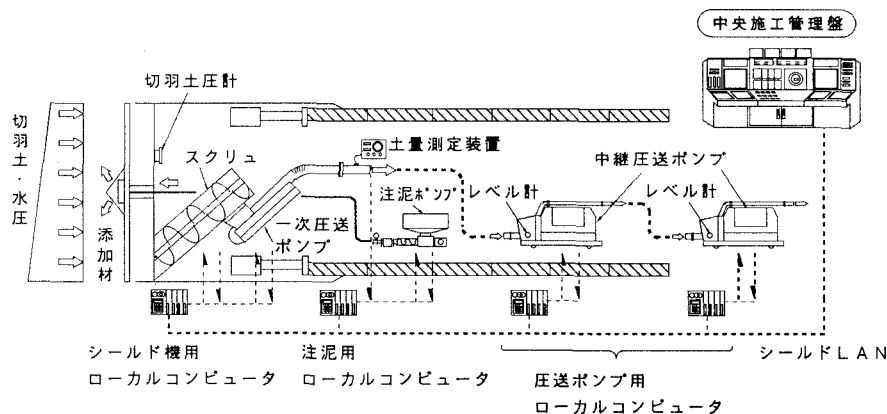


図-5 土砂圧送の自動運転システム構成

4. 現場実証試験の結果と今後の課題

表-1 に示す3現場において改良を重ねながら実証試験を行い、その成果として、①圧送直結方式により実績として2.6kg/cm²の高水圧に対応できる、②圧送ポンプのポンピング速度の調整により土圧制御が可能、③圧送方式でも2方式を併用すれば実用上十分な精度で土量の測定できる、④泥水シールドなみの自動化・集中管理システムの構築が可能といったことが確認できた。また、今後の課題としては、①圧送による土圧変動の低減、②土量測定精度およびメンテナンス性の向上、③砂層などへの圧送方式の適用性の拡大、④圧送に適した添加材の開発、⑤管内の閉塞検知などがあげられる。

表-1 実証試験工事の施工概要

名 称	掘削外径 (m)	施工延長 (m)	土 質	土被り (m)	水圧 (kgf/cm ²)	試験期間
A 工事	φ7.450	1,040	砂礫、細砂	29.2~38.0	1.6~2.6	'90/ 3~'91/ 2
B 工事	φ4.180	763	粘性土、砂礫	17~30.0	1.2~1.7	'90/ 4~'91/ 1
C 工事	φ4.490	1,745	砂質土、粘性土	17~25.0	1.5~2.3	'91/ 2~'91/12

5. おわりに

本報がシールド工法の自動化の一助となることを心から望むものである。最後に、本開発にあたりご指導、ご協力をいただいた企業者、現場、メーカーの皆様、特に青山機工(株)、太平洋機工(株)、丸矢工業(株)の方々に深く感謝する次第である。

6. 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(4)、トンネルと地下、17-8、pp61~70、1986.2。
2) 園田・藤本・名倉：シールド自動施工システムの開発、トンネルと地下、22-5、pp35~42、1991.5。
3) 名倉：統合型シールド自動施工管理システム、JTA設立15周年記念事業シンポジウム講演論文集、pp143~150、1990.3。