

硬質岩盤中のTBM掘削特性などに関する一考察

STUDY ON THE TBM EXCAVATION PROPERTY IN A HARD ROCK CONDITION

植松 澄夫*・飯酒 孟 久夫*・高見沢 滋**・萩原 育夫***

Sumio Uematsu, Hisao Isahai, Shigeru Takamisawa, Ikuo Hagiwara

In recent years the demand for TBM excavation has increased sharply again, accompanying with the spread of the full shield type. The Tsukui Water-way Tunnel Construction Project by the Ministry of Construction, located at Kanagawa prefecture, adopted a double-shielded TBM. This tunnel whose excavation length by TBM was 4,836m with 5.4m in excavation diameter required the high accuracy of bored alignment. The rock mass consists of several pyroclastic materials whose rock quality are generally fairly good. This paper reports the characteristics of TBM excavation, together with the automatic direction control system.

1. まえがき

最近、TBMによるトンネル施工が再び脚光を浴びている。この背景にはTBMの高速掘進性、切羽作業の安全性などがあるが、現時点での課題は大断面化、地質的適用範囲の拡大、作業環境の改善などがある。今回、建設省津久井導水路建設工事（TBM掘削延長4,836m、同掘削径5.4m）に携わる機会を与えられ、TBM掘削に関するデータを収集するとともに、自動方向制御システムを開発実用化してオペレータへの負担の軽減化、ならびに線形精度の高度化と容易化を実現した。本研究は、津久井導水路トンネルにおけるTBMの掘削特性、および自動方向制御システムの特性について考察したものである。

2. 地質およびTBMの概要

津久井導水路は、神奈川県北西部の丹沢山地内に位置している。トンネル掘削区間に分布する地質は、新第三紀中新世生成の愛川層群から構成され、火山噴出物を主体とした堅硬岩盤が分布している。本層は凝灰岩、火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩を主体とし、一部に泥岩と礫岩の堆積性碎屑岩類が挟在されている。全体的な地質構造は西北西～北北東走向で北側に30～80°で傾斜するため、北西方向を持つトンネル軸に対して低角で斜交している。また、本TBMは、スラスト、トルク反力伝達および方向制御の3機能を合わせ持つラチス式スラストジャッキを備えていることを特徴とし、国内での使用は初めてである。

3. TBMの掘削特性

3.1 データサンプリング

* 正会員 (株)熊谷組土木本部土木技術部

** (株)熊谷組横浜支店

*** サンコーコンサルタント(株)東京本社調査技術部

解析に使用したTBMデータの種類は、純掘進速度(cm/min)、総推力(ton)およびトルクに相当するカッターヘッド総電流(A)である。掘進制御は速度調整で行い、それに伴い、総推力・カッターヘッド総電流が上限値を越えないようにしている。データの採取方法はTBM掘削中における自動取り込みで行い、基本的にサンプリング間隔は1掘進長(1ストローク1.5m)において、15cmピッチで計11回実施した。このうち、発進直後と終了直前のデータを除き、9データの平均値を1掘進長の代表値として採用した。但し、破碎帯区間では、切羽崩壊に伴う掘削停止や徐行運転などの人為的要因が大きなウェイトを占めている。また、TBM掘削に伴い坑内地質観察を可能な限り実施したが、坑口付近と坑内の一部では実施していない。

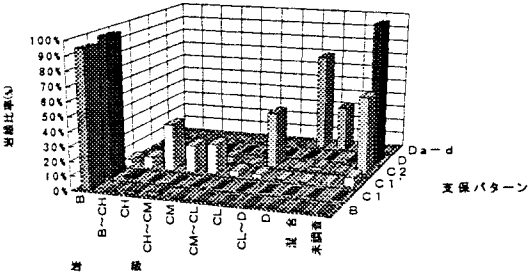
3.2 支保パターン

TBM掘削区間(4,836m)における支保パターンは、表―1に示すB～Da-dの6種類を採用した。B、C1パターンは共に無支保であるが、施工時の岩級区分としてはBパターンが、より堅硬な地山状況であるとされた。各支保パターンの延長計は、B:139.6m、C1:304.5m、C1':4189.8m、C2:114.75m、D:71.25m、Da-d:16.1mであり、機械データ数では各々B:92、C1:200、C1':2796、C2:85、D:45、Da-d:16の計3234点である。したがって、C1'パターンのデータ数が最も多く全体の約86%を占めており、Da-dパターンでは約0.5%と少なくなっている。

支保パターンの選定は、TBM機械データ、岩の物性値(簡易測定器による)を参考にし、シールドテール部での地山状況から判断されている。各支保パターンの岩級別の構成延長を図―1に示す。B、C1パターンは殆どがB級岩盤から構成されており、ひじょうに良好な地山特性であることがわかる。C1'パターンの岩級は、概してCH～CM級に亘って分布しており、CH級比率が最も高くなっている。C2パターンは殆どがCL級岩盤と思われるが、Dパターンは坑口付近に限定されており岩級分布は未調査である。また、Da-dパターンは破碎帯区間で採用されており、TBM本体の締め付けや切羽崩壊などにより掘削に難渋した区間である。

表―1 支保パターンの分類

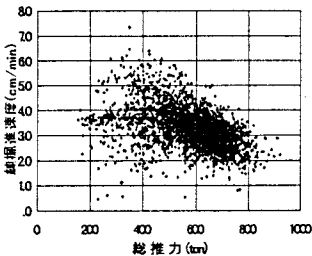
支保パターン	支保工	吹付け
B	無 支 保	
C1	無 支 保	
C1'	H100 @1.5	
C2	H100 @1.2	吹付け t=5cm
D	H100 @1.0	吹付け t=10cm
Da-d	H150 連続～ H100@0.75	



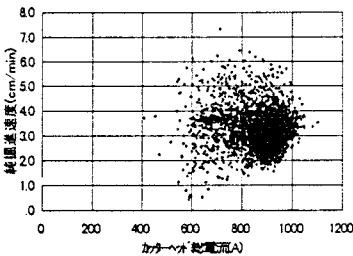
3.3 全体的な傾向

TBM掘削時における総推力と純掘進速度の関係は、図―2に示すとおり、総推力の増加に伴い純掘進速度が顕著に低下している。総推力は概して、300～800ton間に分布するが、純掘進速度は400ton付近の2.0～6.0cm/minから次第に減少し、800ton付近で2.0cm/min程度に収斂する傾向が認められる。カッターヘッド総電流と純掘進速度の関係は図―3に示すとおり明瞭ではなく、カッターヘッド総電流は600～1000Aにほぼ分布している。しかし、総推力とカッターヘッド総電流は、図―4に示すとおり正の相関性が認められ総推力増加に伴ってカッターヘッド総電流の増加傾向が明瞭に認められる。

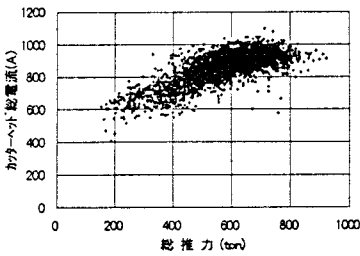
図―1 支保パターンと岩級比率



図―2 総推力と純掘進速度



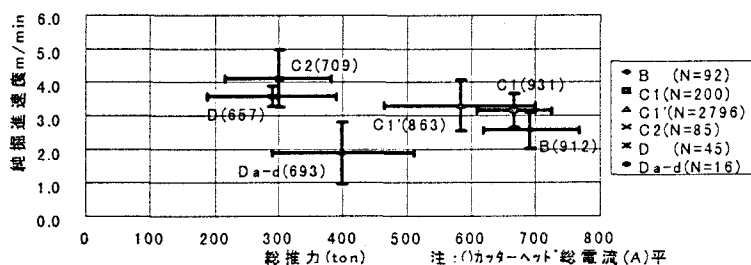
図―3 カッターヘッド総電流と純掘進速度



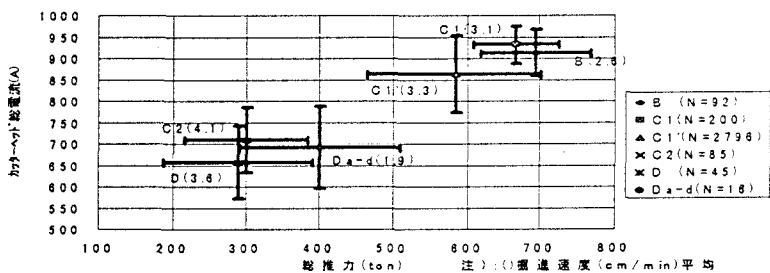
図―4 総推力とカッターヘッド総電流

また、図一5、6 はそれぞれ総推力と純掘進速度およびカッターヘッド総電流の関係を、支保パターン毎の平均値および標準偏差で示したものである。総推力と純掘進速度の関係は、B～C2 パターンにかけて支保程度が軽くなるに伴い、総推力が増加し純掘進速度が低下している。よって、堅硬な地山ほど、低い純掘進速度にも係わらず、より大きな推力を要したことがわかる。しかし、C2 パターンで純掘進速度が最大の 4.0cm/min を示した後、Dパターンでは殆ど総推力が変化せずに純掘進速度が低下している。さらに、Da-d パターンでは再び総推力が増加するものの純掘進速度が一番低下している。これは、TBM本体が地山により締め付けられた影響による。総推力とカッターヘッド総電流の関係では、支保パターンに係わらず正の相関性が認められ、B、C1パターンで総推力、カッターヘッド総電流が最も高く、掘削に当たりより多くのエネルギーが必要であるといえる。しかし、破碎帯区間の Da-d パターンではばらつきが大きく、総推力と共にカッターヘッド総電流もやや高くなっているのは、図一5 と同じ理由による。

支保パターンで B～C2 に相当する岩盤状況は、岩級分類でB～CL級の地山状況に相当する。よって、この間の地山状態であれば、総推力とカッターヘッド総電流がほぼ正の相関性を有し、硬質岩盤ほど高い投入エネルギーが必要であるといえる。反面、硬質岩盤での純掘進速度は低く、CL級で最も進行が得られるため、掘削に当たってはCL級岩盤がもっともふさわしいと考えられる。また、D級を含む破碎質地山では、施工状況によりサンプリングに影響を与えるため、傾向の把握にはより詳細な検討が必要である。



図一5 支保パターン毎の機械データ



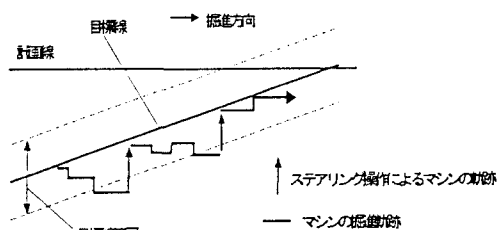
図一6 支保パターン毎の機械データ

4. TBM自動方向制御システムの特性

4. 1 システムの概要

システムの考え方を図一7に示す。

本システムは、まず、TBMに設置したレーザ、ジャイロ、レベル計等の測量データからTBMの位置（計画線に対するずれ）と姿勢（同傾き）を求める。次いで、TBMを同計画線に徐々に戻すような目標線を設定するとともに、所定のスラストジャッキ制御量を算出して同ジャッキを自動操作することによって方向制御を行うものである。測量データの取り込みとスラストジャッキ制御量の算出・指令



図一7 方向制御の考え方

は3秒ごとに行う。

4. 2 解析データ

解析データは、水平及び垂直の位置と姿勢制御量（ヨーイング及びピッチング）、総推力、カッターヘッド貫入量ならびに岩級区分である。総推力はTarkoyによるFPI(Field Penetration Index)値に換算した。

$$FPI(kg/mm)=F_n/P_e$$

F_n :カッタ 1 個当たりの推力(kg)

P_e :カッターヘッド 1 回転当たりのカッターヘッド貫入量(mm/rev)

これらのデータは1掘進長 1.5 m を1リングとして、同リング内での平均値を採用した。またデータ収集区間は 228m、152 リングである。

4. 3 システムの特性

各制御量の時系列変化を図-8～図-11に示す。水平方向については、TBMが計画線に対して右にずれる傾向にある。これはカッターヘッドが右回転(6.3rpm)であるためと考えられる。また、これを修正すべくカッターヘッドを常に左へ向けて元に戻そうとする傾向にあり、水平位置とヨーイングは、ほぼ1:1の対応を示している。垂直方向については、+20mmでほぼ安定している。但し、カッターヘッドは常に上へ向けてTBMの軌道を修正しようとしている。この場合、TBMの沈下が懸念されたため、計画線を+20mmに設定したが、結果的には同設定を0mmとしても良かったと判断される。水平位置と垂直位置とでは、時系列変化のばらつきに差がある。これは、垂直方向ではTBMの自重(約240ton)が挙動の安定に効果的であるのに対して、水平方向では、グリップ反力とスラスト推力のみで挙動の自由度が大きいためと思われる。

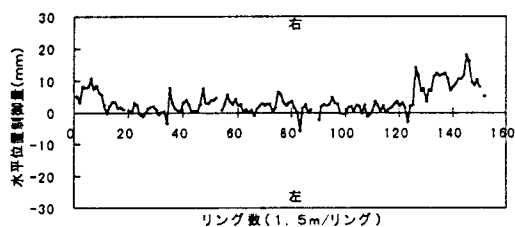


図-8 水平位置制御量の時系列変化

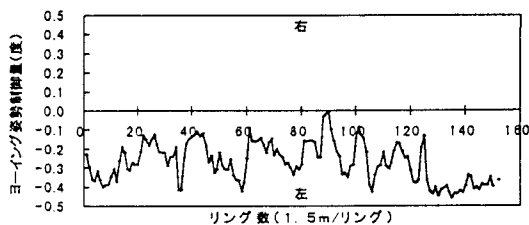


図-9 ヨーイング姿勢制御量の時系列変化

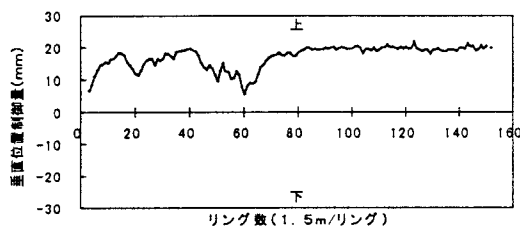


図-10 垂直位置制御量の時系列変化

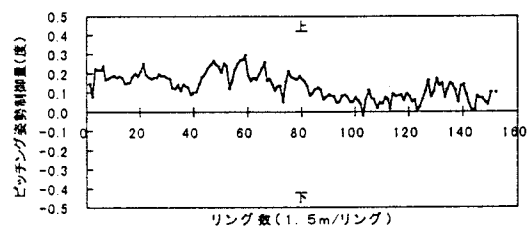


図-11 ピッチング姿勢制御量の時系列変化

岩級と各挙動の関係を図-12～図-15に示す。CH～CM級、CM級、CM～CL級およびCL級に着目すると、地山が悪くなるにつれて水平と垂直の位置が大きくなる、即ちTBM挙動が不安定化する傾向にある。その際、ヨーイングは左方向に大きくなり、TBMを元へ戻そうとする。但し、検討を実施した範囲内では、ピッチングについての本傾向が見られない。

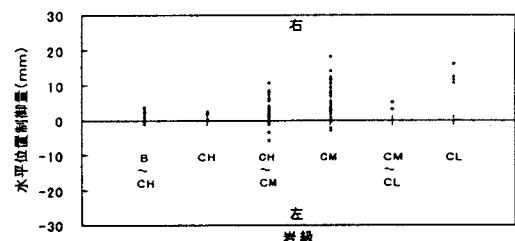


図-12 岩級と水平位置制御量の関係

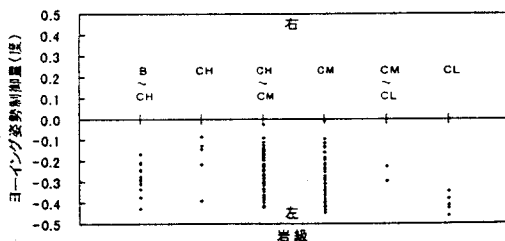


図-13 岩級とヨーイング姿勢制御量の関係

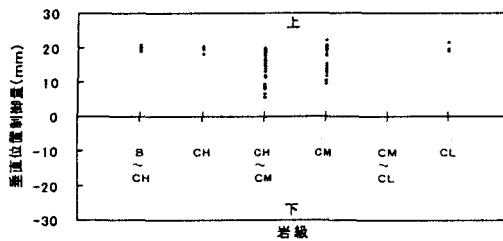


図-14 岩級と垂直位置制御量の関係

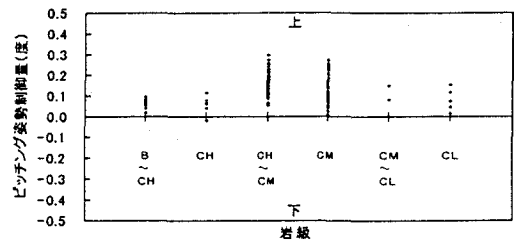


図-15 岩級とピッチング姿勢制御量の関係

FPIと各挙動の関係を図-16～図-19に示す。FPIはカッターヘッドが1mm貫入するのに要するカット1個当たりの推力であり、同値が大きいほど地山が固いと判断される。水平方向については、地山が固くなるにつれて、位置、ヨーイングとも小さくなる傾向にある。特に位置は計画線に一致するようになる。これは、地山が固いこと、即ちカッターヘッドの押し付け力増大が、TBMの挙動の安定化に貢献すると言える。垂直方向については、この傾向はひじょうに弱く、押し付け力よりもTBMの自重の影響が卓越しているものと思われる。

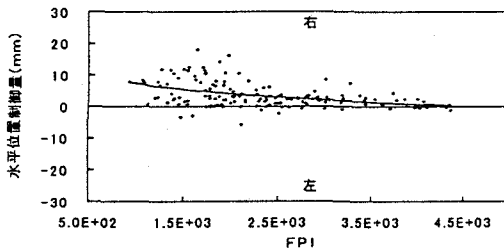


図-16 FPIと水平位置制御量の関係

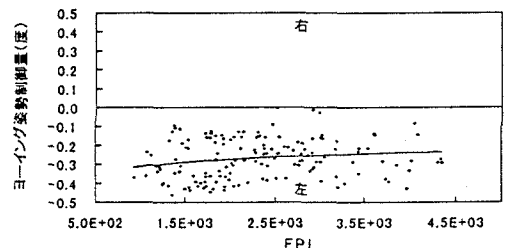


図-17 FPIとヨーイング姿勢制御量の関係

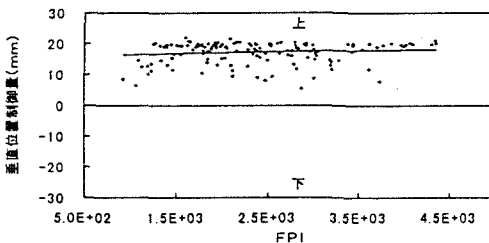


図-18 FPIと垂直位置制御量の関係

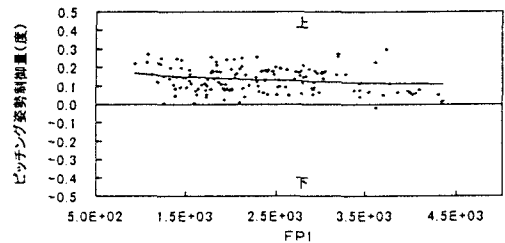


図-19 FPIとピッチング姿勢制御量の関係

5. あとがき

地山条件との関係におけるTBMの掘削および自動方向制御の各特性を考察した結果、以下の結論を得た。

前者については、①掘削特性は地山条件と密接な関連が認められ、特にB～CL級で明瞭である。②破碎質の地山では、施工状況を踏まえた上での検討が必要となる。

後者については、①本システムは、実用上十分な線形管理能力を有する。②線形精度は水平方向に比較して垂直方向が高く、安定している。③自動方向制御特性は岩盤の硬軟に影響を受け、硬いほど掘進精度が高くなる傾向にある。

今後の検討課題は、本TBMならびに本システムの適用範囲を拡大することである。最後に、本システムの開発実用化に関して、コマツに謝意を要します。

6. 参考文献

- 1) Development of an Automatic Direction Control System for TBM, The 13th ISARC, pp831～840, 1996.6
- 2) TBM自動方向制御システムの開発－宮ヶ瀬ダム津久井導水路工事－, 建設の機械化, pp36～41, 1996.4
- 3) Difficult rock comminution and associated geological conditions, Peter j.Tarkoy et al.