

流体輸送式TBMによる泥岩掘削 THE MUDSTONE EXCAVATION BY TBM WITH SLURRY TRANSPORTATION SYSTEM (施工上の問題点と自動掘進にむけて)

中垣俊一*・上田達夫*・○西元洋一*・矢飼稔之*・早瀬敬太郎**
Toshikazu NAKAGAKI Tatsuo UEDA Yoichi NISHIMOTO Toshiyuki YAGAI and Keitarou HAYABUCHI

Recently the number of tunnel project in rock formation at urban areas is steadily increasing. One of widely accepted tunnelling methods suitable for soft soil to hard rock is TBM (Tunnel Boring Machine) method. In this paper a case study of an improvement of a slurry treatment plant for TBM with slurry transportation system is presented. Also computer aided alignment control and excavation control method with on line basis as a part of TBM automatic operation performed at our project is shown below.

Keywords: TBM, Slurry transportation system, Slurry treatment, Alignment control

1. まえがき

都市部においても、岩盤内に構築されるトンネルが増えてきた現在、そのトンネル施工法として硬岩から軟弱層まで幅広く対応できるTBM工法も有力な優れた施工方法のひとつである。TBM工法の場合、ずり出し方法として、ベルトコンベア式と流体輸送式があるが、小口径断面（外径2000mm程度）の場合、ベルトコンベアの採用は困難なため流体輸送式が採用される。流体輸送方式では、土砂分離及び泥水処理設備が必要となるが、この設備の方式・規模を決めるにあたっては、解膠率（掘削された土砂が余剰泥水となって溶け込む割合）の仮定が重要である。そこで当工事における泥岩をTBM流体輸送式で施工した場合の泥水処理設備の改善例を報告する。

また、最近ではあらゆる工事で情報化施工が進み、また自動化施工も試みられるようになった。当工事でも、TBMの自動掘進に向けての第一歩としてコンピュータを導入し、オンライン方式で線形管理・掘進管理を行った結果について報告する。

2. 工事概要

2. 1 地質概要

地形的には盆地の中に位置する当現場は、表層として段丘堆積（玉石混り砂礫）層、その下位層としての第三紀中新世秩父町層群からなる。TBM掘削対象となる秩父町層群の岩相は、黒色珪質の小円礫を含む暗灰色の砂質泥岩を主体とし、新鮮な泥岩は緻密であるが、風化するとスレーキングを起こし、また玉葱状構

* 大林組埼玉西土木工事事務所

** 大林組土木技術本部技術第4部

造が発達している。泥岩の性状を表-1に、地質縦断面を図-1に示す。湧水は 1~5L/min/トンネルm程度が数カ所のほか、適水程度であった。

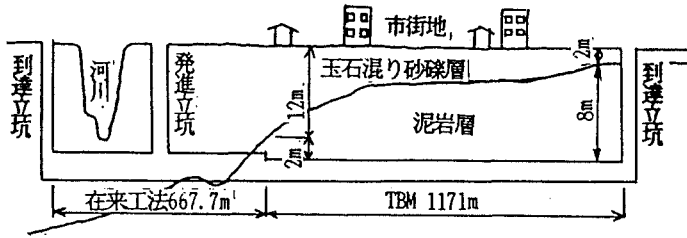


図-1 地質縦断面図

表-1 岩石試験一覧表

自然含水比(%)	11.5
単位体積重量(g/cm ³)	2.24
弾性波速度V _p (km/sec)	2.5~2.7
〃 V _s	1.2~1.4
動的ポアソン比	0.28~0.36
一軸圧縮強度(kgf/cm ²)	50~100
弾性係数静的E _{so} (kgf/cm ²)	1.3~2.3*10 ⁴
〃 動的E _d	8.5~11.3*10 ⁴

2. 2 工事内容

トンネル延長 1838.7m (TBM1171m 在来工法667.7m) TBM外径 2000mm、仕上径 1350mm、
縦断勾配 下り 0.6%、支保工 溝形鋼 125*65*6*8 外径1860mm 1.20mピッチ、
線形 曲線半径500m 3ヶ所 延べ85.5m、半径300m 3ヶ所 延べ165.8m、半径70m 1ヶ所 延べ37.6m

2. 3 当工事のTBM工法の概要

TBMは円筒形の外殻を持つシールド構造となっており、回転するカッターヘッドに装着したローラーカッターを地山に押し付けて、圧砕切削するトンネル掘削機である。掘削されたずりは面盤及び側面に取り付けたスクレーパでバULKヘッドで仕切られたホッパー内へ取り込み、ジェットポンプで後方へ送り、循環水とともに輸送管・排泥ポンプを経由しながら坑外に設置された土砂分離・泥水処理設備へ送られる。TBM本体は、前胴・中胴・後胴より構成され、中折機構となっている。後胴部に機体を固定するメイングリップとセグメント使用時のシールド推進ジャッキがある。前胴と後胴をスラストジャッキで連絡し、カッターヘッドの推進はこのスラストジャッキで行い、推進反力は直接後胴へ伝達される。その他前胴にフロントグリップ、方向制御ジャッキなどを有し、曲線掘進が容易となっている。カッターヘッドトルクは最大 20t・m、主推進力160t、主推進ストローク900mm、流体輸送能力 1.7m³/min等の能力である。後方台車設備は、油圧・流体輸送・電気設備等より構成され、全長約80mである。

3. 泥水処理設備の改善

3. 1 当初設備と実際の解膠率

これまでのTBM掘削施工例では、解膠率は10~25%程度の範囲であったので、当工事ではその最大値として25%を採用し、土砂分離設備として、振動フルイ(サンドコレクタB870*L3200*2段)・サイクロン(74μ分級*4台・サイクロンポンプ2.4m³/min)、泥水処理設備として、シックナー(50t/H)及びフィルタプレス(汙過面積200m²・容量3m³)を計画設置した。掘進開始とともに泥水処理能力が不足し、循環水の比重が著しく増大し、予定の掘進が不可能となった。そこでフィルタプレスの処理能力を調査した結果、汙過速度が3.06kg/m²/hと通常の5~11kg/m²/hに比較し低い能力であった。室内試験を行った結果では、凝集剤添加量・サイクルタイムはほぼ妥当であり、それ以上の能力向上は期待できなかった。フィルタプレスの能力が低いのは泥水中の粒径が小さいため¹⁾と考えられた。物質収支計算(図-2)を行い解膠率を求めた結果、50%強の

解膠率であった。当工事では日進14m掘削する必要があり、そのために1日当り泥水として処理しなければならない固形分（土粒子）は48.16tである。一方、フィルタプレスの処理能力は12.23tしかないため、35.93tの処理能力不足である。

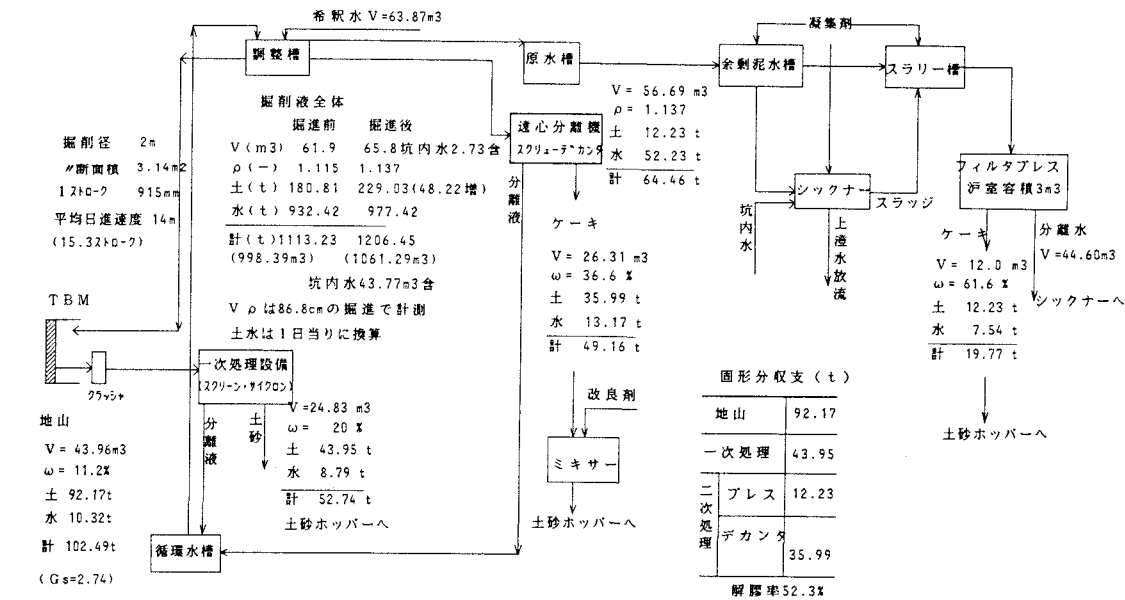


図-2 物質収支計算

3. 2 設備の増強

この問題の解決案として、①フィルタプレス増設②スクリーデカンタ新設③ベルトプレス新設④天日乾燥などが考えられた。どの案を採用するか、立地条件・処理能力・機械損料・設置工事費・運転経費・据付工期・遊休期間の損料などを項目として検討したが、当工事の場合②スクリーデカンタ新設が最も有利であるとして、これを採用した。デカンタの規模は、その能力からφ500とした。

ところで、デカンタより排出されるケーキの性状は含水比40%内外ではあるが、濃縮ヘドロ状であるため、土捨て場での処分はおろか、ダンプトラックへの積み込みもできない。したがって、土捨て場での盛土処分を可能にするために、ケーキを改良する必要性が生じた。ケーキの改良方法としては、セメント系・石灰系改良材の添加攪拌、天日乾燥などの方法があるが、狭い立坑内・人家密集地域では新たに粉塵対策を必要としたり、広大な敷地を必要とするなど問題が大きいため、当工事では高分子吸水剤（添加量2.25kg/デカンタケーキm³）と消石灰の添加攪拌による泥土の改良をおこなった。高分子吸水剤は攪拌後の養生や特におおがりがちな粉塵対策

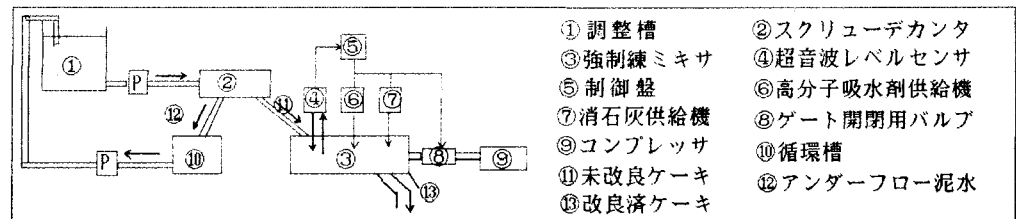


図-3 ケーキ改良システム

・材料置場を必要とせず、狭い敷地では有効な方法であった。高分子吸水剤・消石灰の添加攪拌には、デカンタより排出されたケーキを強制練りミキサーに入れ、これを超音波レベルセンサーで容積計量し、タイマ

一で薬剤投入時間・攪拌時間・排出ゲートの開閉時間をコントロールした自動運転とした。(図-3)

3. 3 今後の課題

TBMのローラーカッターで圧砕切削されたブリの流体輸送に対する性状（特に解膠率）は、今のところ定量的に明らかにされていない。この性状に対する要因としては、岩質、掘削速度（推進圧・切込み量・回転数等）、カッターの配置・摩耗程度、流体輸送中の溶解などが考えられるが、やはり岩質の要因が大きいと考えてよい。TBMの機械的構造的には、バルクヘッド内への取込方法・吸込口の改良が考えられる。

解膠率を事前に正確に把握することは、土砂分離・泥水処理設備を決定する上で極めて大切であるものの、現在まで確立された事前調査方法はまだない。弾性波探査、調査ボーリングを利用した圧縮強度・亀裂係数・含水比・粒度・密度・比重試験の他に、浸水崩壊度試験・耐スレーキング試験などが実施されているが、これらの調査試験結果をTBM流体輸送方式に当てはめるとき、どのように評価するか、具体的に検討する必要がある。あるいは、実際の円盤切削に近い状態を再現する実験方法を開発する必要があると考えられる。

4. TBMの自動運転に向けて

4. 1 コンピュータシステムの概要

当工事では自動掘進に向けての第一歩として、コンピュータを利用した線形管理と共に、機械掘削に関するデータを収集し、解析をおこなっている。今回使用したシステムを図-4に示す。

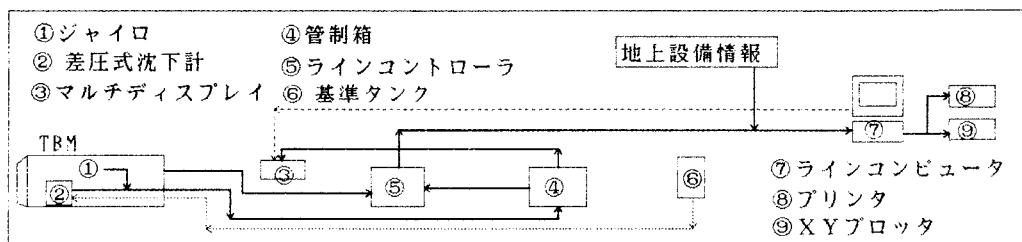


図-4 コンピュータシステムフロー

4. 2 線形管理

TBM機体に取り付けられたジャイロ・差圧式沈下計の情報は、管制箱を経由してマルチディスプレイに表示されるとともに、ラインコントローラに送られ、そこからラインコンピュータへと送られて、データ処理される。コンピュータでは、掘進長50mm毎にデータを収集し、予め入力した予定線形に対する差異を計算表示したり、測量データを入力することによって修正方位・標高の出力や蛇行が大きい場合の修正線形を出力できるシステムなどが組まれている。

コンピュータを導入することによって、測定の省力化・掘削線形の精度向上を図ることができた。従来、TBM T法で、"ジャイロ+差圧式沈下計"だけの場

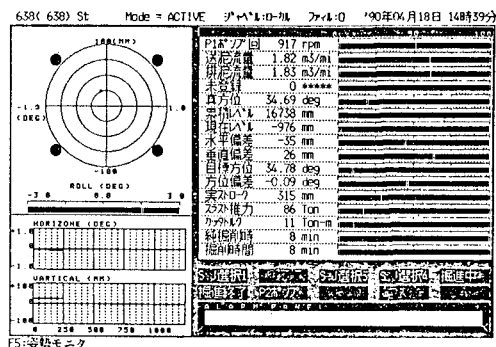


図-5 自動収集モニタ①

合、曲線部での測量回数は1日2～3回実施し、計算結果の整理・掘削指示票の作成など多大な労力を要していた。今回の施工では、測量回数は直線区間で2～3日に1回、曲線区間では1～2日に1回と省力化を図れた。線形精度であるが、コンピュータ演算結果と測量により求めた結果との偏差は、掘進長20mに換算して、R300mで最大65mm程度、R500mで最大50mm程度の精度を収めており、TBMにおける初めてのコンピュータ線形管理としてはそれ相応の成果と考えられる。

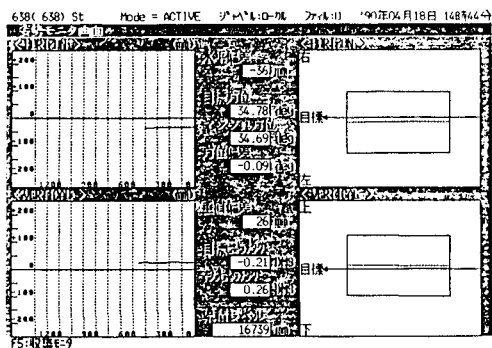


図-6 自動収集モニタ②

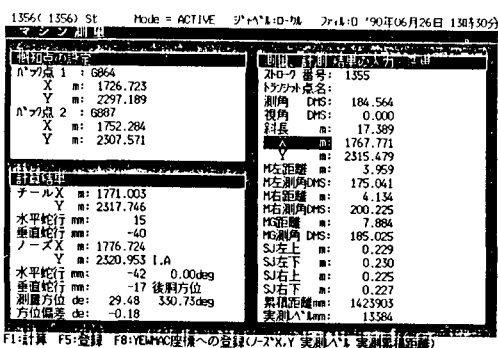


図-7 マシン先端座標計算

4. 3 線形管理システムの改良課題

①ジャイロの小型化・性能向上: $\phi 2000\text{mm}$ TBMの機体内部に占めるジャイロのサイズは大きく、メンテナンス・カッター交換作業時に支障が生じる場合がある。また示北精度(現在 ± 0.2 度)の向上・停電補償時間の延長及び測定稼働復旧時間の短縮などの改良が待たれる。

②坑内運転席へのモニター設置: 今回の施工では、機内運転席で得られる掘進情報は、ジャイロ・沈下計、ピッチング計・ローリング計の指示値、コンピュータから印字出力した掘進指示票がある。当機内運転席が極めて狭く改造が困難なため、今回の施工では見送ったが、直ちに実施可能な策として、コンピュータのディスプレイ(例えば図-5に示す収集モニタで、機体位置方向、偏差等を示している)を運転席で直接モニタできるようにすれば、運転手はより楽に、また正確に運転操作できるものと考えられる。あるいは、地上制御室からの遠隔操作とする必要がある。

③機体・グリップのスリップの検出: 今回の施工では当初想定よりも地山強度が小さい区間が多く、また切削ずりの粘土化されたものをメイングリップと地山の間に挟み、推進反力を支持できず機体スリップした。当初計画では、このスリップは想定されておらず、スリップ量を検出する方策はなされていなかった。したがって、コンピュータにもその対処プログラムは用意されていないため、測量による確認の方法をとった。より実掘進長に近いデータを得るためには、今後、機体スリップを検出し、コンピュータ処理できるシ

【掘進指示票】				
Page: 1/1		変化点 No.	: 6	
		変化開始 St.	: 570	
St. No	ジャイロ測定方位 [deg]	掘 進 [deg]	レベル [mm]	
570	29.47	0.17	217113	
571	29.65	0.35	217107	
572	29.82	0.52	217102	
573	30.00	0.70	217096	
574	30.17	0.87	217091	
575	30.34	1.04	217085	
576	30.52	1.22	217080	
577	30.69	1.39	217074	
578	30.86	1.56	217069	
579	31.04	1.74	217063	
580	31.21	1.91	217058	
581	31.39	2.09	217052	
582	31.56	2.26	217047	
583	31.73	2.43	217042	
584	31.91	2.61	217036	
585	32.08	2.78	217031	
586	32.25	2.95	217025	
587	32.43	3.13	217020	
588	32.60	3.30	217014	
589	32.78	3.48	217009	

図-8 掘進指示票出力例

システムが必要である。その後、実掘進長を測定するための方法が試みられてはいるが、種々の問題が残されているようである。

④掘進方位角・偏位・掘進長のデータ収集方法：今回の施工では、掘進に関するデータ収集を掘進長50mm毎に採取し、演算させたが、ジャイロ信号は常に変動しており、細かいピッチでデータ収集しても、必ずしも精度の向上につながっていないと考えられた。したがって、データ収集の方法を変更した方がよいと考えられる。

小口径トンネルでは、測量作業は大断面トンネルに比べて、狭いが故に制約が多く、困難な場合が多い。最近ではシールド工事などで機体位置の測量については改良されたシステムの開発実用化が進んでいるが、さらに簡易で汎用性のある、精度の高いシステムの実用化が望まれる。

4. 4 TBM掘進管理

当工事では先述のように、コンピュータによるマシン操作・稼働状況・掘進軌跡などのデータを収集している。当工事の施工の中で、これらのデータを利用した施工まで至らなかったのは残念であったが、このデータを使用して統計解析しコンピュータにフィードバックすることによって、自動運転に向けての第2段階として、最適のカッター回転数・推進圧・スラストジャッキの選択・方向制御ジャッキなどをコンピュータで制御するシステムも実施されようとしている段階を迎えている。TBM掘進に関するデータの蓄積・解析が進むとともにTBM掘進の完全コンピュータ制御も可能になると思われる。

5. その他の改良課題

特にφ2000mmといった小口径トンネル掘進においては、換気及び冷却方法の改善の必要を感じた。TBMを駆動させるための電力・油圧・流体輸送設備から発生する熱量は大きく、局部的に高温になる。後続台車上の設備機器の小型化・高出力化と相反する命題かも知れないが、発熱量の少ない設備機器の開発の必要を感じた。

6. おわりに

TBMについて終始問題点の羅列となったが、狭小断面トンネルの自動化施工は、社会的要請上からも是非とも進めなければならない課題と思われる。今回の試みは小さなステップではあるが、自動運転に向けて、基礎的な第一歩となったと考えている。今後、自動化施工の開発が進むことが望まれる。

おわりに当工事の施工について、ご指導・ご協力を頂いた、日本下水道事業団埼玉工事事務所の水野所長及び橋本氏に対し深く感謝する次第である。

1)喜田・辻・炭田：「土工事における濁水処理に関する研究」（第19報）大林組技術研究所報No29(1984)、pp145～149