

前方探査に基づく脆弱地山 TBM 拘束対策の実績

The results of TBM prevention for restriction based on forward investigation method on weak rock.

吉田武男¹⁾・吉田安利²⁾・岡崎隆雄²⁾・森 孝之³⁾

Takeo YOSHIDA, Yasutosi YOSHIDA, Takao OKAZAKI, Takayuki MORI

The greatest feature of TBM is high-speed construction. However, once it is hit by troubles, such as defective geology, in order for the measure to take great expense and a great term, therefore, it is the important subject of TBM construction how the trouble is prevented. It was thought that excavation of pilot tunnel by TBM of the Kanaya tunnel line headed for Tokyo had a high possibility that the geology which the weak and brittle rock followed will be expected, and TBM will be restrained in the ground.

This paper describes the actual result of analysis about reflection tomography considered the correlation with TBM data, and construction result of counter force secured type support used for the weak rock and the result which analyzed TBM excavation data.

Key Words: TBM, support, weak rock, prevention for restriction, machine data, reflection tomography

1. はじめに

TBM の最大の特徴は高速施工にある。日本道路公団ではその高速性を生かした TBM 導坑先進拡張掘削工法を開発し、第二東名・名神の長大トンネルで適用している。しかし一度地山拘束等のトラブルに見舞われると、その対策に多大の費用と期間を要するため、それを如何に防ぐかが TBM 導坑施工の重要課題である。

金谷トンネル上り線では脆弱な地山の連続した層を通過することが予想され、その層の中で TBM が拘束される可能性が高いと考えられた。このため TBM の補助推力であるシールドジャッキと反力確保タイプの仮設支保工を組み合わせた TBM 拘束対策等を計画し、これを効率よく実施するために前方探査の最新技術である反射トモグラフィを有効利用して、この脆弱地山をトラブルなく貫通できた。

本報告はこの実績を報告するものである。この中で反射トモグラフィの実績分析では TBM データとの相関性について考察し、この技術の有効性を確認した。また脆弱地山区間に用いた反力確保できる TBM 支保工の施工実績とその推進時 TBM データを分析した結果についても報告する。

2. 金谷トンネルの概要

1) TBM 工事概要

金谷トンネルは、静岡県掛川市大字倉真～榛原郡金谷町に位置する、上り線総延長 4,454m、下り線総延長 4,607m の第二東名高速道路最長トンネルで、掘削断面約 190 m² の超大断面トンネルである。

(図-1 参照)



図-1 位置図

- 1) 正会員 日本道路公団 静岡建設局 掛川工事事務所
- 2) 正会員 鹿島・竹中土木・青木建設共同企業体
- 3) 正会員 鹿島建設(株)技術研究所

掘削工法としては、日本道路公団から TBM 導坑先進拡幅掘削工法が指定されている。(図-2 参照)

金谷トンネル西工事では、上り線 TBM 先進導坑 4,104m を西側坑口から掘削し、東側坑口まで約 14 ヶ月で、掘削を完了した。

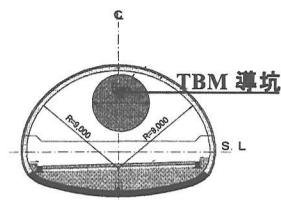


図-2 TBM 導坑位置

2) 地質と地山の特徴

金谷トンネルの地質は新第三紀の倉真層群と古第三紀の瀬戸川層群からなり泥岩、砂岩、頁岩の互層で構成されている。(図-3 参照)

西坑口側の倉真層群泥質岩層は第三紀泥岩としては硬質な良好岩盤である。これに続く砂岩層から戸綿泥岩層、天方砂岩層が脆弱な地山であり、この位置の岩石コアの物性値を表-1 に示すが、泥岩優勢層では砂岩に比べて著しく強度が劣るのが特徴である。しかも、泥岩優勢で風化が進んでいるものは CEC 値は 20 近い値を示すものもあり、スレーキングに対し劣化しやすい特徴を有している。また、砂岩優勢互層では硬質であるが亀裂が発達しているのが特徴である。この区間は土被りが約 300m と大きく、岩の性状から、掘削後に地山変形が生じやすい区間となっている。東坑口側の瀬戸川層群は強い褶曲作用による鏡肌を持つ頁岩が砂岩の亀裂に挟まっており、剥落の多い不良地山区間となっている。

表-1 地山岩石コア物性

地質	泥岩	砂岩
密度(g/cm ³)	2.487	2.494
一軸圧縮強度qu(MPa)	2.4	51.1
変形係数E(MPa)	2,790	9,760
静ポアソン比ν	0.34	0.28
Vp(km/sec)	3.0	3.6
Vs(km/sec)	1.4	2.1

地質凡例	
記号	地層・地質名
Rm	新第三紀 倉真層群 松葉 泥質岩層
Rns	戸綿泥岩層
Rtn	天方砂岩層
Ras	砂岩優勢 砂岩・頁岩互層
Rog	基礎礫岩層
Ssm	古第三紀 瀬戸川層群 砂岩優勢 砂岩・頁岩互層

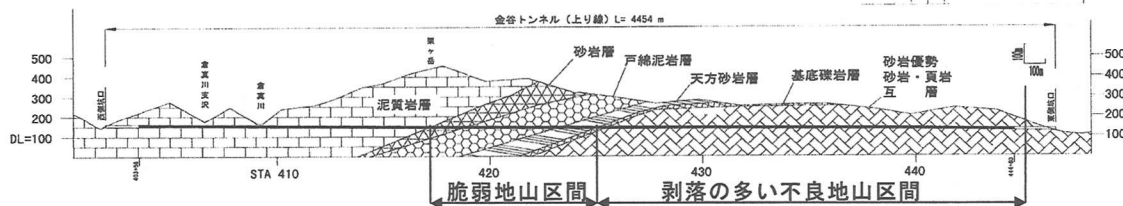


図-3 地質縦断面図

3) TBM の概要

TBM は事前の地質調査結果に基づき、不良地山区間においても施工が安全なフルシールドタイプの TBM (φ 5 m、L=9m) が採用された。表-2 に TBM の標準仕様を示す。

なお TBM に使用する支保工は、導坑として後から切掘げを行なうため、コンクリートセグメントのような剛性の高いものを使わないことが条件となる。そこで主たる支保部材は吹付けコンクリートとリング支保工で、不良地山区間では安全対策を考慮し簡易鋼製ライナーを採用した。

表-2 TBM 標準仕様

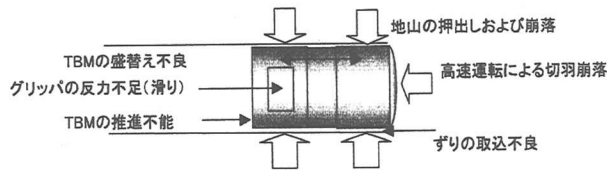
項目	単位	仕様	項目	単位	仕様
掘削径	mm	5000 (5000~5020)	スラスト総推力	kN	9414
掘削機全長	mm	9000	推進ストローク	mm	1500
ディスクカッター	mm	φ 432 (17インチ) × 35個	メイングリッパ総押付力	kN	19613 (水平対抗式)
カット総出力	kW	900	メイングリッパ接地圧	MPa	2.5
カットトルク	kNm	(定格) 1127 / (最大) 2254	メイングリッパストローク	mm	150
カット回転数	r p m	0.5~9.5 (インバータ制御)	ズリ搬出能力	m ³ /h	242

3. 脆弱地山対策

1) TBM の拘束トラブル解析と対策

上り線 TBM 導坑に先行した下り線 TBM 導坑掘削では、脆弱地山区間で 3 回にわたり地山拘束のトラブルに見舞われている。このトラブルを解析した結果、以下の問題点が明らかになった。

- ① 前方探査で準備したボーリング機械は、機動性に劣るため十分機能しなかった。
- ② TBM 後胴の周辺摩擦増大により、盛替不良（前胴が盛替時後退）が頻発に発生し、メイングリッパの押付け力だけでは、推進のための反力確保が出来ない箇所もあった。
- ③ TBM カッターヘッドの掘削ずりの取込が不十分で残留ずりの上に TBM 本体が乗り上げた。
- ④ 掘削速度が速くなると掘削岩盤の亀裂が発達し、切羽崩落または TBM 上部の崩落が生じた。
- ⑤ 脆弱地山区間では、掘削後に周辺地山の押し出し現象が見られ、時間経過とともに進行した。



図－4 TBMの拘束トラブル

以上の問題点から検討し、脆弱地山区間での TBM 拘束対策として、以下の対策を実施した。

- ① 前方探査方法に反射トモグラフィを採用し、迅速に、正確な地質予想を得る。
- ② 上記予想に対して、補助反力の取れる TBM 仮設支保工を採用し、シールドジャッキで反力を得る。
- ③ ずり取残し防止対策を行なった上で、オーバーカッタ（φ5050mm）を実施する。
- ④ 亀裂の発達した地山では、掘削速度の遅い TBM 運転方法を実施する。
- ⑤ 脆弱地山区間では、連続運転を基本とし、できるだけ TBM を休止させない。

本稿ではこのうち対策の①、②について概説する。

2) 反射トモグラフィ測定によるトンネル前方探査

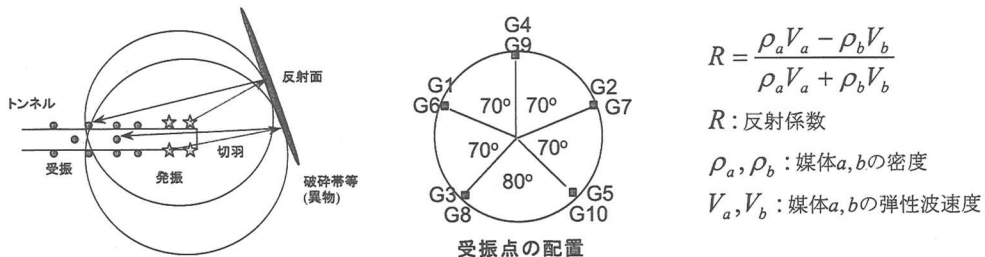
(1) 調査方法

測定の概要を図－5 に示すが、TBM マシンの後部において受振点を同図のように配置し、発振点から弾性波を発振することで、反射波を測定する。なお、受振点は 5m 間隔、発振は大ハンマーを用いて実施した。

弾性波反射トモグラフィは反射波に基づき地山の評価を行なう。反射波は速度の異なる地層や不連続面境界において生ずるが、その反射の程度は図－5 右の式で定義され、反射係数で表わされる。

速度が大きく異なる境界面では反射係数が大きくなり、何らかの不連続面や地質性状の異なる境界層が存在すると解釈される。¹⁾

地山の状態にもよるが、切羽前方 120～150m 程度の範囲まで探査が可能であった。また、解析に一日を要するので、その間の TBM の進行を考慮して探査範囲を 50m 程度ラップしながら調査を行った。



図－5 反射トモグラフィの調査概要図

(2) 調査結果例と考察

図-6は反射トモグラフィによる戸綿泥岩層の比較的軟質な区間での測定結果で、立体図による反射係数分布を上段、トンネル軸方向の反射係数と標準偏差を下段に示したものである。

同図ではSTA418+30から複数の反射面が検出されており、実際に粘土化した破砕帯が存在していた。

また、TBM機械データとの相関では図-7に示すように、反射トモグラフィで想定された破砕帯範囲ではカットトルクから求めた準岩盤強度の値も小さく、両者の相関が認められる。

なおここで用いた準岩盤強度は

$$\sigma_c \text{ (kgf/cm}^2\text{)} = Tr / (C_1 \times Pe^{1.5})$$

Trはトルク値(kN-m)、C1は定数、Peは貫入量(cm/rev)である。²⁾

また、同図の前半部でも細かな断層や脆弱部が存在していたが、明瞭な反射面が検出できていない。すなわち、軟質な地山で断層などの弱層が薄い場合には、地山の弾性波速度が類似していることから明瞭な反射波が得られず、地山と不良部のコントラストを明確にし難い。

図-8は地山が比較的硬質な区間での測定結果で地質は砂岩主体の天方砂岩層である。この地山は亀裂に富み、断層や脆弱部と考えられる反射面が多く検出されており、掘削時には概ね断層や強風化層などが出現しており、TBMの施工にあたり有用な地山情報であった。

今回は切羽前方の広範囲を調査対象としたが、速度インピーダンスの面から硬軟のコントラストがない地山の適用性には限界があることが分かった。

ただし、地質が細かく変化する場合には受振点の増加、解析領域を小さくするなどにより、多少改善できるものと考えられる。

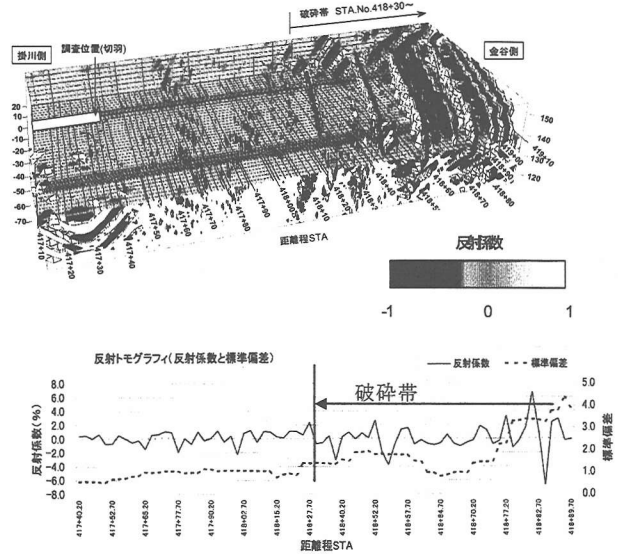


図-6 軟質地山区間における反射トモグラフィ結果

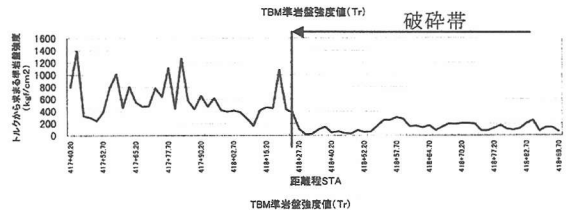


図-7 軟質地山区間の TbM 準岩盤強度推定値

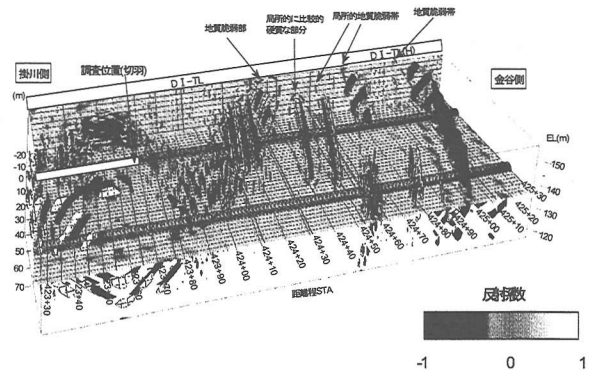


図-8 硬質地山区間における反射トモグラフィ結果

3) 補助反力の取れる TBM 仮設支保工とシールドジャッキ推進

(1) 補助反力 TBM 仮設支保工の概要

TBM 本体を改造し、補助推力用のシールドジャッキを装備した。(100tf×14 基、ストローク 1150mm)

とくに脆弱地山区間では、崩落ずりや周辺岩盤の押出し現象が生じ、TBM 後胴に大きな摩擦力が働くことがあり

①掘削後、前胴のフロントグリップ反力だけでは、後胴を引き寄せられない盛替不良の場合は、インバートタイプの TBM 仮設支保工を反力盤として対処した。

(シールドジャッキ下部 4 本使用)

②掘進時、反力盤であるメイングリップが滑り、反力不足となる場合には、全周シールドジャッキに対応した非拡張タイプの TBM 仮設支保工を反力盤としたシールドジャッキ推進を行なった。(写真-1)

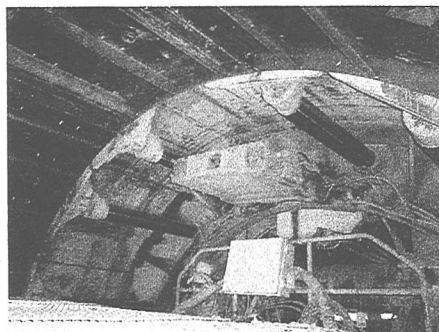


写真-1 シールドジャッキ推進

図-9 にインバートタイプ、図-10 には非拡張タイプの TBM 仮設支保工の概要図を示す。図に示すように、インバートタイプの上側部は TBM 後胴で組立て後、後胴の後ろで拡張して掘削岩盤と密着させる。

非拡張タイプは後胴内の全周シールドジャッキに対応するため、掘削岩盤とのクリアランス (10~20cm) が生じるので支保工裏面に装備した充填袋 (1 基 7 袋) に充填材 (LW) を注入して周辺岩盤の緩みを防止するとともに、推進圧による支保工の座屈を防止した。

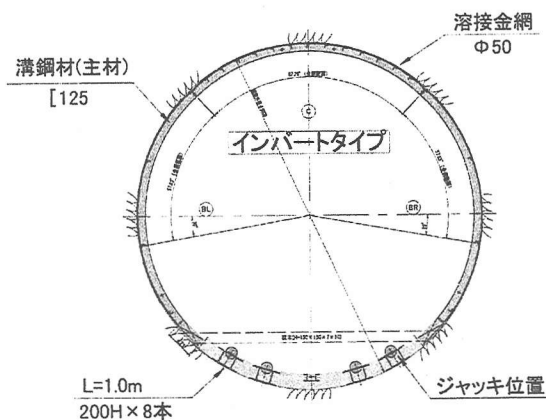


図-9 インバートタイプ支保工
DI-TL (I)

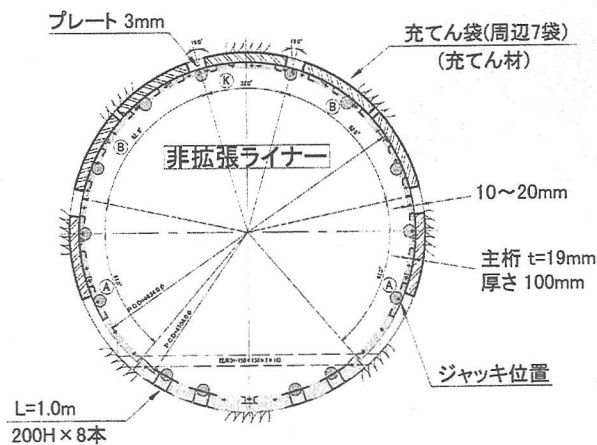


図-10 非拡張タイプ支保工
DI-TL (I)

(2) TBM 仮設支保工の実績

インバートタイプは総延長 813m (19.8%)、非拡張タイプの支保工は総延長 151m (3.7%) を使用した。その適用箇所の大半は脆弱地山である。

4. TBM データと地山特性

図-11は比較的堅硬である倉真層群泥質岩層の F/V^1 と $Tr/V^{1.5}$ の相関グラフである。³⁾ここで F はスラスト推力 (kN)、 V は掘削速度 (mm/min)、 Tr はトルク値 (kN-m) である。この図に示すように、相関係数 0.86 と強い相関関係が認められる。

図-12は脆弱地山区間の F/V^1 と $Tr/V^{1.5}$ の相関グラフである。左上にプロットされるデータが多くなる。これらは岩自体が脆く、周辺摩擦等による推力が上昇する傾向が表れており、全体の相関係数も 0.23 と低い。

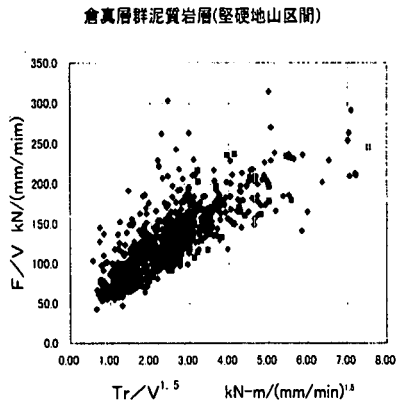


図-11 堅硬岩の F/V^1 と $Tr/V^{1.5}$

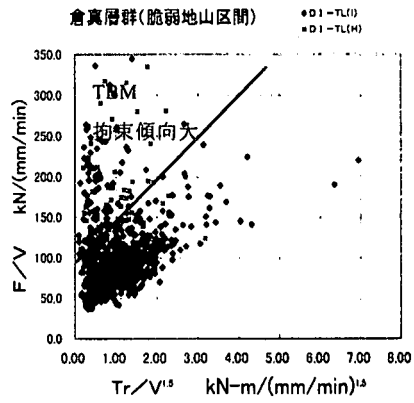


図-12 脆弱岩の F/V^1 と $Tr/V^{1.5}$

5. まとめ

反射トモグラフィによる前方探査と補助推力の取れる TBM 仮設支保工の組み合わせにより、脆弱地山区間をノントラブルで突破できた。なお全体の TBM 進行は図-13 と表-3 に示す。

金谷トンネル西工事ではこれら TBM データと導坑内からの追加調査結果を基礎資料にして、本坑掘削に展開していく予定である。

また今後、さらに経済的なトンネル施工が要求されていく中で、TBM 導坑を利用した経済的な工法の採用が必要になっていくと考えられる。本報告が導坑施工に TBM を使用する場合の参考になれば幸いである。

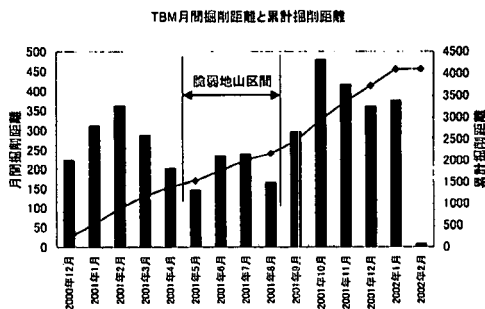


図-13 TBM 月間進行グラフ

表-3 TBM 実績

項目	内容	備考
施工延長	4104.6m	
運転日数	261日	
供用日数	436日	
最大月進	504m	任意月進
平均月進	288m	
最大日進	31.6m	

【参考文献】

1) 白鷺 卓他：反射トモグラフィ法を利用したトンネル周辺地質の予測
第 11 回岩の力学国内シンポジウム F18、2002.1

2) 福井勝則他：TBM 掘削を利用した岩盤強度の推定に関する Q&A、トンネルと地下 第 32 巻 12 号
p43～51、2001.12

3) 青木智幸他：崩壊性地山における TBM 掘削の推力・トルク変化と地山特性との関連性
土木学会 52 回年次学術講演会（平成 9 年 9 月）p98～99