

TBM機械データに基づく地山評価 EVALUTION OF GROUND BY TBM MACHINE DATA

和田宣史¹⁾・勘定 茂²⁾・錠富美夫³⁾

Norifumi WADA, Shigeru KANJYOU, Fumio IKARI

A TBM-driven drift first advances in the top heading of longer tunnels on the Tomei Expressway, so as to enable field engineers to more accurately predict ground conditions and decrease the engineering uncertainties as much as possible prior to enlarging the TBM heading to the top heading (ca.80m²) by NATM, which will be followed by benching and invert excavation to make full section of ca.180m². The Okabe Tunnel, as excavated in such a way for its full length of 2,500m in seamy mudstone ground, experienced continuous crown failure, and has been utilizing various supplemental measures to avoid this and help the face sustain appropriate stability. After a simple evaluation in terms of ground condition of various data obtained through the TBM operation in the heading, the cutter face torque data were evaluated for adaptability in classifying the seamy ground for the design of primary support.

Key Words: tbm machine data, evaluation of ground, torque data, tbm heading, tomei expressway

1. トンネル概要及び検討目的

第二東名高速道路 岡部トンネルの概要

導坑 上り線=2, 613m、下り線=2, 372m、TBM及びNATM導坑(発進坑、到達坑)

本坑 上り線=2, 655m、下り線=2, 419m、TBM導坑先進拡幅掘削工法

平成14年8月30日現在の進捗状況

導坑 上り線=1, 343m(51%)、下り線=2, 372m(100%)

本坑 上り線= 0m(0%)、下り線=1, 121m(46%) ※東西合計延長

現在、下り線はTBM完了後本坑拡幅掘削、上り線はTBM掘削中。

下り線TBMの支保パターンは、当初Cが85%、Dが15%で計画していたが、実施工ではCが12%、Dが88%と逆転している。特にDパターンに於いては、一般的に使用されるリング支保工に替えて特殊パターンを採用し、60%がDI-T(B)(簡易ライナー支保工)、13%がDI-T(A)(長尺鋼管フォアパイリング(FP)併用簡易ライナー支保工)で施工した。

これは、崩壊性の不良地山出現により変更したもので、特にトンネル中央部ではDI-T(A)にて対処し施工した。

このため、工期、工費についての計画の変更が必要となり、崩壊性不良地山を対象としたTBM掘削、特に上り線TBM掘削に於いて有効に活用できる地山評価手法について、TBM既施工区間の施工実績を基に検討・提案するものとした。

-
- | | | | | | |
|----|--------|--------|---------|---------|----------|
| 1) | 日本道路公団 | 静岡建設局 | 静岡工事事務所 | 岡部工事区 | 工事長 |
| 2) | 日本道路公団 | 静岡建設局 | 静岡工事事務所 | 岡部工事区 | 技師 |
| 3) | 正会員 | 日本道路公団 | 静岡建設局 | 静岡工事事務所 | 岡部工事区 技師 |

2. 既施工区間の施工実績

TBM既施工区間機械データの推移を図-1に示す。左側が西、右側が東を示し、TBMは上下線ともに左側から右側に掘削している。

左側からトンネル中央付近までは、標準パターン（CⅡ-T及びDⅠ-T）施工区間も多く見られ、本トンネルでは比較的地山状況の良好な区間であった。また、中央部から右側は、崩落、押し出し等が見られる不良地山区間で、長尺鋼管F P及び簡易ライナー併用の特殊パターンで施工した区間である。なお、下り線TBMの地山分類（支保選定）を表-1に示す崩落及び地山状況を主体に分類し、上り線TBMは本文で提案する機械データによる地山評価を追加して分類し、施工している。

表-1 改良オープン型TBM導坑の地山分類（支保選定）

地山分類	CⅡ-T	DⅠ-T	DⅠ-T(B)	DⅠ-T(A)
崩落状況	ルーフ付近 肩部の部分的剥落 進行性なし カッター付近 自立する	ルーフ付近 肩部の部分的崩落 進行性なし カッター付近 自立する	ルーフ付近 肩から天端部の崩落 カッター後方からルーフ にかけて崩落進行 カッター付近 掘削断面内の部分的剥落 進行性なし	ルーフ付近 肩から天端部の崩落 カッター後方からルーフ にかけて崩落進行 カッター付近 掘削断面外、上方前方に 進行性の崩落あり
地山状況	粘土または湧水の有無が 切羽の自立性に影響しない	粘土または湧水の有無が 切羽の崩落を助長する	粘土または湧水の有無が 切羽の崩落を助長する	粘土または湧水の有無が 切羽の崩落を助長する
機械データ	トルク値 500KN以上	トルク値 500KN以下	地山強度比 3以下	地山強度比 1.5以下 拘束圧 50KN/m2以上 塑性領域 発生する
総合評価	崩落状況、地山状況、機械データを基に総合評価して実施パターンを選定する			
実施パターン	CⅡ-T	DⅠ-T	DⅠ-T(B)	DⅠ-T(A)
二掘進長	1.5m	1.0m	1.0m	1.0m
鋼製支保工	リング支保工 H-100*100	リング支保工 H-125*125	簡易ライナー [-125*65]	簡易ライナー [-125*65]
吹付け	厚さ 2cm 角度 180度	厚さ 3cm 角度 270度		
補助工法	崩落土処理 先受け工		モルタル充填改良	モルタル充填改良 長尺鋼管フォアボーリング

3. 岡部Tn（崩壊性不良地山区間）の地山評価に使用する機械データ

一般的にTBM施工時の地山評価¹⁾は、切羽観察、機械データ、計測結果等を総合的に判断して行われているが、岡部トンネルでは以下の理由により崩落状況及び機械データを主体とした地山評価を採用した。

- ・D地山が88%で、その内、崩落対策として簡易ライナー支保工を施工した区間が大半を占めたため、坑壁観察による地山評価は難しい
- ・改良オープン型TBMではメイングリッパーがマシン後方に位置するため、グリッパー押付け時に簡易ライナー支保工が変形し内空変位等の正確な測定及び計測値の評価が難しい

機械データ（スラスト推力、カッタートルク等）は、TBM掘削に伴いトンネル全線に渡り自動的に記録され、掘削体積比エネルギー、MG係数等のデータに加工して地山評価に活用している例²⁾が多い。

一般的にスラスト推力及びカッタートルクは地山強度と比例関係にあり、各データを利用した地山強度の推定、評価が試みられている¹⁾。本トンネルの強度相関を図-2に示すが、比較的地山状況の良好な西側区間では良い相関が認められトルク、推力を利用した地山評価が可能と思われる。しかし、崩壊性不良地山主体の中央部以降では地山の

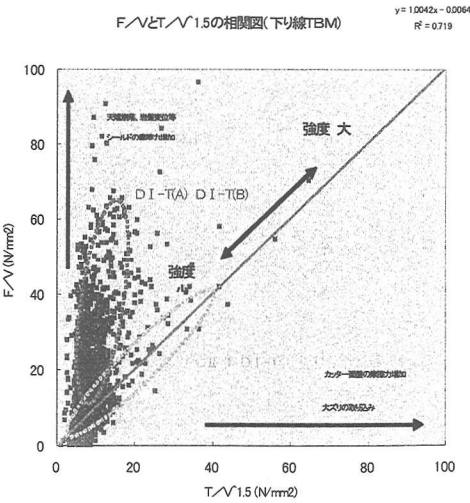


図-2 強度相関と地山評価

崩落、締付け等による推力増加が著しく、推力による地山評価は地山状況と相反する評価となり本トンネルでの適用は難しい。

同様に、1ストロークのトルク及び推力から求まるエネルギーを掘削体積で除算して求まる掘削体積比エネルギーについても、崩壊性不良地山での推力上昇を適切に評価することが難しく本トンネルでの適用は難しい。また、簡易ライナー支保工の施工区間ではメイングリップと地山との間にライナー、背面改良土等が挟みし直接地山に反力が伝達されず、メイングリップの押付力とストロークから求まるMG係数による地山評価の適用も難しい。

以上より、本トンネルではトンネル全線に渡り適用可能な機械データとしてカッタートルクを選定し、崩壊性不良地山での地山評価手法を検討・提案するものとした。

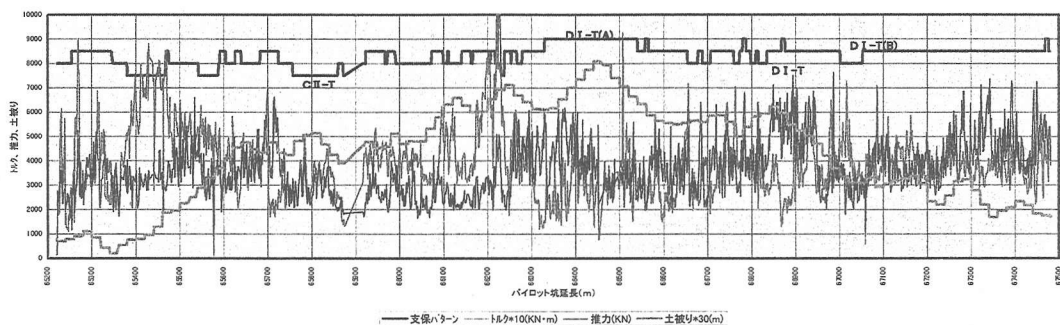


図-1 下り線TBM機械データ推移図

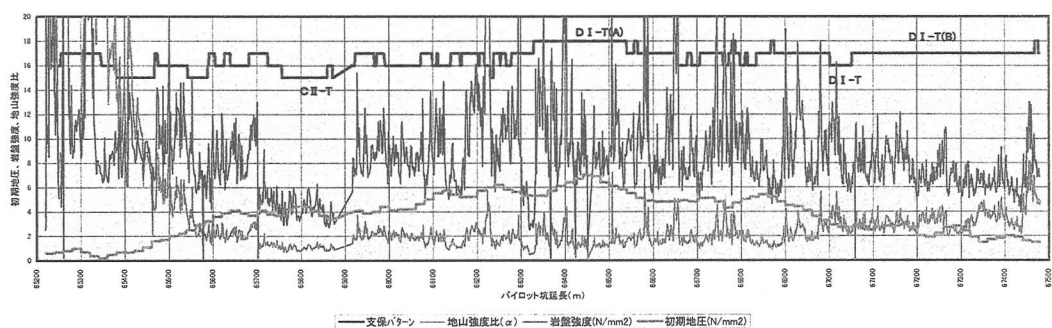


図-3 下り線TBM地山評価（トルク推定強度、地山強度比）

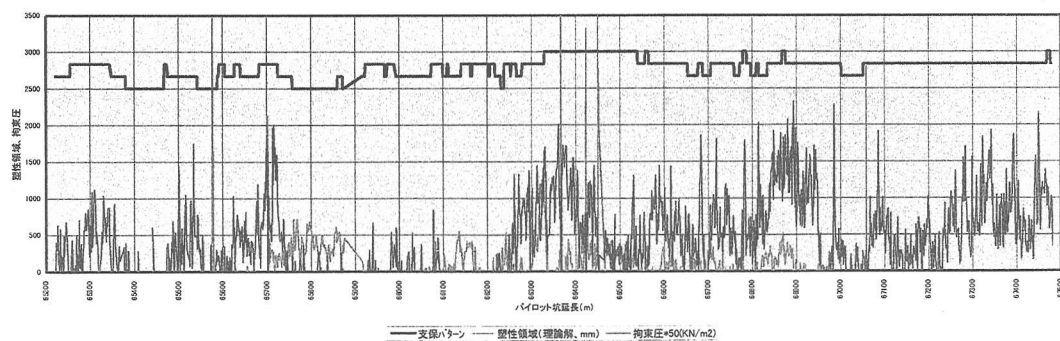


図-4 下り線TBM地山評価（塑性領域、拘束圧）

4. 崩壊性不良地山でのカッタートルクを主体とした地山評価手法

(1) トルク値の直接活用

下り線TBMの機械データを図-1に示すが、標準パターンでの施工実績が多い西側区間で施工されたCⅡ-T及びDⅠ-Tのトルクデータを整理すると表-2のとおりとなり、上り線TBMでは各パターンの境界値を500 KN・mとして区分するものとした。なお、表-2の値は施工後に変状が発生し矢板等で補強したCⅡ-T区間のデータは除き算出したものである。

表-2 標準パターン施工区間実績

機械データ		CⅡ-T	DⅠ-T
トルク値(KN・m)	平均値	674	395
	標準偏差	123	102

また、トンネル中央部以降DⅠ-T(A)で施工したが、機械データでは推力急上昇、トルク急低下として明確に現れ、上り線TBM施工時には下り線機械データと対比しながら前方地山状況を予測しDⅠ-T(A)の施工位置を判断するものとした。

(2) トルク値による地山強度の推定

既往文献^{3) 4)}では切り込み深さ(P)や純掘進速度(V)等を利用した強度推定が提案されているが、本トンネルでは後者を利用して(式1、2、3)により強度推定を試みた。なお、崩落や締付けによる推力増加の影響を除外した推定式を求めるため、下り線西側で崩落の比較的小さい区間での機械データを基に強度を推定し、同位置で実施したポイントロード、シュミットハンマー試験値で補正して比例定数a、b及びTBM下部摩擦力、後続台車牽引力等から生じる定数cを設定した。また、同区間でのトルク、推力による強度相関は0.719と比較的良好な相関が認められ、本式による強度推定が可能と判断した。しかし、崩落区間での推力増加を考慮して、本トンネルではトルクデータにより全線の強度推定を行うものとした。

$$\sigma_{ct} = a * (T / V^{1/3}) \quad \text{----- (式1)} \quad \sigma_{ct}; \text{トルクによる推定強度}$$

$$\sigma_{cf} = b * (F / V) - c \quad \text{----- (式2)} \quad \sigma_{cf}; \text{推力による推定強度}$$

$$\sigma_{ct} = \sigma_{cf} \quad \text{----- (式3)} \quad T; \text{トルク} \quad F; \text{推力} \quad V; \text{純掘進速度}$$

(3) トルク推定強度による地山評価検討

トルクデータによる推定強度を利用して、崩壊性不良地山での崩落、締付け等に関連する評価方法として地山強度比、塑性領域、拘束圧を選定し地山評価を試みた。

a. 地山強度比

トルクデータから推定した下り線全線の強度推移を図-3に示すが、中央付近での強度のパラツキは破碎質泥岩に含まれる砂岩の転石、スランプ性含礫泥岩に含まれる比較硬質な転石によるトルク値の急変を反映したものである。

上記にて算定したトルク推定強度を基に(式4)にて地山強度比を算定する。算定結果を同図に示すが、両坑口部を除き大半が4以下(DⅠ相当)を示す。特に土被り200m以上となる中央付近では2以下(DⅡ相当)を示し、崩落・締付けにより特殊パターンで施工した区間と概ね一致している。

$$\alpha = \sigma_{ct} / \gamma h \quad \text{----- (式4)} \quad \alpha; \text{地山強度比} \quad \gamma; \text{地山の単位体積重量} \quad h; \text{土被り}$$

b. 塑性領域

周辺地山を完全弾塑性体と仮定した場合、周辺地山に発生する塑性領域の範囲は(式5、6)にて算定²⁾でき、算定結果を図-4に示す。同図より中央部から右側で塑性領域が連続して発生する区間が認められ、地山強度比と同様に特殊パターンで施工した区間と概ね一致している。

$$c = r a \{ 2 / (\zeta + 1) * \{ P (\zeta - 1) + \sigma_{ct} \} / \{ P_i (\zeta - 1) + \sigma_{ct} \} \}^{1/(1-\mu)} \quad \text{-- (式5)}$$