

掘削エネルギー解析システムを用いたTBM掘削

TBM excavation using excavation Energy Analysis System

水上秀夫¹⁾・古川哲男²⁾・今藤純朗²⁾・廣川幸喜²⁾

Hideo MIZUKAMI, Tetsuo FURUKAWA, Junro KONDO, Koki HIROKAWA

Inaccessibility for making the direct inspection of the cut face in TBM excavation and a possible Inaccurate assessment of the ground conditions during the excavation may bring about various problems Including a suspension of excavation with eventual impossibility of speedy excavation aimed for the TBM excavation. In order to grasp the ground conditions in real time and to obtain data for establishing a judgment method for support patterns, excavation energy analysis system is introduced. The ground stabilization can be achieved by expeditious erection of supports after excavation.

Key Words: TBM excavation, pilot tunnel, highway tunnel, excavation energy analysis system

1. はじめに

山岳トンネルの施工では、切羽の自立性、地質状況、湧水状況等を観察して地山等級を評価し、地山条件に応じた適切な支保を選定するために切羽観察が日常業務として行なわれている。切羽観察では、切羽写真の撮影、切羽スケッチの作成および観察項目のチェックなどが行われている。

TBM(トンネルボーリングマシン)による施工でも本来切羽観察が必要となるが、切羽面がTBMのカッターヘッドで覆われているため、切羽の直接的な観察に基づく地山評価を常時実施するのが極めて困難な状況にあり、さまざまなトラブルに遭遇し、長期間掘進が停止するなど本来のTBMの最大の利点である高速施工ができなくなる問題が生じている。そのため、掘削後すみやかに支保の施工を行い地山を安定させるために、早期に、より適切な支保パターンを選定手法を確立することを目的とした。

2. 工事概要

本工事は、第二東名高速道路の内、静岡県浜松市滝沢町～引佐郡引佐町に位置する浜松トンネル(上り線)の先進導坑3,118mとその東側の道路土工区間(上下線)908mを施工するものである。図-1に位置図を示す。

工事延長	4,065m
土工延長	908m
発進坑(NATM)	39m
TBM坑	3,118m

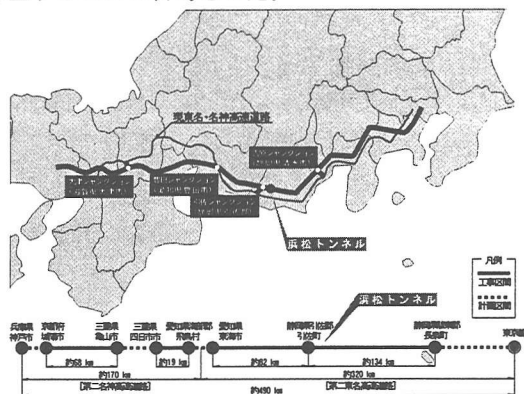


図-1 位置図

1)財団法人 道路空間高度化機構 企画調査部 調査課長

(日本道路公団 静岡建設局 浜松工事事務所 浜松工事区 前工事長)

2)佐藤・住友・株木 JV 浜松トンネル東作業所

3. 地形地質概要

浜松トンネルは浜松市北方の標高 200~400mの起伏量の小さな引佐山地に位置している。地質は中央構造線と赤石構造線に囲まれた中古生代の秩父帯から構成されている。トンネル地質は、チャート、粘板岩、輝緑凝灰岩を主体とし、石灰岩、変成岩である千枚岩、変輝緑岩、変はんれい岩等が分布している。

事前調査結果による地山の弾性波速度は、粘板岩主体部で $VP=4.6\sim 4.8\text{km/sec}$ 、チャート主体部で $VP=5.4\sim 5.8\text{km/sec}$ と大きな値を示していたが、中央構造線と赤石構造線に囲まれたゾーンに位置しているため、割目が非常に多く発達し、断層破砕帯が15本程度確認された。図-2に地質縦断図を示す。

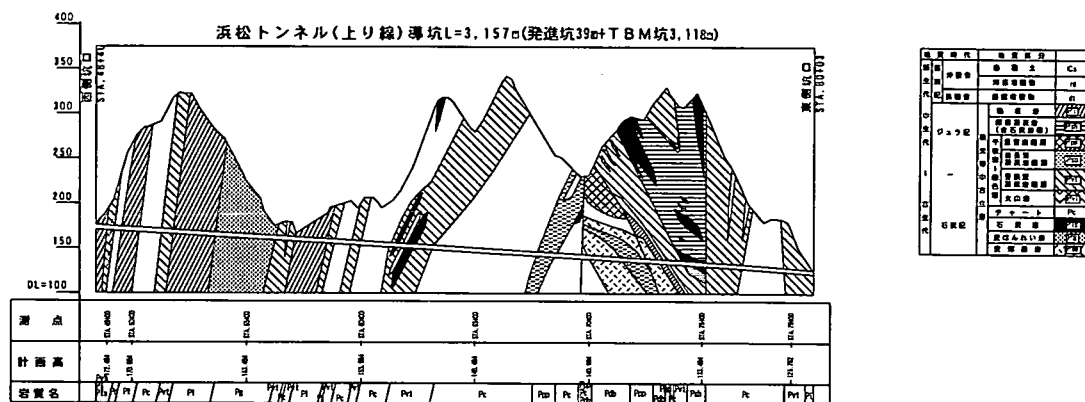


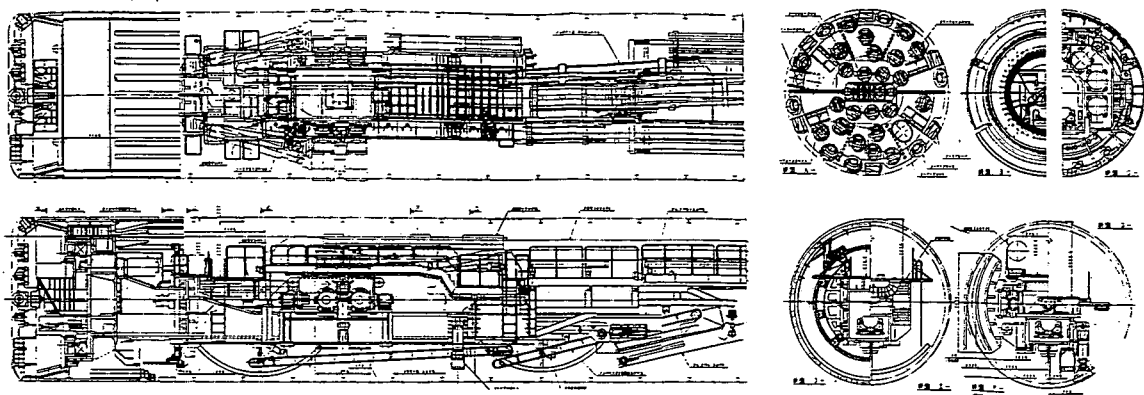
圖-2 地質縱斷圖

4. TBMの概要

本工事では、事前の地質調査結果より、地質状況は比較的良好であると判断され、オープンタイプのTBMが採用されている。オープンタイプの最も大きな特長は、切羽直後で早期に支保工や補助工法が施工できるため、地山の緩みを拡大させることなく、安定した掘削が行えるという点である。TBMの本体概要図を図-3、TBMの仕様を表-1に示す。

表一 1 TBMの仕様

項 目	単位	仕 様
掘削径	mm	5000(5000～5030)
掘削機本体長さ	mm	13900
掘削機全長	mm	74900
総重量	t	約 300
ディスクカッター	mm	φ432(17インチ)×36 個
カッター動力	kw	900(150×6 台)
カッター回転	t・m	(定格)110/(最大)165
カッター回転数	r pm	2.0～8.0(インバ-タ制御)
スラストジャック総推力	t	1000
スラストジャックストローク	mm	1700
メインジャック総押付力	t	2400
メインジャック接地圧	kg/cm ²	29.6
メインジャックストローク	mm	350
ズリ搬出能力	m ³ /h	250×3 編成



図—3 TBMの本体概要図

5. 支保パターン及び選定基準

1) 実績支保パターン

TBM掘削区間における実績支保パターンを表-2、図-4に実績支保パターン図を示す。

表-2 実績支保パターン

地山等級	一掘進長(m)	ロックボルト	鋼製支保工	ファイバー入り吹付モルタル	鉄矢木	延長(m)
B-T	1.5	—	—	—	—	21.0
CⅠ-T1	1.5	—	—	t=20, 120°	—	573.0
CⅡ-T2	1.5	—	H100, P=1.5m	t=20, 120°	—	1342.5
DⅠ-T1	1.0	—	H125, P=1.0m	t=30, 270°	—	137.0
DⅠ-T2	1.0	—	H100, P=1.0m	t=30, 120°	—	853.5
DⅠ-T3	1.0	—	H100, P=1.0m	t=30, 102.4°	18.8°	65.0
DⅠ-T4	1.0	—	H125, P=1.0m	t=30, 95.0°	26.3°	19.0
DⅠ-T5	1.0	—	H125, P=1.0m	t=30, 120°	—	99.0

DⅠ-T1パターンの鋼製支保工は、当初H125で設計されていたが、鋼製支保工応力測定の結果、発生応力が、縁応力で許容応力の20%と小さかったため、H100に変更した。また、グリッパシュー押付けによる、モルタル剥離が見られたため、側壁部の吹付を省略した。但し、側壁部の吹付けは地山状況に応じ実施した。DⅠ-T1の変更パターンとしてDⅠ-T2パターンを新設した。

2) 支保パターン選定基準

支保パターンの選定は、日本道路公団(JH)新切羽評価点法を基本としておこなった。但し、判定が困難な場合は、補助的にRMR法を併用することにより判定をおこなった。

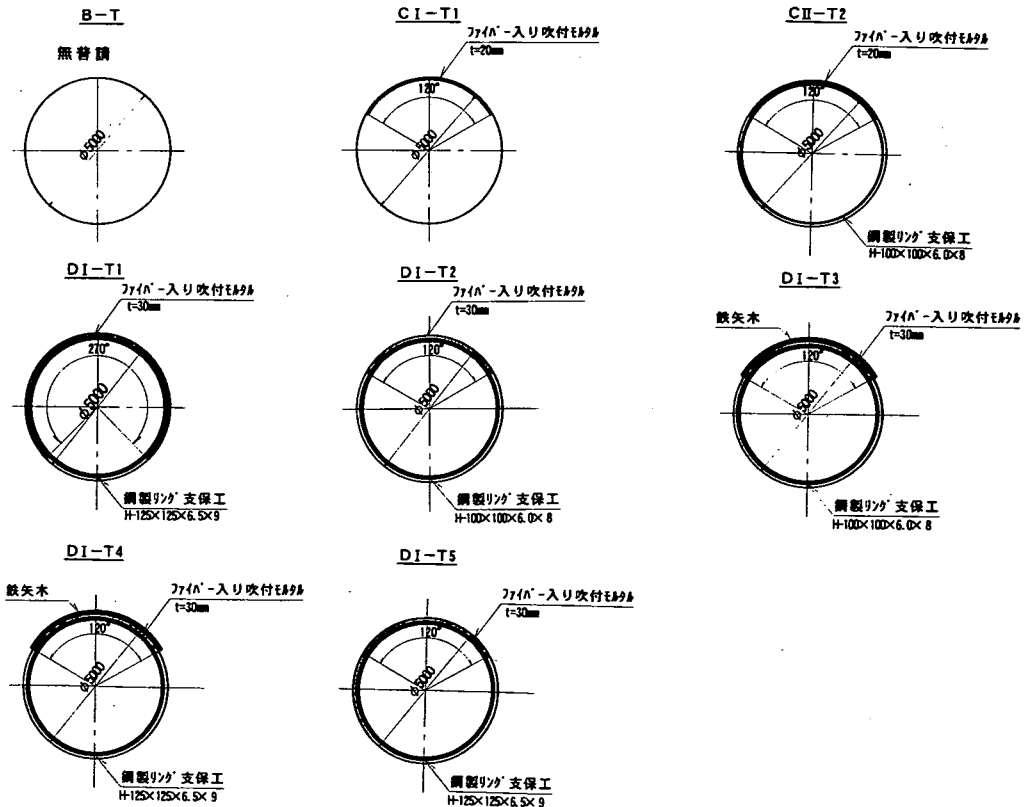


図-4 実績支保パターン図

6. TBMマシンデータと地山評価

TBMのマシンデータと地山評価との関係については、これまでさまざまな分析評価が行われ、TBM掘進時にマシンから直接得られる個々のデータ（掘進速度・スラスト推力・カットトルクなど）との相関を求めた結果が報告されている。しかし、各手法の評価はさまざまであり、これまで統一した見解には至っていない。そこで、本工事では、掘削体積比エネルギーと地山評価との相関性について検討した。

掘削体積比エネルギーの値は、TBMの掘削時に得られるマシンデータを用いて以下の式により算出される。図-5にTBM掘進データの概要図を示す。

$$E = \{(F - F_0) \times L + 2\pi \times (T - T_0) \times N\} / V$$

$$N = n \times L / v$$

ただし、

E：掘削体積比エネルギー(MJ/m³)

F：スラスト推力(N)

F₀：スラスト推力の初期値(N)

T：カットトルク(N・m)

T₀：カットトルクの初期値(N・m)

N：カットヘッドの回転数

n：1分あたりの回転数(rpm)

v：スラスト速度(m/s)

V：掘削体積(m³)

L：1ストロークあたりの掘進長(m)

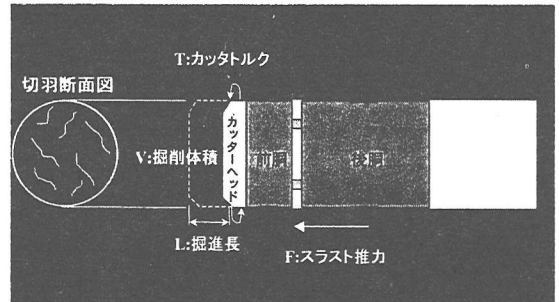


図-5 TBM掘進データの概要図

図-6に本工事で得られた掘削体積比エネルギーと支保パターンとの関係を示す。ここで、掘削体積比エネルギーは、1ストローク掘削当りの平均値を示している。また、支保パターンの選択は、前述とおりJH 新切羽評価点法により決定している。図-6より支保パターンと掘削体積比エネルギーとの傾向は比較的良好に一致しており、切羽の地山状況のある程度リアルタイムに予測でき、支保決定のための1指標として用いることが十分可能であると考えられる。

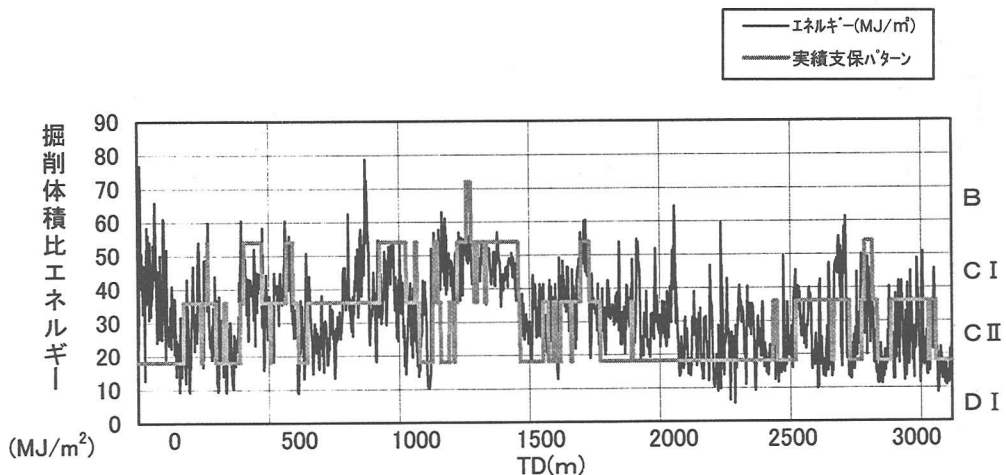


図-6 掘削体積比エネルギーと支保パターンの関係図

実際の掘削では、既掘削区間により得られた掘削体積比エネルギー値を地山等級や支保パターン、地山評価点等との対比を行い、各支保パターンに対応した掘削エネルギー値の範囲を決定し、それ以降の掘削に反映させた。範囲の決定は、既掘削区間で得られたデータを統計処理により判別分析処理を行い、範囲の境界値である基準点の決定を行った。判別処理の方法は、隣合う2分布間において一方の累積分布を左からの累積分布とし、他方の累積分布を右からの累積分布として、互いに逆向きの累積分布を得て、これらの累積分布の交点として定まる掘削体積比エネルギー値を隣合う2分布の判別値とする方法である。

判別率は、度数が1(100%)に近いほど信頼度が高くなり、度数が0.5(50%)以下となった場合には、境界値に信頼性がまったくないということになる。表-3より本工事においては、剛性の高い支保パターンほど、信頼度が低い傾向にある。これは、岩盤強度が高く亀裂間隔が小さいため掘削エネルギー値は大きめに出るのだが、実際は割目間に粘土を挟むなどして天端の抜落ち等が発生し、剛性の高めの支保を行う場合があり、その結果を反映したものと思われる。

以上のことから、掘削体積比エネルギー値のみで地山評価を的確に行うことは困難であると考えられるが、切羽が直接観察できないTBM掘削において地山状況の情報をリアルタイムで得る手段として、また、支保パターンを判別するための1指標とするには、他のデータとの組み合わせによっては十分有効であると考えられる。また今後の課題として、どの程度の判別率であれば正確な判定ができるか、今後十分に検討する必要があると思われる。

図-7に本掘削区間での各基準値を求めるための累積度数分布図を、表-3に求めた基準点とその判別率を示す

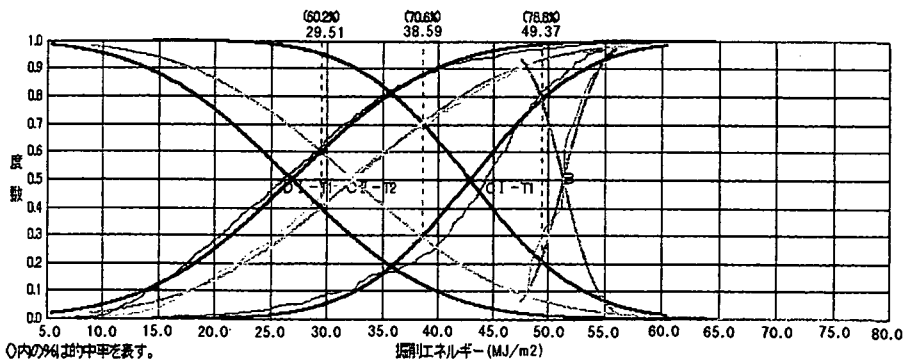


図-7 累積度数分布図

表-3 基準点(掘削エネルギー)と判別率

掘削エネルギー(MJ/m ²)	支保パターン	判別率 (%)
$E \geq 49.37$	B	78.8
$49.37 > E \geq 38.59$	C I	70.6
$38.59 > E \geq 29.51$	C II	60.2
$29.51 > E$	D I	

7. おわりに

当TBM工事は、平成11年4月に初期掘進を始め、平成12年1月上旬に無事貫通している。途中低土被り区間での、断続的な天端崩落にも見舞われたが、平均月進 約312m, 最大日進 42m, 最大月進 701mの進行を達成することができた。今後は、TBM工事で得られた多くの地質データを基に、本坑拡幅に向け鋭意努力する次第である。

本報告がこれから施工するTBM工事の参考となれば幸いである。

【参考文献】

- 1) 中村創・今岡彦三・山本松生・鈴木仁志：TBM掘進データによる地山判定手法について，土木学会第52回年次学術講演会，pp.106-pp.107, 1997.9