

TBM掘進における削孔検層と掘進データの検証

宮沢一雄¹・中野清人²・笹尾春夫³・濱田 宏⁴・岩瀬 隆⁵

¹正会員 東日本高速道路(株) 東北支社 福島管理事務所 (〒960-0231福島市飯坂町平野字前原11)
k.miyazawa.aa@e-nexco.co.jp

²正会員 (株)高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508東京都町田市忠生1-4-1)

³フェロー 鉄建建設(株) エンジニアリング本部 土木技術部 (〒101-8366東京都千代田区三崎町2-5-3)

⁴正会員 鉄建建設(株) 尾鷲作業所 (〒519-3924三重県尾鷲市曾根町840-11)

⁵正会員 鉄建建設(株) 建設技術総合センター (〒286-0825千葉県成田市新泉9-1)

TBMの高速掘進という最大のメリットを活かすため、地山性状に応じた支保パターンを早期に選定し施工することが非常に重要である。地質不良区間の出現を把握し対策工の要否を判定するために、TBM本体に搭載した削岩機によりほぼ全線にわたり削孔検層を実施した。この削孔検層による穿孔エネルギーの大小から掘削地山を定量的かつ相対的に予測評価し、崩落対策補助工の施工判断基準とした。さらに掘削と同時に得られるTBMマシンデータから掘削エネルギー、ルーフサポート圧力、ベルコンスケールとスキャンシステムを併用した排土量により崩落対策の再検討や支保選定基準として活用した。

Key Words : TBM, mountain tunnel, granite, drill-logging, fracture energy, auxiliary method,

1. はじめに

TBMにおけるトンネル掘削では、高速掘進という最大のメリットを活かすため、地山性状に応じた支保パターンを早期に選定し施工することが非常に重要である。しかしながら予期せぬ崩落性地山や突発大量湧水に遭遇して長期におよぶ掘進停止を強いられる場合が少なくない。TBMでは切羽で支保を施工することが困難であるため、地質不良部においてNATMのように種々の対策工で柔軟に対応することができない。このため、不良地山であっても掘進停止せず、TBMとしての高速掘進をするため、地質不良部を事前に予測し、TBMが不用意に地質不良部に突入する以前にあらかじめ切羽前方の地山を改良しておくなどの対策が必要とされた。

TBM掘削切羽の地山を評価する手法として中村ら¹⁾によりTBM掘削抵抗を利用した岩盤特性の把握が提案され施工事例による検証が報告されている²⁾。また、切羽前方地質の探査については、TBMに装着された削岩機を利用した穿孔探査システム(DRISS)が用いられており、施工において支保パターン予測や地山トラブルを回避した事例が報告されている³⁾。

本報告では、調査・設計では予知できなかった崩落性地山と突発大量湧水の出現により掘削当初は幾度となく

掘進停止を余儀されたが、その後の掘進では削孔検層による穿孔エネルギーにより掘削地山を定量的に予測評価し、さらに掘削と同時に得られるTBM掘進データである掘削エネルギー、ルーフサポート圧、排土量および坑壁の測定岩強度、目視観察を組み合わせることで前方地質を予測した補助工法採用の判断基準としたり、掘削と同時に支保パターンをシステムチックに選定する独自の支保選定手法を構築して合理的なTBM掘削を行った施工事例の検証について報告する。

2. トンネル概要

対象としたトンネルは、東北中央自動車道栗子トンネル避難坑(福島側)である。栗子トンネルは福島県と山形県を結ぶ延長約9,000mの長大トンネルであり、完成すると山岳道路トンネルとしては国内3位、東北最長のトンネルである。本坑の施工に先立ち、地質調査と水抜きを兼ねて避難坑を先行施工した。福島県側約5,500mは、地質が比較的硬質な地山であったことからTBM(φ4.5m改良オープンタイプ)を採用し施工を行った。TBM区間の地質(図-1)は前半部(坑口から約2,000mまで)には当地域の基盤を成す中生代の花崗岩類が主として分布し、後半部(坑口から約2,000m以降)にはこれ

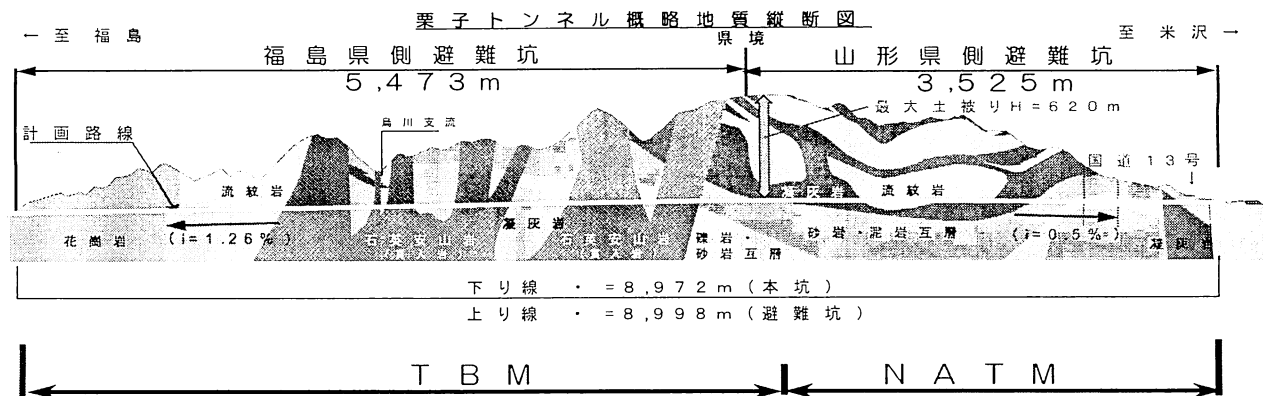


図-1 栗子トンネル概略地質縦断面図

を覆って凝灰岩や凝灰角礫岩を主体とする火山碎屑物が分布し、部分的に火山碎屑岩を貫くデイサイトや流紋岩の大規模な貫入岩があり、かなり複雑な地質構造を成していると想定された。

TBM掘進後の実績としては、事前調査から予知できなかった突発大量湧水 (8,300ℓ/min) を記録した。掘削延長の5割強で地山崩落が発生しており、崩落対策として注入式長尺鋼管フォアパイリングの他、崩落抑制のため木矢板や半割丸太を使用した矢送り・縫い地を多用し施工した⁴⁾。

3. 穿孔探査システム (DRISS)

切羽前方探査としてTBMに搭載した削岩機により、ほぼ全線にわたり削孔検層を実施した (図-2)。1回の削孔長は50mで、計測されたデータ (フィールド圧、打撃圧、回転圧、穿孔速度) は、データレコーダに記録され、坑内に設置した光ケーブルを利用して坑外事務所において専用解析ソフトにより迅速に解析を行った。データ解析によって地山評価の基本となる穿孔エネルギーを算出した式 (1)。穿孔エネルギーとは単位体積あたりの岩盤を穿孔するのに要したエネルギーであり、このパラメータを使用し掘削実績との比較により地山評価をTBM支保パターンに合わせて行った。他に穿孔時の目視情報 (湧水量・くり粉) を地山評価に加味した。

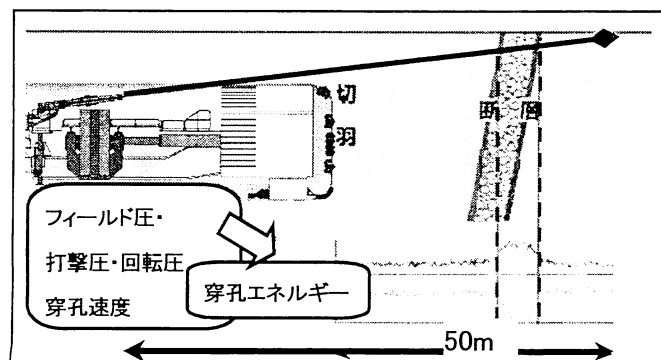


図-2 削孔検層

$$E_p = (E \cdot N) / (V \cdot A) \quad (1)$$

E_p : 穿孔エネルギー (J/cm^3), E : 打撃エネルギー (J), N : 打撃回数 (bps), V : 削孔速度 (cm/sec), A : 削孔断面積 (cm^2)

4. TBM掘削データ

(1) 掘削エネルギー

掘削と同時に得られるTBM掘進データから推力、カットトルク、カット回転数、掘進速度をTBM管理システムに取り込み、単位体積の地山を掘削するのに要する掘削エネルギー (式 (2)) をリアルタイムで自動計算し、モニタリングすることにより、掘削時の地山評価を行い支保選定の手法として用いた。

$$E_t = \{(F \cdot 1000) + (2 \cdot \pi \cdot N \cdot T \cdot 1000 \cdot 100) / (V \cdot 0.1)\} / A \quad (2)$$

E_t : 掘削エネルギー (N/mm^2), F : スラスト推力 (kN), N : カッタ回転数 (rpm), T : カッタトルク ($kN \cdot m$), V : 掘進速度 (mm/min), A : 断面積 (mm^2)

(2) ルーフサポート圧

崩落性地山における掘削時の緩みを少なくするためにルーフ・サイドサポートのジャッキをヒンジ機構として周方向へ伸びることで地山と密着できる構造とした。このサポートジャッキの油圧データに注目し、TBM管理システムに取り込みモニタリングすることにより、掘削直後の崩落度を把握し、目視観察の崩落度と合わせて支保選定の手法として用いた。

(3) 排土量 (ずり形状スキャニングシステム)

TBM掘削における排出土砂の体積は、地質の変化やカッタヘッド部での崩落の発生により変化することが考えられる。掘進中に連続的にTBM管理システムに取り込まれた排土量をモニタリングすることで、特に初期の崩落発生を早期に把握し、大崩落に至る前に対応が可能

となる。ずり搬出ベルコンに特殊なスキャナーを設置してずり搬出時に連続的に形状データを取り込み、形状データとの相関を把握しながら地質・崩落性の地山評価を行った。

5. 穿孔データと地山特性の関係

図-3 に削孔検層の結果出力の一例を示す。上から打撃圧、穿孔速度、穿孔エネルギー、目視情報（湧水量・削孔水の色・くり粉）を表示し、下段に穿孔エネルギー値の絶対値から地山判定を支援パターンで想定している。今回の施工においては、突発大量湧水と崩落性地山に対し、補助工法（注入式長尺鋼管先受け工・矢送り・縫い地・水抜きボーリング）施工の判定基準とした。湧水は、掘進を行いながら実施する削孔検層により位置及び湧水量を事前的に確に把握して、計画的に水抜きボーリングを行うこととした。崩落対策補助工の施工基準として穿孔エネルギー値を鈴鹿トンネル上り線³⁾の地質推定基準目安(100J/cm³を下回る)を施工当初定量的な基準として設定した。しかしながら掘進に伴い多発する崩落地山状況は、千差万別であることから単一な定量基準値での判断ではなく、穿孔データはエネルギー値の分布や相対的な大小を比較した上でTBM掘削データ、目視データ、地質、崩落状況を総合して評価を重ねることでトンネル個別の地山特性を把握して穿孔データにより前方地質予測を行った。

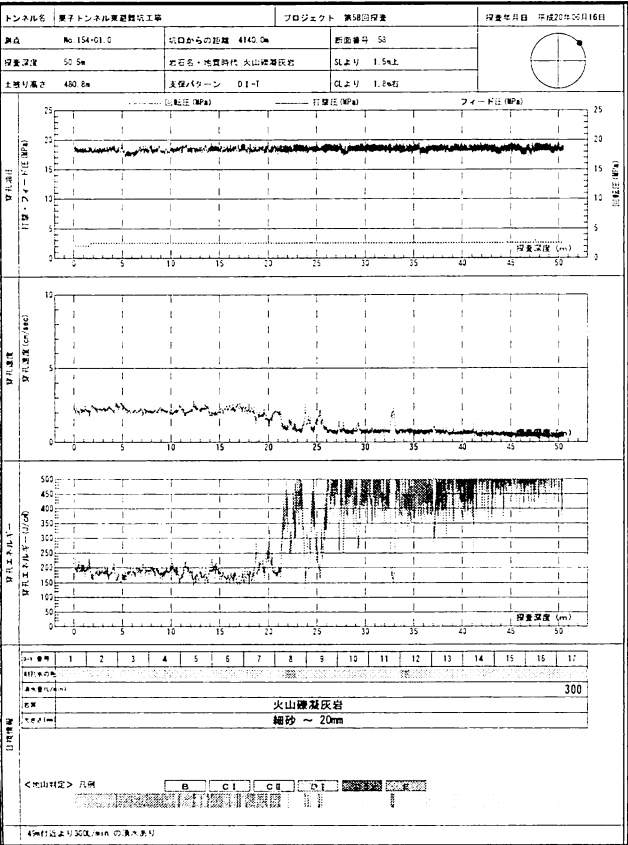


図-3 削孔検層結果出力

6. TBM掘削データと地山特性の関係

(1) 掘削エネルギーと地山特性

掘削エネルギーと地山特性の関係を実施支援パターンとの関係から求めることとした。実施工における支援パターンの選定は、施工前半においては掘進が進みルーフサポート後に坑壁が現れた時点で崩落規模、亀裂の状況、湧水の影響など考慮して判定を行い、他トンネルの施工実績により施工当初は、掘削エネルギー10N/mm²以下を目安にDパターンのみの判定を行っていた。その後、掘削実績をもとに掘削エネルギーと支援パターンの関係（図-4）を取りまとめたところ、掘削エネルギーと支援パターンの相関関係が認められた。支援パターンがDからC II、C Iと軽装になるにしたがって掘削エネルギーの値が上昇していることがわかる。各支援パターンの平均値は、城間ら²⁾が解析した5トンネルの平均値と重なっている。掘削エネルギーのデータの分布は単純平均の近似直線から約±10N/mm²の幅を持っており、そこからはみ出ている箇所は亀裂、粘土、湧水、貫入岩などの影響で外れていると考えられるため、その幅を支援ランクの目安として設定した（表-1）。また、今回の施工では岩石強度試験としてシュミットハンマー試験を実施し坑壁の岩石強度を測定した。これは、岩石強度が支援パターンを決める上で支配的な要素となることから、掘削エネルギーと岩石強度に注目し、ほぼ同値を示すことが実績データとして確認できた（図-5）。よって、支援パターン毎の掘削エネルギー値の範囲を岩石強度区分の目安として設定した（表-1）。

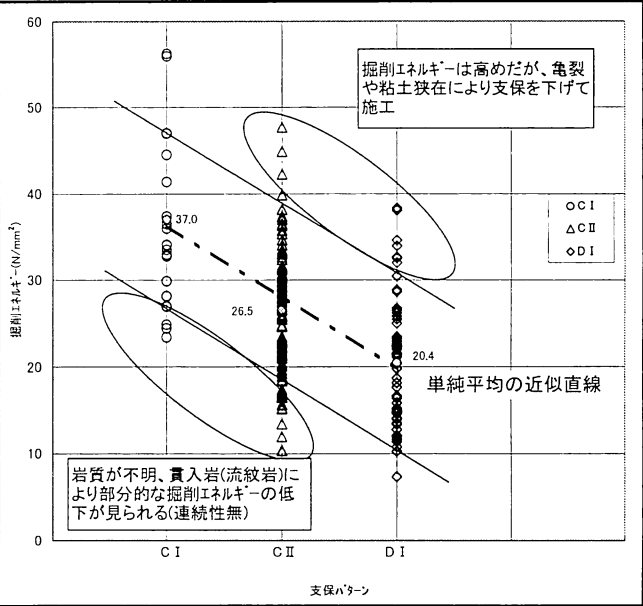


図-4 掘削エネルギーと支援パターン

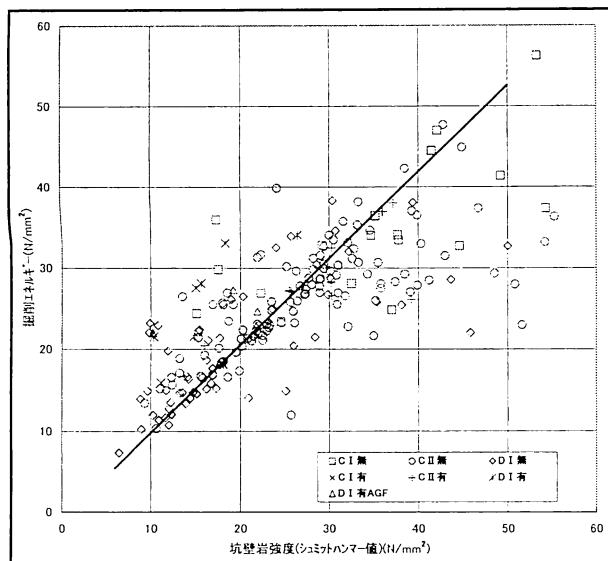


図-5 掘削エネルギーと坑壁岩強度

表-1 支保パターン選定目安

支保パターン目安	C I	C II	D I
Et: 掘削エネルギー (N/mm ²)	50～30	40～20	30～10
qu: 岩石強度 (N/mm ²)	40以上	25以上	10以上

(2) ルーフサポート圧と地山特性

掘削延長の5割強で地山崩落が発生したため、地山崩落の規模は補助工法、支保パターンの選定するための重要な要素となった。掘進が進みルーフサポート後に坑壁が現れる以前にルーフサポート圧を崩落予知として利用した。図-6にルーフサポート圧と崩落度の一例を示す。ルーフサポート圧については、坑壁肌落ち程度の箇所では圧力値が上昇している。これは、剥離した岩片が坑壁とルーフの間に挟まり、それが掘削時の振動で圧力の上昇に繋がったものと考えられる。表示区間は、崩落が多かったこともありルーフサポートジャッキを上げているため、圧力の変動が大きくなっているが、目視観察の崩落度のトレンドとほぼ合致している。

(3) 排土量と地山特性

排土量については、掘削データから岩質毎の地山変化率を求め平均排土量を基準に岩質や崩落性の地山評価を

行った。また、排土量の変化から岩質の変化を検証することができた。今回の施工ではカッターヘッド部での大きな崩落は発生はなかったが、ルーフサポート後方の坑壁での崩落が多く発生して排土量が増加する結果となった。作業ステージ上に崩落したズリはホッパからベルコンに積載するためタイムラグが生じるが基準排土量に比べて多量の排土量が計測され、目視観察の崩落度との関連が認められた。崩落の少ないC IIパターンにおいては、掘進速度が低下すると排土量が増加し、掘進速度が速くなると排土量が低下する傾向があり排土量は、掘削速度と反比例する傾向が見られ(図-7)、単純式【排土量(m³)=110-掘進速度(mm/min)】を導くことができた。

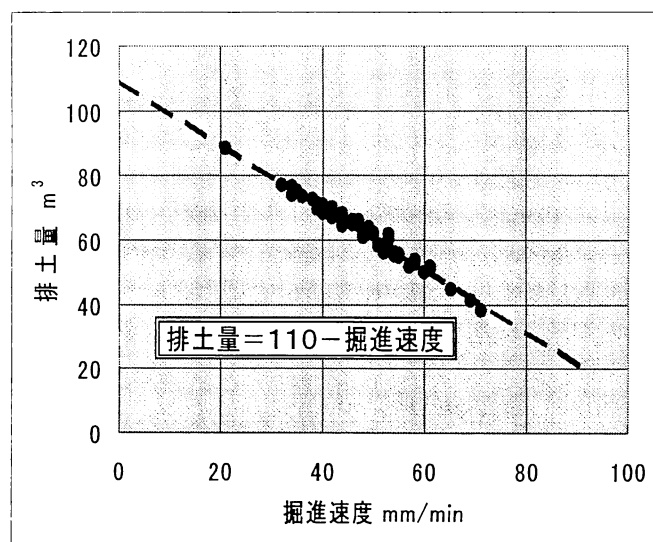


図-7 掘進速度と排土量

7. 崩落性地山対策の検証

(1) 全体

TBM掘削後の実績としては、前半部の花崗岩類は一部割れ目が発達した花崗岩および破碎部があり脆弱で脆く、湧水が多く、崩落が助長された。中盤以降は、火山凝灰岩では、岩強度が低下し地山強度比も低下し、石英安山岩が脈状に貫入しており、層鏡で崩落が生じた。終盤は、早期に礫岩・砂岩、砂岩泥岩互層が出現した。さらに地山強度比が低下し、層状の崩落が発生、特に泥

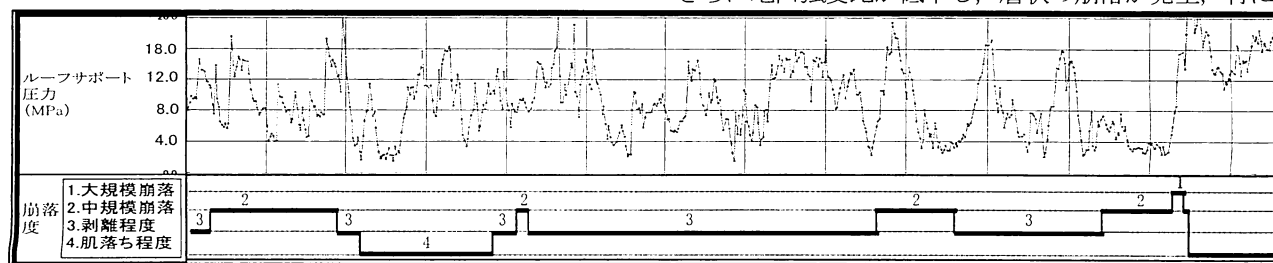


図-6 ルーフサポート圧力と崩落度

岩砂岩互層区間では50cm～100cmにおよぶ崩落が連続し、坑壁の押し出しも発生した。半数を超えたD地山では、ほぼ全域にわたり地山崩落が発生した。対策工として削孔探査により掘削地山を予測・評価し、予めTBMを拘束するような大規模崩落の対策工として注入式長尺鋼管先受け工(AGF)を実施した。この対策工を行った13区間について削孔検層、TBM掘削データ、目視観察の結果を取りまとめた結果を(表-2)に示す。大規模崩落が発生した半数以上は、坑口からT.D. 720mまでの火成岩系の花崗岩で発生している。特にT.D. 500m以降は、大部分が亀裂が多くマサ化しており、一般的な塊状花崗岩に比べてかなり脆く、割れ目が発達した破碎部があり脆弱な地山であった。また、坑壁亀裂からの大量湧水が発生し、崩落が助長された。次に中盤では、堆積岩である凝灰岩部T.D. 3, 500m付近で2箇所、石英安山岩部T.D. 4, 100m～T.D. 4, 400mで3箇所において大規模崩落が発生した。

(2) 区間①(T.D. 206付近)

この区間は花崗閃緑岩であり、全体的に亀裂が多く湧水も多いため崩落を助長させた。穿孔エネルギーは90～300J/cm³の振幅で波打ち不安定に変化し、100J/cm³を下回

る箇所では1m以上の崩落が発生しデータ通りの地山であった。掘削エネルギーは10N/mm²を下回り最低5N/mm²となり、岩強度も同様に6N/mm²で、崩落は1mを超えて穿孔エネルギー90 J/cm³箇所とほぼ一致する。前後に矢送り・縫地を行い、AGFを2シフト施工した。改良区間では崩落度が大規模崩落から剥離程度となり、AGFの効果を実証した。

(3) 区間②(T.D. 543付近)

この区間は花崗閃緑岩であり、崩落箇所では亀裂が多く湧水も多い。改良前に大崩落が発生(天端右肩崩落度2.2m、約2m³の土砂がループ後方の崩落)した。穿孔エネルギーは200J/cm³を下回る部分的な弱層を捉えていたが、大崩落箇所付近から上下振幅(100～700 J/cm³)が激しくなり亀裂の多い岩質に変化したと判断できた。掘削エネルギーは10N/mm²前後で大きな変動は見られなかったが、大崩落箇所ではループ圧が2MPaから16MPaに急激に上昇した。これはループ上で既に崩落が発生しており掘進に伴いループ後端で土砂がデッキに大量に崩落したものである。AGFを4シフト及び注入式FPと矢送り・縫地を併用施工している。改良区間では崩落度が大規模崩落から中規模崩落に改善され、改良効果が発揮された。な

表-2 大規模崩落区間データ一覧

区間	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	⑩	⑪	⑫	⑬
区間距離STA	113+75 ～ 90 TD 206	117+10 ～ 40 TD 543	117+60 ～ 80 TD 593	117+90～ 118+00 TD 618	118+10 ～ 20 TD 638	118+20 ～ 40 TD 653	118+45 ～ 50 TD 673	118+70～ 119+25 TD 718	146+85～ 147+35 TD3,523	148+50 ～ 60 TD3,678	153+30 ～ 45 TD4,163	154+05 ～ 30 TD4,238	156+10 ～ 45 TD4,450
地質	花崗閃緑岩	花崗閃緑岩	花崗閃緑岩	花崗閃緑岩	花崗閃緑岩	花崗閃緑岩	花崗閃緑岩	花崗閃緑岩	凝灰角礫岩 +泥岩	凝灰角礫岩 +泥岩	凝灰岩+変 朽安山岩	凝灰岩+石 英安山岩	石英安山岩
支保パターン	D I - T(A)	D I - T(A)	D I - T(A)	D I - T(A)	D I - T(A)	D I - T(A)	D I - T(A)	D I - T(A)	D I - T(A) D I - T(G)	D I - T(A)	D I - T(A)	D I - T(A)	D I - T(A)
補助工法	AGF+ 矢送り	AGF+ 矢送り	AGF+ 矢送り+ 水抜きBor	AGF+ 矢送り+ 水抜きBor	AGF+ 矢送り+ 水抜きBor	AGF+ 矢送り+ 水抜きBor	AGF+ 矢送り+ 水抜きBor	AGF+ 矢送り+ 水抜きBor	AGF+ + GFRP+ 矢送り	AGF+ 矢送り	AGF+ 矢送り	AGF+ 矢 送り+水 抜きBor	AGF+ 矢 送り+水 抜きBor
穿孔 探査	穿孔エネルギー J/cm ³ Min 90 振幅 90-300	Min 100 振幅 100-700	Min 100 振幅 100-500	Min 50 振幅 50-500	Min 100 振幅 100-500	Min 100 振幅 100-500	Min 100 振幅 100-200	Min 50 振幅 50-500	Min 100 振幅 100-300	Min 100 振幅 100-300	Min 100 振幅 100-250	Min 100 振幅 100-500	Min 200 振幅 200-500
TBM 掘削 データ	掘削エネルギー N/mm ² Min 9	Min 9	Min 7	Min 10	Min 15	Min 10	Min 10	Min 6	Min 10	Min 10	Min 12	Min 10	Min 9
	ループサポート圧 Mpa Max 12	Max 16	Max 20	Max 12	Max 14	Max 14	Max 18	Max 20	Max 20	Max 25	Max 25	Max 25	Max 20
	排土量 地山15.9m ³ /m Max 70	Max 60	Max 50	Max 50	Max 60	Max 40	Max 60	Max 60	Max 60	Max 50	Max 50	Max 60	Max 40
目視 観察 状況	崩落度 1:大規模(1m以上) 2:中規模 (0.3m以上) 3:剥離 4:肌落ち 1⇒3 2⇒3 1⇒3 1⇒3 2⇒4 3⇒4 1⇒3 1⇒4 2⇒4 2⇒3 1⇒3 2⇒3 1⇒4												
	亀裂状況 開口粘 土挟む	開口粘 土挟む	開口粘 土挟む	開口粘 土挟む	開口粘 土挟む	開口粘 土挟む	開口粘 土挟む	開口粘 土挟む	開口粘 土挟む	開口粘 土挟む	割目不 明瞭	開口粘 土挟む	開口粘 土挟む
	岩石強度 N/mm ² Min 6.0	Min 5.0	Min 6.3	Min 13.3	Min 32.6	Min 8.8	Min 6.1	Min 6.5	Min 8.6	Min 5.2	Min 5.5	Min 5.0	Min 35.3
	湧水量 ℓ/min Max 20	Max 20	Max 700	Max 200	Max 600	Max 100	Max 90	Max 1,300	0	0	Max 3	Max 330	Max 100
	⇒	火成岩						⇐◆⇒	堆積岩				

お、穿孔エネルギーによる崩落対策補助工法の施工目安として $100\text{J}/\text{cm}^3$ としてきたが、以降は $200\text{J}/\text{cm}^3$ を目安に穿孔エネルギー値の上下振幅が激しい場合についても補助工法の施工目安とした。

(4) 区間③ (T. D. 593付近)

前区間と連続区間であるが、粘土化が激しい箇所があり、探査孔から湧水 ($7000\text{ l}/\text{min}$) が発生して崩落が拡大した。穿孔エネルギーは上下振幅 ($100\sim 500\text{ J}/\text{cm}^3$) が激しくなり崩落が懸念された。掘削エネルギーは $10\text{N}/\text{mm}^2$ を下回り最低 $7\text{N}/\text{mm}^2$ となり、岩強度もほぼ同様に $6\text{N}/\text{mm}^2$ と岩強度が低く、粘土等の弱層があると考えられた。亀裂により大塊で崩落して崩落境にはこの粘土層が存在した。削孔検層結果よりエネルギー値振幅区間にAGFを3シフトの施工を決定した。崩落は激しかったが、AGF及び水抜きボーリングの改良効果を十分発揮して掘削することができた。

(5) 区間④ (T. D. 608付近)

前区間と連続区間で引き続き湧水 $2000\text{ l}/\text{min}$ が発生した。穿孔エネルギーは $200\text{ J}/\text{cm}^3$ 前後から急に増幅して振幅 ($50\sim 500\text{ J}/\text{cm}^3$) が激しくなり亀裂による崩落が想定された。掘削エネルギーは徐々に上昇 ($40\text{N}/\text{mm}^2$) した。これは、坑壁の岩強度 ($36.6\text{N}/\text{mm}^2$) の増加に伴い必然的にカットトルク、推力も上昇するためである。岩強度は高くなったが、削孔検層結果より穿孔エネルギー値振幅区間にAGFを2シフトの施工をした。今回の施工では、カット前面天端に 1m の空洞発生し、これによりAGFの施工を即開始した。これは穿孔エネルギーの振幅の増幅傾向の判断が数m遅れた結果と考えられる。

(6) 区間⑤ (T. D. 638付近)

前区間と連続区間である。穿孔エネルギーは上下振幅 ($100\sim 500\text{ J}/\text{cm}^3$) が激しく崩落が懸念された。掘削エネルギーと岩強度は $30\text{N}/\text{mm}^2$ 程度と高い状態であるが、大量湧水 ($6000\text{ l}/\text{min}$) に伴う崩落が拡大した。穿孔探査結果よりエネルギー値振幅区間にAGFを3シフトの施工を決定した。AGFと水抜きボーリング施工し湧水に伴う崩落に対し改良効果が発揮された。

(7) 区間⑥ (T. D. 653付近)

前区間と連続区間である。穿孔エネルギーは上下振幅 ($100\sim 500\text{ J}/\text{cm}^3$) が激しくなり崩落が懸念された。後半 $200\text{J}/\text{cm}^3$ を下回る箇所では粘土層や弱層部の存在が考えられた。掘削エネルギーが徐々に低下し、岩強度も同様な傾向を示し $8\text{N}/\text{mm}^2$ 程度まで低下している。岩強度の低下が始まりかけた頃にAGFが始まっており非常に良い

タイミングで施工ができ、湧水量が多いにもかかわらず崩落を抑え、改良効果が十分発揮された。

(8) 区間⑦ (T. D. 673付近)

前区間と連続区間である。穿孔エネルギーは上下振幅 ($100\sim 200\text{ J}/\text{cm}^3$) と収束したが、 $200\text{J}/\text{cm}^3$ を下回る箇所では粘土層や弱層部の存在が考えられた。掘削エネルギーは $10\text{N}/\text{mm}^2$ を下回り、岩強度も同様に $6\text{N}/\text{mm}^2$ と低下した。AGF施工区間に入る手前で 1.8m の崩落が発生している。これは穿孔エネルギーないし掘削エネルギーの低下傾向の判断が数m遅れた結果と考えられる。

(9) 区間⑧ (T. D. 693付近)

穿孔エネルギーの下限値が $200\text{J}/\text{cm}^3$ を下回る箇所が延長 50m にわたり連続したため掘削前にAGFの施工を決定した。AGFを5シフト施工したところ、探査孔及び水抜きボーリングから多量の湧水 ($1,3000\text{ l}/\text{min}$) が発生したため、TBM本体後方から水抜きボーリングを実施して約 $5,000\text{ l}/\text{min}$ の水抜きにより切羽前方の水位低下を図り、AGFを併用して再掘進を行った。掘削エネルギーは $10\text{N}/\text{mm}^2$ 前後から $20\text{N}/\text{mm}^2$ に上昇した後下降 $10\text{N}/\text{mm}^2$ を下回り、岩強度も同様に $6\sim 26\text{N}/\text{mm}^2$ で推移した。削孔検層及びTBM掘削データにより事前に水抜きボーリング、AGFを施工することで大量湧水、大規模崩落が発生が予測された区間を大きなトラブルなく掘進できた (図-8)。

(10) 区間⑨ (T. D. 3, 523付近)

この区間は凝灰角礫岩に石英安山岩が貫入している。貫入岩の影響で大岩塊が亀裂により目離れして崩落が連続した。穿孔エネルギーは一次的な上昇が見られるが、総じて $150\text{J}/\text{cm}^3$ 程度であり低い状態。貫入岩部は上下振幅が激しく、亀裂や岩質の変化が推定される。掘削エネルギーは $10\sim 25\text{N}/\text{mm}^2$ 範囲で貫入岩部では $30\text{N}/\text{mm}^2$ 程度となっている。岩強度も同様に $8\sim 20\text{N}/\text{mm}^2$ で推移し貫入岩部は $27\text{N}/\text{mm}^2$ と傾向が近似している。区間の始めより大岩塊崩落が発生したため、貫入岩中の亀裂も多く大岩塊状の崩落が発生したことから穿孔エネルギーの下限値及び貫入岩による上下振幅により、AGF及び注入式FPの施工を決定した。改良区間にも関わらず中規模崩落や目離れによる内空せり出しが発生したが徐々に収束した。区間⑧までの火成岩系では穿孔エネルギーによる崩落対策補助工法の施工目安として $200\text{J}/\text{cm}^3$ としてきたが、堆積岩系のデータの経緯から $150\text{J}/\text{cm}^3$ を目安とする。穿孔エネルギー値の上下振幅が激しい変化がある場合については、貫入岩や岩質変化に伴う亀裂等が検証されたので補助工法の施工目安とした。

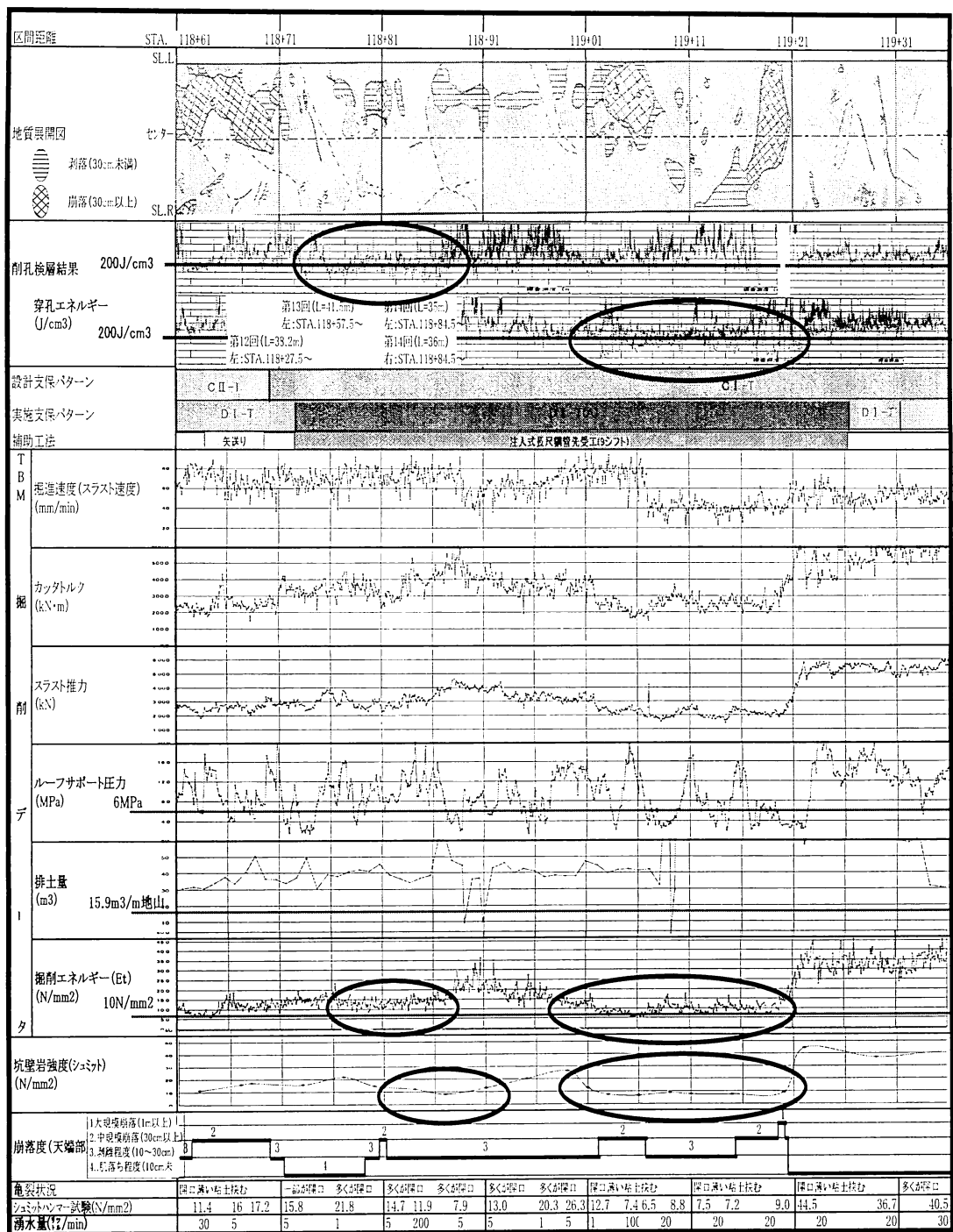


図-8 区間⑧データシート

(11) 区間⑩ (T. D. 3, 678付近)

前区間と連続区間である。穿孔エネルギーは連続して150J/cm³を下回る箇所が連続したため穿孔エネルギーの下限值によりAGFの施工を決定した。掘削エネルギーは10N/mm²程度で、岩強度も同様な傾向を示し5N/mm²程度まで低下している。坑壁の崩落と応力開放に伴う亀裂の目離れからルーフサポート圧が20Mpaと高くなっている。内空せり出しの影響からルーフサポートを地山に押し当てるように掘進しているためルーフサポート圧は高くなる傾向にある。

(12) 区間⑪ (T. D. 4, 163付近)

この区間は火山礫凝灰角岩に変朽安山岩が貫入している。穿孔エネルギーは150J/cm³を下回ったが部分的であったが、変朽安山岩の貫入と少量連続湧水が崩落を助長し、部分的ではあるが大規模崩落が発生したためAGFを2シフトの施工をした。掘削エネルギーは10N/mm²程度で、岩強度も同様な傾向を示し5N/mm²程度まで低下している。

(13) 区間⑫ (T. D. 4, 238付近)

この区間は火山礫凝灰角岩に石英安山岩が貫入している。穿孔エネルギーは150J/cm³を下回り低い状態であっ

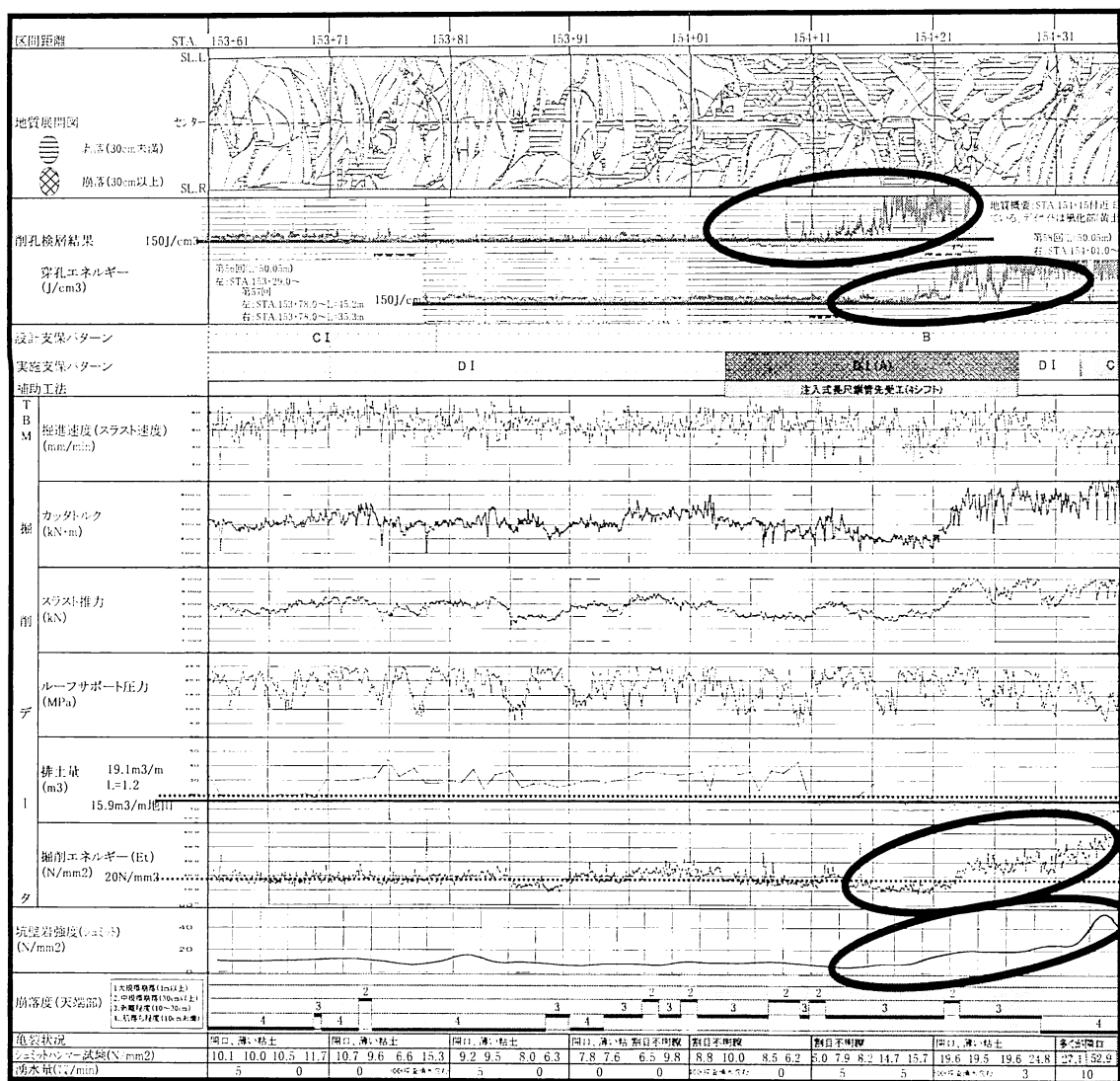


図-9 区間⑫データシート

たが、急激に上昇し、凝灰岩から石英安山岩への岩質の変化が予想され、層境の弱層部での崩落が予想された。穿孔エネルギーの下限値及び岩質変化による上下振幅により、AGFの施工を決定し4シフト施工した。掘削エネルギーは10N/mm²程度から岩質変化点で同様に上昇傾向を示し、岩強度も同様であった。付近では湧水3300/minが発生した。結果的に良い位置でAGFの施工ができたことがデータや目視情報から伺える(図-9)。

(14) 区間⑬(T. D. 4. 450付近)

この区間は石英安山岩が連続しており、岩強度は高いが新鮮部と風化部が混在し、節理が発達して掘削後の応力開放と湧水により崩落が助長された。穿孔エネルギーは上下振幅(200~500 J/cm³)が激しく節理の発達が想定された。掘削エネルギーが10N/mm²を下回った箇所と湧水1000/min発生した箇所で大規模崩落が部分的に発生したためAGFを2シフトの施工をした。

8. まとめ

本報告は、崩落性地山や突発大量湧水が出現する不良地山であってもTBMとして高速掘進するために前方地質の予測を行い、補助工法や支保を選定して施工を行った。この施工事例の検証結果を以下に示す。

- ① 削孔検層による穿孔エネルギーにより定量的に評価を行い崩落対策補助工の施工目安とした。掘進当初は100J/cm³以下を基準値としていたが、その後の掘進経過より、火成岩系では200J/cm³基準レベルから下降傾向が続く場合とした。堆積岩系では150J/cm³基準レベルから下降傾向が続く場合とした。また、穿孔エネルギー値の上下振幅が激しい場合、火成岩系では硬岩亀裂による崩落、堆積岩では貫入岩や岩質変化に伴う亀裂による崩落が発生したため相対的な基準として取り入れた。大規模崩落の発生が予測された区間を事前に対策補助工を行うことで大きなトラブルなく掘進できた。しかしデータの下

降傾向、振幅の増幅傾向の「傾向」の判断の遅れにより予測対策区間前に崩落が発生したケースが2区間であったことは、今後の検討課題としたい。

- ② 調査・設計では予測が難しい長大トンネルの湧水を掘進を行いながら実施した削孔検層により事前に湧水を検知して湧水対策を講ずることができた。特に大量湧水箇所においては、計画的に効率良く水抜きボーリングを施工することができ、切羽前方の水位低下によりトラブルなく掘進ができた。多量湧水地山におけるTBM掘削の削孔検層による湧水検知の有効性を検証できた。
- ③ 坑壁の岩強度(シュミットハンマー測定値)は、掘削エネルギーに大きな影響を及ぼすことがデータにより明白となった。検証の結果、掘削エネルギー(N/m^3)は坑壁の測定岩強度(N/m^3)とほぼ同じ値であった。掘削エネルギーから岩強度を推定することができ、支保パターン選定の指標として掘削エネルギーの選択は適切といえる。
- ④ 穿孔エネルギー、TBM掘削データ(掘削エネルギー、ルーフサポート圧、排土量)、目視観察状況(坑壁岩強度、崩落度、湧水量)は多くの相関性があり、更に検証と解析を行うことで地山状況予測評価の有効な手段となる。

TBM掘削において、削孔検層や掘削データなどを活用すれば、地山のより詳細な情報が得られ、不良地山箇所や湧水の予測が可能で予め対策ができる。更に定量的及び相対的な対策補助工、支保選定評価手法が確立されれば、不良地山におけるTBMの適用範囲を大きく広げることができると考えられる。

最後に西村和夫・首都大学東京教授に貴重な助言をいただいたことに深く感謝する次第である。

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方法について, 第52回年次学術講演会講演論文集Ⅲ, 土木学会pp. 106-107, 平成9年9月
- 2) 城間博通, 赤木渉, 高崎英邦, 山口泰男, 関伸也: TBM機械データを用いた支保パターン選定に関する一考察, トンネル工学研究論文報告集第11巻論文(3), 土木学会pp. 15-22, 2001年11月
- 3) 武部俊典, 林崎信男, 明石健, 岡井崇彦: TBMトンネルにおける切羽前方探査—第二名神高速道路鈴鹿トンネル上り線の事例—, トンネル工学研究論文報告集第12巻報告(10), 土木学会pp. 117-182, 2002年11月
- 4) 宮沢一雄, 中野清人, 城本政雄, 笹尾春夫: 栗子トンネル避難坑の削孔検層を併用したTBM掘進, トンネル工学研究論文報告集第19巻報告(1), 土木学会pp. 51-54, 2009年11月

DRILL LOGGING IN TBM DRIVING AND VERIFICATION OF ADVANCE DATA

Kazuo Miyazawa, Kiyoto NAKANO, Haruo SASAO,
Hiroshi HAMADA and Takashi IWASE

Rapid boring is the greatest benefit of the TBM driving. For taking full advantage of this method, it is essential to select and place, at an early stage, supports in a pattern suited to the geological conditions. In order to predict the existence of poor geology sections and evaluate stabilizing measures selected, drill logging was performed over almost the entire tunneling route. From the magnitude of drilling energy given in logging, the geology was predicted quantitatively and relatively to provide criteria for determining measures to prevent collapse. In addition, the TBM machine data obtained while driving were used for review of the collapse-prevention measures and as selection criteria for supports.