

図-2 標準断面概要図

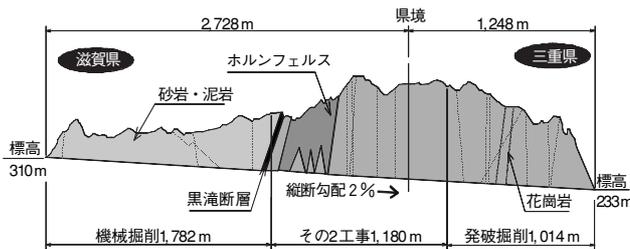


図-3 地質縦断概要図

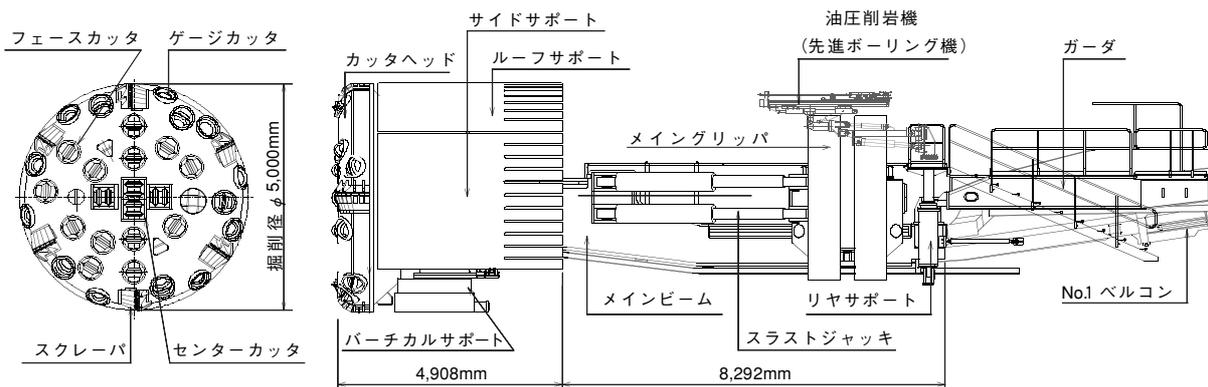


図-4 TBM 本体構造

掘削方式：機械方式上半先進工法

- ・ NATM 先進導坑：掘削断面積 20m²
延長 143m

2-3 地質概要

鈴鹿トンネルの地質は大きく分けて2種類からなる。東側(三重県側)は中生代白亜紀に貫入した花崗岩で比較的硬質であるが、亀裂質な部分を有する。花崗岩の一部は熱水変質しており、その箇所は脆弱化している。また、花崗岩部には中生代ジュラ紀田村川層のホルンフェルスが部分的に出現する。このホルンフェルスは硬質であるが、亀裂の発達によって崩壊性を有している。西側(滋賀県側)は第三紀中新世鮎川層群の砂岩・泥岩・礫岩の堆積岩で比較的軟質である。滋賀県側の到達部付近では土被り20mで河川(笹路川)直下を通過する低土被り区間がある。トンネル掘削区間中には大小20箇所余りの断層および破碎帯が存在する。特に、花崗岩と堆積岩の境界には黒滝断層が存在し、断層粘土約1mとその前後に約50mの破碎部および断層影響範囲を有する。

鈴鹿トンネルの地質縦断概念図を図-3に示す。

§ 3. TBM について

本工事で使用したTBMは、先行工事である鈴鹿トンネル下り線工事のTBM導坑掘削で使用されたものであ

表-1 TBM 主要諸元

項目	主要諸元	備考
形式	オープン型	
掘削基準径	φ5.00m	5000~5020mm
機長	13.20m	本体のみ
全長	85.70m	本体, No.1~No.6 台車
総重量	約 317ton	本体 213ton 後方台車 104ton
カッタ径 カッタ個数	φ432mm (17.0inch) 35 個	
カッタ電動機出力 カッタヘッドトルク カッタ回転数	170kW×6台 最大 2430kN・m 0.8~10.0rpm	カッタ総出力 1020kW 0.8~4.0rpm時 インバータ制御 (10段階)
スラストジャッキ 推進ストローク	2450kN×4本 1500mm	総推力 9800kN 最大 1600mm
グリッパ総押付力 シューの大きさ シューの面圧	23520kN 1350mm×3560mm 2.4Mpa	片側 11760kN
ルーフサポート サイドサポート バッチカルサポート	1 基 左右各 1 基 1 基	可動 可動 固定
ベルトコンベア	600mm	計 3 条 (No.1~No.3)
集塵装置	300m ³ /min×1 台	乾式

る。

TBM 本体構造を図-4に示す。その主要諸元を表-1に示す。

主要諸元に示したように、当該TBMはカッタヘッド

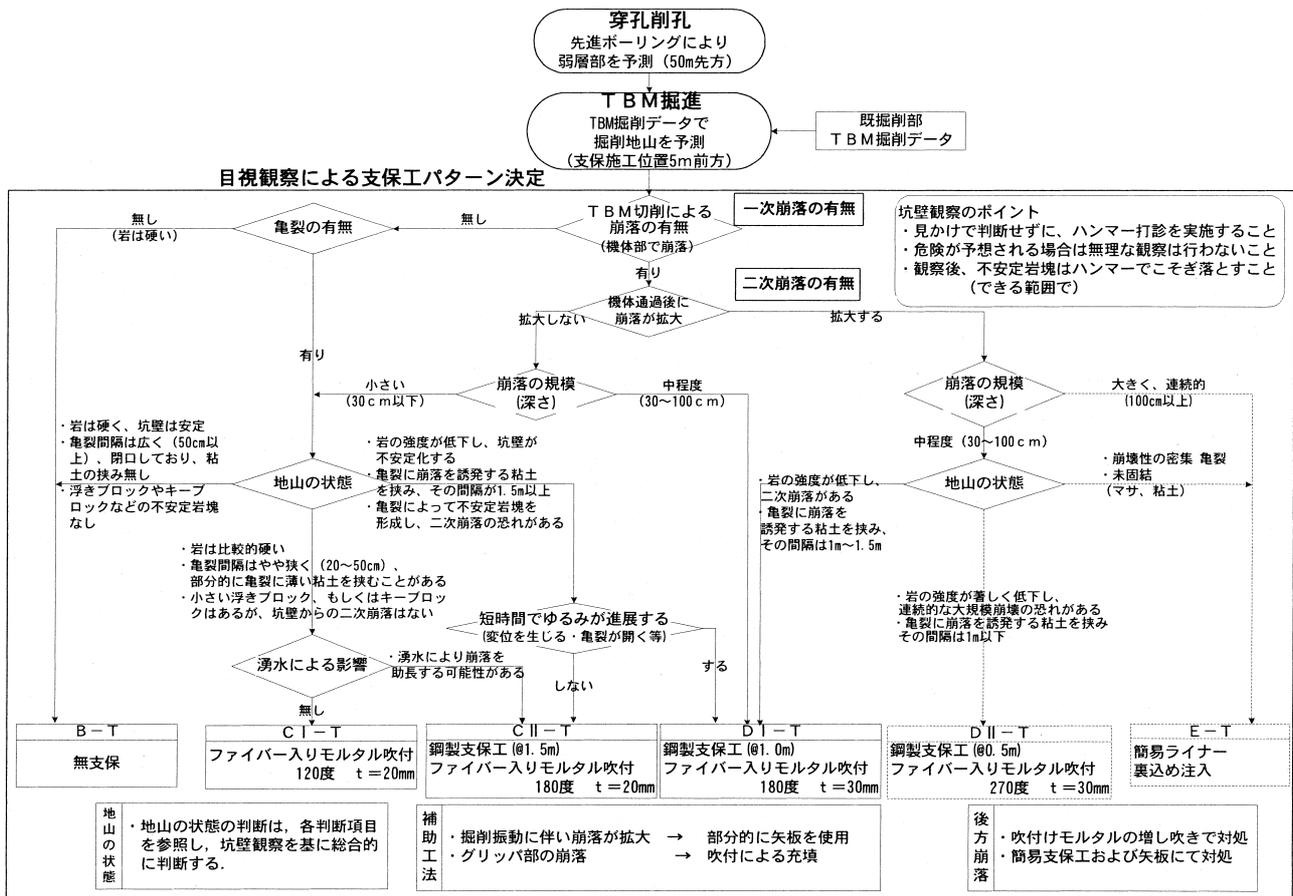


図-5 TBM 導坑支保パターン選定フロー

の回転数がインバータ制御による10段階変速であり、地山状況に応じた回転数を選択することが可能である。

また、本工事ではカット交換に要する時間を削減するために、花崗岩部の掘削において耐磨耗性の高い冷間ダイス鋼のカタリングを採用した。

§ 4. TBM 導坑支保パターン選定フロー

TBMでの掘削は、進行が早いいため掘削後即座に地山評価を行い、採用する支保パターンを決定する必要がある。TBMの支保パターンを決定し施工する位置は、切羽より約1D (D:掘削径=5.0m)離れた後方であり、地山が不良である場合には早急な対応が必要になる。また、切羽担当者によって地山評価が異なることは避けなければならない。

そこで、TBM掘削開始前に発注者と協議の上、今回のTBM導坑用の支保パターン選定フローを設定した。本工事で用いた支保パターン選定フローを図-5に示す。

今回の工事ではTBM掘削前の地山状態を全線にわたり油圧削岩機を用いたノンコアボーリングによって調査することとした。これによって、掘削地山を事前評価するとともに、事前に地山不良部の情報を得ることによって、不用意に地山不良部に突入することを防止した。ま

た、事前に地山補強が必要であれば、この時点で判断を行うこととした。

TBMでの掘削が可能と判断されれば掘削を継続する。掘削中はチャンバー内からの切羽観察も重要なポイントである。また、地山評価には掘削中の機械データも非常に参考になり、データから不良地山が出現すると判断される時には鋼製支保工や矢板等の補助材の準備を遅滞なく実施することができる。

図-5に示したように掘削地山の評価は、段階的に実施することとした。しかし、最終的な判断は実際にルーフより坑壁が現れた段階で、目視観察およびハンマー打診によって浮きの状態・崩落の程度などを把握し、坑壁を総合的に評価して支保を決定することとした。

既存の資料では、崩落の程度および亀裂の状態が定性的な表現で示されており、切羽で判断する場合に苦慮すると考えられたため、今回のフローでは可能な範囲で定量的な表現とするよう努めた。

§ 5. 掘進時の機械データとその評価

5-1 掘進時の機械コントロール

TBM掘進操作フローを図-6に示す。

本工事では、TBM掘進開始初期において、最適な掘進条件を決定するために、カットヘッド回転数をパラ

メータに検討を行った。ここで、最適な掘進条件とは最速の掘削速度、つまり掘進中の機械停止等を含めた実掘削所要時間最短の掘削速度を意味する。検討は、地山条件が同様と考えられる箇所（CI）で、各回転数で最大トルク（ただし、最大トルクの80%を超えると機械的にスラスト停止となるため、80%に設定）を発揮するように掘進速度を調整して操作することにより行った。

その結果、回転数 5.8rpm の場合が最も効率的な掘進が可能であると判断されたため、以降の掘進は回転数を 5.8rpm に固定した。

また、最適な掘進条件は花崗岩と堆積岩で異なることが予想されたため、堆積岩部においても同様の検討を行ったが、ここでも回転数 5.8rpm が最適と判断された。

したがって、本 TBM 導坑は、そのほとんどを一定回転数で掘削したことになる。

5-2 機械データからの岩盤強度の推定

この掘削時の回転数を一定にすることによって、掘進時に得られる機械データから推定される岩盤強度の値が安定した。

岩盤強度の推定は、次式¹⁾を用いて行った。

$$\sigma_F = (F/1000) / (C_1 \cdot P/1000) \quad (1)$$

$$\sigma_T = (Tr/1000) / (C_2 \cdot (P/1000)^{1.5}) \quad (2)$$

- ここに、 σ_F : 推力より推定される岩盤強度 (MPa)
- σ_T : トルクより推定される岩盤強度 (MPa)
- F : 総推力 (kN)
- Tr : カッタトルク (kN・m)
- P : 1回転当りのカッタ切込量 (mm)
- C_1, C_2 : 定数 (掘削径, カッタ直径, カッタ数によって決定される)

今回、 C_1 および C_2 の定数は以下の値とした。

$$C_1 = 16.0m \quad C_2 = 27.0m^{1.5}$$

機械データから推定された岩盤強度を図-7に示す。

掘削初期の段階では、回転数を変化させているため推定される2種類の岩盤強度にばらつきが見られる。しかし、回転数を一定とした掘進距離 260m 以降、両式から推定される岩盤強度はほぼ同値を示している。

5-3 岩盤強度と地山分類

機械データは、支保パターン選定フローに示したように、地山評価・支保決定を行う際、事前データとして参考になる。

そこで、機械データから求められる推定岩盤強度と地山評価との関係を花崗岩部での支保既決定区間における対応から区分することを試みた。ここで、推定岩盤強度は、岩そのものの強度ではなく、 $\phi 5.0m$ の掘削部分における強度・亀裂等を反映した準岩盤強度に相当すると考えられる値（見掛けの強度）であることに注意が必要

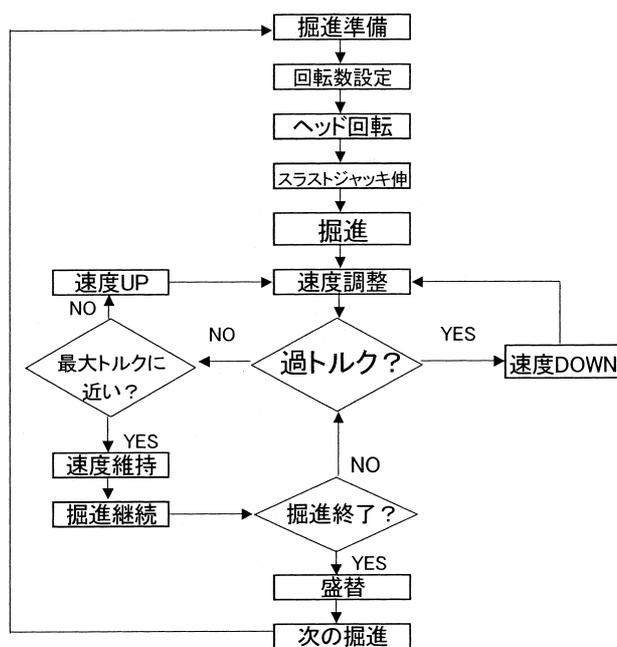


図-6 TBM 掘進操作フロー

表-2 機械データからの推定岩盤強度による地山評価 (Mpa)

地山区分	花崗岩	堆積岩部
B	60 以上	35 以上
C I	40~60	25~35
C II	20~40	20~25
D	20 以下	20 以下

である。

先に示した2式から推定される岩盤強度がほぼ同じであったことから、両者の平均値を推定岩盤強度として採用し、花崗岩部および堆積岩部それぞれに対して表-2に示す岩盤強度によって地山区分の目安とした。

この区分を用いて地山評価を実施すると、実施支保パターンと非常にいい相関があると判断された。その比較を図-7中に併せて示した（推定支保）。機械データからの地山評価と実施での地山評価の違いは、目視観察において亀裂や崩落度の評価によって決定された支保パターンとの相違であると考えている。たとえば、機械データでは地山区分Bの領域であっても、目視観察では亀裂が多いと判断されるとC Iになる。逆に、機械データでは地山区分C IIであっても、目視観察によって亀裂が少なく坑壁は安定すると判断するとC Iとしている。このような部分的な相違はあるものの、全体としては非常に相関があり、機械データによってある程度の地山評価が可能であることがわかった。

§ 6. 切羽評価点と機械データによる地山評価の関係

日本道路公団のトンネルでは、掘削切羽の切羽観察データから切羽評価点を算出し、施工支保パターン判定

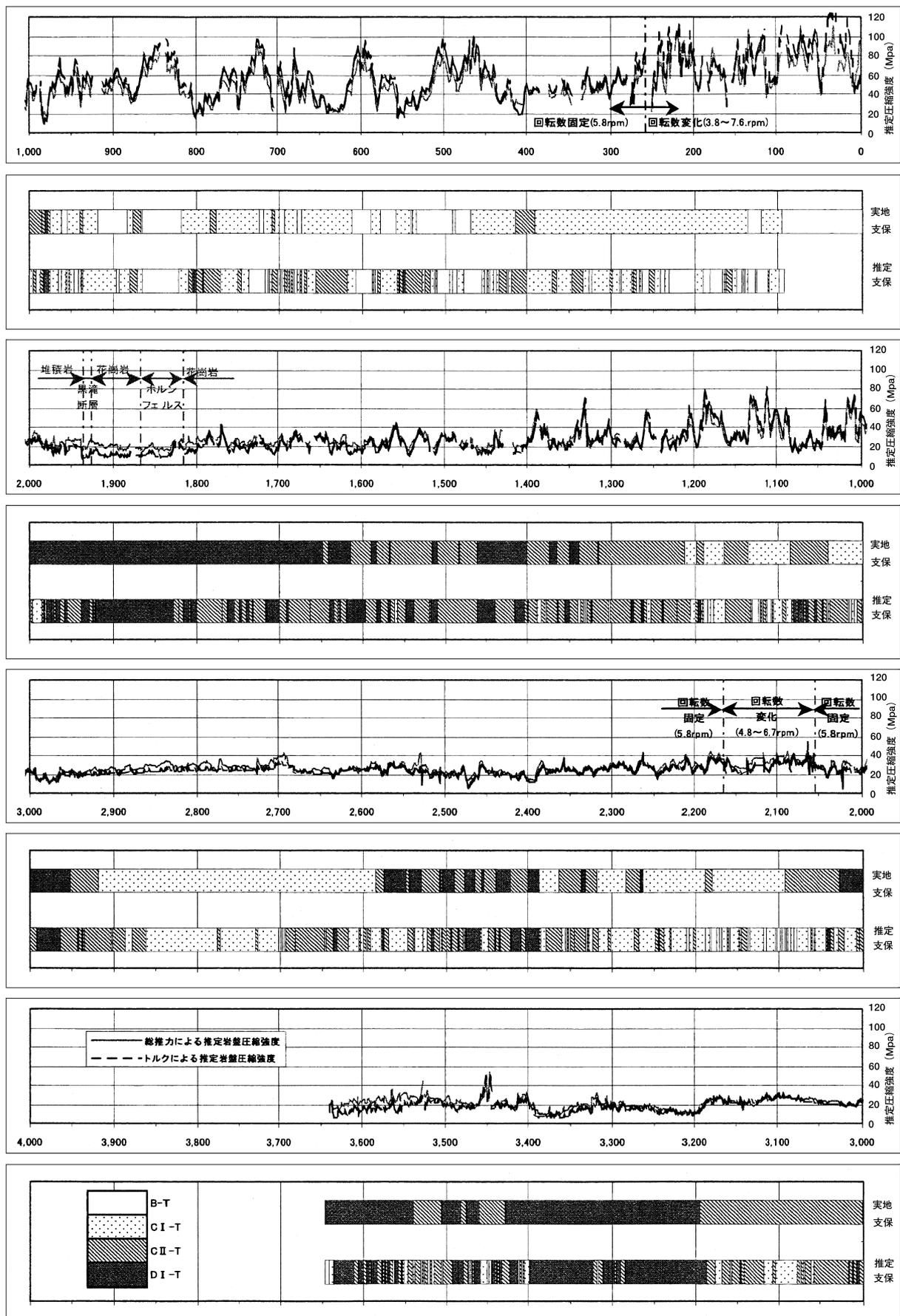


図-7 機械データからの推定圧縮強度と支保パターンの関係

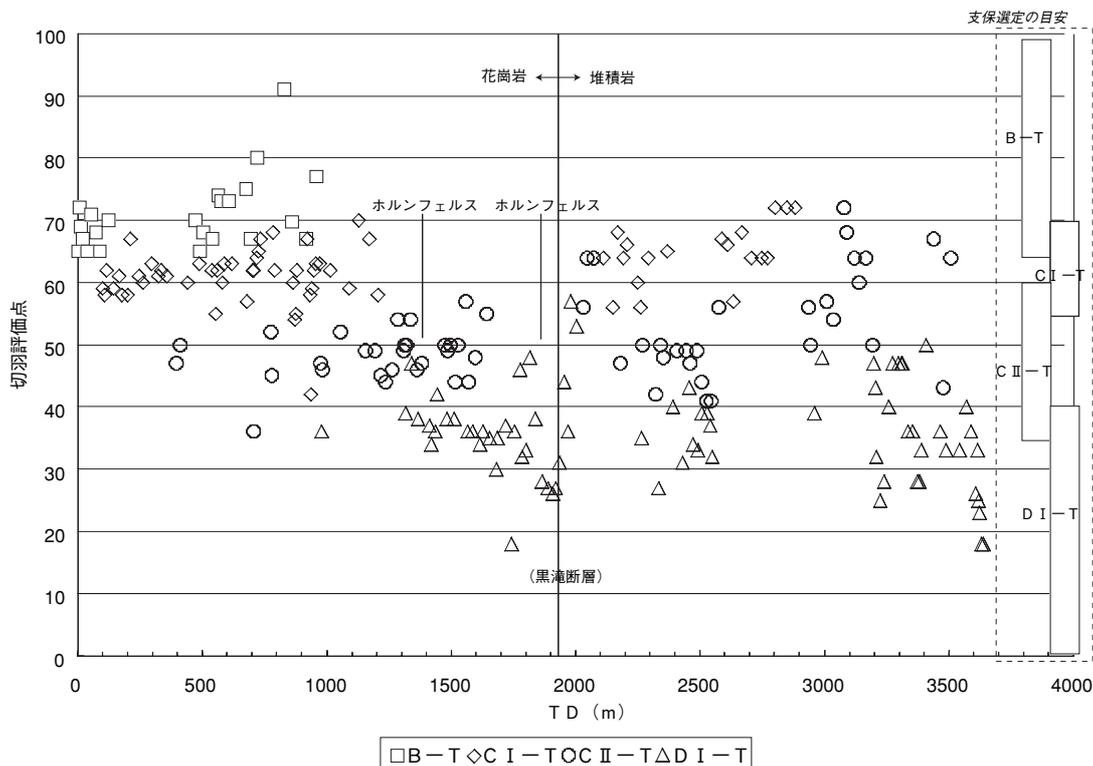


図-8 切羽評価点と支保パターンへの対応

時の参考としている²⁾。その項目は、圧縮強度・風化変質・割れ目間隔・割れ目状態・湧水状況と水による劣化の各項目であり、地山区分毎に評価点を設定し、各支保パターンでの評価点範囲の目安を示している³⁾。

今回のTBM導坑でも、この切羽評価点法を採用した。切羽評価点と採用支保パターンの関係を図-8に示す。この図からわかるように、今回採用した支保パターンは支保選定の目安とされている値とほぼ一致している。

このことから、機械データによる地山評価と実施支保との間により相関があるということは、機械データによる地山評価と切羽評価点の間にもよい相関があると言える。つまり、機械データによる地山評価によってある程度の支保選定が可能であることが示唆される。

しかし、機械データによる地山評価は、対象とする掘削岩盤の相違によって変化し、一律に決定することはできない。今回の工事においても、前半の花崗岩部と後半の堆積岩部では大きく異なる。そのため、掘削対象とする岩盤において初期の段階で機械データによる地山評価および実施支保、切羽評価点の関係を把握することが重要であり、それができれば機械データによって切羽評価を行うことが可能になるものとする。

§ 7. おわりに

本工事は掘削地山にも恵まれ、最大月進885.6mというTBM国内任意月進記録も達成できた。

この高速掘進中でも切羽評価と支保選定という課題は常に付きまとう。この点に関して、本稿では支保選定フローを紹介した。また、機械データからの地山評価について実績を基に報告し、その可能性があることを示した。ただし、支保パターンの決定は目視による地山評価を基本としたことを改めてここに記しておく。

今後の同様な工事において、今回の実績が参考になり、地山評価を実施していく際の一助となれば幸いである。

謝辞：今回、TBM掘削時における機械データからの岩盤強度の推定にあたり、算定式中のC₁、C₂の係数は東京大学 福井勝則助教授の御指導・御協力により決定した。最後になりましたが、今回のTBM導坑の施工にあたり御指導いただいた福井助教授を始め、関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 福井勝則, 大久保誠介: TBMの掘削抵抗を利用した岩盤物性の把握, トンネルと地下, Vol. 28., No. 2, pp. 35-43, 1997.
- 2) 日本道路公団: 設計要領第三集トンネル(1)トンネル本體工建設編, pp. 86-90, 1997.
- 3) 八木弘, 三谷浩二, 赤木渉: 新しい切羽評価手法の提案について, 第23回日本道路会議一般論文集(B), pp. 200-201, 1999.