

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—

GEOLOGIC PREDICTION AHEAD OF FACE UNDER TBM TUNNEL CONSTRUCTION

建部俊典¹⁾・林崎信男²⁾・明石 健³⁾・岡井崇彦³⁾

Toshinori TATEBE, Nobuo HAYASHIZAKI, Takeshi AKASHI and Takahiko OKAI

This paper shows the geologic prediction ahead of tunnel face under TBM tunnel construction. The prediction survey system is the non-core drilling survey system by using a rock drill on TBM. The applied tunnel is Suzuka tunnel for new expressway constructed between Mie Pref. and Shiga Pref. in central Japan. Its geology consists of granite and sedimentary rocks.

Based on the survey results, we forecasted the tunnel supports ahead of the tunnel faces under construction. Its total adaptation ratio is 72%. In addition, we searched the geology in detail before the serious geologic weak zones appearance to consider the effective measures.

Key Words : Prediction ahead of tunnel face, TBM, drilling survey system, Adaptation ratio

1. はじめに

本報告はTBM工における切羽前方探査事例について報告するものである。報告の対象となるトンネルは第二名神高速道路鈴鹿トンネル上り線で、三重県と滋賀県の間の鈴鹿山脈を貫く延長約4kmの三車線大断面トンネルである。掘削断面積は約190m²であり、大断面かつ扁平度が大きいことから施工に対して高い技術力が要求される。そこで掘削工法は、地質確認効果、水抜き効果、事前補強効果などの効果を期待してTBM導坑先進拡幅掘削工法を採用し、拡幅掘削に先立ちφ5mのTBM先進導坑を施工した。

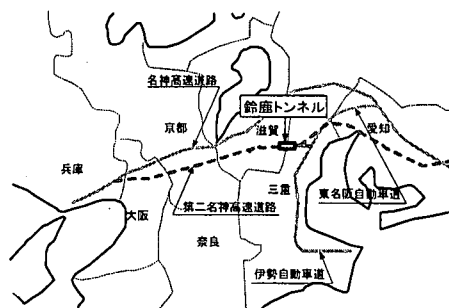


図-1 鈴鹿トンネル位置図

TBM工はトンネルの急速化施工を可能にする施工方法であるが、地山不良部に遭遇すると掘進不能になり、工程管理上で大きなタイムロスを生じることも多い。それを回避するためには、掘削切羽より前方の地質を切羽前方

1) 正会員 日本道路公団中部支社亀山工事事務所(現、日本道路公団関西支社彦根管理事務所)

2) 正会員 日本道路公団中部支社亀山工事事務所

3) 正会員 西松建設(株)中部支店鈴鹿トンネル出張所

探査によって事前に把握し対策を講じる必要がある。

鈴鹿トンネル上り線では、TBM導坑の全線に渡って前方探査を実施し、この結果をTBM掘進管理に利用した。本報告はその実績について紹介すると共に、前方探査の効果について検討するものである。

2. 地質概要

鈴鹿トンネルの地質は大きく分けて、三重県側の花崗岩と滋賀県側の堆積岩に分けることができる。三重県側の花崗岩は中生代白亜紀に形成された鈴鹿花崗岩である。花崗岩分布範囲の西側は熱水変質作用により岩が変質している。また一部で中生代田村川層群の変成岩（ホルンフェルス）がルーフペンダント状に分布する。岩片は硬質だが著しく亀裂質であることから、トンネル施工面に出現する場合は要注意の地質である。一方、滋賀県側の堆積岩は新第三紀中新世の鮎川層群である。主に砂岩、泥岩よりなり、東側におよそ 20° の傾斜で単斜構造をなす。花崗岩と堆積岩の境界には黒滝断層と命名される活断層があり、トンネル施工における要注意個所の一つである。

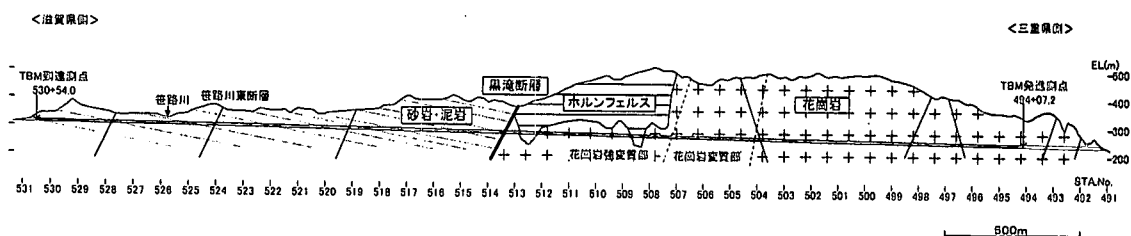


図-2 鈴鹿トンネル上り線地質縦断図

3. 前方探査システム

切羽前方探査法の適用に際しては短時間の計測・解析が条件となる。この条件を満たすものとして、ノンコアボーリングによる探査¹⁾²⁾があり、鈴鹿トンネル上り線ではそれらのうちの穿孔探査システム²⁾を採用した。

この探査方法は、削岩機によって探り削孔を行い、そのときの油圧の変化を電氣的に記録するものである。このデータに基づき切羽前方の地質を推定する。この探査方法では削孔時間のみが計測時間であり、また専用の解析ソフトにより迅速な解析が期待できる。

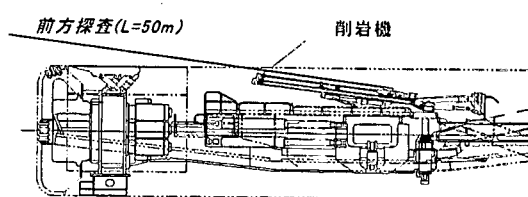


図-3 TBMにおける切羽前方探査

探査で得られたデータを解析することによって地山評価の基本データとなる穿孔エネルギーが算出される。穿孔

エネルギーとは単位堆積の岩盤を掘削するのに必要なエネルギーで、理論式に基づき算出される。一般に穿孔エネルギーが大きいときは堅硬で、逆に小さいときは軟弱と予想される。詳細は既出の論文に譲る²⁾。

前方探査 1 回あたりの探査長は、探査精度および掘削断面からの離隔、探査に要する時間等を考慮し、50m とした。一本 3 m のロッドを継ぎ足して、TBM ルーフサポートの後端からななめ上方に向けて削孔する。これを所定の TBM 到達位置で繰り返して実施する。なお探査のために削孔されたボーリング孔は水抜き孔として活用することができるため、探査は TBM 掘進に対して有効な対策工でもある。

4. 地質予測方法

ここでは穿孔探査に基づく地質予測方法について紹介する。

まず花崗岩における探査例を図-4 に示す。この探査位置周辺の地質は、硬質であるが亀裂質で、B パターンと C I パターンが交互に施工された区間である。探査によって 10m 前方に穿孔エネルギーが大きく低下する箇所が発見され、該当部分で地山の悪化が予想された。実際は熱水変質作用により岩が局所的に軟質化していた部分であり、TBM では C II パターンの鋼製支保工対応となった。この例は切羽前方の地山不良部が明瞭に判別できた事例である。ところが一方で、亀裂の状態などは判別困難であり、また連続的に見ると探査毎の値のばらつきも認められた。そこで本工事では、穿孔エネルギー値と支保区分を一義的に対応させることは難しいと判断し、前方探査に基づく地質推定基準を表-1 のようにした。ただしこれによって決定できない場合も多いため、最終的な地質予測を行う際には、坑壁地質観察などの他の地質情報を加味し総合的に判定することとした。

前方探査を TBM 掘進管理に有効に活用するためには、出力する情報は具体的であることが望まれる。地質が良くなる悪くなるといった抽象的な内容だけでは掘進管理のための有用情報とはならない。そこで本工事では切羽前方の TBM 導坑支保パターンの予測を行い、掘進管理の基礎データとした。また断層などの地山不良部については、適宜探査回数を増やすなどして詳細な調査を行い、それに基づいて対策工の検討を行った。

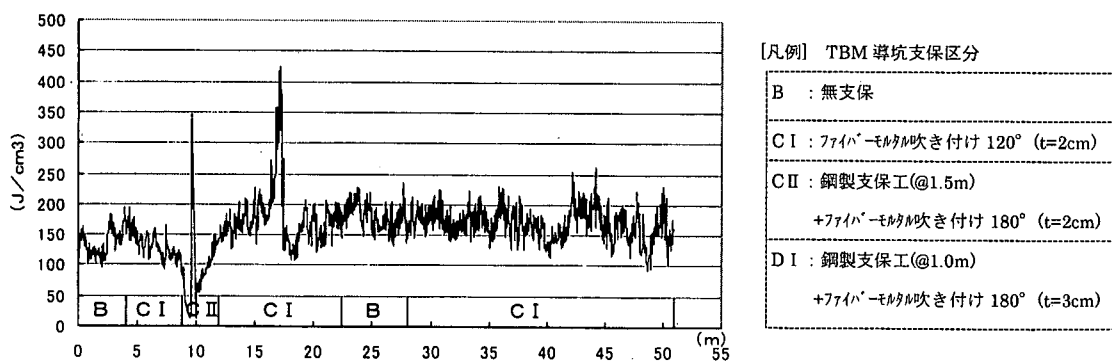


図-4 切羽前方探査結果例（穿孔エネルギーと実施支保）

表－１ 切羽前方探査に基づく地質推定基準（鈴鹿トンネル上り線の例）

<u>穿孔エネルギーを相対値として利用</u> 穿孔エネルギーの絶対値で地山の良し悪しを判別するのではなく、一回毎の探査値の増減から地山を相対的に評価する。例えば、孔位置で CⅠ級であるとして、途中でエネルギーが増加すれば B 級の可能性、減少すれば CⅡ級の可能性、など。
<u>穿孔エネルギー値の目安</u> 穿孔エネルギーが 100J/cm³ を下回ると、一般に地質が悪化し支保が必要となる。CⅡ級もしくは DⅠ級。
<u>回転圧の目安</u> 回転圧の値が上昇すると地山が粘土化している可能性がある。支保との関係は一概には言えないが地山悪化の目安になる。
<u>削孔水の色、およびくり粉の変化</u> 削孔水の色およびくり粉の変化は、岩種・岩質の変化を反映する。
<u>ジャミングの発生</u> ジャミングが発生すると著しい軟化もしくは粘土化が予想される。基本的には DⅠ級。

5. 探査結果

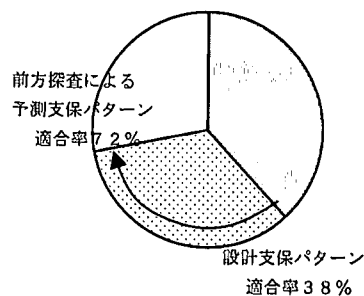
（１）探査実績

探査は TBM 導坑全長 3646.8m に対して 94 回実施した。当現場の地質条件で計測に要した時間は 1 回当たり 1 時間半程度で、解析・予測に要した時間は 1 ～ 2 時間であった。なお結果は即座に関係者に伝達し、出力シートは遅くとも計測後 2 時間程度で切羽担当職員の手に渡るようにした。

（２）予測支保パターンの適合率

探査による予測支保パターンが実施支保とどの程度適合したかを見るために適合率を算出した。ここでの適合率は、探査長に対して、支保予測が適合した区間長の比率とした。これを探査毎に集計し平均を算出すると 72.0% となった。

一方、探査によって地山脆弱部をどれだけ検知できたかを表す比率についても算出した。具体的には、無支保区間からの探査で鋼製支保区間（CⅡもしくは DⅠ）をどれだけ予測しえたかを表す頻度の比率である。全探査で 15 回中 10 回が適合したことになるので、地山脆弱部予測の適合率は 66.7% となった。なお適合率の算出方法については検討の余地があり、今後議論する必要があると考える。



図－５ TBM 支保予測の適合率向上

（３）地山不良部の対策検討

切羽前方探査に基づく地山不良部の対策検討について紹介する。まず事前調査情報などで著しく地山の悪化が予

想される区間に対しては、予め事前情報から縮尺 1/1000 程度のトンネル地質予想図（縦断面図、平面図）を作成し、探査と TBM 掘進によって明らかになった地質情報を加味し当初の出現予想を修正した。また適宜探査の回数を増やして情報の質と量を増やすことに努めた。このようにして地質情報の確実性を向上させた上で、地山不良部の対策方法の検討を行った。鈴鹿トンネルではホルンフェルス出現区間と黒滝断層部が主たる検討対象であったが、他にも事前調査で予想されなかった断層もあり、それについても適宜詳細調査と検討を行った。表－2 にその実際の例を示す。

表－2 切羽前方予測による地山不良部の対策検討例

【検討の流れ】	ホルンフェルス	黒滝断層	笹路川東断層
事前の地質検討	花崗岩の上部に不規則に分布。トンネルへの出現の有無とその位置は不明。	既存情報によっておおまかな出現位置が予測されていた。	事前調査では予想されていなかった。
探査の実施	連続的に探査を実施。くり粉の変化からホルンフェルスの接近状況を捕捉。	該当位置近辺でジャミング発生。くり粉は硬質粘土。湧水なし。	通常探査でジャミングが頻発。追加探査を実施。
地質の総合評価	隣接の下り線トンネルより出現範囲は狭く、影響も相対的に小さいと予測。	粘土断層を予測。地山による TBM 拘束が懸念材料。当初の予測位置を修正。	粘土質の小断層集中部と推定。休日中の切羽崩落と TBM 拘束が懸念材料。
対策の検討	F P 等の先受けは不要と判断。切羽職員・作業員に出現予想位置を通知し、警戒を促す。	F P 等の先受けは不要と判断。夏季休暇返上で地山が安定する位置まで連続掘進を決定。	F P 等の先受けは不要と判断。週末の地山ゆるみ回避のために予想位置の 5 m 手前で一時停止。
(結果)	出現位置をほぼ正確に予測。送り矢板により坑壁を保護しながら施工。大きな崩落もなく危険区間を無事通過。	出現位置をほぼ正確に予測。位置誤差 1m。送り矢板により坑壁を保護しながら施工。TBM が拘束されることなく夏季休暇前に無事断層を通過。	出現位置をほぼ正確に予測。矢板により坑壁を保護しながら施工。休日中に地山がゆるむことなく、翌週の連続掘進により危険区間を通過。

6. TBM工における探査の効果

(1) 地山トラブル回避

TBM が掘進不能になる主な原因には、電気・機械トラブルによるものと、地山トラブルによるものの大きく 2 つがある。このうち後者に対しては、適正な掘進管理と有効な事前対策がトラブル回避の手段となる。これらの意思決定のための地質情報取得が切羽前方探査の役割である。

鈴鹿トンネル工事においてはホルンフェルスと黒滝断層という地質的難所がある。これらについては事前にその悪化程度が判別できたため、フォアパイリング等の事前対策を実施せずに、危険区間を速やかに通過する方法を採用した。特に黒滝断層は硬質粘土よりなり、地山の押し出しが懸念されたため、安全な場所まで連続掘進した後に長期の休暇を取得することとした。掘進中の坑壁保護は送り矢板を多用し地山のゆるみ防止に努めた。このような対策により大きなトラブルなく断層区間を通過した。なお掘進後は該当区間で地山の押し出しが認められ、鋼材等で後補強を実施している。

(2) 掘進管理上の効果

鈴鹿トンネル上り線工事では全線にわたって支保パターンの推定を行った。その目的はスムーズな掘進管理により安定した高速掘進を実現させることにある。たとえば地山不良部が検知され鋼製支保が必要と判定されたときは、その準備を前もって指示できるため、段取りに要する時間のロスをなくすことができた。また休眼前のマシン停止位置の判断にも有効であり、地山のゆるみによる崩壊やTBMマシンの拘束を避けることができた。ただし、探査が不適合となった事例もあることから、前方予測は100%信頼できる情報ではなかったことも現実であった。

(3) 安全面での効果

切羽前方予測によって地山不良部に関する注意喚起を適切に行うことができた。また、前方地質に対する目安が示されることで、切羽担当職員および作業員に精神的な余裕が生まれ、安全面に寄与できたと考えられる。

(4) 水抜き効果

前方探査ではしばしば探査孔より湧水が認められた。堆積岩では最大で60L/minの湧水が発生している。しかし湧水のほとんどは数時間～数日で減少したため、TBM掘進時における切羽安定と坑壁のゆるみ回避に寄与したと考えられる。

7. おわりに

ここまでTBM工の切羽前方探査について鈴鹿トンネル上り線の事例を紹介してきた。一般に、切羽前方探査は「計画→計測→解析→評価」の流れで実施される。ところが現実の切羽前方探査システムは、このうち「計測→解析」までしかカバーしていないのが現状である。施工に対して有用な情報を提供するためには「評価」の過程をいかに迅速かつ確実に行えるかに掛かっている。鈴鹿トンネル上り線工事では地質に関わる情報を総合的に評価することによりこの不足部分を補った。今後、切羽前方探査システムの改善を行うに当たっては、単に計測精度の向上を目指すだけでなく、全ての地質情報を総括し有用情報を抽出するための情報処理に関わる研究も必要であると考ええる。

参考文献

- 1) 例えば、青木謙治・稲葉武史・塩釜幸弘・手塚康成：油圧ドリルによる削孔データを用いた岩盤評価及び切羽前方地質の予測技術について、第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.67-72、1990。
- 2) 山下雅之・石山宏二・袖村孝彦・塚田純一：湧水量の多い脆弱地山における穿孔探査の適用、第31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.191-195、2001。