

TBM施工情報に基づく

拡幅トンネル支保パターン予測と実績

—第二名神高速道路鈴鹿トンネル上り線の事例—

PREDICTION OF ENLARGED TUNNEL SUPPORTS BASED ON TBM-DRIVEN PILOT TUNNEL DATA AND ITS RESULT

吉永 優¹⁾・林崎信男¹⁾・明石 健²⁾・岡井崇彦²⁾

Masaru YOSHINAGA, Nobuo HAYASHIZAKI, Takeshi AKASHI and Takahiko OKAI

This paper shows the enlarged tunnel supports prediction based on TBM-driven pilot tunnel data and shows its result. The collected data for prediction analysis are the TBM machine data, the observed geologic data and the TBM tunnel construction records. The applied tunnel is Suzuka Tunnel that is wide section for new expressway constructed between Mie Pref. and Shiga Pref. in central Japan. Its geology consists of granite and sedimentary rocks. As a result, the ratio of tunnel supports agreement length is 81% at present. This shows that the TBM-driven pilot tunnel data can be extremely available for wide tunnel construction.

Key Words: prediction, tunnel support, TBM, pilot tunnel, tunnel construction

1. はじめに

本報告は高速道路トンネル築造に際して行った、先進TBM工の施工情報に基づく本坑拡幅支保パターン予測とその実績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三車線トンネルである。

本工事では施工の効率化を目的として、まず $\phi 5\text{m}$ のTBM先進導坑を施工した¹⁾²⁾。TBMの施工延長は3646.8mである。その後NATMにより拡幅掘削を行い、延長計3976m、掘削断面積約180m²の大断面トンネルを施工する。平成15年9月1日朝現在で上半拡幅は3276.2mを終了し、現在貫通に向けて工事を行っている最中である。

本坑拡幅に先立って行われるTBM工の施工意義の一つは、地質確認によって合理的な支保パターン想定を可能にする点にある。トンネルの事前調査結果が現実と乖離することが多々あることが指摘される中、社会的なコスト縮減要求や安全配慮要求を満足する情報化施工を行うために、TBM施工情報が本坑拡幅工事にどのように生かされ得るのかの可能性を探る必要がある。その一つの試みとして、鈴鹿トンネル上り線工事における本坑拡幅支保パターンの予測と実績について以下に記述する。

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

1) 正会員 日本道路公団中部支社亀山工事事務所

2) 正会員 西松建設(株)中部支店鈴鹿トンネル出張所

崗岩は中生代白亜紀に形成された鈴鹿花崗岩で、分布範囲の滋賀県側は熱水変質作用により脆弱化している。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。滋賀県側の堆積岩は新第三紀中新世の鮎川層群で主にシルト質砂岩よりなる。花崗岩と堆積岩の境界には黒滝断層と呼ばれる活断層がある。

3. 拡幅支保パターン予測方法

TBM施工情報を地山評価に用いる試みは多くの現場で行われており、これまでも数多くの成果が報告されている³⁾。鈴鹿トンネル上り線工事においては、情報の性質に注意しながら3種類のデータを用いて拡幅支保パターンの予測を行った。予測分析作業の流れを図-1に示す。以下、それぞれの過程について説明する。

(1) データ取得プロセス

データ取得プロセスはTBM施工時に各種の地山データを取得する過程である。この過程ではTBM全線で連続するデータとなるように注意した。得られたデータは、①TBM機械データ、②TBM坑壁地質、③TBM実績支保、の3つに分類できる。

①のTBM機械データについては福井の方法⁴⁾を用いて地山データへの変換を行った。この方法はTBM掘進時の総推力、カッタートルク、および一回転当りのカッター切込量を用いて地山の推定岩盤強度を算出するものである。このデータは亀裂を含むTBM径 $\phi 5\text{m}$ 全体の地山強度で、いわゆる準岩盤強度に対応する。当現場では最速の掘進速度を求めるためにカッターヘッドの回転数比較試験を行い、その結果に基づき回転数一定での掘削を行ったが、この運転方法の統一はデータ取得条件の統一にもつながり、全線同じ条件での連続地山データを取得することができた。表-1に当現場における推定岩盤強度と地山区分との対応関係(目安)を示す。

②のTBM坑壁地質の観察については、TBMの掘進速度が速いために全線の連続記録が取得できるかという問題があった。掘進後すぐに吹付けにより被覆されることが多いために観察のタイミングが限定されるという問題である。そこで導坑上半については昼夜問わず担当職員による坑壁観察を行った。導坑下半についてはTBM通過後に上半記録と照合しながら延長方向を俯瞰した調査を行った。これらにより全線で縮尺1/200の地質記録を取得した。

③のTBM実績支保については、実績をそのまま地山評価につなげることを目的として、切羽評価点に基づいたTBM支保パターン選定を昼夜問わずリアルタイムに実施した。判定に際しては、前記TBM機械データと坑壁観

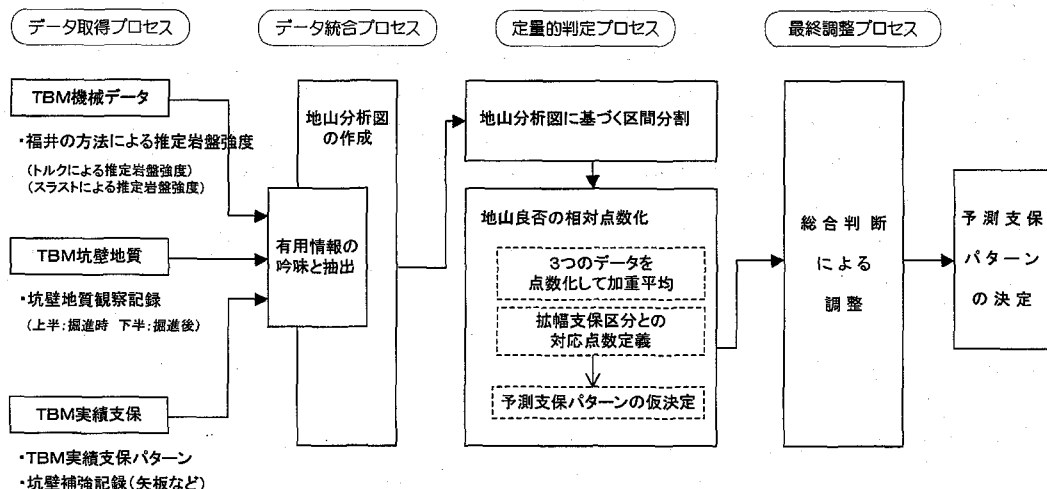


図-1 拡幅支保パターン予測過程

察、および切羽前方探査^りを有効に活用した。

(2) データ統合プロセス

データ統合プロセスとは得られたデータから有用情報を抽出し整理統合する過程である。まずTBM坑壁地質記録については、細目でデータの質にばらつきがあるために吟味の上で有用な情報のみを抽出する必要がある。検討の結果、表-2に示す5項目(変質、上半崩落、下半押し出し、亀裂、湧水)は全線で連続性と確実性が確保されており、定量的に取り扱える項目であると判断した。なお切羽評価点については、TBM実績支保に反映されていることからTBM坑壁地質データとしては取り扱わないこととした。TBM機械データについては、トルクによる推定岩盤強度とスラストによる推定岩盤強度の2つが算出されるが、その差は小さく傾向も類似することから、両者の平均をとって一つにまとめた。TBM実績支保については、問題点があれば最終調整で変更することとし、この過程ではそのままとした。以上のデータの一つにまとめ、予測に際しての基礎情報となる地山分析図を作成した。一例を図-2に示す。

(3) 定量的判定プロセス

定量的判定プロセスとは、区間分割を行った上でデータを定量的に処理し、拡幅支保パターンの仮予測を行う過

表-1 TBM機械データによる推定岩盤強度と地山区分との対応(鈴鹿トンネル上り線における目安)

地山区分	花崗岩(MPa)	堆積岩(MPa)
B	60以上	35以上
C I	40~60	25~35
C II	20~40	20~25
D I	20未満	20未満

表-2 TBM坑壁地質細目の評価表

TBM坑壁地質細目	観察位置	内容	特徴	問題点	評価
切羽評価点	上半、下半	地山地質の総合指数(支保判定基準)	地山情報の定量化が図れる	高速掘進のためデータ欠如区間が生じた	TBM実績支保に反映されている
変質状況	上半、下半	「変質無」「変質」「著しい変質」の3区分 ^{*1}	概して判定者の熟練度によらないデータである。下半においては延長方向への連続調査が可能で、経時変化も観察できる。	下半が吹付リバウンドや矢板などで被覆される場合あり	全線にわたって連続データがあり確実性も確保できていることから、評価項目として利用できる
押し出し状況	下半	「押し出し無」「押し出し」「著しい押し出し」の3区分 ^{*2}		現象(の程度)のみの記録	
崩落状況	上半	「崩落無」「崩落」「崩落大」の3区分 ^{*3}		判定区分が粗い	
亀裂状況	上半、下半	「亀裂少」「亀裂質」の2区分 ^{*4}	地山安定度の変化観察に寄与	底盤からの湧水量は目視判断	
湧水状況	上半、下半	湧水量とその経時変化			

*1 変色が明確なものは「変質」、岩芯まで強度低下は「著しい変質」

*2 下半盤ぶくれを「押し出し」、軌道レベルまでの埋積を「著しい押し出し」

*3 崩落深さ15cm以上を「崩落」、崩落深さ30cm以上を「崩落大」

*4 亀裂間隔50cmを境界値の目安とした

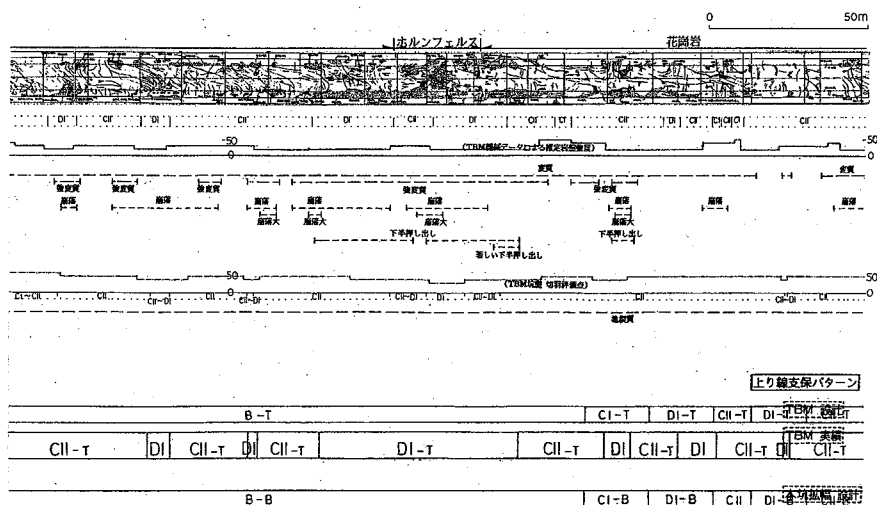


図-2 地山分析図例

地山区分	TBM坑壁地質細目					切羽評価点
	変質	上半崩落	下半押し出し	亀裂	湧水	
B	無	無	無	亀裂少	（顕著な場合はランクダウン）	65~100
C I	変質	崩落		亀裂質		55~70
C II	強変質	崩落大				35~60
D I			押し出し			0~40
D II			著しい押し出し			

図-3 拡張地山区分とTBM坑壁地質細目との対応イメージ（目安）

I. 地山区分の配点表

B点数	C I点数	C II点数	D I点数	D II点数
14	11	8	5	2

II. 各データの基礎点算出

1. TBM機械データによる評価

基礎点①=(B区間長比率×B点数)+(C I区間長比率×C I点数)+(C II区間長比率×C II点数)+(D I区間長比率×D I点数)

2. TBM実績支保による評価

基礎点②=(B区間長比率×B点数)+(C I区間長比率×C I点数)+(C II区間長比率×C II点数)+(D I区間長比率×D I点数)

3. TBM坑壁地質による評価

基礎点③=[1)2)の平均に4)を考慮した点数と、3)の点数を比較して、小さい方の点数]

1)TBM導坑の岩盤変質状況

最大連続区間長(m)を当てはめる

「変質」	0m	1/3D未満	1/3D~1D	1D以上	—
「強変質」	0m	1/6D未満	1/6D~1/2D	1/2D~1D	1D以上
配点	B点数	C I点数	C II点数	D I点数	D II点数

※「変質」と「強変質」で点数が異なるときは点数が低いほうを採用

2)TBM導坑の上半崩落状況

最大連続区間長(m)を当てはめる

「崩落」	0m	1/3D未満	1/3D~1D	1D以上	—
「崩落大」	0m	1/6D未満	1/6D~1/2D	1/2D~1D	1D以上
配点	B点数	C I点数	C II点数	D I点数	D II点数

※「崩落」と「崩落大」で点数が異なるときは点数が低いほうを採用

3)TBM導坑の下半押し出し状況

最大連続区間長(m)を当てはめる

「押し出し」	1/6D未満	1/6D~1D	1D以上	—
「著しい押し出し」	—	—	あり	—
配点	C II点数	D I点数	D II点数	—

※「押し出し」と「著しい押し出し」で点数が異なるときは点数が低いほうを採用

4)TBM導坑の亀裂状況

亀裂質の場合はC I点数以下

※10=18mとした

III. TBM導坑地山評価点の算出

$$TBM導坑地山評価点 = \begin{cases} \text{基礎点③がD I点数以上} & : (\text{基礎点①} \times 0.4) + (\text{基礎点②} \times 0.4) + (\text{基礎点③} \times 0.2) \\ \text{基礎点③がD II点数} & : (\text{基礎点③} \times 1.0) \end{cases}$$

IV. 拡張予測地山区分

TBM導坑地山評価点	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2
拡張予測地山区分	B	B-	C I +	C I	C I -	C II +	C II	C II -	D I +	D I	D I -	D II +	D II
	B		C I			C II			D I			D II	

※一つの地山区分を3つに分割し、良い方に+、悪い方に-の符号を付けた

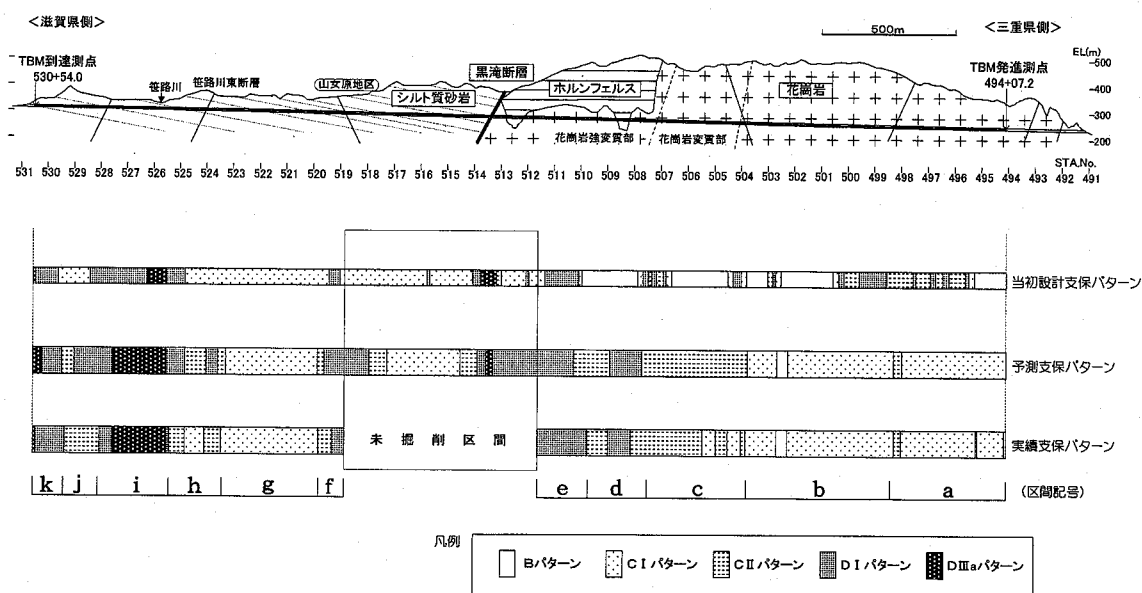
図-4 TBM導坑地山評価点の採点方法（一区間ごとの）

程である。ここではまず始めに、ア) 拡張地山区分とTBM導坑地質細目との対応イメージ(図-3)に基づく評価、イ) 判断しづらい場合は安全側での評価、の2項目を基本方針として、地山分析図照査によって同程度の支保が想定される区間の分割を行った。次にそれぞれの区間に対して図-4のTBM導坑地山評価点の採点基準によって地山良否の相対点数化を図り、予想される地山区分と対応させた。ここでの考え方は、区間内で各地山区分の要素が

それぞれどの程度出現するかの比率を集計して、重みを付けて点数化するというものである。集計方法は、図－3に示す拡張地山区分との対応イメージ図などを参考にしながら、フィードバック的な試行を行って決定した。

(4) 最終調整プロセス

最終調整プロセスとは、定量的に求められた予測支保を総合的に見直す過程である。例えば定量的判定で二つの地山区分の境界付近に判定された場合、再度全データを見直し予測支保パターンの是非を検討する。具体的には定量的判定でBーと評価された箇所でも部分増し吹き付けが実施されていた場合は、ランクを下げて予測をCⅠクラスとするなど。一方、土被りが小さく地表構造物への影響が懸念される場合などは、地質に基づく評価とは別の検討を行った。具体的には滋賀県側の土被り18mの笹路川直下付近で沈下抑止対策としてDⅢaを予定するなど。その他、不具合が想定される部分の調整を行い、この過程で最終的な予測支保パターンを決定した。



図－5 予測支保パターンと実績支保パターン

表－3 拡張切羽地質状況

区間	地形	岩種	岩の状態	亀裂の状態	主たる拡張支保パターン
a	山岳	花崗岩 (中生代)	概ね新鮮岩でしばしば粘土層出現	亀裂質	CⅠ
b			概ね新鮮岩	亀裂質で一部亀裂少	CⅠ
c			変質岩	亀裂質	CⅡ
d			ホルンフェルス捕獲岩と強変質岩	亀裂質	DⅠ
e			強変質岩	亀裂質	DⅠ
f	丘陵	堆積岩 (新第三紀)	新鮮岩と脆弱岩混在	断層を中心に亀裂質	DⅠ
g			新鮮岩	亀裂少	CⅠ
h			断層を中心に脆弱岩	断層を中心に亀裂質	CⅡ
i			新鮮岩と脆弱岩混在	断層を中心に亀裂質	DⅢa
j			新鮮岩と風化岩混在	部分的に亀裂質	CⅡ
k	坑口		強風化岩	亀裂質	DⅢa

4. 拡張支保パターン実績

(1) 実績支保パターンとの比較

図-5に、当初設計、TBMデータによる予測、拡張実績の各支保パターン延長図を示す。また表-3に拡張切羽の地質の概要を示す。なおここには標準的な拡張支保パターン分類を掲載したが、場所によっては地山の状況に応じた支保部材の変更を行い、支保のマルチ化を実施している。

当初設計では、推定断層近辺で主にDIなどの重い支保が想定され、それ以外の区間は地山良好との思想であった。しかし全区間の半分以上を占める三重県側については、支保パターンの軽重に影響を与えたのは断層ではなく花崗岩の熱水変質の程度であった。一方TBMデータに基づく予測支保パターンについては、一部で不適合区間はあるものの、全体的に支保変化の傾向は一致しており、適合性は概ね良好である。

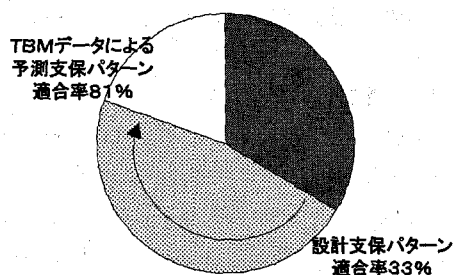


図-6 拡張支保予測の適合率向上

(2) 予測適合率

支保の予測実績を評価するために適合率を算出した。ここでの適合率とは、予測と実績が適合した区間を抜き出し、その合計延長の全掘削長に対する比率を表したものである。集計の結果、現時点での適合率は81%となった。同様に算出した設計支保の適合率が33%であることから、支保予測が大きく改善されていることになる。これはTBMによって実際の地山からデータを得たことによるものであり、弾性波探査、ボーリングおよび地表踏査などの限られたデータから類推せざるを得ない事前調査に対して、掘削地山の連続データを活用することがいかに有用であることを示している。なお、支保予測が外れた箇所については、TBM施工時に現れなかった局所的な地山不良部、漸移的な地山変化と階段状の支保パターン採用とのギャップ、また支保予測時の区間設定における安全側の判断によるもの、などがその要因として考えられる。これら不適合要因の詳細検討については今後の課題である。

5. おわりに

以上、鈴鹿トンネル上り線工事における拡張支保パターン予測とその実績について紹介した。予測支保が外れた区間はあるものの、今回の方法が支保予測の一手段であることを示せたと考えている。しかしこの方法には不確かかつ不確定な要素が含まれていることは認識しており、上記不適合要因の検討、各データの有用性再評価、区間分割方法や統合分析方法の再検討、などが改善に向けての課題であると考えている。

参考文献

- 1) 建部俊典・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 ー第二名神高速道路鈴鹿トンネル上り線の事例ー」トンネル工学研究論文・報告集、Vol.12、pp.177-182、2002。
- 2) 岡井崇彦・岡田隆治・明石健・前野哲男「TBM導坑掘進中の地山評価について」西松技報、Vol.25、pp.49-54、2002。
- 3) 例えば、望月俊明・川越健・手塚仁・堂藤和雄・田部井雅弘「大断面トンネルにおけるTBM導坑掘進実績から想定した支保パターンの検討 ー第二東名高速道路浜松トンネル西工事ー」トンネル工学研究論文・報告集、Vol.12、pp.241-246、2002。
- 4) 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。