

大断面トンネルにおけるTBM導坑先進拡幅掘削工法の有効性に関する評価検証

EVALUATION FOR THE TBM PILOT AND ENLARGEMENT EXCAVATION METHOD IN LARGE SCALE TUNNELS

竹國一也¹⁾・関 茂和²⁾・宮野敏雄³⁾

Kazuya TAKEKUNI, Shigekazu SEKI and Toshio MIYANO

The basic excavation methods to be used in the New Tomei Expressway tunnels are the method of upper heading and bench in locations where the ground is relatively good, and the method of upper heading and bench with a center pilot in the upper heading in locations where face stability is poor.

In addition to these excavation methods, the TBM Pilot and Enlargement Excavation Method is to be introduced as a new excavation method for the New Tomei Expressway tunnels. With the TBM Pilot and Enlargement Excavation Method, by performing a pilot excavation by TBM within the tunnel cross section in advance, various beneficial effects such as confirmation of geological conditions and drainage into the pilot are expected, so that safe and efficient enlargement excavation can be performed.

This paper describes evaluation of beneficial effects for the TBM Pilot and Enlargement Excavation Method in large scale tunnels.

Key Words: tunnel, the TBM Pilot and Enlargement Excavation Method, confirmation of geological conditions and drainage, large scale tunnel

1. はじめに

第二東名高速道路におけるトンネルは、掘削断面積が約190m²と東名高速道路でのトンネルの約2.5倍の規模を有する超大断面である。掘削工法は、上半先進掘削工法(以下「上半工法」という)、TBM導坑先進拡幅掘削工法(以下「TBM工法」という)及び中央導坑先進拡幅工法を標準として施工を行っている。本文は、これら標準掘削工法のうち比較的延長の長いトンネルに適用しているTBM工法に着目し、当掘削工法導入時に期待していた効果(地質確認効果、切羽安定効果、施工効率の向上等)について、現時点で掘削の完了しているトンネルの施工実績を基にその効果及びコスト縮減に関する検証を行うものである。

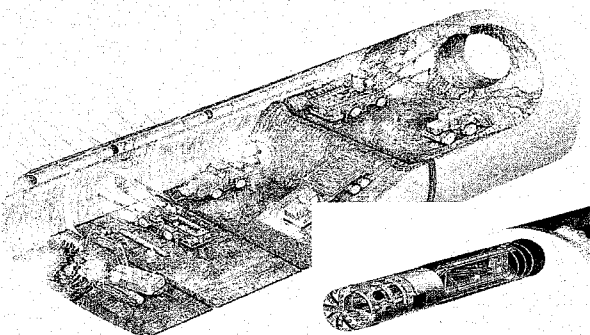
2. TBM導坑先進拡幅掘削工法に期待する効果

大断面トンネルを安全かつ効率よく経済的に施工を行うには、十分な地質の把握が不可欠となる。そのためJHでは、本坑掘削に先駆けて高速掘進性を有するTBMにより先進導坑を施工し、その後NATMにて拡幅掘削を行う工法を導入している。この工法をTBM導坑先進拡幅掘削工法と称している。(図-1参照)

-
- 1) JH日本道路公団 静岡建設局 建設部 建設第一課
 - 2) JH日本道路公団 試験研究所 道路研究部 トンネル研究室
 - 3) JH日本道路公団 企画部 企画課

TBM導坑を先進させることで以下のような効果を期待している。

- ① 本坑拡張掘削時にはTBMによる掘削情報が得られているため、切羽前方の地質が完全に把握できること（地質確認効果）
- ② 先進導坑による水抜き、導坑内からの事前補強及び導坑の存在そのものが切羽の安定に寄与する効果（切羽安定効果）
- ③ 切羽前方の地質確認による本坑拡張掘削の適切な支保選定や施工の効率が図られること（支保の適正化及び施工効率の向上）



図一1 TBM導坑先進拡張工法概念図

3. トンネル施工実績による効果検証

(1)対象トンネル

現在、貫通している19トンネル(TBM工法3トンネル、上半工法13トンネル)の内、10トンネル(TBM工法(清水第三トンネル(上下)、浜松トンネル(上)、上半工法(静岡第二トンネル(上下)、静岡第六トンネル(下)、藤枝第一トンネル(上下)、掛川第一トンネル(上下))の施工実績をベースとした。なお、ここでは延長が比較的短く、低土被部における地表面沈下対策を目的として中壁分割工法を採用しているトンネルは、検証対象外としている。

(2)検証手法及び検証結果

TBM工法には、前述のとおり導入当初より様々な効果が期待されているが、ここでは効果をコストとして客観的に反映しやすい下記2項目について検証を行う。

- ① 地質確認効果による適切な支保選定
- ② 切羽安定効果(本坑掘削時での補助工法の採用度合い)

1)地質確認効果による適切な支保選定

掘削工法別の支保選定の比較検証にあたり、同一トンネルを上半工法とTBM工法の2工法によって掘削することは不可能であるため、両工法により別々に施工されたトンネルの施工実績を地山等級や新切羽評価点を基に統計的分析を行うことで相互比較を行う。両工法における地山等級の設計と実績との整合及び支保パターンの変更頻度について表-1に示す(TBM工法については、TBM掘削後の設計パターンと実績との整合)。ここで、新切羽評価点法とは、切羽における地山の状態(岩の風化変質度合い、割れ目、岩の強度、湧水の状況など)により0~100点の点数によって切羽を定量的に評価するJHの手法で、点数が高ければ良好な地山で、逆に不良地山では点数は低くなる。

表-1 地山評価点とパターン変更回数

掘削工法	延長(m)						地山 ^{※1} 評価点 (加重平均)	パター ン変 更 回 数	1支保パター ンによる 施工延長
	B	CI	CII	DI	DI-2 ^{※2} DII	計			
TBM	21.0	1283.0	1572.5	1561.3	201.0	4638.8	3.57	69	67.2
工法	45.0	1013.1	2460.5	1023.2	92.0	4633.8	3.51	72	64.4
上半	0.0	1465.0	1290.0	169.0	945.0	3869.0	3.58	44	87.9
工法	0.0	352.5	2865.6	366.0	265.0	3849.1	3.57	43	89.5

※1 地山等級の評価点 DI, DI-2:4.5 DI, DI-1:4.0 CII:3.5 CI:3.0 B:2.0

※2 DI-2:中央導坑先進拡張掘削工法, 中壁分割工法

設計地山等級と実績における地山評価点の総評価点を、TBM工法、上半工法の加重平均値で比較すると、両工法ともに設計より実績の方が、若干高く評価しており、双方に顕著な差は見られない。これは、TBM工法は、トンネル延長が長いにも関わらず、TBM導坑掘削により地質確認が十分になされ、正確な情報に基づいた拡張掘削が行われたためであると思われる。一方、上半工法を採用したトンネルは、延長が短く土被りも薄いため当初地質調査(弾性波探査、水平ボーリング等)の精度が比較的高く、概ね一致しているものと考えられる。しかし、一般的に延

長が長く土被りの大きいトンネルにおいては実施工時の地山評価が当初設計から大きく変わることも少なくないという現実を考えれば、むしろTBM工法は適正な支保選定がなされたとも見える。

支保パターンの選定頻度(支保パターン変更回数)を比較すると、TBM工法は、平均6.5m毎に支保パターン変更を実施しているのに対して、上半工法は平均9.0m毎であり、これは、TBM工法が、TBM掘削で地山の状況が事前に把握されているため、より適切

な支保選定をきめ細かく行っていると考えられる。

次に、新切羽評価点と実際の選定支保との関係を、両工法で採用した岩級区分(支保パターン)毎の新切羽評価点の平均値と標準偏差(ばらつき)をもって比較検証する(図-2、表-2)。実施工時の岩級区分毎の新切羽評価点の平均値と標準偏差を比較すると、いずれの岩級区分についてもTBM工法のほうが平均値は低く、標準偏差(バラツキ)も小さい。つまり、TBM工法は低い切羽評価点(地山状態は少し悪くても)で軽い支保を採用しており、経済的な支保選定がなされていることを意味している。このことは、TBM導坑による切羽安定効果及び事前地質確認効果によると考えられる。

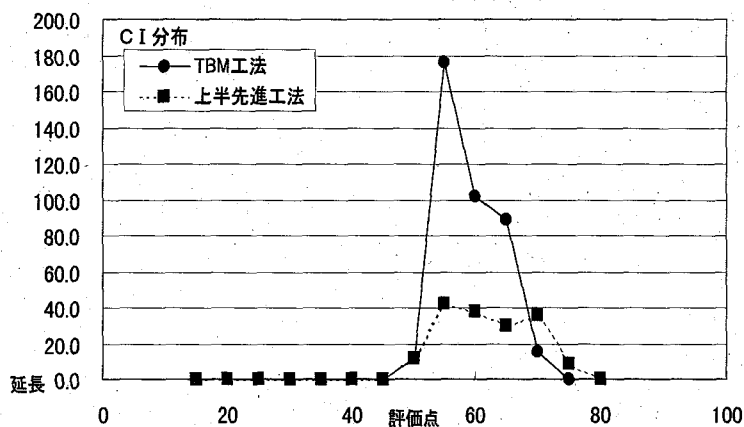


図-2 新切羽評価点分布

表-2 岩級区分別新切羽評価点の平均値と標準偏差

岩級区分 掘削工法	CI			CII			DI		
	Σ区間 距離	評価点 平均	標準 偏差	Σ区間 距離	評価点 平均	標準 偏差	Σ区間 距離	評価点 平均	標準 偏差
TBM工法	373.8	61.3	4.603	1604.9	47.2	5.498	690.0	33.3	4.947
上半工法	166.5	64.1	7.257	2488.9	57.4	11.05	344.4	44.0	12.602

2) 切羽安定効果(補助工法)

切羽安定効果の検証は、両工法において切羽・天端安定対策として採用した補助工法について比較した。TBM工法では、導坑による切羽安定効果が期待されるため、D地質で鏡吹付けコンクリート及び拡幅掘削のためのTBM導坑内からの先行補強ロックボルトのみの採用に対し、上半工法では、C地質で部分的な鏡吹付けコンクリート、D地質では、鏡吹付けコンクリート、鏡ボルト、フォアポーリングが必要となっている。

また、拡幅掘削時における大小含めた切羽崩落の回数は、TBM工法で平均1回/380mに対し、上半工法1回/130mと、TBM工法では崩落回数が上半工法の約3分の1程度と極端に少ないことが判明した。これもTBM工法での切羽安定効果の表れであると考えられる。

3) その他期待される効果

定量的な経済効果の評価は困難であるが、実施工を行った中で、他にTBM導坑の効果として以下の事項が施工者のヒアリングにより得られた。

①換気効率の向上

拡幅掘削が両押しの場合は、坑道換気の評価は難しいが、片押し掘削の場合、風管の延伸作業や風管による作業空間への支障等が解消され、坑内の作業環境は極めて良好な状態になるため、圧倒的な効果を発揮すると考えられる。

②安全性の向上

上半断面の加背が小さくなること及び地山改良効果(杭体効果)により、切羽の安定は勿論のこと、不良地山における地山の崩壊等の際、従前の上半先進工法に比べ小規模なものとなり、安全性も高まる。

4. 上半工法とTBM工法との施工費用比較

経済比較については、TBM工法で施工を行った浜松トンネルの実績と同トンネルを上半工法で掘削した場合を想定し、両工法による経済性について検証する。ただし、検証条件としては、標準支保パターン

等は、現JH設計要領によるものとし、補助工法については、実績のm当り平均連続施工費用として計上した。また、上半工法の仮想設計の地山等級は、適切な支保選定を可能としているTBM工法を基に下記のとおり見直す。

CASE1)

各支保パターン変更部において前後10m区間について、CIをCIIに、CIIをDIとする。これは前述の通り、TBM工法と上半工法の1支保パターンでの平均施工延長はTBM工法65mに対して上半工法90mとその差は25mであり、TBM工法は上半工法における支保パターンの変更が25mの約半分となる10m手前で重い支保に変更され、10m重い支保パターンを継続すると考えた。

CASE2)

更に、湧水区間の支保を、CIをCIIに、CIIをDIとする。(TBM工法の水抜き効果)

CASE3)

両工法の切羽評価点と施工費用の関係を求めてみると図-3に示すとおり評価点平均と両工法のm当り掘削単価の関係は、ほぼ直線的であることがわかる。両工法における切羽評価が適正と考えた場合、評価点がTBM工法でのCII平均評価点47.2の地山を掘削するのに要する上半工法単価は、TBM工法の114.3%となっていることから、上半工法単価を割増する。CIについても同様である。

5. まとめ

既に上り線の拡幅掘削を終えた浜松トンネルにおけるTBM工法の施工実績からは、上半工法に比較して2～9%のコスト縮減を達成していることが判明した。また、コストには直接反映していないものの導坑施工後の拡幅掘削は、作業の効率化や切羽安定の向上、また切羽崩落防止など切羽作業員の安心感は計り知れないものがあり、数字以上の効果があったものとする。

一方、全てのトンネルにおいてTBM掘削・拡幅掘削が順調に進んでいる訳でなく、一部のトンネルでは、大規模な補助工法等の対策を余儀なくされている。これは、TBM工法は上半工法に比して地質条件によって、その掘進能力・効率は大きく左右される。言い換えれば地質条件の見極めが工法の成否を分けると言える。その意味でTBM工法導入判断に当たって、現状の地質調査では不十分であり、TBMを検討するトンネルにあつては更なる詳細な地質調査の実施が望まれる。

表-3 施工延長

地山等級	B	CI	CII	DI-1	DI-2
TBM掘削(実績)	21.0	573.0	1342.5	470.3	282.0
TBM拡幅掘削(実績)	20.0	374.1	1621.5	391.2	282.0
上半工法CASE1	—	274.1	1591.0	541.7	282.0
上半工法CASE2	—	196.5	1441.6	768.7	282.0
上半工法CASE3	20.0	374.1	1621.5	391.2	282.0

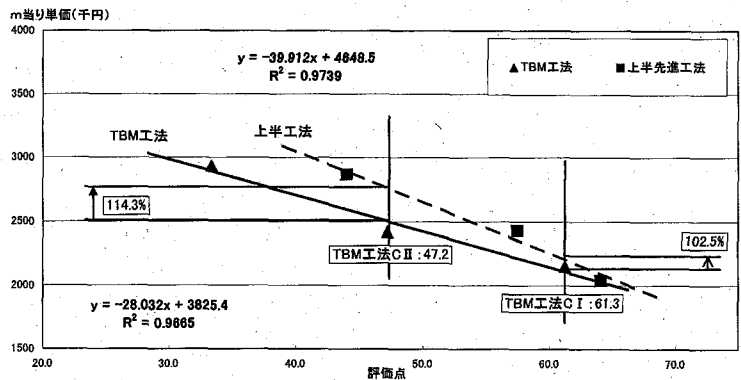


図-3 掘削工法別切羽評価点とm当り施工費の関係

表-4 トンネル施工費用

地山等級	B	CI	CII	DI-1	DI-2	合計
TBM工法	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%
上半工法CASE1	—	64.2%	100.0%	131.7%	108.4%	101.6%
上半工法CASE2	—	46.0%	90.6%	187.0%	108.4%	103.6%
上半工法CASE3	99.4%	95.9%	116.9%	95.1%	108.5%	108.8%