

大断面トンネルにおけるTBM導坑掘進実績から想定した 支保パターンの検証

—第二東名高速道路 浜松トンネル西工事—

Study on the support patterns assumed on the basis of the TBM pilot tunneling records in a large section tunnel project

-Case study of the Hamamatsu Tunnel on the New Tomei Expressway-

望月俊明¹⁾・川越 健²⁾・手塚 仁³⁾・堂藤和雄⁴⁾・田部井雅弘⁴⁾

Toshiaki MOCHIZUKI, Takeshi KAWAGOE, Hitoshi TEZUKA, Kazuo DOTO, Masahiro TAMEGAI

In the Hamamatsu Tunnel project (down lane) on the New Tomei Expressway, the main tunnel is now under construction by enlarging the TBM-bored pilot tunnel by blasting. Before the enlargement, the following were implemented:

- 1) study and determination of support patterns for main tunneling (enlargement), by referring to the record of TBM,
- 2) advanced reinforcement of poor ground locations by driving rock bolts from the TBM pilot tunnel.

When about 50% of excavation of the Hamamatsu Tunnel(down lane) was completed, the data of enlargement work were analyzed. Through the analysis, the authors investigated the effectiveness of the support patterns assumed on the basis of the TBM boring data, and that of the pre-reinforcement. Based on the results of this study, future study themes are presented for establishing ever more reasonable excavation for enlargement.

Key Words : tunnel boring machine, ground evaluation, pre-reinforcement, support pattern

1. はじめに

第二東名高速道路浜松トンネル(下り線)は延長3,262m、掘削断面積約184m²の大断面トンネルである。掘削工法はトンネルボーリングマシン(TBM)により先進導坑を掘進後、発破方式で本坑トンネルの切り上げ掘削を行うTBM導坑先進掘削工法を採用している。本トンネルは平成13年6月にTBM導坑が貫通し、現在、発破方式により両坑口側(東西坑口)から切り上げ掘削を行っている。

なお、切り上げ掘削に先立ち、TBM掘進実績より本坑切り上げ時の支保パターンを検討・想定し、地山不良箇所ではTBM導坑内より高耐力ロックボルトを打設して地山の事前補強を実施している。¹⁾

本報告は、現時点での切羽評価点等のデータに基づいて、TBM掘進実績から設定した支保パターンを検証し、今後の切上げ掘削の合理化の方向性を模索検討するとともに、本坑切上げ前にTBM導坑に埋設したB計測の計測結果に基づいた事前補強工の妥当性を検証したものである。

1) 日本道路公団 静岡建設局浜松工事事務所

2) ㈱熊谷組 土木本部土木設計部地質グループ

3) ㈱熊谷組 土木本部トンネル技術部

4) 熊谷・東急・大本浜松トンネル西工事JV

2. 施工概要

第二東名高速道路浜松トンネル西工事は、静岡県引佐郡引佐町から浜松市滝沢町に至る総延長3,262mの工事で、浜松トンネルの下り線をφ5mのTBM(L=3,147m、発進・到達坑72m)で先進掘進後、発破工法にて本坑の切り上げ掘削を行うものである。TBMは改良型オープンタイプを採用し、機長約15m(内、ルーフのシールド部分は約5m)である。図-1に施工位置図、図-2に標準断面図を示す。

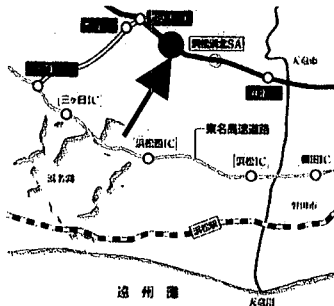


図-1 施工位置図

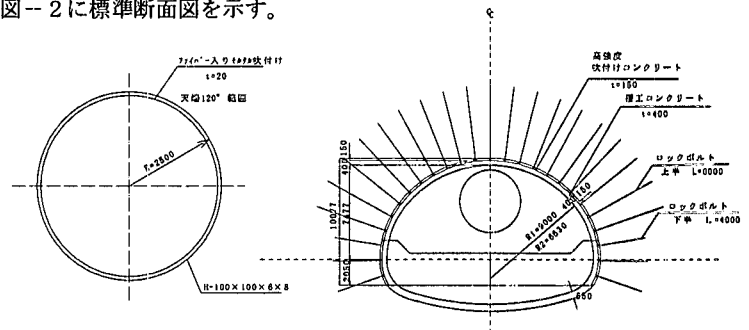


図-2 標準断面図 (C II)

図-3に地形・地質縦断面図(当初想定とTBM掘進実績)を示す。トンネル経過地は標高150~350m程度の丘陵性山地で、途中3箇所で低土被り区間を通過する。トンネルルート上の地山は秩父帯が分布し、概してENE-WSW(起点側)~NE-SW(終点側)走向/N傾斜の地質構造を示し、特徴的な付加体堆積物として、複雑な堆積相を呈している。TBM掘進実績から、基質となる粘板岩(東側坑口側では、片理が発達し千枚岩状を呈する区間が存在)、苦鉄質凝灰岩層中に、チャート・石灰岩・玄武岩(緑色岩)などが含まれた混在岩の層相を呈している。

全体に基質となる岩石中には小規模な剪断面が発達しており、TBM掘進時には天端からの崩落が多発し、一部区間では高さ150~200cm程度の崩落が連続して発生したため、フォアポーリング(l=6m)を施工した。また、地下水はにじみ~しみだしが主体であったが、石灰岩の一部ではぼらからのたまり水の湧出があった。

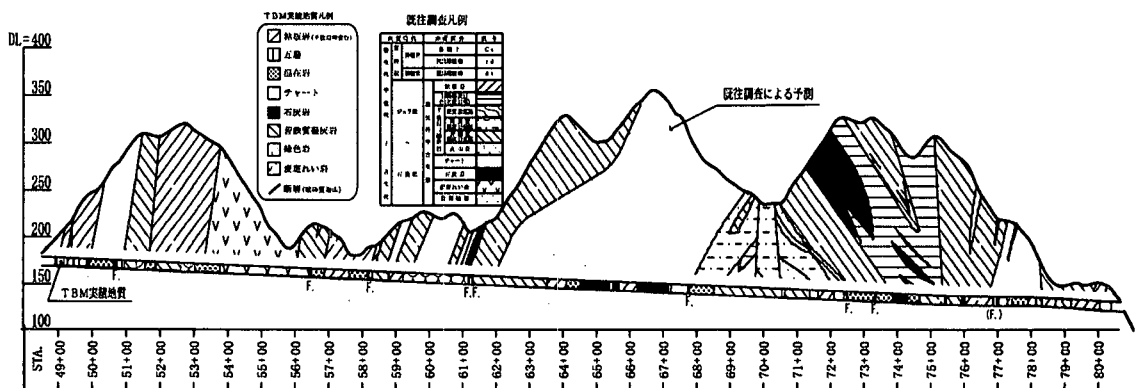


図-3 地形・地質(当初、実績)縦断面図

3. 本坑切り上げ時の支保パターンの想定と事前補強工の概要

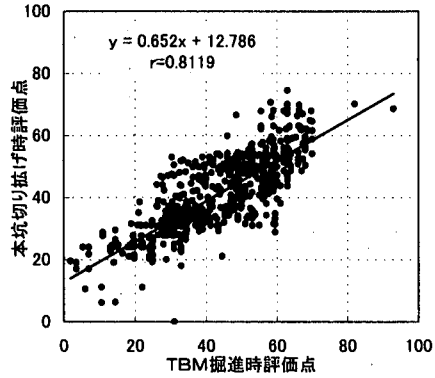
(1) 切り上げ時の支保パターンの想定

本坑切り上げ時の支保パターンは、図-4に示すように先行した上り線のTBMと本坑切り上げ時の地山評価点の相関性から、TBM掘進時と同じ地山等級として想定した。なお、TBM掘進時の崩落面は微小な亀裂に沿った場合が多く、これらの亀裂面ではにじみ~しみだし程度の地下水がついていた。この亀裂面における地下水の状況

は現行の切羽評価点では評価出来ないため、本坑切り上げ時の支保選定時に考慮に入れた。

表－１に下り線での当初設計とTBM掘進実績をもとにした本坑の計画支保パターンをまとめたものを示す。

表－１ 支保パターンの想定（下り線）



			DIIIa	D I	C II	C I	B	坑口弱・坑門坑
TBM 先進導坑	計画	延長(m)	—	747	950	1450	—	—
		%	—	23.7	30.2	46.1	—	—
	実績	延長(m)	—	669	2161.5	330	16.5	—
		%	—	21.3	68.7	9.5	0.5	—
本坑 切り上げ	当初設計の 支保パターン	延長(m)	432	315	950	1450	—	115
		%	13%	10%	29%	44%	—	4%
	TBM掘進実績から 想定した 支保パターン	延長(m)	353	642	1674	478	—	115
		%	11%	20%	51%	15%	—	4%

図－４ TBMと本坑切り上げ時の評価点（上り線）

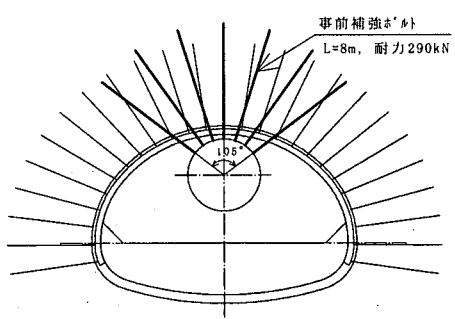
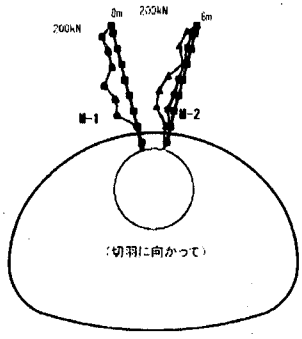
表－２ 事前補強工の設定

		(不安定要因) 大 ← → 小			
	崩落 (崩落度合計:C)	あり (C≥5)			
		C≥15	15>C≥10	10>C≥5	
		TBM掘削実績	D I	C II	—
地質的な要因 (※1)	破碎質地山	レベル3	レベル3		レベル3
	多岩種が局所的に存在 (混在岩・顔互層区間)	レベル3	レベル2 a	レベル2 b	レベル1
	低角度の地質構造 (脆弱な地山が長区間 天端に存在)	レベル3	レベル2 a	レベル2 b	レベル1
	亀裂質地山 (粘土分介在 水が付く場合)	レベル3	レベル2 a	レベル2 b	レベル1
	空洞 (ぼら・大量湧水)	本坑にて対応	本坑にて対応		本坑にて対応

(2) 事前補強工の概要

事前補強工の実施位置は当工区のTBM掘進実績より「崩落度」²⁾と地質性状、TBM支保パターンから決定した。なお、補強対象となった地山の特徴は、「破碎質」、「著しい混在岩相」、「亀裂が発達」、「低角度の地質構造」があげられた。これらについて、表－２に示すランク設定を行い、実施レベルとしては、レベル3の254.3m(全長の8.1%)区間とした。事前補強ボルトの計画に際して、図－５に先行した上り線トンネルで行った事前補強ボルト(耐力170kN、L=8m)の計測結果を参考にした。上り線トンネルの結果によると、発生軸力は最大約150kNで、ボルト軸力は限界耐力に対して余裕が少ないと考えられた。また、ボルト長さは、緩み領域の深度からL=8mで適当であると考えられた。以上の結果から、下り線トンネルでは、事前補強ボルトを先行支保として活用し、本坑断面の天端パターンボルトの削減が可能となるように、高耐力ロックボルト(290kN、L=8m)を採用した。図－６に事前補強ボルトのパターンを示す。

図－５
上り線事前補強ロック
ボルト計測結果

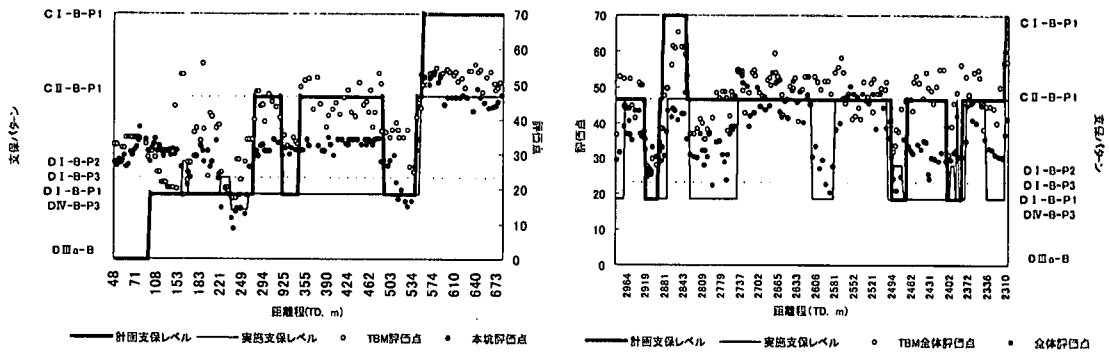


図－６ TBM導坑からの事前補強工

4. 本坑切り上げ時の支保パターンの検証

(1) TBM掘進実績からの想定パターンと切り上げ掘削の実績の比較検討

下り線における両坑口の本坑切り上げ掘削の支保パターン実績(平成14年8月末現在)を図－７に示す。



西坑口

図-7 下り線本坑切り上げ実績

東坑口

図-8 に下り線におけるTBM掘進時と本坑切り上げ時の評価点の関係を示す。この図から、上り線の結果と同様に、切羽評価点は

TBM掘進時 > 本坑切り上げ時の
の関係が読みとれる。

この要因としては、以下のことが考えられる。

- ①トンネル掘削断面の違いによる観察状態の相違
- ②掘削方法の違いによる掘削面の損傷状態

本坑切り上げ時の支保パターンは先に述べたように、TBM掘進実績を基に想定した。そして、本坑切り上げ掘削の実績は、一部区間で想定した支保パターンより1ランク下のパターンで施工した区間はあるが、地質区分、地山の状況、断層破砕帯の位置などはほぼ想定どおりで現在推移している。このことから、本坑切り上げ時における想定支保パターンと実績支保パターンの差を評価点に着目し、以下に検討する。

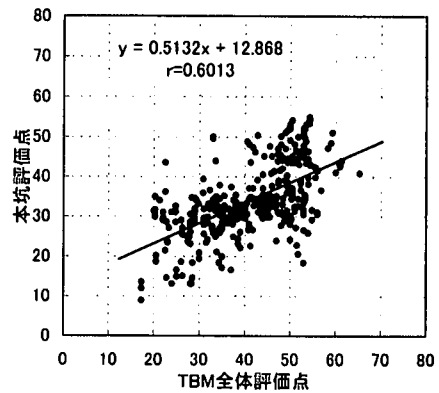


図-8 TBM掘進時

と本坑切り上げ時の評価点

(2) 評価点に影響を与える要因

TBM坑が本坑断面の天端付近に位置することから、TBM掘進時の評価点と本坑切り上げ時の天端部評価点の相関性が推測される。図-9 に切り上げ掘削時の全体評価点と天端部評価点との関係を示すが、相関性はC II の場

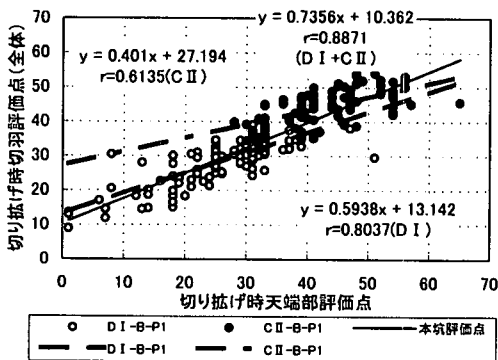


図-9 本坑切り上げ時天端部の評価点

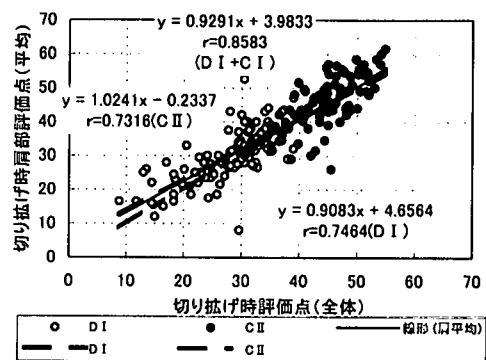


図-10 本坑切り上げ時肩部評価点

合では $r=0.614$ とやや低くなっている。これに対して、図-10は本坑切り上げ時の肩部の評価点（左右肩の平均値）と全体の評価点の関係を示しており、両者の関係は良好な相関性が認められる。

(3) 評価点に影響を与える評価項目

図-11に本坑切り上げ時の肩部の評価項目と評価点の関係を示す。

当トンネルでは、評価点に影響を与える項目は「湧水量($r=0.2093$)」を除けば、概ね良好な相関性を示し、評価項目は相関性の高いものから、{強度→割れ目状態→風化変質→割れ目間隔(→湧水)}の順となっている。これは、基質となる粘板岩、苦鉄質凝灰岩と塊状の石灰岩、チャート、緑色岩との圧縮強度が切羽評価点に重要な影響を与えているものと考えられる。また、亀裂性の地山であるため、亀裂の状態や風化変質状態も切羽評価点と高い相関性を示す結果となった。これらの評価項目の相関性は本坑切り上げ時の天端部評価点でも同様な傾向を示している。

一方、TBM掘進時における評価点と各項目の関係をみると、相関性の高いものから、{風化変質($r=0.7723$)→割れ目状態($r=0.7742$)→圧縮強度($r=0.6810$)→割れ目間隔($r=0.5510$)}の順となり、「圧縮強度」の項目が本坑切り上げ時とは異なる傾向を示している。図-12、13に「圧縮強度」に着目した本坑切り上げ時とTBM掘進時の切羽評価点と天端部評価点の相関性を示す。この図から、TBM掘進時には、本坑切り上げ時よりもやや低い相関性を示している。

以上のことから、TBM掘進時と本坑切り上げ時の評価点で相関性に差が認められた要因として、評価項目の「圧縮強度」が大きく寄与しているものと考えられる。

なお、本坑切り上げ時の切羽では、TBMのグリッパー付近の鏡面からの岩塊の抜け落ちが度々発生していることから(写真-1)、TBM掘進時と本坑切り上げ時で、「圧縮強度」に影響を与える他の要因としては、「鏡面の安定状態」も考えられる。

特に、この傾向は粘板岩などの亀裂の発達した地山で顕著に認められ、西坑口側の粘板岩を主体とする地山では、TBM掘進実績から設定した支保パターンと実績支保パターンの違いが連続した区間で発生している。

5. B計測結果に基づいた事前補強工の有効性の検証

当トンネルで実施した事前補強ボルト工における計測結果を図-14、15に示す。計測は事前補強実施区間No. 50+10.2の位置で実施した。当地点は、

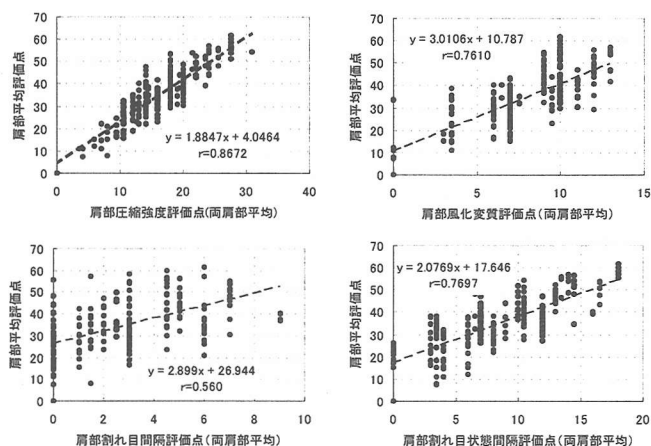


図-11 本坑切り上げ時の肩部評価点(両肩部平均)と評価項目の関係

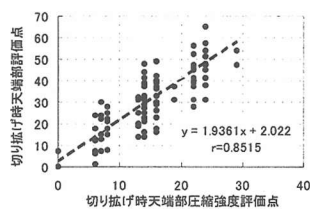


図-12 本坑切り上げ時 天端部の評価点

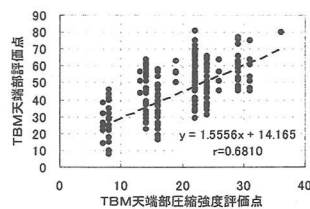


図-13 TBM掘進時 天端部の評価点

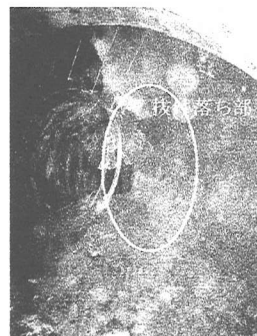


写真-1 切羽鏡面からの抜け落ち状況

在岩相を呈し、岩種が激しく変化し、TBM掘進時に比較的規模の大きな崩落が多発した区間である（崩落度6～16）。なお、同区間は事前補強工の実施区間の中では、地山状況、崩落度の点から、ほぼ全体を代表する地点と位置づけられる。

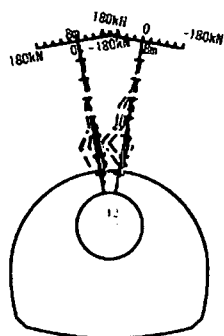


図-14
事前補強区間
ロックボルト

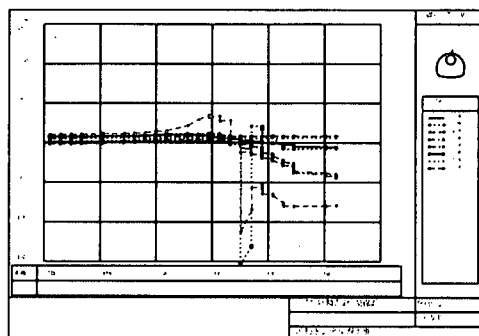


図-15 事前補強区間ロックボルト軸力の経距変化

図-14にロックボルト軸力分布図を示すが、この結果よりロックボルトの長さは $L=8\text{m}$ で、十分であったと推測できる。図-15はロックボルト軸力の経距変化図を示すが、この結果より、本坑切羽が到達する12m手前で、ロックボルトに軸力が発生し、切羽到達直前の3m前で深度1.5m、2.5mの部分で軸力が急激に大きな値を示していることがわかる。これは、掘削切羽の影響により地山の緩みが発生したためと考えられる。この際のボルト軸力は、最大値で180kNを示し、ロックボルトは掘削時の切羽の安定に大きく寄与していると推測される。また、これらの計測結果から、耐力290kNの高耐力ロックボルトを採用した事前補強工がほぼ妥当であったと考えられる。

6. まとめと今後の課題

浜松トンネル下り線は8月末現在で、全長の約半分の切り上げ掘削を終了しており、現時点でのデータを検討した結果を以下にまとめる。

①TBM導坑掘進実績から想定した本坑切り上げ時の支保パターンに乖離が生じた区間がある。これは、TBM掘進時にグリッパー位置の地山の損傷が切り上げ時の鏡面の評価を下げた結果と考えられる。

特にこの傾向は、強度が相対的に弱い粘板岩、苦鉄質凝灰岩などの区間で顕著になっている。

②事前補強工はロックボルトに発生した軸力の結果から、ボルト長さ、耐力ともに妥当なものであったと考える。

この計測結果から、TBMからの事前補強工は本坑切り上げ時の先行支保としての活用など合理的な施工に大きく寄与するものであると推測される。

今後の課題として、現在、本坑トンネルの計測結果を含めたデータは、逐次解析中であり、その結果を基に地山性状に応じた支保構造など、合理化の方向性を検討する予定である。また、事前補強工が本坑切上げ時に大きく寄与していると考えられることから、事前補強施工区間における天端パターンボルトの削減など、支保の合理化の方向性を検討する予定である。

(参考文献)

- 1) 望月・川越・手塚・堂藤・田部井：「大断面トンネルにおけるTBM導坑の坑壁画像を利用した地山評価手法の研究—第二東名高速道路浜松トンネル西工事における地山評価事例—」(2001)、トンネル工学研究論文・報告集第11巻
- 2) 日本道路公団：設計要領第三集トンネル本体工建設編（第二東名・名神高速道路トンネル）pp19