

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—

Study of rock evaluation with tunnel side wall image in TBM pilot tunnel - 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 MOCHIDUKI, Takeshi KAWAGOE, Hitoshi TEDUKA, Kazuo DOTO, Masahiro TAMEGAI

The TBM pilot tunnel has several important roles for the construction of the main tunnel, especially to obtain the geological information beforehand in starting to enlarge the large-scaled main tunnel. In order to achieve the rational works of the main tunnel, therefore, it is necessary to establish the method to analyze the geological information and to evaluate the ground characteristic as soon as possible. We develop the observational system using the digital video camera to get the geological image data of the excavated surface safely in the narrow space. And this system is applied to the TBM pilot tunnel of the HAMAMATSU Tunnel on the New Tomei Expressway. It is able to evaluate in advance the geological feature of the main tunnel efficiently, combining the geological information from the above-mentioned system with the engineering geological index. This paper deals with the observation system newly developed, and the outcome from this system.

Key Words : tunnel boring machine , image of excavation surface , image analysis , ground evaluation

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3,262 m、掘削断面積約184 m²の超大断面トンネルである。掘削方式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、発破工法で本坑トンネルの切り上げ拡幅を行う。

TBM導坑が採用された理由の一つに、導坑掘進時の地山情報が本坑切り上げ時の重要な事前情報となることあげられる。また、本坑切り上げ前に、導坑から事前に地山の補強・改良を実施できる点がある。¹⁾

この場合、TBM掘進方法による各種の制約条件での地山観察と掘削地山の地質性状を十分考慮した地山評価手法により事前補強の検討を行う必要がある。これらの点を受け、本報告ではTBM導坑掘進時に実施した下記の2点について述べるものである。

- ① TBM掘進での制約条件下で、導坑側壁の情報を確実・安全・効率的に得るための画像処理システムの開発
- ② 適切な事前補強工を実施するための地山の評価手法の検討

-
- 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) 正会員 ㈱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 3,716 m の工事で、浜松トンネルの下り線(掘削断面積約 184m²、延長 3,262m)をφ5 m 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抜け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 15 m (内、ルーフのシールド部分は約 5 m) である (TBM 先進導坑は平成 12 年 10 月に初期掘進を開始して平成 13 年 6 月に掘進を終了した)。図-1 に施工位置図、図-2 に標準断面図を示す。

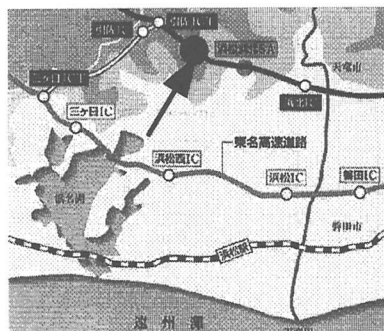


図-1 施工位置図

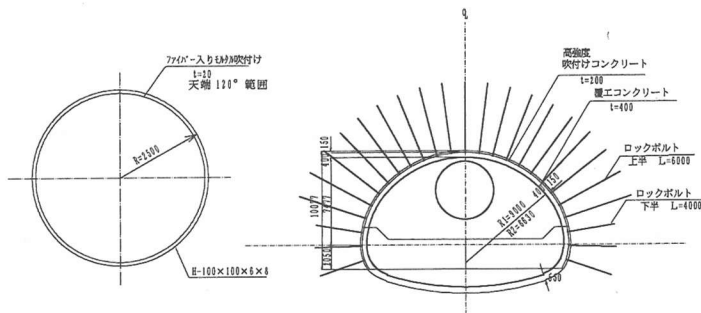


図-2 標準断面図 (C II)

トンネル経過地は標高 150~350 m 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。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は、チャート・石灰岩・玄武岩 (緑色岩) などが含まれて混在岩の層相を呈している。また、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いる。

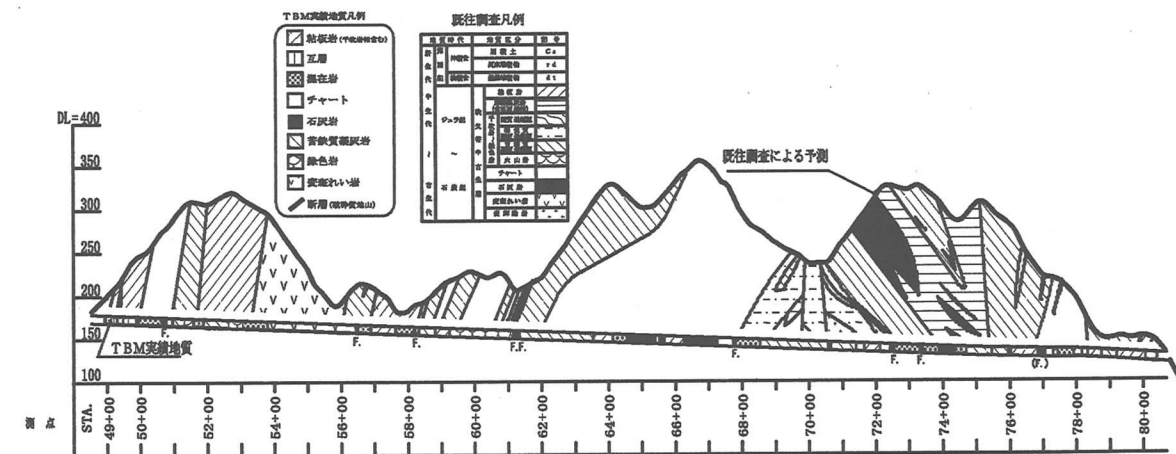


図-3 地形・地質 (当初、実績) 縦断面

3. 地山評価上の問題点

地山を評価する上で、切羽での地山観察は必要不可欠なものである。この地山評価は大別すると、岩種や地質構造などの地質的評価と、岩質や地山挙動などを考慮した切羽評価点を用いる工学的評価があげられる。しかし、TBM を用いたトンネル掘削の場合、1) マシン近傍では、クリノメーターが使用出来ない、2) 一次支保設置前

の危険な状況下での地山観察になる、3)高速施工に伴って観察時間が制約される、などの制約条件がある。

浜松トンネルは先に述べたように、本坑切り掘り時の地山状況の把握と事前の補強・改良を目的の一部として、TBM導坑先進掘削工法が採用されている。そのため、上記の制約条件の中で、確実・安全・効率的に側壁の地質情報を取得する必要があった。また、TBM掘進時の地山の評価区分とその挙動から、本坑掘削時の地山状況を有機的に結びつけ、事前補強が必要な区間についての検討をする必要があった。

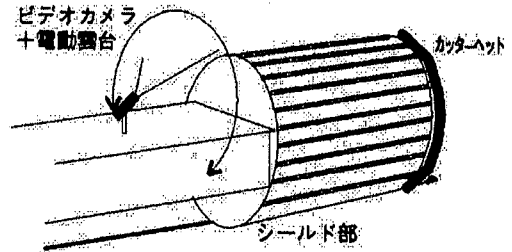


図-4 カメラの設置位置

4. TBM坑壁画像の取得と処理

TBM導坑の坑壁情報を確実・安全・効率良く得るため、デジタルビデオカメラによる坑壁画像の取得方法を開発した。

(1)撮影システム

TBM掘削時の坑壁画像の撮影には、掘削サイクルの支障とならないこと、カメラの設置位置は安全の面から支保完了区間が望ましい。このことから、坑壁天端～側壁部を斜め後方から、短時間でかつ連続した展開写真となるような撮影方法を構築した。

坑壁画像の撮影には撮影画像の処理（補正・結合）が容易なデジタルビデオカメラを採用した。

デジタルビデオカメラの概略の設置位置を図-4に示し、システムの概要を図-5に示す。TBMの施工では各坑壁画像を常にTBM本体のある定点で撮影した場合、坑壁とカメラの位置はほぼ一義的に決定できる。この状態で、カメラを等速度でトンネル周方向に回転させると、画像の処理を経てラインカメラと同様の画像を得ることができる。図-6に画像処理のフローを示す。

この時の解像度は雲台の回転速度とビデオ撮影速度およびカメラと坑壁の距離により決めることが可能である。

撮影は一掘進(1m～1.5m)終了後、次工程への段取替え中に実施する。架台に予めセットしたビデオカメラをTBMマシン本体の固定点にセットし、後方よりリモコンにて操作を行う。撮影終了次第、カメラと架台を撤去する。この一連の作業は1分以内で終了する。

(2)取得画像の緒言と地質展開図の作成

本工事ではTBM本体の設備の制約から、撮影は約150°の範囲(天端中心に左右75°)で実施した。また、ビデオ撮影速度を30枚/秒、カメラの回転を1.25°/秒とした。

この時、理論上の解像度は撮影距離が最も近い天端付近で2mm/ドット、最も遠いSL付近で4mm/ドットとなるが、

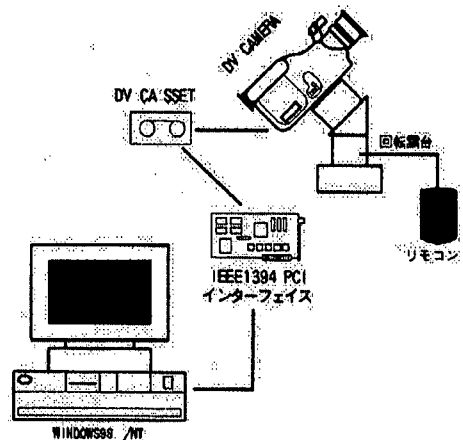


図-5 システム概要

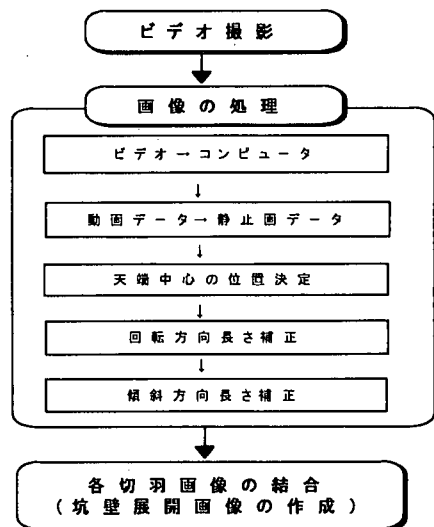


図-6 画像処理フロー

現地では天端付近で1 mm 幅のレーザー光が認識可能であった。

撮影後は、トンネルセンター位置の補正、回転方向とカメラの傾斜角度の補正を実施することで、切羽画像をトンネル軸から坑壁を見たのと同等の画像に処理し、各切羽画像を繋ぎ合わせて、連続した展開画像とした。この画像と切羽における目視観察の結果をあわせ、パソコン上で地質展開図を作成、天端崩落箇所の詳細な抽出などを行った。ここで作成した地質展開図中の情報は全てデジタル化されていることになる。図-7に処理後のTBM坑壁画像と作成された地質展開図の例を示す。

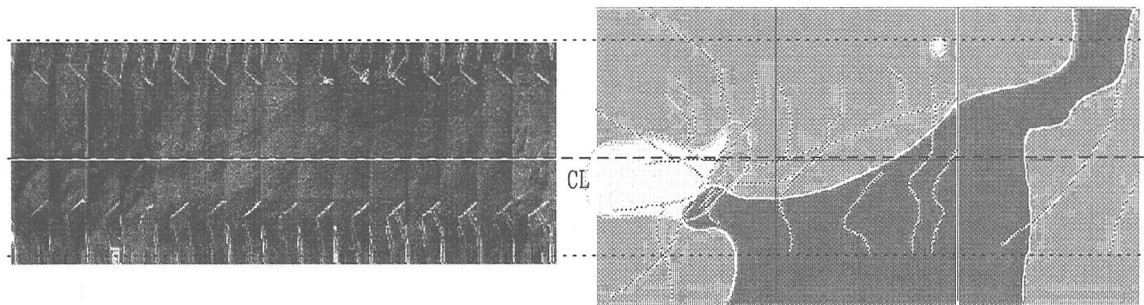


図-7 坑壁展開画像（左）と地質展開図（右）（L=15 m）

5. 地山の評価と事前補強工への展開

TBM導坑からの事前補強工を検討する上では、TBM掘進時の情報から本坑切り抜け掘削時の地山状況を的確に想定することが求められる。

TBM掘進時の地質情報から本坑切り抜け時の地山状況の検討の流れは、①TBM導坑の実績から得られた地質情報（切羽観察シート、坑壁展開画像および坑壁の地質精査）を整理し、②変状（崩落箇所など）発生状況と地質（構造・強度など）および評価区分の関係を整理する。さらに、③デジタルデータとして作成された展開図から主要な地質境界、節理、断層などの線としての情報の走向傾斜を算出し、本坑の想定縦断面図の作成を行った。これらのデータをもとに、④本坑切り抜け時の地山状況・挙動を想定した。

(1)地質的検討

坑壁の連続展開画像と地質調査から得られた情報と地山変状部および評価区分との関係を整理した。

TBM掘進時の地山の明瞭な挙動は、坑壁の崩落現象として現れる。この崩落の規模・状況によっては、本坑断面外への緩みの発生も懸念され、本坑切り抜け時における不安定地山区間となることが想定される。浜松トンネル下り線のTBM掘進時に発生した崩落状況の特徴は大きく分けて、「脆弱な地山

から広い範囲で小岩片が剥離する場合」と「比較的硬質な地山中で節理などにより分離された岩塊が抜け落ちる場合」が認められた。このような崩落の傾向を「崩落度²⁾」（図-8）により置き直すと、以下ようになる。

- ・全周において何らかの崩落が発生した場合の最小値（1点×5箇所）
- ・一箇所のみで大規模な抜け落ちが発生した場合（5点×1箇所）

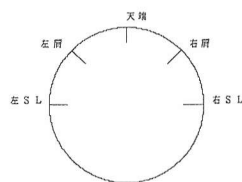
このことから、「崩落度の合計 ≥ 5 」の区間を、本坑の切り抜け時、天端の剥離や抜け落ちについて特に注意を要する地山として便宜的に抽出した。

図-9に掘進地山の評価結果の一部を示す。同図において、切羽観察シートの観察項目の内、特に地山の挙動

地山崩落度の定義：
上半を天端、肩、S.Lの5箇所に分け、崩落度に応じて
各々0～5の点数をつけた合計点（良：0点～悪：25点）

周辺の壁面との比較	
0点	崩落なし
1点	20cm未満の凹部
3点	20cm以上50cm未満の凹部
5点	50cm以上の凹部

1m以上のときは測定値を併記する。



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）

図-8 崩落度の定義

(崩落) に対して、要因の高いと考えられる項目について○を付けている。

この評価結果から、TBM掘進時に「比較的規模の大きな崩落が発生した区間(湧水状況を考慮)」は地質的に以下の地山状況の箇所に多く発生していることがわかった。

- ・ 破碎質地山 (大規模な破碎ゾーンが存在する)
- ・ 多岩種が出現する (混在岩・頻互層区間)
- ・ 低角度の地質構造 (脆弱な地山が長区間天端に存在)
- ・ 亀裂質地山 (粘土分介在・亀裂に水が付く場合)

この内、亀裂質地山では切羽観察簿の湧水の項で「なし、滲水程度」と評価される区間においても、比較的規模の大きな崩落が発生した。TBM掘削時の坑壁の崩落はこれらの要因が絡み合って発生していた。

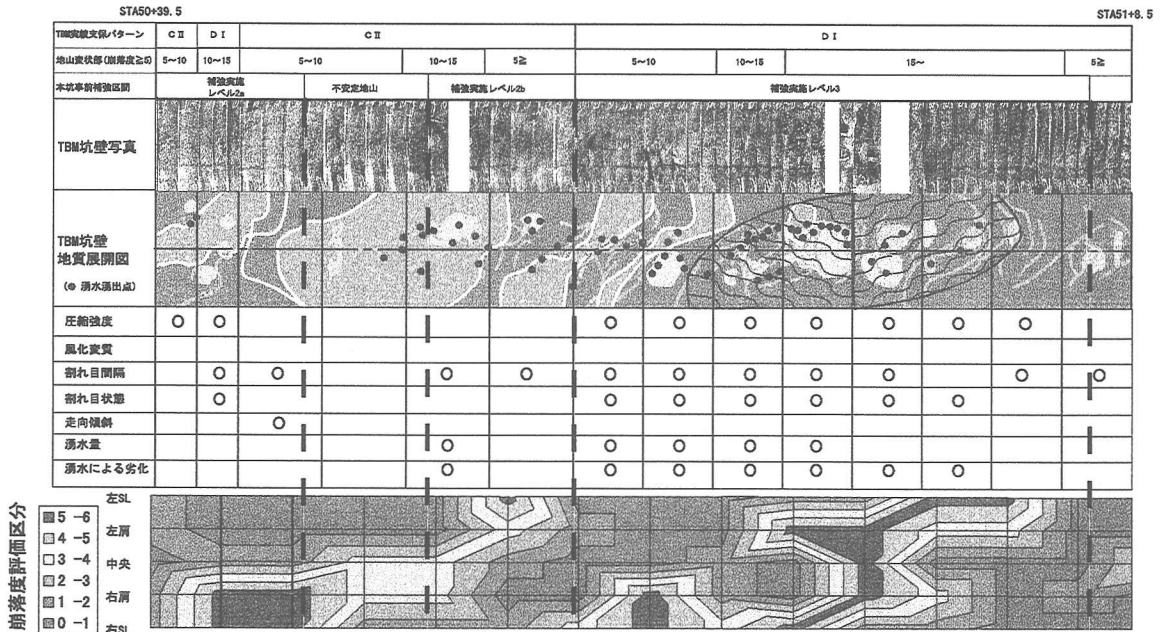


図-9 地山評価結果の一例

(2) 不安定地山の抽出

(1)の結果から得られた地山の挙動(崩落・剥離などの現象)と地質状況をもとに、本坑掘削時に特に注意を要する区間として20区間(全長970.0m)が抽出された。

次に、地質的に抽出された不安定地山区間において、事前補強の実施位置、および必要度(実施レベル)を設定するために、図-10に示す基準を作成した。図-10は「地質要因」と「崩落度」およびTBMの実績支保を各要因として、4段階に事前補強の実施レベルを分けたものである。表-1に実施レベルを示す。

以上の検討結果から、事前補強の対象区間は631.8m(20.1%)となり、その内、実施レベル3は254.3m

(8.1%)、実施レベル2aは115.0m(3.7%)、実施レベル2bは72.0m(2.3%)、実施レベル1は190.5m(6.1%)

		(不安定要因) 大 ← → 小			
地質的な要因(※)	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	—
	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・頻互層区間)	レベル3	レベル2a	レベル2b	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2a	レベル2b	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2a	レベル2b	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

図-10 事前補強工を対象とした地山の評価区分

なお、事前補強工は経済性・工期および隣接する上り線のB計測結果より実施レベル3の区間を対象とし、高耐力ロックボルト（290kN， $l=8$ m）を用いたパターンボルディングを基本として実施した。

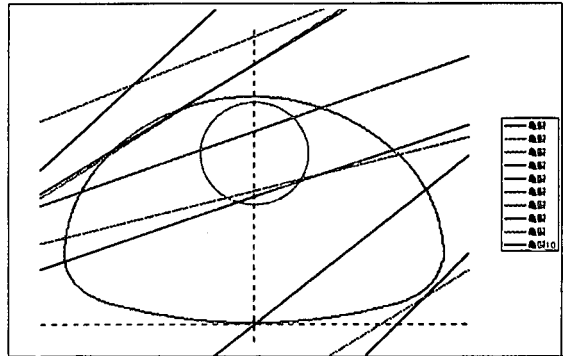
TBM導坑からの事前の補強工の検討、および切り
 上げ時の支保パターンを検討する上で、地質的な評価
 の他に、定量的評価（数値解析など）を実施する必要
 も考えられる。今まで述べてきたように、地質データ
 をデジタル化したことで、図-11に示すような、切
 羽の任意位置における線情報の想定を自動化すること
 が可能となり、地質観察結果を迅速に定量的な評価の
 へ展開することが可能となった。

④デジタルカメラを用いたシステムを開発すること
で、TBM導坑の坑壁展開画像を全線において取
得することができた。このシステムの活用により
な地質情報を得ることができた。さらに、得られ
た地質情報に基づき、掘削時の地質性状を予測した。

③本地山評価手法で得られた地山データを用いた数値解析から、本坑トンネル切り上げ時の支保パターンの妥当性を早期に検証する。

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

レベル3	地山状況が若しく不安定で、本坑切り上げ時に地山の崩落、地質的に予想されるため、事前補強工を必ず実施する。
レベル2	地山状況が不安定で、本坑きり上げ時に天窓、壁の安定性が懸念されるため、事前補強工を実施することが望ましい。 2 a : TBM掘削区間でD I 地山 2 b : TBM掘削区間でC II 地山 特に2 b において事前補強を実施しない場合、本坑切り上げ時に、補助工法の採用を検討することが望ましい。
レベル1	地山状況が不安定であるが、TBM掘削時の崩落度が比較的低く(10%以下)、上記のレベルに較べれば本坑地山の崩みは小さいと思われる。 事前補強工の実施が望ましい。 事前補強を実施しない場合は、本坑切り上げ時には切羽状況に応じて補助工法の実施が望まれる。
本坑にて対応	地質的には不安定な地山状況ではあるが、TBM掘削時の崩落度が低く本坑切り上げ時の切羽状況により対応する。



- 128 -