

国内初の鉄道トンネルへの全断面TBM工法の適用に関する検討

PLAN OF FULL FACE TBM METHOD FOR THE FIRST TIME RAILWAY TUNNELS IN JAPAN

佐藤 憲一¹⁾・岡野 法之¹⁾・高村 重正¹⁾・小久保 博¹⁾

Ken-ichi SATO, Noriyuki OKANO, Shigemasa TAKAMURA and Hiroshi KOKUBO

A part of the Agatsuma Line (East Japan Railway Company) will sink in the Yamba Dam which is being constructed by Ministry of Construction and be rerouted for about 10km. The new line will have three tunnels. We decided to adopt the TBM method due to the medium conditions at the site and surrounding environments for the longest Yamba Tunnel (4.5km).

In the case of Yamba Tunnel, we consider that it is important for high speed excavation and quality keeping to perform detailed geological surveys, modify the TBM and apply an effective support system since the full face TBM method has not been used for railway tunnels in Japan.

Key Words: railway tunnel, full face TBM, support pattern

1. はじめに

現在、建設省が建設を進めているハツ場ダム事業により、JR 吾妻線（単線）の一部が水没し、約 10km の線路付替が必要となった（図-1）。その付替線は約 8km が 3 つのトンネルで計画されており、そのうち、もっとも長いハツ場トンネル（約 4.5km）においては、地山条件、周辺環境および経済性等から TBM 工法の採用が決定している。

本報告では、鉄道トンネルに適応可能な TBM の仕様およびシステムと支保パターンについて検討した結果を述べる。

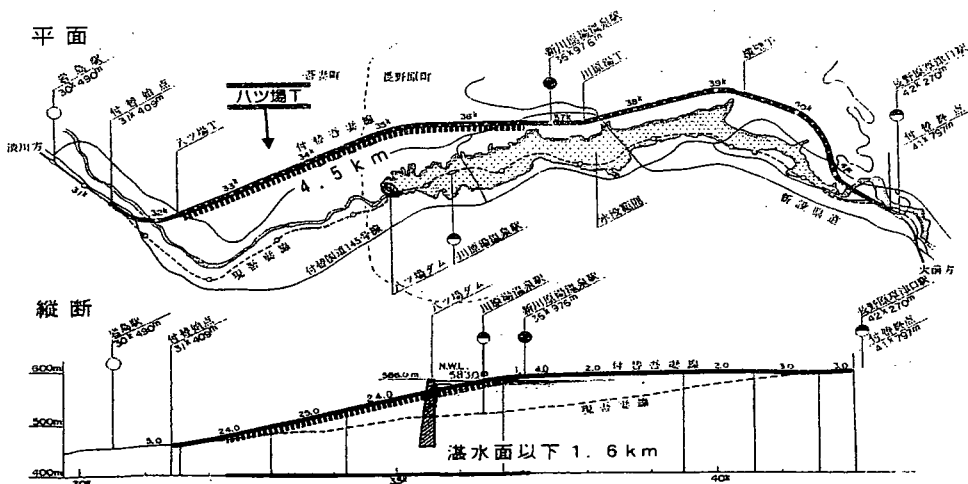


図-1 吾妻線付替概要

1) 正会員 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所

2. ハツ場トンネルの概要

2.1 計画概要

吾妻溪谷に沿ったハツ場トンネルは、途中に進入路も無いため、片押し施工が条件のひとつとなっている。また、ダム湛水後は湖面以下となる施工延長が 1.6km あるほか、ルート終点方では、100m 足らずの距離に温泉街がある。

2.2 地質概要

当初の地質調査では、第三紀のハツ場安山岩質凝灰岩、凝灰角礫岩、貫入岩類であり、一部に弾性波低速度帯が見られるものの全体的には良好な地山状況であった。表－1 に当初の地質調査の結果を示す。

表－1 地質構成の概要

地 山 等 級		Ⅳ _N	Ⅲ _N	Ⅱ _N	Ⅰ _N
T B M 施 工 (4,300m)		81%	13%	4%	2%
平	弾性波速度 [km/s]	4.0	3.0	2.5	1.5
均	一軸圧縮強度 [kgf/cm ²]	1,300	600	300	100

2.3 施工計画上の課題と工法選定

トンネル計画上の課題は、2.1 の条件から

- ・ 高速掘進が可能であること
- ・ 地山を極力緩ませず、漏水対策が容易なこと
- ・ 施工による騒音、振動が少ないこと

さらに、2.2 の地質を勘案した結果、本トンネルは TBM による全断面掘削工法が適当と判断し、選定した。

3. TBMの検討

3.1 地質の詳細把握とマシンタイプの選定

国内での TBM 工法の実績では、パイロット坑であるにもかかわらず、特徴である平均高速掘進は記録されていない。要因としては、掘削断面周辺地質の把握と地山に適した機械掘削システムの検討が不十分と考えられる。また、本トンネルの特徴は国内で施工に用いられた多くの TBM に比べ断面が大きい（単線、D=6.7m）。さらに、全断面掘削であるため、特に施工上の課題として、

- ①機械推進反力としての岩盤強度、切羽、坑壁の自立性
 - ②異常出水の有無
 - ③岩盤強度の分布状況
 - ④地山に適したマシンおよび支保
- の検討が必要と考え、当初の地質調査に加え、ルート全体の地中電磁波による比抵抗探査を行った(図－2)。
- さらに、掘削位置に出現する低比抵抗値区間については、追加ボーリングにより変質の度合いを確認し、解析した結果、①に関しては変質帯や破碎帯の粘土化、土砂状地山の連続性は見られないが、肌落ちや小規模な崩落には注意を要する。②に関しては全般的に透水性（ $5 \times 10^{-5} \sim 1 \times 10^{-6}$ ）が小さく、水頭も最大 100m 程度であり、大きな問題にはならないと考えられるが、貫入岩の周辺および弾性波低速度帯では突発湧水に注意を要する。③については、コアの一軸圧縮強度と比抵抗値（ $10 \sim 1,800 \Omega \cdot m$ ）との相関および弾性波速度との調和から低速度帯は、比抵抗値急変点（3ヶ所）に出現することが明確となった。

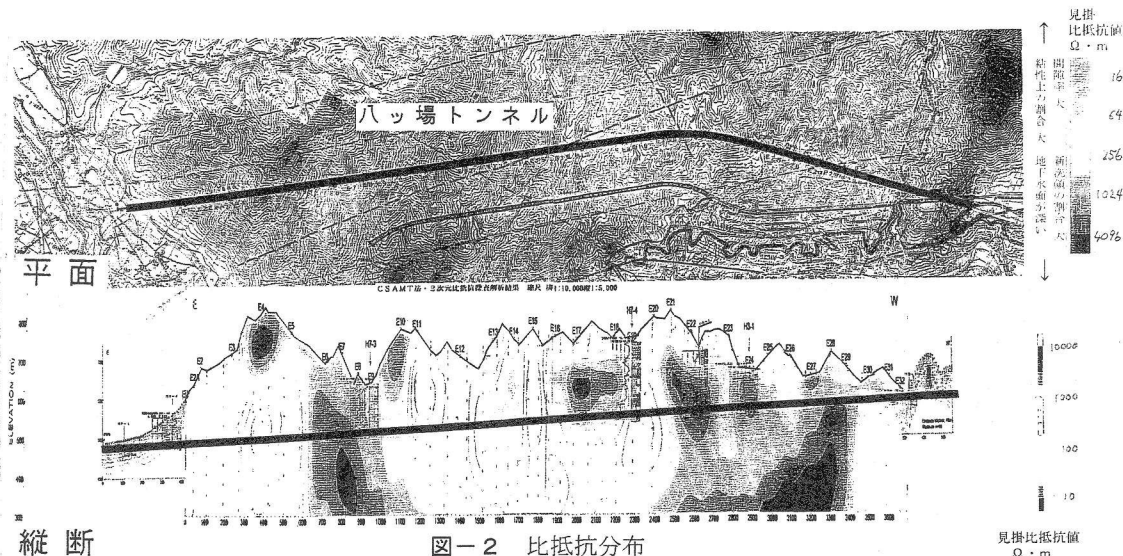


図-2 比抵抗分布

以上より、TBM 施工区間の地山のほとんどが堅岩部（全延長の 94%）であり、弱層部での対策工の取りやすさも考慮し、オープンタイプを選定し、良好地山での高速掘進と不良地山での的確な対策工を行うこととした。

3.2 高速掘進および鉄道トンネルとしての品質の確保

TBMの特徴である高速掘進の確保には、純掘進速度の向上と後続する支保作業のスピードアップが重要となる。検討結果を以下に示す。

①純掘進速度の確保

- ア. 大口径カッタの使用とピッチの縮小
- イ. 動力のパワーアップ（スラスト力、トルク、回転速度のアップ）
- ウ. 掘削 1 ストロークの延伸
- エ. 地質成分に適した耐摩耗ディスクカッタの使用
- オ. 高圧ケーブル、換気管などの延伸タイムの短縮（カセット化）

②支保作業のスピードアップ

効率の良い支保を行うためには、地山の緩みを最小限に抑えることが有効であると考え、ルーフサポートの前端部（約 0.4D 付近）で掘進と並行して一次吹付けを行うシステムを計画した。これにより二次支保の軽減、スピードアップ、安全性が図れる。また、一次吹きで崩落が止まらない場合には、ルーフサポート後端において、鋼製支保と金網の合体をエレクターにより自動化する。（図-3）

③蛇行対策（グリッパタイプ）

鉄道トンネルにおいて、内空断面の確保が大前提であり、蛇行が許容範囲を超えると、覆工コンクリート厚、インバート裏込め注入厚に影響が出るほか、電気設備の支持ボルト埋込み長さが確保が困難となる（止水シートに穴があく）。したがって、鉄道トンネルにおいては蛇行の管理が非常に重要となる。

ハツ場Tにおいては、蛇行余裕を 50mm とし、硬岩部が大半を占めることから、グリッパ盛替時間、マシン長が短く、掘削中にも方向制御可能なシングルグリッパを選定し、盛替時間の更なる短縮とリアルタイムでの蛇行修正システムの開発を進める。

④メンテナンスフリー

当トンネルはダム湛水面より低くなる延長が 1.6 km もあるため、ダム完成後の漏水対策が重要であ

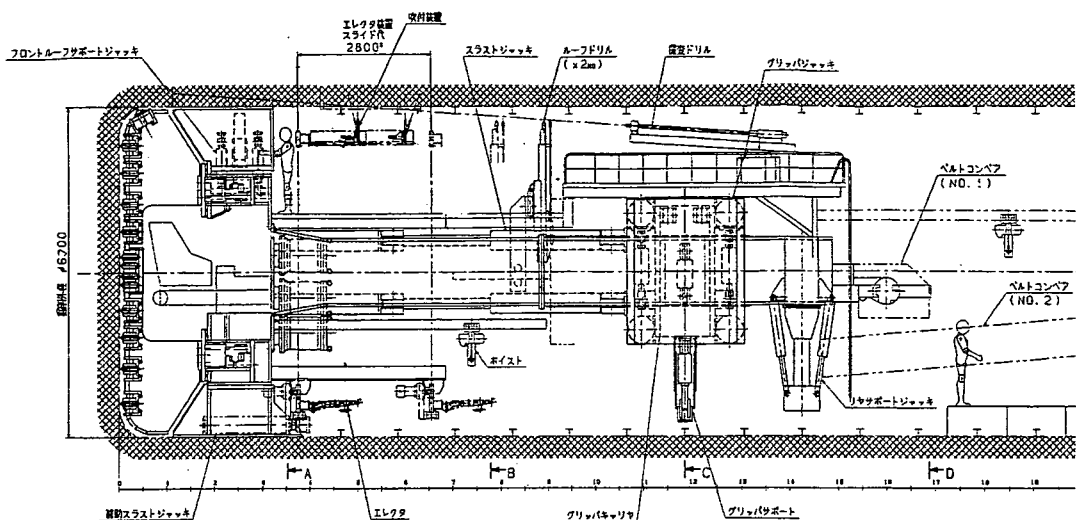


図-3 マシン縦断面

る。この点において TBM 工法は発破工法に比べ、岩盤を緩ませないことや掘削面が平滑であるため、止水シートの施工に有利である。しかしながら、止水シートはインバート部には施工しないため、インバートブロックと地山との注入による密着が必要である。特に、崩落物と漏水は将来の噴泥要素となるため、掘削面の清掃は厳守しなければならない。現時点では、バケットによるズリの片付けのほか、ウォータージェットでの洗浄とバキュームポンプでの吸水を考えている。

⑤建築限界と余裕空間の利用

単線トンネルに TBM を用いた場合、建築限界と円形断面との差が大きい。そのために、余裕空間を利用した安全通路を設置し、40m ごとの小型待避所を省略する。(図-4 参照)

4. 支保の検討

通常の鉄道単線トンネルは図-4(a)に示すような馬蹄形をしており、その設計は地山等級ごとの標準支保パターンによりなされている。しかしながら、今回は TBM 掘削なので断面が円形(掘削外径 $\phi=6.7\text{m}$)となる。すなわち、非常に安定した形状となり、支保が軽減できると考

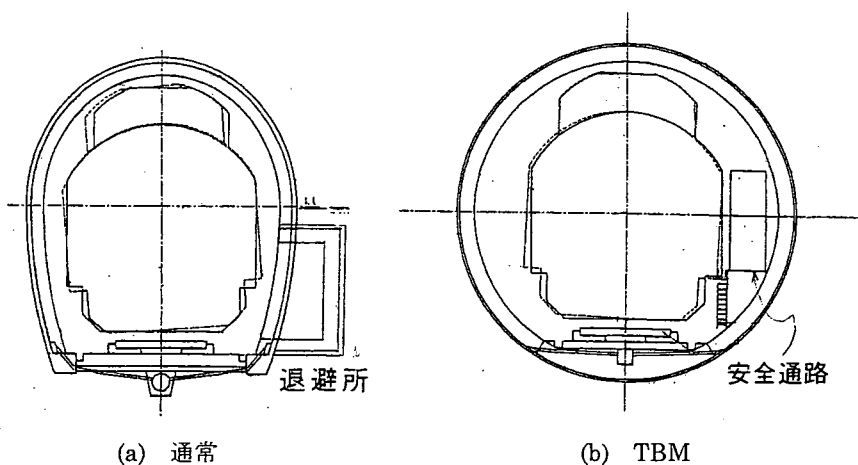


図-4 鉄道単線トンネル断面の比較

え、FEM 解析により一次支保の軽減に関する検討を行った。FEM 解析は破壊接近度法¹⁾による 2 次元非線形弾性である。

4.1 解析対象およびモデル

解析はボーリング調査結果のある IV_N および Π_N と、 I_N を対象とした。

モデル化の範囲は、鉛直方向がトンネルインバートから下端までを2D、クラウンから上端までを10D、水平方向については対称性を考慮して2分の1モデルとし、スプリングラインから境界までを4Dとした。

境界条件は、底面を固定、側面をローラー支承、上面をフリーとした。

トンネル近傍のメッシュを図-5に示す。

4.2 解析条件および解析結果

入力物性値および解析結果を表-2に示す。 IV_N 、 Π_N の単位体積重量、粘着力、内部摩擦角、安定時の弾性係数およびポアソン比はボーリングコアの室内試験に基づいて算出した。残りの弾性限界、非線型パラメータと I_N の入力物性値については文献1)によった。これらの物性は、全ての要素に適用した。

解析モデルは、実際の土被りよりも小さいが、不足分はメッシュ上面に分布荷重として与えた。

応力解放率については、TBM工法の場合、支保作業がNATM工法より遅れてしか行うことができず、NATM工法よりも大きくなると考えられるが、今回は、支保に対して安全側の検討となるように、NATMの一般的な値である30%とした。

インバートブロック部分には吹付コンクリートを施工しない計画であり、当該部分の吹付コンクリートが支保に及ぼす影響を調べる目的で、 I_N の解析において比較した。

解析結果を見ると、 IV_N および Π_N は素掘りでも十分であり、 Π_N において、吹付けコンクリートを考慮しても 28kgf/cm^2 の圧縮応力が生じる程度である。また、 I_N についても10cmの吹付けで十分であるとの計算結果となった。インバートブロック部分の吹付けコンクリートについては、その有無がコンクリート応力に与える影響は非常に小さい。

4.3 支保パターン

4.2の検討結果を踏まえ、支保パターンの検討結果(標準支保パターン²⁾との比較)を表-3に示す。基本的には、解析結果より、通常の掘進サイクルからロックボルトは省略できるのではないかと考える。地山等級ごとに見ていくと、 IV_{NP} については肌落ち等の防止を目的とした随意的吹付けコンクリートのみとした。

Π_{NP} については、前述したとおり、無支保でも大丈夫であるとの解析結果であったが、今回実施した解析はあくまで連続体解析であること等を考慮して、標準支保パターンに比べ、吹付けコンクリート厚を半分にし、ロックボルトは長さを50cm短くするとともに必要に応じて打設する。

その中間である Π_{NP} についてはロックボルトを無しとし、吹付けコンクリートの範囲を Π_{NP} のほぼ半分の上半 180° とした。

I_{NP} も、ロックボルトについては標準支保パターンの半分の長さのものを随意とし、基本的には厚さ10cmの吹付けコンクリートのみとした。

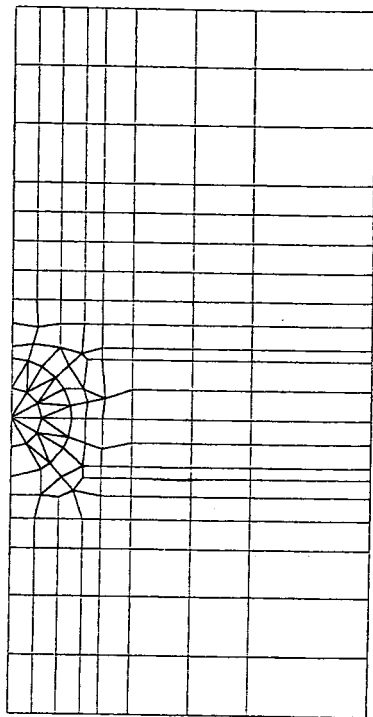


図-5 解析モデル(トンネル近傍)

表－２ 入力物性値および結果一覧

ケ	一	ス	No.	1	2-1	2-2	3-1	3-2
対	象	地	山	安山岩質凝灰岩	斜長斑岩		安山岩質凝灰岩	
地	山	等	級	Ⅳ _N	Ⅱ _N		Ⅰ _N	
弾	性	波	速	度	4.2 km/s	2.6 km/s	1.8 km/s	
土	被	り		117 m	71 m		180 m	
支	保	条	件	素掘り	素掘り	吹付 C 5cm (範囲：全周)	吹付 C 10cm (範囲：全周)	吹付 C 10cm (範囲：インパート ブロック範囲を除く)
応	力	解	放	率	100 %	100 %	30 %	30 %
単	位	体	積	重	量	2.7 tf/m ³	2.6 tf/m ³	1.9 tf/m ³
粘	着	力		59 kgf/cm ²	250 kgf/cm ²		5 kgf/cm ²	
内	部	摩	擦	角	37°	58°	40°	
弾	性	係	数	(安定時)	90,000 kgf/cm ²	20,000 kgf/cm ²	5,000 kgf/cm ²	
"			(破壊時)	9,000 kgf/cm ²	2,000 kgf/cm ²	500 kgf/cm ²		
ポ	ア	ソ	ン	比	(安定時)	0.30	0.30	
"			(破壊時)	0.45	0.45	0.45		
弾	性	限	界	0.2	0.2		0.3	
非	線	形	パ	ラ	メ	ー	タ	
吹	付	C	弾	性	係	数	34,000 kgf/cm ²	34,000 kgf/cm ²
吹	付	C	ホ	ア	ソ	ン	比	0.17
ト	ン	ネ	ル		: -3.5 mm	: -8.9mm	: -8.5mm	: -69.7mm
内	空	変	位	※	— : -1.9 mm	— : -7.1mm	— : -6.8mm	— : -24.2mm
最	大	吹	付	C	応	力	28 kgf/cm ²	158 kgf/cm ²
					—	—	151 kgf/cm ²	

※ | : 鉛直変位、— : 水平変位、符号は－が縮小

表－３ 今回の支保パターンと標準支保パターン（鉄道単線トンネル）との比較

支保部材		ロックボルト			吹付けコンクリート厚 (cm)	鋼製支保工
支保パターン		配置	長さ×本数 (m) (本)	縦断間隔 (m)	アーチ・側壁	種 類
Ⅳ _{NP}	標準	—	—	—	5 (平均)	—
	今回	—	—	—	(随意)	—
Ⅲ _{NP}	標準	アーチ	2×0～4	(随意)	10 (平均)	—
	今回	—	—	—	5 (平均, 上半 180°)	—
Ⅱ _{NP}	標準	アーチ・側壁	2×6	1.5	10 (平均)	—
	今回	アーチ・側壁	1.5×0～6	(随意)	5 (平均)	—
Ⅰ _{NP}	標準	アーチ・側壁	3×10	1.0	10 (最小)	(100H)
	今回	アーチ・側壁	1.5×0～10	(随意)	10 (最小)	(100H)

５. おわりに

本報告では計画の概要を述べた。TBM の詳細等、まだまだ解決しなければならない課題が少なからずあるが、21 世紀の鉄道トンネル建設に向けて、それらの課題を克服し、国内初の鉄道トンネル全断面 TBM 工法で施工する本工事を是非成功させたいと考えている。

最後に、施工が終了した時点で、本報告で述べた計画のレビューを含め、施工報告させていただきたい。

〔参考文献〕

- 1) 土屋 敬：ロックボルト・吹付けコンクリートトンネル工法の設計に関する研究，鉄道技術研究報告 No.1342，1987. 2
- 2) 日本鉄道建設公団：NATM 設計施工指針，1996. 2