

# 岩石トンネル掘進機

—木の浦トンネルの試用実績と今後の問題点—

高橋 克 男\*  
 金 原 弘\*\*  
 久保村 活 二\*\*\*

## 1. R.T.M.\*\*\*\* 開発の背景と意義

これまでの社会の変革をみると、トンネルが社会をかえ、経済を拓けているケースが多々うかがえる。トンネルが山脈を貫ぬくことによって、人間の歩みうる範囲で形成されていた、単体としての社会経済圏は相互に結び、それらの有機的な複合体へと形づくられていった。

こうしてトンネル技術は、文明を変え、また文明の発展がトンネル技術の飛躍を促がすということがくり返され、相互にからみあって、歴史はつづられてきた。火薬の発明は、トンネルの技術に革命をもたらし、多くのトンネルが建設され、中でもアルプスの諸トンネルはヨーロッパ南北文明を直結した。最近の日本における新幹線、津軽海峡連絡は、高度のトンネル技術を要求し、そして技術者はこれに応じつつある。

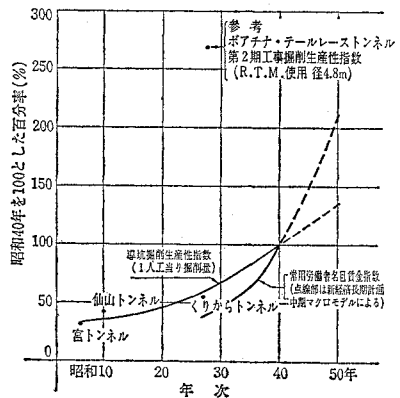
近年、社会経済の発展は目ざましく、長大で、また多量のトンネル建設が行なわれ、さらにそれに拍車をかけようとする傾向にある。

国鉄第3次計画（昭和40年以降7ヵ年）をみれば、約500km、また道路整備のビジョンによれば、むこう20ヵ年間に約600kmのトンネル建設が必要であるとされている。明治以降100年にわたって建設されたものが、鉄道1000km強、道路約400kmであることを考えれば、この数字の大きさが理解できよう。今後新設される鉄道線路延長当りのトンネルの割合は、従来の平均の約3倍、10%以上に達している。

これらトンネル工事に対しては工期の短縮と工費の低廉化が望まれ、軟弱土砂トンネルにおけるシールド工法の機械化や堅岩トンネルにおける全断面掘削が研究され

ているが、その中間に位置して割合としてはほとんどを占める中硬地質トンネルでは、導坑先進切掘り工法が代表的工法であり、部分的な手作業が多く残るうえ、本質的に断続的で、機械相互および手作業の有機性に欠けていて、能率の飛躍的向上のためには基本的な対策が必要である。すなわち、戦後鋼製支保工の採用による機械の大型化や各作業要素における機械の進歩のために、トンネル工事における労働生産性は逐次向上しつつあるが、近年労務者賃金の上昇が生産性の上昇を上まわり、工事費の漸騰を招来している。今後これまでの工法を続ける限りこの傾向は助長されてゆくものと思われる（図-1参照）。

図-1 導坑掘削生産性の向上と労務者賃金の上昇



このような情勢から、国鉄では工期、労働生産性の点で大きな可能性をもつR.T.M.の研究に昭和35年ごろから着目し、青函トンネル用として昭和38年ウォールマイヤー型R.T.M.を発注した。その後この機械は日本鉄道建設公団発足とともに引継がれ、昭和41年より現地で作業を始めているが、同時にR.T.M.の実用化を目指して北陸本線木の浦トンネル導坑にロビンス型を試用した。

\* 正会員 国鉄岐阜工務局長

\*\* 正会員 国鉄岐阜工務局次長

\*\*\* 正会員 国鉄本社元建設局線増課補佐

\*\*\*\* Rock Tunneling Machine の略

## 2. R.T.M. 開発の現状

R.T.M. は十数年前からアメリカを始めとし、ソビエト、ドイツ、イギリス、オーストリーなどの各国で開発され、これまでに製作されたものは 40 台を越えるものと思われる。これらの中には失敗例も若干あるが、多くの成功例と木の浦トンネルでの試用結果から、均質中硬岩（圧縮強度 100~700 kg/cm<sup>2</sup> 程度）における中径トンネル（直径 2~6m）に対しては実用化の域に達していると考えられる。

わが国では昭和 38 年小松製作所が、直径 2.2m の水圧トンネル用・ロビンス型 R.T.M. を製作したのが最初である。同じ年、青函トンネル用としてスイスのハーベガー社にウォールマイヤー型が発注され、昨年現地に到着、試験掘削を行ない、引続き直径 3.2m の炭鉱用のロビンス型国産 2 号機が作製された。同年、国産 1 号機は国鉄北陸線の木の浦トンネルで再び試用され、後述するようにならぬ成果を上げた。今年になって、3.2m, 3.4m, 4.5m の国産 3~6 号機が製作または計画されている。

R.T.M. の掘削機構を大別すると、1) 切削による方法（バイト式カッター型）、2) 筋をつけて圧砕する方法（ディスクカッター型）、3) 凸凹状に傷をつけて圧砕する方法（歯車状カッター型）などがある（表-1 参照）。

国産 1 号機はロビンス型で、掘削機構は 2) のタイプに属している。機能はかなりシンプルで、新居浜で試用されたが、216m を掘削したのみで、その後ベアリングに改良の主力をおき、後述の木の浦トンネルで成果をあげた。九州松島炭鉱のロビンス型 2 号機の特長は、カッターヘッドをドーム型にして機械の直進性を増し、地質調査用先進ボーリングを装置したこと、No. 1 コン

ベヤーを下部に取りつけ、機械部分に泥土がかからないようにしたこと、および電装品は耐圧耐爆型としたことである。日本道路公団恵那トンネルの国産ロビンス型機は地質調査をかねて掘削するため先進ボーリングを装備し、地質の変化に対応できるようシールドを背おい、かなり多機能で重装備となっている。これらロビンス型は、カッターヘッドの回転速度を一定にしている。三菱重工型の掘削機構は 3) のタイプであって、カッターヘッドの回転数が岩質に応じ可変となっている。

青函トンネルのウォールマイヤー型は 1) のタイプで、カッターヘッドの回転速度を自動的に変え、岩質の硬さの変化に対応できるようになっている。また、掘削機構が推力を軽減するようになっているのが特長である。

住友機械が炭鉱の坑道掘進用として試作しているものは、カッター機構は切削、破砕式で新しいアイデアを採用した国産技術の実用機として注目すべきものと思われる。

## 3. 北陸本線木の浦トンネルにおける R.T.M. の使用実績

### (1) 概要

前述のように、国産 1 号機である直径 2.3m の小松ロビンス型 R.T.M. を北陸本線線増工の木の浦トンネルに試用し、導坑 887m の掘削を行なった（写真-1）。

この結果、日進最大 24.6m、月進最大 362m、作業日の平均日進（10 時間 2 交代）11.4m の好記録を得た。

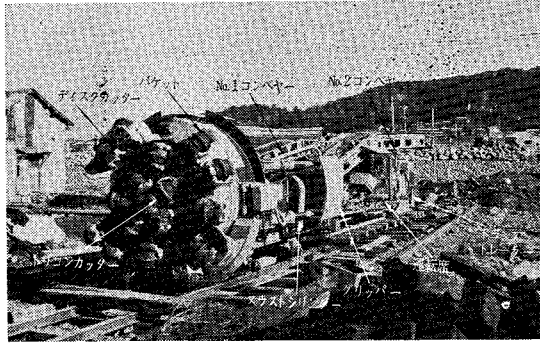
木の浦トンネルは延長 1570m の複線トンネルで、当該部分は 9/1000 の順こう配である。工法としては底設導坑先進上部半断面工法を採用し、その導坑の掘進に試用した。

R.T.M. は昭和 41 年 12 月半ば現地に到着、試運転を

表-1 日本における R.T.M. の使用実例および開発状況

施工箇所	地質	岩石圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	施工時期 (年)	R.T.M. による掘削延長 (m)	掘削径 (mm)	掘削実績	製作所	カッター形式掘削方式	推力 (t)	総出力 (kW)	重量 (t)	記 事
住友共同電力 新居浜トンネル	緑泥片岩 石墨片岩	600~ 1600	1963	216	2200	Max 179m/月 Max 11.1m/日	小松製作所	ディスクカッター - 圧砕式	150	130	24	
鉄道建設公団 青函トンネル	凝灰質シ ルト岩 砂 岩	80~120	1966	160	3600	mean 1.77m/h Max 2.63m/h	スイス ハーベガー 社	バイト式カッター - による切削式	100	425	90	
国 鉄 木の浦トンネル	泥 岩	80~120	1967	890	2300	Max 362m/月 Max 24.6m/日	小松製作所	ディスクカッター - による圧砕式	150	130	24	
石 炭 技 研 九州松島炭鉱	硬 砂 質 岩	600~800	1967	450 (試験予定)	3200	試 験 中	小松製作所	ディスクカッター - による圧砕式	250	335	70	電装品関係、 耐圧、耐爆型
建 設 省 東北地建	(1) 凝灰岩 質砂岩 (2) 流紋岩	200 800~900	1967 (予定)	180 (予定) 700 (予定)	3200	—	三菱重工業	歯車状カッター - による圧砕式	350	424	80	
日本道路公団 恵那トンネル	かこう岩	2000	1968 (予定)	—	4450	—	小松製作所	ディスクカッター - による圧砕式	500	544	180	シールド装置 併用
新技術開発事 業団 炭鉱坑道	砂 岩 質 岩	300~600	1968 (予定)	—	3400	—	住友機械	バイト式カッター - による切削とロー ラによる破砕式	120	320	—	電装品関係、 耐圧、耐爆型

写真-1 小松ロビンズ式トンネル掘進機



行ない、1月中旬から2月中旬にかけて試験掘削、それから5月上旬まで延べ作業日数70日間、延長801mの本掘削を行なった。5月16日わが国初めてのR.T.M.による貫通式が行なわれた。地質は図-2に示すとおりで、泥岩を主体としこれに砂岩、凝灰質砂岩の層をはさみ、弾性波速度は1.8~2.9 km/secで、ところどころ1.4~1.6 km/secの破碎帯が分布している。湧水は全般に少なく、メタンガスの発生をともなったが、全般にユニホームな地質構造となっている。

本機にはレーザービーム、ガス警報器、オペレーター保護用天端覆などを装備した。支保工は延長の71%は平均3cmのコンクリート吹付け工法、残りは100Hの2ピース支保工をNo.2コンベヤーの後端付近で施工した。

(2) 試験掘削

カッターについては、非常に軟かい泥岩に遭遇した場合、ディスクカッターでは岩石にめり込んでしまう心配があったので、バイト状のツールビットをも用意し両者の比較を行なった。泥岩の圧縮強度は100 kg/cm<sup>2</sup>程度であったが、アウトプットに目立った差は見られず、ツールビットは地山を引っかくことによって肌落ちを増す傾向にあり、むしろディスクカッターの方が

好ましかった。ただ湧水箇所では特に外周のディスクカッターの軸にヘドロ状の泥岩がつまり、その回転を不能にして、カッターをいちじるしく偏摩耗させた。この対策としては、カッターの刃に溝型の切欠きを入れることによって非常に改善された。

スラスト圧については、圧縮強度80~120 kg/cm<sup>2</sup>の泥岩に対し35~40t程度が適当であった。スラスト圧を大きくすれば掘進速度は上がるが、しばしば岩石が大塊となって落ち、コンベヤーへの落口につかえたりして、かえって掘進能率を低下させるようなことがあった。湧水箇所では、グリッパー圧を大きくすると側壁が破壊し、小さいグリッパー圧ではグリッパーが滑り、10tの推力を得るのが精一杯の箇所もあった。

(3) 本掘削

試験掘削を経て本掘削に入ったが、その実績を図-3、4に示した。図-3に示すように、4月の掘進が3月より落ちたのは、鋼車待ちの時間が増えたため、これは単線区間が伸びたこととコンクリート吹付作業との競合によるものと思われる。図-4に本掘削の全平均と、日進記録24.6mを出した日の、作業時間の分類を円グラフにしたものを掲げた。記録日に鋼車待ち時間が比較的多いのは、この日機関車の故障でずりトロは一編成であったためである。蛇行の範囲は、レーザービームを用い、慎重な施工を行なえば上下5cm、左右3cm以内に十分収め得るが、地質が軟弱でグリッパーが側壁にめりこむときは30cm程度の蛇行があった。

(4) 軟弱地盤、湧水箇所対策

湧水をとまらぬ泥岩の軟弱破碎帯では、スラスト圧を下げて岩石が大塊となって崩れ、バケットのすくい上げが困難となり、コンベヤーシュートにつまることが多く、これを人力で取除くのは肌落ちの危険があり、掘進が不能の状態になった。やむを得ず機械を後退させて

図-2 木の浦トンネル地質縦断面図

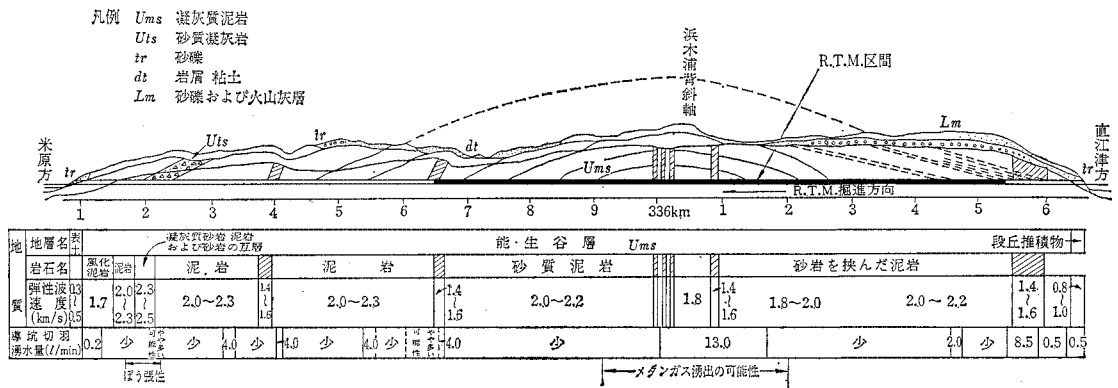


図-3 木の浦トンネル底設導坑進行図

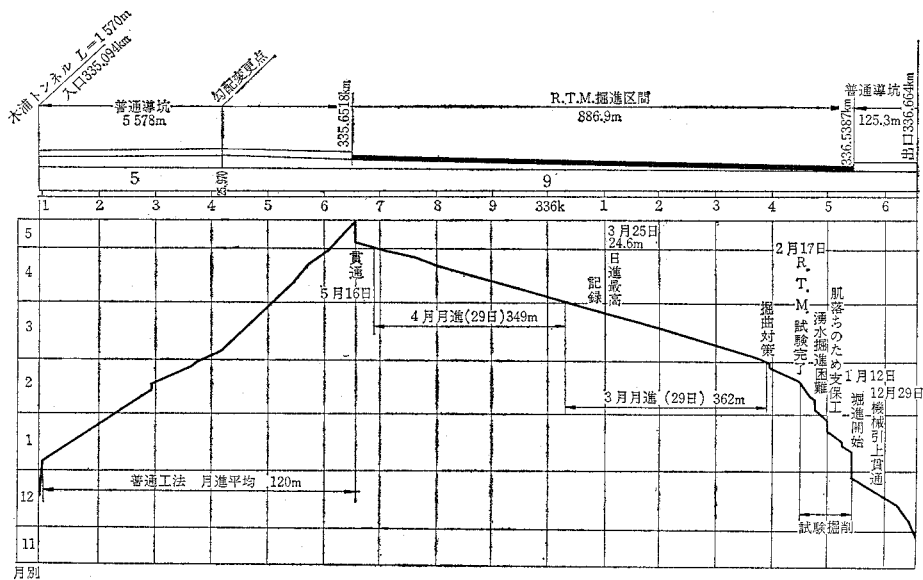
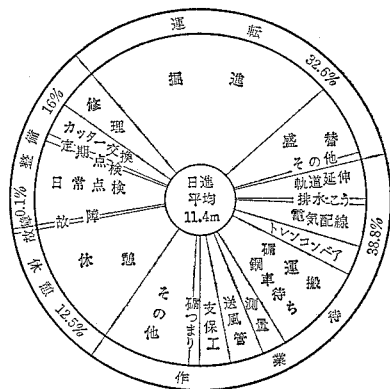
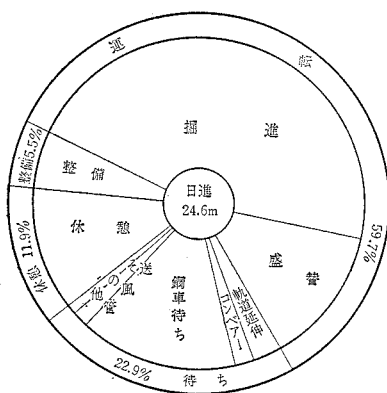


図-4 作業時間の分數

(1) 本掘進平均



(2) 最高記録日(3月25日)



在来工法で突破した。またこの箇所では0.4~0.7l/min程度の湧水があり、泥岩が水に溶けてへドロ状となり、バケットに付着してベルトコンベヤーに落ちず掘進困難となった。バケット前面の下底に釜場を掘って排水したり、切羽に水抜ボーリングを行なったりしたが有効でなかった。

いろいろ苦心の末、逆に注水しながら掘削して一応ずりのつまりはなくなったが、ベルトコンベヤーがすべて困ったので、溝付ドラムに改造する処置をとった。

#### (5) 経済性の検討

本掘進の後半には、それまでの実績をもとにしてほぼ通常の請負契約をしたが、これによると、この導坑の単価は機械損料を含めて1m当り22000円、1m<sup>3</sup>当りでは4400円となっている。さらにコンクリート吹付けを

含めるとm当り28560円、m<sup>3</sup>当り5760円となる。この値は実績の不足から機械損料の算出に疑問があり、確たる経済性の検討はできないものの、この程度の岩質では、現段階でも在来工法に比して単価は余りかわらないと思われる。

#### 4. 今後に残された課題

##### (1) R.T.M. 工法における地質評価方法と地圧規模の検討

本工法は、在来の発破工法に比べていちじるしく地山をゆるめないのが長所とされているものの、かなりユニホームな地質である木の浦トンネルで実験されたように、少量の湧水、小規模な破碎帯と遭遇した場合、極端にその影響を受け、掘進速度がいちじるしく低下すること

はもちろん、工法を変更せざるをえない場合が考えられる。まして大口径の R.T.M. に移行した場合、これによるトラブルは一層大きいものになることは想像に難くない。したがって、本工法にマッチした地質の評価方法と、精度の高い調査法を根本的に再検討する必要がある。漸定的には、先進ボーリングを装備することも考えられ、実際に行なわれているものの、その性能、能率から考えて実用的に根本的な解答にはならない。一方地山を緩めないで、地圧の規模はかなり軽減され、支保工、覆工の設計に大きな影響をもたらす、このことは R.T.M. 経済性の検討に欠かすことのできない要素である。木の浦トンネルにおいては、在来工法と、R.T.M. 工法の地圧比較を行ない、さらに断面の大きさの影響についても検討することになっているが、結論を出すまでには至っていない。

## (2) 地質の適用範囲についての問題

現在の R.T.M. は中硬岩に対しては実用化のめどがいつてきたが、この範囲に該当する地質のユニホームなトンネルは、ほぼ全体の 10% 程度と想定される。したがって、軟岩および特に堅岩に適応する R.T.M. の開発は、将来の大きな課題といえる。

## (3) 掘削機構と施工機能上の問題

すでに述べたように、掘削機構が種々考えられているが、これらと地質との関連を理論的にまた経済的にどのように解明してゆくかが今後の課題であろう。この問題については、大まかな想定は不能としても、いまだに明確でなく、むしろ試行錯誤的な感覚で開発が行なわれているのが現状であるが、特にカッターの種類、速度、スラスト圧について今後十分な研究を進めるべきである。またずり出し機構についても、これまでの実験から種々問題が残っており、この点の解明も積極的に行なうべきであろう。一般的施工機能の問題として、地質悪化時の処理工法、支保工の建込、測量など、付帯的な機能にかなりの問題があった。しかしこれらについては、付帯装備空間および作業空間が制約となる場合が多く、大口径化とともに経済性には疑問は残るとしても技術的に解決は可能と思われる。

## (4) 機械の設計に当たっての汎用性問題

わが国の地質構造は、外国のそれに比してきわめて複雑である。そこでどの程度の地質の範囲に適用し得る機械を設計するか、機械の汎用化をどう考えるか重要な問題となっている。前述の、日本道路公団 恵那トンネルの R.T.M. は、シールドを併備したものになっている。

しかし機械の耐用の範囲で、掘削対象となるトンネルのすべての地質に対応するものとするか、それともある範囲の地質に対しては他の工法を併用するか、むずかしい課題であろう。R.T.M. の地質の対応性、掘削の経済性の解明を待たなくては解決しえない面もあるが、特に大口径になった場合、慎重な検討が必要となってくる。

## (5) 大口径化にともなう問題

余掘りがほとんどないという R.T.M. の大きな特色を十分に活用するためには、最終目標として完成断面を掘削する大口径 R.T.M. の開発が必要である。現段階では 4~5 m 程度は実用化されているとはいえ、特に鉄道の場合 6.5~7.0 m 級の開発が必要とすれば、かなりの問題が生じてくる。すなわち掘削機構では、1) 掘進速度を期待するとすれば、外周の周速が早くなり、カッターの摩耗が激しくなるばかりか、機構的に可能であろうか、掘進速度を落とすとすればどの程度の能率低下を許すか、2) スラスト荷重とラジアル荷重を 1 個のベアリングで取り切れるかどうか、3) ベアリングの製造技術の限界が直径 4.0 m 程度までといわれ、陸上輸送の限界とも関連してどう解決するか、4) ずり出し機構として現在のずり出し機構で多量のずりを処理し得るだろうか、また大塊を生じた場合はどうか、5) R.T.M. に適応したライニング方法の開発など、いずれの問題もまったく今後に残された問題といわざるをえない。

その他、地質悪化に遭遇した場合、大口径で、あるほど問題としては大きく、これまでに述べたような数多くの問題が山積している。

## (6) 経済性の検討と機械価格の適正化

経済性の検討に当たっては、ランニングコストの大半を占めるカッター経費の算定、機械の償却費の査定が大きく影響する。これらについては開発途上の機械であるのでまったく不明といってよいが、十分な検討が望まれる。

## 結 論

今後の R.T.M. の開発の必要性は高く評価すべきで、したがってある程度試行錯誤的であっても、積極的な開発計画を推進する必要がある。ただ機械の設計を進めるうえで、その機構、機能の十分な解明と、汎用性についての考え方のまとめ、さらに地質調査、経済性の検討と、山積する難問を解決してゆかなくてはならない。

(1967.7.13・受付)