

海外のトンネル技術の話題

3.1 アメリカ合衆国

齋 藤 徹*
吉 沢 慶 蔵**

1. ま え が き

昨年 11 月、土木学会のアメリカトンネル視察団に加わり 30 数日間にわたり、アメリカ、カナダのトンネル建設現場を見てまわった。限られた期間内の視察旅行を通じて、いろいろと学ぶ所、感ずる所は多かったが、これだけをもってアメリカのトンネル技術を語るのには、誠におこがましいとは思いますが、見聞した範囲内でご紹介したい。

アメリカ国内のトンネル工事を、最近 2 年間くらいの雑誌で拾って見ると、その数はかなりのものがあり、使用目的別に眺めて見ると、① アメリカ西海岸、西部山地での水路トンネル、② サンフランシスコ、ポストン、トロント、モントリオール等の大都市の地下鉄トンネル、③ 主として東部地区の大都市の上下水道トンネルが主なもので、うち水路関係のものが最も多いようである。これらは、当然のことながら、気候、地形、都市形態等との関連において必然的な要請にもとづいているが、計画として規模の大きなものは、④ カリフォルニア州で行なわれているサクラメント川、サンジョアキン川のデルタ地帯からロスアンゼルス南部までの延々 720 km の水路建設事業、⑤ サンタフェ、アルバカークを中心地とするニューメキシコ州中部原野の開拓のため、コロラ

ド川水系の水を流域変更してニューメキシコ州のチャマ川に導こうとする水路建設事業である。この二計画は、それぞれ海岸山脈、ロッキー山脈の中を経由するため、多くの長い山岳トンネルが掘られている。いま一つの大計画は、⑥ すでに多くの人により報告されている、サンフランシスコ湾岸高速鉄道 (BART) で、これはサンフランシスコ湾岸の都市交通難の解消のため計画され建設が進められている総延長 121 km の鉄道工事であるが、このうち約 32 km が地下部分になっており、この中に延長 5.8 km の複線型の沈埋トンネルが含まれている。

アメリカのトンネル技術の特徴といえば、これはアメリカだけに限ったことではなく、欧州でも日本でも程度の差こそあれ同じようなことがいえるとは思いますが、トンネル労働者の不足と高賃金に対処して、いかに機械化するか、作業を単純、集中化するか、またいかに大型高性能の機械を駆使するかに意がそそがれているという印象である。

アメリカにおけるトンネル労働者の賃金は、ユニオンの強さも手伝って、他産業職種とくらべて最も高いとい

日米賃金材料価格対照表

種 別	国 別 ア メ リ カ (ペンシルバニア州)	日 (東 京) 本
労務賃金	円/時	円/時
大 工	1 450	350
重 機 運 転 工	1 550	300
坑 夫	1 150	340
人 夫	1 040	260
機 械 工	1 450	300
電 気 工	2 030	300
自 動 車 運 転 手	900	280
坑内機関車運転工	1 450	350
石 工	1 640	300
平 均	1 410	310
約 4.5 倍		
材料価格		
爆薬(ダイナマイト)	180 円/kg	新桐 290円/kg
“(ANFO)”	47 ”	
木 材	13 000~19 000円/m ³	松板 22 000円/m ³
セ メ ン ト	7 600円/t	6 400円/t
鉄 筋	60 000 ”	40 000 ”
H 型鋼支保工	87 000 ”	60 000 ”
ガ ソ リ ン	25円/l	43円/l
軽 油	13 ”	28 ”
電 力 料	4.5円/kWh	4.5円/kWh

* 正会員 国鉄山陽新幹線建設部工事課長

**正会員 帝都高速度交通営団建設本部工事第一課長

注：アメリカの賃金価格は1ドル ≒ 360 日本円で換算

われている。これを日本とくらべると、表一1に示すように大体4~5倍という高賃金であり、欧州にくらべても2倍くらいになっていると聞く。一方、トンネル工事のための資材の価格を比較して見ると、資源豊かなお国柄だけに一次生産品は安く、人件費の高いことを反映して二次生産品は一般に高いことがわかる。したがって、アメリカにおいてはトンネル建設費の中で一番大きな比率を占めているのは労務費であり、材料と機械を十分に使い、できるだけ作業環境をよくして労働者の作業能力を上げることが全体工費を安くあげ、また工期を短縮する最良の手段ということになる。こういった労働事情を背景に、非常に安定し天災の少ない地質と気象条件を踏まえて、アメリカのトンネル技術が進歩発展しているといえよう。

2. 山岳トンネル

(1) 工法の選定

トンネルの全断面を一度で掘進させる、いわゆる全断面工法が標準的工法になっている。これは前述のように作業を単純、集中化して、労働力をフルに使いたいという方針の現われであるが、この工法が十分に威力を発揮するためには、①地質が比較的安定していること、②坑内の保安のため支保工材を惜しみなく使うこと、③少々の地質の変動に対しては支保工の方法を大きくし間隔をつめる、などして全断面掘削体制を変えないことなどが必要である。労働力節減の手段として、トンネルボーリングマシンによる機械化掘削が最近急激に普及してきたが、現時点でのこの機械は、硬い岩、湧水、断層をともなった山に対しては、能率、経済性においてまだ問題が多く、それほど万能視はされていない。したがって、トンネルボーリングマシンによる工法の選定に当っては、地質、湧水などにつき十分な調査を行ない、トンネルの長さ、断面を考え、経済的にペイするかどうかを慎重に検討して決定している。

(2) 掘削とコンクリートの分離作業

日本においては、トンネルの奥の方では発破をかけて掘削作業を行っており、数百メートル後方では型枠を組んでコンクリートをうっている。さらに後方で側壁部の掘削とコンクリート工を行っている。すなわち、掘削とコンクリートの併行作業方式が標準工法になっている。しかし、アメリカにおいて見た多くのトンネルは、例外なく分離作業方式であった。すなわち、掘削作業が奥に向かって先進され、掘削完了後、逆に奥から坑口に向かってコンクリートを巻いて帰ってくるという方式である。このような日本とアメリカの違いは、アメリカに

おける職能別組合が競合作業を拒否しているという組合組織にも若干の原因があろうが、それよりも彼我の労務賃金の差、地質の違いに起因しているといった方が当てているだろう。わが国のような地質の変動のはげしい山については、アメリカのような方式が経費的、工期的に見て必ずしも有利とは限らないが、ますます深刻化している労務者不足と賃金高騰の現状にかんがみ、今から勉強しておかねばならぬ施工方式であろう。

(3) 支保工

前述のように掘削完了後までコンクリートの打設が行なわれず、相当長期間にわたって支保工だけで山を留めている状態が続くという工法が採用されているため、必然、支保工（普通の場合はH型鋼）は、寸法、立込間隔ともに十二分の安全性が保たれており、われわれの目からは“ぜいたく”の感がないでもなかった。これは工法のせいだけでなく、坑内の災害予防に対する法規制の厳しさと、坑内労働者の組合の要求の強さ、施工業者が災害により社会的信用の失墜することを恐れている等々にもよっているようである。そうかと思うと、ロックボルト工だけで山をおさえて掘っているトンネルにも各地でお目にかかった。一見、保安度において劣ると思われがちなのこの工法が全面的に使用されて、経費節減の実効をあげていることは、理論的、実験的に安全性が十分確認されている結果であろうが、わが国においても、食わずぎらい的、観念的不安感を払拭して、使える場所では積極的にこの経済的工法を採用して行くべきである。

欧州、最近ではわが国でも普及のきざしのあるコンクリート吹き付けによる支保のやり方は、アメリカにおいては余り一般化してはおらず、H鋼支保工、ロックボルト工の補強あるいは応用に用いられている程度である。アメリカにおける施工技術全般について感じたことであるが、たとえばこのコンクリート吹付工とか、レッグドリルによる小径せん孔工法（スウェーデン工法等）とかいった欧州その他外国で開発された新技術が余りアメリカ国内では使われていない。これがBuy American法の影響なのか、技術的な自負心が強いのか、あるいはそれほど価値が評価されなかったのかはわからないが、なんでもちょっと目新しいものがあるとすぐ手を出したがる日本人気質と対称的に、何事においても世界一たんとするアメリカ人の気質の一端が現われているような気がする。

(4) トンネルボーリングマシン

アメリカ国内で、Robbins, Hnghes, Alkirk, Joy, REED, MEMCO等の機械製作会社がトンネル掘削機の開発を競っている。このことは、トンネル掘削機が試

作期からようやく実績を蓄積しながら改良期に入っていることを物語っている。現在までは、アメリカ国内での使用実績のうち成功したものは、比較的小断面のトンネルで岩石の圧縮強度 500 kg/cm^2 以下、地質の変化、湧水の少ない山におけるものである。そのような条件のそなわっている、ニューメキシコ州のアソテア（長さ 20.8 km ）、オーソ（長さ 8.7 km ）、ブランコ（長さ 13.9 km ）の3トンネルでは、掘削径 $3\sim 3.8 \text{ m}$ のロビンス社の機械が日進 100 m 余、月進 1000 m 余の掘進記録を樹立している。マサチューセッツ工科大学の研究報告書によると、1965年製作のロビンス掘削機が頁岩や石灰岩などの軟岩では成功したが硬岩では成功しなかったのは、① カッターまたはビットが高価につき、取替え頻度が激しい、② ベアリングの損傷が早い、などの理由によるが、これらの問題はやがて解決され、今後10年間にすばらしい飛躍が期待されるだろう。しかし、近い将来には岩の破壊方法は科学的に新しいものにとつかわるだろう、と語っている。現在この大学で行なっているレーザー光線による岩石破壊実験の実用化により、硬岩掘削技術に革命がもたらされるだろう、ということのようである。大いに成果を期待したいものである。

3. 都市トンネル

(1) 工法の選定

アメリカで現在着工され、もしくは着工されようとしている地下鉄路線の工法選定の基本的考え方としては、海底、河川の横断は沈埋工法、停車場部は開削工法、一般の線路部はできるだけシールド工法を採用しようとする傾向にある。このことは一面、設計施工面での標準化 (Standardization)、単純化、(Simplification)、專業化 (Specification) を押し進めようとするアメリカにおけるマネージメントの基本的三原則でもある。

(2) 縦断線形の選定

カナダのモントリオールでは地下鉄車両にゴムタイヤを採用しているが、その粘着力を利用して線路縦断の設計に急勾配 ($65/1000$) をきわめて効果的に利用している。すなわち停車場はできるだけ浅くし、急勾配の利用によって中間は容易に河底を横断し岩盤中にトンネルを掘って建設費を大幅に節減できたと報告されているが、このことは日本でも大都市の多くは上部に軟弱な沖積層を持ち、下部が比較的硬い洪積層となっており、しかも河川が多いことから考えて、停車場の前後に急勾配を利用し、できるだけ良質地盤での施工をより多く可能にするような縦断線形を選定する配慮がとくに必要ではなからうか。このような「金だらけ型」の縦断線形は地下鉄

の場合、電力の消費量を著しく節減できる点でも有利性がある。

(3) 地盤の安定対策

シールド工事の場合、地質調査は 50 m 間隔ぐらいで計画路線にそってボーリングが行なわれているようである。アメリカでは労働事情の点でできるだけ圧気工法を避けたいという意図から、深井戸、ウエルポイント工法などを用いて地下水の低下による地盤安定工法が全面的に採用されている。やむをえず薬液注入を併用する場合でも、ごく局部的で、彼らは薬液注入にあまり信頼をおいていないようである。また圧気工法の場合でも地下水をまず低下させ、できるだけ低い気圧で作業をしようと心がけている。

(4) シールド工法

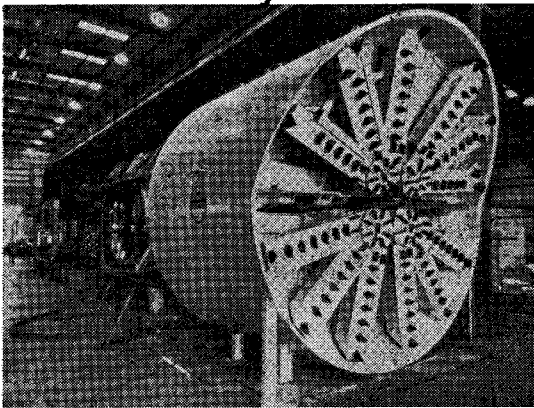
サンフランシスコの BART の地下鉄では全部左右併列、もしくは上下併列方式で、複線断面は採用されていないが、その理由は経済性、施工の安全性からであると関係者は語っていた。上下併列方式は日本のように道路幅のせまい都市では今後大いに検討しなければならない問題で、その成果を注目したい (上下併列の場合、下段の掘進が終ってから上段を掘進している)。シールド工法に関して特筆したいことは、前述のように設計施工面の標準化、単純化の一環として、現在、施工中および計画中のサンフランシスコ、ロスアンゼルス、ボストン、ワシントン、ボルチモアなどの各都市相互間でシールドの断面を外径 18 ft 、内径 17 ft に統一し、大量生産と互換性によりコストの低減を図っている。日本でも、土木学会が音頭をとって使用目的に応じて数種類の規格に統一するよう積極的に推進して欲しいものである。

(5) 掘削の機械化 (メカニカル シールド)

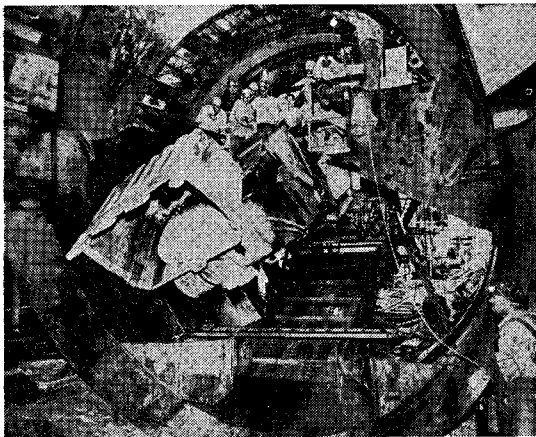
掘削の機械化は世界的な傾向で、とくにアメリカでは労務事情と掘進速度の向上を目指してのメカニカルシールドの開発に熱心である。現在開発されつつあるものを機能別にわけると、① ホイールカッター式、② ①の変形で左右ある角度に回転する $2\sim 4$ 主軸のホイールカッター式、③ ショベル式の3種類がある。

① はロビンス、カルウエルド、メムコ社などで製作されている一般のメカニカルシールドの機種で、この種のもので特殊なものはカッターヘッドが前面に傾斜している大口径 (外径 10 m) シールドがメムコ社により開発され、近く近鉄の灘波乗り入れの地下鉄工事に使用される。② は小口径 (外径 3 m 程度) のものは水路トンネルその他に盛んに活躍しており、大口径 (外径 5.4 m) のものではカルウエルド社が流動性の砂質土を対称

写真一 カルウエルド社・メカニカル シールド



写真二 ビックジョン掘進機



として製作したものがサンフランシスコ市内の地下鉄で現在使用されている。このシールドは上半部のカッターヘッドが 25 度前面に傾斜して切羽前面の地山の崩壊を防ぐよう配慮がなされているほか、写真一1 のようにカッターの設計においても独創的な考案がなされている。③ はシールドにショベルを固定したもので、このショベルは人間の腕のように、前後左右、自由自在に回転操作することができるような巧妙な機構となっている。その代表的なものとしてはメムコ社の Big John がある。これは Forepoling Shield と併用され安全性と掘進速度で偉力を発揮しているが、ホイールカッター式のものにくらべて、馬蹄形の断面にも使用できる、地質の変化に対して対応性がよく、中硬岩、玉石等の掘削もできる、などの特徴を有している。

以上がアメリカにおけるメカニカル シールドの現況であるが、当面は圧縮強度/50~300 kg/cm² 程度の土質に対しては自信をもっているが、問題は軟弱地盤と硬岩の掘削機構の開発にあるようである。

(6) 裏込め注入


シールド工事の裏込め注入については、アメリカでも

非常に重要視して種々の研究が進められている。ロスアンゼルス社の A.A. マッシュューズ・コンサルタント社の責任技術者の見解によると、セメント注入の場合、凝結時間を短縮する方向で検討を進めている。また新しいグラウト材料の開発に努力をしているが、一つの方法として「オガクズ」その他の材料で濃度を高くする方法も行なわれている。最近ではモルタルに膨張剤あるいは附着剤を添加することも試験的に行なわれている。しかし、軟弱地盤の場合は掘削速度と施工精度とが重要な関係を持っているので、施工速度を少しゆるめるのが適当な方法であるといっている。

(7) Rib and Lagging 工法

アメリカの都市内のシールド工事では、地質が良くても比較的断面の小さいトンネルでは、H型鋼のリングに土留板をはめ込み、それに反力をとってシールドを推進するいわゆる Rib and Lagging 工法がしばしば用いられている。この工法は、普通 3 分割の H 鋼リングをテールの通過後、特殊機械装置により拡大し地山に密着させて地山のゆるみを防ぎ、裏込め注入を割愛するのが特徴で、かつて川崎市の水道工事でメムコ社から導入され、40~50 m/日の掘進記録を出し関係者を驚ろかしたことは記憶に新しいところである。

(8) 沈埋工法

BART の沈埋工法の特徴は発展の歴史的背景、立地条件、労務および経済的事情、気象状況、地震の有無などによって生じた結果と思われるが、その主な特徴として、① 断面が型  である、② 鋼殻が付いていて耐震と完全耐水性が保証されている、③ 継手はゴムガスケットを用いた水圧利用圧接工法が採用されている、④ 中間には伸縮継手がなく、両端は地震時に備えてスライディング ジョイントになっている、⑤ 鋼殻は電気防蝕が施されている、などがあげられる。

4. む す び

アメリカのトンネル施工は、技術面で日本や欧州のようにキメの細かさはないが、小手先の芸ではなく、大まかではあるが基本にきわめて忠実である、という点に強い印象を受けた。

筆者の浅い見聞と知識をもととしての紹介、これがアメリカのトンネル技術のすべてではないことはもちろん、その内容の不十分な点、およびその正確さについてもいささか自信に欠ける点があることをおわびしたい。なおくわしくは、土木学会発行の『第4回トンネル工学シンポジウム』をご参照願いたい。