



トンネル技術

伊藤 富雄*

Ⅰ. 序言

わが国のトンネル技術も、戦後すばらしい発展をとげ、世界一の新幹線が短期間のうちに完成したのも、その発展に負う所がきわめて大きい。例えば、現在わが国にある鉄道トンネルについて、それらを長さの順に第10位まで並べると、そのうちの九つまでが戦後に完成したものであり、日本最長の新関門トンネルは世界第2位、道路トンネルで最も長い恵那山トンネルも、やはり世界第2の地位を誇っている。また掘進速度を調べても、戦前の断面積 12m^2 、月進 232m という日本記録が、戦後大幅に更新されて、 22m^2 、月進 540m となり、断面積がほぼ2倍のトンネルを2倍以上の速度で掘削したことになる。この記録は、世界記録と比べても、ほとんど優劣をつけがたいものである。

このようなすばらしい進歩発展の跡をたどりながら、以下、トンネル技術について解説を試みることにしたい。

Ⅱ. 削岩機

トンネルの掘削に当っては、天然地盤すなわち地山（じやま）に向って孔をあけ、爆薬を詰めて発破をかけるのが普通である。その孔をあけるのが削岩機で、動力としては、今日でも圧縮空気が使われている。そのため、効率も悪くコンプレッサその他の設備も必要になるが、しかし、削岩機の排気は、坑内とくに最先端の切端（きりは）から放出されるので、自動車の排気ガスとは正反対に、坑内の換気上きわめて有用であり、また、坑内に設置されるエアパイプは、万一の事故のさい、命の綱ともいふべき役を果すものである。いいかえれば、崩壊事故が発生し作業員が坑内に閉じ込められても、エ

アerpaiプさえ健全ならば、それを通して、食糧はもちろん衣服・電気などを送ったり、逆に内部の排水を行うこともできるのである。

近年は、削岩機についても、その性能と使用技術が著しく向上し、 100m を越える水平ボーリングもさほど困難なことではない。そのため、先進ボーリング、すなわちこれから掘削する前方の地山にさぐりを入れるためのボーリングも可能になり、これが工事の安全上非常に役立っている。また、削岩機を敏速に設置して、一刻も早く次のボーリングを開始することが、かつては課題であるとされていたが、現在それは、図1に示すようなジャンボ（jumbo）によって解決されている。図示のものはツーデッキの中型ジャンボであるが、削岩機10数台を載せたスリーデッキのものもある。

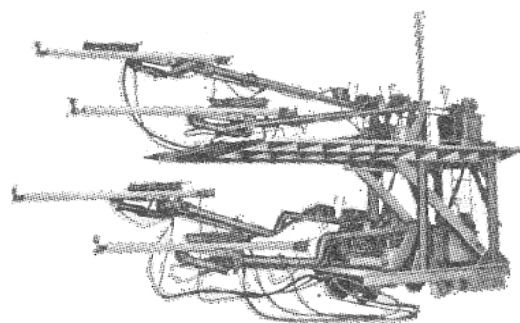


図1 ジャンボ

削岩機に取り付けて直接孔をあけるドリルスティールについては、昔はビット（刃先）とロッドが一体になっていたが、その後、ビットだけを特殊鋼で作って取り替える方式に変わり、さらに進んで最近では、インサートビット、すなわちタングステン・カーバイド合金鋼製のチップを、ビットの直接岩石に当たる先端にはめ込んだビットが、広く用いられている。

* 伊藤富雄 (Tomio ITO), 大阪大学, 工学部土木工学科, 教授, 工博, 土質基礎工学, トンネル工学, 道路工学, 鉄道工学

Ⅲ. 掘削方式

1. 導坑

トンネル工事のさい、その全断面を一度に掘削するのは、現在でも比較的まれで、まず断面の一部をさきに掘進し、ついで全断面に切り抜けるのが普通である。このようにして先行する部分のことを導坑と呼び、それが全断面内で占める位置については、後述のように種々のものがある。

2. 新オーストリー式

軟岩に対して昔よく用いられた方式で、図2に示すように、底設導坑1から立坑を掘り、その前後に頂設導坑2を掘進する点が大きな特徴をなしている。それ以後の施工順序は図示の数字が示す通りである。

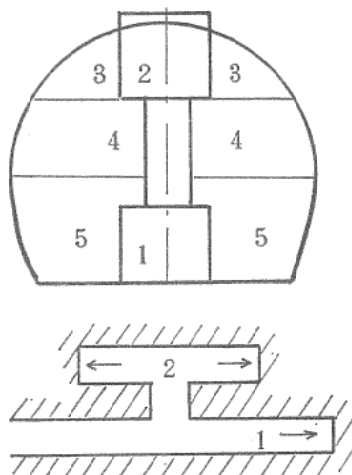


図2 新オーストリー式

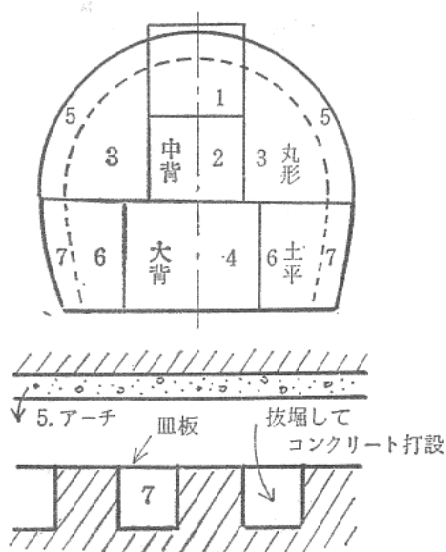


図3 逆巻式

3. 逆巻式（ベルギー式）

地質がかなり不良な場合にしばしば採用されていた方式で、図3に示す順序で施工する。すなわち、6の部分の掘削にさき立って、崩れやすいアーチ部のコンクリートをその上に打設し、ついで6を左右千鳥に抜掘して、側壁のコンクリートを交互に打つ点に特色がある。かようにアーチをさきに完成するので、逆巻式（さかまき式）と名付けられたが、しかしこの方式では、頂設導坑1を最初に掘進することが大きな欠点になっている。なぜならば、1から2、4の部分の掘り下げるとき、排水上支障を生じ、また工事用パイプ類の移設、坑内車両の通路の整備などをしなければならないからである。

4. 底設導坑先進上部半断面掘削式

近年わが国で最も広く適用されている標準的な掘削方法で、上記二つの方式の長所をとり折衷したものである。すなわち、図4に示すように、底設導坑を採用し、アーチコンクリートをさか打ちするようになっており、さらに、2の部分の広くとることによって、大型機械による急速施工が可能となるように配慮されている。しかしその反面、アーチ部崩壊の危険性は増大するようであるが、それは後述の支保工の改善によって避けられる。

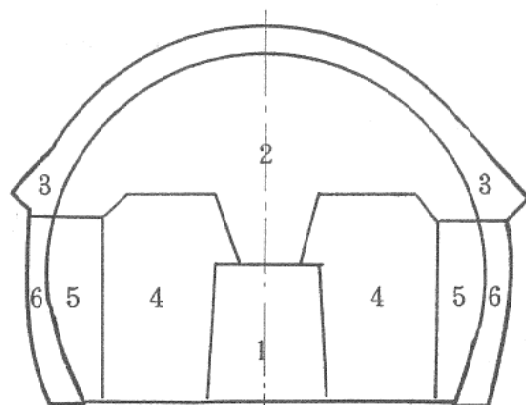


図4 底設導坑先進上部半断面掘削式

5. 全断面掘削式

地質さえ良好ならば、小さな導坑を先進させ、それを切り抜けるような面倒なことはせずに、トンネルの全断面を一度に掘削するのが最も有利なはずで、それが全断面掘削式といわれ

る方法である。しかし、これを採用する場合には、大型の機械設備、すなわち前記のジャンボとか、後述の鋼アーチ支保工、スチール・フォーム、コンクリート・ポンプ、あるいは大容量の積込機械とか運搬車両などが完備していなければ、この方式もその威力を発揮することができない。戦前に実施例がなかったのはそのためである。

Ⅳ. 発 破

岩石の爆破が最も困難なのは、導坑を掘進するときである。なぜならば、この場合には、岩石が空気に接するいわゆる自由面が導坑の切端一つしかなく、しかもその面積が小さいため、切端の手前にある周辺の岩石が爆破に抵抗するからである。そこで、導坑の掘進に当っては、切端の面積 1 m^2 当り 2～5 個という多数の孔をあけるとともに、それらのうち、中央部に設ける心抜孔は切端の中心に向かって掘り、その中の爆薬を一瞬早く爆発させる。そうすれば、まず中央部にくさび形の開壁面ができるので、引き続き、切端の外周に外側に向けて掘ってある孔に発破をかけ、全体の爆破効果を大にするわけである。しかし、効果を最大にする孔の数と配置および爆薬量などは、岩石の強度とか状態によって大きく変化するので、簡単には決められない。したがって、工事開始のさい何度も試験発破を行ったり、あるいは工事中つねに爆破効果を注視し、岩石の変化に応じて修正を加えて行く必要がある。

爆薬としては、今日でもダイナマイト、くわしくはコロイド・ダイナマイトが一般に使われており、いまだにアルフレッド・ノーベルの恩恵を受けていることになる。しかし、より安価な爆薬を望む声はいつの時代にも強く、その意味で、最近、硝安と軽油を混合した AN—FO 爆薬が、かなり使用されるようになっている。

Ⅴ. 支保工

掘削したトンネルの崩壊を防ぐために、一時的に設ける構造物のことを支保工といい、以前わが国では、生の松丸太を使って、図 5 に示すような非常に複雑な骨組を坑内で組み立てていた。図を見ると、手先の器用な日本人の特徴が

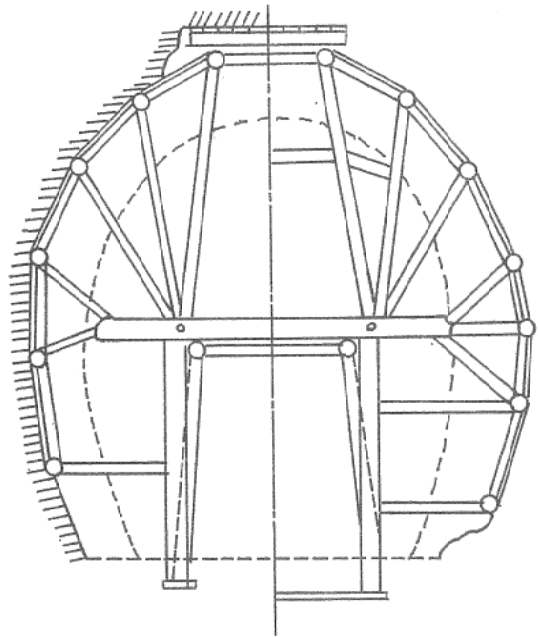


図 5 木製支保工

よくうかがわれるが、しかしこれでは、敏速な施工が困難なうえに、大型機械の使用もほとんど不可能であり、しかもコンクリートを打設するとき、危険を犯して支保工を取りはずさなければならない。

そのため最近では、H 型鋼を用いた鋼アーチ支保工が広く使用されるようになってきている。すなわち、アーチ部の頂点、または頂点と下端に継手が来るような型式の部材を、あらかじめ工場で製作しておき、それをボルトで結合し、外側に矢板を当てて地山を押えるわけである。したがって、その下方に広い空間が残されることになり、そのうえ、この支保工はコンクリート中に埋め殺されるので、工事の安全ならびにコンクリートの強化のために、多大の効果が発揮される。しかし欠点は材料費がかさむことである。いいかえれば、地質によって大差はあるが、内空断面の幅が 10m で地質が中程度の場合、トンネル延長 1 m 当り約 1.3 t の鋼材が、永久に埋め殺されてしまうのである。

Ⅵ. ずり出し

発破が終れば、ただちにずり出し、すなわち破碎した岩石の破片を坑外に搬出する作業を始めなければならない。しかし、前に示した木製支保工の図を見ればわかるように、以前は、その中の狭い空間に単線軌道を設けて、ずりその

他すべての資材の運搬を行なうほかはなく、トンネルの掘進速度はずり出しに支配されるとさえいわれていた。ところが、近年鋼アーチ支保工が採用されて以来、複線軌道の敷設はもちろん、ダンプトラックが坑内で行き違うことも可能になっている。もっとも、トラックといえば、すぐ排気ガスのことが頭に浮ぶであろうが、しかし、そのために換気装置を設けたとしても、軌道の敷設、ポイントの移動、車両の入換その他によって、種々の不利不便をこうむるよりはメリットの多い場合も少なくないので、トラックによるずり運搬もしばしば行われるようになっている。なお積込みには、ショベローダ、ベルトコンベヤーなどが用いられる。

VII. ライニング

地山の崩壊を防ぐ永久的な構造物をライニングといい、最近ではすべて場所打コンクリートによって施工されている。しかも、生コンクリートの輸送にアジテータ・カー、打設にはコンクリート・ポンプ、型わくとしては、例えば図6に示すような移動式スチール・フォーム、すなわち、使用後折りたたんで前方に運び、また組み立てる鋼製型わくが使用されており、戦前のことを思うと、まさに隔世の感がある。

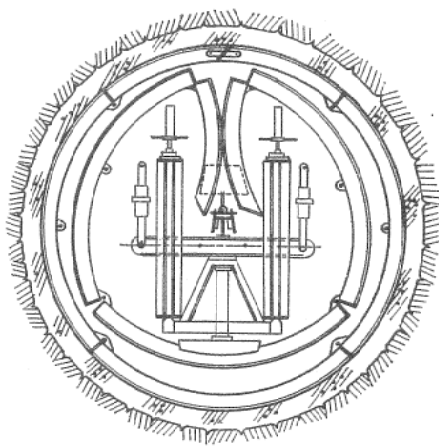


図6 移動式スチール・フォーム

VIII. 水底トンネル

1. 出水事故

水底トンネルの施工上最も重大な問題は、いうまでもなく、出水事故をいかにして防ぐかということである。とくに海底トンネルにあっては、海峡に平行に必ず断層が走っているのを、

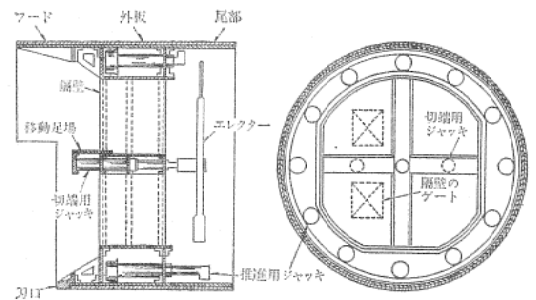


図7 シールド

出水の危険性がきわめて大であり、万一事故が発生したとすれば、場合によっては、その工事を放棄せざるを得ないようにもなるであろう。

2. シールド工法

図7に示すようなシールドと呼ばれる鋼製のシリンダーを、ジャッキにより切端すなわち図の左方に向けて推進し、トンネルを掘削する工法である。ジャッキの反力は、図示のエレクターによって尾部の内側に組み立てられるブロック、すなわちセグメントに直接伝えられ、また止水は、圧縮空気をシールド付近に送入し、外部の水圧とバランスさせることによって、ほぼその目的が達せられる。この方法は、戦前、関門鉄道トンネルに適用されて成功を収め、以来、水底トンネルのみならず、市街地下トンネルでもしばしば採用されている。

3. 沈埋式工法

沈埋管またはエレメントと呼ばれる長さ100m程度のパイプを陸上で製作し、これを現場まで浮上えい航して、事前に水底に掘削してあるみぞの中に沈設する方法である。沈埋管は鉄筋コンクリート、または鋼製のシェルの中に鉄筋コンクリートで作られ、その構造は完成後のトンネルとほぼ同一で、ただ両側に仮の止水壁が取り付けられている。これらの沈埋管は次のようにして接続される。すなわち、図8に示すように、まず、管の両側にあるジャッキとブラ

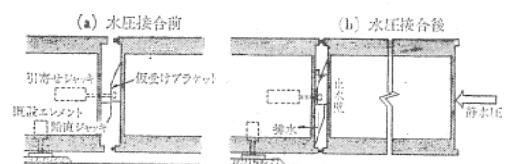


図8 沈埋管の接合方法

ケットで、接合すべき管を引き寄せると、外周に取り付けたゴム・ガスケットが圧着されて、継手部の水が外部と絶縁される。したがって、その水を抜けば、反対側の止水壁にかかる静水圧により、管が図の左方に押し付けられるので、2枚の止水壁を破り、継手部の鉄筋コンクリートを施工するわけである。ただし接合前に、図示の鉛直ジャッキを使い、かつ管の底板から砂とセメントミルクを注入するなどして、あらたに接合すべき沈埋管を、ほぼ正しい位置にセットしておかなければならない。

この工法では、沈埋管の自重と浮力とがだいたいバランスし、基礎地盤にほとんど負担をかけない。したがって、水底に土砂が厚くたい積した場所に適しており、米国のサンフランシスコ湾、東京多摩川の河口、大阪の堂島川など、内外ともに施工例が多い。

4. 青函トンネル

現在工事中の青函トンネルのように、水深が大で岩石の露出した海底下にトンネルを作る場合には、前記の方法はいずれも採用することができない。それならば、上に海があろうがなかろうが、通常 mountain tunnel と同様な方法をと

らざるを得ない。しかし出水対策はどうするのか、これがまず問題である。そのために、切端から前方に向って、多数のボーリングを広範囲に行ない、それぞれに対して、強大な圧力で、薬液またはセメント・ミルクの注入が行われている。いいかえれば、水の出そうなクラックや断層破碎帯をすべてシールし、その中にトンネルを掘ろうというわけである。

また、青函トンネルは、完成すれば全長約50 km、長さだけでも、現在世界一のシンブロン・トンネルの2.5倍、そのうえ海底にあるという、まさに超世界一のトンネルになる。それだけに、本州と北海道の両方から本坑を掘るだけでは、工期が長びいて仕方がない。そこで、本坑のほかに、それと平行に導坑を掘削し、先進したこの平行導坑からさらに横坑を掘って、その前後でも本坑の工事を進めることになっている。平行導坑は、また調査坑の性格も持っており、これさえ貫通すれば、豆トンネルではあるが、初めて本州と北海道が陸続きになり、工事の大半が完成したといっても、過言ではないであろう。