発展するトンネル工学

藤井松太郎*

1. トンネル技術の発展

トンネルとは地表下につくられた通路である。トンネル内をとおるものの相違によって鉄道トンネル，道路トンネル，水路トンネル等々の呼び方の違いはあるが，いずれもが地表下に人間が掘削した通路であるという点で一致している。トンネルは人為的につくられた水平の井戸のようなもので，重力に抗して地下に空間をつくるのであるから，ときとして地圧に悩まされ，また地下水位下を掘る場合は湧水に悩まされることとなる。トンネルは何物にもじゃまをされない最短の通路で便利なものではあるが，これを掘削する技術は誠に複雑多岐で，常に危険をともないかつ工費のかさむものである。最近における産業文化の飛躍的な発展は画期的に道路，鉄道等の交通網の整備を求め，これに加えるに給排水，発電水力等のためにますます多数のトンネル掘削を余儀なくしている。就中最近における世界的な傾向としての人口の都市集中は，地下鉄，上下水の整備のためにいよいよ多数のトンネルを必要として，トンネル ブームに拍車をかけることとなった。アメリカ合衆国の鉱山局長ヒイバード博士は，アメリカ国内で今後15ヵ年間におよそ20ビリオンドルつまり邦貨換算8兆円前後の地下掘削工事をやることになるだろうといっている。日本においても，昨今鉄道や道路当局が考えているような高速交通網の整備をやり，さらに大都市の地下鉄網を拡張すれば，矢張り合衆国の数字に近いような地下工事が起こるのではないかと考えられる。トンネルは金がかかってそのうえ危険がともなうものではあるが，社会の産業文化の発展は不可避的にいよいよ多数のトンネルを必要とする。いかにしてトンネル工事をよりやすく，より安全に施工するかということが，今日トンネル技術者の最大の関心事になったことはきわめて当然である。事実アメリカにおいては，トンネルの高速掘削機ならびにその背後をなすシステムの開発に大童の研究を続けており，今後5年か10年のうちにトンネル掘削費を50%程度下げうる可能性があると，前記ヒイバード博士は力瘤を入れている。アメリカについでトンネル技術の先進国であるソ連は，すでに多種のメカニカル シールドを開発して，われわれの想像以上の廉価で地下鉄を掘っており，また彼等の研究態勢から見ると，まだまだ発展進歩が期待されるのではないかと思われる。欧州諸国も地下鉄掘削や水底トンネルの施工等に各種の新機軸を出しており，恐らくは英仏海峡トンネルの着工を目標として各種の研究開発が行なわれているものと思われる。

トンネル技術は，他の科学技術と同じく前世紀末から今世紀に入って大きな発展をしたものであるが，その歴史はきわめて古い。世界最初のトンネルは紀元前2200年，バビロン王が彼の宮殿と神殿を結ぶために長さ3 000フィートのトンネルを掘ったのがそもそもの始めであるといわれている。このトンネルは相当の長さを有するばかりでなく，ユーフラテス河を横切るために600フィートにわたって，ユーフラテス河の河付替を行ない，ドライ工法で河底トンネルをつくったもので，近代技術に通ずるものがある。当時はトンネル掘削のような危険作業はすべて奴隷労働によったもので，偉大な支配者は容易に消耗品である奴隷を手に入れることができるために，その後の2000年間はさしたるトンネル技術の進歩が見られなかったのである。強いていえば，バビロン王のトンネル後約1500年を経て，ギリシャ人がその後の測量技術の進歩によって，トンネルを両側の坑口から中央に向って掘削する方法を発見したくらいのものであろう。その後，ローマ時代に入って多数のトンネルが掘られ，そのうちのあるものは今日でも使用されているのであるが，彼等はシャフトを利用してずりを巻き上げ，あるいは坑内の換気を行なう方法を発見したが，岩石爆破は依然として焚き火で切羽を熱し，急に撒水して岩石にクラックを入れる方法を出でなかった。文芸復興期になって火薬が発明されたが，トンネル掘削に火薬使用が一般化するまでには，その後なお200年を要したのである。19世紀の産業革命はトンネル掘削にも数々の新機軸を出し，近代トンネル技術の曙を迎えることとなった。すな

* 正会員　工博　国鉄技師長　土木学会トンネル工学委員会委員長

わち，1818年ブルンネルはシールドを発明してトンネル掘削技術に革命的進歩をもたらし，イタリアの物理学者コラアドン（Colladon）は，軟弱地盤の湧水圧を圧さく空気でバランスさせ，地盤の崩壊を防ぐ方法を研究し，その後イギリス人コーチレン（Cochrane）がこの原理により，圧さく空気による水底トンネル掘削の特許を1830年にとっている。

さらにイギリスの技師タルボット（Talbot）は，圧さく空気シールド工法を改善して功績を残した。このように，主としてイギリスを中心として水底トンネル掘削技術が進んでいる間に，欧州大陸においてはアルプスを貫く鉄道トンネルの建設が起こり，岩石トンネルの掘削技術が大いに進歩することとなった。その中心人物はゾオマイラー（Sommeiller），ファブル（Fabre），ブランド（Brandt）らであるが，ゾオマイラーはモンシェニーで始めてさく岩機を導入し，ファブルはサンゴタルドで始めてダイナマイトの使用を始め，ブランドはシンプロンで長大トンネル工事の計画・管理の面で大きな足跡を残している。

合衆国におけるトンネル技術の発展は欧州より多少遅れ，20世紀に入ってからではあるが，1900年初頭，ハドソン河底トンネルの建設で，いわゆるケーソン病の究明・治療の方法を確立し，ミシガン セントラル鉄道のデトロイト河底トンネルでは沈埋工法なる新機軸を出している。

わが国における古いトンネルは，景行天皇12年（西紀82年）熊襲御親征のおり，土蜘蛛のたてこもる石窟を外部から坑道を掘って攻められたと日本書紀が伝えているのが恐らく最古のものであろう。道路交通に車を用いることは王朝時代の一部を除いてわが国では余り一般化せず，交通はもっぱら騎馬，歩行によったため，道路の曲線，勾配等が大して支障とはならず，トンネルの発達が遅れることとなった。江戸時代に入ってかんがい利水のため相当多数のトンネル，当時のいわゆる掘貫，掘抜あるいは切貫が掘られ（琵琶湖用水，品井沼用水等が有名である），掘削技術の幼稚な当時のことであるから，これらはいずれも凝灰岩，集塊岩等の比較的掘りやすい岩石のところに多い。菊地　寛の『恩讐の彼方に』で有名な耶馬渓の青の洞門は，高さ2丈，幅3丈，長さ100余間で，越後の僧禅海が近在の石工を動員して寛延3年8月（西紀1750年）に完成したものである。明治に入ってわが国にも鉄道が導入された。鉄道はその機能からいって線型，勾配に大きな制限があり，わが国のような山国で鉄道を建設するとなれば不可避的に大小のトンネルを掘らざるをえない。わが国のトンネル技術が最近に至るまで鉄道，就中鉄道建設技術者を中心に発達してきたことはきわめて当然であろう。わが国最初の鉄道トンネルは，大阪～神戸間の石屋川トンネル（61 m）でイギリス人技術者の手により天井川を開削したものである。日本人技術者の手になった最初のトンネルは，旧逢坂山トンネル(665 m)で，これに続いて柳ケ瀬トンネル(1 382 m）が掘削され，三角測量，ダイナマイト，さく岩機，空気圧縮機等が順次導入され，わが国トンネル技術もようやく近代技法を身につけることとなった。鉄道前期におけるトンネル技術は，丹那トンネルで代表される。この工事は東海道線 国府津～沼津間の勾配改良のため1916年着手した延長7 840 m の複線トンネルであるが，温泉余土等の悪地質や湧水に悩まされて16年の年月を費し，辛うじて完成を見た世界的にも有名な難物であった。しかしながら，この難物を克服するために用いられたセメント注入，圧気工法，シールド工法，排水トンネル等の諸技法は，わが国トンネル技術を著しく向上させ，その後着手された関門海底トンネル掘削の原動力となったものである。第二次大戦後は独り鉄道のみならず道路，発電水力等のために数多くのトンネルが完成されているが，戦前の人力主体の工法から現在の重機械主体の工法への切替点となったものは，佐久間ダムにともなう飯田

表—1　世界長大鉄道トンネル

トンネル名	国名	延長 (m)	幅×高 (m)×(m)	着工～竣工
Mt. Cenis	フランス・イタリア	12 847	8.00×7.50	1857～1871
St. Gothard	スイス・イタリア	15 000	8.00×7.50	1872～1882
Ronco	イタリア	8 300	—	1882～1888
Arlberg	オーストリア	10 025	8.02×7.62	～1885
Jenda	イタリア	8 098	—	～1899
Hauenstein	スイス	8 047	—	—
Simplon	スイス・イタリア	20 036	3.39×5.49	1895～1906
Karawanken	オーストリア	7 976	—	～1906
Tauern	オーストリア	8 525	—	1901～1907
Ricken	スイス	8 605	—	～1910
Loetchberg	スイス・イタリア	14 534	9.14×6.10	1906～1913
Arthur Pass	ニュージーランド	8 553	4.57×5.12	1906～1923
Somport	フランス・スペイン	7 882	—	1909～
Rogers Pass	カナダ	7 894	8.08×6.63	1913～1915
Apenine	イタリア	18 618	8.63×6.43	1920～1931
清水	日本	9 702	4.88×6.02	1922～1931
Moffat	アメリカ	9 802	4.88×7.32	1923～1927
New Cascade	アメリカ	12 538	4.88×7.32	1925～1928
新丹那	日本	7 905	9.60×7.85	1941～1964
北陸	日本	13 850	8.54×6.44	1957～1962
新清水	日本	13 490	4.76×5.67	1963～1967
頸城	日本	11 355	8.54×6.95	1966～
六甲	日本	16 220	9.60×8.10	1967～
神戸	日本	7 940	9.60×8.10	1967～
帆坂	日本	7 560	9.60×8.10	1967～
Flat head	アメリカ	11 550	5.40×7.50	1966～

線付替の大原トンネルである。このトンネルは延長5062mに過ぎないが，2年弱の短期日で完成を見たものである。佐久間ダム工事と同じくアメリカ式の新しい重機械を駆使して，わが国土木施工の近代化の口火を切ったものとして永遠に記憶さるべきものであろう。

トンネル技術は以上述べたような足取りをたどって現在の近代的な姿に発達してきたものであるが，現在といえども依然として工費がかさみ施工に危険がともなうことに変わりはない。これをいかにして克服するかは世界のトンネル技術者共通の命題である。合衆国，欧州，ソ連等で懸命な努力が精力的に行なわれていることはすでに述べたが，わが国においてはどうであろうか。わが国は山国である関係でひとり鉄道，道路に限らず，水力発電でも利水事業でも相当の土木工事には必ずトンネル工事がともなう。トンネル技術も他の技術と同じく，それぞれの分野でそれなりの研究が行なわれ，相当の発達を見たことは事実であるが，トンネルすなわち，地下に通路をつくることは全く共通なので，各分野を一丸としてトンネル技術のいっそうの発展をはかろうじゃないかということで，昭和38年春土木学会内に各分野のトンネル技術者を網羅するトンネル工学委員会なるものが生れた。同委員会は，各委員の懸命な努力で昭和39年3月には『トンネル標準示方書』を制定し，昭和41年には『わが国シールド工法の実施例第1集』を刊行，さらに毎年トンネル工学シンポジウムを開催し，回を重ねることすでに4回におよんでいる。特に本年は合衆国および欧州へトンネル技術の専門家より成る調査団を派遣して，つぶさに諸外国のトンネル技術を調査し，その報告を第4回トンネル工学シンポジウムで行なって好評を博した。トンネル工学委員会の今後の目標は，さきに制定した標準示方書の現状に即した改訂，わが国情に合ったシールド工法の樹立，さらに根本問題として土質力学，岩盤力学等によるトンネル地圧の究明等であるが，各委員の現在の熱意をもってすれば，相当の成果が期待できるので

表—2　世界長大道路トンネル

トンネル名	国名	延長 (m)	幅員・勾配 (m)	車線	換気方式，換気量	着工～竣工
モンブラン	フランス・イタリア	11600	7.0 2.4%	2	上方送気半横流式 600 m³/sec	1959～1964
ベルンハーディン	スイス	6596	7.0 0.95	2	上方向横流式 825 m³/sec	1962～1966
グランサンベルナール	スイス・イタリア	5823	7.5 5.0	2	上方向横流式 380 m³/sec	1959～1964
関門トンネル	日本	3461	7.5 4.0	2	上方向横流式 779 m³/sec	1939～1958
マーシイ	イギリス	3226	11.0 3.3	4	上方送気半横流式 1180 m³/sec	1926～1934
ガダラマ	スペイン	2800	7.9 3.5	2	下方送気半横流式 800 m³/sec	1961～1964
ブルックリンバタリー	アメリカ	2779	6.5 4.0	2	上方向横流式 978 m³/sec	1940～1950
ホランド	アメリカ	2608	6.1 4.0	2	上方向横流式 900 m³/sec	1920～1927
リンカーン	アメリカ	2504	6.5 4.2	2	上方向横流式 800 m³/sec	～1937
バルチモアハーバー	アメリカ	2331	6.7 3.5	2	上方向横流式 400 m³/sec	1954～1957
六甲山トンネル	日本	2843	6.5 3.0% 0.3%	2	下方送気半横流式 380 m³/sec	1965～1967
恵那山トンネル	日本	8500	7.0 1.7% 0.5%	2	横流式 3000 m³/sec	1968～
Saint Gotthard	フランス	16225	7.5 0.76	2	横流式 2110 m³/sec	1968～
Banihal	インド・カシミール	2400	4.88	2	縦流式	1950～1958
Belchen	スイス	3180	7.75 1.0	2	横流式 572 m³/sec	1963～1968
笹子トンネル	日本	2953	6.5 0.5	2	上方送気半横流式 160 m³/sec	1955～1958
西栗子トンネル	日本	2675	7.0 2.2	2	半横流式 70 m³/sec	1963～1966
東栗子トンネル	日本	2376	7.0 1.0	2	半横流式 62 m³/sec	1963～1966
仰坂トンネル	日本	2778	6.5 1.5	2	下方送気半横流式 480 m³/sec	1965～1967

はないかと考えている。

トンネル技術が近代化した近世になって，どんなトンネルが掘られたであろうか。トンネル技術の発達は，トンネルの長さに反映しているとも考えられるので，前世紀末から現在に至るいわゆる長大トンネルを参考までに表示すると 表—1,2 のとおりである。

2. トンネル技術の現状

トンネルを設置される場所によって山岳トンネル，都市トンネル，水底トンネルの三者に分類することは便宜的なものではあるが，広く行なわれているのでこの分類にしたがって議論をすすめることとする。これらのおのおのの詳細については，本トンネル特集においてもそれぞれの専門家が筆をとっているので，筆者はいわば批評家の立場から自由に気のついたことを述べることにしたい。

(1) 山岳トンネル

ここでいう山岳トンネルとは，山脈を貫く狭義の山岳トンネルばかりでなく，一般に地下鉄と呼ばれている都市トンネル，河底，海底等に設けられる水底トンネルを除いた一般のトンネルを意味している。地下鉄や水底トンネルは，むしろ特殊トンネルとでも呼ぶべきもので，トンネル技術の相当発達した近代になって起こってきたものである。

トンネル作業を分解して見ると，岩石の掘削，ずりの搬出処理，掘削後の空間を一時的に支える支保工，さらに永久に地山を支えるライニングの構築に分かれ，これらのおのおのを能率的に施工することがトンネル工事全体の工期の短縮，工費の節約につながるものではあるが，これに先立って，一体トンネルをどこに掘るかというトンネル ルートの決定が，より一義的に工期，工費を支配し，きわめて重要であることはいうまでもないことなのだが，一般には十分認識されていない憾みがある。わが国は土地が狭小で，十分にルートの調査をして見ても代替ルートを求める範囲が限定されるだろうし，他方十分な地質調査には相当の工費を要することとなるので，いきおい不十分な調査で工事に着手することが多く，思わぬ悪地質に悩まされ工費がかさみ工期の延びる場合がまれではない。この点は十分な事前調査に金を惜しまない合衆国等の合理性に学ぶべきであろう。トンネル作業は掘削，支保工，ずり出し，ライニングの各作業が一貫したベルト コンベアーのように，どこにもたるみがなく動くことで初めて能率があがるもので，局部的に強力なところがあっても，どこかに弱点があれば，進行はその弱点に押えられることとなり，能率はあがらない。ここに作業の調和のとれたシステムの研究が必要となってくる。最近掘削，ずり出し，支保工，ライニングの各部門で新しい能率的な機器が開発され実施に移されているが，新しいものを実作業に導入する場合は，予見できない初期故障等を考えて，十分な余力を持たす配慮が必要であろう。近来 PERT 等の技法が導入され，この種の問題の合理的な究明が行なわれるようになったことは喜ぶべきことである。

トンネルの掘削方式は，頂設導坑式，底設導坑式，新オーストリア式，特殊なものとして側壁導坑式等々の経路をたどって現在に至ったもので，昨今わが国では底設導坑上部半断面式がほとんど標準方式となり，山の良好な場合，全断面式が行なわれるようになった。掘削方式は，地山の良否，作業機械の大いさ，支保工の方式等に支配されるものであるが，現在のように重機械の威力によりできるだけ進行を上げようとすれば，いきおい底設導坑上部半断面式，あるいは全断面式になってくる。上部半断面式は，上部半断面を掘削した後，アーチ部分の巻立をして下部を掘削し，側壁コンクリートを打設するものであるが，この場合下部のいわゆる土平部分は，できうれば千鳥に掘削して十分安全な脚を，既設のアーチにつけてから掘削しなければならないことはもちろんのことである。しかるに，仕事の能率をあげるために勇敢に土平部分をかえしており，十分安全な施工が行なわれていないのをしばしば見かけるのはきわめて残念なことである。

側壁導坑の相当大きなものを左右に2本掘ったり，原爆型と称して底設導坑上部半断面式を勇敢に施工するがごときは，トンネル掘削の本道とはいい難いのである。

掘削の終った地山を本巻立をするまで一時的に支えるものが支保工であるが，わが国においては戦前まではもっぱら生松丸太を用い，地圧の大小によって合掌，枝ばり式，後光ばり式が用いられていた。斧指と称する熟練工が地圧の大小を睨んで支保工を組立てるのであるが，その構造上余り強固なものではなく，機械を入れる十分な作業空間が乏しく，そのうえコンクリートで巻立をする際，支保工材は後日腐朽して空洞を残すということで，取りはずすことを原則としていた。これがいわゆる「木外し」という作業で，荷のかかっているわく組を取りはずして行くのだから危険この上もない作業である。事実，当時のトンネル事故の記録を見ると，その大半は木外しの際に起こっている。合衆国においては，当時でも重機械を入れるため，木の角材をアーチ型に組んだいわゆるテンバー アーチなる支保工が行なわれていたが，作業の能率や安全のため漸次，鋼支保工に移行して行った。わが国においても，戦後 Proctor and White の "Rock Tunneling with Steel Supports" によって，型

鋼アーチ方式が導入され，現在はこの方式が標準方式となり，トンネル工事の安全度が著しく高まったことは誠に喜ぶべきことである。鋼支保工それ自身がいかに強固なものであっても，その強度を十分発揮するためには，脚部は底板その他をしっかりと踏前え，前後の隣接する支保工相互は強固に結ばれており，しかもアーチは，地山にくさびでしっかり締め付けられていることが絶対に必要である。脚のない幽霊が物々しく鎧をつけて辛うじて立っているのでは，お金の浪費ばかりでなく，危険この上もないのである。鋼支保工を施工する技術者は，何をおいても，前記の Proctor and White 両氏の著書を熟読していただきたいものである。

古くから鉱山関係で用いられ，最近はトンネル工事でも使用されるようになった「ロックボルト」も，支保工の一種と考えることができる。これは掘削表面からせん孔した孔底に鋼ボルトをくさび作用で定着し，表面付近を深部に縫い付けるもので，はだ落ち程度を防ぐには作業が簡単できわめて有効である。鋼ボルトを地山アーチの補強材と考えて研究を進めている研究者もいる。掘削表面にコンクリートを乾式または湿式で吹き付け，地山岩石の割目，くぼみをてん充して，掘削面からある深さの地山にアーチ作用を期待する工法も一種の支保工と考えることができる。

現在スイス系の「アリバ」，ドイツ系の「トルクレット」等が一般に知られているが，これらはいずれも乾式吹付機である。型鋼の支保工は工費がかさみ，その建込みも簡単ではないので，これを救う方法としてロックボルト，コンクリート吹付工等の発展が期待されるものと思われる。岩石爆破に用いる爆薬は，40%程度のニトログリセリンを含んだダイナマイトを使うことが一般であるが，約 20 年前合衆国においてアンモニウムナイトレートに 6% 程度の燃料油を加えた ANFO が発明され，取り扱いがダイナマイトに比し安全簡便であるばかりでなく，値段もダイナマイトの半分程度であるということで当の合衆国，カナダを始めとし，世界各国でダイナマイトに代り爆薬の主役になりつつあるのに比し，わが国では新清水トンネルで試用されたのに止り，その後あまり一般化しないのはいかなる理由であろうか。いまさら火薬製造と結びつけて考えることなどは時代錯誤の優なるものであろう。

トンネル工事の安全，能率化の点から坑内換気の問題がある。一般に爆破直後，送気管で新鮮な空気を送りこんで，爆破の煙を薄くし，その後はさく岩機の排出空気で自然に排気が行なわれるものとして，特別な長大トンネル以外は完全な換気設備を設けることが少ないようである。

過去においては，ずり出しは原則的に蓄電池機関車を用いるので，エンジンの排気ガスの心配はなかったが，最近はディーゼル機関車を用いることが多くなって，これらの機関から排気する CO_2 や NO_2 がいっそう坑内空気を汚濁している。さらに最近は各種のトンネルせん削機が開発されつつあるが，これらはいずれも労務者の硅肺等の原因となる石塵を相当量発生し，これの処理が重大問題となりつつある。いずれにしても，これからのトンネル工事は，坑内空気の清浄化に十分な設備をして，作業の安全，能率化を計る必要があろう。原則として排気，送気の両者に切り替えられる十分な容量のファンを設けることが安全上からも，能率上からも必要と思われる。

最近のトンネルは，型鋼のアーチ支保工で地山をがっちり受止め，その内部に従来どおりコンクリートの本巻きを施すことが普通となっているが，この際本巻きのコンクリート ライニングは一体どんな力を受けるのであろうか。きわめて常識的ないい方をすれば，ライニング施工後の地圧の増大を型鋼アーチと分ちささえるということとなる。この問題は相当むずかしい問題で，とかく簡単に割り切ることもできまいが，従来のように山の良否で巻厚を細かく変化さすことは大した意味がなさそうである。掘削方式として底設導坑上部半断面方式が一般化したが，この場合，上部アーチ部の本巻きは下部断面の掘削に先立って行なわれるいわゆる逆巻き工法となり，下部断面を勇敢に掘削すると既設アーチが支承を失なって危険なことはすでに述べたが，下部断面掘削後行なわれる側壁コンクリートと既設アーチ コンクリートの接合部の施工がきわめて困難で，完全に施工されているものは残念ながら少ないのではないかと思われる。練直しコンクリートで入念に施工するくらいの配意は必要なのではないか。

最近トンネル技術が大いに発展してきたことはすでに述べたが，その単的なあらわれとして，掘進速度が著しく大きくなってきた。筆者の知る限りでも，戦前は岩石にもよるが大体日進 2 m 程度，月進 50 m 程度を常識としたものだが，最近は日進 6 m 程度，月進 150 m 程度を常識とするようになった。記録を拾って見ると，わが国では黒部ルートで花崗岩の切羽 22 m^2 の全断面掘削で，月進最大 540 m を出したのが最高のようである。掘進速度が大きければただちに工期が短縮されるばかりでなく，逆比例とまでは行かないにしても著しく工費が下がることとなる。合衆国等で精力的にトンネル掘削機械が研究されているのも，それによって掘進速度を高め，工費の低下を計ろうということにほかならない。わが国においても，日進 10 m，月進 250 m 程度が常識となる日の速やかならんことをこいねがうものである。

トンネル工事は工費のかさむものといったが，それで

はどのくらいのけたのものであろうか。参考のため鉄道トンネルを単線，複線別にし，戦前のものに1000を乗じて現在物価に換算して見ると，戦前は単線キロ当り3億円程度，現在は単線 2.5 億円，複線 4.5 億円程度となっている。

特別に工費の大きいものの例としては，旧丹那で複線キロ当り 31.61 億円，旧清水単線キロ当り 11.70 億円，関門単線キロ当り 54.40 億円等がある。

（2） 都市トンネル

人口が大都市に集中する結果として，地下鉄その他の交通網の整備拡充が必要となり，トンネル工事が諸所に起こってくる。従来の地下鉄は両側にシート パイルを打ちこみ，これに横桁をかけ敷板を施して路面交通を確保しながら路面下を掘削し，地下鉄躯体を構築して土砂で埋めもどし，路面を復旧するいわゆるオープン カット工法によっていたのであるが，近来のものは，既設の地下鉄のさらに下部に行かざるをえない関係や，シート パイル打込みの騒音が問題とされるようになって，トンネル工法就中シールド工法によらざるをえなくなってきた。外国でも概してそうであるが，わが国では大都市は大抵大河川下流の沖積地帯に発達しているために，地下鉄はいきおい軟弱地盤や湧水に悩まされることとなり，工費をきわめて高いものにしている。地下鉄が深いところをとおるといっても，その冠りは小さいものであり，しかも軟弱地盤が多く，普通の山岳トンネル工法によることは困難なので，地下鉄といえばただちにシールドというような事態になってきた。ところでシールドは，地下鉄の掘削断面と同大の鉄製円筒を，円筒内にセグメントで組立てられた1次巻立を足場として，ジャッキで前方地山に押込み掘削を進めて行くものであるが，このためセグメントよりなる1次巻立は，ジャッキの推力を受けるので強固なものとなり，他方シールド自身が後進のできない不都合なものであるため，一般にシールドの工費はきわめて高いものとなる。従来は人力で掘削する普通シールドが多かったが，最近は前方を機械的に掘削するいわゆるメカニカル シールドが多くなってきた。メカニカル シールドは，いうまでもなく，トンネル掘削機械の一種で，地質の変化に対する適応性が低く，しかも大口径のものをつくることが困難である。いかにしてやすいセグメントをつくるか，いかにして地質変化に対し適応性の高い大口径のメカニカル シールドを開発するかということが，シールド発展の将来を卜するものと思われる。

わが国では，シールド工法が本格的に導入されてからまだ日が浅いために，設計者も施工者も少し固くなり過ぎて，不必要に頑丈なものをつくっているのではないかと思われる。現にこの工法の進んだソ連等では，1リング 1m のコンクリート セグメントの巻き放しで無造作に地下鉄をつくっているのである。将来シールド工法が発達して，その工費も漸次下がってくるであろうが，シールド工法が地下鉄工法の唯一の方法ではないことは事実で，オープンカットのできるところはオープン カット，トンネル工法の許されるところは，トンネル工法でいっこうさしつかえはないのである。要はいかにして工費を切り下げるかということであろう。

（3） 水底トンネル

世界最初のトンネル工事で，バビロン王はユーフラテス河の河底に水底トンネルをつくっているが，これはいわゆる河付替によるもので，本格的な水底トンネルとはいい難い。無制限な水の下にトンネルを掘ろうというような暴挙は久しく企てられなかったのであるが，考えて見ると水を押える方途さえ見出せば，水底トンネルも山岳トンネルも本質的にえらぶところはないのである。1830 年代イギリス人コーチレン，タルボット等はブルンネルのシールドに圧さく空気を用い，軟弱な河底トンネルの工法を完成し，さらに遡って 1803 年イギリス人モットレイ（Mottray）は，英仏海峡に巨大な鉄管を敷設してトンネルとする案を提案して，後年 1900 年初頭ミシガン セントラル鉄道のデトロイト河底沈埋式トンネルが生れる示唆を与えている。

水底トンネルは，水底から透水に耐える十分な冠りをとって普通トンネル工法により掘削するものと，あらかじめ長さおよそ100 m程度のトンネル躯体の両端に，バルクヘッドを施して水密にしたものをドックその他で製作し，所定の位置に曳航して水底に掘られたトレンチ内に沈下させ，すでに沈下定着を終った隣接のトンネル部分に連結して，トンネルを構成して行くいわゆる沈埋式の2つの方法が行なわれている。普通トンネル工法によるものは，岩石の節理きれつあるいは断層破砕帯の透水を薬液またはセメントの注入等でいかにして押えるかということが，工事の成否を決する鍵であり，沈埋式は水底にトレンチを掘る関係上可能な深さは，水面下 40 m程度におさえられ，しかもトレンチ内にトンネル躯体をいかにして堅固に定着さすかというところに問題がある。

合衆国では，チェサピーク湾でもサンフランシスコ湾でも，トンネル躯体の沈下直前にトレンチをスクリードマシンでさらい，砂利を敷きならしてその上に躯体を沈下する方法をとっているが，ロッテルダムの地下鉄は，杭頭にナイロンスリーブを取り付けたものの上に躯体を定置し，ナイロンスリーブ内にグラウトを注入して，杭頭を躯体底部に密着させる方法をとっている。さらにス

ウェーデンのゴッタ河底のトンネルでは，河底の杭打基礎の上に巨大なナイロンの袋を敷き，トンネル躯体が定置されるとグラウトをこの袋に注入して，杭と躯体底の密着を計っている。

3．トンネル技術発展の方向

将来は掘削機械が発達して，現在行なわれているさく岩，爆破，ずり出し等の各作業が連続的には行なわれ難い非能率な，いわゆる「爆破工法」にとって代るかも知れない。しかしそのためには，掘削機械を地質の変化に耐えるものにし，他方ずり出し，支保工の建込等の背後のシステムを強化するとともに，切削メタルの開発により，現在の中硬岩 1 000 kg/cm² 程度の上限を硬岩にまで上げる等，まだまだ幾多の問題が残されているのである。他方新しいものとして，泥水ずり出し，あるいは 1 500 kg/cm² 程度の圧力水による岩石切削等が現在研究されている。軟弱地盤に対しては，切羽部分圧気，圧力泥水法等の発達が考えられ，地盤固結，透水防止のためのより廉価・より効果的な注入工法の開発等が考えられる。いずれにしても，英仏海峡，青函トンネル工事を契機に，トンネル技術の飛躍的な発展が期待されるし，また発展させなければならないと思うのである。

▶ トンネル工学シリーズ 1

第1回トンネル工学シンポジウム

B 5判・106ページ
300 円・会員特価
400 円（〒50円）

トンネル用鋼アーチ支保工の設計施工について／長大トンネルの地質／トンネル工事における災害の実情について／高熱トンネルの施工について／名古屋市高速度鉄道のシールド工法について／わが国トンネル施工のすう勢と問題点について

＊新刊

変断面ラーメン設計法　★技報堂全書62

石川時信著　■B 6・定価 400円

本書は変断面ラーメンの技術上単純周知の法則と，それを数値化する方法とに分け，その理論と実際を工高卒程度の知識があれば容易に理解できるよう平易に書かれた入門書。

● 土木技術者のための鋼材知識

鋼材倶楽部編　編集代表　奥村敏恵
■A 5・定価 1,600円

本書は土木技術者として，日頃鋼材を使用するに当って知っておくべき，種類や性質，試験法，用法など基礎知識を網羅平易に解説した必読書。

＊好評発売中！

構造力学における還元法
R・ケルステン著　伊藤学訳　B 5・1,500円

応用力学
荒井利一郎著　A 5・950円

薄肉弾性ばりの理論
V.Z.ウラソーフ著　奥村訳　B 5・1,800円

土木工学通論
八十島／奥村他著　A 5・900円

建設業の昔を語る
飯吉精一編著　A 5・1,500円

東京都港区赤坂1-9-4（〒107）　**技報堂**　電話 585－0166／振替東京10