

特 別 講 演

トンネル技術の回顧と将来の展望

REVIEW AND FUTURE PROSPECT IN TUNNELLING TECHNOLOGY

吉 村 恒*

Hisashi YOSHIMURA

This year, the Tunnelling Technology Committee established in theJSCE, has its 30th anniversary. The author, having been taking part in the Committee since the beginning, deals with a retrospect of transition of tunnelling technology from steel-arch support to the NATM, and remarked that these developments are indebted to reciprocal stimulations between demands for tunnel construction and tunnelling technologies. The author suggests in the latter half, that the improvements on the analytical approach to design and on construction method are useful for future tunnelling, and that these improvements should be contributinal towards the global environment.

Keywords: history of tunnelling technology, New Austrian Tunnelling Method,
shield tunnelling, rock mechanics & numerical analysis,
tunnel & global environment

1. まえがき

土木学会にトンネル工学委員会が設けられたのは1961年（昭和36年）であるので、今年は設立以来ちょうど30周年に当たっている。この委員会に設立以来関係してきた筆者は、この3年間は委員長を務め、この度退任させていただいたところである。

たまたま、この委員会が主催して今後継続的に「トンネル工学研究発表会」を催すことが決定され、その第一回にあたっての冒頭講演者に指名される光栄に浴した。

この機会に、この委員会の30年間の活動を含むトンネル技術の進歩を回顧し、併せてその今後の展望について、所信の一端を述べたい。

2. トンネル技術の回顧

2.1 トンネル技術の歴史

* 正会員 トンネル工学委員会 前委員長、 佐藤工業(株) 専務取締役 技術本部長

人間は太古の昔からトンネルを造り、トンネルを利用してきた。原始時代には自然の空洞を見付けて、住居や物資の貯蔵にあてていたが、やがてトンネルそのものを造ることを覚えて、いろいろの用途に用いるようになった。下って石器時代から銅器、鉄器時代に入ってから、これらに必要な鉱物や石炭など資源を地下より採掘する必要が生まれ、さらに文明の発達に伴って宗教上の諸施設の建設や、あるいは交通、水利用のための需要が生まれ、今日のトンネル技術に通ずる地下掘削の技術が発達していった。

初期の技術的困難は、支保、運搬、換気などにもあったが、最大の問題は堅い地山をいかにして掘り崩すかにあった。(図-1。) 火薬の原形が武器として



A tunnel; B revêtement en toile

図-1 中世のトンネル掘削と換気
(AGRICOLAのMETALLICA より)

何時から使われ始めたかは定かではないが、14世には科学的火薬として製法が確立されて、軍事上ばかりでなく工業的にも利用されるようになった。ヨーロッパの産業革命の進展にともなって、近代的トンネルの需要が高まったが、1866年(明治元年の2年前)の、アルフレッド ノーベル(1833~1896)による安全なダイナマイトの発明は、堅岩トンネルの建設を促進させる大きな動機となった。ジェームス ワット(1736~1819)の蒸気機関の完成は、強力な動力源の利用を可能とした。またジョージ スティーブンソン(1781~1848)による蒸気機関車の実用化は、それまでの徒歩や牛馬による交通に替わって、陸路を走る動力交通機関の開祖として鉄道という画期的な変革をもたらし、その普及は世界各地に鉄道用トンネルに対する大きな需要を発生させることとなった。

このように、需要とこれを可能とする技術手段とが相互に進歩することによって我々の社会の進歩が達成されてきたのである。

2.2 トンネル工学委員会の30年の歩み

1961年(昭和36年)12月、土木学会にトンネル工学委員会が設置された。当時わが国は第2次世界大戦敗北の痛手から漸く立ち直って、戦後の復興からさらに経済成長の隘路の打開と国土の再開発による経済基盤の強化が叫ばれ、東海道新幹線、東名神高速道路、佐久間ダムなどを含み、各分野で本格的な建設工事が活発して、いわゆる建設ブームが到来している時であった。

昭和39年制定のトンネル標準示方書解説(後の山岳編)の序文には、初代の藤井松太郎委員長によって設立の趣旨について次のように書かれている。「これらの建設工事には、わが国が山国である関係上、必ず大小のトンネルがつきものになっている。トンネル工事は、莫大な工費を要するばかりでなく、工事施工の安全性から見ても、建設工事の成否を支配する大きなウェイトを占めているのである。……わが国のトンネル技術は、交通、電力、灌漑などの各分野で相当の発展を見ていたのであるが、未だ各分野の研究、経験を総合してトンネル技術をより速やかに発展さす気運にはなっていなかった。土木学会はこの点に留意し、各分野のトンネル技術者を網羅してトンネル工学委員会を設置し、トンネル技術の組織的研究に着手したのである。」 藤井委員長のもとには、委員会設立の提唱者であった故加納俊二氏が幹事長、調査主査村山朔郎、設計主査故坂本貞雄、施工主査住友友彰の諸先輩が就任され、筆者は設計の幹事の末席に加えていただくこととなった。

委員会はいく通りの議論の末、なるべく早くコンクリートに倣って統一的な標準示方書を作ることになり、その準備の議論を始めた。またこれと平行して早急にできる委員会活動として、各分野の方々を集めてのシ

ンポジウムを開催することとし、翌37年6月にその第1回が開催された。このシンポジウムは論文を公募するのではなく講演者を指名する形で行われ、その後昭和39、41、43、44、45年と回を重ねたが、39年のはその年刊行された初めての標準示方書の解説が主題であり、45年のそれは英・米・独・伊・オランダの各国の講演者を招いての、トンネル部門としては初めての国際会議として開催されたのであった。

最初の標準示方書の策定は、集まった顔ぶれも初めてなら、内容としても当時海外にも先例のない初めてのことで、国内各分野の企業者の示方書、外国の工事仕様書、論文などの収集から始めて、いかに体系づけるか暗中模索の状態であったが、とにかく取り敢えず書いてみることで、原案作成の作業はわれわれ若手に命ぜられた。特に設計では、荷重となる土圧の大きさ、支保工の寸法、覆工巻厚などに、何とか理論的な標準を作り出さねばならぬのである。結局、土圧と支保工については、弛みと崩壊の実例、鋼アーチ支保工の耐荷力実験の結果から割り出し、巻厚については、労働省の各分野のトンネルについての岩種別、掘削径別の巻厚の実績調査結果が入手できたので、これを統計的に処理して標準範囲を決定することを思いついたのであった。トンネルの設計については古くからいろいろの理論的提唱がなされているがどれも万能なものはなく、優れて経験的に決定されていたので、解析的手法でなく実績からの統計的な方法に依らざるを得なかった。(図-

2) 以来、もっと良い方法はなかったかと模索し続けて今日に至っている。

その後、標準示方書には当委員会によってシールド編、さらに開削編が加わり、その後の数次にわたっての改訂によって、現在の充実をみているのである。

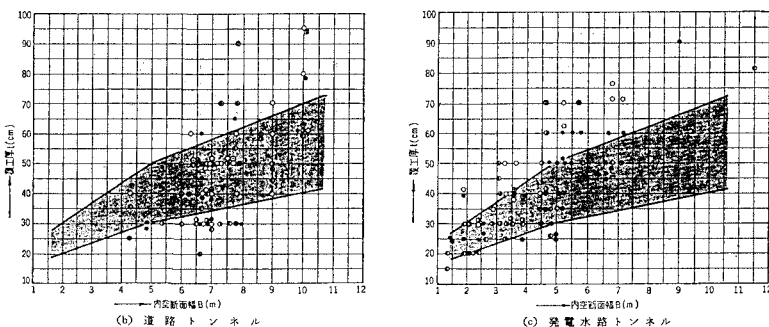


図-2 最初の標準示方書における覆工巻厚決定の根拠
(道路トンネルと発電水路トンネルの例)

2.3 山岳トンネル工法の変遷にみる30年

トンネル建設技術の基本をなすもののひとつは、地山を支える支保工方式である。わが国初めての本格的近代トンネルである東海道線京都・大津間の旧逢坂山トンネル(単線延長 665m, 明治11着工)以来、トンネルの支保工は永らく木製支柱式であったが、この30年間には鋼アーチ式へ、そしてNATMへと進化した。

トンネル工学委員会最初の昭和39年版には、その頃漸く普及した鋼アーチ支保工に関する各条項(第2節)について、第3節に5条を費やして木製支柱式支保工の条項がある。次の44年版では鋼アーチ支保工の節の後にはロックボルトの節が入り、木製支柱式支保工に関してはその後1条のみの節に後退している。さらに次の52年版では、ロックボルトの節の次には吹き付けコンクリートの節が入ってきて、木製支柱式支保工に関する条項は完全に姿を消してしまった。そして最新の61年版では、ロックボルトと吹き付けコンクリートによるNATMが工法の主体となり、木矢板を用いる鋼アーチ支保工すら主流の地位を外されるに至ったのである。これから見ても、この30年間の変遷と著しい進歩の跡を見ることができる。この支保工方式の変革は、同時に削岩、ずり積み、運搬などへの大型機械の導入を可能とし、掘削方式にも変化をもたらし、トンネル施工の高速化と高能率化にも大きく貢献することとなったのである。

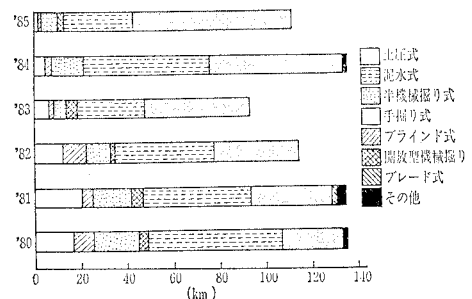
昭和40年台から内外の文献でNATMの理論と実績とに着目していた筆者は、50年の国際トンネル協会第1回総会出席の機会に、本場ヨーロッパの現場の幾つかを見ることができた。この工法によれば、当時のわが国の鋼アーチ支保工方式によるトンネル施工の欠点――くさびがなければ支保工アーチが十分な働きを

しないこと、コンクリート覆工裏に空隙が残ることなどーを補うばかりでなく、さらに岩盤力学の活用など数多くの利点を有することに気付いたので、早速この導入に努めることとした。いろいろの経緯と困難はあったものの、幸い多くの同志の賛同と強力な組織力とによって、全国に亘ってかなり速やかな転換を達成できたことは、トンネル技術者としてやり甲斐のある仕事ができたとと思っている。またこの過程でオーストリアの故ミューラー博士やゴルサー氏との交流が得られたことは、強く記憶に残る出来事であった。

2.4 都市トンネル技術の進歩

昭和39年、土木学会トンネル工学委員会による最初のトンネル標準仕方書は、山岳トンネルについてのみであって、都市トンネルに関しては44年になって標準仕方書の一步手前の指針という形で、初めてシールド工法指針が制定され、52年にトンネル標準仕方書（シールド編）に改訂、格上げされた。開削工法については、より古来からの工法であるにかかわらず、さらに一步遅れて52年に指針が作られ、62年にトンネル標準仕方書（開削編）が制定に漕ぎ着けた。これらは当時いづれも事例が少ないか、あるいは標準仕方書として権威ある数値を決定するための研究に期間を要したためである。

この30年間に都市トンネル工事は著しい増加を見、これに伴ってこの部門の技術も著しい進歩を遂げた。なかでもシールド工法は、切羽解放・人力掘削型から進歩して、今日では切羽密閉型の土圧バランス式あるいは泥水式シールドが大勢を占めるに至っている。また最近では、MF工法やDOT工法と呼ばれる特殊形状のシールドが開発され立派な実績を挙げるとともに、今後の発展が期待されている。シールドマシンの自動化や、セグメントを使わず、生コンクリートで覆工を打設するECL工法も実用化されるなど、活発な研究開発が行われ、成果も上がっている。



図ー3 シールドの形式別シェアの変遷

導入の当初、山岳トンネル工法と考えられていたNATMは、その機動性と工費の低廉さから、今日ではいろいろの工夫を重ねながら、都市の土砂トンネルの領域にも広く適用されている。

3. トンネル技術の将来展望

3.1 トンネル工事の将来展望

トンネル技術の進歩をもたらすトンネル工事、あるいはトンネルを含む建設事業は、山岳トンネル、都市トンネルともに、今後当分の間増加することはあっても減少するとは考えられない。このことはわが国の国内ばかりでなく、世界の趨勢でもあって、社会の発展と経済の成長は、先進国においても発展途上国においても、近代的な生活や活発な経済活動のために、より多くのトンネルやより一層の地下利用を必要としていることは間違いないところである。

道路、鉄道などの交通用のトンネルは、その高度化のために今後ますます数と延長が増えることになろうし、海底下、大断面など、施工条件のより厳しいものが要求されよう。またガス、電力、通信、上下水道など、いわゆるライフラインの需要は、社会の発展に伴って著しい増加を見るものと考えられる。特に過密な都市内においては、地表の土地所有権に縛られない大深度のトンネルと地下利用が叫ばれており、近い将来に現実のものとなると考えられる。具体的なプロジェクト名を挙げるのは本論文の趣旨ではないので省くとして、これらの多様な目的のための大きなトンネル需要は、より高度のトンネル技術を要求することにな

るのは間違いない。

以下には今後に必要なとされ、或いは進展の見られるであろうトンネル技術について、項目の一端を述べることにする。

3.2 トンネル解析、構造設計技術の発展と地質・岩盤工学の活用

トンネル工学は永らく経験工学であると言われてきた。この10年、コンピューターを活用してのFEM、BEMなどによる地盤・岩盤工学の発展と、NATMなどの新しいコンセプトによって、より実際に近く精密な解析が可能になり、広く活用されるようになったことは、トンネル工学の著しい進歩である。これによって変位や変形、地山の弛みや破壊、地下水の流動などがかなり予測できるようになってきた。

また、トンネルの支保工、覆工の力学的研究も盛んに行われ、殊にシールドトンネルの変形や挙動について理論的解析が進んでいる。

これらの解析技術が現場施工にも密に活用されれば、従来経験工学と見られていたトンネル工事から脱皮して、より理論的で定量的な工学に近付くことができ、トンネル工学の進歩として甚だ喜ばしいことである。しかし今日の水準はまだまだ不十分かつ不正確であって、今後より一層の進歩が望まれる。

例えば、NATMにおけるコンバージェンスの計測は、施工上に管理限界値として十分には活用されていないこと、掘削とインバート施工の間などの施工手順に時間のファクターが欠けていることなど、解明されるべき事項は多々あると思われる。またどのような場合にどの補助工法を適用すべきかなど、重要な点でより理論的な解明も必要である。

解析の手法が発達したとはいえ、相変わらず現場の体感的判断の結果として施工実績から次なる判断材料を得ることはトンネル技術にとっては必要なことであり、このためには、広範なデータベースの集積と解析とが、今後もし非行われねばならないものと考えられる。

3.3 トンネル施工法の改善

自動化、省力化、高速化、安全化を目指して、トンネル施工法の改善、改良はトンネル技術者に与えられた永遠のテーマである。

例えば、トンネルボーリングマシン（TBM）の研究と幅広い活用は、その一つであろう。英仏間のドーバー海峡トンネルにおけるTBMの実績は、いろいろの見方もあるが、フランクに言って人類がトンネルを掘った歴史の1ページを飾るにふさわしいものであった。わが国でのTBMの利用実績は、トンネル建設事業の多い割にはあまり多いとは言えない。機械の岩種に対する適用範囲がせまいことや、発注者の予算の単年度主義が災いしていることなどの理由もあるが、シールドと同様な機械化工法として省力化、自動化の達成の有力な方法として、今後大いに研究され、広く実用が進められるべきものと考えられる。

もっと細かい技術項目を挙げれば、NATMにおける吹き付け工法の無塵化、計測の簡便化、シールドにおけるセグメントの改良、組み立ての自動化など、枚挙に暇がないほどであって、従来からの山岳、都市、全てのトンネル施工法について改善の望まれる点は、あまりにも多いと言わざるを得ない。

3.4 地球環境問題とトンネル

近年、国際的にも地球環境の保全が大きな問題となっている。我々のトンネル建設の行為も、地球環境の加害者となつてはならないことは勿論であるが、むしろ積極的にトンネル技術を利用、活用してすることによって、地球環境の保全や改善に役立つことを考えられないものであろうか。

ここにその一例として、カッターラ低地開発計画の提案を紹介する。エジプト西北部にある世界第2位の低地（海面下134m）であるカッターラ地方と地中海との間に、延長約80kmのトンネルを掘って、600t/sの海水を導水して海水湖を作り、その蒸発によって広大な周辺砂漠地の気候を改善して砂漠化防止を図り、

併せて落差を利用する発電所（揚水式併用）も建設して電力を得ようとする大計画が提唱されている。海水湖の蒸発量と導水量がバランスして永続的に発電できるというものである。実現には多くの問題があるにはせよ、トンネルが地球環境の改善と無害なエネルギー獲得に役立つ気宇広大な提案として、大変興味深いものである。イランなどには、古代からカナートという水利のためのトンネルがある。これは山岳の裾野から平野に向かって掘られた小口径のトンネルで、その建設には数多くの立坑を設けてこの間を繋ぐ形で造られたものであって、山脈からの水を流し、平野部での生活用や農業用に用いられてきており、トンネルの古くからの利用として知られているものである。

最近、わが国某社によってデザートアクアネットという構想が提案されている。砂漠化に悩むアフリカの中央部に、運河で結ばれた直径30 kmの巨大海水人工湖を7個造り、湖水の蒸発作用によって砂漠の過酷な気象条件を改善して緑化を図るというものである。湖水の間は150kmの運河で連結するというカナートなどと比べてもおおきい構想である。この計画の運河も、地形によってはトンネルを必要とするのではないかと考えられる。

いずれにせよ、地球規模の話であるので、トンネル技術者によって地球環境問題に役立つ具体的な提案がなされることを望みたい。

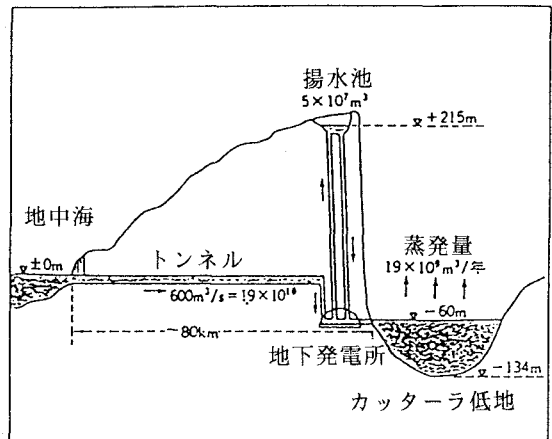


図-4 カッターラ低地開発計画の概要

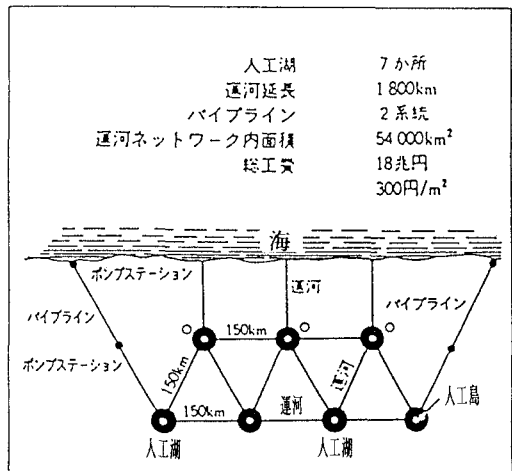


図-5 デザートアクアネット構想モデル

参 考 文 献

- 1) 村上 良丸：トンネルの歴史巻1～4, 土木工学社, 1975.
- 2) J.F. Bougard: Des Methodes Quutilisaient les Anciens dans les Travaux Souterrain, Tunnel & Underground, 1988.
- 3) 土木学会トンネル工学委員会：トンネル標準示方書 39, 42, 52, 61 年版、土木学会
- 4) L. Muller: Tunnelbau, Der Felsbau Bd. III, Ferdinand Enke Verlag, 1978.
- 5) 国鉄NATM研究会：NATMの設計施工の合理化に関する研究、鉄道技術研究所報告、No. 1211, 1982.
- 6) 吉村 恒：トンネル (NATM, シールド), 土と基礎、Vol37, No12, pp65, 土質工学会、1989.