

第19回

鉄道山岳トンネルの建設

はじめに

日本における山岳トンネルの建設技術は、今や世界屈指のレベルにあります。これは、明治以降の鉄道トンネル建設において、最新技術を果敢に取り入れて日本の複雑な地質条件を克服してきた鉄道技術者の挑戦の賜物であると言っても過言ではありません。図1は、明治時代から近代技術を導入してから現在に至るまでの鉄道山岳トンネルにおける掘削、支保、覆工技術の変遷とトンネルの長大化の流れを示したものです。この図を見れば、鉄道山岳トンネルの建設技術が長大化とともに発展してきた様子を垣間見ることができます。

ここでは、①木製支保工の時代(明治～昭和30年頃)、②鋼アーチ支保工の時代(昭和30～50年代初)、③吹付け・ロックボルト(NATM)の時代(昭和50年代～)、④新

な展開(都市部への進出とポストNATM)の時代に分けて、既往の文献^{1)~8)}を参考にしながら、日本における鉄道山岳トンネルの建設技術の変遷を概観します。

木製支保工の時代

近代工法による日本初の山岳トンネルは、1880(明治13)年完成の逢坂山トンネル(延長665m、図2)です。欧米ではイタリア・フランス国境のアルプス山脈を貫く Mont cenis トンネル(1871年完成、当時の世界最長12,847m)などの長大トンネル建設の時代に既に入っており、日本がこれに追いつくのは実に90年後ですが、日本の技術者が初めて建設した山岳トンネルとして大きな意義があります。

その後、ダイナマイトを使用した柳ヶ瀬トンネル(1883年完成)、動力に電力を利用した笹子トンネル(1902年完

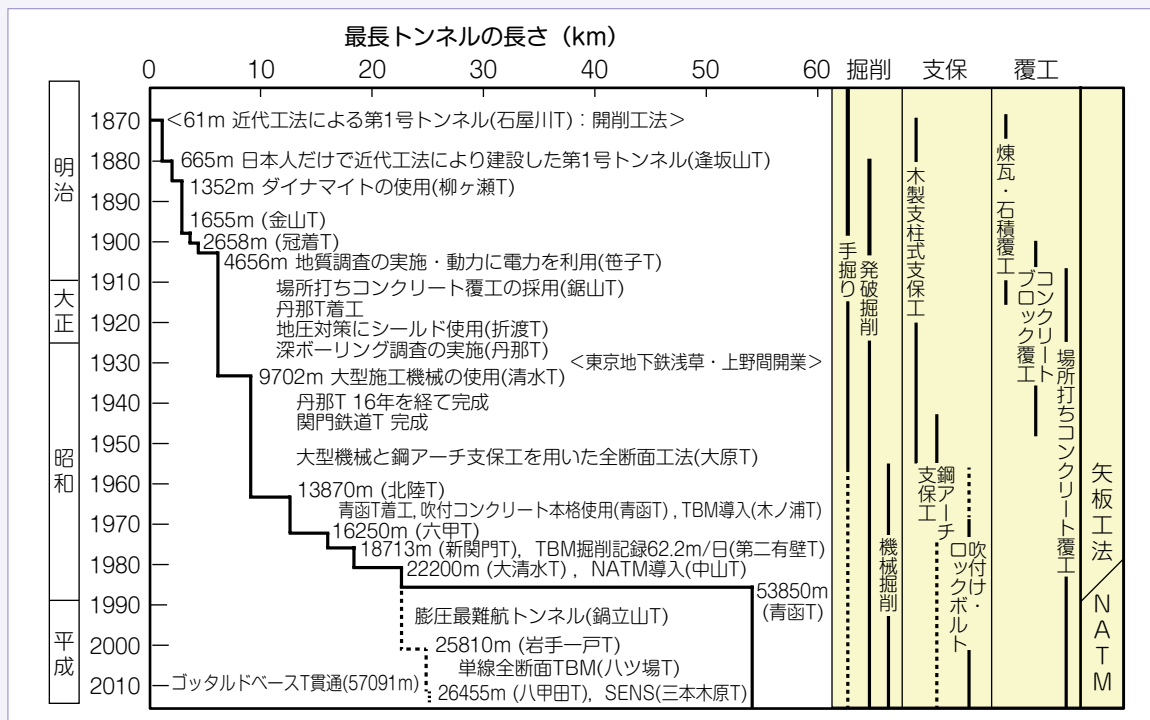


図1 日本の鉄道山岳トンネル技術の変遷(文献²⁾を加筆・修正)



図2 旧逢坂山隧道東口(鉄道記念物)
出典：日本国有鉄道百年史，第2巻，1970.3



図3 明治時代のトンネルの建設
出典：内田録雄編，実用鉄道隧道編，建築書院，1906(所蔵：国立国会図書館)

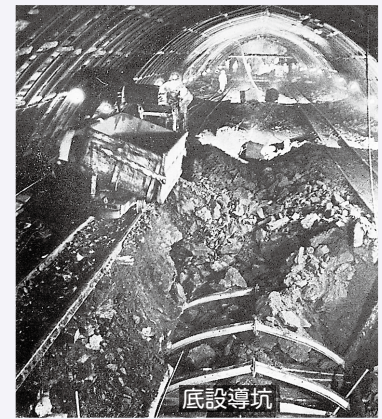


図4 底設導坑先進工法による施工
(東海道新幹線丹那トンネル坑内)
出典：鉄道土木，Vol.4，No.1，1962.1

成)，膨圧対策に日本初のシールドを採用した折渡トンネル(1924年完成)，大型機械を適用した清水トンネル(1931年完成)，水抜き坑・注入・側壁導坑・シールド・圧気など考えうるあらゆる工法を採りながらも67名の犠牲者を出した丹那トンネル(1934年完成)，日本初の地下鉄山岳工法による銀座線神田川右岸～須田町交差点付近(1934年完成)，世界初の海底トンネルである関門鉄道トンネル(1942年完成)などが，次々に建設されました。

当時の支保工は，**図3**に示すような掘削後に地山を木材で支える木製支柱式支保工でした。作業空間が狭いので人力施工を余儀なくされ，支保工を一旦外して覆工を構築する「木外し」という危険な作業を伴うものでした。

明治～大正初期の覆工は，他の構造物と同様に煉瓦や石による組積造が主体でした。大正年間に入ると場所打ちコンクリートが導入されましたが，アーチ部への打設が困難であったため，アーチ部にはコンクリートブロック積みが行われる時期が続きました。場所打ちコンクリートは，後の関東大震災の経験から組積造よりも耐震性に優れると推奨され，昭和になって急速に普及しました(陸羽東線(1911～1917年)，房総線鋸山トンネル(1917年))。

鋼アーチ支保工の時代

昭和30年頃になると，鋼アーチ支保工に木矢板を組み合わせる「矢板工法」が確立し，昭和50年代初頭までの標準工法になりました。高度経済成長期の新線建設時代が到来し，トンネルの長大化とも相まって，鋼アーチ支保工の他にも，底設導坑先進工法，掘削の機械化，覆工の機械化など，施工技術が飛躍的に進展しました。

鋼アーチ支保工の本格採用は，佐久間ダム建設に伴い付

け替えられた飯田線大原トンネル(1955年完成)が始まりです。鋼アーチ支保工の設置によって坑内に広い空間が生まれ，大型機械による全断面掘削が可能となりました。

底設導坑先進工法は，斜坑や立坑により工期短縮が図られた北陸トンネル(1962年完成，長さ13,870m)において試行錯誤のうえ生み出された掘削工法です。この工法は，底設導坑で地質の確認と地下水の排除が可能な工法であり，底盤部が泥濘化しやすい地山のトンネルや換気が困難な長大トンネルのように，レール方式を用いた施工が有利な場合に適合する工法でした。そのため，その後の東海道新幹線以降の新幹線トンネル工事などに汎用されました(**図4**)。

一方，さらなる高速機械化工法として，海外で多用されてきたTBM(Tunnel Boring Machine)が，1964(昭和39)年に発電用導水路トンネルに導入され，鉄道でも1967(昭和42)年から青函トンネルの導坑掘削や北陸線木の浦トンネルの導坑掘削に使用され，以降数トンネルで採用されました。一部は掘進速度の新記録を樹立(東北新幹線第二有壁トンネル導坑：日進62m，月進670m)するなどの成果を収めました，わが国の複雑な地質にはなかなか適応できず，本格採用には至りませんでした。

覆工については，従来の木製型枠・人力打設から，鋼製型枠・機械打設(アジテータ付プレーサなど)に移行しました。施工には引き抜き管方式(天端に打設用の管を挿入して引き抜きながら打設)が用いられましたが，天端の締め部に空隙が残り易いという問題を抱えました。この問題は，現在でも鉄道事業者の保守上の課題となっています。

この時代に忘れてならないのは，1988(昭和63)年に開業した世界最長の青函トンネル(長さ53,850km)です。2010年に貫通したGotthard Baseトンネル(スイス，長さ57,091m)が開業すると最長の座は失われることになりま

すが、青函トンネルでは世界に誇る多くの技術が開発され実用化されました。中でも先進ボーリング(図5)、地盤注入、吹付けコンクリートの技術は「青函トンネル三種の神器」⁶⁾と呼ばれ、以後の日本における山岳トンネル技術の飛躍的な発展を促しました。

NATMの時代

NATM (New Austrian Tunneling Method) は、1960年代にオーストリアのトンネル技術者L・V・Rabcewiczが提唱した山岳トンネル工法です。吹付けコンクリートとロックボルトを主要な支保部材とし、支保部材を掘削後素早く施工することによって、地山がもつ強度を積極的に生かしながらトンネルの安定を図るというものです(図6)。日本では、1977(昭和52)年に上越新幹線中山トンネルで強大な地圧(膨張性地圧)の作用によって難航していた区間に初めて採用され、成功を収めました。

NATMは、その後、当時の国鉄と鉄道公団のトンネル建設に次々と採用され、1980(昭和55)年ころには早くも山岳トンネルの標準工法の座につきました。その成果として、1983(昭和58)年に国鉄と鉄道公団により「NATM設計施工指針(案)」が制定され、その後、1986(昭和61)年改訂の土木学会「トンネル標準示方書(山岳編)」でも標準工法に位置付けられるに至りました。

NATMの本格採用により、膨張性地山、含水未固結地山、小土被り、高地熱・有害ガスなど多様な地山・環境条件において施工実績が積み上げられ、以下に示すように、掘削、支保、覆工などの施工技術が飛躍的な進展を遂げました。

- ・掘削:大断面での掘削、大型機械による掘削、長孔発破、など

- ・支保:吹付けコンクリート、ロックボルトの品質向上
- ・覆工:覆工コンクリートの薄肉化、打込み技術の向上
- ・補助工法:長尺先受け工、長尺鏡ボルト、など

覆工については、NATMの場合は支保によって地山の安定が得られるので、一般に力学的機能を期待しない化粧巻きと位置付けられました。そのため、矢板工法のトンネルに比べて薄肉構造が実現しました(複線トンネルの覆工厚さは、矢板工法で30~70cm, NATMで30cm)。また、吹付けコンクリートと覆工コンクリートの間に防水シートを設置することにより漏水が大幅に減少しました。NATM導入のころは、吹付けコンクリート面に生じる凹凸によってその内側に施工される覆工コンクリートに多数の収縮ひび割れが発生しましたが、吹付け面の平滑化や防水シートの採用によってひび割れは大幅に減少しました。一方、1999(平成11)年に発生した鉄道トンネルの覆工コンクリート剥落事故の教訓から、覆工コンクリートの品質を改善する取組みが精力的に行われ、さらに良質な覆工コンクリートが構築できるようになりました。

新たな展開①—都市部へのNATMの進出

NATM導入から35年が経過しましたが、今でもNATMが標準工法であることに変わりはありません。しかし、もはや“New Austrian”ではないとの見方も出るほど技術は進展しました。その表れの一つが都市部への進出です。

日本の大都市は柔らかい地盤に立地しているため、地下鉄道の建設は、地盤変位や地下水位の低下が生じにくいシールド工法や開削工法と呼ばれる都市トンネル工法によることが一般的です。しかし近年では、条件によっては都市部にもNATMが適用される事例が増えてきました。これは、



図5 青函トンネル坑内での先進ボーリング作業
出典:青函トンネル貫通, 応用地質, Vol.29, No.2, 1988.6

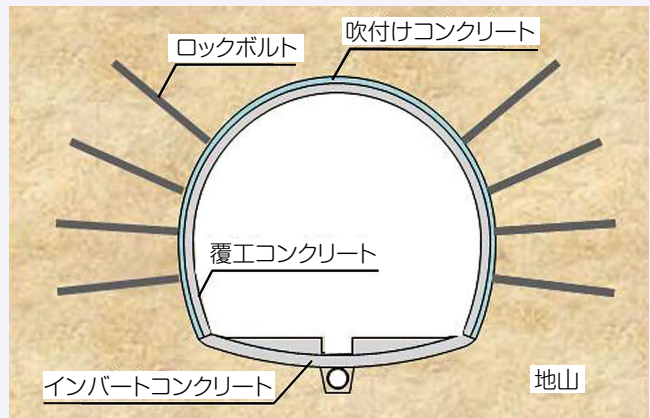


図6 NATMにおける支保・覆工構造の例



図7 東北新幹線三本木原トンネルにおける
SENS工法による施工
出典：RRR, Vol.68, No.3, 2011

NATMは安価で、自由にトンネルの形を変えることができ、柔らかい地盤でも安全に掘削できる技術が飛躍的に進んだことによります。側壁導坑を先行して施工するサイロット工法の成田空港トンネル(1981年完成)、大断面の横浜市営地下鉄三ツ沢上町駅(1982年完成)、都心部初の京葉線京橋トンネル(1988年完成)、CRD工法の東葉高速鉄道習志野台トンネル(1993年完成)、営業線直下施工の東急東横線反町トンネル(2004年完成)など、既に数十例に及ぶ実績により、都市部でも安全で経済的に施工できることが実証されています。

こういった状況から、「都市部山岳工法トンネル設計標準」(国交省, 2002年)が制定され、「トンネル標準示方書(2006年版)」(土木学会)でも都市部山岳工法が記述されました。

新たな展開②ーポストNATM

NATMに替わる新技術が芽生え、実用化されつつあります。その一端を二つ紹介します。

近年、海外の良好な実績や国内のシールド技術の蓄積などが背景となり、TBMが再評価されています。水路では以前から適用され、道路でも3車線トンネルの頂設導坑などに積極的に採用されてきました。鉄道ではしばらく適用されませんでした。吾妻線ハツ場トンネル⁷⁾で鉄道初の全断面TBM(単線)が採用され、2004(平成16)年末に順調に掘削を終えました。破碎帯への対応や支保設計法の確立を要しますが、今後のさらなる適用が期待されます。

一方、NATMに替わる新しい支保システムが実用化されています。地下水が豊富で切羽の自立性が悪い土砂地山中の東北新幹線三本木原トンネル(2010年完成)ではじめて採用され成功を取めた、シールドを用いた場所打ち支保システム「SENS工法」です⁸⁾。SENS工法とは、密閉型シー

ルドマシンを用いて掘削と切羽保持を行い、シールド後方で場所打ちの一次覆工コンクリートを掘進と同時に打設し、その後二次覆工コンクリートを打設してトンネルを構築する工法(図7)で、シールド工法:Shield, 場所打ちライニング工法:ECL, 山岳工法:NATM, 施工システム: Systemの頭文字からSENSと命名されました(鉄道・運輸機構, 鉄道総研, 地域地盤環境研究所他の共同開発による)。

SENS工法は、三本木原トンネルに引き続き北海道新幹線津軽蓬田トンネルにも採用されて昨年順調に施工を終了し、現在は、都市部の相鉄・JR直通線西谷トンネルにおいて施工が進められています。SENS工法は、今後のトンネル建設に変革をもたらす技術として期待されています。

おわりに

現在3,700kmを超える鉄道トンネルが列車運行の一躍を担っており、その保守技術が重要であることは言うまでもありません。一方、これから本格的に動き出す整備新幹線や中央リニア新幹線はトンネル区間が大半を占める計画であり、山岳トンネル技術のさらなる発展が求められています。このことを鑑みれば、先人達が蓄積してきた山岳トンネルの建設技術を絶やすことなく、さらなる進化に向けた取組みを行うことが求められています。

本稿では、主に山岳トンネルの建設技術の変遷を述べました。地質調査と評価技術、都市トンネルの建設技術などには言及できませんでしたが、機会があれば紹介したいと思います。

(小島芳之/構造物技術研究部 トンネル研究室)

文献

- 1) 藤井浩：鉄道トンネルものがたり, 鉄道土木, Vol.25, No.4~Vol.26, No.2, 1983.4~1984.2
- 2) 吉川恵也：山岳トンネルにおける技術の変遷, 日本鉄道施設協会誌, No.1991-4, 1991
- 3) 朝倉俊弘：鉄道トンネル技術の変遷と展望, 鉄道総研報告, Vol.11, No.7, 1997
- 4) 日本トンネル技術協会：トンネル技術白書ー日本の山岳トンネル技術の現状と変遷一, 2006
- 5) 小野田滋：鉄道トンネルにおける覆工材料とその変遷, 鉄道総研報告, Vol.11, No.7, 1997
- 6) 青函トンネル物語編集委員会：青函トンネル物語, 吉井書店, 1994
- 7) 田口芳範, 齋藤貴, 石毛勝男, 茅野浩一：わが国初の鉄道トンネル全断面TBM工法に挑む 吾妻線ハツ場トンネル試験施工区間, トンネルと地下, Vol.35, No.10, 2004
- 8) 飯田廣臣：含水未固結地山におけるシールドを用いた場所打ち支保システムに関する研究, 早稲田大学大学院博士論文, 2008