

鉄道トンネルの技術開発の歩み

小島 芳之

構造物技術研究部(トンネル 研究室長)



こじま よしゆき

はじめに

わが国の鉄道トンネルの供用延長は、現在3,000kmを超えています。その施工方法は、山岳工法、シールド工法、開削工法に大別されますが、各工法は鉄道の先輩達が築き上げてきた技術の賜物であると言って過言ではありません。

JR発足後、鉄道トンネルの建設プロジェクトは減少しました。しかし、整備新幹線や地下鉄の建設は行われており、鉄道総研では、引き続き建設に関する技術開発に力を注いできました。また、線路下横断工などの営業線近接工事に関する技術開発も地道に進めてきました。

一方、鉄道トンネルの保守に関する技術開発のニーズは年々高まるばかりで、検査・診断法や変状対策法などのテーマを重点的に実施してきました。また、近接施工対策、地震対策、列車振動対策といった供用中の鉄道トンネルの諸問題にも取り組んできました。

本稿では、上述のような鉄道トンネルの建設と保守の両面から、鉄道総研発足後20年余りの間における技術開発の歩みの一端を紹介します。

トンネル建設に関する技術開発

国鉄時代は、在来線の複線化や東海道・山陽・東北・上越新幹線などでトンネルが盛んに作られました。JR発足後は、JR各社が新線を建設することは殆どなくなりました。しかし、鉄道全体を見れば、整備新幹線や地下鉄の建設、大深度地下鉄道の都心部乗入れの機運など、建設のニーズは少なからずありました。そのため、要望が強い都市トンネルの設計標準の整備をメインに据え、整備新幹線等における山岳トンネルに対しては受託研究で行ってきました。

設計標準の整備

橋梁や高架橋などと同様に、国の解釈基準である設計標準(鉄道構造物等設計標準)の原案を作成してきました。これらは、都市トンネルを構成する以下の3つです。

- シールドトンネル(平成9年制定)

- 開削トンネル(平成13年制定)
- 都市部山岳工法トンネル(平成14年制定)

シールドトンネル

シールドトンネルについては、国鉄により「シールドトンネル設計施工指針(案)」(昭和53年)が作成されていましたが、技術の進展への対応と設計法の合理化が求められていました。そこで、継手剛性や裏込注入層が地盤反力に及ぼす影響について検討し、2リング梁ばねモデルを用いたセグメント設計法(図1)を提案し、平成9年に「シールドトンネル設計標準」が制定されました。また、事業者の協力を得て「シールドトンネルの実施例集」(平成6年)、セグメント覆工設計

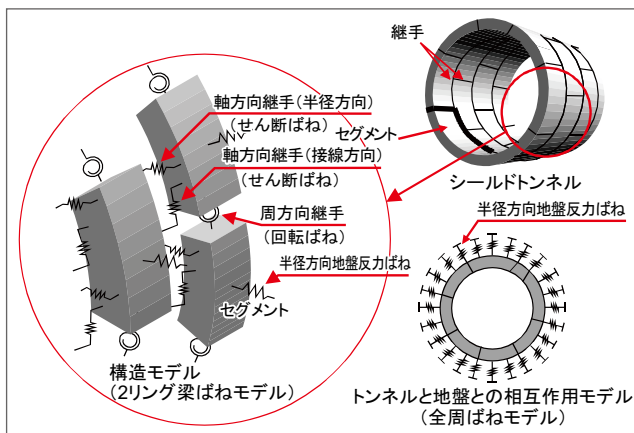


図1 2リング梁ばねモデルによるセグメント設計法

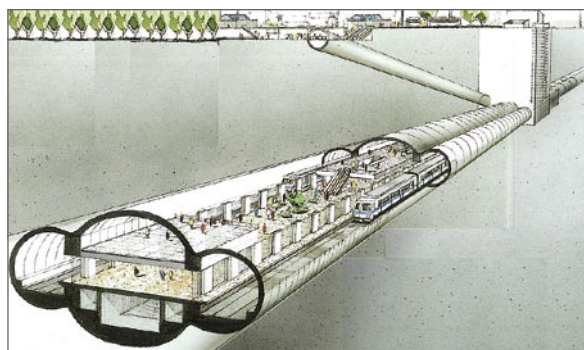


図2 3心円MFシールド工法による地下駅

プログラム STRiDe (平成11年)を開発し、実務に供しました。

その間、シールド工法の技術の発展は目覚しく、鉄道総研も3心円MFシールド工法駅の構築方法(平成2年、図2)を提案し、いくつかの地下駅で実用化されました。

その後、シールドトンネルの施工実績は200件以上(平成6～17年度)に及んでいます。現在、この技術が散逸することのないよう、将来の設計標準改訂や維持管理の視点を考慮し、新しい実施例集を編纂しています。

開削トンネル

開削トンネルについては、今まで共通する鉄道の技術基準がなかったことから、平成13年に「開削トンネル設計標準」が制定されました。その中で、トンネル本体の限界状態設計法、掘削土留め工の設計法の整備などを行いました。また、立坑について、大深度円形立坑の設計法についても言及しています。なお、平成7年兵庫県南部地震で深刻な被害(中柱の崩壊)を受けたことから、開削トンネルの耐震設計法が検討され、その成果は「耐震設計標準」(平成11年)に示されました。

山岳トンネル

山岳トンネルについては、国鉄の鉄道技術研究所において、地質調査法や弾性波速度による地山分類法(昭和44年)、水収支シミュレーション法(昭和58年)など、現在の山岳トンネル技術の基礎を成す重要な成果が出されました。さらに、昭和50年代初頭のNATM(New Austrian Tunneling Method)の導入以来、地山強度比を用いた地山分類基準(昭和58年)や、掘削解析用プログラム NATMFEMによる解析的設計法(昭和62年)が提案され、昭和58年に「NATM設計・施工指針(案)」(国鉄)が制定されました。その後、この指針を改訂する形で鉄道・運輸機構が平成20年に「山岳トンネル設計施工標準」を制定しています。なお、この標準には鉄道総研が開発した膨張性地山の評価法(平成元年)、土砂地山の切羽安定評価法(平成6年)が取り入れられています。

一方最近では、山岳トンネルの施工技術が進歩し、柔らかい地盤でも安全に施工できるようになり、都市部でも適用例が増えてきました。そのため、平成14年に「都市部山岳工法トンネル設計標準」が制定され、その中で、剛塑性法による切羽安定解析法、支保・覆工の標準設計法、覆工の限界状態設計法などを提案しました。

線路下横断工、地盤改良など

線路下横断工は、道路等との単独立体交差の手段として数多く施工されています。鉄道総研では、この分野の研究にも取り組んでおり、URT工法(Under Railway Tunneling

Method)の継手剛性と主桁接合構造を考慮した設計法(平成元年)、エレメント推進時の地盤変位予測法(平成8年)、線路下横断工施工時の地盤改良選定マニュアル(平成12年)、線路下横断構造物の耐震設計法(平成20年)、小断面エレメントの設計土圧(平成21年)を提案してきました。

現在、地盤注入の現状を調査し、国鉄時代に作成された「注入の設計施工指針」(昭和61年)の改訂を進めています。

トンネル保守に関する技術開発

JR発足後は、前述のようにトンネル建設の減少と老朽化したトンネルの増加、一方で保守要員の減少とも相まって、急速に保守の時代に移りました。そのため、トンネル研究の柱を保守であると位置づけ、整備されていなかったマニュアル作成を始めとして、検査、診断、対策などに関する研究開発を精力的に行いました。特に、平成11年度に相次いで発生し社会問題となった鉄道トンネルの覆工コンクリート剥落事故を契機として、技術開発のピッチが急速に加速されました。

マニュアルと維持管理標準の整備

保守の技術基準は、「土木建造物の取替え標準」(昭和49年、国鉄)に遡ります。JR発足後、各社の要請を受け、この標準を改訂するマニュアルを出版してきました。

- ・「トンネル補強・補修マニュアル」(平成2年)
- ・「既設トンネル近接施工対策マニュアル」(平成7年)
- ・「変状トンネル対策工設計マニュアル」(平成10年)

その後、平成11年の剥落事故の教訓を踏まえて運輸省が制定した「トンネル保守管理マニュアル」(平成12年)の原案作成とともに、詳細に解説した「トンネル保守マニュアル(案)」(平成12年)を出版しました。これにより、新しい全般検査体系(初回・通常・特別)が確立され、剥落に対する健全度判定法が整備されました。

一方、これまで十分に把握されていなかった都市トンネルの変状実態を事業者の協力を得て調査し、「都市トンネル保守マニュアル」(平成14年)を作成しました。

さらに、剥落事故を契機として鉄道構造物全体の保守のあり方が議論され、平成19年に「鉄道構造物等維持管理標準」が制定されました。これに併せて、上記各マニュアルで扱った変状対策工(劣化・剥落対策、漏水・凍結対策、外力対策)を集約し、「トンネル補修・補強マニュアル」(平成19年)として再編・出版しました。

自動検査技術

2年毎に実施する全般検査は、坑内の目視とハンマーに

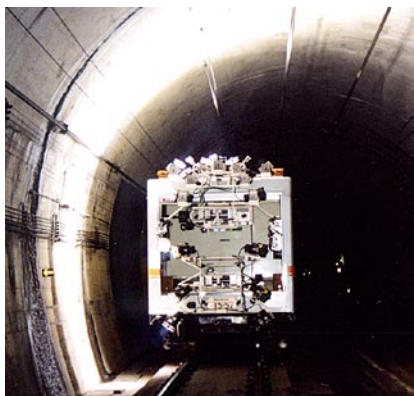
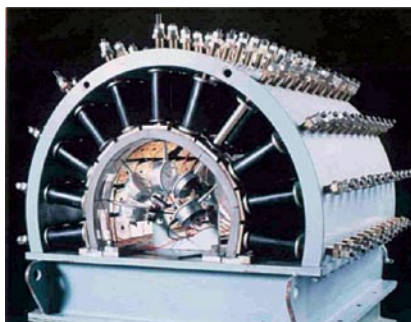


図3 トンネラスによる覆工撮影状況



(a) 小型トンネル覆工模型実験装置 (縮尺 1/30)



(b) 大型トンネル覆工模型実験装置 (縮尺 1/5)

図5 トンネルの模型実験装置

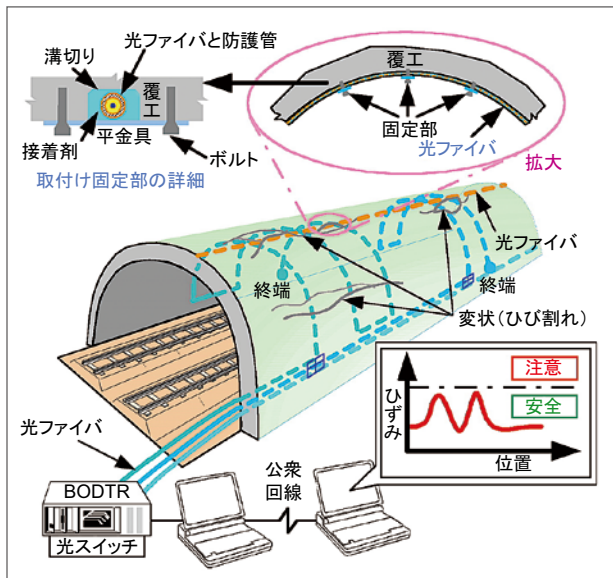


図4 光ファイバによる変状監視システム

よる打音調査により地道に行われます。これらの調査法に替わる(または補完する)新技術が望まれてきました。

目視に替わる技術として、坑内を比較的高速で走行しながら覆工表面をラインセンサカメラにより撮影して展開画像を得るシステム「トンネラス」(図3)をJR東海と共同開発し実用化しました(平成11年, 信号研究室)。このシステムでは、撮影画像からひび割れや漏水などを抽出する変状展開図作成システムを併せ持っています。また、もっとコンパクトな撮影システム「トンネルスキャナ」を開発し、事業者にも活用されています(平成18年, 信号研究室)。現在は、変状を自動的に抽出する方法やその進行性を把握する方法の研究を更に進めています。

打音調査に替わる技術として、覆工の内部欠陥を定量的な評価基準で精度良く検出でき、軽量で取り扱いし易い打音検査装置を開発しました(平成13年, 地質研究室)。また現在、レーザー加振によって連続的に欠陥を検出する方法も開発中です(平成21年, レーザー総研・JR西日本・東京工大との共同研究, 運輸分野の基礎的推進制度採択課題, 基礎・土構造研究室)。

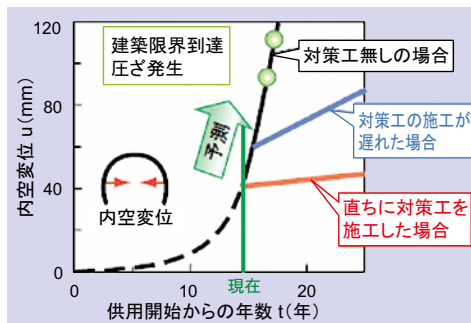


図6 トンネルの変状予測の例

また、全般検査で抽出された変状を長期間監視する技術の開発も大切な課題です。そこで、光ファイバを覆工面に長い区間(最大10km)に敷設し、覆工に生じる歪みやひび割れ幅の変化と位置を検知する手法(図4)(平成12年, 三菱重工と共同研究)や、導電材料を覆工面に線状に敷設し、ひび割れ発生を導電材料の破断(導電性の低下)によって検知する手法(平成18年)を開発し、一部実用化されました。現在、ITを活用した坑内無線計測システムの開発を進めており、長大トンネル内でも監視計測を効率的に行えるようになるものと期待されます。

健全度評価と変状対策法

健全度評価と変状対策に関する研究は、トンネル保守の中心テーマに位置づけて進めてきました。

この研究に大きな役割を演じてきたのは、昭和63年に製作した縮尺1/30の小型覆工模型実験装置(図5(a))です。この実験装置を活用した研究は毎年実施しており、定性的な議論に留まっていたトンネル覆工の変形挙動や変状対策工(裏込注入や内面補強工など)の補強効果に関する多くの重要な知見が得られ、健全度評価法と変状対策工の設計法の確立に寄与しました。これらの成果が、上述したマニュアル類に反映されています。また最近では、平成18年に縮尺1/5の大型覆工模型実験装置(図5(b))を製作し、実物に近い覆工の挙動を再現することで更にステップアップした研究が可能になりました。

一方、トンネルの変状は、長期間にわたって徐々に進み

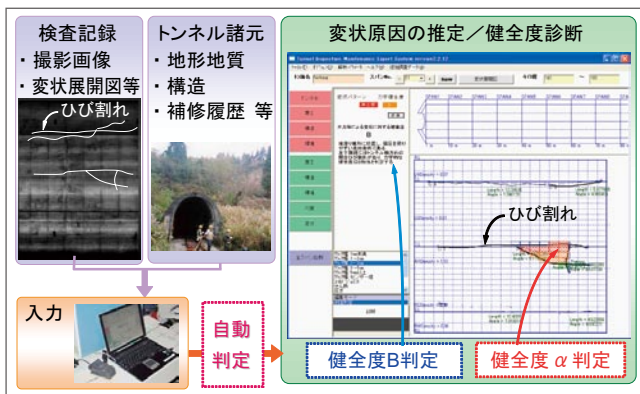


図7 トンネル健全度診断システムTUNOS

ますが、将来の変状の進み方を数値で予測できれば、もっと的確な健全度評価と対策が可能になります。そこで、土圧の作用により年々変状が進む山岳トンネルを対象として、周辺地山の劣化と覆工の変形・破壊が進んでゆく状況を時系列で予測できる解析手法を開発しました(図6)(平成18年, 京都大学と共同研究)。

都市トンネルの変状は、鉄筋の腐食に伴う劣化が問題であり、劣化したく体の力学特性の解明は重要です。そこで、腐食鉄筋とコンクリートの付着に着目し、劣化した地下構造物の耐力評価法を提案しました(平成17年, 国交省補助金を受けて実施)。

診断の支援システム

適切な維持管理には、少ない技術者でも効率的に検査でき、判定のばらつきがなく、結果を記録・保管・活用できることが重要です。そこで、まず平成元年に「トンネル検査診断エキスパートシステムTIMES-1」を開発し、一部の事業者の原因推定などの業務の参考にして頂きました。その後、変状展開図に代表される検査記録とトンネルの諸元(地形・地質、構造など)をパソコンに入力することにより、問題となる変状を自動的に抽出し、変状原因の推定や健全度の診断を行うことのできる「トンネル健全度診断システムTUNOS」を開発し(図7, 平成19年)、実用化の目途をつけました。

なお、鉄道総研では、トンネルも含めた鉄道構造物全般を対象として、全般検査結果を統一仕様で記録・管理するDBと簡易な目安判定機能が付いた「構造物管理支援システム」を開発(平成18年度)し、既に10数社の地下鉄・民鉄事業者を利用して頂いています。

近接施工対策, 地震対策, 列車振動対策

鉄道トンネルをとりまく重要な問題として、通常の維持管理に加えて、近接施工対策, 地震対策, 列車振動対策があり、これらの課題にも取り組んできました。

近接施工対策

鉄道構造物に極めて近接した工事の例が増えてきたため、

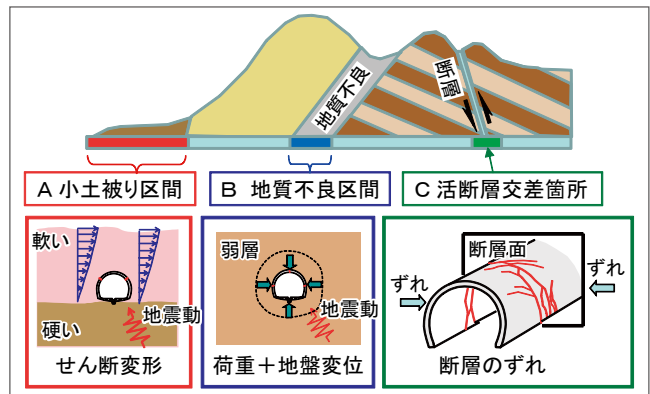


図8 山岳トンネルの地震被害タイプとメカニズム

まず、手法が全く整備されていなかった山岳トンネルについて、「既設トンネル近接施工対策マニュアル」(平成7年)を出版しました。ここでは、近接度の設定法、影響予測解析法を提案し、体系化しています。

一方、都市部の近接施工対策については、「近接橋台橋脚の設計施工指針(案)」(国鉄, 昭和42年)がありましたが、事業者の強い要請を受け、適用範囲を拡大(都市トンネルや補助工法も含む)し、「都市部鉄道構造物の近接施工対策マニュアル」(平成18年)を出版しました。

地震対策

トンネルが大きな地震被害を受けることは比較的少ないことから、トンネルの地震対策の研究は十分に行われてきませんでした。しかし、平成16年10月の新潟県中越地震では、トンネルの被害が新幹線と在来線の運転再開時期を左右したことから、トンネルの地震対策の重要性が再認識されました。そこで、平成17年度から、山岳トンネルの地震対策に関する本格的な研究に着手しました。そして、地震被害メカニズム(図8)を解明し、耐震性能の評価法と耐震設計法を開発しました(平成22年, 京都大学, 鉄道・運輸機構との共同研究, 運輸分野の基礎的推進制度採択課題)。現在、この成果に基づき、「既設トンネル地震対策マニュアル(仮題)」を作成中です。

列車振動対策

列車振動対策に関しては、地下鉄における列車振動予測法と対策法に関する基礎的研究を、関係研究室と連携して進めているところです。

おわりに

鉄道総研発足後における鉄道トンネルの技術開発の歩みを概観しました。今まで紹介してきたように、鉄道トンネルの建設・保守の研究分野は、近年、極めて多岐に及んでいます。これからも、今まで歩んできた実績を踏まえて、関連分野と積極的に連携をとりながら、幅広い視点から、計画的に技術開発を進めてゆきたいと考えています。RRR