

「国際トンネル技術特別講演会」 報告

—世界から見たトンネルの現状と最近の話題—

JTA国際委員会ITA小委員会

1975年8月設立の(一社)日本トンネル技術協会(JTA)が50周年を迎え、記念事業として、一般向けフォトコンテスト、親子現場見学会、技術者向け特別講演会、施設見学会など多岐にわたる企画を実施した。これらの活動は産官学の各団体・機関からの理解と支援にもとづき、協会のこれまでの歩みと発展に関して、トンネル地下空間の役割と技術の重要性を広く国民に周知することを目的とした。

2025年現在、戦後高度経済成長に伴って建設されたインフラの老朽化と人口減少・高齢化がトンネル事業の需要を促進しているとも言える。一方で地盤条件が厳しい地域では施工の難度が高く、かつ、労働力不足への対策が急務と指摘されている。このため、事業の効率化、経済性や安全性の向上を図る取り組みが産業全体のみならずトンネル分野でも進行中である。トンネル技術が生活基盤の向上や社会経済活動の発展には不可欠であり、協会の果たす役割が今後もさらに重要度を増すと考えられる。

国際トンネル技術特別講演会は、JTAの50周年記念事業の一環として、ITA-AITES(国際トンネル協会)理事会の東京開催を実施する特別企画として、「世界トンネルの日＝聖バーバラデー」の国際的な記念日とされている12月4日に開催された。

同講演会では、118名の参加者のもとで、はじめにJTAの菊川滋会長から開会の挨拶があり、同講演会の参加者全員が国際的動向への理解を深め、国際的な連携とネットワーク構築の機会と位置づけ、今後も社会資本の構築とトンネル技術の



写真-1 菊川滋会長による開会の挨拶

発展に協力し合うことが宣言された(写真-1)。

続いて、ITA会長であるAndrea Pigorini氏(イタリア)、PIARC(世界道路協会)TC(技術委員会)4.4(トンネル分野)部会長であるIngo Kaundinya氏(ドイツ)、東日本高速道路(株)総合技術センター・エキスパートである大津敏郎氏、ITA Governance CouncilメンバーであるBill Newns氏(ニュージーランド)、(国研)土木研究所・上席研究員である日下敦氏、ITA Ex-officioメンバーであるLeslie Pakianathan氏(シンガポール)が登壇し、砂金の司会によって会が進められた。

本報告では、各講演者の経歴を紹介するとともに、講演内容の概要を紹介する。

(文責：砂金伸治・東京都立大学)

1 Andrea Pigorini氏の講演

1-1 Andrea Pigorini氏の経歴

Pigorini氏は35年以上にわたりイタリア国内外で主要な社会基盤プロジェクトの設計および施工に従事してきた、豊富な実務経験を有する技術者である(写真-2)。同氏は建設会社、地盤工学系コ



写真-2 Andrea Pigorini氏

ンサルティング企業において道路、鉄道および地下鉄トンネルの設計およびプロジェクトマネジメントを担当するなど、トンネルおよび地下構造物に関する高度で幅広い専門知識を有している。

2002年より Italferr 社に在籍し、2002～2015年はトンネル設計部門の責任者を、2015年以降はインフラエンジニアリング部門を統括している。とくに2011～2017年には、Brenner Base Tunnel(ブレンナー基底トンネル)工事においてプロジェクトマネージャーとして2工区の施工監理を担当した。

2013～2022年の間、イタリアトンネル協会(SIG)会長を務め、現在は前会長として活動している。在任中には同協会が2019年にナポリでWTC(World Tunnel Congress)を主催し、同会議は歴史的にもっとも成功した大会の一つと評価されている。

2022年9月からITAの理事として活動し、現在は2025～2028年の任期にて会長に選出されている。同氏はトンネル工学に関する多数の講習会の講師を務めるだけでなく、2022～2024年にSIGから刊行された3巻本『Handbook on Tunnels and Underground Works』の共同著者として執筆に参加している。

1-2 「イタリア高速鉄道：ボローニャ、フィレンツェ、アペニン山脈を貫く1,000kmの経験とデーター南イタリアへ向けた次の1,000kmを形作る」の講演内容

イタリア高速鉄道(HSR)の整備において中核をなしてきたトンネル技術の発展と安全設備の計画や設計の基準、施工管理方法、都市部での施工

技術、そしてアルプス横断プロジェクトへの展開が体系的に紹介された。

イタリアにおいて高速鉄道は単なる移動の高速化技術ではなく、車両、軌道、運行および安全システムが統合された社会基盤であり、約1,000kmの高速鉄道の整備によって都市間の移動が大幅に短縮され、航空業界との競争関係にも変化をもたらした。また、イタリアは半島をアルプス・アペニン山脈が縦断することから路線の相当部分がトンネルで構成される、都市部には軟弱地盤が多いという特性があることが前提となっている。

イタリアにおけるトンネル技術の歴史的変遷としては、分割掘削で木製支保工を用いるベルギー工法が用いられていたものが、吹付けコンクリートやロックボルトを用いるNATMとなり、2000年代にはLunardi博士によるADECO-RS(Analysis of controlled deformation in rocks and soils)が用いられることになった旨が紹介された。これらは「地山を主たるトンネルの構造材とみなし、変位と変形を制御しつつ支保工や覆工で空洞を維持する」という共通の考え方にもとづいており、その進化が高速鉄道における長大トンネルの建設を支えてきたとしている。

代表例としては、ボローニャ～フィレンツェ高速鉄道を取上げている。当該路線は全長約80kmのうち約94%をトンネルが占め、しかも最大600mの土かぶり下を通過する複数の複線トンネルが連続する区間がある。事業では最大30か所の切羽を同時に稼働させ、その累計月進は1,000～2,000mの施工速度に達したことを紹介し、その理由として従来工法の高度化を伴う「産業化(Industrialization/工業製品のように安定した施工の意)」の成果であるとしている。具体的には、事前調査と切羽での前方探査、先受け工などの補助工法および早期閉合など、地山挙動の三次元的把握にもとづいた施工管理手法が成功要因として挙げていた。

一方、南イタリアのナポリ～フォッジャ新線鉄道では、フリッシュ(Flysch/アルプス造山帯のスイスSimmenthal地域に分布する砂岩、泥岩層)や

スケリークレイ (Sclay clays/プレートの動きによって強い圧力を受けて変形、破壊された泥岩) などきわめて不均質かつ変形しやすい地盤を通過するため、泥土圧シールドが積極的に採用されている。シールド工法は、切羽が密閉になることの高い安全性、ガス湧出への対応、安定した覆工の構築、沈下抑制などの利点をもっていることから、地すべり地帯を含む約120kmのトンネル区間でとくに有効であったと紹介した。

安全設備の計画と設計については、この20年で基準が大きく変化し、SRT-TSI (Safety in Railway Tunnels TSIでEUの安全基準) にもとづく性能照査型アプローチが導入されていることが紹介された¹⁾。乗客の快適性の観点から、列車通過時のトンネル内圧力の変化を10kPa以内に抑えるために断面形状を最適化するなど、空力設計が重要な要素となっているとのことである。また、長大トンネルでは単線並列方式とし500mごとに連絡坑、20kmごとに救助ステーション (Rescue Point) の設置が標準化され、火災時の煙の制御や換気計画を含む高度な安全システム構築が求められていることが紹介された。

さらに都市部施工の事例として、ボローニヤ市街地直下を通過する高速鉄道アンダーパス事業が紹介された。既設レンガアーチ高架橋や鉄道盛土の直下にトンネルを構築する際に、地盤沈下予測と建物被害リスク評価が実施され、必要箇所では曲線削孔を用いたグラウチングにより沈下を抑制したとのことである (図-1)。

さらに、シールド工法によらない山岳工法による大断面トンネルの施工では、地盤改良による過大沈下が観測されたり、建物ごとの剛性によって挙動が大きく異なることなど、計測データにもとづく知見が示された。これらの知見は、都市部における制約下で地下と地上の構造物を両立させるための技術として重要なものになったとしている。

講演の終盤では、イタリアが欧州と接続する国際基幹プロジェクトとして、リヨン〜トリノ間のMont Cenis (Moncenisio) Base Tunnel (モン・スニ基底トンネル、延長57.5km) およびオーストリ

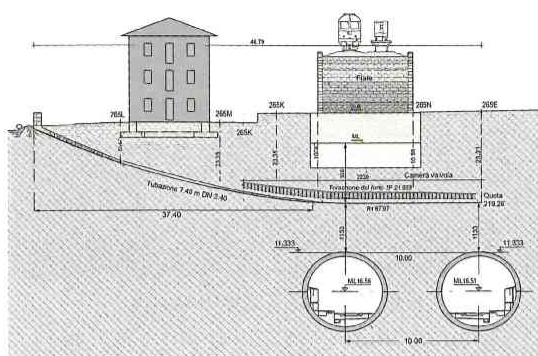


図-1 曲線削孔を用いたグラウチングの概要

アとイタリア間にあるブレンナー峠に計画されたブレンナー基底トンネル (延長55km) を取り上げた。いずれも世界最長クラスの鉄道トンネルであり、2,000m級の土かぶり下を通過する。複数のTBMとNATMなどの工法を組み合わせることで20以上の切羽を同時に進めるというきわめて大規模な施工が行われているとのことである。また、大量に発生する掘削土の資源循環的利用、地下安全ステーションや換気立坑の構築など、持続可能性と安全性を両立させた最新のプロジェクトであることを強調していた。

総括としてイタリアの高速鉄道では、従来工法の高度化とTBMの積極活用、安全設計の体系化、都市部でのリスクマネジメント、そしてアルプス横断トンネルという国際的挑戦を通じて、地下空間を活かした持続可能な交通システムを実現してきた。これらの経験は、長大、都市、複雑な地質といった多様な条件下でトンネル技術が果たす役割を再定義するものであり、今後の高速鉄道整備に重要な知見を与えるものであった。

(文責：大森禎敏・五洋建設(株))

2 Ingo Kaundinya氏の講演

2-1 Ingo Kaundinya氏の経歴

Kaundinya氏は、ドイツ・ロストック大学にて地盤工学分野の博士号を取得した土木技術者である (写真-3)。現在は、ドイツ連邦道路研究所 (BASt) において「トンネル・地盤工学・防災対策 (Section B3)」部門の部門長を務めている。同氏



写真-3 Ingo Kaundinya氏

は、道路トンネルの安全・セキュリティ、施工、耐火設計、止水システムに関する専門家としてドイツ国内外に広く知られている。

また、PIARC TC 4.4の部会長であることに加え、ドイツ国内のトンネル施工に関する合同作業部会(Bund/Länder AG 2.6 Tunnelbau)の委員長を務め、さらに欧州委員会の道路トンネル安全委員会におけるドイツ代表委員も兼任している。

2-2 「欧州の道路トンネル技術の現状とPIARC TC 4.4の取組み」の講演内容

本講演では、道路トンネルのレジリエンス向上と安全・省エネルギーを柱とする内容が紹介された。

はじめに、JTAの設立50周年に祝意を述べるとともに、PIARC会長からのメッセージを紹介し、トンネルのレジリエンス、避難行動の研究成果、サステナビリティとエネルギー効率、PIARC TC 4.4の活動の4つのテーマが取り上げられた。トンネルのレジリエンスのパートでは、まず「何に対して備えるのか」を明確にすることが重要であるとし、自然災害、人為的要因、その他の技術的障害など、想定し得る脅威を網羅的に列挙したうえで、それぞれがトンネルの要素にどのような被害をもたらすかを整理した「脅威・被害シナリオマトリクス」が紹介された。続いて、想定されるシナリオがトンネルの運用に与える影響を評価し、災害発生後も安全性を確保したうえで運用を継続し得る条件を「最低運用要件(Minimum Operating Requirements)」として定義する考え方が示された。レジリエンス向上に向けた三段階の手順として、潜在的な脅威と被害シナリオの同定と、これらが運用に及ぼす影響の調査・評価、そして

レジリエンスを高めるための保護・予防・対応措置の選択を挙げ、その成果として、評価ツールや対策選択表、適用事例を備えたガイドラインが整備されていることを説明した。さらに、トンネルの運用システムの機能が、平常時から災害発生時にどのように低下し、その後どのように回復していくかを時間軸で表した「機能曲線」を示し、被害の大きさだけでなく、復旧速度や暫定運用レベルも含めて評価する視点の重要性を示した。そのうえで、構造物や設備の物理的な強靱化だけでなく、運用手順や危機対応マニュアルの整備、関係機関との連携、訓練などの組織的な対応力の強化が重要な要素であるとし、各種対策を分類・評価したマトリクスを用いることで、限られた予算の中でも効果的な組み合わせを検討できることが紹介された。

また、避難行動に関しては、トンネル火災などの非常時において、利用者がどのように情報を受け取り、避難開始に要する時間やどこへ向かってどのくらいの速度で避難するのかなど、具体的な人間行動を把握することが、安全設計に不可欠であると説明した。避難開始までの反応時間、非常口や避難通路の認知状況、安全設備の利用状況、そして複数人が一団となった場合のグループの効果などを分析対象とし、仮想現実(VR)と実際のトンネルを用いた実験の両方を組み合わせ研究が行われていることを紹介した。

VRを用いた実験では、非常口表示の視認性や案内放送の内容を変化させた場合の行動の違い、高齢者を含む集団構成の変化が避難行動に与える影響など、多数のシナリオを安全かつ効率的に検証できる利点がある一方、ストレスレベルや実際の歩行速度の再現性には限界があることも指摘した。このため、ドイツ国内では実トンネルを用いた実験も実施されており、固定式消火設備が作動している条件と、そうでない条件を比較した結果が示された。車両停止から下車・避難開始に至るまでの時間、避難方向の選択、歩行速度などを評価したところ、固定式消火設備が作動しているグループでは、「その場に留まった方が安全である」

と判断する参加者が多く、避難開始が遅れる傾向が見られる一方で、ミストが散布されている状況では、煙の影響が緩和されることで歩行速度が高まるといった効果も確認され、安全設備の設置は避難行動に複雑な影響を及ぼすため、音声での誘導や動的避難表示と組み合わせて総合的に設計すべきであると結論づけていた。

サステナビリティとエネルギー効率に関しては、道路トンネルの運用における電力消費が、CO₂排出と運営コストの両面から大きな課題となっていることが示された。ドイツ、オーストリア、スイスの道路トンネルを対象とした調査結果にもとづき、照明と換気が総消費電力量の大部分を占めていることが示され、トンネル延長や交通量、地形条件、運用方針などが消費量に影響することが説明された。エネルギー効率向上のための三つの柱としては、太陽光発電や風力、地中熱などの再生可能エネルギーによる電力供給、高効率機器の導入や坑口形状の最適化など技術的対策、そして需要に応じた換気・照明の制御や設備の定期清掃・点検といった運用面の工夫が挙げられた。さらに、新設トンネルの計画段階でエネルギー消費を予測し、設備の構成や制御方針を比較検討できるシミュレーションツールの活用も紹介され、エネルギーと安全性を両立させる設計・運用の重要性が強調された。

最後に、PIARCと技術委員会の活動が紹介され、TC4.4では脱炭素、サステナビリティ、デジタル化、レジリエントなインフラ、新エネルギー車に対応したトンネル安全といったテーマのもとで、各国の専門家が共同で報告書やマニュアルを作成していることが述べられた。トンネル運用のサステナビリティや、歩行者・自転車などアクティブモードのトンネル利用に関するブリーフィングノートがすでに公表されているほか、新エネルギー車両に関するリスク評価ツールの更新や、2026～2027年にかけての詳細報告書の刊行予定などが示された。また、2026年秋にポーランド・クラクフで開催予定の第3回道路トンネル運用・安全国際会議への参加が呼び掛けられたとともに、

日本からの継続的な貢献に対して謝意が表明された。

講演全体を通じて、道路トンネルの安全性と利用者行動、レジリエンス、そして省エネルギーを一体として捉え、エビデンスにもとづくガイドラインと国際協調を通じて改善を図ることの重要性がくり返し強調された。

(文責：河田皓介・東京都立大学)

3 大津敏郎氏の講演

3-1 大津敏郎氏の経歴

大津氏は、道路トンネルを専門とする土木技術者である(写真-4)。1990年に日本道路公団へ入社し、トンネル専門技術者として設計・施工管理基準の策定、工事監理、研究業務などに従事した。現在は、東日本高速道路(株)(NEXCO東日本)のトンネルエキスパートとして、道路トンネルの設計・施工・維持管理にかかわる多岐にわたる課題へ対応するとともに、若手トンネル技術者の育成にも取り組んでいる。

また、国際協力活動にも携わっており、とくにチリ共和国における2年間のトンネル専門家派遣では、同国のトンネル技術の発展に貢献している。

3-2 「世界最大の掘削断面積を誇る釜利谷庄戸トンネルの施工」の講演内容

世界最大の掘削断面積を誇る「釜利谷庄戸トンネル」に関する講演が行われた。本トンネルは延長約1,200mで、3車線の本線トンネルと2車線のランプトンネルが合流する箇所、それらを包含するため最大断面は約485m²に達する(写真-5)。横浜環状南線の要となる区間として、その計画、設



写真-4 大津敏郎氏



写真-5 世界最大級のトンネル大断面掘削完了

計、および施工はいずれも高い技術的挑戦が必要であったことが紹介された。

講演の前半では、NEXCO 東日本の沿革と事業概要に触れつつ、同社が東日本の高速道路ネットワークの建設・維持管理を一体的に担っていること、そして横浜環状南線の建設事業が、既存ネットワークのボトルネック解消と地域交通の円滑化に資する重要事業であることが説明された。そのうえで、釜利谷庄戸トンネルの立地条件として、静穏な住宅地を通過すること、土かぶりが極端に小さい複雑な線形条件にあることが紹介され、このような環境下で大断面トンネルを施工する際のリスクと配慮事項が示された。

続いて、本トンネル施工における主な技術的課題として、①大断面掘削に伴う地山変形・切羽安定性の確保、②施工に伴う騒音・振動が生活環境へ与える影響の低減、③地下水位低下に起因する地盤沈下リスクの抑制、という三点を挙げた。まず、高強度の支保工と注入式鋼管先受け工などを組み合わせた強固な支保体系を構築するとともに、最大高さ約13.8mの大型掘削機械を用いて掘削範囲を拡大し、早期閉合を図ることでトンネル周辺地山の変形を抑制した。また、ロックボルトや鋼管は非打撃式の削孔機を用いて削孔することで、周辺住宅への振動・騒音を極力抑える工夫がなされた。加えて、支保工や吹付けコンクリートの撤去・切断作業も、ブレーカーの多用を避け、油圧式の切断機を活用することで、作業員の安全確保と周辺環境への影響低減の両立を図っている点が

報告された。

さらに、地下水対策はトンネル外周部を厚さ約2.0mmの防水シートで連続的に被覆し、地下水のトンネル内への流入を抑える「止水型トンネル構造」を採用したことが紹介された。これにより、地盤中の地下水位低下を抑制し、長期的な地盤沈下リスクを低減することが期待される。加えて、施工中の安全・品質管理の観点から、トンネル内に固定式のレーザースキャナやカメラ、警報灯などを組み合わせた高精度な変位モニタリングシステムを導入し、トンネル内空変位や局所的な変形を三次元的に「見える化」しながら施工を進めたことも報告された。これにより、異常な変形兆候を早期に把握し、必要に応じて支保や施工手順を適切に見直す体制が構築されている。

施工方法は、土かぶりの小さい区間の一部では開削工法が用いられたが、工事に伴う騒音・振動・粉じんの発生を抑え、周辺環境への影響を最小限に抑えることを目的として、住宅地の区間では小土かぶり下での新たな非開削工法が採用された。講演の中では、この非開削工法の具体的な施工手順や、他の一般的な施工法と比較した際の利点も示され、今後の都市部大断面トンネル建設における有力な選択肢となり得ることが示唆された。

なお、最大断面部を含むトンネル掘削は2023年3月末までに完了しており、現在は覆工コンクリートの打設や周辺構造物との接続工事が進められている。

締めくくりには、本プロジェクトで得られた知見が、今後の大断面トンネル建設における環境配慮型・高安全な施工技術の展開につながることに期待を述べるとともに、翌日のITA理事らを対象とした現場見学において、非開削工法の実際の適用や各種対策・モニタリングの具体的な運用を直接見てもらいたいと語った。

最大断面を有する道路トンネルという先進事例を通じて、都市近接・住宅地における大規模地下空間構築の課題と解決策を共有する貴重な機会となった。

(文責：山田伝一郎・東日本高速道路(株))

4 Bill Newsns氏の講演

4-1 Bill Newsns氏の経歴

Newsns氏は、欧州、アジア、米国、オーストラリア、ニュージーランドにおける主要な地下構造物プロジェクトで、30年以上の実務経験を持つトンネル技術者である(写真-6)。これまで、ダブリン港トンネル、香港・ランタオ空港鉄道、オークランド市内鉄道連絡線(City Rail Link)など多くのプロジェクトで、施工管理や技術マネジメントの役割を担ってきた。

また、ニュージーランド・トンネル協会(NZTS)の設立に尽力し、初代会長を務めた。NZTSが2018年にITAへ加盟して以降は、国際的なトンネルコミュニティにおいても、技術部会(WG)3および5を中心に活動し、2022年からITA Governance Councilのメンバーを務めている。

同氏は、各国で培った多様なトンネル文化の経験、安全性が最優先となる現場での実務、紛争・クレーム解決に関する知見を背景に、価値創出、信頼構築、損失回避に重点を置いたアプローチを展開している。また、今後はITAにおいて「Tunnel failure」に関する検討を進める予定であり、前会長のArnold Dix氏、また、砂金理事とでそのとりまとめを行う予定になっている。

4-2 「トンネル工事における失敗と損失を最小限に抑えるための原則、システムおよび方法：ITA/IMIA TCOP(2023)」の講演内容

「Code of practice for risk management of tunnels works(トンネル施工におけるリスクマネ



写真-6 Bill Newsns氏

ジメント実施準則)」第3版²⁾を中心とした講演を行った。本則は、トンネルおよび地下空間工事にかかわるすべての関係者に対し「失敗をきわめてまれな事象にまで減少させること」を目標とした実務的ガイドである。トンネル本体だけでなく、立坑、地下空間、既設構造物の改修なども含めた広い意味でのトンネル施工・維持管理を対象とし、計画・設計・施工・維持管理の各段階を通じて一貫したリスクマネジメントを求めている点に特徴がある。

また、本則はリスクマネジメント規格であるISO 31000と整合しており、リスクを単なる安全管理の範囲に留めるのではなく、品質・コスト・工期・環境などプロジェクト全体の成果と切り離せないものとして捉え、リスクを記録し常に更新される「生きた文書」として運用することを求めている。また、こうした枠組みを機能させる前提として、発注者、設計者、施工者、監督官庁など多様な主体が、それぞれの専門性と責任を踏まえつつ協働する「コラボレーション」が重要と述べている。ここでいうコラボレーションは、単なる友好的な関係ではなく、地盤条件の不確実性や施工条件の変化に対して、関係者が共通のリスク認識にもとづき柔軟に対応するための行動原則であると位置づけている。

さらに、オーストラリア、シンガポール、タイのトンネルプロジェクトにおける事例を取り上げながら、地盤調査の不足や契約条件の不明確さが事故・トラブルの温床となってきた経緯を紹介した。とくに、地盤基準報告書(Geotechnical Baseline Report: GBR)や地盤情報モデル(Excavation and Ground Model: EGM)を用いて「予見可能な地盤条件」を適切に定義し、そのうえでリスクとコストを関係者間で公平に分担することの重要性が強調された。また、近年頻発する豪雨や浸水被害、気候変動に伴う水文条件の極端化は、トンネル工事や運用段階のリスク構造を変化させつつあり、これらを十分に織り込んだ計画・設計が求められると指摘した。

一方で、「規則を守っていれば安全である」とす

るコンプライアンス偏重の文化には限界がある。重大事故が発生するたびに基準類は厚くなるが、それだけでは新たなリスクや複雑化するプロジェクト環境には対応しきれない。施工の進捗に伴い、地盤工学モデルの理解を更新することが不可欠であるとしている。鉱業、石油・ガス産業で確立された地質統計学的手法を用いて三次元的に先行する状況を予測可能とし、体系的な理解における不確実性を低減できる。さらに現在では、TBM振動を地震源とする確立された地球物理学的手法や、トンネル掘進方向1 km先まで誘導可能な迅速な先行探査・原位置試験手法も確立されている。

原子力発電、航空、医療、高度なインフラ建設など「一度の失敗が重大事故につながる高リスク分野」において、長期間にわたり深刻な事故をほとんど起こさず、高い安全性と信頼性を維持している分野もあることから、トンネル分野においても、失敗事例だけでなく「うまくいっているプロジェクト」からも学びを抽出し、トンネルの冗長性を高めていく必要があると提起した。

最後にNews氏らは、ITAが中心となってトンネルの失敗や損失だけでなく成功事例も含めた国際的なデータベースを構築し、各国の経験を共有する構想を示した。自らも一定の知見を持ちつつ、適切な専門家と協働してリスク除去・低減する意思決定を行う発注者「インフォームドクライアント(informed client)」として責任を果たし、専門家集団との建設的な協働を通じて、より成熟したリスクマネジメント文化を育てていくことが、今後のトンネル工事における安全・安心の鍵であると結び、締めくくった。

(文責:吉川直孝・(独)労働安全衛生総合研究所)

5 日下敦氏の講演

5-1 日下敦氏の経歴

日下氏は2005年に土木研究所に入所して以来、道路トンネルの設計、施工、運用および維持管理に関する研究開発に従事している(写真-7)。とくに、わが国の技術基準類の策定に寄与するとともに、2016年熊本地震および2024年能登半島地震

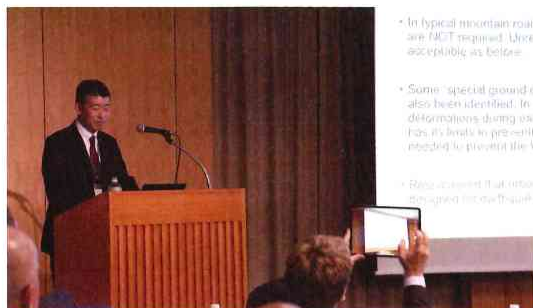


写真-7 日下敦氏

を含む、トンネルに関連する各種災害対応や事故対応において技術支援を行ってきている。

またITAにおける技術部会(WG2)のメンバー、PIARC TC4.4の委員として活動しているほか、日本国内の学協会や官公庁が組織する多数の技術委員会にも参画している。

5-2 「日本の山岳トンネルの地震被害とその対策」の講演内容

日本の道路トンネルにおける地震被害とその対策について紹介した。冒頭、日本には延長約5,000km、約1万本に及ぶ道路トンネルが存在すること、また、過去10年間だけでも有感地震が約2万6千回発生し、そのうち震度7を観測した地震が4回に及ぶことを示し、日本の道路トンネルはきわめて地震活動の活発な環境のもとに置かれているとの認識を共有した。

続いて、近年の代表的被災事例として、2024年1月1日に発生した能登半島地震を取り上げた。この地震では能登半島北西部で2 mを超える隆起を含む顕著な地殻変動が生じ、津波や液状化と併せて広範な被害がもたらされた。道路トンネルについても複数の被害が報告されており、その中でも1995年竣工、延長約800mの2車線道路トンネルである大谷トンネルでは、約100m区間にわたり覆工コンクリートが崩落する深刻な被害が確認された。3次元スキャナによる詳細計測の結果、トンネルが地すべり面と交差する位置に構築されていたこと、周辺地盤が側方から大きく変形し、その外力に覆工が追従できず破壊したことを説明した(写真-8)。一方で、覆工が崩落してもトンネル空間そのものは保持されていたことから、「空



写真-8 大谷トンネルの被災状況(国土交通省提供)

間を保持する」という意味で一定の耐震性能が発揮されていたことも併せて示された。

大谷トンネルの事例に加え、阪神・淡路大震災の盤滝トンネル、新潟県中越地震の和南津トンネル、熊本地震の俵山トンネルなど、過去の代表的な地震における山岳トンネルの被害事例を俯瞰しながら、その共通点を整理した。その結果として、覆工崩壊が生じた区間の多くは、地すべりが存在したり、膨張性地山であったりするなど、掘削時も困難に直面していたことを示した。これらの条件を、「地震による影響を受けやすい特殊条件」と位置づけた。すなわち、一般的な山岳トンネルが一樣に危険というわけではなく、特殊な地山条件がトンネルの地震時の挙動を左右する重要な要因であることが強調された。

そのうえで、こうした特殊な地山条件に対する具体的な対策の方向性を、ライフサイクル全体の観点から提示した。まず計画段階においては、調査結果にもとづき、地震による影響を受けやすい特殊条件に該当する箇所を可能な限り回避すること、やむを得ず通過せざるを得ない場合には、線形や坑口位置を調整することで地震の影響を最小化することが重要であるとした。設計・施工段階については、インバートを設置してリング構造を構築すること、地山条件を過小評価することなく十分な支保工を設置することが求められると述べた。加えて、万が一覆工が損傷したとしても覆工の大規模な塊での落下することを防ぐというフェ

イルセーフの考え方を紹介した。標準的な山岳トンネルの一般部では無筋コンクリート覆工が多用されるが、特別な地盤条件が想定される区間では、単鉄筋補強コンクリートを用いることで、ひび割れ発生後も覆工がブロック状に分離せず、一体性が保持されることを示した。講演では、直径約10 mの実大規模の覆工供試体を用いた載荷試験の例が紹介され、単鉄筋覆工では圧縮破壊に伴う10 cmを超えるせん断変形が生じても鉄筋が破断せず、覆工が一体性を保持していたことが紹介された。このことから、少量の鉄筋によるフェイルセーフが、地震時の最後の砦として有効であると結論づけられた。そして、維持管理段階においては、変状が多く発生している箇所においては、早期の対策が望まれることも示した。

最後に、多くの山岳道路トンネルは、従来の設計・施工の枠組みの中で、すでに一定の耐震性を有していること、また、都市部の土かぶりの小さい軟弱地盤トンネルについては、耐震設計にもとづいた構造計画が行われていることから、必要以上の不安を抱く必要はないと述べた。その一方で、地震時に大きな変形が発生することが懸念されるといった特別な条件に対しては、覆工崩落に対するフェイルセーフを含む追加対策の導入が不可欠であるとし、日本の豊富な被災事例と実験研究にもとづいて得られた知見を今後のトンネル耐震行政・実務に活かしていくことの重要性を強調して締めくくった。

(文責：日下敦・(国研)土木研究所)

6 Leslie Pakianathan氏の講演

6-1 Leslie Pakianathan氏の経歴

Pakianathan氏は、1980年に土木工学の学士号を取得後、スリランカ国内で建築および水力発電関連プロジェクトにおいて施工者としてキャリアを開始した(写真-9)。1986年に修士号を取得したのち英国の国際コンサルティング企業に入社し、シールドトンネルおよび地下構造物工事における設計業務と現場管理に従事した。英国では、ドックランズ・ライト・レールウェイ、ジュビリー線



写真-9 Leslie Pakianathan氏

延伸、英仏海峡トンネル、ヒースロー・エクスプレス鉄道、クロスレールなど、著名なプロジェクトに携わった。

1995～2002年にかけて香港に出向し、香港ハーバー直下の深部トンネル工事の施工監理を担当した。2002年以降はシンガポールを拠点とし、都市鉄道、道路、上下水道、電力ケーブルなど各種インフラトンネルの設計・施工を統括し、数多くのプロジェクトを成功に導いてきた。

2016～2023年は、チャンギ空港第5ターミナル建設プロジェクトにて、トンネル施工のプロジェクトディレクターを務め、現在も同プロジェクトにコンサルタントとして参画している。また、現在、シンガポール・トンネルおよび地下建設協会(TUCSS)の委員を務めるとともに、ITAのEx-officioメンバー(開催国理事)として活動している。

6-2 「シンガポールにおける公共・持続可能性の課題と地下ソリューション」の講演内容

シンガポールが直面する公共・サステナビリティ上の課題と、それに対する地下インフラによる解決策について講演を行った。冒頭、東西約50km、南北約27kmというきわめて限られた国土、独立以降の急速な人口増加(1965年から約3倍の611万人へ)、埋立による国土拡大(面積22%増)の歴史を示し、高密度都市国家としての土地制約、気候変動、水資源制約、廃棄物処理、エネルギー需要といった複合的課題が、地下空間の戦略的活用を強力に後押ししていることを説明した。また、シンガポール・グリーンプラン2030および2050

年ネットゼロ目標のもとで、公共交通、水・廃棄物、エネルギー、沿岸防護といったインフラを総合的に再設計する必要があると述べた。

公共交通分野では、道路・高速道路が国土の大きな割合を占めてきた状況から、地上をこれ以上車道で埋め尽くさず、鉄道中心の移動へ転換する方針が示された。1980年代の最初のMRT開業以来、現在は6路線(うち、4路線が全線地下)に発展し、鉄道ネットワークを242kmから2030年ごろまでに約360kmへ拡大し、今後4路線を追加(うち、3路線が全線地下)することが紹介された。既存線の直下に新線を通すようなきわめて混み合った地下空間では、地盤凍結やアンダーピニングなどを駆使したり、車両基地とバス車庫を同一敷地内で立体的に配置するなど、土地利用効率を極限まで高めている事例も示された。約40年にわたり99%超という高い運行信頼性を維持してきた一方、近年いくつかの重大障害を経験したことから、運行・保守体制のレビューを進めていることにも触れられた。

道路インフラでは、すでに供用中のKallang-Paya Lebar Expressway (KPE) および Marina Coastal Expressway (MCE) に続く第3の地下高速道路として、南北を縦断するNorth-South Corridor (NSC) が紹介された。総延長約22.5kmのうち10.5kmを地下トンネルとする計画で、地表道路の渋滞緩和とバス優先レーンの整備を同時に実現するものである。日本の建設会社が複雑な地下区間の施工を担っており、2029年の完成に向けて工事が進んでいると報告された。水資源・下水処理の面では、マレーシアからの水の輸入協定に依存してきた歴史と併せて、国内の集水域拡大と再生水利用の取り組みが説明され、重力流で汚水を大規模再生処理場へ集約するDeep Tunnel Sewerage System (DTSS) が紹介された。全長206kmを超える深部トンネルで都市全域の下水を集め、高度処理により再生水を生産し、余剰水は環境に配慮して海へ放流するシステムであり、現在建設中のフェーズ4が2027年稼働を目標としていることが示された。

電力・廃棄物分野でも地下空間の活用が進んでいる。シンガポールでは送電の信頼性向上と景観・土地利用の観点から、すべての電力ケーブルが地下に埋設されており、架空電線は存在せず、400kV 高圧送電線用のケーブルトンネルが深度40～75m、内径約6mで建設されている。また、約3ヘクタールの地上用地を解放し、その上部に34階建てオフィスビルを建設する複合開発の一部として、東南アジア初となる大規模地下変電所が整備されつつあることが紹介された。これは日本の地下変電所の知見を取り入れたものであり、地上空間の高度利用と電力インフラの冗長性確保を両立させる好例であると位置づけられた。一方で、現行の埋立処分場が2035年ごろに満杯に達すると予測されていることから、廃棄物削減と資源循環を前提とした新たな処理方策に加え、沿岸防護と一体化した大規模貯蔵空間の整備など、多機能型インフラの検討が進められていることにも言及した。

気候変動と海面上昇への適応としては、現行の東海岸ビーチから沖合に約20km延長するかたちで新たな海岸線を形成する計画が示された。堤防などのハード対策とマングローブのような自然にもとづく手法を組み合わせるだけでなく、多セル型の連続構造物内部に廃棄物貯蔵空間や貯水池を設ける構想も示され、沿岸防護・廃棄物管理・水資源管理を統合する試みとして紹介された。また、空港インフラについては、第3滑走路の供用とともに、将来需要増に対応する第5ターミナルの建設が進行中であり、既存ターミナル群と新ターミナルを地下トンネルで接続する大規模工事を日本企業が担っていることが報告された。こうしたプロジェクトは、地上・地下を一体とした長期的な容量拡張戦略の一部であると強調された。

土地利用とエネルギー転換の観点では、政府が10～15年先を見据えた土地利用計画と地下マスタープランを策定し、5年ごとに見直すサイクルを制度化していることが紹介された。その前提として2015年には地下空間法が制定され、地表地権者の所有権を地下30mまでと定め、その下方につ

いては公共目的で取得・利用し得る明確な枠組みを整備したことが説明された。エネルギー面では、2050年カーボンニュートラルの達成に向け、太陽光だけでなく、原子力や地熱といったクリーンエネルギーの可能性についても検討が進められており、とくに地熱利用や小型モジュール炉など地下インフラとかかわる技術については、日本を含む国際協力が不可欠であるとした。

最後に、公共ニーズの増大と気候変動への対応が、交通、水、電力、エネルギー転換、貯蔵空間に至るまで前例のない規模の地下インフラ開発をシンガポールに促していることを改めて強調し、こうした挑戦は高度な技術だけでなく、長期的な計画と法制度、そして国際的な知の交流によって初めて乗り越えられると述べたうえで、2028年にシンガポールで開催される World Tunnel Congress を、アジア発の先進事例と各国の知見が交差する場としたいと期待を表明し、締めくくった。

(文責：富田哲平・(株)エイト日本技術開発)

7 おわりに

本特別講演会は、JTA 創立50周年という節目の年に、ITAをはじめとした世界的なトンネルに関する団体、およびプロジェクトの最前線に携わっている組織など、国内外の第一線で活躍する専門家を招き、高速鉄道、道路トンネル、耐震・レジリエンス、リスクマネジメント、地下空間の戦略的活用など、多岐にわたるテーマについて、総合的な視点から、トンネルと地下空間のあり方や具体的な事例とともに示され、最新の知見と経験を共有する貴重な機会となった(写真-10)。

本稿は、当日の講演内容をできるだけ平易に整理し、国内の技術者・研究者・行政担当者が国際的な動向を俯瞰しつつ、自らの実務や研究に引き寄せて考えるための一助とすることを目的として取りまとめたものである。誌面の関係から、各講演で示されたデータや議論のすべてを紹介することはできず、各講演者からの情報などをもとに和文化的なものであり、内容も講演ごとに必ずしも

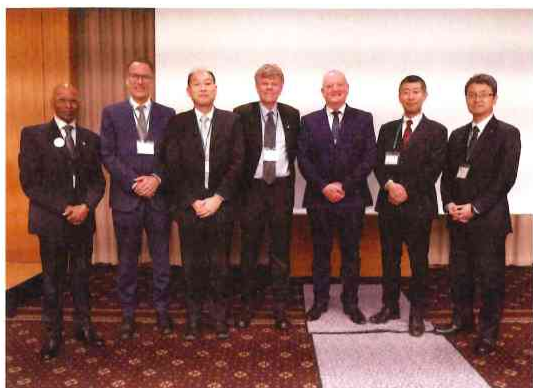


写真-10 講演者と司会者による集合写真

統一された形式となっていないことはご容赦いただきたい。そのうえで、各講演者が強調した要点、すなわち「地盤条件や社会条件に即した設計・施工・維持管理の工夫」と「関係主体の協働・コミュニケーションの重要性」を中心に構成することになった。読者各位には、本稿を足がかりとして、資料や関連文献にも目を通していただき、自身の専門分野における課題解決や新たな発想のきっかけとして活用いただければ幸いである。

また、本講演会の企画・運営にあたっては、ご多忙のなか講師をご快諾いただいた方々をはじめ、資料の作成や会の運営、本稿のとりまとめなどにご尽力いただいたJTA国際委員会、ITA小委員会技術統括WGおよび国際広報WGの各代表、また、積極的な質疑応答やアンケートへのご協力など、多くの参加者の皆さまのご支援もあり、盛会裡に終了することができた(写真-11)。ここに、改めて深く感謝の意を表したい。

菊川会長の挨拶の趣旨によれば、本講演会は、参加者全員がトンネルおよび地下空間をめぐる国際的動向への理解をいっそう深めるとともに、国



写真-11 当日の会場の状況

際的な連携とネットワーク構築の貴重な機会であったと思われる。本会への参加や本稿の閲読が契機となり、一人ひとりが自国の経験にとどまらず、海外の事例から学び、双方向の情報発信と意見交換を通じて国際的なネットワークを育み、今後も社会資本の整備とトンネル技術の発展、そして技術者としての更なる資質の向上に向け、国内外の仲間と連携、協力が重要な要素のひとつとなるであろうことを改めて思い、本報告のあとがきとしたい。

(文責：砂金伸治・東京都立大学)

参 考 文 献

- 1) European Union: Safety in Railway Tunnels T SI, 2025.12.
https://www.era.europa.eu/domains/technical-specifications-interoperability/safety-railway-tunnels-tsi_en
- 2) ITA-AITES: Code of practice for risk management of tunnels works - 3rd edition featured.
<https://about.ita-aites.org/wg-committees/itacus/downloads/2204/code-of-practice-for-risk-management-in-tunnels-works-3rd-edition>