



トンネル技術分野の取り組み

安井成豊

1. はじめに

施工技術総合研究所は、設立当初から道路トンネルを中心に歩掛り調査やトンネル施工法検討などの業務を受託し、数多くのトンネル建設に係わってきた。さらに、トンネルの設計から施工までの一貫した技術的支援などの実績も多くなり、トンネルの計画、設計、施工、維持管理の各段階における技術的な諸問題に対して幅広く対応している。最近では、総合評価方式の導入に伴う発注者支援や新技術関連の業務も行っている。

このように、トンネルに関する仕事が施工総研の柱として培われ、技術を継承しながら経験豊富なトンネル技術者が育って現在に至っているのも、(故)三谷健最高顧問の存在無くしてはあり得ないと言っても過言ではない。設立当初からトンネルの学識経験者として、いくつもの施工困難なトンネルに関する委員会の委員長を担うとともに、日本坂トンネル内での火災事故後には陣頭指揮を執って迅速な対応をするなど、90歳まで生涯現役として現場主義を貫き、我が国でも有名なトンネル技術者であった。

しかし、その後は「日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所」という名前からトンネルに深く関わっているという存在感が薄れつつあるのも確かである。この状況を払拭するためには、今後、トンネルに関する新たな取り組みをしていかなければならないと考えている。

以降に、トンネル技術分野の取り組みとして、施工総研が今までに係わった大型プロジェクトのうち、日本で施工された代表的な山岳トンネルの技術支援、民間企業との新技術の研究開発、シールドトンネルに関する調査・実験、トンネル維持管理における最新技術の現場検証や研究開発について紹介する。

2. 山岳トンネルに関する取り組み

(1) トンネル技術支援

(a) 技術支援の概要

施工総研では、設立当初からトンネルの施工に関する技術的な相談を受けてきた。特に施工段階においてトンネル施工に関する発注者のブレンとして「…切羽観察等検討業務」「…施工検討業務」など多くの業務を受託してきている。

その実施内容は、トンネル施工に携わった経験が少ない発注者側担当者とトンネル施工の専門家である施工業者との間に立ち、ある時は通訳者として特殊なトンネル専門用語や施工業者からの提案内容をわかりやすく説明するとともに、参謀として提案された内容の当該現場への適否や代替案の検討などを第三者的な視点を持って助言を行っている。これにより、発注者の方々が説明責任を負う上位組織や議会等に対して中立公平性を担保されたものとしている。また、施工業者にとっても、発注者からの判断が早くなされ、回答待ちに伴う施工遅延を防ぐことにも寄与しており、両者がWin-Winになるように取り組んできている。

施工総研がこれまでに取り組んできた技術支援では、トンネルの建設開始時(設計検討時)からトンネル施工完了までの長期間に渡って継続した支援を多く行ってきたことがひとつの特徴である。その代表的なトンネルと技術支援時期についてまとめたものを図1に示し、以下に各トンネルの特徴を紹介する。

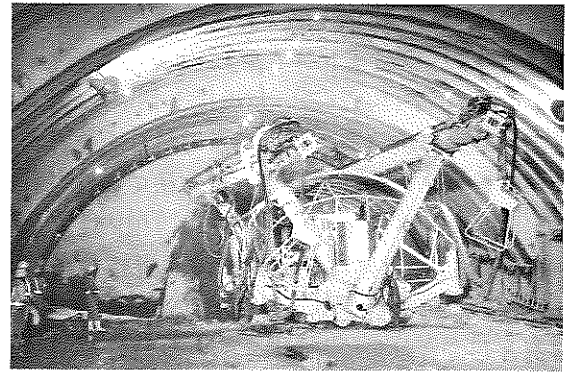
(b) 本州四国連絡道路関連のトンネル

本州四国連絡道路の交通ネットワークには、多くのトンネルが施工されている。その中で大きな特徴を有するトンネルとして「鷺羽山トンネル」と「舞子トンネル」が挙げられる。

鷺羽山トンネルは、本州四国連絡道路の最初に建設が実施された児島・坂出ルート(瀬戸大橋)において本州側の端部にある鷺羽山を掘削したトンネルである。瀬戸大橋は3ルートの中で唯一、道路鉄道併用橋

トンネル	地域	期間	S60	H1	H5	H10	H15	H20	H25	H30
舞子トンネル	本州	11年	■							
オランダ坂トンネル	長崎	13年		■						
鹿島道・トンネル	関東	17年		■						
豊後トンネル他	沖縄	8年 (11年)			■		■	■		
東山トンネル	名古屋	8年			■					
安永田トンネル	豊田	10年						■		

図一 代表的なトンネルと技術支援実施期間



写真一 舞子トンネル

として建設された。瀬戸大橋の北端に位置する下津井瀬戸大橋に隣接することから、計画当初は、鷲羽山をオープンカットする予定であったが、写真一に示すように、景観保存の観点で上部に道路トンネル2本、下部に鉄道トンネル2本の計4本のトンネルが隣接し、さらに下津井瀬戸大橋のアンカートンネル（38°の斜坑）が両側に位置する特殊なトンネルとして建設された。

発注者である本州四国連絡橋公団は、主に橋に関する技術力に精通しているが、トンネルに関する技術力まではカバーできないことから、施工総研が技術支援を行ってきたものである。

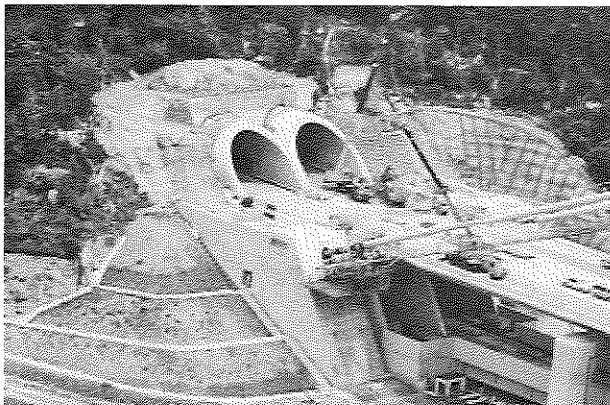
同様に2つめのルートである神戸・鳴門ルートにおいても、技術支援を行ってきた。その代表例が、明石海峡大橋の北側に位置する神戸エリアにおいて、当時は珍しい3車線幅員を有する大断面トンネルで、住宅等の多くの地上構造物への影響抑止を必要とする舞子トンネルである。その建設に際しては、写真二に示すように、国内で始めて適用する新しい技術や施工機械を採用することが必要とされた。そのため、現場にて各種実験や試験施工を行い、現場の工事事務所等にて発注者および施工業者とともに議論を繰り返し、最適な施工法を構築しながら取り組んできた事例である。

(c) 名古屋高速道路関連のトンネル

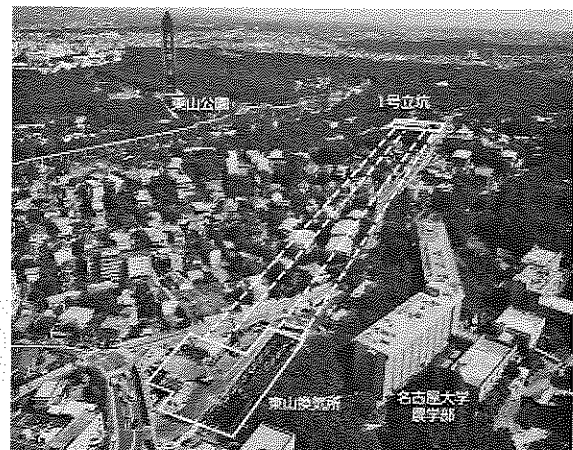
名古屋高速道路は、ほとんどが高架構造の橋梁にて交通ネットワークが形成されているが、その中で唯一、山岳トンネルにて建設されたのが「東山トンネル」である。当該トンネルは、写真三に示すように、都市部の小土被りかつ未固結地盤に対して多くの住宅等を有する地域に建設されたトンネルである。発注者である名古屋高速道路公社は、高架橋中心に道路ネットワークを構築してきた組織であり、トンネルに関する経験を有する技術者がいない状況であった。そのため、当時の職員が舞子トンネルに研修出向されていた関係で、施工総研を知ることとなり、技術支援を行うこととなった。

(d) 特殊施工条件下のトンネル

山岳トンネルは名前のとおり、山岳部にて施工されるトンネル工法として採用されてきた。その後、各種補助工法や施工材料および施工機械の発展に伴って、住宅が密集する都市部でも山岳トンネル工法が適用されてきた。その結果、用地確保の問題で上下線のトンネル離隔がほとんどない条件、トンネル直上の住宅等への沈下抑制および施工時振動の軽減等が必要とされる条件などの特殊な施工条件を有する中で山岳トンネルの施工が必要とされるものができた。



写真一 鷲羽山トンネル



写真三 名古屋高速東山トンネル¹⁾

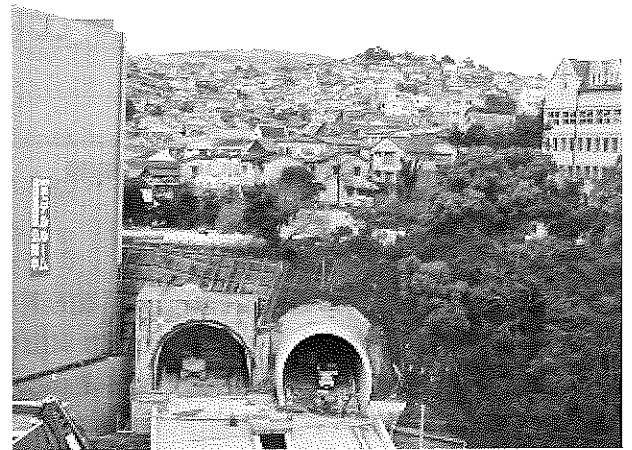
前者の代表的な事例としては、沖縄県内で施工された写真—4の「豊見城トンネル」および写真—5の「識名トンネル」が挙げられる。超近接トンネルの施工は、過去には中央導坑（あるいは側壁導坑）を先行実施するめがねトンネルと呼ばれる施工方法で実施されてきた。しかし、同トンネルにおいては、国内で初めて早期断面閉合による無導坑方式での超近接施工を実施し、以後の超近接トンネルの施工において参考にするべき事例として貢献してきた。

後者の条件では、長崎県のオランダ坂の住宅街直下を掘削した「オランダ坂トンネル」と愛知県豊田市内に施工された「安永川トンネル」が挙げられる。

オランダ坂トンネルは、一般国道324号バイパスとして長崎県が計画した郊外の早坂側から市街地となるオランダ坂近くの新地側に抜ける延長約3kmの長大トンネルであり、2車線併設の道路トンネルである。そのうちの新地側約500mは、写真—6に示すように、小土被りでトンネル直上には住宅が密集し、新地側の坑口は離隔が数mの超近接トンネルとなるなど、設計・施工上の多くの諸問題を抱えていた。

そのため、平成3年度の計画段階から学識経験者によるオランダ坂トンネル技術検討委員会を設立し、計画、設計、施工、非常用施設設置までの約13年間に

わたり、施工総研が委員会の運営と諸問題に対する技術支援を行ったものである。



写真—6 オランダ坂トンネル²⁾

安永川トンネルは、豊田市内に建設された中心市街地の浸水被害軽減を目的とした地下河川トンネルであり、古くから計画はされていた。しかし、トンネル直上に多くの住宅を有すること、トンネルと地上との離隔（土被り）が小さいこと、トンネル施工が実施される地質は、上部に脆弱なマサ土を有しつつ、トンネル断面の多くは硬い花崗岩が分布する特殊な施工条件であり、事業の実現可能性が不明とされていた。

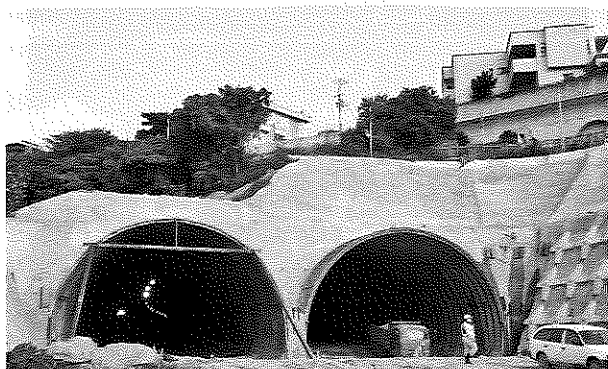
当該事業の実現を目指す豊田市が都市部にてNATM施工を実現した名古屋高速道路公社に相談をされ、公社から紹介された施工総研が施工方法を見直すこととなった。

最終的には、割岩工法を含めたNATM施工区間と写真—7のようなTBM（トンネルボーリングマシン）を用いた先進導坑掘削と特殊電子雷管等を用いた拡幅NATM区間にて施工を実現した³⁾。

本トンネルでは、設計段階において基本となる施工



写真—4 豊見城トンネル



写真—5 識名トンネル



写真—7 安永川トンネル

方法について検討することから初め、詳細設計・工事発注・工事实施の各段階において発注者に対する技術支援を行ったものである。

(e) その他のトンネル

山岳トンネルの技術支援は、上記のような特殊なトンネルのみでなく、(1) 概要で述べたとおり、発注者のプレーンとして多くのトンネルにて寄与してきた。特に、三重県内においては、国および県にて発注されたトンネルの多くに関わり、それら施工実績データ(計51トンネル)の蓄積から、県内での面的な地質的特徴と施工時の性状等を踏まえた技術支援につなげてきている。

また、施工総研では、発注機関管内の複数トンネルに対し、一括した技術支援も行っている。主な技術支援の内容は、設計の妥当性の確認、施工時の地山評価への立合、適切な補助工法選定のための助言などである。このように管内のトンネルを一括して技術支援することで、統一的な地山評価が可能となる。また、この施工データを一元管理することで、将来の管内のトンネル施工時に有用なデータとすることができ、結果として合理的かつ経済的なトンネルの施工管理を行うことが可能になる。最近では、静岡県、山梨県、三重県などの地方公共団体でこのような取り組みを実施している。

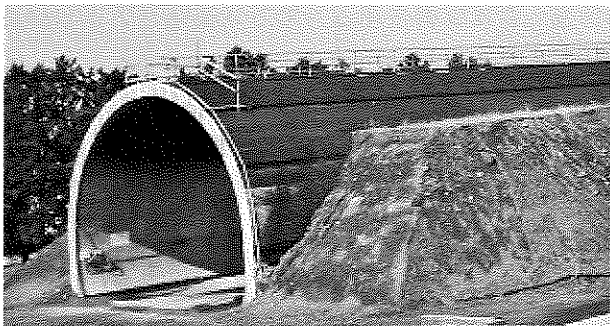
(2) 民間企業との研究開発の取り組み

(a) 民間企業との共同研究、施設貸与と技術指導

施工総研では、ゼネコンに代表される施工会社だけでなく、施工機械や材料等を取り扱う会社との共同研究も多数実施している。

施工総研には、構内に延長80m、内空断面66m²の2車線道路トンネル相当の模擬トンネル(写真—8)があり、机上検討の後、プロトタイプを設計製作した際に、現場に近い条件で基礎試験から応用試験まで各種試験の実施を可能としている。

会社によっては、すでにプロトタイプまで検討を自



写真—8 実物大模擬トンネル

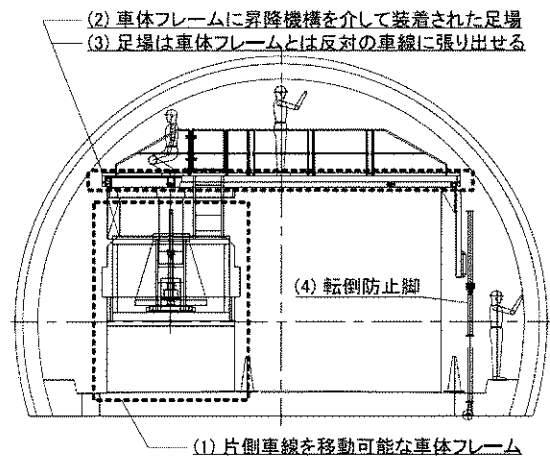
社で進められ、それを実大規模のトンネルで検証する際に、施設貸与にて同トンネルを活用される場合もある。その際には、第三者の立場のトンネル技術者として技術指導を行い、現場に展開される技術へと発展させることも行っている。

共同研究の事例としては、トンネル点検作業の効率化を図るための作業台車開発として図—2に示すものが机上検討例として挙げられる。作業台車については、その後、後述するSIP研究開発プログラムにおいても形状を可変可能とする新たな作業デッキを検討し、写真—9に示す部分模型の製作まで実施した。

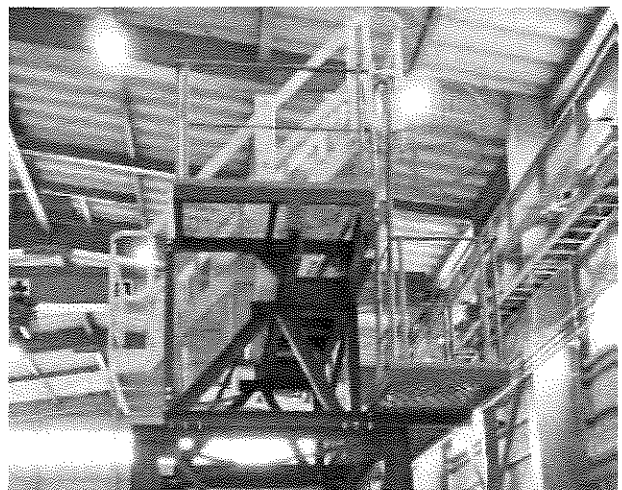
また、開発した技術の実施工検証として写真—10に示すように、防水シートを設置する実験を行ったものや覆工打設実験を行ったものなど各種の実験を実施している。

(b) 新技術開発研究会

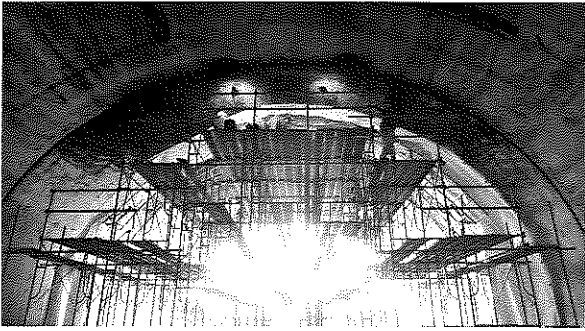
補助工法などの発達に伴い、山岳工法が都市部のトンネルに適用されるケースが増えてきた。その実施に際しては、超近接トンネルの施工、止水構造の採用な



図—2 点検作業台車の研究事例⁴⁾



写真—9 点検台車の部分模型

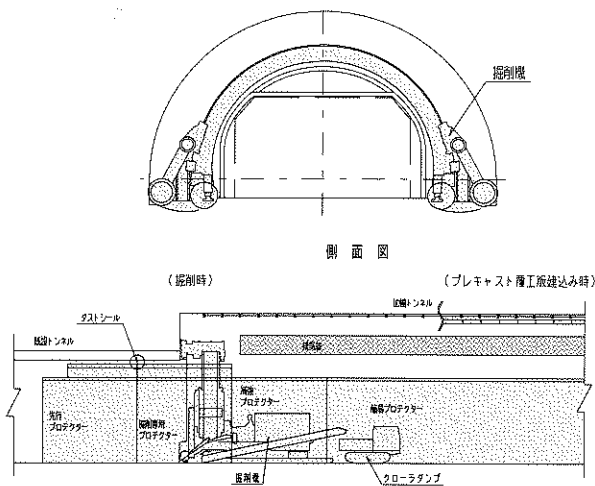


写真一10 防水シートの施工実験

ど、厳しい施工条件が課せられるケースも増え、実現場に適用可能な最新の施工技術の研究開発が求められている。

施工総研では、各種課題に応じて大学、民間企業と協力し、最新の技術をよりスムーズに現場に適用可能とする新技術の開発促進を目的として、『新技術開発研究会』を適宜設立して最新技術の研究に取り組んでいる。これまでに実施してきた研究テーマとしては、「山岳トンネルの止水技術の研究と開発」, 「大深度地下分岐合流部の設計施工技術に関する研究」, 「防水シートの品質向上に関する研究」, 「トンネルの補助工法に関する研究」, 「トンネル活線拡幅工法の技術研究」などが挙げられる。

図一3は、「トンネル活線拡幅工法の技術研究」において検討された活線拡幅施工の一例である。



図一3 活線拡幅検討例

3. シールドトンネルに関する取り組み

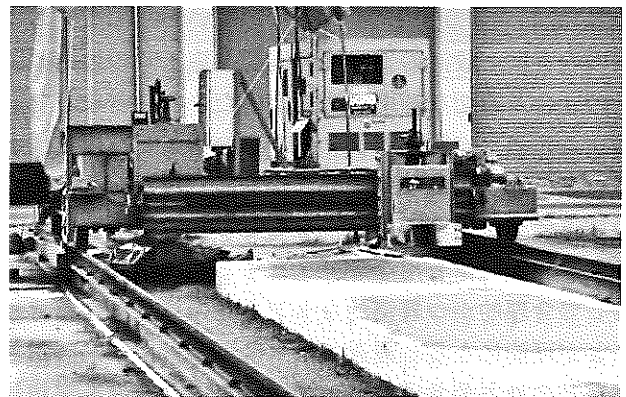
(1) 各種実験の実施

シールドトンネルに対する取り組みは、東京湾アクアライントンネルのシールド検討時が最初と記憶して

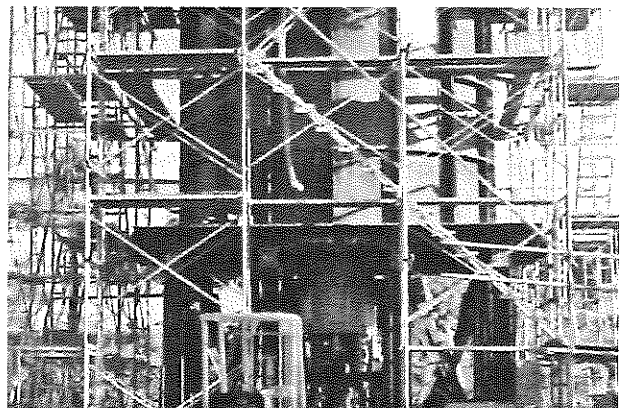
いる。計画当時は、マシン外径6m以下で施工延長1km程度までの施工実績がほとんどであったシールドに対して、マシン外径14mで施工延長2.5kmを実現することが求められたものである。そのキーテクノロジーとして高耐久性ビットが求められ、その実験を施工総研にて実施した(写真一11)。

その後、シールドの多断面化(DOT, MF等)における掘削土の取り込み性能実験や上向きあるいは下向きに発進・施工するシールドの実大規模実験等(写真一12)を民間会社からの委託にて実施してきた。

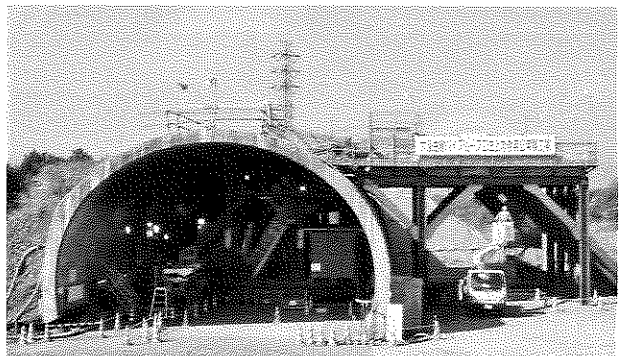
また、写真一13のように実大規模の模擬トンネルを道路本線となる大断面シールドと想定し、ランプ



写真一11 高耐久性ビットの試験



写真一12 上向きシールドの実験



写真一13 大口径曲線ボーリング実験

シールドとの切り抜き施工に関する実験も実施してきた。実験は、非開削幅技術として首都高中央環状新宿線にて適用実績がある大口径曲線ボーリングであり、施工径φ600mmへのサイズダウンと上向き施工に取り組んだものであった。

前記のように、施工総研の広大な敷地を利用して、実験目的に応じて適宜必要なヤードや実験施設を計画・構築して、各民間開発者が必要とされる実大規模の施工実験を積み重ねてきた。

(2) 各種調査および検討

シールドトンネルに対する別の取り組みとしては、各種調査および検討が挙げられる。東京湾アクアラインの施工時には、以後の大断面シールド施工につながるデータ収集を目的として、全工区の施工状況等について調査を行い、現場にて適用された大型の後続設備等の資料収集・とりまとめを行った。また、シールドメーカー各社の設計技術者とともに、さらなる大断面化、長距離・高速施工に関する課題と解決案について検討を行った。

施工総研は、一般社団法人日本建設機械施工協会に属する組織であり、建設機械損料に代表される価格に関する調査にも取り組んでいる。そのため、各種大断面シールドに関する基礎価格の調査を継続して実施してきており、最近施工されている大断面シールドの多くにも携わってきている。

また、新東名にて本格採用された先進導坑用TBMについても、施工対象となる地質条件等を考慮して必要とされる基本仕様を検討するとともに、基礎価格や損料等について検討を行う取り組みを行ってきた。

4. トンネル維持管理における最新技術の取り組み

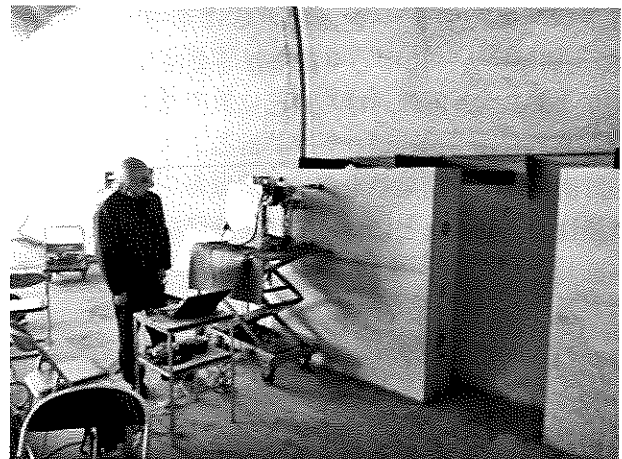
トンネルは、橋梁にみられるような架け替えなどのリフレッシュ工事は困難であり、建設後、別ルートを新たに建設しない限りは、維持管理をしながら利用され続けることが基本とされる構造物である。建設後50年を経過したトンネル数は10年後には34%となることから、点検技術の効率化・高度化が大きな課題とされてきた。施工総研においても、トンネル維持管理における最新技術の取り組みが求められ、実施例として「次世代社会インフラ用ロボット現場検証」と「トンネルマーカの研究開発」について以下に各概要を紹介する。

(1) 次世代社会インフラ用ロボット現場検証

平成25年12月に発生した笹子トンネル天井板崩落事故を受けて、国交省から平成26年6月に「道路トンネル定期点検要領」（以後、「点検要領」と呼ぶ）が発出され、全ての道路トンネルについて5年に1回の定期点検が必要とされた。

国交省では、少子高齢化が進む将来において持続的に点検維持管理を可能とすべく、次世代社会インフラに対する点検を可能とされるロボットについて公募を行い、その現場検証を3ヶ年に渡って実施した。

施工総研では、公募提案されたトンネル点検を目的とした各種ロボット技術について現場適用性を評価可能とするための検証方法および評価方法について検討を行い、実トンネルおよび施工総研の模擬トンネルにて各ロボット技術の現場検証を行った^{5)・6)}（写真—14）。



写真—14 ロボット技術の現場検証

上記検証を踏まえて実際の定期点検へのフィールド試行もその後行われた。そして、点検要領発出後の点検作業が一巡実施された平成30年度末において、点検要領の改訂とともに「新技術利用のガイドライン(案)」が発出され、定期点検における新技術(ロボット)の活用が始まった。

(2) トンネルマーカの研究開発

平成26年度からの5箇年に渡って「戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)」がはじまり、その中の「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」分野に土木研究所および橋梁調査会との研究共同体として参画した。その研究開発プログラムにおいて施工総研は、安全かつ効率的なトンネル点検を実現するために、各社や各機関にて研究開発されているロボットなどの新技術をトンネルに活用可能とするためのインフ

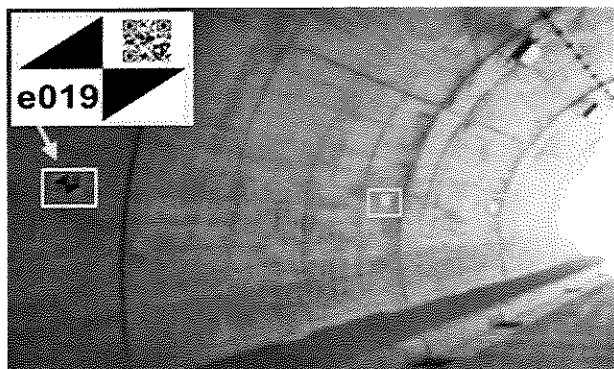


写真-15 トンネルマーカー

ラ側の工夫（構造提案）に関する研究を実施した。

研究の結果、GNSSが活用できないトンネル環境下において、各種ロボット技術の利用促進を図るためには、自己位置をいかに認識可能とするかが大きな課題とされた。そのため、トンネル内にて静止状態だけでなく、移動状態においても中心位置が認識可能となるトンネルマーカーを提案するに至った（写真-15）。同マーカーに中心座標情報等を付与することにより、トンネル内における自己位置座標が算出可能になるとともに、走行型レーザー計測システム（MMS）の計測精度向上効果や走行式画像撮影システムの画像認識性向上効果などについて現場検証結果を踏まえて実証した^{7)~9)}。

今後、同研究結果を踏まえて「(仮称)トンネルマーカーの活用ガイドライン(案)」の作成を進めており、トンネル点検へのさらなる新技術・ロボット技術の活用が促進されることを期待している。

5. おわりに

施工総研がトンネル技術分野に対して取り組んできた事例として、山岳トンネルについては「トンネル技術支援」と「民間企業との共同研究等」、シールドトンネルについては「各種実験の実施」と「各種調査および検討」を紹介した。さらに、トンネル維持管理に対する最新技術に関する取り組みについても示し、トンネルに関する各種段階において取り組んでいる現状を紹介した。

今後も施工総研らしい技術者集団として、コアとなる確かな技術力を高めながら、時代が求める「変化」に対応していき、広く社会に貢献していく所存である。

【参考文献】

- 1) 名古屋高速道路公社：名古屋高速道路 東山トンネル工事誌
- 2) 長崎県土木部、長崎県道路公社：オランダ坂トンネル工事誌
- 3) 岩野圭太：切る 先端技術研究2 周辺環境に優しい制御突破技術，土木技術，Vol.70，pp.26-31，2015.8
- 4) 寺戸秀和：トンネル供用時の維持管理用作業台車の開発，建設機械施工，Vol.65，2013.6
- 5) 寺戸ら：次世代社会インフラ用ロボットの現場検証 トンネル維持管理分野を中心として，建設機械施工，Vol.67，2015.12
- 6) 寺戸ら：次世代社会インフラ用ロボット開発・導入に関するトンネル維持管理分野の取り組み，建設機械施工，Vol.69，2017.10
- 7) 寺戸ら：トンネル点検の効率化を目的とした覆工マーカーの提案，土木学会第73回年次学術講演会，VI-234，2018.8
- 8) 寺戸ら：トンネル維持管理の効率化・高精度化を目的とした覆工マーカーの利用方法，土木学会第74回年次学術講演会，VI-153，2019.9
- 9) 井野ら：トンネル覆工マーカーを用いた位置座標補正効果に関する現場検証，土木学会第74回年次学術講演会，VI-771，2019.9

【筆者紹介】

安井 成豊（やすい しげとよ）
 (一社)日本建設機械施工協会
 施工技術総合研究所
 研究第一部 部長

