

応用地質技術年報に見るトンネル関連技術と今後の展開

太田裕之*

A Review of Tunneling Technology in OYO Technical Reports and Its Future Development

Hiroyuki OTA*

Abstract

A total of 17 reports on "building technology" for new tunnels have been presented in OYO Technical Reports as tunnel-related articles, such as those related to measurement and analysis during the NATM introduction period for mountain tunnel works, and ground evaluations during the period when NATM matured, management of tunnel construction projects, and processing of excavated soil containing natural heavy metals. Meanwhile, the development and introduction of a new "conserving technology" related to maintenance and management of tunnels will be required in the future with growing importance of the maintenance and management of social capital stock. In response to such needs, OYO has been providing high quality, cost effective results for tunnels, particularly road tunnels, by introducing a 3D laser measurement system, as well as studies, analyses, or design of tunnel repair works leveraging technologies accumulated through our tunnel construction works. The company also conducts operations for various local governments, including support for developing tunnel maintenance and management plans which enables rational and efficient integrated maintenance and management of numerous tunnels, or the introduction of a management system.

Keywords: Measurement and management of tunnels, Laser scanner inspection system for tunnels, Damaged tunnel, Numerical analysis, Tunnel maintenance and management plan

要 旨

これまで応用地質技術年報に掲載されたトンネル関連の論文では、山岳トンネルの施工に係る NATM 導入期の計測や解析に関連するもの、NATM が成熟する中での地山評価等に関するもの、トンネル建設事業のマネジメントや自然由来の重金属掘削土処理に関するものなど、新設トンネルに関連する計 17 編の“造る技術”が紹介されている。一方、社会資本ストックの維持管理の重要性が指摘される中で、今後はトンネル維持管理に係る新たな“守る技術”の開発・導入が求められている。当社はこうしたニーズに応えるため、主に道路トンネルを中心として、トンネル点検における 3D レーザー計測システム導入による高品質・低コストでの点検成果の提供や、新設トンネルで培った技術を転用したトンネル補修関連の調査・解析・設計に取り組んでいる。また、数多くのトンネルを一括して合理的、効率的に管理していくためトンネル維持管理計画の策定支援やマネジメントシステム導入に関する業務を多くの自治体で展開している。

キーワード：トンネル計測管理，トンネルレーザー計測，変状トンネル，数値解析，トンネル維持管理計画

*応用地質（株）技術本部

*OYO Corporation Engineering Headquarters

1. はじめに

応用地質技術年報（以下、「技術年報」）第1号が1979年に発行されて今年で38年目を迎える。本稿では、この間の技術年報に掲載されたトンネル関連の論文に着目して総括するとともに、今後の新たな展開・方向性について述べる。

2. 技術年報に掲載されたトンネル関連論文

図1は、技術年報の刊行年次とほぼ同時期の、我が国における鉄道・道路トンネル建設請負額の推移グラフに、技術年報での掲載論文のタイトルを併記したものである。同図に示すように鉄道・道路トンネル工事は1976年から漸増傾向で推移し、新幹線建設や道路改良事業の拡大の下で1989年ごろより急激に増加して、2001年ごろまで高水準を保った後、インフラ投資予算の縮減の中で、右下がりで減少している。このような時代背景の下、技術年報の掲載論文を年代別に整理して以下に示す。

(1) 第一期（1979年～1989年）

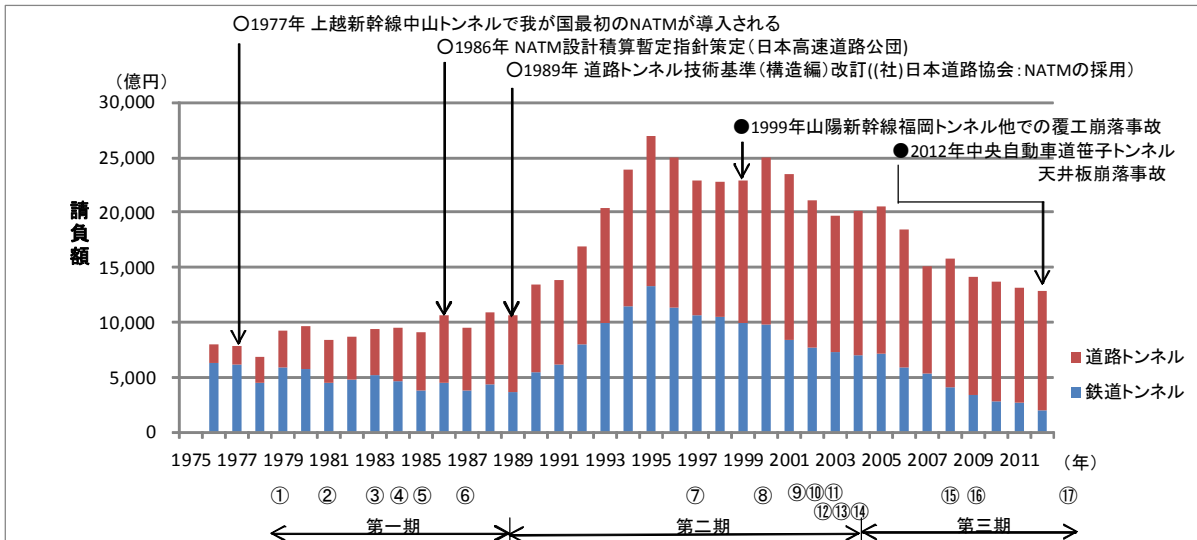
我が国の山岳トンネルの施工は、矢板工法で行われていたが、同工法で工事が難航していた上越新幹線中山トンネルにおいて、1977年に我が国最初のNATM（New Austrian Tunneling Method；新オーストリアトンネル工法、通称ナトム）が導入されて以降、NATMによるトンネル施工が普及していった。このようなトンネル施工技术の変革期において、NATMの計測管理や解析に係る論文が多く掲載されている（図1①～④、⑥）。

(2) 第二期（1990年～2003年）

NATMの施工が普及・成熟する中で、より実態に即した施工を行うために、山岳トンネルの地山評価方法や地すべり等の特殊地山対応に関する論文が多数を占める（図1⑦～⑭）。

(3) 第三期（2004年～2013年）

これまでと異なったCM（Construction Management）方式による工事管理（図1⑮）、地盤リスク（図1⑯）、自然由来の重金属問題への対応（図1⑰）といった新たな観点や環境関連の論文が発表されている。



注1) 図中○番号は、以下の技術年報の掲載論文を示す。

- ①1979年 NATM工法によるトンネル掘削における変位予測¹⁾
- ②1981年 トンネル掘削時の半径方向実測変位に基づいて周辺地山のひずみ分布を求める実際的手法の考察²⁾
- ③1983年 トンネル掘削に伴う壁面の変位量予測手法³⁾
- ④1984年 孔内傾斜計による計測結果から見たトンネル掘削に伴う地山の挙動⁴⁾
- ⑤1985年 都市トンネル建設工事に伴う地中ガス調査法⁵⁾
- ⑥1987年 トンネル掘削時におけるインクリノメーターによる地山変位挙動計測と切羽近傍の地山物性値の推定⁶⁾
- ⑦1997年 地質調査における不確実性の低減ならびにトンネル工事のリスク要因評価⁷⁾
- ⑧2000年 ボーリング孔壁画像を用いた岩盤強度推定法のトンネル切羽前方調査への適用⁸⁾
- ⑨2002年 トンネル掘削時の坑内変位に関する地質工学的研究⁹⁾
- ⑩2002年 弾性波速度の低減を考慮した合理的なトンネル支保の選定について¹⁰⁾
- ⑪2002年 備前トンネルの地質断面解析(1)-多様な形状の構造要素の断面図¹¹⁾
- ⑫2003年 備前トンネルの地質断面解析(2)-カタクレーサイト化した片麻岩・片麻状花崗岩の一軸圧縮強度異方性¹²⁾
- ⑬2003年 湧水によるトンネル切羽の不安定化に関する地質工学的研究¹³⁾
- ⑭2003年 地すべり地におけるトンネル掘削時の諸問題に関する地質工学的考察¹⁴⁾
- ⑮2008年 CM(コンストラクション・マネジメント)方式による道路整備事業の結果と考察-兵庫県豊岡市・養父市 知見八鹿線道路整備事業¹⁵⁾
- ⑯2009年 山岳トンネル事前調査における地盤リスク評価に関する研究¹⁶⁾
- ⑰2013年 リスク評価に基づくトンネル掘削ずりへの対策事例-自然由来金属対策におけるコスト縮減方法¹⁷⁾

注2) グラフは公開資料¹⁸⁾に基づき作成

図1 鉄道・道路トンネル建設請負額の推移(1976年～2012年)と技術年報掲載のトンネル関連論文リスト

以上、期間を区切って掲載論文の概要を述べたが、これら全ての論文は、トンネルの新設(特に山岳トンネル)に係る“造る技術”を取り扱っているのが特徴である。

3. 今後の展開

少子高齢化社会の到来によって、図1に示したようにトンネル建設事業はすでにそのピークを過ぎ、今後もトンネル新設市場の縮小傾向は続くものと考えられる。

一方、同図に示すように1999年には、山陽新幹線福岡トンネル他で覆工コンクリート塊の落下事故が相次いで発生し、更に2013年には中央自動車道笹子トンネルでの天井板落下事故が発生している。

このようなトンネルの老朽化に伴う事故を背景として、これまでに大量に施工された社会インフラ施設の維持管理の重要性が指摘されている¹⁹⁾。

道路トンネルにおいても、その保有数は全国で1万本を超えており(図2)、今後もトンネル維持管理の市場が拡大する中で、当社が取り組んでいるトンネル維持管理関連の“守る技術”を以下に紹介する。

3.1 トンネル点検・診断技術

笹子トンネル事故を受けて改訂された道路トンネル定期点検要領(以下、「国定期点検要領」²¹⁾)に基づき、2014年7月より、国、自治体等が管理する全ての道路トンネル(図2)に対し、5年に1回の頻度を基本として、近接目視や打音検査等による定期点検が義務付けられることになった。

当社は、表1に示す汎用性の高い市販の3Dレーザースキャナー装置を導入し、図3に示すトンネル覆工展開画像処理を行う「3Dトンネルレーザ計測システム」を開発して、トンネル定期点検での併用を開始している。同システムは以下の特徴を有する。

- ① 近接目視や打音検査による覆工変状箇所(チョーク跡)等を点検作業に追従して取得し、展開画像を生成して、これをトレースすることで、人力スケッチに比べ正確な変状展開図作成が可能となる(図4)。
- ② 覆工形状や変状位置をPC上で、3D状態で再現できるため、室内での点検結果の照査が可能となる。
- ③ 従来的人力スケッチ作業を最小限に止め、点検作業

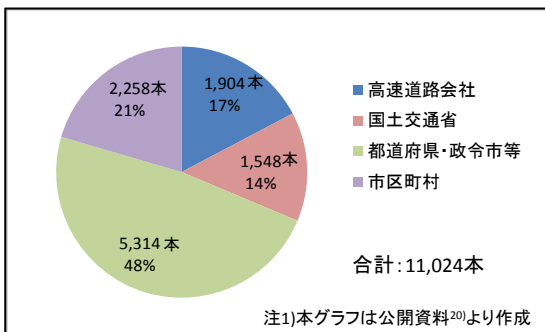


図2 全国の道路トンネル保有数割合(2017年)

時間(交通規制時間)を短縮できる。

- ④ 覆工の展開画像や3D形状を履歴として残すことで、以降の点検等における変状進行性の確認や、対策工施工範囲の現地照合等が容易となる。またCIM(Construction Information Modeling/ Management)モデル等へのデータ活用も期待できる。
- ⑤ 他の走行型覆工展開画像撮影システムに比べ、測定費が極めて安価である。更に作図作業が効率化できるため、従来的人力スケッチに比較しても、覆工の変状展開図作成の低コスト化と迅速化が図れる。

表1 3Dレーザースキャナー概要(FARO社製)

外観	主な性能仕様
	レーザー: レーザークラス1
	波長: 1550nm
	測定範囲: 0.6m~130m
	測定誤差: ±2mm
	解像度: 最大170メガピクセル

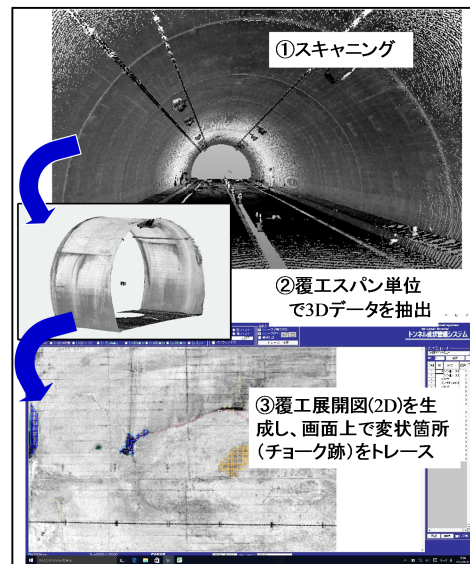


図3 覆工展開画像処理の手順

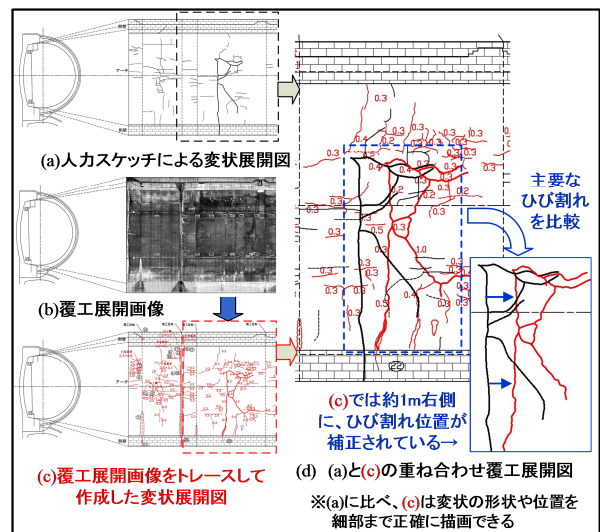


図4 変状展開図の比較例

3.2 トンネル補修補強に関する解析・設計技術

当社は新設トンネル建設で培った地質調査、地山評価、解析・設計技術を活用し、既設トンネルの変状調査、解析、対策工設計業務等への展開を進めている。

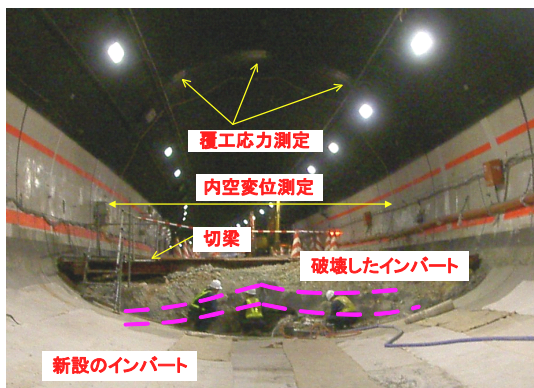
写真1は供用中の高速道路トンネルにおいて、供用後17年目に既設インバートが破壊し、約100m区間にわたって急激な盤ぶくれ（1か月で最大約1mの隆起）が発生した状況を撮影したものである。

当社では、この事態に対し短期間で盤ぶくれ原因の究明のための調査、計測、変状再現解析を立案・実施し、その結果に基づいて、対策工として計画された新設インバート工（図5）の構造検証を実施した。この解析において留意した事項を以下に示す。

- ① 大変形問題の解析で安定して解が得られるFDM(有限差分法)を用いた二次元弾塑性解析により、表2に示す変状メカニズムを想定し、盤ぶくれ現象を再現して、実態に即した解析モデルを決定。
- ② 再現解析や理論解析に基づき、無対策の場合のインバートに作用する荷重を求め、新設インバートの構造検証を実施。

ここで解析モデルは表2に示すCase3を採用したが、施工中の計測では解析値と実測値とが比較的よい一致をみている（図6）。また、この再現解析の経験に基づき盤ぶくれ解析・設計検証のための解析フローを提案し（図7）、他の事例の解析・設計²³⁾等にも利用している。

以上のように、地山性状の評価、変状メカニズムを考慮した解析・設計の技術は、今後も高速道路トンネルで予定されている大規模修繕計画²⁴⁾における、盤ぶくれ対策事業等にも活用していく考えである。



(a)新設インバートと既設の破壊したインバート



(b)破壊した既設インバートの状況
写真1 破壊した既設インバートの状況²²⁾

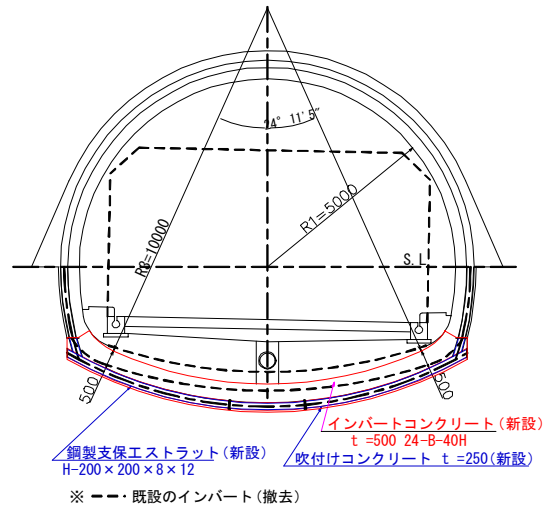
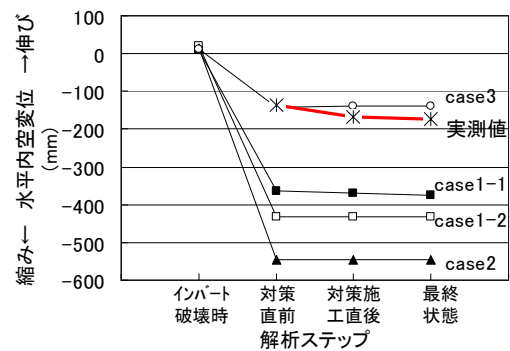


図5 新設インバート横断面図²²⁾

表2 変状メカニズムの設定ケース²²⁾

Case	1	2	3 (採用)
概念図			
説明	下半の地山強度の低下	全周の地山強度の低下	膨張圧の作用 ↓ 下半の地山強度の低下



注1)case1-1,case1-2: 表2のcase1で、覆工・吹付け間の計算条件をそれぞれスライド可、密着に分けて計算。

図6 水平内空変位の解析値と実測値の比較²²⁾

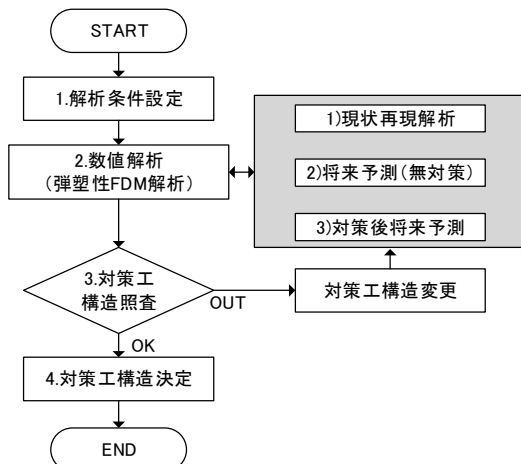


図7 盤ぶくれ対策の解析フロー (案)

3.3 トンネル維持管理計画の策定支援

社会インフラの高齢化により、合理的・効率的な維持管理が求められるなかで、個別施設毎に長寿命化計画の策定が求められている¹⁹⁾。

道路施設についても昭和年代後半に大量に構築された橋梁に対して、予防保全の考え方を導入した長寿命化計画の取り組みが多く自治体で行われている。

一方、山岳トンネルの本体工（覆工コンクリート等）の場合は、橋梁における劣化予測型予防保全の考え方をそのまま適用しても実情に合わない場合が多い。このため当社では、表3に示す山岳トンネルの維持管理上の特徴を考慮したライフサイクルコスト（以下、「LCC」）計算や、LCC 平準化の考え方を提示することにより、自治体の管理する道路トンネルの維持管理計画（本稿では表3に示す実情を考慮し、「長寿命化計画」でなく「維持管理計画」と表記）の策定支援業務を展開している。

当社が提案する道路トンネルの維持管理計画の策定に関する基本的な考え方は以下のとおりである。

- ① 山岳トンネルにおける LCC は下式により、任意の計画期間 n を設定して算出する。

$$LCC = \sum_{i=1}^n (Yai + Ybi) \quad (1)$$

ここに Yai : i 年目の本体工対策費 = 外力対策費 + 材質劣化対策費 + 漏水対策費
 Ybi : i 年目の付属施設更新費 = 照明施設更新費 + 非常用施設更新費 + 換気施設更新費
 n : LCC 評価期間（年）

- ② 山岳トンネルの本体工対策費については、状態監視型予防保全の考え方により、定期点検で判定した健全度（道路トンネルの場合は国定期点検要領に準拠した5段階区分、表4）に応じて、変状毎に対策が

表3 橋梁等の一般構造物と山岳トンネル工の維持管理計画の考え方の比較

項目	橋梁等の一般土木構造物	山岳トンネル（無筋コンクリート覆工主体）
健全度低下と対策費の関係（概念図）	<p>(a) 劣化曲線と対策費（構造体単位）</p>	<p>(b) 健全度低下と対策費（変状単位）</p>
特徴	耐用年数	鉄筋の腐食、疲労破壊等により、構造体の耐力はいずれ著しく低下するため、更新時期＝耐用年数を考慮する必要がある
	劣化予測	中性化等により構造物の劣化はほぼ一様に進行するため、構造物全体の劣化予測が可能
	対策費	劣化の進行（健全度の低下）に伴い対策費は増加する（鉄筋発錆前と後では対策工種が異なり、後者の方が対策費は高額となる）
維持管理計画の考え方	事後保全に代わる合理的な管理手法	【劣化予測型予防保全】 構造物の劣化がほぼ一律に進行する特徴を有するため、構造物単位で劣化の傾向を予測し、適切な時期に予防的に対策を実施し、構造物の（耐用年数の）延命化を図る
	LCC最適化の考え方	事後保全に対して、予防保全による延命化により LCC 評価期間内に更新費（橋梁架替費等）を計上しなくてよいケース＝経済的修繕計画が設定できる
	優先順位	構造物単位で優先順位をつけて、年次修繕計画を策定する
	付属施設更新費	通常は計画の対象外とする
		トンネルは周辺地山と支保工・覆工等が一体となって地下空間を保持するため、地すべり等の特殊な要因により、周辺地山が不安定しない限り、トンネル本体工全体の更新は不要で、耐用年数は考慮しなくてよい 地質・地下水等の諸条件で変状毎に劣化の進行度合いが異なるため、構造物全体の劣化予測は困難 無筋コンクリートが主体であるため、変状の進行過程（健全度の低下）で、対策範囲や対策工種および対策費は基本的に変わらない場合が多い ^{注1)}
		【状態監視型予防保全】 トンネル全体の劣化予測は現実的でないため、定期点検で各変状の状態を監視し、劣化の進行により目標管理水準を下回った変状に対し、限界管理水準に至るまでに予防的に対策を実施する 基本的に健全度によらず対策費が変わらない。また対策後は対策工の再補修や、補修材の落下等のリスクもあるため、管理上、目標管理水準を下回ってから対策を行うことが経済的で効果的。これを考慮し安全性を確保（監視併用）した上で LCC の平準化を図る 健全度の低い変状の対策を優先する。同じ健全度の変状を有するトンネルが複数ある場合は、トンネルに優先順位をつけ、変状単位で年次修繕計画を策定する 照明施設等の更新費が高額であり、一定間隔（耐用年数）で更新が必要であるため、計画に考慮する

注1) 突発性の崩壊現象等の一部の対策を除く

必要となる時期（対策余寿命）を想定し、標準的な対策工を設定した上で、将来発生する本土工対策費（変状規模×標準的な対策工単価）を推計する（図8）。また対策工適用後は、工種毎に設定した耐用年数に達した年に同額の再補修の対策費を計上する。

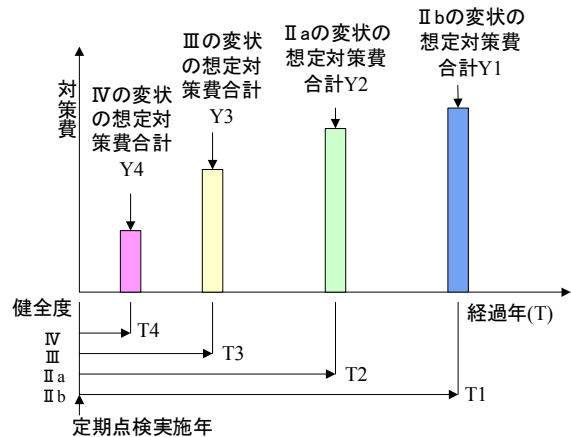
- ③ 国定期点検要領に準拠した場合、本土工対策費算定に必要な変状規模（変状面積等）は定期点検で把握・記録されないため、LCC 計算用情報も加味した集計表様式（図9(b)）等を新たに策定する。
 - ④ 付属施設（照明施設、非常用施設、換気施設）の更新に際しては、それぞれ標準的な耐用年数 t を設定し、付属施設の設置年（トンネル建設年または施設更新年）から t 年ごとに、それぞれの施設の概算更新費を計上する。
 - ⑤ 今後、定期点検や補修を繰り返す中で、トンネル維持管理計画を適時、更新していく必要がある。十本程度以上のトンネルの維持管理には、データベースと維持管理支援システムを組み合わせ、トンネルマネジメントシステム（TMS：Tunnel Management System, 図10）が有効であり、同システムを初期段階で導入する。TMS では、トンネル毎の新設時の設計・施工記録や、供用段階での点検・補修等の記録を一括管理する「データベースシステム」と、点検データ等に基づいて、任意のLCC 評価期間を設定してLCC 計算やLCC 平準化計算を行う「維持管理計画策定支援システム」で構成される。またLCC 計算結果等はEXCELシートで出力でき、任意のグラフ加工等が可能である。
- 以上のような考え方にに基づき、定期点検結果をTMSに登録することで、今後発生するLCCを推計し、予算制約を考慮した最適なLCCの年間配分を検討した上で（図11）、個別トンネル毎に年間予算を配分する維持管理計画（表5）の策定が可能となる。

なお上記に加え、自治体向けの国定期点検要領では、

監視の具体的な方法は各自治体で個別に定める必要がある²⁸⁾。この監視方法も含め、上記②③に示す本土工対策費のLCC 計算のための情報が得られるよう、TMS 導入とともに自治体独自の点検マニュアルを策定するなど、総合的なトンネル維持管理計画策定のための支援業務を、多くの自治体を対象に展開している。

表4 健全度ランクの例（文献²⁵⁾を加筆修正）

健全度	状態	対応	
I	利用者に対して影響が及ぶ可能性がないため、措置を必要としない状態	—	
II	II b	将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、監視を必要とする状態	監視 計画的 予防保全の観点から計画的に 対策を必要とする状態
	II a	将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、重点的な監視を行い、計画的に	
III	早晩、利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、早期に対策を講じる必要がある状態	早急に 対策	
IV	利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、緊急に対策を講じる必要がある状態	直ちに 対策	



注1) T1~T4:健全度に応じて設定した対策余寿命(年)

図8 対策余寿命による対策時期と対策費計上の概念

■【様式D-3】健全性判定集計表（覆工スパン単位）

外力	健全性判定集計表									
	材質劣化				漏水					
	対策区分の判定				対策区分の判定					
変状番号	I	II b	III	IV	変状番号	I	II b	III	IV	
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										
スパン毎健全性					スパン毎健全性					
IV					II					

【特徴】①外力の変状に対しては変状番号を設定しない
②変状数のみ集計

(a)国点検要領に定める点検調査での集計表例²⁶⁾

■健全性判定集計表（覆工スパン単位）

スパン番号	スパン長さ	9.0m	【健全性判定集計表】												備考	本事業の適用注2
			対策区分毎の変状の有無						対策区分毎の変状の発生範囲の規模(m)							
			変状力強I						漏水強I							
変状番号	部位区分	変状区分	変状種類	IV	III	II b	IV	III	II b	IV	III	II b	漏水強I	漏水強II		
1	覆工	アーチ	外力	圧入、ひび割れ												
2	覆工	アーチ	外力	圧入、はく離											0.5m	
3	覆工	アーチ	材質劣化	圧入、はく離				0.10								
4	覆工	側壁	漏水	漏水等									1.25		2.00	
5	覆工	横断目地	材質劣化	圧入、はく離												
6	覆工	水平打設目地	漏水	漏水等											8.00	
7	覆工	アーチ	材質劣化	鋼材腐蝕				0.13								
8	覆工	側壁	漏水	漏水等											1.00	
9	覆工	横断目地	材質劣化	有効厚の不足						2.00						
10	覆工	水平打設目地	漏水	漏水等											7.00	
11	路面	歩道・歩車	外力	変形、移動、沈下												
12																
13																
14																
15																
16																
17																
18																
19																
20																
集計			変状の発生規模合計(m)					0.10	0.13	1.25	2.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
対策区分毎の判定結果			判定区分毎の変状数	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	3		
健全性の診断結果			健全性の診断結果	IV	III	II	IV	III	II	IV	III	II	IV	III	II	

【特徴】①変状単位で変状番号を設定
②変状区分毎に変状数と変状規模（外力は覆工スパン長、材質劣化、漏水は変状面積）を集計

(b)変状規模の集計を可能とする点検調査での集計表例²⁷⁾

図9 覆工スパン単位での健全性判定集計表の比較

4. おわりに

上述したように、当社ではこれまでトンネルの建設市場の拡大に伴い、トンネル新設のための調査、解析、設計、および施工管理等に関する“造る技術”に取り組んできた。また、これと並行してトンネル維持管理市場の拡大に対応すべく、本稿で紹介した“守る技術”への対応も行っている。

トンネルも含めた社会インフラの維持管理市場は間違いなく、これからの我が国の土木市場の主要な位置を占めることになる。しかし一方で道路新設・改良事業と比べ、道路施設の維持管理事業については、件数は圧倒的に多いものの個々の事業規模が小さい場合があり、新技術導入による省力化や低コスト化、技術の継承といった、今後解決すべき課題も多い。当社ではこうした“守る技術”での課題解決に向けた継続的な取組みを展開していく予定である。

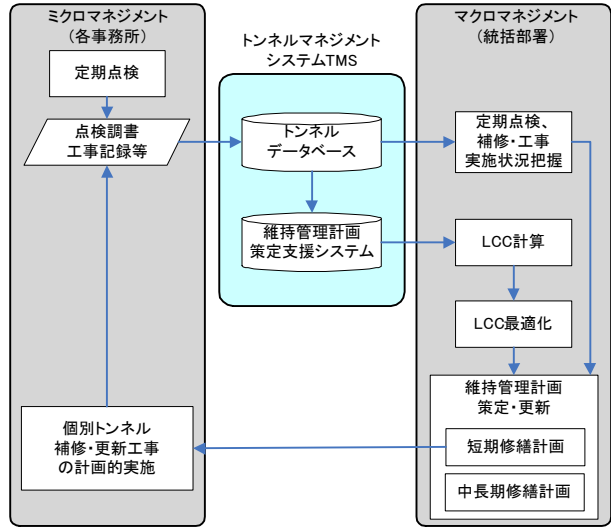
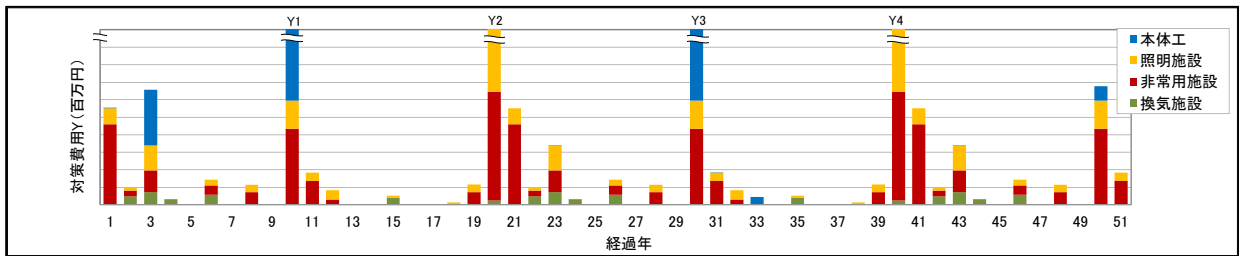
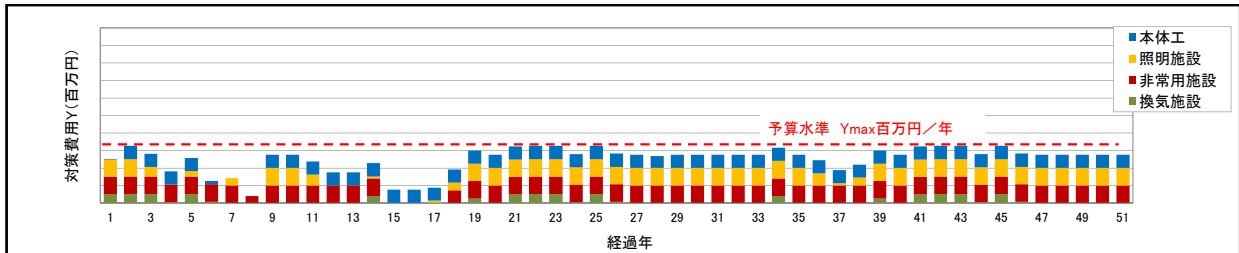


図 10 TMS によるトンネル維持管理の流れの例



(a) 予算制約なし



(b) 予算平準化後

図 11 LCC 計算による年間予算平準化の試算例

表 5 LCC 予算平準化の検討結果に基づいて策定した年次修繕計画表の例

事務所	トンネル名	経過年 西暦 和暦	1年 2017年 H29年			2年 2018年 H30年			3年 2019年 H31年			
			優先 順位	本体工 対策費 (千円)	付属施設更新費 (千円)		本体工 対策費 (千円)	付属施設更新費 (千円)		本体工 対策費 (千円)	付属施設更新費 (千円)	
					照明施設	非常用施設 (一般)		換気施設	照明施設		非常用施設 (一般)	換気施設
〇〇事務所	HSトンネル	102										
〇〇事務所	OOトンネル	134							26,000			
〇〇事務所	KSトンネル	137										
〇〇事務所	TYトンネル	181										
〇〇事務所	OKトンネル	4		32,000	57,000							
〇〇事務所	YKトンネル	110						24,000	2,000			
〇〇事務所	RYトンネル	112										
〇〇事務所	OHトンネル	3										
〇〇事務所	OYトンネル	6										
〇〇事務所	HDトンネル	116										
〇〇事務所	GDトンネル	83							45,000			
〇〇事務所	OYトンネル	5										
□□事務所	SOトンネル	45							2,000			
□□事務所	HMトンネル	166										
□□事務所	TYトンネル	71							21,000			
□□事務所	MTトンネル	74										
□□事務所	THトンネル	75										
□□事務所	TNトンネル	72										
□□事務所	TIトンネル	90										
□□事務所	MTトンネル	41							2,000	67,000	108,000	
□□事務所	OCトンネル	94							2,000			
□□事務所	KPトンネル	38			24,000			61,000	2,000	116,000	116,000	
□□事務所	SMトンネル	96										

参 考 文 献

- 1) 近藤達敏. NATM 工法によるトンネル掘削における変位予測. 応用地質技術年報. 1979, no. 1, p. 229-236.
- 2) 近藤達敏. トンネル掘削時の半径方向実測変位に基づいて周辺地山のひずみ分布を求める実際的手法の考察. 応用地質技術年報. 1981, no. 3, p. 149-164.
- 3) 土屋浩. トンネル掘削に伴う壁面の変位量予測手法. 応用地質技術年報. 1983, no. 5, p. 103-117.
- 4) 成田賢, 松山泰治, 堀伸三郎. 孔内傾斜計による計測結果から見たトンネル掘削に伴う地山の挙動. 応用地質技術年報. 1984, no. 6, p. 49-68.
- 5) 荒瀬義則. 都市トンネル建設工事に伴う地中ガス調査法. 応用地質技術年報. 1985, no. 7, p. 77-84.
- 6) 岡部幸彦, 近藤達敏. トンネル掘削時におけるインクリノメーターによる地山変位挙動計測と切羽近傍の地山物性値の推定. 応用地質技術年報. 1987, no.8, p. 25-41.
- 7) 近藤達敏. 地質調査における不確実性の低減ならびにトンネル工事のリスク要因評価. 応用地質技術年報. 1997, no. 19, p. 1-33.
- 8) 中西昭友, 進士正人. ボーリング孔壁画像を用いた岩盤強度推定法のトンネル切羽前方調査への適用. 応用地質技術年報. 2000, no. 20, p. 103-112.
- 9) 竹林亜夫, 滝沢文教. トンネル掘削時の坑内変位に関する地質工学的研究. 応用地質技術年報. 2002, no. 22, p. 41-63.
- 10) 木村正樹, 大橋弘紀. 弾性波速度の低減を考慮した合理的なトンネル支保の選定について. 応用地質技術年報. 2002, no. 22, p. 117-125.
- 11) 阿部康則, 安江勝夫, 原郁夫. 備驒トンネルの地質断面解析 (1) -多様な形状的構造要素の断面図-. 応用地質技術年報. 2002, no. 22, p. 13-40
- 12) 阿部康則, 安江勝夫, 原郁夫. 備驒トンネルの地質断面解析 (2) -カタクレサイト化した片麻岩・片麻状花崗岩の一軸圧縮強度異方性-. 応用地質技術年報. 2003, no. 23, p. 55-90.
- 13) 竹林亜夫, 滝沢文教, 木村正樹. 湧水によるトンネル切羽の不安定化に関する地質工学的研究. 応用地質技術年報. 2003, no. 23, p. 19-54.
- 14) 竹林亜夫, 上野将司. 地すべり地におけるトンネル掘削時の諸問題に関する地質工学的考察. 応用地質技術年報. 2003, no.24, p. 39-67.
- 15) 鳥居敏, 木村正樹, 石澤伸彰, 岡部幸彦. CM (コンストラクション・マネジメント) 方式による道路整備事業の結果と考察-兵庫県豊岡市・養父市 知見八鹿線道路整備事業-. 応用地質技術年報. 2008, no. 28, p. 43-60.
- 16) 長谷川信介. 山岳トンネル事前調査における地盤リスク評価に関する研究. 応用地質技術年報. 2009, no. 29, p. 79-94.
- 17) 近藤和夫, 河口達也. リスク評価に基づくトンネル掘削ずりの対策事例-自然由来金属対策におけるコスト縮減方法-. 応用地質技術年報. 2013, no. 32, p. 99-108.
- 18) (一社) 日本トンネル技術協会. "図で見る工事の推移と現況(「トンネル年報」より)". 一般社団法人日本トンネル技術協会.
http://www.japan-tunnel.org/tookei_tunnel,
(参照 2017-03-11) .
- 19) インフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議. インフラ長寿命化基本計画. 2013.
- 20) 国土交通省道路局. 道路メンテナンス年報. 2016.
- 21) 国土交通省道路局. 道路トンネル定期点検要領. 2014.
- 22) 奥井裕三, 鶴原敬久, 太田裕之, 佐久間智, 中田主税. 盃山トンネルに発生した急激な路面隆起変状の計測および解析による変状メカニズムの考察. トンネル工学報告集, 第 19 巻, 2009, p. 173-180.
- 23) 奥井裕三, 太田裕之, 早川泰史, 伊佐治. 緩慢に進行する盤ぶくれ現象の調査とトンネルの安定性評価に関する一考察. トンネル工学報告集, 第 20 巻, 2010, p. 85-92
- 24) 東日本高速道路株式会社, 中日本高速道路株式会社, 西日本高速道路株式会社. 東・中・西日本高速道路株式会社が管理する高速道路における大規模更新・大規模修繕計画(概略)について. 2014.
- 25) 国土交通省道路局 国道・防災課. 道路トンネル定期点検要領. 2014, 30 p..
- 26) 国土交通省道路局 国道・防災課. 道路トンネル定期点検要領. 2014, 73 p..
- 27) (公社) 日本道路協会. 道路トンネル維持管理便覧【本体工編】. 2015, 353 p.
- 28) 国土交通省道路局. 道路トンネル定期点検要領. 2014, 8 p.