

山岳トンネルの要求性能と照査項目に関する一考察

A Study on Required Performance and Check Item of Mountain Tunnels

岡田正之^{*}，藤原康政^{**}，山田浩幸^{***}

Masayuki Okada, Yasumasa Fujiwara, Hiroyuki Yamada

The number of tunnels, constructed in the mid-1950's to mid-1960's, 50 years or more passed after their construction, are increasing rapidly in our country. So in the future, it'll be important to do well-planned and efficient maintenance or repair. However, it's not easy to calculate life cycle cost (LCC) and carry out measures such as mend, reinforcement or reconstruction, and do a preventive maintenance, because the demand level or durable years of tunnels are not clear today.

In this study, in order to settle these problems we extract needed functions and required performance of mountain tunnels, based on past record of deformation of tunnels constructed by mountain tunneling method or result of case studies on maintenance control. In addition, we investigated about check item and procedure to give an assessment of required performance. In this article, we introduce results of these studies and clarify the problems on maintenance and repair of mountain tunnels.

Key words; mountain tunnel, needed function, required performance, check item, maintenance and repair

1. はじめに

我が国では昭和30年代に建設され，今後供用後50年以上経過するトンネルが，急激に増大すると予測される．一般にトンネル構造物は容易に取り替えることができないため，計画的な維持・再生を行い，延命化を図ることが特に重要である．しかしながら現状ではトンネルの要求水準や耐用年数などが明確でないことから，ライフサイクルコスト（LCC）を算出して補修・補強・改築といった対策を合理的に実施して予防保全を行うことは一般に困難である．

本研究ではこうした課題を解決するためには，本来トンネルに求められる機能や性能をまず明らかとすることが必要と考え，山岳トンネルを対象に，変状実績や維持管理に係わる事例等を踏まえトンネルの必要機能と要求性能について抽出し，さらに要求性能を評価するための照査項目と照査内容について検討した．

本論文では，これらの研究成果を紹介するとともに，山岳トンネルの維持・再生上の課題について明らかとする．

キーワード；山岳トンネル，必要機能，要求性能，照査項目，維持再生

* フェロー 株式会社ドーコン 交通部

** 正会員 清水建設株式会社 土木事業本部

*** 正会員 株式会社鴻池組 土木技術部

2. 山岳トンネルの覆工コンクリートの特徴

(1) 我が国のトンネルの現状

山岳トンネルは、地中に建設される線状構造物であり、周辺地山の状況等を的確に把握することは困難である。さらに覆工は型枠と地山に挟まれた空間において施工されるものであることから、建設時のみならず維持管理上種々の困難さを伴う。

わが国のトンネルのうち鉄道トンネル、道路トンネル、水路トンネル（電力用）の現況を表-1に示す。これ以外にも、農業用水路トンネルや上下水道用、電気通信用などのトンネル（主にシールドトンネル）があり、今後老朽化が進み維持管理上問題となるトンネルは増加するものと予想される。

表-1 わが国のトンネルの現況¹⁾

用 途	全延長	施工方法 (NATMの割合)	覆工材料	建設後50年 以上経過
鉄 道 (JR各社、新幹線含む)	2,200km	1割程度	レンガ、石、コンクリートブロックが数多く現存している	30%
道 路 (高速国道含む)	2,600km	約半数	ほとんどが場所打ちコンクリート	6%
水 路 (水力発電用のみ)	4,700km	1割程度	場所打ちコンクリートが多い	55%

(2) 矢板工法における覆工

山岳トンネルにおいてNATMが標準工法となる以前は、矢板工法が主流であった。この工法は掘削時には鋼製支保工が土圧を受けもち、覆工打設後には鋼製支保工と覆工が一体となって土圧を受けもつという考え方であることから、覆工に力学的機能を期待し巻厚が厚い無筋コンクリート構造となっていた。しかしながら図-1に示すとおり、打設時コンクリートの地山側への回り込みが不十分になり、矢板と地山の間に空隙が生じやすく、それが原因で覆工と地山の間にも背面空洞が残りがちで欠点を有していた。

覆工の施工方法としては、上半アーチ部を先に打設した後に側壁部を打設する逆巻工法が多く用いられており、アーチ部と側壁部との間の施工目地については図-2のように、後で硬練りモルタルで充填する方法が採用されていた。そのため、モルタル等の経年劣化による漏水や浮き、剥離等の発生が維持管理上の問題として挙げられる。

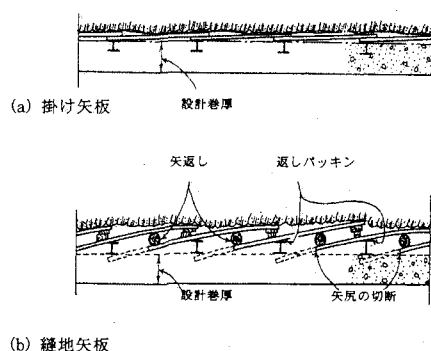


図-1 矢板工法の矢板と覆工²⁾

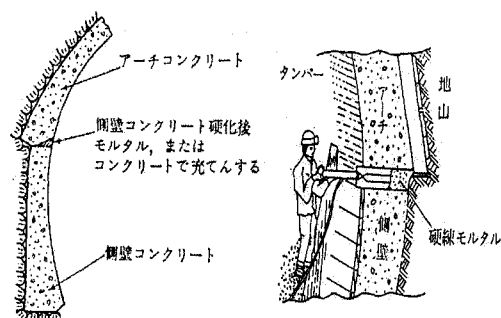


図-2 逆巻き工法のアーチと側壁コンクリートの継目処理の例^{2), 3)}

打設機械には、圧縮空気によりコンクリートを圧送するコンクリートブレーサーやアジテータ付きコンクリートブレッサーが使用されていたが、コンクリートの材料分離、ジャンカ、巻厚不足が発生しやすい欠点を有していた。アーチ部の打込み方式では配管を順次引き抜く方式が採用されていたが、天端部に未充填箇所が発生しやすいという問題があった（図-3）。

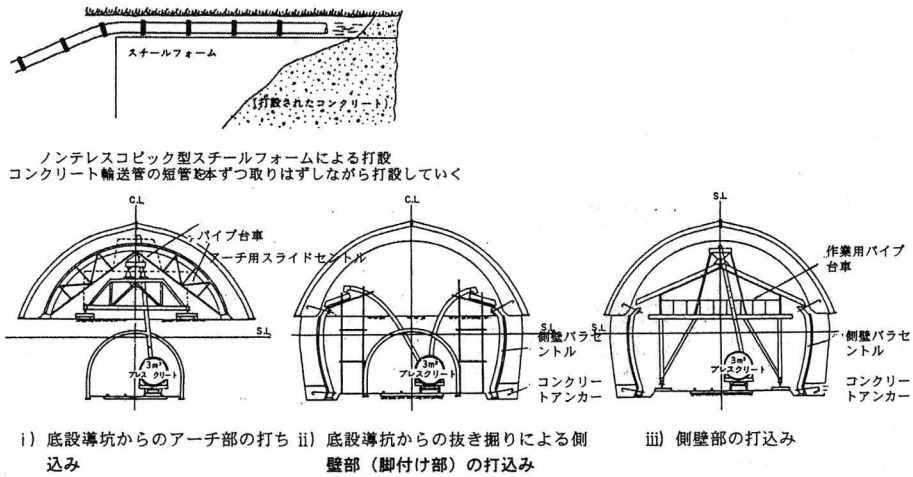


図-3 プレスクリートによる覆工コンクリートの打込み例（引抜き管方式）³⁾⁴⁾

(3) NATMにおける覆工

NATMでは支保が地山と一体となってトンネルの安定を図るため、一般には覆工に力学的機能を付加しないものとし薄肉構造の無筋コンクリートが用いられる。また吹付けコンクリートは地山と密着し覆工との間には防水シートが設置されることから、漏水も少なく覆工背面の空隙を無くすることも可能となった。

打設機械はポンプ方式に、アーチ部の打込みは吹上げ式となり、全断面型枠を使用することによりアーチと側壁の施工目地の発生、材料分離、ジャンカ、背面空洞等の不具合も改善されてきた（図-4）。

このように山岳トンネルの覆工の品質は、施工法の進歩、施工機械の性能向上などにより大きく改善された。しかしながら、覆工型枠と地山に挟まれたアーチ状の薄いコンクリート構造体をトンネル内空側から連続して施工せざるを得ないという、厳しい条件に変わりはない。このため水セメント比や単位水量などの適切な品質管理、効率的な締固めや打込み機械・方法の採用、施工中断によるコールドジョイントや型枠設置の際の過度の押し付けによるひび割れの防止など、施工管理には十分留意することが必要とされる。

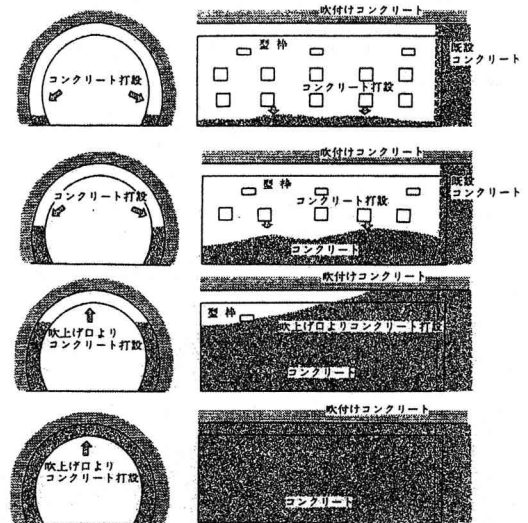


図-4 標準工法（NATM）での覆工コンクリートの打込み順の例⁵⁾

3. 山岳トンネルの要求性能と照査

3. 1 KJ 法に基づく項目の抽出と絞り込み

山岳トンネルの要求性能という漠然とした事項についてアプローチする上で、KJ 法（川喜田二郎氏による創造的問題解決法）を用いて、まず一般的な地下構造物を想定した要求性能の抽出を行った。

KJ 法とはブレイン・ストーミングなどで出されたアイデアや意見、または専門家のこれまでの経験等から得られる雑多な情報を一枚ずつ小さなカードに書き込み、それらのカードの中から近い感じのするもの同士を2、3枚ずつ集めてグループ化していき、それらを小グループから中グループ、大グループへと組み立てていくものであり、これらの作業の中からテーマの解決に役立つヒントやひらめきを生み出していこうとする手法である。今回、KJ 法の実施の過程で抽出された各項目をいくつかのグループにまとめるとともに、山岳トンネルという観点から絞り込みを実施した（図-5）。

その結果、山岳トンネルに必要な機能としては、以下に示す13項目が抽出された。

- ①必要空間の保持（建築限界の確保）
- ②安全保持（第三者への安全確保）
- ③避難路の確保（非常時の避難）
- ④地上とのアクセス
- ⑤メンテナンス性（維持管理の容易さ）
- ⑥水密保持性（地下水への影響、漏水処理）
- ⑦気密性
- ⑧環境保持（照度、景観、地下水への影響）
- ⑨快適性（走行性、照度、線形・視距）
- ⑩耐火性（消火活動が可能、高耐火性）
- ⑪設備の保持性（維持管理、点検・補修）
- ⑫軌道安定性（鉄道における走行性、維持管理）
- ⑬耐久性（周辺地山も含めた構造安定性）

さらに、山岳トンネルに関連する要求性能として分類すると以下のとおりとなる。

- a) 耐久性能（内空変位、耐荷性、周辺地山安定、排水性、耐久性）
- b) 安全性能（剥落無し、避難路、耐火性、消化可能）
- c) 利便性・快適性（走行性、閉塞感、照度、換気）
- d) 周辺環境への影響性能（景観性、振動・騒音、地下水への影響）
- e) 維持管理性能（点検が容易、補修・補強が容易）
- f) 経済性（建設費、維持管理費、湧水処理費、LCC（ライフサイクルコスト））

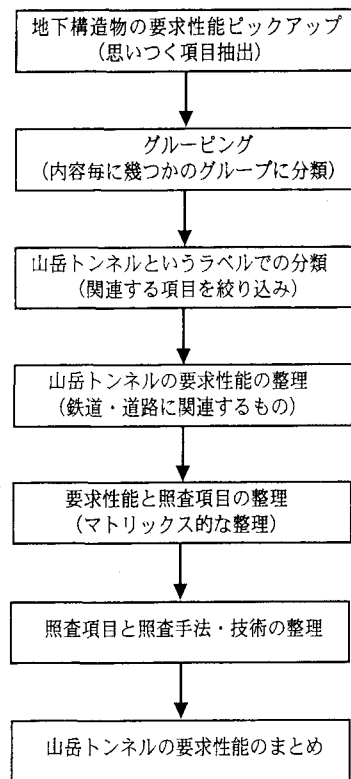


図-5 山岳トンネルの要求性能検討フロー（KJ 法）

要求性能を照査する項目をそれぞれ抽出し、要求性能との関連性についてマトリックス表に整理し表-2に示す。照査項目としては、防災設備や避難路の規模、線形・視距、照度のように、主として走行車両に関連し道路トンネルにおいて特に重要とされるものがいくつかあるものの、概ね鉄道と道路で共通する項目の多いことが分かった。さらに、経済性といった項目のように、トンネルの機能には直接関連性はないものの、要求性能としては重要と考えられる項目については検討項目として抽出した。

表－２ 山岳トンネルにおける要求性能を評価するための照査項目

要求性能	必要指標	内空形状・寸法	内空変位・沈下量	地形・地質	緩衝領域	覆工残余耐力	覆工のひび割れ	覆工強度	防火設備規模	避難路の規模	照度	騒音・振動レベル	漏水量・水圧・水質	覆工・内装の耐火性	線形・視距
耐久性能	内空変位が無い	○	◎	○	○	○	◎								
	荷重に対し覆工安定		◎	◎	◎	◎	◎	◎					◎		
	周辺地山の安定		◎	◎	◎	○	○								
	排水性が良い												○		
	耐久性がある	○		○	○	◎	○	◎					○		
安全性能	覆工が剥落しない		○	○	○	◎	◎	◎					◎		
	非常時避難路の確保								○ G線路	◎ G線路					
	耐久性がある					○	○							◎	
	消火活動が可能								◎ G線路	◎ G線路	○ G線路				
利便・快適性	走行性が良い	○	○								○ (鉄道) ◎ G線路				◎
	閉塞が無い	◎ G線路	◎ G線路								○ G線路				
	必要な照度がある	○ G線路									◎				
	換気が良好			○ G線路											◎ G線路
周辺環境への影響性能	周辺の景観と調和		◎ G線路												◎ G線路
	騒音・振動が無い											◎			
	地下水への影響無い												◎		
維持管理性能	点検が容易								○	○					
	補修・補強し易い	◎		○	○	◎	○	○					◎		
経済性	建設費が安価	◎		○					○	○ G線路				○	
	LCCが安価	○							○	○			○		

G線路や(鉄道)とあるのは、道交法上の鉄道に開示した項目である

3. 2 山岳トンネルの性能照査項目と照査方法

山岳トンネルの照査項目と照査方法に関して一覧表にまとめ、表－３（１）および表－３（２）に示す。照査手法・技術については、新設トンネルの設計・施工時に行うものと既設トンネルの維持・再生時に行うものとに分けて整理したが、新設トンネルと既設トンネルとでかなり項目が異なっていることが分かる。例えば、「覆工残余耐力」や「覆工のひび割れ」、「覆工強度」等は既設トンネルの維持・管理などで考慮される照査項目であるが、「内空形状・寸法」や「内空変位・沈下量」、「騒音・振動」等は新設、既設いずれにおいても考慮されるべき照査項目となっている。

照査手法・技術に関しては、定量的に照査する新しい技術や非破壊検査手法が揃いつつあるが、今後はさらに広範な面的測定方法の開発や、効率的でより安価な検査技術の開発が必要と考えられる。評価基準・方法に関しては、「内空形状・寸法」や「覆工強度」等については、新設時のマニュアル類や各種基準等をよりどころとした比較的定量的な評価基準となっている。これに対し「覆工残余耐力」や「漏水量・水圧」等では定性的な評価を含む項目が多くある。

表－３ 山岳トンネルの性能照査項目と照査方法一覧（１）

照査項目	照査内容	照査手法・技術	評価基準・方法	課 題	密着して調査する 要 求 性 能
内空形状・寸法		・既設 断面測定（ ϕ 化装置等） ・既設 写真測量 ・既設 ドライビングシミュレータ ・既設 実地目視点検	・必要建築限界の確保 ・軌道限界値以内 ・走行制限速度が十分	・効率的な断面測定手法の開発 ・測定誤差の低減 ・断面形状がトンネル規模で異なる ・客観的評価手法の開発 ・断面形状がトンネル規模で異なる	・補修・補強しやすい ・建設費が安価
内空変位・沈下量		・既設 断面計測システム ・既設 コンバージェンス計測 ・既設 レベル測量	・1mm/年以下 ・変位が保続可能 ・走行に支障ない	・施工時からのデータの継続 ・測定誤差の低減 ・変位の原因の推定方法 ・背面地山の状況把握	・内空変位が無い ・荷重に対し覆工安定 ・周辺地山の安定
地形・地質		・既設 断面地質調査 ・既設 ボーリング調査	・土被り ・特殊地山の有無 ・地すべりの有無 規模 範囲 ・地山の劣化度	・施工時地質データの保存 ・継承	・荷重に対し覆工安定 ・周辺地山の安定 ・周囲の景観と調和 （G線等）
緩み領域		・既設 背面空間調査	・背面空間の範囲 大きさ	・効率的な背面空間調査法 の開発	・荷重に対し覆工安定 ・周辺地山の安定
		・既設 コアボーリング調査	・亀裂や岩の硬さ等から緩み域 を推定 ・孔内試験や物理試験から緩み域 を推定	・地山条件により調査の可否 が異なる ・点検調査である	
		・既設 断面地質調査 ・既設 断面地質調査	・緩み領域の形状 ・不連続面の挙動	・緩みの直接的な原因ではない （ひずみ等からの推定） ・地山のモデル化や 物性値の設定	
		・既設 模型実験	・背面空間の有無 ・破壊メカニズム		
覆工残存能力		・既設 ひび割れ調査（開口幅 長さ、密度、進行性等） ・既設 覆工厚測定 ・既設 アルカリ骨材反応試験 ・既設 中性化試験 ・既設 現有覆工能力・ひずみ測定 ・既設 AE法	・剥落の可否、耐荷力 ・設計厚と実際の差 ・残存強度 ・許容応力とひずみ ・応力状態の把握	・調査の効率化 ・ひび割れと耐荷力との関係 ・局所破壊検査 ・点検調査	・荷重に対し覆工安定 ・耐久性がある ・覆工が劣化しない ・補修・補強しやすい ・維持管理費が安価
覆工のひび割れ		・既設 ひび割れ進展解析 ・既設 ひび割れ調査（開口幅 長さ、密度、進行性等） ・既設 レーザ、CCDカメラ	・許容変位 ・ひび割れ進展の有無 ・ひび割れの進行（幅 長さ） ・ひび割れ進展の発生 （維持管理要否） ・閉合ひび割れの有無 （よく落ちる可能性あり）	・作用地王や覆工構造の設定 ・デジタルデータ化（自動ひび 割れ検出装置） ・ひび割れ幅の検出（鉄筋 Con : 0.2mm 以上、JHでは無筋 1mm 以上、精度に 限界：0.3mm 程度） ・測定者（観測者）による誤差	・内空変位が無い ・荷重に対し覆工安定 ・覆工が劣化しない
覆工強度		・既設 シュミットハンマー （反響弾性） ・既設 コア圧縮試験 ・既設 コア超音波速度測定	・設計基準強度を満たしているか （18N/mm ² 、21N/mm ² 等） ・健全なコンクリートの超音波 速度（4000m/s 程度）	・時々必要に応じて設計基準強度 が確認 ・シュミットハンマーは表面 の状態で結果が左右される ・コア採取本数に限り ・位置による強度の相違 （天端、肩部、傾斜部、底辺等） ・ソフトコアリング （φ25mm×高50mm）	・荷重に対し覆工安定 ・耐久性がある ・覆工が劣化しない
防災対策効果		・既設 断面地質調査との整合の確認	G線等 ・非常用施設設置基準 ・道路トンネルは防火基準・同等施設 ・日本道路公団設計要領 ・その他関係法 建築基準法等 （鉄道） ・鉄道営業法 ・運輸省高速	・防火対策	・消火活動が可能 （G線等）
避難経路の確保		・既設 断面地質調査との整合の確認	G線等 ・非常用施設設置基準 ・日本道路公団設計要領		・非常時避難経路の確保 （G線等） ・消火活動が可能 （G線等）

※（既）：既設トンネルの維持・再生時に行なう照査項目、（新）：新設トンネルの設計・施工時に行なう照査項目

表－3 山岳トンネルの性能照査項目と照査方法一覧（２）

照査項目	照査内容	照査方法・技術	評価基準・方法	課 題	密着に関連する 要性能
照度		・既 照度測定	・道路照明施設設置基準・同等照度		・走行性が良い 確保 ・必要は照度がある
騒音・振動レベル		・既 騒音測定（交通車等） ・既 騒音予測 ・既 振動測定（交通車等） ・既 振動予測	・環境基準に基く騒音値に基き騒音予測に基く騒音値（ A_{eq} ）以下（他、時間帯を考慮） ・振動基準に基く振動値（ L_v ）以下（区域、時間帯を考慮）	・騒音振動が周囲に迷惑し、 ・騒音の低減 ・振動の低減 ・騒音の感度が高い	・騒音・振動が無い
漏水量・水圧・水質		・既 覆工コンクリートの施工品質 ・既 漏水箇所 漏水地帯および 不具合の態 ・既 地下水位に関するリスク対応 ・既 トレーサ試験 ・既 地下水位観測 ・既 流量測定 ・既 水圧測定 ・既 PI測定 ・既 水質検査 ・既 濁り	・構造劣化原因のリスク対応 ・健全性、偏圧、対策の低下、近接 施工地 ・通水排水設備の劣化等 ・漏水要因の調査 漏水地の改善 の必要箇所を把握 ・水圧を作用させない ・地下水の流動性の調査 ・漏水等の危険な地下水の流動の有無 ・漏水の流入経路の推定 ・コンクリート劣化の影響の有無 ・コンクリート劣化の影響の有無 ・土砂流入に伴う空溜りの有無	・設備の確保 ・覆工コンクリートの劣化等 ・漏水の発生 ・漏水要因の調査方法 ・漏水地の改善方法 ・漏水の観測地帯の必要となる	・有重で、覆工安定 ・覆工の劣化しない ・補修・補修易い ・排水性が良い ・維持管理費安価 ・漏水の発生安価 ・地下水への影響が無い
覆工・内装の耐火性		・既 不燃性試験・評価 （建築基準法） ・既 耐火性能の試験 ・既 耐火性能の試験	・国土交通省大臣が指定する「不燃 材であること、または 認定不燃 材」であること ・「コンクリート構造物の防火安全性 研究委員会報告書（JCCI）」		・耐火性がある
線形・視距		・既 線形の確認 ・既 ドライビングシミュレータ	・平面線形：直線または半径の曲 線とする。道路の設計に必要 な事項を確保するための補償がで きる必要あり。よう設計 ・縦断線形：施工の安全性、排水の 配分確保、自動車の排ガス等の 効率性の観点から設定		・走行性が良い ・換気装置 確保
坑門のデザイン		・既 断面シミュレーション ・既 アンケート調査 ・既 データ解析技術 ・既 ドライビングシミュレータ	・CG ・SD法等 ・プロフィール析 因子分析 数 量化解析等	・断面の形状の整理・確立 ・断面のデザイン性の向上 ・シミュレーション技術の向上	・周囲の環境と調和

※（既）：既設トンネルの維持・再生時に行なう照査項目、（新）：新設トンネルの設計・施工時に行なう照査項目

3. 3 トンネルの要求性能と維持再生における課題

（１）トンネルの劣化予測と評価

照査した結果をいかに評価するかが大きな課題である。例えば既設トンネルの場合、ひび割れや覆工強度などを定量的に計測したとしても、要求性能である耐久性などどのように関連するのか、その評価方法やプロセスを明確にする必要がある。

鉄筋コンクリート構造物では耐久性に関する劣化過程を、『潜伏期→進展期→加速期→劣化期』ととらえ、劣化要因との関係から劣化予測や評価の方法を定めている。しかしながらトンネル覆工は通常無筋であることから、鉄筋の腐食による耐久性評価ができないなど劣化の予測と評価が極めて困難である。今後は覆工コンクリートの他、吹付けコンクリートやロックボルト等の支保部材に対しても、劣化機構の解明や劣化過程における評価基準の確立、さらには劣化予測のモデル化の研究を進め、さらに耐久性に関する各種の指標と総合的な評価方法やプロセスを明らかにする必要がある。

(2) データの蓄積

トンネルに発生する変状や劣化には多岐の内容があり、その原因としては材料、環境、外力、設計・施工など複数の要因が重複している場合が多い。したがって、調査から設計、施工、維持管理に至るまでのデータをカルテとして一元的に作成・管理し、データの活用を図っていく必要がある。さらに広く変状や劣化状況、改修内容等を開示し、情報の共有化を図る必要がある。

(3) 計画的維持管理手法の確立

現在トンネルの補修・補強の対策は、変状が生じてから対策を立てているのが一般的である。しかしながら下水道分野では、管渠全体のライフサイクルコスト分析から経済的耐用年数を試算し、その結果を基に管渠の計画的な再構築を行っている例もある。今後は事業者を主体とし、ライフサイクルコスト分析等を通じ、事後保全から計画保全へと移行する手法の確立が望まれる。

4. まとめ

山岳トンネルの過去の変状実態を踏まえ、山岳トンネルに必要とされる機能と要求性能を抽出し、それら进行评估するための照査項目・内容について検討した。その結果以下の点が明らかとなった。

- 1) トンネル覆工は基本的に無筋コンクリートであるため、材料自体の劣化予測が困難であるといった側面がある。また一般の明り構造物とは異なり、トンネルの安定は覆工と周辺地山の相互作用のもとで論ずるものであるから地山自体の劣化(緩み領域の増加等)に深く関連していることに配慮する必要がある。
- 2) 計画的に山岳トンネルの維持・再生を行うという観点から、どの要求性能に重点をおきどの照査項目に着目するかということについては課題の部分も多く、また防災や美観、景観といった直接トンネル構造とは無関係な項目についても、用途によってはトンネルの要求性能として重要となってくる。
- 3) これまで建設された山岳トンネルの維持管理に関わる問題事例や変状データを検証すると、地質的な影響(膨張性地山、新第三紀泥岩、未固結地山、湧水地山等)や構造上の影響(インパクト無し、排水対策不足)、環境(塩害、有害水、寒冷地等)などの変状要因との因果関係が明らかとなっている。これらの条件に該当する場合には、計画・設計段階から予防保全的な考えで対応することが必要である。

今後山岳トンネルにおいて、適切な対策を施すことで延命化を図る(再生させる)ことが維持管理上、ますます重要となってくるとともに、大深度地下利用の促進が図られるといった観点からも、今後建設される山岳トンネルにおいては、これまで我々が経験した山岳トンネルの変状や補修・補強対策などの実績を踏まえた上で、トンネルの用途に応じた要求性能に着目し、新設トンネルの計画・設計に際しできるだけ長寿命化を図ることが重要と考える。

最後に、本論文が今後トンネルの計画的な維持管理や長寿命化を進める上で参考となれば幸いである。また本研究は土木学会地下空間研究委員会維持・再生小委員会の活動成果をまとめたものであり、岡野法之氏(元(財)鉄道総合技術研究所)、城間博通氏(日本道路公団)、竹林亜夫氏(応用地質㈱)、田中康弘氏(㈱ダイヤコンサルタント)、梨本裕氏(前田建設工業㈱)、森康雄氏(㈱熊谷組)の各氏にここで謝意を表する。

参考文献

- 1) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 改訂資料(コンクリートライブラリー108)、土木学会コンクリート委員会、2002.3
- 2) (社)土木学会：トンネル標準示方書(山岳編)・同解説[昭和52年版]、1977.3
- 3) 大塚本夫：トンネル工学、朝倉書店、1981.5.
- 4) 高山 昭：山岳トンネルの基礎知識、土木工学社、1975.1.
- 5) (社)土木学会：コンクリートライブラリー102 トンネルコンクリート施工指針(案)、土木学会コンクリート委員会「トンネルコンクリート施工指針作成小委員会」、2002.7.