

寒冷地トンネルにおける二次覆工コンクリートの 長寿命化に関する一考察

(株)地崎工業 土木技術部 ○須藤 敦史*¹北海道大学大学院工学研究科 三上 隆*²(株)ドーコン 交通部 岡田 正之*³(株)地崎工業 北海道本店 河村 巧*⁴(株)エーティック 計測部 角谷 俊次*⁵

北海道内では昭和30年代後半から山岳トンネルの整備は急速に進んだが、今後これらのトンネルが更新期を迎え支保部材の老朽化などに伴う既設トンネルの補修・改修が増加するものと考えられる。一方、昭和60年以降NATMの普及により、トンネル坑内における漏水や地山凍結防止対策などの耐久性は大幅に改善されてきているが、今後の社会状況を考えると支保部材の長期的な劣化対策などトンネル全体の耐久性向上に関する検討が急務となる。そこで北海道土木技術会トンネル研究委員会ではトンネルマネジメントシステム (TMS) 分科会を組織し、既設・新設トンネルに対する長寿命化に関する技術的な検討を行っている。本報告は本分科会で実施しているライフサイクルコストおよび二次覆工コンクリートの現状把握と劣化予測のための基礎検討の一部を紹介する。

Key Words: 山岳トンネル, 寒冷地, マネージメント, 長寿命化, ライフサイクルコスト, 確率過程

1. はじめに

北海道内では昭和 30 年代後半から急速に山岳トンネルの整備が進んでいるが、建設から 30 年以上を経過したトンネルでは老朽化が進行してきており、今後改築や何らかのメンテナンス時期を向かえるトンネルが増加の一途を辿ると予測される。

しかし、現在の経済状態などを考慮すると、トンネルの改築は限られたものになり、既設トンネルの補修や改修など供用中のメンテナンスが増加するものと考えられるが、供用下におけるトンネルの改修や改築は様々な制約条件より難しいことから、合理的な補修・改修、メンテナンス技術が要求される。

一方、昭和 60 年以降 NATM の普及により、トンネル

坑内の漏水や地山凍結防止対策などの耐久性は大幅に改善されてきたが、社会的・経済的な背景より今後は支保部材の長期的な劣化対策やトンネル全体の使用性・耐久性に関する技術的な検討が急務となっている。

そこで北海道土木技術会ではトンネル研究委員会の中に TMS (Tunnel Management System) 分科会を組織して、以下に示すテーマの中で表-1 に示すような既設・新設トンネルにおける長寿命化に関する技術的な検討を行っている。

- ・ 新設トンネルのロングライフ化 (使用・耐久性の向上)
- ・ 既設トンネルの計画的な維持管理と延命対策

* 1 〒105-8488 東京都港区西新橋 2-23-1 TEL03-3592-6955 FAX03-3502-2646

* 2 〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目 TEL011-716-2111 FAX011-706-7893

* 3 〒004-8585 札幌市厚別区厚別中央 1 条 5 丁目 4 番 1 号 TEL011-801-1520 FAX011-801-1521

* 4 〒064-8588 札幌市中央区南 4 条西 8 丁目 6 番地 TEL011-511-8114 FAX011-511-2660

* 5 〒063-0801 札幌市西区二十四軒 1 条 5 丁目 6 番 1 号 TEL011-644-2802 FAX011-644-2890

表1 調査・検討項目

	既設トンネル	新規トンネル
周辺地山	長期トンネルB計測及び変状調査	
支保部材	覆工コアリング	高強度・繊維補強
維持・管理	更新・初期費用・維持補修費 (LCC) 補修・補強工法,評価手法	
その他	補修・改修計画の合理的意思決定	

そこで,本報告では本分科会において実施しているライフサイクルコスト (Life Cycle Cost) に関する考察およびトンネル二次覆工コンクリートの現状把握と劣化予測のための基礎観測の一部を紹介する。

2. トンネルの長寿命化

経済的な安定成長が望めず,さらには環境負荷低減の必要性が望まれている現在の社会状況下において公共 (土木) 構造物に係わる費用は,供用期間の総費用を計画設計段階・建設段階・供用管理段階・廃棄処分段階などに区分したライフサイクルコスト (Life Cycle Cost:以下 LCC) の最小化で考えられている。

しかし LCC は構造物のライフサイクルにわたって総合的にその効用の創出と維持管理による使用性の向上を図りつつもその総費用を最小化し,加えて発生する二酸化炭素量の削減を図るように構造物の企画・建設し,運営・管理を行っていくライフサイクルマネージメント (Life Cycle Management:LCM) の重要な構成要素の一つとして考えなければならないことは言うまでもない。

(1) ライフサイクルマネージメント¹⁾

LCM の概念は図-1 に示すように構造物の全ライフサイクルにおける効用の創出し,かつ維持管理による使用性の向上と共に総費用の削減が目的となる。

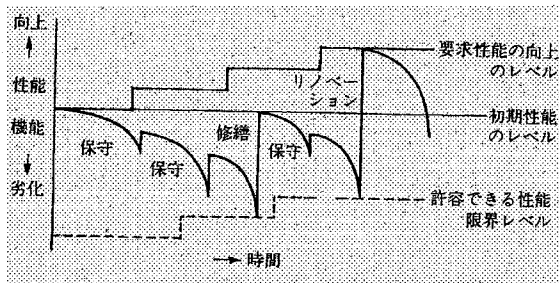


図-1 構造物における LCM の概念図

ここで構造物は種々の原因により当初の性能・機能は時間を経るにつれて低減して損耗を生じる。また社会背景の変化によりその機能・性能の陳腐化が生じてくる。

このような状況において補修・リノベーション (性能を社会的な要求に高める) を行うことで性能・機能を維持し,かつ総費用をできる限り軽減していくことが LCM の目標である。

(2) ライフサイクルコスト

構造物における LCC は以下のように定式化される。

$$LCC(C_{tot}) = C_b + C_m + \sum P_f C_f \Rightarrow MIN \quad (1)$$

$LCC(C_{tot})$: ライフサイクルコスト (全期待損失),

C_b : 初期建設費用, C_m : 維持管理・取壊費用,

C_f : 破壊時損失, P_f : ライフタイムの破壊確率

ここで式(1) (トンネルの長寿命化) において,最初に多額の建設費用をつぎ込んで耐久性の高いトンネルを造ることも考えられるが,LCC では維持管理を当初から考慮しておき,維持管理をしっかり行うことによりトンネルの寿命を延ばすことが合理的 (全期待損失費用の最小化) と考えられている。

しかし,現実的にはトンネルの各部材,特に二次覆工コンクリートの状況および経年劣化の評価は非常に困難であり,実設計に反映させることは容易ではない。

3. 二次覆工コンクリートの経年劣化

(1) コンクリートの劣化機構と劣化過程

二次覆工コンクリートの長寿命化を考えると,現在のコンクリート部材の損傷・劣化状態を正確に把握し,さらに今後の劣化過程を予測することが適切な補修・補強時期を判断する上で重要となる。

たとえば,コンクリート標準示方書²⁾では,コンクリートの劣化機構を表-2 に示すように定義しており,かつ各機構毎に劣化のグレードを表-3 の例のように潜伏期・進展期・加速期・劣化期と区別している。

しかし,既設トンネルの二次覆工コンクリートが現在どの程度の劣化状態にあるのか,また今後どの程度の速度で劣化が進展していくのかを客観的・合理的に評価・推定してゆくことは非常に難しい。

表2 コンクリートに劣化機構と要因

劣化機構	劣化要因	劣化指標
中性化	二酸化炭素	中性化深さ, 鋼材腐食量
塩害	塩化物イオン	塩化物イオン, 鋼材腐食量
凍害	凍結融解作用	凍害深さ, 鋼材腐食量
科学的侵食	酸性物質, 硫酸イオン	劣化因子の浸透深さ, 中性化深さ, 鋼材腐食量
アルカリ骨材反応	反応性骨材	膨張量 (ひび割れ)
疲労	繰返し荷重 (応力)	累積損傷度

表3 各劣化過程の定義 (中性化の例)

劣化過程	定義	期間を決める要因
潜伏期 (I)	鋼材腐食限界に到達するまでの期間	中性化進行速度
進展期 (II)	腐食ひび割れ発生までの期間	鋼材の腐食速度
加速期 (III)	鋼材の腐食速度が増加する期間	ひび割れを有する場合の鋼材の腐食速度
劣化期 (IV)	耐力力の低下が顕著な期間	

②時間に依存した劣化過程の予測手法

このような時間に依存した現象・事象を説明する考え方は少なく, その理論的背景もまだ確立されていない。したがって現状では点検資料などの観測データを確率・統計的に処理して覆工コンクリートの劣化

状態やその進行過程を推定せざるを得ない。

そこで, このような考え方としてマルコフ (確率) 過程³⁾が挙げられ, 最近ではコンクリート構造物 (梁・床版) を小領域に分割した劣化進行過程をこの確率 (マルコフ連鎖) モデルで表した解析・検討が行われている⁴⁾。

② マルコフ (確率) 過程の概要

マルコフ (確率) 過程によればコンクリートの劣化進行度は遷移確率行列を用いた確率事象で表すことができ, 小領域に分割されたコンクリートの劣化度に関する現地調査や点検結果などから, この推移確率行列を同定することでコンクリートにおける劣化進行過程の定量的予測が可能となる。

そこで表3に示した二次覆工コンクリートにおける中性化の劣化度分類をこのマルコフ連鎖モデルに表すと式(2)となる。

$$\begin{matrix} \text{I} \\ \text{II} \\ \text{III} \\ \text{IV} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1-x & 0 & 0 & 0 \\ x & 1-x & 0 & 0 \\ 0 & x & 1-x & 0 \\ 0 & 0 & x & 1-x \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで, I~IVは表3に示されるコンクリートの劣化度 (例として中性化) に分類されるものであり劣化度の分布, t は経過年数を表している。

また x は遷移確率を表しており, ある劣化度のコンクリート部材が単位経過年数で劣化度が移行 (進行) する確率を表しており, 劣化度が進行しない確率は $(1-x)$ で表される。

4. 二次覆工コンクリートの長期観測について

北海道のトンネルは冬期の間厳しい気象環境に曝されるため, 二次覆工コンクリート (特に坑口) は低温状態による凍害・疲労などが懸念される。

そこで TMS 分科会では二次覆工コンクリートの中性化・凍害・疲労などの劣化評価および進展を定量的に把握 (マルコフ過程における推移確率行列の要素を観測値より同定) する目的で二次覆工コンクリートなど支保部材の長期計測を実施しており, 以下に観測結果の一部を紹介する。

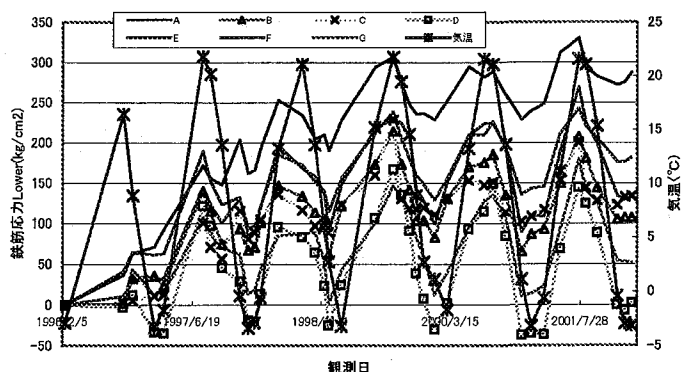


図-2 二次覆工鉄筋の気温に対する応力変動

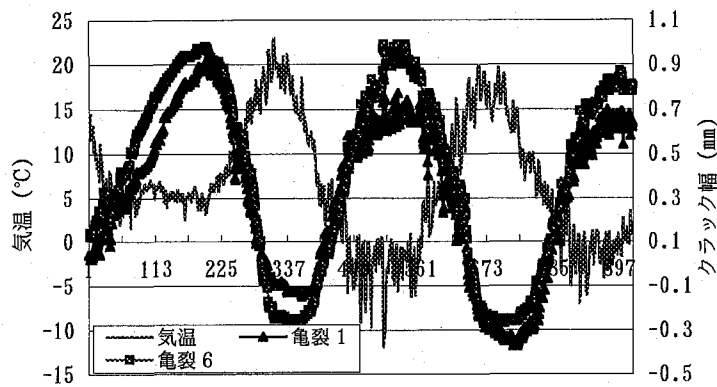


図-4 二次覆工コンクリートのひび割れ幅の変動

(1) トンネル坑口の覆工鉄筋に作用する温度応力

図-2 には、トンネル坑口部の二次覆工コンクリート鉄筋各部におけるトンネル坑口の気温変動に起因する覆工鉄筋の作用する繰返し応力の観測値を示す。

図-2 より、外気温の変動により覆工鉄筋の応力が変動しているのが分かる。

(3) 外気温の変動に起因するひび割れ幅

次に図-3 には、トンネル坑口部の二次覆工コンクリート表面に発生したひび割れのトンネル坑口の気温変動に起因する変化の観測値を示す。

図-3 より、外気温の変動により二次覆工コンクリート表面のひび割れ幅が変動しているのが分かる。

今後は気温変動と経年凍害・疲労および二次覆工コンクリート表面のクラック進展過程との関係を明

らかにする予定である。

4. ま と め

現在トンネルの長寿命化という観点から、初期設計に維持管理の効果・役割を積極的に取り入れる LCC は不可欠である。しかし、維持管理は時間が経たないと本当の意味がわからないため、長寿命化には点検・検査・維持管理技術とその効果の評価が重要となり、今後も調査を続ける予定であり、加えてトンネルの維持管理では同じ状況・状態が全く存

在しないため、合理性・経済性に裏付けられた説明能力も必要となるため、合理的な意思決定手法の調査・研究も継続していく予定である。

【参考文献】

- 1) 石塚義高: 建築のライフサイクルマネジメント, 井上書院, 1996 など
- 2) 土木学会: 2001 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編], 2001
- 3) 森村英典, 高橋幸雄: マルコフ解析, 日科技連, 1995.
- 4) 小牟禮健一, 濱田秀則, 横田 弘, 山路 徹: R C 栈橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, 港湾空港技術研究所報告, 第 41 巻, 第 4 号, 2002.12.

A BASIC CONSIDERATION ON LONG LIFE FOR ROAD TUNNEL LINING IN HOKKAIDO

Atsushi SUTOH, Takashi MIKAMI, Masayuki OKADA, Takumi KAWAMURA
and Syunji KADOYA

In this study consists of the following two topics, one is a basic consideration life cycle cost for road tunnels in Hokkaido, which have calculated and estimated from a stochastic theory. And the other is introduced the result which are observed at the reinforcing rod stress and crack width of concrete lining. In the former study, the expected utility theory which was a stochastic theory, have estimated and/or calculated life cycle cost of total construction cost at load tunnels. In the latter one, the reinforcing rod stress and crack width of concrete lining have cyclic ups and down by the change of temperature.