

(61) トンネル照明設備の効率的な 補修対応策における提案

前田 典昭¹・河村 圭²

¹正会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: g005wc@yamaguchi-u.ac.jp

²正会員 山口大学大学院准教授 創成科学研究科 (〒55-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: kay@yamaguchi-u.ac.jp.

社会基盤施設の維持管理は、点検等で把握した状態から事後の劣化状態を予測し、予防保全としての補修を実施する PDCA (Plan-Do-Check-Action) サイクルから成るアセットマネジメントシステムが有効である。その中で予防保全の補修は、施設の延命化に重要な役割を有している。本研究では、道路トンネル内に設置された照明設備の灯具を対象に点検結果では経過観察となる状態に対して、予防保全として簡易補修の有効性を検討したものである。本論文では、はじめに全灯具数に対する補修数を補修率として、著者らが提案した簡易動的マクロモデルを用いた補修率毎の健全度と補修費用の予測算出の方法を解説する。更にその健全性と経済性から最適な補修率の提案と予想される有用性、並びに実用化に向けた課題等について解説する。

Key Words: repair ratio, health degree, repair cost, simplified dynamic macro model, cost effectiveness, optimum repair, tunnel lighting facilities

1. はじめに

高度経済成長期から整備した社会基盤施設は、老朽化が顕著になっており、安全基軸の管理運営から、大規模な補修や更新の財政負担の最小化が必要とされている。この条件下で、最適な維持管理の手段としては、アセットマネジメントシステムが有効である。アセットマネジメントシステムとは、現状態を点検等で把握し、その状態から将来の劣化等の状態を予測して、予防保全的に補修や更新を実施する維持管理手法である¹⁾。その実施過程は、PDCA (Plan-Do-Check-Action) ステップの維持管理サイクルで成立している。このサイクルにおける予防保全の中核過程は、A ステップ (Action) であり、具体的には補修や更新の実施に該当する。特に、補修や部分的な更新は、将来の状態に深く関与し、機能不可となるまでの期間の延長化 (延命化) に有効である¹⁾。

本研究は、道路トンネル内に設置された照明設備 (以下、「トンネル照明設備」と呼ぶ) の灯具を対象とし、点検後の補修対象数を変化させることにより、予測される補修費用と健全度状態から最適な補修対応を提案するものである。

一般にトンネル照明設備の点検は、数年サイクルでトンネル1チューブを実施するため、データ量も僅少となる。このため、著者らは、時間変化する状態確率を個々の灯具ではなく、トンネル単位を系としたマクロ的統計集団とし、マルコフ確率過程上の時間状態変動として、マスター方程式の解法からトンネル単位の健全度予測を可能とする簡易動的マクロモデルを提案した²⁾。そして、このモデルを用いて鋼板製のトンネル照明設備の灯具を対象にトンネル単位の健全度予測を行った。その際、点検結果での判定内容で補修等の必要がない経過観察の状態から補修等が必要となる状態への遷移確率が非常に高いことが明確になった。この遷移確率が機能可能期間の短縮 (短命化) に繋がっていると考慮される。そのため、経過観察の状態において簡易補修し、この遷移確率を低下させて延命化を図ることを目的としたものである。

しかし、補修には、健全度と費用とのバランスの最適化が重要課題となる。このため、補修対象数の変化を補修率とし、補修率に対応した遷移確率から将来の健全度と補修費用を算出した。この健全度と補修費用の比であるコスト有効度の指標を用いて、健全性と経済性のバランスを検討し、最適な補修率を算出したものである。



写真-1 トンネル照明設備

表-1 点検判定区分表

判定区分	判定内容
D	腐食等による機能低下が著しいため、緊急の補修等が必要な状態
C	腐食等による機能低下があるため、補修等が必要な状態
B	腐食等はあるが、機能低下はないため、補修等は必要ない状態
A	腐食等がない状態

2. 対象施設概要

(1) 機能と構造

トンネル照明設備は、運転者のトンネル内外での視環境格差から生じる明暗順応を解消する機能と安全走行を可能とする視覚上の輝度を確保する機能を有している。

構造的には、照明灯具、ランプ、安定器、および取付金具で成り、写真-1 のとおり壁面に取付られている。

本研究では、灯具の材質が鋼板製のものを対象とする。

(2) 点検の方法

点検は、目視等による外観から機能状態を確認する日常点検、測定器等で定量計測して機能状態を確認する詳細点検、更に、近接目視や触手から構造的な損傷や劣化等の状態確認する定期点検がある。本研究では、構造的な劣化等の状態予測をするため、定期点検を対象とする。なお、実施方法は、点検対象のトンネルを3区分に分割し、全区分を3年周期（1サイクル）で実施する。

(3) 点検の判定

点検判定は、腐食、亀裂、ひび割れ等を落下危険性の観点から状態の把握や進行度、更に補修の必要性を点検基準を参考に判定をする。本研究での判定区分は、表-1 のとおり4段階（A・B・C・D）とする。更に、灯具の本体部、開口部、取付部の各部位でも同様の4段階で判定し、各部位判定で最低段階のものを設備全体の点検結果とする。

(4) 補修等の方法

点検結果が、C・D段階のものは、補修等が必要となる。一般に補修等の実施内容は、各部位の判定に基づき、方法（全更新・部分更新・補修）、範囲（全域・部分域）、タイミング（緊急対応・日常点検対応・詳細点検

対応）の要素で構成され、点検結果からの状態と費用を考慮して実施する。本研究では、予防保全の有効化より、状態Bでの補修を実施するものとする。補修の内容は、方法を簡易補修（腐食除去・腐食抑制剤塗布）、範囲を部分域（本体部の一部）、タイミングを点検時対応（補修費用以外の費用を伴わない）とする。

3. 研究概要

(1) 既往研究との比較

社会基盤施設の補修における研究では、橋梁において古田らや宮本らによる劣化状態の予測から経済性を考慮した最適補修をGA（Genetic Algorithm）を用いて示している³⁴⁾。また、舗装においては、小林らや宮崎らによる混合マルコフ過程モデルを用いて、LCC（Life Cycle Cost）最適化から補修策や期待寿命を示している³⁶⁾。その他、下水道やトンネル照明の設備においてもマルコフモデルやワイブルハザードモデルを用いて、劣化予測をしてリスクとLCCから最適補修を示している⁷⁸⁾。しかし、点検結果で補修の必要がない状態での予防保全を中心に検討したものは、ほとんどないものとなっている。

(2) 補修率を加味した健全度予測

(a) 健全度予測手法

本研究では、著者らが提案した健全度予測手法である簡易動的マクロモデルの遷移確率に補修の対象数を変化させ、補修対象数の変化に対応した健全度予測をする³⁾。簡易動的マクロモデルは、トンネル単位を系としたマクロ的統計集団として取り扱って健全度予測をするものである。まず、点検結果の4段階（A・B・C・D）を各状態とし、この状態の基準健全度（ $A=100\% \cdot B=50\% \cdot C=30\% \cdot D=10\%$ ）を設定をする。次に、状態*i*から*j*への遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$ を算出する。そして、状態*i*, *j*の状態確率 P_i , P_j と遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$ より、マルコフ過程上での各状態の経時変化をマクロ的な確率束とし、流入と流出の差分からなるマスター方程式の解である状態確率を用いて健全度を算出するものである。このマスター方程式は、式(1)で示され、この遷移確率に補修数変化を対応させて健全度予測をするものである。

$$\frac{dP_m}{dt} = \sum_{k,m} (P_k \cdot P_{k \rightarrow m}) - \sum_{m,k} (P_m \cdot P_{m \rightarrow k}) \quad (k \neq m) \quad (1)$$

(b) 補修率と遷移確率の算出

簡易動的マクロモデルでの状態*i*から状態*j*への遷移確率 $P_{i \rightarrow j}$ は、状態*i*における初期数量 B_i と最終数量 A_j から式(2)および式(3)のとおり算出する。

$$P_{i \rightarrow j} = \left| \frac{A_i - B_i}{B_i} \right| \quad (2)$$

$$P_{i \rightarrow i} = 1 - P_{i \rightarrow j} \quad (3)$$

ここで、補修の対象数を変化させるため、補修対象の全数に対する実際に補修する比率を補修率 r と定義する。なお、実際に補修する灯具は、ランダムとし、点検結果以外の優先性はないものとする。この補修率 r を加味して、状態 i から状態 j への遷移確率 $P_{i \rightarrow j}(r)$ は、式(4)および式(5)とおりととなる。

$$P_{i \rightarrow j}(r) = \left| \frac{A_i - B_i}{B_i} \right| (1 - r) = (1 - r)P_{i \rightarrow j} \quad (4)$$

$$P_{i \rightarrow i}(r) = 1 - P_{i \rightarrow j}(r) = P_{i \rightarrow i} + rP_{i \rightarrow j} \quad (5)$$

この補修率 r を 0%~90% で 10% 毎にし、著者らが算出した遷移確率 (補修率 r : 0%, 50%, 90%) を用いて算出すると、表-2 のとおりとなる²⁾。また、この遷移確率から簡易動的マクロモデルにより、トンネル単位を系とした 15 サイクル (45 年経過) での健全度予測 (補修率 r : 0%, 50%, 90%) の結果を図-1 に示す。

(3) 補修費用とコスト有効度

(a) 補修費用の算出

状態 C と状態 D の補修は、方法を補修及び部品取替 (腐食除去・腐食抑制剤塗布・ボルト等部品取替)、範囲を部分域 (本体全域)、タイミングを状態 D で緊急対応、状態 C で点検時対応 (補修費用以外の費用を伴わない) とする。これより、各状態の補修費用 (万円) は、($B=3, C=5, D=5$) と設定した。

表-2 遷移確率一覧表

補修率 r	$B \rightarrow C$	$B \rightarrow B$
0%	95.34%	4.66%
50%	47.67%	52.33%
90%	9.53%	90.47%

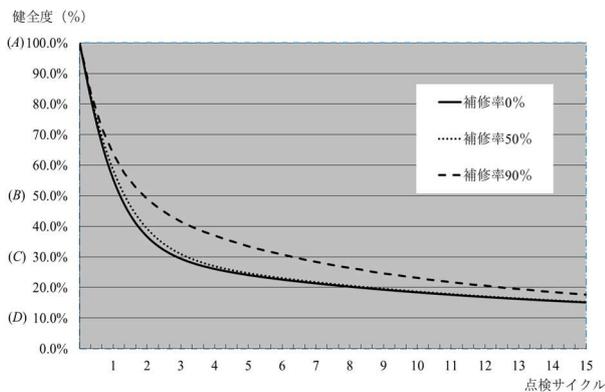


図-1 補修率別予測健全度曲線図

(b) コスト有効度の算出

補修による健全度と費用とのバランスをみる指標として、健全度と費用の比を用いたコスト有効度を導入する。補修率 r による t サイクルでの健全度を $H(t, r)$ 、 t サイクルまでに要した総費用を $C(t, r)$ としたときコスト有効度 $CE(t, r)$ は、次式で示される。

$$CE(t, r) = \frac{H(t, r)}{C(t, r)} \quad (6)$$

式(6)より、15 サイクルのコスト有効度 (補修率 r : 0%, 50%, 90%) の結果を表-3 に示す。

(4) 最適補修率の算出

コスト有効度を用いて、最適な補修率を算出する。一般にこのような複数の数値を 1 つの数値に集約し、代替する方法として、一般化平均概念がある⁹⁾。いま、 n 個の数値を x_1, x_2, \dots, x_n とし、平均値を x_α としたとき、一般化平均概念は、次式のとおり定義される。なお、 α は平均演算を区分するパラメータである。

$$x_\alpha = \left(\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n x_l^\alpha \right)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (7)$$

一般にコスト有効度のような比数は、対数変換が容易な幾何平均 ($\alpha=0$) が有益である¹⁰⁾。幾何平均は、式(7)を $\alpha=0$ の場合で、次式となる。

$$x_0 = \left(\prod_{l=1}^n x_l \right)^{\frac{1}{n}} \quad (8)$$

式(8)による 1 から t サイクルまでの幾何平均を表-3 のコスト有効度 (補修率 r : 0%, 50%, 90%) について 15 サイクルでの結果を表-4 に示す。これより、補修率 90% のときに健全性と経済性のバランスが最もよいことが示されている。

表-3 コスト有効度一覧表

サイクル	補修率0%	補修率50%	補修率90%
1	1.16116	0.98668	1.28358
2	0.22881	0.22763	0.35200
3	0.09865	0.10020	0.16747
4	0.05866	0.05943	0.10011
5	0.04057	0.04100	0.06736
6	0.03040	0.03069	0.04869
7	0.02390	0.02413	0.03692
8	0.01942	0.01961	0.02899
9	0.01616	0.01632	0.02339
10	0.01369	0.01383	0.01928
11	0.01179	0.01190	0.01618
12	0.01027	0.01037	0.01378
13	0.00905	0.00913	0.01189
14	0.00805	0.00811	0.01037
15	0.00721	0.00727	0.00914

表-4 幾何平均一覧表

サイクル	補修率0%	補修率50%	補修率90%
1	1.16116	0.98668	1.28358
2	0.51544	0.47391	0.67217
3	0.29705	0.28233	0.42296
4	0.19802	0.19124	0.29501
5	0.14421	0.14054	0.21956
6	0.11125	0.10906	0.17082
7	0.08931	0.08792	0.13724
8	0.07380	0.07289	0.11300
9	0.06234	0.06172	0.09486
10	0.05357	0.05315	0.08089
11	0.04668	0.04639	0.06988
12	0.04115	0.04094	0.06104
13	0.03662	0.03648	0.05382
14	0.03287	0.03276	0.04785
15	0.02971	0.02964	0.04285

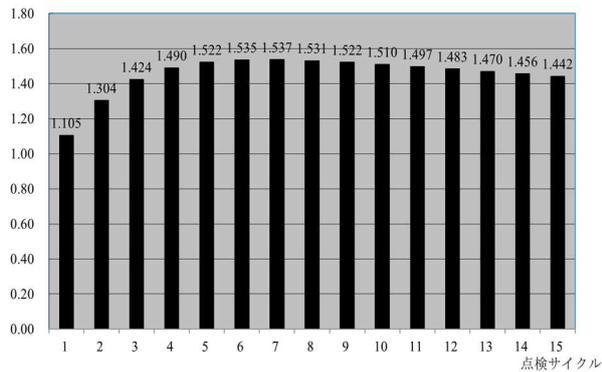


図-2 幾何平均対比グラフ

次に、表-4における補修率0%（補修をしない場合）と補修率90%との比を各サイクルで見ると、図-2のとおりとなる。これから、補修率90%でのコスト有効度は、7サイクル（21年経過）のときに最大となっている。

(5) 結論

コスト有効度による幾何平均を用いた算出結果から、15サイクル（45年経過）において、補修率90%の場合が健全性および経済性のバランスがとれた最適補修率である。また、1から15サイクルまでのサイクルの視点では、6から8サイクル（18年から24年経過）で補修率0%対比1.53以上となり、7サイクル（21年経過）において最大値の1.537となる。この6から8サイクルにおける補修率90%の健全度は、30%から25%程度であり、状態Cの初期に該当している。また、補修率0%の健全度は、25%から20%程度であり、状態Cの中期に該当している。これより、健全度30%から25%程度である状態Cの初期時に健全性および経済性の双方の観点から有効性が最大となる。更に、この最適補修率90%と補修率0%とを延命化の観点で比較すると、健全度30%時点で10年程度、健全度20%時点で13年程度の延命予測となる。

5. おわりに

本研究では、鋼板製のトンネル照明設備で遷移確率の高い状態Bにおける継続的な簡易補修による有効性として、健全性と経済性の観点から最適補修率と最大効果を発揮する点検サイクルでの経年時を提案した。次に、最適補修率における延命予測を算出することで、状態Bにおける継続的な簡易補修による有効性を明確化した。

本研究の提案手法は、アセットマネジメントの実務者が、補修を加味した健全度や延命の予測から費用制約を踏まえた最適な補修方法について、簡易的に検討することが可能であることを示している。

しかし、補修率に応じた補修対象をランダムに決定することは、実務者負担となることが予想される。このため、実務者負担の軽減と簡易補修の有効性を最大化するためにも補修優先性の基準として、状態Bを状態 $B_1 \cdot B_2$ 等に区分化する検討も必要である。これによって、マクロ的統計集団とみなせるような社会基盤施設における系単位での補修方法の検討に適用可能であり、アセットマネジメントの実用性への展開が期待できるものである。

参考文献

- 1) 土木学会編：アセットマネジメント導入への挑戦，技報堂出版，2005.
- 2) 前田典昭，河村圭：簡易動的マクロモデルによるトンネル照明設備の健全度予測，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.71, No.1, pp.19-32, 2015.
- 3) 古田均，金森敦司，堂垣正博：ライフサイクルコストを考慮した橋梁群のRC床版の最適維持管理計画支援システムに関する研究，「材料」（J.Soc.Mat.Sci.,Japan），Vol.47, No.12, pp.1245-1250, 1998.
- 4) 宮本文穂，河村圭，中村秀明：Bridge Management System (BMS) を利用した既存橋梁の最適維持管理計画の策定，土木学会論文集，No.588/VI-38, pp.191-208, 1998.
- 5) 小林潔司，江口利幸，大井明，青木一也，貝戸清之，松村泰典：舗装構造の最適補修更新モデル，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.68, No.2, pp.54-68, 2012.
- 6) 宮崎文平，加藤寛之，小濱健吾，貝戸清之，風戸崇之，田中克則：膨大な路面性状調査データに基づく舗装補修施策の評価法の提案，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.71, No.3, pp.142-161, 2015.
- 7) 堀倫裕，小濱健吾，貝戸清之，小林潔司：下水処理施設の最適点検・補修モデル，土木計画学研究・論文集，Vol.25, No.1, pp.213-224, 2008.
- 8) 青木一也，山本浩司，小林潔司：時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修モデル，土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.
- 9) 森地茂，目黒浩一郎，小川圭一：一般化平均概念を用いた交通情報提供の影響分析手法に関する研究，土木学会論文集，No.555/IV-34, pp.15-26, 1997.
- 10) 岩淵千明，浦光博，石井滋，西田公昭，神山貴弥：あなたもできるデータの処理と解析，福村出版，1997.