

第 VI 部門

更新情報の欠損を考慮した統計的劣化予測モデル

大阪大学大学院工学研究科 学生員 ○田中 誠勝
 東北大学災害科学国際研究所 正会員 水谷 大二郎
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 貝戸 清之

1. はじめに

近年では、道路付属構造物の倒壊事故の発生が報告されている。このような事例は、利用者の安全性を大きく損なう可能性がある。そのため、現在の事後的な維持管理手法を見直し、道路付属構造物に対しても予防保全型の維持管理手法の提案やその実用化が必要であると考えられる。橋梁や高速道路等の大規模な社会基盤施設に対する維持管理手法の提案やその実用化は多くなされている一方で、維持管理手法が確立されてこなかった道路付属構造物に関しては、実際に記録として蓄積されてきた点検結果や更新履歴は乏しいのが現状となっており、道路付属構造物と同様の維持管理手法を適用することが難しい。

本研究では、この問題に対し、道路付属構造物の一つである照明柱を対象として、記録として蓄積されていない過去の更新の有無の不確実性を考慮するために、更新回数と更新時点を潜在変数として明示的に考慮した劣化予測モデルを提案する。その際、従来、照明柱に対して事後的な更新施策が採用されていたという部分的な情報を用いて、潜在変数の確率密度を定義することにより、モデル推定精度の向上を図る。さらに、提案した方法論を実在の道路照明柱（以下、照明柱）の点検データに適用し、その維持管理に関する実証的示唆を行う。

2. 道路照明柱に対する劣化モデルの定式化

(1) モデル化の前提条件

本研究では照明柱の劣化過程を、照明柱の健全性を表現する I 段階の離散的指標（以下、健全度と呼ぶ） $1, \dots, I$ の推移を用いて記述する。ただし、健全度が大きくなるほど、劣化が進行している様子を表現する。すなわち、健全度の小さい値から大きい値への推移は、照明柱の劣化の進行を表現する。さらに、照明柱に対して、その供用開始時点を原点とする離散的時間軸を導入する。この時、離散的時間軸上の点を時点と呼ぶ。

(2) マルコフ劣化ハザードモデル

健全度 $i (i = 1, \dots, I - 1)$ の指数ハザード関数を

$$\lambda_i(y_i) = \theta_i \quad (1)$$

と表現する。指数ハザード関数を用いる事により、劣化過程が過去の履歴に依存しないというマルコフ性を表現できる。さらにハザード関数 $\theta_i (i = 1, \dots, I - 1)$ が照明柱の構造条件や環境条件に依存して変化すると考え、具体的なハザード関数を

$$\theta_i = \exp(x\beta_i') \quad (2)$$

と定義する。記号「 $'$ 」は転置操作を表す。また、 x は説明変数ベクトル、 β_i は未知パラメータベクトルを表す。なお、 $x_0\beta_{0,i}$ は定数項を表すとし、 $x_0 = 1$ とする。式 (2) により、未知パラメータベクトルの関数として、マルコフ推移確率を表現する事ができ、照明柱の構造条件や環境条件が劣化過程に及ぼす影響を定量化できる。このとき、2 時点間において健全度 i が継続する確率は、

$$\pi_{ii}(z|\beta) = \exp\{-\theta_i z\} \quad (3)$$

となる。また、健全度が i から j に推移するマルコフ推移確率 $\pi_{ij}(z|\beta)$ は、次式で表される。

$$\pi_{ij}(z|\beta) = \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp\{-\theta_k z\} \quad (4)$$

($i = 1, \dots, I - 1; j = i + 1, \dots, I$)

また、 $\pi_{II}(z|\beta)$ に関しては、マルコフ推移確率の条件より次式で表される。

$$\pi_{II}(z|\beta) = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi_{ij}(z|\beta) \quad (5)$$

3. 補修施策を考慮したモデル推定

提案したモデルのパラメータ β および照明柱の更新時点を同時推定するために、本研究ではベイズ推定法を援用した推定手法を構築する。ベイズ推定法においては、ベイズの定理を援用することにより、パラメータの真の値の確率分布（事後確率分布）を推定する。ベイズの定理から、パラメータの事後確率分布は、情報が無いときのパラメータの確率分布（事前確率分布）およびデータが得られる確率（尤度関数）の積に比例する。よって、パラメータの事後確率分布を推定するためには、事前確率分布および尤度関数を設定する必要がある。

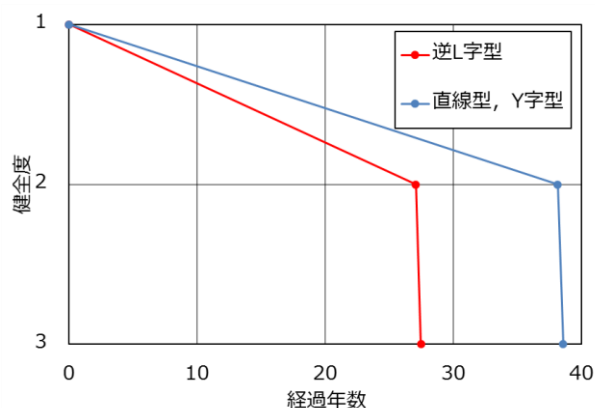


図-1 構造形式によって異なる照明柱の劣化過程

本研究では、モデルの全パラメータの事前確率分布に無情報事前分布を設定することにより、推定するパラメータの事後確率分布の客観性を担保する。一方で、事後確率分布は非常に複雑になることが多いため、それに基づいた議論や考察をすることが難しくなるといった欠点が存在する。このような問題を解決するために、事後確率分布に従う確率標本を発生させ、確率分布を表現する手法に基づいて、パラメータの事後確率分布を推定する。

3. 適用事例

(1) 適用事例の概要

本研究で提案したマルコフ劣化ハザードモデルの有用性を示すために、実際の照明柱における緊急点検データに適用する。緊急点検とは、ある地方自治体の管轄化にある照明柱に対して、倒壊事案を受けて実施された目視点検である。緊急点検により獲得されたサンプルからは、照明柱の劣化事象として、基部コンクリートの亀裂、交通事故による変形損傷、掘削部の孔食、基部の腐食を挙げられる。しかしながら、健全度判定に関しては、倒壊要因が照明柱基部の腐食によるものであったことから、主に照明柱基部の腐食に着目して実施された（健全度判定は1から3の3段階評価となっており、健全度判定3の照明柱が補修または更新対象となっている）。点検回数は1度であったことから、本研究で用いたのは、ある地方自治体管轄照明柱18,510のうち、時間的な整合性が確認できた13,161の同サンプルである。

(2) 推計結果

本研究では、照明柱の構造形式による健全度の劣化の差異を表現した。具体的には照明柱のポール形式である、逆L字型の照明柱と直線型またはY字型の照明柱による健全度の劣化過程の差異を表現した。図-1では逆L字型の照明柱は直線

型またはY字型の照明柱に比べて健全度が1から3へ推移する経過年数が10年の差があることが確認できる。

4. おわりに

本研究では、近年まで事後保全型の維持管理施策が実施されており、さらに過去の点検および補修・更新履歴が記録されていない道路照明柱を対象とした劣化予測モデルの開発を行なった。具体的には、過去の更新回数と更新時点を予算制約から照明柱全体に対する更新回数を確率的に与えた潜在変数として明示的に考慮した劣化予測モデルを提案した。その際、従来では道路照明柱に対して事後的な更新施策が採用されていたという部分的な情報を用いて、潜在変数の確率密度を定義することによりモデル推定精度の向上を図った。

一方で、今後に残された課題がいくつか存在する。第1に、適用事例の拡大があげられる。本研究の実証分析では、提案した方法論の限られた単一の対象区間における道路照明柱への適用を試みたにすぎず、本研究の適用事例で得られた知見は、対象とした道路照明柱でのみ適用可能である。今後、点検記録の蓄積や本研究で提案したモデルの実フィールドへの適用事例の拡大を通して、照明柱の更新手法を逐次改善するとともに、道路照明柱の劣化予測モデルの推定精度をより向上させる努力や、照明柱の劣化機構に関して物理的な考察や定義が必要である。第2に、本研究では、劣化過程の分析を行ったが、より一層、社会的に価値を見出すために、本研究の分析結果に基づいた道路照明柱のライフサイクル費用分析を行うことが必要となる。

【参考文献】

- 1) 津田尚胤，貝戸清之，青木一也，小林潔司：橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.68-82，2005.
- 2) 水谷大二郎，貝戸清之，小林潔司，秀島栄三，山田洋太，平川恵士：判定基準を考慮した隠れマルコフ劣化ハザードモデル，土木学会論文集 D3，Vol.71，No.2，pp.70-89，2015.8
- 3) 小林潔司，貝戸清之，林秀和：測定誤差を考慮した隠れマルコフ劣化モデル，土木学会論文集 D，Vol.64，No.3，pp.493-512，2008.9