

第 VI 部門

サンプル欠損を考慮した劣化予測モデルによる補修効果の評価

大阪大学大学院 学生員 ○山岸 拓歩

阪神高速技術株式会社 正会員 安藤 翠

大阪大学大学院 正会員 貝戸 清之

1. はじめに

道路構造物に対する五年に一度の頻度での定期点検の実施が道路法施行規則により定められている。安全性の向上と予防保全を目的に、点検時に簡易な補修が施される点検時措置が実施されることがある。点検時措置の効果の評価は、点検時措置が実施された場合の劣化過程と、実施されなかったと仮定した場合の劣化過程の比較が有効である。しかし、前者は点検データから獲得可能な一方で後者は獲得不可能であり、後者に代替する劣化過程の補完が求められる。補完を点検時措置が実施されなかった損傷の劣化情報に基づいて試みるが、これらは点検時措置が実施されなかった損傷であり、劣化速度が小さいと考えられるため、劣化速度を過小評価する恐れがある。点検データの収集の偏りに起因する本問題をサンプル欠損バイアス¹⁾として本研究で議論を行う。サンプル欠損バイアスの除去および劣化現象のシミュレーションを通じて劣化過程を補完し、点検時措置の効果の評価する。以下、2.では本研究の基本的な考え方、3.ではマルコフ劣化ハザードモデル²⁾、サンプル欠損バイアスの除去、劣化現象のシミュレーション、4.では推計手法、5.では実証分析について述べる。

2. 本研究の基本的な考え方

点検時措置とは、定期点検の際に実施される簡易的な補修である。対象とする点検データは時期の異なる2回の点検に関するもので、順に前回点検、今回点検と称する。点検では措置前判定として損傷の状態が4段階の健全度で記録される。点検時措置の必要性が認められる損傷には点検時措置が実施の上、措置後判定として健全度が再度記録される。一方、点検時措置が必要ないとされた損傷に対しては点検時措置の実施はされず、措置後判定として便宜上措置前判定と同じ健全度が記録される。本研究では点検時措置は劣化速度が相対的



図-1 劣化過程と評価の流れ

に大きい損傷に対して実施されると仮定する。

獲得されたサンプルの集合を Ω とし、 Ω の要素のうち劣化速度が大きいものの集合を $+\Omega$ 、小さいものの集合を $-\Omega$ とする。これら3つの集合に対して点検時措置が実施されたとした場合、されなかったとした場合に実現する6通りの劣化過程について考え、これを図-1に示す。このうち、点検データとして獲得可能であるものは $+A$ および $-A$ である。 $+A$ および $-A$ は点検時措置の実施の有無のみならずサンプル元来の劣化速度が異なるため、これらの比較に基づいて点検時措置の効果の評価はできない。 $-A$ に発生しているサンプル欠損バイアスを除去することにより $\bar{A}$ を推定し、 $\bar{A}$ に従う劣化現象のシミュレーション結果の劣化が速く進展したものの着目することにより $+\bar{A}$ を推定する。 $+A$ と $+\bar{A}$ は点検時措置の実施の有無のみが異なる劣化過程の組であるため、これらの比較に基づいて点検時措置の効果の評価する。

$\bar{A}$ の推定を考える。 $-\Omega$ は劣化速度が小さいサンプルを要素として持つ集合であるため、 $\bar{A}$ を $-\Omega$ に基づいて推定する場合、劣化速度を過小評価してしまう。これは、劣化速度が大きいサンプルが $-\Omega$ の要素として獲得できない点を考慮していないため生じる問題で、このメカニズムで劣化速度が過小評価される問題をサンプル欠損バイアスと称する。また、劣化速度が相対的に大きいサンプルが欠損している状態をサンプル欠損と称する。

3. モデルの定式化

損傷の進展過程にマルコフ劣化ハザードモデル²⁾を仮定する。状態が離散的な I 段階の健全度として評価される場合、期間 z の健全度が i から j への推移確率 $\pi_{ij}(z)$ は

Takuho YAMAGISHI, Midori ANDO, and Kiyoyuki KAITO

t.yamagishi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

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

と表される． θ_i は健全度 i のハザード率である．サンプル k ($k = 1, \dots, K$)について前回措置後判定 i^k ，今回措置前判定 j^k ，点検間隔 z^k が得られ， $\xi^k = (i^k, j^k, z^k)$ とかくとする．また， $\Xi = (\xi^1, \dots, \xi^K)$ とする．このとき，サンプル欠損を考慮しない Ξ が生起する尤度は

$$\mathcal{L}(\Xi) = \prod_{k=1}^K \prod_{i=1}^I \prod_{j=i}^I \pi_{ij}(z^k)^{\delta_{ij}^k} \quad (2)$$

である．また，サンプル欠損を考慮した尤度は

$$\mathcal{L}(\Xi) = \prod_{k=1}^K \prod_{i=1}^I \prod_{j=i}^I \tilde{\pi}_{ij}(z^k)^{\delta_{ij}^k} \quad (3)$$

である． $\tilde{\pi}_{ij}(z)$ は修正推移確率であり

$$\tilde{\pi}_{ij}(z) = \frac{H_{j|i}}{P(j|i, \beta)} \pi_{ij}(z) \quad (4)$$

と表される． $H_{j|i}$ は前回措置後判定が i のサンプルのうち今回措置前判定が j である割合， $P(j|i, \beta)$ は理論的な健全度分布である．マルコフ劣化ハザードモデルでは健全度が1つ推移するために要する時間はハザード率をパラメータに持つ指数分布に従うため，健全度が1から j に推移するために要する時間の累積分布関数は

$$F_j(\zeta_j) = \prod_{k=1}^{j-1} \theta_k \sum_{k=1}^{j-1} \frac{1 - \exp(-\theta_k \zeta_j)}{\theta_k \prod_{m=1, \neq k}^{j-1} (\theta_m - \theta_k)} \quad (5)$$

である．これを用い， $F_j^{-1}(\alpha)$ によりシミュレーションの結果下側100 α %点を得る．

4. 推計手法

${}_+A$ の推定にあたっては， ${}_+\Omega$ にサンプル欠損を考慮しない推計を行う．尤度関数は点検データを ${}_+\Xi = ({}_+\xi^1, \dots, {}_+\xi^K)$ として式(2)に基づく．

${}_+A$ の推定にあたっては，まず， ${}_+\Omega$ にサンプル欠損を考慮した推計により ${}_+A$ を推定する．尤度関数は点検データを ${}_+\Xi = ({}_+\xi^1, \dots, {}_+\xi^K)$ として式(3)に基づく．続いて， ${}_+A$ に従う劣化現象を式(5)を用いてシミュレーションし，下100 ${}_+K/({}_+K + {}_-K)$ %点相当の結果を ${}_+A$ として得る．

いずれの推計においても，パラメータ β_i を用いてハザード率を $\theta_i = \exp(\beta_i)$ と表すとする．

5. 実証分析

実際の点検データを用い，実証分析を行う．4.に従い ${}_+A, {}_-A, {}_+A$ を推定した結果を図-2に示す．また，これらとの比較を目的に， ${}_+A$ の推定結果も合わせて示す． ${}_+A$ は ${}_+\Omega$ にサンプル欠損を考慮しない推計を行い，尤度関

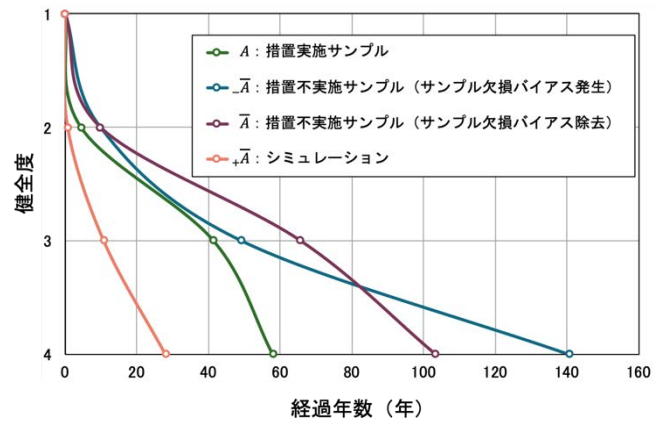


図-2 劣化過程と評価の流れ

数は点検データを ${}_+\Xi = ({}_+\xi^1, \dots, {}_+\xi^K)$ として式(3)に基づく．

${}_+\Omega$ に対してサンプル欠損を考慮しなかった場合の劣化過程が ${}_+A$ であり，考慮した場合の劣化過程が ${}_+A$ である．これら2つの過程に着目すると，前者が健全度3から4にかけて寿命が長く伸びている一方で，後者はその伸びが抑えられ，サンプル欠損による劣化速度の過小評価が解消されていることが確認できる．

${}_+A$ は ${}_+\Omega$ に対して点検時措置が実施された場合の劣化過程を表し， ${}_+A$ は ${}_+\Omega$ に対して点検時措置が実施されなかったと仮定した場合の劣化過程に対応する．これら2つの過程に着目すると，健全度が2から3へ推移する過程で点検時措置の実施による劣化速度の抑制効果が確認できる一方で，健全度が3から4へ推移する過程では効果が見られない．つまり，点検時措置は，実施により健全度が2以下に回復させられる見込みのある場合，もしくは次回の定期点検までに健全度が3以上に進展する恐れの大きい場合に有効であるといえる．

6. おわりに

本研究においては，サンプル欠損を考慮した上で，点検時措置の効果の評価を点検データに基づいて行い，点検時措置による劣化速度の抑制効果を確認した．今後はサンプル欠損発生段階的考慮，LCCを考慮した点検時措置の有効性の評価などを行う必要がある．

【参考文献】

- 1) 小林潔司，熊田一彦，佐藤正和，岩崎洋一郎，青木一也：サンプル欠損を考慮した舗装劣化予測モデル，土木学会論文集 F, Vol.63, No.1, pp.1-15, 2007.
- 2) 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.