

サンプル欠損を考慮した劣化予測モデルに基づく簡易補修の実施タイミングの提案

大阪大学大学院工学研究科 学生会員 ○山岸 拓歩
 阪神高速技術株式会社 正会員 安藤 翠
 大阪大学大学院工学研究科 正会員 貝戸 清之

1. はじめに

橋梁やトンネルに対する五年に一度の定期点検の実施が道路法施行規則で定められている。その際に、安全性の向上と予防保全を目的に、点検時措置（点検時の簡易補修）が施されることがある。点検時措置は補修のために損傷に再接近する必要がなく、さらに点検業務総額の数%の費用で実施可能であることから実務的にその有用性が確認されているものの、点検時措置の効果を実証的に示した事例は存在しない。また効果が最大限発揮されるタイミングを明らかにすることにより、点検時措置に関する実施判断の効率化が期待される。点検時措置の効果を評価は、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る。本研究では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後者の補完を試みるが、これらには点検データの収集に起因するサンプル欠損¹⁾が生じているため、従来の劣化予測モデルを用いると、措置の効果を過小評価する恐れがある。本問題をサンプル欠損バイアスとして議論を行う。サンプル欠損の選択的考慮によりサンプル欠損が発生する属性を特定した上でバイアスの除去を行い、措置の効果を評価を行う。加えて、点検時措置を実施するべきタイミングの提案を行う。

2. 本研究の基本的な考え方

本研究で用いる点検データは、異なる2時点における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を実施の上、措置後判定として同様に4段階の健全度が再度記録される。一方、点検時措置が不要な損傷に対しては、点検時措置を実施しないが、便宜上措置後判定として措置前判定と同じ健全度が記録される。点検時措置は劣化速度が相対的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 、 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。この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

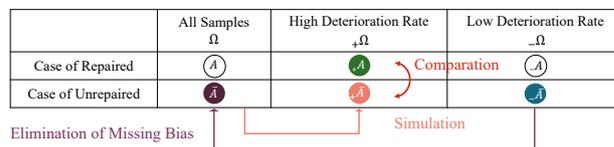


Fig. 1 Deterioration Processes and Flow of Evaluation

通りの劣化過程について考え、これを Fig. 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 $+\bar{A}$ 、 $-\bar{A}$ である。 $+\bar{A}$ および $-\bar{A}$ 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を評価はできない。 $-\bar{A}$ 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に着目することにより $+\bar{A}$ を推定する。 $+\bar{A}$ 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を評価する。

$-\Omega$ 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。サンプル欠損の発生の有無は劣化前の状態である前回措置後判定に依ると仮定し、前回措置後判定が i ($i = 1, 2, 3$)において、それぞれサンプル欠損が生じているか否かを区別した $2^{4-1} = 8$ パターンを選択的考慮を行う。

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を仮定する。期間 z の健全度が i から j への推移確率 $\pi_{ij}(z)$ は

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

である。 θ_i はハザード率である。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、 $\xi^k = (i^k, j^k, z^k)$ 、 $\Xi = (\xi^1, \dots, \xi^K)$ とする。サンプル欠損を考慮しない Ξ が生起する尤度は

$$\mathcal{L}(\Xi) = \prod_{k=1}^K \prod_{i=1}^3 \prod_{j=1}^3 \pi_{ij}(z^k)^{\delta_{ij}^k} \quad (2)$$

キーワード 点検時措置, マルコフ劣化ハザードモデル, サンプル欠損, サンプル欠損バイアス
 連絡先 〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1AR 棟 605 号室 TEL: 06-6879-7622

である。パターン $s (s = 0, \dots, 2^{l-1} - 1)$ の選択的考慮では、前回措置後判定を i としたとき、 s の 2 進数表記 $s_{(2)}$ の下から i 桁目 $d_i(s)$ が 1 ならばサンプル欠損を考慮し、0 ならば考慮しない。パターン s の尤度は

$$L_s(\Xi) = \prod_{k=1}^K \prod_{i=1}^l \prod_{j=i}^l \{\pi_{ij}(z^k)^{1-d_i(s)} \tilde{\pi}_{ij}(z^k)^{d_i(s)}\}^{\delta_{ij}^k} \quad (3)$$

であり、特に $L_0(\Xi) = L(\Xi)$ 。 $\tilde{\pi}_{ij}(z)$ は修正推移確率で

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

と表される。補正係数 $R(j|i, \beta)$ は、理論的な健全度分布 $P(j|i, \beta)$ に対する観測された健全度分布 $H_{j|i}$ の比である。 $R(j|i, \beta) < 1$ ならばサンプル欠損が生じており、 $R(j|i, \beta) > 1$ ならば生じているとはいえない。 $d_i(s) = 1$ である i に対して $R(j|i, \beta) > 1 + \gamma_s$ となる j が存在する s については、サンプル欠損が生じているとの仮定と結果が矛盾するため、パターン s を棄却する。 γ_s は十分小さい正数であり、棄却に関する余裕である。

マルコフ劣化ハザードモデルにおいて、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

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

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 $100\alpha\%$ 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。尤度は式(2)に基づく。

パターン s の推計を考える。 ${}_+\bar{A}_s$ の推定にあたっては、まず、 ${}_-\Omega$ にサンプル欠損の選択的考慮により \bar{A}_s を推定する。尤度は式(3)に基づき、 $R(j|i, \beta) > 1 + \gamma_s$ に従い棄却の可否を判断する。ただし、 $\gamma_s = 0.1$ とする。 \bar{A}_s 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 ${}_+\bar{A}_s$ として得る。

5. 実証分析

橋梁管理者により収集された点検データを用い、実証分析を行う。なお、実証分析では点検時措置として行われた防錆剤の効果に着目する。

\bar{A}_s の推定結果を Fig. 2 に示す。ただし、推計が収束した $s = 0, 2, 4, 6$ のみ示す。 $s = 0, 2, 6$ は $R(j|i, \beta) > 1 + \gamma_s$ により棄却され、 $4 = 100_{(2)}$ よりサンプル欠損は前回措置前判定が 3 のサンプルで生じていると判断できる。

${}_+A, \bar{A}_4, {}_+\bar{A}_4$ の推定結果を Fig. 3 に示す。これらとの比較を目的に、 ${}_-\bar{A}$ の推定結果も示す。 ${}_-\Omega$ にサンプル欠損を考慮しない推計を行い、尤度は式(2)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 ${}_-\bar{A}$ であり、考慮した場合の劣化過程が \bar{A}_4 である。前者が健全度 3 から 4 にかけて寿命が伸びている一方で、後者は伸びが抑えられ、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。

${}_+\Omega$ に対して点検時措置が実施された場合の劣化過程

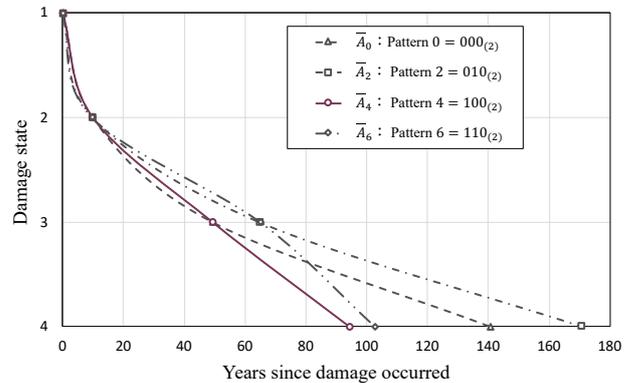


Fig. 2 Patterns of Selective Elimination of Missing Bias

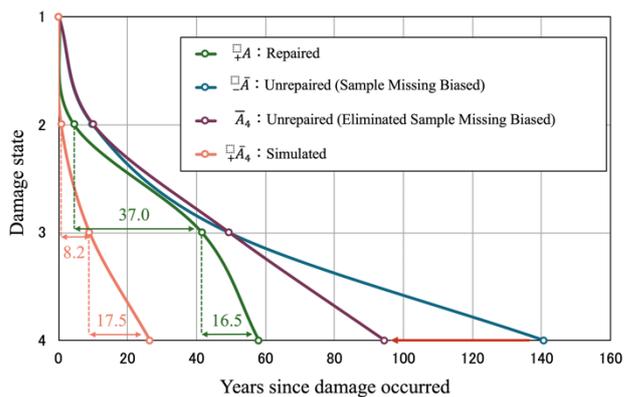


Fig. 3 Deterioration Processes and Evaluation of Repair

が ${}_+A$ であり、実施されなかったと仮定した場合の劣化過程が ${}_+\bar{A}_4$ である。点検時措置の実施により、健全度 2 から 3 へ推移するために要する年数が 37.0 年から 8.2 年と短縮されていることが確認できる。一方、健全度 3 から 4 へ推移するために要する年数はいずれも 17 年程度であり、点検時措置の効果は確認されず、状態が著しく悪い損傷への効果は期待されない。つまり、以下に挙げる場合に点検時措置の実施は有効であるといえる。

- 健全度 3 以上の損傷に対して、点検時措置の実施により健全度 2 以下まで回復させられる見込みのある場合
 - 健全度 2 以下の損傷に対して、次回点検までに健全度 3 以上に進展する恐れが大きく、健全度 2 以下に留めさせられる見込みのある場合
- 以下に挙げる場合は点検時措置の効果は有意に見られないといえるため、実施を見送った上で本補修による補修を行う方が効率的である。

- 点検時措置を実施しても健全度 3 以上に留まる見込みのある場合

6. おわりに

点検データの収集に起因するサンプル欠損を選択的に考慮した上で点検時措置の効果の評価を行い、点検時措置を実施すべきタイミングの提案を行った。

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.