

# 統計的劣化予測モデルを用いた 点検時措置の予防保全効果の検証

安藤 翠<sup>1</sup>・永廣 悠介<sup>2</sup>・塚本 成昭<sup>3</sup>・山下 欣也<sup>4</sup>・貝戸 清之<sup>5</sup>

<sup>1</sup> 法人正会員 阪神高速技術株式会社 保全マネジメント室保全マネジメント課 (〒550-0005 大阪市西区西本町 1-4-1)

E-mail: midori-ando@hex-eng.co.jp

<sup>2</sup> 法人正会員 阪神高速技術株式会社 技術部技術統括・開発課 (〒550-0005 大阪市西区西本町 1-4-1)

E-mail: yusuke-nagahiro@hex-eng.co.jp

<sup>3</sup> 法人正会員 阪神高速技術株式会社 技術部技術統括・開発課 (〒550-0005 大阪市西区西本町 1-4-1)

E-mail: shigeaki-tsukamoto@hex-eng.co.jp

<sup>4</sup> 法人正会員 阪神高速技術株式会社 保全技術研修室保全技術研修課 (〒550-0005 大阪市西区西本町 1-4-1)

E-mail: kinya-yamashita@hex-eng.co.jp

<sup>5</sup> 個人正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

阪神高速技術株式会社では、道路構造物への接近点検の機会を最大限に活用して、損傷に対する簡易的な補修（以下、点検時措置）の適用拡大に努めている。本研究では、点検時措置の予防保全効果を定量的に評価することを目的とし、点検時措置が実施された場合の劣化過程と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を、統計的劣化予測モデルを用い検討した。その結果、C ランク損傷（注：阪神高速道路の点検要領では、重大なものから S, A, B, C と分類）が B ランク損傷に進行するまでの期間は、点検時措置（防錆スプレー）をした場合は約 37 年、しなかったと仮定した場合は約 10 年となり、約 27 年損傷の進行を遅らせることが明らかになった。したがって、予防保全として点検時措置をすることは有効であるといえる。

**キーワード：**統計的劣化予測モデル、定期点検、点検時措置、予防保全効果、劣化過程

## 1. はじめに

阪神高速技術株式会社は、阪神高速道路の点検から診断、補修までを一括管理している。このような役割の中、法令に基づく 5 年周期の構造物点検（以下、定期点検）では、損傷の確認と記録に加え、道路構造物への接近点検の機会を最大限に活用して実施される点検時措置の適用拡大に努めている。近年では、構造物点検業務予算の約 3% を使用し、年間約 12,000 件の点検時措置を実施している。

点検時措置とは、点検員が定期点検時にできる、軽微な損傷に対する補修のことである。阪神高速道路は都市高速という特性上、高架区間の割合が供用延長の約 8 割を占めている。高架区間の下には一般道路が通り、公園や駐車場として活用している箇所も数多くある。そのた

め、阪神高速道路からのコンクリート片やさび片等の落下は、第三者被害に繋がる可能性が高い。点検時措置は、それら落下の危険性のある損傷を点検時に発見と同時に措置することで、第三者被害の抑制に貢献している。また、表-1 に示す阪神高速道路の定期点検の点検判定区分における B および C ランク損傷といった軽微な損傷に対し点検時措置を実施することで、損傷の進行を遅らせ、予防保全にも貢献していることが明らかとなった<sup>2)</sup>。しかし、定量的な予防保全効果はまだ十分に検証されていない。

そこで、本研究では、予防保全を目的に実施された点検時措置に着目し、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を、統計的劣化予測手法を用いて推定、比較することで、点検時措置の予防保全効果の定量的評価を行う。

表-1 阪神高速道路の定期点検の点検判定区分<sup>1)</sup>

判定区分	損傷状況
S	S1 機能低下が著しく、構造物の安全性から緊急に対策の必要がある場合
	S2 第三者への影響があると考えられ、緊急に対策の必要がある場合
A	機能低下があり、対策の必要がある場合 第三者に対し影響を及ぼす恐れ等があり、対策の必要がある場合
B	損傷の状況を観察する必要がある場合
C	損傷が軽微である場合
OK	上記以外の場合

## 2. 点検時措置の概要

### (1) 点検時措置の種類

現在、定期点検において実施している点検時措置の種類を以下に示す。

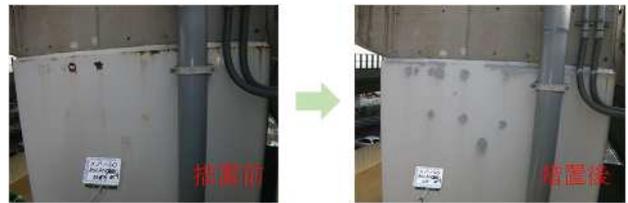
- ①コンクリート片の叩き落とし（つらら状遊離石灰含む）
- ②露出鉄筋等の防錆措置
- ③コンクリート表面防護
- ④さび片の除去
- ⑤さびの簡易塗装補修
- ⑥ゴム支承劣化予防措置
- ⑦ボルト・ナットの応急措置
- ⑧存置物・残置物の撤去
- ⑨標識板落下防止措置
- ⑩日常点検 A ランク措置
- ⑪その他（はり上清掃および落書き除去等）

これら 11 種類の措置のうち、②、③、⑤、⑥が予防保全を目的に実施される。その他の①、④、⑧は、第三者被害抑制を目的に、⑦、⑨、⑩、⑪は経済的な維持管理を目的に実施される。経済的な維持管理とは、補修費用の低減を意味する。点検後に補修班による補修工事を行う場合、作業員や作業機材の再調達や交通規制の再実施の必要があることから補修費用が増大する。しかし、点検員が点検と同時に補修すれば、補修費用を概ね 10 分の 1 に削減できることが明らかとなっている<sup>3)</sup>。

点検時措置は、組み合わせて実施される場合もあり、例えば、コンクリートの浮きが発見された場合、①～③の一連の作業が実施される。図-1 に、⑩を除く各種点検時措置の前後の写真を示す。



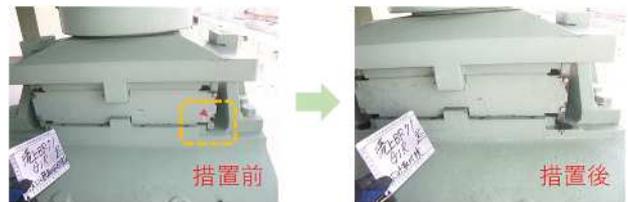
(a) ①Co 片叩き落とし+②露出鉄筋の防錆+③Co 表面防護



(b) ④さび片の除去+⑤さびの簡易塗装補修



(c) ⑥ゴム支承劣化予防措置



(d) ⑦ボルト・ナットの応急措置



(e) ⑧存置物・放置物の撤去



(f) ⑨標識板落下防止措置



(g) ⑩その他（はり上清掃および落書き除去等）

図-1 各種点検時措置前後の状況

### (2) 点検時措置の件数と費用

2014 年度から 2019 年度までの点検時措置件数と費用の推移を図-2 に示す。図中の棒グラフが点検時措置件数を、折れ線グラフが費用を表す。

年度によってばらつきはあるが、年平均約 12,000 件の点検時措置を実施している。それに伴う費用は、年平均約 70,000 千円である。この金額は、構造物点検業務総額の約 3%に相当する。

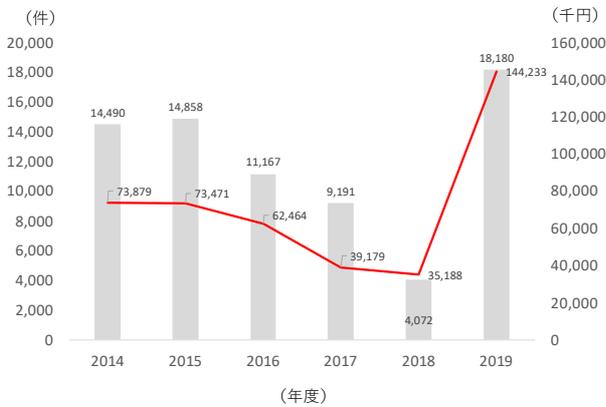


図-2 点検時措置件数と費用の推移

### 3. 本研究の基本的な考え方

#### (1) 使用する点検データ

点検データは、時期の異なる 2 回の定期点検結果を使用する。順に、「前回点検」「今回点検」と呼ぶ。また、点検データには、図-3 に示すように、点検員が点検時措置を実施する前に損傷度判定された「措置前判定」、点検時措置後に損傷度判定された「一次判定」、健全度判定後の「二次判定」の計 3 種類の判定ランクが登録されている。「措置前判定」および「一次判定」の損傷度判定は、要領に基づいた機械的な損傷状態の判定であるのに対し、「二次判定」の健全度判定は、構造物の損傷状態に加え、進行性および冗長性といった損傷の影響度や第三者影響を点検技術者が総合的に評価した判定である。本研究では、「前回点検」における「一次判定」と、「今回点検」における「措置前判定」の損傷度判定された損傷ランクを用い劣化予測を行う。

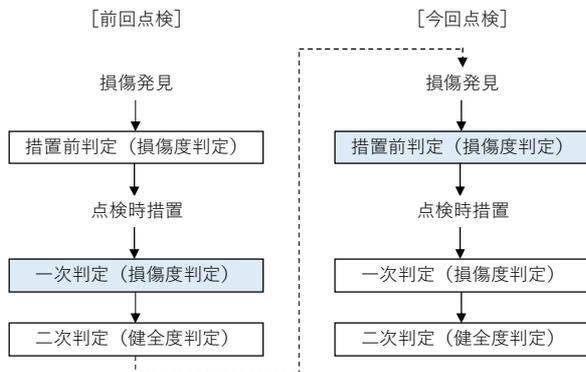


図-3 登録される点検データの種類

#### (2) 想定される劣化過程の組合せ

点検現場における点検時措置の実施判断は、点検員により行われる。損傷が広範囲にわたり養生が困難な場合は実施が見送られることがあるが、本研究では、点検の対象となる全損傷のうち、劣化速度が大きい損傷から優先的に点検時措置が実施されると仮定する。すなわち、点検時措置が実施されなかった損傷の劣化速度は小さいと仮定する。

想定される劣化過程の組合せを図-4 に示す。点検データの全サンプルを  $\Omega$  とし、 $\Omega$  の要素のうち劣化速度が相対的に大きいものの集合を  $+\Omega$ 、小さいものの集合を  $-\Omega$  とする。それぞれの劣化過程は、これら 3 つの集合に対して、点検時措置が実施されたか否かの 2 通りを掛けた、6 通り考えられる。

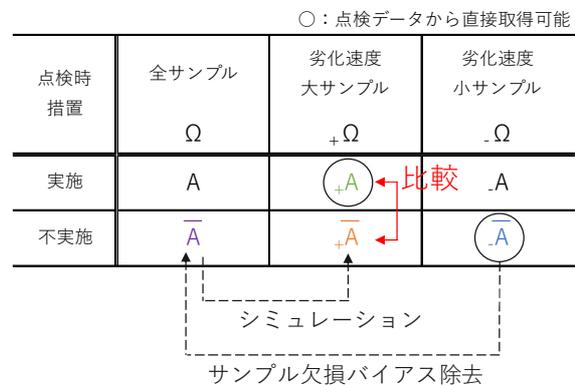


図-4 想定される劣化過程の組合せ

この 6 通りのうち、点検時措置が実施された場合の劣化過程  $+A$  と点検時措置が実施されなかった場合の劣化過程  $+\bar{A}$  の比較を行い、点検時措置の効果を定量的に評価することを考える。

#### (3) サンプル欠損バイアスと劣化過程推定順序

図-4 に示す、点検時措置が実施された場合の劣化過程  $+A$  は、点検データから取得可能である。ある一つの損傷に対し、点検時措置を実施すると、実施しなかった場合のデータは存在しない。同様に、ある一つの損傷に対し、点検時措置を実施しなかった場合、実施した場合のデータは得られない。すなわち、点検時措置が実施された場合のデータが点検データから取得可能ということは、実施しなかった場合のデータは仮定せざるを得ない。よって、点検時措置が実施された損傷に対して、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  $+\bar{A}$  は、点検データから取得可能な、点検時措置が実施されなかった損傷に関する劣化過程  $-\bar{A}$  を用いて補完を試みる。 $+\bar{A}$  が、点検時措置が実施された損傷の劣化過程  $+A$  との比較対象となり、これらの比較を行うことで

点検時措置の効果が評価される。しかし、前節で述べたとおり、点検時措置が実施されなかった損傷の多くは、点検時措置が実施された損傷に比べて劣化速度が小さい傾向にある。つまり、点検時措置が実施されなかった損傷の劣化過程  $_{-}\bar{A}$  を用いて補完する場合、劣化速度を過小評価する恐れがある。この問題をサンプル欠損バイアス<sup>4)</sup>として本研究では議論を行う。よって、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  $_{+}\bar{A}$  を推定する順序は次のとおりである。劣化過程のイメージと推定順序を図-5に示す。

- ①点検時措置が実施されなかった損傷に関する劣化過程  $_{-}\bar{A}$  を推定する。
- ②①よりサンプル欠損バイアスを除去し、 $\bar{A}$  を推定する。
- ③ $\bar{A}$  に基づく劣化現象のシミュレーションを通じて  $_{+}\bar{A}$  を推定する。

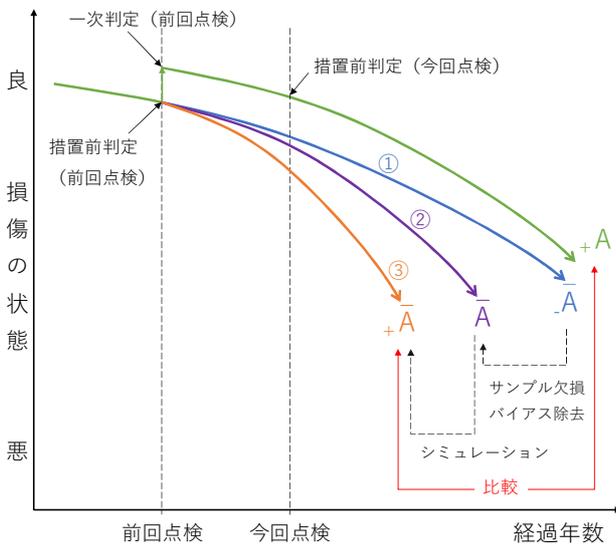


図-5 劣化過程のイメージと推定順序

#### (4) 点検データに基づく劣化過程の推定

本研究においては、3.(1)-(3)で示したように、点検時措置の効果を定期点検の際に収集された点検データに基づいて定量的に評価する。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、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の比較に基づく。点検データからそれぞれの劣化過程を推定する方法について、その概要を記す。なお、数式に基づく説明は4.および5.を参照されたい。

本研究で援用するマルコフ劣化ハザードモデルは、点検データに基づいて劣化過程を推定する統計学的劣化予測モデルである。劣化過程を推定するにあたり必須となる情報は、図-6にあるように異なる2回の点検における判定と、それらの点検の時間間隔である。これらの情報

に加え、劣化要因情報を任意で考慮することが可能であり、劣化要因情報としては一般に交通量や幅員などの劣化に影響を及ぼすと考えられる項目が採用される。しかし、本研究においては統計的に有意な劣化要因情報が存在しなかったこと、および劣化要因情報を考慮するとその組み合わせによってはサンプル数が極端に少なくなってしまうことから、劣化要因情報を考慮しない。これらのデータに基づいてマルコフ劣化ハザードモデルを推定することにより、劣化過程が得られる。この劣化過程は劣化の平均的な挙動を表現している。劣化要因情報を考慮するならば、特性変数を任意に変化させたときの劣化過程がそれぞれ得られるため、劣化に影響を及ぼす特性変数について考察を行うことが可能となる。

上記の説明はマルコフ劣化ハザードモデルを適用する場合のものであるが、その目的に応じて様々な統計的劣化予測モデルを適用することが可能である。本研究においてマルコフ劣化ハザードモデルと並行して用いるサンプル欠損を考慮したモデルは、点検データが部分的に欠損している影響を除去することが可能である。サンプル欠損を考慮したモデルを適用する場合でも、与えるデータは異なる2回の点検における判定と、それらの点検の時間間隔であり、得られる結果は劣化過程である。サンプル欠損を考慮したモデルの場合、点検データにサンプル欠損が生じているかを判断する指標である補正係数が同時に得られる。

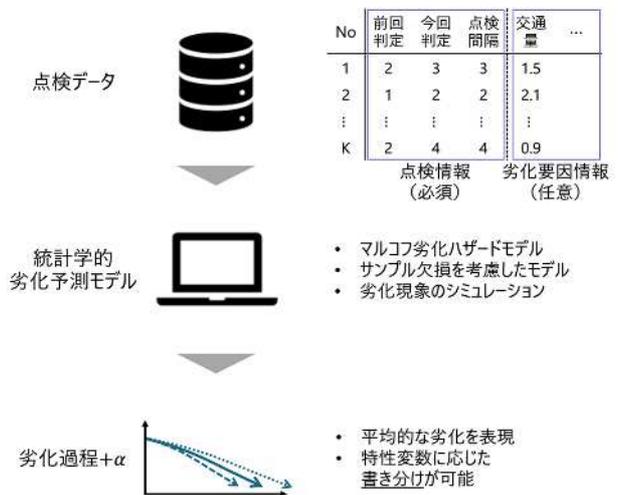


図-6 点検データに基づく劣化過程の推定

## 4. 劣化モデルの定式化

損傷の進展に伴う劣化過程にマルコフ劣化ハザードモデル<sup>5)</sup>を仮定する。マルコフ劣化ハザードモデルにおいては、ある時点における瞬間的な劣化現象は過去の劣化履歴に依存しないマルコフ性を仮定しており、ハザード

関数として指数ハザード関数を採用することでマルコフ性を表現する．状態が離散的な $I$ 段階の損傷度として評価される場合，ある時点において損傷度が $i$  ( $i = 1, \dots, I$ )である損傷が期間 $z > 0$ を経て損傷度が $j$  ( $j = i, \dots, I$ )に推移する確率は，損傷度の組 $i, j$ と時間間隔 $z$ のみに基づて表現可能である．期間 $z$ を経ての損傷度が $i$ から $j$ へ推移する確率 $\pi_{ij}(z)$ は，

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

と表される．ただし，表記の規則として

$$\begin{cases} \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k}, & (k = i \text{ のとき}) \\ \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_m}, & (k = j \text{ のとき}) \end{cases} \quad (2)$$

とする．また， $\theta_i > 0$ は損傷度 $i$ のハザード率である．いま， $K$ 個のサンプルが得られたとし，サンプル $k$  ( $k = 1, \dots, K$ )の前回一次判定が $i^k$ ，今回措置前判定が $j^k$ ，点検間隔が $z^k$ であったとし，これらをまとめて $\xi^k = (i^k, j^k, z^k)$ と書くとする．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 $\Xi$ が生起する尤度（確率）は，

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

である．この尤度は，劣化過程 ${}_+A$ と ${}_-\bar{A}$ の推定に用いられる．また，サンプル欠損を考慮した尤度は，

$$\mathcal{L}(\Xi) = \prod_{k=1}^K \prod_{i=1}^I \prod_{j=i}^I \tilde{\pi}_{ij}(z^k)^{\delta_{ij}^k} \quad (4)$$

である． $\tilde{\pi}_{ij}(z)$ は修正推移確率であり，

$$\tilde{\pi}_{ij}(z) = \frac{H_{j|i}}{P(j|i, \beta)} \pi_{ij}(z) \quad (5)$$

と表される． $H_{j|i}$ は前回一次判定が $i$ であるサンプルのうち，今回措置前判定が $j$ である割合である．また， $P(j|i, \beta)$ は理論的な損傷度分布である．これにより， $P(j|i)$ から算出される確率密度が大きい損傷度 $j$ から抽

出されたサンプルには相対的に小さい補正係数が，逆に小さい損傷度 $j$ から抽出されたサンプルには相対的に大きい補正係数が採用されることになる．言い換えれば，補正係数が1より小さい場合はサンプル欠損が生じており，1より大きい場合はサンプル欠損が生じていないということである．この尤度は，劣化過程 $\bar{A}$ の推定に用いられる．

マルコフ劣化ハザードモデルでは，損傷度が $i$ から $i+1$ へ推移するために要する時間は，ハザード率 $\theta_i$ をパラメータに持つ指数分布 $\text{Ex}(\theta_i)$ に従うため，損傷度が1から $j$ に推移するために要する時間の確率密度関数および累積分布関数は，

$$f_j(\zeta_j) = \prod_{k=1}^{j-1} \theta_k \sum_{k=1}^{j-1} \frac{\exp(-\theta_k \zeta_j)}{\prod_{m=1, \neq k}^{j-1} (\theta_m - \theta_k)} \quad (6)$$

$$F_j(\zeta_j) = \prod_{k=1}^{j-1} \theta_k \sum_{k=1}^{j-1} \frac{1 - \exp(-\theta_k \zeta_j)}{\theta_k \prod_{m=1, \neq k}^{j-1} (\theta_m - \theta_k)} \quad (7)$$

である．これを用い，マルコフ劣化ハザードモデルにおけるシミュレーションを行う．シミュレーションの結果下 $100 \times \alpha\%$  ( $0 < \alpha < 1$ )点に相当する寿命を得ることを考える．損傷度が1から $j$ へ推移する劣化現象のシミュレーションは，確率密度が式(6)である乱数 $d$ を発生させることに相当する．一方，本研究においては乱数が従う確率密度関数と累積分布関数が式(6)，(7)と閉じた式として得られているため， $F_j$ の逆関数 $F_j^{-1}$ により， $F_j^{-1}(\alpha)$ に基づいても同等の結果が得られる．この手法は， $\bar{A}$ に基づいて ${}_+A$ を得る過程で用いられる．

## 5. 劣化過程の推計手法

点検時措置が実施された場合の劣化過程 ${}_+A$ 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． ${}_+\Omega$ は点検時措置が実施された ${}_+K$ 個の点検データにより構成されており，尤度関数は点検データを ${}_+\Xi = ({}_+\xi^1, \dots, {}_+\xi^K)$ として式(3)に基づき，

$$\mathcal{L}({}_+\Xi) = \prod_{k=1}^K \prod_{i=1}^I \prod_{j=i}^I \pi_{ij}(z^k)^{\delta_{ij}^k} \quad (8)$$

である．

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 ${}_+\bar{A}$ 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 $\bar{A}$ を推定する。 $_{-}\Omega$ は点検時措置が実施されなかった $_{-}K$ 個の点検データにより構成されており、尤度関数は点検データを $_{-}\Xi = (_{-}\xi^1, \dots, _{-}\xi^{-K})$ として式(4)に基づき、

$$\mathcal{L}(_{-}\Xi) = \prod_{k=1}^{-K} \prod_{i=1}^I \prod_{j=i}^I \tilde{\pi}_{ij}(z^k)^{\delta_{ij}^k} \quad (9)$$

である。続いて、 $\bar{A}$ に従う劣化現象を式(6), (7)を用いてシミュレーションし、 $_{+}\bar{A}$ を得ることを考える。この劣化現象は $_{+}\Omega$ と $_{-}\Omega$ をあわせた $\Omega$ の要素である $_{+}K + _{-}K$ 個のサンプルに対するシミュレーションとみなされるため、シミュレーション結果のうち、生じた年数の下 $100 \cdot _{+}K / (_{+}K + _{-}K)$ %点に相当する劣化過程が $_{+}\Omega$ の要素である $_{+}K$ 個のサンプルに対する劣化過程 $_{+}\bar{A}$ に対応すると考える。

なお、いずれの推計においても、損傷度 $i$ におけるハザード率 $\theta_i > 0$ をパラメータ $\beta_i$ を用いて $\theta_i = \exp(\beta_i)$ と表すとする。

## 6. 劣化過程の実証分析

### (1) 点検データの概要

今回の分析に用いた点検データの諸元を表-2に示す。2014年度から2018年度までの定期点検結果において、前回点検時に実施された点検時措置のうち、図-1の(b)に示した防錆スプレーが塗布された損傷 $_{+}\Omega$ 、塗布されなかった損傷 $_{-}\Omega$ を抽出した。また、本研究は、予防保全を目的とした点検時措置の効果の評価であるため、措置前判定がSランク損傷と判定されている損傷は除外した。その結果、全サンプルサイズ $\Omega$ は80,511、 $_{+}\Omega$ のサンプルサイズは5,769、 $_{-}\Omega$ のサンプルサイズは74,742となった。

表-2 分析に用いた点検データの諸元

今回点検年度	2014~2018年度
前回点検年度	1999~2017年度
点検時措置内容	防錆スプレー
措置前判定	A, B, C, OKランク
全サンプル $\Omega$	80,511
点検時措置実施サンプル $_{+}\Omega$	5,769
点検時措置不実施サンプル $_{-}\Omega$	74,742

また、 $_{+}\Omega$ と $_{-}\Omega$ の「前回点検」における「一次判定」と「今回点検」における「措置前判定」の結果を、それぞれ表-3および表-4に示す。

表-3  $_{+}\Omega$ の損傷度分布

		今回点検 (措置前判定)				合計
		OK	C	B	A	
前回点検 (一次判定)	OK	136	157	13	1	307
	C	-	3,697	273	140	4,110
	B	-	-	864	92	956
	A	-	-	-	396	396
合計		136	3,854	1,150	629	5,769

表-4  $_{-}\Omega$ の損傷度分布

		今回点検 (措置前判定)				合計
		OK	C	B	A	
前回点検 (一次判定)	OK	58	23	5	0	86
	C	-	45,885	5,115	274	51,274
	B	-	-	20,429	847	21,276
	A	-	-	-	2,106	2,106
合計		58	45,908	25,549	3,227	74,742

### (2) 劣化過程の推定

前述した点検データを用い、4.に従い推定した $_{+}A$ 、 $_{-}A$ 、 $\bar{A}$ 、 $_{+}\bar{A}$ の劣化過程を図-7示す。

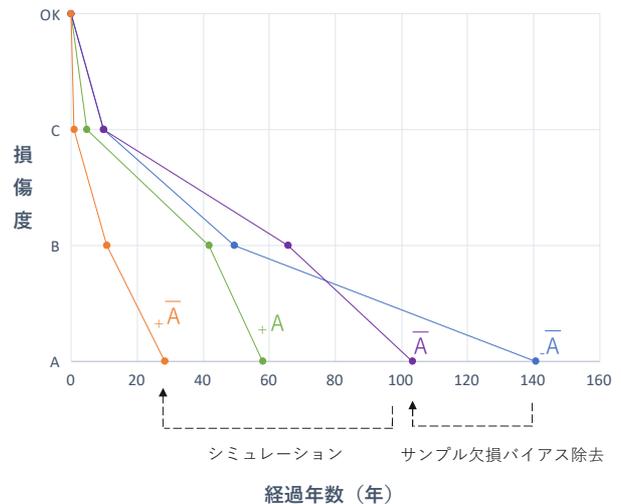


図-7 劣化過程

$_{+}A$ は防錆スプレーが実施された場合の劣化過程であり、実際の損傷が点検時措置後にたどる劣化過程である。また、 $_{-}A$ は防錆スプレーが実施されなかった損傷からサンプル欠損バイアスを除去しなかった場合の劣化過程であり、 $\bar{A}$ はサンプル欠損バイアスを除去した場合の劣化過程である。 $_{+}\bar{A}$ は実際に防錆スプレーが実施された損傷に対して、防錆スプレーが実施されなかったと仮定した場合の劣化過程である。



点検時措置ではあるが、点検とのバランスが崩れぬよう、点検時措置の費用対効果についても検討が必要と考える。

今後の日本社会においては、より限られた経営資源で今と同等またはそれ以上の成果を出すことが求められる。阪神高速技術株式会社では、点検時措置のような小さな投資で大きな成果を得るレバレッジの効いた維持管理を目指していきたい。

**謝辞：**本研究を進めるにあたり共同研究でご協力いただいた、大阪大学大学院の山岸拓歩氏には、深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 阪神高速道路株式会社，阪神高速技術株式会社：道路構造物の点検要領，2018.
- 2) 安藤翠，塚本成昭，山下欣也：点検時応急措置の効果検証，阪神高速道路第51回技術研究発表会論文集，pp. 377-342, 2019.
- 3) 井口祐樹，坂根英樹，杉本義博：点検時応急措置拡張への取組み，阪神高速道路第43回技術研究発表会論文集，pp.251-256, 2011.
- 4) 小林潔司，熊田一彦，佐藤正和，岩崎洋一郎，青木和也：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.
- 5) 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.