

## 第 I 部門 高速道路内における橋梁床版のかぶりコンクリートの剥離・剥落に関する統計分析

|             |     |        |
|-------------|-----|--------|
| 大阪大学大学院     | 学生員 | ○起塚 亮輔 |
| 大阪大学大学院     | 正会員 | 貝戸 清之  |
| 西日本高速道路株式会社 | 非会員 | 伊藤 哲男  |
| 西日本高速道路株式会社 | 非会員 | 西川 秀   |

**1. はじめに**

構造物管理者は、定期的に構造物を目視点検し、常時良好な状態に保つよう努めなければならない。しかしその一方、維持管理費用の中で点検費用が占める割合は少なくない。財政状況が悪化する中で、安全性の確保を前提としながらも、同時に効率性にも配慮した点検の在り方を検討することが必要である。このような状況の下、その解決策としてアセットマネジメント<sup>1)</sup>が着目され、近年、特に目視検査データに基づく統計的劣化予測に関する研究の進展が著しい。本研究では、高速道路の橋梁床版のかぶりコンクリートの剥離・剥落を具体的な対象として選定し、その剥離・剥落過程を高速道路の管理事務所が管理する道路区間を基本単位として、ランダム比例ポワソンモデルで表現し、実際の目視点検データを用いて推計することで、対象道路区間における床版かぶりコンクリートの剥離・剥落の発生確率を定量的に評価するとともに、剥離・剥落の発生に影響を及ぼす要因についても統計的に考察を加える。

**2. モデルの定式化**

いま、径間  $i$  に対して時刻  $\tau_A$  と  $\tau_B$  ( $\tau_B > \tau_A$ ) という 2 時点で点検が行われたと考えると点検間隔は  $z_i = \tau_B - \tau_A$  となり、時刻  $\tau_A$  の点検直後の時刻では、剥離・剥落の数は 0 となる。ここで、時刻  $\tau_B$  に点検を実施した時に、径間  $i$  において、 $n_i$  個の剥離・剥落が発見される確率を剥離・剥落の到着率を表す  $\lambda_i$  という未知パラメータを用いて表わすこととする。また、劣化現象に対して、複数の不可観測要因が介在する場合もあると考えられるが、本研究においては、不可観測要因の影響を検討単位に対して 1 つのパラメータで表現し、これを異質性パラメータと呼ぶこととする。また、維持管理計画の立案を念頭に、維持管理実務の基本単位である管理事務所ごとに異質性パラメータを設定することとした。いま、対象路線が、 $J$  箇所の管理事務所管理されているとする。さらに、管理事務所  $j$  ( $j = 1, \dots, J$ ) 内の任意の橋梁径間  $i$  ( $i = 1, \dots, I_j$ ) に着目し、当該径間の目視点検を通して取得された情報サンプル  $k$  ( $1, \dots, K_{ji}$ ) を例に取る。ここで、当該径間の点検間隔を  $z_{ji}$  と表すと、各径間における剥離・剥落の到着率は、

$$\lambda_{ji}(z_{ji}^k) = \varepsilon_j \mu_{ji} = \varepsilon_j \exp(x_{ji} \beta^m) \quad (1)$$

と定義できる。ただし、上式において、 $x_{ji}$  は管理事務所  $j$  内における径間  $i$  の特性変数  $x_{ji}^m$  ( $m = 1, \dots, M$ ) を要素とする行ベクトルであり、特性変数は剥離・剥落の発生過程に影響を及ぼす要因、例えば、床版種別、径間長、交通量などである。また、 $\beta$  は未知パラメータであり、 $\beta^m$  ( $m = 1, \dots, M$ ) を要素とする行ベクトルである。また、管理事務所  $j$  における到着率の異質性を表すパラメータを  $\varepsilon_j$  として表し、同一の管理事務所  $j$  に含まれる径間に対して  $\varepsilon_j$  は共通の値を取ると考える。異質性パラメータを考慮することで、特性変数として与えられる条件が全く同じ床版であっても、剥離・剥落の発生過程は管理事務所ごとに異なることが表現可能となる。さらに、異質性パラメータ  $\varepsilon_j$  が平均 1、分散  $\phi$  のガンマ分布に従う確率変数であると仮定すると、点検間隔  $z_{ji}$  で点検を実施した際に、径間  $i$  に  $n_{ji}$  個の剥離・剥落が発見される無条件確率は、

$$P(n(z_{ji}) = n_{ji}) = \left( \frac{\phi}{\mu_{ji} z_{ji} + \phi} \right)^\phi \left( \frac{\mu_{ji} z_{ji}}{\mu_{ji} z_{ji} + \phi} \right)^{n_{ji}} \frac{\Gamma(\phi + n_{ji})}{n_{ji}! \Gamma(\phi)} \quad (2)$$

と表わすことができる。

**3. 実証分析**

2)により定式化された、床版コンクリートの剥離・剥落の発生過程を表現するランダム比例ポワソンモデルを点検サンプル情報に基づいて推計する。剥離・剥落の発生過程に影響を及ぼすと考えられる 9 つの特性変数を採用した。具体的には、1) 床版種別、2) 径間長、3) 橋面積、4) 床版厚、5) 交通量、6) 大型車交通量、7) 斜角最小角、8) 主桁間隔、9) 供用開始が 1983 年以前か 1984 年以降か、である。なお、これらの中には相関性が高いものが含まれている

可能性があることも付記しておく。さらに、9) に関しては設計基準やコンクリート材料の変遷の影響を考慮するために、建設年代でサンプルを区分することを考えた。具体的に、1980年から1990年まで1年刻みでサンプルを区分して、区分年の以前か、以降かを特性変数として捉え、モデル推計を行った結果、最も有意性の高い（最も  $t$ -値が高い）区分が1983年以前、1984年以降となった。

#### 4. 推計結果

3で示した9つの特性変数候補のもとで剥離・剥落過程を統計的に推計した。その際、推計値の符号条件および  $t$ -検定を行った。また、多変数を考慮した際には、モデルと実データの当てはまり具合を評価する情報量基準 AIC を算出し、AIC が最小となる推計モデルを最適モデルとして選定した。その推計結果を表-1に示す。同表において、さらに  $t$ -値を確認すると、1983年以前・1984年以降が最大となっており、これが剥離・剥落の発生過程に最も強い影響を及ぼすことが理解できる。以上のような統計分析を実施することで、剥離・剥落過程を推計できるのみならず、対象構造物群において、どのような要因が剥離・剥落の発生過程に有意な影響を及ぼすのか、さらには有意な影響を及ぼすと判定された要因の中で影響の強さに関する順位付けを定量的に行うことが可能となる。

これらのことを視覚的に理解するために、上記の推計結果を用いて、ランダム比例ポワソンモデルの分布関数を算出する。図-1に剥離・剥落発生の累積確率を示す。発生個数を5個以上と固定し、供用年数を横軸に設定した。全体的な傾向として、1983年以前に供用が開始された橋梁の床版の方が、1984年以降の床版より剥離・剥落が数多く発生することが読み取れる。この要因を設計基準の変遷等から調べると、1979年にコンクリート材料に含まれる塩化物イオンの許容含有率の基準が変更されたことによる影響が大きいものと推察される。また、床版種別（RC か、PC か）で比較を行うと、RC床版における剥離・剥落が、より高い確率で発生することも読み取ることができる。さらに、図-1においては、径間長の値として平均値である39.0mを採用している。

つぎに、管理事務所（全10箇所）ごとに異質性パラメータを算出し、10の管理事務所に関する剥離・剥落の累積確率を図-2に示す。これらは全て1983年以前に供用開始された径間長39.0mのRC床版（剥離・剥落数5個以上）を対象としているが、管理事務所単位で剥離・剥落に大きな変動が生じていることが視覚的に把握できる。管理事務所A, B, C, D, Gでは、その他の事務所と比較して、剥離・剥落の進行が相対的に早く、その傾向も大きく異なっていることが確認できる。これらの管理事務所で管理する橋梁は、その建設年代から考えて、コンクリート内の塩化物イオン濃度の規制以前の海砂を含んでいる可能性が高い。もちろん、このような事実は以前から把握されていたことではあるが、以上のような分析結果を通して、定量的な評価が可能となる。

表-1 推計結果

|        | 定数項<br>$\beta_1$ | 床版種別<br>$\beta_2$ | 径間長<br>$\beta_3$ | 1983<br>$\beta_4$ | $\phi$ |
|--------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|--------|
| 推計値    | -1.98            | 0.723             | 6.12e-03         | -1.45             | 0.852  |
| $t$ -値 | 21.5             | 13.5              | 5.84             | -37.1             | 31.8   |
| AIC    | 20045.0          |                   |                  |                   |        |

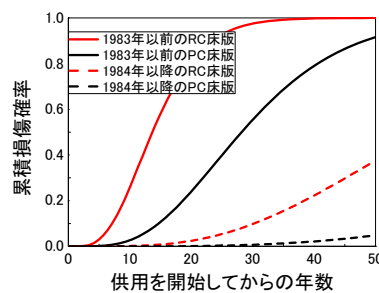


図-1 累積確率（各要因別）

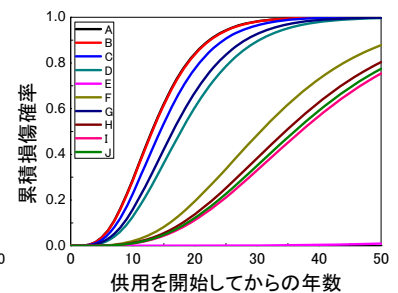


図-2 累積確率（各事務所）

#### 5. まとめ

本研究では、既存の目視点検データを用いて、橋梁床版かぶりコンクリートの剥離・剥落過程のモデル化を行った。具体的には、ランダム比例ポワソンモデルを定式化し、剥離・剥落に影響を及ぼす要因の特定を行うとともに、異質性パラメータを管理事務所ごとに設定し、各条件下における剥離・剥落の発生確率を評価した。本研究で提案したような統計分析を実施することで、目視点検データを中心とした維持管理計画の立案が可能になるだけでなく、データベースの項目としてどのような情報を優先的に記録すべきか、という議論が可能となる。さらに、最終的には、ライフサイクル費用とリスク分析を行うことにより、剥離・剥落の補修対策や優先順位に関する意志決定へと展開できるようになる。

【参考文献】 貝戸清之, 小林潔司, 加藤俊昌, 生田紀子: 道路施設の巡回頻度と障害物発生リスク, 土木学会論文集 F Vol.63, No.1, pp.16-34, 2007.