

# 論文 鉄筋腐食を考慮した RC 高欄の剥離・剥落発生予測モデル

松岡 弘大<sup>\*1</sup>・貝戸 清之<sup>\*2</sup>・徳永 宗正<sup>\*3</sup>・曾我部 正道<sup>\*4</sup>

**要旨:** 鉄筋腐食深さに基づく既存の剥離・剥落発生予測手法は多くの調査データが不可欠であるとともに、多大な不確実性を有するために複数回の調査による補正を前提としている。本研究では、実態調査データに基づき剥離・剥落発生過程を推計する方法論を提案する。具体的には鉄筋腐食深さを既存の劣化予測モデルにより推計したうえで、鉄筋腐食深さに依存した非定常ポアソン過程に従って確率的に剥離・剥落が発生するハイブリッド型剥離・剥落発生モデルを定式化する。さらに、複合劣化が懸念される RC 鉄道高架橋の高欄部材への適用を通じて、提案手法の妥当性を実証的に検証する。

**キーワード:** 非定常ポアソン発生モデル, 剥離・剥落, 複合劣化, 劣化予測, 鉄筋腐食

## 1. はじめに

構造物の劣化現象に介在する不確実性を考慮した予測手法として、目視点検情報を利用した統計的劣化予測モデルが急速な発展を遂げている。本研究で対象とするかぶりコンクリートの剥離・剥落発生予測に関してもいくつかの研究事例が存在する<sup>1)</sup>。統計的劣化予測モデルは取得した劣化情報の背後に存在する規則性をモデル化するとともに、種々の劣化因子の不確実性を考慮した劣化予測を可能とする。一方、統計モデルであるために、その精度は蓄積した劣化情報の量に大きく依存する。特に数回の点検・調査データしか存在しない場合には精度の確保は大きな課題となる。

一方、統計モデルとは異なるが、かぶりコンクリートの剥離・剥落の予測モデルは、2006年制定の鉄道構造物等維持管理標準・同解説<sup>2)</sup>(以下、維持管理標準と呼ぶ)で提案されている。当該手法は過去の研究により蓄積された理論的、経験的な知見に基づいており、剥離・剥落発生過程の将来時点における変化を鉄筋腐食深さから予測する。ただし、確定的手法であるために、安全側の仮定を設けることで剥離・剥落発生過程が有する多大な不確実性に配慮している。維持管理標準では定期的な調査によるデータの取得と予測値の補正が前提となっている。このような理論的、経験的知見に基づいた予測モデルを踏襲しながら、多大な不確実性を統計的に分析可能な方法論の構築は、より精度の高い劣化予測を可能にすると考えられる。

以上を踏まえ、本研究では、実態調査データに基づき、不確実性を考慮して剥離・剥落の発生予測を実施するための方法論を提案する。具体的には鉄筋腐食深さを維持管理標準に基づく鉄筋腐食モデルにより推計したうえで、鉄筋腐食深さに依存した非定常ポアソン

過程に従って確率的に剥離・剥落が発生するようなハイブリッド型の剥離・剥落発生過程をモデル化する。また、内的塩害と中性化による複合劣化が懸念される RC 鉄道高架橋の高欄部材への適用を通じて、提案手法の有効性を検証する。

## 2. ハイブリッド型剥離・剥落発生モデル

### 2.1 モデル化の前提条件

かぶりコンクリートの剥離・剥落発生過程のモデル化に際しては、実態調査により取得した剥離・剥落数、かぶり、初期塩化物イオン濃度、中性化深さ、鉄筋径といった情報を1回以上取得していることを前提とする。また、剥離・剥落の有無の評価は図-1に示すようにコンクリート表面をいくつかのメッシュ単位に分割して判定する。また、それ以外の情報(かぶり、初期塩化物イオン濃度など)は任意の数のメッシュを結合したメッシュ集合単位で使用可能であるものとする。メッシュ分割の詳細は3. 適用事例で述べる。以下ではそれらの調査データを利用して、剥離・剥落の発生数(メッシュ数)を予測する方法論を展開する。2.2で鉄筋腐食の進行を表現するためのモデル(鉄筋腐食モデル)について、2.3で剥離・剥落の発生過程を表現するためのモデル(ポアソン発生モデル)について、それぞれ説明したうえで、2.4でそれらを有機的に結合させたモデル(ハイブリッド型剥離・剥落発生モデル)を導出する。

### 2.2 鉄筋腐食モデル

表-1に鉄道維持管理標準に示されている中性化と初期塩化物イオンによる複合劣化の劣化予測モデルを示す。表-1には後に適用する RC 高欄に合わせて複合劣化の劣化予測モデルを示しているが、適用対象に合

\*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 博士後期課程(学生会員)

\*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 准教授 博士(工学)(正会員)

\*3 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 研究員 工修(正会員)

\*4 公益財団法人 鉄道総合技術研究所 鉄道力学研究部 主任研究員 博士(工学)(正会員)

わけて中性化や外的塩害の劣化モデルに変更することができる。これ以降、複合劣化の劣化モデルを鉄筋腐食モデルと呼ぶ。本モデルでは既往の研究<sup>3)</sup>に基づき変状過程ごとに腐食速度  $dr/dt$  と、過程の終了時の腐食深さ  $\Delta r$  が定められている。内的塩害が進行している構造物でも中性化残り（かぶりから中性化深さを引いた値）が 25mm を下回った時点で内的塩害と中性化による複合劣化へと移行する。なお、表-1 中にはひび割れ、および剥離・剥落の発生限界が示されているが、1. で述べた通り多大な不確実性を有するために、本研究では各期の腐食速度のみを利用し、剥離・剥落の発生過程の評価には後述の確率モデルを用いる。

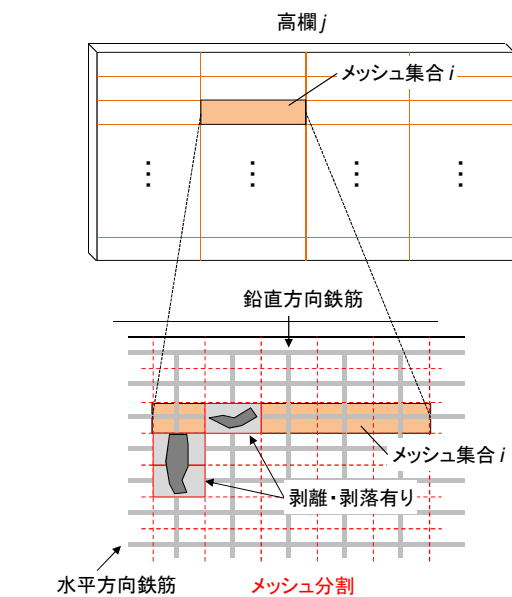


図-1 メッシュ分割(評価単位)と剥離・剥落評価

表-1 鉄筋腐食モデル<sup>1)</sup>(複合劣化)

各期終了時の鉄筋腐食深さ $\Delta r$ (mm)	鉄筋の腐食速度 $dr/dt$ (mm/年)
潜伏期 中性化残り $Y \leq 25\text{mm}$ (初期塩化物イオン濃度 $1.2\text{kg/m}^3$ 以上は潜伏期なし)	0.0
進展期 ひび割れ発生 $\Delta r_{cr} = 13(c/\phi) \times 10^{-3}$	中性化残り $Y > 25\text{mm}$ かつ $Cl^- \geq 1.2\text{kg/m}^3$ $\frac{dr}{dt} = \frac{10^{-3}}{\sqrt{c}} (7.70Cl^- + 0.503W/C - 40.6)$ $1.0 \times 10^{-3} \leq dr/dt \leq 8.0 \times 10^{-3}$
加速期前期 剥離・剥落発生 $\Delta r_{sp} = 56(c/\phi) \times 10^{-3}$	中性化残り $Y \leq 25\text{mm}$ かつ $Cl^- \geq 0.6\text{kg/m}^3$ $\frac{dr}{dt} = \frac{10^{-3}}{\sqrt{c}} (19.34Cl^- + 0.748W/C - 49.4)$ $3.0 \times 10^{-3} \leq dr/dt \leq 8.0 \times 10^{-3}$

c: かぶり (mm),  $\phi$ : 鉄筋径 (mm), W/C: 水セメント比,  $Cl^-$ : 初期塩化物イオン濃度,  $\Delta r_{cr}$ : ひび割れ発生腐食深さ,  $\Delta r_{sp}$ : 剥離・剥落発生腐食深さ

いま、図-2 に示すようにあるメッシュ集合  $i$  について時刻  $\tau_A$  ( $0 \leq \tau_A$ ) と時刻  $\tau_B$  ( $\tau_A \leq \tau_B$ ) で実態調査が実施されている場合を考える。また、メッシュ集合内の鉄筋はいずれも同じ腐食過程に従うと仮定する。時刻  $\tau_A$  から時刻  $\tau_B$  までにメッシュ集合  $i$  の各鉄筋に生じる鉄筋腐食の深さ  $\Delta r_i(\tau_B, \tau_A)$  は、

$$\Delta r_i(\tau_B, \tau_A) = \int_{\tau_A}^{\tau_B} \frac{dr(Cl^-, W/C_i, Y_i(u))}{dt} u du \quad (1)$$

と表すことができる<sup>1)</sup>。なお、メッシュ集合  $i$  の中性化残り  $Y_i$ 、および水セメント比  $W/C_i$  は、

$$Y_i(\tau) = c_i - \alpha_i \sqrt{\tau} \quad (2)$$

$$W/C_i = \left( \frac{\alpha_i}{1.1\gamma_{cb}\beta_e\gamma_c} + 3.57 \right) / 9.0 \quad (3)$$

として、中性化深さ  $y_i = \alpha_i \sqrt{\tau}$  に基づいて算出できる。なお、 $u$  は任意時間 (年),  $\tau$  は供用開始からの経過時間 (年),  $\alpha_i$  はメッシュ集合  $i$  の中性化速度係数 (mm/ $\sqrt{\text{年}}$ ),  $\gamma_{cb}$  は推計値のばらつきを考慮する係数 (=1.15),  $\beta_e$  は環境の影響の程度を表す係数 (=1.6),  $\gamma_c$  はコンクリートの材料係数 (=1.0) である。各係数は既往の研究<sup>3), 4)</sup>に示されている値を用いることができる。

### 2.3 ポアソン発生モデル

まず定常ポアソンモデル<sup>1)</sup>を定式化する。いま、簡単のために、実態調査を通して剥離・剥落が発見されれば、直ちに補修されると考える。 $\tau_A$  に着目すれば、この時点で剥離・剥落は存在しない。その後の時間の経過に伴い、例えば、図-2 においては時刻  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$  にコンクリートの浮きなどの不具合（潜在的な剥離・剥落要因）が生じている。しかし、実態調査では個々の不具合が発生した時刻 ( $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ ) を把握することはできない。時刻  $\tau_B$  で実態調査を行い、ハンマー等でコンクリートをたたき落とすことで、調査間隔  $[\tau_A, \tau_B]$  に発生した剥離・剥落の総数が  $n$  個であったという情報のみをメッシュ集合ごとに取得することができる。

いま、図-2 に示すように、メッシュ集合  $i$  に対して時刻  $\tau_A$  と  $\tau_B$  ( $\tau_B > \tau_A$ ) という 2 時点で調査が行われた

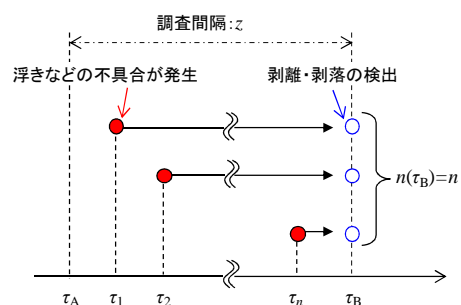


図-2 剥離・剥落の発生過程

と考える。調査間隔は  $z_i = \tau_B - \tau_A$  である。また、時刻  $\tau_A$  の調査直後の時刻では、剥離・剥落の数は 0 となる。ここで、時刻  $\tau_B$  に調査を実施した時に、メッシュ集合  $i$  において、 $n_i$  個の剥離・剥落が発見される確率  $Po$  がポアソン分布に従うと仮定すると、

$$Po(n(z_i) = n_i | \lambda_i) = \frac{(\lambda_i z_i)^{n_i}}{n_i!} \exp(-\lambda_i z_i) \quad (4)$$

と表現できる。なお、 $\lambda_i$  は到着率と呼ばれる制御パラメータである。また、平均値関数  $\Lambda_i$  を

$$\Lambda_i = \lambda_i z_i \quad (5)$$

と定義する。 $\Lambda_i$  は調査期間  $z_i$  の間にメッシュ集合  $i$  で発生する剥離・剥落の平均個数を表す。式(4)は(定常)ポアソン発生モデル<sup>1)</sup>と呼ばれる。式中の  $n_i$ ,  $z_i$  は既知であり、剥離・剥落の到着率を表す  $\lambda_i$  のみが未知パラメータとなる。

一方で、剥離・剥落の主要因が鉄筋腐食であることを考えると、到着率  $\lambda_i$  が時間に依存せず一定値を取るとは考えにくい。そこでポアソン発生モデルを非定常へ拡張するとともに鉄筋腐食モデルを組み込む。到着率  $\lambda_i$  が時間に依存して変化する場合、

$$\lambda_i = \lambda_i(t) \quad (6)$$

となる。 $\lambda_i(t)$  が  $[0, t]$  で積分可能ならば、平均値関数は、

$$\Lambda_i(t) = \int_0^t \lambda_i(u) du \quad (7)$$

により定義できる。これは  $\lambda_i$  が単位時間当たりの発生個数を表すためである。ここで再び、図-2 に示すように、メッシュ集合  $i$  に対して時刻  $\tau_A$  と  $\tau_B$  ( $\tau_B > \tau_A$ ) で調査が行われたと考える。このとき、時刻  $\tau_B$  にメッシュ集合  $i$  で  $n_i$  個の剥離・剥落が観測される確率は、

$$Po(n(\tau_B) - n(\tau_A) = n_i | \lambda_i(t)) = \frac{[\Lambda_i(\tau_B) - \Lambda_i(\tau_A)]^{n_i}}{n_i!} \exp\{-\Lambda_i(\tau_B) + \Lambda_i(\tau_A)\} \quad (8)$$

と導出できる。式(8)は定常ポアソン発生モデルを拡張した非定常ポアソン発生モデルである。

## 2.4 ハイブリッド型剥離・剥落発生モデル

さらに、剥離・剥落発生数の鉄筋腐食深さへの依存性を考慮した到着率を

$$\lambda_i(t) = \varphi_i \cdot \Delta r_i(t) \quad (9)$$

と定義する。 $\Delta r_i(t)$  は鉄筋腐食深さ(式(1))である。なお、 $\varphi_i$  は到着率のうちで時間に依存しない成分を表すがこれについては後に詳述する。式(7)~(9)より、時刻  $\tau_B$  にメッシュ集合  $i$  で  $n_i$  個の剥離・剥落が観測される確率は、

$$Po(n(\tau_B) - n(\tau_A) = n_i | \varphi_i, \Delta r_i(t)) = \frac{(\varphi_i \int_{\tau_A}^{\tau_B} \Delta r_i(u) du)^{n_i}}{n_i!} \exp(-\varphi_i \int_{\tau_A}^{\tau_B} \Delta r_i(u) du) \quad (10)$$

と定式化される。式(10)より明らかなように、剥離・剥落の発生過程は鉄筋腐食深さを制御パラメータを持つ非定常ポアソン発生過程としてモデル化される。本研究では式(10)を鉄筋腐食モデルと非定常ポアソン発生モデルの混合モデルという意味でハイブリッド型剥離・剥落発生モデルと呼ぶ。なお、当該モデルにおいて、調査期間  $[\tau_A, \tau_B]$  の間にメッシュ集合  $i$  で発生する剥離・剥落数の期待値  $E[n_i | \Delta r_i(t)]$  と分散  $V[n_i | \Delta r_i(t)]$  を以下に示す。

$$E[n_i | \Delta r_i(t)] = \varphi_i \int_{\tau_A}^{\tau_B} \Delta r_i(u) du \quad (11a)$$

$$V[n_i | \Delta r_i(t)] = \varphi_i \int_{\tau_A}^{\tau_B} \Delta r_i(u) du \quad (11b)$$

図-2 では実態調査を 2 回実施していることを前提としている。一方で、本研究のように実態調査を 1 回しか実施していない場合でも、 $\tau_A=0$  とすることで、本モデルを適用可能である。この場合、式(10)は、

$$Po(n(\tau_B) = n_i | \varphi_i, \Delta r_i(t)) = \frac{(\varphi_i \int_0^{\tau_B} \Delta r_i(u) du)^{n_i}}{n_i!} \exp(-\varphi_i \int_0^{\tau_B} \Delta r_i(u) du) \quad (12)$$

となる。

剥離・剥落の発生は鉄筋腐食に大きく依存するものの、1. で述べたように多大な不確実性が介在している。そこで、種々の要因が剥離・剥落の発生過程に及ぼす影響をハイブリッド型剥離・剥落発生モデルとともに実データから推計する。いま、各種発生要因の影響により到着率  $\varphi_i$  が変動すると考える。具体的には、

$$\varphi_i = \varphi(x_i, \beta) = \exp(x_i \beta^T) \quad (13)$$

と定義する。ここで、 $x_i$  はメッシュ集合  $i$  の説明変数  $x_i^m$  ( $m = 1, \dots, M$ ) を要素とする行ベクトルで特性変数と呼ぶ。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、かぶり、中性化深さなど)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。なお、記号「 $\cdot$ 」は転置操作を表す。以上から明らかなように、到着率  $\varphi_i$  の推計問題は、 $\beta_m$  の推計問題に帰着されることとなる。なお、 $\beta_m$  は鉄筋腐食深さでは表現することができない剥離・剥落発生過程の不確実性を表現している。

## 2.5 モデルの推計

時点  $\tau$  において実施した実態調査により合計  $K$  個の調査サンプルが得られたとする。調査サンプル  $k$  ( $k=1, \dots, K$ ) の情報  $e^k$  を、

$$e^k = (n^k, \tau^k, \tau^{*k}, X_{i(k)}, \cdot) \quad (14)$$

と表す。なお、前回調査時点は  $\tau'$  であった。また、 $i(k)$  は、調査サンプル  $k$  のデータが対象とするメッシュ集合の ID を表す。また、 $n^k$  は観測された剥離・剥落の

個数, データ集合  $X_{i(k)}$  は, 鉄筋腐食モデルの推計に必要なかぶり  $c_i$ , 中性化深さ  $y_i$ , 初期塩化物イオン濃度 CI で構成される部分データ集合  $x'_{i(k)}$  と, 特性変数によって構成される部分データ集合  $x_{i(k)}$  を合わせた調査データ集合である。まず鉄筋腐食モデルにより鉄筋腐食深さの推計を行う。鉄筋腐食深さは鉄筋腐食モデル (表-1) に部分データ集合  $x'_{i(k)}$  を代入することで一意に推計できる。したがって, 得られた鉄筋腐食深さの推計値  $\Delta \hat{r}_i(t)$  を含む調査サンプルを, 新たに

$$\tilde{\epsilon}^k = (n^k, \tau^k, \tau'^k, x_{i(k)}, \Delta \hat{r}_i(t)) \quad (15)$$

と定義する。このとき, 調査サンプル  $k$  の実測値  $\tilde{\epsilon}^k$  が生起する条件付き確率 (非定常ポアソン発生モデルの対数尤度関数) は,

$$\ln\{L(\beta; \tilde{\epsilon})\} = \ln \prod_{k=1}^K \ell(\beta; \tilde{\epsilon}^k) \quad (16)$$

$$= \kappa + \sum_{k=1}^K \bar{n}^k \ln\{\phi(x_{i(k)}, \beta)\} - \sum_{k=1}^K \phi(x_{i(k)}, \beta) \int_{\tau_A}^{\tau_B} \Delta r_i(u) du$$

と表わされる。ただし,  $\tilde{\epsilon} = \{\tilde{\epsilon}^k (k=1, \dots, K)\}$  である。また,

$$\kappa = \sum_{k=1}^K \left\{ \bar{n}^k \ln \left( \int_{\tau_A}^{\tau_B} \Delta r_i(u) du \right) - \ln \bar{n}^k! \right\} \quad (17)$$

は定数項であり無視し得る。対数尤度関数, 式(16)を最大にするようなパラメータ  $\beta$  の最尤推計量は,

$$\frac{\partial \ln L(\hat{\beta}; \tilde{\epsilon})}{\partial \beta_m} = 0 \quad (m=1, \dots, M) \quad (18)$$

を満足するようなパラメータとして与えられる。最適化条件は  $M$  次の連立線形方程式であり, たとえば, ニュートン法を基本とする逐次反復法を用いて解くことができる。また, 最適な特性変数  $x_i^m$  の選定にあたっては, 以下で定義される AIC (赤池情報量基準) を用いてもっとも説明力の高い特性変数の組合せを選択することができる。なお, AIC は小さいほどモデルの予測能力が高いことを表す。

$$AIC = -2 \ln L(\hat{\beta}; \tilde{\epsilon}) + 2M \quad (19)$$

### 3. 適用事例

#### 3.1 実態調査データ

2. で定式化したハイブリッド型剥離・剥落発生モデルを, 実際の実態調査データへ適用する。実態調査は文献<sup>3)</sup>で詳述されているが, 適用に際して以下にその概要を述べる。表-2 には実態調査データの内訳を示す。調査構造物はいずれも海岸から数 km 以内に位置する路線 A, B の RC 鉄道高架橋の高欄 13 枚である。高欄は竣工から 27 (路線 A), 25 (路線 B) 年経過している。劣化要因を俯瞰的に把握するために, 図-3 に対象高欄の調査時点での中性化残り と 初期塩化物イオン濃度の関係を示す。いずれの高欄でも内的塩害と

表-2 実態調査データの内訳

	路線 A	路線 B	総数
供用年数 (年)	27	25	
総メッシュ数	4,354	1,855	6,209
総メッシュ集合	548	232	780
剥離・剥落総数	342	110	452
平均剥離・剥落数	0.62	0.47	0.58

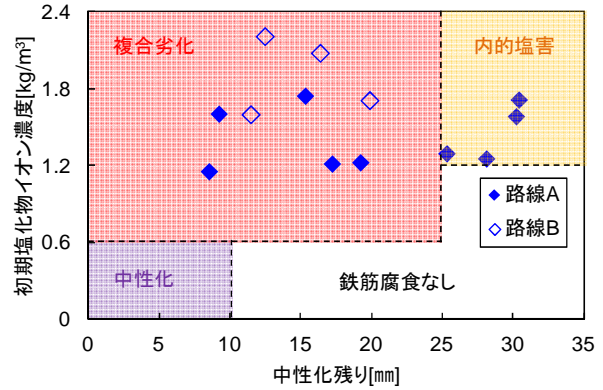


図-3 対象高欄の鉄筋腐食要因

中性化による複合劣化が主な劣化要因であると推測される。なお, 塩化物イオン濃度, 中性化深さ, かぶりは高欄ごとに代表的に調査された値を集計して示している。メッシュは図-1 に示すコンクリート表面 (内面) を鉛直方向鉄筋と水平方向鉄筋を含む赤点線で区切ることで形成した。剥離・剥落の有無は各メッシュに対して判定している。13 枚の高欄を対象とした実態調査により, 合計で 6,209 メッシュに関する剥離・剥落の有無, かぶりの情報が得られている。評価単位となるメッシュ集合については, 代表的に実施した初期塩化物イオン濃度と中性化深さの調査<sup>3)</sup>に合わせて, 隣接する 7~9 メッシュにより構成している (図-1)。これにより, 高欄を橋軸方向に 4 分割, 鉛直方向に 15~17 分割としたメッシュ集合が最小単位となる。なお, かぶりは 3 本の水平方向鉄筋に沿ったメッシュで測定されているが, それ以外のメッシュでは 2 次関数補間により算出した<sup>3)</sup>。また初期塩化物イオン濃度と中性化深さの測定値が存在しないメッシュ集合では, 最も近傍の測定値を代用した。

実態調査を通して取得した調査サンプルは, 式 (14) のようにメッシュ集合ごとの剥離・剥落の発生総数  $n^k$ , 調査時点  $\tau^k$ , 調査データ集合  $X_{i(k)}$  という情報を含む。得られた調査データ集合  $X_{i(k)}$  を構成するデータのうちで, 非定常ポアソン発生モデルの特性変数  $x_{i(k)}$  について説明する。本研究では高欄のかぶりコンクリートの剥離・剥落の発生に影響を及ぼすと考えられた 3 つの変数と, メッシュ集合の設定に起因するバイアスを補正するための 2 つの変数を採用した。具体的には, 1)

かぶり, 2) 初期塩化物イオン濃度, 3) 中性化深さ, 4) (メッシュ集合の) 高さ, 5) (メッシュ集合中の) 鉄筋数, である。また, ポアソン発生モデルの推計に際しては定数項として  $x_1$  (常に  $x_1=1$ ) を用いるとともに, 各特性変数は最大値が 1 となるように基準化している。

### 3.2 鉄筋腐食深さ $\Delta r_i(t)$ の推計

調査サンプルに基づき 2.4 で述べた方法によって各メッシュ集合の鉄筋腐食深さ  $\Delta r_i(t)$  を推計した。例として高欄 A-3 の 5 つのメッシュ集合 ( $i=121, 136, 137, 144, 165$ ) の推計結果を図-4 に, 推計に利用した調査データを表-3 にそれぞれ示す。図-4 からいずれのメッシュ集合の鉄筋も時間の経過とともに腐食が進行するが, その進行速度は影響因子に依存して変動することがわかる。例えば供用開始から 27 年が経過した時点の鉄筋腐食深さの推計値がもっとも大きい ID-121 (赤線) のメッシュ集合では, 被りが 23.2mm と少ないうえに, 初期塩化物イオン濃度が内的塩害の閾値を超えており, 中性化速度係数も大きい。また, ID-136 (橙線) と ID-137 (黄緑線) はかぶり以外のデータが同じであるが, かぶりの小さい ID-136 (橙線) では供用から 8 年程度で内的塩害から内的塩害と中性化による複合劣化に移行している。ID-137 (黄緑線) の推計値に着目すると, 実態調査を実施した 27 年以降の 33 年で複合劣化へと移行している。したがって, 調査時点までのデータのみを利用するポアソン発生モデルでは, 33 年以降を危険側に評価する可能性があることを示唆している。理論的, 経験的知見に基づき構成された鉄筋腐食モデルを内包することにより, ID-137 (黄緑線) のような将来時点での鉄筋腐食速度の加速情報を剥離・剥落発生予測に反映することができる。

同様にすべてのメッシュ集合について鉄筋腐食深さ  $\Delta r_i(t)$  を推計し, 非定常ポアソン発生モデルの推計用調査サンプル (式(15)) を作成した。

### 3.3 非定常ポアソン発生モデルの推計

前節で作成した調査サンプル (式(15)) に基づき 2.4 の方法によって非定常ポアソン発生モデルを推計した。本研究においては, 4 つの説明変数を同時に考慮したモデルが AIC を最小とする最適モデルであった。推計結果を表-4 に示す。なお, 表中に示す  $\beta$  の推計値の多寡は, 剥離・剥落過程に対する説明変数の寄与度を,  $t$ -値は説明変数の剥離・剥落過程に対する説明力を表す指標 (説明変数として採用するか否かの判断指標) である。 $t$ -値に関しては, 採用しようとする説明変数が有意でないという帰無仮説を有意水準 95% で棄却される臨界値が 1.96 である。表-4 に示す通り, いずれの説明変数においても  $t$ -値は絶対値で 1.96 を上回っており, 説明変数として採用するに値することがわかる。

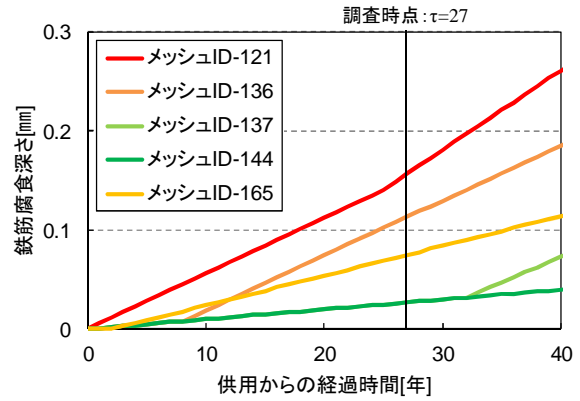


図-4 鉄筋腐食深さ  $\Delta r_i(t)$  の推計結果の例 (高欄 A-3)

表-3 推計に用いた調査データの例 (高欄 A-3)

メッシュ集合 ID	かぶり [mm]	初期塩化物イオン濃度 [kg/m <sup>3</sup> ]	中性化深さ [mm]	中性化速度係数 [mm/√年]
$i$	$c_i$	$Cl$	$y_i(27)$	$\alpha_i$
121	23.2	1.52	12.2	2.35
136	31.8	1.77	11.5	2.21
137	37.8	1.77	11.5	2.21
144	52.3	1.45	10.3	1.98
165	28.8	1.10	10.1	1.94

また, 特性変数の組合せが異なるモデルの例として, 最適モデルからかぶりと除去したモデルの AIC を AIC\*として併せて示している。最適モデルの方が AIC を小さく, 観測データをより説明できている。さらに, 同表には鉄筋腐食深さを考慮しない (ハイブリッド型ではない) 場合のポアソン発生モデル (式(4)) の AIC を AIC\*\*として示している。特性変数の組合せは最適モデルと同じであるが, ハイブリッド型剥離・剥落発生モデルの方が AIC が小さくなっている。したがって, ハイブリッド型剥離・剥落発生モデルは, 将来時点の情報を鉄筋腐食モデルにより予測できるだけでなく, 現時点までの剥離・剥落発生過程の評価という観点でも, 定常ポアソン発生モデルと比較して優れていることがわかる。

### 3.3 推計モデルの利用

表-4 の推計結果により, 推計モデルの鉄筋腐食深さに対するポアソン到着率は,

$$\begin{aligned} \varphi_i &= \exp(x_i \beta) \\ &= \exp(0.076 - 0.142x_2 + 0.093x_3 - 1.048x_4 + 0.337x_5) \end{aligned} \quad (20)$$

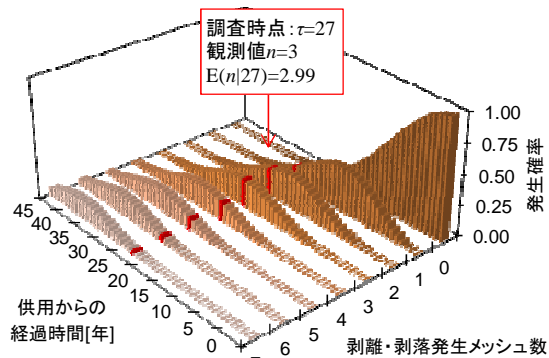
として与えられる。このとき, 式(12)に基づきポアソン分布を算出する。同式より明らかなように, 説明変数, 調査期間を任意に設定することにより, 様々な高欄の剥離・剥落発生過程のモデル化が可能である。ここでは, ハイブリッド型剥離・剥落発生モデルの特徴を把握するために, 高欄 A-3 (平均かぶり 37.1, 平均



表一4 非定常ポアソンモデルの推計結果（最適モデル）

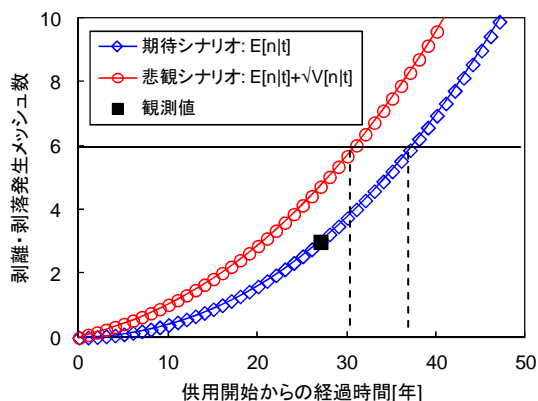
	定数項 $\beta_1$	かぶり $x_2$ $\beta_2$	中性化深さ $x_3$ $\beta_3$	塩化物イオン濃度 $x_4$ $\beta_4$	鉄筋数 $x_5$ $\beta_5$
推計値	0.076	-0.142	0.093	-1.048	0.337
t-値	-	-17.68	3.08	-7.29	4.18
AIC	1134.4				
AIC*	1142.3				
AIC**	1190.5				

t-値は各特性変数が有意でないという帰無仮説に対する検定統計量、AIC\*は最適モデルから中性化深さを除去して推計した場合のAIC、AIC\*\*は鉄筋腐食深さを考慮しない定常ポアソン発生モデル（式(4)）を最適モデルと同じ特性変数で推計した場合のAICをそれぞれ表す。



図一5 調査データと推計結果の例

(各変数には高欄 A-3 の平均値を用いている。)



図一6 剥離・剥落過程の確実性と予測値（高欄 A-3）

中性化深さ 8.80, 平均初期塩化物イオン濃度 1.25, 平均鉄筋数 8, 鉄筋腐食深さは各メッシュごとに算出した鉄筋腐食深さの平均値を適用) を例として取りあげる。図一5 は高欄 A-3 を対象とした非定常ポアソン分布を示す。供用開始時付近では剥離・剥落が発生しない（発生メッシュ数 0 の）確率が最も大きい、時間の経過とともに剥離・剥落発生数の大きい方へとピークが移行していく様子を確認できる。さらに、図中には調査時点のポアソン分布を赤で示しているが、観測値（3 個）と推計モデルの期待値（2.99 個）がよく一致している。また、時間の経過とともにポアソン分布のピークが小さく、裾野が広がっていることも確認できる。確率モデルを用いることでこのような不確実性を評価できる。図一6 ではこのような不確実性に起因するリスクを考慮した劣化予測の一例を示す。同図

には期待シナリオ（式(11a)）と期待シナリオに標準偏差（分散（式(11b)）の平方根）を加えた悲観シナリオを示している。たとえば、図中に黒線で示す剥離・剥落数を 6 個以内に抑えるといった管理水準を設定することで、期待シナリオにより平均的な到達時刻が約 37 年であることがわかる。一方で、悲観シナリオでは、到達時刻は約 30 年となっている。剥離・剥落過程の不確実性を考慮することによってリスクマネジメントの観点から点検や補修の実施時期を議論が可能である。

## 5. おわりに

本研究では、実態調査データに基づいて不確実性を考慮した剥離・剥落の発生予測を実施するための方法論の構築を目的として、鉄筋腐食モデルと非定常ポアソン発生モデルを連動させたハイブリッド型剥離・剥落発生モデルを提案した。さらに、中性化と内的塩害の複合劣化が懸念される RC 鉄道高架橋の高欄部材を対象に実施された実態調査データへの適用を通じて、提案モデルにより、将来時点の鉄筋腐食速度の増加を考慮した予測が可能であるとともに、調査時点までの剥離・剥落発生過程を定常ポアソン発生モデルよりも説明できることを確認した。提案した方法論を用いることで、どの程度の不確実性を考慮して維持管理水準を設定するのか、という議論が可能となる。

## 参考文献

- 1) 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.
- 2) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）コンクリート構造物, 丸善, 2007.
- 3) 曾我部正道, 谷村幸裕, 松橋宏治, 宇野匡和: 鉄道高架橋の RC 高欄の変状調査とその劣化予測, コンクリート工学, Vol.47, No.8, pp.16-24, 2009.
- 4) 松本光矢, 曾我部正道, 轟俊太郎, 谷村幸裕: 内的塩害と中性化の複合劣化を対象とした劣化予測に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp.1423-1428, 2010.