

論文 複合劣化による RC 部材の剥離・剥落に関する統計分析

仁平 達也*¹・松岡 弘大*²・貝戸 清之*³・轟 俊太郎*⁴

要旨：本研究では、内在塩分に起因する塩害（以下、内的塩害）と中性化による複合劣化が懸念される RC 鉄道高架橋の柱・高欄部材を対象に、かぶりコンクリートの剥離・剥落過程を定式化するとともに、劣化要因を統計的に分析する。具体的には、剥離・剥落過程をポアソン発生モデルで表現した上で、実態調査データを用いたモデルの推計手法を提示する。このとき、劣化進展速度を規定するポアソン到着率に、実態調査を通して獲得できる情報を説明変数として内包させることで、それが剥離・剥落過程に及ぼす影響を分析する。さらに、維持管理標準の劣化予測モデルとの比較を通じて、提案手法の妥当性を実証的に検証する。

キーワード：ポアソン発生モデル、剥離・剥落、複合劣化、かぶり、劣化予測

1. はじめに

構造物管理者は、管理対象となる構造物を常時良好な状態に保つよう努めなければならない。このために、管理者は定期的に構造物を目視点検し、安全の確保に努めている。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。

このような観点から、RC 鉄道高架橋に対しても 2006 年制定の鉄道構造物等維持管理標準・同解説¹⁾（以下、維持管理標準と呼ぶ）では鉄筋の腐食速度に基づく剥離・剥落過程の発生予測手法が提案されている。しかし、本手法はあくまで安全側の仮定に基づき設定されているために、適時補正が必要となっている。

一方で、取得した劣化情報の背後に存在する規則性に着目した統計的劣化予測手法が長足の進歩を遂げている。特に、これまで蓄積してきた目視点検データを利用した劣化予測は、維持管理シミュレーションと連動させることで、意思決定プロセスの視覚化に大きく貢献できる。さらに、統計的手法を用いることで、劣化予測のみならず、劣化過程に影響を及ぼす要因に関する分析が可能となる²⁾。このような統計的劣化予測手法は、蓄積された目視点検データなど、現状で手元にあるデータによって最適な劣化予測モデルを作成することを念頭に開発が進められてきた。一方で、今後、より精度の高い劣化予測を実施していくためには、手法の高度化は言うに及ばず、実態調査を通じて取得すべき情報（点検項目）を選定するなど、統計的劣化予測結果の実務へのフィードバックが重要となる。

本研究では、内的塩害と中性化による複合劣化が主

な劣化要因と推定される RC 鉄道高架橋の柱、および高欄部材における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・剥落過程をポアソン過程としてモデル化する。また、実態調査により把握した各 RC 部材のかぶりコンクリート厚さ（以下、単にかぶりと表記）をポアソン到着率の説明変数として採用することで、剥離・剥落過程に及ぼす影響を明らかにする。RC 構造物のかぶりは剥離・剥落の発生に多大な影響を与えるとされているが、通常の定期点検では取得されていない情報である。本研究では、このかぶり情報を含む、文献 3)、4) に示される実態調査データを用いてポアソン発生モデルを推計し、対象とする RC 鉄道高架橋の柱と高欄のかぶりコンクリートの剥離・剥落発生確率、および剥離・剥落の発生要因に関する分析を行う。以下、2. で剥離・剥落に対するポアソン発生モデルの定式化と推計手法について説明する。3. で RC 鉄道高架橋の柱・高欄を対象とした適用事例を述べるとともに、4. 維持管理標準で提案されている劣化予測手法との比較を行う。

2. ポアソン発生モデル

2.1 モデル化における前提条件

本研究で対象とするかぶりコンクリートの剥離・剥落は通常の定期点検とともに次章で述べる実態調査により得られる情報である。剥離・剥落に対する維持管理を行う上では、対象とする部材のコンクリート表面における剥離・剥落発生率を算出するのが重要となる。これに対して、本研究では対象とする部材表面を任意のメッシュに分割するとともに、複数のメッシュにより構成されるメッシュ集合内において、剥離・剥落が

*1 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 副主任研究員 工修（正会員）

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 博士課程（正会員）

*3 大阪大学大学院 工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点 特任講師 博士（工学）（正会員）

*4 財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究員 工修（正会員）

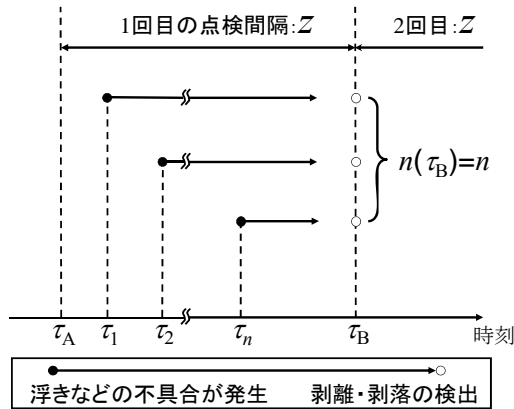


図-1 剝離・剝落の発生過程

発生しているメッシュ数を算出することで、最終的に剝離・剝離発生率を評価することを考える。当然ながら、剝離・剝離発生率の算出プロセスにおいては、剝離・剝落の発生過程をモデル化することが重要となる。

いま、図-1 に任意のメッシュ集合を対象とした剝離・剝落の発生過程と調査スキームを図示している。時刻 t はカレンダー上の実時刻を表す。以下、実時刻のことを「時刻」と呼ぶ。同図の時刻 τ_A , τ_B において、実態調査が実施されている。ある点検時刻から次の点検時刻までの期間を点検間隔 z と定義する。簡単のために、実態調査を通して剝離・剝落が発見されれば、直ちに補修されると考える。 τ_A に着目すれば、この時点で剝離・剝落は存在しない。しかし、時間の経過とともに、例えば、同図においては時刻 $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ にコンクリートの浮きなどの不具合（潜在的な剝離・剝落要因）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 τ_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により、点検間隔 $[\tau_A, \tau_B]$ の間に発生した剝離・剝落の総数が 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。本研究では、このような剝離・剝落が一定の到着率 λ でポアソン到着する場合を考える。

2.2 モデルの定式化

いま、図-1 に示すように、メッシュ集合 i に対して時刻 τ_A と τ_B ($\tau_B > \tau_A$) という 2 時点で点検が行われたと考える。点検間隔は $z_i = \tau_B - \tau_A$ である。また、時刻 τ_A の点検直後の時刻では、剝離・剝落の数は 0 となる。ここで、時刻 τ_B に点検を実施した時に、メッシュ集合 i において、 n_i 個の剝離・剝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、

$$Po(n(z_i) = n_i | \lambda_i) = \frac{(\lambda_i z_i)^{n_i}}{n_i!} \exp(-\lambda_i z_i) \quad (1)$$

と表される。以下、式 (1) をポアソン発生モデル¹⁾

と呼ぶ。式中の n_i, z_i は既知であり、剝離・剝落の到着率を表す λ_i のみが未知パラメータとなる。したがって、剝離・剝落過程の記述は、未知パラメータ λ_i を推計することによって達成される。その一方で、剝離・剝落の発生過程は種々の要因により大きく異なると考えられる。そこで、各種の要因が剝離・剝落に及ぼす影響をポアソン発生モデルとともに実データから推計することを考える。いま、各種発生要因の影響により到着率が変動すると考える。具体的には、到着率を

$$\lambda_i = \lambda(x_i, \beta) = \exp(x_i \beta') \quad (2)$$

と仮定する。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あり、説明変数は剝離・剝落の発生過程に影響を及ぼす要因(例えば、かぶり、部材種別、メッシュ集合の面積など)である。また、 β は未知パラメータであり、 β_m ($m = 1, \dots, M$) を要素とする行ベクトルである。なお、記号「 $'$ 」は転置操作を表す。式 (2) は指数関数形を用いており、これにより到着率は非負の値をとる。さらに、式 (2) から理解できるように、説明変数で表される各種要因 x_i^m の影響は対応する β^m を介して到着率に反映される。以上から明らかなように、到着率 λ_i の推計問題は、 β^m の推計問題に帰着されることとなる。さらに、未知パラメータの数は採用した説明変数の数だけ増加することになるので、「説明変数 x_i^m の選定」と「 β^m の推計」が重要な課題であるといえる。

また、初期時点 τ_A から点検間隔である z_i の経過後に、メッシュ集合 i で把握することができる剝離・剝落の期待値 $E[n_i | z_i]$ と分散 $V[n_i | z_i]$ は、

$$E[n_i | z_i] = \lambda(x_i, \beta) z_i \quad (3a)$$

$$V[n_i | z_i] = \lambda(x_i, \beta) z_i \quad (3b)$$

と表される。ポアソン発生モデルを用いた場合、剝離・剝落数の期待値と分散は一致する。

なお、図-1 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。本研究で対象とするような実態調査が 1 回しか実施されていない場合であっても、 τ_A を供用開始時点（供用開始時点において剝離・剝落数は 0）と設定することで、ポアソン発生モデルが適用可能となる。

2.3 ポアソン発生モデルの推計

実態調査により剝離・剝落に関する情報を取得できる。調査の結果、合計 K 個の調査サンプル情報が得られたとする。調査サンプル k ($k = 1, \dots, K$) の情報 e^k を

$$e^k = (n^k, z^k, x_{i(k)}) \quad (4)$$

表-1 実態調査データの概要

	柱	高欄
竣工年	1976	1979, 1980
総部材数	28	19
総メッシュ数	22,795	18,055
採用メッシュ数	6,070	3,610
総メッシュ集合数	607	361
剥離・剥落数	609	866
平均剥離・剥落数	1.00	2.40

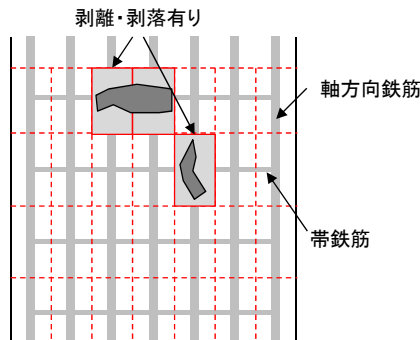


図-2 メッシュ分割（評価単位）と剥離・剥落評価

と表す。ここに、 $i(k)$ 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、 z^k は点検間隔、 $x_{i(k)}$ はメッシュ集合 $i(k)$ の特性ベクトルを表す。このとき、調査サンプル k の実測値 \bar{e}^k が生起する条件付き確率（ポアソン発生モデルの対数尤度関数）は、

$$\begin{aligned} \ln\{L(\beta; \bar{e})\} &= \ln \prod_{k=1}^K \ell(\beta; \bar{e}^k) \\ &= \kappa + \sum_{k=1}^K \bar{n}^k \ln\{\lambda(x_{i(k)}, \beta)\} - \sum_{k=1}^K \lambda(x_{i(k)}, \beta) \bar{e}^k \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$\kappa = \sum_{k=1}^K (\bar{n}^k \ln z_k - \ln \bar{n}^k!) \quad (6)$$

は定数項であり無視し得る。対数尤度関数、式(6)を最大にするようなパラメータ β の最尤推計量は、

$$\frac{\partial \ln L(\hat{\beta}; \bar{e})}{\partial \beta_m} = 0 \quad (m=1, \dots, M) \quad (7)$$

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。

3. 適用事例

3.1 実態調査の概要と使用データ

実態調査の詳細については、文献 3), 4) に譲り、ここでは表-1 に実態調査データの概要を示すととも若干の説明を行う。調査構造物は RC ラーメン高架

橋と RC 門型橋脚の柱部材、および高欄である。柱部材は 1976 年に、高欄は 1979 年と 1980 年に竣工した構造物の構成部材である。調査対象構造物における調査項目は、かぶり、塩化物イオン濃度、中性化深さ、および目視による剥離・剥落発生の有無となっている。

図-2 にはメッシュ分割と剥離・剥落の評価の概要を示している。本研究では、コンクリート表面を軸方向鉄筋と帯鉄筋を含む赤点線で区切られたメッシュに分割する。各メッシュに対しては剥離・剥落の有無が判定される。また、対象構造物においては、代表的に調査された塩化物イオン濃度と中性化深さの調査結果から、各部材のほとんどの箇所での内的塩害、もしくは内的塩害と中性化による複合劣化の進行が懸念されている。柱は 28 本×4 面を、高欄は 19 枚の内面を対象として調査が実施されており、合計で 41,030 メッシュに関する剥離・剥落の有無、かぶり、メッシュ面積の情報が得られている。なお、かぶりは、電磁誘導法により実際に測定したものと、測定結果から放物線補間により推定されたものが存在するが、ここでは実際に測定した値、および剥離・剥落発生箇所に対して補間された値のみを用いることとする。最終的に採用したメッシュ数は柱、高欄でそれぞれ 6070, 3610 メッシュとなった。これらのうち、10 メッシュを 1 グループとするメッシュ集合を作成した。なお、メッシュ集合の作成に際しては、部材種別が混在しないことを前提としたうえで、メッシュ集合内のかぶりのばらつきを抑制するために、かぶりの厚さ順に順次メッシュ集合の作成を行っている。

本研究では柱と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る 3 つの説明変数を採用した。具体的には、1) かぶり: x_2 , 2) メッシュ面積: x_3 , 3) 部材種別: x_4 である。また、定数項として x_1 (常に $x_1=0$) を用いる。3) は定性的パラメータであり、ダミー変数を用いて、

$$x_4 = \begin{cases} 0 & \text{部材種別: 柱} \\ 1 & \text{部材種別: 高欄} \end{cases} \quad (8)$$

と定義できる。(以下、3) を種別ダミーと称する)。なお、各説明変数は最大値が 1 となるように基準化して推計に用いている。

3.2 ポアソン発生モデルの推計

柱と高欄のかぶりコンクリートの剥離・剥落過程を表現するポアソン発生モデルを調査サンプル情報に基づいて推計する。本研究においては、前節で記述した 3 つの説明変数を同時に考慮してモデルの推計を行った。推計結果を表-2 に示す。なお、表中に示す β の推計値の多寡により、剥離・剥落過程に対する説明変

表-2 ポアソン発生モデルの推計結果

	定数項	かぶり	メッシュ面積	部材種別
	β_1	β_2	β_3	β_4
推定値	1.27	-5.91	-4.97	3.36
t-値	25.3	-33.0	-12.0	12.36
AIC	2532			

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（採用に値するか否かの指標）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が有意水準95%で棄却される臨界値が1.96である。すなわち、各説明変数のt-値が絶対値で臨界値を上回る場合、帰無仮説は有意水準95%で棄却され、その説明変数は剥離・剥落発生過程に有意な影響を及ぼす（及ぼさないとは言えない）と判断される。表-2 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。また、情報量基準AICについてはモデルと実データの当てはまり具合を評価するための指標であり、採用する変数などが異なるモデルを比較する際に用いられる。本研究では3変数を同時に考慮した以外のモデルを対象としていないが、参考値として記載している。

同表の推計結果を確認すると、推計値、t-値ともにかぶり β_2 が最大となっており、これが剥離・剥落過程に最も強い影響を及ぼすことが理解できる。このような統計分析を実施することで、剥離・剥落過程を記述できるのみならず、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断される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。

3.3 ポアソン発生モデル

表-2 の推計結果を用いて、具体的な剥離・剥落過程を記述する。推計モデルのポアソン到着率は、

$$\lambda_i = \exp(x_i \beta^i) \quad (9)$$

$$= \exp(1.27 - 5.91x_2 - 4.97x_3 + 3.36x_4)$$

として与えられる。このとき、式(1)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、説明変数を設定することにより、様々な柱、高欄を対象とした剥離・剥落過程のモデル化が可能である。

ここでは、ポアソン発生モデルと各説明変数の基本的な傾向を把握するために、高欄のかぶりが26.22mm、メッシュ面積が0.25m²のコンクリート面に着目する。かぶり、およびメッシュ面積はともに高欄のサンプル平均である（以下、標準モデルと称する）。図-3には、

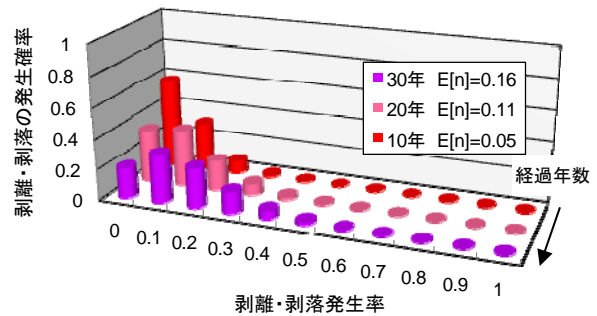


図-3 剥離・剥落のポアソン分布

（標準モデル：かぶり 26.22mm，メッシュ面積 0.25m² の高欄）

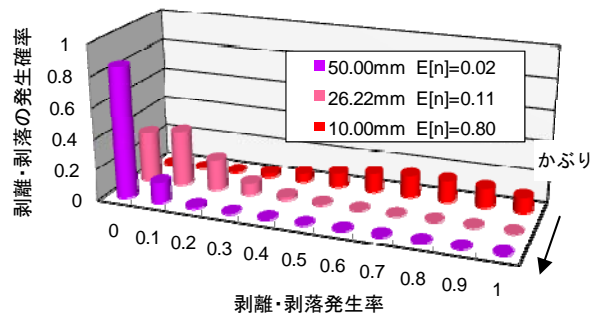


図-4 剥離・剥落のポアソン分布

（メッシュ面積 0.25m² の高欄，30年経過時点）

標準モデルを対象とした剥離・剥落過程の確率分布（ポアソン分布）を示している。比較のために供用開始後10年、20年、30年経過（ $t_f=10, 20, 30$ ）した際のポアソン分布を図示している。なお、剥離・剥落発生率は剥離・剥落発生数（ n ）をメッシュ集合を構成するメッシュ数（10）で割った値を示している。10年経過時点では剥離・剥落発生率は0%をピークとして分布が形成されているが、時間の経過とともに、ピークが右方向（剥離・剥落発生率の大きな方）にシフトしていく様子を確認することができる。これは、時間の経過に伴って、剥離・剥落発生率の期待値 $E[n]$ が増加していることに他ならない。なお、各経過年数における剥離・剥落発生率の期待値 $E[n]$ を凡例とともに図-3中に記載している。

さらに、図-4では、かぶりによるポアソン分布の相違を確認する。同図には高欄の標準モデルに加えて、かぶりが10mm、50mmの場合における高欄のポアソン分布を示している。標準モデルと条件を統一するためにメッシュ面積0.25m²の高欄の30年経過時点におけるポアソン分布をそれぞれ示している。かぶりが減少することで、剥離・剥落発生率が極端に増加しており、前節でも述べたようにかぶりが剥離・剥落の発生過程に大きな影響を及ぼしていることが見て取れる。特にかぶりが10mmの場合、30年経過時点における期

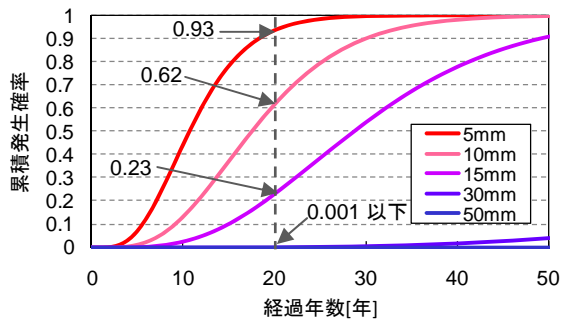


図-5 剥離・剥落のポアソン分布

(メッシュ面積 0.25m²の高欄, 剥離・剥落発生率 50%)

期待値 $E[n]$ は 0.8 と非常に高い値となっていることがわかる。

上記の推計結果を用いて、分布関数を算出する。供用を開始してからメッシュ集合 i において、 z_i 年後に剥離・剥落発生数が N を上回っている確率(分布関数)は、

$$P(n_i(z_i) \geq N) = 1 - \sum_{n_i=1}^{N-1} P(n_i(z_i) = n_i) \quad (11)$$

と定義できる。式(11)の分布関数に基づいて、図-5に剥離・剥落発生率の累積確率を示す。剥離・剥落発生率を50%以上と固定し、供用年数を横軸に設定した。特にかぶりが剥離・剥落発生過程に及ぼす影響を確認するために、図-4と同じ条件で、かぶりを5mm, 10mm, 15mm, 30mm, 50mmと設定した際の剥離・剥落発生率の累積確率を図示している。先ほどと同様に、かぶりの増加とともに、剥離・剥落発生率が減少していることが読み取れる。実際に剥離・剥落発生率が50%以上になる確率にかぶりが及ぼす影響を見てみる。経過年数20年に着目すると、かぶりが5mmの場合、93%の確率で剥離・剥落発生率が50%に達しているのに対して、かぶりが10mmでは、62%、かぶりが15mmでは23%と剥離・剥落発生率が50%に達する確率が減少する。さらに、かぶりが30mm以上の場合は剥離・剥落発生率が50%に達する確率は0.1%以下となっている。特に、かぶりが30mm以上の場合は50年経過後においても剥離・剥落発生率が50%に達する確率は5%以下となっており、ほとんどが剥離・剥落発生率50%には到達しないことがわかる。また、図-6には部材種別による剥離・剥落過程の相違を示す。高欄については、標準モデルに加え、かぶりを5mm, 15mmに設定した場合の剥離・剥落発生率50%に対するポアソン分布を、柱についてはメッシュ面積を0.09m²(柱サンプル平均)、かぶりを36.8mm(柱サンプル平均)、高欄と同様にかぶり5mm, 15mmに設定した場合の剥離・剥落発生率50%に対するポアソン分布をそれぞれ

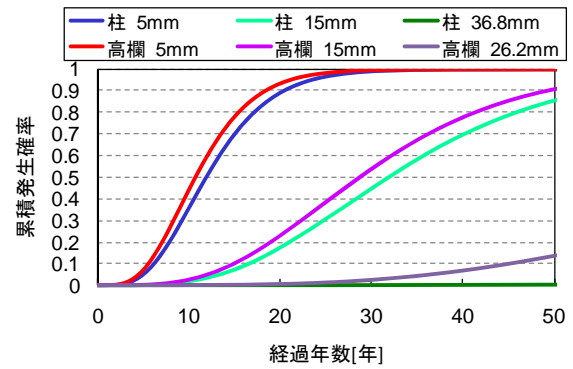


図-6 部材種別ごとのポアソン分布

(メッシュ面積 0.25m²の高欄とメッシュ面積 0.09m²の柱, 剥離・剥落発生率 50%)

示している。いずれの部材でも、かぶりが同様の場合には、ポアソン分布に大きな違いは見受けられず、部材種別が異なっていたとしても、かぶりが剥離・剥落過程に及ぼす影響にほとんど変化がないことがわかる。しかしながら、柱と高欄においては、かぶりの平均が異なっているために、かぶりをそれぞれの部材におけるサンプル平均に設定した場合の累積発生確率は、柱において50年経過時時点でほぼ0であるのに対して、高欄における50年経過時点では10%と差異が生じている。

4. 予測結果の比較

本研究では、かぶりコンクリートの剥離・剥落過程をポアソン発生モデルを用いて表現してきた。これに対して、維持管理標準においては、かぶりコンクリートの剥離・剥落の発生過程を鉄筋の腐食速度に基づいてモデル化しているとともに、本研究で対象とした柱、高欄部材の実態調査データに対して適用し、剥離・剥落に対する劣化予測を変状率として算出している。ここでは、本研究で採用したポアソン発生モデルと維持管理標準にて規定されたモデル(鉄筋腐食モデル)の予測結果の比較を行う。

特に、高欄への鉄筋腐食モデルの適用については、文献1)に詳述されているため、ここでは概略を述べるに留める。予測モデルは中性化と塩化物イオンの濃縮を考慮した鉄筋腐食速度と剥離・剥落の発生限界鉄筋腐食深さにより規定されている。表-3には複合劣化を対象としたときの鉄筋腐食速度 dr/dt 、および各期終了時の鉄筋腐食深さ Δr を示す。剥離・剥落発生率の算定については、調査対象のコンクリート表面を本研究と同様のメッシュに分割した上で、任意表面での各種パラメータ(かぶり、中性化深さ、塩化物イオン濃度)のばらつきを考慮するとともに、モンテカルロ

表-3 鉄筋腐食モデルの定義¹⁾ (複合劣化)

変状原因	各期終了時の鉄筋腐食深さ Δr (mm)		鉄筋の腐食速度 dr/dt (mm/年)
複合劣化	進展期	$\Delta r_{sp} = 13(c/\phi) \times 10^{-3}$	【中性化残り > 25mm かつ $Cl \geq 1.2\text{kg/m}^3$ 】 $dr/dt = 10^{-3} / \sqrt{c} (7.70Cl^- + 0.503W/C - 40.6)$ $1.0 \times 10^{-3} \leq dr/dt \leq 8.0 \times 10^{-3}$
	加速期前期	$\Delta r_{sp} = 56(c/\phi) \times 10^{-3}$	【中性化残り $\leq 25\text{mm}$ かつ $Cl \geq 0.6\text{kg/m}^3$ 】 $dr/dt = 10^{-3} / \sqrt{c} (19.34Cl^- + 0.748W/C - 49.4)$ $3.0 \times 10^{-3} \leq dr/dt \leq 8.0 \times 10^{-3}$

c : かぶり (mm), ϕ : 鉄筋径 (mm), dr/dt : 鉄筋の腐食速度 (mm/年), W/C : 水セメント比, Cl^- : 初期塩化物イオン濃度

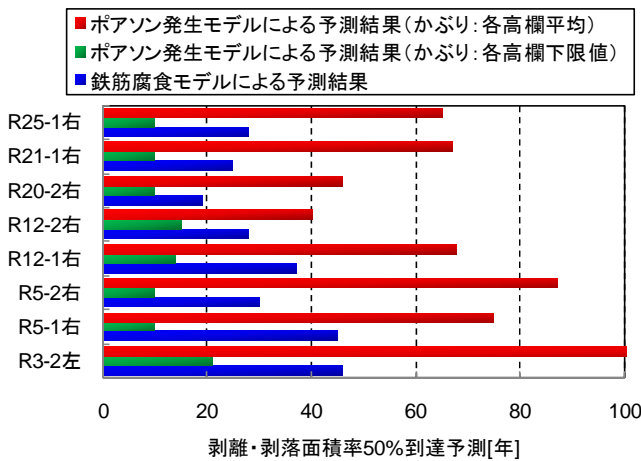


図-7 劣化予測手法の比較

シミュレーションにより算出している。ここでは本研究で適用したポアソン発生モデルと表-3に示す鉄筋腐食モデルによる予測結果について、剥離・剥落発生率が50%に達する期間の累積発生確率により検討する。

図-7には例として、8枚の高欄に対してのポアソン発生モデルと鉄筋腐食モデルでそれぞれ推計した剥離・剥落発生率が50%に達する経過年数の予測結果を示している。鉄筋腐食モデル(青)の各パラメータについては、各高欄で測定した値を用いている。詳細は文献4)を参照されたい。ポアソン発生モデルによる予測ではモデルパラメータとしてメッシュ面積 0.25m^2 、かぶりは各高欄の平均を設定した場合の結果(赤)とともに、各高欄のかぶりの下限値を設定した場合(緑)についても記載している。いずれの高欄においても剥離・剥落発生率が50%に達する期間は、かぶりの平均を用いたポアソン発生モデルで予測した場合が、鉄筋腐食モデルよりも長くなっている。これにより鉄筋腐食モデルを用いた場合、ポアソン発生モデルよりも安全側(剥離・剥落が早く発生する)の予測結果が得られることがわかる。なお、結果が累積発生確率として確率値で与えられるポアソン発生モデルと、確定値として与えられる鉄筋腐食モデルを単純に比較することは、厳密には正確ではないが、両手法の傾向を把握するという意味においては問題ないと考えられる。

5. おわりに

本研究では、中性化と内的塩害の複合劣化が懸念されるRC鉄道高架橋の柱、高欄部材を対象に、かぶりコンクリートの剥離・剥落過程をポアソン発生モデルを用いて表現するとともに、これまで統計的劣化予測にほとんど考慮されてこなかったかぶりが剥離・剥落過程に及ぼす影響を実態調査結果に基づいて定量的に明らかにした。その結果、かぶりが剥離・剥落過程に及ぼす影響は、部材種別やメッシュ面積よりも大きく、部材種別が異なっている場合でもかぶりが同様であれば剥離・剥落発生率はほぼ同様となることなどが判明した。また、ポアソン発生モデルを用いた劣化予測結果を維持管理標準で提案されている鉄筋腐食モデルを用いた場合と比較することで、かぶりによる剥離・剥落発生過程の変動を柔軟に表現できることを示した。なお、本研究で推計したポアソン発生モデルはあくまでも対象とした一部の柱、高欄部材を対象としたものであることを明記しておく。今後、サンプル数を増やすことで、柱と高欄を個別に推計し、より一般的で精度の高い劣化予測モデルの作成を行うとともに、今回は考慮していない塩化物イオン濃度や中性化、剥離・剥落の大きさなどの影響を包括した劣化予測モデルに拡張することが必要である。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 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。
- 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、コンクリート工学論文集, 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。