第VI部門　　道路橋コンクリート床版における漏水遮断を仮定した腐食抑制効果の確率的評価

大阪大学大学院工学研究科　学生員　○前田　克己
西日本高速道路株式会社　正会員　友村　圭祐
大阪大学大学院工学研究科　正会員　笹井　晃太郎
大阪大学大学院工学研究科　正会員　貝戸　清之

1. はじめに

道路橋コンクリート床版では，漏水に伴う水分や塩化物イオンの供給によって鉄筋腐食が促進されることが課題となっている．合理的な維持管理を検討する上では，漏水経路の遮断によって得られる腐食抑制効果を定量的に把握することが重要である．点検データに基づく統計的劣化予測モデルを用いることで，実際の供用環境を踏まえた腐食進展過程を推定し，漏水の有無による劣化速度の差異を示すことができる[1)]．一方，従来の劣化予測では，漏水が確認された床版について，仮に漏水が確認されない状態へ移行した場合の腐食抑制効果を直接評価することは困難である．そこで本研究では，傾向スコア法と統計的劣化予測モデルを組み合わせ，背景条件が類似する床版を対応付けることにより，漏水遮断による腐食抑制効果を反実仮想的に推定する．その際，傾向スコアモデルおよび劣化予測モデルのパラメータをMCMC 法により推定し，その推定不確実性を腐食抑制効果まで伝搬することで，確率的に評価する．

2. 本研究の基本的な考え方

本研究では，点検時に漏水が確認された床版を処置群，確認されなかった床版を対照群とする．本研究における漏水遮断とは，漏水が確認された床版について，漏水以外の背景条件を維持したまま，漏水が確認されない状態に仮想的に移行することを指す．これは，伸縮装置や床版防水層等からの漏水経路を止水措置によって遮断した状況を，維持管理上の介入として抽象化したものである．また，**図-1** に示すように，凍結防止剤，交通量，構造条件および床版種別を，漏水の発生と腐食進展の双方に影響し得る背景要因として扱う．数ある劣化要因の中から，漏水が腐食進展に及ぼす影響のみを評価するためには，同一の床版について，漏水の影響を受けた場合と受けなかった場合の腐食進展を比較する必要がある．しかし，両者を同時に観測することはできない．そこで，

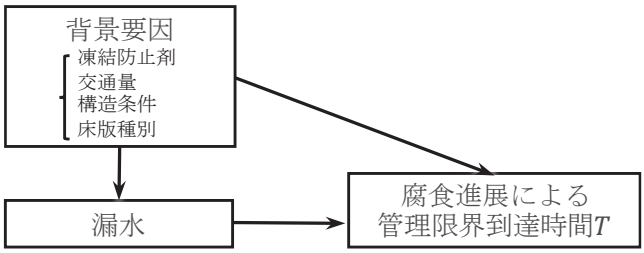


図-1　腐食進展に影響する劣化要因の因果関係

処置群の各床版に対して，漏水以外の背景条件が類似する対照群の床版を対応付け，漏水遮断を仮定した反実仮想ケースを構成する．背景条件の類似性は，観測共変量に基づき，漏水の発生確率である傾向スコア[2)]を用いて評価する．本研究では，実際の腐食進展過程と反実仮想ケースの腐食進展過程を比較し，漏水遮断による腐食抑制効果を評価する．

3. 漏水遮断を仮定した腐食抑制効果の因果推論

離散健全度で区分された点検データに基づき，漏水遮断による腐食抑制効果を評価する．まず，傾向スコアモデルおよび劣化予測モデルの未知パラメータをMCMC 法により推定し，傾向スコアと，処置群および対照群における健全度 i ごとのハザード率を得る．前者は観測共変量に基づく漏水の発生確率に相当し，後者は各健全度における腐食進展速度に相当する．次に，処置群$L_{i,(1)}$ の各要素 l_1に対し，傾向スコアが最も近い対照群 $L_{i,(0)}$ の要素$m(l_1)$を，

$$m(l_1) = arg_{[l_0 \in L_{i,(0)}]}\, min\, |e^{l_1} - e^{l_0}| \qquad (1)$$

により対応付ける．ただし，対応付けるペア間の傾向スコア差に閾値を設け，無理な対応付けを避けることで，観測共変量に関する比較可能性を高める．対応付けられた処置群の部分集合を $L^{+}_{i,(1)}$ とすると，漏水遮断による健全度 iの平均滞在時間の延長量 ΔT_i は，

$$\Delta T_i = \frac{1}{|L^{+}_{i,(1)}|} \sum_{l_1 \in L^{+}_{i,(1)}} \left(\frac{1}{\lambda^{m(l_1)}_{i,(0)}} - \frac{1}{\lambda^{l_1}_{i,(1)}} \right) \qquad (2)$$

Katsuki, MAEDA, Keisuke TOMOMURA, Kotaro SASAI, and Kiyoyuki KAITO
k.maeda@civil.eng.osaka-u.ac.jp

表-1　延長量 ΔT_1 と総延長量 ΔT の推定結果

評価対象	事後中央値 [年]	90%信用区間 [年]
健全度 1→2：ΔT_1	13.6	［10.9，16.3］
健全度 2→3：ΔT_2	4.4	［2.7，6.2］
管理限界到達：ΔT	18.0	［15.0，21.2］

と表せる．漏水遮断による腐食抑制効果は

$$\Delta T = \sum_{i=1}^{I-1} \Delta T_i \qquad (3)$$

により，管理限界到達までの期間の総延長量として評価する．以上の操作を，傾向スコアモデルおよび劣化予測モデルから得られたパラメータの事後標本ごとに繰り返し，延長量 ΔT_1，総延長量 ΔT の事後分布を構成する．

4. 実証分析

西日本高速道路株式会社が管理する道路橋コンクリート床版の目視点検データを対象に分析を実施した．分析対象は 1,680 橋に含まれる 17,367 床版パネルであり，このうち処置群は 4,065 件，対照群は 13,302 件であった．腐食に関する目視点検結果は 7 段階の健全度で記録されているが，本分析では，各健全度におけるサンプル数を確保するため，腐食の初期段階に相当する健全度 1，腐食の進展段階に相当する健全度 2，管理限界に相当する健全度 3 の 3 段階に集約した．まず，式 (1)に基づき，処置群と対照群の床版を対応付けた．対応付け後の両群の比較可能性を確認するため，各共変量の絶対標準化平均差を算出した．絶対標準化平均差は 0 に近いほど両群の背景条件が類似していることを表す．本分析では，対応付け後のすべての共変量が基準値 0.1 未満となるよう閾値を設定し，観測された背景条件に関する両群の比較可能性を確保した．次に，式 (2)，(3) により算出した管理限界到達までの期間の総延長量 ΔT の事後中央値および 90%信用区間を**表-1** に示す．総延長量 ΔT の事後中央値は 18.0 年，90%信用区間は［15.0，21.2］年であり，漏水遮断によって腐食進展が抑制されることが示唆された．また，健全度 1 から健全度 2 までの平均滞在時間の延長量 ΔT_1 の事後中央値は 13.6 年であり，総延長量 ΔT の事後中央値の約 76%を占めた．

処置群における実際の腐食進展過程と，漏水遮断を仮定した反実仮想ケースの腐食進展過程を**図-2** に示す．漏水が観測された処置群の管理限界到達までの平均期間は約 31 年であるのに対し，漏水遮断による総延長量 ΔT の事後中央値は 18.0 年であった．以上のことから，漏水遮断による総延長量は，処置群の管理限界到達までの平均期間に対して無視できない大きさであり，腐食進展の初期段階で相対的に大きいことが示唆された．

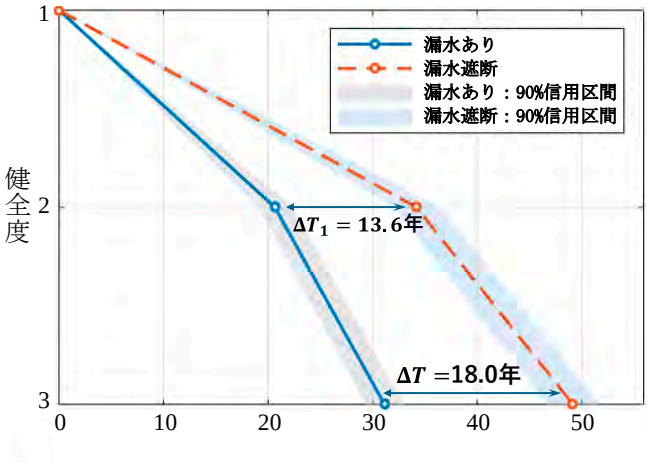


図-2　処置群の腐食進展過程および漏水遮断を仮定した反実仮想ケースの腐食進展過程

5. おわりに

本研究では，背景条件が類似する床版を傾向スコア法により対応付け，統計的劣化予測モデルと組み合わせることで，漏水遮断を仮定した反実仮想ケースの腐食進展過程を評価した．その際，両モデルの推定不確実性を考慮し，管理限界到達までの期間の総延長量を事後分布として評価した．その結果，漏水遮断による総延長量は，処置群の管理限界到達までの平均期間に対して相対的に大きく，その延長量の多くが腐食進展の初期段階で生じることが示唆された．このことは，床版の腐食進展に影響する漏水に対して維持管理上の介入を行うことの意義，特に腐食進展の早い段階で対策を講じることの重要性を示唆する．ただし，本分析は観測された共変量に基づく反実仮想評価であり，未観測交絡の影響が残る．また，本研究における漏水遮断は仮想的な介入であり，特定の補修工法の効果を直接示すものではない．今後は，具体的な補修方法や実施時期を考慮し，補修対象の優先順位付けに資する評価手法へ発展させる必要がある．

【参考文献】

1）貝戸清之，小林潔司，水谷大二郎，二宮陽平，河合良治：鋼桁端部の腐食に対する伸縮装置止水材の予防保全効果，土木学会論文集 F4（建設マネジメント），Vol.77, No.1, pp.96–114, 2021.

2）Rosenbaum, Paul R. and Rubin, Donald B.: The Central Role of the Propensity Score in Observational Studies for Causal Effects, *Biometrika*, Vol.70, No.1, pp.41–55, 1983.