

第 VI 部門

橋梁劣化シミュレーションの実務的意思決定問題への適用

大阪大学大学院	学生員	○安藤	由弥
大阪大学大学院	正会員	小濱	健吾
西日本高速道路株式会社	正会員	福田	泰樹
大阪大学大学院	正会員	貝戸	清之
大阪大学大学院	正会員	笹井	晃太郎

1. はじめに

高度経済成長期に建設された橋梁の老朽化が進行しており、それらに対する維持管理が重要視されている。橋梁マネジメントにおいては、一般的に目視・打音検査による点検データに基づいた補修計画が策定される。現状としては、劣化が進行した健全度（構造物単位健全度）Ⅲ判定の橋梁に関してはすでに補修計画が定められている。しかしながら、近年における橋梁の劣化の進行状況を踏まえると、予防保全の観点から合理的に健全度Ⅱ判定の橋梁に対して補修優先順位を定め、順次Ⅲ判定となる橋梁を減少させることが重要である。本研究では健全度Ⅰ、Ⅱ判定の橋梁を対象とし、当該橋梁が任意期間後に健全度Ⅲ判定となる確率を劣化確率と定義する。また、これらの比較により補修優先順位の決定における合理化を図る。以下、2. では本研究の基本的な考え方、3. では混合マルコフ劣化ハザードモデルによる劣化速度の評価、4. ではマルコフ推移確率と決定木による劣化シミュレーション 5. では実証分析について述べる。

2. 本研究の基本的な考え方

橋梁の健全性評価は構造物単位健全度と部材単位健全度に大別される。前者は橋梁全体の健全性を示すと同時に、補修計画を策定する際の判断指標となる。一方で後者は桁端部、下部工等の橋梁をより詳細な部材単位で評価するものである。一般的に構造物単位健全度は部材単位健全度の最悪値としているが、部材単位健全度は記録された部材ごとの個別変状判定から管理者の暗黙知により評価される側面がある。したがって、本研究では橋梁部材の劣化予測を行う際に個別変状判定を用いる。ここで、個別変状判定と部材健全度の対応関係を示す必要性が生じる。

本研究では具体的な劣化事象として桁端部の損傷に着目する。桁端部は、桁中央部や他の部材と比較すると、相対的に劣化速度が速い。これは、桁端部の直上に設置される伸縮装置、あるいは降雨時の止水材からの漏水の影響が大きいためであると考えられる。他の部材と比べ劣化速度が速い桁端部に着目した補修優先順位を策定することで、順次構造物単位健全度がⅢ判定となる橋梁の減少が期待される。

3. 劣化速度の評価

桁端部に分類される個別変状の劣化速度を混合マルコフ劣化ハザードモデルにより評価する。点検による施設の健全性が離散的なⅠ段階で判定される場合、期間 z に判定が i から j へ推移する確率 $\pi_{ij}(z)$ は

$$\pi_{ij}(z^k | \varepsilon^k) = \sum_{s=i}^j \prod_{m=i}^{s-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_k} \prod_{m=s}^{j-1} \frac{\lambda_m}{\lambda_{m+1} - \lambda_m} \exp(-\lambda_i \varepsilon^k z^{l_k}) \quad (1)$$

と表される。 λ_i は健全度 i のハザード率、 k は部位-変状グループ、 l_k はグループ k に属する変状、 ε^k はグループ k の劣化速度の異質性を表すパラメータである。施設に対する点検データを与件として MCMC 法により未知パラメータを推定する。

4. 劣化シミュレーション

観測下にある変状を対象として、モンテカルロ法により任意の期間 z 後の橋梁の劣化状況を予測する。時刻 τ_A で観測された個別変状判定 $h(\tau_A)$ に対し、将来時点 $\tau_B = \tau_A + z$ における個別変状判定を $h(\tau_B)$ とするとき、一様乱数 $r \in [0,1]$ を発生させ、

$$\sum_{s=h(\tau_A)}^{\theta_i-1} \pi_{h(\tau_A),s} < r \leq \sum_{s=h(\tau_A)}^{\theta_i} \pi_{h(\tau_A),s} \quad (2)$$

を満たした場合、個別変状判定は $h(\tau_A)$ から $h(\tau_B) = \theta_i$ へ推移したとみなす。

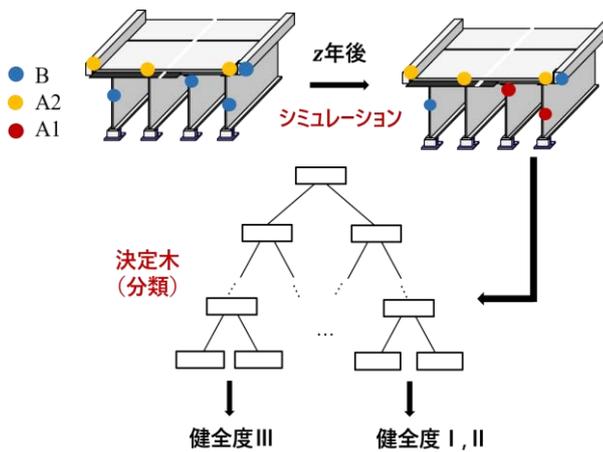


図-1 劣化シミュレーション

図-1 に示す手順に従いシミュレーション結果から、当該橋梁が健全度Ⅲに相当するかを決定木により判定する。決定木では、主桁端部、床版間詰端部等に記録される個別変状判定と桁端部の部材健全度の関係性をあらかじめ学習させる。本手法では、決定木の学習方式として CART を用いており、CART では不純度としてジニ不純度が推奨されている。ノード m において、データ Q_m を二分割とする。 n 番目のクラス C_n ($n = 1, \dots, N$) のデータが選択される確率を $P(C_n|m)$ とすると、ジニ不純度 $L(Q_m)$ は

$$L(Q_m) = \sum_{n=1}^N (P(C_n|m)(1 - P(C_n|m))) \quad (3)$$

と表すことができる。分割後の不純度最小化に基づき、各ノードに対して入力ベクトルごとに得られる閾値を決定することで木が成長する。

劣化シミュレーションは期間 z 後を繰り返し行い、健全度Ⅲ判定となる回数をシミュレーション回数で除すことにより劣化確率を算出する。

5. 実証分析

実際の橋梁点検データを用いることで実証分析を行った。混合マルコフ劣化ハザードモデルにより、22,329 件の 2 時期点検データから地域-部材 142 グループの劣化速度の異質性を推定した。推定結果より地域や部材ごとに劣化速度の差異が見られることを確認した。決定木は 475 橋梁 (90%訓練データ, 10%テストデータ) を対象とし、個別変状判定 A1 と桁端部の部材単位健全度Ⅲの対応関係を学習した。

推定・学習結果を用いた劣化シミュレーションは最

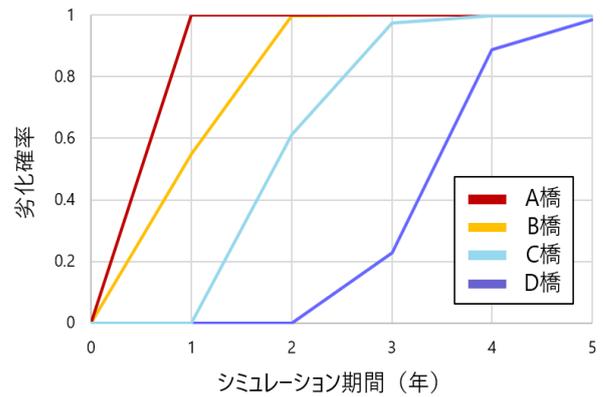


図-2 シミュレーション結果

終点検から 5 年後までを対象とし、1,183 橋梁の長期的な劣化確率の変化を確認した。図-2 に健全度Ⅰ,Ⅱ判定の 4 橋梁に対する劣化シミュレーションの結果を示す。橋梁ごとに劣化確率が上昇するタイミングには大きな差異が見られるため、最終点検からの適切な補修時期は異なることが示唆される。本手法により提案したモデルを用いることで補修計画の合理化が図れる可能性がある。

6. おわりに

本研究では、健全度Ⅰ,Ⅱ判定である橋梁に対し桁端部の損傷に着目した劣化シミュレーションを行い、劣化確率を算出した。また、これまで判定が暗黙知によりなされてきた個別変状判定と部材単位健全度との対応関係を分析した。一方で、本研究に関して残された課題が存在する。提案手法によると、劣化シミュレーションにおいて任意期間 z の間に新規発生する変状を考慮できていない。観測された変状の他に、対象構造物内に潜在的な変状が存在すると考えられる。今後は橋梁ごとの変状生起を劣化シミュレーションに反映させる必要があるといえる。

【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: 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, Vol. 77, No. 1, pp.96-114, 2021.
- 2) 貝戸清之, 小林潔司, 青木一也, 松岡弘大: 混合マルコフ劣化ハザードモデルの階層ベイズ推計, 土木学会論文集D3, Vol.68, No.4, pp.255-271, 2012.