

## 部材・損傷種別のベンチマーク分析に基づく健全度2判定橋梁の補修優先順位の決定

大阪大学大学院工学研究科 学生会員 ○山村 昂也 正会員 貝戸 清之

近畿地方整備局 非会員 増田 寛四郎

(株)建設技術研究所 正会員 光川 直宏 正会員 塚田 祥久 非会員 井川 理智

## 1. はじめに

近年、高度経済成長期に団塊的に建設された橋梁の老朽化が急速に進行し、定期点検や補修等を通じた橋梁の安全性確保及び長寿命化対策が喫緊の課題となっている。国土交通省近畿地方整備局は、これらの対策として橋梁の健全度に基づいた補修計画を策定している。このような場合、従来手法である混合マルコフ劣化ハザードモデル<sup>1)</sup>の劣化過程の比較は、補修の優先順位の決定の際、定量的な情報として有用である。これにより、劣化が目立った健全度3判定、4判定の橋梁の補修は順次進んでいる。整備局管内においては、健全度4判定の橋梁は補修が済み、健全度3判定の橋梁も5年以内に補修される目途が立っている<sup>2)</sup>。一方で、まだ、劣化が大きく目立っていない健全度2判定の橋梁の補修着手率は低い。2014年度に点検した橋梁において、2019年度末までに補修された健全度2判定の橋梁は29%である<sup>3)</sup>。仮に健全度2判定の橋梁が健全度3判定となる前に、その橋梁の補修を行えば、順次健全度3判定となる橋梁は減少し、戦略的に橋梁の長寿命化対策を行うことが可能となる。

本研究では、健全度2判定の橋梁の内、健全度3判定となりやすい橋梁を評価し、補修優先順位の決定手法を提案する。具体的には、各部材・損傷の劣化過程について後述する混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いた劣化予測を行い、各部材・損傷について次期に健全度が低下するリスクの生起確率を定量化する。そして、得られたリスクの生起確率を用いたフォルト・ツリー分析を行うことで、当該橋梁の健全度が低下するリスクを定量化し、複数の橋梁間の相対的な比較を行う。

## 2. 優先順位の決定手法

## (1)混合マルコフ劣化ハザードモデル

本研究では、各部材・損傷の劣化速度の推定に混合マルコフ劣化ハザードモデルを用いる。いま、部材・損傷の劣化速度を表現するハザード率 $\theta_i^k$ を、

キーワード：補修優先順位 点検データ 混合マルコフ劣化ハザードモデル フォルト・ツリー分析

連絡先：〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1 工学研究科 AR棟605号室 TEL 06-6879-7622

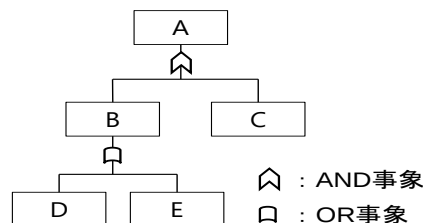


図-1 フォルト・ツリーの基本的な概念

$$\theta_i^k = \varepsilon^k \exp(\mathbf{x}^k \boldsymbol{\beta}_i^T) \quad (1)$$

と表現する。なお、 $i$ は健全度、 $k$ は部材・損傷番号、確率変数 $\varepsilon^k$ は可観測要因による劣化速度の変動を表す未知パラメータ $\boldsymbol{\beta}_i$ 、特性変数 $\mathbf{x}^k$ では表現しきれない劣化過程の不確実性である。このパラメータを以降、異質性パラメータ $\varepsilon^k$ と称す。そして、式(1)で表現されるハザード率を用い、健全度の推移を表現する推移確率は、

$$\pi_{ij}(z) = \sum_{s=i}^j \prod_{m=i}^{s-1} \frac{\theta_m^k}{\theta_m^k - \theta_s^k} \prod_{m=s}^{j-1} \frac{\theta_m^k}{\theta_{m+1}^k - \theta_s^k} \exp(-\theta_s^k z) \quad (2)$$

と計算される。式(2)で得られる推移確率に基づき、対象とする部材・損傷について次期に健全性が低下する確率を計算することが可能である。また、推計手法として階層ベイズ推計<sup>4)</sup>を採用しているため異質性パラメータ $\varepsilon^k$ は確率分布として推計されることを留意されたい。

## (2)フォルト・ツリー分析 (FTA)

本研究における、FTAは、次期に構成する部材・損傷の健全度が低下する事象が生起する確率を与件とし、頂上事象の生起確率についてブール演算を用いて計算することを指す。なお、通常のFTAにおいては、図-1に示すような事象に応じ、AND事象（下位事象が両方生起した場合に上位事象が発生）及びOR事象（下位事象の片方が生起した場合に上位事象が発生）を組み合わせ、フォルト・ツリーを作成する。ただし、本研究で取り扱う橋梁の維持管理は、OR事象のみで整理することが可能であったため、全ての上位事象の生起確率は、

表-1 健全度判定区分

| 区分 |        |   |        |
|----|--------|---|--------|
| 1  | 健全     | 3 | 早期措置段階 |
| 2  | 予防保全段階 | 4 | 緊急措置段階 |

表-2 主桁-腐食の推移確率

|     |   | 次期健全度  |        |        |
|-----|---|--------|--------|--------|
|     |   | 1      | 2      | 3      |
| 健全度 | 1 | 0.7571 | 0.2007 | 0.0423 |
|     | 2 | 0      | 0.6861 | 0.3139 |
|     | 3 | 0      | 0      | 1.0000 |

表-3 主桁-腐食の健全度が低下する事象の生起確率

| 点検データ    |       | シミュレーション |      |      |     |        |
|----------|-------|----------|------|------|-----|--------|
| 内容       | 事後健全度 | 1        | 2    | 3    | ... | 10,000 |
| 主桁-腐食    | 2     | 2        | 2    | 2    | ... | 2      |
| 主桁-腐食    | 2     | 2        | 3    | 2    | ... | 2      |
| 主桁-腐食    | 2     | 2        | 2    | 3    | ... | 2      |
| 主桁-腐食    | 2     | 2        | 2    | 3    | ... | 2      |
| 3の割合     |       | 0.00     | 0.25 | 0.50 | ... | 0.00   |
| 閾値を超えた回数 |       | 2,159回   |      |      |     |        |
| 閾値を超える確率 |       | 0.2159   |      |      |     |        |

$$P(B) = P(D \cup E)$$
$$= P(D) + P(E) - P(D \cap E)$$

(3)

により計算されることを留意されたい。

与件とした部材・損傷の健全度が低下する事象が生起する確率は、部材・損傷の健全度データと式(2)推移確率を用い、次期の健全度をシミュレーションすることで求める。シミュレーションの結果、許容できない健全度の割合を超えた回数をシミュレーション総数で除した値を健全度が低下する事象が生起する確率とする。

3. 適用事例

近畿地方整備局が管理する橋梁の定期点検データに適用した事例を述べる。表-1に、点検データの健全度判定区分を示す。ただし、実際には健全度4判定の点検データは存在しないため、健全度3判定までとして推計を行う。また、具体的な橋梁名は伏せていることに留意されたい。

(1)推計結果

階層ベイズ推計により、異質性パラメータ $\varepsilon^k$ が推計され、推移確率を求めることができる。ただし、本事例では、劣化速度が想定より早い場合のシミュレーションを行い、 $\varepsilon^k$ は期待値ではなく上側95%点を用いることとする。表-2に、主桁-腐食の推移確率を示す。

(2)FTA

3-(1)の結果とA橋（京都府、1983年建設）の健全度データから、次期に部材・損傷の健全度が低下する事象

表-4 A橋のFTA結果

| 部材-損傷名     | 部材-損傷  | 部材     | 橋梁     |
|------------|--------|--------|--------|
| 堅壁-ひびわれ    | 0.0030 | 0.0664 | 0.5708 |
| 堅壁-剥離・鉄筋露出 | 0.0021 |        |        |
| 堅壁-漏水・遊離石灰 | 0.0006 |        |        |
| 堅壁-漏水-滞水   | 0.0611 |        |        |
| 胸壁-ひびわれ    | 0.0338 | 0.0188 |        |
| 胸壁-剥離・鉄筋露出 | 0.0028 |        |        |
| 胸壁-うき      | 0.0005 |        |        |
| 胸壁-漏水・滞水   | 0.0118 |        |        |
| 床版-漏水・遊離石灰 | 0.0736 | 0.2008 |        |
| 床版-床版ひびわれ  | 0.0620 |        |        |
| 床版-うき      | 0.0389 |        |        |
| 床版-その他     | 0.0431 |        |        |
| 主桁-腐食      | 0.2159 | 0.4137 |        |
| 主桁-亀裂      | 0.0098 |        |        |
| 主桁-防食機能の劣化 | 0.2448 |        |        |

表-5 補修優先順位上位の橋梁

| 名称 | 建設年度 | 橋梁リスク  |
|----|------|--------|
| B橋 | 1951 | 0.8076 |
| C橋 | 1982 | 0.7223 |
| D橋 | 1988 | 0.7217 |
| E橋 | 1969 | 0.6669 |
| F橋 | 1959 | 0.6666 |

の生起確率を求める。表-3に、主桁-腐食における生起確率を求める過程を示す。健全度3の割合が0.2以上を許容できないものとし、シミュレーション総数を10,000回とする。各部材-損傷で同様の計算を行い、更にFTAを行った結果を表-4に示す。表-4よりA橋の頂上事象の生起確率は、0.5708であることが分かる。

(3)補修優先順位の決定

近畿地方整備局管内の健全度2判定の橋梁の内297橋に本手法を適用した。表-5に、頂上事象の生起確率上位5橋を示し、これを補修優先順位とした。

4. おわりに

本研究では、健全度2判定である橋梁の内、健全度3判定となりやすい橋梁を評価し、補修優先順位を決定した。結果は、建設年度が古いものが上位と出たことから妥当性があると考えられる。一方で、今後の課題として、部材-損傷の影響度を考慮することがあげられる。

【参考文献】

1) 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

2) 河合良治, 貝戸清之, 吉津宏夫: 近畿地方整備局における橋梁補修施策マネジメントの取り組み～橋梁補修政策プロファイリング手法の活用～, 第4回 JAAM 研究・実践発表会論文集, 2020