

第VI部門

部材・損傷種別のベンチマーク分析に基づく橋梁の補修優先順位の決定

大阪大学工学部

学生員 ○山村 昂也

大阪大学大学院工学研究科

正会員 貝戸 清之

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¹⁾の劣化過程の比較は、定量的な情報として、補修の優先順位の決定において有効である。これにより、整備局管内においては健全度が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²⁾。一方で、2判定の橋梁の優先順位は決定されていない。従来手法における分析では、単に橋梁間の比較に留まり、橋梁を構成する部材・損傷までを考慮した比較が困難なため、管理者の補修計画との乖離が生じている。仮に、複数の部材・損傷が橋梁の健全度に及ぼす影響を考慮した評価が可能となれば、補修の優先順位の決定に有益な情報を提供できる可能性がある。

本研究では、複数の部材・損傷の劣化予測結果が、橋梁の劣化過程に及ぼす影響を考慮した橋梁の補修の優先順位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 θ_i^k を、

$$\theta_i^k = \varepsilon^k \exp(\beta_i x^k) \quad (1)$$

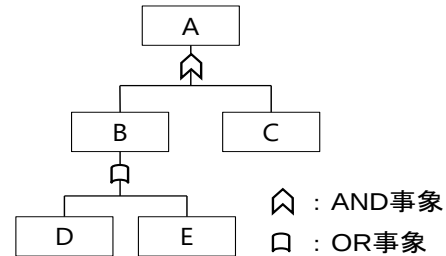


図-1 フォルト・ツリーの基本的な概念

と表現する。なお、 i は健全度、 k は部材・損傷番号、確率変数 ε^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 β_i 、特性変数 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 ε^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³⁾を採用しているため異質性パラメータ ε^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）を組み合わせて、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、

$$P(B) = P(D \cup E) = P(D) + P(E) - P(D \cap E) \quad (3)$$

により計算されることを留意されたい。

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				

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4判定の点検データは存在しないため、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 ε^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、 ε^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

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-滯水	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・滯水	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	所在地	建設年度	橋梁リスク
B橋	滋賀県	1951	0.8076
C橋	兵庫県	1982	0.7223
D橋	京都府	1988	0.7217
E橋	兵庫県	1969	0.6669
F橋	兵庫県	1959	0.6666

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、複数の部材・損傷の劣化予測結果が、橋梁の劣化過程に及ぼす影響を考慮した橋梁の補修の優先順位決定手法を提案し、健全度判定が2である橋梁に適用した。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。なお、本研究を遂行するにあたって、近畿地方整備局より点検データの提供を受けた。

【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