

損傷進展情報を考慮した橋梁マネジメントのための損傷発生予測

大阪大学大学院工学研究科 学生会員 ○二宮陽平

大阪大学大学院工学研究科 学生会員 水谷大二郎

大阪大学大学院工学研究科 正会員 貝戸清之

1. はじめに

社会基盤施設に対する点検業務によって獲得された損傷の有無に関する点検データを統計的に解析し、損傷の発生を予測する手法が確立されている。しかし、対象とする損傷の発生に関するデータが十分に蓄積されていない場合、予測の信頼性を担保できない問題が存在する。本研究では、従来開発された統計モデルを改良し、損傷の発生に関する情報のみならず、損傷の進展に関する情報を用いて、損傷の発生を精緻に予測する方法論を提案する。

2. 損傷進展情報を考慮した損傷発生モデル

損傷の発生過程にワイブル劣化ハザードモデル¹⁾、損傷の進展過程にマルコフ劣化ハザードモデル²⁾を適用する。いま、対象とする施設群 $d(d=1, \dots, D)$ それぞれに複数存在する損傷が生起する可能性のある箇所を領域と呼び、本研究における劣化予測単位とする。領域1つ1つに領域番号 $n_d(n_d=1, \dots, N_d)$ を付与する。さらに、領域 n_d の損傷発生・進展過程を記述するために、サンプル時間軸 $t_k^d = t_{k-1}^d + u_k^d$ ($k=1, \dots, K_d$)を導入する。なお、 $t_k^d = 0$ は施設 d の供用開始時点、 t_k^d は施設 d に対する k 回目の点検時点、 K_d は施設 d に対して現在までに実施された点検の総回数を表す。また、損傷が発生している領域 n_d には、 $W_{d,n_d}(=V_{d,n_d}+1)$ 回目の点検で初めて損傷が確認されたとする。ワイブル分布の確率密度関数を

$$f(\tau | \lambda, \alpha) = \alpha \lambda \tau^{\alpha-1} \exp(-\lambda \tau^\alpha) \quad (1)$$

と定義する。さらに、マルコフ劣化ハザードモデルの推移確率を

$$p_{ij}(\tau | \theta) = \prod_{g=i}^j \sum_{h=i}^{g-1} \frac{\theta_h}{\theta_h - \theta_g} \sum_{h=i}^{g-1} \frac{\theta_h}{\theta_{h+1} - \theta_g} \exp(-\theta_g \tau) \quad (2)$$

と定義する。なお、 k 回目の点検で獲得される領域

n_d の損傷の進展度合いを示す領域損傷度を s_k^{d,n_d} と表す。

サンプル時間軸上の損傷発生時点を ξ_{d,n_d} と表すと、ある損傷が発生している領域 n_d の尤度関数は、

$$\begin{aligned} l_{d,n_d}(\Xi_{d,n_d}, \lambda, \alpha, \theta) \\ = \int_{t_{W_{d,n_d}}^d}^{t_{W_{d,n_d}+1}^d} f(\xi_{d,n_d} | \lambda, \alpha) \cdot p_{1s_{W_{d,n_d}}^{d,n_d}}(\xi_{d,n_d} - t_{V_{d,n_d}}^d | \theta) \\ \cdot \prod_{k=W_{d,n_d}+1}^{K_d} p_{s_{k-1}^{d,n_d} s_k^{d,n_d}}(u_k^d | \theta) d\xi_{d,n_d} \end{aligned} \quad (3)$$

と定式化できる。なお、 Ξ_{d,n_d} は施設 d の領域 n_d において獲得される情報で構成される点検データセットを表している。これと損傷が発生していない領域における尤度関数を定式化することにより、全データの尤度関数が導出される。この尤度関数からパラメータを推定するためには、極めて複雑な尤度関数の最大化問題を解かなければならない。本研究では、ベイズ推定法を援用した効率的な推定手法を開発することにより、計算負荷を低減している。

3. 実証分析

鋼橋の代表的な損傷である疲労亀裂を対象として、実際に蓄積されている点検データを用い、開発したモデルにより損傷発生予測を行う。領域を部材の溶接部と設定する。表-1に点検データ概要を示す。領域損傷度は表-2のように、7段階で値が大きくなるほど領域の状態が悪いと設定した。

以上の条件のもと、損傷発生モデルのパラメータを推定した。推定されたパラメータと、損傷観測時の情報を用いることにより、損傷発生時点の確率分布を推定することができる。例えば、ある橋梁A(1988年度竣工)においては、2013年の点検で3領域に損傷が確認された。これらの領域の損傷発生時点は直

Keywords: 点検データ, 統計モデル, ハザードモデル, ベイズ推定法, 橋梁マネジメント

〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1 工学研究科 E4-332 TEL:06-6879-7622

表-1 データ概要

橋梁数	377
竣工年度	1983-1991
点検年度	2006-2014
全領域数	79,482
全領域の内、損傷が発生している領域数	330
全領域に対する損傷が発生している領域の割合	0.415%
点検データ数	464

表-2 領域の損傷度設定

損傷度	領域内の全亀裂合計長さL(mm)
1	$0 < L \leq 50$
2	$50 < L \leq 100$
3	$100 < L \leq 150$
4	$150 < L \leq 200$
5	$200 < L \leq 400$
6	$400 < L \leq 600$
7	$600 < L$

接観測されないが、観測時の損傷度がそれぞれ 1,5,6 であったという事後的な損傷進展情報から図-1 のように損傷発生時点の確率分布を描き、損傷発生時点を逆推定することができる。このような損傷発生時点の推定の手続きを損傷発生予測に加えることにより、損傷発生予測の過小評価が解消される。図-2 には、ある橋梁 B（1983 年度竣工、2015 年度時点で損傷は未発生）に損傷度 7 の領域が 1 領域以上生起する累積確率の経年推移の予測結果を示している。また、同図には、損傷進展情報を考慮しない場合とした場合の予測結果を併記している。ここで、2030 年度の確率を比較すると、考慮した場合、およそ 1 と推定されるのに対し、考慮しない場合は、0.1 程度と推定される。このように、損傷進展情報を考慮しない場合、適用対象データによっては、大幅な過小予測の危険性が存在することが理解できる。従来、損傷の進展に関する情報を損傷発生予測に活用する手法が無く、予測精度を向上させるためには、損傷の発生に関するデータの蓄積を待つ必要があった。しかし、本研究で開発した損傷進展情報を考慮して発生予測を行う手法を用いることにより、損傷発生に関するデータ蓄積を待たずして、精緻な損傷発生予測をおこなうことができ、幅広い点検データが橋梁のマネジメントに活用されることが期待される。

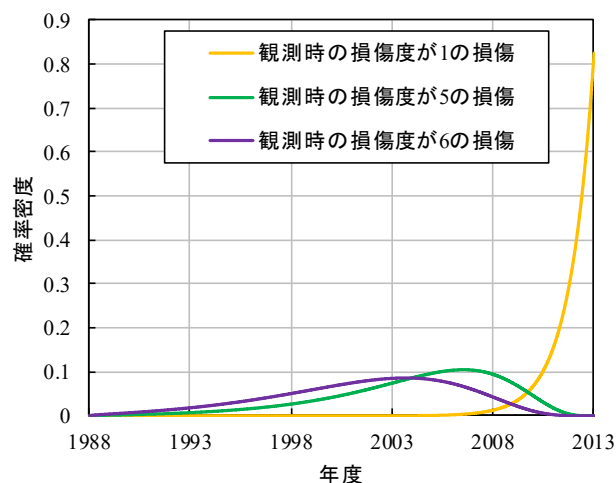


図-1 損傷発生時点の確率分布

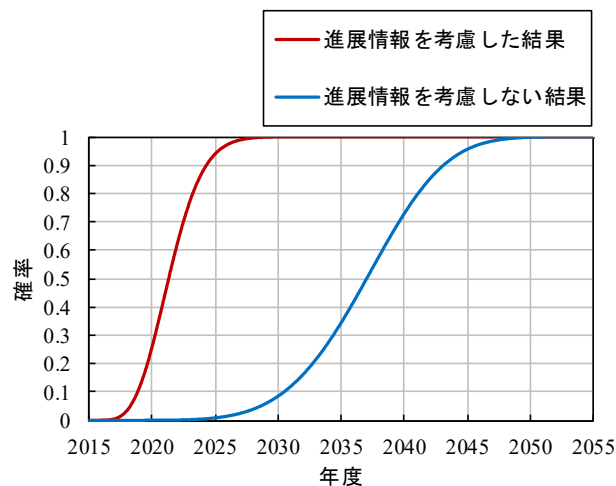


図-2 損傷度 7 の損傷が発生する確率分布

4. おわりに

本研究では、損傷の発生を統計的に予測する際に、損傷の進展に関する情報を用いることにより、観測されない損傷発生時点を推定し、損傷発生予測を行う方法論を開発した。今後の課題として、他事例への適用を行い、本研究で開発した方法論を逐次改良することが挙げられる。

参考文献

- 1) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 劣化予測のためのハザードモデルの推計, 土木学会論文集, No.791/VI-67, pp.111-124, 2005.
- 2) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.68-82, 2005.