

伸縮装置の劣化が 鋼桁端部の腐食に及ぼす影響評価

音地 拓¹・阪本 凌一²・貝戸 清之³・小林 潔司⁴

¹学生会員 大阪大学大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail:t.onji@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²学生会員 大阪大学工学部 地球総合工学科 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail:r.sakamoto@civil.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 大阪大学准教授 大学院工学研究科 地球総合工学専攻 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail:kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

⁴フェロー会員 京都大学教授 経営管理大学院 経営管理講座 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail:kobayashi.kiyoshi@kyoto-u.ac.jp

橋梁の維持管理において、鋼桁端部の劣化は修繕・更新の意思決定の主要な要因となる。鋼桁端部は腐食が主要な劣化事象の一つであり、それらの上部に設置されている伸縮装置からの漏水や滞水が原因であると考えられる。そのため、伸縮装置の点検間隔および取替え間隔を適切に設定することにより、橋梁の長寿命化とライフサイクル費用の低減が可能となり得る。本研究では、橋梁における伸縮装置の劣化が鋼桁端部の腐食に及ぼす影響をマルコフ劣化ハザードモデルとレジーム・スイッチングモデルを援用したスイッチング型マルコフ劣化ハザードモデルにより表現し、その劣化予測結果を用いて両者の関係について定量的に評価する方法論を提案する。最後に、道路橋を対象とした適用事例を通して、本研究で構築した方法論の有用性を実証的に検証する。

Key Words : *asset management, bridge management, regime switching model, corrosion, Markov deterioration hazard model*

1. はじめに

1950年代半ばの高度経済成長期以降に集中的に建設された我が国の道路橋は、約70万橋（橋長2m以上）存在している。これらの橋梁の半数が2020年代半ばには建設後50年以上となり、今後、道路橋の老朽化が急激に進行していくことが知られている。老朽化した橋梁の増加は、利用者の安全性の低下による社会不安や、橋梁を維持管理していく費用の増大等に直結し、単に橋梁の劣化という工学的な問題のみならず、社会的な問題と捉える必要がある。しかしながら、我が国では、少子高齢化が進んでおり限られた人材や緊縮財政の中で、いかに効率的に橋梁を維持管理していくか、ということが喫緊の課題となっている。そのため、適切な間隔で点検を実施し、橋梁の劣化状態および重要性等に応じて修繕および更新を行うことにより、橋梁の長寿命化とライフサイクル費用の低減に資する対策を講じる必要がある。

本研究では、特に鋼橋の維持管理において、修繕および更新の意思決定の主要な要因となる主桁や支承などの橋体を支える橋梁の端部の部材（以下、鋼桁端部と呼ぶ）の劣化に着目する。鋼桁端部における主要な劣化事象として腐食があげられる。鋼桁端部の腐食の

原因は、それらの上部に設置されている伸縮装置からの漏水による鋼桁端部付近での滞水であると考えられる。一方で、一般的に、鋼橋における鋼桁端部の修繕および更新では、通行規制が伴い、重機を用いた大規模なものとなる。そのため、鋼桁端部の修繕および更新は、道路の利便性の低下だけでなくライフサイクル費用の増大につながる可能性がある。したがって、伸縮装置の点検間隔および取替え間隔を適切に設定することにより、鋼橋の長寿命化とライフサイクル費用の低減が可能となり得る。

以上の問題意識のもと、本研究では、伸縮装置の劣化により発生する漏水の有無が鋼桁端部の腐食に及ぼす影響について評価するための方法論を提案する。具体的には、鋼桁端部直上の伸縮装置の漏水の有無を2種類のレジームと考え、伸縮装置からの漏水が桁端部に及ぼす影響を考慮し、桁端部の腐食の進展過程をスイッチング型マルコフ劣化ハザードモデルにより表現する。以下、**2.**で本研究の基本的な考え方を説明する。**3.**では、スイッチング型マルコフ劣化ハザードモデルを定式化する。**4.**では、モデルの推定方法について詳述する。**5.**では、橋梁部材の目視点検データを本研究にて開発したモデルに適用することにより、本研究の有用性について示す。

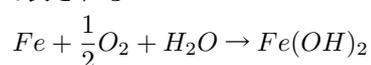
2. 本研究の基本的な考え方

(1) 社会基盤施設の統計的劣化予測手法

本研究では、統計的手法を用いて伸縮装置からの漏水の発生過程と桁端部における腐食の進展過程をモデル化するとともに、目視点検結果を用いてモデルを推定する。社会基盤施設の管理者は国から小規模な自治体まで様々であり、またインフラ事業者により管理される施設もある。それぞれの管理者により社会基盤施設に対して多様な点検が実施され、各点検における膨大な点検結果が蓄積されている。アセットマネジメントにおいては、これらの点検結果を用いた統計的劣化予測に関する研究が蓄積されてきた。なかでも、生存時間解析¹⁾を用いた劣化予測手法（劣化ハザードモデル）の開発により、故障しているか否かの 2 値状態で劣化状態が観測される施設に対して、供用開始から管理限界を迎えて更新されたような施設のデータ（完全データ）のみならず、供用期間中に予防的な修繕および更新が実施された施設に対する点検データ（不完全データ）についても用いて劣化予測を行うことが可能となり、劣化予測精度が飛躍的に向上した²⁾。さらに、多段階の離散的な健全度で劣化状態が記述される施設に対して、複数の劣化ハザードモデルを用いてその劣化過程を記述した多段階指数劣化ハザードモデル（マルコフ劣化ハザードモデル）³⁾や多段階ワイブル劣化ハザードモデル⁴⁾の開発により、上述の生存時間解析の利点を多段階の健全度推移に対しても用いることができるようになった。また、これらのモデルをもとに混合確率モデルや隠れマルコフ劣化モデルを定式化することにより、劣化過程のベンチマーキングや複合的劣化過程の予測など、より複雑な劣化過程の推定も可能となってきている⁵⁾⁻⁶⁾。本研究においても、このような生存時間解析の考え方をを用いて、伸縮装置の劣化による漏水の有無が桁端部の腐食に及ぼす影響について定量的な評価を行う。筆者らの知る限り、現在までに、道路橋の伸縮装置と上部構造の劣化過程の関係性を定量化した研究事例は見当たらない。

(2) 腐食の進展メカニズム

鋼材が酸素や水と結合して安定な状態である酸化化合物に戻ろうとする現象を腐食と呼び、鋼構造物において腐食は主な劣化事象の内の 1 つとされている。腐食における鋼材の水中または大気中での浸食は、水および水中の溶存酸素により引き起こされ、その化学反応式は次式で表される。



また、腐食の進行の程度は構造物の使用環境、構造物および部材の種類と形状、部位などに大きく左右さ

れるため、防食の方法には塗装の他、構造物そのものに腐食耐久性の高い鋼材を使用するなど、それぞれの条件に応じて様々な手法が存在するが、経済性と景観および施工性を考慮して、塗装による防食が最も普及している。塗装された構造物では、塗装が健全に保たれている間は腐食は進行しない一方で、塗装が劣化し防食機能を失った状態で放置すると鋼材の腐食は進行する。鋼材の腐食が進行した場合、鋼材の断面減少が生じるため、腐食発生箇所に対して対策を講じなければ、橋梁の構造的な健全性に大きな影響を及ぼす。このような考えの下、予算制約の厳しい現状においてライフサイクル費用の低減を考慮する場合、鋼材の更新等の事後保全型の維持管理よりも、適切な時期に塗装の塗替え等の予防保全を行い鋼材を延命化する維持管理の方が、ライフサイクル費用の低減に有効となる可能性がある。さらに、鋼材の腐食防止には、適切な時期に塗装を行うだけでなく、腐食の原因である水を鋼材付近に浸入させないことが望ましい。すなわち、鋼橋の維持管理を行う上で、鋼桁端部への水の浸入を防ぐことを目的とした伸縮装置の適切な取替えは、鋼橋の長寿命化とライフサイクル費用低減のために非常に重要であると考えられる。

(3) 漏水の発生メカニズム

桁端部の下部の腐食は、伸縮装置からの漏水が主な原因となっている⁷⁾。この伸縮装置は非排水型と排水型の 2 種類に大別される。非排水型の伸縮装置は図-1(a)のように伸縮装置の下部に止水材が設置されており、桁端部の下部への水分の浸入を防ぐ。この止水材の脱落や破損の原因として、図-2 に示すような、土砂の堆積、通行車両によって繰り返される衝撃、過積載による過大な衝撃、伸縮の繰り返し及び経年による劣化が考えられる。止水材が損傷した場合、桁端部に漏水し、腐食という劣化事象が顕在化しやすくなる。そのため、止水材が損傷しているか否かは、桁端部の腐食に深い関係があることから定期的に点検が行われており、止水材の損傷や脱落、止水材からの水跡、橋台、橋脚上部の滞水などから漏水の有無が判断され、点検結果に記録される。一方で、排水型の伸縮装置は図-1(b)のように、伸縮装置の継目から桁端部の下部へ水分が侵入する構造となっており、漏水に関する点検結果は記録されていない。以上のことから、非排水型の伸縮装置における止水材が脱落、破損することにより、桁端部に漏水し、塗装がはがれた箇所から腐食が進展するような劣化メカニズムが考えられる。そこで、本研究では伸縮装置の損傷と、桁端部の腐食の関係性を定量的に示すことができるような劣化予測モデルを用いる。

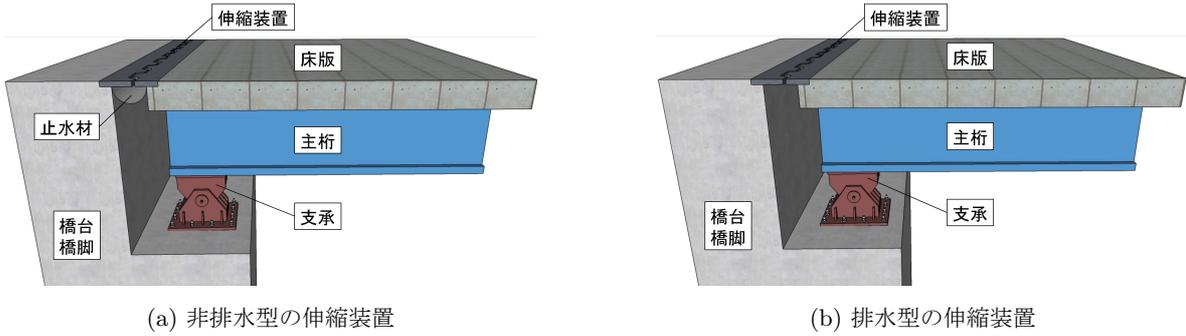


図-1 2種類の伸縮装置

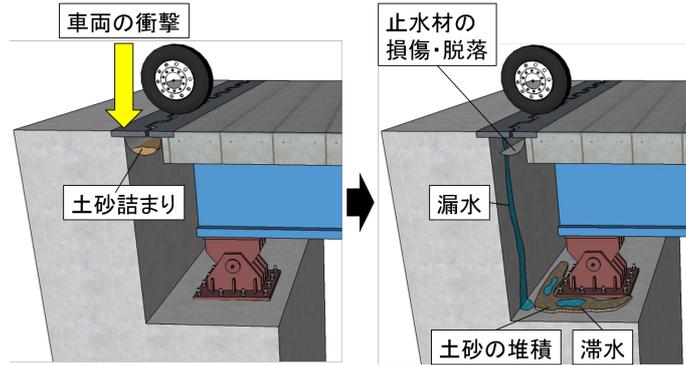


図-2 伸縮装置の主な損傷原因

3. モデルの定式化

(1) モデル化の前提条件

橋梁管理者がカレンダー時刻 a_0^l に橋梁を供用（もしくは更新）し、それ以降の時刻にわたって桁端部と伸縮装置を管理する問題を考える。 l ($l = 1, \dots, L$) は桁端部 ID であり、それぞれの l において 1 セットの時系列点検データ（腐食進展を表す健全度推移データと伸縮装置の漏水の有無を表す時系列データ）が得られているとする。

カレンダー時刻 a_0^l を初期時点 $t_0^l = 0$ とする離散時間軸

$$t_g^l = t_{g-1}^l + z \quad (g = 1, 2, \dots, G^l) \quad (1)$$

を導入する。 $t_{G^l}^l$ は l における観測期間の終了時点である。離散時間軸上の点を時点とよびカレンダー時刻と区別する。対象とする劣化過程は、腐食の進展過程と、漏水の発生状況という 2 つの複合的な劣化過程で構成されている。簡単のために、初期時点から桁端部の更新は一度も実施されていないと考える。桁端部の更新が実施されれば、そのカレンダー時刻を初期時点と考えればよい。時点 t_g^l における桁端部 l の腐食進展状況を離散的状態変数 $f(t_g^l) = i$ ($i = 1 \dots, I$) を用いて表現する。レーティング i ($i = 1, \dots, I$) は、 i の値が大き

なるほど腐食が進展していることを意味している。初期時点 $t_0^l = 0$ において $f(0) = 1$ である。さらに、時点 t_g^l における伸縮装置の漏水の有無を表す状態変数を漏水管理モードとして

$$s_g^l = \begin{cases} 1 & \text{異常モード (漏水発生有り)} \\ 0 & \text{通常モード (漏水発生無し)} \end{cases} \quad (2)$$

と定義する。なお $s_0^l = 0$ とする。本研究では、腐食の進展過程と漏水の発生状況をそれぞれマルコフ連鎖モデルで表現する。漏水管理モードは伸縮装置の損傷に影響された腐食の進展状態が生起しているかどうかを表すリスクモードであり、漏水管理モードにより桁端部の腐食の進展速度が異なると考える。

いま、漏水管理モード $s_g^l = h$ ($h = 0, 1$) における桁端部の腐食の健全度 i における状況依存的進展速度を $\lambda_{i,g}^l$ と表す。このとき、期間 $[t_g^l, t_{g+1}^l)$ における腐食進展速度 $\lambda_{i,g}^l$ を

$$\begin{aligned} \lambda_{i,g}^l &= s_g^l \lambda_{i,1}^l + (1 - s_g^l) \lambda_{i,0}^l \\ &= s_g^l \mathbf{x}_1 \boldsymbol{\beta}'_{1,i} + (1 - s_g^l) \mathbf{x}_0 \boldsymbol{\beta}'_{0,i} \end{aligned} \quad (3)$$

と表す。ただし、 $\mathbf{x}_h = (1, x_{1,h}, \dots, x_{C,h})$ ($h = 0, 1$) は説明変数ベクトル、 $\boldsymbol{\beta}_{h,i} = (\beta_{0,h,i}, \dots, \beta_{C,h,i})$ は未知パラメータベクトルを表し、記号「 $'$ 」は転置操作を表す。

(2) 腐食進展モデル

期間 $[t_g^l, t_{g+1}^l)$ において腐食の健全度が i から j ($j = i + 1, \dots, I - 1$) に推移するマルコフ推移確率は、

$$\pi^{ij}(l, g, z) = \sum_{m=i}^j \prod_{r=i, \neq m}^{j-1} \frac{\lambda_{r,g}^l}{\lambda_{r,g}^l - \lambda_{m,g}^l} \exp(-\lambda_{m,g}^l z) \quad (4)$$

と定義できる³⁾。また、 $\pi^{iI}(l, g, z)$ に関しては、マルコフ推移確率の条件より次式で表せる。

$$\pi^{iI}(l, g, z) = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi^{ij}(l, g, z) \quad (s = 0, 1) \quad (5)$$

これらのマルコフ推移確率から分かるように、本研究では、期間 $[t_g^l, t_{g+1}^l)$ における桁端部の腐食進展は期首 t_g^l における漏水管理モード s_g^l により決定されると仮定する。

(3) 状態変数モデル

漏水管理モードは、桁端部の腐食の進展過程とは独立に推移すると考える。漏水管理モードの 0 から 1 への推移は伸縮装置止水材の劣化を、1 から 0 への推移は止水材の補修を表す。本研究では、止水材の補修履歴の一部が記録されていない場合も対象として、漏水管理モードの 1 から 0 への推移も確率的に表現する。なお、全ての補修履歴が記録されている場合には、1 から 0 への推移を確定的に設定すれば良い。

本研究では、漏水管理モードの推移確率が、 t_g^l 期の期首で観測される情報に基づいて作成される指数ハザードモデル¹⁾で表現されると考える。いま、時点 t_g^l において、通常モード $s_g^l = 0$ が観測されたと考える。この時、期間 $[t_g^l, t_{g+1}^l)$ の間に通常モード $s_g^l = 0$ が終了するハザード率を $\theta_{g,0}^l$ と表す。同じく、時点 t_g^l に異常モード $s_g^l = 1$ が観測されており、当該期間中に異常モード $s_g^l = 1$ が終了するハザード率を $\theta_{g,1}^l$ とする。ハザード率 $\theta_{g,h}^l$ ($h = 0, 1$) を、期間 t_g^l における漏水特性等を表す特性ベクトル $\mathbf{y}_{g,h}^l = (1, y_{g,h,1}^l, \dots, y_{g,h,D}^l)$ を用いて、

$$\theta_{g,h}^l = \exp(\mathbf{y}_{g,h}^l \boldsymbol{\alpha}_h) \quad (6)$$

と表す。 $\boldsymbol{\alpha}_h = (\alpha_{h,0}, \dots, \alpha_{h,D})$ は未知パラメータによる D 次元行ベクトルである。時点 t_g^l において、漏水管理モード $s_g^l = h$ ($h = 0, 1$) が観測されモード $s_g^l = h$ が時刻 t_{g+1}^l においても継続する確率は、各モードの寿命が z 以上になる生存確率 $\tilde{F}_{g,h}^l(z)$ として

$$\tilde{F}_{g,h}^l(z) = \exp(-\theta_{g,h}^l z) \quad (7)$$

と表せる。さらに、期間 $[t_g^l, t_{g+1}^l)$ で漏水管理モードが通常モードから異常モードに推移する確率 $p_g^l(\theta_{g,0}^l)$ は、

$$p_g^l(\theta_{g,0}^l) = 1 - \tilde{F}_{g,0}^l(z|\theta_{g,0}^l) \quad (8)$$

期間 $[t_g^l, t_{g+1}^l)$ で漏水管理モードが異常モードから通常モードに推移する確率 $q_g^l(\theta_{g,1}^l)$ は、

$$q_g^l(\theta_{g,1}^l) = 1 - \tilde{F}_{g,1}^l(z|\theta_{g,1}^l) \quad (9)$$

と表現できる。

4. モデル推定

(1) 尤度関数

全ての時点 t_g^l で桁端部の腐食の健全度 \bar{i}_g^l 、漏水管理モード \bar{s}_g^l が観測されているとひとまず考える。記号「 $\bar{\cdot}$ 」は観測値を表す。このとき、尤度関数 $\mathcal{L}(\bar{\mathbf{i}}, \bar{\mathbf{s}}, \bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta})$ は、

$$\begin{aligned} & \mathcal{L}(\bar{\mathbf{i}}, \bar{\mathbf{s}}, \bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}, \boldsymbol{\alpha}, \boldsymbol{\beta}) \\ &= \prod_{l=1}^L \prod_{g=0}^{G-1} \pi^{\bar{i}_g^l \bar{s}_g^l}(l, g, z) \\ & \cdot \left[p_g^l(\theta_{g,0}^l)^{\delta_g^l} \{1 - p_g^l(\theta_{g,0}^l)\}^{1 - \delta_g^l} \right]^{1 - \bar{s}_g^l} \\ & \cdot \left[q_g^l(\theta_{g,1}^l)^{\delta_g^l} \{1 - q_g^l(\theta_{g,1}^l)\}^{1 - \delta_g^l} \right]^{\bar{s}_g^l} \quad (10) \end{aligned}$$

と表せる。ここに、 δ_g^l はダミー変数で以下のように表す。

$$\delta_g^l = \begin{cases} 0 & \bar{s}_g^l = \bar{s}_{g+1}^l \text{ のとき} \\ 1 & \text{それ以外のとき} \end{cases} \quad (11)$$

また、 $\bar{\mathbf{i}}$ は観測された健全度集合、 $\bar{\mathbf{s}}$ は観測された漏水管理モード集合、 $\bar{\mathbf{x}}$ と $\bar{\mathbf{y}}$ は特性変数集合である。

ここで、全ての時点 t_g^l で桁端部の腐食の健全度 \bar{i}_g^l 、漏水管理モード \bar{s}_g^l が観測されているという状況は現実的ではない。本研究では、観測されている桁端部の腐食の健全度 \bar{i}_g^l 、漏水管理モード \bar{s}_g^l については観測値を用い、観測されていない健全度、漏水管理モードに関しては、潜在変数として取り扱う。すなわち、尤度関数 (式 (10)) を完備化尤度関数⁸⁾と捉え、モデルの未知パラメータと潜在変数を MCMC (マルコフ連鎖モンテカルロ) 法を用いて同時推定することにより、健全度、あるいは、漏水管理モードの部分的不可観測性を考慮してモデルの推定を行う。

(2) 不可観測な漏水発生状況

提案するスイッチング型マルコフ劣化ハザードモデルにおいて、漏水管理モードの推移は、桁端部の腐食の健全度の影響を受けないため、漏水管理モードの潜在変数は、

$$\begin{aligned} & \Pr(s_{g+1}^{l*} | \bar{s}_g^l) \\ &= \left[p_g^l(\theta_{g,0}^l)^{\delta_g^{l*}} \{1 - p_g^l(\theta_{g,0}^l)\}^{1 - \delta_g^{l*}} \right]^{1 - \bar{s}_g^l} \\ & \cdot \left[q_g^l(\theta_{g,1}^l)^{\delta_g^{l*}} \{1 - q_g^l(\theta_{g,1}^l)\}^{1 - \delta_g^{l*}} \right]^{\bar{s}_g^l} \quad (12) \end{aligned}$$

と表現できる。記号「*」は潜在変数を表し、

$$\bar{\delta}_g^{l,*} = \begin{cases} 0 & \bar{s}_g^l = s_{g+1}^{l,*} \text{ のとき} \\ 1 & \text{それ以外} \text{ のとき} \end{cases} \quad (13)$$

である。ただし、 \bar{i}_{-i_g} は i_g^l を除いた健全度集合を表す。

(3) 不可観測な腐食進展状況

腐食の進展状況も、点検時点以外は不可観測なデータだが、潜在変数により局所時点における腐食状況の表現が可能となる。時点 t_g^l における腐食の健全度が観測されておらず潜在変数 $i_g^{l,*}$ としてサンプリングする場合、 $i_g^{l,*} \in \{\bar{i}_{g-1}^l, \dots, \bar{i}_{g+1}^l\}$ の全条件付き事後確率は、

$$\begin{aligned} & \Pr(i_g^{l,*} | \bar{i}_{-i_g}^{l,*}, \bar{s}, \bar{x}, \bar{y}, \alpha, \beta) \\ &= \frac{\mathcal{L}(\bar{i}_{-i_g}^{l,*}, i_g^{l,*}, \bar{s}, \bar{x}, \bar{y}, \alpha, \beta)}{\sum_{i=\bar{i}_{g-1}^l}^{\bar{i}_{g+1}^l} \mathcal{L}(\bar{i}_{-i}, i, \bar{s}, \bar{x}, \bar{y}, \alpha, \beta)} \end{aligned} \quad (14)$$

と表現できる。

5. おわりに

本研究では、マルコフ・スイッチング・ポワソン発生モデル⁹⁾の考え方に基づいて、スイッチング型マルコフ劣化ハザードモデルを定式化し、漏水の有無が鋼桁端部の腐食に及ぼす影響を定量化した。具体的には、伸縮装置からの漏水の有無により、漏水無しの場合を通常モード、漏水有りの場合を異常モードとして漏水管理モードを定義した上で、鋼桁端部における腐食の進展過程をマルコフ劣化ハザードモデル、各漏水管理モードの推移確率をマルコフ・スイッチングモデルを援用することにより表現し、各漏水管理モードにおける腐食の進展過程をスイッチング型マルコフ劣化ハザードモデルとして定式化した。これにより、伸縮装置からの漏水が有る場合と無い場合における鋼桁端部の腐食進展過程を区別して考えることができ、各漏水管理モードでの鋼桁端部の期待寿命をもとに、伸縮装置の適切な取替え時期を選定することが可能となる。従来のマルコフ劣化ハザードモデルでは、漏水の有無を腐食進展過程の説明変数として採用することにより、劣化過程の差異を表現することが可能である。しかしながら、点検業務において確認された伸縮装置からの漏水は、点検時点の直近で漏水が発生したとは必ずしも言い切れない。すなわち、鋼桁端部が伸縮装置からの漏水に曝されている期間に関しては考慮できていない。そのため、伸縮装置からの漏水が鋼桁端部の腐食の進展に及ぼす影響を十分に評価しきれていない可能性が残る。このことから、本研究で提案するモデルでは、伸縮装置における漏水の発生状態および発生時期（漏水管理モード）を確率的に表現した上で、鋼桁端部における腐食の進展過程を表現している点で従来のマルコフ劣化ハ

ザードモデルと比較して有用であると考えられる。さらに、時系列データとして記録されている交通量等を漏水管理モードのマルコフ・スイッチングモデルにおける推移確率の説明変数として採用し、スイッチング型マルコフ劣化ハザードモデルを推定した場合、交通量の増減に対する伸縮装置における各漏水管理モードの発生確率を表現することが可能となり、橋梁を維持管理していく上で非常に有益な情報となり得る。

一方で、本研究には今後の課題がいくつか残されている。第 1 に、本研究での実証分析では、提案した方法論の限られた道路橋への適用を試みたにすぎず、本稿の適用事例で得られた知見は、対象区間でのみ直接的に使用することができる。今後、点検データの蓄積や、本研究で提案したモデルの実務への適用事例を蓄積することにより、漏水発生時における鋼桁端部および伸縮装置の維持管理手法を逐次改善することが必要である。第 2 に、通常モードと異常モードにおける鋼桁端部の腐食の進展過程を用いて、伸縮装置の定期的な取替え（予防保全型維持管理）が主桁の架け替え等の大規模な更新を伴う事後保全型維持管理と比較して、どれほどライフサイクル費用の低減に資するか、定量的に分析する必要がある。その際、通行規制等に伴う道路利用者の社会的損失を費用に勘案して分析する必要がある。第 3 に、鋼桁端部の腐食の進展が、塗装の劣化に付随して発生するという段階的な劣化の進展機構をモデルで表現することにより、腐食発生・進展モデルの随時改良が必要となる。具体的には、現状では、塗装等の防食機能の劣化における損傷度区分と腐食の劣化における損傷度区分は点検者の判断により別々の劣化事象に分類され、記録されているが、防食機能の劣化と腐食における損傷度区分を統合させるような健全度を新たに設定することにより、防食機能の劣化と腐食を一連の劣化事象として考えることが可能となる。そうすることにより、劣化の進展の初期段階と末期段階でそれぞれ劣化進展状態モードがマルコフ・スイッチングするといった二段階レジーム・スイッチング・マルコフ劣化ハザードモデルへとモデルを改良する必要がある。一方で、マルコフ劣化ハザードモデルにより表現される鋼桁端部における腐食の進展過程に、ワイブル分布で表現されるような伸縮装置の生存確率が隠れているような階層的隠れワイブル劣化モデルも考えられる。なお、講演会当日には、道路橋の目視点検データを用いて本研究の有用性を実証的に検証した事例を紹介する。

参考文献

- 1) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 2) 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.
- 3) 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.
 - 4) 青木一也, 山本浩司, 津田尚胤, 小林潔司: 多段階ワイブル劣化ハザードモデル, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.125-136, 2005.
 - 5) 小濱健吾, 岡田貢一, 貝戸清之, 小林潔司: 劣化ハザード率評価とベンチマーキング, 土木学会論文集 A, Vol.64, No.4, pp.857-874, 2008.
 - 6) 小林潔司, 貝戸清之, 大井明, Thao, N. D., 北浦直樹: データ欠損を考慮した複合的隠れマルコフ舗装劣化モデルの推計, 土木学会論文集 E1, Vol.71, No.2, pp.63-80, 2015.
 - 7) 田村正樹, 菊池淳, 千葉洋: 道路橋の伸縮装置における漏水対策の検討について, 国土交通省国土技術研究会論文集, pp.103-106, 2014
 - 8) 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司, 秀島栄三, 山田洋太, 平川恵士: 判定基準変更を考慮した隠れマルコフ劣化ハザードモデル, 土木学会論文集 D3, Vol.71, No.2, pp.70-89, 2015.
 - 9) 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司, 平川恵士: 気象状況を考慮したポットホール管理重点化ルール, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.70, No.3, pp.63-80, 2014.

(2017. 4. 28 受付)