

舗装路面の劣化状況に依存した 高速道路橋 RC 床版の点検実施ルール の提案

二宮陽平¹・貝戸清之²

¹非会員 大阪大学大学院博士後期課程 工学研究科地球総合工学専攻・独立行政法人日本学術振興会 特別研究員
(〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: y.ninomiya@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²個人正会員 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

橋梁 RC 床版の劣化と床版直上のポットホール発生との間には相関性が存在することが経験的に知られている。RC 床版の目視点検には多大な労力と費用を要する一方で、ポットホールの発生状況は日常の道路巡回を通して確認できる。そこで本研究では RC 床版の劣化とポットホールの発生との相関関係を明示的に考慮したポアソン隠れマルコフ劣化ハザードモデルを開発した上で、目視点検の効率化や、状態依存型の点検への移行を視野に入れた点検スキームを提案する。具体的には、RC 床版の目視点検周期を延伸する際に、目の道路巡回で獲得できるポットホールの発生頻度を補完的情報として、延伸期間中の安全を担保する点検手法を策定する。最後に、実際の道路橋 RC 床版への適用を通して、提案モデルの妥当性を実証的に検証する。

キーワード: 状況依存型点検ルール, ポアソン隠れマルコフ劣化ハザードモデル, 点検スキーム, RC床版

1. はじめに

2014 年の道路法の改正により、橋梁に対しては 5 年に一度の近接目視点検が義務づけられている。2019 年時点において、全ての橋梁に対する目視点検が一巡しつつあり、今後も継続的に目視点検データが蓄積されていく。現在の橋梁に対する目視点検は、一定期間ごとに実施される、いわゆる時間依存型の点検である。我が国の社会基盤施設の老朽化が深刻化していく中で、時間依存型の点検施策を採用し続ける限り、今後点検周期が短縮されていく可能性は否定できない。老朽化が深刻化する橋梁に対する目視点検周期は短縮させる一方で、蓄積された目視点検データを分析することによって、安全性が確認された橋梁に対しては点検周期を延伸するような状態依存型の点検施策の採用も視野に入れることが今後重要であると考えられる。ただし、時間依存型から状態依存型の点検へ移行する過渡的段階では、目視点検周期を 5 年以上に延伸した橋梁に対して、延伸期間中の安全を担保するために、対象とする劣化事象と比較して相対的に観測しやすい情報を補完的情報として蓄積し、その補完的情報、あるいはそれに基づいて設定された基準値に異常が確認された場合には橋梁の状態を迅速に確認する緊急点検を実施するような点検スキームを構築しておく必要がある。

本研究では道路橋を構成する多種多様な部材の中でも鉄筋コンクリート床版（以下、RC 床版）に着目する。

RC 床版の目視点検は床版下面から実施されるが、点検足場の設置、あるいは橋梁点検車両等を必要とすることが多く、また桁下空間の状況によっては道路通行規制を要することから、多大な労力と費用が必要となる。一方で、RC 床版の劣化と床版直上のポットホール発生との間には相関性が存在することが経験的に知られている。ポットホールの発生状況は日常の道路巡回を通して視認・記録される。したがって、RC 床版に対する点検周期が延伸される場合、ポットホールの発生状況を分析し、延伸期間中に発生頻度が事前に設定した基準値を超えた場合には緊急点検を実施するような点検スキームを整備することによって、時間依存型点検から状態依存型点検への 1 つの具現化案を提示できる。

以上の問題意識のもと、本研究では、道路橋 RC 床版に関する目視点検データに着目し、RC 床版の劣化速度と、その直上の舗装路面のポットホール発生確率が相互に影響を与えるような相関関係を明示的に考慮したポアソン隠れマルコフ劣化ハザードモデルを定式化する。さらに、マルコフ連鎖モンテカルロ法（以下、MCMC 法）を用いて、提案モデルのパラメータを推定する手法を開発する。最後に、実際の RC 床版に対する目視点検データとポットホールに対する道路巡回データを使用して、RC 床版の劣化とポットホール発生との関係性を定量的に評価した上で、将来的なポットホールの発生をシミュレーションし、複数のポットホール発生シナリオを仮定した上で、それぞれのシナリオとリスク

評価に基づいた状態依存型の点検スキームを提案する。以下、2. では本研究の基本的な考え方を述べる。3. ではポアソン隠れマルコフ劣化ハザードモデルを定式化する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 点検周期の最適化に関する既往研究

近年、社会基盤施設に対する点検業務の効率化を目的として、点検周期の最適化に関する研究が蓄積されている。貝戸らは、道路上の障害物の発生過程をモデル化して、道路巡回データに基づく推定手法を提案した上で、障害物発生リスク管理モデルを用いて道路巡回費用を削減するような道路巡回施策を提案している²⁾。小濱らは、貝戸らのモデルを発展させ、路上障害物の発生に起因する苦情発生メカニズムをモデル化し、苦情発生確率や苦情発生件数を推定している³⁾。さらに、これらの推定結果に基づいて、所与のリスク管理指標の下で道路巡回費用を最小化するような最適道路巡回施策を求めることが可能であると指摘している。また、貝戸らは橋梁を対象として、目視点検データに基づく統計的劣化予測手法（マルコフ劣化ハザードモデル⁴⁾）とフォルト・ツリー分析を組み合わせ、実際の長大橋のリスク発生確率を算出し、ライフサイクル費用とリスク発生確率の観点から最適点検施策を決定するための方法論を提案している⁵⁾。さらに貝戸らは、ライフサイクル費用とリスク費用の総和で定義されるトータル費用を評価指標として、その最小化を達成するような点検周期の決定手法も提案している⁶⁾。この他にも、ライフサイクル費用とリスクを評価指標とする最適点検間隔の決定手法は複数提案されている^{7),8)}。

これらの既往研究では、社会基盤施設に対して蓄積された点検データを用いた統計分析を基本として、施設の将来の劣化過程が過去の劣化過程と同一であるとの仮定のもとで、社会基盤施設のライフサイクル費用やリスクを定量化したり、点検間隔を含む最適な維持管理施策を決定したりしている。しかし、本研究で対象とする橋梁 RC 床版の場合、床版直上の舗装路面におけるポットホールの発生状況が、RC 床版の劣化速度に多大な影響を及ぼすことが経験的に知られている。ポットホールの発生頻度は時間的に変動する。劣化要因の時間的変動性を考慮して、社会基盤施設の劣化速度と点検周期を決定する研究は少ないのが実情である。

(2) 点検業務の効率化と状態依存型点検スキーム

橋梁は、多種多様な部材によって構成される。そのなかでも RC 床版は構造安全上、最重要部材に位置づけられている。近年の高速道路における大規模更新、大

規模修繕事業は、実質的に床版の取替事業と言ってもよい。当然のことながら、RC 床版の取替には膨大な費用が発生するだけでなく、通行規制・通行止めが生じることから、社会的影響は計り知れない。2014 年の道路法の改正により、現在道路橋に対しては 5 年に 1 回の周期で目視点検が実施されている。今後、目視点検データが蓄積されるに従い、それらを分析することによって実態に則した目視点検に移行する、すなわち時間依存型の点検から状況依存型の点検へと移行することも考えられる。ただし、時間依存型から状態依存型の点検へ移行する過渡的段階では、目視点検周期を 5 年以上に延伸した橋梁に対して、延伸期間中の安全を担保するために、1) 対象とする劣化事象に関して比較的観測しやすい情報を補完的情報として観測し、2) 補完的情報、あるいはそれに基づいて設定された基準値に異常が確認された場合には橋梁の状態を迅速に確認する緊急点検を実施するような点検スキームを構築しておく必要がある。

RC 床版においては、床版内部への雨水の侵入がその劣化速度に多大な影響を及ぼすことが知られている。舗装と RC 床版との間に防水層を設け、雨水の浸入を予防するような対策も取られているが、いずれにせよ一般的には、雨水の侵入量は路面状態に左右される。したがって、RC 床版の点検周期を延伸することを考える際に、延伸期間中の安全を担保するために、路面状態の低下によって雨水の侵入状況が変化し、それに伴って RC 床版の劣化速度が加速されるようなシナリオを無視することはできない。特に本研究の実証分析で対象とする高速道路においては表層材料として排水性舗装（高機能舗装）が大半を占めることから、RC 床版の劣化とポットホールの発生頻度との間には相関性が存在することが指摘されている。RC 床版に対する目視点検は上述したように 5 年に一度であるが、一方でポットホールに対しては走行安全性に関する重要項目であることから、道路管理者による日常巡回を通してその発生状況は日々観察され、データが蓄積されている。そこで本研究では、ポットホールの発生状況を補完的情報（舗装ひび割れ率も補完的情報として利用可能であるが、RC 床版の劣化との相関性に関して、ポットホールの発生の方が舗装ひび割れ率の進展よりも高かった）として、RC 床版の劣化を間接的に把握するような方法論を提案する。なお、ここでは舗装状態の低下の結果として、RC 床版の劣化が進展するような過程を述べた。一方で、実際には RC 床版に先に疲労き裂が発生して、舗装状態を低下させるような劣化過程も確認されている。RC 床版の劣化とポットホールの発生に関して、いずれが原因でいずれが結果であるかを点検データのみから明確に特定することは困難であるが、両者の劣化事象が互い

に影響を及ぼし合う関係性は成立しているものと判断して、これ以降の議論を進める。

(3) モデル化の基本的概念

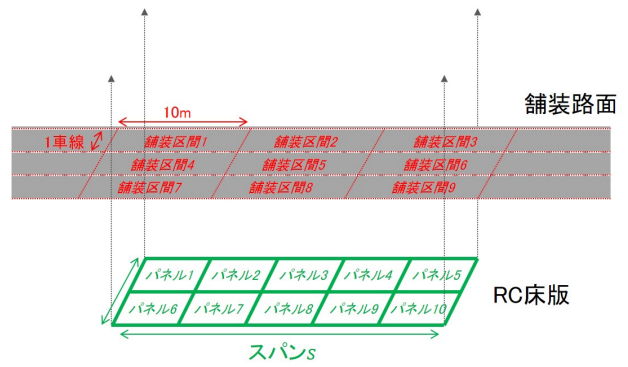
提案するポアソン隠れマルコフ劣化モデルは、1) 道路橋 RC 床版の劣化過程を表現するマルコフ劣化ハザードモデル、2) 床版直上に位置する舗装路面におけるポットホール発生過程を表現するポアソンモデルの2つで構成される。本研究では高速道路の橋梁 RC 床版を適用事例として取り上げるが、高速道路会社では、RC 床版に関して、床版パネル単位（縦桁と横桁で囲まれた領域であり、本研究において RC 床版の劣化を考える際の基本単位）で目視点検の結果を記録している。本研究においては床版パネル単位の点検時系列データを用いてモデル推定を行う。一方でポットホールに関しては、日常的な道路巡回を通してその発生日時と発生場所を記録しており、2. で定義する路面ユニット（床版パネルと同じように舗装路面の劣化を考える上での基本単位）内で発生数を集約し、その点検時系列データを用いてモデルを推定する。ただし、これらの2つの劣化事象は独立にモデル化されるのではなく、任意時点の RC 床版の劣化確率に当該時点におけるポットホールの発生状況が影響を及ぼすことを表現するパラメータ（以下、路面スケールパラメータ）を導入する。同様に、任意時点におけるポットホールの発生確率に、当該時点における床版の劣化状態が影響を及ぼすような床版スケールパラメータも導入する。これらによって互いの劣化状態が影響を及ぼし合うような関係性を表現することが可能となる。ただし、先に述べたようにこれらは両者の相関関係を表すものであり、因果関係を説明するものではない。

スケールパラメータの推定値から、床版の劣化状態が路面のポットホール発生頻度に及ぼす影響度、路面の状態が床版の劣化速度に及ぼす影響度を定量的に評価することができる。その結果、有意な影響があれば、路面の状態に応じて床版の劣化リスクを評価でき、比較的簡単に実施できる路面の日常点検で、床版のリスクを管理することができると考えられる。最後に、ポットホールの発生状況に応じた床版のリスクを評価し、ポットホールの発生状況ごとの RC 床版のリスクと点検周期の関係性を明らかにすることが可能となる。

3. ポアソン隠れマルコフ劣化モデル

(1) 劣化予測の基本単位と時間軸の設定

橋梁の任意スパン $s(=1, \dots, S)$ に着目し、当該スパンの舗装路面におけるポットホールの発生過程と、当該スパンを構成する RC 床版の劣化過程をモデル化する。



注）路面ユニットの数 $P_s = 9$ 、パネル数 $Q_s = 10$ のスパンを想定

図-1 劣化予測単位

ポットホールの発生過程に関しては、図-1 に示すように、1車線×10m で区切られる範囲（以下、路面ユニット）をモデル化の基本単位とする。一方で、RC 床版の劣化過程に関しては、縦桁と横桁で構成されるパネルをモデル化の基本単位とする。

スパン s の供用開始時点 $t_{s,0}$ を原点とする離散時間軸 $t_{s,1}, \dots, t_{s,K_s}$ を導入する。また、連続する2時点間 $[t_{s,k}, t_{s,k+1})$ ($k=0, \dots, K_s-1$) の期間長を $z_{s,k}$ とする。スパン s 上に位置する任意の路面ユニット p_s の連続する2時点間 $[t_{s,k}, t_{s,k+1})$ におけるポットホールの発生個数を $v_{s,p,k}$ とし、スパン s を構成する任意の床版パネル q_s の時点 $t_{s,k}$ におけるパネルの健全度を $\kappa_{s,q,k}$ とする。

本研究で提案する劣化予測モデルは、図-1 に示すように、1) 複数のパネルで構成されるスパン、2) 当該スパンの直上に位置し、車線×キロポストで区切られた複数の路面ユニットで構成される舗装路面、からなる RC 床版橋を想定し、1) パネル単位の RC 床版の劣化過程、2) 路面ユニット単位のポットホール発生過程を記述する。具体的に、パネル単位の劣化過程は、 I 段階の離散的健全度 $1, \dots, I$ の推移として表現する。ここで、健全度が大きくなるほど、RC 床版の劣化が進行していることを意味する。

RC 床版の劣化状態とポットホールの発生頻度が相互に影響を与えるようなポアソン隠れマルコフ劣化ハザードモデルを開発する際にはデータ取得に関する時間的不整合性と空間的不整合性に留意する必要がある。一般的に、2つの劣化事象に着目する場合、それぞれの事象に対する点検時点に時間差が生じるという時間的不整合性が問題となる。ただし、本研究では、RC 床版の目視点検は5年に一度実施されるのに対して、ポットホールに対する道路巡回は日常的に実施されるため、時間的不整合性の問題は大きくない（RC 床版に対する目視点検実施日にも道路巡回は実施される）と考えられる。一方で、RC 床版はパネル単位、舗装路面はキロポスト単位（本研究では10m単位）で点検や巡回のデー

タが記録される．図-1でも確認できるように，パネル単位とキロポスト単位では空間的に整合性が取れていない．この空間的不整合性について，本研究の範囲内において許容できるか否かを検証する必要はあるものと考えるが，この点については別の機会に議論することとし，本研究では学術的な検討は行わずヒューリスティックに整合性を図るにとどめた．なお，ここで指摘した空間的不整合性に関しては，様々なデータベースが業務ごとに分散化されていることに起因するが，RC床版と路面の点検・調査，維持管理を独立に実施している分には何ら問題は生じない．しかし，アセットマネジメントのさらなる高度化や実践という視点に立ったときには，この問題を解決するために統合的データベースの開発が重要な課題となる．

(2) ポットホール発生モデル

いま，スパン s ($= 1, \dots, S$) 上に位置する路面ユニット p_s ($= 1, \dots, P_s$) に関して，任意の連続 2 時点間 $[t_{s,v}, t_{s,v+1})$ に着目し，ポットホールの発生過程をモデル化する．当該期間の単位時間あたりのポットホール発生数（ポットホール到着率）が，1）構造条件や環境条件といった当該路面ユニット p_s の特性を表現する複数の説明変数 $x_{s,p,0}, x_{s,p,1}, \dots, x_{s,p,A}$ （ただし， $x_{s,p,0}$ は定数項に対する変数を表現し， $x_{s,p,0} = 1$ とする），2）当該スパン s を構成する全てのパネル $1, \dots, Q_s$ それぞれの時点 $t_{s,v}$ における健全度 $\kappa_{s,1,v}, \dots, \kappa_{s,Q_s,v}$ をもとに表現される関数 $f_q(\kappa_{s,v}|\alpha)$ （ただし， α は未知パラメータベクトルであり，関数値は 1 から E までの整数値をとる）に依存すると考える．ただし， $\kappa_{s,v} = (\kappa_{s,1,v}, \dots, \kappa_{s,Q_s,v})$ とする．以上のことから，スパン s の路面ユニット p_s における 2 時点間 $[t_{s,v}, t_{s,v+1})$ でのポットホール到着率 $\lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha)$ を，

$$\lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) = \begin{cases} \exp(x_{s,p}\alpha'_1) & \text{if } f_q(\kappa_{s,v}) = 1 \\ \vdots & \\ \exp(x_{s,p}\alpha'_E) & \text{if } f_q(\kappa_{s,v}) = E \end{cases} \quad (1)$$

と設定する．ここに， $x_{s,p} = (x_{s,p,0}, \dots, x_{s,p,A})$ である． α_e ($e = 1, \dots, E$) は各説明変数 $x_{s,p,0}, \dots, x_{s,p,A}$ がポットホールの到着率へ及ぼす影響の度合いを表現する未知パラメータベクトルであり， $\alpha_e = (\alpha_{e,0}, \alpha_{e,1}, \dots, \alpha_{e,A})$ ($e = 1, \dots, E$) で構成される．記号「 $'$ 」は転置操作を表す．

本研究では，関数 $f_q(\kappa_{s,v})$ をスパン判定と考える．具

体的には， $E = 5$ とし，

$$f_q(\kappa_{s,k}) = \begin{cases} 1 & \text{if } \#(\kappa_{s,q,v} \geq 2, q = 1, \dots, Q_s)/Q_s < 0.3 \\ 2 & \text{if } \#(\kappa_{s,q,v} \geq 2, q = 1, \dots, Q_s)/Q_s \geq 0.3 \\ 3 & \text{if } \#(\kappa_{s,q,v} \geq 2, q = 1, \dots, Q_s)/Q_s \geq 0.4 \\ 4 & \text{if } \#(\kappa_{s,q,v} \geq 4, q = 1, \dots, Q_s)/Q_s \geq 0.3 \\ 5 & \text{if } \#(\kappa_{s,q,v} \geq 4, q = 1, \dots, Q_s)/Q_s \geq 0.4 \end{cases} \quad (2)$$

と表現する．ただし， $\#(\kappa_{s,q,v} \geq i, q = 1, \dots, Q_s)$ は， $q = 1, \dots, Q_s$ の中で $\kappa_{s,q,v} \geq i$ を満たす q の数を表現する．

設定したポットホール到着率 $\lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha)$ に基いて，当該 2 時点間 $[t_{s,v}, t_{s,v+1})$ においてポットホールが任意の v (≥ 0) 個発生する確率 $\rho_{s,p,v,v}(z_{s,v}, x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha)$ を導出する．ポットホールの発生が，1）ポットホールの発生は互いに独立である（独立増分），2）ポットホールが発生する確率はどの時点においても同じである（定常性），3）微小時間内にポットホールが 2 個以上発生することはない（希少性），といった 3 つの条件を満たすとし，ポットホールの発生過程がポアソン過程に従うと考える．2 時点間 $[t_{s,v}, t_{s,v+1})$ を期間長 Δz の微小期間に n 等分する．2 時点間 $[t_{s,v}, t_{s,v+1})$ に v 個のポットホールが発生する確率は，ポットホールの発生がポアソン過程となる条件から， n 個の微小期間のうち，任意の v 個の微小期間においてポットホールが発生し（仮定 2）より），残りの $n - v$ 個の微小期間においてポットホールが発生しない確率と同義である．また，任意の微小期間にポットホールが発生する確率と発生しない確率はそれぞれ，式 (1) を用いて $\lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) \cdot \Delta z$ および $1 - \lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) \cdot \Delta z$ と表現できる．以上のことから，確率 $\rho_{s,p,v,v}(z_{s,v}, x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha)$ は，

$$\begin{aligned} \rho_{s,p,v,v}(z_{s,v}, x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \binom{n}{v} (\lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) \cdot \Delta z)^v \\ &\quad \cdot (1 - \lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) \cdot \Delta z)^{n-v} \\ &= \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{n!}{(n-v)!v!} (\lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) \cdot \Delta z)^v \\ &\quad \cdot (1 - \lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) \cdot \Delta z)^{n-v} \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{(\lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) \cdot z_{s,v})^v}{v!} \\ &\quad \cdot \frac{n(n-1) \cdots (n-v+1)}{n^v} \\ &\quad \cdot \left(1 - \frac{\lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) \cdot z_{s,v}}{n}\right)^{n-v} \\ &= \frac{(\lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) \cdot z_{s,v})^v}{v!} \\ &\quad \cdot \exp(-\lambda_{s,p,v}(x_{s,p}, f_q(\kappa_{s,v})|\alpha) \cdot z_{s,v}) \end{aligned} \quad (3)$$

と導出できる。以上の床版の劣化状況を考慮した床版直上の舗装路面におけるポットホール発生モデルを、これ以降、ポットホール発生モデルと呼ぶ。

(3) 床版パネルの劣化過程のモデル化

スパン s を構成する RC 床版パネル q_s に関して、任意の連続2時点間 $[t_{s,w}, t_{s,w+1})$ に着目し、床版パネルの劣化過程をモデル化する。時点 $t_{s,w}$ から時点 $t_{s,w+1}$ の期間の任意時点まで健全度 i の状態で推移し、かつその時点で健全度 $i+1$ に推移する確率（健全度 i のハザード率）が、1) 床版パネル q_s の構造条件や環境条件といった床版パネルの特性を表現する説明変数 $y_{s,q,0}, y_{s,q,1}, \dots, y_{s,q,B}$ （ただし、 $y_{s,q,0}$ は定数項を表現し、 $y_{s,q,0} = 1$ とする）、2) スパン s のすべての路面ユニット $1, \dots, P_s$ それぞれのポットホール発生率 $\mu_{s,1,w}, \dots, \mu_{s,P_s,w}$ をもとに表現される関数 $f_p(\mu_{s,w}|\gamma)$ （ただし、 γ は未知パラメータである）に依存すると考える。ただし、 $\mu_{s,w} = (\mu_{s,1,w}, \dots, \mu_{s,P_s,w})$ とする。ここに、ポットホール発生率 $\mu_{s,p,w}$ ($w = 1, \dots, W_s$) は、路面ユニット p_s における期間 $[t_{s,w}, t_{s,w+1})$ のポットホール発生個数 $v_{s,p,w}$ を2時点間の期間長 $t_{s,w+1} - t_{s,w} = z_{s,w}$ で除した値と定義する。すなわち、

$$\mu_{s,p,w} = \frac{v_{s,p,w}}{z_{s,w}} \quad (w = 1, \dots, W_s) \quad (4)$$

と表す。以上のことから、スパン s の床版パネル q_s における時点 $t_{s,w}$ から時点 $t_{s,w+1}$ の期間での健全度 i のハザード率 $\theta_{s,q,w,i}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_i, \gamma)$ を、

$$\begin{aligned} & \theta_{s,q,w,i}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_i, \gamma) \\ &= \exp(f_p(\mu_{s,w}|\gamma)) \cdot \exp(y\beta'_i) \\ & \quad (i = 1, \dots, I-1) \end{aligned} \quad (5)$$

と設定する。ここに、 $y_{s,q} = (y_{s,q,0}, \dots, y_{s,q,B})$ 、 β_i は各説明変数 $y_{s,q,0}, \dots, y_{s,q,B}$ がハザード率へ及ぼす影響の度合いを表現する未知パラメータベクトルであり、 $\beta_i = (\beta_{i,0}, \dots, \beta_{i,B})$ ($i = 1, \dots, I-1$) で構成される。

本研究では、関数 $f_p(\mu_{s,w})$ に対して、未知パラメータ γ を導入し、

$$f_p(\mu_{s,w}|\gamma) = \gamma \cdot \max\{\mu_{s,1,w}, \dots, \mu_{s,P_s,w}\} \quad (6)$$

と表現する。

設定したハザード率 $\theta_{s,q,w,i}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_i, \gamma)$ に基いて、当該2時点間 $[t_{s,w}, t_{s,w+1})$ において、健全度が任意の i ($= 1, \dots, I$) から j ($\geq i$) に推移する確率 $\pi_{s,q,w,i,j}(z_{s,w}, y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta, \gamma)$ を導出する。将来時点での健全度が、過去の健全度履歴に依存しないという条件を満たすと考え、健全度の推移過程はマルコフ過程となる。津田らが開発した多段階指数ハザードモデル⁴⁾（マルコフ劣化ハザードモデル）を用いて床版パネルの劣化確率を表現する。以上のことから確率

$\pi_{s,q,w,i,j}(z_{s,w}, y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta, \gamma)$ は、

$$\begin{aligned} & \pi_{s,q,w,i,j}(z_{s,w}, y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta, \gamma) \\ &= \text{Prob}[h(t_{s,w+1}) = j | h(t_{s,w}) = i] \\ &= \sum_{a=i}^j \left\{ \prod_{b=i}^{a-1} \frac{\theta_{s,q,w,b}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_b, \gamma)}{\eta_{s,q,w,b,a}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_b, \beta_a, \gamma)} \right. \\ & \quad \cdot \prod_{b=a}^{j-1} \frac{\theta_{s,q,w,b}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_b, \gamma)}{\eta_{s,q,w,b+1,a}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_{b+1}, \beta_a, \gamma)} \\ & \quad \cdot \exp(-\theta_{s,q,w,a}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_a, \gamma) \cdot z) \Big\} \quad (7) \\ & \quad (i = 1, \dots, I; j = i, \dots, I) \end{aligned}$$

と導出できる。ただし、

$$\left\{ \begin{aligned} & \eta_{s,q,w,a,b}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_a, \beta_b, \gamma) = \\ & \quad \theta_{s,q,w,a}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_a, \gamma) \\ & \quad - \theta_{s,q,w,b}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_b, \gamma) \\ & \quad (a = 1, \dots, I-1; b = 1, \dots, I-1) \\ & \quad \prod_{b=i}^{a-1} \frac{\theta_{s,q,w,b}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_b, \gamma)}{\eta_{s,q,w,b,a}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_b, \beta_a, \gamma)} = 1 \quad \text{if } a = i \\ & \quad \prod_{b=a}^{j-1} \frac{\theta_{s,q,w,b}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_b, \gamma)}{\eta_{s,q,w,b+1,a}(y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta_{b+1}, \beta_a, \gamma)} = 1 \quad \text{if } a = j \end{aligned} \right. \quad (8a)$$

とする。

また、床版パネルは補修や更新を行わない限り、健全度が回復することはない。そこで、期間 $[t_{s,w}, t_{s,w+1})$ 中に、スパン s の床版パネル q_s の健全度が任意の i ($= 2, \dots, I$) から任意の j ($< i$) に推移する確率 $\pi_{s,q,w,i,j}(z_{s,w}, y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta, \gamma)$ を、

$$\begin{aligned} & \pi_{s,q,w,i,j}(z_{s,w}, y_{s,q}, f_p(\mu_{s,w})|\beta, \gamma) = 0 \\ & \quad (i = 2, \dots, I; j = 1, \dots, i-1) \end{aligned} \quad (9)$$

と設定する。以上の舗装路面におけるポットホール発生状況を考慮した舗装路面直下の床版の劣化モデルを床版劣化モデルと呼ぶ。

4. おわりに

本研究では、RC 床版の劣化過程と RC 床版直上に位置する舗装路面におけるポットホールの発生過程とを点検データに基いて同時に表現するモデルを開発した。本研究では、RC 床版の劣化過程と舗装路面におけるポットホールの発生過程という複合的劣化過程に着目したが、開発した方法論は、点検データさえ存在すれば、他の劣化過程にも適用できる汎用性を有している。例えば、土工区間の舗装に着目した場合、舗装表面のポットホールの発生と地中の層の健全度が相互に影響し合い、複合的劣化過程を構成していることが考えられる。地中の層の健全度は目視では確認できないが、Falling Weight Deflectometer (FWD) による舗装たわみ量の測

定結果から、地中の層の健全度を推定する手法も開発されている。このようなデータを本研究で開発した方法論に適用し、舗装の点検の効率化を達成できる可能性が残されている。

なお、本研究で開発した方法論を実在する高速道路 RC 床版に関するデータに適用した実証分析および今後の研究課題に関しては、研究発表会当日に発表する予定である。

謝辞：本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP（戦略的イノベーション創造プログラム）「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：JST）によって実施された。また、本研究の一部を実施するあたり、独立行政法人日本学術振興会科学研究費助成事業「特別研究員奨励費（研究課題/領域番号：JP18J20014）」の助成を受けた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2014.
- 2) 貝戸清之，小林潔司，加藤俊昌，生田紀子：道路施設の巡回頻度と障害物発生リスク，土木学会論文集 F，Vol.63，No.1，p.16-34，2007.
- 3) 小濱健吾，貝戸清之，小林潔司，福田泰樹，板垣勝則：道路障害物に関する苦情発生分析，土木学会論文集 F4，Vol.69，No.1，p.32-46，2013.
- 4) 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.
- 5) 貝戸清之，金治英貞，小林寛，間嶋信博，大石秀雄，松岡弘大：目視点検データを用いたフォルト・ツリー分析に基づく長大橋の最適点検政策の決定手法，土木学会論文集 F4，Vol.67，No.2，p.74-91，2011.
- 6) 貝戸清之，金治英貞，杉岡弘一，大石秀雄，松岡弘大：鋼材腐食ハイブリッド劣化予測とフォルト・ツリー分析を用いた長大橋の最適点検間隔，土木学会論文集 F4，Vol.69，No.2，p.84-101，2013.
- 7) 堀倫裕，小濱健吾，貝戸清之，小林潔司：下水処理施設の最適点検・補修モデル，土木計画学・研究論文集，土木学会，Vol.25，No.1，pp.213-224，2008.
- 8) 貝戸清之，鎌田敏郎，大谷明，山中明彦：下水道コンクリート官渠のストックマネジメント，下水道協会誌，Vol.47，No.577，pp.78-87，2010.