

補修効果の経時変化を考慮した統計的劣化予測モデル

宇野 裕亮¹・二宮 陽平²・貝戸 清之³

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: y.uno@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²学生会員 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

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

近年、老朽化の進展した社会基盤施設に対して劣化を抑制することを目的とした補修工法の開発・導入が行われている。すでに社会基盤施設に対して膨大な補修実績が存在するものの、補修効果の定量的評価に関する研究成果は十分に蓄積されているとはいえない。特に補修効果の経時変化に関する研究はほとんど蓄積されていない。本研究では RC 床版における床版防水を対象として点検データを用いた統計的劣化予測を行い、補修効果を事後的に評価する方法論を提案する。具体的には、補修効果を補修導入前後の劣化ハザード率の差異として補修効果関数で規定されるとし、補修効果関数を経時変化するように定式化し劣化予測を行う。最後に実際の点検データを用いて実証分析を行う。

Key Words : *asset management, hazard model, repair effect, post evaluation, RC deck, waterproof*

1. はじめに

近年、社会基盤施設（以下、施設）の老朽化が進展し、それに起因する多様な問題が発生している。それらの問題を予算制約や人的制約を満たしながら対処するために、既存の施設の劣化を抑制することを目的とした補修工法の開発、および導入が行われている。補修導入の意思決定を行う際には、シミュレーションや実験などによる評価を行った後に、実施施設に対して試行的に導入したうえで本格的な導入を行うことが望ましい。また、すでに多くの施設に対して適用されている補修の効果を適切に把握し、補修工法の取捨選択を通じて、マネジメントサイクルを継続的に改善することも必要となる。補修効果に関してはシミュレーションや実験を通じて検証を行った事例¹⁾や補修前後の劣化速度の差異として評価した事例²⁾は存在するものの、これらの研究においては補修効果が施設の寿命を迎えるまで存在しているとの仮定をもとに検証や評価が行われている。しかしながら実際の施設においては補修効果が施設の寿命を迎えるまでに損失する可能性が存在するため、補修効果が施設の寿命を迎えるまで存在しているとの仮定によって補修効果が適切に推計されていない可能性が存在する。また施設群の価値を最大化するためには、管理者が管理する施設群に対して適切なタイミングで適切な補修を行うほかに、適切なタイミン

グで再び補修を行う意思決定がなされることが望ましい。再補修のタイミングを決定するためには補修効果が損失するタイミングを把握することが必要であるが、補修効果が損失するタイミングを把握するための手法に関する研究は十分に蓄積されているとはいえない。

本研究では、点検データを用いた施設の統計的劣化予測手法に基づき、補修効果の経時変化を事後的に評価するための方法論を開発する。具体的には、補修効果を補修導入前後の劣化ハザード率（劣化速度）の差異として評価し、その差異が補修導入後に経時変化する補修効果関数によって表現されるものとしてモデルの定式化を行う。その際、補修効果関数の候補として、いくつかの関数形を提案しそれらを情報量基準を用いて適切な関数形を決定する。その上で推定された補修効果関数を用いて補修寿命を評価するための方法論を提案する。

以下、**2.**で本研究の基本的な考え方を述べる。**3.**で本研究で提案する補修効果の経時変化を考慮した統計的劣化予測モデルを定式化する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) 統計的劣化予測に関する既往研究

統計的劣化予測に関する研究が数多く蓄積されている。統計的劣化予測では目視点検データから劣化過程

の背後に存在する規則性をモデル化することを目的としており数多くの研究事例が蓄積されている。特に劣化過程をハザードモデルを用いて表現する手法^{3),4)}が提案されて以来、多様な劣化ハザードモデルが提案されている。

劣化状態が故障の有無のような 2 値情報で表現される点検データを用いることで、Shin and Madanat³⁾は道路舗装のひび割れ開始時刻を予測するためのワイブル劣化ハザードモデルを提案している。また、青木等⁵⁾はトンネル照明を対象として、ワイブル劣化ハザードモデルの有効性について検証している。さらに貝戸等⁶⁾は交通管制システムが膨大な種類の機器類で構成されていることに着目し、多品種・小数の機器群の呼称仮定をモデル化するために、ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデルを提案している。

一方で劣化状態が複数の健全度で表現されるような施設の劣化予測に対しては、津田等⁴⁾が健全度の推移を複数の独立な指数ハザードモデル⁷⁾として表現した多段階指数ハザードモデル（マルコフ劣化ハザードモデル）を提案している。また小濱等⁸⁾は個々の施設グループに固有な劣化条件の異質性を表現するために、混合マルコフ劣化ハザードモデルを提案している。水谷等²⁾は混合マルコフ劣化ハザードモデルにおける異質性パラメータが不可観測要因によって決定される点に着目し、混合マルコフ劣化ハザードモデルを階層ベイズ推計する手法⁹⁾を援用することによって、施設における補修効果の有意性を定量化する手法を提案している。

(2) 補修導入タームと時間軸

施設群のアセットマネジメントを実施するに当たり、ライフサイクル費用評価などに基づく長期的戦略の策定と、それを実現するための個々の施設に対する点検、補修導入等の意思決定が必要となる。その際、説明責任を満足した上で合理性を担保しつつ、可能な限り最善の戦略の策定や点検、補修に関する意思決定を実施するためには、蓄積された点検データや補修履歴などの情報を用いたマネジメントアクションの事後評価に基づきマネジメントサイクルを継続的に改善することが重要となる。このようなマネジメントサイクルの継続的な改善のためのフレームワークとしては、意思決定の不可逆性^{10),11)}を考慮した動学的なリアルオプション評価^{12),13)}などが考えられ、ライフサイクル費用や施設需要を考慮した研究事例^{14),15)}も蓄積されている。

本研究では、このような長期的なマネジメント戦略立案に加え、個々の施設に対する補修工法選定のようなミクロレベルでのマネジメントにも有用となる技術として、施設の劣化過程に着目し補修効果を定量化するための方法論を提案する。具体的には、水谷等²⁾の

考え方を踏襲し、管理する施設群のそれぞれの施設で獲得されている膨大な点検データから劣化ハザード率（劣化速度）を推計し、補修前後で劣化ハザード率の差異を定量的に評価するための方法論を提案する。

水谷等²⁾の提案した方法論では、劣化ハザード率の補修前後での変動を全ての健全度において共通の異質性パラメータの変動として推計している。言い換えるところある施設における補修効果はどの健全度においても共通という仮定をおいている。そのため、水谷等の提案した方法論では、補修効果が経年と共に変化するような現象を分析することが不可能である。しかしながら補修効果が施設寿命が訪れるまで変化しないことは考えにくい。そのため、補修効果が経年変化するモデルを構築する必要がある。

ある施設の竣工時点を 0 とする時間軸 t を設定する。いま、この時間軸上の時点 t_r において補修がなされたと考える。すると、時間軸 t 上の時点 t_r を 0 とする補修からの時間軸 τ を設定することが可能となる。ここで図-1 のように、供用開始から補修導入時点までをターム 1、補修導入時点から現在までをターム 2 と定義する。このときターム 2 における劣化ハザード率とターム 1 における劣化ハザード率の間に、

$$\begin{aligned} & (\text{ターム 2 における劣化ハザード率}) \\ & \propto (\text{ターム 1 における劣化ハザード率}) \quad (1) \end{aligned}$$

が成り立つと仮定する。なお、補修導入されていない施設グループは全てターム 1 とする。本研究においては式 1 における比例定数を補修効果と定義する。いまこの比例定数を定量的に把握することができれば、補修効果を定量的に把握することが可能となる一般には本研究で提案する方法論を用いることにより、複数種類の補修効果や複数回の長補修効果の評価も可能であるが、ここでは、1 種類の補修が 1 度だけ導入される場合を考える。また、本研究においては補修導入時点は観測できるものとした。一般には補修導入時点は獲得可能であるが、獲得されていない場合には本研究で提案する手法を直接は適用できないことに留意されたい。

(3) 床版防水層の構造

本研究の実証分析では、高速道路橋 RC 床版上面の防水層の施工を補修と考え、分析を行う。高速道路橋は一般に下面から、コンクリート床版、プライマー層、防水層と床版の接着層、防水層、舗装と防水層の接着層、舗装の順に層構造をしている。プライマー層とは、床版と防水層の接着効果を高める働きや床版内部からの水蒸気の発生を抑制するために設けられる層である。また、防水層とは、舗装等より侵入してきた水を床版面まで浸透させないように、止水するために設けられる

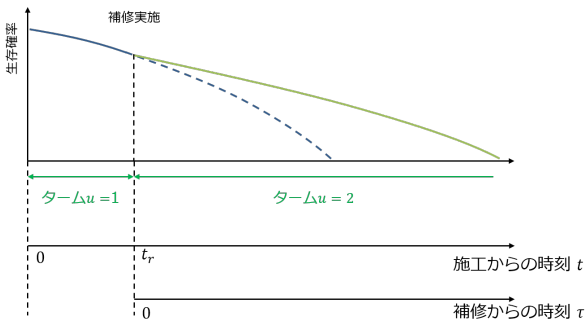


図-1 補修ターム設定

層である。防水層に不備、もしくは、損傷がある際には床版が浸水し、床版の耐久性を低下させる恐れがある。そのため、道路橋床版の耐久性向上を目的とし、平成14年に改訂された「道路橋示方書・同解説」¹⁶⁾においては「アスファルト舗装とする場合は、橋面より侵入した雨水等が床版内部に浸透しないように防水層等を設けるものとする」と明記された。近年新設された道路橋においては防水層が施工されている場合がほとんどであり、従来の道路橋においても順次施工されているが、防水層が未だ施工されていない道路橋も存在している。本研究で対象とする竣工時に防水層が施工されていない高速道路橋においては、舗装の打換えが行われる際に同時に防水層が施工される。つまり、防水層の施工はRC床版の劣化度合い、劣化速度に関係なく選定されることに留意されたい。仮に防水層の施工がRC床版の劣化度合い、劣化速度によって意思決定されている場合、サンプル選択バイアスが生じていると考えられるため、補正するような方法論が必要である。

床版防水層は、シート系床版防水層と塗膜系床版防水層の2種類に大別される。また、それらは施工方法や防水材料によって細分化される。シート系床版防水層とは、ポリエステル系不織布や織布等に改良アスファルトを含浸被覆させて積層したシートによる防水材である。シート系床版防水層は、施工方法によって流し貼り型、加熱溶着型、常温粘着型の3種類に分類される。シート状のため塗膜系床版防水に比べ確実な防水が期待できるが、シートのつなぎ目や曲面などの複雑な部分の施工には欠陥が生じる恐れがある。塗膜系床版防水層とは、合成ゴムや樹脂などで改質されたアスファルトを加熱装置で溶融し、塗布することにより防水するものである。塗膜系床版防水層は、防水層の材料により、アスファルト加熱型、ゴム溶剤型、反応樹脂型の3種類に分類される。シート系床版防水層と比べ、均一に防水層を施工することは難しいが、複雑な部分の施工にも対応することができる。本研究の実証分析では、床版防水層の施工によるRC床版への浸水形態

の変化に起因したRC床版の劣化過程の変化を補修効果と捉え分析を行う。

3. 補修効果経時変化モデルの定式化

(1) ハザードモデル

本研究では、RC床版の劣化過程を指数ハザードモデルにより表現する。指数ハザードモデルに関しては参考文献⁷⁾に詳しいが、読者の便宜を図るためにその概要を説明する。いま、ある施設が建設され、損傷が発生するまでの期間（以下、施設寿命）に着目する。損傷発生の有無が常時観測されていると考え、社会基盤施設の寿命 ζ は確率密度関数 $f(\zeta)$ 、分布関数 $F(\zeta)$ に従う確率変数であると考えることが出来る。ただし施設寿命 ζ の定義域は $[0, \infty)$ である。いま、建設時点から任意の時点 $t \in [0, \infty)$ まで施設寿命を迎えない確率 $\tilde{F}(t)$ （以下、生存確率）は、全事象確率1から時点 t までに施設寿命を迎える累積確率 $F(t)$ を引いた

$$\tilde{F}(t) = 1 - F(t) \quad (2)$$

によって定義できる。ここで、損傷が時点 t まで発生せずに、かつ期間 $[t, t + \Delta t]$ 中に発生する確率は

$$\lambda(t)\Delta t = \frac{f(t)\Delta t}{\tilde{F}(t)} \quad (3)$$

と表せる。損傷が時点 t まで発生せず、かつ当該時点で発生する確率密度 $\lambda(t)$ を「劣化ハザード関数」とよぶ。式(2)の両辺を t に関して微分することによって、

$$\frac{d\tilde{F}(t)}{dt} = -f(t) \quad (4)$$

を得る。このとき、式(3)を用いることで

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\tilde{F}(t)} = \frac{d}{dt} \left(-\log \tilde{F}(t) \right) \quad (5)$$

と変形できる。ここで、 $\tilde{F}(0) = 1 - F(0) = 1$ を考慮し、式(5)を t に関し積分すると

$$\int_0^t \lambda(u) du = -\log \tilde{F}(t) \quad (6)$$

を得る。したがって劣化ハザード関数 $\lambda(u)$ を用いれば、生存確率 $\tilde{F}(t)$ は

$$\tilde{F}(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(u) du \right] \quad (7)$$

と表される。このように、劣化ハザード関数 $\lambda(u)$ の関数形を決定すれば、社会基盤施設の生存確率 $\tilde{F}(t)$ を導出することが出来る。

いま、補修を行うことによって補修を行っていない場合と比較し、劣化速度が比例的に変化すると考える。つまり、補修を行っていないターム $u = 1$ の場合のハザード率 $\lambda_1(t)$ と、補修を行った後のターム $u = 2$ の場合のハザード率 $\lambda_2(t)$ との間に、

$$\lambda_2(t) = \eta(\tau)\lambda_1(t) \quad (8)$$

が成り立つと考える。ここで、 $\eta(\tau)$ は補修による劣化速度変化を規定する関数（以下、変化率規定関数）であり、補修効果関数 $\tilde{\eta}(\tau)$ は

$$\tilde{\eta}(\tau) = 1 - \eta(\tau) \quad (9)$$

で表現することができる。本研究では、長寿命化技術導入を導入していないターム $u = 1$ の場合の劣化ハザード関数として指数ハザード関数

$$\lambda_1(t) = \theta \quad (10)$$

を用いるとする。これは補修ターム u によって劣化速度が比例的に変化すると考えることから、劣化速度が補修導入タイミングによらず一定となるように設定するためである。劣化速度が経時によって変化するような場合を考慮する場合には、変化率規定関数を劣化速度に依存する形で定式化する必要があると考えられるが一般的な劣化ハザード関数は補修ターム u によって

$$\lambda_u(t) = \begin{cases} \theta & (u = 1) \\ \eta(\tau)\theta & (u = 2) \end{cases} \quad (11)$$

のように表される。よって式 (7) を用いると、

$$\tilde{F}_u(t) = \begin{cases} \exp(-\theta t) & (u = 1) \\ \exp\left[-\theta\left\{t_r + \int_{t_r}^t \eta(t' - t_r) dt'\right\}\right] & (u = 2) \end{cases} \quad (12)$$

となる。

(2) 変化率規定関数と補修効果関数

3.(1) において定義した変化率規定関数に関しては様々な関数形が考えられるが、ハザードモデルの定義より、ハザード率 $\lambda(t)$ は 0 以上の値をとる必要がある、そのため、式 (8) より

$$\eta(\tau) \geq 0 \quad (13)$$

である必要がある。劣化予測モデルを定式化するには、力学的なメカニズムによる定式化もしくは経験的な定式化が一般的である。しかしながら、本研究で対象としている補修効果の経時的な変化に関する力学的、経験的な知見は十分蓄積されているとは言いがたい。そのような現状においては、一般的な関数形を用いて劣化事象を表現する必要があるため、いくつかの関数形を比較検証する必要がある。本研究の実証分析では式 (13) 以外にいくつかの制約条件を設けることで、制約を満たす変化率規定関数を選定する。

2.(3) に示したとおり床版防水層施工を長寿命化技術の導入と考える。床版防水層施工は床版の上面から施工されるものであり、一般に劣化速度を低下させる効果があると考えられることから、

$$\eta(\tau) \leq 1 \quad (14)$$

であると仮定する。さらに補修導入時点で最大の効果を発揮し、十分時間が経過した後には補修効果が消失

すると仮定することで、

$$\begin{cases} \lim_{\tau \rightarrow 0} \eta(\tau) = \eta(0) = \eta_r \\ \lim_{\tau \rightarrow \infty} \eta(\tau) = 1 \end{cases} \quad (15)$$

という制約条件を導くことができる。 η_r は初期変化率規定値であり、初期補修効果 $\tilde{\eta}(0) = 1 - \eta_r$ を規定する。

式 (13) - 式 (15) の制約条件を満たす関数として、本研究では a) Brody 関数、b) Von Bertalanffy 関数、c) Logistic 曲線、d) Gompertz 曲線を提案する。その上で、それぞれの関数形を変化率規定関数として採用した際の Widely Applicable Information Criteria (以下、WAIC) ¹⁷⁾ を算出、比較することで最適な変化率規定関数を決定する。以下に本研究で候補とした関数の式を記載する

a) Brody 関数

基本的な Brody 関数は

$$\eta(\tau|A, B, C) = A \{1 - B \exp(-C\tau)\} \quad (16)$$

である。式 (16) のパラメータ A, B を定数と考え、式 (13) - 式 (15) の条件を満たすように変形することで、

$$\eta(\tau|\eta_r, C) = 1 - (1 - \eta_r) \exp(-C\tau) \quad (0 < \eta_r < 1, 0 < C) \quad (17)$$

が得られる。

b) Von Bertalanffy 関数

基本的な Von Bertalanffy 関数は

$$\eta(\tau|A, B, C) = A \{1 - B \exp(-C\tau)\}^3 \quad (18)$$

である。式 (18) のパラメータ A, B を定数と考え、式 (13) - 式 (15) の条件を満たすように変形することで、

$$\eta(\tau|\eta_r, C) = \left\{1 - (1 - \eta_r^{\frac{1}{3}}) \exp(-C\tau)\right\}^3 \quad (0 < \eta_r < 1, 0 < C) \quad (19)$$

が得られる。

c) Logistic 関数

基本的な Logistic 関数は

$$\eta(\tau|A, B, C) = \frac{A}{1 + B \exp(-C\tau)} \quad (20)$$

である。式 (20) のパラメータ A, B を定数と考え、式 (13) - 式 (15) の条件を満たすように変形することで、

$$\eta(\tau|\eta_r, C) = \frac{1}{1 + \left(\frac{1}{\eta_r} - 1\right) \exp(-C\tau)} \quad (0 < \eta_r < 1, 0 < C) \quad (21)$$

が得られる。

d) Gompertz 関数

基本的な Gompertz 関数は

$$\eta(\tau|A, B, C) = AB \exp(-C\tau) \quad (22)$$

である。式 (22) のパラメータ A, B を定数と考え、式 (13) - 式 (15) の条件を満たすように変形することで、

$$\eta(\tau|\eta_r, C) = \eta_r \exp(-C\tau)$$

$$(0 < \eta_r < 1, 0 < C) \quad (23)$$

が得られる。

(3) 尤度関数の定式化

同種の施設に関する K 個のサンプルが獲得できたとする。サンプル $k(k = 1, \dots, K)$ には 2 個の連続する点検が実施された時点 t_a^k, t_b^k 、それぞれの点検における損傷発生の有無の 2 値データ s_a^k, s_b^k 、さらに補修が実施された場合においては補修導入時点 t_r^k に関する情報が記述されている。なお補修が実施されていない場合は補修導入時点が獲得されない。いま損傷発生の有無の 2 値データを用いてダミー変数 s^k を

$$s^k = \begin{cases} 0 & (s_a^k = 0, s_b^k = 0) \\ 1 & (s_a^k = 0, s_b^k = 1) \end{cases} \quad (24)$$

と定義する。また補修導入時点と点検実施時点の情報を用いることで、補修導入状態に関するダミー変数 r^k を

$$r^k = \begin{cases} 0 & (\text{補修導入時点が獲得されない場合}) \\ -1 & (t_a^k < t_r^k \leq t_b^k) \\ 1 & (t_r^k \leq t_a^k) \end{cases} \quad (25)$$

と定義する。 $r^k = 0$ の状態は補修導入時点が獲得されない、つまり補修が導入なされていない状態であり、補修ターム 1 で獲得されたサンプルである。 $r^k = 1$ の状態は事前点検時点より補修導入時点が前である、つまり補修が導入されている状態であり、補修ターム 2 で獲得されたサンプルである。 $r^k = -1$ は補修導入時点が事前点検時点と事後点検時点の間に位置する状態であり、補修ターム 1 から補修ターム 2 にかけて獲得されたサンプルである。補修導入時点に施設の損傷発生状態を点検している場合、 $r^k = -1$ の状態は発生しえない。しかし、本研究で対象としているような RC 床版に対する床版防水層のような補修の場合、損傷発生の有無は床版下面の状態によって判定されるが、床版防水層は床版上面より導入されるため、損傷発生状態を獲得することができない。さらにサンプルの構造特性や使用環境を表す特性変数ベクトルを $\mathbf{x}^k = (x_1^k, \dots, x_M^k)$ と表す。ただし、 $x_m^k (m = 1, \dots, M)$ はサンプル k の m 番目の特性変数の観測値を表す。

サンプルは、損傷発生状態によるダミー変数 s^k と補修導入状態に関するダミー変数 $r^k = -1$ の組み合わせによって表-1 のように 6 つの劣化パターンに分類される。それぞれのサンプルの劣化パターン情報に基づいてダミー変数 δ_i^k を

$$\delta_i^k = \begin{cases} 1 & (\text{劣化パターンが } i \text{ の場合}) \\ 0 & (\text{劣化パターンが } i \text{ 以外の場合}) \end{cases} \quad (26)$$

で定義する。これによってサンプル k が有する情報は $\Theta^k = (\delta_i^k, t_r^k, t_a^k, t_b^k, x^k)$ として整理できる。

表-1 損傷発生状態と補修導入状態の組み合わせ

		r^k		
		0	1	-1
s^k	0	1	3	5
	1	2	4	6

これより、パラメータを与件として、全サンプルに関して獲得できた情報 Θ が観測される同時生起確率密度関数である尤度関数は

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\beta, \eta_r, C | \bar{\Theta}) &= \prod_{k=1}^K \{ \exp[-\theta^k t_b^k] \}^{\delta_1^k} \\ &\cdot \{ \exp[-\theta^k t_a^k] - \exp[-\theta^k t_b^k] \}^{\delta_2^k} \\ &\cdot \left\{ \exp \left[-\theta^k \left\{ t_r^k + \int_{t_r^k}^{t_b^k} \eta(t' - t_r^k) dt' \right\} \right] \right\}^{\delta_3^k + \delta_5^k} \\ &\cdot \{ \exp(-\theta^k t_a^k) \\ &- \exp \left[-\theta^k \left\{ t_r^k + \int_{t_r^k}^{t_b^k} \eta(t' - t_r^k) dt' \right\} \right] \}^{\delta_4^k} \\ &\cdot \left\{ \exp \left[-\theta^k \left\{ t_r^k + \int_{t_r^k}^{t_a^k} \eta(t' - t_r^k) dt' \right\} \right] \right. \\ &\left. - \exp \left[-\theta^k \left\{ t_r^k + \int_{t_r^k}^{t_b^k} \eta(t' - t_r^k) dt' \right\} \right] \right\}^{\delta_6^k} \end{aligned} \quad (27)$$

と表される。なお記号「 \cdot 」は実測値であることを示す。なお本研究においてはこの尤度関数を用いて未知パラメータの条件付き事後確率密度を MCMC 法によって推計する。

4. おわりに

本研究では、社会基盤施設に対する補修効果の経時変化を考慮した劣化予測モデルを開発した。具体的には、補修による劣化速度の変化を補修効果関数で規定されるとし、その補修効果関数が経時変化するようモデル化している点が本研究の特徴である。本研究の補修効果関数を用いることで、補修効果が損失するタイミングを定量的に示すことが可能となる。なお、本研究で提案した方法論を用いて、RC 床版に対する床版防水層の効果の実証分析を行っており、その結果及び考察に関しては研究発表会にて提示する。

謝辞：本研究を実施するにあたり、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

ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 仁平達也, 渡辺忠明, 滝本和志, 笹谷輝勝, 土屋智史, 原夏生, 谷村幸裕, 岡本大: 損傷履歴を考慮した修復部材の性能評価に関する一考察, 土木学会論文集 E, Vol.65, No.4, pp.490-507, 2009.
- 2) 水谷大二郎, 貝戸清之, 小林潔司: 階層ベイズ法による補修効果の事後評価, 土木学会論文集 F4, Vol.69, No.3, pp.204-221, 2013
- 3) Shin, H.C. and Madanat, S.M.: Development of stochastic model of pavement distress initiation, 土木学会論文集, No.744/IV-61, pp.61-67, 2003.
- 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) 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.
- 6) 貝戸清之, 山本浩司, 小濱健吾, 岡田貢一, 小林潔司: ランダム比例ワイブル劣化ハザードモデル: 大規模情報システムへの適用, 土木学会論文集 F, Vol.64, No.2, pp.115-129, 2008.
- 7) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 織田澤利守, 小林潔司: プロジェクトの事前評価と再評価, 土木学会論文集, No. 737/IV-60, pp. 189-202, 2003.
- 11) 織田澤利守, 小林潔司, 松田明広: 評価費用を考慮したプロジェクトの事前・再評価問題, 土木学会論文集, No. 751/IV-62, pp. 97-110, 2004.
- 12) Dixit, A. K. and Pindyck, R. S. : *Investment Under Uncertainty*, Princeton University Press, 1994.
- 13) Trigeorgis, L. : *Real Options, Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation*, The MIT Press, 1996.
- 14) 小林潔司, 江口利幸, 大井明, 青木一也, 貝戸清之: 劣化過程の不確実性を考慮した路面性状調査の最適実施方策, 土木学会論文集 E1, Vol.67, No.2, pp.75-90, 2011.
- 15) 小濱健吾, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司, 福田泰樹: 劣化過程を考慮した最適廃棄・補修モデル, 土木学会論文集 F4, Vol.68, No.3, pp.141-156, 2012.
- 16) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, pp.102-103, 2002.
- 17) 渡辺澄夫: ベイズ統計の理論と方法, コロナ社, 2012.

DETERIORATION FORECASTING MODEL CONSIDERING CHANGE OF REPAIR EFFECT OF INFRASTRUCTURES

Yusuke UNO, Yohei NINOMIYA and Kiyoyuki KAITO