

舗装構造の最適補修更新モデル

小林潔司¹・江口利幸²・大井明³・青木一也⁴・貝戸清之⁵・松村泰典⁶

¹フェロー会員 京都大学教授 経営管理大学院 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail: kobayashi.kiyoshi.6n@kyoto-u.ac.jp

²正会員 東日本高速道路株式会社技術本部 (〒 100-8979 千代田区霞が関 3-3-2 新霞が関ビルディング)
E-mail: m.eguchi.ac@e-nexco.co.jp

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 (〒 194-8508 町田市忠生 1-4-1)
E-mail: a.oi.aa@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 株式会社パスコ研究開発センター (〒 153-0043 目黒区東山 2-8-11 目黒ビル新別館 1F)
E-mail: kiakzo6013@pasco.co.jp

⁵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

⁶学生会員 京都大学大学院工学研究科 都市社会工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: matsumura.yasunori.42s@st.kyoto-u.ac.jp

舗装の劣化過程は路面の劣化過程と舗装全体の耐荷力の低下過程で構成される複合的劣化過程である。耐荷力の低下は路面の劣化速度に影響を及ぼす。管理者は路面性状調査により路面の健全度を観測できる。一方、耐荷力の低下に関しては FWD 調査等により部分的に観測可能である。本研究では、このような特性を有する路面の劣化過程を、耐荷力の状態に依存する混合マルコフ過程として記述する。そのうえで、期待ライフサイクル費用を最小にするような最適調査間隔と補修更新政策を同時に決定することを目的とする最適補修更新モデルを提案する。さらに、具体的に NEXCO が管轄する高速道路を対象とした適用事例を通じて、最適補修更新モデルの有効性を実証的に検証する。

Key Words : *pavement management, inspection policy, mixed Markov process, state-dependent rules*

1. はじめに

道路舗装の劣化過程には多くの不確実性が介在しており、舗装の劣化過程を確定的に予想することは困難である。路面性状調査により、路面の劣化状態（以下、路面健全度と呼ぶ）を観測することができる。路面の劣化過程の不確実性を考慮した統計的劣化予測モデルとして、マルコフ劣化モデル等が提案されている^{1)~7)}。マルコフ劣化モデルを用いることにより、実際の路面性状調査結果に基づいて、実態に即した劣化過程を予測することができる。その結果、舗装の補修費用の流列を用いて定義される期待ライフサイクル費用（以下、期待 LCC と表す）の低減に資するような路面補修政策を合理的に検討することが可能となった。

一方、道路を長期間にわたり利用することにより、路面だけでなく道路舗装全体の劣化が進展し舗装耐荷力が低下する。舗装耐荷力が低下すれば、ひび割れの発生が加速する等、路面の劣化速度に影響を及ぼす。舗装耐荷力に関しては、FWD 調査を用いたたわみ量調査等により観測することができる。期待 LCC の低減化を達成するためには、舗装耐荷力が低下した道路区間においては路面だけでなく、舗装全体の補修（以下、舗装更新と呼ぶ）を行うことが必要となる。

舗装の劣化過程に関する情報を獲得するために調査費用や社会費用が発生する。調査費用を抑制するためには、調査頻度を減少させることが望ましい。一方、調査頻度が減少すれば、劣化過程に関する不確実性が増加する。道路管理者が道路舗装のサービス水準に対して一定のリスク管理水準を設定する場合、調査頻度が減少すればリスク管理水準を達成できないリスクが増加する。あるいは、リスク管理水準を達成するためには予防的に舗装を補修することが必要となる。したがって、道路管理者が設定する舗装サービス水準に関する所与のリスク管理水準の下で、補修費用、調査費用、モニタリング費用で構成される期待 LCC の最小化を達成するような調査間隔や舗装の補修更新政策を求めるような方法論が必要となる。

以上の問題意識の下で、本研究では、舗装の劣化状態を路面健全度、舗装耐荷力という複数の状態変数を用いたマルコフ過程として表現するとともに、所与のリスク管理水準の下で期待 LCC を最小にするような調査間隔と補修更新政策を同時に決定するためのマルコフ決定モデル（以下、最適補修更新モデルと呼ぶ）を定式化する。以下、**2.**で本研究の基本的な考え方を説明する。**3.**で、舗装の劣化過程を複数状態変数を用いたマルコフ過程として定式化する。**4.**で、最適補修更

新モデルを定式化する。5. で、実際の高速道路を対象とした実証分析事例を示す。

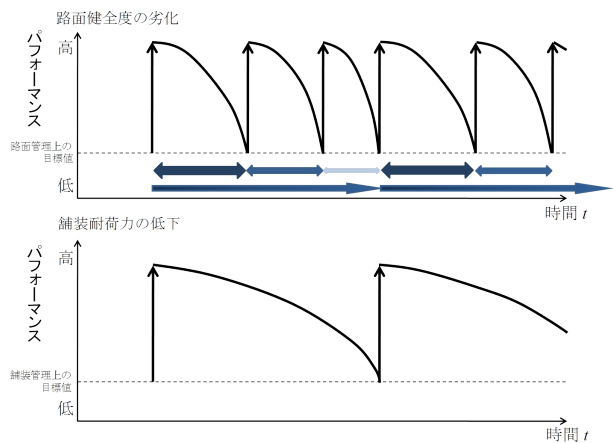
2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来の研究概要

土木施設の維持・補修方法として、1) 時間依存的ルール、2) 状況依存的ルールという2種類の補修更新政策を考えることができる。時間依存的ルールは、一定の時間間隔を経て定期的に土木施設の維持更新を実施する方法である。たとえば、照明施設等の道路付帯施設のように、数多くの小規模の設備で構成されているような設備・機器システムや、管路等の地中埋設物のように、維持管理費に対して調査費用が占める割合が高くなるような土木施設に関しては、土木施設の劣化状態に関わらず定期的に土木施設や設備を更新するという時間依存的ルールを適用することが望ましい。一方、劣化過程に多大な不確実性が存在する場合、土木施設の劣化状態に依存して補修更新政策を決定するという状況依存的ルールを採用することが考えられる。本研究では、道路舗装の劣化過程の不確実性に着目し、状況依存的ルールを用いた補修更新政策を求め方法論を提案する。

破壊や故障がある定常的な確率過程に従って生じするようなシステムの最適補修政策に関しては膨大な研究が蓄積されている^{8),9)}。特に、健全度を離散的な状態変数で記述するマルコフ決定モデル¹⁰⁾は、劣化過程の記述が簡単であり、土木工学の分野でも数多くの実用モデル¹¹⁾⁻¹⁹⁾が提案されている。多くの土木施設においては、調査業務を通じてのみ施設の健全度が部分的に観察可能である場合が少なくない。このような劣化過程が直接観測可能でないような施設の補修問題をマルコフ決定過程を用いて分析する方法がいくつか提案されている。しかし、そこでは調査時期があらかじめ確定的に与えられており、定期的な調査により獲得した調査情報に基づいて補修の有無を決定するアプローチとなっている。特に、地下埋設物のような土木施設の調査費用は無視できない。このような施設に関しては調査のタイミングを決定すること自体が問題となる。このような問題意識の下に、調査間隔と補修政策を同時に求める最適補修モデルが提案されている¹⁶⁾⁻¹⁹⁾。

本研究では、道路舗装のマネジメントを対象として最適補修更新モデルを定式化する。その際、舗装の劣化過程を路面健全度、舗装耐荷力という2種類の異なる状態変数を用いた2次元のマルコフ連鎖モデルとしてモデル化する。舗装の劣化状態は部分的に観測可能であり、路面性状調査により路面健全度を、さらにFWD調査等により舗装耐荷力を観測することが可能である。



注) 図の上段は、路面健全度の劣化過程を、下段は耐荷力の低下過程を模式的に示している。耐荷力が低下すれば、路面健全度の劣化速度が速くなる。

図-1 舗装劣化過程

これらの調査結果に基づいて、路面補修、あるいは舗装更新が実施される。当然のことながら、舗装更新が実施される場合、路面も打ち換えられることになる。本研究では、期待LCCを最小にするような望ましい調査間隔、補修更新政策を分析するために、路面健全度、舗装耐荷力という複数状態変数を考慮したマルコフ決定モデルを定式化する。筆者の知る限り、このような複数次元を考慮したマルコフ決定モデルを用いた最適補修更新モデルに関する研究事例は見あたらない。

(2) 劣化過程の不確実性と調査の目的

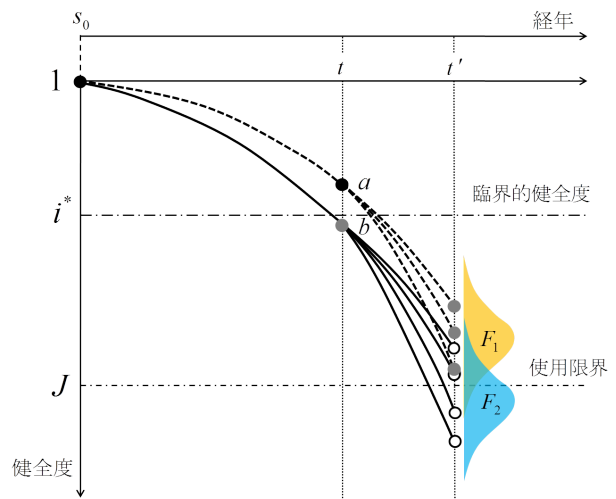
道路の舗装構造は、表層部、基層部、路盤部という複数の層で構成される多層構造を有している。このうち、表層(路面)は車両交通による摩耗や繰り返し荷重、天候・気象等の直接的な影響により劣化が進展する。さらに、各層における構造的欠陥の有無が路面の劣化速度に影響を及ぼす。基層や路盤部も雨水や地下水の浸透、繰り返し荷重の作用等により劣化が進展する。舗装構造の劣化過程を、模式的に図-1に示している。図の上段は路面健全度の劣化過程を、下段は舗装耐荷力の低下過程を示している。同図においては、路面健全度の劣化過程の方が、耐荷力の低下よりも、早く進展するように描かれている。舗装マネジメントにおいては、路面のサービス水準に対して、維持すべき管理目標が規定されており、路面の健全度が管理目標に達した時点で補修が実施され、路面の健全度は初期状態まで回復する。しかし、耐荷力が低下することにより、路面の劣化速度が加速される。このため、初期時点から路面の補修回数が増加するほど、路面の補修間隔が短くなる。耐荷力が低下した場合、路面の補修を繰り返すより、舗装全体を更新することが期待LCCを抑制す

る上でも望ましくなる。

道路管理者は路面性状調査を定期的実施することにより、路面健全度を観測することができる。しかし、舗装耐荷力は直接観測することが不可能である。舗装構造の劣化状態を把握するためには、コア抜きや開削調査のように破壊試験により舗装構造の劣化を直接観測するか、FWD 調査やベンケルマンビーム試験を用いてたわみ量を計測することによって耐荷力を調査することが必要である。このうち、FWD 調査においては、舗装表面に重錘を落下させ、その時に生じるたわみ量を測定することによって、舗装耐荷力を診断することが可能である。すなわち、FWD 調査を用いることにより、舗装構造の劣化状態に関する情報を客観的な数値(たわみ量)を用いて評価することが可能である。しかし、FWD 調査を実施するためには道路交通規制を実施することが不可欠であり、渋滞混雑という社会的費用が発生する。また、調査範囲が広範囲となれば、広範囲にわたる渋滞の発生や調査費が膨大になることが懸念されるため、管理対象となる全線で FWD 調査を実施することは非現実的である。本研究では、路面性状調査を定期的実施するとともに、路面の劣化が進展し補修が必要であると判断された区間に対して、さらに FWD 調査により舗装耐荷力を調査し、路面のみの補修を実施するか、あるいは舗装を更新するかを決定するような状況を想定する。

(3) 調査・補修スキーム

路面性状調査の結果に基づいて道路舗装の補修実施の有無が判断されると考える。いま、図-2において、時点 t における路面性状調査により路面健全度が、たとえば点 a (あるいは点 b) のように観測される。路面健全度が観測された時に、道路管理者が選択可能なアクションとして、1) 補修工事を実施せずに路面健全度の判定結果を記録する(アクション e_1)、2) FWD 調査を実施し、舗装の補修方法を検討する(アクション e_2)、という2つをとりあげる。アクション e_2 が選択された場合、FWD 調査の結果に基づいて、1) 路面のみが補修され、路面が健全な状態に回復する(アクション e_{21})、2) 舗装更新が実施され、舗装全体が健全な状態に改善する(アクション e_{22}) のうちいずれかが直ちに実施される。道路管理者がアクション e_1 を採用した場合、時点 t から、つぎの定期的な路面性状調査時点 t' まで劣化が進展する。時点 t において、補修の実施(FWD 調査の実施)を見送った場合、時点 t における耐荷力を確定できないが、過去の FWD 調査結果(舗装更新時からの経過年数)に基づいて当該時点における耐荷力の確率分布を推定することができる。さらに、時点 t の定期的な路面性状調査により、当該時点における路面健全度



注) 時点 t で路面性状調査を実施し、その時に観測された健全度が a であった場合、時点 t' における健全度分布が F_1 となる。一方、時点 t における劣化状態 b が、臨界的健全度を下回っている場合、時点 t' における健全度分布が F_2 となり、使用限界 J に到達する確率が増加する。

図-2 舗装管理水準

に関する情報を獲得しているため、これらの情報を利用して、さらに時点 t' における路面健全度の確率分布 F を予測することができる。本研究の舗装マネジメントでは、路面健全度が所与の使用限界 J に到達している確率を一定水準以下に維持することをリスク管理水準として設定する。当然ながら、時点 t における劣化状態が悪くなるほど、補修の実施を見送った時に、次の路面性状調査時点 t' において路面健全度が使用限界に到達している確率は増加する。たとえば、図-2 の点 a のように路面健全度が比較的良好であれば、時点 t' における路面健全度は確率分布 F_1 に従って分布することが予測される。しかし、点 b に示すように、今期に補修を見送れば、次の定期的な路面性状調査時点においてリスク管理水準を達成することが不可能となる。この場合、時点 a において、今期に補修を行うことを決定するような臨界的な路面健全度(以下、臨界的健全度と呼ぶ)が存在する。すなわち、補修政策は、定期的な路面性状調査時点において「路面健全度が臨界的健全度より小さい状態(臨界健全度に到達していない状態)にある場合は補修を見送る」、「臨界的健全度より大きい状態(臨界健全度を超過して劣化が進行している状態)にある場合は補修を実施する」というルールとして記述できる。

以上の議論では、定期的な路面性状調査の間隔を与件としていた。調査頻度を増加すれば(調査間隔を短くすれば)、ある調査時点における路面健全度が同一であっても、次回の定期的な路面性状調査時点において、

舗装の路面健全度が使用限界にまで到達している確率は小さくなる。舗装の補修費用を小さくするためには、補修の実施の有無を判定するための臨界的健全度ができるだけ悪い状態であることが望ましい。したがって、補修費用を抑制するためには、調査間隔を短くすることが最適調査政策となる。一方で、調査間隔を短くすれば、調査費用が増加する。したがって、調査費用と補修費用で構成される LCC 費用を最小にするような路面性状調査の間隔と補修更新政策を同時に求めることが必要となる。なお、道路管理者が社会的費用の最小化を考える場合、利用者費用も含めた期待 LCC の最小化を検討することが理想的である。しかし、現時点において、道路管理者が負担する直接的費用（調査費、補修費）と比較して利用者費用の推計精度には課題が残されていると言わざるを得ない。そこで、本研究では、期待 LCC に、利用者費用を含めないこととした。その代わりに、利用者の安全性や快適性等を総合的に考慮して、舗装の路面健全度に対してリスク管理水準を設けることとした。

(4) リスク・費用管理曲線

道路舗装の管理項目として期待 LCC とリスク管理水準をとりあげる。定式化については 4.(2) で詳述するが、定期的な路面性状調査時点において舗装の路面健全度が使用限界以下に到達する確率を用いてリスク管理水準を定義する。いま、リスク管理水準を所与の値 \bar{U} に固定する。この時、道路管理者は、所与のリスク管理水準の下で、期待 LCC を最小にするように調査間隔と臨界的健全度（補修更新政策）を決定することが課題となる。以上の考え方で求めた最適調査間隔と補修政策は、リスク管理水準を与件として求めた条件的最適補修更新政策である。ここで、リスク管理水準の値をパラメータと考え、個々のリスク管理水準に対応する条件付き最適調査・補修更新政策を求めれば図-3 に示すようなリスク管理水準と期待 LCC のトレードオフの関係を表した曲線を得ることができる。本研究では、このような曲線をリスク・費用管理曲線と呼ぶ。舗装の劣化過程に不確実性が存在するため、たとえば点 α に示すようにリスク管理水準を厳しく設定すれば頻繁な調査が必要となり、期待 LCC の増加を招く。したがって、現実的には一定程度のリスクを受け入れざるを得ない。一方で、現状が同図の点 β に位置する場合、わずかな調査費用の節約が、リスク管理水準の大幅な増加を招くことになる。道路管理者がサービス水準の達成確率に関するリスク管理水準を決定すれば、それを実現するための最適調査・補修更新政策を求めることができる。道路管理者は、利用者の効用や管理瑕疵の可能性等を総合的に配慮してリスク・費用管理曲線、

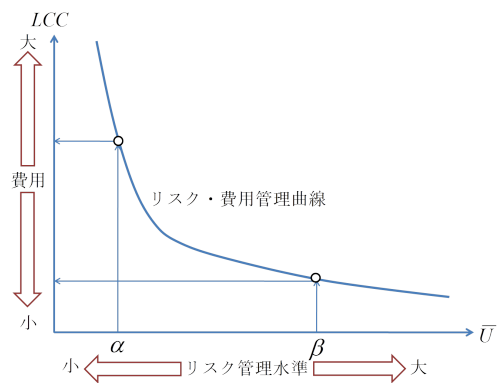


図-3 リスク・費用管理曲線

リスク管理水準を決定することが必要となる。リスク管理水準の決定問題は、本研究の域を超えているが、リスク・費用管理曲線は道路管理者が適切なリスク管理水準を決定する上で重要な役割を果たすことになる。

3. 舗装構造の劣化過程のモデル化

(1) 前提条件

道路管理者がカレンダー時刻 t_0 に道路施設を建設（もしくは更新）し、それ以降の時刻にわたって道路舗装を管理する問題を考える。カレンダー時刻 t_0 を初期時点 $t = 0$ とする離散時間軸 $t = 0, 1, 2, \dots$ を導入する。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。対象とする舗装システムは、図-1 に示したように、路面健全度、舗装耐荷力という 2 階層システムで構成されていると考える。離散時間軸上の時点 t_1, \dots, t_k, \dots において路面の補修が実施される。さらに、路面の補修が実施された時点 t_k を始点 $u_k = 0$ とする局所離散時間軸 $u_k = 0, 1, 2, \dots$ を導入する。局所離散時間軸上の時点 u_k を局所時点と呼ぶ。各離散時点における舗装耐荷力を離散的状態変数 $g(t)$ ($t = 0, \dots$) を用いて表現する。ただし、離散的状態変数はレーティング $g(t) = s$ ($s = 1, \dots, S$) を用いて記述される。レーティング s ($s = 1, \dots, S$) は、 s の値が大きくなるほど舗装耐荷力が低下していることを意味している。 $g(t) = S$ の場合は、舗装耐荷力が使用限界に到達していることを意味する。初期時点 $t = 0$ において $g(0) = 1$ である。つぎに、路面健全度を J 個のレーティング $h(u_k) = i$ ($i = 1, \dots, J; u_k = 0, \dots, T_k$) で記述する。ただし、 T_k は時点 t_k で路面を補修し、次の補修時点に到達するまでの期間長であり $T_k = t_{k+1} - t_k$ で表される。ただし、局所時点 $u_k = 0$ において $h(0) = 1$ が成立する。 $h(u_k) = J$ は、路面の使用限界を表す。

本研究では、舗装の劣化状態を路面健全度、舗装耐荷力という 2 種類の状態変数で表現し、路面健全度の劣化過程、舗装耐荷力の低下過程をともにマルコフ劣

化過程で記述する。舗装耐荷力の低下過程は、過去の劣化過程に依存せず、斉次マルコフ過程で表現できると考える。しかし、路面の劣化過程は、舗装耐荷力に依存すると考える。このため、本研究では、舗装の劣化状態を路面健全度と舗装耐荷力という2種類の状態変数の組で表現する。さらに、舗装の劣化過程をこれら2種類の状態変数で構成される状態空間上で表現される斉次マルコフ連鎖モデルとして記述する。

(2) 舗装耐荷力の低下過程

離散時間軸上の期間 $[t, t+1)$ における舗装耐荷力の低下過程を表すマルコフ推移確率を、時点 t で評価された舗装耐荷力 $g(t) = s$ を与件とし、次の $t+1$ 期において舗装耐荷力 $g(t+1) = l$ が生起する条件付確率

$$\text{Prob}[g(t+1) = l | g(t) = s] = p^{sl} \quad (1)$$

を用いて表現する。期間長を1に基準化する。マルコフ推移確率は、津田等²⁾が開発したマルコフ劣化ハザードモデルを用いて表現できる。時点 t における舗装耐荷力 s ($s = 1, \dots, S-1$) のハザード率^{20), 21)} λ^s を

$$\lambda^s = \exp(\mathbf{x}\boldsymbol{\beta}^s) \quad (2)$$

と表す。ただし、 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_Q)$ は説明変数ベクトル、 $\boldsymbol{\beta}^s = (\beta_1^s, \dots, \beta_Q^s)'$ は未知パラメータベクトルである。記号 $'$ は転置を、 Q は説明変数の数を表す。ハザード率 λ^s は、期間 $[t, t+1)$ に対して一定であると仮定する。この時、時点 t において舗装耐荷力 s の状態から、時点 $t+1$ においても舗装耐荷力 s が継続する確率は、

$$\begin{aligned} p^{ss} &= \text{Prob}[g(t+1) = s | g(t) = s] \\ &= \exp(-\lambda^s) \end{aligned} \quad (3)$$

となる。さらに、時点 t と時点 $t+1$ の間で舗装耐荷力が s から l ($l > s$) に推移するマルコフ推移確率 p^{sl} ($s = 1, \dots, S-1; l = s+1, \dots, S$) は、

$$\begin{aligned} p^{sl} &= \text{Prob}[g(t+1) = l | g(t) = s] \\ &= \sum_{m=s}^l \prod_{z=s}^{m-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^z - \lambda^m} \prod_{z=m}^{l-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^{z+1} - \lambda^m} \exp(-\lambda^m) \\ &\quad (s = 1, \dots, S-1; l = s+1, \dots, S) \end{aligned} \quad (4)$$

と表すことができる²⁾。ただし、表記上の規則として、

$$\begin{cases} \prod_{z=s}^{m-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^z - \lambda^m} = 1 & (m = s \text{ の時}) \\ \prod_{z=m}^{l-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^{z+1} - \lambda^m} = 1 & (m = l \text{ の時}) \end{cases}$$

が成立すると考える。さらに、表記の便宜上、

$$\begin{aligned} &\prod_{z=s, z \neq m}^{l-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^z - \lambda^m} \exp(-\lambda^m) \\ &= \prod_{z=s}^{m-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^z - \lambda^m} \prod_{z=m}^{l-1} \frac{\lambda^z}{\lambda^{z+1} - \lambda^m} \exp(-\lambda^m) \end{aligned}$$

と簡略化する。また、 p^{sS} に関しては、マルコフ推移確率の条件より次式で表せる。

$$\begin{aligned} p^{sS} &= 1 - \sum_{l=s}^{S-1} p^{sl} \\ &\quad (s = 1, \dots, S-1) \end{aligned} \quad (5)$$

以上の推移確率を用いれば、期間 $[t, t+1)$ で定義される条件付確率(3)を要素とするマルコフ推移行列を

$$P = \begin{pmatrix} p^{11} & \dots & p^{1S} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & p^{SS} \end{pmatrix} \quad (6)$$

と定義することができる。さらに、期間 $[t, t+u)$ における推移確率行列(以下、 u 期推移確率行列と呼ぶ)は

$$P(u) = \{P\}^u \quad (7)$$

と表される。なお、 u 期推移確率行列を

$$P(u) = \begin{pmatrix} p^{11}(u) & \dots & p^{1S}(u) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & p^{SS}(u) \end{pmatrix} \quad (8)$$

と表記する。

(3) 路面健全度の劣化過程

離散時間軸上の時点 t_1, \dots, t_k, \dots において路面の補修が実施される。路面の補修が実施された時点 t_k を始点 $u_k = 0$ とする局所離散時間軸 $u_k = 0, \dots, T_k$ を考える。ただし、 $u_k = T_k$ において次回の路面の補修が実施される。局所離散時間軸上の時点 u_k は、離散時間軸上の時点 $t_k + u_k$ と対応する。いま、時点 t_k ($u_k = 0$) に路面の補修が実施され、路面健全度が $h(0) = 1$ に改善する。局所時点 u_k から $u_k + 1$ の間において生起する路面の劣化状態の推移状態を、マルコフ推移確率で表す。単位期間 $[u_k, u_k + 1)$ の期間長も1に基準化する。

舗装耐荷力は観察可能ではないが、ひとまず既知であると考え。局所期間 $[u_k, u_k + 1)$ (離散時間軸上の期間 $[t_k + u_k, t_k + u_k + 1)$) における路面の劣化過程を表すマルコフ推移確率を、局所時点 u_k (時点 $t_k + u_k$) で評価された舗装耐荷力 $g(t_k + u_k) = s$ と路面健全度 $h(u_k) = i$ を与件とし、次の局所時点 $u_k + 1$ において路面健全度 $h(u_k + 1) = j$ が生起する条件付確率

$$\begin{aligned} &\text{Prob}[h(u_k + 1) = j | h(u_k) = i, g(t_k + u_k) = s] \\ &= \pi^{ij}(s) \end{aligned} \quad (9)$$

を用いて定義する。局所期間 $[u_k, u_k + 1)$ において舗装耐荷力 s は一定であると仮定する。この時、舗装耐荷力 s を与件とした路面健全度 i ($i = 1, \dots, J-1$) のハザード率 $\mu^i(s)$ を

$$\mu^i(s) = \exp(\gamma_0^s \boldsymbol{\gamma}^i) = \exp(\gamma_0^s \mu^i) \quad (10)$$

と表す。ただし、 γ_0^s は舗装耐荷力 s に依存するパラメータ、 $\mathbf{y} = (y_1, \dots, y_V)$ は説明変数ベクトル、 $\boldsymbol{\gamma}^i = (\gamma_1^i, \dots, \gamma_V^i)'$ は未知パラメータベクトル、 $\mu^i = \mathbf{y}\boldsymbol{\gamma}^i$ である。このとき、舗装耐荷力 s の下で局所時点 u_k において路面健全度が i であり、局所時点 $u_k + 1$ においても路面健全度 i が継続する確率は、

$$\begin{aligned} \pi^{ii}(s) &= \text{Prob}[h(u_k + 1) = i | h(u_k) = i, g(t_k + u_k) = s] \\ &= \exp\{-\mu^i(s)\} \end{aligned} \quad (11)$$

となる。さらに、局所時点 u_k と局所時点 $u_k + 1$ の間で路面健全度が i から $j (> i)$ に推移するマルコフ推移確率 $\pi^{ij}(s)$ ($i = 1, \dots, J-1; j = i+1, \dots, J$) は、

$$\begin{aligned} \pi^{ij}(s) &= \text{Prob}[h(u_k + 1) = j | h(u_k) = i, g(t_k + u_k) = s] \\ &= \sum_{z=i}^j \prod_{r=i, \neq z}^{j-1} \frac{\mu^r(s)}{\mu^r(s) - \mu^z(s)} \exp\{-\mu^z(s)\} \\ & \quad (i = 1, \dots, J-1; j = i+1, \dots, J) \end{aligned} \quad (12)$$

と表すことができる。また、 $\pi^{iJ}(s)$ に関しては、マルコフ推移確率の条件より次式で表せる。

$$\begin{aligned} \pi^{iJ}(s) &= 1 - \sum_{j=i}^{J-1} \pi^{ij}(s) \\ & \quad (s = 1, \dots, S-1) \end{aligned} \quad (13)$$

以上の推移確率(12),(13)を用いれば、局所期間 $[u_k, u_k + 1)$ で定義される条件付確率(9)を要素とするマルコフ推移行列を

$$\Pi(s) = \begin{pmatrix} \pi^{11}(s) & \dots & \pi^{1J}(s) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \pi^{JJ}(s) \end{pmatrix} \quad (14)$$

と定義することができる。

(4) 舗装全体の劣化過程

舗装全体の劣化状態を、路面健全度 i と舗装耐荷力 s という2つの状態変数の組 (i, s) を用いて表現する。いま、隣接する2つの時点 t と $t+1$ を考える。時点 t における劣化状態を (i, s) 、時点 $t+1$ の劣化状態を (j, l) と表す。期間 $[t, t+1)$ 中における舗装耐荷力は時点 t における状態 s が近似的に継続すると仮定する。ただし、劣化過程の単調性条件より $i \leq j, s \leq l$ が成立する。この時、期間 $[t, t+1)$ において劣化状態が (i, s) から (j, l) に推移する確率 $\theta_{i,s}^{j,l}$ は次式で定義される。

$$\theta_{i,s}^{j,l} = \begin{cases} p^{sl} \pi^{ij}(s) & i \leq j, s \leq l \text{ の時} \\ 0 & \text{それ以外の時} \end{cases} \quad (15)$$

ここで、 $\theta_{i,s}^{j,l}$ を (s, l) 要素とする対角ブロック行列を

$$\boldsymbol{\theta}_i^j = \begin{pmatrix} \theta_{i,1}^{j,1} & \theta_{i,1}^{j,2} & \dots & \theta_{i,1}^{j,S} \\ 0 & \theta_{i,2}^{j,2} & \dots & \theta_{i,2}^{j,S} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \theta_{i,S}^{j,S} \end{pmatrix} \quad (16)$$

とし、舗装全体の劣化過程の推移確率行列を

$$\boldsymbol{\Theta} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{\theta}_1^1 & \boldsymbol{\theta}_1^2 & \dots & \boldsymbol{\theta}_1^J \\ 0 & \boldsymbol{\theta}_2^2 & \dots & \boldsymbol{\theta}_2^J \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \boldsymbol{\theta}_J^J \end{pmatrix} \quad (17)$$

と定義する。この時、調査時点 t からつぎの調査時点 $t+r$ までの r 期間に生起する劣化状態の推移確率行列はマルコフ推移確率

$$\boldsymbol{\Theta}(r) = \{\boldsymbol{\Theta}\}^r \quad (18)$$

を用いて表現できる。マルコフ推移確率 $\boldsymbol{\Theta}(r)$ の $\{(i, s), (j, l)\}$ 要素 $\theta_{i,s}^{j,l}(r)$ は r 期間のうちに劣化状態が (i, s) から (j, l) に推移する条件付き確率を表している。

初期時点 $t = 0$ において舗装全体が更新され、舗装耐荷力が $g(0) = 1$ に、路面健全度が $h(0) = 1$ に確定したと考える。初期時点以降、舗装の劣化が進行するが、劣化過程に不確実性が介在する。時点 t において舗装状態 (i, s) が生起する確率を $\psi_{i,s}(t)$ と表し、状態ベクトルを $\boldsymbol{\psi}(t) = \{\psi_{1,1}(t), \psi_{1,2}(t), \dots, \psi_{i,s}(t), \dots, \psi_{J,S}(t)\}$ と表す。 r 期間に及ぶ劣化状態の推移確率が式(18)で表現される時、調査時点 t と $t+r$ の状態生起確率 $\boldsymbol{\psi}(t)$ と $\boldsymbol{\psi}(t+r)$ の間に

$$\boldsymbol{\psi}(t+r) = \boldsymbol{\psi}(t)\boldsymbol{\Theta}(r) \quad (19)$$

が成立する。また、初期時点における舗装状態は $(i, s) = (1, 1)$ であり、 $\boldsymbol{\psi}(0) = (1, 0, \dots, 0)$ と表せることに着目すれば、任意の時点 t における舗装状態の生起確率は

$$\boldsymbol{\psi}(t) = \boldsymbol{\psi}(0)\boldsymbol{\Theta}(t) \quad (20)$$

と表せる。

4. 最適補修更新モデル

(1) モデル化の前提条件

路面健全度がある閾値を超えた際に FWD 調査を実施し、舗装耐荷力を調査する場合を考える。路面性状調査を r 期ごとに実施する。 r は政策変数であるが、ひとまず与件とする。 w 回目の路面性状調査が実施される離散軸上の時点 $\tau = t_k + rw$ ($w = 0, 1, \dots, W$) と定義する。 w 回目の路面性状調査により、ある特定の地点における路面健全度が $h(\tau) = i$ ($i = 1, \dots, J$) と判定されたと考える。時点 τ において、路面健全度が $h(\tau) = J$ と判定された場合は、直ちに路面の補修、もしくは更新が実施され路面健全度が 1 まで回復する。一方、時

点 τ において路面健全度が $h(\tau)$ ($1 < h(\tau) < J$) の場合に選択可能なアクション e として, 1) 補修工事を実施せずに路面健全度の判定結果を記録する (アクション e_1), 2) FWD 調査を実施し, 舗装の補修方法を検討する (アクション e_2), という2つをとりあげる. アクション e_2 が選択された場合, FWD 調査の結果 $g(\tau) = s$ に基づいて, 1) 路面のみが補修され, 舗装の劣化状態が $(1, s)$ に回復する (アクション e_{21}), 2) 舗装更新が実施され, 舗装の劣化状態が $(1, 1)$ に改善する (アクション e_{22}). ここで, 調査時点 τ における補修更新政策 $\xi \in \bar{\xi}$ を, 調査で観測された路面健全度 $h(\tau) = i$ に対して, 補修後の路面健全度を指定するルール $\eta^\xi(i)$ を用いて定義する. ただし, $\bar{\xi}$ は補修更新政策の集合である. すなわち, 補修更新政策 $\xi \in \bar{\xi}$ は,

$$\eta^\xi(i) = \begin{cases} i & \text{アクション } e_1 \text{ の場合} \\ 1 & \text{アクション } e_{21} \text{ の場合} \\ 1 & \text{アクション } e_{22} \text{ の場合} \end{cases} \quad (21)$$

$(i = 1, \dots, J)$

と記述される. いま, 路面の補修の有無を判定する臨界健全度 $i^*(\xi)$ が存在し, 路面健全度 i が臨界健全度 $i^*(\xi)$ 以上になった場合, FWD 調査が実施される. さらに, FWD 調査の結果, 舗装耐荷力 s が臨界的耐荷力 $s^*(\xi)$ より小さい場合, 路面のみが補修される. それ以上の場合には, 舗装全体が更新される. すなわち, 路面の補修政策は

$$\eta^\xi(i) = \begin{cases} i & i < i^*(\xi) \\ 1 & i \geq i^*(\xi) \end{cases} \quad (22)$$

$(i = 1, \dots, J)$

と表される. さらに, 舗装の更新政策は, 更新後の舗装耐荷力 s を記述するルール

$$l^\xi(i, s) = \begin{cases} s & i < i^*(\xi) \\ s & i \geq i^*(\xi), s < s^*(\xi) \\ 1 & i \geq i^*(\xi), s \geq s^*(\xi) \end{cases} \quad (23)$$

$(i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S)$

を用いて表現される. 条件 (23) を満足する補修更新政策の集合を Ξ と表す. 調査後路面健全度に基づいて, 必要な場合には直ちに補修更新が実施される.

(2) 舗装の劣化・補修過程

舗装の調査・補修更新政策 (r, ξ) の下で実現する劣化・補修過程をマルコフ過程としてモデル化する. 任意の調査時点 τ において実施される一連のアクションの論理的順序を図-4 に整理している. いま, 調査時点の期首における真の舗装状態を (i, s) で表す. しかし, 真の舗装状態は調査を実施する直前の時点において知ることはできない. つぎに, 1) 路面性状調査が実施され路面健全度 i が観測される. 2) 路面健全度が $i \geq i^*(\xi)$ の

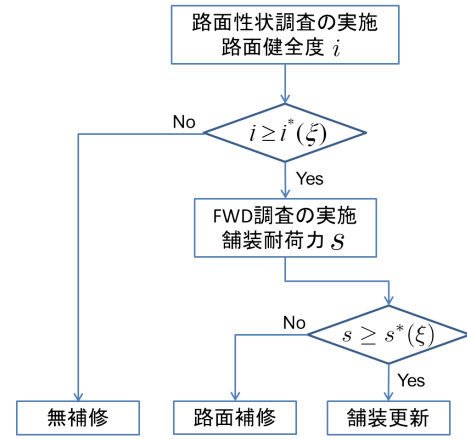


図-4 調査・補修更新アクションの論理的順序

場合, FWD 調査が実施される. 3) 舗装耐荷力 s が観測され, $s \geq s^*(\xi)$ の場合には, 舗装が更新される. 一方, $s < s^*(\xi)$ の場合には, 路面のみが補修される. 以上の一連のアクションは瞬時に実施されると考える. これらの補修アクションの終了後における真の舗装状態を (j, l) と表す. すなわち, 補修更新政策 ξ を実施することにより, 真の舗装状態は (i, s) から (j, l) に推移する. このような真の状態変数の推移関係を

$$\alpha_{i,s}^{j,l;\xi} = \begin{cases} 1 & \eta^\xi(i) = j, l^\xi(i, s) = l \\ 0 & \text{それ以外の場合} \end{cases} \quad (24)$$

$(i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S)$

と表す. さらに, 推移関係 $\alpha_{i,s}^{j,l;\xi}$ を $\{(i, s), (j, l)\}$ 要素とする推移行列

$$\mathbf{A}^\xi = \begin{pmatrix} \alpha_{1,1}^{1,1;\xi} & \alpha_{1,1}^{1,2;\xi} & \dots & \alpha_{1,1}^{j,l;\xi} & \dots & \alpha_{1,1}^{J,S;\xi} \\ \alpha_{1,2}^{1,1;\xi} & \alpha_{1,2}^{1,2;\xi} & \dots & \alpha_{1,2}^{j,l;\xi} & \dots & \alpha_{1,2}^{J,S;\xi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{i,s}^{1,1;\xi} & \alpha_{i,s}^{1,2;\xi} & \dots & \alpha_{i,s}^{j,l;\xi} & \dots & \alpha_{i,s}^{J,S;\xi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \alpha_{J,S}^{1,1;\xi} & \alpha_{J,S}^{1,2;\xi} & \dots & \alpha_{J,S}^{j,l;\xi} & \dots & \alpha_{J,S}^{J,S;\xi} \end{pmatrix} \quad (25)$$

を用いて定義する.

さらに, 調査・補修更新政策 (r, ξ) の下で調査時点 τ において (調査が実施される直前で) 定義される真の舗装状態の生起確率分布を

$\psi^{r,\xi}(\tau) = \{\psi_{1,1}^{r,\xi}(\tau), \psi_{1,2}^{r,\xi}(\tau), \dots, \psi_{J,S}^{r,\xi}(\tau)\}$ と表すと, 調査時点 τ と次の調査時点 $\tau + r$ において実現する舗装の劣化・補修過程は

$$\psi^{r,\xi}(\tau + r) = \psi^{r,\xi}(\tau) \mathbf{\Theta}^{r,\xi} \quad (26)$$

と表すことができる. ただし, $\mathbf{\Theta}^{r,\xi} = \mathbf{A}^\xi \mathbf{\Theta}(r)$ であり, その $\{(i, s), (j, l)\}$ 要素を $\theta_{i,s}^{j,l;\xi}(r)$ と表す. さらに, 舗装の劣化・補修過程の定常状態をとると,

$$\psi^{r,\xi,*} = \psi^{r,\xi,*} \mathbf{A}^\xi \mathbf{\Theta}(r) \quad (27)$$

が成立する. ここに, $\psi^{r,\xi,*} = (\psi_{1,1}^{r,\xi,*}, \psi_{1,2}^{r,\xi,*}, \dots, \psi_{J,S}^{r,\xi,*})$ は調査時点における真の舗装状態に関する長期定常生起確率を表す.

最適補修更新モデルを, 舗装のリスク管理水準を一定水準以上に確保した上で, 初期時点から無限期間にわたって発生する補修更新費用の現在価値 (期待 LCC) を最小にする問題として定式化する. 舗装の調査時点において路面健全度が使用限界に到達している定常生起確率 (使用限界確率と呼ぶ) を一定水準以下に抑制することをリスク管理目標として設定する. 調査時点 τ における舗装の路面健全度の定常生起確率を

$$\rho^{r,\xi,*} = (\rho_1^{r,\xi,*}, \dots, \rho_J^{r,\xi,*}) \quad (28)$$

で表現する. ただし,

$$\rho_i^{r,\xi,*} = \sum_{s=1}^S \psi_{i,s}^{r,\xi,*} \quad (i=1, \dots, J) \quad (29)$$

と表される. 任意の路面性状調査時点 τ において使用限界である路面健全度 J が観測される使用限界確率 $\rho_J^{r,\xi,*}$ をリスク管理水準 \bar{U} 以下に抑えることが可能な調査・補修更新政策 (r, ξ) の集合 $\Xi(\bar{U})$ を, 次式のように定義する.

$$\Xi(\bar{U}) = \{(r, \xi) | \rho_J^{r,\xi,*} \leq \bar{U}\} \quad (30)$$

(3) 定式化

調査間隔 r と調査時点において実施される補修更新政策 ξ は, ともに政策変数である. これら 2 つの政策変数の組 $(r, \xi) \in \Xi$ を調査・補修更新政策と呼ぶ. ただし, Ξ は, 調査・補修更新政策集合である. 道路管理者が調査・補修更新政策 $(r, \xi) \in \Xi(\bar{U})$ に従って, 道路舗装の点検・補修を実施する場面を考える. 道路管理者は, 時点 $\tau = t_k + rw$ ($w = 0, 1, \dots$) において, 路面性状調査を実施する. 路面性状調査費用を c と表す. さらに, 路面性状調査の実施時点において, 路面健全度が臨界的健全度 $i^*(\xi)$ より大きくなった場合, 舗装の補修を実施する. 補修費用は補修直前の路面健全度 i に依存しないと仮定し, 路面の補修費用を ω で表す. また, FWD 調査費用を ζ , 舗装の更新費用を D と表す. いま, ある路面性状調査時点 u_k において真の劣化状態が (i, s) であると仮定する. 路面性状調査を行うことにより, 路面の性状 i に関する情報を獲得できる. さらに, FWD 調査を行うことにより, 舗装耐荷力 s に関する情報を獲得できる. ここで, 補修更新政策 ξ を表す 2 種類の 0-1 変数

$$\delta_i^\xi = \begin{cases} 0 & i < i^*(\xi) \\ 1 & i \geq i^*(\xi) \end{cases}$$

$$\nu_{i,s}^\xi = \begin{cases} 0 & i < i^*(\xi) \\ 0 & i \geq i^*(\xi), s < s^*(\xi) \\ 1 & i \geq i^*(\xi), s \geq s^*(\xi) \end{cases}$$

を定義する. ただし, $i = 1, s = 1$ の場合には $\delta_i^\xi = 0, \nu_{i,s}^\xi = 0$ を仮定する. ある調査時点 τ において真の劣化状態が (i, s) の時に, その時点以降, 調査・補修更新政策 (r, ξ) を恒常的に適用することによって発生する調査・補修更新費用の期待割引当該期価値 (期待 LCC) $V_{i,s}^{r,\xi}$ は, 再帰的に

$$\begin{aligned} V_{i,s}^{r,\xi} &= c + \nu_{i,s}^\xi (D + \zeta + V_{1,1}^{r,\xi}) \\ &\quad + \delta_i^\xi (1 - \nu_{i,s}^\xi) (\omega + \zeta + V_{1,s}^{r,\xi}) \\ &\quad + (1 - \delta_i^\xi) \sum_{j=i}^J \sum_{l=s}^S \exp(-\rho r) \theta_{i,s}^{j,l}(r) V_{j,l}^{r,\xi} \quad (31) \end{aligned}$$

$(i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S)$

と定義できる. ただし, ρ は割引率, $\theta_{i,s}^{j,l}(r)$ は式 (18) で定義されるマルコフ推移確率 $\Theta(r)$ の $\{(i, s), (j, l)\}$ 要素を表している. 式 (31) は状況依存的期待 LCC 費用 $V_{i,s}^{r,\xi}$ ($i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S$) に関する連立方程式になっている. 式 (31) は

$$\begin{aligned} V_{i,s}^{r,\xi} &= \mathcal{R}_{i,s}^{1,1;r,\xi} V_{1,1}^{r,\xi} + \mathcal{R}_{i,s}^{1,s;r,\xi} V_{1,s}^{r,\xi} \\ &\quad + \sum_{j=i}^J \sum_{l=s}^S \mathcal{R}_{i,s}^{j,l;r,\xi} V_{j,l}^{r,\xi} + \mathcal{U}_{i,s}^{r,\xi} \quad (32) \end{aligned}$$

$(i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S)$

と書き換えることができる. ただし,

$$\mathcal{R}_{i,s}^{1,1;r,\xi} = \nu_{i,s}^\xi \quad (33a)$$

$$\mathcal{R}_{i,s}^{1,s;r,\xi} = \delta_i^\xi (1 - \nu_{i,s}^\xi) \quad (33b)$$

$$\mathcal{R}_{i,s}^{j,l;r,\xi} = (1 - \delta_i^\xi) \exp(-\rho r) \theta_{i,s}^{j,l}(r) \quad (j \neq 1) \quad (33c)$$

$$\mathcal{U}_{i,s}^{r,\xi} = c + \delta_i^\xi (1 - \nu_{i,s}^\xi) (\omega + \zeta) + \nu_{i,s}^\xi (D + \zeta) \quad (33d)$$

である. 連立方程式 (32) を

$$\mathbf{V}^{r,\xi} = \mathbf{V}^{r,\xi} \mathbf{\Gamma}^{r,\xi} + \mathbf{U}^{r,\xi} \quad (34)$$

と行列表記する. ただし,

$$\mathbf{V}^{r,\xi} = (V_{1,1}^{r,\xi}, V_{1,2}^{r,\xi}, \dots, V_{i,s}^{r,\xi}, \dots, V_{J,S}^{r,\xi}) \quad (35a)$$

$$\mathbf{U}^{r,\xi} = (\mathcal{U}_{1,1}^{r,\xi}, \mathcal{U}_{1,2}^{r,\xi}, \dots, \mathcal{U}_{i,s}^{r,\xi}, \dots, \mathcal{U}_{J,S}^{r,\xi}) \quad (35b)$$

$$\mathbf{\Gamma}^{r,\xi} = \begin{pmatrix} \mathcal{R}_{1,1}^{1,1;r,\xi} & \mathcal{R}_{1,1}^{1,2;r,\xi} & \dots & \mathcal{R}_{1,1}^{J,S;r,\xi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{R}_{i,s}^{1,1;r,\xi} & \mathcal{R}_{i,s}^{1,2;r,\xi} & \dots & \mathcal{R}_{i,s}^{J,S;r,\xi} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathcal{R}_{J,S}^{1,1;r,\xi} & \mathcal{R}_{J,S}^{1,2;r,\xi} & \dots & \mathcal{R}_{J,S}^{J,S;r,\xi} \end{pmatrix} \quad (35c)$$

である.

連立方程式 (34) を解くことにより, 状況依存的期待 LCC を求めることができる. 状況依存的期待 LCC である $V_{i,s}^{r,\xi}$ は当該時点において舗装状態が (i, s) の時に, それ以降調査・補修更新政策 (r, ξ) を恒常的に適用する場合に発生する期待 LCC の当該期価値を表している.

いま、長期定常状態において、道路舗装の運用により発生する期待 LCC の現在価値を

$$\overline{LCC}(r, \xi) = \sum_{i=1}^J \sum_{s=1}^S \psi_{i,s}^{r,\xi,*} V_{i,s}^{r,\xi} \quad (36)$$

と定義する。この時、リスク管理水準 \bar{U} を所与とした時に、期待 LCC を最小とするような舗装の調査・補修更新政策を求める最適補修更新政策モデルは、

$$\min_{r,\xi} \{ \overline{LCC}(r, \xi) \} \quad (37a)$$

$$\text{subject to } (r, \xi) \in \Xi(\bar{U}) \quad (37b)$$

と定式化できる。この問題の最適解として求まる最適調査・補修更新政策はリスク管理水準 \bar{U} を所与とした条件付き最適政策であり、このことを明示的に表現するために最適政策を $(r^*(\bar{U}), \xi^*(\bar{U}))$ と表す。

(4) 解法

最適補修更新モデルの最適解を求める方法を提案する。ひとまず、調査・補修更新政策 (r, ξ) を与件とする。調査・補修更新政策 (r, ξ) を所与とした場合、舗装状態 (i, s) を与件とした期待 LCC である $V_{i,s}^{r,\xi}$ は、連立方程式 (34) を解くことにより求めることができる。すべての $(r, \xi) \in \Xi$ に対して網羅的に $V_{i,s}^{r,\xi}$ ($i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S$) を計算することにより、問題 (37a),(37b) の最適解 $(r^*(\bar{U}), \xi^*(\bar{U}))$ を求めることができる。最適補修更新モデルの解法は以下の手順で求めることができる。

- **step 1** (r, ξ) を設定する。
- **step 2** 推移確率 $P^\xi(r)$ を求める。
- **step 3** 式 (27),(29) を用いて $\rho_j^{r,\xi,*}$ を求め、 $\rho_j^{r,\xi,*} \leq \bar{U}$ を満足するかどうかを検討する。満足しない場合、**step 6** へ進む。満足する場合、**step 4** へ進む。
- **step 4** 連立方程式 (34) を解き、 $V_{i,s}^{r,\xi}$ ($i = 1, \dots, J; s = 1, \dots, S$) を求める。
- **step 5** $\overline{LCC}(r, \xi)$ を求める。
- **step 6** すべての (r, ξ) に対して探索が終了していない場合、新しい (r, ξ) を設定し、**step 2** へ戻る。すべての (r, ξ) に関して探索した場合、 $\overline{LCC}(r, \xi)$ を最小にするような (r^*, ξ^*) を求める。

以上の最適補修更新モデルの解法を図-5に一括して整理している。

5. 適用事例

(1) 適用事例の概要

本研究で提案した方法論を NEXCO 各社が管理する高速道路舗装のマネジメント問題に適用し、方法論の有効性を実証的に検討する。本研究で用いたデータは、高速道路総合技術研究所が実施した舗装健全度調査の

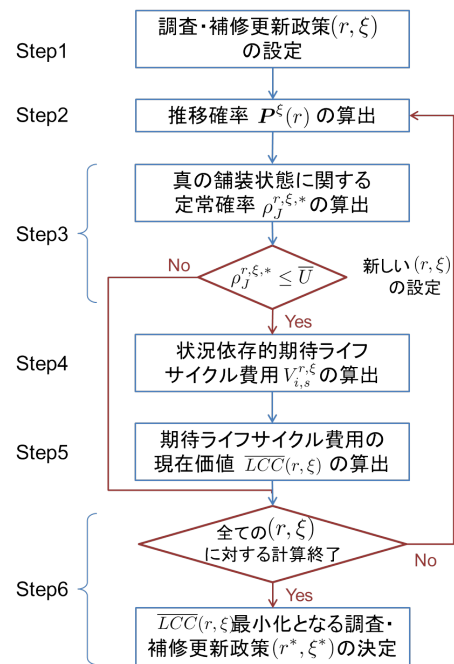


図-5 最適補修更新モデルの解法

結果であり、全 47 路線、合計 940 箇所において路面性状調査と FWD 調査が実施されている。対象箇所では、複数の時間断面において調査が実施されている。対象区間では、路面補修は実施されているものの、道路建設時点から舗装更新は実施されていない。建設時点に関するデータが利用可能であるため、建設時点から最初の調査時点までの期間、調査時点からつぎの調査時点に至るまでの期間のそれぞれを 1 単位のサンプルデータと定義した。このような考え方で階層的隠れマルコフ劣化モデル²²⁾を推計するためのデータベースを整備した。モデル推計に用いたサンプル数は 1,510 個となる。路面性状調査では 100m 区間を基本単位として、路面健全度を評価する。その結果に基づいて補修箇所を選定する。以上の方法で作成したサンプルデータの特性を表-1 に整理している。

路面性状調査では比較的長い区間を一斉調査し、その調査結果から損傷が進行している区間を 100m 区間に判定し、補修する区間を選定する。路面性状調査では、1) ひび割れ、2) わだち掘れ、3) 平坦性 (IRI) という 3 種類の損傷タイプのそれぞれに対して路面健全度に関する情報が得られる。補修基準値は、3 つの損傷別に予め設定されており、ある舗装区間の 3 つの損傷のいずれかの値が補修基準値に達すれば、要補修区間として判別される。本研究では、3 種類の損傷の中で、劣化の進展が早いとされるひび割れに着目して、路面健全度を定義する²³⁾。ひび割れは、調査対象範囲を小メッシュに分割し、ひび割れが存在するメッシュの割合で評価する。ひび割れ率に基づいて、路面健全度を

表-1 サンプルデータの特性

総延長	37.75km					
敷設年度	1963年～2005年					
総道路区間数	755					
総サンプル数	1,510					
大型車交通量	平均 4,572 台/日 (81～19,347)					
耐荷力別	健全度 (耐荷力)	1	2	3	4	5
サンプリング状況	サンプル数	710	495	201	82	22
	サンプルの割合	47%	33%	13%	5%	1%

表-2 路面健全度

健全度	ランクひび割れ評価 (%)
1	$Cr = 0$
2	$0 < Cr \leq 2.5$
3	$2.5.Cr \leq 5$
4	$5 < Cr \leq 7.5$
5	$7.5 < Cr \leq 10$

表-3 舗装耐荷力の健全度

耐荷力ランク	FWD
1	$D \leq 400$
2	$400 < D \leq 800$
3	$800 < D \leq 1,200$
4	$1,200 < D \leq 1,600$
5	$1,600 < D$

表-2 に示すように定義した。健全度5の状態が使用限界である。なお、実務ではひび割れ率20%を補修の目安としている。しかし、今回解析対象とした道路区間においては、ひび割れ率が20%に到達する前に補修が実施される道路区間も多くみられ、ひび割れ率10%を超えるようなサンプルが相対的に少ない状況であった。このような一部のサンプルが欠損した状態でモデル推計を行うと、期待寿命が現実よりも過大に評価されるというサンプル欠損バイアスが生じることになる。サンプル欠損バイアスの影響を考慮したモデルについては参考文献7)に詳しいが、本研究では路面健全度と耐荷力の低下に関する階層性に主眼を置くことを目的とし、サンプル欠損バイアスの影響を避けるために、サンプルが十分に確保できるひび割れ率10%を上限と設定した。一方、路面性状調査を実施した対象区間において、FWD調査によるたわみ測定も実施されている。本適用事例では、たわみ測定の結果に基づいて、アスファルト層の健全度を D 指標

$$D = \frac{D_0 - D_{90}}{\Delta} \times 10^6 \quad (38)$$

を用いて評価する。ただし、 D_0, D_{90} は、それぞれ重錘の載荷点直下、および載荷点から90cm離れた地点のたわみ量 (mm)、 Δ はアスファルト層の設計厚 (mm) を表す。さらに、 D 指標を表-3に示すように離散化し、耐荷力健全度 (以下、路面健全度との相違を明確にするために、耐荷力ランクと呼ぶ) を定義した。耐荷力ランク5は使用限界を意味している。耐荷力ランクが5に到達した場合、アスファルト層全体の更新が実施されることになる。

本研究では、小林等²²⁾が提案した階層的隠れマルコフ劣化モデルを用いて、式(17)で表現されるマルコフ推移確率を推計する。その際、表-2で設定した路面健全度に基づき、健全度5を除く合計4つの健全度に対して式(2)で表される路面健全度ハザードモデルを、表-3に示す5個の耐荷力ランクのうち、耐荷力ランク5を除く4つのランクに対して式(10)の耐荷力ハザードモデルを推計した。同式に示したように、路面健全度ハザード率には、耐荷力ランクに応じて劣化ハザードが比例的に変化することを表すスケールパラメータ γ_0^s ($s = 1, \dots, S-1$) が含まれる。パラメータの識別可能条件より、 $S-1$ 個のパラメータ γ_0^s のうち、 γ_0^1 を1に基準化する。MCMC (Markov Chain Monte Carlo) 法²²⁾⁻²⁵⁾を用いた階層的隠れマルコフ劣化モデルの推計方法に関する詳細は参考文献28)に譲ることとする。

階層的隠れマルコフ劣化モデルを推計するにあたり、路面健全度ハザード率に影響を及ぼす要因として、地域区分、舗装種別、舗装厚、道路構造特性、交通量等を候補として取り上げた。一方、耐荷力ハザード率に関しても同様の変数を説明変数の候補として取り上げ、これら候補となる説明変数すべての組み合わせに対して階層的隠れマルコフ劣化ハザード関数を推計した。舗装厚、交通量のような定量的パラメータに関しては、サンプル中の最大値が1となるように基準化した。説明変数の組み合わせの中で、符号条件および Geweke 検定を満足しないような変数の組を除外し、最終的にはベイズファクター^{4),26)-28)}を最大にするような変数の組み合わせを採用することとした。以上のように推計した

表-4 パラメータの推計結果 (耐荷力)

耐荷力	定数項 β_1^i	大型車交通量 β_2^i
1	-3.012 (-3.082,-2.943) 0.386	— (—) —
2	-2.307 (-2.414,-2.204) 0.125	0.576 (0.420,0.730) 1.024
3	-2.090 (-2.218,-1.965) 0.401	0.567 (0.406,0.723) 0.670
4	-2.439 (-2.595,-2.284) 1.762	— (—) —

注) 各健全度ごとに、第1行はパラメータサンプルの期待値、第2行はパラメータ推計値の95%信用域の下限値と上限値、第3行はGeweke検定統計量を表している。

表-5 パラメータの推計結果 (路面健全度)

健全度	定数項 γ_1^i	大型車交通量 γ_2^i
1	-2.271 (-2.361,-2.184) 0.844	0.086 (-0.062,0.234) 0.148
2	-2.170 (-2.290,-2.052) 0.527	— (—) —
3	-1.553 (-1.696,-1.406) 1.615	— (—) —
4	-1.996 (-2.150,-1.842) 1.414	— (—) —

注) 各健全度ごとに、第1行はパラメータサンプルの期待値、第2行はパラメータ推計値の95%信用域の下限値と上限値、第3行はGeweke検定統計量を表している。スケールパラメータ γ^0 の推計値に関しては別途表-6に示す。

階層的隠れマルコフ劣化ハザードモデルのうち、表-4には耐荷力の低下過程を表すハザードモデルを、表-5には路面の劣化過程を表すハザードモデルの推計結果を示している。表-4と表-5のいずれのモデルも定数項、および大型車交通量が説明変数として選ばれている。定数項のみが選ばれたモデルは、大型交通量の多寡に関わらず、劣化が時間に対して一定の速度で進展することを意味している。また、耐荷力に依存する路面劣化速度の異質性を表すスケールパラメータの推計結果を表-6に示す。耐荷力の健全度が大きくなれば、スケールパラメータの値も増加している。式(10)を考慮すると、耐荷力の健全度が2の場合、健全度が4のときよりも路面健全度の劣化速度が約2倍速くなることを意味している。

表-6 スケールパラメータの推計結果 (γ_0)

健全度	スケールパラメータ γ_0^s
$s=2$	1.170 (1.046,1.452)
$s=3$	1.629 (1.418,2.233)
$s=4$	2.348 (1.961,3.421)

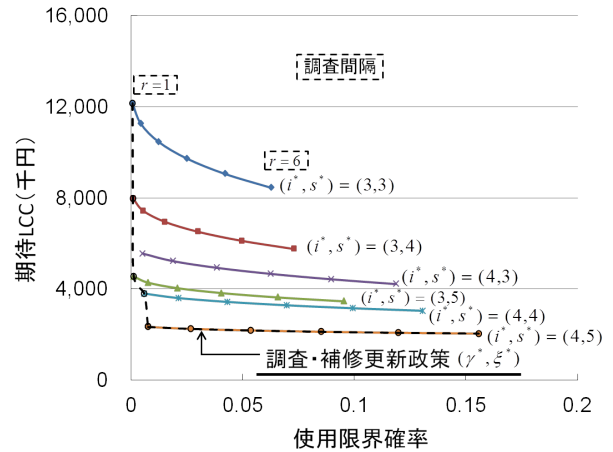


図-6 使用限界確率と期待LCCの関係

表-7 リスク管理水準と最適調査・補修更新政策

リスク管理水準 \bar{U}	臨界的健全度 i^*	臨界耐荷力 s^*	調査間隔 r^*	期待LCC \overline{LCC} (千円)
0.5%	3	5	1	4,500
1.0%	4	5	1	2,300
2.0%	4	5	1	2,300
5.0%	4	5	2	2,200
10.0%	4	5	4	2,100
15.0%	4	5	5	2,070
20.0%	4	5	6	2,030

(2) モデルの分析結果

本研究で提案した最適補修更新モデルは、所与のリスク管理水準 \bar{U} の下で、期待LCC(式(36)参照)を最小にするような最適調査・補修更新政策 (r^*, ξ^*) を求めることを目的としている。適用事例である高速道路区間(延長100m, 幅員を3.5m)は、密度1.98t/m³, 表層4cmの排水性舗装が施されている。過去の調査・補修実績に基づいて、単位区間当たりの補修費用は810千円/区間、路面性状調査費用は2千円/区間と設定した。また、FWD調査諸費用は495千円/区間、舗装の更新費用は3,800千円/区間である。リスク管理水準 \bar{U} をパラメトリックに変化させ、それぞれのリスク管理水準に対応する最適政策を求めることによりリスク・費用管理曲線を導出した。図-6の各線は臨界健全度 (i^*, s^*) を与件として、調査間隔を変化させた各ケースに対応

した $\overline{LCC}(r, \xi)$ (期待 LCC) と使用限界確率 $\rho_5^{r, \xi, *}$ の関係をプロットしたものである。すなわち、同一線上の各点は、同一の臨界健全度 (i^*, s^*) と対応している。さらに、同図の各線の中で、もっとも下方に位置する線に着目して包絡線を描くことによりリスク・費用管理曲線を求めることができる。さらに、表-7には、リスク・費用管理曲線上の各点に対応するリスク管理水準 \bar{U} と最適臨界健全度 (i^*, s^*) および最適調査間隔 r^* の関係を示している。

つぎに、リスク・費用管理曲線上の各点に着目する。図-6の横軸をリスク管理水準 \bar{U} に読み替える。路面性状調査の調査間隔が長くなるほど、調査費用が低減するために、 $\overline{LCC}(r^*, \xi^*)$ は減少する。その一方で、リスク管理水準が逆に増加する。表-7に示すように、リスク管理水準が1.0%以上の場合は、路面健全度が臨界健全度 $i^* = 4$ に到達した時点で路面補修を実施することが望ましい。リスク管理水準 \bar{U} を0.5%という高水準に維持するためには、臨界的健全度を $i^* = 3$ に設定することが必要となる。しかし、リスク管理水準 $\bar{U} = 0.5\%$ という値は、極めて高水準であり、現実的ではない。現行の舗装マネジメントで採用されているように、路面健全度が(使用限界である健全度5より1つ小さい)健全度 $i^* = 4$ の段階で予防的に路面補修を行うことが望ましい。一方、耐荷力に関しては、臨界耐荷力がいずれのリスク管理水準においても、 $s^* = 5$ であり、耐荷力が使用限界に到達した時点で舗装全体の補修を行うことが期待 LCC の観点からは望ましい。適用事例に関する限り、調査費用と比較して補修更新費用が卓越的に大きい場合、リスク管理水準を上昇させるためには、路面性状調査、FWD 調査の頻度を増加させることが望ましいことが判明した。リスク管理水準を $\bar{U} = 5\%$ に設定すれば、2年ごとに路面性状調査を実施することが最適点検間隔となる。このような政策は、同区間で現在実施されている調査・補修更新政策とほぼ同一であり、現行の調査・補修更新政策はリスク管理水準を5%に設定した場合における最適政策になっていると評価できる。

(3) 感度分析

本研究では、小林等が推計した階層的隠れマルコフ劣化モデル²²⁾を用いて路面、耐荷力のパフォーマンスカーブを作成し期待 LCC を算定した。しかし、路面、耐荷力の劣化過程には多大な不確実性が存在するとともに、道路区間によって劣化速度は多様に変動する。以下では、劣化速度の異質性、不確実性が舗装の調査・補修更新政策に及ぼす影響について感度分析を試みる。いま、2種類の感度パラメータ μ_0, μ_1 を用いて、舗装耐荷力 s ($s = 1, \dots, S - 1$) のハザード率(式(2))、舗装

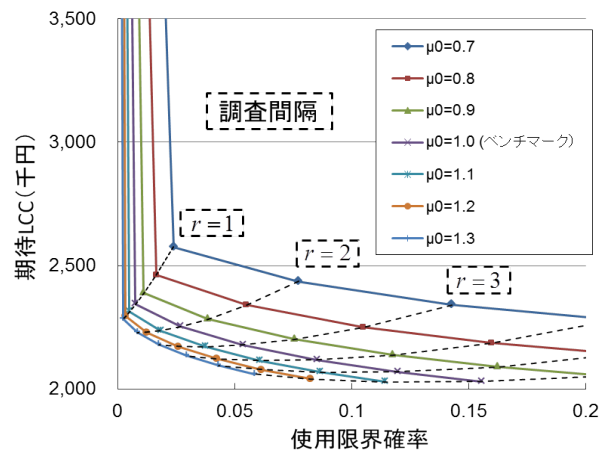


図-7 感度分析 μ_0

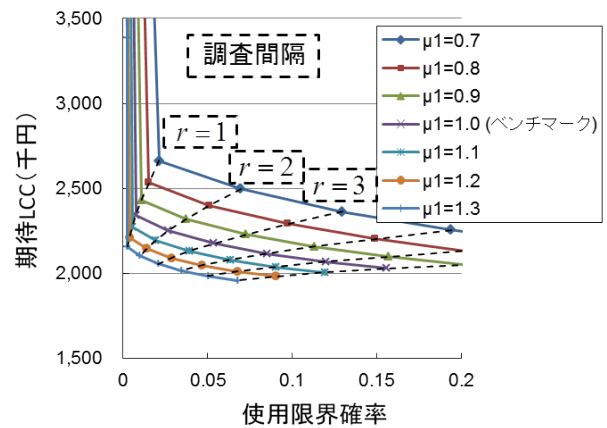


図-8 感度分析 μ_1

耐荷力 s を与件とした路面健全度 i ($i = 1, \dots, J - 1$) のハザード率(式(10))を

$$\lambda^s(\mu_0) = \mu_0 \lambda^s \quad (39a)$$

$$\mu^i(s; \mu_1) = \mu_1 \gamma_0^s \mu^i \quad (39b)$$

と書き改める。図-7には感度パラメータ μ_0 を区間 $[0.7, 1.3]$ にわたり、幅 0.1 刻みに変化させた舗装耐荷力に関するリスク・費用管理曲線を示している。また、図-8には、路面健全度の劣化ハザード率を変化させた場合に対して求めたリスク・費用管理曲線を示している。いずれの図においても、 $\mu_0 = 1, \mu_1 = 1$ の場合が、ベンチマーキングとして求めた場合に該当する。特に、感度パラメータ μ_0, μ_1 が1より小さい場合、ベンチマークケースよりも、当該の道路区間における劣化速度が遅くなる場合に対応している。その結果、ベンチマークケースと比較して、リスク・費用管理曲線が上方にシフトすることが読み取れる。逆に、 μ_0, μ_1 が1より大きくなると、リスク・費用管理曲線が下方にシフトする。図-7、図-8には、最適点検間隔も併記している。感度パラメータ値が大きくなると、劣化速度が

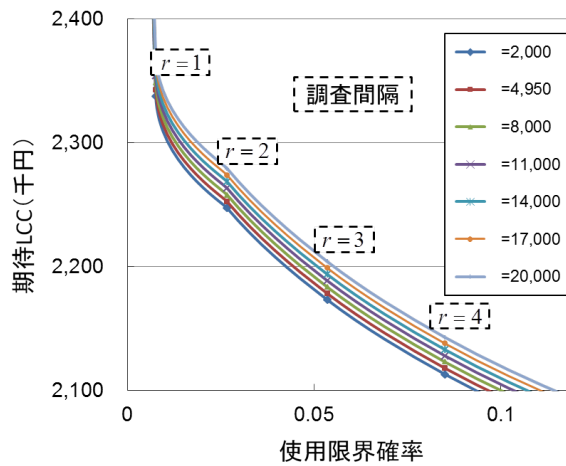


図-9 感度分析

速くなるため、点検間隔が短くなる。図-7と図-8を比較することにより、舗装耐荷力の感度パラメータ μ_0 が変化した方が、期待LCCの変化が大きいことが読み取れる。なお、感度分析を行った場合においても、最適補修更新政策を表す臨界健全度 i^* と臨界耐荷力 s^* の組み合わせは、表-7の場合と同様に、 $\bar{U} = 0.5$ の場合に $(i^*, s^*) = (3, 5)$ 、それ以外の場合には $(i^*, s^*) = (4, 5)$ になっていることを付記しておく。

また、図-9は舗装基礎部分の耐荷力を調査するFWD調査費用についての感度分析を行った結果を示している。本研究の適用事例では一区間の調査費用を4,950円を所与の値として計算を行った。しかし、社会的情勢や経済状況に応じて、FWD調査費用が変動することは十分に起こりえる事態といえる。そのため、当該道路管理者は費用変化による管理費用の変動を、ある程度把握していることが理想的である。今回はFWD調査費用を2,000円から20,000円まで約3,000円間隔で変動させて計算を行った。図からもわかるように図-7、図-8のように何らかが原因しハザード率に影響が生じて場合は異なり、FWD調査による管理費用変動はほぼ変わらないことが見て取れる。つまり、舗装構造物の更新費用が多額であり、舗装構造物を調査を適切に行い、予防的に補修更新することが最適な管理姿勢であるといえる。

(4) 実用化への示唆

本研究では路面性状調査を実施し路面補修の有無を決定するとともに、路面補修の対象となる区間で追加的にFWD調査を実施し舗装更新の有無を決定するという方針の下で、期待LCCの最小化を達成するような最適点検間隔と補修更新政策を求める最適補修更新モデルを定式化した。FWD調査の実施時には車両通行に影響が生じるため、調査対象区間を限定してFWD調

査を実施することは道路交通の効率化に資するだけでなく、情報の蓄積を通して、今後の意思決定の精緻化に極めて有用な行為であると考えられる。しかしながら、FWD調査の結果、舗装耐荷力の低下が判明し、路面補修から舗装更新に切り替えることにより追加的費用が発生する。事前に補修更新計画を立案し、必要な更新費用を確保しておくためには、路面補修回数と路面健全度の劣化速度(パフォーマンスカーブ)の相対的な関係を把握しておくことが望ましい。例えば、表-6に示したスケールパラメータを参考にすることができる。具体的には舗装耐荷力が $s = 4$ の場合には $s = 1$ の場合と比較して、路面健全度の劣化速度が約2.4倍速くなっている。したがって、新設時の路面健全度のパフォーマンスカーブと比較して、現時点のパフォーマンスカーブが相対的に2倍以上速いようであれば、次回路面健全度が臨界的健全度に到達した段階では舗装更新を視野に入れておく必要がある。

さらに、感度分析を通してリスク管理水準5%付近では臨界的健全度や臨界耐荷力は変化しないことも判明した。前述した通り、今回の適用事例のように補修更新費用が調査費用に比べて卓越的に大きい場合には、調査間隔や期待ライフサイクル費用の変動のみを考慮しておけば良いことを意味する。さらに、路面に関しては健全度4という予防保全策が採用されるが、耐荷力に関しては事後保全策が採用される。もちろん、本研究で検討した適用事例は、ごく一部の高速道路区間を対象としたものであって、異なる道路環境の下では、最適補修更新政策の内容や期待ライフサイクル費用が異なることが十分に起こり得る。しかしながら、対象道路区間は代表的区間でもあることから、獲得した知見は道路管理者の実務的経験とある程度整合的であると考えている。さらに、高速道路においても今後耐荷力の低下に伴う舗装更新の増加が見込まれる中、最適補

修更新政策に関する知見を獲得可能な方法論は今後の調査・補修更新計画の立案において極めて有用であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、道路管理者が設定する舗装サービス水準に関する所与のリスク管理水準の下で、補修更新費用、および調査費用で構成される期待LCCの最小化を達成するような調査間隔や舗装の補修更新政策を求めよう方法論を提案した。具体的には、舗装の劣化状態を路面健全度と舗装耐荷力という2種類の状態変数を用いて表現するとともに、舗装の劣化過程を路面健全度の劣化過程と舗装耐荷力の劣化過程という複合的なマルコフ劣化モデルを用いて表現した。その上で、所与のリスク管理水準の下で期待LCCを最小にするような調査間隔と補修更新政策を同時に決定するような最適補修更新モデルを定式化した。最後に、現実の高速道路を対象とした適用事例を通じて、本研究で提案した方法論の有効性を実証的に分析した。その結果、路面に関しては健全度4という予防保全策を、耐荷力に関しては事後保全策を採用することが望ましいという結果が得られた。もちろん、この知見は、実証分析の対象としてとりあげた道路区間のみ成立する事項であることは言うまでもない。今後、異なる道路環境を対象とした実証分析を蓄積することにより、本研究で提案した方法論の有効性を継続的に検討するとともに、実用的な調査・補修更新政策に関する知見を蓄積することが必要である。

本研究で提案した方法論の有用性を増加するためにいくつかの研究課題が残されている。第1に、補修更新政策に関しては、本研究でとりあげた方法以外にも多様な方法が考えられる。たとえば、本研究では補修を実施する際にFWD調査を実施することを想定したが、FWD調査の実施タイミングの最適化を行うような最適補修更新モデルを定式化することも可能である。第2に、路面健全度の劣化速度を相対評価することによりFWD調査を実施するような実用的舗装マネジメント手法の開発が可能である。耐荷力が低下すれば路面健全度の劣化速度が大きくなる。路面健全度の劣化速度を評価することにより、舗装耐荷力の低下状態に関する情報を間接的に獲得することができる。路面健全度の劣化速度に関する相対評価を通じて、FWD調査の実施タイミングの合理化を図ることが可能である。第3に、本研究では対象とする路線が、ほとんど同一の舗装特性や交通特性を有する区間で構成される場合を想定している。このため、単一のパフォーマンスカーブを用いた最適補修更新モデルを定式化した。対象と

する路線が、多様な舗装構造や道路特性を有する区間で構成される場合、道路区間の異質性を考慮した最適補修更新モデルを開発することが必要となる。第4に、本研究の適用事例では単一の路線を対象として、調査・補修更新政策を検討した。今後は、複数路線を対象として、実用的な路面性状調査の計画方法論を開発することが必要である。第5に、本研究で提案した最適補修更新モデルは、若干の修正により、舗装以外の土木施設のアセットマネジメント問題に適用可能である。特に、補修工法に多様性がある場合、補修更新政策の数が膨大になるため効率的な解法を開発することが必要である。

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計, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.68-82, 2005.
- 3) 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.
- 4) 津田尚胤, 貝戸清之, 山本浩司, 小林潔司: ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法, 土木学会論文集, No.3/VI-62, pp.473-491, 2006.
- 5) 貝戸清之, 小林潔司: マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.
- 6) 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.
- 7) 小林潔司, 熊田一彦, 佐藤正和, 岩崎洋一郎, 青木一也: サンプル欠損を考慮した舗装劣化予測モデル, 土木学会論文集 F, Vol.63, No.1, pp.1-15, 2007.
- 8) 例えば, Heyman, D. P. and Sobel, M. J. (eds.): *Stochastic Models, Handbooks in Operations Research and Management Science*, Vol.2, North-Holland, 1990.
- 9) 例えば, 三根久, 河合一: 信頼性・保全性の数理, 朝倉書店, 1982.
- 10) Howard, R. A.: *Dynamic Programming and Markovian Processes*, 関根智明他訳: ダイナミックプログラミングとマルコフ過程, 培風館, 1971.
- 11) Madanat, S.: Incorporating Inspection Decisions in Pavement Management, *Transportation Research*, Part B, Vol.27B, pp.425-438, 1993.
- 12) Madanat, S. and Ben-Akiva, M.: Optimal Inspection and Repair Policies for Infrastructure Facilities, *Transportation Science*, Vol.28, pp.55-62, 1994.
- 13) Durango, P. and Madanat, S.: Optimal Maintenance and Repair Policies for Infrastructure Facilities under Uncertain Deterioration Rates: An Adaptive Control Approach, *Transportation Research*, Part A, Vol.36, pp.763-778, 2002.
- 14) 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.
- 15) 織田澤利守, 石原克治, 小林潔司, 近藤佳史: 経済的寿命を考慮した最適修繕政策, 土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.169-184, 2004.

- 16) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: トンネル照明システムの最適点検・更新政策, 土木学会論文集, No.805/VI-67, pp.105-116, 2005.
- 17) 青木一也, 山本浩司, 小林潔司: 時間依存型劣化過程を有するシステムの集計的最適点検・補修政策, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.2, pp.240-257, 2006.
- 18) Jido, M., Otazawa, T. and Kobayashi, K.: Synchronized Repair Policy for Bridge Management, in: Watanabe, E., Frangopol, D. M. and Utsunomiya, T. (eds.), *Bridge Maintenance, Safety, Management and Cost*, CD-ROM, Balkema, 2005.
- 19) 慈道充, 小林潔司: 不確実性下における最適点検補修ルール, 土木学会論文集, No.744/IV-61, pp.39-50, 2003.
- 20) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 21) Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.
- 22) 小林潔司, 貝戸清之, 江口利幸, 大井明, 起塚亮輔: 舗装構造の階層的隠れマルコフ劣化モデル, 土木学会論文集, Vol.67, No.4, pp.422-440, 2011.
- 23) 熊田一彦, 江口利幸, 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: モニタリングデータを用いた高速道路舗装の統計的劣化モデルの検討, 舗装工学論文集, 土木学会, Vol.14, pp.229-237, 2009.
- 24) 和合肇: ベイズ計量経済分析, マルコフ連鎖モンテカルロ法とその応用, 東洋経済新報社, 2005.
- 25) 伊庭幸人: 計算統計学のフロンティアー計算統計 II, マルコフ連鎖モンテカルロ法とその周辺, 岩波書店, 2005.
- 26) Chib, S.: Marginal Likelihood from Gibbs Output, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.90, pp.1313-1321, 1995.
- 27) Newey, W. K. and West, K. D.: A Simple, Positive Semi-Definite, Heteroskedasticity and Autocorrelation Consistent Covariance Matrix, *Econometrica*, Vol.55, pp.703-708, 1987.
- 28) Han, C. and Carlin, B. P.: MCMC Methods for Computing Bayes Factors, A Comparative Review, *Biometrika*, Vol.84, pp.711-732, 2000.

(2011.12.5 受付)

THE OPTIMAL REPAIR AND REPLACEMENT MODEL OF PAVEMENT STRUCTURE

Kiyoshi KOBAYASHI, Masayuki EGUCHI, Akira OI, Kazuya AOKI, Kiyoyuki KAITO
and Yasunori MATSUMURA

The deterioration processes of pavement are compound ones characterized by surface deterioration as well as capacity. This study proposes a methodology to find the optimal inspection policy for road pavement with uncertain deterioration processes. Since the deterioration progresses are characterized by a lot of uncertainty, the pavement conditions cannot be deterministically evaluated unless the inspection or repair activities are carried out. The road administrators have to make the decisions of whether repair should be implemented based upon the results of inspection. In this paper, the value of the inspection is evaluated by use of real option theory, and the optimal inspection and repair model is formulated to investigate the optimal inspection frequencies an repair policy which may minimize the expected life cycle costs. Finally, the validity of the methodology presented in the paper is investigated by a case study dealing with the expressway in the real world.