

舗装構造の予防保全モデル

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 京都大学経営管理大学院 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)
E-mail: kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

²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: m.eguchi.ac@ri-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 大阪大学大学院工学研究科 グローバル若手研究者フロンティア研究拠点 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)
E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

⁶学生会員 京都大学地球工学科 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: yasunori.m@fy7.ecs.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。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・更新政策を同時決定する予防保全モデルを提案する。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、予防保全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^{2)~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、現実の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を用いたたわみ量調査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ようなマルコフ決定モデル（以下、予防保全モデルと呼ぶ）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、予防保全モデルを定式化する。

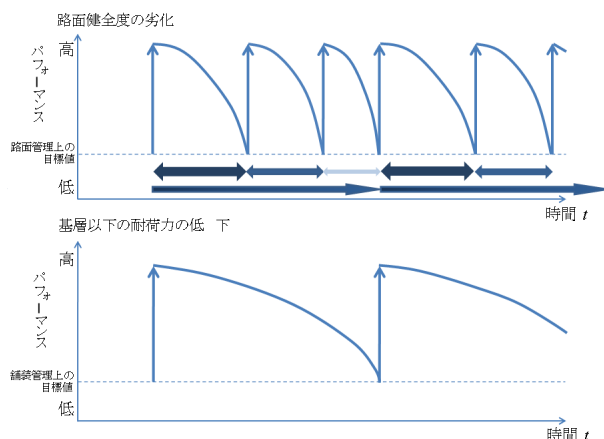
2. 本研究の基本的な考え方

(1) 従来研究概要

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調査費用が禁止的に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望ましい。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るとする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^{2),3)}。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²⁾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²⁾⁻³⁾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³⁾⁻⁴⁾。

本研究では、まず道路舗装のマネジメントを対象として予防保全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が、FWD調査により舗装耐荷力を観測することが可能である。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、路面も打ちか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



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

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予防保全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

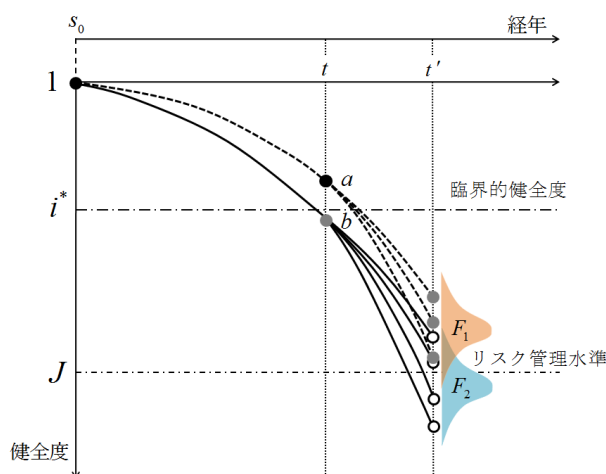
道路の舗装構造は、表層部、基層部、路盤部という複数の層で構成される多層構造を有している。このうち、表層(路面)は車両交通による摩耗や繰り返し荷重、天候・気象等の直接的な影響により劣化が進展する。さらに、各層における構造的欠陥の有無が路面の劣化速度に影響を及ぼす。基層や路盤部も雨水や地下水の浸透、繰り返し荷重の作用等により劣化が進展する。舗装構造の劣化過程を、模式的に図-1に示している。図の上段は路面健全度の劣化過程を、下段は舗装耐荷力の低下過程を示している。同図においては、路面健全度の劣化過程の方が、耐荷力の低下よりも、早く進展するように描かれている。舗装マネジメントにおいては、路面のサービス水準に対して、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、舗装の補修間隔が短くなる。耐荷力が低下した場合、舗装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、舗装耐荷力は目視により直接観察することは不可能である。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

化を直接観察するか、FWD 調査やベンケルマンビーム試験を用いた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 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の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、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、路面の補修を実施する時点で、FWD 調査を実施することにより舗装耐荷力を調査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 試験を実施し、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 試験の結果 $g(t) = s$ に基づいて、1) 路面のみが補修され、補修の劣化状態が $(1, s)$ に回復する（アクション e_{21} ）、2) 舗装打ちかえが実施され、舗装の劣化状態が $(1, 1)$ に改善する（アクション e_{22} ）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 の定期調査により、当該時点における路面健全度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リスク管理水準を下回る確率を一定水準に維持することを管理目標としている。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、次の定期調査時点 t' においてリスク管理水準を下回る確率は増加する。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



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

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、次の定期調査時点において管理目標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、定期調査時点において「路面健全度が臨界的健全度より望ましい状態にある場合は補修を見送る」、「臨界的健全度より悪い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、定期調査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、次の定期調査時点において、舗装の路面健全度がリスク管理水準を満足しない確率は小さくなる。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、定期調査間隔を小さくすることが最適調査政策となる。一方で、調査間隔を減少すれば、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定期調査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

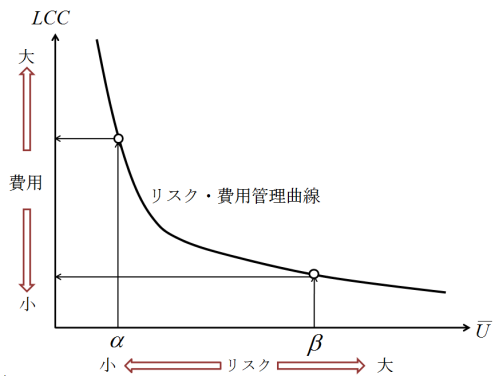


図-3 リスク・費用管理曲線

えない。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。リスク管理水準に関しては、3.(2) で定式化するように、舗装のサービス水準が管理水準 \bar{U} を満足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低下を招くことになる。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間隔・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リスク・費用リスク・費用、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 s_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 s_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。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^{?)}が開発したマルコフ劣化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^{?)}, λ^s を

$$\lambda^s = x\beta^s \quad (2)$$

と表す．ただし， $x = (x_1, \dots, x_Q)$ は説明変数ベクトル， $\beta^s = (\beta_1^s, \dots, \beta_Q^s)'$ 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，

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

と表すことができる^{?)}．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．

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

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(??)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．

いま，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

$$\mu^i(s) = \gamma_0^s y \gamma^i = \gamma_0^s \mu^i \quad (10)$$

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， $y = (y_1, \dots, y_V)$ は説明変数ベクトル， $\gamma^i = (\gamma_1^i, \dots, \gamma_V^i)'$ は未知パラメータベクトル， $\mu^i = y \gamma^i$ 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，

$$\begin{aligned} &\pi^{ii}(s) \\ &= \text{Prob}[h(u_k + 1) = i | h(u_k) = i, g(t_k + u_k) = s] \\ &= \exp\{-\mu^i(s)\} = \exp(-\gamma_0^s \mu^i) \end{aligned} \quad (11)$$

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 ($j > i$) に推移するマルコフ推移確率 $\pi^{ij}(s)$ ($i = 1, \dots, J-1; j = i, \dots, J$) は，

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

$$= \sum_{z=i}^j \prod_{r=i, \neq z}^{j-1} \frac{\mu^r(s)}{\mu^r(s) - \mu^z(s)} \exp\{-\mu^z(s)\} \\ (i = 1, \dots, J-1; j = i+1, \dots, J) \quad (12)$$

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．

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

以上の推移確率 (??),(??) 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 (??) 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

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

とし，舗装全体の劣化過程の推移確率行列を

$$\Theta = \begin{pmatrix} \theta_1^1 & \theta_1^2 & \dots & \theta_1^J \\ 0 & \theta_2^2 & \dots & \theta_2^J \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \theta_J^J \end{pmatrix} \quad (17)$$

と定義する．この時，調査時点 t_k からつぎの調査時点 t_k+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

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

を用いて表現できる．マルコフ推移確率 $\Theta(r)$ 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 $\psi(t) = \{\psi_{1,1}(t), \psi_{1,2}(t), \dots, \psi_{i,s}(t), \dots, \psi_{J,S}(t)\}$ と表す． r 期間に及ぶ劣化状態の推移確率が式 (??) で表現される時，調査時点 t と $t+r$ の状態生起確率 $\psi(t)$ と $\psi(t+r)$ の間に

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

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， $\psi(0) = (1, 0, \dots, 0)'$ 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

$$\psi(t) = \psi(0)\Theta(t) \quad (20)$$

と表せる．

4. 予防保全モデル

(1) モデル化の前提条件

路面の補修時に 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 $t = t_k + rw$ ($w = 0, 1, \dots, W$) 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 $h(t) = i$ ($i = 1, \dots, J$) と判定されたと考える．時点 t において，路面健全度が $h(t) = J$ と判定された場合は，直ちに路面が補修され路面健全度が 1 まで回復する．一方，時点 t において路面健全度が $1 < h(t) \leq J$ 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 試験を実施し，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 試験の結果 $g(t) = s$ に基づいて，1) 路面のみが補修され，補修の劣化状態が $(1, s)$ に回復する (アクション e_{21})，2) 舗装打ちかえが実施され，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 t における補修更新政策 ξ を，調査で観測された路面健全度 $h(t) = i$ 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．すなわち，補修更新政策 ξ は，

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

と記述される．いま，路面の補修の有無を判定する臨

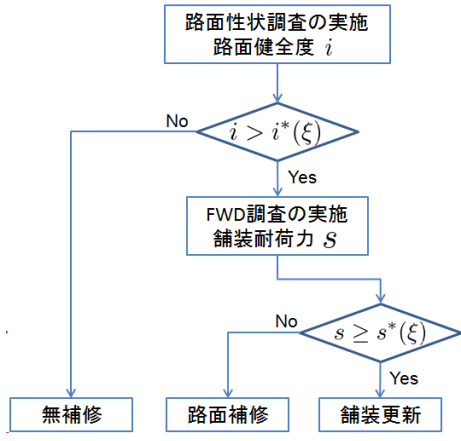


図-4 調査・補修更新アクションの論理的順序

界的健全度 $i^*(\xi)$ が存在し、路面健全度 i が臨界健全度 $i^*(\xi)$ より大きくなった場合、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、舗装全体が打ちかえられる。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

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

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

と表される。条件(??)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 t 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 $i > i^*(\xi)$ の場合、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、舗装全体が打ちかえられる。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

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

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

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

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

を用いて定義する。

さらに、調査・補修更新政策 ξ の下で調査時点 t 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

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

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

と表すことができる。ただし、 $\Theta^{r,\xi} = A^\xi \Theta(r)$ 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、

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

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。

予防保全モデルを、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 t 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 t 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 $u_k = rd$ ($d = 0, 1, \dots$) 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 $i^*(\xi)$ を下回った場合、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、FDW 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．ある調査時点 t_k において真の劣化状態が (i, s) の時に、その時点以降、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

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

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

と定義できる．ただし、 ρ は割引率、 $\theta_{i,s}^{j,l}(r)$ は式 (??) 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 (??) は状況依存的期待 LCC 費用 $V_{i,s}^{r,\xi}$ ($i = 1, \dots, I; s = 1, \dots, S$) に関する連立方程式になっている．式 (??) は

$$\begin{aligned} V_{i,s}^{r,\xi} &= \mathcal{R}_{i,s}^{1,1;r,\xi} V_{1,1}^{r,\xi} + \mathcal{R}_{i,s}^{1,s;r,\xi} V_{1,s}^{r,\xi} \\ &+ \sum_{j=2}^J \sum_{l=1}^S \mathcal{R}_{i,s}^{j,l;r,\xi} V_{j,l}^{r,\xi} + \mathcal{U}_{i,s}^{r,\xi} \quad (32) \end{aligned}$$

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

と書き換えることができる．ただし、

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

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

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

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

である．連立方程式 (??) 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 (??) 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・点検政策 (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

予防保全モデルの最適解を求める方法を提案する．ひとまず、定期補修更新政策 (r, ξ) を与件とする．定期補修更新政策 (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 (??) 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 $V_{i,s}^{r,\xi}$ ($i = 1, \dots, J; s =$

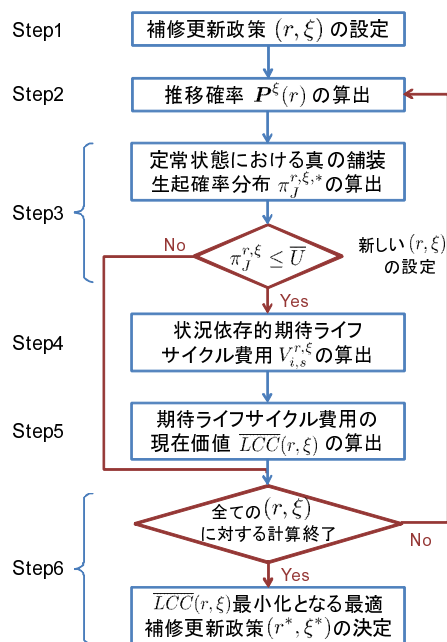


図-5 予防保全モデルの解法

1, ..., S) を計算することにより、問題 (??),(??) の最適解 $(r^*(\bar{U}), \xi^*(\bar{U}))$ を求めることができる。予防保全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 (??),(??) 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 (??) 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。

以上の予防保全モデルの解法を図-5 に一括して整理している。

5. 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、補修費用、及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・更新政策を求めるような方法論を提案した。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予防保全モデルを定式化した。なお、現実の高速道路を対象とした適用事例に関しては講演会当日に発表する予定である。

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・安全性の数理, 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) 林秀和, 貝戸清之, 熊田一彦, 小林潔司: 競合的劣化ハザードモデル: 舗装ひび割れ過程への適用, 土木学会論文集 D, Vol.65, No.2, pp.143-162, 2009.
- 21) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 22) Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.
- 23) Shin, H.C. and Madanat, S.: Development of stochastic model of pavement distress initiation, *Journal of Infrastructure Planning and Management*, No.744/IV-61, pp.61-67, 2003.
- 24) 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, 土木学会舗装工学論文集, Vol.14, pp.229-237, 2009.
- 25) 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 (投稿予定)
- 26) 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.
- 27) 伊庭幸人: 計算統計学のフロンティア - 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.
- 28) Chib, S.: Marginal likelihood from Gibbs output, *Journal of the American Statistical Association*, Vol.90, pp.1313-1321, 1995.
- 29) 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.
- 30) Han, C. and Carlin, B.P.: MCMC methods for computing Bayes factors, A comparative review,

Biometrika, Vol.84, pp.711-732, 2000.

(2011.*.** 受付)

PREVENTIVE UPKEEP MODEL FOR PA

Kiyoshi KOBAYASHI, Masayuki EGUCHI, Akira OI, I
and Yasunori MATSUMU

The deterioration processes of pavement are compound ones characterized as capacity. This study proposes a methodology to find the optimal inspection frequencies with uncertain deterioration processes. Since the deterioration processes are characterized by uncertainty, the pavement conditions cannot be deterministically predicted. Therefore, preventive activities are carried out. The road administrators have to make decisions on the inspection and repair activities implemented based upon the results of inspection. In this paper, we propose a methodology by use of real option theory, and the optimal inspection and repair frequencies, and an optimal inspection frequencies and a repair policy which may minimize the total cost. The validity of the methodology presented in the paper is investigated by numerical analysis on an expressway in the real world.