

LCCを考慮した最適補修戦略のための 舗装マネジメントフロー

早矢仕廉太郎¹・Nguven Dinh Thao²・青木一也³・貝戸清之⁴・小林潔司⁵

¹学生員 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: r.hayashi@civil.eng.osaka-u.ac.jp

²Lecturer, Dept of Civil Engineering, University of Transport and Communication, (Lang Thuong, Dong Da, Hanoi, Vietnam)
E-mail: dinhthao.utc@gmail.com

³正会員 株式会社パスコ インフラマネジメント事業部 (〒227-0062 横浜市青葉区青葉台 2-6-17)
E-mail: kiakzo6013@pasco.co.jp

⁴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

⁵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

道路管理者は、限られた予算の中で効率的に道路を維持管理していくために、適切な補修工法・補修時期を選定しなければならない。本研究では、ベトナム国道を対象とした舗装マネジメントシステムを構築するための方法論を提案する。具体的には、路面性状調査データから獲得される、1) 総合管理指標 MCI, 2) 個々の管理指標 (ひびわれ, わだちぼれ) に対して、マルコフ劣化モデルを適用し、劣化予測を行う。つぎに、各管理指標に対して、LCC 最小化マルコフ決定モデルを適用することにより、それぞれの最適補修戦略を決定する。最後に、これら 1) 2) の評価を組み合わせることにより、補修工法・補修時期を定めるための舗装マネジメントフローの構築を試みる。

Key Words : *life cycle cost, Markov hazard model, pavement management system*

1. はじめに

道路舗装においては、利用者の安全を妨げるような損傷に対して補修・更新が実施される。補修・更新の要否は、日常点検や定期的な実施される路面性状調査の結果に基づいて、現場管理者によって判断される。しかしながら、わが国においては、近年道路施設の老朽化が団塊的に進展しており、維持管理費用は急激に増加している。また、新興国においても、道路施設の整備が急速に進んでおり、管理する道路施設の増加に伴う維持管理費用の増加が見込まれる。厳しい予算の制約下で、増加する道路施設を効果的に維持管理していくためには、ライフサイクルコスト (以下, LCC) の削減を達成することが重要となる。そのために、道路管理者は、合理的な補修工法や補修時期の選択など、効果的な道路マネジメントを実践することが必要となる。

これに対し、土木施設のアセットマネジメントでは、点検データに基づいた統計的手法の発展が著しい。土木施設に対する劣化予測モデル, LCC 評価分析などの方法論が開発されており、実務での適用例も数多く報告されている。とりわけ、道路舗装においては、路面の損傷状態を定量的に把握するための調査技術が早くか

ら確立されており、アセットマネジメントの分析に必要な情報を豊富に獲得できる状況にある。本研究で対象とするベトナム国道においても、わが国の先進的な舗装マネジメント技術である路面性状調査車による調査実績があり、道路舗装のアセットマネジメントを実践する環境は整っている。しかし、ベトナムをはじめとする新興国においては、道路舗装を維持管理するための管理指標や管理目標値といった管理基準が未だ整備されていない。そのため、損傷レベルに応じた効果的な補修工法を選択することが困難となっている。道路舗装のアセットマネジメントを実践するためには、補修工法・補修時期を定めるためのマネジメントシステムを構築することが不可欠となる。

以上の問題意識のもと、本研究では、ベトナム・北部の国道路を対象とした舗装マネジメントシステムを構築するための方法論を提案する。具体的には、路面性状調査から獲得されるデータに対して、1) 総合管理指標 MCI, 2) 個々の管理指標 (ひびわれ, わだちぼれ) を用いて、マルコフ劣化ハザードモデルを適用し、道路舗装の劣化予測を行う。つぎに、各指標に対してマルコフ決定モデルを用いた LCC 評価を実施し、各指標における最適補修戦略を決定する。さらに、これらの

複数の管理指標の評価を用いて、補修工法・補修時期を定めるための舗装マネジメントフローの構築を試みる。以下、2. で本研究の基本的な考え方を説明する。3. では提案手法について説明する。

2. 本研究の基本的考え方

(1) 従来の研究概要と本研究の視点

土木施設のアセットマネジメントにおいては、合理的な補修戦略を立案するために、将来時点の1) 補修需要の推計、2) LCC 評価を実施することが重要となる。将来時点の補修需要を推計するためには、土木施設の劣化過程をあらかじめ予測する必要がある。これに対し、点検データを用いた統計的劣化予測モデルが多く開発されてきた^{1)–4)}。津田等は、橋梁部材を対象として、部材の劣化過程をハザードモデルを用いて表現するとともに、劣化過程が多段階の健全度で表現される劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルにより定式化した³⁾。さらに、補修戦略を決定するためのLCC評価については、健全度を離散的な変数で記述するマルコフ決定モデル⁵⁾を用いた実用モデルが、土木工学の分野で多く提案されている^{6)–11)}。たとえば、貝戸等は、橋梁のような半永久的構造物に対して、平均費用最小化原則に基づくマルコフ決定モデルを用いることによって、最適補修戦略を決定する手法を開発した⁷⁾。これにより、LCC最小化を達成する最適補修政策や最適点検間隔を決定することが可能となっている。このように、わが国における土木施設のアセットマネジメント技術は急速に進展している。

道路舗装のアセットマネジメントにおいても、これらの手法を用いて実践に取り組んだ例が報告されている^{11)–14)}。なかでも、小林等は、路面の総合管理指標MCI(Maintenance Control Index)を用いて道路舗装の劣化予測を行い、LCC最小化を達成するような調査間隔と補修タイミングを同時に決定する方法論を提案している¹¹⁾。MCIは、路面性状調査から獲得されるひび割れ率、わだち掘れ量、平坦性とといった損傷値から算出される管理指標であり、3つの損傷値から路面の状態を総合的に評価し、補修の要否判断を行うことができる。一方、実際の道路舗装の維持管理においては、重度な損傷に対する、オーバーレイや打ち換えといった補修の他に、軽微な損傷に対する、シーリングなどの簡易的な補修など、損傷レベルに合わせて、適宜、補修工法が選択されている。どの補修工法を選択するかは、損傷レベルや損傷の種類に依存するため、MCIのような総合的管理指標を用いて判断することは困難であり、個々の管理指標での評価が重要となる。本研究では、道路舗装のアセットマネジメントの実践を目的

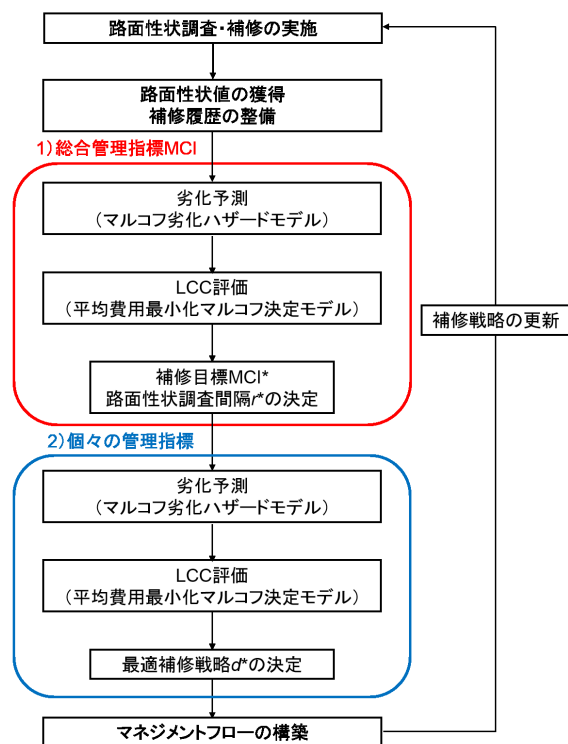


図-1 舗装マネジメントフロー作成の概要

として、複数の管理指標の最適補修戦略に基づく舗装マネジメントフローを構築する。舗装マネジメントフローは、道路舗装の状況に合わせた最適な補修工法・補修時期の選択を可能とする舗装マネジメントシステムである。

(2) 舗装マネジメントフローの概要

補修工法・補修時期を定めるための舗装マネジメントフローを作成するためには、路面性状調査から獲得されるデータをもとに、劣化予測、LCC評価を実施し、最適補修戦略を決定することが必要となる。劣化予測は、路面性状調査によって獲得されるデータをもとに、道路舗装の劣化過程をマルコフ劣化ハザードモデルで表現することによって推計する。また、LCCについては、道路を半永久的構造物と仮定することで、平均費用最小化マルコフ決定モデルを用いた評価を実施する。本研究で提案するマネジメントシステムでは、これらの劣化予測、LCC評価を1) MCI、2) 個々の管理指標(ひび割れ率、わだち掘れ量)の複数の管理指標に対して実施し、各管理指標の最適補修戦略を得る。総合管理指標MCIでは、使用限界状態となる管理限界MCIと後述するリスク管理水準 \bar{U} を所与した条件のもとで、LCC最小化を達成するような路面性状調査間隔 μ^* と補修目標MCI*を決定する。また、個々の管理指標(ひび割れ率、わだち掘れ量)では、損傷レベルに合わせ

た最適な補修工法・補修時期を決定する。これらの結果を組み合わせることによって、実務へのフィードバックを実施するための舗装マネジメントフローを構築する。以上の舗装マネジメントフローの概要について図-1に示す。

3. マネジメントフロー決定モデル

(1) モデル化の前提条件

カレンダー時刻 s_0 を初期時点とする離散的時間軸 $t = 0, 1, 2, \dots$ を考え、離散的時間軸上の点を時点とよび、カレンダー時刻と区別する。単位時間幅を1に基準化する。舗装の健全度を J 個のレーティング $i (i = 1, \dots, J)$ によって表現する。 i の値は大きくなるほど、劣化が進んでいることを示す。時点 t における舗装の健全度を状態変数 $h(t) = i (i = 1, \dots, J; t = 0, 1, \dots)$ を用いて表現する。ここで、 J は吸収状態である。施設の劣化過程がマルコフ連鎖に従うと仮定し、離散時間軸上の単位時間間隔における健全度間の推移確率をマルコフ推移確率を用いて表現する。マルコフ推移確率は、時点 t における路面性状調査において観測された健全度 $h(t) = i$ を与件とし、次の時点 $t + 1$ における健全度 $h(t + 1) = j (j \geq i)$ が生じる条件付確率

$$\text{Prob}[h(t + 1) = j | h(t) = i] = p_{ij} \quad (1)$$

を用いて定義される。このような推移確率を全ての健全度ペア (i, j) に対して定義することにより、マルコフ推移確率行列

$$\mathbf{p} = \begin{pmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1J} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & p_{JJ} \end{pmatrix} \quad (2)$$

を定義することができる。マルコフ推移確率 $\mathbf{1}$ は所与の2つの時点 $t, t + 1$ の間において生じる健全度間の推移確率を示したものであり、当然のことながら、対象とする調査間隔が異なれば推移確率の値は異なる。補修がない限り常に劣化が進行するので、 $p_{ij} = 0 (i > j)$ が成立する。また、推移確率の定義より $\sum_{j=i}^J p_{ij} = 1$ が成立する。すなわち、マルコフ推移確率に関して、

$$\left. \begin{array}{l} p_{ij} \geq 0 \quad (i, j = 1, \dots, J) \\ p_{ij} = 0 \quad (i > j \text{ の時}) \\ \sum_{j=i}^J p_{ij} = 1 \end{array} \right\} \quad (3)$$

が成立しなければならない。状態 J は、補修のない限りマルコフ連鎖における吸収状態であり、 $p_{JJ} = 1$ が成立すると考える。なお、マルコフ推移確率は過去の状態履歴には依存しない。マルコフ推移確率モデルでは、健全度が $i - 1$ から i に推移した時点に関わらず、時点 t から時点 $t + 1$ の間に推移する確率は時点 t における健全度だけに依存するという性質（マルコフ性）を満

足する。マルコフ推移確率を用いれば、前回の観測時点 t から、 r 期経過した時点 $t + r$ に至る期間の間に生じる劣化過程を推移確率行列

$$\mathbf{p}(r) = \mathbf{p}^r \quad (4)$$

を用いて表現できる。また、 r 期における推移確率行列 $\mathbf{p}(r)$ の各要素を $p_{ij}(r) (i, j = 1, \dots, J)$ と表す。また、表記の便宜上、

$$\mathbf{p}(0) = \mathbf{I} \quad (5)$$

が成立すると仮定する。ただし、 \mathbf{I} は $(J \times J)$ 単位行列である。

(2) マルコフ劣化ハザードモデル

マルコフ推移確率は、マルコフ劣化ハザードモデルを用いて推定できる。本研究では、津田等³⁾が開発したマルコフ劣化ハザードモデルを用いるが、読者の便宜を図るためモデルの概要を説明しておく。いま、健全度 $i (i = 1, \dots, J - 1)$ の寿命を確率変数 ζ_i で表す。健全度 i の寿命が、確率密度関数 $f_i(\zeta_i)$ 、分布関数 $F_i(\zeta_i)$ に従うと仮定する。ここで、健全度が変化した時刻 $\tau_i (i = 0, \dots, J - 2)$ を起点とする時間軸（以下、サンプル時間軸と呼ぶ）を考えよう。健全度 i のサンプル時間軸上で、カレンダー時刻 τ_{i-1} からの経過時間を y_i と表記する。定義より、時刻 τ_{i-1} では $y_i = 0$ となる。ここで、時刻 τ_{i-1} に健全度が i となり、そこから時間 y_i が経過した時刻において健全度が $i + 1$ に変化する確率密度をハザード関数 $\lambda_i(y_i)$ を用いて表現する^{18), 19)}。ハザード関数は、健全度が i となった時刻から、時間 y_i が過ぎる間、健全度が i のまま継続する生存確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ を用いて、

$$\lambda_i(y_i) \Delta y_i = \frac{f_i(y_i) \Delta y_i}{\tilde{F}_i(y_i)} \quad (6)$$

と表せる。すなわち、ハザード関数 $\lambda_i(y_i)$ は、初期時刻 $\tau_{i-1} (y_i = 0)$ から時間 y_i が経過するまで健全度 i の状態が継続したという条件のもとで、期間 $[y_i, y_i + \Delta y_i)$ 中に健全度 $i + 1$ に進展する条件付確率である。ハザード関数が経過時間 y_i に依存せず、常に一定値 $\lambda_i > 0 (i = 1, \dots, J - 1)$ をとる場合、指数ハザード関数

$$\lambda_i(y_i) = \lambda_i \quad (7)$$

が成立する。指数ハザード関数を用いることにより、劣化過程が過去の履歴に依存しないというマルコフ性を表現できる。さらに、指数ハザード関数を用いれば、健全度 i の寿命が y_i 以上となる確率 $\tilde{F}_i(y_i)$ は、

$$\tilde{F}_i(y_i) = \exp(-\lambda_i y_i) \quad (8)$$

と表現できる。

さらに、カレンダー時刻 t の路面性状調査の結果、健全度が i と判断されたとしよう。そののち、時刻 t から

追加的に期間 $z(z \geq 0)$ 以上にわたって健全度 i が継続する確率 $\tilde{F}_i(t+z|\zeta_i \geq t)$ は、

$$\begin{aligned} \tilde{F}_i(t+z|\zeta_i \geq t) &= \text{Prob}\{\zeta_i \geq t+z|\zeta_i \geq t\} \\ &= \frac{\exp\{-\lambda_i(t+z)\}}{\exp(-\lambda_i t)} = \exp(-\lambda_i z) \end{aligned} \quad (9)$$

と表される。すなわち、調査時刻 t において健全度が i と判定され、次の調査時刻 $t+z$ においても健全度が i と判定される確率は、

$$\text{Prob}[h(t+z) = i|h(t) = i] = \exp(-\lambda_i z) \quad (10)$$

となる。ただし、 z は2つの調査時刻の間隔を表す。確率 $\text{Prob}[h(t+z) = i|h(t) = i]$ はマルコフ推移確率 $p_{ii}(z)$ にはかならない。指数ハザードを用いた場合、推移確率 $p_{ii}(z)$ はハザード関数 λ_i と調査間隔 z のみに依存し、時刻 t 、 $t+z$ に関する情報を用いなくとも推移確率を推定することが可能となる。以上の議論を拡張し、指数ハザード関数を用いて、調査時刻 t と $t+z$ の間で健全度が i から j ($> i$) に推移するマルコフ推移確率 $p_{ij}(z)$ ($i = 1, \dots, J-1; j = i+1, \dots, J$) は、

$$\begin{aligned} p_{ij}(z) &= \text{Prob}[h(t+z) = j|h(t) = i] \\ &= \sum_{m=i}^j \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_m} \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_{s+1} - \lambda_m} \exp(-\lambda_m z) \\ & \quad (i = 1, \dots, J-1; j = i+1, \dots, J) \end{aligned} \quad (11)$$

と表すことができる³⁾。ただし、表記上の規則として、

$$\begin{cases} \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_m} = 1 & (m = i \text{ の時}) \\ \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_{s+1} - \lambda_m} = 1 & (m = j \text{ の時}) \end{cases}$$

が成立すると考える。さらに、表記の便宜上、

$$\begin{aligned} & \prod_{s=i, s \neq m}^{j-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_m} \exp(-\lambda_m z) \\ &= \prod_{s=i}^{m-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_s - \lambda_m} \prod_{s=m}^{j-1} \frac{\lambda_s}{\lambda_{s+1} - \lambda_m} \exp(-\lambda_m z) \end{aligned}$$

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

$$p_{iIJ}(z) = 1 - \sum_{j=i}^{J-1} p_{ij}(z) \quad (i = 1, \dots, J-1) \quad (12)$$

なお、マルコフ劣化ハザードモデルを用いれば、アセットマネジメントのためのリスク管理指標を導出できる。すなわち、当該健全度にはじめて到達した時点から、劣化が進展して次の健全度に進むまでの期待期間長（以下、期待寿命と呼ぶ）は、生存関数 $\tilde{F}_i(y_i)$ を用いて

$$RMD_i = \int_0^{\infty} \tilde{F}_i(y_i) dy_i \quad (13)$$

と表される¹⁸⁾。ここで、指数ハザード関数を用いた生存関数 $\tilde{F}_i(y_i)$ が式(8)で表されることに留意すれば、期

待寿命は次式で表される。

$$RMD_i = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda_i y_i) dy_i = \frac{1}{\lambda_i} \quad (14)$$

式(14)を用いることにより、初期時点からの経過年数と舗装構造の平均的な健全度との対応関係を求めることができる。このような対応関係を「パフォーマンスカーブ」と呼ぶこととする。

(3) 調査・補修政策

いま、路面性状調査を r 期ごとに実施する場合を考える。 r は政策変数であるが、ひとまず与件とする。 k 回目の路面性状調査が実施される離散軸上の時点 t_k^r ($k = 0, 1, \dots$) を $t_k^r = rk$ と定義する。 k 回目の路面性状調査により、ある特定の地点における舗装の健全度が $h(t_k^r) = i$ ($i = 1, \dots, J$) と判定されたと考える。時点 t_k^r において、健全度が $h(t_k^r) = J$ と判定された場合には、直ちに補修され健全度が1まで回復する。一方、時点 $h(t_k^r)$ において健全度が $1 < h(t_k^r) < J$ の場合には、現場管理者は事前に定められたルールに従って、舗装の健全度に対応した補修工法を選択する。現場管理者がある健全度に対して、採用すべき補修工法を指定するルールを「補修アクション」と呼ぶこととする。

いま、補修政策 d を、各健全度 i に対して、その時点で実施する補修アクションを指定する一連のルールとして定義しよう。ただし、 d は政策変数である。ここで、健全度 i に対して補修を実施し、健全度が $\eta^d(i)$ に推移することを、補修アクション $\eta^d(i) \in \Theta(i)$ を用いて表すとする。例えば、補修アクション $\eta^d(i) = j$ は健全度が i の時に補修を実施し、健全度が j に回復することを意味する。また、集合 $\Theta(i)$ は健全度 i の場合に利用可能な補修工法（すなわち、補修アクション）の集合を表している。健全度 i ($i = 1, \dots, J$) のそれぞれに対して採用されるべき補修アクションの内容を指定したルールを、補修アクションベクトル η^d として

$$\eta^d = (\eta^d(1), \dots, \eta^d(J)) \quad (15)$$

と表すこととする。補修アクション集合 $\Theta(i)$ ($i = 1, \dots, J$) の中には、「補修しない」という補修アクションも含まれる。健全度 i の時に補修をしないというアクションが選択される場合には、 $\eta^d(i) = i$ となる。健全度が最悪のランク J に到達した場合、その区間は必ず更新が実施される。すなわち、 $\eta^d(J) = 1$ となる。

つぎに、補修政策 d を構成する補修アクション $\eta^d(i)$ によって生じる舗装の健全度の変化を

$$q_{ij}^d = \begin{cases} 1 & (\eta^d(i) = j) \\ 0 & (\text{それ以外の時}) \end{cases} \quad (16)$$

と定義する。つまり、補修が実施された後の健全度に確率1で推移し、補修が実施されない場合は、もとの健全度に確率1でとどまることを示している。以上の

推移確率を q^d として整理することにより,

$$q^d = \begin{pmatrix} q_{11}^d & \cdots & q_{1J}^d \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{J1}^d & \cdots & q_{JJ}^d \end{pmatrix} \quad (17)$$

となる. 健全度が J の場合, 当該区間は直ちに補修され

$$q_{J1}^d = 1, \quad q_{Jj}^d = 0 \quad (j = 2, \dots, J-1) \quad (18)$$

が成立する. ここで, 2つの政策変数の組 $(r, d) \in \Xi$ を調査・補修政策と呼ぶ. ただし, Ξ は調査・補修政策集合である. 調査・補修政策 (r, d) のもとで実現する劣化・補修過程は, 推移確率は

$$P^d(r) = q^d p(r) \quad (19)$$

となる. 調査・補修政策 (r, d) を適用した場合に, 定期調査時点 t_k^r において実現する健全度分布を相対頻度 $\pi_i^d(t_k^r)$ を用いて表す. さらに, 相対頻度ベクトル

$$\pi_i^d(t_k^r) = \{\pi_1^d(t_k^r), \dots, \pi_J^d(t_k^r)\} \quad (20)$$

を用いて表現すれば, 劣化・補修過程は

$$\pi_j^d(t_{k+1}^r) = \sum_{i=1}^J P_{ij}^d \pi_i^d(t_k^r) \quad (21)$$

と定式化できる. 上式をベクトル表記すれば,

$$\pi^d(t_{k+1}^r) = \pi^d(t_k^r) P^d(r) \quad (22)$$

である. 道路舗装の劣化・補修過程が繰り返され, 長期定常状態に到達したとする. 各セクションの健全度に関する定常確率ベクトルを $\pi^{r,d} = (\pi_1^{r,d}, \dots, \pi_J^{r,d})$ と表す. 定常確率は

$$\pi^{r,d} = \pi^{r,d} P^d(r) \quad (23a)$$

$$\sum_{i=1}^J \pi_i^{r,d} = 1 \quad (23b)$$

を満足するような $\pi^{r,d}$ として定義される. 路面性状調査時点において使用限界である健全度 J が観測される定常確率 $\pi_J^{r,d}$ を, リスク管理水準 \bar{U} 以下に抑えることが可能な調査・補修政策 (r, d) の集合 $\Xi(\bar{U})$ を

$$\Xi(\bar{U}) = \{(r, d) | \pi_J^{r,d} \leq \bar{U}\} \quad (24)$$

と定義する.

(4) LCC 評価

本研究では, 道路舗装を半永久構造物と仮定し, 平均費用最小化マルコフ決定モデルを用いた LCC 評価を実施する. 補修政策 (r, d) のもとで必要となる平均費用を w_r^d と定義する. 平均費用 w_r^d は, 劣化過程に関する推移確率行列 p , 損傷度別の補修工法単価行列 c , および補修政策行列 q を用いれば,

$$w_r^d = \sum_{i=1}^J \sum_{j=1}^J p_{ij}(r) q_{ij}^d c_i \pi_i \quad (25)$$

と定義される. ただし, 補修アクション η^d を実施する場合に必要となる補修費用を費用ベクトル $c^d =$

(c_1^d, \dots, c_J^d) により表現する. 費用 c_i^d は健全度が i の場合に補修アクション $\eta^d(i)$ を採用する場合に必要な補修費用を意味する. 健全度を i から j ($1 \leq j \leq i$) へ回復させるための補修費用を c_{ij} と表せば, $\eta^d(i) = j$ のとき, $c_i^d = c_{ij}$ が成立する. 補修を実施しない場合 ($\eta^d(i) = i$ が成立する場合) には $c_i^d = c_{ii} = 0$ が成立する. ただし, 補修費用は条件

$$c_{jj} \leq \dots \leq c_{ij} \leq \dots \leq c_{Jj} \quad (26)$$

$$(j \leq i \leq J; j = 1, \dots, J) \quad (27)$$

を満足すると仮定する. このことは補修前の健全度が悪いほうが同一の健全度に回復するための費用が大きくなることを意味する. このとき, 道路舗装の年平均費用を最小化とするような補修政策を求める最適モデルは,

$$\min_{d,j} \left\{ \frac{w_r^d}{r} \right\} \quad (28)$$

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を (d^*, r^*) と表す. (28) は平均費用最小化モデルであり, 最適補修戦略 d^* , 最適調査間隔 r^* を, 平均費用最小化原則に基づく最適補修戦略, 最適調査間隔と呼ぶこととする.

いま, カレンダー時刻 $t = t_0$ を現在時刻とする. 時刻 t_0 の路面性状調査による, 路面の健全度が i と判断されたと考える. 期待累積 LCC $u^{d^*}(i, t_k^{r^*})$ は, 補修政策 d^* のもとで, 時刻 t_0 において健全度 i の初期状態から時刻 $t = t_k^{r^*}$ に至るまでに発生する補修費の総和に関する期待値を表す. 時刻 t_0 から時刻 $t_1^{r^*} \sim 1$ 期経過する間に劣化が進展し, 時刻 $t_1^{r^*}$ の直前に健全度が j に推移したと考える. また, 時刻 $t_1^{r^*}$ の直前に補修アクションが実施されると考える. 時刻 t_0 において時刻 $t_1^{r^*}$ にどのような補修が実施されるかは不確実である. そこで, 時刻 t_0 において, 健全度が i である場合, 時刻 $t_1^{r^*}$ の直前までに補修政策 d^* のもとで必要となる期待補修費 $l_{r^*}^{d^*}(i)$ は,

$$l_{r^*}^{d^*}(i) = \sum_{j=1}^J \sum_{j'=1}^j p_{ij} q_{jj'}^{r^*} c_{jj'} \quad (29)$$

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

と表される. つぎに, 時刻 $t_1^{r^*}$ に着目する. 時刻 t_0 から, 1 期間経過する間に劣化が進展し, 時刻 $t_1^{r^*}$ の調査後に実施された補修アクションを経て, 時刻 $t_1^{r^*}$ に健全度が j に推移したと考える. さらに, 時刻 $t_1^{r^*}$ から補修政策 r^* を適用し, 時刻 $t_k^{r^*}$ に至るまでの期間中に発生する期待累積 LCC を $u^{d^*}(i, t_{k-1}^{r^*})$ と定義する. 時刻 t_0 から時刻 $t_1^{r^*}$ までの間に, 健全度が i から j に推移する確率 $p_{ij}^{r^*}$ を用いれば, 期待累積 LCC $u^{d^*}(i, t_k^{r^*})$ と

$u^{d^*}(i, t_{k-1}^{r^*})$ の間に次式が成立する.

$$u^{d^*}(i, t_k^{r^*}) = l_{r^*}^{d^*}(i) + \sum_{j=1}^J P_{ij}^{d^*} u^{d^*}(i, t_{k-1}^{r^*}) \quad (30)$$

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

時刻 $t_k^{r^*}$ 期末の期待累積 $LCCu^{d^*}(i, 0)$ は $u^{d^*}(i, 0) = 0 (i = 1, \dots, J)$ を満足する. 十分大きな k に対して, 再帰方程式 (31) の解 $u^{d^*}(i, t_k^{r^*})$ が

$$u^{d^*}(i, t_k^{r^*}) = kw_{r^*}^{d^*} + v_{r^*}^{d^*}(i) \quad (31)$$

と近似できる⁷⁾. 期待累積 $LCCu^{d^*}(i, t_k^{r^*})$ は期間長 k に比例する項 $kw_{r^*}^{d^*}$ と初期健全度 i に依存する項 $v_{r^*}^{d^*}(i)$ に分解できる. 式 (31) と式 (31) を用いて,

$$kw_{r^*}^{d^*} + v_{r^*}^{d^*}(i) = l_{r^*}^{d^*}(i) + \sum_{j=1}^J P_{ij}^{d^*} \{(k-1)w_{r^*}^{d^*} + v_{r^*}^{d^*}(j)\} \quad (32)$$

を得る. $\sum_{j=1}^J p_{ij}^{d^*} = 1$ を考慮すれば, 連立方程式

$$w_{r^*}^{d^*} + v_{r^*}^{d^*}(i) = l_{r^*}^{d^*}(i) + \sum_{j=1}^J p_{ij}^{d^*} v_{r^*}^{d^*}(j) \quad (33)$$

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

を得る. 連立方程式 (33) は, $J-1$ 本の方程式に対して, $w_{r^*}^{d^*}$ と $v_{r^*}^{d^*}(i) (i = 1, \dots, J-1)$ の合計 J 個の未知変数が含まれる. これに対して, 現在時点において健全度が $i = 1$ の場合, 期待予算総額を補正する相対費用は必要でないため, $v_{r^*}^{d^*}(1) = 0$ と置くことができる⁷⁾. したがって, $J-1$ 本の方程式に対して, 未知変数は, 先ほどの J 個から $v_{r^*}^{d^*}(1)$ を除いた $J-1$ 個となり, 連立方程式 (33) を $v_{r^*}^{d^*}(i)$ に関して一意的に解くことができる⁷⁾.

(5) 舗装マネジメントフローの構築

本節では, **3.(1)~(4)** を用いた舗装マネジメントフローの構築論について説明する. **2.(2)** で述べたように, 本研究で対象とするベトナムにおいては, 舗装マネジメントフローを作成するために, 複数の管理指標での補修戦略の決定が必要となる. 特に, LCC 評価においては, 対象とする管理指標によって求める補修戦略が異なる. 総合管理指標 MCI においては, 補修限界 MCI と, その際のリスク管理水準 \bar{U} を所与することで, 最適路面性状調査間隔 r^* と最適補修目標 MCI* を決定する. 管理指標 MCI での評価において, 最適補修戦略 d^* を求めることは最適補修目標 MCI* を求めることにほかならない. ここで, 補修目標 $MCI = \bar{m} (\bar{m} = 1, \dots, M)$ を閾値とする健全度を $J_{\bar{m}}$ とすると, 補修政策行列 q は,

$$q_{ij}^d = \begin{cases} 1 & (\eta^d(i) = j, i \geq J_{\bar{m}}, j = 1) \\ 0 & (\text{それ以外の時}) \end{cases} \quad (34)$$

と定義される. また, 補修費用は,

$$c_{ij} = \begin{cases} c_{J_{\bar{m}}1} & (i \geq J_{\bar{m}}, j = 1) \\ 0 & (\text{それ以外の時}) \end{cases} \quad (35)$$

の条件を満たすこととする. このとき, 管理指標 MCI における最適調査・補修政策モデルは式 (28) より,

$$\min_{MCI, r} \left\{ \frac{w_r^{MCI}}{r} \right\} \quad (36a)$$

$$\text{subject to } (r, MCI) \in \Xi(\bar{U}) \quad (36b)$$

となる. 式 (36a), (36b) の条件のもと, 連立方程式 (33) を解くことによって, 最適路面性状調査間隔 r^* および最適補修 MCI* を決定することが可能となる. つぎに, 個別の管理指標 (ひび割れ率, わだち掘れ量) での評価により, 最適路面性状調査間隔 r^* における最適補修工法・時期を決定する. ひび割れ率, わだち掘れ量によって決定される最適補修戦略を, それぞれ d_{Cr} , d_{Ru} とする. 個別の管理指標については, **3.(1)~(4)** に従うことで, 最適補修戦略 d_{Cr}^* , d_{Ru}^* を決定することができる. 以上を踏まえたマネジメントフロー作成の手順を **図-2** に示す. **図-2** の手順に沿って, 舗装マネジメントフローの構築を試みる.

4. 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もとで, LCC 最小化を達成するような最適補修戦略に基づく舗装マネジメントシステムを構築する方法論を提案した. 具体的には, 複数の管理指標に対して, 劣化予測, LCC 評価を行い決定した最適補修戦略を組み合わせることで, 今後の舗装マネジメントに資するフローチャートを構築する方法論を提案した. なお, 講演会当日には, 本研究で提案した手法をベトナム国道路における路面性状調査データに適用し, 有効性を検証した事例を紹介する.

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) 青木一也, 山本浩司, 津田尚胤, 小林潔司: 多段階ワイブルハザードモデル, 土木学会論文集, No.798/VI-68, pp.125-136, 2005.
- 3) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁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.69-82, 2005.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 小林潔司: 分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性, 土木学会論文集, No.793/IV-68, pp.59-71, 2005.

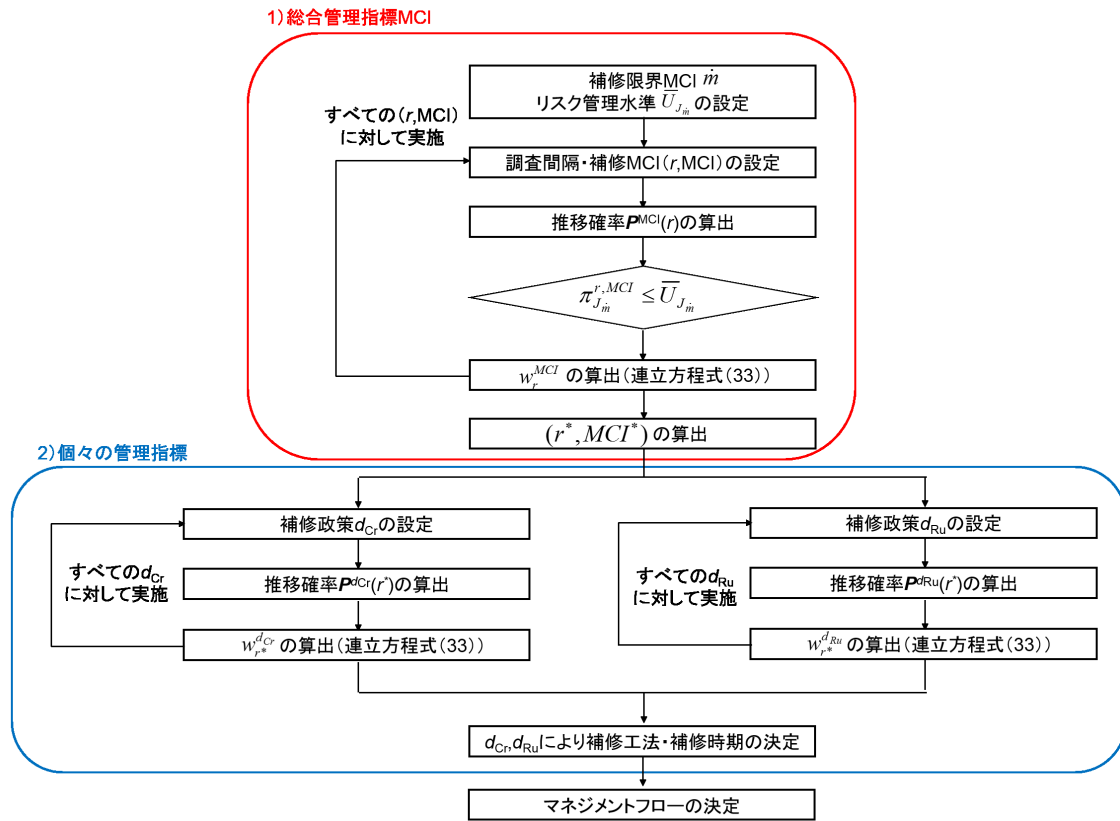


図-2 舗装マネジメントフローの解法ステップ

- 7) 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.
- 8) 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-69, pp.105-116, 2005.
- 9) 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・補修モデル, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.1, pp.39-50, 2006.
- 10) 堀倫裕, 鶴田岳志, 貝戸清之, 小林潔司: 下水処理施設の維持管理会計システム, 土木学会論文集 F4 (建設マネジメント), Vol.67, No.1, pp.33-52, 2011.
- 11) 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 (舗装工学), Vo.67, No.2, pp.75-90, 2011.
- 12) 熊田一彦, 江口利幸, 青木一也, 貝戸清之: 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.
- 13) 宮崎文平, 風戸崇之, 濱梶方希, 小濱健吾, 貝戸清之: 高機能舗装を対象とした高速道路の路面管理基準に関する実証的研究, 土木学会論文集 E1 (舗装工学), Vo.69, No.3 (舗装工学論文集 Vol.18), pp.175-183, 2013.
- 14) 青木一也, 小田宏一, 児玉英二, 貝戸清之, 小林潔司: ロジックモデルを用いた舗装長寿命化のベンチマーキング評価, 土木技術者実践論文集, Vo.1, pp.40-52, 2010.
- 15) PIRAC: Overview of HDM-4, Highway Development and Management Series, 2006.
- 16) 青木一也: 舗装マネジメントシステムの国際標準化に向けて (特集 インフラストラクチャーのアセットマネジメント), 土木技術 67(11), pp.34-40, 2012.
- 17) Dept of Road Management & Maintenance, DRVN, 2013.
- 18) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 19) Gourieroux, C.: *Econometrics of Qualitative Dependent Variables*, Cambridge University Press, 2000.

(2014. 4. 25 受付)