

京都大学工学部
京都大学経営管理大学院

学生会員 ○松村泰典
フェロー会員 小林 潔司

1 はじめに

舗装構造物の劣化過程は路面の健全度の劣化過程と舗装構造自体の耐荷力の低下過程によって構成される複合的過程である。本研究では劣化推移確率を用いて期待ライフサイクル費用を最小化するような最適調査間隔と補修政策を同時に決定する最適調査・補修政策モデルを提案する。

2 基本モデル

2.1 モデルの前提条件

路面健全度が判明した時に道路管理者は3種類のアクションをオプションとしてもつ。(1)路面補修せず運営を継続する。(2)FWD調査を実施し、補修方法の検討。(2.1)路面のみの補修(2.2)舗装構造の打ち換え(舗装更新)。いずれかが実施される。次の調査時点 t' において管理目標の達成が不可能となるような臨界的な路面健全度(舗装については臨界耐荷力)の存在を定義する。耐荷力 $g(t) = (1, \dots, S)$ に関して S は耐荷力の使用限界、 $h(u_k) = (1, \dots, I)$ において I は路面の使用限界を表す。

2.2 舗装構造の劣化過程のモデル化

道路舗装構造物の劣化過程は、ハザード率を利用したマルコフ劣化モデルを用いて表現できる。舗装耐荷力の劣化過程は時点 t で評価された耐荷力 $g(t) = s$ を与件とし、次の $t+1$ 期において耐荷力 $g(t+1) = l$ が生起する条件付確率

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

として定義できる。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 $\mathbf{P}$ と定義し、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)は時間的整合性から

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

と表す。同様にして路面健全度の劣化過程は舗装耐荷力に依存した形で表される。局所時点間 $[u, u+1)$ (離散時間軸上の時点間隔 $[t_k + u, t_k + u+1)$ の路面の

マルコフ劣化推移確率は、局所時点 u (時点 $t_k + u$)で評価された舗装構造の耐荷力 $g(t_k + u) = s$ と路面の健全度 $h(u) = i$ を与件とし、次の局所時点 $u+1$ において健全度 $h(u+1) = j$ が生起する条件付確率 $\text{Prob}[h(u+1) = j | h(u) = i, g(t_k + u) = s] = \pi^{ij}(s)$ として定義できる。これより、局所期間 $[u, u+1)$ 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 $\mathbf{\Pi}(s)$ と定義する。舗装の劣化状態を、路面の健全度 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。期間 $[t, t+1)$ 中における耐荷力は時点 t における状態 s が近似すると仮定。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

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

と表し、舗装全体の劣化推移確率行列を $\mathbf{\Theta}$ と定義する。

3 最適調査・補修更新政策モデル

3.1 階層的隠れマルコフ劣化過程

初期時点 $t = 0$ において $g(0) = 1$ 、 $h(0) = 1$ と想定する。路面に関しては、離散時間軸上の時点 t_k ($k = 1, 2, \dots$)において補修が実施されるとする。時点 t における舗装構造の耐荷力分布 $\nu(t)$ は

$$\nu(t_k + u) = \nu(0)P(t_k + u)$$

ここで $\nu(0) = (1, 0, \dots, 0)$ 。路面の推移確率は、複数の舗装構造の耐荷力に対する路面の推移確率を加重平均した混合マルコフ推移確率

$$\tilde{\pi}^{ij}(t_k + u) = \sum_{s=1}^S \nu_s(t_k + u) \pi^{ij}(s)$$

で表される。

これは混合分布モデルと呼ばれる。

$$\sum_{j=1}^I \tilde{\pi}^{ij}(t_k + s) = \sum_{s=1}^I \nu_s(t_k + u) \sum_{j=1}^I \pi^{ij}(s) = 1$$

を満足するため $\tilde{\pi}^{ij}(t_k + s)$ は推移確率の条件を満たす。路面の健全度分布を $\rho(t)$ と表す。

$$\rho(u) = \rho(0) \prod_{v=0}^{u-1} \tilde{\pi}(t_k + v)$$

と表し、舗装構造の劣化過程は、任意の時点 $t = t^k + u_k$ において

$$\nu(t) = \nu(0) \{P\}^{t_k+u}$$

$$\rho(u) = \rho(0) \prod_{v=0}^{u-1} \tilde{\pi}(t_k + v)$$

と表すことが出来る。

「舗装構造の耐荷力分布が路面の劣化過程に影響を及ぼす」階層的隠れマルコフ劣化モデルが表現される。

3.2 モデル化の前提

定期的路面性状調査時点 t における調査・補修更新政策 ξ は補修後の路面健全度を指定するルール $\eta^\xi(i)$ 、舗装耐荷力を指定するルール $\iota(s)$ を用いて定義する。臨界的劣化状態に関する政策行列 $\mathbf{A}^\xi$ を定義する。舗装の劣化過程 Θ のマルコフ性と政策行列 $\mathbf{A}^\xi$ を用いて、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 $\psi^{r,\xi}(t)$ 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

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

と表すことができ、舗装の劣化・補修過程の定常状態をとると、

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

が成立する。ここに、 $\psi^{r,\xi,*}$ 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。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

$$\rho^{r,\xi,*} = \sum_{s=1}^S (\rho_1^{r,\xi,*}, \dots, \rho_J^{r,\xi,*})$$

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

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 が観測される定常生起確率 $\rho_J^{r,\xi,*}$ 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、

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

と定義する。

3.3 モデルの定式化

調査間隔 r と実施される調査・補修更新政策 ξ はともに政策変数である。状況依存的期待ライフサイクル費用である $V_{i,s}^{r,\xi}$ 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ライフサイクル費用の当該期価値を表している。いま、長期定常状態において、期待ライフサイクル費用の現在価値を

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

と定義する。リスク管理水準 $\bar{U}$ を所与とした時に、期待ライフサイクル費用を最小とするような最適調査・補修更新政策モデルは、

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

$$\text{s.t. } (r, \xi) \in \Xi(\bar{U})$$

と定式化できる。

3.4 分析結果

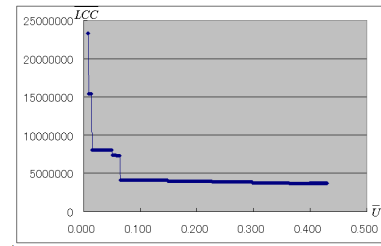


図 1: リスク管理水準と期待 LCC の関係

リスク管理水準（横軸）とライフサイクル費用（縦軸）のトレードオフの関係、つまり、舗装道路運営においてサービス水準を高いレベルからさらにサービスの向上を目指し、より高いサービス水準を求めると急激な費用負担に直面し、経済面から管理費用を低減させると最低ランクの舗装（路面）状態になる確率（使用限界リスク水準）の急激な低下が必要となる。一定以下のリスク管理水準と予算制約のもとでの最適調査・補修更新政策の必要性が分析より明らかになった。

4 おわりに

本研究では、所与の劣化過程の下で基層部分の更新を考慮した最適調査・補修更新政策について分析を行った。本研究で拡張の可能性のある問題として、FWD 調査間隔についての最適更新政策のモデル化、舗装特性と交通特性の考慮、補修工法の多様化した場合の政策のモデル化が挙げられる。

参考文献

- [1] 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.