

状況依存型点検施策による予防保全効果：舗装耐荷力における検証

東北大学 学生会員 ○中里悠人 正会員 水谷大二郎

1. はじめに

道路管理者は、道路施設（以下、施設）の劣化による利用者の利便性や快適性への影響を許容範囲内に抑えつつ、施設の維持管理費用をできる限り低減するように、施設を維持管理してゆくことが望ましい。一般的な施設の維持管理体制として、点検により施設の劣化状態を把握し、補修や更新の有無に関する意思決定がなされる状況があげられる。その際、点検頻度を低下させると劣化によるリスクの管理水準を満足できなくなる一方で、過剰な頻度での点検は点検費用の増加を招く。このような状況で、点検費用の合理的な低減を図る方法として、劣化の進展していない施設に対する点検頻度を相対的に減少させ、劣化の進展している施設に対して重点的に点検を行ってゆくような柔軟な時間間隔での点検施策があげられる。その際、補修・更新の早期実施、すなわち予防保全によって、点検費用を低減できる可能性がある。

本研究では、施設の劣化状態に応じて更新費用が変化しない状況で、施設の劣化過程をマルコフ過程で表現し、リスク管理水準を満足しつつ点検費用と更新費用の総和を最小化するような、最適点検時刻と最適更新施策（以下、最適点検・更新施策）を同時決定することを考える。その際、離散的な健全度で施設の劣化状態が記述される状況を想定し、施設の健全度ごとに次の点検の最適時刻を求めるとともに、どの健全度まで劣化が進展していれば更新を行うかを最適更新施策として求める。また、舗装耐荷力を対象として最適点検・更新施策を求め、施設の劣化状態に応じて更新費用が変化しない状況においても、耐荷力の予防保全に、点検頻度の軽減による点検費用の低減を通じた維持管理費用低減効果があることを実証的に示す。

2. 点検・更新施策の定式化

耐荷力を劣化指標として単一の舗装区間の維持管理問題を対象とする。まず、耐荷力の低下過程をモデル化する。\$t_0=0\$を起点（供用開始時刻）とする連続的時間軸を考える。舗装区間の劣化状態は離散的な健全度 \$i(i=1,2,\dots,I)\$ で定義され、健全度 \$i\$ が大きいほど劣化が進展している状態を表す。時刻 \$t\$ での健全度を表す

関数を \$C(t)\$ とする。任意の時刻 \$t_a\$ で健全度が \$C(t_a)=i\$ の条件のもと、時刻 \$t_b + z\$ (\$z > 0\$) に健全度が \$C(t_b)=j\$ となる確率を、\$t_a\$ とは独立に、マルコフ推移確率 \$\pi_{ij}(z) = \text{Prob}[C(t_b)=j|C(t_a)=i]\$ で定義する。なお、\$i > j\$ のとき、\$\pi_{ij}(z)=0\$ であり、\$\sum_j \pi_{ij}(z)=1\$ を満足する。ここでは、マルコフ推移確率が多段階指数ハザードモデル¹⁾ で定義されるとする。すなわち、マルコフ推移確率 \$\pi_{ij}(z)\$ が、

$$\pi_{i,i}(z) = \exp(-\theta_i z) \quad (i = 1, \dots, I-1) \quad (1)$$

$$\pi_{i,j}(z) = \sum_{k=i}^j \prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} \prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} \exp(-\theta_k z) \quad (i = 1, \dots, I-2; j = i+1, \dots, I-1) \quad (2)$$

$$\pi_{i,I}(z) = 1 - \sum_{j=i}^{I-1} \pi_{i,j}(z) \quad (i = 1, \dots, I-1) \quad (3)$$

と表される状況を対象とする。\$\theta_{i|}\$ は健全度 \$i\$ から \$i+1\$ への推移過程を規定するハザード関数である。ただし、

$$\prod_{m=i}^{k-1} \frac{\theta_m}{\theta_m - \theta_k} = 1 \quad (k = i) \quad (4)$$

$$\prod_{m=k}^{j-1} \frac{\theta_m}{\theta_{m+1} - \theta_k} = 1 \quad (k = j) \quad (5)$$

が成り立つとする。交通量や構造条件などの特性変数 \$\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_M)\$ の影響を考慮するために、\$\theta_i = \exp(\boldsymbol{\beta}_i \mathbf{x}^T)\$ とする。\$\boldsymbol{\beta}_i = (\beta_{i,0}, \dots, \beta_{i,M})\$ はパラメータベクトルである。なお、記号「\$^T\$」は転置操作を表す。

次に点検・更新施策について定義する。ある時刻 \$t\$ に健全度 \$C(t)=i\$ が観測された場合に更新を行うか否かを表す指示変数 \$\delta_i\$ を、\$t\$ とは独立に、

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{更新を行う} \\ 0 & \text{更新を行わない} \end{cases} \quad (6)$$

と定義する。また、次の点検までの時間間隔を、\$t\$ とは独立に、\$z_i\$ と定義する。点検費用を \$m\$、更新費用を \$n\$、割引率を \$\rho\$ とすると、当該舗装区間の総維持費用の供用開始時間 \$t_0\$ における期待割引費用 \$l(z, \delta)\$ は、

$$l(z, \delta) = \sum_{i_1=1}^I \rho^{z_1} \{m + \pi_{1,i_1}(z_1)(\delta_{i_1} n + v(i_{i_1}))\} \quad (7)$$

$$v(i) = \sum_{i_2=1}^I \rho^{z_2} \{m + \pi_{i,i_2}(z_2)(\delta_{i_2} n + v(i_{i_2}))\} \quad (8)$$

キーワード：アセットマネジメント 状況依存型点検施策 予防保全 最適化 舗装耐荷力

連絡先 〒980-0845 仙台市青葉区荒巻字青葉468-1 東北大学災害科学国際研究所 TEL:022-752-2160

表-1 分析の条件

設定値		
健全度の個数	I	5
特性変数の個数	M	1
ハザード率の パラメータ	β_1	$(-3.012, 0)$
	β_2	$(-2.307, 0.576)$
	β_3	$(-2.090, 0.567)$
	β_4	$(-2.439, 0)$
点検費用の単価	m	495 [千円]
更新費用の単価	n	3,800 [千円]
割引因子	ρ	0.96
リスク管理水準	U	0.10

表-2 最適点検タイミング

	大型車交通量		
	最大	平均	最小
z_1^*	16.360	19.650	20.850
z_2^*	7.505	9.885	10.772
z_3^*	3.930	4.812	5.127
z_4^*	1.207	1.207	1.207

と定式化できる． $l(i)=i^{(1-\delta)}$ であり，健全度 i に対して更新が行われるときには1，行われなるときは i となる指示関数である． $\mathbf{z}=\{z_1, \dots, z_{I-1}\}$ である．舗装区間の維持管理のためのリスク管理指標 $R(\mathbf{z}, \delta)$ を，

$$R(\mathbf{z}, \delta) = \max_{i \in I} \pi_{i(i), I}(z_{i(i)}) \quad (9)$$

と定義する． $I = \{1, 2, \dots, I\}$ で，健全度の集合である．リスク管理水準を U として，総費用の割引現在価値を最小化する最適点検タイミング $\mathbf{z}^*$ と最適更新施策 δ^* の同時決定問題は，

$$(\mathbf{z}^*, \delta^*) = \arg \min_{(\mathbf{z}, \delta)} l(\mathbf{z}, \delta) \quad (10)$$

$$\text{s.t. } R(\mathbf{z}, \delta) \leq U \quad (11)$$

と定式化できる．健全度ごとの最適点検タイミング z_i^* は，リスク管理水準を満たす最大の z_i として計算し，シミュレーションを用いて最適更新施策 δ^* を求める．

3. 実在の舗装区間を想定した分析

既往研究²⁾における条件を用い，ある単一の高速道路区間（延長100m，幅員3.5m）において状況依存型点検施策を採用した状況下での予防保全効果を検証する．検証の条件の詳細は当該参考文献も参照されたいが，モデルへの入力値を一括して表-1に掲載する．最適点検タイミング $\mathbf{z}^*$ は，大型車交通量と健全度ごと

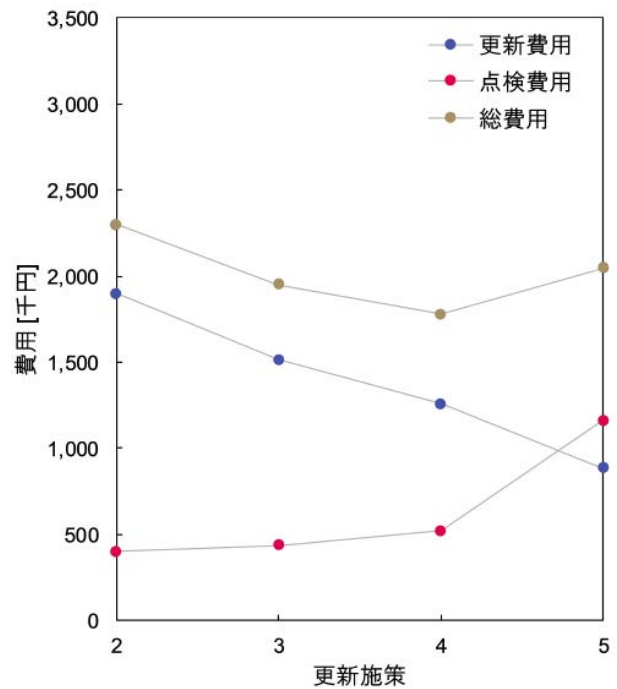


図-1 割引総費用と更新施策: 大型車交通量 平均

に表-2のようになった．表-1の入力値及び表-2の最適点検タイミングを用いて，100年間の総費用を，更新施策 δ の全組み合わせに対して10万回ずつシミュレーションを行った結果，最適更新施策は全ての大型車交通量のケースで $\delta^*=(0,0,0,1,1)$ となった．例として図-1では大型車交通量が平均のとき，横軸に各健全度以上で更新を行う施策での平均割引総費用を示している．更新する最小の健全度が大きくなると，更新費用は減少するが点検頻度が大きくなるため点検費用は増加し，本ケースでは健全度4での予防保全を行うことが最適更新施策になる．

4. おわりに

本研究では，施設の点検間隔を状況依存的に決定することにより，点検費用の削減によるライフサイクル費用の削減が可能であることを，実在の舗装区間を想定した分析により示唆した．劣化予測の精度向上に伴い，状況依存型点検はより現実的になるであろう．今後の課題としては，時間依存型の劣化過程を持つ施設に対する状況依存型点検施策を考える必要がある．

【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定，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.69-82，2005．
- 2) 小林潔司，江口利幸，大井明，青木一也，貝戸清之，松村泰典：舗装構造の最適補修更新モデル，土木学会論文集E1，Vol.68，No.2，pp.54-68，2012．