

1. はじめに

道路舗装の損傷発生過程は、比較的発生頻度が高い局所的損傷（以下、ポットホール）と、相対的に変化の遅い路面全体の劣化過程（以下、ひび割れ）で構成される複合的な劣化過程である。さらに、ポットホールは日常的な道路巡回で観測される。一方で、ひび割れ率は路面性状調査を通して観測されるが、その観測頻度は日常巡回と比較して圧倒的に少ない。但し、経験的にひび割れ率の増加（健全度の低下）により、ポットホールの到着率が増加することが知られている。そこで本研究では、このように観測頻度と劣化進展速度が異なるポットホールとひび割れで構成される階層的劣化過程を、ポアソン隠れマルコフモデルを用いて表現する。

2. モデルの定式化

いま、2つの連続する路面性状調査時点 t_n, t_{n+1} におけるひび割れの健全度 $h(t_n) = i, h(t_{n+1}) = j$ を既知とし、2つの路面性状調査時点を用いて定義される期間 $\tau_n = [t_n, t_{n+1})$ に着目する。当該期間 τ_n において舗装の補修が実施されないと考える。さらに、調査時点 t_n を始点とする局所時点 $u_n = 0, 1, \dots, T_n - 1$ におけるポットホールの発生個数 $g(u_n) = y_{u_n} (u_n = 0, \dots, T_n - 1)$ も観測されている。一方、局所時点 $u_n (u_n = 1, \dots, T_n - 1)$ に関する健全度 $h(t_n + u_n)$ での情報は獲得できないが、ひとまず健全度 $h(t_n + u_n) = l_{u_n}$ が既知であると仮定する。ここで、期間 τ_n を構成する局所期間 $l_{u_n} = [u_n, u_{n+1}) (u_n = 0, \dots, T_n - 1)$ に着目する。当該期間 l_{u_n} においてポットホールが到着率 $\mu(l_{u_n}, z_{u_n}) > 0$

$$\mu(l_{u_n}, z_{u_n}) = z_{u_n} \alpha^{l_{u_n}} \quad (1)$$

で表されるポアソン過程に従って生起すると考える。ただし、 $z_{u_n} = (z_{1,u_n}, \dots, z_{p,u_n})$ は、局所時点 u_n で観測される説明変数ベクトルである。 $\alpha^{l_{u_n}} = (\alpha_1^{l_{u_n}}, \dots, \alpha_p^{l_{u_n}})'$ は未知パラメータベクトルであり、 $\alpha = (\alpha^1, \dots, \alpha^{T-1})'$ と表記する。記号 $'$ は転置操作を、 l は説明変数の数を表す。到着率 $\mu(l_{u_n}, z_{u_n})$ は、局所期間 $[u_n, u_{n+1})$ に対して定義されている。

表-1 データ概要

ポットホール総発生個数	366				
平均発生個数	2.56				
事後健全度	1	2	3	4	5
サンプル数	1,224	1,496	332	204	86

ただし、 l_{u_n} は局所時点 u_n における舗装の健全度であり、局所期間 l_{u_n} において一定であると仮定する。局所期間 l_{u_n} の期間長が1に基準化することにより、局所期間 l_{u_n} 中に y_{u_n} 個のポットホールが発生する条件付き確率 $\pi(y_{u_n} | l_{u_n}, z_{u_n})$ は、

$$\begin{aligned} \pi(y_{u_n} | l_{u_n}, z_{u_n}) &= \text{Prob} [g(u_n) = y_{u_n} | h(t_n + u_n) = l_{u_n}, z_{u_n}] \quad (2) \\ &= \exp \left\{ -\mu(l_{u_n}, z_{u_n}) \right\} \frac{\left\{ \mu(l_{u_n}, z_{u_n}) \right\}^{y_{u_n}}}{y_{u_n}!} \end{aligned}$$

と表すことができる。

3. 適用事例

2.で定式化した、ポアソン隠れマルコフモデルを点検サンプル情報に基づいて推計する。混合確率モデルの推計では、尤度関数が高度な非線形性を有することになるため、通常の前尤法やベイズ推計法を用いることが困難である。このようなことから、通常の前尤法ではなく、完備化尤度関数を定義するとともに、MCMC法を採用した推計を行う。表-1に推計に用いた点検サンプル情報の概要を示す。推計では、ポットホールの発生過程、ひび割れの劣化過程に影響を及ぼすと考えられる7つの特性変数を検討した。具体的には、1) 大型車交通量、2) 走行区分、3) 道路構造、4) 補修回数、5) 施工層、6) 舗装種別、7) 施工層の厚さ、である。

4. 推計結果

3.で示した7つの特性変数候補のもとでマルコフ劣化ハザードモデルを推計した結果（パラメータの期待値および90%信用域、Geweke検定量）を表-2に示す。今回の解析において採用された特性変数は大型車交通量のみであった。同表より、大型車交通量の影響はひび割れ発生段階より、ひび割れ発生後劣化の最終段階の方が大きくなっていることが確認できる。また、健全度1と健全度3における期待寿命が相対的に短いこと、健全度1から健全度5に到達するまでの期待寿命が約36.5年で

あることが読み取れる。一例として大型車交通量の多寡による期待劣化パスを図-1 に示す。

一方で、ポアソン発生モデルの推計結果を表-3 に示す。同様の方法で推計を行った結果、採用された特性変数は走行区分、構造形式であった。同表から明らかなようにポアソン隠れマルコフモデルでは、ポアソン発生モデルを、各健全度に応じて複数個設定することができる。また、健全度が大きくなる（ひび割れの状態が悪くなる）につれ、平均到着率が増加している。これは舗装状態の劣化に伴い、ポットホール発生頻度が増加していることを意味する。これらのことを視覚的に理解するために、推計結果を用いて算出したポアソン分布を図-2 に示す。同図はポットホール発生直後から1年経過時点におけるポットホールの発生数と発生確率の関係を健全度毎に図示したものである。

図-3 には任意の路面性状調査時点からのある経過時点でのポットホール発生個数の期待値を示している。ここでは1kmの範囲内での発生個数を算出した。例えば経過時間6ヶ月に着目した場合、発生個数の期待値は健全度1の時点ではほぼ0個であるのに対し、健全度3で1.24個、健全度4で5.56個、健全度5で6.84個となる。舗装マネジメントという観点から見た場合、6ヶ月経過時点で、ある1km区間内でのポットホールの発生が1個であれば、ひび割れの健全度は3に留まるが、5、6個と観測された時には、健全度が4、5に到達している可能性があるということになる。このような場合、通常行われているポットホールに対する簡易な応急補修ではなく、舗装全体の劣化が進行しているものと捉え、オーバーレイや打ち換えなどの大規模な補修を検討する必要があることを示唆している。このように、ポアソン隠れマルコフモデルを用いることで日常点検データを用いた意思決定を行っていくことが可能となる。

5. おわりに

本研究では、ポットホールとひび割れの階層的な劣化過程をポアソン隠れマルコフモデルで表現し、その相互関係を実際の点検サンプル情報を用いて実証的に検証した。その結果、ひび割れ健全度が低下するに従って、ポットホールの発生率（ポアソン分布の到着率）が増加する傾向にあった。本研究で提案した統計分析を実施することで、ポットホールの発生頻度を評価基準として、オーバーレイや打ち換えなどの大規模補修の実施のタイミングの提案に結び付けていくことが可能となる。

表-2 パラメータ推計結果

健全度	定数項 β_{ij}	大型車交通量 β_{ij}	平均ハザード率 $E[\lambda(i)]$	期待寿命 $E[RMD]$
1	-4.801 (-5.064,-4.612) -0.202	1.066 (0.769,1.467) 0.014	0.017	4.869
2	-6.408 (-6.698,-6.045) -0.107	1.821 (1.274,2.239) 0.112	0.006	14.441
3	-5.785 (-6.193,-5.346) 0.139	2.175 (1.511,2.766) -0.138	0.014	6.074
4	-8.944 (-9.640,-8.245) -0.024	5.895 (5.007,6.744) 0.024	0.008	11.067

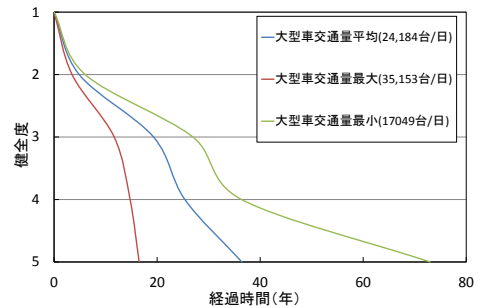


図-1 期待劣化曲線

表-3 パラメータ推計結果

健全度	定数項 α_{ij}	走行=1,追越=0 α_{ij}	橋梁=1,土工=0 α_{ij}	平均到着率 $E[\mu(i)]$
1	-9.763 (-10.629,-8.986) -0.016	4.190 (3.427,5.089) 0.004	0	0.0038
2	-7.054 (-7.290,-6.825) -0.014	0.357 (0.052,0.659) 0.105	1.927 (1.638,2.211) -0.036	0.0085
3	-8.342 (-9.109,-7.668) 0.136	2.180 (1.490,2.959) -0.131	2.284 (1.793,2.757) 0.032	0.0207
4	-10.569 (-11.474,-9.477) -0.015	5.615 (4.539,6.527) 0.013	2.576 (2.215,2.919) 0.008	0.0927
5	-8.017 (-9.190,-6.863) 0.142	2.107 (0.965,3.3) -0.149	3.739 (2.988,4.453) -0.051	0.1140

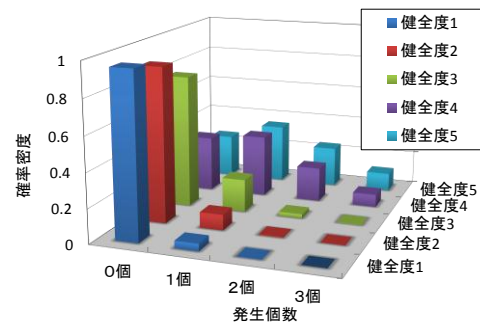


図-2 健全度毎のポアソン分布

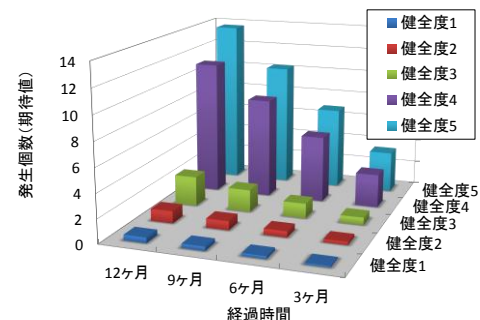


図-3 ポットホール発生個数の期待値

【参考文献】

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, No.14, pp.239-237, 2009.