

大阪大学大学院 学生員 ○起塚 亮輔

大阪大学大学院 正会員 貝戸 清之

京都大学経営管理大学院 フェロー会員 小林 潔司

1. はじめに

道路舗装には、1) 安全で快適な走行を行うための表面的な路面性状などの機能と、2) 長期にわたってサービスを提供するための構造的な耐久性が要求される。しかし、財政縮減の中、老朽化が進む膨大な道路ストックに対して、維持管理業務の効率性を一層高めることは極めて困難を伴う。このような状況の下、その解決策としてアセットマネジメント¹⁾が着目され、近年、特に目視点検データに基づく統計的劣化予測に関する研究の進展が著しい。本研究では、積雪寒冷地において発生したポットホール²⁾に対して、一般的な常温合材を用いて補修をした際の補修合材の剥離までの時間を実際の点検データを用いて統計的に推計し、その耐久性を実証的に分析する。具体的には、ポットホールの発生過程をワイブル劣化ハザードモデル³⁾によって表現し、そのモデルの推計結果を用いて補修合材の剥離までの時間（耐久性）を算出する。

2. モデルの定式化

本研究では補修合材による補修の実施から剥離するまでの時間（耐久時間）、すなわち寿命をもって耐久性を評価する。補修合材の寿命を確率変数 ζ で表し、確率密度関数 $f(\zeta)$ 、分布関数（累積寿命確率） $F(\zeta)$ に従って分布すると仮定する。ただし、寿命 ζ の定義域は $[0, \infty)$ である。いま初期時点から任意の時点 $t \in [0, \infty)$ まで、構造物の劣化が発生しない確率（以下、生存確率と呼ぶ） $\tilde{F}(t)$ は、全事象確率 1 から時点 t までにポットホールが発生する（合材が剥離する）累積寿命確率 $F(t)$ を差し引いた値である。また、補修合材が時点 t まで生存し、かつ当該時点でポットホールが発生する確率密度 $\lambda(t)$ を「ハザード関数」と呼ぶ。ここで劣化ハザード関数としてワイブル劣化ハザード関数

$$\lambda(t) = \theta \alpha t^{\alpha-1} \quad (1)$$

を考える。ただし、 θ はポットホールの発生頻度を表す定数パラメータであり、さらに θ が道路区間の構造特性や補修合材の破損に影響を及ぼすような特性で表現できると考えれば、特性ベクトル $x = (x_1, \dots, x_M)$ を用いて、

$$\theta = x\beta' \quad (2)$$

と表せる。上式中で、 $x_m (m=1, \dots, M)$ 番目の特性変数の観測値を表し、 $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_M)$ は未知パラメータベクトルである。'は転置操作を表す。また、式(1)の α はハザード率の時間的な増加傾向を表す加速度パラメータである。ワイブル劣化ハザード関数を用いた場合、補修合材の寿命の確率密度関数 $f(t)$ 、補修合材の生存確率 $\tilde{F}(t)$ は、それぞれ

$$f(t) = \theta \alpha t^{\alpha-1} \exp(-\theta t^\alpha) \quad (3)$$

$$\tilde{F}(t) = \exp(-\theta t^\alpha) \quad (4)$$

と表される。

3. 実証分析

2)により定式化されたワイブル劣化ハザードモデルを用いて、ポットホール補修合材の耐久性分析を実施する。ポットホールの発生に影響を及ぼすと考えられる変数（特性ベクトル x ）は、1)ポットホールの複数回発生、2)表層材料、3)融雪散水装置の有無、4)締固め方法、5)施工時の気温とした。これらのうち、ポットホールの複数回発生に関しては、通常は定量的パラメータとして扱うことができるが、今回の分析では、事前の検討において、ポットホールの発生回数そのものよりも、再発するか否かが耐久性に対する要因分析を行う上で重要となることが判明していたために、定性的パラメータとして扱ったことを断わっておく。また、採用した説明変数の間で相関性が高いものが含まれている可能性があることも付記しておく。

4. 推計結果

3 で示した条件のもとでポットホール補修材の耐久性を統計的に推計した。一例として、説明変数にポットホールの複数回発生と融雪散水装置の有無を採用したワイブル劣化ハザードモデルの推計結果を表-1 に示す。ここで、AIC とは、モデルの複雑さと、データの適合度とのバランスから統計的に最適なモデルを評価するための指標であり、一般的に AIC 最小のモデルが選択されることになる。ちなみに表-2 のモデルが今回の解析で AIC 最小値を与えた。以下このモデル（推計結果）から読み取れる経験的事項を通して、補修材の耐久性に関する考察を行う。

はじめに、特性変数の係数である β_2 がいずれも正値を取ることから、ポットホールが複数回発生した箇所や融雪散水装置を設置した箇所は、そうでない箇所よりもハザード関数が大きくなり、寿命が短くなる。したがって、常温合材の耐久性に水の影響が大きく介在していることが読み取れる。また、一度ポットホールが発生した地点ではポットホールが再発する可能性が高くなることを示している。この推計結果から、ポットホールの発生が完全なランダム事象ではなく、少なくとも複数回発生の有無、あるいは融雪散水装置の有無（水の存在）に影響するような因子（例えば、路面状態、構造特性や施工条件）に大きく依存していることがわかる。また、加速度パラメータ α の値は $0.4046 > 0$ であり、補修後の時間の経過とともに、補修材の耐久性が低下していくことがわかる。

つぎに推計結果を式(4)に代入し、補修材の耐久性（生存確率）と補修後の経過日数の関係を求めた。図-1 に結果を示す。同図から複数回発生：有と融雪散水装置：有の場合には、補修後数日間で約 20%の補修材が剥離してしまうことがわかる。また、複数回発生と融雪散水装置では、複数回発生の方が耐久性に及ぼす影響が大きいことも視覚的に確認できる。

表-1 推計結果（ポットホールの複数回発生の有無）

	β_1 定数項	β_2 発生の有 無	α 加速度パ ラメータ
推計値	0.035	0.0939	0.4046
t-値	3.5531	3.7598	10.2053
対数尤度	-472.5981		
尤度比	0.6712		
AIC	951.1962		

表-2 推計結果（複数回発生の有無と散水装置の有無）

	β_1 定数項	β_2 発生の有 無	β_3 装置の有 無	α 加速度パ ラメータ
推計値	0.0117	0.077	0.0412	0.411
t-値	1.9996	3.2805	2.9212	10.2821
対数尤度	-465.9262			
尤度比	0.3767			
AIC	939.8524			

5. まとめ

ポットホールの発生過程をワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現し、ポットホールが複数回発生するような箇所、融雪散水装置の設置箇所では補修材の大半が短期間で剥離してしまうことを確認した。これは、積雪寒冷地、とりわけ常時滞水状態におかれるような過酷な条件下では、現状の補修材が本来の性能を発揮できない事例が数多く存在すること、さらには積雪寒冷地に適した補修材料と補修工法の開発が不可欠であることを示唆するものである。

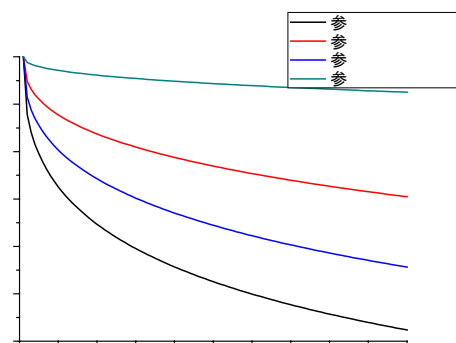


図-1 経過日数と生存確率の関係

【参考文献】

1)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.59-71，2005，2)藤原栄吾，小濱健吾，貝戸清之，小林潔司，沢田康夫：積雪寒冷地におけるポットホール補修材の耐久性分析，建設マネジメント研究論文集 Vol.15，pp.239-248，2008，3)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.111-24，2005。