

積雪寒冷地におけるポットホール補修合材の耐久性分析

京都大学大学院 小濱 健吾*1

大阪大学大学院 貝戸 清之*2

京都大学経営管理大学院 小林 潔司*3

国土交通省近畿地方整備局 沢田 康夫*4

財団法人道路保全技術センター 生田 紀子*5

By Kengo OBAMA, Kiyoyuki KAITO, Kiyoshi KOBAYASHI, Yasuo SAWADA and Noriko IKUTA

積雪寒冷地の道路舗装では、冬季の除雪対策として散水が行われる。その結果、路面は常に滞水状態におかれることが少なくなく、ポットホールが多発する要因となっている。ポットホール等の路面異常に対しては、通常補修合材を用いて迅速に応急補修がなされるが、補修合材本来の性能を発揮するだけの施工条件を満たすことが難しく、すぐに合材が剥離してしまう事例が多い。したがって、積雪寒冷地の維持管理では、積雪寒冷地に適した補修工法、補修材料を選定していくことが必要となる。本研究では、そのための基礎検討として、ポットホールの補修に用いられる補修合材の耐久性を統計的見地から考察する。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で表現し、積雪寒冷地の一般国道に生じたポットホールに関する点検記録、および補修後の経過履歴データを用いてモデルの推計を行うとともに、補修合材の耐久性を実証的に分析する。

【キーワード】道路舗装、積雪寒冷地、ポットホール、補修合材、耐久性

1. はじめに

道路舗装には、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、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、特に目視検査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。さらに、劣化予測手法と連動したライフサイクル費用評価手法も提案され、それらの実用化に期待が寄せられている。

しかしながら、積雪寒冷地の道路舗装では、冬季の融雪や除雪対策としての散水により、路面が常に滞水状態におかれることが少なくなく、ポットホールが多発するという特有の現象を確認することがで

きる。ポットホール等の路面異常に対しては、通常補修合材を用いて迅速に応急補修がなされるが、積雪寒冷地では補修合材本来の性能を発揮するだけの施工条件を満たすことは難しく、すぐに合材が剥離してしまう事例が多い。したがって、一般的な道路舗装を対象とした劣化予測手法に基づいて、ライフサイクル費用の低減を期待することは必ずしも得策とはいえない。また、実態に即した対策を講じることが、道路利用者のさらなる安全確保にもつながり得る。一方、ポットホールに関してはその発生メカニズムが概ね解明されてはいるものの²⁾、積雪寒冷地での実際のポットホールの発生状況や補修合材の耐久性を分析した事例は著者らの知る限り見当たらない。実証分析結果に基づいて、積雪寒冷地に適した補修工法、補修材料を開発していくことは重要な課題であるといえよう。

本研究では、積雪寒冷地において発生したポット

*1 工学研究科 都市社会工学専攻 修士課程 k.obama@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

*2 工学研究科 フロンティア研究センター 特任講師 kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

*3 経営管理講座 教授 kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

*4 道路部 特定道路工事対策官 sawada-y86kk@kkr.mlit.go.jp

*5 近畿支部 技術課長 ikuta-n@hozen.or.jp

ホールに対して、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によって表現し³⁾、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。なお、本研究は、積雪寒冷地のポットホール対策として適切な補修工法や補修材料を開発・提案するものではないが、積雪寒冷地の現状に即した道路舗装の維持管理手法を構築するための基礎検討を行うものである。以下、2. では、ワイブル劣化ハザードモデルについて説明し、3. では、積雪寒冷地の一般国道を対象として取得した実データを用いて、補修合材の耐久性を実証的に分析する。

2. ワイブル劣化ハザードモデル

本研究では、ポットホールの発生過程を表現するにあたり、ワイブル劣化ハザードモデル³⁾を用いる。ハザードモデルに関する詳細は、参考文献4) に詳しいが、読者の便宜を図るためにワイブル劣化ハザードモデルについて概要を説明しておく。

いま、ある道路区間において発生したポットホールが補修合材で補修され、同一箇所ですべてポットホールが発生するまでの期間に着目しよう。これは補修合材の寿命に他ならず、本研究では寿命（耐久時間）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、ポットホールが発生しない（合材が生存する）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

$$\tilde{F}(t) = 1 - F(t) \quad (1)$$

により定義できる。ここで、補修合材が時点 t まで生存し、かつ期間 $[t, t + \Delta t]$ 中にはじめてポットホールが発生する確率は

$$\lambda(t)\Delta t = \frac{f(t)\Delta t}{\tilde{F}(t)} \quad (2)$$

と表せる。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」と呼ぼう。式(1)の両辺を t に関して微分することにより、

$$\frac{d\tilde{F}(t)}{dt} = -f(t) \quad (3)$$

を得る。このとき、式(2)は

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{\tilde{F}(t)} = \frac{d}{dt} (-\log \tilde{F}(t)) \quad (4)$$

と変形できる。ここで、 $\tilde{F}(0) = 1 - F(0) = 1$ を考慮し、式(4)を積分すれば

$$\int_0^t \lambda(u)du = -\log \tilde{F}(t) \quad (5)$$

を得る。したがって、ハザード関数 $\lambda(u)$ を用いれば、時点 t まで補修合材が生存する確率 $\tilde{F}(t)$ は

$$\tilde{F}(t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(u)du \right] \quad (6)$$

と表される。このように、ハザード関数 $\lambda(u)$ の関数形を決定すれば、合材の生存確率 $\tilde{F}(t)$ を導出することができる。さらに、 $\tilde{F}(t) = 1 - F(t)$ より、合材の累積寿命確率 $F(t)$ を求めることができる。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

$$\lambda(t) = \theta \alpha t^{\alpha-1} \quad (7)$$

を考えよう。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 $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_M)$ を用いて、

$$\theta = \mathbf{x}\boldsymbol{\beta}' \quad (8)$$

と表せる。上式中で、 $x_m (m = 1, \dots, M)$ は m 番目の特性変数の観測値を表し、 $\boldsymbol{\beta} = (\beta_1, \dots, \beta_M)$ 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(7)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 $f(t)$ 、および補修合材の生存確率 $\tilde{F}(t)$ は、それぞれ

$$f(t) = \theta \alpha t^{\alpha-1} \exp(-\theta t^\alpha) \quad (9a)$$

$$\tilde{F}(t) = \exp(-\theta t^\alpha) \quad (9b)$$

と表される。

表-1 ポットホール発生箇所の概要 (全340箇所)

最新補修からの 経過年数	舗装種別	大型車交通量区分	複数回発生の有無	地域区分
7.8年 (全340箇所の平均)	密粒度舗装: 191箇所 排水性舗装: 149箇所	C交通: 44箇所 D交通: 296箇所	有: 119箇所 無: 221箇所	雪寒地域・市街地: 168 雪寒地域・平地: 150 雪寒地域・山地: 22

表-2 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

	β_1 定数項	β_2 複数回発生の有無	β_3 舗装種別	α
最尤推計量 (<i>t</i> 値)	0.113 (5.82)	0.106 (4.59)	-0.0614 (-3.69)	0.569 (18.23)
対数尤度	-970.7			
尤度比	0.813			

注) 括弧内は*t*-値を示している。

3. 実証分析

(1) 実証分析の概要

補修合材の耐久性を分析するために、本研究では、国土交通省〇国道維持出張所管内の国道を取り上げ、2006年4月1日から2007年2月22日までのポットホール発生データを用いる。分析の対象とする路線延長は55.2kmであり、平成11年度道路交通センサスによると、当該路線の混雑時の平均旅行速度は46.5km/時、平日24時間大型自動車交通量は5,098台であった。また、この期間中に合計で340件のポットホールが発生した。ポットホールが発生した箇所の概要を表-1に示す。同表のうち、「複数回発生の有無」は、同一箇所におけるポットホールの発生回数に着目したものであり、1回のみの発生を「無」、2回以上の発生を「有」とした。「無」がポットホールの発生が0回ではないことを断っておく。なお、道路巡回は参考文献5)に基づいて実施され、道路区間ごとの基礎データは全て、またポットホール情報は一部データベース化されている。

(2) 分析結果

上記のデータベースを用いて、ワイブル劣化ハザードモデルを推計する。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)の候補として、表-1に示すように、当該路線の最新補修からの経過年数、舗装種別、大型車交通量区分、ポットホール複数回発生の有無、地域区分の5つを採用した。その中で、説明変数の説明力に関する仮説を有意水準5%の*t*-検定で棄却することができない説明変数を取り上げ、ワイブル劣化ハザード関数を推計

した。*t*-検定の結果、大型車交通量区分と地域区分は説明変数として棄却され、採用した説明変数は最終的に、 x_1 : 定数項、 x_2 : ポットホール複数回発生の有無、 x_3 : 舗装種別の3つであった。また、定性的パラメータについては、

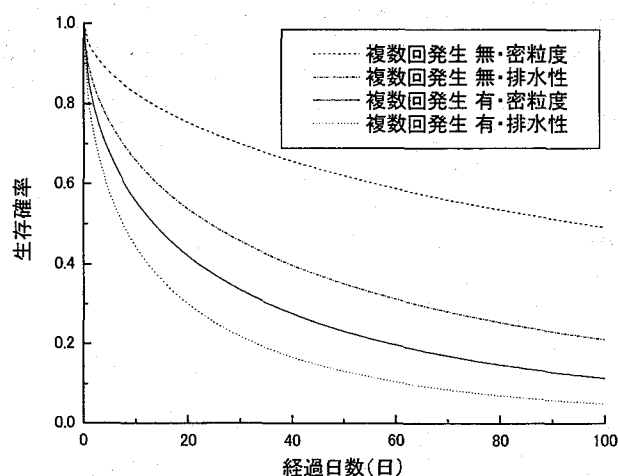
$$x_2 = \begin{cases} 1 & \text{ポットホールの複数回発生 有} \\ 0 & \text{ポットホールの複数回発生 無} \end{cases} \quad (10)$$

$$x_3 = \begin{cases} 1 & \text{密粒度舗装} \\ 0 & \text{排水性舗装} \end{cases} \quad (11)$$

とした。なお、 x_1 は定数項であるので常に $x_1 = 1$ である。ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果を表-2に示す。

はじめに、表-2の β_2 が正値0.106を取ることから、ポットホールが複数回発生した箇所は、複数回発生しなかった箇所よりもハザード関数が大きくなることがわかる。すなわち、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。これは、ポットホールの発生が完全なランダム事象ではなく、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を示している。さらには、現在使用されている補修材料、および補修工法は、積雪寒冷地という過酷な路面条件下では、十分な補修効果や性能を発揮することが難しいことを示唆している。つぎに、舗装種別のパラメータに着目しよう。 β_3 が-0.0614と負値を示しており、今回の実証分析に限定すれば、排水性舗装の方が密粒度舗装よりも、ポットホールの発生確率がやや大きくなる結果であった。

また、加速度パラメータ α の値は0.569となっており、補修合材による補修後、時間の経過とともに、ポットホール発生確率は減少していくことがわかる。



図－１ 補修合材の生存確率

このことを視覚的に理解するために、推計結果を用いて、式(9a)の補修合材の生存確率を算出しよう(図－1)。図の横軸は補修合材による補修後の経過日数である。加速度パラメータ α が $\alpha < 1$ であるため、いずれのケースであっても時間の経過に伴って、生存確率の減少速度は小さくなっている。これは補修合材の耐久性が、極めて短い場合と、恒久的な場合という両極端な特性を示している可能性を否めない。さらに、ポットホールが複数回発生する箇所では一層その傾向が強くなり、補修合材の大半が短期間(数日程度)で剥離することがわかる。実際に同図において、同じ密粒度舗装であっても、ポットホールが複数回発生しない場合には、経過日数96日で補修合材の生存確率が50%になるのに対し、ポットホールが複数回発生する場合には経過日数13日で生存確率が50%となることからこの点が理解できる。

4. おわりに

本研究では、積雪寒冷地における道路舗装の維持管理の効率化および耐久性向上を目的として、ポットホール等の路面異常に対して使用される補修合材の耐久性を統計的に分析した。その際、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では補修合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

の補修合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。

以下に、本研究での検討を通じた知見より、今後の具体的な研究課題をまとめる。第1に、積雪寒冷地に対応した補修合材の開発である。融雪や散水などの厳しい路面条件においても耐えうる補修合材が求められる。さらに、道路利用者の安全で快適なサービスの提供のためにも、限られた時間内での補修で、十分な耐久性を発揮できるような施工性にも優れた補修合材が必要である。第2に、補修合材の耐久性を始めとした性能に対する適切な評価モデルの開発である。積雪寒冷地における補修合材は現状でも種々開発されており、今後も新しい補修合材が逐次提供されるものと考えられる。それらを適材適所に配置するためにも、画一的な性能評価手法による定量的な比較分析スキームが不可欠である。

なお、本研究の遂行にあたり、国土交通省近畿地方整備局道路管理課より多大な援助を頂いた。ここに、感謝の意を表す次第である。また、本研究の一部は文部科学省科学技術調整振興費「若手研究者の自立的研究環境整備促進」事業によって大阪大学大学院工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点において実施された。

【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) 鎌田修，山田優：水浸ホイールトラッキング実験による橋面舗装でのポットホールの発生とその要因，舗装工学論文集，土木学会，No.6，pp.196-201，2001.
- 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.111-124，2005.
- 4) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 5) 国土交通省近畿地方建設局：道路巡回実施要領(案)，1981.