

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

大林道路株式会社 藤原 栄吾*1

京都大学大学院 小濱 健吾*2

大阪大学大学院 貝戸 清之*3

京都大学経営管理大学院 小林 潔司*4

国土交通省近畿地方整備局 沢田 康夫*5

By Eigo FUJIWARA, Kengo OBAMA, Kiyoyuki KAITO, Kiyoshi KOBAYASHI and Yasuo SAWADA

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ことがある。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、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²⁾⁻⁴⁾。さらに、これらの劣化予測手法と連動したライフサイクル費用評価手法^{5),6)}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、近畿地方整備局が管理する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的な補修がなされるが、積雪寒冷地では補修合材が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、通常の道路舗装を対象としたアセットマネジメント手法に基づいて、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は、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⁷⁾、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統計的見地から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

*1 技術研究所 eigo-fujiwara@obayashi-road.co.jp

*2 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

*3 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

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

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

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²⁾、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. では本研究の基本的な位置づけを述べる。3. では、ワイブル劣化ハザードモデルについて説明し、4. 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. 本研究の基本的な位置づけ

(1) ポットホールの発生

ポットホールの発生は、1) 降雨、降雪、融雪散水などにより、舗装表面に滞水した水がひび割れなどのき裂が発生した箇所から舗装体に侵入する、2) さらに繰り返し作用する交通荷重により、滞水した水が骨材とアスファルトモルタルの間に侵入する、3) これに伴って、舗装が時間の経過とともに結合力を失い、骨材が剥離し、最終的に破損する、という過程を経る。また、この際の剥離 (Stripping) のメカニズムに関しても、水浸ホイールトラッキング試験⁷⁾により剥離現象を再現することで、確認することができる。実際に、水浸ホイールトラッキング試験の結果に基づき、舗装下方からの剥離現象の進行によりポットホールが発生することが解明され、舗装下面の滞水がポットホールの原因となることが明らかにされている。さらに、ポットホールの発生は、主に次の3つの要因によると考えられている：1) 繰り返し荷重（大型車交通量、車線の横断勾配による負荷）、2) 道路形状等（カーブ区間、交差点部）、3) 舗装の滞水（水状況、降雨量、層の透水条件（コンクリート床版、アスファルト舗装など））。これらの

3つの要因の中で、舗装の滞水が大きな要因となっていることが多い。一般的に、滞水に関しては、ドレイン管等で排水を十分に行う等、適切な排水構造を設けることで防止策となり得るが、融雪を目的とした散水を実施する積雪寒冷地舗装の場合には、冬季の常時滞水が問題となる。

(2) 補修用常温合材と耐久性

常温アスファルト合材は100度以下で混合することができる混合物であり、一般的には粗骨材、細骨材にアスファルト乳剤を常温で混合したものと、カットバックアスファルトを混合したものに分類されている。アスファルト乳剤を使用した常温アスファルト混合物は、乳剤に含まれる水分が分解されることにより強度が発現して舗装体として安定するが、混合物の貯蔵が困難なために、通常路上再生工法のように現場混合方式に用いられる。これに対して、カットバックアスファルトを使用した混合物は、アスファルトに含まれる揮発成分の蒸散により安定するために、空気を遮断することで長期間の保存が可能となる。こうしたことから、市販の袋入りの補修用常温合材はこのタイプのものが多い。カットバックアスファルトを使用した補修用常温合材は、加熱アスファルト混合物と比較して貯蔵や運搬等の面で扱い易いことから、ポットホールや段差等の小規模な緊急補修に広く用いられているが、その反面、初期の安定性や耐久性、耐水性は加熱アスファルト合材に劣る。近年では特殊樹脂を添加したものや骨材の粒度を調整することにより安定性や耐久性を高めた全天候型の補修合材や、反応硬化型の樹脂やセメントを主成分とする補修合材も開発されている。

しかしながら、補修用常温合材に関しても、積雪寒冷地では、仕様通りの性能を発揮することが困難な場合が多い。すなわち、路面の滞水状態に代表される、過酷な環境条件の下での適用を余儀なくされることに加え、交通を長時間にわたって遮断することなく補修を行うためには、締固め等の施工条件も様々な制約を受けることになる。したがって、このような積雪寒冷地においても応急補修材としての性能を発揮することができる常温合材の開発が望まれているが、そもそも現状の常温合材の実際の耐久性に関する統計分析データが蓄積されていないのも事

実である。小濱ら⁸⁾は、一般国道で蓄積されたポットホールに関する点検記録、および常温合材による補修後の経過履歴データを用いて、ポットホールが発生して常温合材で補修した時点から常温合材が剥離し、再びポットホールが発生するまでの時間を推計することで、常温合材の耐久性を評価する方法を提案した。本研究においても、基本的には小濱らの提案した手法を援用して、ワイブル劣化ハザードモデルによる補修合材の耐久性評価を行う。ただし、小濱らの研究成果を踏まえた上で、常温合材の耐久性に影響を及ぼす要因を分析する目的で、道路舗装に関する詳細な構造条件を追加したことに加え、補修施工時の施工状態に関するデータの記録も新たに行った。より多角的に補修合材の耐久性に関する統計分析を実施した点に、本研究の工学的価値と実用性を見出すことができる。

3. ワイブル劣化ハザードモデル

(1) モデルの定式化

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²⁾を用いる。ハザードモデルに関する詳細は、参考文献9)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た後、再び同一地点で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 $\boldsymbol{x} = (x_1, \dots, x_M)$ を用いて、

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

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

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。

(2) モデルの推計方法

観測情報に基づいてワイブル劣化ハザード関数を推計する問題をとりあげる。いま、すべての補修合材の使用開始時点 $t = 0$ と基準化し、補修合材 i ($i = 1, \dots, n$) の使用時間の実測値を \bar{t}_i と表す。以下、記号「 $\bar{\cdot}$ 」は実測値であることを表す。モニタリング期間中にポットホールが発生し、補修合材の寿命が終了した場合、使用期間と寿命が一致し、 $\bar{t}_i = \zeta_i$ が成立する。一方、ポットホールが発生せず、補修合材の寿命が終了していない場合、補修合材の使用期間は観測期間長 \bar{T}_i と一致し、補修合材の寿命 ζ_i は観測されない。そこで、補修合材 i の寿命が観測期間を越えるかどうかを表すダミー変数 \bar{d}_i を

$$\bar{d}_i = \begin{cases} 1 & \bar{t}_i = \zeta_i \leq \bar{T}_i \text{ の時} \\ 0 & \zeta_i > \bar{T}_i = \bar{t}_i \text{ の時} \end{cases} \quad (10)$$

と定義する。この時、補修合材 i の観測情報は $\bar{\xi}_i = (\bar{d}_i, \bar{t}_i, \bar{x}_i)$ と整理できる。ここで、ワイブル劣化ハザードモデルの未知パラメータベクトル $\omega = (\alpha, \beta)$ を定義する。さらに、 $f(t_i), \tilde{F}(y_i)$ が補修合材の特性データ \mathbf{x}_i 、未知パラメータベクトル ω の関数であることを明示的に示すために、 $f(t_i, \mathbf{x}_i; \omega), \tilde{F}(t_i, \mathbf{x}_i; \omega)$ と表記する。いま、補修合材 i に関して観測情報 $\bar{\xi}_i = (\bar{d}_i, \bar{t}_i, \bar{x}_i)$ が観測されたとしよう。このとき、補修合材 i に関してモニタリング期間長により寿命 ζ_i の分布の右側が切断する条件を考慮した条件付確率は、

$$\ell(\bar{d}_i, \bar{t}_i, \bar{x}_i; \omega) = f(\bar{t}_i, \bar{x}_i; \omega)^{\bar{d}_i} \tilde{F}(\bar{t}_i, \bar{x}_i; \omega)^{1-\bar{d}_i} \quad (11)$$

と表される。ただし、右辺第1項は、ポットホールの発生により補修合材の観測期間が終了し、寿命が \bar{t}_i となる確率を意味しており、第2項は、補修合材の寿命が観測期間長 \bar{T}_i (すなわち、使用期間長 \bar{t}_i) より長くなる確率を表している。補修合材 n 個それぞれ

表-1 ポットホール発生箇所の概要 (構造条件)

車線	総発生数	発生回数	平均寿命
上り	51	1.50	45.0
下り	67	1.72	33.8
センター	5	1.25	49.8

横断位置	総発生数	発生回数	平均寿命
わだち部	118	1.64	33.9
非わだち部	5	1.00	61.3

構造物	総発生数	発生回数	平均寿命
土工部	102	1.50	36.2
CO床版部	21	2.33	52.8

表層材料	総発生数	発生回数	平均寿命
密粒度舗装	100	1.72	30.2
排水性舗装	23	1.21	77.5

融雪散水装置	総発生数	発生回数	平均寿命
有	90	1.76	25.2
無	33	1.27	76.8

合計	123	1.60	39.1
----	-----	------	------

れの劣化現象の生起は、互いに独立に分布すると仮定すると、尤度関数は、

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\omega | \bar{\xi}) &= \prod_{i=1}^n \ell(\bar{d}_i, \bar{t}_i, \bar{x}_i; \omega) \\ &= \prod_{i=1}^n f(\bar{t}_i, \bar{x}_i; \omega)^{\bar{d}_i} \tilde{F}(\bar{t}_i, \bar{x}_i; \omega)^{1-\bar{d}_i} \end{aligned} \quad (12)$$

と表すことができる。 $\bar{\xi} = (\bar{\xi}_1, \dots, \bar{\xi}_n)$ である。最尤推定法では一般に尤度関数 (12) の対数をとった関数を最大にするようなパラメータ値 $\hat{\omega}$ を最尤推定量として求める。

4. 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、国土交通省のある国道維持出張所管内の国道に着目する。同管内において、平成19年6月から平成20年2月末までに自然発生したポットホールに対して補修用常温合材を用いて補修を行い、その後の補修合材の経過履歴を観測した。ワイブル劣化ハザードモデルを適用するに先立って、ポットホールの発生状況をポットホールに関する点検記録、補修後の経過履歴データと、道路舗装の基礎情報 (観測延長: 71.1km, 融雪散水装置有の区間: 22.1km) をもとに分析した。

表-2 ポットホール発生箇所の概要（施工条件）

水の除去	総発生数	平均寿命
有	8	116.5
無	54	14.8
存在せず	61	50.4
泥の除去	総発生数	平均寿命
有	3	156.0
無	62	16.0
存在せず	58	57.7
融雪散水	総発生数	平均寿命
有	18	16.6
無	105	42.9
締固め方法	総発生数	平均寿命
人力	1	109.0
作業車転圧	60	63.1
機械	62	14.7
合計	123	39.1

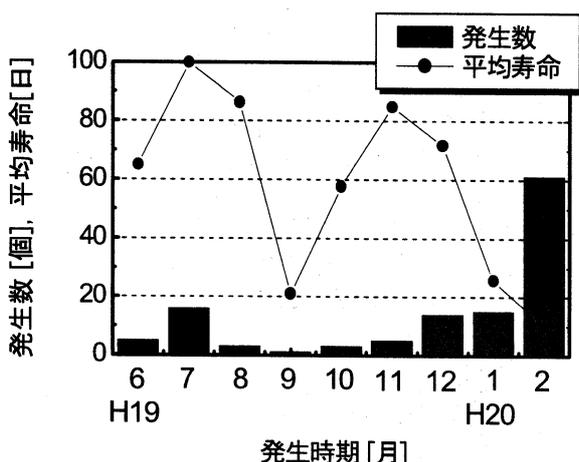


図-1 月別のポットホール発生数と補修合材の平均寿命

これらを整理した結果を表-1 および表-2 に示す。表-1 は構造条件、表-2 は施工条件に着目して、それぞれポットホールの発生数と補修合材の平均寿命を整理している。なお、対象期間内にポットホールは合計123個発生し、補修合材の平均寿命は39.1日であった。なお、これらの情報はすでにデータベース化されている。

はじめに、表-1 の構造条件の相違によるポットホールの発生数に着目する。横断位置のわだち部・非わだち部、構造物の土工部・CO床版部、表層材料の密粒度舗装・排水性舗装、融雪散水装置の有・無で発生数に顕著な違いを確認することができた。ただ

表-3 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

	複数回発生の有無 β^1		
	α	β_1^1	β_2^1
加速度		定数項	複数回発生
最尤推計量	0.579	0.0387	0.0759
(t値)	(8.88)	(2.98)	(2.71)
対数尤度	-252.0		

注) 括弧内はt値を示している。

表-4 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

	表層材料 β^2		
	α	β_1^2	β_2^2
加速度		定数項	表層材料
最尤推計量	0.588	0.0156	0.0607
(t値)	(8.86)	(1.71)	(3.16)
対数尤度	-252.1		

し、表層材料に関しては、密粒度舗装の区間では融雪散水装置が設置されており、排水性舗装の区間では融雪散水装置が設置されていないために、一概に表層材料がポットホールの発生に影響を及ぼすとは言えないことを断っておく。また、同表中の「発生回数」は同一地点においてポットホールが繰り返し発生する回数を示したものであり、数値の大きさはその傾向が強いことを示す。ポットホールの発生回数が多い条件として、構造物、表層材料と融雪散水装置の有無があげられる。例えば、構造物に着目した場合、ポットホールの発生回数は全体平均が1.60回であるのに対して、CO床版では2.33回（土工部：1.50回）となっている。また、表層材料では、密粒度舗装が1.72回（排水性舗装：1.21回）、融雪散水装置の有無では、有が1.76回（無：1.27回）となっている。さらに、平均寿命に着目すると、横断位置、表層材料、融雪散水装置の相違により、補修合材の耐久性に2倍以上の差を確認することができる。

つぎに、施工条件に着目する（表-2）。今回、施工条件として、施工時の水の除去、泥（埃）の除去、融雪散水の有無、締固め方法を記録した（天候、気温、ポットホールの大きさ等も別途記録している）。いずれの項目を確認しても、構造条件（表-1）よりも、施工条件の相違により、平均寿命に顕著な違いが現われている。特に一般的に指摘されているように、水と泥を施工時に除去するか否かが補修合材の耐久性に影響を及ぼすことが理解できる。このことから、施工時の時間的な制約条件により、補修合材が持つ本来の性能を発揮できないケースが存在してい

表-5 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

	融雪散水装置の有無 β^3		
	α 加速度	β_1^3 定数項	β_2^3 融雪散水装置
最尤推計量 (<i>t</i> 値)	0.619 (9.00)	0.0140 (1.95)	0.0673 (3.34)
対数尤度	-247.5		

表-6 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

	ポットホール内の水の除去 β^4		
	α 加速度	β_1^4 定数項	β_2^4 水の除去
最尤推計量 (<i>t</i> 値)	0.613 (8.49)	0.0372 (2.73)	0.0598 (2.63)
対数尤度	-254.1		

ることがわかる。一方で、施工条件を満足するケースでは現状の補修合材でも積雪寒冷地において十分な耐久性を発揮でき得ることも示している。

また、月別のポットホールの発生個数および平均寿命を図-1に示す。2月を筆頭に冬季(12月~2月)にポットホールが突出して発生し、かつ平均寿命が極めて短いことがわかる。例えば、1月と7月を比較すると、ポットホールの発生数は同じであるが、平均寿命には大きな差異が確認される。この原因としては、冬季の降雪と、それに伴う融雪散水であり、ポットホールの発生と補修合材の耐久性に水が大きく影響していることがうかがえる。なお、9月の平均寿命が短くなっているが、発生数が1件であり、その1件は複数回発生地点においてポットホールが発生したものであった。

(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)の候補は、既往の研究成果⁸⁾と、表-1と表-2を勘案して、1)ポットホールの複数回発生: x_1^2 、2)表層材料: x_2^2 、3)融雪散水装置の有無: x_3^2 、4)施工時のポットホール内の水の除去: x_4^2 、5)泥(埃)の除去: x_5^2 、6)締固め方法: x_6^2 、7)大型車交通量: x_7^2 、とした。これらのうち、ポットホールの複数回発生などは定性的パラメータとなり、以下のように設定した。ただし、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⁸⁾において、ポットホー

表-7 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

	ポットホール内の泥(埃)の除去 β^5		
	α 加速度	β_1^5 定数項	β_2^5 泥の除去
最尤推計量 (<i>t</i> 値)	0.608 (8.43)	0.0379 (2.66)	0.0504 (2.51)
対数尤度	-255.1		

表-8 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

	締固め方法 β^6		
	α 加速度	β_1^6 定数項	β_2^6 締固め
最尤推計量 (<i>t</i> 値)	0.613 (8.66)	0.0928 (3.51)	-0.0577 (-2.72)
対数尤度	-253.8		

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。

$$x_1^2 = \begin{cases} 1 & \text{ポットホールの複数回発生 有} \\ 0 & \text{ポットホールの複数回発生 無} \end{cases} \quad (13)$$

$$x_2^2 = \begin{cases} 1 & \text{密粒度舗装} \\ 0 & \text{排水性舗装} \end{cases} \quad (14)$$

$$x_3^2 = \begin{cases} 1 & \text{融雪散水装置 有} \\ 0 & \text{融雪散水装置 無} \end{cases} \quad (15)$$

$$x_4^2 = \begin{cases} 1 & \text{水の除去 無} \\ 0 & \text{水の除去 有} \end{cases} \quad (16)$$

$$x_5^2 = \begin{cases} 1 & \text{泥(埃)の除去 無} \\ 0 & \text{泥(埃)の除去 有} \end{cases} \quad (17)$$

$$x_6^2 = \begin{cases} 1 & \text{締固め方法 作業車で転圧} \\ 0 & \text{締固め方法 人力・機械} \end{cases} \quad (18)$$

なお、これらの説明変数は、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た説明変数(*t*値が1.96以上の説明変数)のみを取り上げている。実際に、表-1であげた車線や構造物は*t*-検定によって棄却できなかったために、分析項目として列挙していない。また、 x_1 は定数項であるので常に $x_1 = 1$ が成り立つ。ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果を表-3~表-9に示す。

はじめに、表-3のポットホールの複数回発生の有無に着目する。 β_2^2 が正値0.0759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(すなわち、寿命が短くなる)ことがわかる。すなわち、

表-9 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

大型車交通量 β^7			
	α	β_1^7	β_2^7
	加速度	定数項	大型車交通量
最尤推計量	0.571	0.172	-2.91E-05
(t値)	(8.77)	(2.79)	(-2.13)
対数尤度	-256.7		

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。また、加速度パラメータ α の値は0.579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、ポットホールの発生確率が減少していくことがわかる。表-4以降も同様の特徴を確認することができるが、t値や対数尤度から、構造条件では融雪散水装置の有無、施工条件では水や泥の除去よりも締固め方法が補修合材の耐久性に影響を及ぼす結果となった。

つぎに、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、式(9b)の補修合材の生存確率を算出しよう(図-2~図-6)。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。また個別の条件ごとの耐久性を確認しよう。図-2は、ポットホールの複数回発生の有無による補修合材の生存確率を示しているが、有の場合には10日後の生存確率が約65%程度であるのに対し、無(初めてポットホールが発生)では約85%の生存確率である。複数回ポットホールが発生する地点に対してはその根本に構造的、あるいは施工的要因との関連性があるものと考えられるが、いずれにせよ、補修合材の耐久性が低いことは明らかである。図-3の融雪散水装置の有無では、装置が設置されている地点では10日後の生存確率が約70%であるのに対して、装置が設置されていない個所では90%以上であった。特に、融雪散水装置が「無」の場

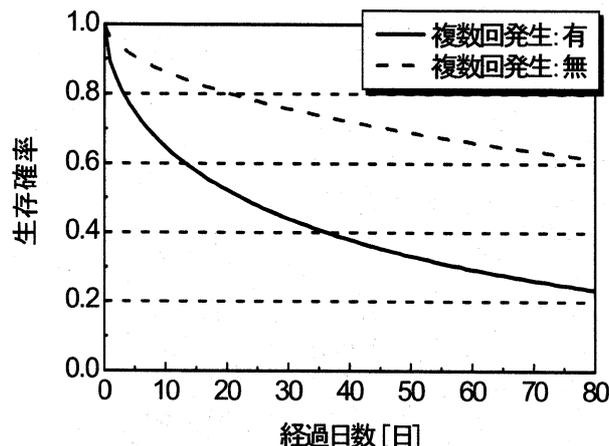


図-2 補修合材の生存確率(複数回発生の有無)

合には、80日経過時点においても生存確率が80%程度までしか低下しておらず、その生存確率の高さや「有」の場合との生存確率の差を他のケースと比較すると、構造条件の中ではこの影響が補修合材の耐久性に対して極めて大きいことがわかる。また、生存確率が50%となる経過日数が表-1の平均寿命と必ずしも一致しない点にも留意されたい。つまり、表-1で示した平均寿命のようにサンプルの単純平均を算出するだけでは、特異値の影響を強く受けることになり正確な分析を行うことが困難となることがわかる。一方、施工条件を示した図-4と図-5を比較すると、水を除去した場合と作業車で転圧した場合の生存曲線はほぼ同様の傾向を示している。しかしながら、その反面、施工条件が不十分な場合には、補修合材の耐久性が低くなる。さらに、図-6は、大型車交通量の相違による生存曲線を示したものであるが、大型車交通量が多いほど、耐久性が上がるという結果となった。これは、大型車交通量がある区間を代表したものであるために、局地的に発生するポットホールではその他の要因が大きく影響しているものと考えられる。実際に表-9中に示した大型車交通量に関する β_2^7 のt値が低いことから、この点が理解できる。

5. 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

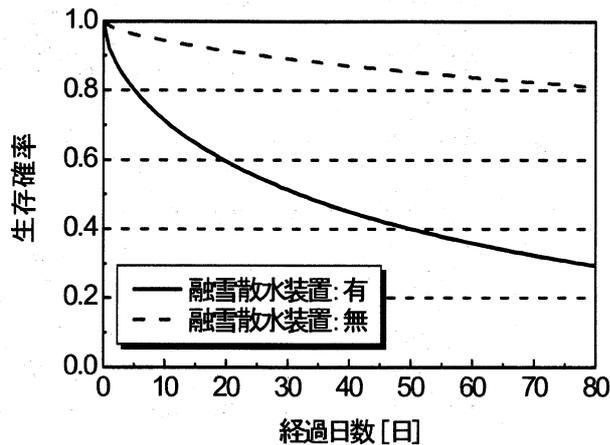


図-3 補修合材の生存確率（融雪散水装置の有無）

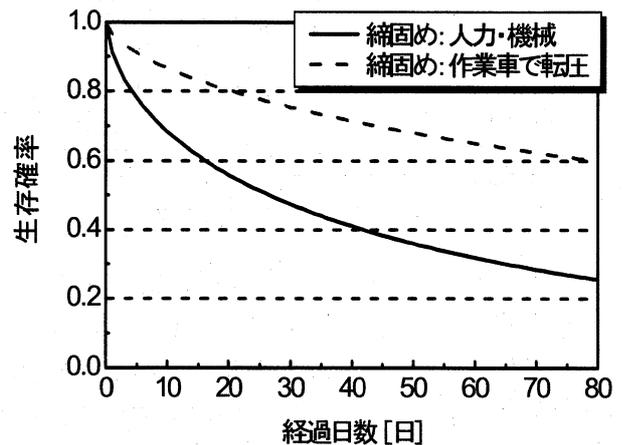


図-5 補修合材の生存確率（施工時の締固め法）

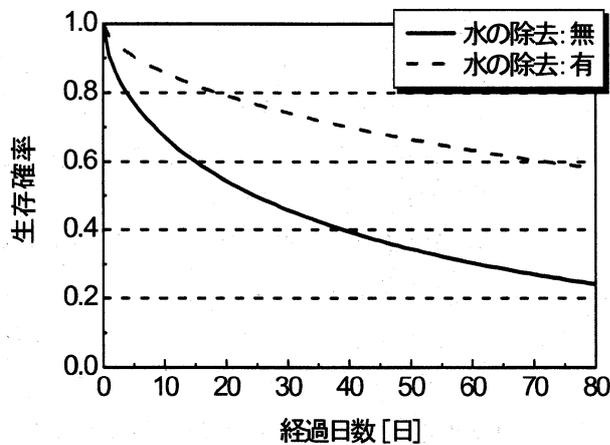


図-4 補修合材の生存確率（施工時の水の除去の有無）

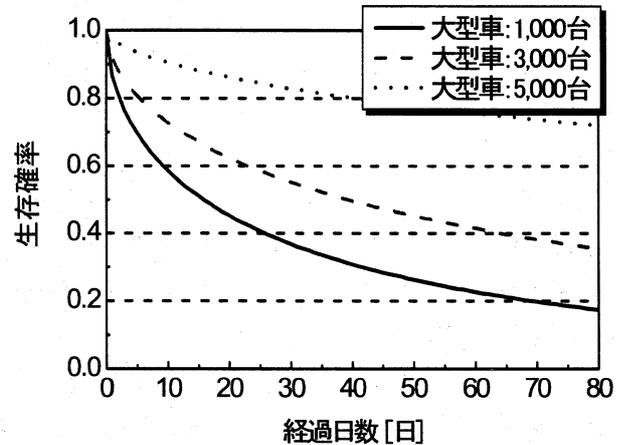


図-6 補修合材の生存確率（大型車交通量）

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地点、融雪散水装置の設置地点、不十分な施工状況では補修合材の大半が短時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な研究環境整備促進」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) 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.
- 3) 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.68-82，2005.
- 4) 青木一也，山本浩司，津田尚胤，小林潔司：多段階ワイブル劣化ハザードモデル，土木学会論文集，No.798/VI-68，pp.125-136，2005.
- 5) 織田澤利守，石原克治，小林潔司，近藤佳史：経済的寿命を考慮した最適修繕政策，土木学会論文集，No.772/IV-65，pp.169-184，2004.
- 6) 貝戸清之，保田敬一，小林潔司，大和田慶：平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略，土木学会論文集，No.801/I-73，pp.83-96，2005.
- 7) 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.
- 8) 小濱健吾，貝戸清之，小林潔司，沢田康夫，生田紀子：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，第25回建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会概要集，土木学会，pp.73-76，2007.
- 9) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.

Durability Analysis of Pot Hall Patching Mixture in Snowly Cold Region

By Eigo FUJIWARA, Kengo OBAMA, Kiyoyuki KAITO, Kiyoshi KOBAYASHI and Yasuo SAWADA

On the pavement in snowly cold region, water spray is carried out as a snow removal activity in winter. Therefore in most cases, pavement surface is in water-soaked condition, and it causes the occurrence of a lot of pot halls. Usually, for the pot halls, urgent repair is immediately conducted using patching mixtures. However under these circumstances, the patching mixture falls away soon due to the constraint in the construction. Consequently, as for the maintenance in snowly cold region, it is important to develop the optimal repair method or patching mixture material for such region. In order to provide the basic investigation of this issue, this study statistically evaluates the durability of the patching mixtures of pot halls. Concretely, the occurrence process of pot halls are modeled by the Weibull hazard model, and the durability performance of the patching mixtures is verified by estimating the hazard model based on the inspection data of actual pot halls on the national road in snowly cold region and monitoring data after repairing them.