

積雪地におけるポットホール補修用 常温混合物の耐久性分析

小林潔司¹・貝戸清之²・藤原栄吾³・森悠⁴・山本真悟⁵・藤岡芳征⁶・山田優⁷

¹フェロー会員 京都大学教授 経営管理大学院 経営管理講座 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: kkoba@psa.mbox.media.kyoto-u.ac.jp

²正会員 大阪大学特任講師 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 (〒 565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

³正会員 京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻 (〒 615-8540 京都市西京区京都大学桂)

E-mail: fujiwara.e@hy7.ecs.kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 京都大学 経営管理大学院 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: h.mori@hs7.ecs.kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 国土交通省 近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 道路管理課 (〒 668-0025 豊岡市幸町 10-3)

E-mail: yamamoto-s86ay@kkr.mlit.go.jp

⁶正会員 国土交通省 近畿地方整備局 豊岡河川国道事務所 八鹿国道維持出張所 (〒 667-0044 養父市八鹿町国木 134-1)

E-mail: fujioka-y86uv@kkr.mlit.go.jp

⁷正会員 大阪市立大学名誉教授, 都市リサイクル工学研究所 (〒 530-0055 大阪市北区野崎町 1-25)

E-mail: urasam.y6-6@nifty.com

積雪地の道路舗装では、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、路面が常に滞水状態におかれ、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、通常常温混合物を用いて迅速に応急補修がなされるが、常温混合物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、すぐに混合物が剥離してしまう事例が多い。本研究では、積雪地に適した補修工法、補修材料を選定するための基礎検討として、常温混合物の耐久性を統計的見地から考察する。具体的には、混合物の剥離過程をワイプル劣化ハザードモデルで表現し、積雪地の一般国道に生じたポットホールに関する点検データ、および補修後の経過履歴データを用いてモデルを推計するとともに、常温混合物の耐久性を実証的に分析する。

Key Words : *pavement management, snowly region, pothole, patching mixture, durability analysis*

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、例えば近畿地方整備局が管理する積雪地の道路舗装の一部では、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、通常常温混合物を用いて迅速に応急的な補修がなされるが、積雪地では常温混合物が本

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、すぐに混合物が剥離してしまう事例が多い。したがって、維持補修費用の低減化を達成するためには、短期的には積雪・降雨期におけるポットホールの効果的な応急補修の方法を検討することが重要となる。また、実態に即した対策を講じることは、道路利用者の安全性の向上にも資することができる。さらに、長期的には、ポットホールの発生を未然に防ぐために、路面の補修方法や道路舗装全体の補修・更新政策を検討することが必要となる。

本研究では、積雪・降雨期におけるポットホールの応急補修の効率化のための基礎的情報を獲得することを目的として、実際の特定道路区間に対する、3年間にわたる継続的な現地計測データを用いて常温混合物の耐久性とそれに対する影響要因を実証的に評価する。滞水状態にある路面のポットホールに関してはその発生メカニズムについて、いくつかの研究⁷⁾の蓄積があるものの、積雪地での実際のポットホールの発生状況や常温混合物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。

以上の問題意識の下に、本研究では、積雪地において発生したポットホールに対して、一般的な常温混合物を用いて補修を行った際の常温混合物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、常温混合物の剥離過程(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常温混合物の剥離までの時間(耐久性)を評価する。また、常温混合物の耐久性は、常温混合物による応急補修を行う地点の構造条件、環境条件、施工条件など、多数の要因によって左右される。さらに、これらの多数の要因が同時に、かつ相互依存的に影響を及ぼす可能性が否めない。耐久性に対する影響要因を一意に特定することは難しいと考えられるが、統計学的見地から考察を加えていく。なお、本研究は、積雪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考え方を述べる。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、積雪地の一般国道を対象として取得した実データを用いて、常温混合物の耐久性を実証的に分析する。

2. 本研究の基本的な考え方

(1) ポットホールの発生

滞水状態にある路面の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、骨材からアスファルトが剥離し、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、水浸ホイールトラッキング試験により剥離現象を再現できることが確認されている⁷⁾。実際に、水浸ホイールトラッキング試験に基いて、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過程が再現され、舗装下面の滞水がポットホールの原因の1つとなることが明らかにされている。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(滞水状況、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地舗装の場合には、冬季の常時滞水が問題となる。したがって、積雪地における舗装アセットマネジメントを実施するためには、以上のような積雪地に特有の現象を考慮した方法論の開発が不可欠である。

(2) 補修用常温混合物と耐久性

常温アスファルト混合物は常温状態で使用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混合物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混合物は、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混合物に劣る。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常温混合物や、反応硬化型の樹脂やセメントを主成分とする常温混合物も開発されている。

しかしながら、補修用常温混合物に関しても、積雪地では、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混合物の開発が望まれているが、そもそも現状の常温混合物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。藤原⁸⁾は、一般国道で蓄積されたポットホールに関する点検データ、および常温混合物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混合物で補修した時点から常温混合物が剥離し、再びポットホールが発生する

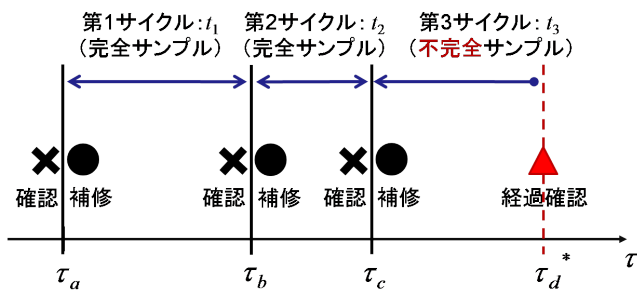


図-1 点検スキームと観測情報

までの時間を推計することにより常温混合物の耐久性を評価する方法を提案した。本研究においても、基本的には藤原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常温混合物の耐久性評価を行う。ただし、藤原らの研究では用いたデータが限られており、分析結果も限定された内容となっている。これに対して、本研究では常温混合物の耐久性とそれに影響を及ぼす要因を分析する目的で、実際の特定道路区間に対する、3年間にわたる継続的な現地計測により、道路舗装に関する詳細な構造条件、補修施工時の施工状態に関する詳細なデータを蓄積した。常温混合物の耐久性に関する統計分析をより多角的に実施した点に、本研究の工学的価値と実用性を見出すことができる。

(3) 点検スキームと観測情報

ワイブル劣化ハザードモデルを推計するためには、ポットホールの発生と常温混合物の健全性に関する時系列データが必要となる。また、これらの観測情報の不完全性について留意することが重要である。ここでは点検スキームと観測情報の概要について述べる。

いま、ある道路区間に対する点検・補修履歴が図-1のように与えられたと考える。時刻 τ はカレンダー上の実時刻を表す。以下、実時刻のことを「時刻」と呼ぶ。同図において、 τ_a においてポットホールの発生が確認され、直後に常温混合物による応急補修がなされたと想定する。すなわち、 τ_a から常温混合物の寿命の第1サイクルが始まる。また、日常の点検業務を通して常温混合物の状態が観測される。つぎに、任意の時刻 τ_b に実施された点検で、常温混合物の剥離が確認されたとする。このとき、常温混合物の寿命の第1サイクルは τ_b で終了し、第1サイクルの寿命が t_1 ($t_1 = \tau_b - \tau_a$) と確定する(ただし、実際に常温混合物が剥離した時刻と、剥離が確認された時刻には差異があり、依然として不確実性が存在することに留意が必要である)。このように常温混合物の寿命に関する完全な情報が得られるケースを本研究では完全サンプルと呼ぶ。当然ながら、 τ_b において、再び常温混合物による応急補修がな

され、寿命の第2サイクルが始まる。同図では第2サイクルも完全サンプルとなっている。一方で、時刻 τ_c より始まる第3サイクルに着目する。時刻 τ_d^* で実施された直近の点検では、常温混合物が剥離しておらず、健全であることが観測されている。このような場合には、第3サイクルの寿命 t_3 は $t_3 \geq (\tau_d^* - \tau_c)$ であることが判明するのみである。第3サイクルのように寿命に関する不完全な情報しか得られないケースを不完全サンプルと呼ぶ。完全サンプルに関しては、寿命に関する情報が獲得できる。しかし、不完全サンプルに関しても、「寿命が終了していない」という部分的な情報を獲得できる。不完全サンプルの中には、1) ポットホール発生時から経過時間が短いサンプルだけでなく、2) 十分な耐久性を有しているために寿命が長くなり、結果として不完全サンプルになっている事例も少なくない。したがって、完全サンプルのみに着目して、常温混合物の耐久性(寿命)を評価した場合、耐久性を過小評価する危険性が存在する。したがって、常温混合物の耐久性評価においては、完全サンプルと不完全サンプルの双方を同時に考慮することが必要である。

以上のように、常温混合物のサイクル長(寿命)に不確実性が介在する場合には、その評価のために確率モデルの採用が不可欠である。また、常温混合物の剥離発生時点と観測時点との間に存在する不確実性や、不完全サンプルを寿命評価に考慮することが可能な確率モデルとしてハザードモデル⁹⁾がある。常温混合物の剥離が発生する確率は、時間に依存して増加していく。このようにある事象の寿命が終了する確率が、経過時間に応じて増加するような寿命分布はワイブル劣化ハザードモデルを用いて表現することができる。

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、ポットホール補修用常温混合物の剥離過程を表現するにあたり、ワイブル劣化ハザードモデルを用いる。ワイブル劣化ハザードモデルに関する詳細は、参考文献2)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。

ある道路区間において発生したポットホールが常温混合物で補修された後、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する。これは常温混合物の寿命に他ならず、本研究ではこの寿命をもって耐久性を評価する。常温混合物の寿命を確率変数 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(混合物が生存する)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(混合物が剥離する)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、常温混合物が時点 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。常温混合物が時点 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。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

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

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 まで常温混合物が生存する確率 $\tilde{F}(t)$ 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、常温混合物の生存確率 $\tilde{F}(t)$ を導出することができる。さらに、 $\tilde{F}(t) = 1 - F(t)$ より、混合物の累積寿命確率 $F(t)$ 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

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

を考える。ただし、 α は加速パラメータであり、ポットホールの発生確率の時間依存性を表す。一方、 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常温混合物の剥離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。 \prime は転置操作を表す。ワイブル劣化ハザード関数を用いた場合、常温混合物の寿命の確率密度関数 $f(t)$ 、および常温混合物の生存確率 $\tilde{F}(t)$ は、それぞれ

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

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

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取りあげる。いま、すべての常温混合物の使用開始時点を $t = 0$ と基準化し、常温混合物 $i (i = 1, \dots, n)$ 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常温混合物が剥離し(ポットホールが再発生し)、常温混合物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、常温混合物が剥離せず、常温混合物の寿命が終了していない場合、常温混合物の使用期間は観測期間長 \bar{T}_i と一致し、常温混合物の寿命 ζ_i は観測されない。そこで、常温混合物 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。このとき、常温混合物 i の観測情報は $\bar{\xi}_i = (\bar{d}_i, \bar{t}_i, \bar{\mathbf{x}}_i)$ 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 $\boldsymbol{\omega} = (\alpha, \boldsymbol{\beta})$ を定義する。さらに、 $f(t_i), \tilde{F}(y_i)$ が常温混合物の特性データ \mathbf{x}_i 、未知パラメータベクトル $\boldsymbol{\omega}$ の関数であることを明示的に示すために、 $f(t_i, \mathbf{x}_i; \boldsymbol{\omega}), \tilde{F}(t_i, \mathbf{x}_i; \boldsymbol{\omega})$ と表記する。いま、常温混合物 i に関して観測情報 $\bar{\xi}_i = (\bar{d}_i, \bar{t}_i, \bar{\mathbf{x}}_i)$ が観測されたと考える。このとき、常温混合物 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、

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

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常温混合物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、常温混合物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。常温混合物 n 個それぞ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、

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

と表すことができる。式中、 $\bar{\xi} = (\bar{\xi}_1, \dots, \bar{\xi}_n)$ である。最尤推定法では一般に尤度関数式(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 $\hat{\boldsymbol{\omega}}$ を最尤推定量として求める。

ポットホール調査・補修帳票(□ 試験施工箇所・□ 自然発生箇所)

位置情報	ID	地方整備局	事務所	出張所	路線番号	上り・下り	車線数	
	〇	〇〇	〇〇〇〇〇	<input checked="" type="checkbox"/> A <input type="checkbox"/> B	〇	下り	〇	
	距離標(km)	距離(m)	ポットホールの位置		合材種類(表層)	合材種類(基層)		
〇〇	〇	<input checked="" type="checkbox"/> 走行車線 <input type="checkbox"/> 追越車線	<input type="checkbox"/> 進行方向右側 <input checked="" type="checkbox"/> 進行方向左側	密粒				
補修状況	構造物		交差点の有無		道路線形		道路勾配(%)	
	<input checked="" type="checkbox"/> 土工部 <input type="checkbox"/> 鋼床版 <input type="checkbox"/> CO床版	<input type="checkbox"/> 鋼床版 <input type="checkbox"/> CO床版	<input type="checkbox"/> 交差点部 <input checked="" type="checkbox"/> それ以外	<input type="checkbox"/> カーブ部分 <input checked="" type="checkbox"/> 直線部分			2	
	ポットホール発生日		帳票作成日		補修面積(m ²)	補修深さ(mm)		
	2007/02/13		2007/02/13		1.2	36		
	施工日時				補修材料名(製品名)			
	2007/02/13 14:15:00							
	天候	気温(℃)	作業時間(分)	散水状況(融雪用)の有無				
	晴れ	12	10	<input checked="" type="checkbox"/> 散水有り <input type="checkbox"/> 散水無し				
	ポットホール内の水の有無				施工時に散水融雪装置からの水の対応			
	<input type="checkbox"/> 施工時に水を除去した <input checked="" type="checkbox"/> 施工時に水を除去しない <input type="checkbox"/> 施工時に水はなかった				<input checked="" type="checkbox"/> 何もしない <input type="checkbox"/> 堰を作って遮断した			
ポットホール内の泥の有無				施工性について				
<input type="checkbox"/> 施工時に泥を除去した <input type="checkbox"/> 施工時に泥を除去しない <input checked="" type="checkbox"/> 施工時に泥はなかった				<input checked="" type="checkbox"/> 施工しやすい <input type="checkbox"/> 施工しにくい <input type="checkbox"/> ふつう				
施工後の状況	日時	剥離面積 1(m ²)	剥離深さ 1(mm)	ひび割れ1	日時	剥離面積 2(m ²)	剥離深さ 2(mm)	ひび割れ2
				<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し				<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し
	日時	剥離面積 3(m ²)	剥離深さ 3(mm)	ひび割れ3	日時	剥離面積 4(m ²)	剥離深さ 4(mm)	ひび割れ4
				<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し				<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し

図-2 ポットホール点検シート

4. 実証分析

(1) 対象路線の概要とポットホール発生状況

常温混合物の耐久性を分析するために、本研究では、国土交通省近畿地方整備局豊岡河川国道事務所八鹿国道維持出張所管内の国道(対象延長:71.1km)に着目する。当該国道において、平成19年6月から平成22年2月までに自然発生したポットホールに対して補修用常温混合物を用いて応急補修を行い、その後の常温混合物の経過履歴を観測した。日常点検は、ポットホールも含めた路面異常の確認や路上落下物の除去を目的として、平日には1日1回の頻度で通常4名体制で実施され、休日は土日のいずれかに1日1回の頻度で2名体制により実施される。点検中にポットホールを確認した場合には、点検車に積載している常温混合物によりその場で応急補修が行われる。応急補修中は片側交互通行により、交通流に支障を来さないように最大限の配慮を行っている。しかし、当該路線はスキー場への

アクセス道路となっていることから冬季は夜間でもある程度の交通量が保たれるために、交通を早期に全面開放することが不可欠である。このことが対象地域で常温混合物による応急補修に対して、十分な施工条件を確保することが困難な要因となっている。なお、補修履歴として、ポットホールの発生位置(キロポスト、上下線により把握)、常温混合物の施工日時、損傷状態(寸法、形状、深さにより把握)、補修内容(使用した常温混合物の種類)、施工条件(天候、融雪散水装置の有無)、施工性(施工の容易さで判断)、締固め方法(人力 or 機械)を記録している。

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をもとに分析した(なお、これらの情報はすでにデータベース化されている。日常点検においては点検員がこれまで上述の項目を記録していたが、本研究では新たに上述の項目を包括するような図-2のポットホール

表-1 ポットホール発生状況の概要 (構造条件)

構造条件	相違	総発生数	同一地点での 平均発生回数	平均寿命 (日) (不完全サンプル含む)	平均寿命 (日) (不完全サンプル除外)
1) 構造物	土工部	333	2.0	224.4	54.6
	CO床版部	70	2.3	159.9	51.9
	その他	1	1.0	21.0	-
2) 表層材料	密粒度舗装 (57%)	355	2.2	192.4	52.6
	排水性舗装 (21%)	47	1.3	374.5	77.5
	その他	2	2.0	17.0	-
3) 融雪散水装置 の有無	有 (33%)	281	2.2	180.0	44.4
	無 (67%)	123	1.7	288.2	83.6
4) 地域	A地区 (47%)	121	1.7	316.4	84.6
	B地区 (53%)	283	2.2	168.4	43.8
5) 車線	上り	211	2.1	215.6	62.9
	下り	181	2.0	210.0	43.3
	センター	6	1.5	183.7	63.0
	中央帯	6	1.0	221.8	-
6) 平面線形	直線部	288	1.8	214.6	49.9
	曲線部	118	2.3	208.0	66.6
7) 横断位置	わだち部	391	2.1	206.3	53.9
	非わだち部	13	1.1	404.5	68.5
8) 複数回発生	1回	265	1.0	393.9	-
	2回以上	139	4.4	117.7	54.3
合計		404	2.0	212.7	54.0

注) 9) 大型車交通量に関しては連続値として観測される定量的パラメータであり、離散的カテゴリーの設定に恣意性が残るため記載は割愛する。

表-2 ポットホール発生状況の概要 (施工条件)

施工条件	相違	総発生数	平均寿命 (日) (不完全サンプル含む)	平均寿命 (日) (不完全サンプル除外)
10) 水の除去	有	90	240.0	37.5
	無	314	204.9	60.3
11) 泥の除去	有	93	305.1	46.5
	無	311	185.1	56.5
12) 融雪散水の有無	有	53	132.5	10.1
	無	351	224.8	62.6
13) 締固め方法	人力	211	116.3	45.9
	作業車転圧	98	342.3	88.3
	機械	90	306.5	41.4
	その他	5	53.6	32.3
14) 常温混合物の材質	カットバック系	76	237.6	66.3
	非カットバック系	328	206.9	51.1
合計		404	212.7	54.0

注) 15) 施工時気温, 16) 施工時間, 17) ポットホールの面積, 18) 深さに関しては連続値として観測される定量的パラメータであり、離散的カテゴリーの設定に恣意性が存在するため割愛する。

点検シートを作成し、それらの項目に対して現場で情報収集を行った。また、本研究では10種類の常温混合物(カットバックアスファルト系3種類(開粒度タイプ2種類, 密粒度タイプ1種類), 改質アスファルト系6種類(開粒度タイプ4種類, 密粒度タイプ2種類), セメント系補修材1種類)を選定し、実際の補修時には10種類の常温混合物をほぼ無作為抽出に近い形で適用した。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状況と常温混合物の平均寿命を

整理している。全体的な特徴として、対象期間内にポットホールは199地点に合計404個発生し、それらの応急補修として用いられた常温混合物の平均寿命は、不完全サンプルを含む場合は212.7日、不完全サンプルを除外する場合は54.0日であった。ただし、このような不完全サンプルの取り扱いについては留意が必要であるが、この点に関しては、4.(3)で述べる。

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状況と常温混合物の平均寿命に着目する。本研究では構造条件として、1) 構造物(土工部 or CO床

版部), 2) 表層材料(密粒度舗装 or 排水性舗装), 3) 融雪散水装置(有 or 無), 4) 地域(A 地区 or B 地区), 5) 車線(上り or 下り), 6) 平面線形(直線部 or 曲線部), 7) 横断位置(わだち部 or 非わだち部), 8) ポットホール複数回発生(1 回 or 2 回以上), 9) 大型車交通量を設定した. 同表には, 1)~8) の構造条件に対して, ポットホールの総発生数, 同一地点における平均発生回数, 常温混合物の平均寿命を記載している. なお, 9) 大型車交通量のように連続値として観測する定量的パラメータに関しては, 離散的カテゴリーの設定に恣意性があり, カテゴリー分割により結果が大きく変動するために記載しないこととした. ハザード解析においては, 連続変数として取り扱うため, 離散的カテゴリー分割の恣意性の問題は回避できることを付記しておく. ここで, 条件 2) の表層材料に着目すると, 対象区間の道路延長のうち, 密粒度舗装の割合は 57% と排水性舗装の 21% と比較して大きい, ポットホールの総発生数は約 7.5 倍 (355/47) と顕著に大きい. 一方, 条件 1) の構造物の場合には, 土工部のポットホール総発生数が CO 床版部よりも顕著に多いことが確認できるが, これはそもそも道路延長に占める土工部の割合が多いことに起因すると考えられる. 実際に両者(土工部と CO 部)の同一地点における平均発生回数や平均寿命には有意な差異は認められない. また, 表層材料以外では, 3) 融雪散水装置, 4) 地域, 7) 横断位置で発生回数, 平均寿命のいずれかで顕著な相違が確認できる. ただし, 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. このように, 各条件間はずしも互いに独立関係にあるとは言い難く, この点については 4.(2) で詳述する.

つぎに, 施工条件に着目する(表-2). 今回, 施工条件として, 10) ポットホール内の水の除去, 11) 泥の除去, 12) 融雪散水の有無, 13) 常温混合物の締固め方法, 14) 常温混合物の材質(カットバック系 or 非カットバック系), 15) 施工時気温, 16) 施工時間, 17) ポットホールの面積, 18) ポットホールの深さを記録した(この他に天候等も記録している). なお, 10) は常温混合物による補修直前にポットホール内の水を除去したか否か, 12) は補修直前に融雪散水がポットホール内に存在していたか否か, を識別する変数である. 全体的な傾向として, 構造条件(表-1)と同等以上に, 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, 融雪散水の存在が常温混合物の耐久性に影響を及ぼすことが平均寿命(不完全サンプル除外)の比較を通して理解できる. このこと

から, 施工時の時間的な制約や施工環境により, 常温混合物が持つ本来の性能を発揮できないケースが存在していることがわかる. 一方で, 施工条件を満足するケースでは現状の常温混合物でも積雪地において十分な耐久性を発揮し得ることも示している. ただし, 本節で述べた平均寿命は, 不完全サンプルの取り扱いを簡素化し, 平均寿命を確定的に算出している. ハザードモデルのような確率モデルを用いた詳細な統計分析を行う必要があることは言うまでもない.

(2) 1 次分析

4.(1) で示したように本研究では常温混合物の耐久性に影響を及ぼす要因として 9 つの構造条件, 7 つの施工条件を選定している. しかし, これらの要因の中には相関関係を無視しえない要因が存在している可能性がある. そこで, はじめに構造条件と施工条件の全組み合わせに対する相関係数を算出した. 構造条件と構造条件の相関係数を算出する際には, 地点を 1 サンプル, 構造条件と施工条件および施工条件と施工条件の相関係数を算出する際には施工回数を 1 サンプルと数えた. その結果, 前者は 199 サンプル, 後者は 404 サンプルとなった. ハザードモデルに相関関係が大きい変数が含まれるとパラメータの安定的な推計値が得られない. 表-3 は説明変数間の相関関係を示しているが, 説明変数間に無視しえない相関関係が存在していることが読み取れる. 中には, 相関係数が 0.50 以上となる説明変数のペアが存在している. たとえば, 4) 地域に着目する(相関係数を算出するに際して, 地域のような定性的パラメータに関しては 4.(3) に示すようなダミー変数として扱った). 地域は表-1 において, A 地区と B 地区で常温混合物の平均寿命(不完全サンプル除外)に約 2 倍の相違が確認できた. しかし, 地域は表層材料と相関が強く(相関係数: -0.577), さらに表層材料は融雪散水装置の有無とも相関が強い(相関係数: 0.604)ことが読み取れる. 相関係数のみに基づいて因果関係を明確に説明することはできないが, 一般的に考えると, これは常温混合物の耐久性に地域差があるのではないと考えられる. すなわち, B 地区では密粒度舗装区間の割合が大きく, それに伴って融雪散水装置の設置件数が多くなっていることが主たる要因であると推察できる. したがって, 表-1 を一見すると, ポットホールの発生状況が 4) 地域の違いで顕著に異なっていると読み取れるが, 「地域」は融雪散水装置の有無, あるいは表層材料の代理変数となっている可能性が大きいことがわかる. また, 同様の理由で, 地域と相関が強い 9) 大型車交通量もこれらの代理変数となっている可能性がある(結果の記述は割愛するが, 4.(3) の検討において, 実際に大型車交通量に関しては, 交通量が少ない

表-3 条件変数間の相関係数 (相関係数 0.4 以上)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1) 構造物	1																	
2) 表層材料	-	1																
3) 融雪散水装置	-	0.604	1															
4) 地域	-	-0.577	-0.409	1														
5) 車線	-	-	-	-	1													
6) 平面線形	-	-	-	-	-	1												
7) 横断位置	-	-	-	-	-	-	1											
8) 複数回発生	-	-	-	-	-	-	-	1										
9) 大型車交通量	-	-0.405	-	0.721	-	-	-	-	1									
10) 水の除去	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1								
11) 泥の除去	-	-	-	-	-	-	-	-	0.640	-	1							
12) 融雪散水	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1						
13) 締固め方法	-	-	-	0.840	-	-	-	-	0.698	-	-	-	1					
14) 材質	-	-	-	0.667	-	-	-	-	0.465	-	-	-	0.437	1				
15) 気温	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1			
16) 施工時間	-	-	-	-0.506	-	-	-	-	-	-	-	-	-0.430	-0.422	-	1		
17) 面積	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	
18) 深さ	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1

方が常温混合物の耐久性が低下するという実務的な常識と反対の分析結果を得た)。さらに、4) 地域と13) 締固め方法、14) 常温混合物の材質、16) 施工時間との間で相関係数 0.5 以上の強い相関関係を見出すことができた。同様に、相関係数が 0.5 未満の説明変数のペアに関しても、その内容を考察することにより、可能な限り相関性が少なく、しかもポットホール発生に直接的に影響を与えるような変数の組み合わせをハザードモデルの説明変数群の候補として採用することが重要である。そこで、次節において、ポットホール発生に各変数がどのような影響を及ぼすのかを検討するために、各変数を単一の説明変数としてとりあげ、ハザードモデルを推計した結果を示す。

つぎに、月別のポットホールの発生個数および平均寿命を図-3 に示す。棒グラフが発生個数で、折れ線グラフが平均寿命である。発生数に着目すると、2月を筆頭に冬季(1月~2月; 図中の赤囲み)にポットホールが突出して発生していることがわかる。また、6月と7月にも発生数がやや増加傾向にあるが、これは梅雨時期に対応しているものと考えられる。したがって、ポットホールの発生に水が大きく影響していることが同図からも読み取れる。ただし、常温混合物の平均寿命(不完全サンプル含む、除外の両方)を確認すると、冬季や梅雨時期とそれ以外で特段の傾向を読み取ることはできない。

以上で確認したように、1) 構造条件や施工条件で単純集計しても、各要因間の相関関係を無視し得ないことが多い、2) 月別集計では、ポットホールの発生個数に関しては傾向が読み取れるものの、常温混合物の寿命(耐久性)に関する傾向は読み取れない、といった問題が発生する。したがって、常温混合物の耐久性評価のためには、より詳細な統計分析を実施する必要がある。

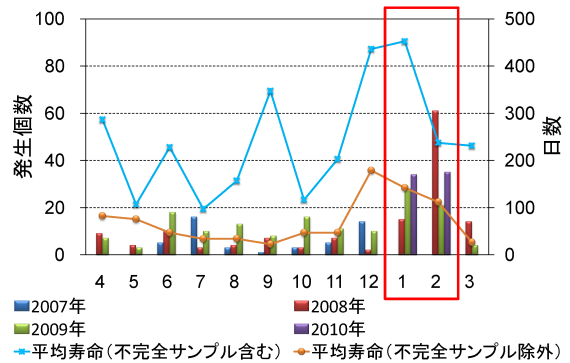


図-3 ポットホール月別発生状況

(3) ハザードモデルの推計 (1 変数のみを考慮)

常温混合物に対する点検、応急補修後の経過履歴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特性変数(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) 構造物: x_1^2 , 2) 表層材料: x_2^2 , 3) 融雪散水装置の有無: x_3^3 , 4) 地域: x_4^4 , 5) 車線: x_5^5 , 6) 平面線形: x_6^6 , 7) 横断位置: x_7^7 , 8) ポットホールの複数回発生: x_8^8 , 9) 大型車交通量: x_9^9 , 10) 施工時のポットホール内の水の除去: x_{10}^{10} , 11) 泥の除去: x_{11}^{11} , 12) 融雪散水の有無: x_{12}^{12} , 13) 締固め方法: x_{13}^{13} , 14) カットバック系: x_{14}^{14} , 15) 施工時気温: x_{15}^{15} , 16) 施工時間: x_{16}^{16} , 17) ポットホールの面積: x_{17}^{17} , 18) ポットホールの深さ: x_{18}^{18} とした。これらのうち、大型車交通量: x_9^9 などの特性変数は定量的パラメータであり、各パラメータの最大値が 1 となるように基準化を行った。一方、構造物: x_1^2 などの特性変数は定性的パラメータとなり、以下のようにダミー変数を設定した。

$$x_2^1 = \begin{cases} 1 & \text{土工部} \\ 0 & \text{CO床版} \end{cases} \quad (13a)$$

$$x_2^2 = \begin{cases} 1 & \text{密粒度舗装} \\ 0 & \text{排水性舗装} \end{cases} \quad (13b)$$

$$x_2^3 = \begin{cases} 1 & \text{融雪散水装置 有} \\ 0 & \text{融雪散水装置 無} \end{cases} \quad (13c)$$

$$x_2^4 = \begin{cases} 1 & \text{A 地区} \\ 0 & \text{B 地区} \end{cases} \quad (13d)$$

$$x_2^5 = \begin{cases} 1 & \text{上り} \\ 0 & \text{下り} \end{cases} \quad (13e)$$

$$x_2^6 = \begin{cases} 1 & \text{直線} \\ 0 & \text{曲線} \end{cases} \quad (13f)$$

$$x_2^7 = \begin{cases} 1 & \text{わだち部} \\ 0 & \text{非わだち部} \end{cases} \quad (13g)$$

$$x_2^8 = \begin{cases} 1 & \text{ポットホールの複数回発生 有} \\ 0 & \text{ポットホールの複数回発生 無} \end{cases} \quad (13h)$$

$$x_2^{10} = \begin{cases} 1 & \text{施工時の水の除去 有} \\ 0 & \text{施工時の水の除去 無} \end{cases} \quad (13i)$$

$$x_2^{11} = \begin{cases} 1 & \text{泥(埃)の除去 有} \\ 0 & \text{泥(埃)の除去 無} \end{cases} \quad (13j)$$

$$x_2^{12} = \begin{cases} 1 & \text{融雪散水 有} \\ 0 & \text{融雪散水 無} \end{cases} \quad (13k)$$

$$x_2^{13} = \begin{cases} 1 & \text{締固め方法 作業車で転圧} \\ 0 & \text{締固め方法 人力・機械} \end{cases} \quad (13l)$$

$$x_2^{14} = \begin{cases} 1 & \text{カットバック系} \\ 0 & \text{非カットバック系} \end{cases} \quad (13m)$$

これらのうち、ポットホールの複数回発生： x_2^8 に関しては、同一地点におけるポットホールの発生回数（常温混合物の剥離回数）であるので、通常は定量的パラメータとして扱うことができる。しかし、図-4に示す事前検討の結果、さらには定性的パラメータとして扱った場合と定量的パラメータとして扱った場合のワイブル劣化ハザードモデルの推計結果の比較を通して、同一地点における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可能性が大きかったために、定性的パラメータとして扱った。具体的に、図-4にはポットホールの発生回数に対する、地点数と平均寿命を示している。ポットホールの総発生回数を見ると、発生箇所数199地点のうち、発生回数1回が約140地点を占める。最高で1地点に33回ポットホールが発生しているケースも確認できるが、複数回発生地点は少数である。また、平均寿命（不完全サンプル含む）に関しては、発生回数が増加するにつれ、短くなる傾向がある。一方で

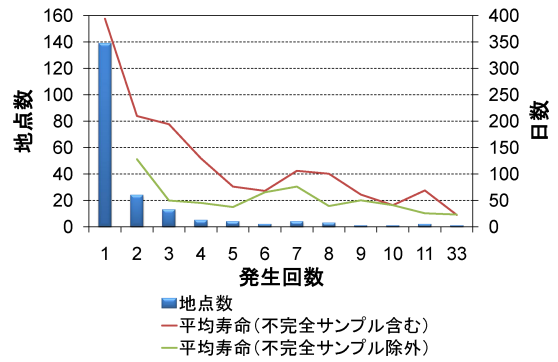


図-4 ポットホールの発生回数と平均寿命

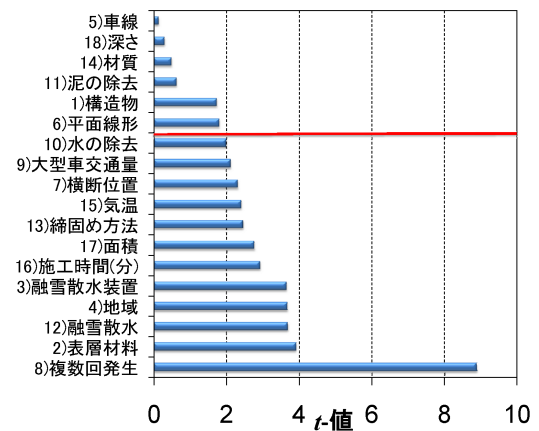


図-5 各特性変数の t-値

平均寿命（不完全サンプル除外）に関してはそれほどの変動は確認できない。

具体的なハザード関数を式(8)に基づき、

$$\theta^j = \beta_1^j + \beta_2^j x_2^j \quad (j = 1, \dots, 18) \quad (14)$$

と表し、1変数のみを考慮したワイブル劣化ハザードモデルを定義した。実際の目視点検データを用いてモデルの推計を18回（18個の特性変数の候補の数だけ）行った。これらのうち、それぞれの特性変数に対応する未知パラメータ β_2^j の t-値が1.96以上（有意水準5%）の特性変数の候補が1変数のみを考慮したワイブル劣化ハザードモデルの特性変数として採用されることとなる。今回の解析において、実際に t-値が1.96以上となった特性変数の候補は図-5に示すように計12個であった。t-値が大きいほど説明力が強いことを意味しており、同表より「ポットホールの複数回発生の有無」が説明力が最も強いことがわかる。また、採用する特性変数の数が同じ場合（今回は1つ）には対数尤度が大きいモデルが実データとの適合性が高いと考えられるが、「ポットホールの複数回発生の有無」は対数尤度に関しても

表-4 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

4) 複数回発生の有無 β_2^8

	α 加速度	β_1^8 定数項	β_2^8 複数回発生
最尤推計量 (<i>t</i> -値)	0.447 (17.5)	-3.55 (-18.2)	1.37 (8.89)
AIC	2486.0		

表-5 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

2) 表層材料 β_2^2

	α 加速度	β_1^2 定数項	β_2^2 表層材料
最尤推計量 (<i>t</i> -値)	0.416 (17.1)	-3.68 (-11.4)	1.17 (3.92)
AIC	2552.9		

表-6 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

12) 融雪散水の有無 β_2^{12}

	α 加速度	β_1^{12} 定数項	β_2^{12} 融雪散水の有無
最尤推計量 (<i>t</i> -値)	0.412 (17.2)	-2.70 (-18.0)	0.695 (3.70)
AIC	2563.1		

最大値を与えた。そこで、当該モデルに対する推計結果を1例として表-4に示す。

表-4の「ポットホールは複数回発生の有無」を特性変数として採用した場合の推計結果に関して、式(14)を考慮すれば、定数項 β_1^8 が負値: -3.55 を取り、 β_2^8 が正値: 1.37 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(寿命が短くなる)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(常温混合物が短時間で剥離する)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、何らかの要因に依存して発生する事象であることを示している。また、加速パラメータ α の値は0.447となっており、常温混合物による補修後、時間の経過とともに、剥離確率(ポットホールの再発生確率)が低下していくことがわかる。さらに表-5~表-8には、図-5の*t*-値が大きい順に表層材料、融雪散水の有無、地域、融雪散水装置の有無に対する推計結果を示すが、表-4と同様の解釈により、密粒度舗装、融雪散水有り、地域B、融雪散水装置有りでの耐久性が低くなることがわかる。なお、加速パラメータに関しては、特性変数として採用されたいずれのモデルにおいても概ね0.4程度であった。また、これら以外の特性変数に対する推計結果に関しては掲載を割愛するが、図-5で*t*-値が有効であった特性変数に関しては次のような要因により常温混合物の耐久性が低下するという結果を得た: 16) 施工時間が長い、17) ポット

表-7 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

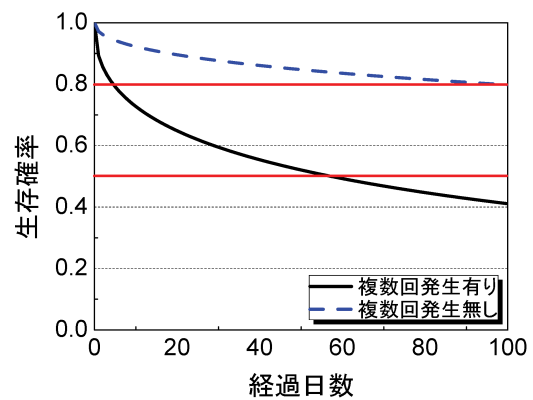
4) 地域 β_2^4

	α 加速度	β_1^4 定数項	β_2^4 地域
最尤推計量 (<i>t</i> -値)	0.418 (17.1)	-2.46 (-16.6)	-0.593 (3.68)
AIC	2560.0		

表-8 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

3) 融雪散水装置の有無 β_2^3

	α 加速度	β_1^3 定数項	β_2^3 融雪散水装置の有無
最尤推計量 (<i>t</i> -値)	0.414 (17.1)	-3.03 (-15.5)	0.591 (3.66)
AIC	2560.2		

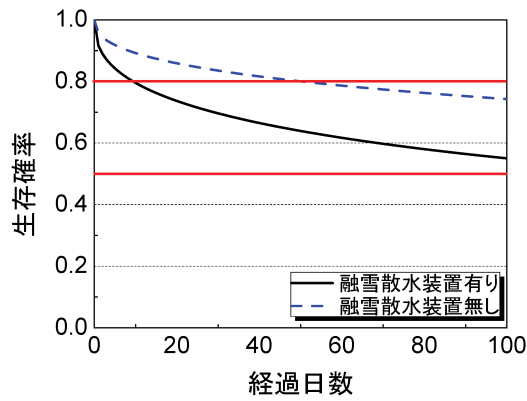


注) 総サンプル数 414 のうち、複数回発生有りは 281 サンプル、複数回発生無しは 123 サンプル。

図-6 常温混合物の耐久性(複数回発生の有無)

ホールの面積が大きい、13) 人力・機械による締固め、15) 気温が低い、7) わだち部、9) 大型車交通量が少ない、10) ポットホール内の水を除去しない。

つぎに、これらのことを視覚的に理解するために、複数回発生に対する推計結果(表-4)を用いて、式(9b)の常温混合物の生存確率を算出する(図-6)。図の横軸は常温混合物による補修後の経過日数である。加速パラメータ 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。これは常温混合物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、ポットホールの複数回発生有りの場合には生存確率が約80%まで低下するのに5日ほどしか要していないのに対して、無しの場合には100日ほど要する。生存確率50%を期待寿命と定義すると、複数回発生有りの場合の期待寿命は約55日となる。複数回ポットホールが発生するような地点に対し



注) 総サンプル数 414 のうち、融雪散水装置有りは 286 サンプル、融雪散水装置無しは 118 サンプル。

図-7 常温混合物の耐久性(融雪散水装置の有無)

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、常温混合物の耐久性が劣っていることは明らかである。図-7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生存確率が約80%まで低下するのに10日ほど必要となるのに対して、装置が設置されていない個所では50日ほど必要であった。また、生存確率が50%となる経過日数が表-1の平均寿命と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、常温混合物が剥離していないサンプル(センサーサンプル)を考慮できないこと、また特異値の影響を強く受けることとなり正確な分析が困難であることがわかる。

(4) 最適モデルの推計

4.(3)では、常温混合物の耐久性に影響を及ぼすと考えられる18個の特性変数の候補を対象として、18ケースのワイブル劣化ハザードモデルの推計を実施した。その結果、12個の特性変数に統計的な有意性を確認することができた。当然ながら、特性変数を同時に複数考慮したワイブル劣化ハザードモデルの推計も可能であり、総合的な耐久性分析を実施する際に、複数の特性変数を考慮した最適なワイブル劣化ハザードモデルを推計する必要がある。そこで、本節では、これら12個の特性変数をベースに、多変数を考慮したワイブル劣化ハザードモデルの推計を実施する。ここで、モデルの最適性を計量するために、AIC⁽¹⁰⁾を導入する。AICは次式で定義することができる。

$$AIC = -2\ln(L) + 2k \quad (15)$$

上式から明らかなように、AICは対数尤度と未知パラメータの数:kによって決定できる。未知パラメータの

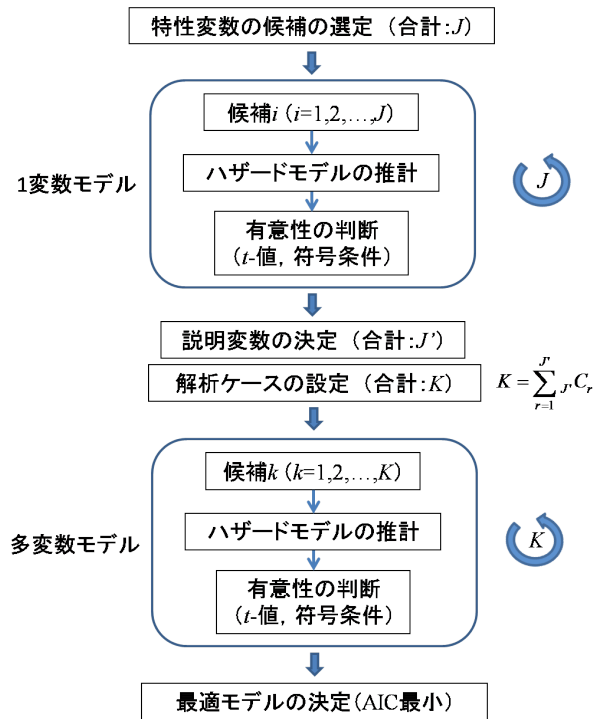


図-8 最適モデルの決定手法

表-9 3) 融雪散水装置と2) 表層材料との関係

	密粒度	排水性	計
融雪散水装置有り	281	0	281
融雪散水装置無し	75	48	123
計	356	48	404

数を増やせば増やすほど、対象とする現象を詳細に説明することができるモデルとなるが、モデルが詳細になればなるほど、獲得したサンプル固有の統計的特性までもモデル化することになり、モデルの汎用性を損ねる。AICは、モデルの精緻さと堅牢性のバランスにより最適なモデルを決定するための指標であり、AICを最小とするモデルが最適モデルとして採用される。最適モデルの決定フローを図-8に示す。以下の実証分析と併せて参照されたい。

はじめに、2変数を考慮したワイブル劣化ハザードモデルについて述べる。4.(2)で述べたように、上記12の特性変数のうち、2)表層材料、4)地域に関しては直接的に、16)施工時間、13)締固め方法、9)大型車交通量については4)地域を介して間接的に、それぞれ3)融雪散水装置の有無と相関性が高いことから対象から除外し、これらの5変数を除いた7変数を対象として以降の解析を進める。特に融雪散水装置と表層材料に関して、密粒度舗装区間と排水性舗装区間に占める融雪散水装置の設置率を表-9に示す。同表より、密粒度舗装区間の約80%で融雪散水装置が設置されているのに対して、排水性舗装区間では0%である。したがって、

表-10 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

8) 複数回発生の有無, 12) 融雪散水の有無

	α	β_1	β_2^8	β_3^{12}
	加速度	定数項	複数回発生	融雪散水
最尤推計量	0.455	-3.70	1.40	0.790
(t-値)	(17.8)	(-18.4)	(9.04)	(4.19)
AIC	2473.3			

表-11 ワイブル劣化ハザードモデルの推計結果

8) 複数回発生の有無, 12) 融雪散水の有無, 3) 融雪散水装置の有無

	α	β_1	β_2^8	β_3^{12}	β_4^3
	加速度	定数項	複数回発生	融雪散水	融雪散水装置
最尤推計量	0.457	-3.93	1.36	0.693	0.363
(t-値)	(17.8)	(-17.1)	(8.76)	(3.60)	(2.19)
AIC	2470.3				

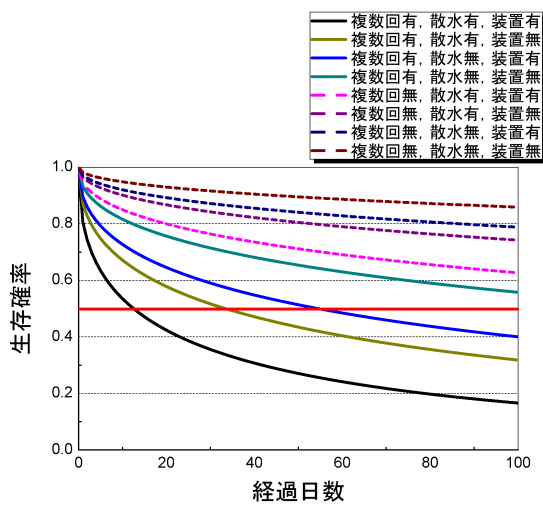


図-9 最適モデルによる常温混合物の耐久性 (8) 複数回発生の有無, 12) 融雪散水の有無, 3) 融雪散水装置の有無

常温混合物の耐久性に水の影響が大きく関与することが従来から指摘されている点を勘案し、今回の分析においては表層材料が融雪散水装置の代理変数となっていると判断した。

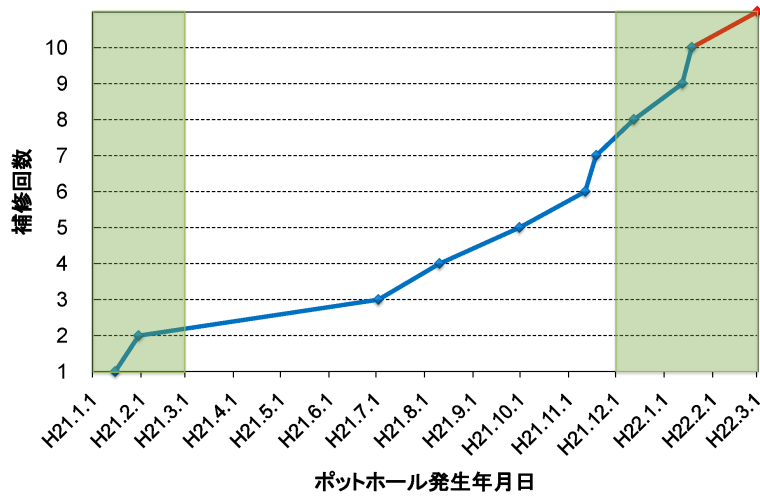
対象とする7変数のうち、2変数を取り出した全ケースについてワイブル劣化ハザードモデルを推計する。これらの中で、t-値および符号条件を満足するものうち、AICが最小となったモデルは、{複数回発生の有無, 融雪散水の有無}で、AIC: 2473.3であった(表-10)。つぎに、考慮する変数の数を3, 4, 5としたときの解析結果について述べる。t-値と符号条件を満足するワイブル劣化ハザードモデルのうち、AIC最小モデルは{複数回発生の有無, 融雪散水の有無, 融雪散水装置の有無}であった。推計結果を表-11に示す。この推計結果をもとに、常温混合物の耐久性を図-9に示す。同図から、ポットホールの複数回発生地点で、融雪散水装置と融雪散水がともに有りの場合には、常温混合物は約

10日ほどで半数50%が剥離する(期待寿命は約10日)という結果が見て取れる。その反対に、ポットホールの初回発生地点で水の影響が無い場合には100日経過時点においても剥離は10%程度にとどまっている。

以上の分析を通して、最適モデルの特性変数として融雪散水の有無と融雪散水装置の有無が採用された。表-3で両者の相関係数は小さい値であったが、実質的に両者は同じことを意味していると考えられる。ポットホールに対する常温混合物の補修時に単に融雪散水が無かっただけで通常は融雪散水が存在しているのか等、条件の詳細を把握する必要はあると考えられるが、いずれにせよ、常温混合物の耐久性に水が大きく関与していることが統計的に実証された。さらに、もう1つの特性変数である、複数回発生に関しては、複数回発生地点に何らかの共通要因が潜在している可能性があるが、本研究では共通要因の把握までは踏み込んでいない。しかしながら、このような場合には表層状態のみならず、舗装構造の健全性も考慮した分析が必要となろう。工学的には極めて重要な課題であるが、本研究の域を大きく超えるために今後の課題としたい。なお、本研究のハザードモデルの推計結果はあくまでも対象地域において適用可能であり、積雪地域全域において同様の結果を保証するものではない。むしろ、本研究の成果は日常の点検を通して獲得できる実務データを用いて、常温混合物の耐久性を統計的評価できることにある点を強調しておく。

(5) 実務的示唆

本研究では積雪地における常温混合物の耐久性を統計的見地から実証的に検証を行った。これまでの成果を通して、実務へフィードバック可能な知見を整理したい。はじめに、施工時にはポットホール内の水を完全に除去する必要がある。これは従来から指摘されていることではあるが、本研究を通して改めてその重要性が



注) 土工部の密粒度舗装区間、直線部のわだち箇所では10回ポットホールが発生している(常温混合物が剥離している)時間履歴を示している。緑色は冬季(1月~2月)を表す。また、赤色の直線部は不完全サンプルであることを意味している。

図-10 ポットホール発生と補修の履歴

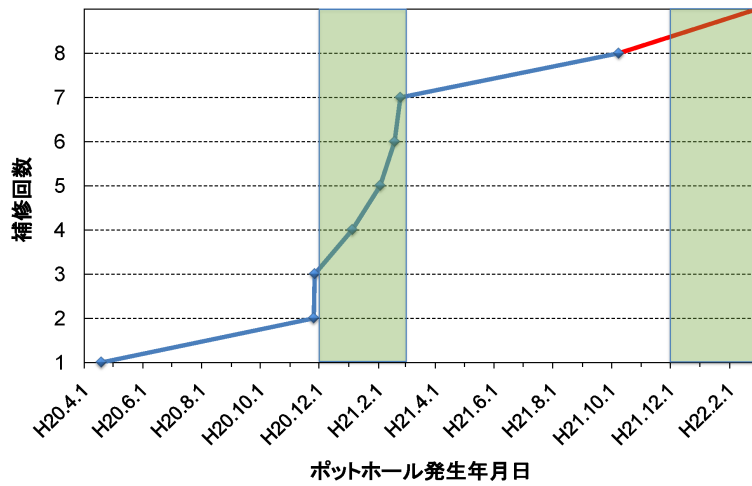
表-12 補修履歴

発生回数	施工時気温(°C)	施工時間(分)	融雪散水の有無の有無	ポットホール内の水の有無	ポットホール内の泥の有無	加熱合材補修時の常温混合物の状況
1	1	20	無し	施工時に除去した	無し	特になし
2	8	20	無し	無し	無し	保温保管
3	21	20	無し	無し	施工時に除去した	特になし
4	26	20	無し	施工時に除去した	無し	特になし
5	18	20	無し	無し	無し	特になし
6	14	20	無し	施工時に除去した	無し	特になし
7	8	20	無し	施工時に除去した	無し	特になし
8	14	20	無し	施工時に除去した	無し	特になし
9	5	20	無し	無し	無し	特になし
10	2	20	無し	無し	無し	特になし

統計的に示された。また、複数回発生の有無を除くと、水の影響を除外することができれば、既存の常温混合物であっても応急補修として十分な耐久性を有していることも判明した(例えば、図-9において複数回発生有の場合であっても、水の影響がなければ100日経過時点での生存確率は50%を超える; 図中の緑実線)。その一方で、今後の積雪地を対象とした常温混合物の開発の方向性を示すならば、水を触媒として硬化する材質、例えばセメント系の常温混合物の開発があげられよう。また、以上のような対処を施したとしても、同一地点においてポットホールが複数回(実務的には3回程度を目安)発生するような場合には、常温混合物を用いた応急的な対策ではなく、恒久的な対策を考える必要がある。

また、常温混合物に対する補修履歴を収集する過程で、混合物を点検車の荷台ではなく、暖房の効いた車内に保管する(以下、保温保管と称する)ことの有効性が指摘された。残念ながら、保温保管の有無を特性変

数として組み入れるだけのサンプルを本研究の期間内に蓄積するまでには至らなかった。そのために、ワイブル劣化ハザードモデルの特性変数として考慮していないが、いくつかの実例を示す。図-10は土工部の密粒度舗装区間、直線部のわだち箇所では10回ポットホールが発生している地点における常温混合物の補修履歴を示している。横軸はカレンダー時刻であり、縦軸は補修回数である。2回目の補修時点での常温混合物のみが5ヶ月ほどの耐久性を示している。さらに、表-12には各補修時点での施工条件などを記載しているが、唯一、常温混合物を保温保管したことが要因のように見受けられることができる。また、図-11はCO床版部の密粒度舗装区間、直線部のわだち箇所では8回ポットホールが発生している地点である。もちろん、同図のように保温保管した場合であっても耐久性が低いケースや、保温保管しない場合であっても耐久性が高いケースも存在する。常温混合物の保温保管に関しては、その有意性が統計的に検証されたわけではなく、補修の施工者



注) CO床版部の密粒度舗装区間，直線部のわだち箇所でも8回ポットホールが発生している(常温混合物が剥離している)時間履歴を示している。緑色は冬季(1月～2月)を表す。また，赤色の直線部は不完全サンプルであることを意味している。

図-11 ポットホール発生と補修の履歴

表-13 補修履歴

発生回数	施工時気温(°C)	施工時間(分)	融雪散水の有無の有無	ポットホール内の水の有無	ポットホール内の泥の有無	加熱合材補修時の常温混合物の状況
1	13	5	無し	施工時に除去しない	無し	特になし
2	9	7	有り	施工時に除去しない	無し	特になし
3	8	9	無し	施工時に除去した	施工時に除去した	特になし
4	3	7	無し	無し	施工時に除去しない	特になし
5	1.8	7	無し	無し	施工時に除去しない	保温保管
6	0.4	10	無し	施工時に除去した	施工時に除去しない	保温保管
7	6	8	無し	無し	施工時に除去しない	保温保管
8	18	10	無し	施工時に除去しない	施工時に除去しない	特になし

や分析者による経験的判断の域を出ない。したがって、この点に関しては今後データを蓄積していく必要があるが、保温保管と言っても、車内に常温混合物を保管しておく程度であるから、まずは実用を試みる価値はあると考えられる。

5. おわりに

本研究では、積雪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常温混合物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、常温混合物の耐久性に影響を及ぼす要因に関しても統計学見地から考察を行った。その結果、積雪地、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、現状の常温混合物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できた。本研究を通じた具体的な知見として以下をあげる。

- ワイブル劣化ハザードモデルの加速パラメータの値が概ね 0.4 であったことから、常温混合物が剥離する(ポットホールが再発生する)確率は時間依存性があることが判明した。また、剥離傾向は、施工直後(数日後)に剥離するものと、長期間(数十日間)耐久性を有するものに大別できる。
- 常温混合物の耐久性に影響を及ぼす要因として、ポットホールが複数回の発生するような地点、融雪散水が滞水しているような地点(融雪散水装置の設置地点)では常温混合物が短期間で剥離してしまう。例えば、これらのいずれの条件を満足するような地点では、施工した常温混合物の50%が約10日以内で剥離することが実証された。
- 実務的には常温混合物の施工時に、水の影響を除去することが重要である。水を除去することで複数回発生地点であったとしても、100日経過時点における常温混合物の生存確率は50%以上である。また、ポットホールが頻発するような地点に対しては、舗装構造そのものを診断する必要がある。

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、積雪地を対象とした舗装マネジメントシステムの開発が必要である。開発に際しては、本研究で得られたポットホールが発生頻度や常温混合物の耐久性を考慮した上で、ライフサイクル費用最小化を達成する最適補修政策を求める方法論が重要となる。その一方で、ポットホールが頻発する箇所では舗装表層部の問題に留まらず、舗装構造を根本的に見直す必要性も生じる。したがって、舗装構造の耐久性も同時に考慮した補修政策の決定手法を内包したマネジメントシステムが不可欠である。第2に、常温混合物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。積雪地における常温混合物は現状でも種々開発されており、今後も新しい常温混合物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。実際に本研究の適用事例で示したように、基本的にどの道路区間であっても構造特性、環境条件が異なる上に、常温混合物の施工条件も個々で異なる。同一条件下で複数案の比較検討を実施することは限りなく不可能に近い。これは通常の土木構造物を対象とした試験施工でも言えることであり、このような社会実験法の確立が求められる。第3に、積雪地に対応した常温混合物の開発である。融雪や散水などの厳しい路面条件においても耐えうる常温混合物が求められる。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常温混合物が必要である。既述したように、本研究は常温混合物の開発そのものを目的とした研究ではない。しかしながら、本研究で得られた知見を蓄積することで、積雪地に適した常温混合物の開発の方向性を定める基礎資料となると期待できる。

なお、本研究は新都市社会技術融合創造研究会「積雪寒冷地における舗装の耐久性向上及び補修に関する研究プロジェクト(プロジェクトリーダー:小林潔司)」の活動成果の一部である。実測データを用いた統計分

析を実施するにあたり、国土交通省近畿地方整備局道路管理課および豊岡河川国道事務所 八鹿国道維持出張所より多大な援助を頂いた。また、研究プロジェクトのメンバーである、大林道路(株)、金下建設(株)、昭和瀝青工業(株)、シンレキ工業(株)、住友大阪セメント(株)、大成ロテック(株)、日進化成(株)、ニチレキ(株)、光工業(株)の各社からは常温混合物の提供や、本研究に対する実務的見解を賜った。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。また大阪大学大学院・起塚亮輔氏には解析の一部を補助して頂いた。

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) 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, 建設マネジメント論文集, 土木学会, Vol.15, pp.239-248, 2008.
- 9) Lancaster, T.: *The Econometric Analysis of Transition Data*, Cambridge University Press, 1990.
- 10) 坂元慶行, 石黒真木夫, 北川源四郎: 情報量統計学, 共立出版, 1983.

(2010. 7. 20 受付)

DURABILILTY ANALYSIS OF POTHOLE PATCHING MIXTURE IN SNOWY REGIONS

Kiyoshi KOBAYASHI, Kiyoyuki KAITO, Eigo FUJIWARA, Hisashi MORI,
Shingo YAMAMOTO, Yoshiyuki FUJIOKA and Masaru YAMADA

On the pavement in snowy regions, 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 potholes. Usually, for the potholes, 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 works. Consequently, as for the maintenance in snowy regions, it is important to develop the optimal repair method or patching mixture material for such regions. In order to provide the basic investigation of this issue, this study statistically evaluates the durability of the patching mixtures of potholes. Concretely, the occurrence process of potholes 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 potholes on the national road in snowy regions and monitoring data after repairing them.