

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と
補修に関する研究プロジェクト

2008 年 1 月

1. 研究概要

道路舗装は、安全で快適な走行を行うために必要な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必要とされる。そのため、道路管理者は道路利用者に一定レベルのサービスを提供するために道路の維持管理が重要な課題となっている。しかし、道路ストックの増大・老朽化、限られた予算、道路利用者のニーズの高度化などさまざまな制約がある中で、道路構造物の効率的な維持管理が求められている。

また、平成5年に道路構造令及び車両制限令が改正され、20トンを超える車両の通行が可能となったことや、景気の回復基調にともない、交通量が増加している状況が見られ、道路に対する荷重の負担は大きくなっていると考えられる。

このような状況により、予算が縮減されている中でこれまでの対症療法的な修繕（切削オーバーレイ、打換えなど）ではなく、計画的な予防的維持（シール材注入工法など）や耐久性の高い舗装構造に対する必要性が高まっている。予防的維持は、破損が軽微なうちに維持を行うことによって、舗装の寿命を延ばし、多額の費用を投じる修繕工事の回数を減らし、ライフサイクルコストを低減することが期待されている。

積雪寒冷地においては、冬季の除雪対策としての融雪（散水）により、小さなひび割れに水が入り、凍結膨張してひび割れを成長させたり、ポットホールを発生させるなど舗装の損傷原因の1つとなっている。ポットホールに関しては、それが小さいものであっても、車両の通行に伴い成長しパンクや事故の原因

となっている。また、近年にみられる集中豪雨、豪雪などにより舗装がダメージを受け易い状況も生じている。こうした中で舗装に起因する事故を防ぐためにも、適切な維持管理手法の確立が急務となっている。

本研究では、積雪寒冷地の現状に即した舗装の維持管理手法の構築を目的として、補修工法・材料などの評価方法を検討するとともに、試験施工を行い、その効果や影響を確認するための社会実験の方法について検討を行う。その結果を踏まえて、道路舗装材料、舗装構造の耐久性の向上に対する基礎的な知見をとりまとめることを目的としている。

具体的には、まず、ミクロレベルの研究として、現在積雪寒冷地の冬季における舗装の維持管理上、大きな課題になっているポットホールに対する維持管理方策に関する研究を実施する。そのために、ポットホールの発生メカニズムを整理することを目的として、ポットホールなど、路面の損傷に関する文献の調査、クラックが成長してポットホールになるまでの定点観測などを行う。また、舗装のアセットマネジメントを確立するために、舗装の評価を目的として、補修履歴データの分析、既存の点検データを用いた舗装の劣化曲線算定、データベース項目を検討する。さらに、舗装補修の評価を目的として、試験舗装区間を設定し、民間業者より提案された積雪寒冷地に適応した補修工法・材料を用いて試験施工を行う。その箇所を定点観測するとともに、工法、材料の評価軸（耐久性、施工性、コスト、保存性など）の検討を行う。さらに、マクロレベルの研究として、舗装材質、舗装構造、および舗装をとりまく社会的、環境的

要因の関連関係について、データベース（豊岡河川国道の既存データ，研究が進んでいる北陸地方整備局等のデータ）に基づいて照査し，ライフサイクル費用の低減に資するような，ポットホールを含めた舗装の維持管理政策について検討する．これら 2 つの研究テーマは互いに密接に関係しており，本研究会ではミクロレベルでの検討を先行的に進めるが，そこで得られた知見は常にマクロレベルにおける舗装の長期的な維持管理方策の視点から舗装構造などについて再検討し，現実の舗装アセットマネジメントの高度化に資するよう

2. 研究フロー

平成 18～20 年度は評価，マネジメント，舗装構造の検討のために既存資料を用いた検討を行う．ポットホールなど日常的に発生する路面損傷に関する文献の調査や，クラックが成長してポットホールになるまでの定点観測からポットホールの発生メカニズムを整理する．また，補修履歴データ，既存の点検データを用いた舗装の劣化線算定，ライフサイクルコスト算出，データベース項目の整理などを行い，アセットマネジメントを構築するための基礎的な検討を行う．さらに，路面の損傷に対し日常的に対応しているデータの蓄積のため，試験舗装区間を選定し試験施工を実施する．その箇所を定点観測し，積雪寒冷地に適応した舗装構造，補修工法，舗装材料の効果について調査する．さらに，工法，舗装材料の評価軸（耐久性，施工性，コスト，保存性など）の検討を行う．また日常的な維持管理を考慮した，舗装のマネジメントシステムについて検討する．

な知見として取りまとめることとする．

これらの検討結果を用いて，舗装構造・材料・工法ごとの性能カルテ作成方法を検討し，社会実験の方法論の検討を行い，近畿地方整備局における社会実験の方法を確立する．また，日常的な維持管理を考慮したマネジメントシステムについて検討を試みる．

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が管轄する道路を適用事例として，積雪寒冷地域における維持管理業務への適用を試みる．

平成 21 年度は，舗装構造・補修工法・舗装材料に関する性能評価から性能カルテ作成方法，アセットマネジメントシステムの構築として計画的な維持管理を行うためにライフサイクルコストの分析より必要な予算について検討を行う．さらに，本研究で行った社会実験をもとに，舗装設計・管理手法の見直しを検討して，近畿地方整備局におけるこれらの社会実験の方法について基準を検討する．

平成 19 年度ではポットホールのデータ収集と常温合材を評価するための指標の検討のために室内試験を実施している．

本研究のフローを図-1 に示す．

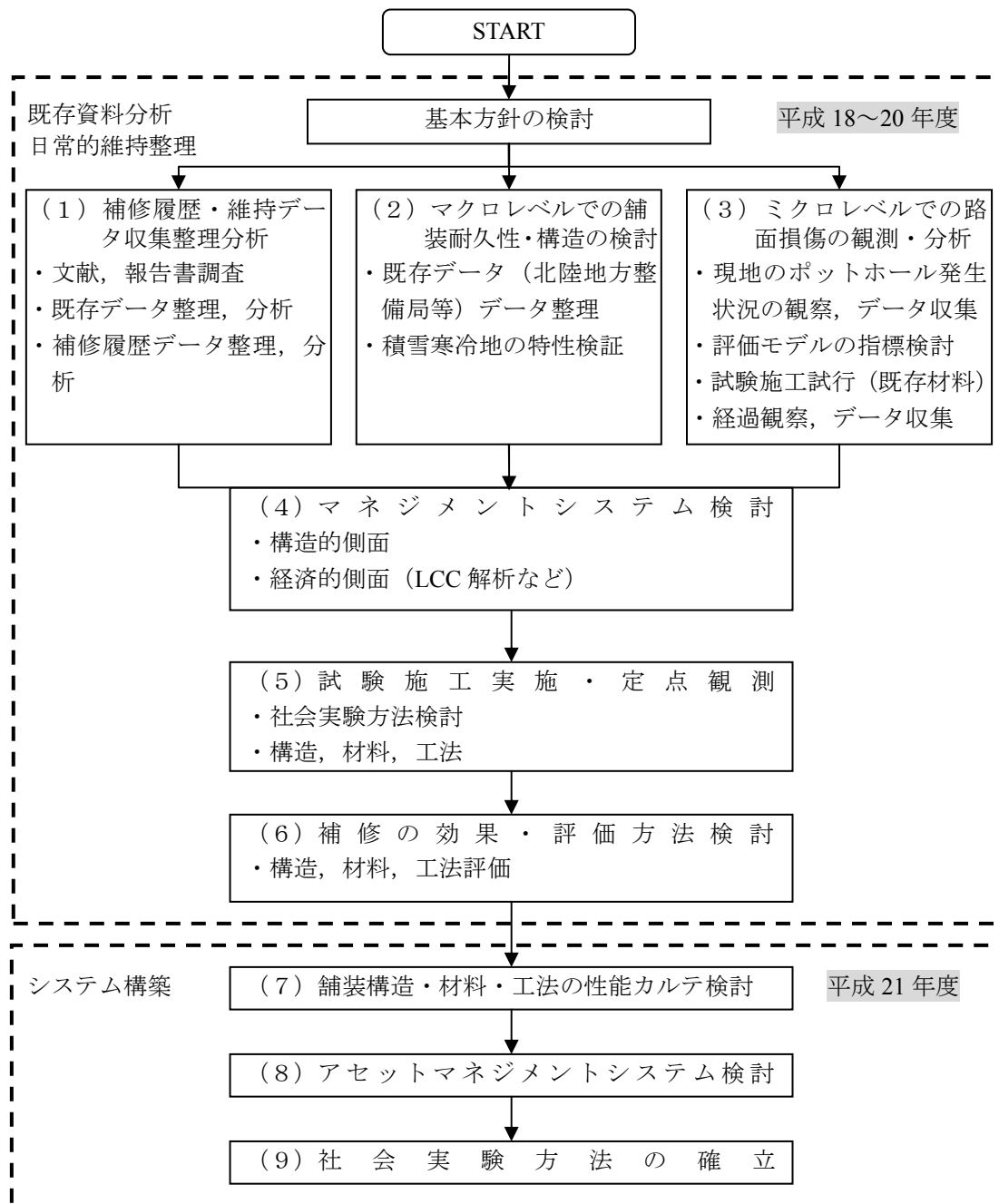


図-1 研究のフロー

3. ポットホールの発生メカニズム、試験施工と室内評価試験について

3-1. ポットホールの実態

阪神高速道路公団（現 阪神高速道路株式会社）における調査では、平成5年度のアスファルト舗装の破損の発生数681カ所のうち、ポットホールは239カ所であった。

発生状況は、道路勾配が水平部の箇所の高い頻度で発生しており、この原因が排水の悪い現場条件に起因するものと考えられている。この結果、使用する混合物は、そのほく離抵抗性を考慮する必要があると結論づけている。

3-2. ポットホールの発生原因

ポットホールの発生原因は、図-2のように交通荷重による繰り返し応力を受けて、雨水がアスファルトと骨材の間に徐々に浸入し、骨材が結合力を失い破壊することによる。つまり、図-3のように骨材に交通荷重Pが作用すると、間隙水圧によりアスファルトが徐々にその上部より排出されるために発生するもので、欧米ではStripping、わが国では剥離と呼ばれている。

3-3. ポットホールを発生させる要因

ポットホールの代表的な発生要因を以下に示す。

①繰返荷重

- ・大型交通量の大小
- ・車線の横断勾配による負荷（谷側）

②道路形状等

- ・カーブ区間
- ・交差点部

③舗装の滞水

- ・排水状況（目詰り・水平区間）
- ・降雨量
- ・下層の透水条件（Co床版 or As舗装）

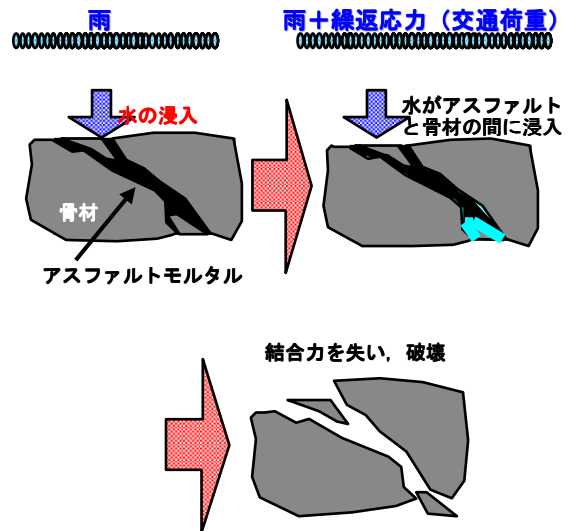


図-2 ポットホールの発生原因

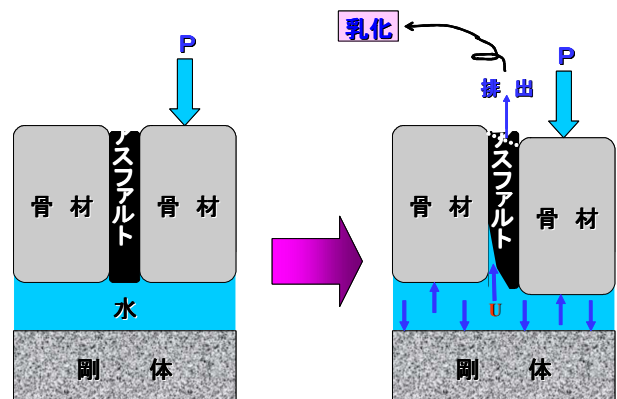


図-3 剥離のメカニズム

3-4. ポットホールの補修方法と課題

ポットホールの補修方法は、通常、持ち運びやすいように袋詰めになった常温アスファルト混合物を直接ポットホールに埋め、軽く転圧することにより仮復旧されることが多い。

しかし、積雪寒冷地では融雪を目的とした散水が常時実施されているケースが多く、仮復旧作業もポットホールに水が充満した条件下で実施されるため、仮復旧後3～4日で補修箇所が破損して再びポットホールが発生するケースもあることが大きな課題である。

3-5. ポットホール調査・補修帳票

そこで、図-4のような『ポットホール調査・補修帳票』を作成し、以下のデータベースを作成するとともに、図-5に示される使用限界レベルを設定する。

- ①ポットホールの発生場所および日時
- ②ポットホールの発生要因の詳細
- ③常温補修材料による補修日時とその種類
- ④仮復旧作業状況の詳細
- ⑤仮復旧後の経時観察（剥離面積・剥離深さ）

3-6. 試験施工の実施

平成19年2月、平成19年10月に2回の試験施工を実施した。2月の実施場所は、図-6～8に示す国道9号線関宮1の区間である。

この区間を選定した理由は、①雪寒地域の条件が厳しく、散水融雪施設が整備されていること、②登坂車線が整備されているため、試験施工による不具合が発生しても緊急時の対応が比較的容易であること、③CCTVIによる監視範囲内であるため、日常的に監視が可能であることが挙げられる。

試験施工における模擬ポットホールの位置は、図-9のように登坂車線がある上り走行車線の負荷の大きい谷側車輪部に設置した。設置方法は、切削機で路面を深さ4cm、幅2mに切削した後、軽く清掃した。

評価する常温アスファルト混合物は6種類、試験区間は約22m、また切削による段差は安全を考慮し5%の擦り付けを行うものとした。

その後、この模擬ポットホールを写真1～7のように常温アスファルト混合物で補修した。

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	区	市町村	道路番号
	4	近畿	近畿
道路情報	道路種別	道路幅員	道路名称
	140	140	近畿
補修状況	補修箇所	補修材料	補修方法
	※ 土工部	※ 砕石部	※ 砕石部
補修日時	補修日時	補修材料	補修方法
	2007/02/13	2007/02/13	2007/02/13
補修後の状況	補修後の状況	補修後の状況	補修後の状況
	2007/02/13 14:15:00	2007/02/13 14:15:00	2007/02/13 14:15:00
補修後の状況	補修後の状況	補修後の状況	補修後の状況
	2007/02/13 14:15:00	2007/02/13 14:15:00	2007/02/13 14:15:00

図-4 ポットホール調査・補修帳票

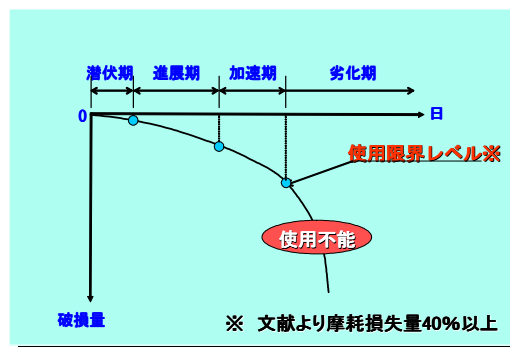


図-5 使用限界レベルの設定

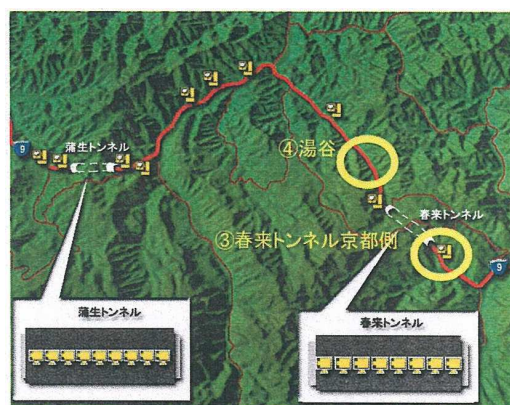


図-6 プレ試験施工場所の地図



図-7 プレ試験施工場所の地図

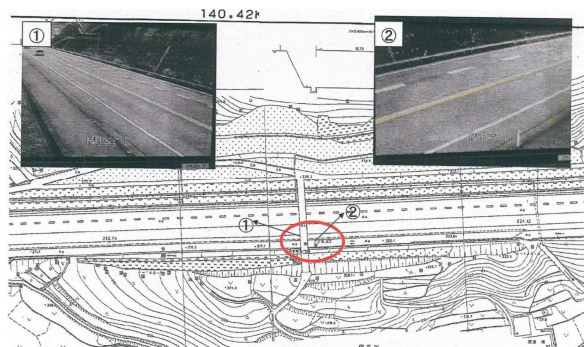


図-8 プレ試験施工場所の全体図

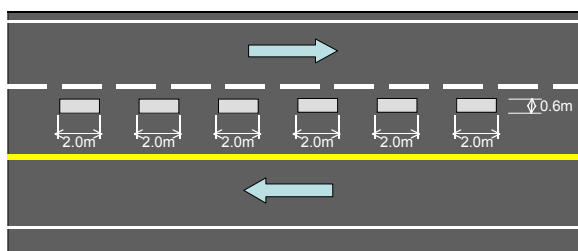


図-9 模擬ポットホールの位置図



写真-4 常温アスファルト混合物の転圧状況



写真-1 模擬ポットホールの全景



写真-5 散水車による模擬散水状況



写真-2 模擬ポットホールの詳細



写真-6 常温アスファルト混合物による補修全景



写真-3 常温アスファルト混合物の敷均状況



写真-7 道路勾配の測定

試験施工の結果は施工条件も良く、プレートを用いて締固めを行ったことなどにより、3月末に補修が行われるまで常温合材のはく離などはなく健全な状態を保つことができた。

平成19年10月に試験施工を実施した場所は図-10に示す道の駅ハチ北（駐車場内）である。本試験施工は室内試験で常温補修用混合物の物性を把握するときに破損と関連があると思われる締固め度を現地の施工方法で確認し、室内試験へ反映させるために行った。

試験施工における模擬ポットホールは図-11のように400×450×50mm、400×500×80mmの2種類の深さを設定し、舗装の深さと締固め度の関係を把握できるようにした。

工区1（補修材A、プレートによる締固め）と工区2（補修材B、作業車による締固め）で日常作業で補修を行っている材料と締固め方法を用いて施工した（写真-8、9参照）。さらに日常作業よりも入念に締固めを行い締固め方法の違いによる比較を行った。

1週間後に試験施工箇所から供試体を採取し、密度測定を行った結果は入念な締固めによる補修箇所ではポットホールの深さによる密度の差が通常作業箇所よりも小さい結果が得られた。



図-10 試験施工箇所の地図 道の駅ハチ北（駐車場内）

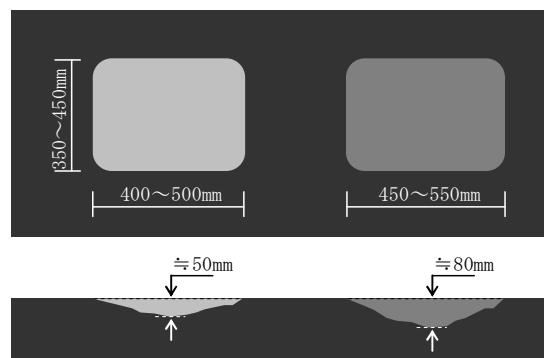
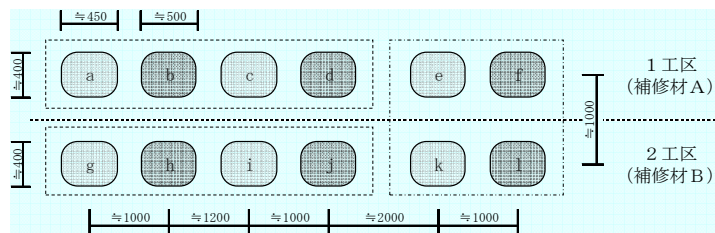


図-11 模擬ポットホールの概要



写真-8 作業車による締固め



写真-9 プレートによる締固め

3-7. 性能評価を考慮した室内試験との相関

試験施工の結果を踏まえ、室内試験での層厚と締固め度の関係について検討を行うこととした。

図-12に示す型枠とモールドを用いた2種類の供試体の作成し密度の測定を行う。この試験結果を踏まえて、今後行う室内試験（ジャイレトリー試験機による締固め試験、ラベリング試験、圧列試験、曲げ試験など）に用いる供試体の作成を行う。

ここでは室内試験の一例として、将来における性能評価の実施の可能性を考慮し、写真-10に示すラベリング試験機の概要を述べる。

この試験機は、積雪寒冷地におけるチェーン走行による舗装の耐久性を模擬したもので、ステップⅠとしてラジアルタイヤ走行を10,000回、ステップⅡとしてスパイクチェーン走行を20,000回の負荷をかけることができる。

試験体数は、同時に12体が可能であるが、供試体の種類が異なる場合等は、供試体間の影響を防ぐために、供試体間に1枚のコンクリート製のダミー供試体を入れるため、同時に6種類の常温アスファルト混合物の評価が可能である。



写真-10 ラベリング試験機

4. 参考資料

参考資料として、ポットホール調査・補修帳票を次頁に示す。さらに既存の論文を以下に示す。

- ・ 小濱健吾，貝戸清之，小林潔司，沢田康夫，生田紀子，2007，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，建設マネジメント問題に関する研究発表・討論会講演集，Vol.25，pp.73-76.

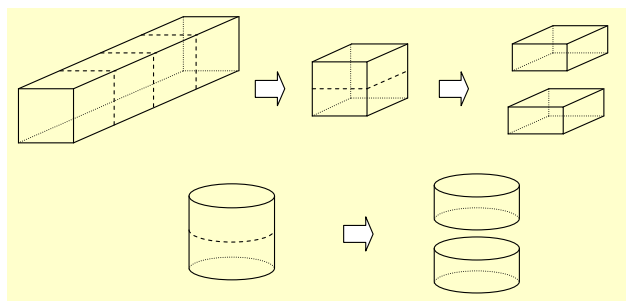
【参考文献】

- ・ 関惟忠，山口良弘，久利良夫：高架道路におけるポットホールの実態について，第21回日本道路会議論文集，pp716-717，1995.
- ・ 三瀬貞，山田優，根来日出晴：アスファルト舗装混合物のはく離に関する現象論，第37回年次学術講演会講演概要集V部門，pp543-544，1982.
- ・ 鎌田修，山田優：アスファルト混合物のはく離抵抗の評価と改善に関する研究，土木学会論文集，No.760/V-63，pp63-74，2004.



a) モールド

b) 型枠



c) 室内締固め度評価試験用供試体分割

図-12 供試体の作成

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
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)	
		☐ 走行車線 ☐ 追越車線	☐ 進行方向右側 ☐ 進行方向左側			
構造物		交差点の有無		道路線形		道路勾配(%)
☐ 土工部 ☐ 鋼床版 ☐ CO床版		☐ 交差点部 ☐ それ以外		☐ カーブ部分 ☐ 直線部分		

補修状況

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)
施工日時		補修材料名(製品名)	
天候	気温(℃)	作業時間(分)	散水状況(融雪用)の有無
			☐ 散水有り ☐ 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	
☐ 施工時に水を除去した ☐ 施工時に水を除去しない ☐ 施工時に水はなかった		☐ 何もしない ☐ 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	
☐ 施工時に泥を除去した ☐ 施工時に泥を除去しない ☐ 施工時に泥はなかった		☐ 施工しやすい ☐ 施工しにくい ☐ ふつう	

施工後の状況

日時1	剥離面積1(m ²)	剥離深さ1(mm)	ひびわれ1	日時2	剥離面積2(m ²)	剥離面積2(mm)	ひびわれ2
			☐ 有り ☐ 無し				☐ 有り ☐ 無し
日時3	剥離面積3(m ²)	剥離深さ3(mm)	ひびわれ3	日時4	剥離面積4(m ²)	剥離面積4(mm)	ひびわれ4
			☐ 有り ☐ 無し				☐ 有り ☐ 無し
日時5	剥離面積5(m ²)	剥離深さ5(mm)	ひびわれ5	日時6	剥離面積6(m ²)	剥離面積6(mm)	ひびわれ6
			☐ 有り ☐ 無し				☐ 有り ☐ 無し
日時7	剥離面積7(m ²)	剥離深さ7(mm)	ひびわれ7	日時8	剥離面積8(m ²)	剥離面積8(mm)	ひびわれ8
			☐ 有り ☐ 無し				☐ 有り ☐ 無し
日時9	剥離面積9(m ²)	剥離深さ9(mm)	ひびわれ9	日時10	剥離面積10(m ²)	剥離面積10(mm)	ひびわれ10
			☐ 有り ☐ 無し				☐ 有り ☐ 無し

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、同一箇所でも再び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

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

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。 $\prime$ 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 $\mathbf{x}$ ）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、

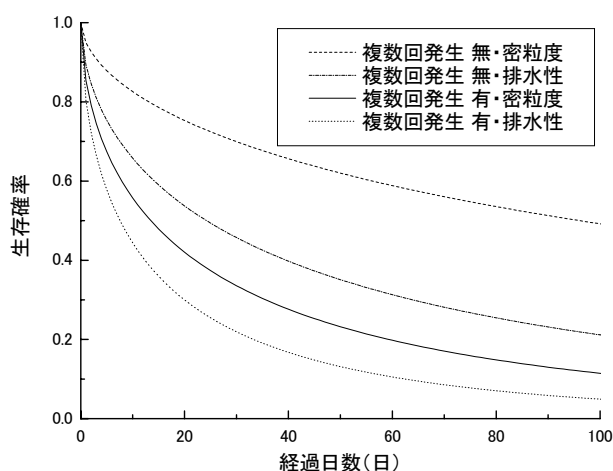
$$x_2 = \begin{cases} 1 & \text{ポットホールの複数回発生 有} \\ 0 & \text{ポットホールの複数回発生 無} \end{cases} \quad (10)$$

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

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 が正值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．