
2008.01.24

新都市社会技術融合創造研究会

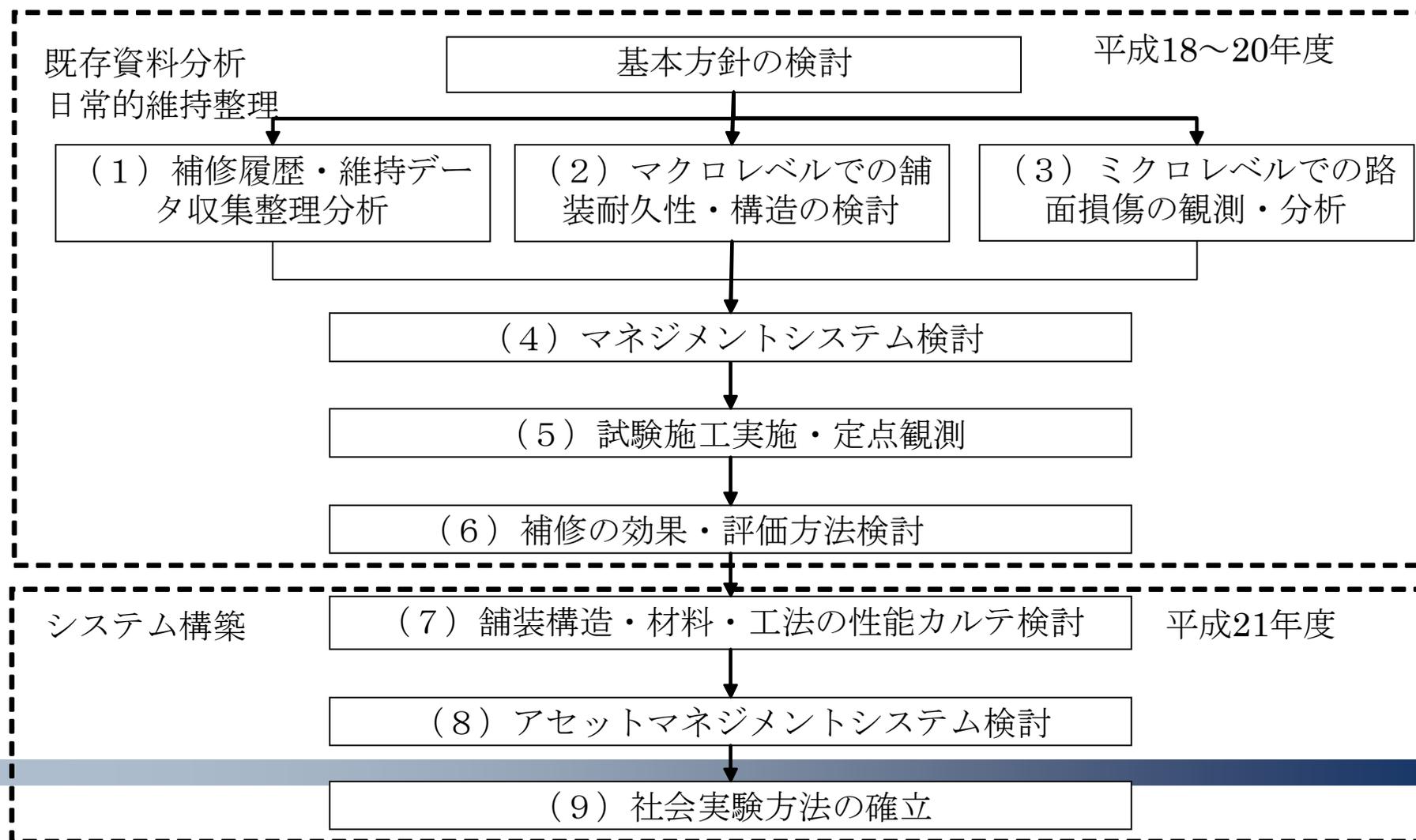
積雪寒冷地における舗装の耐久性向上と
補修に関する研究プロジェクト

京都大学
小林潔司

研究の目的

- 積雪寒冷地の舗装の維持管理手法の構築
 - 補修工法, 材料の評価方法の検討
 - 試験施工, 効果影響の確認のための社会実験方法論の検討
- 舗装材料, 舗装構造の耐久性向上に対する基礎的な知見の取りまとめ

研究の概要



路線概要：福井河川国道(27号)

号線	巡回延長 [km]	区間 数	ポットホール 発生件数 [件]	混雑時平均 旅行速度 [km/h]	平日24時間 大型自動車 交通量[台]
27	109.8	103	207	46.5	5,098

上下線

利用ポットホール発生データ：2006.04.01～2006.10.31

ポットホール発生に関する推計結果

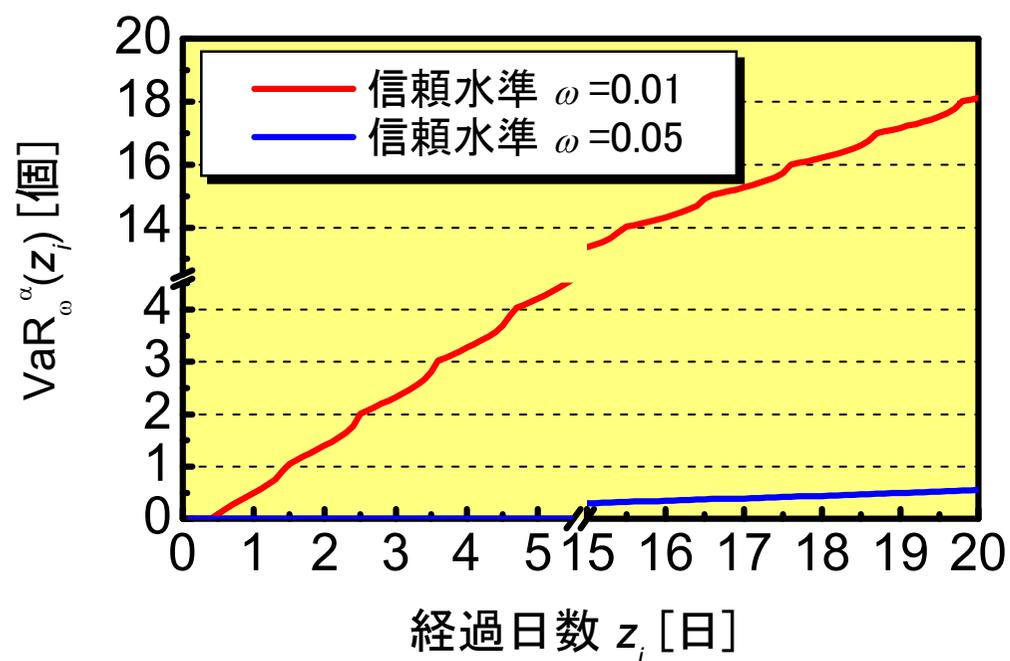
	$\beta 1$ 定数	$\beta 2$ 延長	$\beta 3$ 混雑	$\beta 4$ 大型車	$\beta 5$ 橋梁	$\beta 6$ トンネル	ϕ 分散
最尤推定値	-11.6	2.35	-0.0432	—	—	—	0.0180
t-値	-5.69	8.12	-2.78	—	—	—	5.93
対数尤度	-980.2						
尤度比	0.956						

ポアソンガンマ発生モデル

信頼水準

区間番号86-88（距離標62KP～65KP）

（区間延長1.00km，混雑時平均旅行速度33.5km/h）

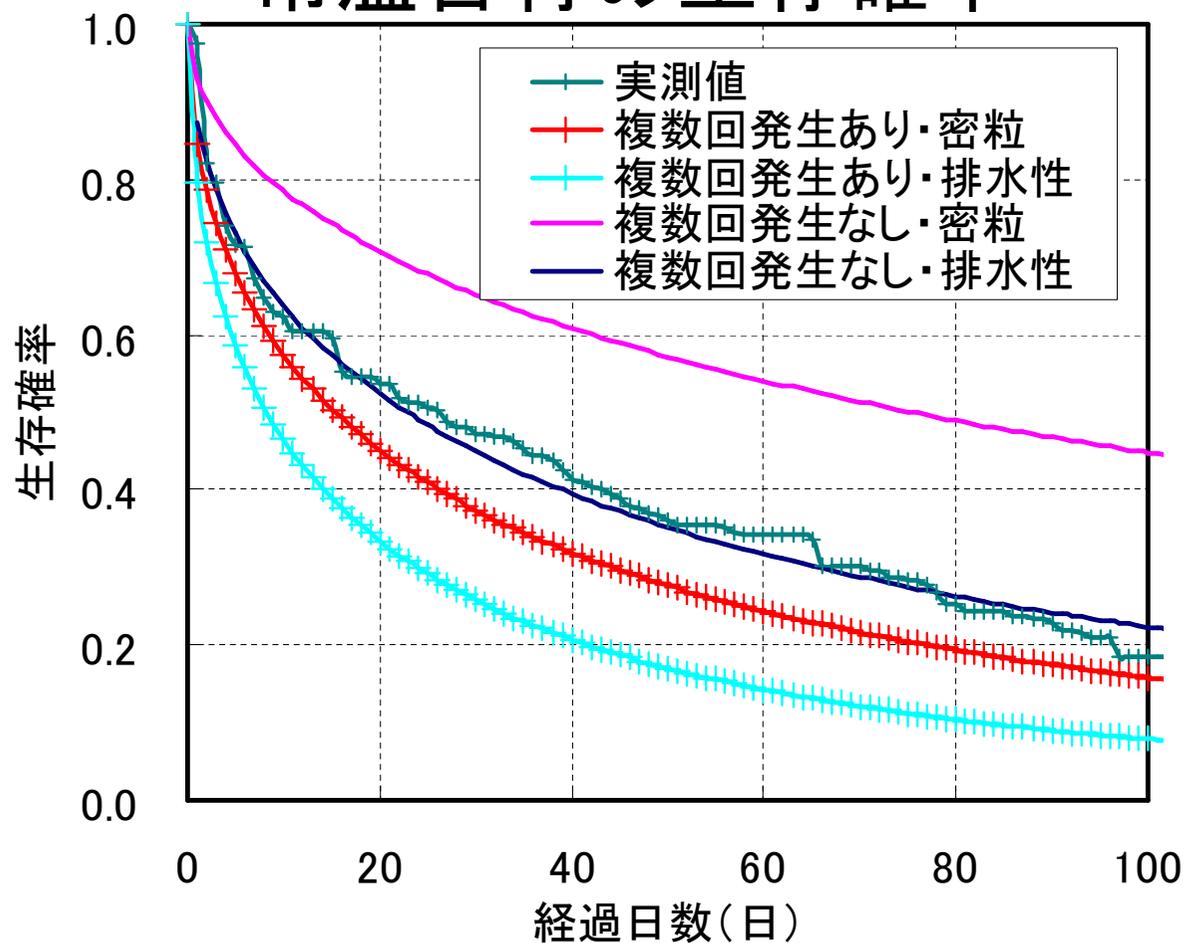


常温合材の耐久性に関する推計結果

	$\beta 1$ 定数	$\beta 2$ ポットホール 複数発生	$\beta 3$ 舗装種別	$\beta 4$ 混雑	$\beta 5$ 大型車	m
最尤推定値	0.135	0.0939	-0.0629	—	—	0.522
t-値	4.92	3.01	-2.76	—	—	14.52
対数尤度 尤度比	-696.5 0.805					

ワイブルハザードモデル

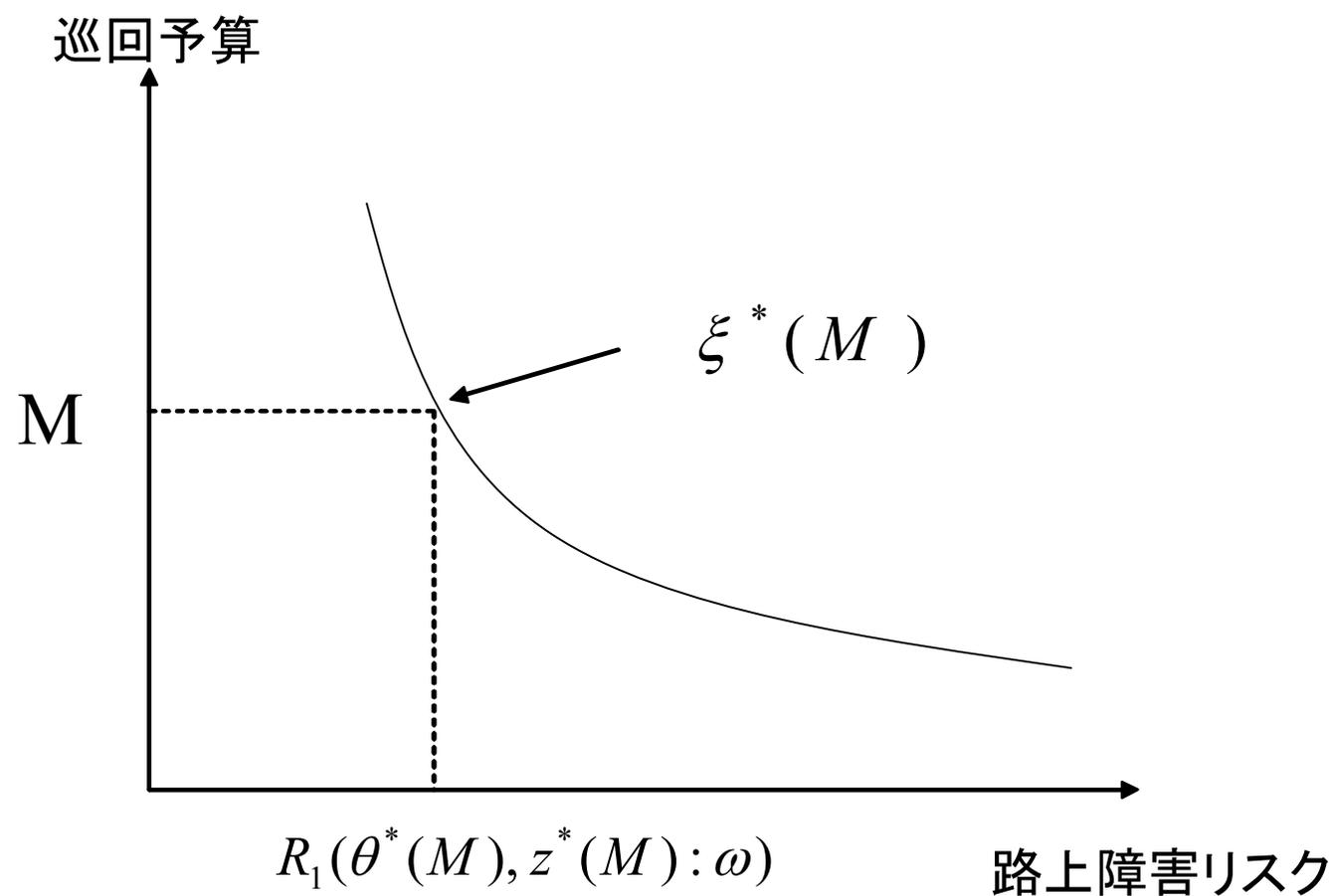
常温合材の生存確率



常温合材の生存確率

(同一箇所ポットホール発生有無別)

巡回予算と路上障害リスク



路線概要：一般国道

区間	対象区間延長 [km]	単位 区間数
A	5.0	38
B	6.2	42
合計	15.0	80

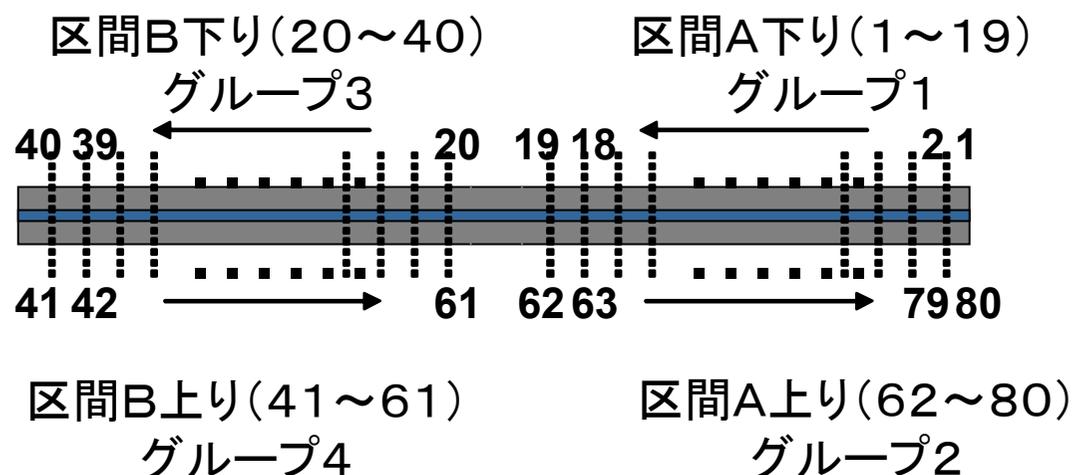
通常巡回、夜間巡回の履歴データ：2004.04.01～2005.03.31

路上障害発生に関する推計結果

	$\beta 1$ 定数	$\beta 2$ 単位道路 区間延長	$\beta 3$ 大型車 日交通量	ϕ 分散
最尤推定値	-15.3	4.61	0.0003	0.0855
t-値	-19.1	-4.75	-2.98	-2.14
対数尤度	-826.1124			
尤度比	0.9274			

ポアソンガンマ発生モデル

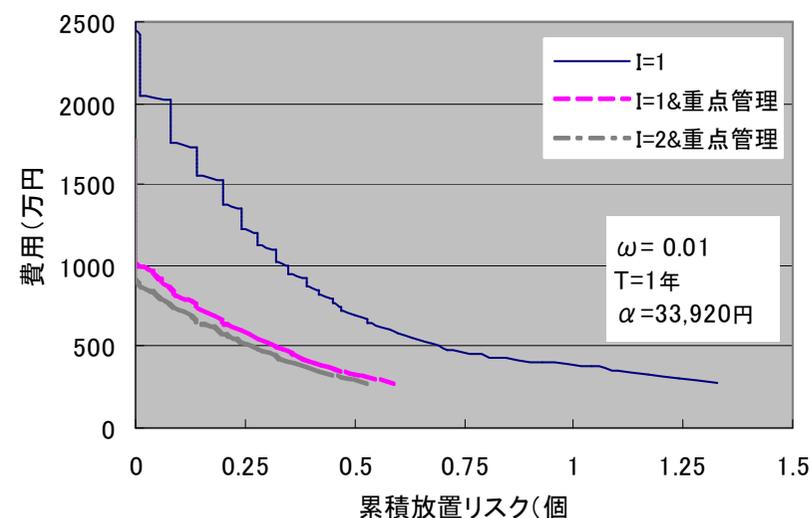
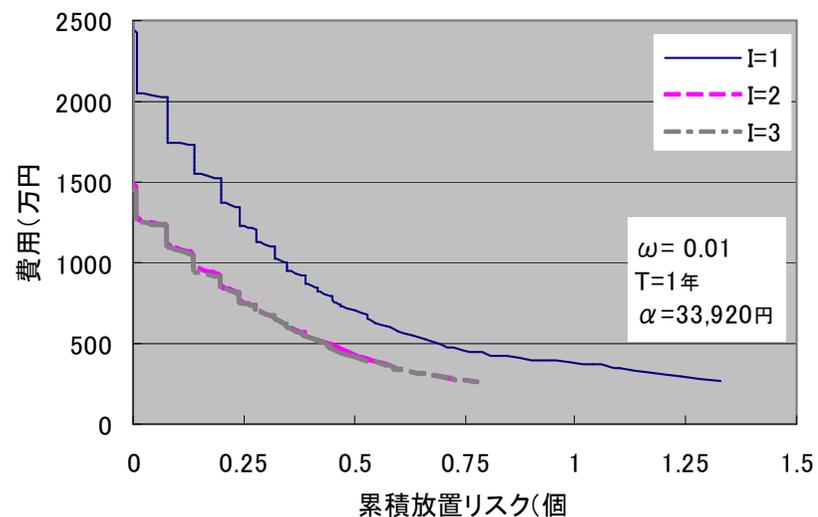
道路巡回方策の検討



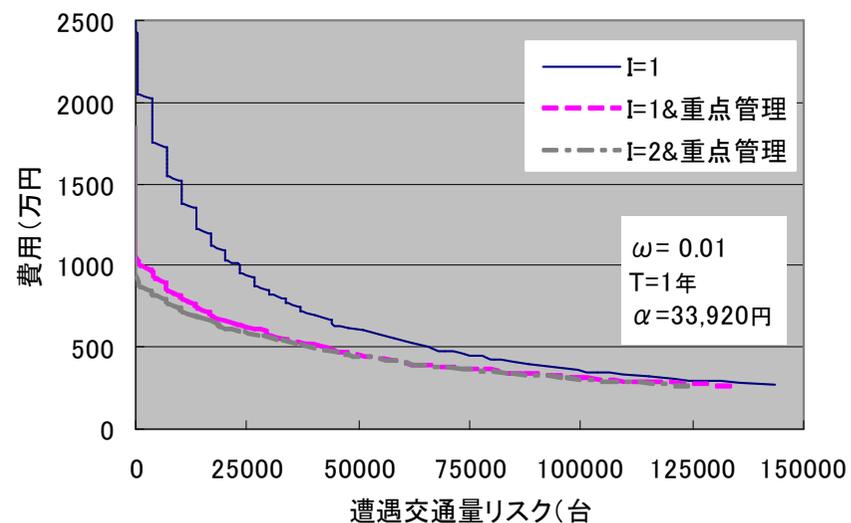
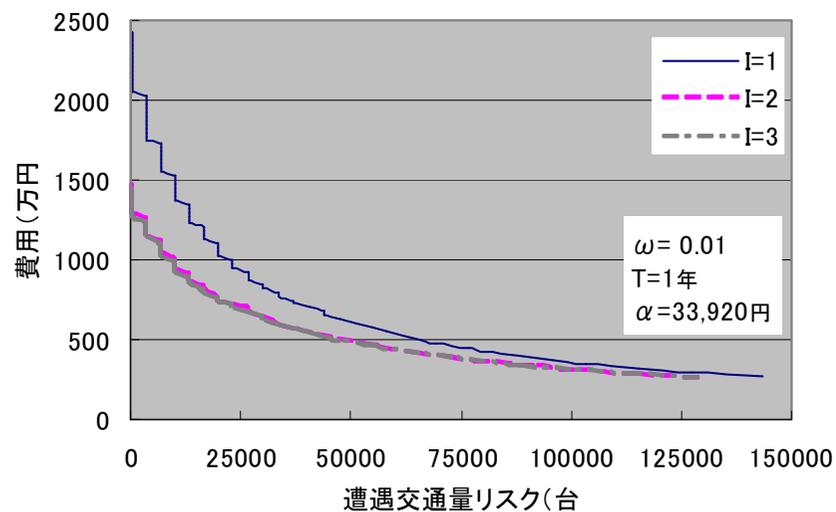
単位道路区間のグループ化

巡回時における重点管理区間の設定

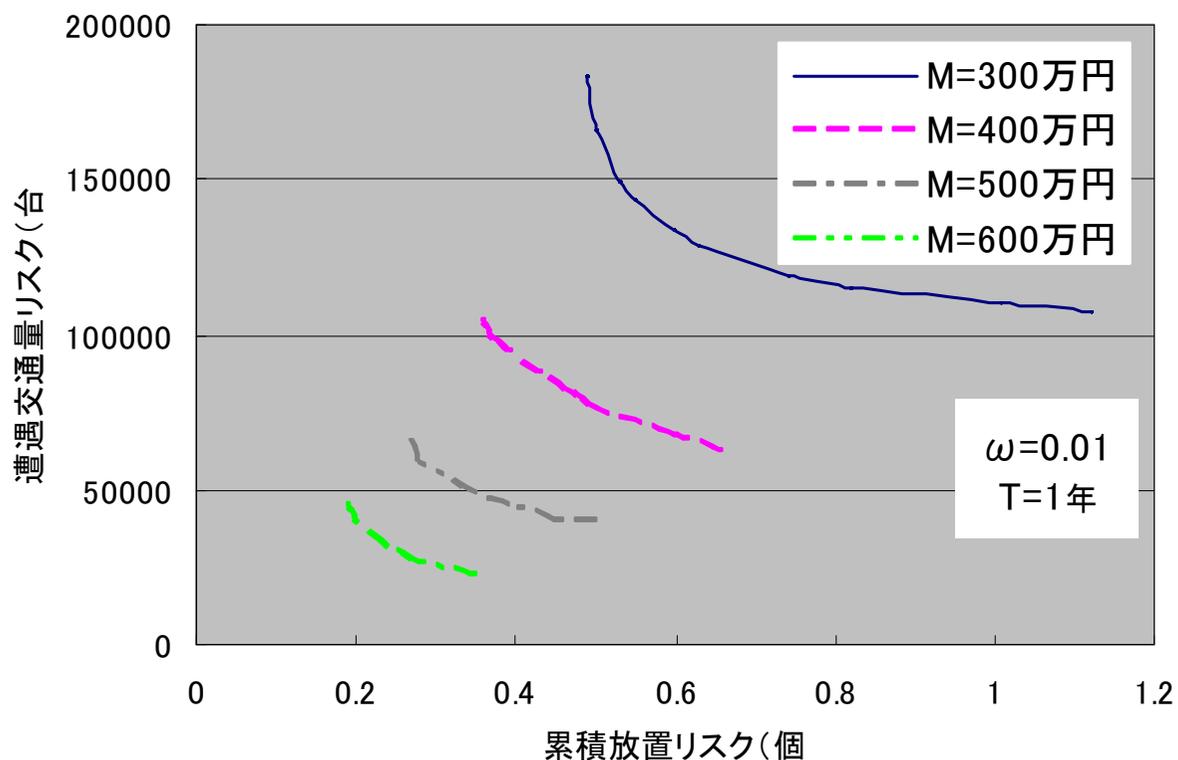
巡回費用と累積放置リスク



巡回費用と道路障害遭遇交通量リスク



累積放置リスクと遭遇交通量リスク



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

19年度(2年目)の報告

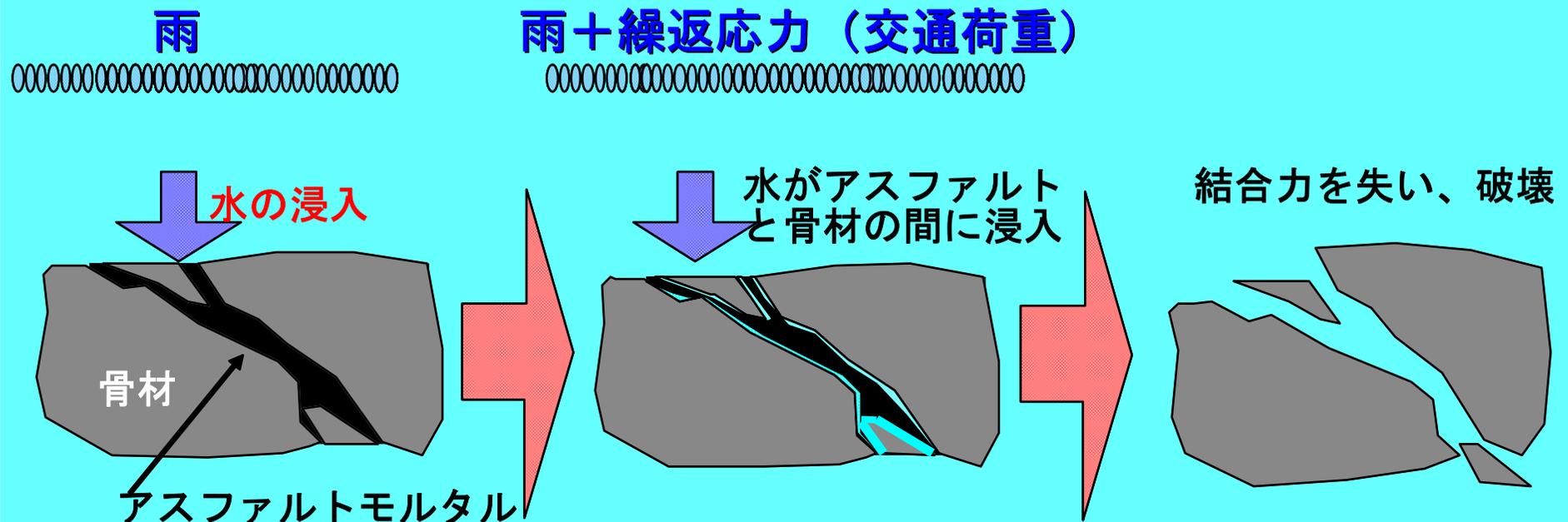
- ①ポットホールの発生メカニズム
- ②試験施工と室内評価試験

・現状の問題点

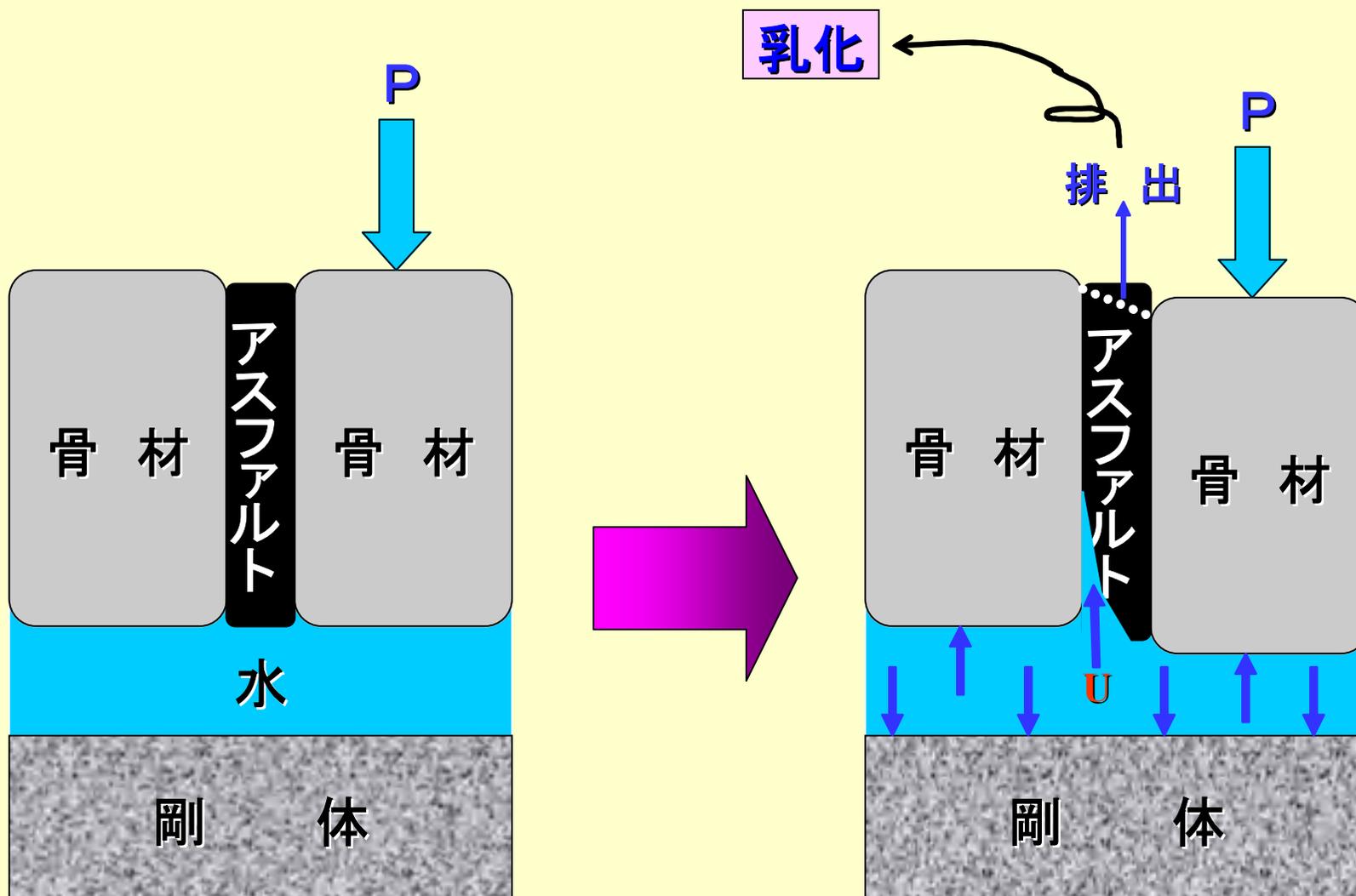
阪神高速道路公団における調査では、平成5年度のアスファルト舗装の破損の発生数681カ所のうち、ポットホールは239カ所。

報文からの考察

ポットホールは水平部において高い頻度で発生している。これは、排水の悪い現場条件に起因するものと考えられ、使用する混合物は、そのはく離抵抗性を考慮する必要がある。



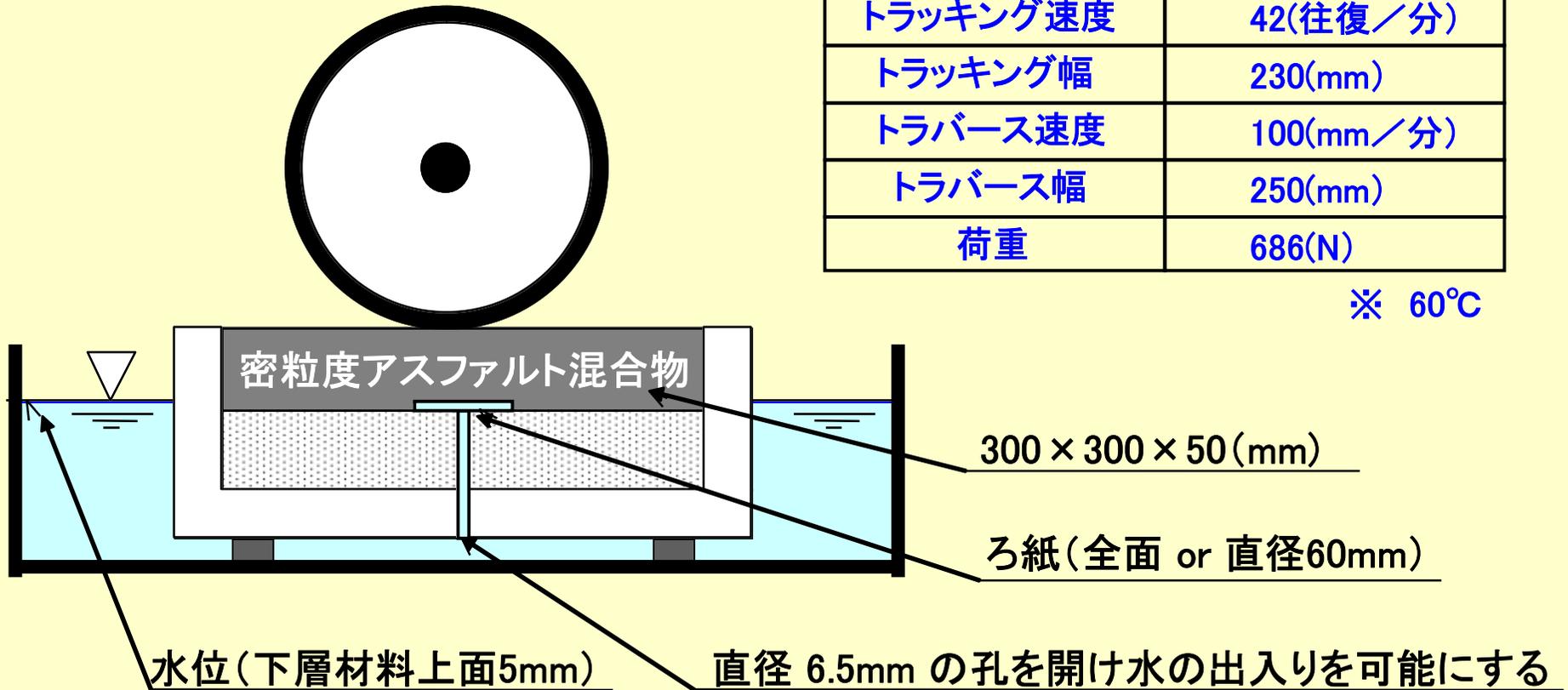
はく離のメカニズム = Stripping



再現実験(水浸ホイールトラッキング試験)

項目	設定値
トラッキング速度	42(往復/分)
トラッキング幅	230(mm)
トラバース速度	100(mm/分)
トラバース幅	250(mm)
荷重	686(N)

※ 60°C



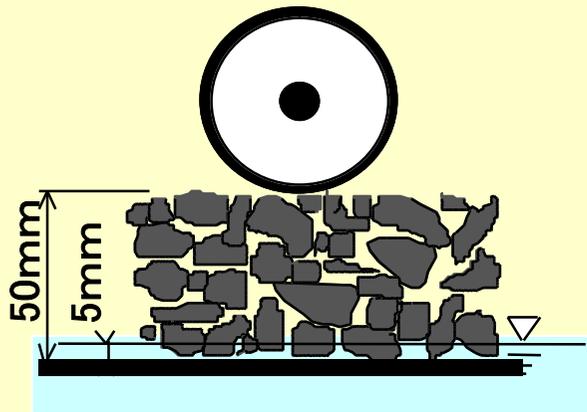
・2水準の境界条件

条件1 全面にろ紙を敷設

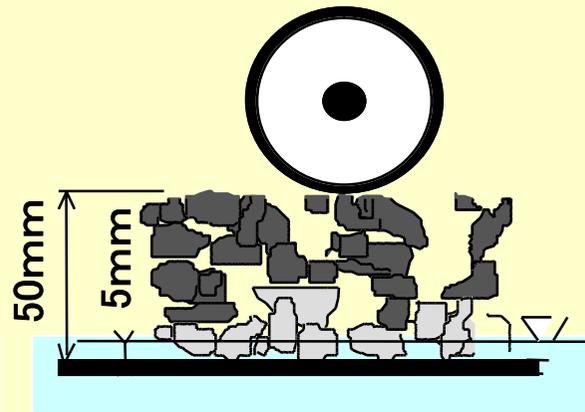
条件2 中央部に直径60mmのろ紙を敷設, 他部分は乳剤を塗布

剥離過程の検証

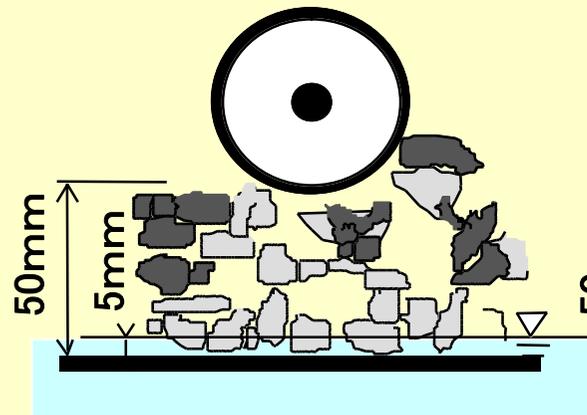
(1) 走行試験開始時(0分)



(2) アスファルトが骨材から剥離

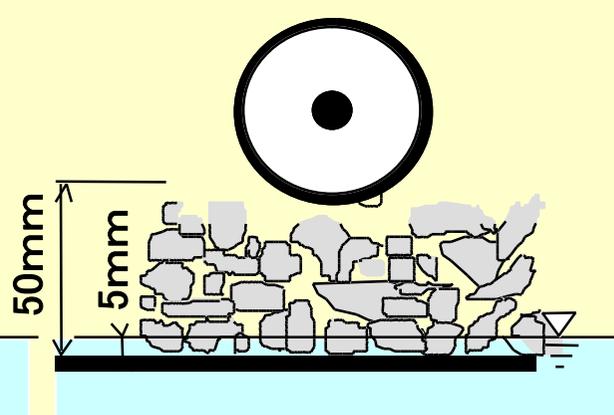


(3) 予想破壊時間の75%(90分)



上部だけにアスファルトが残る

(4) 破壊直前(115分)



ほとんどアスファルトが剥離

ハクリ状況

・ 全面にろ紙



ほぼ全断面同等にはく離が見られる

・ 中央部に60mmのろ紙



特に供試体中央部にはく離がよく見られる

破壊直後の断面

全面ろ紙



中央60mmろ紙



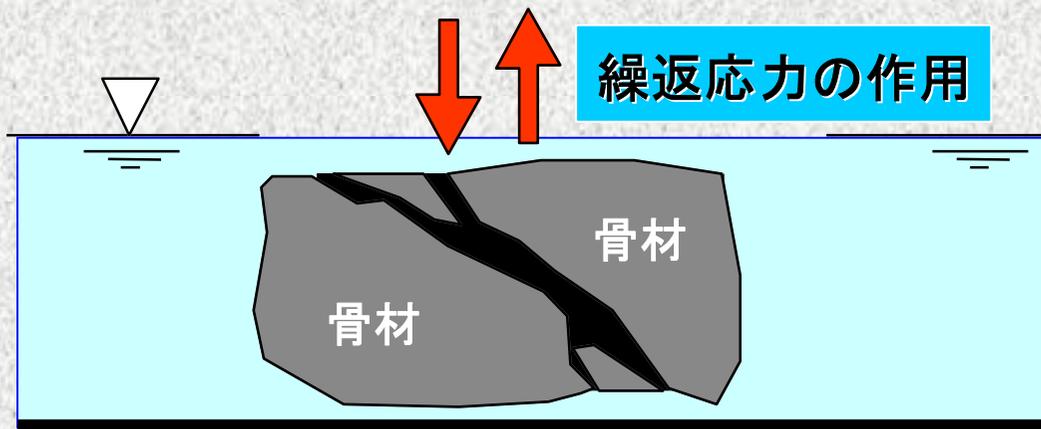
中央部にのみはく離が見られた

∴ 舗装下面の滞水が、ポットホールの原因となる

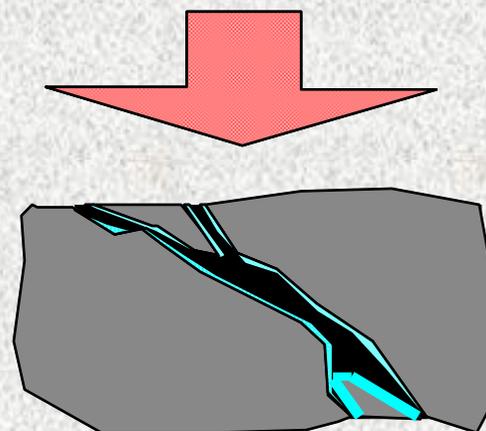
文献および実験等からのまとめ

- ・ 阪神高速道路公団の調査において、ポットホールが水平部に高い頻度で発生していることから、この破損は、排水の悪い現場条件に起因するものと考えられた。
- ・ 水浸ホイールトラッキング試験において、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を確認できた。
- ・ **つまり、剥離のメカニズムは、水と繰り返し応力の相互作用により発生することが分かった。**

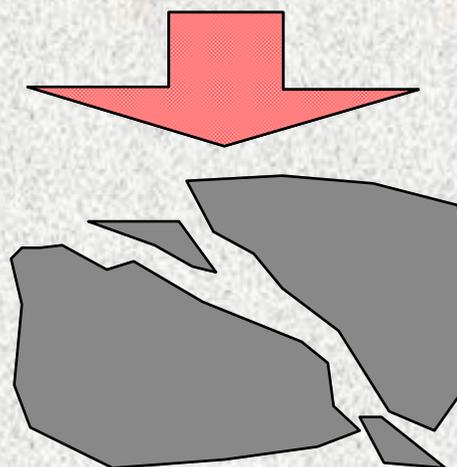
滞水と繰返応力 による破壊のメカニズム



・ 骨材に繰返応力が働き、骨材間
が動くと、少しずつ水がアスファ
ルトと骨材の間に浸入していく



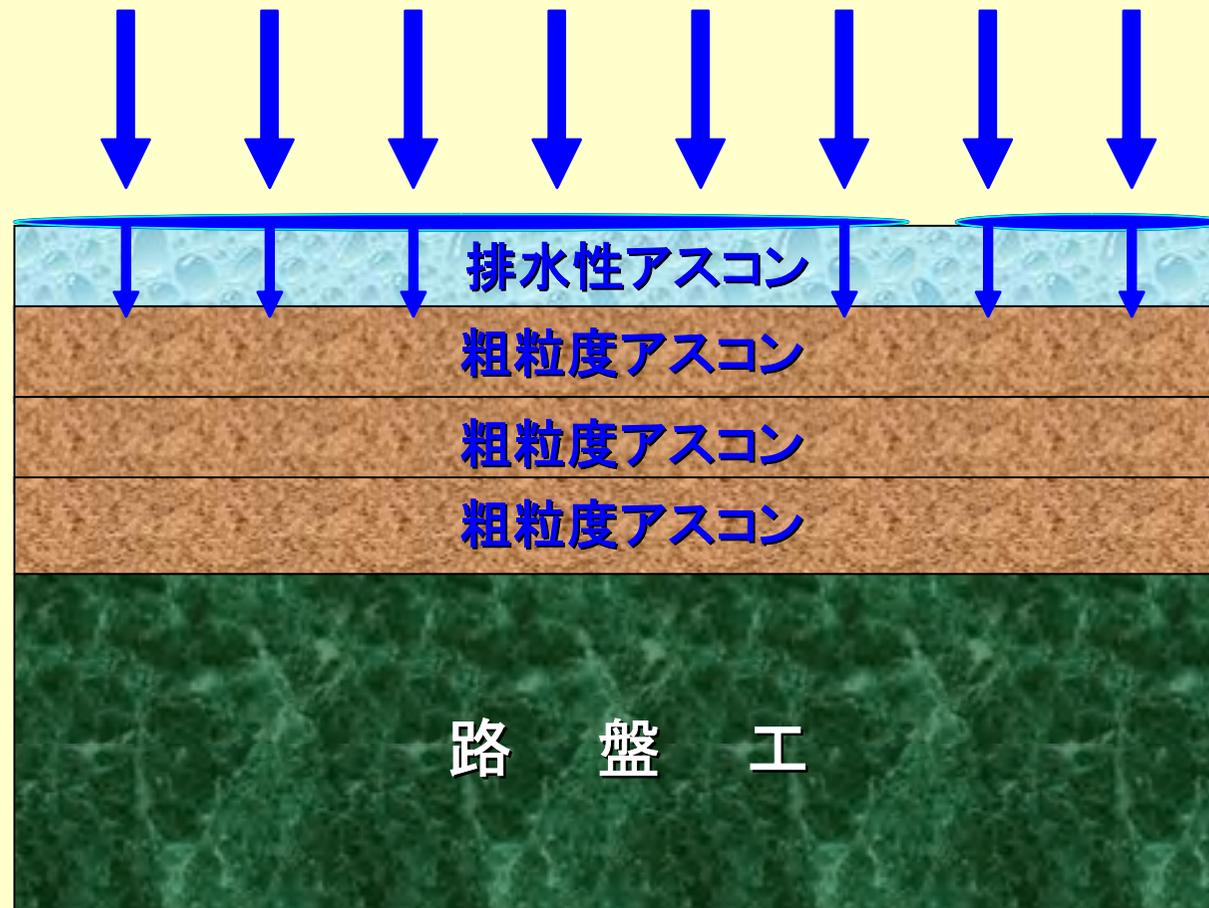
・ はくりした箇所が起点となり、
繰返応力により骨材間の結合力
を失い破壊する



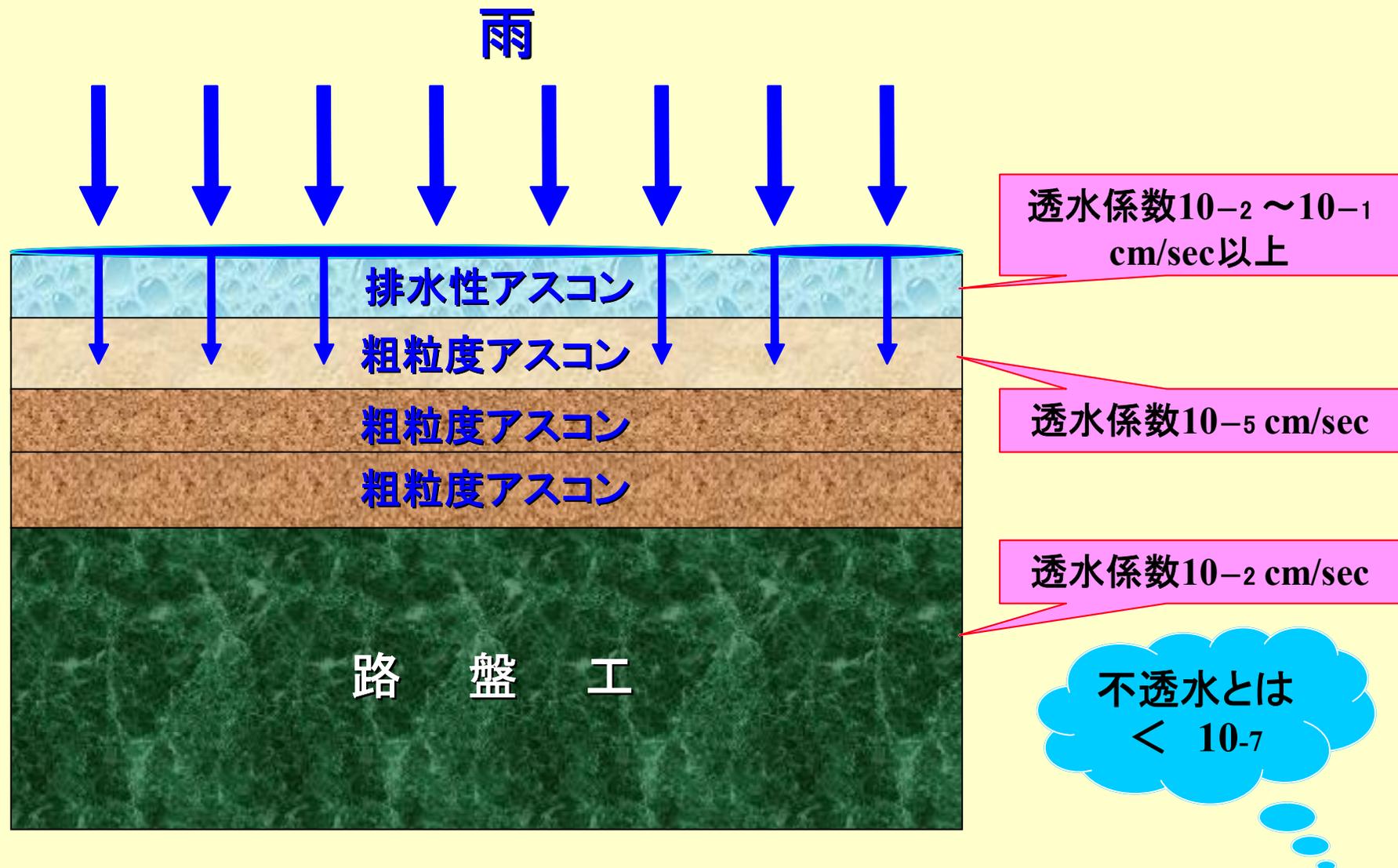
剥離事例の紹介

(1) 降雨が排水性アスコンから**基層表面まで浸入する**

雨



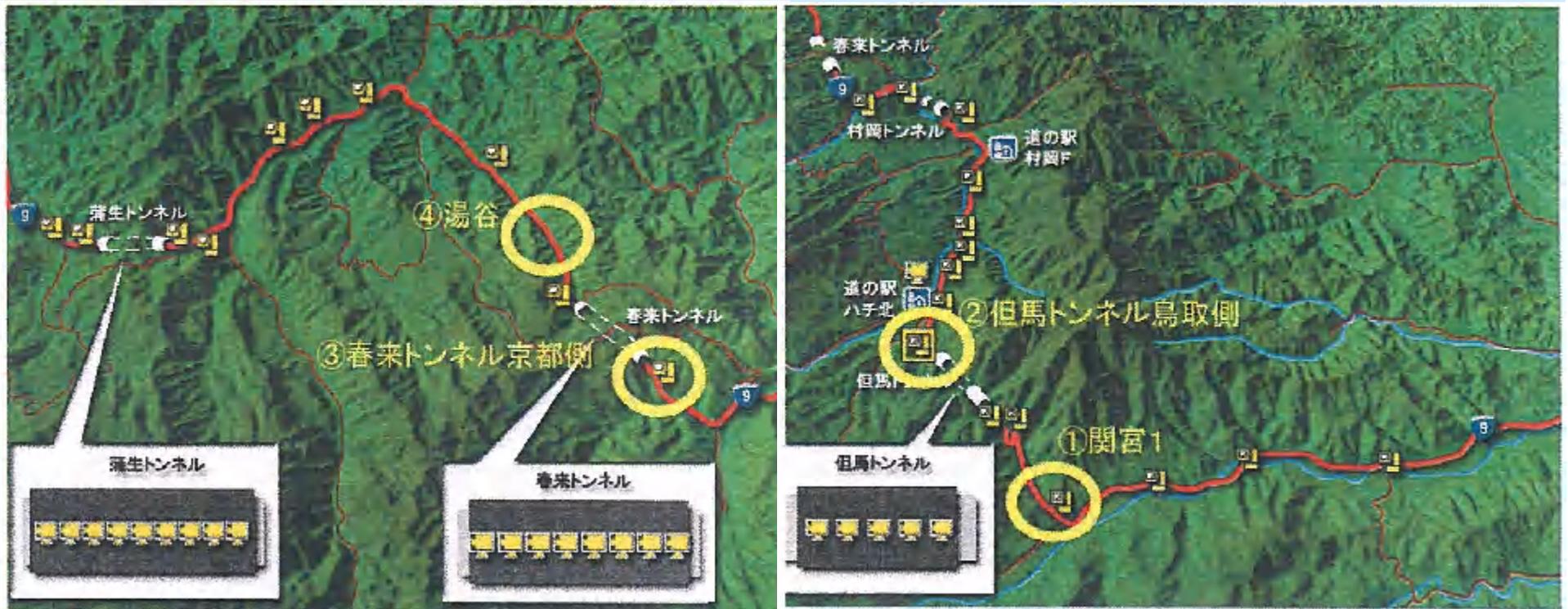
(2) 基層の粗粒度アスコンは水を通すため、**基層部に水が滞水する** → **繰返応力(交通荷重)による剥離の発生**





試験施工1 補修材の耐久性評価

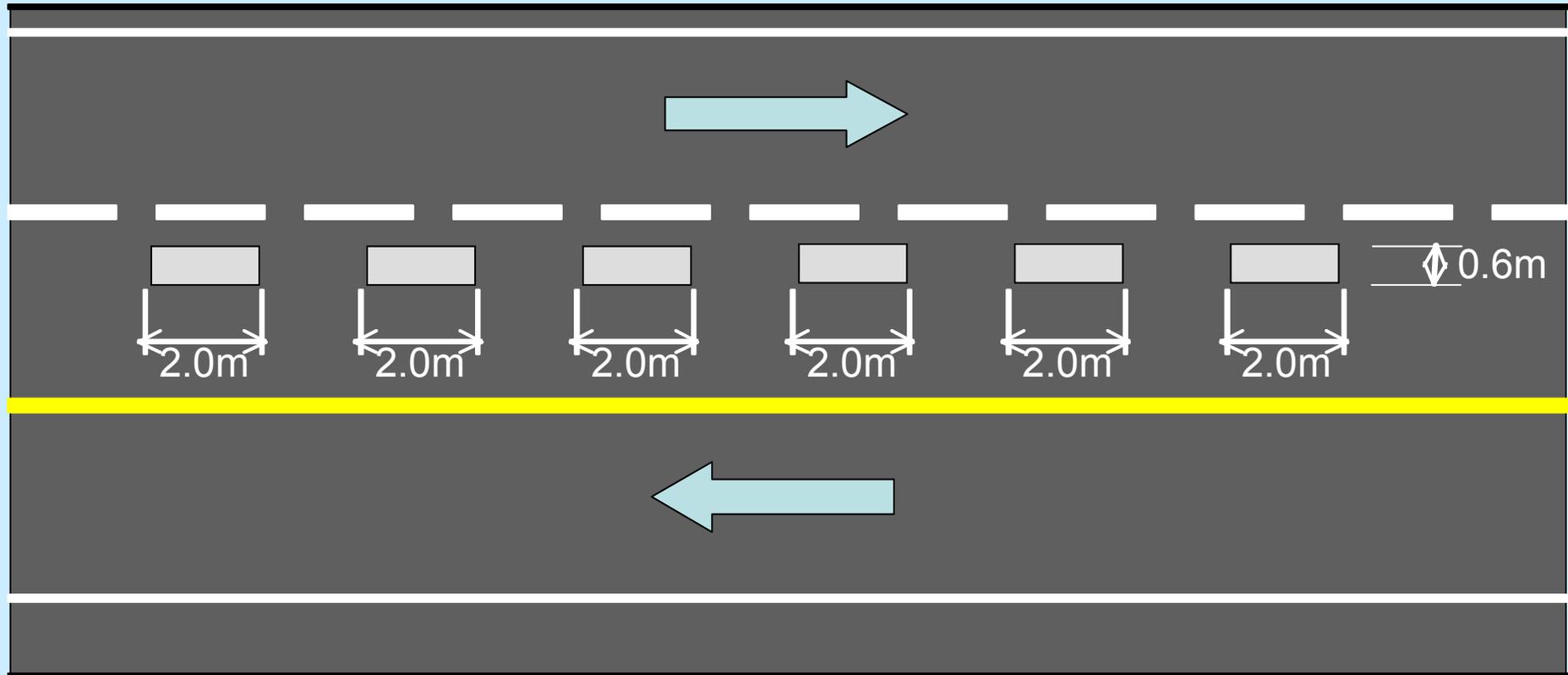
(1)場 所 関宮1の概要



- ① 雪寒地域の条件が厳しい。→ 散水融雪施設が整備されている
- ② 緊急時の対応が比較的容易—登坂車線が整備されている。
- ③ 日常的に監視が可能。→ CCTVによる監視範囲内である。

試験施工1 補修材の耐久性評価

(2) 試験施工の概要



- ①試験する常温合材は6種類
- ②試験区間=22m
- ③段差は安全を考慮し、5%の擦り付けをおこなう

試験施工1 補修材の耐久性評価

(3) 試験施工状況(施工前)



試験施工1 補修材の耐久性評価

(3) 試験施工状況(人工ポットホール)



試験施工1 補修材の耐久性評価

(3) 試験施工状況(補修材充填)



試験施工1 補修材の耐久性評価

(3) 試験施工状況(補修材締固め)



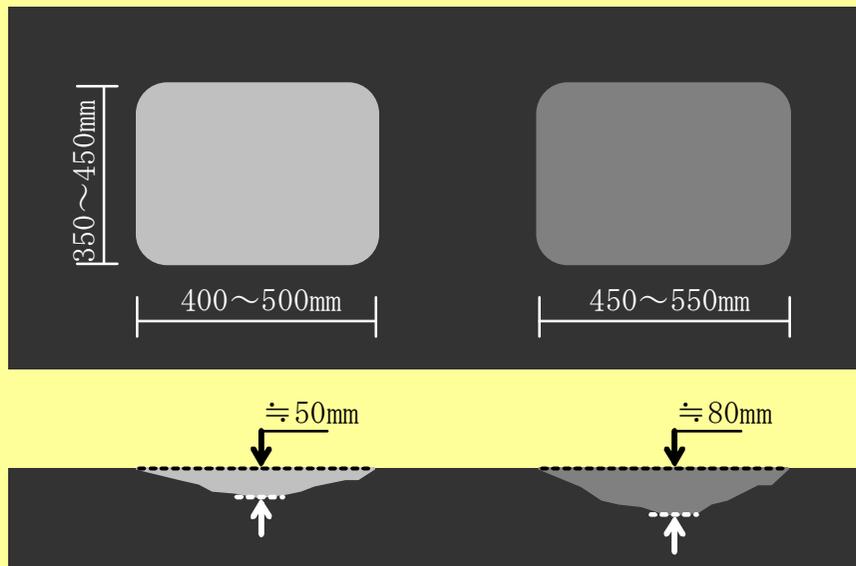
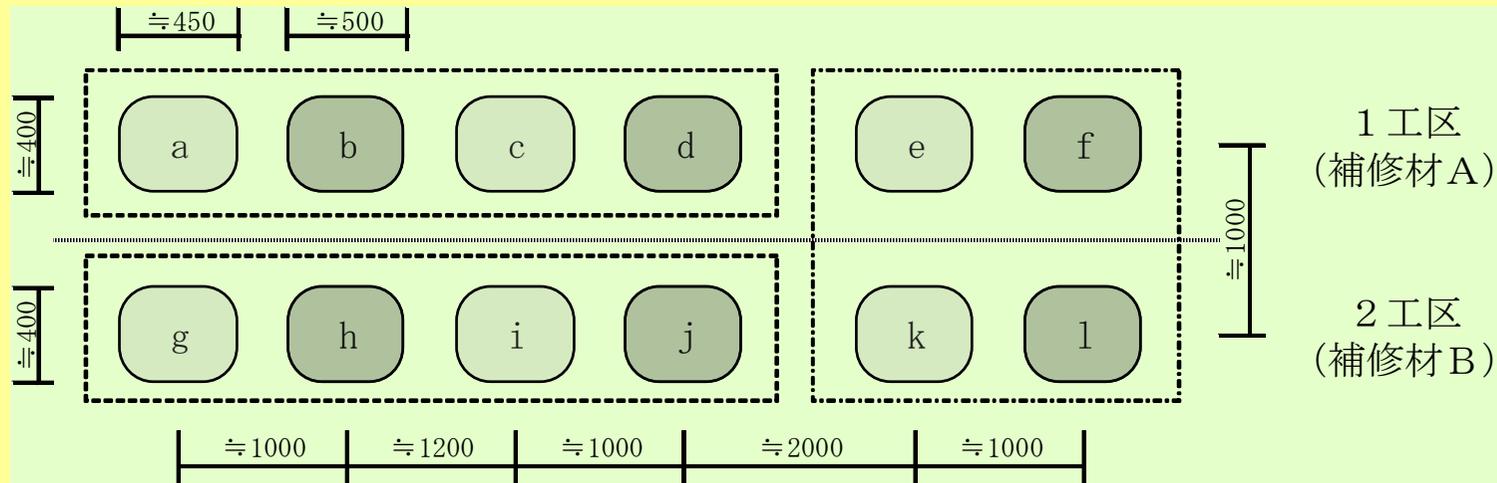
試験施工2 補修材の締固め度評価

(1)場 所 みちの駅ハチ北



試験施工2 補修材の締固め度評価

(2) 試験施工の概要



2種類の深さの
疑似ポットホール



深さと締固め度
の関係を把握

試験施工2 補修材の締固め度評価

(3) 試験施工状況(人工ポットホール)



試験施工2 補修材の締固め度評価

(3) 試験施工状況(作業車による締固め)



試験施工2 補修材の締固め度評価

(3) 試験施工状況(プレートによる締固め)



室内試験 層厚と締固め度の関係

(1) 供試体の作製(型枠、モールド)



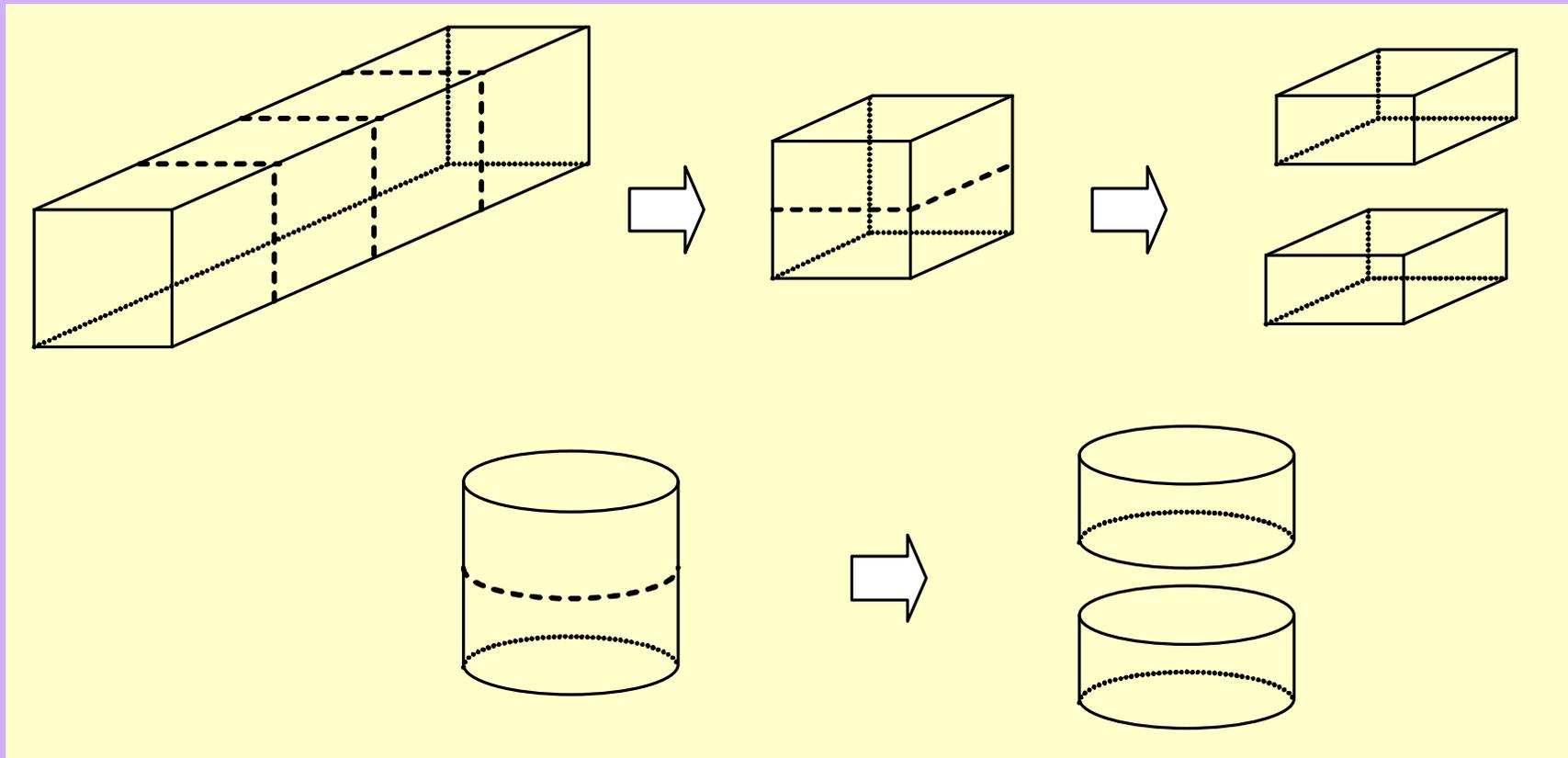
室内試験 層厚と締固め度の関係

(2) 供試体外観



室内試験 層厚と締固め度の関係

(3) 供試体密度



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．

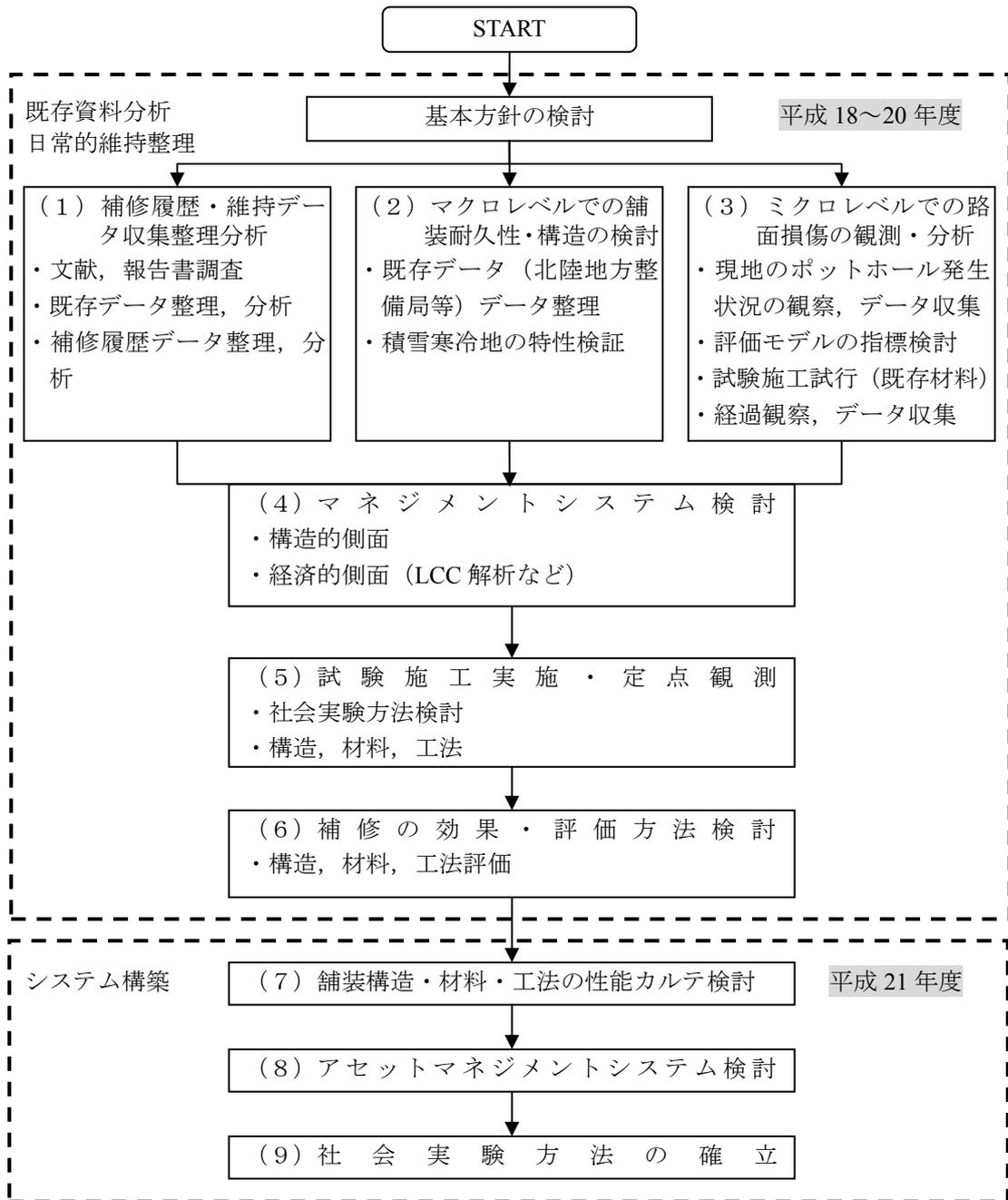


図-1 研究のフロー

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、そのはく離抵抗性を考慮する必要があると結論づけている。

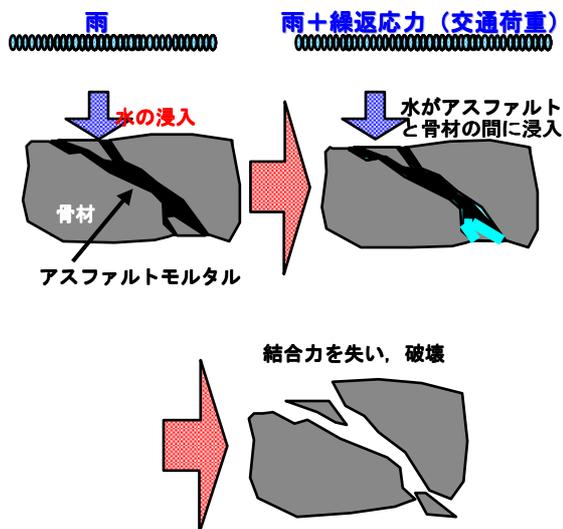


図-2 ポットホールの発生原因

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。

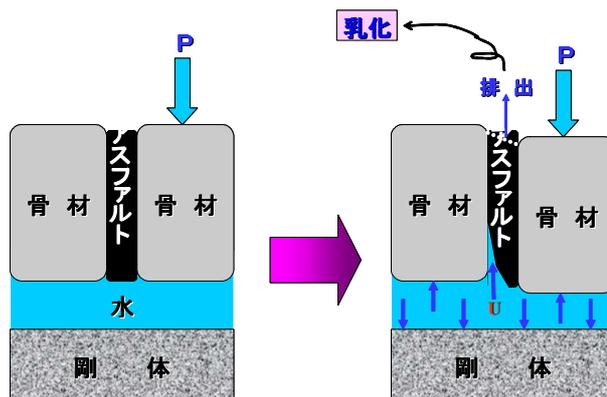


図-3 剥離のメカニズム

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）

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。

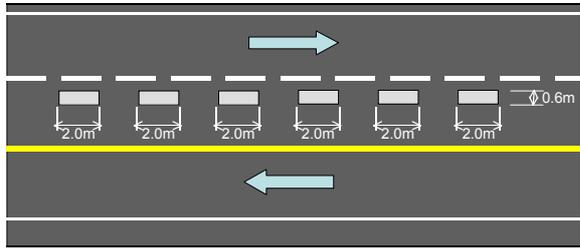


図-9 模擬ポットホールの位置図



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は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。

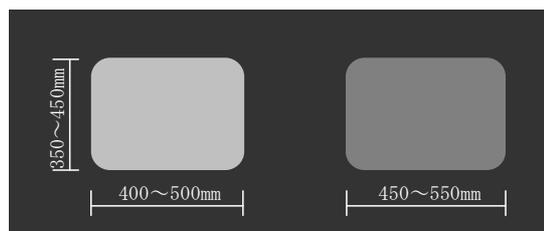
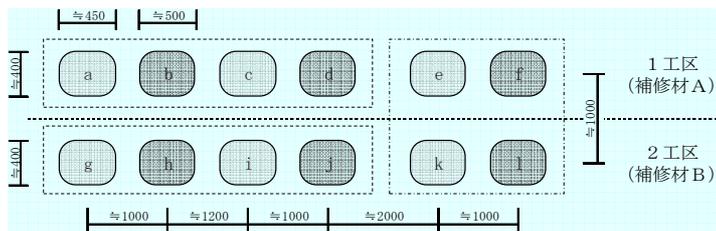


図-11 模擬ポットホールの概要



写真-8 作業車による締固め



図-10 試験施工箇所の地図 道の駅ハチ北（駐車場内）



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.

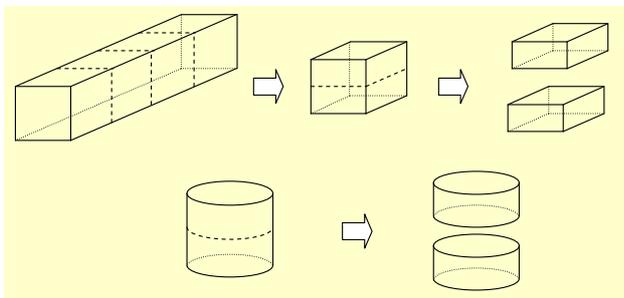
【参考文献】

- ・ 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)	
		<input type="checkbox"/> 走行車線 <input type="checkbox"/> 追越車線	<input type="checkbox"/> 進行方向右側 <input type="checkbox"/> 進行方向左側			
構造物		交差点の有無		道路線形		道路勾配(%)
<input type="checkbox"/> 土工部 <input type="checkbox"/> 鋼床版 <input type="checkbox"/> CO床版		<input type="checkbox"/> 交差点部 <input type="checkbox"/> それ以外		<input type="checkbox"/> カーブ部分 <input type="checkbox"/> 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(°C)	作業時間(分)	散水状況(融雪用)の有無
			<input 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 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 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 type="checkbox"/> 施工時に泥はなかった		<input 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
			<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し				<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 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
			<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し				<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 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
			<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し				<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 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
			<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し				<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 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
			<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 無し				<input type="checkbox"/> 有り <input type="checkbox"/> 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。 $'$ 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 7.8年 (全340箇所の平均)	舗装種別	大型車交通量区分	複数回発生の有無	地域区分
	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O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時の経過年数、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のがわかる。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。

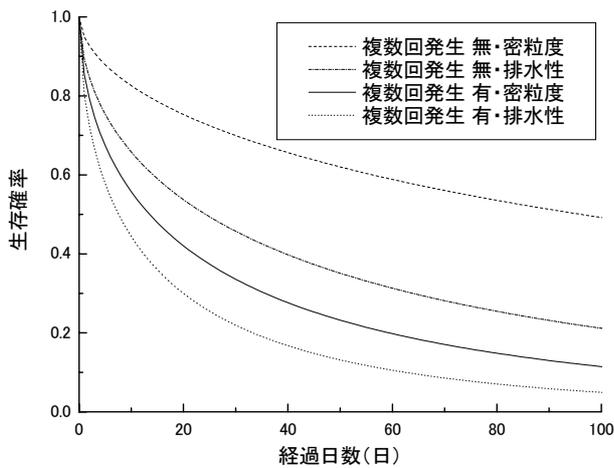


図-1 補修合材の生存確率

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認しない。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) 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.