

重点 24. 積雪寒冷地における道路舗装の予防保全に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 27

担当チーム：寒地道路保全チーム

研究担当者：木村孝司、丸山記美雄、
星 卓見、谷口聡

【要旨】

本研究は、積雪寒冷地における道路舗装の損傷・劣化を早期に予測する診断方法と予防保全的補修技術を開発し、道路舗装の長寿命化に資することを目的として実施した。その結果、道路の損傷、劣化を未然に予測する道路診断手法として、①FWD 経年調査データを解析し、FWD 散逸仕事量から舗装の構造的破壊を事前に検知する手法、②地中レーダの信号の変化から、舗装内部が砂利化に至る前の含水状態を検知・診断する手法、③赤外線カメラにより舗装体内部の含水・滞水に起因する温度変化を捉え、ポットホール等の発生危険部位を事前に検知する手法を提案したほか、X 線 CT 画像およびデジタル画像相関法を用いて舗装体内部の骨材の動きに伴う変形をステップ毎に捉えることで舗装の破壊メカニズムの解明につなげる可能性があることを確認した。

また、舗装の長寿命化のための予防的対策手法として、①積雪寒冷地におけるシール材の適用方法、②ボトムアップクラックに対し、シート工法を併用したオーバーレイによるひび割れ抑制手法、③コンクリート床版上に施工する耐久性の高い基層用アスファルト混合物を提案したほか、寒冷地域におけるひび割れシール材の評価試験方法及び寒冷地用ひび割れシール材を開発した。

キーワード：予防保全、FWD、地中レーダ、赤外線カメラ、X 線 CT、シール材、シート工法、橋面舗装

1. はじめに

道路予算の縮減に伴い、道路建設時のみならず維持管理時のコストダウンが強く求められており、既存のストックをより長く活用する技術が必要となっている。舗装の劣化をより早く把握することができれば、予防保全による効率的、効果的な資産管理が可能となる。そのためには、道路舗装の劣化を早期に診断する技術、舗装の修繕が必要となる前に、未然の対応を取り、延命化することでコスト縮減を図る技術が重要である。

予防保全のための診断手法としては、目視によるもの、機器を用いるもの、破壊を伴うもの、非破壊で行うものなど、様々な手法がある。この内、非破壊で舗装の損傷を早期の段階で検知する診断手法として FWD、レーダ探査技術、赤外線計測技術、X 線 CT 技術などが考えられるが、診断技術は開発途上にあり検討の余地があった。また、舗装の損傷に対する未然の対応方法としては、ひび割れへのシール材注入や、ひび割れ抑制シートを併用した薄層舗装のほか、RC 床版上の舗装の高耐久化などの予防保全工法があり、これらの工法によって劣化の進行を軽減させることができれば、舗装が延命化され、LCC

の縮減が期待される。しかし、これらの予防保全工法の延命効果や耐久性の評価が十分でなかったため検証が必要であった。

そこで本研究では、道路の損傷、劣化を早期に把握する道路診断手法に関し、データの計測および解析などを含め、各種の道路診断手法について検討を行い、①重錘落下式たわみ測定装置（Falling Weight Deflect meter : FWD）により舗装の構造的破壊を事前に検知する手法、②地中レーダにより舗装内部が砂利化に至る前の含水状態を検知・診断する手法、③赤外線カメラによりポットホール等の発生危険部位を事前に検知する手法を提案した。このほか、X 線 CT 画像およびデジタル画像相関法を用いて舗装体内部の骨材の動きに伴う変形をステップ毎に捉え、破壊メカニズムの解明につなげる可能性があることを確認した。

また、舗装の長寿命化のための予防的対策手法に関し、積雪寒冷地における舗装の予防保全工法の効果や耐久性などに関する調査検討を行い、①積雪寒冷地におけるシール材の適用方法、②ボトムアップクラックに対する、シート工法を併用したオーバーレイによるひび割れ抑制手法、③コンクリート床版

上に施工する耐久性の高い基層用アスファルト混合物を提案したほか、寒冷地におけるひび割れシール材の評価試験方法及び寒冷地用ひび割れシール材を開発した。

本研究で得られた成果について、以下に詳述する。

2. 既往の道路施設の損傷実態の検証

2. 1 調査研究の方法

舗装の損傷、劣化を早期に予測する道路診断方法と舗装の長寿命化のための予防的対策手法を確立するため、積雪寒冷地におけるアスファルト舗装の疲労破損について、舗装下面から上層に向かって伸びるボトムアップクラック、舗装表面から下層に向かって伸びるトップダウンクラックの損傷の形態、特徴について実態調査を行った。

2. 2 調査研究の成果

(1) アスファルト舗装の破損形態

図 2.2-1 に示すとおり北海道の一般国道郊外部においてボトムアップクラックが多く発生していることがわかる。また、図 2.2-2 ではトップダウンクラックの発生分布が市街部の幹線道路での発生が多いことがわかる。

次に、表 2.2-1 では各疲労ひび割れの発生延長及び全道の一般国道の全延長に対する比率を示す。ボトムアップクラックは舗装厚の薄い方に多く発生していることがわかる。一方、トップダウンクラックは舗装厚が厚い方に多く発生している傾向が見られた。

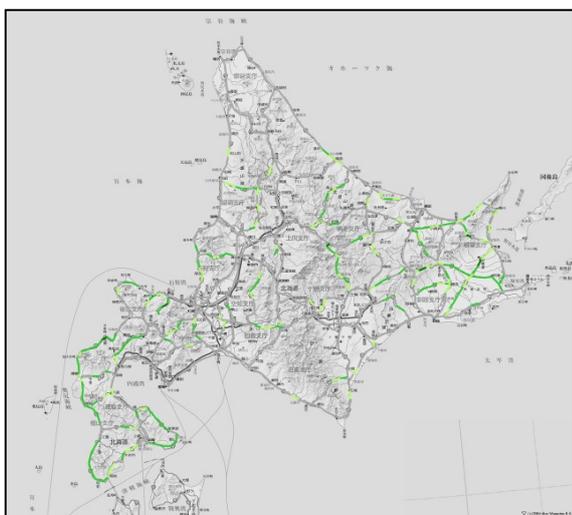


図 2.2-1 ボトムアップクラックの発生分布図

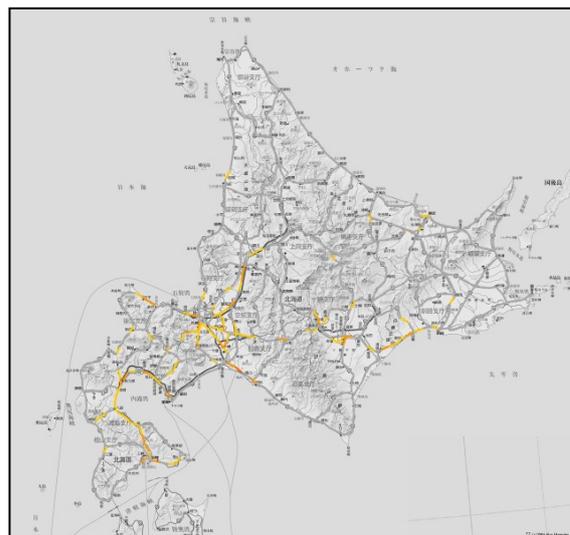


図 2.2-2 トップダウンクラックの発生分布図

表 2.2-1 疲労ひび割れ別延長一覧表

(最新ひび割れ5.0%以上)

舗装厚 (cm)	ボトムアップ疲労ひび割れ			トップダウン疲労ひび割れ		
	延長(m)	比率(%)	除外線の 全延長 との比率 (%)	延長(m)	比率(%)	除外線の 全延長 との比率 (%)
14未満	336,044	67.6%	13.1%	131,273	52.9%	5.1%
14以上 20未満	150,288	30.2%	11.1%	62,707	25.3%	4.6%
20以上 30未満	10,135	2.0%	2.0%	46,451	18.7%	9.1%
30以上	932	0.2%	0.8%	7,845	3.2%	6.8%
合計	497,399	100.0%	11.0%	248,276	100.0%	5.5%

3. 道路の損傷、劣化を未然に予測する道路診断手法の提案

3. 1 重錘落下式たわみ測定装置による構造的破壊の事前検知手法の検討

重錘落下式たわみ試験装置 (Falling Weight Deflectometer: 以下、FWD) によって得られた調査データの解析方法には、たわみ量によるもの、逆解析弾性係数によるものなどが広く使用されているが、散逸仕事量 (Dissipated Work) という指標も提案されている。FWD による散逸仕事量 (以下、FWD 散逸仕事量) は、既往の文献において舗装のダメージや損傷状態と密接な関係があるとされており^{1), 2), 3)}、理論的にも仕事量と疲労ダメージの蓄積との間には関係性が成立することが期待されるものの、実際の道路において FWD 散逸仕事量の経年的な変化傾向や疲労ひび割れ発生との関係を検証した論文は見当たらないのが実態である。

これまで 1993 年から 2007 年までの間、8 種類のアスファルト舗装断面が同一車線上に設けられた国道区間においてわだち部および非わだち部で FWD

によるたわみ量の測定を継続的に実施してきた。継続調査の間に、8つの断面のうち5つの断面において疲労ひび割れの発生が確認されている。そこで、本研究では、これらのFWD測定データと輪荷重データを用いて、FWD散逸仕事量の経年変化を把握し、疲労ひび割れ発生時期など疲労ダメージとの関係を検証して、FWD散逸仕事量の疲労評価への適用性について検討を試みた⁴⁾。

3. 1. 1 調査研究の方法

(1) 美々新試験道路でのFWD試験方法

本研究に用いたFWD測定データは、美々新試験道路と名づけた国道区間において1993年から2007年までの間に測定したものである。美々新試験道路は1990年7月に構築され、それ以降一般の交通に供用しており、図3.1-1に示す8種類の舗装断面においてわだち部(IWP部)および非わだち部(BWP部)で継続的にFWD測定を実施している。ただし、1993年から2007年までの間の同一地点の時系列データがそろっているのは、各舗装断面でIWP部1点、BWP部1点ずつであり、本研究ではそのデータを使用した。FWDの測定実施日を表3.1-1に示すが、春期と秋期の測定を基本とし、舗装体の温度が異なる様々な時期にも測定を行っている。また、輪荷重調査を供用後ほぼ毎年1回定期的に、秋期の平日に24時間実施している。測定手法は舗装調査・試験法便覧⁵⁾S062「可搬式車両重量計を用いた走行車両の輪荷重測定試験方法」に拠って実施しており、FWD測定日までの累積49kN換算輪数も表3.1-1に併せて示した。

FWDで継続調査を実施している期間の間に、美々

新試験道路に設けた8種類の舗装断面のうち、5種類の舗装断面において疲労ひび割れが発生しており、その発生時期はT1-1断面、旧A交通断面、T2-1断面で供用後880万輪、旧B交通断面で供用後1124万輪、T1-2断面で供用後1295万輪の49kN換算輪数通過時点であった。T1-1断面、旧A交通断面、T2-1断面、旧B交通断面はアスファルト混合物層(以下、混合物層)厚が12cmまたは15cmで、かつ、混合物層の最下層がアスファルト安定処理混合物である。また、T1-2断面は混合物層厚が12cmで、混合物層最下層が粗粒度アスファルト混合物で造られた断面である。疲労ひび割れが発生した断面に比べて、アスファルト混合物層厚が26cmと35cmである旧C、

表 3.1-1 FWD 測定年月および輪荷重

測定 年月		累積49kN換算輪数(万輪)	測定 年月		累積49kN換算輪数(万輪)
1993年	8月	395.9	1998年	7月	741.1
	9月	412.0		1999年	10月
	9月	424.0	2000年		5月
	11月	461.2		2001年	10月
	12月	468.7	2002年		5月
1994年	2月	513.4		2003年	10月
	7月	546.7	2004年		6月
	8月	549.5		2005年	10月
	9月	553.3	2006年		5月
	11月	557.5		2007年	11月
11月	560.1	2008年	7月		1089.5
1995年	2月		569.6	2009年	12月
	5月	583.2	2010年		6月
	7月	594.2		2011年	10月
	9月	605.9	2012年		6月
	10月	612.8		2013年	10月
1996年	6月	653.6	2014年		6月
	10月	672.3		2015年	10月
1997年	5月	701.7			
	10月	714.8			

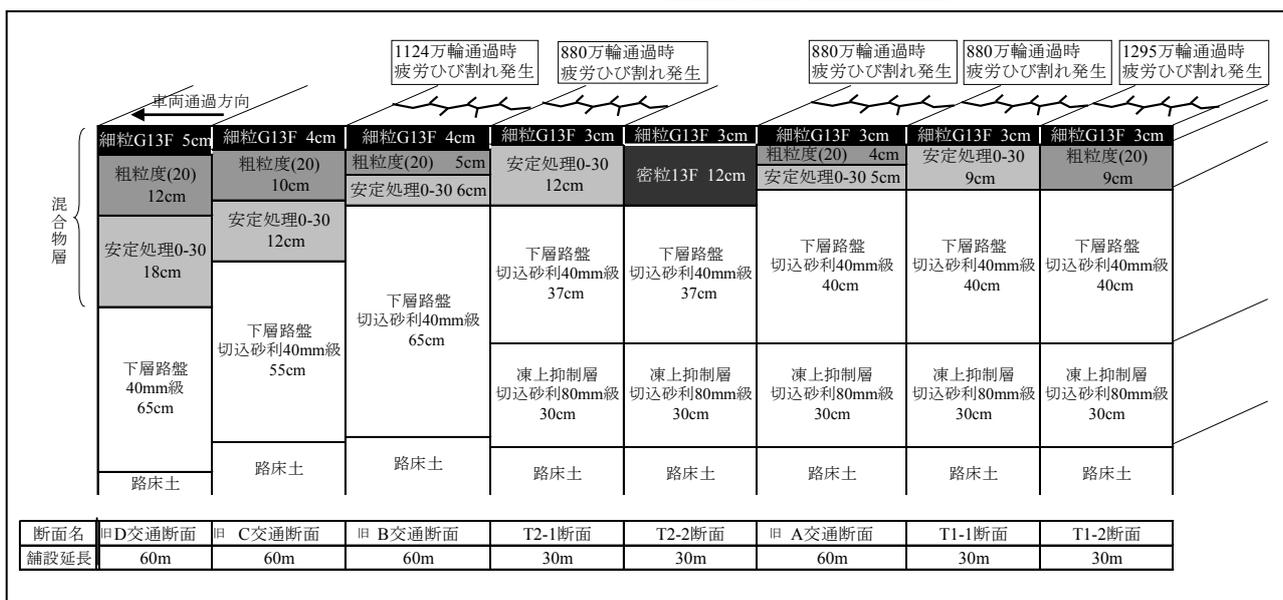


図 3.1-1 美々新試験道路の舗装断面および疲労破壊状況

旧 D 交通断面と、混合部物層最下層が密粒度アスファルト混合物である T2-2 断面には疲労ひび割れの発生は認められておらず、混合物層の厚さと最下層混合物の配合の違いが疲労ひび割れの発生に影響したと推測できることも報告している⁶⁾。このような疲労ひび割れの発生状況と、FWD 散逸仕事量の関係をつき合わせて検討をすすめた。

(2) FWD 散逸仕事量の定義

FWD 散逸仕事量(Dissipated Work)とは、FWD 測定によって得られる載荷荷重と載荷点直下のたわみ量 D0 の時系列データを用い、図 3.1-2 のように測定荷重を縦軸に、D0 たわみ量を横軸として時系列順にプロットした際にグラフ上に描かれるヒステリシスループに囲まれた部分の面積と定義される。この部分の面積は、FWD 衝撃荷重の載荷過程でなされる仕事量と、除荷過程でなされる仕事量の差と考えることができ、その仕事量の差は舗装体の挙動に伴ってどこかへ散逸したと見ることができる。仕事量の散逸先は、アスファルト混合物層や路盤層、路床層、さらには FWD 載荷版下面のゴム材やゴムバッファや測定装置の機械的摩擦等と考えられ、FWD 散逸仕事量はこれら散逸先で散逸した仕事量を全て含んだものと考えられる。したがって、アスファルト舗装の疲労ダメージ評価に厳密を期すには、各々の部位で散逸した仕事量を個別に定量的に把握した上で、アスファルト混合物層や路盤層、路床層において散逸した仕事量を切り出して疲労ダメージとの関係評価を行うのが理想である。

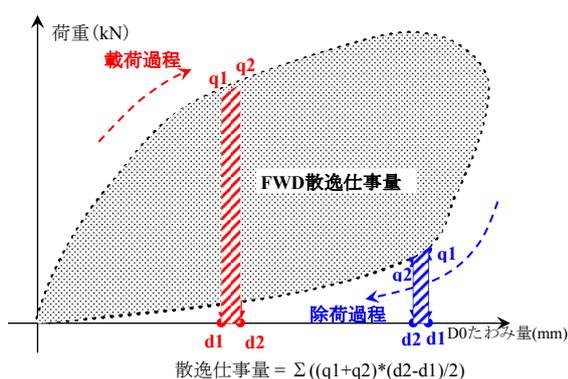


図 3.1-2 散逸仕事量の算出方法

しかし、本研究では以下に挙げる 4 つの観点から、FWD 散逸仕事量とアスファルト混合物層の疲労破壊現象の間に関係が存在するかに絞った検証を試みた。

1) 混合物層、路盤層、路床層、FWD 載荷版下面の

ゴム材、ゴムバッファ、測定装置の機械的摩擦等の各々の FWD 散逸仕事量に対する寄与分を切り分ける手法は現在存在しないこと。

2) 本研究で用いた FWD データは、同一の FWD 試験機械を用いて、同一試験日に 8 つの舗装断面で測定を実施することを継続して得たものなので、載荷版下面のゴム材やゴムバッファなど機械側の影響程度は同一と扱うことが可能で、その場合の FWD 散逸仕事量は、アスファルト混合物層や路盤層、路床層における影響程度を反映したものととして比較評価が可能であると考えたこと。

3) 3.1.2 で後述するが、FWD 散逸仕事量は温度によって変化し、舗装断面構成によってもその値が異なることから、アスファルト混合物層の影響を確実に受けていると認められること。なお、路盤層や路床層の影響部分は温度によってさほど変化しないものと考えている。

4) 室内試験である曲げ疲労試験によって得られる散逸エネルギーと混合物の疲労破壊回数との間には両対数紙上で直線の関係が成立することが既に知られている^{7,8)}が、現場試験である FWD 試験によって得られる FWD 散逸仕事量と混合物層の疲労破壊現象の間にも同様の関係が成立するか検証する意義があると考えたこと。

(3) FWD 散逸仕事量の算定方法

美々新試験道路において測定した FWD 時系列データから FWD 散逸仕事量を算定する手順は図 3.1-2 および以下の説明のとおりである。すなわち、載荷荷重と載荷点直下のたわみ量 D0 の時系列データのサンプリング間隔は 0.002 秒であり、載荷過程においてはサンプリング間隔毎にたわみ量の増加分と荷重の変化分の積を算出して積算し、除荷過程においてはサンプリング間隔毎にたわみ量の減少分と荷重の変化分の積を順次引き算することでヒステリシスループに囲まれた部分の面積に相当する FWD 散逸仕事量を算出した。なお、FWD の測定は、1 測点につき 4 回の衝撃荷重の載荷を行っているが、この内、1 回目のデータを棄却し、2、3 および 4 回目の各々について散逸仕事量を算定し、その平均値を 1 測点の FWD 散逸仕事量とした。

(4) 舗装体温度の整理方法

アスファルト混合物の性状は、混合物温度の影響を受けることが知られており、舗装体温度に応じて FWD 散逸仕事量も影響を受けると予想されたことから、FWD 散逸仕事量の整理に当たっては、測定時

の舗装体温度と対応させた整理を行うこととした。

美々新試験道路では、旧 A 交通断面、旧 B 交通断面、旧 C 交通断面および旧 D 交通断面の 4 種類の舗装内部に、表 3.1-2 に示す深さに熱電対を埋設し、FWD 測定時の舗装体温度観測を行っており、そのうち、表 3.1-2 中に網掛けで示したアスファルト混合物層における温度測定結果を元に、アスファルト混合物層の平均温度を式 3.1-1 によって算定した。

$$t_{as} = ((t_0 + t_1)h_1 / 2 + (t_1 + t_2)(h_2 - h_1) / 2 + \dots + (t_{n-1} - t_n)(h_n - h_{n-1}) / 2) / h_n \quad \text{式 3.1-1}$$

- t_{as} : アスファルト混合物平均温度(°C)
- t_0 : 路面温度(°C)
- t_i : 路面から深さ h_i の位置の混合物温度 (°C)
- h_i : 路面から1番目の熱伝対埋設深さ(cm)
- t_n : 路面から深さ h_n の位置の混合物温度 (°C)
- h_n : 路面から1番目の熱伝対埋設深さ(cm)

表 3.1-2 各舗装断面の温度測定深さ
(A, B, C, D 旧交通断面)

A交通断面	B交通断面	C交通断面	D交通断面
3	4	4	5
7	9	9	17
12	15	14	26
32	20	20	35
52	40	26	40
72	60	41	60
82	80	61	80
		81	100

(単位 : cm)

3. 1. 2 調査研究の成果

(1) 舗装体温度と FWD 散逸仕事量の関係

舗装体温度と FWD 散逸仕事量の関係を舗装構造別に整理した結果を図 3.1-3、図 3.1-4、図 3.1-5 に示す。図 3.1-3 は、TA 法で標準的に設計された混合物層厚が各々異なる A、B、C、D 旧交通断面のグループについて整理したものであり、図 3.1-4 と図 3.1-5 は混合物層厚が各々 12cm と 15cm で混合物層最下層の混合物種が異なるグループについて整理したものである。なお、整理対象としたデータは、供用後の年数があまり経過しておらずダメージの累積が少なく、かつほぼ通年で FWD 調査を実施している 1993～1995 年のデータとした。

まず図 3.1-3、図 3.1-4、図 3.1-5 から、いずれの舗装断面においても、舗装体温度が 25°C 程度までの範囲では温度の増加に伴い FWD 散逸仕事量が増加

し、舗装体温度が 25°C 以上になると FWD 散逸仕事量は横ばいもしくは低下する傾向があり、その傾向は 2 次曲線で近似できるようである。また、図 3.1-3 より、TA 法で標準的に設計され、混合物層厚が各々異なる場合には、FWD 散逸仕事量は異なっていることが分かる。図 3.1-4 からは、同じアスファルト混

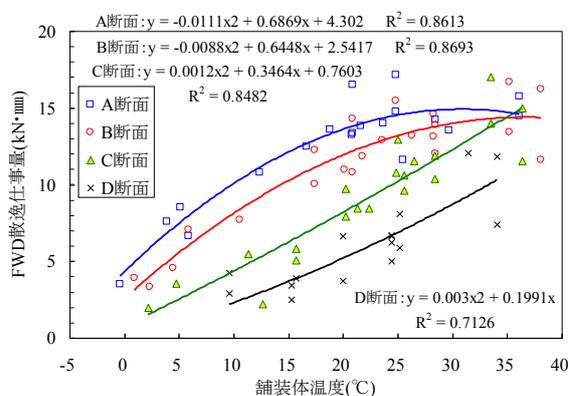


図 3.1-3 舗装体温度と散逸仕事量の関係
(A, B, C, D 旧交通断面)

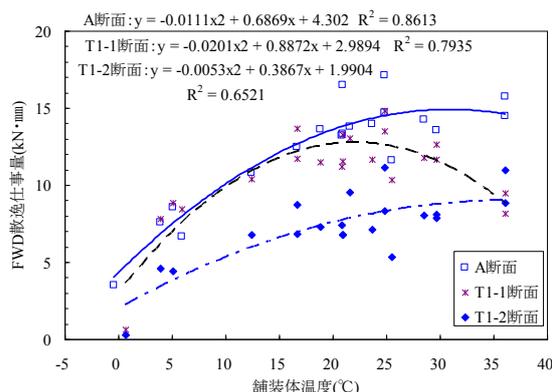


図 3.1-4 舗装体温度と散逸仕事量の関係
(As 層厚 12cm)

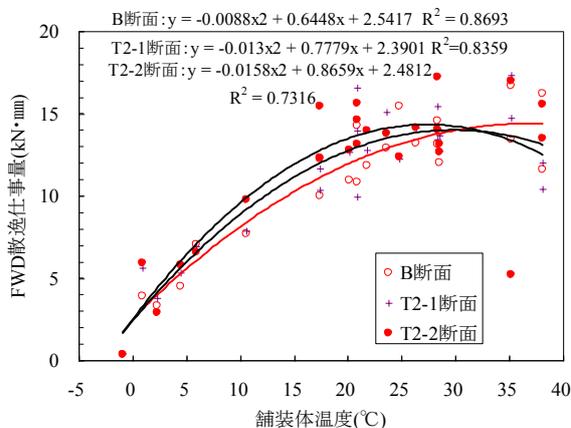


図 3.1-5 舗装体温度と散逸仕事量の関係
(As 層厚 15cm)

合物層厚さ 12cm であっても、T1-2 断面の FWD 散逸仕事量は小さい傾向がみえる。その一方で、図 3.1-5 からは、舗装断面による差は認められない。

(2) 舗装断面構成と FWD 散逸仕事量の関係

1) アスファルト混合物層厚さと散逸仕事量の関係

アスファルト混合物層厚さと FWD 散逸仕事量の関係を、図 3.1-6 に示す。図 3.1-6 中のプロットは、図 3.1-3、図 3.1-4、図 3.1-5 に示した各舗装断面の回帰式において、舗装体温度が 10°C として算定した値としている。ここで、10°C としたのは、美々新試験道路の年間の平均舗装体温度が概ね 10°C であることから、10°C の時の値で代表させたものである。アスファルト混合物層が厚くなれば散逸仕事量が小さくなる傾向が確認できる。

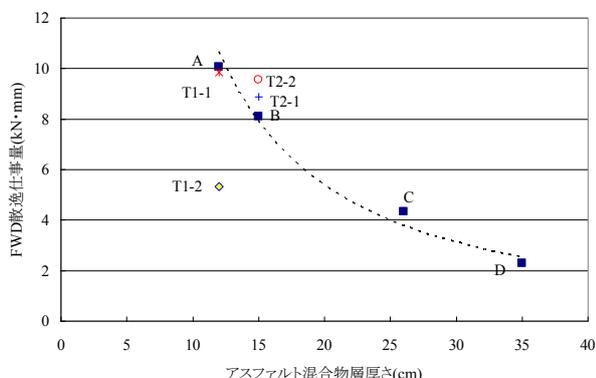


図 3.1-6 アスファルト混合物層厚と散逸仕事量 (10°C)

2) 基層混合物の種類と散逸仕事量の関係

アスファルト混合物層厚さが同じであるが、基層混合物の種類が異なる旧 A 交通、T1-1 および T1-2 と旧 B 交通、T2-1 および T2-2 のアスファルト混合物層厚さと散逸仕事量の関係を整理した結果を図 3.1-7、図 3.1-8 に示す。なお、図 3.1-7、図 3.1-8 中の値は、図 3.1-3、図 3.1-4、図 3.1-5 に示した各舗装断面の回帰式において、舗装体温度が 10°C として算定した値である。

アスファルト混合物の最下層に粗粒度混合物を使用している T1-2 断面の散逸仕事量が、最下層が安定処理混合物である旧 A 交通断面や T1-1 断面の散逸仕事量にくらべて小さく差が見られる一方、アスファルト混合物層の最下層に密粒度混合物を使用している T2-2 断面の散逸仕事量が、最下層が安定処理である旧 B 断面や T2-1 断面とほぼ同じとなっている。アスファルト混合物層の厚さが同一であっても、混合物の種類に応じて散逸仕事量は異なるのではないかと推測していたが、一定の傾向を確認することはでき

きなかった。

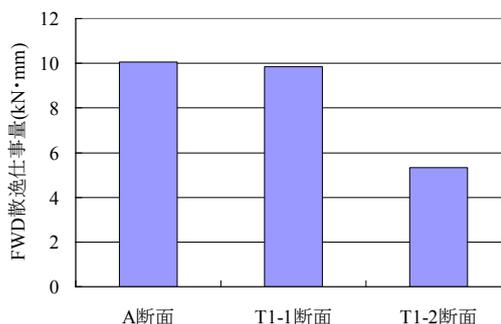


図 3.1-7 混合物層厚 12cm の断面の FWD 散逸仕事量 (10°C)

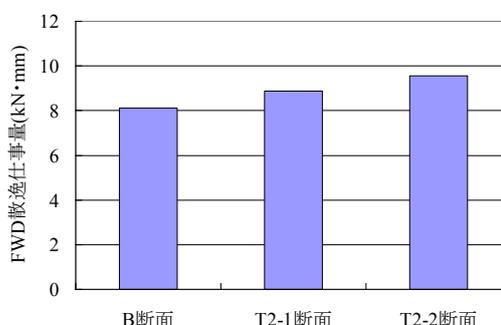


図 3.1-8 混合物層厚 15cm の断面の FWD 散逸仕事量 (10°C)

(3) ひび割れ発生後の散逸仕事量の変化

ひび割れの発生前後の混合物温度と散逸仕事量の関係について整理した結果を図 3.1-9 に示す。舗装に損傷の生じていない 1993 年～1995 年のデータを用いた混合物温度と散逸仕事量の散布図に、最初に疲労ひび割れが発生した前後のデータ (2000 年 10 月～2001 年 10 月) およびオーバーレイ後、リフレクションクラックが発生する前後のデータ (2003 年 7 月～2006 年 6 月) をプロットし損傷に伴う舗装体温度と散逸仕事量の関係について整理した。

旧 A 交通断面においては、直接荷重の影響を受ける IWP の散逸仕事量は、舗装の損傷に伴い損傷前の混合物温度と散逸仕事量の関係から乖離する傾向が見られる。旧 B 交通断面においても、直接荷重の影響を受ける IWP の散逸仕事量は、舗装の損傷に伴い損傷前の混合物温度と散逸仕事量の関係から乖離する傾向が見られる。

一方、旧 C 交通断面は、調査期間中に疲労ひび割れは発生しておらず、散逸仕事量と温度の関係に乖

離は見られない。旧 D 交通断面も、調査期間中に疲労ひび割れは発生しておらず、概ね散逸仕事量と温度の関係に乖離は見られない。

以上のことから、疲労ダメージの蓄積や疲労ひび割れの発生に伴って散逸仕事量は健全な状態における値よりも大きくなる傾向を示すと推測される。

(4) FWD 散逸仕事量と疲労破壊時 49kN 換算輪数

FWD 散逸仕事量と疲労ひび割れ発生時点までの累積 49kN 換算輪数との関係および、疲労ひび割れ発生時点までの散逸仕事量の総和と疲労ひび割れ発生時点までの累積 49kN 換算輪数との関係について、疲労破壊が生じた 5 つの舗装構造(旧 A、T1-1、T1-2、旧 B、T2-1 断面)を対象に整理を行なった結果を図 3.1-10、図 3.1-11 に示す。図 3.1-10 における単位散逸仕事量とは、舗装体温度が 10℃の時の 1 回の FWD 載荷による散逸仕事量と定義したものである。10℃の時の FWD 散逸仕事量で代表させたのは、美々新試験道路の年間の平均舗装体温度が概ね 10℃であるため、各々の舗装断面の 10℃の時の 1 回の FWD 載荷による散逸仕事量(=単位散逸仕事量)は

図 3.1-3、図 3.1-4、図 3.1-5 に示した回帰式から算定した。また、図 3.1-11 における総散逸仕事量とは、単位散逸仕事量 \div 49kN 輪での 1 回走行当りの散逸仕事量とみなして、疲労ひび割れ発生までに通過した累積 49kN 換算輪数を単位散逸仕事量に乗じて得られる、疲労ひび割れ発生までの散逸仕事量の総和と定義したものである。

なお、図中には、現段階では疲労ひび割れの発生に至っていない。旧 C 交通断面、旧 D 交通断面、T2-2 断面に対しても、疲労破壊までの年数を予測した筆者らの研究結果⁹⁾を用いて、疲労ひび割れ発生予測時期までの累積 49kN 換算輪数を計算して、併せて白抜き表示でプロットした。また、アスファルト混合物層の最下層が安定処理混合物の断面のデータ群(旧 A、旧 B、旧 C、旧 D、T1-1、T2-1 断面)に対して回帰線を求めた結果も表示しておいた。

図 3.1-10 に示すとおり、これまでに疲労ひび割れの発生が確認された舗装断面のデータだけでは、傾向がつかめないものの、予測値まで含めると、単位散逸仕事量と疲労ひび割れ発生時の累積 49kN 換算

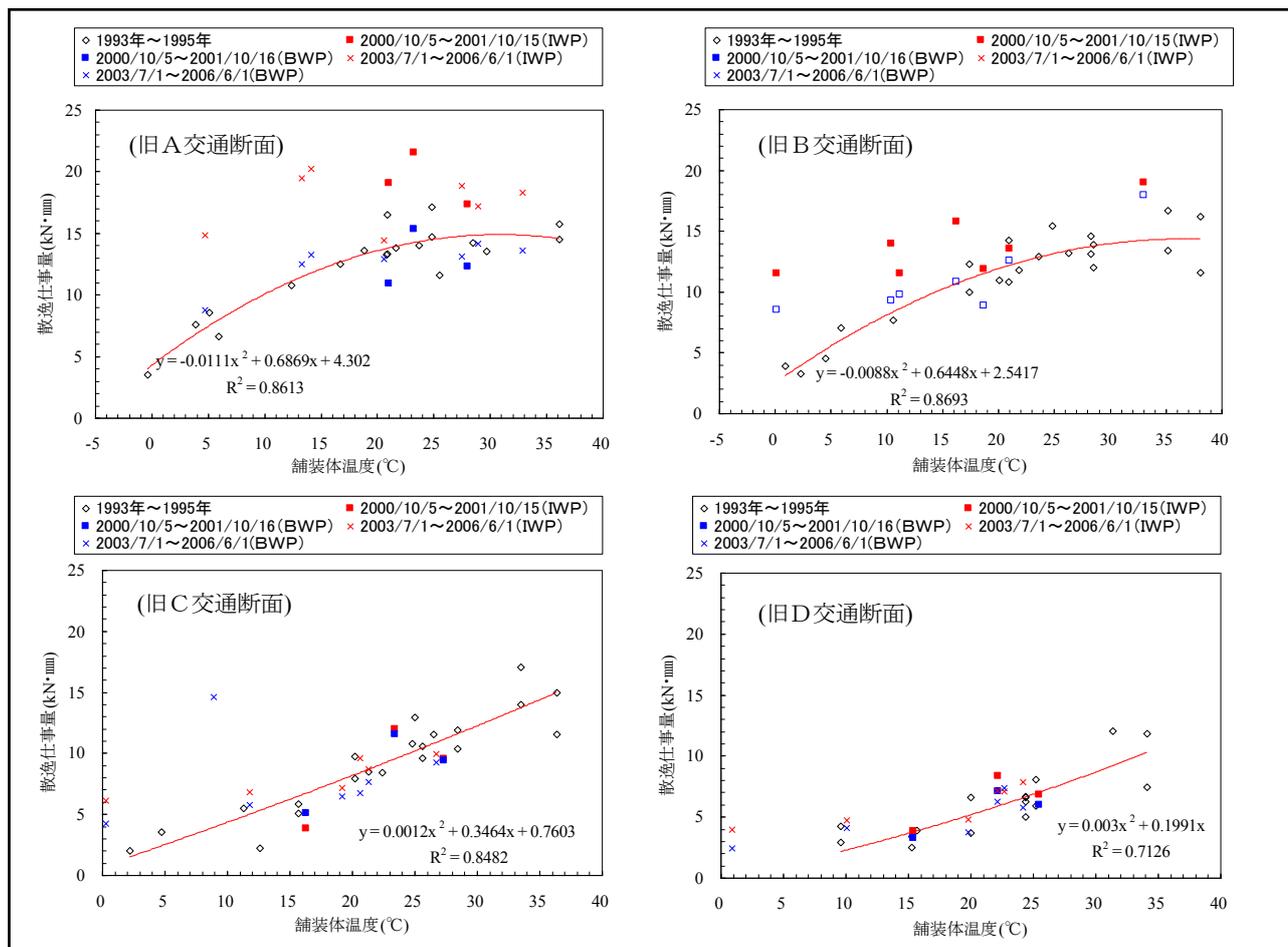


図 3.1-9 疲労ひび割れ発生後の FWD 散逸仕事量変化 (A, B, C, D 旧交通断面)

輪数は、両対数紙上で直線の関係が明確となる。また、図 3.1-11 からは、総散逸仕事量と累積 49kN 換算輪数の間にも両対数紙上で直線となる関係が認められる。

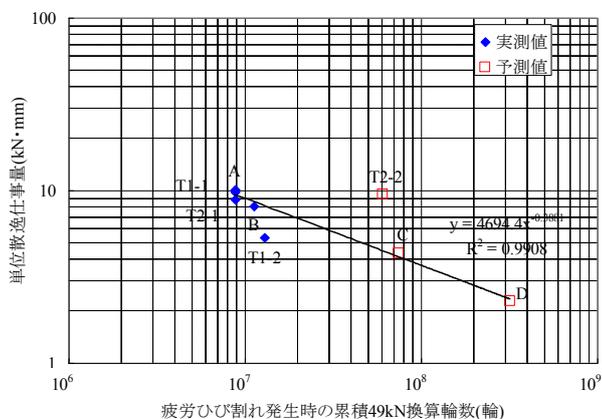


図 3.1-10 FWD 散逸仕事量 (10°C) と疲労破壊輪数の関係

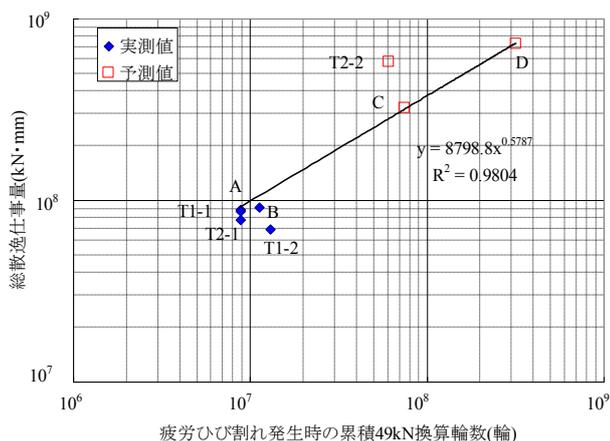


図 3.1-11 総散逸仕事量と疲労破壊輪数の関係

室内での疲労曲げ試験より得られる散逸エネルギーは、試験方法等によらず疲労破壊回数と両対数紙上で直線関係にあることを姫野らや Van Dijk が報告している^{7),8)}。FWD 散逸仕事量と疲労破壊回数においても同様の関係が成立するものと類推できる結果が得られたと考えており、FWD 散逸仕事量は舗装体の疲労ダメージの評価を行う際に有用な指標になりうると思われる。しかし、図 3.1-10、図 3.1-11 において、混合物層の最下層に粗粒度混合物を使用した T1-2 断面と、密粒度混合物を用いた T2-2 断面は、混合物層の最下層に安定処理混合物を使用した断面から得られる回帰線とは離れた位置にプロットされており、これらのデータも含めて矛盾なく説明できる結果とはなっていない。

以上のように、FWD 散逸仕事量は疲労破壊時期との関連を説明できる有用な指標となりうるものの、まだ今後も様々な現場におけるデータを蓄積し、検証を行ったうえでの判断が必要なものと考えられる。

3. 1. 3 まとめ

疲労ひび割れの発生に伴って FWD 散逸仕事量は健全な状態における値よりも大きくなる傾向が確認された。舗装が健全な時点の混合物温度と FWD 散逸仕事量の関係を求めることにより、舗装の構造的破壊の評価指標に用いることが可能と考えられる。

3. 2 電磁波レーダを利用した診断手法の検討

橋面舗装内部に浸入した水分は、舗装混合物のはく離や床版コンクリートの耐久性を低下させる原因になると考えられる。積雪寒冷地ではさらに、冬期間路面に凍結防止剤として塩化ナトリウムを散布することがあり、水分に溶けた塩化ナトリウムが橋面舗装内部に浸入し、混合物や床版コンクリートに悪影響を及ぼす可能性もある。橋面舗装内部の水分や塩分の存在を非破壊で検知できれば、混合物層のはく離損傷やコンクリート床版への影響評価を行う際に有用と考えられる。そこで本研究は、水分や凍結防止剤(本研究では塩化ナトリウムに限る)を含んだアスファルト混合物が電磁波レーダの比誘電率や反射波特性に与える影響について、基礎的な実験によって検証を試み、電磁波レーダによる水分や塩分検知の可能性を探った¹⁰⁾。

橋面舗装の基層混合物に使用されることの多い粗粒度混合物が、乾燥状態、真水含水状態、塩水含水状態にあるときに各々の比誘電率やレーダ反射波の測定を行った。実験方法や実験条件を以下に述べる。

3. 2. 1 調査研究の方法

(1) 比誘電率測定方法

30cm×30cm×5cm の粗粒度混合物試料からφ4cm、厚さ 1cm の円柱状試料を切り出し、その中心をφ1.5cm くり抜いて、同軸管による S パラメータ反射法で周波数域 45~3000MHz の比誘電率を計測した。

(2) 反射波測定方法

図 3.2-1 に示すように、表層に細粒度ギャップアスファルト混合物 5cm、基層に粗粒度アスファルト混合物 5cm を配した縦 30cm×横 30cm×厚さ 10cm の供試体を金属板の上に 6 枚並べ(乾燥状態 2 枚、真水含水状態 2 枚、塩水含水状態 2 枚)、その表面上を周波数 1000~2000MHz の電磁波レーダで通過計測して反射波を比較した。真水含水状態や塩水含水状態と

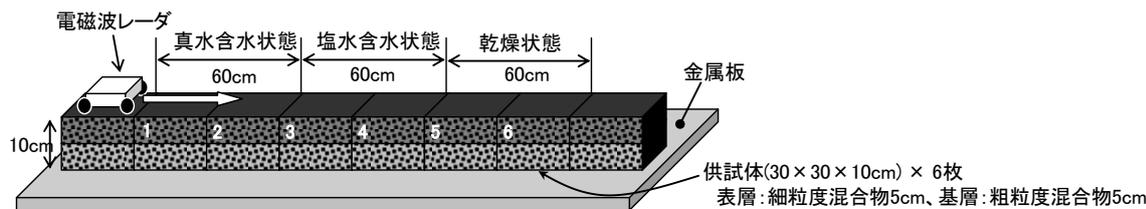


図 3.2-1 反射波測定概要図

するためには試験前約 1 週間水槽に浸漬し、試験の際に供試体表面の水分または塩水をふき取り計測を行った。浸漬した塩水の濃度は 25% と飽和に近い濃度、水温は約 20℃ とした。

3. 2. 2 調査研究の成果

(1) 比誘電率計測結果

比誘電率の測定結果を図 3.2-2 に示す。粗粒度混合物が乾燥状態と真水含水や塩水含水状態の比誘電率を比較すると、500MHz 以下では比誘電率に明らかな差が見られる。500MHz 以上では乾燥と真水含水または、乾燥と塩水含水の間では若干の差が見られるものの、真水含水と塩水含水の間では大きな差がみられない。

比誘電率は周波数に応じて変化しており、周波数が高くなると乾燥と真水含水および塩水含水の比誘電率の差は小さくなる傾向にあるのが分かる。路面から数 cm から数 10cm の範囲の損傷検知を目的とした場合、一般的には使用するレーダの周波数は 1000MHz 以上の高周波数を用いるのが適当で、それよりも低い周波数では損傷部位の検知精度が低下するとされる。水分検知を目的とする場合は、1000MHz 以上でかつ、比誘電率の差が認められる周波数を調査に用いる必要があるといえる。

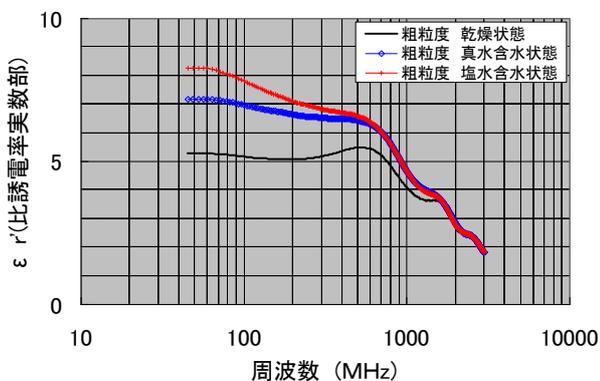


図 3.2-2 比誘電率計測結果

表 3.2-1 には、レーダの周波数が 1522MHz の時の比誘電率測定結果を示す。乾燥と真水含水、乾燥と塩水含水の比誘電率には若干の差があるが、真水含水と塩水含水の比誘電率は差がないことが分かる。なお、参考として既往文献においてアスファルト(乾燥)の比誘電率は 2~4、真水 81、海水 81、空気は 1 とされている¹¹⁾のと比べ、本試験で得られた結果は概ね妥当なものと考えられる。

表 3.2-1 比誘電率の値(1522MHz の場合)

試験条件 供試体	乾燥状態	真水 含水状態	塩水 含水状態
	粗粒度 (st80-100)	3.6	3.8

(2) 反射波測定結果

反射信号の遅れに着目した比較結果を図 3.2-3 に示す。厚さ 100mm の供試体の下に設置した金属板からの反射信号の深度(枠で囲んだ部分)について、乾燥状態の供試体において金属板からの反射信号の深度を 100mm とした場合、真水および塩水含水状態の反射信号は、ともに深度 105mm 程度の位置で反射信号が確認された。これは、図 3.2-2 と表 3.2-1 でも判明しているように、乾燥状態と真水および塩水含水状態では比誘電率が異なり、電磁波が入射する際に水分の影響で伝播速度が低下したため、本来 100mm の位置で得られる反射信号が、見かけ上約 5mm

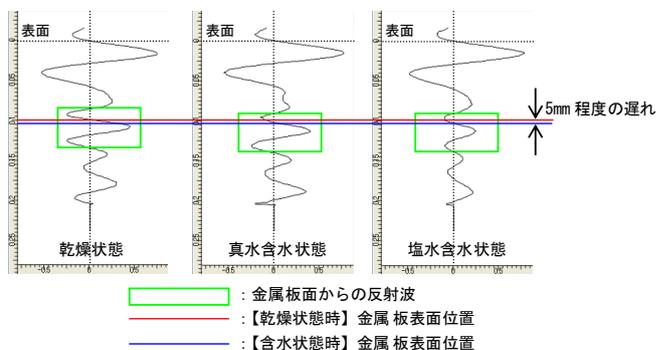


図 3.2-3 反射波信号の遅れ比較結果

程度深い位置で得られたものと考えられる。

反射信号の強度の変化に着目した比較結果を図 3.2-4 に示す。乾燥状態の供試体では金属板の反射信号(枠で囲んだ部分)は強い強度振幅で捉えられており、真水含水状態の供試体も乾燥状態とほぼ同様の強度振幅で反射信号を捉えている。一方、塩水含水状態の供試体では、他に比べて著しく反射信号の強度振幅が弱い状況が確認された。これは、真水に比べて塩水は電解質で電気伝導性をもつ物質のため、その影響を受けたものと推測され、電磁波レーダによって塩分の存在を検知できる可能性を示唆している。

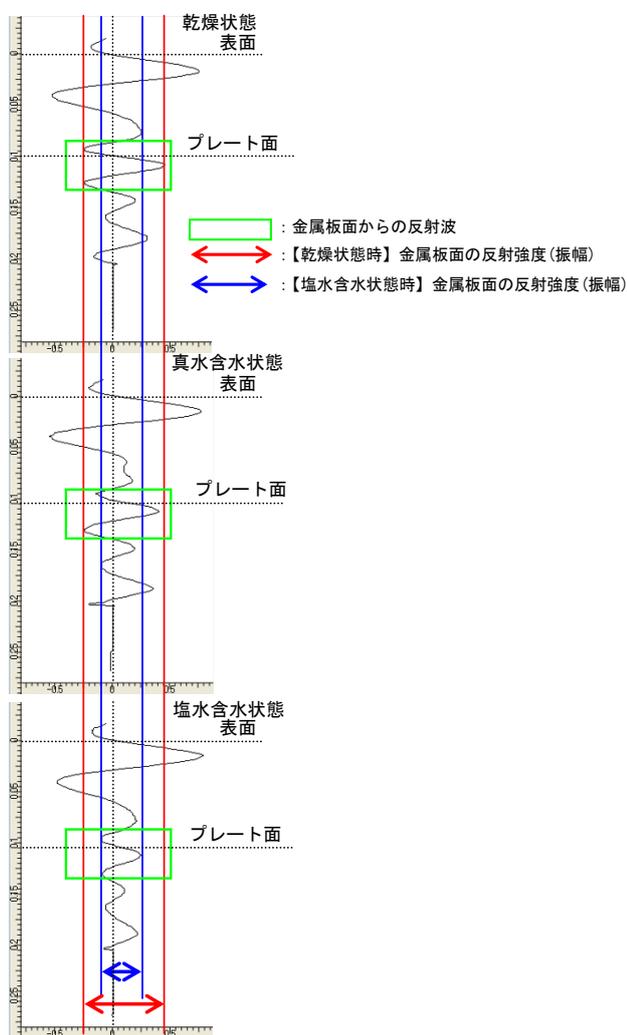


図 3.2-4 反射波信号強度の比較

3. 2. 3 まとめ

アスファルト混合物の乾燥時、真水含水時、塩水含水時の比誘電率を把握した。さらに、反射波測定によって、真水、塩水ともに含水状態では反射信号

の遅れが発生し、塩水含水状態では反射信号の強度が乾燥状態や真水含水状態と比較して弱くなることを確認した。そして、電磁波レーダによって、舗装内の水分滞留状態や、滞留している塩分の存在を検知できる可能性があることがわかった。

3. 3 赤外線カメラによる診断手法の検討

舗装体内部の損傷を非破壊かつ非接触で調査する手法として、これまでも赤外線カメラによる計測法が用いられてきた部分があるが、主に固定カメラによる静止画像によって診断するものであり、予防保全を行う際に必要となる広範囲のスクリーニング的な調査への適用性に難点があった。また、診断目的も舗装のブリスタリングや内部のはく離発生などを事後的に検知することに絞られており、本研究で対象としているような融雪期のポットホールなどの損傷の発生を事前に予防的に検知する技術としての検討は行われていない。

そこで本研究では、交通規制を行わずに法定速度で調査車両を走行させて赤外線熱計測をする技術^{12),13)}の開発が近年進んできた点に着目し、赤外線カメラによって供用中の道路を交通規制することなく計測して得られたアスファルト舗装の熱分布画像から、融雪期のポットホール損傷に至るような温度変状を検知する技術の開発に向けた調査を行い、基礎的なデータの取得と整理を行った。

3. 3. 1 赤外線熱計測の原理

赤外線熱計測は、構造物における素材の違いや損傷の有無などの物質の状態に基づく赤外線放射量を赤外線サーモグラフィカメラで感知し、それから変換した温度の相違に基づき、外観から見えない内部の状態を把握する手法である。

構造物内部に含水、滞水、空隙等の異常が発生した場合、健全部と異常部では状態が異なるため、熱容量に相違が発生する。熱容量の相違は温度の相違となり、内部から表面上に伝わる温度にも相違が発生する。そのため、異常が発生した部位では、表面温度が健全部に比べて相対的に高いもしくは低い状態となる。

例えば、アスファルト舗装内部で含水や滞水している場合、加熱過程時であれば周囲よりも低温となり、一旦加熱された後の冷却過程時であれば周囲よりも高温となる。一方、アスファルト舗装内部で空隙が発生した場合は、昼間の太陽光による路面の加熱過程時であれば、表面側からの熱の伝導が空隙の

空気層によって遮られるため、空隙直上の部分は周囲のアスファルト舗装よりも早く熱せられ、周囲よりも高温となる。逆に夕方以降の気温低下に伴う冷却過程時であれば、空隙直上の部分の温度低下が早く、周囲よりも低温となる。すなわち滞水と空隙では一般的に温度平衡状態の場合を除き、温度の相対的な表出状態が反対になる(図 3.3-1)。

本研究では、特にポットホール発生箇所的事前検知に重点をおいた検討を行うものである。別途実施している研究によって、融雪期に発生するポットホールはひび割れが元々存在する部分でかつ水の影響を受けやすいところに高い確率で発生することがわかっているので、そのような部分を赤外線カメラによって検知することができればポットホール発生危険部位の事前検知が可能になると考えられる。つまり、ひび割れ周辺に多くの水分を含んだ状態になっているところや、水の影響を受けやすいところを赤外線カメラによる熱画像計測で温度変状箇所として抽出することで、ポットホール発生危険部位の事前検知が可能になるのではないかと考えられる。

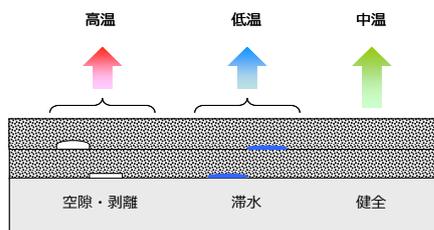


図3.3-1 健全部や滞水部の赤外線画像の傾向
(路面の加熱過程)

3.3.2 調査研究の方法

札幌市近郊のアスファルト舗装区間(延長 5km)において、秋期に、赤外線サーモグラフィカメラを用いて非破壊、非接触で路面測定を行った。赤外線サーモグラフィカメラは写真 3.3-1 に示すような車両に搭載し、通常の走行速度(60km/h 以下)で車線規制などは行わずに熱計測調査を実施できる。赤外線計測にあわせて、赤外線画像と同じ部位を可視画像でも撮影し、路面及び道路周辺の状況を把握した。走行計測で得られるアスファルト舗装の熱分布画像から、内部の含水や滞水に起因する温度変状箇所を抽出した。計測時の各種条件は以下のとおりである。

計測時期：12月1日

計測時間帯：10時～14時

気象条件：晴れ、早朝まで若干の降雪あり

計測時の路面状態：ほぼ乾燥状態

走行速度：法定速度内で実施(60km/h 以内)

また、秋期に赤外線計測を実施した 5km 区間において、融雪期に発生したポットホール箇所を確認する目視調査を3月中旬に行い、融雪期にポットホールが発生した箇所の赤外線画像データを整理した。



写真 3.3-1 赤外線カメラを搭載した調査車両

3.3.3 調査研究の結果

赤外線計測時の舗装表面はほぼ乾燥状態であったが、前日までの雨や早朝までの降雪に伴う水分の影響で、多くの箇所では含水や滞水を示す温度の低下部分が確認された。特にひび割れなどの損傷が発生している周辺は、周囲と比較して温度が低い部分が多く見られ、ひび割れの周辺は含水している状態であると推測された。一例として、ある測定箇所の可視画像と赤外線画像を写真 3.3-2 に示す。可視画像では水分の存在は見られず、ひび割れが見られる以外は特段の変状は気にならないが、赤外線画像では外側タイヤ走行位置に発生したひび割れの周辺の温度が面的に低くなっていることが確認できた。これはひび割れ周辺のアスファルト混合物が含水や滞水によって温度が低くなっているためと推測される。同一の箇所を翌年3月に目視調査した際の写真を写真 3.3-3 に示すが、ポットホールが発生していた。写真 3.3-2、写真 3.3-3 において緑色で示した枠はほぼ同じ部位を囲っているが、融雪期にポットホールが発生した部位は、秋期の赤外線計測時には温度低下がはっきりと記録されていることが確認できる。ひび割れ部付近の混合物は水の影響を比較的受けやすく、ポットホールの発生に繋がる危険性があるが、

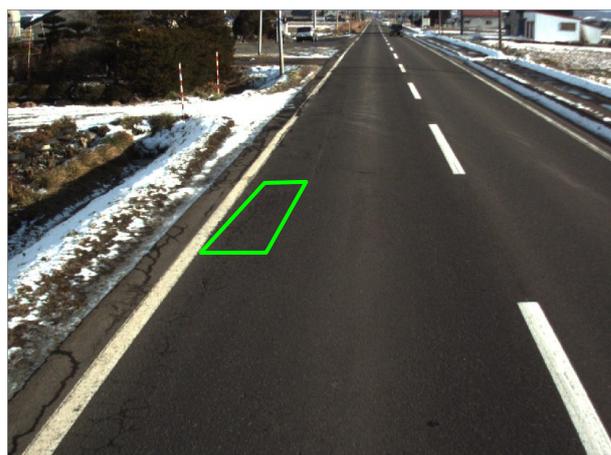
そのような部分は赤外線画像で周辺部と違いがあることが確認できた。

赤外線計測を行った 5km 区間のうち、水の影響を受けたとおもわれる温度変状が見られた部分を整理した結果を図 3.3-2 に示す。図 3.3-2 には、100m 区間内の 10m 毎の写真のうち、水の存在に起因すると思われる温度低下が見られた画像の枚数の多さに応じて、青色を濃く示してあり、車線部は横断方向に 3 分割して表示した。上下線とも幅広く温度低下箇所が見られ、特に、車道部の路肩に近い側に多く温度低下箇所が見られた。これらの部分にはひび割れが多く発生しており、ひび割れ周辺が水の影響を受けて含水や滞水していたためと考えられる。

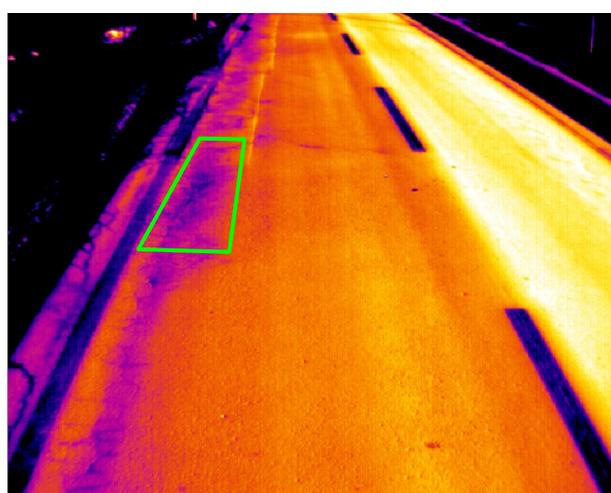
図 3.3-2 には、調査区間内で融雪期後の調査でポットホールが発生を確認した 23 箇所を緑色の丸印で囲って示してある。ポットホールが発生した箇所は、概ね秋の調査の段階で水分の影響を受けて温度低下が記録されていた箇所であることが確認できる。しかし別の見方をすれば、秋の段階で温度変状が見られた箇所のうちでポットホールの発生に至らなかった箇所も多く存在していることも指摘できる。

表 3.3-1 には、融雪期にポットホールが発生していた部位について、秋に撮影した赤外線熱画像と可視画像を詳細に確認した結果を示した。ポットホールの発生が確認された部位ほぼ全てで周辺部に比べて温度が低下していることが確認できた。このことから、ポットホール発生部位については含水状態や水分が滞留しやすい状態となっており、この水分が凍結・融解を繰り返すことによりポットホールの発生を引き起こすものと推察される。

今年度の赤外線カメラ計測による基礎的な調査によって、融雪期に発生するポットホール部位では、秋の段階で水分の滞留に伴う温度低下が見られることが確認されたが、秋の段階で温度変状が確認されていてもポットホールの発生に至っていない部位も多く存在する。また、ポットホールの発生は、ひび割れ部や欠陥部が水の影響を受けること以外にも、融雪期に実際に融雪水にどの程度晒されるかや凍結融解の回数や車両などの影響も受けるため、赤外線カメラのみでポットホールの発生を検知することには一定の限界があることも感じられる。そのため、ポットホール発生危険部位をあらかじめ検知するためにはまだ今後も計測診断を繰り返し行い、技術の開発を進める必要があると考えられる。



(可視画像)



(赤外線画像)

赤外線熱画像内：(低温) 濃い青←紫←橙→黄→白 (高温)

写真3.3-2 同一箇所の路面調査時画像



写真3.3-3 写真3.3-2と同一箇所の目視調査時状況
(ポットホールが発生し穴埋めされている)

3. 3. 4 まとめ

予防保全のための診断手法として、赤外線カメラによる損傷検知技術について基礎的な調査を行った。その結果、舗装に生じたひび割れの周辺部の水分の存在や空隙によって温度変状が発生しており、その温度変状を通常走行中の車両に搭載した赤外線カメラで検出できることを確認した。さらに、融解期にポットホールが発生する部位は、秋の段階で温度変状箇所として記録されていることが分かった。一方で、秋の段階で温度変状が確認されていてもポットホールの発生に至っていない箇所も多く存在していることから、今後、計測時期や計測時間を変えて継続的に赤外線熱計測データを蓄積するなどして、潜在的なポットホール危険箇所を事前に把握できるような技術開発を進めていく必要がある。

表 3.3-1 ポットホール発生部位の赤外線画像確認結果

No	秋期の路面状況	3月の目視調査時の路面状況	赤外線熱画像温度低下有無
1	損傷なし	ポットホール	有
2	ひび割れ	ポットホール	有
3	ひび割れ	ポットホール	有
4	パッチ	ポットホール	有
5	ひび割れ	ひび割れ、ポットホール	有
6	ひび割れ	ひび割れ、パッチ、一部ポットホール	有
7	ひび割れ	ひび割れ、一部ポットホール	有
8	ひび割れ、ポットホール	ひび割れ、ポットホール	有
9	ひび割れ、ポットホール	ひび割れ、ポットホール	有
10	ひび割れ	ひび割れ、ポットホール	有
11	ひび割れ、パッチ	ひび割れ、パッチ、ポットホール	有
12	パッチ	パッチ、ポットホール	有
13	ひび割れ	ひび割れ、ポットホール	有
14	ひび割れ、パッチ	ひび割れ、ポットホール	有
15	ひび割れ、ポットホール	ひび割れ、ポットホール	有
16	ひび割れ	ポットホール	有
17	ひび割れ、ポットホール	ひび割れ、ポットホール	有
18	ひび割れ、パッチ	ひび割れ、パッチ	有
19	ポットホール	ポットホール	有
20	ひび割れ、ポットホール	ひび割れ、ポットホール	有
21	ひび割れ、ポットホール	ひび割れ、ポットホール	有
22	ひび割れ	ひび割れ、ポットホール	無
23	ひび割れ	ひび割れ、ポットホール	有

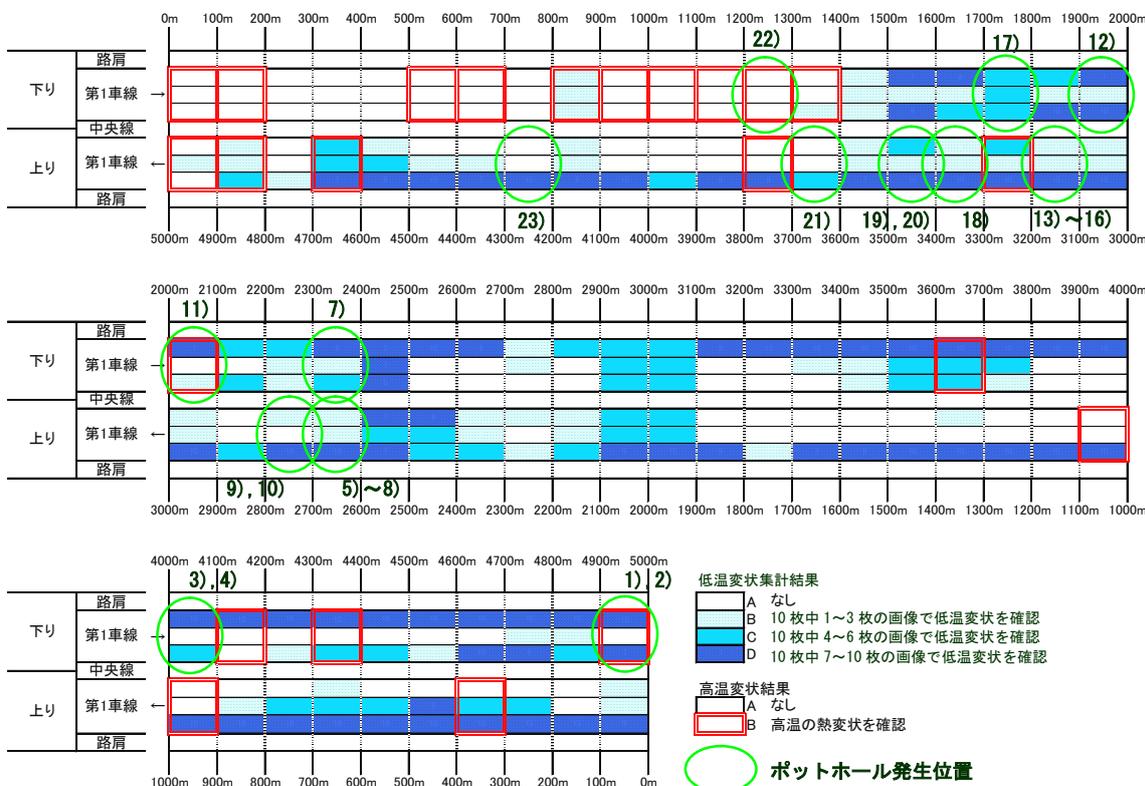


図 3.3-2 赤外線調査区間の温度変状箇所整理結果

3.4 X線CT画像およびデジタル画像相関法を用いた舗装の破壊メカニズムの解明

3.4.1 試験の方法

本試験では、アスファルト混合物内部の変位およびひずみなどを評価するため、ホイールトラッキング試験前後に、供試体内部の状況を把握することが可能な X 線 CT スキャナを用いて、輪荷重下の断面を撮影した。また、得られた CT 画像から、デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation、以下、DIC) により変位およびひずみを算出し、アスファルト混合物の破損原因に関する考察を行った。

(1) X線CT

本研究で用いた X 線 CT スキャナは、熊本大学が保有する産業用 X 線 CT スキャナを使用した。

管電圧を 300kV、スライス厚を 1mm、撮影領域を直径 150mm、画像再構成マトリクス数を 2,048×2,048 ピクセル、空間分解能を 0.073×0.073×1.0mm³ に設定した。試験対象は図 3.4-1 に示すとおり、150mm×300mm×50mm のアスファルト混合物供試体である。供試体の前部(y=250mm 付近)、中央部(y=150mm 付近)、後部(y=50mm 付近)の位置において、撮影時のターゲット骨材である電気炉酸化スラグ(密度=約 3.7g/cm³)を配置して供試体の撮影を実施した。

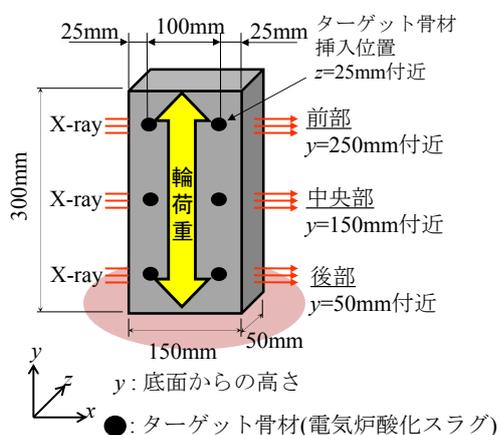


図 3.4-1 X線CT撮影方法

(2) ホイールトラッキング試験

今回の試験で使用したアスファルト混合物は最大骨材粒径 13mm の密粒度アスファルト混合物(以下、密粒度)にストレートアスファルト(以下、ストアス)を添加したもの(以下、W1)、及びポリマー改質アスファルト II 型(以下、PMA-II)を添加したもの(以下、W2)、並びにポーラスアスファルト混合

物(以下、ポーラス)にポリマー改質アスファルト H 型(以下、PMA-H)を加えたもの(以下、W3)の 3 種類である。

ホイールトラッキング試験は『舗装調査・試験法便覧』⁵⁾に示される方法で実施し、試験温度は 60°C、載荷荷重は 49kN である。載荷は xy 平面上の表面(z=0)で y 軸と平行に行った。

初期の圧密段階を想定した初期載荷として、載荷回数を 600 回に設定した。また、初期載荷後の挙動を観察するための載荷回数を 2,400 回とし、さらに大きな変位を観察するための載荷回数を 6,000 回に設定した。

ここで設定したそれぞれの載荷回数に到達した際に X 線 CT 撮影を実施した。なお、W2、W3 については 2,400~6,000 回におけるホイールトラッキング試験による変形量が W1 に比べ小さく、供試体内で大きな変形がなかったものと判断し、6,000 回での X 線 CT 撮影を実施しなかった。

(3) DIC

DIC は、測定対象物のデジタル画像の輝度値を利用して、測定前後の変形量と方向を同時に求める手法である¹⁴⁾。具体的な解析手順は以下のとおりである¹⁵⁾。

- ①変形前後のデジタル画像の取得
- ②変形前の画像に節点群を定義
- ③各節点を中心に相関窓の大きさを定義
- ④相関窓が移動すると想定される範囲を検索窓として定義
- ⑤相関窓を動かしながら式(3.4-1)により相関係数を算定

$$CC(u, w) = \sum_{x, z} I_1(x, z) I_2(x+u, z+w)$$

式 3.4-1

ここに、 $CC(u, w)$: 相関係数、 $I_1(x, z)$: 変形前の画像輝度値、 $I_2(x+u, z+w)$: 変形後の画像輝度値、 u : x 方向の移動量、 w : z 方向の移動量

- ⑥相関係数が最大となる位置を移動後の領域と同一とし、移動量を算出
- ⑦移動量をもとにひずみを算出

本研究では、供試体の断面寸法から、DIC 用の CT 画像サイズを 124.5mm×54.9mm(1,700×750 ピクセル)に設定した。また、相関窓、検索窓の設定は、25 年度は 15 ピクセル(約 1.1mm)、検索窓を 30 ピクセ

ル(約 2.2mm)として設定した。しかし、変位解析結果に多くのノイズが入り、ひずみを正しく算出することができなかった。そこで、図 3.4-2 に示すように、節点間隔を 14 ピクセル(約 1.0mm)、相関窓を 6 号砕石(粒径 5~13mm)の対数中間値である 110 ピクセル(約 8mm)に設定した。また、検索窓は、WT 試験の最大変位、CT 画像比較等から、 z の + 方向を検索窓に対し +35 ピクセル(約 2.56mm)、 z の - 方向を検索窓に対し -15 ピクセル(約 1.1mm)、 x 方向を検索窓に対し ± 25 ピクセル(約 2.56mm)に設定した。実際の解析は、熊本大学が保有する DIC プログラム "TomoWarp"¹⁶⁾により行った。

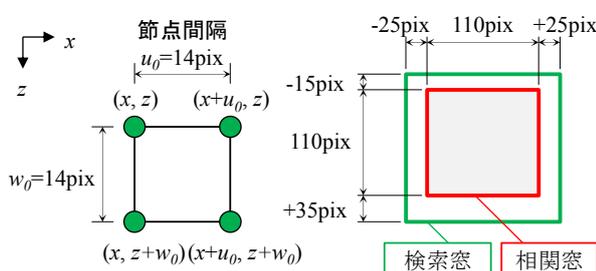


図 3.4-2 節点間隔、検索窓、相関窓の設定

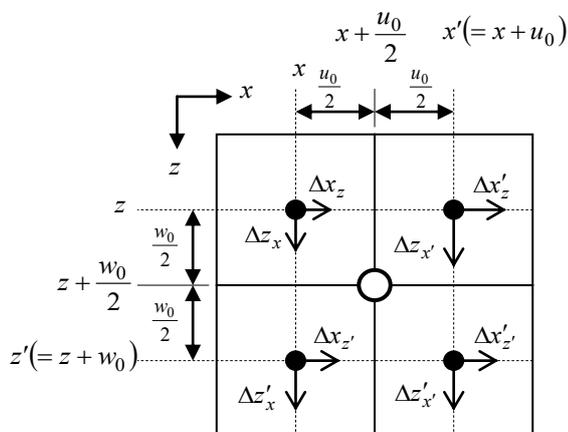


図 3.4-3 ひずみ算出のための座標系の設定

(4) ひずみの計算

ひずみはDICにより算出された変位から計算する。ひずみの計算は図 3.4-3 に示すように xz 座標系を設定し、4つの節点の中心において計算を行う。4 節点の中心における x 方向のひずみ ϵ_x は式 (3.4-2)、 z 方向のひずみ ϵ_z は式 (3.4-3) で表される。

$$\epsilon_x = \frac{(\Delta x'_z - \Delta x_z) + (\Delta x'_x - \Delta x_{z'})}{2u_0} \quad \text{式 3.4-2}$$

$$\epsilon_z = \frac{(\Delta z'_x - \Delta z_x) + (\Delta z'_{x'} - \Delta z_{x'})}{2w_0} \quad \text{式 3.4-3}$$

3.4.2 試験結果

(1) CT 画像

2,400 回載荷時の各供試体後部における CT 画像を図 3.4-4 に示す。CT 画像により表面のわだち掘れの形状が確認できるとともに、内部の骨材、空隙の状況を確認することができる。

ここで、DIC 解析を行うために、図 3.4-5 に示すような画像処理を行った。具体的には、はじめに原画像のノイズを取り除くために、メディアンフィルタと呼ばれる平滑化処理を行った。次に輪郭を抽出するためのエッジ処理と、骨材を抽出するためのしきい値処理を実施し、and 演算を行うことにより、骨材抽出画像を作成した。

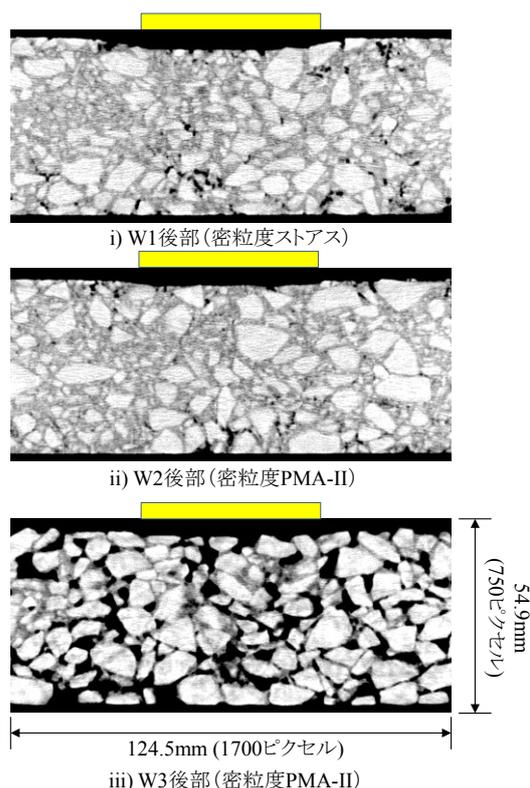


図 3.4-4 2,400 回載荷時における CT 画像

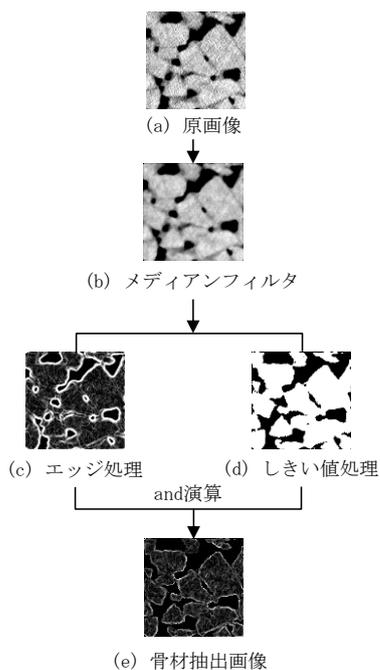


図 3.4-5 DIC のための画像処理

(2) DIC による変位特性

1) W1 (密粒度ストアス)

W1 後部の変位ベクトル図を図 3.4-6 に示す。

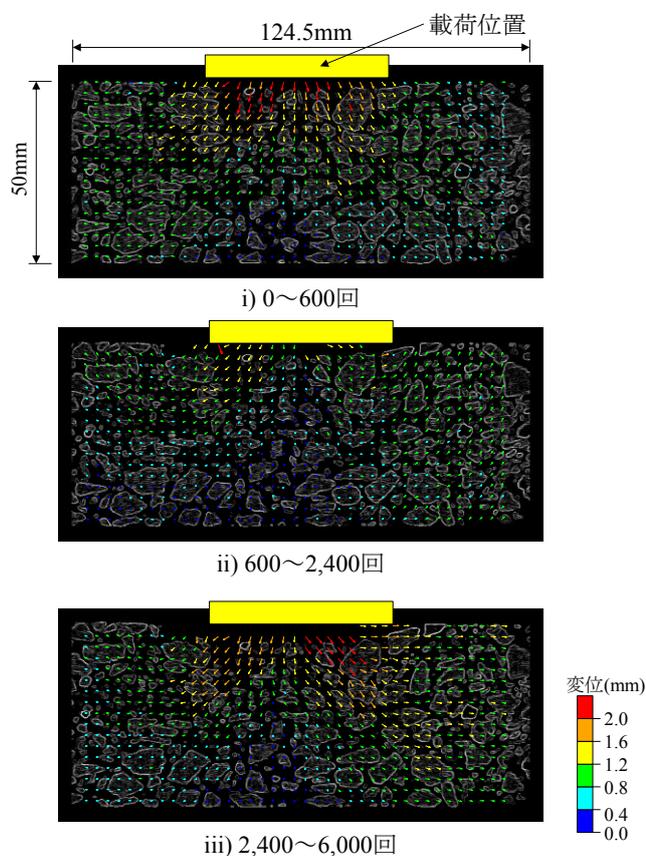


図 3.4-6 W1 後部における変位ベクトル図

0~600 回においては、荷重位置の直下において、鉛直下方向への移動が卓越していることが確認でき、2mm 以上の変位が確認できる。また、水平方向は側方部において外側への移動が卓越しており、その大きさは 1mm 程度である。全体的には荷重部直下から放射状に骨材が移動していることが確認できた。

600~2,400 回においては、荷重位置直下における鉛直下方向へ変位が小さくなる一方、側方部で鉛直上方向の変位が大きく、側方部で隆起していることが確認できた。

2,400~6,000 回においては、外側斜め 45°方向のベクトルが卓越しており、側方部では水平方向にも 1.2mm 以上のベクトルが確認できた。これは 600~2,400 回のケースとは反対に、鉛直に対して骨材が密な状況であり、鉛直下方向の移動が限られたために左右方向への引張りが強まったものと考えられる。

2) W2 (密粒度 PMA-II)

W2 後部の変位ベクトル図を図 3.4-7 に示す。

0~600 回においては、輪荷重直下を中心に鉛直下方向のベクトルが卓越しており、側方への変形はほとんどが 0.8mm 以下のものであった。これは PMA-II の特性である塑性変形抵抗性やたわみ追従性が発揮されたためと考えられる。

さらに 600~2,400 回においても、ほとんど変形が生じていないことが確認できる。

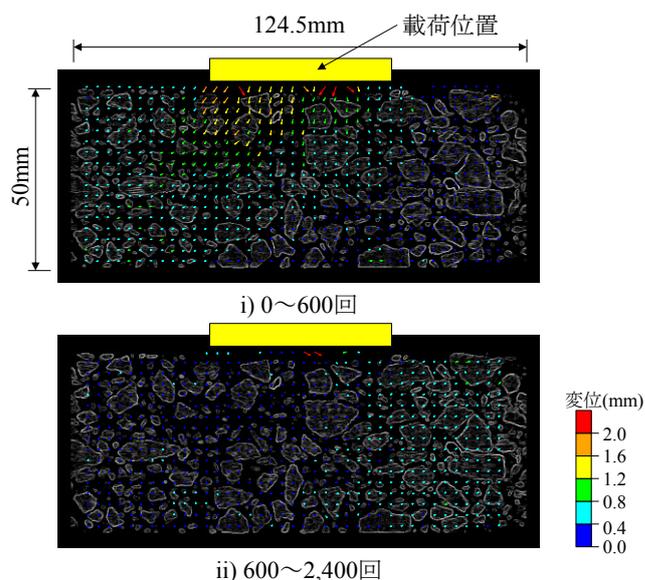


図 3.4-7 W2 後部における変位ベクトル図

3) W3 (ポーラス)

W3 後部の変位ベクトル図を図 3.4-8 に示す。

0~600 回においては、W2 と同様、輪荷重直下を中心に鉛直下方向のベクトルが卓越している。一方、側方への変形は W2 に比べ変位が 0.8~1.2mm のベクトルが多くなる傾向が見られた。

600~2,400 回においては、W2 と同様、ほとんど変形が生じていないことが確認でき、骨材のかみ合わせの効果、ならびに PMA-H がもつ塑性変形抵抗性および骨材飛散抵抗性の効果が発揮されたものと考えられる。

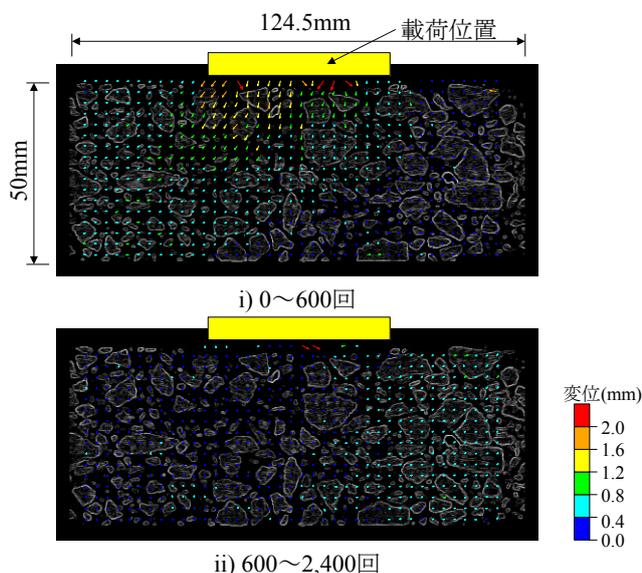


図 3.4-8 W3 後部における変位ベクトル図

(3) DIC によるひずみ特性

水平方向のひずみはアスファルト混合物の縦ひび割れに影響を及ぼす。そこで、W1 後部の水平方向のひずみを図 3.4-9 に、W2 後部の水平方向のひずみを図 3.4-10 に、W3 後部の水平方向のひずみを図 3.4-11 に示す。なお、青は圧縮ひずみ、赤は引張りひずみを表す。

1) W1 (密粒度ストアス)

W1 においては、载荷回数が増加するに従って引張りひずみが大きくなる傾向が見られた。また、0~600 回においては浅い部分で大きな引張りひずみが発生しているが、2,400 回、6,000 回と载荷回数が増えるに従い、引張りひずみの大きな部分は深い部分にまで達していることが確認できた。

2) W2 (密粒度 PMA-II)

0~600 回において荷重直下の浅い部分で W1 より

も大きい引張りひずみが発生していることが確認された。これは、W2 は W1 に比べ、「わだち割れ」(Top-down cracking)と呼ばれる縦ひび割れが発生しやすいことを示唆している。一方、600~2,400 回においては大きなひずみは見られなかった。松野¹⁷⁾は「わだち割れ」の原因との一つとして、「交通解放後の早期に入るものが多い」ことを挙げているが、これを裏付ける結果となった。

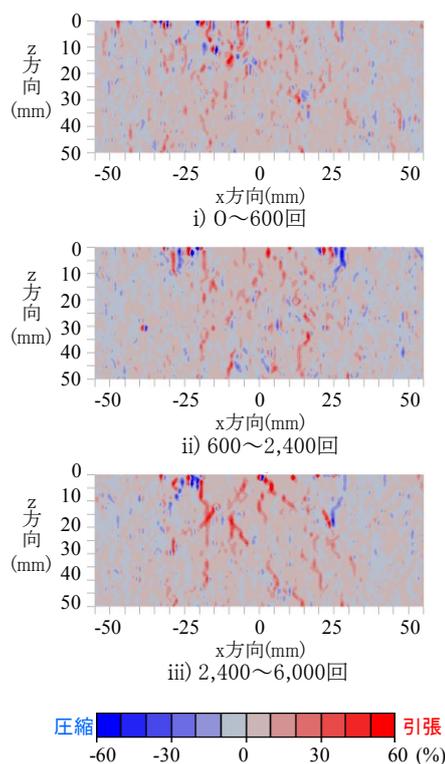


図 3.4-9 W1 後部における水平ひずみ

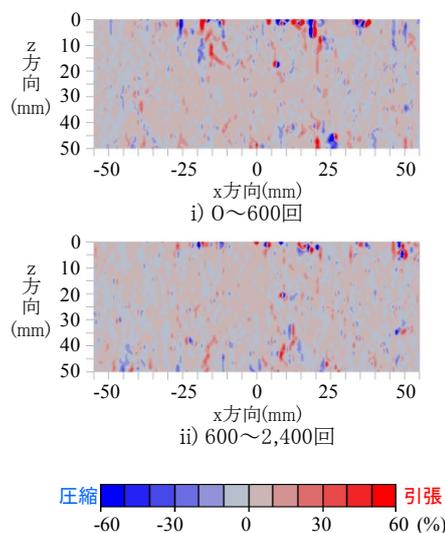


図 3.4-10 W2 後部における水平ひずみ

3) W3 (ポーラス)

0～600 回において密粒度とは異なり、荷重直下の深い部分で大きい引張りひずみが発生していることが確認された。Taniguchi ら¹⁸⁾は、北海道の高速道路のポーラスアスファルト混合物を用いて X 線 CT 撮影を行った結果、「縦ひび割れは舗装の表面からだけでは無く、舗装の内部または下部から発生する」と結論づけているが、今回の試験からもこの結論が裏付けられた。600～2,400 回においては、大きなひずみの発生は見られなかった。

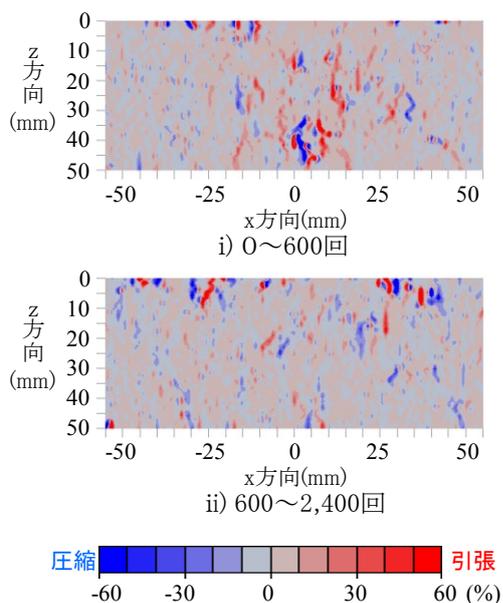


図 3.4-11 W3 後部における水平ひずみ

3. 4. 3 まとめ

本研究では、ホイールトラッキング試験供試体に X 線 CT 撮影及び DIC 解析を用いることで、舗装体内の変位およびひずみ特性を明らかにするとともに、縦ひび割れの発生原因を特定することができた。

4. 舗装の長寿命化のための予防的対策手法の提案

4. 1 積雪寒冷地におけるひび割れに対するシール材注入工法の検討

4. 1. 1 調査研究の方法

ひび割れへのシール材注入による延命効果を検証するために北海道の国道において試験施工を行い、シール材の残存率やひび割れ率などを追跡調査している^{19),20)}。試験施工は 2 種類実施しており、各々の調査箇所の概要を次に述べる。

(1) 発生形態の異なるひび割れに対するシール材注入工法の追跡調査

調査箇所 A および B (図 4.1-1) において、発生形態の異なるひび割れに対して平成 18 年度に施工した 2 箇所の試験施工箇所にて追跡調査を行った。

調査箇所 A は、舗装表面から下層に向かって伸びる「トップダウンクラック」が発生している。また、調査箇所 B は、舗装下面から上層に向かって伸びる「ボトムアップクラック」が発生している。

試験施工箇所の概要を表 4.1-1 に示す。試験施工箇所を使用しているシール材は、どちらの工区も高弾性タイプを使用している。



図 4.1-1 シール材注入工法の施工箇所図

表 4.1-1 調査箇所 A、B の概要

		調査箇所 A	調査箇所 B
延長		100m	100m
施工時期		2006年7月	2006年8月
大型車交通量		5,508台	801台
シール材	ひび割れ率(%)	31.9%	34.6%
	注入前の わだち掘れ量(mm)	13.1mm	13.7mm
路面性状値	平坦性(mm)	1.02mm	2.54mm

(2) 種類の異なるシール材を注入した試験施工箇所の追跡調査

調査箇所 C (図 4.1-1) において、シール材の種類による効果の差を検討することを目的として、同一区間内に種類の異なるシール材を連続的に注入した試験施工を行っている。施工前にひび割れ延長を測定しシール材注入後にシール材延長を測定した。そして、経年変化による変化を追跡調査し各種シール材の性状や残存状態を比較検討することとした。試験施工箇所の概要を表 4.1-2 に、試験施工の概要を図 4.1-2 に示す。本箇所は、トップダウンクラックが縦断的に連続に発生している箇所です試験施工は

下り車線のみ行き、各種シール材を隣接する同一車線に施工を行った。

表 4.1-2 調査箇所Cの概要

		調査箇所C
延長		320m
施工時期		2008年10月
大型車交通量		4,551台
シール材 注入前の 路面性状値	ひび割れ率(%)	11.3%
	わだち掘れ量(mm)	15.2mm
	平坦性(mm)	2.32mm

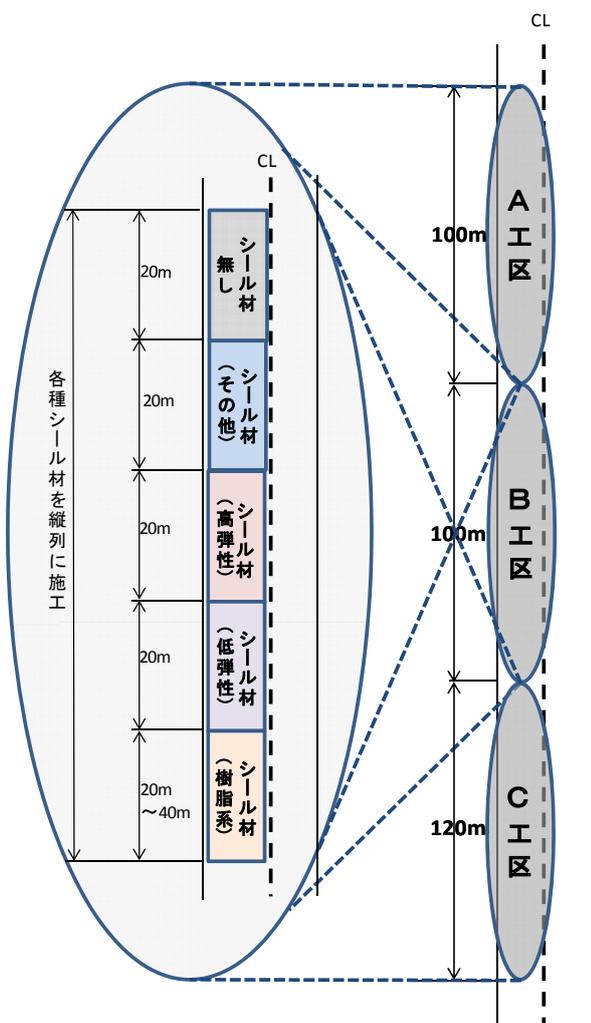


図 4.1-2 調査箇所Cの概要図

4. 1. 2 調査研究の成果

(1) 発生形態の異なるひび割れに対するシール材注入工法の追跡調査結果

1) シール材残存率調査結果

図 4.1-3 に経過月数におけるシール材の残存率の推移を示す。グラフより、施工後 46 ヶ月経過後の残存率は、調査箇所 A は、75%であったのに対し、調査

箇所 B は 11%の残存率となった。発生形態の異なるひび割れに対しシール材の注入を行った場合に、残存率の減少傾向に差が見られることが分かった。

トップダウンクラックが発生している箇所（調査箇所 A）においては、緩やかに残存率が減少したが、ボトムアップクラックが発生している箇所（調査箇所 B）においては、1 年経過後に半減し、4 年経過後に 90%程度減少したことが分かった。これらの結果より、トップダウンクラックに対して注入したシール材は、ひび割れ部分における骨材の飛散やアスファルトの剥離を予防し、ポットホール等に至ることを防止し、シール材としての機能を維持していると言える。しかし、ボトムアップクラックに対して注入したシール材は、これらの機能を維持されず剥離している。

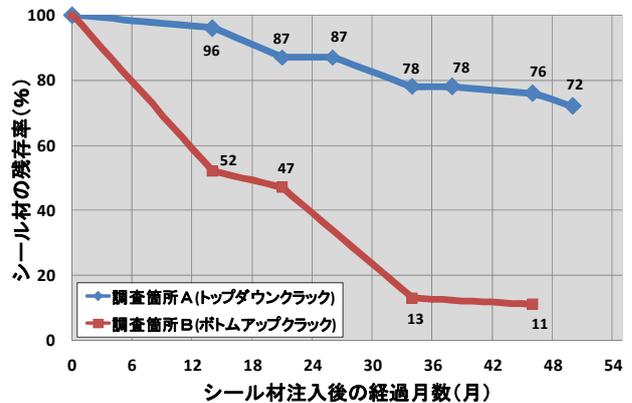


図 4.1-3 シール材の残存率推移結果

2) 経年変化による路面状況の調査結果

調査箇所 A の 46 ヶ月後の現地は、ひび割れの伸長は認められたが、シール材が注入され残存している部分は、ひび割れの角欠けや幅の拡大が抑制されており、路面補修を行うまで破損は進んでいない状況であった。調査箇所 B における 46 ヶ月経過後の路面状況は、破損が進みパッチング等の路面補修が行われていた。図 4.1-4 に調査箇所 B における路面補修および破損状態を面積率に表した円グラフを示す。路面補修が行われている面積は、14 ヶ月後の測定時には、10%だったのに対し、34 ヶ月後の測定時には 44%まで増加した。ボトムアップクラック箇所でのシール材注入は、早期に剥離や飛散を生じ、ひび割れ幅の拡大や角欠けを抑制することができないだけでなく、ポットホールなどの路面の破損が進行し、路面補修が行われたためであると考えられる。

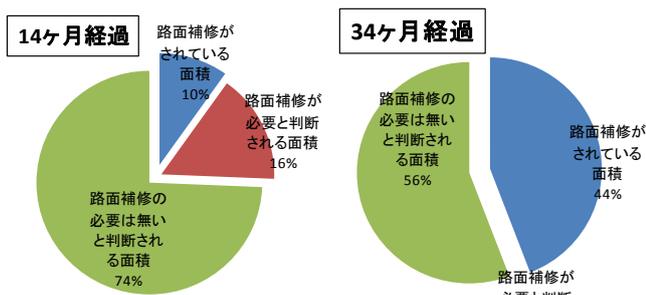


図 4.1-4 路面補修・破損状況割合 (調査箇所 B)

3) ひび割れ率調査結果

図 4.1-5 に調査箇所 A、B のひび割れ率の測定結果を示す。ここで、シール材を注入されているひび割れも、ひび割れ率に含めて計測している。21 ヶ月経過後のひび割れ率測定結果は、調査箇所 A が 41%、調査箇所 B が 54% であった。また、44 ヶ月経過後の測定結果は、調査箇所 A が 44%、調査箇所 B が 59% であった。シール材が注入されたひび割れを含めたひび割れ率は、両工区共に経年変化による増加傾向を示しており、この増加分は、ひび割れの伸長や新たなひび割れの発生分である。ひび割れ率の増加傾向から、シール材注入によってひび割れの伸長を抑制することはできないと言える。

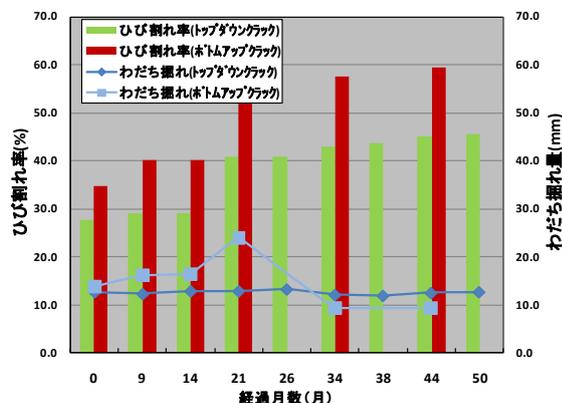


図 4.1-5 路面補修・破損状況割合 (調査箇所 A, B)

(2) 種類の異なるシール材の追跡調査結果

1) シール材残存率調査結果

図 4.1-6 にシール材注入延長の残存率調査結果を示す。32 ヶ月経過後の調査において、加熱注入型の高弾性タイプは 30%、低弾性タイプは 53%、フィラー入りアスファルトは 17% の残存率となった。また、常温注入型の樹脂系が 46%、瀝青系が 54% の残存率となった。調査結果より、各種類のシール材を比較す

ると、低弾性タイプ、常温型樹脂系・瀝青系は、高弾性、フィラー入りアスファルトより残存率がやや優れる値となった。

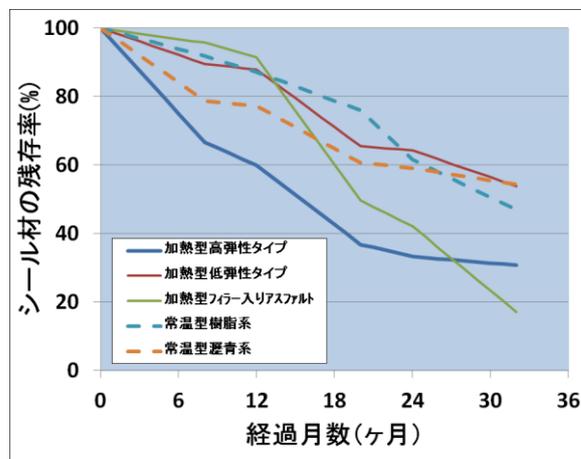


図 4.1-6 シール材の残存率推移結果

2) ひび割れ累積延長量調査結果

図 4.1-7 にひび割れ累積延長の調査結果を示す。12 ヶ月経過後の調査結果は、シール無し工区とシール材を注入した工区では、ひび割れ累積延長に差が見られた。その後、32 ヶ月後までのひび割れ累積延長の推移は、どの工区も同様な増加傾向を示している。これらの結果から、シール材注入を行った直後 1 年程度は、シール材注入を行わない場合よりも、ひび割れ伸び量を抑制できる傾向にある結果を得た。しかし、その後のひび割れ量の増加傾向が、シール材を注入の有無によって差が見られないことから、ひび割れの抑制効果は小さいと言える。

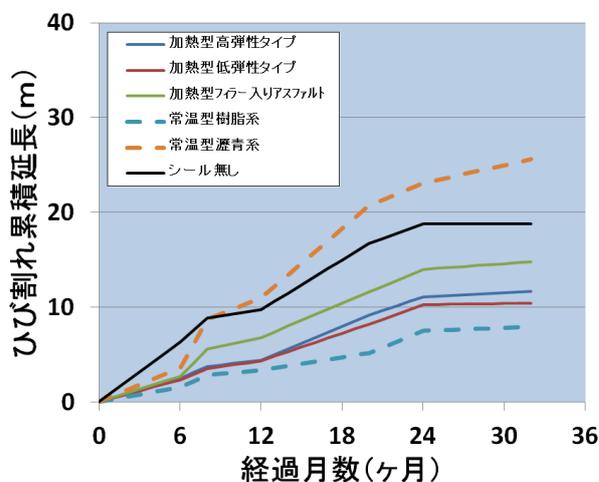


図 4.1-7 ひび割れ累積延長推移結果

4. 1. 3 まとめ

予防保全工法について、シール材注入の延命効果を調査した結果は、以下のとおりである。

(1) 発生形態の異なるひび割れに対して行ったシールの残存率の減少傾向に差が見られた。トップダウンクラック箇所において、残存率は緩やかに減少し、残存しているシール材はシール材としての機能を維持し、ひび割れの角欠けやひび割れ幅の拡大を抑制することで、路面補修を必要としない路面状態を保持している。

一方、ボトムアップクラック箇所においては、シール材の残存率が悪く剥離している。

(2) トップダウンクラックに対してはシール材注入による破損の進行を抑制する効果が認められ、2～3年程度の延命効果が得られた。ボトムアップクラックに対する延命効果は認められていない。

(3) 種類の違うシール材を注入し調査を行った結果、シール材の残存率の経年変化は、加熱注入型低弾性タイプと常温型は、加熱注入型高弾性タイプとファイラー入りアスファルトより比較的、残存率が高い値で推移している。このことより、加熱注入型低弾性タイプと常温型は、ひび割れ幅の拡大や角欠けを抑制する効果に優れると言える。

4. 2 ボトムアップクラックに対するシート工法を併用したオーバーレイによるひび割れ抑制手法の検討

4. 2. 1 調査研究の方法

ひび割れ抑制シートの疲労ひび割れ補修効果を検証する目的で、平成19年度に北海道の国道において試験施工を行っており²¹⁾、本研究では当該箇所において追跡調査を実施した。当該箇所は国道36号苫小牧市美々、交通量区分はN7 (3,000台以上、旧D交通)の路線箇所である。ここに、平成2年に交通量区分N5 (250以上1000台未満、旧B交通) 対応の開発局舗装標準断面(表層4cm、基層5cm、上層路盤6cm)を試験的に延長60m設けていたが、平成13年3月に疲労ひび割れの発生が観測され、その後平成14年3月に切削4cm+オーバーレイ4cmが施工された。さらにその後、平成19年度の時点で亀甲状の疲労ひび割れが全区間に亘って発生し、ひび割れ率が26%、わだち掘れ量が16.5mmと補修が必要な状況となったことから、補修に際して前述した目的の試験施工を行ったものである。補修工事は平成19年10月末に実施され、補修後に一般交通に供用されて約5年5ヶ月経過(平

成25年3月末現在)している。

補修方法の概要を図4. 2-1に示すが、既設舗装の表層を4cm切削後、ガラス繊維シートを基材に用いたひび割れ抑制シートを既設舗装の基層表面タイヤ通過位置に1m幅で縦断方向に連続して流し貼りし、表層に細密粒度ギャップアスコン13F55 (改質II型)を4cm舗設している。したがって、疲労ひび割れが発生した既設舗装は、部分的にシートの下にそのまま残存した状態である。ひび割れ抑制シート貼り付け後の状況を写真4. 2-1に示す。追跡調査項目は表4. 2-1に示すとおりであるが、試験目的がひび割れ抑制シートの疲労ひび割れ補修効果を検証することであるから、特にひび割れの再発状況の観察に重点を置いて調査している。

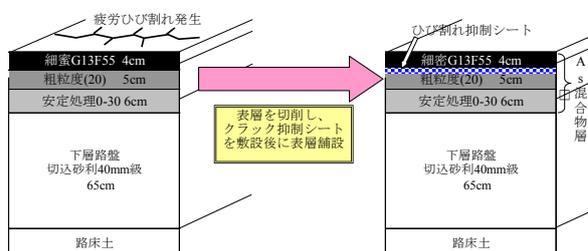


図4. 2-1 疲労ひび割れ補修方法概要図



写真4. 2-1 ひび割れ抑制シート貼り付け後の状況

表4. 2-1 追跡調査項目

わだち掘れ量
平坦性
ひび割れ率
交通量及び輪荷重
FWDによるたわみ量

4. 2. 2 調査研究の成果

供用後約8年間のわだち掘れ量、平坦性、ひび割れ率などの路面性状追跡調査結果を表4. 2-2に示す。特にひび割れ率に着目すると、約7年経過時点でひ

ひび割れ率は5%未満、約8年経過時点でもひび割れ率は10%未満となっており、ひび割れの進行が抑制されている。また、わだち掘れ量や平坦性の値も問題のない範囲となっており経過は良好である。

図4.2-2には、平成14年3月に施工した切削オーバーレイ後のひび割れ率追跡調査結果と、平成19年にひび割れ抑制シートを施工した後のひび割れ率追跡調査結果を対比して示した。切削オーバーレイでは施工後約2年でひび割れの再発が目立つようになり、約6年後には30%近くにまで進展したのに比べて、ひび割れ抑制シートはひび割れの再発を抑制していることが確認できる。

次に、交通量および車両重量調査結果を表4.2-3に示す。日当りの大型車交通量は約1,700台/車線である。また、輪荷重の49kN換算輪数は日当たりで約1,300輪であり、補修工事実施後、約5年5ヶ月経過までの間の累計49kN換算輪数は310万輪(平成25年3月現在値)に達している。舗装断面自体は交通量区分N5(250以上1,000台未満、旧B交通)に対応したものであり、その大型車交通量の上限1,000台/日に比べて、本試験箇所は約1.7倍の交通量であることがわかる。つまり、設計の想定より多くの交通量が通過する箇所での促進載荷試験の意味合いを持っている。また、交通量区分N5(250以上1,000台未満、旧B交通)の疲労破壊輪数は100万回/10年であるので²¹⁾、約5年5ヶ月経過までの間に既に疲労破壊輪数を大幅に上回る49kN換算輪数が通過していることになる。

以上を整理すると、1,700台/日の大型車交通量に対して少なくとも約5年の間ほびひび割れの再発が無いことから、交通量区分N5(250以上1,000台未満、旧B交通)の大型車交通量上限1,000台/日の場合には単純計算で $5 \times 1.7 = 8.5$ 年までのひび割れ抑制効果が確認できたことになる。交通量区分N5(旧B交通区分)の疲労破壊輪数を超える累積49kN換算輪数が作用してもひび割れの再発がほぼ無いことから、ガラス繊維シート基材のひび割れ抑制シートによってひび割れの発生が抑制されているものと評価できる。

次に、FWD調査結果を図4.2-3に示す。シートの敷設によって補修前後でたわみ量は改善傾向を示すと予想していたが、シートを敷設したIWP部(Inner Wheel Path、内側タイヤ通過位置)のたわみ量は、補修の前後で若干改善したように見えるが、その後徐々にたわみ量が増加し、供用後2年程度で補修前と同じ程度まで戻っており、明確な改善傾向は見られないと推察される。ちなみに、シートを貼っていない

いBWP部(Between Wheel Path、非わだち部)のたわみ量にも改善の傾向は見られない。以上のことから、ガラス繊維シートを基材としたひび割れ抑制シートを敷設しても、疲労破壊した舗装のたわみ量を改善する効果は期待できないと考えられる。舗装体自体は疲労ひび割れによって健全とはいえない状態にあるものの、ひび割れ部のせん断変形などをシートが抑制することによって、表層混合物にひび割れが発生することを抑えていると推察される。

表4.2-2 路面性状追跡調査結果

測定年月	H19	H20	H21	H22	H23	H24	H25	H26	H27
測定項目									
わだち掘れ量(mm)	0.8	2.9	3.7	4.5	5.3	6.2	6.6	7.9	9.5
平坦性(mm)	1.1	1.1	1.2	1.3	1.3	1.3	1.3	1.4	1.3
ひび割れ率(%)	0	0	1.4	1.4	1.4	2.7	3.7	4.5	9.3

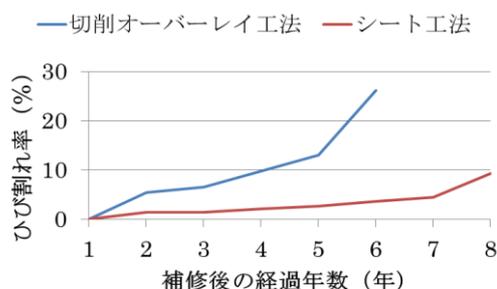


図4.2-2 ひび割れ率追跡調査結果

表4.2-3 交通量および車両重量調査結果

測定年	交通量調査結果(台/日)		輪荷重測定結果(輪/日)
	全交通量	大型車	日49kN換算輪数
2007年(H19)	5,678	1,652	1,480
2008年(H20)	5,635	1,634	1,518
2009年(H21)	5,788	1,507	1,126
2010年(H22)	5,722	2,167	1,245
平均	5,706	1,740	1,342

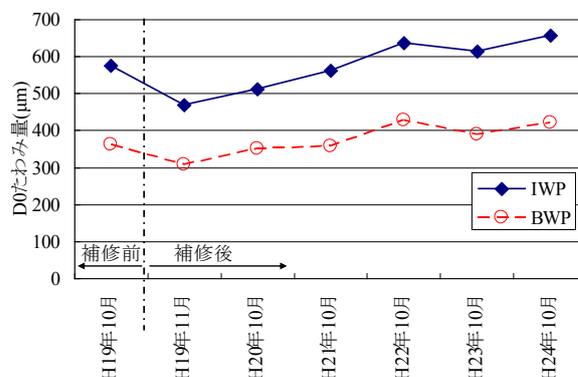


図4.2-3 補修前後のFWDたわみ量の推移

4. 2. 3 まとめ

疲労ひび割れ補修箇所における追跡調査結果から、ひび割れ抑制シートによって疲労ひび割れ部のリフレクションクラックの発生を抑制する効果が確認された。

疲労ひび割れが発生している状態は、舗装体が疲労破壊しており所定の支持力を有していない状態と判断されるため、理想的には破損部分を撤去し打替工法を採用するのが基本である。しかし、舗装維持修繕費が限られる中で現在ある舗装資産の延命化を図り有効に活用するという観点では、ひび割れ抑制シートの活用が有効な対策となりうることを示されたと考えられる。

4. 3 寒冷地におけるひび割れシール材の評価試験方法および寒冷地用ひび割れシール材の開発

舗装の予防保全手法の代表的なものとしては、ひび割れへのシール材注入工法が挙げられる。前述のとおり、シール材をトップダウン型ひび割れに注入することで、舗装の破損が進行することを抑制する効果があり、2～3年程度の延命効果が得られる。

しかし、シール材の一部は冬期間にひび割れシール材自体の温度収縮による亀裂、ひび割れ部の動きへ追従できないためのひび割れシール材の亀裂や剥がれ、冬期の除雪によるひび割れシール材の飛散の発生等、補修の効果が早期に喪失するケースが見られ、シール材の材料面で改善の必要があった。また、寒冷地特有のひび割れ形態である横断ひび割れの補修に適したシール材の開発が必要であった。

上述したようなシール材の問題が発生する要因のひとつとして、低温時にひび割れシール材の応力緩和性や変形性および付着性が低下して、ひび割れシール材自体に発生した応力やひび割れ部の動きにひび割れシール材が追従できなくなることが考えられる。さらに、ひび割れシール材に求められる要求性能を評価する手法、さらにその基準値が明確には決まっておらず、低温時の性状が十分に把握されていない状況で適用されている現状も要因のひとつであるとも考えられる。

そこで、寒冷地で適用するひび割れシール材の低温時における変形性能や応力緩和性ならびに付着性能を評価できる新たな評価試験方法を開発すべく検討を行った。同時に、低温時の応力緩和性や変形追従性および付着性に優れる寒冷地用ひび割れシール材の開発を試み、室内試験および試験施工で適用性や補修効果を検証した。以下に検討結果を報告する。

ル材の開発を試み、室内試験および試験施工で適用性や補修効果を検証した。以下に検討結果を報告する。

4. 3. 1 寒冷地におけるひび割れシール材の課題

アスファルト舗装のひび割れシール材には、ブローンアスファルトやコンクリート舗装目地材の加熱型注入材（以下、既存のひび割れシール材）が主に用いられており、明確な要求性能および性能値がなく、メーカーの社内規格や表4.3-1に示すコンクリート舗装目地材の加熱型注入材の品質目標値が仕様として報告されている場合が多い。

表4.3-1に示す引張量とは、低温時における変形性を評価する試験項目である。試験は、コンクリートブロック面に付着させた加熱型注入材を引き剥がす試験（温度-10℃、引張速さ0.1mm/6分間）であり、コンクリート面から注入材が剥がれる、あるいは注入材にひび割れが発生した時点での伸び量を測定するものである。高弾性タイプの引張量の目標値は10mm以上と、低弾性タイプと比較して3倍以上であるが、寒冷地においては、高弾性タイプであっても亀裂などの損傷が早期に生じるケースが多い。このことから、寒冷地に用いるひび割れシール材としては、当該試験における引張量の目標値は不十分である可能性が考えられ、また試験方法が簡便ではないという課題もある。

このように、従来のシール材規格や評価試験方法では、寒冷地におけるシール材に必要な機能を適切に評価できていない部分があると考えられることから、寒冷地のひび割れシール材に対する要求性能を的確に評価できる簡便な試験方法を開発することとした。併せて、低温域での耐久性を向上させた寒冷地用ひび割れシール材の開発も試みた。

表4.3-1 コンクリート舗装目地材の加熱型注入材の品質目標値²²⁾

試験項目	低弾性タイプ	高弾性タイプ
針入度(円すい針) (mm)	6以下	9以下
弾性(球針)	—	初期貫入量0.5～1.5mm 復元率60%以上
流動 (mm)	5以下	3以下
引張量 (mm)	3以上	10以上

4. 3. 2 新たな評価試験方法の開発

寒冷地のひび割れシール材に対する要求性能として、低温域での応力緩和性、変形追従性および付

着性が重要であり、それら要求性能を同時に簡便に評価する試験方法として、アスファルトの把握力と粘結力を評価するタフネス・テナシティ試験⁵⁾を応用することが有用ではないかと考えた。

低温時におけるひび割れシール材の特性を評価する試験条件として、予備試験により以下のとおりとした。

- 1) 試験温度を-10℃に変更
- 2) 試験速度を1mm/min に変更

上記条件における既存のひび割れシール材（低弾性タイプおよび高弾性タイプ）の試験（以下、低温タフテナ試験）結果を図4.3-1に示す。

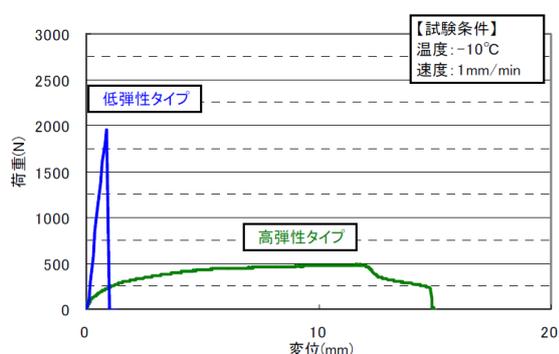


図4.3-1 低温タフテナ試験結果

低弾性タイプは、破壊荷重が大きく、変位は小さい。また、金属半球を引き抜く際に部材が割れるなど、脆性的な破壊を生ずる材料である。一方、高弾性タイプは、荷重500N程度を保ったまま変位が15mm程度まで延伸し、その後金属半球から剥がれる状況であった。

低温タフテナ試験では、試料が金属半球を把握しながら変形する際の抵抗性を評価することができ、付着性や変形追従性および応力緩和性などが評価できる。低弾性タイプは脆性的な破壊を生じることから変形追従性や応力緩和性に劣り、高弾性タイプは低弾性タイプよりも付着性や変形追従性および応力緩和性に優れるという特長を有すると考える。

4.3.3 寒冷地用ひび割れシール材の開発

寒冷地域では付着性や変形追従性および応力緩和性に優れる高弾性タイプをひび割れシール材に用いても、早期に亀裂などの損傷が生じるケースがある。

そのため、早期に損傷が生じない寒冷地用ひび割れシール材としては、更に低温時の変形追従性や応力緩和性を向上させることが必要と考え、シール材の開発を行った。

道路舗装のリフレクションひび割れ抑制対策で実績のある特殊改質アスファルト²³⁾をベース材料として粘度調整を行ったシール材を作成することで、高弾性タイプより低温時の変形追従性や応力緩和性を向上させたシール材が得られると考えた。開発したひび割れシール材（以下、開発品）の性状を、高弾性タイプの目標値と合わせて表4.3-2に示す。開発品の針入度（円すい針）は14.2mm、弾性（球針）の初期貫入量は3.8mmで高弾性タイプの目標値と比べて大きい。また、高温時の安定性を表す流動は1.9mmで高弾性タイプの目標値3mm以下である。

表4.3-2 開発品の性状例と高弾性タイプの目標値

試験項目	開発品	高弾性タイプの目標値
針入度(円すい針) (mm)	14.2	9以下
弾性(球針) 初期貫入量(mm)	3.8	0.5~1.5mm
流動 (mm)	1.9	3以下

4.3.4 ひび割れシール材の性状評価

開発品および既存のひび割れシール材（低弾性タイプ、高弾性タイプ）に関して、各種性状試験を実施した。

性状試験は、低温タフテナ試験のほか、ベンディングビームレオメータ試験、直接引張り試験、および剥がれ疲労試験とした。

また、当所が所有する苫小牧寒地試験道路（実物大の周回道路、周回延長2,700m、幅3.5m×2車線）において、アスファルト舗装に発生した温度応力ひび割れ部に各種ひび割れシール材を試験的に施工し、冬期間の耐久性を評価するとともに、破損の現象やひび割れ部の開きなど、実路における低温下での供用状況を確認した。

各種試験の概要、試験方法、試験結果を以下に示す。

(1) 低温タフテナ試験

1) 概要

低温域での応力緩和性、変形追従性および付着性を同時に簡便に評価する試験方法として、前述した低温タフテナ試験で評価を行った。

2) 試験方法

「舗装調査・試験法便覧A057 タフネス・テナシティ試験方法」に準拠して実施するが、寒冷地のひび割れシール材性能を評価する目的に合うよう、試験温度は-10℃に、試験速度は1mm/minに変更している。

3) 試験結果

試験結果を図4.3-2に示す。低弾性タイプは脆性的な破壊を生じることから変形追従性や応力緩和性に劣り、高弾性タイプは付着性、変形追従性および応力緩和性に優れる。そして、開発品は高弾性タイプと同程度の変形追従時に荷重500Nを有しつつ、変位量は高弾性タイプの4倍にあたる60mmと大きい。このことから、開発品は低温時の付着性、変形追従性および応力緩和性が高弾性タイプと比較して更に優れていると判断される。

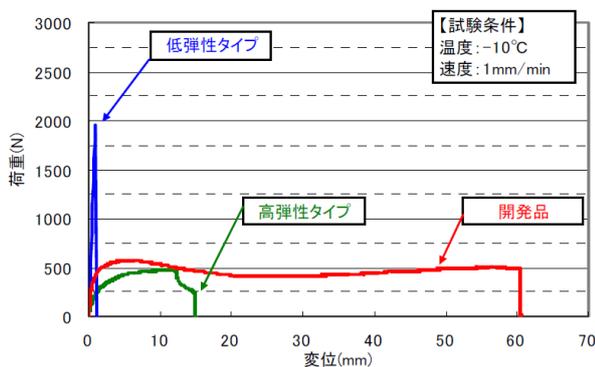


図4.3-2 低温タフテナ試験結果

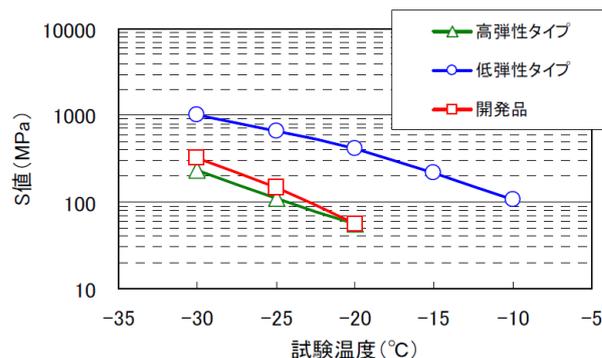


図4.3-3 温度とS値の関係

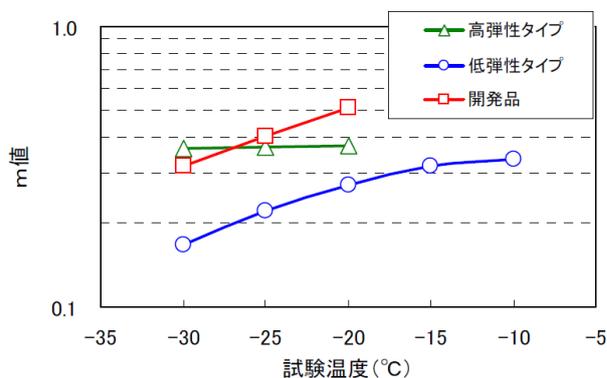


図4.3-4 温度とm値の関係

(2) ベンディングビームレオメータ試験

1) 概要

ベンディングビームレオメータ試験（以下、BBR試験）によって、曲げクリープスティフネスを測定することで、低温時の応力緩和性などを評価できると考えた。

2) 試験方法

「舗装調査・試験法便覧A060 ベンディングビームレオメータ試験法」に準拠して実施した。

3) 試験結果

試験結果を図4.3-3、図4.3-4に示す。開発品と高弾性タイプは同程度のS値（低温時に収縮して発生する応力）とm値（発生した応力を緩和する能力）を示し、低弾性タイプと比較してS値が小さく、m値が大きい。なお、開発品と高弾性タイプは温度-10℃、-15℃においても変形性能と応力緩和性能が高すぎて通常の試験が成立しなかった。このことから、開発品と高弾性タイプは、低弾性タイプと比較して低温時に発生する応力が小さく、また応力緩和性が優れていると判断される。

(3) 直接引張り試験

1) 概要

アスファルト混合物とひび割れシール材の付着性を直接引張り試験で確認した。

2) 試験方法

直接引張り試験の供試体は、図4.3-5に示すように2個の円柱供試体（φ10cm、厚さ5cm、アスファルト混合物）の間にひび割れシール材を塗布して作製したものである。

試験はインストロン万能試験機を用いて、温度-10℃、引張り速度1mm/minの条件下で行った。なお、ひび割れシール材は円柱供試体表面に直接塗布した後に2個の円柱供試体を押し付けて、0.1mm程度の薄い塗布厚とした。

3) 試験結果

直接引張り試験結果を図4.3-6に示す。全てのひび割れシール材が最大荷重3~3.5MPa程度で同等の値を示した。いずれのシール材も、供試体表面とシール材付着面の境界面で破断しており、アスファルト混合物とシール材の付着力は概ね本試験で得られた3MPa程度であると考えられる。

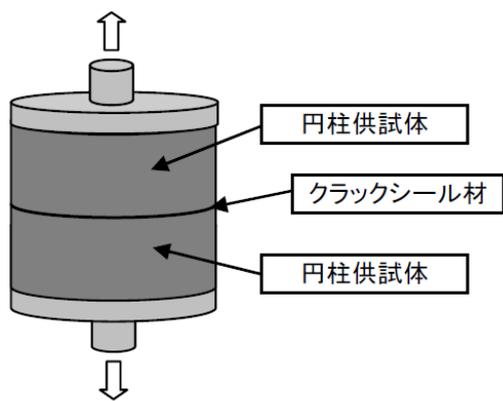


図4.3-5 直接引張り試験概要図

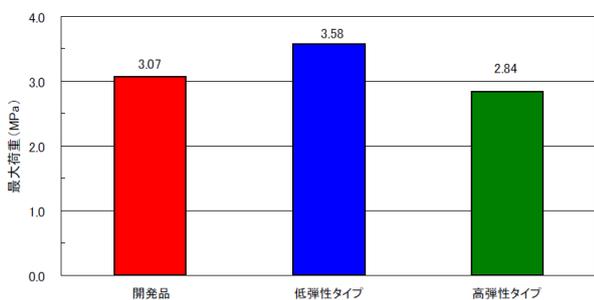


図4.3-6 直接引張り試験結果

(4) 剥がれ疲労試験

1) 概要

アスファルト混合物とひび割れシール材の繰返し交通荷重による界面剥離の抵抗性を剥がれ疲労試験で確認した。

2) 試験方法

剥がれ疲労試験は、寺田らが提案した試験方法²⁴⁾を参考に、4点曲げ荷方式によるひずみ制御とした。試験治具の構造を図-4.3-7に、試験条件を表4.3-3に示す。

なお、供試体は図-4.3-7に示す角柱供試体 (40×40×410mm) とし、供試体中央部10mmをひび割れシール材とした。

3) 試験結果

剥がれ疲労試験結果を図4.3-8に示す。剥がれ疲労試験終了後の供試体の破壊は、全て付着界面における付着の剥がれであった。低弾性タイプは、荷重回数8,000回程度に明確な破壊点が見られた。しかし、開発品および高弾性タイプは荷重回数80,000回程度から応力の低下傾向が見られるものの、明確な破壊点は確認できなかった。このことは、開発品と高弾性タイプは低弾性タイプと比較して、付着界面の剥

がれの発生が遅く、また発生した剥がれは一気に進行せず徐々に進行することを意味している。以上のことから、開発品と高弾性タイプは低弾性タイプと比較して、界面剥離抵抗性に優れていると判断した。

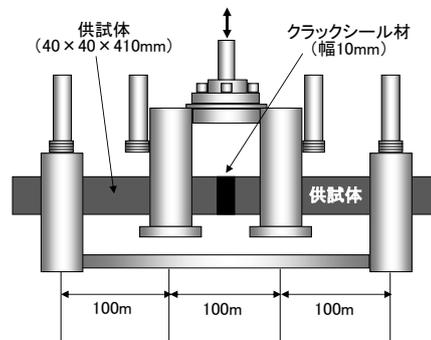


図4.3-7 剥がれ疲労試験 (試験治具の構造)

表4.3-3 剥がれ疲労試験条件

項目	条件
荷重方法	両端固定2点荷重、ひずみ制御
寸法	40×40×410mm(クラックシール材10mm)、スパン長300mm
温度、周波数、ひずみ	-10°C、5Hz、サイン波、200μ

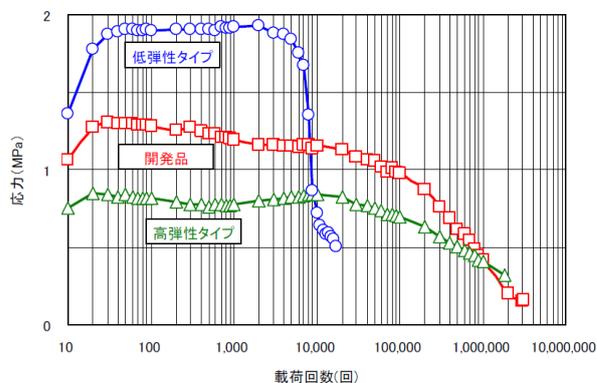


図4.3-8 剥がれ疲労試験結果

(5) 試験施工での検証

1) 概要

寒地土木研究所の苫小牧寒地試験道路において試験施工を実施した。冬期間の耐久性を評価するとともに、破損の現象やひび割れ部の開きを確認する目的で、11月に施工を行い、1冬経過後の3月に観察することとした。

2) 試験方法

苫小牧寒地試験道路の既設アスファルト舗装に発生している幅5~15mm程度の温度応力ひび割れ箇所において、開発品および既存のひび割れシール材

(低弾性タイプ、高弾性タイプ)を施工した。一般的な施工に準じて、ひび割れ部のごみやほこりは高圧空気で除去した後で加熱したシール材を注入した。5箇所温度応力ひび割れ箇所、同一のひび割れに開発品と既存のひび割れシール材1種類をそれぞれ1.5m程度ずつ行い比較することとした。また、ひび割れ幅の季節変動を確認するために、ひび割れ部を挟んだアスファルト舗装体の両端に観測ピンを埋め込んで変動幅を計測することとした。既設アスファルトのひび割れ箇所を写真4.3-1に示す。

3) 試験結果

1 冬経過後の3月にひび割れシール材の観察を実施した。なお、苫小牧市の11月～3月の最低気温は-16.2℃、日平均気温は-1.6℃(気象庁データより)であった。

また、観測ピンの計測で、ひび割れ部の日々の変動は計測できていないものの、1冬経過後には幅が2～5mm程度広がっていることが確認された。高弾性タイプの1冬経過状況を写真4.3-2に、低弾性タイプの1冬経過状況を写真4.3-3に、開発品の1冬経過状況を写真4.3-4に示す。



写真4.3-3 低弾性タイプの1冬経過状況



写真4.3-4 開発品の1冬経過状況



写真4.3-1 既設アスファルト舗装のひび割れ箇所



写真4.3-2 高弾性タイプの1冬経過状況

高弾性タイプおよび低弾性タイプは、写真4.3-2、写真4.3-3のように既設アスファルト舗装との境界面に、亀裂や付着が剥がれてできた開口部が更に拡大してできた大きなすき間が見られ、既設アスファルト舗装とシール材の付着がなくなり、剥がれたことがうかがえる。施工延長に対する損傷の無い延長の割合を示す残存率は、高弾性タイプは3箇所計7.2mの施工延長に対して44.1%、低弾性タイプは2箇所計3.8mの施工延長に対して35.5%であった。このことは、苫小牧寒地試験道路の冬期において、高弾性タイプと低弾性タイプの付着性、変形追従性および応力緩和性が不十分であったことを意味する。

一方で、開発品は一部すき間が発生した箇所もあったものの、残存率は5箇所計10mの施工延長に対して92.8%と良好であった。開発品の大部分は写真4.3-4に示すようにすき間が無い良好な状態を保っており、苫小牧寒地試験道路の冬期の気象条件においても、優れた付着性や変形追従性および応力緩和性を有し、冬期のひび割れ幅の変動に対しても追従できていることが確認された。

4. 3. 5 考察

開発品は、苫小牧寒地試験道路（実物大の周回路）における冬期間の検証によって、一部すき間が発生した箇所も見られたが、既存のひび割れシール材（高弾性タイプ、低弾性タイプの残存率は40%程度）と比較して、残存率は92.8%と優れた性能を有していることが確認された。また、新たに開発した低温タフテナ試験はこの冬期の残存率との関連が高いと考えられる。

これまでに用いられてきたひび割れシール材よりも寒冷地における性能が高いひび割れシール材の低温タフテナ試験の目安値としては、今後設定に向けた検証を進める予定である。現時点では、図4.3-2の試験結果と試験施工結果から判断して、最大荷重は700N 程度以下、破断時変位は可能な限り大きい方が良いと考えられるが、夏場の流動破壊等を踏まえて、高弾性タイプの破断時変位15mm の2倍量にあたる30mm以上を暫定的な目安値と考えている。

4. 3. 6 まとめ

寒冷地用ひび割れシール材を評価する一つの試験方法として、低温タフテナ試験を提案した。この試験は簡便で汎用性があり、また寒冷地用ひび割れシール材の要求性能である応力緩和性や変形追従性および付着性を総合的に評価することができる。また、低温時の付着性や変形追従性および応力緩和性に優れる寒冷地用ひび割れシール材を作成し、その優れた寒冷期における性能を室内試験および苫小牧寒地試験道路で検証を行った。

4. 4 コンクリート床版上に施工する耐久性の高い基層用アスファルト混合物の検討

道路橋は、車両による繰り返し荷重、振動、衝撃、せん断等の力学的作用や降雨、風雪、温度変化等の気象作用、さらに床版の膨張収縮などが複雑に作用する環境におかれ、舗装、床版防水層及び床版で形成される構造体が疲労を受ける。この内、床版防水層に直接接する基層用アスファルト混合物は、防水層と密着して構造体を保護するが、舗装体のひび割れや施工目地、橋梁付属物（排水桝、伸縮装置等）付近のすき間から進入した水分が混合物中及び床版上に滞水した状態で、夏期の高温時に輪荷重の作用を受けることで、混合物のはく離やブリスタリングが生じる例が散見されている（写真4.4-1）。

さらに RC 床版のクラック等を介して床版内部へ到達した水分が冬期に凍結融解を繰り返し、床版表

面にスケーリングが発生した後、ポップアウト、コンクリートの砂利化へと進展し、最終的には押し抜きせん断破壊による床版の陥没に至る事例も報告されている²⁵⁾。

上述の課題解決のための方策としては、舗装の増厚や透水性の極めて低いゲースアスファルトの使用等が考えられるが、死荷重や建設コストの増加といった問題がある。このため本研究では、橋面舗装のはく離対策として、舗装体内部への水分の浸入と RC 床版上の滞水を防止し、現行の国道に用いられる橋面舗装の基層厚（4 cm）を変更せずに施工可能なアスファルト混合物をベースに、RC 床版上の基層用アスファルト混合物（以下、基層用混合物）としての性能について検討した。



写真 4.4-1 水分の浸入による基層のはく離

4. 4. 1 試験研究の方法

コンクリート床版上に施工される基層用混合物層の底面が平滑で、床版と密に接していれば、床版上面に達した雨水や融雪水等の水分が滞留可能な空間は境界に存在しないことになる。しかし、現実には混合物層の底面はテクスチャが粗く、小さな間隙群（凹み）があるため水分が滞留する空間となり、ブリスタリングの発生やアスファルト混合物のはく離の一因になると考えられる（図4.4-1）。既往の研究では、この小さな間隙群（凹み）が舗装のひび割れ等から進入した水の滞留及び水平方向への拡散空間になり得ること及び混合物中の粗骨材の割合が低く、アスモル分の割合が高い混合物ほど混合物層底面のきめが浅く、小さな間隙群（凹み）の形成抑制に効果的であるとの報告がある²⁶⁾。

筆者らは、配合の異なる数種類のアスファルト混合物について、室内試験用供試体を用いて混合物層底面の平滑性を数値化して評価するとともに、コンクリート床版の基層混合物に求められるその他の性能を検証した。

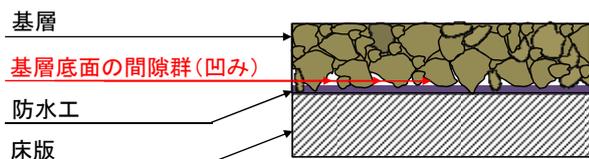


図 4.4-1 基層底面の間隙群（凹み）のイメージ

4.4.2 基層用混合物とバインダーの選定

本検討に用いた混合物の諸元を表 4.4-1 に示す。

北海道の国道において排水性舗装区間の橋梁部の基層及び重交通区間の流動対策として表層に使用されている細密粒度ギャップアスコン(13F55)改質Ⅱ型及び東・中・西日本高速道路株式会社（以下、NEXCO）でコンクリート床版橋面の基層として使用されている SMA を検討対象とした。なお、SMA は、ストレートアスファルトを用いて NEXCO の中間層用配合設計標準粒度範囲²⁷⁾をもとに繊維質補強材 0.3%（外割）を添加して配合設計を行い、この配合を用いてストレートアスファルト及び改質Ⅱ型を使用した混合物とした。このほか、基層用混合物として一般的に使用されている粗粒度アスコンを比較用として用いた。

表 4.4-1 混合物の諸元

項目	粗粒度 アスコン (20)	細密粒度 ギャップアス コン(13F55)	SMA (13)	
	合 成 粒 度			
ふるい通過重量百分率 (%)	26.5	100.0		
	19.0	98.8	100.0	100.0
	13.2	81.0	98.1	97.5
	4.75	45.1	62.1	42.5
	2.36	30.0	44.9	27.4
	600μ	16.9	41.6	20.3
	300μ	11.7	31.1	17.1
	150μ	6.6	12.0	12.7
75μ	4.6	9.2	10.5	
アスファルト種別	ST	改Ⅱ	ST	改Ⅱ
アスファルト量(%)	5.3	6.0	7.7	
空隙率(%)	4.0	3.5	2.3	2.2
略 号	粗粒_ST	細密_Ⅱ	SMA_ST	SMA_Ⅱ

※1 表中の記号は次の内容を示す。

ST : ストレートアスファルト

Ⅱ : ポリマー改質アスファルトⅡ型

※2 以下、図中では表中の略号を用いる。

4.4.3 要求性能と性能確認

舗装表面からの水分の浸透及び床版上の滞水への対策として、基層用混合物に求められる要求性能、これを評価するための試験項目及び評価値を表 4.4-2 のとおり整理した。なお、「非滞水性」とは、浸入した水の滞留及び水平方向への拡散空間となる基層用混合物層底面の間隙群（凹み）の割合が低いことと定義した。

表 4.4-2 基層用混合物に求められる要求性能と評価試験項目及び評価値

要求性能	試験方法	評価値
非滞水性	プリンティング法	接地面積率
	CTM	MPD
水密性	加圧透水試験	透水係数
耐水性	水浸マーシャル安定度試験	残留安定度
はく離抵抗性	水浸ホイールトラッキング試験	はく離率
防水工の低損傷性	目視による防水工の損傷状況確認	損傷点数
骨材飛散抵抗性	低温カンタブロ試験	損失率

(1) 非滞水性

各混合物の供試体底面の状態を紙に転写した後、これをプリンティング法により 2 値化し、供試体底面の全体面積から凹みの面積を控除した面積を接地面積として混合物層底面の平滑性を把握し、混合物の非滞水性を表す指標として評価した。

また、接地面積を計測した供試体底面のきめ深さ（以下、MPD : Mean Profile Depth）を回転式きめ深さ測定装置（以下、CTM : Circular Track Meter）で計測し、接地面積と MPD との関係性を検証した。

1) プリンティング法による接地面積の測定

① 供試体の作成

供試体の作成は、舗装調査・試験法便覧「ホイールトラッキング試験方法」⁵⁾に準じた。供試体の作成条件を表 4.4-3 に示す。現場での施工条件を考慮して、型枠は加熱せずに常温とした。また、この供試体を使用して CTM を用いたきめ深さの測定を行うため、CTM のレーザーセンサの回転中心からの半径 142mm を考慮し、型枠の寸法は 40cm×40cm×5cm とした。

表 4. 4-3 供試体の作成条件

型 枠 寸 法	40cm×40cm×5cm
型 枠 温 度	常温 (概ね 20℃)
締め固め装置	ローラーコンパクタ 線圧 29.4kN/m、5 往復

② プリンティング法による 2 値化

ローラーコンパクタを用いて、供試体の底面を判画の要領で紙に転写した後、転写用紙をデジタルカメラで撮影した。転写時には、供試体上にゴム板を載せて線圧を分散した。なお、転写に使用したインクは朱色の墨汁で、転写用紙は市販の薄手普通紙である。転写の手順を表 4. 4-4 に、作業状況を写真 4. 4-2 に示す。

表 4. 4-4 転写の手順

1. 供試体の設置	供試体の底面が上になるようにして型枠を設置
2. インクの塗布	供試体に墨汁を塗布
3. 転写用紙の設置	供試体上に転写用紙を載せる
4. ゴム板の設置	供試体上の複写紙の上にゴム板を設置
5. 転写	ローラーコンパクタを 2 往復させて転写



写真 4. 4-2 転写作業の状況

③ 接地面積率と「粗骨材重量比」及び「アスモル重量比」の比較

混合物毎に撮影した 3 枚の供試体のデジタル画像の中央部分 (30cm×30cm) を切り出して画像処理・解析ソフトウェアで 2 値化し、各々の面積の平均値を算出した。2 値化した混合物底面の画像の例を写真 4. 4-3 に示す。画像の白色部分は供試体底面に空隙 (窪み) があるためにインクが用紙に付着しなかった箇所を示し、黒色は窪みが無く平滑性が高い部分で、実施工時には床版面の防水層と密着すると想定される部分を表す。

2 値化データの黒色部分の面積を接地面積 (下層と接する面積) とし、全体面積 (30cm×30cm) に対する割合を「接地面積率」として算出した。なお、全体面積は画像処理・解析ソフトウェア上で 1,212pxl×1,212pxl とした。

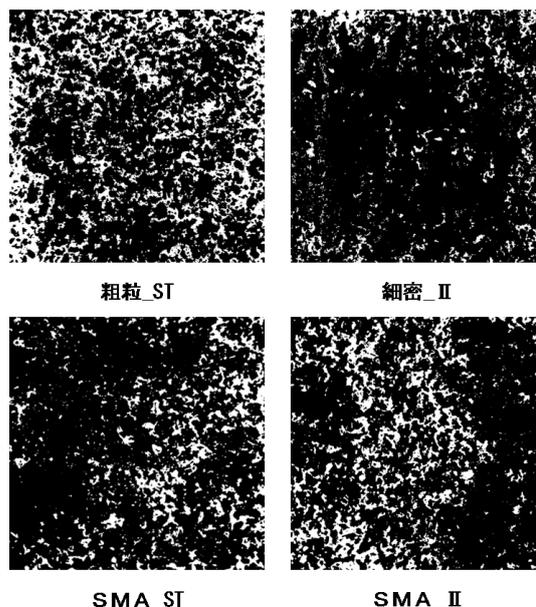


写真 4. 4-3 2 値化した混合物底面の画像 (例)

また、アスファルト混合物中の粗骨材の割合が低く、アスモルの割合が高い混合物は、混合物底面の凹凸の形成抑制に有効であるとの既往の報告²⁶⁾を参考に、各混合物中の 2.36mm 以上の粗骨材の合計重量とアスファルト混合物の全体重量の比を「粗骨材重量比」とし、2.36mm 未満の細骨材、石粉及びアスファルトの合計重量とアスファルト混合物の全体重量の比を「アスモル重量比」として算出した。

ここで求めた混合物別の接地面積率と粗骨材重量比及びアスモル重量比を図 4. 4-2 に示す。

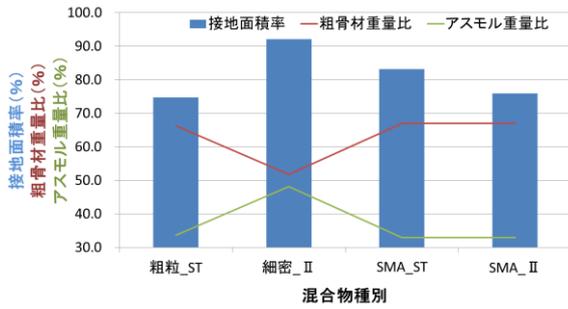


図 4.4-2 混合物別の接地面積率と粗骨材重量比及びアスモル重量比

試験の結果、接地面積率が一番高い混合物は細密粒度ギャップアスコン(改質II型)の92%であった。この結果から、細密粒度ギャップアスコンは、他の混合物に比べて混合物層底面の平滑性が高く、小さな間隙群の形成の割合が低いことが確認された。

また、粗骨材重量比とアスモル重量比の観点から接地面積率を比較した場合、アスモル重量比が高く、粗骨材重量比が低い混合物は接地面積率が高い傾向を示すことを確認した。

以上の結果から、混合物底面の小さな間隙群の形成の割合が低く、非滯水性が高いアスファルト混合物として細密粒度ギャップアスコンが有利であることが示唆された。

2) CTM を用いた MPD 測定試験

① 試験方法

CTM を用いて、前述の接地面積測定用の供試体底面及び上面の MPD を計測し、MPD と接地面積との関係について検証した。ここで MPD とは、表面のプロファイルの回帰直線とプロファイルの最大値の差で、MPD が大きいほど表面のきめが粗いことを示す。

② 試験結果

各混合物の供試体「底面」の MPD と接地面積率の関係を図 4.4-3 に、供試体「上面」の MPD と接地面積率の関係を図 4.4-4 に示す。双方の図から MPD と接地面積率には高い相関が見られ、MPD が小さな混合物ほど接地面積率が高い傾向を示していることが読み取れる。

なお、この MPD と接地面積率の関係は、供試体「底面」、「上面」ともに同様の傾向を示すことから、供試体「上面」の MPD でも混合物底面の小さな間隙群の形成の割合、すなわち非滯水性を評価できることが明らかとなった。

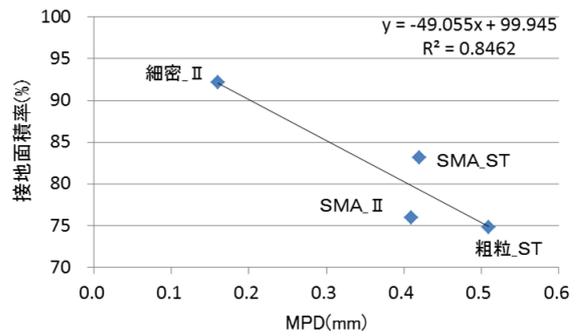


図 4.4-3 供試体「底面」の MPD と接地面積率

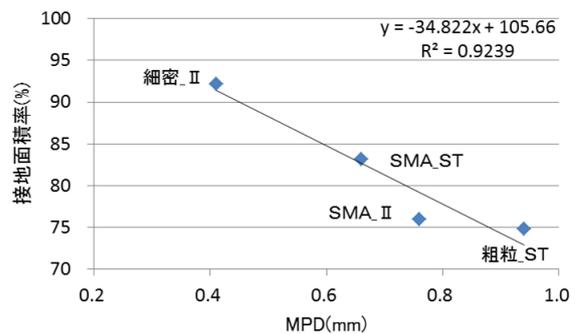


図 4.4-4 供試体「上面」の MPD と接地面積率

(2) 水密性及び耐水性

各混合物の水密性を評価するために加圧透水試験を、耐水性を評価するために水浸マーシャル安定度試験を実施した。

1) 加圧透水試験

① 試験方法

加圧透水試験は、舗装調査・試験法便覧「アスファルト混合物の加圧透水試験方法」⁵⁾に拠り、ゴムスリーブで漏水を防止するタイプの試験機を使用した。

② 試験結果

目標締め固め度 96%及び 98%の供試体の加圧透水試験結果(水圧 150kPa)を表 4.4-5 に示す。

水利用アスファルト混合物では 1×10^{-7} cm/sec 以下の透水係数を不透水の目安(以下、便宜的に「不透水」と表記)としているが、細密粒度ギャップアスコン(改質II型)及び SMA(ストアス、改質II型)は、締め固め度が 96%及び 98%ともに不透水で水密性が高い。これに対し、粗粒度アスコンは締め固め度が 96%及び 98%ともに透水しており、水密性の低い混合物であることを確認した。

表 4.4-5 加圧透水試験結果 (水圧 150kPa)

混合物種別	透水係数 (cm/sec)	
	締め固め度96%	締め固め度98%
粗粒_ST	2.43×10^{-5}	3.40×10^{-6}
細密_II	不透水	不透水
SMA_ST	不透水	不透水
SMA_II	不透水	不透水

2) 水浸マーシャル安定度試験

① 試験方法

本研究では、水の影響を受けやすい混合物に対する評価として、国土交通省北海道開発局（以下、開発局）によって規格値が示されている水浸マーシャル安定度試験⁵⁾から求められる残留安定度により混合物の耐水性を評価した。

② 試験結果

開発局では水の影響を受けやすい混合物の残留安定度の規格値を75%以上と規定している。

試験の結果、図 4.4-5 に示すとおり全ての混合物で残留安定度が75%以上となり、開発局の規格値を満足する結果となった。なお、最高値は細密粒度ギャップアスコン（改質II型）の99%で、残留安定度から耐水性を評価する場合、細密粒度ギャップアスコン（改質II型）は、最も耐水性に優れていることを確認した。

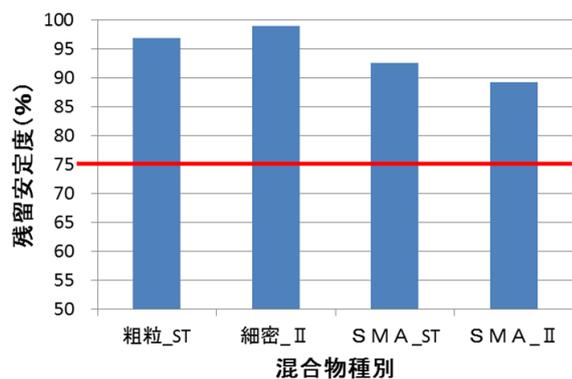


図 4.4-5 各混合物の残留安定度

(3) はく離抵抗性

アスファルト混合物のはく離の原因として、気温の高さ、水分の存在、交通荷重の繰り返し作用が挙げられる。コンクリート床版上の基層用混合物では、

ひび割れ等から流入した水分が床版上に滞水し、高温時に交通荷重が繰り返し作用することで骨材とアスファルトがはく離する。本研究では、はく離抵抗性を評価するため水浸ホールトラッキング試験を行った。

① 試験方法

水浸ホールトラッキング試験方法⁵⁾に拠り、供試体の寸法は 30cm×30cm×5cm とした。なお、床版上の滞水を想定して、混合物層底面からの水の浸入を対象とした試験方法とした。本試験により各混合物供試体の断面のはく離率及び目視によるはく離状況から各混合物のはく離抵抗性を評価した。

なお、はく離率の算出にあたっては、全ての供試体において骨材の剥落による供試体底面の断面欠損は無かったため、供試体を4分割した2断面において、骨材からアスファルト被膜がはく離している部分の供試体底面から内部方向への深さの測定値を元に、当該断面のはく離面積を算出し、これを全断面積で除した値をはく離率とした。

② 試験結果

各混合物のはく離率を図 4.4-6 に示す。試験の結果、粗粒度アスコン（ストアス）及び SMA（ストアス、改質II型）のはく離率が約1%以上であったのに対し、細密粒度ギャップアスコン（改質II型）は0.1%以下と低い値となった。

このことから、混合物底面に水分が存在し、交通荷重の作用を受ける条件下で混合物層の底面からはく離が進行した場合、細密粒度ギャップアスコン（改質II型）は、他の混合物に比べ、はく離抵抗性が高いことを確認した。

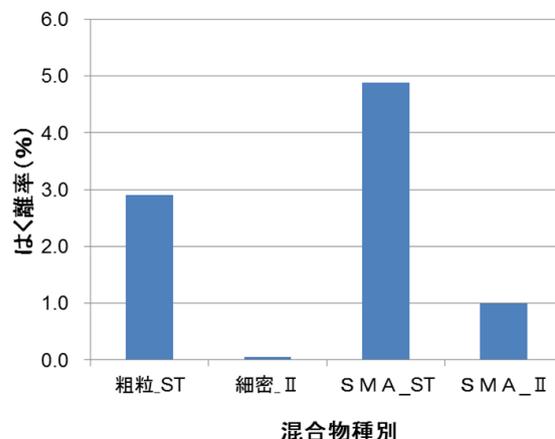


図 4.4-6 はく離率

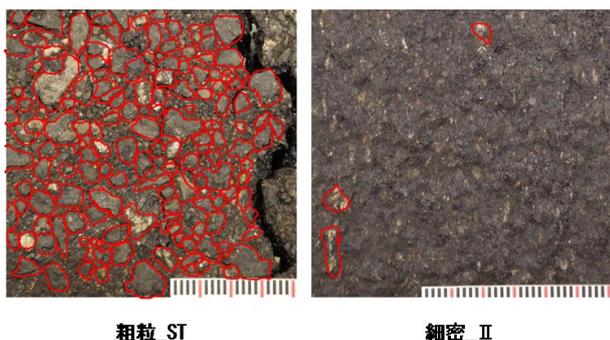


写真 4. 4-4 供試体底面のはく離の状況

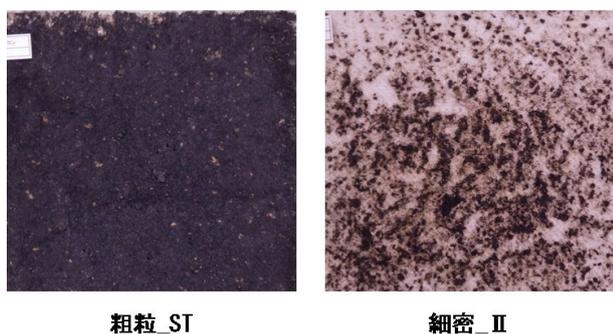


写真 4. 4-5 不織布へのアスファルト付着状況

なお、写真 4. 4-4 は水浸ホイールトラッキング試験後の供試体底面のはく離状況の例であるが、粗粒度アスコン（ストアス）では供試体底面の粗骨材からアスファルト被膜がはく離している部分（赤線の囲み）が多く、これと比較して細密粒度ギャップアスコン（改質Ⅱ型）は、はく離が殆どないことが分かる。

また、写真 4. 4-5 は、水浸ホイールトラッキング試験によって混合物中の骨材からはく離したアスファルト分が、供試体底面に敷かれていた不織布に付着している様子で、黒色が付着したアスファルト分である。これらの写真から、粗粒度アスコン（ストアス）は、細密粒度ギャップアスコン（改質Ⅱ型）に比べて付着したアスファルト分が多いことが分かる。また、この写真の両者の不織布の重量（不織布の重量を含む）を測定したところ、粗粒度アスコン（ストアス）の 89.1(g) に対し、細密粒度ギャップアスコン（改質Ⅱ型）は 23.0(g) と、混合物中の骨材からはく離したアスファルト分が少なかった。これらの不織布の観察結果からも、細密粒度ギャップアスコン（改質Ⅱ型）のはく離抵抗性が高いことが裏付けられた。

(4) 防水工の損傷状況

基層用混合物を施工する際、混合物中の粗骨材の稜角部が防水工を貫通して RC 床版に達することで、床版への水分の浸入経路になると想定した。この防水工の損傷状況を確認するため、コンクリート版上に防水工及び基層用混合物を施工した供試体を用いて、混合物中の粗骨材の稜角部が防水工を貫通した点数をカウントし、各混合物が防水工へ与える損傷の程度を評価した。

なお、本試験に先立ち、コンクリート版、防水工及びアスファルト混合物間の引張接着強度を確認するため、以下の①と同様の手順で作成した供試体を用いて引張接着試験を行った結果、全ての混合物が開発局道路設計要領に規定される規格値を満足することを確認している。

① 供試体の作製

供試体の作製は、道路橋床版防水便覧(付録-1)²⁸⁾に示される「供試体作成」に拠り、JIS A 5371 の I 類に規定する厚さ 6cm のコンクリート平板上にプライマーを塗布した後、塗膜系床版防水層（アスファルト加熱型）を厚さ 1.0～1.5mm 程度施工し、その上に厚さ 4cm の基層用混合物を重ねた。次に図 4. 4-7 及び写真 4. 4-6 に示すとおり 1 体の寸法が 30cm×5cm×厚さ 10cm になるように切断した。

② 防水工の損傷確認方法

作製した 3 個の供試体の隣り合った 4 つの切断面を目視観察し、混合物中の粗骨材の稜角部が防水工を貫通して RC 床版に達している点数を数えた。この各断面で観察された点数の平均値を用いて、防水工に与える損傷の程度を評価した。

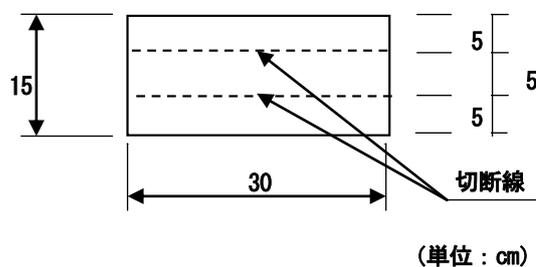


図 4. 4-7 供試体詳細図
(防水工の損傷確認用)



写真 4.4-6 防水工の損傷確認用供試体

③ 試験結果

例として SMA (改質 II 型) の供試体切断面を写真 4.4-7 に示す。アスファルト混合物中の骨材の稜角部が防水工を貫通してコンクリート版に達しているのが確認できる。試験結果を図 4.4-8 に示す。粗粒度アスコン及び SMA (ストアス、改質 II 型) は骨材が防水工を貫通した点数が高いのに対し、細密粒度ギャップアスコン (改質 II 型) の点数が低く、防水工の損傷が少ない結果となった。

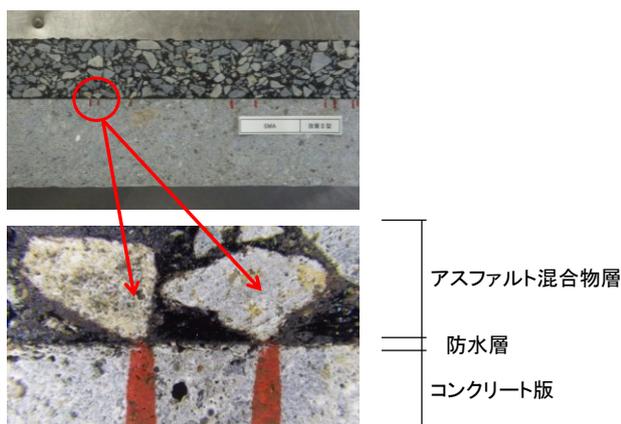


写真 4.4-7 骨材が防水工を貫通した箇所
SMA (改質 II 型) の例

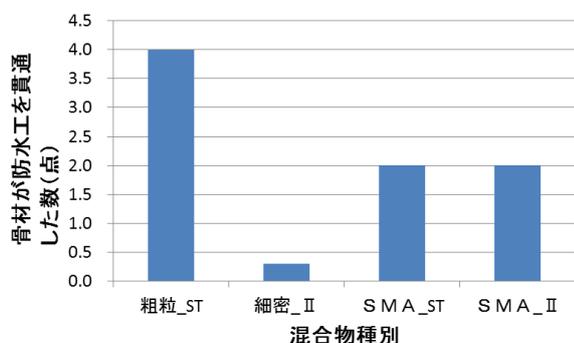


図 4.4-8 骨材が防水工を貫通した点数の比較

(5) 骨材飛散抵抗性

① 試験方法

舗装性能評価法別冊²⁹⁾では、タイヤチェーンを装着した車両の走行等により発生する衝撃骨材飛散の程度を衝撃骨材飛散値とし、測定方法はロサンゼルス試験機を使ったカンタブロ試験方法を規定している。開発局では、空隙率の高い表層混合物である排水性舗装 (目標空隙率 17%) 及び北海道型 SMA (目標空隙率 5%) について骨材飛散抵抗性を確認するため、供試体温度 -20°C 、試験温度 -20°C で実施するカンタブロ損失率の規格値を各々 20% 未満、16% 未満としている。

道路橋の伸縮装置近傍は通過車両の衝撃による混合物の骨材飛散が懸念される。このため、筆者らは現地における通過車両が混合物に与える作用と類似した条件の試験方法としてカンタブロ試験が適切と考え、基層用混合物の衝撃に対する抵抗性を評価する方法として用いた。

なお、試験温度は開発局の試験条件に準拠し供試体温度 -20°C 、室温 -20°C とした。

② 試験結果

カンタブロ試験結果を図 4.4-9 に示す。細密粒度ギャップアスコン (改質 II 型) 及び SMA (改質 II 型) の損失率が約 14% で、両者の混合物はバインダーにストレートアスファルトを用いた粗粒度アスコン及び SMA (ストアス) と比較して、骨材飛散抵抗性の高い混合物であることを確認した。

なお、粗粒度アスコンは 25.2%、SMA (ストアス) は 18.5% と他の混合物に比べて高い損失率であった。これはバインダーがストレートアスファルトであることに起因すると推察される。

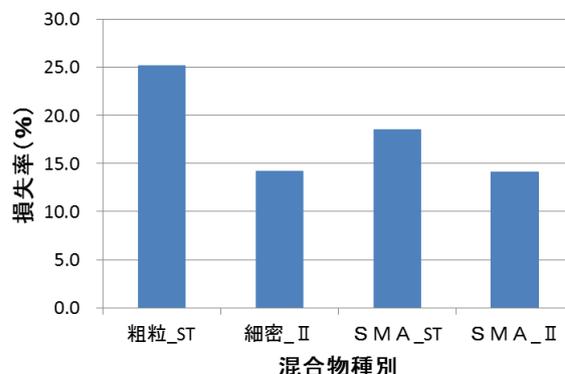


図 4.4-9 カンタブロ損失率

(6) その他の耐久性

ホイールトラッキング試験に抛り動的安定度を計測し、混合物の耐流動性を検証した。各混合物の動的安定度（以下、DS : Dynamic Stability）を図 4. 4-10 に示す。

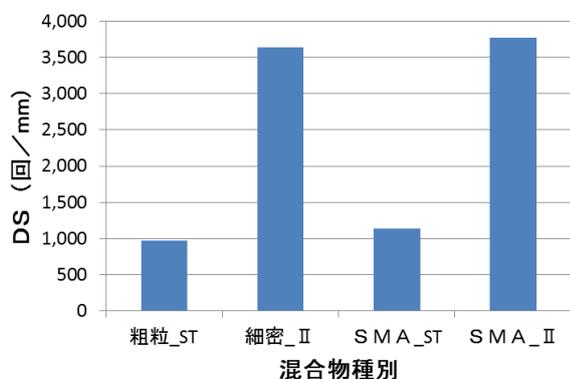


図 4. 4-10 動的安定度 (DS)

試験の結果、ストレートアスファルトを使用している粗粒度アスコンは、DS の値が 1,000 (回/mm) 未満、SMA (ストアス) で 1,139 (回/mm) であったが、改質アスファルトを用いた他の混合物が 3,000 (回/mm) 以上であった。

4. 4. 4 まとめ

本検討の結果、細密粒度ギャップアスコン（改質 II 型）は、水の滞留及び水平方向への拡散空間になり得る混合物層底面の小さな間隙群の形成が少ない混合物で、他の混合物と比較して水密性、耐水性、はく離抵抗性、防水工の低損傷性及び骨材飛散抵抗性にも優れていることを確認した。

なお、SMA（ストアス、改質 II 型）は細密粒度ギャップアスコン（改質 II 型）と同様に水密性が高く、さらに SMA（改質 II 型）については骨材飛散抵抗性にも優れた試験結果が得られた。しかし、これらは混合物層底面の平滑性が低く、小さな間隙群の形成の割合が高いことから非滯水性の面で懸念が残るほか、耐水性やはく離抵抗性といった水分の影響による損傷抵抗性に劣ることから、RC 床版上の基層用混合物としては細密粒度ギャップアスコン（改質 II 型）がより良いと推察される。

また、塑性変形抵抗性の面では、橋梁部は車両の走行位置が限定される等の理由から一般部に比べて流動しやすいことを考慮すると、基層用混合物に改質アスファルトを使用することで塑性変形抵抗性を高め、RC 床版と基層のはく離リスク及び流動によ

る補修頻度の低減を図ることは有益であると思料する。

以上の結果から、橋面舗装及び RC 床版の長寿命化を図ることが可能な予防保全対策として、RC 床版上の基層用混合物に細密粒度ギャップアスコン（改質 II 型）を用いることが有効であると考えられる。

さらに、細密粒度ギャップアスコン（改質 II 型）は、既に現場での豊富な施工実績があり、施工が容易で品質や出来映えにおいても信頼性の高い混合物であることから、現場へもスムーズに適用可能であると考えられる。

参考文献

3. 1 重錘落下式たわみ測定装置による構造的破壊の事前検知手法の検討

- 1) Harold Von Quintus and Brian Killingsworth.: Analysis Relating To Pavement Material Characterization And Their Effects On Pavement Performance, FHWA-RD-97-085, 1998. 1.
- 2) 東滋夫, 金井利浩, 岡部俊幸, 林信也, 松井邦人: FWD による時系列データの舗装構造評価への適用, 土木学会舗装工学論文集, 第 3 巻, pp. 31-38, 1998. 12.
- 3) 阿部長門, 関口幹夫: 小型 FWD による道路橋鉄筋コンクリート床版健全度評価への適用性の検討, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp. 1237-1238, 2004. 9.
- 4) 丸山記美雄・熊谷政行: FWD 散逸仕事量によるアスファルト舗装の疲労ダメージ評価, 土木学会論文集 E1(舗装工学), Vol167, No. 3(舗装工学論文集 16 巻), I_27-I_34, 2011.
- 5) 日本道路協会: 舗装調査・試験法便覧, 2007. 6
- 6) 丸山記美雄, 田高淳, 笠原篤: 美々新試験道路におけるアスファルト舗装の長期供用性, 土木学会論文集 E, 62 巻 3 号, pp. 519-530, 2006.
- 7) 姫野賢治, 渡辺隆, 丸山暉彦: 低スティフネス状態におけるアスファルト混合物の疲労破壊特性に関する研究, 土木学会論文集, V-4 第 366 号, pp. 143-151, 1986.
- 8) Van Dijk, W.: Practical Fatigue Characteristics of Bituminous Mixes, Proc. of AAPT, Vol. 44, pp. 38-74, 1975.
- 9) 丸山記美雄, 田高淳, 笠原篤: アスファルト舗装の疲労ひび割れ発生予測に関する研究, 土木学会論文集 E, 64 巻 3 号, pp. 416-426, 2008.

3. 2 電磁波レーダを利用した診断手法の検討

- 10) 丸山記美雄・熊谷政行：水分と凍結防止剤の影響を受けたアスファルト混合物の電磁波レーダ特性，日本道路会議論文集，29th，ROMBUNNO.2072，2011
- 11) 社団法人物理探査学会編：物理探査用語辞典，2005年

3. 3 赤外線カメラによる診断手法の検討

- 12) 塚本成昭・山上哲示・内間満明・黒須秀明・前田近邦・関上直浩：赤外線による舗装の点検手法、舗装 vol. 46-7、2011.7
- 13) 宇野津哲哉・山上哲示・塚本成昭・内間満明・黒須秀明・前田近邦：赤外線検査法による内部損傷に着目した効率的な舗装管理への取り組み、土木学会第67回年次学術講演会、pp.645-646、2012.9

3. 4 X線CT画像およびデジタル画像相関法を用いた舗装の破壊メカニズムの解明

- 14) 内野正和、佐川康貴、尾上幸造：デジタル画像相関法を用いたコンクリート供試体のひずみ計測、日本機械学会年次大会講演論文集(1)、平成18年9月
- 15) 高野大樹、大谷順：X線CTによる地盤材料の構造の可視化、材料、材料科学学会、第62巻第10号、pp.654-659、平成25年10月
- 16) Hall S.A., Lenoir N., Viggiani G., Desures J. and Besulle P.: "Strain Localization in Sand under Triaxial Loading: Characterization by X-ray Micro Tomography and 3D Digital Image Correlation", Proceedings of International Symposium on Computational Geomechanics (COMGeo09)、2009
- 17) 松野三朗：アスファルト舗装の破損とパフォーマンス、理工図書、平成23年12月
- 18) Taniguchi S., Nishizaki I. and Moriyoshi A.: A study of Longitudinal Cracking in Asphalt Pavement using CT scanner, Road Materials and Pavement Design, vol. 9, issue 3, pp.549-558, 2008.

4. 1 積雪寒冷地におけるひび割れに対するシール材注入工法の検討

- 19) 金子雅之・田高淳・丸山記美雄：舗装における予防的修繕工法に関する調査検討、第51回(平成19年度)北海道開発局技術研究発表会 2008.2
- 20) 金子雅之・田高淳・丸山記美雄：舗装における予防的修繕工法に関する調査検討、第52回(平成20年度)北海道開発局技術研究発表会 2009.2

4. 2 ボトムアップクラックに対するシート工法を併用したオーバーレイによるひび割れ抑制手法の検討

- 21) 日本道路協会：舗装設計便覧、平成18年2月

4. 3 寒冷地域におけるひび割れシール材の評価試験方法および寒冷地用ひび割れシール材の開発

- 22) (社)日本道路協会：舗装施工便覧(平成18年版)、pp.46~48、2006.
- 23) 島崎勝、紺野路登、高橋光彦：応力緩和性能を改善したSMAによるリフレクションクラック抑制工法、道路建設、pp28-34、2009.11.
- 24) 寺田剛、渡邊一弘、久保和幸：ひび割れ注入材の品質規格の提案に向けて、第28回日本道路会議、pp77-78、2009.

4. 4 コンクリート床版上に施工する耐久性の高い基層用アスファルト混合物の検討

- 25) 三田村浩、佐藤京、本田幸一、松井繁之：道路橋RC床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響、構造工学論文集、Vol.55A、pp.1420-1431、2009.3
- 26) 加藤亮、宮永憲一：橋梁床版防水工の高度化に対応したレベリング層用混合物の検討、道路建設、(社)日本道路建設業協会、No.739、pp.64-70、2013.7
- 27) 東日本高速道路株式会社、中日本高速道路株式会社、西日本高速道路株式会社：設計要領第1集 舗装編、(株)高速道路総合研究所、平成21年7月
- 28) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、平成19年3月
- 29) 日本道路協会：舗装性能評価法 別冊、平成20年3月

A Study on Preventive Maintenance for Road Pavements in Cold, Snowy Regions

Research budget: Grants for operating expenses
(general account)
Duration of research: FY 2011-2015
Research team: Road Maintenance Research Team
Authors: KIMURA Takashi,
MARUYAMA Kimio,
HOSHI Takumi,
TANIGUCHI Satoshi

Abstract

This study aims to contribute to road pavement lifespan extension in snowy cold regions. Diagnostic techniques for the early prediction of damage and deterioration of road pavements and techniques for preventive maintenance of road pavements were developed. As a result of our study, three techniques were developed: 1) a technique for analyzing the falling weight deflectometer (FWD) time history data and detecting possible structural failure of pavement before the occurrence of failure, based on FWD dissipated work; 2) a technique for detecting the moisture in aggregate and diagnosing the condition of the aggregate before the pavement interior becomes gravelly, which uses changes in the signal of the underground radar; and 3) a technique for detecting locations of possible pothole occurrence through the detection of changes in temperature from confined moisture or water inside the pavement by using an infrared camera. The study also confirmed the possibility of elucidating the rupture mechanism of pavement by clarifying the deformation of aggregates inside the pavement step by step, which was done by using X-ray CT and digital image correlation.

For preventive measures that are beneficial in extending pavement lifespan, three proposals were made: 1) a technique for using sealing materials in cold, snowy regions; 2) a control technique against bottom-up cracks that uses overlay with a sheet coating technique; and 3) an asphalt mixture for high-durability binder course which is constructed over the concrete slab. Furthermore, we developed a test method for assessing the performance of crack sealing materials for cold regions, and a new crack sealing material for cold regions.

Key words: preventive maintenance, FWD, underground radar, infrared camera, sealing material, sheet coating technique, concrete slab