

## 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】

本研究では、積雪寒冷地での道路の損傷、劣化を早期に予測する道路診断方法と、舗装の延命化のための予防的対策手法を確立し、積雪寒冷地における道路舗装の維持管理の効率化に取り組む。

本年度は、舗装の予防保全のための診断手法の検討として、X線CTを用いたアスファルト混合物内部の変位などを評価する技術について検討した。その結果、X線CT撮影及びデジタル画像相関法を用いることにより、舗装体内の変形挙動を把握することができ、破壊メカニズムの解明につながる事が判明した。また、舗装の予防保全手法の検討に関しては、耐久性を有するコンクリート床版上の基層について、配合の異なるアスファルト混合物の性能評価を行った。その結果、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ある細密粒度ギャップアスコンが有利で、他の混合物と比較して耐水性、はく離抵抗性等の耐久性に優れていることを確認した。

キーワード：予防保全、道路診断方法、予防的対策手法、X線CT、コンクリート床版、基層

### 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、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る。また、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る。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に関しては、評価が十分でなかったため検証が必要である。

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する検討と、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

する調査検討を行った結果について報告する。

### 2. 舗装の予防保全のための診断手法の検討

舗装の損傷に対して予防的に診断をする手法としては、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。本研究においては、これまで非破壊で舗装の損傷を早期の段階で検知する診断手法を主に検討を進めてきた。平成23年度は、FWD散逸仕事量による舗装体の疲労度を診断する方法と、電磁波レーダによって橋面舗装内部の舗装混合物の状態や床版コンクリートの損傷状態を検知する技術について報告した。平成24年度は、ポットホールに代表される融雪期に顕著に見られる損傷箇所を、赤外線カメラによって事前に検知する手法に関する調査検討結果を報告した。また、平成25年度は、舗装内部の挙動を把握し、破損のメカニズムを解明するための技術として注目されるX線CTを用いたアスファルト混合物内部の変位などの評価技術に関する検討結果を報告してきた。

平成26年度は、X線CTを用いたアスファルト混合物内部の変位などを評価する技術について、前年度までの研究において明らかとなった、変位解析結果のノイズ混入によるひずみの算出結果に対する精

度などの課題について、引き続き検討した結果を報告する。

## 2.1 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 0.073×0.073×1.0mm<sup>3</sup> に設定した。試験対象は図-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/cm<sup>3</sup>)を配置して供試体の撮影を実施した。

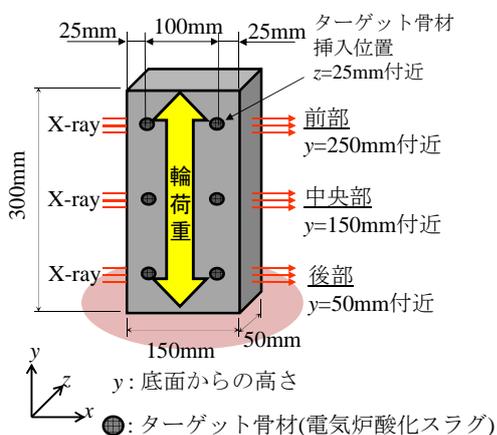


図-1 X 線 CT 撮影方法

### (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』<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>。具体的な解析手順は以下のとおりである<sup>4)</sup>。

- 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(1)により相関係数を算定
- $$CC(u, w) = \sum_{x, z} I_1(x, z) I_2(x+u, z+w) \quad (1)$$
- 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定し、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

ことができなかつた。そこで、**図-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 $\pm 25$ 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"<sup>5)</sup>により行った。

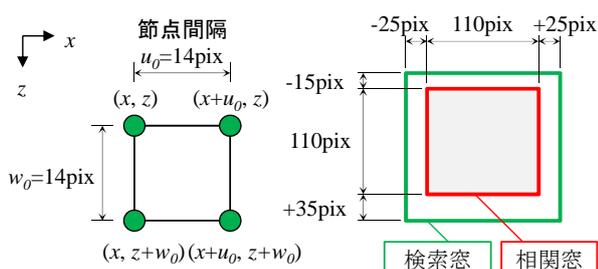


図-2 節点間隔、検索窓、相関窓の設定

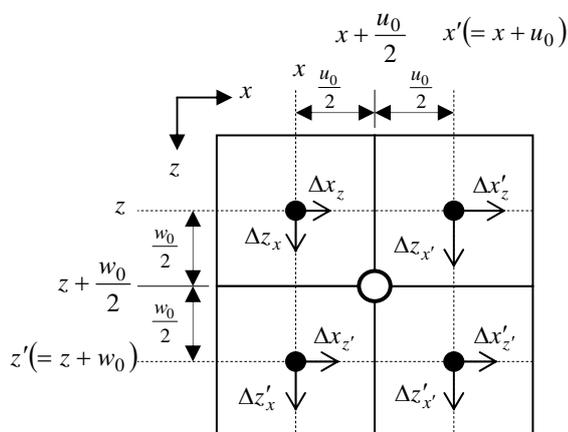


図-3 ひずみ算出のための座標系の設定

(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**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  $\varepsilon_x$  は式(2)、 $z$  方向のひずみ  $\varepsilon_z$  は式(3)で表される。

$$\varepsilon_x = \frac{(\Delta x'_z - \Delta x_z) + (\Delta x'_z' - \Delta x_z')}{2u_0} \quad (2)$$

$$\varepsilon_z = \frac{(\Delta z'_x - \Delta z_x) + (\Delta z'_x' - \Delta z_x')}{2w_0} \quad (3)$$

2. 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-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-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。

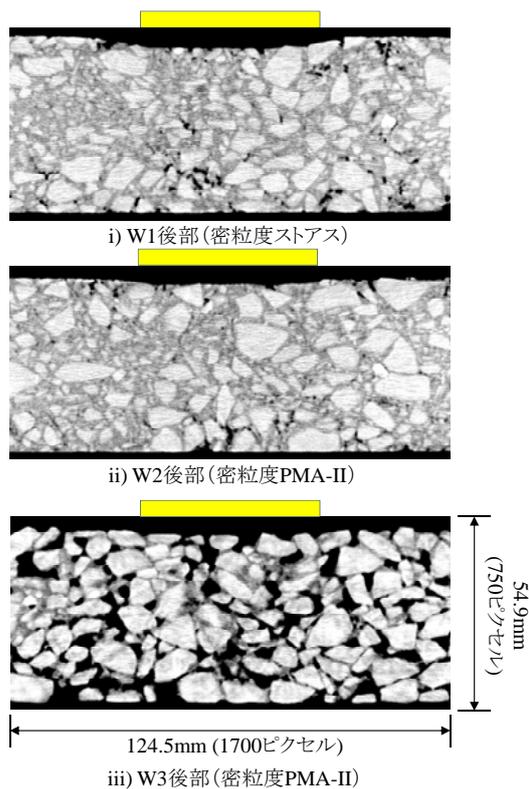


図-4 2,400回載荷時におけるCT画像

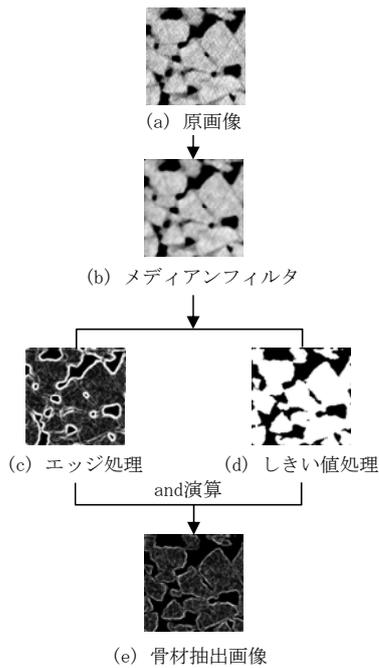


図-5 DICのための画像処理

(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-6 に示す。

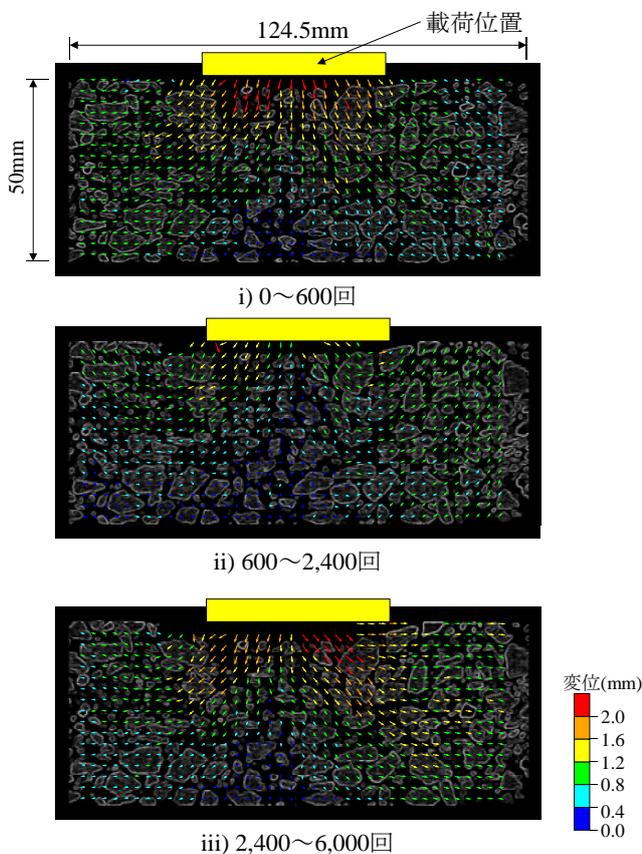


図-6 W1 後部における変位ベクトル図

0~600 回においては、荷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。全体的には荷位置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-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。

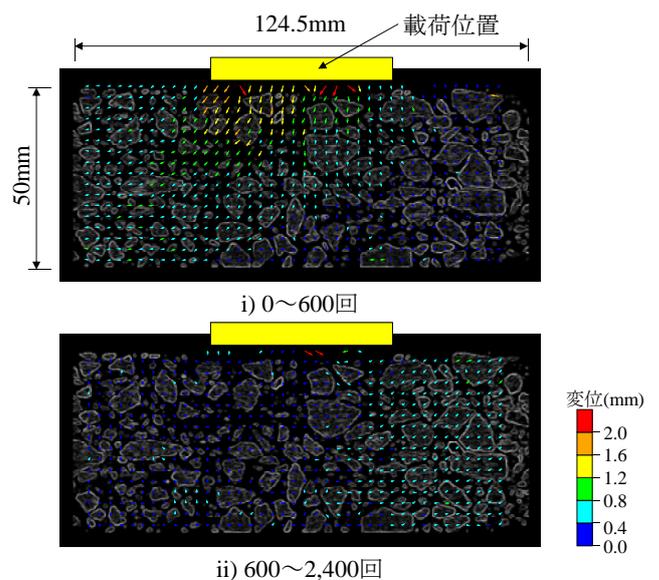


図-7 W2 後部における変位ベクトル図

3) W3(ポーラス)

W3 後部の変位ベクトル図を図-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。

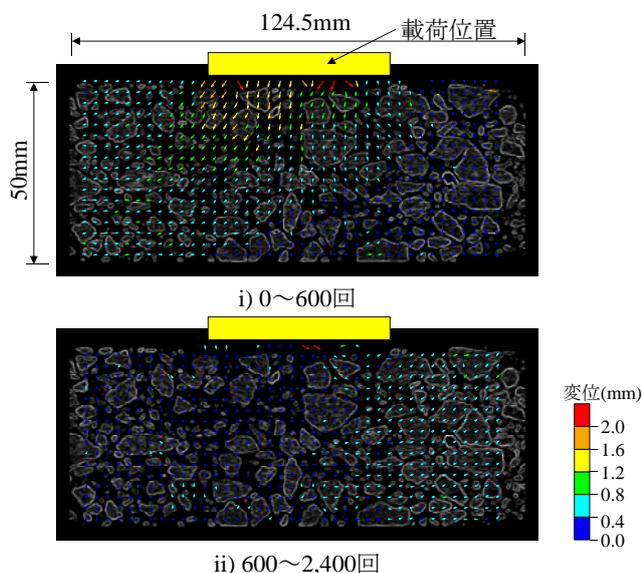


図-8 W3 後部における変位ベクトル図

(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-9 に、W2 後部の水平方向のひずみを図-10 に、W3 後部の水平方向のひずみを図-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、荷重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 回と荷重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<sup>6)</sup>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。

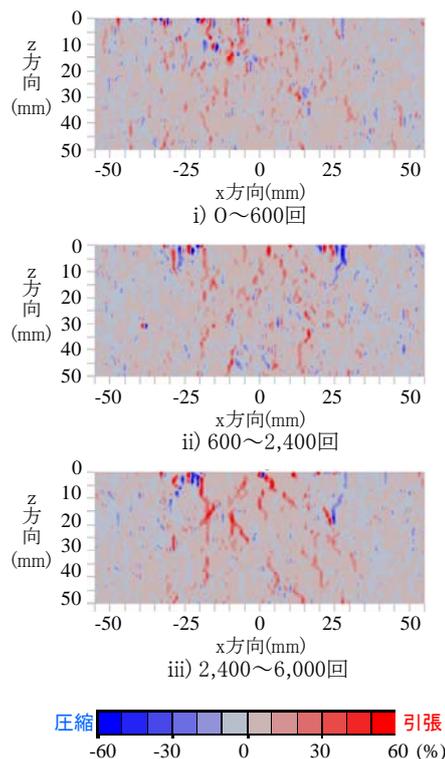


図-9 W1 後部における水平ひずみ

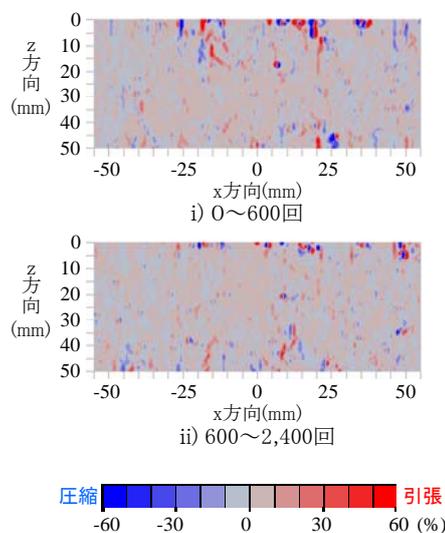


図-10 W2 後部における水平ひずみ

### 3) W3(ポーラス I)

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<sup>7)</sup>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なく、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。

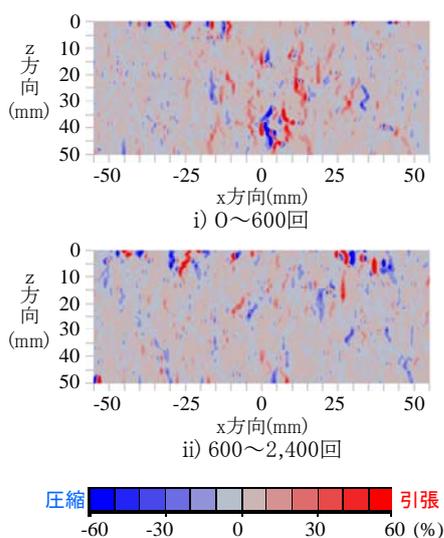


図-11 W3 後部における水平ひずみ

### 3. 舗装の予防保全手法の検討

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（排水柵、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-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<sup>8)</sup>。

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-1 水分の浸入による基層のはく離

#### 3. 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。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<sup>9)</sup>。

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非滞水性を評価するとともに、コンクリート床版の基層混合物に求められるその他性能を検証した。

#### 3. 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-1 に示す。密粒

度アスコンは北海道の国道の一般部の表層に使用されているほか、旧日本道路公団（以下、JH）ではコンクリート床版橋面の基層（改質Ⅱ型）として使用<sup>10</sup>されていたことから積雪寒冷地用の混合物として密粒度アスコン（13F）改質Ⅱ型を選定した。また、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についても検討対象とした。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<sup>11</sup>)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-1 混合物の諸元

項目	粗粒度アスコン (20)	密粒度アスコン (13F)	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	100.0
	13.2	81.0	98.4	98.1	97.5
	4.75	45.1	63.7	62.1	42.5
	2.36	30.0	49.7	44.9	27.4
	600μ	16.9	35.5	41.6	20.3
	300μ	11.7	25.2	31.1	17.1
	150μ	6.6	12.6	12.0	12.7
	75μ	4.6	9.4	9.2	10.5
アスファルト種別	ST	改Ⅱ	改Ⅱ	ST	改Ⅱ
アスファルト量 (%)	5.3	5.4	6.0	7.7	
空隙率 (%)	4.0	3.4	3.5	2.3	2.2
略号	粗粒_ ST	密粒_ II	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。

### 3.3 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-2のとおり整理した。

表-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
非滯水性	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) 非滯水性

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値化して、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数値的に捉えることで、混合物層底面の密実性・平滑性を把握し、混合物の非滯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」に準じた。供試体の作成条件を表-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-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、供試体の底面を判面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に、作業状況を写真-2に示す。

表-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-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-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。

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<sup>9)</sup>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。

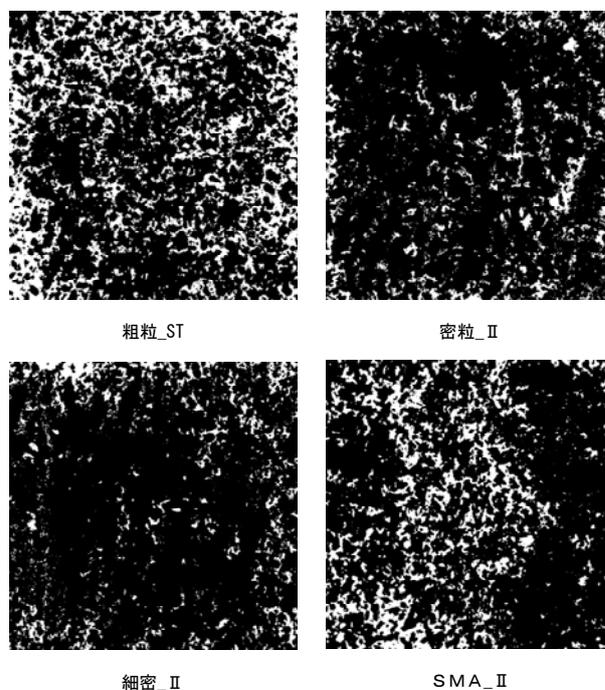


写真-3 2値化した混合物底面の画像(例)

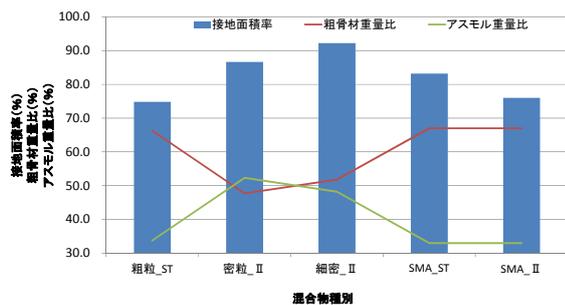


図-12 混合物別の接地面積率と粗骨材重量比及びアスモル重量比

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-12に示す。

試験の結果、接地面積率が一番高かった混合物は細密粒度ギャップアスコン（改質II型）の92%で、次いで密粒度アスコン（改質II型）87%であった。この結果から、細密粒度ギャップアスコンは、混合物層底面の平滑性が高く、他の混合物に比べて混合物層底面の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-13に、供試体「上面」の MPD と接地面積率の関係を図-14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。

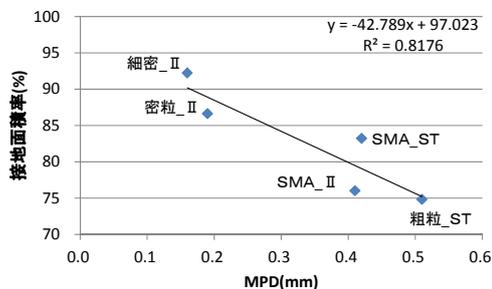


図-13 供試体「底面」のMPDと接地面積率

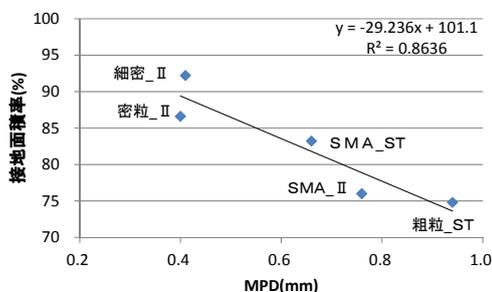


図-14 供試体「上面」のMPDと接地面積率

## (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。加圧透水試験では、混合物の締め固め度の違いによる透水係数の差異を確認することを目的に、各混合物について4種類の締め固め度（100%、98%、96%、94%）の供試体を用いた。

### 1) 加圧透水試験

#### ①試験方法

加圧透水試験は、アスファルト混合物の加圧透水試験方法<sup>2)</sup>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。水利用アスファルト混合物では  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  以下の透水係数を不透水の目安としているが、150kPa で加圧して透水係数が  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  以下の場合には、500kPa で加圧した透水量も計測した。

#### ②試験結果

締め固め度 100%の供試体の加圧透水試験結果及び舗装調査・試験法便覧に示されているアスファルト混合物の透水係数の概略値を表-5に示す。

150kPa で加圧した場合、全ての混合物で透水係数が  $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$  以下であった（以下、便宜的に「不透水」と表記）が、500kPa で加圧した場合では、細密粒度ギャップアスコン（改質Ⅱ型）及びSMA（改質Ⅱ型）が不透水となり、両者は水密性の高い混合物であることを確認した。

ただし、今回の試験では、粗粒度アスコン及び密粒度アスコン（改質Ⅱ型）の透水係数は、舗装調査試験法便覧に示されているアスファルト混合物の透水係数の概略値よりも  $10^{-1} \sim 10^{-2}$  のオーダーで小さいことから、再試験等により引き続き検討を要すると思われる。

また、混合物の締め固め度と透水係数の関係では、図-15 に示すとおり、締め固め度が低いほど透水係数は大きくなり、締め固め度が 98% を下回った場合は、不透水性を満足する混合物は無かった。

表-5 加圧透水試験結果（締め固め度 100%）

混合物	透水係数 (cm/sec)		舗装調査・試験法便覧の概略値
	150kPa	500kPa	
粗粒_ST	不透水	9.32E-07	1.00E-04~05
密粒_Ⅱ	不透水	8.80E-07	1.00E-05~06
細密_Ⅱ	不透水	不透水	1.00E-06~07
SMA_ST	不透水	8.27E-07	1.00E-07
SMA_Ⅱ	不透水	不透水	同上

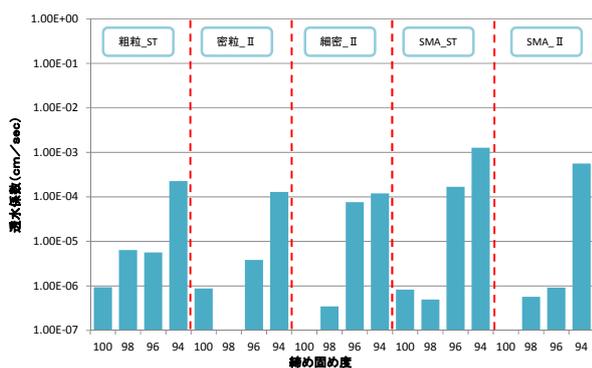


図-15 締め固め度別の加圧透水試験結果

## 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、NEXCO も同値である。各混合物の残留安定度を図-16 に示す。

試験の結果、全ての混合物で残留安定度が 75% 以上となり、最高値は細密粒度ギャップアスコン（改質Ⅱ型）の 99% で、最低値は SMA（改質Ⅱ型）の 89% であった。残留安定度から耐水性を評価する場合、対象とした各混合物は、現状で各道路管理者が示す規格値を満足しているが、中でも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。

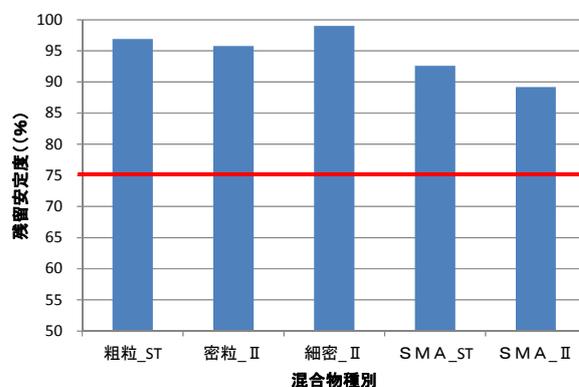


図-16 各混合物の残留安定度

### (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<sup>[12]</sup>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-17に示す。試験結果から、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、密粒度アスコン（改質Ⅱ型）及び細密粒度ギャップアスコン（改質Ⅱ型）は0.2%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、密粒度アスコン（改質Ⅱ型）及び細密粒度ギャップアスコン（改質Ⅱ型）は、はく離抵抗性が高く、現状で用いられている粗粒度アスコンははく離抵抗性に劣ることが確認された。

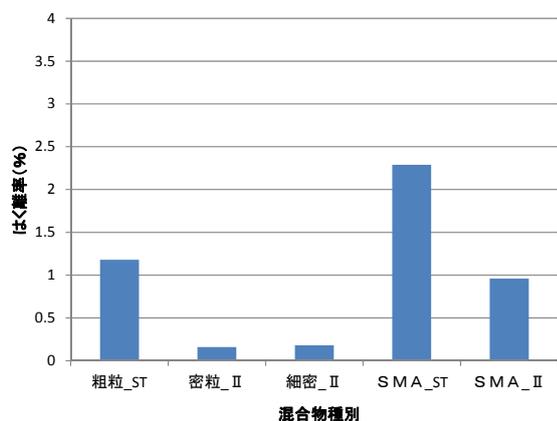
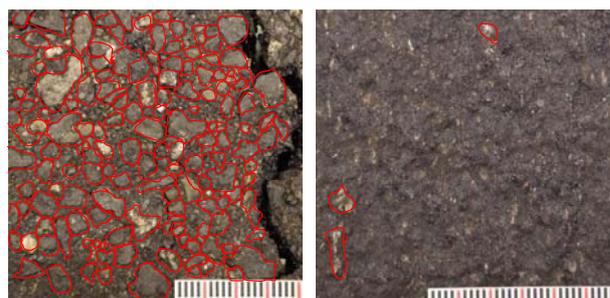


図-17 はく離率

なお、写真-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-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

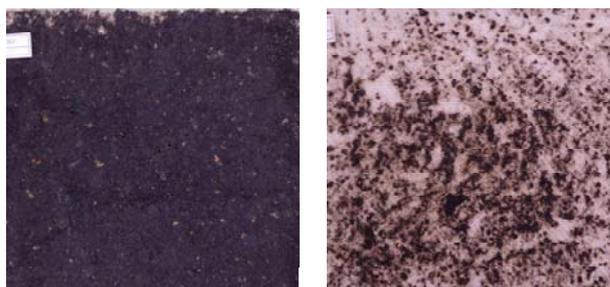
て付着したアスファルト分が多いことが分かる。また、この写真の両者の不織布の重量（不織布の重量を含む）を測定したところ、粗粒度アスコン（ストアス）の89.1(g)に対し、細密粒度ギャップアスコン（改質Ⅱ型）は23.0(g)と、混合物中の骨材からはく離したアスファルト分が少なかった。これらの不織布の観察結果からも、細密粒度ギャップアスコン（改質Ⅱ型）のはく離抵抗性が高いことが裏付けられた。



粗粒\_ST

細密\_II

写真-4 供試体底面のはく離の状況



粗粒\_ST

細密\_II

写真-5 不織布へのアスファルト付着状況

## (4)防水工の損傷状況

### 1) 防水工の損傷状況の確認

基層用混合物を施工する際、混合物中の粗骨材の端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端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)<sup>12)</sup>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-18及び写真-6 に示すとおり 1 体の寸法が 30cm×5cm×厚さ 10cm になるよう切斷した。

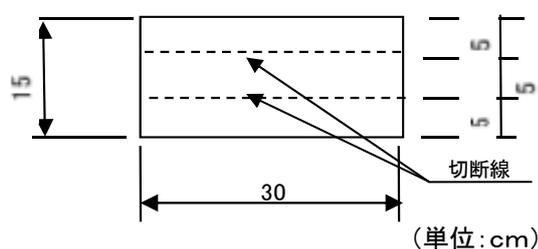


図-18 供試体詳細図  
(防水工の損傷確認用)



写真-6

### 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つの切斷面を目視観察し、混合物中の粗骨材の端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。

### ③試験結果

例としてSMA（改質II型）の供試体切斷面を写真-7に示す。アスファルト混合物中の骨材の角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-19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、密粒度アスコン（改質II型）及び細密粒度ギャップアスコン（改質II型）の点数が低い結果となった。

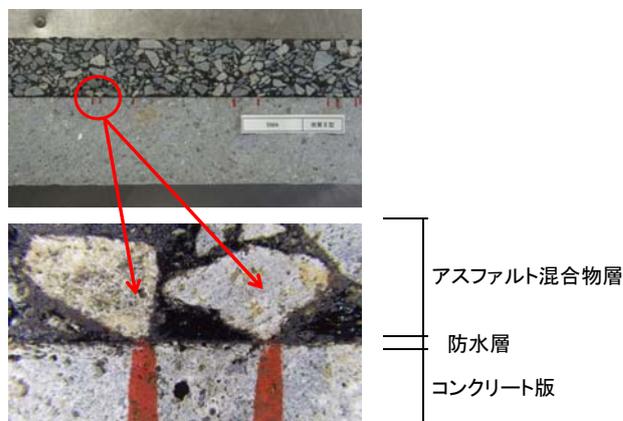


写真-7 骨材が防水工を貫通した箇所  
SMA（改質II型）の例

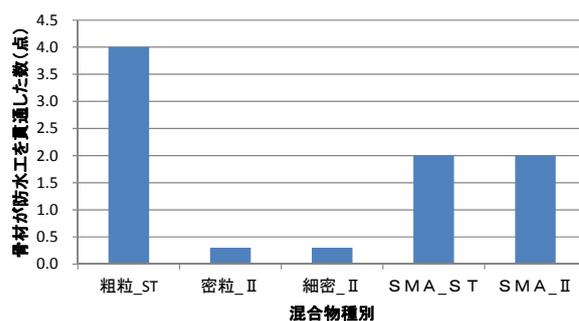


図-19 骨材が防水工を貫通した点数の比較

## (5) 骨材飛散抵抗性

### ①試験方法

舗装性能評価法別冊<sup>13)</sup>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℃、試験温度-20℃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当と考え、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 $-20^{\circ}\text{C}$ 、室温 $-20^{\circ}\text{C}$ とした。

## ②試験結果

カンタブロ試験結果を図-20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%、密粒度アスコン（改質Ⅱ型）は16%という結果で、これらの混合物は粗粒度アスコン及びSMA（ストアス）と比較して、衝撃に対する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。

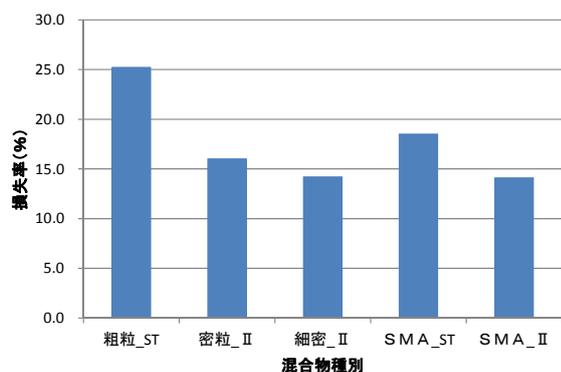


図-20 カンタブロ損失率

## (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-21に示す。

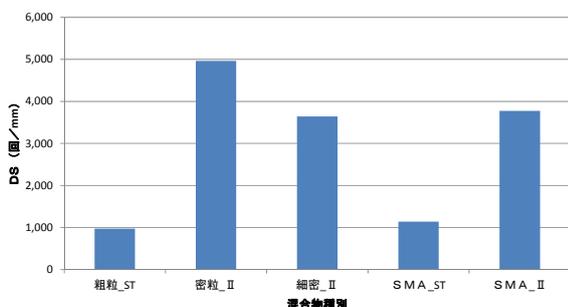


図-21 動的安定度 (DS)

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. まとめ

### 4.1 舗装の予防保全のための診断手法の検討

本研究は、ホイールトラッキング試験供試体にX線CT撮影及びDIC解析を用いることにより、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。

### 4.2 舗装の予防保全手法の検討

コンクリート床版上の基層混合物には、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ある細密粒度ギャップアスコンが有利であることが明らかとなった。また、この細密粒度ギャップアスコンは、他の混合物と比較して耐水性、はく離抵抗性等の耐久性に優れていることを確認した。

## 参考文献

- 1) 高木幹雄、下田陽久：画像解析ハンドブック、東京大学出版会、平成16年9月
- 2) 日本道路協会：舗装調査・試験法便覧(第3分冊)、平成19年6月
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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.

- 8) 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
- 9) 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
- 10) 日本道路公団：設計要領 第1集 舗装編、(財)道路厚生会、平成16年1月
- 11) 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
- 12) 日本道路協会：道路橋床版防水便覧、平成19年3月
- 13) 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 OF PAVEMENTS IN COLD, SNOWY REGIONS

**Budgeted** : Grants for operating expenses general account

**Research Period** : FY2011-2015

**Research Team** : Road Maintenance Research Team

**Author** : KIMURA Takashi

MARUYAMA Kimio

HOSHI Takumi

TANIGUCHI Satoshi

**Abstract** : Under this study, we have been working to develop a pavement diagnosis method that enables the early detection of road damage and deterioration in snowy cold regions. The study aims to establish measures for deterioration prevention in order to extend pavement life. The objective of these studies is to improve the efficiency of pavement maintenance in snowy cold regions.

In FY 2014, we adopted X-ray computed tomography (CT) technology to assess the asphalt mixture displacement inside pavement, toward developing preventative maintenance methods for pavement. The results confirmed that the combined use of X-ray CT and digital image correlation enables us to understand the deformation behavior of asphalt mixture inside pavement; therefore, these can be used to clarify the destruction mechanism of pavement. Regarding preventative maintenance methods for pavement on bridge concrete slabs, we studied various asphalt base course mixtures. Fine and gap-graded asphalt concrete mixture proved superior to other mixtures in terms of durability, such as in waterproofing, flaking resistance and peeling resistance. This is because fine and gap-graded asphalt concrete has voids that are few and small. Generally such voids retain water and cause water to flow horizontally along the bottom of the pavement body.

**Key words**: Preventative maintenance, pavement diagnosis method, preventative measures, X-ray computed tomography (CT), concrete deck, asphalt base course mixture