

一般財団法人新潟県建設技術センター

令和2年度 研究助成事業活動結果報告

橋梁 RC 床版の長寿命化に資する橋面舗装表層用
碎石マスチックアスファルトの配合設計に関する事業

令和3年3月18日



長岡技術科学大学大学院
環境社会基盤工学専攻

高橋 修



1.はじめに

本報告書は、一般財団法人新潟県建設技術センターからの「令和2年度研究助成事業」に対する申請事業「橋梁 RC 床版の長寿命化に資する橋面舗装表層用砕石マスチックアスファルトの配合設計に関する事業」の検討成果を報告するものである。

道路橋の鉄筋コンクリート（RC）床版は、車両の活荷重によって疲労ダメージが生じる。そして、浸水等によって RC 床版の表面が濡れた状態になると、その疲労損傷は促進される。新潟県は長い海岸線を有する積雪地域であるため、浸水に塩分が含まれている場合、RC 床版の損傷はさらに加速されることになる。床版表面の濡れを防止するため、床版防水工の高性能化が進められているが、更に防水性能を高め、RC 床版の長寿命化を実現させるためには、橋面アスファルト舗装の水密性を高くするとともに、その性能を長期に渡って持続することが必要である。本事業では、砕石マスチックアスファルト（Stone Mastic Asphalt : SMA）に注目し、表層に使用することを前提に、高水密性を確保しつつも変形抵抗性の高い橋面舗装としての配合仕様を策定することについて調査、検討を行った。

SMA は 1960 年代の中期に、摩耗抵抗性を向上させるアスファルト混合物としてドイツで開発された。その後、改良が行われて 1984 年に標準化されると、その優れたパフォーマンスによって欧州の多くの国でも運用されるようになった。基本的には道路舗装の表層用アスファルト混合物として運用されてきたが、現在では空港や港湾の舗装にも使用されており、表層だけではなく、基層にも活用されている¹⁾。我が国においては、1980 年代の後半にやはり摩耗抵抗性の優れたアスファルト混合物として導入され、主に積雪寒冷地の表層材料として運用された。我が国では、繊維質補強材（ファイバー）の添加が推奨され、摩耗抵抗性に加えて塑性流動抵抗性の向上も見込んで運用されてきた。

橋面アスファルト舗装の高水密化は、主に基層に対して行われてきており、例えば高速道路会社（NEXCO）では SMA を標準仕様で基層に使用してきた経緯がある。橋面アスファルト舗装の基層は、RC 床版表面の不陸を調整するレベリング層としての機能も要求されることから、高い水密性ととともに均一な仕上がり性能（施工性）が必要とされている。そのため、SMA の配合仕様の策定には、十分な水密性を保持しながらも締固めが容易な物性が追究されてきた²⁾。

以上のとおり、我が国の SMA 研究においては、一般土工部の表層および橋梁部の基層に適用することを前提にした配合仕様の検討が主に行われてきた経緯がある。すなわち、橋面舗装の表層に使用することを前提とした検討は十分に行われておらず、耐用年数として 20 年が求められている現時点において、長寿命化の視点も含めて検討の余地があると言える。このような背景から、本事業では以下に挙げる事項を具体的な目的として設定した。

- (1)表層への適用を前提とすれば仕上り厚は 40～50 mm であり、最大骨材粒径が 20 mm か 13 mm の SMA が選択肢として挙げられる。それぞれの SMA における配合設計上の留意点を把握するとともに、橋面舗装の表層としての性能を評価する。
- (2)我が国の橋面舗装表層で一般的に運用されている最大骨材粒径が 20 mm の密粒度アスファルト混合物と基本性能を比較し、水密性を重視した場合に SMA がその代替材料として優位になり得るのかどうか評価する。

(3)橋面アスファルト舗装の表層として適当な SMA の配合仕様を検討する．具体的には，推奨される最大骨材粒径，骨材粒度範囲，ファイラー量およびファイバー量，ダレ量を選定する．また，骨材粒度範囲の選定に係る重要ふるい目寸法とその通過量の目安についても検討する．

(4)後述のとおり，本事業では米国の AASHTO 基準を規範として配合設計の検討を行うが，我が国の実状を踏まえて，取り入れるべき手続きや基準，取り入れるべきではない，あるいは変更すべき手続きや基準について考察する．

本事業は単年度のものであり，時間的な制約があることから，アスファルト混合物の素材としては一つのグループのみを使用した．そのため，上記の目的について定量的な成果を得るには至れなかった．しかしながら，本事業の成果は定性的な知見ではあるが，今後に対する方向性を示すものと位置づけることができる．

2. 表層用 SMA の概要

2.1 SMA の特徴

SMA は一般的な表層用混合物である密粒度アスファルト混合物に比べ，粗骨材とフィラーの量が多い骨材配合である．一般的な混合物は粗骨材量が質量比で 50～65%，フィラー量が 5～8%であるのに対し，SMA は粗骨材量が 70～80%，フィラー量が 8～13%となっている²⁾．図 2.1 に SMA の骨材配列について模式的に示す．

SMA は，粗骨材の割合を多くすることにより，粗骨材が相互に接触する骨材骨格が形成して，かみ合わせ効果が向上することを見込んでいる．さらに，フィラー量の増加によって，粗骨材の間隙部がフィラー分の多いアスファルトモルタルで満たされ，密実な構造となることが期待されている．その結果，塑性流動抵抗性，ひび割れ抵抗性，水密性が向上する．また，ファイバーの添加や多めのアスファルト量の配合によって優れた摩耗抵抗性も付加されている．表 2.1 に SMA に期待されている特長について，耐久面と機能面に分けて列挙する．

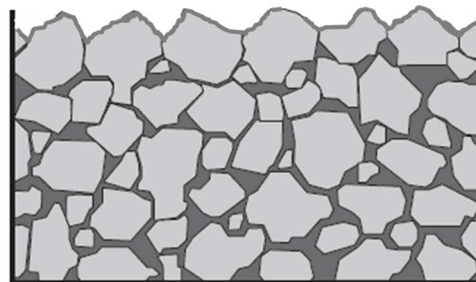


図 2.1 SMA の骨材配合の概念

2.2 表層用 SMA の運用状況と本事業での着目点

我が国において，公的な機関によって標準化されている表層用の SMA は「北海道型 SMA」のみである³⁾．北海道型 SMA は，北海道開発局が施工する高規格幹線道路の舗装工事に対して適用されているもので，「積雪寒冷地における舗装技術検討委員会」がその手引きを作成した．手引きには，素材として

表 2.1 SMA に期待される特長

耐久面	機能面
<ul style="list-style-type: none"> ・ 塑性流動抵抗性の向上 ・ 摩耗抵抗性の向上 ・ ひび割れ抵抗性の向上 ・ 骨材飛散抵抗性の向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 騒音の低減 ・ 水はねの低減 ・ 雨天時の滑り抵抗性の向上 ・ 夜間時，雨天時の視認性の向上 ・ 路面凍結抑制効果の向上

のアスファルトバインダや各種骨材、フィラーの要求性能、配合設計の要領が規定されており、その他の製造、運搬、施工、管理についての留意点が記載されている。北海道内では多くの実績があるが、北海道外での実績はほとんどない。また、配合設計には我が国で標準的なマーシャル安定度に基づく方法を採用しており、設計アスファルト量は設計パラメータの基準値を満足する共通範囲から決められる。そして、設計した SMA の供試体を作製し、低温カンタプロ試験、ホイールトラッキング試験、きめ深さ測定を実施して、規格値を満足するかどうか評価する。

北海道型 SMA の手引きでは、最大骨材粒径が 13 mm でバインダは改質アスファルトが標準となっている。すなわち、骨材粒度としては一つの範囲が示されているだけで、選定した骨材粒度に基づいてアスファルト量を変化させ、基準値を満足する条件を模索することが配合設計の手続きである。本事業では、最大骨材粒径やバインダ種を限定せずに、汎用性のある検討が行えるように、北海道型 SMA 手引きの仕様を標準として採用しなかった。

米国や欧州諸国、オーストラリアでは、表層に SMA を使用することは一般的であり、標準化されているアスファルト混合物の一つとして位置づけられている。特に、米国 AASHTO の基準は、素材も含め、配合設計方法や物性評価の試験法、規格値等も詳細に規定されている。そして、関連する参考資料や情報も入手しやすいことから、本事業では、AASHTO 基準に基づく SMA (AASHTO 型 SMA) をベースに検討を行った。我が国の材料 (アスファルトと骨材) を使用し、我が国の生産工場 (アスファルトプラント) で製造できることを考慮して、橋面舗装としての水密性と耐久性が十分に確保できる配合仕様を模索するとともに、SMA 配合設計法の留意点についても考察した。

2.3 AASHTO の SMA 基準 (配合要領)

本事業では、AASHTO 型 SMA の配合仕様を決定するガイドラインとして、「Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA)」⁴⁾ および「Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA)」⁵⁾ に準拠した。ただし、骨材およびアスファルトバインダ、ファイバーに関しては AASHTO 基準によるものではなく、新潟県内のアスファルトプラントで実際に運用されている一般的なものを使用した。

AASHTO 基準には、最大骨材粒径が 19 mm, 12.5mm, 9.5 mm の 3 種類の SMA が規定されている。本事業では、最大骨材粒径が 19 mm の SMA (AASHTO 型 SMA (20)) について配合を試みたところ、骨材粒度をかなり調整しても空隙率の基準とダレ量の基準を同時に満足させることが難しく、準備した骨材では対応不可能と判断した。そのため、本報告書では配合設計の経緯や具体的データ類について割愛した。

図 2.2 に AASHTO 型 SMA に対する配合設計の標準的フローを示す。実際の AASHTO 基準では、骨材の品質試験を実施して、規格を満たしていることを確認するが、ここで使用したすべての骨材は新潟県内のアスファルトプラントから調達したことから、国内の要求性能は満足していることになる。配合設計フロー中の「材料の物性調査」では、分級骨材の粒度、密度 (比重)、吸水率を測定した。また、本事業での検討では、バインダは改質アスファルト II 型のみを使用した。「骨材配合比の決定」では、AASHTO 基準の粒度範囲に基づいて複数

の骨材粒度を選定し、その後「SGC 供試体の作製」を実施して「VMA と VCA の確認」によって複数の骨材粒度の中から有望なものを選出する。SGC は Superpave Gyratory Compactor のことであり、SGC は現場施工でのローラ転圧に近い締固め状態で SMA 供試体を作製することができる。VMA は Voids in Mineral Aggregate, すなわち骨材間隙率のことであり、VCA は Voids in Coarse Aggregate, すなわち粗骨材間隙率のことである。両者の値を比較することにより、粗骨材が骨格構造を形成しているか否か、その粗骨材間のスペースを細骨材を含むフィラービチューメンが十分に充填しているか否かを評価できる。そして、「アスファルト量による空隙率の調整」を行った SMA 供試体を作製し、「TSR の確認」および「ダレ量の確認」を実施して、これらの基準を満たしているアスファルト量を選定することが「設計アスファルト量の決定」となる。TSR は Tensile Strength Ratio, すなわち残留圧裂強度比のことである。選定した骨材粒度と設計アスファルト量で作製した SMA 供試体に対して、設計パラメータのすべてが規格値を満足していることを確認して「配合の決定」となる。すべての規格値を満たさない場合は、骨材粒度およびファイバー量を調整して再度アスファルト量の選定からリスタートする。

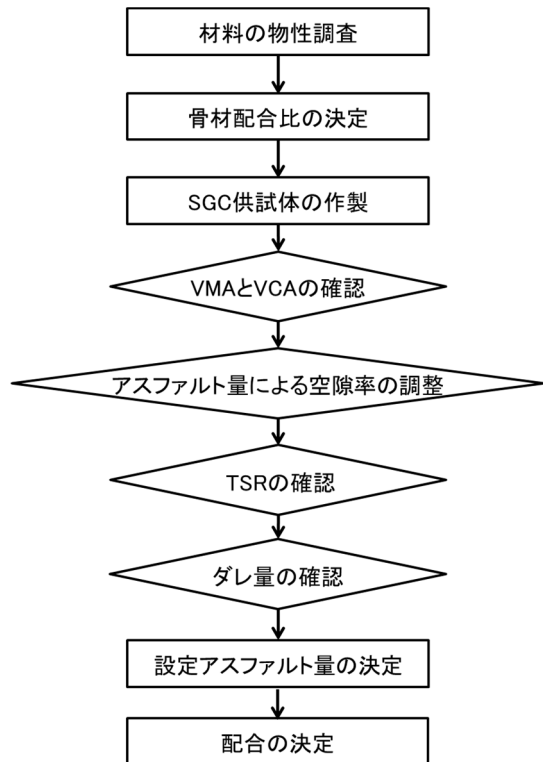


図 2.2 AASHTO 型 SMA の配合設計フロー

しているアスファルト量を選定することが「設計アスファルト量の決定」となる。TSR は Tensile Strength Ratio, すなわち残留圧裂強度比のことである。選定した骨材粒度と設計アスファルト量で作製した SMA 供試体に対して、設計パラメータのすべてが規格値を満足していることを確認して「配合の決定」となる。すべての規格値を満たさない場合は、骨材粒度およびファイバー量を調整して再度アスファルト量の選定からリスタートする。

SMA については、欧州諸国のほうが古くからの実績があり、国や関係機関で基準類が整備されているが、気象条件や交通条件の違いから、国によって基準がかなり異なっている¹⁾。また、我が国の標準ふるい目寸法は欧州諸国のものとは異なっており、欧州諸国の基準類をそのまま適用することが難しい。

3. AASHTO 型 SMA (13) の配合設計

前章で記した AASHTO 基準に従って、最大骨材粒径 12.5 mm の SMA (AASHTO 型 SMA (13)) の配合設計を実施した。この配合設計を通じ、AASHTO 型 SMA (20) との違いや北海道型 SMA の手引きも加味して、AASHTO 基準の特徴やメリット、デメリットについて知見を得た。

3.1 使用材料の物性

使用した骨材の基本物性として、表 3.1 に各分級骨材の粒度および比重、吸水率のデータを示す。本事業に用いた 6 号砕石は、9.5 mm を境界として 2 つに分級した。これは、我が国の粒度設計では採用していないふるい目寸法 9.5 mm に対して、AASHTO 基準では粒度範囲が規定されており、粒度設計上、無視できない規定であるからである。分級後の骨材は、そ

れぞれ 9.5～13.2 mm の碎石と 4.75～9.5 mm の碎石の粒度分布となる。ここでは、それぞれを 6 号碎石 A、6 号碎石 B と表記する。また、本事業において使用したアスファルトはすべて改質アスファルト II 型であり、日本改質アスファルト協会の品質規格⁹⁾を満足していた。

3.2 骨材配合比の決定

各分級骨材の粒度および粒度範囲の基準に準拠して、骨材配合比を選定した。選定した設計粒度の目標粒度は、①基準粒度範囲の中央値、②基準粒度範囲の上限値と中央値のさらに中央の値、③基準粒度範囲の下限値と中央値のさらに中央の値の 3 とおりとした。AASHTO 型 SMA (13) の基準粒度範囲、3 とおりの目標粒度、および実際に配合した合成粒度の値を表 3.2 にまとめて示す。また、各合成粒度の粒度曲線を図 3.1 に示す。合成粒度には細かい順に①～③の記号を付けて表現する。

AASHTO 型 SMA の配合設計では複数とおりの合成粒度を設定し、実際にアスファルトを添加して SMA 供試体を作製する。そして、VMA や VCA 等の設計パラメータの値を規格値と比較することにより、最適な合成粒度を選定して以降の手続きに進む。

表 3.1 使用骨材の物性

物 性		6 号碎石 A	6 号碎石 B	7 号碎石	粗砂	細砂	石粉
通過質量百分率 (%)	19.0 mm	100	100	100	100	100	100
	13.2 mm	97.7	100	100	100	100	100
	9.5 mm	4.4	99.0	100	100	100	100
	4.75 mm	0	2.3	97.3	100	100	100
	2.36 mm	0	0	0.4	98.5	99.5	100
	0.075 mm	0	0	00	2.1	0.9	93.3
表乾比重		2.674	2.692	2.737	2.629	2.578	—
かさ比重		2.658	2.671	2.716	2.607	2.522	—
見かけ比重		2.700	2.728	2.776	2.667	2.670	2.700
吸水率 (%)		0.588	0.778	0.803	0.870	2.200	—

表 3.2 各骨材粒度の目標値と合成結果

ふるい目呼び 寸法 (mm)	基準 粒度範囲	粒度①		粒度②		粒度③		
		目標	合成	目標	合成	目標	合成	
通過質量百分率 (%)	19.0	100	100	100	100	100	100	
	12.5	90 - 100	97.5	99.3	95.0	99.2	92.5	99.0
	9.5	50 - 80	72.5	72.3	65.0	65.1	57.5	57.9
	4.75	20 - 35	31.3	31.2	27.5	27.3	23.8	23.8
	2.36	16 - 24	22.0	21.9	20.0	19.9	18.0	17.9
	0.075	8 - 11	10.3	10.2	9.5	9.3	8.8	8.9

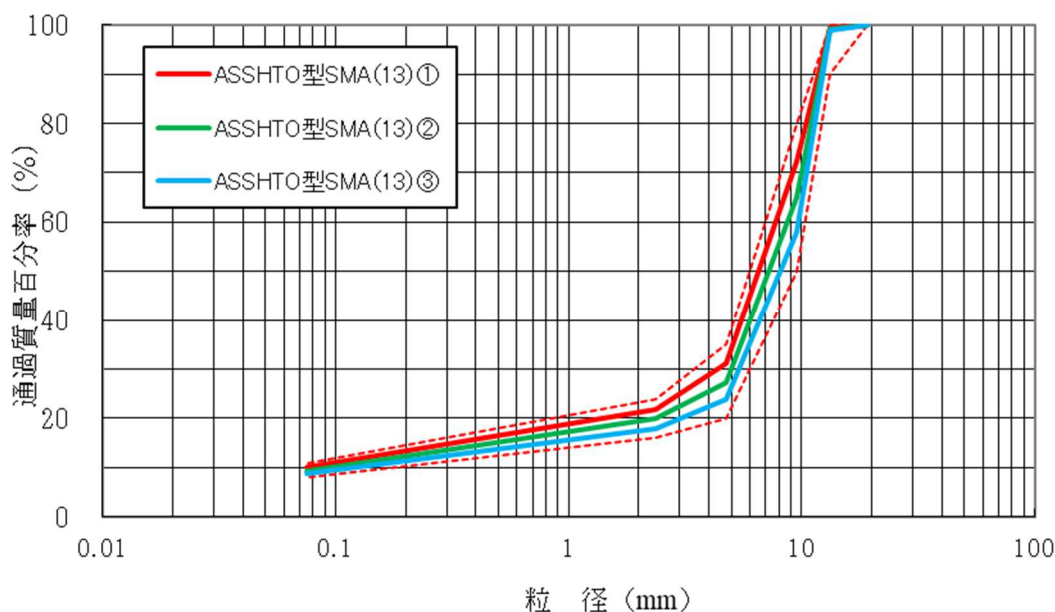


図 3.1 各骨材粒度の粒度曲線

3.3 VMA と VCA の確認

(1) SMA 供試体の作製要領

各合成粒度の骨材に対してアスファルトを添加し、混合、締固めを行って SMA 供試体を作製した。AASHTO 基準では、締固めを SGC によって行う。SGC は、米国の SHRP (Strategic Highway Research Program) による Superpave 配合設計法の開発に付随して規格化された締固め装置である。SGC を用いた Superpave 設計法は米国を主体として、現在は欧州、アジア諸国においても道路舗装のアスファルト配合設計法として運用されている。

SGC は、上方からの一定圧力を付加した状態で供試体を傾けながら回転させることで、混合物にニーディング作用を与えながら締め固める機器である。我が国において配合設計の主流となっているマーシャル設計法では、供試体の締固めにマーシャルランマを使用しているが、マーシャルランマは常に鉛直方向からの衝撃荷重によって突き固めるため、締固め方向が一定となってしまうニーディング作用が与えられない。そのため、SGC は実舗装での車両走行による圧密作用に近似した締固めを行うことができるという特徴を持つ。また、SMA の配合設計では、マーシャルランマは粗骨材の割れや角欠けを起しやすいため、適当ではないとの指摘もある。

本事業での SMA 供試体は標準仕様の SGC を用いて締固めを行い、円柱状供試体を作製した。SGC の標準仕様は、垂直圧力が 600 MPa、回転速度が 30 回/分、回転時傾斜角度が 1.25 度である。そして、SMA 配合設計での回転数は 100 回と規定されており、使用バインダの温度特性に基づき、混合温度は 175~185℃、締固め温度は 160~170℃と設定した。締固めは、混合後 165℃で 2 時間の養生 (空気恒温槽内に静置) の後に実施した。また、各合成粒度の SMA 混合物に対して、締固め後の供試体高さが 115±5 mm となるように試料の投入量を調節

した。なお、骨材粒度を選定するための SMA 供試体の作製においては、アスファルト量は暫定値として 6.5%とした。これは、AASHTO 基準が規定している適正アスファルト量の範囲である 6.0~7.0%の中央値である。

(2) VMA の測定

VMA は、締め固めたアスファルトコンクリート（アスコン）において、空隙およびバインダが占める体積割合のことである。一般に VMA の値が小さいアスコンは、骨材が密に詰まり過ぎていて、塑性流動抵抗性が低い。そのため、十分な空隙率を確保しつつも、高い VMA を有するアスコンが望ましいとされている。AASHTO 基準の SMA では、VMA は 17%より大きく、かつ 17%に近い値が望ましいとされている。VMA は次式で求められる。

$$VMA = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{sb}} \times P_s$$

ここに、VMA：骨材空隙率（%）， G_{mb} ：アスコンのかさ比重， G_{sb} ：骨材全体のかさ比重，および P_s ：混合物中の骨材の配合割合（質量比）である。

(3) VCA の測定

VCA はアスコンにおける粗骨材（粒径が 4.75 mm 以上の骨材）の空隙率のことである。また、VCA には 2 つの値がある。1 つは VCA_{DRC} （Voids in Coarse Aggregate for the Dry-Rodded Condition）で、バインダを加えずに粗骨材のみを締め固めた状態での VCA である。もう 1 つは VCA_{MIX} （Voids in Coarse Aggregate for the Compacted Mix）で、バインダを加えて混合し、締め固めたアスコン状態での VCA である。AASHTO の基準は VCA_{DRC} が VCA_{MIX} よりも大きいことが求められる。 VCA_{DRC} が VCA_{MIX} より小さい場合、細骨材（粒径が 4.75mm 未満の骨材）が粗骨材の空隙を過度に充填して、粗骨材のかみ合わせ（粗骨材粒子の相互の接触）を阻害していることになる。この場合、合成粒度の見直しが必要となる。図 3.2 に VCA_{DRC} および VCA_{MIX} の物理的意味とその違いについて模式的に示す。

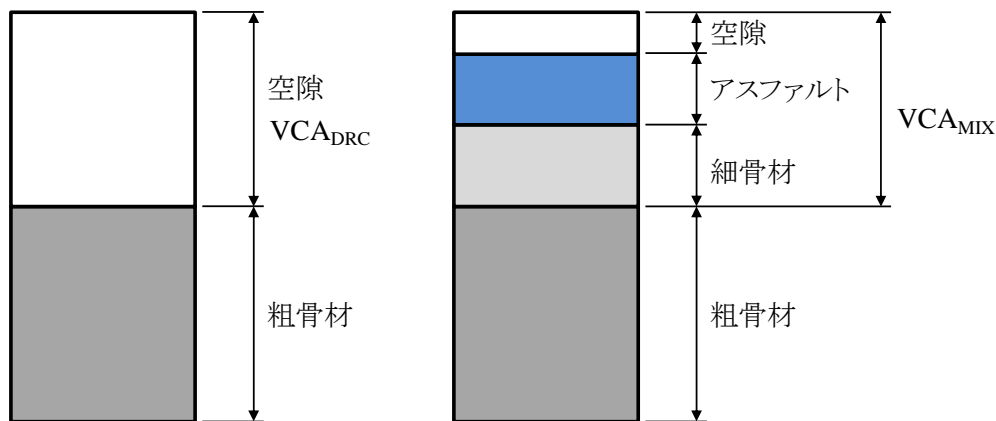


図 3.2 VCA_{DRC} と VCA_{MIX} の物理的意味

Dry-rodded 試験は、写真 3.1 に示すように、乾燥状態の粗骨材のみを容積が既知の容器に詰め、その質量を測定することにより、 VCA_{DRC} を求める。骨材を容器に詰めて、締め固める際に金属性の棒を使うことから、このような試験名称となっている。

VCA_{DRC} および VCA_{MIX} は次式で求められる。

$$VCA_{DRC} = \frac{G_{CA}\gamma_w - \gamma_s}{G_{CA}\gamma_w} \times 100$$

$$VCA_{MIX} = 100 - \frac{G_{mb}}{G_{CA}} \times P_{CA}$$



写真 3.1 Dry-rodded 試験の実施状況

ここに、 VCA_{DRC} :粗骨材のみの骨材間隙率(%), G_{CA} :粗骨材のかさ比重, γ_w :水の密度(998 kg/m³), γ_s :締め固めた状態での粗骨材の密度, VCA_{MIX} :アスコン中の粗骨材間隙率(%), G_{mb} :アスコンのかさ密度, P_{CA} :アスコン中の粗骨材の配合割合(質量比)である。

(4) VMA と VCA の測定結果

3種類の骨材粒度の SMA に対する VMA と VCA の結果、および AASHTO 基準との評価結果を表 3.3 に示す。すべての骨材粒度の SMA とも、VMA, VCA どちらにおいても基準を満足していた。したがって、これらの骨材粒度のなかで VMA の値が 17.0%にもっとも近い粒度①が適切な骨材粒度であると評価される。

以降の AASHTO 型 SMA (13)の配合設計手続きにおいては、骨材粒度①のみに対して行うものとする。

3.4 アスファルト量による空隙率の調整

空隙率はアスコン内部の空隙の体積割合である。一般に密粒度系のアスコンでは、空隙率が過度に小さいと骨材粒子が相対的に動きやすく(流動しやすく)なり、逆に過度に大きい

表 3.3 各骨材粒度の SMA に対する VMA と VCA の結果および評価

骨材粒度	骨材間隙率 VMA	粗骨材間隙率		VMA 基準	VCA 基準
		VCA_{DRC}	VCA_{MIX}	VMA>17.0	DRC>MIX
粒度①	17.5	41.9	32.1	○	○
粒度②	20.2	42.2	32.6	○	○
粒度③	22.7	42.6	33.0	○	○

と強度が低く、水分ダメージを受けやすくなる。そのため、長期供用性の高いアスコンを設計するためには、空隙率を適正かつ厳格に管理することが推奨されている。この考え方が米国 SHRP に踏襲されており、この基本理念に基づいて策定されたのが Superpave 配合設計法である。そして、空隙率の調整は、適正な骨材粒度のもと、アスファルトの添加量で行われる。

AASHTO 型 SMA もこの考え方に基づいており、空隙率 4.0% の状態が望ましいとされている。すなわち、選定した有望な骨材粒度に対してアスファルト量を変化させた SMA 供試体を作製し、それらの空隙率のデータから空隙率が 4.0% となるアスファルト量を設計値として決定する。そして、その設計アスファルト量で作製した SMA 供試体に対して、TSR やダレ量のパフォーマンスが規格値を満足するか否かを評価する。

空隙率は次式で求められる。

$$V_a = \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right) \times 100$$

ここに、 V_a : 空隙率 (%), G_{mb} : アスコンのかさ比重, G_{mm} : アスコンの理論最大比重である。AASHTO 基準では、 G_{mm} は Rice 法によって求めることになっている。Rice 法は、練り混ぜた混合物をばらばらに解し、水浸させた状態で真空ポンプを用いて空気を取り除き、その水中質量を測定することで、真空状態における混合物の密度を直接求めることができる⁷⁾。アスファルト量を 6.5% とした場合の、各骨材粒度の理論最大比重および骨材のみの有効比重を表 3.4 に示す。有効比重の値からアスファルト量が任意の場合の理論最大比重を計算することができる。

表 3.4 各骨材粒度の理論最大比重

骨材粒度	理論最大 比重 G_{mm}	有効比重 G_{se}
粒度①	2.452	2.710
粒度②	2.432	2.684
粒度③	2.447	2.703

全節で選定した骨材粒度①に対して、アスファルト量を 6.0, 6.5, 7.0% とした場合の SMA 供試体を作製し、空隙率の値を確認した。アスファルト量と空隙率の関係を図 3.3 に示す。近似直線を外挿して空隙率が 4.0% となるアスファルト量を求めると 7.6% である。AASHTO 型 SMA の基準では、アスファルト量は 6.0% 以上であり、6.0~7.0% が望ましいとされている。また、経験上 7.6% のアスファルト量は、明らかにダレ量の基準値を満足できないことから、ここでは 7.0% を暫定的な設計アスファルト量と選定した。

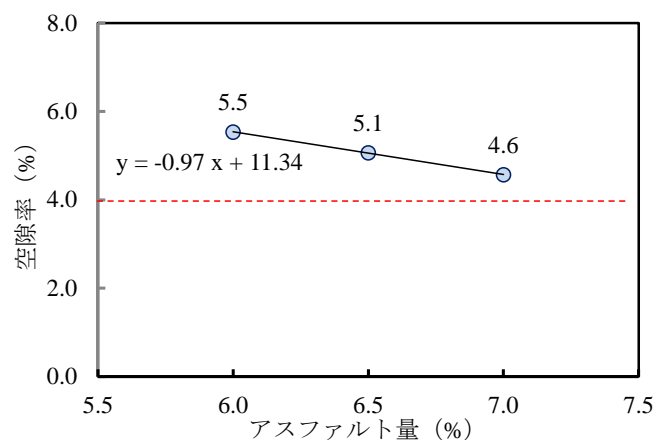


図 3.3 アスファルト量と空隙率の関係

3.5 TSR およびダレ量の確認

TSR は、空隙率を大きめに設定して締め固めた供試体について、空隙に強制的に水分を存在させて凍結融解のダメージを与えた状態の間接引張強度と、何もダメージを与えない状態の間接引張強度の比である。このような評価法は修正ロットマン試験と言われ、アスコンの水分劣化作用に対する剥離抵抗性を評価する試験法である⁸⁾。我が国の残留安定度試験と類似するが、与えるダメージの程度がより厳しいことが特徴である。AASHTO では TSR が 0.8 を超えていることを基準としている。

また、ダレ試験はギャップ型のアスファルト混合物に適用される評価試験で⁹⁾、アスファルト混合物の製造過程および現場に到着するまでの運搬時に、添加したアスファルトやフィラー分がダレ落ちてしまうことを防ぐために実施する。ダレ量が多い場合は、配合が変化してしまうだけでなく、品質や表面性状にばらつきが生じてしまう。

ダレ試験では、練り混ぜたアスファルト混合物を締め固めずに容器に投入し、混合温度（ここでは 170℃）に保持した空気恒温槽で 60 分養生し、ダレ落ちた試料の質量を測定する⁹⁾。そして、その質量を投入した試料の質量で除してダレ量（%）を計算する。AASHTO が定めるダレ量の規格値は 0.3%未満である。

骨材粒度①でアスファルト量が 7.0%の場合の、TSR の結果を表 3.5 に、ダレ量の結果を表 3.6 に示す。TSR は値が 0.8 より大きいことから、AASHTO 基準を満足している。しかし、ダレ量については、規格値の 0.3%未満を満足できなかった。

ダレ試験の結果が基準値を満足できなかったことから、ダレ量を抑えるためにアスファルト量を減らして、再度ダレ試験を行った。その結果を表 3.7 に示す。アスファルト量が 5.5%でダレ量は基準内となるが、空隙率が 4.0%、およびアスファルト量が 6.0~7.0%という基準を満足することができない。適正なアスファルト量については、次章でさらに検討する。

表 3.5 残留圧裂強度比 TSR の結果

供試体種別	供試体No.	最大荷重値	供試体高さ	引張強度	引張強度平均	TSR
乾燥状態グループ	1	7696.10	96.2	339.53	346.36	0.94
	2	7734.26	95.5	343.72		
	3	8082.17	96.4	355.83		
凍結融解グループ	4	7271.11	96.7	319.13	327.29	
	5	7324.24	97.9	317.52		
	6	7865.94	96.7	345.23		

表 3.6 ダレ量の結果（設計アスファルト量 7.0%）

項目	供試体 No.	No.1	No.2
温度（℃）		170	170
容器の重さ（g）		370.2	373.7
試験前の容器の重さ+試料（g）		1515.6	1490.4
試験後の容器の重さ+試料（g）		1472	1464.6
ダレ量（%）		3.81	2.31
基準○×		×	×

表 3.7 ダレ量の結果 (アスファルト量 5.5~6.5%)

項目	供試体No.	No.1	No.2	No.3	No.4
アスファルト量 (%)		5.5	5.8	6.0	6.5
温度 (°C)		170	170	170	170
容器の重さ (g)		461.8	482.6	414.6	405.6
試験前の容器の重さ+試料 (g)		1614.5	1632.8	1551.0	1554.0
試験後の容器の重さ+試料 (g)		1611.4	1624.7	1540.2	1522.0
ダレ量 (%)		0.27	0.70	0.95	2.79
基準○×		○	×	×	×

3.6 AASHTO 型 SMA (13) の配合設計で得られた知見

AASHTO 基準の手順，規格値に基づいて最大骨材粒径が 12.5 mm の SMA の配合設計を行った。一連の手続きを通して，以下に示す知見が得られた。

- (1) AASHTO 基準の粒度範囲内の骨材粒度としても，VMA，VCA，空隙率，推奨アスファルト量，ダレ量の基準値をすべて満たす配合を得ることは容易ではない。これらの基準を満足できないということは，粗骨材の配置が図 2.1 に示したような骨格構造を形成していないと考えられる。
- (2) 上記のことから，アスファルト量の選定の際に空隙率，推奨アスファルト量，ダレ量の基準値をすべて満足させるには，VMA が小さな骨材粒度が望ましい。この場合，VMA の基準値は 17%以上であるが，17%をピンポイントで狙って粒度設計を行ったほうがよいと考えられる。また，骨材粒度の設計では，粒度範囲の上限に近い合成粒度のほうが基準値を満たしやすい。
- (3) また，VCA の基準についても，単に「 $VCA_{DRC} > VCA_{MIX}$ 」の条件だけではなく，「 $VCA_{DRC} \cong VCA_{MIX}$ 」の条件もあったほうがよい。
- (4) AASHTO 基準では，ファイバー量は 0.3~0.4%の目安が記されているが，ファイラー量およびファイラー量+ファイバー量についてのガイドラインもあったほうがよい。
- (5) 最終的には，ここで設計した AASHTO 型 SMA (13)もすべての AASHTO 基準を満足することができなかった。本報告書では割愛したが，AASHTO 型 SMA (20)は SMA (13)よりもさらに設計パラメータの値が規格値と乖離していた。配合設計上の手続きとしては，SMA (20)のほうが SMA (13)よりも骨材粒度，ファイラー量，ファイバー量の選定に注意を要するものと考えられる。

4. AASHTO 型 SMA (13) のアスコン物性

新潟県内の骨材を使用して AASHTO 型 SMA (13)の配合設計を行ったところ，すべての AASHTO 基準を満たすことはできないが，骨材粒度①でアスファルト量が 5.5~6.0%，ファイバー有り（外割で 0.3%）という配合が導出された。本来ならば，配合設計の実質的な目的である設計アスファルト量がユニークに決まる必要があるが，空隙率とダレ量の基準を同時に満たせなかったことから，設計アスファルト量は範囲でしか選定できなかった。

AASHTO 基準では、SMA のアスファルト量を 6~7%にすることを推奨している。また、ダレ量が 0.3%以下の推奨に基づくと、骨材粒度①の場合、アスファルト量は 5.5%程度が望ましいことになる。そこで次なる検討として、より適正なアスファルト量を決定するため、2とおりの AASHTO 型 SMA (13)を配合し、そのアスコンが有する物性の評価、比較を行うこととした。配合の 1 つは、ダレ量は基準外であるがアスファルト量は AASHTO 推奨範囲の 6.0%とする SMA (13) (SMA I) である。もう 1 つの配合は、ダレ量が基準内となるようにアスファルト量は 5.5%とした SMA (13) (SMA II) である。両者の違いはアスファルト量のみであり、それ以外の配合は同じとした。

そして、AASHTO 基準に則って配合設計を行った SMA が、橋面舗装の表層材料として適用できるか否かを確認するため、アスコンレベルでの性能試験として高接地圧ホイールトラッキング試験、すえ切り試験、現場透水試験、および DF テスタによるすべり摩擦係数の測定を行った。これらの評価試験は、(公社)日本道路協会による舗装調査・試験法便覧に記載されている標準仕様に準拠して実施した。

4.1 高接地圧ホイールトラッキング試験

ホイールトラッキング (WT) 試験は、高温時におけるアスコンの塑性流動抵抗性を評価する試験法で、評価指標として動的安定度 (Dynamic Stability : DS) が求められる¹⁰⁾。本事業では SMA を重交通路線の高架橋への適用も想定していることから、通常の試験法よりもホイールの接地圧を高く設定した WT 試験を実施して、SMA の塑性流動抵抗性を評価した。試験条件を表 4.1 に、試験結果を表 4.2 にそれぞれ示す。

また、試験の実施状況を写真 4.1 に示す。

WT 試験の車輪荷重を標準 (686 kN) の 2 倍以上といているにもかかわらず、DS はどちらの SMA とも高い値であり、まったく問題ないと言える。SMA という配合上の優位性に加えて、改質アスファルトを使用したことがその要因として挙げられる。



写真 4.1 WT 試験の実施状況

表 4.1 WT 試験の条件

項目	仕様
供試体寸法 (mm)	300×300×50
転圧回数 (回)	20
試験温度 (°C)	60
養生時間 (分)	360
試験時間 (分)	60
往復走行回数 (回)	1,260
車輪荷重 (kN)	1,470
車輪材質	ソリッドゴム

表 4.2 WT 試験の結果

SMA種類	No.	動的安定度 (回/mm)	
SMA I	1	4,500	4,865
	2	4,845	
	3	5,250	
SMA II	4	7,000	5,909
	5	5,727	
	6	5,000	

4.2 すえ切り試験

すえ切り試験は、アスコン表面における骨材飛散抵抗性を評価する試験である¹¹⁾。すえ切りとは、車両等が停止時あるいは低速時にハンドルを操舵する際、車輪が回転することにより車輪と舗装表面の間に大きなせん断力が作用する状況のことである。橋梁上に交差点は存在しないが、ギャップ型アスファルト混合物である SMA の客観的な耐久性評価の一つとしてこの試験を実施した。試験要領は、アスコン供試体の表面上に載荷した自動車タイヤを押し付けた状態で旋回運動させ、その過程における供試体質量の変化率、すなわち骨材の飛散損失率を測定する。表 4.3 にすえ切り試験の条件を、写真 4.2 にその実施状況を示す。

図 4.1 に SMA I の 3 つの供試体に対する飛散損失率の経時変化を、図 4.2 に SMA II に対する同じものを示す。すべての供試体で、経過時間 120 分以降で骨材飛散が生じている。供試体によってばらつきが見られるものの、アスファルト量の多い SMA I のほうが、240 分経過時点の飛散損失率は低いことがわかる。しかし、その差はわずかであり、どちらもばらつきが大きいことから、骨材飛散抵抗性については差がないと評価すべきである。また、バインダに改質アスファルトを使用しているため、飛散損失率の値は通常密粒度アスファルト混合物と同じレベルである。

表 4.3 すえ切り試験の条件

項目	仕様
タイヤ種類	小型トラック用5.00-10 (リプラグパターン)
接地圧 (MPa)	0.15→0.30
試験温度 (°C)	30
タイヤ回転数 (rpm)	10
テーブル回転数 (rpm)	5



写真 4.2 すえ切り試験の実施状況

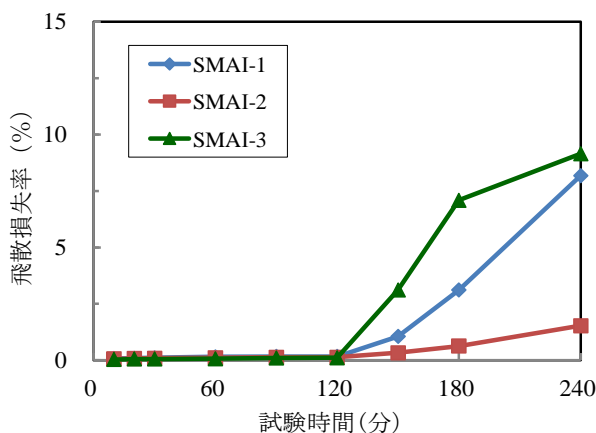


図 4.1 SMA I 供試体の飛散損失率の結果

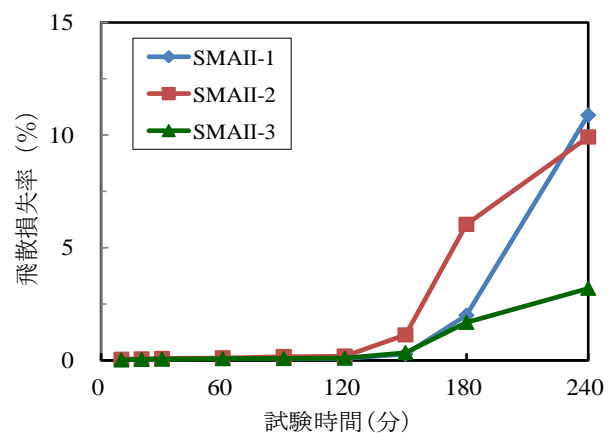


図 4.2 SMA II 供試体の飛散損失率の結果

4.3 現場透水試験

本事業で重視しているアスコンとしての水密性については、透水試験で評価する必要がある。アスコンは土質材料と異なり、通常の流下条件で透水することはない。そのため、アスコンに対しては、実現象では考えられない圧力を強制的に作用させて透水させる加圧透水試験¹²⁾が行われる。しかしながら、本事業では諸般の事情で加圧透水試験を実施できなかったため、現場透水試験¹³⁾によって透水性能を評価した。現場透水試験は、舗装表面に流入した一定量の水が流出するまでの時間、あるいは一定時間内に流出する水量を測定する試験である。ポーラスアスファルトの場合は、水を浸透させる性能を評価する試験法であるが、水密性の高いSMAの場合は、降雨時に表面上の雨水を速やかに排出できる性能、すなわち表面排水性能を評価することになる。

各SMA供試体に対して、400 mlの水量が排水する流下時間、および15秒間に排水する水量を測定した。測定結果を表4.4にまとめて示す。400 mlの流下時間については、どちらのSMAともほぼ同じである。15秒間透水量については、わずかにSMA Iのほうが多い結果となっている。我が国では、15秒間で1,000 ml以上を基準値とすることが多い。どちらのSMAとも、十分な透水性を有していることが確認される。

表 4.4 各 SMA の現場透水試験の結果

SMA種類	No.	400 ml 流下時間 (sec)					15 sec 透水量 (ml)	
		1回目	2回目	3回目	平均	総平均	測定値	平均
SMA I	1	5.21	5.19	5.24	5.21	5.43	1,151.6	1,106.8
	2	5.67	5.83	5.71	5.74		1,045.3	
	3	5.38	5.30	5.34	5.34		1,123.6	
SMA II	4	5.59	5.58	5.55	5.57	5.49	1,077.2	1,093.5
	5	5.26	5.26	5.20	5.24		1,145.0	
	6	5.66	5.70	5.66	5.67		1,058.2	

4.4 すべり摩擦係数

舗装の路面性状で重要な表面のすべり抵抗性については、回転式すべり抵抗測定器（DF テスタ）を使用して摩擦係数を測定した¹⁴⁾。DF テスタは、回転する測定用円盤をアスコン表面に押し付け、そのときに測定される摩擦力を押し付けた荷重で除すことにより、表面のすべり摩擦係数を測定する装置である。したがって、この場合の摩擦係数は動的摩擦係数ということになる。

各SMA供試体に対する動的摩擦係数の測定結果を表4.5に示す。どの試験速度におい

表 4.5 各 SMA の動的摩擦係数の結果

SMA種類	No.	試験速度 (km/h)		
		40	60	80
SMA I	1	0.38	0.37	0.39
	2	0.38	0.37	0.40
	3	0.39	0.4	0.43
	4	0.37	0.37	0.41
	平均	0.38	0.38	0.41
SMA II	5	0.31	0.3	0.31
	6	0.36	0.34	0.37
	7	0.36	0.35	0.37
	8	0.34	0.33	0.33
	平均	0.34	0.33	0.35

でも、アスファルト量が多い SMA I のほうがすべり抵抗性に優れていることがわかる。通常であれば、アスファルト量の多いほうが表面の粗さが滑らかになり、摩擦係数は小さくなると考えられる。両 SMA の供試体について、CT メータできめ深さを測定してみたところ¹⁵⁾、SMA I のほうがきめ深さの値も大きかった。SMA I のほうが摩擦係数、きめ深さとも大きくなった要因は、SMA の場合、アスファルト量が少ないと締め固まり性が低下するためと考察される。このことの検証は、今後の課題としたい。

5. まとめ

本事業では、新潟県内においても道路橋 RC 床版の早期損傷が問題になっていることを鑑み、橋面アスファルト舗装の水密性を向上させることを目的に、表層用 SMA の配合設計について検討した。我が国の標準的設計法であるマーシャル安定度に基づく方法は、特殊なギャップ粒度型アスファルト混合物である SMA には適していないと考え、米国 AASHTO での SMA 基準の基礎的知見を得るために、県内の骨材を使用し、AASHTO の規定に基づいて SMA を配合した。そして、配合設計した SMA の基本的物性を室内試験によって評価した。

検討では、最大骨材粒径を 20 mm とした AASHTO 型 SMA と最大骨材粒径を 13 mm とした AASHTO 型 SMA の 2 つについて配合設計を行った。AASHTO 型 SMA (20) は、AASHTO 基準を満足させることが難しく、我が国での実用性を考慮すると、表層用アスファルト混合物としては不適と判断された。AASHTO 型 SMA (13) については、空隙率とダレ量の基準を同時に満足させることが難しく、ダレ量を抑制するために基準値を下回るアスファルト量 5.5% とした SMA とダレ量が多いが基準値を満足するアスファルト量 6.0% とした SMA の 2 種を配合し、それぞれの供試体について塑性流動抵抗性、骨材飛散抵抗性、表面排水性、すべり抵抗性を評価した。本事業で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 最大骨材粒径が 20 mm の AASHTO 型 SMA は、基準どおりの手続きに従っても、ダレ量がかかなり多くなってしまう。アスファルト量を減らしてダレ量の基準を満足させても、ダレやすくなつて締固め難いため、表層材料として運用することは難しい。
- (2) 最大骨材粒径が 13 mm の AASHTO 型 SMA は、基準粒度範囲の上限に近い骨材粒度が VMA 基準値に対して適当である。この SMA も、基準どおりの手続きに従っても、ダレ量の基準を満足させることは難しい。
- (3) AASHTO 型 SMA (13) において、ダレ量の基準を満足するアスファルト量 5.5% とダレ量の基準を満足しないアスファルト量 6.0% の 2 種についてアスコンレベルの評価試験を実施したところ、塑性流動抵抗性、骨材飛散抵抗性、表面排水性、すべり抵抗性はどちらも同様な性能であった。また、実質的なダレ量は、施工性や品質のばらつきに影響するほどの差異は確認されなかった。総合的には、ダレ量の基準を満足しないがアスファルト量の推奨範囲内である 6.0% としたほうが、SMA としては優位であった。
- (4) 時間的および設備的な制約で、本事業では加圧透水試験、ひび割れ抵抗性試験、およびすべての AASHTO 基準を満足させるための配合調整ができなかった。評価試験については今後実施することとし、配合調整については VMA と VCA のパラメータを厳密に管理して骨材粒度を設計するとともに、空隙率とダレ量の基準値にさらなる幅をもたせたほ

うがよい。すなわち、VMA は 17.0%をターゲットにする、VCA は $VCA_{DRC} > VCA_{MIX}$ でかつ $VCA_{DRC} \approx VCA_{MIX}$ となるようにする、アスファルト量は空隙率が 4.0%となる量とダレ量が 0.3%となる量の間で総合的に判断する。また、フィラー量とファイバー量の合計に対するガイドラインがあったほうがよい。

参考文献

- 1) European Asphalt Pavement Association (EAPA) : Heavy Duty Surfaces the Arguments for SMA, https://eapa.org/wp-content/uploads/2018/12/Heavy_Duty_Surfaces_The_Arguments_for_SMA.pdf, 2018.
- 2) 七五三野茂, 佐藤正和, 皆方忠雄 : 砕石マッシュクアスファルトの床版防水層への適用性に関する検討, 舗装, 34-10, pp.15-20, 1999.
- 3) 積雪寒冷地における舗装技術検討委員会 : 北海道型 SMA の施工の手引き, 平成 28 年 3 月改訂版, 2016.
- 4) AASHTO M325-08 : Standard Specification for Stone Matrix Asphalt (SMA) , 2012.
- 5) AASHTO R 46-08 : Standard Practice for Designing Stone Matrix Asphalt (SMA), 2008.
- 6) (一社)日本改質アスファルト協会 : ポリマー改質アスファルトポケットガイド, p.12, 2015.
- 7) AASHTO T 209-99 : Standard Method of Test for Theoretical Maximum Specific Gravity and Density of Bituminous Paving Mixtures, 2004.
- 8) AASHTO T 283-03 : Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, 2008.
- 9) AASHTO T 305 : Standard Method of Test for Draindown Characteristics in Uncompacted Asphalt Mixtures, 2014.
- 10) (公社)日本道路協会 : B003 ホイールトラッキング試験方法, 舗装調査・試験法便覧 [第 3 分冊], pp.[3]-44-[3]-64, 2019.
- 11) (公社)日本道路協会 : B021 ねじりによる骨材飛散試験方法, 舗装調査・試験法便覧 [第 3 分冊], pp.[3]-197-[3]-208, 2019.
- 12) (公社)日本道路協会 : B017T アスファルト混合物の加圧透水試験方法, 舗装調査・試験法便覧 [第 3 分冊], pp.[3]-158-[3]-168, 2019.
- 13) (公社)日本道路協会 : S025 現場透水量試験方法, 舗装調査・試験法便覧 [第 1 分冊], pp.[1]-154-[1]-160, 2019.
- 14) (公社)日本道路協会 : S021-3 回転式すべり抵抗測定器による動的摩擦係数の測定方法, 舗装調査・試験法便覧 [第 1 分冊], pp.[1]-121-[1]-129, 2019.
- 15) (公社)日本道路協会 : S022-3 回転式きめ深さ測定装置を用いた舗装路面のきめ深さ測定方法, 舗装調査・試験法便覧 [第 1 分冊], pp.[1]-140-[1]-146, 2019.