

機能性SMAの積雪寒冷環境下における耐久性向上技術に関する研究

研究予算：運営費交付金
研究期間：平 28～令 3
担当チーム：寒地道路保全チーム
研究担当者：丸山記美雄、伊藤憲章、
佐藤圭洋、田中俊輔

【要旨】

積雪寒冷地である北海道地方の一般国道や高規格道路では、2000 年以後、排水性舗装の導入が進んだ。しかし、近年では融雪期にポットホールなどの破損が散見され、耐久性の面で課題が生じている。その中で、2017 年以後、排水性舗装の代替として適用され、普及が進んでいるのが機能性（北海道型）SMA である。

本研究では、機能性 SMA の長期的な耐久性の検証およびライフサイクルコスト分析を実施し、機能性 SMA 適用の有効性を評価した。さらに、近年さらなる道路舗装の長寿命化・高耐久化が大きなニーズとなる中で、機能性 SMA を基にした耐久性向上技術を検討した。

キーワード：機能性 SMA、積雪寒冷地、耐久性向上、ライフサイクルコスト分析

1. はじめに

我が国の積雪寒冷地に属する北海道地方では、2000 年頃から一般国道や高規格幹線道路へ排水性舗装の適用が本格化した。排水性舗装は、雨天時や路面凍結時の走行安全性確保、車両走行騒音の低減などの効果が期待できる。しかし近年、融雪期を中心にポットホールなどの大きな破損事例が散見されるようになり（写真-1）、耐久性面からの課題が報告されている。

そこで、積雪寒冷環境下でも十分な耐久性と走行安全性を併せ持つことをコンセプトとして開発された機能性 SMA が、排水性舗装に替わり普及してきた。国土交通省北海道開発局（以下、北海道開発局）では 2017 年より本格的な運用を開始し、図-1 のように施工実績も増加している（北海道開発局では、現場適用の段階で北海道型 SMA と呼称されるようになった）。

機能性 SMA の耐久性および走行安全性能は、既往研究により十分期待できることが確認されている¹⁾。一方で、機能性 SMA は排水性舗装と比較して混合物単価が高いことから、初期費用（建設費用）も高くなる。そのため、排水性舗装の代替として適用されている機能性 SMA の有効性は、初期費用だけでなくライフサイクル全体で評価しなければならない。

そこで本研究は、まず、北海道地方の一般国道および高規格幹線道路における排水性舗装の供用状況を明らかにし、さらに、機能性 SMA 適用の有効性を明らかにするためにライフサイクルコスト（以下、LCC）分析を行った。

また、機能性 SMA を開発した当時と比較して、道路舗装に対する長寿命化・高耐久化が近年大きな社会的ニーズとなってきた。そこで、機能 SMA の技術を基にした更なる耐久性向上技術について、混合物の配合および施工の観点から検討した。

2. 機能性 SMA の本格的な運用

2012 年より、北海道開発局が管理する高規格道路を



写真-1 排水性舗装の破損状況

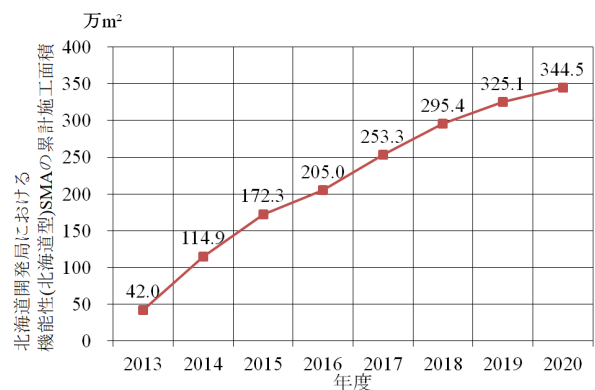


図-1 機能性 SMA の施工実績（北海道開発局）

中心に、機能性 SMA の試験施工を実施してきた。

図-2 に高規格道路で実施した試験施工の区間における路面性状調査（追跡調査）の結果の一例を示す。

供用開始後約9年経過するが、きめ深さは施工直後程度の値を維持し、わだち掘れ量も1cm程度であることから、良好な路面性状を維持していることが分かる。

以上の調査結果から、機能性 SMA は積雪寒冷地の高規格道路に適した表層用アスファルト混合物である

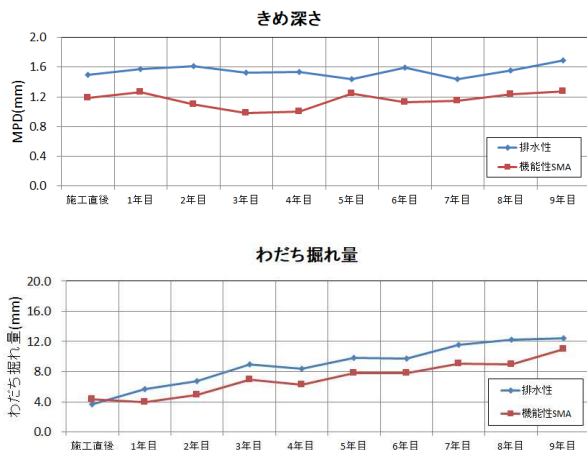


図-2 高規格道路（道北地方）における機能性 SMA の路面性状（上：きめ深さ、下：わだち掘れ）

ことが認められ、2017年より北海道開発局が管理をする路線において、本格的に運用されることが決定し、現在も普及が進んでいる。

3. 機能性 SMA 適用の有効性検討

3.1 積雪寒冷地における排水性舗装の供用状況

機能性 SMA 適用の有効性を明確にするためには、まず、従来適用されていた排水性舗装の現状を把握することが必要である。

そこで、積雪寒冷地における排水性舗装の現状を明確にするため、北海道地方の高規格道路および一般国道で路面状況の目視調査を実施した。調査対象は、北海道開発局の舗装台帳閲覧システムより排水性舗装の施工年もしくは供用開始年が明確にできた区間とした。その区間において 2017 年から毎年春期に車両走行しながら取得した映像および走行中の目視において、排水性舗装が現存しているか否かを確認した。また、2017 年より前の供用状況は、北海道開発局の舗装台帳に記載された補修履歴を基に判断した。

3.1.1 高規格道路における供用状況

表-1 に、北海道地方の高規格道路における排水性舗装の調査結果を示す。なお、24 時間交通量は 2015 年

表-1 高規格幹線道路に施工された排水性舗装の現況

路線	区間	供用開始年	24 時間交通量 (台/日・両方向)	最大積雪深 (過去 10 年)	最短供用年数 (目視調査&舗装台帳)	残存率 (2019 年春期)
A	①	2003	2,146	1.42m	14 年	13.8%
	②	2004	3,233	1.42m	12 年	69.9%
	③	2006	3,591-4,306	2.73m	7 年	29.8%
	④	2012	4,091	2.73m	—	100%
B	—	2004	1,892-1,975	1.18m	—	100%
C	—	2010	1,919	1.18m	—	100%
D	①	2002	5,446-5,732	1.51m	11 年	28.5%
	②	2006	3,157-4,020	1.74m	9 年	45.8%
E	①	2000	3,468	0.69m	15 年	1.7%
	②	2005	4,689	0.69m	10 年	24.1%
F	—	2012	4,551-5,151	1.14m	7 年	99.1%
G	①	2004	3,651-7,434	1.37m	13 年	36.4%
	②	2006	6,646	1.37m	13 年	46.6%
	③	2001	3,407	1.28m	11 年	83.3%
	④	2007	3,160	1.28m	13 年	90.9%
H	①	2002	3,900	1.06m	15 年	81.0%
	②	2005	7,349	1.06m	—	100%
I	①	2007	10,353	0.43m	8 年	32.0%
	②	2008	11,236	0.43m	7 年	23.8%
	③	2003	10,777	0.43m	11 年（※局部 1 年）	0%
	④	2005	8,798	0.43m	11 年	41.8%
J	①	2003	7,698-14,438	0.91m	11 年（※局部 4 年）	9.1%
	②	2009	4,747	0.91m	8 年	92.0%
	③	2011	3,392	0.91m	—	100%

※局部とは、橋梁部周辺など特殊な要因によって局所的にオーバーレイされた区間が確認されたことを意味する。

道路交通センサス一般交通量調査による。また、最大積雪深は各区間最寄りのアメダス観測点における直近10年(2010~2019年)の最大量を示しており、最短供用年数は北海道開発局の舗装台帳および2017年以降の目視調査の結果から算出した。残存率は排水性舗装が施工された区間のうち、調査時点で現存している区間延長の割合を示している。

最短供用年数に着目すると、概ね供用年数が10~15年になるとオーバーレイなどの修繕が必要になる区間が散見されるようになることが分かる。その中でも複数の区間で最短供用年数が10年以下、もしくは残存率が低い区間が確認できる。その区間について詳しく見ると、A-③およびD-②では、最大積雪深が多くなっており、I-①、②、③およびJ-①では24時間交通量が10,000台/日・両方向を超えているという特徴がある。したがって、除雪作業や融雪期の凍結融解作用、および交通荷重による影響が大きい区間では、排水性舗装が10年未満で劣化・破損する可能性が考えられる。

次に、表-1のうち、残存率が30%未満の区間を対象に、排水性舗装の供用年数について確認した。

図-3に結果を示す。若干の差は見られるが、概ね10~15年が平均供用年数となっており、図-3中の区間全体の平均供用年数を求めると13.3年であった。また、

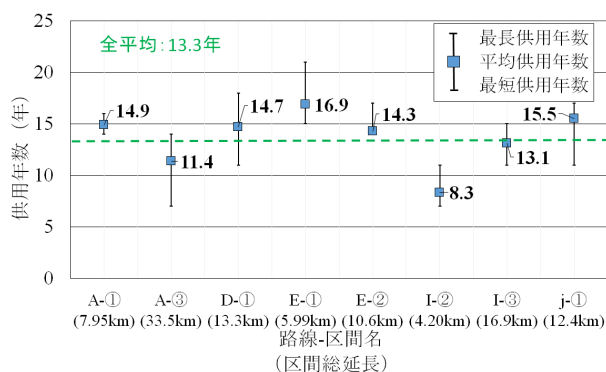


図-3 高規格道路における排水性舗装の供用年数

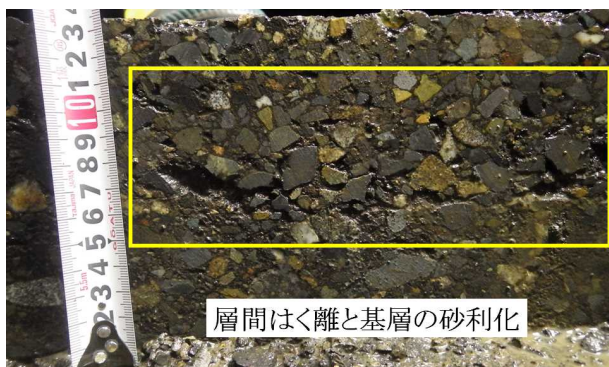


写真-2 排水性舗装供用区間で発生した構造的破損

供用年数の最長と最短の差に着目すると、2~7年(平均4.9年)となっており、この期間で表層の大幅な修繕が進められている。

なお、本調査において、オーバーレイなどの修繕がされていない場合でも、ポットホールや骨材飛散、およびそれらを補修した箇所が多く見られる状況が散見され、修繕が追いついていないと思われる区間も存在した。さらに、基層以下にも砂利化や層間はく離などの劣化が発生している事例も確認された(写真-2)。これは、排水性舗装が有する透水機能が影響したと考えられるが、このような場合、表層のみの修繕では十分な効果が期待できず、舗装構造全体を含めた修繕工法の選択が必要となる。北海道地方の高規格道路に現存している排水性舗装は、供用開始から10年程度、もしくはそれ以上経過している区間が多く存在する。そのため、日常の維持作業から大幅な修繕までを含めた補修計画の検討が必要な状況になっていると考えられる。

3.1.2 一般国道における供用状況

次に、一般国道に施工されている排水性舗装を対象に、路面状況の目視調査を実施した。

図-4に路線別の供用年数を示す。各路線の平均供用年数は9.1~12.9年となっており、全路線の平均供用年数は10.7年となった。これは、高規格道路と比較して2.6年短い供用年数である。最短供用年数と最長供用年数の差に着目すると、4~16年と路線により差がある。また、調査対象7路線中5路線で供用年数が5年以下で修繕された区間が生じている。これは高規格道路と比較して非常に短い。しかし、一方で最長で19年供用されている区間もある。一般国道の舗装は、高規格道路と比較して、交通条件や気象条件、沿道環境など、複雑多様で過酷な環境下に置かれていると考えられる。これらの複雑な要因が影響して、供用年数に大きな違いが見られたと考えられる。

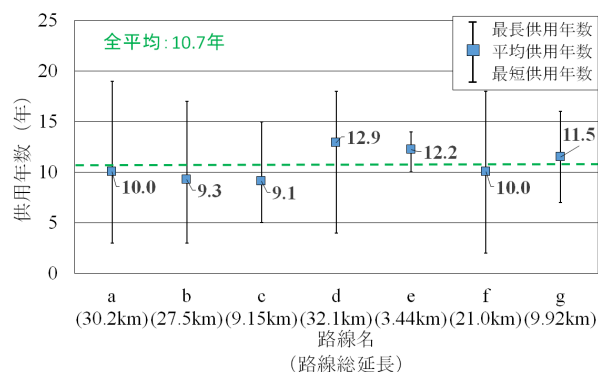


図-4 一般国道における排水性舗装の供用年数

3.2 LCC 分析に基づく機能性 SMA 適用の有効性

3.2.1 LCC 分析の方法²⁾

本分析の実施にあたり、まず、北海道開発局が管理する一般国道のうち、路面状況の目視調査の結果、全ての排水性舗装区間が打替えられていたことがわかった路線 g を分析対象とした。

路線 g における供用状況や道路構造、道路区分・交通区分などの条件を表-2 に示す。本路線は札幌市内にあり、2018 年までに全ての排水性舗装が打替えられた。この区間の供用年数は最短が 7 年、最長が 16 年、平均が 11.5 年となっており、一般国道全調査対象路線の平均供用年数 (10.7 年) より若干長くなっている。

表-2 路線 g における環境条件

区間延長	4,960m (往復 9,920m)
供用年数	平均 11.5 年 (最短 7 年、最長 16 年)
道路区分・交通区分	第 4 種第 1 級・N6
道路構造	片側 2 車線 1 車線あたり幅員 3.25m

まず、機能性 SMA と排水性舗装の分析期間における純現在価値 (NPV: Net Present Value) を算出し、それを分析期間 1 年あたりの平均にした等価平均年間費用 (EUAC: Equivalent Uniform Annual Cost) を用いて、各舗装の LCC を比較した。NPV および EUAC の算出式を次に示す。

$$NPV = PV_0 + \sum FV_i \left[\frac{1}{(1+r)^{ni}} \right] + SV \left[\frac{1}{(1+r)^{ns}} \right] \quad (1)$$

$$EUAC = NPV \times \left[\frac{(1+r)^{ns}}{(1+r)^{ns} - 1} \right] \quad (2)$$

ここで、 PV_0 : 初期費用

FV_i : i 番目のオーバーレイ費用の将来価値

SV : 分析期間終了時の残存価値

r : 社会的割引率

ni : i 番目のオーバーレイを実施する年

ns : 分析期間

i 番目のオーバーレイ費用の将来価値 : FV_i は、初期費用 : PV_0 と同じと仮定した。また、分析期間終了時の残存価値 : SV は、 FV_i を供用年数で除した値に i 番目のオーバーレイから供用した年数を乗じて求められる。なお、分析期間は 40 年とし、排水性舗装の供用可能年数は路線 g の平均供用年数 (11.5 年) としている。

まず、路線 g における排水性舗装および機能性 SMA の混合物費用を試算した。混合物費用を算出するにあたり、区間延長 4,960m、1 車線あたりの幅員を 3.25m (全 4 車線、路肩などは考慮しない)、表層厚さを 40mm、混合物密度を機能性 SMA が 2,250kg/m³、排水性舗装が 2,050kg/m³ とした (北海道開発局土木工事数量算出要領より)。また、混合物単価として表-3 を用いると、区間全体における機能性 SMA の混合物費用は 126,509,760 円、排水性舗装は 97,023,056 円となる。さらに国土交通省土木工事標準積算基準書に基づいて初期建設費用 PV_0 を算出した結果、機能性 SMA は 136,826,560 円、排水性舗装は 124,252,960 円となった。

なお、社会的割引率 r は国土交通省の費用便益分析マニュアル³⁾に基づき、4%を用いることとした。また、排水性舗装のオーバーレイ時の費用 FV_i および供用可能年数は、初期施工時の費用 PV_0 と同値と仮定した。

3.2.2 LCC 分析の結果

機能性 SMA の供用可能年数を変化させて、排水性舗装と LCC を比較した結果を図-5 に示す。

機能性 SMA の供用可能年数が約 13 年の時に排水性舗装の LCC とほぼ同値となり、それ以上の供用可能年数になると機能性 SMA の方が LCC で有利になった。したがって、本分析では、機能性 SMA が 13 年以上供用できれば、排水性舗装よりも有用であると言える。

なお、一般国道 (交通区分 N6) において過去に実施した試験施工で、供用約 19 年経過しても現存している区間があり、2020 年 1 月の調査時点で、所々パッチング跡やひび割れがあるものの、概ね良好な路面性状を維持していることが確認できた (写真-3)。したがって、LCC 分析結果で機能性 SMA の供用可能年数が 13 年以上となれば排水性舗装より有用との結果になったが、機能性 SMA の所定の品質が確保されていれば、13 年以上の供用が十分に期待できる。

表-3 北海道開発局札幌開発建設部の混合物単価 (2018 年度)

混合物	品質規格など	単位	価格
機能性 (北海道型) SMA	ポリマー改質 II 型 / 植物性繊維入り	1,000kg	21,800 円
排水性舗装 (ポーラスアスコン)	ポリマー改質 H-F 型 / 13mm トップ / 空隙 17%	1,000kg	18,350 円

ただし、これらの結果は、LCC 分析の結果に影響を与えると考えられるいくつかの要素を考慮しておらず、例えばオーバーレイ後の供用可能年数も初期施工時と同様と仮定して分析を実施している。実道では、様々な環境条件の違いによって、舗装構造全体の劣化やオーバーレイ以外の維持補修費用などの管理者費用にも影響が現れてくると考えられる。これらを考慮した分析精度の向上が今後の課題である。

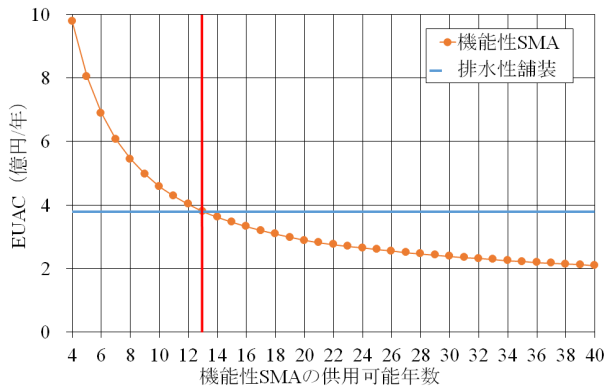


図-5 EUACの算出結果に基づくLCC分析の結果



写真-3 供用後19年経過した機能性SMA

4. 機能性SMAを基にした耐久性向上技術の検討

4.1 配合設計における検討

積雪寒冷地の表層用アスファルト混合物には、十分な耐久性と走行安全性の機能を発揮することが求められる。その中で近年普及が進んでいるのが機能性SMAである。また、SMA系混合物は高い耐久性を期待できる舗装として世界的に施工実績が増加しており、特に米国では、2011年と比較して2015年の施工実績が約30倍と急速に普及している²⁾。

このように、SMA系混合物には、さらなる高耐久化を実現できる可能性が考えられることから、我が国で普及している機能性SMAの配合を基にして、新しい配合(高耐久型機能性SMA)を検討した。

まず、室内試験において、機能性SMAの基準となる配合から骨材粒度とアスファルト量を変化させて、耐久性評価を実施した。その結果、骨材粒度を細かく

する、およびアスファルト量を多くすることによって、高耐久化が期待できる可能性を見出すことができた(図-6、7)。

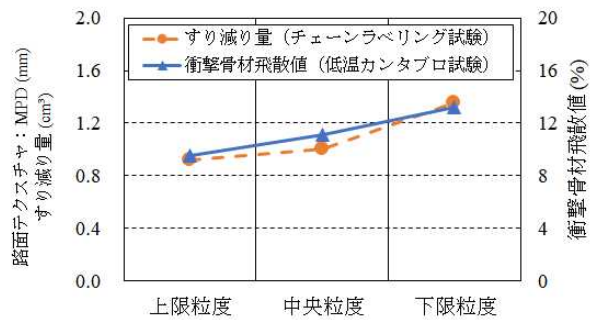


図-6 骨材粒度を変化させた混合物の耐久性

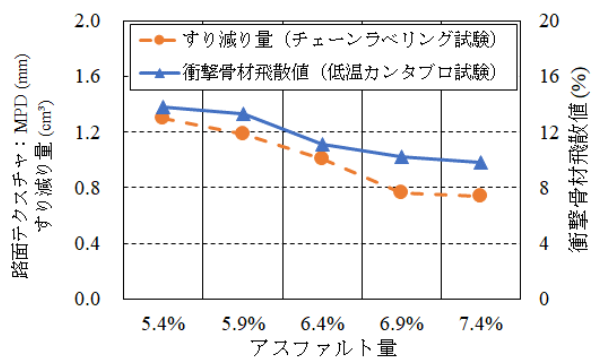


図-7 アスファルト量を変化させた混合物の耐久性

次に室内試験の結果を参考に混合物の配合を決定し、苫小牧寒地試験道路における試験施工を実施した。その結果からも機能性SMAを基に骨材粒度およびアスファルト量を調整した混合物が高耐久化を期待できる結果となった(図-8)。

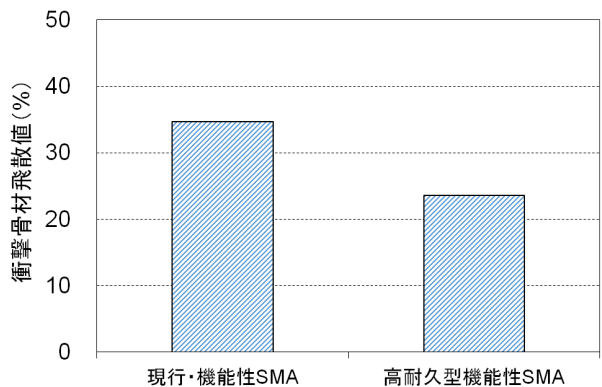


図-8 試験施工における耐久性評価

以上から得た知見を基に、配合設計の各項目における基準値を定めた。表-4に粒度範囲、表-5にアスファルト量、表-6にマーシャル安定度試験に対する基準値を示す。

これらの成果は、機能性 SMA の耐久性向上技術マニュアル（案）を技術資料としてとりまとめることができた。

4.2 施工技術の検討

道路舗装の長寿命化・高耐久化が強く求められる一方で、道路予算の縮減に伴いコスト縮減も必要な近年の現状において、アスファルト舗装の耐久性向上および建設コスト縮減を可能にする施工方法の検討が必要である。

本研究では、水平振動ローラを使用した転圧方法を検討した。水平振動ローラとは、ローラ内に取り付けてある水平振動起振装置で発生させた振動エネルギーを利用して締固めを行う機械で、自重に加えて水平振動による動荷重を付加することにより、高い締固め効果を期待することができる（写真-4）。欧州や米国では、SMA 系混合物の施工や大量な混合物を少ない転圧回数で締固める場合において使用されている^{4),5)}。一方、

我が国において水平振動ローラを使用した表層用アスファルト混合物の施工事例は少なく、普及も進んでいない。

そこで、水平振動ローラを用いた施工方法の有効性を確認し、施工技術としての確立を目的とした試験施工を実施した。混合物は機能性 SMA を使用した。施工区間は、対面通行区間の片側 1 車線を想定して幅員 3.5m とし、延長は 10m、さらに比較工区として機能性 SMA の一般的な転圧方法であるマカダムローラ、タンデムローラ、タイヤローラを用いて転圧する区間も設けた。

表-7 に水平振動ローラを使用した転圧時の施工機械、転圧回数などの施工条件を示す。

初期転圧から仕上げ転圧まで、すべて水平振動ローラ 1 台で実施した。これは、水平振動ローラが高い締固め効果だけでなく、ローラマークもつきにくく平坦性が良好に仕上がることから可能である。また、一般的施工方法と比較して、水平振動ローラを使用した方法は、施工機械の種類・台数が少ないため、建設コストの削減に寄与する可能性もある。

試験施工の結果を図-9、10 に示す。

締固め度の結果より、水平振動ローラは高い締固め効果を有しており、耐久性向上が期待できる仕上がり

表-4 高耐久型機能性 SMA の粒度範囲

フルイ目 呼び寸法		粒度範囲 ※最大粒径 (13)
		高耐久型機能性 SMA
百分率 通過重量 (%)	19mm	100
	13.2mm	95~100
	4.75mm	32~42
	2.36mm	22~32
	0.075mm	8~12

表-5 高耐久型機能性 SMA のアスファルト量

混合物種類	アスファルト量
高耐久型機能性 SMA	6.0~8.0%

表-6 マーシャル安定度試験における基準値

項目	基準値
空隙率 (%)	2~4
飽和度 (%)	70~90
安定度 (kN)	4.9kN 以上
フロー値 (1/100cm)	20~50



写真-4 水平振動ローラ (7t 級)
になることがわかる。また、試験施工後採取した供試

表-7 水平振動ローラを使用した転圧時の施工機械、転圧回数および転圧温度

		初期転圧	二次転圧	仕上げ転圧
施工機械 目標温度 転圧回数	水平振動 ローラ	水平振動ローラ・無振動 (7t) 160±10℃ 2 回 ※タンデムローラとして使用	水平振動ローラ・有振動 (7t) 130±10℃ 6 回 ※起振力 124kN・振動数 49Hz	
	一般的方法 ※参考	マカダムローラ (10t) 155±5℃ 6 回	タンデムローラ (6t) 130±10℃ 6 回	タイヤローラ (8-12t) 70±10℃ 4 回

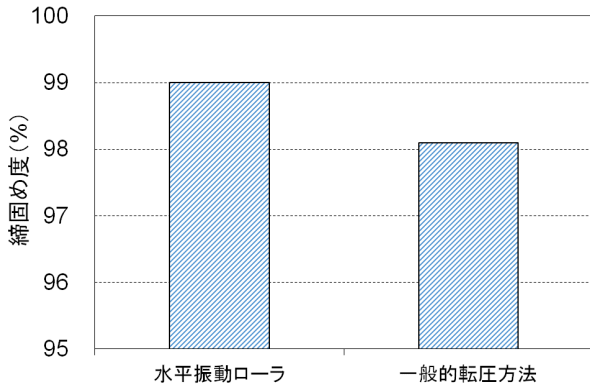


図-9 締固め度の比較

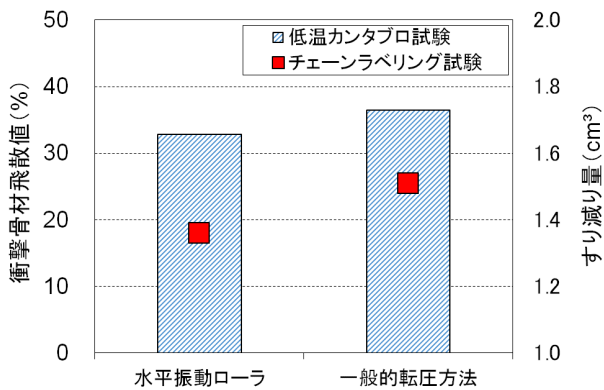


図-10 骨材飛散抵抗性の比較

他を用いた低温カンタプロ試験およびチェーンラベリング試験の結果より、耐久性に優れた品質に仕上がっていることがわかる。

以上の結果から、転圧に水平振動ローラを用いることで、表層用アスファルト混合物の耐久性向上が期待できることが明らかになった。

これらの成果は、機能性 SMA の耐久性向上技術マニュアル (案) としてとりまとめることができた。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 積雪寒冷地特有の環境条件や交通条件などによって、排水性舗装は供用開始から 10 年未満の短期間に補修を必要とする可能性があることが明らかになった。一方、建設費用に着目した LCC 分析の結果より、機能性 SMA の耐久性が十分に発揮され、供用年数が 13 年以上となれば、排水性舗装よりも経済的に有利になり、機能性 SMA の適用が有効であることが確認できた。
- 2) 機能性 SMA を基にした標準的な粒度範囲より細骨材の割合を増やし、アスファルト量も増やした新

しい配合 (高耐久型機能性 SMA) を開発し、耐久性向上に有効であることを確認した。

- 3) 表層用アスファルト混合物の施工において、水平振動ローラを用いることで、耐久性向上が期待できる品質に仕上がることを確認した。
- 4) 耐久性向上に関する技術は、機能性 SMA の耐久性向上技術マニュアル (案) を技術資料としてとりまとめることができた。

参考文献

- 1) 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 (案)、2014
- 2) Fan Yin, Randy West: Performance and Life-Cycle Cost Benefits of Stone Matrix Asphalt, 1st International Conference on Stone Matrix Asphalt, Atlanta, Georgia, 2017
- 3) 国土交通省道路局：費用便益分析マニュアル、2018
- 4) Krzysztof Blazejowski: Stone Matrix Asphalt -Theory and Practice-, CRC Press, pp.179-184, 2011
- 5) Todd Mansell: Best Practices -Construction-, 1st International Conference on Stone Matrix Asphalt, 2017

STUDY OF TECHNOLOGY TO IMPROVE THE DURABILITY OF HIGH-PERFORMANCE SMA IN A COLD, SNOWY ENVIRONMENT

Research Period: FY2016-2021

Research Team: Road Maintenance Research Team, Cold-Region
Maintenance Engineering Research Group

Author: MARUYAMA Kimio

ITO Noriaki,

SATO Takahiro

TANAKA Syunsuke

Abstract: Porous asphalt pavement has progressively been introduced on national highways and high-standard highways in Hokkaido, a cold, snowy region, since 2000. However, potholes and other types of distress are occasionally found in the thawing season these days, presenting durability-related problems. Against this background, the use of high-performance (Hokkaido-type) stone mastic asphalt (SMA), which has been introduced to replace porous asphalt pavement, has spread since 2017.

This study evaluated the effectiveness of applying high-performance SMA by verifying its long-term durability and performing life-cycle analysis. Durability improvement technology based on high-performance SMA was also investigated in response to the increasing demand for a longer service life and higher durability of road pavement in recent years.

Keywords: High-performance SMA, Cold, snowy region, Durability improvement, Lifecycle cost analysis