

# アスファルトに代わる舗装材料の開発

世紀東急工業(株) 技術本部 技術研究所 ミ ミ サン  
 // // 堤 丈 瑠  
 // // 村井 宏 美  
 (国研) 土木研究所 先端材料資源研究センター 材料資源研究グループ 百武 壯  
 // 道路技術研究グループ 舗装チーム 田中 俊 輔

## 1 はじめに

地球温暖化対策の国際的な取り組みであるパリ協定において、日本は2050年にカーボンニュートラルを達成することを長期目標とし、2030年までに温室効果ガスを46%削減することを中間目標としている。道路舗装分野においても、化石原料に代わる脱炭素原料の導入が求められている。

また従来より、舗装材料として広く使用されてきた石油アスファルト(以下、アスファルト)は、原油から製造される石油製品であり、道路インフラにおいて欠かせない資材である。しかし、近年の社会情勢や原油価格の高騰、供給の不安定化により、安定的な確保が難しくなりつつある<sup>1)</sup>。そのため、アスファルトを代替する持続可能なバインダ(以下、代替バインダ)への関心が急速に高まっている。これらの背景から、道路インフラにおいて、アスファルトと同等以上の性能を持ちながら、環境負荷を大幅に削減できる代替バインダの研究開発が必要とされている。

そこで、将来的にアスファルトの一部または全部を置き換えられる材料、かつ環境負荷の軽減を目指し、天然素材や植物由来のオイル系材料、リサイクル材料を使用した代替バインダの開発を開始した。さらに、(国研)土木研究所と世紀東急工業(株)の共同研究「カーボンニュートラルに資するアスファルト代替舗装材料の研究開発」を実施し、舗装材料の各種性状、試験施工および供用性の評価を行った。本報告は、これらの成果を総括したものである。

## 2 開発のコンセプト

本開発の目的は、将来的にアスファルトの一部または全部を置き換えられる舗装材料の開発と、環境負荷

低減効果の実現である。具体的な目標は下記のとおり、代替バインダを使用した混合物は一般的なアスファルト混合物と同様の混合物性状および施工性を有し、供用性においても同等の性能を持ち、さらに、CO<sub>2</sub>排出量の削減を目指した。

- ・アスファルトの一部または全部を置き換えられる材料
- ・一般的なアスファルト混合物と同様の基本性状である
- ・一般的なアスファルト混合物と同様の施工性および施工が可能である
- ・一般的なアスファルト混合物と同様の供用性がある
- ・一般的なアスファルト混合物よりCO<sub>2</sub>排出量の削減ができる

## 3 代替バインダの概要

代替バインダに使用する素材としては、天然アスファルト由来のギルソナイト、植物由来のオイル系材料および廃プラスチック材料(以下、廃プラ)を選定した<sup>2)</sup>。代替バインダの使用方法は、加熱した骨材に廃プラスチック材料を混合した後、オイル系材料およびギルソナイトをそれぞれ常温でミキサに投入し、混合している。代替バインダの配合および概要を表-1、図-1に示す。

表-1 代替バインダの配合

	オイル系材料	ギルソナイト	廃プラ
配合割合(%)	60	40	0.3(対混合物)



図-1 代替バインダの概要

## 4 混合物の基本性状および施工性の確認

### 4-1 代替バインダを用いた混合物の配合方法

新規混合物および再生混合物に代替バインダを使用した配合方法を図-2に示す。新規混合物の場合、通常はバインダにストレートアスファルト(以下、ストアス)などを使用するが、本検討ではバインダのすべてを代替バインダに置き換えたのち、最適バインダ量を確認し、決定配合とした。また、再生混合物の場合、通常は再生アスファルトに再生用添加剤と新アスファルトを用いるが、これらのすべてを代替バインダで置き換えることとし、最適バインダ量を確認して決定配合とした。

なお、代替バインダはアスファルトと性状や挙動が異なり、既存のアスファルトの性状試験は適用できなかったため、混合物で性状を評価することとした<sup>3)</sup>。

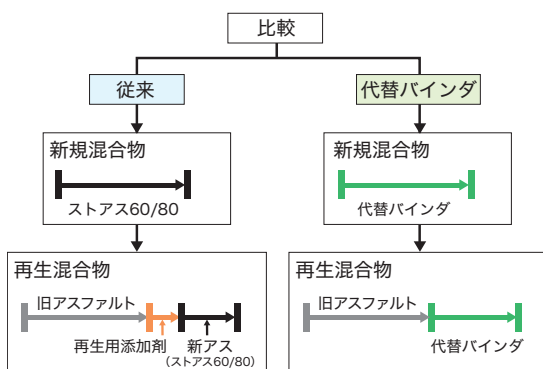


図-2 バインダの配合方法

### 4-2 混合物の基本性状

代替バインダを用いた新規混合物、再生混合物(以下、代替混合物(新規)、代替混合物(再生))およびストレートアスファルト60/80を用いた新規混合物、再生混合物(以下、ストアス混合物(新規)、ストアス混合物(再生))の基本性状を表-2に示す。

表-2 密粒度混合物の基本性状

評価項目	代替混合物(新規)	ストアス混合物(新規)	代替混合物(再生)	ストアス混合物(再生)
バインダ量 (%)	5.0	5.5	4.5	5.3
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.370	2.398	2.409	2.386
マーシャル安定度 (kN)	13.8	12.6	15.3	10.5
フロー値 (1/100cm)	25	29	29	30
残留安定度 (%)	89.2	89.2	91.7	—
動的安定度 DS (回/mm)	3.150	423	15,000	—
曲げ強度 (MPa)	2.35	7.53	7.64	—
破断時のひずみ (×10 <sup>3</sup> )	7.1	3.9	8.7	—

試験の結果、どちらのバインダを使用した密粒度混合物もマーシャル安定度はほぼ同程度の値であるが、動的安定度は代替混合物において良好な値が得られた。また、代替混合物(新規)の曲げ強度はストアス混

合物と比較して小さい傾向がみられたが、破断ひずみは2倍程度の値となった。

これより、代替混合物は一般的な密粒度混合物と同等以上の基本性状が得られることを確認した。

### 4-3 施工性の確認

表-3に示すように試験練りおよび試験施工を実施し、設定した製造方法で混合状態を確認した。その結果、練り落とし代替混合物は混合ムラなどなく、良好な混合性を得られた。練り落とし状況を写真-1に示す。なお、製造時の温度はギルスナイトの融点が高いため、ストアス混合物より約10℃高くなった。

また、一般的な施工機械での施工が可能かどうかを、試験施工で確認した。施工状況を写真-2に示す。試験施工の結果、一般的な舗装と同様の機械で問題なく施工できることを確認した。また、施工の際、作業員より、スコップやレーキで代替混合物を取り扱った時の感覚が一般的なアスファルト混合物より若干軽いとの評価があった。

以上のことから、代替混合物の製造、施工方法および施工性は、一般的なアスファルト混合物と同様であることを確認できた。

表-3 試験練り・試験施工概要

項目	詳細
製造場所	世紀東急工業(株) 佐倉混合所
製造温度 (°C)	175 ~ 185
代替バインダの温度	常温
敷きならし温度 (°C)	160 以上
初期値転圧温度 (°C)	150 以上
二次転圧温度 (°C)	110 以上



写真-1 練り落とし



写真-2 試験施工

## 5 供用性の評価

### 5-1 舗装走行実験場による促進載荷試験

#### (1) 評価内容

代替混合物の供用性を評価するため、土木研究所の舗装走行実験場において、舗装走行試験用荷重車を無人走行させ、一般の道路で数年に相当する交通荷重を短期間で再現し、荷重車走行前後でのわだち掘れ量などの変化を調査した。評価した舗装および調査の概要を表-4に、施工状況を写真-3、4、5に示す。なお、評価した混合物は代替混合物(新規)の密粒度混合物であり、舗設時の施工性は試験施工と同様に良好であった。

表－４ 舗装走行実験場の舗装・調査概要

項目	詳細	
舗装概要	場所	(国研)土木研究所 舗装走行実験場
	混合物種類	代替混合物(新規)の密粒度混合物 13
	施工日	2023年7月
	施工規模	幅員3.5m × 延長15m
	製造場所	世紀東急工業(株) 佐倉混合所
舗装構成	切削オーバーレイ(表層5cm)	
促進・荷重	荷重車	車両総重量30トン
	走行速度	30km/h
調査内容	すべり	すべり抵抗値(BPN)、動的摩擦係数( $\mu 60$ )
	横断形状	最大わだち掘れ量(mm)
	目視観察	ひび割れ、色の変化等



写真－３ 敷きならし 写真－４ 転圧 写真－５ 完成

(2) 評価結果

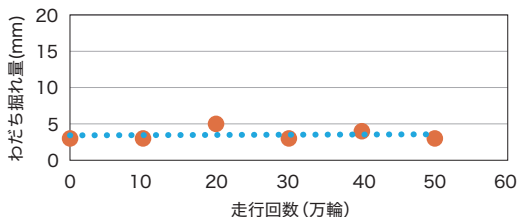
荷重車の走行中の様子を写真－６に、荷重車走行後の路面性状を表－５に示す。表に示すとおり、すべり抵抗値(BPN)および動的摩擦係数( $\mu 60$ )は、施工直後から50万輪走行後の値が概ね同程度であった。また、図－３に示すとおり、わだち掘れ量にも大きな変化は見られなかった。



写真－６ 荷重車の走行状況

表－５ 路面性状(施工直後～50万輪走行後まで)

経過	調査日	すべり抵抗値 BPN		動的摩擦係数 $\mu 60$		わだち掘れ量 (mm)	クラック (目視)
		BWP (中)	OWP (左)	BWP (中)	OWP (左)		
施工直後	2023/7/31	88	88	0.47	0.47	3	なし
10万輪後	2023/11/8	79	76	0.45	0.43	3	なし
20万輪後	2023/12/26	79	74	0.45	0.49	5	なし
30万輪後	2024/4/3	80	78	0.49	0.49	3	なし
40万輪後	2024/7/30	76	81	0.46	0.49	4	あり
50万輪後	2024/11/12	77	77	0.56	0.59	3	あり
目標値	-	60以上		-		-	-



図－３ わだち掘れ量(施工直後～50万輪走行後)

ただし、写真－７に示すとおり、30万輪走行後までは路面性状に問題はなかったが、40万輪走行後から表面にひび割れが発生し、50万輪走行後には多少進行した。ひび割れは、車輪走行部の一部に発生し、ひび割れの形状はヘアクラックに近い。また、ひび割れ箇所は舗設直後と比較して舗装表面のバインダモルタル分が減少している様子が確認できたため、ひび割れは舗装表面から生じたと推測できる。さらに、ひび割れ発生時期を考察すると、夏期の高温時と一致するため、高温時のひび割れ抵抗性に課題があると推測される。



写真－７ ひび割れの発生状況(50万輪走行後)

以上の結果から、代替混合物(新規)の供用性を評価したところ、30万輪走行後までは路面性状に問題なく、安全に走行できた。さらに、普通道路の交通量に換算すると、N4交通で20年間は問題なく供用できることを確認した。

5-2 土木研究所の構内道路における供用性の確認

(1) 評価内容

代替混合物の供用性を評価するため、普通車が走行する構内道路での長期供用性を確認した。評価した舗装は、代替混合物(再生)および一般的な再生密粒度混合物とし、土木研究所の構内道路で施工を行ったのちに、定期的な追跡調査を行った。評価した舗装および

表－６ 構内道路の舗装・調査概要

種類	代替混合物(再生)		ストアス混合物(再生)
	施工場所	(国研)土木研究所 構内道路	
交通量	N2相当(構内工事の影響により)		
混合物種類	再生密粒度混合物(13)(再生率60%)		
施工日	2023年10月		
施工規模	幅員3m × 延長20m		
製造場所	世紀東急工業(株) 佐倉混合所		
舗装構成	切削オーバーレイ(表層5cm)		
調査内容	すべり抵抗値(BPN)、動的摩擦係数( $\mu 60$ )		
横断形状	最大わだち掘れ量(mm)		
目視観察	ひび割れ、色の変化等		



写真－８ 敷きならし 写真－９ 転圧 写真－10 完成

調査の概要を表-6に、施工状況を写真-8、9、10に示す。また、舗設時の施工性は試験施工と同様に良好であった。

## (2) 評価結果

施工直後から供用1年後までの路面性状を表-7に示す。表のとおり、すべり抵抗値(BPN)および動的摩擦係数( $\mu 60$ )は施工直後から1年後の値がほぼ同程度であった。また、図-4に示すとおり、わだち掘れ量は施工直後から1年後まで、変化が見られていない。さらに、ひび割れや目視で確認できる損傷は生じていない。以上のことから、代替混合物(再生)は、施工から1年後までは、すべての路面性状は良好であることを確認できた。

表-7 路面性状(施工直後~供用1年後)

混合物の種類	経過	すべり抵抗値 BPN		動的摩擦係数 $\mu 60$		わだち掘れ量 (mm)	クラック (目視)
		BWP (中)	OWP (左)	BWP (中)	OWP (左)		
代替混合物(再生)	施工直後	79	79	0.41	0.41	3	なし
ストアス混合物(再生)		76	76	0.35	0.35	4	なし
代替混合物(再生)	6か月後	81	84	0.52	0.54	4	なし
ストアス混合物(再生)		83	75	0.49	0.47	3	なし
代替混合物(再生)	1年後	81	75	0.62	0.64	3	なし
ストアス混合物(再生)		75	69	0.77	0.62	3	なし
目標値		60以上		-		-	-

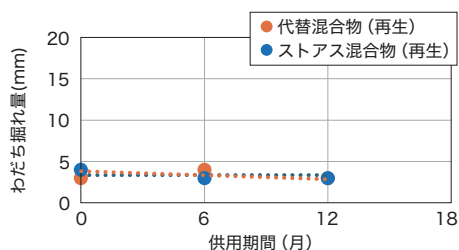


図-4 わだち掘れ量(施工直後~1年後)

また、舗装走行実験場および構内道路の評価結果から、いずれの代替混合物もわだち掘れに対する抵抗性が高いと言える。一方、代替混合物(新規)の促進載荷試験の結果、40万輪走行後にひび割れが発生したため、ひび割れ性状に課題がある可能性が得られた。

## 6 ひび割れ抵抗性に関する検討

### 6-1 圧裂強度比と高温カンタプロ損失率による高温時のひび割れ抵抗性

代替混合物のひび割れ抵抗性を確認するため圧裂強度比およびカンタプロ損失率を測定した。圧裂強度比は、0℃の圧裂強度を60℃で除した値である。一般的には、この値が大きいとわだち掘れが発生しやすく、小さいとひび割れが生じやすいとされている<sup>4),5)</sup>。既往の文献による圧裂強度比と高温カンタプロ損失率の関係による高温時のひび割れが生じにくい範囲を表-8に示す<sup>6)</sup>。

表-8 高温時のひび割れが生じにくい範囲

	高温時のひび割れ	
	生じにくい 範囲内	生じやすい 範囲外
圧裂強度比	20以上	20未満
高温カンタプロ損失率(%)	1.14未満	1.14以上 2.40未満 2.40以上

試験の結果を図-5、表-9、10に示す。代替混合物(新規)および代替混合物(再生)の圧裂強度は、60℃ではストアス混合物と同程度であったが、0℃と20℃では低い傾向となった。

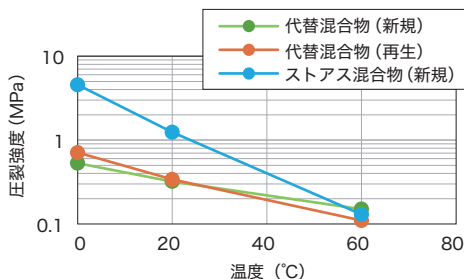


図-5 圧裂強度

表-9 圧裂強度とカンタプロ損失率

種類	圧裂強度(MPa)			カンタプロ損失率(%)		
	0℃	20℃	60℃	0℃	20℃	60℃
代替混合物(新規)	0.53	0.32	0.15	9.5	27.5	63.0
代替混合物(再生)	0.71	0.34	0.11	1.9	0.6	4.8
ストアス混合物(新規)	4.56	1.24	0.13	12.4	3.4	0.0

表-10 圧裂強度比と高温カンタプロ損失率

種類	代替混合物(新規)	代替混合物(再生)	ストアス混合物(新規)
圧裂強度比 (0℃/60℃)	3.5	6.3	36.4
高温カンタプロ損失率(60℃)(%)	63.0	4.8	0.0

また、代替混合物(新規)のカンタプロ損失率は0℃では良好であった。それ以外の温度ではストアス混合物よりカンタプロ損失率が高い傾向であった。一方、代替混合物(再生)では0℃に加えて20℃でも極めて低く、60℃においても5%以下であり、すべての温度領域で安定したカンタプロ損失率が得られた。なお、60℃でのストアス混合物のカンタプロ損失率は0%ではあったが、供試体は変形する現象が見られた。

一般的に、代替混合物の圧裂強度比の値が20未満であり、ストアス混合物より小さいことから、わだち掘れが発生しにくく、ひび割れが生じやすい性状と言える。さらに、圧裂強度比と高温カンタプロ損失率の関係から、圧裂強度比が20未満かつ高温カンタプロ損失率が2.4以上であるため、高温時のひび割れ抵抗性が低いと言える。ただし、代替混合物は0℃で良好な性状が得られており、アスファルト混合物と挙動が異なることから、一般的な指標では評価しきれない可能性も考えられた。また、代替混合物(再生)は、代替混合物(新規)と比較して高温時のひび割れが生じにくい範囲に近い性状が得られていることから、代替パイン

ダの使用方法の見直しなどにより、性状改善の可能性が見いだされた。

## 6-2 小型曲げ試験による性状評価

### (1) 小型曲げ試験による脆化点の確認

アスファルト舗装のひび割れは、アスファルトの脆化による材料劣化、交通荷重、温度変化などが原因で発生する<sup>7)</sup>。そこで、代替混合物の脆化点を把握するため、小型曲げ試験を行った。試験の概要を表-11に示す。

表-11 小型曲げ試験の概要

混合物の種類	ストアス混合物(新規)、代替混合物(新規)、代替混合物(再生)
試験温度	-40 ~ 15°C
載荷速度	10mm/min
支点間距離	80mm
原点補正	有
供試体寸法	厚さ: 20mm 長さ: 120mm 幅: 20mm
供試体採取位置	表層: 混合物表面から0 ~ 20mm 内部: 混合物表面から20 ~ 40mm

図-6に示すとおり、代替混合物(新規)の曲げ強度から求めた脆化点は、-40°C以下の低温域にあることを確認した。さらに、代替混合物(再生)の脆化点は-30°C程度であり、ストアス混合物より約30°C低温であることが確認できた。また、各混合物の曲げ強度および破断ひずみから求めた脆化点を表-12に示す。これらの結果から、代替混合物は脆化点が0°C以下と低いため、低温でも脆くならず、低温時のひび割れ抵抗性に優れると言える。

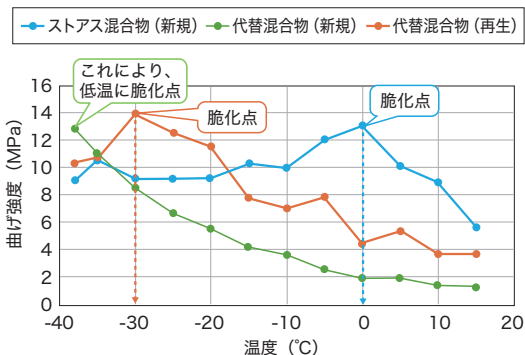


図-6 曲げ強度(表面)

表-12 各混合物の脆化点

脆化点(°C)	ストアス混合物(新規)		代替混合物(新規)		代替混合物(再生)	
	曲げ強度	ひずみ	曲げ強度	ひずみ	曲げ強度	ひずみ
表面	0	-5	-40以下	-35	-30	-30
内部	5	0	-40以下	-30	-35	-20

ここで、0°Cにおける圧裂強度、-10°Cで測定した曲げ破断ひずみの値が良好であったのは、代替混合物の脆化点が低温であったためと分かった。

### (2) 暴露による性状変化<sup>8,9)</sup>

代替混合物の暴露による性状変化を確認するため、1年暴露後に小型曲げ試験を実施した。試験結果を図-7,8,表-13に示す。1年暴露後の代替混合物(新規)では、表面および内部の曲げ強度がすべての温度域で

上昇し、山型ピークも右側にシフトした。破断時のひずみは低温側では概ね同じであったが、高温側では低下の傾向が見られた。また、代替混合物(再生)では、表面および内部の曲げ強度が上昇し、山型ピークも右側にシフトした。破断時のひずみはいずれも低下の傾向が見られた。一方、ストアス混合物は暴露前と1年後の値が概ね同じであった。したがって、代替混合物2種類は暴露によって脆化点が上昇することを確認した。

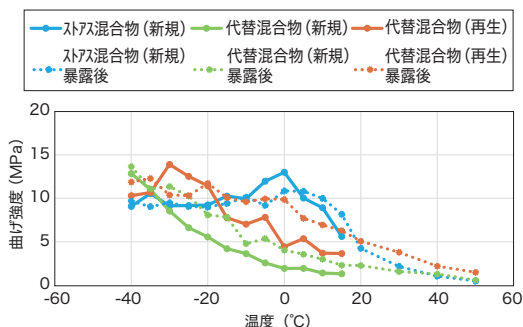


図-7 曲げ応力(表面)

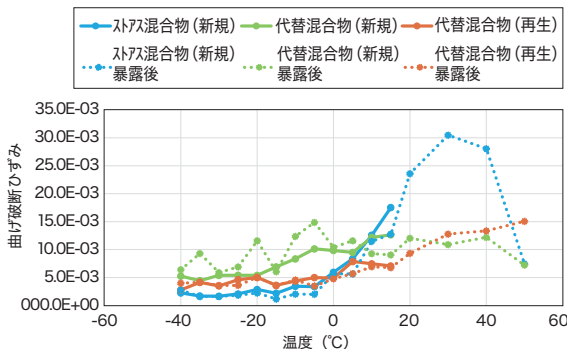


図-8 破断ひずみ(表面)

表-13 曲げ強度から求めた暴露前後の脆化点

脆化点(°C)	ストアス混合物(新規)		代替混合物(新規)		代替混合物(再生)	
	0年	1年後	0年	1年後	0年	1年後
表面	0	0	-40以下	-40以下	-30	-20
内部	5	5	-40以下	-40以下	-35	-25

## 6-3 曲げ疲労試験

代替混合物の疲労抵抗性を確認した。試験の条件を表-14に、結果を図-9に示す。試験の結果、代替混合物の方がストアス混合物より疲労破壊回数が大きく、良好な結果を得られた。なお、代替混合物(再生)はひずみ600μで変曲点のみみられず、破壊に至らなかった。

表-14 曲げ疲労試験の条件

項目	試験条件
混合物の種類	ストアス混合物(新規)、代替混合物(新規)、代替混合物(再生)
載荷方法	両端固定2点載荷
供試体寸法	40mm × 40mm × 40mm
スパン長	300mm
試験方法	ひずみ制御
試験温度	20°C
載荷周波数	5Hz
載荷波形	サイン波
ひずみ	600μ、900μ

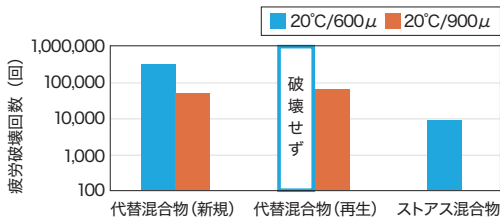


図-9 曲げ疲労試験結果

以上のことから、代替混合物のいずれもストアス混合物と比較して、繰り返し荷荷による疲労破壊抵抗性は良好であることを確認した。

## 7 CO<sub>2</sub>排出量と経済性の試算

舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブックに準じて、代替混合物1(t)あたりのCO<sub>2</sub>排出量を試算した。試算結果を図-10に示す。図より、新規混合物で比較すると、代替混合物はストアス混合物より63%の削減ができた。また、再生混合物では約30%の削減ができた。

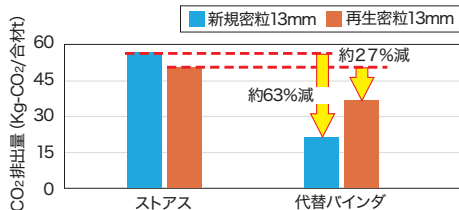


図-10 CO<sub>2</sub>排出量の試算結果

これらの結果は、代替バインダに使用する素材が天然素材、植物由来、リサイクル材料であるため個々の素材のCO<sub>2</sub>排出量が小さいことから、代替バインダのCO<sub>2</sub>排出量はストアスより大幅に削減できると言える。加えて、混合物製造時の骨材加熱温度は高めたが代替バインダは常温で使用するため、ストアスと比較して、環境負荷低減効果を期待できることが明らかになった。

一方、代替バインダを使用する場合、材料費は増加するものの、施工費および施工時間は一般的なアスファルト混合物と同程度であることを確認できた。特にCO<sub>2</sub>削減効果と環境負荷低減を重視する現代の社会情勢を考慮すれば、代替バインダの実用化における経済的・社会的な価値は高いと言える。

表-15 CO<sub>2</sub>排出量と経済性の試算結果

項目	評価結果	
	代替混合物(新規)	代替混合物(再生)
CO <sub>2</sub> 排出量	約63%削減	約27%削減
コスト	材料費	増加
	施工費	同程度
施工時間	同程度	同程度

## 8 まとめ

以下に研究の成果をまとめる。

- ・促進荷試験の結果、代替混合物(新規)は、30万走行行後(N4交通で20年間に相当)までは、供用の問題ないことを確認できた。
- ・構内施工の追跡調査の結果、代替混合物(再生)は、施工1年後までは、すべての路面性状が良好であることを確認できた。
- ・供用性評価から、代替混合物はわだち掘れ抵抗性が高いと言える。
- ・代替混合物の圧裂強度比が小さいため、わだち掘れが発生しにくく、ひび割れが生じやすいと言える。しかし、脆化点が-40℃程度と低かったことから、一般的なアスファルトの評価とは異なり、低温時のひび割れ抵抗性に優れることが確認できた。
- ・圧裂強度比と高温カンタプロ損失率の関係から、代替混合物の高温時のひび割れ抵抗性が低いことが確認できた。ただし、代替混合物(再生)は、代替混合物(新規)と比較して性状が良好であるため、代替バインダの使用方法の見直しなどによる性状改善の可能性が見いだせた。
- ・暴露による性状変化を確認した結果、代替混合物は暴露によって脆化点が上昇することを確認した。
- ・代替混合物のCO<sub>2</sub>排出量はストアス混合物より大幅に削減ができた。一方、材料費は増加した。

## 9 おわりに

石油アスファルトに代わる代替バインダを使用した混合物を検討した結果、一般的なアスファルト混合物と同等の混合物性状、施工性が得られた。さらに、わだち掘れ抵抗性と低温性状は、アスファルト混合物よりも優れる結果を得た。しかし、長期供用を想定すると高温時のひび割れ抵抗性に課題がある。今後は、代替バインダの使用方法や置換量を検討するなど課題解決に努め、実用化に向けた検討を進めたい。

### 【参考文献】

- 1) 浅野：石油アスファルト需要動向と将来展望について、アスファルト pp.1-4、2021.12
- 2) 村井宏美、ミミサン、源藤勉：天然素材を使用した代替バインダの検討、第35回日本道路会議、2023.11
- 3) ミミサン、堤丈瑠、村井宏美、田中俊輔：アスファルトに代わる舗装材料に関する検討、土木学会、第79回年次学術講演会 V628、2024
- 4) 建設省関東技術事務所：昭和56年度試験道路における試験調査報告書(1982)
- 5) 阿部頼政：第5回アスファルト規格試験とその意義(1)、アスファルト、Vol.17、No.96(1974.4)
- 6) 掛札さくら、川上篤史、藪雅行、新田弘之、山本富業：再生アスファルト混合物評価方法としてのカンタプロ損失率と圧裂強度比の関係、舗装 pp.24-29、57-9、2022
- 7) 佐々木巖、新田弘之：促進紫外線劣化試験における舗装表面のアスファルト劣化性状土木学会論文集 E1(舗装工学)、2020、25、Vol.76.No.2、p.1211-1216
- 8) 佐々木巖、西崎到、川島陽子、新田弘之：アスファルト表層材供用2.5年後の曲げ性状変化における表面深さと再生方法の影響、土木学会、第72回年次学術講演会、平成29(2017)
- 9) 掛札さくら、川上篤史、藪雅行：屋外暴露した再生アスファルト混合物の脆性・流動領域の性状変化、第35回日本道路会議、2023.11