

CO₂を固定化した合成炭酸カルシウムを用いたアスファルト舗装の開発

日本道路株式会社	技術研究所	立花	徳啓
	同	工藤	朗
出光興産株式会社	石炭・環境事業部	汲田	章司
	同	寺前	剛
出光興産株式会社	機能舗装材事業部	澤山	拓
	同	呉	悦樵

1. はじめに

我が国では、2050年までに温室効果ガスの排出を全体としてゼロにするカーボンニュートラルの実現を目指すことが宣言されている¹⁾。国際エネルギー機関(IEA)の試算では、カーボンニュートラル実現のためには、年間約38～76億トンのCO₂を回収する必要がある、CO₂排出量を削減するだけでなく、すでに大気中に排出されたCO₂を減らすことが求められている。一方、近年ではカーボンニュートラル実現の鍵とされる「Carbon dioxide Capture, Utilization and Storage (CCUS)」が注目されており、「CO₂を回収・貯留・有効利用」する技術として期待されている。このような状況下、道路舗装業界では、化石燃料由来のアスファルトの使用やアスファルト混合物製造時の骨材加熱乾燥過程において、多くのCO₂を排出しているのが現状である。そこで、本検討では、燃焼排ガス由来のCO₂とコンクリートスラッジから生成される合成炭酸カルシウム²⁾³⁾(以下、開発品)をアスファルト混合物の材料の一部として利用することで、CO₂をアスファルト舗装に固定化し、道路舗装におけるCCUSの社会実装に寄与できるアスファルト混合物の評価を行った。本報では、その結果について報告する。

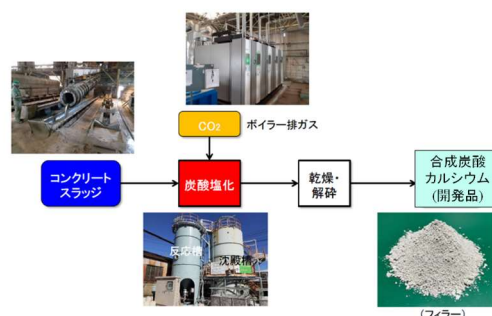


図-1 開発品の製造

2. 合成炭酸カルシウムの概要

開発品は、図-1に示すように、コンクリート2次製品の製造過程などから排出されたコンクリートスラッジに含有する水酸化カルシウムと、ボイラーから排出されるCO₂を水中で反応させ生成される。本検討では、生成物を乾燥後に解砕しフィラー状としたものを使用し、一部にコンクリート由来の砂を含有している。

開発品の外観を写真-1に示す。本検討では、開発品を炭酸カルシウムを主成分とする石粉の代替材料としての適用性評価を目的とし、各試験により開発品の性状を確認した。

試験結果を表-1に示す。なお、目標値は、一般的な石粉の規格値や回収ダスト等の目標値を参考に設定した。結果から、密度と粒度は目標値を満足しているが、フロー値および水分量は、目標値を満足しない結果となった。水分量については、製造方法やプラントでの投入方法を検討することで対処が可能であるが、フロー値が大きいくほど多くのアスファルト量を必要とする傾向にあるため、アスファルト混合物の混合物特性値を評価した。



写真-1 開発品の外観

表-1 開発品の性状結果

試験項目			測定値	目標値
密度 (g/cm ³)			2.611	2.6以上
水分 (%)			1.6	1.0以下
粒度	ふるい通過質量百分率 (%)	0.6 mm	98.3	100
		0.3 mm	97.0	—
		0.15 mm	97.0	90-100
		0.075 mm	95.9	70-100
塑性指数 (PI)			NP	4以下
フロー値 (%)			149.5	50以下

3. 開発品を用いたアスファルト混合物性状

密粒度アスファルト混合物(13)に配合される石粉と開発品を置換し、アスファルト混合物への適用性を評価した。なお、置換割合は 100%、50%、25%の 3 水準とし、置換なし(0%)の性状と比較した。また、使用アスファルトはポリマー改質アスファルトⅡ型とし、それぞれの置換割合で配合設計を実施し、最適アスファルト量を算出した。結果を図-2 に示す。

100%置換の最適アスファルト量は、「置換なし」の混合物と比較し、0.6%増加しており、アスファルトの吸収性が高くなっていることを確認した。一方、50%以下の置換割合では、「置換なし」と同一の最適アスファルト量を示し、開発品のフロー値の影響を抑制できることを確認した。また、それぞれの配合において算出した最適アスファルト量にて供試体を作製し、混合物性状試験を実施した。結果を表-2 に示す。

(1) マーシャル安定度

開発品の置換割合によらず、すべての配合で置換なしと同等の性状であり、目標値である 4.9 kN 以上を満足した。また、残留安定度もすべての配合で置換なしと同等以上の値であり、十分な剥離抵抗性を有していると判断される。

(2) 動的安定度

25%、50%置換では 6,000 回/mm 以上の動的安定度を示し、十分な耐流動性を有していると判断される。一方、100%置換では 3,000 回/mm を下回り、動的安定度の低下が認められる。これは、最適アスファルト量の増加が耐流動性に影響したものと推察される。

(3) 曲げ強度および破断時のひずみ

曲げ強度は、開発品の置換割合によらず、すべての配合で置換なしと比べ高い値を示した。一方、破断時のひずみは、開発品を用いたすべての配合で、置換なしよりも低い値となり、 5.0×10^{-3} 程度の性状を示した。

(4) 曲げ疲労破壊回数

曲げ試験の結果から、開発品を用いることでひび割れ抵抗性に影響が懸念されたため、曲げ疲労試験により、ひび割れ抵抗性を評価した。試験条件は首都高速道路(株)に準拠し、与ひずみ 900 μ 、試験温度 0℃、載荷周波数 5 Hz にて実施した。結果から、破壊回数は、開発品の置換割合によらず、置換なしと同等以上の値を有していることを確認した。このことから、開発品に置換することによるひび割れ抵抗性の影響は小さいと判断した。

以上の結果より、開発品置換割合の上限を 50%とすれば、アスファルト混合物性状への影響は小さいと判断した。

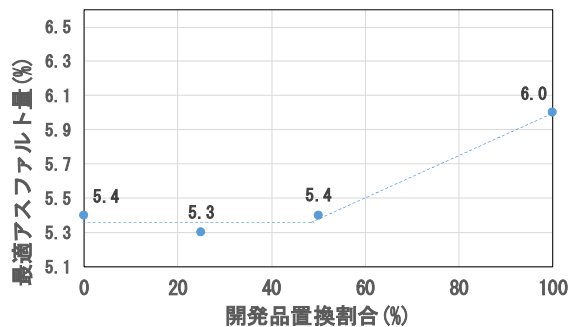


図-2 置換割合と最適アスファルト量

表-2 混合物性状一覧

混合物性状	開発品置換割合 (%)				目標値
	0	25	50	100	
マーシャル安定度 (kN)	12.1	12.5	14.5	14.0	4.9以上
残留安定度 (%)	81.0	91.7	86.8	94.6	75以上
動的安定度 (回/mm)	9,109	7,875	6,708	2,838	-
曲げ強度 (N/mm ²)	10.4	11.9	11.8	12.7	-
破断時のひずみ	7.01E-03	4.99E-03	4.84E-03	5.19E-03	-
曲げ疲労破壊回数	810	837	1,250	830	-

4. 実機プラントでの試験練り

開発品置換割合 30%の密粒度アスファルト混合物(13)を対象に、実機プラントでの混合性、製造性を評価するため、試験練りを実施した。試験練り条件を表-3に示す。

本試験練りでは、アスファルトはポリマー改質アスファルトⅡ型を使用し、開発品の置換の有無の2水準により比較を行った。なお、事前の配合設計により、最適アスファルト量は両配合ともに5.4%であった。また、試験練りでは、開発品はミキサーの粉体投入口よりドライミキシング時に直接投入し(写真-2)、ドライミキシング時間を15秒、ウェットミキシング時間を35秒とした。

練り落とされた混合物は、写真-3に示すようにアスファルトの被膜不良は確認されず、良好な混合性を確認することができた。また、試験練り時の混合物を用いて供試体を作製し、各混合物性状試験を実施した。試験結果を表-4に示す。

マーシャル安定度および残留安定度は、置換なしと同等の値を示し、目標値を満足することを確認した。また、動的安定度についても、6,000回/mm以上の値を示し、置換なしと比較しても十分な耐流動性を有していると判断した。以上の結果から、実機を用いたアスファルト混合物の混合性および混合物性状は良好であることを確認した。

表-3 試験練り条件

配合	密粒度アスファルト混合物(13)
使用アスファルト	ポリマー改質アスファルトⅡ型
最適アスファルト量	5.4%(置換なしと同様のAs量)
開発品置換割合	石粉の30%
ミキシング時間	ドライミキシング15秒 ウェットミキシング35秒
検討品投入方法	粉体投入口より人力投入



写真-2 開発品投入状況



写真-3 練り落とし混合物

表-4 試験練り混合物の性状

混合物性状	置換割合 (%)		目標値
	0	30	
マーシャル安定度 (kN)	15.8	15.2	49以上
残留安定度 (%)	98.7	98.9	75以上
動的安定度 (回/mm)	5,274	7,725	-

5. 試験施工

(1) 試験施工の概要

開発品を置換した密粒度アスファルト混合物(13)の施工性および供用性を評価するため、2024年3月に試験施工を実施した。試験施工条件を表-5に示す。施工場所は出光興産(株)千葉事業所構内(写真-4)の2車線道路において、大型ローリーが頻繁に通行する箇所を選定した。なお、当該箇所の既設路面は写真-5に示すように亀甲状のひび割れが発生し、舗装が損傷している路線である。また、事前にコアを採取した結果、既設平均舗装厚は概ね50 mm(表層 20~30 mm、基層 35~40 mm)であったことから、切削深さの平均を50 mmとした。

現場は図-3に示すように、開発品置換の有無で2工区に分割し、同一の機械編成で施工した。施工機械や施工方法は、通常のアスファルト混合物と同様の施工体制で行った。

表-5 試験施工条件

条件	工区①	工区②
使用混合物	密粒度アスファルト混合物(13) 改質Ⅱ型	
開発品置換割合	開発品置換なし	開発品30%置換
施工厚さ	t=50 mm	t=50 mm
施工面積	W9.8 m×L54 m=529.2 m ²	W9.8 m×L52 m=509.6 m ²

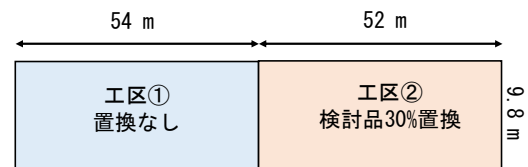


図-3 試験施工の工区分け

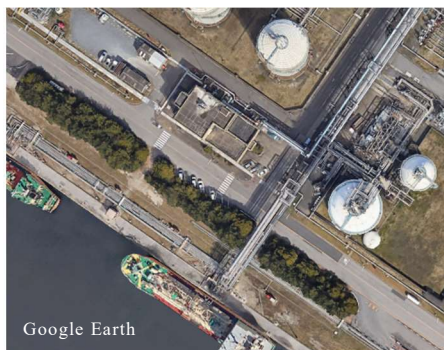


写真-4 施工場所

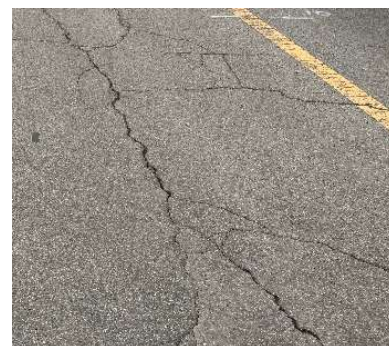


写真-5 ひび割れ状況の一例

(2) 試験施工結果

試験施工結果を表-6に示す。本試験施工は3月の実施であったが、概ね目標施工温度範

囲内で施工することができた。また、施工性に大きな課題や問題は特になく、舗装の仕上がりについても開発品の置換の有無によらず同程度の舗装表面となった(写真-6)。なお、現場コアを採取し締固め度を算出した結果は、開発品置換なし工区：98.3%、開発品 30%置換工区：97.0%となり、どちらも良好な締固め度であることを確認した。



写真-6 施工完了後仕上がり

表-6 試験施工結果

項目	工区①	工区②
練り落とし温度	174℃	185℃
敷きならし温度	161℃	162℃
初期転圧温度	158℃	157℃
二次転圧温度	105℃	100℃
締固め度	98.3%	97.0%

6. 追跡調査

供用 3 ヶ月後に路面性状測定車を使用し、追跡調査を実施した。計測項目はひび割れ率、わだち掘れ量、平たん性の 3 項目である。施工直後と比較した測定結果を以下に示す。

(1) ひび割れ率

ひび割れ率は両工区とも供用 3 ヶ月後において 0%であり健全な状態を維持している。

(2) わだち掘れ量

図-4 に示すように、わだち掘れ量は、開発品の置換なし工区では供用による変化は認められないが、開発品 30%置換工区では供用直後が 2.8 mm から 3.5 mm と 0.7 mm の増加が確認された。ただし、増加量は小さく健全な状態を維持しており、今後も引き続き供用性を評価していく。

(3) 平たん性

図-5 に示すように、平たん性は、両工区とも大きな変化は認められず、良好な状態を維持している。



図-4 わだち掘れ量の経時変化

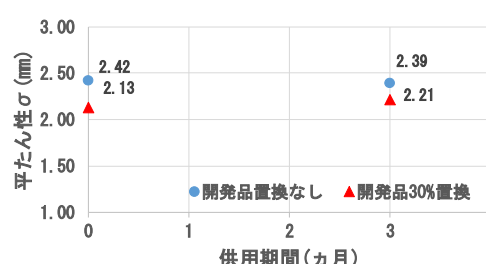


図-5 平たん性の経時変化

7. CO₂ 排出量の試算

開発品を石粉の代替として使用することで、通常のアスファルト混合物の製造と比較した場合の CO₂ 排出量について試算した。試算に使用した原単位は、「舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック」⁴⁾に記載されている値を使用した。なお、開発品の原単位は製造による CO₂ 排出量等を考慮・算出し -133 kg-CO₂/t とした。また、骨材およびアスファルトの配合比は試験練り時の配合とし、製造数量は 800 t で試算した。試算結果を表-7 に示す。1t 当たりの CO₂ 排出量は通常のアスファルト混合物が 79.48 kg-CO₂ であるのに対

し、開発品を 30%置換した場合は 76.98 kg-CO₂ であり、混合物 1t あたり約 3.1%(−2.5 kg-CO₂)削減できることがわかった。今回実施した試験施工の規模(509.6 m²)の場合、約 149.7 kg の CO₂ をアスファルト舗装に固定していると試算される。

また、石粉の置換割合を変化させて試算し、CO₂ 削減量を評価した結果を図-6 に示す。なお、開発品 100%置換について、アスファルト量の増加分を加味し算出している。試算結果から、開発品 50%置換では約 5.2%減、開発品 100%置換では約 7.0%の CO₂ 排出量を低減となり、中温化アスファルト技術(30℃低減)と同程度となっている。ただし、本検討では、混合物性状を確保するために置換割合の上限を 50%としており、CO₂ 排出量削減は最大で 5.2%であると試算される。

表-7 CO₂ 排出量の試算結果

名称	単位	原単位 (kg-CO ₂ /単位)	通常		開発品使用	
			数量	排出量 (kg-CO ₂)	数量	排出量 (kg-CO ₂)
素材	6号砕石	t	7.98	242.40	1934.35	242.40
	7号砕石	t	7.98	170.40	1359.79	170.40
	粗砂	t	11.54	148.00	1707.92	148.00
	細砂	t	11.54	148.00	1707.92	148.00
	石粉	t	5.41	48.00	259.68	33.60
	開発品	t	-133	0.00	0.00	14.40
ポリマー改質アスファルトB型			488.82	43.20	21117.02	43.20
輸送	砕石輸送(軽油)	L	4.19	608.58	2549.95	608.58
	砂輸送(軽油)	L	4.19	208.66	874.29	208.66
	石粉輸送(軽油)	L	4.19	52.16	218.55	52.16
	アスファルト輸送(軽油)	L	4.19	359.04	1504.38	359.04
製造	電力	kWh	0.46	8,000.00	3680.00	8000.00
	A重油	L	2.91	6,782.00	19735.62	6782.00
その他	軽油	L	2.95	256.00	755.20	256.00
	重量計が等量品み盛(アスコン)	t	7.72	800.00	6176.00	800.00
計				63580.67		61587.57
1tあたり				79.48		76.98

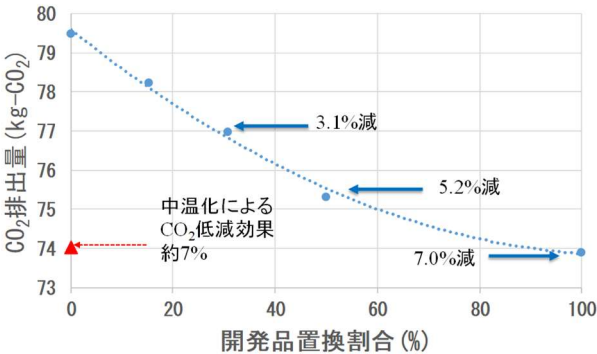


図-6 CO₂ 排出量の削減効果

8. まとめ

以上の結果より、CO₂ を固定化した材料(開発品)を石粉の代替として使用する場合、置換割合の上限を 50%とすれば、置換なしと同等の混合物性状を確保できることがわかった。さらに、試験練り・試験施工により、実機プラントでの混合性および通常のアスファルト混合物と同様の施工体制でも施工性が良好であることを確認した。

また、本検討では CO₂ 排出量削減効果は最大 5.2%であると試算され、アスファルト混合物 1 t あたり約 4.2 kg の CO₂ をアスファルト舗装へ固定できていると考える。よって、道路舗装における CCUS の社会実装に寄与できると判断される。今後は、適用する混合物種類の拡大や中温化技術との組み合わせを検討し、さらなる CO₂ 削減を図り、カーボンニュートラル実現に貢献する所存である。

参考文献

- 1) 環境省 2050 年カーボンニュートラルを巡る国内外の動き
<https://www.env.go.jp/content/900445133.pdf>
- 2) 呉悦樵 他：比表面積を用いた配合設計方法による CO₂ を固定化した資材のアスファルト混合物への適用検討，舗装，Vol.58，No.3，pp.4-8，2023.3
- 3) 立花徳啓 他：CO₂ を固定化した合成炭酸カルシウムのアスファルト混合物への適用，土木学会第 79 回年次学術講演会，2024.9
- 4) (公社)日本道路協会：舗装の環境負荷低減に関する算定ガイドブック，p.138，2014.1