

研究開発部門 佳作

CO₂ 再資源化材料を適用した次世代低炭素型半たわみ性舗装の開発

(株) NIPPO 総合技術部 技術研究所 岩間 将彦
 “ “ “ 渡邊 真一
 “ “ “ 人見 信男
 住友大阪セメント(株) セメント・コンクリート研究所 安久 憲一
 “ “ “ 林口 幸子
 “ “ “ 伊藤 優太

1 はじめに

昨今の地球温暖化に伴う気候変動を背景に、温室効果ガスの排出量削減は各国で喫緊の課題となっている。18世紀の産業革命以降、温室効果ガスは増加傾向にあり、その大半を占める二酸化炭素(CO₂)の排出は地球温暖化を引き起こす主要因とされている。

このような背景のもと、2016年に発効した気候変動抑制に関する国際的な枠組み、いわゆる「パリ協定」をきっかけに、各国では温室効果ガス削減に向けた機運が高まっている。2020年には、我が国でも2050年までに温室効果ガスの排出量を実質ゼロとするカーボンニュートラル、すなわち脱炭素社会の実現が宣言された。また、2021年には、2030年度までに温室効果ガス排出量を2013年比で46%削減することを目指し、50%削減にも挑戦することが目標として掲げられた¹⁾。こうした状況のなか、我が国が排出する温室効果ガスの約9割はCO₂であり、CO₂排出量削減に向けた取組みは、産業界で重要な課題となっている。特にCO₂排出量が増加している運輸部門では、排出量の約9割を自動車交通が占めており、関連する道路分野でも脱炭素に向けた取組みが期待されている²⁾。舗装分野でも、CO₂排出量削減に向けた取組みは社会的要請であり、地球規模の課題解決に向けて、更なる貢献が求められる。

こうしたなか、セメント材料を使用する半たわみ性舗装でも、CO₂排出量削減に向けて更なる技術開発が必要とされる。半たわみ性舗装に使用されるセ

メントは、原材料となるクリンカの生成に伴い石灰石を焼成するため、その際にCO₂が排出される。一方で、近年では、この課題解決に向けて、コンクリート廃材からCaOを抽出しセメント製造時に発生するCO₂と再結合することで、CO₂を再資源化し人工的に石灰石を生成する二酸化炭素貯蔵・貯留技術(CCS)が開発されている³⁾。CO₂を吸収・固定化させて再資源化する人工石灰石を舗装材料に適用することは、製造・施工・供用を考慮したうえで、舗装分野における更なるCO₂排出量の削減に貢献できると考えられる(図-1)。

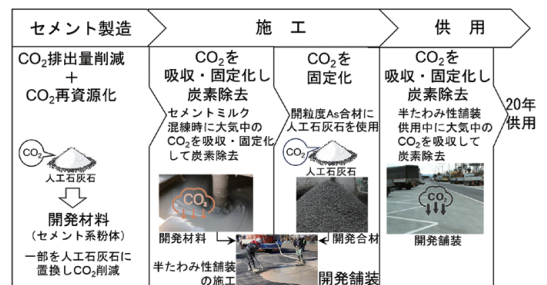


図-1 開発技術のイメージ

そこで本研究では、再資源化した人工石灰石を活用し、半たわみ性舗装用材料とアスファルト舗装材料に適用することで、CO₂排出量削減とCO₂吸収による炭素除去を兼ね備えた次世代の低炭素型半たわみ性舗装の開発を目的に各種検討を実施した。本論文は、一連の検討を通して得られた知見について報告する。

2 次世代低炭素型半たわみ性舗装の開発

(1) 開発方針

本開発にあたり、CO₂を吸着・固定化して再資源化する人工石灰石を舗装に適用することが、長期的なCO₂排出量の削減に有効と考えた。そこで、鉄筋を使用せず、中性化に伴う腐食を懸念する必要がない半たわみ性舗装に着目した。本開発では、これらを組み合わせることでCO₂排出量削減と吸収を可能とする次世代低炭素型半たわみ性舗装（以下、開発舗装）を目指した。

元来、セメントは石灰石を焼成して得られるクリンカを粉砕して製造されるが、石灰石の化学組成としてCaOが56%、CO₂が44%から成る。焼成時に組成が分離され、CaOがクリンカとして得られて、セメントが製造される（図-2）。しかし、近年では技術開発が進み、排ガスからはCO₂を、廃コンクリートなどからはCaOをそれぞれ分離回収し、それらを反応することでCO₂を固定化し生成する「人工石灰石」の製造が可能となった（図-3）⁴⁾。

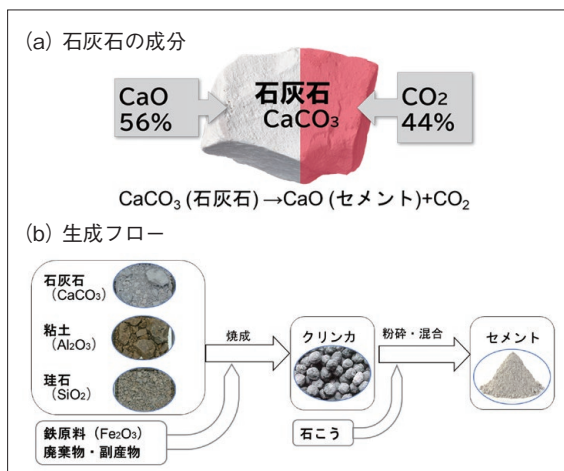


図-2 セメントの生成

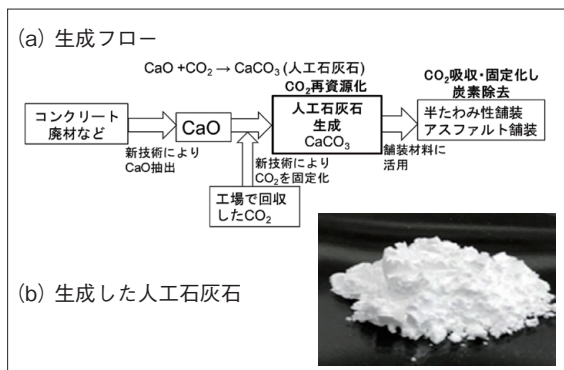


図-3 人工石灰石の概要

開発舗装では、人工石灰石をセメントの増量材として活用し、半たわみ性舗装用材料とすることで、CO₂の吸収・固定化を試みた。増量材を添加することで、セメント中のクリンカ比を低減しCO₂排出量も削減される。また、半たわみ性舗装の母体となる開粒度アスファルト混合物にも人工石灰石を骨材の一部として置き換えることで、母体舗装のCO₂固定化を図った。

(2) 開発のフロー

開発舗装の検討に際して、人工石灰石を使用し開発したセメントミルク材（以下、開発材料）と従来のセメントミルク材（以下、従来材料）との性状を比較し評価する必要がある。そこで本検討では、最初に室内試験で開発材料の物性を評価し、その後に実機グラウトミキサでの小規模試験施工と実現場での試験施工を行い、品質、施工性、供用性を検証した。さらに供試体と採取コアを用いて環境性も評価した。開発のフローを図-4に示す。

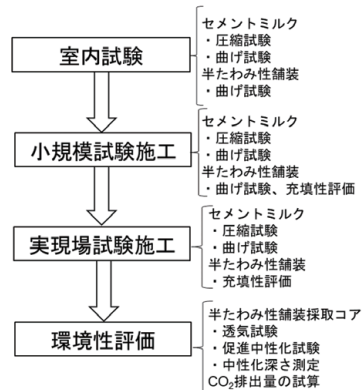


図-4 開発のフロー

3 室内試験での検討

(1) セメントミルクの強度特性

表-1は、開発材料の強度特性を評価した室内試験結果である⁵⁾。結果より、開発材料は半たわみ性舗装の目標値を満足していることが分かる。一方で、従来材料と比較すると、セメントミルクの曲げ強度と圧縮強度が低下している。これは、人工石灰石を増量材としていることで、クリンカ比が低下していることに起因している。そこで、セメントミルクの強度が半たわみ性舗装に及ぼす影響を検討するため、開発材料を使用した半たわみ性舗装の曲げ強度特性について検討を行った。

表-1 室内でのセメントミルクの試験結果（7日養生）

	従来材料	開発材料	目標値
圧縮強度 (MPa)	20.5	17.2	9.8 ~ 29.4MPa
曲げ強度 (MPa)	5.6	4.4	2.0MPa 以上

(2) 充填性と曲げ強度特性

表-2は、開発材料の流動性を評価したフロー試験の結果である。本検討では、セメントミルクの流動性評価で従来用いられるPロートの流下時間と、充填性評価と関連するテーブルフロー値とで比較検討を行った⁶⁾。テーブルフロー試験は、JASS15M-103セルフレベリング材の品質基準に従い、円径50mm×高さ100mmの円柱コーン(内容積約200mL)にセメントミルクを充填し、円柱コーンを引き上げ、横の広がりを測定した。結果より、開発材料はPロートの流下時間で11.41秒であり、目標値を満足している。テーブルフロー値でも開発材料が364mmであり、従来材料に比べて高い充填性を示していることが分かる。既往の研究では、テーブルフロー値が340mm以上で十分な充填性を示すとされていることから、開発材料の充填性は妥当と判断した⁶⁾。

表-2 セメントミルクのフロー試験結果(試験温度 20℃)

	W/B	Pロート流下時間(秒)	φ50×100mm テーブルフロー (mm)	目標値	
				Pロート流下時間(秒)	テーブルフロー(mm)
従来材料	50	10.11	354	9~14	340以上
開発材料	45	11.41	364		

表-3は、半たわみ性舗装の曲げ試験結果(7日養生)である。曲げ強度で見た場合、開発舗装が1.9MPa、従来舗装が1.8MPaであり、開発舗装は従来舗装と遜色ない強度特性を有しているといえる。

表-3 半たわみ性舗装の試験結果(7日養生)

	従来材料	開発材料
曲げ強度(MPa)	1.8	1.9

(3) 開粒度アスファルト舗装

表-4は、本開発で使用した石粉の粒度分布である。本開発では、開粒度アスファルト混合物(13)(空隙率24%)に使用される石粉の50%を人工石灰石に置換し(以下、開発合材)、検討を実施した。表-5は、母体舗装に対し実施したマーシャル安定度試験の結果である。結果より、開発合材は従来合材に比べて若干低い結果となった。しかし、従来合材に比べて

表-4 母体アスファルト混合物で使用する石粉の粒度分布

ふるい目の開き	通常石粉	通常石粉50% 人工石灰石50%	人工石灰石	規格 (石粉)
600μm	100.0	100.0	100.0	100
300	100.0	100.0	100.0	-
150	97.6	98.4	100.0	90~100
75	88.2	92.0	99.8	70~100

表-5 母体アスファルト混合物の性状

	アスファルト量(%)	密度(g/cm ³)	安定度(kN)	フロー(1/100cm)
従来合材	3.5	1.922	3.68	30
開発合材	3.5	1.945	3.47	29

混合物性状には大きな影響はないと判断し、継続して混合物性状を検討した。

(4) 耐流動性

開発材料と開発合材で作製した開発舗装の耐流動性を評価するため、ホイールトラッキング試験を実施した⁷⁾。本検討では、剛性の高い半たわみ性舗装の耐流動性を適切に評価するため、試験速度を従来(42回/分)に比べて低速(21回/分)で実施し、試験を行った。

図-5に示す結果より、従来舗装と比較し開発舗装は高い耐流動性を示している。従来舗装が15,750回/mmであるのに対して開発舗装は31,000回/mmを示し、開発舗装は良好であった。表-2に示すテーブルフローの結果を踏まえれば、開発舗装は従来舗装に比べて高い充填性を示していることから、このことが試験結果に影響したと推察される。

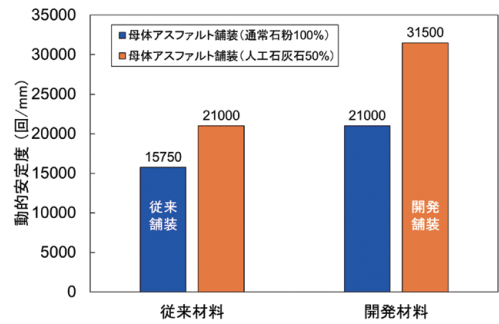


図-5 低速ホイールトラッキング試験の結果

以上より、開発舗装は従来舗装と遜色ない結果を示していることから、実機での試験施工で開発材料の品質と施工性を確認することにした。

4 小規模試験施工での検討

(1) 小規模試験施工の概要

実機グラウトミキサで、開発材料を混合した際の品質と施工性を確認するために、小規模試験施工(1工区の施工面積7m²、2工区舗設)を実施した。施工断面は、母体舗装を開粒度アスファルト舗装(13)(空隙率24%、層厚5cm)とし、従来材料と開発材料を比較した。施工後には、採取したコアにより開発材料の充填性も確認した。施工は2023年9月に実施し、気温は30℃であった。開発材料の施工状況を写真-1に示す。

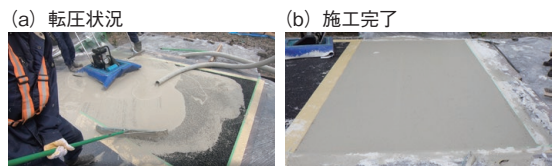


写真-1 開発材料の小規模施工状況

(2) 小規模試験施工の結果

1) 実機製造したセメントミルクの流動性

表-6は、小規模試験施工で採取したセメントミルクのフロー試験結果である。結果より、開発材料はPロート流下時間で目標値(9~14秒)を満足し、室内と同等の性能を示しており、流動性は良好であった。

表-6 セメントミルクのフロー試験結果

	W/B	Pロート流下時間 (秒)	目標値
			Pロート流下時間 (秒)
従来材料	50	9.31	9~14
開発材料	45	11.24	

2) セメントミルクの強度特性

実機製造した開発材料のセメントミルクは、室内試験と同等の結果を示した(表-7)。また、7日養生後の曲げ試験と圧縮試験の結果が目標値を満足することを確認した。半たわみ性舗装の曲げ試験結果からも、開発材料が室内試験結果と同等の品質を有していることを確認した。

表-7 小規模試験施工の試験結果

材料種	試験内容	従来材料	開発材料	目標値
セメント ミルク	圧縮強度 (MPa)	21.5	15.6	9.8~29.4MPa
	曲げ強度 (MPa)	6.4	4.4	2.0MPa以上
半たわみ性 舗装	曲げ強度 (MPa)	1.8 (室内試験結果)	1.8	従来と同等

3) 施工性

施工後に、現場から採取したコアの充填率を測定した。結果、開発材料の充填率は89.4%であり、十分な充填と判断される充填率90%を概ね満足した。目視による充填確認でも、開発材料は従来材料と遜色ない状態だった。作業性も良好であり、施工性は問題ないと判断した。

以上、小規模施工の結果より、開発材料は従来材料と同等の品質と施工性が確保できていると判断し、実現場で試験施工を実施することとした。

5 試験施工での検討

(1) 試験施工の概要

開発舗装の品質、施工性、供用性を確認するため、実現場で試験施工を実施した。施工箇所は4トントラックの停車箇所であり、時期によっては車両が往来する場所である。施工断面は、母体の開粒度アスファルト舗装(13)(空隙率24%、層厚5cm)を従来合材(通常石粉を使用)と開発合材(通常石粉分の50%を人工石灰石粉に置換)とし、半たわみ性舗装の従来舗装と開発舗装を比較するために、2工区を施工した(図-6)。

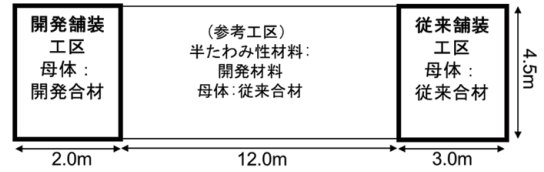


図-6 試験施工箇所の平面図

(2) 試験施工の状況

本試験施工は、通常の半たわみ性舗装と同様の機械編成で実施し、グラウトミキサで半たわみ性舗装用材料の製造と流し込みを行い、敷きならしをゴムレーキで行った後に、浸透は振動ローラーを使用することで、セメントミルクの充填と締め固めを行った。施工は2024年9月に行い、気温は約20℃であった。施工状況を写真-2に示す。

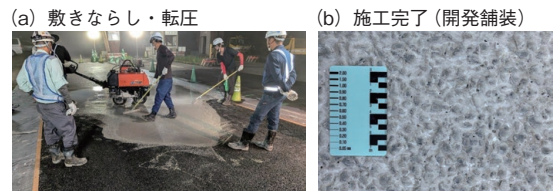


写真-2 試験施工状況

(3) 試験施工の結果

1) 強度特性

表-8に示す結果より、母体アスファルト混合物では、マーシャル安定度試験で従来合材と開発合材とで、試験結果が概ね同等であることを確認した。また、表-9より開発材料の圧縮試験と曲げ試験の結果(7日養生)が、目標値を満足することを確認した。

表-8 母体アスファルト混合物の性状(試験施工)

	アスファルト量 (%)	密度 (g/cm ³)	安定度 (kN)	フロー (1/100cm)
従来合材	3.8	1.958	3.94	32
開発合材	3.8	1.956	3.84	33

表-9 試験施工でのセメントミルクの試験結果(7日養生)

材料種	試験内容	従来材料	開発材料	目標値
セメント ミルク	圧縮強度(MPa)	22.0	18.4	9.8~29.4MPa
	曲げ強度(MPa)	5.9	5.4	2.0MPa以上

2) 充填性

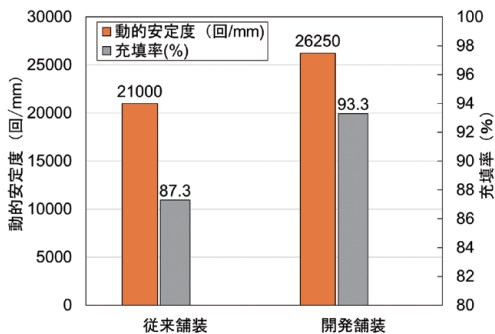
表-10は、試験施工で採取したセメントミルクのフロー試験の結果である。結果より、材料の流動性を示すPロート流下時間では、開発材料は混合後で目標値を満足している。充填性を示すテーブルフロー値でも、既往の研究を参考に設定した目標値(340mm以上)を満足したことから、十分な充填が得られたといえる⁶⁾。

表－10 試験施工でのセメントミルクのフロー試験結果

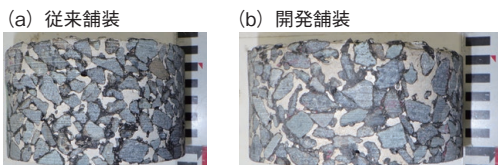
	W/B	経過時間 (分)	温度 (°C)	P ロート 流下時間 (秒)	φ 50×100mm テーブルフロー (mm)	目標値	
						P ロート 流下時間 (秒)	テーブル フロー (mm)
従来材料	50	0	29.3	10.33	341	9～14	340以上
		30	27.7	11.11	313		
		60	26.3	12.13	274		
開発材料	45	0	29.2	10.62	390		
		30	27.1	10.69	392		
		60	25.9	10.77	370		

3) 施工性

施工後に現場切り取りコアを採取し、切り取りコアの充填率を測定した。図－7に示すとおり、開発舗装は目標とする90%を満足している。また、目視で確認した充填確認でも、従来材料と遜色ない結果であった(写真－3)。作業性も良好であったことから、開発材料の実現場での施工性は問題ないと判断した。



図－7 低速ホイールトラッキング試験の結果と充填率(試験施工コア)



写真－3 試験施工後のコア充填状況

4) 耐流動性

開発舗装の施工後における耐久性評価を目的に、現場から採取コア(φ 200mm)を用いて、低速ホイールトラッキング試験を実施した。図－7に示すとおり、開発舗装は従来舗装に比べて耐流動性に優れることが分かる。従来舗装が21,000回/mmであるのに対し、開発舗装は26,250回/mmとなり、従来舗装と同等以上の結果が得られている。開発舗装の充填率を踏まえれば、充填性は良好であり、結果として動的安定度も向上したと推察する。

5) 供用性

試験施工箇所の供用性確認を目的に、施工2か月後に路面性状を測定した。測定結果を表－11に示す。

結果より、開発舗装の供用性は概ね良好といえ

る。すべり抵抗性試験によるBPN値とDFT値では、BPN値で60以上、DFT値で0.47以上であり、開発舗装は従来と遜色ない結果であった。また、わだち掘れ量の測定では、開発舗装は横断形状にほとんど変化が見られない結果だった。

以上より、開発舗装は従来舗装と同等の品質と施工性を確保しており、実現場での供用性も良好だと判断した。

表－11 路面性状測定結果(供用2か月後)

測定項目	測定位置	従来舗装	開発舗装
すべり抵抗値 BPN	L	63	69
	R	65	66
動的摩擦係数 DFT(μ)	L	0.47	0.51
	R	0.47	0.48
わだち掘れ量 (mm)	測定値	5	2

6 環境性評価

(1) 評価の概要

本検討では、開発舗装の環境性を評価するために、供試体による透気試験、採取コアによる中性化深さ測定、試験結果による試算からCO₂排出量を検討した。

(2) 透気試験によるCO₂吸収評価

表－12は、セメントミルクで作製した供試体の透気試験結果である。本検討では、透気試験を行うことで供試体の緻密性からCO₂の吸収を間接的に評価した⁸⁾。結果より、開発材料は従来材料に比べて透気係数が高く、CO₂を大幅に吸収できることが分かる。この結果より、従来材料に比べて緻密性が低いため、若干強度は低位であるが、開発材料は供用中におけるCO₂の吸収が期待できる。

表－12 セメントミルクの透気試験結果

湿潤／乾燥状態	材料種	表面水分率(%)	透気係数(×10 ⁻¹⁶ m ²)
乾燥状態	従来材料	4.9	0.304
	開発材料	5.2	2.580

(3) 中性化深さ測定

半たわみ性舗装では、鉄筋の腐食が課題となるコンクリート舗装と異なり、中性化によるCO₂の吸収・固定が期待できる。そこで開発材料による舗装のCO₂吸収状況を確認するため、屋外採取コアの中性化深さを測定した。

写真－4は、小規模試験施工後に採取したコアに対して実施した促進中性化試験(CO₂濃度：5%、促進期間4週間)の結果である。結果より、従来材料に比べて開発材料の中性化が促進されていることが分かる。従来材料が11.9mmであるのに対して開発材料が23.7mmであり、開発材料は従来材料の2倍

程度の中性化深さであった。写真-5は、施工1年3か月後に採取したコアの中性化状況である。ここでも、開発材料の中性化が従来材料に比べて進んでいることが分かる。

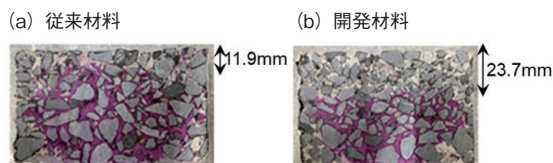


写真-4 促進中性化試験結果

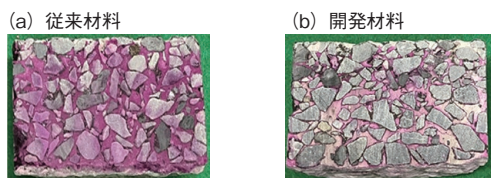


写真-5 施工後採取コアの中性化状況

表-13は、屋外と室内で暴露した従来材料と開発材料の中性化深さの測定結果である。結果より、どちらの環境でも従来材料に比べて、開発材料の中性化が進んでいることが分かる。開発材料は従来材料に対して、3倍程度の中性化深さを示している。屋外暴露した状態でも室内と同様の速度で中性化が進んでおり、開発舗装には供用中により多くのCO₂を吸収する炭素除去が期待できる。

表-13 採取コアの中性化深さ測定の結果

暴露状況	中性化深さ (mm)		備考
	従来材料	開発材料	
屋外	1.75	5.35	施工1年3か月後にコア採取
室内	2.36	7.15	施工直後にコア採取 (室内暴露期間：1年3か月)

(4) CO₂排出量の試算

これまでの室内試験と試験施工の結果を踏まえ、開発舗装のCO₂排出量を試算した。表-14は、従来舗装と開発舗装のCO₂の吸収と固定化を踏まえて試算したCO₂排出量である。結果より、CO₂が固定化された開発材料を使用して練混ぜと流し込みを行い、さらに母体の開粒度アスファルト混合物に人工石灰石を使用した開発合材を施工することで、供用時のCO₂吸収・固定化による炭素除去も考慮

表-14 半たわみ性舗装のCO₂排出量の試算

	CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂ /m ²)		開発舗装のCO ₂ 削減率 (%)
	従来舗装	開発舗装	
開粒度アスファルト混合物	1.33	0.49	9
セメントミルク	7.57	4.35	36
供用時のCO ₂ 吸収・固定化による炭素除去	-0.93	-1.16	13
供用期間(20年)のCO ₂ 排出量の合計	7.97	3.68	58

すると、開発舗装は従来舗装に比べて、CO₂排出量を58%削減できることが試算された。

7 まとめ

CO₂再資源化材料を適用した次世代低炭素型半たわみ性舗装の開発に向けて、室内試験と試験施工を通じて各種検討を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- ① 室内試験の結果から、開発材料はセメントミルクの曲げ強度、圧縮強度、半たわみ性舗装の曲げ強度で目標値を満足した。また、低速で実施したホイールトラッキング試験では、従来舗装に比べて開発舗装は耐流動性に優れることを確認した。
- ② 試験施工より、採取したコアの充填率が目標値を満足していることから、開発舗装の施工性は問題ないと判断した。また、追跡調査の結果より、開発舗装は従来舗装と比較し、同等のすべり抵抗性とわだち掘れ量を示し、供用性は良好であった。
- ③ 環境性評価より、従来舗装に比べて開発舗装は透気係数が高く中性化も進んでいることから、供用中にCO₂を吸収する炭素除去が期待できる。また、実験結果を踏まえた試算から、開発舗装は従来舗装のCO₂排出量を58%削減できることが試算された。

以上より、CO₂再資源化材料を適用して開発した次世代低炭素型半たわみ性舗装は、更なるCO₂削減を図るうえで、有用な技術として期待できることが確認できた。

【謝辞】この成果は、NEDO（(国研)新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託事業（JPNP21023）の結果得られたものです。

【参考文献】

- 1) 環境省：令和6年版環境白書・循環型社会白書・生物多様性白書、2024。
- 2) 国土交通省：カーボンニュートラルに向けた道路分野の貢献について、<<https://www.mlit.go.jp/policy/shingikai/content/001387167.pdf>>、最終閲覧日2025.1.5。
- 3) 住友大阪セメント(株)：多様なカルシウム源を用いた炭酸塩化技術の確立、<<https://www.soc.co.jp/news/63859/>>、最終閲覧日2025.1.5。
- 4) 大泉ら：CO₂を再資源化した人工石灰石を用いたモルタルの水和特性評価、第77回セメント技術大会講演要旨、3117、2023。
- 5) (公社)日本道路協会：舗装施工便覧(平成18年版)、2006。
- 6) 清水ら：半たわみ性舗装用セメントミルクの各種流動性試験方法に関する実験的研究、セメント・コンクリート論文集、71-1、2017。
- 7) (公社)日本道路協会：舗装調査・試験法便覧〔第3分冊〕、2019。
- 8) (公社)日本非破壊検査協会：NDIS3436 コンクリートの非破壊試験-表層透気試験方法-第2部：ダブルチャンパー法、2020。