



製造施工部門 優秀賞

中央混合方式によるCAE路盤材料の全国展開に対応した移動式プラントの開発

前田道路(株) 技術本部 技術研究所

土川 真一

石田 慧士

小田 猛

若狭 雄二郎

"/ "

"/ "

"/ "

北関東支店

1 はじめに

セメント・アスファルト乳剤安定処理路盤材料(以下、CAE路盤材料)の製造は、現位置で既設舗装を破碎してセメントおよびアスファルト乳剤(以下、乳剤)と混合・施工する路上混合方式が一般的であるが、施工条件の制約が多いことなどの課題がある。

この課題の解決策の1つとして、CAE路盤材料の製造専用に建設されるプラント(以下、CAEプラント)を用いた中央混合方式¹⁾の適用が挙げられる。プラントで製造したCAE路盤材料は一般的な路盤材料と同様に運搬・施工できるため、施工条件の制約が少ないことが特徴である。また、骨材の粒度や含水比を正確に管理できるため、路上混合方式よりも安定した品質で製造可能である。

さらに中央混合方式には、CAE路盤材料の骨材として再生路盤材を有効に活用できるという利点もある。図-1に示すように、将来的にインフラの更新に伴う解体工事の増加により、コンクリート発生材が余剰になると予想されており、そのリサイクル材である再生路盤材の需要拡大が求められている²⁾。

一方、中央混合方式の課題として、製造拠点となるCAEプラントの不足により供給可能な地域が限定されるという点が挙げられる。

そこで、定置式プラントが存在しない地域でも中央混合方式によるCAE路盤材料を製造可能にするために、低コストで簡易に搬送・設置可能なCAEプラントとして「移動式CAE製造装置」を開発した。

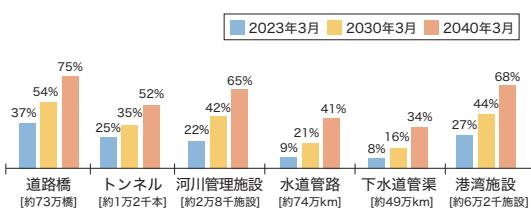
2 既存技術の課題と開発の目標

2-1 CAE路盤材料製造方法の現状と課題

路上混合方式においては、路上破碎混合機やセメント散布機、乳剤ローリ、モーターグレーダなど、多数の機械を組み合わせて製造・施工するため、施工規模や騒音・振動などの問題により施工可能な場所が制約される。また、既設舗装の状態が製品の品質に大きく影響すること、路上ですべての作業を行うため品質のばらつきが大きくなる可能性があることなども課題とされている⁴⁾。

一方、中央混合方式では専用のCAEプラントを建設する必要がある。CAEプラントは定置式が一般的であるが、1つの定置式プラントから供給可能な地域には限りがある。アスファルトプラントのように日本全国に建設することは需要やコストの観点からも現実的ではない。

両方式の課題を解決する方法として、仮設プラントによる製造方法が開発されている。定置式プラントのない地域において、仮設プラントを現場近くの敷地に設置することで高品質のCAE路盤材料を提供する方法である。既存の仮設プラントの例⁵⁾を図-2に示す。これは敷設板の上で稼働可能なため基礎工事が不要で、設置費用の低減と工期の短縮が実現されている。しかしながら、依然として専門業者によ

図-1 建設後50年以上経過する社会資本の割合³⁾

る設置工事を必要とするため、大規模工事でない限り採算が取りにくいという課題がある。

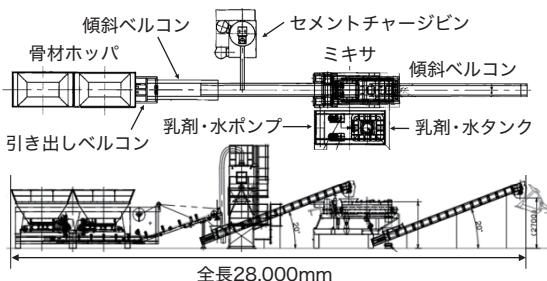


図-2 既存の仮設プラントの例

2-2 移動式CAE製造装置の開発目標

既存の製造装置の特徴を評価し、装置の開発目標を設定した(表-1)。路上混合方式は低成本であるが適用可能な現場に制約があり、定置式と仮設のプラントは品質が優れているが設置コストに課題がある。そこで本開発では、高品質のCAE路盤材料を、日本全国の様々な条件の現場に可能な限り低成本で提供することを目標とした。具体的には、専門業者による工事が不要で、品質を保ちながらもより安価・簡易に設置できるプラント「移動式CAE製造装置」を開発した。

表-1 既存の製造装置の評価および開発装置の目標

製造方法		現場の制約	品質	設置コスト
路上混合方式		△	○	○
中央混合方式	定置式プラント	○	○	×
	仮設プラント	○	○	△
	移動式 CAE 製造装置 (開発装置)	○	○	○

凡例: ○ 非常に良い ○ 良い △ 普通 × 悪い

3 移動式CAE製造装置の開発

3-1 開発フロー

開発のフローを図-3に示す。設定した要件を基に構成機械を選定したのち、品質向上のための措置を行う。品質が評価基準に達したら連続製造試験による動作確認を実施し、問題がなければ実施工に適用する。

3-2 装置の要件とその評価方法

移動式CAE製造装置の開発にあたり、設定した要件を表-2に示す。ここで機能性とは中央混合方式によりCAE路盤材料を製造する機能を指し、品質と製造能力を評価する。可搬性とは装置を安価で自由に移設可能であることを指し、可能な限り簡易・小型な機械を用いることで、搬送と設置に必要なコストを削減する。

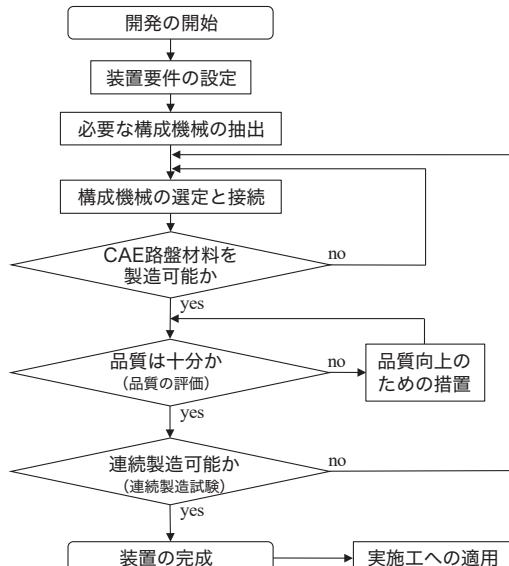


表-2 移動式CAF製造装置の要件

表 E 移動式 CAE 装置設置の要件	
要件	内 容
機能性	中央混合方式で CAE 路盤材料を製造できること
	・品質：高品質の CAE 路盤材料を製造できる
	・能力：十分な製造速度を得られる
可搬性	安価で自由に移設可能であること
	・搬送：トレーラ等で日本全国へ移動できる
	・設置：基礎や敷鉄板のない地面に設置できる

機能性について、中央混合方式によるCAE路盤材料の製造に必要な機械を図-4に示す。大きく分けて材料供給・混合・製品排出の3つの機能で構成され、材料供給機械は各材料に対して必要となる。装置小型化のため計量器は設けず、流量で配合を管理する。機能性の要件を満たすためには、これらの機械を選定し、品質を確保することが必要である。

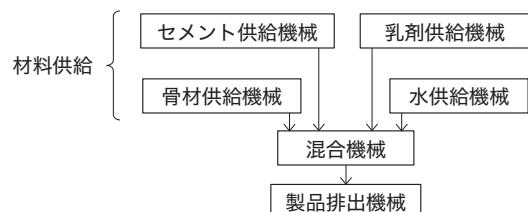


図-4 中央混合方式によるCAE路盤材料の製造に必要な機械

また、可搬性の要件を満たすため、すべての機械をフォークリフトなどの汎用機械で運搬可能な仕様とするか、または走行装置の付属するものを採用する。

本開発では、装置が要件を満たしているかについて、表-3に示す評価方法と基準により判定した。被膜状態の判断基準を写真-1に示す。粗骨材表面が露出しない状態を被膜正常状態とし、骨材表面が目視できる状態を被膜不良状態とみなす。

表-3 要件の評価方法と基準

要件	評価方法	基準
機能性	製造能力は十分か	100 t/h 程度
	製造した材料において乳剤が骨材全体へ被膜しているか	目視確認 (写真-1)
	製造した材料がCAE路盤材料の品質規格 ^④ を満たすか	規格範囲内
可搬性	搬送	搬送に要する機材の量
	設置	搬入完了から製造開始までに要する期間
		仮設プラントより低減



写真-1 CAE路盤材料の被膜状態の判断基準

3-3 混合機械の選定

混合機械として、自走式土質改良機^⑤に着目した。自走式土質改良機は、石灰やセメントなどの固化材を用いた地盤改良を現場で行うための建設機械であり、図-4に示した骨材供給機械、セメント供給機械、混合機械、製品排出機械の4つが一体となったものである。

本開発では、混合の機構が異なる2種類の自走式土質改良機を比較した。候補となる機械の仕様および各機械を用いて試験製造したCAE路盤材料の評価を表-4に示す。

3軸ロータリハンマ式土質改良機は、多様な原料土に対応するためにせん断混合が支配的となる構成であるのに対し、2軸パグミルミキサ式土質改良機は混合性を高めるために、移動を伴う強制混合を行う機構となっている。

表-4 混合機械の候補の仕様と評価

項目	3軸ロータリハンマ式土質改良機	2軸パグミルミキサ式土質改良機
外観		
寸法(mm)	13,190 × 3,180 × 4,600	12,500 × 2,990 × 4,355
液体の投入	専用配管を別途取付け	付属の添加装置あり
製造能力	40 ~ 150 m ³ /h	40 ~ 135 m ³ /h
支配的な混合機構	せん断混合	移動を伴う強制混合
長所	・多段階での混合 ・他目的との汎用性	・高い混合性 ・液体添加装置付属
試験製造したCAE路盤材料の状態		
被膜状況	・乳剤と骨材の分離が顕著 ・全体的に著しい被膜不良	・おおむね被膜正常 ・一部骨材のみ被膜不良
評価	×	○

試験製造の結果は、3軸ロータリハンマ式土質改良機では著しく被膜不良であったのに対し、2軸パグミルミキサ式土質改良機では、一部の粒径の大きな骨材に被膜不良があるものの、おおむね正常に被膜していた。中央混合方式によるCAE路盤材料の製造においては原料土が破碎済みであるため、混合性の高い2軸パグミルミキサ式土質改良機が適していると考えられる。

以上を受け、2軸パグミルミキサ式土質改良機を混合機械として移動式CAE製造装置を構成することとした。

3-4 移動式CAE製造装置の全体構成

2軸パグミルミキサ式土質改良機(以下、土質改良機)を混合機械とした、移動式CAE製造装置の全体構成を図-5に示す。骨材はバックホウ、セメントは付属のクレーンにより土質改良機に投入する。乳剤と水の供給機械はそれぞれタンクとポンプからなり、土質改良機の2軸パグミルミキサ(以下、ミキサ)まで材料を圧送する。土質改良機の内部で、各材料を混合しCAE路盤材料を製造する。

土質改良機の詳細を図-6に示す。骨材はベルコンでホッパからミキサに投入し、セメントはベルコン上にて骨材に添加する。乳剤と水は、土質改良機のミキサ上部にある乳剤・水添加ノズルよりミキサに投入する。ミキサは連続式であり、材料を混合しながら前方に送る構造で、混合の完了した材料をミキサの最前部底面から製品排出ベルコンへと放出し、その先端にて排出する。

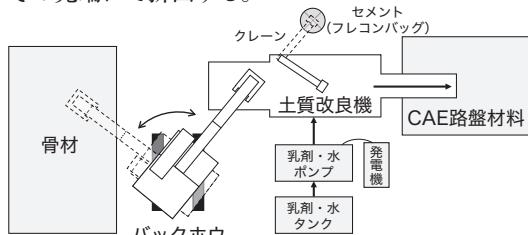


図-5 土質改良機を混合機械とした移動式CAE製造装置の全体構成

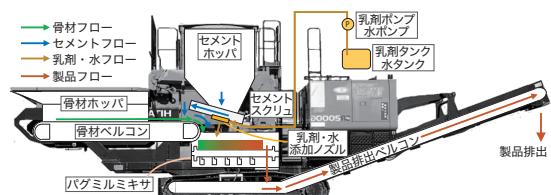


図-6 土質改良機の詳細

4 品質向上のための措置

土質改良機で製造したCAE路盤材料には一部被膜不良があり、特に粒径の大きい骨材においては顕著

著にみられた。CAE路盤材料の製造には通常の地盤改良の場合よりも長い混合時間を必要とするが、土質改良機のミキサは連続式であるため、ミキサの長さにより混合時間が制約され、十分な混合時間を確保することが困難である。そこで、表-5に示すような品質向上のための措置を講じ、高品質のCAE路盤材料を製造できるよう調整した。

表-5 品質向上のための措置

項目	内容
土質改良機の設定	ミキサ回転数の変更
乳剤・水の添加方法の調整	添加位置の変更 吐出方法の変更

4-1 ミキサ回転数の変更

CAE路盤材料の製造中に土質改良機のミキサ内を観察すると、上部の空間で材料が飛び跳ね、乳剤と混合されないまま出口へ送られていた。ミキサの回転数が高すぎることが原因であると考え、表-6に示すように回転数を下げて製造した。その結果、材料がミキサの羽根のある箇所にとどまり、よく混合され被膜状態が改善した。本装置では、標準の回転数として50 rpmを採用した。

表-6 ミキサの回転数による混合状況の差

回転数 (rpm)	ミキサの内部状況	混合状況
78		回転数が高すぎるため、羽根に材料が跳ね上げられ上部で飛散している
50		回転数が適正で、材料が羽根部分にとどまりよく混合されている

4-2 乳剤・水の添加位置の調整

被膜不良が発生する原因として、乳剤・水の添加位置が適切でない可能性が考えられたため、これを変更することで混合性の向上を目指した。検討した添加位置の候補を図-7に示す。

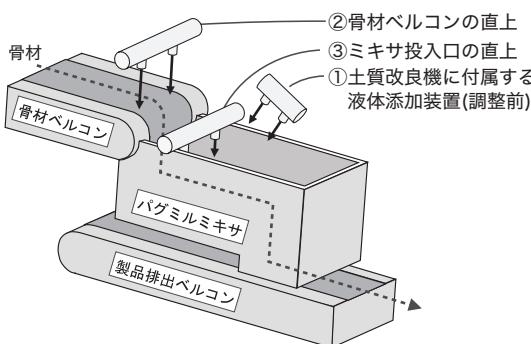


図-7 乳剤・水の添加位置の候補

① 土質改良機に付属する液体添加装置（調整前）

採用した土質改良機には、付属の液体添加装置が

ある。これはセメント系固化材による地盤改良において原地盤の含水比が低いときにセメントの水和反応を促すためのものであるが、ミキサ内中央部で添加するため乳剤・水を含めた混合時間が短くなり、被膜不良となつた。

② 骨材投入ペルコンの直上

混合時間を確保するため、骨材をミキサに投入する前にペルコン上で乳剤を添加した。その結果、乳剤が骨材を通り越してペルコンに付着し、それが垂れてミキサの後部に滞留したことにより、結果としては付属の添加装置による場合よりも被膜不良状態となつた。

③ ミキサ投入口の直上

乳剤がペルコンに付着しないよう、ミキサ投入口の直上に添加装置を配置し、骨材をペルコンからミキサへ投入する箇所で乳剤を添加した。その結果、羽根で持ち上げられた骨材とともに乳剤・水が搅拌されており、被膜不良の軽減が確認できた。

以上の結果を踏まえ、③ミキサ投入口の直上から添加する方法を採用した。

4-3 乳剤・水のノズル形状の変更

乳剤と水はポンプで圧送し、ノズルから吐出する際には圧力の高い状態となっているため、乳剤と水の全量が骨材中にとどまらず、一部が骨材を通過してミキサ底部に滞留し、骨材への乳剤の被膜が不十分なCAE路盤材料が製造されることがあった。そこで、ノズルの吐出口において乳剤と水の吐出時の圧力を下げ、薄く広げることを検討した。ノズル形状の改良内容を表-7に示す。

表-7 ノズル形状の改良内容

項目	①直接吐出	②スプレーノズル	③拡散金具
吐出状況			
拡散性	×	○	○
詰まり	○	×	○
混合性	ミキサ底部に滞留	骨材と良好に混合	

①は改良前の状態である。②はスプレーノズルの形状で乳剤の通り道が小さく、乳剤の詰まりが発生した。そこで③のように、①と同様に吐出された乳剤の経路に梢円状の拡散金具を取り付け、薄く広げながら減圧した。その結果、落下する骨材に乳剤を巻き込みながらミキサに投入できるようになり、粒径の大きい骨材にも乳剤が被膜するようになった。

以上の結果を踏まえ、③拡散金具によって吐出する仕様を採用した。

5 連続製造試験および構内施工

以上に示した品質向上のための措置により、移動式CAE製造装置で十分高品質なCAE路盤材料を製造することが可能となった。次の段階として、本装置により実用的な量のCAE路盤材料を製造可能か確認するため、1時間の連続製造試験を行うとともに、製造したCAE路盤材料を用いて構内施工を行った。製造・施工の概要を表-8に、連続製造でのCAE路盤材料の性状を表-9に示す。

連続製造・構内施工および完成した路盤面の状況を写真-2に示す。連続運転を行っても装置の不具合は発生せず、また製造されたCAE路盤材料は品質も十分であり、碎石による路盤と同じようにベースペーパによって施工可能であることが確認できた。

表-8 製造・施工の概要 表-9 連続製造でのCAE路盤材料の性状

施工面積	120m ² (4m × 30m)	項目	設計値	製造時	規格 ^④
施工厚さ	20cm	一軸圧縮強さ (MPa)	2.05	1.96	1.5 ~ 3.0
製造速度	100t/h	一次変位量 (1/100cm)	23.3	26.7	5 ~ 30
製造時間	1時間	残留強度率 (%)	71.0	77.0	65以上



写真-2 連続製造・構内施工の状況および完成した路盤面

6 移動式CAE製造装置の評価

6-1 機能性の評価：製造能力と品質

移動式CAE製造装置の製造能力を調べるために、被膜正常状態となる製造速度の範囲を確認した。製造量を120t/hまで上げると、被膜正常ではあったが過負荷によりミキサが停止した。一方で製造量を40t/hまで下げるとき、乳剤と水のポンプ流量が安定せず、被膜不良となった。以上の結果を踏まえ、本装置の製造能力は50t/h ~ 100t/hと設定した。100t/hの速度で、被膜正常かつ品質規格を満たすCAE路盤材料が製造できたため、機能性の要件は満たしていると評価できる。

6-2 可搬性の評価：設置の方法と所要時間

可搬性の要件について、関連する仕様を表-10に示す。搬送・設置に必要な機械・人員・工期を仮設

プラントと比較した。工期については、設置開始から製造開始までのプロセスと工程表を表-11に示す。ラフテレーンクレーンが不要となり、人員が10名から2名、工期が9日から1日へと、仮設プラントに比べて大きく低減できているため、可搬性の要件も満たしていると評価できる。

表-10 可搬性に関連する仕様

要件	内 容	仮設プラント	移動式CAE製造装置
搬 送	積込機械	ラフテレーンクレーン	フォークリフト
	運搬機械	トレーラ3台	トレーラ2台
設 置	人 員	専門業者10名	重機オペレータ2名
	工 期	9日	1日

表-11 設置開始から製造開始までのプロセスと工程表

プロセス	対 象	工程表								所要時間
		1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	
① 各機械の配置と接続	土質改良機	■								1.0h
	ポンプ・タンク		■							0.5h
	発電機等			■						0.5h
	配管・配線等				■					1.0h
② 各材料の投入	乳剤・水					■				2.0h
③ 流量のキャリブレーション	骨材・セメント						■			1.0h
④ 試運転								■		1.0h
	合 計									8.0h

以上で機能性と可搬性の要件をすべて満たしていると評価し、移動式CAE製造装置の完成とした。

7 実施工への適用

本装置で十分な品質のCAE路盤材料を製造可能であることが確認できたため、実施工への適用を行った。

施工厚低減と液状化対策のためCAE路盤材料を適用しようとしたが、既設定式プラントから施工現場までは120km程度離れており、CAE路盤材料の可使時間(1 ~ 2時間程度^①)以内には到着できない。そこで移動式CAE製造装置を適用し、現場から16.2km離れた合材工場の敷地の一角にて製造を行った。実製造・施工の概要を表-12に、製造場所の平面図を図-8に示す。

表-12 実製造・施工の概要

工事種別	工場敷地内駐車場舗装
施工日	2024年3月25日 ~ 28日(休工1日を含む)
CAE路盤適用層	上層路盤(厚さ10cm)
施工面積	3,000m ²
製造数量	約750t
目あたり製造量	約250t/日
製造場所と施工現場の間の距離	16.2km

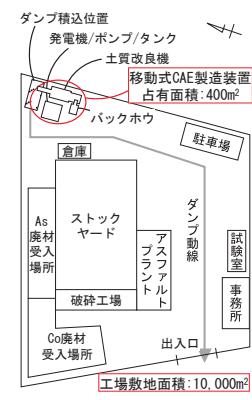


図-8 製造場所の平面図

実製造・施工でのCAE路盤材料の性状を表-13に、実製造・施工の状況を写真-3に示す。製造したCAE路盤材料はダンプトラックに直接積み込む配置とし、全台の混合状態が良好なことを確認した。施工においてはブルドーザやモーターグレーダで敷きならし、コンバインドローラやタイヤローラで転圧した。施工性や仕上がりに問題がないことを確認できた。

表-13 実製造・施工でのCAE路盤材料の性状

項目	設計値	製造時	規格 ⁴⁾
一軸圧縮強さ(MPa)	2.84	2.71	1.5 ~ 3.0
一次変位量(1/100cm)	18.0	28.3	5 ~ 30
残留強度率(%)	75.2	69.8	65以上



写真-3 実製造・施工の状況

8 現場規模によるコスト比較

移動式CAE製造装置は小規模工事への対応を主として開発したため、設置解体時の初期費用は低減されていると予想される。しかしながら骨材投入にショベルのほかにバックホウも必要であるなど、運転費用の面では仮設プラントより不利となるため、大規模工事においては仮設プラントの使用が最適となるケースも考えられる。

そこで、小規模工事が多数発生するケース(以下、ケース1)と、大規模工事が少数発生するケース(以下、ケース2)を設定し、各ケースの製造費用を比較した。いずれのケースにおいても合計24,000tを出荷するが、ケース1では1,000tの工事を24件受注して、都度プラントを設置・解体して製造することを想定しているのに対し、ケース2では24,000tの工事1件を受注し、1つのプラントで製造することを想定している。

仮設プラントによる費用を100%としたときの、移動式CAE製造装置による費用を試算した結果を表-14に示す。ケース1では仮設プラントが100%に対して移動式CAE製造装置が37.2%と、コストを大きく削

表-14 移動式CAE製造装置による製造費用

項目	ケース1	ケース2
施工条件	1工事の数量	1,000t/件
	工事数	24件
	合計数量	24,000t
	日あたり施工量	250t/日
	各工事の日数	4日/件
	製造費用*	37.2%

*製造費用は装置の機械損料、設置解体・点検整備費用、レンタル機械、材料費、オペレータ人件費の合計

減できている。一方、ケース2では移動式CAE製造装置が101.3%と、かえって高額になっている。小規模工事には移動式CAE製造装置が、大規模工事には仮設プラントが適していると結論づけられる。

9 その他の特徴

移動式CAE製造装置は動力として高圧電源を必要としないため、災害時などで電力系統が使用できない場合においても、外部から持ち込んだ燃料と発電機によりCAE路盤材料を製造することができる。特に大規模災害時にはアスファルトプラントなどの機能が停止することがあるため、仮設道路が路盤開放により供用されることも多い。ここに移動式CAE製造装置を適用することで、長期の供用にも対応可能なCAE路盤による仮設道路が施工可能となり、道路開発後の救助作業や復旧作業の効率化に貢献できると考えられる。

10 まとめ

移動式CAE製造装置の開発により、中央混合方式によるCAE路盤材料が日本全国の小規模工事にも適用可能となった。開発成果を以下にまとめる。

- ① 2軸パグミルミキサ式土質改良機を応用することにより、中央混合方式によるCAE路盤材料を、日本全国で製造することが可能となった。
- ② 本装置で製造したCAE路盤材料は、被膜状態や混合状態が均一なものであり、十分高品質である。
- ③ 小規模工事では移動式CAE製造装置、大規模工事では仮設プラントの使用が最適である。

11 おわりに

CAE路盤材料は粒状路盤材料と比べ、施工厚の低減のほか、液状化被害の軽減、凍上抑制といった効果も確認されている⁴⁾。また製造に加熱工程を含まないため、製造時のCO₂排出量が比較的少ないことも特徴である。本開発がCAE路盤材料の普及を促進し、その効果を活用して国土強靭化の一助になると期待される。

【参考文献】

- 1) 清水ほか：環境負荷軽減を考慮した舗装の長寿命化に向けた路盤材料の適用性、土木学会論文集E1、Vol.78-No.2、2023
- 2) 全国解体工事業団体連合会：循環経済に向けた解体工事業界を取り巻く現状・課題・取組等、第17回建設リサイクル推進施策検討小委員会配布資料3-4、2024.7
- 3) 国土交通省：建設後50年以上経過する社会資本の割合、インフラメンテナンス情報-社会資本の老朽化の現状と将来
- 4) 日本道路協会：舗装再生便覧(令和6年版)、2024.3
- 5) 清水ほか：CO₂排出量低減を考慮したセメント・アスファルト乳剤安定処理(CAE)混合物の適用性に関する検討、舗装、Vol.59-1、2024.1
- 6) 日本建設機械化協会：施工部会 建設副産物リサイクル部門：自走式土質改良機技術資料(修正版)、2010.2.3