

焼却主灰の細骨材利用に関する基礎的研究

藤沼 智洋 藤倉 裕介

概 要

一般廃棄物の焼却後に発生する焼却灰の有効利用が望まれており、溶融スラグおよびセメント原料化等が再利用の一形態となっているが、筆者らは、焼却灰の中でも大きな径を有する焼却主灰の建設資材への有効利用を目標としている。一方、焼却主灰を建設資材に利用する際に、重金属類の不溶化処理を図る必要がある。そこで、本研究では炭酸化による不溶化処理を施した焼却主灰を細骨材の代替材として混入させたモルタルを試験体として、重金属類の溶出、フレッシュ性状、力学的性状、微細構造の4項目について基礎的な試験を実施した。

試験結果から、焼却主灰の混入によって、圧縮強度の低下および粗大な微細構造が形成されていることなどが確認された。また、未処理の焼却主灰に比べて、炭酸化処理させた焼却主灰を混入させると、相対的に圧縮強度が高くなることが確認され、炭酸化処理による力学的性状へのメリットの可能性が見出せた。

Basic study on utilization of fine aggregate of incinerated bottom ash

Abstract

Effective use of incineration ash derived from general waste is desired, and we are aiming for effective use of incineration bottom ash, which has a large diameter, as a construction material.

Generally, when incineration bottom ash is used as a construction material, it is necessary to insolubilize heavy metals. Therefore, in this study, we made a mortar in which incinerated bottom ash that had been insolubilized by carbonation was mixed as a substitute for fine aggregate, and conducted basic experiments on elution of heavy metals, fresh properties, mechanical properties, and microstructure.

From the test results, it was confirmed that the compression strength was reduced, and a coarse fine structure was formed due to the mixing of incinerated bottom ash.

In addition, it was confirmed that the compression strength was relatively high when carbonated incinerated bottom ash was mixed as compared with untreated incinerated bottom ash, which could be beneficial to the mechanical properties through carbonation treatment.

キーワード:	焼却主灰、炭酸化処理、 モルタル、圧縮強度、微細構造
--------	-------------------------------

§1. はじめに

2000年に循環型社会形成推進基本法の施行以来、廃棄物削減やリサイクル率の向上により、廃棄物全体の最終処分量は減少していき、1999年には8.5年であった最終処分場の残余年数は2017年には21.8年と大きく改善し、一定の成果が挙げられている¹⁾。一般廃棄物の最終処分量のうち、焼却灰の占有率は70%以上であるが、図1に示すように、焼却灰のリサイクル率は30%未満に留まっている²⁾ため、今後の廃棄物関連の課題解決を図るうえでは、焼却灰のリサイクルが肝要になるといえる。

焼却灰の主なリサイクル技術として、熔融スラグ利用やセメント原料化があるが、製造上のエネルギーの消費やその他の諸問題を抱えており、今後、リサイクル率を更に向上させるためには、上記の2項目に加え、建設資材へ利用拡大を図ることも有用であると考えられる。

焼却灰のうち、焼却主灰を建設資材としてリサイクルを図るためには、鉛などの重金属類の不溶化が必要になる。不溶化処理の手法としては、焼却灰の炭酸化に着目した研究事例^{3~5)}は多数あり、フジタも散水と炭酸ガスの通気処理を兼備えた独自の炭酸化処理システムを開発した⁶⁾。

当社の炭酸化処理システムを用いた研究内容としては、焼却灰自身の不溶化に焦点を当て、その有効性及び最適条件等についての検討を重ねてきたが、炭酸化処理した焼却灰をコンクリートやモルタル等の建設資材に適用した研究はこれまでにない。そこで、本研究では、焼却主灰を骨材利用するための基礎検討として、当社の炭酸化処理システムの原理によって炭酸化処理した焼却主灰をモルタルの細骨材として混入し、その混入および炭酸化処理が諸性状に及ぼす影響について確認した。

§2. 焼却主灰の炭酸化処理の概要

2.1 炭酸化処理装置の概要

本研究で使用した炭酸化処理装置(以下:本装置)は、充填箱(L:1195mm×W:750mm×H:500mm)および炭酸ガスボンベで構成されている。充填箱の下部には、炭酸ガスの通気口を設けており、通気口から炭酸ガスを注入することで、充填箱の下部より、焼却主灰の炭酸化を図る機構となっている。

2.2 炭酸化処理の設定条件

本研究における焼却主灰の炭酸化処理の設定条件を表1に示す。なお、本研究では、本幡らの研究報告³⁾で示された焼却灰の炭酸化処理に適した含水率を参考に、含水率を10~20%の範囲に調整した。

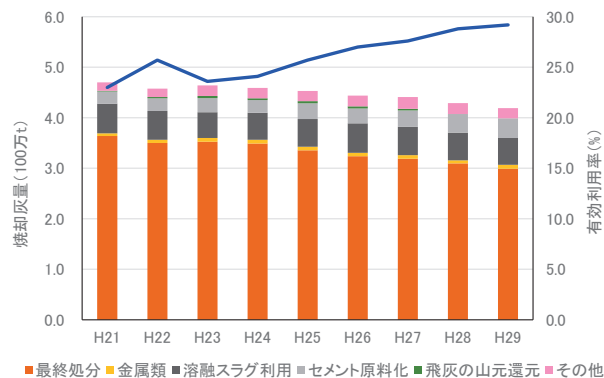


図1 焼却灰の最終処分とリサイクルの推移

表1 焼却主灰の炭酸化処理条件

焼却主灰			炭酸ガス		
充填量	充填高さ	含水率	濃度	通気量	通気時間
124 kg	270 mm	17.47%	100%	20 L/min	5 h

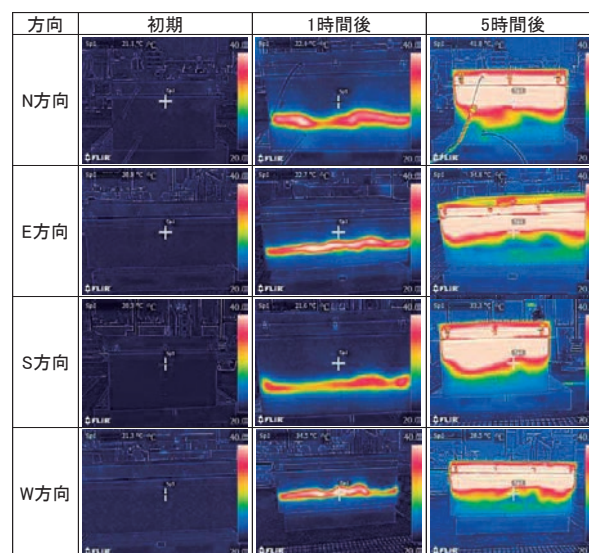


図2 炭酸化処理の進行状況

2.3 炭酸化処理の実施工程

本研究では、以下の工程を経て、焼却主灰の炭酸化処理を実施した。なお、本研究は基礎検討の段階なので、複合的な因子による影響を捉えることは困難であると考え、散水処理による影響を除くため、散水機能は用いず、炭酸ガスの通気処理のみを適用する方針とした。

- 均一な充填高さになるように焼却主灰を充填箱に充填させた後、充填箱を蓋で密閉する。
- 表1の設定条件で炭酸ガスを供給して、充填箱の下部から一様に炭酸化を進行させる。
- 炭酸化の進行状況については、図2に示すように、充填箱の表層の温度を4方向(N、E、S、W)からモニタリングする手法で管理した。

§3. 試験概要

3.1 試験要因と水準

本研究の試験要因と水準を表2に示す。試験要因は、水セメント比、焼却主灰の炭酸化処理の有無、細骨材の容積に対する焼却主灰の置換率の3項目とした。

3.2 使用材料

本研究の使用材料を表3、使用した焼却灰の化学組成を表4にそれぞれ示す。本研究では、細骨材の代替材として焼却主灰を用いることを趣旨としていることから、硬質砂岩砕砂の粒度分布と焼却主灰の粒度分布を揃えて使用した。焼却主灰の表乾密度及び吸水率はJIS A 1109(細骨材の密度及び吸水率試験方法)に準じて作成した焼却主灰の試料を表面乾燥飽水状態と捉えたうえでそれぞれ求めた。

3.3 モルタル調合およびモルタルの製作方法

モルタルの調合を表5に示す。本研究は、単位容積中における細骨材の代替材として、焼却主灰を多用するための基礎検討である。そこで、細骨材(S+NAまたはS+CA)の単位容積量を500 L/m³に固定し、表2の実験要因に従い、各材料の単位容積量を定めた。モルタルの製作方法は、JIS R 5201に則った。

3.4 試験項目および試験方法

本研究における試験項目および試験方法を表6に示す。本研究では、有害性(重金属類の溶出)、フレッシュ性状、強度性状、微細構造の4項目を試験項目とし、焼却主灰の混入による影響や傾向を把握するための各試験を行った。

(1)有害性

有害性については、環告46号試験に準拠して、事前に振動ミルによって、2mmアンダーに粉碎した試料を対象に鉛、カドミウム、六価クロムの溶出量を計測した。なお、検液分析についてはJIS K 0102に従った。

(2)フレッシュ性状

JIS R 5201に則って、0打および15打での各フロー値を測定した。また、空気量については、JIS A 1128に準拠し、空気室圧力方法によって計測した。

(3)強度性状

強度性状試験では、φ 50×100mmの試験体を作製し、アムスラー型万能試験機を用い、圧縮強度試験を行った。なお、養生については、試験体作製の翌日に脱型し、材齢28dまで標準養生を施した。

(4)微細構造

微細構造については、材齢28dで水和反応をアセトンで停止し、110℃で24時間の乾燥後、約5mm角に加工した

試料の細孔径分布を水銀圧入式ポロシメータで計測した。本計測における算定条件としては、Washburnの式により、水銀の表面張力を0.484N/m、接触角を130°で算出して、おおよそ3nm～327μm(圧入入力では413MPa～0.0038MPa)の測定範囲で計測した。

表2 試験要因および水準

要因	水準
水セメント比	45%, 50%, 55%
焼却主灰の炭酸化処理	無し, 有り
焼却主灰の置換率(対細骨材容積)	0%, 50%

表3 使用材料

記号	種類
W	上水
C	普通ポルトランドセメント (密度: 3.16 g/cm ³)
S	硬質砂岩砕砂 (表乾密度: 2.65 g/cm ³ , 吸水率: 0.62 %, F.M.: 2.85)
NA	焼却主灰(未処理) (表乾密度: 1.69 g/cm ³ , 吸水率: 36.36 %, F.M.: 2.85)
CA	焼却主灰(炭酸化処理) (表乾密度: 1.92 g/cm ³ , 吸水率: 20.18 %, F.M.: 2.85)

表4 焼却主灰の化学組成

試料名	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	cl	ig. loss
NA	18.01	13.67	6.09	30.04	2.32	3.34	1.72	17.06
CA	18.61	13.04	6.63	28.45	2.28	3.26	1.63	18.81

表5 モルタルの調合

名称	W/C	置換率 (Vol.%)	焼却主灰 種類	単位容積 [L/m ³]			
				W	C	細骨材	
						S	A
45-00-NNM	45%	0%	—	294	206	500	0
45-50-NAM		50%	NA			250	250
45-50-CAM		50%	CA			250	250
50-00-NNM	50%	0%	—	306	194	500	0
50-50-NAM		50%	NA			250	250
50-50-CAM		50%	CA			250	250
55-00-NNM	55%	0%	—	317	183	500	0
55-50-NAM		50%	NA			250	250
55-50-CAM		50%	CA			250	250

W: Water C: Cement S: Sand A: Ash (NA or CA)

表6 試験項目および試験方法

試験項目	測定項目	試験方法
有害性	Pb, Cd, Cr(VI)の溶出量	環告46号試験
フレッシュ性状	0打および15打フロー値	JIS R 5201
	空気量	JIS A 1128に準拠
強度性状	圧縮強度	JIS A 1108に準拠
微細構造	細孔径分布	水銀圧入法

§4. 試験結果および考察

4.1 重金属類の溶出

環告 46 号試験による各物質の溶出結果を表 7 に示す。本試験の範疇では、一部を除き、各物質に対する各基準を満たしていたことが確認された。以下、本試験で確認された物質ごとの溶出傾向をそれぞれ示す。

鉛については水セメント比 45%と 50%の試験体では、おおむね同等であったが、水セメント比 55%においては、炭酸化処理焼却主灰を混入したモルタル(以下 CAM)が未処理焼却主灰を混入したモルタル(以下 NAM)の 4 倍相当の溶出量であった。鉛の溶出量については、炭酸化処理によって溶出抑制効果があるという知見⁵⁾に鑑みると、本研究中では明らかにされていないが、何らかの因子が作用した可能性があり、別途、検証を重ねる必要がある。

カドミウムについてはすべての試験体で定量下限値を下回っていた。

六価クロムについては水セメント比が高くなるにつれ、溶出量の増大傾向が確認された。また、焼却主灰の種類別に比較すると、NAM の溶出量は CAM の約 2.5~3.5 倍の溶出量であった。

4.2 フレッシュ性状

(1) 焼却主灰の混入が及ぼすフロー性状への影響

図 3 に示すように、いずれの水セメント比においても、無混入モルタル(以下 NNM)と比べ、NAM と CAM のフロー値は低減傾向を示した。とりわけ、NAM よりも CAM のフロー値が低かった。

(2) 焼却主灰の混入が及ぼす空気量への影響

図 4 に示すように、いずれの水セメント比においても、NNM と比べ、NAM と CAM の空気量は多く、とりわけ、CAM よりも NAM の空気量が多かった。

4.3 圧縮強度および細孔径分布

(1) 圧縮強度

材齢 28 日の圧縮強度を図 5 に示す。いずれの試験体水準においても、水セメント比の増大に伴い、圧縮強度が低下しており、一般的な傾向と同様であった。また、同一の水セメント比では、NNM の圧縮強度に対して、NAM は約 40~50%、CAM は約 60%であり、相対的に空気量の多い NAM の圧縮強度が最も低かった。焼却主灰の混入による圧縮強度の低下の主要因としては、田浦らが指摘している微細構造のポーラス化⁷⁾に加え、大久保らが指摘している焼却主灰の成分(Na₂O 等)に起因する膨張現象⁸⁾なども考えられる。

表7 環告46号試験の結果

名称	W/C	置換率 (Vol.%)	焼却主灰種類	Pb (mg/L)		Cd (mg/L)		Cr(VI) (mg/L)	
				基準	分析結果	基準	分析結果	基準	分析結果
45-50-NAM	45%		NA	0.01以下	0.009	0.01以下	<0.001	0.05以下	0.037
45-50-CAM			CA		0.009		<0.001		0.015
50-50-NAM	50%	50%	NA	0.01以下	0.009	0.01以下	<0.001	0.05以下	0.049
50-50-CAM			CA		0.007		<0.001		0.014
55-50-NAM	55%		NA	0.01以下	0.008	0.01以下	<0.001	0.05以下	0.053
55-50-CAM			CA		0.033		<0.001		0.019

※ “<”印は定量下限値未満を示す

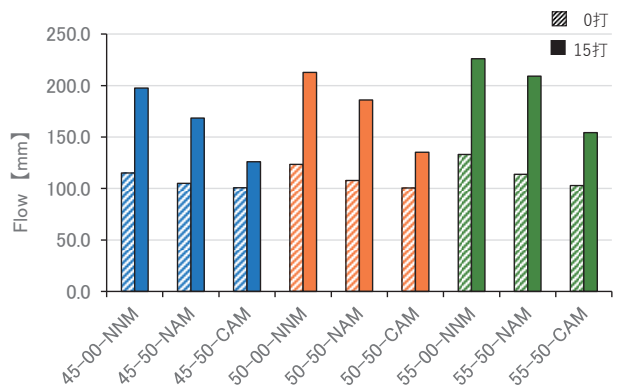


図3 フロー値の測定結果

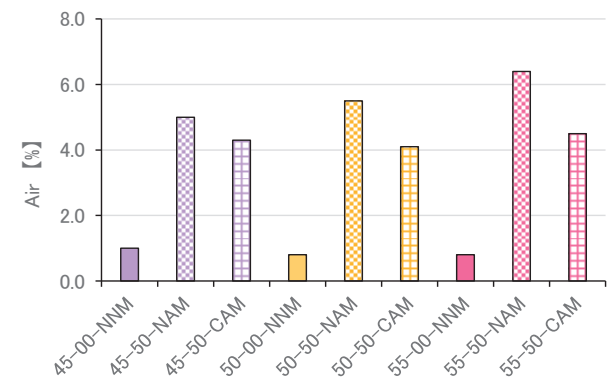


図4 空気量の測定結果

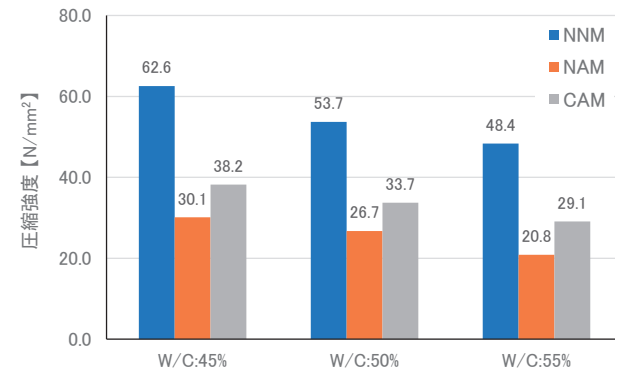


図5 圧縮強度試験の結果(材齢28日)

(2) 細孔径分布

本研究では、焼却主灰の混入が及ぼした強度低下の一要因と考えられる、微細構造のポーラス化に着目して、微細構造と圧縮強度の関係性等について考察した。

微細構造の分析結果として、細孔径分布を表 8 および図 6~8 に示す。表 8 に示すように、水セメント比 55% の NNM、NAM、CAM の全細孔容積および細孔率は、水セメント比 45% に比べ、いずれも小さく、水セメント比 55% の試料は、水セメント比 45% の試料に比べ、粗大な微細構造が形成されたといえる。また、同一の水セメント比における全細孔容積と細孔率の大小関係は、いずれも $NNM > CAM > NAM$ であった。すなわち、焼却主灰の混入に伴い、粗大な微細構造が形成されており、微かに、未処理焼却主灰を混入させた試料の微細構造が粗大であったといえる。一方、微細構造中における細孔直径は、広範囲に分布しており、内川らの研究報告⁹⁾にて、細孔直径が $0.05\mu\text{m}$ 以上の範囲と圧縮強度には高い相関があると指摘されている。図 6 や図 7 の積算細孔容積の結果を横軸の目盛のオーダーで捉えれば、NAM と CAM の全細孔容積の差は 10% 未満であるが、図中の網掛では、比較的、大きな差異が生じていることがわかる。すなわち、圧縮強度の差異は、網掛範囲に依存している可能性がある。そこで、本研究では、内川らが指摘している $0.05\mu\text{m}$ 以上の範囲も考慮に入れて、図 8 に示すように、

各試料における細孔率の内訳を細孔直径別に 5 つの群に区分し、以降の考察を行った。

(3) 細孔径分布と圧縮強度の相関性

図 8 の区分ごとに、積算細孔容積と圧縮強度について、回帰分析を行った結果を図 9 に示す。本研究の範囲では全細孔容積と圧縮強度の寄与率が最も高かった。

一方、 $0.05\mu\text{m}$ 未満、 $0.05\mu\text{m}$ 以上、 $0.10\mu\text{m}$ 以上、 $1.00\mu\text{m}$ 以上の 4 区間で各々の回帰分析を行ったところ、内川らの研究報告⁹⁾同様、 $0.05\mu\text{m}$ 未満に比べ、 $0.05\mu\text{m}$ 以上の範囲において高い寄与率が確認された。また、焼却主灰の混入によって、微細構造が粗くなった点を考慮し、 $0.05\mu\text{m}$ 以上の範囲のうち、 $0.10\mu\text{m}$ 以上および $1.00\mu\text{m}$

表8 微細構造の分析結果

名称	W/C	置換率 (Vol%)	焼却主灰種類	微細構造の諸データ			
				全細孔容積	細孔直径 0.05 μm 以上の全細孔容積	細孔直径 0.10 μm 以上の全細孔容積	細孔率
45-00-NNM	45%	0%	-	0.0680 mL/g	0.0229 mL/g	0.0131 mL/g	14.3 %
45-50-NAM		50%	NA	0.1397 mL/g	0.0532 mL/g	0.0372 mL/g	25.1 %
45-50-CAM		50%	CA	0.1295 mL/g	0.0355 mL/g	0.0299 mL/g	23.4 %
55-00-NNM		0%	-	0.0854 mL/g	0.0333 mL/g	0.0151 mL/g	17.3 %
55-50-NAM	55%	50%	NA	0.1589 mL/g	0.0697 mL/g	0.0472 mL/g	27.2 %
55-50-CAM		50%	CA	0.1499 mL/g	0.0420 mL/g	0.0310 mL/g	26.2 %

※ W/C:50%の試験体については試料作製の都合により微細構造の分析を割愛した

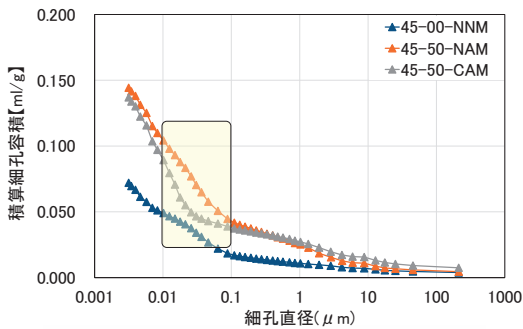


図6 積算細孔容積(W/C: 45%)

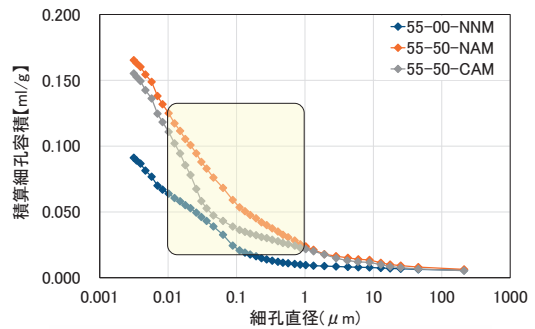


図7 積算細孔容積(W/C: 55%)

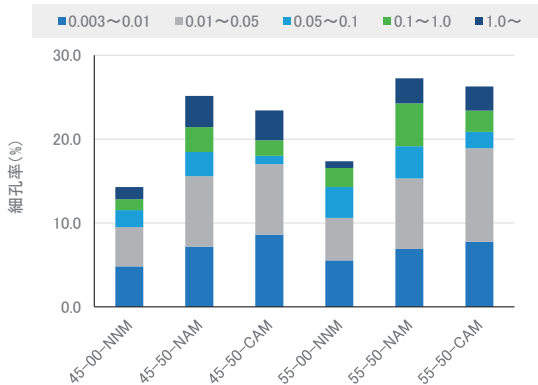


図8 細孔率の分布

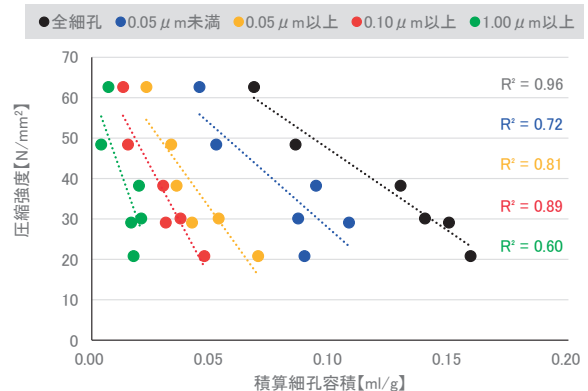


図9 積算細孔径分布と圧縮強度の関係

以上の範囲に限定し、各々の回帰分析を行ったところ、 $0.05\mu\text{m}$ 以上での寄与率よりも、 $0.10\mu\text{m}$ 以上の範囲での寄与率が高かった。一方、 $1.00\mu\text{m}$ 以上の範囲になると、寄与率が低下した。本試験結果より、一般的なモルタルの圧縮強度に寄与している $0.05\mu\text{m}$ 以上の細孔直径群よりも焼却主灰を混入したモルタルについては、より粗大な細孔直径群での推定の方が幾分か有効であると推察される。

§5. まとめ

本研究では、焼却主灰の細骨材利用に向けた基礎的な検討として、モルタルに焼却主灰を混入して、焼却主灰の混入および炭酸化処理が及ぼす影響について確認した。本研究の範疇で得られた知見は以下の通りである。

- 重金属類の溶出に関しては、水セメント比 45%および 50%のモルタル試料からは、焼却主灰の処理の有無に関わらず、重金属類(鉛、カドミウム、六価クロム)の環告 46 号の溶出基準をいずれも満たしたが、水セメント比の増大や焼却主灰の炭酸化未処理に伴って、溶出量が増大する傾向も一部確認された。
- フレッシュ性状に関しては、無混入に比べ、焼却主灰を混入させるとフローの低減および空気量の増大傾向がそれぞれ確認された。また、未処理焼却主灰に比べ、炭酸化処理焼却主灰を混入した場合、フロー値および空気量はやや低下した。
- 圧縮強度および微細構造に関しては、無混入に比べ、焼却主灰を混入させると、粗な微細構造が形成されて、圧縮強度も低下した。また、未処理焼却主灰に比べて、炭酸化処理焼却主灰を混入した場合、フレッシュ時の空気量が少なかったこともあり、圧縮強度が高まったと推察される。
- 圧縮強度と細孔径分布の相関性については、 $0.10\mu\text{m}$ 以上の範囲の細孔径と圧縮強度の相関性が高いことが確認された。

本研究によって、焼却主灰の混入および炭酸化処理がモルタルの諸性状に及ぼす影響や大まかな傾向などは、おおむね捉えられた。しかしながら、本試験の範疇では、元の焼却主灰が1種類であるため、今後は物理的・化学的性質の異なる焼却主灰も比較対象とした追加実験を行い、焼却灰自身の形状や結晶構造等の違いなどの観点からの考察なども含め、モルタルの諸性状に及ぼすメカニズムの解明が必要になる。

参考文献

- 1) 経済産業省:循環経済ビジョン2020、2020.5
- 2) 肴倉宏史:一般廃棄物焼却灰のリサイクル 意義と課題、東京都環境科学研究所公開研究発表、pp.26、2019.12
- 3) 本幡照文、李政準、張瑞娜、崎田省吾、島岡隆行:焼却灰有効利用のための炭酸化による重金属の不溶化に関する基礎的研究、環境工学研究論文集、第41巻、pp.459-467、2004
- 4) 齊藤啓輔、高橋史武、江藤次郎、島岡隆行:炭酸化に伴う都市ごみ焼却灰中の鉛の不溶化因子の解明、土木学会西部支部研究発表会、pp.929-930、2008.3
- 5) 崎田省吾、西村和之:都市ごみ焼却灰の炭酸化処理における物理的溶出抑制効果の検討、第25回廃棄物資源循環学会研究発表会講演原稿2014、pp.365-366、2014
- 6) 久保田洋、繁泉恒河、山田裕己、野口俊太郎、増田圭司:FAST-BOXシステムの開発、フジタ技術研究報告、第53号、pp.85-90、2017
- 7) 田浦靖知、添田政司、大竹武史:物理選別処理した都市ごみ焼却灰の骨材への適用性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.25、No.1、pp.1379-1384、2003
- 8) 大久保全陸、浦川洋介:ゴミ焼却灰を混入したモルタル・コンクリートの圧縮強度特性等に関する基礎的研究、日本建築学会構造系論文報告集、第443号、pp.1-9、1993.1
- 9) 内川浩、羽原俊祐、沢木大介:混合セメントモルタル及びコンクリートの硬化体構造が強度発現に及ぼす影響、セメント・コンクリート論文集、No.44、pp.330-335、1990

ひとこと

人々が生活を営む以上、ゴミの問題が尽きることはありません。我々が毎日のように排出している日常ゴミを建設資材へと有効活用するための技術開発にこれからも尽力していきたいと考えます。

