

石炭灰を大量に用いたセメント硬化体の CO₂ 排出量削減技術の検討

安藤ハザマ 正会員 ○高木 亮一, 正会員 林 俊斉
新潟大学 神村 幸弥, 正会員 斎藤 豪

1. はじめに

現在、地球規模での脱炭素化の流れが加速しており、二酸化炭素排出量の少ないコンクリートとして、セメントをフライアッシュ、石灰石、高炉スラグ、粘土などの補助セメント系材料（以下、SCMs）に部分的に置き換える検討が進められている¹⁾。本稿では、石炭火力発電所から産出される石炭灰（JIS規格外のフライアッシュ原粉）（以下、FA）を大量に有効活用するアッシュクリート（以下、AC）の技術²⁾について、セメントをSCMsに置き換えることで材料由来のCO₂排出量を削減する技術について検討した結果について報告する。

2. 試験概要

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1に示す。ACは強度促進の観点から海水及び石膏を、有害元素溶出抑制の観点から高炉セメントB種及び石膏を用いており、本試験ではこの配合（FA-BB-GS）を基準とした。CO₂排出量評価に用いる各材料のCO₂排出量原単位はコンクリートの環境負荷評価（その2）の値³⁾を参考としたが、記載の無かった消石灰のみはIDEAの値⁴⁾を採用した。

表-1 使用材料

材料名称	記号	密度 (g/cm ³)	CO ₂ 排出量 原単位 (kg-CO ₂ /t)	備考
水	W	1.03	—	人工海水
セメント	BB	3.04	457.7	高炉セメントB種
石炭灰	FA	2.24	17.9 ^{*1}	火力発電所産 石炭灰原粉
バイオマス灰	BFA	2.47	17.9 ^{*2}	バイオマス灰(飛灰)
高炉スラグ微粉末	BS	2.90	24.1	比表面積 4000 cm ² /g
消石灰	CH	2.24	1.04	特号消石灰
石膏	GS	2.15	17.9 ^{*3}	火力発電所産 脱硫石膏

配合およびフレッシュ性状を表-2に示す。基準配合に対し、FAをバイオマス灰（以下、BFA）に置換して石膏の有無を検討した水準（W/C=288%）、セメントを全量SCMsに置換して検討した水準（W/C=0%）を実施した。本試験では単位水量と石膏量は固定とし、セメントの容積分を他の材料に置換したため、フレッシュ性状は配合によって異なるが調整は行わなかった。

※1：本試験では分級処理を実施していない原粉であるがフライアッシュの値とした
※2：バイオマス発電所の炉は循環流動層のため、石炭火力発電所と同等と仮定した
※3：石炭火力発電所産の脱硫石膏を用いているためフライアッシュの値とした

表-2 配合およびフレッシュ性状

配合 No.	W/C (%)	W/P (%)	単位量(kg/m³)							Vf20 (mm)
			W	BB	灰(SCMs)		SCMs			
					FA	BFA	BS	CH	GS	
FA-BB-GS	288	35.6	447	155	1066	0	0	0	36	278
FA-BB					1101				0	0
BFA-BB-GS		33.1			0	1160			36	195
BFA-BB						1197			0	193
FA-BS-GS	0	35.8	447	0	1066	0	148	0	36	291
FA-CH-GS		36.8			1066		0	0		114
FA		36.8			1216	0	0	0	0	301
BFA		33.8			0					1324

2.2 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-3に示す。試験体への打込み後、材齢7日までは封緘養生とした。材齢7日で脱型し、それ以降は所定の材齢まで標準水中養生を実施した。

表-3 試験項目および試験方法

項目	試験方法
Vf20	テーブルトッププレート(以下、TB)の上でフローコン（以下、FC）(JIS A 5201)に混練物を詰め、FCを静かに鉛直に引き上げ、TBを20秒加振させた時の直行する広がり2点を1mm単位で測定した。
圧縮強度	JIS A 1108, 試験体寸法：φ5×10cm, 試験材齢：7, 28, 91日
空隙構造	水銀圧入ポロシメータ, 試験材齢：7日, 28日

3. 試験結果

3.1 圧縮強度試験および空隙構造

圧縮強度試験およびCO₂排出量検討結果を表-4に、圧縮強度試験結果を図-1に示す。基準配合に対しFAをBFAに置換した場合、長期強度が高くなった。特に石膏を使用しない場合でその

キーワード 石炭灰, バイオマス灰, CO₂排出量, SCMs

連絡先 〒305-0822 茨城県つくば市荻間 515-1 安藤ハザマ 技術研究所 TEL 029-858-8813

表-4 圧縮強度試験および CO₂ 排出量検討結果

配合 No.	表－2 配合 CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)A	圧縮強度 (N/mm ²)			材齢 28 日 圧縮強度に相当する AC の推定配合					CO ₂ 排出量 削減率(%) (B-A)/B
					単位量 (kg/m ³)				CO ₂ 排出量 (kg-CO ₂)B	
		材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 91 日	W	BB	FA	GS		
FA-BB-GS	90.7	9.9	17.4	23.9	—	—	—	—	—	0 (基準)
FA-BB	91.3	7.8	13.3	19.6	442	121	1086	37	75.5	-21.0
BFA-BB-GS	92.4	6.7	21.3	38.3	445	177	1040	35	100.3	7.9
BFA-BB	91.7	7.6	33.0	46.7	451	282	953	32	146.7	37.5
FA-BS-GS	23.3	7.7	15.5	20.1	443	138	1073	36	83.0	71.9
FA-CH-GS	19.8	1.7	7.5	14.2	439	74	1126	38	54.7	63.7
FA	—	0.3	0.9	1.2	—	—	—	—	—	—
BFA	23.7	1.9	12.4	16.1	442	113	1092	37	71.9	67.1

傾向が顕著で、材齢 28 日においても高い圧縮強度となっていた。基準配合に対しセメントを全量 SCMs に置換した場合、材齢 28 日で FA-BS-GS では基準配合とほぼ同等、FA-CH-GS では約 4 割の強度が発現していた。FA ではほとんど強度発現が確認されなかったが、BFA では基準配合に対し、圧縮強度は材齢 28 日および 91 日で約 7 割となっていた。

細孔直径と細孔容積の関係を図-2 に示す。FA よりも BFA を使用したほうが小さい空隙径が増えていた。BFA は材齢の経過とともに 50nm 以上の細孔量が減少したことで強度が増加し、更に小さい径の空隙が増加していたため、C-S-H の生成量が増加しているものと考えられた。

3. 2CO₂ 排出量

AC は FA を大量に用いるために単位水量を抑えており、硬練りのペーストを振動締固めによって硬化させたものである²⁾。更に高炉セメント B 種を用いているため、圧縮強度が同等のコンクリート (W/C=84%, s/a=53%, 単位水量 160 kg, CO₂ 排出量=151.4 kg-CO₂) と比べると、基準配合の CO₂ 排出量は約 6 割程度となる。

本検討ではこの基準配合から更に CO₂ 排出量削減を試みた。なお、CO₂ 排出量削減率は各水準にて材齢 28 日における圧縮強度が同等となる AC の配合を推定し、その配合の CO₂ 排出量と比較して算出した。この時の AC 配合の推定は実施工⁵⁾での実績値 (n=351) を用いて実施した。

基準配合に対し FA を BFA に置換した場合の CO₂ 排出量削減率は、BFA-BB で 37.5%であった。基準配合に対しセメントを全量 SCMs に置換した場合の CO₂ 排出量削減率は、FA-BS-GS で 71.9%, FA-CH-GS で 63.7%, BFA で 67.1%と高い値であった。特に BFA は再生可能エネルギーとして需要の増加が見込まれているバイオマス発電所から副産される灰であることから、今後、本技術の更なる検討を進めていく予定である。

4. まとめ

セメントを補助セメント系材料 (SCMs) に置き換えることで CO₂ 排出量を削減する技術について検討した。その結果、従来の配合に対し CO₂ 排出量削減率が 70%程度の海水とバイオマス灰を用いた配合を選定できた。

参考文献

- 1) Aslam Kunhi Mohamed, et al: The Atomic-Level Structure of Cementitious Calcium Aluminate Silicate Hydrate, Journal of the American Chemical Society, Vol.142, pp11060-11071, 2020
- 2) Ryoichi Takagi, et al: Introduction of mass effective utilization technology of coal ash, 4th International Symposium on Concrete and Structures for Next Generation, 2019
- 3) 土木学会: コンクリートの環境負荷評価 (その 2), コンクリート技術シリーズ No. 62, 2008.9
- 4) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所: LCI データベース IDEA version 2.3.2
- 5) 高木亮一, 坂本守, 森本良, 古川園健朗: 福島第一原子力発電所港湾関係工事における石炭灰活用の取組み, コンクリート工学, Vol. 58, No. 12, pp. 944-951, 2020. 12

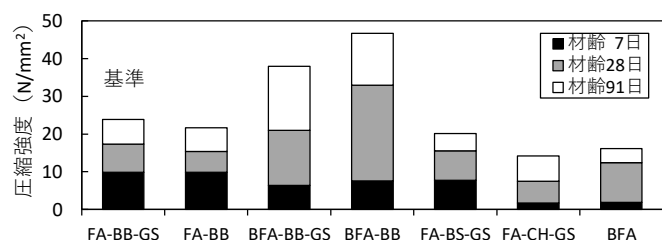


図-1 圧縮強度試験結果

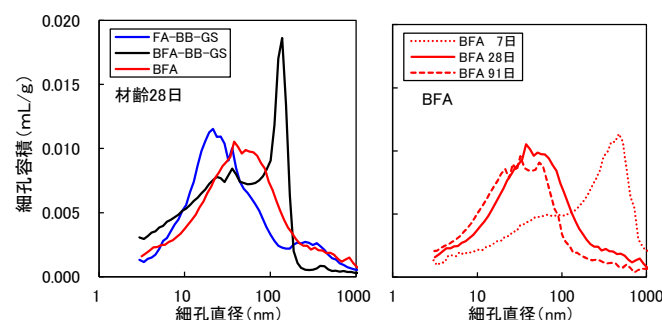


図-2 細孔直径と細容積の関係