

加圧流動床灰混入コンクリートの水和発熱過程のモデル化

広島大学大学院工学研究科	学生会員	○田中 雅章
中国電力(株)技術研究センター	正会員	中下 明文
広島大学大学院工学研究科	フェロー会員	佐藤 良一
広島大学大学院工学研究科	学生会員	野田 翼

1. はじめに

加圧流動床形式の石炭火力発電所から排出される加圧流動床灰 (PFBC 灰) は CaO および SO_3 が多く, SiO_2 は少ないことが特徴である。本研究では, PFBC 灰混入コンクリートの水和反応特性を明らかにする基礎的研究として, 水酸化カルシウム量の経時変化および不溶残分量に基づくポゾラン反応率について, PFBC 灰の置換率, フライアッシュ (FA) との比較, 温度履歴に対応して実験的に検討し, 水和反応過程を考察した。あわせて, PFBC 灰に対応する水和反応過程を岸らが提案する複合水和発熱モデル¹⁾に取り込みモデル化し, 擬似断熱試験体の温度計測結果と比較し, PFBC 灰の水和発熱過程の妥当性を検証した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

PFBC 灰および FA の化学成分を表-1 に示す。表-2 にコンクリートの配合を示す。水結合材比 (W/B) を 45% とし, PFBC 灰の置換率はセメントの質量に対し, 内割で 10, 20, 30 および 50% の 4 水準 (記号 P10, P20, P30, P50) とした。比較用として, 普通コンクリート (記号 P0) と FA30% 混入コンクリート (記号 F30) を作製した。

2.2 養生方法

養生方法を図-1 に示す。

2.3 実験項目および測定方法

(1) 水酸化カルシウム (Ca(OH)_2) 量

ペースト試料を用いて Ca(OH)_2 量を熱分析装置 (TG-DTA) により測定した。 Ca(OH)_2 量は, ペースト試料の 1000°C の値に対する Ca(OH)_2 量として示した。

(2) ポゾラン反応率

セメントペースト試料を用い, JIS R 5202 に準拠し不溶残分を測定し, ポゾラン反応率を算定した²⁾。

(3) 擬似断熱温度履歴

厚さ 100mm の断熱材で前面を被覆したコンクリートブロック (400×400×600mm) の中央部の温度計測を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 水酸化カルシウム量

図-2 に 20°C 養生の Ca(OH)_2 量の経時変化を示す。

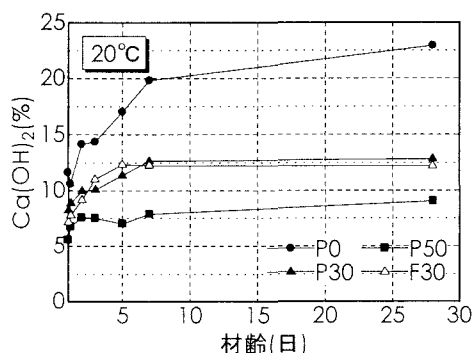
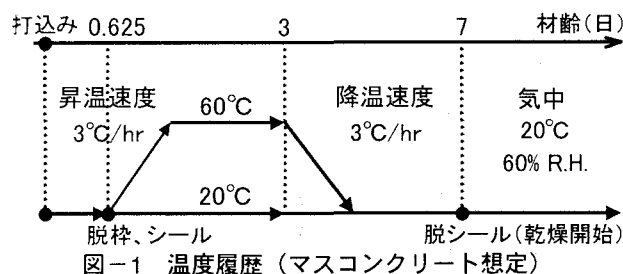
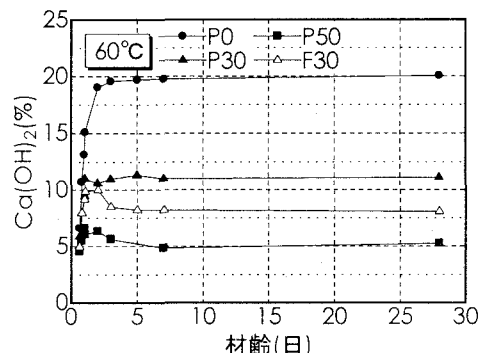
表-1 PFBC 灰およびフライアッシュの化学成分

種類	化学成分(%)			
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	SO_3
PFBC 灰	42.40	12.60	24.10	5.71
フライアッシュ (JIS)	64.60 (≥45)	25.00	1.10	0.30

注 (JIS): フライアッシュ JIS 規格 (二種 JIS A 6021)

表-2 コンクリートの配合

記号	W/B (%)	単位量(kg/m^3)					
		W	C	P	F	S	G
P0	45	165	367	—	—	792	989
P10	45	165	330	37	—	786	989
P20	45	165	293	73	—	781	989
P30	45	165	257	110	—	773	989
P50	45	165	184	184	—	749	989
F30	45	165	257	—	110	749	989

図-2 水酸化カルシウム量 (20°C)図-3 水酸化カルシウム量 (60°C)

材齢 2 日までの P30 の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は F30 の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量より大きくなっているが、これは PFBC 灰の CaO 含有量が多い結果であり、若材齢において PFBC 灰の自硬性が発揮され、高い反応性を示していると判断できる。材齢 7 日以降において、灰無置換 P0 の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量に対して、P30、F30 ともにおおむね 63%から 55%まで減少し、ポゾラン反応の進行が確認できる。60℃養生についても同様、図-3 に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量の経時変化を示す。P30、F30 ともに高温養生開始直後からセメント減量分以下の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量となっており、高温養生によりポゾラン反応が促進されている。しかしながら、両者の材齢 3 日以降の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は大きく異なり、材齢 7 日以降における $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は P0 と比較し P30 の場合で約 55%、F30 の場合で約 40%となり、高温養生時のポゾラン反応性は PFBC 灰に比べ FA のほうが高いことがわかる。これは、PFBC 灰の SiO_2 含有量が少なく、ポゾラン反応性に乏しいという推測と一致する結果である。

3.2 ポゾラン反応率

材齢 28 日における PFBC 灰および FA の反応率（表-3）について、20℃養生ではそれぞれ 5.0%および 4.6%となり、図-2 に示すように P30 と F30 の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量がほぼ等しくなる点と一致している。一方 60℃養生では、PFBC 灰の反応率が 18.9%に対し、FA の反応率は 24.1%となった。これについても図-3 に示すように、材齢 3 日以降の $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 量は P30 と比較し F30 のほうが小さくなる傾向と一致している。PFBC 灰が FA と同様に温度依存性が高いものの、長期的には SiO_2 含有量が少ないことにより反応速度が低下する可能性を示唆している。

3.3 PFBC 灰の水和発熱のモデル化と温度解析

温度解析は、既存の複合水和発熱モデル¹⁾に PFBC 灰の基準発熱速度と PFBC 灰自体のエトリンガイト生成反応にともなう発熱速度を足し合わせることによって結合材総体の水和発熱速度を求める。PFBC 灰の基準水和発熱速度は図-4 のように設定した。図-5 より温度解析値はおおむね実験値と一致した。しかしながら、最大温度上昇量で検討した場合、P10 の解析値が実験値より 1.3℃小さくなっているように、低置換率で解析結果の適合性が低下していることがわかる。図-6 のように PFBC 灰混入コンクリートの強度発現性においても、特に P10 および P20 の材齢 28 日における圧縮強度は P0 と同等である。したがって、低置換率での PFBC 灰混入コンクリートの構成要素間の反応相互依存性をより明らかにする必要があるとの方向が示された。

4. まとめ

PFBC 灰は若材齢において自硬性が発揮され高い反応性を示し、長期では非常に緩やかなポゾラン反応が継続することが明らかとなり、その PFBC 灰の水和過程を水和発熱速度で表現することができた。

参考文献

- 1) 岸 利治, 前川宏一: ポルトランドセメントの複合水和発熱モデル, 土木学会論文集, No.526, Vol.29, pp.97-109, 1995
- 2) 小早川真, 黄 光律, 羽原俊祐, 友澤史紀: 水比, 混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.121-126, 1999

表-3 ポゾラン反応率（材齢 28 日）

養生温度	配合名	
	P30	F30
20℃	5.0%	4.6%
60℃	18.9%	24.1%

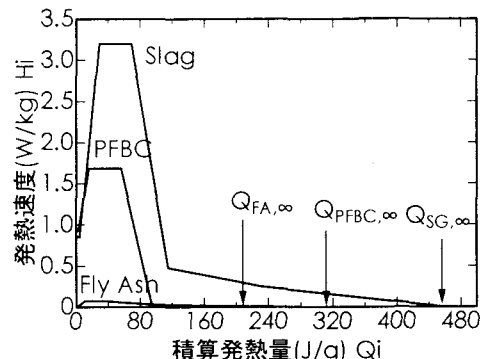


図-4 PFBC 灰の基準水和発熱速度

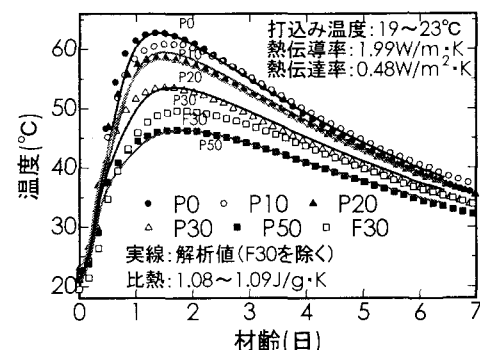


図-5 擬似断熱温度履歴と解析結果

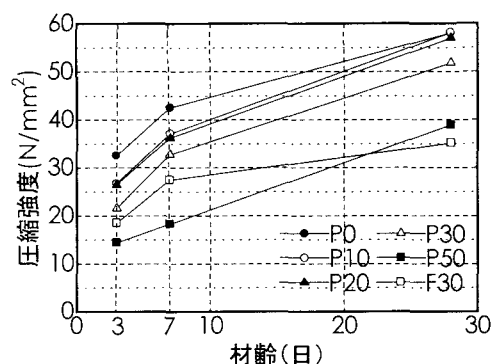


図-6 強度発現性（標準養生）