

フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を添加したコンクリート材料の長期熱物性評価

日本製鉄(株) 正会員 ○寺田豊 小林創 小野本憲人

1. はじめに

フライアッシュは、発電所、製鉄所などで産出される産業副産物であり、コンクリートに添加した場合、アルカリ骨材反応の抑制や、ポズラン反応による長期強度の増加等の効果があることが知られている。フライアッシュ添加によるコンクリートの熱物性についても研究例が存在するものの、それらは短期的な加熱を想定したものであり、長期の高温に晒される場合を想定していない。今回は、高温環境における供試体の暴露試験を行い、フライアッシュの添加量が熱物性に与える影響を評価することとした。

2. 供試体

暴露試験に用いる供試体およびその使用材料を表-1、2に示す。供試体の水セメント比(W/C)は50%で統一し、セメントには普通ポルトランドセメント(O)、高炉セメントB種(B)、低熱ポルトランドセメント(LH)を用いた。各セメントを用いた配合について、骨材置換でフライアッシュ(FA)と高炉スラグ微粉末(GGBS)を添加した。各供試体は、製作後28日の標準養生を行った後、暴露試験現場に設置した。供試体のサイズは、すべてφ100,L200とした。

表-1：使用材料一覧

材料の種類		銘柄	物性値	
			密度	粗粒率
O	セメント	普通ポルトランドセメント	3.16	-
B		高炉セメントB種	3.02	-
LH		低熱ポルトランドセメント	3.23	-
FA	フライアッシュ	フライアッシュⅡ種	2.33	-
S	細骨材	陸砂	2.60	-
GGBS	微粉末	高炉スラグ微粉末(6000)	2.86	-
G	粗骨材	安山岩2005	2.68	6.68
W	水	水道水	1.00	-
SP	混和剤	高性能AE減水剤	1.06	-
AE	AE調整剤	AE剤	1.00	-

3. 暴露現場環境

製作した供試体を高温環境に1年間の暴露を行った。図-1に現場の温度状況を示す。この温度データは、供試体と同じ場所に設置した熱電対によって得られたデータであり、供試体が置かれた環境の雰囲気温度を示している。供試体の上部を高温の板が通過する設備であり、雰囲気温度は設備稼働時に概ね最高で300℃程度となっている。ただし、計測されたデータは100℃以下のものが多く、実質的にサイクル加熱の環境となっていると考えられる。また、図-1の横軸は日付を示している。

4. 評価の方法

材齢28(暴露無し)、44、98、203、397日の供試体について、圧縮強度試験(JIS A 1108)とXRD/Rietveld法による鉱物組成分析を行った。XRD分析について、試験用の粉体については、供試体を粗粉碎後、供試体の表面部分を避けてモルタル部分を採取、乾燥後、遊星型ボールミルにより微粉碎した。また、X線回析装置D2 PHASERを用いて測定し、Rietveld解析により試料に含まれる鉱物の同定、定量を行った。測定の

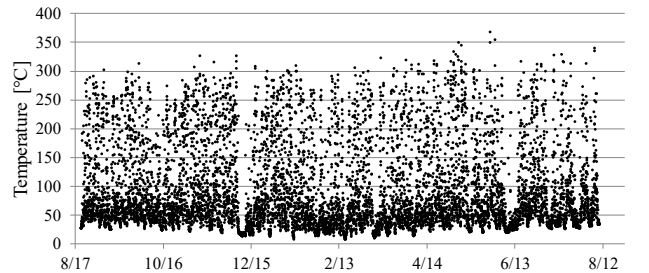


図-1：現場の温度環境

表-2：供試体の配合

供試体	W/C	W/B	添加率				単位量(kg/m ³)											SLF平均	空気量
			FA	GGBS	SP	AE													
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(A)	W	O	B	L	FA	S	GGBS	G	SP	AE	(cm)	(%)	
LH-50-0	50	26.9	37.5	-	0.9	18	175			350	300	558	0	920	5.5	12	64.5	2.9	
LH-25-25	50	25.6	18.8	18.8	0.9	15	175			350	150	557	184	920	6.2	10	72	3.2	
B-50-0	50	27	37.5	-	1	18	175		350		297	552	0	910	6.2	12	67	2	
B-25-25	50	25.7	18.8	18.8	0.9	15	175		350		149	551	182	910	6.1	10	61	2.9	
O-25-25	50	25.6	18.8	18.8	1	13	175	350			150	555	184	917	6.8	8.9	66.5	3.5	

キーワード：フライアッシュ、高炉スラグ、ポズラン反応、C-S-H、熱物性

連絡先：〒293-8511 千葉県富津市新富 20 番 1 日本製鉄(株)技術開発本部鉄鋼研究所鋼構造研究部 Tel:080-4449-2031

5. 評価

図-2に各供試体の圧縮強度推移を示す。LH-25-25のみ 203→397 日にて強度増加が見られる。LH-50-0は 28 日強度から 1 年暴露後の強度増加率が最も高い。これは、ビーライト起因の水和反応が強く影響していると考えられる。

表-3に Ettringite と Gypsum の含有率を示す。98 日以降はすべての供試体で検出されておらず、高温を受けて分解したと考えられる。圧縮強度は 44→98 日で、すべて低下しているが、この低下は Ettringite や Gypsum 等が分解し、供試体の緻密性が低下した結果と考えられる。一方、98→203 日で圧縮強度が増加している。これは、フライアッシュのポゾラン反応による供試体の緻密化が主要因と考えられる。既往の研究¹⁾ではフライアッシュによるポゾラン反応の結果、Mullite が生じることが報告されており、本供試体でも Mullite の生成が確認され (図-3)、特にフライアッシュ含有量の多い供試体では、Mullite の推移と圧縮強度の推移に類似性が認められる。図-3の Quartz の変化を見ると、28→203 日で増加し、203→397 日では減少している。ただし、B-25-25 のみ 98 日から減少している。この増加は、Anorthite 等の Si 分を含む鉱物が分解して Quartz となったことが考えられるが、300℃程度の温度でこのような挙動を確認した事例は少なく、より詳細な分析が必要である。一方、203→397 日の減少については、ポゾラン反応等によって Si 分が消費されたことによると思われる。図-4の非晶質物質推移を見ると、203→397 日で顕著に増加しており、フライアッシュによるポゾラン反応等によって C-S-H が増加したと考えられる。図-5に示す通り、非晶質物質量は圧縮強度と比例関係にあり、強度増加の直接的な要因であると考えられる。

6. まとめと今後の展望

今回の供試体が 300℃程度の高温下で長期的に暴露されると、鉱物組成の変化とポゾラン反応等による非晶質物質の増加が生じることが明らかとなった。また、それらに伴い硬化体内部の緻密性が変化し、強度の変化を生じさせるものと考えられる。

参考文献

1)山本武志, 金津努:フライアッシュのポゾラン反応に伴う組織緻密化と強度発現メカニズムの実験的考察, 土木学会論文集 E, Vol.63 No.1, pp.52-65 (2007)

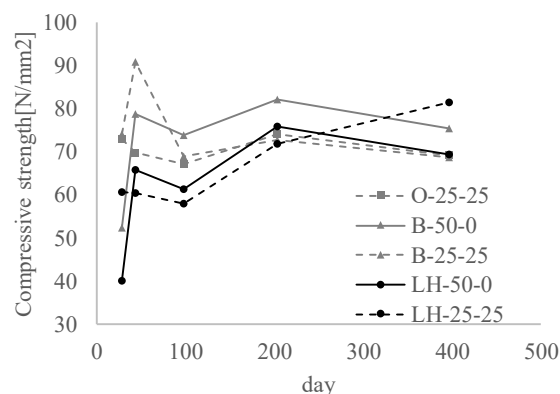


図-2：圧縮強度の推移

表-3：エトリンガイトと石膏の含有率 Unit wt%

Material	day	Specimens				
		O-25-25	B-50-0	B-25-25	LH-50-0	LH-25-25
Ettringite	28	0.27	0.33	0.41	0.13	0.15
	44	0.16	0.05	0.19	0.10	0.22
Gypsum	28	1.76	2.09	1.45	0.87	1.67
	44	1.54	1.35	1.10	0.85	0.85

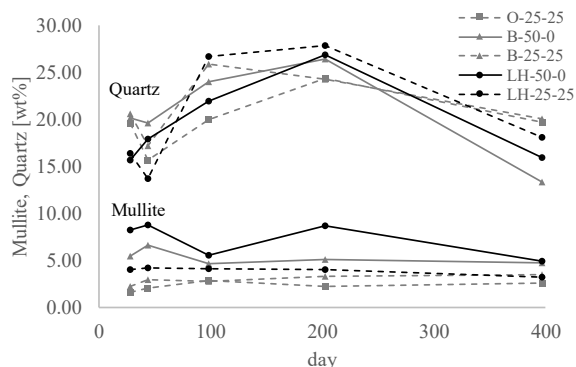


図-3：ムライトとクォーツの含有率

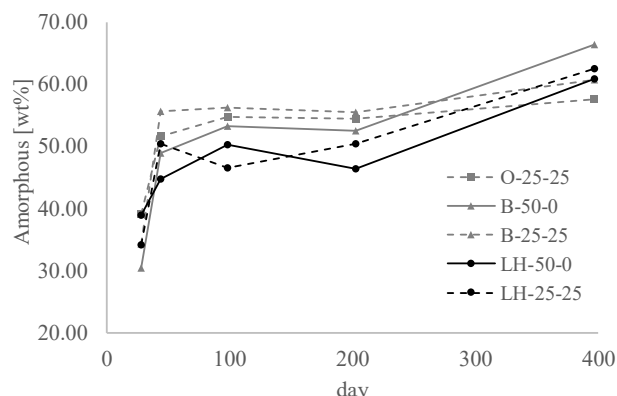


図-4：非晶質物質の推移

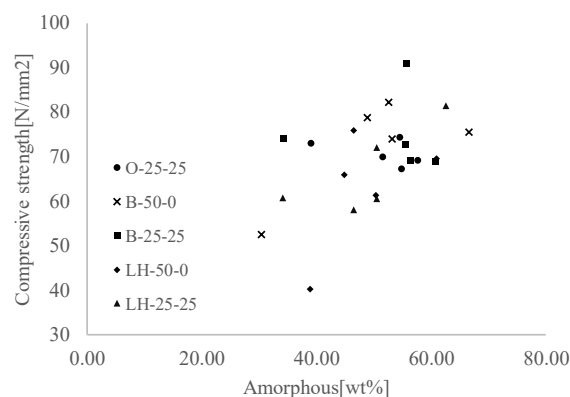


図-5：圧縮強度と非晶質物質の関係