

フライアッシュコンクリートの強度発現とポゾラン反応生成物に関する微視的検討

金沢大学 正会員 ○山戸 博晃 太平洋コンサルタント 正会員 安藤 陽子
金沢大学 学生会員 菊地 弘紀 金沢大学 正会員 鳥居 和之

1. はじめに

北陸地方では「地産地消」および「環境負荷低減」の観点から、この地方で産出されるフライアッシュを積極的に活用することが期待されている。一方、この地方の石炭火力発電所において、フライアッシュのⅡ種灰をさらに分級化する技術が開発され、高品質なフライアッシュ(Ⅰ種灰相当)の供給体制が確立された。本研究は、高品質なフライアッシュを15%内割置換したコンクリートの強度発現性とフライアッシュ粒子のポゾラン反応相の生成過程との関連性を微視的な内部組織の観察により調べたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料 使用骨材は、細骨材には川砂(石川県手取川産、表乾密度:2.57g/cm³, 吸水率:2.1%)と陸砂(石川県高松産、表乾密度:2.57g/cm³, 吸水率:2.1%)を、粗骨材には川砂利(石川県手取産、表乾密度:2.61g/cm³, 吸水率:1.8%)を使用した。セメントは、早強ポルトランドセメント(T社製、密度:3.14g/cm³, 等価アルカリ量:0.55%)を使用した。使用した分級フライアッシュの物理的性質を表-1に、フライアッシュコンクリートの配合を表-2にそれぞれ示す。

2.2 試験体の種類、養生条件および測定項目 試験体の種類は、HOPC(早強セメント単味)およびFA15%(フライアッシュ15%内割添加)の2種類である。また、試験体は、直径10cm×高さ20cmの円柱である。養生条件は、屋内に24時間静置した後に、それぞれの試験体において(1)水中浸漬養生(温度20℃の水中浸漬養生、略号:HOPC(水中), FA15%(水中)), (2)金沢大学構内での屋外暴露養生(略号:HOPC(屋外), FA15%(屋外))の2種類の環境条件下で暴露した。測定項目は、圧縮強度、超音波パルス伝播速度、水銀圧入式ポロシメーターによる細孔径分布である。さらに、圧縮強度試験終了後の断片試料を用いて、電界放出形走査電子顕微鏡(以下、FE-SEM)によりポゾラン反応生成物と微細組織の観察を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 フライアッシュコンクリートの強度発現性 フライアッシュコンクリートの圧縮強度と材齢の関係を図-1に示す。FA15%は、HOPCと比較して両環境下で圧縮強度の発現が顕著であり、初期から長期材齢までの強度発現性は良好であった。同様に、超音波パルス伝播速度においても、圧縮強度の発現が良好であった試験体(FA15%(水中, 屋外))は材齢とともに超音波パルス速度が増大していた。

3.2 細孔径分布の変化 水銀圧入式ポロシメーターの測定結果(細孔径分布(0.003~400μm))を図-2に示す。FA15%は、HOPCと比較して微細な空隙が増加し、0.1μm以上の粗大な空隙が減少していた。これは、フライアッシュのポゾラン反応生成物(CSH)がフライアッシュ粒子周囲の空隙を充填したことによるものと推察された。また、28日材齢と比較して、1年材齢では0.04μm以下の微細な空隙の割合が増加し、粗大な空隙が大きく減少していることが確認できた。これは、セメント粒子の水和反応とフライアッシュのポゾラン反応の相乗効果によりセメント硬化体の内部組織が緻

表-1 フライアッシュコンクリートの物理的性質

平均粒径 (μm)	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)	活性度指数(%)	
			材齢28日	材齢91日
7.61	2.46	4920	101	108

表-2 フライアッシュコンクリートの配合

セメント	W/B	s/a	単位量(kg/m ³)						
			C	FA	W	S	G	Ad1*1	Ad2*2
HOPC	48.3	45.5	325	-	157	812	987	2.28	2.60
FA15%	42.9	44.4	305	54	154	779	989	2.69	11.49

*1 AE減水剤標準形

*2 AE剤

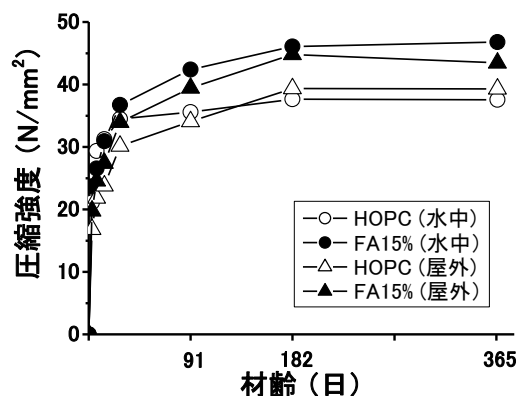


図-1 圧縮強度の経時変化

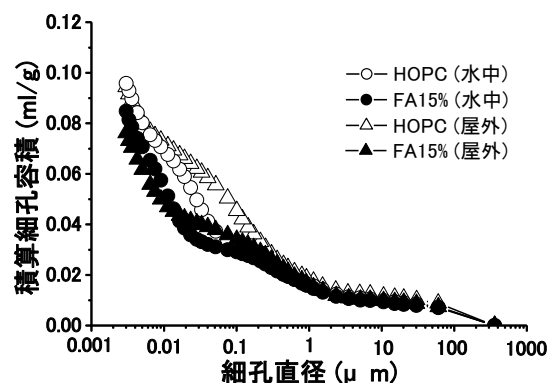


図-2 細孔径分布 (1年材齢)

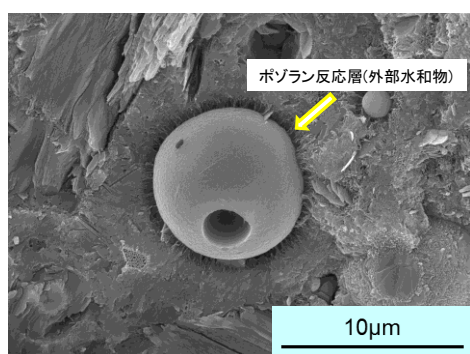


写真-1 FE-SEM 像 (FA15%水中、1年材齢)

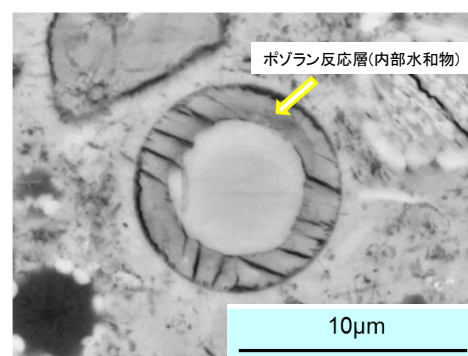


写真-2 反射電子像 (FA15%水中、1年材齢)

密になったことによるものであった。

3.3 FE-SEM によるフライアッシュ界面の観察 FE-SEM によるフライアッシュ粒子の観察結果 (コンクリート破断面) を写真-1 に示す。フライアッシュ粒子の粒径に関係なく、フライアッシュの粒子表面には1~2μm 程度の反応領域 (非晶質) が観察された。また、この粒子表面の反応領域のみがポゾラン反応に携わっており、内部の結晶相 (ムライト、石英、ヘマタイト、マグネタイト) はまったく反応していないことも観察できた (写真-2, 反射電子像)。したがって、フライアッシュを分級化することにより、フライアッシュ表面のガラス相からなる反応相の比表面積が大きくなり、ポゾラン反応が早期に、より活発になることが明らかになった。一方、材齢にともなうフライアッシュ表面のガラス反応相からのシリカやアルミナのガラスが溶け出しにより、粒子周縁には低 Ca/Si 比の CSH 相やエトリンガイトが生成していた¹⁾。この CSH 相が、アルカリ (ナトリウムおよびカリウム) を吸着することにより、細孔溶液中の OH⁻ が減少し、ASR 抑制に寄与しているものと推察された。

4. まとめ 本研究で得られた主要な結果をまとめると以下のようである。

- (1) 水銀圧入式ポロシメーターによるモルタル部の細孔径分布の結果より、フライアッシュを 15% 置換した試験体ではポゾラン反応により、粗大な空隙が減少し、微細な空隙が増大していた。
- (2) 細孔径分布の測定および SEM による観察により、フライアッシュを分級化することにより、フライアッシュ表面の 1~2μm 程度のガラス相の比表面積が大きくなり、ポゾラン反応が大きく促進されていた。
- (3) フライアッシュの表面のガラス相のみがポゾラン反応に関与しており、セメント硬化体の内部組織の緻密化に貢献していた。

謝辞: 本研究は、平成 28 年度科学研究費助成事業 (奨励研究: 16H00406) により実施したものである。

参考文献 1) 広野真一, 安藤陽子, 大代武志, 鳥居和之: フライアッシュと高炉スラグ微粉末による ASR 抑制効果の比較, セメント・コンクリート論文集, No. 67, pp. 441-448, 2013