

異なる環境に暴露されたフライアッシュコンクリートのポゾラン反応に関する評価

電源開発(株)茅ヶ崎研究所 正会員 ○石川 嘉崇
 太平洋セメント(株)中央研究所 正会員 細川 佳史
 太平洋セメント(株)中央研究所 正会員 林 建佑
 太平洋セメント(株)中央研究所 非会員 曾我 亮太

1. はじめに

フライアッシュ (FA) のポゾラン反応に関する研究は、現在まで多々なされている^{例え1)}が、実環境下に暴露された FA コンクリートの解析結果はほとんど報告されていない。本研究では、暴露開始から7年経過後の異なる環境に暴露された FA コンクリートを用いて、FA のポゾラン反応に着目した評価を行った。

2. 試験概要

2.1 供試体概要

FA コンクリートの長期耐久性を評価するために、2009 年から暴露を開始した試験体²⁾を用いた。コンクリートの配合は、W/P=55%, s/a=43%の汎用的な配合のものであり、FA をセメント重量の 0%, 20%および 30%置換している。ここで使用した FA は表 1 にキャラクターを示した JIS II 種品である。また、検討に使用した試験体の暴露地点は、亜寒帯の北海道(H 地点)、温帯の神奈川県(K 地点)および亜熱帯の沖縄(O 地点)と環境が大きく異なる 3 地点である。この暴露試験体は W770mm × H540mm × D300mm の壁供試体であり、ここから採取した φ74mm のコンクリートコア²⁾を解析の対象とした。各暴露供試体より採取したコンクリートコアの圧縮強度³⁾は、図 1 のとおりである。図のように、FA の置換率や暴露地点の違いに関わらず、ほぼ同等の圧縮強度を有していることが分かる。なお本概要では、例えば H 地点に暴露した FA30%のコンクリートの場合は H-30 のように、暴露地点-FA 置換率の順で表した略記を使用することとする。

2.2 評価項目

上記のコンクリートコアを用いて以下の分析をすることにより FA のポゾラン反応を評価した。

1) ペースト部の Ca/Si モル比

FA のポゾラン反応の進行度は、小早川の手法⁴⁾を参考に、EPMA を用いた元素マッピング分析によりコンクリート中のセメントペースト部分の Ca/Si モル比(C/S)を求めることにより評価した。元素マップは、1点を 1×1μm、測定範囲を 400×400 μm とし、16 万点について C/S を算出し頻度分布を作成した。そして、頻度分布において最頻値となる C/S をポゾラン反応の進行度の指標とした。

2) モルタル部分の細孔径分布

コンクリートコアより出来る限り粗骨材を取り除いたモルタル部分の試料を用いて、ポゾラン反応の進行に伴い変化すると考えられる細孔径分布を水銀圧入法により測定した。

3) 水酸化カルシウムの有無

表 1 使用した FA のキャラクター

密度 (g/cm ³)	ブレン 比表面積 (cm ² /g)	XRDリートベルト法により 求めた鉱物組成(wt%)			
		Qtz	Mul	Mag	Glass
2.25	3800	5.8	35.0	0.6	58.5

※表中の略記は Qtz:α 石英, Mul:ムライト, Mag:マグネサイト, Glass:ガラス相である。

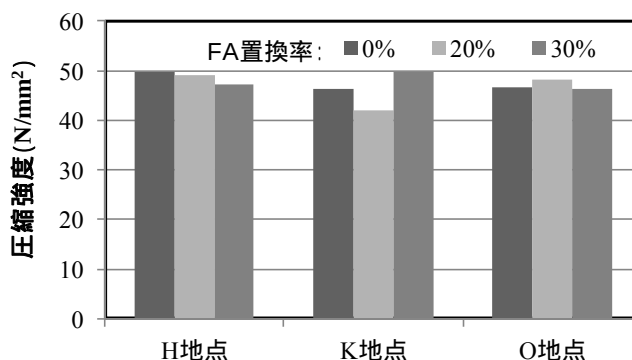


図 1 材齢 7 年における各暴露供試体の圧縮強度

モルタル部分の試料を、ディスクミルにより粉砕し、得られた粉末試料を用いて、ポゾラン反応の進行に必要な水酸化カルシウム(CH)の有無を、XRD 分析により確認した。

3. 結果ならびに考察

3.1 ペースト部の Ca/Si モル比

図 2 に、EPMA 分析により得られた反射電子像ならびに C/S マップの一例として、H-30 のモルタル部分の結果を示す。2 種類の図を見比べることで、気泡や Ca をほとんど含まない細骨材、未反応 FA の部分では C/S が低く黒色となっており、逆に、未水和のフェライト相などは反射電子像で輝度が高い箇所に相当し、Si を含まないため C/S が高く白色で表される。次に、頻度分布から得た各試料の C/S の最頻値を表 2 に示す。表に示した 3 地点の平均値を比較すると、C/S の最頻値は、FA を置換していない場合は 1.95 であるが、FA を 20%置換することにより 1.72 へ、30%置換することにより 1.63 へと低下している。このように、FA を置換することによりペースト部の C/S が低下することが分かる。図 2 から分かるように未反応の FA や細骨材の C/S は 1 未満であり、C/S の最頻値には影響しないものと考えられる。これらのことから、FA を置換することによるペースト部分の C/S の最頻値の低下は、FA のポ

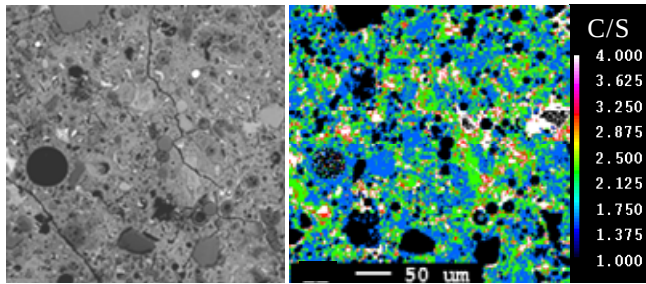


図2 H-30のEPMA分析結果
(左:反射電子像, 右:C/Sのマップ)

表2 ペースト部のC/S最頻値

FA 置換率	暴露地点			平均
	H地点	K地点	O地点	
0%	1.95	2.00	1.90	1.95
20%	1.70	1.70	1.75	1.72
30%	1.65	1.60	1.65	1.63

ポズラン反応による低C/Sの水和物の生成によるものといえる。また、小早川の研究によれば、FAの反応率が高くなるに従って、ペースト部のC/Sの最頻値は線形に低下するため、その低下度合いからFAの反応率が推定出来ることを示唆している⁴⁾。そこで、C/Sの最頻値に着目し、暴露地点の違いによるFAのポズラン反応の進行度の比較を行った。その結果、表のようにFA置換率20%の場合、C/S最頻値の地点間の差は最大で0.05であり、FA置換率30%でも0.05の差となった。FAの置換率の差による変化量と比較すると、地点間の違いによるC/S最頻値の差はごく僅かである。このことから、暴露環境が違ってFAのポズラン反応の進行度は同等であるものと推察される。

3.2 細孔径分布

図3に水銀圧入法により求めた細孔径分布を示す。細孔径の区分は、山本らの研究¹⁾に従い3~20nm, 20~330nmおよび330nm~360μmという3区分¹⁾で示した。図のように、FAの置換率が高くなるに従い、3~20nmの細孔容積が増加し、逆に20~330nmの細孔容積は減少する傾向が認められた。FAを置換することによる3~20nm細孔の増加と20~330nm細孔の減少は、山本らによる試験結果と同様であり、ポズラン反応に伴う細孔の変化であると考えられた。次に暴露地点の違いに着目すると、いずれのFA置換率の場合であっても、上述したポズラン反応により影響されると考えられる区分の細孔容積の差は僅かであった。以上のように、ペースト部のC/Sや細孔容積の観点からは、暴露地点の違いによるFAのポズラン反応の進行度と、それに伴う細孔の変化に差は認められなかった。このことは、図1に示した圧縮強度に差が認められなかったことを裏付けるデータと考えられる。本試験で解析対象としたコンクリートは暴露開始から7年が経過したものであり、十分な期間が経てば、亜寒帯から亜熱帯の範囲ではFAのポズラン反応の進行度に差が生じないものと推察される。

3.3 水酸化カルシウムの有無

図4にモルタル部分のXRD分析により得られた回折パターンならびにCHのピーク位置を示す。図より、

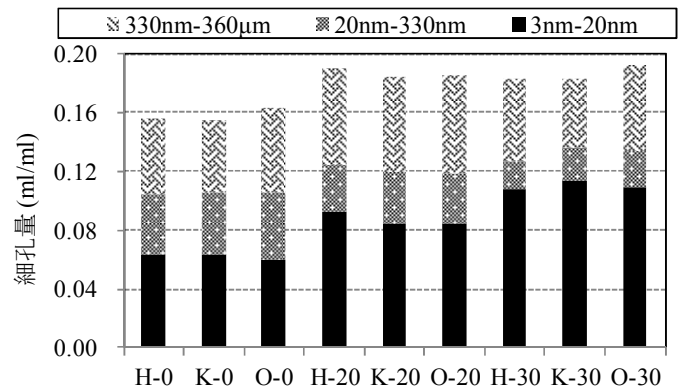


図3 細孔径分布

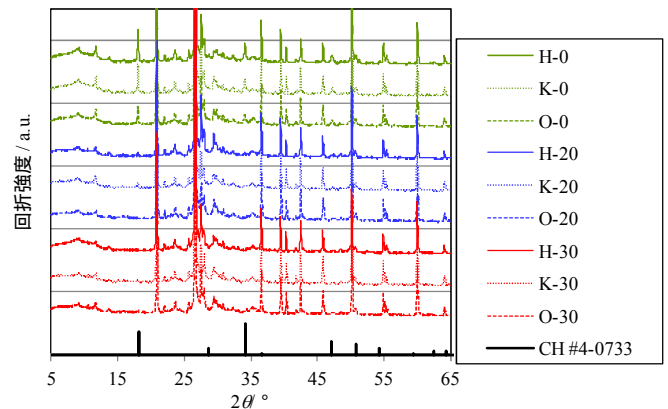


図4 XRD分析結果

FAを置換していないものではCHの明瞭な回折ピークが認められる。一方、FAを置換したものでは、CHのピークはほぼ認められなかった。以上のことから、暴露環境が違ってFAの反応の進行度が同等になった原因は、7年という期間を経ることで、全てのFAコンクリートにおいて、コンクリート中のCHが既にポズラン反応によってほとんど消費され、さらなる反応が進行しなくなったことによるものと考えられた。

4. まとめ

北海道、神奈川県および沖縄県に7年間暴露したFAコンクリートを対象に、暴露環境の違いがポズラン反応の進行度に与える影響を評価し、以下の結果を得た。

- ・ペースト部分のCa/Siモル比や細孔径分布の分析結果より、暴露地点の違いによるFAのポズラン反応の進行度に差は無いものと考えられた。
- ・その原因として、7年という十分な期間を経ることで、いずれの暴露環境であっても、水酸化カルシウムがほぼ消費されるまでFAのポズラン反応が進行したためと推察された。

【参考文献】

- 1) 山本武志ほか:フライアッシュのポズ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)
- 2) 有菌大樹ほか:フライアッシュを混和したコンクリートの暴露試験による長期耐久性モニタリング, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.1, pp.700-705 (2012)
- 3) 石川嘉崇ほか:異なる実環境に暴露したフライアッシュコンクリートの耐久性モニタリング, 第71回セメント技術大会講演要旨集, 投稿中 (2017)
- 4) 小早川真:フライアッシュのポズラン反応解析法と既設構造物への適用, 東京工業大学学位論文 (2009)