

屋外曝露されたフライアッシュコンクリートのポゾラン反応率と中性化に関する研究

太平洋セメント(株)中央研究所 正会員 ○林 建佑
 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 非会員 曾我 亮太

1. はじめに

フライアッシュ(FA)を混和材として用いたコンクリートは、遮塩性に優れることやアルカリシリカ反応の抑制効果を有するなど耐久性面で有利とされる一方で、ポゾラン反応に伴うボルトランタイトの消費が一因となり中性化抵抗性に劣ることも報告されている^{例え1)}。しかし、これらの報告は、FAのポゾラン反応進行度が十分でないコンクリートに対する促進試験の結果に基づいているものが多く、実環境での現象を反映できていない可能性がある。

そこで本研究では、2009年より実環境に曝露したFAコンクリート²⁾のポゾラン反応率の経時変化を積算温度により求めるとともに、ポゾラン反応の進行が中性化へ与える影響を評価した。

2. 試験概要

2.1 曝露供試体概要

実環境曝露したコンクリートは、W/P=55%, s/a=43%の汎用的な配合のものであり、結合材として普通ポルトランドセメントのみを使用した水準(OPC)ならびにJIS II種FAをセメントの30wt%置換した水準(FA30)を設定した。曝露供試体の形状は、W770mm×H540mm×D300mmの壁供試体であり、上記2種類のコンクリートを型枠に打ち込み、脱型までの7日間散水養生を行い、材齢4週まで室内で静置したのち、屋外曝露を開始した。曝露場所は、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)という環境が大きく異なる3地点である。このような供試体から採取したφ74mmのコンクリートコア²⁾を評価の対象とした。なお、供試体には内部温度を計測するため温度センサーを設置している。

2.2 評価項目

採取したコンクリートコアのうち曝露開始から1,4および7年目のものを対象に、以下の計測を行った。

1) 中性化深さ

JIS A 1152「コンクリートの中性化深さの測定方法」に準拠し中性化深さならびに中性化速度係数を求めた。

2) コアの比抵抗(体積抵抗率)

比抵抗はコンクリートの細孔構造の複雑さを評価する指標として求めた。比抵抗の計測は、土木学会規準JSCE K 562-2008「四電極法による断面修復剤の体積抵抗率測定方法(案)」に準じて行った。

3) FAのポゾラン反応率

曝露供試体中のFAのポゾラン反応率を直接評価することは困難と判断したため、著者らは、曝露供試体と同じFAを使用した模擬ペーストを用いて、FAのポゾラン反応率と積算温度の関係を調査し、基準温度を

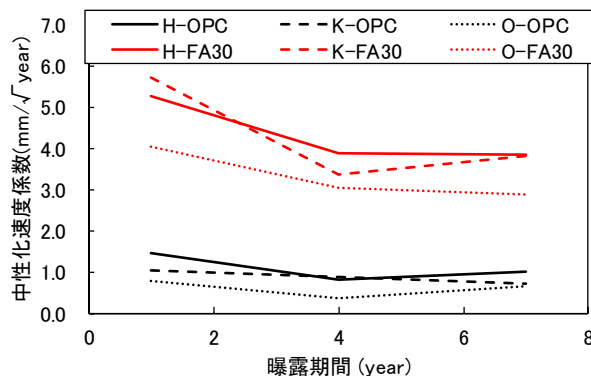


図1 中性化速度係数の経時変化

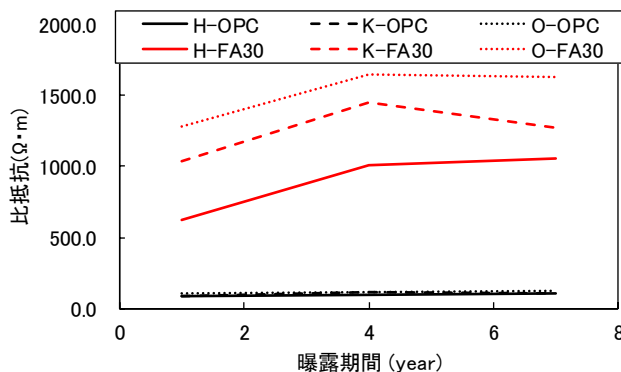


図2 比抵抗の経時変化

16℃とした場合のある材齢における積算温度(対数)とポゾラン反応率とに良い直線関係があることを明らかにした³⁾。FA30%置換における両者の関係の回帰式(検量線)を式[1]に示す。計測した供試体内部温度を用いて式[2]で求めた積算温度Mを式[1]に代入し、各材齢におけるポゾラン反応率を求めた。

$$\text{ポゾラン反応率} = 17.597 \ln(M) - 89.131 \quad [1]$$

$$M = \sum (\theta - 16) \cdot \Delta T \quad [2]$$

ここに、M: 積算温度(℃・日) θ : 供試体温度(℃)
 ΔT : 時間(日)

なお、本研究におけるポゾラン反応率とは、谷口らの研究⁴⁾を参考に、FAのガラス相中の酸不溶分量に対するある材齢における反応量と定義している。

3. 結果および考察

3.1 中性化速度係数

図1に、中性化速度係数の経時変化を示す。図中の凡例は、曝露地点-コンクリート種類を示している。図のように、FA30は中性化速度係数がOPCと比較して高く、FAコンクリートが中性化抵抗性に劣るという

キーワード: フライアッシュ 曝露試験 ポゾラン反応 比抵抗 中性化

連絡先: 〒285-8655 千葉県佐倉市大作 2-4-2 太平洋セメント(株)中央研究所 TEL 043-498-3909 FAX 043-498-3832

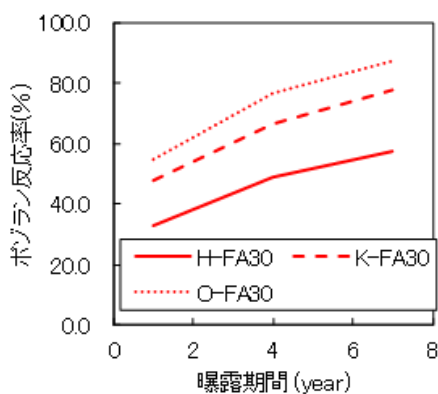


図3 ポゾラン反応率の経時変化

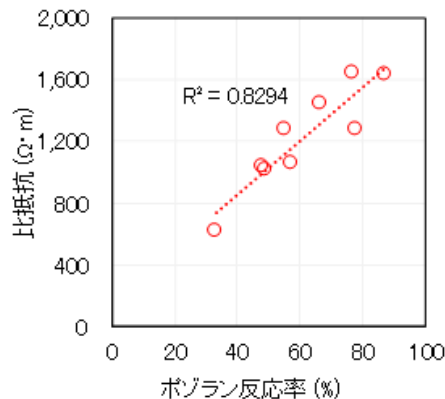


図4 ポゾラン反応率と比抵抗の関係

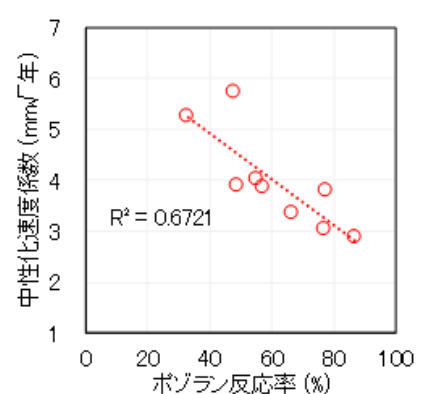


図5 ポゾラン反応率と中性化速度係数の関係

一般的に良く知られた結果^{例え5)}となったものの、FA30の中性化速度係数はOPCに比べ曝露期間の経過に伴って漸減することが分かった。

3.2 比抵抗

図2に、コアの比抵抗の経時変化を示す。OPCの比抵抗は、いずれの曝露地点においても低い値であり、曝露1～7年目における経時変化は認められなかった。一方、FA30では、曝露地点により比抵抗が異なり、時間の経過に伴い増加する傾向が認められ、特に曝露1年から4年間で大きな変化が認められた。比抵抗は硬化体の細孔構造の複雑さを反映した値であると考えられる⁶⁾ため、FA30はOPCと比較し、遮塩性などの物質移動抵抗性に優れ、時間の経過とともにその効果は大きくなるものと推察される。また、地点間の比較をすると、比抵抗が大きいO-FA30はH-FA30よりも複雑な硬化体細孔構造を有するものと考えられた。

3.3 FAのポゾラン反応率

図3に、積算温度より求めたFAのポゾラン反応率を示す。ポゾラン反応率は、O地点>K地点>H地点の順で高く、亜寒帯のO地点と亜熱帯のH地点では、1年目の時点で20%程度、7年目の時点では30%程度のポゾラン反応率の差が生じた。

図4に、コアの比抵抗とFAのポゾラン反応率との関係を示す。図のように、曝露地点の相違に関わらず比抵抗とポゾラン反応率には良い相関関係が認められており、ポゾラン反応率の増加に伴い、比抵抗が大きくなる傾向が認められた。上述したように、比抵抗は硬化体細孔構造の複雑さを表す指標となり得るので、ポゾラン反応に伴う細孔構造の複雑化が実環境曝露条件下においても進行することが確認された。

図5に、中性化速度係数とポゾラン反応率の関係を示す。図のように、ポゾラン反応率の増加に伴い、中性化速度係数が低下する傾向が認められた。

以上のことから、FAコンクリートのポゾラン反応は屋外環境に曝露中も進行しており、それに伴い硬化体の細孔構造の複雑化が継続し、更に中性化速度係数の低下が生じた。一般に、FAコンクリートが中性化に対して不利であるとされる一因として、FAのポゾラン反応によりポルトランダイトが消費される効果が挙げられる¹⁾ものの、この効果よりも、ポゾラン反応による細孔構造の複雑化の方が中性化に対して卓越するため、ポゾラン反応率が増加するに従い中性化速度係数

が低下するものと推察された。

4. まとめ

異なる実環境に曝露したFAコンクリート中のFAのポゾラン反応率の経時変化を、積算温度を用いて推定するとともに、硬化体の細孔構造の変化や中性化への影響を検討し、以下の結果を得た。

- ・積算温度から推定したポゾラン反応率は、曝露地点が北海道と沖縄では、曝露7年目の時点で30%程度の差が生じた。

- ・FAのポゾラン反応率とFAコンクリートの比抵抗の間には、良い相関性があり、実環境においてもポゾラン反応の進行に伴う細孔構造の複雑化は期待できるものと考えられた。また、細孔構造の複雑化は、コンクリートに耐久性に有利に働くものと考えられる。

- ・ポゾラン反応率の増加に伴い、FAコンクリートの中性化速度係数は低下する傾向であった。このことより、実環境に曝露されたFAコンクリートでは、ポゾラン反応によるポルトランダイトの消費よりも、上記の細孔構造の複雑化の方が、中性化に対して卓越して作用するものと推察された。

【参考文献】

- 1) 黄光律ほか：フライアッシュを外割混合したモルタルの中性化特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.21，No.2，pp.109-114 (1999)
- 2) 有蘭大樹ほか：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) 曾我亮太ほか：実環境におけるフライアッシュのポゾラン反応の定量評価その1 曝露試験に使用したフライアッシュのポゾラン反応率と積算温度の関係，第72回セメント技術大会講演要旨集 (2018) (投稿中)
- 4) 谷口円ほか：フライアッシュの反応速度に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.189-194 (2007)
- 5) 佐伯竜彦：中性化・炭酸化，C³クリップボード，(社)セメント協会，pp.60-61(2013)
- 6) 石川嘉崇ほか：異なる実環境に曝露したフライアッシュコンクリートの耐久性とフライアッシュの反応進行度の評価，セメント・コンクリート論文集，Vol.71 (2017) (掲載予定)