

# セメント硬化体におけるフライアッシュの反応率と強度発現性能に対する養生温度の影響

広島大学 学生会員 ○三吉 勇輝  
 広島大学 HUYNH T PHAT  
 広島大学 正会員 小川由布子  
 広島大学 フェロー会員 河合 研至

## 1. はじめに

資源循環や環境負荷低減の観点から、産業副産物であるフライアッシュの活用が望まれている。フライアッシュは良質なポゾランであり、セメントに置換してコンクリートに混入することで、長期強度の増進や硬化体組織の緻密化といった利点を得られる。

フライアッシュコンクリートの強度の予測はフライアッシュの強度発現性能を示すセメント有効係数(k 値)を用いることが検討されているものの<sup>1)</sup>、コンクリートに混入することで養生温度の影響を受けやすくなる、初期強度が低下するといった欠点から、活用および利用促進に繋がっているとは言いがたい。また、フライアッシュの k 値に対する置換率および養生温度の影響についての研究はあるが、フライアッシュの反応率等を含めて総合的に検討しているものは少ない。そこで本研究では、フライアッシュの結合材としての強度発現性能を表す k 値に対する養生温度の影響を検討するとともに、水酸化カルシウム(CH)含有量・消費量およびフライアッシュ反応率を用いて考察した。

表 1 セメントおよびフライアッシュの化学成分(%)

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
普通ポルトランドセメント	20.29	4.91	2.96	65.05	1.2	1.93
フライアッシュ	56.74	28.06	5.75	3.59	0.92	1.07

## 2. 実験方法

### 2. 1 供試体概要

本研究では、結合材として、普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>,比表面積 3290cm<sup>2</sup>/g)および JISA6201 のⅡ種に分類されるフライアッシュ(密度 2.23g/cm<sup>3</sup>,比表面積 3503cm<sup>2</sup>/g)を用い、圧縮強度試験用のモルタル供試体とフライアッシュ反応率および CH 量測定用のペースト供試体を作製した。フライアッシュの化学成分を表 1 に示す。全ての供試体は、水結合材比を 0.50 とし、フライアッシュ置換率は 0, 10, 20, 40mass% とした。k 値を算出する際に用いる等価セメント水比を求めるため、フライアッシュ無混和のモルタルについては、水セメント比を 0.40,0.60 の配合も用意した。モルタルは Φ50×100mm の型枠に打ち込み、ペーストは 16mL のポリプロピレン容器に打ち込み、打ち込み直後から 20℃ および 40℃ の封緘養生を行った。

### 2. 2 試験方法

モルタルの圧縮強度試験は、JSCE-G505 に従い材齢 3,7,28 日に行った。フライアッシュ無混和の配合において、圧縮強度とセメント水比の関係を養生温度および材齢ごとに求め、図 1 のようにフライアッシュモルタルの圧縮強度に対する等価水セメント比((C/W)<sub>eq</sub>)を求めた。この(C/W)<sub>eq</sub> およびセメント水比(C/W)、置換率(r)を用いて、式[1]により k 値を算出した。

$$k = \{(C/W)_{eq} / (C/W) - 1\} \times \{(1 - r) / r\} \quad [1]$$

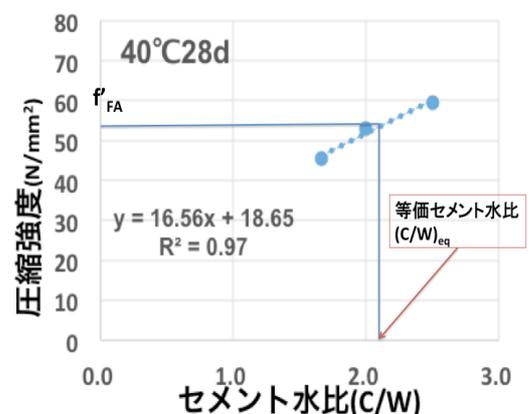


図 1 等価セメント水比(C/W)<sub>eq</sub>

キーワード セメント有効係数 k 値, 水酸化カルシウム含有量・消費量, フライアッシュ反応率

連絡先 739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1 広島大学院工学研究科 082-424-7786

CH 含有量は、材齢 3,7,14,28 日にアセトン浸せきにより水和停止を行ったペーストを  $150\mu\text{m}$  以下に粉砕し、示差熱重量分析により測定した。また、式[2]を用いて CH 消費量を算出した。

$$\text{CH}_A = \text{CH}_{\text{OPC}} \times (1 - r) - \text{CH}_{\text{FA}} \quad [2]$$

ここで  $\text{CH}_A$ : フライアッシュが消費する CH 量,  $\text{CH}_{\text{OPC}}$ : フライアッシュ置換率 0%のペースト中の CH 含有量,  $\text{CH}_{\text{FA}}$ : 置換率  $r$  でフライアッシュを混和したペーストの CH 含有量, である。

フライアッシュの反応率は、CH 含有量測定のための試料と同じ粉末試料を使用し、塩酸および炭酸ナトリウムを用いた選択溶解法<sup>2)</sup>によって求めた。

### 3. 実験結果および考察

#### 3. 1 セメント有効係数 $k$ 値

図2~4にセメント有効係数  $k$  値をフライアッシュ置換率ごとに示す。置換率 10%では、 $20^\circ\text{C}$ 、 $40^\circ\text{C}$ ともに材齢 28 日で  $k$  値が 1 を超えた。置換率 20%においては、 $40^\circ\text{C}$ では材齢 14 日で 1 を超えたのに対し、 $20^\circ\text{C}$ では 0 付近に留まった。置換率 40%では、 $20^\circ\text{C}$ の場合材齢 28 日までマイナスの値となり、 $40^\circ\text{C}$ でも 0.8 付近で留まった。これは、養生温度が高い方がフライアッシュの反応が早期に活発化したため、 $k$  値が向上したと考えられる。また低置換率で使用した方が、セメントの水和反応により生成する水酸化カルシウムがフライアッシュ量に対して多く、フライアッシュが水酸化カルシウムと活発に反応し、強度発現に貢献したと考えられる。これらの傾向は、既往の研究<sup>3)</sup>と整合した。置換率 10%の材齢 3 日において、 $k$  値が -1 以下を示した。これは等価セメント水比が小さい (1.52) ことに加え、小さい置換率により誇張して表現されていると考えられ、留意する必要がある。

#### 3. 2 CH 消費量と反応率の関係

図 5 に CH 消費量と反応率の関係を示す。材齢 3, 7 日においては  $40^\circ\text{C}$ の方が  $20^\circ\text{C}$ と比較し、CH 消費量および反応率は大きい値を示しているがさほど差は見られなかった。しかし材齢 28 日では、 $40^\circ\text{C}$ の反応率は  $20^\circ\text{C}$ に比べ 2 倍以上高い値となった。これは、養生温度が高いほど、フライアッシュの反応が早期から活発化し CH 生成量および消費量が増加したためと考えられる。また、同じ養生温度で比較すると、フライアッシュ置換率が低い方が CH 消費量は少ないにも関わらず、反応率は高い値を示した。これは、フライアッシュの置換率が増加すると、セメントによる CH 生成量が減少するため、フライアッシュが満足に反応できなかったことが原因と考えられる。

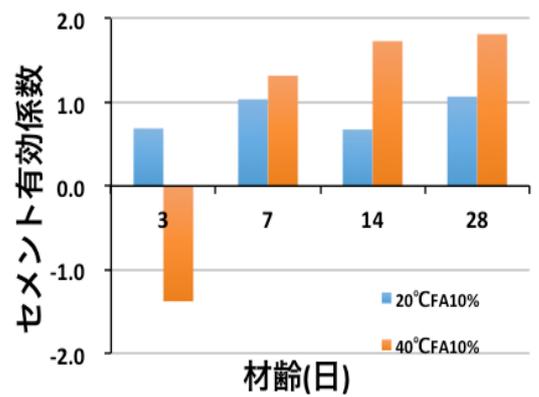


図 2 セメント有効係数 FA10%

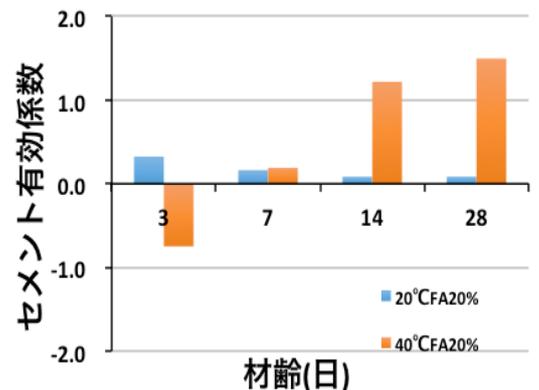


図 3 セメント有効係数 FA20%

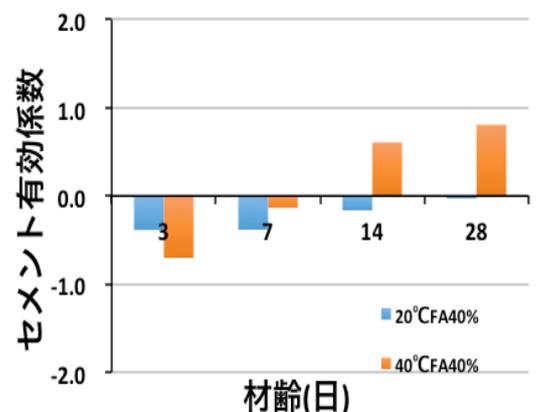


図 4 セメント有効係数 FA40%

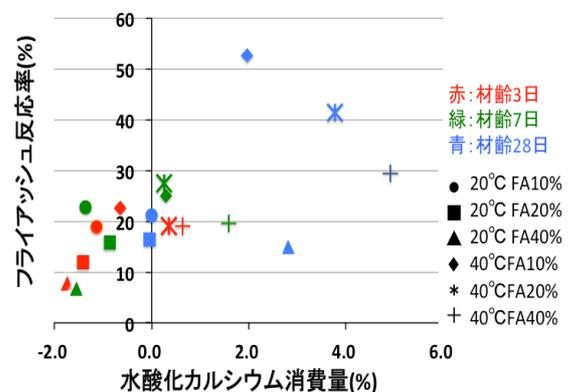


図 5 CH 消費量と反応率の関係

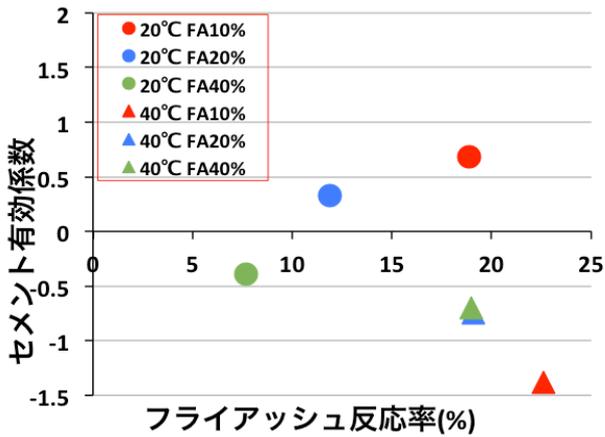


図 6 反応率と k 値の関係(材齢 3 日)

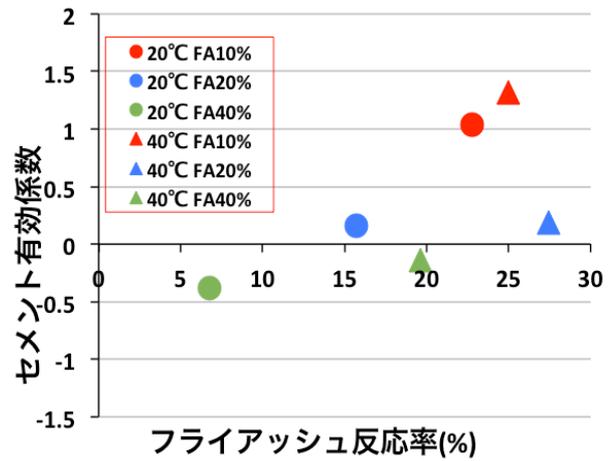


図 7 反応率と k 値の関係(材齢 7 日)

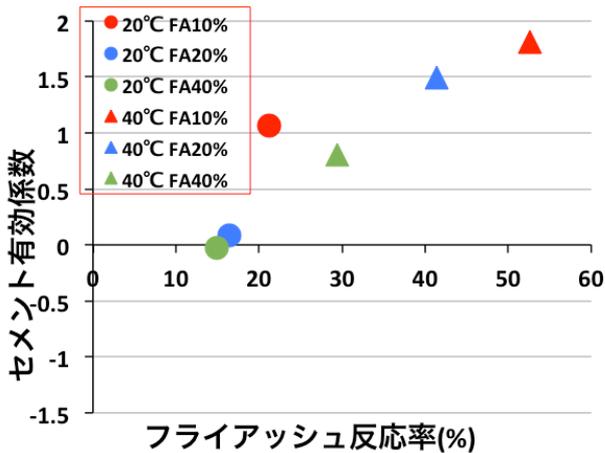


図 8 反応率と k 値の関係(材齢 28 日)

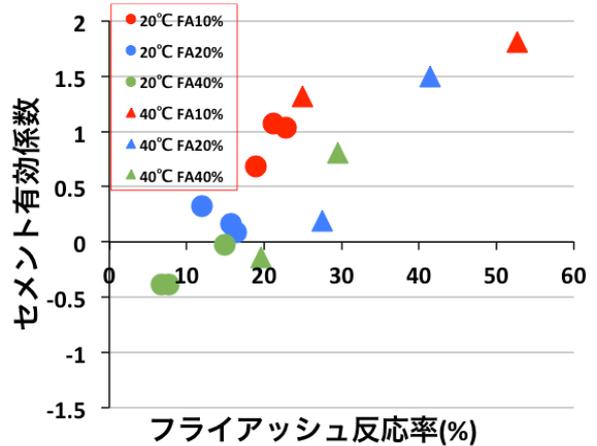


図 9 反応率と k 値の関係(40°C材齢 3 日無し)

### 3. 3 反応率と k 値の関係

図 6~8 に反応率と k 値の関係を材齢ごとに示す. 図より, 材齢 7 日までは養生温度による差はあまり見られなかったが, 材齢 28 日では, 40°C の方が 20°C と比較し, 反応率が高く k 値も増加していることが分かる. 特に, 図 6~8 の結果をまとめた図 9 のように, 養生温度 40°C の材齢 3 日を除くと, 置換率および温度に関わらず, k 値とフライアッシュの反応率は直線関係にある. つまりフライアッシュの反応を示すフライアッシュ反応率と, フライアッシュ単位量の強度発現への貢献度が対応していることを表しており, 養生温度が高く低置換率である方がフライアッシュの反応が活発となり, k 値が大きくなることを示していると考えられる.

### 4. 結論

養生温度 40°C の場合, 20°C と比較して, フライアッシュの反応が早期から活発となり, モルタルの強度発現に貢献できる. また低置換率のほうが, セメントがより多くの CH を生成するためフライアッシュの反応が活発となる. フライアッシュ反応率とフライアッシュ単位量の強度発現への貢献度は対応しており, 反応率と k 値の関係は置換率や温度に関わらず直線で表せる可能性がある.

### 参考文献

- 1) 土木学会：循環社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, 2010.
- 2) 大沢栄也ほか：フライアッシュ・セメント系水和におけるフライアッシュの反応率, セメント・コンクリート論文集, No.53, pp96-101, 1999.
- 3) 小川由布子ほか：フライアッシュの結合材としての性能に対する養生温度の影響, 土木学会論文集, E2, Vol.67(2), pp.482-492, 2011.