

# 論文 各種フライアッシュの活性に関する研究

齋藤 伸明<sup>\*1</sup>・山本 泰彦<sup>\*2</sup>

要旨: JIS A 6201 の 1 種 ~ 4 種に該当する 4 種類のフライアッシュについて, モルタルの強度発現に寄与する活性の影響について実験的に調べた。実験では, フライアッシュの実際の強度増進効果を定量的に把握することを目的として, 基準モルタル中のセメントの一部を, これと同体積のフライアッシュまたはけい砂粉末で置換した供試体を用いた。実験の結果, フライアッシュのポゾラン反応性に及ぼす温度条件の影響が予想外に大きいことが判明した。

キーワード: フライアッシュ, 活性, 養生温度, 圧縮強度, 強度発現, モルタル

## 1. はじめに

JIS A 6201 では, フライアッシュの活性を評価する指標として, 「定められたセメント量の 25% をフライアッシュで質量置換したモルタル (試料モルタル) の圧縮強度を, セメントのみを用いたモルタル (基準モルタル) の圧縮強度で除した値 (%)」である活性度指数を用いている。この指数の計算方法は, フライアッシュが一般に質量置換される実態<sup>1),2),3),4)</sup>に配慮したものであって, この点では合理的あるいは実用的であると言える。しかし, フライアッシュの密度がセメントの密度の約 2/3 に過ぎないことを考えると, フライアッシュで “質量置換” したモルタルではペースト中の粉体の体積が自ずから増加するので, この影響だけで試料モルタルの強度が増加することも考えられる。したがって, JIS の活性度指数やセメントの一部をフライアッシュで質量置換する従来の一般的実験手法では, フライアッシュの真の活性の程度を正しく評価するのは困難であると思われる。

本論文は 基準モルタルのセメントの一部を, これと同体積のフライアッシュあるいはけい砂粉末で置換したモルタルの強度発現性状を各種の温度条件下で試験し, フライアッシュの実際の活性と強度増進効果について基礎的に調べた

結果について論じたものである。

## 2. 使用材料

セメントには, 純粋な普通ポルトランドセメントとして製造されている研究用セメント (C) を用いた。フライアッシュは, JIS A 6201 の 1 種 ~ 4 種の品質規格に適合するものを 1 種類ずつ, 計 4 種類 (以下, それぞれを F1, F2, F3, F4 と呼称する) を使用した。また, ペースト中における活性のない粉末の影響を調べる試験では, 豊浦標準砂をボールミルで粉砕したけい砂粉末も使用した。けい砂粉末は, Si1, Si23, および Si4 の 3 種類であり, 粉末の細かさ (単位体積当たりの比表面積) が, それぞれ, F1, F2 と F3, および F4 とほぼ同じになるように粉砕時間を変えて作製した。これらの粉体系材料の物理的性質および化学分析結果を, それぞれ,

表-1 粉体系材料の物理的性質

種類	記号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	プレーン比表面積	
			(cm <sup>2</sup> /g)	(cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup> )
セメント	C	3.15	3080	9700
フライ アッシュ	F1	2.45	5840	14310
	F2	2.35	3370	7920
	F3	2.14	3750	8030
	F4	2.21	1840	4070
けい砂 粉末	Si1	2.64	5550	14650
	Si23	2.64	3170	8370
	Si4	2.64	1590	4200

\*1 筑波大学大学院 理工学研究科 (正会員)

\*2 筑波大学教授 機能工学系 工博 Ph.D. (正会員)

表-2 粉体系材料の化学分析結果

記号	強熱減量 (%)	化学成分 (%)									メチレンブルー吸着量 (mg/g)
		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>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	
C	0.6	21.2	5.4	2.7	64.7	2.0	1.9	0.28	0.56	0.32	-
F1	2.2	54.0	31.6	4.0	4.2	0.6	0.4	0.47	1.04	1.73	0.45
F2	1.7	52.6	32.4	4.8	3.7	0.6	0.2	0.44	0.88	1.67	0.34
F3	6.9	53.3	25.6	6.2	5.4	0.6	0.5	0.45	0.75	1.27	0.52
F4	1.6	54.0	28.0	5.7	4.1	0.9	0.2	0.64	1.00	1.17	0.27

表-1 および表-2 に示す。

細骨材には、鬼怒川産の川砂(密度:2.59g/cm<sup>3</sup>, 吸水率:2.50%, 粗粒率:2.45)を使用した。

### 3. 実験方法

実験の温度条件は、10、20 および 30 の 3 種類とし、使用前 24 時間以上の材料の貯蔵、モルタルの練混ぜ、供試体の養生、等は、すべて同一温度条件下で行った。

基準モルタルの配合は、水セメント比を 0.40、砂セメント比を 1.80 とした。また、この基準モルタルのセメントの一部をフライアッシュまたはけい砂粉末で置換する場合は、体積置換を適用し、この置換率を 25% とした。ただし、一部の試験では、体積置換率を 10 および 40% に変えた供試体も作製した。

モルタルの練混ぜには容量約 2 リットルのホバート型ミキサを用い、1 回の練混ぜ量は 1.2 リットルとした。

モルタルの圧縮強度試験には、5×10cm の円柱供試体を用いた。また、各材齢における圧縮強度試験には、3 バッチから 1 個ずつ作製した計 3 個の供試体を用いた。供試体の脱型は、材齢 3 日に行った。脱型した供試体は、直ちにそれぞれの試験温度に保った水槽の中に入れ、所定の材齢まで養生した。圧縮強度は、材齢 3、7、28 および 91 日に試験した。

### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 フライアッシュモルタルの圧縮強度に及ぼす養生温度の影響

図-1 は、基準モルタルおよび基準モルタルの

セメント量の 25% を各種のフライアッシュで体積置換したモルタル(以下、フライアッシュモルタルと呼ぶ)の圧縮強度試験結果を養生温度別に示したものである。

まず、養生温度が 10 の場合の結果を参照すると、フライアッシュモルタルの圧縮強度は、何れの材齢においても、基準モルタルの圧縮強度より 10~15 N/mm<sup>2</sup> 程度小さくなっていることが認められる。また、フライアッシュの種類による影響に関しては、材齢 28 日の試験値にやや差があるものの、全体的には、使用したフライアッシュの種別による明確な差異はほとんど認められない。この後者の結果は、温度が 10 程度に下がる条件下では、フライアッシュのポゾラン反応性が微弱となり、良質なフライアッシュを用いてもポゾラン反応による強度増進はほとんど期待できないことを示唆しているものと考えられる。

養生温度が 20 の場合は、10 の場合と比べ、圧縮強度は何れの場合も大きくなっているが、F1 を使用したモルタル(以下、F1 モルタルといった略称を用いる)の材齢 28 日以降の試験結果を除くと、全般的な傾向は 10 の場合と同様であるようにも見える。しかし、20 のデータを詳細にみると、材齢 28 日以降の圧縮強度は F1 モルタル > F2 モルタル > F3 モルタル > F4 モルタルの順になる傾向が現れ始めており、特に F1 モルタルの場合に、材齢 28 日から 91 日までの強度の伸びが相当に大きいことが認められる。

養生温度を 30 とした場合は、基準モルタルの圧縮強度が材齢 28 日から 91 日までの間にほとんど増加していないのに対し、フライアッシュ

モルタルの強度増進は逆に加速されている傾向すら認められる。すなわち、F1 モルタルおよび F2 モルタルの圧縮強度は、材齢 28 日で基準モルタルの圧縮強度の 94%にも達し、材齢 91 日では基準モルタルの圧縮強度を上回っている。また、コンクリート用混和材として一般的に用いられてきたフライアッシュ (F2 が同等品) と比べた場合に炭素量が多い F3 および粒子が粗い F4 を用いても、材齢 91 日には基準モルタルや F2 モルタルとほぼ同等の圧縮強度が得られている。これらの結果は、温度条件を 30 に上げた場合にフライアッシュの活性が相当に高まったことを示すと同時に、(1)良質なフライアッシュ (F1 および F2) を温度が高い条件下で使用すれば、28 日以内の強度増進も期待できること、(2)品質があまり良好でないフライアッシュ (F3 および F4) でも、温度が高い条件下では高いポゾラン反応性が期待できること、などを示唆しているものと考えられる。

なお、F2 とほぼ同等な品位のフライアッシュを 15~30%の置換率で使用している既往の研究結果を通覧すると、養生温度を 20 としたフライアッシュモルタルあるいはフライアッシュコンクリートの圧縮強度は、材齢 91 日において、基準モルタルあるいは基準コンクリートの圧縮強度の 90~100%の範囲にあるものが多い<sup>4)</sup>。これに対し、図-1 において上記とほぼ同じ条件 (20) にある F2 の結果をみると、この強度比は約 80%に留まっている。この原因に関しては、既往の研究では質量置換率が適用されていることを考慮すると、フライアッシュで質量置換した場合における粉体系材料の体積の増加が既往の研究におけるフライアッシュモルタル等の強度を高めたものと考えられる。

#### 4.2 フライアッシュの活性と強度増進効果

前節で示した図-1 は、単に基準モルタルとフライアッシュモルタルとの強度差あるいは強度比についての情報を与えるものであって、これらの試験結果だけでは、フライアッシュの活性あるいはこれによる強度増進効果の有無や程度

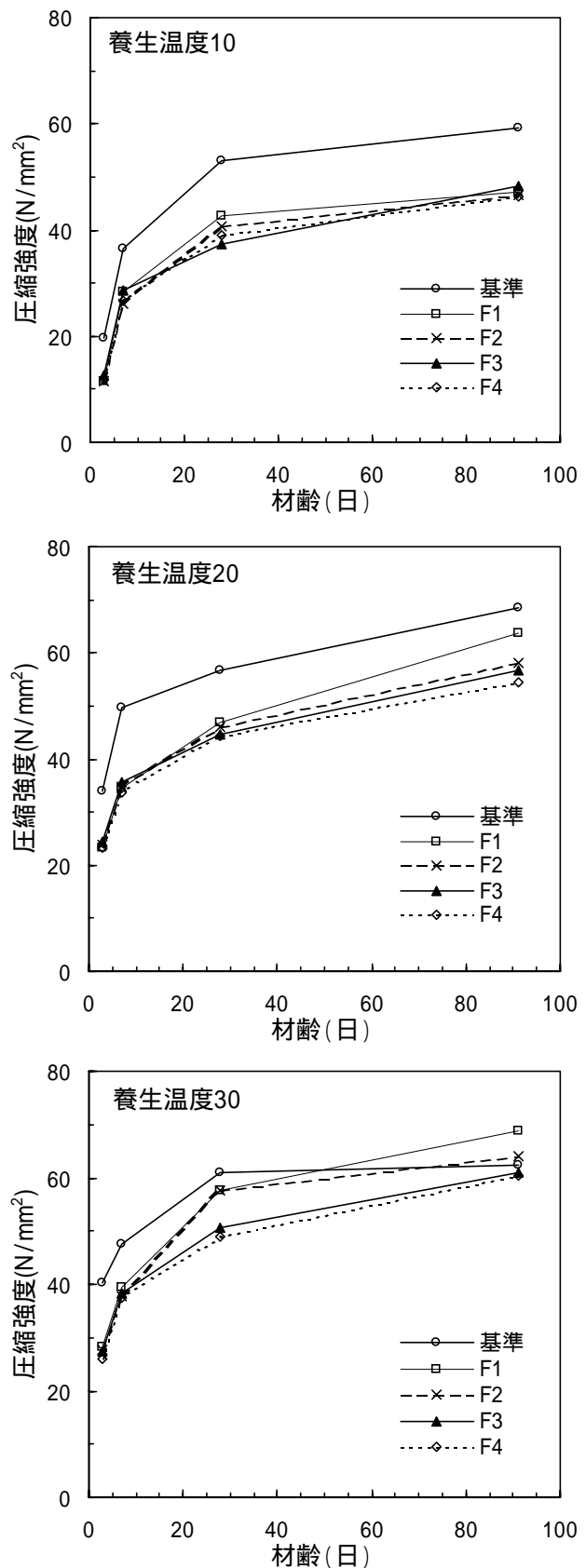


図-1 フライアッシュで置換したモルタルの材齢と圧縮強度の関係

を評価することは不可能である。そこで、図-1の試験に用いた各フライアッシュとほぼ同等の細かさを有し、かつ、活性を持たないけい砂粉末をフライアッシュの代わりに用いて前節のフライアッシュモルタルと全く同じ試験を併行して実施し、この結果と前節の結果を使って各フライアッシュの強度増進能力を調べることにした。使用したけい砂粉末は、Si1 (F1 対応), Si23 (F2, F3 対応) および Si4 (F4 対応) の3種類である。

図-2に、フライアッシュの代わりにけい砂粉末を用いたモルタル（以下、けい砂粉末モルタルと呼ぶ）の試験結果を養生温度別に示した。この図を通覧しても明らかなように、けい砂粉末モルタルの材齢と強度の関係は、何れの養生温度の場合も類似した形状を示し、フライアッシュモルタルを 10 で養生した場合（図-1）と類似した形の曲線となった。また、使用したけい砂粉末の細かさがモルタルの圧縮強度に及ぼす影響に関しては、細かいけい砂粉末を使った場合に強度が大きくなる傾向にあったが、その差は予想外に小さい（数  $N/mm^2$ ）ものであることが判明した。この後者の結果から判断すると、図-1 のようなフライアッシュモルタルやフライアッシュコンクリートの強度発現性状は、主としてフライアッシュ粒子そのものの活性の程度に左右され、粒子の細かさの相違による直接的な影響はあまり受けていないと考えても良いように思われる。

図-3は、各フライアッシュモルタルの圧縮強度を、それぞれに対応するけい砂粉末モルタルの圧縮強度で除した圧縮強度比を求め、この結果を養生温度別に示したものである。

図-3において養生温度が 10 の場合について着目すると、若材齢での試験結果に強度比が 0.9 程度になっているものもあるが、全体的には、材齢 91 日の試験結果も含めて、強度比の値が 1.0 の近傍に位置していることが認められる。これは、フライアッシュモルタルとけい砂粉末モルタルの圧縮強度が材齢 91 日までほぼ同じで

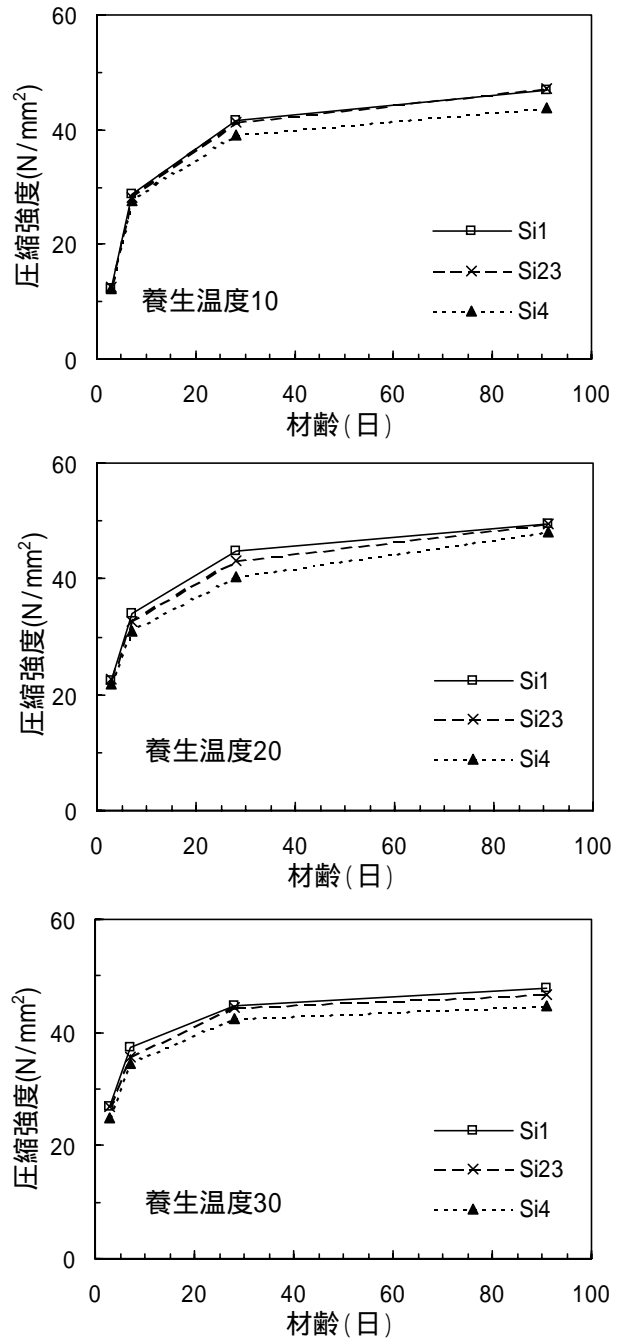


図-2 けい砂粉末で置換したモルタルの材齢と圧縮強度の関係

あったことを意味するのであって、温度が 10 程度まで下がるとフライアッシュのポゾラン活性による強度増進がほとんど期待できなくなると推測した前節の考えの妥当性を実証しているものと考えられる。

養生温度が 20 の場合は、全ての強度比の値が 1.0 より大きくなっている。しかし、材齢 28 日までの強度比は、何れも 1.1 より小さい範囲

にあり，フライアッシュの種別による強度比の大小関係や材齢に伴う強度比の変化にも一貫性がほとんど認められない。したがって，この材齢 28 日以内の強度比の値は，特にフライアッシュの活性による強度増進を反映したものでなく，試験誤差などに起因したものであると考えるのが適切であるように思われる。また，この時期にポゾラン反応が生じていた可能性はあるが，これによる強度増進がきわめて僅かであったことを示す結果であると思われる。一方，材齢 91 日における強度比は，約 1.15～1.3 の範囲にあり，この場合には，フライアッシュの活性によるかなりの強度増進が期待できることを示していると考えられる。

換言すれば，養生温度 20 の結果は，この温度におけるフライアッシュの活性は，材齢 28 日程度までの強度に影響を及ぼすほど強いものでなく，材齢 91 日の強度にはっきりとした差が現れる程度のものであることを示していると考えられる。

養生温度をさらに上げた 30 の場合は，20 養生での材齢 91 日における強度比が既に材齢 28 日に確保されていることが認められる。また，材齢 91 日における強度比もさらに増大し，1.3～1.45 にもなっている。これらは，30 の温度条件下では，フライアッシュの活性が著しく高まり，初期材齢から比較的長い期間に亘ってフライアッシュのポゾラン反応が活発に進行することを明示していると考えられる。

なお，前節では，品質の良好でないフライアッシュ (F3, F4) でも，温度が高い条件下で使用すれば，結合材として有効に使用できる可能性があることを指摘したが，F3 および F4 に対する図-3 中の養生温度 30 の場合の大きな強度比は，この可能性がきわめて大きいことを示しているものと思われる。

#### 4.3 フライアッシュによる置換率とモルタルの強度増進効果との関係

フライアッシュによる強度増進効果について，体積置換率を 10 および 40% とした場合に対し

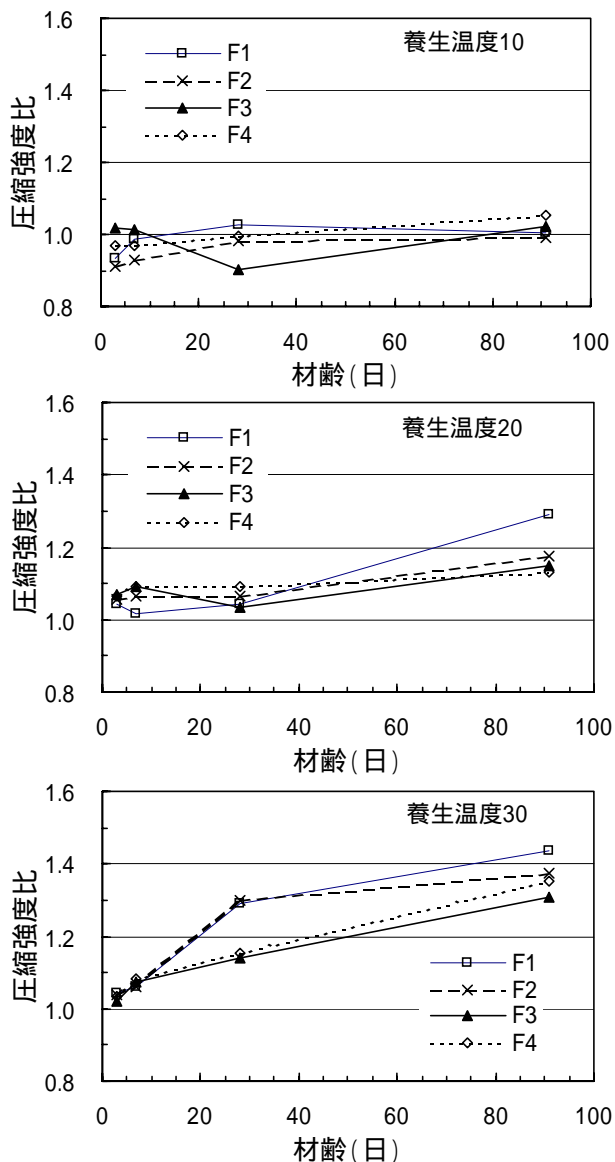


図-3 材齢と圧縮強度比の関係

ても調べることにした。この場合の養生温度は，前節の実験結果に強度増進効果が明確に現われた 30 とした。また，フライアッシュ試料は，F1 および F4 のみとした。なお，図-2 の試験においてけい砂粉末の細かさの影響が小さかったことを考慮し，比較対象とするけい砂粉末モルタルの作製には，Si23 のみを用いた。

図-4 は，前節と同様に，フライアッシュモルタルとけい砂粉末モルタルの圧縮強度比を求め，その結果を，フライアッシュの種類別に，体積置換率に対してプロットしたものである。

図-4 を通覧すると，材齢 28 日および 91 日の強度比が F1 を用いた場合に 0.1～0.2 程度大き

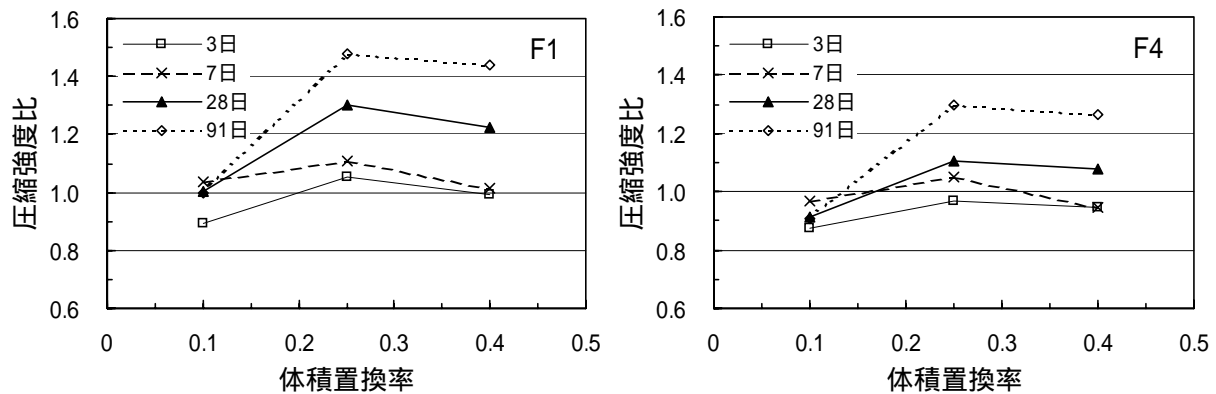


図-4 フライアッシュの体積置換率と圧縮強度比の関係（養生温度 30℃）

くなっていることを除くと，F1 の結果と F4 の結果にほとんど差がないことが認められる。すなわち，全般的な傾向は両者ともほぼ一致しており，体積置換率が 25%前後の時に強度比が最大になっている。また，体積置換率を 40%とした場合には強度比が逆に減少する傾向にあること，体積置換率が 10%の場合には長期材齢においても強度比が 1.0 近辺に留まっていること，なども両者に共通している。これらの結果から判断すると，水セメント比が 40%程度の場合には，フライアッシュによるセメントの体積置換率を 25%前後に設定した場合に，フライアッシュの活性による強度増進効果が最大限に発揮されると考えてよいと思われる。

## 5. 結論

本研究の範囲内で，以下のことが言えると思われる。

- (1) フライアッシュの活性は温度が低いほど小さくなり，温度が 10℃に下がった条件下では，材齢 91 日でもポゾラン反応による強度増進はほとんど期待できなくなる。
- (2) JIS A 6201 の 1 種または 2 種に該当するフライアッシュの場合は，温度が 30℃程度に上がった条件下では，材齢 28 日以内の強度増進に寄与することも可能となる。
- (3) JIS A 6201 の 3 種または 4 種に該当するフライアッシュであっても，温度が高い条件下では高いポゾラン反応性を発揮する。

(4) フライアッシュのポゾラン反応性は，粒径よりも，むしろ粒子そのものの品質に大きく依存していると考えられる。

(5) 水セメント比が 40%程度の場合には，フライアッシュによるセメントの体積置換率が 25%程度のときに，フライアッシュの活性による強度増進効果が最大限に発揮される。

## 参考文献

- 1) 國府勝郎，上野 敦，平野将司：フライアッシュの強度発現に関する養生温度および材齢効果の定量的評価，コンクリート工学年次論文報告集，vol.22，No.2，pp.79-84，2000
- 2) 小早川 真，黄 高律，羽原俊祐，友澤史紀：水比，混合率および養生温度がフライアッシュのポゾラン反応に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，vol.21，No.2，pp.121-126，1999
- 3) 佐伯竜彦，長瀧重義：フライアッシュと水酸化カルシウムの反応性に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.162-167，1997
- 4) 例えば，国分正胤，高野俊介，三浦一郎，杉木六郎：養生中の温度及び湿度が，フライアッシュを用いたコンクリートの強度におよぼす影響，土木学会論文集，No71，別冊(4-3)，pp.1-10，1960