

環境負荷低減を目指したフライアッシュ利用コンクリートの強度・細孔構造に関する一考察

㈱四国総合研究所土木技術部

四国電力㈱土木建築部

香川大学大学院工学研究科

香川大学工学部安全システム建設工学科

正会員 ○高野 剛

正会員 竹中 佳

学生会員 増田 裕

正会員 堺 孝司

1. はじめに

フライアッシュ(以下、FAと記す)のコンクリートへの利用は、強度増進、耐久性向上等コンクリートの機能性向上の他に、製造過程でのCO₂排出やエネルギー消費の多いセメントや天然資源である骨材使用量の低減など環境負荷低減機能も有している。そこで、環境負荷低減効果を最大限引き出す最適なFA置換率の検討の一環として、今回は、FAを容積置換したときの硬化性状(圧縮強度、細孔径分布)を把握するとともに、FAのポゾラン反応等による時系列的な変化(強度等に与える影響)の検討を試みた。

2. 試験の概要

本実験では、セメントに普通ポルトランドセメントを使用し、FAにはJIS A 6021のⅡ種に相当するもの(密度2.27g/cm³、比表面積4270cm²/g、強熱減量2.58%)を使用した。コンクリートの配合は、水結合材比を40、50、60%とし、FAは、セメントまたは細骨材の容積置換で、内割の置換率を0、10、20%、外割の置換率を0、10、20%で、これらを組み合わせた計11ケースとした。また、細骨材率は、各配合の最適細骨材率とした。

なお、AE減水剤は全ての配合において結合材の0.25%で一定とし、スランプ(10±1 cm)および空気量(4.5±0.5%)の調整は、単位水量およびAE剤によって行った。表-1にコンクリートの配合を示す。

表-1 コンクリートの配合

水結合材比	内割フライアッシュ置換率	外割フライアッシュ置換率	細骨材率	水	セメント	内割フライアッシュ置換率	外割フライアッシュ置換率	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤	スランプ	空気量
W/B	FA _o	FA _e	s/s	W	C	FA _o	FA _e	S	G				
(kg/m ³)										結合材×%	(cm)	(%)	
60	0	0	45	177	285	0	0	801	972	0.25	0.0011	10.8	4.5
	10	0	46	173	280	21	0	828	982	0.25	0.0039	10.9	4.9
	20	0	47	173	231	41	0	844	945	0.25	0.0072	9.9	4.9
	0	10	43	166	277	0	68	705	1031	0.25	0.0165	10	4.3
	10	10	44	165	248	20	70	724	1015	0.25	0.027	9.5	5
	0	20	40	171	285	0	126	577	1074	0.25	0.0435	9.4	4.8
20	20	42	171	228	41	132	606	1038	0.25	0.054	9.2	4.3	
50	0	0	44	170	340	0	0	775	979	0.25	0.0014	9.2	4.8
	10	10	42	170	306	33	85	688	1014	0.25	0.0185	9.2	4.5
40	0	0	42	172	430	0	0	706	968	0.25	0.0036	9	4.8
	10	10	40	182	410	33	57	588	973	0.25	0.0204	9.2	4.7

3. 圧縮強度

図-1、図-2にコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。全般的に圧縮強度は材齢28日以降FA置換コンクリートは顕著に増加しているのに対し、FA無置換コンクリートはほとんど増加していない。このことから、ポゾラン反応が顕著となるのは材齢28日以降であることがわかる。

図-1より、内割のみ10、20%の場合と、これにそれぞれ外割10、20%を付加した場合を比較すると、材齢に関わらず内・外割10、20%の場合の方が圧縮強度は大きくなっている。このことは、内割のみの配合に外割でFA置換することによる強度増加、即ち、内割のみより多くのFAを用い所要の圧縮強度を確保できることを示している。

また、図-2より、圧縮強度は、水結合材比および材齢に依存してFA無置換の場合と比べて、FA置換の場合のほうが増加している。

4. 細孔径分布

図-3、図-4に細孔径分布の測定結果を示す。図-3より、細孔容量が最大となる細孔直径は、FA置換の有無および水結合材比に関わらず同程度であるが、材齢の経過に伴い、細孔直径は小さくなっている。また、細孔容量の最大値は、FA置換の有無に関わらず、材齢28日においては水結合材比の減少に伴い大きくなる

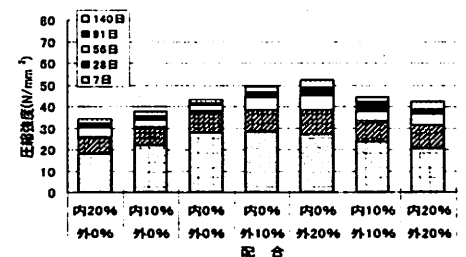


図-1 圧縮強度試験結果(水結合材比 60%)

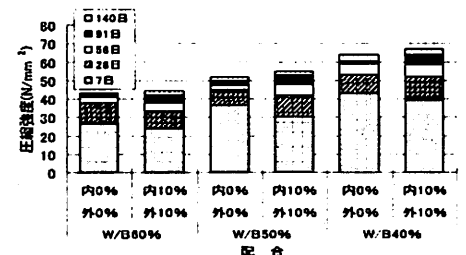


図-2 圧縮強度試験結果(水結合材比 60, 50, 40%)

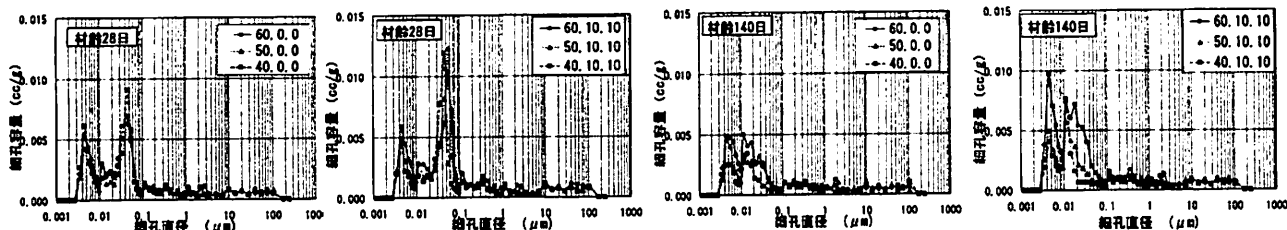


図-3 細孔径分布に与える水結合材比の影響 (FA 無置換, FA 置換)

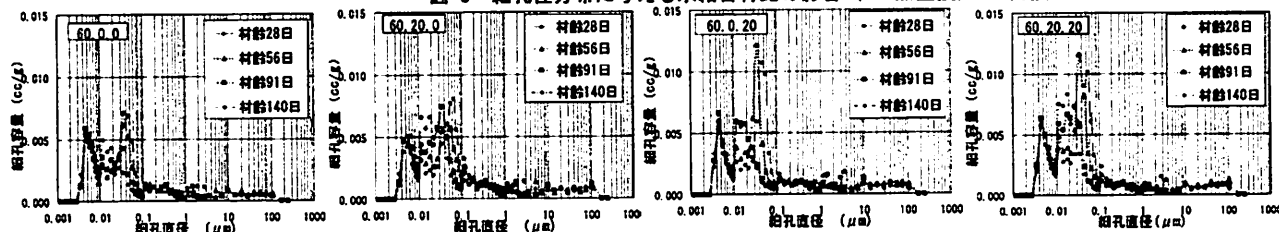


図-4 細孔径分布に与える材齢の影響 (W/B=60%)

が、材齢 140 日においては、水結合材比の減少に伴い小さくなる。

図-4 より、細孔容量が最大となる細孔直径は、FA 置換の有無に関わらず、材齢の経過に伴い径の大きい空隙から径の小さい空隙に移動しながら減少している傾向が窺える。これは、セメントの水和反応および FA のポゾラン反応によってコンクリートの組織構造が緻密化したことを意味する。

5. FA 置換コンクリートの圧縮強度の推定

(1) 圧縮強度比推定式の意味合い

FA 置換無しのコンクリートのセメント水比と FA の強度影響係数を考慮した FA 置換コンクリートの粉体水比の比率が強度比と関係を持つと仮定すると以下のような式(1)となる。

$$\text{圧縮強度比推定式} = \frac{f_f}{f_c} = F(x) \quad x = \frac{(C + k_c \times F_c + k_s \times F_s) W}{C_0 W_0} \quad (1)$$

ここで、 f_c 、 f_f ：FA 置換無しおよび FA 置換コンクリートの圧縮強度 (N/mm^2)、 C 、 C_0 ：FA 置換コンクリートおよび FA 置換無しのコンクリートの単位セメント量 (kg)、 W 、 W_0 ：FA 置換コンクリートおよび FA 置換無しのコンクリートの単位水量 (kg)、 F_c ：セメント置換 FA 量 (kg)、 F_s ：細骨材置換 FA 量 (kg)、 k_c 、 k_s ：セメント置換および細骨材置換 FA の強度影響係数を示している。

(2) 推定圧縮強度の算定および検証

まず、本研究で得られた圧縮強度試験結果をもとに、セメント水比説により材齢ごとの強度影響係数を求めた。次に、この強度影響係数と圧縮強度試験結果を用いて式(1)の圧縮強度比推定式の係数を決定し、以下の式(2)を得た。

$$\frac{f_f}{f_c} = 0.5234x + 0.4608 \quad x = \frac{(C + k_c \times F_c + k_s \times F_s) W}{C_0 W_0} \quad (2)$$

さらに式(2)より推定圧縮強度比を求め、FA 置換無しの圧縮強度 f_c をセメント水比説によって推定し、これらの結果から FA 置換コンクリートの推定圧縮強度 f_f を算定した。これまでの計算で得られた FA 置換コンクリートの推定圧縮強度と実測圧縮強度の関係を図-5 に示す。今回の算定結果では、概ね実測値と合う結果となっていることがわかる。

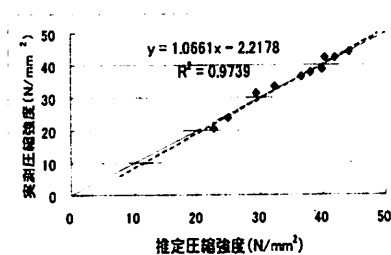


図-5 圧縮強度の推定値と実測値の比較

6. 結論

(1) FA を内・外割で併用したコンクリートの強度は、FA 無置換の場合と比べて、同等以上の強度発現が期待できる。また、細孔容量が最大となる細孔直径は、FA 置換の有無に関わらず、材齢の経過に伴い径の大きい空隙から径の小さい空隙に移行し、細孔容量も減少することがわかった。

(2) FA の内・外割併用によるコンクリートの圧縮強度推定は、推定式の物理的解釈に今後検討を要するものの、概ね可能であることがわかった。

参考文献 1)土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針(案)，1999

2)土木学会四国支部：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針，2003