

# 論文 加圧流動床灰を用いたコンクリートの強度特性

河合研至<sup>\*1</sup>・楊 楊<sup>\*2</sup>・佐藤良一<sup>\*3</sup>・斉藤直<sup>\*4</sup>

**要旨**：本論文は、火力発電所の廃棄物である加圧流動床灰のコンクリートへの有効利用のため、水結合材比、加圧流動床灰の置換率および養生の温度、水分供給条件をパラメータとし、加圧流動床灰を用いたコンクリートの強度特性について実験的に研究を行ったものである。その結果、灰の置換率が増加するにつれ、コンクリートの圧縮強度の低下が起こるが、同じ置換率のフライアッシュに比べると強度は大きく、また高温下での水中促進養生により初期強度の改善が期待できることが明らかとなった。

**キーワード**：加圧流動床灰、混和材、コンクリート、強度特性

## 1. はじめに

加圧流動床形式の石炭火力発電所は、発電効率の向上および環境負荷の低減を目的に開発された発電所である。この発電形式は、加圧状態で燃焼するため従来の発電形式と比べ、燃焼温度が低いこと、脱硫のため石灰石微粉末を混和して燃焼させることが特徴である。しかし、発生する石炭灰（以下、PFBC 灰）は CaO、SO<sub>3</sub> が多く、SiO<sub>2</sub> が少なく現在のフライアッシュの JIS 規格を満足していないため、その有効利用は大きな課題となっている。

PFBC 灰は 1, 2 次サイクロンおよび EP の 3 段階の集塵設備で採取される。既往の研究<sup>1), 2)</sup>では、2 次、EP 灰は、強度改善効果を有していること、耐久性上に悪影響を与えないことが確認され、コンクリートの混和材として有効利用の可能性が高いと報告されている。しかし、PFBC 灰発生量の 90%を占める 1 次灰に関する研究は少なく、明らかにされていない部分が多いため、有効利用にあたっては、その解明が必要である。

そこで本研究では、1 次灰を含む混合灰をコンクリート混和材として利用する可能性について検討することを目的とし、水結合材比、PFBC

灰の置換率および養生条件をパラメータとして、PFBC 灰を用いたコンクリートの強度特性について初期および長期にわたって実験的に検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料およびその物理化学的性質

表-1、表-2 および表-3 に使用材料とその物理・化学的性質を示す。

表-1 使用材料

使用材料	種類または性質・組成
セメント (C)	普通ポルトランドセメント
細骨材 (S)	栃木県鬼怒川産川砂（表乾密度 2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.78%, 粗粒率 2.90）
粗骨材 (G)	茨城県岩瀬産碎石（表乾密度 2.62 g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.88%, 粗粒率 6.81, 最大粒径 20mm）
PFBC 灰	C 社原粉, ワンボ炭
フライアッシュ (FA)	コンクリート用フライアッシュ II 種（細粉, ワークワース炭）
AE 剤	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非陰イオン界面活性剤
減水剤 (SP)	高性能 AE 減水剤, ポリカルボン酸エーテル系と分子内架橋ポリマーの複合体

\*1 広島大学助教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻 工博 (正会員)

\*2 広島大学助手 大学院工学研究科社会環境システム専攻 博 (工) (正会員)

\*3 広島大学教授 大学院工学研究科社会環境システム専攻 工博 (正会員)

\*4 中国電力株式会社土木部石炭灰有効活用プロジェクト副長 博 (工) (正会員)

表-2 使用材料の物理的性質

種類	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	MB 吸着量 (mg/g)	強熱減量 (%)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)	
						材齢 28 日	材齢 91 日
OPC	3.16	3380	---	2.00	---	---	---
PFBC 灰	2.61	4580	0.42	5.90	84	---	---
FA	2.22	4110	0.59	0.80 (炭素)	102	85	98

表-3 使用材料の化学的性質

種類	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>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O
OPC	20.65	5.15	2.96	64.63	1.03	1.93	0.30	0.36
PFBC 灰	42.40	12.60	3.96	24.10	1.21	5.71	0.49	0.68
FA	73.80	16.80	4.60	0.50	0.50	0.10	0.60	0.60

表-4 コンクリートの配合

配合名	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					減水剤 SP (B×%)*	AE 剤 (B×%)*
				水 W	セメント C	PFBC 灰 (FA)	細骨材 S	粗骨材 G		
25-P0	25	38.9	0	165	660	0	615	968	1.30	---
25-P30		37.7	30		462	198	589		1.70	---
25-F30		36.5	30(FA)		462	198(FA)	562		1.24	---
45-P0	45	45.0	0		367	0	792		0.82	---
45-P10		44.8	10		330	37	785		0.75	0.0010
45-P20		44.6	20		293	73	779		0.70	0.0015
45-P30		44.4	30		257	110	773		0.65	0.0022
45-F30		43.9	30(FA)		257	110(FA)	756		0.59	0.0019
60-P0	60	47.3	0		275	0	867		1.30	---
60-P30		46.8	30	193	83	853	1.05	0.0010		
60-F30		46.7	30(FA)	193	83(FA)	847	0.70	0.0005		

\*B=C+PFBC 灰 (or FA)

表-5 目標スランプおよび空気量

W/B	60%	45%	25%
スランプ (cm)	12.0±2.5	15.0±2.5	---
スランプフロー (cm)	---	---	60.0±5.0
空気量 (%)	4.5±1.5	4.5±1.5	2.0±1.0

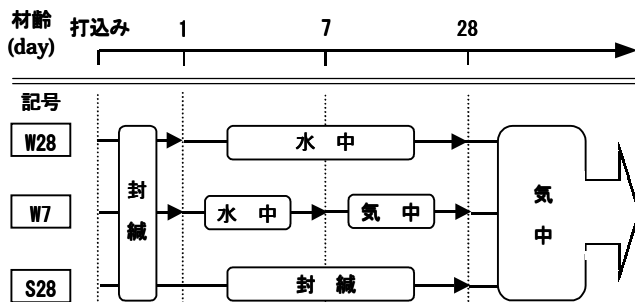


図-1 養生方法

## 2.2 コンクリートの配合およびスランプ、空気量

実験に用いたコンクリートの配合を表-4 に示す。水結合材比 (W/B) は 60, 45 および 25% の 3 水準とし、PFBC 灰の混入率はセメントの質量に対し、内割で 10, 20 および 30% とした。また、比較用としてフライアッシュを 30% 置換

した場合についても作製した。単位水量および単位粗骨材量はそれぞれ 165kg/m<sup>3</sup> および 968kg/m<sup>3</sup> と一定とし、灰を置換した配合に関しては、表-5 のスランプおよび空気量の目標値を満たすよう、高性能 AE 減水剤および AE 剤の添加量で調整した。

## 2.3 養生方法

養生は図-1 に示す 3 水準で行った。図中記号の W, S とそのあとに続く数値は、初期の養生条件 (W: 20°C 水中, S: 20°C 封緘) とその継続日数を示している。この養生条件終了後は、全供試体において気中養生 (20 ± 3°C, 60 ± 5% R.H.) とした。

なお、配合 25-P30, 45-P0 および 45-P30 については、上記の 20°C 一定温度養生とともに 60 ± 3°C 下の水中促進養生も行った。すなわち、20°C 恒温室において打設から 1 日後脱枠して、断熱水槽に供試体を入れ 20°C から 60°C まで 5 時間で水温を上昇させ、その後 60°C 一定温度で材齢 28 日まで養生した。28 日後上述の気中養生

生を行った。

## 2.4 測定方法

圧縮強度の測定は JIS A 1108 に準拠した。測定材齢は 1, 3, 7, 14, 28, 90, 180, 360 日とした。なお、供試体の打込端面に関し W/B45% の 1 日および W/B60% の 1, 3 日の測定材齢ではセメントペーストでキャッピング、そのほかの配合および測定材齢では研磨を行った。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 圧縮強度

#### (1) PFBC 灰の混入の有無が圧縮強度に及ぼす影響

図-2 に水中 28 日養生した W/B25% の供試体の圧縮強度の経時変化を示す。図-3 には、PFBC 灰およびフライアッシュ無置換プレーンコンクリートの圧縮強度に対する材齢ごとの強度比（以下強度比）を示す。これらの図より、PFBC 灰置換の場合、初期材齢の圧縮強度がプレーンコンクリートより小さいが、材齢 7 日以降になるとほぼ同等になることがわかる。これに対して、フライアッシュ置換の場合、プレーンコン

クリートと同等の強度となる材齢は 180 日であった。

W/B45%, 水中 28 日養生の圧縮強度と材齢の関係を図-4 に、材齢と強度比の関係を図-5 に示す。図-5 より、材齢 1 日における圧縮強度比は、PFBC 灰を置換することにより全ての配合で 1 以上を示していることが分かる。これは、灰の自硬性が強く発揮されたものと推察される。しかし、W/B25%（図-3）および後述の W/B60%（図-7）においては、この現象が見られなかった。灰の自硬性による強度への寄与は若材齢におけるものと考えられるので、W/B25% の場合、セメント量が多く、若材齢での強度発現が速いため、灰の自硬性の影響が相対的に小さい。W/B60% の場合、水結合材比が大きく若材齢での内部構造が粗いため、灰の自硬性の寄与は W/B45% の場合ほど顕著ではないと考えられる。したがって、自硬性の若材齢の強度への寄与は顕著に表す最適 W/B が存在する可能性がある。

図-5 のように、材齢 28 日における圧縮強度比は、PFBC 灰の置換率 10, 20, 30, 30 (FA) % の順に 0.98, 0.93, 0.79, 0.63 となっており、

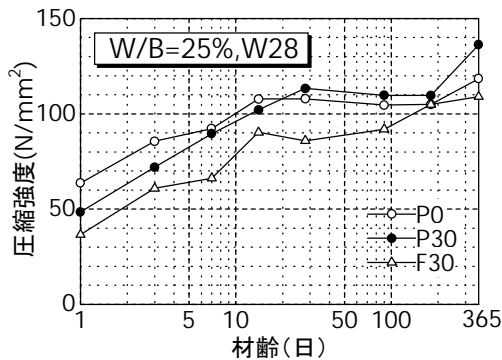


図-2 圧縮強度と材齢の関係 (W/B25%)

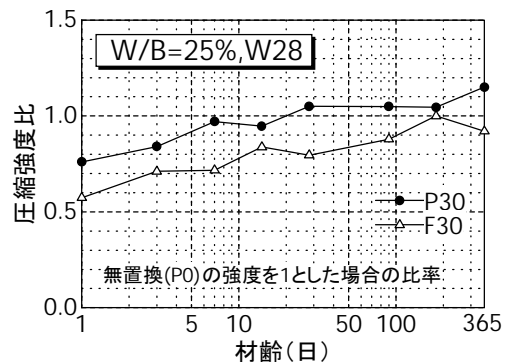


図-3 強度比と材齢の関係 (W/B25%)

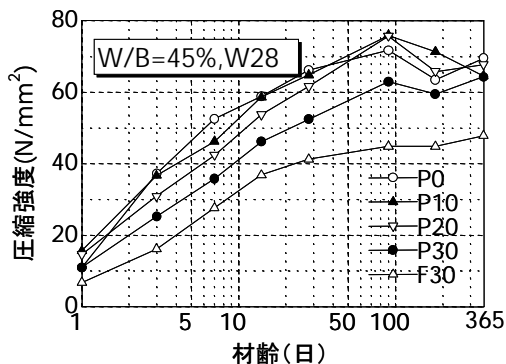


図-4 圧縮強度と材齢の関係 (W/B45%)

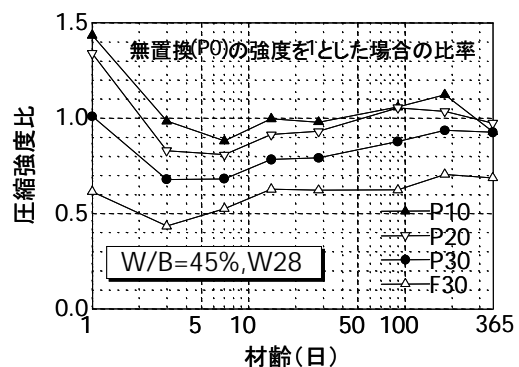


図-5 強度比と材齢の関係 (W/B45%)

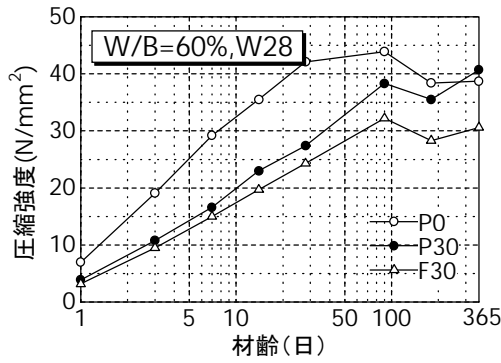


図-6 圧縮強度と材齢の関係 (W/B60%)

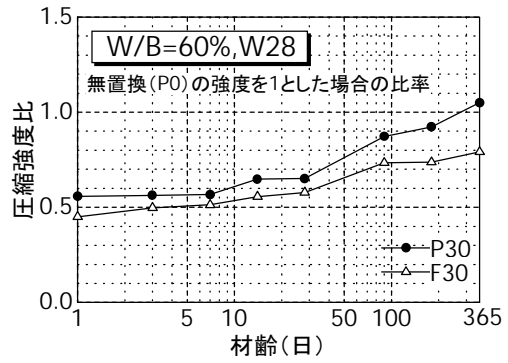


図-7 強度比と材齢の関係 (W/B60%)

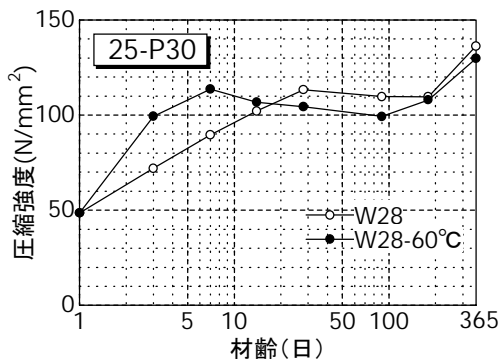


図-8 圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

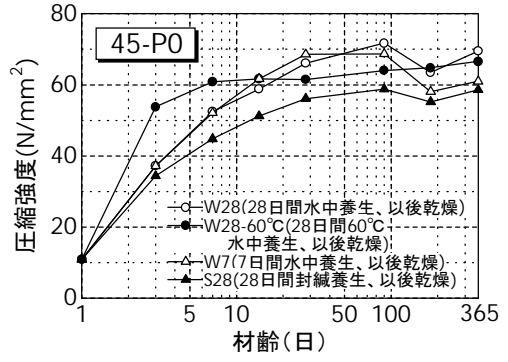


図-9 圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

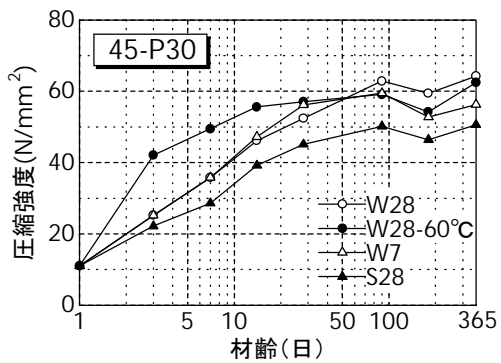


図-10 圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

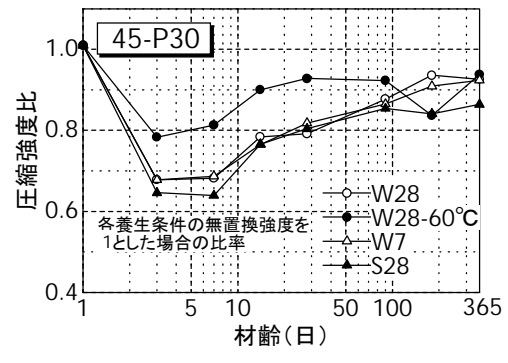


図-11 圧縮強度比の比較

置換率が増大するにつれて強度が低下することが分かる。しかしながら、W/B25%の場合と同様に、同置換率のフライアッシュと比較すると強度増進が大きいことが分かる。

W/B60%の場合、図-6 および図-7 に示すように、PFBC 灰置換とフライアッシュ置換したコンクリートの圧縮強度の違いは大きくなかった。材齢 28 日まで両者ともに圧縮強度は無置換の圧縮強度の 60%以下であった。

## (2) 養生条件が圧縮強度に及ぼす影響

図-8 に異なる養生温度下の 25-P30 の圧縮強度を示す。図のように 60°C、7 日養生した場合の圧縮強度は、材齢 7 日で、ほぼ 20°C 水中養生

の 28 日強度に達しており、PFBC 灰混入のコンクリートは高温養生により強度が増進されることがわかる。

図-9 および図-10 にそれぞれ 45-P0、45-P30 の圧縮強度に及ぼす養生条件の影響を示す。これらの図から分かるように、いずれの配合においても、W28、W7、S28 の順で強度が低下する傾向があるが、材齢 90 日までは W7、W28 の差はほとんどない。S28 の強度が最も低くなる傾向は、どちらの配合からも確認できる。また、養生温度での比較では、いずれの配合においても水中 60°C 養生は、初期の強度増進は大きい、その後の強度増進が小さい傾向にある。

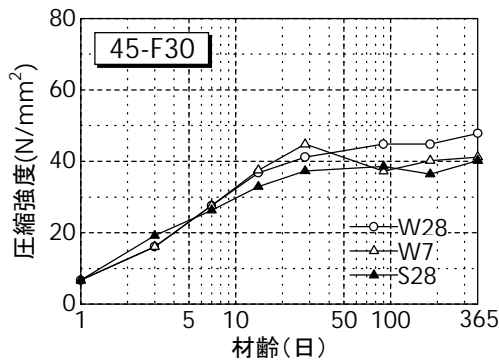


図-12 圧縮強度に及ぼす養生条件の影響

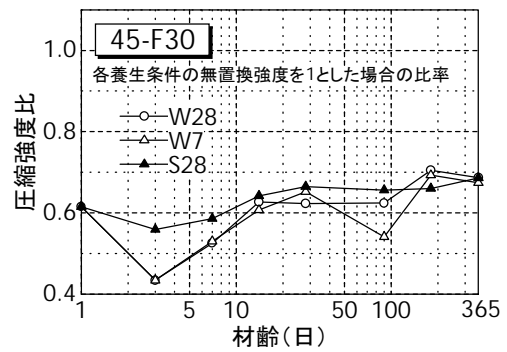


図-13 圧縮強度比の比較

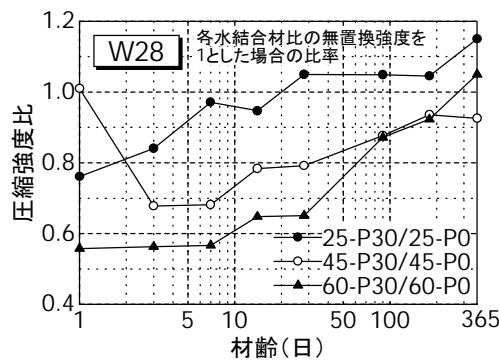


図-14 強度比に及ぼす水結合材比の影響 (PFBC 灰混入)

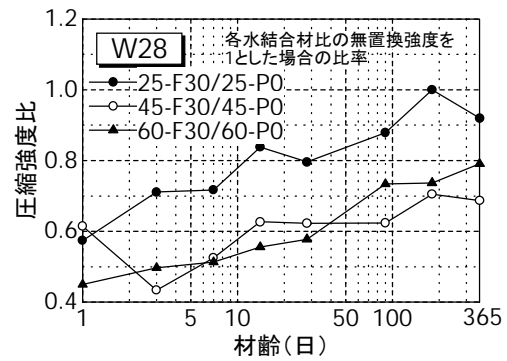


図-15 強度比に及ぼす水結合材比の影響 (FA 混入)

図-11 に 45-P30 の異なる養生条件の圧縮強度比を示す。これより、水分供給条件の違いによる、圧縮強度比の相違は見られない。しかし、養生温度の比較においては、材齢 28 日における値は、20℃養生が約 0.8 の強度比であるのに対し、60℃養生は約 0.9 と 60℃養生のほうが 20℃養生より高い値を示している。

フライアッシュ混入の 45-F30 の場合、図-12、図-13 に示すように、PFBC 灰混入の 45-P30 に比べ強度増加は若干鈍く、プレーンに対する強度比もおおむね 20%低い。

### (3) 水結合材比が強度比に及ぼす影響

図-14 に PFBC 灰混入のコンクリートにおける水結合材比の相違による材齢と圧縮強度比の関係を示す。これより、水結合材比が小さくなるにつれて圧縮強度比が増大していく傾向が示されている。図-15 に示すフライアッシュ混入の場合と比べ、PFBC 灰の利用は水結合材比が小さくなるにつれて有利になるといえる。

## 3.2 ヤング係数

図-16～図-21 にヤング係数の経時変化を示

す。圧縮強度と比べ、いずれの水結合材比においても PFBC 灰およびフライアッシュ混入の有無、養生条件、養生温度の違いによるヤング係数の相違は相対的に大きくはない。

W/B25%、水中 28 日養生の場合、P30 および F30 のヤング係数は P0 より若干小さいが、P30 で 60℃水中養生を受けると、材齢 3 日から P0 とほぼ同等なヤング係数が得られる。

W/B45%の場合、いずれの養生条件においても、PFBC 灰混入のほうがフライアッシュ混入の場合よりヤング係数は大きく、無混入の場合のヤング係数の値に近い。W/B60%、水中養生の場合も同様な傾向があるが、PFBC 灰およびフライアッシュ混入の場合若干小さくなる。

## 4. まとめ

本研究の範囲で得られた結論は以下の通りである。

- 1) PFBC 灰の置換率が増加するにつれ、コンクリートの初期圧縮強度の低下が起こるが、長期においては無置換の場合と同程度の強

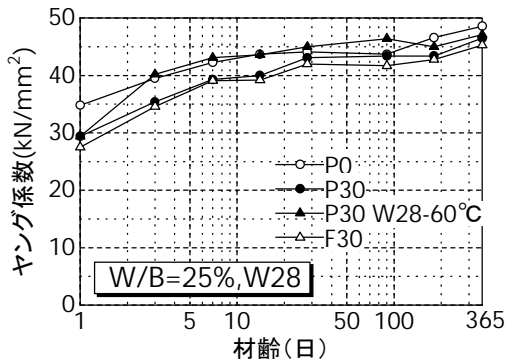


図-16 ヤング係数の経時変化

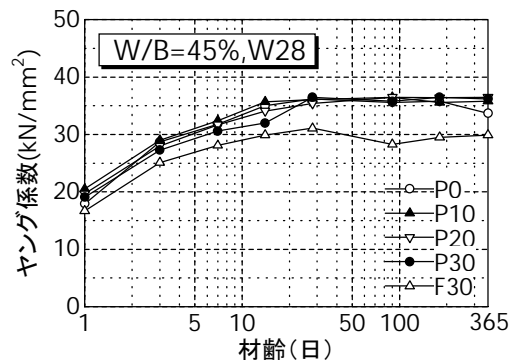


図-17 ヤング係数の経時変化

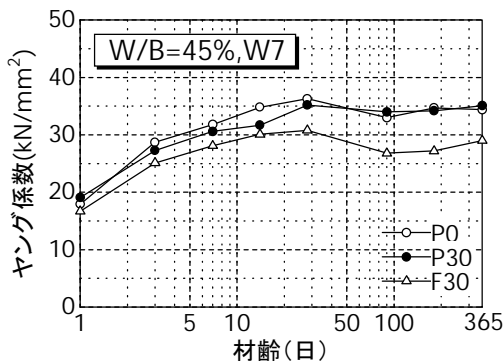


図-18 ヤング係数の経時変化

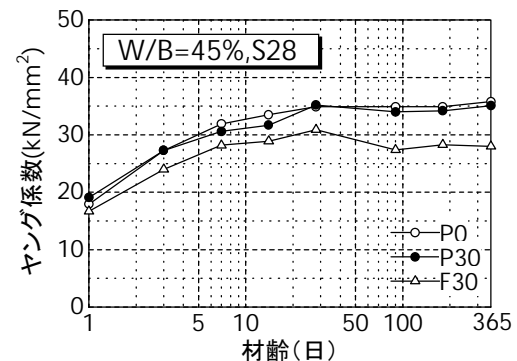


図-19 ヤング係数の経時変化

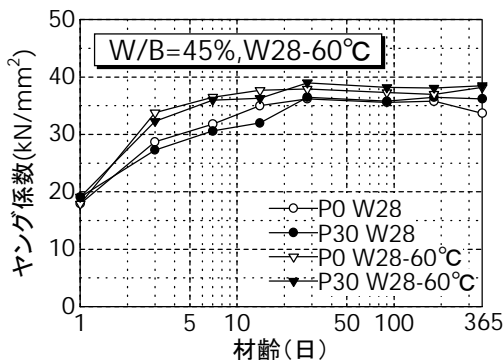


図-20 ヤング係数の経時変化

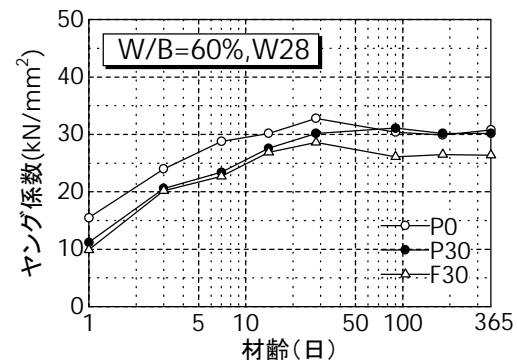


図-21 ヤング係数の経時変化

度が得られる。また、同じ置換率のフライアッシュに比べると圧縮強度は大きい。

- 2) PFBC 灰を混入したコンクリートの圧縮強度に及ぼす養生の水分条件の影響は、いずれの配合においても、W28, W7, S28 の順で強度が低下する傾向がある。高温促進養生は PFBC 灰混入による初期強度の低下の改善に有効である。
- 3) PFBC 灰の混入により初期のヤング係数は小さくなるが、同置換率のフライアッシュ混入のコンクリートより大きく、材齢 28 日以降無混入のコンクリートと同程度の値に

なる。

#### 参考文献

- 1) 佐々木肇, 新谷登, 喜多達夫, 福留和人: 加圧流動床発電所から発生する石炭灰の有効利用に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.229-234, 1997.6
- 2) 岡本修一, 宇治公隆, 松村勘寿: 流動床灰を多量に使用したコンクリートに関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.109-114, 2000.6