

## 論文 高温履歴を有する加圧流動床灰混入コンクリートの収縮特性

近藤 慎也\*1・中下 明文\*2・楊 楊\*3・佐藤 良一\*4

要旨：本研究は加圧流動床灰の有効利用を図ることを目的として、灰を用いた普通強度のコンクリートと高強度コンクリートを対象とし、灰の置換率および養生条件をパラメータとして、特に初期に高温履歴を与えた場合のコンクリートの収縮特性と、その細孔径分布測定に基づく内部構造と関連付けて、検討したものである。その結果、初期高温養生により灰混入コンクリートの内部構造は緻密化し、高強度コンクリートの場合には高温履歴後の乾燥収縮ひずみは無置換と比べ小さくなることがわかった。

キーワード：加圧流動床灰，混和材料，乾燥収縮，自己収縮，高温履歴

## 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のために開発された新しい方式の発電所であるが、ここから排出される石炭灰（以下、PFBC 灰）の有効利用が重要な課題となっている。

PFBC 灰はフライアッシュに比べ CaO および SO<sub>3</sub> を多く含有しているためエトリンガイト、Ca(OH)<sub>2</sub> の膨張性水和物の生成が特徴的なことから、その体積変化に着目した研究が行なわれているがその数は少なく、これらは一定の温度条件で養生を行なったものがほとんどである<sup>1)</sup>。

一方、PFBC 灰を用いたコンクリートの強度発現に関する既往の研究では、低水結合材比の場合によりプレーンに近い性質を示し、また初期強度の低下を高温養生により改善できることが明らかにされている<sup>2)</sup>。したがって、強度特性に関しては PFBC 灰の有効利用の可能性が見出されており、PFBC 灰を用いたコンクリートの実構造物への使用が期待されている。

しかしながら、PFBC 灰を用いたコンクリートの収縮特性に及ぼす養生条件の影響に関する検討は未だ不十分であり、PC 部材やマスコンクリートなどでの使用を想定する際に、高温履歴

を有する場合の収縮・クリープ性状などに関する検討は必要不可欠である。

そこで、本研究では PFBC 灰を混入した普通強度のコンクリートと高強度コンクリートを対象としてその温度依存性に着目し、特に初期に高温履歴を与えた場合の収縮特性について、長さ変化、鉄筋拘束応力を経時的に測定するとともに、内部構造との関連を明らかにすることを目的に細孔径分布についても調べ、検討を行なった。

## 2. 実験概要

## 2.1 使用材料

使用材料およびその物理的性質、化学的性質をそれぞれ表 - 1 および表 - 2 表 - 3 に示す。

## 2.2 コンクリートの配合

コンクリートの配合を表 - 4 示す。水結合材比(W/B)は 30% および 45% とし、PFBC 灰の置換率はセメントの量に対し内割とした。また、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 989kg/m<sup>3</sup> の一定とした。スランプおよび空気量の管理値は表 - 5 に示すとおりとした。

## 2.3 養生方法

供試体は水結合材比 30% および 45% でそれぞれ

\*1 広島大学大学院工学研究科 社会環境システム専攻 (正会員)

\*2 中国電力(株) 技術研究センター 土木・構築担当副長 工修 (正会員)

\*3 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)

\*4 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)

表 - 1 使用材料

使用材料	種類	物理的性質又は組成
セメント(C)	普通ポルトランドセメント(OPC)	表 - 2, 表 - 3 に示す
細骨材(S)	栃木県鬼怒川産川砂	密度 2.60g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 1.78%, 粗粒率 2.78
粗骨材(G)	山口県産砕石	密度 2.62g/cm <sup>3</sup> , 吸水率 0.88%, 粗粒率 6.81, 最大寸法 20mm
PFBC 灰(P)	原粉, ワンボ炭	表 - 2, 表 - 3 に示す
混和剤	AE 剤(AE)	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
	高性能 AE 減水剤(SP)	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

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 (%)
OPC	3.16	3380	-	2.00	-
PFBC 灰	2.61	4580	0.42	5.90	84

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

表 - 4 コンクリートの配合

配合名	水結合材比 (W/B) (%)	細骨材率 (s/a) (%)	置換率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					添加量(B×%)	
				水 W	セメント C	PFBC 灰 P	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤	
									SP	AE
30-P0	30	42.4	0	165	550	-	707	989	0.85	-
30-P30		41.4	30		385	165	679		1.15	-
45-P0	45	45.2	0		367	-	792		0.50	-
45-P30		44.6	30		257	110	773		0.75	0.002
45-P50		44.2	50		184	184	760		0.95	0.006

※ B=C+P

表 - 5 目標スランプおよび空気量

	W/B=30%	W/B=45%
目標スランプ(cm)	20.0±1.5	15.0±2.5
目標空気量(%)	2.0±1.0	4.5±1.5

れ材齢 0.5 日および 0.63 日まで 20±3 の室内で打込み直後から湿潤養生した後、脱枠し、直ちにアルミ箔粘着テープを用いて供試体をシールし、その後、図 - 1 に示す 3 種類の養生を行なった。60 及び 80 の高温養生を行なう場合は昇温速度を 3 /hr で所定の養生温度まで昇温させ、材齢 3 日まで恒温養生し、それ以降は昇温時と同一の速度で温度降下させた。材齢 7 日以降はシールを剥がし、温度：20±3，湿度：60±5%の環境条件で気中養生を行なった。

## 2.4 実験項目と実験方法

### (1) 長さ変化試験

無拘束供試体のコンクリートのひずみは、供試体の中央部に埋設した低弾性型（弾性係数：約 40N/mm<sup>2</sup>）の埋込み型ひずみゲージによって打込み直後より測定を行なった。なお、型枠の

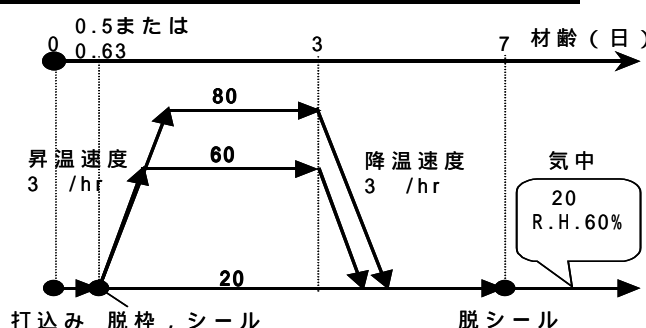


図 - 1 養生方法

底面の内側にテフロンシート，両端部の内側に発砲ポリエチレンシートを入れ，さらに型枠内側の側面，端面および底面にポリエチレンフィルムを入れ，供試体の自由な変形が拘束されるのを防いだ。

### (2) 鉄筋拘束応力

鉄筋の拘束応力は「コンクリートの自己収縮応力試験方法（案）」（自己収縮研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会）<sup>3)</sup>に準拠した試験方法で測定を行なった。なお，供試体は図 - 2 に示すとおりであり，拘束用の鉄筋は D19

(SD295A)で拘束鉄筋比は2.8%とした。20及び60で養生した供試体についてこの実験を行ない、60養生の場合には鉄筋のみ急激に温度変化するのを防ぐため断熱材で覆い、さらにアルミ箔粘着テープでシールした。

### (3) 細孔径分布

細孔径分布の測定は所定の材齢で圧縮強度試験を行なったコンクリートのモルタル部分のみを採取し、水和反応を停止させた後に水銀圧入法により実施した。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 無拘束ひずみ

本研究では、コンクリートの熱膨張係数は打込み直後から  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  で一定と仮定し、無拘束供試体の収縮ひずみを求めた。

20封緘養生後、材齢7日以降に乾燥を受けた場合の W/B=30%および45%の無拘束コンクリート供試体の材齢と収縮ひずみの関係を図-3に示す。W/B=30%における材齢7日までの自己収縮ひずみは無置換(P0)の  $-150 \times 10^{-6}$  に対して、P30は  $-50 \times 10^{-6}$  と大きく低減された。乾燥後の収縮(自己収縮+乾燥収縮)ひずみはP30が無置換に比べ若干大きい傾向が見られたが、材齢40日時点における全収縮ひずみは無置換に比べ約10%小さかった。

W/B=45%における材齢7日までの自己収縮ひずみも同様に、PFBC灰置換率の増加に伴い低減される傾向が見られた。これは膨張性水和物であるエトリンガイトの生成によるものと考えられる。W/B=45%においては乾燥後の収縮ひずみは置換率に関わらずほぼ一定の傾向を示し、

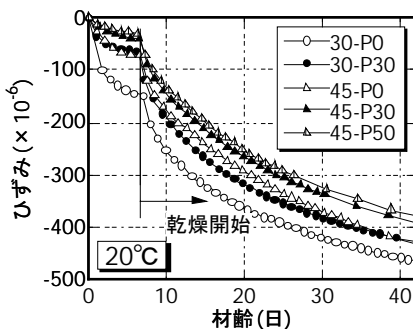


図-3 収縮ひずみの経時変化

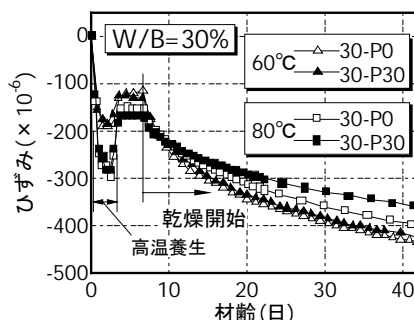


図-4 収縮ひずみの経時変化

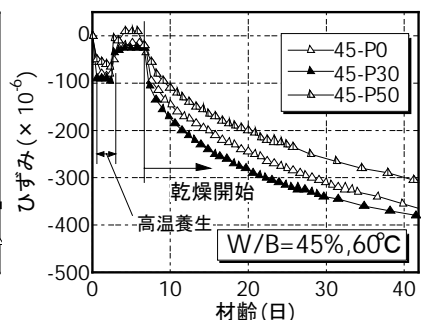


図-5 収縮ひずみの経時変化

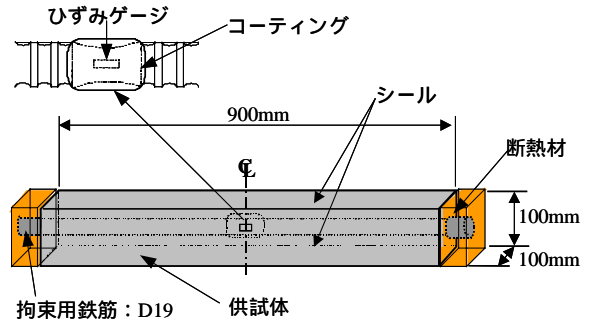


図-2 鉄筋拘束供試体

材齢40日時点での全収縮ひずみはP30で10%、P50で15%程度小さかった。

図-4に材齢3日まで60および80で封緘養生し、材齢7日以降に乾燥を受けた場合の W/B=30%の収縮ひずみと材齢の関係を示す。また、図-5に60で同様の養生を行なった W/B=45%の収縮ひずみと材齢の関係を示す。無拘束の収縮ひずみはいずれの水結合材比、灰置換率においても高温養生中に大きく増加するが、降温時には大きく減少する傾向が見られた。高温中に無拘束の収縮ひずみがこのような挙動を示したのは、水和進行中の若材齢におけるコンクリートの熱膨張係数の時間依存性に関連すると思われる。

W/B=30%におけるP30の材齢7日までの自己収縮ひずみは60の場合では無置換とほぼ同程度であるが、80においてはわずかに大きくなった。20養生の場合と異なり、高温養生により灰置換されたコンクリートの自己収縮ひずみは無置換とほぼ同程度となることがわかる。乾燥後の収縮ひずみはP30が無置換と比較し小さくなる傾向が見られ、その傾向は60より80でさらに顕著であった。P30の材齢40日時点の全収縮ひずみは60養生の場合3%程度、80養生では10%程度無置換と比較してそれぞ

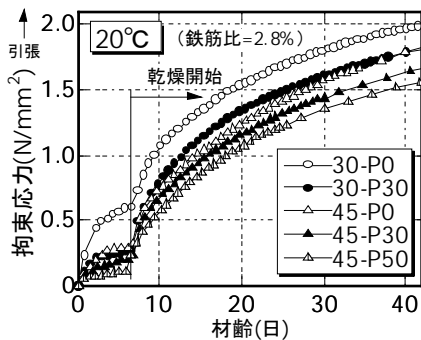


図 - 6 拘束応力の経時変化

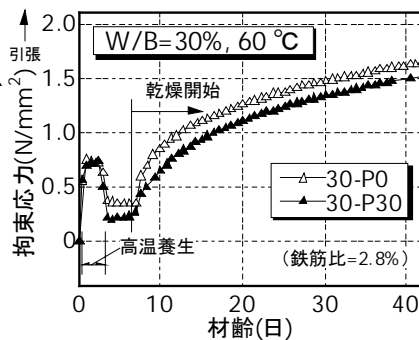


図 - 7 拘束応力の経時変化

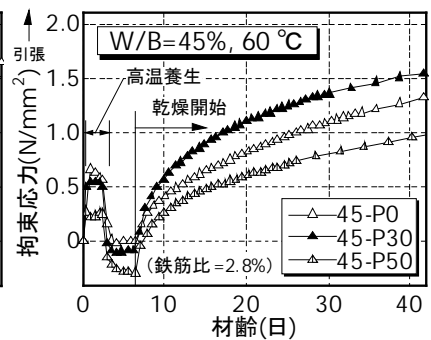


図 - 8 拘束応力の経時変化

れ小さかった。

一方、 $W/B=45\%$ で60℃養生した場合の材齢7日までの自己収縮ひずみは、P30と無置換はほぼ同程度であったがP50は小さく、材齢7日時点のP50のひずみはほとんど0であった。乾燥後の収縮ひずみはP50では無置換と比べ小さくなったが、P30では無置換より若干大きくなっており、灰置換による一義的な影響は見られなかった。材齢40日における全収縮ひずみはP30、P0、P50の順に大きかった。これは膨張性成分を含むPFBC灰の混入量が $P50 > P30 > P0$ の順である一方、収縮の駆動力となる50nm以下の細孔量(図-13参照)が $P30 \approx P0 > P50$ であり、これらの相互関係によると思われる。今後の検討課題としたい。

### 3.2 鉄筋拘束応力

本研究では、コンクリートと鉄筋の線膨張係数は等しいと仮定し、鉄筋のひずみよりコンクリートの拘束応力を求めた。

鉄筋拘束試験(鉄筋比2.8%)より得られた、20℃封緘養生後、材齢7日以降に乾燥を受けた場合の $W/B=30\%$ および45%の材齢と収縮応力の関係を図6に示す。 $W/B=30\%$ におけるP30の材齢7日までの自己収縮応力は無置換に対し50%以下と大きく低減された。乾燥後の収縮応力はP30が無置換と比較し若干大きい傾向が見られたが、材齢40日時点の全収縮応力はP30が無置換に比べ10%程度小さかった。

$W/B=45\%$ においても同様に材齢7日までの自己収縮応力はPFBC灰置換率の増加に伴い低減される傾向が見られた。無拘束ひずみと同様に、 $W/B=45\%$ における乾燥後の収縮応力は置換率

に関わらずほぼ一定の傾向を示し、材齢40日時点での全収縮応力はP30で10%、P50で17%程度小さかった。

材齢3日まで60℃で封緘養生し、材齢7日以降に乾燥を受けた場合の $W/B=30\%$ および45%の収縮応力の経時変化を図7および図8に示す。無拘束ひずみの場合と同様に、いずれの水結合材比、灰置換率においても高温養生中に大きく拘束応力が増加し、降温時に大きく減少する傾向が見られた。これは若材齢時のコンクリートの熱膨張係数が鉄筋と異なり温度応力が発生している可能性がある。

60℃養生を行なった場合の $W/B=30\%$ における材齢7日までのP30の自己収縮応力は無置換と比べ若干小さいが、無拘束ひずみと同様に高温養生により無置換との差が小さくなる傾向が見られた。乾燥後の収縮応力はP30と無置換でほぼ同程度であった。

$W/B=45\%$ においても同様にP30の材齢7日までの自己収縮応力は高温養生により無置換と近くなることが認められた。しかし、P50では明らかに無置換と比べ小さかった。乾燥後の収縮応力はP50と無置換がほぼ同程度であり、P30がやや大きくなった。材齢40日における全収縮応力はP30、P0、P50の順に大きくなっており、無拘束ひずみに対応している。P30とP0の応力差が収縮の場合の差と比べて若干大きくなっているのは図-9に示す見かけの有効ヤング係数の相違によると思われる。

ここで得られた拘束応力と、同一配合かつ同一養生を行なった無拘束供試体のひずみとの差より求めた拘束ひずみとの関係を図9に示す。

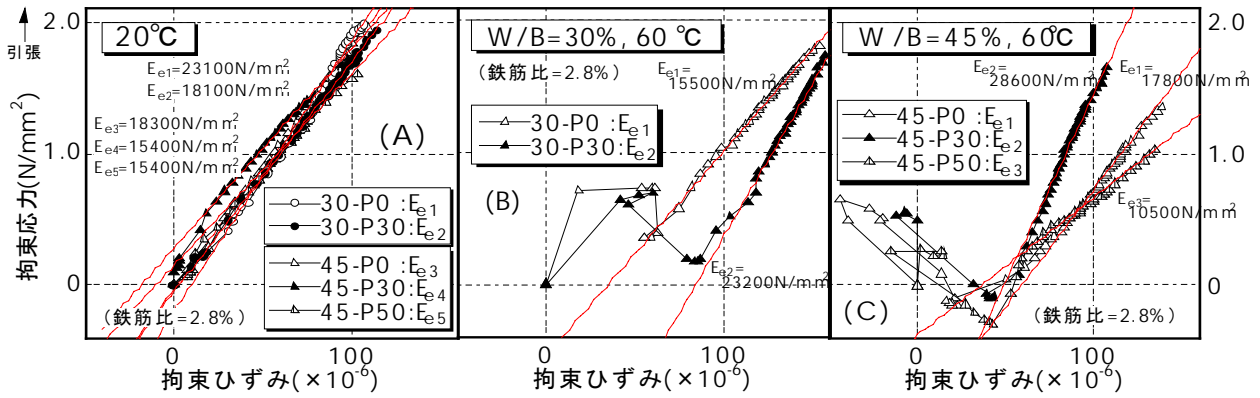


図 - 9 見かけの有効ヤング係数 (左から (A), (B), (C))

この図における曲線の傾き  
は見かけの有効ヤング係数  
( $E_e$ )と呼ばれ<sup>3)</sup>, 変動応力下  
の弾性ひずみとクリープ変  
形を含んだものである。また,  
図 10 および図 11 にヤング  
係数の経時変化を 20 お  
よび 60 養生について示す。

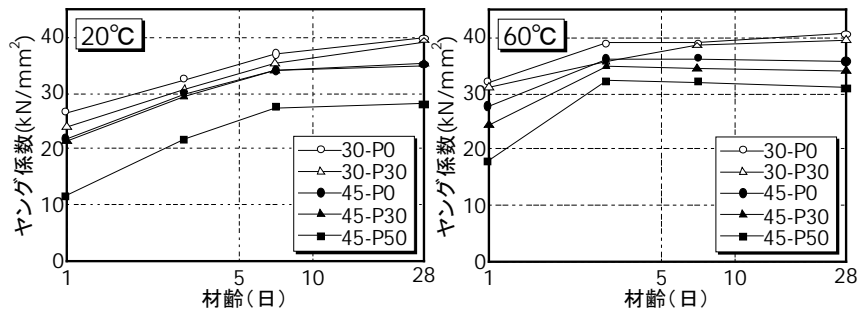


図 - 10 ヤング係数の経時変化 図 - 11 ヤング係数の経時変化

図 9(A)は 20 養生の場合  
を示すが, 乾燥後の見かけの有効ヤング係数は灰  
置換率の増加に伴い若干低下する傾向が見られた。  
一方, 60 封緘養生後, 材齢 7 日以降に乾燥を受  
けた場合の W/B=30%および 45%の同様の関係を  
(B)および(C)に示す。いずれの水結合材比に  
おいても乾燥開始以降における P30 の接線の傾き  
が無置換と比べ大きく, 見かけの有効ヤング係数  
が大きいことが認められた。ヤング係数の発現は

図 - 12 に W/B= 30%のコンクリートのモルタル  
部分を採取して調べた材齢 3 日および 28 日の累積  
細孔容積と細孔径分布を各養生温度で示す。20  
の場合の材齢 3 日での P30 の累積細孔容積は無置  
換と比較して若干大きくポラスな構造となってい  
るものの, 材齢 28 日では両者は累積細孔容積,  
分布ともほぼ等しくなった。60 の場合, 材齢 3  
日の累積細孔容積は無置換および P30 とともに

P30 と無置換に大き  
な差はないことから,  
P30 のクリープ変形  
が無置換と比べ小さ  
いことが推察される。  
小さいクリープ変形  
は PC 構造におけるス  
トレスロス低減に直  
接結びつくので, この  
点で灰置換コンクリ  
ートの有効性が示さ  
れた。

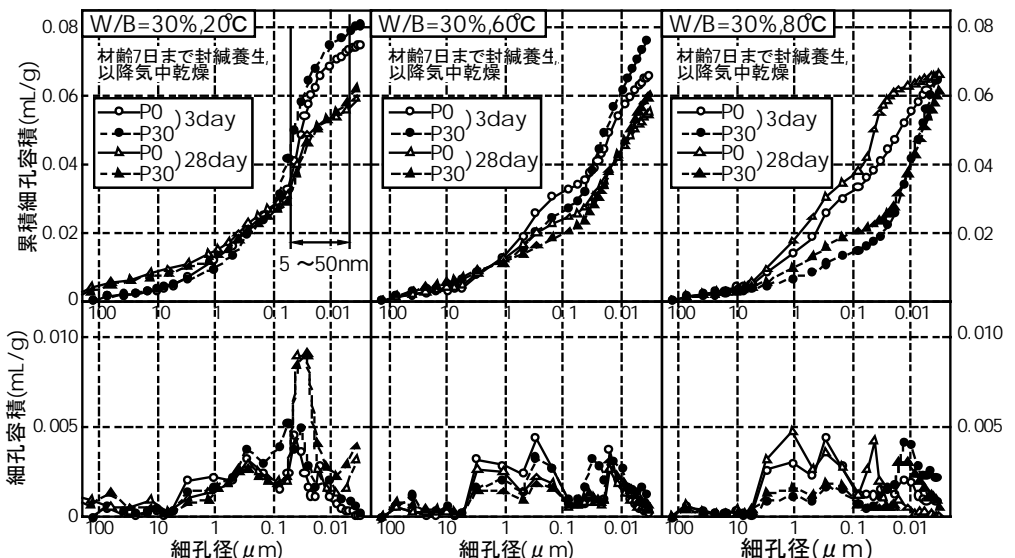


図 - 12 材齢 3 日および 28 日の累積細孔容積と細孔径分布 (W/B=30%)

### 3.3 細孔構造



20 の場合と比べ少なく、いずれの配合も高温養生により水和反応が促進され、内部構造が緻密化されている。しかし、P30 の材齢 3 日における累積細孔容積は無置換と比べ依然として若干大きかった。80 の場合、累積細孔容積は材齢 3 日および 28 日ともに P30 は無置換とほぼ同程度であった。

60 および 80 で養生した場合の細孔径分布は、無置換では 0.5~5 μm の範囲の空隙が多いのに対し、P30 では 50nm 付近の細孔が多く、それは特に 80 養生の場合で顕著であった。60 養生の場合に灰置換したコンクリートの見かけの有効ヤング係数が無置換より大きくなったのは、このようにより緻密な硬化体が形成されたためと考えることができる。一方、乾燥収縮は 5~50nm 付近の空隙が多いほど大きくなるが<sup>4)</sup>、本研究はその傾向と一致しなかった。

図 - 13 に W/B=45% の材齢 3 日および 28 日における累積細孔容積と細孔径分布を 20 , 60 で示す。W/B=30% の場合と同様に、20 養生における細孔構造は灰置換率の増加に伴いポラスとなっている。60 養生した場合、いずれの配合の細孔径も高温養生により緻密化されているのがわかる。高温養生の場合、灰置換されたコンクリートの 50nm より大きな径の細孔容積は無置換とほぼ同程度もしくはそれより少なくなり、一方でそれより小さな細孔は多くなる傾向が見られた。材齢の進行による細孔の内部構造の緻密化はいずれの配合においても見られなかった。

#### 4. まとめ

- (1) 灰置換したコンクリートの材齢 7 日までの自己収縮ひずみ及び自己収縮応力は、20 養生の場合、いずれの水結合材比においても置換率の増加に伴い減少するが、高温養生の場合においても無置換とほぼ同程度であった。
- (2) 材齢 7 日以降乾燥を受けた場合の W/B=30% の灰置換コンクリートの乾燥後の全収縮ひずみは、20 養生では無置換と比べ

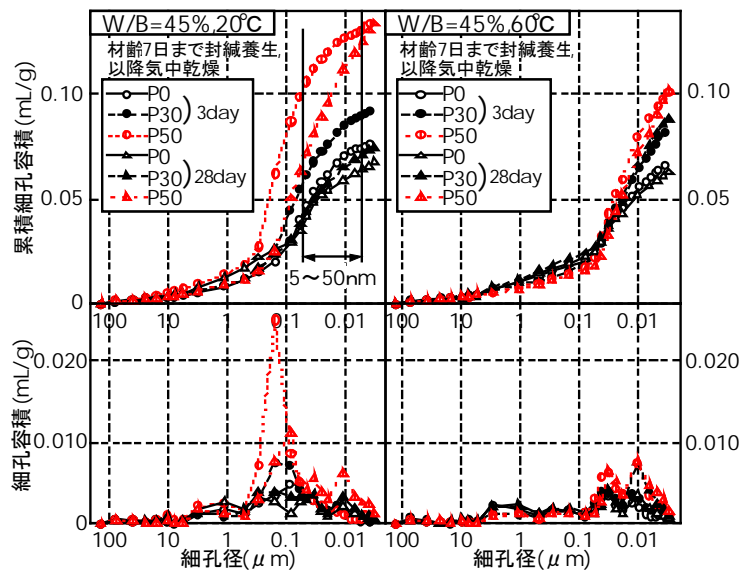


図 - 13 材齢 3 日および 28 日における累積細孔容積と細孔径分布 (W/B=45%)

若干大きい、高温養生した場合には無置換より小さくなり、特に 80 養生の場合にその傾向が顕著であった。

- (3) 高温養生により灰置換したコンクリートの水和反応が促進され、内部構造が緻密となった。特に W/B=30% において 80 養生した場合に、置換率 30% のコンクリートは無置換と比べ微細な空隙をもつ硬化体を形成した。
- (4) (3) の緻密化により、高温養生を受けたコンクリートの見かけの有効ヤング係数は置換率 30% の場合に無置換と比べ 50~60% 大きくなる傾向が見られ、灰置換によってクリープ変形は低減された。

#### 参考文献

- 1) 佐々木肇ほか：加圧流動床石炭灰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，Vol19，pp229-234，1997
- 2) 河合研至ほか：加圧流動床灰を用いたコンクリートの強度特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp273-278,2002
- 3) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，pp140-141,pp199-210,1996
- 4) P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro 著，田澤榮一，佐伯昇 監訳；コンクリート工学，技報堂出版，pp29,1998