

# 論文 フライアッシュセメントの水和反応と細孔構造に及ぼす蒸気養生の影響

鏡 健太\*1・佐藤 正己\*2・梅村 靖弘\*3

**要旨:** 本研究は、フライアッシュを混和したプレキャストコンクリートの製造における蒸気養生工程が圧縮強度と水和反応および細孔構造に及ぼす影響について検討した。その結果、蒸気養生工程が1日2サイクル工程の場合、1日1サイクル工程に比較して、圧縮強度は材齢1日、3日で小さくなったが、材齢7日に同等となった。水和反応の観点からもC<sub>3</sub>Sの反応率は材齢1日、3日は低くなったが、材齢7日には同等となった。C<sub>2</sub>Sの反応率は材齢3日以降から大きく増加した。FAの反応率は全材齢で低くなった。材齢7日における細孔構造を比較した結果、総細孔量は常温封かん養生に比較して1日1サイクル工程の場合は少なくなり、1日2サイクル工程の場合は同等となった。

**キーワード:** プレキャストコンクリート, フライアッシュ, 蒸気養生, XRD/リートベルト法, 水和反応, 細孔構造

## 1. はじめに

石炭火力発電所などから発生する石炭灰は年々増加しており、石炭灰の大部分を占めるフライアッシュの処理が大きな課題となっている<sup>1)</sup>。そのため、フライアッシュを使用した混合セメントは、グリーン購入法特定調達品目に指定され、消費促進がなされているが、欧米ほどにはコンクリート混和材としての有効利用が進んでいない<sup>2)</sup>。最近では、造り置きが可能で養生期間が施工工程に影響しないプレキャストコンクリート製品(PCa製品)への利用が検討され、地方公共団体のリサイクル認定製品として優先利用されている先行事例がある<sup>3)</sup>。一般にPCa製品は、図-1に示すプログラムに従った一般的な蒸気養生を行っており、性能照査型の示方書となった土木学会のコンクリート標準示方書の施工編では、特に厳密な規定がなされていない<sup>4)</sup>。一方、実際の工場では、公共工事が年度末に集中し製造出荷量が增大する現状や製造効率を上げ製品単価を低くするため早期に脱型する必要があることから、一般的な蒸気養生とは異なり、前置時間、昇温速度、最高温度継続時間を短縮し、最高温度から常温に取出し急激に冷却して全体の蒸気養生時間を短縮させた図-1に示すような1日2サイクル工程の促進蒸気養生を行っている<sup>5)</sup>。しかし、この促進蒸気養生においては、前置時間の短縮による異常凝結やDEF膨張<sup>6)</sup>、さらに、降温速度を急激に大きくして冷却すると内部鉄筋の拘束などにより微細ひび割れの発生が懸念される。一方、フライアッシュなどの混和材を使用した混合セメントが蒸気養生などの加熱養生を受けた場合の性能評価については、水和反応の観点から検証が進んでいないのも現状である。さらに、水密性、中性化、塩分浸透性に対する抵抗性を支配するコンクリートの物質透過性など耐久性に関わる評価では、セメントや混和材の水和反応から生成される水和物とそれらが構成する細孔

構造からの検討が必要であるが、これに関する研究報告が少ないのも現状である。そこで、本研究は、PCa製品へのフライアッシュの利用拡大を図るために、フライアッシュを混和したセメントの圧縮強度発現性と水和反応に与える蒸気養生の影響を明らかにすることを目的としたものである。本論では、特に1日2サイクル工程の促進蒸気養生がセメントの水和反応の観点から性能を担保できる養生方法かを検証するために、セメントの主鉱物であるC<sub>3</sub>S、C<sub>2</sub>S、C<sub>3</sub>A、C<sub>4</sub>AFの水和反応およびフライアッシュの反応とC-S-Hの生成量と細孔構造に与える蒸気養生履歴の影響について、常温養生との比較からも検証した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と配合条件

使用材料を表-1、コンクリート配合を表-2に示す。コンクリート配合は、水結合材比を50%とした。結合材(B)は、普通ポルトランドセメント(C)をフライアッシュ(FA)で質量比30%内割置換した。スランブは10.5±2.5cm、空気量は4.5±0.5%に設定した。水和反応解析で使用したセメントペースト配合を表-3に示す。圧縮強度試験をコンクリ

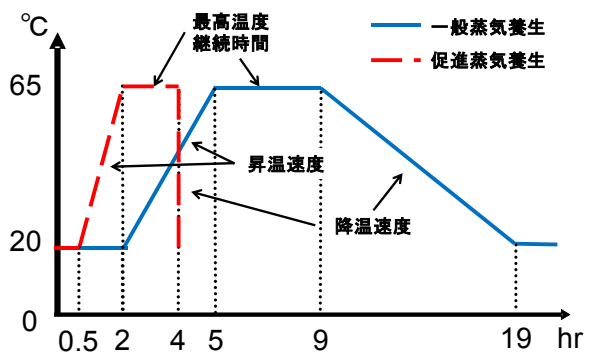


図-1 蒸気養生槽内の温度プログラム

\*1 日本大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 博士後期課程 修士(工学) (正会員)

\*2 日本大学 理工学部土木工学科 助手 修士(工学) (正会員)

\*3 日本大学 理工学部土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

ート配合で行い、細孔径分布測定試験には、コンクリートをウェットスクリーニングしたモルタルを用いた。水和反応解析をセメントペースト配合により行った。

## 2.2 蒸気養生方法

図-1 に示す蒸気養生槽内の温度プログラムにおいて、一般的な蒸気養生である A20B15C4D と前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度の4項目全てを変化させた1日2サイクル工程の蒸気養生プログラムを表-4の様に2パターン設定した。本研究では、前置温度を室温と同じ20°C、最高温度は65°C一定とした。前置時間を2hと0.5h、昇温速度を15°C/hと30°C/h、最高温度継続時間を4hと2h、降温速度を4.5°C/hの徐冷降下と最高温度から常温20°Cの環境条件下に暴露した急冷降下(実測モルタル内中心温度45°C/h)したものに变化させた。蒸気養生中はいずれの供試体も型枠上面を開放した。蒸気養生終了後、室温20°Cの部屋で封かん養生を行った。さらに、蒸気養生を行わない場合と蒸気養生の比較を行うため、練混ぜ直後に20°C恒温室で封かん養生した常温養生(Normal curing)を行った。

## 2.3 試験項目

試験項目は、以下のように圧縮強度試験とセメントとフライアッシュの水和反応率試験および細孔径分布測定試験を行った。細孔径分布測定試験の材齢は7日とした。それ以外の試験は材齢1, 3, 7, 14日とした。

### (1) 圧縮強度試験

JISA 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。養生条件ごとにφ100×200mmの缶モールドにてコンクリート供試体を作製し、蒸気養生終了直後に封かん養生を行い、試験材齢まで20°C一定の部屋で養生した。

### (2) 水和反応分析用試料調整

蒸気養生終了直後に封かん養生を行った硬化したφ50×100mmのセメントペースト供試体を、各試験材齢にダイヤモンドカッターでカットし、その後2.5mm角に粉碎した試料をアセトンで1日浸漬させ、40°C乾燥炉内に1日入れてアセトンを蒸発させた試料を分析用試料とした。

### (3) フライアッシュ未反応量の測定

浅賀らの研究を参考に<sup>7)</sup>、水和反応分析用試料1gを20ccの希塩酸(2mol/l)に入れ30分間攪拌し溶解後、不溶残分に濃度5%の炭酸ナトリウム溶液を30cc入れて溶解させ、残った溶液を105°Cで乾燥して不溶残分を測定した。これらの不溶残分は水和生成物の結合水量の補正を行う必要があるため、結合水量を補正した不溶残分を式(2)より求め、この結合水量を補正した不溶残分と普通ポルトランドセメントにフライアッシュを質量比30%置換した未反応原材料を同様に溶解させ処理した残分との差分から式(1)よりフライアッシュの反応率を算出した<sup>8)</sup>。

$$b_d = (a_0 - a_d) / (a_0 / 100) \quad (1)$$

$$a_d = a_d' / (1 - IG_d / 100) \quad (2)$$

表-1 使用材料

材料名	略号	材料の種類	備考
水	W	水道水	
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度=3.16g/cm <sup>3</sup>
			比表面積=3260cm <sup>2</sup> /g
混和材	FA	フライアッシュII種	密度=2.21g/cm <sup>3</sup>
			比表面積=4030cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	千葉県君津産山砂	表乾密度=2.65g/cm <sup>3</sup> FM=2.60
粗骨材	G	北海道産石灰岩碎石	表乾密度=2.70g/cm <sup>3</sup> FM=6.94
混和剤	AE	AE剤	変性ロジン酸化合物系

表-2 コンクリート配合

S/a (%)	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					AE (×B%)
		W	B		S	G	
			C	FA			
46	50	160	224	96	833	996	0.08

表-3 セメントペースト配合

W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		
	W	B	
		C	FA
50	583.2	816.8	349.9

表-4 蒸気養生槽内温度プログラム

蒸気養生パターン	前置時間	昇温速度	最高温度継続時間	降温速度
	(h)	(°C/h)	(h)	(°C/h)
	A	B	C	D
A20B15C4D	2	15	4	4.5
A05B30C2	0.5	30	2	急冷降下※

※常温20°Cの環境条件下に暴露

$b_d$ :材齢d日のFAの反応率 (%)

$a_0$ :未水和時の混合セメントの不溶残分 (%)

$a_d$ :結合水量を補正した不溶残分 (%)

$a_d'$ :材齢d日の試料の不溶残分 (%)

$IG_d$ :材齢d日の試料の強熱減量 (%)

### (4) 水酸化カルシウム生成量の定量

熱重量示差熱分析(TG-DTA)によって、水和反応分析用試料内の水酸化カルシウム(以下CH)の存在量を測定した。

### (5) セメント鉱物および水和物の定量

セメント鉱物および水和物の定量は、XRD/リートベルト法により解析ソフトTOPAS(Bruker AXS)を用いて星野らの手法に準拠して測定した<sup>9)</sup>。定量は、内部標準物質としてα-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10mass%)を用いて、エーライト(C<sub>3</sub>S)、ビーライト(C<sub>2</sub>S)、間隙質(C<sub>3</sub>A、C<sub>4</sub>AF)、石こう(二水、半水)、水酸化カルシウム、エトリンガイトの各セメント鉱物、水和物およびケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)とFAを含む非晶質について行った。その定量値と選択溶解法によるFA量、熱重量示差熱分析によるCH量から相組成を求めた。

### (6) 細孔径分布の測定

細孔径分布測定の試料は、コンクリートをウェットスクリーニングしたモルタルを用いて100×100×400mmの供試体を作製し、材齢1日で脱型後、封かん養生を行った試料とした。試料調整として、材齢7日に打設側面の中心部

近傍を表層から10mmでカットし、2.5~5.0mmに調整した後、凍結乾燥機(-80℃, 1Pa)で一週間水和停止処理を行った。この試料を用いて、水銀圧入式ポロシメータ(測定範囲:直径3nm~60μm)により、細孔径分布の測定を行った。

### 3. 実験結果と考察

一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2, Normal curingとの圧縮強度発現性およびC<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF, FAの反応率とCH量, C-S-Hの生成量, 細孔構造へ及ぼす影響について比較検討した。

#### 3.1 養生履歴が圧縮強度へ及ぼす影響

一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2, Normal curingの場合の圧縮強度の比較を図-2に示す。

1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2は、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較し、材齢1日では約35%小さくなったが、材齢が経過するに伴い圧縮強度が増加し、材齢3日で約10%小さく、材齢7日には同等の圧縮強度となり、材齢14日には蒸気養生時間を短縮した影響は認められなかった。Normal curingは、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較し、材齢1日では約50%小さくなったが、蒸気養生を行った場合よりも材齢の経過に伴う圧縮強度の増加が大きく、材齢3日ではほぼ同等、材齢7日には約40%、材齢14日には約35%大きくなった。前置時間の極端な短縮により、コンクリートの凝結時間よりも前に温度上昇を行うことで、異常凝結の可能性が懸念されたが、前置時間0.5hにおいても圧縮強度の面から異常凝結は確認されず、1日2サイクル工程の蒸気養生は圧縮強度の面では十分に可能であると考えられる。

#### 3.2 養生履歴が水和反応へ及ぼす影響

一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2, Normal curingの場合の各鉱物であるC<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF, FAの反応率およびCH量, C-S-Hの生成量の比較と蒸気養生条件ごとの相組成を図-3に示す。

C<sub>3</sub>Sの反応率は、1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2の場合、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して、材齢1日で15%程度低くなり、材齢3日においても5%以上低くなったが、材齢7日以降は同等となった。Normal curingの場合は、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して、材齢1日で約30%程度低くなり、材齢3日においても約15%以上低くなったが、材齢7日以降は同等となった。

C<sub>2</sub>Sの反応率は、1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2の場合、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して、材齢1日で同等となり、材齢3日以降におい

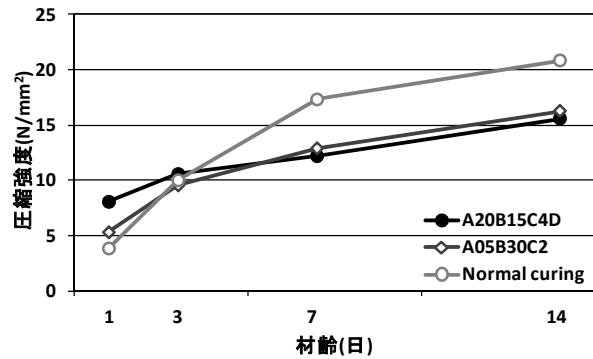


図-2 養生履歴が及ぼす圧縮強度への影響

ては10%以上も高くなった。加熱時間が短いことでC<sub>2</sub>Sの反応率が低くなることが推察されたが、材齢3日以降から反応率の増進が大きくなった。Normal curingの場合は、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して、材齢1日の反応率が同等となり、材齢3日、7日においては若干低くなったが、材齢14日には約10%も反応率が高くなった。

C<sub>3</sub>Aの反応率は、一般的な蒸気養生であるA20B15C4D, 1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2, Normal curingの全ての養生履歴において、ほぼ同等となり、材齢の経過に伴い反応率が増加する結果となった。

C<sub>4</sub>AFの反応率は、1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2の場合、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して、材齢1日で10%程度低くなったが、材齢3日にはほぼ同等となり、材齢7日以降においては約5%高い結果となった。Normal curingの場合は、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して、材齢1日、3日で30%以上低くなったが、材齢7日以降においては約10%高くなった。

FAの反応率は、1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2の場合、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して、材齢1日、3日で各々10%程度低くなり、材齢の経過とともに増加したが、材齢14日においても5%以上低くなった。FAの反応率が低くなったのは、蒸気養生時間を短縮したことで与えられる積算熱量が減少したためと考えられる<sup>10)</sup>。Normal curingの場合は、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して、材齢1日、3日でそれぞれ15%、10%程度低くなったが、材齢の経過とともに増加し、材齢14日においてはほぼ同等となった。

CH量は、1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2の場合、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して、材齢1日から多く、材齢7日、14日において2%以上多い結果となった。Normal curingの場合は、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して、材齢1日では約2%少なくなったが、材齢3日以降においては2%以上多い結果となった。これは、一般的な蒸気養生であるA20B15C4Dと比較して1日2サイクル工程の蒸気養生であるA05B30C2とNormal curingの場合は、FAの反応率が低くなったために、FAの特徴であるポズラン反応が活性

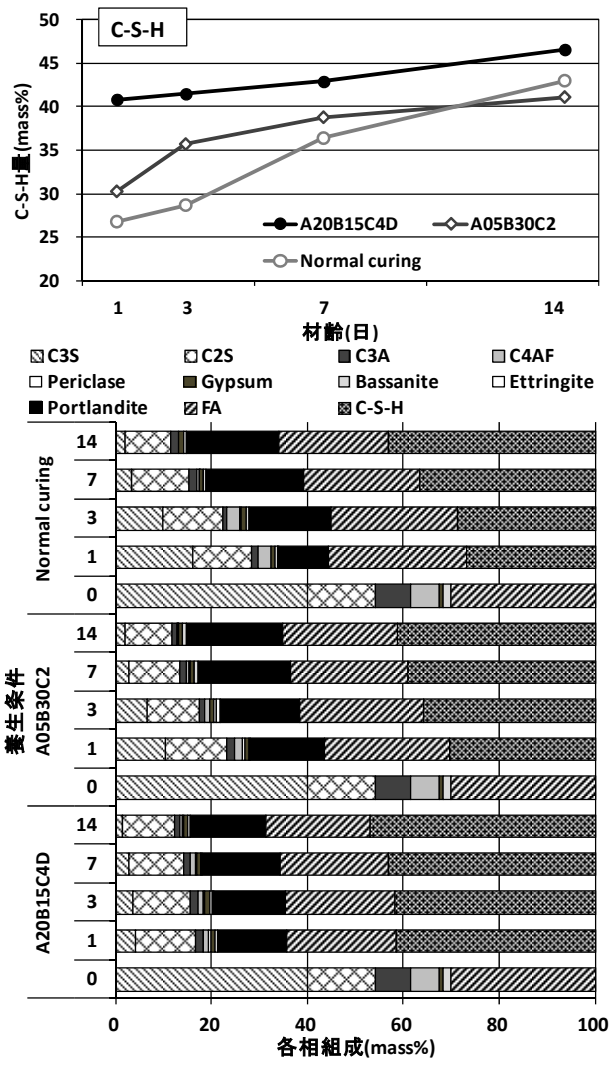
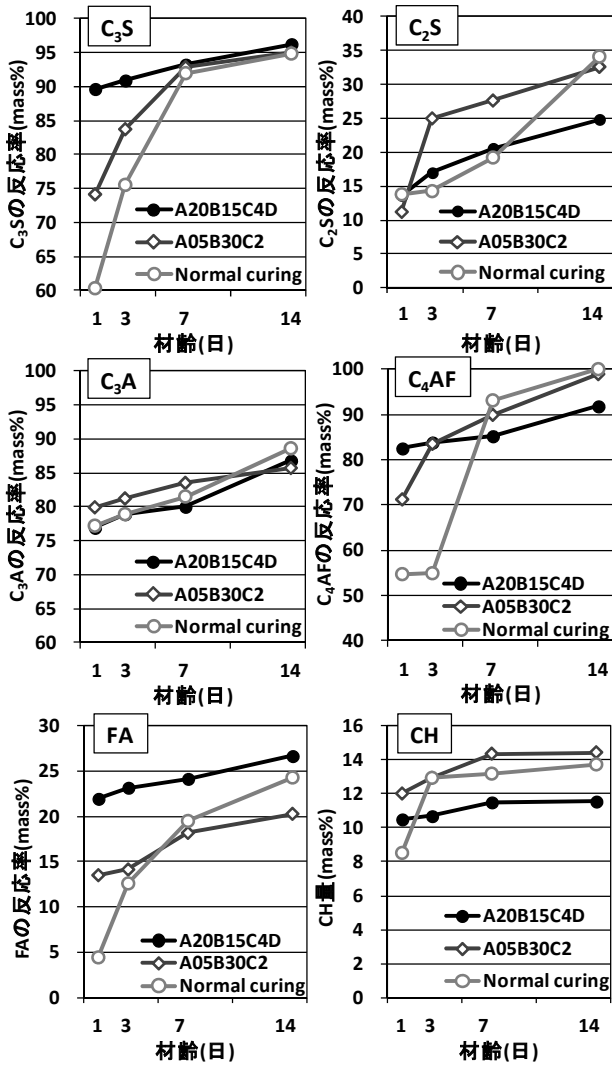


図-3 養生履歴が及ぼす水和反応への影響

化せずに、 $C_3S$  および  $C_2S$  の水和反応で生成された CH 量が多く測定されたと考えられる。

C-S-H の生成量は、1日2サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 の場合、一般的な蒸気養生である A20B15C4D と比較して、材齢1日で10%以上少なくなり、材齢の経過とともに増加したが、材齢14日においても5%程度少なくなった。Normal curing の場合は、一般的な蒸気養生である A20B15C4D と比較して、材齢1日、3日で10%以上少なくなり、材齢の経過とともに大きく増加したが、材齢14日においても少なくなった。

養生履歴ごとの相組成をみると、エトリンガイトはいずれの養生履歴においてもほとんど認められず、特に、1日2サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 を行った場合は、凝結終了時間前に最高温度まで温度を上昇させ、水和反応をさせたことにより間隙質である  $C_3A$  と  $C_4AF$  からエトリンガイトが多く生成されることが予想されたが、エトリンガイトの増加は認められなかった。

### 3.3 養生履歴が細孔径分布へ及ぼす影響

図-2 の圧縮強度の試験結果より、一般的な蒸気養生で

ある A20B15C4D と1日2サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 ではほぼ同等の圧縮強度の値となった材齢7日の細孔径分布を測定した。養生履歴ごとの細孔直径と細孔量の関係を図-4、累積細孔量を図-5に示す。

細孔直径と細孔量の関係をみると、 $0.5\sim 10\mu m$  の細孔直径の範囲では、Normal curing に大きなピークは認められなかったが、1日2サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 では $1\sim 3\mu m$  に、一般的な蒸気養生である A20B15C4D では $0.5\sim 1\mu m$  にピークが認められた。特に1日2サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 では $1\sim 3\mu m$  の範囲の細孔量が、一般的な蒸気養生である A20B15C4D と Normal curing の細孔量に比較して多く、その結果、1日2サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 の $0.3\sim 10\mu m$  範囲の累積細孔量は一般的な蒸気養生である A20B15C4D と Normal curing に比較して多くなった。 $0.1\sim 0.5\mu m$  の細孔直径の範囲では、一般的な蒸気養生である A20B15C4D の細孔量に比較して1日2サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 が多くなり、Normal curing はさらに多い細孔量となった。したがって、累積細孔量も1日2サイクル工程の蒸気養生

である A05B30C2 と Normal curing は同等となり、一般的な蒸気養生である A20B15C4D に比較して大きく増加した。0.03~0.1 $\mu\text{m}$  の細孔直径の範囲では、一般的な蒸気養生である A20B15C4D と 1 日 2 サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 は同等の細孔量を示したが、Normal curing は少ない細孔量となった。その結果、一般的な蒸気養生である A20B15C4D の累積細孔量は 1 日 2 サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 と Normal curing の累積細孔量に近づいた。0.01~0.03 $\mu\text{m}$  の細孔直径の範囲では、一般的な蒸気養生である A20B15C4D に比較して、1 日 2 サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 と Normal curing は多い細孔量となった。そのため、累積細孔量も一般的な蒸気養生である A20B15C4D が少なくなっており、1 日 2 サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 と Normal curing の累積細孔量はほぼ同等になった。

蒸気養生を行った場合に、1 日 2 サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 では 1~3 $\mu\text{m}$  に、一般的な蒸気養生である A20B15C4D では 0.3~1 $\mu\text{m}$  にピークが認められた。この原因としては、熱履歴を与えたことにより、水和反応が促進されることで生成される結晶が粗になりセメント硬化体の緻密さに不均一性ができたこと<sup>11)</sup>、蒸気養生工程の最高温度から冷却される際にモルタル内の余熱により打設面から水が逸散してモルタル内深さ方向に湿度勾配ができ、乾燥状態になったため水和に必要な水分が十分に供給されずに水和したことが原因として推察される。乾燥状態になることで 0.3~3 $\mu\text{m}$  の細孔直径の範囲でピークが認められるという結果は、郭らの研究でも同様な結果が報告されている<sup>12)</sup>。しかし、累積細孔量は、一般的な蒸気養生である A20B15C4D が最も少なくなり、蒸気養生を行っても緻密な構造体が形成されていることが確認できた。

### 3.4 養生履歴が及ぼす細孔量分布と C-S-H 量ならびに圧縮強度の関係

一般的な蒸気養生である A20B15C4D と 1 日 2 サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2、Normal curing の場合の材齢 7 日における細孔量分布と C-S-H の生成量ならびに圧縮強度の関係を図-6 に示す。ここでは、図-4 で示した細孔径分布のピークから、細孔量を細孔直径の範囲ごとに 0.003~0.01 $\mu\text{m}$ 、0.01~0.03 $\mu\text{m}$ 、0.03~0.1 $\mu\text{m}$ 、0.1~0.5 $\mu\text{m}$ 、0.5~10 $\mu\text{m}$  に区分して表現した。

総細孔量と C-S-H の生成量の関係性をみると、一般的な蒸気養生である A20B15C4D は、Normal curing に比較して、C-S-H 量が多く生成されたことで、総細孔量が少なくなり、C-S-H の生成量の増加に伴う総細孔量の減少が認められた。しかし、1 日 2 サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 は、Normal curing に比較して、C-S-H の生成量が多いにもかかわらず総細孔量はほぼ同等となり、C-S-H の生成量と総細孔量の関係性が認められなかった。各範囲の細孔量と

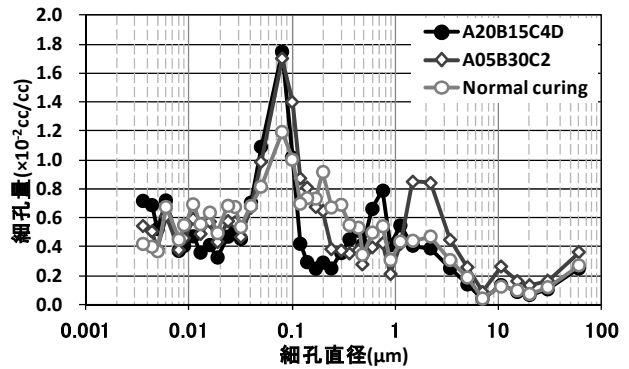


図-4 養生履歴が及ぼす細孔径分布への影響

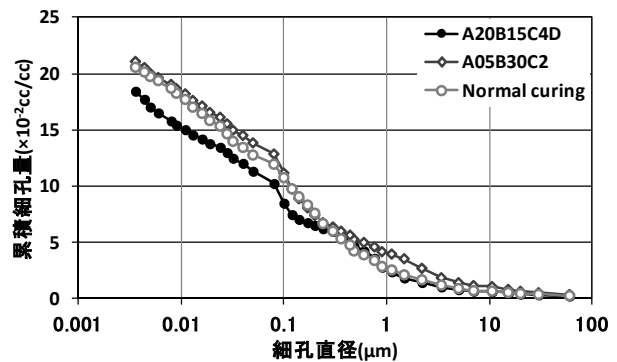


図-5 養生履歴が及ぼす累積細孔量への影響

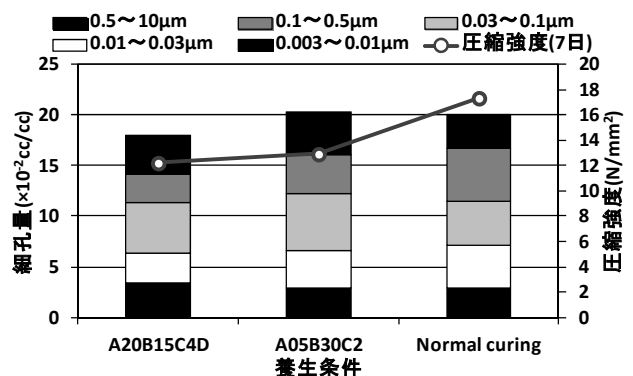
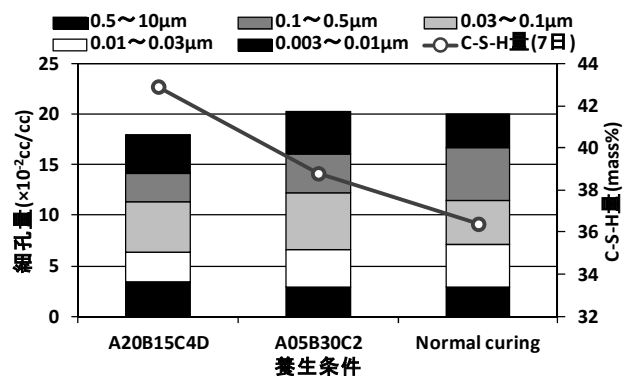


図-6 養生履歴が及ぼす細孔量分布と C-S-H 量ならびに圧縮強度の関係

C-S-H の生成量の関係は、一般的な蒸気養生である A20B15C4D は、Normal curing に比較して C-S-H の生成量が多く、0.003~0.01 $\mu\text{m}$  の範囲のゲル空隙が多いことが確認された。これは積算熱量が大きいことから、水和反応が促進されることで毛管細孔などの大きい空隙が水和物の



結晶で満たされたことでゲル空隙が増加したと考えられる<sup>11)</sup>。

総細孔量と圧縮強度の関係をみると、総細孔量は一般的な蒸気養生である A20B15C4D が最も少なく、1日2サイクル工程の蒸気養生である A05B30C2 と Normal curing はほぼ同等となった。しかし、圧縮強度は一般的な蒸気養生である A20B15C4D が最も小さく、Normal curing が最も大きくなった。蒸気養生を行った場合には、一般的に報告されている総細孔量の減少に伴う圧縮強度増加の関係性<sup>13)</sup>は認められなかった。各範囲の細孔量と圧縮強度の関係性は、一般的な蒸気養生である A20B15C4D で  $0.003\sim 0.01\mu\text{m}$  の範囲のゲル空隙が多くなったが、圧縮強度は小さくなり、C-S-H の生成量の増加に伴う圧縮強度の増加は認められなかった。Normal curing は蒸気養生を行った場合に比較して毛管細孔である  $0.1\sim 0.5\mu\text{m}$  の範囲の細孔量と微細な空隙である  $0.01\sim 0.03\mu\text{m}$  の範囲の細孔量が多く、圧縮強度も増進していることが確認できた。これら2つの範囲の細孔量が圧縮強度に大きく影響していることが推察される。

#### 4. まとめ

本実験の範囲から、結果をまとめると次のようになる。

- (1) 圧縮強度は、1日2サイクル工程の蒸気養生の場合、一般的な蒸気養生に比較して、材齢1日、3日で小さくなったが、材齢7日以降は同等となった。Normal curing の場合、一般的な蒸気養生に比較して材齢1日では小さくなったが、材齢7日以降大きくなった。
- (2)  $\text{C}_3\text{S}$  の反応率は、材齢1日、3日で、一般的な蒸気養生が最も高く、材齢7日以降では1日2サイクル工程の蒸気養生、Normal curing と同程度となった。 $\text{C}_2\text{S}$  の反応率は、材齢1日では養生条件にかかわらず同程度であったが、材齢3日以降では一般的な蒸気養生と比較して1日2サイクル工程の蒸気養生の場合に高くなり、Normal curing では、材齢14日に高くなった。FA の反応率は、1日2サイクル工程の蒸気養生の場合に一般的な蒸気養生と比較して、全材齢で低くなったが、材齢に伴う増進率は同等となった。Normal curing は、材齢7日までは低くなったが、材齢14日にほぼ同等の反応率となった。C-S-H の生成量は、1日2サイクル工程の蒸気養生の場合に一般的な蒸気養生と比較して、全材齢で少なく、Normal curing は、材齢1日で非常に少なくなったが、材齢14日までに大きく増加した。
- (3) 材齢7日の細孔径分布試験結果より、累積細孔量は一般的な蒸気養生を行った場合に Normal curing よりも少なくなる結果となり、蒸気養生を行った場合に細孔径分布に2つのピークが認められた。細孔量とC-S-Hの生成量には相関関係が認められたが、圧縮強度と総細孔量には相関関係が認められなかった。

1日2サイクル工程の蒸気養生は、一般的な蒸気養生に比較して、セメントの水和反応と圧縮強度が材齢7日で同等以上となった。材齢7日の細孔構造に関しても Normal curing と比較して総細孔量がほぼ同等になった。以上のことより、水和反応の観点から、1日2サイクル工程の蒸気養生は十分に実用可能な蒸気養生方法と考えられる。

#### 参考文献

- 1)財団法人石炭エネルギーセンター：石炭灰発生量データ(平成7年～平成21年)，pp.1-2，2011
- 2)蔵重勲：土木学会「混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333委員会)報告書ならびにシンポジウム講演概要集」，pp.1-31-1-42，2007.3
- 3)北辻政文：日本コンクリート工学会「プレキャストコンクリート製品の課題と展望」に関するシンポジウム報告書，pp.13-18，2008.3
- 4)土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，pp.420-435，2010.11
- 5)日本コンクリート工学会：プレキャストコンクリート製品の設計と利用研究委員会報告書，p.57-115，2009.8
- 6)池田隆徳，川端雄一郎，濱田秀則，佐川康貴：混和材による高温養生を行ったモルタルのDEF膨張の抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.135-140，2008.7
- 7)浅賀喜与志ほか：セメント-石英系水熱反応における未反応石英の定量，窯業協会誌No.90，pp.397-400，1982.7
- 8)小早川真，坂井悦郎，大門正機，佐藤道生：フライアッシュのボゾラン反応がコンクリートの圧縮強度発現に及ぼす影響，無機マテリアル学会，Journal of the Society of Inorganic Materials，Japan 15(334)，pp.137-145，2008.5
- 9)星野清一，山田一夫，平尾宙，山下弘樹：石灰石微粉末を添加したセメントのX線回折/リートベルト法による水和反応解析と強度発現機構に関する検討，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.47-54，2006.2
- 10)K. Koizumi, K. Kagami, Y. Umemura, N. Tsuyuki: The Effects of Silicate Structures on Hydration of Pozzolanic Materials, Congress proceedings of 13th International Congress on the Chemistry of Cement, CD-ROM, No.388, 2011.7
- 11)須藤儀一，秋葉徳二：社団法人セメント協会「コンクリート技術者のためのセメント化学雑論」，pp.15-20，1983.11
- 12)郭度連，岸利治，梅村靖弘：土木学会「混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究小委員会(333委員会)報告書No.2」，pp.132-140，2010.5
- 13)吉田潤平，堺孝司，石井光裕，武知隆男：フライアッシュを用いたコンクリートの強度・細孔構造特性とCO<sub>2</sub>削減効果に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.173-178，2010.7