

# 論文 フライアッシュモルタルの強度に及ぼす蒸気養生履歴の影響

鏡健太\*1・入江正明\*2・小泉公志郎\*3・梅村靖弘\*4

**要旨:** 本研究は、フライアッシュを混入したモルタルを蒸気養生した場合の養生過程における前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度が圧縮強度発現性に及ぼす影響について検討した。その結果、前置時間、昇温速度と比較して、最高温度継続時間と降温速度が圧縮強度に大きく影響していることが明らかになった。前置時間については、昇温開始時間と凝結始発時間を考慮して設定する必要がないことがわかった。さらに、蒸気養生を行うとフライアッシュのポゾラン反応が材齢3日から活性化し始めていることが明らかとなった。積算温度と圧縮強度発現性の相関は材齢1日では見られたが、材齢3日以降では見られなかった。

**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, ポゾラン反応, Ca(OH)<sub>2</sub>, 積算温度

## 1. はじめに

1970年代のオイルショック以降、わが国の電力供給体制は大きく変化し、原子力、LNG火力、石炭火力の3つが多くを占めている。その中でも、石炭火力は、年間約1000万トンの石炭灰を発生させ、その量は年々増加する傾向にあり、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。フライアッシュの現場用コンクリートへの適用は、ロットの違いによるワーカビリティの変動や初期養生期間の増加、レディーミクストコンクリートプラントへの供給問題などから一般の工事にはあまり用いられず、水和熱の低減および水密性の向上等を重視するダムコンクリートなど以外には利用されていないのが現状である<sup>1)</sup>。そこで、近年では、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二次製品への利用が検討されている。フライアッシュや高炉スラグ微粉末を使用した混合セメントは、ポルトランドセメントに比較し生産工程におけるCO<sub>2</sub>発生量が少ないという特徴からグリーン購入法特定調達品目に指定され、島根県や北陸地方の各県では、フライアッシュを使用したPCa製品が、県のグリーン調達指定品目として優先利用されている先行事例もある<sup>2)</sup>。一般にプレキャストコンクリート二次製品は、図-1に示すプログラムに従った蒸気養生を行っているが、蒸気養生条件についての明確な規定はされていない。工場では、製造効率を上げるため早期に脱型時強度を得る必要があることから、蒸気養生時間を短縮した促進蒸気養生を行っている<sup>2)</sup>。促進蒸気養生は蒸気養生終了直後に型枠を脱型することから、1日2回工程の蒸気養生が可能である。蒸気養生による強度発現性の比較はセメント協会研究所の報告事例にもあるように普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高

炉セメントなどの検討は行われているが<sup>3)</sup>、フライアッシュを用いたコンクリートの蒸気養生に関する研究事例が少ないのが現況である。そこで、本研究は、蒸気養生したコンクリート二次製品へのフライアッシュの利用拡大を目的として、蒸気養生条件がフライアッシュを混和したモルタルの圧縮強度発現性と水和反応に及ぼす影響について比較検討を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と配合条件

使用材料を表-1、モルタル配合を表-2に示す。水結合材比は、50%一定とした。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)で重量比30%置換した。

### 2.2 モルタル・ペーストの練混ぜ方法

(1)モルタル：セメントの物理試験(JIS R 5201-1997)に準拠した練混ぜ機(容量3L)を用いて、1バッチ2.6Lとした。練混ぜ方法を以下に示す。

- 1) セメント+混和材を30秒間空練りする。

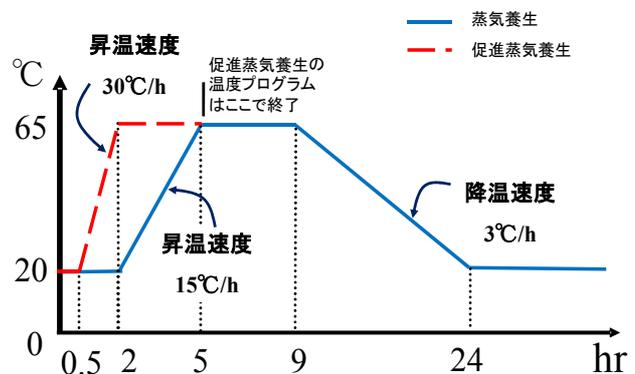


図-1 一般的な蒸気養生の温度プログラム

\*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 (正会員)

\*2 日本躯体工事(株) 代表取締役社長 (正会員)

\*3 日本大学 理工学部一般教育学科化学教室 専任講師 博士(工学) (正会員)

\*4 日本大学 理工学部土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

- 2) 1)に細骨材を加え 30 秒間空練りする。
- 3) 2)に水を加えて低速で 60 秒間練る。
- 4) 3)を 30 秒間掻き落としする。
- 5) 4)をさらに 120 秒間高速で練る。

(2) ペースト：セメントの物理試験(JIS R 5201-1997)に準拠した練混ぜ機(容量 3L)を用いて、1 バッチ 1.8L とした。練混ぜ方法を以下に示す。

- 1) セメント+混和材を 30 秒間空練りする。
- 2) 1)に水を加えて低速で 60 秒間練る。
- 3) 2)を 30 秒間掻き落としする。
- 4) 3)をさらに 120 秒間高速で練る。

### 2.3 蒸気養生方法

図-1 に示す一般的な蒸気養生槽内の温度プログラムにおいて、前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度の 4 項目を変化させたプログラムを表-4 の様に 16 パターン設定し、圧縮強度および水和反応率を比較検討した。本研究では、前置温度を室温と同じ 20℃、最高温度は、65℃一定とした。そして、前置時間を 0.5h と 2h、昇温速度を 15℃/h と 30℃/h、最高温度継続時間を 2h と 4h、降温速度を 4.5℃/h の徐冷降下と最高温度から常温 20℃へ急冷(最高温度 65℃の状態では蒸気養生槽から取り出し、常温 20℃の環境条件下に暴露)したものに変化させた。終了後、室温 20℃の部屋で封緘養生を行った。

### 2.4 試験項目

#### (1) 圧縮強度試験

JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準じて行った。蒸気養生パターンごとにφ5cm×10cm のモルタル供試体を作製し、蒸気養生終了後は試験材齢まで 20℃一定の部屋で封緘養生とした。さらに、蒸気養生を行っていない圧縮強度と蒸気養生の圧縮強度を比較するため、練混ぜ直後に室温 20℃の部屋で養生した封緘養生を行った。また、試験材齢は 1 日、3 日、7 日、14 日において測定した。その結果から、初期強度発現性の大きい蒸気養生パターン 4 つと材齢 14 日までの強度増進が大きいパターン 4 つの合計 8 パターンにおいて、材齢 28 日の圧縮強度を測定した。

#### (2) 水酸化カルシウム生成量の定量

表-3 にセメントペースト配合を示す。8 パターンごとに、φ5cm×10cm のセメントペースト供試体を作製し、材齢 3、14、28 日において、150μm ふるいを通過するよう粉碎し、水和停止後、熱重量示差熱分析(TG-DTA)によって、水酸化カルシウム存在量を測定した。

#### (3) フライアッシュ未反応量の測定

硬化したセメントペースト供試体を 150μm ふるいを通過するように粉碎し、水和停止後、50cc の希塩酸(2mol/l)に試料 1g を入れ 20 分間攪拌し溶解後、溶液を吸引ろ過して残った試料を 1000℃で焼成して不溶残分を計測した。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

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>
			ブレン値=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>
			ブレン値=4030cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S	(社)セメント協会 セメント強さ試験用標準砂	表乾密度=2.62g/cm <sup>3</sup> 吸水率=0.42%

表-2 モルタル配合

配合	W/B (%)	S/B	単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
			W	B		S
				C	FA	
FA	50	2.25	292	410	175	1316

表-3 セメントペースト配合

配合	W/B (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )		
		W	B	
			C	FA
FA	50	583	817	350

表-4 蒸気養生条件

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)	(℃/h)	(h)	(℃/h)
	A	B	C	D
A20B15C4D	2	15	4	4.5
A20B15C4	2	15	4	-
A20B15C2D	2	15	2	4.5
A20B15C2	2	15	2	-
A20B30C4D	2	30	4	4.5
A20B30C4	2	30	4	-
A20B30C2D	2	30	2	4.5
A20B30C2	2	30	2	-
A05B15C4D	0.5	15	4	4.5
A05B15C4	0.5	15	4	-
A05B15C2D	0.5	15	2	4.5
A05B15C2	0.5	15	2	-
A05B30C4D	0.5	30	4	4.5
A05B30C4	0.5	30	4	-
A05B30C2D	0.5	30	2	4.5
A05B30C2	0.5	30	2	-

表-5 圧縮強度試験結果 単位(N/mm<sup>2</sup>)

蒸気養生 パターン	材齢				
	1日	3日	7日	14日	28日
A20B15C4D	12.4	17.9	21.4	24.4	31.5
A20B15C4	11.0	17.1	21.2	26.5	-
A20B15C2D	12.6	16.9	22.4	23.3	-
A20B15C2	8.4	18.8	25.1	31.4	39.9
A20B30C4D	14.2	18.3	22.5	24.3	31.7
A20B30C4	11.4	18.6	21.5	29.0	-
A20B30C2D	11.3	18.5	23.4	26.4	-
A20B30C2	9.2	17.1	23.7	30.5	40.3
A05B15C4D	12.8	17.3	20.4	24.2	29.8
A05B15C4	9.9	17.8	24.1	28.8	-
A05B15C2D	10.9	16.2	22.5	25.4	-
A05B15C2	9.3	17.4	25.1	30.3	35.0
A05B30C4D	12.3	17.7	21.2	25.7	27.4
A05B30C4	9.9	18.4	25.2	31.3	-
A05B30C2D	10.5	16.6	23.3	27.7	-
A05B30C2	7.8	18.6	26.6	30.7	39.4
標準養生	4.8	18.5	28.2	35.3	-

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>4)</sup>。

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

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

$b_d$  : 材齢 d 日の FA 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 (%)

### 3. 実験結果と考察

表-5 に蒸気養生条件全 16 パターンごとの圧縮強度試験の実験結果を示す。

#### 3.1 圧縮強度に及ぼす最高温度継続時間の影響

前置時間, 昇温速度, 降温速度が同じ条件下での最高温

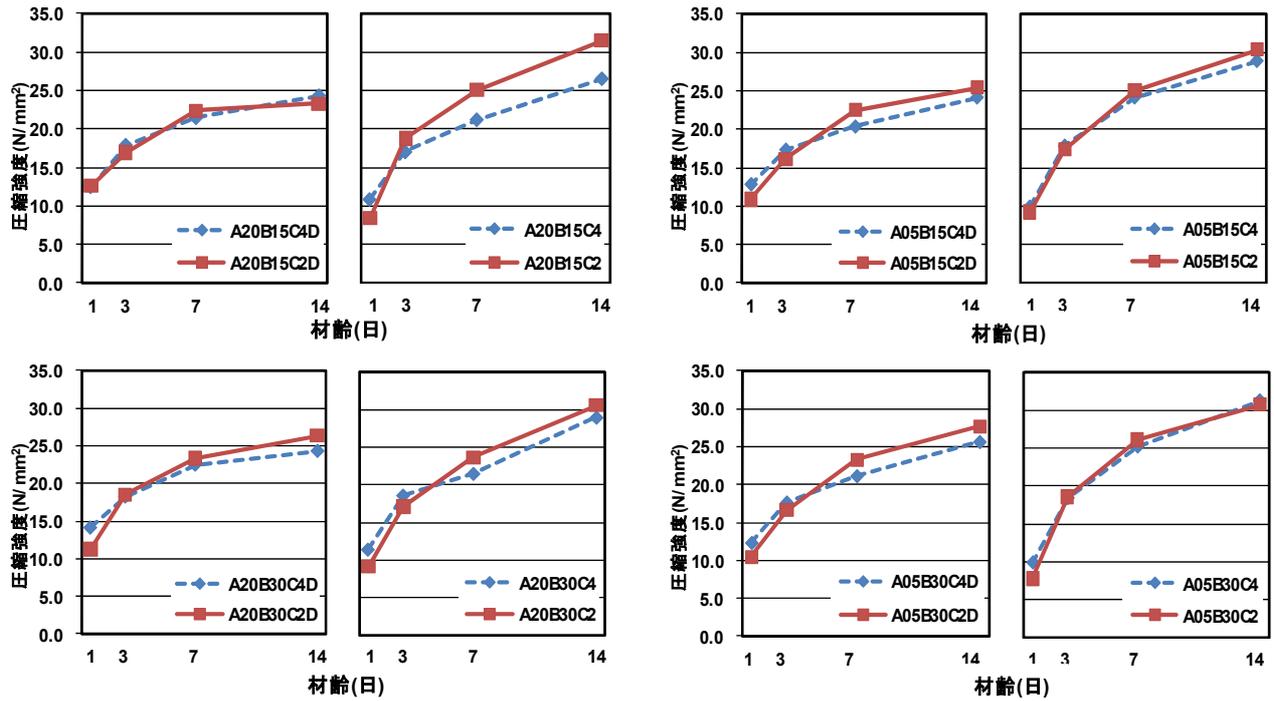


図-2 最高温度継続時間による強度比較

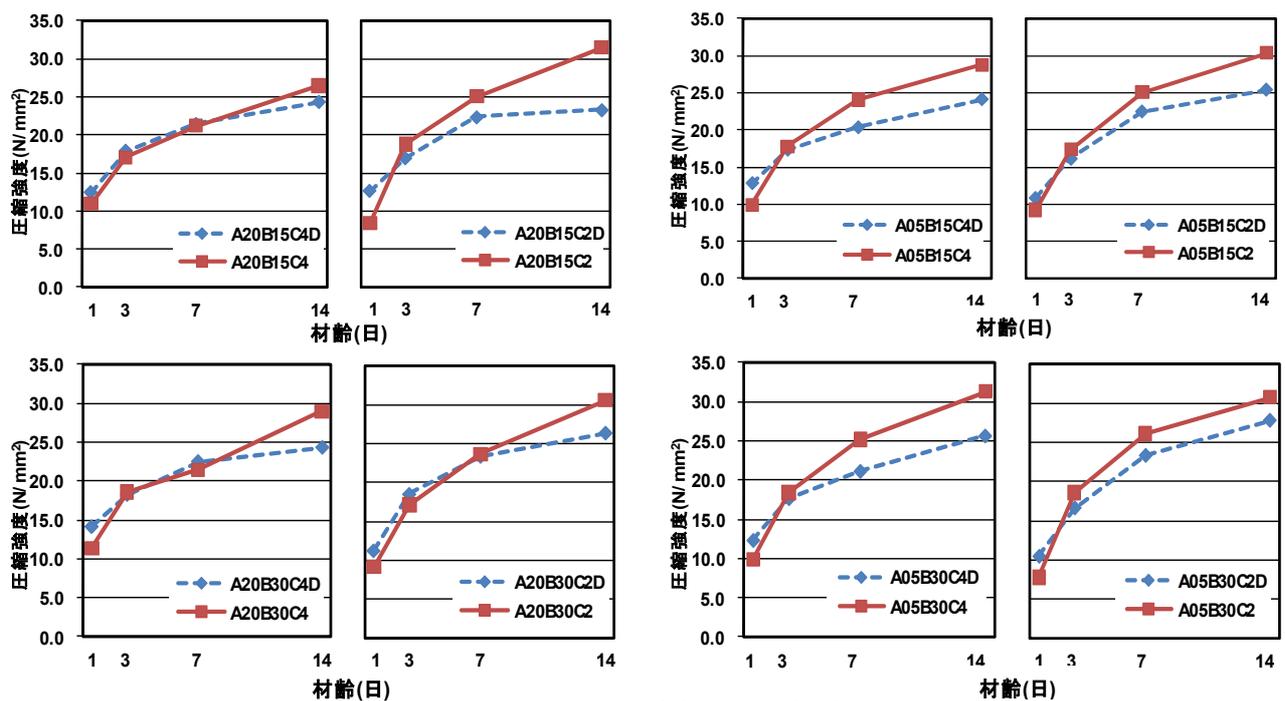


図-3 降温速度による強度比較

度継続時間 2h, 4h 別による材齢 14 日までの強度比較を図-2 に示す。これらのグラフを見ると、初期強度材齢 1 日では、最高温度継続時間 2h の場合強度が低くなっているが材齢 3 日以降はほぼ同等となった。蒸気養生パターン A20B15C4 と A20B15C2 は材齢 14 日の圧縮強度に差が出る結果となったが、他のパターンでは最高温度継続時間 2h と 4h では差が認められない結果となった。

### 3.2 圧縮強度に及ぼす降温速度の影響

前置時間, 昇温速度, 最高温度継続時間が同じ条件下での降温速度別の材齢 14 日までの強度比較を図-3 に示す。この結果を見ると、最高温度から常温 20°Cまで降温速度 4.5°C/h で徐冷した場合と、最高温度から常温 20°Cへ急冷した場合とで、明らかな違いが見られた。徐冷降下した場合の圧縮強度を基準にして常温 20°Cへ急冷した場合を強度比較をすると、初期材齢 1 日で 79%, 材齢 14 日で 119% の強度比となっている。すなわち、急冷した場合は徐冷降下した場合と比較して、初期材齢 1 日の圧縮強度が小さくなるが、材齢 14 日の圧縮強度が大きくなる傾向を示した。

さらに、圧縮強度発現性に及ぼす蒸気養生条件の影響を検討するため、材齢 1 日の初期強度が大きいパターンと材齢 14 日までの強度発現の増進が大きいパターンの蒸気養生 8 パターンを選択した。選択した蒸気養生条件を表-6 に示す。なお、この 8 パターンは材齢 28 日まで測定し、検討した。試験結果を表-5 に示す。

### 3.3 圧縮強度に及ぼす前置時間の影響

昇温速度, 最高温度継続時間, 降温速度が同じ条件下での前置時間 0.5h と 2h 別の強度比較を図-4 に示す。前置時間 2h における圧縮強度を基準として前置時間 0.5h を強度比較すると平均して材齢 1 日で 96%, 材齢 3 日で 99%, 材齢 7 日で 100%, 材齢 14 日で 100%, 材齢 28 日で 92% となり、全てのパターンでほぼ同等となった。前置時間を短くしても強度に差が出ない結果となった。従来、練混ぜ直後から昇温開始時間までの前置時間の設定については、異常硬化が発生しないように概ね使用セメントの凝結始発時間と合致するように考慮して設定がなされており、この考えに従い、本研究でも前置時間 2h を設定した。しかし、本試験結果では、前置時間を 2h から 0.5h に短くしても異常硬化の兆候は見られなかった。したがって、フライアッシュセメントの場合は、凝結始発時間より前置時間を短く設定しても圧縮強度発現性に影響が出ないと考えられる。

### 3.4 圧縮強度に及ぼす昇温速度の影響

前置時間, 最高温度継続時間, 降温速度が同じ条件下での昇温速度を 15°C/h と 30°C/h に変化させた強度比較を図-5 に示す。15°C/h と 30°C/h を比較した場合、ほぼ同等の値となる結果が得られた。特に蒸気養生パターン A20B15C4D と A20B30C4D に着目すると、材齢 1 日から 28 日の各材齢でほぼ同等の強度となった。この結果から、

表-6 選択後の蒸気養生条件

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
A20B15C2	2	15	2	-
A20B30C4D	2	30	4	4.5
A20B30C2	2	30	2	-
A05B15C4D	0.5	15	4	4.5
A05B15C2	0.5	15	2	-
A05B30C4D	0.5	30	4	4.5
A05B30C2	0.5	30	2	-

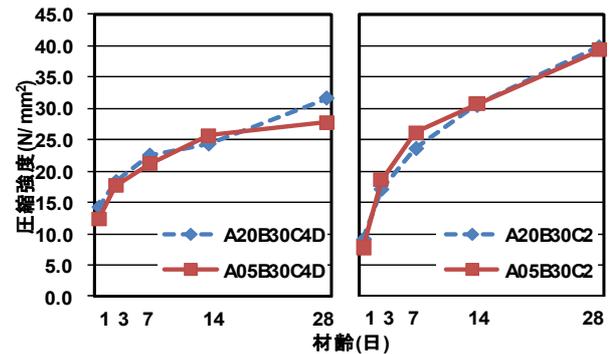
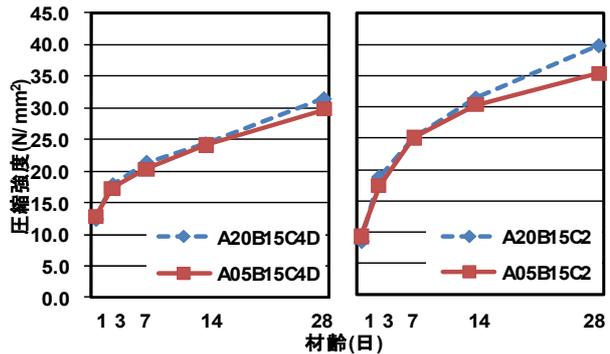


図-4 前置時間による強度比較

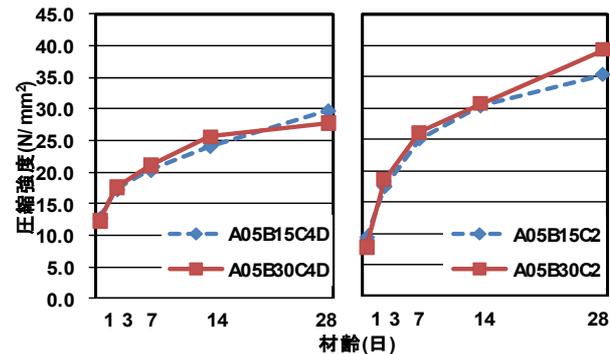
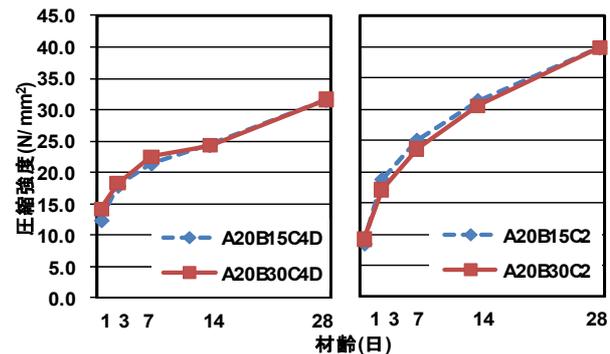


図-5 昇温速度による強度比較

昇温速度を 15°C/h から 30°C/h に短縮しても圧縮強度発現性に影響が出ないと考えられる。

### 3.5 圧縮強度に及ぼす最高温度継続時間と降温速度の影響

圧縮強度発現性に及ぼす蒸気養生プログラムでの各過程の影響については、前述したように前置時間と昇温速度の影響は小さく、最高温度継続時間は初期強度発現で影響が認められ、降温速度はかなり大きな影響が認められたことから、最高温度継続時間と降温速度の両方を考慮し検討を行った。図-6に前置時間、昇温速度が同じ条件下で最高温度継続時間が4hと降温速度が4.5°C/hの一般的な蒸気養生に近いパターンと最高温度継続時間2hかつ降温速度を常温20°Cへ急冷させた蒸気養生時間短縮のパターンの強度比較を示す。材齢1日強度は一般的な蒸気養生に近いパターンが大きいが、材齢3日ではほぼ同等の強度になり、材齢7日以降は蒸気養生時間短縮のパターンで大きい強度が出る結果となった。詳細に見ると蒸気養生時間短縮のパターンは一般的な蒸気養生に近いパターンと比較して材齢1日では、65%程度しか強度が出ていないが、材齢3日では同等となり、材齢7日では115%、材齢14日では125%、材齢28日では平均130%程度の強度となっている。このことから、前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度の個々の影響に比べて、最高温度継続時間と降温速度の組合せの影響が最も大きいことが明らかとなった。

### 3.6 積算温度と圧縮強度の関係

図-7に各蒸気養生パターンでの積算温度と圧縮強度の関係を示す。なお、ここで用いた積算温度は0°Cを基準として20°Cの前置時間から始まり、最高温度65°Cから常温20°Cまでの徐冷降下の時間を含めた全19時間の温度として算出した。材齢1日までは積算温度が高いほど圧縮強度が大きい傾向にあるが、材齢3日ではほぼ同等となり、材齢7日になると若干だが積算温度が低い場合に強度が高くなる傾向が出ている。材齢14日、28日になると、さらにこの傾向が顕著に見られた。降温速度を常温20°Cに急冷にすることで、積算温度は小さくなったが、影響が出るのは材齢1日のみであり、3日以降は積算温度に影響されなかった。フライアッシュを使用した混合セメント場合、従来の普通ポルトランドセメントにおける積算温度による強度予測方法は、適用できないものと考えられる<sup>9)</sup>。

### 3.7 フライアッシュの反応率

図-8に熱重量示差熱分析(TG-DTA)試験によって求めたCa(OH)<sub>2</sub>の存在量を示す。図-8のグラフを降温速度で見ると、降温速度4.5°C/hの徐冷降下したパターンではCa(OH)<sub>2</sub>の存在量は材齢が進むに従って増加していく結果となっている。しかし、最高温度から常温20°Cに急冷したパターンは材齢14日までは増加しているが、材齢28日になるとCa(OH)<sub>2</sub>量が減少している。この結果から、急冷

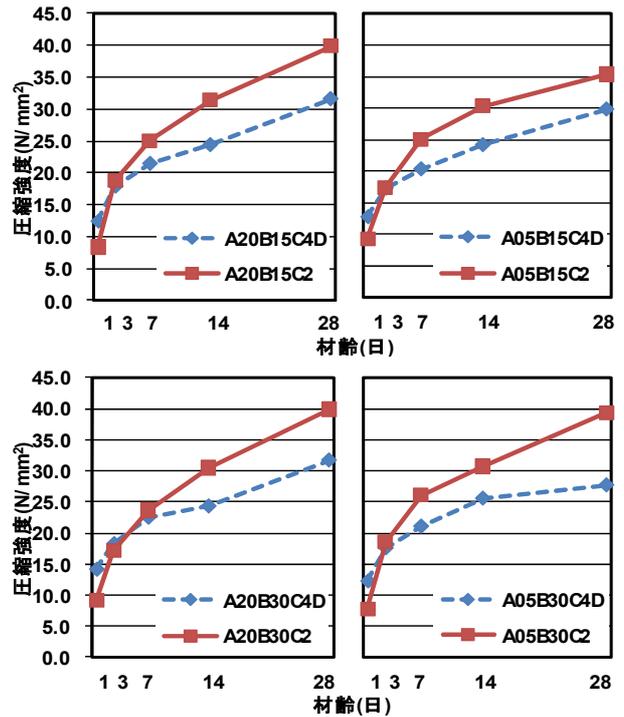


図-6 最高温度継続時間と降温速度による強度比較

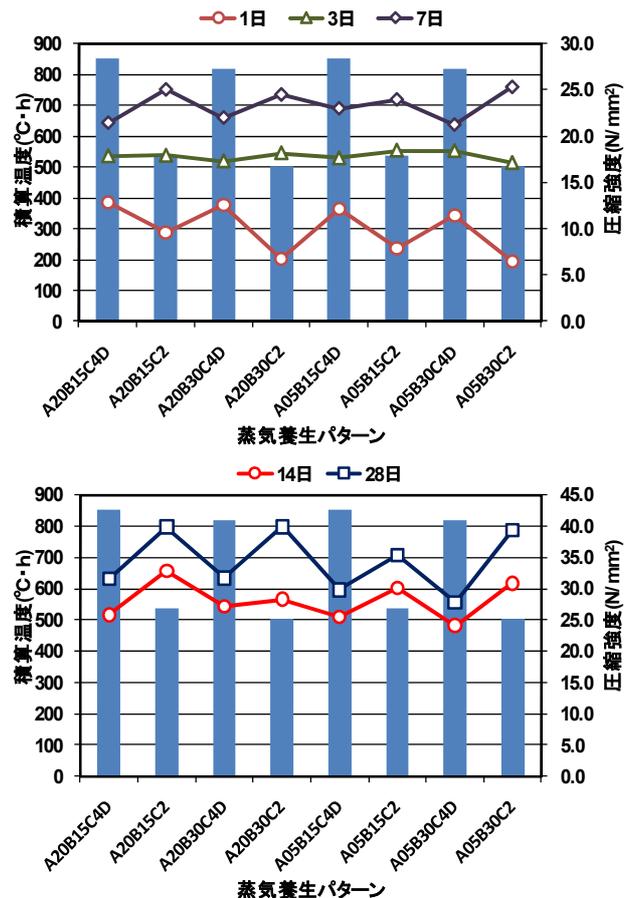


図-7 積算温度と蒸気養生パターン別の強度比較

したパターンは徐冷降下したパターンに比較し、ポズラン反応が速く始まっていることが予想される。蒸気養生した場合を標準養生した場合と比較すると、積算温度を増加させることでフライアッシュの反応が活性化することから

Ca(OH)<sub>2</sub> 消費量は増加する<sup>6)</sup>。この実験結果から、フライアッシュを混和したモルタルに蒸気養生を行った場合、ポゾラン反応が早く開始される傾向が確認できた。

最も蒸気養生時間が長いパターン A20B15C4D と最も蒸気養生時間が短い A05B30C2 において、選択溶解法で求めたフライアッシュ反応率のグラフを図-9 に示す。A20B15C4D では材齢 14 日から 28 日にかけて反応率が増進しているのに対して、A05B30C2 は材齢 3 日から 14 日にかけて反応率が増進している。この結果から、蒸気養生時間が短いパターンの場合には、ポゾラン反応が早く活性化することが明らかとなった。したがって、この反応の活性化が A05B30C2 の材齢 3 日以降の圧縮強度の増進に関係しているものと推察される。

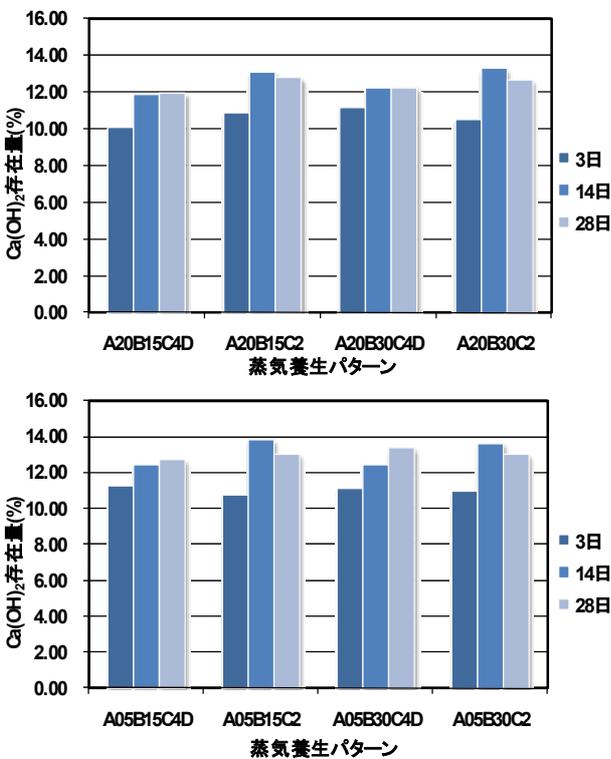


図-8 Ca(OH)<sub>2</sub> 存在量の比較

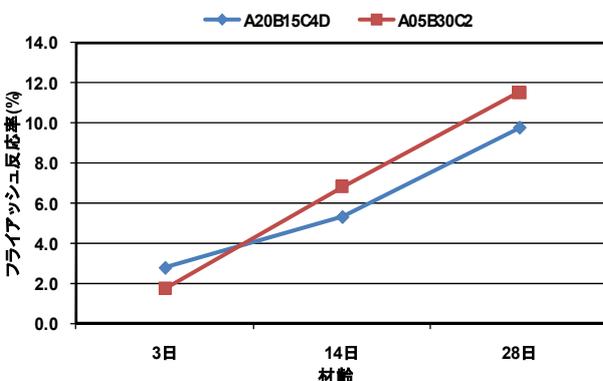


図-9 A20B15C4D と A05B30C2 のフライアッシュ反応率

#### 4. まとめ

本実験の範囲から、蒸気養生における各養生パターンが

圧縮強度発現性、フライアッシュの反応率に与える影響をまとめると次のようになる。

- (1) 前置時間 0.5h と 2h を変化させても圧縮強度はほぼ同等となり、前置時間は、昇温開始時間と凝結始発時間を考慮して設定する必要がないことがわかった。
- (2) 昇温速度 15°C/h と 30°C/h を変化させても圧縮強度はほぼ同等となり、昇温速度を速めても影響は少なかった。
- (3) 最高温度継続時間 2h と 4h を変化させると、材齢 1 日の圧縮強度は若干低くなるが、3 日以降はほぼ同等となり、2h に短縮した影響は見られなかった。
- (4) 降温速度では徐冷降下した場合と比較して、最高温度から常温 20°C に急冷した場合、材齢 1 日の初期強度は低くなるが、材齢 3 日で同程度、材齢 7 日で一般的な蒸気養生パターンより大きくなった。
- (5) 最高温度継続時間を 2h に短縮し、降温速度を最高温度から常温 20°C に急冷した場合は、前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度の個々と比較して圧縮強度への影響が最も大きいことが明らかとなった。
- (6) 積算温度の増加により、圧縮強度に大きな影響を与えたのは材齢 1 日のみであり、材齢 3 日以降の強度発現性に影響は見られなかった。
- (7) フライアッシュを混和したモルタルで蒸気養生を行うと、ポゾラン反応が材齢 3 日から活性化することが明らかとなった。この反応の活性化が材齢 3 日以降の圧縮強度の増進に関係しているものと推察される。

今後は、最高温度継続時間を短縮し、降温速度を最高温度から常温 20°C に急冷した場合の蒸気養生条件において、収縮特性やひび割れに対する検討が必要だと考えられる。

#### 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) 日本コンクリート工学協会:「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」, 2009.8
- 3) 社団法人セメント協会:「コンクリート専門委員会報告 F-53 「蒸気養生条件がコンクリートの強度発現に及ぼす影響」」, 2006.3
- 4) 小早川真, 坂井悦郎, 大門正機, 佐藤道生:「フライアッシュのポ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) 呉昊, 遠藤友紀雄, 森本博昭, 小柳治:「蒸気養生中のコンクリートの力学的性質におよぼす温度履歴の影響」, セメント・コンクリート論文集 No52, pp.592-597, 1998
- 6) 上野敦, 國府勝郎, 宇治公隆:「養生温度および置換率がフライアッシュの反応性に及ぼす影響」, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.215-226, 2006