

# 論文 加熱養生履歴がフライアッシュセメント及び高炉スラグセメントの圧縮強度発現と水和反応へ与える影響

梅村 靖弘\*1・佐藤 正己\*2

**要旨：**本研究は、フライアッシュセメント及び高炉スラグセメントを使用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発現と水和反応に及ぼす影響を検証した。セメントの水和反応から見た脱型材齢と出荷材齢での圧縮強度へ大きく影響する養生工程と1日2サイクル製造工程に適した養生工程について検討した。両セメントとも脱型材齢と出荷材齢での圧縮強度に一番大きく影響している養生条件は、最高温度と降温時間であることが明らかになった。1日2サイクル工程では前置時間と降温時間の短縮と上昇温度速度と最高温度継続時間は変えず、最高温度を上昇させることが有効であることが明らかとなった。

**キーワード：**プレキャストコンクリート, フライアッシュ, 高炉スラグ微粉末, 蒸気養生, ポゾラン反応

## 1. はじめに

フライアッシュのコンクリート混和材としての使用は高炉スラグ微粉末と比較して、ダム工事以外の一般コンクリート構造物への使用例が少ないのが現状である。この要因として、フライアッシュをセメントの内割り使用した場合には、常温状態での初期強度が小さく脱型養生日数がかかることにある。しかし、フライアッシュセメントは、普通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ており消費促進の努力が必要である。一方、国土交通省の新たな取り組みであるi-Constructionでは、コンクリート施工効率向上の手段として、工場生産されるプレキャスト(PCa)コンクリートが注目されている<sup>1)</sup>。一般にプレキャストコンクリートは、蒸気による加熱養生を行っており、コンクリートの初期発現強度を高めることが可能となり、フライアッシュセメントや高炉スラグセメントに代表される混合セメントの使用がし易くなるものと考えられる。蒸気養生温度のプログラムに関しては、図-1に示すような標準蒸気養生が施されている<sup>2)</sup>。しかし、実際の工場では、製造効率を上げるため、1日2回サイクル工程を実施する必要があることから、全体の蒸気養生時間を短縮した促進蒸気養生が実施されている<sup>3)</sup>。促進蒸気養生は、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間を短縮、最高温度から常温に急冷し全体の蒸気養生時間を短縮させ、1日2回サイクル工程の蒸気養生を可能としたものである。フライアッシュセメントの蒸気(加熱)養生が及ぼす強度発現性への影響に関する研究事例は高炉スラグセメントと比較して少ないのが現状であり<sup>4)</sup>、さらに、フライアッシュセメントの水和反応へ与える蒸気(加熱)養生の影響に関する研究は極めて少ない。一方、高炉スラグ

セメントコンクリートに加熱養生を施した場合、高炉スラグセメントの水和反応の進行による硬化時の線膨張係数の数増大と骨材の線膨張係数との相違からひび割れ発生リスクが高まることが指摘されている<sup>5)</sup>。このような背景から、本研究は、PCaコンクリートへのフライアッシュの利用拡大を目的として、市場への普及が進んでいる高炉スラグセメントと比較しながら、蒸気(加熱)養生履歴がフライアッシュセメントと高炉スラグセメントの水和反応へ与える影響を明らかにし、さらに、コンクリートとして評価することを想定し骨材の影響を除外したセメントペースト硬化体の圧縮強度発現性へ与える影響について明らかにすることを目的とした基礎研究である。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と配合条件

使用材料を表-1に示す。水和反応と圧縮強度試験用のセメントペースト(CP)配合を表-2に示す。水結合材比は50%一定とした。フライアッシュ(FA)のセメント置換率はフライアッシュセメントC種を想定し30%とし、高炉スラグ微粉末(BS)のセメント置換率は、高炉スラグセメントB種を想定し45%とした。

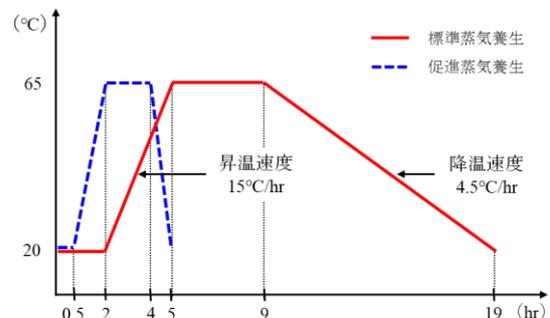


図-1 一般的な蒸気養生の温度プログラム

\*1 日本大学 理工学部土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

\*2 日本大学 理工学部土木工学科 准教授 博士(工学) (正会員)

## 2.2 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-3の様に10パターンを設定し、圧縮強度を比較検討した。本研究では、前置温度を室温と同じ20°C、最高温度は65°Cと80°Cとした。そして、前置時間を0.5hと2h、昇温速度を15°C/hと30°C/h、最高温度継続時間を2hと4h、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へ急冷(最高温度の状態蒸気養生槽から取り出し、常温20°Cの環境条件下に暴露)したものに変化させた。終了後、供試体はアルミテープにて封かんし室温20°Cで養生した。

## 2.3 試験項目

### (1) 圧縮強度試験

硬化したCP試料をダイヤモンドカッターで5×15×15mmの立方体に切り出し端面を研磨したものを供試体とした。試験値は供試体8本の内、上下限値を除く6本の平均値とした。促進蒸気養生の脱型材齢は、1, 2サイクルとも同時脱型として材齢1日として評価した。

### (2) 水和反応分析用試料調整

硬化したCPの相組成を後述する(3)~(6)の試験により求めた。(3), (4)は水和停止前、(5), (6)は水和停止を施した試料を用いた。水和停止はCP試料を直径約2.5mm程度に粉砕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て行った。

### (3) 間隙水量の測定

蒸発皿に試料を量り取り、105°Cの乾燥炉に入れ、質量減少量を間隙水量とした。

### (4) 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)を用いて測定した。内部標準物質として $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(10mass%)を用いて、各セメント鉱物と結晶質水和物および非晶質相を定量した。さらに、熱重量示差熱分析により水酸化カルシウム量及び炭酸カルシウム量の補正を行った。

### (5) FAの反応率の測定

FAの反応率は選択溶解法を用いて、試料を希塩酸(2mol/l)に入れ攪拌し溶解後、不溶残分に5%の炭酸ナトリウム溶液を入れて溶解させ残った溶液を105°Cで乾燥し不溶残分を測定してから未反応量を求め算出した。

### (6) BSの反応率の測定

BSの反応率は、試料と未水和スラグに900°C、30分の加熱処理を行い、標準添加法を用いて、未水和スラグを試料に内割0, 10, 20mass%をそれぞれ添加し、XRD測定後、XRD/リートベルト法により、BSに含有する鉱物であるGehlenite, Akermaniteの定量合計値と添加量から求めた検量線からBS未反応量を求め算出した<sup>6)</sup>。

表-1 使用材料

材料	略号	材料の種類	諸元
水	W	蒸留水	-
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度 = 3.15 g/cm <sup>3</sup>
			比表面積 = 3260 cm <sup>2</sup> /g
混和材	B	BS	高炉スラグ微粉末
			密度 = 2.89 g/cm <sup>3</sup>
	FA	フライアッシュII種	
			密度 = 2.24 g/cm <sup>3</sup>
			比表面積 = 3700 cm <sup>2</sup> /g

表-2 セメントペースト配合

配合名	W/B (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	B		
			C	BS	FA
NBB	50	602	662	542	-
NFC		585	819	-	351

表-3 蒸気養生条件

熱養生パターン	最高養生温度 (°C)	前置時間 (h)	昇温速度 (°C/h)	最高温度継続時間 (h)	降温速度 (°C/h)
		A	B	C	D
65A20B15C4D	65	2	15	4	4.5
65A05B15C4D	65	0.5	15	4	4.5
65A20B30C4D	65	2	30	4	4.5
65A20B15C2D	65	2	15	2	4.5
65A20B15C4	65	2	15	4	急冷
65A05B15C4	65	0.5	15	4	急冷
65A05B30C2	65	0.5	30	2	急冷
80A20B15C4D	80	2	15	4	4.5
80A05B15C4	80	0.5	15	4	急冷
80A05B30C2	80	0.5	30	2	急冷

表-4 圧縮強度試験結果

蒸気養生パターン		単位 (MPa)						
		1day	3day	7day	14day	28day	91day	
65A20B15C4D	NBB	24.6	32.1	39.1	46.1	50.3	61.3	
	NFC	10.0	14.5	18.2	25.3	34.6	47.8	
65A05B15C4D	NBB	24.3	31.1	37.4	44.4	49.3	62.6	
	NFC	10.1	13.7	17.6	23.1	33.8	44.7	
65A20B30C4D	NBB	25.1	32.1	40.1	45.7	49.8	61.4	
	NFC	10.8	13.9	19.4	24.1	34.6	47.8	
65A20B15C2D	NBB	24.2	32.9	38.4	45.7	52.0	63.9	
	NFC	11.9	15.2	19.3	26.7	34.2	47.5	
65A20B15C4	NBB	20.0	28.8	36.4	42.9	50.9	61.2	
	NFC	6.8	12.5	17.2	22.8	32.0	43.3	
65A05B15C4	NBB	17.3	25.1	34.1	40.7	47.9	58.1	
	NFC	8.6	14.5	18.0	23.8	34.8	47.1	
65A05B30C2	NBB	12.0	21.8	30.7	39.6	47.3	59.4	
	NFC	4.7	10.9	16.2	21.6	29.5	44.9	
80A20B15C4D	NBB	31.0	38.8	43.7	50.1	55.6	60.0	
	NFC	17.7	21.1	24.1	26.5	30.4	40.3	
80A05B15C4	NBB	24.0	31.7	40.2	48.1	56.1	60.5	
	NFC	10.0	13.6	19.9	25.6	32.2	40.6	
80A05B30C2	NBB	16.8	25.6	35.3	43.0	49.5	58.2	
	NFC	7.6	12.9	17.9	22.7	27.8	41.2	

### 3. 実験結果と考察

表-3に示す蒸気養生条件全10パターンごとのペースト配合NBB, NFCの圧縮強度試験結果を表-4に示す。

#### 3.1 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別の圧縮強度比較を図-2に示す。前置時間0.5hと2hを比較すると, NBBとNFCともに材齢91日迄ほぼ同等の圧縮強度となり, NBBとNFCともに前置時間を短くしても強度に大きな差が生じない結果となった。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いる。この考えにしたがい, 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に短縮してもフライアッシュセメント, 高炉スラグセメントとも異常硬化は見られなかった。

#### 3.2 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に変化させた圧縮強度比較を図-3に示す。15°C/hと30°C/hを比較した場合, NBB, NFCともに材齢91日迄ほぼ同等の圧縮強度となり, NFCとNBBともに昇温速度を大きくても強度に大きな差が生じない結果となった。この結果から, 昇温速度を15°C/hから30°C/hに大きくして昇温時間を短縮してもフライアッシュセメント, 高炉スラグセメントとも圧縮強度発現性に影響は見られなかった。

#### 3.3 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度継続時間2h, 4h別による圧縮強度比較を図-4に示す。2hと4hを比較した場合, NBBの場合は材齢91日では, 2hは4hよりも強度がやや増加したがNBB, NFCともに材齢91日迄ほぼ同等の圧縮強度となった。この結果から, 最高温度継続時間を4hから2hに短縮してもフライアッシュセメント, 高炉スラグセメントとも圧縮強度発現性に大きな影響は見られなかった。

#### 3.4 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圧縮強度比較を図-5に示す。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へ急冷した場合を比較するNBBの場合では, 材齢1日で81%, 材齢3日で90%, 材齢7日, 14日で93%の強度比となり材齢14日まで低下し, 材齢28日以降では同程度となった。NFCの場合では材齢1日で68%, 材齢3日で86%, 材齢7日で95%, 材齢14日以降では90%の強度比となり材齢91日まで低下した。

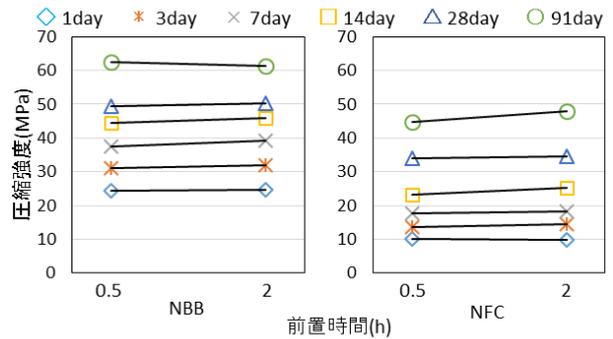


図-2 前置時間別による圧縮強度比較

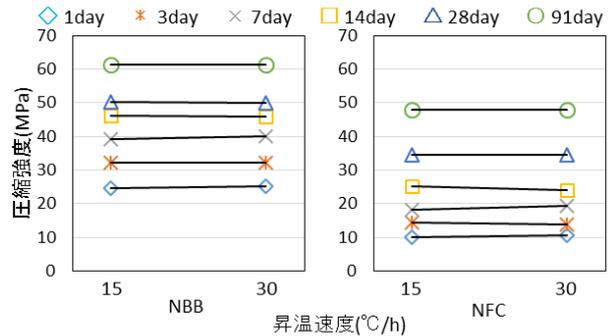


図-3 昇温速度別による圧縮強度比較

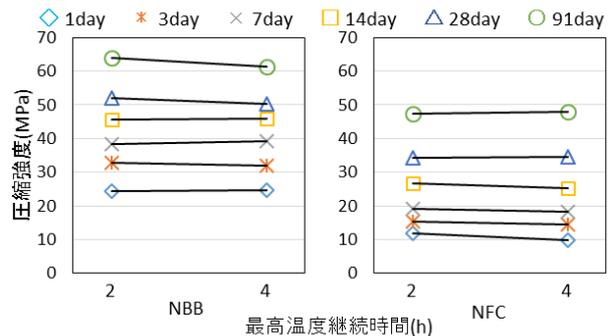


図-4 最高温度継続時間別による圧縮強度比較

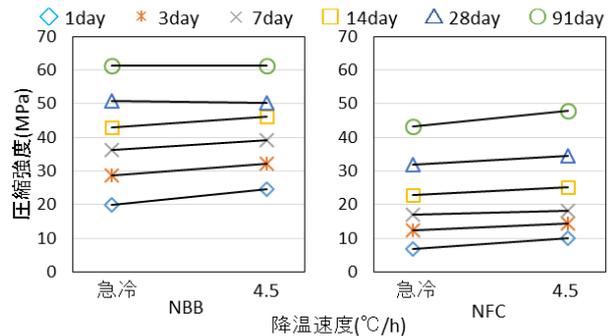


図-5 降温速度別による圧縮強度比較

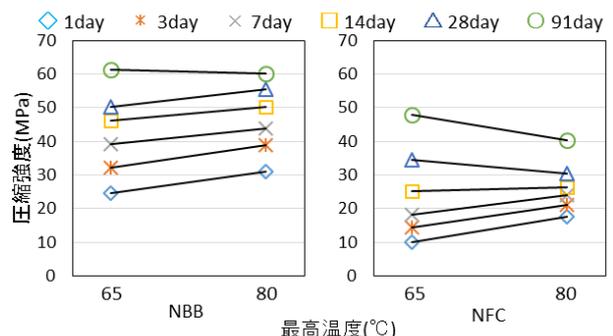


図-6 最高温度別による圧縮強度比較

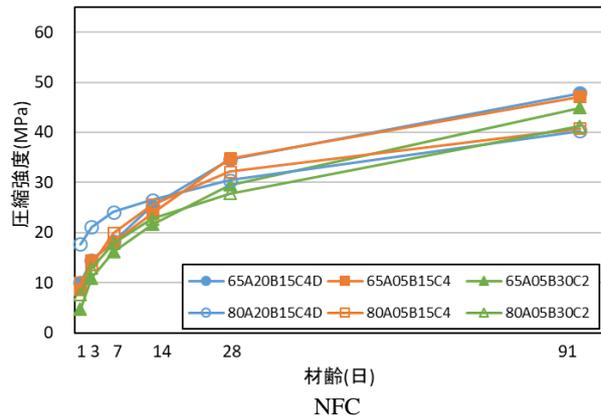
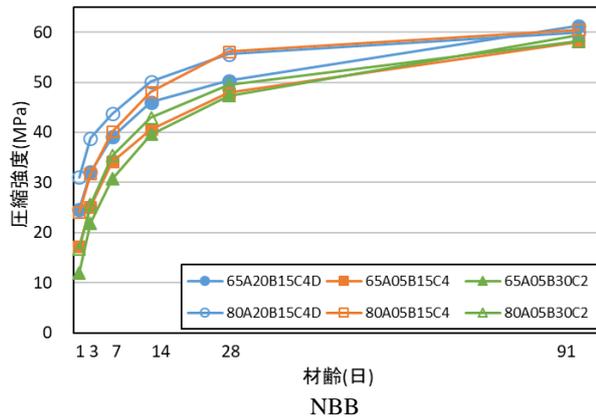


図-7 熱養生履歴別の圧縮強度

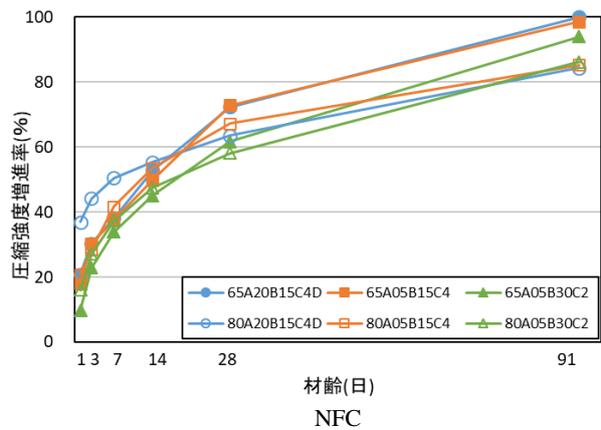
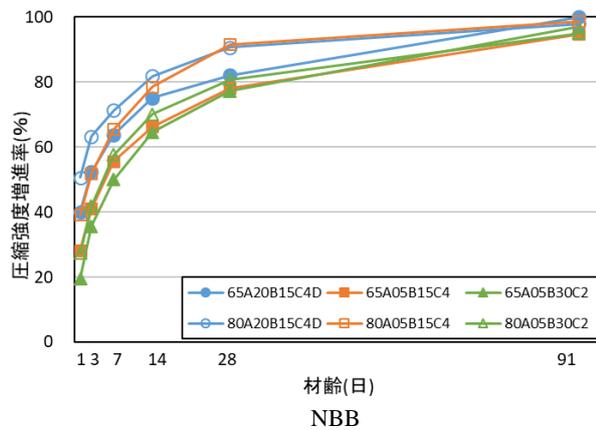


図-8 熱養生履歴別の圧縮強度増進率

### 3.5 圧縮強度に及ぼす最高温度の影響

前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度が同じ条件下で最高温度別の圧縮強度比較を図-6に示す。NBB、NFCともに最高温度を65℃から80℃へ上昇させた場合は強度増進が見られた。NBBの場合では、材齢1日で126%、材齢3日で121%、材齢7日、14日、28日では約110%の強度比となり、材齢91日で同程度となった。NFCの場合では材齢1日で177%、材齢3日で146%、材齢7日で132%の強度比となり、材齢14日で同程度となり、材齢28日で88%、材齢91日で84%の強度比となり低下した。NBB、NFCともに初期材齢での発現強度を大きくするために最高温度を上げることは有利であり、その傾向はフライアッシュの方が大きいことが明らかとなった。

### 3.6 養生履歴が圧縮強度発現性へ及ぼす影響

一般的な標準蒸気養生パターンであるA20B15C4Dと前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間をすべて短縮した1日2サイクル促進蒸気養生パターンであるA05B30C2、さらに、前置時間と降温時間を短縮し、PCaコンクリート工場作業者の就業時間の多少の延長を想定し、極力養生時間を多くとり1日2サイクル工程が可能な蒸気養生パターンであるA05B15C4、各々の養生

パターンで最高養生温度65℃と80℃とした場合のNBBとNFCの圧縮強度の比較を図-7に示す。さらに、最高養生温度が65℃の標準蒸気養生パターン65A20B15C4Dの材齢91日の圧縮強度を基準(100%)として、各圧縮強度をその強度比で比較したものを図-8に示す。NBB、NFCともに最高養生温度を80℃にした標準蒸気養生パターンであるA20B15C4Dの場合(80A20B15C4D)が、脱型材齢1日及びPCaコンクリート製品の出荷基準材齢14日での圧縮強度が一番大きくなった。しかし、NFCの場合は、材齢28日以降では、最高養生温度を65℃とした養生パターンである65A20B15C4D、65A05B15C4、65A05B30C2の強度が80A20B15C4Dと同等以上となった。一方、NBBの場合は材齢28日以降、80A20B15C4Dと80A05B15C4が材齢91日まで一番大きくなった。

NBBの場合は、材齢28日までの圧縮強度増進率がNFCよりも大きくなったが、その後の増進は鈍くなり材齢91日では、各養生パターンの圧縮強度は同程度となった。NFCはNBBよりも圧縮強度増進率は緩やかで材齢91日以降も増進傾向を示した。さらに、最高温度80℃は65℃と比較して、材齢28日までは圧縮強度発現率が大きい、それ以降は下回る結果となった。また、一般的な知見では、蒸気養生履歴では降温時間を長くとり積算温

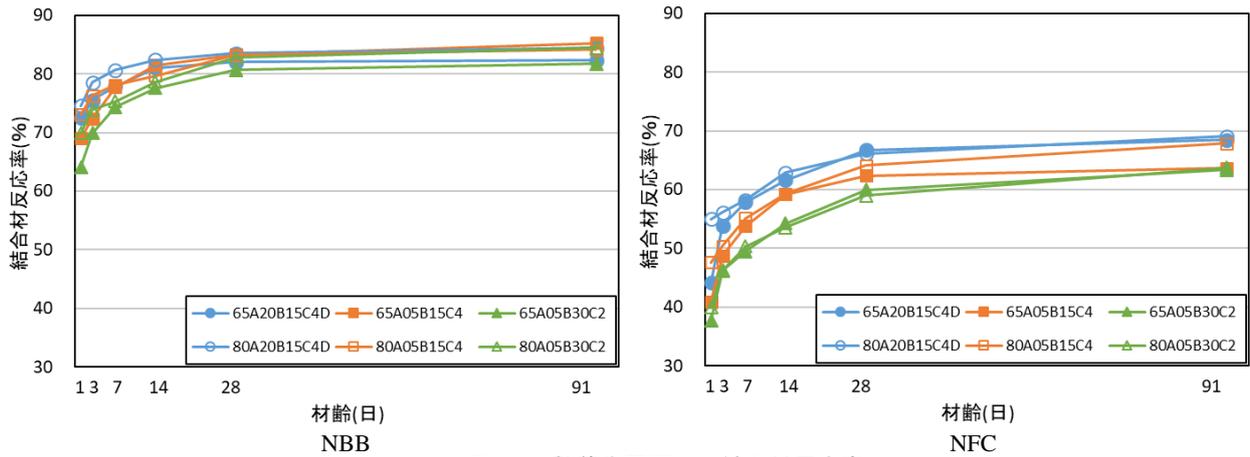


図-9 熱養生履歴別の結合材反応率

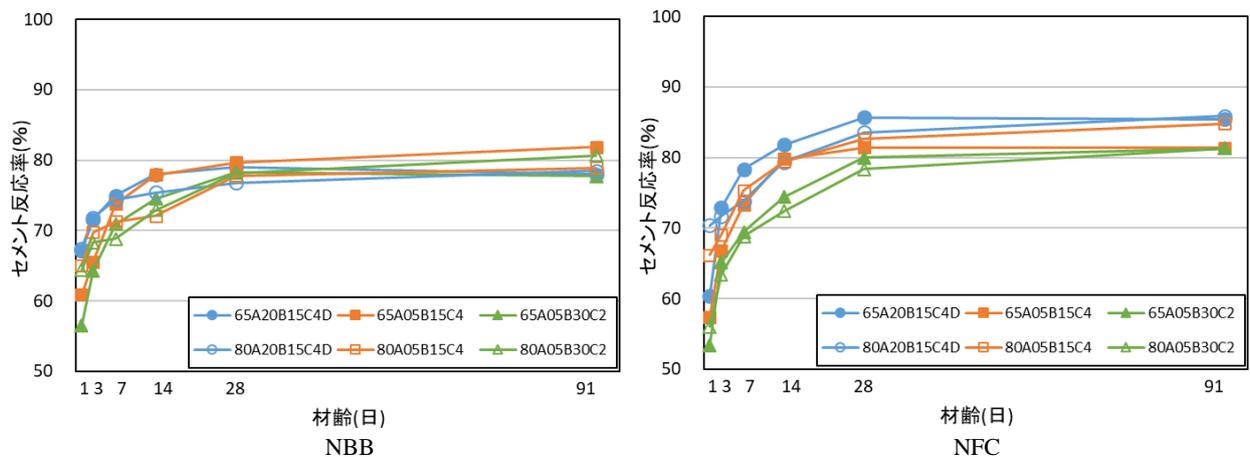


図-10 熱養生履歴別のセメント反応率

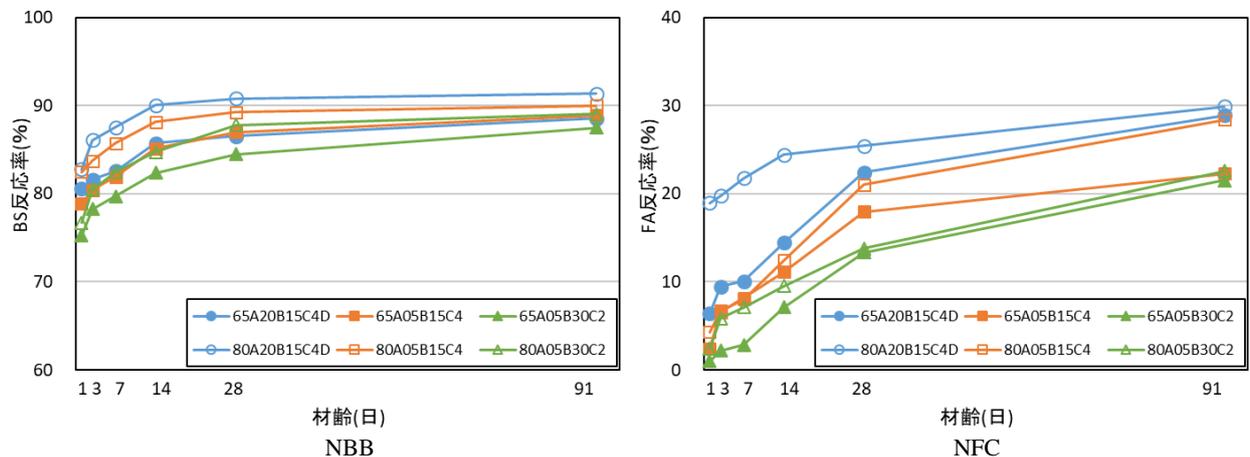


図-11 熱養生履歴別の高炉スラグ・フライアッシュ反応率

度を増やせば発現強度が大きくなるが<sup>8)</sup>、NFC の場合は、降温時間を短くし常温に早く戻した方(80A05B30C2, 65A05B30C2)が材齢 28 日以降の長期強度増進率が大きくなる傾向を示した。

### 3.7 養生履歴が水和反応へ及ぼす影響

一般的な標準蒸気養生パターンである A20B15C4D と前置時間、昇温時間、最高温度継続時間、降温時間をすべて短縮した 1 日 2 サイクル促進蒸気養生パターンであ

る A05B30C2, さらに、前置時間と降温時間を短縮し、PCa コンクリート工場作業者の就業時間の多少の延長を想定し、極力養生時間を多くとり 1 日 2 サイクル工程が可能な蒸気養生パターンである A05B15C4 各々の場合で最高養生温度 65℃と 80℃とした場合の NBB と NFC の結合材(セメントと混和材)ならびにセメント及び混和材(FA と BS)の水和反応の比較を図-9, 図-10, 図-11 に示す。図-9 に示すように、NBB の結合材の水和反

応変化率は、各蒸気養生パターンとも同様な変化を示し、材齢 1 日での反応率が 60%を超え材齢 28 日以降は 80%から 85%の範囲で一定となり大きなばらつきが生じなかった。このように結合材の水和反応率に大きな違いが生じなかった要因としては、図-10 に示すようにセメント水和反応率が各蒸気養生パターンで同様な反応率となり大きなばらつきが生じなかったことと図-11 に示す BS の水和反応率も各蒸気養生パターンで初期材齢において多少ばらつきが生じたが、材齢に伴う変化率が同様であったことが考えられる。BS の水和反応率は、最高温度が 80℃で一般的な標準蒸気養生パターンである A20B15C4D が一番大きくなった。また、以上の NBB の水和反応変化率は、前節の図-8 で示した NBB の圧縮強度増進率と高い相関性が認められた。一方、NFC は、図-9 に示すように蒸気養生パターンで結合材の水和反応率がばらつき、材齢 28 日以降の水和反応率は 60%から 70%で一定となった。このように NBB と比較してばらつきが生じた要因として、図-11 に示すように FA の水和反応率が BS と比較して小さくばらつきが大きかったことが上げられる。FA の水和反応率は、最高温度が 80℃で一般的な標準蒸気養生パターンである A20B15C4D の場合が一番大きくなった。

#### 4. まとめ

本実験の範囲から、蒸気養生工程が NFC と NBB ペーストにおける圧縮強度発現性と水和反応へ与える影響をまとめると次のようになる。

- (1) 前置時間を 2h から 0.5h に変化させても NFC, NBB ともに同程度の圧縮強度となった。
- (2) 昇温速度を 15℃/h から 30℃/h に変化させても NFC, NBB ともに同程度の圧縮強度となった。
- (3) 最高温度継続時間を 4h から 2h に変化させも NFC, NBB ともに同程度の圧縮強度となった。
- (4) 最高温度から常温 20℃まで降温速度 4.5℃/h で徐冷した場合から 45℃/h で急冷した場合、NBB の場合では、材齢 1 日で約 20%、材齢 14 日で約 10%の低下となり、材齢 28 日以降では同程度となった。NFC の場合では材齢 1 日で約 30%、材齢 14 日以降から材齢 91 日まで約 10%の低下となった。
- (5) 最高温度を 65℃から 80℃へ上昇させた場合は、NBB NFC ともに出荷材齢 14 日まで強度増進が見られた。NBB の場合では脱型材齢 1 日では約 25%、出荷材齢 14 日では約 10%の増加となり、材齢 91 日では同程度となった。NFC の場合では脱型材齢 1 日では約 75% 出荷材齢 14 日では同程度となり、材齢 91 日では約 15%の減少となった。NBB, NFC ともに最高温度を上げることは、初期材齢での発現強度を大きくする

ために有利であり、その効果は FA の方が大きいことが明らかとなった。

- (6) NBB の場合は、材齢 28 日までの圧縮強度増進率が、NFC よりも大きくなったが、その後の増進は鈍くなり材齢 91 日では、同程度の圧縮強度となった。NFC は NBB よりも圧縮強度増進率は緩やかで材齢 91 日以降も増進傾向を示し、最高温度 80℃は 65℃と比較して、材齢 28 日までは圧縮強度発現率が大きい、それ以降は 65℃を下回る結果となった。
- (7) NBB の結合材の水和反応変化率は、各蒸気養生パターンとも同様な変化を示し、材齢 1 日での反応率が 60%を超え材齢 28 日以降は 80%から 85%の範囲で一定となり大きなばらつきが生じなかった。また、圧縮強度増進率との高い相関性が認められた。
- (8) NFC の結合材の水和反応変化率は、各蒸気養生パターンでばらつき、材齢 1 日での反応率は 40%から 55%となり、材齢 28 日以降の水和反応率は 60%から 70%で一定となった。この要因としてフライアッシュの反応率が高炉スラグと比較して小さくばらつきが大きかったことがあげられる。

NFC, NBB ともに初期材齢 1 日と出荷材齢 14 日での圧縮強度に一番大きく影響している養生条件は、最高温度と降温速度であることが明らかになった。1 日 2 サイクル工程では前置時間と降温時間を短くし、上昇温度と最高温度継続時間は変えず、最高温度を上昇させることが有効であることが明らかとなった。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省：「i-Construction ～建設現場の生産性革命～」, <http://www.mlit.go.jp/common/001127740.pdf>, 2016
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編], 2012
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 89「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」Ⅱ期報告書, pp.278-282, 2010
- 6) 石川玲奈, 名和豊春, 佐川孝広：加熱試料を用いた X 線回折-リートベルト法による高炉セメント中のスラグ反応率測定法の検討, *Cement Science and Concrete Technology*, Vol.69, pp76-81, 2015
- 7) 呉昊, 遠藤友紀雄, 森本博昭, 小柳冷：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