

蒸気養生履歴がフライアッシュセメントの水和反応と圧縮強度に及ぼす影響

日大・理工（院）○臼田 康平 日大・理工 佐藤 正己
日大・理工 梅村 靖弘

1 はじめに

フライアッシュ(以下 FA)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_2 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、北陸の某県等では FA を使用したプレキャストコンクリート(以下 PCa)製品が、県のグリーン調達品目として優先利用されている先行事例がある¹⁾。しかし PCa 製品の蒸気養生による圧縮強度発現性については、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメント等の検討は行われているが²⁾、FA を混和したコンクリートに関する研究事例が少ないのが現状である。本研究は、蒸気養生条件が FA を混和したモルタルの水和反応と圧縮強度発現性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、モルタル配合条件を表 2 に示す。結合材(B)は、普通ポルトランドセメント(C)に FA を内割で質量比 30%置換したものとし、水結合材比(W/B) 50%で行った。水和反応分析用のペーストの配合はモルタル配合から細骨材を除いたものとした。

2.2 蒸気養生方法

一般的な蒸気養生プログラム(1 日 1 サイクル)と実際に工場で使用されている促進蒸気養生プログラム(1 日 2 サイクル)の比較を図 1 に示す。本研究では、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

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	B	C	普通ポルトランドセメント 密度=3.16g/cm ³ ブレン値=3260cm ²
混和材		FA	フライアッシュⅡ種 密度=2.21g/cm ³ ブレン値=4030cm ²
細骨材	S	(社)セメント協会 セメント強さ試験用標準砂	表密度=2.62g/cm ³ 吸水率=0.42%

表 2 モルタル配合

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

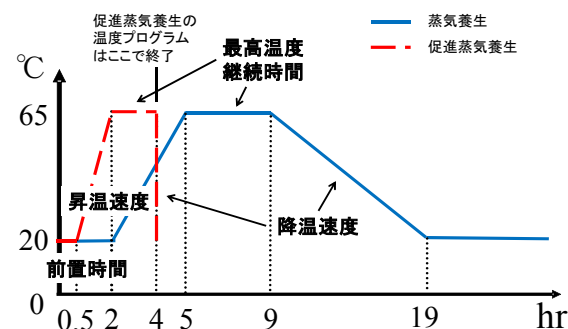


図 1 蒸気養生プログラムの比較

表 3 蒸気養生パターン

蒸気養生パターン	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)
A20B15C4D	2	15	4	4.5
A20B15C4	2	15	4	—
A20B15C2D	2	15	2	4.5
A20B30C4D	2	30	4	4.5
A05B15C4D	0.5	15	4	4.5
A05B30C2	0.5	30	2	—

6 パターンを設定し、表 3 に示す。前置温度を室温 20°C、最高温度は 65°C一定とし、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 4.5°C/h の徐冷と、最高温度から常温 20°Cへの急冷(最高温度 65°Cの状態では蒸気養生槽から取り出し、常温 20°Cの環境条件下に暴露)に変化させた。蒸気養生終了後は、常温 20°Cの部屋で封緘養生を行った。

Influence of Steam Curing History on Cement Hydration Reaction
and Compressive Strength of Fly Ash Cement
Kohei USUDA, Masaki SATO, and Yasuhiro UMEMURA

2. 3試験項目

(1) 圧縮強度試験

JIS A 1108 に準拠し、材齢 1, 3, 7, 14, 28, 91 日で、測定を行った。φ50×100mm の缶モールドにてモルタル供試体を作製し、蒸気養生終了後、試験材齢までは 20℃で封緘養生とした。

(2) 水和反応分析用試料調整

硬化したセメントペースト供試体を 2.5mm 角に粉砕し、試料をアセトンで 1 日浸漬させて水和停止を行い、40℃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) 水酸化カルシウム(CH)の定量

水和反応分析用試料を材齢 1, 3, 7, 14, 28, 91 日で、熱重量示差熱分析(TG-DTA)により、FA のポゾラン反応と関係する CH の量を測定した。

(4) フライアッシュの反応率の測定

浅賀らの遠心分離法³⁾に準拠した選択溶解法を行い、材齢 1, 3, 7, 14, 28, 91 日で分析用試料の不溶残分を測定し、FA の反応率を算出した。

(5) セメント鉱物および水和物の定量

分析用試料中の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⁴⁾。定量は、内部標準物質として $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (10mass%)を用いて、ユーライト(C_3S)、ビーライト(C_2S)、間隙質(C_3A , C_4AF)、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 の量、熱重量示差熱分析による CH の量から相組成を求めた。試験材齢は 1, 3, 7, 14, 28, 91 日とした。

3 試験結果および考察

3.1 蒸気養生条件が圧縮強度へ及ぼす影響

一般的な蒸気養生である A20B15C4D を基準として、前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度を変化させた場合の圧縮強度の比較を図 2 に示す。図 2(A) より、前置時間を 2h

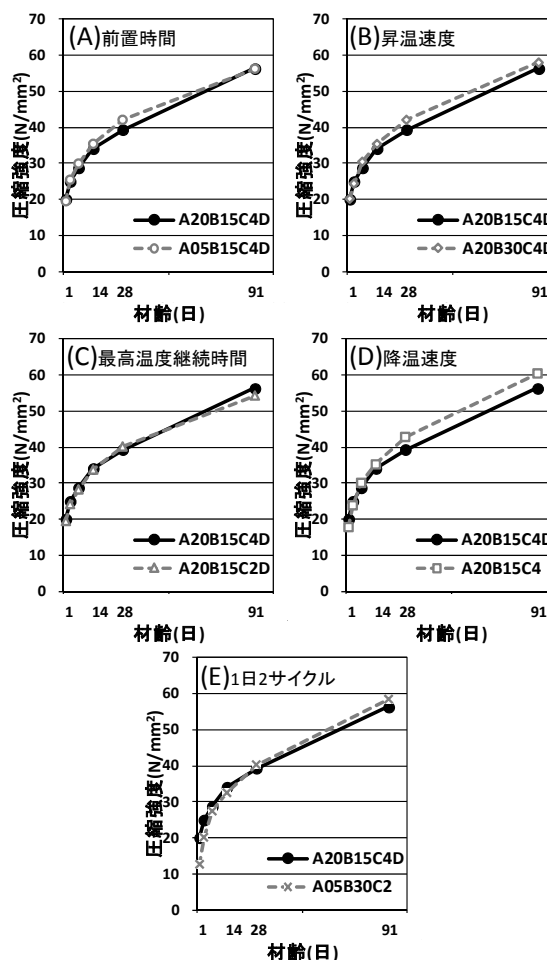


図 2 蒸気養生条件による圧縮強度の比較

から 0.5h に短縮させても、全材齢で同等となった。図 2(B) より、昇温時間を 15℃/h から 30℃/h に短縮させても、全材齢で同等となった。図 2(C) より、最高温度継続時間を 4h から 2h に短縮させても、全材齢で同等となった。図 2(D) より、降温速度 4.5℃/h の徐冷と比較して、最高温度から常温 20℃の急冷に変化させた場合は材齢 3 日までは約 3%以上低下、材齢 7 日以降は約 3%以上増加した。図 2(E) より、全蒸気養生工程を短縮した A05B30C2(1 日 2 サイクル)においては、基準である A20B15C4D(1 日 1 サイクル)と比較し、材齢 1 日では約 9%、材齢 3 日では約 5%低下したが、材齢 7 日以降ではほぼ同等となり、出荷基準材齢である 14 日での圧縮強度に影響は認められなかった。

全蒸気養生工程を短縮させた 1 日 2 サイクルでは、製造効率の面で必要な脱型材齢 1 日での強度は、一般的な 1 日 1 サイクルの蒸気養生工

程よりも低下したが、出荷材齢 14 日の圧縮強度は基準と同等となった。したがって、脱型強度に影響がでなければ、1 日 2 サイクルの蒸気養生工程は十分に可能だと考えられる。

圧縮強度試験結果より、A20B15C4D を基準とし、圧縮強度への影響が見られた降温速度を短縮させた場合および全蒸気養生工程を短縮させた場合の水和反応について比較検討する。

3.2 蒸気養生条件が C_3S の反応率へ及ぼす影響

図 3 に C_3S の反応率の比較を示す。図 3(A) より、降温速度 $4.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ の徐冷と比較して、最高温度から常温 20°C の急冷に変化させた場合は、全材齢で徐冷降下とほぼ同等の反応率となった。

図 3(B) より、全蒸気養生工程を短縮した A05B30C2 においては、基準である A20B15C4D と比較し、材齢 1 日では約 15%低下、材齢 3 日では約 8%の低下が認められたが、材齢 7 日以降は基準と同等の反応率となった。

3.3 蒸気養生条件が C_2S の反応率へ及ぼす影響

図 4 に C_2S の反応率の比較を示す。図 4(A) より、降温速度 $4.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ の徐冷と比較して、最高温度から常温 20°C の急冷に変化させた場合は、材齢 1 日では低下したが、材齢 3 日では同程度まで増進し、材齢 7 日以降は A20B15C4D よりも高い反応率となった。図 4(B) より、全蒸気養生工程を短縮した A05B30C2 においては、基準である A20B15C4D と比較し、材齢 1 日では同等の値となり、材齢 3 日以降においては、約 7%以上反応率が高い結果となった。

3.4 蒸気養生条件が FA の反応率へ及ぼす影響

図 5 に FA の反応率の比較を示す。図 5(A) より、降温速度 $4.5^{\circ}\text{C}/\text{h}$ の徐冷と比較して、最高温度から常温 20°C の急冷に変化させた場合は、材齢 14 日まで低下する傾向が見られたが、28 日以降は同等の反応率となった。図 5(B) より、全蒸気養生工程を短縮した A05B30C2 においては、基準である A20B15C4D と比較し、材齢 7 日までの FA の反応率が大きく低下したが、材齢の経過とともに増進し、材齢 91 日では約

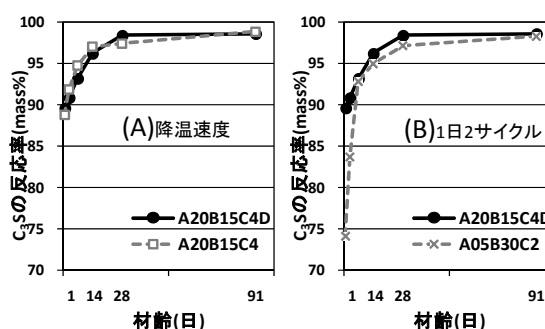


図 3 C_3S の反応率の比較

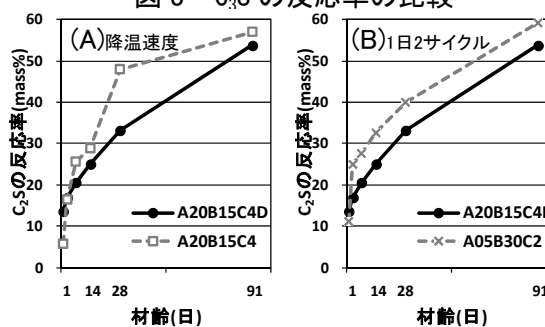


図 4 C_2S の反応率の比較

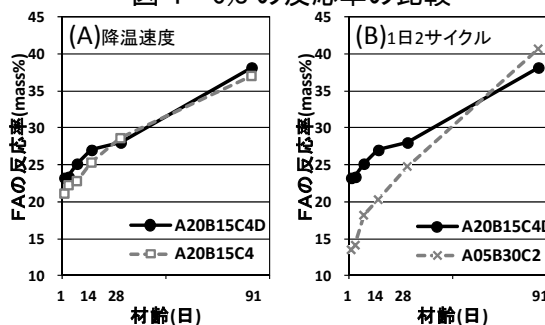


図 5 FA の反応率の比較

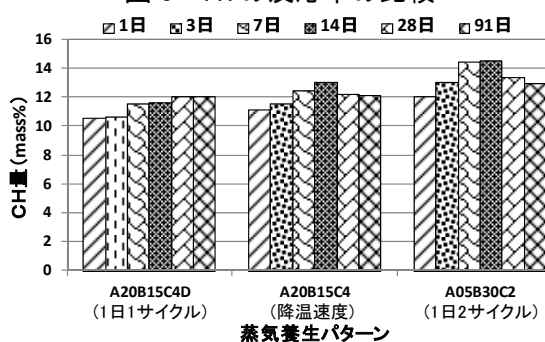


図 6 CH 量の比較

5%大きくなる結果となった。

FA の反応率の低下は、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。

3.5 蒸気養生条件が CH 生成量へ及ぼす影響

図 6 に熱重量示差熱分析により測定した CH の量を示す。基準である A20B15C4D の CH の量は、材齢の経過とともに増加するのに対し、最高温度から常温 20°C の急冷に変化させた

A20B15C4 および全蒸気養生工程を短縮した A05B30C2 では、材齢 14 日まで増加し、28 日以降は減少する傾向が見られた。

以上のように CH の量に違いが生じた理由として、降温速度を変化させた場合および全養生工程を短縮させた場合、基準である A20B15C4D と比較し FA の反応率が低下しているために、FA の特徴であるポゾラン反応が活性化せずに、 C_3S および C_2S の水和反応で生成された CH の量が多く残存されたと考えられる。しかし、材齢 28 日以降は、ポゾラン反応が活性化し CH の量を大量に消費することで、CH の量が減少したと推察される。

3.6 蒸気養生条件が C-S-H 生成量へ及ぼす影響

図 7 に XRD/リートベルト法により求めた C-S-H 生成量の比較を示す。図 7(A) より、降温速度 4.5°C/h の徐冷と比較して、最高温度から常温 20°C の急冷に変化させた場合は、材齢 1 日で約 3% 低下したが、材齢 3、7 日で同等、材齢 28 日で増加、材齢 91 日では同等となった。材齢 28 日の C-S-H 生成量増加は、図 4(A) より C_2S の反応率の増加によるものと推察される。図 7(B) より、全蒸気養生工程を短縮した A05B30C2 においては、基準である A20B15C4D と比較し、材齢 14 日まで C-S-H 生成量が 5% 以上低く、材齢 28 日以降は同等となった。これは図 4(B) より、 C_2S の反応率が高いため、材齢 28 日以降の C-S-H 生成量が、基準である A20B15C4D とほぼ同等になったと推察される。

以上のことから、 C_2S および FA の反応率が C-S-H 生成量に大きく影響していることが推察される。

4 まとめ

(1) 圧縮強度は、前置時間、昇温時間、最高温度継続時間を短縮しても低下は認められず、降温時間を短縮することで脱型材齢 1 日および材齢 3 日で低下、材齢 7 日以降は同等となった。1 日 2 サイクルの蒸気養生では、材齢 3 日までの強度は低下するが、出荷基準材齢 14 日では

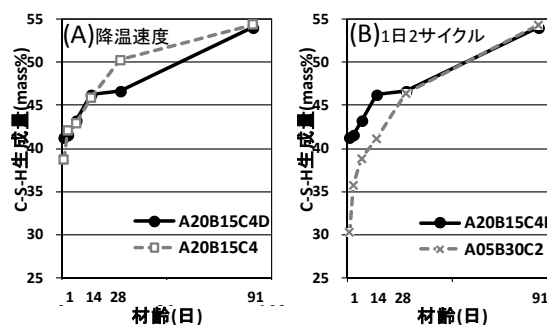


図 7 C-S-H 生成量の比較

ば同等となり、影響は認められなかった。

(2) C_3S の反応率は、降温時間を短縮しても反応率の低下は認められなかった。1 日 2 サイクルの蒸気養生は材齢 3 日までの反応率が大きく低下したが、材齢 7 日以降は同程度となった。

(3) C_2S の反応率は、降温時間を短縮すると、材齢 7 日以降に大きく増進することが認められた。また 1 日 2 サイクルの蒸気養生は、材齢 1 日では同程度であったが、3 日以降は増加した。

(4) FA の反応率は、降温時間を短縮すると材齢 14 日まで低下、材齢 28 日以降はほぼ同等となった。また 1 日 2 サイクルの蒸気養生は、材齢 28 日まで大きく低下したが、材齢 91 日では増加した。

(5) C-S-H 生成量は、降温時間を短縮すると、材齢 1 日で低下、材齢 3、7 日で同等となり、材齢 28 日以降は増加した。また 1 日 2 サイクルの蒸気養生は、材齢 14 日まで大きく低下し、材齢 28 日以降は同等となった。

5 参考文献

- 1) 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課題と展望」に関するシンポジウム 報告書，2008
- 2) 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「蒸気養生がコンクリートの強度発現に及ぼす影響」2006.3
- 3) 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, pp397-400(1982)
- 4) 星野清一ほか：石灰石微粉末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，N60, pp47-54, 2006