

蒸気養生履歴が普通ポルトランド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) ○尾畑 展宏 日大・理工 佐藤 正己

日大・理工 梅村 靖弘

1 まえがき

近年、現場打ちコンクリート工法で発生する合板型枠等の廃材の減量化、また熟練した型枠工職人の不足問題がある。そのため、工場で製造可能なコンクリート製品(PCa 製品)の普及拡大が必要とされている。しかし、PCa 製品は製造工程上の蒸気養生が工程時間の大半を占め、蒸気養生の製造サイクルの短縮化が製造コストの削減に大きく影響する。そこで本研究では、蒸気養生工程短縮のために、一般的に多く使用されている普通ポルトランドセメント(OPC)の蒸気養生工程を変化させた場合の温度履歴の変化による水和反応及び圧縮強度への影響について検討した。

2 実験方法及び測定方法

2.1 使用材料, 使用配合

使用材料を表1, モルタル配合を表2に示す。水セメント比 W/C は 50%で行った。また、水和反応分析用のペースト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

一般的な蒸気養生工程 A20B15C4D と実際の工場で行われている1日2サイクル工程¹⁾の促進蒸気養生工程 A05B30C2 を図1に示す。また、前置時間、昇温速度、最高温度継続時間、降温速度の4項目を変化させた工程を表3のように6パターン設定した。本研究では、前置時間を2hと0.5h、昇温速度を15°C/hと30°C/h、最高温度持続時間を4hと2h、降温速度を4.5°C/hの徐冷と最高温度65°Cの状態での蒸気養生槽から取り出し、常温20°Cに暴露させた場合の急

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 ³ ブレン値=3260cm ²
細骨材	S	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/C (%)	S/C	単体量(kg/m ³)		
			W	C	S
OPC	50	2.25	300	599	1348

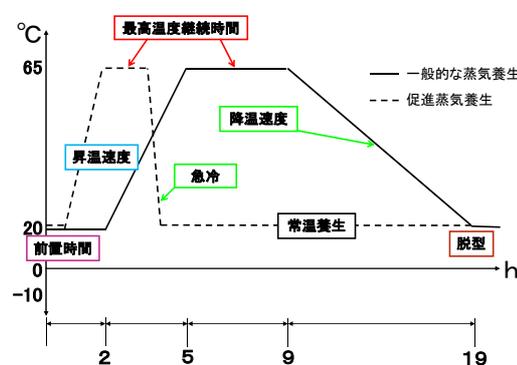


図1 蒸気養生プログラム

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	—

冷(実測モルタル内中心温度45°C/h)に変化させた。蒸気養生終了後は、試験材齢まで室温20°Cで封緘養生を行った。

2.3 試験項目

- (1) 圧縮強度試験: $\phi 50 \times 100$ mm の缶モールドにてモルタル供試体を作製し、JIS A 1108 に準拠した。試験材齢は、蒸気養生終了後から開始とした材齢1, 3, 7, 14, 28, 91日とした。
- (2) 水和反応分析用試料調整: セメントペースト供試体を2.5mm角に粉碎し、試料をアセトンで1日浸漬させ水和停止を行い、40°C乾燥

Influence of Steam Curing History on Cement Hydration and Compressive Strength of Ordinary Portland Cement

Nobuhiro OBATA, Masaki SATO and Yasuhiro UMEMURA

炉内に 1 日入れてアセトン蒸発させた試料を水和反応分析用試料とした。

(3) 水酸化カルシウム (CH) の定量: 分析用試料を熱重量示差熱分析 (TG-DTA) によって, C H の量を測定した。試験材齢は 1, 3, 7, 14, 28, 91 日とした。

(4) セメント鉱物及び水和物の定量: XRD/リードベルト法により解析用ソフト TOPAS (Bruker AXS) を用い星野らの手法に従った²⁾。定量は, 内部標準物質として $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ (10mass%) を用いて, エーライト (C_3S), ビーライト (C_2S), 間隙質 (C_3A , C_4AF), 石こう (二水, 半水), CH, エトリンガイトの各セメント鉱物, 水和物及びケイ酸カルシウム水和物 (C-S-H) を含む非晶質を同時に測定した。その定量値と熱重量示差熱分析による CH の量から相組成を求めた。試験材齢は材齢 1, 3, 7, 14, 28, 91 日とした。

3 実験結果及び考察

一般的な蒸気養生 A20B 15C4D を基準とし, 各蒸気養生工程をそれぞれ変化させた場合の圧縮強度と C_3S , C_2S の反応率, C-S-H 生成量について比較した。また, 一般的な蒸気養生 A20B15C4D と実際の工場で行われている 1 日 2 サイクル工程の促進蒸気養生工程 A05B30C2 を比較した。

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 A20B 15C4D を基準とし, 前置時間, 昇温速度, 最高温度継続時間, 降温速度をそれぞれ変化させた場合の圧縮強度の比較を図 2 に示す。図 2 (A) では, 一般的な蒸気養生 A20B 15C4D と比較し, 前置時間のみを 2h から 0.5h に短縮させた A05B15C 4D の圧縮強度は材齢 1 日, 3 日, 7 日ではほぼ同等となったが, 材齢 14 日以降は増進し, 材齢 28 日, 91 日では共に 7% 大きくなった。図 2 (B) では, 一般的な蒸気養生 A20B 15C4D と比較し, 昇温速度のみを $15^\circ\text{C}/\text{h}$ から $30^\circ\text{C}/\text{h}$ に速めた A20B 30C 4D の圧縮強度は, 全材齢でほぼ同等となった。図 2 (C) では, 一般的な蒸気養生 A20B 15C

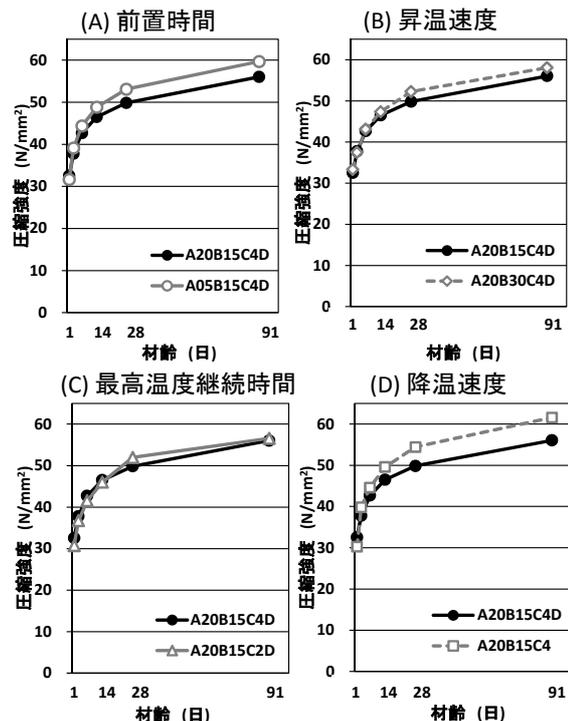


図 2 蒸気養生条件による圧縮強度の比較

4D と比較し, 最高温度継続時間のみを 4h から 2h に短縮させた A20B 15C2D の圧縮強度は全材齢でほぼ同等となった。図 2 (D) では, 一般的な蒸気養生 A20B 15C4D と比較し, 降温速度のみを $4.5^\circ\text{C}/\text{h}$ の徐冷から最高温度 65°C から常温 20°C に急冷させた A20 B15C4 の圧縮強度は材齢 1 日で 7% 低下したが, 材齢 3 日以降で増進し, 材齢 28, 91 日では 10% 大きくなった。

3.2 蒸気養生条件が水和反応へ及ぼす影響

圧縮強度試験の結果から影響が認められた前置時間のみを短縮させた A05B15C 4D と降温速度を速めた A20B 15C4 の C_3S , C_2S の反応率, C-S-H 生成量について比較した結果を図 3, 図 4, 図 5 に示す。

(1) 蒸気養生条件が C_3S の反応率へ及ぼす影響

図 3 (A) では, 一般的な蒸気養生 A20B 15C4D と比較し, 前置時間のみを短縮させた A05B15 C 4D の C_3S の反応率は全材齢でほぼ同等となった。また, 図 3 (B) では, 一般的な蒸気養生 A20B 15C4D と比較し, 降温速度のみを速めた A20B15C4 の C_3S の反応率も全材齢でほぼ同等となった。よって, 蒸気養生工程を短縮しても C_3S の反応率に影響は認められなかったため,

C₃S の反応率は圧縮強度への影響は少ないと推察される。

(2) 蒸気養生条件が C₂S の反応率へ及ぼす影響

図 4 (A) では、一般的な蒸気養生 A20B15C4D と比較し、前置時間のみを短縮させた A05B15C4D の C₂S の反応率は材齢 1 日ではほぼ同等となったが、材齢 3 日では 10%低下した。しかし、材齢 7 日で大きくなり、材齢 14 日では同等となった。材齢 28 日では 7%高くなり、材齢 91 日ではほぼ同等となった。また、図 4 (B) では、一般的な蒸気養生 A20B15C4D と比較し、降温速度のみを速めた A20B15C4 の C₂S の反応率は材齢 1 日ではほぼ同等となった。材齢 3 日、7 日ではそれぞれ 7%、5%低下した。材齢 14 日ではほぼ同等となり、材齢 28 日では、5%高くなった。材齢 91 日ではほぼ同等となった。よって、蒸気養生工程を短縮した場合、C₂S の反応率は材齢 3 日、7 日で影響し、材齢 14 日以降では同等以上となることが推察される。

(3) 蒸気養生条件が C-S-H 生成量へ及ぼす影響

図 5 (A) では、一般的な蒸気養生 A20B15C4D と比較し、前置時間のみを短縮させた A05B15C4D の C-S-H 生成量は材齢 1 日ではほぼ同等となった。しかし、材齢 1 日から 3 日において C-S-H 生成量が停滞した。しかし、材齢 3 日以降は大きくなり、材齢 7 日、14 日では再びほぼ同等となった。材齢 28 日以降では C-S-H 生成量が大きくなった。また、図 5 (B) では、一般的な蒸気養生 A20B15C4D と比較し、降温速度のみを速めた A20B15C4 の C-S-H 生成量は材齢 1 日、3 日でほぼ同等となった。材齢 7 日、14 日では低下したが、材齢 28 日以降では大きくなった。よって、蒸気養生工程を短縮した場合、C-S-H 生成量の増加が認められなかった材齢は C₂S の反応率が低下しており、C₂S の反応率が低下したことで C-S-H の生成に遅れが生じたことが推察される。また、蒸気養生工程を短縮した場合は、一般的な蒸気養生 A20B15C4D と比較し、材齢の経過により C₂S の反応率が

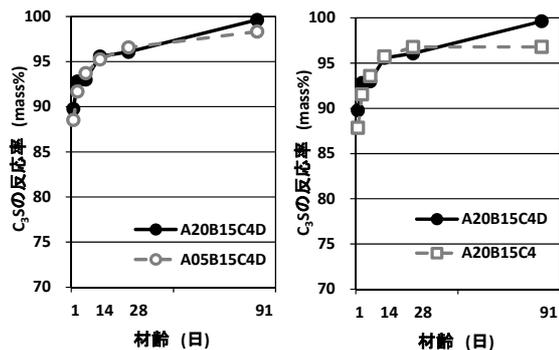


図 3 C₃S 反応率の比較

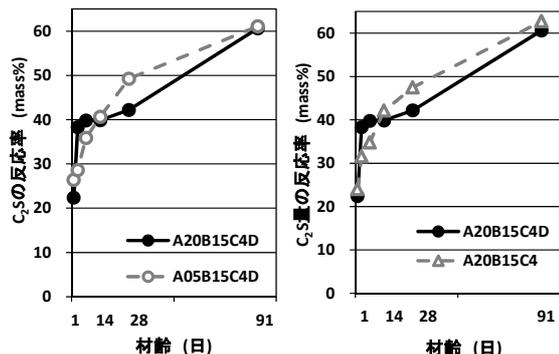


図 4 C₂S 反応率の比較

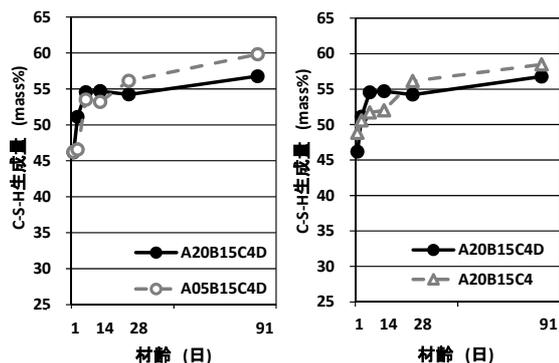


図 5 C-S-H 生成量の比較

大きくなったことで、C-S-H 生成量も大きくなったことが推察される。

3.3 一般的な蒸気養生と 1 日 2 サイクル工程の促進蒸気養生工程の比較

一般的な蒸気養生(1 日 1 サイクル工程)A20B15C4D と実際の工場で行われている 1 日 2 サイクル工程の促進蒸気養生 A05B30C2 による圧縮強度、C₃S、C₂S の反応率、C-S-H 生成量の比較について図 6、図 7、図 8、図 9 に示す。

図 6 では、1 日 1 サイクル工程と比較し、1 日 2 サイクル工程の圧縮強度は、材齢 1 日では 30%低下した。しかし、材齢 3 日以降、圧縮強度が増進し材齢 7 日でほぼ同等となり、材齢 14 日、28 日、91 日では、それぞれ 5%、7%、

13%大きくなった。図7では、1日1サイクル工程と比較し、1日2サイクル工程のC₃Sの反応率は、材齢1日では15%低下した。しかし、材齢3日では大きくなり、材齢7日以降ほぼ同等となった。図8では、1日1サイクル工程と比較し、1日2サイクル工程のC₂S反応率は、材齢1日では20%低下した。材齢3日、7日でC₂Sの反応率が増進したが、材齢14日で停滞が認められたが、材齢28日以降、ほぼ同等となった。図9では、1日1サイクル工程と比較し、1日2サイクル工程のC-S-H生成量は材齢1日で13%低下した。材齢3日、7日でC-S-H生成量は増進し、材齢14日以降ほぼ同等となった。この結果から、1日1サイクル工程A20B15C4Dを基準とし全蒸気養生工程を短縮させた1日2サイクル工程A05B30C2の圧縮強度は、脱型材齢1日での強度は1日1サイクル工程の蒸気養生工程よりも低下したが、出荷基準材齢14日の圧縮強度は基準とほぼ同等となった。よって、脱型強度に影響がなければ、1日2サイクル工程の蒸気養生工程でも十分に可能だと推察される。また、1日2サイクル工程のC₃S、C₂Sの反応率は、1日1サイクル工程と比較し、初期材齢に低下が認められ、C-S-H生成量も低下が認められた。よって蒸気養生を短縮した場合、初期材齢で水和反応が遅れがあると確認された。1日2サイクル工程のC-S-Hの生成量が材齢の経過でほぼ同等となっているにもかかわらず圧縮強度が大きくなった結果は、空隙構造の違いやC-S-Hの構造的な違いによるものと推察され、今後検討が必要である。

4 まとめ

(1) 圧縮強度は、昇温速度、最高温度継続時間を短縮しても強度低下は認められなかった。前置時間を短縮した場合の圧縮強度は、材齢14日以降大きくなった。降温速度を短縮した場合の圧縮強度は、材齢1日は低下したが、材齢28日、91日では大きくなった。

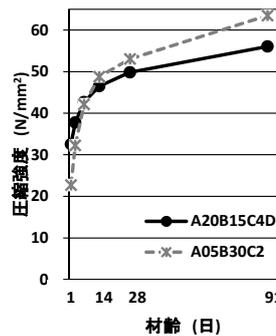


図6 圧縮強度

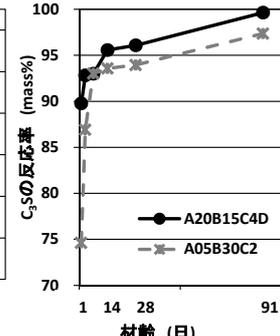


図7 C₃S 反応率

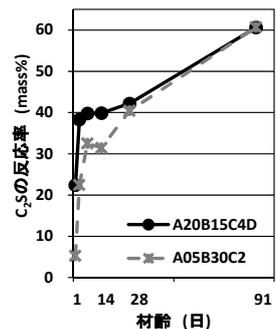


図8 C₂S 反応率

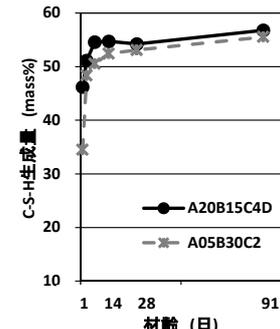


図9 C-S-H 存在量

(2) C₃Sの反応率は前置時間、降温速度を短縮しても反応率低下は認められなかった。C₂Sの反応率は前置時間、降温速度を短縮した場合、材齢3日、7日でC₂S反応率低下が認められた。C-S-H生成量は前置時間、降温速度を短縮した場合、C₂Sの反応率が低下した場合の材齢では、C-S-Hの生成が遅れたが、C₂Sの反応率が大きくなった場合の材齢では、C-S-H生成量も大きくなった。

(3) 1日2サイクル工程は1日1サイクル工程と比較し、圧縮強度は材齢1日、3日では低下したが材齢14日以降大きくなった。C₃Sの反応率は材齢1日、3日では低下した。C₂Sの反応率は材齢14日まで低下したが材齢28日以降はほぼ同等となった。C-S-H生成量は7日まで低下したが材齢14日以降はほぼ同等となった。

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設計と利用研究委員会」2009,pp.111
- 2) 星野清一ほか: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, 2006, pp47-54