

## C-S-H系早強剤を用いたモルタルの硬化特性に及ぼす蒸気養生の影響

BASFジャパン(株) 正会員 工修 ○小山 広光  
 東海大学大学院 上村 将吾  
 東海大学工学部 博士(工学) 伊達 重之

キーワード：プレキャストコンクリート，蒸気養生，C-S-H系早強剤，圧縮強度

## 1. はじめに

近年の建設業界において、就労人口減少への対応は喫緊の課題であり、作業の自動化・省力化が求められている。国交省では「建設生産システムの省力化・効率化・高度化による生産性向上への取組みを強化する方針」を示しており、建設現場の省力化・効率化、および工期短縮を図るため、プレキャストコンクリート構造物の採用が推進されてきている。

プレキャストコンクリートにおいて品質および効率的な生産を確保するためには、初期材齢時の強度発現性を把握する必要がある。初期強度増進のための蒸気養生は不可欠である。しかしながら、蒸気養生を施したコンクリートは、材齢初期に水和反応が促進されるため、長期強度の増進が見込めないことや、発熱による温度応力の発生が懸念されるなどの問題点があり、蒸気養生条件には十分な配慮が必要である<sup>1), 2)</sup>。また、プレキャストコンクリート製品の生産性を向上させる手段として、C-S-H系早強剤（以下、C-S-H系と称す）の使用による凝結および強度の促進は有効であり<sup>3)</sup>、これまでに筆者らは配合および養生条件が初期強度発現性に及ぼす影響を確認している<sup>4)</sup>。

本研究は、プレキャストコンクリートの生産性および品質の更なる向上を目的として、C-S-H系早強剤の水和反応特性、発熱特性および圧縮強度に及ぼす蒸気養生条件の影響について検討を行った。なお、試験はその特性を的確に把握するため、モルタルにて行うこととした。

## 2. 試験概要

## 2. 1 使用材料

表-1に試験に使用したモルタルおよびセメントペーストの材料を示す。プレキャストコンクリートの1日2サイクル製造を想定し、セメントは早強ポルトランドセメントを用いた。細骨材は陸砂、混和剤は高性能減水剤とC-S-H系早強剤を使用し、高性能減水剤のみの場合（以下、無添加と称す）とC-S-H系早強剤をC×2%併用した場合について試験を行った。

## 2. 2 養生条件

モルタルの養生は、恒温恒湿槽を用いて温度・湿度を制御し、蒸気養生を模擬した。試験体を作製直後から20℃環境下で静置（前置）した後、あらかじめ一定温度条件に設定した恒温恒湿槽に試験体を移動し、所定の時間まで蒸気養生を行った。恒温恒湿槽内の相対湿度はいずれも98%に設定し、試験体打設面からの水分逸散を防ぐため表面をフィルムで覆った状態で加温履歴を与えた。

## 2. 3 測定項目

## (1) 水和発熱速度測定

蒸気養生を想定した、高温時におけるセメントの初期水和反応に及ぼす温度の影響を確認するため、反応温度50、

表-1 使用材料

材料	種類および物理的性質
練混ぜ水	上水道水
セメント	早強ポルトランドセメント (密度：3.14 g/cm <sup>3</sup> , 比表面積：4,450cm <sup>2</sup> /g)
細骨材	大井川水系陸砂 (表乾密度：2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率：2.15%, FM：2.57)
混和剤	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物) C-S-H系早強剤 (C-S-H ナノ粒子のサスペンション)

40および20℃におけるセメントペースト (W/C=50%) の水和発熱速度をコンダクションカロリメータにて測定した。なお、セメントペーストにはモルタルと同じ使用量の混和剤を使用し、装置内で練混ぜを行った。

(2) セメント反応率の測定

蒸気養生過程におけるセメントの反応を確認するため、環境温度50℃で養生したセメントペースト硬化体中のC<sub>3</sub>Sの反応率を、粉末X線回折内部標準法により測定した。測定試料に内部標準物質としてマグネシアを内割で10mass%添加し、X線源にはCu-Kαを用いた。定量に用いた結晶の面指数は、エーライトは[620][040]、マグネシアは[200]とした。

セメントペースト硬化体は、環境温度20℃においてW/C=40%でモルタルと同じ混和剤使用量で練り混ぜ、20℃環境下で0.5時間置いた後に、50℃環境下の恒温恒湿槽に移動させ測定材齢まで封緘養生した後に直ちに粉碎し、大量のアセトンに浸漬して水和を停止させた。なお、測定材齢は2~5時間とした。

(3) 高温環境下におけるモルタル試験体の温度測定

蒸気養生過程におけるモルタル内部の温度上昇過程を確認するため、モルタル試験体の温度測定を行った。図-1に使用したモルタル試験の概要図を示す。試験は、側面および底面を断熱材 (厚さ200mm) で覆い、上面の開口部からモルタルを打込んだ試験体 (L300mm×B300mm×H250mm) について、恒温恒湿槽で所定の温度履歴を与え、熱電対にてモルタル内部の温度を測定した。測定箇所は表面からの距離hが25mm, 125mm, 225mmとなる箇所とし、それぞれの距離で2か所測定した。図-2に試験に使用した蒸気養生パターンを示す。前置時間は1.0h、蒸気養生最高温度は50℃とし、6hで脱型する養生パターンを想定した。

(4) モルタルの圧縮強度測定

試験に用いたモルタルは、環境温度20℃においてW/C=40%, S/C=2.0で練混ぜ、JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」に準じフローテーブルを用いてモルタルフロー値を測定し流動性の確認を行い、高性能減水剤にて所定の流動性 (モルタルフロー値200mm程度) を確保させた。モルタル供試体形成用型を用いて、40mm×40mm×160mm の供試体を作製した。表-2に蒸気養生条件のパラメータを示す。蒸気養生は、最高温度、前置時間、供試体は、型枠に打込み20℃環境の試験室で所定の時間前置を行った後に、蒸気養生を想定した恒温恒湿槽内での高温環境下で促進養生を行った。所定の時間養生を行った後に恒温恒湿槽から供試体を取り出して脱型し、脱型時の圧縮強度を測定した。それ以外の供試体については、20℃環境の試験室にて気中養生を行い、任意の材齢にて圧縮強度を測定した。なお、試験はJIS R 5201の試験方法に準じ、切片圧縮強度を測定した。

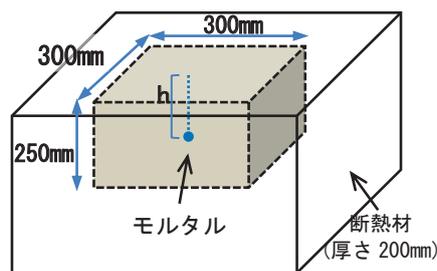


図-1 モルタル温度測定試験体

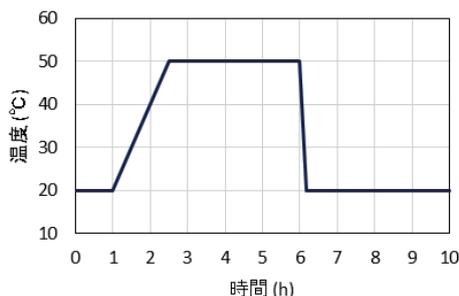


図-2 蒸気養生パターン

表-2 蒸気養生条件

パラメータ (単位)	水準
前置時間 (h)	0.5, 1.5, 2.5
最高温度 (°C)	65, 55, 45
脱型時間 (h)	5, 6, 7

3. 試験結果および考察

3. 1 高温環境におけるセメントの水和反応

図-3に水和発熱速度の測定結果を、図-4に積算発熱量を示す。高温環境において、発熱速度は誘導期および加速期が短縮され、ピークへの到達時間が早くなり、初期の水和反応速度が大幅に上昇

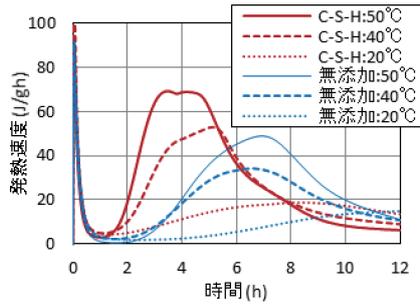


図-3 水和発熱速度

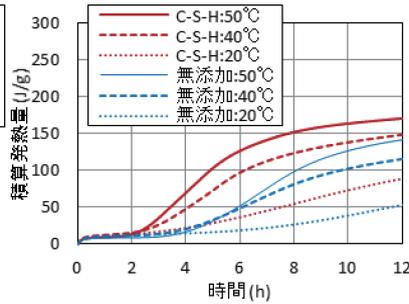


図-4 積算発熱量

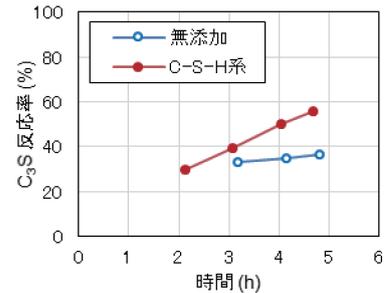
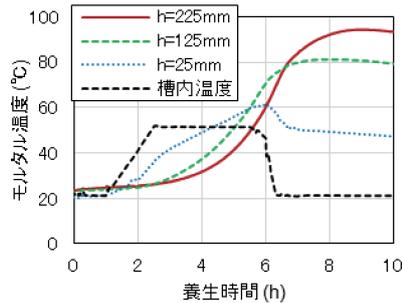
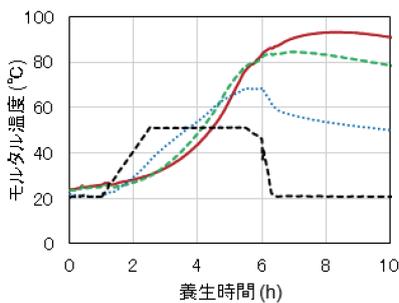


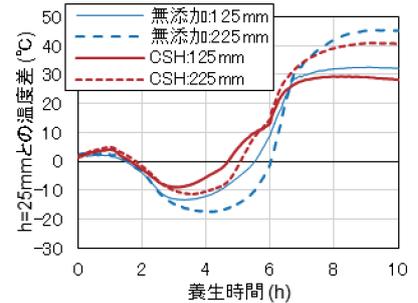
図-5 C<sub>3</sub>S 反応率



(a) 無添加



(b) C-S-H 系



(c) 表面との温度差

図-6 モルタル試験体温度測定結果

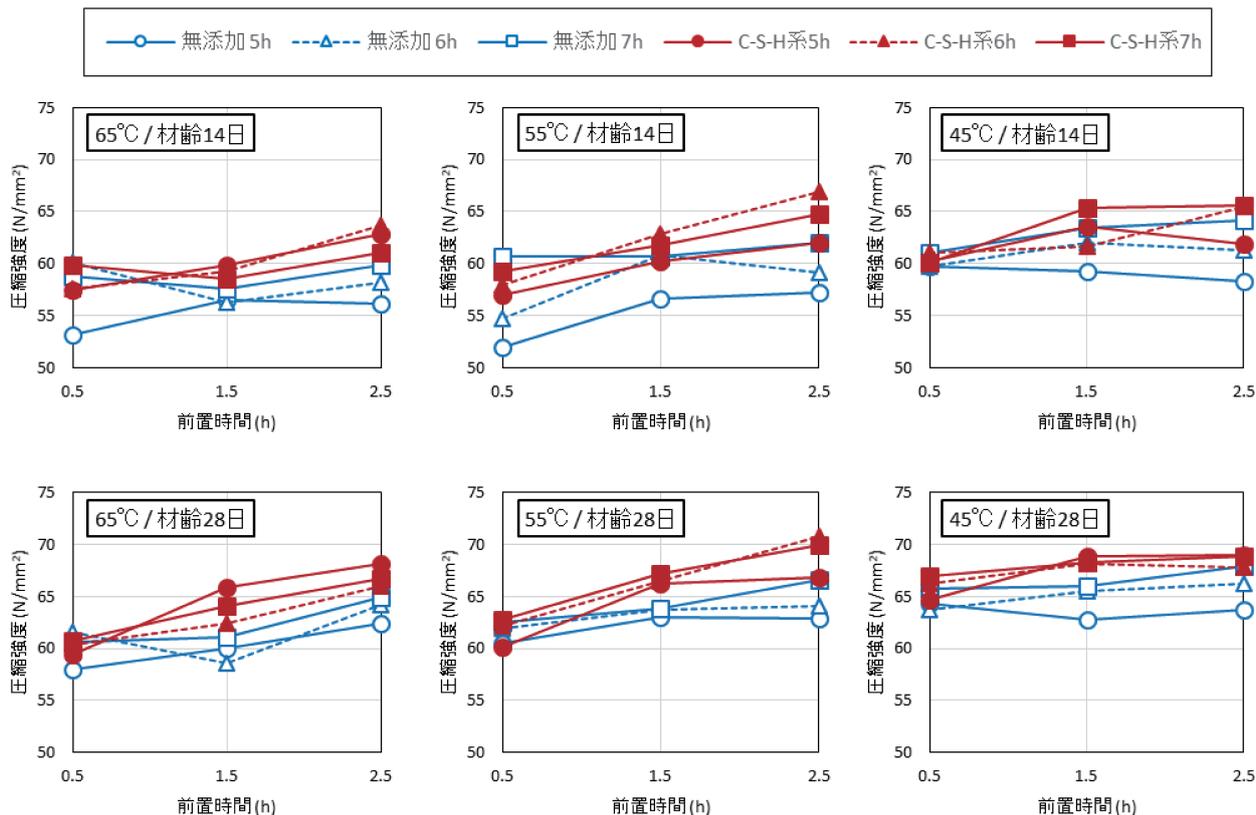
する傾向にあり、C-S-H系の方がよりその傾向が高いことが確認された。また、反応温度50°Cと40°Cでは加速期の開始はほぼ同時期で、開始後の発熱速度および積算発熱量は50°Cの方が大きく、C-S-H系は加速期の初期からその差が確認された。図-5に、環境温度50°Cにおけるセメントペーストの測定材齢2~5時間におけるC<sub>3</sub>Sの反応率を示す。C-S-H系は無添加よりも反応率が高く、時間に伴う反応率の増加も大きい傾向にあった。上記の結果から、C-S-H系早強剤により蒸気養生過程中的セメントの水和反応は促進され、環境温度が高いほどその効果は大きいことが確認された。

### 3. 2 蒸気養生を施したモルタルの温度変化

図-6 (a), (b)に蒸気養生を施したモルタルの温度測定結果を示す。試験体表面と内面でモルタルの温度履歴異なり、無添加の場合(図-6 (a))に比べC-S-H系(図-6 (b))は、蒸気養生過程中的内部と外部の温度履歴の差が小さく、比較的断面内の温度が均一であるといえる。図-6 (c)にモルタル表面(h=25mm)と内面(h=125mm, 225mm)の温度差を示す。C-S-H系は無添加より、蒸気養生過程中的および蒸気養生終了後(脱型後)の内外面の温度差は小さく、C-S-H系早強剤の使用により蒸気養生中および脱型後の温度応力の発生を抑制し、温度ひび割れ発生リスクの低減に繋がること示唆された。

### 3. 3 蒸気養生を施したモルタルの強度発現性

図-7に前置時間と圧縮強度の関係を示す。いずれの蒸気養生条件においても、無添加よりもC-S-H系の方が圧縮強度は確認された。また、条件前置時間が長いほど圧縮強度は大きくなる傾向であることが確認され、最高温度が大きいほどその傾向は顕著であり、最高温度45°Cの材齢28日強度においては蒸気養生条件の違いによる影響はあまり確認されなかった。前置時間と最高温度が同一の場合、脱型時間の違いによって圧縮強度には差が認められ、材齢28日より材齢14日、C-S-H系よりも無添加の方がより顕著であった。上記の結果から、既往の研究<sup>5)</sup>と同様に蒸気養生の最高温度および前置時間がその後の強度発現性に影響を及ぼすことが確認され、C-S-H系早強剤を用いることにより、脱型後の強度増進効果および蒸気養生条件の違いによる圧縮強度の変動が小さくなること示唆された。



図ー 7 前置時間と圧縮強度の関係

#### 4. まとめ

- (1) 蒸気養生環境下においてもC-S-H系早強剤はセメントの水和反応を促進し、環境温度が高いほどその効果は高い。
- (2) C-S-H系早強剤を用いることにより、蒸気養生過程および脱型後のモルタルの内外面の温度差が低減され、蒸気養生中および脱型後の温度ひび割れ発生リスクを低減できることが示唆された。
- (3) C-S-H系早強剤を用いることにより、モルタルは初期材齢だけでなくその後においても圧縮強度が増進する。また、蒸気養生最高温度、前置時間、および蒸気養生時間は、脱型後の強度発現性にも影響を及ぼし、C-S-H系早強剤によりその違いによる影響は小さくなることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編：特殊コンクリート]，11章 工場製品，2012.3
- 2) 小林哲夫ほか：短時間脱型用混和剤を用いたコンクリートの諸特性，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.134-139，1990.12
- 3) 井元晴丈ほか：C-S-H系早強剤を用いたコンクリートの初期硬化性状とブリーディング抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.2248-2253，2014.7
- 4) 小山広光ほか：C-S-H系早強剤を用いたプレキャストコンクリートの初期強度発現性に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.331-336，2015.7
- 5) 郭度連ほか：高炉スラグ微粉末を用いたモルタルの蒸気養生による圧縮強度特性，セメント・コンクリート論文集，No.60，pp.279-285，2006