論文　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

小山　広光[*1]・上村　将吾[*2]・中嶋　望[*2]・伊達　重之[*3]

要旨：C-S-H 系早強剤を使用したモルタルに蒸気養生を施し，蒸気養生が圧縮強度特性および発熱特性に及ぼす影響を検討した。C-S-H 早強剤の効果として，蒸気養生環境下においても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こと，蒸気養生過程中および脱型後の内外面の温度差を低減することが確認された。また，C-S-H 系早強剤を用いることにより脱型直後の初期材齢だけでなく長期材齢においても圧縮強度が増進し，蒸気養生条件は脱型時だけでなくその後のモルタルの強度発現性にも影響を及ぼし，回帰式によりその影響要因の特性を把握できることが確認された。

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り，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[1),2)]。

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[3)]，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[4)]。

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，発熱特性および長期材齢の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（以下，C-S-H 系と称す）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，予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何れも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。

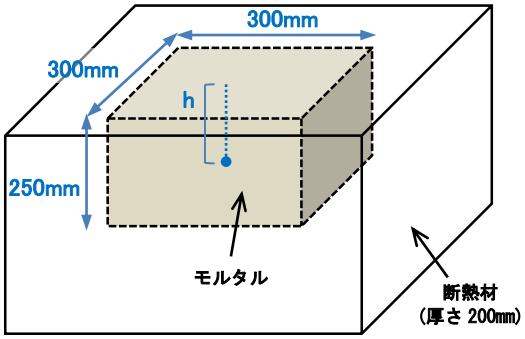
表－１　使用材料

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^3，比表面積：4,450cm^2/g）
細骨材	大井川水系陸砂 （表乾密度：2.58g/cm^3，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）

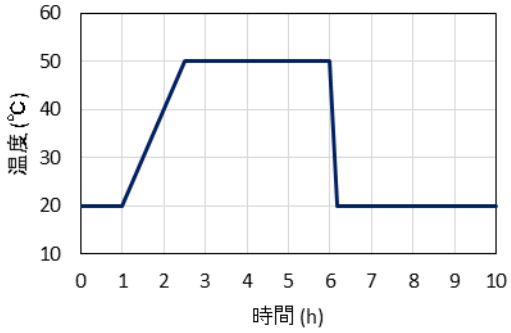
表－２　蒸気養生条件

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

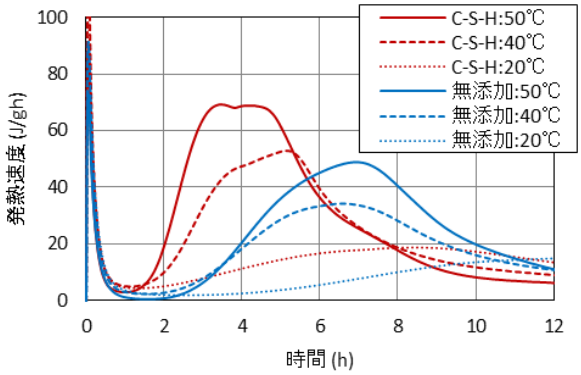
*1 BASF ジャパン株式会社 建設化学品事業部 茅ケ崎技術開発センター　修士(工学)（正会員）
*2 東海大学 工学部 土木工学科 （学生会員）
*3 東海大学 工学部 土木工学科　教授　博士(工学)（正会員）



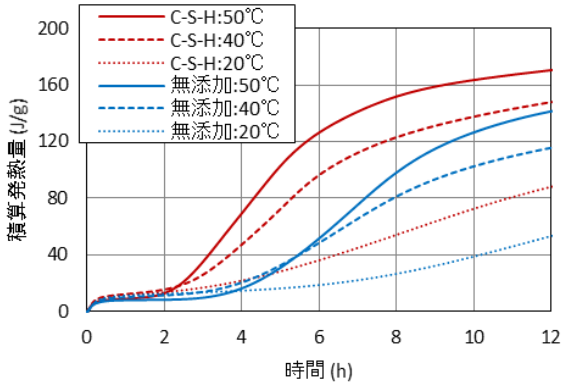
図－１　モルタル温度測定試験体



図－２　蒸気養生パターン



図－３　水和発熱速度



図－４　積算発熱量

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℃，40℃および 20℃においてセメントペースト（W/C=50%）の水和発熱速度をコンダクションカロリー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

蒸気養生過程中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_3S 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-Ka 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。

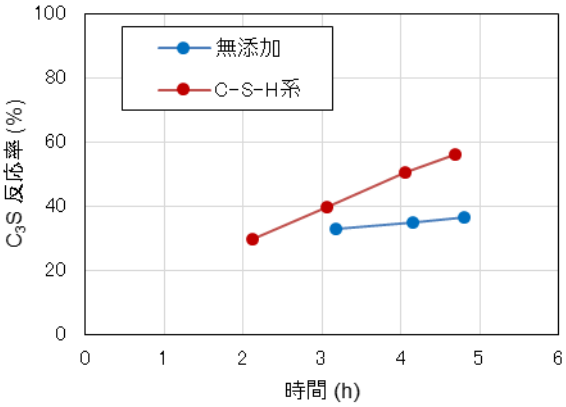
セメントペースト硬化体は，環境温度 20℃においてW/C=40%でモルタルと同じ混和剤使用量で練混ぜ，20℃環境下で 0.5 時間前置後に 50℃環境下の恒温恒湿槽に移動させ，測定材齢まで封緘養生した後に直ちに粉砕し，大量のアセトンに浸漬して水和を停止させた。なお，測定材齢は 2～5 時間とした。

(3) 高温環境下におけるモルタル試験体の温度測定

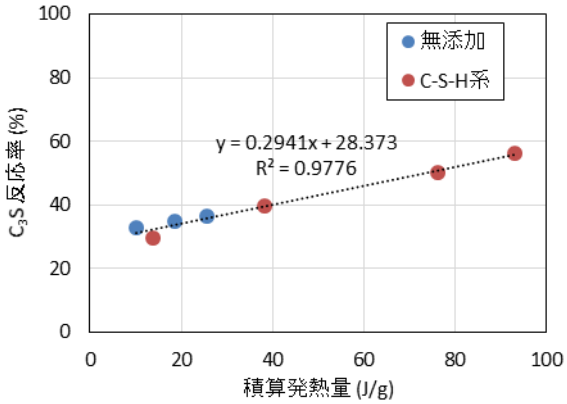
蒸気養生過程中のモルタル内部の温度上昇過程を確認するため，モルタル試験体の温度測定を行った。**図－１**に使用したモルタル試験の概要図を示す。試験は，側面および底面を断熱材（厚さ 200mm）で覆い，上面の開口部からモルタルを打込んだ試験体(L300mm×B300mm×H250mm)について，恒温恒湿槽で所定の温度履歴を与え，熱電対にてモルタル内部の温度を測定した。測定箇所は表面からの距離 h が 25mm，125mm，225mm となる箇所とし，それぞれの距離で 2 か所測定した。**図－２**に試験に使用した蒸気養生パターンを示す。前置時間は 1.0h，蒸気養生最高温度は 50℃とし，6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

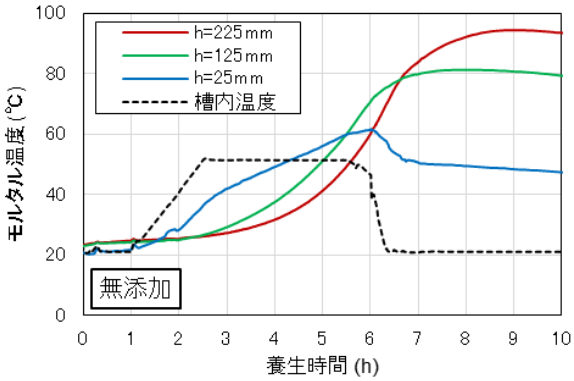
試験に用いたモルタルは，環境温度 20℃においてW/C=40%，S/C=2.0 で練混ぜ，JIS R 5201 「セメントの物理試験方法」に準じフローテーブルを用いてモルタルフロー値を測定し流動性の確認を行い，高性能減水剤にて所定の流動性（モルタルフロー値 200mm 程度）を確保させた。モルタル供試体形成用型を用いて，40mm×40mm×160mm の供試体を作製した。**表－２**に蒸気養生条件のパラメータを示す。蒸気養生は，最高温度，前置時間，供試体は，型枠に打込み 20℃環境の試験室で所定



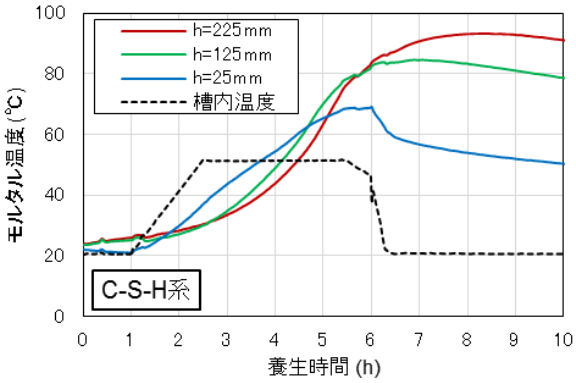
図－５　C_3S 反応率



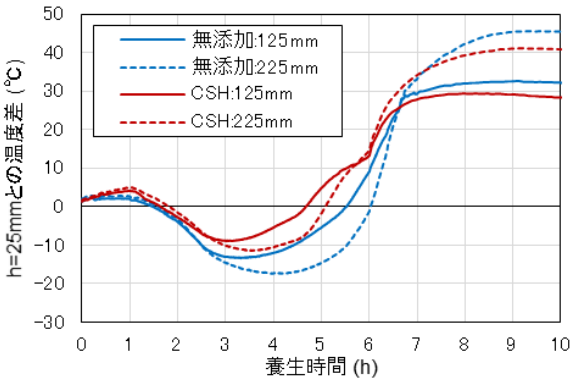
図－６　積算発熱量と C_3S 反応率の関係



(a) 無添加の場合



(b) C-S-H 系の場合



(c) 表面(h=25mm)との温度差

図－７　モルタル試験体温度測定結果

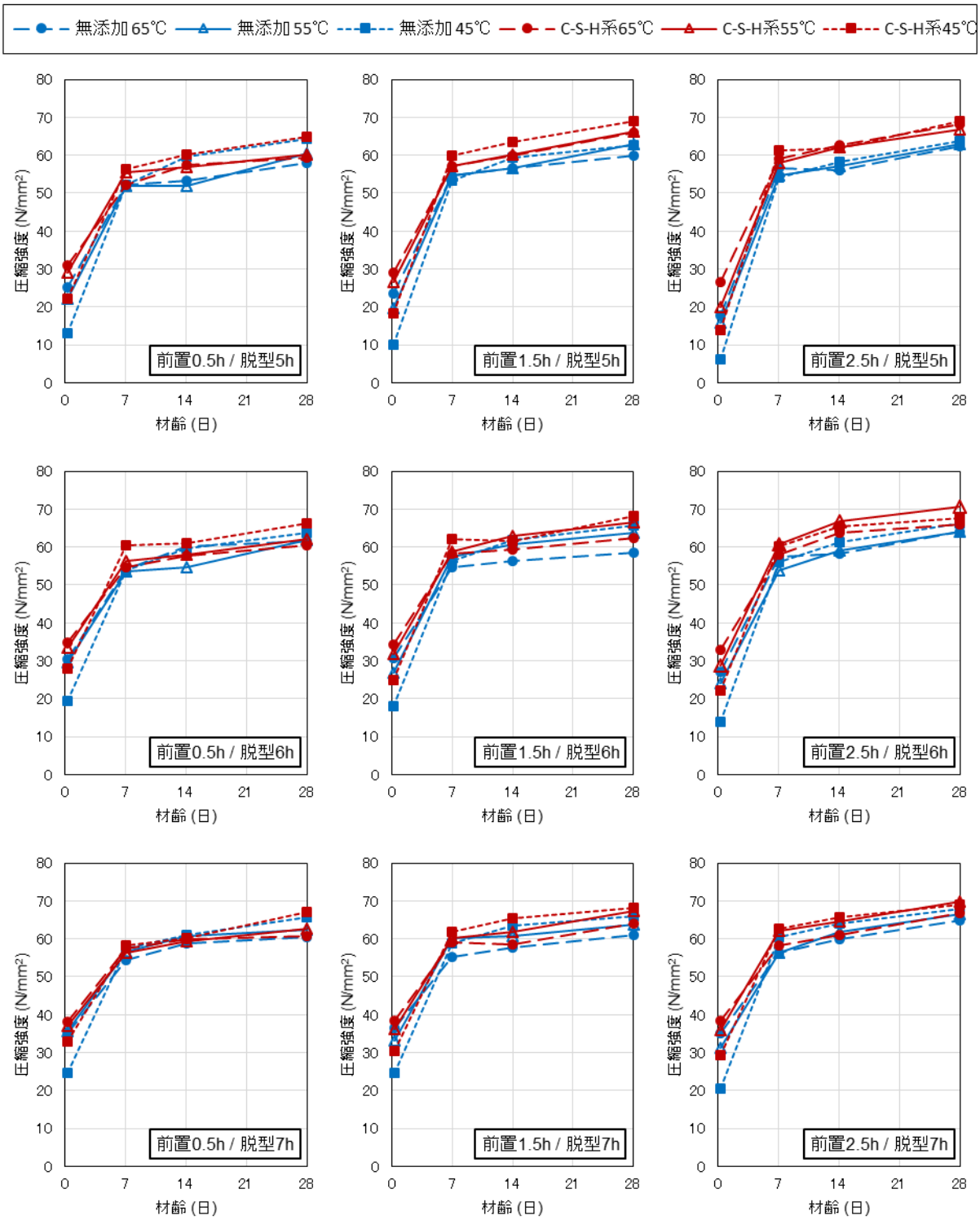
の時間前置を行った後に，蒸気養生を想定した恒温恒湿槽内での高温環境下で促進養生を行った。所定の時間養生を行った後に恒温恒湿槽から供試体を取出して脱型し，脱型時の圧縮強度を測定した。それ以外の供試体については，20℃環境の試験室にて気中養生を行い，任意の材齢にて圧縮強度を測定した。なお，試験は JIS R 5201 の試験方法に準じ，切片圧縮強度を測定した。

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℃と 40℃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℃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℃で養生したセメントペーストの測定材齢 2～5 時間における C_3S の反応率を示す。無添加と比較して，C-S-H 系は高い反応率を示し，時間に伴う反応率の増加も大きいことが確認された。



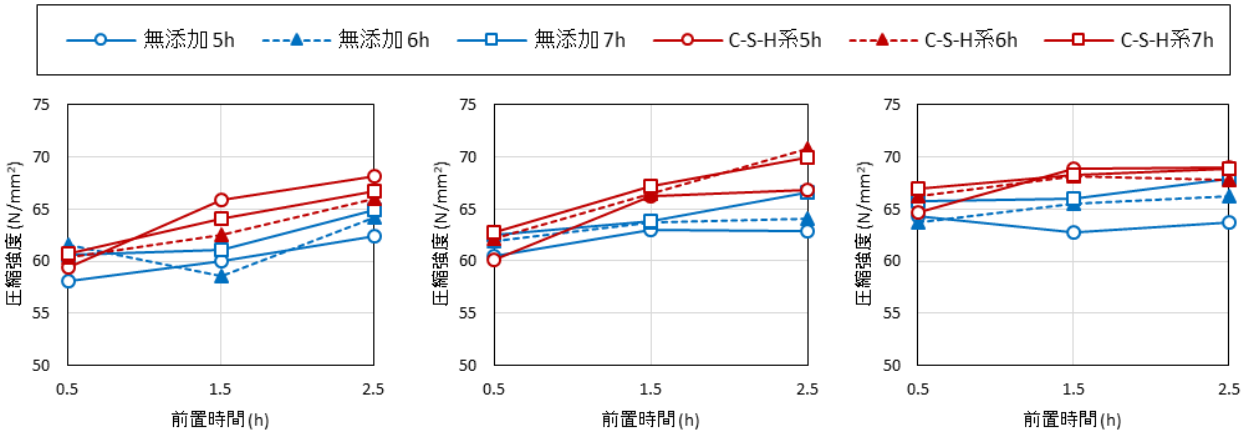
図－８　材齢と圧縮強度の関係

上記の結果から，高温環境下においても 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が高いことが確認された。

図－６は，**図－４**の 50℃環境下の積算発熱量のうち，**図－５**の反応率を測定した同一の時間のものを抜き出し，積算発熱量と C_3S 反応率の関係を示したものである。積算発熱量と C_3S 反応率には高い相関性が確認された。しかしながら，それぞれの試験において W/C および温度条件が異なっており，また他の鉱物の反応の影響も考えられるため，圧縮強度との関係も含めて今後検討する予定である。

3.2 蒸気養生を施したモルタルの温度変化

図－７ (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



(a) 最高温度 65℃の場合　　(b) 最高温度 55℃の場合　　(c) 最高温度 45℃の場合

図－９　前置時間と圧縮強度の関係（材齢 28 日）

異なり，無添加の場合（図－７(a)）に比べ C-S-H 系（図－７(b)）は，蒸気養生過程中の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言える。図－７(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が示唆された。

3.3 蒸気養生を施したモルタルの強度発現性

図－８に蒸気養生を施したモルタルの前置時間と脱型時間が同一の条件における材齢（脱型時，7 日，14 日，28 日）とモルタル圧縮強度の関係を示す。いずれの条件においても蒸気養生を施さないコンクリートの強度発現と同様に脱型時から 7 日で大幅に強度が増加し，前置時間が長い方が増加量は大きい傾向にあった。最高温度 45℃の場合においては脱型時の強度は低いが 28 日強度の値は大きくなり，前置時間 0.5h の場合においては 7 日以降の強度増加量は小さくなる傾向にあった。

また，何れの条件においても C-S-H 系は無添加よりも脱型時から材齢 28 日までの強度は大きく，C-S-H 系早強剤の強度増進効果は，蒸気養生条件に拘わらず長期にわたり効果があることが確認された。

図－９に前置時間と材齢 28 日圧縮強度の関係を示す。最高温度 65℃（図－９(a)）では，何れの場合においても前置時間が長いほど圧縮強度は大きくなる傾向にあった。最高温度 55℃（図－９(b)）の前置時間と圧縮強度の関係は，C-S-H 系は 65℃と同様の傾向であったが，無添加では圧縮強度はほぼ同等であり，最高温度 45℃（図－９(c)）においては，何れの場合においても圧縮強度にあまり差は認められなかった。また，C-S-H 系早強剤を用いることにより，最高温度が 65℃および 55℃の場合においても，1.5h 以上の前置時間を確保することにより 45℃と同等の 28 日圧縮強度を確保することが可能であることが確認された。

上記の結果から，既往の研究 [5]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た。各蒸気養生条件が圧縮強度に及ぼす影響を把握するため，各材齢における圧縮強度について，下記に示す回帰式を用いて重回帰分析を行った[6]。説明変数としては，蒸気養生最高温度，前置時間，および蒸気養生時間（脱型までに蒸気養生を施した時間）を用いることとした。

$$Y=A0+A1\cdot X1+A2\cdot X2+A3\cdot X3 \qquad (1)$$

Y：圧縮強度 [N/mm²]

表－３　圧縮強度に及ぼす試験パラメータの影響

早強剤		無添加				C-S-H 系			
強度測定材齢		脱型時	7 日	14 日	28 日	脱型時	7 日	14 日	28 日
重相関係数 R		0.963	0.784	0.827	0.890	0.963	0.866	0.853	0.883
重回帰係数	A0	-47.36	45.63	54.19	64.70	-25.58	57.81	61.53	70.14
	A1(蒸気養生最高温度)	0.618	-0.057	-0.179	-0.193	0.457	-0.157	-0.137	-0.194
	A2(前置時間)	4.451	2.840	3.087	2.520	3.433	2.933	3.048	3.152
	A3(蒸気養生時間)	6.834	1.911	2.191	1.187	5.571	1.222	0.626	0.344

X1：蒸気養生最高温度 [℃]
X2：前置時間 [h]
X3：蒸気養生時間 [h]
A0, A1, A2, A3：重回帰係数

表－３に(1)式を用いた重回帰分析結果を示す。無添加および C-S-H 系の何れの材齢においても，重相関係数は高い値を示しており，圧縮強度は蒸気養生各パラメータとの相関が高いことが確認された。また，各パラメータの影響度を表す重回帰係数の値は材齢によって異なった。回帰式の切片(A0)は C-S-H 系の方が無添加よりの値が大きく，C-S-H 系早強剤により何れの材齢においても圧縮強度が増進されることが確認された。蒸気養生最高温度(A1)は，材齢 7 日以降は最高温度が高いほど強度が低下する傾向にあり，早強剤の有無による違いはあまり確認されなかった。蒸気養生時間(A3)は，脱型時に圧縮強度に及ぼす影響が最も大きく，材齢が進むにつれ影響が小さくなる傾向にあり，無添加に比べ C-S-H 系の方がその値は小さかった。前置時間(A2)は脱型時に影響が大きく，材齢 7 日以降は圧縮強度に及ぼす影響が最も大きい要因であることが確認された。

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。また，C_3S 反応率と積算発熱量は高い相関性が確認された。
(2) C-S-H 系早強剤を用いることにより, 蒸気養生過程中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) 蒸気養生を施したモルタルにおいて, C-S-H 系早強剤を用いることにより，脱型直後の初期材齢だけでなく, 長期材齢においても圧縮強度が増進した。また，蒸気養生最高温度, 前置時間, および蒸気養生時間は, 脱型時だけでなくその後の強度発現性にも影響を及ぼし，回帰式によりその影響要因の特性を把握できることが確認された。

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
6) 高橋智彦ほか：重回帰分析等を用いた再生コンクリートの強度特性に関する評価，コンクリート工学年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1227-1232, 2002.7