

## C-S-H系早強剤を用いた蒸気養生コンクリートの耐凍害性に関する検討

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

キーワード：C-S-H系早強剤，蒸気養生，凍結融解試験，耐凍害性

### 1. はじめに

プレキャストコンクリートは生産性の観点から，初期の強度発現性向上のために蒸気養生が行われることが一般的であるが，適切な蒸気養生が行われない場合においてはプレキャストコンクリート製品の耐久性などの品質への影響が懸念される。既往の研究において，コンクリートの練混ぜ方法の変更<sup>1)</sup>，脱型後の再蒸気養生を行うなどの手法<sup>2)</sup>により，耐久性の向上を図ることが可能であることが確認されているが，製造工場において新たな設備の導入や，製造ライン変更を伴うことが不可避であるため，導入が困難な場合も考えられる。

一方，プレキャストコンクリート製品において品質を維持しつつ生産性を向上させる手段として，C-S-H系早強剤の使用が有効であることが確認されている<sup>3)</sup>。これまでに筆者らは，C-S-H系早強剤を用いたモルタルにおいて，蒸気養生条件が強度発現性および発熱特性に影響を及ぼす要因を検討し，C-S-H系早強剤が蒸気養生直後の材齢初期のみでなくその後の強度発現性および水和反応においても影響を及ぼすことを確認した<sup>4),5)</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向上を目的に，モルタル試験体において，蒸気養生コンクリートの耐凍害性に及ぼす蒸気養生条件およびC-S-H系早強剤の影響について確認し，プレキャストコンクリート工場の既存設備で対応可能な耐凍害性向上の検討を行った。

### 2. 試験概要

#### 2.1 使用材料および配合

セメントは早強ポルトランドセメント，細骨材は大井川系陸砂（表乾密度 $2.58\text{g/cm}^3$ ）を使用した。混和剤には高性能減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）およびC-S-H系早強剤を用いた。試験に用いたモルタルは，環境温度 $20^\circ\text{C}$ において $W/C=40\%$ ， $S/C=2.0$ でJIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準じて練り混ぜ，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 $200\text{mm}$ 程度）となるように調整した。

試験体は $40\text{mm}\times 40\text{mm}\times 160\text{mm}$ のモルタル試験体形成用型を用いて作製し，高性能減水剤のみ（以下，無添加と称す）とC-S-H系早強剤を $C\times 2\%$ 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

蒸気養生は，恒温恒湿槽を用いて養生温度および湿度を制御して実施した。蒸気養生条件は，前置時間と養生温度をパラメータとし，それぞれ3水準（前置時間： $0.5, 1.5, 2.5\text{h}$ ，養生温度： $65, 55, 45^\circ\text{C}$ ）について試験を行った。モルタルを型枠に打ち込んだ直後から $20^\circ\text{C}$ 環境下で所定の時間静置（前置）した後に，予め最高温度の条件に設定した恒温恒湿槽に試験体を移動し，試験体打込み後から6時間に恒温恒湿槽から試験体を取り出し， $20^\circ\text{C}$ 環境下にて脱型を行った。なお，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および結露水の混合を防ぐため、試験体表面をフィルムで覆った状態で加温履歴を与えた。蒸気養生終了後は20℃環境の試験室にて、材齢28日まで気中養生を行った。

### 2. 3 モルタル試験体の凍結融解試験

本研究では、40mm×40mm×160mm のモルタル試験体を用いて、JIS A 1148:2010「コンクリートの凍結融解試験方法」のA法の試験方法に従い凍結融解試験を行った。図-1に凍結融解試験に使用したモルタル試験体の概要図を示す。材齢28日の試験体を

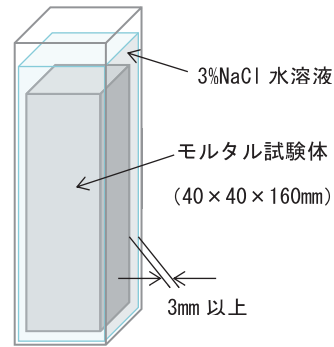


図-1 凍結融解試験に使用したモルタル試験体

20℃の水中に24時間浸漬した後、ポリエチレン袋に入れて側面に3mm以上の隙間を確保し水溶液で満たした。各試験条件におけるコンクリートの耐凍害性への影響を早期かつ的確に判断するため、ポリエチレン袋内の溶液には質量パーセント濃度3%の塩化ナトリウム水溶液を用いた。凍結融解試験は、試験体内部に熱電対を埋め込んだ温度管理用のモルタル試験体の内部温度を測定し、凍結融解1サイクルに要する時間を4時間として、試験体内部温度が2時間で5±2℃から-18±2℃に下がり、2時間で-18±2℃から5±2℃に上がるように、恒温恒湿槽を用いて凍結融解温度を制御した。凍結融解試験の測定項目は、各試験体の JIS A 1127 によるたわみ振動の一次共鳴振動数、および質量とし、これらの値からモルタル試験体の相対動弾性係数と質量変化率を求めた。測定後は、毎回新たなポリエチレン袋に入れ替え、新たに作製した塩化ナトリウム水溶液で試験体を満たした。また、耐凍害性を早期で判断することを目的として50サイクルまで凍結融解試験を行った。

### 3. 試験結果および考察

図-2に養生温度65℃のモルタルの相対動弾性係数を示す。なお、グラフ中の凡例に示す“0.5h, 1.5h, 2.5h”はそれぞれの条件における前置時間を表している。相対動弾性係数は、何れの条件においても測定開始より減少する傾向にあり、無添加およびC-S-H系とも前置時間0.5hおよび1.5hにおいては16サイクル以降でさらに減少する傾向にあった。図-3に養生温度65℃の質量変化率を示す。質量変化率は、測定開始から若干増加する傾向にあったものの、12サイクル以降は減少し、前置時間が短いほど減少する傾向にあった。図-4に養生温度55℃のモルタルの相対動弾性係数を、図-5に養生温度55℃の質量変化率を示す。相対動弾性係数は、無添加およびC-S-H系とも前置時間が0.5hの場合において測定開始より減少する傾向にあり、C-S-H系の前置時間1.5hにおいては25サイクルから緩

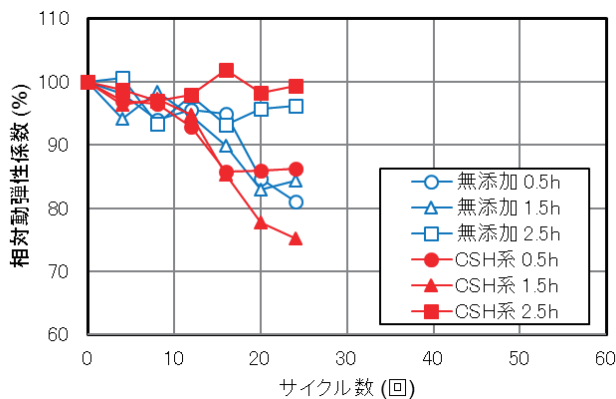


図-2 相対動弾性係数 (養生温度 65℃)

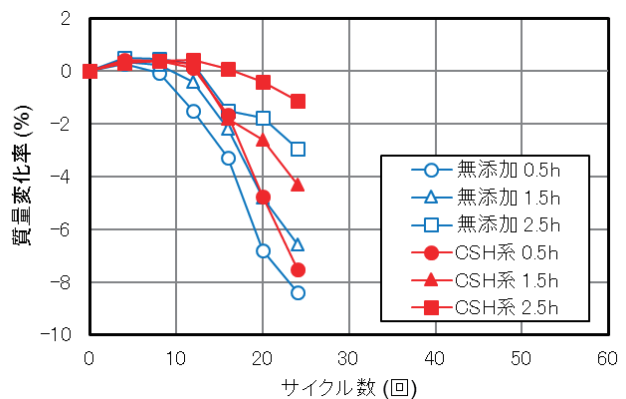


図-3 質量変化率 (養生温度 65℃)

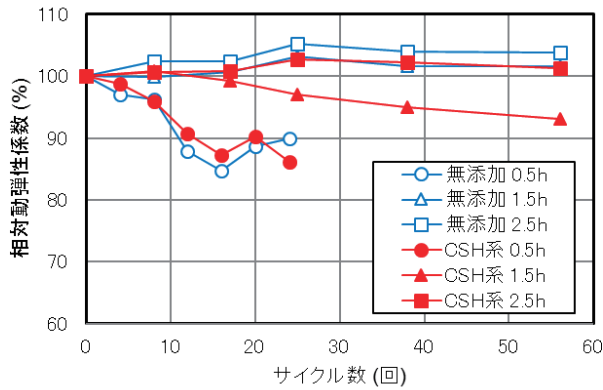


図-4 相対動弾性係数 (養生温度 55°C)

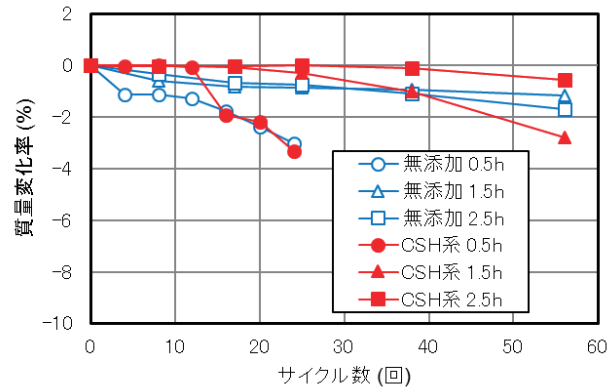


図-5 質量変化率 (養生温度 55°C)

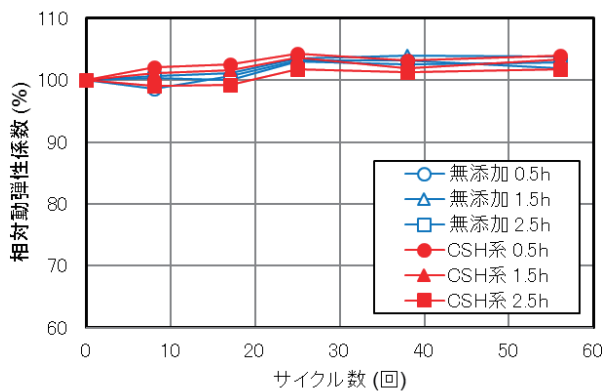


図-6 相対動弾性係数 (養生温度 45°C)

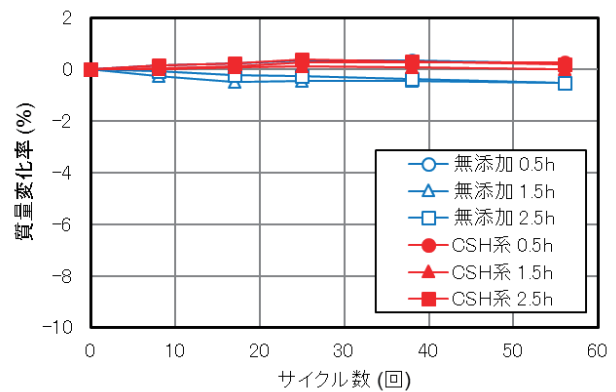


図-7 質量変化率 (養生温度 45°C)

やかに減少し、それ以外の条件においてはあまり変化が認められなかった。また、相対動弾性係数の減少が認められた条件において、質量変化率も同様の傾向が確認され、またそれ以外の条件においても38サイクル以降で緩やかな減少が認められた。図-6に養生温度45°Cのモルタルの相対動弾性係数を、図-7に質量変化率を示す。いずれの条件においても、凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数および質量変化率ともあまり変化は認められなかった。

上記の結果より、前置時間が短く、養生温度が高いほど、モルタル試験体の相対動弾性係数および質量変化率は減少することが確認された。丸山ら<sup>6)</sup>の研究より、前置時間を長くする、あるいは温度上昇を緩やかにすることにより、強度発現性の向上、細孔構造の緻密化に寄与することが確認されている。本研究では、前置直後に所定の養生温度環境に試験体を移動させており、急激な温度変化の影響を受けていると考えられるが、養生温度が高いほど試験体の温度上昇はより急激になるため、耐凍害性の向上においても同様の傾向があることが示唆される。

そこで、モルタル試験体の耐凍害性と脱型後の強度発現性の関係を把握するため、材齢28日のモルタル試験体の圧縮強度を確認した。圧縮強度の測定については、凍結融解試験と同様のモルタル試験体を用いて切片圧縮強度を確認し、蒸気養生による強度への影響を確認するため20°C養生の試験体の強度を併せて測定した。図-8は20°C養生のモルタル試験体に対する圧縮強度の強度比を示したものである。強度比が低い条件において、モルタルの凍結融解試験の相対動弾性係数および質量変化率は減少する傾向を示していることが確認されており、材齢28日の強度発現性が低下する蒸気養生条件においては、耐凍害性が低下する可能性があることが示唆された。

C-S-H系早強剤を用いることにより初期強度発現性が向上するため、同一脱型強度での養生温度の低減および前置時間の確保が可能となる。図-9に筆者らが既往の研究で確認した、材齢初期における等価材齢と圧縮強度の関係<sup>4)</sup>を示す。このグラフから、無添加の養生温度55°C・前置時間0.5hの養

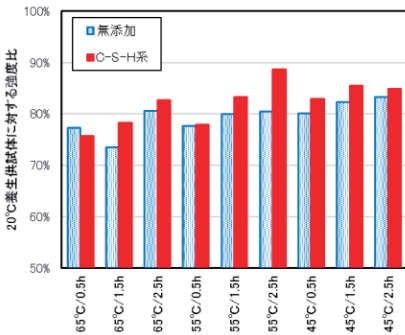


図-8 20°C養生試験の圧縮強度に対する強度比

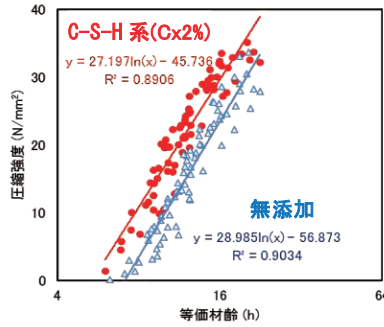


図-9 等価材齢と推定圧縮強度の関係<sup>4)</sup>

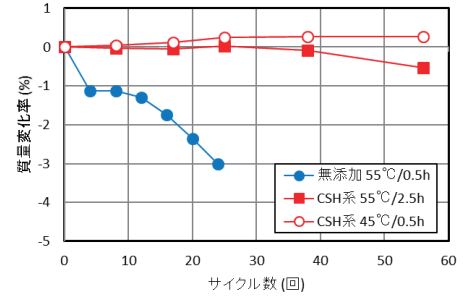


図-10 無添加 55°C/0.5h と同程度の脱型強度の場合のモルタル試験体の質量変化率

生条件 (以下, 55°C/0.5h と称す) の圧縮強度は, C-S-H系では55°C/2.5h または45°C/0.5h の養生条件で同程度の強度となることが推定される。図-10 は無添加の55°C/0.5h, C-S-H系の55°C/2.5h および45°C/0.5h において, 図-5, 7 に示す質量変化率のグラフから抜粋したものである。無添加においては測定開始から質量変化率の減少が確認されたが, C-S-H系では減少が認められなかった。したがって, C-S-H系早強剤の使用により, 前置時間の延長あるいは養生温度低減を図ることにより, プレキャストコンクリートの耐凍害性を向上させることが可能であることが示唆された。

#### 4. まとめ

- (1) モルタル試験体を用いた簡易的な凍結融解試験において, 耐凍害性に及ぼす蒸気養生条件および C-S-H系早強剤による影響について概ね確認することができ, 養生温度が高く, 前置時間が短いほど, モルタル試験体の耐凍害性は低下した。
- (2) C-S-H系早強剤の有無が耐凍害性に及ぼす影響は, 養生温度や前置時間の影響に比べ小さい。
- (3) 材齢28日の強度発現性が低下する養生条件では耐凍害性が低下する可能性があり, C-S-H系早強剤を用いることにより, 養生温度の低減, あるいは前置時間の確保が可能となるため, 高い耐凍害性を確保できる養生条件の設定が可能となることが示唆された。

#### 参考文献

- 1) 鈴木翔太, 田澤榮一, Jariyathitipong Paweena, 笠井哲郎: ダブルミキシングで製造したプレキャストコンクリートの耐凍害性と細孔構造に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.1.36, No.1, pp.355-360, 2014.7
- 2) 佐々木優衣, 宇治公隆, 上野敦, 原洋介: 細孔構造に着目した蒸気養生コンクリートの中性化特性および塩化物イオン浸透性の評価, Vol.37, No.1, pp.1483-1488, 2015.7
- 3) 小山広光, 井元晴丈, 小泉信一, 土谷正: C-S-Hナノ粒子を含有する早強剤の特性と効果について, コンクリート工学, Vol.53, No.7, pp.614-621, 2015.7
- 4) 小山広光, 佐々木駿, 伊達重之: 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) 小山広光, 上村将吾, 中嶋望, 伊達重之: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.231-236, 2016.7
- 6) 丸山晃平, 宇治公隆, 上野敦, 大野健太郎: 蒸気養生条件が相違するコンクリート製品の強度特性および細孔構造に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.571-576, 2011.7