

論文 C-S-H 系早強剤を用いたプレキャストコンクリートの耐凍害性に関する検討

小山 広光*1・上村 将吾*2・保科 拓也*3・伊達 重之*4

要旨：蒸気養生条件および C-S-H 系早強剤が耐凍害性に及ぼす影響を検討するため、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その影響を確認した。試験の結果、耐凍害性に及ぼす蒸気養生条件および C-S-H 系早強剤の影響を概ね確認することができ、蒸気養生温度が高く、前置時間が短いほどモルタル供試体の耐凍害性は低下し、C-S-H 系早強剤の有無による耐凍害性への影響は小さいことが確認された。また、C-S-H 系早強剤を用いて蒸気養生温度の低減および前置時間の確保を行うことにより、蒸気養生コンクリートにおいて高い耐凍害性を確保する養生条件の設定が可能であることが示唆された。

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, 圧縮強度

1. はじめに

近年の建設業界における生産性向上への取り組みにおいて、プレキャストコンクリートに期待される役割は大きく、高品質・高耐久な構造物を構築するため、プレキャストコンクリートの品質および生産性に影響を及ぼす要因を的確に把握する必要がある。

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、外観や耐久性などのコンクリートの品質への影響が懸念される。既往の研究において、蒸気養生がコンクリートの耐久性に及ぼす影響について、蒸気養生条件と蒸気養生後の二次養生が重要であることが確認されており^{2)~5)}、コンクリートの練混ぜ方法の変更や、脱型後に再度蒸気養生を行うなどの手法により、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^{6) 7)}。しかしながら、このような手法を用いるには、プレキャストコンクリート製造工場において新たな設備の導入や、製造ラインの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たまま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⁸⁾。C-S-H 系早強剤はコンクリートの液相中に C-S-H ナノ粒子を直接導入し、セメントからのイオンの溶出による結晶核の生成を待たずに C-S-H を成長させ、水和反応過程の誘導期および加速期を大幅に短縮することができるため、プレキャストコンクリートの脱型時間短縮、または養生温度の低減を図ることが可能となる。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^{9) 10)}。

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、モルタル供試体において、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

表 1 に試験に使用した材料を示す。セメントは早強ポルトランドセメント、細骨材は陸砂を使用した。混和剤には高性能減水剤、AE 剤および 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℃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」に準じて練混ぜ、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)となるように調整した。

供試体は 40mm×40mm×160mm のモルタル供試体形成用型を用いて作製し、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。また、微細空気泡の有無による試験結果への影響を確認するため、AE 剤を用いない場合(空気量 2.5±0.5%)と併せ、AE 剤を用いてモルタルの空気量を 7.0±0.5%(コンクリートで 4.5%相当)とした場合について試験を行った。

*1 BASF ジャパン株式会社 建設化学品事業部 茅ヶ崎技術開発センター (正会員)

*2 東海大学大学院 土木工学専攻 (学生会員)

*3 東海大学 工学部 土木工学科

*4 東海大学 工学部 土木工学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 使用材料

材料	記号	種類および物理的性質
セメント	C	早強ポルトランドセメント (密度 : 3.14 g/cm ³)
細骨材	S	大井川水系陸砂 (表乾密度 : 2.58g/cm ³ , 吸水率 : 2.15%)
混和剤	SP	高性能減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系化合物)
	AE	AE 剤 (変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤)
	CSH	C-S-H 系早強剤 (C-S-H ナノ粒子のサスペンション)

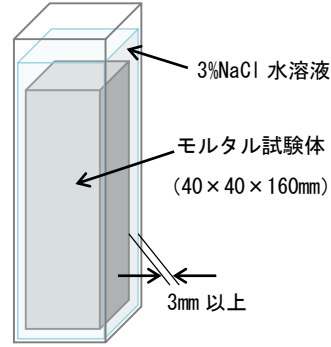


図-1 凍結融解試験に使用したモルタル供試体

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

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。表-2に蒸気養生条件を示す。モルタルを型枠に打ち込んだ直後から 20°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供試体を移動し、供試体打ち込み後から 6 時間に恒温恒湿槽から試験体を取り出し、20°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、供試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、供試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°C 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 のモルタル供試体を用いて、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供試体の概要図を示す。材齢 28 日の供試体を 20°C 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、小山田らの試験方法を参考に¹⁾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、供試体内部に熱電対を埋め込んだ温度管理用のモルタル供試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、供試体内部温度が 2 時間で 5±2 °C から -18±2 °C に下がり、2 時間で -18±2 °C から 5±2 °C に上がるように、

表-3 モルタルのフレッシュ性状

W/C (%)	早強剤 (Cx2%)	AE 剤	モルタル径 (mm)	空気量 (%)	モルタル温度 (°C)
40	0	なし	188×188	2.7	20
		あり	188×185	7.4	20
	2	なし	199×195	2.6	20
		あり	205×203	7.2	20

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、各供試体の JIS A 1127 によるたわみ振動の一次共鳴振動数、及び質量とした。測定された、たわみ振動の一次共鳴振動数および質量より、式(1)および式(2)を用いて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供試体を満たした。また、耐凍害性を早期で判断することを目的として、AE 剤を用いた場合においては 100 サイクル、AE 剤を用いない場合においては 50 サイクルまで凍結融解試験を行った。測定は融解行程終了直後に行い、試験槽から取り出した供試体は、その表面を軽く洗い流した後に表面の水をふき取り、速やかに供試体のたわみ振動の一次共鳴振動数及び質量を測定した。

$$P_n = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100 \quad (1)$$

P_n : 凍結融解 n サイクル後のモルタルの相対動弾性係数 (%)

f_n : 凍結融解 n サイクル後のモルタルのたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

f_0 : 凍結融解 0 サイクルのモルタルのたわみ振動の一次共鳴振動数 (Hz)

$$W_n = \frac{w_n - w_0}{w_0} \times 100 \quad (2)$$

W_n : 凍結融解 n サイクル後のモルタルの質量変化率 (%)

w_n : 凍結融解 n サイクル後のモルタル供試体の質量 (g)

w_0 : 凍結融解 0 サイクル後のモルタル供試体の質量 (g)

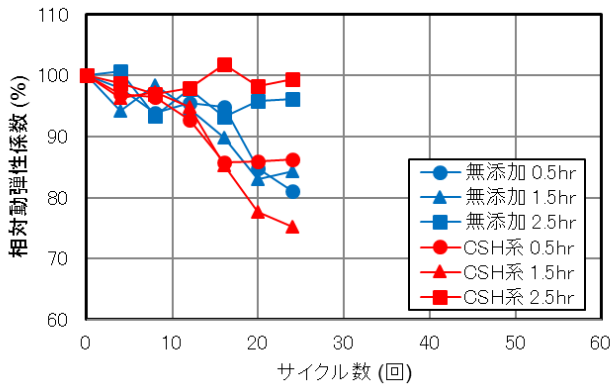


図-2 相対動弾性係数
(最高温度 65°C, AE 剤なし)

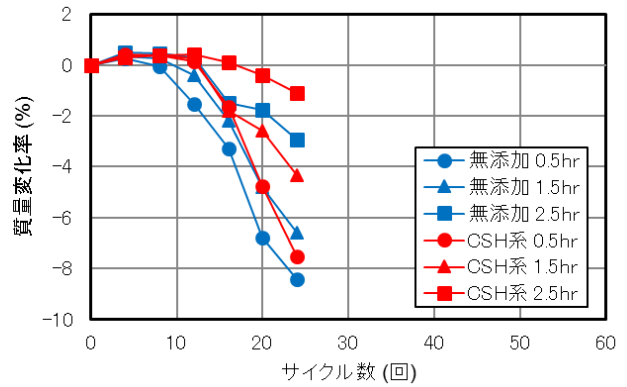


図-3 質量変化率
(最高温度 65°C, AE 剤なし)

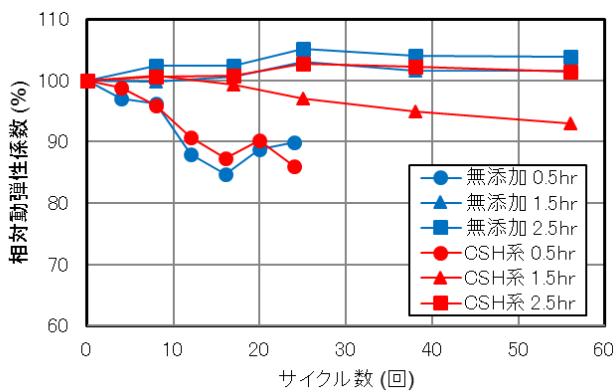


図-4 相対動弾性係数
(最高温度 55°C, AE 剤なし)

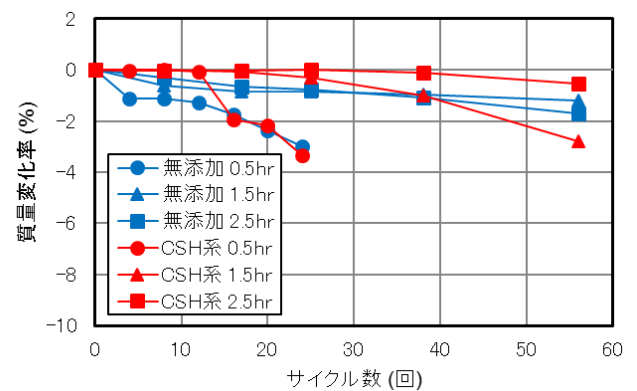


図-5 質量変化率
(最高温度 55°C, AE 剤なし)

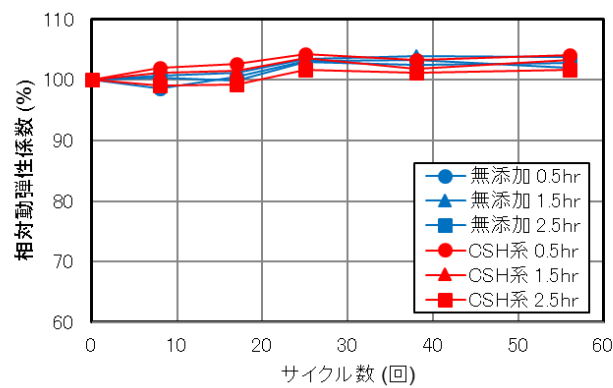


図-6 相対動弾性係数
(最高温度 45°C, AE 剤なし)

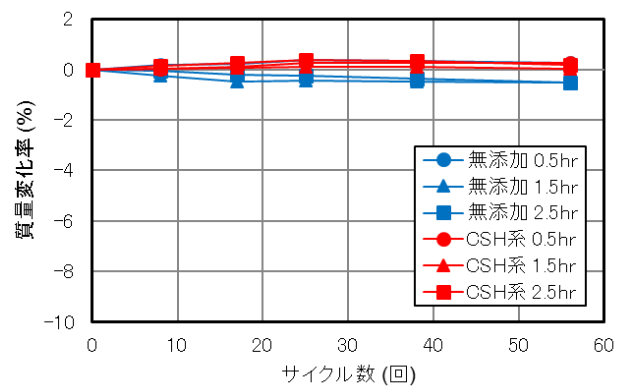


図-7 質量変化率
(最高温度 45°C, AE 剤なし)

3. 試験結果および考察

表-3にモルタルのフレッシュ試験結果を示す。何れのモルタルにおいても、所定の流動性および空気量を有することを確認した。

図-2にAE剤を用いない場合における蒸気養生最高温度 65°C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“0.5hr, 1.5hr, 2.5hr”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 0.5hrおよび1.5hrにおいては16サイクル以降で更に減少する傾向にあった。図-3に温度 65°C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その増加量はAE剤を用いた場合に比べ小さく、12サイクル以降

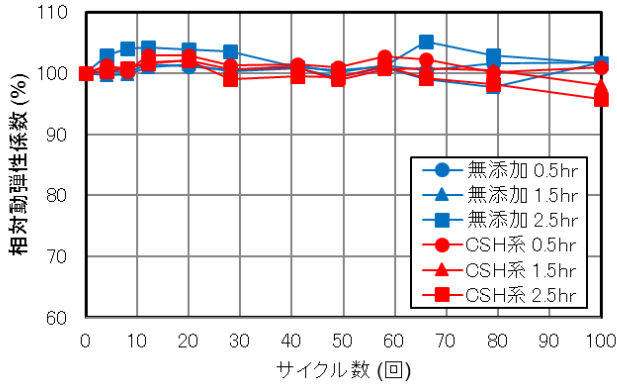


図-8 相対動弾性係数
(最高温度 65°C, AE 剤あり)

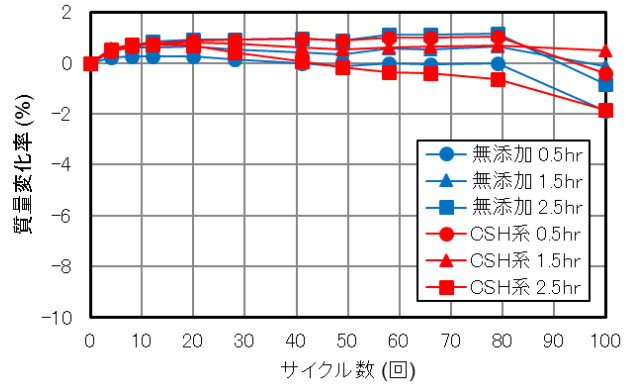


図-9 質量変化率
(最高温度 65°C, AE 剤あり)

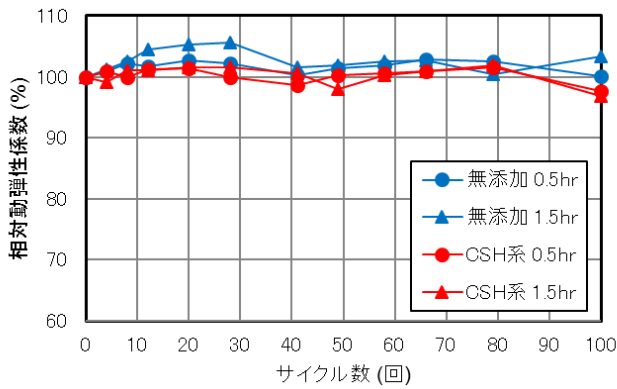


図-10 相対動弾性係数
(最高温度 55°C, AE 剤あり)

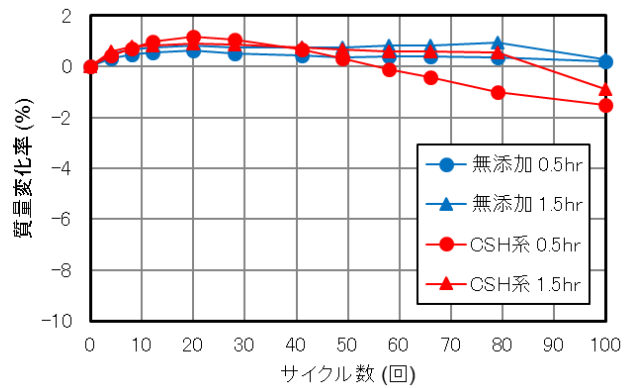


図-11 質量変化率
(最高温度 55°C, AE 剤あり)

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**に蒸気養生温度 55°Cのモルタルの相対動弾性係数を示す。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 0.5hr 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 1.5hr においては25サイクルから緩やかに減少し、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。**図-5**に温度 55°Cの質量変化率を示す。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**に蒸気養生温度 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。

図-8、**10**にAE剤を用いた場合における蒸気養生温度 65°Cおよび 55°Cのモルタルの相対動弾性係数を、**図-9**、**11**に質量変化率を示す。質量変化率が100サイクルで若干減少する傾向にあったものの、100サイクルまでの測定においては、相対動弾性係数および質量変化率

に大きな変化はなく、早強剤の有無および前置き時間の違いによる差はあまり認められなかった。AE剤を用いない場合で相対動弾性係数および質量減少率が減少する蒸気養生条件においても、AE剤を用いて微細空気泡を導入することにより、耐凍害性を改善することが可能であることが示唆された。また、相対動弾性係数および質量変化率は、試験開始からやや増加する傾向にあったが、これは今回使用した供試体が気中養生であり、融解行程時による吸水の影響と考えられる。

上記の結果より、前置時間が短く、蒸気養生最高温度が高いほど、モルタル供試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¹²⁾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おり、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。脱型後の強度発現性を確認することにより、耐凍害性を推察することが可能であると考えられる。そこで、モルタル供試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日のモルタル供試体の圧縮強度を確認した。

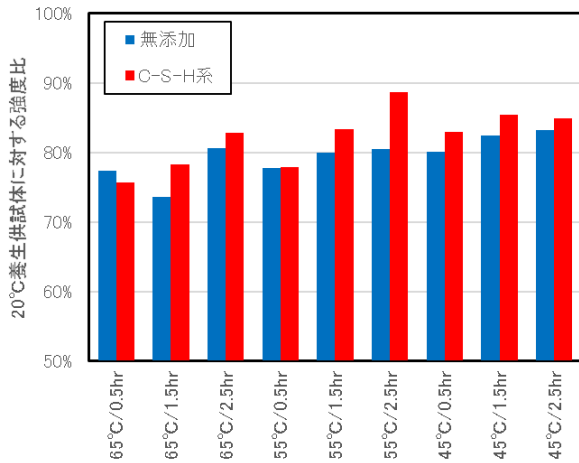


図-12 20°C養生試験の圧縮強度に対する強度比

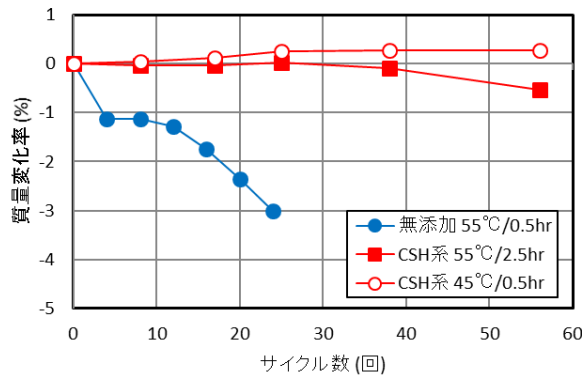


図-14 無添加 55°C/0.5hr と同程度の脱型強度の場合のモルタル供試体の質量変化率

なお、圧縮強度の測定に凍結融解試験と同様に 40mm×40mm×160mm 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養生のモルタル試験体の圧縮強度を併せて測定した。図-12 は AE 剤を用いない場合における 20°C養生のモルタル供試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。

また、C-S-H 系早強剤の有無によって相対動弾性係数および質量変化率にあまり違いは認められなかったことから、C-S-H 系早強剤は蒸気養生を施した場合において耐凍害性を低下させるような細孔構造への影響は少ないと考えられる。C-S-H 系早強剤を用いることによる初期強度向上効果により、同一脱型強度を得るための、蒸気養生最高温度の低減および前置時間の確保が可能となる。筆者らは既往の研究において、蒸気養生を施したコンク

$$t_e = \sum_0^t \exp \left[\frac{-E}{R} \left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{293} \right) \right] \times \Delta t$$

t_e : 等価材齢 (h)
 T_c : 養生温度 (K)
 E : 活性化エネルギー (=27.0 J/mol)
 R : 気体定数 (=8.314 J/mol/K)
 Δt : 時間 (h)

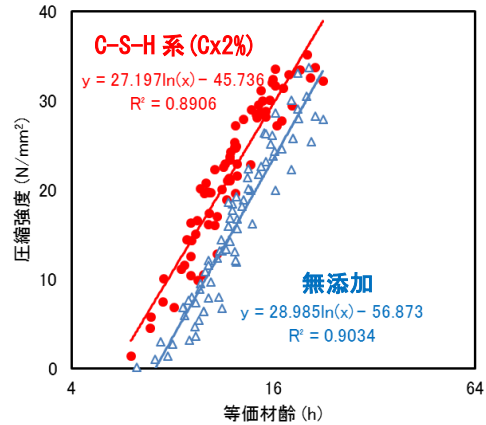


図-13 等価材齢と推定圧縮強度の関係⁹⁾

表-4 無添加 55°C/0.5hr と同程度となる脱型強度

配合	養生条件	等価材齢 (hr)	推定圧縮強度 (N/mm ²)	圧縮強度実測値 (N/mm ²)
無添加	55°C/0.5hr	18.5	27.6	29.4
C-S-H系	55°C/2.5hr	13.9	25.9	28.9
	45°C/0.5hr	13.7	25.3	27.9

リートの同一配合における脱型強度について、蒸気養生条件を Arrhenius 式で応用した等価材齢で表すことにより高い精度で推定できることを確認している (図-13 参照)⁹⁾。表-4 に、無添加の養生温度 55°C・前置時間 0.5hr の養生条件 (以下、55°C/0.5hr と称す) において、同程度の圧縮強度が推定される C-S-H 系の養生条件、等価材齢、推定圧縮強度および圧縮強度実測値を示す。無添加の 55°C/0.5hr では等価材齢は 18.5hr となり、図-13 のグラフから圧縮強度は 27.6N/mm² と推定される。一方、C-S-H 系の 55°C/2.5hr および 45°C/0.5hr の養生条件では、等価材齢はそれぞれ 13.9hr および 13.7hr で、同程度の圧縮強度 (25.9N/mm² および 25.3N/mm²) が推定され、何れの条件においても同程度の強度となることが実測値でも確認された。図-14 に無添加の 55°C/0.5hr、C-S-H 系の 55°C/2.5hr および 45°C/0.5hr における図-7、9 に示す質量変化率のグラフから抜粋したものを示す。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。従って、C-S-H 系早強剤の使用によって、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、生産性を確保しつつ、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) モルタル供試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、蒸気養生温度が高く、前置時間が短いほど、モルタル供試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、蒸気養生温度や前置時間の影響に比べて極めて小さく、C-S-H系早強剤がプレキャストコンクリートの耐凍害性に及ぼす影響は小さいと考えられる。
- (3) 材齢28日の強度発現性が低下する養生条件においては、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) 国土交通省：i-construction 報告書，2016.3
- 2) 添田政司，大和竹史，左東有次，江本幸雄：高炉スラグ微粉末を用いた早強性を有する高流動コンクリートの耐凍害性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.18，No.1，pp.153-158，1996.7
- 3) 大塚浩司，庄谷政美，阿波稔：蒸気養生コンクリートの耐久性に及ぼす表面微細ひび割れの影響，土木学会論文集，No.585/V-38，pp.97-111，1998.2
- 4) 一宮一夫，山崎竹博：高流動コンクリートの表面気泡性状と蒸気養生方法や物質浸透性の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp.1205-1210，

2010.7

- 5) 上野敦：コンクリート製品の品質向上のための基礎研究，コンクリートテクノ，vol.35，No.11，pp.9-13，2016.11
- 6) 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.36，No.1，pp.355-360，2014.7
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 小山田哲也，羽原俊祐，高橋拓真，高橋俊介：スケーリング劣化を考慮した新しい凍結融解試験法の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.1，pp.935-940，2011.7
- 12) 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