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初期強度発現性に関する検討

小山　広光[*1]・佐々木　駿[*2]・伊達　重之[*3]

要旨：C-S-H 系早強剤を使用した蒸気養生コンクリートにおいて，配合および養生条件が初期強度発現性に及ぼす影響を検討した。検討の結果，水セメント比が小さいほど C-S-H 系早強剤の強度促進効果は高くなる傾向にあり，無添加の場合と同じ強度を確保できる養生時間は 0.5～2.0 時間短縮が可能であること，同一養生時間であれば養生温度の低減が可能であることを確認した。また，圧縮強度は蒸気養生温度の影響を大きく受け，同一積算温度においては蒸気養生温度が高い方が圧縮強度は高く，蒸気養生温度が同一の条件であれば積算温度により脱型強度の推定が可能であることが示唆された。

キーワード：プレキャストコンクリート，蒸気養生，初期材齢，圧縮強度，積算温度

1. はじめに

プレキャストコンクリートにおいて一定の品質を確保し効率的な生産を検討するためには，製品の製造に必要な強度を確保するための配（調）合選定および養生を行う必要があり，とりわけ型枠を 1 日の製造で 2 回以上使用するなど，養生時間が製造工程に占める要因割合が多い場合においては，初期材齢時の強度発現性に及ぼす各種要因の影響を把握することが有効である。また，プレキャストコンクリートの効率的な生産のためには促進養生（蒸気養生）は不可欠であり，これまでに蒸気養生を施したコンクリートの初期強度に関する研究 [1), 2)]は行われているものの，強度発現性を支配している要因の特定およびメカニズムの解明には至っていない。

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ることが確認されている [3)]。生産性向上だけでなく，耐久性の確保，および環境負荷低減といった観点からも，早強剤を用いた蒸気養生コンクリートの初期強度発現性を把握することは重要であると考えられる。

本研究は，プレキャストコンクリートの生産性向上の観点から，C-S-H 系早強剤を用いた蒸気養生コンクリートにおいて，各種条件（養生条件，配合条件）が初期強度発現性に及ぼす影響を確認し，脱型強度推定について検討を行った。

2. 実験概要

実験は，まず一般的なプレキャストコンクリート製品の蒸気養生を想定した蒸気養生コンクリートの強度発現性の確認（シリーズ 1）を行い，次に各養生条件および配合条件の違いが強度発現性に及ぼす影響の確認（シリーズ 2）を行った。

2.1 使用材料および配（調）合

表－1 および２に実験に使用した材料および配（調）

表－１ 使用材料

材料	種類および物理的性質
セメント	早強ポルトランドセメント（密度3.14g/cm^3）
細骨材	大井川水系陸砂（密度2.58g/cm^3，粗粒率2.57）
混和剤	高性能減水剤（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粒子のナノサスペンション， 粒子サイズ数百～数千nm）
	亜硝酸系早強剤

表－２ 配（調）合・養生条件

●シリーズ１（W/C=40%で一定）

項目	パラメータ
早強剤	無添加，C-S-H系(Cx2，4%)，亜硝酸系(Cx2%)
養生条件	[条件1] 前置：20℃/2.0h → 昇温：22.5℃/h・2.0h → 最高温度：65℃・1.0h → 降温：10℃/h [条件2] 前置：20℃/1.0h → 昇温：20℃/h・1.5h → 最高温度：50℃・4.0h → 降温：10℃/h [条件2] 前置：20℃/2.0h → 昇温：22.5℃/h・1.0h → 最高温度：45℃・5.5h → 降温：10℃/h

●シリーズ２

項目	パラメータ
早強剤	無添加，C-S-H系(Cx2%)
W/C	30%，40%，50%
前置時間	0.5h，1.5h，2.5h （前置時の温度は20℃）
最高温度	65℃，55℃，45℃，35℃，20℃（一定）

*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 東海大学大学院　土木工学専攻
*3 東海大学　工学部　土木工学科　教授　博士(工学)　（正会員）

合条件を示す。実験には，セメントは早強ポルトランドセメント，細骨材は陸砂，混和剤は高性能減水剤を用い，早強剤として C-S-H 系早強剤および亜硝酸系早強剤（以下，亜硝酸系と称す）を使用した。本実験はモルタルにて試験を行い，高性能減水剤にて所定の流動性（フロー値 200mm 程度）を確保した。早強剤を併用する場合は，高性能減水剤の使用量を一定とし，早強剤が強度発現性に及ぼす影響について確認した。

2.2 養生条件

コンクリートの養生は，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。

シリーズ 1 では，一般的なプレキャストコンクリートの蒸気養生パターンを想定し，前置時間，昇温勾配・時間，最高温度・保持時間および降温勾配・時間を設定した。養生条件 1 と 2 については，蒸気養生パターンから式(1)より求めた 5，6.5，8 時間の積算温度がほぼ同一となるように養生条件を設定し，養生条件 3 は養生条件 2 と同じ前置時間，昇温・降温勾配とし，最高温度および保持時間を変化させた（**表－2** を参照）。

$$M = \int_0^t (\theta + A)\, dt \qquad (1)$$

M：積算温度（℃･h）

θ ：dt 時間中の養生温度（℃）

A：定数（10℃）

dt：時間（h）

シリーズ 2 では，初期強度発現性に及ぼす影響が高いと考えられる，水セメント比，前置時間および最高温度の影響を確認するため，供試体を作製直後から 20℃環境下で前置した後，予め一定温度に設定した恒温恒湿槽に供試体を移動し，所定の時間まで蒸気養生を行った（**表－2** を参照）。

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を防ぐため表面をフィルムで覆った状態で温度履歴を与えた。

2.3 測定項目

(1) フレッシュ性状確認

フレッシュ性状は，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た。

(2) 圧縮強度試験

JIS R 5201 の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。供試体は型枠に打設後，所定の養生を行い，任意の時間に型枠から脱型して圧縮強度を測定した。試験は JIS R 5201 の試験方法に準じて，切片圧縮強度を測定した。

また，養生温度とモルタル温度の差を確認するため，一部の供試体について，熱電対を用いてモルタル温度および恒温恒湿槽内の温度を測定した。

(3) 水和発熱速度測定

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 40℃および 20℃において，モルタルと試験と同様に混和剤および早強剤を使用した，W/C=50%のセメントペースト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。

(4) 凝結試験

JIS A 1147 の凝結試験方法に準拠し，環境温度 20℃で所定の時間（1.5，2.5 時間）前置をした後，45℃環境にて貫入抵抗値を測定した。対比として，20℃一定環境においても併せて測定を行った。

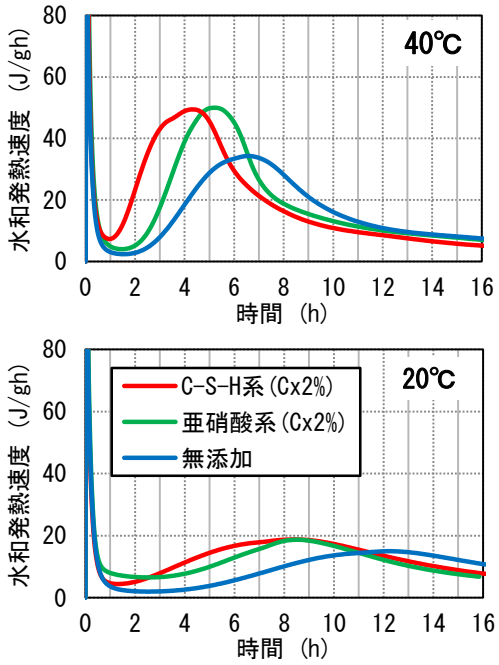
3. 実験結果

3.1 高温環境における水和発熱速度

図－1 に 20℃および 40℃の水和発熱速度の測定結果を示す。40℃の高温環境において，早強剤を添加した場合は，これまでの知見と同様に [4]無添加に比べ誘導期の短縮，加速期への移行，およびピークへの到達時間が早くなり，20℃環境と比べ水和反応速度が大幅に上昇することを確認した。また，亜硝酸系よりも C-S-H 系の方がより水和反応促進効果が高く，40℃で亜硝酸系は無添加よりもピークの到達時間が約 1 時間短縮されるのに対して，C-S-H 系は約 2 時間短縮された。

3.2 C-S-H 早強剤を用いた蒸気養生コンクリートの初期強度発現性（シリーズ 1）

図－2 にモルタルおよび恒温恒湿槽内の温度測定結果



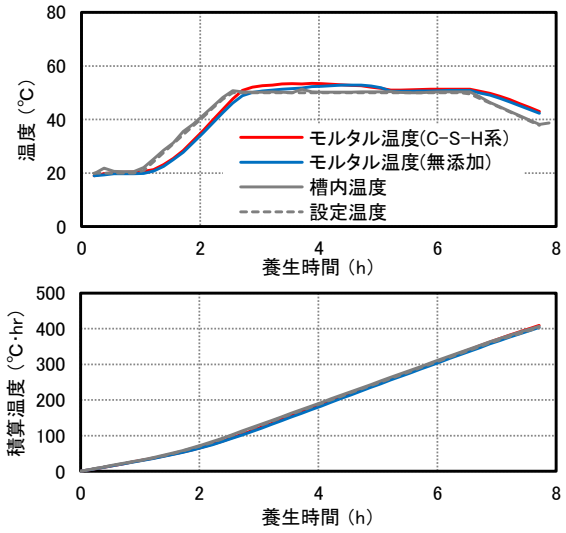
図－1 水和発熱速度

を示す。槽内温度は設定温度とほぼ一致しており，モルタル温度は昇温時には槽内温度よりもやや低いものの，最高温度到達後は同程度となっており，養生時間における積算温度はモルタルおよび槽内はほぼ同一であった。これは，今回用いた供試体の寸法が小さいため槽内温度とモルタル温度の差が小さかったと考えられ，本研究においては積算温度を設定温度で整理することとした。

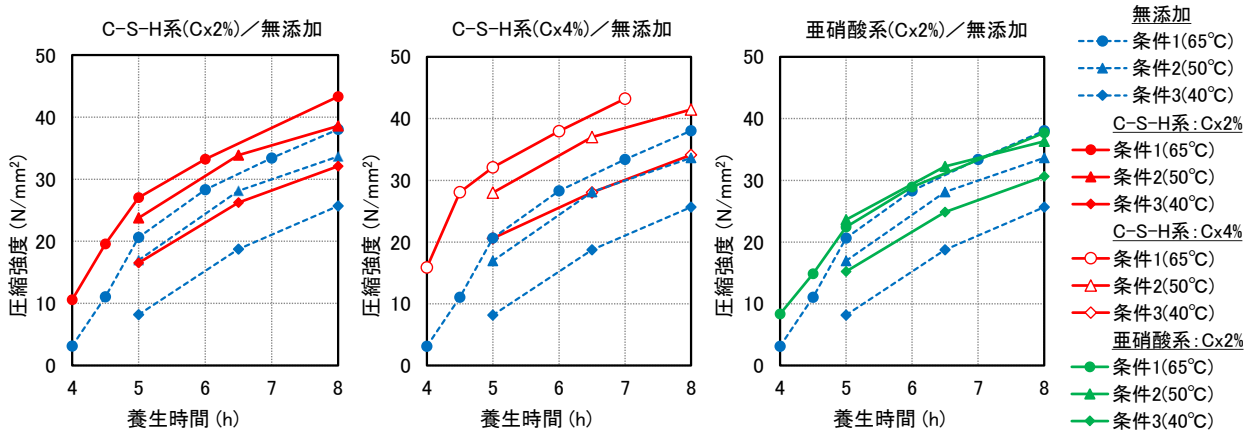
図－３に養生時間と圧縮強度の関係を示す。蒸気養生コンクリートにおいて C-S-H 系を併用した場合，無添加よりも強度発現性は高く，材齢の早い段階から強度差が確認され，C-S-H 系を C×2％併用した場合で 5～10N/mm^2 程度，C×4％併用した場合で 10～20N/mm^2 程度高くなった。これは，脱型強度時間短縮の観点から，無添加の場合よりも C×2％併用で 0.5～1.5 時間，C×4％併用で 1.0～2.0 時間の養生時間短縮が可能であると考えられる。また，C-S-H 系は養生条件 3（最高温度 40℃）で無添加の養生条件 2（最高温度 50℃）と，養生条件 2 で無添加の養生条件 1（最高温度 60℃）と同程度以上の強度発現性であり，C-S-H 系を併用することにより養生温度低減が可能であると考えられる。

亜硝酸系を併用した場合の圧縮強度は，養生条件 3 においては C-S-H 系と同程度であるが，養生条件 1 と 2 においては C-S-H 系より低く，養生条件 1 と 2 の圧縮強度はほぼ同等で，5 時間以降においては養生条件 1 の無添加ともほぼ同等であった。

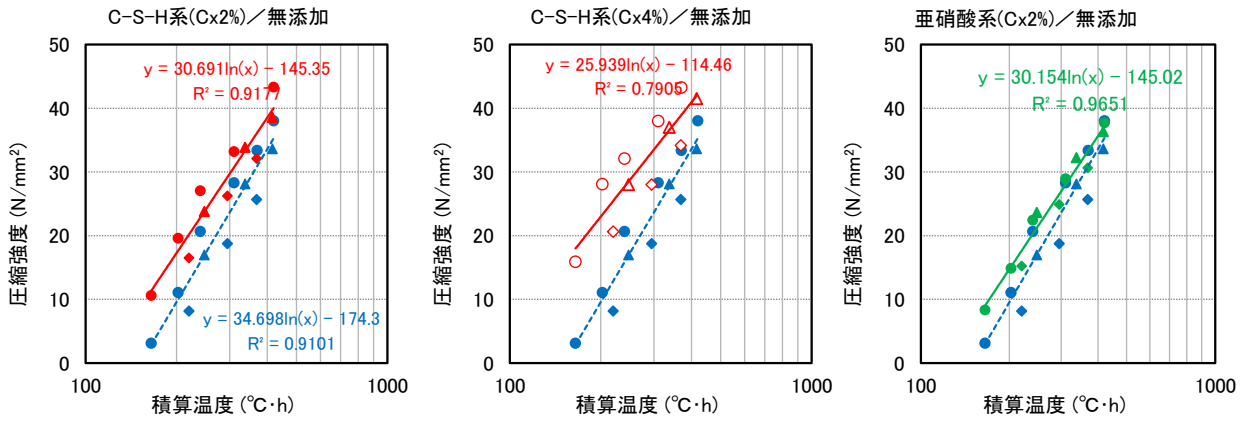
図－４に積算温度と圧縮強度の関係を示す。何れの早強剤を用いた場合においても，同一積算温度の圧縮強度は高い側にシフトし，積算温度が小さい方がその差は大きくなる傾向にあった。無添加および何れの早強剤の条



図－２ 温度測定結果



図－３ 養生時間と圧縮強度の関係



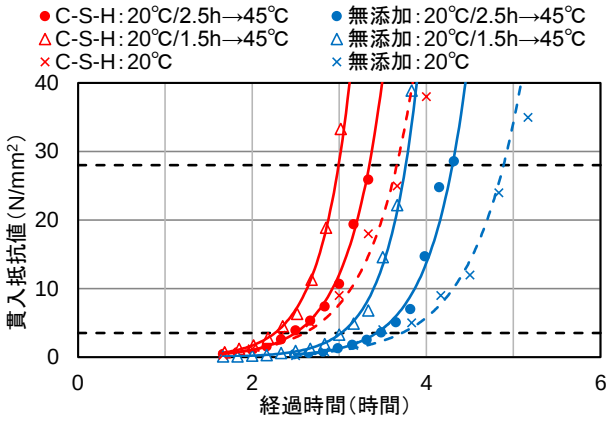
図－４ 積算温度と圧縮強度の関係

凡例は図－３と同一

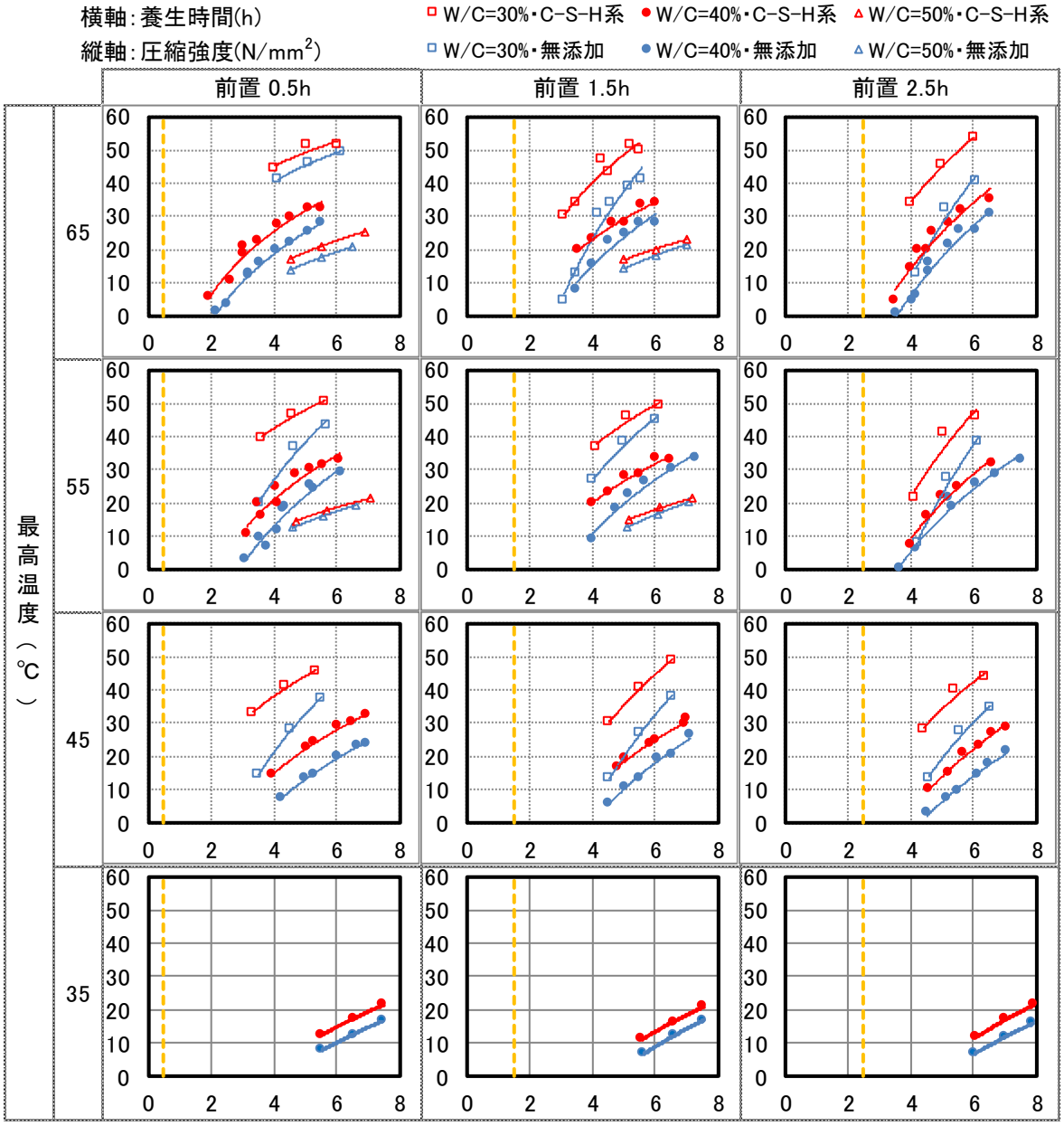
件においても，積算温度と圧縮強度は高い相関関係が認められ，同一の積算温度においては最高温度が高いほど圧縮強度が大きくなる傾向にあった。C-S-H 系は添加量が多い方が相関性は低く，亜硝酸系は C-S-H 系よりも高い相関関係にあった。C-S-H 系は蒸気養生条件の違いによる影響を大きく受け，亜硝酸系は養生条件の影響が小さく，最高温度 50℃付近で強度促進効果は頭打ちになっていると考えられる。

3.3 配合・養生条件が蒸気養生コンクリートの初期強度発現性に及ぼす影響の確認（シリーズ 2）

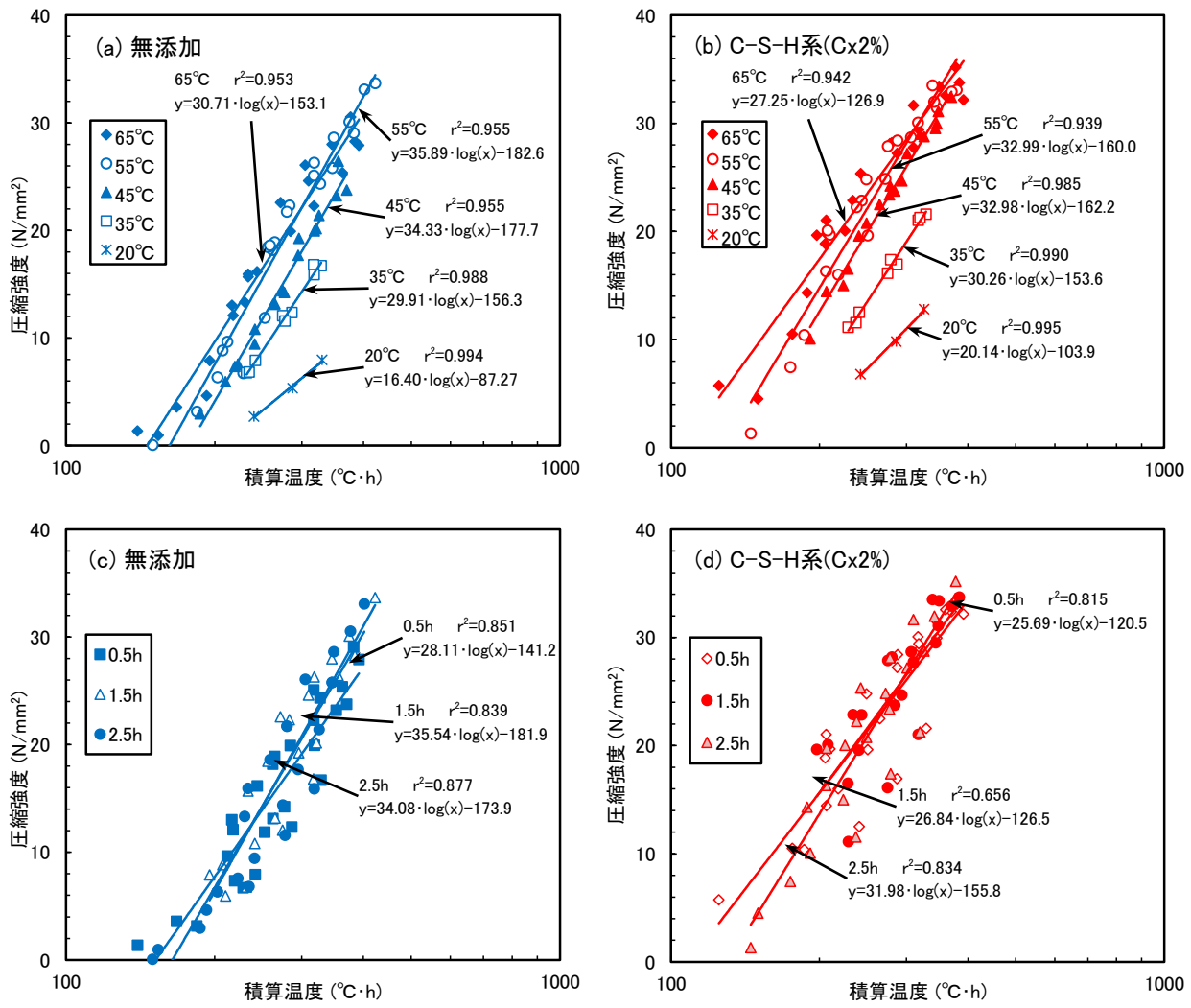
積算温度と圧縮強度の関係について確認するため，シリーズ 2 では前置時間と最高温度をパラメータ（表－2 参照）として，蒸気養生条件が材齢初期の圧縮強度発現性に及ぼす影響を確認した。



図－5 経過時間と貫入抵抗値の関係（W/C=40%）



図－6 養生時間と圧縮強度の関係



図－７ 積算温度と圧縮強度の関係（W/C=40%）

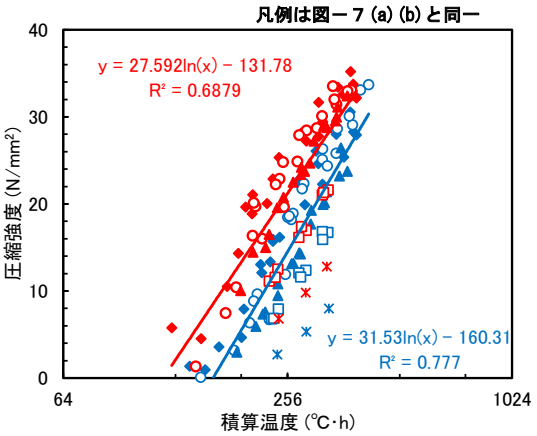
図－５に凝結試験における経過時間と貫入抵抗値を示す。前置時間の違いにより貫入抵抗値は大きく影響を受け，時間が経過するほど抵抗値の差は大きくなった。また，C-S-H 系を併用することにより，貫入抵抗値の値は早い時間から大きくなり，始発および終結時間は 45～75 分早くなった。これは，図－１に示す水和発熱速度の結果とも合致しており，C-S-H 系は極めて初期から水和反応促進効果を生じ，蒸気養生コンクリートにおける材齢初期の強度発現性向上に有効であると考えられる。

図－６に養生時間と圧縮強度の関係を示す。いずれの条件においても，養生温度が高く前置時間が短いほど，同一養生時間における圧縮強度は高くなった。W/C=30%においては，何れの最高温度においても無添加よりも大幅に圧縮強度が促進され，材齢が早い方が強度差は大きい傾向にあった。また，W/C=50%においてはいずれも無添加と同程度の強度であった。よって，蒸気養生コンクリートにおける C-S-H 系の初期強度促進効果は，水セメント比が低いほどその効果が高いと考えられる。

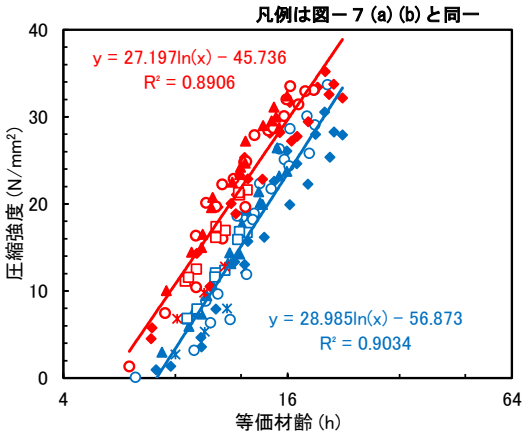
図－７に W/C=40%における無添加（(a)，(c)）および C-S-H 系（(b)，(d)）の積算温度と圧縮強度の関係を示す。(a)および(b)は各養生温度で整理したものを表す。何れの養生温度においても積算温度と圧縮強度の間には非常に高い相関関係が認められた。シリーズ１と同様，同一積算温度では養生温度が高いほど強度は高く，55℃までは温度が高くなるにつれ近似曲線の勾配は大きくなる傾向にあり，65℃では勾配は小さくなった。

(c)および(d)は前置時間で整理したものを表す。こちらの図においても，積算温度と圧縮強度は高い相関関係が確認されるものの，(a)，(b)に比べ相関係数は小さく，同一積算温度での圧縮強度はばらつきが大きかった。また，前置時間が長いほど近似曲線の勾配は大きくなる傾向にあり，前置時間がその後の強度発現性に影響を及ぼすことが示唆された。

上記の結果から，C-S-H 系を用いた蒸気養生コンクリートの初期強度発現性においては，水セメント比および最高温度の影響を大きく受け，同一の最高温度においては積算温度と圧縮強度の相関関係は非常に高く，脱型強度の推定が可能であると考えられる。



図－８　積算温度と圧縮強度の関係



図－９　等価材齢と圧縮強度の関係

4. 考察

プレキャストコンクリートの効率的な生産を検討するためには，任意の養生条件（温度，時間）から蒸気養生コンクリートの脱型強度を推定する必要がある。

図－８に**図－７**(a)および(b)をそれぞれまとめた，圧縮強度と積算温度の関係を示す。図中の近似曲線は，すべての養生温度の値から求めたものである。最高温度が異なる試験結果をまとめると積算温度と圧縮強度の相関性は低くなり，任意の養生温度および材齢よりこの近似式で脱型強度を推定することは困難である。

コンクリートの圧縮強度を推定する方法として，積算温度を用いる方法の他に，以下示す Arrhenius 式を応用した等価材齢で整理する方法[5)]が確認されている。

$$t_e = \sum_0^t \exp\left[\frac{-E}{R}\left(\frac{1}{T_c} - \frac{1}{293}\right)\right] \times \Delta t \qquad (2)$$

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－９に(2)式により求めた等価材齢と圧縮強度の関係を示す。等価材齢で整理すると，**図－８**との積算温度で整理した場合と比較して最高温度の違いによる圧縮強度のばらつきが小さく，圧縮強度との相関性が高いため，養生温度をパラメータとした場合に等価材齢の方が積算温度よりも強度推定の精度が高いと考えられる。しかしながら，同じ等価材齢で最大 10N/mm² 程度差があることから，この近似式のみでは強度推定式として精度が高いとは言い難い。蒸気養生コンクリートにおける精度の高い強度推定式を検討するには，材齢初期に高温履歴を受けた際の強度発現メカニズムを解明し，等価材齢に反映させる必要がある。

5. まとめ

(1) 蒸気養生コンクリートは C-S-H 系早強剤を用いることにより，脱型時間の短縮，あるいは蒸気養生温度の低減を図ることが可能である。
(2) 蒸気養生コンクリートは蒸気養生最高温度の影響を大きく受け，同じ積算温度でも最高温度が高い場合の方が圧縮強度は大きくなる。
(3) 蒸気養生コンクリートにおいては，水セメント比が低いほど C-S-H 系早強剤の初期強度促進効果は高い。
(4) 蒸気養生最高温度が同一の条件においては，圧縮強度は積算温度との相関性が非常に高く，積算温度により脱型強度の推定が可能であると考えられる。

参考文献

1) 森本博昭ほか：蒸気養生中のコンクリートの強度および弾性係数に関する実験，セメント・コンクリート論文集, No.50, pp.922-925, 1996
2) 入江正明ほか：高温蒸気養生履歴を受けるモルタルの脱型強度の推定，コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.353-358, 2011.7
3) 小泉信一ほか：C-S-H 系早強剤を用いたコンクリートの強度発現性および耐久性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.154-159, 2014.7
4) 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
5) 友澤史紀，牛島栄：最近の積算温度方式の発展とその応用，セメント・コンクリート, No.527, pp.66-74, 1991.1