

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

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

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は行われているものの¹⁾²⁾、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⁾。生産性の向上だけでなく、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、早強剤種類)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を行い(実験1)、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を行った(実験2)。

2.1 使用材料および配(調)合

表-1, 2に実験に使用した材料および配(調)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たモルタルを使用し、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)を併用した。実験に使用したモルタルは高性能減水剤にて所定の流動性(フロー値200mm程度)を確保させ、早強剤を併用する場合には高性能減水剤の使用量を一定とした。

2.2 養生条件

蒸気養生は、恒温恒湿槽を用いて温度および湿

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)
	亜硝酸系早強剤

表-2 配(調)合・養生条件

●実験1

項目	水準
W/C	40%
早強剤	無添加, C-S-H系(Cx2, 4%), 亜硝酸系(Cx2%)
蒸気養生	[養生条件1] 20°C・2.0h→昇温:2.0h→65°C・1.0h→降温 [養生条件2] 20°C・1.0h→昇温:1.5h→50°C・4.0h→降温 [養生条件3] 20°C・1.0h→昇温:1.0h→45°C・5.5h→降温

●実験2

項目	水準
W/C	40%
早強剤	無添加, C-S-H系(Cx2%)
前置時間	0.5h, 1.5h, 2.5h (20°C)
最高温度	65°C, 55°C, 45°C, 35°C, 20°C (一定)

度を制御して実施した。実験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、強度発現性を確認した。実験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)。

2. 3 圧縮強度試験方法

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。

3. 実験結果

3. 1 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(実験1)

図-1に養生時間と圧縮強度の関係を示す。C-S-H系を併用した蒸気養生コンクリートは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%併用で5~10N/mm²程度、C×4%併用で10~20N/mm²程度高くなった。この結果は脱型時間短縮の観点から、C-S-H系を用いることにより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系の併用により養生温度低減も可能であると考えられる。亜硝酸系を併用した場合は、養生条件1および2の圧縮強度はC-S-H系よりも低く、また養生条件1と2においては5時間以降の強度発現性が無添加の養生条件1とほぼ同等であった。

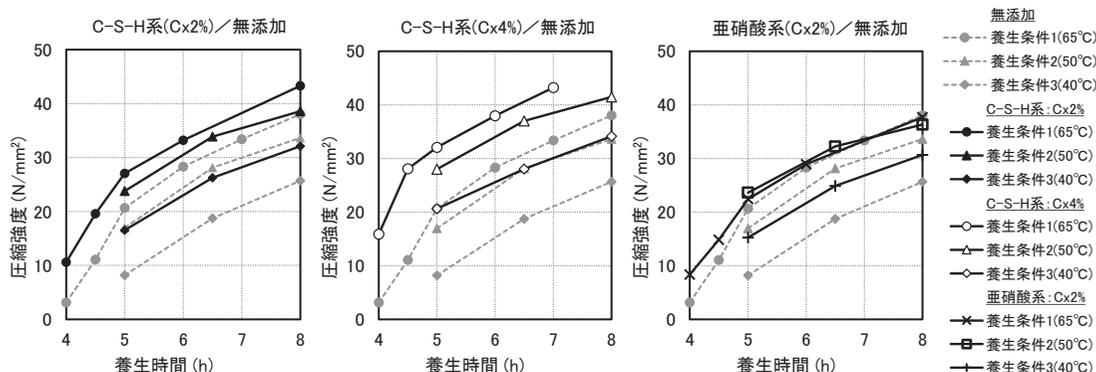


図-1 養生時間と圧縮強度の関係

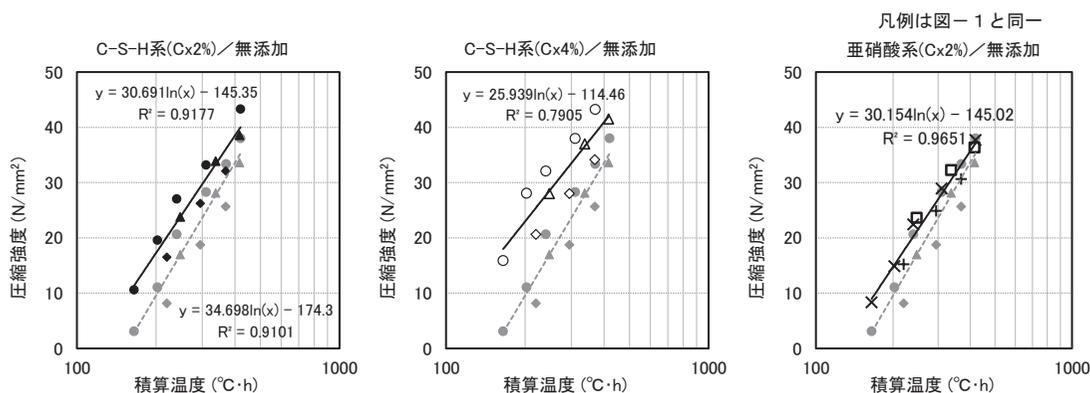


図-2 積算温度と圧縮強度の関係

図-2に積算温度と圧縮強度の関係を示す。何れの条件においても積算温度と圧縮強度の間には高い相関関係が認められた。同一の積算温度では、最高温度が高いほど圧縮強度が大きくなる傾向にあり、C-S-H系は添加量が多い方ほどその傾向が高く、亜硝酸系はあまり差がなかった。また、何れの早強剤においても、同一積算温度での圧縮強度は高い側にシフトし、C-S-H系の方が亜硝酸系よりその差は大きい傾向にあった。C-S-H系は亜硝酸系よりも蒸気養生条件の違いによる影響を大きく受け、亜硝酸系は最高温度50℃付近で強度促進効果が頭打ちになっていたと考えられる。

3. 2 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 (実験2)

積算温度と圧縮強度の関係について確認するため、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-3に無添加(a)およびC-S-H系(b)の積算温度と圧縮強度の関係を示す。それぞれ各養生温度で整理したものを表しており、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。実験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℃では勾配はやや小さくなった。よって、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、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いため脱型強度の推定が可能であると考えられる。

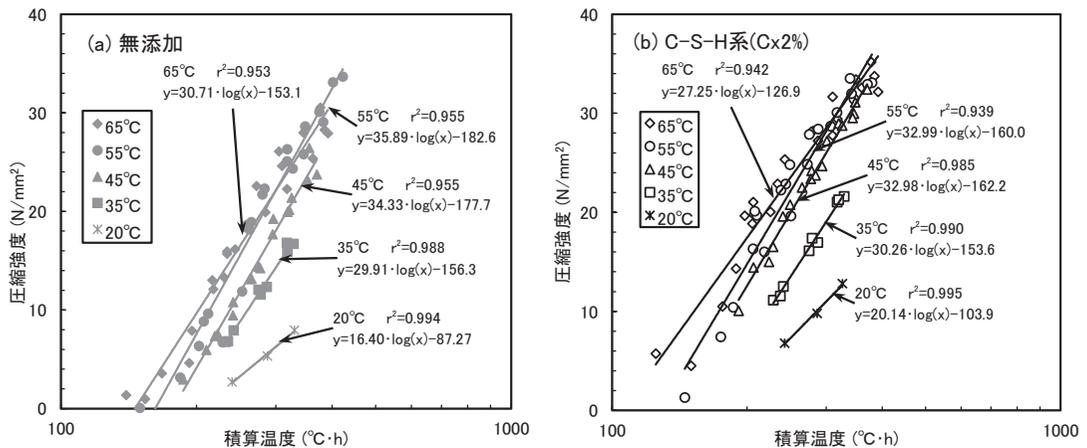


図-3 積算温度と圧縮強度の関係

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-4に図-3をまとめた圧縮強度と積算温度の関係を示す。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が確認されている⁴⁾。

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

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

図-5に上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、積算温度で整理した場合よりも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く、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。

6. 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) 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

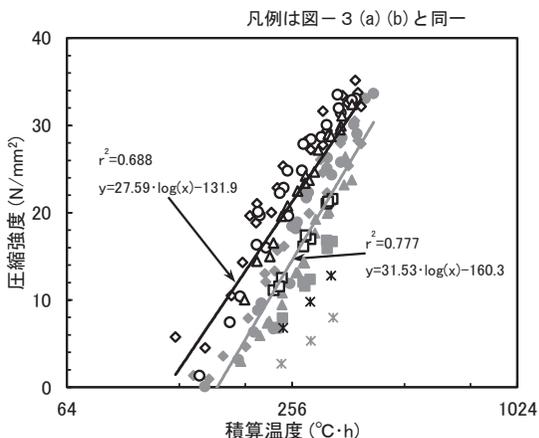


図-4 積算温度と圧縮強度の関係

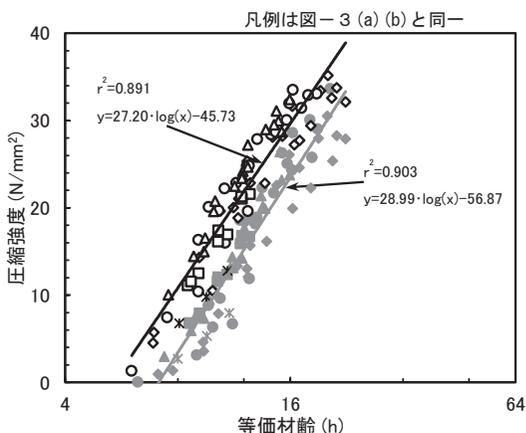


図-5 等価材齢と圧縮強度の関係