

## C-S-H系早強剤による早強コンクリートの初期強度増進効果

BASFジャパン(株) 博士(工学) ○小泉 信一  
 BASFジャパン(株) 博士(工学) 井元 晴文  
 BASFジャパン(株) 博士(工学) 馬場 勇介  
 BASFジャパン(株) 正会員 修士(工学) 小山 広光

### 1. はじめに

近年の震災復興や今後のインフラ整備の需要増加に対してプレキャストコンクリートの重要性が高まっており、コンクリートの凝結・硬化をさらに促進して製造の効率化につながる早強剤(材)が注目されている。

著者らは、カルシウムシリケート水和物のナノ粒子を有効成分とし、液体中で安定的に分散させた液状のサスペンションからなる早強剤(C-S-H系早強剤)を開発し、既報にて普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの凝結促進効果、初期強度増進効果、ブリーディングの低減効果および各種耐久性への影響について報告している<sup>1), 2)</sup>。

本研究では、プレキャストコンクリートの生産性の向上を目的として、C-S-H系早強剤と早強ポルトランドセメントを併用したコンクリートによる凝結促進や初期強度の増進効果について検討した。また、マチュリティを用いて初期強度発現性を整理し、プレキャスト部材の脱型時間やプレストレストコンクリートのプレストレス導入までの時間の短縮効果について検討した。

### 2. 試験概要

使用材料を表-1に、コンクリートの配(調)合を表-2に示す。環境温度が20℃、5℃の条件で、W/C、WおよびGを一定とし、スランブ12±1.5cm、空気量2.0±0.5%が得られるように混和剤の使用量を調整した。養生条件は図-1に示すような20℃、5℃の水中養生と最高温度40℃の常圧蒸気養生および20℃の場合のみ最高温度60℃の常圧蒸気養生の計5水準とした。フレッシュおよび硬化コンクリートの各種測定は、スランブ：JIS A 1101、空気量：JIS A 1128、コンクリート温度：JIS A 1156、凝結時間：JIS A 1147、圧縮強度：JIS A 1108によった。水和発熱速度の測定にはコンダクションカロリメータを用い、W/C=50%のペーストにて24時間まで測定した。

表-1 使用材料

材料	記号	種類および物理的性質
練混ぜ水	W	上水道水
セメント	N	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:3,350cm <sup>2</sup> /g)
	H	早強ポルトランドセメント (密度:3.14g/cm <sup>3</sup> , 比表面積:4,510cm <sup>2</sup> /g)
細骨材	S	大井川水系陸砂 (表乾密度:2.59g/cm <sup>3</sup> , FM:2.57)
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩砕石 (表乾密度:2.66g/cm <sup>3</sup> , MS:20mm)
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)
早強剤	ACX	C-S-H系早強剤 (C-S-Hナノ粒子のサスペンション)

表-2 コンクリートの配(調)合

環境温度 (℃)	種別 記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (C×%)				
				W	N	H	S	G	SP	ACX			
20	N0	35	45.5	160	457	-	796	975	0.75	0			
	H0								0.75	0			
	H2					457	794			0.70	2		
	H4									0.65	4		
5	H0	35	45.5	160	-	457	794	975	0.70	0			
	H2											0.65	2
	H4												0.60

### 3. 試験結果

#### 3.1 凝結時間

凝結時間を図-2に示す。図中の記号は、『環境温度-表-2記載の種別記号』で示した。20℃環境下において、20-N0に対する20-H0の凝結促進効果は小さい。一方、20-H2、20-H4はその使用量の増加とと

もに凝結が著しく促進する傾向が確認された。ポルトランドセメントの凝結時間は、主要構成化合物である $C_3S$ の反応に依存するが、図-3に示すように、NとHでは誘導期から加速期に移行するまでの時間はほとんど変わっておらず、異なるのは各時間の発熱量のみである。すなわち、HはNよりも $C_3S$ 含有量が大きく粉末度が高いが、それらの凝結促進効果は小さい。一方、HにACXを用いた場合には使用量の増加とともに加速期への移行が早くなっており、ACXが種結晶として作用することで $C_3S$ の反応を早め、凝結を著しく促進しているものと考えられる。次に、5°C環境下において5-H0は20-N0よりも凝結の始発が約2時間遅延しているのに対して、5-H2は20-N0よりも凝結が早くなり、5-H4は20-H2と同程度の時間にまで凝結が促進した。ここで、蒸気養生したコンクリートの前置き時間が短い場合や冬季に製造した場合に硬化後の表層の浮きや剥がれが顕著となるが、凝結の始発以降に昇温することがその予防に有効であり、昇温開始時の貫入抵抗値が大きい程、透気性・透水性の向上に寄与することが報告されている<sup>3)</sup>。よって、ACXとHを併用して凝結を促進することは、寒冷時におけるプレキャストコンクリートの仕上げまでの時間の短縮に貢献するとともに硬化後の表層品質の向上にも有効であると考えられる。

### 3.2 圧縮強度

各養生条件下における圧縮強度試験結果を図-4 a)~e)に示す。いずれの環境温度、養生温度においても、ACX使用量の増加に伴い初期強度が増進した。また、ACXとHを併用すると、Nのみを用いた場合に比べて大幅に初期強度が増進した。さらに、a) 20°C養生の6時間、b) 5°C養生の14時間のようにNやHのみでは強度がほとんど発現していない初期材齢において、ACXの使用による強度増進効果が顕著に認められた。なお、いずれの配(調)合においても養生温度が高い場合、その後の強度が伸びにくい傾向を示したが、ACXを使用した場合には初期材齢だけでなく、その後の材齢においても圧縮強度が未使用と同等以上となった。長期強度発現性は耐久性などと相関があると考えられることから、養生温度を低減させても初期強度を確保できるACXの使用は、長期強度や耐久性の観点からも効果的であると言える。

### 3.3 相当材齢を用いた初期強度発現性の整理

#### (1) 相当材齢と圧縮強度の関係

Arrhenius式に基づくマチュリティである相当材齢を用いて、初期強度発現性の整理を行った。なお、相当材齢の算出には下式(1)を用いて、活性化エネルギーはセメントの種類にかかわらず同一とした。

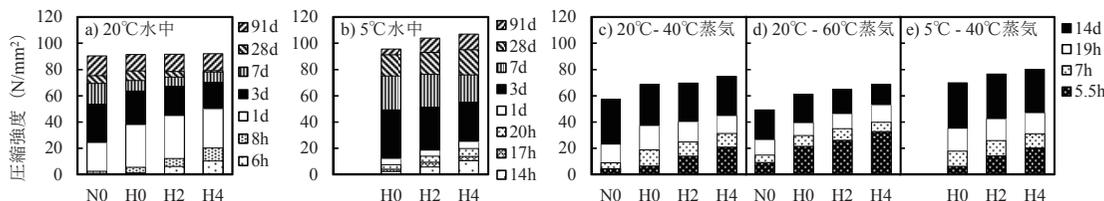


図-4 圧縮強度試験結果

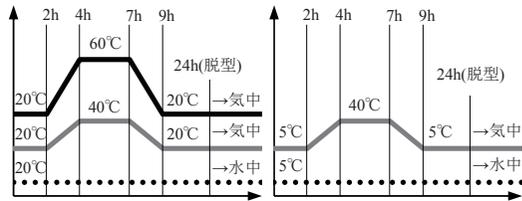


図-1 養生条件

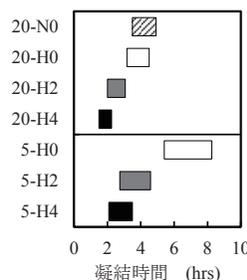


図-2 凝結時間

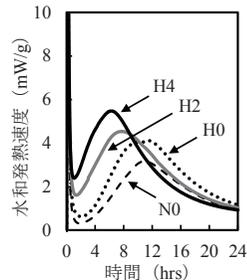


図-3 水和発熱速度

$$T_e = \int_0^t \exp[E/R \cdot (1/T_s - 1/(273 + T))] dt \quad (1)$$

ここに、  
 $T_e$  : 相当材齢 (h)  
 $E$  : 活性化エネルギー 33.5kJ/mol,  $T \geq 20^\circ\text{C}$   
 $R$  : 気体定数 8.314J/mol・K  
 $T_s$  : 基準温度 293K  
 $T$  : dt 時間中の養生温度 ( $^\circ\text{C}$ )

次に、相当材齢と圧縮強度の関係を最小二乗法により下式(2)で近似した。

$$S(T_e) = a \log(T_e) + b \quad (2)$$

ここに、 $S(T_e)$  : 相当材齢  $T_e$  時の圧縮強度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )  
 $a, b$  : 定数

材齢24時間までの相当材齢と圧縮強度の関係を図-5に、近似式の定数： $a$ 、 $b$ と相関係数： $R$ を表-4に示す。相当材齢と材齢24時間までの圧縮強度には高い相関が認められ、相当材齢が養生温度の影響を適切に反映していることが確認できる。次に、各近似式の間を見比べると、20-N0と20-H0では定数： $a$ 、 $b$ が異なる傾向にあった。一方、Hを使用した3水準(20-H0, 20-H2, 20-H4)はACXの使用の有無にかかわらず定数： $a$ は同等であり、定数： $b$ の値がACXの使用量の増加に伴い大きくなった。よって、ACXを使用した場合は、同等の圧縮強度を得るためのマチュリティが小さくなるため、蒸気養生温度の低減および蒸気養生時間の削減に有効であると考えられる。

(2) プレキャスト部材の脱型時間の短縮効果

プレキャスト部材の脱型時所要強度の目安は $12\text{N}/\text{mm}^2$ とされ<sup>4)</sup>、コンクリート製品工場では $15\text{N}/\text{mm}^2$ で管理していることが多い。そこで、脱型時強度を $15\text{N}/\text{mm}^2$ と仮定し、式(2)から必要な相当材齢と今回の蒸気養生パターンにおける養生時間を求めた。その結果、各水準で必要な相当材齢は20-N0 : 17.7h, 20-H0 : 11.3h, 20-H2 : 8.8h, 20-H4 : 6.7hとなり、 $15\text{N}/\text{mm}^2$ に到達するまでの時間は図-6の通りである。Nを用いて $40^\circ\text{C}$ 蒸気養生した場合には11時間を要するのに対して、Hを用いた場合は6.5hに短縮し、ACXをC×2%使用した場合は5.5hに半減、C×4%使用した場合は4.6hにまで短縮された。これより、プレキャスト部材を1日に2サイクル以上製造することも可能となるため、生産量の増加に伴う工期短縮や生産量が同じ場合でも型枠数の低減に寄与することが期待できる。また、HにACXをC×4%使用した場合、蒸気養生をすることなく6.7hで到達する結果となり、エネルギーや $\text{CO}_2$ 排出量の削減に効果があるものと考えられる。

(3) プレテンション方式によるプレストレス導入までの時間短縮効果

プレストレストコンクリートにおいて、プレテンション

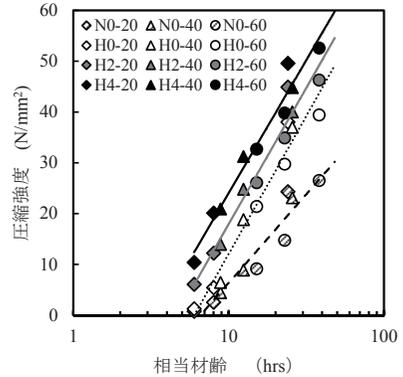


図-5 相当材齢と圧縮強度の関係

表-4 図-5より得られた式(2)の定数および相関係数

種別	定数		相関係数 R
	a	b	
20-N0	35.0	-28.6	0.959
20-H0	54.4	-42.3	0.980
20-H2	53.7	-35.7	0.982
20-H4	52.4	-28.4	0.983

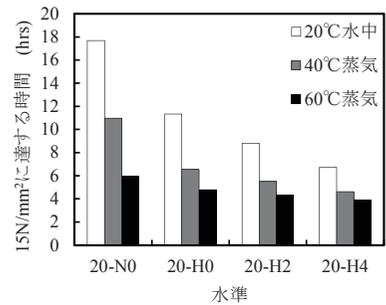


図-6 プレキャスト部材の脱型時所要強度 ( $15\text{N}/\text{mm}^2$ ) に達する時間

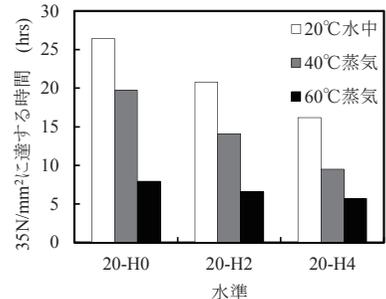


図-7 プレテンション方式によるプレストレス導入に必要な圧縮強度 ( $35\text{N}/\text{mm}^2$ ) に達する時間

方式の場合に必要な圧縮強度の目安は $30\text{N}/\text{mm}^2$ とされ<sup>5),6)</sup>, コンクリート製品工場では $35\text{N}/\text{mm}^2$ で管理していることが多い。そこで、脱型時強度を $35\text{N}/\text{mm}^2$ と仮定し、上記と同様の手法で必要な相当材齢と養生時間を算出した。その結果、各水準で必要な相当材齢は20-H0 : 26.4h, 20-H2 : 20.8h, 20-H4 : 16.2hとなり、 $35\text{N}/\text{mm}^2$ に到達するのに必要な時間は図-7の通りである。ACXを使用せずにHを用いて $40^\circ\text{C}$ 蒸気養生した場合には20時間を要するのに対して、ACXを使用すると線形的に時間が短縮し、C×4%使用した場合には10時間に半減する結果となった。また、ACXをC×4%使用し、 $20^\circ\text{C}$ 水中養生したものは、Hのみを使用し $40^\circ\text{C}$ 蒸気養生したものよりも到達時間がやや短くなる結果となった。

#### (4) まとめ

以上の結果から、ACXを使用することによって所要の圧縮強度を得るためにマチュリティを小さくすることができるため、プレキャストコンクリートの生産の効率化に寄与することが可能であると考えられる。また、養生温度の低減は、前述の長期強度発現性のみならず、エネルギーコスト低減や、温度応力ひび割れ発生リスクの低減などにつながる。このような観点から、HとACXの併用による蒸気養生温度の低減や蒸気養生時間の削減は高品質なコンクリート製品の製造に貢献可能であると言える。

また、図-6, 7に示すように養生温度を高めて $60^\circ\text{C}$ 蒸気養生した場合には所要の強度に達する時間を短縮することができるが、温度応力ひび割れの発生が懸念される。そのため、ACXとHを併用し、養生方法の最適化を図ることによって温度応力ひび割れ発生のリスクを抑えながら生産効率を高めることが可能であると考えられる。

#### 4. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) 普通ポルトランドセメントに対する早強ポルトランドセメントの凝結促進効果は小さいが、C-S-H系早強剤は誘導期から加速期への移行を早め、凝結を著しく促進する。
- 2) C-S-H系早強剤は早強ポルトランドセメントでも強度がほとんど発現しない極初期材齢の強度増進効果があり、長期強度発現性も未使用と同等以上となる。
- 3) C-S-H系早強剤は所要の圧縮強度を得るためのマチュリティを小さくする効果があるため、蒸気養生温度の低減および蒸気養生時間の削減に有効である。
- 4) C-S-H系早強剤と早強ポルトランドセメントを併用することでプレキャストコンクリートやプレストレストコンクリートの生産の効率化が図れる。

#### 参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 中村敏之ほか：蒸気養生で製造されるコンクリートの表層品質，プレストレストコンクリート工学会 第23回シンポジウム集，pp. 77-80, 2014. 10
- 4) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 10 プレキャスト鉄筋コンクリート工事2013, 3節 プレキャスト部材・接合部および現場打ちコンクリート部材の性能および品質，p. 81, 2013
- 5) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事2009, 19節 プレストレストコンクリート，p. 83, 2009
- 6) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書 [施工編：特殊コンクリート]，10章 プレストレストコンクリート，p. 315, 2012