

論文 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の強度発現性

小泉 信一*1・井元 晴丈*1・馬場 勇介*1・山崎 遥平*2

要旨: 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、カルシウムシリケート水和物のナノ粒子を主成分とする液状の早強剤 (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初期強度増進効果について検討した。その結果、C-S-H 系早強剤は早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの凝結促進や初期強度増進効果に優れ、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こと、両者の併用によりプレキャストコンクリート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を大幅に短縮できることを確認した。

キーワード: C-S-H, 早強剤, 早強ポルトランドセメント, 初期強度, プレキャスト, プレストレス

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、建設技術者・職人不足を補いながらコンクリート構造物の高耐久化を図る解決策の一つとしてプレキャストコンクリートの重要性が高まっている。プレキャストコンクリートは一般に専用工場で製造され、製品を効率的に出荷するために常圧蒸気養生などの促進養生を行っているが、コンクリート製品の需要増加への対応として、コンクリートの凝結・硬化をさらに促進して製造工程の効率化につながる早強剤(材)の使用が注目されている。

著者らは、カルシウムシリケート水和物のナノ粒子(粒子サイズ: 数十~数百 nm) 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^{1),2)}。

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

2.1 使用材料, 試験水準および練混ぜ

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℃および 5℃の条件で W/C, W および G を一定とし、スランブ、空気量は目標値が得られ

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 ³ , 比表面積: 3,350cm ² /g)
	H	早強ポルトランドセメント (密度: 3.14g/cm ³ , 比表面積: 4,510cm ² /g)
細骨材	S	大井川水系陸砂 (表乾密度: 2.59g/cm ³ , FM: 2.57)
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩碎石 (表乾密度: 2.66g/cm ³ , 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, 粒子サイズ: 数十~数百 nm)

表-2 コンクリートの配(調)合

区分	目標 スランブ (cm)	目標 空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	N	H	S	G
N	12±1.5	2.0±0.5	35	45.5	160	457	-	796	975
H				45.5		-	457	794	

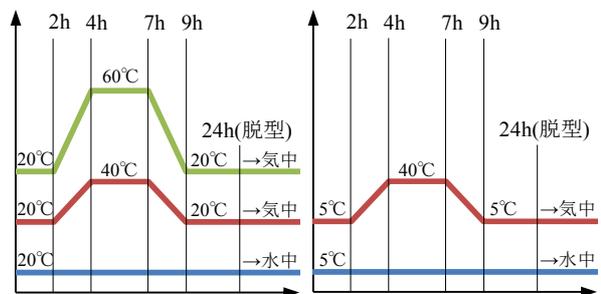


図-1 養生条件

*1 BASF ジャパン(株) 建設化学品事業部 博士(工学) (正会員)

*2 BASF ジャパン(株) 建設化学品事業部 修士(理学)

るように混和剤の使用量で調整した。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。

コンクリートの練混ぜには強制練りミキサーを用い、材料を一括投入して空練りを10秒間行った後、注水後90秒間練り混ぜた。その後、直ちにフレッシュ性状を確認し、供試体を作製した。

2.2 測定項目

(1) フレッシュ性状

各種フレッシュ性状の測定は、スランブ：JIS A 1101、空気量：JIS A 1128、コンクリート温度：JIS A 1156によった。

(2) 凝結時間

凝結時間の測定はJIS A 1147によった。

(3) 水和発熱速度

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、環境温度20℃においてW/C=50%のペーストにて24時間まで測定した。

(4) 圧縮強度

φ10×20cmの供試体を作製し、JIS A 1108によった。

(5) 細孔構造

φ10×20cmの供試体の中心部5cmを粗粉碎してから粗骨材を除いたモルタル部分を2.5~5.0mmに調整し、アセトンで水和停止後に14日間D-乾燥したものを測定用試料とした。測定は、水銀圧入式ポロシメータを用いた。

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状

フレッシュコンクリートの測定結果を表-3に示す。表中の記号は、『セメント種類(N,H)とC-S-H系早強剤の使用量(0,2,4)』で示した。いずれの環境温度においても、C-S-H系早強剤を使用したコンクリートは未使用の場合と同様のフレッシュ性状が得られた。

3.2 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-3記載の種別記号』で示した。20℃環境下において、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリート(20-N0)に対する早強ポルトランドセメントを使用したコンクリート(20-H0)の凝結促進効果は小さい。一方、早強ポルトランドセメントにC-S-H系早強剤を使用した場合(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。この傾向を、図-3、図-4に示した水和発熱速度、積算発熱量と併せて比較すると以下のように考えられる。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エーライト

表-3 フレッシュコンクリートの測定結果

環境温度 (°C)	種別記号	SP (C×%)	ACX (C×%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)
20	N0	0.75	-	12.5	1.6	20
	H0	0.75	-	12.0	2.0	20
	H2	0.70	2.0	12.5	2.0	20
	H4	0.65	4.0	12.5	1.8	20
5	H0	0.70	-	12.0	1.9	5
	H2	0.65	2.0	12.5	2.4	5
	H4	0.60	4.0	12.5	1.8	5

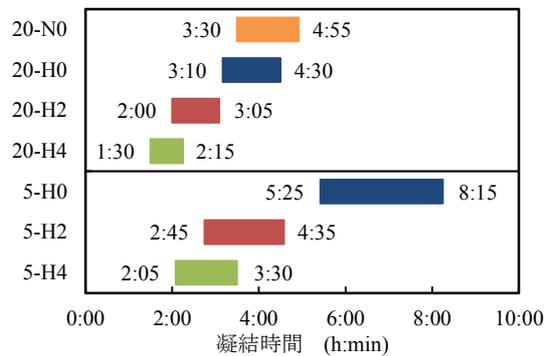


図-2 凝結時間

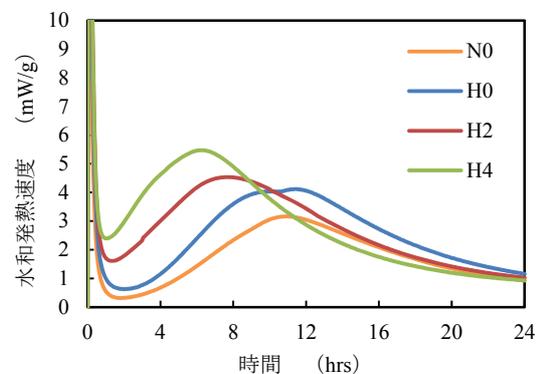


図-3 水和発熱速度

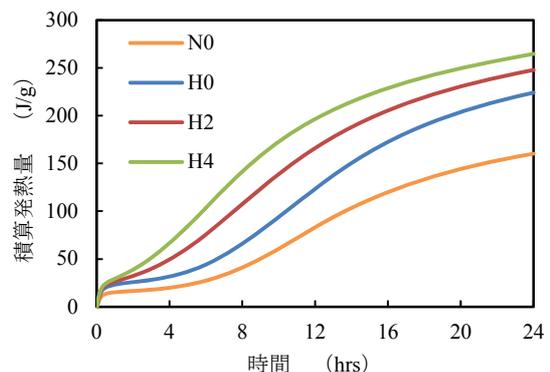


図-4 積算発熱量

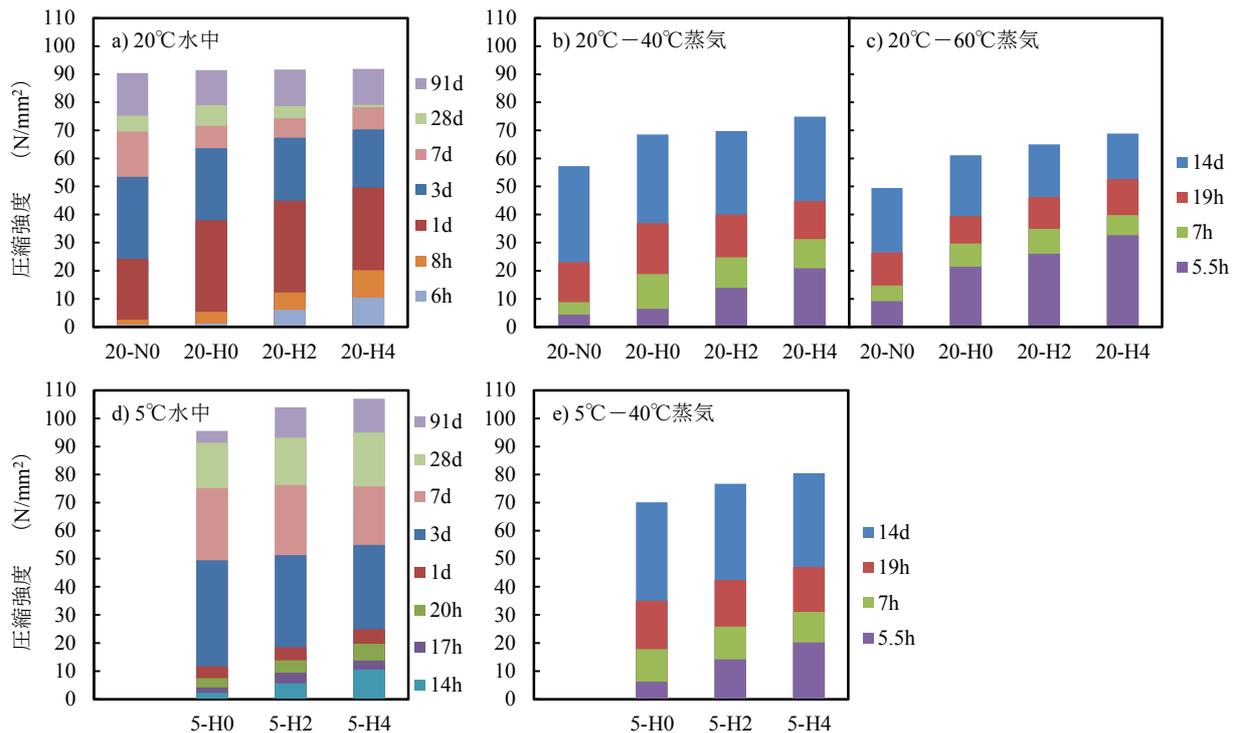


図-5 圧縮強度試験結果

の反応に依存するが、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメント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、早強ポルトランドセメントは普通ポルトランドセメントよりもエーライト含有量が多く粉末度が高いが、それらの凝結促進効果は小さい。一方、早強ポルトランドセメントにC-S-H系早強剤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、C-S-H系早強剤が種結晶として作用することでエーライトの反応を早め、凝結を著しく促進しているものと考えられる。なお、C-S-H系早強剤はアルカリや陰イオン成分を微量含有しているが、配合されるC-S-Hがセメントの反応に及ぼす影響に比べてそれらの効果は小さいことを確認している。

次に、5°C環境下の結果を見ると、早強ポルトランドセメントのみの5-H0では20°Cで普通ポルトランドセメントを用いた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、C-S-H系早強剤をC×2%用いた5-H2は20-N0よりも凝結が早くなった。さらに、C-S-H系早強剤をC×4%使用した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く程、透気性・透水性の向上に寄与することが報告されている³⁾。よって、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。

3.3 強度発現性

(1) 圧縮強度

各養生条件下における圧縮強度試験結果を図-5 a)~e)に示す。いずれの環境温度、養生温度においても、C-S-H系早強剤の使用量の増加に伴い初期強度が増進した。また、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により普通ポルトランドセメント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、d) 5°C養生の14時間のように普通ポルトランドセメントや早強ポルトランドセメント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、C-S-H系早強剤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、C-S-H系早強剤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C-S-H系早強剤の使用は、長期強度や耐久性の観点からも効果的であると言える。

(2) 細孔組織の変化に着目した強度増進効果の考察

高温履歴を受けて初期強度を増進させた場合に長期

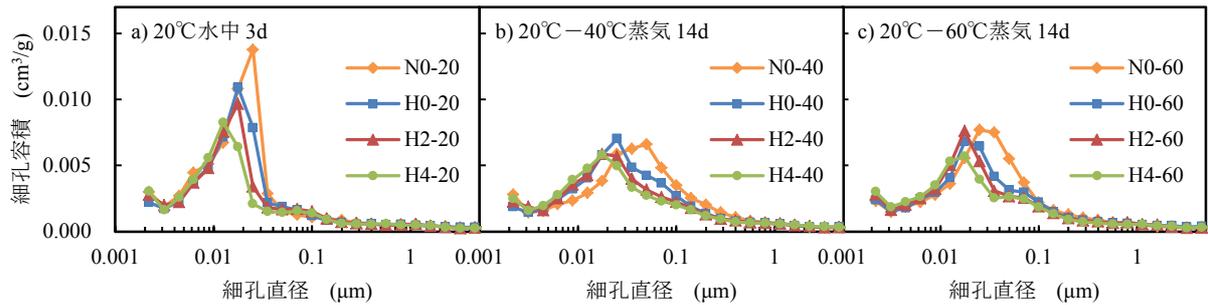


図-6 異なる養生条件下における細孔径分布の比較

強度が停滞することは一般に知られている。また、その低下メカニズムは、材齢初期のセメントの反応率が高いために新たな水和反応が起こりにくいことやセメント粒子の周囲に形成される緻密な水和物層によってその後の水和反応が停滞するためと説明され⁴⁾、その結果、初期に形成された空隙が埋まらずに長期に渡り残存すると考えられている。そこで、各養生条件下における細孔組織を比較し、C-S-H系早強剤を使用した場合の強度増進効果について考察した。図-5より a) 20°C水中養生の材齢3日と b) 40°C蒸気養生の材齢14日が概ね同等の圧縮強度を示したため、c) 60°C蒸気養生の材齢14日と併せて比較した。それぞれの細孔径分布を図-6に示す。ここで、図中の記号は、『表-3 記載の種別記号-養生温度』で示した。a) と b), c)を比較すると、20°C水中養生の材齢3日に比べて40°Cや60°Cで蒸気養生したものは50nm以下の空隙は少なくなるが50nm以上の比較的大きな空隙が多くなっている。次に、C-S-H系早強剤の影響を見ると、20°C水中養生下では10~50nm程度の空隙の減少に寄与し、蒸気養生下では50nm以上の空隙の減少にも寄与することが確認された。これより、C-S-H系早強剤は初期高温履歴を受けるコンクリートに形成される比較的細孔径の大きい空隙の減少にも効果があると言える。また、図-7に示すように、C-S-H系早強剤を使用したコンクリートの長期材齢における細孔組織は未使用の場合と概ね同様であり、硬化促進による悪影響は認められなかった。

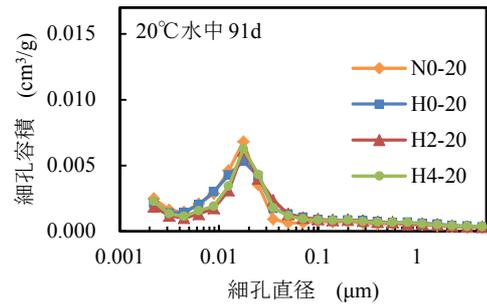


図-7 細孔径分布 (20°C水中養生, 材齢91日)

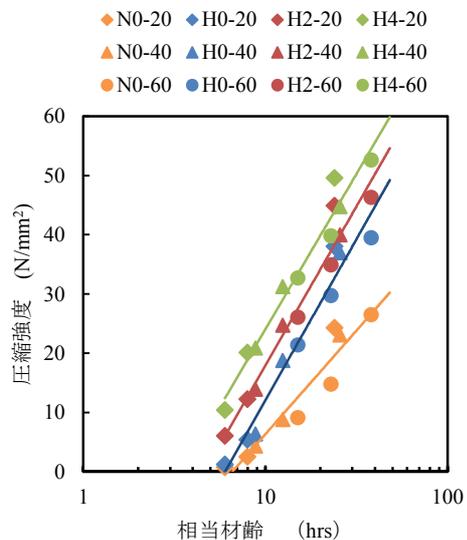


図-8 相当材齢と圧縮強度の関係

3.4 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。

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

ここに、 T_e : 相当材齢 (hrs)

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

表-4 図-8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
	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

T_s : 基準温度 293K

T : dt 時間中の養生温度 (°C)

次に、セメント種類と C-S-H 系早強剤使用量の組合せ毎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 (N/mm²)

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-8 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、C-S-H 系早強剤未使用の普通ポルトランドセメント (20-N0) と早強ポルトランドセメント (20-H0) では定数 : a, b が異なる傾向にあった。一方、早強ポルトランドセメントを使用した 3 水準 (20-H0, 20-H2, 20-H4) は C-S-H 系早強剤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 C-S-H 系早強剤の使用量の増加に伴い大きくなった。よって、C-S-H 系早強剤を使用した場合は、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 12N/mm² とされ⁵⁾、コンクリート製品工場では 15N/mm² で管理していることが多い。そこで、脱型時強度を 15N/mm² 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 : 17.7hrs, 20-H0 : 11.3hrs, 20-H2 : 8.8hrs, 20-H4 : 6.7hrs となり、15N/mm² に到達するまでの時間は図-9 の通りである。普通ポルトランドセメントを用いて 40°C 蒸気養生した場合には 11 時間を要するのに対して、早強ポルトランドセメントを用いた場合は 6.5hrs に短縮し、C-S-H 系早強剤を C×2% 使用した場合は 5.5hrs に半減、C×4% 使用した場合は 4.6hrs 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、早強ポルトランドセメントに C-S-H 系早強剤を C×4% 使用した場合、蒸気養生をすることなく 6.7hrs で到達する結果となり、エネルギーや CO₂ 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

プレストレスコンクリートにおいて、プレテンシヨ

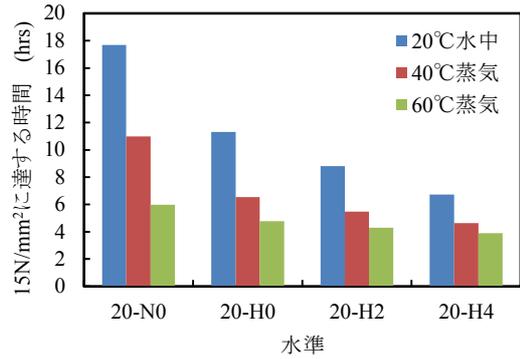


図-9 プレキャスト部材の脱型時所要強度 (15N/mm²) に達する時間

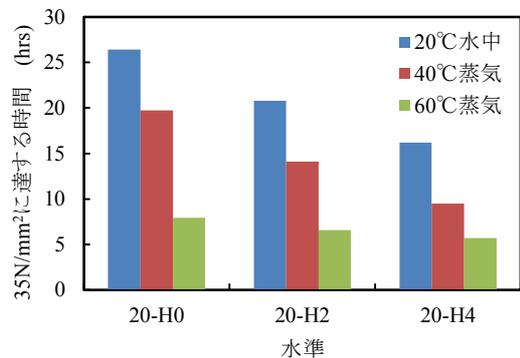


図-10 プレテンション方式によるプレストレス導入に必要な圧縮強度 (35N/mm²) に達する時間

ン方式の場合に必要な圧縮強度の目安は 30N/mm² とされ⁶⁾⁷⁾、コンクリート製品工場では 35N/mm² で管理していることが多い。そこで、脱型時強度を 35N/mm² 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 : 26.4hrs, 20-H2 : 20.8hrs, 20-H4 : 16.2hrs となり、35N/mm² に到達するのに必要な時間は図-10 の通りである。C-S-H 系早強剤を使用せずに早強ポルトランドセメントを用いて 40°C 蒸気養生した場合には 20 時間を要するのに対して、C-S-H 系早強剤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、C-S-H 系早強剤を C×4% 使用し、20°C 水中養生したものは、早強ポルトランドセメントのみを使用し 40°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、C-S-H 系早強剤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

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、早強ポルトランドセメントとC-S-H系早強剤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-9, 10 に示すように養生温度を高めて60℃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、C-S-H系早強剤と早強ポルトランドセメントを併用し、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

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、カルシウムシリケート水和物のナノ粒子を主成分とする液状の早強剤（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初期強度増進効果について検討した。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系早強剤は初期高温履歴を受けるコンクリートで形成される比較的細孔径の大きい空隙の減少に効果がある。
- (4) 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。

- (5) 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, 小泉信一, 花房賢治, 馬場勇介: 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, 井元晴丈, 馬場勇介, 山崎遥平: 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, 北澤利春, 佐々木良太, 呉 承寧: 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) 森寛晃, 久家龍一郎, 高橋晴香, 鶴澤正美: 高温履歴を受けたセメント硬化体の強度発現メカニズムと添加材による物性改善の試み, 材料, Vol.59, No.10, pp.743-750, 2010.10
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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