

# 論文 速硬性混和材と加熱養生を併用した超速硬コンクリートの実大実験による強度発現性と耐久性の検証

小島 正朗<sup>\*1</sup>・佐々 嘉宣<sup>\*2</sup>・入内島 克明<sup>\*3</sup>・樋口 隆行<sup>\*4</sup>

**要旨**：初期にエトリングaitを生成し、セメント中のエーライトの反応を促進する速硬性混和材と加熱養生を併用することを特徴とする水結合材比 30~50%の超速硬コンクリートを用い、床版プレキャスト部材の実大実験を行った。いずれの条件でも1日複数サイクル製造が可能な超速硬性が得られること、設計基準強度 60N/mm<sup>2</sup> 程度までは十分に実現可能なことを確認した。また、本コンクリートの耐久性に関し検証し、中性化抵抗性は、通常のプレキャストコンクリートと同等であること、凍結融解抵抗性は、適切な連行空気量を確保することで高い耐凍害性が得られることを確認した。

**キーワード**：超速硬コンクリート、速硬性混和材、加熱養生、実大実験、中性化、凍結融解

## 1. はじめに

筆者らは、建設躯体工事の品質の向上や生産性向上に有効なプレキャストコンクリート工法（以下、PCa工法）の適用拡大をねらいとして、プレキャスト部材の生産性の向上に資する超速硬コンクリートを開発している<sup>1)</sup>。通常の建築用プレキャスト部材は、コンクリートを打ち込んだ翌日、脱型時強度を確認して脱型する。工場生産であるプレキャスト部材も同様であるが、1日に2~3サイクル製造が可能になれば、生産量の増大や、製造期間が同じ条件では型枠数の低減が可能となり、建設業の生産性向上につながると考えられる。これまでに、速硬セメントや速硬性混和材を用いた超速硬コンクリートや<sup>2)</sup>、ホットコンクリート<sup>3)</sup>を用いたプレキャスト部材の製造技術などが開発されてきた。しかし、これらの技術は一般の設備で一般のプレキャスト部材に適用するには、ハンドリング、品質、コスト等、様々な課題がある。筆者らは、これらの課題の解決を目指して、少量の速硬性混和材と加熱養生を併用し、1日に複数サイクル製造を可能とする超速硬性とハンドリング性、高品質、かつ経済性に優れた超速硬コンクリートを開発している。

本論文では、筆者らが開発している超速硬コンクリートを実大の版状プレキャスト部材への適用性について検証した結果について述べる。また、本超速硬コンクリートは、ごく初期材齢に脱型するため、コンクリート中の水分が逸散することで品質が低下する可能性がある。鉄筋コンクリート構造物の主要な劣化要因である中性化に対する抵抗性と凍結融解抵抗性について検討した結果について述べる。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験因子と水準

実験因子と水準を表-1に、実験の組み合わせを表-2に示す。コンクリートの種類は、早強ポルトランドセメントの一部を速硬性混和材で置換した超速硬コンクリートと、比較用として早強ポルトランドセメント単味の一般的なプレキャスト部材用コンクリート（以下、一般PCa）の2種類とした。超速硬コンクリートの水結合材比(W/B)は30, 40, 50%とし、一般PCaは50%とした。実大部材の製造は、調査No.2, 3とし、他の調査は、部材と同等の温度履歴を受ける供試体を用いて各種試験を行った。

### 2.2 使用材料、調査および練り混ぜ

使用材料を表-3に示す。速硬性混和材は、初期にエトリングaitを生成するカルシウムサルホアルミネート成分とエーライトの反応を促進するアルカリ成分を主成分とする材料を使用した。

調査を表-4に示す。単位水量および粗骨材かさ容積を一定とした。

表-1 実験因子と水準

因子	水準
コンクリートの種類	超速硬, 一般PCa
水結合材比(W/B)	30, 40, 50%

表-2 実験の組み合わせ

No	コンクリートの種類	水結合材比	強度発現		中性化	凍結融解
			供試体	実大(コア)		
1	超速硬	30%	○	—	○	○
2	超速硬	40%	○	○	○	○
3	超速硬	50%	○	○	○	○
4	一般PCa	50%	○	—	○	○

\*1 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部門 主任研究員 工修 (正会員)

\*2 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部門 研究員 工修

\*3 電気化学工業(株) インフラ・無機材料部門 特殊混和材部 課長 (正会員)

\*4 電気化学工業(株) 青海工場 セメント・特混研究部 工修 (正会員)

練り混ぜには、容量 1.25m<sup>3</sup> と容量 60L の強制 2 軸ミキサを用い、いずれも全材料を投入後、60 秒間練り混ぜた。

### 2.3 実大部材および温度履歴供試体

製造した実大部材を図-1 に示す。版状部材は、一般部が 140mm 厚、最大部が 300mm 厚である。

全調合に対し、実大部材コンクリートと類似の温度履歴を受けた供試体を得ることを目的に、図-2 に示す型枠を準備し、実大部材と同じ条件で加熱養生を行った温度履歴供試体を作製した。

### 2.4 加熱養生

超速硬コンクリートおよび一般 PCa コンクリートは、図-3 に示す温度履歴で加熱養生を行った。超速硬コンクリートは、打込み完了直後（練り混ぜ後 30 分）から 45°C で前養生し、0.9 時間後に設定温度を 80°C に高め 2.5 時間加熱養生を行った。加熱養生後は大気開放とした。比較用の一般 PCa コンクリートは、前置き時間 2 時間後に 15°C / 時間で昇温し、最高温度 55°C を 3 時間保持した後、10°C / 時間程度の勾配で徐冷する条件とした。

### 2.5 実大部材の加熱養生後の養生

超速硬コンクリートの実大部材は、練り混ぜから材齢 3 時間後に脱型し、水分の逸散抑制等による耐久性の低下の抑制、特に中性化抵抗性の向上<sup>1)</sup>を目的に養生剤（非イオン系界面活性剤）を 150g/m<sup>2</sup> 塗布した。また、急激な温度降下による温度ひび割れを抑制するために、簡易な方法で保温し、翌日から気中で養生した。

### 2.6 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法を表-5 に示す。

フレッシュコンクリートの試験は、打込み前と打込みが完了して加熱養生を開始するタイミングである練り混ぜ後 30 分に測定した。

加熱時の温度測定は、外気温、加熱養生槽内および図-1 に示す部材中の○、●印の位置を熱電対にて測定した。

圧縮強度用の温度履歴供試体（φ10×20cm）は、構造体コンクリート強度を評価することを目的としており、コンクリートを鋼製モールドに打ち込んだ後に断熱材の中に設置し、実大部材と同じように上下面のみから加熱されるように配慮した。脱型時強度の評価を目的として練り混ぜから材齢 3、4.5 時間で試験を行い、構造体コンクリート強度の評価を目的に材齢 7、28 日で圧縮試験を行った。材齢 3、4.5 時間の圧縮試験用供試体は、成形直後にあらかじめ速硬性セメントでキャッピングを行って載荷面を平滑にした。他の材齢の供試体は、試験前に端面を研磨したのちに強度試験を行った。なお、加熱養生は材齢 3 時間までとしており、材齢 4.5 時間の供試体は、部材と一緒に簡易保温養生を施して試験に供した。比較のため、標準養生供試体についても、圧縮試験を行った。

コア強度は、実大部材の 140mm 厚の部位から外径 φ

表-3 使用材料

種類	物性
結合材	早強ポルトランドセメント（密度 3.14g/cm <sup>3</sup> ） 速硬性混和材（密度 2.44g/cm <sup>3</sup> ）
細骨材	川砂（表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> ，吸水率 1.6%，FM2.80） 石灰岩砕砂（表乾密度 2.69g/cm <sup>3</sup> ，吸水率 0.9%，FM2.75）
粗骨材	硬砂岩碎石 2005（表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> ，実積率 62%）
化学混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤 樹脂酸塩系陰イオン界面活性剤（AE 助剤）

表-4 調合

No	W/B (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	速硬性混和材 B× (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				化学混和剤 B× (%)		
						水 W	結合材 B セメント	速硬性材	細骨材 川砂 砕砂		粗骨材	
1	30	12.0	4.5	5	39.7	165	523	28	188	456	978	0.7
2	40	12.0	4.5	5	43.7	165	392	21	221	539	978	0.4
3	50	12.0	4.5	5	45.9	165	314	17	242	590	978	0.4
4	50	8.0	4.5	0	44.4	157	314	0	239	582	1028	0.35

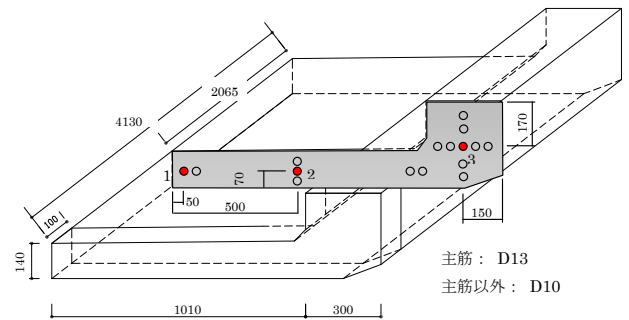


図-1 実大部材（○●：温度計測点）

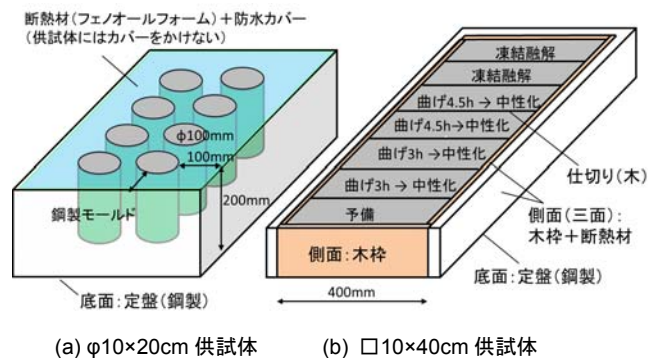


図-2 温度履歴供試体

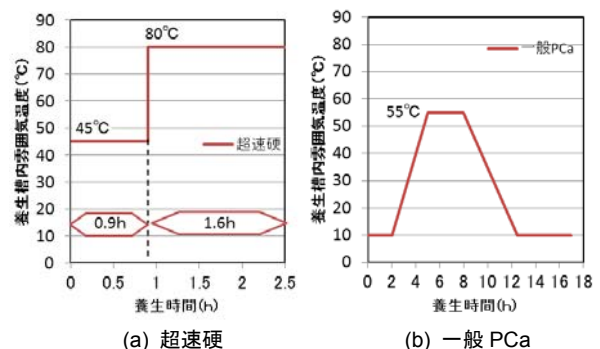


図-3 加熱養生（蒸気）の温度履歴設定

75mmのコアを採取して材齢7, 28日に試験した。

曲げ強度は、10×10×40cmの供試験体を用い4点曲げ試験を行った。温度履歴供試体の型枠は、側面は木製とし、底面はプレキャスト部材と同様に鋼製底盤とした。比較用に鋼製型枠を用いた標準養生供試体についても試験を行った。

耐久性試験は、促進中性化試験および凍結融解試験を行った。試験体の製作方法は、力学特性のための試験体と同様とした。超速硬コンクリートの中性化抵抗性は、脱型後に養生剤を塗布することで向上することが確認できていることから、超速硬コンクリートに関しては、加熱養生して脱型した後、実大部材と同じ条件で養生剤を塗布して試験に供した。中性化試験用の供試体には、曲げ試験後のものを用いた。

から30分で4cm低下したが、工場でのプレキャスト部材の円滑な打ち込みに十分な流動性であった。

表-5 試験項目および試験方法

試験項目および試験方法		試験方法
フレッシュ性状	スランプ, 空気量, 練り上がり温度	直後, 30分後に, JIS A 1101, A1128, A1156 に準じて試験
温度	雰囲気およびコンクリート温度	熱電対 (測定位置は図-1, 2 参照)
強度発現性	圧縮強度 φ10×20cm (供試体) φ7.5×14cm (コア)	温度履歴養生: 3,4.5h, 7,28 日 コア強度: 7,28 日 標準養生: 7,28 日
	曲げ強度 □10×40cm	温度履歴養生: 3,4.5h 標準養生: 7,28 日
耐久性	促進中性化 □10×40cm	温度履歴養生後 (超速硬は養生剤塗布), 材齢2週まで封かん, 材齢4週まで20°C 60%RH 気中養生. JIS A 1153 に準じて試験 標準養生: JIS A 1153 に準じて試験
	凍結融解 □10×40cm	材齢4週まで封かん養生 (超速硬は養生剤塗布の後) の後, JIS A 1148 に準じて試験

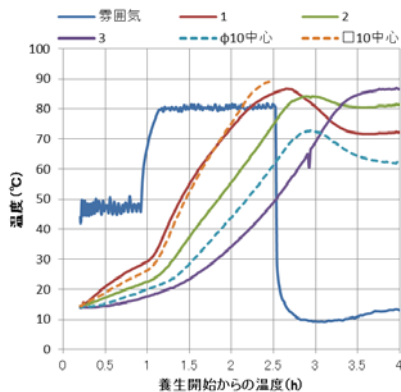
### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 フレッシュコンクリートの性状

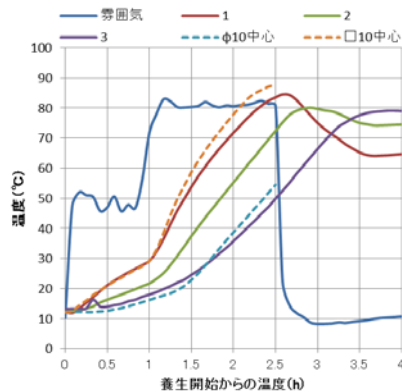
表-6 にフレッシュコンクリートの試験結果を示す。水結合材比が30%の条件では、スランプが12cmと小さい場合にはハンドリングが悪く、試験体の成形が困難と判断し、目標スランプより大きめとなるように化学混和剤を後添加 (結合材×0.1%) して練り上げた。水結合材比50%の調合が最もスランプの低下が大きく、練り混ぜ

表-6 フレッシュコンクリートの試験結果

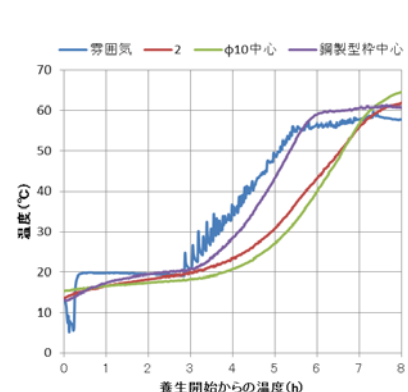
No	種類	水結合材比 (%)	混和剤		試験時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	CON 温度 (°C)	外気温 (°C)
			SP (B%)	AE 助剤 (A)					
1	超速硬	30	0.7+0.1	18.0	直後	15.0	4.1	13.0	9.0
					30分後	12.5	3.5	12.5	9.0
40		0.4	2.5	直後	14.0	3.5	14.0	9.0	
				30分後	13.0	3.0	14.0	11.0	
3	50	0.4	2.5	直後	12.0	3.8	11.0	8.5	
				30分後	8.0	3.4	11.0	10.0	
4	一般PCa	50	0.35	5.7	直後	9.0	5.0	14.0	10.0



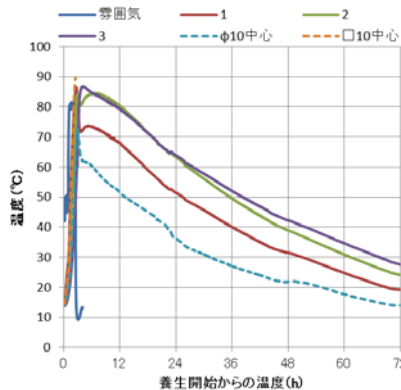
(a) 超速硬: 水結合材比 40%



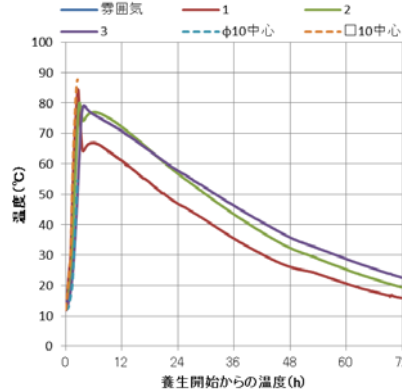
(b) 超速硬: 水結合材比 50%



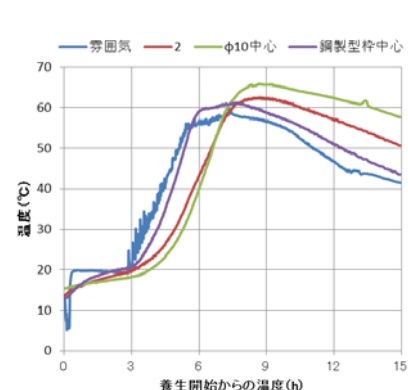
(c) 一般PCa: 水結合材比 50%



(d) 超速硬: 水結合材比 40%



(e) 超速硬: 水結合材比 50%



(f) 一般PCa: 水結合材比 50%

図-4 加熱養生時の温度 (上段: 加熱養生期間, 下段: 昇温期間)

空気量は、一般 PCa が 5.0%であったのに対し、超速硬コンクリートは、目標値 4.5%に対して 3.5~4.1%とやや小さ目であった。練り上がりから 30 分後には、空気量は 3.0~3.5%にまで減少した。

### 3.2 加熱養生時のコンクリート温度

図-1 に示す実大部材の●印の点の温度、温度履歴供試体試験体および養生時の雰囲気温度を図-4 に示す。

φ10×20cm 温度履歴供試体の中心部の温度履歴は、実大部材の一般部 140mm (測定点 2) よりやや低い温度になっており、実大部材の部材厚が最大の箇所 (測定点 3) より、やや高いか同等程度となっている。周囲を断熱して上下面から給熱される供試体を用いて部材同一養生することにより、実大部材と比較的類似した温度履歴を与えることができる。

図-4(c)(f)の一般 PCa 部材には関しては、従来から行われている鋼製型枠に詰めたコンクリートと、今回の周囲を断熱した温度履歴供試体について、実大部材の温度を比較している。周囲を断熱した温度履歴供試体のほうが、実際の部材温度に近い温度履歴になっている。脱型時の強度は、初期の温度履歴に敏感であるため、実施の部材と温度履歴が乖離しないように、給熱方向や部材厚を考慮した供試体を用いて脱型時強度を評価する必要があると考えられる。

### 3.3 強度発現性

#### (1) 圧縮強度

温度履歴供試体の結合材水比 B/W と、材齢 3 時間~28 日までの圧縮強度の関係を図-5 に示す。

いずれの材齢においても、B/W が大きいほど圧縮強度は高くなっている。B/W=3.3 (水結合材比 30%) では、材齢 3 時間で 16.3N/mm<sup>2</sup> が得られたが、B/W=2.0, 2.5, 水結合材比 W/B が 40%, 50%と大きくなるにつれ、圧縮強度の発現は低くなり、材齢 4.5 時間の段階でそれぞれ約 16N/mm<sup>2</sup>, 10N/mm<sup>2</sup>程度となった。初期材齢では、加熱養生温度が高いほど発現強度が高くなる<sup>4)</sup>が、3.2 で述べたように実大部材の一般部よりも温度履歴供試体のほうが温度は低い傾向にある。したがって、脱型時の強度を安全側に評価できたとも言えるが、過少評価している可能性もあるため、できる限り正確に部材中での発現強度を把握する手法が望まれる。プレキャスト部材の吊り上げに必要な強度は、形状や吊り上げ条件で決まり、本部材の場合は曲げで決まり、所要の圧縮強度は 6.6N/mm<sup>2</sup> である。水結合材比 40%については加熱養生開始から 2 時間 45 分後に、50%については 3 時間経過時点で吊り上げることができ (写真-1)、1 日複数サイクル製造が可能であることが確認された。

図-6 に水結合材比 40, 50%の材齢 7, 28 日における温度履歴供試体とコアの強度の関係を示す。両者はよく

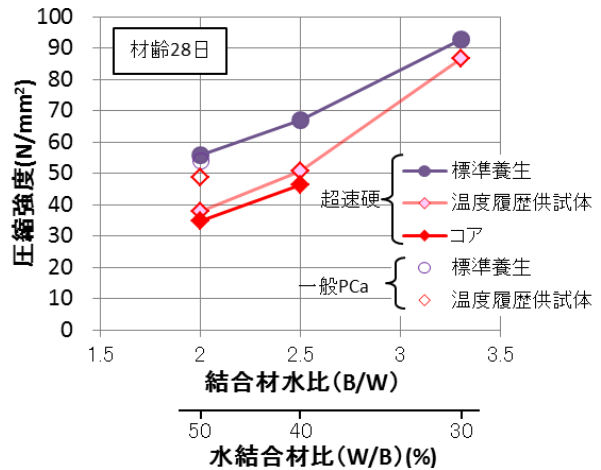


図-5 水結合材比と温度履歴供試体の圧縮強度発現



写真-1 実大部材の吊り上げ状況 (超速硬: W/B=50%)

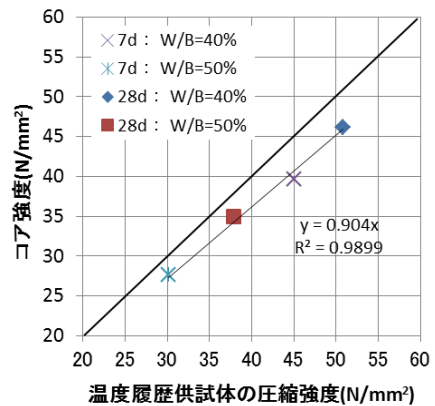


図-6 温度履歴供試体とコアの圧縮強度比較

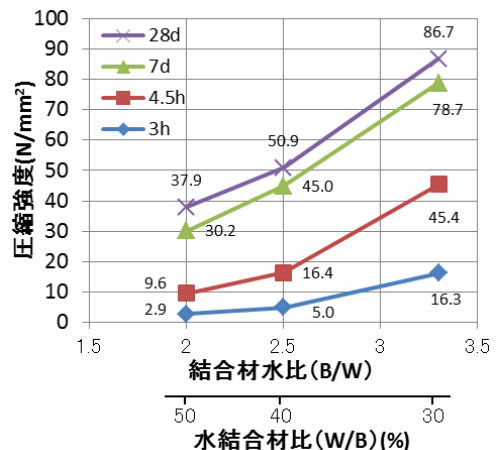


図-7 結合材水比と標準養生および構造体強度の関係

対応しているが、今回の試験ではコア強度のほうが温度履歴供試体の圧縮強度より 10%程度低かった。原因は明確でないが、温度履歴の差異等が一因として考えられる。

図-7に、材齢 28 日における結合材水比と標準養生供試体強度および構造体強度(コアおよび温度履歴供試体)の関係を示す。材齢 28 日における標準養生供試体の圧縮強度と構造体強度との差 ( $S_{28}$ ) は、水結合材比が小さく圧縮強度が高くなるほど小さくなる傾向にある。水結合材比が小さいほど初期材齢の強度も高くなる点も含めて考えると、本超速硬コンクリートは、圧縮強度が高い領域で適用するのが有利であるといえる。

### (2) 曲げ強度

圧縮強度と曲げ強度の関係を図-8に示す。標準養生した長期材齢の場合に比べて、材齢初期の曲げ強度は、圧縮強度に対する比率が高くなっている。圧縮強度試験用の  $\phi 10\text{cm}$  供試体よりも、曲げ試験用の  $\square 10\text{cm}$  供試体のほうが、高温履歴を受けているため材齢初期の強度が高くなっている影響もあるが、本超速硬コンクリートは針状結晶のエトリンガイトを生成する系の成分を含むことや、若干の体積膨張性を有し変形が型枠に拘束されたことも、曲げ強度が高くなった一因として考えられる。一般に、プレキャスト部材の脱型・吊り上げ時の部材の曲げの検討では、圧縮強度から推定した曲げ引張強度を用いるが、実際にはもっと余力があるものと推測される。

## 3.4 耐久性

### (1) 中性化抵抗性

図-9に促進中性化試験結果を示す。超速硬コンクリートも、通常のコンクリートと同様に、前養生の別にかかわらず、水結合材比が大きいかほど中性化深さは大きくなっている。中性化深さの値は、いずれの条件でも、促進材齢 26 週(炭酸ガス濃度 5%)においても 5mm 以下と小さかった。炭酸ガス濃度を、屋内 0.2%、屋外 0.05%、中性化速度係数が炭酸ガス濃度の平方根に比例する<sup>5)</sup>と仮定すると、促進 26 週はそれぞれ暴露 25 年、50 年に相当する。本超速硬コンクリートの中性化抵抗性は極めて

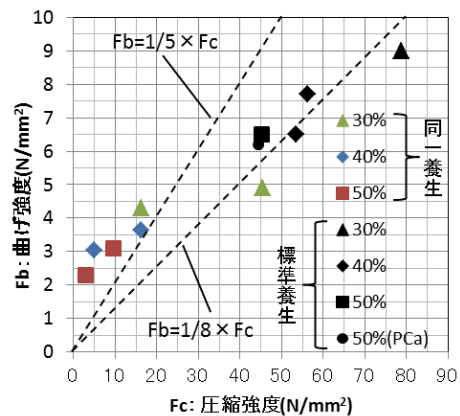


図-8 圧縮強度と曲げ強度の関係

高いといえる。

養生条件の別でみると、加熱養生を行わない前養生 20°C水中養生(標準と表記)とした場合に比べて、加熱養生したもの(超速硬: 3h, 4.5h, 一般 PCa: 1d と表記)は、促進中性化深さは大きくなっている。超速硬コンクリートにおいて、前養生 3h と 4.5h では中性化深さに優位差はない。また、超速硬コンクリートの水結合材比 40%と水セメント比 50%の一般 PCa の場合で、中性化深さが同程度になっている。これは、図-10に促進中性化試験の材齢 4 週まで前養生した時点の圧縮強度と促進中性化深さ(26 週)の関係を示す。超速硬: 3h, 4.5h と一般 PCa: 1d は、圧縮強度が同等であったため、中性化深さも同等になったと考えられる。

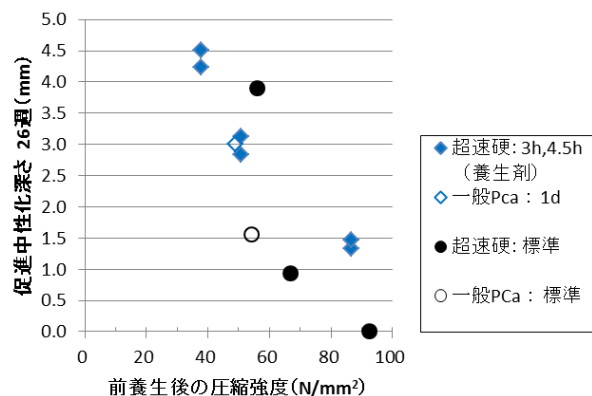


図-10 前養生後の圧縮強度と促進中性化深さ

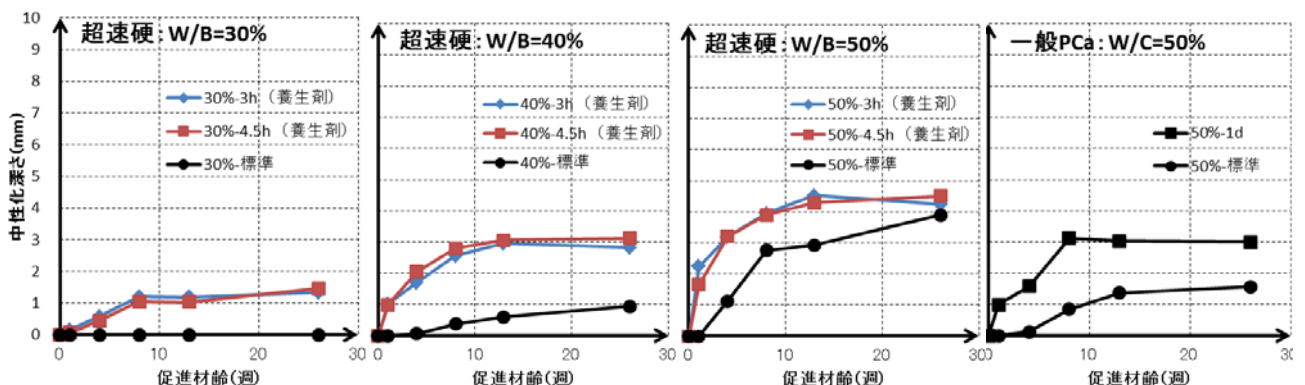


図-9 促進中性化試験結果

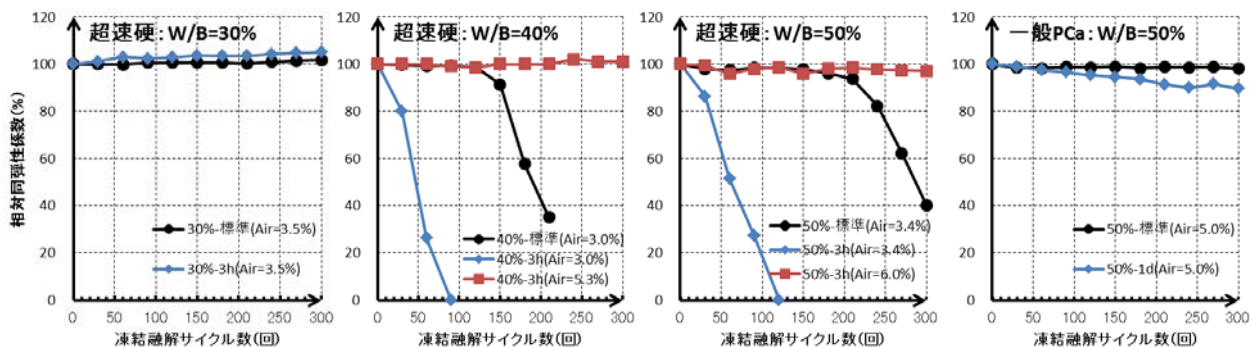


図-11 凍結融解試験結果

過去の室内実験<sup>1)</sup>では、中性化深さが大きくなったことから、本実大実験では、中性化の進行抑制を目的として養生剤を塗布した。しかし、中性化深さが極めて小さく、室内試験と実機試験で異なる結果となっており、養生剤塗布の必然性については検討の余地があるといえる。

## (2) 凍結融解抵抗性

凍結融解試験結果を図-11に示す。超速硬コンクリートの水結合材比40%, 50%に関しては、実大実験で空気量が少なめになり、コンクリート強度も高くない。凍結融解抵抗性が劣る可能性が考えられたことから、空気量のみを増やしたコンクリートを室内テストミキサを用いて製作し、図-3(a)の加熱養生の条件で養生した後に凍結融解試験もあわせて実施した。

超速硬コンクリートの場合、水結合材比30%では300サイクルにおいても相対動弾性係数は変化がなく、凍結融解抵抗性に優れていることがわかる。水結合材比40, 50%の空気量がそれぞれ3.0, 3.4%の場合には、いずれも300サイクルまで相対動弾性係数を保持できなかった。しかし、水結合材比40, 50%で空気量をそれぞれ5.3, 6.0%を増やした場合では、いずれも300サイクルの時点でも相対動弾性係数の低下は生じず、適切な空気量を確保することで、耐凍害性を確保できることが確認できた。

連行空気量5.0%であった一般PCa(水セメント比50%)は、標準養生、加熱養生後1日で脱型したものと300サイクルでも相対動弾性係数の低下はみられなかった。

空気量が少なかった超速硬コンクリートの水結合材比40, 50%について養生方法の影響をみると、加熱養生したほうが標準養生の場合より凍結融解抵抗性が劣る結果となった。これは、加熱養生したほうが試験開始時のコンクリート強度が低いことと、加熱養生により空隙構造が粗大化し、凍結融解抵抗性の向上に寄与する空隙が減少したことなどが理由として考えられる。

## 4. 結論

エトリンガイトの生成とエーライト反応を促進する効果を有する新規の速硬性混和材と加熱養生を併用した超速硬コンクリートについて、水結合材比30~50%の範囲で実大実験を行い、強度発現性と耐久性について以下

の知見を得た。

- (1) 本コンクリートは、版状プレキャスト部材の打ち込みに必要なワーカビリティを有しており、適切な加熱養生を施すことで3~4.5時間で脱型・吊り上げに必要な強度発現が得られ、1日複数サイクル製造が可能である。
- (2) 材齢7日で構造体強度30.2~78.7N/mm<sup>2</sup>、材齢28日において構造体強度37.9~86.7N/mm<sup>2</sup>が得られ、設計基準強度60N/mm<sup>2</sup>程度までの超速硬コンクリートが十分に実現できる。
- (3) 中性化に関しては、脱型後に養生剤を塗布する条件で試験を行い、極めて高い中性化抵抗性が得られることを確認した。
- (4) 凍結融解に関しては、適切な空気量を連行させることで、高い凍結融解抵抗性を確保することができる。

## 謝辞

実大実験の実施にあたり、(株)ダイワに多大なる協力を頂きました。末尾ながら記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 畑信次, 小島正朗ほか: 超速硬性混和材と加熱養生を併用する超速硬コンクリートの開発, その1~その2, 日本建築学会学術講演梗概集, 材料施工, pp.493-496, 2012.9
- 2) 笠井芳夫編著: コンクリート総覧, 技術書院, pp.136-138, 1998
- 3) 例えば, 仕入豊和ほか: PCパネル用ホットミキストコンクリートの強度におよぼす初期養生条件について, セメント技術年報26, pp.552-556, 1972
- 4) 小島正朗, 佐々嘉宣, 内内島克明, 栖原健太郎: 速硬性混和材と加熱養生を併用したプレキャスト用超速硬コンクリートの強度発現特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1786-1791, 2014
- 5) 阿部道彦, 榎田佳寛, 田中斉, 柳啓, 和泉意登志, 友澤史紀: コンクリートの促進中性化試験方法の評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第409号, pp.1-9, 1990.3