

# 論文 プレキャスト部材用低炭素型コンクリートの開発に関する研究

浦野登志雄\*1・溝口稔也\*2・松本康資\*3・松田 学\*4

**要旨:** プレキャストコンクリートに適した低炭素型コンクリートの開発を目的として、結合材を高炉セメント B 種とフライアッシュの 2 種類に絞り、凝結時間および初期強度の改善について検討した。その結果、材齢 28 日までの強度発現の結果から、高炉セメント B 種にフライアッシュ置換率 20%までは同等の強度が得られ、適切な硬化促進剤を使用することによって、型枠の脱型に必要な圧縮強度の目標値 12N/mm<sup>2</sup>を満足することを示した。また、フライアッシュ置換率 20%で CO<sub>2</sub>排出量を 50%以上削減できることが明らかとなった。

**キーワード:** 低炭素型コンクリート, プレキャストコンクリート, 高炉セメント, フライアッシュ

## 1. はじめに

地球温暖化対策として各分野における CO<sub>2</sub> 排出削減が急務となる中、コンクリート分野では製造時に大量の CO<sub>2</sub> を排出する普通ポルトランドセメントに代わって、産業副産物等の混和材料を多量に用いた「低炭素型コンクリート」の開発が進められている。コンクリートの使用材料は地産地消が基本であり、九州では高炉スラグ微粉末やフライアッシュが比較的入手しやすい環境にあることから、“2050 年カーボンニュートラルの実現”に向けた積極的な姿勢が求められている。

低炭素型コンクリートは、様々なアプローチが行われているが<sup>1),2),3)</sup>、普通セメント、消石灰、膨張材等のアルカリ刺激材に、高炉スラグ微粉末、フライアッシュ及び CO<sub>2</sub> 回収起源とした石灰石系材料といった多種類の材料構成による研究事例が多く、材料輸送費やサイロ増設費など、運用面を考えるとハードルが高いと考えられる。また、これらの材料構成によるコンクリートでは初期強度発現性に課題が残る。

プレキャストコンクリート（以下、PCa と称する）部材の製造では、高価な鋼製型枠を用いていることから型枠の転用回数が経済性に与える影響が著しく大きく、PCa に低炭素型コンクリートを適用するためには、早期の脱型強度の確保が必要不可欠である。ほとんどの PCa は蒸気等の促進養生によって初期強度を確保しているが、燃料消費によって CO<sub>2</sub> 排出がともなう蒸気養生を過剰に用いることは、本研究の趣旨には沿うものではない。

本研究では、PCa に適した低炭素型コンクリートの開発を目的として、結合材を高炉セメント B 種、フライアッシュの 2 種類に絞り、初期強度の改善については硬化促進剤の種類や添加量を実験水準として検討を行った。

表-1 実験水準

	内容
STEP1 配合検討	<p><b>◇既往配合の確認（比較用）</b></p> <p>①普通ポルトランドセメント (N) ②高炉セメント B 種 (BB) ③フライアッシュセメント C 種相当 (N75FA25)</p> <p><b>◇低炭素型コンクリートの配合検討</b></p> <p>高炉セメント B 種+フライアッシュの調合をベースに、FA の最適置換率を検討する。</p> <p>①BB90FA10 ②BB80FA20 ③BB60FA40</p>
STEP2 初期強度 凝結時間 の改善	<p><b>◇初期強度改善材料の選定</b></p> <p>BB80FA20 に初期強度改善材料を用いて、各種材料の効果および添加量を検討する。</p> <p>①初期強度促進剤 (FL) ②硬化促進剤 (MX)</p>

表-2 使用材料

種類	記号	品名	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
水	W	上水道水	1.00
セメント	N	普通ポルトランド	3.16
	BB	高炉セメント B 種	3.04
混和材	FA	フライアッシュⅡ種	2.28
細骨材	S	洗浄海砂	2.58
粗骨材	G13	砕石 (5~13mm)	2.75
	G20	砕石 (13~20mm)	2.75
混和剤	SP	高性能減水剤	—
促進剤	FL	初期強度促進剤	—
	MX	硬化促進剤	—

## 2. 実験概要

### 2.1 実験水準

表-1 に実験水準を示す。本実験は STEP1 にて低炭

\*1 久留米工業大学 建築・設備工学科 教授 博士(工学) (正会員)

\*2 (株)ヤマックス 技術本部開発研究課 主任 (正会員)

\*3 (株)ヤマックス 技術本部開発研究課 次長 博士(工学) (正会員)

\*4 (株)ヤマックス 執行役員 技術本部長 博士(工学) (正会員)

表-3 実験配合

STEP	種別	硬化促進剤		W/B (%)	W/C (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )							
		FL (%)	MX (%)			W	B			S	G13	G20	SP (%)
							C		FA				
							N	BB					
1	N	-	-	40	40.0	165	413	-	-	707	564	564	0.3
	N75FA25				53.2		310	-	103	676			
	BB				40.0		-	413	-	694			
	BB90FA10	-	-	40	44.4	165	-	372	41	684	564	564	0.3
	BB80FA20				50.0		-	330	83	671			
	BB60FA40				66.5		-	248	165	648			
2	BB80FA20-FL1.0	1.0	-	40	50.0	165	-	330	83	671	564	564	0.3
	BB80FA20-FL3.0	3.0											
	BB80FA20-FL5.0	5.0											
	BB80FA20-MX1.0	-	1.0	40	50.0	165	-	330	83	671	564	564	0.3
	BB80FA20-MX3.0		3.0										
	BB80FA20-MX5.0		5.0										

素型コンクリートの配合検討を、STEP2にて初期強度および凝結時間の改善方法について検討した。

## 2.2 使用材料

表-2に使用材料を示す。本実験では初期強度の改善材料として、無機カルシウム塩系の初期強度促進剤（以下、FLと称す）とカルシウムシリケート水和物（以下、C-S-Hと称す）のナノ粒子を添加する硬化促進剤（以下、MXと称す）を用いた。

## 2.3 実験配合

表-3に実験配合を示す。設計基準強度35N/mm<sup>2</sup>相当の普通ポルトランドセメントNを基準としており、全ての配合で水結合材比40%、単位水量165kg/m<sup>3</sup>、高性能減水剤の添加率を0.3%一定とした。また、凝結試験の簡便化を図るために、表記のコンクリート配合から予め粗骨材を差し引いたモルタル配合にて実施した。

STEP1:比較用の既往配合として、N（普通セメント）、N75FA25（フライアッシュC種相当）およびBB（高炉セメントB種）を用いた。低炭素型コンクリートの配合は、BBをベースとして、結合材の重量に対しFA置換率を10%、20%、40%の3水準（BB90FA10、BB80FA20およびBB60FA40）とした。

STEP2:STEP1の実験結果からBB80FA20を選択し、FLとMXの添加量は、結合材に対する重量比でそれぞれ1.0、3.0、5.0%の3水準とした。

## 2.4 試験項目

表-4に試験項目を示す。試験はフレッシュモルタルの温度測定、モルタルフロー試験、凝結試験および材齢1、14、28日における圧縮強度試験を行った。供試体の養生は恒温恒湿養生としたが、N、BB80FA20、BB80FA20-FL3.0、BB80FA20-MX3.0の供試体は、脱型時間短縮などの運用面を考慮して加熱促進養生を追加した。

表-5にインベントリデータを示す。各配合のCO<sub>2</sub>排出量は表中の値を用いて算出した。

表-4 試験項目

項目	方法	目標値	備考
モルタル温度	JIS A 1156		
モルタルフロー	JIS R 5201		
凝結試験	JIS A 1147	・始発時間がNと同等以下	始発：3.5N/mm <sup>2</sup>
圧縮強度	JIS A 1108	・材齢1日で12N/mm <sup>2</sup> 以上 ・管理材齢でNと同等以上	材齢1,14,28日 養生：恒温養生、加熱促進養生
CO <sub>2</sub> 排出量	表6	・Nの50%以下	

※恒温養生：打込み後、恒温室（20±2℃、60±5%RH）で養生  
 ※加熱促進養生：前置き2時間、昇温20℃/h以下、最高温度65℃で1時間保持、降温は自然徐冷、徐冷後恒温室内で養生

表-5 インベントリデータ

	排出量 (kg/t)			
	CO <sub>2</sub>	SO <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	ばいじん
水 <sup>*1</sup>	0.253	-	-	-
ポルトランドセメント <sup>*2</sup>	758.2	0.042	1.513	0.026
高炉セメントB種 <sup>*2</sup>	439.6	0.029	0.871	0.015
フライアッシュ <sup>*3</sup>	17.9	0.0062	0.0075	0.00125
細骨材 <sup>*3</sup>	3.7	0.0086	0.00586	0.00199
粗骨材 <sup>*3</sup>	2.9	0.00607	0.00415	0.00141
高性能AE減水剤 <sup>*3</sup>	187.5	-	-	-

\*1 東京都水道局、環境報告書2020<sup>4)</sup>より

\*2 セメント協会、セメントのLCIデータの概要<sup>5)</sup>より

\*3 土木学会、「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）」<sup>6)</sup>より

## 2.5 練混ぜ方法

練混ぜは気温 20°C の試験室にて行い、容量 20L のモルタルミキサーを用いて 1 バッチあたり約 6L 練混ぜた。練混ぜ時間は材料を一括投入してから 180 秒間とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 低炭素コンクリートの配合検討 (STEP1)

#### (1) フレッシュ性状

表-6 にフレッシュ性状の試験結果を示す。高炉スラグ微粉末や FA 等の混和材には単位水量の低減効果があるため、単位水量および減水剤添加量が一定の条件下では、混和材の含有量が多い  $BB > N75FA25 > N$  の順にモルタルフローが大きくなった。

#### (2) 凝結試験

図-1 に凝結試験結果、表-7 に始発時間を示す。N と BB, N75FA25 の始発時間を比較すると、N と比べて BB は 30 分、N75FA25 は 35 分の遅延が確認され、高炉スラグ微粉末や FA の混入によって始発時間が遅延した。また、FA 置換率を比較すると、BB に比べて BB90FA10 で

25 分、BB80FA20 で 45 分、BB60FA40 で 1 時間 15 分の遅延が生じた。PCa 製品は、打込み→締め→仕上げ→養生の順で作業が行われるが、コンクリート表面のこて仕上げ完了時間が短くなるほど、多くの型枠に対して効率的に人員が配置されて少人数での製造が可能となるため、結果として経済性への影響が著しく大きい。こて仕上げの完了時間は凝結始発時間に依存するため、BB+FA 配合は N に比較して 1~2 時間以上も遅延することから、現状での運用は厳しく、対策を講じる必要がある。

表-6 フレッシュ性状の試験結果 (STEP1)

種別	モルタルフロー (mm)	モルタル温度 (°C)
N	236	23
N75FA25	247	23
BB	256	22
BB90FA10	255	21
BB80FA20	256	21
BB60FA40	261	21

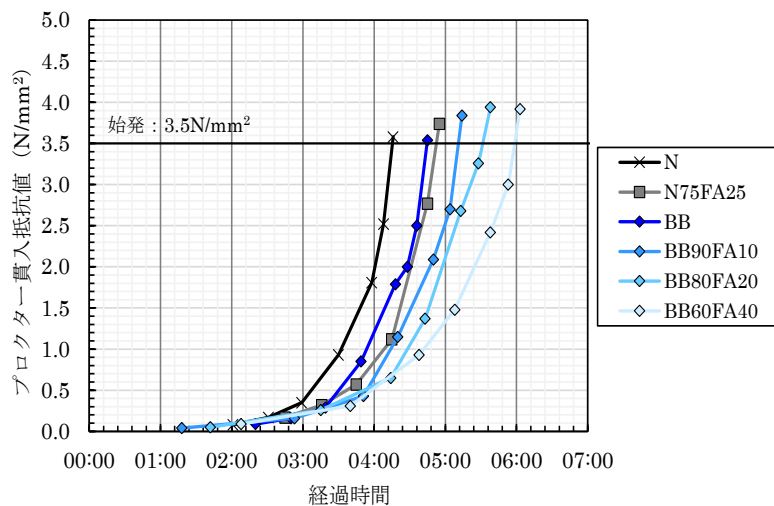


図-1 凝結試験結果 (STEP1)

表-7 始発時間 (STEP1)

種別	始発時間
N	4 時間 15 分
N75FA25	4 時間 50 分
BB	4 時間 45 分
BB90FA10	5 時間 10 分
BB80FA20	5 時間 30 分
BB60FA40	6 時間 00 分

表-8 圧縮強度試験結果 (STEP1)

種別	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )		
	1 日 恒温	14 日 恒温	28 日 恒温
N	16.9	42.8	49.2
N75FA25	10.8	34.9	42.0
BB	9.86	44.2	48.7
BB90FA10	9.01	46.3	50.4
BB80FA20	7.33	42.3	45.8
BB60FA40	3.96	34.9	34.3

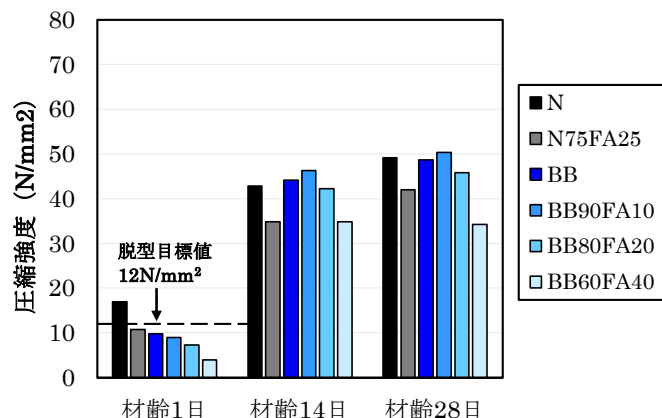


図-2 圧縮強度試験結果 (STEP1)

表-9 CO<sub>2</sub>排出量

種別	CO <sub>2</sub> 排出量 (kg/m <sup>3</sup> )								削減率 (%)
	W	N	BB	FA	S	G	SP	合計	
N	0.0	313.1	—	—	2.6	3.3	0.2	319.2	—
N75FA25		235.0	—	1.8	2.5			242.8	24
BB		—	181.6	—	2.6			187.7	41
BB90FA10		—	163.5	0.7	2.5			170.2	47
BB80FA20		—	145.1	1.5	2.5			152.6	52
BB60FA40		—	109.0	3.0	2.4			117.9	63

(3) 圧縮強度試験

表-8, 図-2 に圧縮強度試験結果を示す。材齢 1 日の圧縮強度は, N が 16.9N/mm<sup>2</sup> で脱型時所要強度 12N/mm<sup>2</sup> を超えたものの, BB や N75FA25, BB+FA の配合は目標値を下回る結果となり, 40%以上低下した。BB+FA 配合では FA 置換率の増加にともなって圧縮強度は低下し, BB に比較して BB90FA10 で 9%, BB80FA20 で 26%, BB60FA40 で 60%低下した。ここで, 脱型時所要強度は, 一般的な PCa 製品の型枠脱型時に必要な吊上げ荷重から設定した。

材齢 28 日の圧縮強度で比較すると, BB は N とほぼ同等となり, N75FA25 は N よりも若干低いものの, 材齢 1 日の低下率よりも差は小さくなった。塩基条件下で水和反応が生じる潜在水硬性と比べると, ポズラン材料からのシリカ成分の溶出に伴い反応が生じるポズラン反応は比較的緩慢であり, BB に比較すると FA の強度発現はやや遅くなるため, 概ね予想された結果となった。

一方, BB90FA10 は材齢 1 日の圧縮強度はやや小さいが, 材齢 14 日ならびに 28 日の圧縮強度は最も高くなった。粒度分布の最適化や形成される細孔構造などに起因すると推定されるが, 詳細な検討は今後の課題である。BB90FA10 以降は FA 置換率の増大にともなって圧縮強度の低下が認められるが, 特に BB60FA40 では BB90FA10 に比較すると 20%以上低下しており, 多量の FA 置換で反応に要するアルカリ量が不足し, 潜在水硬性やポズラン反応の進行が進みにくい状況にあると考えられる。

STEP1 の結果から, FA 置換率 20%までは材齢 14 日および材齢 28 日の強度低下が小さいため, 低炭素型コンクリートとして BB80FA20 を選択し, 脱型時強度および凝結時間の改善については, STEP2 において硬化促進剤による効果を検討することとした。

(4) CO<sub>2</sub>排出量

表-9 および図-3 に CO<sub>2</sub> 排出量を示す。CO<sub>2</sub> 排出量は表-5 のインベントリデータを用いて算出した。BB や FA を用いることで CO<sub>2</sub> 排出量は減少し, N と比較して BB80FA20 で 52%, BB60FA40 で 63%削減できることが示された。STEP1 の圧縮強度試験結果を踏まえて, 低炭

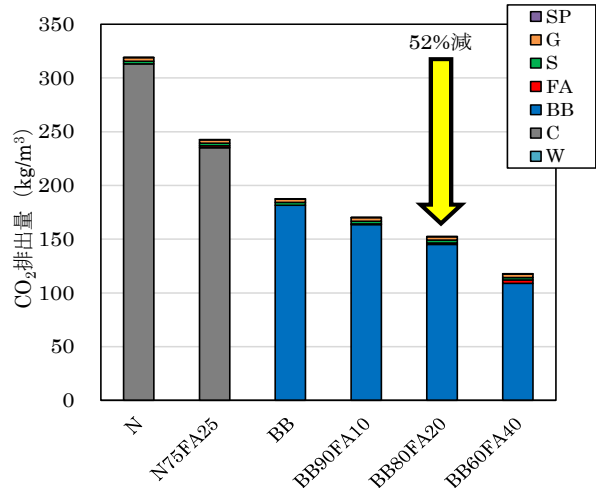


図-3 CO<sub>2</sub>排出量

表-10 フレッシュ性状の試験結果 (STEP2)

種別	モルタルフロー (mm)	モルタル温度(°C)
N	236	23
BB80FA20	256	21
BB80FA20-FL1.0	265	20
BB80FA20-FL3.0	285	19
BB80FA20-FL5.0	271	19
BB80FA20-MX1.0	283	20
BB80FA20-MX3.0	300	20
BB80FA20-MX5.0	300 以上*	20

\*フローテーブルをオーバーした

素コンクリートの配合は BB80FA20 が妥当と判断し, これを STEP2 のベース配合とした。

3.2 初期強度および凝結時間の改善 (STEP2)

(1) フレッシュ性状

表-10 にフレッシュ性状の試験結果を示す。FL, MX の添加率の増加にともない, モルタルフローは大きくなる傾向にあった。また, 硬化促進剤は単位水量の内割添加であることから, 単位水量の低減効果があることがわかった。

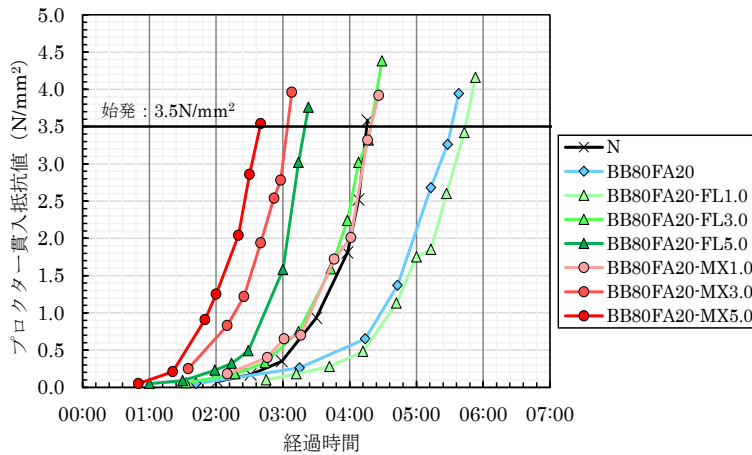


図-4 凝結試験結果 (STEP2)

表-11 始発時間 (STEP2)

種別	始発時間
N	4 時間 15 分
BB80FA20	5 時間 30 分
BB80FA20-FL1.0	5 時間 45 分
BB80FA20-FL3.0	4 時間 20 分
BB80FA20-FL5.0	3 時間 20 分
BB80FA20-MX1.0	4 時間 20 分
BB80FA20-MX3.0	3 時間 05 分
BB80FA20-MX5.0	2 時間 40 分

表-12 圧縮強度試験結果 (STEP2)

種別	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )					
	1 日		14 日		28 日	
	恒温	促進	恒温	促進	恒温	促進
N	16.9	35.3	42.8	49.9	49.2	48.2
BB80FA20	7.33	22.3	42.3	37.2	45.8	43.0
BB80FA20-FL1.0	6.74		37.7		45.6	
BB80FA20-FL3.0	6.82	22.0	41.6	41.2	50.2	45.5
BB80FA20-FL5.0	7.57		44.5		52.6	
BB80FA20-MX1.0	9.33		47.6		57.3	
BB80FA20-MX3.0	12.7	32.3	55.2	49.6	63.0	52.6
BB80FA20-MX5.0	14.6		55.9		62.9	

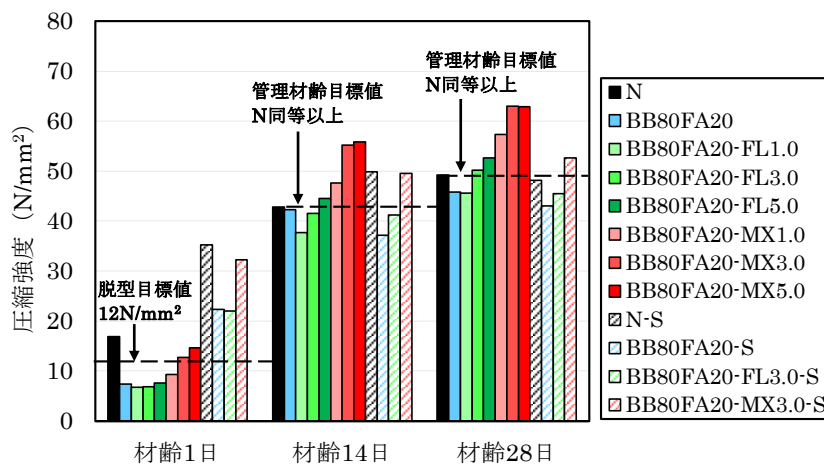


図-5 圧縮強度試験結果 (STEP2)

## (2) 凝結試験

図-4 に凝結試験結果, 表-11 に始発時間を示す。FL およびMX を使用することによって凝結促進効果が確認され, 始発時間は無添加に比べてFL が添加率3%で1時間10分, 添加率5%で2時間10分, MX が添加率1%で1時間10分, 添加率3%で2時間25分, 添加率5%で2時間50分短縮された。

FL と MX を比較すると, FL で添加率3%, MX で添加率1%において N と同等の始発時間を示したことから, MX が凝結時間の短縮に効果的であることがわかった。FL は 3CaO · SiO<sub>2</sub> (エーライト) を刺激する従来型の硬化促進剤であり, エーライトの含有が多い早強セメントに対して効果が高いと思われる。一方, MX は C-S-H ナノ粒子を直接液相中に導入させてナノ粒子が結晶核とし

て作用する新たな促進剤であり<sup>7)</sup>、セメントの種類に関係なく高い促進作用が得られたと考えられる。

### (3) 圧縮強度試験

表-12および図-5に圧縮強度試験結果を示す。ここで、図中の凡例の末尾に示す記号「S」は、加熱促進養生の供試体を表している。恒温養生による試験結果に対して、FLを用いた場合の材齢1日の圧縮強度は、無添加と比較すると同等以下になり、初期強度の増加効果が得られなかった。FLは無機カルシウム塩系の成分がエーライトを刺激することによって初期強度の発現を促しているが、本実験のBB+FA配合ではエーライトの成分量が少ないことから効果が小さかったと考えられる。一方、MXを用いた場合の材齢1日の圧縮強度は、無添加に比べると添加率1%で27%、添加率3%で73%、添加率5%で99%増加した。さらに材齢14日および28日の圧縮強度も添加率1%で13~25%、添加率3%で30~38%、添加率5%で32~37%増加した。C-S-H系の硬化促進剤を添加することにより、初期強度を促進させるだけでなく長期的に強度発現性が向上する結果が得られた。

次に配合別に比較すると、材齢1日の圧縮強度はN>MX5.0>MX3.0>MX1.0>FL5.0≧BB80FA20>FL3.0≧FL1.0の順となり、N、MX3.0およびMX5.0が脱型強度の目標値12N/mm<sup>2</sup>を満足した。BB80FA20にMXを3%以上添加することで、PCa製品の製造効率を下げることなく運用できることが認められた。また、材齢14日の強度がMX5.0≧MX3.0>MX1.0>FL5.0>N≧BB80FA20>FL3.0>FL1.0、材齢28日の強度がMX3.0≧MX5.0>MX1.0>FL5.0>FL3.0≧N>BB80FA20≧FL1.0の順となった。Nの圧縮強度よりも高くなったのがMX1.0、MX3.0、MX5.0およびFL5.0で、これらはNの設計基準強度と同等以上の配合設計が可能であることを示している。

本研究では一部の配合において、比較検討のために加熱促進養生を行ったが、促進養生による初期強度発現への影響は顕著で、促進養生と恒温養生を材齢1日の圧縮強度比で示すと、Nで2.09、BB80FA20で3.04、FL3.0で3.23、MX3.0で2.54と2倍以上の強度増進が得られた。

次に加熱による促進養生を配合種別で比較すると、Nの材齢1日の圧縮強度に対して、BB80FA20で0.63、FL3.0で0.62、MX3.0で0.92の比率となり、MX3.0の供試体はNと同等であり、通常使用する配合として特に問題ない初期強度発現性が得られた。同様にNの材齢14日および材齢28日の圧縮強度に対して、BB80FA20で0.75(14日)、0.89(28日)、FL3.0で0.83(14日)、0.94(28日)およびMX3.0で0.99(14日)、1.09(28日)となり、MXは、恒温養生および促進養生ともに、初期の硬化促進に加えてその後の強度発現にも有効であることが明らかとなった。なお、加熱促進養生はCO<sub>2</sub>排出量の増加を伴う

が、製品製造時の総排出量に対する影響については今後の課題としたい。

## 4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) BB+FA配合の始発時間は、Nに比較して1~2時間遅延したが、BB80FA20にFLを3%、MXを1%添加することでNの始発時間よりも短縮された。
- (2) BB+FA配合の材齢1日の圧縮強度は、脱型強度の目標値12N/mm<sup>2</sup>を下回る結果が得られたが、BB80FA20にMXを3%添加することで目標値を満足することができた。一方でFLはBB+FA配合の初期強度の向上には寄与しないことが確認された。
- (3) 促進養生を比較した場合、N供試体の材齢1日の圧縮強度に対して、BB80FA20で0.63、FL3.0で0.62、MX3.0で0.97の比率となった。BB80FA20-MX3.0は、Nと同等であり通常使用する配合として特に問題ない初期強度発現性が得られた。
- (4) MXは初期の硬化促進に加えてその後の強度発現にも有効であることが明らかとなった。
- (5) CO<sub>2</sub>排出量はBB80FA20でNに対して50%以上削減することができた。
- (6) 以上より、BB80FA20にMXを3%添加することで、CO<sub>2</sub>排出量をNに対して50%以上削減することができ、初期強度および凝結始発時間を満足した低炭素型コンクリートが開発可能と判断された。

## 参考文献

- 1) 松家武樹ほか：フライアッシュおよび高炉スラグ微粉末を用いた環境負荷低減コンクリートの基本性能、ハザマ研究年報、pp.1-6、2010
- 2) 小野里みどり、齋藤淳、齋藤尚、塚孝司：高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを用いたローカーボンハイパフォーマンスコンクリートの施工事例、コンクリート工学年次論文集、Vol.38、No.1、pp.2235-2240、2016
- 3) 宮原茂禎、荻野正貴、岡本礼子、丸屋剛：高炉スラグ微粉末とカルシウム系刺激材を使用した環境配慮型コンクリートの水和反応と組織形成、コンクリート工学年次論文集、Vol.35、No.1、pp.1969-1974、2013
- 4) 東京都水道局：環境報告書2020、p.69、2020
- 5) セメント協会：セメントのLCIデータの概要、p.8、2022
- 6) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)、コンクリートライブラリー125、2005
- 7) 小山広光、佐々木駿、伊達重之：C-S-H ナノ粒子を含有する早強剤の特性と効果について、コンクリート工学、Vol.53、No.7、pp.615-621、2015