

環境配慮型プレキャスト部材用コンクリートの 強度特性および収縮特性の検討

技術本部

技術研究所

椎野 碧

技術本部

技術研究所

中瀬 博一

概要：高炉スラグ微粉末などの混和材をセメントと置換使用することで、コンクリート製造時の CO₂ 排出量を削減する環境負荷低減技術が検討されているが、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは初期の強度発現の遅延や、自己収縮ひずみの増加が懸念される。そのため、PC コンクリートでは高炉スラグ微粉末の置換率は 50%程度に留まっているのが現状である。そこで、早期脱型膨張材により、初期の強度発現の向上と自己収縮ひずみを抑制した環境配慮型プレキャスト部材用コンクリートの実現を目指した。その結果、高炉スラグ微粉末の置換率を増加させても、初期の強度発現の向上と自己収縮ひずみの抑制が確認された。

Key Words：高炉スラグ微粉末、初期強度発現性、収縮ひずみ、早期脱型膨張材

1. はじめに

近年、地球温暖化対策の一環として CO₂ 排出量の削減が望まれており、建設の分野でも様々な取組みがなされている。今後はカーボンニュートラルの実現のため、更なる削減が求められる。

これらに対応するため、産業副産物である高炉スラグ微粉末(以降、BFS と称す)を混和材としてセメントと置換使用することで、コンクリート製造時の CO₂ 排出量を削減する環境負荷低減技術が検討されている。

しかし、BFS をセメントに置換使用したコンクリート(以降、BFS コンクリートと称す)は、初期の強度発現が遅延する傾向にあり¹⁾、プレテンション方式のプレキャストプレストレストコンクリート(以降、PCaPC と称す)に適用する場合、プレストレス導入時強度の確保が困難となる可能性がある。

また、低水結合材比であることに加えて、BFS を使用することで自己収縮ひずみの増加が懸念される。そのため、BFS コンクリートを PCaPC に適用する場合、BFS の置換率は 50%程度に留まっているのが現状である。

一方で、筆者らはこれまでに、生産性向上を目的として、早強材を使用することで初期の強度発現性を向上させた BFS コンクリートを開発した²⁾。

そこで、これらの技術を応用し、セメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率を 70%以上とした配合に早期脱型膨張材もしくは硬化促進剤を用いて、初期の強度発現性を向上および収縮ひずみを抑制し、より多くの CO₂ 排出量削減を可能にする環境配慮型プレキャスト部材用コンクリート(以降、環境配慮型コンクリート)の実現を目指した。



椎野 碧



中瀬 博一

2. 実験概要

2.1 目標性能

環境配慮型コンクリートの目標性能を表-1 に示す。PCaPC への適用を想定していることから、目標強度は材齢 1 日で 35N/mm²(配合強度 40.6N/mm²)、材齢 7 日で 50N/mm²(配合強度 58.0N/mm²)とした。練上り直後のスランブフローは 50±7.5cm とした。

表-1 目標性能

試験項目	目標値	
①スランブフロー(練上り直後)	50±7.5cm	
②空気量(練上り直後)	4.5±1.5%	
③圧縮強度	設計基準強度(材齢 7 日)	50N/mm ² (配合強度 58.0N/mm ²)
	プレストレス導入時強度(材齢 1 日)	35N/mm ² (配合強度 40.6N/mm ²)

2.2 使用材料

使用材料を表-2 に示す。早強ポルトランドセメントをベースとし、高炉スラグ微粉末は比表面積が 6000cm²/g のものを使用した。早期脱型膨張材 E はエトリンガイトの生成によって強度を発現するものであり、硬化促進剤 A はカルシウムシリケート水和物のナノ粒子が種結晶として作用し、ポルトランドセメントの水和反応を促進することによりコンクリートの凝結および初期強度を向上させるものである。

表-2 使用材料

材 料	記号	仕 様
水	W	上水道水
セメント	B	H 早強ポルトランドセメント, 密度3.14g/cm ³
高炉スラグ微粉末		BFS 高炉スラグ微粉末6000, 密度2.91g/cm ³
早期脱型膨張材	E	エトリンガイトの生成を作用機構とする, 粉体, 密度2.91g/cm ³
硬化促進剤	A	カルシウムシリケート水和物のナノ粒子により水和反応を促進させる, 液体
細骨材	S	S1 陸砂(茨城県行方市産), 表乾密度2.58g/cm ³ , 吸水率2.58%, F.M.2.59
		S2 砕砂(茨城県鹿沼市産), 表乾密度2.62g/cm ³ , 吸水率1.14%, F.M.2.98
粗骨材	G	碎石(茨城県鹿沼市産), 表乾密度2.64g/cm ³ , 吸水率0.64%, 最大寸法20mm
混和剤	SP	高性能減水剤
	AE	AE剤

2.3 配合

環境配慮型コンクリートの配合を表-3 に示す。結合材 B に対して BFS の置換率は質量比で 50~80%とした。早期脱型膨張材 E の使用量は 60kg/m³, 硬化促進剤 A は結合材に対して 3.0wt%とした。全ての配合で、水結合材比 W/B は 32%, 単位粗骨材量は 985kg/m³とした。

表-3 配合

配合*	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							A (B×%)
			W	B		E	S		G	
				H	BFS		S1	S2		
H	32	41.3	160	500	-	-	339	344	985	-
B50%	32	40.8	160	250	250	-	331	336	985	-
B50%-E	32	38.8	160	250	250	60	305	309	985	-
B50%-A	32	40.8	160	250	250	-	331	336	985	3.0
B60%	32	40.6	160	200	300	-	329	334	985	-
B60%-E	32	38.7	160	200	300	60	303	308	985	-
B60%-A	32	40.6	160	200	300	-	329	334	985	3.0
B70%	32	40.5	160	150	350	-	328	333	985	-
B70%-E	32	38.5	160	150	350	60	302	306	985	-
B70%-A	32	40.5	160	150	350	-	328	333	985	3.0
B80%	32	40.4	160	100	400	-	326	331	985	-
B80%-E	32	38.4	160	100	400	60	300	305	985	-
B80%-A	32	40.4	160	100	400	-	326	331	985	3.0

*配合は 【例①】 B80%-E ⇒ 【BFS置換率：80%】 - 【E：60kg/m³】
 【例②】 B80%-A ⇒ 【BFS置換率：80%】 - 【A：B×3wt%】

2.4 練混ぜ方法

練混ぜ方法を図-4 に示す。練混ぜには公称容量 55L の強制練り水平二軸ミキサを使用し、1 バッチ当たりの練混ぜ量は 35L とした。空練り後、水を投入する前にミキサ内に付着した粉体を掻き落とした。

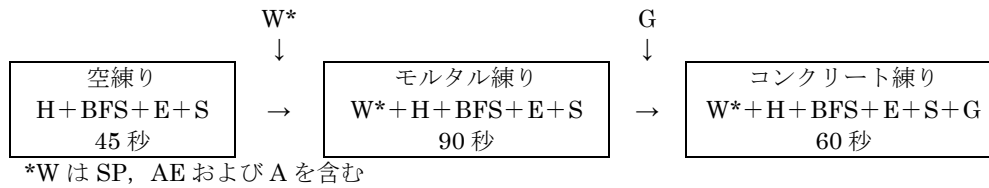


図-4 練混ぜ方法

2.5 養生方法

給熱促進養生の温度設定を図-5 に示す。給熱促進養生は写真-1 に示す可変恒温恒湿槽を用いて実施した。給熱促進養生後は水温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ の水中で 3 日間静置したのち、試験材齢まで室温 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相対湿度 $60 \pm 5\%$ の空气中で保管した。

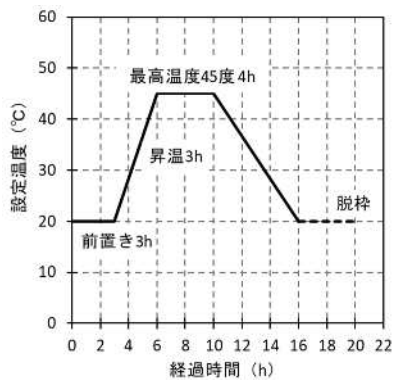


図-5 給熱促進養生の温度設定



写真-1 可変恒温恒湿槽

2.6 試験項目

試験項目および試験方法を表-4 に示す。試験は表-4 に示す試験方法に準拠もしくは準用して実施した。

表-4 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
スランプフロー	JIS A 1150
空気量	JIS A 1128
コンクリート温度	JIS A 1156
圧縮強度	JIS A 1108
収縮ひずみ	公益社団法人日本コンクリート工学会 「超流動コンクリート研究委員会 報告書Ⅱ」を準用

3. 試験結果

3.1 初期の強度発現性

3.1.1 圧縮強度試験の結果

圧縮強度試験の結果を表-5 に示す。

表-5 圧縮強度試験の結果

配合	圧縮強度 (N/mm ²)		
	σ_1	σ_7	σ_{28}^*
HC	59.2	67.8	75.1
B50%	48.8	61.7	71.2
B50%-E	62.5	80.3	88.4
B50%-A	52.8	63.6	74.8
B60%	48.3	60.8	67.3
B60%-E	63.7	78.5	87.6
B60%-A	53.2	62.4	70.7
B70%	47.6	57.8	65.8
B70%-E	54.7	67.7	74.3
B70%-A	57.3	68.1	73.6
B80%	45.1	50.0	55.0
B80%-E	54.7	68.0	76.4
B80%-A	51.5	53.8	61.3

3.1.2 高炉スラグ微粉末の置換率による影響

BFS 置換率と圧縮強度の関係を図-6 に示す。図-6 より、HC と比較し、セメントに対する BFS 置換率が増加すると圧縮強度が低下することが確認された。

各 BFS 置換率における材齢と圧縮強度の関係を図-7 に示す。材齢 1 日では BFS 置換率の変動による圧縮強度の差は僅かであったが、材齢 7 日以降では、B50%~B70%と比較して B80%の圧縮強度の増進が緩やかとなっている。これは、水酸化カルシウムの量が少量となり、BFS の水和反応が緩やかとなったことに起因すると考えられる³⁾。

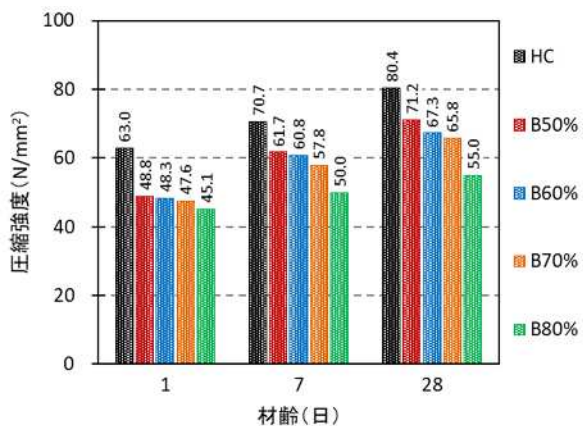


図-6 BFS 置換率と圧縮強度の関係

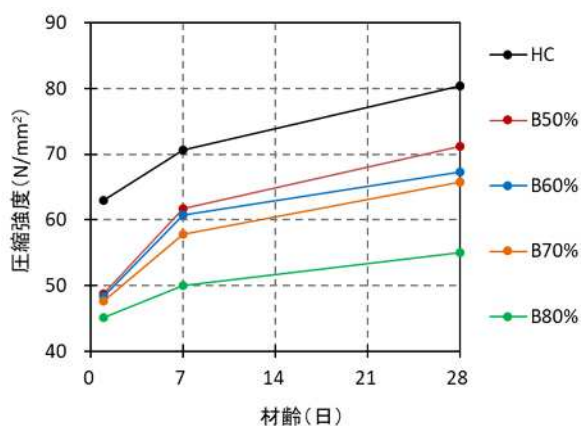


図-7 材齢と圧縮強度の関係

3.1.3 早期脱型膨張材や硬化促進剤の使用による影響

材齢と圧縮強度の関係を図-8に示す。早期脱型膨張材 E や硬化促進剤 A を用いていない配合 B50%~B80% と比較し、早期脱型膨張材 E や硬化促進剤 A を用いることで初期の強度発現性が向上した。

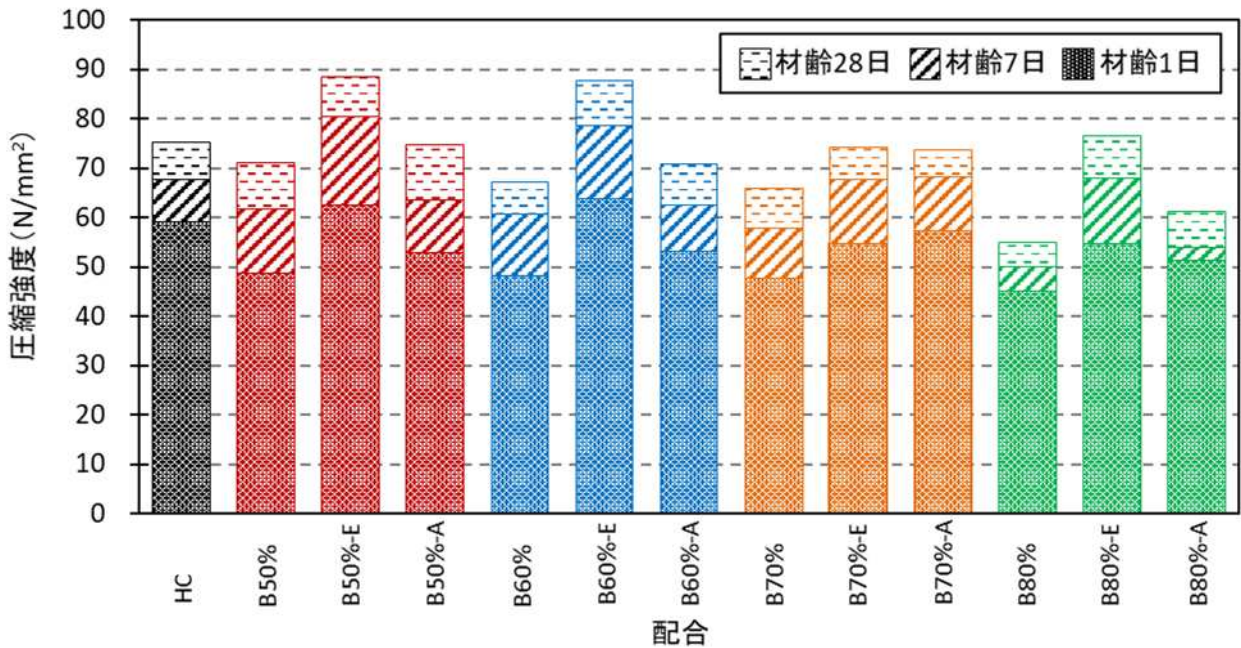


図-8 圧縮強度試験の結果

早期脱型膨張材 E や硬化促進剤 A を用いていない配合 B50%~B80%に対する各材齢での圧縮強度の割合を図-9に示す。配合 B50%~B80%と比較して、圧縮強度の割合は、早期脱型膨張材 E を用いた配合の場合、材齢 1 日で 1.1 から 1.3 倍程度、材齢 7 日以降は最大で 1.4 倍程度となった。一方、硬化促進剤 A を用いた配合の場合、材齢 1 日で 1.2 倍程度、材齢 7 日以降は最大で 1.1 倍程度となった。このことから、早期脱型膨張材 E を用いた場合、初期の強度発現性の向上のみでなく、材齢 7 日以降も圧縮強度の増進が期待できると考えられる。

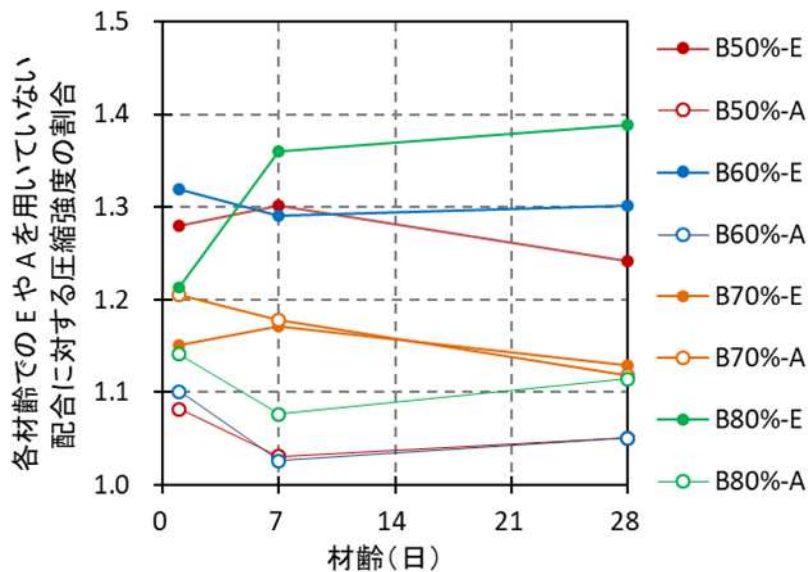


図-9 各材齢での圧縮強度の割合

図-8 および図-9 より、早期脱型膨張材 E や硬化促進剤 A を用いることで、セメントに対する BFS の置換率増加による初期の強度発現の遅延を改善することが可能となることが確認された。

3.2 収縮ひずみ

収縮ひずみの測定は打設直後から測定した。ここで、収縮ひずみとは自己収縮ひずみと乾燥収縮ひずみを併せたひずみを表す。

3.2.1 高炉スラグ微粉末の置換率による影響

材齢と収縮ひずみの関係を図-10 に示す。材齢 1 日では置換率を 70%以上とすると、収縮ひずみが大きくなったが、その後、材齢 1 日から材齢 4 日まで実施した水中養生期間中ではいずれの配合でも膨張する傾向を示した。この膨張は膨潤によるものと考えられ、配合 HC および B50%は 30μ 程度であるのに対し、B70% および B80% は 60μ 程度と約 2 倍となった。その後の材齢 168 日の収縮ひずみはそれぞれ、HC が -654μ 、B50%が -558μ 、B70%が -616μ 、B80%が -569μ であり、HC と比較して、B70%が同程度、B50%および B80% が 9 割程度となった。

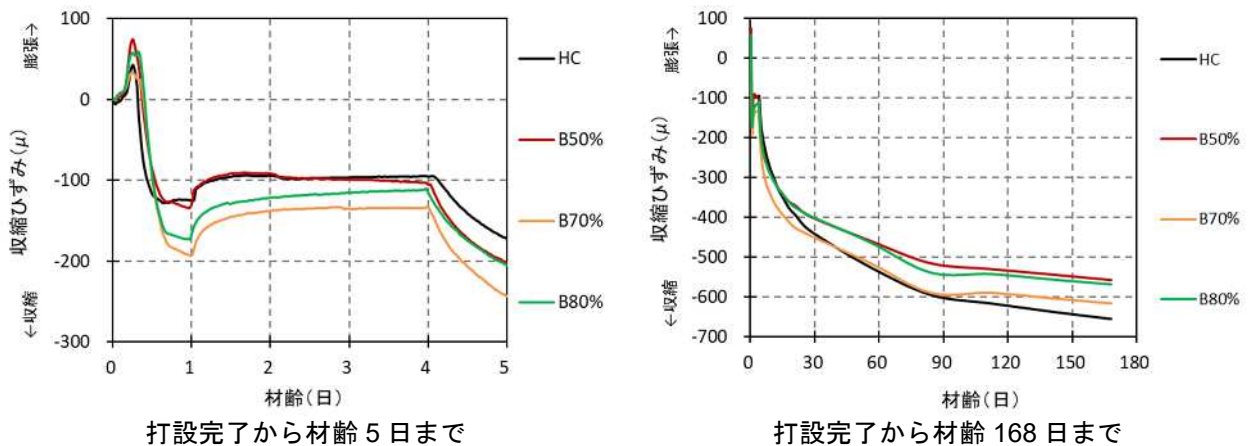


図-10 材齢と圧縮強度の関係

3.2.2 早期脱型膨張材や硬化促進剤の使用による影響

収縮ひずみの経時変化を図-11 に示す。早期脱型膨張材 E を用いた配合では打設完了後、給熱促進養生期間中(給熱促進養生開始から 6 時間経過頃)から膨張することが確認された。その後、収縮が進行したものの、材齢 168 日の収縮ひずみはそれぞれ、B50%-E が -137μ 、B70%-E が 23μ 、B80%-E が -72μ 程度となった。

一方、硬化促進剤 A を用いた配合では打設完了後、給熱促進養生期間中から収縮が進行し、材齢 168 日での収縮ひずみはそれぞれ、B50%-A が -700μ 、B70%-A が -697μ 、B80%-A が -632μ 程度となり、硬化促進剤 A を用いていない配合 B50%~B80%と同程度となることが確認された。

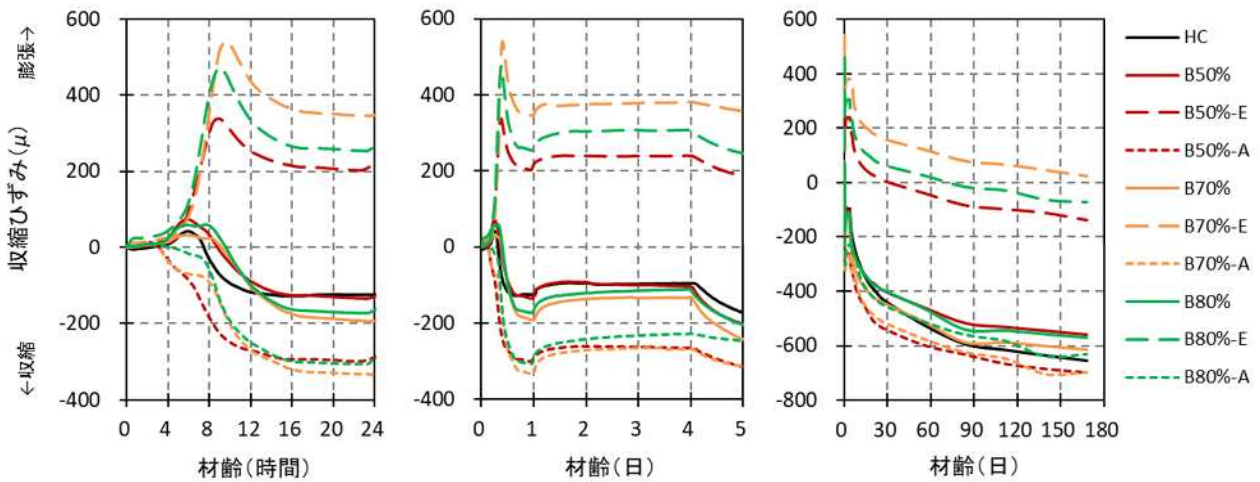


図-11 収縮ひずみの経時変化

材齢と収縮ひずみの関係を図-9 に示す。給熱促進養生が終了した材齢 1 日では早期脱型膨張材 E を用いた配合では膨張しているが、硬化促進剤 A を用いた配合では収縮していることが確認された。さらに、早期脱型膨張材 E や硬化促進剤 A を用いていない配合と比較し、硬化促進剤 A を用いた配合の収縮ひずみが他の配合と比較して大きくなっているが、これは、初期の強度発現性の向上に伴う硬化収縮の増加が影響しているものと考えられる。材齢 168 日では、材齢 1 日と比較してすべての配合で収縮が進行している。早期脱型膨張材 E を用いた配合の収縮ひずみが、他の配合と比較して小さくなっていることから、早期脱型膨張材 E を使用したことによる収縮低減効果が確認された。これらのことから、置換率が 50～80% の範囲内では早期脱型膨張材 A を用いることで収縮ひずみが抑制されることが確認された。

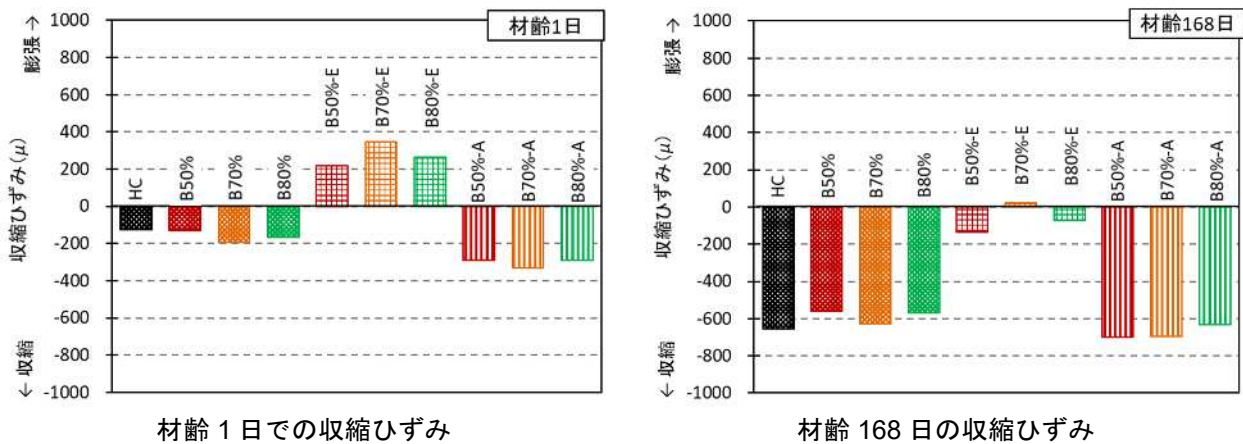


図-9 材齢と収縮ひずみの関係

4. まとめ

セメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率を 70%以上とした配合に、早期脱型膨張材もしくは硬化促進剤を用いて、初期の強度発現性を向上および収縮ひずみを抑制し、より多くの CO₂ 排出量削減を可能にする環境配慮型プレキャスト部材用コンクリートの実現を目指した。その結果、以下の知見が得られた。

4.1 初期の強度発現性

- ・早強セメント単味の配合と比較し、セメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率が増加すると圧縮強度は低下する。その差は材齢 1 日では僅かであるが、材齢 7 日以降では大きくなる。
- ・早期脱型膨張材や硬化促進剤の使用により、初期の強度発現性は向上する。また、早期脱型膨張材を使用することで、材齢 1 日の圧縮強度だけでなく、材齢 7 日以降も圧縮強度は増進する。

4.2 収縮ひずみについて

- ・早強セメント単味の配合と比較し、セメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率が増加すると、初期材齢での収縮ひずみは大きくなる。ただし、材齢 168 日では早強セメント単味と同程度となる。
- ・早期脱型膨張材を使用すると給熱促進養生期間中に膨張し、材齢 168 日でも収縮ひずみが抑制される。
- ・硬化促進剤を使用すると、使用していない配合と比較して初期の収縮ひずみが大きくなる。

以上より、早期脱型膨張材を使用することで、セメントに対する高炉スラグ微粉末の置換率増加にともなう初期の圧縮強度発現の低下を抑制でき、さらに、低水セメント比であること、および高炉スラグ微粉末の使用に起因する硬化収縮も抑制できることが確認された。

参考文献

- 1) 壇康弘, 近田孝夫ほか: 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの蒸気養生特性, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp222-227, 1991
- 2) 椎野碧, 中瀬博一ほか: 混和材を用いた場所打ちコンクリートの早強化の検討, プレストレストコンクリート工学会 第 29 回シンポジウム論文集, pp435-440, 2020
- 3) 坂井悦朗, 相川豊ほか: 高炉スラグ高含有セメントの水和に及ぼす養生温度の影響, セメント・コンクリート論文集, 70 巻 1 号, pp119-126, 2016