

論文 早強ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を混合した試製混合セメントを使用したコンクリートの発熱特性

吉本 慎吾*1・新見 龍男*2・加藤 弘義*3・関 卓哉*4

要旨：高炉セメントの初期強度改善方法として提案してきた早強ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を混合した試製混合セメントについて、試製混合セメントを使用したコンクリートの発熱特性の検討を行った。その結果、試製混合セメントの圧縮強度とヤング係数の関係は高炉セメント B 種の混合率に関わらず普通ポルトランドセメントと同様な関係を示した。また、温度上昇特性の観点からは、単位セメント量が 400kg/m^3 程度までは終局断熱温度上昇量は普通ポルトランドセメントと同程度であり、高炉セメント B 種の混合率は 50%以上とすることが望ましいと考えられる。

キーワード：混合セメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、発熱特性

1. はじめに

セメント産業では、クリンカーの原料となる石灰石の脱炭酸、化石エネルギーの使用によって多くの CO_2 を排出している。 CO_2 は地球温暖化の原因とされており、 CO_2 排出量の削減はセメント産業にとって大きな課題である。そこで、セメント産業では低炭素社会実現に向けて、省エネルギーや混合セメントの利用が推進されている。

筆者らは、混合セメントの 1 つである高炉セメントのさらなる利用推進に向けて、生コンクリート工場（以下、生コン工場）の既存の設備で実施できる高炉セメントの初期強度改善方法として、早強ポルトランドセメント（以下、HPC）に高炉セメント B 種（以下、BB）を混合した試製混合セメントを提案してきた^{1), 2)}。HPC および BB は汎用的な材料であるため、多くの生コン工場での実施が可能である。また、既存の設備での実施により、設備投資を少なくできると考えられる。しかしながら、通常、生コン工場ではセメントを混合して使用することがなく、実際に生コン工場の設備で実施できないことが懸念された。そこで、実際に生コン工場の設備を使用して検討を行い、生コン工場の既存の設備で HPC と BB を混合した生コンクリートを問題なく製造できることを確認した¹⁾。

コンクリートの物性面では、普通コンクリート配合について強度性状および耐久性の検討を行った。その結果、試製混合セメントは、普通ポルトランドセメント（以下、OPC）の水セメント比（以下、W/C）が 55% のとき、試製混合セメントは W/C が 60% で材齢 28 日の圧縮強度が同程度となる。さらに、前記配合における材齢 1 日の圧縮強度は BB の混合率が 70% 以下で OPC と同程度以上を示すことから、HPC と BB を混合することによって、材齢

28 日の圧縮強度を OPC と同程度に維持しつつ、高炉セメントの初期強度を改善できる²⁾ことを把握した。また、耐久性では試製混合セメントは中性化については OPC に比べて不利となるものの、BB の混合率を 50% 以下とすることで自己収縮が OPC と同程度以下となることが確認された³⁾。一方、マスコンクリート構造物においては、セメントの水和熱が原因となる温度ひび割れによって、コンクリート構造物の耐久性の低下を引き起こす場合がある。そのため、強度性状や耐久性だけでなく、温度ひび割れの原因となる温度上昇特性、ヤング係数等の検討が必要である。そして、試製混合セメントを広く使用推進する上では、材齢 28 日の圧縮強度や温度上昇特性は OPC と同程度であることが望ましく、初期強度発現性は OPC と同等以上が望ましい。

そこで本検討では、HPC と BB を混合した試製混合セメントを使用したコンクリートの発熱特性について検討を行った。比較対象は、OPC とし試製混合セメントの発熱特性が OPC と同程度となるか確認を行った。

2. 実験概要

本検討では、高炉セメントの初期強度改善方法として提案してきた HPC と BB を混合した試製混合セメントについて、試製混合セメントを使用したコンクリートの発熱特性について検討を行った。検討項目は、圧縮強度、ヤング係数およびコンクリートの温度上昇特性とした。温度上昇特性としては、断熱温度上昇試験を実施した。

2.1 使用材料

表-1 に使用した材料を示す。セメントは、OPC、HPC および BB を使用した。試製混合セメントは、コンクリ

*1 (株) トクヤマ セメント開発 Gr. (正会員)

*2 (株) トクヤマ セメント開発 Gr. 工修 (正会員)

*3 (株) トクヤマ セメント開発 Gr. リーダー 工博 (正会員)

*4 (株) トクヤマ セメント開発 Gr. 工修

表－1 使用材料

項目	種類	物性		記号
セメント	普通ポルトランドセメント	密度 3.16g/cm ³ , ブレーン 3230cm ² /g		OPC
	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm ³ , ブレーン 4790cm ² /g		HPC
	高炉セメント B 種	密度 3.04g/cm ³ , ブレーン 3720cm ² /g, 高炉スラグ微粉末量 45.0%		BB
細骨材	砕砂	表乾密度 2.68g/cm ³		S1
	丘砂	表乾密度 2.68g/cm ³		S2
粗骨材	硬質砂岩碎石	1505	表乾密度 2.72g/cm ³	G1
		2010	表乾密度 2.73g/cm ³	G2

表－2 セメント物性

セメント種類	鉱物組成(%)				密度 (g/cm ³)	ブレーン (cm ² /g)
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF		
OPC	63.9	8.8	9.4	8.5	3.16	3230
HPC	63.2	10.3	9.3	8.0	3.14	4790
BB の母材セメント	55.8	13.0	9.0	8.5	3.16	3680

表－3 セメント物性の推定値

セメント種類	高炉スラグ微粉末量 (%)	混合セメントのクリンカー鉱物の含有量(%)				密度 (g/cm ³)	ブレーン (cm ² /g)
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF		
BB	45.0	30.7	7.2	5.1	4.7	3.04	3720
BB70%	31.5	40.5	8.1	6.4	5.7	3.07	4041
BB50%	22.5	47.0	8.8	7.2	6.4	3.09	4255
BB30%	13.5	53.4	9.4	8.0	7.0	3.11	4469

表－4 コンクリートの配合 (1)

配合	BB 混合率 (%)	高炉スラグ 微粉末量 (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)							
				水	セメント			細骨材		粗骨材	
					OPC	BB	HPC	S1	S2	G1	G2
OPC	-	-	55	182	331	-	-	842	34	464	466
BB	100	45.0	60	176	-	293	-	879	36		
BB70%	70	31.5		175	-	204	88	885	36		
BB50%	50	22.5		175	-	146	146	886	36		
BB30%	30	13.5		175	-	88	204	888	36		

表－5 コンクリートの配合 (2)

配合	BB 混合率 (%)	高炉スラグ 微粉末量 (%)	W/C (%)	単位量(kg/m ³)								
				水	セメント				細骨材		粗骨材	
					合計	OPC	BB	HPC	S1	S2	G1	G2
OPC	-	-	55.0	165	300	300	-	-	912	37	460	458
			42.5	170	400	400	-	-	818	33		
			36.0	180	500	500	-	-	711	29		
BB70%	70	31.5	42.5	170	400	-	280	120	808	33		
BB50%	50	22.5	55.0	165	300	-	150	150	907	37		
			42.5	170	400	-	200	200	811	33		
			36.0	180	500	-	250	250	702	28		
BB30%	30	13.5	42.5	170	400	-	120	280	813	33		

および BB を使用した。試製混合セメントは、コンクリートの混練の際に HPC と BB を混合して使用した。その際の BB の混合率はセメントの質量比で 30%, 50%および 70%とした。細骨材は砕砂および丘砂を使用し、混合率は体積比で 24 : 1 とした。粗骨材は硬質砂岩碎石 1505 および 2010 を使用し、混合率は体積比で 1 : 1 とした。混和剤は AE 減水剤高機能タイプを使用した。

2.2 セメントの物性

表－2 に使用したセメントの物性、表－3 にセメント物性から算出された BB および試製混合セメントの物性の

推定値を示す。BB のクリンカー鉱物の含有量は、母材となるセメントに高炉スラグ微粉末を 45.0%置換していることから母材となるセメントの鉱物組成を基に算出した。試製混合セメントのクリンカー鉱物の含有量、密度およびブレーンは BB と HC の物性を基にそれぞれの BB 混合率に従って算出した。

2.3 コンクリートの配合

表－4、表－5 にコンクリートの配合を示す。本検討では、圧縮強度およびヤング係数は表－4 の配合を用いて実施した。また、断熱温度上昇試験は表－5 の配合を用

いた。圧縮強度およびヤング係数の測定に使用したコンクリートの W/C は、基準となる OPC を W/C=55%とし、試製混合セメントについては、既往の研究より材齢 28 日の圧縮強度が OPC と同程度となる W/C=60%とした²⁾。混和剤として使用した AE 減水剤高機能タイプの添加率は、いずれの配合もセメント質量の 1.30%とし、粗骨材のかさ容積は 0.560m³/m³とした。コンクリートのフレッシュ性状の目標範囲は、スランプを 18.0±1.5cm、空気量を 4.5±1.0%に設定した。断熱温度上昇試験は、単位セメント量が 300～500kg/m³の範囲で実施し、混和剤として使用した AE 減水剤高機能タイプの添加率は、いずれの配合もセメント質量の 1.30%とした。

2.4 コンクリートの混練

コンクリートの混練は、100L パン型ミキサーを使用し、標準期を想定し環境温度 20℃にて行った。混練手順は、セメント、細骨材および粗骨材を投入後 30 秒空練り、水および混和剤を投入後 90 秒混練し排出した。

2.5 コンクリートの圧縮強度

圧縮強度試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強度試験方法」に準拠して行った。供試体の養生方法は、20℃水中養生とし、材齢 1, 3, 7, 28, 56, 91 日について測定を行った。また、マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016⁴⁾に示される JCI 式 式(1)を用いて算出した OPC の圧縮強度との比較を行った。

$$f'_c(t_e) = ((t_e - S_f) / (a + b(t_e - S_f))) f'_c(t_n) \quad (1)$$

t_e : 有効材齢 (日)

t_n : 20℃水中で養生したコンクリートの
管理材齢 t_n (日)

$f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e における圧縮強度 (N/mm²)

a, b : セメントの種類および管理材齢に応じた
圧縮強度の発現を表す係数

S_f : セメントの種類に応じた硬化原点に対する
有効材齢 (日)

$f'_c(t_n)$: 管理材齢 t_n における圧縮強度 (N/mm²)

2.6 コンクリートのヤング係数

ヤング係数は、JIS A 1149「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準拠して行った。ひずみの測定には、PC コントロール型動ひずみ測定器を使用し、応力、ひずみの測定結果からヤング係数を求めた。供試体の養生方法は、20℃水中養生とした。測定は、材齢 1, 3, 7, 28, 56, 91 日について実施し、マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016⁴⁾に示される JCI 式 式(2)を用いて実験結果を回帰することで実験式を得た。

$$E_c(t_e) = C_3 \times f'_c(t_e)^{C_4} \quad (2)$$

$E_c(t_e)$: 有効材齢 t_e におけるヤング係数 (N/mm²)

$f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e における圧縮強度 (N/mm²)

C_3, C_4 : 係数



写真-1 断熱温度上昇試験装置

2.7 断熱温度上昇試験

写真-1 に本検討で使用した断熱温度上昇試験装置を示す。断熱温度上昇試験装置の断熱形式は空気循環式である。コンクリート容器には、溶融亜鉛めっき鋼板製の φ397mm×h485mm、板厚 0.5mm、容量 55L の容器を用いた。供試体の容量は 50L、コンクリートの打ち込み温度は 20℃とした。温度の測定は 1 時間毎に行い、OPC は材齢 7 日、試製混合セメントは材齢 10 日まで実施した。終局温度上昇量 Q_∞ は断熱温度上昇試験の最高温度とし、温度上昇速度の定数 r_{AT} は、マスコンクリートのひび割れ制御指針に示される JCI 式 式(3)を用いて最小二乗法により近似し算出した。

$$Q(t) = Q_\infty [1 - \exp\{-r_{AT}(t - t_{0,Q})^{S_{AT}}\}] \quad (3)$$

$Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量 (℃)

Q_∞ : 終局断熱温度上昇量 (℃)

r_{AT}, S_{AT} : 断熱温度上昇速度に関する係数

t : 材齢 (日)

$t_{0,Q}$: 発熱開始材齢 (日)

3. 結果と考察

3.1 コンクリートの圧縮強度

図-1 にコンクリートの圧縮強度を示す。既往の研究と同様に、材齢 28 日の圧縮強度は試製混合セメントの W/C が 60%の場合と OPC の W/C が 55%の場合とで同程度の値を示した。また、材齢 1 日の圧縮強度は BB の混合率が 70%以下で OPC と同程度以上の値を示した²⁾。一方、JCI 式 式(1)を用いて算出された OPC (W/C=55%)の材齢 28 日圧縮強度の計算値と比較した場合、本検討ではいずれの配合も計算値よりも高い値を示した。そのため、試製混合セメントを使用したコンクリートは、BB の混合率に関わらずコンクリートの強度管理材齢である材齢 28 日の圧縮強度は OPC と同程度となるものと考えられる。

図-2 に各セメントの C_3S 量と材齢 1 日の圧縮強度の関係を示す。 C_3S は、初期材齢の強度発現性に寄与する

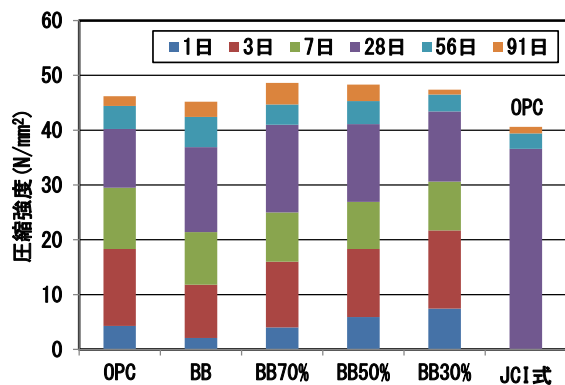


図-1 コンクリートの圧縮強度

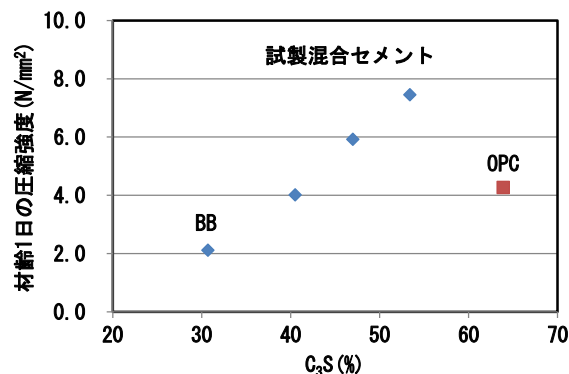


図-2 各セメントの C₃S 量と材齢 1 日圧縮強度の関係

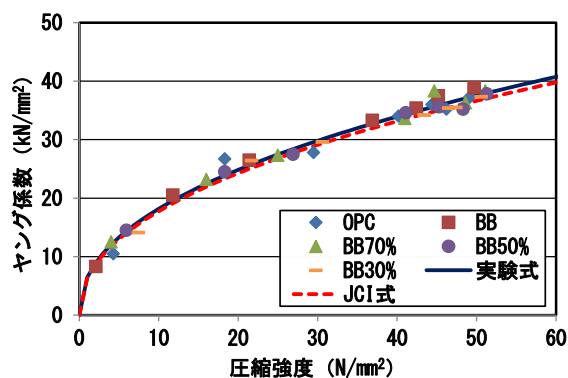


図-3 圧縮強度とヤング係数の関係

ため、C₃S 量が多いほど初期強度は高くなる。一方、本検討において試製混合セメントは OPC に比べて C₃S 量が少ないにも関わらず材齢 1 日の圧縮強度は同程度以上の値を示した。これは、セメントのブレン値の影響であると考えられる。試製混合セメントは OPC に比べてブレン値が高く、セメントの水和反応が早く進行すると考えられる。そのため、C₃S 量が少ないにも関わらず材齢 1 日の圧縮強度が OPC と同程度以上になったものと推察される。また、材齢 1 日の圧縮強度が OPC と同程度となった BB70% の C₃S 量とブレン値の関係から C₃S 量 10% を補うために必要となるブレン値を算出した。その結果、C₃S 量 10% あたりブレン値を 350cm²/g 程度高くすることによって材齢 1 日の圧縮強度を同程度にできることが示唆された。そのため、本検討で使用了 BB は OPC に比べてブレン値を 1150cm²/g 程度高くすることで、材齢 1 日の圧縮強度を OPC と同程度とすることができると推察されるが、ブレン値を高くすると長期の強度発現性に影響を及ぼす可能性が考えられる。一方、本報の方法によれば材齢 28 日以降の強度発現性を維持しつつ材齢 1 日の圧縮強度を改善できる。

以上より、高炉セメントの初期強度改善方法として提案する HPC に BB を混合する方法は有用であると考えられる。

3.2 コンクリートのヤング係数

図-3 にコンクリートの圧縮強度とヤング係数の関係を示す。本検討では、いずれの配合においても圧縮強度とヤング係数には相関関係が確認された。試製混合セメントは、BB の混合率に関わらず圧縮強度とヤング係数の関係は同程度であり、OPC と同程度であった。そのため、試製混合セメントの圧縮強度とヤング係数には OPC と同様な関係が成り立ち、BB の混合率はこの関係に影響を及ぼさないと考えられる。また、実験式と JCI 式 式(2)を比較した場合、実験式における圧縮強度とヤング係数の関係は JCI 式 式(2)と同程度であった。

以上より、試製混合セメントを使用したコンクリートは、BB の混合率に関わらず OPC と同様に圧縮強度からヤング係数を推定することが可能であると考えられる。

3.3 コンクリートの断熱温度上昇特性

図-4、図-5、図-6 に各単位セメント量における断熱温度上昇履歴を示す。本検討では、OPC の終局断熱温度上昇量はいずれの単位セメント量においても JCI 式 式(3)で算出される終局断熱温度上昇量に比べて低い値を示した。この原因については定かではないが、供試体の容量や容器の材質などが影響しているのではないかと考えられる。OPC と BB50% の終局断熱温度上昇量を比較した場合、いずれの単位セメント量においても BB50% の方が OPC に比べて大きくなった。これは、セメントのブレンの影響であると考えられる。BB50% は OPC に比べてブレンが 1000cm²/g 程度大きいため、水和反応が活発になり終局断熱温度上昇量が大きくなったものと考えられる。また、本検討では単位セメント量が大きくなるほどその傾向は顕著であり、単位セメント量が 300kg/m³、400kg/m³ では終局断熱温度上昇量の差は 4.0℃ 程度であるが、単位セメント量が 500kg/m³ では 9.0℃ 程度であった。

図-7、図-8 に単位セメント量と試験結果から得られた特性値との関係を示す。終局断熱温度上昇量の計算値と本実験における測定値を比較した結果、OPC の終局断

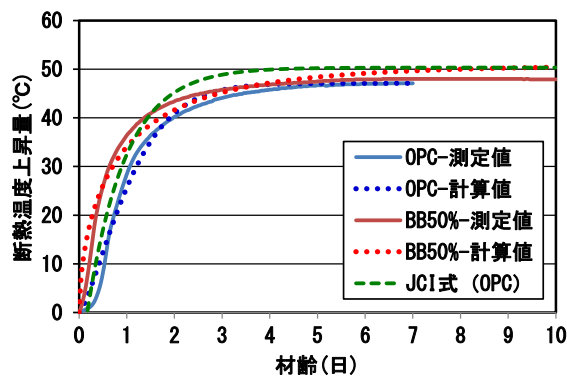


図-4 断熱温度上昇履歴 (単位セメント量-300kg/m³)

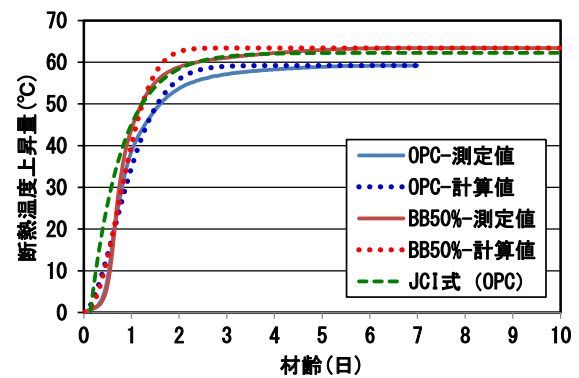


図-5 断熱温度上昇履歴 (単位セメント量-400kg/m³)

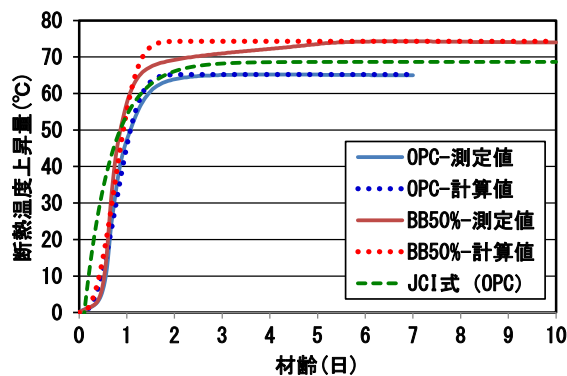


図-6 断熱温度上昇履歴 (単位セメント量-500kg/m³)

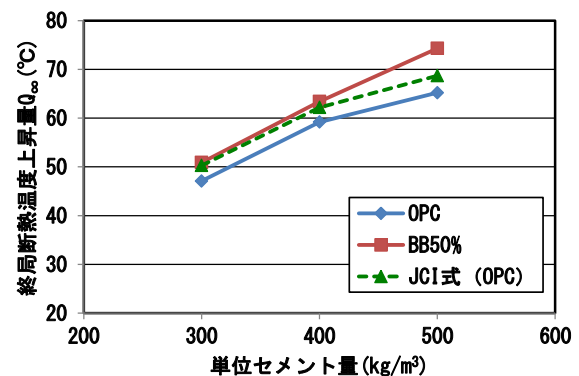


図-7 単位セメント量と終局断熱温度上昇量の関係

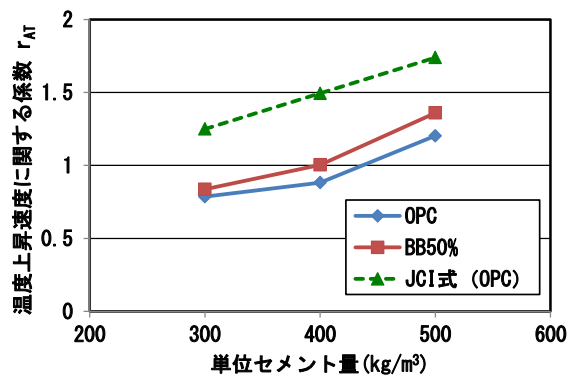


図-8 単位セメント量と温度上昇速度の定数の関係

熱温度上昇量は計算値に比べていずれの単位セメント量においても小さい結果となった。一方、BB50%の終局断熱温度上昇量は、単位セメント量が、300kg/m³、400kg/m³では、OPCの計算値と同程度であるものの、単位セメント量が500kg/m³では計算値に比べて高い結果を示した。温度上昇速度の定数は、単位セメント量が多くなるほどOPCに比べてBB50%の方が大きくなったが、JCI式(3)を用いて算出されたOPCの計算値に比べると小さい値を示した。これは、計算に用いた測定値の影響と考えられる。本検討では材齢0日からの測定値を用いて定数の算出を行った。既往の文献より⁵⁾、コンクリー

トの温度上昇履歴は、水和発熱がほとんどない区間、断熱温度が急激に上昇する区間、最大断熱温度上昇が維持される区間の3区間に分類されることが報告されており、本検討においては水和発熱がほとんどない区間の測定値も計算に用いている。そのため、計算上、温度上昇の傾きがなだらかなるため温度上昇速度の定数が小さくなったものと推察される。

以上より、試製混合セメント(BB50%)を使用したコンクリートの断熱温度上昇特性は、単位セメント量が500kg/m³の場合注意が必要であるものの、単位セメント量が400kg/m³程度までであれば終局断熱温度上昇量はOPCと同程度として取り扱えるものと考えられる。

図-9に試製混合セメントの各BB混合率における断熱温度上昇履歴を示す。試製混合セメントは、BBの混合率が高くなるに従って終局断熱温度上昇量は小さくなることが確認された。試製混合セメントは、HPCとBBの混合セメントであり、一般的に終局断熱温度上昇量はHPCの方がBBに比べて高い。そのため、終局断熱温度上昇量が高いHPCの割合が高いほど終局断熱温度上昇量も高くなっていると推察される。

図-10、図-11に試製混合セメントのBB混合率と試験結果から得られた各特性値の関係を示す。試製混合セメントの終局断熱温度上昇量はBBの混合率と相関関係

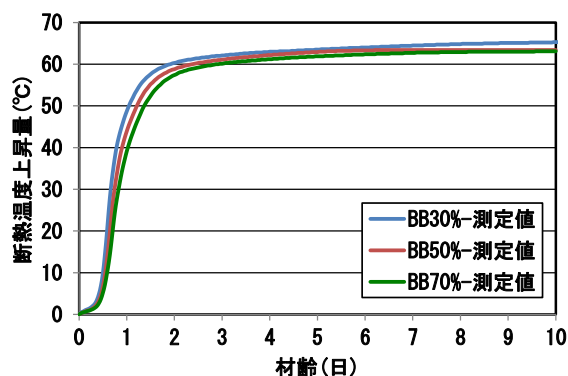


図-9 各 BB 混合率における断熱温度上昇履歴

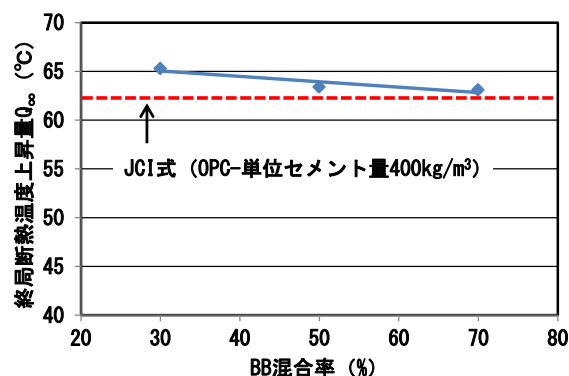


図-10 BB 混合率と終局断熱温度上昇量の関係

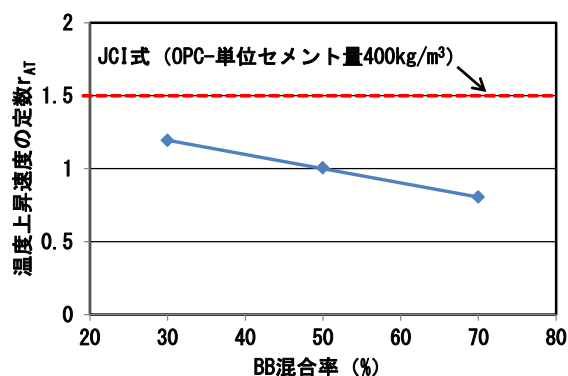


図-11 BB 混合率と温度上昇速度の定数の関係

が確認された。JCI 式 式(3)で算出される OPC の終局断熱温度上昇量と、試製混合セメントの BB 混合率と終局断熱温度上昇量の関係を結ぶ直線を比較した場合、試製混合セメントは BB の混合率が 50%以上で終局断熱温度上昇量が OPC と概ね同程度となった。ただし、BB の混合率が 50%の場合、終局断熱温度上昇量は OPC に比べて約 2°C高いため、この差が温度ひび割れに悪影響を及ぼさないかは今後、温度応力解析による検証が必要と考えられる。一方、温度上昇速度の定数は、終局断熱温度上昇量と同様に BB の混合率と相関関係があり、BB の混合率が高いほど小さくなる傾向を示した。また、本検討では、試製混合セメントの温度上昇速度の定数は BB の混合率に関わらず JCI 式 式(3)で算出された OPC の値に比べて小さい結果となった。

4. まとめ

本検討では、試製混合セメントの発熱特性が OPC と同程度となるのか検討を行った。その結果、試製混合セメ

ントは、材齢 28 日の圧縮強度が OPC と同程度となる配合において OPC と同様に圧縮強度からヤング係数の推定が可能である。一方、断熱温度上昇特性は単位セメント量が大きい配合では注意が必要であるものの単位セメント量が 400kg/m³程度までであれば OPC と同程度として扱えるものと考えられる。また、試製混合セメントの最適な BB 混合率は温度上昇特性の観点からは、終局断熱温度上昇量が OPC と同程度となる BB の混合率が 50%以上と推察される。ただし、詳細には今後温度応力解析による検証が必要である。

参考文献

- 1) 吉本慎吾, 新見龍男, 加藤弘義, 本居貴利: 早強ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を混合した 1DAY PAVE の検討, セメント・コンクリート論文集, Vol.71, pp.308-314, 2017
- 2) 吉本慎吾, 新見龍男, 加藤弘義, 関卓哉: 早強ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を混合した試製混合セメントの強度性状, セメント・コンクリート論文集, Vol.73, pp.208-213, 2019
- 3) 吉本慎吾, 新見龍男, 加藤弘義, 関卓哉: 早強ポルトランドセメントと高炉セメント B 種を混合した試製混合セメントの耐久性, 第 74 回セメント技術大会講演要旨, pp.2-3, 2020
- 4) 公益社団法人日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, pp.43-48, 2016
- 5) 具岡諒, 金圭庸, 宮内博之, 金武漢: セメント量及び打設温度によるコンクリートの断熱温度上昇特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.1279-1284, 2013