

論文 低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたコンクリートの特性

宮澤 伸吾^{*1}・大澤 友宏^{*2}・廣島 明男^{*3}・鯉淵 清^{*3}

要旨：高炉セメント B 種のひび割れ抵抗性の向上を目的とし、高炉スラグの比表面積、置換率、SO₃量を変化させて試作した高炉セメントの諸特性を検討した。コンクリートの断熱温度上昇量、圧縮強度、自己収縮、乾燥収縮、凍結融解抵抗性等について市販の各種セメントと比較検討した。試作高炉セメントは従来の高炉セメントと比較して、同一圧縮強度での断熱温度上昇量、自己収縮、乾燥収縮を低減できることが明らかとなった。

キーワード：高炉セメント、断熱温度上昇量、自己収縮、乾燥収縮、凍結融解抵抗性

1. はじめに

高炉セメントはコンクリートの温度ひび割れの低減、化学的抵抗性の向上、アルカリ骨材反応の抑制等を目的として多くの構造物に使用されている。また高炉セメントはグリーン調達品に指定されており地球環境の観点からその利用の拡大が期待されている。しかし、高炉セメントをマスコンクリートに用いた場合に、かならずしも温度ひび割れの制御効果が十分得られない場合があることが報告されている。

一般に、高炉セメント中の高炉スラグの比表面積が高いほど初期材齢での強度特性は向上するが、収縮低減の観点からは高炉スラグの比表面積は低いほうが望ましい^{1),2)}。また高炉セメント中の SO₃量が過大であると異常膨張や強度低下等の悪影響を生じる場合があるが、SO₃量を適切な範囲で大きくすることにより収縮および水和熱の低減が期待される^{3)~6)}。これらの知見に基づいて著者らは、高炉セメント B 種の比表面積と組成を JIS 規格範囲内で変えることにより、自己収縮および断熱温度上昇特性を大幅に改善できることを報告した⁷⁾。

そこで本研究では、比表面積を 3000cm²/g 程度、SO₃量を 4%程度とし、高炉スラグ置換率

を 40%および 60%とした 2 種類の高炉セメントを試作した。これらの試作セメントを用いたコンクリートについて、水セメント比が圧縮強度に及ぼす影響、断熱温度上昇量、自己収縮、乾燥収縮、凍結融解抵抗性について実験により検討し、市販の高炉セメント B 種、中庸熱セメント、低熱セメントと比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料およびコンクリートの配合

高炉スラグは表-1に示すような高炉スラグ粗粉 (BF1500) (密度 2.98g/cm³, 比表面積 1530cm²/g) および高炉スラグ微粉末 (BF3900) (密度 2.92g/cm³, 比表面積 3870cm²/g) を 4:6 の割合で混合して使用した。これを市販の普通ポルトランドセメント (N) (密度 3.16g/cm³, 比表面積 3420cm²/g, 化学成分は表-2 参照) に混合し、置換率 40%のものを試作 BB40、置換率 60%のものを試作 BB60 と略記する。試作 BB40 および試作 BB60 の比表面積の計算値はそれぞれ 3220cm²/g および 3130cm²/g であり、従来の高炉セメントより低い。また、高炉セメント中の SO₃量が 4.0%になるように天然無水せっこう添加した。なお、いずれの試作品も高

*1 足利工業大学 工学部都市環境工学科教授 工博 (正会員)

*2 足利工業大学 大学院工学研究科

*3 (株) デイ・シイ セメント事業本部

表-1 高炉スラグ粗粉および高炉スラグ微粉末の化学成分 (%)

	ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	塩基度
BF1500	0.09	33.66	15.41	0.55	41.44	6.59	0.14	0.23	99.17	0.29
BF3900	0.57	33.29	15.07	1.18	41.39	5.85	0.16	0.24	99.37	1.87

表-2 セメントの化学成分 (%)

	ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	total
N	1.29	21.00	5.41	3.06	63.82	2.27	2.11	0.35	0.31	100.43
M	0.65	22.92	3.77	4.23	63.99	1.10	2.35	0.23	0.29	99.99
L	1.16	25.83	2.97	2.87	64.29	0.93	2.42	0.34	0.22	100.26
BB	1.02	24.68	8.62	2.36	56.83	3.52	1.67	0.33	0.31	99.17

表-3 コンクリートの配合

セメントの種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)							Ad (C×%)
			W	C	BF1500	BF3900	CaSO ₄	S	G	
L	40	43.6	170	425	—	—	—	743	958	0.20
	50	42.9	170	340	—	—	—	761	1009	0.20
M	40	41.6	170	425	—	—	—	709	991	0.40
	50	42.9	170	340	—	—	—	761	1009	0.25
BB	40	42.9	170	425	—	—	—	724	960	0.25
	50	42.9	170	340	—	—	—	755	1001	0.25
試作 BB40	35	39.9	170	268	78	117	23.6	652	978	0.50
	40	42.9	170	234	68	102	20.6	723	959	0.25
	50	42.9	170	187	54	82	16.5	755	1001	0.25
試作 BB60	35	39.9	170	167	117	175	27.1	649	975	0.50
	40	42.9	170	146	102	153	23.7	721	956	0.25
	50	42.9	170	117	82	122	19.0	753	998	0.25

炉セメント B 種の JIS 規格の範囲内である。

比較用セメントとしては、表-2 に示すような市販の高炉セメント B 種 (BB) (密度 3.07g/cm³, 比表面積 3920 cm²/g, 高炉スラグの分量 40%), 低熱ポルトランドセメント (L), 中庸熱ポルトランドセメント (M) を用いた。細骨材には鬼怒川産川砂 (密度 2.63 g/cm³, 粗粒率 2.57), 粗骨材には葛生町産硬質砂岩砕石 (最大寸法 20mm), 混和剤には AE 減水剤 (リグニンスルホン化合物とポリオール複合体) を使用した。

2.2 実験方法

表-3 にコンクリートの配合を示す。単位水量はいずれも 170kg/m³ とした。コンクリートの断熱温度上昇試験は、練上がり温度 20℃とし、

空気循環式の断熱温度上昇試験機 (コンクリート容量 4.75l) を用いて行った。本実験ではコンクリート容量が通常と比べて少量であるが、各種市販セメントの既存データと比べると、セメントの種類相対比較において同様の傾向が得られている。自己収縮試験は JCI 自己収縮研究委員会の方法で行った。コンクリートの自己収縮試験においては、凝結の始発から自己収縮ひずみの測定を開始した。凍結融解試験は、材齢 28 日まで水中養生を行った後、JIS A 1148 に従って行った。乾燥収縮試験は JIS A 1129-2 に従い、材齢 7 日まで水中養生し、その後 20℃, 60%RH の室内に静置し乾燥収縮ひずみの測定を行った。

3. 結果および考察

3.1 高炉スラグの比表面積、置換率および SO₃ 量の影響

図-1 および図-2 は、高炉セメント中の高炉スラグの比表面積、置換率および SO₃ 量を高炉セメント B 種の JIS 規格範囲内で変化させて 7 種類の高炉セメントを試作し、コンクリートの自己収縮および断熱温度上昇量を測定した結果を示している⁷⁾。比表面積の低い高炉スラグを高置換率で混入し、SO₃ 量を増やすことにより自己収縮特性および断熱温度上昇特性が改善されることが認められた⁷⁾。

そこで本研究では、高炉セメント B 種の比表面積を JIS 下限値の 3000cm²/g 程度、SO₃ 量を JIS 上限値の 4% 程度とし、置換率 40% および 60% に設定した試作 BB40 および試作 BB60 を選定し、以下の検討対象とした。

3.2 フレッシュコンクリートの性状

表-4 はフレッシュコンクリートの試験結果を示したものである。混和剤の添加率が等しい W/C=40% および 50% の場合について、市販 BB

と比較すると、試作高炉セメントのスランブは試作 BB40 は同等、試作 BB60 は若干大きくなった。試作高炉セメントの凝結始発時間は、W/C=35% の場合に凝結が大幅に遅れたのは混和剤の過剰添加の影響と考えられるが、W/C=40% および 50% についての結果から、試作

表-4 フレッシュコンクリートの性状

種類	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	始発 (hour)
L	40	10.2	4.5	15.0	8.47
	50	10.5	5.0	15.0	9.18
M	40	5.1	5.2	20.0	7.58
	50	7.5	4.5	19.0	7.30
BB	40	6.0	5.1	13.0	7.58
	50	9.7	5.2	19.0	9.50
試作 BB40	35	5.6	5.7	12.0	16.72
	40	7.1	5.4	11.0	9.83
	50	8.8	5.1	12.0	9.05
試作 BB60	35	9.4	5.1	15.0	23.65
	40	9.5	5.4	10.0	10.92
	50	11.9	5.3	14.0	10.75

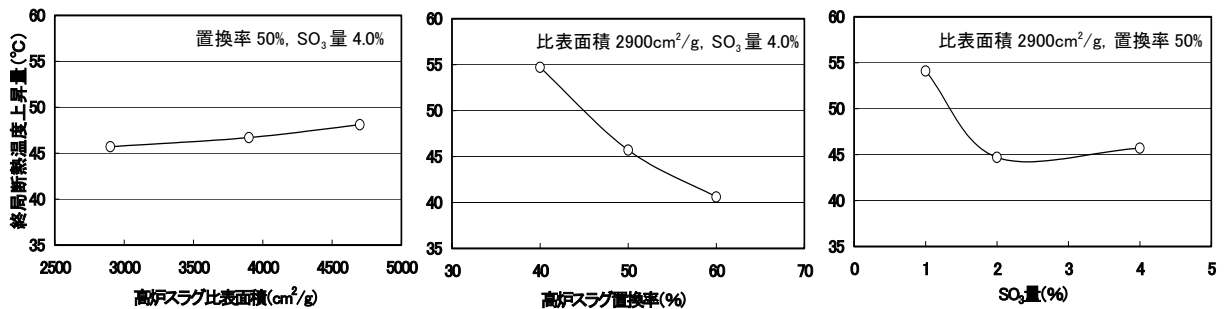


図-1 高炉スラグの比表面積、置換率、SO₃ 量が断熱温度上昇に及ぼす影響

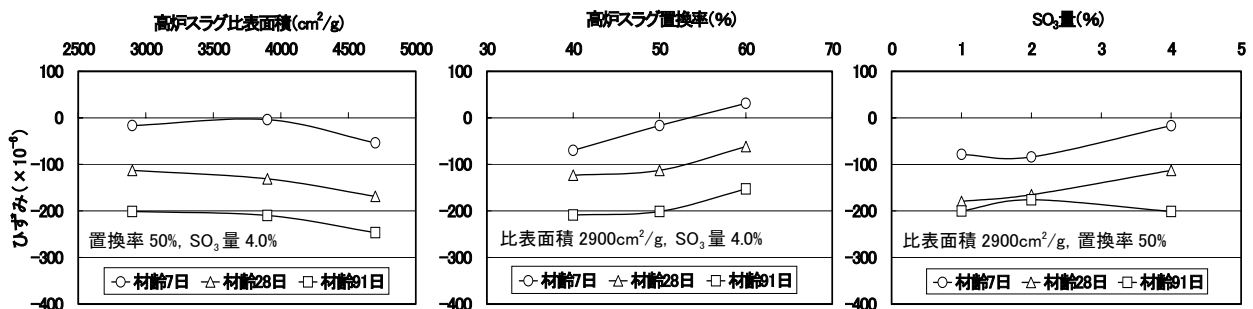


図-2 高炉スラグの比表面積、置換率、SO₃ 量が自己収縮に及ぼす影響

高炉セメントは市販高炉セメントと比べると凝結が若干遅くなると考えられる。

3.3 圧縮強度

図-3はセメント水比と圧縮強度の関係を示したものである。同一セメント水比で比較すると、試作 BB60 の圧縮強度はいずれの材齢においても市販 BB より小さくなる。一方、試作 BB40 は市販 BB と同等の圧縮強度となっている。

3.4 断熱温度上昇量

図-4は打ち込み温度が 20℃程度の場合におけるコンクリートの断熱温度上昇試験結果を示したものである。水セメント比 40%では、試作 BB40 および試作 BB60 の終局断熱温度上昇量は市販 BB と比べて、それぞれ約 12℃および約 20℃低く、試作 BB40 は中庸熱セメントと同程度、試作 BB60 は低熱セメントと同程度となっている。水セメント比 50%の場合は、試作 BB40 は中庸熱セメントと比べて温度上昇速度が低くなっている。また試作 BB は低熱セメントと比べると、終局断熱温度量は同程度であるが、上昇速度は高くなっている。

図-5は材齢 28 日の圧縮強度と終局断熱温度上昇量の関係を示したものである。試作 BB40 および試作 BB60 は、いずれも圧縮強度の増大とともに終局断熱温度上昇量が高くなっている。同一の圧縮強度で比較すると、試作 BB40 および試作 BB60 の断熱温度上昇量は市販 BB と比較して低くなることが認められる。

以上のことから、本研究で使用した試作高炉セメントは、従来の高炉セメントと比較して断熱温度上昇特性が優れているといえる。

3.5 自己収縮

図-6はコンクリートの自己収縮試験結果を示したものである。同図においては、コンクリートの熱膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として計測されたひずみから温度ひずみを差し引いて示している。水セメント比 40%および 50%のいずれの場合についても、試作 BB40 および試作 BB60 は市販 BB に比べて自己収縮が小さくなっている。

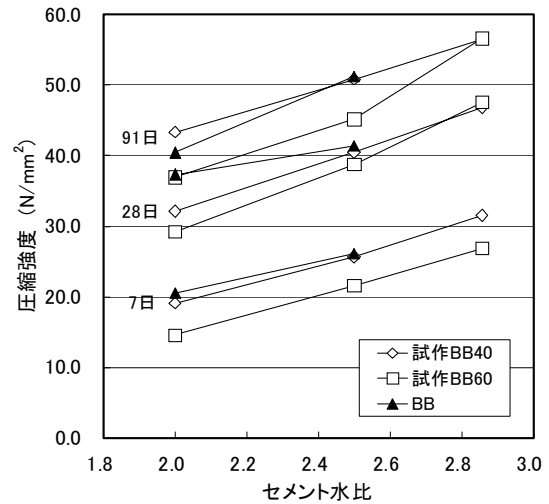


図-3 セメント水比と圧縮強度の関係

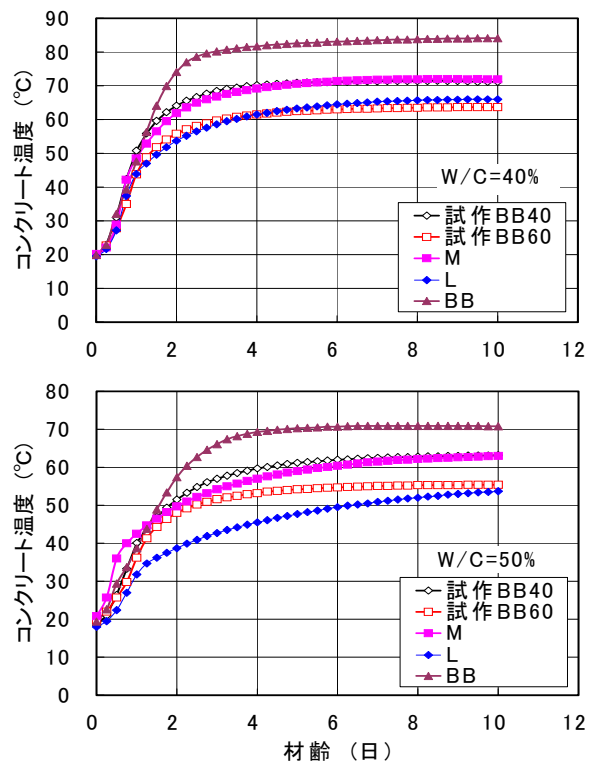


図-4 断熱温度上昇量試験結果

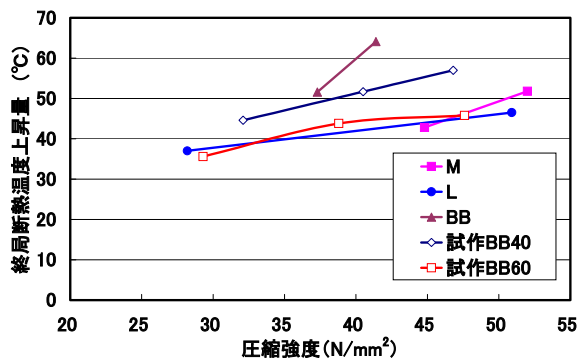


図-5 圧縮強度と終局断熱温度上昇量の関係

また、試作 BB40 および試作 BB60 では材齢 1～2 日までに膨張が認められ、特に試作 BB60 は膨張ひずみが大きくなった。しかし膨張終了後の収縮ひずみの増加程度は、いずれの試作 BB とも市販 BB とほぼ同等であった。実構造物ではコンクリートは拘束を受けるので、初期材齢の膨張ひずみが拘束応力に及ぼす影響については今後検討が必要である。

図-7 は圧縮強度と自己収縮の関係を示したものである。試作 BB40 および試作 BB60 は、いずれも圧縮強度の増大とともに自己収縮が大きくなる。同一の圧縮強度で比較すると、試作 BB40 および試作 BB60 の自己収縮ひずみは市販 BB と比較して小さく、特に試作 BB60 の収縮低減効果が著しい。

以上のことから、本研究で使用した試作高炉セメントは、従来の高炉セメントと比較して自己収縮特性が改善されていることが確認された。

3.4 で述べたように発熱特性も改善されているので、マスコンクリートに用いた場合にひび割れ抵抗性の向上が期待できる。今後、自己収縮の温度依存性や拘束応力の発生状況等について検討が必要である。

3.6 乾燥収縮

図-8 は水セメント比 50% の場合におけるコンクリートの乾燥収縮ひずみおよび質量変化を示したものである。試作 BB40 および試作 BB60 は市販 BB、中庸熱セメント、低熱セメントに比べて質量減少率および乾燥収縮ひずみが小さくなっている。3.5 で述べたように、試作高炉セメントは乾燥以前の自己収縮ひずみも低減されるので、コンクリートの収縮ひび割れの抑制に効果が期待できる。

3.7 凍結融解抵抗性

図-9 はコンクリートの凍結融解抵抗性試験結果を示したものである。水セメント比 40% および 50% のいずれの場合についても、試作 BB40 の相対動弾性係数の経時変化は市販 BB とほぼ同等である。試作 BB60 は水セメント比 40% の場合に、市販 BB に比べて相対動弾性係数が若

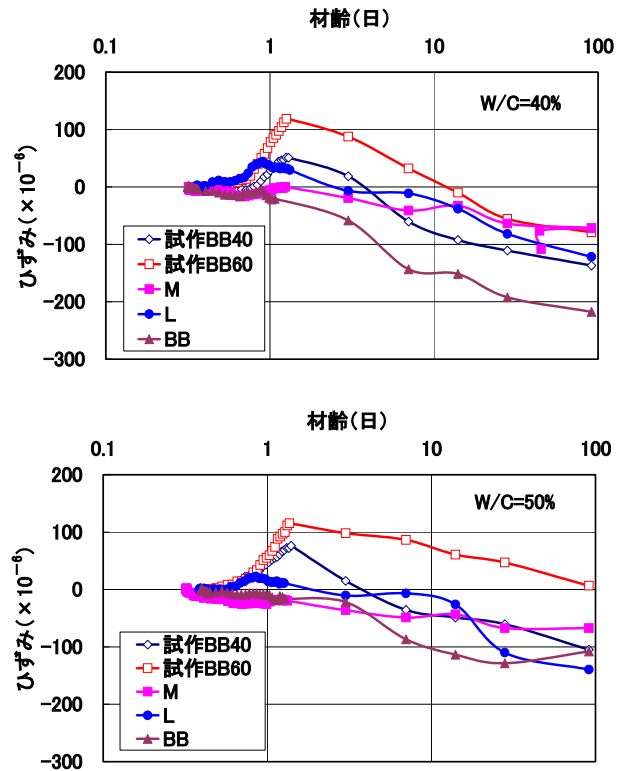


図-6 自己収縮試験結果

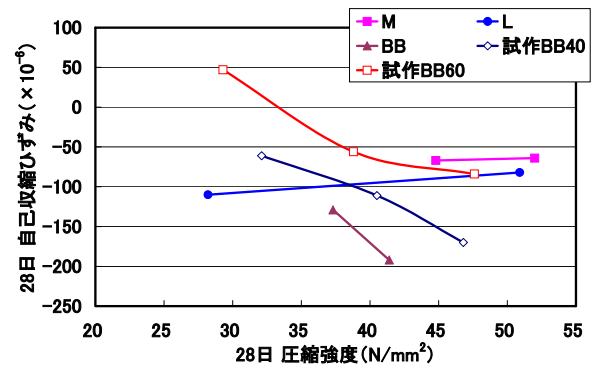


図-7 圧縮強度と自己収縮の関係

干小さくなっているが、300 サイクルで 60% 以上であり、通常の使用条件においては特に問題はないと言える。

4. 結論

本研究では、高炉セメント B 種のひび割れ抵抗性の向上を目的とし、高炉スラグの比表面積、置換率、SO₃ 量を変化させて試作した高炉セメントの諸特性を検討した。本研究の範囲内で明らかになった事項は以下のとおりである。

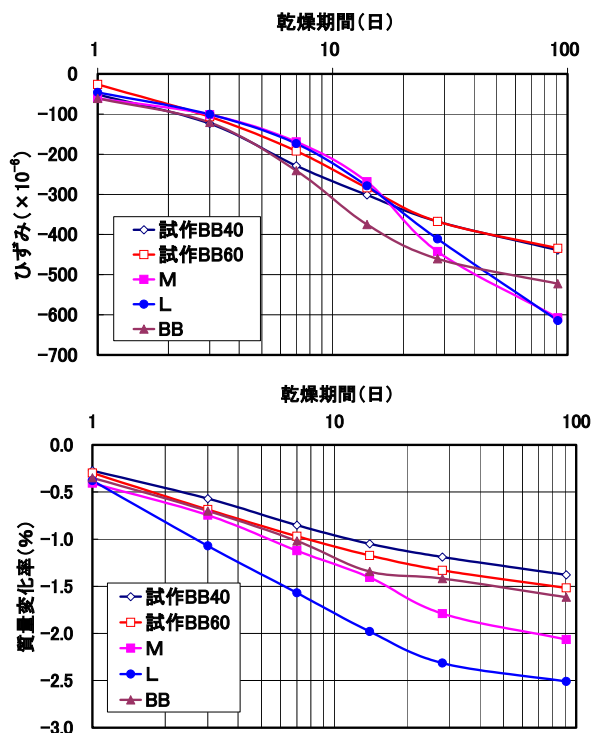


図-8 乾燥収縮試験結果

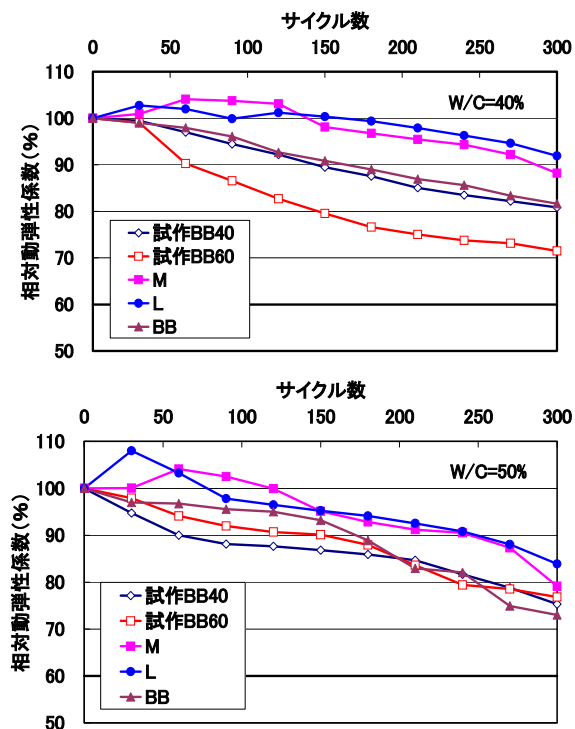


図-9 凍結融解抵抗性試験結果

- 1) 試作高炉セメントを用いたコンクリートは、従来の高炉セメントと比較して、同一圧縮強度での断熱温度上昇量、自己収縮、乾燥収縮を低減することができる。
- 2) 水セメント比 40%では、試作 BB40 の断熱温度上昇特性は中庸熟セメントと同等、試作 BB60 では低熟セメントと同等であった。
- 3) 試作高炉セメントの凍結融解抵抗性は、BB40 では市販 BB と同等であり、BB60 では若干低下する場合もあるが通常の使用条件であれば問題はない。
- 3) 寺野宣成ほか：収縮低減剤の使用および石膏量が自己収縮ひずみに及ぼす影響について、コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21, No.2, pp.727-732, 1999
- 4) 國府勝郎ほか：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの断熱温度上昇と水和性状に関する研究，土木学会論文集，第396号/V-9, pp.39-48, 1988
- 5) 石川陽一，鯉渕清，村上武衡：高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材への適用研究，(その2・水和熱と断熱温度上昇)，日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)，pp.1003-1004, 1991
- 6) 大友健，松岡康訓：3成分系セメントを使用した水中不分離性コンクリートの低発熱化手法に関する研究，コンクリート工学論文集，第3巻第2号，pp.49-61, 1992
- 7) 宮澤伸吾，大澤友宏，廣島明男，鯉渕清：高炉セメントの自己収縮および断熱温度上昇量に関する研究，セメント・コンクリート論文集，No.58, pp.154-159, 2005

参考文献

- 1) 田澤栄一，宮澤伸吾：セメント系材料の自己収縮に及ぼす結合材および配合の影響，土木学会論文集，No.502/V-24, pp.43-52, 1994
- 2) 原田克己，松下博通，後藤貴弘：水和熱を考慮した高炉セメントコンクリートの自己収縮ひずみ特性，コンクリート工学論文集，第14巻第1号，pp.23-33, 2003