

論文 各種セメントを用いたコンクリートの耐久性

横室 隆^{*1}・依田 彰彦^{*2}・廣島 明男^{*3}・神崎 隆男^{*3}

要旨：本研究は，従来の高炉スラグ微粉末よりも粗いスラグを用い，置換率，SO₃量を変化させて試作した高炉セメントを用いたコンクリートについて，市販の高炉セメント，低熱セメントおよび中庸熱セメントと比較検討した。その結果，試作した高炉セメントは高炉スラグの分量が多いほど，凝結は遅れ，断熱温度上昇量は中庸熱セメントと同程度となり，10程度低減できる。また，低熱セメントは市販の高炉セメントより15低減できる。初期の圧縮強度は若干低下するが，長期強度は中庸熱セメントを除く他のセメントコンクリートと同程度である。さらに，乾燥収縮率，塩分浸透深さは小さくなることなどを明らかにした。

キーワード：高炉セメント，断熱温度上昇量，圧縮強度，乾燥収縮，中性化，塩分浸透深さ

1. はじめに

近年，省資源・省エネルギーおよび地球環境保全などの観点から，多くの構造物に高炉セメントが用いられている。高炉セメントを使用する目的は，コンクリートの温度ひび割れの低減，アルカリ骨材反応の抑制および化学的抵抗性に対して効果があることなどが挙げられる。

しかし，高炉セメントをマスコンクリートに用いた場合，温度ひび割れの低減効果が十分に発揮されない場合がある。

一般に，高炉セメント中の高炉スラグの比表面積は大きいほど初期材齢における強度は増進するが，収縮の観点からみると高炉スラグの比表面積が小さいものほど収縮が低減される¹⁾。

また，高炉セメントのSO₃量が過大であると強度低下などの悪影響を生じることがある。しかし，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^{2),3),4),5)}。

本研究は，これらの知見に基づき高炉セメントのJIS規定の範囲内で，比表面積が約3,000cm²/gの高炉スラグを用い，高炉スラグの分量とSO₃量を調整した2種類の試作した高炉セメントを用いたコンクリートについて，ブリーディング量をはじめ，凝結，断熱温度上昇量，圧縮強度，乾燥収縮，中性化，塩分浸透深さおよび凍結融解作用に対する抵抗性について実験し，市販の高炉セメントB種，低熱ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントと比較検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

試作した高炉セメントは，表-1に示す石膏が含まれていない，高炉スラグ微粉末(BF)(密度2.94g/cm³，比表面積3,030cm²/g)に市販の普通ポルトランドセメント(N)(密度3.16g/cm³，

表-1 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	S	Na ₂ O	K ₂ O
BF	0.02	33.43	15.20	0.93	41.41	6.15	0.85	0.24	0.10

*1 足利工業大学 工学部建築学科教授 博士 (工学) (正会員)

*2 足利工業大学 工学部建築学科教授 工博 (正会員)

*3 (株) デイ・シイ セメント事業本部 (正会員)

表 - 2 市販セメントの化学成分 (%)

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

表 - 3 各種セメントを用いたコンクリートの調合と得られた結果

セメント種類	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				スランブ (cm)	空気量 (%)	ワーカビリティ
			水	セメント	細骨材	粗骨材			
BB	52	46.3	168	323	822	966	20.0	3.6	良
BB40	50	46.0	166	332	814	966	20.5	3.6	良
BB60	42	42.0	170	405	711	993	20.5	3.5	良
L	45	44.0	169	376	768	989	20.0	3.8	良
M	51	42.0	170	333	747	1042	20.5	3.7	良

[注]化学混和剤量は、セメント量×1.0%添加した。

比表面積 3,320cm²/g)と天然無水石膏(密度 2.90g/cm³,比表面積 4,800cm²/g)を SO₃ 量が 4% となるように混合し,高炉スラグの分量 40%のものBB40(密度 3.04g/cm³,比表面積 3,220cm²/g),高炉スラグの分量 60%のもの BB60(密度 2.98g/cm³,比表面積 3,130cm²/g)の 2 種類とした。

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 3.04g/cm³,比表面積 3,920cm²/g,高炉スラグの分量 40%),低熱ポルトランドセメント(L) (密度 3.22g/cm³,比表面積 3,400cm²/g),中庸熱ポルトランドセメント(M) (密度 3.21g/cm³,比表面積 3,140cm²/g)を用いた。細骨材は,葛生産砕砂(70%)と陸砂(30%)の混合砂(絶乾密度 2.56g/cm³,粗粒率 2.73),粗骨材は葛生産砕石 2005(絶乾密度 2.63g/cm³,最大寸法 20mm)を用いた。水は上水道水,化学混和剤は主成分がリグニンスルホン酸化合物とオキシカルボン酸の複合体の AE 減水剤標準形を用いた。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの目標強度は,材齢 91 日圧縮強度 27N/mm² が得られるものとし,試し練りによって調合を定めた。そのコンクリートの水セメント比は,セメント BB は 52%,BB40 は 50%,BB60 は 42% L は 45% および M は 51% とした。

また,スランブは 18±2.5cm,空気量は 4±1% を目標とした。これら実際に得られたコンクリートの調合を表 - 3 に示す。

3. 実験項目と方法

実験の項目と方法を以下に述べる。

3.1 フレッシュコンクリートの性状

(1) スランブ

JIS A 1101 によった。

(2) 空気量

JIS A 1125 によった。

(3) ワーカビリティ

ワーカビリティは,スランブ試験時にスランブしたコンクリートの形状やタッピングした

ときのくずれ方などを目視によって観察した。

(4) プリーディング量

JIS A 1123 によった。

(5) 凝結

ASTM C 403 (Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, Standard Method of Test for) によった。

(6) 断熱温度上昇量

コンクリートの断熱温度上昇量試験は、鋼製型枠 (80 × 80 × 80cm) を用い、厚さ 10cm の発泡スチロールで内側全面を断熱し、その中心に銅 - コンスタントンの熱電対を埋め込み、8 日間の断熱温度上昇量を測定した。

3.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

JIS A 1108 によった。供試体は、10 × 20cm の供試体を用い、20 水中養生した。

なお、測定は材齢 7 日、28 日、91 日および 365 日とした。

(2) 乾燥収縮率

JIS A 1129-1 のコンパレータ法により、乾燥期間 52 週までの長さを測定した。

なお、基長は材齢 7 日とし、乾燥収縮率を求めた。

(3) 中性化

コンクリートの促進中性化試験方法によって測定した。すなわち、10 × 10 × 40cm の供試体を用い、打込みの翌々日に脱型し、材齢 28 日まで 20 水中養生した。その後、温度 20、湿度 60% R.H. の恒温恒湿室にて材齢 8 週まで静置した。中性化の促進試験は、材齢 8 週より開始し、環境条件は温度 20、湿度 60% R.H.、CO₂ 濃度 10% とした。なお、供試体の打込み面、底面および両端面をエポキシ樹脂によりシールした。中性化深さの測定方法は、供試体の長さ方向と直角に供試体を端部から 60mm の位置で切断し、両側面計 10ヶ所にフェノールフタレインアルコール溶液を噴霧し、赤紫色にならなかった部分を中性化したものとみなし、その深さをノギスを用いて測定し、平均中性化深さを求めた。中性

化促進期間は 4 週、13 週および 52 週とした。

(4) 塩分浸透深さ

フレッシュコンクリートを 5mm ふるいでウェットスクリーニングしたモルタルを、40 × 40 × 160mm の型枠を用い供試体を作製した。型枠の脱型は翌々日におこない、供試体は材齢 28 日まで 20 水中養生した。その後、海水に 48 時間浸せきし、次に温度 60 乾燥期間 48 時間をくり返した。これを 1 サイクルとし、7 サイクルまで実施した。

塩分浸透深さは、この供試体を用い中心から切断し、その断面にフルオロセインナトリウム溶液と硝酸銀溶液を噴霧し、白色に変色した部分の深さの両側面、計 8ヶ所をノギスを用いて測定し、その平均浸透深さを求めた。

(5) 凍結融解作用に対する抵抗性

ASTM C 666 A 法 (Resistance of concrete rapid freezing and thawing) により 300 サイクルまでの相対動弾性係数を測定した。

4. 実験結果と考察

(1) ワーカビリティ

各種セメントを用いたコンクリートのスランプおよび空気量は、目標とした値が得られ、ワーカビリティは良好であった (表 - 3)。

(2) プリーディング量

各種セメントを用いたコンクリートの最終プリーディング量を図 - 1 に示す。

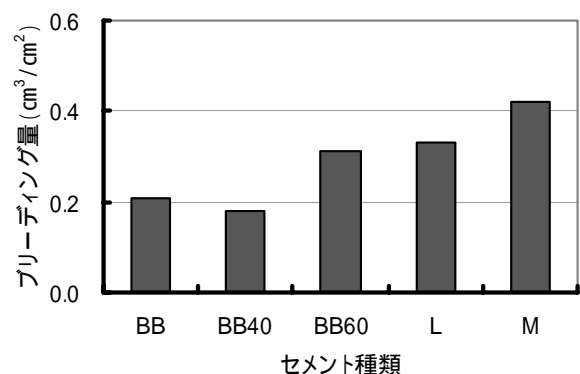


図 - 1 各種セメントコンクリートのプリーディング量

これをみると、市販のセメント BB のブリーディング量は $0.21\text{cm}^3/\text{cm}^2$ である。これに対して、BB40 は $0.18\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 、BB60 は $0.31\text{cm}^3/\text{cm}^2$ である。

また、L および M のブリーディング量は若干多くなっているが、いずれのコンクリートとも JASS 5 の目標値 $0.50\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下となっている。

(3) 凝結

各種セメントを用いたコンクリートの凝結時間の結果を図 - 2 に示す。この図から市販のセメント BB の始発時間は 625 分、終結時間は 820 分となっている。これに対して BB40 は始発時間で 25 分、終結時間で 50 分、BB60 は始発時間で 45 分、終結時間で 80 分といずれも遅くなっている。これは高炉スラグの分量が多いほど、また比表面積が粗くなっているため始発・終結とも遅れたものと考えられる。

同様に M は始発時間で 30 分、終結時間で 65 分、L は最も遅く始発時間で 75 分、終結時間で 150 分と遅くなっている。

(4) 断熱温度上昇量

コンクリートの断熱温度上昇量を図 - 3 に示す。図から市販のセメント BB の終局温度は 56.3 、BB40 は同 50.7 、BB60 は同 46.3 、M は同 46.6 、L は同 41.1 となっている。

従って、セメント BB に対して、終局温度は BB40 では約 6 、BB60 および M は 10 で同程度、L は 15.2 と低くなる。

(5) 圧縮強度

各種セメントを用いたコンクリートの圧縮強度を図 - 4 に示す。初期の材齢 7 日でみると、市販のセメント BB の圧縮強度は $20.6\text{N}/\text{mm}^2$ に対して BB40 は $19.3\text{N}/\text{mm}^2$ 、BB60 は $18.2\text{N}/\text{mm}^2$ となっている。これは、高炉スラグの分量が多くなっているため、初期強度が低くなったものと考えられる。

しかし、材齢 28 日でみると BB は $30.1\text{N}/\text{mm}^2$ に対して試作した BB40 は $32.6\text{N}/\text{mm}^2$ 、BB60 は $33.1\text{N}/\text{mm}^2$ と逆に高くなり、同程度の強度が得られている。このことは、BB60 のものは他のセ

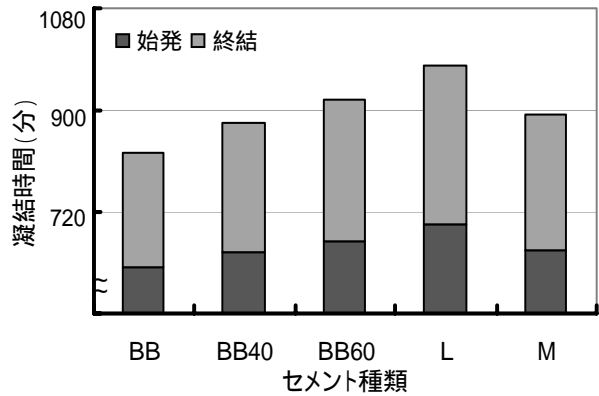


図 - 2 各種セメントコンクリートの凝結

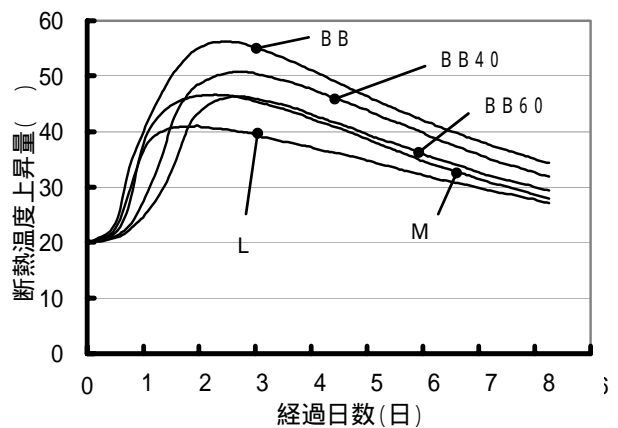


図 - 3 各種セメントコンクリートの断熱温度上昇量

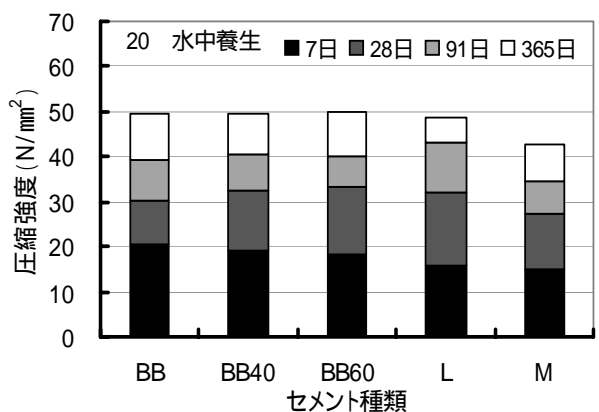


図 - 4 各種セメントコンクリートの圧縮強度

メントコンクリートに比して、水セメント比が小さいためと考える。

また、目標とした強度材齢 91 日で $27\text{N}/\text{mm}^2$ は、いずれのセメントコンクリートとも、材齢 28 日で目標強度が得られている。さらに、材齢

91 日および 365 日の長期材齢でみると、セメント M を除く他のセメントコンクリートは同程度の強度が得られている。

(6) 乾燥収縮率

各種セメントを用いたコンクリートの乾燥収縮率を図 - 5 に示す。

初期の乾燥期間 1 週でみると市販のセメント BB の乾燥収縮率は 2.3×10^{-4} に対し、BB40 は 2.0×10^{-4} 、BB60 は 1.7×10^{-4} となっている。これは従来の高炉セメントよりも、BB40 および BB60 のものは、比表面積を粗くしたため乾燥収縮率が小さくなったものと考えられる。また、このことはこれまでに報告¹⁾されている結果と同様の傾向を示している。さらに、乾燥期間 4 週でみるといずれのセメントコンクリートでも同程度の収縮率を示すが、乾燥期間の 13 週および 52 週の長期材齢になるに従って BB40 および BB60 のものは収縮率が低減されている。これは、BB40 および BB60 のものは自己収縮率が小さいとの報告¹⁾もあり、自己収縮率と乾燥収縮率があいまって収縮が小さくなったものと考えられる。

(7) 中性化

各種セメントを用いたコンクリートの中性化深さを図 - 6 に示す。促進期間 4 週をみると市販のセメント BB の中性化深さ 3.9mm、BB40 では 5.0mm、BB60 では 8.2mm となっている。

しかし、促進期間 52 週でみると BB40 で 18.5mm、BB60 で 19.3mm となっている。これを市販のセメント BB と比較すると 19.0mm で、試作した BB40 および BB60 の中性化深さは同程度ないしは若干小さい値となっている。

(8) 塩分浸透深さ

各種セメントを用いたコンクリートの塩分浸透深さを図 - 7 に示す。

図に示した海水と乾燥を繰り返した 7 サイクルまでの塩分浸透深さについてみると、セメント BB は 6.3mm、BB40 は 5.9mm、BB60 は 4.7mm となっている。

従って、高炉スラグの分量が増すほど塩分浸透深さは小さくなる。

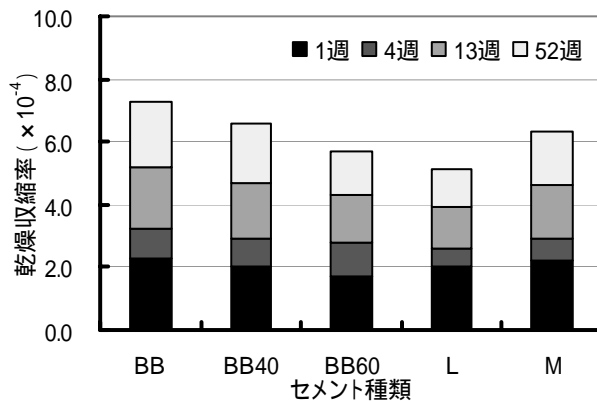


図 - 5 各種セメントコンクリートの乾燥収縮率

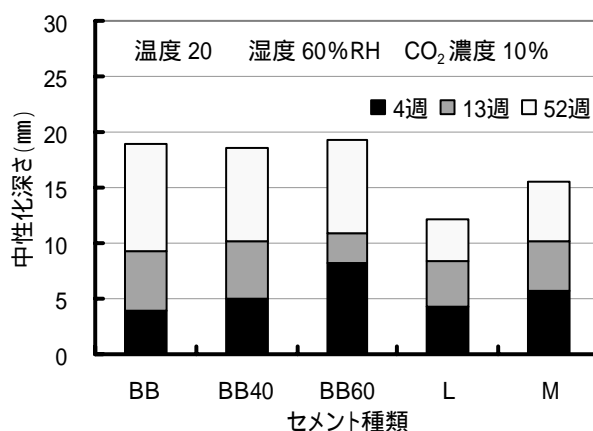


図 - 6 各種セメントコンクリートの中性化深さ

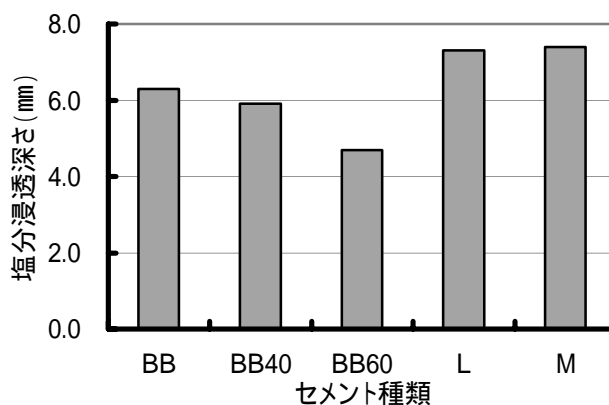


図 - 7 各種セメントコンクリートの塩分浸透深さ

このことは、これまでに報告⁶⁾した通り、高炉スラグの分量が多いセメントほど、ポルトランド量が減少し、表層でフリーデル氏塩として塩化物イオンが固定され、塩化物イオンの浸透が抑制されたものと考えられる。

(9) 凍結融解作用に対する抵抗性

各種セメントを用いたコンクリートの 300 サイクルまでの相対動弾性係数の結果を図 - 8 に示す。これを見ると相対動弾性係数は 95 ~ 98% の範囲にあり、いずれのセメントコンクリートとも日本建築学会の JASS 5 で目標値としている 80% を上廻っている。

5. まとめ

従来の高炉スラグ微粉末よりも粗い高炉スラグ微粉末 (約 $3,000\text{cm}^2/\text{g}$) を用い、高炉スラグの分量 (40% と 60%) と SO_3 量 (4%) を調整し、試作した高炉セメントを用いた材齢 91 日強度が同程度のコンクリートについて、市販の高炉セメント B 種、中庸熱ポルトランドセメントおよび低熱ポルトランドセメントと比較検討した結果、次のことが明らかとなった。

(1) ブリーディング量は同程度である。

(2) 凝結は、高炉スラグの分量が多いものほど始発・終結とも遅れる。また、低熱ポルトランドセメントの始発・終結は最も遅れる。

(3) 断熱温度上昇量は、高炉セメント B 種と比べて低減でき、高炉スラグの分量 40% で約 6、高炉スラグの分量 60% と中庸熱ポルトランドセメントは約 10 できる。また、低熱ポルトランドセメントは約 15 低減できる。

(4) 圧縮強度は、高炉スラグの分量が多いものほど、初期強度は若干低下するが、長期強度は中庸熱ポルトランドセメントを除く他のセメントコンクリートと同程度となる。

(5) 乾燥収縮率は、高炉スラグの分量が多いものほど、初期および長期とも低減される。

(6) 中性化深さは、高炉スラグの分量が多いほど初期では大きいですが、長期では同程度となる。

(7) 塩分浸透深さは、高炉セメント B 種と同程度かそれ以下となる。

(8) 凍結融解作用に対する抵抗性は、いずれのセメントコンクリートとも同程度である。

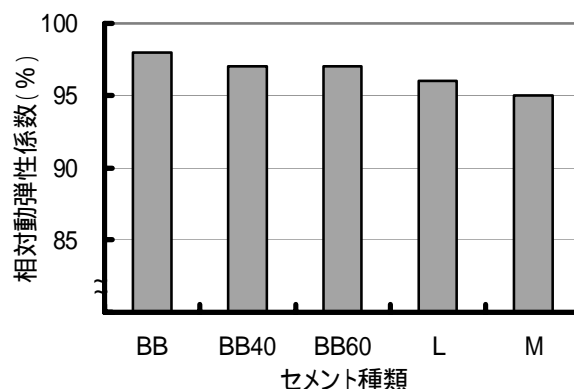


図 - 8 各種セメントコンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性

参考文献

- 1) 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, Vol.14, No.1, pp.23-33, 2003.7
- 2) 宮澤伸吾, 大澤友宏, 廣島明男, 鯉淵 清: 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, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.27, No.1, pp.487-492, 2005.6
- 3) 寺田宣成ほか: 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, 1999.6
- 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, Vol.9, No.396, pp.39-48, 1988.8
- 5) 石川洋一, 鯉淵 清, 村上武衛: 高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和剤への適用研究(その2・水和熱と断熱温度上昇), 日本建築学会大会学術梗概集(東北), pp.1003-1004, 1991.9
- 6) 依田彰彦, 高田 誠: 20 年間海水の作用を受けた高炉セメントコンクリートの耐久性に関する実験研究, セメント・コンクリート論文集, No.45, pp.502-507, 1991.12