

論文 早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末から調製した高炉セメントの物性とエコロジカル評価

前田 拓海^{*1}・寺内 貴史^{*2}・飯田 達郎^{*3}・盛岡 実^{*4}

要旨: 早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末から調製した高炉セメントを提案し、このセメントのモルタル物性とエコロジカル評価を行った。早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を 40mass% 置換混合した高炉セメントは、普通ポルトランドセメントと同等の凝結性状と強度発現性を示した。また、エコロジカル評価の結果より、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末から調製した高炉セメントは、初期の強度発現性と環境性能を両立したセメントであることがわかった。

キーワード: 早強ポルトランドセメント, 高炉スラグ微粉末, 凝結時間, 圧縮強さ, エコロジカル評価

1. はじめに

セメント産業に対して、環境負荷低減の観点から大きな期待が寄せられている。環境負荷の小さいセメントとして混合セメントがあり、その代表として、高炉セメントが挙げられる。しかしながら、高炉セメントは普通ポルトランドセメントと比べると凝結時間が長いことや、初期の強度発現性が乏しいため、改善が望まれている。特に、気温の低い冬場には、凝結の遅延や養生期間を余計に確保しないといけないなど、実用上の課題がある。例えば、「コンクリート標準示方書」では、使用するセメントの種類によって、養生期間の標準日数を提示している¹⁾。これを見ると、日平均気温が 10℃以上の場合でも、高炉セメントは普通ポルトランドセメントの養生日数に 2 日を加算しなければならず、日平均気温が 5℃以上で 10℃未満の場合には、3 日を加算しなければならない。

このように、同一の設計強度で配合設計されたコンクリートでも、混合セメントを用いた場合には初期強度発現性は乏しい。そこで、本研究では、凝結性状と初期強度発現性を混合セメントの根本的課題と捉えて議論する。

一方、環境負荷低減の観点から、セメント製造時のエコロジカル評価も行われている^{2),3)}。環境負荷の低減には、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混合材を混合した混合セメントが有効である。これら混合材の置

換率を高めることが環境負荷の更なる低減に繋がる。しかしながら、混合セメントは単に環境負荷を低減するだけでなく、要求性能を維持しつつ環境負荷の低減を達成する必要がある、そのための材料設計手法の確立が求められる。ところが、セメントの性能と環境負荷の関係について検討している研究は少ない⁴⁾。そこで、高炉セメントの課題である凝結性状や初期強度発現性の改善を目的とし、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末から調製した高炉セメントを提案し、このセメントのモルタル物性とエコロジカル評価について普通ポルトランドセメントや従来の高炉セメントとの比較検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

表-1 に普通ポルトランドセメント (OPC)、早強ポルトランドセメント (HPC)、および高炉スラグ微粉末 (BFS) の化学成分と物理的性質を示す。BFS は市販の 4000 ブレーンを用いた。また、細骨材には標準砂 (S) を使用した。本研究では、OPC や HPC に BFS を置換混合して高炉セメントを調製した。この際、OPC に対する BFS の置換率は 40mass% (BBO-40) とし、HPC に対する BFS の置換率は 40, 50, 60mass% (BBH-40, BBH-50, BBH-60) とした。

表-1 使用材料

材料	化学成分 (mass%)								密度 (g/cm ³)	ブレーン (cm ² /g)
	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	LOI		
OPC	64.7	5.3	20.1	2.9	2.1	0.25	0.37	3.0	3.15	3,240
HPC	65.4	5.0	20.1	2.9	3.0	0.22	0.33	1.5	3.12	4,490
BFS	43.5	14.0	33.5	0.4	0.04	—	—	0.2	2.91	4,140

*1 デンカ株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 研究員 (正会員)

*2 デンカ株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 研究員

*3 デンカ株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 グループリーダー (正会員)

*4 デンカ株式会社 青海工場 セメント・特混研究部 部長 (正会員)

2.2 モルタルの調製

モルタルは JIS R 5201 に準じて調製した。すなわち、水結合材比 (W/C) 50mass%, 結合材と砂の比率を 1 対 3 とした。表-2 にモルタルの配合を示す。

2.3 試験項目および試験方法

(1) コンシステンシー

コンシステンシーは JIS R 5201 に準拠し、テーブルフローを測定した。

(2) 凝結時間

凝結時間は JIS R 5201 に準拠し、20℃および5℃の試験環境で測定した。

(3) 圧縮強さ

JIS R 5201 に準拠し、20℃および5℃の環境で行った。ただし、20℃において材齢 1 日、3 日、7 日、28 日で測定し、5℃については、初期材齢に着目して、材齢 3 日と 7 日について行った。

(4) 断熱温度上昇量

ステンレス製デュワー瓶 (内径 185mm×内筒高さ 269mm, 容量 6 リットル) にモルタル 11kg を入れ、中心部に熱電対を設置してモルタルの簡易断熱温度上昇をデータロガーにて計測した。

3. セメントのエコロジカル評価

セメントのエコロジカル評価は、小沼ら⁵⁾が検討したエコロジカル評価手法に基づいて行った。すなわち、OPC や HPC の製造に係る炭素排出量原単位と、高炉スラグの粉砕に係る炭素排出量から算出した。

表-3 に、OPC 製造時にかかる炭素排出量原単位⁶⁾、HPC の製造に係る炭素排出量原単位⁷⁾、BFS の粉砕に係る炭素排出量原単位⁸⁾を示した。本研究では、OPC や HPC と BFS を混合してセメントを調製している。したがって、各混合セメントの炭素排出量原単位は、OPC、HPC、BFS の炭素排出量原単位と、これらの配合割合から算出することができる。

4. 実験結果

4.1 モルタルのコンシステンシー

図-1 に、モルタルのフロー値を示した。OPC に比べ、BBO-40 のフロー値はやや小さい値を示している。これは、BFS の比表面積が OPC と比較して大きいことや、BFS の密度が OPC と比べて小さく、占有体積が大きいため、水粉体体積比が小さくなっていることが影響していると考えられる。次に、高炉セメントの種類で比較してみる。BBO-40 と BBH-40 を比較すると、HPC を適用した BBH-40 の方がやや小さい値を示している。これは、OPC

表-3 セメント製造に係る炭素排出量

項目	炭素排出量 (kgC/t)		
	OPC	HPC	BFS
輸送・採掘	1	1	—
クリンカー焼成燃料	68	71	—
電力	原料調製・焼成	7	—
	仕上げ粉砕	5	11
石灰石の仮焼	113	118	—
合計	194	206	11

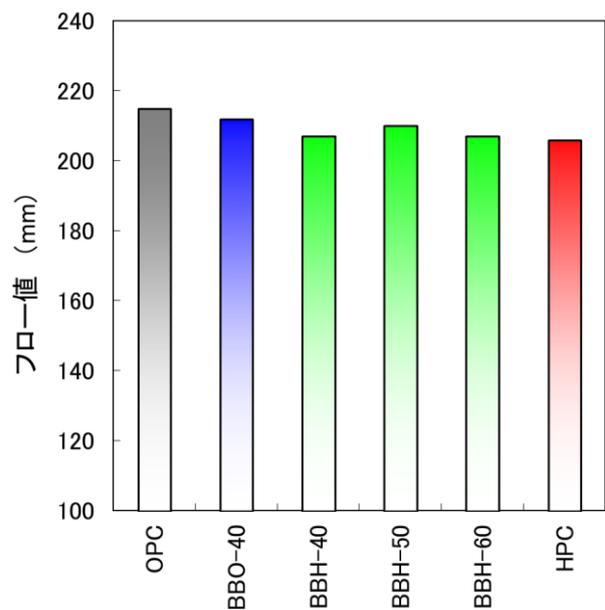


図-1 モルタルのフロー値

表-2 モルタルの配合

	(%)		(g)				
	W/C	BFS 置換率	W	OPC	HPC	BFS	S
OPC	50	0	225	450	—	0	1350
HPC		0		—	450	0	
BBO-40		40		270	—	180	
BBH-40		40		—	270	180	
BBH-50		50		—	225	225	
BBH-60		60		—	180	270	

と HPC の違いが反映されたと考える。また、BBH の中で BFS の置換率を変化させた BBH-40、BBH-50、BBH-60 では、BBH-50 のフロー値がやや高い値を示したものの、BBH-40 と BBH-60 のフロー値は同等程度であり、BFS の置換率による明確な差は認められなかった。しかしながら、コンシステンシーの差は軽微であり、また、HPC と BFS から調製した BBH は HPC よりも大きな値を示していることより、コンシステンシーの観点から BBH は実用に支障はないと考える。

4.2 凝結性状

図-2 に、モルタルの凝結時間を示した。OPC に比べ、BBO-40 の凝結時間は始発時間および終結時間ともに長くなった。一方、高炉セメントの種類で比較してみる。BBO-40 と BBH-40 を比較すると、HPC を適用した BBH-40の方が凝結時間は始発および終結ともに短くなり、OPC とほぼ同等の値を示した。これは、OPC と HPC の違いが反映されたと考える。BBH の中で BFS の置換率を変化させた BBH-40、BBH-50、BBH-60 では、BFS の置換率が高くなるに従って、凝結時間は長くなる傾向を示した。

図-3 に、5°Cにおける凝結時間を示した。OPC に比べ、BBO-40 の凝結時間は始発時間および終結時間ともに著しく長くなった。これは、BBO の凝結硬化が遅いという課題が低温でより顕在化することを表している。一方、BBO-40 と BBH-40 を比較すると、HPC を適用した BBH-40の方が凝結時間は始発および終結ともに著しく短くなり、OPC より短くなっている。このように、BBH は、高炉セメントの低温で凝結硬化が遅いという課題を解消する提案となり得ることが分かった。

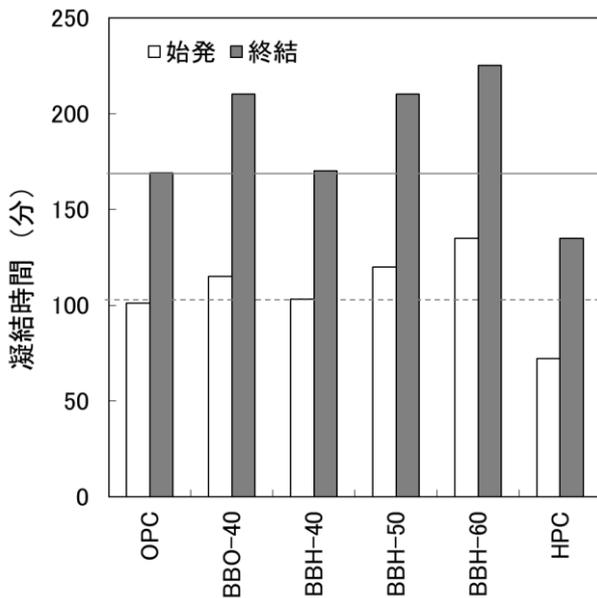


図-2 20°Cにおけるモルタルの凝結時間

4.3 圧縮強さ

図-4 に、20°Cでのモルタルの圧縮強さを示した。OPC に比べ、BBO-40 は初期材齢では小さい値を示すものの、材齢7日から28日の強度増進が大きく、OPC よりも高い値を示した。また、BBH-40 は材齢1日では、OPC よりもむしろ高い値を示し、材齢3日および材齢7日では OPC と同等の値を示した。そして、BBO-40 と同様に材齢7日から材齢28日での強度増進が見られ、材齢28日では BBO-40 と同等の値を示し、OPC よりも高い値を示した。このように、BBH-40 は初期の強度発現性は OPC に類似しながらも、長期材齢における強度増進の挙動は

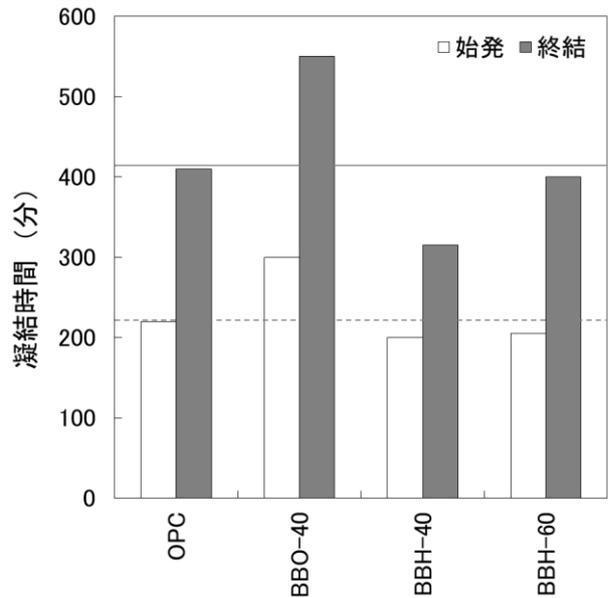


図-3 5°Cにおけるモルタルの凝結時間

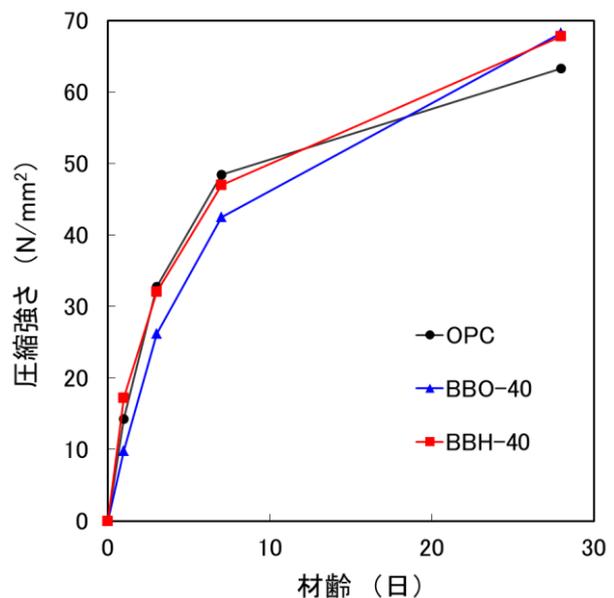


図-4 20°Cにおけるモルタルの圧縮強さ

高炉セメントの特性が表れている。次に、材齢 7 日までの初期材齢に着目し、BFS の置換率を変えて検討した。

図-5 に、20℃における材齢 3 日および 7 日の測定結果を示した。また、図-6 に、5℃での材齢 3 日および 7 日の測定結果を示した。まず、20℃について見ると、OPC に比べ、BBO-40 の材齢 7 日までの圧縮強さは小さい値を示している。これは、BBO が OPC よりも型枠存置期間を長く必要とすることと一致している。一方、BBO-40 と BBH-40 を比較すると、HPC を適用した BBH-40 の方が圧縮強さは高くなり、OPC とほぼ同等の強度発現性を示した。このように、BBH は、初期材齢から高い強度を

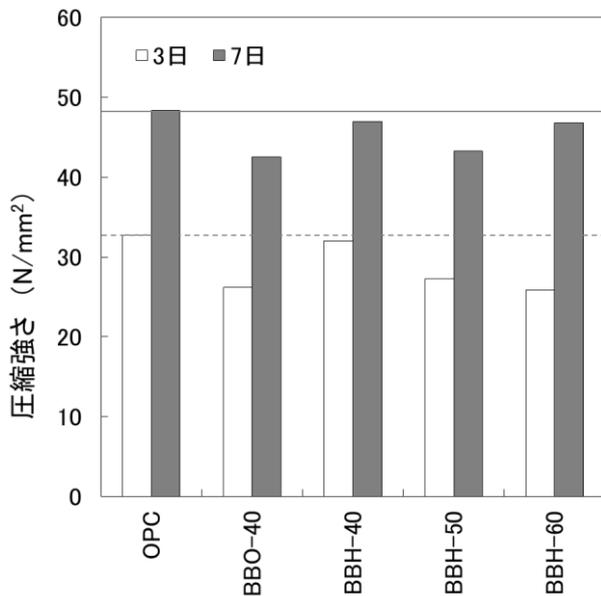


図-5 20℃における材齢 3 日および 7 日の圧縮強さ

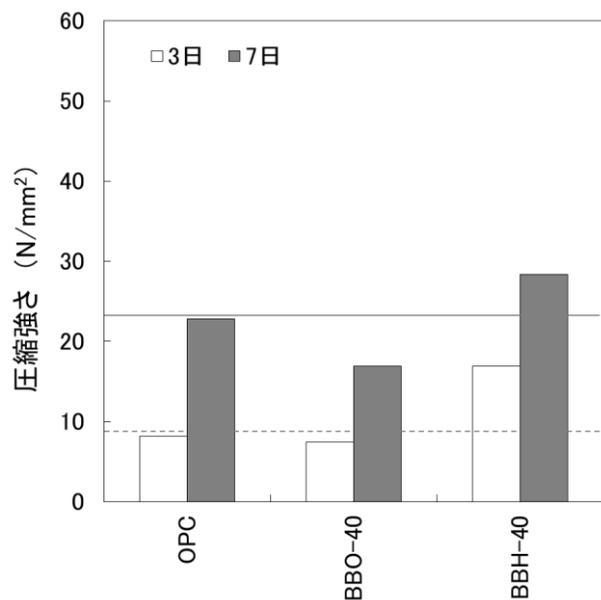


図-6 5℃における材齢 3 日および 7 日の圧縮強さ

発現するため、強度発現性の観点から、OPC と同じ型枠存置期間で脱型可能となることが示唆される。また、BBH-60 は BBO-40 に比べ、材齢 3 日の圧縮強さは同等であり、材齢 7 日ではむしろ高い値を示している。これは、BBH-60 は使用しているベースセメントが HPC であるため、強いアルカリ刺激が与えられ、BFS の反応が促進されたことなどの影響が考えられる。

次に、5℃について見ると、OPC に比べ、BBO-40 の材齢 7 日までの圧縮強さは小さい値を示している。これは、土木学会標準示方書に記されているように、低温では高炉セメントが OPC よりも標準養生期間をより長く必要とすることと一致している。一方、BBO-40 と BBH-40 を比較すると、HPC を適用した BBH-40 の方が圧縮強さは高くなり、OPC と比較しても、むしろ良好な強度発現性を示している。BBH-40 は低温であっても、型枠存置期間について OPC と同じ設定で考えて良いと言える。

4.4 断熱温度上昇量

図-7 に断熱温度上昇試験の測定結果を示す。BBO-40 は OPC に比べ、小さい値となった。一方、BBH-40 の断熱温度上昇量は大きな値を示している。これは HPC の特性が卓越したためと考えられる。しかしながら、BFS の置換率を 60mass% まで高めた BBH-60 では、断熱温度上昇量は著しく小さい値となり、BBO-40 とほぼ同等の値を示した。マスコンクリートなどの用途では、水和発熱を考慮して、BFS の配合量を高めた BBH-60 を選定することが有用と思われる。

ここで、BBH-60 は、凝結性状や初期の強度発現の観点からは BBO-40 と類似の挙動を示した(図-2, 図-3, 図-4, 図-5, 図-6, 図-7)。一方で、BFS の置

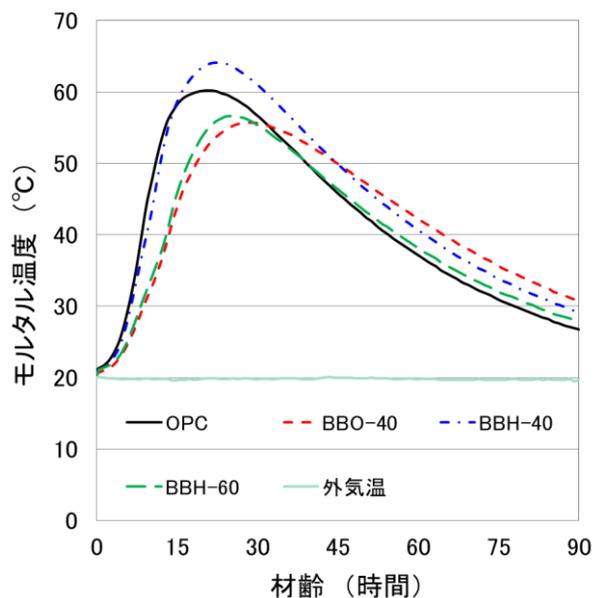


図-7 モルタルの簡易断熱温度上昇

換率を BBO-40 と比べて 20mass% も高めていることより、炭素排出量の観点からは、より環境負荷の小さいセメントと見なせる。そこで、セメントのエコロジカル評価を行うとともに、炭素排出量と強度発現性の関係について検討する。

4.5 エコロジカル評価

図-8 に各セメントの炭素排出量原単位を示した。OPC に比べ、BBO-40 は著しく小さい値を示している。BBH-40 は BBO-40 と比べると、やや大きな値を示しているものの、大差はなく、ほぼ同等と見なせる。BBH 系で BFS の置換率の違いに着目すると、BFS の置換率が高くなるに従って、炭素排出量は小さい値を示している。このように、炭素排出量原単位の観点からは、BFS の置換率が大きな影響を与えることがわかる。ここで、20℃における凝結性状(図-2)や強度発現性(図-4、図-5、図-6)の観点から見ると、OPC と BBH-40 に大きな差はなく、また、5℃では、BBH-40 は OPC に比べてやや凝結時間(図-3)が短くなり、圧縮強さ(図-6)は BBH-40 の方が高くなることわかる。BBH-40 は低温下でも優れた強度発現性を有し、OPC と同等程度の性能であると言える。この2つのセメントで炭素排出量原単位を比較してみると、BBH-40 は OPC に比べ、炭素排出量を約 34% 削減できることになる。また、BBO-40 と BBH-60 も同等の性能を示した。この2つのセメントで炭素排出量原単位を比較すると、BBH-60 は BBO-40 と比べ、炭素排出量を 24% も削減できることになる。

ここで、セメントの環境性能である炭素排出量原単位と、代表的な物性面での要求性能である強度発現性の関係を検討してみることにした。

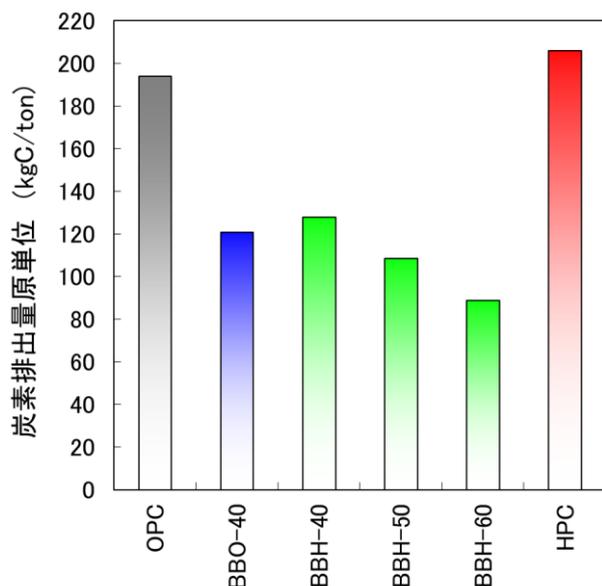


図-8 各種セメントの炭素排出量原単位

図-9 に、20℃における圧縮強さと炭素排出量原単位の関係を示す。図-10 に、5℃における圧縮強さと炭素排出量原単位の関係をそれぞれ示した。まず、20℃での初期の強度発現性と環境性能の関係についてみると、OPC は強度発現性に優れる一方で、炭素排出量原単位が大きいことがわかる。BBO-40 は、環境性能には優れるが、初期の強度発現性が乏しいことがわかる。BBH-40 は、初期の強度発現性に優れ、また、環境性能にも優れたセメントであることがわかる。材齢3日の段階では、BBH-40 のみが、OPC に近似した圧縮強さであるが、材齢7日になると、BBH-60 も OPC と同等強度になっており、炭素排出量を著しく低減できることがわかる。

ここで、視点を変えて、強度発現性が同等である BBO-40 と BBH-60 に着目すると、炭素排出量原単位をさらに低減することが可能であることもわかる。

次いで、5℃の圧縮強さと炭素排出量原単位の関係について見る。5℃では、BBH-40 が材齢3日でも材齢7日でも、OPC より優れた強度発現性を示し、加えて、環境性能にも優れることが明らかであり、低温時ほど BBH-40 の選定は有用であると言える。

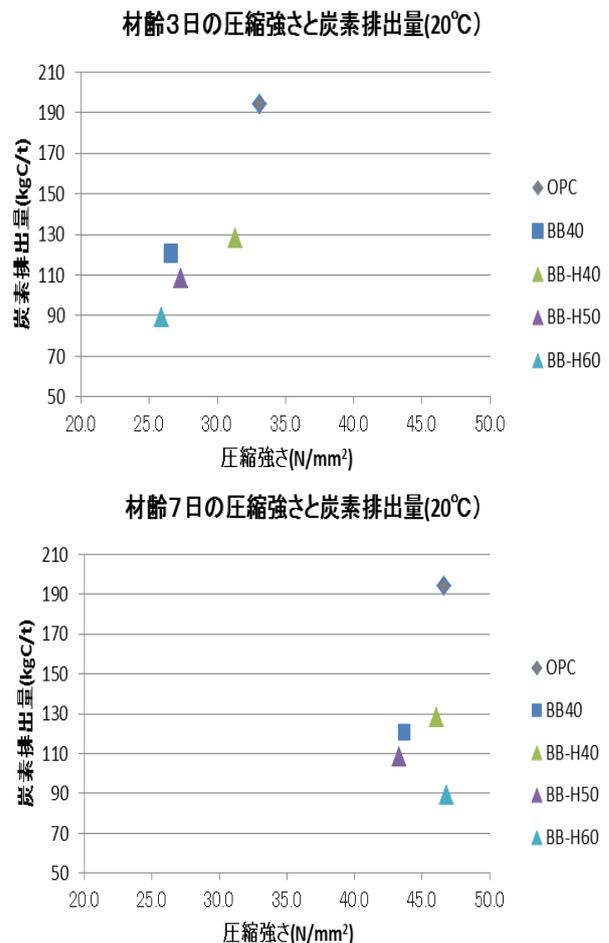


図-9 20℃における圧縮強さと炭素排出量原単位

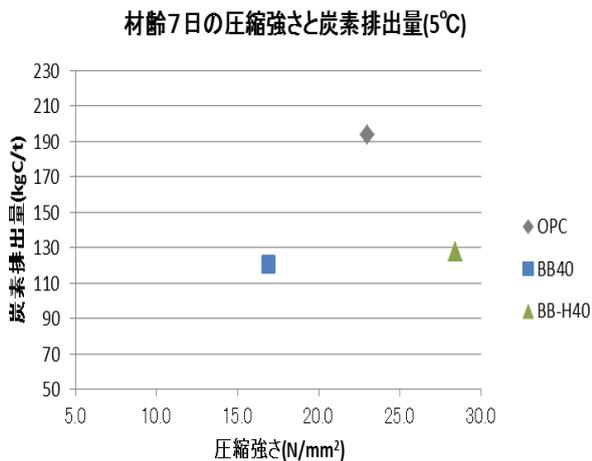
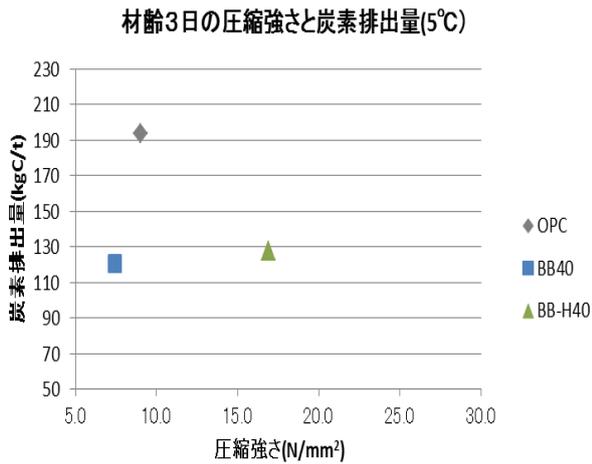


図-10 5°Cにおける圧縮強さと炭素排出量原単位

以上のように、HPCとBFSから調製した高炉セメントは、環境負荷低減の観点からも有効な材料設計手法のひとつと言える。

5. まとめ

早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末から調製した高炉セメントを提案し、モルタル物性とエコロジカル評価を行い、以下の結論を得た。

- (1) 早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を40mass%置換混合した高炉セメントは、練りあがりのモルタルフロー値がわずかに小さくなったが、早強ポルトランドセメントよりは大きな値を示し、実用上は支障がないと考えられる。
- (2) 早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を40mass%置換混合した高炉セメントは、凝結時間が普

通ポルトランドセメントと同等であった。

- (3) 早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を40mass%置換混合した高炉セメントは、強度発現が普通ポルトランドセメントと同等であった。
- (4) エコロジカル評価の検討結果より、早強ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を40mass%置換混合した高炉セメントは、普通ポルトランドセメントと比較して、セメント製造時の炭素排出量を約34%削減できる。また、普通ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末から調製された高炉セメントと同等の強度になるように、高炉スラグ微粉末の置換率を60mass%まで高めた場合には、普通ポルトランドセメントと比べて炭素排出量を約54%削減でき、普通高炉セメントと比較しても約24%削減できる。
- (5) 早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末から調製した高炉セメントは、初期の強度発現性と環境性能を両立したセメントであることがわかった。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書，土木学会，Vol.52，pp.412-417，1998
- 2) 小沼栄一：セメント産業における二酸化炭素対策，秩父小野田研究報告，Vol.47，pp.120-137，1996
- 3) 小沼栄一：セメント製造におけるリサイクル原燃料使用による二酸化炭素排出量低減率の推定，秩父小野田研究報告，Vol.49，pp.66-77，1998
- 4) 佐野燐・市川牧彦・下山善秀・小沼栄一：セメントおよびコンクリートのエコバランス，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.697-704，1999
- 5) 小沼栄一・田熊靖久：フィルターセメントのエコロジカル評価，秩父小野田研究報告，Vol.46，pp.126-132，1995
- 6) 飯塚洲一：セメント産業と環境対策，セメント・コンクリート，No.563，pp.37-46，1994
- 7) 盛岡実，樋口隆行，坂井悦郎，大門正機：早強セメントとフライアッシュから調製したフライアッシュセメントの物性とエコロジカル評価，コンクリート工学論文集，Vol.13，No.2，pp.33-39，2002
- 8) 盛岡実，前田悦孝，坂井悦郎，松下博通：高炉徐冷スラグと高炉水砕スラグを併用した32.5N/mm²クラスセメントに関する研究，コンクリート工学論文集，Vol.15，No.2，pp.79-88，2004