

論文 試作した高炉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・二戸 信和*3・神崎 隆男*4

要旨: 高炉セメントの温度ひび割れ低減のため、市販されている高炉セメントよりも比表面積を粗くし、高炉スラグの分量および SO₃ 量を変化させ、試作した高炉セメントを用い、実機で練混ぜたコンクリートについて、市販の普通ポルトランドセメントおよび高炉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、凝結時間は長くなり、温度上昇量は普通ポルトランドセメントに比して、最高温度で 10℃程度低減できる。また、20℃水中養生した初期の圧縮強度は低い値を示すが、長期強度は高くなり、乾燥収縮率は小さくなる。さらに、中性化深さは大き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, 温度上昇量, 圧縮強度, 乾燥収縮率, 中性化深さ, 凍結融解作用

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、多くの土木および建築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などに対して効果があることが挙げられる。

しかし、高炉セメントをマスコンクリートに用いた場合、打込み条件によっては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、高炉セメントの比表面積は細かいほど初期材齢強度は増進するが、収縮の観点からみると粗いものほど低減される¹⁾²⁾。また、SO₃ 量が過大であると異常膨張や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^{3)~6)}。

本研究は、これらのことから高炉セメントの JIS 規定の範囲内で、比表面積を 3,000cm²/g 程度、高炉スラグの分量および SO₃ 量を調整し、試作した高炉セメントを用い、実機で練混ぜたコンクリートについて、市販の普通ポルトランドセメント、高炉セメント B 種および中庸熱

ポルトランドセメントと比較検討した。

なお、本論文はコンクリート工学年次論文集、前報⁷⁾に引続き、取り纏めたものである

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、市販の普通ポルトランドセメント (N) に、表-2に示す、せつこうが含まれていない高炉スラグ微粉末 (BF) と天然無水せつこう (密度 2.90g/cm³, 比表面積 4,800cm²/g) を調整し、SO₃ 量が 4% となるように混合した BB60 (密度 2.98g/cm³, 比表面積 3,130cm²/g, スラグ分量 60%) を試作した。

比較用セメントは、表-1に示す市販の普通ポルトランドセメント (N) および高炉セメント B 種 (BB) である。また、参考のため中庸熱ポルトランドセメント (M) および、高炉セメント B 種にセメントの内割で膨張材を 30kg/m³ 混入した (BBX) を用いた。細骨材は、葛生産砕砂 (70%) と茨城産陸砂 (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。水は地下水、化学混和剤は主成分がリグニンスルホン酸化合物と

表-1 市販セメントの物性および化学成分 (%)

セメント種類	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	高炉スラグ分量 (%)	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O
普通ポルトランドセメント	N	3.16	3,320	0	1.29	21.00	5.41	3.06	63.82	2.27	2.11	0.35	0.31
高炉セメント	BB	3.04	3,920	40	1.02	24.68	8.62	2.36	56.83	3.52	1.67	0.33	0.31
中庸熱ポルトランドセメント	M	3.21	3,120	—	0.67	23.12	3.91	4.16	63.70	0.91	2.36	0.26	0.39

*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 名誉教授 工博 (名誉会員)

*3 ㈱デイ・シイ 事業開発部 (正会員)

*4 ㈱デイ・シイ セメント事業本部 (正会員)

表－2 高炉スラグ微粉末の物性および化学成分（％）

混和材	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	S	Na ₂ O	K ₂ O
高炉スラグ 微粉末	BF	2.94	3030	0.02	33.43	15.20	0.93	41.41	6.15	0.85	0.24	0.10

表－3 実機により練混ぜ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)				荷卸し時			
			水	セメント	細骨材	粗骨材	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)	コンクリートの練 上り温度(°C)	ワーカ ビリティ
N	53.9	44.8	168	312	803	1003	10.0	4.5	23.4	良
BB	53.0	45.0	168	317	802	992	11.0	3.8	22.0	良
BB60	48.0	44.0	165	344	774	996	12.0	5.0	22.0	良
BBX	53.0	45.0	168	287 (膨張材30)	801	992	13.5	4.5	23.5	良
M	50.0	45.0	169	338	800	989	12.0	5.5	23.5	良

[注]使用した化学混和剤量はセメント×1.0%添加した。

オキシカルボン酸の複合体の AE 減水剤を用いた。

2.2 コンクリートの調合

各種セメントを用いたコンクリートの強度は、材齢 91 日で圧縮強度 27N/mm²を超える強度を目標とした。そのため、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 (W/C) は、N では 54%、BB では 53%、BB60 では 48%、BBX では 53%および M では 50%とした。また、スランプは 12±2.5cm、空気量は 4.5±1.0%を目標とした。

なお、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。また、コンクリートの打込み時期は秋季に実施した。

2.3 生コン工場の練混ぜから荷卸しまで

生コン工場の練混ぜは 2 軸強制ミキサを用い、1.5m³分に相当する化学混和剤を含む水、細骨材および粗骨材の順に投入し、その後、セメントを入れ、合計 2 分間練混ぜた。このコンクリートをアジテータトラックで、20 分かけて現場に輸送し、荷卸し時におけるスランプ、空気量およびコンクリートの練り上り温度を測定した。

3. 実験項目と方法

3.1 フレッシュコンクリートの性状

(1) スランプ

スランプ試験は JIS A 1101 によった。

(2) 空気量

空気量試験は JIS A 1128 によった。

(3) ワーカビリティ

スランプ試験時に、スランプしたコンクリートの形状やくずれ方などから目視によって判断した。

(4) ブリーディング量

ブリーディング量試験は JIS A 1123 によった。

(5) 凝結

凝結試験は ASTM C 403 によった。

(6) 温度上昇量

コンクリートの温度上昇量は、鋼製型枠 (100×100×100 cm) 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-コンスタンタンの熱電対を埋め込み、10 日間の内部温度を測定した。

3.2 硬化コンクリートの性状

(1) 圧縮強度

圧縮強度試験は JIS A 1108 によった。なお、20°C 水中養生は材齢 7 日、28 日、91 日および 365 日で試験した。また、現場水中養生および現場封かん養生は、20°C 水中養生と同様、翌日にキャッピングを施し、翌々日に脱型し、材齢 28 日、91 日および 365 日で試験した。

(2) コアによる圧縮強度

コアによる圧縮強度試験は、上記 3.1 (6) の供試体を用い、JIS A 1107 によりコアを抜き取り強度試験した。なお、材齢 28 日、91 日および 365 日で試験した。

(3) 乾燥収縮率

乾燥収縮率の試験は JIS A 1129-1 により、乾燥期間 52 週までの長さをコンパレータ法により測定した。なお、

基長は材齢7日とし、その乾燥収縮率を求めた。

(4) 中性化深さおよび鉄筋の発錆

中性化深さおよび鉄筋の発錆の試験は、図-1 に示す通りの供試体を用い、かぶり厚さ(2, 3, 4cm)の磨き鉄筋(10φ)を配筋した。なお、屋外自然暴露した材齢1年の中性化深さと鉄筋の発錆について試験した。

中性化深さの測定は、長手方向に10cm厚に切断・清掃し、その断面にフェノールフタレインアルコール溶液(1%)を噴霧し、両側面計40カ所をノギスを用いて測定し、平均中性化深さを求めた。

また、鉄筋の発錆についてはこの供試体からコンクリートを研り、鉄筋を取り出し発錆を肉眼で確認した。

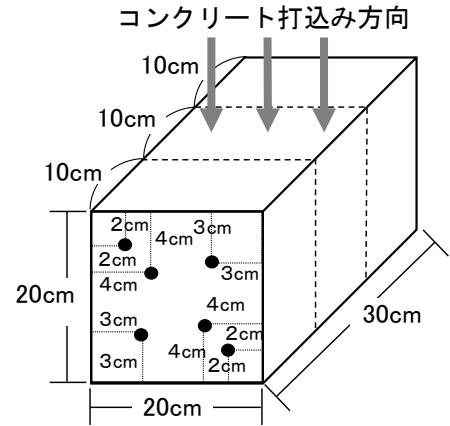


図-1 屋外自然暴露したコンクリートの供試体

(5) 凍結融解作用に対する抵抗性

凍結融解作用に対する抵抗性の試験は、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) ワーカービリティ

各種セメントを用いたフレッシュコンクリートの結果を表-3 に示す。荷卸し時のスランプおよび空気量は目標とした値が得られ、ワーカービリティは良好であった。

(2) ブリーディング量

各種セメントを用いたコンクリートの最終ブリーディング量を図-2 に示す。この図からNに比して、他のコンクリート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。

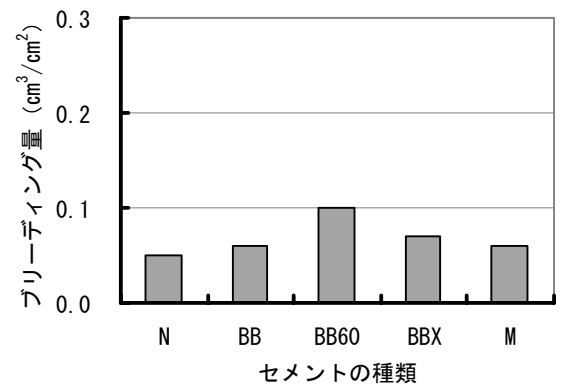


図-2 ブリーディング量

(3) 凝結

各種セメントを用いたコンクリートの凝結を図-3 に示す。この図からNの始発は372分、終結は468分となっている。これに対して、BBは始発で90分、終結で120分、同様に、BB60は始発で270分、終結で336分、BBXは始発で156分、終結で192分、およびMは始発で30分、終結で12分と、いずれのコンクリートとも長くなっている。

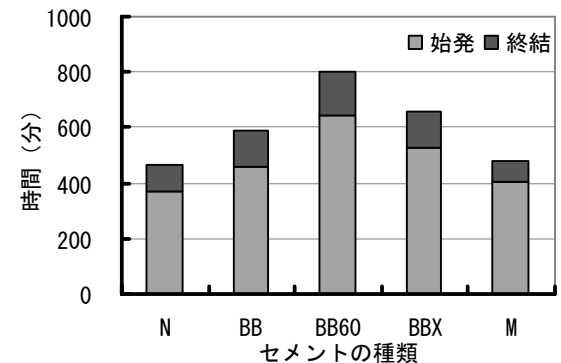


図-3 凝結

このことから試作した高炉セメント BB60 のものは高炉スラグの分量が多いこと、さらには、比表面積を粗くしたため、始発・終結とも長くなったものと考える。

(4) 温度上昇量

各種セメントを用いたコンクリートの温度上昇量を図-4 に示す。この図からNの最高温度は66.7°C、BBは62.9°C、BB60は57.0°C、BBXは60.3°C、およびMは56.9°Cとなっている。このことから、Nに対して最高温度はBB60およびMでは約10°C低減することができる。

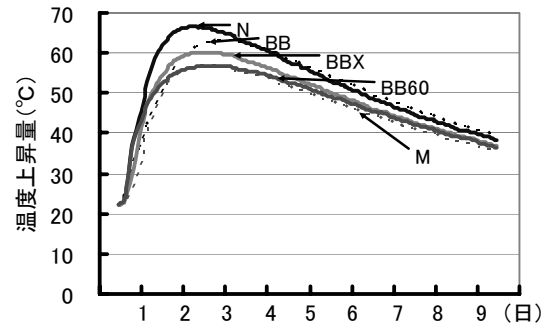


図-4 温度上昇量

従って、試作した高炉セメントの温度上昇量は小さくなる。

(5) 圧縮強度

各種セメントを用いたコンクリートの 20℃水中養生した圧縮強度を図-5に示す。材齢 7 日の N の圧縮強度は 20.8N/mm²、BB は 18.1N/mm²、BB60 は 12.8N/mm²、BBX は 17.1N/mm²、および M は 15.0N/mm² となっている。試作した BB60 のものは、他のセメントに比して最も小さい値になっている。これは、高炉スラグの分量が多いため、さらには、比表面積を粗くしたため、初期強度が低くなったものと考えられる。しかし、材齢 28 日でみると市販の BB は 27.2N/mm² に対して BB60 は 29.3N/mm² と逆に高い値となっている。

また、目標とした圧縮強度 27N/mm² は、いずれのコンクリートとも、材齢 91 日で目標強度を超えている。さらに、材齢 365 日でみると、試作した BB60 のものは高炉スラグの分量が多いため、潜在水硬性が発揮されたことにより、長期強度が高くなったものと考えられる。また、BBX は他のセメントに比して最も高い強度が得られている。

次に、20℃水中養生と現場水中養生の圧縮強度の関係を図-6に示す。同様に、現場封かん養生およびコアによる圧縮強度の関係を図-7および図-8に示す。

これらの図から、20℃水中養生と現場水中養生、現場封かん養生およびコアによる圧縮強度との間に高い相関が認められた。

次に、20℃水中養生に対して、同一材齢における圧縮強度で除した値の圧縮強度比を求めると、現場水中養生および現場封かん養生したその値は、材齢の経過に伴い、0.92~1.11 倍となっている。しかし、コアによるその値は、材齢の経過に伴い 0.90~1.03 倍となっているが、圧縮強度の増進は小さい。

これは、屋外放置のため水分の供給条件が異なることおよびコンクリートの内部温度の影響もあり長期で水合があまり進行しなかったものと考えている。

(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-9に示す。この図から初期の 1 週の N は 2.0×10^{-4} 、BB は 1.9×10^{-4} 、BB60 は 1.7×10^{-4} 、BBX は 1.2×10^{-4} および M は 1.8×10^{-4} となっている。これは市販の高炉セメントよりも、試作した高炉セメントの BB60 のものは、比表面積を粗くしたため、収縮率が小さくなったものと考えられる。さらに、BBX は他のセメントに比して最も小さい値となっている。これは膨張材を混入したため、その効果が現れたためと考える。また、4 週では、BBX を除く、他のコンクリートは同程度の収縮率を示している。さらに、52 週でみると、長期材齢になるにしたがって、試作

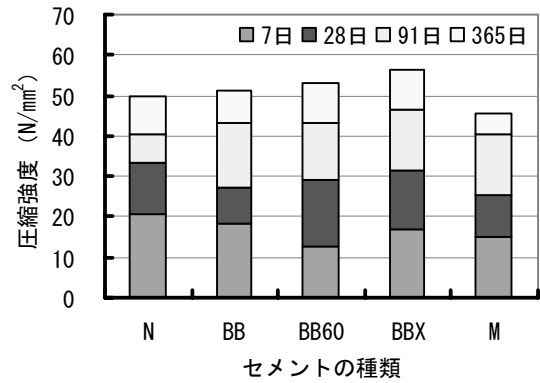


図-5 20℃水中養生の圧縮強度

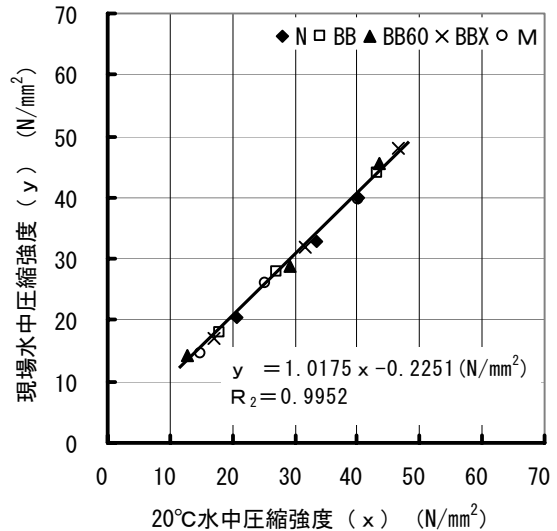


図-6 各養生と圧縮強度の関係 (1)

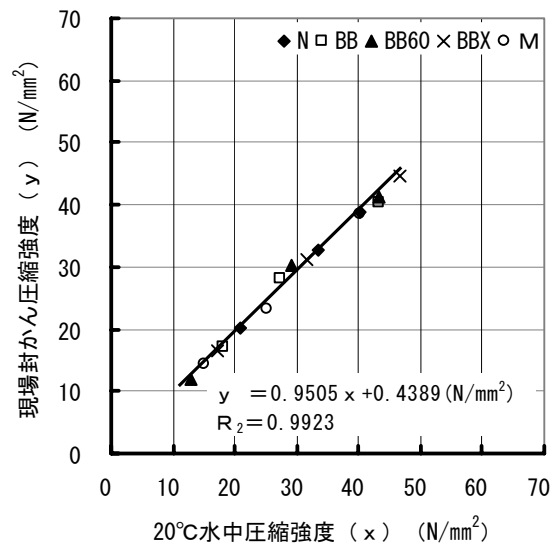


図-7 各養生と圧縮強度の関係 (2)

した高炉セメントの BB60 のものは収縮率が低減されている。

このことは、これまで報告⁸⁾している通り、実験室実験の結果と同様の傾向を示している。

(7) 中性化深さおよび鉄筋の発錆

各種セメントを用いたコンクリートの中性化深さを図-10に示す。屋外自然暴露した材齢1年のNは1.3mm、BBは2.3mm、BB60は3.8mm、BBXは2.6mmおよびMは2.3mmとなっている。ここで、試作した高炉セメントのBB60のものは市販のBBに比して約2倍の値になっている。これは、高炉スラグの分量が60%と多量に入っていること、また比表面積を粗くしたことなどが考えられる。

従って、高炉スラグの分量が多いほど、さらには、比表面積を粗くしたことなどから中性化深さが大きくなったものといえる。

なお、材齢1年までの鉄筋の発錆については、認められていない。

(8) 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(BBXを除く)の結果を図-11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JASS5で目標値としている80%を大きく上廻っている。

5. まとめ

市販されている高炉セメントをJIS規格の範囲内で比表面積を粗くし、SO₃量を調整し、さらに高炉スラグの分量を変化させ、試作した高炉セメントを実機によって練混ぜたコンクリートについて、市販の普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種および中庸熱ポルトランドセメントと比較検討した。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) ブリーディング量は、いずれのセメントコンクリートとも同程度である。
- (2) 試作した高炉セメントは比表面積を粗くし、さらに、高炉スラグの分量が多いため、始発・終結とも長くなる。
- (3) 温度上昇量は、普通ポルトランドセメントに比して、試作した高炉セメントは、中庸熱ポルトランドセメントと同様に10℃程度低減できる。
- (4) 試作した高炉セメントの圧縮強度は、高炉スラグの分量が多いため、さらには、比表面積を粗くしたため初期強度は低くなるが、長期強度は高くなる。

また、現場水中養生、現場封かん養生およびコアによるコンクリートの強度は、材齢の経過に伴い増進するが、コアによる強度の増進は小さい。

- (5) 乾燥収縮率は、比表面積を粗くしたため、初期および長期とも低減される。

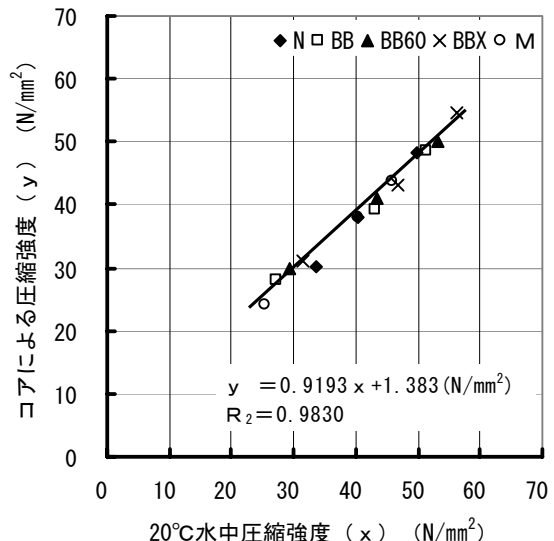


図-8 各養生と圧縮強度の関係(3)

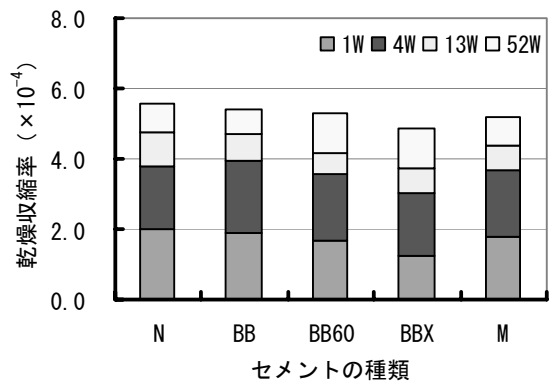


図-9 乾燥収縮率

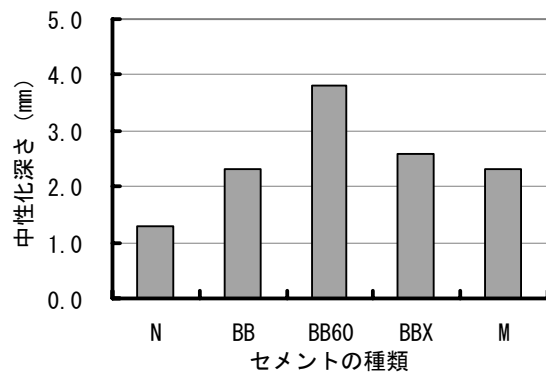


図-10 中性化深さ

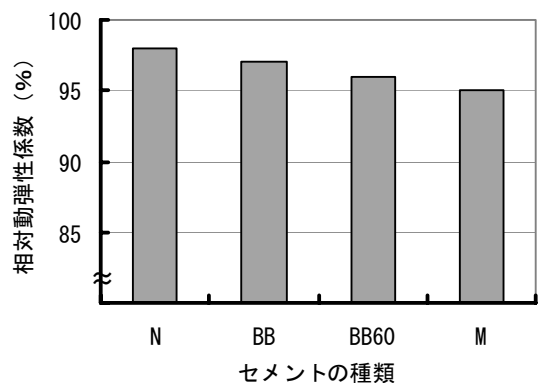


図-11 凍結融解作用に対する抵抗性

- (6) 屋外自然暴露した材齢1年の中性化深さは、高炉スラグの分量が多いほど、さらには比表面積を粗くしたことなどから大きくなる。
- (7) 同様に材齢1年の鉄筋の発錆は、いずれのセメントコンクリートとも認められない。
- (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。

〈謝辞〉

本研究を進めるにあたり、実験に協力頂いた本学非常勤講師の宮澤祐介氏に対して、深甚の謝意を表す。

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, コンクリート工学年次論文集, 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集, Vol.27, No.1, pp.487-492, 2005.6
- 3) 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量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
- 4) 石川陽一, 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材への適用研究, (その2・水和熱と断熱温度上昇量), 日本建築学会大会学術講演梗概集(東北), pp.1003~1004, 1991
- 5) 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, コンクリート工学年次論文報告集, 第3巻, 第2号, pp.49~61, 1992.7
- 6) 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
- 7) 横室 隆, 依田彰彦, 神崎隆男, 飯野雅行: 試作した高炉セメントを用いたコンクリートの性質, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.87~92, 2007.7
- 8) 横室 隆, 依田彰彦, 廣島明男, 神崎隆男, : 各種セメントを用いたコンクリートの耐久性, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.677~682, 2006.7