

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの基本性能

片山 行雄 依田 侑也 齊藤 亮介 黒田 泰弘 山口 浩
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (土木技術本部)

Basic Properties of High-Volume Ground Granulated Blast-Furnace Slag Concrete

Yukio Katayama, Yuya Yoda, Ryosuke Saito, Yasuhiro Kuroda and Hiroshi Yamaguchi

高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの設計・製造・施工において必要な情報を得るために、種々のセメント・コンクリートとの比較検討を実施した。実験の結果、高炉スラグ微粉末の分量だけでなく、粉末度や化学組成によって、コンクリートの発熱特性は大きく異なること、高炉スラグ高含有コンクリートでは、スランプロスを抑制した場合に凝結硬化が遅れる傾向にあること、水和発熱量や自己収縮量を抑制できること、高炉スラグ微粉末の分量を70%としたケースでは夏期の構造体強度補正值は大きくなること、などがわかった。また、マスコンクリートを対象とした温度応力解析の結果、高炉スラグ高含有コンクリートは外部拘束によるひび割れへの抵抗性が高いものの、内部拘束によるひび割れへの抵抗性については不利になる可能性もあることが示された。

Experimental and analysis investigations were carried out to obtain knowledge required for design, manufacturing and construction of concrete containing high-volume ground granulated blast-furnace slag (BFS). The experimental results show that exothermic characteristics of concrete containing BFS are significantly different by not only amount but also fineness and chemical composition of BSF. It is also implied that if BFS amount is large, the setting and hardening are delayed in case slump loss is inhibited, and the calorific value of hydration and autogenous shrinkage are restrained. Furthermore, the structure strength corrections value in summer becomes large if BFS replaced 70% for cement amount. Based on the temperature stress analysis about mass concrete, high-volume BFS concrete has high resistance to external restraint cracks but low resistance to internal restraints cracks.

1. はじめに

地球温暖化の問題を背景に、他産業の副産物を結合材として利用し、セメント量を減らした低炭素型のコンクリートへの関心が高まっている。とりわけ高炉スラグ微粉末（以下、BFS）を高含有したコンクリートに関する研究や開発は盛んに行われており、その適用事例も増えている（例えば、1)~3)）。

こうした特殊なコンクリートを安全に使いこなすには、汎用的に使われているセメント・コンクリートとの特性の違いをきちんと把握した上で、設計・製造・施工に反映していくことが肝要と考えられるが、そうした情報の開示は十分に進んでいない印象がある。

そこで、筆者らは、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの設計・製造・施工において必要な情報を得るために、高炉スラグ微粉末を用い

たコンクリートの基本特性に関する実験や温度応力解析を行い、種々のセメント・コンクリートと比較検討を実施した。

2. 高炉スラグ微粉末の違いと分量がコンクリートの特性に及ぼす影響

2.1 高炉スラグ微粉末および高炉セメントの種類

BFSは溶鉱炉で銑鉄を製造する際に副産する熔融状態の高炉スラグを水によって急冷固化し、微粉碎したものである。JIS A 6206:2013（コンクリート用高炉スラグ微粉末）によると、BFSは「高炉水砕スラグを乾燥・粉碎したもの、又はこれにせっこうを添加したもの」と定義されており、凝結調整剤として添加する石膏を含むものも、BFSと扱われている点に注意が必要である。なお、石膏には、結晶水により、二水石膏（ $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）、半水石膏

表-1 高炉スラグ微粉末の化学成分の例

		化学成分(%)									
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	ig.loss	塩基度
日本	最大	34.41	16.18	0.18	43.91	6.68	0.26	0.44	0.03	1.76	1.94
	最小	31.69	13.80	0.74	40.70	3.86	0.15	0.20	2.92	0.00	1.81
	平均	33.19	14.45	0.36	42.43	5.78	0.22	0.31	-	0.51	1.88
海外	最大	42.20	17.54	2.75	43.20	15.40	0.67	1.47	3.21	3.00	1.91
	最小	32.29	5.85	0.18	33.90	0.66	0.01	0.15	0.04	0.00	1.25
	平均	35.83	11.31	0.83	39.69	7.91	0.29	0.57	-	1.12	1.65

表-2 使用したポルトランドセメントの化学成分

材料	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	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	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl
C	3.16	3430	0.71	21.31	5.09	3.16	65.44	1.01	2.02	0.32	0.41	0.25	0.14	0.10	0.006
M	3.21	3220	0.47	23.58	3.61	4.28	63.62	0.98	2.06	0.29	0.41	0.19	0.15	0.15	0.006
L	3.22	3470	0.67	26.77	2.58	2.95	63.06	0.58	2.37	0.18	0.30	0.13	0.11	0.09	0.003

表-3 使用した BFS の化学成分

材料	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	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	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	Cl
3000	2.89	3380	0.14	34.58	13.92	0.42	42.96	6.33	0.04	0.22	0.33	0.54	-	0.23	-
4000_1	2.88	4230	0.03	33.63	14.88	0.50	42.15	6.52	0.26	0.22	0.30	0.57	-	0.25	-
6000	2.89	5420	0.15	33.96	14.42	0.71	42.53	6.34	0.04	0.23	0.34	0.51	-	0.25	-
4000_2	2.90	3730	0.00	31.16	16.11	0.43	38.02	11.28	0.02	0.37	0.36	1.77	0.01	0.41	-
4000_3	2.89	4040	0.81	31.30	15.52	0.42	40.25	7.75	1.40	0.30	0.46	1.21	-	0.20	-

(CaSO₄・1/2H₂O)、無水石膏(CaSO₄)の3種類があるが、製品によって添加しているものが異なる点にも注意が必要である。

JISではBFSの種類は比表面積(粉末度)により、3000、4000、6000、8000の4種類が分類されているが、海外においては活性度で分類している場合や、最低限の粉末度・活性度などの規格値のみを定めている場合もある。表-1に、日本および海外の高炉スラグ微粉末の化学成分の例を示す⁴⁾。日本と海外では、化学組成の範囲が異なり、日本のBFSの化学組成は比較的狭い範囲にあることがわかる。

また、高炉セメントは、ポルトランドセメントにBFSを所定量混合して製造されたセメントである。JIS R 5211:2009(高炉セメント)によると、混合されるBFSの分量により、A種(5を超え30%以下)、B種(30を超え60%以下)、C種(60を超え70%以下)が存在するが、日本ではBFSの分量が40~45%程度のB種がほとんどである。一方、海外に目を向けると、EN197-1:2011(Cement Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements)で示されているように、CEMIII/A(36以上65%以下)、CEMIII/B(66以上80%以下)、CEMIII/C(81以上95%以下)のように、BFSを高含有した高炉セメントも存在し、一般的に使用されている国もある。

2.2 高炉スラグ微粉末を含有したコンクリートの発熱特性

コンクリートの特性に及ぼすBFSの粉末度や化学組成および分量の違いによる影響を評価するため、5種類のBFSを用い、社団法人セメント協会の研究用セメント(記号:C)に対してBFSの分量を50%および70%とした時のコンクリートの断熱温度上昇量を測定し、中庸熱ポルトランドセメント(記号:M)および低熱ポルトランドセメント(記号:L)を用いた場合との比較を行った。

表-2にポルトランドセメントの化学組成を、表-3にBFSの化学組成を示す。3000、4000_1、6000については日本のBFSであり、4000_2、4000_3については、海外産のBFSである。XRDによる分析の結果、BFSは、ほぼ全てガラス質で構成されていることを確認しており、日本のBFSのみ、BFS中のSO₃量が2.0%となるように無水石膏を添加して調整した。なお、粗骨材は青梅市産硬質砂岩砕石(表乾密度2.66g/m³)、細骨材は君津市産山砂(表乾密度2.63g/m³)を使用した。

コンクリートの配調合は、水結合材比を50%、単位セメント量を350kg/m³、単位粗骨材量985kg/m³(単位粗骨材かさ容積0.61m³/m³)とし、スランプが18±1.5cm、空気量が4.5%となるように、AE減水剤およびAE剤を用いて調整した。

1) BFSの分量を50%としたときの発熱特性

粉末度が断熱温度上昇量に及ぼす影響を図-1に示す。粉末度が増加するに従い、断熱温度上昇量は大きくなり、6000を用いた場合は材齢2日でCよりも大きくなった。また、4000を用いた場合でも材齢7日でCと同等になったが、3000を用いた場合では材齢7日でCと比較して約8℃断熱温度上昇量が小さく、Mと同等であった。

次に、化学組成が断熱温度上昇量に及ぼす影響を図-2に示す。海外のBFSである4000_2と4000_3は、日本のBFSである4000_1と比較して、粉末度が概ね同等であるにも関わらず、材齢7日における断熱温度上昇量がやや大きくなった。特に4000_2については、材齢2日付近から急激に温度が上昇する様子を示した。この要因として、化学組成からは Al_2O_3 が多いこと、 MgO が多いことが影響していると推察されるが、詳細な理由は不明である。

2) BFSの分量を70%としたときの発熱特性

粉末度が断熱温度上昇量に及ぼす影響を図-3に示す。分量を70%とした場合も、粉末度が大きいほど断熱温度上昇量は大きくなったが、6000を用いた場合でもMと同等であり、3000を用いた場合はLと同等であった。材齢7日における断熱温度上昇量はCよりも8℃以上低くなった。

次に、化学組成が断熱温度上昇量に及ぼす影響を図-4に示す。4000_3を用いた場合は、4000_2を用いた場合と同じく、断熱温度上昇量は低減され、MとLの中間程度となった。一方、4000_2を用いた場合については、BFSの分量が70%であるにも関わらず、材齢4日でCよりも温度上昇量が大きくなった。つまり、BFSの化学組成によっては、分量を増加しても十分な発熱量の低減効果が得られない可能性があり、特に Al_2O_3 量や MgO 量が多い海外産の場合、注意が必要と考えられる。

3. 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートに関する実験的検討

3.1 実験概要

普通ポルトランドセメント（記号：N）30%と予め無水石膏を添加したBSF70%を混合した高炉セメントC種相当の結合材（記号：BC）を使用したコンクリートと、BFSの分量が58%の低発熱・収縮抑制型高炉セメント（記号：LBB）を用いたコンクリートの諸特性の把握を目的とし、実機による実験的検討を実施した。結合材の化学成分および強さは表-4に示すとおりである。

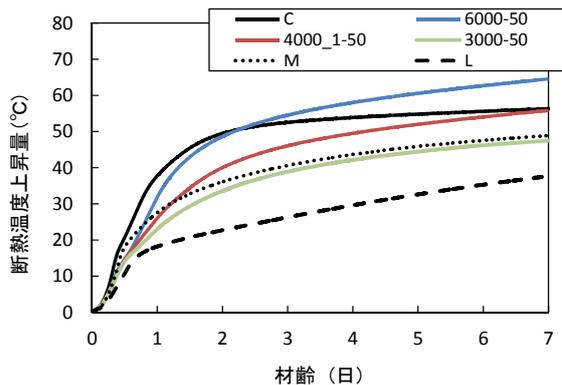


図-1 BFS分量50%における粉末度の影響

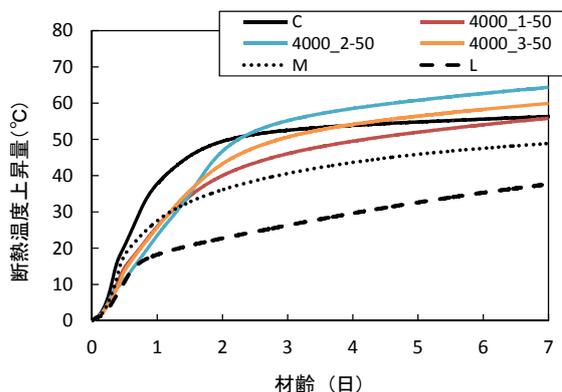


図-2 BFS分量50%における化学組成の影響

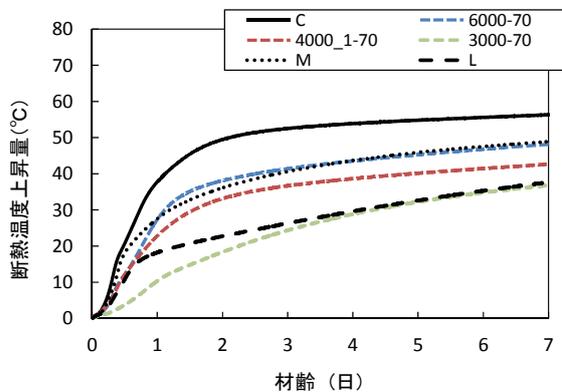


図-3 BFS分量70%における粉末度の影響

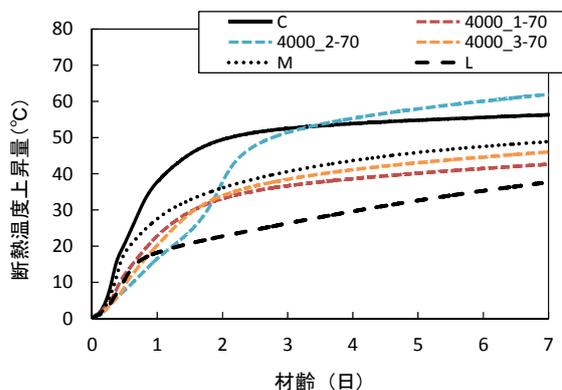


図-4 BFS分量70%における化学組成の影響

表-4 使用した結合材の化学成分および強さ

材料	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)	化学成分(%)										強さ(N/mm ²)		
			Ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	3日	7日	28日
N	3.15	3420	2.67	20.9	5.71	3.16	63.5	2.10	2.31	0.40	0.35	0.012	29.1	43.9	64.0
BFS	2.91	4370	0.28	32.4	13.8	0.34	43.2	5.93	2.58	0.24	0.35	2.91	-	-	-
LBB	2.99	3570	0.54	27.3	10.71	1.48	50.6	4.22	3.44	0.32	0.33	0.011	16.6	26.0	46.4
BC*	2.98	4085	1.00	29.0	11.4	1.19	49.3	4.78	2.50	0.29	0.35	2.04	17.2	33.0	57.3

*密度、比表面積および化学成分は、加重平均 (N:30%, BFS:70%)

表-5 配調合およびフレッシュコンクリートの試験結果

記号	W/B (%)	s/a (%)	単用量(kg/m ³)				AD* (C×%)	試験項目	練上がり後の時間(分)				
			C	W	S	G			0分	30分	60分	90分	120分
LBB50	50	44.5	344	172	773	1002	1.1	スランプ (cm)	22.0	19.5	-	-	-
								空気量 (%)	4.2	5.0	-	-	-
								コンクリート温度 (°C)	27	29	-	-	-
BC50	50	44.4	344	172	779	1002	1.6	スランプ (cm)	17.5	17.5	17.0	14.5	13.0
								空気量 (%)	5.2	5.1	5.4	5.0	5.1
								コンクリート温度 (°C)	28	28	27	27	27

*LBB50 で用いた AE 減水剤では急激なスランプロスが認められたため、BC50 ではさらにスランプロスを抑制する分散剤を含む AE 減水剤を用いた

1) 配調合および練混ぜ

コンクリートの配調合を表-5 に示す。粗骨材は石灰岩碎石 2005 (表乾密度 2.70g/cm³)、細骨材は山砂 80%と砕砂 20%の混合砂 (表乾密度 2.62g/cm³) を用いた。水結合材比を 50%、単位粗骨材量を 1002kg/m³ (単位粗骨材かさ容積 0.61m³/m³) とし、スランプは現場での受入時(練上がり 30~60分後)に 15±2.5cm となるよう練上がり時の目標を 18cm 以上、空気量の目標は 4.5%とし、AE 減水剤および AE 剤を用いて調整した。なお、練混ぜには容量 3.0m³ の強制二軸練りミキサを用い、練混ぜ時間を 60 秒とした。

2) 試験項目および方法

フレッシュ性状として、スランプ (JIS A 1101)、空気量 (JIS A 1123)、コンクリート温度 (JIS A 1156) の測定を、練上がり直後、30、60、90 および 120 分後に実施した。

硬化性状として、圧縮強度 (JIS A 1108)、長さ変化 (JIS A 1129-2) および促進中性化 (JIS A 1153) の試験を実施した。また、20°C 条件下での自己収縮 (JCI-SAS2-2) と図-5 のような簡易断熱養生下でのひずみ量の測定を実施した。

さらに、BC50 に関して、マットスラブの一部を想定した模擬部材試験を実施した。養生は、上面を養生マットで覆い、材齢 4 日まで湿潤養生とし、その後気乾養生とした。模擬部材試験の試験項目は、温度計測とコア強度試験である。部材寸法、温度測定位置およびコア採取位置を図-6 に示す。また、後日、練上がり温度を実機実験時と合わせて、BC50 を練り混ぜ、断熱温度上昇試験 (断熱精度: 0.1°C/DAY) を行い、断熱温度上昇特性について検討した。

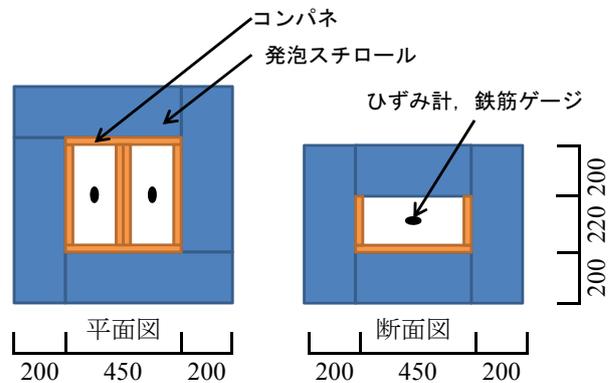


図-5 簡易断熱養生試験体の概要

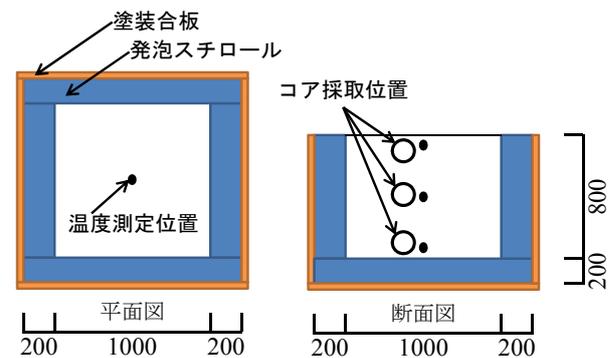


図-6 模擬部材試験体の概要

3.2 実験結果及び考察

3.2.1 フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を、コンクリートの配調合とともに表-5 に示す。LBB50 では練り上がりから 30 分で急激なスランプロスが生じた。既往の研究で指摘されているアルミネート系水和物の反応によるものと推察される⁵⁾。

このため、BC50では、その水和反応を抑制する分散剤を含むAE減水剤を用いたところ、使用量は多くなったものの、90分程度まで一定のスランプを保持できることを確認できた。LBB50においても同じAE減水剤を用いることで、スランプロスを抑制できると思われる。

3.2.2 硬化コンクリート

1) 強度発現

圧縮強度試験結果を図-7に示す。LBB50、BC50の標準養生供試体の強度発現は材齢によらず同程度であり、ともに材齢28日以降の強度の伸びは想定より小さかった。一般に高炉セメントは長期強度の増進が大きく、管理材齢を延長することも多いが、今回のケースでは、管理材齢は28日が適当と考えられる結果となった。

また、BC50のコア強度は材齢28日以降、全く伸びなかった。硬化時の水和発熱による高温履歴を受けた影響と考えられる。

2) 自己収縮

図-8に20℃一定条件下の自己収縮ひずみと簡易断熱条件における自己収縮に相当すると考えられるひずみ(=実ひずみ-温度ひずみ)を示す。

20℃条件下のBC50では、初期に大きく膨張し、材齢5日以降に収縮へ推移しているのに対し、簡易断熱養生したBC50やLBB50では、材齢14日まで膨張挙動が継続し、その後収縮側へ推移した。また、簡易断熱養生による挙動は、材齢28日の時点で、まだ膨張側にあり、今回の試験ケースでは、自己収縮はほぼ無視できると判断された。

既往の研究でも若材齢時に60℃程度の高温履歴を受けた場合、温度下降域において膨張挙動を示す傾向が報告されており⁶⁾、本研究においては最高温度がいずれも50℃程度であり、60℃には至らなかったものの、同様の現象が生じていると推察される。なお、一般に高炉セメントは自己収縮量が大きいとされている⁷⁾が、SO₃量や比表面積によっては自己収縮量を抑制できることも報告されており⁸⁾、高炉スラグを高含有したコンクリートでも、化学成分や粉末度の違いによって、自己収縮量は大きく異なると推察される。

3) 長さ変化

長さ変化率の測定結果を図-9に示す。6か月乾燥後の長さ変化率はいずれも 5.0×10^{-4} 以下と極めて小さかった。

石灰岩砕石の使用に加え、前述の若材齢時の膨張挙動が乾燥収縮抑制の要因と推察される。若材齢時

の膨張量が大きいBC50の方がLBB50より長さ変化率は幾分小さかった。

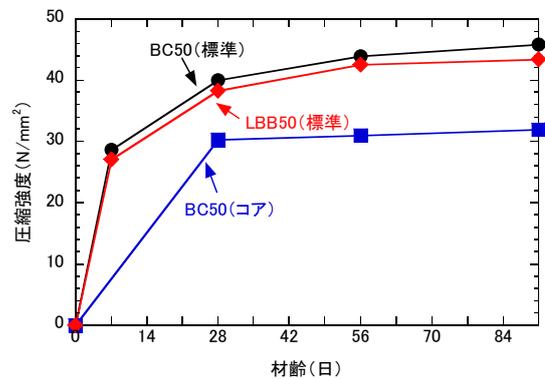


図-7 圧縮強度試験結果

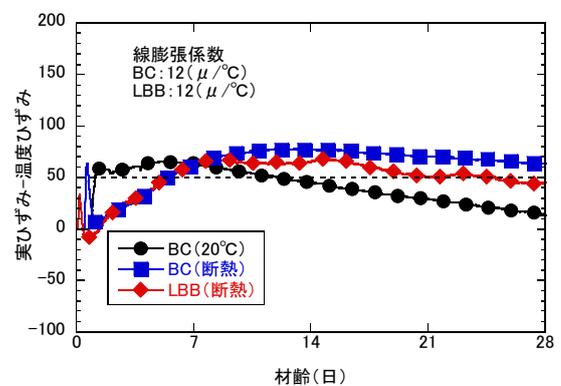


図-8 自己収縮試験結果

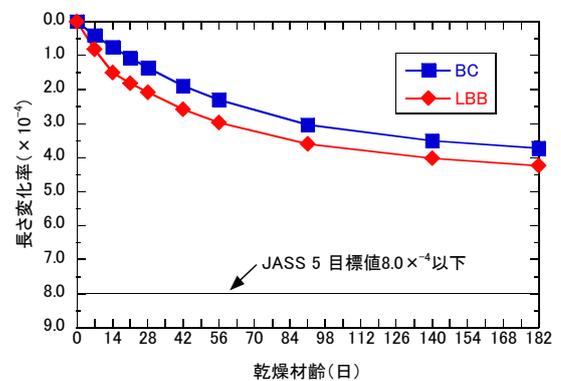


図-9 長さ変化試験結果

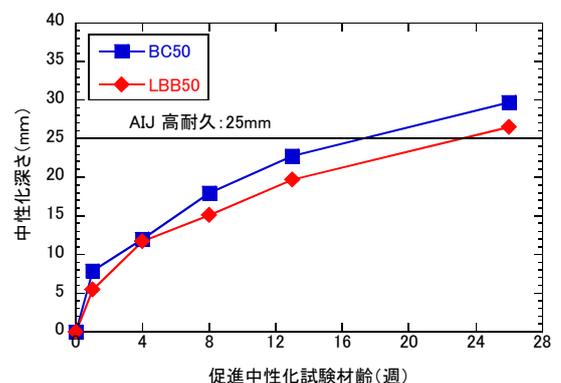


図-10 促進中性化試験結果

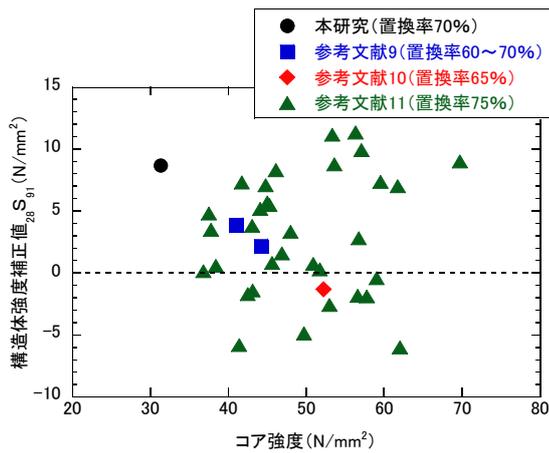


図-11 材齢91日のコア強度と $_{28}S_{91}$ の関係

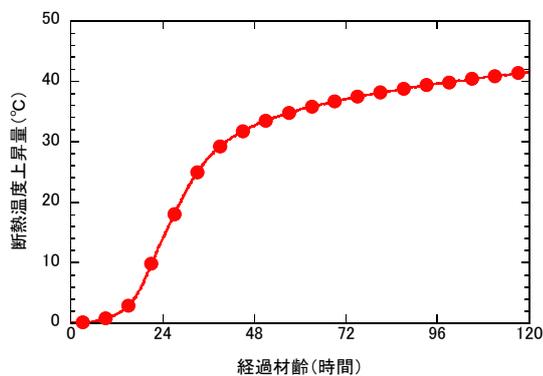


図-12 断熱温度上昇試験結果

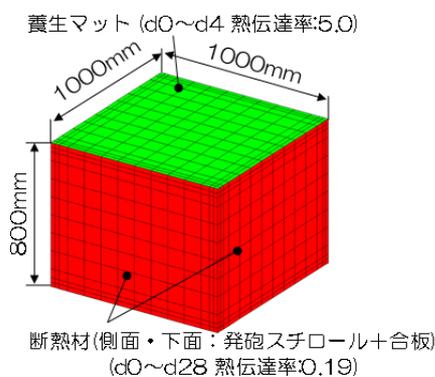


図-13 解析モデル

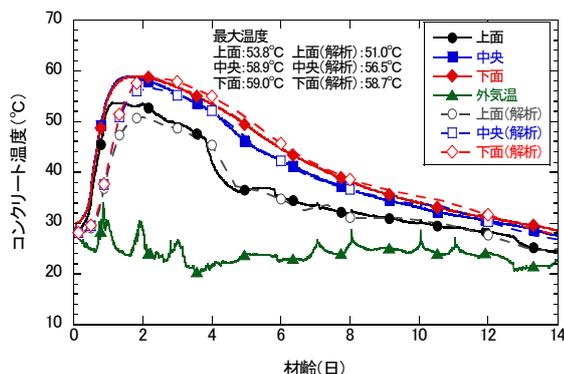


図-14 模擬部材の温度計測結果と解析結果の比較

4) 促進中性化

中性化深さの測定結果を図-10に示す。中性化深さは、BC50、LBB50ともにAIJ「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説」の26週で25mm以下という値を上回っていることから、この強度レベルでは、建築の一般の地上躯体への利用は厳しいと判断される。

なお、高炉スラグの分量が多いBC50の方が、LBB50よりも中性化深さは幾分大きくなった。

3.2.3 模擬部材および断熱温度上昇特性

1) 構造体強度補正值

図-11に材齢91日のコア強度と $_{28}S_{91}$ (材齢28日の標準養生強度と材齢91日のコア強度との差)の関係を既往の高炉スラグ高含有コンクリートの結果(9・11)と合わせて示す。

文献によって、部材条件、高炉スラグ微粉末の品質や分量は同一ではなく、温度履歴も異なることから、材齢91日のコア強度と $_{28}S_{91}$ の関係は、大きくばらつくが、今回の 8.7N/mm^2 という結果は、上限に近い値で、JASS5に記載されているNやBBの夏期のSM値 6N/mm^2 よりも大きかった。長期強度の増進が認められなかったことが原因と考えられる。

2) 断熱温度上昇特性

断熱温度上昇試験結果を図-12に示す。発熱の立ち上がりが遅く、材齢1日までの発熱量が極めて小さいのがわかる。スランプロスを防ぐために、水和反応を抑制する分散剤を含むAE減水剤を使用していることから、凝結が遅延しているのみでなく、ごく初期の強度発現が遅いことが推察される。

図-13に示す解析モデルを設定して、3次元FEMによる解析を実施した。熱伝達境界の条件は、上面の湿潤養生期間(材齢4日まで)の熱伝達率を $5.0\text{W/m}^2\text{C}$ 、それ以降は $14.0\text{W/m}^2\text{C}$ 、側面および下面(断熱材+合板)の熱伝達率は $0.19\text{W/m}^2\text{C}$ とした。

部材内部の温度計測結果を、断熱温度上昇特性を用いて実施した解析結果と合わせて図-14に示す。模擬部材の内部温度の実測値と解析結果を比較すると、最高温度は概ね近い値を示しており、収束温度にも差がないことから、断熱温度上昇実験結果を用いれば、実部材の温度予測は可能と判断された。

4. ひび割れ抵抗性の解析的検討

4.1 解析条件

高炉スラグを高含有したコンクリートは、水和発熱が小さいため、マスコンクリート部材に使用され

ることが想定される。そこで、図-15のマットスラブおよび図-16の橋脚を対象にFEMを用いた温度応力解析を行って、LBB、BCとN、M、Lおよび高炉セメントB種（記号：BB）を用いた場合の温度ひび割れの抵抗性を比較検討することにした。

1) コンクリートの条件

コンクリートを出荷する工場は、3章の工場とし、この工場を出荷している実際の配調合をベースに、配調合を決めた。配調合条件を、圧縮強度発現式の係数とともに表-6に示す。ここでは構造体強度補正值については考慮せず、呼び強度を27、マットスラブではスランブを15cm、橋脚ではスランブを8cmとした。また、圧縮強度の計算には、式(1)の強度発現式を使用した。条件1の係数は実験結果をベースとし、条件2の係数はメーカーの技術資料、条件3~5の係数はコンクリート標準示方書から引用した。

引張強度、ヤング係数、ポアソン比および線膨張係数については、表-7に示すとおりである。BC、LBBおよびBBを用いたコンクリートの線膨張係数は $12\mu/\text{°C}$ とした。なお、BCの線膨張係数については、埋込みずみ計を入れたコンクリートの試験体を用いた実測値である。

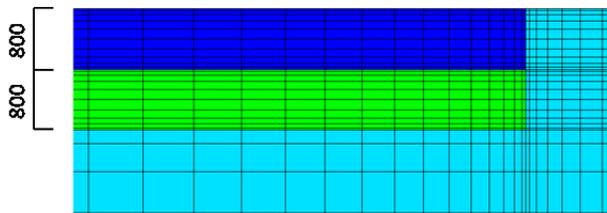


図-15 マットスラブの解析モデル

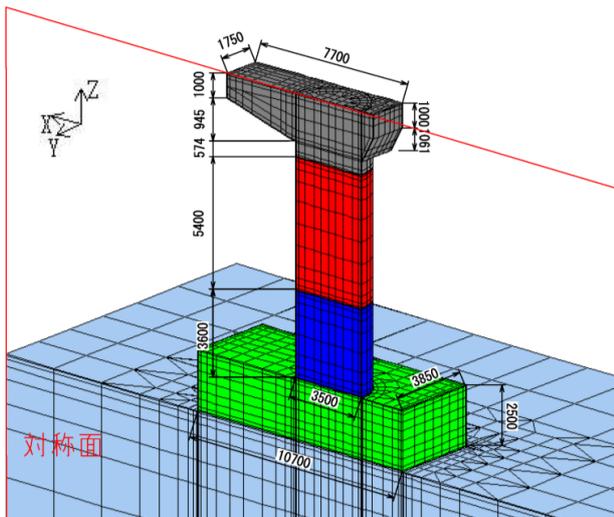


図-16 橋脚の解析モデル

$$\frac{t - S_f}{a + b \cdot (t - S_f)} f'_c(t_{28}) \quad \text{式(1)}$$

ただし、 t ：材齢(日)

$f'_c(t_{28})$ ：材齢28日における圧縮強度

表-6 配調合条件と圧縮強度発現式の係数

条件	配調合	W/B (%)	単位結合材量 (kg/m³)	圧縮強度発現式の係数			
				a	b	Sf	f' c (t ₂₈)
1	27 15 20BC	50.0	344	6.70	0.76	0.53	36.7
	27 8 20BC	50.0	316				
2	27 15 20LBB	50.0	344	6.02	0.74	0.55	35.5
	27 8 20LBB	50.0	310				
3	27 15 20N	53.5	328	3.77	0.86	0.37	38.0
	27 8 20N	53.5	301				
4	27 15 20M	52.5	317	9.25	0.67	0.42	34.8
	27 8 20M	52.5	294				
5	27 15 20BB	52.3	329	7.02	0.75	0.42	36.3
	27 8 20BB	52.3	303				

表-7 コンクリートの条件

項目	数式	備考
引張強度 (N/mm²)	$0.13 \times f'_c(t)^{0.85}$	標準示方書 2012 年度版 $f'_c(t)$ ：圧縮強度
ヤング係数 (N/mm²)	$\phi(t) \times 6300 \times f'_c(t)^{0.45}$	JCI マスコン指針 $\phi(t)$ ：ヤング係数の補正係数
ポアソン比	0.20	標準示方書 2012 年度版
線膨張係数 ($\mu/\text{°C}$)	条件 3, 4 10 条件 1, 2, 5 12	条件 1 は実験値

表-8 温度予測に関する条件

項目	内容	設定値
温度	外気温	気象庁観測地点データ
	打込み温度	外気温+5°C
	地盤の固定温度	16.6°C
断熱温度上昇量	条件 1：図-17の実験値 条件 2：メーカーの技術資料 条件 3~5：コンクリート標準示方書 2012 年度版	
熱定数データ	コンクリートの熱伝導率	3.2 W/m°C
	コンクリートの比熱	1.15 kJ/kg°C
	地盤の熱伝導率	1.94 W/m°C
	地盤の比熱	0.79 kJ/kg°C
	湿潤養生期間の熱伝達率	5.0 W/m²°C
	型枠脱型までの熱伝達率	8.0 W/m²°C
養生後の熱伝達率	14.0 W/m²°C	

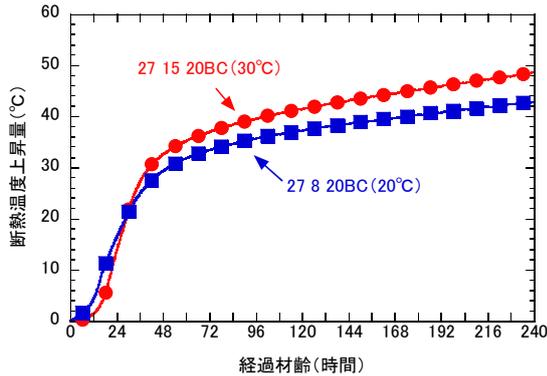


図-17 断熱温度上昇試験結果

2) 温度予測に関する条件

マットスラブは打込みを9月上旬とし、厚さ0.8mを打込んだ後、7日後に2層目を0.8m打ち込む条件とし、橋脚はフーチングを4月上旬に、柱1ロットを4月中旬に、柱2ロット目を4月下旬に、最後の梁を5月上旬に打ち込む条件とした。

温度予測に関する条件を表-8に示す。断熱温度上昇量は、条件1(BC)については図-17の実験値とし、マットスラブでは27 15 20BCの値、橋脚では27 8 20BCの値を、条件2(LBB)についてはメーカーの技術資料の値を、その他のセメントを用いた場合についてはコンクリート標準示方書2012年度版の式を、それぞれ参考とした。

4.2 マットスラブを対象とした温度応力解析

1) 温度予測

条件1(BC)の温度の経験値図は図-18に示すとおりであり、2層目中央のコンクリート温度が最も高くなった。

図-19に2層目中央の温度解析結果を示す。結合材の種類では、最高温度はN(68.0°C) > BB(65.3°C) > M(57.9°C) > BC(57.0°C) > LBB(54.3°C)の順であり、LBBの温度が最も小さく、BCはMと同程度であった。

2) ひび割れ指数

条件1(BC)のひび割れ指数の経験値図は図-20に示すとおりであり、1層目中央のひび割れ指数が最も小さくなった。

図-21に各条件の1層目中央のひび割れ指数の解析結果を示す。ひび割れ指数の最小値はBB(1.16) < N(1.29) < BC(1.34) < M(1.70) < LBB(1.82)の順となった。BCのひび割れ指数の最小値がMより小さくなったのは、BCの線膨張係数がMより大きいことに起因するものと考えられる。

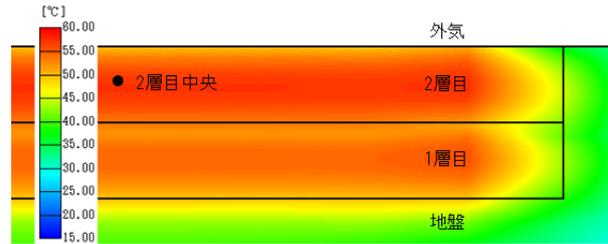


図-18 条件1(BC)の温度の経験値図

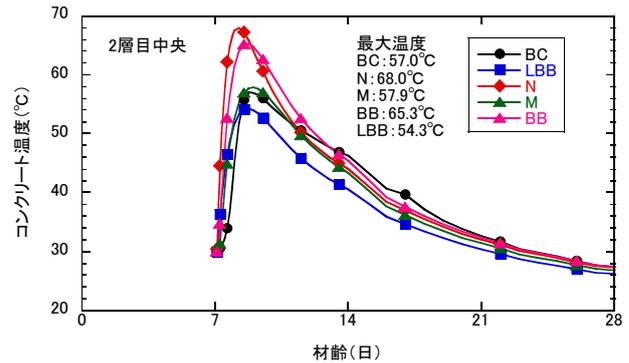


図-19 2層目中央温度の温度解析結果

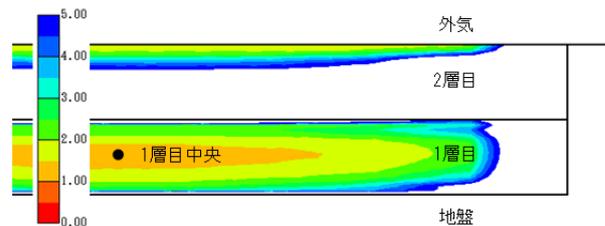


図-20 条件1(BC)のひび割れ指数の経験値図

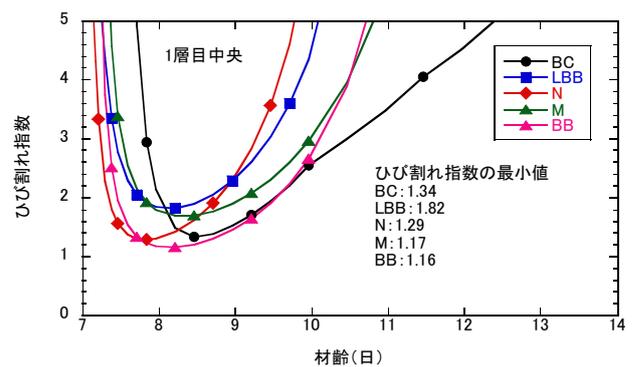


図-21 1層目中央のひび割れ指数の解析結果

4.3 橋脚を対象とした温度応力解析

1) 温度

条件1(BC)のコンクリート温度の経験値図を図-22に示す。4層目の中央の温度が最も高くなった。

図-23と図-24に、4層目中央と表層の温度解析結果を示す。中央の最高温度はN(69.8°C) > BB

(68.6℃) > M (59.6℃) > LBB (55.3℃) > BC (54.6℃) の順となり、最高温度は M より LBB および BC の方が低くなった。

2) ひび割れ指数

条件 1 (BC) のひび割れ指数の経験値図を図-25 に示す。中央のひび割れ指数は 4 層目で最も小さくなった。

図-26 に各条件の 4 層目中央のひび割れ指数の解析結果を示す。ひび割れ指数の最小値は BB (1.19) < N (1.43) < LBB (1.55) < BC (1.60) < M (1.62) の順であり、ひび割れ指数の最小値は M が最も大きくなった。最高温度が M より小さいにもかかわらず、LBB と BC でひび割れ指数が小さくなったのは、線膨張係数の影響によるものと考えられる。

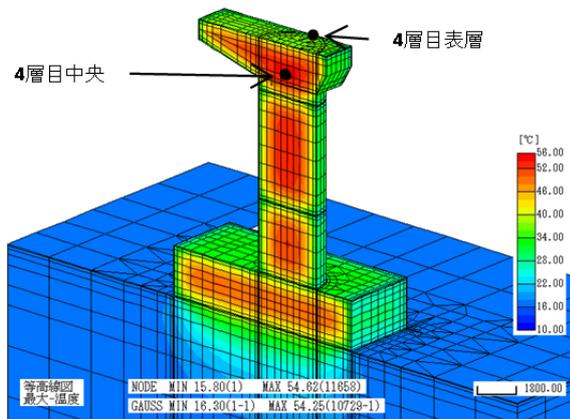


図-22 条件 1 (BC) の温度の経験値図

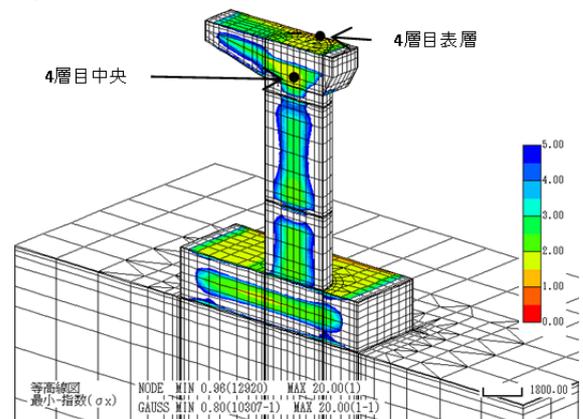


図-25 条件 1 (BC) のひび割れ指数の経験値図

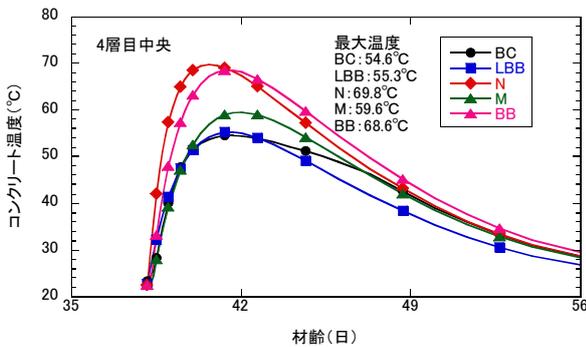


図-23 4 層目中央温度の温度解析結果

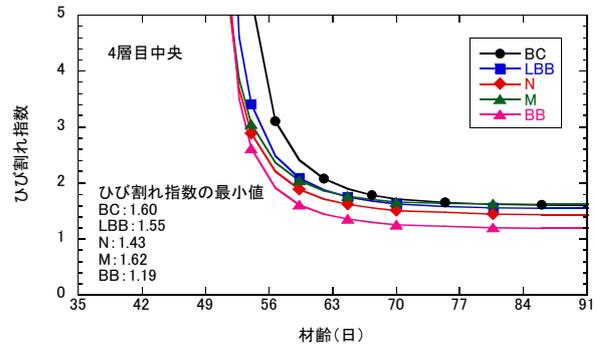


図-26 4 層目中央のひび割れ指数の解析結果

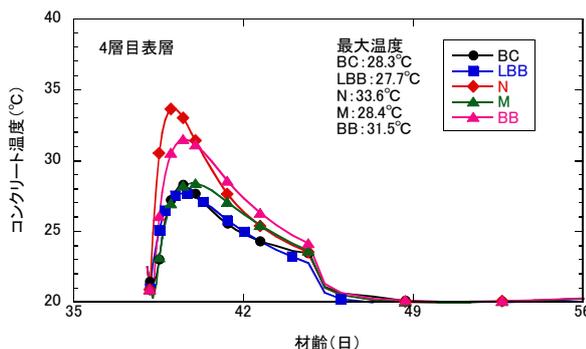


図-24 4 層目表層温度の温度解析結果

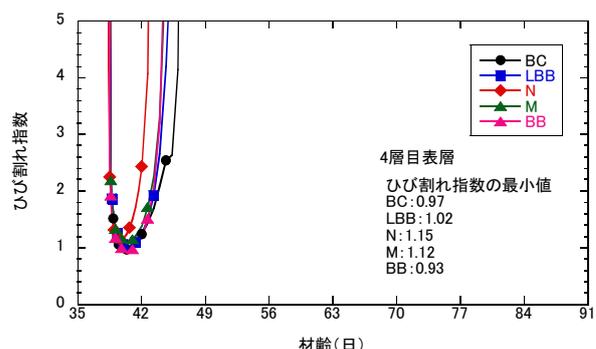


図-27 4 層目表層のひび割れ指数の解析結果

5. まとめ

本研究では、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの基本特性に関する実験や温度応力解析を行い、種々のセメント・コンクリートと比較検討を行った。主な結果は、次のとおりである。

- (1) 高炉スラグ微粉末の分量だけでなく、粉末度や化学組成によって、コンクリートの特性は大きく異なり、高炉スラグ微粉末の分量を増加しても十分な発熱量の低減効果が得られない場合があった。
- (2) 高炉スラグ高含有コンクリートは、スランプロスが大きくなる傾向にあるが、アルミネート系水和物の反応を抑制する分散剤を含むAE減水剤を使用することで、一定の時間、スランプを保持できた。ただし、その場合、凝結硬化が遅れる傾向が認められた。
- (3) 高温履歴を受けた場合、高炉スラグ高含有コンクリートでも長期強度は増進しない傾向にあり、高炉スラグ微粉末の分量を70%としたケースでは、JASS5に記載されている、普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種を用いた場合の夏期のSM値 $6\text{N}/\text{mm}^2$ よりも構造体強度補正值は大きくなった。
- (4) 一般に高炉セメントは自己収縮量が大きいとされているが、 SO_3 量や比表面積によっては自己収縮量を抑制できることも報告されており、低発熱・収縮抑制型高炉セメントを用いたケースだけでなく、高炉スラグ微粉末の分量を70%としたケースでも、初期に認められる膨張挙動の影響で、自己収縮は小さくなった。
- (5) マスコンクリートを対象に、温度応力解析を行った結果、高炉スラグ高含有コンクリートは、発熱量が小さいこともあり、線膨張係数の影響を加味しても、外部拘束によるひび割れ抵抗性は、高いことが示された。しかしながら、初期強度発現が遅いため、内部拘束によるひび割れ抵抗性は幾分低くなる傾向を示した。

謝辞

本研究におけるレディーミクストコンクリート工場における実験に関しては、土木技術本部基盤技術部だけでなく、生産技術本部建築技術部の協力を得ました。ここに記して心から御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) 森田康夫：環境配慮型のコンクリートの建築構造物への適用コンクリート工学 Vol.51 No.7, p584-589, 2013.07
- 2) 田中秀樹：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの実構造物への適用 日本建築学会大会学術講演梗概集 pp537-538, 2015年9月
- 3) 溝渕麻子：高炉セメントC種を用いたコンクリートの構造物への適用 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp404-405, 2016年8月
- 4) 日本コンクリート工学会：混和材を大量使用したコンクリートのアジア地域における有効利用に関する研究委員会報告書, p.7, 2015年10月
- 5) 西祐宜ほか：高炉スラグ微粉末を大量混合したコンクリートの経時安定性改善に関する一提案(その1), 土木学会第67回年次学術講演会, pp.923-924, 2012
- 6) 丸山一平ほか：セメント硬化体の若材齢体積変化と線膨張係数の経時変化, セメント・コンクリート論文集, Vol.63(2009), No.1, p.77-84
- 7) 三浦智哉ほか：コンクリートの自己収縮に及ぼす高炉スラグ微粉末の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.1, 1995
- 8) 和地正浩ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性(その3 SO_3 量と水セメント比が自己収縮, 乾燥収縮, 中性化に及ぼす影響), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2011
- 9) 関田徹志ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの構造体強度補正值に関する実験検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 10) 辻大二郎ほか：高炉スラグ高含有セメントを用いた場所打ちコンクリート杭の品質, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, 2015
- 11) 小林利充ほか：混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状(その13 2成分系の構造体コンクリート強度), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2015