

高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートの性状

その1 試験概要とフレッシュ性状

Effects of granulated blast-furnace slag as the mineral admixtures to concrete properties Part1.
Outline of experiment and fresh concrete

藺井孫文*1

概 要

コンクリートに多用しているポルトランドセメントの製造には二酸化炭素(766.6kg-CO₂/t)発生量が多い。現状において製造される高炉セメントはB種が殆どであり、A種およびC種の市場への一般の流通はない。このような背景の中、高炉スラグ微粉末を幅広い使用率(0~70%)で混和材料として用いたコンクリートについて、その各種性状を把握し、建築物への汎用的な適用について検討を行った。その1では、試験概要とフレッシュ性状等を検証した結果について報告する。

key words : 環境配慮型コンクリート、高炉スラグ微粉末、使用率、ブリーディング、凝結

1. はじめに

建設業界においては、エネルギーの消費量や二酸化炭素の排出量が大きく、建築分野に限定しても住宅や業務ビルの建設では国内全体の約10%の二酸化炭素を排出するとも試算される。また、セメント産業では同様に約4%の二酸化炭素の排出量を占めており、構造材料として最も使用量が多いコンクリート分野においては、二酸化炭素排出量削減の課題は重要となる。

経済産業省では、非エネルギー起源の二酸化炭素の削減のため、混合セメントの利用拡大の方策¹⁾を示し、2013年度の利用率22.1%から2030年度には25.7%とすることを目標としている。建築分野での混合セメントの利用率拡大については、杭や地下および地上構造物など幅広い部位・部材に適用することが理想となる。

混合セメントのひとつである高炉セメントは、JIS R 5211「高炉セメント」でセメント中の高炉スラグの分量に応じてA~C種に分類されている。高炉セメントでは、構成材料における二酸化炭素の排出量の原単位²⁾がポルトランドセメントの766.6kg-CO₂/tに対して混合される高炉スラグ微粉末(以下BFとする)が26.5kg-CO₂/tであることから、高炉スラグの分量が多くなるほど、二酸化炭素排出の削減量も大きくなる。

また、日本建築学会の建築工事標準仕様書JASS5では、それぞれの高炉セメントの特性が示されており、A種は普通ポルトランドセメントと同様な性質を持つことから上部構造物への適用も見込め、また、B種やC種では杭や地下構造物が主となるが、その利点を生かした適用方法

があると考えられる。

しかし、現状において製造される高炉セメントはB種が殆どであり、A種およびC種の市場への一般の流通はない。また、高炉セメントB種においても、JIS R 5211での高炉スラグの分量規定は30%を超え60%以下なのに対し、市場の製品は40~45%に限定されており、前述のような適材適所への使い分けは難しい。

一方で、近年ゼネコンが主導となり、主に高炉スラグ微粉末を高炉セメントC種や、それ以上の分量で高含有した環境配慮型コンクリートの開発・実用も多く見られる。これらのコンクリートはいずれも、高炉スラグ微粉末などの混和材料をポルトランドセメントの代替として使用するという概念は同じものの、混和材料の種類や量などの仕様が異なるため、生コン工場においては各ゼネコンに応じた材料の手配や調査設計、サイロや貯蔵ビンの確保といった煩雑な管理が負担となる面もある。

1.1 研究の概要

このような背景の中、各種の高炉セメントの使い分けでなく、高炉スラグ微粉末を混和材料として用いた環境配慮型コンクリートは、使用率に応じて各部位に求められる性能を満たし、かつ、生コン工場におけるサイロや流通といった材料管理の負担も軽減することができると考えられる。そこで、本研究では、高炉スラグ微粉末を幅広い使用率で混和材料として用いたコンクリートについて、その各種性状を把握し、建築物への汎用的な適用について検討を行った。

本研究は、13社で組織された共同研究「環境配慮型コ

*1 Magofumi SONOI

技術本部技術研究所 主任研究員

ンクリートの諸性状および評価方法に関する研究会」で実施したものであり、表-1 に示す研究範囲について、その1では各種使用率で高炉スラグ微粉末を混合したコンクリートの諸性状を、その2では、硬化コンクリートの圧縮強度および静弾性係数および高炉スラグ微粉末を高い割合で使用したコンクリートの低温環境下の性状を報告する。なお、コンクリートの製造および施工に関する検討は実機による実験データとして収集予定である。

表-1 本研究の範囲

要因	水準
BF*使用率	10%~70% (A種クラス~C種クラス)
BF*の品質	高炉スラグ微粉末 4000 (JIS A 6206)
設計基準強度	18~36N/mm ² (普通コンクリート)
コンクリート性状	・フレッシュコンクリート：経時変化 ブリーディング、凝結時間、温度上昇量 ・強度：圧縮強度、静弾性係数 ・耐久性：長さ変化、中性化、凍結融解

(※BF：高炉スラグ微粉末)

2. 室内実験の概要

室内実験は、表-2 に示す要因と水準とし、表-3 に示す組合せで全 40 調査を実施した。セメントに対して混和材として混合する高炉スラグ微粉末 4000 (以下、BF) は使用率 10~70%とし、それぞれの BF 使用率により、水結合材比 (以下、W/B) を 3 水準とした。実験には各 3 種類の BF (a、b、c) および混和剤種類 (イ、ロ、ハ) を使用し、一部の調査においては無水せっこうを用いて三酸化硫黄 (SO₃) の量を調整した調査や、水中コンクリート用とした調査についても実施した。

なお、本研究では BF 使用率に応じて、例えば BF 使用率 10%を超え 30%以下を「A 種クラス」と表記する。これは、各 BF 使用率において JIS A 5211 で高炉セメント

表-2 室内実験の要因と水準

要因	水準
BF 使用率	0% (プレーン：記号 N)
	10%、20%、30% (A 種クラス)
	45%、60% (B 種クラス)
	70% (C 種クラス)
水結合材比 (W/B)	45%、55%、65% (BF 使用率 0~45%)
	35%、45%、55% (BF 使用率 60~70%)
BF 種類	表-5 (記号：a、b、c)
三酸化硫黄量 (SO ₃ 量)	約 2%※、4% ※SO ₃ 量 2%は、各 BF に含まれる SO ₃ 量とする。
混和剤種類	表-4 (記号：イ、ロ、ハ)
環境温度	20℃ (低温環境における凝結試験においては 20℃、10℃、5℃で実施)
その他	水中コンクリート用調査 (記号：W)

の種類および高炉スラグの分量の関係と対応することを示すものである。また、日本建築学会「高炉セメントまたは BF を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針 (案)・同解説³⁾」では、BF 使用率により、20%以上 30%以下を「高炉セメント A 種相当」と定義しているが、本研究における BF 使用率と呼び名の関係はこれとは一致しない。

表-3 室内実験の組合せ

No.	種類	BF 使用率 (%)	W/B (%)	BF 種類	SO ₃ 量 (%)	混和剤種類	
1	N	0	65	—	—	イ	
2			55	—	—	イ	
3			45	—	—	ロ	
4			—	—	—	ハ	
5			—	—	—	イ	
6	A 種クラス	10	65	a	2	イ	
7			55	a	2	イ	
8			45	a	2	イ	
9		20	55	65	a	2	イ
10				a	2	イ	
11				a	2	ロ	
12				a	2	ハ	
13				b	2	イ	
14				c	2	イ	
15		45	a	2	イ		
16		30	65	a	2	イ	
17				55	a	2	イ
18				45	a	2	イ
19		B 種クラス	45	65	a	2	イ
20				55	a	2	イ
21	45			a	2	イ	
22	60		55	a	2	イ	
23				a	4	イ	
24				a	2	ロ	
25				a	2	ハ	
26				b	2	イ	
27				c	2	イ	
28	C 種クラス		70	35	a	2	イ
29				55	a	2	イ
30				a	2	イ	
31		a	4	イ			
32		a	2	ロ			
33		a	2	ハ			
34		b	2	イ			
35		c	2	イ			
36	70 (W)	35	a	2	イ		
37			55	a	2	イ	
38			45	a	2	イ	
39			35	a	2	イ	
40							

2.1 使用材料

表-4 に、実験における使用した混和剤の品質を示す。混和剤は製造者の異なる3種類(イ、ロ、ハ)を使用し、製造者の試験室において練混ぜを行った。セメントは同一ロットの普通ポルトランドセメントを使用した。BF 種類は a、b、c の3種類(表-5)とし、いずれも、せっこう添加タイプを使用した。各種 BF の品質は、JIS A 6206 (コンクリート用高炉スラグ微粉末) による規格値を満たし、比表面積約 4300cm²/g、三酸化硫黄約 2%、塩基度

表-5 高炉スラグ微粉末 4000 の品質

品 質	JIS A 6206 による規格値	BF 種類			
		a	b	c	
密度 (g/cm ³)	2.80 以上	2.89	2.86	2.89	
比表面積 (cm ² /g)	3500 以上 5000 未満	4370	4290	4390	
活性度指数 (%)	材 齢 7 日	55 以上	73	70	79
	材 齢 28 日	75 以上	95	91	104
	材 齢 91 日	95 以上	105	102	118
フロー値 (%)	95 以上	99	96	98	
酸化マグネシウム (%)	10.0 以下	5.75	6.65	6.11	
三酸化硫黄 (%)	4.0 以下	2.06	2.07	1.92	
強熱減量 (%)	3.0 以下	0.32	1.24	0.63	
塩化物イオン (%)	0.02 以下	0.003	0.003	0.005	
高炉水砕スラグの塩基度	1.60 以上	1.89	1.80	1.80	

約 1.8 のものを使用した。無水せっこうは、三酸化硫黄量 4%とした調合に使用した。骨材は各種試験結果への影響を小さくするため、各製造者の試験室で使用している JIS A 6204 (コンクリート用化学混和剤) のコンクリート試験用骨材を使用した。練混ぜ水には上水道水を使用した。

2.2 混和剤区分

表-6 に使用した混和剤の区分を示す。混和剤は一般に入手可能で、BF 使用率に応じて対応可能なものを選定した。

W/B35%、45%については高性能 AE 減水剤 (以下、SP) を使用し、BF 使用率 70%の水中コンクリート用調合に対してのみ AE 減水剤 (以下、Ad) を使用した。W/B55%、65%については Ad を使用した。

2.3 練混ぜ方法

練混ぜは、JIS A 1138 (試験室におけるコンクリートの作り方) に準拠した。練混ぜには強制二軸練りミキサを使用した。材料の投入順序および練混ぜ時間は、粗骨材全量、細骨材半量、セメント全量、BF 全量、細骨材半量の順にミキサへ投入し 10 秒間の空練りの後に、水と混和剤をミキサに投入し 90 秒間練り混ぜた。なお、BF 使用率 60%、70%に使用した SP については、練混ぜ時間を 30 秒間延長し 5 分間静置した後に排出した。

表-6 使用した混和剤の区分

種 類	BF 使用率 (%)	W/B (%)			
		35	45	55	65
N	0	—	SP	Ad	Ad
A 種 クラス	10	—	SP	Ad	Ad
	20	—	SP	Ad	Ad
	30	—	SP	Ad	Ad
B 種 クラス	45	—	SP	Ad	Ad
	60	SP	SP	Ad	—
C 種 クラス	70	SP	SP	Ad	—
	70 (W)	Ad	Ad	Ad	—

※記号 Ad は AE 減水剤、SP は高性能 AE 減水剤、W は水中コンクリート用調合を示す。

表-4 使用した混和剤の品質

種類	記号	品質		
		混和剤種類：イ	混和剤種類：ロ	混和剤種類：ハ
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3280cm ² /g, SO ₃ 量 2.10%		
高炉スラグ微粉末 4000	BF	a, b, c	a	a
無水せっこう	CS	粉末度 3620cm ² /g CaO:40.3%, SO ₃ :57.1%	—	—
細骨材	S	掛川産山砂 粗粒率 2.77 表乾密度 2.58 g/cm ³ ,	大井川産陸砂 粗粒率 2.71 表乾密度 2.58 g/cm ³ ,	大井川産陸砂 粗粒率 2.69 表乾密度 2.58 g/cm ³ ,
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.65g/cm ³ , 実積率 58.2%	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.65g/cm ³ , 実積率 62.0%	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.66g/cm ³ , 実積率 62.0%

3. 試験方法および検討要因

表-7 に試験方法と検討要因の組合せを示す。検討要因は BF 使用率、W/B、BF 種類、SO₃ 量、混和剤種類である。以下に試験別に検討要因について説明する。なお、①～⑤の試験結果はその 1 で、⑥～⑩の試験結果はその 2 にて報告する。

- ① スランプ試験：JIS A 1101（コンクリートのスランプ試験）に準拠し、全ての要因について検討した。
- ② 空気量試験：JIS A 1128（フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法）に準拠し、全ての要因について検討した。
- ③ ブリーディング試験：JCI-S-015（小型容器によるコンクリートのブリーディング試験方法）に準拠し、BF 使用率 0%、20%、60%、70%において W/B、BF 種類、SO₃ 量、混和剤種類について検討した。また、容器の内法寸法は φ150×300mm のぶりき製の型枠を使用し、測定間隔は 30 分とした。
- ④ 凝結時間試験：JIS A 1147（コンクリートの凝結時間試験方法）に準拠し、W/B、SO₃ 量について検討した。
- ⑤ 断熱温度上昇試験：空気循環式で実施し、BF 使用率 70%、W/B=45%において、BF 種類の比較を行い検討した。また、鋼製の型枠（φ400×400mm、厚さ 0.6mm）を使用し、測定間隔は測定時間 0～72 時間までは 2 時間とし、それ以降は温度上昇が認められなくなるまで 6 時間とした。

- ⑥ 圧縮強度試験：JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に準拠し、全ての要因について検討した。また、供試体の寸法は φ100×200mm とし、標準養生を行い、材齢 7、28、63、91 日において試験を実施した。
- ⑦ 静弾性係数試験：JIS A 1149（コンクリートの静弾性係数試験方法）に準拠し、全ての要因について検討した。また、材齢 28、91 日の圧縮強度試験時に行った。
- ⑧ 長さ変化率試験：供試体両端中央部間の長さをレーザ変位計により測定する非接触方式とし、BF 使用率 0%、20%、60%、70%において W/B、SO₃ 量について検討した。また、測定用の供試体寸法は 100×100×400mm とした。脱型後、材齢 7 日まで標準養生を行い、標準養生終了時点を基長として、その後、温度 20℃、湿度 60%の環境に保存した。測定は、乾燥期間 1、4、8、13、26、41 週時に実施した。
- ⑨ 促進中性化試験：JIS A 1153（コンクリートの促進中性化試験方法）に基づいて実施し、混和剤種類を除く全ての要因について検討した。また、供試体の個数は各調査 2 個とした。中性化深さの測定は、促進試験開始前と促進期間が 1、4、8、13、26 週時に実施した。
- ⑩ 凍結融解試験：JIS A 1148（コンクリートの凍結融解試験方法）に準拠し、BF 使用率 0%、20%、60%、70%において W/B、SO₃ 量について検討した。また、脱型後、材齢 28 日まで標準養生を行い、その後、水中凍結融解試験（A 法）を 300 サイクルまで実施した。

表-7 試験方法および検討要因の組合せ

報告	試験項目	試験方法	検討要因														
			BF 使用率(%)								W/B	BF 種類	SO ₃ 量	混和剤種類			
			N	A 種クラス			B 種クラス		C 種クラス								
			0	10	20	30	45	60	70	70 (W)	65~35%	a・b・c	2%・4%	イ・ロ・ハ			
その1	フレッシュコンクリート	①スランプ	JIS A 1101	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
		②空気量	JIS A 1128	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		③ブリーディング	JCI -S- 015	○	-	○	-	-	○	○	-	○	○	○	○	○	○
		④凝結時間	JIS A 1147	○	-	○	-	-	○	○	-	○	-	○	-	-	-
		⑤断熱温度上昇	空気循環式	-	-	-	-	-	-	○	-	45%のみ	○	-	-	-	-
その2	硬化コンクリート	⑥圧縮強度	JIS A 1108	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	
		⑦静弾性係数	JIS A 1149	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	○
		⑧長さ変化率	レーザによる非接触式	○	-	○	-	-	○	○	-	○	-	○	-	-	-
		⑨促進中性化	JIS A 1153	○	○	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-	-
		⑩凍結融解	JIS A 1148	○	-	○	-	-	○	○	○	○	○	-	○	-	-

4. フレッシュ試験（スランプ試験と空気量試験）

室内実験で行った代表的なコンクリートの調合とフレッシュコンクリートの試験結果を表-8 に示す。目標性能は、原則、Ad を用いたものでスランプ 18±2.5cm、SP を用いたものでスランプ 21±2.0cm とし、空気量は全ての調合で 4.5±1.5% で管理した。

4.1 調合条件

調合条件は、いずれの BF 種類においても単位粗骨材かさ容積は、混和剤 Ad 使用では 0.60m³/m³ とし、SP 使用では 0.58m³/m³ とした。また、単位水量は化学混和剤の種類ごとに異なる骨材を使用したため、目視やハンドリング状態が目標スランプおよび使用した混和剤区分 (Ad、SP) ごとに概ね同等となるように設定した。水中コンクリート調合では、混和剤に Ad を用いて単位水量を 190kg/m³ に設定した。各コンクリートのスランプおよび空気量は、全て目標値を満足する結果が得られた。

また、BF 使用率 70%、W/B=45%における混和剤 3 種類および BF 使用率、W/B が同様の水中コンクリートの経時変化試験を行った。

4.2 試験方法

スランプ試験は JIS A 1101 (コンクリートのスランプ試験) に準拠し、全ての要因について検討した。

空気量試験は JIS A 1128 (フレッシュコンクリートの空気量の圧力による試験方法) に準拠し、全ての要因について検討した。

4.3 試験結果および考察

スランプの経時変化を図-1 に、空気量の経時変化を図-2 に示す。

水中コンクリートのスランプの経時変化が大きかったが、混和剤に Ad を使用したためと考えられる。その他は、静置 60 分でほぼロスが無く実際の運搬時間を考慮しても、実機実験を行うにあたって問題ないと考えられた。

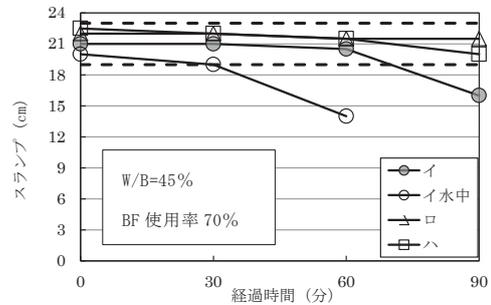


図-1 スランプの経時変化

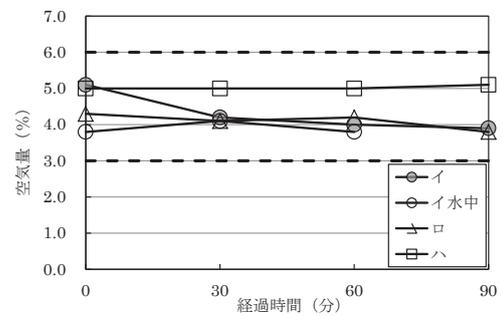


図-2 空気量の経時変化

表-8 代表的なコンクリートの調合とフレッシュコンクリートの試験結果

No	種類	BF 使用率 (%)	W/B (%)	BF 種類	G かさ容積 (m ³ /m ³)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					化学混和剤			SL (cm)	SLF (mm)	Air (%)	CT (°C)
							W	C	BF	S	G	種類	区分	使用量 (B × wt%)				
2	N	0	55	-	0.60	48.0	180	327	0	831	925	イ	Ad	0.80	20.0	325	4.5	22
3		0	55	-	0.60	45.9	170	309	0	813	986	ロ	Ad	1.00	19.5	300	4.3	20
4		0	55	-	0.60	44.6	180	327	0	773	990	ハ	Ad	0.50	20.0	330	4.6	18
9	A 種クラス	20	65	a	0.60	49.1	180	222	55	868	925	イ	Ad	1.00	20.0	305	4.5	21
10		20	55	a	0.60	47.8	180	262	65	826	925	イ	Ad	0.70	19.5	315	4.7	21
11		20	55	a	0.60	45.7	170	247	62	808	986	ロ	Ad	0.95	20.0	340	4.7	20
12		20	55	a	0.60	44.4	180	262	65	768	990	ハ	Ad	0.40	19.5	355	5.2	18
15		20	45	a	0.58	48.4	175	311	78	818	895	イ	SP	0.85	22.5	395	4.5	21
20	B 種クラス	45	55	a	0.60	48.3	175	175	143	841	925	イ	Ad	0.90	19.5	305	4.8	21
22		60	55	a	0.60	48.2	175	127	191	837	925	イ	Ad	0.90	20.0	325	4.4	21
23		60	45	a	0.58	48.8	170	151	227	829	895	イ	SP	0.85	21.5	360	4.2	21
25		60	45	a	0.58	46.8	160	142	213	817	953	ロ	SP	0.85	21.5	385	4.2	20
26		60	45	a	0.58	45.4	170	151	227	772	957	ハ	SP	0.85	23.0	410	4.7	19
29		60	35	a	0.58	44.9	175	200	300	710	895	イ	SP	0.85	23.0	385	4.9	21
30	C 種クラス	70	55	a	0.60	48.1	175	95	223	835	925	イ	Ad	0.90	19.0	295	4.2	21
31		70	45	a	0.58	48.7	170	113	264	826	895	イ	SP	0.85	21.0	360	5.5	21
33		70	45	a	0.58	46.7	160	107	249	814	953	ロ	SP	0.80	22.0	385	4.4	19
34		70	45	a	0.58	45.3	170	113	264	769	957	ハ	SP	0.90	22.5	410	5.1	18
35		70	45	b	0.58	48.6	170	113	264	823	895	イ	SP	0.93	21.0	335	5.0	22
36		70	45	c	0.58	48.7	170	113	264	826	895	イ	SP	0.90	21.5	355	4.6	22
39		70(W)	45	a	0.60	43.9	190	127	296	705	925	イ	Ad	0.45	20.0	335	5.3	21

5. ブリーディング試験

5.1 試験方法

ブリーディング試験は、JCI-S-015 (小型容器によるコンクリートのブリーディング試験方法) (以下、JCI 法) に基づいて行った。試験回数は2回とし、試験結果にはその平均値を示した。比較検討として、JIS A 1123 (コンクリートのブリーディング試験方法) (以下、JIS 法) に基づいた試験も行った。JIS 法での試験回数は1回とした。

5.2 試験結果および考察

(1) 試験法毎のブリーディング量

図-3にJCI法およびJIS法によるブリーディング量の経時変化を示す。二つの試験法の結果は同程度であることを確認した。以下の試験結果は全てJCI法のものである。

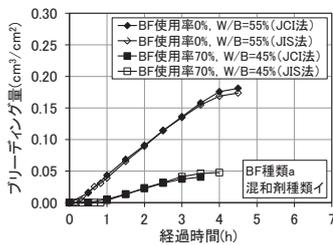


図-3 試験法毎のブリーディング量

(2) W/B 毎のブリーディング試験結果

図-4にW/B毎のブリーディング量およびブリーディング終了時間の試験結果を示す。W/Bの低減に伴って、ブリーディング量は減少する傾向を示した。一方、ブリーディング終了時間は遅延する傾向となったが、これは混和剤使用量の増加に因るものと考えられる。

同一W/Bでは、BF使用率の増加に伴ってブリーディング量は減少し、終了時間は短くなる傾向を示した。既往の研究では、①BF使用率の増加(単位セメント量の減少)により初期の反応が遅延するためブリーディング量は増加する⁴⁾、もしくは②BF使用による比表面積の増大に伴って水との接触面積が増大し、BF粒子周囲に拘束される水量が増加するため、ブリーディング量は減少する⁵⁾、との知見がある。本実験におけるBF使用率とブリーディング量の関係は、後者と同様の傾向を示した。なお、本実験で調査した調合のブリーディング量は0.03~0.25cm³/cm²であり、日本建築学会「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」に示される0.3cm³/cm²以下⁶⁾を満足した。

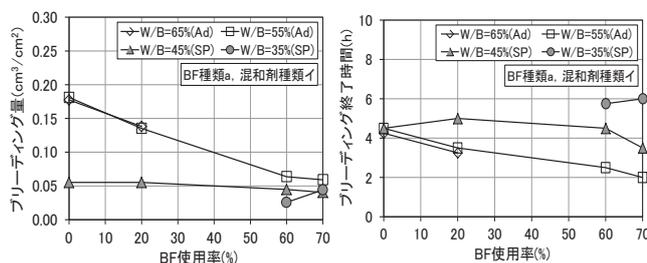


図-4 W/B 毎のブリーディング量と終了時間の関係

(3) BF 種類毎のブリーディング量

図-5にBF種類毎のブリーディング量およびブリーディング終了時間の試験結果を示す。BF種類による影響は小さいことから、BF種類の選定の際にブリーディングに特別な配慮をする必要はないと考えられる。

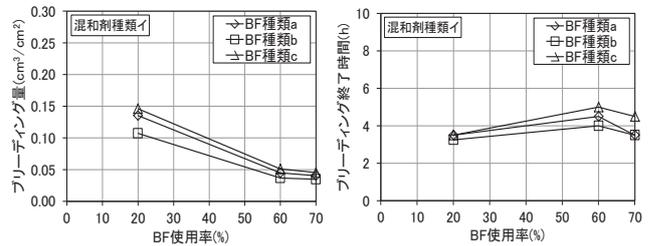


図-5 BF 種類毎のブリーディング量と終了時間の関係

(4) SO₃ 量毎のブリーディング量

図-6にブリーディング量におけるSO₃量の比較を示す。SO₃量2%の調合に対するSO₃量4%の調合のブリーディング量の増加量は、最大でも0.01cm³/cm²程度と小さかった。

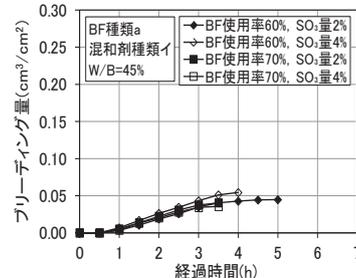


図-6 SO₃ 量毎のブリーディング量

(5) 単位水量毎のブリーディング量

図-7にブリーディング量における単位水量の比較を示す。単位水量190kg/m³の調合におけるブリーディング量の増加量は、最大でも0.015cm³/cm²程度と小さく、過剰な増加は見られなかった。

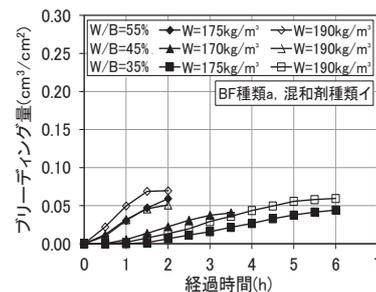


図-7 単位水量毎のブリーディング量

6. 凝結時間試験

6.1 試験方法

凝結時間試験は、JIS A 1147 (コンクリートの凝結時間試験方法) に準拠して行った。

6.2 試験結果

(1) BF 使用率と凝結時間

図-8にBF使用率と凝結時間の関係を示す。BF使用率の増加に伴って凝結時間は遅延する傾向を示し、終結時間ではBF使用率60~70%で3時間程度の遅延を示した。

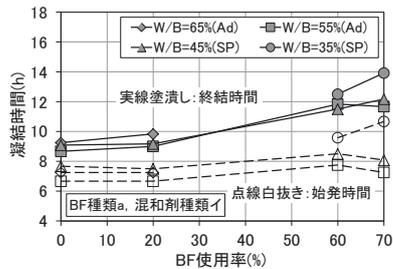


図-8 BF 使用率と凝結時間の関係

(2) SO₃ 量と凝結時間

図-9 に SO₃ 量と凝結時間の関係を示す。ブリーディング量と同様に、SO₃ 量による大きな影響は見られなかった。

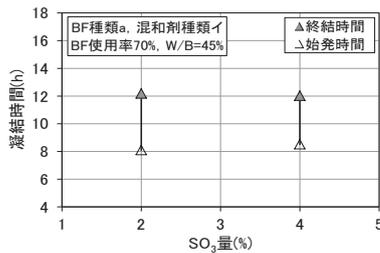


図-9 SO₃ 量と凝結時間の関係

(3) 単位セメント量と凝結時間

図-10 に単位セメント量と凝結時間の関係を、図-11 に混和剤使用量と凝結時間の関係を示す。ばらつきは大きいものの、BF 使用率の増加に伴う単位セメント量の減少、および混和剤使用量の増加により、特に終結時間が遅延する傾向を示した。これは、単位セメント量の減少、および混和剤使用量の増加により、初期の反応が遅延したためと考えられる。

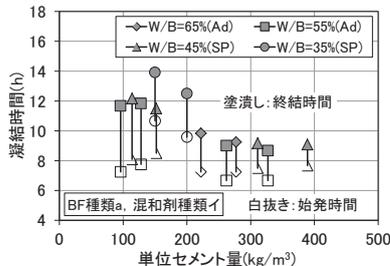


図-10 単位セメント量と凝結時間の関係

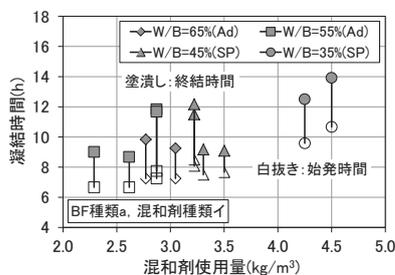


図-11 混和剤使用量と凝結時間の関係

(4) ブリーディング量と凝結時間の関係

図-12 にブリーディング量と凝結時間の関係を示す。凝結時間は、BF 使用率の増加に伴う単位セメント量の減少、および混和剤使用量の増加により、遅延する傾向を

示した。一方、BF 使用率の増加に伴う比表面積の増大と考えられる影響により、ブリーディング量は減少する傾向を示した。このように、BF を使用した場合のブリーディング量および凝結時間においては、結合材の比表面積や調合条件等の影響の受け、それらが複合的に影響を及ぼすものと考えられる。

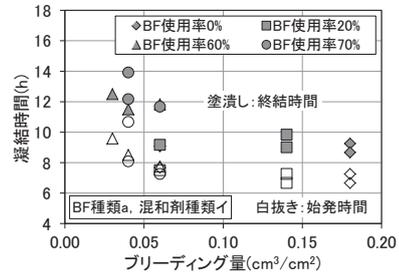


図-12 ブリーディング量と凝結時間の関係

7. 断熱温度上昇量試験

7.1 試験方法

断熱温度上昇量試験は、BF 使用率 70%、W/B=45%の BF3 種類において試験を行った。

断熱温度上昇量の最高温度は、BF 種類 a が 38.4℃、BF 種類 b が 36.1℃、BF 種類 c が 40.4℃であり、BF 種類 c を用いたものが最も高かった。

7.2 試験結果

(1) 3 種類の BF の断熱温度上昇量

図-13 に 3 種類の BF の断熱温度上昇量の実測値と日本建築学会「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針」の予測式[1]⁷⁾と日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」の予測式[2]⁸⁾による高炉セメント B 種、中庸熱ポルトランドセメント、低熱ポルトランドセメントの予測値との比較を示す。予測に用いた単位セメント量は、結合材量(=C+BF)、打込み温度は、フレッシュ試験時のコンクリート温度とした。

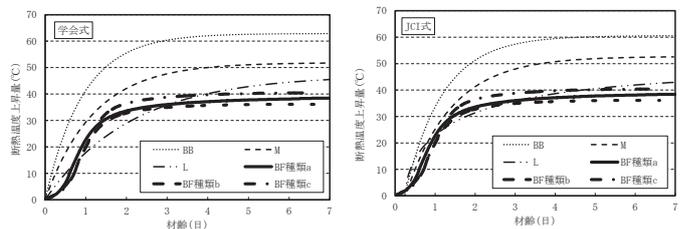


図-13 断熱温度上昇量の実測値と日本建築学会式、JCI 式による予測値との比較

$$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad [1]$$

ここで、 $Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量(℃)

t : 材齢(日)

K : 最終断熱温度上昇量(℃)

α : 断熱温度上昇速度を表す係数

$$Q(t) = Q_{\infty} \left[1 - \exp \left\{ -r_{AT} (t - t_{0,Q})^{SAT} \right\} \right] \quad [2]$$

ここで、 $Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量(°C)
 t : 材齢(日)
 Q_{∞} : 最終断熱温度上昇量(°C)
 r_{AT}, S_{AT} : 断熱温度上昇速度に関する係数
 $t_{0,q}$: 発熱開始材齢(日)

断熱温度上昇量の実測値と学会式、JCI 式による予測値を比較すると、BF3 種類ともに、低熱ポルトランドセメントによる予測値と実測値が最も近い傾向を示した。ただし、JCI 式でも、材齢 1 日～3.5 日程度の期間については、予測値の方が実測値よりも小さくなる傾向がある。従って、中庸熱ポルトランドセメントによる予測値を用いれば、安全側の評価となる。また、学会式と JCI 式による予測値を比較すると、JCI 式の方が BF3 種類ともに、予測値と実測値に近い傾向を示した。

以上より、BF 使用率 70% の調合の断熱温度上昇量は、JCI 式の中庸熱ポルトランドセメントの係数を用いて予測することにより、マスコンクリートの温度予測では安全側の評価になると考えられる。

(2) BF 種類 a の断熱温度上昇量結果

図-14 に BF3 種類の中から BF 種類 a の結果および予測式による回帰結果を示す。断熱温度上昇曲線の回帰は、日本建築学会「マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針」の予測式[3]⁷⁾、材齢初期の温度上昇の遅れを考慮した予測式[4]⁹⁾、および河野らの研究による予測式[5]¹⁰⁾の 3 つの式により行った。

実測値と回帰式を比較すると、予測式[5]が最も実測値と一致した。

$$Q(t) = K(1 - e^{-at}) \quad [3]$$

$$Q(t) = K(1 - e^{-a(t-t_0)^\delta}) \quad [4]$$

$$Q(t) = \frac{1}{1+a \cdot e^{-bt}} K(1 - e^{-at}) \quad [5]$$

ここで、 $Q(t)$: 材齢 t 日までの断熱温度上昇量(°C)
 t : 材齢(日)
 K : 最終断熱温度上昇量(°C)
 a, δ : 断熱温度上昇速度を表す係数
 t_0 : 材齢初期の温度上昇の遅れを表す係数 (=0.4)
 a : 発熱加速期の温度上昇速度に関する係数
 b : 発熱開始から発熱加速期に至るまでの時間に関する係数

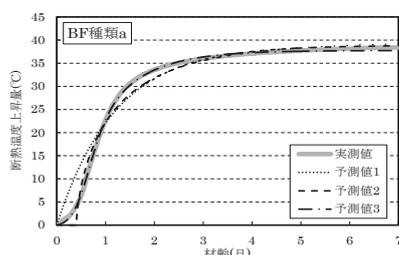


図-14 断熱温度上昇量試験結果、回帰結果

8. おわりに

その 1 では試験概要と主にフレッシュ試験について検討した。その 2 では、主に硬化コンクリートの圧縮強度および静弾性係数および、BF を高い割合で使用したコンクリートの低温環境下における性状を報告する。

【謝辞】

本研究は、当社と長谷工コーポレーション、青木あすなる、浅沼組、安藤・間、奥村組、熊谷組、鴻池組、五洋建設、鉄建建設、東急建設、東洋建設、矢作建設工業の 13 社の共同研究です。関係各位に謝意を表し、ここに記します。

【参考文献】

- 1) 経済産業省製造産業局住宅産業窯業建材課：セメント産業における省エネ製造プロセスの普及拡大方策に関する調査－混合セメントの普及拡大方策に関する検討－報告書、2016.3
- 2) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)、コンクリートライブラリー125、pp.14～15、2005
- 3) 日本建築学会：高炉セメントまたは高炉スラグ微粉末を用いた鉄筋コンクリート造建築物の設計・施工指針(案)・同解説、p.33、2017
- 4) 伊代田岳史：高炉スラグ微粉末を大量使用したコンクリート、コンクリート工学, Vol.1. 52, No. 5, pp. 409-414, 2014
- 5) 宮澤祐介他：高炉スラグ微粉末の比表面積および置換率がコンクリートの長期強度発現に及ぼす影響, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 82, No. 740, pp. 1517-1526, 2017. 10
- 6) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事, p.100, 2018.7
- 7) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針、p.51、2008
- 8) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針、p43、2016
- 9) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム、コンクリート工学年次論文集、pp.1-6、1982
- 10) 河野政典、榎田佳寛、上西隆、起橋孝徳：シリカフュームを使用した 100N/mm² 級高強度コンクリートの発熱・強度特性、コンクリート工学年次論文集 Vol. 20, No. 2, pp. 1015-1020、1998