

## 各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いた コンクリートに関する研究

唐沢 智之\*1・川又 篤\*2

### 概 要

建設業界におけるエネルギーの消費量や二酸化炭素の排出量は大きく、取り分けセメント産業の二酸化炭素排出量は国内全体の約4%を占めている。経済産業省でも、非エネルギー起源の二酸化炭素削減のため、混合セメントの利用拡大の方策を示している。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、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うことを目的として各種室内実験を行った。

実験では、設計基準強度18～36N/mm<sup>2</sup>を対象とし、3種類の高炉スラグ微粉末を各種使用率で混合し、3種類の混和剤を用いた各々の調合について、フレッシュコンクリートの性状、硬化性状、耐久性等を試験により確認し、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の適用のための基礎的なデータを収集した。

キーワード：環境配慮型コンクリート、高炉スラグ微粉末、混和材料、使用率

### STUDY OF BLAST FURNACE SLAG CONCRETE, USING SLAG FINE POWDER AS ADMIXTURE MINERAL WHILE CHANGING MIX PROPORTION

Tomoyuki KARASAWA\*1, Atsushi KAWAMATA\*2

#### Abstract

The construction industry has an extremely large percentage of energy consumption and carbon dioxide emissions, and carbon dioxide emissions in the cement industry is particularly high, accounting for about 4% of the total in Japan. The Ministry of Economy, Trade and Industry has circulated and recommended a policy of expanding the use of mixed cement in order to reduce carbon dioxide of non-energy origin. For this study, we have conducted various laboratory experiments for the purpose of determining various material characteristics and examining whether or not the concretes using the slag as admixture mineral are feasible building construction materials.

In the experiment, the goals of 18 to 36 N/mm<sup>2</sup> were set, and three kinds of blast furnace slag fine powder were mixed and dosed while changing their proportions, and the characteristics of fresh concrete, and hardening and durability were verified by tests. Collecting the basic data concerned, we reviewed if such new type of concrete using an admixture of furnace slag powder has broad application as an environmentally friendly material.

Keywords: environmentally friendly concrete, blast furnace slag fine powder, admixture material, mixing rates

\*1 Manager, Material Group, Research & Development Center, Construction Technology General Center

\*2 Material Group, Research & Development Center, Construction Technology General Center

## 各種使用率で高炉スラグ微粉末を混和材として用いたコンクリートに関する研究

唐沢 智之\*1・川又 篤\*2

## 1. はじめに

建設業界におけるエネルギーの消費量や二酸化炭素の排出量は大きく、取り分けセメント産業の二酸化炭素排出量は国内全体の約 4%を占めている。構造材料として最も使用量が多いコンクリート分野では、二酸化炭素排出量の削減が重要な課題となる。経済産業省でも、非エネルギー起源の二酸化炭素削減のため、混合セメントの利用拡大の方策<sup>1)</sup>を示し、建設会社からのアンケート結果に基づいた需要予測より、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。混合セメントの一つである高炉セメントは、高炉スラグの分量に応じて A 種～C 種に分類されており、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「建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事<sup>2)</sup>」(以下、JASS 5 とする)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、現状製造されている高炉セメントは B 種がほとんどであり、A 種および C 種の市場への一般の流通はない。このような背景の下、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、利用率に応じて各部位に求められる性能を満たし、かつ、二酸化炭素排出の削減にも寄与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うことを目的とし、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室内実験により確認した。

なお、本研究は、長谷工コーポレーション、青木あすなろ建設、浅沼組、安藤・間、奥村組、熊谷組、鴻池組、五洋建設、銭高組、鉄建建設、東急建設、東洋建設、矢作建設工業の 13 社で組織された共同研究「環境配慮型コンクリートの諸性状および評価方法研究会」として実施したものである。

## 2. 実験の概要

## 2. 1 実験の組合せ

室内実験は、表-1 に示す要因と水準を組合せ、表-2 に示す全 40 調合について実施した。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(以下、BF とする)は、使用率を 10～70%とし、それぞれの BF 使用率により W/B を 3 水準とした。実験には各 3 種類の BF (a, b, c) および製造者の異なる 3 種類(イ, ロ, ハ)を使用し、一部の調合においては無水せっこうを用いて三酸化硫黄(SO<sub>3</sub>)の量を調整した調合や、水中コンクリート用とした調合についても実験を実施した。なお、本研究では

表-1 室内実験の要因と水準

要因	水準
BF 使用率	0% (ブレン：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	45%,55%,65%(BF 使用率 0～45%)
	35%,45%,55%(BF 使用率 60～70%)
BF 種類	記号：a,b,c
三酸化硫黄量	約 2%,4%(記号：S)
混和剤種類	記号：イ,ロ,ハ
その他	水中コンクリート用調合(記号：W)

\*1 研究開発センター 材料グループ グループリーダー

\*2 研究開発センター 材料グループ

BF 使用率の範囲に応じて、例えば BF 使用率 10%を超え 30%以下を“A 種クラス”と表記することとした。これは、各 BF 使用率の水準と JIS A 5211 における高炉セメントの種類と高炉スラグの分量の関係に対応させるためである。また、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<sup>3)</sup>」では、BF

使用率により、例えば BF 使用率 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。

## 2.2 使用材料

本実験で使用した BF の品質を表-3 に、その他の使用材料の物性を表-4 に示す。BF は、a, b, c の 3 種類とし、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 4300cm<sup>2</sup>/g、三酸化硫黄約 2%、塩基度約 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。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。骨材は各種試験結果への影響を小さくするため、各々の混和剤製造者の試験所で使用している 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。

表-2 室内実験の組合せ

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

※各 BF に含まれる SO<sub>3</sub>量と別添した SO<sub>3</sub>量の合計を示す。

表-3 高炉スラグ微粉末 4000 の品質

品質	JIS A 6206 による規格値	種類			
		a	b	c	
密度 g/cm <sup>3</sup>	2.80 以上	2.89	2.86	2.89	
比表面積 cm <sup>2</sup> /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
フロー値比 %	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	

表-4 使用材料

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 <sup>3</sup> , 比表面積 3280cm <sup>2</sup> /g, SO <sub>3</sub> 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 <sup>2</sup> /g CaO 40.3%, SO <sub>3</sub> 57.1%	—	—
細骨材	S	掛川産山砂 表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> 粗粒率 2.77	大井川産陸砂 表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> 粗粒率 2.71	大井川産陸砂 表乾密度 2.58g/cm <sup>3</sup> 粗粒率 2.69
粗骨材	G	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> 実積率 58.2%	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> 実積率 62.0%	青梅産硬質砂岩碎石 表乾密度 2.66g/cm <sup>3</sup> 実積率 62.0%

### 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、各々の混和剤製造者の試験室において行った。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、高炉スラグ微粉末全量、細骨材半量の順にミキサへ投入し、空練り 10 秒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%に使用した高性能 AE 減水剤イ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。

## 3. 実験結果

### 3. 1 フレッシュコンクリート試験結果

室内実験で行った代表的な調合とフレッシュコンクリートの試験結果を表-5に示す。スランプは、原則 AE 減水剤（以下、Ad とする）を用いた調合では  $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、高性能 AE 減水剤（以下、SP とする）を用いた調合では  $21 \pm 2.0\text{cm}$  とし、空気量は全ての調合で  $4.5 \pm 1.5\%$  を目標値とした。単位粗骨材かさ容積は、いずれの BF 種類においても、Ad を用いた調合では  $0.60\text{m}^3/\text{m}^3$ 、SP を用いた調合では  $0.58\text{m}^3/\text{m}^3$  とした。また、単位水量は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  $190\text{kg}/\text{m}^3$  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。

### 3. 2 断熱温度上昇量試験結果

断熱温度上昇量試験は、BF 使用率 70%、W/B=45%の BF3 種類の調合について行った。断熱温度上昇量試験は、鋼製の型枠（ $\phi 400 \times 400\text{mm}$ 、厚さ 0.6mm）を使用し、測定時間 0～72 時間までは 2 時間間隔、それ以降は温度上昇が認められなくなるまで 6 時間間隔で測定した。

断熱温度上昇量の最高温度は、BF 種類 a が  $38.4^\circ\text{C}$ 、BF 種類 b が  $36.1^\circ\text{C}$ 、BF 種類 c が  $40.4^\circ\text{C}$  であり、BF 種類 c を用いた調合が最も高かった。図-1 に BF3 種類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<sup>4)</sup>(式(1)、以下、AIJ 式とする)、また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<sup>5)</sup>(式(2)、以下、JCI 式とする)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

表-5 コンクリートの調合とフレッシュコンクリート

BF 種類	BF 使用率 (%)	W/B (%)	G かさ容積 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )	s/a (%)	単位量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )					化学混和剤			スランプ (cm)	スランプフロー (mm)	空気量 (%)	コンクリート温度 ( $^\circ\text{C}$ )
					W	C	BF	S	G	種類	区分	使用量 ( $\text{B} \times \text{wt}\%$ )				
-	0	55	0.60	48.0	180	327	0	831	925	イ	Ad	0.80	20.0	325	4.5	22
-	0	55	0.60	15.9	170	309	0	813	986	ロ	Ad	1.00	19.5	300	4.3	20
-	0	55	0.60	44.6	180	327	0	773	990	ハ	Ad	0.50	20.0	330	4.6	18
a	20	65	0.60	49.1	180	222	55	868	925	イ	Ad	1.00	20.0	305	4.5	21
a	20	55	0.60	47.8	180	262	65	826	925	イ	Ad	0.70	19.5	315	4.7	21
a	20	55	0.60	45.7	170	247	62	808	986	ロ	Ad	0.95	20.0	340	4.7	20
a	20	55	0.60	44.4	180	262	65	768	990	ハ	Ad	0.40	19.5	355	5.2	18
a	20	45	0.58	48.4	175	311	78	818	895	イ	SP	0.85	22.5	395	4.5	21
a	45	55	0.60	48.3	175	175	143	841	925	イ	Ad	0.90	19.5	305	4.8	21
a	60	55	0.60	48.2	175	127	191	837	925	イ	Ad	0.90	20.0	325	4.4	21
a	60	45	0.58	48.8	170	151	227	829	895	イ	SP	0.85	21.5	360	4.2	21
a	60	45	0.58	46.8	160	142	213	817	953	ロ	SP	0.85	21.5	385	4.2	20
a	60	45	0.58	45.4	170	151	227	772	957	ハ	SP	0.85	23.0	410	4.7	19
a	60	35	0.58	44.9	175	200	300	710	895	イ	SP	0.85	23.0	385	4.9	21
a	70	55	0.60	48.1	175	95	223	835	925	イ	Ad	0.90	19.0	295	4.2	21
a	70	45	0.58	48.7	170	113	264	826	895	イ	SP	0.85	21.0	360	5.5	21
a	70	45	0.58	46.7	160	107	249	814	953	ロ	SP	0.80	22.0	385	4.4	19
a	70	45	0.58	45.3	170	113	264	769	957	ハ	SP	0.90	22.5	410	5.1	18
b	70	45	0.58	48.6	170	113	264	823	895	イ	SP	0.93	21.0	335	5.0	22
c	70	45	0.58	48.7	170	113	264	826	895	イ	SP	0.90	21.5	355	4.6	22
a*	70	45	0.60	43.9	190	127	296	705	925	イ	Ad	0.45	20.0	335	5.3	21

※：水中コンクリートの調合を示す。

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。

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

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

ここで,  $Q(t)$ : 材齢  $t$  日までの断熱温度上昇量(°C),  $t$ : 材齢(日),  $K$ : 最終断熱温度上昇量(°C),  $\alpha$ : 断熱温度上昇速度を表す係数,  $Q_{\infty}$ : 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 AIJ 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, AIJ 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。

### 3. 3 ブリーディング試験結果

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」に基づいて実施した。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。試験回数は 2 回とし, 試験結果にはその平均値を用いた。

図-2 に W/B ごと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よるものと考えられる。同一の 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, BF 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が増加する<sup>6)</sup>, もし

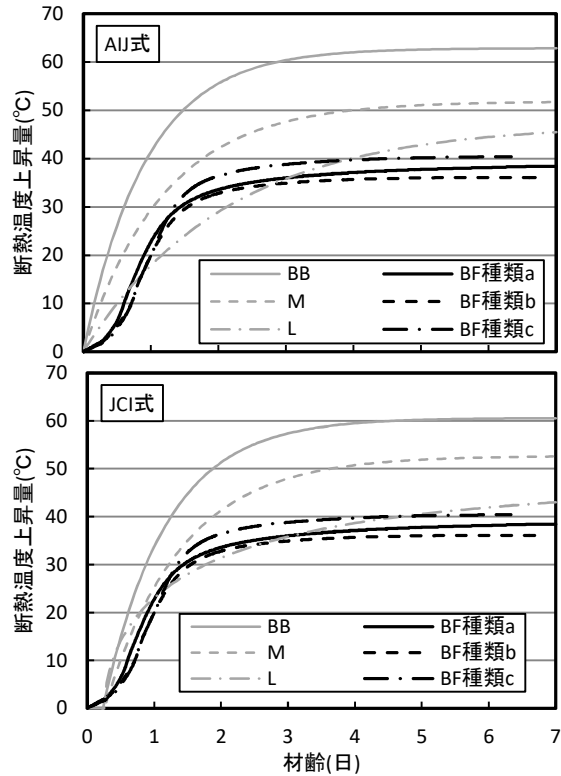


図-1 断熱温度上昇量の実測値と AIJ 式, JCI 式による予測値との比較

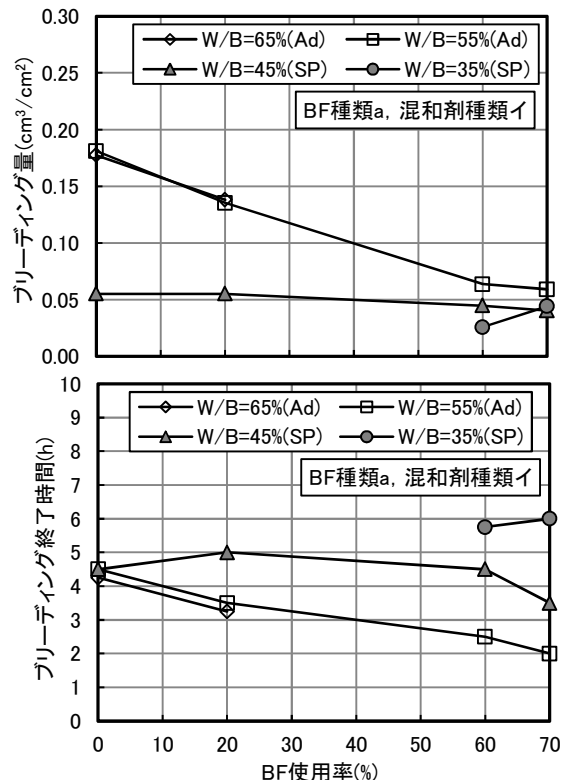


図-2 W/B ごとのブリーディング試験結果

くは BF 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、ブリーディング量が減少する<sup>7)</sup>、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  $0.03 \sim 0.25 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  であり、JASS 5 に示される  $0.3 \text{ cm}^3/\text{cm}^2$  以下<sup>2)</sup>を満足した。

### 3. 4 凝結時間試験結果

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。

図-3 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、終結時間については BF 使用率 60~70% で 3 時間程度遅延する結果となった。図-4 に単位セメント量と凝結時間の関係を、図-5 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-6 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は、結合材の比表面積や調合条件等の影響を受け、それらが複合的に影響を及ぼすものと考えられる。

### 3. 5 圧縮強度試験結果

図-7 に圧縮強度と BF 使用率の関係を示す。圧縮強度は、いずれの BF 使用率においても材齢の経過に伴い増加した。材齢 7 日では、BF 使用率の増加に伴い圧縮強度は連続的に低下したが、BF 使用率 70% の圧縮強度は BF 使用率

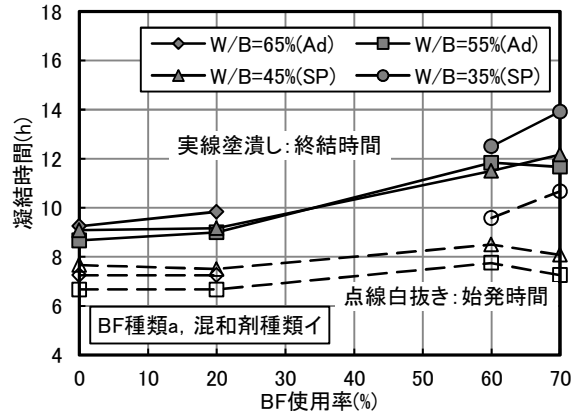


図-3 BF 使用率と凝結時間の関係

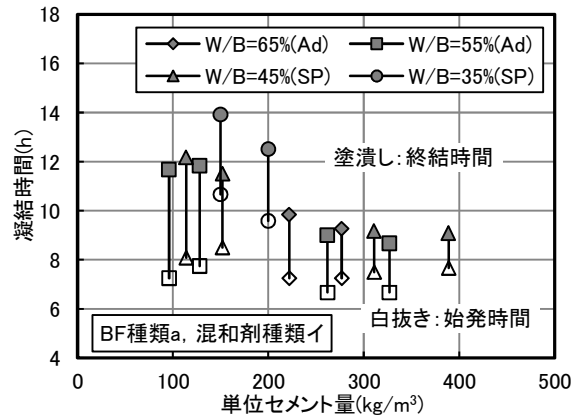


図-4 単位セメント量と凝結時間の関係

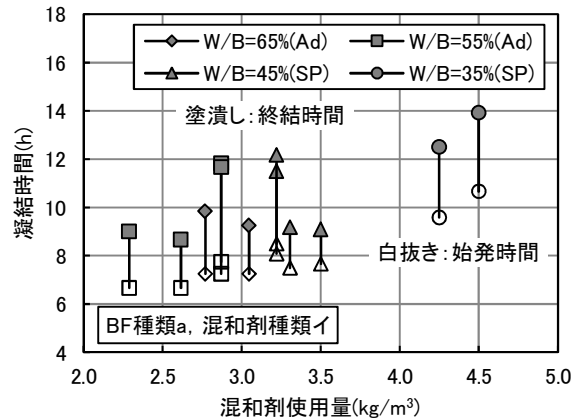


図-5 混和剤使用量と凝結時間の関係

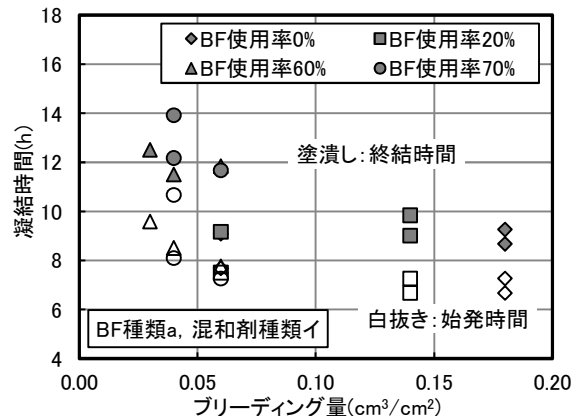


図-6 ブリーディング量と凝結時間の関係

60%よりも大きくなった。材齢 28 日以降では、BF 使用率 0~30%まで同程度の圧縮強度を有しているが、BF 使用率 45~70%では BF 使用率の増加に伴い緩やかに低下した。また、どの水結合材比においても、BF を使用したコンクリートは概ね初期強度が BF 使用率 0%(N)よりも小さいが、潜在水硬性の影響により材齢が長期になるほど強度増進され、BF 使用率 0%(N)との強度差が概ね小さくなる結果となった。W/B=65%では、いずれの材齢においても BF 使用率の増加による圧縮強度の低下は小さく、長期材齢になるほど圧縮強度が BF 使用率 0%(N)よりも大きくなる BF 使用率の範囲が広がる結果となった。図-8 に材齢 28 日の圧縮強度を基準とした圧縮強度比に及ぼす SO<sub>3</sub> 量の影響を示す。SO<sub>3</sub> の添加によって材齢 7 日の初期強度は大きくなるが、長期材齢になるほど強度増進が低下することが確認された。

図-9 に静弾性係数と圧縮強度の関係を示す。なお、図中には New RC 式<sup>2)</sup>(式(3))による推定値 ( $k_1=1.0, k_2=0.95, 1.0, 1.1, \gamma=2.31$ ) を合わせて示す。New RC 式では、高炉スラグ微粉末を用いる場合、混和材の種類により定まる修正係数  $k_2=0.95$  を採用している。

$$E = 33.5 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

ここで、 $E$ : 静弾性係数(kN/mm<sup>2</sup>)、 $k_1$ : 粗骨材の種類により定まる修正係数、 $k_2$ : 混和材の種類により定まる修正係数、 $\gamma$ : コンクリートの単位容積質量(t/m<sup>3</sup>)、 $\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度(N/mm<sup>2</sup>)

静弾性係数は、圧縮強度が増加するに伴い New RC 式による推定値に沿って増加する傾向を示した。表-6 に本試験結果の圧縮強度と静弾性係数を New RC 式に代入し算出した  $k_2$ 、および算出した BF 使用率 0%(N)の  $k_2$  を基準とした各 BF 使用率における  $k_2$  の比率を示す。BF 使用率に関わらず、混和材の種類により定まる修正係数  $k_2$  は 0.97~1.02 であった。これより、いずれも BF を使用しない調合と同程度の静弾

性係数を有しており、BF 使用による静弾性係数への大きな影響は見られなかったと考える。

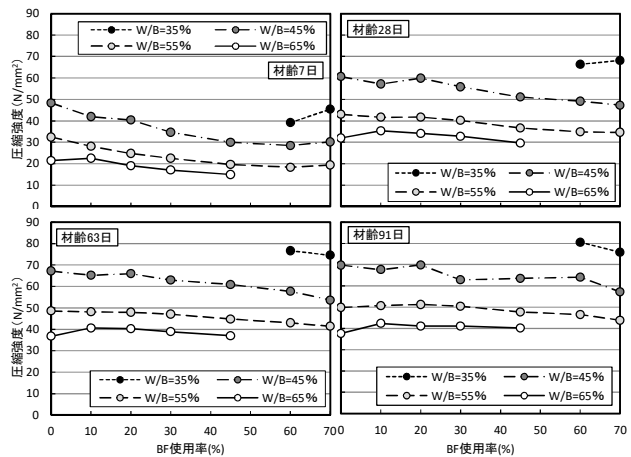


図-7 圧縮強度と BF 使用率の関係

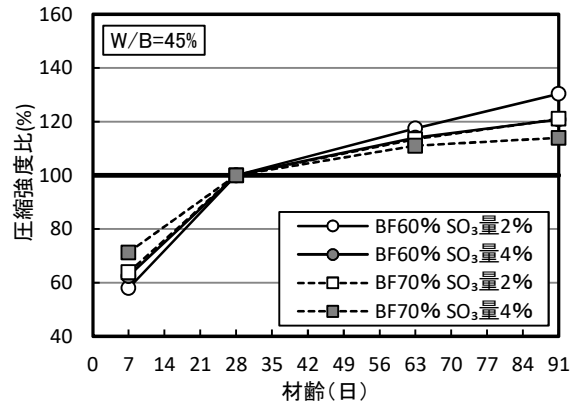


図-8 圧縮強度比に及ぼす SO<sub>3</sub> 量の影響

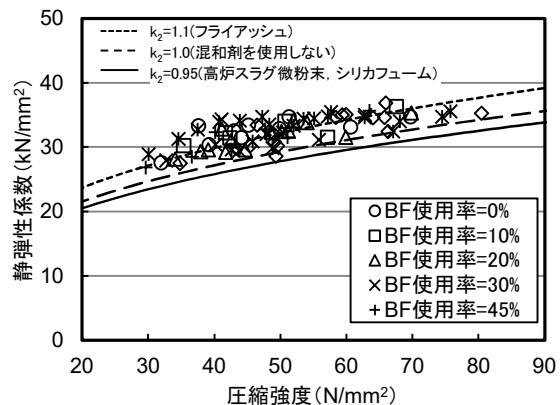


図-9 混和剤使用量と凝結時間の関係

表-6 静弾性係数の推定式における  $k_2$  の値

BF 使用率 (%)	$k_2$	
	計算値	N を基準
0	1.11	1.00
10	1.11	1.00
20	1.09	0.98
30	1.11	1.00
45	1.12	1.01
60	1.08	0.97
70	1.14	1.02

### 3. 6 促進中性化試験結果

促進中性化試験は、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、供試体の個数は各調合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週になった時に実施した。促進試験開始前に測定した中性化深さを初期値として、各測定材齢の中性化深さは、実際の測定値より初期値(0.0mm~2.3mm)を減じた修正値を採用した。中性化速度係数(mm/√週)は、全測定材齢の中性化深さ(mm)と促進期間の平方根(√週)の関係より、原点を通る1次直線で回帰した時の傾きとして算出した。

図-10に中性化深さと促進期間の関係の一例として、BF使用率0%, 45%, 70%の結果を示す。全体的な傾向として、中性化深さと促進期間には直線的な関係が認められ、BF使用率が異なっても√t則が成り立つことが確認された。図-11に中性化速度係数とBF使用率の関係を示す。水結合材比ごとにみると、いずれの水結合材比でもBF使用率の増加に伴い、中性化速度係数は大きくなる傾向を示した。従って、水結合材比およびBF使用率から中性化深さを評価できると考えられる。図-12にBF種類に

よる中性化速度係数の比較を示す。中性化速度係数は、BF種類により若干の違いが認められる。スラグの活性度指数が大きい種類ほど、中性化速度係数は小さくなっており、スラグの活性度指数が中性化に影響を及ぼしていることが伺える。図-13にBF使用率0%のCa(OH)<sub>2</sub>量に対する各BF使用率のCa(OH)<sub>2</sub>量の比率として算出した中性化比率CHと水結合材比の積と中性化速度係数の関係を示す。なお、中性化比率CHは式(4)により算出した。

$$\text{中性化比率CH} = \sqrt{100/(100 - \text{BF使用率})} \quad (4)$$

全体的な傾向として、中性化比率と水結合材比の積が大きくなるに伴い、中性化速度係数は大きくなる傾向を示した。また、C種クラスを除けば、両者の傾向はほぼ等しい。従って、高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートの中性化速度係数は、C種クラスを除けば、BF使用率に応じたCa(OH)<sub>2</sub>量の中性化比率を考慮すれば同様に評価することができると考えられる。

### 3. 7 長さ変化率試験結果

長さ変化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

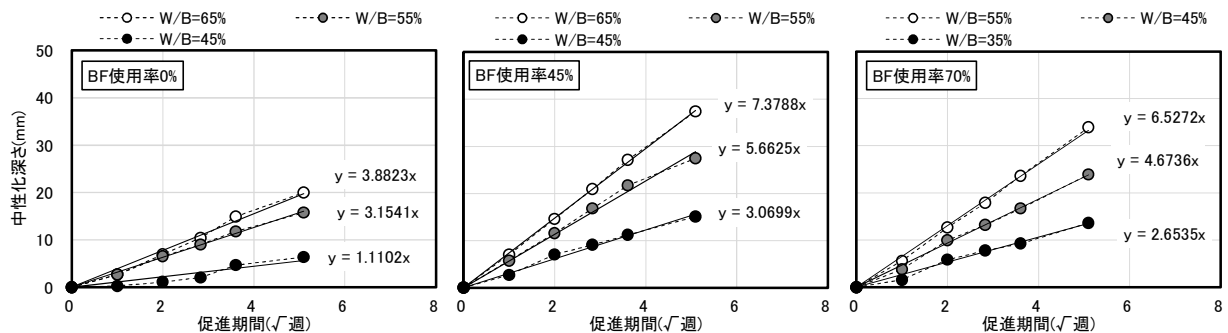


図-10 中性化深さと促進期間の関係

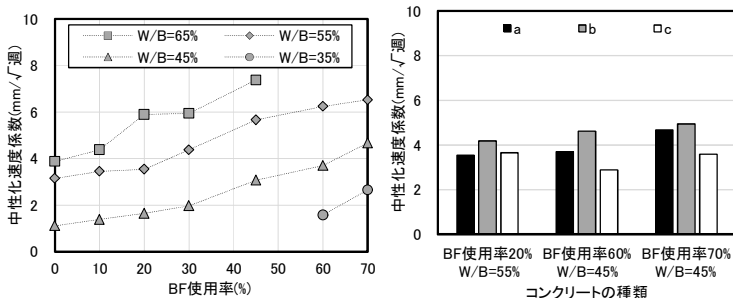


図-11 中性化速度係数とBF使用率の関係

図-12 BF種類による中性化速度係数の比較

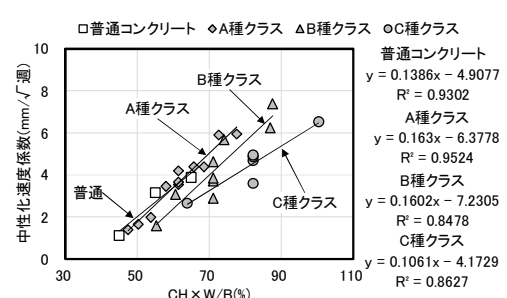


図-13 中性化速度係数と中性化比率とW/Bの積の関係



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。長さ測定は、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た。長さ変化試験では、長期材齢においても乾燥収縮が進行すると考えられる傾向にあったため、乾燥期間 41 週まで試験を実施した。使用材料については、BF 種類が a, 混和剤種類がイに統一している。

乾燥期間と長さ変化率の関係を図-14 に示す。全ての供試体において、乾燥期間 26 週の長さ変化率が、JASS 5 にて規定されている設計値  $8 \times 10^{-4}$  を下回った。BF 使用率ごとに比較すると、乾燥期間 4~13 週においては、BF 使用率の高い B 種, C 種クラスで長さ変化率が 50

~ $100 \times 10^{-6}$  程度低減されている。乾燥期間 26 週以降では、W/B=35%を除いて、BF を使用したコンクリートでも同様の長さ変化率に収束していく傾向を示した。

### 3. 8 凍結融解試験結果

凍結融解試験は、JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」に準拠した。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。

凍結融解試験による相対動弾性係数を図-15 に示す。コンクリートの空気量は  $4.5 \pm 1.5\%$  を目標値としており、最も小さい空気量でも 4.2%であった。BF 使用率 0%では、W/B=65%において 150 サイクル以降に大きく相対動弾性係数が小さくなっている。BF 使用率 20, 60%

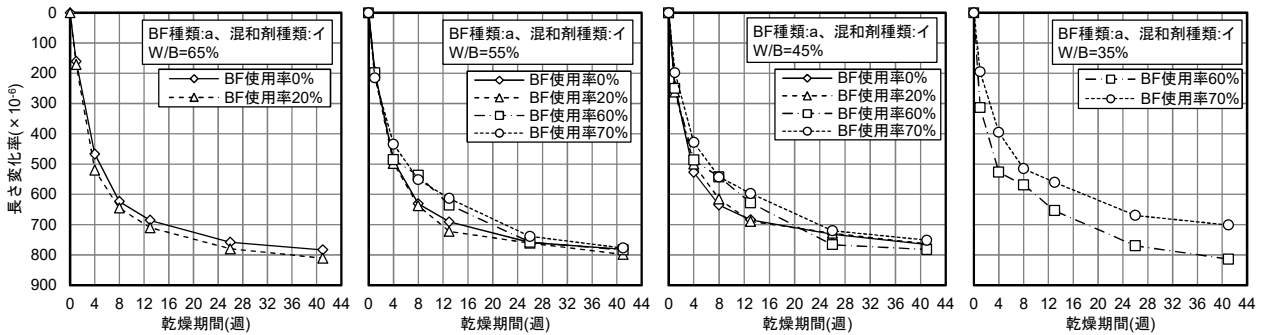


図-14 乾燥期間と長さ変化率の関係

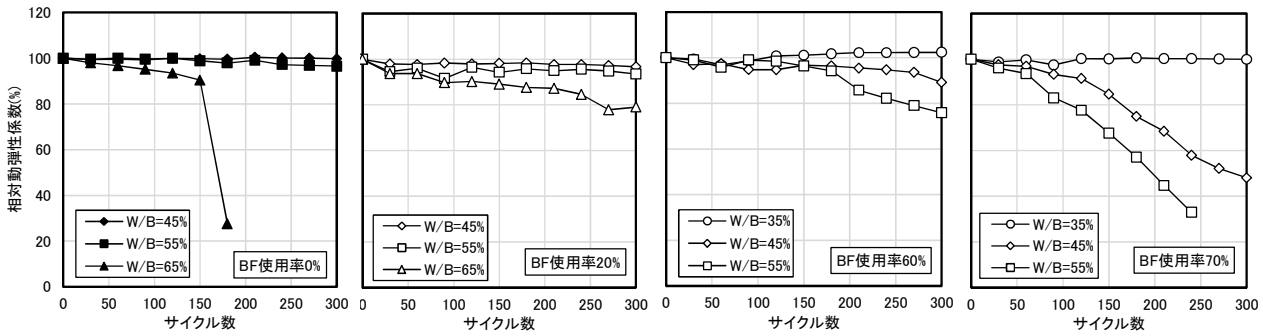


図-15 相対動弾性係数試験結果

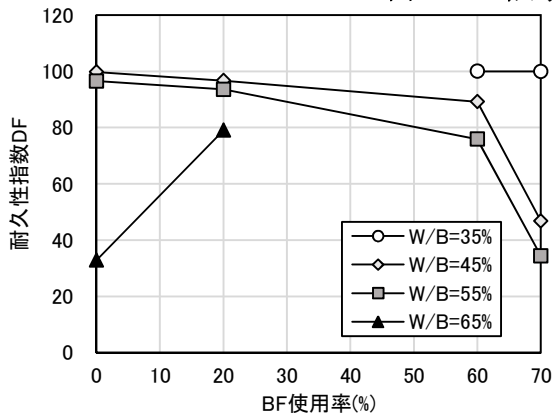


図-16 BF 使用率と耐久性指数の関係

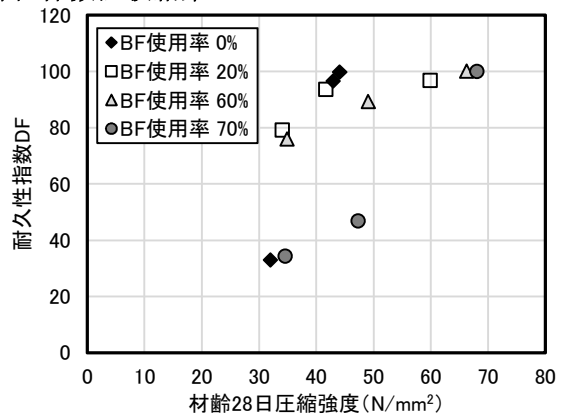


図-17 圧縮強度と耐久性指数の関係

では、大きく変動することはなく同様の傾向を示した。しかし、BF 使用率 70%では相対動弾性係数 60%を下回る結果となった。JASS 5で規定されている 300 サイクルにおける相対動弾性係数 85%以上の基準は、BF 使用率が大きい調合と W/B が大きい調合を除くと、満たしていた。BF 使用率と耐久性指数の関係を図-16に、圧縮強度と耐久性指数の関係を図-17に示す。BF 使用率で比較すると、BF 使用率が高くなるほど耐久性指数が徐々に低下し、BF 使用率 70%で急激に低下することが確認された。また、W/B が小さい調合ほど、耐久性指数は高くなった。材齢 28 日における圧縮強度と耐久性指数を比較すると、圧縮強度が高いほど耐久性指数も高くなっており、両者の相関性が確認された。BF 使用率 60%以下では、圧縮強度が 40N/mm<sup>2</sup>以上で耐久性指数 80 以上を確保できている。BF 使用率 70%では、圧縮強度が高い場合でも耐久性指数が低くなっており、BF 使用率が高い場合は注意が必要である。

#### 4. まとめ

本研究の結果、BF 使用率 10%から 70%の範囲における各性状について、以下の知見を得た。

- (1) BF 使用率の増加に伴いブリーディング量が減少した。
- (2) BF 使用率 60%以上になると、セメント量の減少および混和剤使用量の増加により、終結時間がやや遅延した。
- (3) 断熱温度上昇量の最高温度は、BF 使用率 70%の場合、同一結合材量の低熱セメントを使用したコンクリートよりも小さい値であった。
- (4) 圧縮強度は、材齢 28 日以降であれば BF 使用率 30%以下は BF 使用率 0%と同等と見なせ、BF 使用率 30%を超えると強度低下が認められた。
- (5) 静弾性係数は、New RC 式の混和材の修正係数  $k_2=0.95$  とした推定値と比較して同等以上の値であった。

- (6) 長さ変化率は、BF 使用率に関わらず BF 使用率 0%と同等であった。
- (7) 中性化深さは、BF 使用率が高くなるに伴い大きくなる傾向であるが、使用率 10%から 20%は BF 使用率 0%と同程度、60%以上になると BF 使用率 0%より大きくなる傾向であり、BF 使用率に応じて耐久性を評価する必要性が示唆された。
- (8) 耐凍害性は、BF 使用率が高くなるほど低下し、かつ、水結合材比が大きい場合、BF 使用率 70%で急激に低下するため、BF 使用率が大きく水結合材比も大きい場合は注意が必要である。

#### 謝辞

本研究の実施にあたり、鉄鋼スラグ協会、フローリック、BASF ジャパン、日本シーカのご協力をいただきました。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) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 鉄筋コンクリート工事(JASS 5)，2018
- 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) 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，pp.51，2008
- 5) 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，pp.43，2016
- 6) 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.52，No.5，pp.409-414，2014
- 7) 宮澤祐介ほか：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