

6. 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の室内実験

Laboratory Experiment of Concrete Using Granulated Blast-furnace Slag as the Mineral Admixtures at Replacement Ratio

加藤義明* 村井克綺** 林 晴佳**

—概要—

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、構造材料としてもっとも使用量が多いコンクリート分野においては、二酸化炭素排出量の削減といった課題は重要となる。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、構成材料における二酸化炭素の排出量の原単位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。しかし、現状において製造される高炉セメントは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。

—技術的な特長—

本研究は、普通ポルトランドセメントに高炉スラグ微粉末を10~70%の範囲で混和材料として用いたコンクリートについて、各調合における各種コンクリート性状を室内実験にて把握し、そこで得られたデータをもとに建築物への汎用的な適用について検討することを目的としたものである。特長として、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ることにより、高炉スラグ微粉末の使用率に応じた各部位に求められる性能を満たす最適な環境配慮型コンクリートを適用することができ、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思われる。

表1 本研究の範囲

要因	水準
高炉スラグ微粉末使用率	0% (プレーン)
	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% (高炉スラグ微粉末使用率 0~45%)
	35%、45%、55% (高炉スラグ微粉末使用率 60~70%)
高炉スラグ微粉末種類	記号：a、b、c
三酸化硫黄量	約2%、4%
混和剤種類	記号：イ、ロ、ハ
その他	水中コンクリート用調合

謝辞

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社共同研究による成果であり、本報の内容は、日本建築学会大会学術講演梗概集(2019.09.pp.535-550)で発表済である。関係各位に謝意を表し、ここに記します。

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の室内実験 Laboratory experiment of concrete using granulated blast-furnace slag as the mineral admixtures at replacement ratio

○加藤 義明* 村井 克綺** 林 晴佳**
Yoshiaki KATO Katsuki MURAI Haruka HAYASHI

ABSTRACT In blast furnace cement, which is one of the mixed cement, the amount of carbon dioxide emission reduction increases as the amount of blast furnace slag increases. However, blast furnace cement produced at present is mostly B type, and there is no general distribution to the A and C market.

Therefore, the laboratory experiment was conducted for generic application to buildings of concrete using granulated blast furnace slag as a mineral admixture in a wide range of 10% to 70%, and the properties of concrete in each mix were confirmed.

Keywords: 環境配慮型コンクリート, 混和材料, 高炉スラグ微粉末
Environment conscious concrete, Mineral admixture, Granulated blast furnace slag

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、構造材料としてもっとも使用量が多いコンクリート分野においては、二酸化炭素排出量の削減といった課題は重要となる。

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JASS 5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。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

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	<ul style="list-style-type: none"> ・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

*建築技術本部 総合評価部 **技術研究所 構造研究部 建築構造研究室

※本報の内容は、日本建築学会大会学術講演会梗概集(2019.09.pp.535-550)にて発表済みである。

量は 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、近年では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合設計、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。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うことを目的として実施した。

なお、本研究は、ゼネコン 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に関する研究会」で実施したものである。

表 2 室内実験の要因と水準

要因	水準
BF 使用率	0% (ブレーン：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	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)

2. 室内実験の概要

2.1. 実内実験の組合せ

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

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				—	—	ロ		
4				—	—	ハ		
5				45	—	—	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		45	55	a	2	イ	
23				a	2	イ		
24				a	4	イ		
25				a	2	ロ		
26				a	2	ハ		
27				b	2	イ		
28				c	2	イ		
29	35	a	2	イ				
30	C 種クラス	70	45	55	a	2	イ	
31				a	2	イ		
32				a	4	イ		
33				a	2	ロ		
34				a	2	ハ		
35			b	2	イ			
36			c	2	イ			
37			35	a	2	イ		
38			70 (W)	45	55	a	2	イ
39					45	a	2	イ
40					35	a	2	イ

*SO₃量 2%は、各 BF に含まれる SO₃量とする。

末（以下、BF とする）は使用率 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。

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」と表記することとした。これは、各 BF 使用率において JIS A 5211 で高炉セメント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³⁾」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

本実験における使用材料を表 4 に示す。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。高炉スラグ微粉末 4000 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。BF の品質を表 5 に示す。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、製造者の試験室で使用する 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。

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/B=35%、45%については高性能 AE 減水剤を使用し、W/B=55%、65%については AE 減水剤を使用した。BF 使用率 70%の水中コンクリート用調合に対しては、W/B に関わらず、AE 減水剤を使用した。

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

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	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 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 表乾密度 2.58 g/cm ³ , 粗粒率 2.77	大井川産陸砂 表乾密度 2.58 g/cm ³ , 粗粒率 2.71	大井川産陸砂 表乾密度 2.58 g/cm ³ , 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 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%

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

3.1.1. 試験方法

スランブ試験はJIS A 1101（コンクリートのスランブ試験）に準拠した。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）に準拠した。

目標性能は、原則、AE減水剤（以下、Adとする）を用いたものでスランブ18±2.5cm、高性能AE減水剤（以下、SPとする）を用いたものでスランブ21±2.0cmとし、空気量は全ての調合で4.5±1.5%で管理した。

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ブ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。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。

3.1.2. 試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表6に示す。各コンクリートのスランブおよび空気量は、全て目標値を満足する結果が得られた。

スランブの経時変化を図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ブ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分では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。

3.2. 断熱温度上昇量試験

3.2.1. 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。鋼

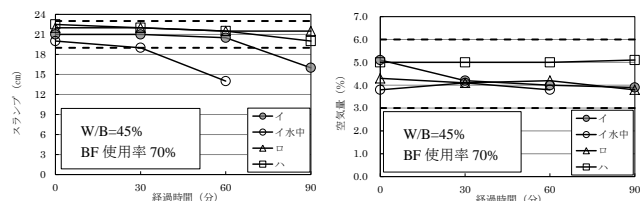


図1 スランブの経時変化

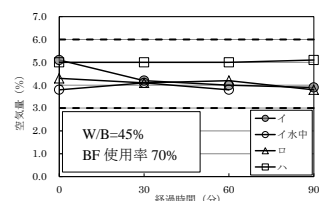


図2 空気量の経時変化

表6 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 (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%)				
-	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	45.9	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。

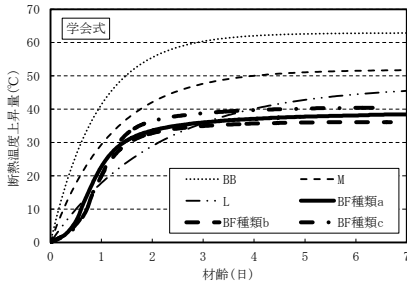


図3 断熱温度上昇量の実測値と日本建築学会式、JCI式による予測値との比較

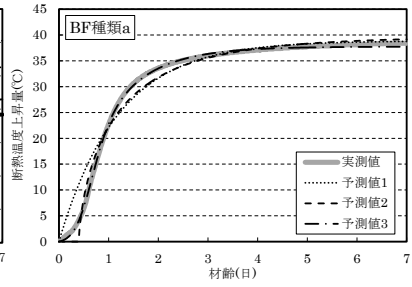
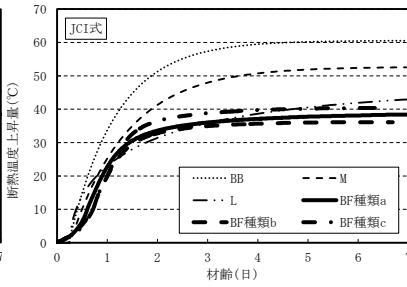


図4 断熱温度上昇量試験結果、回帰結果

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。

3.2.2. 試験結果

(1) 最高温度

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。

(2) 実測値と予測値の比較

図3にBF3種類の断熱温度上昇量の实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]⁴⁾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]⁵⁾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。

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

ここに、 $Q(t)$: 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)
 α : 断熱温度上昇速度を表す係数

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

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)

断熱温度上昇量の实測値と学会式、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。

図4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]⁴⁾、材齢初期の温度上昇の遅れを考慮した予測式[4]⁶⁾、および河野らの研究による予測式[5]⁷⁾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。

$$Q(t) = K(1 - e^{-\alpha t}) \quad \dots\text{式}[3]$$

$$Q(t) = K \left(1 - e^{-\alpha(t-t_0)^{\delta}} \right) \quad \dots\text{式}[4]$$

$$Q(t) = \frac{1}{1+a e^{-bt}} K(1 - e^{-\alpha t}) \quad \dots\text{式}[5]$$

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)
 α, 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

3.3. ブリーディング試験

3.3.1. 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。容器には内法寸法が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示した。比較検討として、JISA 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。

3.3.2. 試験結果

(1) 試験法の比較

図5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

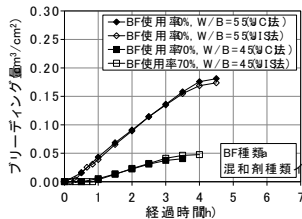


図5 試験法毎のブリーディング量

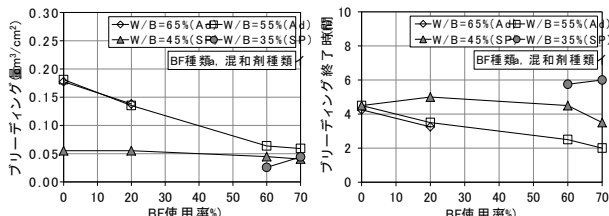


図6 W/B毎のブリーディング試験結果

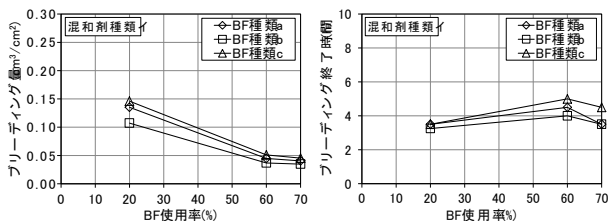


図7 BF種類毎のブリーディング試験結果

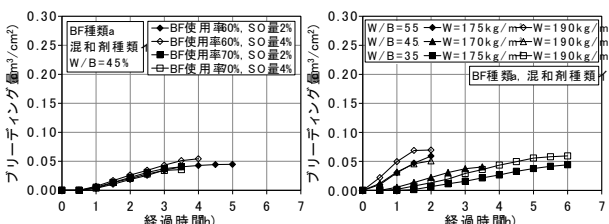


図8 SO₃量毎のブリーディング量

図9 単位水量毎のブリーディング量

同程度であることを確認した。以下の試験結果は全てJCI法によるものである。

(2) W/Bの影響

図6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⁸⁾、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⁹⁾、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査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 JASS 5 鉄筋コンクリート工事」に示される0.3cm³/cm²以下¹⁰⁾を満足した。

(3) BF種類の影響

図7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。

(4) SO₃量および単位水量の影響

図8にブリーディング量におけるSO₃量の比較を示す。SO₃量2%の調査に対するSO₃量4%の調査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9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の調査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。

3.4. 凝結時間試験

3.4.1. 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。

3.4.2. 試験結果

(1) BF 使用率の影響

図 10 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。

(2) SO₃ 量の影響

図 11 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。

(3) 単位セメント量および混和剤使用量の影響

図 12 に単位セメント量と凝結時間の関係を、図 13 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。

(4) ブリーディング量と凝結時間の関係

図 14 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

3.5.1. 試験方法

圧縮強度試験は JIS A 1108（コンクリートの圧縮強度試験方法）に準拠した。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。

3.5.2. 試験結果

(1) 圧縮強度と BF 使用率の関係

図 15 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 日においては、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 60% よりも大きくなる結果となった。材齢 28 日以降においては、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 N (BF 使用率 0%) よりも小さいが、潜在水硬性の影響により材齢が長くなるほど強度増進され、N との強度差が概ね小さくなることを確認した。W/B=65% では、いずれの材齢においても BF 使用率の増加に

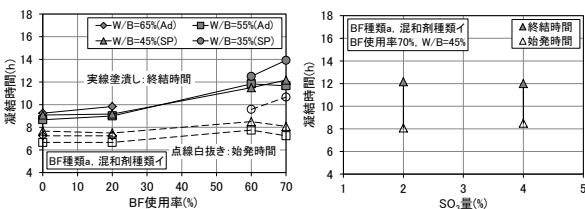


図 10 BF 使用率と凝結時間の関係

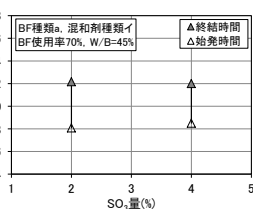


図 11 SO₃ 量と凝結時間の関係

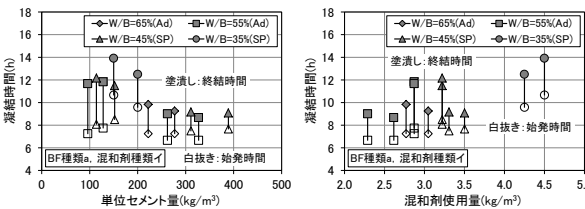


図 12 単位セメント量と凝結時間の関係 図 13 混和剤使用量と凝結時間の関係

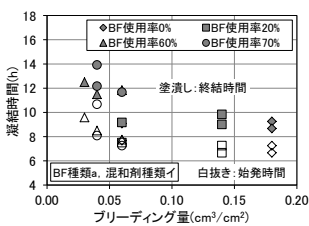
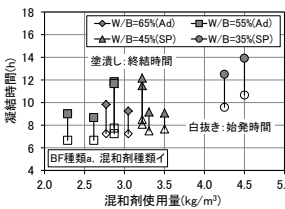


図 14 ブリーディング量と凝結時間の関係

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 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。

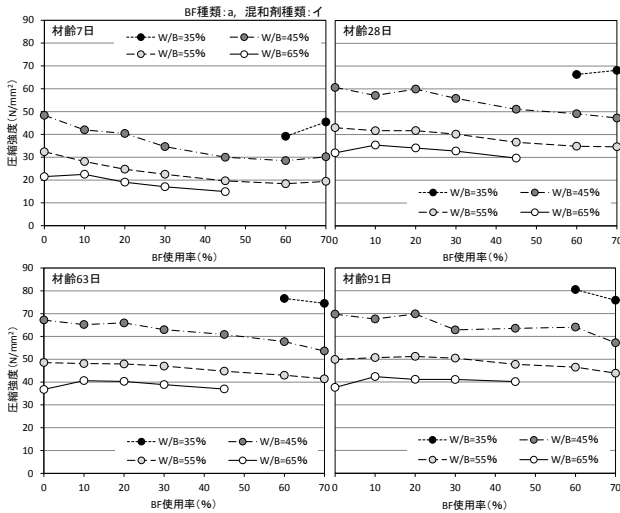


図 15 圧縮強度と BF 使用率の関係

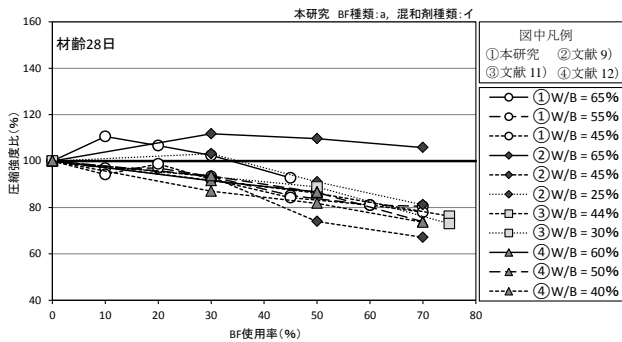


図 16 圧縮強度の既往文献との比較

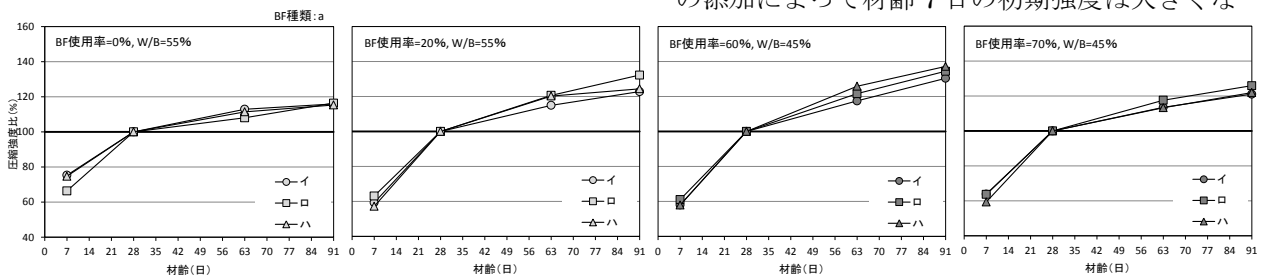


図 17 圧縮強度比におよぼす化学混和剤種類の影響

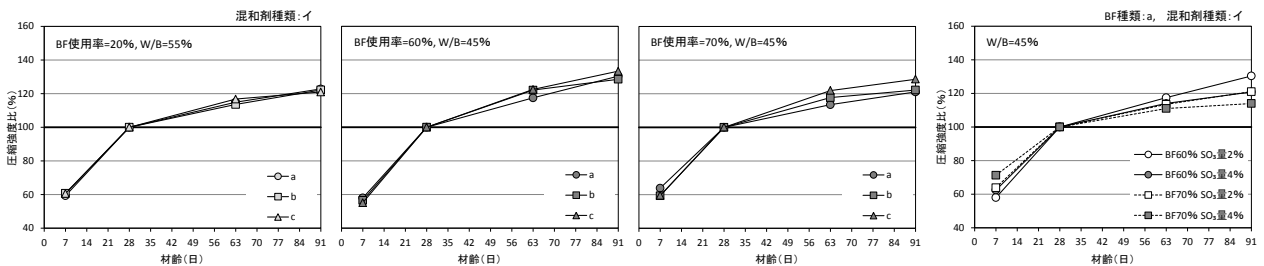


図 18 圧縮強度比におよぼす BF 種類の影響

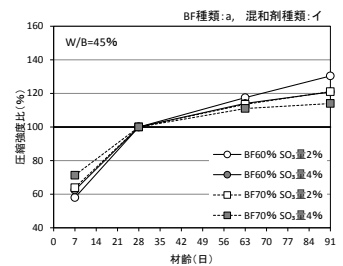


図 19 圧縮強度比におよぼす SO₃ 量の影響

(2) 既往の文献との比較

図 16 に材齢 28 日の N の圧縮強度を基準とした圧縮強度比と BF 使用率の関係における、本研究と既往文献^{9)・11)・12)}との比較を示す。なお、既往文献の数値はグラフから読み取っている。W/B=60%以上においては、BF 使用率の増加による圧縮強度比の増減にばらつきがみられるが、W/B=55%以下においては、本研究も既往文献も BF 使用率が増加すると圧縮強度比が低下する傾向が類似していることを確認した。

(3) 化学混和剤種類、BF 種類の影響

図 17 に材齢 28 日の圧縮強度を基準とした圧縮強度比におよぼす化学混和剤種類の影響を、図 18 に材齢 28 日の圧縮強度を基準とした圧縮強度比におよぼす BF 種類の影響を示す。化学混和剤の種類の違いによる強度発現への大きな影響は認められず、いずれの化学混和剤においても同程度の圧縮強度比であった。また、BF 種類の違いによる強度発現への大きな影響も認められず、いずれの BF 種類においても同程度の圧縮強度比であった。

(4) SO₃ 量の影響

図 19 に材齢 28 日の圧縮強度を基準とした圧縮強度比におよぼす SO₃ 量の影響を示す。SO₃ 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を確認した。

3.6. 静弾性係数試験

3.6.1. 試験方法

静弾性係数試験は、JIS A 1149（コンクリートの静弾性係数試験方法）に準拠し、材齢 28、91 日の圧縮強度試験時に行った。

3.6.2. 試験結果

(1) 静弾性係数と圧縮強度の関係

図 20 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¹³⁾による推定値 ($k_1=1.0$ 、 $k_2=0.95$ 、 1.0 、 1.1 、 $\gamma=2.31$) (式[6]) を示している。New RC 式では、高炉スラグ微粉末を用いる場合、混和剤の種類により定まる修正係数 $k_2=0.95$ を用いる。

$$E = 33.5 \times k_1 \times k_2 \times \left(\frac{\gamma}{2.4}\right)^2 \times \left(\frac{\sigma_B}{60}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \dots \text{式[6]}$$

- ここに、E : 静弾性係数 (kN/mm²)
- k_1 : 粗骨材の種類により定まる修正係数
- k_2 : 混和剤の種類により定まる修正係数
- γ : コンクリートの単位容積質量 (t/m³)
- σ_B : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

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であった。表 7 に本試験結果の圧縮強度と静弾性係数を推定式 (式[6]) に代入し算出した k_2 、算出した N の k_2 を基準とした各 BF 使用率における k_2 を示す。BF 使用率にかかわらず、混和剤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 N と同程度の静弾性係数を有しており、BF を使用すること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。

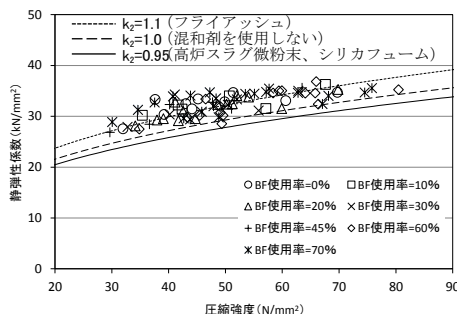


図 20 圧縮強度と静弾性係数の関係

3.7. 促進中性化試験

3.7.1. 試験方法

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)に基づいて行った。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。

3.7.2. 試験結果

(1) 中性化深さと促進期間の関係

図 21 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 \sqrt{t} 則が成り立つことが確認された。

(2) BF 使用率と中性化速度係数の関係

図 22 に中性化速度係数と BF 使用率の関係を示す。水結合材比ごとに見てみると、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が認められる。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。

(3) 圧縮強度と中性化速度係数の関係

図 23 に中性化速度係数と材齢 28 日標準養生圧縮強度の逆数の関係を示す。全体的な傾向として、圧縮強度の逆数が大きくなるに伴い、中性化

表 7 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

速度係数は大きくなる傾向が認められる。しかし、異なるBF使用率を比較すると、同一強度であっても中性化速度係数はA種、B種、C種クラスによって若干異なる傾向を示していることから、中性化深さは、強度のみでなくBF使用率も考慮して評価する必要があると考えられる。

(4) 既往の研究との比較

図24に中性化速度係数と材齢28日圧縮強度の逆数の関係に関する既往の研究^{11)~14)~17)}との比較を示す。なお、文献データは、文献中のグラフより読み取った値である。全体的な傾向として、本研究結果の中性化速度係数と圧縮強度の逆数の関係は、他の検討と同様な傾向を示していることから、本研究の中性化速度係数は、一般的な値であると判断できる。

(5) BF種類の違いによる影響

図25にBF種類による中性化速度係数の比較

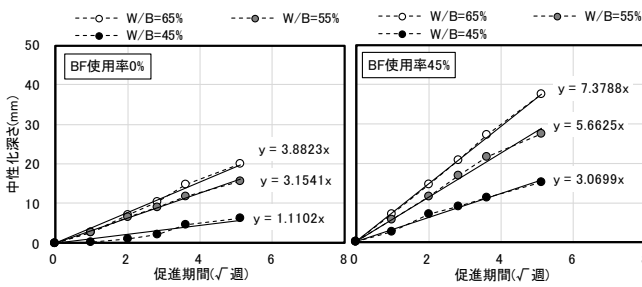


図21 中性化深さと促進期間の関係

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(表5参照)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。

(6) SO₃量の違いによる影響

図26にSO₃量2%および4%の中性化速度係数の比較を示す。両者の差は、僅かであることから、SO₃量が中性化速度係数に与える影響は小さい。

(7) Ca(OH)₂量に応じた中性化比率による評価

図27にBF使用率0%のCa(OH)₂量に対する各BF使用率のCa(OH)₂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[7]により算出した。

$$\text{中性化比率}CH = \sqrt{100/(100 - \text{BF使用率})} \dots \text{式}[7]$$

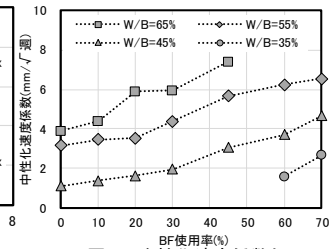


図22 中性化速度係数とBF使用率の関係

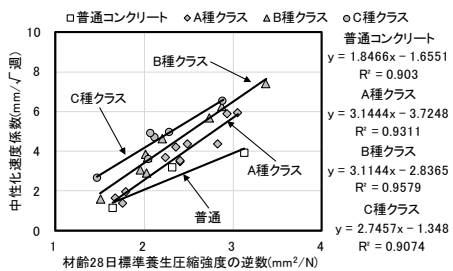


図23 中性化速度係数と材齢28日標準養生圧縮強度の逆数の関係

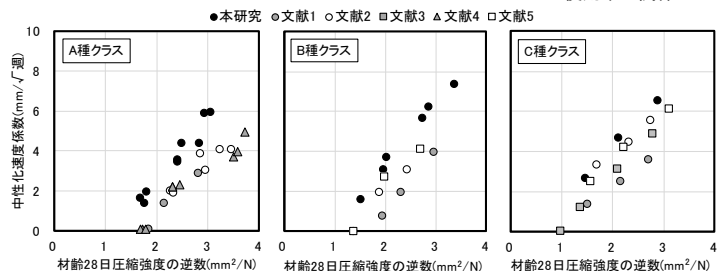


図24 既往の研究との比較(中性化速度係数と材齢28日圧縮強度の逆数の関係)

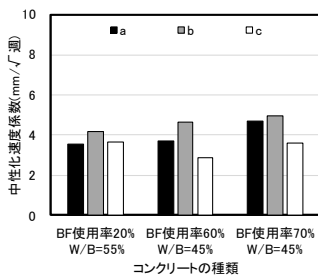


図25 BF種類による中性化速度係数の比較

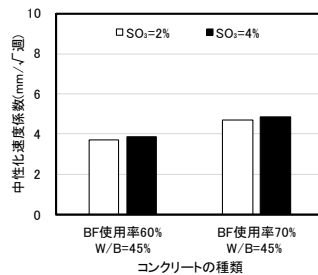


図26 SO₃量2%および4%の中性化速度係数の比較

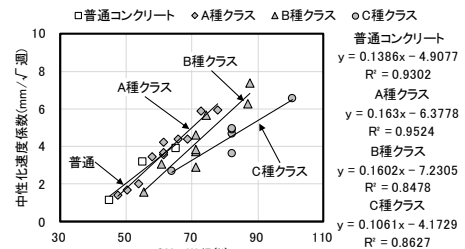


図27 中性化速度係数と中性化比率と水結合材比の積の関係

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が認められる。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)₂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。

3.8. 長さ変化試験

3.8.1. 試験方法

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。

3.8.2. 試験結果

(1) 乾燥期間と乾燥収縮率の関係

乾燥期間と乾燥収縮率の関係を図28に示す。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

では、BF種類：a、混和剤種類：イは統一としている。すべての供試体において、乾燥期間26週の乾燥収縮率が、建築工事標準仕様書・同解説JASS5鉄筋コンクリート工事¹⁸⁾(以下、JASS5)にて規定されている設計値 8×10^{-4} を下回っていることが確認できる。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、C種クラスで乾燥収縮率が $50 \sim 100 \times 10^{-6}$ 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乾燥収縮率に収束することが確認できる。乾燥期間1週時ではW/Bが小さいほど乾燥収縮率が大きくなっているが、その後はほぼ収束していく傾向を示した。

(2) 早期判定の検討

乾燥期間26週に対する各乾燥期間での乾燥収縮率を図29に、早期判定式の係数の比較を表8に示す。早期判定には、JASS5に示されている以下の早期判定式を用いて算出した。

$$\epsilon_{sh}^{est} = \alpha_i \times \epsilon_{sh}^i \quad \dots \text{式}[8]$$

ここに、 ϵ_{sh}^{est} : 乾燥期間26週における乾燥収縮率の推定値
 ϵ_{sh}^i : 乾燥期間*i*週における乾燥収縮率
 (iは4、8、13のいずれか)
 α_i : ϵ_{sh}^i から ϵ_{sh}^{est} を推定するための係数

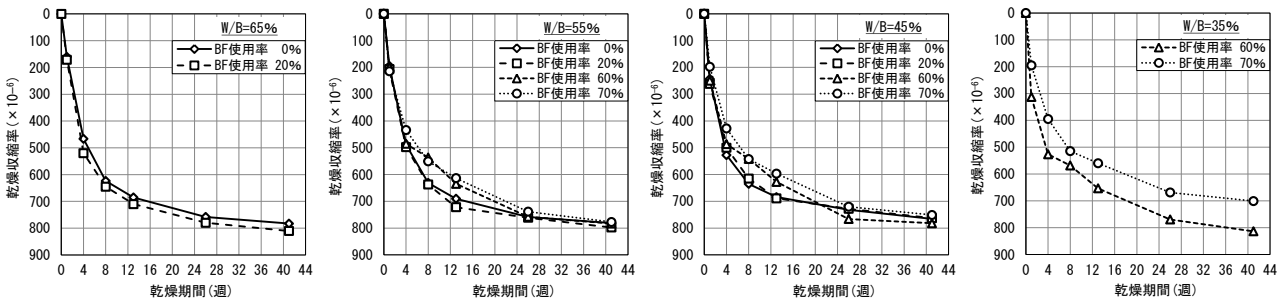


図28 乾燥期間と乾燥収縮率の関係

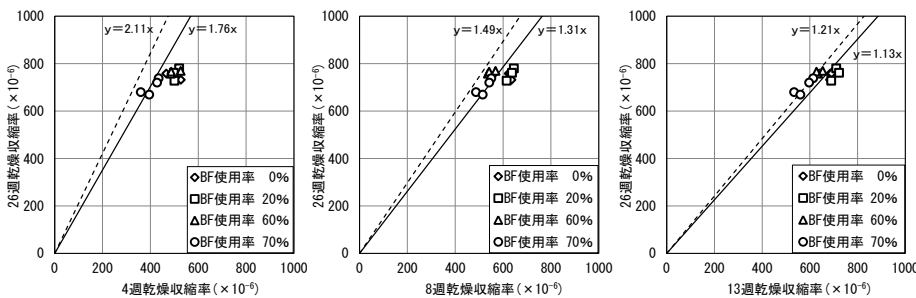


図29 乾燥期間26週に対する各乾燥期間での乾燥収縮率

表8 早期判定式の係数の比較

BF 使用率 (%)	乾燥収縮率比			
	26週 / 4週	26週 / 8週	26週 / 13週	
試験結果	0	1.52	1.19	1.09
	20	1.50	1.20	1.07
	60	1.53	1.39	1.20
	70	1.69	1.32	1.20
JASS 5	平均値	1.76	1.31	1.13
	α_i	2.11	1.49	1.21

図 29 には、JASS 5 に記載されている早期判定式の平均値と 4%不良率を許容した係数 α_i を用いた式を結果とともに示している。表 8 の試験結果から算定した係数は、試験結果の母数が少ないため平均値を採用している。図より、乾燥期間 4 週と 26 週では BF 使用率によってばらつきがあるものの、13 週と 26 週では JASS 5 の平均値に収束していることがわかる。試験結果より算定した早期判定式の係数を比較すると、すべての結果において JASS 5 に示されている α_i よりも小さくなることを示した。また、BF 使用率が高くなるほど係数が大きくなる傾向を示した。これは、乾燥材齢 4~13 週における乾燥収縮率の低減が影響していると考えられる。早期判定式を用いる場合は、BF 使用率による係数の補正が必要である。

3.9. 凍結融解試験

3.9.1. 試験方法

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。

3.9.2. 試験結果

(1) 相対動弾性係数と質量減少率

凍結融解試験による相対動弾性係数を図 30 に、質量減少率を図 31 に示す。コンクリートの空気量は $4.5 \pm 1.5\%$ で管理しており、最も小さな空気量でも 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%では、大きく変動することはなく同様の傾向を示している。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%以上という基準に対しては、BF 使用率 70%を除くと、W/B が 35~45%と低いものすべてが満たしている結果となった。質量減少率を見てみると、BF を使用したコンクリートでは、相対動弾性係数の増減に対する相関性が見られなかった。

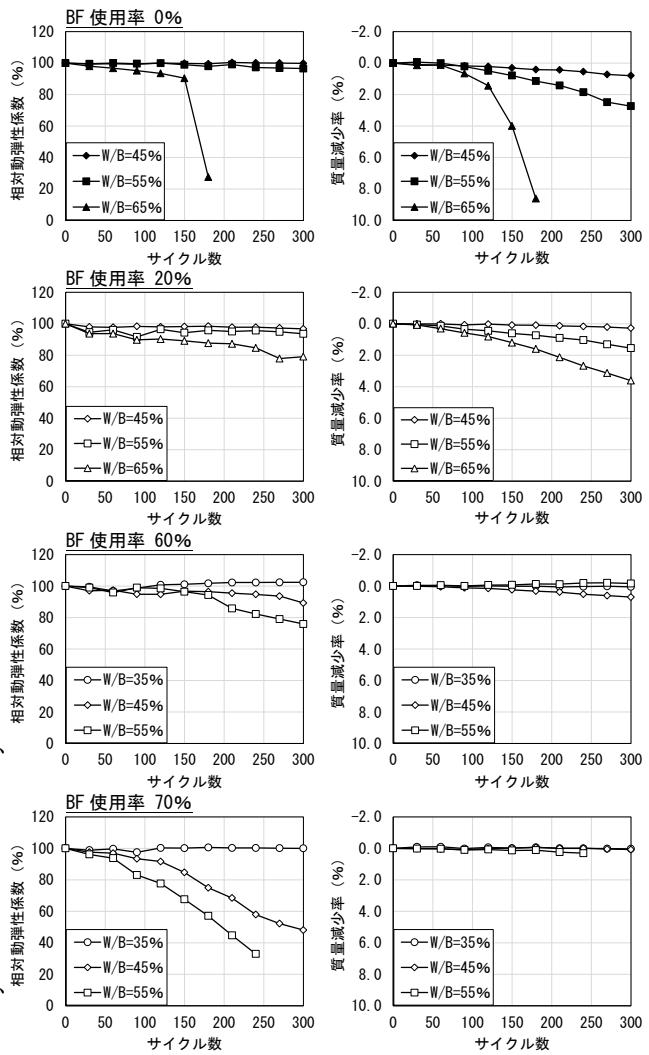


図 30 相対動弾性係数

図 31 質量減少率

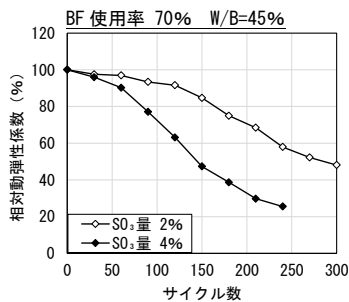


図 32 SO₃量による影響

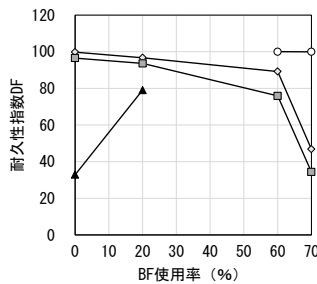


図 33 BF 使用率と耐久性指数の関係

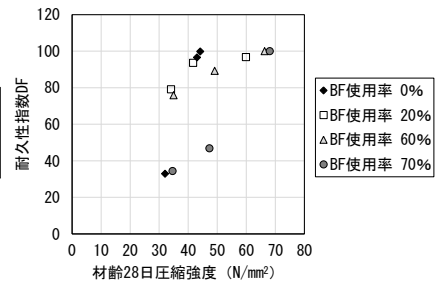


図 34 圧縮強度と耐久性指数の関係

(2) SO₃量の影響

SO₃量による相対動弾性係数の比較を図 32 に示す。SO₃量 2%の供試体よりも、SO₃量 4%の供試体の方が低い相対動弾性係数を示し、既往の研究¹⁹⁾と同様の傾向を示した。

(3) BF 使用率と耐久性指数の関係

BF 使用率と耐久性指数の関係を図 33 に、圧縮強度と耐久性指数の関係を図 34 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できる。また、W/B が小さいほど耐久性指数は高くなっている。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出来る。BF 使用率 60%以下では、圧縮強度が 40N/mm²以上で耐久性指数が 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. 低温環境下における検討

高炉スラグ微粉末を使用したコンクリートは、低温環境下で凝結遅延が生じることや初期強度発現の停滞が生じることが指摘されている²⁰⁾。以下に、環境温度(5℃、10℃、20℃)が凝結性状に及ぼす影響について検討した結果について報告する。

4.1. 実験概要

実験の要因と水準を表 9 に示す。環境温度は、5℃、10℃および 20℃の 3 水準とした。BF 使用率は 0%、20%、60%および 70%の 4 水準とし、SO₃量は 2%および 4%の 2 水準(BF 使用率 70%のみ実施)とした。

4.2. 使用材料

表 10 に使用材料を示す。環境温度 20℃の使用材料は「2. 室内実験の概要」に示したものと同一であり、環境温度 5℃および 10℃の実験で使用した材料は異なるロットのものを使用した。表

10 に示すように、材料の物性値に大きな違いがないことから、物性値の差がコンクリートに及ぼす影響は小さいと判断し、以後の考察では考慮していない。

4.3. 試験方法

試験はスランプ (JIS A 1101)、空気量 (JIS A 1128)、コンクリート温度 (JIS A 1156) および凝結時間 (JIS A 1147) を実施した。また、凝結時間の遅延によりブリーディング量が増加し、沈

表 9 要因と水準

要因	水準
環境温度	5℃、10℃、20℃
BF 使用率	0%、20%、60%、70%
SO ₃ 量	約 2%、4%

表 10 使用材料

材料名	項目	物性値等		
		環境温度		
		5℃、10℃	20℃	
セメント	普通	密度 (g/cm ³)	3.16	3.16
	ポルトランドセメント	比表面積 (cm ² /g)	3270	3280
		SO ₃ 量 (%)	2.06	2.10
混和材	高炉スラグ微粉末 (a)	密度 (g/cm ³)	2.89	2.89
		比表面積 (cm ² /g)	4460	4370
	無水せっこう	SO ₃ 量 (%)	2.01	2.06
細骨材	静岡県掛川産山砂	表乾密度 (g/cm ³)	2.57	2.58
		粗粒率	2.61	2.77
粗骨材	東京都青梅産硬質砂岩碎石	表乾密度 (g/cm ³)	2.64	2.65
		実積率 (%)	58.0	58.2
混和剤	高性能 AE 減水剤	種類イ		

表 11 コンクリートの調合およびフレッシュ性状

BF 使用率 (%)	SO ₃ 量 (%)	環境温度 (℃)	単位粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量 (kg/m ³)			高性能 AE 減水剤 使用量 (Bxwt%)	SL (cm)	Air (%)	C.T. (℃)
				W	C	BF				
0	2.06	5・10	0.58	175	389	0	0.90	22.5	4.6	7
	2.10	20	0.58				0.80	22.5	4.3	22
20	2.05	5・10	0.58	175	311	78	0.85	22.0	4.7	8
	2.09	20	0.58				0.73	22.5	4.5	21
60	2.03	5・10	0.58	170	152	227	0.85	21.5	4.9	9
	2.08	20	0.58				0.85	21.5	4.2	21
70	2.03	5・10	0.58	170	114	265	0.85	21.5	5.0	8
	2.07	20	0.58				0.78	21.0	5.5	21
70	4.00	5・10	0.58	170	114	265	0.85	21.5	4.8	8
	4.00	20	0.58				0.75	21.5	5.3	21

降量が増大することが懸念されたため、沈降量試験（JASS 5T-503）も実施した（環境温度 5°Cのみ）。各種試験の環境温度 5°Cおよび 10°Cのものは同一バッチとし、室温 5°Cでコンクリートの練混ぜを行い、練上がり直後のフレッシュ試験実施後、直ちに環境温度 5°Cまたは 10°Cの環境下で試験および養生を実施した。

4.2. 試験結果

(1)フレッシュ性状

表 11 にコンクリートの調合およびフレッシュ性状を示す。目標スランプは 21±2cm、目標空気量は 4.5±1.5%とし、水結合材比 45%、単位粗骨材かさ容積は 0.58m³/m³ と一定にした。スランプおよび空気量については、目標範囲を満足する結果であった。

(2)凝結時間と BF 使用率の関係

図 35 に凝結時間と BF 使用率の関係を示す。環境温度 20°Cの場合、始発時間は BF 使用率の影響を受けずに、ほぼ同等の値となった。終結時間は、BF 使用率が大きくなるに伴い、若干遅延する傾向（最大約 3 時間）が認められた。環境温度 5°Cおよび 10°Cでは、BF 使用率が 20%を超えると始発時間が遅延する傾向が認められ、最大で約 4 時間程度遅延する傾向であった。また、終結時間については、その傾向がより顕著であり、BF 使用率 0%および 20%に比べ、60%および 70%は 7～13 時間程度の凝結遅延が生じる結果であった。

(2)凝結時間と環境温度の関係

図 36 に凝結時間と環境温度の関係（SO₃ 量の影響）を示す。図中より、SO₃ 量が異なっても、環境温度と凝結時間の関係は同等であると判断できる。よって、SO₃ 量が異なっても凝結時間に及ぼす影響はないものと考えられる。

24 時間経過時点における沈降量は、BF 使用率 0%で 1.04mm、BF 使用率 70%で 0.85mm であり、BF 使用率 70%のものがスラグを使用していないものより小さい沈降量であった。

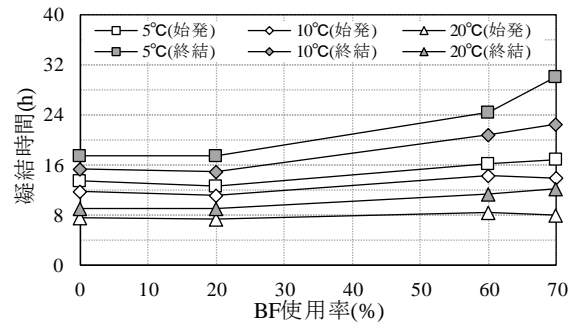


図 35 凝結時間と BF 使用率の関係

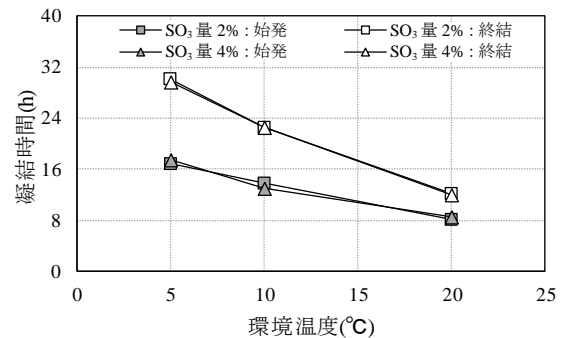


図 36 凝結時間と環境温度の関係 (SO₃ 量の影響)

5. 室内実験のまとめ

本研究検討結果を表 12 に示す。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 70%においても、静置で経時 60 分のスランプ保持性能を有していた。
- (2) BF 使用率の増加に伴い、ブリーディング量が減少した。
- (3) 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、終結時間が遅延した。
- (4) 低温環境下における凝結時間は、BF 使用率 60%以上になると終結時間が大幅（7～13 時間）に遅延した。
- (5) 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。
- (6) 圧縮強度は、材齢 28 日以降であれば BF 使用率 30%以下は N 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。

- (7) 静弾性係数は、BF 使用率に関わらず、BF を使用していない一般のコンクリートと同様な静弾性係数を有していた。
- (8) 乾燥収縮は、BF 使用率に関わらず N と同等であった。
- (9) 中性化抵抗性は、BF 使用率の増加に伴い低下した。
- (10) 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 使用率が高く水結合材比も大きい場合は注意が必要である。

表 12 室内実験のまとめ

項目	BF 使用率(%)					
	10	20	30	45	60	70
フレッシュ 経時変化	—	—	—	—	—	同等
ブリーディング	—	同等	—	—	—	減少
凝結時間	—	同等	—	—	—	遅延
凝結時間 (低温)	—	同等	—	—	—	大遅
温度上昇量	—	—	—	—	—	減少
圧縮強度 (7 日)	BF 使用率の増加に伴い低下					
圧縮強度 (28 日)	同等		使用率に伴い低下			
圧縮強度 (91 日)	同等		使用率に伴い低下			
静弾性係数	同等					
乾燥収縮	—	同等	—	—	—	同等
中性化抵抗性	BF 使用率の増加に伴い低下					
耐凍害性	—	同等	—	—	微低	低下

表内は N と比較した場合の増減等を示す
[—] は未検討

【謝辞】

本研究は、長谷工コーポレーション、青木あすなる建設、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 社共同研究による成果です。また、本研究の実施にあたり、鐵鋼スラグ協会、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) 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) 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
- 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、p.43、2016
- 6) 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
- 7) 河野政典 他：シリカフェウムを使用した 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
- 8) 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
- 9) 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
- 10) 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
- 11) 溝渕麻子 他：混和材を高含有したコンクリートの基礎的性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.185～190、2011.8
- 12) 親本俊憲 他：混合セメントを用いたコンクリートの耐久性能（その 1 実験概要）、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.427～428、2014
- 13) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、2018
- 14) 小林利充 他：高炉セメント A 種相当品を使用したコンクリートの基礎的性状に関する検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.61～62、2017.8
- 15) 辻大二郎 他：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、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.205～210、2011.8
- 16) 金子樹 他：セメント混合における高炉セメント A 種相当のコンクリートの諸性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、2017.8、pp.63～68
- 17) 大岡督尚 他：高炉スラグ微粉末を高含有した環境配慮型コンクリートの基礎物性、日本建築学会大会学術講演梗概集、2016.8、pp.79～84
- 18) 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、2016
- 19) 和地正浩 他：高炉スラグ微粉末高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性に関する研究、竹中技術研究報告、No.67、2011
- 20) 井戸康浩 他：高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの環境温度が各種性状に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集（東北）、pp.721～722、2018.9