

論文 高炉スラグ粗粉のコンクリートへの利用に関する基礎的研究

大矢 洋^{*1}・宮澤 伸吾^{*2}・廣島 明男^{*3}・久保田 賢^{*3}

要旨：比表面積 1000~2000cm²/g 程度の高炉スラグ粗粉をコンクリート用混和材として利用することを目的とし、高炉スラグ粗粉を混入したコンクリートのワーカビリティ、発熱特性、圧縮強度および耐凍害性について実験により検討した。その結果、高炉スラグ粗粉を用いたコンクリートは、無混入と同等のワーカビリティおよび断熱温度上昇量、顕著な材齢 3 日以降の強度増加、水結合材比 50%程度以下の場合に、無混入と同等な耐凍害性が得られることが明らかとなり、これらの特性を考慮することにより高炉スラグ粗粉を有効利用できる可能性があることが明らかとなった。

キーワード：高炉スラグ粗粉、比表面積、ワーカビリティ、圧縮強度、耐凍害性

1. はじめに

コンクリート用混和材である高炉スラグ微粉末は、比表面積が 4000cm²/g 程度、6000 cm²/g 程度および8000 cm²/g 程度の3種類のもので JIS 製品として規定されている。しかし、高炉スラグ微粉末の製造において、粉砕工程で所定の粒径にまで細くならなかった高炉スラグ粗粉は、再び粉砕機に供給され、繰り返し粉砕されているのが現状である。このような比表面積の小さい高炉スラグ粗粉を、コンクリート用混和材として利用することができればエネルギーの削減が期待できる。

また、高炉スラグ粗粉を混入することにより粉体の粒度分布が変化して充てん率が大きくなり、セメントペーストの流動性が改善されることが報告されており、コンクリートにおいても流動性の向上などが期待される¹⁾。

そこで本研究では、比表面積 1000~2000cm²/g 程度の高炉スラグ粗粉を、コンクリート用混和材として有効利用することを目的とし、高炉スラグ粗粉を混入したコンクリートのワーカビリティ、発熱特性、圧縮強度特性および耐凍害性について実験により検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料を表-1 に示す。高炉スラグ粗粉 BS としては、比表面積の異なる 3 種類のを混和材として使用した。

2.2 配合

本研究で用いた配合を表-3 に示す。高炉スラグ粗粉 (BS) は普通ポルトランドセメント (N) に対し、置換率 10~50%で混入した。W/B=40

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント (密度3.16g/cm ³) 高炉セメントB種 (密度3.07g/cm ³)
高炉スラグ粗粉	BS1200 (比表面積1200cm ² /g,密度2.91 g/cm ³) BS1400 (比表面積1390cm ² /g,密度2.97 g/cm ³) BS1800 (比表面積1800cm ² /g,密度2.91 g/cm ³)
細骨材	鬼怒川産川砂,密度2.58~2.60 g/cm ³ , 吸水率2.01~2.28%,粗粒率2.67~2.88
粗骨材	葛生町産碎石,最大寸法20mm,密度2.62~2.64 g/cm ³ ,吸水率0.52~0.59%,粗粒率6.76~6.81
AE減水剤	リグニン系(WR)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系(SP)

表-2 BS1400 の化学成分 (単位: %)

ig-loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O
0.26	31.96	14.48	5.23	39.90	5.64	0.17
	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	total	塩基度 補正塩基度
0.23	1.04	0.04	0.53	97.38	1.88	1.87

*1 足利工業大学 大学院工学研究科修士課程土木工学専攻 (正会員)

*2 足利工業大学教授 工学部都市環境工学科 工博 (正会員)

*3 第一セメント(株) 営業部

表-3 コンクリートの配合

試験項目	セメント	BS	W/B (%)	BS/B (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤(B×%)		
							W	C	BS	S	G	WR	SP	
加圧ブリーディング試験	N	BS無混入	60	0	5±1	49.2	167	278	0	882	925	0.35	----	
		BS1200 12%		12				245	33	881	924			
		BS1200 19%		19				225	53	880	923			
		BS1800 12%		12				245	33	881	924			
		BS1800 19%		19				225	53	880	923			
	BS無混入	60	0	5±1	49.2	185	308	0	847	888	0.35	----		
	BS1200 12%		12				271	37	846	887				
	BS1200 19%		19				250	59	845	886				
	BS1800 12%		12				271	37	846	887				
	BS1800 19%		19				250	59	845	886				
断熱温度上昇試験	N	BS無混入	60	0	5±1	49.2	167	278	0	882	925	0.35	----	
		BS1200 19%		19				225	53	880	923			
		BS1800 19%		19				225	53	880	923			
圧縮強度試験および凍結融解試験	N	BS無混入	65	0	5±1	49.1	170	262	0	890	937	0.35	----	
		BS1400 10%		10				235	26	889	936			
		BS1400 30%		30				183	78	888	935			
		BS1400 50%		50				131	131	887	933			
		BS無混入	50	0	5±1	46.1	162	324	0	822	975	0.45	----	
		BS1400 10%		10				292	32	821	974			
		BS1400 30%		30				227	97	819	973			
		BS1400 50%		50				162	162	818	971			
		BS無混入	40	0	5±1	43.1	170	425	0	723	970	0.45	----	
		BS1400 10%		10				383	43	722	968			
	BS1400 30%	30		298				128	720	966				
	BS1400 50%	50		213				213	719	963				
	BS無混入	30	0	2±1	43.8	170	567	0	718	936	----	0.65		
	BS1400 10%		10				510	57	717	934		0.60		
	BS1400 30%		30				397	170	714	931		0.55		
	BS1400 50%		50				283	283	712	927		0.90		
	BS無混入	25	0	2±1	45.6	170	680	0	705	854	----	0.75		
	BS1400 10%		10				612	68	704	852		0.60		
	BS1400 30%		30				476	204	700	848				
	BS1400 50%		50				340	340	697	844				
BB	BS無混入	65	36	5±1	2±1	43.8	170	49.1	170	262	887	934	0.35	----
		50						46.1	162	324	818	971	0.45	
		40						43.1	170	425	719	964	0.45	
		30						43.8	170	567	712	928	0.70	

～65%の場合 BS 無混入の配合の目標スランブを、8.0±2.5cm とした。加圧ブリーディング試験においては 8.0±2.5cm および 18.0±2.5cm の 2 水準とした。BS を混入した場合も混和剤の添加率を一定とした。W/B=25, 30% の場合は目標スランブフローを 65.0±5.0cm とし、目標スランブフローが得られるよう高性能 AE 減水剤添加率により調整した。また、圧縮強度試験および凍結融解試験については、比較のため高炉セメント B 種 (BB) を用いた。

2.3 実験方法

高炉スラグ粗粉を混入したコンクリートのスランブ試験、加圧ブリーディング試験、断熱温度上昇量試験、圧縮強度試験および凍結融解試験を行い、BS 無混入の場合と比較検討した。加圧ブリーディング試験は各配合につき 2 バッチ

ずつ行った。加圧ブリーディング試験においてのスランブ試験は 1 バッチにつき 2 回行い、計 4 回行った。結果は平均値で示す。

(1) スランブ試験およびスランブフロー試験

コンクリートの流動性を調べるため、スランブ試験およびスランブフロー試験を行った。スランブ試験後、水密性平板の四隅を突き棒で叩き、変形の状態を観察した。

(2) 加圧ブリーディング試験

コンクリートのポンパビリティーを検討するため、加圧ブリーディング試験 (JSCE-F 502-1990) を行った。

(3) 断熱温度上昇試験

モルタルミキサーでモルタルを練り混ぜた後、粗骨材を加え、手練りをした。1 バッチ 4.75ℓ のコンクリート全量を試料として、断熱温度上昇

試験機（空気循環方式）により測定を行った。

(4) 圧縮強度試験

材齢 3 日, 7 日, 28 日, 91 日におけるコンクリートの圧縮強度試験を行った。W/B=40%, 50%, 65%の配合に関しては養生温度を 20℃, 35℃の 2 水準とした。いずれの条件についても, 水中養生とした。

(5) 凍結融解試験

W/B=50%, 65%におけるコンクリートの凍結融解試験 (JIS A 1148-2001) を行った。

3. 試験結果および考察

3.1 スランプ

W/B=40~65%のコンクリートのスランプ試験結果を図-1 に示す。

BS 無混入のコンクリートと, BS を混入したコンクリートでは, 置換率 30%程度以下の場合, スランプに大きな差は認められなかった。しかし, BS 置換率が 50%程度の場合, W/B が低いほど, スランプが大きくなる傾向が見られた。また, スランプ試験後振動を与え, コンクリートの状態を観察したが, BS 混入の有無による大きな違いはみられなかった。BS を混入したコンクリートは, 無混入のコンクリートと同等以上のワーカビリティが得られると考えられる。

3.2 加圧ブリーディング

BS1200 および BS1800 をそれぞれ混入したコンクリートの脱水量曲線を, BS 無混入の場合と比較した結果を図-2 に示す。

図-2 は各配合につき 2 バッチの試験値の平均値で示しているが, 2 バッチの脱水量の差は 240 秒時で 10~20ml 程度あり, そのばらつきを考えると単位水量が同じ場合は, 脱水量曲線に大きな差は認められなかった。高炉スラグ粗粉の種類や置換率による一定の関係も見られず, 置換率が 20%程度以下であれば, 高炉スラグ粗粉を用いたコンクリートのポンパビリティは, 無混入のものとはほぼ同等であると考えられる。

3.3 断熱温度上昇

コンクリートの断熱温度上昇量は, セメント

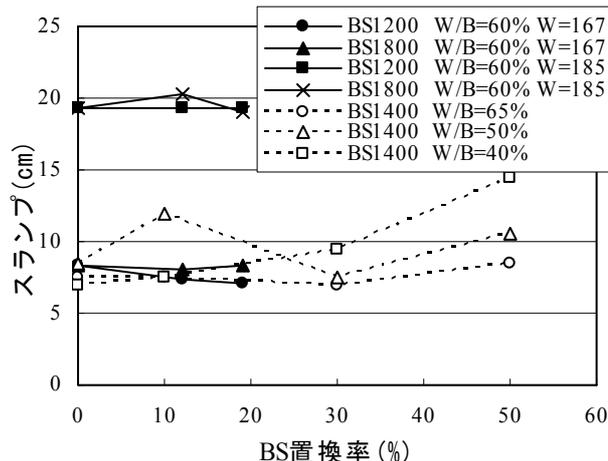


図-1 スランプ試験結果

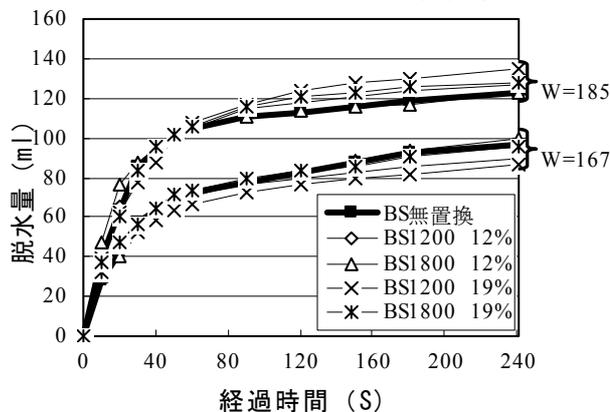


図-2 加圧ブリーディング試験結果

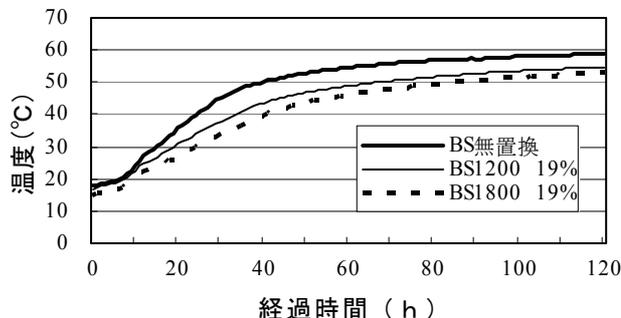


図-3 断熱温度上昇試験結果

表-4 断熱温度上昇試験 Q_{∞} および γ (W/B 一定)

	BS無混入	BS1200 19%	BS1800 19%
Q_{∞} (°C)	42.3	39.7	39.4
γ	0.75	0.60	0.55

の水和熱によるマスコンクリートの温度変化を解析するための基本的な定数であり, 一般に以下の式で表すことができる²⁾。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t}) \quad (1)$$

ここに, Q_{∞} は終局断熱温度上昇量, γ は温度上昇速度に関する定数で, t は材齢 (日), $Q(t)$

は材齢 t 日における断熱温度上昇量 (°C) である。

BS1200, BS1800 をそれぞれ混入および無混入のコンクリートの断熱温度上昇量試験の結果を図-3 に示した。また, Q_{∞} および γ を図-3 より求めた結果を表-4 に示す。同一の W/B で比較すると BS 無混入と比べて, BS を混入した場合のほうが断熱温度上昇量が低くなった。しかし, 本実験で得られた C/W と圧縮強度の関係を用い, 土木学会の標準値²⁾ を参考にして, 同一圧縮強度で比較した場合, 終局温度上昇量はほぼ同等になると思われる。また, BS1800 を混入した配合が BS1200 を混入した配合より断熱温度上昇量が低くなっているが, 打ち込み温度の違いを考慮すると, BS1800 を混入した方がやや高くなると思われる。

3.4 圧縮強度

(1) 長期材齢における圧縮強度

図-4 に材齢 91 日までの圧縮強度試験結果を示す。同一水結合材比で比較すると BS 置換率の増加とともに材齢 3 日の圧縮強度が低くなったが, 材齢 3 日から 91 日にかけての圧縮強度の伸びは, $W/B=65, 50, 40\%$ の場合 BS 無混入とほぼ同等, $W/B=30, 25\%$ の場合 BS 無混入よりも大きくなっている。また, 図-5 に示すようにセメント水比と強度の関係で整理すると高炉スラグ粗粉は強度発現に寄与しており, この効果は長期材齢ほど顕著であることがわかる。

所定の圧縮強度を得るためには高炉スラグ粗粉の置換率の増加とともに水結合材比を下げる必要があるが, 高炉スラグ粗粉は強度発現に寄与するため, 単位セメント量の低減が期待できる。図-7 は, 材齢 28 日または 91 日で所定の圧縮強度を得るための単位セメント量を示したものである。単位セメント量は BS 置換率 10% では 10~15%, BS 置換率 50% では 30~40% 減らすことが可能である。

(2) 養生温度が圧縮強度に及ぼす影響

図-6 に示すように, BS 無混入の場合は 20°C で養生した場合も 35°C で養生した場合も同一

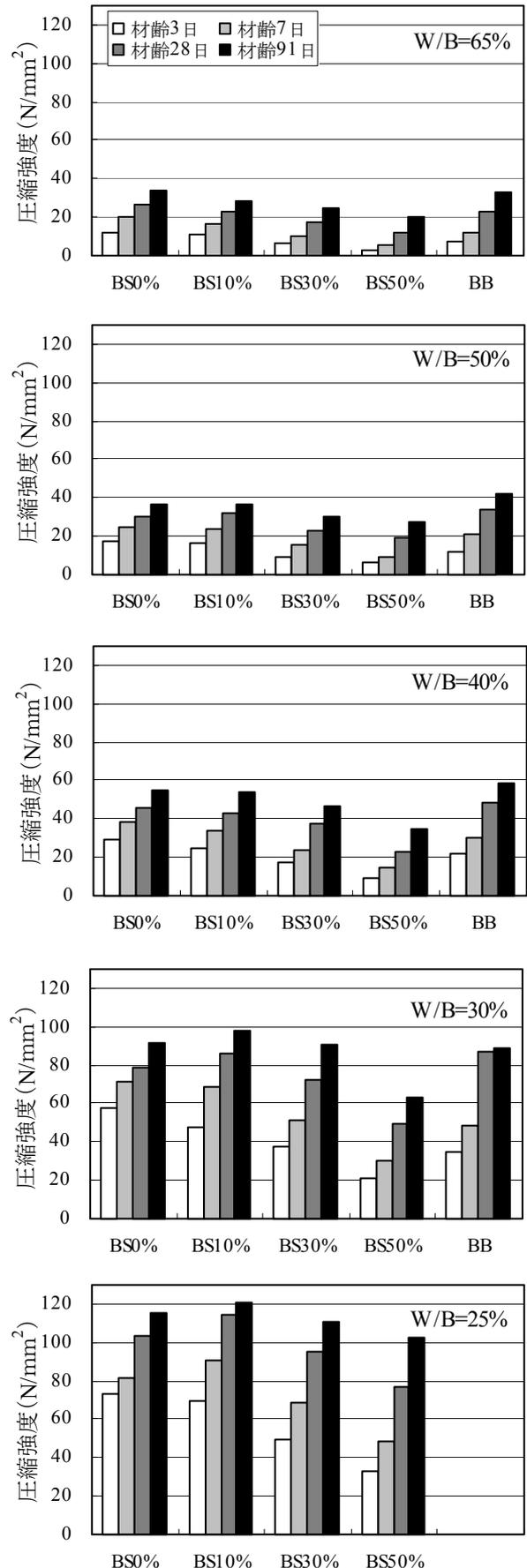


図-4 圧縮強度試験結果

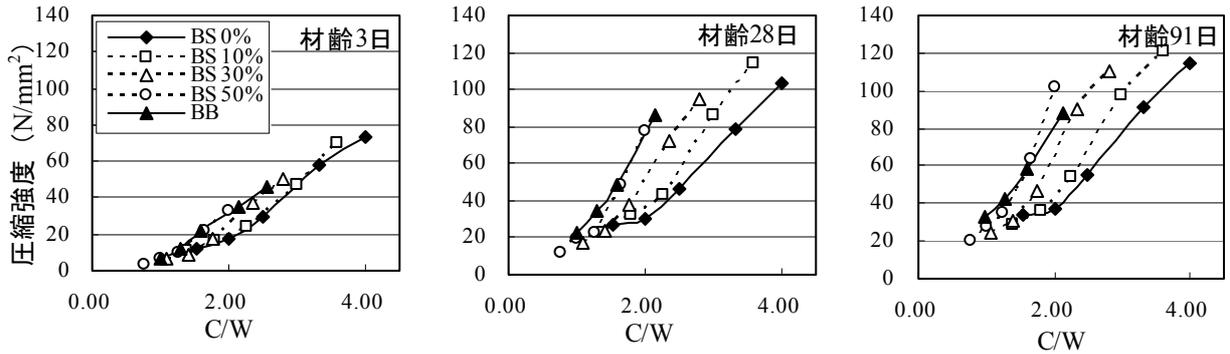


図-5 セメント水比と圧縮強度の関係

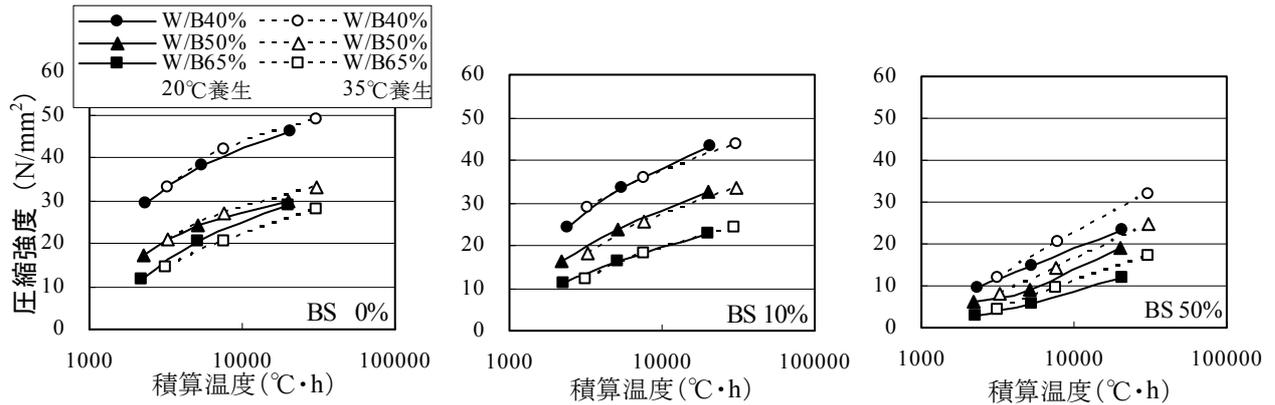


図-6 養生温度別圧縮強度試験結果

積算温度における圧縮強度はほぼ同等だが、BS 置換率を高くするほど 35°C で養生した方が圧縮強度が高く、この傾向は長期材齢であるほど顕著になることが認められた。

3.5 凍結融解抵抗性

コンクリートの凍結融解の試験結果を図-8、図-9 に示した。W/B=65% の場合は、高炉セメント B 種を使用したコンクリートは普通ポルトランドセメントを用いた場合と比べて耐凍害性に優れているのに対し、BS を混入したコンクリートは、置換率が大きいほど耐凍害性が低下することがわかる。

W/C=50% ではいずれの配合においても相対動弾性係数が 300 サイクルで 80% 以上となっており、BS 置換率が 50% 以下であれば相対動弾性係数が BS 無混入の場合と同等な値となった。ただし、図-9 より、BS 置換率が大きくなるほど質量減少率は大きくなる。

図-10 に示すように、W/B=65% においては BS 置換率の増加とともに耐久性指数が低下しているのに対し、W/B=50% の場合は BS 置換率を上げて、耐久性指数はほぼ一定の値を示した。

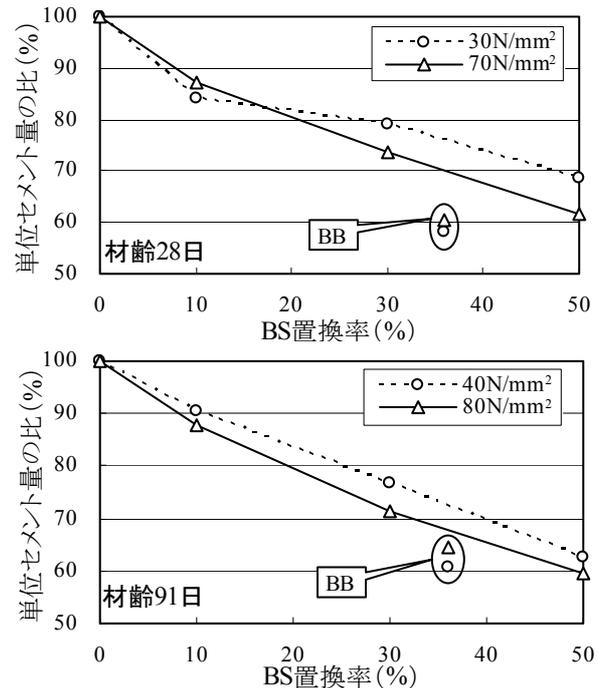


図-7 圧縮強度とセメント使用量の関係

また、同一圧縮強度で比較すると高炉スラグ粗粉を混入したコンクリートの耐凍害性は無混入の場合と同等以上であると推測される。

4. 結論

本研究によって得られた結論を以下に記す。

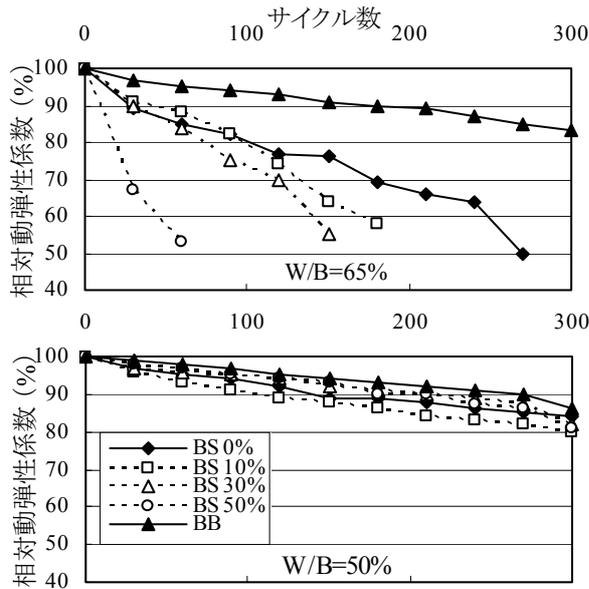


図-8 サイクル数と相対動弾性係数との関係

- (1) 高炉スラグ粗粉 (BS) を用いたコンクリートは、BS 無混入のコンクリートと同等以上のワーカビリティを有している。
- (2) 高炉スラグ粗粉を用いたコンクリートは W/B 一定の場合、BS 無混入のコンクリートと比べて、断熱温度上昇量を低く抑えられる。しかし、同一強度で比較するとほぼ同等の値になると考えられる。
- (3) 高炉スラグ粗粉の置換率の増加とともに圧縮強度は低減するが、材齢 3 日以降の圧縮強度の増加は BS 無混入の場合と同等、または大きくなる。
- (4) 高炉スラグ粗粉は強度発現に寄与しているため、所定の圧縮強度を得るための単位セメント量を減らすことが可能であり、この効果は長期材齢であるほど顕著である。
- (5) 養生温度を 20℃および 35℃とした場合、BS 無混入では同一積算温度における圧縮強度に大きな差は認められなかったが、置換率の増加とともに 35℃養生のほうが同一積算温度における圧縮強度が高くなる。
- (6) W/B=65%の場合、高炉スラグ粗粉の置

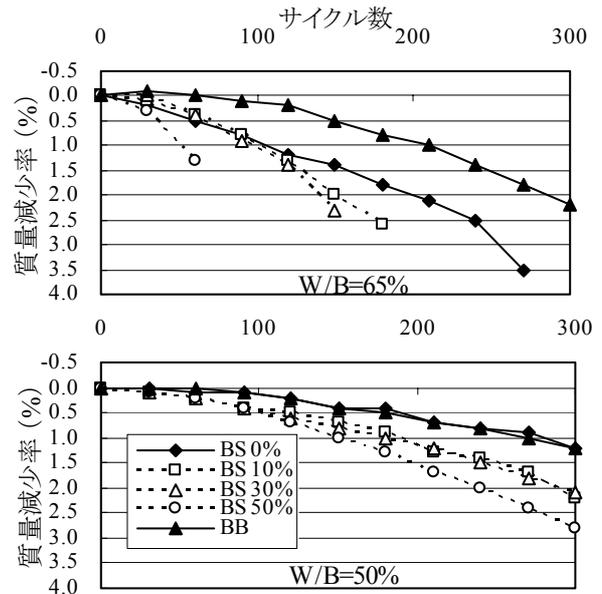


図-9 サイクル数と質量減少率との関係

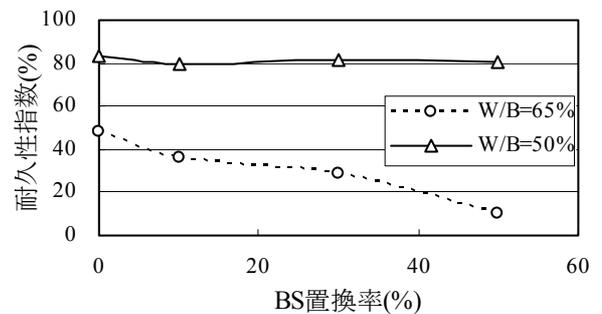


図-10 耐久性指数

換率が増加するほど耐凍害性は低下するが、W/B=50%ではいずれの配合においても同等な値となった。また、同一圧縮強度で比較すると BS を混入しても、BS 無混入の場合と同等以上の耐凍害性を得ることが可能であると言える。

以上のことから、高炉スラグ粗粉はコンクリート用混和材として有効利用できる可能性がある。

参考文献

- 1) 井田 敦師, 宮澤 伸吾ほか: 高炉スラグ粗粉を用いたセメントペーストの流動性, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集第 5 部, pp.1030-1031, 1999
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書, 施工編, 2002