

論文 高炉スラグ微粉末を混入したセメントモルタルの早期強度の増進に関する研究

李 翰承*¹・姜 勳*²・申 成雨*³

要旨：高炉スラグ微粉末(SB)を混入したコンクリートの初期圧縮強度の増進のため SB を混入したセメントモルタルを対象として、セメントの種類、SB の置換率及び調合方法がセメントモルタルの初期圧縮強度発現に及ぼす影響を実験的に検討した。その結果、セメントモルタルの塩基度を高くする方法、セメント量を一定にし砂の一部分を SB で置換する SB 外割調合方法、材齢初期の圧縮強度発現率が高い早強ポルトランドセメントを結合材として用いた方法及び SB をセメント及び砂に分けて混入する SB 内・外割調合方法が SB 混入セメントモルタルの初期圧縮強度を増進させる効果があることを確認した。

キーワード：高炉スラグ微粉末、セメントモルタル、初期圧縮強度、ポゾラン反応

1. はじめに

高炉スラグ微粉末は(以下 SB という)、高い品質安定性や潜在水硬性があるポゾラン材料で、コンクリートの混和材料として用いた場合、水和発熱速度の低減、塩化物イオンの浸透抑制及びアルカリシリカ反応の抑制などのメリットを発揮する。また、産業副産物の再利用による環境保護及びレミコンの製造原価低減を図るために積極的な活用が期待される。しかし、韓国内ではその使用実績や研究が不足であり、特に、工事現場では SB の混入によるコンクリートの早期強度低下という認識があってその実用化には解決すべき課題がある。

本研究では、SB 混入コンクリートの初期圧縮強度の増進のための基礎資料を得るために、SB を混入したセメントモルタルを対象として、セメントの種類、SB の置換率及び調合設計方法がセメントモルタルの初期圧縮強度発現に及ぼす影響を実験的に検討した。

2. 高炉スラグ微粉末を混入したセメントモルタルの初期圧縮強度の増進方法

一般的に、高炉スラグ微粉末を混入したセメントモルタルの初期圧縮強度の増進方法として図-1がある。(1)と(2)は SB の活性度を高くしたり、注水後の SB 周囲に生じる不透水性の膜をアルカリが刺激し始まるポゾラン反応時期を早くするものであり、(3)は現場で十分な湿潤養生をするものである。しかし、製造原価低減を目標とするレミコン工場での大量生産を目標とするならば、サイロの変更や追加が必要しない(4)のように早強セメントの使用や(5)、(6)、(7)のように調合設計方法を変えて総粉体量を増やす方法が合理的であると考えられる。

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> (1) SB の高粉末度化 (2) 分割練り混ぜ方法 (3) 十分な初期湿潤養生 (4) 早強セメントの使用 (5) 内割調合方法 (6) 外割調合方法 (7) 内・外割調合方法 |
|---|

図-1 初期圧縮強度の増進方法

*1 韓国, 漢陽大学校研究助教授 超大型構造システム研究センター 博士(工学)(正会員)

*2 韓国, 高麗産業開発株式会社 技術研究部室長 工修(正会員)

*3 韓国, 漢陽大学校教授 工学大学建築工学科 工博(正会員)

3. 実験概要

3. 1 実験因子及び調合計画

図-2に実験の調合計画の概要を示す。基準結合材としては普通ポルトランドセメント(OPC)を用いており、早期強度をあげる方法として、早強ポルトランドセメント(HPC)を用いた場合と、SBを内割調合、外割調合及び内・外割調合方法で混入した場合を適用した。表-1にセメントモルタルの調合表及び実験結果を示す。実験は、2シリーズで構成されており、シリーズIではJIS R 5201「セメントの物理試験方法」によりHPC使用及び内割、外割調合方法の効果を検討した。また、シリーズIIでは

シリーズIでの実験結果を踏まえてKS L 5105「水硬性セメントモルタルの圧縮強度試験方法」により内・外割調合方法の効果を検討した。



図-2 調合計画の概要

表-1 調合計画及び実験結果の一覧表

番号	実験方法	記号	実験因子	OPC (%)	HPC (%)	SB (%)	OPC (g)	HPC (g)	SB (g)	Sand (g)	塩基度	Flow (cm)	圧縮強度 (MPa)						
													3日	7日	14日	28日			
1	Series I (JIS) 方法 W/B 65*** (%)	OPC100	OPC	100	-	-	1120	-	-	2240	3.26	17.3	16.2	25.7	-	34.4			
2		OSB20		内割方法	80	-	20	896	-		224	2.86	17.9	11.3	19.1	-	37.2		
3		OSB40			60	-	40	672	-		448	2.53	18.2	9.7	21.0	-	41.6		
4		OSB60			40	-	60	448	-		672	2.26	19.0	-	15.0	-	33.4		
5		HPC100	HPC	-	100	-	-	1120	-		-	3.60	13.5	21.8	31.3	-	33.1		
6		HSB20		内割方法	-	80	20	-	224		896	3.13	14.3	17.7	23.1	-	31.3		
7		HSB40			-	60	40	-	448		672	2.69	16.9	12.6	20.3	-	36.1		
8		HSB60		-	40	60	-	672	448		2.34	17.5	-	17.5	-	35.5			
9		OS 30		OPC	100	-	30*	1120	-		672	1568	2.80	13.1	25.2	39.5	-	60.1	
10		OS 40			外割方法	100	-		40*		-	896	1344	2.71	11.1	28.9	44.0	-	63.4
11		OS 50				100	-		50*		-	1120	1120	2.63	10.8	31.5	48.8	-	64.0
12	Series II (KS) 方法 W/B 48.5*** (%)	OPC100-2	OPC	100	-	-	760	-	-	1862	3.26	16.6	22.7	36.5	42.7	50.2			
13		OSB10-2		内割方法	90	-	10	684	-		76	3.05	16.6	20.4	31.9	42.5	50.0		
14		OSB20-2			80	-	20	608	-		152	2.86	16.7	18.5	30.1	43.1	50.6		
15		OSB30-2			70	-	30	532	-		228	2.68	18.2	14.6	27.5	39.5	55.3		
16		OS 10-2	外割方法	100	-	10*	760	-	186		1676	3.07	19.2	33.3	52.5	68.9	77.5		
17		OS 20-2		100	-	20*	760	-	372		1490	2.92	17.9	37.7	60.8	69.2	88.9		
18		T 10-2	OPC	95	-	10**	722	-	131		1769	3.16	17.7	26.3	43.8	57.3	56.7		
19		T 20-2		内外割方法	90	-	20**	684	-		262	1676	3.07	17.4	29.8	48.0	56.3	63.5	
20		T 30-2			85	-	30**	646	-		393	1583	2.96	16.8	31.8	51.3	68.1	77.9	

* SBをSand質量の10%、20%、30%、40%、50%混入する。** SBをセメント質量の5%、10%、15%の内割方法で、Sand質量の5%、10%、15%の外割方法で混入する。*** W/Bは、外割でも結合材部分のみのセメントとSBをBinderとして算定する。**** Flow値は振動なしでフローコーンを上げた時のFlow値である。

表-2 セメント及び高炉スラグ微粉末の化学組成

記号	粉末度 (cm ² /g)	密度 (g/cm ³)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	ig-Loss (%)	塩基度 b	圧縮強度 (MPa)	
											7日	28日
OPC	3440	3.15	21.74	5.86	3.22	61.06	3.99	2.40	0.78	3.26	280	398
HPC	4400	3.15	19.70	5.90	3.00	62.10	3.00	1.20	1.10	3.60	370	470
SB	4550	2.90	34.69	15.42	0.23	41.98	6.36	0.15	0.04	1.84	-	-

3.2 使用材料及び実験方法

表-2に結合材である普通ポルトランドセメント(OPC)と早強ポルトランドセメント(HPC), 混和材料である高炉スラグ微粉末(SB)の化学組成を示す。また, セメントモルタルに用いた標準砂は韓国ジュウモンジン砂を用いた。シリーズ I では JIS 方法によって試験体(4x4x16cm)を製造した。シリーズIIでは KS 方法によってセメントと標準砂を質量比で 1:2.45 の割合で調合し, 水結合材比を 48.5%にして試験体(5x5x5cm)を制作した。セメントモルタルは結合材と混和材料を十分に混合した後, 機械ミキサーを用いて練り混ぜた。また, 試験体は各材齢別に3個ずつ製作しており, 材齢3日, 7日, 14日, 28日で標準養生した試験体を万能試験機によって圧縮強度を測定した。

4. 実験結果及び考察

4.1 塩基度と圧縮強度

高炉スラグ微粉末(SB)の反応性は, 塩基度 $=[(CaO+MgO+Al_2O_3)/SiO_2]$ やガラス化率(%) $=[(1-結晶化率) \times 100]$ が高いほど大きい傾向にある¹⁾。従って, SB 及び結合材の塩基度を塩基度として算定すると, 図-3のように SB 置換率が大きくなると塩基度は小さくなる。しかし, 図-4のように塩基度が大きくなると材齢3日及び7日では, 結合材の種類(OPC, HPC)に関係なく初期圧縮強度比が大きくなるが, 材齢28日での圧縮強度比はほとんど変化がない。従って, セメントモルタルの塩基度を高くするのは, SB のポズラン反応を活性化させてセメントモルタルの初期圧縮強度を増進させる効果があると考えられる。

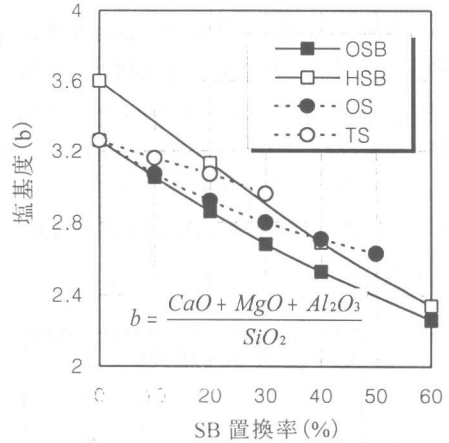


図-3 SB置換率による塩基度の変化

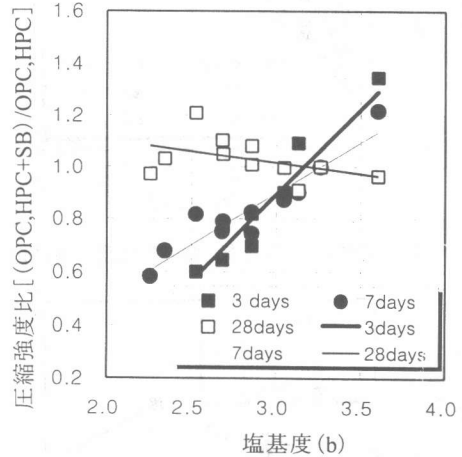


図-4 塩基度と圧縮強度との関係

4.2 SB内割調合方法と圧縮強度の発現

図-5は, 内割調合方法の場合, SB 置換率によるセメントモルタルの圧縮強度の発現性状を示したものである。また, 図-6は, 材齢による SB 置換率とセメントモルタルの圧縮強度との関係を示したものである。シリーズ I の JIS

のセメント強度とシリーズⅡのKSのセメント強度には水結合材比やセメントの圧縮強度試験方法の差によってセメント強度の差があり、コンクリートの基本材料であるセメントの圧縮強度試験方法に関する国際的な共通試験方法の採択が望まれる。一方、OPC単味を用いたOPC100及びOPC100-2試験体の材齢別の圧縮強度を1にした場合、SB混入試験体の圧縮強度比は、SB置換率が増加すると材齢3日及び7日の初期圧縮強度では低下するが、材齢14日からSBのポズラン反応によって圧縮強度の増進がみられ、材齢28日ではSBを混入しなかったOPC100及びOPC100-2試験体の圧縮強度より大きくなった。

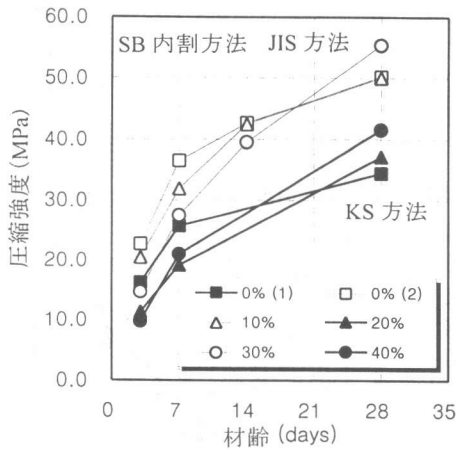


図-5 材齢による圧縮強度の発現（内割）

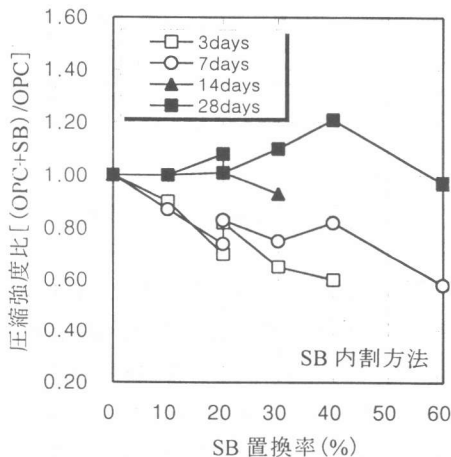


図-6 SB内割置換率と圧縮強度比との関係

4. 3 SB外割調合方法と圧縮強度の発現

図-7にSB外割調合方法の場合、圧縮強度の発現性状を、図-8にSB置換率と圧縮強度比との関係を示す。SB外割調合方法は、SB内割調合方法より、初期強度ばかりでなく長期強度も増進するのに非常に効果があり、SB置換率が増加すると圧縮強度比は大きくなり、SB混入セメントモルタルの初期圧縮強度の増進側面では、ポズラン効果を十分に期待できる外割調合方法が望ましいと考えられる。しかし、コンクリートへの適用面では、SB置換率の増加による流動性の低下、製造原価の上昇及び硬化後の物性変化などの把握及びポズラン反応の化学的分析などが必要であると思われる。

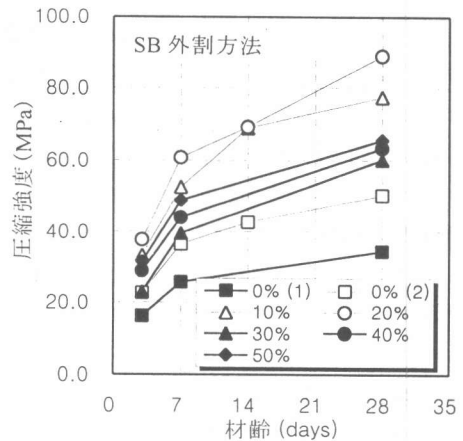


図-7 材齢による圧縮強度の発現（外割）

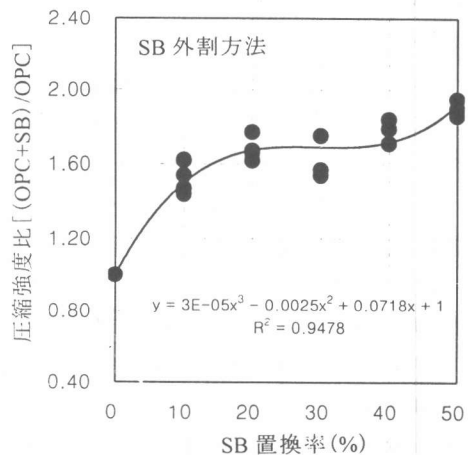


図-8 SB外割置換率と圧縮強度比との関係

4. 4 HPCの使用と圧縮強度の発現

図-9に早強ポルトランドセメント(HPC)へSBを混入した場合の圧縮強度の発現性状を示す。材齢3日での OPC100 試験体の圧縮強度発現率は材齢28日の47%, 材齢7日では75%である。しかし, 材齢3日での HPC100 試験体の圧縮強度発現率は材齢28日の66%, 材齢7日では94%で HPC は早強性があり, SB を混入したセメントモルタルの初期圧縮強度を増進するために HPC の使用は効果があると考えられる。HPC を結合材として用いた場合, 材齢3日での SB 置換率 20%である試験体の圧縮強度は, OPC100 試験体の圧縮強度より大きく初期材齢に置ける圧縮強度増進に HPC の効果が現れている。しかし, 材齢28日では SB 混入による圧縮強度の増進が小さい。一方, 図-10のように SB の置換率が大きくなると初期材齢での圧縮強度比は低下し, 長期材齢では SB のポズラン反応によって圧縮強度比が若干増加している。従って, HPC の使用は SB 混入セメントモルタルの初期圧縮強度を増加させるのに効果があると考えられる。

4. 5 内・外割調合方法と圧縮強度の発現

図-11にセメント質量の10%, 20%, 30%のSBをセメントの内割で半分, 砂の一部分で混入する外割で半分を混入した内・外割調合方法の場合, 試験体の圧縮強度の発現性状を示す。OPC 単味を用いた OPC100-2 試験体に比べ内・外割調合方法を用いた試験体の圧縮強度は材齢28日の長期圧縮強度ばかりでなく材齢3日及び7日の初期圧縮強度も大きい。また, 図-12に示すように, SB 置換率が大きくなると各材齢の圧縮強度比は増加しており, 初期材齢でも圧縮強度の低下がない。従って, SB をセメントモルタルの混和材料として混入する場合, 内・外割調合方法は, 初期圧縮強度を増加させるのに非常に効果があると判断される。また, セメントの一部分を SB で置換することで経済性面でも効果があると考えられる。

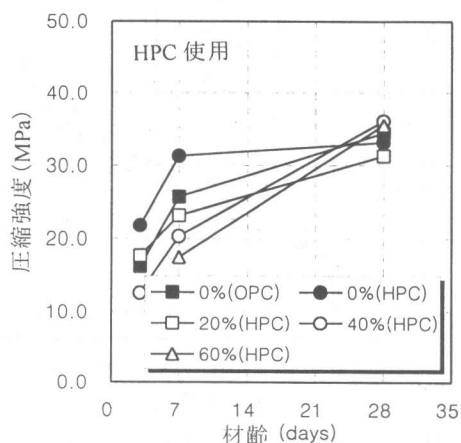


図-9 材齢による圧縮強度の発現 (HPC)

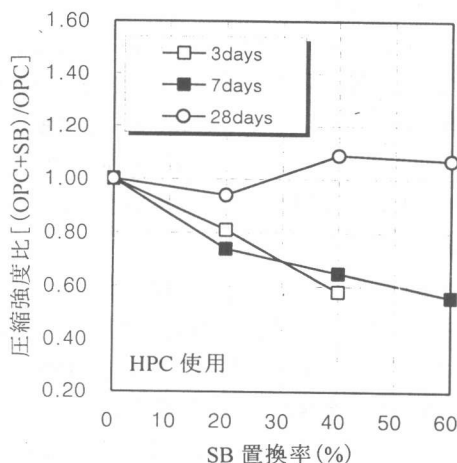


図-10 HPC置換率と圧縮強度比との関係

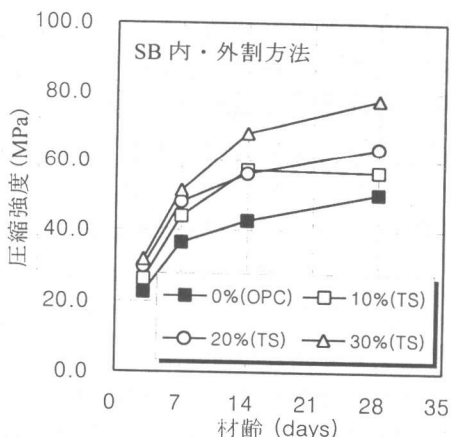


図-11 材齢による圧縮強度の発現 (内外割)

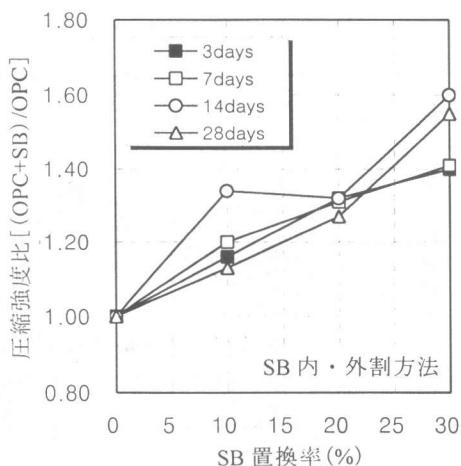


図-12 内外割調合方法と圧縮強度との関係

5. まとめ

SB 混入コンクリートの初期圧縮強度の増進のため、SB を混入したセメントモルタルを対象として、セメントの種類、SB の置換率及び調合方法がセメントモルタルの初期圧縮強度発現に及ぼす影響を実験的に検討した結果、次のような知見が得られた。

(1) セメントモルタルの塩基度を高くするのは、高炉スラグ微粉末(SB)のポゾラン反応を活性化させてセメントモルタルの初期圧縮強度を増進する効果があると考えられる。

(2) セメント量を一定にし、砂の一部分をSBで置換するSB外割調合方法で、SB置換率が増加すると圧縮強度は材齢に関係なくセメント単味の試験体の圧縮強度より大きく増加し、SB外割調合方法はSB混入セメントモルタルの初期圧縮強度の増進に非常に効果がある。

(3) 材齢初期の圧縮強度発現率が高いHPCを結合材として用いた場合、SB置換率20%ではOPC単味を用いた場合より初期圧縮強度が大きい。従って、HPCの使用はSBを混和材料として用いたセメントモルタルの初期圧縮強度を増進させる効果がある。

(4) OPC単味を用いた試験体に比べ内・外割調合方法を用いた試験体の圧縮強度は材齢28の長期圧縮強度ばかりでなく材齢3日及び

7日の初期圧縮強度も高く、SB内・外割調合方法はSB混入セメントモルタルの初期圧縮強度を増加させるのに非常に効果がある。

(5) 今後、SBを混入したセメントモルタルの圧縮強度ばかりでなくフレッシュ状態の流動性、ポゾラン反応の化学的定量分析及びコンクリートへの適用に関する研究を進める予定である。

謝辞：本研究は、漢陽大学校工学大学建築工学科高強度-高性能コンクリート構造研究室と高麗産業開発(株)との共同研究の一部として行ったものであり、漢陽大学校超大型構造システム研究センターのご支援及び高麗産業開発(株)の技術研究部の方々にご協力を得ました。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本建築学会：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの技術の現状，1992
- 2) 依田彰彦ほか：超高強度コンクリートの性質に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.10，1989
- 3) 長瀧重義ほか：高炉スラグ微粉末のコンクリート用混和材としての適用性，セメント・コンクリート，No.489，1987
- 4) 依田彰彦ほか：高炉スラグ微粉末を20，40，65%内割添加したコンクリートの性質，セメント・コンクリート論文集，No.43，1989
- 5) 奥田隆之ほか：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの若材齢の諸特性について，セメント・コンクリート論文集，No.44，1990
- 6) 申成雨，李翰承，カン勳：高炉スラグ微粉末を混入したコンクリートの圧縮強度の算定，韓国コンクリート学会秋季学術発表大会論文集，pp.30-35，1998