高爐슬래그微粉末을 混入한 콘크리트의 壓縮强度 算定

Calculation of Compressive Strength in Concrete Using Finely Ground Granulated Furnace Blast Slag

신 성 우* 이 한 승** 최 명 신***
Shin, Sung Woo Lee, Han Seung Choi, Myung Shin
김 정 식**** 이 재 삼**** 강 훈*****
Kim, Jung Sik Lee, Jae Sam Kang, Hoon

ABSTRACT

This study was carried out to investigate quantitatively the relationship between the water binder ratio and the concrete strength using finely ground granulated furnace blast slag. In the experiment, the compressive strength and elastic modulus of concrete which slag contents are 0%, 10%, 20% and 30% at 7days and 28days age. As a result, the compressive strength have a high correlation with slag contents and water binder ratio. Thus, it is possible to calculate the water binder ratio using compressive strength of concrete contented with slag.

1. 서 론

고로슬래그 미분말(이하 SB라 함)은 잠재 수경성을 갖고 있기 때문에 포틀랜드 시멘트(이하 OPC라 함)와 혼합한 경우 수산화칼슘이나 유산염과의 작용에 의해 경화가 촉진되며, 수화발열저감, 높은 화학저항성, 장기강도 증대, 내구성 향상 등의 이점을 발휘한다. 따라서, SB를 그 사용목적에 대응하여 OPC의 일부로서 치환하여 사용한다면, 콘크리트의 제성능을 향상시킬 뿐만 아니라 산업부산물의 재활용 및 콘크리트의 원가절감의 효과가 있을 것으로 판단된다. 그러나, 국내에서는 SB의 사용량이 타 혼화재료와 비교하여 매우 적은 실정이나 SB자체의 높은 품질 안정성과 레미콘 공장에서 특별한 장치없이 사일로만의 설치에 의해 손쉽게 제조 할 수 있기 때문에 그 사용량은 점차 확대될 것으로 생각된다. 본 연구는 SB의 치환율 및 물시멘트비가 콘크리트의 역학적 성능에 미치는 영향을 검토하여 SB를 혼입한 콘크리트의 배합설계시 필요한 물시멘트비와 압축강도와의 관계를 파악함으로서 실제로 레미콘 공장에서 SB를 혼입한 콘크리트의 생산을 위한 기초자료를 제공하는 것이 그 목적이다.

2. 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 물시멘트비 산정식

콘크리트 배합설계는 일반적으로 그림 1과 같이 설계기준강도(F_C)에 따라 배합강도(F_{28})를 산정하고, 배합강도를 보증하기 위한 물시멘트비를 산정하는 역학적 관점에서의 설계와 단위수량과 세골재율의

* 정회원 한양대학교 공학대학 건축공학과 교수
** 정회원, 한양대학교 초대형 구조물 시스템 연구 센터 연구 조교수
*** 정회원, 한양대학교 대학원 건축공학과 박사과정
**** 정회원, 고려산업개발 주식회사 기술연구부 과장
***** 정회원, 고려산업개발 주식회사 기술연구부 차장

산정에의한 워커빌리티 확보 관점에서의 설계로 이루어 진다. 특히, 물시멘트비의 산정은 표 1과 같이 SB를 사용한 콘크리트 제조시, SB치환율에 따른 시메트강도 K로부터 물시멘트비를 산정하는 방법과 SB의 치환율에 따른 콘크리트의 강도를 물시멘트비 별로 산정하는 방법을 생각 할 수 있다.

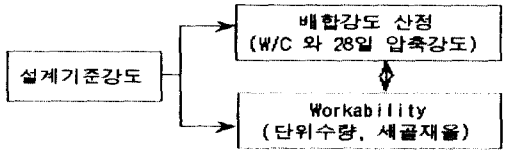


그림 1 콘크리트 배합설계 방법

표 1 물시멘트비(W/C)와 배합강도(F_{28}) 관계식

산정방법	W/C 와 F_{28}	비 고
건축학회	(W/C) = 73 / ((K/F_{28})+0.43)	K:시멘트강도
토목학회	F_{28} = A · (W/C) + B	A,B:실험정수

3. 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 배합 및 물성

3.1 실험개요

고로슬래그 미분말을 혼입한 콘크리트의 배합설계시 필요한 콘크리트의 압축강도와 물시멘트비와의 관계를 도출하기 위하여, 고로슬래그 미분말의 치환율과 물시멘트비가 콘크리트의 압축강도에 미치는 영향을 검토하였다. 표 2에 콘크리트 배합표 및 물성실험 결과를 나타낸다.

표 2 콘크리트 배합표 및 물성 실험 결과

NO	결합재 치환율 (%)			$\frac{W}{(C+SB)}$ (%)	s/a (%)	결합재량	W	OPC	SB	SC	S	G	A.D	Slump	Air	σ_7	E_7 $\times 10^5$	σ_{28}	E_{28} $\times 10^5$
	OPC	SB	SC			(kg/m³)								(cm)	(%)	(kg/cm²)			
1	90	10	·	40	42	503	181	453	50	·	693	944	1.26	17	4.2	365	2.4	507	3.4
2				45	43	427	170	384	40	·	749	978	1.07	15.5	4.4	309	2.3	447	3.1
3				50	44	374	164	337	37	·	792	993	0.94	17	4.1	237	2.2	382	3.0
4				55	45	331	158	298	33	·	832	1003	0.83	17	4.8	194	2.0	324	2.9
5				60	46	302	156	272	30	·	863	999	0.76	15	5.2	148	1.8	287	2.7
6	80	20	·	40	42	503	181	402	101	·	693	944	1.26	15.2	4.5	339	2.4	510	3.3
7				45	43	427	170	342	85	·	749	978	1.07	17	4.0	290	2.3	468	3.3
8				50	44	374	164	299	75	·	792	993	0.94	17.5	4.1	232	2.1	394	3.2
9				55	45	331	158	265	66	·	832	1003	0.83	17	5.0	181	1.9	352	2.9
10				60	46	302	156	242	60	·	863	999	0.76	17.5	5.0	147	1.7	298	2.8
11	70	30	·	40	42	503	181	352	151	·	693	944	1.26	17	4.3	311	2.1	510	3.4
12				45	43	427	170	299	128	·	749	978	1.07	17.5	3.6	266	2.0	474	3.3
13				50	44	374	164	262	112	·	792	993	0.94	18	4.0	205	1.9	432	3.1
14				55	45	331	158	232	99	·	832	1003	0.83	17	4.6	160	1.6	368	2.9
15				60	46	302	156	211	91	·	863	999	0.76	18	4.8	123	1.4	308	2.7
16	100	·	·	40	42	503	181	503	·	·	693	944	1.26	15	4.6	382	2.6	505	3.5
17				45	43	427	170	427	·	·	749	978	1.07	15.5	4.5	351	2.6	453	3.3
18				50	44	374	164	374	·	·	792	993	0.94	16.5	4.8	289	2.2	388	3.1
19				55	45	331	158	331	·	·	832	1003	0.83	16.5	5.5	216	2.1	336	2.9
20				60	46	302	156	302	·	·	863	999	0.76	17	6.4	170	2.0	277	2.7
21	·	·	100	40	42	503	181	·	·	503	693	944	1.26	17	3.6	385	2.4	562	3.5
22				45	43	427	170	·	·	427	749	978	1.07	16	3.8	335	2.3	518	3.3
23				50	44	374	164	·	·	374	792	993	0.94	16	3.8	266	2.1	446	3.2
24				55	45	331	158	·	·	331	832	1003	0.83	15.5	4.3	203	2.0	377	3.0
25				60	46	302	156	·	·	302	863	999	0.76	16	4.0	171	1.9	360	3.0

3.2 사용재료

표 3에 시멘트 및 고로슬래그 미분말의 물성을 나타낸다. 고로슬래그 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트에 고로슬래그를 30% 혼합한 Premix형을 사용하였다. 조골재는 25mm의 쇄석을 사용하였고, 세골재는 100% 세척사(해사)를 사용하였으며 각각의 물성을 표 4에 나타낸다.

표 3 시멘트 및 고로슬래그 미분말의 물성

종 류	기 호	분말도	비 중	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	lg-Loss	압축강도	
											7日	28日
보통 포틀랜드 시멘트	OPC	3440	3.15	21.74	5.86	3.22	61.06	3.99	2.40	0.78	280	290
고로 슬래그 시멘트	SC	4046	2.99	25.32	8.48	2.32	56.23	4.35	2.57	1.10	280	414
고로 슬래그 미분말	SB	4550	2.90	34.69	15.42	0.23	41.98	6.36	0.15	0.04	·	·

표 4 세골재 및 조골재의 물성

종 류	최대크기 (㎜)	비 중	조 립 율	흡 수 율 (%)	단위용적질량 (절건, kg/m³)
세 골 재(세척사)	-	2.61	2.80	0.89	1623
조 골 재(쇄 석)	25	2.63	6.55	0.78	1,542

3.3. 실험방법 및 측정항목

콘크리트의 비빔은 모래, 시멘트, 고로슬래그 미분말을 투입한 후 건비빔을 실시하고나서 조골재 및 물을 투입하여 실시 하였다. 또한, 콘크리트 경화전에는 슬럼프 및 공기량을 측정하였고 JIS A 1132에 따라 압축강도 공시체를 제작한 후 재령 7일 및 재령 28일에서 표준양생한 공시체의 압축강도 및 탄성계수를 측정하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 물시멘트비와 압축강도와의 관계

그림 2는 콘크리트의 응력도-변형도 관계로서 물시멘트비가 작을수록 최대강도는 증가하며 탄성계수도 커지는 것을 알 수 있다. 또한, 그림 3과 그림 4는 고로슬래그 미분말의 치환율별로 재령7일 및 28일에서 물시멘트비와 압축강도와의 관계를 나타낸다. 물시멘트비가 클수록 압축강도는 저하하나 물시멘트비화 압축강도와는 높은 상관관계를 나타내고 있으며 이들 상관관계를 표 5에 나타낸다.

표 5 재령별 물시멘트비와 압축강도와의 상관 관계식

중량 치환율(%)	재령 7日 상관 관계식 (kg/㎠)	재령 28日 상관 관계식 (kg/㎠)
OPC 100	$F_7 = -18.8(W/C) + 412.8$	$F_{28} = -11.46(W/C) + 964.8$
OPC90% + SB 10%	$F_7 = -10.98(W/C) + 799.6$	$F_{28} = -10.98(W/C) + 799.6$
OPC80% + SB 20%	$F_7 = -9.86(W/C) + 730.8$	$F_{28} = -10.8(W/C) + 944.6$
OPC70% + SB 30%	$F_7 = -9.64(W/C) + 695$	$F_{28} = -10.2(W/C) + 928.4$
SC 100	$F_7 = -11.2(W/C) + 832$	$F_{28} = -10.9(W/C) + 997.6$

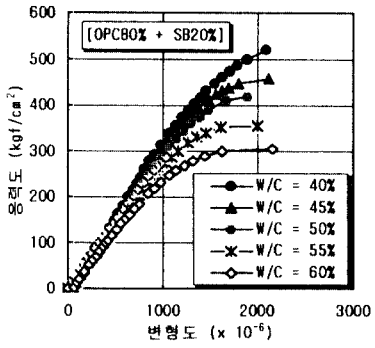


그림 2 응력-변형곡선

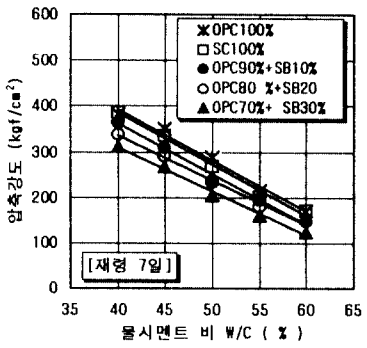


그림 3 물시멘트비 - 압축강도

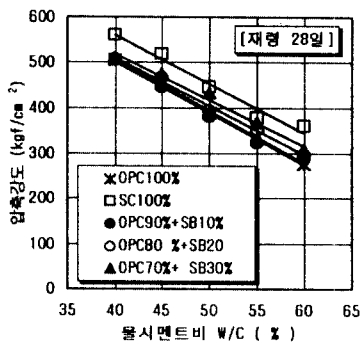


그림 4 물시멘트비 - 압축강도

4.2 고로슬래그 미분말의 치환율과 압축강도와의 관계

그림 5 및 그림 6은 물시멘트비별로 재령7일 및 28일에서 SB 치환율과 압축강도와의 관계를 나타낸 것이다. 재령7일 에서는 SB 치환율이 클 수록 압축강도는 저하하나 재령28일에는 OPC만을 사용한 콘크리트와 비교하여 SB 치환율이 클수록 압축강도는 증가하고 SB가 재령이 경과함에 따라 포졸란 반응이 일어나 장기강도가 증진됨을 알 수 있다. 또한, 그림7은 재령7일과 28일의 압축강도 관계를 나타낸 것으로 이들 사이에는 높은 상관관계가 있으며 표 6에서 알 수 있듯이 SB를 혼입한 콘크리트도 재령7일 압축강도로부터 재령28일의 압축강도를 추정하는 것이 가능하다.

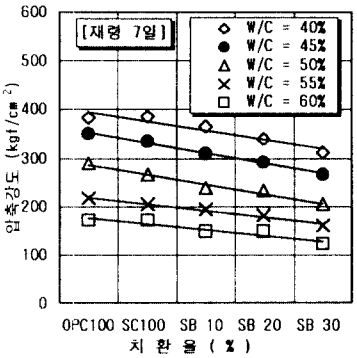


그림 5 치환율 - 압축강도

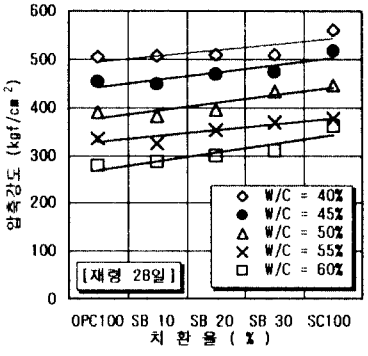


그림 6 치환율 - 압축강도

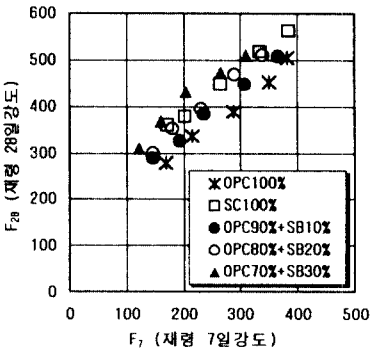


그림 7 재령7일과 28일 압축강도

표 6 재령7일 압축강도와 재령 28일 압축강도와의 관계식

중량 치환율(%)	재령 7일강도와 재령 28일 강도와의 관계식 (kg/㎠)
OPC 100	F_{28} = 1.011 (F_7) + 107.11
OPC90% + SB 10%	F_{28} = 1.0234 (F_7) + 132.93
OPC80% + SB 20%	F_{28} = 1.0913 (F_7) + 144.89
OPC70% + SB 30%	F_{28} = 1.0443 (F_7) + 195.96
SC 100	F_{28} = 0.9797 (F_7) + 186.13

4.3 고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 물시멘트비 산정식

표7 및 그림 8은 시멘트강도 K및 배합강도 F_{28}로부터 콘크리트의 물결합재비를 산정하는 방법을 나타내고 있다. 우선, SB를 중량비로 0%, 10%, 20%, 30%로 치환한 시멘트 모르터로 시험으로부터 시멘트강도 K를 산출하고, 본 연구에서 시멘트모르터와 SB치환율이 동일하고 W/C가 50% 및 60%인 콘크리트의 28일강도 F_{28}를 산정한다. 결합재물비인 (C+SB)/W와 F_{28}/K과의 관계를 이용하여 2변수 직선 회귀분선을 실시하여 그림 8과 같은 일차관계식을 이용하여 SB를 혼입한 콘크리트의 배합강도와 물시멘트비와의 관계식을 산출 할 수 있다. 또한, 그림 9는 재령별로 압축강도와 탄성계수와의 관계를 기존의 산정식과 비교하여 나타낸 것으로 SB를 혼입한 콘크리트도 일반 콘크리트와 동일하게 기존의 산정식을 이용하여 압축강도로부터 탄성계수를 산정하는 것이 가능함을 알 수 있다.

표 7 시멘트강도 K및 배합강도 F_{28}을 이용한 콘크리트의 물시멘트비 산정식

$\frac{W}{(C+SB)}$	$\frac{(C+SB)}{W}$	고로슬래그 치환율 (%)	시멘트강도 K (kg/㎠)	콘크리트강도 F_{28} (kg/㎠)	F_{28}/K	고로슬래그 미분말을 사용한 콘크리트의 물시멘트비 산정식
50 (%)	2.00	0	351	388	1.105	$W/C=\frac{90}{\frac{F_{28}}{K}+0.68}$
		10	313	382	1.220	
		20	355	394	1.110	
		30	392	432	1.102	
60 (%)	1.67	0	351	277	0.789	
		10	313	287	0.917	
		20	355	298	0.839	
		30	392	308	0.786	

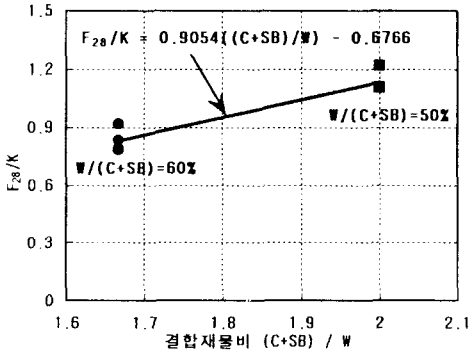


그림 8 결합재물비와 F_{28}/K와의 관계

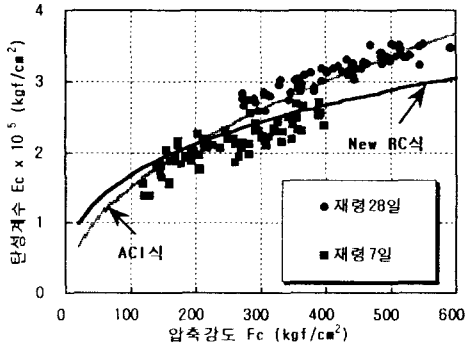
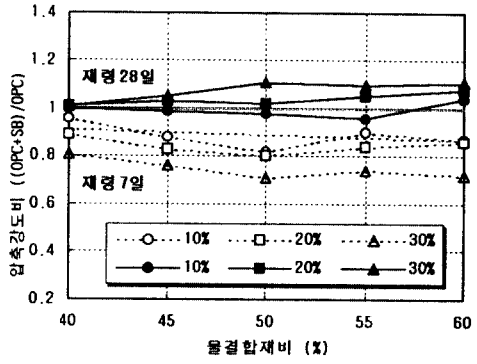


그림 9 압축강도와 탄성계수와의 관계

4.4 고로슬래그 미분말의 포졸란 반응 효과

그림 10은 재령7일 및 28일에서 물결합재비와 압축강도비(SB혼입 콘크리트의 압축강도/OPC만 사용한 콘크리트의 압축강도)와의 관계를 나타낸 것이다. 재령7일에서는 물시멘트비가 클수록 압축강도비는 감소하는 경향을 보이나 재령 28일에서는 SB의 포졸란 반응에의해 증가하는 경향을 나타내고 있다. 한편, 그림 11은 물시멘트비에 관계없이 SB치환율과 압축강도와의 관계를 나타낸 것이다. 재령7

일에서는 SB치환율이 클수록 압축강도비는 저하하며 콘크리트의 초기재령에서는 SB치환에의해 콘크리트의 압축강도가 저하하는 것을 알 수 있다. 그러나, 재령 28일에서는 SB의 포졸란 반응에 의해 SB를 혼입한 콘크리트 대부분이 OPC만을 사용한 콘크리트보다 압축강도가 커 짐을 알수 있다. 따라서, SB를 혼입한 콘크리트의 압축강도는 SB혼입에 의한 포졸란 반응 효과를 재령별로 적절히 산정하는 것에 의해 OPC의 재령별 압축강도를 산정할 수 있다면 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 압축강도를 추정하는 것이 가능하다고 생각된다.



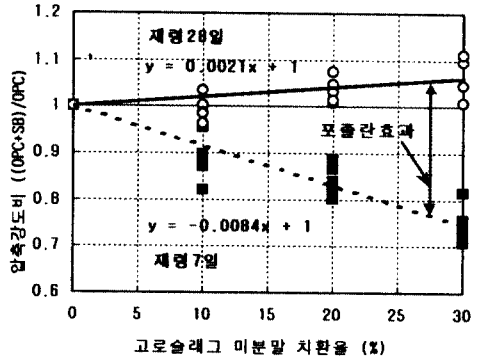


그림 10 물결합재비와 압축강도비와의 관계 그림 11 고로슬래그미분말 치환율과 압축강도비와의 관계

5. 결 론

고로슬래그 미분말의 치환율 및 물시멘트비를 실험인자로 하여 콘크리트의 역학적 성능을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 고로슬래그 미분말의 치환율과 압축강도, 콘크리트의 물시멘트비 와 압축강도 사이의 높은 상관관계로부터 재령별로 물시멘트비와 압축강도와의 상관관계식을 정량적으로 산출하는 것이 가능하였다.

2) 고로슬래그 미분말의 치환율 및 물시멘트비를 변수로하는 시멘트의 K강도 및 콘크리트의 압축강도를 이용하여 고로슬래그 미분말을 혼입 콘크리트의 물시멘트비 산정식을 정량적으로 도출하였다.

3) 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 포졸란 반응 효과를 재령별로 적절히 산정 할 수 있다면 보통 포틀랜드 시멘트의 재령별 압축강도를 이용하여 고로슬래그 미분말의 치환율에 따른 콘크리트의 압축강도를 추정하는 것이 가능하며, 금후, 고로슬래그 미분말의 분말도, 포졸란 반응정도 및 장기재령을 변수로 하는 고로슬래그 미분말 혼입 콘크리트의 압축강도 산정에 관한 연구가 필요하다고 생각된다.

감사의 글

본 논문은 한양대학교와 고려산업개발 주식회사가 수행하고 있는 공동연구의 일부분이며, 한양대학교 STRESS의 지원에 의해 수행된 것으로 관계자 여러분께 깊은 감사의 말씀을 올립니다.

참고문헌

1.김창범외 4인,"시멘트 혼합재 첨가에 따른 콘크리트 내구특성",한국 콘크리트학회 1998년도 봄 학술 발표대회, pp.687-692, 1998.5

2.日本建築學會,"高爐スラグ微粉末を用いたコンクリートの技術の現狀",日本建築學會,1992.6

3.依田彰彦, "高爐スラグ微粉末を用いたコンクリート",コンクリート工學, Vol.34, No. 4, pp.72-82, 1996.4

4.シーエムシ, "新・コンクリート用混和材料-高爐スラグ微粉末", pp.180-198, 1988.6