

산업부산물을 활용한 초고강도콘크리트의 제조

Manufacture of Ultra High Strength Concrete using Industrial by-products

문 한 영*

김 병 권**

Moon, Han-Young

Kim, Byoung-Kwon

Abstract

This paper presents the fundamental study on rational manufacture of Ultra High Strength(UHS) concrete using industrial by-products as like silica fume, slag and fly ash.

In this study, we had tested various mixing cases to manufacture the UHS concrete(target compressive strength : over 1,000 kgf/cm²) which is easily workable (target slump flow : 60 ±10cm). The main variables are studied: 1) to find the optimum replacement ratio of mineral admixture, 2) to find a rational water-binder ratio and a proper binder content, 3) to find the method for reduction of slump loss. From the test results, it is concluded that the rational mix design can be made by using 40% slag, 10% silica fume. We found that compressive strength of UHS concrete increases according to decreasing W/B ratio but in W/B ratio 18~20%, the difference is vague and the compressive strength does not necessarily increase according to increasing binder content over 700kg.

keywords : Ultra high strength concrete, silica fume, slag, slump loss

1. 서 론

최근 콘크리트구조물의 초고층화, 상대화, 경량화 및 특수기능 등이 요구되고 있는 추세이므로 이러한 시대적 요청에 부응하기 위하여 콘크리트의 고강도, 초고강도 및 고성능화는 필요 불가결하다고 생각된다.

고강도 및 초고강도콘크리트를 제조하기 위하여 橘 등⁽¹⁾은 결합재로 보통 포틀랜드시멘트만을 사용할 경우 1,000kgf/cm² 정도가 강도의 한계이므로 산업부산물이인 초미립의 실리카흄 등을 혼화재로 사용함이 바람직하다고 한다. 한편 Tomosawa 등에 의하면⁽²⁾ 콘크리트의 장기강도, 워커빌리티 및 내구성 등의 성능

* 경희원, 한양대학교 토목공학과 교수

** 경희원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의끝 2001년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2002년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

을 향상시킬 목적으로 시멘트에 실리콘 금속, 페로실리콘 합금 등과 같은 제조 산업의 부산물인 실리카흙, 화력발전소의 부산물인 플라이애시 및 제철산업의 부산물인 고로슬래그미분말 등을 일정비율로 혼합하여 사용함으로써 초고강도콘크리트를 얻었다고 한다. 이와 같이 산업부산물을 콘크리트용 혼화제로 활용하므로써 기능적 또는 공학적인 효과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 자원절약, 환경보호측면 및 경제성 등에서도 이점이 많아 초고강도콘크리트의 제조에 상당히 효용 가치가 높다고 할 수 있다.

그래서 외국의 경우, 초고강도 콘크리트에 관련된 연구가 활발히 진행되어 압축강도가 1,000kgf/cm²이상의 콘크리트를 실제 구조물에 적용한 실적이 많으나^{(3)~(6)}, 국내의 경우 연구실 규모의 실험성과가 발표되고 있는 정도에 지나지 않으며, 실제 현장구조물에 적용한 사례는 거의 없는 실정이며 산업부산물들을 조합하여 그 특성을 유효 적절히 활용한 연구성과도 많지 않은 현실이다.

본 연구에서는 산업부산물을 혼화제로 활용한 초고강도 콘크리트(목표강도 1,000~1,200kgf/cm²)를 실용화하기 위한 기초단계 연구의 일환으로, 산업부산물인 실리카흙, 고로슬래그미분말 및 플라이애시를 각각 시멘트와 몇 단계로 대체하여 제조한 모르타르와 콘크리트의 재료특성에 대한 실험을 수행하여 비교 분석하였다.

본 연구 내용에서 검토한 바와 같이 초고강도콘크리트를 제조하기 위한 콘크리트의 배합은 물-결합재비가

상당히 낮고 단위결합재량이 크므로 시공성확보가 매우 중요하게 생각되어 슬럼프플로우값이 큰 60±10cm정도의 고유동콘크리트를 목표로 제조하였다. 따라서 시간의 경과에 따라 유동성의 변화가 큰 점을 고려하여 타설기간 중 유동성 손실을 저감할 수 있는 방안을 마련하기 위한 실험을 수행하고 그 결과를 고찰하였으며, 초고강도콘크리트의 합리적 배합비를 선정하기 위하여 각종 배합변수를 달리한 콘크리트에 대한 물성실험을 실시하였다.

2. 실험개요

2.1 사용재료

(1) 시멘트

국내에서 제조한 S사의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 화학성분 및 물리적 성질은 Table 1과 같다.

(2) 혼화재료

광물결혼화제는 실리카흙(SF로 약함), 고로슬래그미분말(GGBF slag 또는 SG로 약함) 및 플라이애시(FA로 약함) 3종류를 사용하였으며, 화학혼화제는 2종류의 고성능감수제(HRWR로 약함)로서 일반형 폴리칼본산계(ORD로 약함)와 슬럼프손실저감형으로 제조된 폴리칼본산계(SLR로 약함)를 사용하였다. 광물결혼화제 및 화학혼화제의 화학성분 및 물리적 성질은 각각 Table 2 및 Table 3과 같다.

Table 1 Chemical composition and physical properties of cement

Chemical composition(%)						I _g . loss (%)	Specific gravity	Blaine (cm ² /g)	Setting time(hr:min)	
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃				Initial	Final
62.75	22.06	5.47	3.31	2.40	2.34	1.01	3.15	3,366	4:35	8:10

Table 2 Chemical composition and physical properties of mineral admixtures

Items Types	Chemical composition(%)						Blaine (cm ² /g)	Specific gravity	I _g . loss (%)
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃			
Silica fume	0.19	95.0	0.26	0.13	0.45	0.23	260,000	2.30	0.10
GGBF Slag	41.98	34.69	15.42	0.23	6.36	0.15	4,550	2.90	0.04
Fly ash	3.60	59.90	23.30	7.30	1.10	1.70	3,720	2.18	3.53

Table 3 Properties of chemical admixtures

Types \ Items	Main composition	Specific gravity	Appearance	Standard dosage (C×%)
HRWR(ORL)	Polycarboxylic	1.05	Brown liquid	2.0~3.5
HRWR(SLR)	Polycarboxylic	1.04	Transparent liquid	0.5~3.0

Table 4 Physical properties of aggregates

Types \ Items	G _{max}	Specific gravity	Absorption (%)	F.M.	Unit weight (kg/m ³)	Percentage of solids (%)
Fine agg.	-	2.60	0.95	2.80	1,580	60.8
Coarse agg.	13	2.65	0.87	6.33	1,567	59.1

(3) 골재

모르타르 실험용으로는 표준모래를 사용하였으며, 콘크리트 실험용 잔골재는 바다모래를 채적하여 사용하였다. 굵은골재는 최대치수 13mm인 부순돌을 사용하였다. 잔, 굵은골재의 물리식 성질은 Table 4와 같다. 굵은골재의 입도시험결과 13mm체 통과율은 98%, 10mm체 통과율은 60%, 5mm체 통과율은 5%, 2.5mm 통과율은 2%를 얻었다.

2.2 실험방법

(1) 콘크리트의 제조

콘크리트 제조방법은 골재와 시멘트를 먼저 투입한 후 20초간 건식비타기를 실시한 다음 혼합수를 넣고 60초간 비타기한 후 고성능감수제를 투입하여 120초 동안 비타기하였다.

(2) 슬럼프 및 슬럼프플로우

굳지않은 콘크리트의 슬럼프시험은 KS F 2402에 의하여 실시하였으며, 슬럼프플로우 시험은 슬럼프시험이 끝난 직후 최대지름과 직교하는 지름을 측정하여 이들 평균값을 슬럼프플로우값(cm)으로 나타내었다.

(3) 압축강도

모르타르는 KS L 5105 시멘트 모르타르의 압축강도 시험방법에 의하여 실시하였다. 한편, 콘크리트는 $\phi 10 \times 20$ cm 원주형 공시체를 제조, 1일 후 탈형하여

23±2℃ 수중에서 표준양생하였으며, 재령 3, 7 및 28 압축강도를 KS F 2405에 의하여 측정하였다. 이때 압축강도용 시험기는 MTS회사의 500 ton 만능시험기를 사용하였다.

2.3 모르타르 및 콘크리트의 배합

(1) 모르타르

초고강도 콘크리트용 혼화제별 최대체율을 도출하기 위한 기초적인 실험의 일환으로, 3종류의 혼화제별 대체변수를 삼위배치법으로 설정하였다.

모르타르의 배합은 보통포틀랜드시멘트에 실리카흙의 대체율 3수준(결합제의 중량에 대하여 0%, 10% 및 20%), 고로슬레그미분말 및 플라이애시의 대체율 각각 4수준(결합제의 중량에 대하여 0%, 10%, 20% 및 30%)으로 변화시켜 Table 5와 같이 변수를 선정하였다. 이때 잔골재는 주문진산 표준모래를 사용하였다.

(2) 콘크리트

시공성을 고려한 초고강도콘크리트의 최적 배합비를 도출하기 위하여 모르타르에 의한 예비실험결과로서 혼화제 3종류간의 최적대체율을 토대로 콘크리트의 배합을 선정하였다. 이 때 물-결합제비, 단위결합제량, 각각 혼화제의 대체율, 산화제율 및 고성능감수제의 사용량을 변수로 하여 40배치의 실험배합을 실시하였으며, 그 중 19배합만을 골라 정리한 것이 Table 6이

Table 5 Test variables for optimum replacement of mineral admixtures

Items	Replacement of SG				Replacement of FA			
	0%	10%	20%	30%	0%	10%	20%	30%
Replacement of SF	SF ₀ SG ₀	SF ₀ SG ₁₀	SF ₀ SG ₂₀	SF ₀ SG ₃₀	SF ₀ FA ₀	SF ₀ FA ₁₀	SF ₀ FA ₂₀	SF ₀ FA ₃₀
0%	SF ₁₀ SG ₀	SF ₁₀ SG ₁₀	SF ₁₀ SG ₂₀	SF ₁₀ SG ₃₀	SF ₁₀ FA ₀	SF ₁₀ FA ₁₀	SF ₁₀ FA ₂₀	SF ₁₀ FA ₃₀
10%	SF ₂₀ SG ₀	SF ₂₀ SG ₁₀	SF ₂₀ SG ₂₀	SF ₂₀ SG ₃₀	SF ₂₀ FA ₀	SF ₂₀ FA ₁₀	SF ₂₀ FA ₂₀	SF ₂₀ FA ₃₀
20%								

Table 6 Mix proportions of concrete

No.	Binder content (kg/m ³)	W/B (%)	SG (%)	SF (%)	S/a (%)	HRWR type	Unit weight(kg/m ³)						
							W	C	SG	SF	S	G	HRWR
1	800	20	30	10	35	ORD	160	480	240	80	520	984	24.0
2	800	20	30	20	35	ORD	160	400	240	160	520	984	28.0
3	800	19	40	10	28	ORD	152	400	320	80	422	1105	20.0
4	800	19	40	15	28	ORD	152	360	320	120	422	1105	22.4
5	800	18	30	10	35	ORD	144	480	240	80	534	1011	28.0
6	800	18	30	20	35	ORD	144	400	240	160	534	1011	28.0
7	800	18	40	10	37	ORD	144	400	320	80	565	1109	26.4
8	800	18	30	15	33	ORD	144	440	240	120	504	1180	24.8
9	750	21	30	10	37	ORD	158	450	225	75	567	983	22.5
10	750	21	30	20	37	ORD	158	375	225	150	567	983	28.5
11	750	19	30	10	37	ORD	143	450	225	75	581	1008	26.3
12	750	19	30	20	37	ORD	143	375	225	150	581	1008	31.5
13	700	22	30	10	39	ORD	154	420	210	70	617	984	21.7
14	700	22	30	20	39	ORD	154	350	210	140	617	984	28.0
15	700	20	30	10	39	ORD	140	420	210	70	631	1007	25.9
16	700	20	30	20	39	ORD	140	350	210	140	631	1007	30.8
17	700	20	30	10	39	SLR	140	420	210	70	631	1007	17.5
18	700	20	40	10	39	SLR	140	350	280	70	631	1007	17.5
19	700	20	50	10	39	SLR	140	280	350	70	631	1007	17.5

다. 이 표에서 알 수 있듯이, 16배합은 일반형 고성능 감수제, 3배합은 슬럼프손실 저감형 고성능감수제를 사용하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 광물질혼화제의 종류별 배합비

(1) 모르타르

광물질혼화제 3 종류별 최적대체율을 선정하기 위하여 Table 5와 같은 변수로서 모르타르 공시체를 제조하였으며, 재령 3, 7 및 28일의 압축강도를 측정하여 정리한 것이 Table 7이다.

앞의 Table 5에서 실리카흙의 대체율 0, 10 및

Table 7 Test results of compressive strength of mortar according to the replacement variables of mineral admixtures

Items	Compressive strength(kgf/cm ²)		
	3 days	7 days	28 days
SF ₀ SG ₀ (SF ₀ FA ₀)	175 (175)	285 (285)	336 (336)
SF ₁₀ SG ₀ (SF ₁₀ FA ₀)	160 (160)	294 (294)	423 (423)
SF ₂₀ SG ₀ (SF ₂₀ FA ₀)	151 (151)	231 (231)	368 (368)
SF ₀ SG ₁₀ (SF ₀ FA ₁₀)	175 (195)	285 (308)	420 (415)
SF ₁₀ SG ₁₀ (SF ₁₀ FA ₁₀)	160 (131)	294 (224)	525 (374)
SF ₂₀ SG ₁₀ (SF ₂₀ FA ₁₀)	151 (123)	231 (265)	529 (416)
SF ₀ SG ₂₀ (SF ₀ FA ₂₀)	195 (119)	308 (215)	421 (309)
SF ₁₀ SG ₂₀ (SF ₁₀ FA ₂₀)	131 (111)	224 (191)	514 (347)
SF ₂₀ SG ₂₀ (SF ₂₀ FA ₂₀)	123 (98)	265 (214)	510 (362)
SF ₀ SG ₃₀ (SF ₀ FA ₃₀)	119 (144)	215 (190)	430 (308)
SF ₁₀ SG ₃₀ (SF ₁₀ FA ₃₀)	111 (104)	191 (151)	476 (318)
SF ₂₀ SG ₃₀ (SF ₂₀ FA ₃₀)	98 (95)	214 (167)	501 (375)

()는 실리카흙과 플라이애시의 대체율 및 압축강도

20%에 대한 고로슬래그미분말 및 플라이애시의 대체율을 각각 4 단계로 변화시켜 재령 3, 7 및 28일 모르타르의 압축강도를 정리한 것이 Fig. 1, 2 및 3이다.

Fig. 1에서 실리카흙을 대체하지 않은 모르타르(SF=0%)의 재령 28일 압축강도는 고로슬래그미분말 및 플라이애시의 대체율에 관계없이 최대값이 400kgf/cm² 정도에 지나지 않았다. 그러나 Fig. 2와 Fig. 3에서 알 수 있듯이 실리카흙을 대체한 모르타르(SF=10, 20%)의 압축강도는 최대값은 500kgf/cm² 정도로서 실리카흙을 대체하는데 따라 압축강도가 약 25%정도 향상되었다.

이들 그림에서 실리카흙의 대체율 10% 및 20%와 고로슬래그미분말을 대체한 모르타르의 압축강도가 가장 큰 값을 나타내는 반면 플라이애시를 대체한 모르타르의 압축강도는 대체적으로 강도발현정도가 떨어지는 경향을 보였다.

즉 실리카흙을 적절히 대체함에 따라 모르타르의 압축강도는 크게 증진되었으며, 특히 고로슬래그미분말의 대체율 10%에서 강도가 가장 향상되는 좋은 결과를 얻었다. 이로부터 모르타르의 강도증진을 위해서는 실리카흙이나 고로슬래그미분말의 효과가 클 뿐만 아니라 최적대체율이 존재함을 알 수 있었으며, 이러한 결과는 文 등⁽⁷⁾의 연구에서도 입증된 내용과 유사하였다.

(2) 콘크리트

광물실혼화제 3종류의 대체율을 각각 달리한 40배합의 콘크리트를 제조하여 압축강도를 측정된 결과, 실리카흙과 플라이애시를 각각 대체한 콘크리트의 압축강도 결과가 실리카흙과 고로슬래그미분말을 각각 대체한 콘크리트의 압축강도와 비교하여 훨씬 작았기 때문에 본 논문에서는 플라이애시 대체 콘크리트를 제외하 19배합의 실험결과만으로 정리한 것이 Table 8이다.

이 표의 배합순서별 압축강도 및 슬럼프플로우값을 측정된 결과를 정리한 것이 Fig. 4이며, 이 그림에서 알 수 있듯이 슬럼프손실 저감형 고성능감수제를 사용한 콘크리트배합 3 종류(No. 17~19)의 슬럼프플로우 및 압축강도가 대체로 가장 좋게 나타났다.

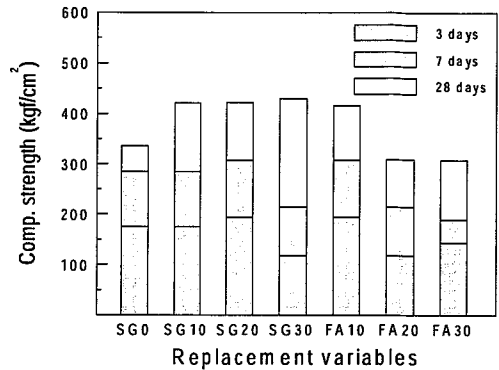


Fig. 1 Compressive strength of mortar according to the replacement variables of mineral admixtures(SF=0%)

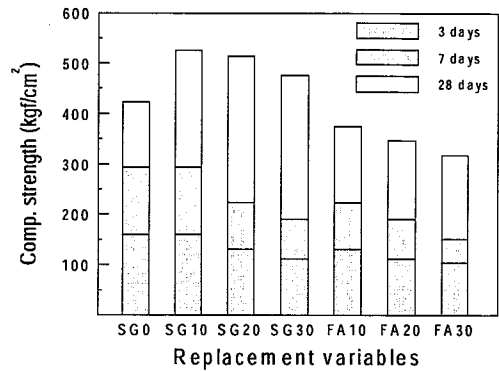


Fig. 2 Compressive strength of mortar according to the replacement variables of mineral admixtures(SF=10%)

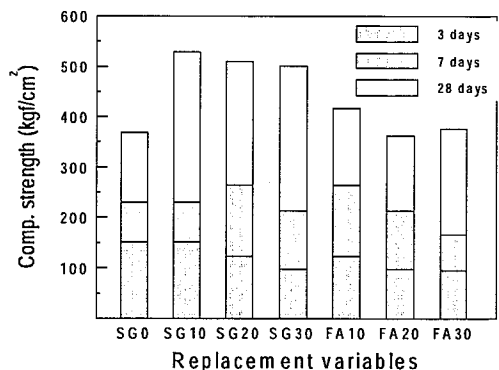


Fig. 3 Compressive strength of mortar according to the replacement variables of mineral admixtures(SF=20%)

Table 8 Experimental results of slump flow value and compressive strength of concrete

No.	Blinder content (kg/m ³)	W/B (%)	Slump flow(cm)	Compressive strength(kgf/cm ²)		
				3days	7days	28days
1	800	20	62	535	849	1025
2	800	20	45	409	750	1029
3	800	19	59	525	835	1142
4	800	19	40	463	777	1036
5	800	18	61	571	813	1131
6	800	18	47	550	828	1145
7	800	18	70	427	793	1069
8	800	18	40	519	745	1091
9	750	21	62	525	758	1071
10	750	21	41	431	737	998
11	750	19	53	565	793	1135
12	750	19	35	459	768	1110
13	700	22	59	517	781	1085
14	700	22	46	392	691	982
15	700	20	65	475	808	1152
16	700	20	41	396	729	1089
17	700	20	65	460	758	1153
18	700	20	70	513	802	1199
19	700	20	70	446	731	1108

3.2 슬럼프 손실(Slump loss)의 저감 방안

콘크리트 구조물의 현장타설 작업시 굳지 않은 콘크리트의 워커빌리티는 경화한 콘크리트의 강도 못지 않게 중요한 인자임은 두말 할 나위가 없다. 그러므로 초고강도 콘크리트의 경우에도 일반적으로 펌프압송방법 또는 절근이 과밀배근된 현상이 많기 때문에 콘크리트의 타설작업이 진행되는 동안 굳지 않은 콘크리트는 양호한 유동성과 재료분리가 적은 물성을 유지해야 함이 필요불가결하다⁽⁹⁾. 그래서 본 연구에서도 고성능 감수제를 다량으로 사용하여 슬럼프폴로우값이 큰 60 ± 10cm 정도의 고유동콘크리트를 목표로 제조하였다.

일반적으로 초고강도 콘크리트는 단위결합재량이 클 뿐만 아니라 화학혼화제의 과다사용, 적은 단위수량 및 매우 작은 물-결합계비 탓으로 슬럼프손실이 현저히 큰 문제점이 지적되고 있어 충분한 대책이 요망된다.

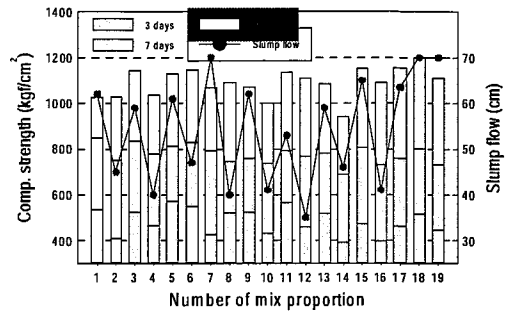


Fig. 4 Compressive strength and slump flow according to the variables of mix proportion

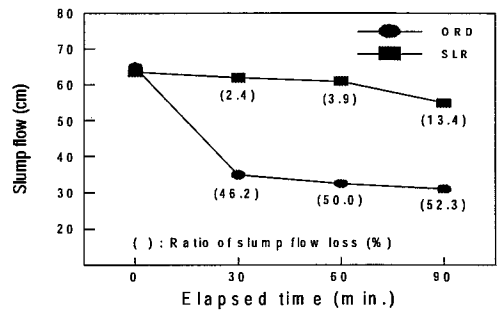


Fig. 5 Slump flow value and ratio of slump flow loss with elapsed time

다.^{(10),(11)}

그래서 혼화제 분할 후 첨가방법이 동시첨가방법보다 슬럼프손실을 감소시켰다는 연구결과⁽¹²⁾를 참고로 하여 고성능감수제의 분할첨가방법에 대해서도 실험을 실시하여 비교적 긍정적인 결과를 얻었으나 실제 현장적용시의 시공관리등 문제점이 있어 본문에서는 생략하였다. 그리고 일반적으로 사용되고 있는 고성능 감수제와 슬럼프 손실을 줄일 목적으로 제조된 고성능 감수제를 사용한 콘크리트 배합 중 No. 15와 No. 17 배합으로 굳지 않은 콘크리트의 경과시간에 따른 슬럼프폴로우값을 측정하여 슬럼프폴로우 손실률로 정리한 것이 Fig. 5이다.

초고강도콘크리트에 일반형 고성능감수제를 사용할 경우, 믹싱 후 경과시간 30분만에 슬럼프폴로우 손실률이 46.2% 정도로 급격히 떨어졌으므로써 현장시공시의 큰 지장을 초래하는 문제점이 있음을 알 수 있다.

반면에 슬럼프 손실 저감형 고성능감수제를 사용한 콘크리트의 경우에는 경괴시간 90분에서도 슬럼프플로우의 목표값 60 ± 10 cm범위 내에 있을 뿐만 아니라 슬럼프플로우 손실률이 15% 이내의 좋은 결과를 나타낼 수 있다.

이는 시멘트 수화에 의하여 발생하는 알칼리 성분에 의하여 폴리칼본산계 슬럼프손실저감형 혼화제의 유효 성분이 서서히 가수분해됨으로써 시멘트페이스트의 유동성이 지속적으로 공급되는 성질에 의하여 슬럼프의 안정성이 일정시간 유지되기 때문인 것으로 생각된다. (13), (14)

그래서 이들 두 종류 고성능감수제로서 제조한 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프플로우값 및 콘크리트 공시체에 의한 재령 3, 7 및 28일을 압축강도를 측정하여 정리한 것이 Fig. 6이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 두 종류 콘크리트의 슬럼프플로우값 및 재령별 압축강도도 거의 유사한 좋은 결과를 얻었다.

특히 슬럼프손실 저감형 고성능감수제를 사용한 콘크리트의 경우, 일반형 고성능감수제를 사용한 콘크리트와 비교하여 재령 7일 압축강도는 다소 떨어졌으나, 28일 압축강도는 오히려 약간 상회하는 결과를 나타내었다. 그러므로 초고강도콘크리트에서도 폴리칼본산계 슬럼프손실 저감형 고성능감수제의 사용은 유익하다고 판단되므로 초고강도용 콘크리트의 현장적용을 위해서는 예비실험 등을 통하여 고성능감수제의 성능에 대한 확인 검토가 요망된다.

3.3 초고강도 콘크리트의 최적배합비 선정

(1) 물-결합재비

콘크리트의 배합표 중에서 일반형 고성능감수제를 사용한 콘크리트 No.1~No.16 배합으로 제조한 콘크리트의 재령 28일 압축강도를 물-결합재비 별로 정리한 것이 Fig. 7이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 약간의 변동은 있으나 물-결합재비가 커질수록 단위결합재량에 관계없이 압축강도가 약간 감소하는 경향을 나타내었으나 물-결합재비 18~20%의 범위에서 압축강도는 거의 차이가 없었다.

다시 말해서 초고강도콘크리트의 경우에도 보통 콘

크리트와 마찬가지로 물-시멘트 비가 커지면 압축강도가 감소하는 Abrams의 물-시멘트비 이론과도 잘 일치하는 결과임을 알 수 있다.

그래서 이번에는 단위결합재량 800, 750 및 700kg에 대한 압축강도와 슬럼프플로우로 정리한 것이 각각 Fig. 8, 9 및 10이다. 먼저 단위결합재량 800kg인 Fig. 8에서는 물-결합재비가 커질수록 압축강도가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 Fig. 9 및 Fig. 10의 단위결합재량 750 및 700kg에서도 물-결합재비가 증가할수록 압축강도는 약 10%정도 감소하는 경향을 나타내었으나, 슬럼프플로우값은 경향을 알 수 없었다. 그 이유는 고성능감수제의 사용량에 따라 다소 변동된 결과로 평가된다.

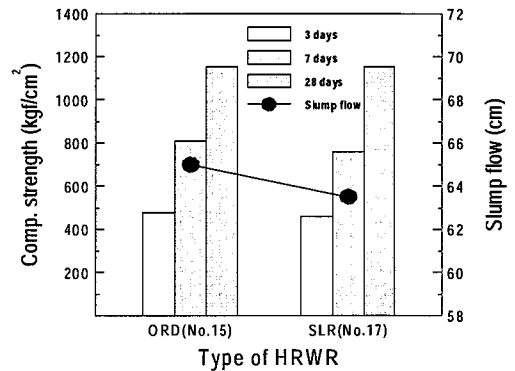


Fig. 6 Compressive strength of concrete according to type of HRWR

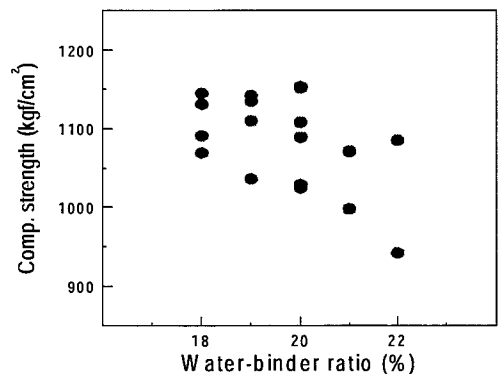


Fig. 7 Compressive strength of concrete according to water-binder ratio(28 days)

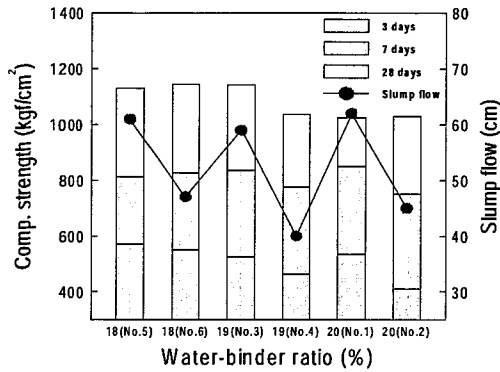


Fig. 8 Compressive strength of concrete according to water-binder ratio(Binder content=800kg)

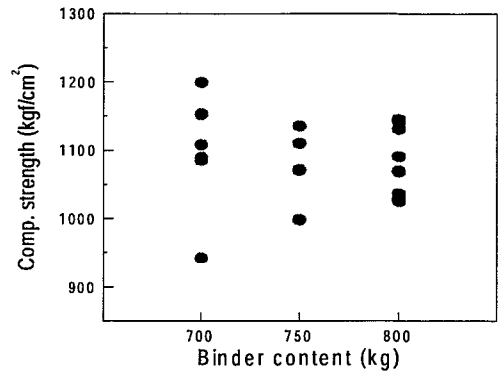


Fig. 11 Compressive strength according to binder content (28 days)

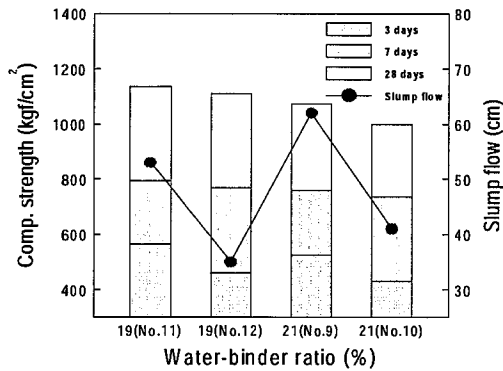


Fig. 9 Compressive strength of concrete according to water-binder ratio (Binder content=750kg)

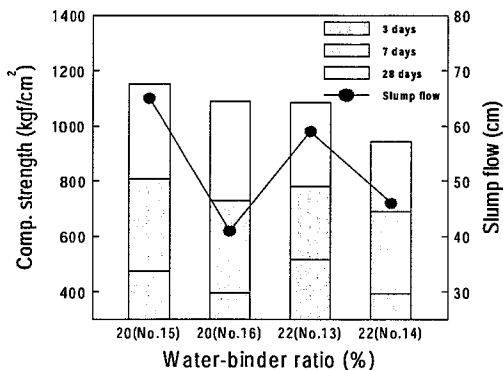


Fig. 10 Compressive strength of concrete according to water-binder ratio (Binder content=700kg)

(2) 단위결합재량

고강도 및 초고강도콘크리트의 제조에 가장 중요한 인자 중 하나로 꼽히는 단위결합재량의 중요성과 최적량을 파악하기 위하여 16배합에 대한 단위결합재량별 재령 28일 압축강도로 정리한 것이 Fig. 11 이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 초고강도콘크리트를 얻기 위하여 단위결합재량이 크게 요구되지만, 700kg 정도로서 재령 28일 압축강도 1100kgf/cm²를 충분히 얻을 수 있다고 판단됨으로 단위결합재량은 강도를 만족시키는 범위에서 작은 값을 선정하는 것이 바람직하다는 결론을 얻었다. 다시 말해서 단위결합재량이 클수록 압축강도가 반드시 증가하지 않음을 확인한 좋은 결과를 얻었다.

(3) 실리카흄의 대체율

실리카흄의 대체율을 10, 15 및 20% 대체한 콘크리트의 슬럼프플로우와 압축강도를 각각 나타낸 것이 Fig. 12 및 13 이다.

Fig. 13은 실리카흄 대체율에 따른 슬럼프플로우값을 나타낸 것으로 실리카흄을 10% 이상 대체할 경우 유동성의 저하가 현저하여 슬럼프플로우를 50cm 이상을 확보하기 위하여 고성능감수제의 사용량을 과다하게 사용할 수 밖에 없으며, 사용량이 지나치게 되면 재료분리현상이 심각하게 나타나는 문제점이 있었다.

실리카흄 대체율에 따른 압축강도로서 정리한 것이 Fig. 13이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 대체율이 증

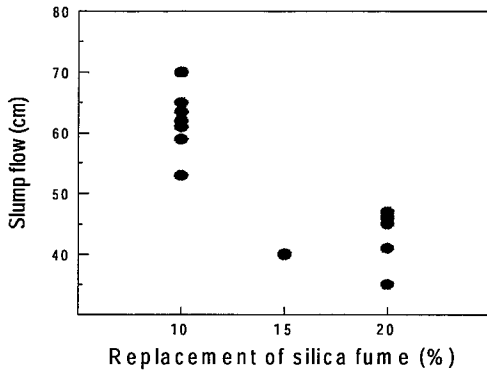


Fig. 12 Slump flow value according to replacement of silica fume

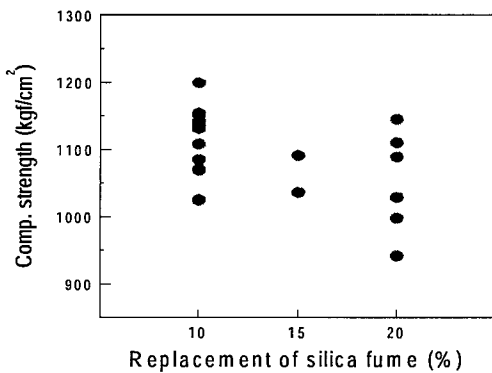


Fig. 13 Compressive strength of concrete according to replacement of silica fume

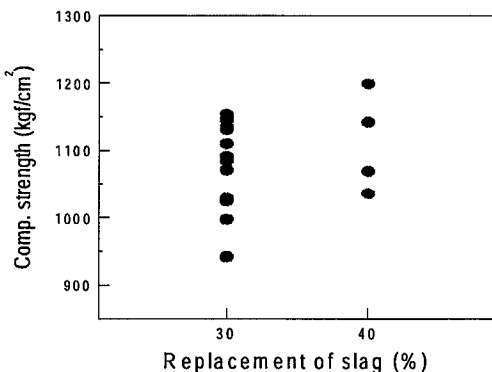


Fig. 14 Compressive strength of concrete according to replacement of slag(%)

가하는데 따라 물-결합재비 및 단위결합재량에 관계없이 강도가 약간 감소하는 경향을 나타내었다.

그러므로 초고강도콘크리트의 유동성, 강도 및 경제성 등을 고려할 때, 실리카흙의 적정 대체율은 10% 정도가 합리적이라 판단되었다.

(4) 고로슬래그미분말의 대체율

초고강도콘크리트의 제조를 위한 고로슬래그미분말의 석성 대체율을 알아보기 위하여 고로슬래그미분말의 대체율 30% 및 40%에 대하여 비교 정리한 것이 Fig. 14 이다. 이 그림에서 고로슬래그미분말의 대체율 두 종류에 따른 압축강도의 차이는 크게 없음을 확인할 수 있었으나, 경제성, 장기강도 및 내구성을 향상시킬 목적⁽¹⁵⁾ 등을 고려해 볼 때, 고로슬래그미분말의 대체율은 40% 정도가 이상적일 것으로 판단된다.

4. 결 론

실리카흙, 고로슬래그미분말 및 플라이애시를 혼화재로 활용하여 초고강도용 콘크리트를 제조하기 위하여 실시한 실험을 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 실리카흙, 고로슬래그미분말 및 플라이애시의 대체율을 각각 변화시킨 모르타르시편의 압축강도를 측정된 결과, 실리카흙과 고로슬래그미분말을 대체한 모르타르의 압축강도는 500 kgf/cm² 정도였다. 이때 모르타르의 강도증진을 위해서는 플라이애시보다 실리카흙이나 고로슬래그미분말의 효과가 클 뿐만 아니라 최적대체율이 존재함을 알 수 있었다.
- 2) 일반적으로 통용되고 있는 고성능감수제를 사용한 굳지 않은 콘크리트의 비성 후 경과시간 30분만에 슬럼프플로우 손실률이 16.2% 정도로 급격히 떨어지는 문제점이 있는 반면 슬럼프손실 저감형 고성능감수제를 사용한 콘크리트의 경우 경과시간 90분에서도 슬럼프플로우 손실률이 15% 이내의 좋은 결과를 나타내었다.
- 3) 초고강도콘크리트의 경우에도 보통 콘크리트와

미찬가지로 물-결합재비 18~22%의 범위에서도 물-결합재비가 증가할수록 단위결합재량에 관계없이 압축강도가 약 10%정도 감소하는 경향을 나타내었다. 한편 슬럼프플로우값은 고성능감수제 사용량의 변화에 따라 다소 변동하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

- 4) 실리카흙 대체율의 증가에 따라 유동성이 현저하게 저하되므로 고성능감수제의 사용량을 과다하게 사용하게 되면 재료분리현상이 크게 나타나는 문제점이 있기 때문에 대책이 요망되었다. 한편 실리카흙의 대체율이 증가하는데 따라 물-결합재비 및 단위결합재량에 관계없이 압축강도가 약간 감소하는 경향을 나타내었다.
- 5) 실리카흙과 폴리아에시를 대체한 콘크리트의 압축강도가 실리카흙과 고로슬래그미분말을 대체한 콘크리트와 비교하여 훨씬 작은 값을 나타내었다. 그리고 초고강도콘크리트를 제조하기 위한 실리카흙 및 고로슬래그미분말의 대체율은 유동성, 강기강도 및 경제성을 고려할 때 각각 10% 및 40%정도가 효과적이라 판단되었다.

참 고 문 헌

1. 橋 大介, 山崎庸行, "超高強度コンクリート", *コンクリート工学*. Vol.31, No.3, 1993.
2. Tomosawa, F. 외 3명, "Development and Evaluation of Binders for High Strength Concrete", *Proceeding of Cement Association of Japan*, Vol.46, 1992.
3. J. Moreno 외 5명, "High Strength Concrete from Low Water Demand Cement", *High Strength Concrete*. First International Conference. American Society of Civil Engineers. July 13~18, 1997. pp.434~441.
4. J. J. Myers and R. L. Carrasquillo, "Mixture Proportioning for High-Strength High-Performance Concrete Bridge Beams", *High-performance Concrete*, ACI International sp-189, Research to Practice, 1999, pp.37~56.
5. CEB-FIP Working Group, *Application of High Performance Concrete*. Report of CEB-FIP Working Group on High Strength/High Performance Concrete, 1994.
6. S. Helland, "Utilization of high-performance concrete", Fourth international symposium on the *Utilization of High Strength/High Performance Concrete*, 1996, pp.67~73.
7. 文翰英, 崔然注, "고로슬래그미분말을 혼화제로 사용한 고강도콘크리트의 강도특성에 관한 연구", *대한토목학회논문집*, 제 16 권 1-4 호, 1996, pp.463~472.
8. CEB-FIP Working Group, *CEB-FIP MODEL CODE 1990*. Design Code, Report of CEB-FIP Working Group, 1993.
9. 文翰英, 金基亨, "고성능감수제를 사용한 콘크리트의 유동성 손실을 저감시키기 위한 연구", *대한토목학회논문집*, 제 12 권 3 호, 1992, pp.81~90.
10. 長瀬重義, *コンクリートの高性能化*. 技報堂出版, 1997.
11. ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High Strength Concrete", *Committee Report ACI 363R-98*, American Concrete Institute, Detroit, 1998.
12. 文翰英, 文大重, "굳지 않은 콘크리트의 슬럼프손실 저감을 위한 혼화제의 활용", *한국콘크리트학회지*, 제 10 권 2 호, 1998, pp.155~165.
13. 노제성, "나프탈렌술폰산축합물과 폴리카르보산계 혼화제가 첨가된 시멘트 페이스트의 유동성 유지에 관한 연구", *한국콘크리트학회논문집*, 제 7 권 5 호, 1995, pp.189~199.
14. S. Y. N. Chan, "Workability Retention of High Strength/Superplasticized Concrete", *Magazine of concrete research*. Vol. 48, No. 177, 1996, pp.301~310.
15. V. M. Malhotra, P. Kumar Mehta, *Pozzolanic and Cementitious Materials*, 1996, pp.69~103.

(접수일자 : 2001년 3월 8일)