

# 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 강도향상을 위한 실험적 연구

## An Experimental Study for Improving the Strength of High Strength Concrete with Silica Fume

文翰英\* · 文大重\*\* · 申承鎭\*\*\*

Moon, Han Young · Moon, Dae Joong · Shin, Seung Ho

### Abstract

For complying with the demand of developing high strength concrete, the high strength concrete with higher cement contents and lower water-cement ratio using high range water reducing admixture has been manufactured. In this study, for the purpose of improving the strength of concrete, concrete with silica fume and gypsum was produced so that it was acquired to high compressive strength of 1,058 kg/cm<sup>2</sup>, 1,170 kg/cm<sup>2</sup> at age 28 and 91 days, respectively. But neither tensile strength nor modulus of elasticity were highly improved although the compressive strength of the concrete increased. And it was concluded that a higher slump loss of fresh high strength concrete and interior temperature increment of concrete in according to elapsed time than convential concrete should be solved.

### 要 旨

콘크리트의 고강도화 요구에 부응하기 위하여 단위시멘트량을 크게 증가시키고 고성능감수제를 사용하여 물-시멘트비를 대폭 감소시킨 고강도콘크리트가 제조되고 있다. 본 연구에서는 콘크리트의 강도를 더욱 향상시키기 위한 목적으로 실리카흙과 석고를 사용하여 콘크리트를 제조함으로써 재령 28일과 91일의 압축강도가 각각 1,058 kg/cm<sup>2</sup>, 1,170 kg/cm<sup>2</sup>되는 고강도를 얻었다. 그러나 인장강도와 탄성계수는 압축강도의 증가에 비하여 크게 향상되지 않았다. 그리고 굳지않은 고강도콘크리트의 경과시간에 따른 슬럼프 손실과 콘크리트의 내부 온도상승이 기존의 콘크리트보다 큰 점 등이 해결되어야 할 문제점이라 생각되었다.

## 1. 서 론

건설기술도 과학기술의 발전과 더불어 일취월장

하는 추세에 있으며, 콘크리트도 역시 고성능화가 요구되는 장대교량, 초고층건물, 고속철도, 심해수중의 해양구조물 및 원자력발전소 등과 같은 다양한 구조물에 적용되므로써 콘크리트의 고품질화 및 고강도화가 요구되고 있는 실정이다. 이와 같은 요구에 부응하기 위하여 일찌기 서독, 일본 등에서는 콘크

\* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 박사과정

\*\*\* 정회원 · 시립인천전문대학 토목과 교수

리트용 감수제의 일종인 고성능감수제가 개발되어 콘크리트의 고강도화에 크게 기여하였다.

최근에 와서는 실리콘 메탈이나 페로실리콘 등과 같은 구조 합금 제조시 생성되는 실리카흄을 고성능감수제와 병용함으로써 콘크리트의 강도 및 재물성을 크게 개선시킨 연구사례들이 국내외의 콘크리트 연구자들에 의해 발표되었다.<sup>(1-10)</sup> 잘 알려진 바와 같이 실리카흄은 시멘트 비표면적의 50~80 배에 이르는 초미립 분말이므로 콘크리트용 혼화제로 사용할 경우, 시멘트 입자 사이의 공극 및 불연속 영역을 충전하여 고밀도화하는 micro filler 효과를 가지며, 또한 포졸란 반응으로 콘크리트의 장기강도를 향상시킬 뿐만 아니라 내구성, 수밀성 및 내화성 등을 개선시키는데 유효하다는 연구성과도 발표되고 있다.<sup>(11-15)</sup>

본 연구에서는 콘크리트의 고강도화를 위한 목적으로 결합재량을 크게 증가시키고, 실리카흄의 혼합률과 고성능감수제의 사용량을 변화시켜 물-결합재비를 대폭 낮춘 콘크리트를 제조하였다. 그리고 고강도콘크리트의 강도를 보다 향상시키기 위한 수단으로 석고를 소량 첨가하여 콘크리트의 강도 이외에 굳지않은 고강도용 콘크리트의 믹싱후 경과시간에 따른 슬럼프 손실 및 콘크리트 내부의 온도 변화에 대하여도 고찰하였다. 아울러 실리카흄을 혼합한 고강도콘크리트의 재물성 개선에 도움이 될 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬를 3성분계로 혼용한 기초 단계의 실험 결과에 대하여도 고찰하였다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 사용재료

#### 2.1.1 시멘트 및 혼화제

보통포틀랜드 시멘트(OPC)와 혼화제로서는 실리카흄(SF), 고로슬래그 미분말(GS), 플라이애쉬(FA)를 사용하였으며, 이들의 화학성분 및 물리적 성질은 표 1과 같다.

#### 2.1.2 고성능감수제(HRWR)

나프탈린 술폰산 포르말린 고축합물이 주성분이며, 비중 1.19~1.21, pH 9±1인 혼화제를 사용하였다.

#### 2.1.3 석고

공업용 석고를 사용하였으며 화학성분은 표 2와 같다.

#### 2.1.4 골재

잔골재는 한강산 강모래이며, 굵은골재는 한강산 강자갈을 부순 것으로서 물리적 성질은 표 3과 같다.

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 슬럼프 손실 시험

실리카흄과 석고를 사용한 굳지않은 고강도용 콘크리트의 믹싱후 경과시간에 따른 슬럼프 손실의 정도를 알아보기 위하여 강제식 믹서에서 제조한 굳지않은 고강도용 콘크리트를 가경식 믹서에 옮겨 2 rpm으로 교반하면서 30분 간격으로 90분 및 120분 동안 KS F 2402에 의해서 슬럼프 시험을 실시하

표 1. 시멘트 및 혼화제의 화학성분과 물리적 성질

Item Type	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	SO <sub>3</sub> (%)	Total (%)	Ig. loss (%)	Specific Gravity	Specific Surface (cm <sup>2</sup> /g)
OPC	21.95	6.59	2.81	60.12	3.32	2.11	96.90	2.58	3.15	3,112
SF	90.00	1.50	3.00	2.00	0.30	—	96.80	3.00	2.33	204,700
FA	68.00	25.00	2.85	2.00	0.90	—	98.75	3.47	2.15	4,546
GS	31.12	14.24	0.51	41.40	6.14	4.36	97.77	0.63	2.80	4,880

표 2. 공업용 석고의 화학성분(%)

C	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	SO <sub>3</sub>
6.00	0.11	0.001	0.0001	0.0001	38.50	55.10

표 3. 골재의 물리적 성질

Type \ Item	G <sub>max</sub> (mm)	Specific Gravity	Absorption (%)	F.M.	Organic Impurities	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )	Percentage of Solids (%)
Fine Agg.	—	2.60	1.83	2.66	Good	1,584	61.0
Coarse Agg.	19	2.62	1.21	6.83	—	1,586	61.0

였다.

### 2.2.2 콘크리트 온도 측정 시험

고강도용 콘크리트의 믹싱후 경과시간에 따른 온도의 변화 정도를 알아보기 위하여 25×25×25 cm의 스티로폴 단열용기속에 콘크리트를 채우고 용기의 중심부위와 대각선 방향으로 3등분한 위치의 2 지점에 T type thermocouple를 매립하고 2시간 간격으로 72시간 동안 콘크리트의 온도를 측정하였다.

### 2.2.3 강도 시험

10×20 cm 원주형 공시체를 제조한 후 표준양생하여 재령 3, 7, 28 및 91일의 압축강도를 KS F 2405에 의하여 측정하였으며, 인장강도 및 탄성계수는 재령 28일에 KS F 2423 및 KS F 2438에 의하여 각각 측정하였다. 강도시험 결과는 3~5개의 공시체를 측정하여 평균값을 취하였으며, 재하속도는 1 초당 2~3 kg/cm<sup>2</sup>으로 시험하였다.

### 2.2.4 SEM 분석 및 X선 회절분석

실리카흙 및 석고를 혼합한 시멘트경화체의 조성 광물 및 수화생성물을 알아보기 위하여 재령 28일에서 SEM 및 X선 회절분석을 실시하였다. X선 회절 시험의 측정조건은 Target : Cu, 35 KV, 20 mA, Scan Speed : 10°/min, 2θ:5~60°로 하였다.

## 2.3 콘크리트의 배합 및 제조

### 2.3.1 콘크리트의 배합

결합재량 600, 700, 750 및 800 kg 4종류, 실리카흙 혼합률 0, 10 및 20%, 잔골재율 42%, 공기량 1.5%, 슬럼프값 18±1.5 cm가 되도록 고성능감수제를 선정하여 21배합을 정한 것이 표 4이며, 이 중에서 결합재량 750 kg, 물-결합재 23%, 실리카흙 혼합률 0, 10 및 20%인 3배합에 대해서는 석고를 3% 첨가하였다. 또한 실리카흙 0, 10% 혼합한 콘크리트의 제 성질을 개선시키기 위한 수단으로 고로슬래그 미분말 및 플라이애쉬를 3성분계로 혼합한 4배합이 표 5이다.

### 2.3.2 고강도콘크리트의 제조

용량 50l의 강제식 믹서에 시멘트, 혼화재 및 잔골재를 투입하여 30초 동안 건식 상태로 믹싱한 후 혼합수에 고성능감수제 사용량의 2/3를 섞고 1분 30초 동안 믹싱하여 굵은 골재와 나머지 고성능감수제 1/3을 넣고 1분 30초 동안 믹싱하였다. 한편 콘크리트의 강도를 향상시키기 위한 목적으로 혼합수에 석고를 용해시켜 동일한 방법으로 콘크리트를 제조하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 굳지않은 고강도용 콘크리트의 슬럼프 손실

고성능감수제를 사용하여 제조한 굳지않은 고강도용 콘크리트의 유동성 손실이 보통콘크리트에 비하여 큰 점은 잘 알려진 바와 같으므로 이들 콘크리트의 유동성 손실을 감소시키기 위한 연구내용이 발표되고 있다.<sup>(16,17)</sup>

여기서는 굳지않은 콘크리트의 유동성 손실에 미치는 실리카흙의 영향을 알아보기 위하여 결합재량 750 kg, 물-결합재비 23%, 실리카흙 혼합률 0, 10 및 20%로 제조한 고강도용 콘크리트에 석고를 단위시멘트 중량에 대하여 3% 첨가하여 제조한 콘크리트의 믹싱후 경과시간 90분까지 30분 간격으로 슬럼프값을 측정하여 믹싱직후 슬럼프값에 대한 슬럼프 손실률로 정리한 것이 그림 1이다.

이 그림에서 알 수 있듯이 보통포틀랜드시멘트와 고성능감수제만으로 제조한 콘크리트(이하 고강도 콘크리트라 약함)의 경우 믹싱후 경과시간 30분 정도에서 슬럼프 손실률이 약 50% 정도, 경과시간 90분에서 약 85% 정도의 큰 변화를 나타내었으며, 실리카흙 혼합 콘크리트의 경우 고강도콘크리트에 비하여 슬럼프 손실률이 크게 나타났다. 특히 실리카흙 10% 혼합 콘크리트에서 슬럼프 손실이 크게 나타났으며, 석고를 첨가함으로써 슬럼프 손실률이

표 4. 고강도용 콘크리트의 배합(1)

Binder Content (kg/m <sup>3</sup> )	G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	W (C+SF) (%)	Air (%)	S/a (%)	SF (C+SF) (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )					HRWR (C×%)
							W	C	SF	S	G	
600	19	18±1.5	32	1.5±1	42	0	192	600	0	653	918	0.60
			33			10	198	540	60	645	915	0.68
			33.5			20	201	480	120	643	912	0.85
700	19	18±1.5	25	1.5±1	42	0	175	700	0	639	897	1.32
						10	175	630	70	639	897	1.30
						20	175	560	140	639	897	1.68
700	19	18±1.5	23	1.5±1	42	0	161	700	0	657	915	1.52
						10	161	630	70	657	915	1.38
						20	161	560	140	657	915	1.60
750	19	18±1.5	23	1.5±1	42	0	172	750	0	627	873	1.87
						10	172	657	75	627	873	1.58
						20	172	600	150	627	873	2.17
750*	19	18±1.5	23	1.5±1	42	0	172	750	0	627	873	2.48
						10	172	675	75	627	873	2.00
						20	172	600	150	627	873	2.50
800	19	18±1.5	25	1.5±1	42	0	200	800	0	580	807	1.32
						10	200	720	80	580	807	1.30
						20	200	640	160	580	807	1.68
800	19	18±1.5	23	1.5±1	42	0	184	800	0	597	831	1.52
						10	184	720	80	597	831	1.43
						20	184	640	160	597	831	1.80

\*석고를 단위시멘트 총량에 3% 첨가

더욱 크게 나타나는 문제점이 있었다. 谷口등에 의 하면<sup>9)</sup> 물-시멘트비가 25% 보다 작은 실리카흙 혼합 콘크리트에서 실리카흙 혼합물(SF/(C+SF))이 10% 일 때 고성능감수제가 가장 적게 소요되었으며, 슬럼프 손실이 크다는 연구결과와 유사한 내용이라고 하겠다.

그림 2는 결합재량 600 kg, 물-결합재비 32%인

고강도용 콘크리트에 석고를 2% 혼합한 콘크리트를 제조하여 믹싱후 경과시간 120분까지 30분 간격으로 슬럼프값을 측정하여 계산한 슬럼프 손실률을 정리 한 것이다.

이 그림에서 고강도콘크리트의 슬럼프 손실률이 경과시간 30분에서 72% 정도, 120분에서 85% 정도로 크게 나타났으나, 실리카흙을 혼합하므로써

표 5. 고강도용 콘크리트의 배합(2)

G <sub>max</sub> (mm)	Slump (cm)	Air (%)	S/a (%)	W (C+SF) (%)	Ad.(%) (C+Ad.)			Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )						HRWR (C×%)	
					SF	GS	FA	W	C	SF	GS	FA	S		G
19	18±1.5	1.5±1	42	23	10	20	-	161	490	70	140	-	657	915	1.61
					10	40	-	161	350	70	280	-	657	915	1.50
					10	-	10	161	560	70	-	70	657	915	1.68
					10	-	20	161	490	70	-	140	657	915	1.79

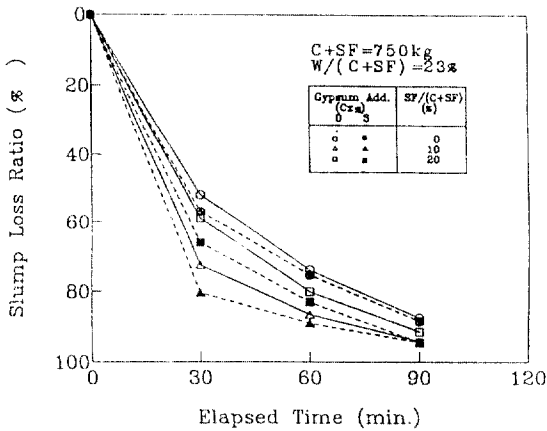


그림 1. 굳지않은 고강도용 콘크리트의 경과시간에 따른 슬럼프 손실률(C+SF)=750 kg, W/(C+SF)=23%)

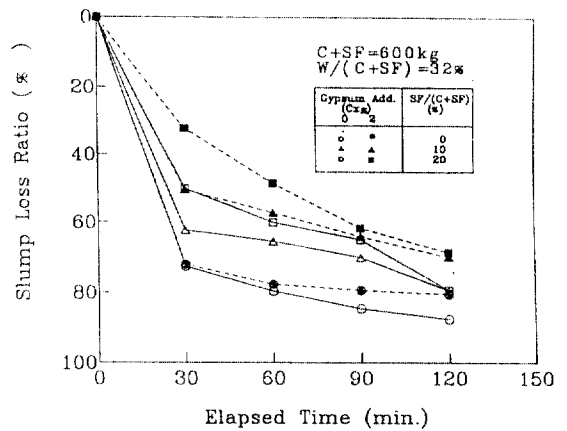


그림 2. 굳지않은 고강도용 콘크리트의 경과시간에 따른 슬럼프 손실률(C+SF)=600 kg, W/(C+SF)=32%)

약간의 슬럼프 손실을 줄이는 효과가 있었으며, 여기에 석고를 첨가함으로써 석고 무첨가 콘크리트에 비하여 경과시간 30분에서 약 10% 정도, 경과시간 120분에서 5% 정도의 슬럼프 손실률이 감소되는 효과가 있었다. 이러한 결과는 앞의 그림 1의 실험 결과와는 다소 상반되는 결과임을 알 수 있겠으나, 실리카흙을 혼합함으로써 시멘트 입자 사이의 공극을 밀실하게 채움과 동시에 불베어링 역할과 보수성이 슬럼프 손실을 감소시켰으며, 석고를 첨가함으로써 경과시간 0~2시간 정도에서 알루미늄이트게 화합물의 초기 수화를 억제하는 작용이 슬럼프 손실을 감소시켰다고 여겨진다.

### 3.2 고강도용 콘크리트의 경과시간별 온도변화 단위시멘트량이 크고 물-시멘트비가 매우 작은

고강도콘크리트를 사용하여 기온이 높은 서중콘크리트로 시공할 경우, 콘크리트의 온도상승이 콘크리트 구조물에 미치는 영향이 매우 크기 때문에 온도를 감소시키기 위한 충분한 대책을 강구해야 한다.<sup>9) 11)</sup> 그래서 고강도용 콘크리트의 믹싱후 경과시간에 따른 온도변화를 알아보기 위하여 결합재량 800 kg, 물-결합재비 25%의 고강도용 콘크리트 시험체를 제조한 후 경과시간 72시간까지 콘크리트 내부의 온도변화를 측정하여 정리한 것이 그림 3이다. 이 그림에서 믹싱후 경과시간 약 16시간 정도에서 시험체 중앙부의 최대온도가 62.7C 정도로 나타났으며, 이 시험 결과에서 알 수 있듯이 콘크리트 내부의 온도상승으로 온도응력의 차에 의한 균열발생 등을 억제하기 위하여 콘크리트 내부의 온도상승을 억제하는 대책이 수립되어야 한다.

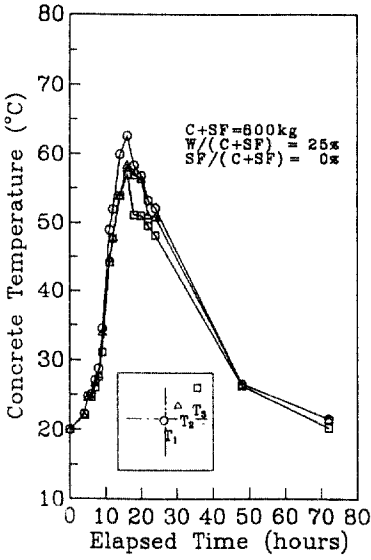


그림 3. 고강도용 콘크리트 시험체의 믹싱후 경과시간에 따른 온도변화(C+SF)=800 kg, W/(C+SF)=25%)

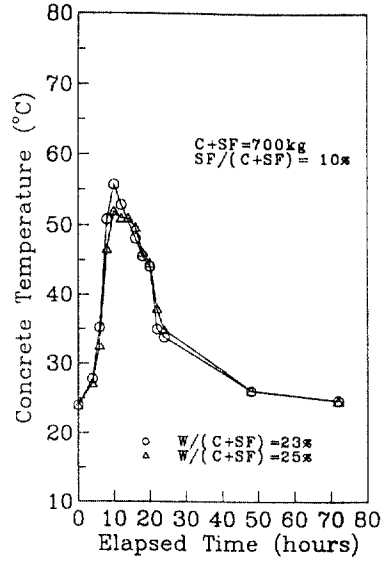


그림 5. 고강도용 콘크리트 시험체의 믹싱후 경과시간에 따른 온도변화(물-결합재비 상이)

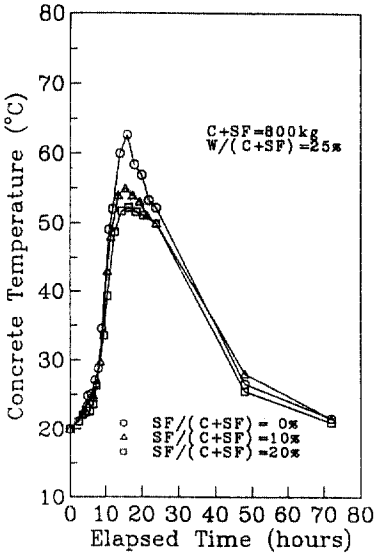


그림 4. 고강도용 콘크리트 시험체의 믹싱후 경과시간에 따른 온도변화(실리카흙 혼합률 상이)

그림 4에서는 실리카흙 혼합률을 0, 10 및 20%로 변화시킨 고강도용 콘크리트 시험체 중앙부의 온도 변화를 경과시간에 따라 측정하여 정리하였다. 이 그림에서 알 수 있듯이 실리카흙 10 및 20% 혼합하는데 따라 콘크리트 시험체 중앙부의 최대온도가 각각 7.7°C, 10.5°C 정도 감소되는 효과를 얻을 수

있으며, 이러한 결과는 실리카흙의 혼합률이 증가하는데 따라 실리카흙으로 대체하는 양만큼 시멘트량이 감소되어 시멘트 초기 수화발열량이 적어진 탓으로 생각된다.

다음은 결합재량 700 kg, 물-결합재비 23, 25% 두 종류에 실리카흙 10% 혼합한 콘크리트 시험체 내부의 온도변화를 측정하여 정리한 것이 그림 5이다.

이 그림에서 콘크리트의 최대온도는 물-결합재비 23, 25%에서 각각 55.7°C, 52.0°C로 물-결합재비가 작을 경우 콘크리트의 최대온도가 크게 나타남을 알 수 있으며, 이는 물-결합재비가 작을수록 시멘트 수화시의 잉여수량이 감소하기 때문에 시멘트 수화발열량이 커져 콘크리트 내부의 온도가 증가되었다고 생각된다.

이번에는 실리카흙 혼합 콘크리트에 석고를 3% 첨가한 콘크리트 시험체 내부의 온도변화를 측정하여 정리한 것이 그림 6이다.

이 그림에서 석고를 첨가하지 않은 고강도콘크리트의 경우 경과시간 12시간 정도에서 최대온도가 59°C 정도를 나타내고 있으나, 실리카흙을 10, 20% 혼합함에 따라 각각 약 3 및 6°C 정도 감소되는 효과가 나타났다. 그러나 콘크리트 시험체 내부의 최대온도 피크는 경과시간 10~15시간 사이에서 나타났으며, 이는 시멘트 수화물인 C<sub>3</sub>S 및 C<sub>3</sub>A 수

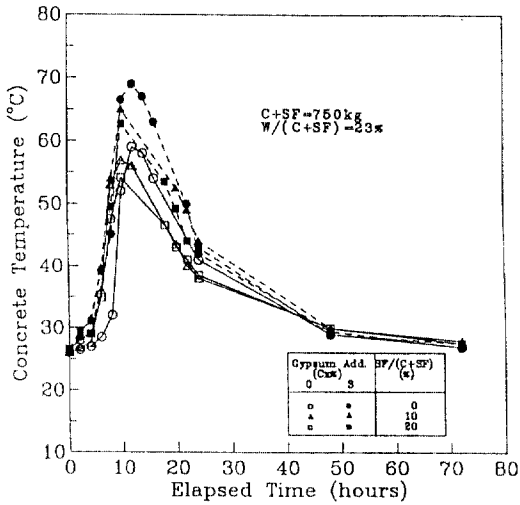


그림 6. 고강도용 콘크리트 시험체의 믹싱후 경과시간에 따른 온도변화(석고첨가 유무)

화반응으로 인한 시멘트 수화발열량 때문이라고 생각되며, 또한 석고를 첨가하므로써 C<sub>3</sub>A의 수화반응을 촉진하여 시멘트의 수화발열량이 크게 나타났다고 생각된다.

### 3.3 고강도용 콘크리트의 강도향상 방안

결합재량, 물-결합재비 및 실리카흙 혼합률이 상이한 21배합 콘크리트의 재령 3, 7, 28 및 91일의 압축강도, 인장강도 및 탄성계수를 측정하여 정리한 것이 표 6이다. 이 표에서 알 수 있듯이 결합재량 750 kg에서 가장 큰 압축강도가 발생되었으며, 석고를 3% 첨가한 콘크리트의 재령 28일에서 1,058 kg/cm<sup>2</sup>, 91일에서 1,170 kg/cm<sup>2</sup>의 고강도콘크리트를 얻었다.

결합재량을 700, 750 및 800 kg 3종류로 변화시켜 제조한 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 및 인장강도를 알아보기 위하여 재령 91일 까지의 압축강도와 재령 28일에서의 인장강도를 측정하여 정리한 것이 그림 7이다.

이 그림에서 결합재량 750 kg에서 압축강도가 가장 크게 나타남을 알 수 있으며 실리카흙 20% 혼합 콘크리트의 경우 재령 28 및 91일에서의 압축강도가 각각 1,024 kg/cm<sup>2</sup>, 1,107 kg/cm<sup>2</sup>의 고강도를 나타내었으며, 단위시멘트량 700 kg 정도에서 가장 큰 강도를 발현한다는 연구내용과 잘 일치함을 알 수 있다.<sup>18)</sup> 그리고 인장강도는 실리카흙 혼합률에 따라

다소 차이가 있으나 대체적으로 60 kg/cm<sup>2</sup>에 못 미치는 작은 값을 알 수 있다.

그림 8 및 그림 9는 물-결합재비에 따른 실리카흙을 혼합한 콘크리트의 압축강도를 알아보기 위하여 실리카흙을 혼합하지 않은 고강도콘크리트의 압축강도를 100으로 정한 경우에 대한 각 재령별 압축강도비를 정리하였다. 그림 8에서 알 수 있듯이 실리카흙 20% 혼합 콘크리트의 경우, 재령 3일에서의 압축강도비는 고강도콘크리트에 비하여 크지 않았지만, 재령이 증가함에 따라 압축강도비가 커지며 재령 91일에서의 압축강도비가 약 125% 정도로 큰 값을 나타내었다.

그림 9는 결합재량 800 kg일 때의 압축강도비를 나타낸 것으로 물-결합재비 23%인 경우 재령 3일에서 압축강도비가 100보다 오히려 작은 값으로 나타났다. 그 이유를 알아보기 위하여 믹싱후 경과시간에 따른 콘크리트의 초기 재령에서 온도변화를 측정한 결과를 정리한 것이 그림 10이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 물-결합재비가 23%에서 믹싱후 18시간에 콘크리트의 최고온도가 54°C 정도로 나타나는데 비하여 물-결합재비 25%에서는 믹싱후 16시간 정도에서 63°C 정도의 최고온도를 나타내었다. 이는 단위 시멘트량이 지나치게 클 경우 3일 정도의 초기 재령에서는 충분한 수화가 진행되지 않았을 뿐만 아니라 혼합정도 및 공시체 제조시 다짐의 어려운 점 등의 원인으로 콘크리트의 압축강도비가 작아졌다고 생각된다. 그러나 재령이 증가함에 따라 강도는 증가하여 실리카흙 20% 혼합 콘크리트의 재령 91일 압축강도비는 고강도콘크리트에 비하여 113% 정도로 나타났다. 이는 재령이 증가함에 따라 실리카흙의 포졸란 활성반응이 활발히 진행되어 강도가 증진된 결과로 생각된다.

다음은 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령 28일 탄성계수와 압축강도 및 인장강도와의 관계를 나타낸 것이 그림 11이다.

이 그림에서 탄성계수와 압축강도 및 인장강도와의 상관계수는 각각 0.97 및 0.90로 비교적 좋았으며,  $\sigma_c/\sigma_t$ 비는 14~19 범위로 보통콘크리트에 비하여 크게 나타났으며, 탄성계수값은  $4.50 \times 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>에 못 미치는 값으로 압축강도가 증가하는데 비하여 작은 값을 알 수 있다. 이 값은 ACI식에서 구한 값  $5.26 \times 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>보다 훨씬 작은 값이나, Mehta

표 6. 실리카흙 혼합 고강도콘크리트의 강도실험 결과

Binder Content (kg/m <sup>3</sup> )	W (C+SF) (%)	SF (C+SF) (%)	Comp. Strength(kg/cm <sup>2</sup> )				Tensile Strength (kg/cm <sup>2</sup> )	Elastic Modulus (×10 <sup>5</sup> kg/cm <sup>2</sup> )
			3 days	7 days	28 days	91 days		
600	32.0	0	319	438	590	625	37.2	—
	33.0	10	419	493	716	788	50.8	—
	33.5	20	446	537	800	820	52.3	—
700	25	0	370	581	770	837	50.2	3.63
		10	433	595	909	978	50.1	3.84
		20	352	665	912	1,060	53.0	3.92
700	23	0	462	621	785	850	53.4	3.69
		10	509	704	961	1,045	55.8	4.03
		20	450	723	977	1,086	57.2	4.14
750	23	0	510	625	781	872	49.5	3.59
		10	588	748	967	1,052	53.5	3.98
		20	576	749	1,024	1,107	56.2	4.10
750*	23	0	566	649	801	889	50.3	3.72
		10	592	782	979	1,084	55.2	4.13
		20	579	797	1,058	1,170	56.9	4.20
800	25	0	375	512	712	791	47.2	3.44
		10	409	545	764	849	48.9	3.45
		20	436	589	850	944	50.3	3.72
800	23	0	478	552	735	817	51.1	3.53
		10	433	612	790	878	51.4	3.56
		20	416	584	858	853	53.4	3.78

\*석고를 단위시멘트 증량에 3% 첨가

등이<sup>(19)</sup> 제안한 고강도콘크리트의 탄성계수를 구하는 식  $E_c = 40,000\sqrt{f'_c} + 1.0 \times 10^6 (\text{lb/in}^2)$ 에 의하여 구한  $4.15 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 과는 거의 비슷한 값이다.

다음은 실리카흙 혼합 콘크리트의 강도를 향상시키기 위한 수단으로 석고를 결합재량에 3% 첨가한

콘크리트의 압축강도를 측정하여 고강도콘크리트의 각 재령별 압축강도비를 정리한 것이 그림 12이다.

이 그림에서 석고를 첨가하지 않은 고강도콘크리트에 비해 재령 3일에서 약 10%의 강도증진이 있으며, 재령이 증가함에 따라 강도증진이 큼을 알 수



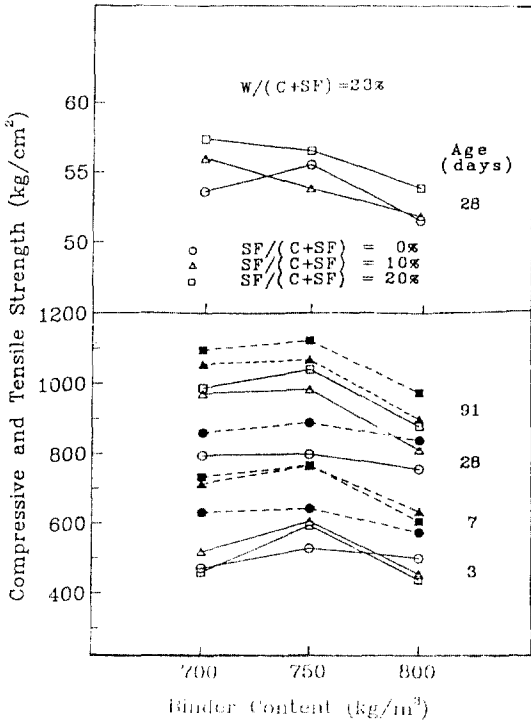


그림 7. 실리카흙 혼합 콘크리트의 단위시멘트량과 압축강도 및 인장강도

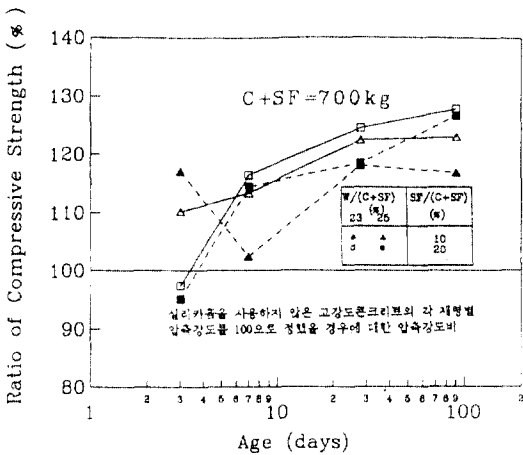


그림 8. 물-결합재비가 상이한 고강도용 콘크리트의 각 재령별 압축강도비

있다. 또한 실리카흙 혼합률이 증가함에 따라 강도비가 커지며, 실리카흙 20% 혼합 콘크리트의 경우 재령 28일에서 석고를 첨가하지 않은 콘크리트에 비하여 약 5% 정도의 강도가 증가하였으며, 재령 28일이 지나서는 오히려 강도비가 떨어지는 경향이

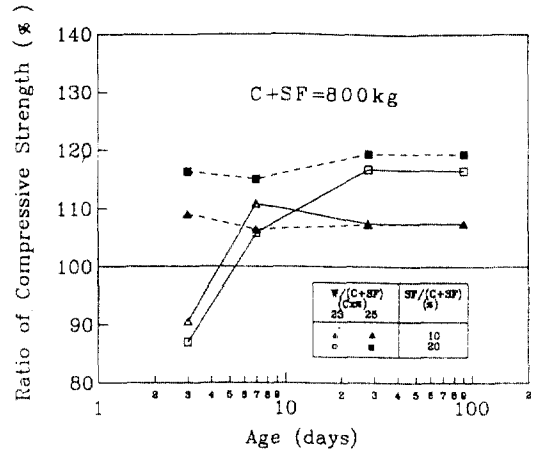


그림 9. 물-결합재비가 상이한 고강도용 콘크리트의 각 재령별 압축강도비

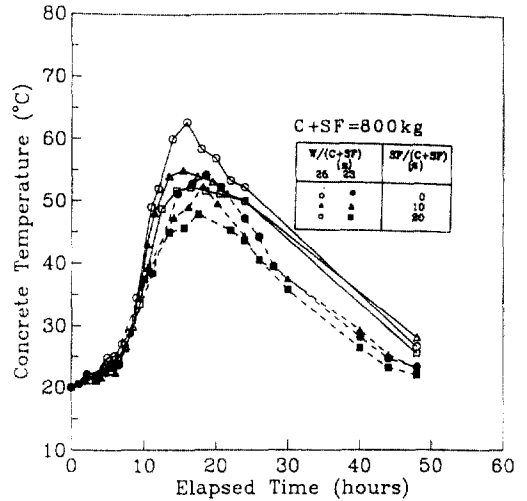


그림 10. 고강도콘크리트의 믹싱후 경과시간에 따른 온도변화

있다.

그래서 실리카흙 0, 10 및 20% 혼합한 시멘트풀에 석고 3%와 고성능감수제를 첨가하여 제조한 시멘트풀 경화체의 화합물을 알아보기 위하여 재령 28일에 X-Ray 회절분석한 것이 그림 13이다. 이 그림에서 대체로 측정각도 30° 주위에서 실리카이트 수화물이 발견되었으며, 실리카흙 혼합률이 증가함에 따라 수화물의 피크가 실리카흙을 혼합하지 않은 시멘트풀 경화체에 비하여 감소됨을 알 수 있다. 이는 실리카흙과 석고를 첨가하므로써 포졸란 반응 및 시멘트 화합물중 C<sub>3</sub>S의 수화를 촉진하여 강도

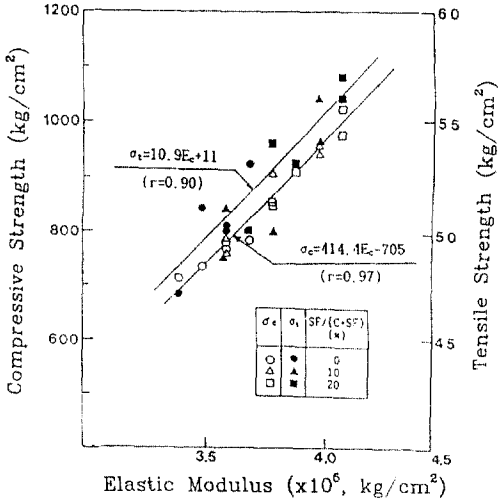


그림 11. 실리카흙 혼합 콘크리트의 탄성계수와 압축강도 및 인장강도와의 관계

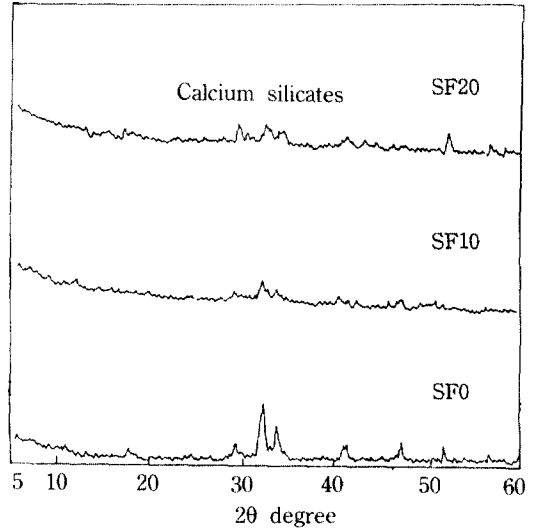


그림 13. 석고첨가 시멘트풀 경화체의 X선 회절도(재령 28일)

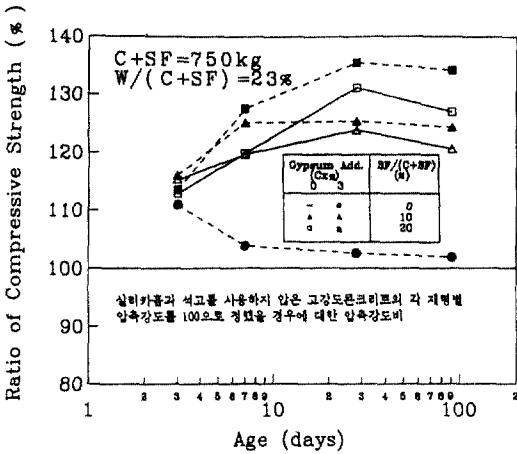


그림 12. 석고첨가 고강도용 콘크리트의 각 재령별 압축강도비

발현에 유효하게 작용한다는 연구<sup>(4,20)</sup>와도 비슷함을 알 수 있었다.

이번에는 시멘트풀 경화체의 수화생성물을 알아보기 위하여 재령 28일의 시멘트풀 경화체를 전자현미경 사진으로 10,000배 확대 촬영한 것이 사진 1 및 사진 2이다. 사진 1은 보통포틀랜드시멘트풀 경화체의 전자현미경 사진으로 미수화물로 보이는 부분이 나타나고 있으며, 사진 2에서는 석고 및 실리카흙을 혼합한 시멘트풀 경화체의 조직이 치밀한 수화물이 생성되어 실리케이트 미수화물이 현저히 줄어들었다고 생각한다. 이와 같이 석고와 실리카

흙을 혼합하므로써 실리케이트 수화물의 수화를 촉진하여 콘크리트의 조기강도 발현에 유리하였다고 생각한다.

다음은 고강도용 콘크리트의 온도가 큰 점과 슬럼프 손실이 큰 점 등의 문제점을 개선하기 위한 목적으로 실리카흙 10% 혼합 콘크리트에 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬를 혼합하여 압축강도와 고성능감수제와의 관계를 정리한 것이 그림 14이다.

이 그림에서 실리카흙에 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트가 실리카흙 혼합 콘크리트에 비하여 재령 28일의 압축강도는 작았으나 고성능감수제의 사용량은 대체로 많이 요구되었다. 그러나 재령 91일에서의 압축강도는 고로슬래그 미분말이나 플라이애쉬를 혼합하므로써 포졸란 반응의 영향으로 크게 증진되는 효과가 있었으므로 고강도용 콘크리트의 수화열이 문제가 되는 경우 또는 내구성을 요구하는 구조물 등에 응용하기 위한 연구 검토가 요망된다.

#### 4. 결 론

본 연구실험의 범위로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 결합재량이 크고 물-결합재비가 매우 작은 실리카흙 혼합 고강도콘크리트는 실리카흙을 혼합

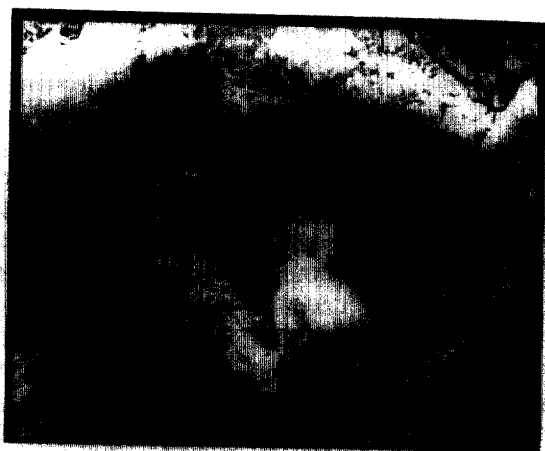


사진 1. 시멘트를 경화체의 전자현미경 사진(재령 28 일)

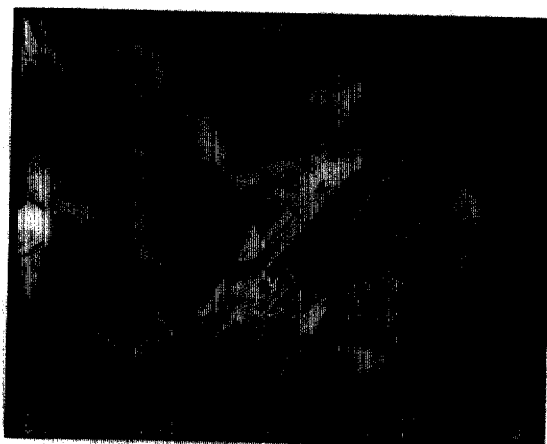


사진 2. 석고 및 실리카흙 혼합 시멘트를 경화체의 전자현미경 사진(재령 28일)

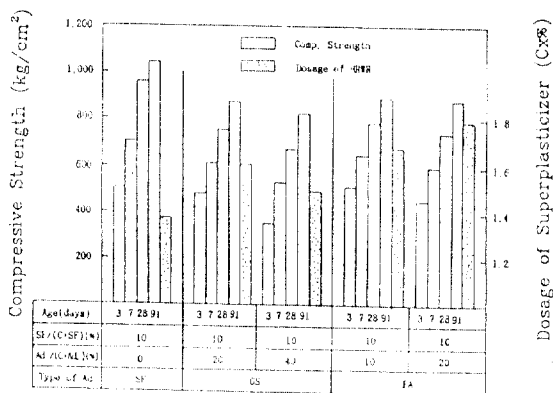


그림 14. 실리카흙과 혼화제를 사용한 고강도용 콘크리트의 압축강도와 고성능감수제의 사용량

하지 않은 고강도콘크리트에 비하여 슬럼프 손실이 크며, 석고를 첨가하므로써 슬럼프 손실이 크게 되는 문제점이 있었다. 그러나 결합재량 600 kg, 물-결합재비 32%의 실리카흙 및 석고첨가 고강도콘크리트의 슬럼프 손실은 오히려 감소하는 경향이 있었다.

(2) 고강도용 콘크리트 시험체 중앙부에서 측정된 온도는 경과시간 20시간 이전에 대체로 최대치가 나타났으며, 실리카흙을 혼합함에 따라 5℃~10℃ 정도의 온도를 낮출 수 있었으나, 고강도콘크리트의 강도를 한층 더 향상시키기 위하여 석고를 첨가하므로써 콘크리트의 내부온도가 약 17% 정도 증가하는 문제점이 있었다.

(3) 실리카흙을 혼합한 고강도콘크리트의 압축강도는 실리카흙을 혼합하지 않은 고강도콘크리트에 비하여 재령 28일에서 약 25% 정도 크게 향상되었으나, 인장강도는 보통콘크리트에 비하여 크게 향상되지 않았으며, 탄성계수는  $4.50 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 에 지나지 않으므로 고강도콘크리트의 인장강도 및 탄성계수값의 향상을 위한 대책이 요망되었다.

(4) 실리카흙 혼합률 20%, 결합재량 750 kg, 물-결합재비 23%인 실리카흙 혼합 콘크리트의 재령 28일 압축강도가  $1,024 \text{ kg/cm}^2$  정도였으나, 3%의 석고를 첨가하므로써 재령 28 및 91일 압축강도가 각각  $1,058 \text{ kg/cm}^2$ ,  $1,170 \text{ kg/cm}^2$ 이 되는 고강도콘크리트를 얻었다.

(5) 실리카흙을 혼합하여 압축강도  $1,000 \text{ kg/cm}^2$  이상의 고강도콘크리트를 얻기 위하여 물-결합재비는 23% 정도, 고성능감수제의 사용량은 2% 전후, 혼화제로서 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말을 각각 20%와 40% 정도 혼합하는 것이 유익하다고 생각되었다.

## 감사의 말

본 연구는 한국과학재단 특정연구과제 연구비로 수행한 연구의 일부로서 연구비를 지원해 주신 재단 당국에 감사를 드립니다.

## 參考文獻

1. 文翰英, 金眞徹, "실리카흙을 혼합한 콘크리트의 고強度化에 관한 基礎的 研究", 大韓土木學會論文

- 集, 第12卷, 第4號, 1992년 12월.
2. 李丙浩, “실리카흙 콘크리트의 工學的 特性에 關한 實驗的 研究”, 忠南大學校, 博士學位論文, 1991. 2.
  3. 長瀧重義, “高強度콘크리트에 關する 研究とその 實用化”, 콘크리트工學年次論文報告集, 日本콘크리트工學協會, Vol. 10-1, 1988, pp. 61-68.
  4. Novokshchenov, V., “Factors Controlling the Compressive Strength of Silica Fume Concrete in the Range 100~150 MPa”, *Magazine of Concrete Research*, No. 158, March, 1992, pp. 53-61.
  5. de Larraed, F., and Bostvironnois, J.-L., “On the Long-term Strength Losses of Silica-Fume High-Strength Concretes”, *Magazine of Concrete Research*, No. 155, June, 1991, pp. 109-119.
  6. Thomas Telford London, FIP Commission on Concrete, “Condensed Silica Fume in Concrete”, State of the Art Report, 1988.
  7. Xiaofeng Cong, Shanglong Gong, Davoid Darwin, and Steven L. McCabe, “Role of Silica Fume in Compressive Strength of Cement Paste, Mortar, and Concrete”, *ACI Materials Journal*, Vol. 89, No. 4, July-August 1992, pp. 375-387.
  8. Collepardi, M., Monosi, S. and Valente, M., “Optimization of Superplasticizer Type and Dosage in Fly Ash and Silica Fume Concretes” Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, *ACI*, SP 119-22, 1992, pp. 425-443.
  9. 谷口裕史 外 3名, “高強度콘크리트의 強度および 斷熱溫度上昇に及ぼす 各種材料의 影響”, 콘크리트工學年次論文報告集, 日本콘크리트工學協會, Vol. 12-1, 1990, pp. 31-36.
  10. Pierre-Claude Aitcin, Pierre Laplante, and Claude Bedard, “Development and Experimental Use of a 90 MPa (13,000 psi) Field Concrete”, High-Strength Concrete, *ACI*, SP 87-5, 1985, pp. 52-70.
  11. Le Bris, J., Redoulez, P., Augustin, V., Torrenti, J.M., and de Larrard, F., “High Performance Concretes in the Elorn Bridge”, High Performance Concrete in Severe Environments, *ACI*, SP 140-4, 1992, pp. 73-93.
  12. Fiorato, A.E., “PCA Research on High-Strength Concrete”, *PCA, Design and Construction*, Vol. 11, No. 4, 1989.
  13. Hertz, K.D., “Danish Investigations on Silica Fume Concretes at Elevated Temperatures”, *ACI Materials Journal*, July-August, 1992, pp. 345-347.
  14. Johnston, C.D., “Durability of High Early Strength Silica Fume Concrete Subjected to Accelerated and Normal Curing”, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, *ACI*, SP 132-63, 1992, pp. 1167-1187.
  15. Marusin, S.L., “Chloride Ion Penetration in Conventional Concrete and Concrete Containing Condensed Silica Fume”, Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, *ACI*, SP 91-55, 1986, pp. 1119-1133.
  16. 文翰英, 金基亨, “高性能減水劑를 使用한 콘크리트의 流動性 損失을 低減시키기 위한 研究”, 大韓土木學會論文集, 第12卷, 第3號, 1992년 9월.
  17. Mitsui, K., Kasami, H., Yoshioka Y., and Kinoshita, M., “Properties of High-Strength Concrete with Silica Fume Using High-Range Water Reducer of Slump Retaining Type”, Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, Proceedings Third International Conference, Ottawa, Canada, 1989.
  18. 長瀧重義, “高強度콘크리트의 諸性質”, 콘크리트工學, Vol. 14, No. 3, 1976.
  19. P. Kumar Mehta and Rachel J. Detwiler, “Chemical and Physical Effects of Silica Fume on the Mechanical Behavior of Concrete”, *ACI Materials Journal*, Nov.-Dec. 1989, pp. 609-614.
  20. Taylor, H.F.W., “Cement Chemistry”, AP, 1990, pp. 234-236.

(接受: 1994. 4. 17)